

目 次

1. 研究重点教員研究

1) 動力・エネルギーシステム工学研究	天野 嘉春	1
2) 次世代放射線検出器開発と宇宙・医療への応用	片岡 淳	5
3) 遺伝情報の維持と継承の分子機構： 染色体基本構造と DNA 組換え機構の解明を目指して	胡桃坂 仁志	13
4) 流体数学	柴田 良弘	19
5) 理論核物理学研究	鷹野 正利	25
6) 統計科学と金融工学	谷口 正信	29
7) 高エネルギー宇宙粒子物理学研究	鳥居 祥二	35
8) インシリコ・ケミストリーの確立： 大規模量子化学計算手法の高精度化・高速化・汎用化	中井 浩巳	39
9) 宇宙放射線科学の実験的研究	長谷部 信行	45
10) 建築・都市における次世代型空間デザインの実践的研究	古谷 誠章	53
11) 高エネルギー素粒子物理学実験研究	寄田 浩平	57
12) 加速器科学・放射線科学	鷺尾 方一	67

2. プロジェクト研究（【 】内は研究番号）

1) 【14P28】電気化学ナノテクノロジーの工学応用	逢坂 哲彌	71
2) 【15P01】バイオンを中心としたアンコール回廊の調査・研究と 重要遺構の保存修復計画案の策定	小岩 正樹	75
3) 【15P02】スマートプラントの制御・管理に関する研究	天野 嘉春	81
4) 【15P03】確率場による高次元データ解析	石川 博	85
5) 【15P05】再生可能エネルギー有効活用のための 次世代エネルギーネットワークの調査研究	中垣 隆雄	89
6) 【15P06】ナノサイズ Ag 粒子を用いた 次世代 SiC パワーモジュールの生産技術開発	吉田 誠	93
7) 【15P07】公共所有不動産の経営研究	小松 幸夫	97
8) 【15P08】エネルギー需給ネットワークのモデルリングと統合メカニズム	内田 健康	101
9) 【15P09】医学教育用ヒューマノイドの開発	高西 淳夫	105
10) 【15P10】機能性レドックスポリマー	西出 宏之	109
11) 【15P13】高品質ビームの発生及びその応用研究	鷺尾 方一	113

12)	【15P14】作業機械の知能化インタフェースに関する研究	菅野 重樹	119
13)	【15P51】実践的油層評価および最適開発計画策定に関する研修	栗原 正典	123
14)	【15P52】安全安心な社会を実現し豊かな文化を創造する コンテンツ・映像処理技術研究	森島 繁生	127
15)	【15P53】エネルギー・ネクスト研究	朝日 透	131
16)	【15P55】先端メディアの生体影響研究	河合 隆史	145
17)	【16P02】次世代型超省エネルギーリサイクル技術開発	大和田 秀二	149
18)	【16P03】深層学習を利用したコミュニケーションロボットに関する研究	尾形 哲也	155
19)	【16P04】スマートコミュニティの実現に向けた 環境配慮エネルギー・循環システムの構築に関する研究	小野田 弘士	159
20)	【16P05】高精度 3D カラー放射線イメージング	片岡 淳	165
21)	【16P06】高効率で省電力な IoT・ビッグデータ処理基盤	甲藤 二郎	173
22)	【16P07】廃炉事業に資する放射線遮蔽・遮水機能を有する 超重泥水・土質系材料の開発	小峯 秀雄	195
23)	【16P08】単一細胞解析のための生体分子ハンドリング技術の研究	庄子 習一	201
24)	【16P09】ナノ・エネルギー研究	西出 宏之	205
25)	【16P10】人間の認知行動の顕在的・潜在的過程の研究	渡邊 克巳	209
26)	【16P11】生物制御機構のモデリングと治療戦略確立への応用	内田 健康	213
27)	【16P12】震災復興のためのコンクリート技術開発	清宮 理	217
28)	【16P13】エジプトの文化財保存修復・管理の学際的研究	近藤 二郎	221
29)	【16P14】相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計	中井 浩巳	225
30)	【16P15】非線形問題に対する精度保証法の確立	大石 進一	233
31)	【16P16】新電磁探査法の研究	斎藤 章	237
32)	【16P17】ロボティック・センス・オブ・ムーブメント	高西 淳夫	243
33)	【16P18】国際宇宙ステーションにおける 高エネルギー宇宙線観測 (CALET)	鳥居 祥二	247
34)	【16P19】サステイナブル・デザインプロセス研究	高口 洋人	251
35)	【16P51】次世代ヒートポンプ技術に関する研究	齋藤 潔	255
36)	【16P53】計算科学による原子炉過酷事故メカニズムの解明と 安全性の向上研究	山路 哲史	261
37)	【16P54】資源鉱物を原料とする高機能性環境浄化素材の開発	山崎 淳司	265
38)	【16P56】ナノ材料の実用的合成プロセス開発と応用展開	野田 優	267
39)	【16P58】共生環境化学研究	中尾 洋一	273

40)	【17P03】微生物機能高度活用プロジェクト	木野 邦器	277
41)	【17P04】バイオプロダクション	桐村 光太郎	287
42)	【17P05】自動車技術と持続可能なモビリティに関する研究	草鹿 仁	293
43)	【17P06】建築デザインを介した生活空間支援の実践的研究	小林 恵吾	303
44)	【17P08】各種建築物の制振構造デザイン手法の高度化	曾田 五月也	307
45)	【17P09】次世代宇宙システム技術開発	鳥居 祥二	313
46)	【17P10】天然物化学を基盤としたケミカルバイオロジー研究	中尾 洋一	315
47)	【17P11】地域再生デザイン研究	古谷 誠章	317
48)	【17P12】東日本大震災後の電力システム再構築	岩本 伸一	333
49)	【17P13】スペーシャル・プランニング研究	後藤 春彦	339
50)	【17P14】エネルギーキャリアのための非在来型触媒	関根 泰	347
51)	【17P15】大都市圏の環境と安全性向上研究 PJ	長谷見 雄二	357
52)	【17P16】ハイパースクール研究	古谷 誠章	363
53)	【17P17】組織再生機能に優れた複合足場材料の開発研究	山崎 淳司	373
54)	【17P18】物理・コミュニケーション音響学	及川 靖広	377
55)	【17P19】リニアセルを用いた高速無線通信 および高精度レーダーに関する研究	川西 哲也	381
56)	【17P20】地下エネルギー資源の増産手法の開発	栗原 正典	387
57)	【17P21】精緻な解析手法による東京 23 区の リアルタイム浸水予測システムの開発	関根 正人	391
58)	【17P22】機能性ナノシートを用いた 生体情報モニタリングシステムの開発	武岡 真司	397
59)	【17P23】計算化学の社会実装	中井 浩巳	401
60)	【17P24】地球外天体におけるジャイロ応用システムの開発	長谷部 信行	409
61)	【17P25】災害情報データベースの継続的構築 及び社会安全への活用に関する研究	長谷見 雄二	415
62)	【17P26】水力ターボ機械システムの高性能化、高信頼性化研究	宮川 和芳	419
63)	【17P27】次世代宇宙構造物開発に関する研究	宮下 朋之	425
64)	【17P28】共感的な場の創出原理とそのコミュニケーション技術への応用 其の 2 : 共創学の体系化	三輪 敬之	433
65)	【17P29】結合切断科学と革新的分子合成技術の開発	山口 潤一郎	437
66)	【17P51】建設産業における BIM 技術の開発 建築工事における施工シミュレータ	嘉納 成男	441

67)	【17P52】人間特性計測に関する研究	菅野 重樹	445
68)	【17P53】首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上のためのデータ収集・整備と 被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用の検討	西谷 章	451
69)	【17P55】次世代 e-learning に関する研究	後藤 正幸	455

3. 長期大型プロジェクト研究 (【 】内は研究番号)

1)	【13L01】建築・空調におけるエネルギー有効利用計画に関する研究	田辺 新一	465
2)	【13L02】非臨床評価の確立による先進医療実現の 加速化に関する医工学的研究	梅津 光生	471
3)	【13L03】自然と共生する知能情報機械系に関する基盤研究	橋本 周司	477
4)	【16L01】量子ビームが可能にする高分子ナノ構造体の創製	鷲尾 方一	487
5)	【17L00】生理活性物質科学	竜田 邦明	491
6)	【17L01】住宅・建築の快適性と健康性に関する研究	田辺 新一	495
7)	【17L02】規則性ナノ空間の化学	松方 正彦	501

4. 奨励研究 (【 】内は研究番号)

1)	【17C01】国際宇宙ステーションにおける 高エネルギー宇宙線実験 (CALET)	浅岡 陽一	507
2)	【17C02】アストロサイト分化活性を持つ食品由来化合物の研究	新井 大祐	513
3)	【17C03】機械操作者のプランニング技能の定量化に関する研究	亀崎 允啓	515
4)	【17C04】ベトナム阮朝期建築生産組織に関する史料調査研究	木谷 建太	521
5)	【17C05】パイオニア転写因子による標的ヌクレオソーム認識機構の解析	小山 昌子	525
6)	【17C06】インフォマティクスと融合させた 高精度・高効率な相対論的量子化学理論の開発	清野 淳司	529
7)	【17C07】次期月着陸探査搭載能動型蛍光 X 線分光計の研究開発	長岡 央	535
8)	【17C08】微生物由来アミノ酸修飾酵素の探索と物質生産への応用	原 良太郎	539
9)	【17C09】スペイン、カタルーニャにおける建築の近代化過程に関する 理論的研究と実践的展開	人見 将敏	543
10)	【17C10】異なる密度をもつ材料からなる模擬河床上で生じる土砂移動現象	平松 裕基	547
11)	【17C12】非侵襲脳活動制御による認知機能向上	松吉 大輔	551
12)	【17C13】知覚支援装置－神経リハビリテーションの融合による機能回復戦略	安田 和弘	555

13)	【17C14】高速かつ高精度な一般化固有値問題に対する 精度保証付き数値計算法の確立	柳澤 優香	569
14)	【17C15】高靱性・高減衰耐力壁を用いた 薄板軽量形鋼造の中層化に関する研究	脇田 健裕	573

5. 特別推進研究

1)	【15S01】エネマネハウスに関する研究	田辺 新一	577
----	----------------------------	-------	-----

研究重点教員研究

動力・エネルギーシステム工学研究

研究代表者 天野 嘉春

(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 研究課題

2017 年度に取り組んだ重点領域研究は、以下の A・B の 2 分野である。

A:エネルギーシステムを対象とするもの

エネルギー需要の予測外れに頑強な家庭用エネルギー管理手法に関する研究

B:自律移動システムを対象とするもの

GNSS を用いた飛行ロボットの高精度位置姿勢推定と三次元計測に関する研究

Mobile Mapping Systemデータの自動処理方法に関する研究

2. 主な研究成果

2.1 (A) HEMS を対象としたロバスト制御器の設計

家庭用エネルギー機器を集中的に自動制御する仕組みである家庭用エネルギー管理システム（HEMS）は、エネルギー消費量の見える化に加えて、エネルギー需要の予測、スケジューリングおよび実時間制御から構成される機能を持ち、予測誤差の補償が課題となっている。本研究では、よりロバスト性の高い運用方策導出を目的に、これまで開発してきたシナリオベースの確率的運用計画手法に対して、二次錐制約により表現される分参考を加え、平均分散モデルへと拡張を行った。本運用計画手法の実機実装のために、後退ホライズンによる繰り返し最適制御への拡張も実施し、その有効性を検証した。数値検討として、図1に示すコージェネレーションシステムおよびルームエアコンディショナから構成される次世代型家庭用エネルギーシステムに対して、構築した予測・運用・制御主要を適用した。図2に示す通り、リスク回避係数を増加させることと比較して、予測シナリオ本数を増加させることが運用成績の向上につながることが判明した。結果として、提案手法はエネルギー消費量の予測値と実現値の乖離に対してロバスト性を示し、エネルギー消費量の低減が可能であることを示した。

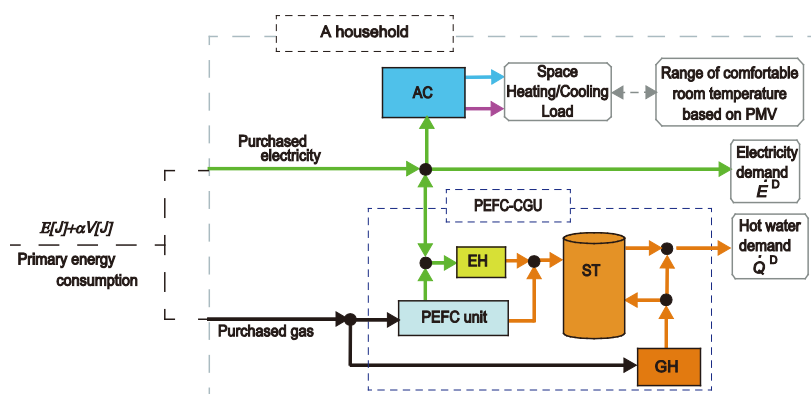


Fig.1 対象とする家庭用エネルギーシステム系統図

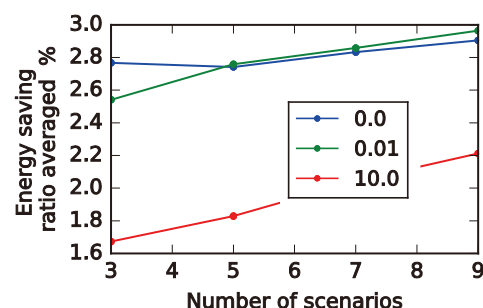


Fig. 2 シナリオ本数 1 に対するエネルギー消費量削減率（凡例はリスク回避パラメータを示し、大きいなるほど分散項の重みが増す）

2.2 (B) 複数の GNSS を搭載した UAV の高精度位置姿勢推定と三次元計測

自律飛行が可能な小型 UAV による高精度な三次元計測は、農業、林業などの分野において航空測量に代わる環境情報の取得手段として期待されている。ここで UAV による三次元計測では、上空での高精度な位置・姿勢情報の取得が重要な課題となる。従来の UAV は、機体の方位角を磁気センサーを用いて取得するため、外乱に弱く誤差が大きいという課題があった。そこで、UAV を用いて上空から高精度な地理空間情報の取得を実現するために、複数の GNSS アンテナを用いた UAV の高精度位置・姿勢情報の取得手法の研究を行った。図 3 に示すように 6 個の GNSS アンテナを UAV に搭載することで、RTK-GNSS により算出した複数のアンテナ間の三次元ベクトル（基線ベクトル）を用いた姿勢推定手法を構築した。6 個の GNSS アンテナを用いた場合、15 本の基線ベクトルが推定可能であり、この 15 本の基線ベクトルから姿勢を推定する。提案手法では、以下のステップで姿勢角を算出する。

- (1) 6 個の GNSS 受信機により、コード擬似距離、搬送波位相の観測値を得た後、6 個の GNSS 受信機の時刻を同期させ、GNSS 観測値を補間する。
- (2) 6 個のアンテナの組み合わせにおいて、アンテナ間、衛星間の GNSS 観測値の二重差分を算出し、搬送波位相の整数値バイアスを決定することで、高精度に基線ベクトルを算出する。
- (3) 得られた複数の基線ベクトルから、アンテナ配置による基線ベクトルの信頼性の評価、RANSAC を用いた基線ベクトルの選択を行い、最終的に選択された複数の基線ベクトル全てを用いて、最適な UAV 姿勢を決定する。

多数の基線ベクトルから姿勢を推定することで、基線ベクトルの推定誤差を平均化し、姿勢推定の精度の向上が可能である。

次に、推定した UAV の位置姿勢情報とレーザスキャナにより取得した距離情報を用いて、環境の三次元地図の作成に取り組んだ。精密に推定した UAV の位置姿勢情報を用いて、レーザスキャナにより計測した距離データを座標変換することで、三次元地図を作成する手法を構築した。図 4 に提案手法により作成した環境の三次元地図を示す。図中の赤い点ほど標高が高いことを示している。地上にマーカーを配置し、作成した三次元地図の精度検証を実施したところ、およそ 5cm の精度で絶対座標（緯度・経度・標高）が計測できることを確認した。

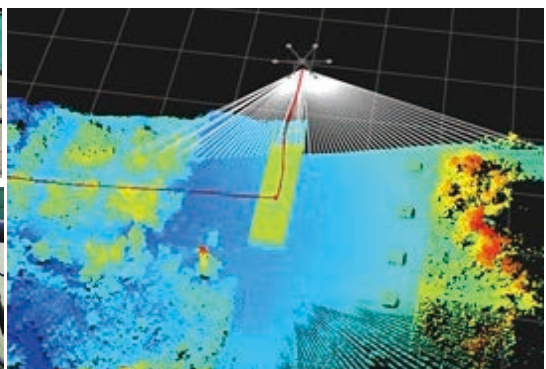


Fig. 3 複数の GNSS を搭載した UAV

Fig. 4 複数の GNSS を搭載した UAV による三次元計測

2.3 (B) 車両位置出入口部奥の空間認識と縁石モデル化

高度運転支援システムや自動運転の実現に向けてダイナミックマップの整備が必要とされている。ダイナミックマップの基盤となる地図は、道路地物の種別と位置情報を含んでおり、作成には MMS (Mobile Mapping System) 計測データの利用が期待されている。ダイナミックマップ構築検討コンソーシアムによれば、基盤的地図の精度は相対位置 25cm 以内とされている。MMS 計測データには

道路地物の属性情報は付与されていない。そこで基盤的地図作成には三次元点群から道路地物を自動抽出し、離散的点群データから連続的データに変換する必要がある。そこでまず、スキャンラインごとに高さ方向の変化量を用いることで縁石の抽出を行ってきた(2017年度精密工学会秋季大会学術講演会で報告)。特に車道から商業施設駐車場などへの接続性に注目し、縁石の形状から進入可能な縁石と進入不可な縁石を分類する手法を提案した。しかし進入可能縁石の歩道側は、駐車場に接続し車両が進入できるものと、乗り上げや方向転換のみのスペースしかないものがある。また、前報の手法では縁石に照射された点の抽出にとどまっており、離散的なデータのままとっていた。そこで2018年度精密工学会春季大会学術講演会では進入可能縁石の歩道側のスペースの認識、また縁石の連続的なデータ作成手法と精度について検討した結果を報告した。

3. 共同研究者

鈴木 太郎 (高等研究所 助教)

吉田 彬 (基幹理工学部・機械科学・航空学科・助教)

石川貴一郎 (日本工業大学・准教授, 理工総研・招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

Akira Yoshida, Jun Yoshikawa, Yu Fujimoto, Yoshiharu Amano, Yasuhiro Hayashi, Stochastic receding horizon control minimizing mean-variance with demand forecasting for home EMSs, Energy and Buildings, Vol. 158, pp. 1632-1639, 2018.

Akira Yoshida, Jun Yoshikawa, Yoshiharu Amano, Yasuhiro Hayashi, Stochastic Model Predictive Control of Residential Fuel Cell Cogeneration Unit with Periodic Forecast Update for Distributed Architecture, Proceedings of ECOS 2017, San Diego, July, 2017.

Toshiyuki Nagai, Akira Yoshida, Yoshiharu Amano, Optimal Configuration of Energy System in Multiple Households with Power Interchange for CO₂ Abatement in Japan, Proceedings of ECOS 2017, San Diego, July, 2017.

Harunobu Ikegami, Akira Yoshida, Yoshiharu Amano, Impact on Energy Saving under Energy Interchanges among Building Concerning Demand Profiles, Proceedings of ECOS 2017, San Diego, July, 2017.

Toshiyuki Nagai, Akira Yoshida, Yoshiharu Amano, Impact of Utilizing PV Surplus Electricity on CO₂ Emissions from the Residential Energy Systems, Proceedings of the 17th International Conference on Power Engineering, Charlotte, June, 2017.

永井 俊行, 吉田 彬, 天野 嘉春, 電力融通可能な住宅地域における CO₂ 排出量最小となる住設機器構成の検討, 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2017.

横木 達哉, 吉田 彬, 天野 嘉春, 天空画像の色情報と雲領域の時間変化に基づく PV 発電量短周期予測手法の提案, 第22回動力・エネルギー技術シンポジウム, 愛知, 2017.

複数の GNSS を用いたドローンの高精度位置姿勢推定とレーザー三次元計測, 鈴木太郎, 天野嘉春, 建設機械 Vol. 12, 2017.

小型 UAV 搭載レーザスキャナによる災害環境の三次元計測 —レーザスキャナの取り付け角度キャリブレーションと三次元地図の精度評価—, 丹羽啓介, 高橋佑允, 鈴木太郎, 天野嘉春, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.

小型 UAV 搭載レーザスキャナによる災害環境の三次元計測 —6 個の GNSS 受信機と IMU 複合による高精度姿勢推定—, 佐々木涼平, 高橋佑允, 鈴木太郎, 天野嘉春, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.

NLOS マルチパス信号の機械学習による都市環境における自己位置推定の高精度化, 中野裕介, 鈴木太郎, 天野嘉春, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.

NLOS Multipath Detection by Using Machine Learning in Urban Environments, Taro Suzuki, Yusuke Nakano, Yoshiharu Amano, The 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), 2017.

レーザ三次元計測のための複数 GNSS 受信機を用いた UAV の高精度姿勢推定, 鈴木 太郎, 佐々木 涼平, 高橋 佑允, 天野 嘉春, 第 23 回ロボティクスシンポジウム, 2018.

久保大輔, 石川貴一郎, 天野嘉春, MMS データからの縁石車両出入口部の認識, 精密工学会 2017 年度秋季大会講演論文集, 2017/9/20, 大阪.

久保大輔, 石川貴一郎, 天野嘉春, MMS データからの縁石車両出入口部の認識[第二報], -車両出入口部の空間認識とモデル化-, 精密工学会 2018 年度春季大会講演論文集, I06, 2018/3/15, 東京, pp.551-552.

5. 研究活動の課題と展望

エネルギーシステムに関しては, 今年度構築した 1 家庭を対象とした HEMS を複数台集約することで, より広域的な目的, 例えば地域単位の電力負荷平準化を達成する方法論の構築を目指す. 自律移動システムに関しては, 今後複数の UAV, 移動ロボットが協調して環境の三次元情報を取得する手法を開発する予定である. リアルタイムに推定した三次元地図や位置姿勢情報をロボット間で共有することで, 効率的な三次元情報の取得と解析が可能となる.

次世代放射線検出器開発と宇宙・医療への応用

研究代表者 片岡 淳
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

本研究は次世代放射線イメージングをキーワードに、高エネルギー宇宙物理実験から医療応用、環境計測まで広く包含する分野横断型研究を展開する。宇宙物理実験においては人工衛星や気球を用いた天体観測と新規装置開発、医療応用では3D低被ばく多色CTや高精度陽子線治療を目指したガンマ線カメラの開発、環境計測では福島県下（とくに森林部）での調査を目的とする新規ドローンシステムの開発などを行う。

2. 主な研究成果

2.1 高エネルギー宇宙物理関連の成果

本年度はフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡やすざく衛星を用いた各種データ解析、また *Galaxies* 誌にフェルミ・バブルの review 論文を依頼執筆し、分野の進展に貢献した (Kataoka et al. 2018)。フェルミ・バブルは我々の銀河中心が10万年前に大爆発を起こした有力な証拠であるが、X線をはじめとする他波長での調査は始まったばかりである。今回掲載された review は、電波からX線を広く包含する、初めての長編解説論文となった。また、スウェーデンと共同で行っている PoGO+ のカニ星雲のデータ解析結果から20-160keVの硬X線領域で初めて高い信頼度で偏光を観測し、*Scientific Reports* 誌に掲載された (Chauvin et al. 2017)。本結果は8月10日付で広島大学・早稲田大学・東京大学ほかからプレスリリースを行った。その他、研究室メンバーの共同成果として電波銀河の変動解析 (Tanada et al. 2018)、NPS/Loop I 領域のX線系統解析 (Akita et al. 2018) が進行中で、*ApJ* 誌に論文を投稿中である。

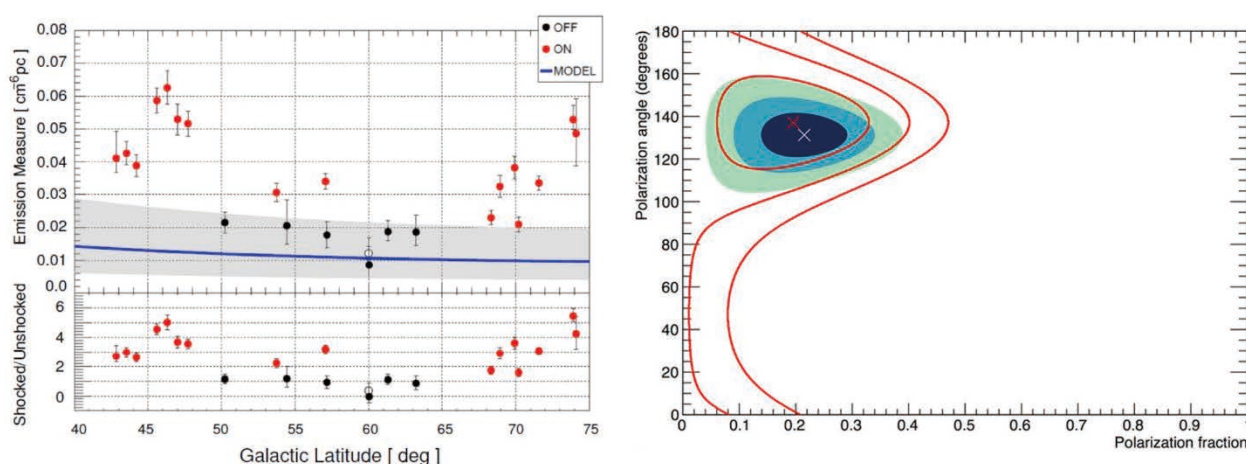


図 1: (左) フェルミバブルと X 線放射から探る、銀河中心爆発の痕跡。NPS/Loop I 領域の詳細解析から、衝撃波加熱されたガスを発見 (Kataoka et al. 2018; Akita et al. 2018) (右) 気球実験 PoGO+ により、20-160keV 領域でカニ星雲からの偏光を世界初検出 (Cauvin et al. 2017)

2.2 医療応用へむけたイメージング

科研費・基盤研究（S）（H27 -31 年度）「実用化へ向けた高解像度 3D カラー放射線イメージング技術の開拓」および挑戦的研究・開拓（H29 -31 年度）「粒子線治療中の 2 次被ばく低減に向けた中性子可視化への挑戦」（いずれも代表：片岡淳：早稲田大学理工学術院・教授）を中心とし、様々な研究が進行中である。ここではいくつか例を挙げたい。

(1) 即発ガンマ線イメージング

線量集中性を特長とする粒子線治療では、高精度かつ迅速な照射が求められる。現状では、陽電子断層撮影(PET)による確認が主流であるが、ガントリ構造のため治療ビームとの共存が難しく、また PET で得られる画像と実際の線量分布には大きな差がある。シミュレーションにより、陽子線と体内 ^{12}C , ^{16}O の核反応で生ずる 4.4MeV ガンマ線は陽子線量を良くトレースすることが示唆されているが、実機による検証が未だ十分に行われていない。本研究では、これら治療時に生ずる即発ガンマ線のオンライン可視化技術を世界に先駆けて開発した。平成 29 年度には、マルチアノード PMT と 3 次元 Ce:GAGG シンチレータアレイを用いたコンプトンカメラを製作した。解像度は 4.4MeV で 6.4° (FWHM)であり、板状の

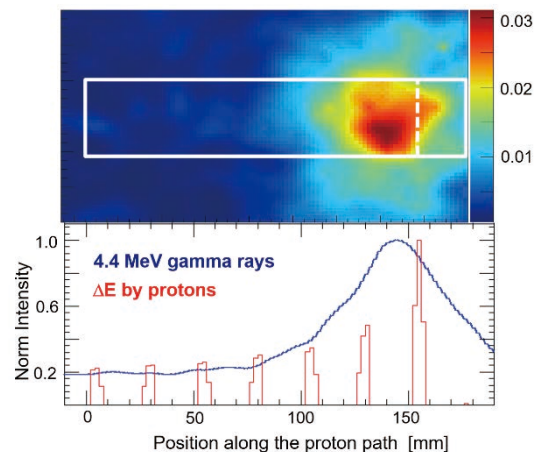


図 2: (上) 4.4MeV 即発ガンマ線イメージ (下) ブラッグピークと上記ガンマ線ピークは一致する

レイを用いたコンプトンカメラを製作した。解像度は 4.4MeV で 6.4° (FWHM)であり、板状の亚克力板を複数枚並べることで疑似的に 70MeV 陽子線の飛程を 15.5cm まで伸ばして照射時のイメージングを行った。結果を図 3 に示す。ブラッグピーク周辺に集中したガンマ線照射が世界で初めて明確に捉えられた (Koide et al. 2018, submitted to Scientific Reports)。

(2) 陽電子放出核種反応断面積の精密測定

陽子線照射の確認において、PET 検出器を用いたオフライン計測でさえも改善すべき課題が多い。とくに、体内の元素と陽子線が引き起こす原子核反応は十分に理解されておらず、医療で重要な低エネルギー陽子線の核反応断面積は不定性が大きい。本研究では、陽電子放出核種から生じるチェレンコフ光を CCD カメラで撮影することで、その生成頻度を簡単かつ正確に導出する画期的な手法を確立した。本手法により得られた結果は従来のデータベースを刷新する高い精度を誇り、初めて、PET 計測を正確にシミュレーションでできるようになった (Masuda et al. 2018, Scientific Reports)。

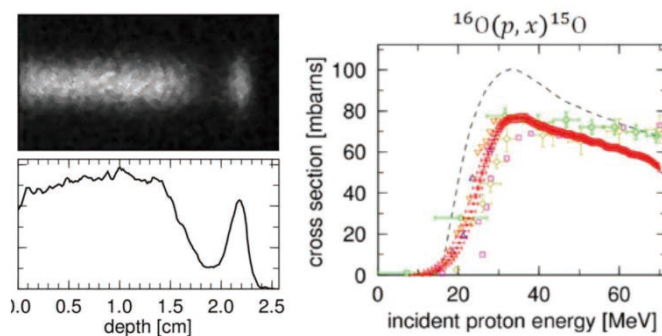


図 3: (左) CCD で撮影した陽子線照射後のチェレンコフ発光分布 (右)これより導出した原子核反応断面積

なお、多色 X 線 CT に関する成果はプロジェクト研究「高精度 3D カラー放射線イメージング」において主体的に実施したため、ここでは割愛する。

2.3 環境計測への応用

福島県下において、ほぼ 2 か月おきにドローンを用いた調査を継続している。本年度はとくに、等立体角射影で取得した画像を平面画像に変換する新たな手法を構築し、地上におけるサーベイメータとの定量比較を行った。さらに、鉛直高さ方向に 10 メートル刻みで線量データ取得を行い、各高度におけるスペクトルを詳細に取得することに成功した。プレリミナリではあるがデータ解析が進んでおり、これまで知られていなかった重大かつ興味深いデータが得られている。今後のプレスリリースを想定し、本報告書での画像掲載等は割愛する。

3. 共同研究者（学内）

有元 誠（研究院講師・次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] Koide,A.; Kataoka,J.; Masuda,T.; Takabe,M.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Fujieda,K; Maruhashi,T; Kurihara,T; Inaniwa,T. Precision imaging of 4.4 MeV gamma rays using a 3-D position sensitive Compton camera, *Nature Scientific Reports*, submitted on Feb.28
- [2] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T; Fujieda,K; Kurihara,T; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (5 pages)
- [3] Arimoto,M.; Morita,H.; Fujieda,K; Maruhashi,T; Kataoka,J.; Nitta,H.; Ikeda,H. Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (5 pages)
- [4] Sueoka,K.; Kataoka,J.; Takabe,M.; Iwamoto,Y.;Arimoto,M.; Yoneyama,M.; Yoda,I.; Torii,T; Sato,Y.; Kaburagi,M.; Terasaka,Y. Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate Environments, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (4 pages)
- [5] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (4 pages)
- [6] Hitomi Collaboration; Hitomi X-ray Observation of the Pulsar Wind Nebula G21.5-0.9, accepted for publication in *PASJ*
- [7] Hitomi Collaboration; Temperature Structure in the Perseus Cluster Core Observed with Hitomi , accepted for publication in *PASJ*
- [8] Hitomi Collaboration; Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi , accepted for

publication in *PASJ*

- [9] Hitomi Collaboration; Hitomi Observations of the LMC SNR N132D: Highly Redshifted X-ray Emission from Iron Ejecta, accepted for publication in *PASJ*
- [10] Hitomi Collaboration; Hitomi Observation of Radio Galaxy NGC 1275: The First X-ray Microcalorimeter Spectroscopy of Fe-K α Line Emission from an Active Galactic Nucleus, accepted for publication in *PASJ*
- [11] Hitomi Collaboration; Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi, accepted for publication in *PASJ*
- [12] Hitomi Collaboration; Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi, accepted for publication in *PASJ*
- [13] Hitomi Collaboration; Measurements of resonant scattering in the Perseus cluster core with Hitomi SXS, accepted for publication in *PASJ*
- [14] Hitomi Collaboration; Hitomi X-ray studies of Giant Radio Pulses from the Crab pulsar, accepted for publication in *PASJ*
- [15] Hitomi Collaboration; Search for Thermal X-ray Features from the Crab nebula with Hitomi Soft X-ray Spectrometer, accepted for publication in *PASJ*
- [16] Kataoka,J.; Sofue,Y.; Inoue,Y.; Akita,M.; Nakashima,S.; Totani,T. X-ray and Gamma-Ray Observations of the Fermi Bubbles and NPS/Loop I Structures, *Galaxies*, 2018, vol.6, pp.27-39 (INVITED REVIEW PAPER)
- [17] Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,K.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T; Toshito,T. Measurement of nuclear reaction cross sections by using Cherenkov radiation toward high-precision proton therapy, *Nature Scientific Reports*, 2018, vol.8, 2570 → プレス発表を参照 (2018年2月7日: 早稲田大学、東京女子医科大学、京都府立医科大学、量研機構、名古屋大学、名古屋市立西部医療センター)
- [18] Arimoto,M.; Harita,S.; Sugita,S; Yatsu,Y.; Kawai,N.; Ikeda,H.; Tomida,H.; Isobe,N.; Ueno,S.; Mihara,T.; Serino,M.; Kohmura,T.; Sakamoto,T.; Yoshida,A.; Tsunemi,H.; Hatori,S.; Kume,K.; Hasegawa,T. Development of a 32-channel ASIC for an X-ray APD detector onboard the ISS, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, Vol.882, pp.138-147
- [19] Chauvin, M.; Florén, H.-G.; Friis, M.; Jackson, M.; Kamae, T.; Kataoka, J.; Kawano, T.; Kiss, M.; Mikhalev, V.; Mizuno, T.; Tajima, H.; Takahashi, H.; Uchida, N.; Pearce, M. The PoGO+ view on Crab off-pulse hard X-ray polarization, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 2018. sly027
- [20] Hitomi Collaboration; Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster, *Nature*, 2017, Volume 551, Issue 7681, pp. 478-480
- [21] Chauvin, M.; Florén, H.-G.; Friis, M.; Jackson, M.; Kamae, T.; Kataoka, J.; Kawano, T.; Kiss, M.; Mikhalev, V.; Mizuno, T.; Ohashi, N.; Stana, T.; Tajima, H.; Takahashi, H.; Uchida, N.; Pearce, M. Shedding new light on the Crab with polarized X-rays, *Nature Scientific Reports*, 2017, Volume 7, id. 7816 → プレス発表を参照 (2017年8月10日: 早稲田大学、広島大学、東京大学)
- [22] Yoneyama,M.; Kataoka,J.; Arimoto,M; Masuda,T; Yoshino,M.; Kamada,K.;

Yoshikawa,A.; Sato, H.; Usuki, Y. Evaluation of GAGG:Ce scintillators for future space applications, *Journal of Instrumentation*, 2018, 13, P02023

[23] Nakanish,K.; Yamamoto,S.; Kataoka,J. Performance comparison of finely pixelated LYSO- and GAGG-based Si-PM gamma cameras for high resolution SPECT, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2017, vol.872, pp.107-111

[24] Taya,T.; Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Tagawa,L.; Mochizuki,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Kurita,K.; Yamaguchi,M.; Kawachi,N. Optimization and verification of image reconstruction for a Compton camera towards application as an on-line monitor for particle therapy, *Journal of Instrumentation*, 2017, vol.12, P07015 (17 pages)

[25] Kishimoto,A.; Kataoka,J.; Tagawa,L.; Mochizuki,S.; Ohsuka,S.; Nagao,Y.; Kurita,K.; Yamaguchi,M.; Kawachi,N.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; First demonstration of multi-color 3-D in vivo imaging using ultra-compact Compton camera, *Nature Scientific Reports*, 2017, vol.7; 2110

→ プレス発表を参照 (2017 年 5 月 18 日 : 早稲田大学、大阪大学、量研機構)

[26] Mochizuki,S; Kataoka,J.; Tagawa,L.; Iwamoto,Y.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Arimoto,M.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara.T.; Ohsuka,S. First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima, *Journal of Instrumentation*, 2017, vol.12, P11014 (13 pages)

[27] CALET Collaboration; Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station, *Physical Review Letters*, Volume 119, Issue 18, id.181101

[28] CALET Collaboration; Energy calibration of CALET onboard the International Space Station, *Astroparticle Physics*, Volume 91, p. 1-10.

4.2 総説・著書

[1] 有元 誠; 片岡 淳. 増幅型光センサーMPPCを用いた低被ばく・多色 CT への挑戦, *Isotope News*, 2018, vol.755,pp.25-29

4.3 国際会議での発表

[1] Takabe,M.; Masuda,T.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Sueoka,K.; Maruhashi,T.; Tanaka,S.; Nishio,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T. Development of simple proton CT system with novel correction methods of proton scattering, 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) , 2017, 10-15 December, OIST, Okinawa, Japan (Poster) → 優秀ポスター賞を受賞

[2] Morita,H.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Nitta,H. Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Oral)

[3] Arimoto,M.; Morita, H.; Kataoka,J.; Maruhashi,T.; Nitta,H.; Fujieda,K. Design and Development of LSI for new photon-counting CT with multi-pixel photon counters, IEEE

Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Oral)

[4] Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,T.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T.; Toshito,T. A novel method of measuring nuclear reaction cross sections by using Cherenkov light toward high-precision proton therapy. IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Poster)

[5] Takabe,M.; Masuda,T.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Tanaka,S.; Nishio,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T. Development of simple proton CT system with novel MCS correction methods, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Poster)

[6] Akita,M.; Kataoka,J.; Totani,T.; Sofue,Y.; Nakashima,S.; Inoue,Y. Diffuse X-ray emission from Loop I Additional evidence of past activity of Galactic Center and relation to Fermi Bubbles, 7th international Fermi Symposium, 2017, 15-20, Oct., Congress Center Garmisch-Partenkirchen, Germany

[7] Tanada,K.; Kataoka,J.; THE ORIGINS OF THE GAMMA-RAY FLUX VARIATION OF NGC1275 ANALYZED WITH 8-YEAR FERMI-LAT OBSERVATION, 7th international Fermi Symposium, 2017, 15-20, Oct., Congress Center Garmisch-Partenkirchen, Germany

[8] Kataoka,J.; Sofue,Y.; Inoue,Y.; Akita,M.; Nakashima,S.; Totani,T. X-ray Observations of the Fermi Bubbles and Loop-I Structures. Whereabouts and Physics of the Roaming Baryons in the Universe, 2017,10-14, Sexten, Italy ([INVITED REVIEW](#))

[9] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[10] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[11] Sueoka,K.; Kataoka,J.; Takabe,M.; Iwamoto,Y.; Arimoto,M.; Yoneyama,M.; Yoda,I.; Torii,T.; Sato,Y.; Kaburagi,M.; Terasaka,Y. Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate

Environments, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[12] Morita,H.; Oshima,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Nitta,H.; Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[13] Arimoto,M.; Morita,H.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kataoka,J.; Nitta,H.; Ikeda,H. Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using

multipixel photon counters, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Poster)

4.4 国内会議での発表・公開セミナー

- [1] (招待講演) 片岡 淳 「宇宙から医療まで：放射線イメージングの最前線」, “物質と宇宙の基礎研究とそれがもたらす最先端産業技術”, 特別シンポジウム、第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日・20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
- [2] 望月 早駆; 片岡 淳; 小出 絢子; 藤枝 和也; 丸橋 拓也; 栗原 拓也; 末岡 晃紀; 米山 昌樹; 稲庭 拓, 陽子線治療オンラインモニタに向けた即発ガンマ線イメージングの実証, 第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日・20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
- [3] 丸橋 拓也; 片岡 淳; 有元 誠; 森田 隼人; 藤枝 和也; 新田 英雄, マルチチャンネル MPPC を用いた低ひばくかつ多色 X 線 CT の構築と評価, 第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日・20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
- [4] 田川 怜央; 片岡 淳; 末岡 晃紀; 藤枝和也; 栗原拓也; 有元誠; 望月早駆; 丸橋拓也; 歳藤利行; 木村充宏, 粒子線治療下でのイメージングに向けた中性子カメラの開発, 第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日・20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
- [5] (招待講演) 片岡 淳 「手のひらサイズ」コンプトンカメラを用いた 3D in vivo イメージングへの挑戦, 第 13 回小動物インビボイメージング研究会, 日本核医学会, 2017, 7 月 29 日, 大阪大学医学部
- [6] 棚田和玖; 片岡淳, フェルミ衛星を用いた電波銀河 NGC 1275 の長期変動解析, 日本天文学会 2017 年秋季年会. 北海道大学

4.5 プレスリリース

- [1] 2018 年 2 月 7 日: [プレスリリース](#)
「陽子線が体内で起こす核反応を光で可視化 陽子線治療の精度向上に大きく貢献」
・早稲田大学ホームページ: <https://www.waseda.jp/top/news/57078>
- [2] 2017 年 8 月 10 日: [プレスリリース](#)
「直径 100 m の気球で天体からの硬 X 線の偏光情報を世界初検出」
・早稲田大学ホームページ: <https://www.waseda.jp/top/news/53250>
- [3] 2017 年 5 月 18 日: [プレスリリース](#)
「世界最軽量「手のひらサイズ 580g」医療用ガンマ線可視化カメラを開発」
・早稲田大学ホームページ: <https://www.waseda.jp/top/news/51161>

4.6 マスメディア掲載

- [1] 2018 年 3 月 1 日(木): BS ジャパン 7ch: 木曜夜 8:55~ TV 放送
「科学ミチル 世界は未知で満ちている」見えない光で未知を観る!
・BS Japan ホームページ: http://www.bs-j.co.jp/official/kagaku_michiru/
- [2] 2017 年 12 月 15 日: 理系マイナビ 2019 SPECIAL INTERVIEW volume.50
ー 若き研究・開発者への提言 ー
・理系マイナビホームページ: <https://job.mynavi.jp/conts/2019/sci/interview/50/>

- [3] 2018年2月14日：化学工業日報、医療ニュースほか
「陽子線治療精度を向上 早大が体内進路可視化」
・化学工業日報 ホームページ：<http://www.chemicaldaily.co.jp/>
- [4] 2017年5月29日：日本経済新聞（全国版）
「早大など、ガンマ線を3D画像に 手のひら大のカメラ」
・日経新聞 ホームページ：
https://www.nikkei.com/article/DGXLASGG25H55_X20C17A5TJM000/
- ・2017年5月26日：科学新聞
「世界最軽量580グラム実現 ガンマ線可視化カメラ」

4.7 パンフレット等への掲載

- [1] 2018年3月：早稲田大学理工学術院報「塔」93号
・「世界最軽量「手のひらサイズ580g」 医療用ガンマ線可視化カメラを開発」
- [2] 2017年11月：NTT ファシリティーズジャーナル
・「研究者の横顔」
- [3] 2017年5月：WASEDA University Research Activities
“Next-generation WASEDA Research Resources”

5. 研究活動の課題と展望

宇宙関連では各種データ解析を継続し論文執筆を行うほか、新規偏光検出器の開発・評価を行う。具体的には、10MeV程度の単色ガンマ線を提供する兵庫県立大学のNewSubaruを用いた実機試験を考えており、現地調査や調整が進んでいる。環境計測では、これまで通り2か月に一度程度の頻度で福島県浪江の調査を継続し、環境放射線の分布状況に関して新しい知見を得ることを目的とする。医療系実験においては大阪大学医学部と共同での臨床実験を予定し、倫理委員会に申請・受理済みである。とくに前立腺癌骨転移患者の塩化ラジウム(^{223}Ra)体内分布評価の撮影が主眼となり、年間15例程度を目指す。 ^{223}Ra はアルファ線放出と共に270keV, 350keVなど様々なガンマ線を体外に放出するため、これらを精度良くイメージングできれば、ドラッグデリバリーの有効な確認手段となりえる。来年度は理工総研・重点研究員として最後の年となるが、引き続き宇宙・医療・環境分野の発展に広く貢献していきたい。

遺伝情報の維持と継承の分子機構：

染色体基本構造と DNA 組換え機構の解明を目指して

研究代表者 胡桃坂 仁志

(先進理工学部 電気・情報生命学科 教授)

1. 研究課題 遺伝情報の維持と継承の分子機構：染色体基本構造と DNA 組換え機構の解明を目指して

生物の遺伝情報は DNA として維持され継承されており、真核生物において、DNA はヒストンタンパク質からなるヌクレオソームを基本構造としている。ヌクレオソーム構造が折り畳まれて形成されるクロマチン構造は、長大な DNA を細胞核内に収納するだけでなく、動的に変化することによりゲノムの機能を制御している。そのため、クロマチン構造の変化は、遺伝情報が正常に維持され継承されるメカニズムの根幹を成す。

本研究課題では、染色体の基本構造であるヌクレオソームを試験管内で再構成し、原子分解能での構造解析と生化学的解析により、遺伝情報を正確に維持し継承するための分子機構を明らかにすることを目指す。

2. 主な研究成果

(1) 染色体基本構造を試験管内において再構成し、立体構造を解析した

真核生物の DNA は、ヒストン H2A、H2B、H3、H4 からなるヒストン 8 量体に約 1.7 回巻き付いたヌクレオソームを基本単位としている。ヌクレオソームは、それを構成するヒストン亜種の種類や翻訳後修飾により、立体構造や安定性の違い、および特異的な因子の呼び込みによりゲノムの機能を調節している。研究代表者は、ヌクレオソームを試験管内で再構成し、詳細な立体構造を解析することにより、クロマチンによるゲノム機能の制御メカニズムを解析してきた。本研究課題では、遺伝子の発現を制御する多様な染色体基本構造を試験管内で再構成し、立体構造を解析した。

遺伝子発現制御領域に形成されるヌクレオソーム-ヌクレオソーム融合体を再構成し、X 線結晶構造解析によって立体構造を解析した。この構造は、通常形成されるヒストン 8 量体からなるヌクレオソームと、ヒストン 8 量体から H2A-H2B が抜けた 6 量体からなるヌクレオソームが融合した、ヒストン 14 量体に DNA が 3 回巻き付いた新規のヌクレオソーム構造であることを明らかにした (図 1, Kato et al., Science, 2017)。生体内における遺伝子の転写活性化には、ATP 加水分解のエネルギーを使いヌクレオソームの位置やクロマチン構造を変化させるクロマチンリモデリング反応が必要である。本研究で示した新規ヌクレオソーム構造はクロマチンリモデリング中間体であると考えられており、遺伝子発現とクロマチン構造の制御に関する研究に新たな展開が期待される。また、肝発生において鍵となる転写因子 FoxA1 の

結合配列を含む内在性遺伝子の発現制御領域を用いてヌクレオソームを再構成し、クライオ電子顕微鏡により解析を行なった。これにより、生体内に存在する遺伝子制御領域に形成されるクロマチン構造を明らかにした (Takizawa et al., Open Biol., 2018)。ヒトにおいて新たに同定したヒストン H3 の亜種である H3.6 を含むヌクレオソームを再構成し、生化学的手法によりダイナミクスを解析した。その結果、H3.6 を含むヌクレオソームは、通常形成されるヌクレオソームと比較して不安定であることを明らかにした。ヒストン H3.6 を含むヌクレオソームの X 線結晶構造を解析することにより、ヒストン亜種が転写活性化に関わる機構を提唱した (Taguchi et al., Biochemistry, 2017)。

ヘテロクロマチンは、遺伝子の発現や組換えを抑制し染色体の安定性を維持する重要な構造体である。従来、ヌクレオソームが凝集した構造であると考えられてきたが、その詳細はほとんど不明であった。本研究課題では、ヘテロクロマチンの基盤構造を形成する HP1 タンパク質-クロマチン複合体を試験管内で再構成し、クライオ電子顕微鏡による単粒子解析により立体構造を解析した。本研究の成果から、HP1 とヌクレオソームにより形成されるヘテロクロマチンの基盤構造が、これまで考えられてきた密な構造とは異なり、様々なクロマチン構造調節因子の相互作用が可能な構造であることが明らかになった (図 2, Machida et al., Mol. Cell, 2018)。本成果により、ヘテロクロマチンの形成機構や機能が明らかになることが期待される。

本研究課題で明らかにした染色体の基本構造は、クロマチンによる遺伝子発現制御に関する研究に重要な基盤情報を提供している。

(2) 染色体相同組換えの機構を明らかにするため、DNA 組換えにおいて中心的な役割を果たすタンパク質の生化学的性質や立体構造を解析した

減数分裂は、ヒトなどの高等動物から酵母などの単細胞生物に至るまで、有性生殖を行なう生物においてゲノムを子孫に継承するための重要なプロセスである。高等動物では体細胞から卵子や精子などの配偶子を作る、通常の体細胞分裂とは異なる様式の細胞分裂である。減数分裂期には、父母に由来する相同染色体が互いを認識して対合し、相同染色体間の組換えが起こる。この際、クロマチンを含む巨大な構造物であるシナプトネマ複合体が形成され、相同染色体の対合と乗換えにより DNA の交差構造が生じる。この構造はキアズマと呼ばれ、正常な染色体分配を保証し、形成不全は染色体異数性に起因した疾患の原因となる。研究代表者は、クロマチン上で起こる DNA 組換えのメカニズムを明らかにすることを目的とし、相同染色体組換えを促進するタンパク質群の機能を解析してきた。本研究課題では、様々な細胞において相同染色体の対合反応を促進する RAD51、同活性を有し減数分裂期特異的に機能する DMC1 に注目した。組換えに関与するタンパク質をリコンビナントタンパク質として精製し、試験管内で相同組換え反応系を解析した。その結果、シナプトネマ複合体に含まれキアズマ形成を促進するタンパク質である SYCP3 が RAD51 に結合することにより、RAD51 に依存した相同鎖検索を抑制することを明らかにした (Kobayashi et al., Genes Cells, 2017)。本成果から、減数分裂期組換えでは、RAD51 による対合活性が抑制されることにより DMC1 依存的対合反応が促進されるモデルを示し、クロマチン上で起こる減数分裂期組換えの機構に新たな知見を加えた。

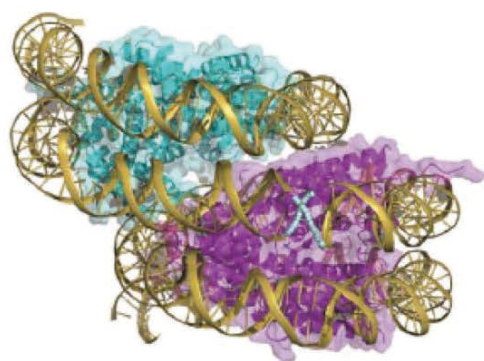


図1 転写制御領域に形成されるヌクレオソーム-ヌクレオソーム融合体のX線結晶構造 (Kato et al., Science, 2017)

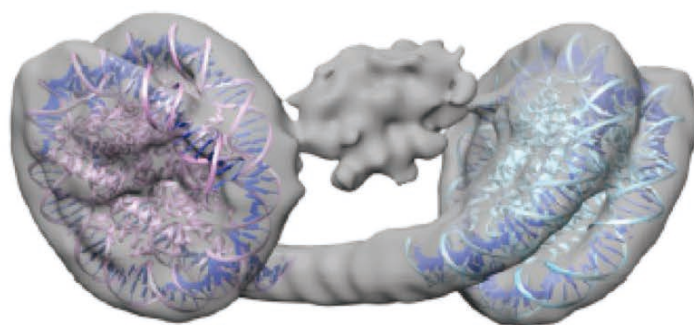


図2 HP1を含むヘテロクロマチンの基盤構造。クライオ電子顕微鏡による単粒子解析から再構築した立体構造 (Machida et al., Mol. Cell, 2018)

3. 共同研究者

堀越 直樹 (理工学術院総合研究所 次席研究員)
 小山 昌子 (理工学術院総合研究所 次席研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Y. Okamoto, M.W. Iwasaki, K. Kugou, K.K. Takahashi, A. Oda, K. Sato, W. Kobayashi, H. Kawai, R. Sakasai, A. Takaori-Kondo, T. Yamamoto, M.T. Kanemaki, M. Taoka, T. Isobe, H. Kurumizaka, H. Innan, K. Ohta, M. Ishiai, M. Takata, Replication stress induces accumulation of FANCD2 at central region of large fragile genes, *Nucleic Acids Res.*, in press (2018).
- Y. Takizawa, H. Tanaka, S. Machida, M. Koyama, K. Maehara, Y. Ohkawa, P.A. Wade, M. Wolf, H. Kurumizaka, Cryo-EM structure of the nucleosome containing the *ALB1* enhancer DNA sequence, *Open Biol.*, **8**, 170255 (2018)
- S. Machida, Y. Takizawa, M. Ishimaru, Y. Sugita, S. Sekine, J. Nakayama, M. Wolf, H. Kurumizaka, Structural Basis of Heterochromatin Formation by Human HP1, *Mol. Cell*, **69**, 385-397 (2018)
- T. Fuse, K. Katsumata, K. Morohoshi, Y. Mukai, Y. Ichikawa, H. Kurumizaka, A. Yanagida, T. Urano, H. Kato, M. Shimizu, Parallel mapping with site-directed hydroxyl radicals and micrococcal nuclease reveals structural features of positioned nucleosomes in vivo, *PLoS One*, **12**, e0186974 (2017)
- W. Kobayashi, N. Hosoya, S. Machida, K. Miyagawa, H. Kurumizaka, SYCP3 regulates strand invasion activities of RAD51 and DMC1. *Genes Cells*, **22**, 181-189 (2017).
- S. Inano, K. Sato, Y. Katsuki, W. Kobayashi, H. Tanaka, K. Nakajima, S. Nakada, H. Miyoshi, K. Knies, A. Takaori-Kondo, D. Schindler, M. Ishiai, H. Kurumizaka, M. Takata, RFWD3-mediated ubiquitination promotes timely removal of both RPA and RAD51 from DNA damage sites to facilitate homologous recombination, *Mol. Cell*, **66**, 622-634 (2017).

- H. Taguchi, Y. Xie, N. Horikoshi, K. Maehara, A. Harada, J. Nogami, K. Sato, Y. Arimura, A. Osakabe, T. Kujirai, T. Iwasaki, Y. Semba Y, Tachibana T, Kimura H, Ohkawa Y, Kurumizaka H, Crystal structure and characterization of novel human histone H3 variants, H3.6, H3.7, and H3.8, *Biochemistry*, **56**, 2184-2196 (2017).
- D. Kato, A. Osakabe, Y. Arimura, Y. Mizukami, N. Horikoshi, K. Saikusa, S. Akashi, Y. Nishimura, S.Y. Park, J. Nogami, K. Maehara, Y. Ohkawa, A. Matsumoto, H. Kono, R. Inoue, M. Sugiyama, H. Kurumizaka, Crystal structure of the overlapping dinucleosome composed of hexasome and octasome. *Science*, **356**, 205-208 (2017).
- S. Barral, Y. Morozumi, H. Tanaka, E. Montellier, J. Govin, M. de Dieuleveult, G. Charbonnier, Y. Couté, D. Puthier, T. Buchou, F. Boussouar, T. Urahama, F. Fenaille, S. Curtet, P. Héry, N. Fernandez-Nunez, H. Shiota, M. Gérard, S. Rousseaux, H. Kurumizaka, S. Khochbin, Histone variant H2A.L.2 guides transition protein-dependent protamine assembly in male germ cells, *Mol. Cell*, **66**, 89-101 (2017).

4.1 総説・著書

- M. Koyama, H. Kurumizaka, Structural diversity of the nucleosome, *J. Biochem.*, **163**, 85-95 (2018)
- M. Ishiai, K. Sato, J. Tomida, H. Kitao, H. Kurumizaka, M. Takata. Activation of the FA pathway mediated by phosphorylation and ubiquitination. *Mutat Res.*, **803-805**, 89-95 (2018)

4.2 招待講演

国際学会

- “Chromatin contribution in DNA repair”, The 6th US-Japan DNA Repair Meeting, Clark-Kerr Campus, Berkeley, California, May 2017
- “Structural versatility and dynamics of chromatin units” (タイトル変更: Structural studies of the nucleosome-nucleosome interaction), EMBO CONFERENCE “The Nucleosome: From Atoms to Genomes”, EMBL Heidelberg, Germany, August 2017
- “Structural studies of reconstituted chromatin units” HMGU-Japan Epigenetics and Chromatin Symposium, Helmholtz Zentrum München, Großhadern, September 2017
- “Structural Biology of Epigenetic Chromatin Regulation”, 15th Chinese Biophysics Congress, Shanghai, November 2017
- “Nucleosome Remodeling and Structure”, INDO-JAPAN Conference (2018): Epigenetics, Human Microbiomes and Disease, Human Microbiomes and Disease, Bose Institute, Kolkata, February 2018

国内学会

- “エピジェネティクスの制御基盤としてのクロマチン構造多様性”, DSSB シンポジウム, 横浜理研, 2017 年 6 月
- “ヌクレオソームの構造と動的多様性によるゲノム DNA 機構制御”, 第 17 回日本蛋白質科学会年会, 仙台国際センター, 2017 年 6 月
- “ゲノム DNA 機能制御のクロマチン構造基盤”, 大阪大学蛋白質研究所セミナー, 大阪大学,

2017 年 8 月

“ヌクレオソームのリモデリング機構”，第 76 回日本癌学会学術総会，パシフィコ横浜，2017 年 9 月

“クロマチン構造とゲノム機能制御機構”，平成 29 年度遺伝研研究会，国立遺伝学研究所，2017 年 10 月

“クロマチンの高次構造とダイナミクスの相関構造解析”，第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム，つくば国際会議場，2018 年 1 月

“クロマチンコーディングの構造基盤”，染色体研究の最前線 2018，東京工業大学すずかけ台キャンパス，2018 年 3 月

4.3 学会および社会的活動

主催：文部科学省科学研究費補助金新学術領域「動的クロマチン構造と機能」一般公開シンポジウム、2018 年 1 月、東京

共催：文部科学省研究費補助金新学術領域研究「生殖細胞のエピゲノムダイナミクスとその制御」「ステムセルエイジングから解明する疾患原理」「動的クロマチン構造と機能」3 領域合同若手勉強会 2017、2017 年 6 月、和歌山

講演：『エピジェネティクス：生命の源である遺伝子の新しい制御メカニズム』、早稲田大学商議会、2017 年 7 月、東京

講演：『エピジェネティクス研究と創薬のための再構成クロマチンの産生と性状解析』、平成 29 年度創薬等先端技術支援基盤プラットフォーム公開シンポジウム、2017 年 8 月 30 日、東京

講演：『自動化によって得られたものは？』、量子ビームサイエンスフェスタ、2018 年 3 月、茨城

5. 研究活動の課題と展望

ヌクレオソーム間の立体配置や、ヌクレオソーム結合因子とヌクレオソームとの相互作用は、クロマチン構造を変化させゲノムの機能を制御する。今後は、より高次クロマチンや複合体を試験管内で再構成し、構造と機能を解析する必要がある。

流体数学

研究代表者 柴田 良弘
(基幹理工学部 数学科 教授)

1. 1 研究課題

非圧縮性粘性流体の1相、2相問題の解の一意存在と解の漸近挙動に関し数学的に厳密な証明を与える。

2. 主な研究成果

非圧縮性粘性流体の1相問題及び2相問題に関する解の一意存在と漸近挙動の研究を行った。1相問題に関しては、半沢変換による方程式の定式化を行なった。この線形化問題として得られる方程式は Stokes 作用素と運動学的方程式(kinetic equation)の連立系に表面張力項をもつ境界条件とする境界値問題となるが、その一般化レゾルベント問題に対して、 R -有界な解作用素を一般領域で構築し、これを用いて時間発展方程式の最大正則性原理を示した。従来運動学的方程式には滑らかさの足りない係数をもつ項が現れることにより、局所解の存在証明が困難であったところを、最高次の微分項は発散することを示すような近似関数により係数を近似することにより、線形化問題の R 有界な解作用素をラプラス軸が十分大なところで構成し、もって時間発展問題の最大正則性原理を示した。ここで時間を十分小さく絞れば、近似関数から現れる発散量を一定に保てることを示すことが可能であり、従来の困難さを克服できた。時間局所解の一意存在を示すことが出来た。また2相問題に関しては、対応する線形化問題の半群の生成とその減衰度を求めることに成功した。これを用いて非有界領域での非圧縮性粘性流体の2相問題の時間大域解の一意存在とその漸近挙動を示した。さらに Nematic Liquid Crystal の Q -tensor モデルについての時間大域解の存在と漸近挙動に関する研究を全空間で行った。また多相流の Stefan-Maxwell-Navier-Stokes モデルに関する考察や、電磁流体の2相問題、時間周期問題に対する理論構築などの研究を開始し、2018年度引き続き行っている。

3. 共同研究者

Maria Schonbek (UCLA, サンタバーバラ校、教授),
Elena Frolova (ロシアアカデミー、教授)
Tomaz Piasecki (ポーランドアカデミー、准教授),
Ewlina Zatorska (Imperial College of London, 研究員)
Robert Denk (Konstanz 大教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

発表論文

著者 Robert Denk and Yoshihiro Shibata,

論文題目 Maximal regularity for the thermoelastic plate equations with free boundary conditions,

雑誌名 J. Evol. Equ. 17 巻 1 号 (2017), 215-261. doi:10.1007/s00028-016-0367-x

著者 Maria Schonbeck and Yoshihiro Shibata,

論文題目 On a global well-posedness of strong dynamics of incompressible nematic liquid crystals in $\mathbb{R}^N$,

雑誌名 J. Evol. Equ. 17 巻 1 号 (2017), 537--550. doi:10.1007/s00028-016-0358-y

著者 Yuko Enomoto and Yoshihiro Shibata,

論文題目 Global Existence of Classical Solutions and Optimal Decay Rate Via the Theory of Semigroup,

本 Y. Giga and A. Novotny (eds.) Handbook of Mathematical Analysis in Mechanics of Viscous Fluids, Springer International Pub. AG 2017.

DOI 10.1007/978-3-319-10151-4_42-1

著者 Yoshihiro Shibata,

論文題目 Global wellposedness of a free boundary problem for the Navier-Stokes equations in an exterior domain,

雑誌名 Fluid Mech Res Int, 1 巻 2 号 (2017), DOI:10.15406/fimrij.2017.01.00008

著者 Yoshihiro Shibata,

論文題目 Global well-posedness of unsteady motion of viscous incompressible capillary liquid bounded by a free surface,

雑誌名 Evolution Equations and Control Theory, 7 巻 1 号(2018)117--152,
doi:10.3934 /eect.2018007

著者 Yoshihiro Shibata

論文題目 On the L_p - L_q decay estimate for the Stokes equations with free boundary conditions in an exterior domain

雑誌名 Asymptotic Analysis 107 巻(2018), 33—72

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Free boundary problem for incompressible viscous fluid flows with surface tension

会議名 第 10 回名古屋微分方程式研究集会、

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Global well-posedness for one phase and two phase problem for the Navier-Stokes equations in unbounded domains

会議名 Geophysical Fluid Dynamics,

日時 2017 年 5 月 7 日—13 日

場所 Mathematical Research Institute of Oberwolfach

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Local and Global wellposedness of two component flow

会議名 Analysis Day

日時 2017 年 5 月 16 日

場所 TU Darmstadt

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Two phase problem for the Navier-Stokes equations

会議名 RIMS Workshop on Mathematical Analysis in Fluid and Gas Dynamics

日時 2017 年 7 月 5 日—7 日

場所 RIMS, Kyoto University

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 On the Navier-Stokes-Korteweg equations

会議名 International Workshop on the Multi-Phase Flow; Analysis, Modelling and Numerics,

場所 早稲田大学西早稲田キャンパス

日時 2017 年 11 月 28 日~12 月 1 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Maximal regularity and free boundary problem for the Navier-Stokes equations

会議名 第 15 回日独流体数学国際研究集会

場所 早稲田大学西早稲田キャンパス

日時 2018 年 1 月 9 日—12 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Free boundary problem for incompressible viscous fluid flows with surface tension

会議名 第 10 回名古屋微分方程式研究集会

日時 2018 年 3 月 15 日—16 日

場所 名古屋大学多元数理科学棟 509 号室

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 On L_p - L_q decay estimate for Stokes equations with free boundary condition in an exterior domain

日本数学会 首都大学東京 2017 年 3 月 27 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Global well-posedness for the free boundary problem of the Navier-Stokes equations in an exterior domain

日本数学会 首都大学東京 2017 年 3 月 27 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Maximal L_p - L_q regularity theorem for the linearized electro-magnetic field equations

日本数学会 山形大学 2017 年 9 月 14 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Local well-posedness for the magnetohydrodynamics in the different two liquies case

日本数学会 山形大学 2017 年 9 月 14 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Local well-posedness for the two components flow

日本数学会 山形大学 2017 年 9 月 14 日

発表者 Yoshihiro Shibata

発表題目 Global well-posedness for the two components flow

日本数学会 山形大学 2017 年 9 月 14 日

研究集会開催

International Wokshop on the Multi-Phase Flow; Analysis, Modelling and Numerics.

主宰者 柴田良弘(早稲田大学)

開催日 2017 年 11 月 28 日—12 月 1 日

場所早稲田大学西早稲田キャンパス 55 号館 N 棟 1 階第 2 会議室

RIMS 共同研究(公開型)「非圧縮性粘性流体の数理解析」 主宰者 前川泰則(京都大学) 柴田良弘(早稲田大学)

開催日 2017 年 12 月 4 日—6 日

場所 京都大学数理解析研究所

5. 研究活動の課題と展望

来年度も引き続き、最大正則性原理と半群の漸近挙動を基盤とする、粘性流体の自由境界問題に関する研究を行う。非圧縮性の場合だけでなく、圧縮性の場合も研究する。圧縮性の場合は輸送方程式による双極性を克服することが課題である。少なくとも表面張力が無い場合は Lagrange 変換

を用いることでこの困難さは克服でき、非圧縮の場合と同様の議論が出来ると予想されるが、表面張力がある場合は、エネルギー法で最高次の微分を評価し、低階項は半群の減衰を用いるという方法で時間大域解の存在と漸近挙動を示せるのではないかという展望をもっている。また、Nematic Liquid Crystal, 電磁流体方程式、多相流体の Stefan-Maxwell-Navier-Stokes モデルへの理論の拡張も研究課題として取り上げる。

理論核物理学研究

研究代表者 鷹野 正利
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

現実的核力から出発して一様核物質の状態方程式(EOS)を決定するための多体変分法の研究を行う。またその核物質 EOS を拡張して超新星爆発等の数値シミュレーションへの適用を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 陽なエネルギー汎関数を用いた変分法による絶対零度一様核物質 EOS の研究

現実的核力から出発して一様核物質の EOS を計算する方法として、これまで陽なエネルギー汎関数 (EEF) を用いた変分法を提唱し、その改良を行って来た。特に昨年度は、2 体核力ポテンシャルとしてスピン・アイソスピン依存の中心力及びテンソル力から成る Argonne v6' (av6')ポテンシャルを、そして 3 体核力として斥力項と 2π 交換項から成る Urbana IX (UIX)ポテンシャルを採用して、中性子物質 (PNM) に対する EEF を作成し、それを用いた変分エネルギー計算結果が、同じ核物質 Hamiltonian から出発した Monte Carlo 計算結果と良く一致することを確認した。また、Akmal らの先行研究で指摘されているような、PNM の π 中間子凝縮 (PC) 相の可能性を探るために、spin-longitudinal (SL) response の平均エネルギーの計算も行った。ただしこの際、response の energy-weighted sum (EWS) の計算が必要であり、それは response の演算子と Hamiltonian との二重交換子の期待値として求められるが、昨年度までの計算では、ここで用いる Hamiltonian において 3 体核力の寄与を無視していた。これは Akmal らの先行研究に倣ったが、この近似の妥当性は自明ではない。

そこで本年度は、SL EWS への 3 体力 2π 交換項の寄与を取り入れる計算を行った。具体的には波動関数を Jastrow 型に仮定した場合の上記二重交換子の期待値のクラスター展開において、3 体クラスター直接項の特に核子間相関について最低次の寄与を求め、それを正しく取り入れてさらに 3 体分布関数に対する Kirkwood の仮定が成立するように表式を作成し、その値を評価した。すると対応する SL response の平均エネルギーはわずかに上昇し、PC 相への相転移の傾向は若干弱まった。また Akmal らのような 1 次相転移は見られない、という結果は変わらなかった。

次に同じ Hamiltonian から出発した対称核物質 (SNM) のエネルギー計算を行った。対応する EEF を作成し、それに基づくエネルギー計算により、妥当な結果が得られた。また SNM の場合、 2π 交換項のエネルギーが常に負に寄与し、しかも密度と共にその大きさが増加する傾向は、Akmal らの先行研究結果と矛盾しない。ただし Akmal らの予言した 1 次相転移の傾向は、SNM の場合でも見られなかった。さらに Isovector (IV)の SL response の平均エネルギーを求めると、PNM の場合と同様に、波数が $k \sim 2\text{--}3 \text{ fm}^{-1}$ でスペクトルのソフト化が見られたが、そのエネルギーは正のままであり、PC 相への相転移は見られなかった。また Akmal らの予言した 1 次相転移の傾向も見られなかった。

2.2 EEF 変分法による有限温度一様核物質の EOS の研究

EEF 変分法を有限温度核物質へと拡張する研究も、継続研究課題として推進した。特に 2 体核力としては中心力成分のみから成る Argonne v4' (av4') ポテンシャルを、そして 3 体核力としては UIX ポテンシャルの斥力成分を用い、PNM 及び SNM に対して自由エネルギーの計算を行った。得られた自由エネルギーは妥当な振る舞いを示した。

そこで本研究を拡張して、得られた EOS に基づいて原始中性子星 (PNS) 構造計算を行った。特に UIX3 体核力ポテンシャルの斥力の強度は現象論的に決定されているため、その値を変化させた 2 種類の核物質 EOS を作成し、それらを用いて PNS の構造計算を行うことで、3 体核力斥力項の不定性が PNS 構造に与える影響を調べた。そのためにまず、av4'ポテンシャルの isospin-singlet チャネルの強度を調整し、絶対零度 SNM の飽和密度の経験値をできるだけ良く再現するような修正を行った。そして、UIX ポテンシャルの強度として、オリジナルのポテンシャルの値に加え、より強度を弱めた場合の核物質 EOS の計算も行った。任意の陽子混在度での非対称核物質の自由エネルギーは、SNM と PNM に対する自由エネルギーを用いて内挿により決定した。さらに低密度状態で核子クラスターが形成される領域においては、昨年度作成した Togashi EOS を代用した。こうして作成した核物質 EOS を用いて、PNS 内部物質を等エントロピーでレプトン混在比も一定な物質と仮定し、TOV 方程式を解いて PNS の構造を得た。

結果は図 1 のようになり、3 体力の斥力の強さがより大きい核物質 EOS の場合に、より PNS の半径も大きくなった。この傾向は絶対零度核物質 EOS を用いた冷たい中性子星(CNS)構造計算結果にも見られ、妥当な結果である。ただしどちらの EOS を用いた場合でも、求められた CNS の半径は、昨年夏に観測された中性子星連星合体による重力波放出 (GW170817) から推定された CNS の半径に対する制限と矛盾しないことが判明した。

2.3 EEF 変分法による ${}^3\text{He}$ 原子系の研究

${}^3\text{He}$ 原子が原子間力で相互作用する系として、3 次元液体 ${}^3\text{He}$ や 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系のエネルギーを本変分法により求めた。その際、 ${}^3\text{He}$ 系ではスピン三重項状態の原子間相関が重要な役割を果たすことを考慮し、スピン偏極が生じないように制限を加えた変分計算も同時に行い、エネルギー計算結果へのスピン三重項相関の影響を調べた。この際 EEF として現在核物質に対して用いている表式をそのまま適用すると、3 次元 ${}^3\text{He}$ に対して実験値より高い値が得られるので、まずは上記問題に焦点を絞るため、3 次元 ${}^3\text{He}$ のエネルギー値に近い結果を得るような、本研究初期に提案した EEF を用いる。

その結果、3 次元 ${}^3\text{He}$ に対しても実験値より若干高いが妥当なエネルギーが得られ、それを 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系に適用すると、スピン偏極を許す場合には束縛状態が生じ、またスピン偏極を許さない場合には系が気体となる、という結果が得られた。従来の 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系の研究において、理論計算では気体となることが予想されていたが、近年の実験ではグラファイト表面に吸着した 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系が液化すること

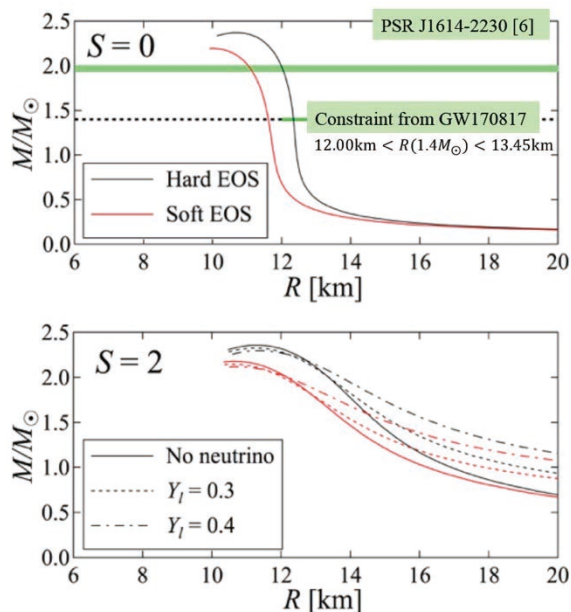


図 1 : CNS と PNS の質量と半径の関係

が示唆されている。本研究結果は、この従来の理論計算結果と実験の両者の特徴を、定性的に説明する。

3. 共同研究者

作道 直幸（お茶の水大学・ソフトマター教育研究センター・特任助教）

富樫 甫（理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, and M. Takano, “New Table of Supernova Equation of State Using a Variational Method and Its Application to Astrophysical Compact Objects”, JPS Conf. Proc. 20 (2018) 011021.

S. Furusawa, H. Togashi, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, and M. Takano, "A new equation of state for core-collapse supernovae based on realistic nuclear forces and including a full nuclear ensemble", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 (2017) 094001.

H. Togashi, E. Hiyama, and M. Takano, “Equation of state of hyperonic nuclear matter at zero and finite temperatures with the variational method”, JPS Conf. Proc. 18 (2017) 011028.

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto, and M. Takano, “Variational approach to neutron star matter with hyperons”, JPS Conf. Proc. 17 (2017) 102002.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

H. Togashi et al., “Properties of a variational equation of state in core-collapse supernovae”, PACIFIC 2018, February 14, 2018, Hokkaido, Japan.

H. Togashi et al., “Variational approach to hot and dense matter in compact stars”, International Workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017 (HNP2017), December 21, 2017, Wako, Japan.

富樫甫「現実的核力に基づく超新星物質状態方程式の構築」日本物理学会第73回年次大会（東京理科大学）2018年3月23日

富樫甫「現実的核力に基づく核物質状態方程式の研究と今後の展望」、RIBF 理論若手放談会：エキゾチック核物理の広がり（理化学研究所 神戸事業所）2017年8月1日

4.4 受賞・表彰

富樫甫 第12回（2018年）日本物理学会若手奨励賞

4.5 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

EEF 変分法の研究は、核物質及び ${}^3\text{He}$ 系に対して、着実に進展してきた。核物質に対しては、2体核力のスピン・軌道力成分を精密に取り入れることで、現実的2体核力全体を取り扱う理論へと発展させ、3体核力の不定性の核物質 EOS への影響をより明確にする。さらに ${}^3\text{He}$ 系に対しても

矛盾のない統一的な理論の構築を目指す。

統計科学と金融工学

研究重点教員 谷口 正信
(基幹理工学部 応用数理学科 教授)

1. 研究課題

本年度は、時系列観測からの統計推測の基礎理論構築に力をいれた。具体的には以下の研究を進めた。(i) 高次元正規定常時系列の共分散行列が単位行列に等しいか否かの意味での周辺分布の球形性の検定論の構築。(ii) 非正規高次元定常時系列に対して Whittle 積分汎関数や Whittle 推定量の漸近理論を構築。(iii) 非正規高次元時系列分散分析モデルでの、群間平均の等価性に関する検定論の構築。(iv) 極めて一般的な曲確率分布族(多次元時系列観測も含む)を導入し、この曲母数の推測に最尤推定量の縮小推定量を提案し、この3次の漸近的な良さの評価。(v) 母数が境界にある場合の検定統計量の漸近理論と Bartlett 調整可能性。(vi) 円周上の従属分布と高次のスペクトル分布の関係性。

上記、研究課題の成果の応用は膨大で、金融、経済、生体や遺伝子まで適用可能である。

2. 主な研究成果

上記研究課題の項目(i)-(vi)について、以下解説する。(i) 高次元正規時系列観測の共分散行列の言葉で、周辺分布の球形性の検定を、検定統計量の導入とその漸近分布導出、及び、理論の数値的検証も行った。(ii) 有限次元の時系列観測では、Whittle 推定量や、最尤推定量の高度な推測論が出来ている。しかしながら近年現れる高次元時系列データに対してはこういった従来のよい推定量が、有効でなくなる。そこで高次元の時系列データに対して自己共分散行列の **banding, thresholding** 推定量を作り、これらが基本的な良さをもつことを示した。さらには、Whittle 積分汎関数の漸近理論や、Whittle 推定量の漸近推測理論を構築した。Whittle 積分汎関数は、種々の、例えば、重要経済指標を記述できるので、金融、経済、生体、遺伝子等、広汎な応用が可能である。(iii) 分散分析は、古典的な重要統計手法であるが、従属標本に対しては、極めて未熟な状態である。本研究では、高次元従属誤差過程をもつ時系列回帰モデルで、群間の差異を測る検定統計量を導入し、それらの観測次元と観測数が発散するとき、漸近分布をもとめ福島の放射能汚染に関する実データにも応用した。(iv) 極めて一般的な曲確率分布族(多次元時系列観測も含む)を導入し、この曲母数の推測に最尤推定量の縮小推定量を提案し、この3次の漸近的な良さを議論した。これが3次のオーダーで最尤推定量を改善する十分条件を与えた。このセッティングは、金融の平均・分散ポートフォリオの縮小推定量の導入を捉え、膨大な応用がある。この分野に新地平をひらくものと思われる。(v) 母数が母数空間の境界上にある場合、尤度比統計量や Wald 型検定統計量の帰無分布を導出した。それはカイ2乗分布にはならず混合型カイ2乗分布となる。この状況で、Bartlett 調整可能性の議論を展開した。(vi) 円周上の従属分布と高次のスペクトル分布

の関係を谷口は時系列解析における高次のスペクトル分布の観点から見る提案をした。この流れで、統一的に研究をすすめている。

3. 共同研究者

明石 郁哉：早稲田大学 PD

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) Giraitis, L., Taniguchi, M. and Taqqu, M.S. (2017). Asymptotic normality of quadratic forms of martingale differences. *Stat. Inference Stoch Process.* 20, no. 3, 315–327. DOI 10.1007/s11203-016-9143-3.
- (2) Kato, Solvang H. and Taniguchi, M. (2017). Portfolio estimation for spectral density of categorical time series data. *Far East J. theoretical statistics.* 53-1, 19-33. DOI.org 10.17654/
- (3) Kato, Solvang H. and Taniguchi, M. (2017). Microarray analysis using rank order statistics for ARCH residual empirical process. *Open Journal of Statistics.* 7, 4-71, DOI:10.4236/ojs.2017.71005.
- (4) Liu, Y., Nagahata, H., Uchiyama, H. and Taniguchi, M. (2017). Discriminant and cluster analysis of possibly high-dimensional time series data by a class of disparities. *Com. Stat. Simul. Computation.* 46-10, 8014-27. Doi.org/10.1080/03610918.2016.1263732.
- (5) Chen, C.W.S., Hsu, Y.C. and Taniguchi, M. (2017). Discriminant Analysis by Quantile Regression with Application on the Climate Change Problem. *J. Stat. Plan. Inf.* } 187, 17–27.
- (6) Akashi, F., Odashima, H., Taniguchi, M. and Monti, A.C. (2018). A new look at portmanteau test. *Sankhya*, Vol. 80 - A. Part I, 121-137. DOI 10.1007/s13171-017-0109-3.
- (7) Monti, A.C. and Taniguchi, M. (2018). Adjustments for a class of tests under nonstandard conditions. To appear in *Statistica Sinica*.
- (8) Liu, Y., Tamura, Y. and Taniguchi, M. (2018). Asymptotic theory of test statistic for sphericity of high-dimensional time series. To appear in *J. Time Ser. Anal.*, DOI:10.1111/jtsa.12288.

(9) Shiraishi, H., Taniguchi, M. and Yamashita, T. (2018). Higher-order asymptotic theory of shrinkage estimation for general statistical models. To appear in J.Multivariate Anal.

(10) Giraitis, L., Taniguchi, M. and Taqqu, M.S. (2018). Estimation pitfalls when the noise is not i.i.d. To appear in Jap. J. Stat. and Data Science.

4.2 総説・著書

英文著書

(1) Taniguchi, M., Shiraishi, H., Hirukawa, J., Kato, H.S. and Yamashita, T. (2018) "Statistical Portfolio Estimation", Chapman & Hall/CRC, New York, 377 pages.

(2) 仏系国際誌: Statistical Inference for Stochastic Processes の1巻 (Volume 20, No.3, 2017) に谷口を中心とする早稲田大学の3年間の研究を特集号として発刊した。
Special Issue on "Recent Trends and Developments in Portfolio Estimation and the Statistical Analysis of Stochastic Processes" Waseda University 2015 - 2017.
Guest Editor: Masanobu Taniguchi. ページ: 273 - 397.

4.3 招待講演

[1] Akashi, F., Dette, H. & Liu, Y. "Change point detection by self-weighted empirical likelihood method and its application to real data"
May. 27, 2017 *Invited talk at "A Symposium on Complex Data Analysis". National Tsing Hua University, Taiwan.*

[2] Akashi, F. "Robust GEL method for linear hypothesis of infinite variance processes"
Jun. 15, 2017
Invited talk at "1st International Conference on Econometrics and Statistics (Organized Session by Kaiji Motegi)". The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.

[3] 明石郁哉「経験尤度法・基準化法に基づく非正則時系列モデルの頑健な統計的推測法の構成」
Sep. 13, 2017 特別講演 (VIII: 統計分科会) 日本数学会 2017 年度秋季総合分科会 (山形大学).

[4] Akashi, F. "Robust statistical inference for non-standard time series models by empirical likelihood, self-weighting and self-normalization"
Feb. 23, 2018
Departmental Colloquia at Texas A&M University.

4.4 受賞・表彰

2017年4月ー2018年3月は、なし。

4.5 学会および社会的活動

学会活動

(1) 長播英明、谷口正信。 Analysis of variance for high dimensional time series.

日本数学会、於 山形大学、2017年9月13日。

(2) Yujie Xue, 谷口正信。 Modified LASSO estimators of the models with long-memory disturbances.

日本数学会、於 山形大学、2017年9月13日。

(3) 谷田義行、明石郁哉、谷口正信。高次元時系列における Whittle 推定量の漸近理論とその数値例。日

本数学会、於 東京大学、2018年3月21日。

(4) Yuji Xue, 谷口正信。 LASSO estimators for high-dimensional time series with long-memory disturbances.

日本数学会、於 東京大学、2018年3月21日。

以下の国際シンポジウムを主宰した。

(1) Waseda International Symposium

“Recent Developments for Statistical Asymptotic Theory for Time Series & Circular Distributions”

October 23 - 25, 2017 Waseda University

http://www.taniguchi.sci.waseda.ac.jp/2017_WIS.pdf

(2) Kyoto (Fushimi-Uji) International Seminar

"Recent Developments for Statistical Science"

Date: October 26 - 28, 2017.

Venue: Kyoto Terrsa

http://www.taniguchi.sci.waseda.ac.jp/2017_KIS.pdf

(3) Waseda International Symposium

“Recent Developments in Time series Analysis: Quantile

Regression, High Dimensional Data & Causality”

Date: February 26 -28, 2018

http://www.taniguchi.sci.waseda.ac.jp/2017_WASEDA_SP.pdf

(4) Kouchi International Seminar

“Recent Developments of Quantile Method, Causality and High Dim Statistics ”

Date: March 3-5, 2018

Venue: Tosa Royal Hotel

<http://www.taniguchi.sci.waseda.ac.jp/KIS201803.pdf>

5. 研究活動の課題と展望

本学年度の成果は、国際的に見える形で、仏系国際誌：Statistical Inference for Stochastic Processes の1巻をかりて 特集号として、この3年間の成果の一部を出版できた。また数年来、共同研究を進めてきた年金積立金運用の独法との成果にモチベートされた、ポートフォリオの統計的最適推測論も、Chapman-Hall 社からの英文著書として発刊され、これも、国際的に見える形となった出版である。

今後も研究は、この流れで展開する予定である。

新しい研究テーマは、極めて一般的な観測：時空間過程は言うに及ばずグラフ、遺伝子、医用画像、グラフ、トポロジカルデータ、ウェブ上データ、、に対して、因果性指標を導入して、この最適推測論を構築し、この上に膨大な応用を乗せたい。例えば、医用画像から将来の疾病への因果性を見出す、ウェブデータから、因果性を見出し、社会、経済、、等のリスクを軽減、、等、膨大である。

高エネルギー宇宙粒子物理学研究

研究代表者 鳥居 祥二
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

宇宙における高エネルギー現象の体系的解明をめざして、高エネルギー宇宙線の観測と高エネルギー素粒子相互作用の研究を行う。そのため、国際宇宙ステーション搭載の宇宙線観測装置 (CALET) の開発を行い、2015年8月の打ち上げ後、継続的に観測及びデータ解析を実施している。観測結果を用いて、宇宙線加速・伝播機構の定量的な研究を行うとともに、暗黒物質と近傍加速源の探査を実施している。加えて、チベット高原に建設した空気シャワー測定装置による、高エネルギー宇宙線及びガンマ線の観測を実施している。さらに、宇宙線観測に必要なシミュレーション計算に必要な相互作用モデルを検証する目的で、CERN-LHC などの高エネルギー加速器によるビーム実験を実施している。

2. 主な研究成果

国際宇宙ステーションにおける CALET による観測は、すでに 2.5 年以上に亘って観測が継続的に実施できており、理工学研究所内に設置した早稲田大学 CALET 運用室 (Waseda CALET Operations Center) において、軌道上運用のモニターとデータ解析を実施している。これまでに、主要な観測目的である電子成分について、世界に先駆けた TeV 領域の直接観測の成果をすでに、Physical Review Letters にて発表している。ガンマ線、陽子・原子核成分の観測も予定通り実施されており、そのいくつかの成果はすでに論文投稿および論文作成を行っている。そして、米伊との国際共同研究によるデータ解析が進行しており、その成果は国内外の会議における招待講演等において公表している。

チベット高原における空気シャワー観測は、東京大学宇宙線研究所をホスト機関として、日中共同研究としてすでに 30 年以上の歴史をもつ研究であり、テラ電子ボルト (TeV) 以上のガンマ線観測や数 1000TeV 領域に及ぶ宇宙線の観測において成果をあげている。そのほか、太陽活動の宇宙線への影響を長期に観測することにより、太陽地球磁気圏の研究が実施されている。

CERN-LHC を用いたハドロン相互作用実験 (LHCf プロジェクト) は、CERN に承認された LHC 実験の一つであり、世界でも最高エネルギーの領域において最前方に生成されるガンマ線、中性子の測定をおこなった。そして、これまでは検証が困難であった 10^{17} eV 領域におよぶハドロン相互作用モデルの検証を実施して、シミュレーション計算の精度向上により宇宙線観測データのより高精度な理解に大きな貢献を果たしている。

3. 共同研究者

浅岡陽一 (理工研 次席研究員)

小沢俊介 (先進理工学部、物理学科、次席研究員)

Holger Motz (国際教育センター 助教)

ほか 約 150 名 (日米伊中研究者を含む)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) "Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", O.Adriani, Y. Asaoka, H.Motz, S. Torii, et al. (CALET Collaboration), Physical Review Letters, 119 (2017) 181101.
 - 2) "On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS", Y.Asaoka, S.Ozawa, S.Torii et al. (CALET Collaboration), Astroparticle Physics, 100 (2018) 29-37.
 - 3) "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", B.P. Abotto, S.Torii, Y.Asaoka, S.Ozawa, et al., Astrophysical Journal Letters 848, L12, 2017.
 - 4) "Decaying Fermionic Dark Matter Search with CALET", S. Bhattacharyya, H.Motz, S.Torii, Y.Asaoka, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017 (2017) 1-19.
 - 5) "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October 2015", S.Torii et al., (CALET collaboration), Proceedings of Science (ICRC2917), ID: 1092 (2017) 1-16.
 - 6) "The LHCf Experiment: Forward particle production spectra at LHC", E. Berti, O. Adriani, K. Kasahara, T. Suzuki, S.Torii et al., (LHCf collaboration), Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C., 40 (2017) 13.
 - 7) "Northern Sky Galactic Cosmic Ray Anisotropy between 10 and 1000 TeV with the Tibet Air Shower Array", M. Amenomori, S.Torii et al., The Astrophysics Journal, 836 (2017) 153.
- 他、国際会議 Proceedings 論文 25 件。

4.2 総説・著書

該当なし

4.3 招待講演

- 1) "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October 2015", 35th International Cosmic Ray Conference, July 12-20, 2017 (Busan, Korea)
- 2) "Calorimetric Electron Telescope (CALET): Summary of the First Two-Year on Orbit", International Symposium on Cosmology and Astroparticle Physics (CosPA 2017) December 11-15, 2017 (Kyoto)
- 3) 「国際協力による高エネルギー電子・ガンマ線観測 (CALET)」, ISS 利用 NASA-JAXA ジョイントワークショップ、丸の内オアゾ フクラシア Hall A、2018 年 1 月 24, 25 日

4.4 受賞・表彰

該当なし

4.5 学会および社会的活動

1) 理工学術院総合研究所講演会 「加速器と先端計測を駆使して宇宙の謎を探る」

2017年6月20日 早稲田大学国際会議場井深大記念ホール

CALET で宇宙を見る -国際宇宙ステーション「きぼう」での宇宙線観測-

5. 研究の課題と展望

CALET による観測はすでに 2.5 年を経過して、今後 JAXA との共同研究として 2020 年までの観測が予定されている。観測の主要目的である TeV 領域での電子観測による暗黒物質及び近傍加速源の探索が実施されており、現在すでに初期的な 3TeV までの観測結果について論文発表を行っている。その他のガンマ線、陽子・原子核観測の結果についても数ヶ月内に論文発表が予定されている。宇宙科学観測として大変難しい課題である長期間に亘る安定的な軌道上運用が実現されており、WCOC における 24 時間体制による運用モニターや国際共同研究によるデータ解析も順調に実施されている。このため、2018 年度内には観測全般に関わる成果を国内外で公表するとともに、主要な雑誌に発表を予定している。今後の課題としては、鳥居が代表者として早稲田大学を中心に実施している JAXA との共同研究体制を維持しながら、研究継続を実現することにより所期の観測目的を達成することにある。

なお、チベット高原における空気シャワー観測実験は、さらなる展開によりさらに高精度な観測装置の建設が予定されており、今後に大きな進展が期待できる。また、加速器を用いたハドロン相互作用の研究は、CERN-LHC での実験を終了してすでに成果が公表されている。現在、偏極ビームを含む原子核相互作用実験を米国ブルックヘブン研究所を行っている。これらの研究はすべて相補的な内容を含んでおり、全体として宇宙線観測による高エネルギー宇宙物理学の進展に、今後とも大きく寄与できるものと確信している。

インシリコ・ケミストリーの確立：

大規模量子化学計算手法の高精度化・高速化・汎用化

研究代表者 中井 浩巳

(先進理工学部 化学・生命化学科 教授)

1. 研究課題

本重点教員研究では、材料設計・開発を目的としたインシリコ・ケミストリーの確立を目指す。実践的なインシリコ・ケミストリーを確立するために、量子化学計算の高精度化・高速化・汎用化を目的の一つとする。ただし計算手法の開発だけでは、実践的なインシリコ・ケミストリーを様々な材料開発の分野へ浸透させるには不十分である。そこで、高度化された量子化学計算をどのように用いるのかという実践的な『レシピ』作りも本研究における目的の一つとする。本重点教員研究の学術的な研究成果は、プロジェクト研究「相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計」(16P14)および「計算化学の社会実装」(17P23)の年次報告を参照されたい。

重点教員研究(第2期)としては、学術的な活動に加えて、以下の5点の目標を設定している。

- (i) 元素戦略を基軸とした国家プロジェクトの実施, (ii) 早稲田大学発の量子化学計算プログラムの開発・公開・運用, (iii) 産業界における理論化学の普及, (iv) 分子モデリングセンターの設立, (v) 理論化学におけるアジア拠点の形成。以下に具体的な成果を示す。

2. 主な活動実績**(i) 元素戦略を基軸とした国家プロジェクトの実施**

研究代表者として、平成24年度よりJST CREST『元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出』において研究課題“相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計”を遂行してきた。今年度は5年半の研究を総括すべく研究総括および研究アドバイザーによる最終審査に臨んだ。そして、最高評価であるA+の評価を平成24年度より受けることができた。

平成24年度より進めている文部科学省 元素戦略プロジェクト 研究拠点形成型『京都大学 実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点』においては、第3期を迎えるにあたってセカンドキックオフミーティングに臨み、これまでの研究の総括と今後の研究計画を示した。

(ii) 早稲田大学発の量子化学計算プログラムの開発・公開・運用

JST CRESTで開発を進めてきた相対論的量子化学計算プログラム RAQET を物質科学シミュレーションのポータルサイトである MateriApps にて公開した (<http://ma.cms-initiative.jp/ja/listapps/RAQET>)。また、多くのユーザーが RAQET を容易に使うことができるように、量子化学計算のための Graphical User Interface (GUI)の一つである Winmostar と連携し、インプットファイル作成の補助や計算結果の可視化を可能にした。さらに、現在 RAQET に関する論文を Journal of Computational Chemistry 誌の Software News and Updates に投稿中である。

「京」コンピュータのプロジェクトで開発した大規模量子力学的分子動力学プログラム「DC-DFTB」を GUI である Winmostar と連携し、一般に公開した。さらにこの超並列版プログラムである「DC-DFTB-K」は、ポスト「京」コンピュータのプロジェクトにより、その機能および性

能を向上させるべくプログラム開発・改良を進めている。

(iii) 産業界における理論化学の普及

産業界との共同研究として、CO₂ 分離回収貯蔵 (CCS) に関する研究、水素キャリアーに関する研究、リチウムイオン電池および燃料電池に関する研究を進めた。また、電子材料開発に関する研究に対しては、研究指導を行った。

(iv) 分子モデリングセンターの設立

表記センターの設立に向けて、大学における研究サポート体制の必要性を粘り強くアピールし続けている。

(v) 理論化学におけるアジア拠点の形成

2012 年に設立者の 1 人として立ち上げた中日韓理論・計算化学ワークショップ (China-Japan-Korea Tripartite Workshop of Theoretical and Computational Chemistry; CJK-WTCC) の代表に就任した。今後、開催される中国 (南京)、日本、韓国でのワークショップにおいて中堅・若手研究者が真に交流できるように組織運営に従事していく。

また、2018 年からはアジア環太平洋理論・計算化学者連合 (Asia-Pacific Association of Theoretical & Computational Chemists; APATCC) のボードメンバーに加わった。ここでは、日本、中国、韓国のみならず、オーストラリア、ニュージーランド、インド、シンガポール、タイ、台湾などの研究者との交流に尽力していく。

3. 共同研究者

清野 淳司 (理工学術院・理工学術院総合研究所・理工総研が募集する次席研究員)

五十幡 康弘 (理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員)

王 祺 (理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員)

西村 好史 (理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員)

小野 純一 (理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員)

周 建斌 (理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員)

吉川 武司 (理工学術院・化学・生命化学科・助教)

大越 昌樹 (理工学術院・化学・生命化学科・助手)

Toni Maier (日本学術振興会 (JSPS)・外国人特別研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, T. Oyama, Y. Iwabata, S. Seino, H. Nakai, *Chem. Phys. Lett.*, **680**, 37-43 (2017). (DOI: [10.1016/j.cplett.2017.05.023](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.05.023))
- (2) “Near-infrared absorption of π -stacking columns composed of trioxotriangulene neutral radicals”, Y. Iwabata, Q. Wang, T. Yoshikawa, A. Ueda, T. Murata, K. Kariyazono, M. Moriguchi, H. Okamoto, Y. Morita, H. Nakai, *npj Quantum Materials*, **2**, 27 (2017). (DOI: [10.1038/s41535-017-0033-8](https://doi.org/10.1038/s41535-017-0033-8))
- (3) “Electrocatalytic synthesis of ammonia by surface proton hopping”, R. Manabe, H. Nakatsubo, A. Gondo, K. Murakami, S. Ogo, H. Tsuneki, M. Ikeda, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, *Chemical Science*, **8** (??), 5434-5439 (2017). (DOI: [10.1039/c7sc00840f](https://doi.org/10.1039/c7sc00840f))
- (4) “Density functional theory analysis of elementary reactions in NO_x reduction on Rh surface and Rh

- clusters”, F. Deushi, A. Ishikawa, H. Nakai, *J. Phys. Chem. C*, **121** (28), 15272-15281 (2017). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b04526](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04526))
- (5) “Computerized implementation of higher-order electron-correlation methods and their linear-scaling divide-and-conquer extensions”, M. Nakano, T. Yoshikawa, S. Hirata, J. Seino, H. Nakai, *J. Comput. Chem.*, **38** (29), 2520-2527 (2017). (DOI: [10.1002/jcc.24912](https://doi.org/10.1002/jcc.24912))
 - (6) “Divide-and-conquer density-functional tight-binding molecular dynamics study on the formation of carbamate ions during CO₂ chemical absorption in amine solutions”, A. Sakti, Y. Nishimura, H. Sato, H. Nakai, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **90** (11), 1230-1235 (2017). (DOI: [10.1246/bcsj.20170142](https://doi.org/10.1246/bcsj.20170142))
 - (7) “Parallel implementation of efficient charge-charge interaction evaluation scheme in periodic divide-and-conquer density-functional tight-binding calculations”, Y. Nishimura, H. Nakai, *J. Comput. Chem.*, **39** (2), 105-116 (2017). (DOI: [10.1002/jcc.25086](https://doi.org/10.1002/jcc.25086))
 - (8) “Catalytic performance of Ru, Os, and Rh nanoparticles for ammonia synthesis: A density functional theory analysis”, A. Ishikawa, T. Doi, H. Nakai, *J. Catal.*, **357**, 213-222 (2017). (DOI: [10.1016/j.jcat.2017.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.11.018))
 - (9) “Rigorous pKa estimation of amine species using density-functional tight-binding-based metadynamics simulations”, A. Sakti, Y. Nishimura, H. Nakai, *J. Chem. Theory Comput.*, **14** (1), 351-356 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jctc.7b00855](https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b00855))
 - (10) “Density-functional tight-binding molecular dynamics simulations of excess proton diffusion in ice I_h, Ice I_c, Ice III, and melted ice VI phases”, A. Sakti, Y. Nishimura, C. Chou, H. Nakai, *J. Phys. Chem. A*, **122** (1), 33-40 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpca.7b10664](https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b10664))
 - (11) “Electron-hopping brings lattice strain and high catalytic activity in low temperature oxidative coupling of methane in an electric field”, S. Ogo, H. Nakatsubo, K. Iwasaki, A. Sato, T. Yabe, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, *J. Phys. Chem. C*, **122** (4), 2089-2096 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b08994](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b08994))
 - (12) “Semi-local machine-learned kinetic energy density functional with third-order gradients of electron density”, J. Seino, R. Kageyama, M. Fujinami, Y. Ikabata, H. Nakai, *J. Chem. Phys.*, **148** (24), 241705 (13 pages) (2018). (DOI: [10.1063/1.5007230](https://doi.org/10.1063/1.5007230))
 - (13) “Theoretical analysis of carrier ion diffusion in superconcentrated electrolyte solutions for sodium-ion batteries”, M. Okoshi, C.-P. Chou, H. Nakai, *J. Phys. Chem. B*, **122** (9), 2600-2609 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b10589](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10589))
 - (14) “Gauge-origin independent formalism of two-component relativistic framework based on unitary transformation in nuclear magnetic shielding constant”, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, *J. Chem. Phys.*, **148** (11), 114109 (8 pages) (2018). (DOI: [10.1063/1.5016581](https://doi.org/10.1063/1.5016581))
 - (15) “Simulations of synthesis of the boron-nitride nanostructures in a hot, high pressure gas volume”, P. S. Krstic, L. Han, S. Irle, H. Nakai, *Chemical Science*, in press. (DOI: [10.1039/c8sc00667a](https://doi.org/10.1039/c8sc00667a))
 - (16) “Derivative of electron repulsion integral using accompanying coordinate expansion and transferred recurrence relation method for long contraction and high angular momentum”, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, *J. Comput. Chem.* in press. (DOI: [10.1002/qua.25640](https://doi.org/10.1002/qua.25640))

4.2 総説・著書

- (1) “量子化学計算のコツ（基礎編）”, 中井浩巳, *応用物理*, **86** (8), 720-724 (2017).
- (2) “量子化学計算のコツ（実用編）”, 中井浩巳, *応用物理*, **86** (9), 802-807 (2017).

- (3) “調和溶媒和モデル(HSM)を用いた凝縮系の自由エネルギー計算” (Harmonic solvation model (HSM) for evaluation of condensed-phase free energy), 中井 浩巳, *J. Comput. Chem. Jpn.*, **16** (4), 83-88 (2017). (DOI: [10.2477/jccj.2017-0038](https://doi.org/10.2477/jccj.2017-0038))
- (4) “基礎研究と応用研究～理論化学の社会実装に向けて”, 中井浩巳, 化学と工業, **70** (10), 928-930 (2017).
- (5) “インフォマティクスとの融合による理論化学研究”, 清野淳司, 中井浩巳, 化学工業, **69** (1), 53-58 (2018).
- (6) “ジブチルヒドロキシトルエンにおける遠赤外吸収 ～測定と量子化学計算によるスペクトル同定～”, 遠藤滉士, 香西拓哉, 吉川武司, 中井浩巳, 大木義路, 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, **DEI-17-100**, 23-28 (2017)
- (7) “分割統治型密度汎関数強束縛 (DC-DFTB) 法に対する最近の開発と応用”, 西村 好史, 中井 浩巳, 分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”, **20** (1), 18-23 (2018).
- (8) “A perspective on density-functional tight-binding parameterization towards transition metals”, C.-P. Chou, H. Nakai, 分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”, **20** (1), 8-17 (2018).
- (9) “特集「DFTB」:「特集にあたって」”, 中井 浩巳, 分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”, **20** (1), 7 (2018).

4.3 招待講演

(海外学会)

- (1) “Chemical Reaction Simulations treated by Linear-Scaling Divide-and-Conquer type Density-Functional based Tight-Binding Molecular Dynamics (DC-DFTB-MD) Method”, H. Nakai, *253rd ACS National Meeting & Exposition*, San Francisco (California, USA), April 2-7, 2017.
- (2) “Large-Scale Chemical Reaction Simulations by Divide-and-Conquer Density-Functional Tight-Binding Molecular Dynamics Method”, H. Nakai, *2017 Korea-Japan Molecular Science Symposium ‘Frontiers in Molecular Science: Structure, Dynamics, and Function of Molecules and Complexes’*, Haeundae Tivoli Hotel (Busan, Korea), July 10-12, 2017.
- (3) “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, H. Nakai, *17th International Conference on Density-Functional Theory and its Applications (DFT2017)*, Tällberg (Dalarna, Sweden), August 21-25, 2017.
- (4) “Chemical Reaction Simulations on CO₂ Chemical Absorption Process”, H. Nakai, *11th Triennial Congress of the World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC 2017)*, (Munich, Germany), August 27-September 1, 2017.
- (5) “Quantum Chemistry Meets Artificial Intelligence”, H. Nakai, *Eighth Asia-Pacific Conference of Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC 8)*, (Mumbai, India), December 15-17, 2017.

(国内学会)

- (1) “インフォマティクスとの融合による理論化学研究の推進”, 中井浩巳, 日本化学会関東支部主催講演会「マテリアルズ・インフォマティクスとAIを用いたものづくり」, 化学会館(お茶の水), 2017年9月29日.

- (2) “データ科学は理論化学に何をもたらすか”, 中井浩巳, 日本コンピュータ化学会 2017 秋季年会 プレシンポジウム, 熊本大学黒髪キャンパス(熊本), 2017 年 10 月 20 日.
- (3) “元素戦略のための相対論的量子化学”, 中井浩巳, MEXT-JST 元素戦略合同シンポジウム ~元素戦略研究の歩みと今後~, JP タワーホール(東京), 2018 年 2 月 20 日.

4.4 受賞・表彰

- (1) 日本化学会第 97 春季年会 優秀講演賞(学術), 西村 好史(次席研究員), “Linear-scaling quantum mechanical molecular dynamics simulations with divide-and-conquer density-functional tight-binding method”.
- (2) 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 日本コンピュータ化学会(SCCJ)奨学賞, Aditya Wibawa Sakti (D3), "Accurate pKa Evaluation by Metadynamics Simulation at the Density-Functional Tight-Binding Level".
- (3) 第 11 回分子科学討論会 2017 分子科学会優秀講演賞, 大山 拓郎 (M2) 「局所ユニタリー変換を用いた効率的な 2 成分相対論的密度汎関数理論の開発」.
- (4) 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017 優秀ポスター発表賞, 影山 椋 (M1) 「Orbital-free 密度汎関数理論のための機械学習を用いた運動エネルギー汎関数の開発」.
- (5) 第 31 回分子シミュレーション討論会 学生優秀発表賞, 河本奈々 (B4) 「分割統治型励起状態密度汎関数強束縛法を用いた光活性イエロータンパク質に関する理論的研究」.
- (6) APCTCC8, Best Poster Award (ACS Omega) Minori Imai (M2), “DC-DFTB-metadynamics simulations for the primary proton transfer of bacteriorhodopsin”.
- (7) 早稲田大学先進理工学部化学・生命化学科 2017 年度卒業研究発表賞, 河本奈々 (B4) 「光受容タンパク質の機構解明に向けた分割統治型時間依存密度汎関数強束縛法の開発」.
- (8) 第 121 回触媒討論会 学生ポスター発表賞, 平井貴裕 (M2) 「Rh 表面での NO-CO 反応の温度・圧力依存性に関する理論的検討」.

4.5 外部資金

- (1) 科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業(CREST)『元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出』『相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計』, (研究代表, 平成 24-29 年度).
- (2) 日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金 基盤研究(A), 「ユビキタス水素の機能とダイナミクスに関する理論的研究」 (研究代表, 平成 26-30 年度).
- (3) 日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究, 「凝縮系の熱力学量に対する高精度量子化学計算法の開発」 (研究代表, 平成 27-29 年度).
- (4) 文部科学省 元素戦略プロジェクト 研究拠点形成型『京都大学 実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点』『触媒及び電極の電子状態計算のための理論開発』, (分担研究代表, 平成 29 年度).

宇宙放射線科学の実験的研究

研究代表者 長谷部 信行
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題：宇宙放射線科学の実験的研究

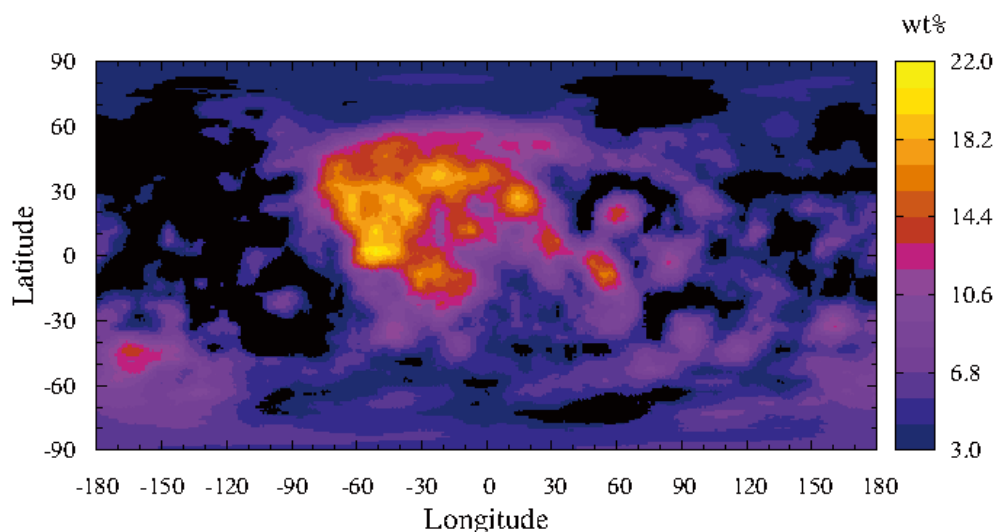
宇宙で繰り広げられている様々な高エネルギー現象を観測することは、宇宙の起源とその後の進化等、それぞれの時空で生起している物理現象の解明の手掛かりになるだけでなく、新しい世界へと導く自然科学の魅力を有しています。本研究では、地球科学を含め惑星科学、宇宙線・宇宙空間物理学に深く関連している宇宙放射線科学の実験的研究です。特に、MeV領域の γ 線、中性子線、粒子線、また keV領域のX線は、惑星・宇宙を構成している重要な物質情報(原子核や原子成分)を担っています。それらの情報を得て、月・惑星・小惑星や天体の形成や進化の謎の解明に取り組んでいます。また、それらの観測・実験分野で要求される新しい検出器技術やエレクトロニクス技術の開発、その周辺技術の開発を同時に進めています。

2. 主な研究とその成果

2.1 月・火星衛星・小惑星の科学と資源探査

月探査「かぐや」ガンマ線観測データ

最近の探査データ解析結果によって、月表層の火成活動は従来考えられてきたよりも、長い期間継続しかつ複雑なプロセスで引き起こされていたことが指摘されるようになりました。月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計(KGRS)のデータを駆使して、月表層の側北領域のPKTと呼ばれる領域にみられる火山性の地形の組成を調べてみました。かぐやガンマ線分光計(KGRS)は月探査として始めて高純度ゲルマニウム半導体検出器を搭載したので、これまでに用いられたシンチレータと比較して高いエネルギー分解能をもっているのが特徴です。この特徴を生かして、複数のピークをフィッティングしてデータの解析した結果、鉄由来の846 keVと7.6 MeVのガンマ線強度を、従来得られたものよりも高い精度で求めることができました。月の鉄濃度分布図の結果を下図に示します。作成した元素分布図は、過去の探査の結果と比較して検出の下限値が小さく、高精度である。結果をCa、Thの分布や鉱物分布と比較した結果、複数の盆地地形の起源についてその形成過程が火成活動起源か隕石衝突起源かを決定することができました。



KGRS によって得られた月面の月濃度分布図

火星衛星及び地球近傍小惑星の研究

将来の火星衛星及び地球近傍小惑星探査における科学観測機器として、天体の表層物質を構成する元素組成やその分布を求めるうえで有用な高性能ガンマ線・中性子分光計(GNS)の基礎開発をしている。天体に関する情報としては、天体の形状、サイズ、質量と並んで元素組成は基礎的かつ重要な情報である。核分光法は、天体の全体像を知るうえで重要な元素組成の情報が取得できることから、元素情報を取得する意義は高い。観測対象となる元素は、H, O, Mg, Al, Si, Ca, Feなどの主要元素や天然放射性元素 K, Th, U である。観測対象となる複数種類の天体の元素組成を仮定して数値シミュレーションを行い、それらから放出されるガンマ線・中性子束を得た。また、宇宙機から放出されるガンマ線・中性子束についても評価した。各々の天体の組成の特徴が、核分光法によって如実に反映され、これらの観測によって天体の組成を決定することが可能であることが確認することができた。また、観測器についても複数のタイプの検出器を仮定して観測シミュレーションを行い、それぞれの検出器の利点の特徴が確認された。衛星鋼体から放出されるバックグラウンドについても計算を行い、それらが天体の観測に及ぼす影響について見積もった。

2.2 探査機搭載の高性能小型元素分析装置及び探査機器の基礎開発

X線発生装置の開発

月・惑星(含む小惑星)の着陸探査において元素分析を行う能動型蛍光 X 線分光計(AXS)の開発を進めています。AXS の特徴は小型・軽量・省電力な点であり、これらの特徴は着陸探査で搭載機器に課せられる厳しい制限に適しています。AXS に搭載する励起源とした焦電型 X 線発生器(PXG)を利用した開発研究を実施しています。PXG の開発では、前年度までに決定した高強度の X 線が得られる PXG 内部の環境設定を反映させ更なる高強度 PXG のモデルの試作に取り組んでいます。試作モデルから得られる X 線は市販品と比較して 40 倍以上の強度を達成しています。また、本年度は、焦電結晶の X 線発生物理機構についても研究を進めています。焦電結晶は温度に依存して自発的に分極を生じる強誘電体の一種です。大気圧下では結晶の自発分極は空気中の自由電子によって中和され、見かけ上電気的に中性となります。一方、1 Pa 程度の圧力下では電子の加速に利用され、X 線の発生器と使用することができます。焦電結晶による X 線発生器は小型軽量の線源として期待されていますが、その電子の発生の起源が不明な点も多いのが現状です。本研究では、真空チェンバー内の圧力を 10^{-5} – 10 Pa の範囲で変化させるとともに、封入ガスを He, CH₄, Dry air, O₂, Ar, Kr, Xe について、結晶を温度変化させて発生する X 線の強度を調べました。その結果、 10^{-4} – 1 Pa の圧力範囲と気体の種類に対して X 線発生量に依存性は見られなかった一方、1 Pa 以上と 10^{-5} Pa 付近では X 線発生量が有意に減少する。このことから、電子の発生は結晶表面近くに形成される強電界領域の残留ガスが電子放出の起源であると結論付けることができました。

HPGeを用いた高性能ガンマ線分光計の開発

470g の軽量の冷凍機を用いて既存の検出器の 100K 以下への冷却を目標とし、設計・制作・試験を実施しました。先行研究において、200cc の Ge 結晶を想定した銅ダミーの-176°Cへの冷却が実現しました。実際のミッションを考える上では性能の評価が必須であることから、既存の Ge 検出器を用い、性能評価を行うモデルを設計しました。計算・強度シミュレーションにより検証を行い、全て部品から設計し、新しいモデルを作製しました。また、一連の研究結果について国際学会 ISTS、SELENE Symposium、韓国との二国間ワークショップに参加・講演を行いました。

中心窩を有する広視野センサの開発

本研究では、月や小惑星表面等の低重力環境下において、より短時間での効率の良い調査作業が行える不整地ならびに低重力環境下で安定した高速走行を可能とする車両型移動ロボット(ローバー)を開発することを目標としています。本研究は芝浦工業大学の研究代表者清水教授と研究者島田教授及び本研究室の共同で実施しています。機構部の基本設計を行い、ローバーの低重力下での

動作の挙動とローバーに搭載する各種センサの動作についての検討を加え、ローバーを試作しました。その性能評価は現在進行中です。その成果は、ISIE に投稿予定です。

地球外天体におけるジャイロ応用システムの開発

昨年度は独楽のモデルを用いた CMG という姿勢制御アクチュエータのモデリングから、複数の CMG による 3 軸の姿勢制御装置のモデリングを行いました。その 3 軸の姿勢制御装置に関する制御則を考え、数値シミュレーションにてその制御則の有効性に関して検証をしました。また、同じ運動モデルをドローンの姿勢安定モデルにも適用し、そちらについてはバックステッピングという制御法を用いることで、姿勢制御とドローンの並進運動の速度制御に関してシミュレーションにて検証を行い、制御則が有効であることを確認しました。それらの結果を 9 月に金沢大学で開催された計測自動制御学会で発表し、高い評価を得ることができました。

3. 共同研究者

国内の共同研究者

名誉研究員(名誉教授)： 菊池 順
 主席研究員教授： 大内 茂人
 主席研究員准教授： 清水 創太
 次席研究員助教： 長岡 央
 助手： 内藤雅之
 招聘研究員： 桜井邦朋、久野治義、柴村英道、月出章、大田周也、宮島光弘、
 山下直之、小林正規、春山純一、森国城、藤井雅之、古内ちゆみ

国内の協力研究者

放射線総合医学研究所 小林進吾、小平聡
 JAXA 春山純一、草野広樹

海外の協力研究者

韓国： K.J. Kim (KIGAM), G.Ju (KARI), K.B. Lee(KRISS)
 ロシア： V. Dmitrenko, S. Ulin, V.M. Grachev, K. Vlasik (MEPhI),
 ポルトガル： J.A. Matias-Lopes (UoC)

学生： 博士 D3： 内藤雅之
 修士 M2： 石井隼也、田中直道、村上航平、石智成
 修士 M1： 氣賀信太朗、山崎達也、敷島真奈
 卒論生： 有松貴弘、橘高有哉、萩原成也、長谷部嵩道、平川翔一朗、松田一真、渡邊隆甫

4. 研究業績、

著書

N. Hasebe, K.J. Kim, E. Shibamura, K. Sakurai, "Nuclear Planetary Science", Advances in Planetary Science – Vol. 1, 2018, Series Ed. Wing-Huen Ip, World Scientific.

学術論文(査読有)

2018

H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K.J. Kim "Development of X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science" Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 16(2)(2018)137-142.

- O. Adriani 他, "Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", *Physical Review Letters*, 119(2017) 181101, Issue 18-3, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.181101>.

2017

- M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, E. Shibamura, M. Ohtake, K. J. Kim, C. Wöhler, A. A. Berezhnuy, "Iron Distribution of the Moon Observed by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer: Geological Implications for the South Pole-Aitken Basin, the Orientale Basin, and the Tycho Crater", *ICARUS*, 2017 in press, /doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.005
- K.J. Kim, Y. Choi, J. Park, E.S. Yi, S. Lee, Y. Yeon, C.W. Sun, K.B. Lee, Y. Kim, K. Min, K. Kang, J.Y. Cho, J.H. Cha, **N. Hasebe**, R. Elphic, P. Englert, O. Gasnault, E. Shibamura, H. Nagaoka, L. Lim "Current Development Status of a Gamma-Ray Spectrometer for the Korea Pathfinder Lunar Orbiter" International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2017-k-28, 2017
- N. Hasebe**, H. Nagaoka, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, S. Shimizu, K. J. Kim, V.V. Dmitrenko, T. Nakamura, H. Otake "Nuclear Spectroscopy for Unveiling the Origin of the Martian Moons" International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2017-k-54, 2017.
- M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, "Improved pyroelectric x-ray generator for planetary active x-ray spectroscopy," *Proc. SPIE 10392* (2017) 1039215; doi: 10.1117/12.2273773
- M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, J. Ishii, D.Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, "A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement," *Proc. SPIE 10392* (2017) 103920C; doi: 10.1117/12.2273735.
- S. Shimizu and **N. Hasebe**, "Development of wide angle fovea telescope with wide-field-of-view immersive eyepiece", (2007)IECON2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
- S. Kiga, S. Ouchi, **N. Hasebe**, "Attitude control of drones by back-stepping controller", 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineering,
- T. Yamazaki, **N. Hasebe** and S. Shimizu, "Considerations about saliency map from Wide Angle Fovea image", IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (2017), IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Y. Asaoka 他, "Energy calibration of CALET onboard the International Space Station", *Astroparticle Physics*, 91(2017)1-10.

国際会議・“国内学会・研究会・講演会など

- N. Hasebe**, Nuclear Spectroscopy for Unveiling the Origin of the Martian Moons, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 9th, 2017
- V.V. Dmitrenko, S.E. Ulin, **N. Hasebe**, Experiment SIGNAL Onboard the Interhelioprobe Spacecraft, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 9th, 2017
- H. Nagaoka, Development of X-ray Generators for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science, Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 8th, 2017
- M. Naito, Numerical Estimation of Gamma-ray Spectroscopy for Deep Space Microsatellite, Department of Physics, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University,

- Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 7th, 2017
- J. Ishii, Neutron Spectroscopy for Exploration of Near-Earth Asteroids, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 7th, 2017
- M. Shikishima, The Cooling System of HPGe Gamma-ray Spectrometer on a Deep Space Microsatellite, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 7th, 2017
- N. Hasebe, Nuclear spectrometer for exploration of near-earth-asteroids on a microsatellite, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- M. Naito, Gamma-ray emission from near-Earth objects and its observation background, Department of Physics, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- J. Ishii, Water detection by neutron spectroscopy for exploration of small bodies, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- N. Tanaka, Development of a pyroelectric X-ray generator for future lunar and planetary explorations, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- T. Seki, Digital signal processing for nuclear spectroscopy, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- S. Kiga, Altitude control of drones by back-stepping controller, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- T. Yamazaki, Consideration about wide angle fovea lens on the planetary exploring Rover, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- N. Hasebe, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- H. Nagaoka, Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan, 36th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- M. Naito, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- J. Ishii, Numerical and Experimental Investigation of Neutron Spectroscopy to explore Near-Earth Asteroids by micro-satellite, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- N. Tanaka, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017

- S. Kiga, Self-sustaining drive control of Gyrobike and its application to planetary exploration, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- M. Shikishima, High-purity Germanium Gamma Ray Detector Cooled by a Small Stirling Cooler, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- N. Hasebe, H. Nagaoka, M. Naito, J. Ishii, M. Shikishima, E. Shibamura, S. Torii, M. Miyashita, S. Shimizu, V.V. Dmitrenko, S. Ulin, V. Grachov, J.A. Matias-Lopes, J. Martinez-Frias, and K.J. Kim, "Nuclear spectrometer to explore near-earth asteroids onboard Microsatellite", European Planetary Science Congress (EPSC) 2017, Riga, Latvia, 17–22 September 2017.
- M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, J. Ishii, D. Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A. Matias Lopes, J. Martínez-Frías, "High-performance neutron spectrometer for planetary hydrogen", SPIE 2017, San Diego, USA, 6-20 August, 2017.
- H. Nagaoka, N. Hasebe, S. Torii, 他 21 名 "Overview of Instrumental Package Combined with Nuclear- and Hyper- spectrometers for Geological Investigations of Near-earth Objects", The 3rd COSPAR symposium 2017, Cheju, Korea, 18-22 September, 2017.
- M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, "Improved pyroelectric X-ray generator for planetary active X-ray spectroscopy", SPIE 2017, San Diego, USA, 6-20 August, 2017.
- J. Ishii, H. Nagaoka, M. Naito, D. Aoki, N. Hasebe, "Water Detection by Neutron Spectrometer for the Exploration of Near-Earth Asteroids", 14th AOGS, Singapore, 6-11 August, 2017.
- N. Hasebe, S. Torii, T. Miyashita, T. Ota, T. J. Fagan, H. Nagaoka, M. Naito, J. Ishii, D. Aoki, T. Adachi, M. Shikishima, E. Shibamura, A. Hitachi, S. Shimizu, M. Ohtake, K.J. Kim, J. Martínez-Frías, J.A. Matias-Lopes, V.V. Dmitrenko, S. Ulin, "Investigation of Elemental Composition of Near-Earth Asteroids by Nuclear Spectrometer on the Miniature Deep Space Satellite", 14th AOGS, Singapore, 6-11 August, 2017.
- H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, M. Mizone, H. Kuno, "Pyroelectric X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectrometer on Future Lunar and Planetary Landing Missions", 14th AOGS, Singapore, 6-11 August, 2017.
- M. Naito, J. Ishii, N. Hasebe, E. Shibamura "Gamma-ray and Neutron Spectrometer for Microsatellites: Numerical Estimation of Elemental Compositions", The 3rd COSPAR symposium 2017, Cheju, Korea, 18-22 September, 2017.
- T. Miyashita, N. Hasebe, S. Torii, S. Shimamoto, T. Ohta, T. J. Fagan, H. Nagaoka, M. Naito, Y. Sato, "Waseda SAT-X: --- Miniaturized Deep Space Probe ---", The 3rd COSPAR symposium 2017, Cheju, Korea, 18-22 September, 2017.
- 内藤雅之, 田中直道, 氣賀信太郎, 長岡央, 長谷部信行, "焦電結晶による X 線発生時のガス種・ガス圧依存性", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 日本, 2017 年 3 月 18 日
- 長岡央, 長谷部信行, 内藤雅之, 石井隼也, "中性子分光による天体表層の水検出", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 日本, 2017 年 3 月 19 日
- 石井隼也, 長谷部信行, 長岡央, 内藤雅之, "地球近傍小惑星探査に向けた小型中性子分光計の性能評価", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 日本, 2017 年 3 月 19 日

4.6 2017年度卒論及び修論

修士論文

- 石井隼也 地球近傍小惑星探査に向けた超小型衛星搭載用中性子分光計の開発、
- 石智成 月面及び溶岩チューブ内の放射線量の評価
- 田中直道 月面探査ローバー搭載に向けた X 線発生装置の研究（焦電結晶型と CNT 型の比較）、

村上航平	Xe+CH ₄ を用いた Luke 型平行平板電離箱のエネルギー分解能
卒業論文	
有松貴弘	デジタル信号処理による放射線計測システムの高性能化
橘高有哉	小天体探査用の核分光計と SiPM を使用した反同時計数用プラスチックシンチレータの性能評価
萩原成也	小天体探査に向けた超型冷凍機を用いた小型軽量 HPGe ガンマ線分光計
長谷部嵩道	ピラミッド型リアクションホイールを用いた小型衛星の姿勢制御及び冗長性
平川翔一郎	顕著性マップと Haar-Like 特徴量を用いた単眼カメラによる惑星表面での障害物検出
松田一真	巨大衝突 盆地 (SPA) (SPA) における K 及び Th 濃縮地域の起源
渡邊隆甫	コプラナー電極を有する円筒型希ガス電離箱のエネルギー分解能

5. 研究活動の課題と展望

月は、我々の住んでいる地球の天然衛星であって、最も身近な地球外天体です。エレクトロニクス、材料科学、IT 技術、天体観測の技術、宇宙工学などの飛躍的な進歩に伴って、近い将来には月への旅行も実現するだろう。月は、アポロにより持ち帰られた岩石試料や周回衛星による大量のリモートセンシングデータが揃った研究対象であり、惑星科学と地球科学の両分野に跨っています。従って、地球科学の幅広い分野の手法、技術や知見を総合的に利用することによって、月の全体像の構築とその起源と進化の理解ができるものと考えています。更に、知的好奇心のもと文明発展と活動領域の拡大を続けてきた我々人類が、地球を飛び出して太陽系の大海へと漕ぎ出す日(宇宙大航海時代)はそう遠くないはずです。地球外天体への第一歩は、間違いなく月であり、さらなる宇宙へ活動領域を拡大していく上で月は、必要となる知識や技術を獲得するための重要な足固めの場となることでしょう。そして、地球の第8番目の大陸としての月を研究する月科学は、これからも探究し続け発展する人類の必然的な対象であるのかもしれない。

建築・都市における次世代型空間デザインの実践的研究

研究代表者 古谷 誠章
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

1-1. 建築デザイン研究の特徴、関連分野の統合

実際にひとつの建築を生み出すためには、建築学の全分野の知識、経験が総合的に必要となる。構造、環境、生産など専門分野ごとに深化されている建築の工学系諸分野の研究も、歴史や都市などを含む「建築デザイン」にフィードバックされることによって実証されます。関連諸分野の相乗的な協働による建築作品制作を図る。

1-2. 公共空間計画やコミュニティ再生、市民協働

マスメディアや通信手段の変革などにより、今日の建築や都市に求められる「公共性」も変容しつつある。専門家や官主導の都市環境・住環境整備から、より多くの住民が直接参加する、市民や利用者との協働による公共空間整備やコミュニティ再生の方向へと大きく舵を切らねばならない。その手法のさらなる模索、確立を目指す。

1-3. 大学院における PBL の実践、環境体験型研究教育

20 世紀の西欧近代主義に根ざす建築学研究とその教育法に代わり、現在では世界中の様々な環境・風土を体験することを通じて学ぶ、新たな建築学研究／教育が模索されている。特にアジア地域での多様な気候風土、民族文化からは、今後地球上に求められる「持続する生活環境デザイン」への大いなる示唆を得ることができる。本重点研究においては、これら多様な題材に基づいた PBL (Project Based Learning) を基本とし、これからの人類の生活環境を、「どう作るか」だけでなく、今あるリソースを「どう使うか」についても深く研究し、広く全世界に発信できるものとする。

2. 主な研究成果

2-1. 歴史的建造物の耐震改修に関する研究

2-2. 木造仮設建築に関する研究

東京大学大学院農学生命科学研究科稲山正弘教授と協働し研究を行っている。今年度の研究は主に、「歴史的建造物の耐震改修に関する研究」と「木造仮設建築に関する研究」である。

2-1. 歴史的建造物の耐震改修に関する研究

歴史的建造物の耐震改修に関する研究は、高知県宿毛市に位置し明治 22 年に建設された林邸を改修するにあたって必要な耐震化に関する研究である。

林邸は、地域の文化を有する建築物であるため復元的に改修する必要があった。また一方で現代の新しい使い方に対応できるようにする必要もあった。そこで林邸を大きく二つのエリアに分け、それぞれ「文化的改修」と「現代的改修」を行った。耐震化の方法としてはそれぞれの改修に適した耐震方法を考案して採用した。「文化的改修」には、「ガラス耐震壁」、「現代的改修」には、「組子耐震壁」である。

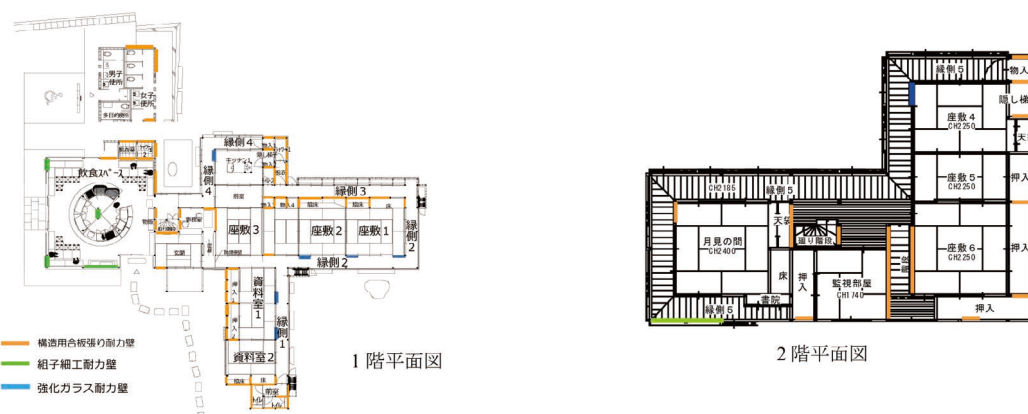


図 1 耐震壁の配置 (古谷誠章研究室 作成)

「ガラス耐震壁」は、座敷側から見た時に障子の後ろに隠れるように設置されており、また透明で光を透過するため、障子の後ろに存在していることがわかりにくくするようにしている。元々の林邸の雰囲気を残すための工夫である。「組子耐震壁」は、「ガラス耐震壁」のように目立たなくするためのものではなく、逆に魅せるための耐震壁である。林邸の新しい顔となる外観にもその姿が見えるように設置している。



図 2 ガラス耐震壁



図 3 組子耐震壁 (古谷誠章研究室 撮影)

2-2. 木造仮設建築に関する研究

奈良県で行われるオクトーバーフェストのテント会場を奈良県産材を用いて木造で計画するものである。これまでの木造仮設建築の事例の収集を行い、第一次案を作成した。既存の会場規模に合わせた、ドーム状のものを計画した。

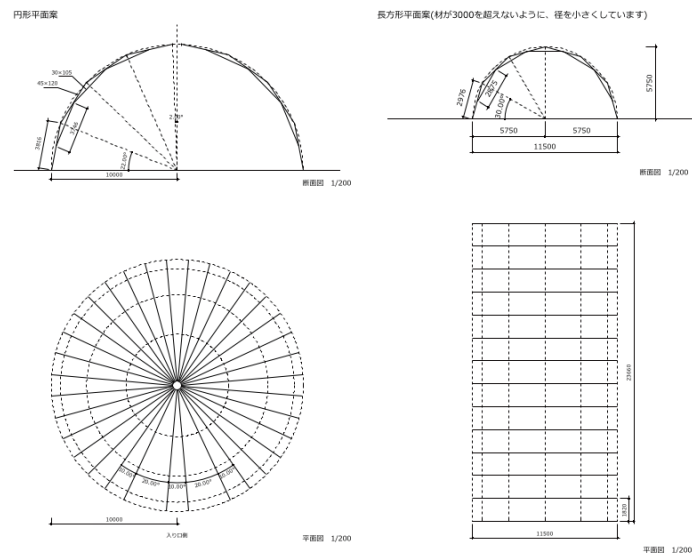


図 4 第一次案 (東京大学稲山正弘研究室・古谷誠章研究室 作成)

3. 共同研究者

斎藤 信吾 (創造理工学部・助教)
 根本 友樹 (創造理工学部・助手)
 山田 浩史 (創造理工学部・助手)
 王 薪鵬 (創造理工学部・助手)

4. 研究業績

特になし

5. 研究活動の課題と展望

5-1. 歴史的建造物の耐震改修に関する研究

日本中に存在する歴史的建造物への応用を検討していく。

5-2. 木造仮設建築に関する研究

再来年度での実現に向け、デザイン、コスト、運搬収納方法など検討していく。

高エネルギー素粒子物理学実験研究

研究代表者 寄田 浩平
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

欧州原子核共同研究機構（以下 CERN）における LHC 加速器を用いた ATLAS 実験に参加し、国際共同研究として最先端の高エネルギー素粒子実験研究を推進している。素粒子の標準模型を超える新粒子・新現象の発見に向けて、データ取得のためのトリガー増強からまったく新しい物理過程や解析手法を提案等、さまざまな角度から取り組んでいる。LHC 加速器は 2015 年に重心系エネルギーを 13TeV に増強、その後 2017 年度も瞬間輝度を上げ、ATLAS 実験における解析積分データは合計で約 100fb^{-1} に達しつつある。LHC 加速器は 2018 年度も運転し、Run2 実験の最終データ量は $120\sim 150\text{fb}^{-1}$ を蓄積する予定である。ヒッグス粒子の発見によって標準模型で予言されている粒子はすべて出揃ったため、今後あらたに発見される粒子はまちがいないく、“Physics Beyond the Standard Model”である。そこで 2017 年度はヒッグス粒子の物理に加え、それを越えた新粒子・新現象探索にさらに焦点を当てた研究展開を図った。また、今後の LHC 加速器の高エネルギー化（13→14TeV）・高輝度化（現在の 2～3 倍）に伴うパイルアップ（1 衝突当たりの多重反応）問題を解決するための新しいトリガーハードウェアシステム（FTK）の開発研究も引き続き行った。我々が開発してきたカスタム電子回路基板を ATLAS 検出器へ挿入し、さまざまな試験運転を進めた。ハードウェア開発構築だけでなく、実際の FTK からの飛跡情報の利用方法（オンライントリガーでの τ 識別や衝突点再構成）についても新しいアイデアを提案しながら、より汎用的な研究を展開している。

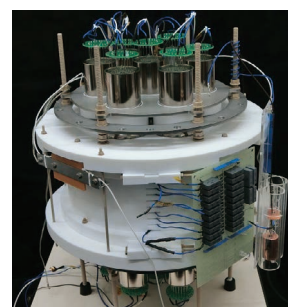
LHC/ATLAS 実験における早稲田大学の役割・貢献として 2017 年度に行った主な研究課題を以下に示す。それぞれの詳細については研究成果の項で記述する。

1. Single-/Di- τ トリガーの評価
2. 新粒子から崩壊する高運動量のヒッグス粒子が $\tau\tau$ に崩壊する過程の同定手法の開発
3. 新しい重粒子探索、とりわけ高運動量に“ブーストされたジェット”の評価・改善
4. 3 を踏まえた弱ボソンの散乱断面積測定
5. 新粒子（超対称性長寿命粒子）探索に向けた“消失飛跡”の研究
6. 高速飛跡再構成システム（FTK: Fast Tracker）の構築・挿入・運転

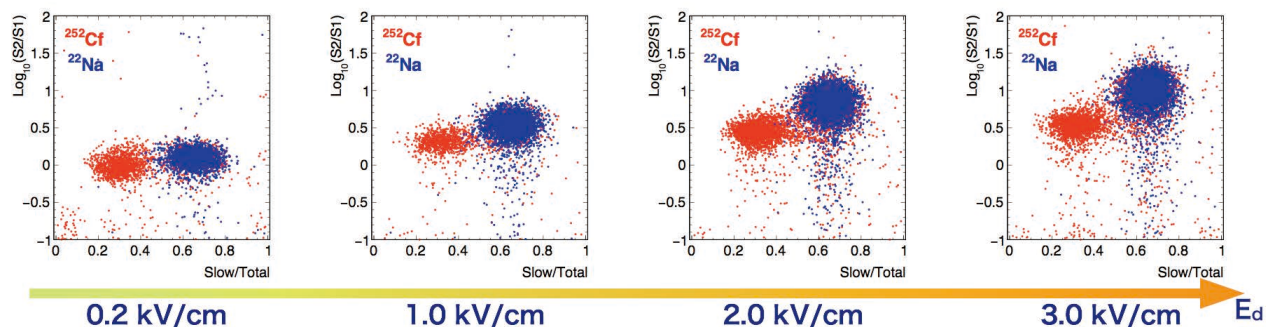
一方、暗黒物質探索を目的とした高感度検出器（気液 2 相型アルゴン光検出器）の開発も行っている。低質量 WIMP 探索に向け、2017 年度は以下の項目に注力し研究を進めた。

- ① 有効質量拡張+多チャンネル PMT 読出しのための検出器構築
- ② 高電場下の Ar 応答特性、とくに消光や電離蛍光比 ($S2/S1$) の電場依存性
- ③ 電子反跳事象の理解と神岡地下環境での環境中性子測定

これまでの検出器を拡張し、右図にあるような上下 7 本ずつの PMT (3inch, R11065) を配備した TPC を構築した。これまで同様、高純度 Ar（電子減衰時定数で約 2ms）の安定運用を達成し、水平方向に位置分解能をもつことが背



景事象同定に有効なことをデータにより確認することができた。一方、コッククロフトウォルトン回路による電圧印加装置を利用し、先行研究にはない 1kV/cm から 3kV/cm までの S2/S1 発光特性を精査し、電離蛍光比による除去力性能が高電場で向上する知見を得た。

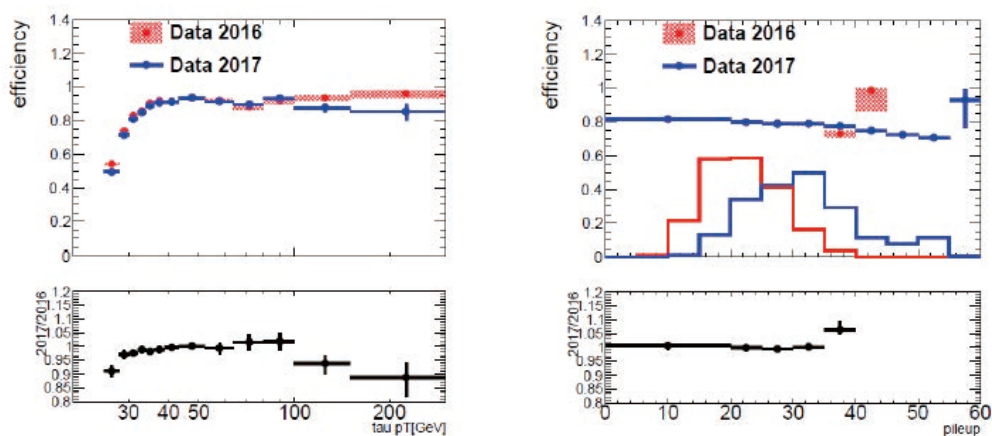


また地下実験に向けて、液体シンチレータを用いた神岡地下施設での環境中性子測定を行った。中性子測定コンソーシアムを通じて大阪大学や神戸大学とともに検出器の純化を進めている。これらの成果は学術論文、国際学会、国内学会において公表した。今後は地上での構築をさらに進めるとともに、地下実験に向けての詳細検討をさらに促進させる予定である。

2. 主な研究成果

2.1 τ トリガー構築・評価と高運動量ヒッグス粒子同定手法の研究

昨年度に引き続き、2017 年度に取得したデータに関する τ トリガーの性能評価を行った。2016 年度のデータと比較すると、おおそ同等の性能が出ていることが確認できたが、一方で、信号取得効率に関して微小な差異を観測した。詳細を調べた結果、これは瞬間輝度増強に伴うパイルアップの影響が間接的に効いていることがわかった。しかし MC シミュレーションもこれを正しく再現しているため、ヒッグス粒子の解析等に使用するうえでは直接的に大きな悪影響を及ぼすことはない。ただし、今後 FTK を含めた飛跡の有効活用によってこのパイルアップ現象の抑制をする必要がある。

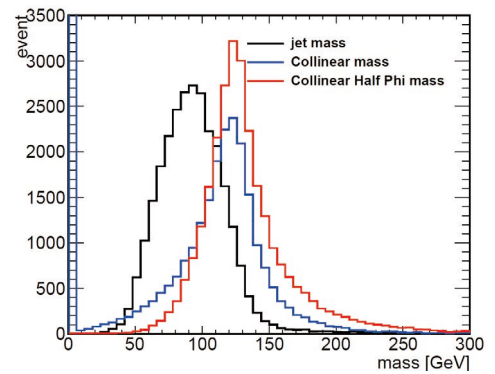


図： τ 粒子の取得効率（2016 年と 2017 年の比較）。左図は運動量、右図はパイルアップ

一方で τ 粒子が大きく絡む新物理として、重い新粒子から崩壊するヒッグス粒子 ($\rightarrow \tau \tau$) があげられる。例えば、1.5TeV 程度のグラビトンから崩壊するヒッグス粒子は高運動量をもつため、ヒッグスから崩壊する 2 つの τ 粒子は互いに近付き、これまでの同定手法では解析することができない。今後の探索方針・実行性を検討するため、そのような高運動量

ヒッグス粒子の同定、また質量再構成に関する研究をあらたに行った。

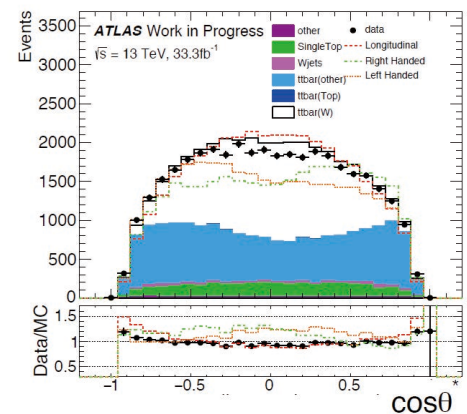
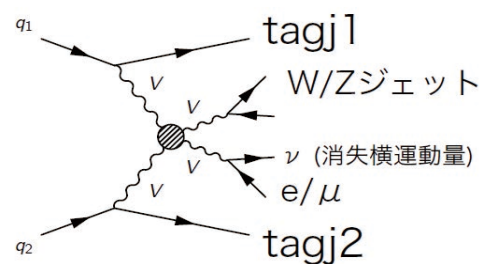
その結果、飛跡数の情報を使うことで非常にシンプルに信号と背景事象と分離できることがわかった。また、互いに近い2つの τ 粒子に関して、jet mass、collinear mass、さらに本研究で開発した half phi mass (消失横運動量を2つの τ 粒子の真ん中に補正する方法)を比べたところ、half phi mass が再構成率・質量分解能ともに最良な結果を与えることがわかった。引き続き手法を発展させ、今後、高統計でのヒッグス粒子が絡む新粒子探索の感度を上げていく必要がある。



2.2 弱ボソン散乱断面積測定の研究

もし新現象のエネルギースケールが LHC のエネルギーで届かない領域にある場合、位相空間上、新粒子の直接探索は不可能となる。また、電弱対称性の破れの根幹である弱ボソンの発散の抑制（ヒッグス粒子によるユニタリティー回復）は弱ボソンの散乱断面積のエネルギー依存性を測定してはじめて検証可能なる。一方で、もし新現象のエネルギースケールが非常に高かった場合、その影響がこの弱ボソンの散乱断面積のエネルギー依存性に影響し、スペクトルが標準模型の予想からずれることが知られている。そこで、2017 年度は本格的にこの研究を行った。その結果、3つの崩壊過程を統合すれば2018年度までのデータで 5σ の発見が感度が期待できることがわかった。

一方で、高運動量の W ジェットに対し、縦波成分と横波成分が分離できることをトップクォークのから崩壊する W の実データを用いて検証することができた。これらの結果は今後のエネルギーフロンティア実験の将来を決定するために重要な要素となるため、引き続き次年度以降も解析を続け、新現象の発見につなげる。



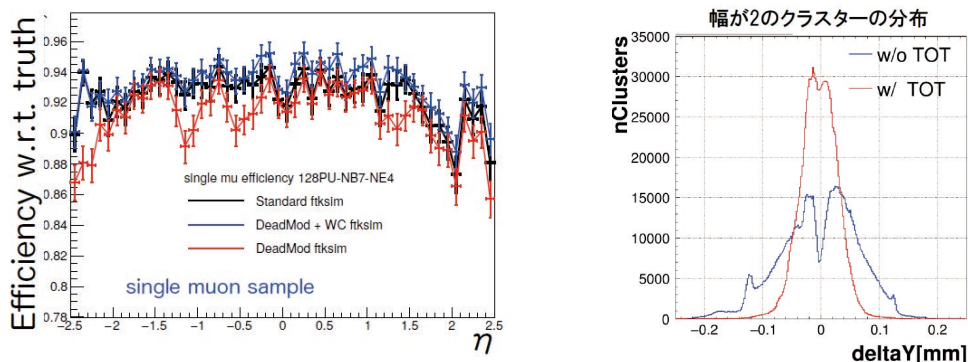
2.3 新粒子探索に向けた“消失飛跡”の基礎研究

昨年度から引き続き、飛跡検出器内数 cm で消失する飛跡の研究を行った。超対称性 (SUSY) 粒子はフェルミオンとボソンのスピンに対する対称性を課すことで、標準模型粒子とペアを組むような粒子が要請される。それに伴い Higgs 粒子の質量階層性問題、GUT スケールでの結合定数の統一、暗黒物質の候補など標準理論での問題点の解決が期待されている。この SUSY の枠組みの中で、暗黒物質の有力候補である Wino が LSP となるシナリオを扱っている。この場合、チャージーノ ($\tilde{\chi}_1^\pm$) とニュートラリーノ ($\tilde{\chi}_1^0$) の質量が縮退し、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ が長寿命となる。そのため、内部飛跡検出器内で崩壊し、消失飛跡と呼ばれる特殊飛跡として検出される。

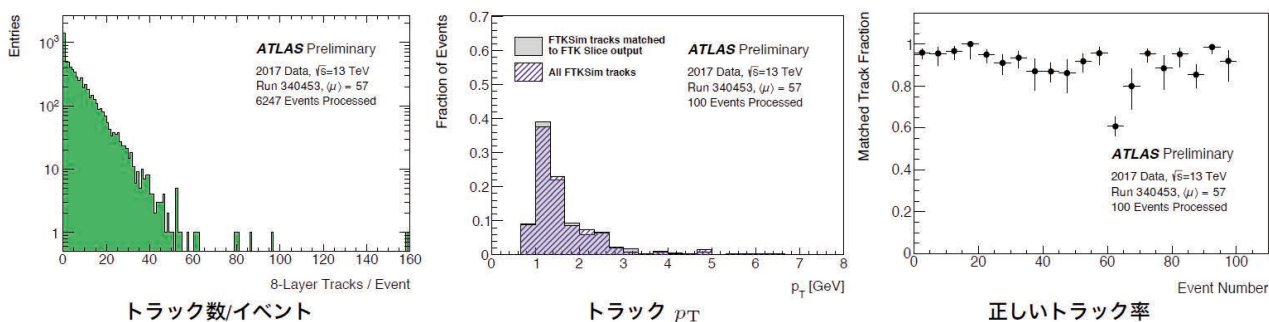
2017 年度はさらに短い飛跡（衝突点とピクセル検出器 2 層やピクセル検出器 3 層）を再構成するための原理・実行性の検証を行った。また、Run2 データを使った解析において、この信号として扱うのは不可能とされていた（より短い飛跡のため同定が困難な）higgsino 探索に対する解析感度の再解釈を行い、論文にまとめた。

2.4 高速飛跡再構成システム (FTK: Fast Tracker) の構築・挿入試験

ATLAS Upgrade である Fast tracking trigger システム (FTK) の CERN 現地での運用試験を続けている。早稲田グループは、実機開発として特に FTK システムの最上流でシリコン検出器から 40MHz の高速通信 (optical fiber) で送信されるヒット情報を受信し、クラスタ化する機能をもつ受信カードの設計を行い、これまでプロトタイプを製作してテストを行ってきた。2017 年度は、とくに ATLAS 検出器への挿入を進め、試運転を開始することができた (高エネルギーニュース)。以下、要点を簡単に整理する。ハードウェア動作試験、挿入作業、ATLAS Run Control への実装、実機で運用するパターン・コンスタント生成とチューニング (Wild Card Algorithm)、pixel-ToT を用いた実機変数の最適化とそれによる飛跡変化の評価 Fast Simulation の構築などである。



左図：不感検出器に対して WC を用いた再構成率の回復 右図：TOT による改善



このように、hardware, firmware, software の 3 本柱で挿入・試験を継続的に行っており、2018 年には多くの飛跡が ATLAS トリガーで運用できることが期待できる。

このように 2017 年度は、トリガー回路・実装・評価から新しい解析手法の提案、暗黒物質や電弱対称性の破れの検証にくわえ、新しいエネルギースケールの発見に向けた基礎開発を並行して行うことができた。なお、早稲田大学の貢献度はここ数年毎年要求値の 200% から 300% となっている。

3. 共同研究者

田中雅士（国際理工学センター・准教授）

森永真央（理工研・次席研究員）

木村直樹（イタリア・ウディネ大学/CERN 研究員）

The ATLAS Collaboration（国際協力：CERN, Univ. of Geneva, Univ. of Melbourne etc）

ATLAS-FTK group（国際協力：Univ. of Chicago, Stanford Univ., INFN Pisa, Frascati etc）

東京大学素粒子国際研究センター（ICEPP）、京都大学

東京大学宇宙線研究所、神戸大学、名古屋大学、大阪大学

The CDF Collaboration（国際協力：Fermilab, USA）

☆ 学外共同研究者は多数いるため、各個人の氏名は省略。

4. 研究業績

4.1 学術論文（主要なものを抜粋）

“Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), PRD97(2018), no.7, 072003

“Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1801(2018) 126

“Search for additional heavy neutral Higgs and gauge bosons in the ditau final state produced in 36fb⁻¹ of pp collision at sqrt(s)=13TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1801(2018) 055

“Search for diboson resonances with boson-tagged jets in pp collisions at sqrt(s)=13TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), PLB777(2018) 91-113

“Evidence for the H→bb̄ decay with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1712(2017) 024

“Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in pp collisions at sqrt(s)=13TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), PRD96(2017) no.7, 072002

“Top-quark mass measurement in the all-hadronic tt̄ decay channel at sqrt(s)=8TeV with the ATLAS detector”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), JHEP1709(2017) 118

“Performance of the ATLAS Trigger System in 2015”

M. Aaboud, K.Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), Eur.Phys.J. C77(2017) no.5, 317

“The ATLAS Fast Tracker Processing Units – input and output data preparation”

A. Bolz, K.Yorita et.al., PoS ICHEP 2016 (2017) 1233

“The ATLAS Fast Tracker System”

T. Iizawa, K. Yorita et.al., (ATLAS collaboration) PoS, TWEPP17, 139, 2018

“Search for direct pair production of higgsinos by the reinterpretation of the disappearing track analysis with 36.1fb⁻¹ of sqrt(s)=13TeV data collected with the ATLAS experiment”

T. Kaji, K. Yorita et.al., (ATLAS Collaboration), ATL-PHYS-PUB-2017-019, 15.Dec.2017

“Status and prospect of the ANKOK project : Low mass WIMP dark matter search using double phase argon detector”

M. Kimura, M. Tanaka, K. Yorita, Journal of Physics: Conference Series (JPCS)

“Study of the low-energy ER/NR discrimination and its electric-field dependence with LAr”

T. Washimi, T. Kikuchi, M. Kimura, M. Tanaka and K. Yorita , Journal of Instrumentation, Volume 13, C02026, February 2018

* その他共著論文多数

4.2 講演

国際会議 :

(Invited) M. Morinaga for the ATLAS collaboration “Search for neutral and charged BSM Higgs Bosons with the ATLAS detector”, QCD2017, July3-7.2017, Montpellier, France

(Invited) T. Iizawa “The ATLAS Fast Tracker System” TWEPP2017, Sep.11-15.2017, UC-SC, USA

T. Nitta “Identification of Hadronically-Decaying W Boson and Top quark using High-Level Features as input to BDT and DNN in ATLAS at sqrt(s)=13TeV” July.16-21, 2017, BOOST2017, Buffalo USA

(Invited) T. Nitta “Identification of Hadronically Decaying W boson and Top quarks using Multivariate Techniques at ATLAS” August.21-25.2017, ACAT2017, Seattle, USA

T. Washimi, K.Yorita et.al.

"Study of the Low-Energy ER/NR Discrimination and its Electric-Field Dependence with Liquid Argon", 2017/9/22, LIDINE2017 @ SLAC National Accelerator Laboratory, USA

M. Kimura, K.Yorita et.al.

“Status and prospect of the ANKOK project: Low mass WIMP dark matter search using double phase argon detector”

TAUP2017 XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics,
July 24-28, 2017, Laurentian University Sudbury, ON, Canada

日本物理学会：

2017 年 9 月 12-15 日：日本物理学会秋季大会@宇都宮

加地俊瑛「LHC-ATLAS 実験における大きな dE/dx を持つ短い消失飛跡探索のための背景事象研究」

新田龍海「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるハドロン崩壊を含む弱ボソン散乱過程の測定可能性」

飯澤知弥「LHC-ATLAS 実験における高速飛跡トリガー (FTK) の初期データ解析と本格運転への展望」

木村真人「ANKOK 実験 20：電子反跳事象分離能力の理解」

矢口徹磨「ANKOK 実験 21：本検出器に向けた光学過程の理解」

田中雅士「ANKOK 実験 22：現状の課題と今後の展望」

2018 年 3 月 22-25 日：日本物理学会年次大会@東京理科大学

寄田浩平 シンポジウム講演 (ユニークな TPC 開発) 「気液 2 相型アルゴン TPC」

森永真央「LHC-ATLAS 実験における高速飛跡トリガー (FTK) の初期データ解析と本格運転への展望」

初山慶輔「LHC-ATLAS 実験における FTK 受信システムの性能評価」

加地俊瑛「LHC-ATLAS 実験における FTK 本格稼働のためのソフトウェア構築現状」

新田龍海「LHC-ATLAS 実験 Run2 における 1 レプトン終状態を用いた弱ボソン散乱過程の測定」

益田匠 「LHC-ATLAS 実験における高運動量 $h \rightarrow \tau\tau$ の同定と質量再構成の研究」

田中雅士「ANKOK 実験 23：気液 2 相型 Ar 光 TPC 検出器による暗黒物質探索」

武田知将「ANKOK 実験 24：ガス中 2 次蛍光の検出器内環境依存性」

菊地崇矩「ANKOK 実験 25：高電場下における Ar 蛍光特性」

木村真人「ANKOK 実験 26：高電場下における電子反跳/原子核反跳事象の分離」

竹村祐輝「ANKOK 実験 27：背景事象の低減と理解」

矢口徹磨「ANKOK 実験 28：TPC の拡張と今後の展望」

他研究会、国内シンポジウム等：

(招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

CRC タウンミーティング 東京大学柏キャンパス 2017 年 6 月 24-25 日

(招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

東大宇宙線研究所共同利用研究成果発表会 東京大学 2017 年 12 月 8 日

(招待講演) 寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」

「極低放射能技術」研究会 天童, 山形県 2018 年 3 月 7-10 日

(招待講演) 寄田浩平「FastTracKer」アトラス日本総会 宇都宮大学 2017 年 9 月

(招待講演) 森永真央「FastTracKer」アトラス日本総会 東京理科大学 2018 年 3 月

(招待講演) 鷺見貴生「気液 2 相型アルゴン検出器による低質量暗黒物質探索」

SMART2018、蔵王、山形県、2017 年 11 月 11 日

(招待講演) 鷺見貴生「暗黒物質探索実験“ANKOK”」KEK 超伝導コロキウム、KEK、2017 年 12 月

ATLAS Boosted Object Workshop, 2017 年 4 月 24-27 日, Brighton, UK

新田龍海, BDTs Trained in Data

FTK 2018 Kickoff Workshop, 2018 年 1 月 17-19 日, CERN, スイス

森永真央, IM Review

加地俊瑛, FTK Offline Software 2017 Post-Mortem

中性子研究会 2018 年 1 月 26 日、大阪大学

田中雅士「これまでの早稲田大学の取り組み」

アクティブ媒質 TPC 開発座談会 2017 年 11 月 11 日、KEK

鷺見貴生「DM 探索 液体アルゴン技術開発」

Poster: The 1st KMI School “Dark Matter” 28.Feb-2.Mar.2018, Nagoya

M. Kimura, Particle Identification in Double Phase Argon Detector(ANKOK)

Poster: 地下素核研究会、2017 年 5 月 21-23 日、岡山大学

矢口徹磨「30cm ドリフト TPC における電場形成と高純度アルゴン」

Poster: 地下素核研究会、2018 年 3 月 7-9 日、山形県天童

飯島耕太郎「ANKOK 実験におけるシールド構築とその遮蔽について」

第 9 回新学術領域 B02 班若手研究会、2017 年 11 月 早稲田大学

木村真人「ANKOK 実験における ER/NR 分離」

矢口徹磨「ANKOK 本実験に向けた新規検出器開発」

竹村祐輝「ANKOK 実験における内部放射線背景事象の理解と低減」

飯島耕太郎「ANKOK 実験 環境ガンマ線測定とその遮蔽」

菊地崇矩「TOF を用いた消光因子測定」

第 10 回新学術領域 B02 班若手研究会、2018 年 1 月 大阪大学

木村真人「中性子 Calibration Try」

4.3 その他、学会および社会的活動等

2015 年 9 月～2017 年 9 月 高エネルギー委員・将来計画検討委員

2015 年 10 月～現在 MOCAS International Conference, Program Committee

2016 年 2 月～2017 年 9 月 高エネルギー物理学研究者会議測定器開発優秀修士論文賞審査委員

2017 年 3 月 31 日～2019 年 3 月 31 日 日本物理学会 第 73～74 期 代議員

2016 年～現在 早稲田大学重点研究領域「先端基礎物理学研究所」代表

2017 年度 学術振興会特別研究員審査委員

2017 年度 学術振興会外国人特別研究員審査委員

2017 年度 高エネルギー加速器研究機構 CERN 派遣研修（技術・事務）候補者審査委員

2018 年 2 月 筑波大学附属高校 SGH 特別講義講師

2018 年 3 月 日本物理学会年次大会@東京理科大学 ヒッグスの物理セッション座長

2017 年～現在 ICEPP シンポジウムプログラム委員

2017 年 11 月 ICFA セミナー招待参加者（オタワ、カナダ）

2017 年 9 月 北海道大学集中講義（非常勤講師）

2018 年 3 月～現在 ATLAS-Japan 執行部

2017 年～現在 ATLAS Overview Week Tokyo 2018 実行委員長

（アプトリーチ活動）第一回 麗澤中学・高校サイエンスカフェ、2017 年 5 月 26 日

飯澤知弥「宇宙のはじまりの謎 ダークマターって何だ？」

鷲見貴生「素粒子物理学の最前線」

4.4 受賞褒章・著書・寄稿

（著書・寄稿）

寄田浩平、田中雅士他、高エネルギーニュース 第 36 巻 4 号 p180-188 2018 年 1/2/3 月

朝日新聞出版「AERA」掲載：2018 年 3 月号 「階層を越えた最先端物理学」

4.5 学位論文

博士論文：

飯澤知弥「Construction of the fast track reconstruction system (FTK) at the LHC-ATLAS experiment」

三谷貴志、鷲見貴生 in progress(執筆中)

修士論文：

竹村 祐輝「ANKOK 実験における内部放射線背景事象の理解と低減」

菊地 崇矩「ANKOK 実験における高電場形成と消光因子測定」

益田 匠「LHC-ATLAS 実験における高運動量 $H \rightarrow \tau\tau$ の同定と質量再構成」

糸山 慶輔「LHC-ATLAS 実験における FTK 受信モジュール運用と機能最適化」

学士論文：

青山 一天「ANKOK 本実験に向けた Ar 蛍光の直接及び間接検出手法の研究」

植原 靖裕「LHC-ATLAS 実験におけるオフライントラックと FTK トラックの比較」

尾形 暢隆「LHC-ATLAS 実験におけるヒッグス- μ 粒子湯川結合の測定可能性に関する研究」

平良 文香「神岡地下での液体シンチレータ長期間測定データの解析」

武田 知将「ANKOK 実験における 2 次蛍光量の検出器内環境依存性」

鶴田 亮「LHC-ATLAS 実験 2017 年 RUN における τ トリガーの性能評価」

5. 研究活動の課題と展望

2017 年、LHC 加速器の瞬間輝度は 2×10^{34} に達し、高輝度実験として運転されている。今後の実験環境はさらに厳しくなることが予想される。これに伴う急務な課題として、FTK システムによる飛跡情報の利用である。加速器再開とともに磐石な状況を構築し、高輝度下でのオペレーションに対して十分な対策を講じることが重要である。この課題に対して、早稲田大学は包括的に取り組む予定である。また、標準模型を超える重粒子探索や超対称性粒子に代表される新現象探索も現地海外研究者との密な議論を行った上で、早稲田独自の大きな役割を果たしていく。

また、早稲田大学独自発信の ANKOK 実験に関しても、これまでの成果を総括し、本格的な探索に移行するべく、極低バックグラウンド技術や地下実験に向けた検討を含め、東京大学宇宙線研究所共同利用への参画をはじめ、国内外の研究者と協力しながら推進する。

LHC 加速器を利用した最先端素粒子物理学と非加速器実験による暗黒物質探索を並行して行うことで、まったく新しい発見、今後の素粒子・宇宙物理学の指針を見出していきたいと考えている。

加速器科学・放射線科学

研究代表者 鷲尾 方一
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

我々は本研究プロジェクトにおいては、加速器から得られる高品質電子ビームを用いて半導体リソグラフィや、産業に資する新材料に関する研究を行っている。

パーソナルコンピュータや携帯端末の性能を決定している集積回路は、基板（ウェハ）に微細な回路パターンを転写するリソグラフィ技術により作製されている。

このリソグラフィ技術では紫外光(UV)が露光光源として用いられており、光源の短波長化と技術の進歩によって加工の空間分解能は年々向上を続けている。しかし、紫外光を利用した加工は既に限界に達しつつあり、集積回路のさらなる高度化・高集積化に向け、電離放射線領域である極端紫外光(EUV)・X線・電子線等の量子ビームの利用へと大きな転換期を迎えている。

本研究において一つの対象としている次世代リソグラフィに利用される光源—EUV (Extreme Ultra Violet) 光—について民間企業との共同研究を実施してきている。現在、大強度の EUV 光源や加工技術の確立が急がれるなかで、我々は特に、FEL (Free Electron Laser) を利用した光源の可能性についても研究を続けてきた。

一方、我々の持つ物質と放射線の相互作用に関する詳細な知見をもとに、放射線施設などの多様な場所において使用可能な高い耐放射線性を持つゴム等の素材開発や高分子の放射線有機反応の基礎課程解明にも取り組んできた。

今年度はこれら一連の研究の中で、以下のような研究を推進した。上記のように、露光線源や加工技術の確立が急がれる一方で、一昨年来取り組んできた、ポリ α -アリルオキシメチルアクリル酸メチル (AMA 重合体) の反応性について詳細な検討を行った。この研究は放射線によるがん治療などにおいて必須とされる3次元線量測定にも応用可能なゲル線量計への応用を視野に入れた応用へと展開している。具体的には、放射線照射によりモノマーが重合し系内で白濁することで線量分布を可視化するというものであるが、この際にシステムとしては、ゲル化剤、重合材、脱酸素剤、重合調整剤などによって構成されるが、この中で脱酸素剤はできれば排除したい物質となる。AMA はその特許情報によれば、酸素捕捉性がうたわれている。また、AMA 重合体はレジスト材料としての可能性も秘めている。そこで我々は AMA に対し加速器からの放射線を用いたパルスラジオリシス法により放射線化学反応の初期過程に関する先駆的な研究を行った。

2. 主な研究成果

今年度は、大阪大学産業科学研究所 L バンド電子ライナックからのパルス電子線を用いて、吸光法パルスラジオリシス実験を行った。実験には、AMA (日本触媒)¹⁾を用いた。AMA ポリマーの化学構造を図1に示す。

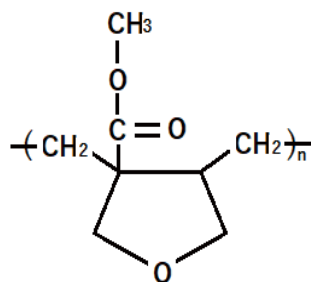


図1 AMA 重合体の構造

AMA 重合体は主鎖に THF 環を含む高分子であり、多くの溶媒に可溶で多種多様な実験環境を実現することができる

AMA 重合体は THF に容易に溶解するが、THF 中では溶媒和電子の寿命が短く、10 ナノ秒程度の時間分解能では電子寿命の測定には適さない。そのため電子との反応性の確認には N,N-ジメチルホルムアミド(DMF)を溶媒として用いた。DMF は THF と同様に極性溶媒であり、電子線照射時には溶媒和電子による過渡吸収が近赤外領域に現れ、その減衰寿命は数百ナノ秒程度である。(Fig.2)

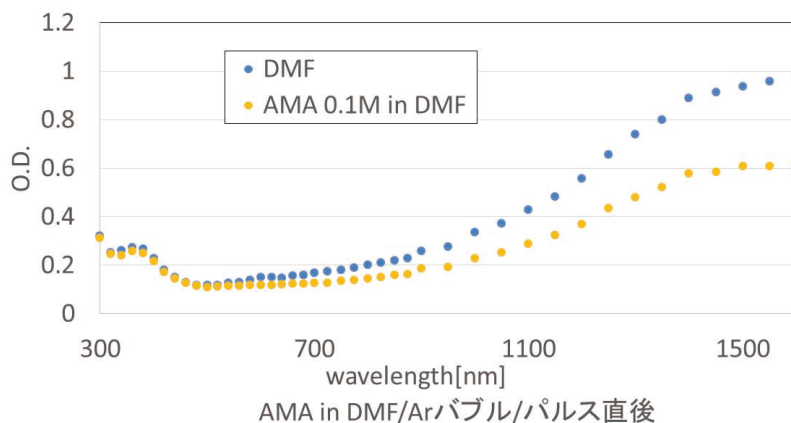


Fig.2 AMA の DMF 中での過渡吸収スペクトル。赤外領域で溶媒和電子との反応が確認できる。

Fig.2 より DMF 中の溶媒和電子が AMA の添加により減少していることがわかる。これにより AMA と電子の反応性が確認された。

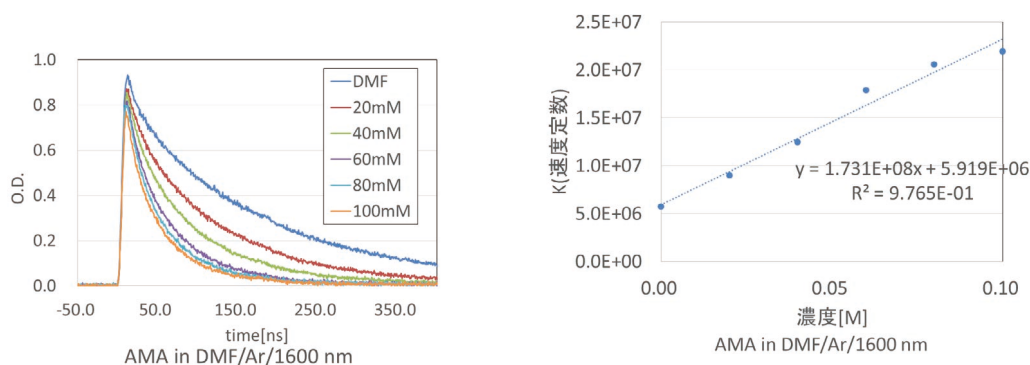


Fig.3 DMF 中での AMA と電子の反応挙動 (左) と反応速度計算 (右)

Fig.3 は DMF 中に生成している電子と AMA の反応挙動の濃度依存性を示したものである。この結果から AMA と電子の反応速度定数を求めると、 $1.73 \times 10^8 \text{ [M}^{-1}\text{s}^{-1}]$ となった。次に溶質を AMA 同様にアクリレート基を有する PMMA に変え電子との反応測定を行ったところ反応速度定数は $1.75 \times 10^8 \text{ [M}^{-1}\text{s}^{-1}]$ であった。このことから、AMA において電子と反応しているのはその分子内に存在するアクリレート基が大きな役割を果たしていることが確認できた。また、ジクロロメタン (DCM) 溶媒中で AMA のラジカルカチオンに対する反応性に関する実験も実施した。また、同条件で溶質を THF に変えたときのスペクトルを確認したところ、双方に類似性が確認された。このことから、AMA においてラジカルカチオンと反応しているのは THF 環であると推論される。

謝辞

なお、AMAポリマーを提供下さった日本触媒株式会社、並びに実験に際し、実験の実施に際し、お世話になりました、阪大産研・吉田教授をはじめとして、実際の装置運転等を行っていただいた阪大産研・近藤先生に、また、過渡吸収測定プログラムを作成いただいた阪大産研・神戸先生に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Kaneko . α -allyloxymethylacrylic acid-based copolymer, resin compositions, and use thereof. US Patent (2013), 8497332 B2.

3. 共同研究者

大島明博（大阪大学・産業科学研究所特任准教授）

坂上和之（高等研・助教）, 遠藤彰（理工研・客員上級研究員）

保坂 勇志（理工研 次席研究員） 田川精一（大阪大学・産業科学研究所特任教授）

伊藤 政幸（理工学研究所・招聘研究員）

三浦 喬晴（理工学研究所・招聘研究員）

佐々木 隆（理工学研究所・招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

“Study on Electron-beam-induced Reactions of Methyl α -Allyloxymethyl Acrylic Polymer”

(Accepted for publication for Journal of Photopolymer Science and Technology, 2018)

Yuji Hosaka, Takafumi Kondoh, Tomoko Gowa Oyama¹, Tomoya Uchida, Mitsumasa Taguchi, Yoichi Yoshida, and Masakazu Washio

4.2 総説・著書

4.3 講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

日本放射線化学会 副会長

日本放射線研究連合（JARR） 副会長
日本アイソトープ協会 理工学部会委員
ラドテック研究会 幹事
RadTech Asia Organization, Vice-president

5. 研究活動の課題と展望

今回の結果から、次世代リソグラフィ技術に資する新しい反応制御について、その原理実証を行うことができ、新しいステップへの展開が期待される。各種産業への新しい実用化技術について一層の支援を期待したい。

プロジェクト研究

電気化学ナノテクノロジーの工学応用

研究代表者 逢坂 哲彌

(ナノ・ライフ創新研究機構 特任研究教授)

1. 研究課題

世界に先駆けて提唱し実践してきた「電気化学ナノテクノロジー」を機軸として、界面反応場を原子・分子界面単一層から設計し、その複合的な機能を発現させるデバイスの構築を図るだけでなく、実用化につながる実践的なデバイス開発研究を包括的に展開している。公的研究プロジェクトである革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM)、戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) 特別重点技術領域「次世代蓄電池」、および RISING2 (NEDO 革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発) 等の研究遂行のための基礎的な共通部分・周辺部分の研究を進める。

2. 主な研究成果

2.1 電界効果型トランジスタ (FET) を用いた食品中のアレルゲン検出

COI STREAM 事業において、2017 年度の研究成果として、FET 界面に固定化した抗体結合性フラグメント (Fab) との相互作用およびターゲットたんぱく質への界面活性剤修飾によるシグナル増幅手法を組み合わせることで FET を用いたそばアレルゲンたんぱく質の高感度検出を達成した。また加工食品中に含まれるそばアレルゲンたんぱく質の検出に向けて、クッキー抽出液中のそばアレルゲンたんぱく質の検出も試み、達成している。

2.2 高エネルギー密度電池の作製

ALCA 事業において、2017 年度は硫黄系正極-リチウム負極からなる全電池の作製および硫黄系正極の最適化を実施した。高エネルギー密度化のためには電解液量の削減が重要であると位置付け、本年度の検討においては有用な電解量/硫黄量の比を見出し、約 200 Wh/kg のエネルギー密度を有し、動作が可能な全電池の作製に成功している。

2.3 高エネルギー密度電池の電気化学インピーダンス (EIS) 解析

RISING2 事業において Spring-8 などの放射光解析施設でのインピーダンスの同時測定の実現に向けて、2017 年度は放射光 operand 測定と並列して電気化学インピーダンス解析可能な矩形波 EIS 測定システムの構築およびインターフェースの開発を行った。図 1 にシステムのプロトタイプを示す。本システムは抵抗およびコンデンサからなるテストボックスにおいて作動することを確認している。

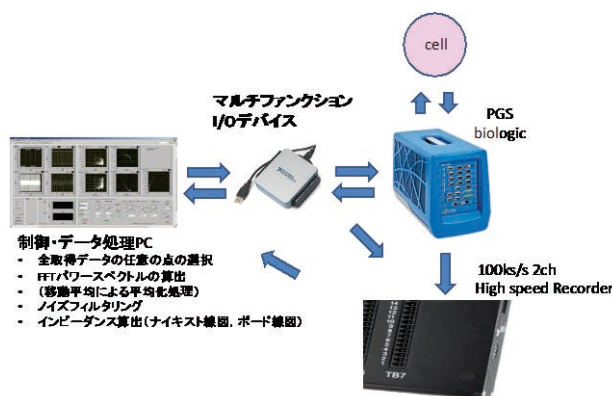


図 1. 矩形波 EIS システムのプロトタイプ

3. 共同研究者

門間 聡之 (先進理工学部・応用化学科 教授)
 大橋 啓之 (ナノ・ライフ創新研究機構・研究院教授)
 横島 時彦 (ナノ・ライフ創新研究機構・研究院教授)
 向山 大吉 (ナノ・ライフ創新研究機構・研究院准教授)
 奈良 洋希 (ナノ・ライフ創新研究機構・研究院准教授)
 秀島 翔 (ナノ・ライフ創新研究機構・研究院講師)

4. 研究業績

4.1. 学術論文

- H. Nara, K. Morita, D. Mukoyama, T. Yokoshima, T. Momma, T. Osaka, “Impedance Analysis of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ Cathodes with Different Secondary-particle Size Distribution in Lithium-ion Battery”, *Electrochimica Acta*, 241, 323-330 (2017).
- T. Yokoshima, D. Mukoyama, H. Nara, S. Maeda, K. Nakazawa, T. Momma, T. Osaka, “Impedance Measurements of Kilowatt-Class Lithium Ion Battery Modules/Cubicles in Energy Storage Systems by Square-Current Electrochemical Impedance Spectroscopy”, *Electrochimica Acta*, 246, 800-811 (2017).
- S. Hideshima, M. Saito, K. Fujita, Y. Harada, M. Tsuna, S. Sekiguchi, S. Kuroiwa, T. Nakanishi, T. Osaka, “Label-free detection of allergens in food via surfactant-induced signal amplification using a field effect transistor-based biosensor”, *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 254, 1011-1016 (2018).

他, 多数

4.2. 総説・著書

- K. Ohashi, S. Kuroiwa, S. Hideshima, T. Nakanishi, T. Osaka, “Review of Physiological Balance Sensing in an Unobtrusive Manner”, *Electronics and Communications in Japan*, 100 (9), 50-55 (2017).

4.3. 招待講演

- T. Osaka, “Device Designing from Electrochemical Nanotechnology - From Materials to

System”, 2017 International Workshop on Electrified Interfaces for Energy Conversions, 2017.05.19.

- T. Momma, Y. Wu, T. Yokoshima, H. Nara, H. mikuriya, T. Osaka, Li-ion Battery using Lithiated Sulfur Cathode Covered with Entrapping Structure of Polysulfides, 10 th International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications 2017.10.25.
- 大橋啓之, “QoW のための疲労センシング”, 人間機械協奏技術コンソーシアム第 3 回公開シンポジウム, 2017.11.7.

他, 多数

4.4. 受賞・表彰

- 逢坂哲彌, 学会賞 一般社団法人エレクトロニクス実装学会, 2017.5.25

4.5. 学会および社会的活動

- H. Nara, T. Yokoshima, T. Noguchi, T. Momma, T. Osaka, “Application of Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate (PEDOT-PSS) to Cathode for Improvement of Charge-discharge Property of Lithium Sulfur Battery”, 2nd Li-SM3 conference, 2017.04.26.
- D. Mukoyama H. Nara T. Yokoshima, T. Momma, T. Osaka, “EIS Analysis of Commercial Lithium-ion Battery for Long-term Charge-discharge Cycling under Various Temperature Conditions”, 68 th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, S01-017, 2017.08.31.
- S. Hideshima, M. saito, Y. Harada, M. Tsuna, S. Kuroiwa, T. Nakanishi, T. Osaka, Development of Semiconductor-Based Biosensor for Detection of Buckwheat Allergenic Protein in Food Products, 232 nd ECS Meeting, 2352, 2017.10.04
- 横島時彦, 向山大吉, 逢坂哲彌, 高澤孝次, 江草 俊, 直井里美, 石倉悟, 山本耕市, “超高速高解像度 X 線スキャナを用いた LIB 内部短絡試験の内部状態 Operando 観察”, 第 58 回電池討論会, 2I01, 2017.11.15

他, 多数

5. 研究活動の課題と展望

本研究課題において, 実用化に資するセンシングデバイスやエネルギーストレージデバイスの開発研究を包括的に進めてきた. COI STREAM 事業において開発している FET バイオセンサについては医療現場だけでなく, 家庭内や食品工場での簡便なアレルギー検出手法としての応用可能性を示してきた. ALCA 事業にて実施している高エネルギー密度電池の作製に関しては, ターゲットである 250 Wh/kg を達成するための設計指針として, 正極に含まれる炭素材料含有量の最適化が有用であると考えられる. RISING2 事業においては本年度に開発した放射光測定と電気化学インピーダンス測定同時可能なシステムを基盤として, 今後の高度解析を推進していく.

バイヨンを中心としたアンコール回廊の調査・研究と 重要遺構の保存修復計画案の策定

研究代表者 小岩 正樹
(創造理工学部 建築学科 准教授)

1. 研究課題

今日のカンボジア領土を中心として巨大な版図を擁したクメール帝国は、寺院建築を中心とした大小様々な無数の地方拠点となる宗教施設と、それらを連絡する幹線道路を通じて、往時の首都であるアンコールを核とした一つの緊密な文化圏を築いていた。しかしながら、こうしたクメール遺跡の中でも、観光地として近年急速な発展を遂げているシェムリアップに一極集中して、観光開発、保存修復事業、学術的関心が寄せられている。



Fig.1 バイヨン寺院正面ファサード

本研究では、こうしたシェムリアップに位置するアンコール遺跡群の中でも、地理的にも歴史的にも一つの極点をなしている王城アンコール・トムの中心寺院バイヨン遺跡の保存修復と調査研究を進め、またこれと並行して、周縁部に広がる重要なクメール遺跡の基礎調査を実施し、アンコール遺跡を回廊状に連結して理解を深め、将来的な文化遺産の長期的、広域的保存修復計画と文化観光整備のマスタープランを策定しようとするものである。

2. 主な研究成果

2-1. バイヨン寺院保存修復・調査研究

バイヨン寺院の東正面ファサード景観整備：第4フェーズの保存修復工事として、バイヨン寺院の正面ファサードの景観整備を目的とした修復工事を継続して行っている。塔55、回廊70、回廊56の整備作業は2016年末までに終了し、一般公開に至った。

2017年度は、回廊70、回廊56の整備作業後の図面記録作業、塔55、回廊70、回廊56周辺散乱石材のデータベース記録を進めた。また次フェーズの対象となっている塔69整備のための準備作業として、塔69周辺への修復現場の移設、塔69周辺の修復前の環境整備、塔69周辺の散乱石材の記録および原位置特定作業を行った後、整備前の記録作業を開始した。



Fig.2 塔69周辺の様子

考古学的発掘調査：これまでクメール文明とバイヨン寺院造成過程の解明を目的に、2007～

2008年に南経蔵と中央塔の発掘調査、2009～2010年及びバイヨン寺院南東外郭部等の発掘調査を行い、2012年以降は、第4フェーズの整備対象となっている塔57及び塔55周辺、東参道テラス周辺、そしてバイヨン南沐浴池及び南東外郭部周辺で発掘調査を進めてきた。2017年度は、これまでの調査成果と出土遺物の整理を継続して進めていった。

中央塔の恒久的保存方法の研究：本研究では、これまで基礎・基壇構造調査（地下探査、考古学的発掘調査、ボーリング調査、電気探査等）、および上部構造調査（振動調査、風洞実験調査等）を主として行ってきた。2017年度は、前年度に引き続き、石材表面の強度の測定、中央塔上層テラスおよび上部構造の目地開きの変状を把握するための3Dスキャナーや写真測量を用いた記録方法の検討を行った。合わせて上層構造の亀裂や気象状況、中央テラス内の含水量の測定等の各種モニタリングも引き続き実施している。また中央塔基礎の強度のメカニズムを理解するため、小規模な試験用盛土を利用して、雨や湿気が版築土の強度に及ぼす影響を研究した。

内回廊浮き彫りの保存方法の研究：バイヨン寺院の長大な浮き彫りは、クメール王国の歴史や庶民の生活などが残された貴重な文化遺産であり、この素材である砂岩の強化が保存のための重要な課題である。これまで、耐候性試験（強化剤投与後の暴露試験と撥水材塗布後の耐候試験）と周辺環境調査、擬岩を用いた修復・補充材の実験等を併行して行ってきた。2017年度は、2・3月、5月、8月及び12月に2007年より実施している新材砂岩を利用した保存材料の暴露試験、そして2013年から開始したバイヨン寺院内での試験的な撥水剤・強化剤塗布の経過観察を継続して実施した。同時期に微生物、地衣類、コウモリの糞等バスレーフの劣化要因を探るための各種サンプリング、劣化箇所の塩類を特定するためのサンプリング、3D測量技術を応用した岩石表面の劣化状況のモニタリング、通常のクリーニングでは除去しにくい地衣類にも有効なクリーニング方法の検討も引き続き行った。また環境調査の一環として大気中の汚染物質の調査も実施した。

加えて本年度からは内回廊浅浮き彫りの保存方法を確定するため、バイヨン内回廊塔42東付属回廊で施工試験を開始した。本年度は施工試験前の施工対象箇所周辺のクリーニング、処置前の事前調査、屋根充填試験を行った。

ナーガ像・シンハ像の修復工事：2012年8月より、バイヨン寺院の景観改善のために日本ユネスコ協会連盟と共同（JASAは技術協力）で、バイヨン寺院外回廊及び正面参道テラスの崩壊・損傷しているナーガ・シンハ像の修復および原位置への設置を行うプロジェクトを行っている。2017年度は、正面参道テラス周辺の彫像及び欄干等の修復・再設置作業の後、塔69と回廊68、その他外回廊北側西翼の危険箇所にて修復前のナーガ・シンハ像及び欄干の記録作業

を行った。その後、JASAの修復作業の進捗状況を鑑みて、回廊68より順次西へ向かいながら外回廊北側のナーガ・シンハ像及び欄干の修復作業を進めていった。



Fig. 3 クリーニングの様子



Fig. 4 ナーガ修復の様子

パイヨン寺院本尊仏再安置計画：パイヨン寺院中央にかつての本尊仏（オリジナル）を再安置し、併せて、原寸大レプリカを制作する事業である。2011 年 12 月よりレプリカ制作のための準備を開始した。2017 年度は、2017 年 11 月、2018 年 2・3 月、合計 2 回、仏像彫刻の日本人専門家に現場での直接指導を依頼し、カンボジア人作業員が 3 人体制でレプリカの制作に当たり、順次彫り出し作業を進めている。

2-2. 地方のクメール遺跡における基礎調査

2012 年度より開始された科研費・基盤研究 A（海外）『クメール帝国の空間構造と地方拠点都市遺跡に関する研究』（研究代表：溝口明則）は、2010 年度までのクメール建築の地方拠点に関する基礎調査研究の継続であり、コー・ケー、ベン・メアレア調査を



Fig. 5 レプリカ模刻作業

主とした前回の研究から対象地域を広げ、コンボン・スヴァイのプレア・カーン、タイ国境に近いバンテアイ・チュマール、プレア・ヴィヘア等において記録作業を行い、保存修復のための基礎資料の作成とともに、クメール帝国の発展の基幹を成した空間構造の解明を目的としている。2017 年度は、大プレア・カーン欠損及び埋没による不明部分の検証を行うため、同時期に建造されたアンコール遺跡群内の寺院において対応する箇所形状の比較調査を行った。また、関西大学との共同調査で 8 月にプレア・ヴィヘアにおいて地盤・基礎構造調査を行った。

2-3. シェムリアップ歴史地区の近代文化遺産の保存活用

現地アプサラ機構からの依頼を受けて、2013 年 3 月のシェムリアップ歴史地区の事前調査を皮切りに、世界遺産アンコール遺跡に隣接するシェムリアップ市街地内のオールド・マーケット周辺の近代遺産の持続可能な保存と利活用を目的に、早稲田大学建築学科や日本学術振興会の助成を受けて実施した。2017 年度は 2017 年 8 月にシェムリアップ内の古建造物の実測及び聞き取り調査、防火に関する調査並びにオールドマーケット周辺の住民の方と共に防火に関するワークショップを行った。2018 年 1-2 月にかけて、オールドマーケット周辺の防災に関する JICA 草の根協力に向けたミーティングを現地行政機関、地域住民の方と行った。



Fig. 6 シェムリアップ歴史地区の街並み

3. 共同研究者

中川 武（名誉教授）

新谷 真人（名誉教授）

長谷見 雄二（創造理工学部・建築学科・教授）

内田 悦生（創造理工学部・環境資源工学科・教授）

溝口 明則（理工学研究所・研究院客員教授）

山本 信夫（理工学研究所・研究院客員准教授）

赤澤 泰（理工学研究所・客員次席研究員）

齋藤 潮美（理工学研究所・客員主任研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

溝口明則，中川武，小岩正樹，石塚充雅，黒岩千尋「クメール寺院の石造壁と木造架構の接続技法」，日本建築学会計画系論文集 741，pp.2969-2978，2017.11

4.2 総説・著書

Takeshi NAKAGAWA (ed.), Project for Siem Reap/Angkor-Base Town of the World Heritage Site-, Institute of UNESCO World Heritage, Waseda University, January 2018.

4.3 招待講演

中川武「アジアの古代建築と調和思想」，日本建築学会関東支部栃木支所，宇都宮（日本），2017.11.12

4.4 受賞・表彰

該当無し

4.5 学会および社会的活動

高橋泉美，中川武，溝口明則，小岩正樹，石塚充雅，黒岩千尋「コンボン・スヴァイのプレア・カーン寺院 第 1 回廊における形状の復元的考察 カンボジア コンボン・スヴァイのプレア・カーン寺院に関する研究(2)」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.837-838，2017.07

成井至，中川武，溝口明則，小岩正樹，石塚充雅，黒岩千尋「アンコール期大型寺院における列柱回廊の計画方法の分析 カンボジア コンボン・スヴァイのプレア・カーン寺院に関する研究(3)」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，839-840，2017.07

宮崎瑤希，中川武，溝口明則，小岩正樹「NeakPean の寸法計画とその配置計画の比較考察」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.841-842，2017.07

金子達哉，中川武，溝口明則，小岩正樹，黒岩千尋「ペディメント装飾形式の時代変遷 クメール建築における屋根発展の考察」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.843-844，2017.07

尾上千尋，中川武，小岩正樹，黒岩千尋「シェムリアップ中心市街地周辺の近代建築と街の変遷に関する考察 カンボジア・シェムリアップ市街地における近代都市建築に関する研究 その 6」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.845-846，2017.07

中川武「フエ伝統的上流住宅「延福長公主祠」の保存修復工事の概要とキムロン地区の保全 ヴィエトナム・フエ阮朝王宮の復元的研究（その 198）」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.849-850，2017.07

林英昭，中川武「ベトナム・トゥアティエン・フエ省のディンの現況 ヴィエトナム・フエ阮朝王宮の復元的研究（その 199）」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.851-852，2017.07

木谷建太，中川武「阮朝建築の営繕に関する官吏と工匠 ヴィエトナム・フエ阮朝王宮の復元的研究 その 200」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.853-854，2017.07

六反田千恵，中川武「重梁彫刻絵様の基本構成 2 ヴィエトナム・フエ阮朝王宮の復元的研究 その 201」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.855-856，2017.07

齋藤潮美，中川武「午門・五鳳樓正樓初層柱の飾技術 ヴィエトナム・フエ阮朝王宮の復元的研究 その 202」，日本建築学会学術講演梗概集 2017，pp.857-858，2017.07

Takeshi NAKAGAWA, Research on the Ancient Architectural and City Ruins of Phnom

Kulen and Quarries in the Surrounding Area, 17th Conference of the Science Council of Asia, Manila (Philippines), June14-16, 2017

Chihiro KUROIWA, HistoricalFormative Process and Present Subjects of Siem Reap Central Area, 17th Conference of the Science Council of Asia, Manila (Philippines), June14-16, 2017

Takeshi NAKAGAWA, SOEUR Sothy, Technical Issues of Phase V of the Bayon Project, International Coordinating Committee for the Safeguarding and Development of the Historic Site of Angkor (ICC-Angkor, 28th Technical Session), Siem Reap (Cambodia), June 21, 2017

Takeshi NAKAGAWA, Yoshinori IWASAKI, Toshiya MATSUI, The Bayon: Follow-up on recommendation 28TS.11, International Coordinating Committee for the Safeguarding and Development of the Historic Site of Angkor (ICC-Angkor, 29th Technical Session), Siem Reap (Cambodia), December 13, 2017

Takeshi NAKAGAWA, Phase V of JASA project, International Coordinating Committee for the Safeguarding and Development of the Historic Site of Angkor (ICC-Angkor, 24th Plenary Session), Siem Reap (Cambodia), December 14, 2017

5. 研究活動の課題と展望

2017年度はバイヨン保存修復事業の第4フェーズ最終年度(事業第5年次)が完了を受けて、それらの成果のまとめを行うとともに、第5次フェーズ開始のための準備期間でもあった。このことから、2018年度は、第5フェーズ開始とともに本格的に各プロジェクトを進めていく計画である。特に、「中央塔の恒久的保存方法の研究」と「内回廊浮き彫りの保存方法の研究」においては、実施体制確立へ向けた第一段階として、基本計画策定に耐えうるだけの十分なデータの収集とその評価を行うために、多方面からの専門家の協力を得て事業を推進していく予定である。

また、日本学術振興会の研究拠点形成事業（B. アジア・アフリカ学術基盤形成型）の「メコン川流域国における文化遺産の保存活用学形成」では、2018年度が最終年度となることから、ワークショップ・セミナーをミャンマーで開催し、これまでの約6年間の交流活動の統括を行い、メコン流域国5ヶ国（カンボジア、ベトナム、ラオス、タイ、ミャンマー）のより自発的な交流と定例会議制度のあり方、そして核となる文化遺産の保存活用について、メコン流域国のみならず中国などの周辺国の研究者とも積極的に協議し、学術研究のネットワークをより確固なものとすることを目指す。さらに、「地方のクメール遺跡における基礎調査」やこれまでの各方面の研究成果の集約及び報告書出版を踏まえて、より総合的な文化遺産の保存活用のための人と情報のネットワーク構築のための計画を策定することに継続して取り組んでいく予定である。

スマートプラントの制御・管理に関する研究

Control and Management of Smart Plant

研究代表者 天野 嘉春
(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 研究課題

プロセス工業界ではプラントのスマート化のため、各種センサー、アクチュエータなどで構成するフィールドにおける制御系には従来、アナログ信号を用いてきた。これがデジタル信号へと代替が進んでいる。アナログ信号による制御系では、長距離信号ケーブルでの電圧降下による信号劣化や電磁ノイズの重量による外乱に起因した制御成績の劣化などの課題解決が要請されていた。制御信号のデジタル通信規格への正確なプロセスデータがもたらされることで、製品品質の向上に寄与することが確認されている。また、Industrial Internet of Things (IIoT) として注目される技術として、フィールドに設置した制御デバイスから送信される情報以外に、各種センサー信号を、プラント外からも IoT 関連技術を利用して利用できるような状況が整いつつある。プラントからの制御信号以外の様々な情報を統合して保存し、AI を利用した上位解析・判断システムによる新たなシステムマネジメントに関わる具体的なアプリケーションのあり方、可能性が活発に議論されている。

一方で、スマートグリッドによる電力網の改革では、末端の需要家に太陽電池などの分散電源の導入が急速に進展している。このため系統側から需要情報をプロシューマーとしての需要家にフィードバックすることによる需要バランス調整機能や系統安定化のための協調制御技術への、需要側の積極的で確度の高い関与の仕組みを明らかにすることが期待されている。たとえば家庭内のエネルギー機器の協調制御のための具的な枠組みは HEMS を中核としたマネジメントシステムの実装要件として、研究代表者等は別途研究を進めている。

以上の状況のもと、本研究では、スマートグリッドおよびファクトリーオートメーション分野での実装技術などと並列的に比較し、プロセスオートメーション用プラントのスマート化に欠かせないマネジメントシステムに適用する通信要件を明らかにする。具体的にはエネルギー制御系を含むプラントのエネルギーマネジメント機能を再定義し、複雑なエネルギーシステムのマネジメントシステムに適した CPS (Cyber Physical System) を提案することを最終目標とする。

スマートグリッドによる電力網の改革では、需給情報を需要家にフィードバックすることによる需給バランス調整機能や系統安定化のための協調制御技術の開発が進んでいる。しかし、

たとえば家庭内のエネルギー機器の協調制御のための具体的な枠組みは HEMS (Home Energy Management System) を中核とした漠たる概念が提示されているにとどまっている。

以上のような状況を踏まえ、プロセスオートメーション分野の企業、NP0 などとの協力のもと、IONL (Industrial Open Network Lab) として、本プロジェクト研究では以下の 3 点を明らかにすることを目的とした。

(1) 既に開発が先行し実績のあるプロセス制御用通信規格を対象に、異種の通信規格機器の相互運用性試験を実施し、主にユーザーのためのシステムの制御・設計の技術的課題を抽出し、ユーザー視点に立った評価を行う。その結果を、各通信規格を相互接続するための新たな技術的提言として関連箇所にフィードバックすることで、真にオープンなプロセス制御用通信規格を提案する。

(2) 特定のスマートデバイス (高精度流量計) の診断技術の開発を行い、デバイス側からの通信する情報の要求仕様を明らかにする。

(3) 民生用エネルギーシステムの協調制御のための、最適計画方法手法、全体統合のための概念検討、そして、そこで必要とされる要求仕様を明らかにする。

2. 主な研究成果

2.1 I0-Link セクションの設置

2017 年度からは、プロフィバス協会のもとに設置されている I0-Link コミュニティージャパンとの連携を開始した。IONL の I0-Link セクションとしての活動は、日本フィールドコムグループとの共催で実施している技術セミナーのシリーズの一つとして、実施している。現場の(比較的価格の安い)機器においてもデジタルネットワークに接続し、測定値、操作値だけでなく、パラメータデータ、診断データ、そしてイベントの通信可能にする技術である

2.2 スマートデバイス開発

スマートデバイスの開発成果として 1 件、国内学会にて発表⁽¹⁾した。

2.3 技術セミナー

本プロジェクト研究を運営する産業用オープンネットワークラボ (IONL, 天野研) は、国際規格 (IEC) 対応フィールドバスの技術発展と普及のために、NP0 法人日本フィールドコムグループとの共催で FOUNDATION フィールドバス技術および HART 通信技術の技術セミナーを企画し、年 4 回程度のセミナーを実施している。2017 年度からは、I0-Link の技術紹介も同シリーズの一つとして開始 (理工総研 第 3 種行事として) した。

FCG セクション: 第 1 回 2017 年 6 月 5 日, 6 日, 第 2 回 2017 年 9 月 4 日, 5 日 第 3 回 2017 年 12 月 14 日, 15 日, 第 4 回 2018 年 3 月 5 日, 6 日

2 日コース参加者人数合計: 29 人

会場: 早稲田大学喜久井町キャンパス 41-3 号館 赤煉瓦棟会議室

I0-Link セクション: 第 1 回 2017 年 6 月 7 日, 第 2 回 7 月 12 日, 第 3 回 8 月 2 日, 第 4 回 9 月 13 日, 第 5 回 10 月 11 日, 第 6 回 11 月 8 日, 第 7 回 12 月 13 日, 第 8 回 2018 年 1 月 17 日, 第 9 回 2 月 14 日, 半日コース参加者人数合計: 66 人

会場: 早稲田大学喜久井町キャンパス 41-3 号館 赤煉瓦棟会議室, 41-3 号館 101B 室

3. 共同研究者

吉田彬（基幹理工学部 助教），森岡 義嗣（招聘研究員），池田 卓史（嘱託），梅原 篤樹（嘱託），込堂 雅幸（嘱託），津金 宏行（嘱託），高橋誠一郎（嘱託），中川慎也（嘱託），小川修一（嘱託），元吉伸一（嘱託），小林季子（嘱託），竹下恵介（嘱託）

4. 研究業績

4.1 学術論文

宋謙一，天野嘉春，伊藤来，小山弘，大槻真也，コリオリ質量流量計における被測定流体の粘度が流量測定に与える影響の分析，SICE2017 年度産業応用部門大会 流体計測制御シンポジウム

4.2 総説・著書

(1) 天野嘉春，産業用オープンネットワーク・ラボラトリー（IONL）の活動概要と今後への期待，計装，2017 年 8 月号，工業技術社.

(2) 笹嶋 久，津金 宏行，"プラント設備管理とフィールドコム技術"，第 48 回 ICEC 2017(The Instrument & Control Engineering Conference) 2017 計装制御技術会議，2017/10/13，東京.

(3) 元吉伸一，産業用デジタル通信の変遷と将来展望，計測と制御，57(1)，2018/1，pp.24-28.

4.3 学会および社会的活動

技術セミナー（理工研第 3 種行事）；FCG セクション

森岡義嗣ほか：第 1 回 2017 年 6 月 5 日，6 日，第 2 回 2017 年 9 月 4 日，5 日第 3 回 2017 年 12 月 14 日，15 日，第 4 回 2018 年 3 月 5 日，6 日，2 日コース参加者人数合計：29 人
同上；IO-Link セクション

元吉伸一ほか：第 1 回 2017 年 6 月 7 日，第 2 回 7 月 12 日，第 3 回 8 月 2 日，第 4 回 9 月 13 日，第 5 回 10 月 11 日，第 6 回 11 月 8 日，第 7 回 12 月 13 日，第 8 回 2018 年 1 月 17 日，第 9 回 2 月 14 日，半日コース参加者人数合計：66 人

会場：早稲田大学喜久井町キャンパス 41-3 号館 赤煉瓦棟会議室，41-3 号館 101B 室，早稲田大学，2017.

(2) フィールド通信技術ユーザーセミナー 2018（理工研第 2 種行事），早稲田大学，2018/3/9，参加者数：100 名.

5. 研究活動の課題と展望

Industrial Internet of Things (IIoT) の様々な業種への展開が活発に図られていることを受け，プロセスオートメーション分野における IIoT 推進のための基盤技術としてのフィールドバス技術の発展に寄与していきたい. 2017 年度と同様に技術者教育については継続的に取り組むが，HART 通信規格に加え，IO-Link センサ通信規格まで対象を拡張し，幅広い通信規格への統合効果を追求し，さらなるユースケースの収集を図る.

確率場による高次元データ解析

研究代表者 石川 博
(基幹理工学部 情報理工学科 教授)

1. 研究課題

画像や音声データのように物理世界をセンシングして得られる高次元実データから意味情報を引き出すことは長年の努力を跳ね返してきたが、例えば画像中の物体や状況などを人間のように認識させることは、ロボットの能力向上に不可欠で、介護などの労働力不足が予想される日本における社会的必要性の高い技術である。本プロジェクトでは、高階・多層確率場を主な道具として、既存の情報技術で実現困難な「認識」という現象の数学的モデルを構築することをめざしている。そのための研究項目として、トップダウン認識モデルによる確率場の動的生成、確率場最適化の高度化と応用実用化、多層モデルが高性能を示す原因の解明、高階・多層モデルの関係の検討などがある。

2. 主な研究成果

深層学習により画像の欠損部分を補完するアルゴリズム(図 1)を開発し、ACM SIGGRAPH2017で発表した。(Iizuka, Simo-Serra, and Ishikawa, ACM ToG (Proc. SIGGRAPH2017))。これは、写真の一部が欠損しているときに、CNN を用いて情景の大域的かつ局所的な整合性を考慮した画像補完を行う。この CNN は大きく分けて 3 部分からなる。補完ネットワークは任意のサイズの画像における自由な形状の欠損を補完し、大域および局所識別ネットワークは本物の画像と補完された画像を識別し、補完ネットワークに情景の整合性を考慮した画像補完を学習させる。大域識別ネットワークは画像全体が自然な画像になっているかどうかを評価し、局所識別ネットワークは補完領域周辺のより詳細な整合性によって画像を評価する。この両方に補完した画像を本物だと識別させる、つまり「だます」ように補完ネットワークを学習させることで、情景全体で整合性が取れており、局所的にも自然な補完画像を出力することができる。一方で 2 つの識別ネットワークもまた同時に、補完ネットワークに「だまされない」ように学習させる。これにより、様々な情景において自然な画像補完が可能となり、さらに従来のパッチベースの手法ではできなかった、入力画像に写っていないテクスチャや物体を新たに生成することもできる、人間の顔の一部を補完するなどの複雑な画像補完を実現した。

また、ラフスケッチの自動線画化を効果的に学習するための統合的なフレームワークにおいて、教師データのない入力画像のみを教師なし学習することで、入力画像に対する線画化ネットワークの最適化を行う、「敵対的データ拡張」の手法を開発した。これにより、教師付学習のみの場合に比べて、学習データの必要性を削減できる。

3. 共同研究者

望月義彦 (情報理工学科・助教)

飯塚 里志（基幹理工学研究科・次席研究員）
シモセラ エドガー（基幹理工学研究科・次席研究員）
小山田 雄仁（鳥取大学 助教）
杉本 晃宏（国立情報学研究所 教授）
北村 嘉郎（富士フイルム）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] Ryutaro Kitagawa, Yoshihiko Mochizuki, Satoshi Iizuka, Edgar Simo-Serra, Hiroshi Matsuki, Naotake Natori, and Hiroshi Ishikawa (2017), “Banknote Portrait Detection Using Convolutional Neural Network”, Proc. Fifteenth IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2017).
- [2] Masahiro Masuda, Yoshihiko Mochizuki, and Hiroshi Ishikawa (2017), “Unsupervised Video Object Segmentation by Supertrajectory Labeling”, Proc. Fifteenth IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2017).
- [3] Toshiya Takaoka, Yoshihiko Mochizuki, and Hiroshi Ishikawa (2017), “Multiple-organ Segmentation by Graph Cuts with Supervoxel Nodes”, Proc. Fifteenth IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2017).
- [4] Kazuma Sasaki, Satoshi Iizuka, Edgar Simo-Serra, and Hiroshi Ishikawa (2017), “Joint Gap Detection and Inpainting of Line Drawings”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2017).
- [5] Satoshi Iizuka, Edgar Simo-Serra, and Hiroshi Ishikawa (2017), “Globally and Locally Consistent Image Completion”, ACM Transactions on Graphics (Proc. Of SIGGRAPH2017), August 2017.
- [6] Kazuma Sasaki, Yuya Nagahama, Zheng Ze, Satoshi Iizuka, Edgar Simo-Serra, Yoshihiko Mochizuki, and Hiroshi Ishikawa, "Adaptive Energy Selection for Content-Aware Image Resizing", The 4th Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR 2017).
- [7] Naoto Inoue, Edgar Simo-Serra, Toshihiko Yamasaki and Hiroshi Ishikawa, "Multi-Label Fashion Image Classification with Minimal Human Supervision," Proceedings of the Computer Vision for Fashion Workshop at the International Conference on Computer Vision (CVF-ICCV2017).
- [8] Moeko Takagi, Edgar Simo-Serra, Satoshi Iizuka and Hiroshi Ishikawa, "What Makes a Style: Experimental Analysis of Fashion Prediction," Proceedings of the Computer Vision for Fashion Workshop at the International Conference on Computer Vision (CVF-ICCV2017).
- [9] Edgar Simo-Serra, Satoshi Iizuka, and Hiroshi Ishikawa, "Mastering Sketching: Adversarial Augmentation for Structured Prediction," ACM Transactions on Graphics, Volume 37, Issue 1, Article 11, January 2018.
- [10] 北村嘉郎, 石川博, "高階エネルギー最小化による医用画像セグメンテーション", 電子情報通信学会 和文論文誌 D, Vol.J101-D, No.1, Jan. 2018.

4.2 総説・著書

石川 博, 「人工知能で白黒写真をカラーに」, 画像ラボ, 2017 年 10 月号.

4.3 招待講演

石川、飯塚、シモセラ「ディープラーニングによる画像生成」第 42 回光学シンポジウム, 東京大学, 2017 年 6 月 21 日

飯塚「Globally and Locally Consistent Image Completion」, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017, 一橋講堂, 2017 年 6 月 24 日

石川、飯塚、シモセラ “Frontiers of Image Processing and Computer Graphics by Deep Learning”, Computer Graphics International (CGI2017), 慶應義塾大学, 2017 年 6 月 27 日

石川 “Rules and Models versus Data and Machine Learning in Graphics and Vision” (Panel Discussion), Computer Graphics International (CGI2017), 慶應義塾大学, 2017 年 6 月 29 日

石川 「□えるものは頭で作られる：視覚による空間認識の数理モデル」, 文部科学省 数学連携ワークショップ「数学だからできる現実世界を超えた「メタ」現実の可能性」, 山形大学, 2017 年 9 月 12 日

飯塚「深層学習の画像処理・生成への応用」, 情報処理学会 第 208 回コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM)研究会, 東京大学, 2017 年 9 月 15 日

シモセラ「深層学習による画像変換」, 情報処理学会 第 208 回コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM)研究会, 東京大学, 2017 年 9 月 15 日

シモセラ “Leveraging the Web for Fashion and Image Understanding”, Workshop on E-Commerce and Entertainment Computing (ECEC), つくば国際会議場, 2017 年 9 月 18 日

石川「視覚の数理モデルと構造付き予測問題」, 東北大学情報科学研究科 重点プロジェクト第 17 回講演会 兼 第 64 回応用数学連携フォーラム, 東北大学, 2017 年 10 月 11 日

飯塚「ディープラーニングの基礎と導入に向けて」, 平成 29 年度次世代放射線治療計画技術開発 AI 編 (ベーシック), 国立がん研究センター東病院, 2017 年 10 月 12 日

シモセラ “Exploiting the Web to Understand Fashion”, ICCV2017 Computer Vision for Fashion Workshop, Venice Convention Center, 2017 年 10 月 29 日

飯塚「ディープラーニングによる画像変換」, 第 20 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2017), 東京大学, 2017 年 11 月 10 日

石川「深層学習による画像変換について」, 第 7 回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム (SBRA2017), 産業技術総合研究所臨海副都心センター, 2017 年 11 月 13 日

シモセラ「ディープネットワークを用いた白黒写真の自動色付け」, 3D フォーラム第 122 回研究会, 機械振興会館, 2018 年 1 月 24 日

シモセラ「ディープネットワークを用いた画像変換」, 第 69 回 Stereo Club Tokyo 例会【春】+先進映像表現研究会, 早稲田大学, 2018 年 3 月 3 日

飯塚「深層学習が変える画像処理・変換」, 第 80 回情報処理学会全国大会, 早稲田大学, 2018 年 3 月 15 日

シモセラ「深層学習の基礎と導入に向けて」, 電子情報通信学会総合大会, 東京電機大学, 2018 年 3 月 20 日

シモセラ “Semi-Supervised Learning of Sketch Simplification”, The Deep Learning

Workshop 2018, 理研 AIP, 2018 年 3 月 22 日

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

General Chair, IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA2017).

Associate Editor in Chief, IPSJ Transactions on Computer Vision Applications.

Editorial Board Member, International Journal of Computer Vision.

幹事, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究運営委員会

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトの最終目標は、高階・多層確率場を主な道具として、既存の情報技術で実現困難な「認識」という現象の数学的モデルを構築することである。これらの目標へ向けて、引き続きディープラーニングモデルに内在する対称性とトップダウン認識モデルとの関連を考察し、CNN を一般化した多層モデルの動的生成を試行する。

- ・エネルギー最小化による 3 次元復元アルゴリズムの開発
- ・多層モデルのより少ない教師データによる効率的学習方法の模索
- ・多層モデルのグラフィクスへの応用

再生可能エネルギー有効活用のための次世代エネルギーネットワークの調査 研究

Advanced Energy Network for practical applications of Renewable energy

研究代表者 中垣 隆雄
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

我が国では、2011年3月に発生した東日本大地震により、脆くも原子力及び火力発電設備が損壊し、供給力不足が発生した。このような大規模な電力不足を経験したことにより、家庭、事務所、工場、地方自治体は、電力会社に全面依存しない自前の電源を確保しておくことの必要性を痛感した。その際、地産地消の太陽光や風力発電等の再生可能エネルギーを導入すると、その発電出力の変動が電力ネットワークに影響を与え、電力品質（周波数、電圧）を悪化させることが懸念されるため、新たな電力供給社会インフラの考え方が必要となる。本研究では、実用化レベルに達してきた再生可能エネルギー発電とエネルギー貯蔵システムを活用するための、次世代送配電ネットワーク及び熱エネルギーネットワークへの実運用可能性および有効性の検証を行うことを目的とする。特に、再生可能エネルギー有効活用のためのグリッド構成やネットワーク技術に関して、汎用的な動特性解析のためのモデルとデータベースの構築を進める。前段の調査では、各種再生可能エネルギーの特性、用途事例、制御方法、運用方式、およびシミュレーション手法など現状と開発課題を明らかにする。また、電力システム改革が着手される中、これらの技術が適応される事業の変化をとらえ、それぞれの事業面からの有用性、さらには環境負荷低減効果などの分析を行い、社会インフラの提言を行う。

2. 主な研究成果

本年度は、上記課題で記載した「再生可能エネルギー有効活用のためのグリッド構成やネットワーク技術」に関して、昨年引き続き、最適化技術を適用した「風力発電向け新設送電線の構築」技術を構築した。さらに、送電線投資に関する経済的な課題を検討するためのモデル開発を行なった。具体的には、

- ・ ウィンドファーム設置に関する既存変電所毎の領域最適化技術
- ・ 風力大量導入のための地域間連系線運用計画技術
- ・ 風力発電出力予測及び対策としての蓄電池最適配置技術

などの手法に焦点を当てて研究を実施した。

また、地図情報の活用を考慮した計画手法のフレームワーク構築を開始し、東南アジア圏の研究者との交流を行い、研究プロジェクト e-Asia スキームを立上げ、プロジェクトを開始した。

3. 共同研究者

- 紙屋 雄史（理工学術院 環境・エネルギー研究科 教授）
中西 要祐（理工学術院 環境・エネルギー研究科 特任教授）
伊庭 健二（理工学術院 環境・エネルギー研究科 客員上級研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文（査読付論文）

- Nguyen Hong Nhung, Y. Nakanishi, “Stochastic Unit Commitment Considering Markov Process of Wind Power Forecast, International Conference on Renewable Energy Research and Applications”, ICRERA-2017, San Diego, USA, 2017-11
- Nguyen Hong Nhung, Y. Nakanishi, “Stochastic Dynamic Power Flow Analysis Based on Stochastic Response Surface Method and ARMA-GARCH Model”, 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT 2017 North American, Washington DC, USA) 2017-4

4.2 ワークショップ、招待講演

- 早稲田大学にて韓国 KETEP（経産省）とのワークショップ開催（2017 年 12 月 21 日）
早稲田大学にて慶尚大学とのワークショップ開催（2017 年 8 月 28 日）
早稲田大学にてケンブリッジ大学とのワークショップ開催（2017 年 7 月 5 日）
高麗大学にて講義（2017 年 6 月 21 日）
中国地質大学にて講義（2017 年 5 月 3 日）

4.3 学会および社会的活動

- 電気学会全国大会
 - ✓ 三宅 修平、馬郡 英樹、中西 要祐、岩村 一昭、「バッドデータ検出と M-estimator に基づくマルチエリアにおける電力状態推定」平成 30 年電気学会全国大会 6-090、2018/3/5
 - ✓ 西山 航平、小林 良、岩村 一昭、中西 要祐、「送電網建設を考慮したウィンドファーム設置領域最適化手法の開発」平成 30 年電気学会全国大会 6-103、2018/3/5
 - ✓ 森元 雄介、田中 哲人、岩村 一昭、高森 寛、中西 要祐、「拡張型マイクログリッドクラスターにおける送電混雑時の送電運用および託送料金の分析」平成 30 年電気学会全国大会 6-150、2018/3/5
 - ✓ 茂木 文哉、伊庭 健二、中西 要祐、「風力発電の出力平準化のための蓄電池配置個所の検討」平成 30 年電気学会全国大会 6-267、2018/3/5
- タイ合同シンポジウム
 - ✓ Shuhei Miyake, Hideki Magori, Yosuke Nakanishi, Kazuaki Iwamura, “Multi-area State Estimation based on Detection of Bad Data and Analysis using M-estimator”, TJS – 18– 8, Thailand, 2018-3
 - ✓ Kohei Nishiyama, Kazuaki Iwamura, Yosuke Nakanishi, “Optimal Allocation Method for Introduction of a Large Amount of Wind Farms and Substations in Wind Farms”, TJS – 18– 10, Thailand, 2018-3
 - ✓ Yusuke Morimoto, Akito Tanaka, Hiroshi Takamori, Yosuke Nakanishi, “Study on Transmission

Pricing Method for Congested Transmission Line due to Large Penetration of Renewable Energy”, TJS – 18– 11, Thailand, 2018-3

- ✓ Hong Nhung Nguyen, Yosuke Nakanishi, “Unit Commitment considering Frequency Dynamic Constraint and Wind Power Forecast Uncertainties”, TJS – 18– 16, Thailand, 2018-3
- ✓ Duc Huy Nguyen, Hong Nhung Nguyen, Yosuke Nakanishi, “Development of Small Signal Stability Model for Power Systems considering the Network Transients”, TJS – 18– 15, Thailand, 2018-3

➤ 電気学会電力・エネルギー部門大会

- ✓ 小林良, 岩村一昭, 伊庭健二, 中西要祐, 「風力発電向け送電線計画を目的としたクラスタリング手法の適用と評価」, 電気学会 B 部門大会, 9. 2017
- ✓ 佐藤友紀, 高野幸雄, 中西要祐, 「蓄電池モデルの単独運転に関する系統保護対策の検討」, 電気学会 B 部門大会, 9. 2017
- ✓ 田中哲人, 森元雄介, 小林 良, 高森 寛, 中西要祐, 「再生可能エネルギーの大量導入を考慮した地域間連系線の運用計画の検討」, 電気学会 B 部門大会, 9. 2017

➤ 電気学会調査専門委員会

- ・電気学会「風力発電大量導入時の系統計画・運用・制御技術調査専門委員会」委員長として、学会活動中
- ・電気学会「電力系統解析技術の歴史調査専門委員会」委員として、学会活動終了

4.4 海外教授・学生の短期留学研究室受入れ

中国地質大学訪問学生（3ヶ月）受入（2017年8月より）
 ハノイ工科大学訪問学者（2ヶ月）受入（2017年8月より）
 中国地質大学訪問学生（3ヶ月）受入（2017年8月より）

4.5 講演会開催

電力技術懇談会講演会 （2018年3月12日）
 日韓シンポジウム （2017年11月10日）
 電力技術懇談会講演会 （2017年9月25日）
 電力技術懇談会講演会 （2017年7月12日）
 電力技術懇談会講演会 （2017年5月26日）

5. 研究活動の課題と展望

本研究で構築された風力発電のような地域再生可能エネルギーの送電・運用解析に必要となる土地状況、風力発電容量、送電線配置などの情報を地図上で統合管理する地理情報データベースの基本整備を行った。これらの技術に基づいて、需要状況を加味しながら再生可能エネルギー導入に必要な送電ネットワークの構築に向けて、完備された基幹系統と異なる東南アジアでの環境調査、情報収集の方策を立案するための、総合的なツールを開発することは、非常に有意義な研究であり、次へのステップとして、e-Asia プロジェクトと呼ばれる各国との協同研究を開始し、各種関連研究を推進する予定である。

ナノサイズ Ag 粒子を用いた次世代 SiC パワーモジュールの生産技術開発

研究代表者 吉田 誠
(創造理工学部 総合機械学科 教授)

1. 研究課題

本研究では、SiC パワーモジュールにおけるエポキシ樹脂でモールドイングされたモジュールと冷却器間の接合を目指している。その際、低温接合 (200℃以下)、低加圧接合 (0.1MPa 以下)、メッキレス、フラックスレスを全て満たす接合条件が求められている。本研究では、前述の接合条件を満たすような接合技術としてナノサイズ Ag 粒子金属による接合技術に着目している。前年度、Ag ナノ粒子に Sn-Bi 粉末を添加し、ギ酸雰囲気下で Cu-Cu 接合を行い、前述の接合条件を満たすような接合プロセス条件を見出した。当初、小面積で接合実験を行い、その結果としては関連産業が定めたせん断強度を達成し、さらに、米国軍事規格 (MIL-STD-883K) もクリアした。本年度は、実際のモジュールを冷却器に接合することを目的とした大面積接合に着目しており、その接合手法の検討を行った。

2. 主な研究成果

本研究で目指す接合は、モジュールの絶縁基板下の Cu 板と Cu ヒートスプレッダー付き Al 冷却器の Cu-Cu 接合である。この接合においては、せん断強度評価用の試験片接合面積より約 100 倍の大面積接合となる。これにより、酸化膜の還元用のギ酸ガスが接合面積の中央部に到達しきれない恐れがあり、目標の接合強度が得られないことが懸念される。それを解決すべく、大面積接合のための 2 種類の接合手法を検討し、その結果を以下に述べる。

2.1 大面積接合に向けた乾燥工程の導入

当初の接合実験の際、下 Cu 板に塗布された混合ペースト (面積が約 25mm²) に上 Cu 板を搭載してサンドイッチ状態にし、さらにその上におもりを載せ、チャンバー内で加熱し接合実験を行った。同じ接合手法を大面積接合 (接合面積が約 400mm²) に適用すると、図 1 に示す走査型超音波顕微鏡 (SAM) 写真から示唆されるように接合物の中央部が生焼きのような状態となり、接合しなかったことになる。これは、ギ酸ガスが中央部に到達しないため Sn-Bi 粉末の酸化膜が還元されず、Ag 粒子と Cu 板に濡れなくなり、接合を抑制することが推測される。解決法として、図 2(a) に示すようなギ酸ガスを通すためのパスを設けた。しかしながら、ペーストの上にガラス板を載せ、さらにその上におもりを搭載して再実験を行った結果、図 2(b) からわかるように、加熱後のパスが搭載されたおもりにより潰され、ギ酸ガスが中央部に到達しない恐れがある。なお、おもりの加重は接合ペーストが 0.02MPa の圧力を受けるよう調整したが、ペーストの粘性により最初からおもりを載せて接合材の形が潰されることが推測される。そのために、おもりを載せる前に、ペーストの固化が重要と思われ、新たな接合手法を提案した (図 3)。

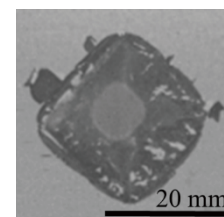


図 1 SAM 像

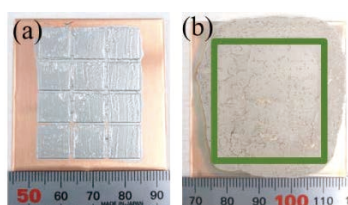


図 2(a) 塗布後のパス (b) 加熱後のパス状態

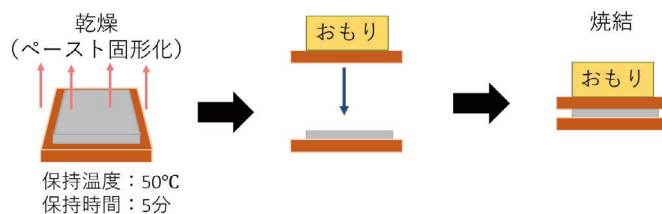


図 3 大面積に向けた提案した新接合方法

図 3 に示している新たな接合法により接合した Cu-Cu 板は図 4 に表示する. なお, 図 4 はハンマで叩いた後の破断面を示す. パスの残存は確認されたが, 未接合部分も確認され大面積接合を達成したということはい言い難い. 乾燥工程 (ペースト固形化工程) では, ペースト内にある有機溶媒が蒸発しペーストが固形化されパスの残存につながるが, ペーストが固形化したため, 上の Cu 板との密着性が低下する恐れがある. そのために, 次節で述べる両面塗布かつ Sn-Bi はんだの導入による大面積接合法について検討した.

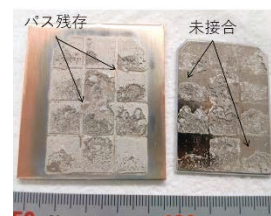


図 4 図 3 接合法により接合した Cu-Cu の破断面

2.2 大面積接合に向けたペースト両面塗布かつ Sn-Bi はんだの導入

2.1 節で述べた乾燥工程を取り入れた接合手法においては, 乾燥工程後に乗せた上 Cu 板が接合材との密着性が少なく, 未接合部分につながるということがわかった. そのため, 上下 Cu 板に接合ペーストを塗り, ペーストを固形化してから両 Cu 板を密着させ接合実験を行う新たな接合手法を提案する. ただし, 固形化ペースト同士を接合すると固相接合と同様であり, 高温かつ高圧力が必要となり, 当初の接合条件を満たせなくなる. そのために, 中間層として低温 Sn-Bi 系はんだを導入することで, Sn-Bi 液相による過渡液相接合を通して, 上下 Cu 板の大面積接合を図る. 図 5 はペースト両面塗布かつはんだを導入した新たな接合法を示す.

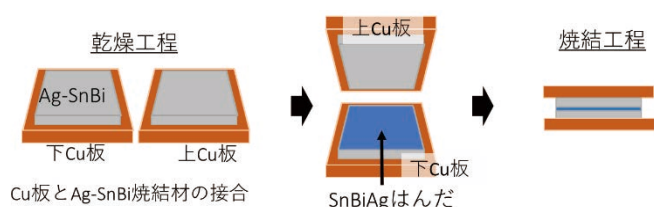


図 5 はんだ中間層を導入した大面積接合法

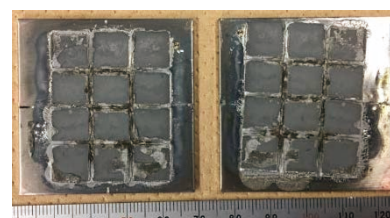


図 6 図 5 接合法で接合した Cu-Cu の破断面

図 6 は図 5 に示す接合法で接合した後の破断面を示す. 図 4 と違って Cu 板との接合が確保できると言っても過言ではない (未接合部分がない). また, 破断面から評価すると, 接合面積が 95%以上確保できると言えるであろう. しかしながら, せん断試験を行った結果, せん断強度が約 2.4MPa となり, 目標値に達成しないといった新たな研究課題が生まれる.

3. 共同研究者

宮下 朋之 (創造理工学部・総合機械工学科・教授)

ムハマド ハイリ ファイズ (創造理工学部・総合機械工学科・助手)

4. 研究業績

4.1 学術論文

Muhammad Khairi Faiz, Takehiro Yamamoto, Makoto Yoshida, Low temperature and low pressure bonding of plateless Cu-Cu substrates by Ag-based transient liquid phase sintering, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 28 (2017) 9351-9362.

M. Khairi Faiz, Kazuma Bansho, Tadatomo Suga, Tomoyuki Miyashita, Makoto Yoshida, Low temperature Cu-Cu bonding by transient liquid phase sintering of mixed Cu nanoparticles and Sn-Bi eutectic powders, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 28, (2017) 16433-16443.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

Cu ナノスケール粒子および Sn-Bi 共晶粉末を用いた過渡液相焼結法による低温 Cu-Cu 接合, 電子情報通信学会, シリコン材料・デバイス研究会 (SDM), 「配線・実装技術と関連材料技術」, 東京大学, 2018 年 2 月.

4.4 受賞・表彰

ECR Session Award 2017, Low temperature, low pressure, fluxless and plateless Cu-Cu bonding by Cu nano particle transient liquid phase sintering, IEEE CPMT Symposium Japan 2017.

4.5 学会および社会的活動

M. Khairi Faiz, Takehiro Yamamoto, Makoto Yoshida, Sn-Bi added Ag-based transient liquid phase sintering for low temperature bonding, 2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D), May 16-18, Tokyo, Japan.

M. Khairi Faiz, Takehiro Yamamoto, Makoto Yoshida, Low temperature and low pressure fluxless Cu-Cu bonding by Ag-based transient liquid phase sintering for high temperature application, IEEE CPMT Symposium Japan 2017, November 20-22.

Takehiro Yamamoto, M. Khairi Faiz, Tadatomo Suga, Tomoyuki Miyashita, Makoto Yoshida, IEEE CPMT Symposium Japan 2017, November 20-22.

5. 研究活動の課題と展望

関連産業のニーズにより初期接合面積は 95%以上である必要があるが, 2.2 で実施した大面積接合はこの目標値を達成したと言えるが, 目標のせん断強度が達成しない課題がある. 今後, 2.2 で提案した手法における強度支配因子を組織観察, 分析などを通して明らかにし, プロセス条件の変量を行いせん断強度の強化を目指していく. また, 動作時のモジュールは繰返し冷熱を受けるため, せん断強度並びに接合面積の目標値を達成した Cu-Cu 大面積接合試験片を用いた冷熱試験を実施し, 接合材における熱疲労環境下での破壊メカニズムおよび強度支配因子を明らかにしていく予定である.

公共所有不動産の経営研究

研究代表者 小松 幸夫
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

わが国の地方自治体や政府が所有する公共の不動産は、ストック量の肥大化に伴う総量の適正化、老朽化対応、運営体制の効率化や高度化、ライフサイクルコストの適正化など様々な課題を抱えている。本研究は公共の不動産、特に学校施設を中心として公共施設の運営段階における経営およびマネジメントに関する研究を行う。

また企業の保有する不動産もある種の公共性をもっており、従来注目を集めることが少なかった分野である。特に中小の賃貸オフィスビルについてはその実態もほとんど把握されておらず、今後の研究の必要が痛感される分野である。本プロジェクト研究では民間の不動産研究所と協同でこの分野の研究も進めている。

2. 主な研究成果

1) 秩父市における調査研究

秩父市よりの委託を受けて、学校施設の個別施設計画の作成を 2017 年度と 2018 年度に行うこととなっている。対象の小中学校 21 校のうち 2017 年度は 11 校の調査を行った。また、将来の人口減少を踏まえた施設の再配置についても試みの検討を行っているが、ここでの報告は割愛する。

秩父市の公立小中学校では、全 54 棟中 27 棟と半数が築 30 年以上経過している。また、最も古いものは築 50 年を経過しており、老朽化が進んでいると考えられる。旧耐震基準のものも 18 棟と約 3 割を占めているが、規模の小さく耐震補強の必要がない特別教室棟 2 棟を除いた 16 棟は耐震補強工事が実施済みであった。今後の施設管理計画を策定するため、まず今年度は 11 校についての現状調査をおこなった。調査は解説書に示された要領に従っている。調査対象の校舎等を訪問し、屋上・屋根、外壁内部仕上げの観察・写真撮影を行い、劣化の状況を解説書の写真と照合しつつ A (概ね良好) ～ D (早急に要対応) の 4 段階で評価する。評価例を以下に示す。

■ H小学校

【屋上・屋根】 第 1 校舎棟 : **D 評価** 【外壁】 第 2 校舎棟 : **D 評価**



これらの評価結果を文科省の『学校施設の長寿命化計画策定に係る解説書』にしたがって数値化し、健全度を算定する。小学校校舎は最も低いものが38点、中学校校舎は27点でどちらも屋上・屋根、外壁の状態が悪いものが目立った。一方、小学校校舎で健全度が高い小学校の校舎棟は2016年に大規模改造を実施していた。次年度残りの10校について同様の調査を行い、最終的な施設管理計画を策定する予定である。

また秩父市内の某中学校区において、公共施設利用および施設の統廃合に関する住民意識を郵送アンケートによって調査した。調査対象は中学校区内の5917世帯で回答率は19.3%であった。これは以前からおこなっている一連の調査であり、次年度も調査対象を変えて継続する予定である。

2) RISTEX におけるプロジェクト

前橋工科大学の堤准教授を中心とした RISTEX（科学技術振興機構・社会技術研究開発センター）における「持続可能な多世代共創社会のデザイン」研究開発領域におけるプロジェクト「地域を持続可能にする公共資産経営の支援体制の構築」（BaSS）が進行している。プロジェクトの概要は以下の通りである。

「多くの地方都市では人口減少や少子・高齢化に伴い財政が悪化し、公共建築物や土木インフラなどの公共資産の維持・整備や運用にかかる経費の捻出が困難になっている。しかし、公共資産の現状把握が不十分なこともあり、自治体や住民の危機感は乏しい。

そこで本プロジェクトでは、自治体職員が多世代の住民とともに地域生活の基盤である公共資産の望ましい姿を描き、実現させる支援の仕組みを構築する。具体的には、公共資産の老朽化や利用状況の評価を基に、将来世代を見据えた公共資産経営の方向を提示し、住民や議会も含めた合意形成に繋げていく手法を開発する。こうした知見を蓄積し、多様な地域を支援するプラットフォームの構築を目指す。」(http://ristex.jst.go.jp/i-gene/projects/h28/project_h28_4.html) プロジェクトは2016年に採択され、準備段階を経て2017年現在では、大阪府池田市や広島県廿日市市など全国の9市を対象として公共施設の再編に関するプロジェクトを通して支援システムの構築を進めている。2017年1月には3都市で第2回のプロジェクト主催連続シンポジウムを開催している。

3) 企業不動産に関する研究

ザイマックス不動産総合研究所（以下X研究所）との共同研究について、2017年度は主に3つのテーマで研究を進めた。

- ① 東京都区部における建物利用の変化に関する研究
- ② 中小規模オフィスビルオーナーに関する実態調査
- ③ 賃貸用オフィスビルの寿命及び建替えに関する実態調査

最初の①に関しては、東京都による土地利用現況調査の5回分のデータを都から借用し、建物に関する用途別の棟数および延べ床面積の分析をおこなっている。この調査データはその名の通り、土地の利用状況を東京都が分析し公表するためのもので、都市計画法第6条の規定に基づく都市計画に関する基礎調査の一つである。方法は外観目視による現地調査を行い、調査結果の概要は「東京の土地利用」と土地利用現況図にまとめられているものである。データには建物の状況を表すものも含まれており、今回はそれに注目して分析をおこなっている。解析はまだ途中であるが、たとえば商業施設の大規模化の傾向、戸建て住宅の延べ床面積120㎡への収斂傾向等が読み取れた。

次の②に関しては中小規模のビルを経営する約五千社にアンケートを行い、ビルオーナーの抱える問題点を抽出し分析している。結果として所有棟数の少ない小規模のビルオーナーが多く、また高齢化の傾向も見られることから、今後の事業継続に問題を生じる可能性が読み取れた。

また③についてはX研究所の親会社が保有する賃貸用オフィスビルのデータに基づき寿命推計等を行っている。昨年度は東京都の主要5区についての調査であったが、今年度は対象を23区全体に広げ、さらに大阪市も対象とした。主な分析として平均寿命の推計をおこなっているが、ほぼ60年という結果が得られた。これは過去の分析結果とも比較的近い値であった。以上の他に企業不動産に関わる研究はいくつか行っているが、ここでは割愛する。

3. 共同研究者

堤 洋樹 (前橋工科大学・工学部・准教授、招聘研究員)
 板谷 敏正 (プロパティデータバンク・代表取締役、招聘研究員)
 李 祥準 (関東学院大学・講師、招聘研究員)
 平井 健嗣 (株式会社KMK・代表取締役、招聘研究員)
 駒井 裕民 (青森県総務部財産管理課・主幹、招聘研究員)
 池澤 龍三 (建築保全センター・保全技術研究所・次長、招聘研究員)
 松村 俊英 (ジャパンシステム株式会社・公共事業本部ビジネス推進室・室長、招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- ・ 板谷 敏正, 小松 幸夫, 長期間の工事履歴に基づく部位・設備ごとの信頼度の算定及びこれを活用した最適な更新周期の推計, 日本建築学会計画系論文集, Vol.82, No.741, pp.2939-2948
- ・ 井海 航也, 堤 洋樹, 水谷 俊貴, 入澤 良, 8139 公共施設劣化評価システムの概要 公共施設劣化評価システムの有用性に関する研究(その1), 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.277-278
- ・ 水谷 俊貴, 堤 洋樹, 井海 航也, 入澤 良, 8140 オープン型施設管理システムを用いた点検項目の検討 公共施設劣化評価の有用性に関する研究(その2), 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.279-280
- ・ 入澤 良, 堤 洋樹, 井海 航也, 水谷 俊貴, 8141 ワークショップによる協働型施設管理の可能性の検討 公共施設劣化評価の有用性に関する研究(その3), 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.281-282
- ・ 山越 郁也, 堤 洋樹, 水出 有紀, 讃岐 亮, 8144 公共施設評価指標を用いた土木インフラの評価手法に関する研究 人口と道路のGISデータを活用した上水道の配置推測, 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.287-288
- ・ 商崎 雅人, 小松 幸夫, 板谷 敏正, 8146 投資用不動産の建築的要件と収益及び費用に関する研究, 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.291-292
- ・ 田邊 隆太, 小松 幸夫, 板谷 敏正, 8147 商業経営における施設維持管理の意識調査, 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.293-294
- ・ 梁川 遼宥, 小松 幸夫, 板谷 敏正, 林 貴大, 8148 投資用不動産における建物の寿命及び建替えに関する研究 その3 東京および大阪におけるストック量及び減失量調査, 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.295-296
- ・ 林 貴大, 小松 幸夫, 板谷 敏正, 梁川 遼宥, 8149 投資用不動産における建物の寿命及び建替えに関する研究 その4 東京および大阪における事務所ビルの寿命に関する調査,

学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.297-298

- ・ 板谷 敏正, 小松 幸夫, 8150 投資用不動産におけるリスク評価を活用した維持保全工事の実態調査 その 3 信頼度及び故障リスクに基づく建物の部位・設備の最適な更新周期の推計, 学術講演梗概集 DVD.建築社会システム, 2017, pp.299-300
- ・ 商崎 雅人, 小松 幸夫, 板谷 敏正, 8005 投資用不動産の建築的要件と収益及び費用に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2017, pp.495-498
- ・ 平井健嗣, 小松幸夫, 既存建築物の長期使用に資する改修手法に関する研究 ―既存学校施設の減築改修工事事例―, 日本建築学会建築生産シンポジウム論文集, Vol.33, pp.187-192

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

- ・ 板谷敏正, 名古屋大学施設・環境計画推進室主催 第 18 回大学施設マネジメント研究会 講演「データサイエンスを活用した不動産・施設マネジメント／ライフサイクルを見据えた事後保全と予防保全」, 2018.3.2
- ・ 板谷敏正, 早稲田大学理工学術院総合研究所主催 第 7 回次世代建設産業モデルシンポジウム 講演「CRE/PRE 戦略における成長戦略」, 2018.2.6
- ・ 板谷敏正, 公益社団法人 日本ファシリティマネジメント協会 (JFMA) 主催 「FACILITY MANAGEMENT FORUM 2017」にて講演「不動産×テックの最新潮流／ICT を活用したビル・不動産管理」, 2016.6.1

4.4 受賞・表彰

JFMA 大賞功績賞 (小松幸夫, 堤洋樹, 池澤龍三, 公共施設マネジメントのススメ, 建築資料研究社, 2017.3), 公益社団法人日本ファシリティマネジメント協会, 2018.2.22

4.5 学会および社会的活動

- ・ 日本建築学会 建築社会システム委員会委員 (板谷)
- ・ 日本建築学会 建築社会システム委員会 施設マネジメント小委員会委員 (小松、堤、李、板谷、池澤、松村)
- ・ 公益社団法人日本ファシリティマネジメント協会 (JFMA) FM 推進戦略委員会委員長 (板谷)

5. 研究活動の課題と展望

公共施設に関しては各地方団体で個別施設計画にとりかかる状況である。学校施設に関しては文部科学省より平成 32 年度末までの策定が求められており、秩父市における学校施設調査もその一環である。今後は本プロジェクトにも様々な相談が寄せられると予想しているところである。

企業不動産については、バブル崩壊以後の不動産のオフバランス化（売却等）の動きや証券化の解禁など大きな動きがあったが、昨今はやや落ち着いてきた。最近では環境問題への企業意識の高まりや経営の効率化の要請を反映して、施設管理をより合理的に行おうとする動きが目立つ。来年度は某社と共同で施設管理方法についての研究を進めることが決定している。また昨今は空家の問題がマスコミ等で話題になっているが、将来的には空きビルも問題となってくるのではないかとの問題意識から、企業との共同研究を継続している。解決策がただちに見つかるわけではないが、とりあえず社会に対して問題提起ができればよいと考えているところである。

エネルギー需給ネットワークのモデリングと統合メカニズム

研究代表者 内田 健康
(先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授)

1. 研究課題

エネルギー伝送ネットワークと双方向情報伝達ネットワークをインフラとして、ダイナミクスを持つエネルギー需要者及びエネルギー供給者、並びに公益事業体をエージェントとする次世代のエネルギー需給システムを想定する。このエネルギー需給システムにおいて、エネルギー需要者とエネルギー供給者が利己的かつ戦略的に決定する分散制御を束ねて公共の利益に導く最適な統合メカニズム（公益事業体の機能）を構築するために、エネルギー需給ネットワークをモデル化し、同時に統合メカニズムの理論的な基礎を築き、統合メカニズムの設計法を確立することを目指す。

2. 主な研究成果

2016年度から我が国においても電力自由化が本格化し、自由な電力需給のために、卸売市場から小売市場への展開、スポット市場からリアルタイム調整市場への展開が推進されている。一方で再生可能エネルギーの導入が進められており、電力自由化を踏まえながら再生可能エネルギーの不確かさを克服してアンシラリーサービスを実現するリアルタイム調整市場の実現が望まれている。本研究プロジェクトにおいては、ダイナミックな電力システムを前提としたリアルタイムオークションの新たなモデルを提案し、その経済的評価の理論的解析を継続的に実施している。

多種多様な目的・意思や資財を持つエージェント・ユーティリティ間で経済的・物理的に公平なエネルギー授受を実現するには、本研究課題でこれまで取り組んでいたメカニズムデザインによるモデルベース電力市場設計理論をより一般化した契約理論に基づく枠組みが必要である。この枠組みを理論的に構築するために、経済分野で長年研究されてきた契約理論をシステム制御分野の知見を基に再解釈し、制御入力を持つダイナミクス制約を考慮した新たなエネルギー需給システムを提案した。特に、従来研究でも行われてきた契約構造の分析だけでなく、最適な契約を導出する構成手法まで世界で初めて理論的に示し、経済モデルと物理モデルを統合したエネルギー需給システムの基盤理論体系の拡張に成功した。また、需要者の市場取引への参加を促すためのアグリゲータの新たなモデル、特にマーケットパワーを最大化するアグリゲータの検討を開始し、複数のアグリゲータの機能を提案した。さらに、再生可能エネルギーを市場取引によって安定化するための確率モデルを提案した。

実際の電力システムはマルチタイムスケール制御を行うことで安定化を実現しているが、個々のエージェントに運用状態決定の権利を与える分散型の情報処理・意思決定を各タイムスケールで実現する必要がある。しかし、タイムスケール間の影響を陽に考慮したモデル解析の研究は限られていた。機器のダイナミクスを考慮した多地域電力網システムの実時間制御を対象に、電力市場からの参照信号を考慮しつつ、負荷周波数制御器設計において物理的運用コストに関する評価関数をエージェント毎に最適化するゲーム構造の問題を定式化した。これらの理論的成果は、実際の物理モデルを用いたシミュレーション解析を通してその効果を検証した。昨年度からこれまでの本研究プ

プロジェクトの理論的成果を実装できる電力市場シミュレータ開発のためのシステム構築を始め、開発に必要とする基盤を整備した。特に、本システムは機械学習に基づく計算機上で行われる入札と共に、実際の市場の約定結果を踏まえ、人間による入札も同時に行える機能を備えている。今年度から本機能を用いて、機械学習の知見、行動経済学的知見、システム制御的知見を融合した分析を開始している。本研究テーマについては、昨年度の成果を踏まえて、今年度も継続的に取り組む。

再生可能エネルギーの導入量拡大を前提として、今後の電力・エネルギー市場ではネガワットを含む調整力の確保が課題である。また同時に、蓄電設備容量の拡大も予想される。ネガワットや蓄電量の大幅な取引は従来の電力市場には見られない新たな要素であり、これらの取引規模の拡大が市場パフォーマンスに与える影響について、十分な知見が蓄積されているとはいえない。本研究プロジェクトでは、今後の電力市場を想定した市場モデル分析にも取り組んでいる。この研究課題は、ネガワットや蓄電取引に加え、アグリゲータといった新たな市場プレーヤも視野にいれ、今後の電力市場設計に資する政策的インプリケーションを得ることを目的としている。2017年度は調整力市場におけるネガワット取引量が、消費者側のエネルギー利用効率と密接な関連を持ち得ることに着目し、理論的分析を推進した。分析の結果、調整力市場におけるネガワットと火力発電の代替的関係を想定した場合、消費者側のエネルギー効率改善はネガワット価格を上昇させ、調整力としての火力発電量の増加をもたらすケースがあることを示した。今後は、電力市場設計における具体的なインプリケーションを導くために、蓄電を含むモデルへの拡張に取り組む予定である。これにより、市場取引の各プレーヤ（消費者、小売事業者、など）にとって節電（ネガワット）や蓄電量が戦略的にどのような意味をもつのか、また市場全体のパフォーマンスをどのように左右するのか、明らかにすることを目指す。それと同時に小売価格の内生化に取り組み、エネルギー効率改善が小売価格へ与える効果を含め、市場全体に与える影響について分析をすすめる。

上記研究課題とも関連し、一般消費者の電力需要（節電）行動を行動経済学的な視点から分析するために、2017年1月に一般住民200世帯を対象としたラボラトリー経済実験を実施した。2017年度は実験結果の分析をすすめると同時に、ラボラトリー実験、および関連するフィールド実験結果を統合的に説明可能な電力需要モデルの構築に取り組んだ。2018年度も継続して取り組む計画である。本モデルの構築は、スマートメータをはじめとする電力システム設計への貢献も期待できる。

3. 共同研究者

赤尾健一（社会科学総合学術院 教授）	庫川幸秀（理工学術院総合研究所 次席研究員）
和佐泰明（理工学術院総合研究所 次席研究員）	塚本幸辰（理工学術院総合研究所 招聘研究員）
辻 隆男（理工学術院総合研究所 招聘研究員）	澤田英司（理工学術院総合研究所 招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Nguyen Gia Minh Thao and K. Uchida, "An Enhanced Feedback Linearization with Fuzzy Logic to Control the Active and Reactive Powers of Bidirectional Three-Phase Grid-Connected Renewable Energy Inverters," International Journal of Electrical Energy, vol. 5, no. 1, pp. 1-13, June 2017
- Nguyen Gia Minh Thao and K. Uchida, "An Improved Interval Fuzzy Modeling Method: Applications to the Estimation of Photovoltaic/Wind/Battery Power in Renewable Energy Systems," Energies 2018, 11(3), 482
- T. Murao, K. Hirata, Y. Okajima and K. Uchida, "Real-time pricing for LQG power networks with independent types: A dynamic mechanism design approach," European Journal of Control, vol. 39, pp. 95–

105, 2018

- Y. Okajima, K. Hirata, T. Murao, T. Hatanaka, V. Gupta and K. Uchida, "Strategic Behavior and Market Power of Aggregators in Energy Demand Networks," Proc. 56th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 694-701, 2017
- Y. Wasa, K. Sakata, K. Hirata and K. Uchida, "Differential Game-based Load Frequency Control for Power Networks and Its Integration with Electricity Market Mechanisms," Proc. 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 1044-1049, 2017
- Y. Wasa, K. Hirata and K. Uchida, "A Dynamic Contract Mechanism for Risk-sharing Management on Interdependent Electric Power and Gas Supply Networks," Proc. 2017 Asian Control Conference, pp. 1222-1227, 2017
- 庫川幸秀, 田中誠, "調整力市場におけるネガワット取引とエネルギー利用効率", RIETI Discussion Paper Series 18-J-003, pp.1-13, 2017
- Norhafiz Bin Salim, T. Tsuji, T. Oyama, and K. Uchida, "Optimal Reactive Power Control of Inverter-based Distributed Generator for Voltage Stability Insight using Particle Swarm Optimization", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 137, No. 5, pp.392-404, 2017
- Norhafiz Bin Salim, Hossam Aboelsoud Eid Elhassaneen, T. Tsuji, T. Oyama, and K. Uchida, "Load Frequency Control of Two-Area Network using Renewable Energy Resources and Battery Energy Storage System", Journal of Electrical Systems, 13(2): 348-365, 2017
- Hyangryul Bae, T. Tsuji, T. Oyama, and K. Uchida, "Frequency control in power system based on balancing market considering wind power forecasting error", 6th International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER Renewable Energy Resource Impact (ICCEP), ICCEP.2017.8004843, 2017
- Bo Jie, Hyangryul Bae, T. Tsuji, "Combined Modelling of Frequency Regulation of Power Systems with Renewable Energy Sources Based on Control Mechanism and Balancing Market", Proc. of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE), S6-1-06, 2017

5. 研究活動の課題と展望

昨年度に引き続き、電力自由化を前提として動的ゲーム理論並びに最適制御理論を基礎とした統合メカニズムの理論については引き続き検討を進める予定である。市場モデルにおける需要者及び供給者の戦略振る舞いに抗して社会厚生を実現する統合メカニズム、ネットワークの不確かさに対処してアンシラリーサービスを実現する統合メカニズムの創生が課題である。そのための、メカニズムデザインの方法、契約ベースの方法、提携・離脱など組織変更の分析、新たなプライシングの方法、並びにそれらの動的システムへの展開を検討し、動的統合メカニズム理論の更なる展開と体系化を目指す。それらの成果を組み込んだ電力市場シミュレータ開発にも精力的に取り組む。また、経済的評価・分析に重点をおいて、電力市場モデル、および消費者行動モデルについて各種パラメータを推計し、定量的な観点からも政策立案に資する分析の実施を目指す。

医学教育用ヒューマノイドの開発

研究代表者 高西 淳夫
(創造理工学部・総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

近年，世界的にシミュレーション医学教育が注目されている．これは，医学教育シミュレータと呼ばれる患者の体の一部または全身を再現した模型を用いて，臨床手技トレーニングを行う手法である．現在，さまざまな医学教育シミュレータが市場に存在するが，より高性能で，精巧に人体を模した医学教育シミュレータに対するニーズは大きい．そこで申請者らは，第1期のプロジェクト研究において，ヒューマノイド技術を応用した革新的な医学教育シミュレータの開発に取り組んできた．ここでは，NEDO「イノベーション実用化ベンチャー支援事業」による支援のもと，株式会社京都科学と共同でさまざまな医学教育シミュレータの開発に取り組んできた．そして縫合手技評価シミュレータとEDAMシミュレータの上市を実現した．

第2期では，世界標準を目指した新たな医学教育シミュレータの開発に取り組んでいる．具体的にはWHOが提唱する医学教育カリキュラムでの使用に主眼を置いて，全身型患者シミュレータの開発に取り組んでいる．WHOは特に，医学教育に品質保証の考え方を導入し，学生個人や教育カリキュラムそのものを十分に評価し，常にカリキュラムの改善を進めることを提唱している．これに対応するにはシミュレータに訓練者の手技を定量的に計測し，データベースに保存する機能が求められる．このようなニーズを受けて，株式会社京都科学と共同で，中小企業庁の「戦略的基盤技術高度化支援事業」に「医療スキルの修得支援のためのインタラクティブ・チュートリアル・システムの開発・事業化」と題した申請を行い，採択された．インタラクティブ・チュートリアル・システムとは，シミュレータに埋め込まれた各種センサで手技を計測し，評価や助言提示を行うシステムである．

2. 主な研究成果

2017年度は，まず，図1に示すような新生児蘇生法(NCPR)の訓練のための新生児シミュレータの開発に取り組んだ．シミュレータには，新生児のさまざまな状態を再現するためのアクチュエータと，手技を計測するための各種センサが埋め込まれている．アクチュエータはマイコンによって制御され，センサで得られたデータはマイコンを介してパソコンに送られるようになっている．この研究の実施に際しては新生児科医の協力を得ることで，現場のニーズに即した研究開発を進めることができた．

続いて，触診手技の訓練のための触診シミュレータの開発に取り組んだ．ここでは，ジャミング転移など柔軟体の粘弾性を変更する技術を応用して，硬度を変化させる腫瘍モジュールを開発した．このモジュールを触診シミュレータに埋め込むことで，1台のシミュレータでさまざまな腫瘍の状態を再現し，それを用いて手技と診断の試験を行うことが可能となる．

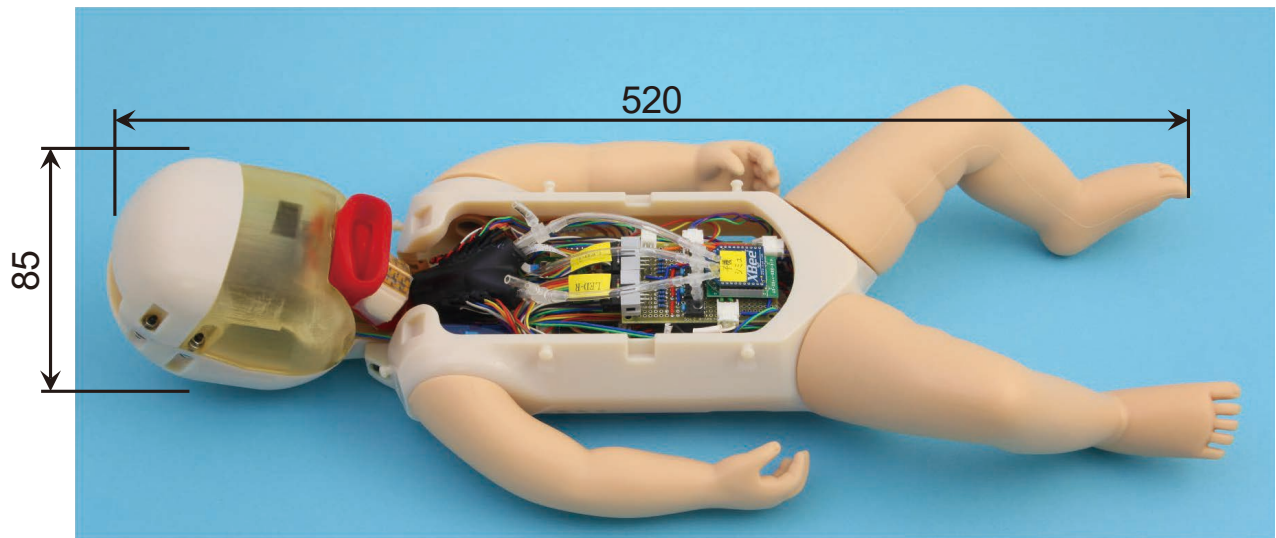


図1 新生児シミュレータ（寸法単位：mm）

3. 共同研究者

梅津光生（早稲田大学理工学術院 教授）
伊関 洋（早稲田大学理工学術院 教授）
石井裕之（早稲田大学理工学術院 准教授）
Sessa Salvatore（早稲田大学理工学術院 講師）
Zecca Massimiliano（ラフバラー大学（UK） 教授）
尾崎 眞（東京女子医科大学麻酔科学分野 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

Otani, T., Hashimoto, K., Miyamae, S., Ueta, H., Natsuhara, A., Sakaguchi, M., ... Takanishi, A. (2018). Upper-body control and mechanism of humanoids to compensate for angular momentum in the yaw direction based on human running. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(1), [44]. DOI: 10.3390/app8010044

Zhang, D., Sessa, S., Kasai, R., Cosentino, S., Giacomo, C., Mochida, Y., ... Takanishi, A. (2018). Evaluation of a sensor system for detecting humans trapped under rubble: A pilot study. *Sensors (Switzerland)*, 18(3), [852]. DOI: 10.3390/s18030852

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

Atsuo Takanishi, Plenary Talk, 17th International Conference on Control, Automation and Systems, 韓国, 2017年10月18日

高西淳夫，基調講演，ソフトマターロボティクスコンソーシアム第 3 回シンポジウム，2018 年 3 月 2 日

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

高西淳夫，日本 IFToMM 会議，実行委員長

高西淳夫，日本ロボット学会，監事

5. 研究活動の課題と展望

今後は，各診療科の指導医と連携し，開発した各シミュレータの妥当性の検証を進める．その結果をもとに，株式会社京都科学と共同で研究成果の早期実用化を目指す．

機能性レドックスポリマー

研究代表者 西出 宏之
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題・目的

可逆的かつ迅速な電子授受能をもつ有機高分子「レドックスポリマー」に着目し、独自に合成してきたラジカルポリマーによる高速電荷輸送と高密度な電荷貯蔵とその応用を起点として、電子交換反応に基づく導電・蓄電物質「レドックスポリマー」の科学の確立と、その新たな機能を開拓することを目的としている。本プロジェクトは、レドックスポリマーでの電子授受を有機材料での「電荷分離・輸送・貯蓄」の新しい機能として捉え、分子レベルから界面まで俯瞰した高次構造により機能を増幅し、斬新な電子機能性有機材料として、実用につなげるべく実践的に展開している。2017年度では具体的には、(1)ラジカルポリマー/カーボンナノチューブ複合体と超高出力電極としての実証、(2)無機酸化物とラジカルポリマーのナノ複合化による極めて高いレドックス容量、(3)新しい水素キャリアとしてのレドックスポリマーの展開、などである。実践的物質群として「機能性レドックスポリマー」を確立したく展開している。

2. 主な研究成果

2. 1 ラジカルポリマー/カーボンナノチューブ複合体と超高出力電極

親水性高分子鎖に安定ラジカル TEMPO を高密度で導入したラジカルポリマー ポリ(TEMPO 置換アクリルアミド)を合成し、高結晶性カーボンナノチューブとのナノ複合体をはじめて作製し、その電荷輸送・貯蔵過程を解明した (図 1a)。酸化還元席間の迅速な自己電子交換 ($k_{ex} > 10^5 \text{ s}^{-1}$) と自己組織化的に三次元連続構造を形成するナノチューブの長距離電荷輸送の相乗効果に基づき、二次電池電極としては例外的に大きな出力電流 1 A/cm^2 超を達成した (図 1b)。電子受容性のアントラキノンをポリエチレンイミン分岐鎖中に密度高く導入したレドックス高分子も新規に合成、正極としての TEMPO ポリマーと組み合わせフレキシブル二次電池を試作した (図 1c)。これら親水性レドックス高分子は、電解液として高いイオン伝導度と安全性を有する食塩水とも親和性が高く、ポリマー内での迅速なイオンの輸送に基づき数分以内での高速充放電を実現できた。

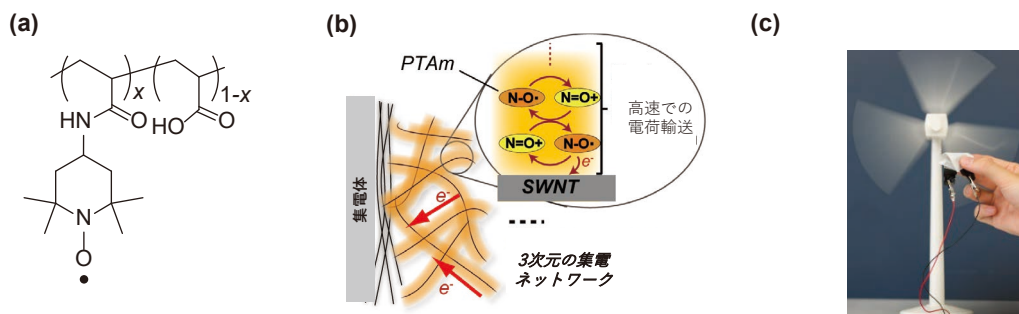


図 1 (a) 親水性ラジカルポリマーの例. (b) ラジカルポリマー/カーボンナノチューブ複合体中での高速電荷輸送. (c) 全有機二次電池の動作実証.

2. 2 リチウム含有無機酸化物とのナノ複合化と高密度レドックス

ラジカルポリマーの優れた電荷輸送能と結着性に着目し、高いエネルギー密度を有するリチウム含有無機酸化物とのナノレベル複合化による高密度レドックスを実現した。例えば、リチウムイオン電解液との親和性を高めたポリ(TEMPO 置換ビニルエーテル) (図 2a)とコバルト酸リチウムの複合体は”ペーパーライク”な機械特性、つまり 1 GPa を超える強靱なヤング率と曲率半径数 mm 以下の繰り返し曲げ耐性を保持しつつ、フレキシブル電極としては世界最高の充放電容量 (>300 mAh/cm³)を示した (図 2b)。ラジカルポリマーの高い電荷輸送能と弾性に由来し、動的応力の印加条件においても影響受けず定量的な充放電応答を得られた。以上、従来より課題となっていた電極の応力耐性と高密度化のトレード・オフを本質的に解決可能なアプローチとして、結着剤としても機能するラジカルポリマーのナノ複合化の有効性を明らかにした。

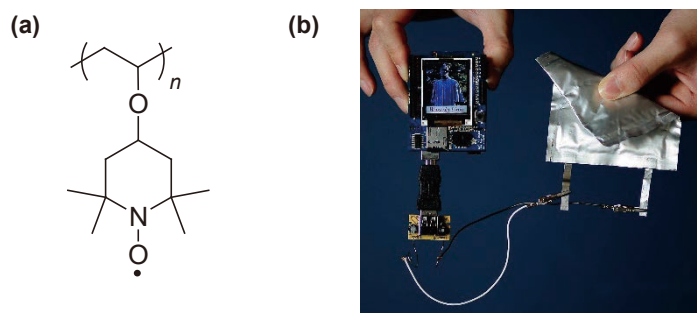


図 2 (a) 有機溶媒と高い親和性を示すポリ(TEMPO 置換ビニルエーテル).
(b) 無機酸化物との複合による高密度充放電

2. 3 新しい水素キャリアとしてのレドックスポリマー

レドックスポリマーの凝縮相での電荷交換反応を水素交換反応に拡張し、有機高分子に水素の輸送・貯蔵能を付与する類例ない試みを展開している。芳香族ケトン高分子であるフルオレノンポリマーおよび窒素複素環式高分子であるキナルジンポリマーを合成し、微弱な電圧印加により容易にプロトン付加して安定な水素化体フルオレノールポリマーおよびヒドロキナルジンポリマーに変化し、しかも触媒存在下の加温により水素が発生してくることを実証した。これは有機ハイドライドに次ぐ、まったく新しい水素キャリアとして高分子の提案である。揮発・漏れ、毒性が無く、また貯蔵安定性が極めて高い樹脂ならではの利点もつ、「ポケットに入れて持ち運べる」水素運搬プラスチックとして提示している。

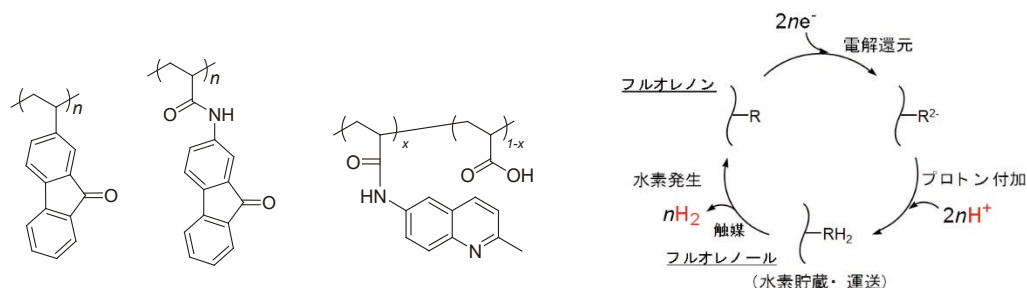


図 4 フルオレノンおよびキナルジンポリマーと水素貯蔵・輸送・発生サイクル.

以上、レドックス活性なポリマーの分子構造と機能の相関を明らかにし、新しい特にエネルギーデバイスに供しうる機能有機材料として開拓している。

3. 共同研究者

小柳津 研一 (理工学術院・応用化学科・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. H Maruo, S Tanaka, M Takamura, K Oyaizu, H Segawa, H Nishide, "Oxoammonium cation of 2, 2, 6, 6-tetramethylpiperidin-1-oxyl: a very efficient dopant for hole-transporting triaryl amines in a perovskite solar cell", *MRS Communications* **8**, 122-126 (2018).
2. Kan Sato, Rieka Ichinoi, Ryusuke Mizukami, Takuma Serikawa, Yusuke Sasaki, Jodie Lutkenhaus, Hiroyuki Nishide, Kenichi Oyaizu, "Diffusion-cooperative model for charge transport by redox-active nonconjugated polymers", *Journal of the American Chemical Society*, **140**, 1049-1056 (2018).
3. R Kato, H Nishide, "Polymers for carrying and storing hydrogen", *Polymer Journal*, **50**, 77 (2018).
4. S Maniam, K Oka, H Nishide, "N-Phenyl naphthalene diimide pendant polymer as a charge storage material with high rate capability and cyclability", *MRS Communications*, **7**, 967-973 (2017).
5. Mario E Flores, Toshimichi Shibue, Natsuhiko Sugimura, Hiroyuki Nishide, Ignacio Moreno-Villoslada, "Aggregation Number in Water/n-Hexanol Molecular Clusters Formed in Cyclohexane at Different Water/n-Hexanol/Cyclohexane Compositions Calculated by Titration ¹H NMR", *The Journal of Physical Chemistry B*, **121**, 10285-10291 (2017).
6. K Sato, T Yamasaki, H Nishide, K Oyaizu, "Grafted radical polymer brush for surface-driven switching of chiral nematic liquid crystals", *Polymer Journal*, **49**, 691 (2017).
7. K Sato, T Mizuma, H Nishide, K Oyaizu, "Command Surface of Self-Organizing Structures by Radical Polymers with Cooperative Redox Reactivity", *Journal of the American Chemical Society*, **139**, 13600-13603 (2017).
8. Y Sasada, R Ichinoi, K Oyaizu, H Nishide, "Supramolecular Organic Radical Gels Formed with 2,2,6,6-Tetramethylpiperidin-1-oxyl-Substituted Cyclohexanediamines: A Very Efficient Charge-Transporting and -Storable Soft Material", *Chemistry of Materials*, **29**, 5942-5947 (2017)
9. R Kato, T Oya, Y Shimazaki, K Oyaizu, H Nishide, "A hydrogen - storing quinaldine polymer: nickel - electrodeposition - assisted hydrogenation and subsequent hydrogen evolution", *Polymer International*, **66**, 647-652 (2017).
10. K Sato, R Katagiri, N Chikushi, S Lee, K Oyaizu, JS Lee, H Nishide, "Totally Organic-based Bendable Rechargeable Devices Composed of Hydrophilic Redox Polymers and Aqueous Electrolyte", *Chemistry Letters*, **46**, 693-694 (2017).

4.2 基調講演

1. H. Nishide, "Polymer-Perovskite Hybrids: their Structures and Photovoltaic Performance", 8th IUPAC Symposium on Macromolecular Architectures, Sochi (Russia), 2017. 6.
2. H. Nishide, "Organic Polymers for Chemically Carrying and Storing Hydrogen", 5th FAPS International Polymer Congress, Cheju (Korea), 2017. 10.
3. H. Nishide, "Redox Polymers for Energy Devices", 8th International Conference on Materials Engineering, Akita, 2017.10.

4.3 学会および社会的活動

日本化学連合前会長、The Federation of Asian Polymer Societies (FAPS)元会長

5. 研究活動の課題と展望

機能性レドックスポリマーの有機電池、太陽電池、水素キャリアなどへの実学的な展開を世界に先駆け実証しており、その評価と波及は大きい。

高品質ビームの発生及びその応用研究

研究代表者 鷲尾 方一
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

我々は非常に良く制御された高品質ビーム、ここでは電子ビーム・X線ビーム・レーザービーム等、を発生しそれを用いることによる応用研究を行っている。非常に良く制御された高品質ビームは科学技術のみならず、産業・医療などへの応用が見込まれており、精力的に研究開発を実施している。

本年度は非常に高精度に“角度”を制御した電子ビームと高品質なレーザー光の衝突によってX線を発生するレーザーコンプトン散乱の研究に関して、報告をする。

2. 主な研究成果

レーザーコンプトン散乱によって得られるX線は高輝度・短パルス・準単色・偏光特性などの特徴を持ち、小型高輝度X線源として期待される。我々はこの技術に対し、これまでに実施してきた電子ビームの角度制御技術を用いた『クラブ衝突』の原理実証を進めている。これまでに電子ビームの高精度角度制御を実証し、衝突用レーザー光として高品質なレーザービームが得られる薄ディスク増幅システムを構築した。2.1節にてクラブ衝突の原理に関して、2.2節にて電子ビームの角度制御に関して、2.3節にて開発したレーザーシステムを報告する。

2.1 クラブ衝突レーザーコンプトン散乱の原理

レーザーコンプトン散乱とは、高エネルギーの電子によってレーザー光を散乱し、エネルギーを与えることで、高エネルギーの光子(X線や γ 線領域)を得る手法であり、様々な特徴を有する。特に小型な加速器によってX線領域の高輝度光を得られることから、次世代の小型光源として注目されている。電子による光子の散乱確率を最大化するためには電子と光子を正面衝突させることが必要であるが、その確率は最大でも 10^{-5} 程度であるため、衝突に用いた電子や光子を周回させ、再度利用する手法が用いられる。しかしながら、レーザー光に対して周回させるような構成を用い、正面衝突を実施すると、電子とミラー等の干渉・散乱光子とミラー等との干渉が問題となる。そこで疑似的に正面衝突を作り出すのがクラブ衝突である。電子ビームを適切な角度(衝突角の半分)に傾けた状態で衝突させることによって、散乱確率のロスを最小化することができる。(図1参照)

このとき、レーザー光に対して傾きを付与することが困難であることから、電子ビームよりも十分に短いパルス幅のレーザー光を用いることが必要である。以下の図2に示すが、パ

ルス幅が短ければ短いほど、より正面衝突に近い状況を再現できることがわかる。そこで我々は 1ps (fwhm) を切るレーザー光を得るために、平行して Yb 添加薄ディスクセラミクスレーザーの開発を進めた。その成果に関しては 2.3 にて報告する。

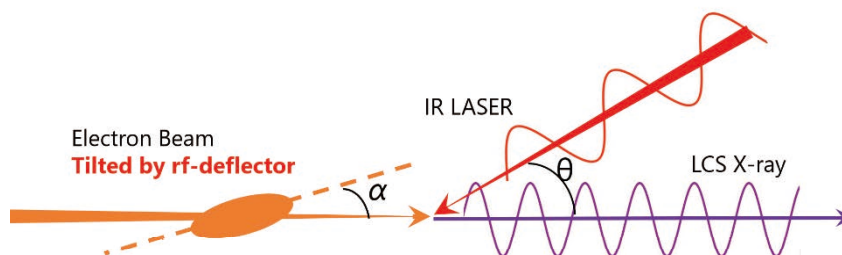


図 1 : クラブ衝突原理図

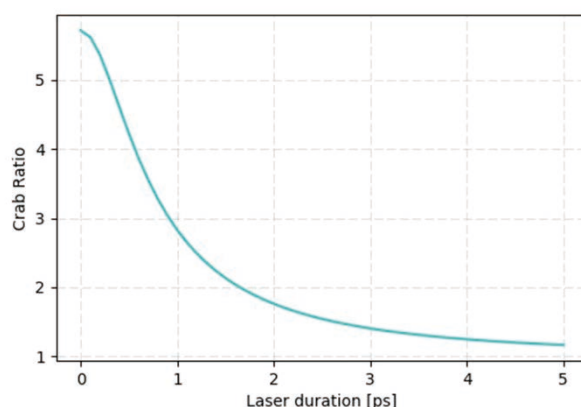


図 2 : クラブ衝突におけるルミノシティのレーザーパルス幅依存

2.2 電子ビームの高精度角度制御とその電子ビーム計測への応用

疑似的に正面衝突を実現する、クラブ衝突の実施のためには電子ビームの傾きを高精度に計測・制御する必要がある。我々はこれまでに開発した高周波偏向空胴（図 3）を用いてその詳細計測・高精度制御を実施した。高周波偏向空胴に印加する高周波の強度を変えることで、電子ビームに適切な傾きを与えることが可能である。

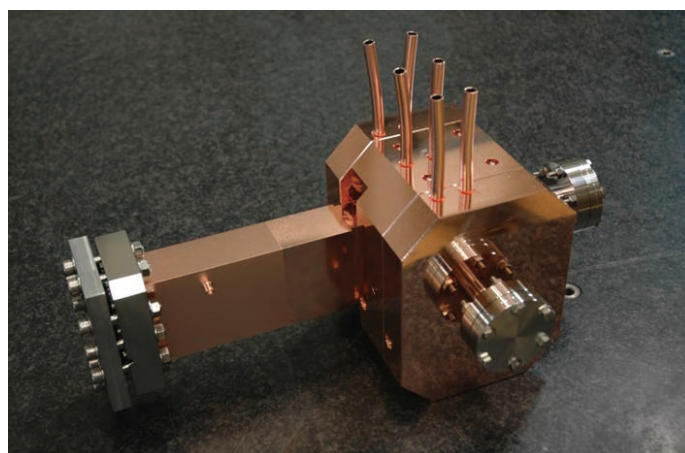


図 3 : 電子ビームの傾き制御用高周波偏向空胴

これを用いて、電子ビームの CT (Computer Tomography) 計測を実施した。以下の図 4 にその

結果の一例を示す。

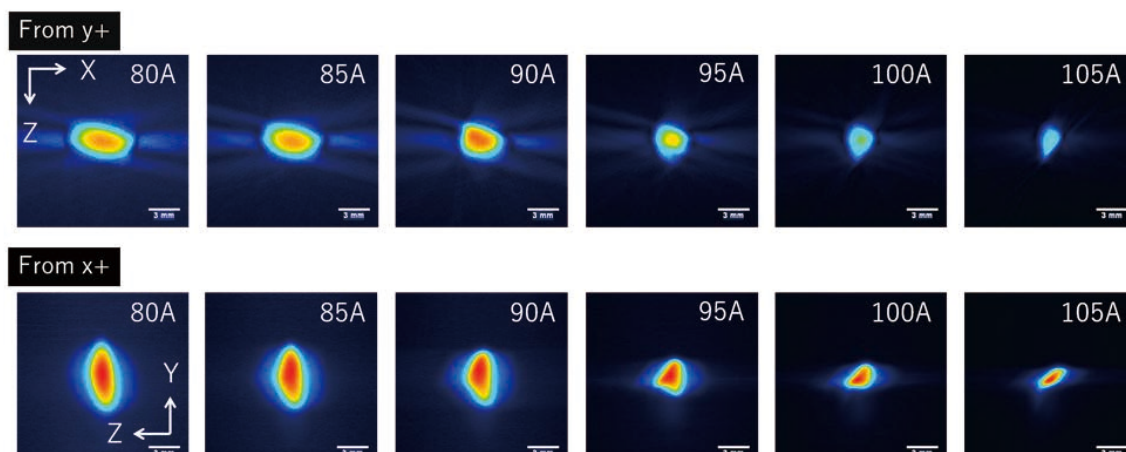


図4：電子ビームの傾き制御を用いたCT法による電子ビーム3次元計測結果

これらの図はそれぞれのソレノイド電流値（電子ビームのレンズ）に対して計測した3次元分布を示している。それぞれy方向・x方向から見た電子ビームである。z方向に電子ビームは進行している。ソレノイド電流値を変化させることで、xy方向には収束されていくのが確認できるとともに、z方向の長さはほぼ変化していない。また、もともとある程度傾きを持つように電子ビームを生成しているため、z軸に対して対称な形状でなく、傾きが確認できることがわかる。このように我々は電子ビームへの傾き付与の精度を高めることで、電子ビームのCT計測が可能であることを明らかにすることができた。

2.3 Yb添加薄ディスクセラミックスを用いた高品位レーザーシステム開発

前述の通り、短パルスかつ高品質なレーザー光が本原理実証試験には求められる。そこで、Yb添加薄ディスクセラミックスレーザーの構築を実施した。構築したレーザー増幅器の構成図及びその結果を以下の図5に示す。

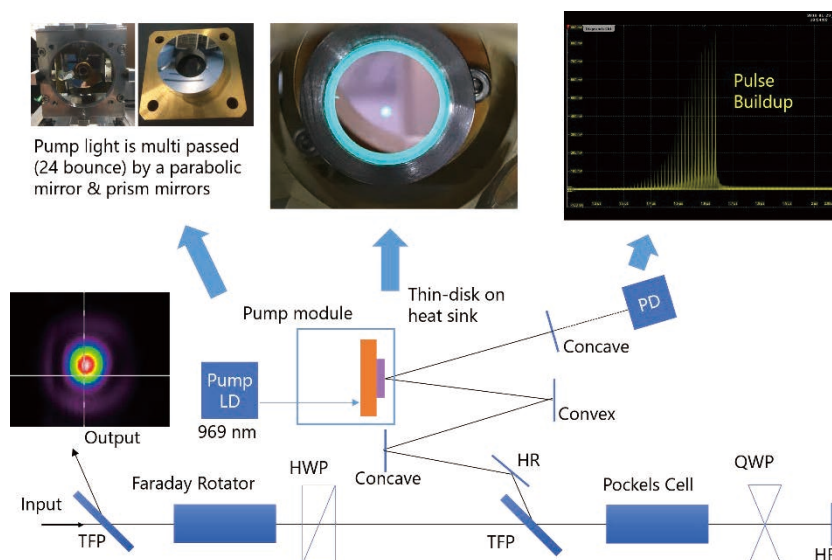


図5：構成したYb添加薄ディスクセラミックスレーザー増幅器

再生増幅という手法を用いて、1パルスのみを共振器内に周回させ、増幅後に取り出す校正と

なっている。現時点では、0.23mJ (10kHz 繰り返し)・0.8mJ (1kHz 繰り返し) の出力を得ている。目標は 10mJ (25Hz) 繰り返しであるので、出力としては到達していないが、励起光をパルス動作のレーザーダイオードに置き換えることによって、実現できるところまで来ていると結論している。また、出力されたパルスは圧縮をする必要があるが、圧縮機は未完である。しかしながら、レーザー光のスペクトル幅によってどの程度到達が可能であるかが概算できる。出力されたスペクトル幅は約 2nm あり、計算上 0.8ps 程度までの圧縮が可能である。これにより概ねダイオードの置き換えによって目標性能が達成できることを確認している。

3. 共同研究者

遠藤 彰 (理工学研究所・客員教授) 坂上 和之 (高等研究所・准教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

“Stabilization of burst laser pulse storage in an optical enhancement cavity using a counter propagating mode” Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yosuke Honda, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Rev. Sci. Instrum., 89(2018)023305.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

「フェムト秒極端紫外光による有機薄膜のアブレーションに関する研究」 X 線結像光学シンポジウム つくば 2017 年 11 月 坂上和之

4.4 受賞・表彰

佐々木智則 RF-Deflector を用いた電子ビームの 3 次元分布計測 第 60 回放射線化学討論会 最優秀賞 若手発表部門 2017 年 9 月

ブラメルド真理 Generation and evaluation of coherent terahertz waves using tilted electron beams Presentation Award of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ) August 2017

佐々木智則 Measurement of three-dimensional bunch profile using RF deflector cavity, Presentation Award of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ) August 2017

4.5 学会および社会的活動

日本放射線化学会 副会長

日本放射線研究連合 (JARR) 副会長

日本アイソトープ協会 理工学部会委員

ラドテック研究会 幹事

RadTech Asia Organization, Vice-president

5. 研究活動の課題と展望

上記のように、レーザーコンプトン散乱を非常に効率的にすることが可能なクラブ衝突技術の原理実証のために、要素技術開発を実施した。電子ビームの傾き制御は非常に高精度になっており、1度以下の精度で傾きを制御することが可能である。これを用いて電子ビームのCT計測を実施し、3次元分布の取得に成功している。レーザー光の開発としては、Yb添加薄ディスクレーザーが概ね完成しており、励起ダイオードの交換により、目標性能を達成できる見込みである。近い将来、これらを合わせることでクラブ衝突の原理実証試験を実施し、世界で初めてのレーザーコンプトン散乱のクラブ衝突化の成果を挙げる予定である。この成果により、小型高輝度X線源の実現可能性は飛躍的に向上することが見込まれ、実践的な装置開発に向けて研究プロジェクトとして舵を切っていく。

作業機械の智能化インタフェースに関する研究

研究代表者 菅野 重樹
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

建設機械等に代表される多くの人間機械システムにおける I/O ゲインは、作業内容や操作者によらず固定されており、その値は、客観的・定量的な基準というよりは、主観的な経験に基づいて決定されているのが現状である。高度な技能をもつ操作者であれば、I/O ゲインと使用条件とのミスマッチをある程度まで補えるものの、作業内容や操作者に合わない I/O ゲインは、身体的・精神的疲労を増大させ、時間効率や安全性などの作業パフォーマンスを低下させる原因となってしまう。そこで、この問題を解決するために、本プロジェクト研究では、I/O ゲインを調整する知的システムを導入することを提案している。人間機械システムにおける I/O ゲインは、大局的な作業特徴に基づき、操作者が違和感を覚えないように、その作業特性に徐々に馴染ませていくべきであることを鑑み、機械システムのベースとなる I/O ゲインを導出する根本的調整を行う。従来のゲインの概念と明確に区別するために、これを基本入出力ゲイン(Basic Input-Output Gain: BIOG)と呼ぶ。手動制御系においては、パワーアシスト車椅子におけるパラメータ調整や自動車用操縦レバーの粘性要素の調整、人間機械システムを解析するための Crossover Model など、多くの手法が提案されている。しかしながら、これらの研究では、作業内容や操作者は既知であることが多く、BIOG という観点のゲイン調整は考慮されていない。2017 年度は、2016 年度に具体化されたモジュール群を統合し、被験者実験からシステムの評価を行った。

2. 主な研究成果

実機実験から、BIOG調整によってヒストグラム波形が目標基準波形に整形されること、作業効率が向上すること、主観的な使いやすさが向上することを確認した。

2.1 実験の概要

(1) タスク： 本実験は、3つのピッチ軸を有する油圧駆動マニピュレータをスレーブ、関節角速度指令型のばね復帰型レバーをマスタとして利用する。本研究では、手先の位置決めに支配的に利用されるピッチ軸第1関節(+/-)と第2関節(+/-)における4つのBIOGマップ(合計12個のBIOGパラメータ)の調整を行う。評価タスクは、高速動作が求められるボールの運搬と微細操作が要求されるブロックの積み上げとした。ボール運搬タスク(タスクA)では、機体の前に設置されたボールプールからできるだけ多くのボールを掴み手前の収集領域まで運ぶものである。被験者には、決められた時間内でできる限り多くのボール運ぶように指示した。ブロック積み上げタスク(タスクB)では、環境に、2つの角柱と1から8まで番号付けされた8つのブロックが設置されている。被験者は、6つのブロックと2つの角柱を使用して、5段の構造物を構築する。積み上げ領域の余裕を縦横ともに1[cm]

と狭く設定することで、微細操作要求を非明示的に付与した。被験者には、できる限り早くかつ、環境への誤接触を避け、構造物を崩さない丁寧な作業を行うように指示した。

(2) 実験手順・評価方法： 被験者は6名、本実験機の操作に十分に慣れた操作者を利用した。すべての被験者は、まずタスクAを4セット行う(1日につき、20分×2セット)。初期BIOGには、中庸なデフォルトBIOG(G_{def})を利用する。BIOGは、施行日ごとに収集された操作量ヒストグラムを用いて調整される(合計3回の変更： $G_{A1} - G_{A3}$)。次に、タスクBを10回×2セットを1日とし、5日間連続で行う。1日目は各自のタスクAへの適応後BIOG(G_{A3})で作業を行う。次に、この1日目の作業結果を参照し、グループ間の作業時間の平均と分散が等しくなるように、被験者6名を3名ずつのグループに分ける。グループ1(以下、支援ありG)では、調整システムを用いたBIOG変更を行い($G_{B1} - G_{B3}$)、グループ2(以下、支援なしG)では、調整を行わない(G_{A3} のまま)。BIOG調整は、当該日の全施行データを用いて終了時に行う。最終5日目には、支援ありGは、 G_{def} で再試行し、支援なしGは、4日目の作業データを用いて調整したBIOG(G_{B1})にて作業を行う。なお、調整システムに関する説明は、被験者には一切しない。変更規範の波形整形能力の評価として、操作量ヒストグラムと正規分布波形の面積差分、作業パフォーマンスの評価として、ボールの運搬個数(タスクA)・作業遂行時間(タスクB)を計測する。また、操作者の主観的な使いやすさを評価するために、NASA-TLXを用いたアンケートを1セット、4セット、5セット終了後にそれぞれ行う(タスクBのみ)。

2.2 基本性能評価

運搬したボールの個数と面積差分の推移をFig. 1(a)に示す。面積差分は各関節(4枚分)における差分の合計値であり、最大値を100、最小値を0に基準化した。BIOGを調整することで、4日目のボールの個数は1日目に比べ1.5倍に増加した。また、面積差分が減少するにつれてボール個数が増加していることが分かる。タスクAは、大きな操作が繰り返し必要となるため、BIOGマップは大きな操作入力がしやすいように急峻な傾きに調整されている。軸ごとのBIOGマップの違いを分析すると、ブームのBIOGは、操作者に応じて大きく変化しており、特に、ブーム上げはすべての操作者で異なっている(Fig. 1(b))。これは、タスクAにおけるブーム上げ操作が操作者の操作技能によって影響を受けやすい(高難易度である)ことを示している。一方、アームのBIOGは、ほとんど同じであることから、アーム操作は操作者によらず同様であった(低難易度であった)ことが分かる。

2.3 支援有無比較評価

(1) 面積差分： Fig. 2(a)に、各グループにおける面積差分の推移を示す。支援ありGでは、1日目から4日目にかけて確実に面積差分が減少しているが、デフォルトBIOGに戻した5日目では増加している一方、支援なしGでは、面積差分の減少はほとんど見られなかった。しかしながら、4日目の作業データへ適応したBIOGマップで行った5日目では、面積差分の減少が確認された。BIOG調整を行うことで操作量ヒストグラム波形が、正規分布波形に近づくように整形されるのが分かる。また、面積差分の増減に対応して、作業時間が増減していることも分かる。以上より、本BIOG調整システムは、操作量ヒストグラム波形を基準波形(正規分布)に近づけられる可能性が示唆された。

(2) 作業効率： Fig. 2(b)に、各グループにおける遂行時間の推移を示す。両グループともに減少傾向はあるものの、支援ありGのほうが、支援なしGに比べ大きく減少し続けていることが分かる。支援なしGでは、3日目以降に作業時間の減少が見られず、自己改善が頭打ちになったものと予想される。調整支援の有無を切り替えた5日目において、支援ありGでは、すべての被験者でタスク時間が増加し、支援なしGでは、すべての被験者で減少することが分かった。4日目において支援ありG-支援なしG間で t 検定を行った結果、統計的な有意差($t=4.98$, $p<0.05$)が得られた。これは、BIOG

調整の支援効果により, 初日には確認されなかった作業時間差がグループ間に現れたことを示している. また, 支援なしGの4-5日目間で t 検定を行った結果, 統計的な有意差 ($t=4.31$, $p<0.05$) が確認されたことから, 調整されたBIOGを利用することで, 自己改善以上の作業効率性を引き出せることが分かった. その一方で, 支援ありGの4-5日目間は, 統計的な有意差が確認されなかった. これは, マニピュレータの効率的な動作イメージの習熟が大きく起因していると考えられる. 動作イメージが未習熟であれば, BIOG調整の効果は大きい, 習熟すれば, BIOG調整の効果は相対的に小さくなると考えられる. これは, 今後の調整戦略の再考に活用できる.

(3)精神的作業負荷: Fig. 2(c)に, NASA-TLXを用いた精神的作業負荷の定量化結果を示す. 支援ありGでは, BIOG変更に伴い, 使いやすさが向上しているが, 5日目のデフォルトBIOGでは評価が悪化している. 支援なしGでは, 慣れの影響(自己適応)により多少の改善はあるものの, 4日目の作業結果に適応を行った5日目では, 使いやすさが向上することが示唆された.

ヒアリングの結果, BIOG調整に気付いた操作者はおらず, 調整によって操作に違和感を覚えるものはいなかった. 以上より, 提案したBIOG調整手法が, 人間機械システムにおけるI/Oゲイン調整の要求機能を満たし, 作業性・操作性の改善に寄与することが示唆された.

3. 共同研究者

亀崎 允啓

(理工学術院総合研究所・主任研究員)

岩田 浩康

(創造理工学部 総合機械工学科・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] K. Chen, M. Kamezaki, T. Katano, T. Kaneko, K. Azuma, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, and S. Sugano, "Compound Locomotion Control System Combining Crawling and Walking for Multi-Crawler Multi-Arm Robot to Adapt Unstructured and Unknown

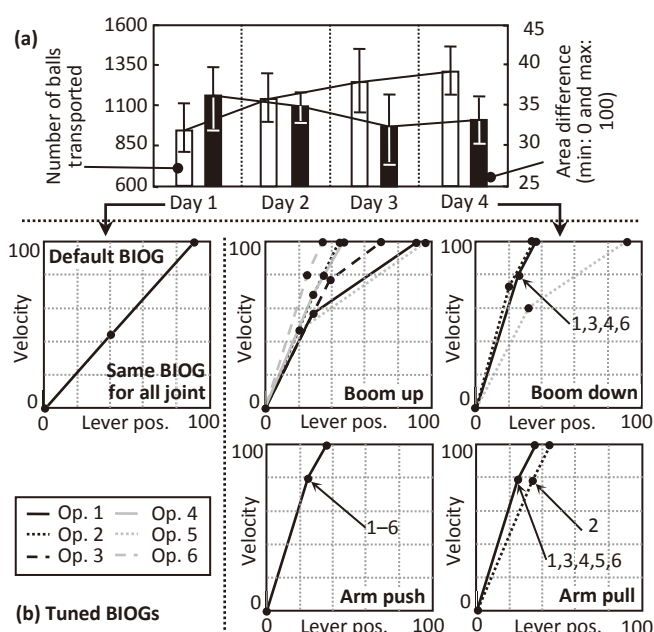


Fig. 1 The number of balls transported and tuned BIOG (Task A)

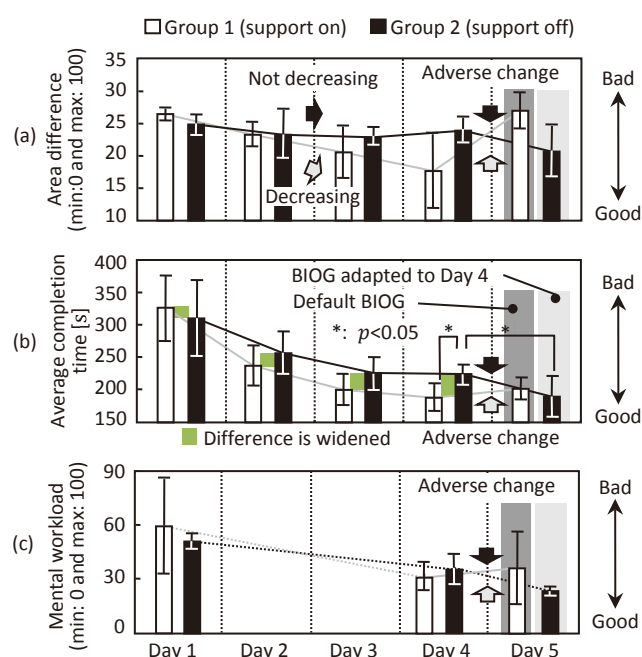


Fig. 2 Improvement of work performance by BIOG tuning (Task B)

- Terrain,” ROBOMECH Journal, 5 (2), pp. 1-17, Jan. 2018.
- [2] 宮田雅博, 亀崎允啓, 菅野重樹, “マルチ飛行カメラを用いた遠隔操作映像提示システム～映像の連続性と映像間の相補性を考慮したカメラの動的配置～”, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2017), pp. 2120-2123, 2017 年 12 月.
 - [3] R. Sato, M. Kamezaki, S. Niuchi, S. Sugano, and H. Iwata, “A Pre-offering View System for Teleoperators of Heavy Machines to Acquire Cognitive Maps,” Proc. IEEE Int. Symp. Safety, Security, and Rescue Robotics 2017 (SSRR 2017), pp. 61-66, Oct. 2017.
 - [4] K. Chen, M. Kamezaki, T. Katano, T. Kaneko, K. Azuma, T. Ishida, M. Seki, K. Ichiryu, and S. Sugano, “A Semi-Autonomous Compound Motion Pattern Using Multi-Flipper and Multi-Arm for Unstructured Terrain Traversal,” Proc. of 2017 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2017), pp. 2704–2709, Sept. 2017.
 - [5] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Condition-Based Less-Error Data Selection for Robust and Accurate Mass Measurement in Large-Scale Hydraulic Manipulators,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 66 (7), pp. 1820-1830, July 2017. (Impact Factor: 2.456) 10.1109/TIM.2017.2669759
 - [6] Kui Chen, Mitsuhiro Kamezaki, Takahiro Katano, Taisei Kaneko, Kohga Azuma, Tatsuzo Ishida, Masatoshi Seki, Ichiryu Ken, and Shigeki Sugano, “Usability Test in Different Types of Control Authority Allocations for Multi-Operator Single-Robot System OCTOPUS,” Proc. Int. Conf. Applied Human Factors and Ergonomics, pp. 675-685, July 2017.
 - [7] 亀崎允啓, 佐藤淳平, 三矢隆史, 岩田浩康, 菅野重樹, “機械操作者のプランニング技能の定量化に関する研究～操作手順と操作意識に着目した特徴量の抽出～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 論文集(Robomec'17), paper no. 1P2-A03, 2017 年 5 月.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

- [8] SI2017 優秀講演賞, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017 年 12 月.
- [9] SI2017 優秀講演賞, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017 年 12 月.

4.5 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

基本的な考え方は, その他の HMI においても応用できると考えている. 今後は, 被験者数の増加および被験者特性の多様化(技能など)を行うとともに, 調整システムのパラメータ(ヒストグラム階級数や BIOG マップ形状など)と調整効果の関係性を整理する.

実践的油層評価および最適開発計画策定に関する研修

研究代表者 栗原 正典
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

国際石油開発帝石株式会社 (INPEX) は、現在アゼルバイジャン共和国において石油開発の権益を保有しているが、新たな試みとして、アゼルバイジャン共和国国営石油会社 SOCAR 社の若手技術者に対し、包括的スキル向上を目指した人材育成研修を実施することで、友好関係を深め、産油国における日本の石油開発技術に対する信頼感を増幅させ、今後の権益保持・拡大を実現することを計画している。同社は上記研修を経済産業省より受託し、研修生の受け入れ、技術教育、現場見学、日本文化見学、等を主体的に実施することを計画している。その円滑な遂行のため、早稲田大学は主たる研修部分を INPEX より受託し、仮想油層を対象とした実践的な油層評価、油層モデリング、油層シミュレーション、経済検討・開発計画策定等に関する講義・演習教材を作成し、アゼルバイジャン共和国の若手技術者に対し研修を行うことを目的としている。

なお、本年度の研修は昨年度の研修に引き続き実施したものであるが、昨年度の研修が好評であったため、本年度は、より多くの人材に早稲田大学の石油開発技術を教示してほしいとの要請をアゼルバイジャン共和国より受けた。そのため、SOCAR 社の若手技術者の受入に先立ち、アゼルバイジャン共和国において、SOCAR 社の若手技術者および石油開発技術を専攻している学生を対象に、約 1 週間の特別講座を実施することも目的としている。

具体的には以下が実施された。

- ・ 特別講座の講義・演習教材の作成
- ・ 本研修（受入研修）の講義・演習教材の改訂
- ・ 作成教材に基づく、アゼルバイジャン共和国における特別講座（約 1 週間）
- ・ SOCAR 社若手技術者の受け入れおよび研修（本研修：約 2.5 か月）

2. 主な研究成果

2.1 特別研修

独自に作成した教材を用いて、石油増進回収 (EOR) の数値シミュレーションについて、2017 年 5 月 23 日～26 日に、アゼルバイジャン共和国 (Baku Higher Oil School) において、SOCAR 社の若手技術者および石油開発技術を専攻している学生を対象に、以下の講義および演習指導を実施した (表 1 参照)。

- ・ 基礎講義：EOR 概論、非在来型油層への EOR の適用、最新の EOR、EOR を対象とした数値シミュレーション
- ・ EOR シミュレーション演習：多成分系シミュレーションによる二酸化炭素圧入挙動予測、低塩分濃度水攻法挙動予測シミュレーション

表 1 特別講座内容

	DAY 1	DAY 2	DAY 3	DAY 4
10:00-12:00 (120min)	Introduction to EOR	EOR applied to Unconventional	Practical Reservoir	EOR Simulation Demonstration
13:00-14:30 (90min)	Individual EOR Methods/	EOR under investigation	Simulation Procedure/	
14:50-15:50 (60min)	Simulators		Demonstration	

2.2 本研修

昨年度独自に作成した教材を改訂し、油層評価、油層モデリング、油層シミュレーション、開発計画策定、経済検討手法等について、以下の講義および演習指導を 2017 年 8 月 21 日～2017 年 11 月 10 日に実施した（表 2 参照）。

表 2 本研修内容

Part	Session Title	Contents
1	Lecture on reservoir evaluation	• Introduction to reservoir engineering and development planning • Review of basic reservoir engineering • Fundamentals of reservoir data analysis
	Workshop on reservoir data analysis	• Introduction of computer system/network • Introduction to hypothetical reservoir and its available data • Well log data analysis • Conventional and special core data analyses • Fluid PVT data analysis • Well test data analysis (using "Saphir" of Kappa) • Presentation by participants
	Workshop on reservoir evaluation	• Construction of geological model (using "RMS" of Emerson) • Estimation of reservoir properties distributions by geostatistical approach • Evaluation of original oil and gas in place • Presentation by participants
2	Lecture on reservoir simulation	• Introduction to reservoir simulation and numerical analysis • Mathematical background of reservoir simulators • Fundamentals of reservoir simulation study
	Workshop on reservoir simulation	• Introduction to reservoir simulator (using "Nexus" of Landmark) • Conversion of geological model to reservoir model • Fine grid simulation • Calculation of well flow profiles • History matching • Prediction • Presentation by participants
3	Special lectures on petroleum refinery, production engineering and geophysics	• Overview of midstream and downstream • Geomechanical aspects of petroleum production engineering • Fundamentals of geophysics
	Lecture on economic evaluation and development planning	• Review of drainage mechanism and oil recovery methods • Fundamentals of economic evaluation • Introduction to surface facilities and development planning
	Workshop on economic evaluation and development planning	• Estimation of capital and operating costs • Development planning (participant's own plans) • Prediction • Economic evaluation • Optimization of development planning • Presentation by participants • Wrap up

- 油層解析講義：油層工学の位置付けと役割、油層工学の基礎、油層解析手法紹介、等
- 油層解析ワークショップ（研修生との共同作業）：模擬油田の検層・コア・坑井テスト・流体のデータの解析、地質モデリングプログラムの使用法説明、油層モデリング、原始埋蔵量の評価、等

- ・油層シミュレーション講義：油層シミュレータの概要、油層シミュレーションスタディの手法、開発計画の策定手法、等
- ・油層シミュレーションワークショップ（研修生との共同作業）：油層シミュレータ使用法説明、ヒストリーマッチング、生産挙動予測
- ・石油生産施設・石油精製施設の概要、経済性評価・開発計画策定手法の講義
- ・経済検討・開発計画策定ワークショップ（研修生との共同作業）：石油生産施設のコスト推定、経済計算プログラムの使用法説明、最適開発計画策定

3. 共同研究者

松方正彦（先進理工学部 応用化学科 教授）

斎藤 章（創造理工学部 環境資源工学科 特任教授）

古井健二（創造理工学部 環境資源工学科 准教授）

4. 研究業績

4.2 総説・著書

野村、栗原、牟田、原：“独自に構築した仮想貯留層モデルを用いたアゼルバイジャン共和国の石油開発技術者育成支援の取り組み”、石油技術協会誌、82 巻、3 号、2017

4.4 受賞・表彰

SOCAR 総裁から感謝状を受領、アゼルバイジャン共和国大統領主催の式典における日本国代表の外務省政務官の祝辞での言及など、本研修への高い評価と感謝を受けている。

4.5 学会および社会的活動

石油技術協会会長

日本地層評価学会（SPWLA Japan）会長

5. 研究活動の課題と展望

より多くの人材育成研修を目指し、本研修はフェーズ 2 として、2018 年度以降も継続する計画である。フェーズ 2 では、上記と同様の研修に加え、以下の特別講座を INPEX と共同で実施する計画である。

特別講座（INPEX - Waseda University EOR Reservoir Simulation Workshop）

INPEX は、アゼルバイジャン共和国国内にて、SOCAR 社若手技術者ならび現地大学生約 15 名を対象として、10 日間程度の EOR に特化したワークショップ形式の演習（INPEX - Waseda University EOR Reservoir Simulation Workshop）を実施する予定である。早稲田大学は以下を担当する。

- ・ EOR シミュレーションに関する講義資料および演習問題の作成
- ・ EOR シミュレーションに関する講義および演習の実施
- ・ 演習時の補助
- ・ 実油田における諸問題の対応に関する議論

安全安心な社会を実現し豊かな文化を創造する コンテンツ・映像処理技術研究

研究代表者 森島 繁生
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

安全安心という観点からは、画像処理によって犯罪捜査支援を実現したり、交通事故を未然に防ぐアクティブセーフティな技術開発が研究課題である。また豊かな文化の創造という観点では、Web動画や音楽コンテンツの効率的な鑑賞支援やアマチュアによるコンテンツ創作支援が重要な研究課題である。効率的な鑑賞支援の典型は、必要なコンテンツを要約して短時間で内容把握できる技術をブラウザの機能として実現することである。また最近のCGM (Consumer Generated Media) の隆盛により一般のアマチュアでも手紙を書く感覚でコンテンツの作成が可能な環境が整いつつあるが、プロ並みのクオリティを実現するには未だにスキルと長い制作時間が必要となる。既存のコンテンツを再利用して付加価値を高めるN次創作も一般的になりつつあるが、誰の作品をリファーマしたかを明らかにしてオリジナルの著作権を保護する技術は今後ますます要視されてきている。このようなコンテンツの鑑賞や創作の支援をする技術開発が研究課題の大きな柱である。

2. 主な研究成果

まず鑑賞支援技術の一例として、最近一般化している一人称視点動画の要約システムを開発した。一人称視点カメラとは、GoProに代表されるように頭部や体、車のフロントガラス等に装着して映像を垂れ流し状態で収録するものである。よって後に鑑賞に堪える作品に落とし込んだり、事故のシーンのみを抽出するなどして、必ず後処理を伴うものである。開発した要約システムでは、画像に映り込んだオブジェクト認識を行った後に、その一覧を提示して、ユーザーが見たい対象をインタラクティブに選択することによって、どのシーンを重点的に提示するかを自動的に決定して、重要なシーンのみリアルタイムで、その他の重要度の低いシーンを早送りで再生することによって、鑑賞時間を大幅に短縮しながら動画の内容を忠実に把握することを可能としている。この成果は、トップコンファレンスの1つであるACM CHIにおいてデモ発表およびLate Breakingセッションに採択された。

創作支援技術としては、1枚の顔写真からの顔の3次元形状モデリングとアルベド推定、スペキュラー分離を同時に実現可能な深層学習に基づく新しい手法を提案した。トレーニングデータとして正解の3次元形状、様々な照明環境化における2次元画像とそれぞれに対して分離されたスペキュラーBRDFを正解データとしてLightStageシステムで収録し、この多人数データベースに基づいて、深層学習によって1枚画像を入力としてこれらの情報を推定するシステムを提案した。この技術は、従来方式のState-of-the-artと比較しても優れた性能を示すことが評価によって明らかとなり、ACM SIGGRAPH2018においてTechnical Paperとして採択されることが決定した。この会議はグラフィックス分野の頂点の会議であり、最高水準の技術として認定された。これによって、1枚

の顔画像さえあれば、新しい照明環境下での高品質な顔画像合成が可能となり、瞬時に特定人物の3Dモデルを生成し、Digital DoubleやAvatarのインスタント生成に寄与することができ、現在多くの企業から問い合わせが殺到している状況である。

深層学習を用いた研究成果は他にも存在し、例えば顔の印象の近い画像をWeb上から検索・抽出したり、あるいは3次元モデルを介することなく髪型の入れ替えを実行できる技術など、多くの成果を上げることが実現できている。今後は、様々なコンテンツデータなどの収集に積極的に取り組み、さらに加速度的に多くのハイレベルな研究成果の蓄積が期待される。

3. 研究業績

3.1 学術論文（査読付きジャーナル）

- [1] Tatsunori Hirai, Hironori Doi, Shigeo Morishima, "Latent Topic Similarity for Music Retrieval and Its Application to a System that Supports DJ Performance", *Journal of Information Processing*, Vol. 26, pp. 276-284, 2018.
- [2] 小澤禎裕, 谷田川達也, 久保尋之, 森島繁生, "光学的最短経路長を用いた表面下散乱の高速計算による半透明物体のリアルタイム・レンダリング", *画像電子学会誌* Vol.46, No.4, pp.533-546, 2017.
- [3] 福里 司, 藤崎匡裕, 加藤卓哉, 森島繁生, "頭蓋骨形状を考慮した肥瘦変化顔画像合成", *画像電子学会誌*, Vol.46, No.1, pp.197-205, 2017.

3.2 学術論文（査読付きプロシーディングス）

- [1] Seita Kayukawa, Keita Higuchi, Ryo Yonetani, Masanori Nakamura, Yoichi Sato and Shigeo Morishima, "Dynamic Object Scanning: Object-Based Elastic Timeline for Quickly Browsing First-Person Videos", *Proceedings of 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*, Demo, D503, 2018. DOI: 10.1145/3170427.3186501, <https://chi2018.acm.org/>, Montreal, Canada, 2018.
- [2] Seita Kayukawa, Keita Higuchi, Ryo Yonetani, Masanori Nakamura, Yoichi Sato and Shigeo Morishima, "Dynamic Object Scanning: Object-Based Elastic Timeline for Quickly Browsing First-Person Videos", *Asian CHI symposium, Posters*, No.16, <http://hci.tokyo/chi2018/>, Montreal, Canada, 2018.4
- [3] Seita Kayukawa, Keita Higuchi, Ryo Yonetani, Masanori Nakamura, Yoichi Sato and Shigeo Morishima, "Dynamic Object Scanning: Object-Based Elastic Timeline for Quickly Browsing First-Person Videos", *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2018)*, Posters, LBW611, DOI: 10.1145/3170427.3189085, 2018.
- [4] Shoichi Furukawa, Tsukasa Fukusato, Shugo Yamaguchi, Shigeo Morishima, "Voice Animator: Automatic Lip-Synching in Limited Animation by Audio", *14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTER ENTERTAINMENT TECHNOLOGY (ACE 2017)*, <http://ace2017.info/>, London, UK, 2017.12.14-2017.12.16, Paper Award:Gold Prize
- [5] Naoya Iwamoto, Takuya Kato(joint first author), Hubert P. H. Shum, Ryo Kakitsuka, Kenta Hara, Shigeo Morishima, "DanceDJ: A 3D Dance Animation Authoring System for Live Performance", *14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTER ENTERTAINMENT TECHNOLOGY (ACE 2017)*, <http://ace2017.info/>, London, UK,

2017.12.14-2017.12.16, Award Paper: Gold Prize

- [6] Hirofumi Takamori, Haruki Sato, Takayuki Nakatsuka, Shigeo Morishima, "Automatic Arranging Musical Score for Piano using Important Elements", 14th Sound and Music Computing Conference (SMC-17), <http://smc2017.aalto.fi/proceedings.html>, SMC17_p35.pdf, Espoo, Finland, 2017.
- [7] Takayuki Nakatsuka, Shigeo Morishima, "Simulating the friction sounds using a friction-based adhesion theory model", The 20th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX2017), pp. 32-39, 2413-6689, Edinburgh, UK, 2017.
- [8] Takahiro Itazuri, Tsukasa Fukusato, Shugo Yamaguchi, Shigeo Morishima, "Court-based Volleyball Video Summarization Focusing on Rally Scene", Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, DOI: 10.1109/CVPRW.2017.28, Honolulu, USA, 2017.
- [9] Shoki Miyagawa, Yoshihiro Fukuhara, Fumiya Narita, Norihiro Ogata, Shigeo Morishima, "Retexturing under Self-Occlusion using Hierarchical Markers", SIGGRAPH 2017, <http://s2017.siggraph.org/posters>, <http://s2017.siggraph.org/posters>, 2017.
- [10] Naoki Nozawa, Tsukasa Fukusato, Shigeo Morishima, "3D Model Partial-Resizing via Normal and Texture Map Combination", SIGGRAPH 2017, DOI: 10.1145/3102163.3102203, <http://s2017.siggraph.org/posters>, Los Angeles, USA, 2017.
- [11] Takahiro Itazuri, Tsukasa Fukusato, Shugo Yamaguchi, Shigeo Morishima, "Court-Aware Volleyball Video Summarization", SIGGRAPH 2017, DOI: 10.1145/3102163.3102204, <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3102204>, Los Angeles, USA, 2017.
- [12] Masanori Nakamura, Shugo Yamaguchi, Shigeo Morishima, "Beautifying Font: Effective Handwriting Template for Mastering Expression of Chinese Calligraphy", SIGGRAPH 2017, 978-1-4503-5015-0/17/07, <http://s2017.siggraph.org/posters>, Los Angeles, USA, 2017.
- [13] Shintaro Yamamoto, Pavel Savkin, Takuya Kato, Shoichi Furukawa, Shigeo Morishima, "Facial Video Age Progression Considering Expression Change", Computer Graphics International 2017, DOI: 10.1145/3095140.3095145, <http://fj.ics.keio.ac.jp/cgi17/>, Yokohama, Japan, 2017.
- [14] 成田 史弥, 齋藤 隼介, 福里 司, 森島 繁生, "可展面制約を考慮したテンプレートベース衣服モデリング", Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017, <http://cgvi.jp/vc2017/>, 東京, 2017.
- [15] 山本晋太郎, サフキンパーベル, 加藤卓哉, 佐藤優伍, 古川翔一, 森島繁生, "表情変化データベースを用いた経年変化顔動画合成", Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017, <http://cgvi.jp/vc2017/>, 東京・日本, 2017.
- [16] 板摺貴大, 福里司, 山口周悟, 森島繁生, "コート情報に基づくバレーボール映像の鑑賞支援", Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017, <http://cgvi.jp/vc2017/>, 東京, 日本, 2017.
- [17] Ayano Kaneda, "Fiber-dependent Approach for Fast Dynamic Character Animation", The 30th International Conference on Computer Animation and Social Agents(CASA 2017), <http://casa2017.kaist.ac.kr/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/1-Kaneda.pdf>, Seoul, South Korea, , 2017.
- [18] Ryo Kakitsuka, Kosetsu Tsukuda, Satoru Fukayama, Naoya Iwamoto, Masataka Goto,

Shigeo Morishima, "Authoring System for Choreography Using Dance Motion Retrieval and Synthesis", The 30th International Conference on Computer Animation and Social Agents(CASA 2017), <http://casa2017.kaist.ac.kr/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/122-Kakitsuka.pdf>, Seoul, South Korea, 2017.

3.3 総説・著書

佐藤優伍, 森島繁生, "” 車載センシング技術の開発と ADAS、自動運転システムへの応用” 第 8 章 第 2 節 顔表情変化に基づくドライバの眠気度合推定と眠気検出技術", 株式会社 技術情報協会, No. 1896, pp. 410-418, 2017.

3.4 学会および社会的活動

日本学術振興会 新学術領域 評価委員会座長
ACM VRST 2018, General Chair
SIGGRAPH ASIA 2018, VR/AR Advisor
VC シンポジウム 2018, 運営副委員長

4. 研究活動の課題と展望

コンテンツの鑑賞支援、創作支援という新しいコンテンツ文化への貢献、さらに犯罪捜査支援や運転手支援による安全安心な社会実現のための要素技術研究を行い、より高いレベルでの課題解決を目指して研究を推進していく。最終的には、顔画像 1 枚を入力として高精度な顔形状の 3 次元推定を行いモデルが自動構成され、様々な要素で本人にカスタマイズされたキャラクタを生成した後に、音楽に同期してダンスし、そのモーションに追従して頭髮が変形し、クロスシミュレーションが実行され、表情変形がリアルに反映される、このような一連の技術の集大成としての個性を反映可能なキャラクタ生成プラットフォームを構築し、今後開発予定の新技术を逐次これをベースに反映していく予定である。この成果に基き新たな外部資金獲得に向けて様々なプロポーザルを行っていく。

エネルギー・ネクスト研究

研究代表者 朝日 透
(先進理工学部 生命医科学科 教授)

1. 研究課題

エネルギー問題が叫ばれて久しい今日、次世代エネルギー材料・デバイスに関する研究は国際社会および日本社会の抱えるエネルギー問題解決に大きく貢献する。本プロジェクトでは新しいエネルギー変換・貯蔵、分子エネルギープロセス、省エネルギープロセス、生物資源エネルギーの開発に取り組み、次世代・次々世代のエネルギーの開発指針を提案できる研究推進と拠点形成を目指す。電荷の生成・輸送・貯蔵・放出の制御に関する研究に基づき、光屈曲材料、固相反応、無溶媒重合、バイオ燃料、エネルギー生産に関わる酵素の探索などを研究のキーワードとして取り上げ、次世代、次々世代のエネルギー材料・デバイス・システムの開発、省エネルギープロセスの開発、新しい解析手法の開発に繋げることが特色となる。

2. 主な研究成果

2.1 熱的な相転移による結晶の移動

光や熱などの外部刺激でメカニカルに動く有機結晶は、これまでのエネルギー変換機構とは異なる新しい材料として注目されている。本研究では、光を当てるとねじれ曲がることをすでに報告したキラルアゾベンゼン結晶について、145℃付近で熱的に単結晶-単結晶相転移することを新しく見出した。顕微鏡下で結晶を観察すると、構造相転移の際に結晶が屈曲した。これは、ホットプレートで加熱すると結晶の下側から高温相に変化し、長軸方向に縮むためである。冷却時は上側(空気側)から低温相に戻るため、同様に屈曲する。相転移前後で単結晶 X 線構造解析を行った結果、低温相から高温相に変化すると、キラルアゾベンゼン分子の側鎖フェニル基が回転し、*b* 軸(長軸方向)は 0.3%縮むことが分かり、結晶の屈曲機構を分子レベルで説明できた。

厚みに勾配のある板状結晶をホットプレート上に置き、相転移温度(145℃)を挟んで加熱・冷却を繰り返したところ、屈曲を繰り返しながら、結晶が 3 mm/h の速さで尺取り虫のように歩いていくことを発見した(図 1a)。これは、厚みに勾配のある結晶において、加熱時は厚い左端が動き、冷却時は薄い右端が動いたためである。また、幅に勾配のある薄い結晶は、1 回の加熱または冷却により、回転しながら 15 mm/s の速さ(尺取り虫歩行の約 2 万倍)で高速移動した(図 1b)。回転する理由は、結晶が屈曲したときにバランスを保てず、横に倒れてひっくり返るからである。ひっくり返る間に、高温相は空気に冷やされて低温相に戻るため、一度ひっくり返った後も再び屈曲する。最初の回転の勢いも相まって一方向に転がり続け、低温相に戻れないほど高温になると動きが止まると説明できる。これらの結晶移動の

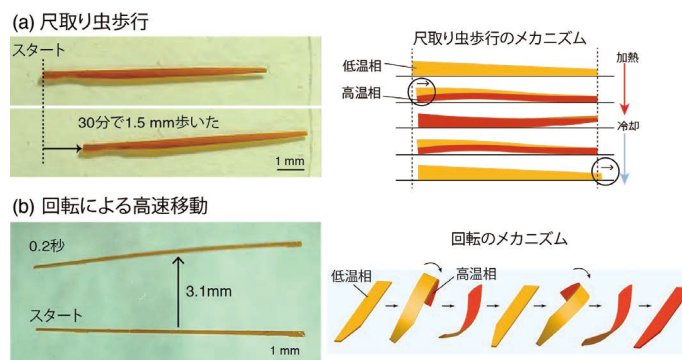


図 1. 加熱・冷却による結晶の移動現象

推進力は結晶外形の非対称性によって発生することを明らかにし、結晶自体を移動させることに成功した。本研究成果は小島秀子客員教授との共同研究の成果であり、国際誌 *Nature Communications* に掲載された。

2.2 両親媒性チミン誘導体分子の水中における自己集合体形成と光化学反応

光照射による外部刺激のみで可逆に重合・解重合できる高分子は、再生可能・自己修復機能をもつ低環境な材料として期待できる。本研究の共同研究者であるオーストラリア・モナッシュ大学の齋藤らは、DNA 構成塩基のひとつであるチミンが、[2+2]光環化付加反応により二量化することに注目し、チミン置換誘導体が結晶内での光化学反応により、可逆的に光重合する高分子の合成を報告している。また、Thymine 骨格をもつ双頭型両親媒性の分子(疎水性を親水性が挟む形をした分子)が水中で自己集合体を形成し、光化学反応により二量体を生成して自己集合体の形態が変化することを報告している。双頭型両親媒性化合物は自己集合体を形成する臨界凝集濃度(Critical Aggregation Concentration : CAC)が従来の両親媒性化合物よりも低い。しかし、その光化学反応と形態の相関はわかっておらず、自己集合体中で光化学反応により高分子を生成することはできていない。本研究では、水素結合部位としてアミド結合を有する双頭型両親媒性 Bis-Thymine 誘導体を合成し、水中での自己集合体形成と光化学反応性との関連を調べることで、光化学反応による多量体の生成を目的とし、アミド結合を有する双頭型両親媒性 Bis-Thymine 誘導体を合成した。また、水中での自己集合体形成と光化学反応性との関連を調べた。UV 吸収スペクトル測定により、UV 照射(302 nm)による

Bis-Thymine 誘導体の水中での光化学反応を追跡し、光化学反応が 1 時間程度で進行することを確認した。また、TEM 観察により、水中でシート形状の自己集合体を形成し、UV 照射前後で形態が崩れたことを見出した。今後、シート形状の自己集合体であることから、光照射により可逆的に形態変化する有機素材シートの開発が期待される。

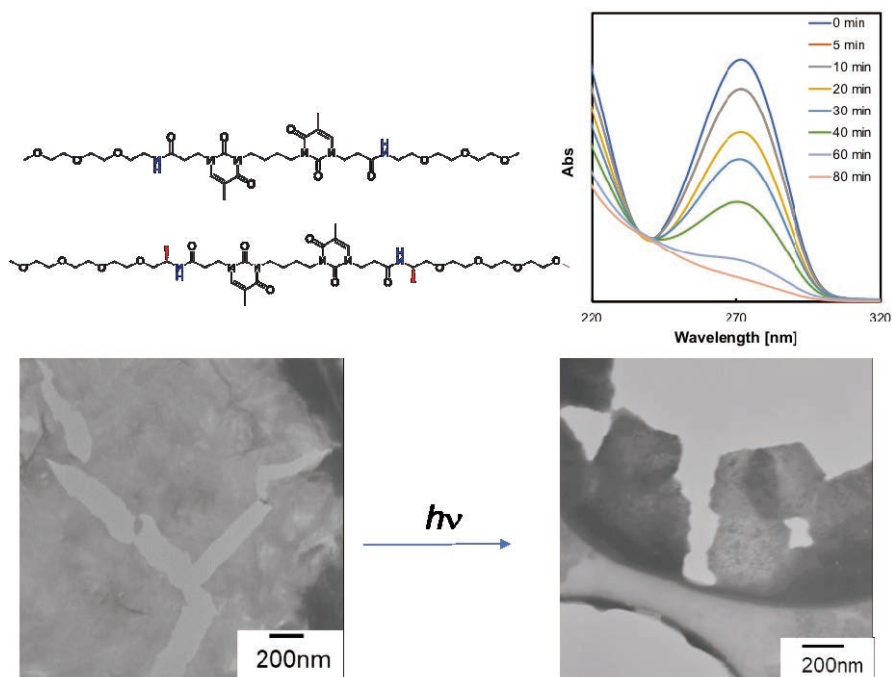


図 1. 両親媒性ビスチミン誘導体の分子構造(左上)；光反応前後の自己集合体構造の TEM 観察(下)と UV スペクトル (右上)

2.3 シングルセルゲノムデータの新規アセンブリ法の開発

近年、培養手法が確率されていない環境微生物の研究に向けてシングルセルゲノム解析手法が注目されている。主としてシングルセルゲノム解析では、MDA (Multiple displacement amplification)法によって増幅された SAG (Single-cell amplified genome)のシーケンスデータをもとに、ゲノム配列のアセンブリが行われる。しかし、MDA によるゲノム増幅において、混入 DNA の増幅、キメラ配列の増幅、増幅バイアスが生じてしまうため、培養細胞からの抽出ゲノム DNA を用いる従来のゲノム解析手法と比べて、シングルセル解析によって取得されるゲノム情報の配列精度およびゲノムカバー率が低下するという課題が存在する。

これらの問題を解決するためにこれまで様々なシングルセル解析手法が開発されてきた。我々はピコリットルサイズの微小液滴を用いることで、混入 DNA 増幅の少ない SAG を超並列的に増幅する sd-MDA 法(Hosokawa et al. Sci. Rep., 2017)を開発している。そこで本研究では、sd-MDA を用いて並列取得したコンタミネーションの少ない SAG データを用いて、キメラ配列の除去を伴った高精度ゲノム解析手法の開発を行った。SAG データのエラー配列除去およびそれに伴う高精度ゲノム情報の取得を目的として、新規解析ツール「ccSAG (Cleaning and Co-assembly of a Single-Cell Amplified Genome)」の開発を行った。ccSAG は複数の SAG データをインプットとして、①同株由来 SAG データの選定、②同株由来 SAG データの相互参照によるキメラ配列および非ゲノム DNA 配列の除去、③クリーニングした同株由来 SAG データの co-assembly による高精度ゲノム配列の取得を行う解析ツールである (Fig. 1)。枯草菌 SAG データをモデルとして、co-assembly によって取得されるゲノム情報の評価を行った。生 SAG データの co-assembly においては、いかなるインプットデータ数を用いて解析しても配列断片数が 200 本以上となった。これは、培養細胞集団からの抽出ゲノムを用いた解析結果(Bulk)と比べて、アセンブリが低質であったことを示す結果である。一方で、クリーン SAG データの co-assembly においてはインプットファイル数の上昇とともに配列断片数が減少し、8 サンプル以上の SAG データを用いることで Bulk サンプルと同等の約 60 本にまで達した。また、クリーン SAG データの co-assembly によって得られた配列は、より長くつながっただけではなく、生データのアセンブリ結果と比べて顕著にミサアセンブリが減少していた。本結果から、ccSAG を用いることで、培養手法の確立されていない環境微生物に対しても、SAG データから高精度なドラフトゲノムを取得できる可能性が示された (Kogawa et al. 2018 Sci. Rep.)。

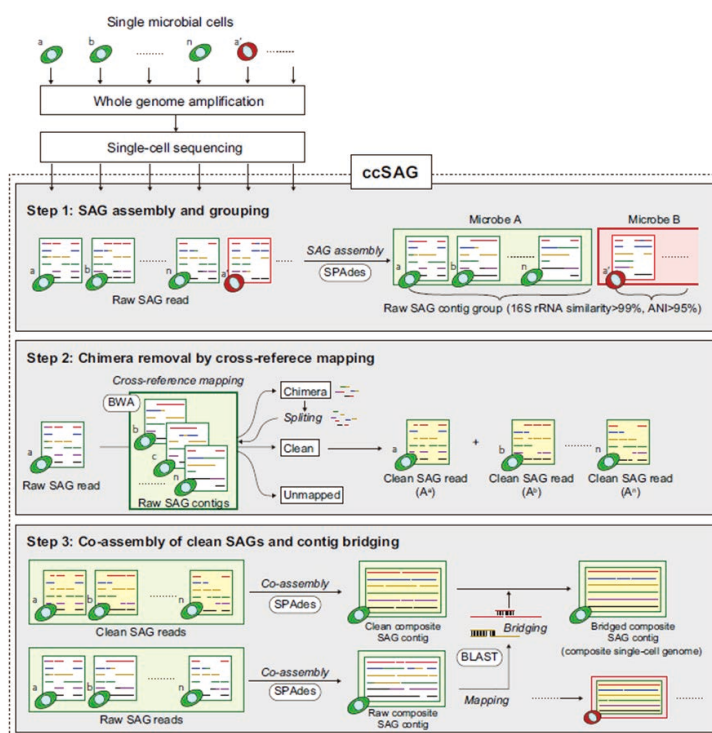


図 1. シングルセルゲノムデータの解析法

3. 共同研究者

逢坂 哲彌(ナノ・ライフ創新研究機構・特任研究教授)

竹山 春子(先進理工学部・生命医科学科・教授)

森 康郎(地域・地域間研究機構・客員上級研究員)

五條堀 孝(ナノ・ライフ創新研究機構・招聘研究教授)

横島 時彦(理工学研究所・主任研究員)

秀島 翔(ライフサポートイノベーション研究所・次席研究員)

由良 敬(理工学術院・教授(任期付)／お茶の水女子大学・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. T.Wada, T.Hanyu, K.Nozaki, K.Kataoka, T.Kawatani, T.Asahi, N.Sawamura, Antioxidant activity of Ge-132, a synthetic organic germanium, on cultured mammalian cells, *Bulletin*, 41(5), 749-753 (2018).
2. T.Taniguchi, H.Sugiyama, H.Uekusa, M.Shiro, T.Asahi, H.Koshima, Walking and rolling of crystals induced thermally by phase transition, *Nature Communications*, 9, Article number: 538 (2018).
3. N.Sawamura, M.Yamada, M.Fujiwara, H.Yamada, H.Hayashi, N.Takagi, T.Asahi, The Neuroprotective Effect of Thalidomide against Ischemia through the Cereblon-mediated Repression of AMPK Activity, *Scientific Reports*, 8, Article number: 2459 (2018).
4. Y.Shitashima, T.Shimozawa, T.Asahi, A.Miyawaki, A dual-ligand-modulable fluorescent protein based on UnaG and calmodulin, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 496(3), 872-89 (2018).
5. Y.Shitashima, T.Shimozawa, A.Kumagai, A.Miyawaki, T.Asahi, Two Distinct Fluorescence States of the Ligand-Induced Green Fluorescent Protein UnaG, *Biophysical Journal*, 113(12), 2805-2814 (2017).
6. K.Nakagawa, Alexander T. Martin, Shane M. Nichols, Veronica L. Murphy, B.Kahr, T.Asahi, Optical Activity Anisotropy of Benzil, *J. Phys. Chem. C*, 121(45), 25494-25502 (2017).
7. Y.Ju, T.Asahi, N.Sawamura, Arctic Aβ40 blocks the nicotine-induced neuroprotective effect of CHRNA7 by inhibiting the ERK1/2 pathway in human neuroblastoma cells, *Neurochemistry International*, 110, 49-56 (2017).
8. D.Baba, C.Li, V.Malgras, B.Jiang, Hatem R. Alamri, Zeid A. Allothman, Shahriar A. Hossain, Y.Yamauchi, T.Asahi, Fabrication of Mesoporous Cu Films on Cu Foils and Their Applications to Dopamine Sensing, *Chem. Asian J.*, 12, 2467-2470 (2017).
9. M.Iqbal, C.Li, K.Wood, B.Jiang, T.Takei, O.Dag, D.Baba, Asep Sugih Nugraha, T.Asahi, Andrew E Whitten, Shahriar A Hossain, V.Malgras, Y.Yamauchi, Continuous Mesoporous Pd Films by Electrochemical Deposition in Nonionic Micellar Solution, *Chem. Mater.*, 29(15), 6405-6413 (2017).
10. Asep Sugih Nugraha, C.Li, J.Bo, M.Iqbal, Saad M. Alshehri, T.Ahamad, V.Malgras, Y.Yamauchi, T.Asahi, Block-Copolymer-Assisted Electrochemical Synthesis of Mesoporous

- Gold Electrodes: Towards a Non-Enzymatic Glucose Sensor, *ChemElectroChem*, 4(10), 2571-2576 (2017).
11. Y.Fang, C.Li, J.Bo, J.Henzie, Y.Yamauchi, T.Asahi, Chiral Sensing with Mesoporous Pd@Pt Nanoparticles, *ChemElectroChem*, 4, 1832-1835 (2017).
 12. Y.Ogino, M.Tanaka, T.Shimozawa, T.Asahi, LC-MS/MS and chiroptical spectroscopic analyses of multi-dimensional metabolic systems of chiral thalidomide and its derivatives, *Chirality*, 29, 282-293 (2017).
 13. K.Ishikawa, Y.Terasawa, M.Tanaka, T.Asahi, Accurate measurement of the optical activity of alanine crystals and the determination of their absolute Chirality, *J. Phys. Chem. Solids*, 104, 257-266 (2017).
 14. A.Takanabe, H.Koshima, T.Asahi, Fast-type high-accuracy universal polarimeter using charge-coupled device spectrometer, *AIP Adv.*, 7, 025209 (2017).
 15. A.Takanabe, T.Katsufuji, K.Johmoto, H.Uekusa, M.Shiro, H.Koshima, T.Asahi, Reversible Single-Crystal-to-Single-Crystal Phase Transition of Chiral Salicylidene-phenylethylamine, *Crystals*, 7(1), 7 (2017).
 16. T. Mori, J.K.B. Cahn, M.C. Wilson, R.A. Meoded, V. Wiebach, A.F.C. Martinez, E.J.N. Helfrich, A. Albersmeier, D. Wibberg, S. Dätwyler, R. Keren, A. Lavy, C. Rückert, M. Ilan, J. Kalinowski, S. Matsunaga, H. Takeyama, J. Piel, Single-bacterial genomics validates rich and varied specialized metabolism of uncultivated *Entotheonella* sponge symbionts, *PNAS*, DOI: 10.1073/pnas.1715496115 (2018).
 17. M. Kogawa, M. Hosokawa, Y. Nishikawa, K. Mori, H. Takeyama, Obtaining high-quality draft genomes from uncultured microbes by cleaning and co-assembly of single-cell amplified genomes, *Scientific Reports*, 8(1):2059 (2018).
 18. K. Yura, Preface of Special Issue "Databases" Biophysics and Physicobiology, 15, 86 (2018).
 19. C. Ohtaka-Maruyama, M. Okamoto, K. Endo, M. Oshima, N. Kaneko, K. Yura, H. Okado, T. Miyata, N. Maeda, Synaptic transmission from subplate neurons controls radial migration of neocortical neurons, *Science*, 360(6386):313-317 (2018).
 20. A. Higuchi, N. Nonaka, K. Yura, iMusta4SLC: Database for the structural property and variations of solute carrier transporters, *Biophysics and Physicobiology*, 15:94-103 (2018).
 21. R. Tamura, M. Takeda, M. Sakaue, A. Yoshida, S. Ohi, K. Hirano, T. Hayakawa, N. Hirohashi, K. Yura, K. Chiba, Starfish Apaf-1 activates effector caspase-3/9 upon apoptosis of aged eggs, *Scientific Reports*, 8:1611 (2018).
 22. S. Reza, A. Kobiyama, Y. Yamada, Y. Ikeda, D. Ikeda, N. Mizusawa, K. Ikeo, S. Sato, T. Ogata, M. Jimbo, T. Kudo, S. Kaga, S. Watanabe, K. Naiki, Y. Kaga, K. Mineta, V. Bajic, T. Gojobori, S. Watabe, Taxonomic profiles in metagenomic analyses of free-living microbial communities in the Ofunato Bay, *Gene*, 665:192-200 (2018).
 23. S. Reza, A. Kobiyama, Y. Yamada, Y. Ikeda, D. Ikeda, N. Mizusawa, K. Ikeo, S. Sato, T. Ogata, M. Jimbo, T. Kudo, S. Kaga, S. Watanabe, K. Naiki, Y. Kaga, K. Mineta, V. Bajic, T. Gojobori, S. Watabe, Basin-scale seasonal changes in marine free-living bacterioplankton community in the Ofunato Bay, *Gene*, 665:185-191 (2018).
 24. Kobiyama, K. Ikeo, S. Reza, J. Rashid, Y. Yamada, Y. Ikeda, D. Ikeda, N. Mizusawa, K. Ikeo,

- S. Sato, T. Ogata, M. Jimbo, T. Kudo, S. Kaga, S. Watanabe, K. Naiki, Y. Kaga, K. Mineta, V. Bajic, T. Gojobori, S. Watabe, S, Metagenome-based diversity analyses suggest a strong locality signal for bacterial communities associated with oyster aquaculture farms in Ofunato Bay, *Gene* 665:149-154 (2018).
25. J. Rashid, A. Kobiyama, S. Reza, Y. Yamada, Y. Ikeda, D. Ikeda, N. Mizusawa, K. Ikeo, S. Sato, T. Ogata, T. Kudo, S. Kaga, S. Watanabe, K. Naiki, Y. Kaga, K. Mineta, V. Bajic, T. Gojobori, S. Watabe, Seasonal changes in the communities of photosynthetic picoeukaryotes in Ofunato Bay as revealed by shotgun metagenomic sequencing, *Gene*, 665:127-132 (2018).
26. T. Kudo, A. Kobiyama, J. Rashid, S. Reza, Y. Yamada, Y. Ikeda, D. Ikeda, N. Mizusawa, K. Ikeo, S. Sato, T. Ogata, M. Jimbo, S. Kaga, S. Watanabe, K. Naiki, Y. Kaga, S. Segawa, K. Mineta, V. Bajic, T. Gojobori, S. Watabe, Seasonal changes in the abundance of bacterial genes related to dimethylsulfoniopropionate catabolism in seawater from Ofunato Bay revealed by metagenomic analysis, *Gene*, 665:174-184 (2018).
27. S. Kinjo, N. Monma, S. Misu, N. Kitamura, J. Imoto, K. Yoshitake, T. Gojobori, K. Ikeo, Maser: one-stop platform for NGS big data from analysis to visualization, *Database* (Oxford):1-12 (2018).
28. A.M. Abdel-Haleem, H. Hefzi, K. Mineta, X. Gao, T. Gojobori, B.O. Palsson, N.E. Lewis, N. Jamshidi, Functional interrogation of Plasmodium genus metabolism identifies species- and stage-specific differences in nutrient essentiality and drug targeting, *PLoS Comput Biol*, 4:14(1):e1005895 pp1-18 (2018).
29. J. Chung, X. Wang, T. Maruyama, Y. Ma, X. Zhang, J. Mez, R. Sherva, H. Takeyama, Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative, K.L. Lunetta, L.A. Farrer, G.R. Jun, Genome-wide association study of Alzheimer's disease endophenotypes at prediagnosis stages, *Alzheimer's & Dementia*, S1552-5260(17)33842-6 (2017).
30. M. Hosokawa, Y. Nishikawa, M. Kogawa, H. Takeyama, Massively parallel whole genome amplification for single-cell sequencing using droplet microfluidics, *Scientific Reports*, 7(1):5199 (2017).
31. T. Yoda, M. Hosokawa, K. Takahashi, C. Sakanashi, H. Takeyama, H. Kambara, Site-specific gene expression analysis using an automated tissue micro-dissection punching system, *Scientific Reports*, 7(1):4325 (2017).
32. G. Loch, I. Zinke, T. Mori, P. Carrera, J. Schroer, H. Takeyama, M. Hoch, Antimicrobial peptides extend lifespan in Drosophila, *PLOS ONE*, 12(5):e0176689 (2017).
33. H. Mizutani, H. Sugawara, A.M. Buckle, T. Sangawa, K. Miyazono, J. Ohtsuka, K. Nagata, T. Shijima, S. Nosaki, Y. Xu, D. Wang, X. Hu, M. Tanokura, K. Yura, REFOLDdb: a new and sustainable gateway to experimental protocols for protein refolding, *BMC Structural Biology*, 17:4-11 (2017).
34. Masakiyo, K. Ogura, K. Ichihara, K. Yura, S. Shimada, Candidate key genes for low-salinity adaptation identified by RNA-seq comparison between closely related Ulvarian species in marine and brackish waters, *Algal Resources*, 9(2), 61-76 (2017).
35. S. Pandit, V. Ravikumar, A.M. Abdel-Haleem, A. Derouiche, V. Mokkapati, C. Sihlbom, K.

- Mineta, T. Gojobori, X. Gao, F. Westerlund, I. Mijakovic, Low Concentrations of Vitamin C Reduce the Synthesis of Extracellular Polymers and Destabilize Bacterial Biofilms, *Front Microbiol*, 02599:pp1-11 (2017).
36. A.M. Abdel-Haleem, N.E. Lewis, N. Jamshidi, K. Mineta, X. Gao, T. Gojobori, The Emerging Facets of Non-Cancerous Warburg Effect, *Front. Endocrinol.*, 8:279 pp1-7 (2017).
 37. C. Auffray, M. Sagner, S. Abdelhak, I. Adcock, A. Agusti, M. Amaral, S. Antonarakis, R. Arena, F. Argoul, R. Balling, A.L. Barabasi, J. Beckmann, A. Bjartell, N. Blomberg, T. Bourgeron, B. Boutron, S. Brahmachari, C. Bréchet, C. Brightling, M. Cascante, A. Cesario, D. Charron, S.J. Chen, Z. Chen, F. Chung, K. Clément, A. Conesa, A. Cozzzone, M. de Jong, J.F. Deleuze, J. Demotes, A. di Meglio, R. Djukanovic, U. Dogrusoz, E. Epel, A. Fischer, A. Gelemanovic, C. Goble, T. Gojobori, M. Goldman, H. Goossens, F. Gros, Y.K. Guo, P. Hainaut, D. Harrison, H. Hoffmann, L. Hood, P. Hunter, Y. Jacob, H. Kitano, U. Klingmüller, B. Knoppers, W. Kolch, M. Koopmans, D. Lancet, M. Laville, J.M. Lehn, F. Lévi, A. Lisitsa, V. Lotteau, A. Magnan, B. Mayosi, A. Metspalu, Y. Moreau, J. Dow, L. Nicod, D. Noble, M. Nogueira, A. Norrby-Teglund, L. Nottale, P. Openshaw, M. Oztürk, S. Palkonen, S. Parodi, J. Pellet, O. Polasek, N. Price, C. Pristipino, T. Radstake, M. Raes, J. Roca, D. Rozman, P. Sabatier, S. Sasson, B. Schmeck, I. Serageldin, A. Simonds, B. Soares, P. Sterk, G. Superti-Furga, D. Supple, J. Tegner, M. Uhlen, S. van der Werf, P. Villoslada, M. Vinciguerra, V. Volper, S. Webb, E. Wouters, F. Sanz, F. Nobrega, Viva Europa, a Land of Excellence in Research and Innovation for Health and Wellbeing, *Progress in Preventive Medicine*, 2(3):e006 (2017).
 38. J. Nielsen, J. Archer, M. Essack, V.B. Bajic, T. Gojobori, I. Mijakovic, Building a bio-based industry in the Middle East through harnessing the potential of the Red Sea biodiversity, *Appl Microbiol Biotechnol*, 101(12):4837-4851 (2017).
 39. D.E. Jarvis, Y.S. Ho, D.J. Lightfoot, S.M. Schmöckel, B. Li, T. Borm, H. Ohyanagi, K. Mineta, C.T. Michell, N. Saber, N.M. Kharbatia, R.R. Rupper, A.R. Sharp, N. Dally, B.A. Boughton, Y.H. Woo, G. Gao, E. Schijlen, X. Guo, A.A. Momin, S. Negrão, S. Al-Babili, C. Gehring, U. Roessner, C. Jung, K. Murphy, S.T. Arold, T. Gojobori, C.G. van der Linden, E.N. van Loo, E.N. Jellen, P.J. Maughan, M. Tester, Corrigendum: The genome of *Chenopodium quinoa*, *Nature*, 545(7655):510 (2017).
 40. S. Nakagawa, Y. Niimura, T. Gojobori, Comparative genomic analysis of translation initiation mechanisms for genes lacking the Shine–Dalgarno sequence in prokaryotes, *Nucleic Acids Res*, 45(7):3922-3931 (2017).
 41. W. Anderson, R. Apweiler, A. Bateman, G.A. Bauer, H. Berman, J.A. Blake, N. Blomberg, S.K. Burley, G. Cochrane, V. Di Francesco, T. Donohue, C. Durinx, A. Game, E.D. Green, T. Gojobori, P. Goodhand, A. Hamosh, H. Hermjakob, M. Kanehisa, R. Kiley, J. McEntyre, R. McKibbin, S. Miyano, B. Pauly, N. Perrimon, M.A. Ragan, G. Richards, Y-Y. Teo, M. Westerfield, E. Westhof, P.F. Lasko, Towards coordinated international support of core data resources for the life sciences, *bioRxiv*, 110825 (2017).
 42. W. Anderson, R. Apweiler, A. Bateman, G.A. Bauer, H. Berman, J.A. Blake, N. Blomberg, S.K. Burley, G. Cochrane, V. Di Francesco, T. Donohue, C. Durinx, A. Game, E.D. Green, T.

- Gojobori, P. Goodhand, A. Hamosh, H. Hermjakob, M. Kanehisa, R. Kiley, J. McEntyre, R. McKibbin, S. Miyano, B. Pauly, N. Perrimon, M.A. Ragan, G. Richards, Y-Y. Teo, M. Westerfield, E. Westhof, P.F. Lasko, Data management: A global coalition to sustain core data, *Nature*, 543 (7644):179 (2017).
43. D.E. Jarvis, Y.S. Ho, D.J. Lightfoot, S.M. Schmöckel, B. Li, T. Borm, H. Ohyanagi, K. Mineta, C.T. Michell, N. Saber, N.M. Kharbatia, R.R. Rupper, A.R. Sharp, N. Dally, B.A. Boughton, Y.H. Woo, G. Gao, E. Schijlen, X. Guo, A.A. Momin, S. Negrão, S. Al-Babili, C. Gehring, U. Roessner, C. Jung, K. Murphy, S.T. Arold, T. Gojobori, C.G. van der Linden, E.N. van Loo, E.N. Jellen, P.J. Maughan, M. Tester, The genome of *Chenopodium quinoa*, *Nature*, 542(7641):307-312 (2017).
44. O. Motwalli, M. Essack, B.R. Jankovic, B. Ji, X. Liu, H.R. Ansari, R. Hoehndorf, X. Gao, S.T. Arold, K. Mineta, J.A. Archer, T. Gojobori, I. Mijakovic, V.B. Bajic, In silico Screening for candidate chassis strains of free fatty acid-producing cyanobacteria, *BMC Genomics*, 18(1):33 1-21 (2017).

4.2 学会発表

1. T.Taniguchi, H.Sugiyama, H.Uekusa, M.Shiro, H.Koshima, T.Asahi, “Directional Locomotion of Chiral Azobenzene Crystals by Phase Transition”, The 23rd International Conference on the Chemistry of the Organic Solid State(ICOSS 2017), Stellenbosch, South Africa, ポスター発表, Apr. 4, 2017.
2. K.Kataoka, T.Asahi, N.Sawamura, “Cereblon promotes mitophagy in human neuroblastoma cells”, 第8回オートファジーに関する国際会議 (ISA), 奈良春日野国際フォーラム, May. 31, 2017.
3. H.Koshima, T.Taniguchi, M.Shiro, T.Asahi, “Photomechanical Motion of Chiral Azobenzene Crystals with Twisting”, 29th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 10, 2017.
4. A.Takanabe, M.Tanaka, H.Koshima, T.Asahi, “Fast-Type High-Accuracy Universal Polarimeter Using Charge-Coupled Device Spectrometer”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 10, 2017.
5. Y.Fang, T.Asahi, Y.Yamauchi, “Enantioselective/Stereoselective Recognition at Surface of Mesoporous Pd@Pt Nanoparticles”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 10, 2017.
6. D.Baba, T.Asahi, Y.Yamauchi, “Chiral Recognition by Using Mesoporous Cu Film which Absorbs Alanine”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 10, 2017.
7. A.S.Nugraha, Y.Yamauchi, T.Asahi, “Enantioselectivity Evaluation of Mesoporous Au Synthesized by Block Copolymer Assisted Electrochemical Synthesis”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 10, 2017.
8. N.Sawamura, M.Yamada, M.Fujiwara, H.Yamada, H.Hayashi, N.Takagi, T.Asahi, “Molecular Mechanism of the Neuroprotective Effect of Thalidomide against Ischemic Neuronal Damage”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ.,

ポスター発表, Jul. 10, 2017.

9. K.Zhang, M.Matsumoto, K.Nakagawa, S.Watauchi, A.Matsuda, T.Asahi, “Optical Properties and Broken Symmetries in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ ”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
10. T.Taniguchi, H.Sugiyama, H.Uekusa, M.Shiro, H.Koshima, T.Asahi, “Directional Locomotion of Chiral Azobenzene Crystals”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
11. J.Komiya, M.Matsudomi, D.Yamanaka, A.Furube, H.Koshima, T.Asahi, “Photomechanical Motion of Chiral Crystals Formed from Achiral Aminosalicylideneaniline”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
12. T.Kawatani, K.Ishikawa, Y.Terasawa, M.Ichiki, T.Asahi, “Physicochemical Properties in L-lactic Acid Doped Ferroelectric Triglycine Sulfate”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
13. K.Nakagawa, X.Fu, G.Villora, K.Shimamura, T.Asahi, “Optical Properties of Langasite Family $\text{Ca}_3\text{TaAl}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ Single Crystals”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
14. Y.Terasawa, K.Ishikawa, T.Asahi, “Controlling Chirality of Triglycine Sulfate Crystal by the Addition of Alanine”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
15. N.Sakiyama, Y.Terasawa, K.Ishikawa, T.Asahi, “The Physical Properties of Various Amino Acids Doped Triglycine Sulfate Crystals”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
16. M.Nakamura, Y.Ogino, T.Shimozawa, K.Otogawa, Y.Niizuma, T.Asahi, “Spontaneous Dehydration Mechanism of Thalidomide Hydrolysis Products in Organic Solvent”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
17. Y.Niizuma, K.Tanaka, M.Nakamura, K.Otogawa, T.Asahi, “Thermally-Induced Racemization of Powder Thalidomide”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
18. K.Tanaka, Y.Ogino, H.Toriyama, T.Tohtaya, M.Tanaka, T.Shimozawa, T.Asahi, “Solution and Solid State Chiroptical Analysis for Dynamic Multimerization of Thalidomide”, 9th International Symposium of Chiral Discrimination, Waseda Univ., ポスター発表, Jul. 11, 2017.
19. Kosuke Kataoka, Toru Asahi, Naoya Sawamura, “Cereblon promotes mitochondrial degradation via autophagy in human neuroblastoma cells”, 第 60 回日本神経化学会大会, 仙台国際センター, 口頭発表, Aug. 3, 2017.
20. 小野寺航, 朝日透, 澤村直哉, “精神遅滞原因候補遺伝子 cereblon の分子進化速度解析による機能的サイトの解明”, 第 19 回日本進化学会, 京都大学, ポスター発表, Aug.26, 2017.
21. J.Komiya, T.Taniguchi, D.Yamanaka, A.Furube, H.Koshima, T.Asahi, “Photo- and Thermo-induced Mechanical Motion of Aminosalicylideneaniline Crystals”, 2017 年光化学討

- 論会, 東北大学, ポスター発表, Sep. 4, 2017.
22. A.Udagawa, M.Inada, A.Al-Shereiqi, H.Koshima, K.Saito, T.Asahi, “Photochemical Reaction of Bis-Thymine Derivatives in Selfassembly”, 2017 年光化学討論会, 東北大学, ポスター発表, Sep. 4, 2017.
 23. T.Takuya, S.Ryota, K.Jun, K.Hideko, A.Toru, “Photo- and Thermal-induced Mechanical Motion of Chiral Salicylideneaniline Crystals”, 2017 年光化学討論会, 東北大学, 口頭発表, Sep. 4, 2017.
 24. K. Ide, T. Maruyama, M. Ito, H. Fujimura, Y. Nakano, S. Suda, S. Aburatani, H. Takeyama, “Network Analysis to Reveal Microbial Community Dynamics in the Coral Reef Ocean”, 19th International Conference on Systems Biology, Dubai, UAE, 口頭発表, May. 9, 2017.
 25. H. Ito, T. Maruyama, M. Ito, C. Shinzato, H. Fujimura, Y. Nakano, S. Suda, S. Aburatani, H. Takeyama, “Gene Expression Analysis for Corals / Zooxanthellae under High Seawater Temperature Stress”, 19th International Conference on Systems Biology, Dubai, UAE, 口頭発表, May. 9, 2017.
 26. 依田卓也, 細川正人, 高橋清文, 坂梨千佳子, 神原秀記, 竹山 春子, “微小組織採取システムによる組織空間トランスクリプトミクス解析”, NGS 現場の会・第五回研究会, 仙台国際センター, ポスター発表, May. 22, 2017.
 27. 西川洋平, 細川正人, 小川雅人, 竹山春子, “マイクロ流体デバイスによる高精度な超並列 1 細胞ゲノム増幅技術の開発”, NGS 現場の会・第五回研究会, 仙台国際センター, ポスター発表, May. 22, 2017.
 28. R. Chijiwa, S. Yamaguchi, K. Ide, T. Maruyama, M. Hosokawa, H. Saito, H. Takeyama, “16S metagenomics sequencing of microbes in Marine Red Alga, *Pyropia yezoensis*”, Asia-Pacific Marine Biotechnology Conference 2017, Honolulu, USA, 口頭発表, May. 23, 2017.
 29. M. Kogawa, Y. Nishikawa, K. Mori, M. Hosokawa, H. Takeyama, “Development of technique for parallel single cell genome amplification of bacteria and sequence read cleaning for de novo assembly”, Asia-Pacific Marine Biotechnology Conference 2017, Honolulu, USA, 口頭発表, May. 23, 2017.
 30. 竹田裕貴, 細川正人, 西川洋平, 小川雅人, 中野義勝, 須田彰一郎, 伊藤通浩, 竹山春子, “ドロップレットデジタル PCR を用いたサンゴ生息地点間、採取季節間におけるサンゴ共在細菌量変動の追跡”, 第 19 回マリンバイオテクノロジー学会, 東北大学, ポスター発表, June. 3, 2017.
 31. 吉田雅駿, 宮岡理美, 安藤正浩, 中島琢自, 野中健一, 高橋洋子, 濱口宏夫, 竹山春子, “顕微ラマン分光法と多変量スペクトル分解法によるペニシリンの *in vivo* 検出”, 第 19 回マリンバイオテクノロジー学会, 東北大学, ポスター発表, June. 3, 2017.
 32. 井手圭吾, 伊藤通浩, 藤村弘行, 須田彰一郎, 中野義勝, 油谷幸代, 竹山春子, “環境微生物群集ダイナミクス解明に向けた海洋環境ネットワーク解析”, 第 19 回マリンバイオテクノロジー学会, 東北大学, ポスター発表, June. 3, 2017.
 33. 伊藤遼, 丸山徹, 伊藤通浩, 新里宙也, 藤村弘行, 中野義勝, 須田彰一郎, 油谷幸代, 竹山春子, “高水温ストレス条件下におけるサンゴ・褐虫藻の遺伝子発現解析”, 第 19 回マリンバイオテクノロジー学会, 東北大学, ポスター発表, June. 3, 2017.
 34. 高橋海, 西川洋平, 細川正人, 竹山春子, “ドロップレットデバイスによる 1 細胞レベルでの特

- 異的遺伝子配列検出法の開発”, 第 19 回マリンバイオテクノロジー学会, 東北大学, ポスター発表, June. 3, 2017.
35. 吉田雅駿, 宮岡理美, 安藤正浩, 中島琢自, 野中健一, 高橋洋子, 濱口宏夫, 竹山春子, ”In situ detection of penicillin by Confocal Raman Microspectroscopy and Multivariate Curve Resolution Alternating Least Squares (MCR-ALS)”, 5th Taiwan International Symposium on Raman Spectroscopy (TISRS 2017) and Taiwan Association of Raman Spectroscopy (TARS) Summer Camp, Chiayi, Taiwan, ポスター発表, June. 28, 2017.
 36. R. Miyaoka, M. Ando, M. Yoshida, M. Hosokawa, H. Hamaguchi, H. Takeyama, ”In situ detection of bioactive metabolites from bacteria using Raman microspectroscopy”, IUMS2017, Singapore, ポスター発表, July. 17, 2017.
 37. 千々岩樹佳, 丸山徹, 細川正人, 柴田重信, 竹山春子, “マウス腸内環境に与える水溶性食物繊維イヌリンの効果の時間栄養学的解析”, 第 4 回時間栄養科学研究会, 名古屋大学, ポスター発表, Aug. 25, 2017.
 38. 依田卓也, 細川正人, 高橋清文, 坂梨千佳子, 有川浩司, 神原秀記, 竹山春子, “微小組織採取システムを用いたマウス脳組織の位置特異的遺伝子発現解析”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 39. 宮岡理美, 安藤正浩, 細川正人, 濱口宏夫, 竹山春子, “顕微ラマン分光法及び多変量解析を用いた微生物内における生理活性物質の in situ 検出”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 40. 西川洋平, 細川正人, 小川雅人, 竹山春子, “マイクロドロップレットを用いた高精度な超並列 1 細胞ゲノム解析技術の開発”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 41. 千々岩樹佳, 丸山徹, 細川正人, 柴田重信, 竹山春子, “マウス腸内環境に与える水溶性食物繊維イヌリンの効果の時間栄養学的解析”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 42. 竹田裕貴, 細川正人, 西川洋平, 小川雅人, 須田彰一郎, 中野義勝, 伊藤通浩, 竹山春子, サンゴ生息地点・季節間における共生細菌叢と細菌量変動の追跡, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 43. 小川雅人, 西川洋平, 森一樹, 細川正人, 竹山春子, “一細胞ゲノムデータの相互比較による高精度ゲノムの取得”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 44. 吉田雅駿, 宮岡理美, 安藤正浩, 中島琢自, 野中健一, 高橋洋子, 濱口宏夫, 竹山春子, “顕微ラマン分光法と多変量スペクトル分解法によるペニシリンの In situ イメージング”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 45. 井手圭吾, 伊藤通浩, 藤村弘行, 須田彰一郎, 中野義勝, 油谷幸代, 竹山春子, “珊瑚礁海域における環境微生物群集ダイナミクス解明に向けた海洋環境解析”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 46. 伊藤遼, 伊藤通浩, 中野義勝, 大久保悠介, 森一樹, 竹山春子, “サンゴ共生細菌の機能予測に向けた細菌叢解析及びゲノム解析”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
 47. 山口そのみ, 千々岩樹佳, 井手圭吾, 丸山徹, 齋藤寛, 細川正人, 竹山春子, “スサビノリにおける共生細菌の 16S rRNA メタゲノムシーケンス”, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム, 東京

- 大学, ポスター発表, Sep. 7, 2017.
48. 依田 卓也、細川 正人、高橋 清文、坂梨 千佳子、神原 秀記、竹山 春子, “微小組織採取システムを用いた生体組織の空間的 RNA-seq”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 49. 宮岡理美, 安藤正浩, 細川正人, 濱口宏夫, 竹山春子, “顕微ラマン分光法を用いた微生物内における生理活性物質の in situ 検出”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 50. 西川洋平, 細川正人, 小川雅人, 竹山春子, “微小液滴を用いた単一細胞からの超並列ゲノム解析技術の開発”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 51. 千々岩樹佳, 丸山徹, 青木菜摘, 細川正人, 柴田重信, 竹山春子, “水溶性食物繊維イヌリンのマウス腸内細菌叢に及ぼす影響の時間栄養学的解析”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 52. 竹田裕貴, 細川正人, 西川洋平, 小川雅人, 須田彰一郎, 中野義勝, 伊藤通浩, 竹山春子, “ドロップレットデジタル PCR によるサンゴ共生細菌量の地点間・季節間変動の追跡”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 53. 小川雅人, 西川洋平, 森一樹, 細川正人, 竹山春子, “微小液滴を用いて並列取得した微生物シングルセルゲノムデータに対する相互参照ゲノム解析法の開発”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 54. 吉田雅駿, 宮岡理美, 安藤正浩, 中島琢自, 野中健一, 高橋洋子, 濱口宏夫, 竹山春子, “顕微ラマン分光法と多変量スペクトル分解法を組み合わせたペニシリンの in situ 検出”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 55. 井手圭吾, 伊藤通浩, 藤村弘行, 須田彰一郎, 中野義勝, 油谷幸代, 竹山春子, “珊瑚礁海域における環境微生物群集ダイナミクス解明及び機能に向けた海洋環境解析”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 56. 伊藤遼, 伊藤通浩, 中野義勝, 大久保悠介, 竹山春子, “サンゴと共生細菌叢の構造解明に向けた細菌叢解析及び関連遺伝子群の推定”, 第 69 回日本生物工学会大会, 早稲田大学, ポスター発表, Sep. 11, 2017.
 57. 小川雅人, 西川洋平, 森一樹, 細川正人, 竹山春子, “微小液滴を用いた 1 細胞ゲノムの並列取得と相互比較解析による高精度ゲノムの獲得”, 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017, タワーホール船堀, ポスター発表, Oct. 17, 2017.
 58. 吉田雅駿, 宮岡理美, 安藤正浩, 中島琢自, 野中健一, 高橋洋子, 濱口宏夫, 竹山春子, “顕微ラマン分光法と多変量スペクトル分解法による 抗生物質の in situ イメージング”, 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017, タワーホール船堀, ポスター発表, Oct. 17, 2017.
 59. 細川正人, 西川洋平, 小川雅人, 竹山春子, “ドロップレット・マイクロフルイディクスを用いた未培養微生物の 1 細胞ゲノム解析”, 2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 神戸ポートアイランド, 口頭発表, Dec. 9, 2017.
 60. 依田卓也, 細川正人, 高橋清文, 坂梨千佳子, 有川浩司, 森田ちひろ, 神原秀記, 大島登志男, 竹山春子, “アルツハイマーモデルマウス脳海馬領域の空間的トランスクリプトミクス解析”, 2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 神戸ポートアイランド, ポスター発表, Dec. 6, 2017.
 61. 細川正人, 西川洋平, 小川雅人, 竹山春子, “ドロップレット・マイクロフルイディクスを用いた未培養微生物の 1 細胞ゲノム解析”, 2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 神戸ポートアイランド, ポスター発表, Dec. 6, 2017.

イランド, ポスター発表, Dec. 8, 2017.

62. 高橋清文, 松永浩子, 有川浩司, 坂梨千佳子, 依田卓也, 細川正人, 神原秀記, 竹山春子, “多様なサンプルを RNA-seq に提供する微小生体試料の自動調製システム”, 2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 神戸ポートアイランド, ポスター発表, Dec. 8, 2017.
63. H. Takeyama, “Development of novel technology for microbial community analyses by the meta-omics analyses of marine unculturable microbes based on single cell genome information”, CREST International Symposium Promotion of global network studies on seagrass ecosystem based on innovative new technology, 早稲田大学, 口頭発表, Feb. 19, 2018.
64. 小川雅人, 西川洋平, 森一樹, 細川正人, 竹山春子, “網羅的シングルセルゲノム解析フローの構築に向けた高精度シングルセルゲノム解析ツールの開発”, 第 6 回生物工学会東日本支部コロキウム, 筑波大学東京キャンパス, 口頭発表, Mar. 2, 2018.
65. 堀井俊平, 安藤正浩, 宮岡理美, 濱口宏夫, 竹山春子, “ラマン分光法による豚肉の劣化に伴う経時的な成分変化の測定”, 第 6 回生物工学会東日本支部コロキウム, 筑波大学東京キャンパス, 口頭発表, Mar. 2, 2018.
66. 山崎美輝, 細川正人, 依田卓也, 松永浩子, 有川浩司, 高橋清文, 坂梨千佳子, 竹山春子, “生体組織の空間的な遺伝子発現解析における組織調製法の検討”, 第 6 回生物工学会東日本支部コロキウム, 筑波大学東京キャンパス, 口頭発表, Mar. 2, 2018.
67. 千々岩樹佳, 丸山徹, 細川正人, 柴田重信, 竹山春子, “時間栄養学的解析による水溶性食物繊維イヌリンのマウス腸内細菌叢に及ぼす影響”, 日本農芸化学会 2018 年度大会, 名城大学, 口頭発表, Mar. 15, 2018.
68. 小川雅人, 西川洋平, 森一樹, 細川正人, 竹山春子, “超並列シングルセルゲノムの増幅産物の相互比較による高精度ゲノム解析法の開発”, 日本農芸化学会 2018 年度大会, 名城大学, 口頭発表, Mar. 15, 2018.
69. Y. Nishikawa, M. Hosokawa, M. Kogawa, K. Takahashi, H. Takeyama, “Droplet microfluidics toward accurate genome sequencing of environmental bacteria at the single-cell level”, 日本化学会第 98 春季年会, 日本大学, 口頭発表, Mar. 22, 2018.
70. 堀井俊平, 安藤正浩, 宮岡理美, 濱口宏夫, 竹山春子, “In situ monitoring of molecular change during degredataion of pork meat using Raman spectroscopy”, 日本化学会第 98 春季年会, 日本大学, 口頭発表, Mar. 22, 2018.

4.3 招待講演

1. 朝日透, “G-HAUP opens the door to condensed matter chirality”, 豊田理研国際ワークショップ, トヨタ産業技術記念館, Nov. 26, 2017.
2. H. Takeyama, “Marine microbiome analysis with the technologies for single-cell microbiology”, Asia-Pacific Marine Biotechnology Conference 2017, Honolulu, USA, May. 23, 2017.
3. 竹山春子, “腸内細菌解析へのシングルセルテクノロジーの展開”, BioJapan2017 セミナー マイクロバイオームが導く健康革命, パシフィコ横浜, Oct. 13, 2017.
4. 竹山春子, “異分野の研究をブリッジして新たなサイエンスを展開する～1 細胞レベルのゲノム解析法の開発と応用～”, 第 5 回なでしこ Scientist トーク, 甲南大学, Nov. 5, 2017.

5. 竹山春子, “微生物 1 細胞を解読する技術から開かれる新しいバイオロジー”, 第 27 回インテリジェント材料／システムシンポジウム, 早稲田大学, Jan. 15, 2018.
6. 竹山春子, “空間的な遺伝子発現解析に向けた微小組織採取システムとシングルセル解析手法の開発”, CREST 植物頑健性第 3 回領域会議, コングレスクウェア中野, Jan. 19, 2018.
7. 竹山春子, “サンゴ礁研究－沖縄をフィールドとした現場からの報告と提言”, 海洋政策研究所公開シンポジウム「国家管轄権外区域の海洋生物多様性の保全及び持続可能な利用」, 虎ノ門 SPF ビル, Jan. 29, 2018.
8. 竹山春子, “Microbiome 解析への新しいアプローチ : Single cell 解析の進展”, 第 4 回生活習慣病予防のための機能性食品開発に関する研究会, 大阪大学, Feb. 26, 2018.

5. 研究活動の課題と展望

室温付近で相転移し、熱変形を示し、それを利用して移動する結晶を探索するために、新規有機化合物を創製する。

結晶化とチミン誘導体分子の結晶中光反応による再生可能高分子の開発の研究において、今後トリスチミン誘導体の長時間光照射後の結晶構造解析により、得られた高分子量体の 3 次元的構造を明らかにし、その知見をもとに異なる構造のチミン誘導体結晶による高分子の合成に展開する。

細菌の代謝に関わる酵素などの遺伝子をシングルセルからハイスループットに取得できるプラットフォーム構築に取り組む。

先端メディアの生体影響研究

研究代表者 河合 隆史
(基幹理工学部 表現工学科 教授)

1. 研究課題

情報通信技術の発達に伴い、デジタルメディアの生体影響に対する関心が、国際的に高まっている。特に、バーチャルリアリティ (VR)、ミックスリアリティ (MR)、オーグメンテッドリアリティ (AR) 等に代表される、近い将来にさまざまな形で普及が期待される先端メディアにおいては、その安全性や快適性、機能性に関する科学的な評価手法を確立し、エビデンスを蓄積していくことが、急務とされている。

そこで本プロジェクト研究では、多様な先端メディアを対象に、人間工学的なアプローチにより生体影響について実験的な検討を行っている。

2. 主な研究成果

本プロジェクト研究では、2020 年に向け増加する当該分野の社会的ニーズに応えるべく、多様な産学間のコラボレーションを促進すると同時に、重点課題として VR や MR の生体影響の評価に取り組んだ。以下に、日常生活における VR 体験の位置づけに関する検討事例について述べる。

VR ヘッドセットの普及や VR コンテンツの増加・流通により、日常生活における VR 体験が容易になることが期待されている。これまで VR 体験は、主に実験室での短期的かつ直接的な影響として、評価・検討されてきたが、今後は日常生活行動の一つとしての位置づけや、その他の行動との相互作用に関する取り組みも重要になると考える。そこで本事例では、日常生活における VR 体験に関する基礎的な知見を得ることを目的として、日課に設定した条件下での生理指標を用いた実験的な検討を行った。

VR コンテンツの呈示には PlayStation VR (Sony Interactive Entertainment) を、VR コンテンツはバリエーションの観点から 4 種類を、それぞれ選択した。生理指標として心拍変動を選択し、Lifestyle Assessment (Firstbeat) を用いた心拍の 24 時間の連続測定を、3 日間、実施した。参加者は、20 才代の男性 10 例であり、事前に趣旨を説明し同意を得た。3 日間の実験期間中、参加者には、自由な生活行動およびその記録と同時に、都合の良い時間帯に 1 日 30 分間の VR 体験を求めた。

VR 体験中 (VR) および前後 30 分間 (PRE, POST) の心拍数、ストレスとリラクスの反応強度の平均を図 1 に示した。分散分析の結果から、測定時期の主効果に有意差が認められた ($p<.05$)。具体的に、VR 体験中は心拍数およびストレス反応強度は低下し、リラクスの反応強度は上昇する傾向がみられた。また、VR 体験中のストレス反応強度が低下する傾向はコンテンツ間で共通していたが、体験中変化にはコンテンツ間で差異がみられた。図 2 に主観視点でのシューティングゲーム体験中のストレス反応強度の変化と、その多項式近似曲線によるスムージングの結果を示す。

本事例における VR 体験中と前後での各指標の変化から、日常生活における VR 体験がストレス反応を低下させる影響源となり得ると考えられた。また、ストレス反応強度の変化において、VR コンテンツ間で差異がみられたことから、各コンテンツの特徴が反映され、特に体験中のインタラ

クシヨンの能動性が影響したと推察された。今後は、その他の行動との比較や VR コンテンツの特徴との連関について詳細に検討していくことで、日常生活における VR 体験の位置づけと利活用のあり方を探っていく。

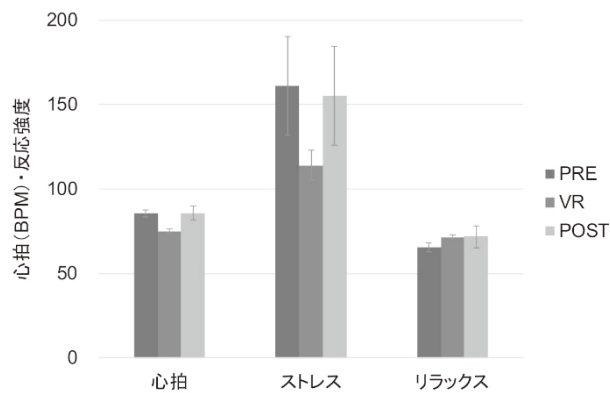


図1 VR 体験中および前後における各指標の変化

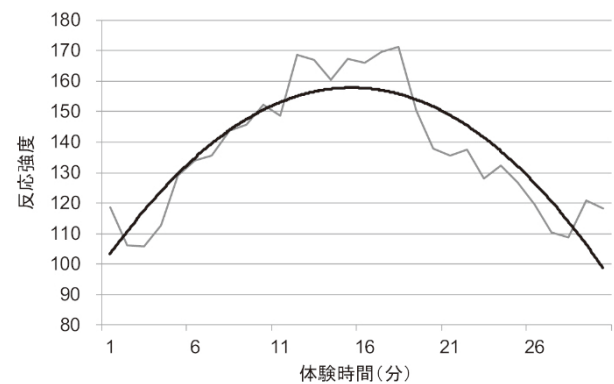


図2 シューティングゲーム体験中のストレス反応の変化

3. 共同研究者

三家 礼子（理工学研究所・客員教授）

金 相賢（基幹理工学部・表現工学科・助手）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Satoru Saito, Hiroki Kitajima, Toshiki Yajima, Junichi Ninomiya, Kunihiisa Nakayama, Sachiyo Furusaka, Reiko Mitsuya : “Ergonomic evaluation of mobile work type office environments”, Journal of Ergonomic Technology, Vol. 16, pp.23-31, 2017 年 10 月.

4.2 基調講演

- Takashi Kawai : “Ergonomics in Advanced Imaging Technologies”, 人間工学, Vol.53, Supplement, pp.26-29, 2017 年 6 月.

4.3 国際会議

- Jo Inami, Ryo Kodama, Yusuke Hasegawa, Nobushige Fujieda, Takashi Kawai : “Emotional Effects of Car-based Motion Representations with Stereoscopic Images”, Electronic Imaging 2018, 2018 年 2 月.
- Reiko Mitsuya, Kazuhito Kato, Nei Kou, Takeshi Nakamura, Kohei Sugawara, Hiroki Dobashi, Takashi Kawai : “Analysis of Body Pressure Distribution on Car Seats through Machine Learning”, 1st International Comfort Congress, 2017 年 6 月.
- Yoshihiro Banchi, Shota Tsukada, Keisuke Yoshikawa, Takashi Kawai : “Behavioral and psychological effects by short time viewing 360 videos using a HMD”, The 2nd Asian Conference on Ergonomics and Design 2017, 2017 年 6 月.
- Sanghyun Kim, Yuichi Uchiyama, Katushito Yagi, Takashi Kawai : “Gazing behavior by viewing virtual heritage using a head-mounted display”, The 2nd Asian Conference on Ergonomics and Design 2017, 2017 年 6 月.

4.4 国内大会

- ・ 平尾悠太朗, 河合隆史: “視覚と深部感覚のクロスモーダルによる重さ感覚提示手法の提案と評価”, 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2017年9月.
- ・ 伊波 穰, 小玉 亮, 長谷川雄祐, 藤枝延維, 河合隆史: “電気自動車を用いた VR システムによる運動情報の表現と評価”, 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2017年9月.
- ・ 金 相賢, 宋 香邑, 陳 均欣, 河合隆史: “VR システムにおけるヘッドセットの最適視聴環境に関する考察”, 映像情報メディア学会年次大会, 32D-1, 2017年9月.
- ・ 佐藤 秀磨, 伊波 穰, 中村 啓佑, 和田 滉平, 河合 隆史: “複合現実映像の呈示条件が映像酔いに及ぼす影響”, 人間工学, Vol.53, Supplement, pp.174-175, 2017年6月.
- ・ 和田滉平, 佐藤秀磨, 中村啓佑, 盛川浩志, 河合隆史: “複合現実映像を用いた仮想物体操作における表現手法の検討”, 人間工学, Vol.53, Supplement, pp.176-177, 2017年6月.
- ・ 中村啓佑, 佐藤秀磨, 和田滉平, 河合隆史: “複合現実映像における視点移動に伴う不快感の軽減手法の検討”, 人間工学, Vol.53, Supplement, pp.178-179, 2017年6月.

4.5 学会および社会的活動

- ・ 国際会議 議長: Stereoscopic Displays and Applications 2018, Conference Chair, 2018年2月, 米サンフランシスコ.
- ・ 国際学会 理事: International Ergonomics Association, Executive Committee, 2017年度.
- ・ 国際団体 日本部会長: Advanced Imaging Society, Japan Committee Chair, 2017年度.

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクト研究では、VR や MR をはじめとした多様な先端メディアを対象として、人間工学的なアプローチにより生体影響について実験的な検討を行っている。

実証実験やケーススタディ等を通して、当該分野において緊急度の高い知見を獲得・共有すると同時に、関連するセットメーカー、コンテンツ制作・流通事業者に加え、モビリティやオフィス環境分野などへも対処を拡張し、安全かつ快適な先端メディアの開発・応用にかかるエビデンスやソリューションを提示していく。

次世代型超省エネルギーリサイクル技術開発

研究代表者 大和田 秀二
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

適正な資源循環プロセスの構築において、有価物回収と有害物除去を達成する分離技術の重要性は言うまでもないが、その中でも、各種成分を、分子原子レベルで分離する化学的分離法（高エネルギー消費的だが分離精度が高い）と固体レベルで分離する物理的分離法（分離精度が低いが省エネルギー的である）を適切に組み合わせて、高精度かつ省エネルギー的・経済合理性の高いプロセスを確立することが重要である。両分離技術は互いに相互補完的な要素を持つが、後者の技術開発は発展途上の段階にあり、今後、持続的な資源循環型社会を構築するには、それを強化することが必要である。本研究では、この目的を達成するために、物理的分離法の核となる粉砕・選別の両技術について、最新の技術を利用してその高度化を図る。

2. 主な研究成果

2.1 電気パルス粉砕における異相境界面優先破壊機構解明（環境省・パナソニック・熊本大学共同）

各種複合物質の単体分離に有効な電気パルス粉砕の機構解明のために、各種二成分系人工試料の電気パルス粉砕実験を行い、この現象が、従来より言われてきた異相境界面での電子雪崩による瞬時の昇華（マイクロ爆発）以外に、周囲に存在する水のブレイクダウンで発生する衝撃波の影響も大きいことを発見した。また、各種の実験条件化において、この両素現象で消費されるエネルギー分配を明らかにした。

この粉砕現象は、今後、各種の固体廃棄物の単体分離に適用可能であり、従来の力学的粉砕に代わる省エネルギー的な単体分離法として発展することが期待される。

2.2 太陽光発電パネルおよび各種廃積層型薄膜パネルのリサイクルー電気パルス粉砕による高純度ガラス回収ー（環境省・ガラス再資源化協議会・ハリタ金属・所研共同）

使用済み太陽光発電モジュールからの金属類の回収はほぼ目途が立っているが、この重量の7～8割を占めるガラスの再資源化は喫緊の課題である。本テーマでの提案は、従来不可能であった大量処理が可能な高純度ガラスプロセスの開発である。プロセスの概要は、大型シュレッダー処理→磁選・渦電流選別→攪拌型粉砕 or 電気パルス粉砕→湿式テーブル選別、であり、本年度は、特に、太陽光発電パネルの高純度ガラス製造に不可欠な攪拌型粉砕および電気パルス粉砕の最適条件を見出し、そのセラミックタイル原料としての評価を行った。

2.3 廃光ファイバーの電気パルス粉砕挙動（エコ計画共同）

使用済み光ファイバーに電気パルス粉砕を適用し、その各種構造物の単体分離について検討した。その結果、適切な条件下では、光ファイバーを構成する鉄芯・ファイバー・シース・スロット等がほぼ非破壊で単体分離すること、および、光ファイバーを事前に脱気することが試料の水中での滞留に有効であり単体分離性の向上につながる事等が判明し、こうした各種素材のリユース・リサイクルの可能性が示された。また、電気パルス粉砕中に単体分離した鉄心は水中で唯一沈降するので、粉砕と同時に選別も可能であることが分かった。

2.4 E-scrap 焼却灰の粉砕・選別技術開発—電気パルス粉砕・力学的粉砕と各種物選別技術の適用—（経産省 JOGMEC・DOWA エコシステム・産総研共同）

廃電子機器中の基板には各種の有価重金属が含有されており、現状でその多くは銅・鉛・亜鉛製錬にて回収されているが、廃基板中には有価金属以外に上記製錬での禁忌成分も多く含まれている。ここでは、廃基板を焙焼したのちに有価金属を適切に粉砕・選別して有価成分を濃縮と禁忌成分の除去の両者を同時に達成するプロセスを開発する。本年度は、この目的を達成するための適切な焙焼条件を決定するとともに、その電気パルス粉砕産物中の各種成分の粒度分配の差を利用して、各種成分の分離粒度を明らかにした。

2.5 物理選別（含・電気パルス粉砕）による焼却灰からの貴金属濃縮プロセス開発（太平洋セメント・JFE エンジニアリング・スズトク・エコネコル・東京大学共同）

一般廃棄物の焼却主灰には各種の重金属が濃縮しており、特に経済的には貴金属類の回収が期待される。ここでは、同焼却主灰中の各種成分の粒度別分配を明らかにし、その後の粒度別選別（エアテーブル・磁選・渦電流選別等）プロセスを提案した。また、選別前に同焼却主灰に電気パルス粉砕を適用すると、各種金属類の単体分離性が向上することも明らかにした。本テーマは過去 3 年間にわたり基礎研究を行っており、本年度は、太平洋セメント大船渡工場敷地内に同プロセスの字操業プラントの設計が完了し、その建設が始まった。

2.6 LIBS 分析のソータ（アルミ合金相互分離）への適用に関する基礎研究（経産省 NEDO・ハリタ金属・アルミ協会等共同）

2015 年に当研究室が中心となって開発した LIBS（レーザー誘起ブレークダウン分光法）ソータを利用して使用済みのアルミ合金の相互分離について検討した。不規則形状のアルミ合金試料表面の傾斜角度・表面粗度等の形状特性の識別制度への影響を明らかにするとともに、1000～8000 系の各種合金類を相互分離するアルゴリズムを開発し、実廃棄物の LIBS ソーティングを実施して、それらの多くが 99 wt%以上の高純度で分離可能であることが判明した。この成果の一部は、現在、東京メトロおよび新幹線の車両を構成する各種アルミ合金の相互分離への適用が検討されている。

2.7 MW-SIBS ソータ開発（イマジニアリング・ハリタ金属共同）

世界初のマイクロ波アシスト・スパーク放電誘起ブレークダウン分光法（MW-SIBS と命名）によるソーティング技術を開発することを目的として、その基礎研究を行った。まずは、SIBS 自体の有効性を検証すべく、各種アルミ合金を対象にその定量性の確認を行った。また、マイクロ波照射による定量性の向上について確認するとともに、合金表面の表面粗度・スパーク後の表面変化による各種合金成分検知制度への影響を明らかにした。

2.8 浮選による重油燃焼灰からのVの回収（昭和電工共同）

火力発電における重油燃焼灰中にはV（バナジウム）が含有されており、これを回収することは、貴重な資源の有効利用になるとともに、Vが除去された未燃カーボン成分は再度燃料として利用することが可能となる。ここでは、Vをアルカリ処理にて回収したのちに、未燃カーボンを浮選によって回収するプロセスを検討した。その過程において、高温・高濃度でのアルカリ処理がカーボン表面を親水化することを発見し、カーボン表面の接触角がアルカリ処理でのV回収率を制御することを示した。

3. 共同研究者

所千晴（創造理工学部 環境資源工学科 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

S. Owada, R. Suzuki, Y. Kamata, T. Nakamura: Novel Pretreatment Process of Critical Metals Bearing E-Scrap By Using Electric Pulse Disintegration, J. Sustainable Metallurgy, pp. 1-6, Mar. 17, 2018

堀内健吾, 松岡光昭, 所千晴, 大和田秀二, 薄井正治郎: 磁選による使用済みリチウムイオン電池からのコバルト回収に適した加熱条件の検討, 化学工学論文集, 特集「未来を担う環境化学工学」, vol.43, no.4, pp.213-218, 7月, 2017

S. Owada: Technical and Process Innovation in Resources Recycling by Applying Intelligent Comminution and Physical Separation, Erzmetall, vol.70, no.3, pp.148-153, June 2017

4.2 総説・著書

（なし）

4.3 招待講演

S.Owada: Novel Resources Recycling Process by Applying Intelligent Comminution and Separation Technology, The 10th AUN/SEED-NET Regional Conference on Geological and Geo-Resource Engineering, Plenary Lecture, Phnom Penh, Cambodia, p.7, Aug. 3, 2017

S.Owada: Technical and Process Innovation in Resources Recycling by Applying Intelligent Comminution and Physical Separation, European Metallurgical Conference (EMC) 2017, Plenary Lecture, pp.1-9, Leipzig, Germany, June 27, 2017

S.Owada: Intelligent Comminution and Separation Technology in Resources Recycling, Invited Speech, 齊合天地, 香港, pp.1-49, June 22, 2017

大和田秀二: SBSC2018報告, 日本アルミニウム協会、アルミ車輛の水平リサイクルに関する推進委員会, 日本アルミニウム協会, pp.1-2, 2018

大和田秀二: 都市鉱山メダルのプロジェクト経緯・製造プロセス・小型家電リサイクルの現状, 日本環境教育機構・環境セミナー「2020に向けた小型家電リサイクルの現状」, 東京ウィメンズプラザ, pp.1-14, 0116, 2018

大和田秀二: 次世代型資源分離プロセスの展望, 特別講演, エヌ・イー ケムキャット（沼

津), 0112, 2018

大和田秀二: 都市ごみ焼却主灰からの金属濃縮技術, 都市ごみ焼却残渣の資源化最前線～金属回収、土木資材化による最適な資源循環～, 廃棄物資源循環学会, 資源・素材学会 包括的資源利用システム部門委員会共催セミナー, pp.1-19, 1225, 2017

大和田秀二: 資源循環における次世代型分離技術, グローバル産学連携シンポジウム, 北京聯合大学健康与環境学院, pp.1-19, 1208, 2017

大和田秀二: 都市ごみ焼却灰からの金属濃縮技術, 都市ごみ焼却残渣の資源化最前線—金属回収, 土木市税化による最適な差資源循環—, 廃棄物資源循環学会, 北とぴあ, pp.95-136, 1225, 2017

大和田秀二: 環境調和型資源循環プロセスと破碎・選別技術, 第 17 期フォーラム環境塾, pp.1-44, 1206, 2017

大和田秀二・所千晴: 各種焙焼産物の電気パルス粉碎結果, 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発事業, JOGMEC, pp.1-20, 1205, 2017

大和田秀二: 資源循環分野から見た接合・分離技術の重要性, 大阪大学接合科学研究所, 東京セミナー「微粒子を利用した界面性都合制御・スマートプロセスの開拓」, 大阪大学・工学研究科東京ブランチ, pp.15-24, 1127, 2017

大和田秀二: 浮選および凝集・分散理論: ツネイシカムテック社への講義, 早大理工, pp.1-12, 1-10, 1114, 2017

大和田秀二: 非鉄金属および家電のリサイクルに関する最新の技術動向について, 三井業際研究所静脈産業技術調査研究招待講演, 三井業際研究所大会議室, pp.1-45, 1024, 2017

大和田秀二: 資源循環における分離技術の将来像—東北大学・金属資源プロセス研究センターへの期待—, 資源・素材学会秋季大会 (MMIJ/EARTH 2017), pp.1-20, 0926, 2017

大和田秀二: 資源・素材分野における産学連携の在り方, レアメタル研究会, 東京大学生産技術研究所, pp.1-26, 0915, 2017

大和田秀二: リサイクリング概論, 資源・素材塾, DOWA 研修センター・錦糸町, pp.17-32, 0826, 2017

大和田秀二: 環境調和型資源循環システムと分離技術, あきたアーバンイン開発マイスター養成コース, pp.1-54, 0708, 2017

4.4 受賞・表彰

吉原彩華・千賀太喜・丸山修平・林芳樹・大和田秀二: 静電場解析および絶縁破壊モデル(DBM)による電気パルス粉碎選択破壊挙動の解明, 資源・素材学会, 春季大会 (東京), vol.5, no.1, pp.1-7, 0327, 2018<優秀発表賞>

(その他、優秀ポスター賞多数)

4.5 学会および社会的活動

資源・素材学会、会長

環境資源工学会、理事

日本技術者教育認定機構 (JABEE)、理事

自動車リサイクル高度化財団、理事

経済産業省産業構造審議会、委員

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、既述のように、物理的分離の核をなす粉砕・選別両技術の改善により、資源循環プロセスの更なる高度化と省エネルギー化を目指している。我々はこのような技術を” Intelligent Comminution”、” Intelligent Separation” と呼んでおり、今後、様々なプロセスにこうした技術改善を施したいと考えている。

深層学習を利用したコミュニケーションロボットに関する研究

研究代表者 尾形 哲也
(基幹理工学部 表現工学科 教授)

1. 研究課題

本研究では、我々がこれまでに成果をあげてきた深層学習によるロボット行動学習と言語学習を融合させることにより、環境認知や言語処理といったコミュニケーションに必要な高次認知能力を自律的に獲得することを目的とする。最終的には人間型の実ロボットを用いて、人間との多様な協働を必要とするような実作業で評価を行う。

2. 主な研究成果

2.1 本文

本年度は、昨年度までの成果を受ける形で、より一般的なコミュニケーションへの拡張を狙いとした。具体的には、ロボットが(1) 言語指示に応じて動作を生成する能力と、(2) 自身の動作からその説明文を生成する能力の、双方を対データから学習するニューラルネットワークモデルおよび学習アルゴリズムを構築した。図1に示すように、本モデルは2つの Recurrent Autoencoder (RAE) からなる。一方が単語シーケンス、すなわち文章を、もう一方がロボットの動作シーケンスを扱う。RAE は、エンコーダ{デコーダモデルの一種であり、出力シーケンスが入力シーケンスと同じになるように、すなわち恒等写像を目的として学習を行う。学習により RAE は、シーケンスを表す固定長ベクトル表現を、そのシーケンスを再生成可能な形で獲得する。この提案モデルでは、各 RAE における復元誤差に加え、互いに対となる文章と動作の表現同士が近くなるように拘束する損失関数を設ける。これら二つの学習により、上記の二つの機能が実現することが期待される。

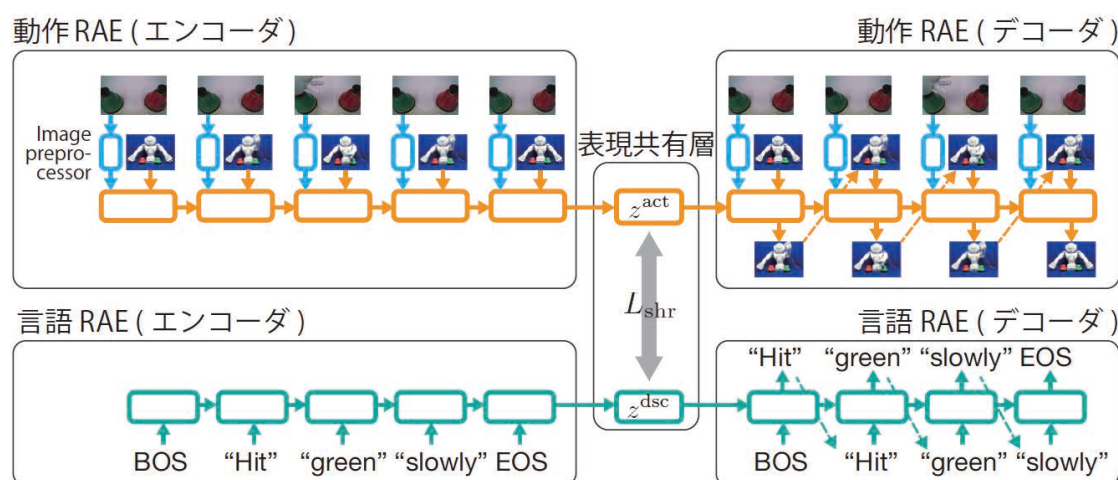


図1 提案モデルの概要

提案手法の有効性を評価するために、ロボット実験を行なった。実験用ロボットとして、ヒューマノイドロボット NAO を用いた。ロボットの前には色付きの立方体オブジェクトが2つ決められた位置に置かれる。オブ

ジェクトの色は赤, 緑, 黄のいずれかである. 各配置で, ロボットは 12 通りの動作を行うことができる. それぞれの動作に対応する文章は, 動詞, 目的語, 副詞の 3 単語からなる. 学習後の動作 RAE のエンコーダに動作シーケンスを入力して, その表現を元に言語 RAE のデコーダを計算することで, 正しい文章が生成されるかを評価した. 既学習の 54 パターンと未学習の 18 パターンすべてにおいて正しい文章を生成することができた.

逆に言語RAE のエンコーダに文章を入力して, その表現を元に動作RAE のデコーダを計算することで正しい動作が生成されるか, ロボットを使用して評価した. この結果, 既学習状況については 36/54 パターン, 未学習状況については 12/18 パターンの動作生成に成功した. 失敗したケースについても, 軌道はほぼ正しいが, わずかな位置誤差のためにオブジェクトが指示された方向に動かなかったというケースがほとんどであった.

学習後の共有空間におけるシーケンスの表現を主成分分析によって可視化した. その結果, 動詞, 目的語, 副詞のそれぞれの品詞について, 体系的にエンコードされ, 72 パターンの動作シーケンスも文章の表現と正しく対応づけられていることが確認された.

3. 共同研究者

森 裕紀 (次世代ロボット研究機構・研究院准教授)

村田 慎吾 (創造理工学部・総合機械工学科・助手)

4. 研究業績

4.1 学術論文

Shingo Murata, Yuxi Li, Hiroaki Arie, Tetsuya Ogata, and Shigeki Sugano: Learning to Achieve Different Levels of Adaptability for Human-Robot Collaboration Utilizing a Neuro-dynamical System, IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, accepted, Jan. 2018.

Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata: Representation Learning of Logic Words by an RNN: from Word Sequences to Robot Actions, Frontiers in Neurorobotics, accepted, December 2017.

Kuniyuki Takahashi, Kitae Kim, Tetsuya Ogata, and Shigeki Sugano: Tool-body Assimilation Model Considering Grasping Motion through Deep Learning, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 91, pp. 115-127, May 2017. doi.org/10.1016/j.robot.2017.01.002

4.2 総説・著書

Angelo Cangelosi and Tetsuya Ogata: Speech and Language in Humanoid Robots, "Humanoid Robotics: A Reference", Editor: Ambarish Goswami, and Prahlad Vadakkepat, Springer, ISBN: 978-94-007-7194-9 (Print) 978-94-007-7194-9 (Online), December 2017.

尾形哲也: ディープラーニングがロボットを変える, B&T ブックス日刊工業新聞社, 2017 年 7 月 25 日.

尾形哲也: AI 白書 2017~人工知能がもたらす技術の革新と社会の変貌~, 株式会社角川アスキー総合研究所, 2017 年 7 月 20 日. (1.3.6 節担当)

尾形哲也: AI (深層学習) とロボットの発展, ロボット工業会機関紙「ロボット」, Vol. 240, 2018 年 1 月.

尾形哲也: 深層学習の実世界応用へのアプローチ, 日本機械学会計算力学部門ニュースレター, pp.8-10, 2017 年 11 月 22 日.

尾形哲也：神経回路モデルとコミュニケーションの創発，日本ロボット学会誌，Vol. 35, No. 3, pp.195-198, 2017 年 4 月．

佐々木一磨，尾形哲也：手書きスケッチを扱う深層学習モデル，日本画像学会誌，Vol. 56, No. 2, pp.177-186, 2017 年 4 月．

4.3 招待講演

AIRC の知能ロボティクス研究，次世代 AI ロボット先端動向ワークショップーロボットにとっての AI 物体認識ー，一般財団法人マイクロマシンセンター，東大本郷キャンパス伊藤国際学術研究センター，2018 年 3 月 16 日．

深層学習による予測に基づくロボットの動作生成，Science Robotics Meeting in Japan，東京国際交流館，2018 年 3 月 14 日．

ディープラーニングによるロボットの物体ハンドリング，デンソーウェーブテクニカルセミナー，東京国際フォーラム，2018 年 2 月 20 日．

End-to-end learning for combining multiple robot actions，産業技術研究所人工知能研究センター国際シンポジウム”AI collaborating with Humans in the real world”，イイノホール，2018 年 2 月 14 日．ディープラーニングによるロボットの知能化と展開，第 163 回産学交流サロン「ひびきのサロン」最先端ロボティクス技術の展開，2018 年 2 月 9 日．

深層学習による動作と言語の統合学習，「深層学習の先にあるもの - 記号推論との融合を目指して」公開シンポジウム，東京大学先端人工知能学教育寄附講座，東京大学工学部 2 号館，2018 年 1 月 22 日．

ロボティクスと AI の融合へ向けて，GTC Japan 2017，ヒルトン東京お台場，2017 年 12 月 13 日．ディープラーニングによるロボットの今後の展開，日刊工業新聞社主催ワークショップ，国際ロボット展 2017，東京ビッグサイト，2017 年 11 月 30 日．

Robot Behavior Generation Based on End-to-End Learning, ETRI Workshop, Deajon, 16th November, 2017.

ディープラーニングによるロボットの複数タスク学習，JEITA マイクロプロセッサ専門委員会 IoT 懇談会，電子情報技術産業協会，2017 年 11 月 1 日．

ディープラーニングの実世界応用と今後の可能性，データサイエンティスト協会 4th シンポジウム，JP タワー ホール&カンファレンス，2017 年 10 月 23 日．

End to End Approach for Behavior Generation and Language Understanding in Robot Systems, Workshop on “Representation Learning for Human and Robot Cognition”, 5th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI 2017), Bielefeld, 17th October 2017.

Deep Learning for Robotics toward Deep Cognitive Systems, RSJ Tutorial, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017), Vancouver, 25th September 2017.

Mirror neuron-like deep learning model implemented in humanoid robots, Brain Challenge 2017-the 20th Annual Meeting of the Korean Society for Brain and Neural Science, Seoul, 30th Aug. 2017.

深層学習によるロボットの動作模倣学習と今後の展望，第 4 回脳型人工知能とその応用 Mini Workshop，株式会社国際電気通信基礎技術研究所，2017 年 6 月 22 日．

深層学習によるロボットマニピュレーション，新潟県工業技術総合研究所 研究成果発表会，2017 年 6 月 15 日．

ディープラーニングを用いたロボットの行動計画, OS3: ロボット: ビジョンからアクションへ～理論・実用の最新事例～, 画像センシングシンポジウム 2017, パシフィコ横浜アネックスホール, 2017 年 6 月 9 日.

End to End Learning Models for Robot Object Manipulation, Workshop on “AI in Automation”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017), Singapore, 2nd June 2017.

ディープラーニングのロボティクス応用の可能性, LSI とシステムのワークショップ 2017, 東京大学生産技術研究所, 2017 年 5 月 15 日.

4.4 受賞・表彰

IBM 2017 Faculty Award, 2017 年 7 月

4.5 学会および社会的活動

産業技術総合研究所人工知能研究センター特定フェロー (クロスアポイントメント)

科学技術振興機構 ACT-I 「情報と未来」領域アドバイザー

科学技術振興機構さきがけ研究「社会デザイン」領域アドバイザー

日本ディープラーニング協会理事

人工知能学会理事

人工知能学会誌編集委員

計測自動制御学会理事

Senior Editor, Advanced Robotics Editorial Board

Action Editor, Neural Networks Editorial Board

5. 研究活動の課題と展望

本年度までに, 小型のロボットを利用した実験について, ある程度の成果を得ることができている. 今後の最大の課題は, 本手法をより実用的なシステムにスケールして行くことであると考えられるが, そのためには言語インタラクションのデザインや大量の教師データの効率的な収集など複数の課題が残っている. まず大型の人間協調ロボットシステムを整備し, より複雑なタスク下でのモデル評価や, 聴覚・触覚情報も統合したモデルへの拡張を行う予定である.

スマートコミュニティの実現に向けた環境配慮エネルギー・循環システムの構築に関する研究

研究代表者 小野田 弘士
(環境・エネルギー研究科 教授)

1. 研究課題

環境配慮型社会の実現に向けて、自立・分散型エネルギーシステム、資源循環システム、次世代モビリティシステム等を導入したスマートコミュニティの構築が国内外で注目されている。本研究では、地域・産学官等との強固なネットワークを活用し、下記のサブテーマを設定することにより、その実現に向けたアプローチを行うことを目的としている。

- ・再生可能エネルギーを導入した自立・分散型エネルギーの構築に向けた技術・評価手法の開発
- ・安全・安心な資源循環システムの高度化に向けた検討
- ・次世代モビリティシステムとしての超軽量小型モビリティ ULV (Ultra Lightweight Vehicle) の開発と実証

2. 主な研究成果

(1) 再生可能エネルギーを導入した自立・分散型エネルギーの構築に向けた技術・評価手法の開発

① 太陽熱・地中熱複合利用システム

埼玉県本庄市における新幹線・本庄早稻田駅の北側街区におけるまちづくり事業と連携し、本庄スマートエネルギータウンプロジェクトを展開してきた。大規模ショッピングモールの一角に立地する飲食店3店舗の共有熱源として、太陽熱・地中熱の複合利用システムを整備した(図1)。太陽熱の冷房利用を目的とした吸着式冷凍機を導入しており、2015年4月より本格稼働している。現在、運転実績に基づく実測評価を継続的に実施しており、それに基づく性能評価および需要予測手法の構築を行った。また、同様のシステムを千葉県酒々井町における福祉施設への導入を支援し、水平展開を図った。今後は、両者のデータを比較・検討し、手法の高度化を図る。

② 中小規模のバイオマスのエネルギー転換技術の評価

木質バイオマスの熱分解プロセスに焦点を充てた技術・システム評価を実施している。長野県飯田市における360kW級の中小規模木質バイオマスガス化発電の実測データに基づく評価を継続して実施した。年間を通じた稼働実績等を明らかにした。また、国内のバイオマス利活用のみならず、東南アジア各国におけるバイオマス利活用を推進するJST/e-ASIA共同研究プログラム「東アジアにおけるバイオマスエネルギーの社会実装に関わる実現可能性調査」が採択され、連携を強化している。とりわけ、電化率が低いミャンマーを重点連携対象国と位置づけ、現地ニーズに立脚した自立・分散型エネルギーシステムの構築を支援する国際共同研究に着手した(図2)。

(2) 安全・安心な資源循環システムの高度化に向けた検討

① 食品系バイオマスを対象としたバイオガス化実証事業

本庄市の下水処理施設において、食品系バイオマスのメタン発酵による実証事業(処理規模:1t/D)

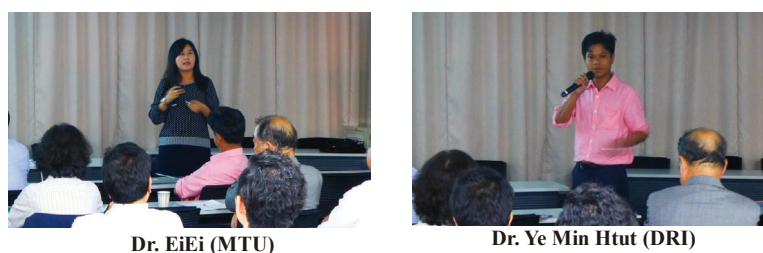
を 2015 年度に実施した。負荷が高い排水処理プロセスにおいて、下水処理施設を活用する「官民連携」、廃プラ等の残渣を地域のセメント工場で石炭代替燃料として有効利用する「産業間連携」を特徴としている。本モデルをベースとし、埼玉県や福島県・会津若松市等への事業化に向けた検討を行った。次年度以降は、人口減少社会を見据えた静脈インフラの在り方を考察すべく、MBT (Mechanical Biological Treatment) システムの社会実装に向けた環境負荷・社会コスト縮減効果等を定量化することを試みる。

② 「廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会」における取り組み

廃棄物処理・リサイクル分野におけるイノベーションの促進、循環型社会・低炭素社会に向けた政策提言を行うことを目的とした「廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会」における活動が活発化している。協議会内に設置された「低炭素化 WG」を通じて、地域循環圏等の政策と連動したフラッグシッププロジェクトを創出する計画である。



図 1 本庄スマートエネルギータウンにおける太陽熱・地中熱複合熱源システム



- “Only 34% of the total population had access to electricity in 2014”(by Dr.EiEi)
 - Rural electrification(2030-100%) (by Dr. Ye Min Htut)
- ↓
- Investigation of scenario for electrification(2030-100%)
 - Design of independent / distributed (isolated) energy system network (small and medium sized; including Connection of a large system)
 - Biomass is one of the powerful RE.

図 2 日本-ミャンマー ワークショップ (2017 年 8 月 3 日, 早稲田大学)

(3) 次世代モビリティシステムとしての超軽量小型モビリティ ULV (Ultra Lightweight Vehicle) の開発と実証

超軽量小型モビリティ ULV は、省エネルギー性を追求した競技用車両をベースに、早稲田大学の永田勝也・小野田弘士研究室で開発された一人乗りのコンセプトカーである。「自転車以上自動車未満」をコンセプトに、必要最低限の機能を付加するという考え方で開発を行ってきた。

ULV のコンセプトのひとつである Multi - PM(Multi Prime Mover)の拡張の一環として、空気エンジンの搭載を検討している(図 3)。具体的には、空気エンジンの 3D モデルを作成し(図 4)、CFD により、圧縮空気の供給系統、圧縮空気エンジン内部の損失を可視化した。さらに、本学情報生産システム研究科・大貝研究室との連携により、部分自動運転対応の ULV の開発に着手した。当研究グループでは、新たに製作した試験用車両の走行基本性能を把握した(図 5)。



図 3 空気エンジン搭載車両

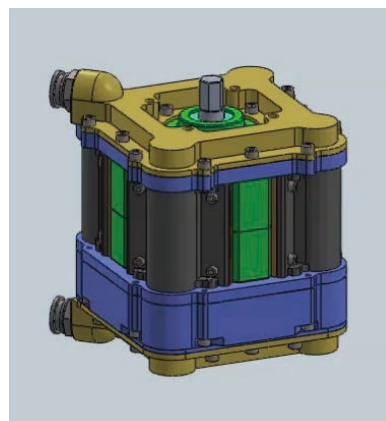


図 4 空気エンジンの 3D モデル



図 5 部分自動運転用 ULV の試作

3. 共同研究者

南川秀樹	環境総合研究センター・客員上級研究員(研究院客員教授)
内藤克彦	環境総合研究センター・客員上級研究員
清水康	グローバルエデュケーションセンター・客員教授
永井祐二	環境総合研究センター・主任研究員(研究院准教授)
胡浩	環境総合研究センター・客員主任研究員
中嶋崇史	環境総合研究センター・客員次席研究員

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) 八木勝也, 松浦加奈, 小野田弘士, 圧縮空気エンジン搭載小型モビリティの開発と性能評価, JSME 第 27 回環境工学総合シンポジウム 2017 講演論文集, 2017
- (2) 上瀧将邦, 小野田弘士, 中小飲食店街における再生可能エネルギー熱利用システムの実測評価 (吸着式冷凍機を含む太陽熱・地中熱利用型空調・給湯システムを例に), JSME 第 27 回環境工学総合シンポジウム 2017 講演論文集, 2017
- (3) Ruixi ZHAO, Hao HU, Zeshi WANG, Ryota TSUBOUCHI, Kenta OMURA, Motoyuki OKADA, Hiroshi ONODA, Economic and environmental assessment of waste biomass recycling system in Aizuwakamatsu city, The 28th Annual Conference of JSMCWM, 503-504, 2017
- (4) Hao HU, Ruixi ZHAO, Kenta OMURA, Hiroshi ONODA, Development of a municipal waste management system from environmental and economic evaluation perspectives : A best available system methodology, Proceedings of EcoDesign 2017 International Symposium, 2017
- (5) Ruixi Zhao, Junichi Tabe, Hiroshi Onoda, Development of an Estimation Method of Energy Consumption and CO2 Emissions for Regional Travel Transportation, The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment (ACSEE2017), 2017

4.2 総説・著書

- (1) 小野田弘士, 失敗から学ぶ「早稲田式」地域エネルギービジネス, エネルギーフォーラム, 2017
- (2) 2050 年戦略研究会 (内藤克彦他), 2050 年戦略 モノづくり産業への提案-エネルギー, 環境, 社会インフラから考える未来予想図, 化学工業日報社, 2017
- (3) 小野田弘士, 官民連携・産業間連携による食品系廃棄物のバイオガス化実証事業, 月刊下水道 Vol.41 No.5, 19-25, 2018
- (4) 小野田弘士, モビリティシステムの社会受容性, 高速道路と自動車, Vol.61 No.2, 13, 2018
- (5) 小野田弘士, 廃棄物・リサイクル分野における IoT 活用の可能性～安全・安心への対応策を中心として～, 電気ガラス, 58 号, 9-12, 2018
- (6) 小野田弘士, スマートコミュニティと水素エネルギーの可能性, 燃料電池, Vol.17 No.4, 33-37, 2018

4.3 招待講演

以下, 研究代表者 (小野田弘士) の主たるものを抜粋する.

- (1) 小野田弘士, 中国の第 13 次 5 カ年計画における自動車リサイクル政策の推進と日中協力シンポジウム, 招待講演「日本における自動車リサイクル制度の成果と経験, 中国への示唆」, 一般社団法人環境政策対話研究所, 2017.3.7
- (2) 小野田弘士, 廃棄物エネルギーの地域での利活用促進に関する説明会 (関西)、「廃棄物エネルギーの利活用に係る推進の意義について」, 環境省, 2017.2.19
- (3) 小野田弘士, 荒川区職員ビジネスカレッジ「エネルギー問題の見方と地域に求められる対応」, 東京都荒川区, 2017.12.7
- (4) 小野田弘士, 日本廃棄物コンサルタント協会技術セミナー, 「廃棄物処理・リサイクル分野にお

ける IoT の活用の可能性」, 日本廃棄物コンサルタント協会, 2017.11.29

- (5) 小野田弘士, 電気硝子工業会第 48 回技術セミナー, 「廃棄物処理・リサイクル分野における IoT の活用の可能性」, 電気硝子工業会, 2017.11.21
- (6) 小野田弘士, 地域エネルギーと水素の利活用セミナー, 基調講演「再生可能エネルギー等を活用した地域エネルギーシステムについて」, 唐津市, 2017.11.14
- (7) 小野田弘士, 平成 29 年度分散型エネルギー関連政策立案研修, 「地域新電力の可能性」, 経済産業省・資源エネルギー庁, 2017.11.1
- (8) 小野田弘士, IoT・AI (人工知能) に係る勉強会, 「廃棄物処理・リサイクル分野における IoT の活用の可能性」, 埼玉県・資源循環工場事業者協議会事務局, 2017.10.24
- (9) 小野田弘士, 「次世代水上交通システムによる低炭素社会の実現」『スマートシティの実現と舟運による活性化』, 基調講演「スマートシティの実現に向けて～地域エネルギービジネスの可能性～」, 一般財団法人電池推進船普及研究財団, 2017.10.10
- (10) 小野田弘士, 水素・再生可能エネルギー導入セミナー, 基調講演「再生可能エネルギーを活用した地域エネルギーシステムに関する動向」, 鹿児島県, 2017.10.5

4.4 受賞・表彰

- (1) 『環境工学総合シンポジウム研究奨励表彰』; 八木勝也, 松浦加奈, 小野田弘士, 圧縮空気エンジン搭載小型モビリティの開発と性能評価, JSME 第 27 回環境工学総合シンポジウム 2017 講演論文集, 2017

4.5 学会および社会的活動

以下, 研究代表者 (小野田弘士) の主たるものを抜粋する。

- (1) 日本機械学会環境工学部門 第 2 技術委員会 (委員)
- (2) 廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会 (副会長)
- (3) 公益財団法人本庄早稲田国際リサーチパーク, 本庄早稲田オープンイノベーションネットワーク, 環境・エリアマネジメント研究部会 (部会長)
- (4) 内閣府・地域活性化伝道師
- (5) 平成 29 年度低炭素型の行動変容を促す情報発信 (ナッジ) による家庭等の自発的対策推進事業～家電・自動車等利用に関するナッジを活用した低炭素型行動変容モデルの構築～「低炭素行動変容推進方策検討委員会」(委員)
- (6) 環境省・平成 29 年度エネルギー起源 CO₂ 排出削減技術評価・検証事業検討会 (委員)
- (7) 環境省・平成 29 年度水素利活用 CO₂ 排出削減効果評価・検証検討会 (委員)
- (8) 環境省・平成 29 年度再生可能エネルギーに関するゾニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務 (外部アドバイザー)
- (9) 環境省・使用済小型電子機器等再資源化促進に向けた検討会 (委員)
- (10) 環境省・平成 29 年度廃棄物エネルギー利活用計画策定調査検討会 (委員)
- (11) 環境省・平成 29 年度廃棄物処理等に関わる中長期行動指針等策定業務(委員)
- (12) 公益財団法人廃棄物・3R 研究財団・MBT(メタン発酵+SRF 製造)システムの中小廃棄物処理施設におけるエネルギー回収に関する調査」検討会(委員)
- (13) 環境省・「地域循環圏高度化ワーキンググループ」及び「産業・地域共生のための動静脈ネットワーク会議」(委員)

- (14) 経済産業省・小型家電リサイクル制度の持続的発展に向けた検討会（委員）
- (15) 国土交通省・「リサイクルポータル施策の高度化研究会」（委員）
- (16) 国土交通省・まち・住まい・交通の創畜省エネルギー化モデル構築支援事業タスクフォース（委員）
- (17) 埼玉県・埼玉県水素エネルギー普及推進協議会（副会長）
- (18) 宮城県・再生可能エネルギー等・省エネルギー促進審議会委員（委員）
- (19) 岡崎市・市政アドバイザー
- (20) 平成 29 年度「敦賀市調和型水素社会形成計画」にかかる意見交換会（委員）
- (21) 渋谷区・環境基本計画等改定委員会（委員）
- (22) 新宿区・リサイクル清掃審議会（副会長）
- (23) 中央区・環境行動計画推進委員会（委員）
- (24) 横浜市・廃棄物減量化・資源化等推進審議会（委員）
- (25) 産業廃棄物適正管理能力検定検討委員会（委員）
- (26) 相模原商工会議所・スマートコミュニティ調査研究特別委員会（アドバイザー）
- (27) 一般社団法人美園タウンマネジメント・「浦和美園地区・地産地消型再生可能エネルギー活用マスタープラン策定事業」検討会（委員）
- (28) エックス都市研究所・「銚子市の地場産業エネルギー需要特性を考慮した CEMS 構築可能性調査」検討会（委員）
- (29) 平成 29 年度地域中核企業創出・支援事業「リユース蓄電池を活用した低コスト EV 充電システム製品化支援事業」（専門家）

5. 研究活動の課題と展望

- (1) 再生可能エネルギーを導入した自立・分散型エネルギーの構築に向けた技術・評価手法の開発
太陽熱、地中熱利用を複合利用した熱源システムは、福祉施設等への水平展開が実現できている。これらを含めた実測データ体系化を図ることにより、新規の計画に活用できるデータ基盤を整備する。また、VPP(Virtual Power Plant)やエネルギー貯蔵等を含めたスマートコミュニティにおけるエネルギーマネジメントシステムの高度化に向けた検討を行う。具体的には、大規模な再開発事業の計画がある神奈川県某所におけるケーススタディおよび計画の策定支援を行う。さらに、ミャンマー等の海外の非電化地域における自立・分散型エネルギーシステムの検討に着手する。

- (2) 安全・安心な資源循環システムの高度化に向けた検討

2016 年度に、産学官連携のプラントフォームとして、廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会を発足した。これまで検討してきた食品リサイクルや労働安全分野において、IoT を活用することにより、低炭素効果やリスク低減効果等が期待できる。同協議会と連携することにより、新たな研究展開を模索する。

- (3) 次世代モビリティシステムとしての超軽量小型モビリティ ULV (Ultra Lightweight Vehicle)の開発と実証

空気エンジンの設計改善およびその搭載車両の開発を継続して行う。さらに、「地産地活」やスマートコミュニティにおける新たなモビリティサービスのビジネスモデルを検討することを目的に、部分自動運転や地域におけるモビリティシステムの設計支援手法の開発を検討する。具体的には、埼玉県秩父市をモデルケースとして、ULV の自動運転の実証事業の企画・立案を行う。

高精度 3D カラー放射線イメージング

研究代表者 片岡 淳
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

近年、ステレオセンシング技術を利用した 3 次元動的イメージングが、様々な分野で応用展開されつつある。たとえば自動車の外形把握や自動運転システムでの利用、また 3D スキャンはゲーム機やプリンタ、バーチャルリアリティ(VR)を利用した動画システムに至るまで、現代産業には欠かせない。一方で、放射線イメージングは未だレントゲン撮影に代表される 2 次元モノクロ静止画が基本であり、画像はエネルギー情報を持たない。現代医療診断の根幹をなす CT も同様で、 10^{8-9} cts/s/cm² もの膨大な X 線を人体に当てる必要があり、その被ばく量は 1 回の撮影で 10mSv (成人男性の年間自然被ばく量の 5 倍) にも及ぶ。病後の経過観察には多数回の撮影が要求されることもあり、いまだ妊婦や子供が安心して受診できる環境は整っていない。X 線からガンマ線にわたる、広いエネルギーで放射線イメージを高解像度かつ 3 次元・カラー (多色) で単時間に取得できれば、被写体の立体構造や材質、現象のダイナミクスに至るまで、医療のみならず産業界にも大きなブレークスルーが見込まれる。本プロジェクトでは X 線パルスごとに色 (エネルギー) を識別する、フォトン・カウンティング CT やガンマ線イメージングの革新技术開発に挑戦する。

2. 主な研究成果

2.1 低被ばく・多色 X 線 CT の開発

本研究では、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) と高速シンチレータを用いて、「低被ばく」かつ「多色」撮影が可能な X 線 CT システムを提案し、装置の開発を行った。MPPC は約 100 万倍の内部増幅をもつ半導体光素子で、微弱信号への感度が極めて高い。従来型 CT より遥かに低い線量でも同等以上の高い S/N を実現できる。一方では高速応答により個々のパルスを分解し、エネルギー情報を用いた多色イメージングも可能である。本年度は特に、16 系統を有するアレイ型 CT システムの開発を行った。まず 16ch の MPPC アレイと YGAG シンチレータアレイを組み合わせた一次元検出器を 1D スキャナーとして使用し、被写体 (ライター) のレントゲン撮影を試みた。結果の一例を図 1 に示す。複数のエネルギー域を組み合わせ、プラス

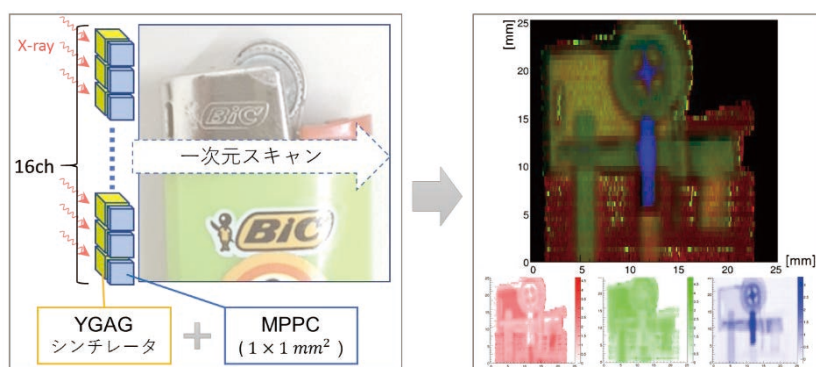


図 1: 16ch MPPC アレイと専用高速 LSI をもちいたライターの一次元ラインスキャン

チック部・軽金属部・重金属部をそれぞれ赤・緑・青と色分けすることで、物質を明確に識別することに成功した。更に複数の CT スライスを組み合わせて、三次元画像の取得も可能となる。結果を図 2 に示す(森田修士論文 2018)。この 3D 再構成により、XZ,YZ 平面など様々な角度のスライス画像を取得することが出来る。

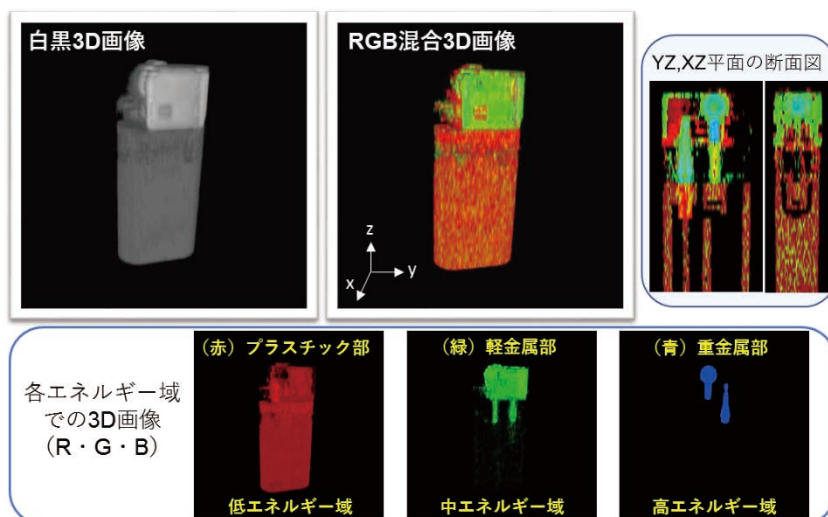


図 2: ライターで取得・実証した 3 次元カラー CT 画像

また色分けすることで物質の識別を明確にし、被写体から特定の物質のみを立体的に抽出することにも成功した。

2.2 超高線量下での環境放射線イメージング

福島第一原発の事故により多量の放射性核種が放出され、約 7 年を経た今でも除染は深刻な課題である。特に原子炉建屋内の線量率はいまだに $1\text{mSv/h} \sim 530\text{Sv/h}$ と極めて高く、廃炉に向けた取り組みを一層困難なものとしている。本研究では、従来イメージングが不可能であった超高線量率下に焦点をあて、新規ガンマ線イメージング手法の確立を目指す。とくに、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ (GOS)増感紙をピンホールコリメータ焦点面に配置し、その発光を EM-CCD で積算撮影する新しい手法を確立した。装置写真を図 3 に示す。本年度は特に、線源のステレオ測定による 3 次元イメージング

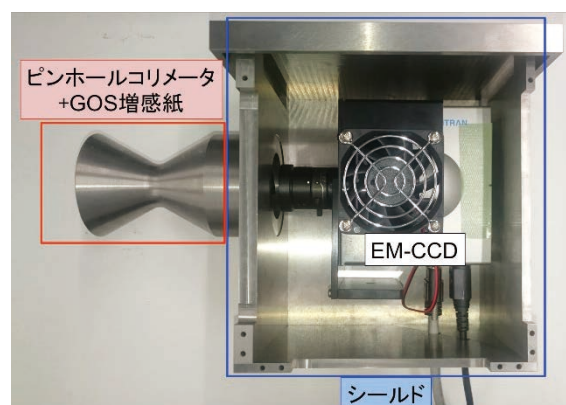


図 3: 開発した高線量用ピンホールカメラ

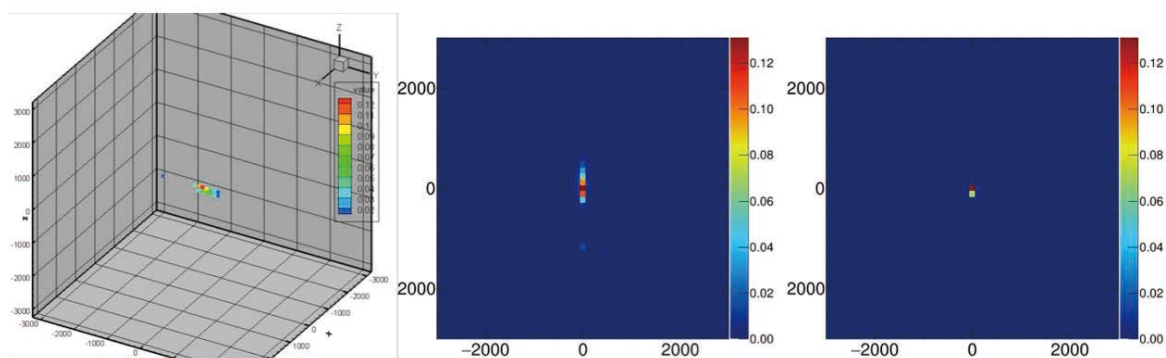


図 4: 3 次元画像再校正結果 (左) と、xy 平面 (中) および xz 平面 (右) での射影画像

に挑戦した。既存の画像再構成法においては、射影平面を仮定しその平面上での放射性核種分布を算出しているが、奥行き方向が縮退するため3次元空間分布を求めることは出来ない。そこで逐次近似法である ML-EM 法に基づく 3 次元画像再構成法を考案した。原点にある ^{60}Co 線源に対し、6 箇所 3~4 方向から計 20 回の撮像実験を行った。図 4 は再構成結果を示しており、3 次元で正確なイメージングが可能であることを確認した（末岡修士論文 2018）。今後は装置全体を軽量化し、無人ロボット搭載などより現実的な装置開発へと発展させていきたい。

3. 共同研究者（学内のみ）

有元 誠（研究院講師・次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] Koide,A.; Kataoka,J.; Masuda,T.; Takabe,M.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kurihara,T.; Inaniwa,T. Precision imaging of 4.4 MeV gamma rays using a 3-D position sensitive Compton camera, *Nature Scientific Reports*, submitted on Feb.28
- [2] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (5 pages)
- [3] Arimoto,M.; Morita,H.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kataoka,J.; Nitta,H.; Ikeda,H. Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (5 pages)
- [4] Sueoka,K.; Kataoka,J.; Takabe,M.; Iwamoto,Y.; Arimoto,M.; Yoneyama,M.; Yoda,I.; Torii,T.; Sato,Y.; Kaburagi,M.; Terasaka,Y. Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate Environments, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (4 pages)
- [5] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, in press (4 pages)
- [6] Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,K.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T.; Toshito,T. Measurement of nuclear reaction cross sections by using Cherenkov radiation toward high-precision proton therapy, *Nature Scientific Reports*, 2018, vol.8, 2570 → プレス発表を参照（2018 年 2 月 7 日：早稲田大学、東京女子医科大学、京都府立医科大学、量研機構、名古屋大学、名古屋市立西部医療センター）
- [7] Arimoto,M.; Harita,S.; Sugita,S.; Yatsu,Y.; Kawai,N.; Ikeda,H.; Tomida,H.; Isobe,N.; Ueno,S.; Mihara,T.; Serino,M.; Kohmura,T.; Sakamoto,T.; Yoshida,A.; Tsunemi,H.;

Hatori,S.; Kume,K.; Hasegawa,T. Development of a 32-channel ASIC for an X-ray APD detector onboard the ISS, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2018, Vol.882, pp.138-147

[8] Yoneyama,M.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Masuda,T.; Yoshino,M.; Kamada,K.; Yoshikawa,A.; Sato, H.; Usuki, Y. Evaluation of GAGG:Ce scintillators for future space applications, *Journal of Instrumentation*, 2018, 13, P02023

[9] Nakanish,K.; Yamamoto,S.; Kataoka,J. Performance comparison of finely pixelated LYSO- and GAGG-based Si-PM gamma cameras for high resolution SPECT, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 2017, vol.872, pp.107-111

[10] Taya,T.; Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Tagawa,L.; Mochizuki,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Kurita,K.; Yamaguchi,M.; Kawachi,N. Optimization and verification of image reconstruction for a Compton camera towards application as an on-line monitor for particle therapy, *Journal of Instrumentation*, 2017, vol.12, P07015 (17 pages)

[11] Kishimoto,A.; Kataoka,J.; Tagawa,L.; Mochizuki,S.; Ohsuka,S.; Nagao,Y.; Kurita,K.; Yamaguchi,M.; Kawachi,N.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; First demonstration of multi-color 3-D in vivo imaging using ultra-compact Compton camera, *Nature Scientific Reports*, 2017, vol.7; 2110

→ プレス発表を参照 (2017 年 5 月 18 日 : 早稲田大学、大阪大学、量研機構)

[12] Mochizuki,S; Kataoka,J.; Tagawa,L.; Iwamoto,Y.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Arimoto,M.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara.T.; Ohsuka,S. First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima, *Journal of Instrumentation*, 2017, vol.12, P11014 (13 pages)

4.2 総説・著書

[1] 有元 誠; 片岡 淳. 増幅型光センサーMPPC を用いた低被ばく・多色 CT への挑戦, *Isotope News*, 2018, vol.755,pp.25-29

4.3 国際会議での発表

[1] Takabe,M.; Masuda,T.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Sueoka,K.; Maruhashi,T.; Tanaka,S.; Nishio,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T. Development of simple proton CT system with novel correction methods of proton scattering, 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) , 2017, 10-15 December, OIST, Okinawa, Japan (Poster) → 優秀ポスター賞を受賞

[2] Morita,H.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Nitta,H. Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Oral)

[3] Arimoto,M.; Morita, H.; Kataoka,J.; Maruhashi,T.; Nitta,H.; Fujieda,K. Design and Development of LSI for new photon-counting CT with multi-pixel photon counters, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct –

28 Oct, Atlanta, USA (Oral)

[4] Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,T.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T.; Toshito,T. A novel method of measuring nuclear reaction cross sections by using Cherenkov light toward high-precision proton therapy. IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Poster)

[5] Takabe,M.; Masuda,T.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Tanaka,S.; Nishio,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T. Development of simple proton CT system with novel MCS correction methods, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Poster)

[6] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[7] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[8] Sueoka,K.; Kataoka,J.; Takabe,M.; Iwamoto,Y.; Arimoto,M.; Yoneyama,M.; Yoda,I.; Torii,T.; Sato,Y.; Kaburagi,M.; Terasaka,Y. Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate Environments, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[9] Morita,H.; Oshima,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Nitta,H.; Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[10] Arimoto,M.; Morita,H.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kataoka,J.; Nitta,H.; Ikeda,H. Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Poster)

4.4 国内会議での発表・公開セミナー

[1] (招待講演) 片岡 淳 「宇宙から医療まで：放射線イメージングの最前線」, “物質と宇宙の基礎研究とそれがもたらす最先端産業技術”, 特別シンポジウム、第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日-20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス

[2] 望月 早駆 ; 片岡 淳; 小出 絢子 ; 藤枝 和也; 丸橋 拓也; 栗原 拓也; 末岡 晃紀; 米山 昌樹; 稲庭 拓, 陽子線治療オンラインモニタに向けた即発ガンマ線イメージングの実証, 第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日-20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス

[3] 丸橋 拓也 ; 片岡 淳; 有元 誠; 森田 隼人 ; 藤枝 和也; 新田 英雄, マルチチャンネル MPPC を用いた低ひばくかつ多色 X 線 CT の構築と評価, 第 65 回 応用物理学会・春季学術

講演会, 2018, 3 月 17 日・20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス

[4] 田川怜央 ; 片岡 淳; 末岡 晃紀; 藤枝和也; 栗原拓也; 有元誠; 望月早駆; 丸橋拓也; 歳藤利行; 木村充宏, 粒子線治療下でのイメージングに向けた中性子カメラの開発, 第 65 回応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日・20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス

[5] (招待講演) 片岡 淳「手のひらサイズ」コンプトンカメラを用いた 3D in vivo イメージングへの挑戦, 第 13 回小動物インビボイメージング研究会, 日本核医学会, 2017, 7 月 29 日, 大阪大学医学部

4.5 プレスリリース

[1] 2018 年 2 月 7 日: [プレスリリース](#)

「陽子線が体内で起こす核反応を光で可視化 陽子線治療の精度向上に大きく貢献」

・早稲田大学ホームページ: <https://www.waseda.jp/top/news/57078>

[2] 2017 年 5 月 18 日: [プレスリリース](#)

「世界最軽量「手のひらサイズ 580g」医療用ガンマ線可視化カメラを開発」

・早稲田大学ホームページ: <https://www.waseda.jp/top/news/51161>

4.6 マスメディア掲載

[1] 2018 年 3 月 1 日(木): BS ジャパン 7ch: 木曜夜 8:55~ TV 放送

「科学ミチル 世界は未知で満ちている」見えない光で未知を観る!

・BS Japan ホームページ: http://www.bs-j.co.jp/official/kagaku_michiru/

[2] 2017 年 12 月 15 日: 理系マイナビ 2019 SPECIAL INTERVIEW volume.50

ー 若き研究・開発者への提言 ー

・理系マイナビホームページ: <https://job.mynavi.jp/conts/2019/sci/interview/50/>

[3] 2018 年 2 月 14 日: 化学工業日報、医療ニュースほか

「陽子線治療精度を向上 早大が体内進路可視化」

・化学工業日報 ホームページ: <http://www.chemicaldaily.co.jp/>

[4] 2017 年 5 月 29 日: 日本経済新聞 (全国版)

「早大など、ガンマ線を 3D 画像に 手のひら大のカメラ」

・日経新聞 ホームページ:

https://www.nikkei.com/article/DGXLASGG25H55_X20C17A5TJM000/

・2017 年 5 月 26 日: 科学新聞

「世界最軽量 580 グラム実現 ガンマ線可視化カメラ」

4.7 パンフレット等への掲載

[1] 2018 年 3 月: 早稲田大学理工学術院報「塔」93 号

・「世界最軽量「手のひらサイズ 580g」医療用ガンマ線可視化カメラを開発」

[2] 2017 年 11 月: NTT ファシリティーズジャーナル

・「研究者の横顔」

[3] 2017 年 5 月: WASEDA University Research Activities

“Next-generation WASEDA Research Resources”

5. 研究活動の課題と展望

2018 年度は 64ch の専用高速アナログ LSI を製作する。これを用いて 64ch の 1 次元ラインセンサもしくは 2 次元アレイの製作を行い、より臨床 CT に近い状況で各種ファントムの画像評価を行う。また、様々なシンチレータサンプルと専用アナログ LSI と組み合わせることで、光量やレート耐性の定量評価を行う。その他、医療イメージングでは重点研究と技術シェアしながら効率化をはかる。環境計測においては、里山や森林など、福島県下でも除染が進んでいない地域に焦点をあて、ドローンを用いたフィールド計測を定期的に続行する。

高効率で省電力な IoT・ビッグデータ処理基盤

研究代表者 甲藤 二郎
(基幹理工学部 情報通信学科 教授)

1. 研究課題

各種センサ、スマートフォン、自動車、列車、移動ロボット等、IoT (Internet of Things) デバイスは多岐に渡り、またそのセンシングデータも、加速度、温度等の小容量データから高精細映像等の大容量データまで、あるいは、SNS (Social Networking Service)等の遅延要求の緩いものから自動運転、Industry 4.0等の遅延要求の厳しいものまで、これまた多岐に渡っている。また、災害時や大きなイベント時にはバースト的に大量のデータが発生するが、どのような環境下でも安全かつ高信頼なセンシングを確保すると共に、適切な情報を抽出できるデータ処理技術の確立が求められている。さらには、東日本大震災時の反省に基づき、電力供給が限られた中でも長時間動作可能な省電力化技術の確立が求められている。

そこで本申請では、高効率（高スループット）、低消費電力、低遅延、かつ安全な IoT センシングデータの収集技術、センシングデータが爆発的に発生した場合にも柔軟に対応可能な階層化モバイルクラウドの構築技術、ならびにそれらの研究成果の有効性実証のための高機能テストベッドの開発、に関する研究開発を進める。最終的には、プロトタイプ実装を通じて提案方式の有効性を実証し、具体的な出口としての東京オリンピック、運輸・自動車、医療・健康、農業・林業等の社会的課題の解決と産業貢献、ならびに、安心・安全な IoT・ビッグデータ処理基盤の構築に資することを目標としている。

2017 年度の研究成果としては、第一に、マルチメディア処理の低遅延化を実現する、仮想エッジクラウドシステムの検討を行った。近年、アプリケーションサービスの高度・複雑化やビッグデータの台頭の影響を受け、モバイルトラフィックや通信遅延、クラウドの処理負担の増大等が懸念されている。そこで、提案システムでは、ネットワークのエッジ部に分散配置したリソースを利用してアプリケーション処理を実行するエッジコンピューティングを想定し、さらにマルチメディアサービスを機能レベルに細分化し、それらを機能チェイニング (Function Chaining) することで、仮想的なマルチメディアサービスとしての再定義を試みる。さらに、本提案システムを OpenStack により実装し、研究室内の OpenStack 環境と商用クラウドを併用することで、低遅延化の検証を行った。

また、第二に、「高品質」、「低負荷」、「省電力」なフィールド監視システムの検討を行った。本システムでは、フィールドの状態を多種多様なセンサ、高精細な監視カメラによってセンシングを行い、監視フィールドの状態に合わせた適応レート制御を適用している。このイベントドリブン型レート制御により、監視カメラにおいて、監視品質を維持したまま、主に冗長な映像トラフィックを削減する。また、センサ端末において、センサ送信頻度抑制によるセンサの消費電力量の削減を図っている。

2. 主な研究成果

2.1. エッジクラウドにおけるマルチメディア・サービスファンクションチェイニング

2.1.1. はじめに

近年、アプリケーションサービスの高度・複雑化やビッグデータの台頭の影響を受け、モバイルトラフィックや通信遅延、クラウドの処理負担の増大等が懸念されている[1]。これに対し、ネットワークのエッジ部に分散配置したリソースを利用してアプリケーション処理を実行するエッジコンピューティング[2]に関する議論が行われている。エッジコンピューティングのメリットとして、アプリケーション処理要求を行う端末とエッジ間の物理的な距離が、同端末と従来のクラウドコンピューティングで利用されるクラウドサーバ間の距離に比べて大幅に短縮されることが挙げられる。さらに、複数エリアに分散配置されているエッジサーバで分散的にアプリケーション処理を実行できるため、サーバ1台あたりの処理負担も軽減される。一方、デメリットとして、それぞれのリソースが小規模なデータセンタのような構造で分散的に存在するため、分散した各エリアで見ると計算リソース量が少なくなること、リソースの配置や選択が複雑になり、管理コストが増大することが挙げられる。そのため、エッジコンピューティングのユースケースとして考えられているマルチメディア処理のような処理コストのかかるアプリケーションを実行するためには、構築が容易で冗長性のあるエッジコンピューティング環境および各アプリケーション特性に適した計算リソース選択が必要と言える。

これを踏まえ、筆者らはエッジコンピューティングにおける分散処理による低遅延処理の検討を進めてきた[7]。本章では、これまで提案してきたエッジクラウドシステムの紹介をするとともに、その性能検証として、対象とするマルチメディアアプリケーションを追加し、複数のアプリケーションを複数ユーザで共有シナリオ化といった、より現実的な環境下で性能評価を行う。また、比較対象として、現実的なクラウド環境を導入し性能比較を行う。

提案しているエッジクラウドシステムは、オープンソースのクラウド管理ソフトウェア群であるOpenStack[3]を活用している。複数エリアにまたがる仮想クラウド基盤上のエッジクラウドをOpenStackにより構築し、マルチメディア処理に対して、マルチメディア処理を単独で動作可能な機能レベルに分割する「マルチメディアサービスの機能分割」と、それらを最適な順番・場所で行う「マルチメディアサービスファンクションチェイニング」を実行することで、マルチメディア処理の低遅延化を図っている。

2.1.2. 関連技術

2.1.2.1. ネットワーク仮想化

前節で述べた背景を受け、ネットワークの効率的な利用を図るために、Software Defined Network (SDN)[4]やNetwork Function Virtualization (NFV)[5]といったネットワーク仮想化技術に関する議論が行われている。SDNでは、従来各ネットワーク機器内にハードウェア実装されていたネットワークの経路制御機能とデータ転送機能を分離し、SDNコントローラと呼ばれるソフトウェアによってこれらを一か所で集中的に制御することが可能となる。一方、NFVでは、ロードバランサやファイアウォールといった、従来では各専用のネットワーク機器上で仮想していたネットワーク機能を、論理的に統合、分割された汎用サーバ上で実現することが可能となる。

上記技術に関連して、Service Function Chaining (SFC)[6]では、NFVにおけるサービス機能であるVirtualized Network Functionに対して、適切な順序でパケットを転送するサービスチェイニングを実現している。動作手順例を図2.1.1に示す。サービスを利用する各ユーザに対して適切

なサービスを柔軟に提供するために、まず、転送するパケットにサービスを識別するためのタグをそれぞれ付与する。次に、付与されたタグに基づいてサービス機能を連結したサービスチェーンを定義し、最終的にそのサービスチェーンに従ってパケット転送を行う。

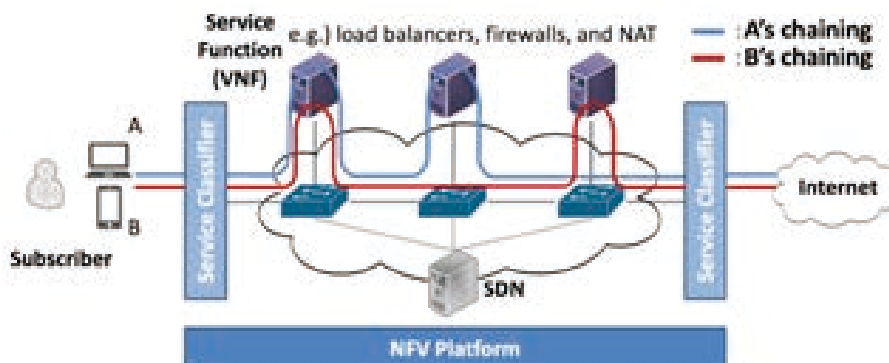


図 2.1.1. SFC 動作手順例

2.1.2.2. サーバ仮想化

2.1.2.1 節同様、サーバの効率的な利用を図るために、サーバ仮想化技術に関する議論が行われている。サーバ仮想化とは、CPU やメモリ、ストレージといったサーバのリソースを物理的な構成にとらわれずに論理的に統合・分割することで、1 台の物理サーバ上で複数の仮想サーバを利用し、リソースの有効活用を可能とする仕組みである。これにより、物理サーバ 1 台あたりの稼働率向上と物理サーバ台数の削減が可能となり、余剰リソースや保守費用、設置スペースの削減を実現できる。また、仮想サーバの台数やスペック、稼働箇所を動的に変化させることで、システムの負荷軽減や処理能力向上、災害時のバックアップのためのスケールアウトを容易にし、移行前と同じ環境で仮想サーバを利用することができる。本稿では、提案するシステムにおいて、オープンソースのクラウド管理ソフトウェア群である OpenStack を用いて Infrastructure as a Service (IaaS) 環境を構築している。コントローラノードとコンピュータノードの連携により、仮想サーバやネットワーク、ストレージなどの各機能が実行され、システム利用者の要求にあわせて、仮想サーバであるインスタンスのメモリ拡大やインスタンス自体の複製といったリソーススケーリングを柔軟に行うことができるようになっている。

2.1.3. エッジクラウドシステム

本章では、筆者らが[7]にて提案しているエッジクラウドシステムを紹介する。本システムは、仮想クラウドシステムという観点から効率的なリソース利用を実現するために、OpenStack を活用している。

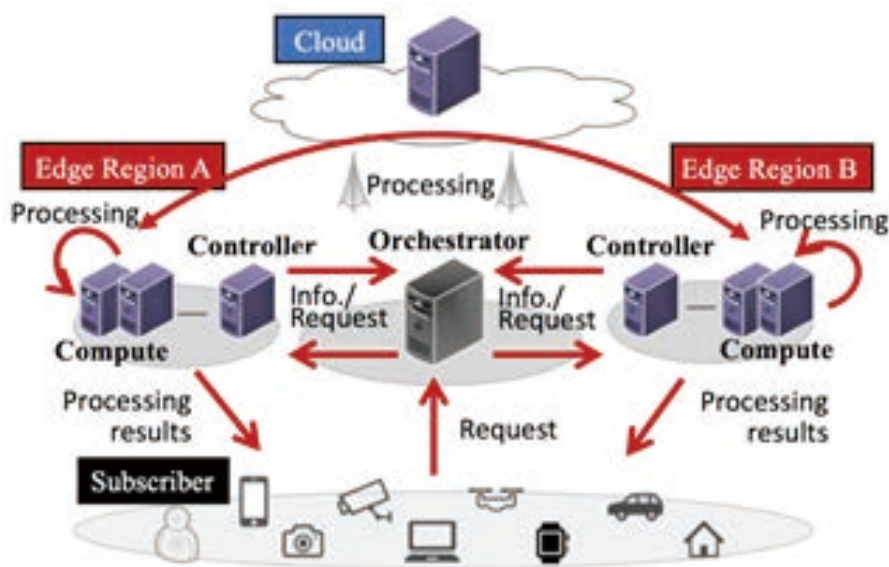


図 2.1.2. エッジクラウドシステムの全体構成

2.1.3.1. システム概要

提案しているエッジクラウドシステムの全体構成を図 2.1.2 に示す。従来のクラウドコンピューティング環境(Cloud)ではユーザから見て遠隔地に計算リソースが配置されている。一方、エッジコンピューティング環境(Edge)では、マルチメディア処理に必要な計算リソースをユーザの近隣に配置することで従来のクラウドコンピューティング環境利用時に比べて通信遅延の削減が期待できる。エッジコンピューティング環境は OpenStack Ocata で構築された複数リージョン(エリア)のクラウド環境となっており、以後、エッジコンピューティング環境をエッジクラウドとして定義する。なお、各リージョンは 1 台のコントローラノードと複数台のコンピュートノードから構成されており、図 2.2 では例として 2 リージョン構成(Region A, B)の場合を示している。スマートフォンやタブレット、IoT 端末のユーザ(Subscriber)は、これら従来のクラウドコンピューティング環境もしくはエッジクラウドに対して、マルチメディア処理を要求する。さらに、本システムではエッジネットワーク内にオーケストレータを配置し、ユーザの要求情報や各リージョンのエッジクラウドリソースを把握し、エッジクラウドへのリソース操作指示やマルチメディア処理実行のスケジューリングを担う。オーケストレータの詳細は 2.1.3.2 節に示す。

最後に、エッジクラウドシステムにおけるマルチメディア処理手順を以下に示す。

1. オーケストレータおよび各リージョンのコントローラノードが定期的に各リージョンのリソース情報を収集する。
2. ユーザがオーケストレータに対してマルチメディア処理実行リクエストを送信する。
3. オーケストレータが処理 1、2 で得た情報を基にマルチメディア処理の実行スケジューリングを決定する。
4. オーケストレータが該当のリージョンのコントローラノードにスケジューリング情報を送信し、適切なエッジクラウドでマルチメディア処理やリソース操作を実行する。
5. 実行結果をユーザに送信する。

2.1.3.2. オーケストレータ

オーケストレータはエッジネットワーク内に配置され、OpenStack コントローラと合わせてエッジクラウドの各リージョンのノード・リンク情報を定期的に収集している。また、アプリケーション情報をあらかじめ与えられているものとし、ユーザの要求情報はユーザのマルチメディア処理要求発生時に随時受け取るものとする。また、それらの情報に基づいて、マルチメディア処理手順のスケジューリングを行う。

本システムでは、マルチメディア処理機能を分割し、エッジクラウド内に各処理機能を搭載したインスタンスを生成し、「マルチメディアサービスの処理機能分割」を行っている。そのため、アプリケーションサービスをユーザに提供するためには、それら複数の処理機能を連結する「マルチメディアサービスファンクションチェイニング」を行う必要がある。また、既存の処理機能の連結だけでなく、使用予定のエッジクラウドの計算リソースが少ない場合や、対象リージョンが混み合っている場合などに、OpenStack の機能により、リソーススケーリングやリソース複製といった、インスタンスへのリソース割り当ても各リージョンのエッジクラウド配下のコントローラノードへ指令する機能も持つ。

2.1.3.3. マルチメディアサービスの機能分割

マルチメディアサービススライシングでは、マルチメディア処理を単独で動作可能な機能レベルに細分化し「処理機能」として定義する。さらに、エッジクラウド内にそれらの処理機能を搭載した専用のインスタンスを立ち上げ、処理結果やデータをサービス間で共有、再利用する。ここで、本技術を人物検出処理に適用した場合の動作例を図 2.1.3 に示す。人物検出処理は、大きく「映像の取得」「エンコード」「検出処理」という 3 つの処理機能に分けることができる。マルチメディア処理のサービスは近年多様化しているものの、処理を分割した際の典型的な大枠はいずれも類似している。そのため、オーケストレータがこれらの共通した大枠を認識することで、複数のサービス間で処理機能を共有することが可能で、効率的なリソース利用につながる。

なお、本章では単純化のため、各インスタンスを一つの処理機能の専用マシンとし、処理機能の分割はアプリケーション実行前に行っておくものとする。マルチメディアサービススライシングを動的に行うためのアルゴリズムの検討と評価については、今後の課題とする。

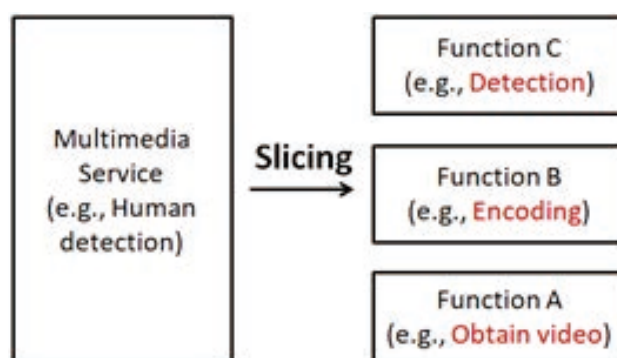


図 2.1.3. マルチメディアサービススライシング動作例

2.1.3.4. マルチメディアサービスファンクションチェイニング

エッジクラウドにおいて低遅延なマルチメディア処理を達成するためには、分割されたサービス

の処理機能を適切な順序、場所で提供する必要がある。そこで、マルチメディアサービスファンクションチェイニングでは、ユーザの要求とリソース情報に基づき、分割された処理機能を適切な順序、場所で提供し、連結することで、一つのマルチメディア処理という形で提供する。

ここで、2.1.3.3 節同様、本技術を人物検出処理に適用した場合の動作例を図 2.1.4 に示す。まず、ユーザがオーケストレータに対して人物検出処理を要求し、オーケストレータは人物検出処理をマルチメディアサービススライシングによって「映像の取得」「エンコード」「検出処理」という 3 つの処理に分ける。その上で、オーケストレータおよびコントローラノードで取得しているリソース情報に基づき、オーケストレータもしくはコントローラノード上で処理手順のスケジューリングを行う。この場合は、スケジューリングの結果、「映像の取得」を第一の処理としてリージョン A のインスタンスで実行、取得した映像を同じリージョン内の別のインスタンスへ転送した後、そのインスタンスで「エンコード」を第二の処理として実行、さらにそのエンコードした映像をリージョン B のインスタンスへ転送し、そのインスタンスで「検出処理」を第三の処理として実行、最後に処理結果をユーザに転送する、という手順で行うこととなる。

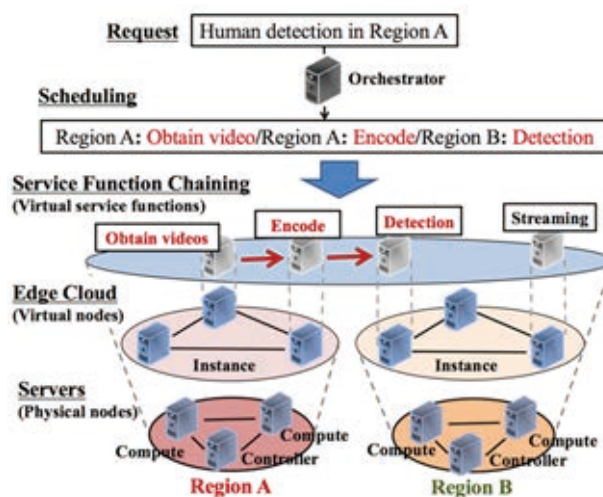


図 2.1.4. マルチメディアサービスファンクションチェイニングの動作例

最後に、本システムの主な特徴をまとめる。

1) OpenStack を用いたエッジコンピューティング環境

物理的な構成にとらわれない、論理的なリソースの統合管理・運用を実現するために、IaaS 環境を構築するオープンソースのクラウド管理ソフトウェア群である OpenStack を用いてエッジコンピューティング環境を構築する。これにより、必要なリソースのスケーリングを動的に行うことが可能となる。

2) 複数エリア間でのマルチメディア処理機能の共有やデータ再利用

エッジクラウドの複数リージョンの情報を収集するオーケストレータを設ける。情報収集と各処理のスケジューリングを行い、単一エリアのエッジサーバ内および複数エリアのエッジサーバ間で処理機能の共有や処理に必要なデータの再利用により、システム内のリソース利用効率を向上させる。

3) マルチメディア処理のための機能分割とサービスファンクションチェイニング

マルチメディア処理に必要な処理機能を細分化し、専用の仮想マシン(=インスタンス)として生成する (=サービスの機能分割)。さらに適切なスケジューリングにより、必要な機能を動的かつ適切に選択し、連携させる(=サービスファンクションチェイニング)。これによってマルチメディアサービスを仮想的に再定義する。

2.1.4. 遅延特性評価

本節では、2.1.3 節で説明したエッジクラウドシステムにおいて、マルチメディア処理を実行した際の遅延特性を評価し、従来のクラウド環境と比較評価する。

2.1.4.1. 実験環境

本実験の実験環境を図 2.1.5 に示す。2 リージョンのエッジクラウド(Region A、B)を大学の 2 研究室内に OpenStack で構築し、コントローラノードを 1 台、コンピュートノードを 2 台ずつ設置する。また、オーケストレータを Region B に 1 台設置する。ここまでの各物理サーバの概要は表 2.1.1 の通りである。また、ネットワークカメラをリージョン A に配置して、リージョン A 内にいる人物の様子を撮影しているものとする。各コンピュートノード上には、処理機能別に以下の 4 つの機能を実装したインスタンスを生成した。

- 1) “Camera”：ネットワークカメラからの映像の取得機能を実装
- 2) “FFmpeg”：FFmpeg [8]により動画像圧縮機能を実装
- 3) “YOLOv2”：YOLOv2 [9]により人物検知処理機能を実装
- 4) “DASH”：MPEG-DASH [10]により適応レート制御による映像配信機能を実装

また、エッジクラウドとの遅延特性比較用に、クラウドコンピューティング環境として、東京都内にデータセンタをもつクラウド事業者が提供するクラウドサーバ 1 台(Cloud)、およびエッジコンピューティング環境としてリージョン A 内にエッジサーバ 1 台(Edge)を生成し、エッジクラウドにある機能を全て持っているものとする。各仮想環境の概要は表 2.1.2 の通りである。

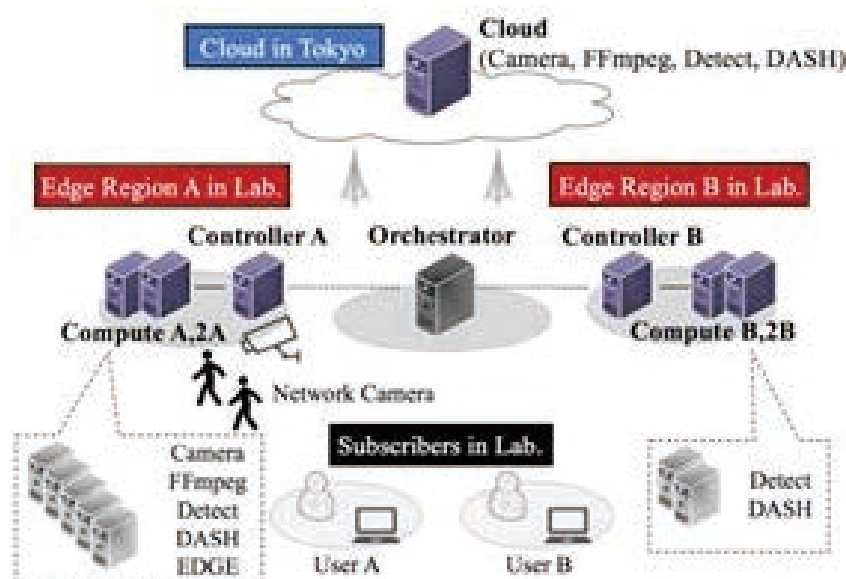


図 2.1.5. 実験環境

表 2.1.1. 物理サーバの概要

Server	CPU	Memory	OS
Compute A	Intel® Core™ i5-2400@3.10GHz	8GB	Ubuntu 16.04
Compute 2A	Intel® Core™ i7-6700@3.40GHz	16GB	Ubuntu 16.04
Compute B	Intel® Core™ i5-2400@3.10GHz	16GB	Ubuntu 16.04
Compute 2B	Intel® Core™ i5-3330@2.70GHz	4GB	Ubuntu 16.04
Orchestrator	Intel® Core™ i7-4770@2.50GHz	16GB	Ubuntu 16.04

表 2.1.2. インスタンスの概要

Instance	Region	CPU	Memory	Function
Cloud	Tokyo	20	224GB	ALL
Edge	A(lab)	2	4GB	ALL
Camera	A(lab)	2	4GB	CAMERA
FFmpeg	A(lab)	1	2GB	FFMPEG
Detect	A/B(lab)	2	4/8GB	DETECT
DASH	A/B(lab)	1	2GB	DASH

2.1.4.2. マルチメディアアプリケーション

本実験では、実際のエッジコンピューティングサービスのユースケースをもとに、「映像監視システムによる人物検出」「MPEG-DASH による映像ストリーミング配信」の 2 つのアプリケーションを実行する。概要を図 2.1.6、および図 2.1.7 に示す。

Application 1. 映像監視システムによる人物検出

マルチメディアサービスの機能分割により、「Camera」「FFmpeg」「Detect」の 3 つの処理機能に分割される。ユーザがアプリケーション実行を要求すると、一番目のインスタンス(Camera)がネットワークカメラから Region A 内の様子を映した映像を取得する。次に、二番目のインスタンス(FFmpeg)が取得した映像をエンコードする。最後に、三番目のインスタンス(Detect)がエンコードされた映像に対して人物検出処理を行う。

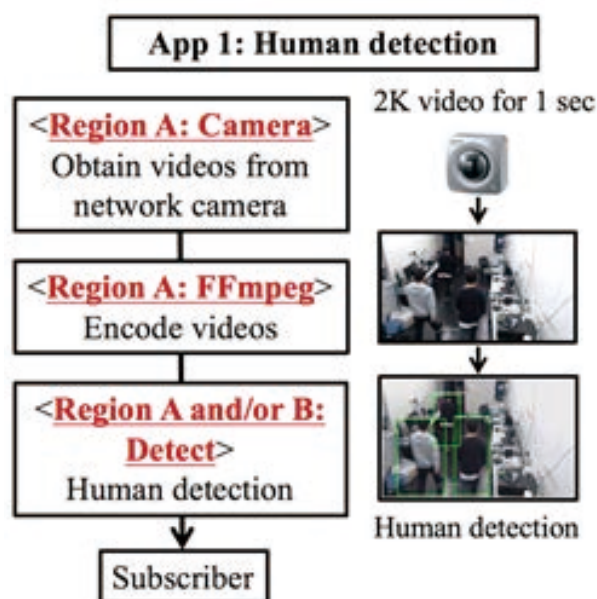


図 2.1.6. アプリケーション 1 (人物検知)

Application 2. MPEG-DASH による映像ストリーミング配信

マルチメディアサービスの機能分割により、「Camera」「FFmpeg」「DASH」の 3 つの処理機能に分割される。ユーザがアプリケーション実行を要求すると、一番目のインスタンス(Camera)がネットワークカメラから Region A 内の様子を映した映像を取得する。次に、二番目のインスタンス(FFmpeg)が取得した映像をエンコードする。なお、ここまではアプリケーション 1 と共通している。最後に、三番目のインスタンス(Detect)がエンコードされた映像を 4 つのビットレート(5Mbps、3Mbps、1Mbps、0.5Mbps)にトランスコードし、DASH ストリーミング用の Media Presentation Description (MPD)ファイルを作成する。

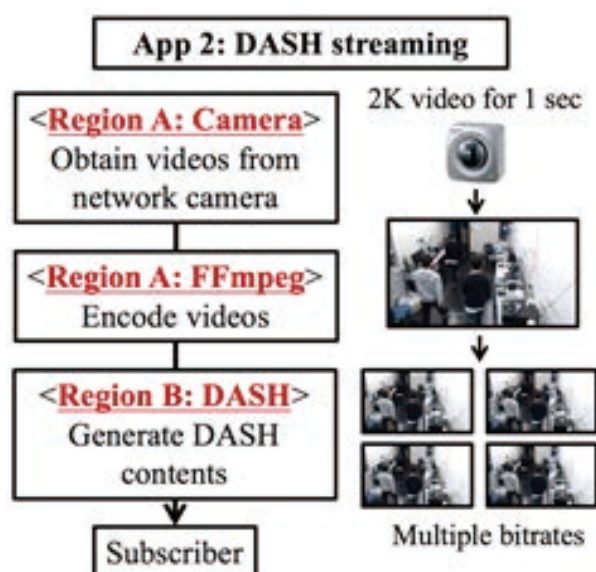


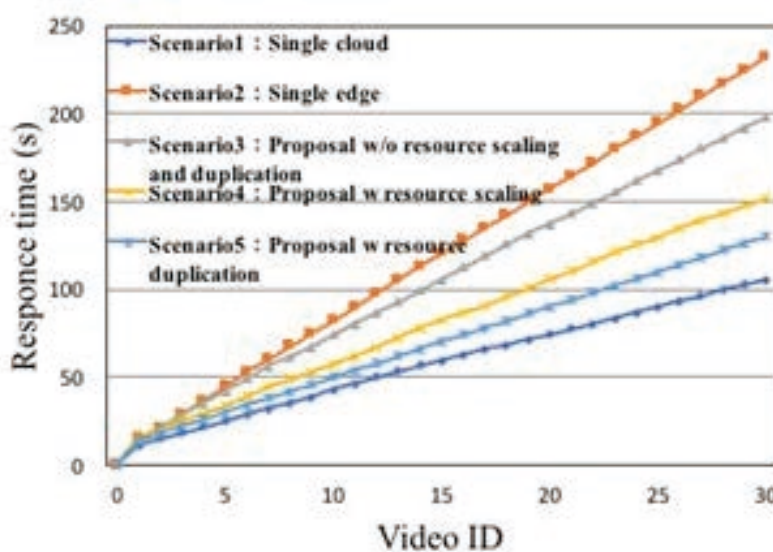
図 2.1.7. アプリケーション 2 (DASH 配信)

2.1.4.3. 実験シナリオ

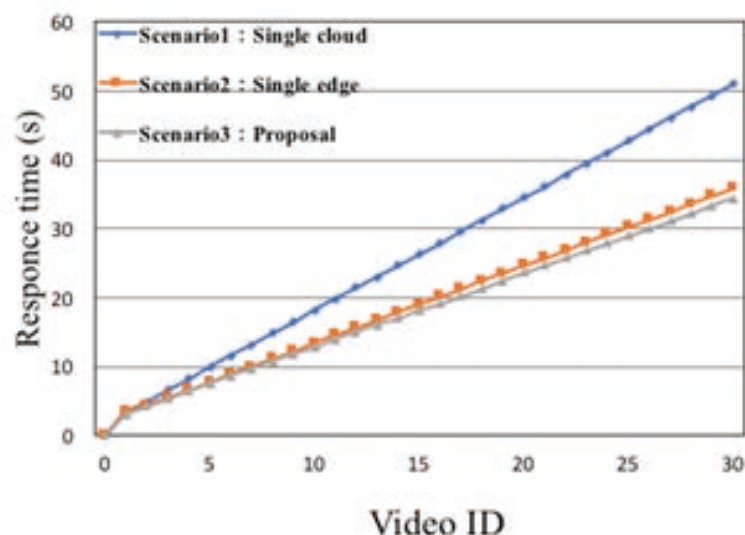
本実験では、エッジクラウド内でのリソース操作やアプリケーション要求の組み合わせによる遅延特性の変化を表 2.1.3 のシナリオで評価する。評価する遅延は、1 秒のセグメントの処理結果をユーザが 30 秒分要求する際の要求開始からセグメント到着までの時間とする。シナリオ 1 では、クラウドサーバ(Cloud) 1 台でアプリケーション処理を実行する。シナリオ 2 では、エッジクラウドと同じリージョン内に存在するエッジサーバ(Edge) 1 台でアプリケーション処理を実行する。シナリオ 3 では、エッジクラウド内の 3 台のインスタンスで機能分割された 3 つの処理機能(Camera、FFmpeg、Detect/DASH)をそれぞれ実行する。ここで、オーケストレータの機能により、アプリケーション 1 に関して、Detect 処理が遅延のボトルネックとなっていることを検知し、スケジューリングにより、シナリオ 4 ではメモリ量 2 倍のインスタンス(4GB→8GB)で Detect 処理を実行(リソーススケーリング)、シナリオ 5 ではこれまで Detect 処理を実行していたインスタンスを複製し、2 台のインスタンスで Detect 処理を実行(リソース複製)する。

表 2.1.3. 評価シナリオ

Scenario	Instance	Resource mgmt.
1	Cloud	—
2	Edge	—
3	Camera->FFmpeg ->Detect/DASH	—
4	Camera->FFmpeg ->Detect*	メモリ増設 (Detect)
5	Camera->FFmpeg ->Detect*	複製 (Detect)



(a) アプリケーション 1 要求時



(b) アプリケーション 2 要求時

図 2.1.8. 実験結果

2.1.4.4. 実験結果

図 2.1.8(a)より、アプリケーション 1 を要求した場合、遅延が短い順に「クラウド 1 台 < 提案手法 < エッジ 1 台」となることがわかる。これは、アプリケーション 1 では **Detect** 処理に高度な計算資源を要するため、今回の評価環境でもっとも高度な計算資源を保有しているクラウドで最も低遅延処理が可能となっている。しかし、提案手法ではクラウドに比べて計算資源が少ないにも関わらず、シナリオ 5 のようにリソースマネジメントを施すことで、クラウドの遅延に近い時間で処理が可能となっている。

一方、図 2.1.8(b)より、アプリケーション 2 を要求した場合、遅延が短い順に「提案手法 < エッジ 1 台 < クラウド 1 台」であることがわかる。これは、アプリケーション 2 では各処理に高度な計算資源を必要とせず、提案手法およびエッジ 1 台でエッジコンピューティングによる通信遅延の削減効果の影響により、クラウドに比べて低遅延処理を実現できているためである。

2.1.5. まとめと今後の課題

本章では、エッジクラウドを活用したマルチメディア処理システム上で複数のマルチメディアアプリケーションを実行した際の遅延特性を評価し、実際のクラウド環境との比較を行った。エッジクラウドを **OpenStack** により構築し、オーケストレータと連携して、マルチメディアサービスの機能分割、マルチメディアサービスファンクションチェイニングといった技術を導入した。これらにより、ユーザの要求・実行環境に応じたリソース操作に加え、マルチメディア処理の機能共存やデータ再利用、並列分散などといったリソース操作を可能とするマルチメディア処理システムを実現した。その結果、本システム上においてアプリケーション実行遅延の削減が可能であることを示した。今後は、ユーザからの要求振り分けや処理インスタンスの割り当てを動的に行うためのアルゴリズムの検討を行い、他の技術と合わせてより大規模かつ複雑な実環境における提案システムの遅延評価を行う予定である。

2.2. 高品質・低負荷・省電力なフィールド監視システム

2.2.1. はじめに

近年、日本における道路、橋、トンネル等の社会インフラの老朽化、それに伴う事故が問題視されている[11]。また、2020年に開催される東京オリンピックを契機に、駅、空港といった公共施設における防犯用途の監視も需要が高まっている。その結果、社会インフラや公共施設における状態監視が重要な課題の一つとなっている。この課題に対して、高精細な監視カメラを含め、多種多様なセンサ端末を監視場所に設置し、日々の状態変化を監視する動きが盛んに行われている。

このような多種多様なセンサによる状態監視について、筆者らは、「ソーシャルビッグデータ活用・基盤技術の研究開発[12]」と呼ばれる研究課題に参画している。これまで本研究課題において、Low Power Wide Area (LPWA)の一つとして知られる Wireless Smart Utility Network (Wi-SUN) 通信規格を活用した鉄道斜面監視システムの開発を行っている[13][14][15]。[13]において、鉄道試験線の沿線、鉄道車両、また大規模な人工斜面に対して、多数の加速度センサを設置し、Wi-SUNによるセンサデータ収集を実施した。[14]では、それら収集された加速度データから斜面状態変化の検知手法を提案している。さらに、[15]では、実際の鉄道営業線の鉄道斜面に対して、傾斜センサ、土壌水分センサ、気象センサを設置し、長期的なセンサデータ収集を実施している。[16]では、監視エリアを鉄道踏切と想定し、監視カメラを活用した通行人の安全監視を実施している。特に[16]では、監視カメラが生成するネットワークトラフィックを抑制するために、監視エリアの状態（イベント）に応じた適応レート制御を行っている。監視エリアの状態として、監視エリアに通行人が居るかどうか、さらにその通行人の現在の行動を監視エリアの危険度として定義している。その際、監視カメラを利用した画像ベースとレーザスキャナを利用したセンサベースのハイブリッドで状態を検知し、その危険度に合わせて動画の圧縮レートを適応制御することで、冗長な映像トラフィックの抑制を達成している。これら状態検知やレート制御は、エッジコンピューティングを活用し、センサデバイスに物理的に近いエッジノードで処理される。

本稿では、[16]のイベントドリブン型適応レート制御を利用して、「高品質」、「低負荷」、「省電力」な映像監視システムへ拡張する。適応レート制御として、監視カメラ側は、撮影条件（特に、夜間撮影）も考慮し、より細やかな適応レート制御を実施することで、映像品質や監視品質をさらに維持しつつ、冗長な映像トラフィックを削減することを図る。[15]の拡張版に位置するセンサ端末側への適応レート制御として、監視エリアの状況に合わせてセンサ端末の送信頻度制御を実施する。これにより、監視カメラと同様に、冗長なセンシングを抑制することで、センサデータトラフィックおよびセンサ端末の消費電力量の抑制も図る。これら削減効果を定量的に評価するために、監視エリアの状態遷移を定義し、各状態におけるセンサ端末の送信回数、監視カメラのトラフィック量をモデル化する。これらモデルより、イベントドリブン型適応レート制御によるトラフィック、消費電力量の削減効果を数値計算する。

2.2.2. 省電力・高品質・低負荷なフィールド監視システム

2.2.2.1. フィールド監視システム概要

本稿で想定しているフィールド監視システムを図 2.2.1 に示す。本システムは、[15][16]で紹介されているフィールド監視システムの拡張版という位置づけである。図 2.2.1 に示すように、監視エリアに対して、高精細な監視カメラを含め、マルチモーダルなセンサを設置して、高信頼な監視を実現する。通常、センサの動作は非常に繊細で、機器固有な挙動をすることが多い。このような機器の特性を除去するために、マルチモーダルなセンサデータを包括に取り扱い、センサフュージョ

ンにより監視エリアの状態を定義する。

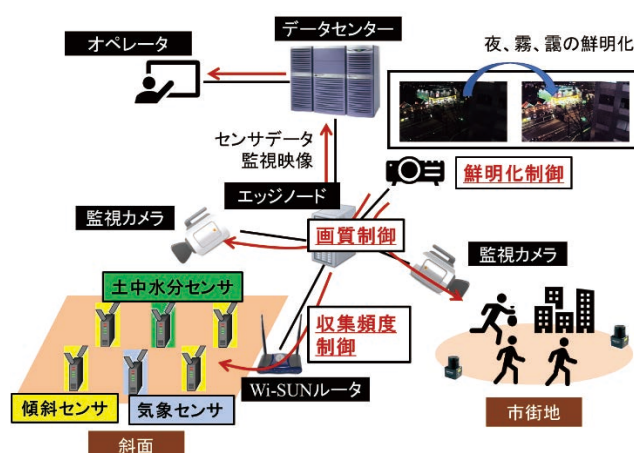


図 2.2.1. フィールド監視システムの概要図。

24 時間の定常的な監視を実施する際、環境の変化を考慮する必要がある。特に、監視カメラの場合、24 時間の日照のサイクル、また、気象の変化は撮影された画像に強く影響を受ける。例えば、夜間、霧、霽の場合、撮影された動画は輝度不足から非常に視認性が悪くなる。そのため、画像鮮明化といった画像処理を加えることにより、様々な撮影条件でも視認性を高めることを図っている[19][21]。

このような多種多様なセンサを監視エリアに設置することは、監視に要するトラフィック量が爆発的に増加することに繋がる。特に、高精細な監視カメラによる定常的な監視は、大規模なトラフィックを生成する恐れがあり、ネットワークの輻輳を容易に引き起こすことが予想される。これに対して、[16]に挙げられる監視エリアの状態に応じた適応レート制御は、高品質な状態監視を保ちつつネットワーク負荷を低減するために、有効な手法であると言える。これは監視カメラに対する適応レート制御のみならず、センサ端末の送信頻度といった適応制御へも有効活用であると考えられる。

そこで、本稿では、適応レート制御を図 2.2.2 のように、センサ側とカメラ側へ適応し、「高品質」、「低負荷」、「省電力」なフィールド監視を達成する。図 2.2.2 に示すように、収集されたマルチモーダルなセンサ情報から、それぞれの制御に必要なセンサフュージョンを実施し高品質なフィールド監視を行う。その後、検知された状態に応じてセンサの送信頻度やカメラの画質制御、フレームレート制御を行うことで、フィールド監視の品質を維持しつつ効果的に冗長トラフィックを削減する。さらに、センサ端末において送信頻度を抑制することはセンサの消費電力を抑えることに繋がり、省電力なフィールド監視が達成される。このような適応レート制御をデータセンターではなく、物理的にセンサ端末、監視カメラに近いエッジノードで実施する。また、[19][21]のような画像鮮明化処理もエッジノードで制御することで、より環境条件に合わせた柔軟な適応レート制御を図る。

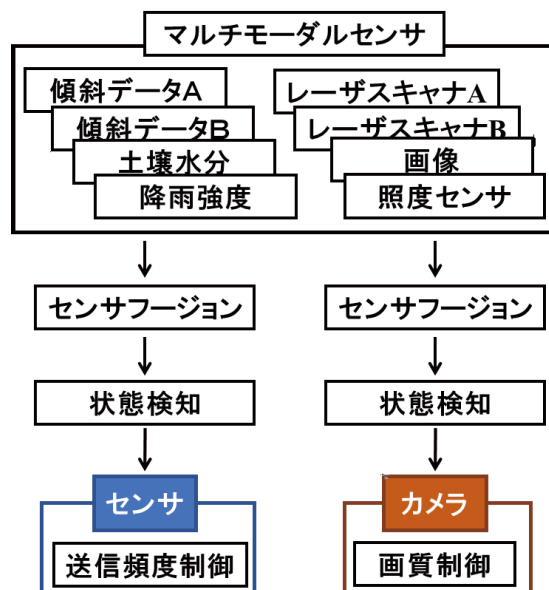


図 2.2.2. センサフュージョンによるセンサおよびカメラへの適応制御。

2.2.2.2. 監視エリアの状態遷移

監視エリアの状態に合わせた適応レート制御を実施するために、監視エリアの状態を定義する必要がある。先に述べたように、24 時間監視を想定した場合、監視エリアの環境変化を考慮する必要がある。特に監視カメラの場合、撮影時の光（コントラスト）の影響は大きい。[20]によると、画像鮮明化処理において、時間帯（コントラスト値）によって、鮮明化強度を適応制御することが人物検知精度の向上につながることを報告している。また、[15][16]では、崖の傾きや人物といった監視対象の状態に応じて、監視の品質を決定することを勧めている。以上より、監視カメラの適応レート制御においては、図 2.2.3 のように、鮮明化強度を決定し、その鮮明化強度において、動画像圧縮符号化率を決定する。また、図 2.2.4 にその状態遷移図を示す。図 2.2.4 に示すように、各鮮明化モードにおいて、レート選択モードが存在する。鮮明化の強度を高めると、動画像圧縮時のブロックノイズが際立つため、画質を維持するためには、より低強度モード時よりも高ビットレートを設定する必要がある。なお、センサの送信頻度制御については、単純化のため鮮明化モードにかかわらず、品質モードのみで制御するものとする。つまり、高品質時は送信頻度を高頻度とし、低品質時は低頻度とする。

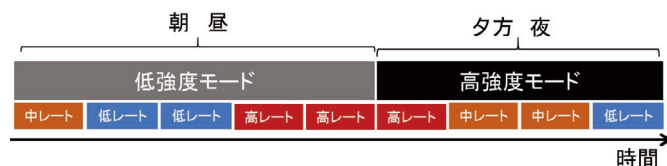


図 2.2.3. 24 時間監視における状態遷移のイメージ図。

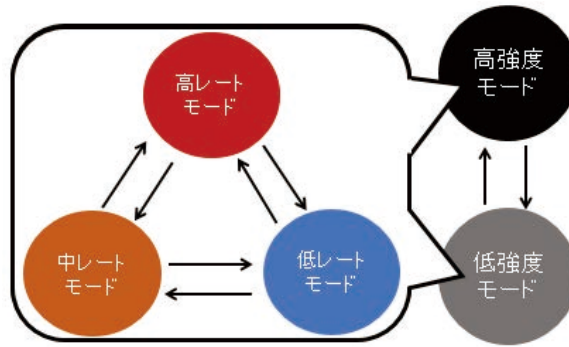


図 2.2.4. 鮮明化処理を考慮したレート制御の状態遷移図。

2.2.3. システムのモデル化

本章では、2.2.2 節で説明した適応レート制御によるシステムが生成するトラフィック量、センサで消費される電力量をモデル化する。表 2.2.1 にモデルパラメータをまとめる。

表 2.2.1 : モデルパラメータ

パラメータ	定義
i	鮮明化強度モード
j	レート選択モード
S	モードの状態確率
$T(\text{s})$	監視時間
$R(\text{Mbps})$	動画ビットレート
$f(\text{per sec})$	センサの送信頻度
$P_{tx}(\text{W})$	センサの送信電力
$P_{idle}(\text{W})$	センサの待機電力
$D(\text{Mbit})$	センサのデータサイズ
$B(\text{Mbps})$	センサの通信速度

2.2.3.1. 映像トラフィックのモデル化

まず、監視カメラが生成する映像トラフィックをモデル化する。図 2.2.4 に示すように、鮮明化処理を考慮した場合、モードの状態確率 S は、鮮明化強度モード i とレート選択モード j を利用して S_{ij} として表現できる。各モードの状態確率 S_{ij} において、ビットレート R_{ij} が選択される。以上より、監視時間 T (秒) におけるシステムが生成する映像トラフィックは次の(1)式で表現できる。

$$T \cdot \sum_{i,j} (R_{ij} \cdot S_{ij}) \quad (1)$$

$$\sum_{i,j} S_{ij} = 1$$

2.2.3.2. センサ電力消費量のモデル化

次に、システムにおけるセンサの消費電力量をモデル化する。センサの消費電力量は主に、センサの通信に要する電力とセンシングを含んだ待機電力で算出される。そのため、まずは、センサの

送信回数をモデル算出する。監視カメラの状態遷移と同様に、センサ端末においては、レートモード j のみを考慮するとする。モードの状態確率 S_j におけるセンサの送信頻度は f_j と表現できるため、監視時間 T (秒) におけるセンサの送信回数は次の(2)式で表現できる。

$$\frac{T \cdot \sum_j (f_j \cdot S_j)}{\sum_j S_j = 1} \quad (2)$$

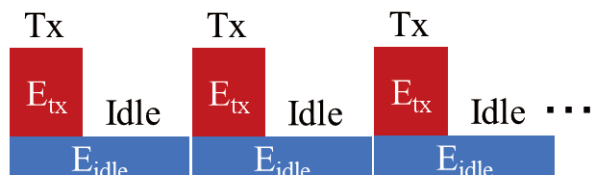


図 2.2.5. センサの消費電力周期モデル (理想状態)

センサの消費電力量は、[18]に挙げられるように、理想状態であれば、送信状態と待機状態の周期で繰り返される (図 2.2.5)。よって、図 2.2.5 のセンサ消費電力の周期モデルを考慮すると、監視時間 T (秒) におけるセンサの消費電力モデルは (2) 式を利用して、次のように表現できる。

$$\begin{aligned} E_{idle} + E_{tx} \cdot T \cdot \sum_i (f_i \cdot S_i) \\ E_{tx} = (P_{tx} - P_{idle}) \cdot \frac{D}{B} \\ E_{idle} = P_{idle} \cdot T \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 P_{tx} , P_{idle} は、それぞれ送信電力、待機電力とし、 D は一度の送信時に生成されるセンサのデータ量、 B はセンサの通信速度とする。

2.2.4. 数値計算例

本章では、2.2.3 章のモデル化に基づき、本システムが生成する映像トラフィック、センサの消費電力量を数値計算により算出する。また、適応レート制御の有無により、トラフィック量、消費電力量の削減効果を比較評価する。

2.2.4.1. 各モードの状態確率および適用パラメータの一例

各モデルに適用する数値パラメータの一例を表 2.2.2 から表 2.2.4 に示す。まず、表 2.2.2 は各モードの状態確率の一例を示している。鮮明化強度モードは、鮮明化処理の有無を表し、各鮮明化強度モードは同一の確率で存在するものとする。それを踏まえ、各鮮明化強度モード内の選択されるレートモードの状態確率を設定する。高レートモード (要監視状態) へ遷移する確率は低く、およそ低レートモード (定常状態) がほとんどである、と予想される。そのため、表 2 のようなパラメータに設定している。

表 2.2.2 : 各モードの状態確率 (例)

	低強度	高強度
低レート	0.3	0.3
中レート	0.15	0.15
高レート	0.05	0.05

表 2.2.3 : 各状態における動画ビットレート(R)およびセンサの収集頻度(f) (例)

	低強度	高強度	センサ
低レート	0.5	2	60 / min
中レート	1	4	10 / min
高レート	3	6	5 / min

表 2.2.4 : 適用パラメータ (例)

パラメータ	適用値
T	1 (日)
P_{tx}	0.033 (W)
P_{idle}	0.018 (W)
D	675 (Bit)
B	0.1 (Mbps)

次に、各状態におけるレートを表 2.2.3 のように決定する。動画像圧縮符号化のためのビットレートについては、鮮明化処理を考慮するため、[20]の客観画質評価結果より選択する (図 2.2.6)。図 2.2.6 は、Netflix により提案されている客観画質評価指標 VMAF[22]とビットレートの Rate-Distortion (R-D)カーブである。VMAF は、人間の知覚特性と高い相関を持つことで知られる。図 2.2.6 より、低、中、高レート時は VMAF がそれぞれおおよそ 50、70、80 となるように、ビットレートを選択する。なお、低強度は鮮明化なし (w/o IE) とし、高強度は鮮明化あり (w IE) と定義する。センサの収集頻度については、[15]で紹介されている値を採用する。

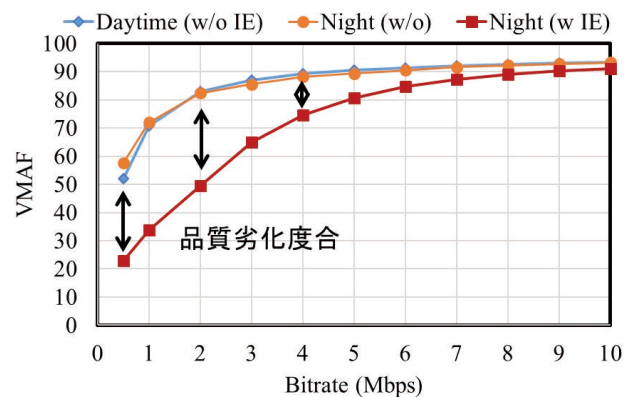


図 2.2.6. 鮮明化処理の有無における客観画質評価結果 (IE: 鮮明化処理)

表 2.2.4 にて、監視時間、センサの送信電力、待機電力、データサイズ、通信速度を設定する。監視時間以外のパラメータについては、Wi-SUN による加速度センサの値[18]を参考値として利用

することとする。以上のパラメータを利用して、(1)式~(3)式に基づき、映像トラフィック量、消費電力削減量を概算する。

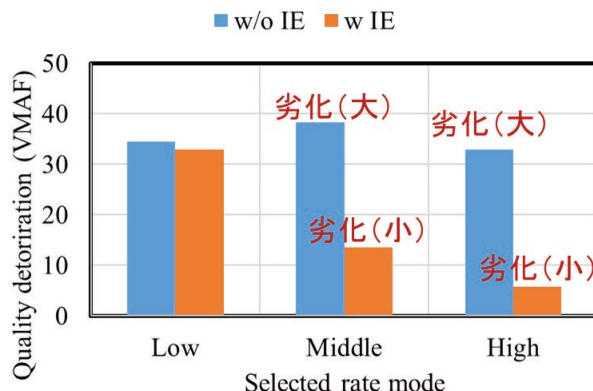


図 2.2.7. 選択ビットレートにおける画質劣化度合比較。(IE: 鮮明化処理)

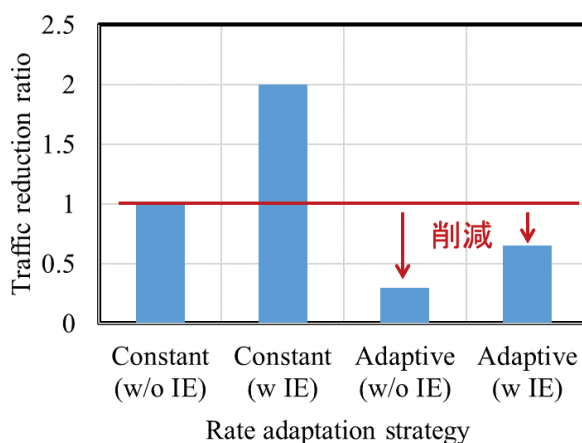


図 2.2.8: 適応レート制御による映像トラフィック削減率。(一定収集頻度は常に高レートが選択されるものとする)

2.2.4.2. 映像品質と映像トラフィック

まず、映像品質と映像トラフィック量を評価する。映像品質については、今回は、画質を品質と定義し、表 2.2.3 で選択されるビットレートから図 2.2.6 を利用して評価する。各モード時の選択ビットレートにおける VMAF による画質劣化値を図 2.2.7 に示す。図 2.2.7 より、鮮明化処理を加えた場合と加えなかった場合を比較すると、鮮明化処理を加えることで、より高いビットレートが選択されるため、鮮明化処理による画質劣化を抑えられることがわかる。特に高レート選択時には、より高いレートを設定しているため、画質劣化が最小に抑えられる。

次に、適応レート制御を行う場合と行わない場合（一定収集頻度）によるトラフィック削減率を(1)式より概算し、その結果を図 2.2.8 に示す。なお、一定収集頻度については、常に高レートが選択されるものとする。一定レートの場合、鮮明化処理を加えると、より高いビットレートが必要となるため、トラフィック量は増加する。一方で、適応レート制御の場合、鮮明化処理を加えたとしても、鮮明化なしの一定レート時よりも抑えられることがわかる。

図 2.2.7, 図 2.2.8 の結果より、鮮明化処理による画質劣化を抑えつつ映像トラフィックを効果的

に削減できることが期待できる。

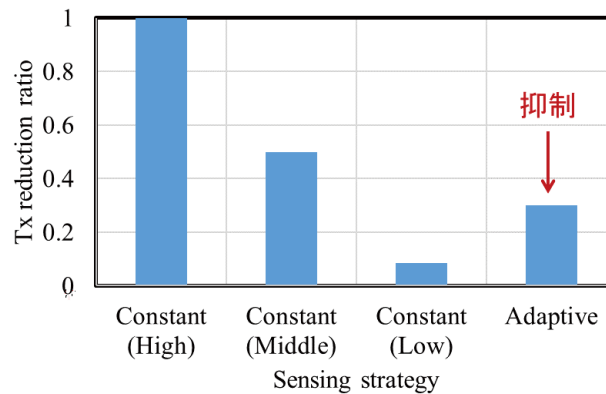


図 2.2.9. 適応レート制御によるセンサ送信頻度抑制率。

2.2.4.3. センサの送信頻度および消費電力削減量

次に、センサの送信頻度抑制率および消費電力削減量をそれぞれ(2)、(3)式から概算する。まず、適応レート制御によるセンサ送信頻度抑制率を図 2.2.9 に示す。図 2.2.9 は、常に高レートモードで送信する場合と比較したものである。低レートモード時よりも送信頻度は高くなるが、今回のパラメータでは、中頻度よりも送信頻度を抑えることができることがわかる。

最後に、(3)式より算出される適応レート制御によるセンサ消費電力削減量を図 2.2.10 に示す。図 2.2.9 と同様に、常に高レートモードが選択される場合と比較する。図 2.2.9 により、送信頻度が抑制されることから、送信に要する消費電力が抑えられるため、消費電力量削減量も増加することがわかる。今回のパラメータ（表 2.2.4）では、待機時の消費電力量が送信時のものと大きな違いが無いいため、大きな削減効果に繋がらないが、待機と送信時の消費電力量のギャップが大きくなれば、この効果は大きくなると期待される。

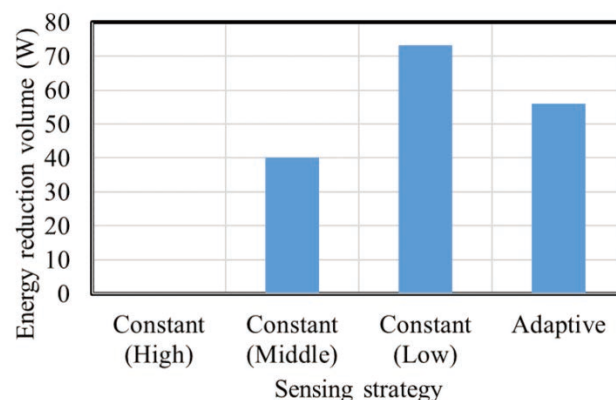


図 2.2.10. 適応レート制御によるセンサ消費電力削減量

2.2.5. まとめと今後の予定

本稿では、「高品質」、「低負荷」、「省電力」なフィールド監視システムを紹介した。本システムでは、多種多様なセンサや高精細な監視カメラから生成されるトラフィック量、消費電力量を効果的

に削減することを図った。監視エリアを環境条件やセンサ、画像から検知される結果に対して、監視状態という形で定義し、その状態に合わせて適応制御するイベントドリブン型適応レート制御を適用した。これにより、一定レートで収集、映像配信する場合と比較して、監視品質を維持しつつ、ネットワークの負荷を抑え、センサの消費電力を抑えられることを示した。今後は、[15]で継続的に収集している実試験フィールドのデータを分析、利用することで、本システムの性能を実証していく予定である。

2.3. 参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016-2021, [online]: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
- [2] ETSI Multi-access Edge Computing [online]: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing>.
- [3] OpenStack [online]: <https://www.openstack.org/>.
- [4] H. Kim, N. Feamster, “Improving Network Management with Software Defined Networking,” IEEE Communications Magazine, vol.51, no.2, pp.114-119, Feb. 2013.
- [5] ETSI GS NFV 001: “Network Functions Virtualization (NFV); Use Cases,” [online]: http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/001/01.01.01_60/gs_NFV001v010101p.pdf.
- [6] B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji and S. Lee, B, “Network Function Virtualization: Challenges and opportunities for innovations,” IEEE Communications Magazine, vol.53, no.2, pp.90-97, Feb.2015.
- [7] K. Imagane, et al., “Performance Evaluations of Multimedia Service Function Chaining in Edge Clouds,” IEEE CCNC2018, Jan.2018.
- [8] FFmpeg, [online]: <https://ffmpeg.org/>.
- [9] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 779-788, Jun.2016.
- [10] I.Sodager, “The MPEG-DASH Standard for Multimedia Streaming Over the Internet,” IEEE Computer Society, vol.18, Issue4, pp.62-67, Apr.2011.
- [11] 国土交通省 社会インフラの老朽化 [online]: <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n1131000.html>.
- [12] NICT: “ソーシャルビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発” [online]: https://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_178b07.html.
- [13] 岩澤, 羽田, 流王, 川村, 野末, 川崎, “鉄道現場における Wi-SUN を利用した状態監視システムの適用可能性の検証,” 情報処理学会 ITS 研究会, Vol.2015-ITS-62, No.1, pp.1-6, 2015 年 8 月.
- [14] 流王, 川村, 羽田, 岩澤, “状態監視データ間の関係性をを用いた状態変化検出手法の構築,” 電気学会論文誌 Vol.137, No. 8, 2017 年 8 月.
- [15] 岩澤, 流王, 野末, 木下, 大賀, “Wi-SUN センサネットワークによる鉄道斜面の状態監視,” 電気学会産業応用部門大会, 2017 年 8 月.
- [16] K. Kanai, K. Ogawa, M. Takeuchi, J. Katto and T. Tsuda, “Intelligent Video Surveillance System Based on Event Detection and Rate Adaptation by Using Multiple Sensors” IEICE Trans. Comm. Vol.E101-B, No.3, Mar. 2018.

- [17] インフォテック: Red Super Eye G2 [online]: http://www.infotech-japan.co.jp/res2_3ghd_s.html.
- [18] 青木, 金井, 甲藤, 中里, 津田, “Wi-SUN デバイスを活用した監視システムにおける消費電力特性評価,” 電子情報通信学会 信学技報 Vol. 116, No. 322, NS2016-114, pp. 73-78, 2016 年 11 月
- [19] A. Sakaushi, K. Kanai, J. Katto and T. Tsuda, “Image Quality Evaluations of Image Enhancement Under Various Encoding Rates for Video Surveillance System,” IEEE GCCE 2017, Oct. 2017.
- [20] 坂牛和里, 金井謙治, 甲藤二郎, 津田俊隆, “高品質・低通信量な監視映像システムのためのビットレート制御及び鮮明化制御,” 情報処理学会 AVM 研究会 2017 年 12 月.
- [21] 高橋沙希, 竹内健, 金井謙治, 甲藤二郎, “CNN を用いた画風変換による不鮮明画像の改善,” PCSJ/IMPS 2017, 2017 年 11 月.
- [22] Z. Liu, et al, “Toward A Practical Perceptual Video Quality Metric,” Netflix Tech. Blog. [online]: <https://medium.com/netflix-techblog/>.

3. 共同研究者

佐藤 拓朗 (早稲田大学・教授)
 亀山 渉 (早稲田大学・教授)
 津田 俊隆 (早稲田大学・客員教授)
 金井 謙治 (早稲田大学・助教)
 山崎 恭 (北九州市立大学・准教授)
 市野 将嗣 (電気通信大学・助教)

4. 研究業績

論文誌 :

- [P1] Kenji Kanai, Sakiko Takenaka, Jiro Katto and Tutomu Murase: “Energy-efficient Mobile Video Delivery utilizing Moving Route Navigation and Video Playout Buffer Control,” IEICE Trans. on Comm., July.2018 (accepted).
- [P2] Kenji Kanai, Keigo Ogawa, Masaru Takeuchi, Jiro Katto and Toshitaka Tsuda: “Intelligent Video Surveillance System Based on Event Detection and Rate Adaptation by Using Multiple Sensors,” IEICE Trans. on Comm., Mar.2018 (accepted).
- [P3] Kenji Kanai, Kentaro Imagane and Jiro Katto: “Overview of Multimedia Mobile Edge Computing,” ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.6, No.1, pp.46-52, Jan.2018 (invited).

国際学会 :

- [C1] Kentaro Imagane, Kenji Kanai, Jiro Katto, Toshitaka Tsuda and Hidenori Nakazato: “Performance Evaluations of Multimedia Service Function Chaining in Edge Clouds,” IEEE CCNC 2018, Jan.2018.
- [C2] Keigo Ogawa, Kenji Kanai, Masaru Takeuchi, Jiro Katto and Toshitaka Tsuda: “Edge-centric Field Monitoring System for Energy-efficient and Network-friendly Field Sensing,” IEEE EdgeCom 2018, Jan.2018.

国内講演：

- [D1] 今金健太郎、金井謙治、甲藤二郎、津田俊隆、中里秀則：“エッジクラウドにおけるマルチメディアサービスファンクションチェイニングを活用した処理低遅延化に関する検討,” 情報処理学会 AVM 研究会, Mar.2018.
- [D2] 小川啓吾・坂牛和里・金井謙治・甲藤二郎・津田俊隆：“高品質・低負荷・省電力なフィールド監視システム,” 信学会 CS 研究会, Dec.2017.
- [D3] 小川啓吾・金井謙治・竹内 健・甲藤二郎・津田俊隆：“IoT のためのエッジコンピューティングを用いたフィードバック制御フレームワークの性能評価,” 信学会 MoNA 研究会, Nov.2017 (奨励講演).
- [D4] 今金健太郎, 金井謙治, 甲藤二郎, 津田俊隆, 中里秀則：“低遅延マルチメディア処理のための OpenStack を活用したエッジクラウドシステム,” 信学会 CS 研究会, Jul.2017.

5. 研究活動の課題と展望

今後の課題として以下が挙げられる。

- 第一に、第5世代移動通信システムにおける高精細映像伝送と高精細映像処理の研究開発を進める。具体的には、4K 映像伝送の効率化、及び、マルチセンサーによる物体検知技術の開発に着手し、前者については、パケットロスにロバストな TCP 方式の適用による 4K 映像伝送の効率化技術の開発を進め、後者については、4K 映像に 3D-Lidar、赤外線等を組合せたマルチセンサー情報処理による不審者・不審物検知技術と駅構内における人物、物体の三次元マップの作製技術に関する検討を進める。
- 第二に、多様な IoT サービスを効率的に IoT ネットワーク内に収容することを目的とし、ネットワーク内に分散配置されている計算リソースを柔軟かつ効率的に利用し、連携させるための「ファンクション・オーケストレーション・レイヤ (FOL)」の研究開発を進める。FOL の機能により、IoT 機器管理の簡素化をはじめ、ネットワーク負荷やファンクション利用率を基に適切なファンクションを選定することを可能とし、動的な分散配備と負荷分散によるサービスレイテンシの低減が実現できる。さらに、IoT デバイスとして通信機能を備えた各種センサを活用し、データ収集、データ処理、イベント検知、エッジ処理等の具体的な IoT サービスを FOL 上に展開し、複数の IoT サービスを組み合わせ、新たな IoT サービスを構築できるようなサービス開発環境の実現も目指す。

廃炉事業に資する放射線遮蔽・遮水機能を有する

超重泥水・土質系材料の開発

研究代表者 小峯 秀雄
(創造理工学部 社会環境工学科 教授)

1. 研究課題

福島第一原子力発電所の廃止措置を、実効性の高い技術に基づき実現することを目指して、高放射線環境等原子力特有の条件を地盤工学に融合し、原子力発電所の現状から廃炉までの時間軸を考慮して、「土・地盤の放射線遮蔽性能を活用したデブリ取出し補助技術と掘削技術の適用評価、それに基づく実効性の高い数種類のデブリ処理メニューの提示」を行う。

また、これらの技術を体系化し、原子力技術者と協働できる新しい地盤工学技術者の育成プログラム「廃炉地盤工学」の一単位を提供することを目的とする。なお、本研究は、文部科学省「国家課題対応型研究開発推進事業」『廃止措置研究・人材育成等強化プログラム』に採択された「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技術開発と人材育成プログラム」(代表：公益社団法人 地盤工学会)の再委託研究の一環として進める。

2. 主な研究成果

平成 29 年度は、福島第一原子力発電所のデブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や、構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため、各材料仕様に応じて取得した放射線遮蔽データを拡充するとともに、一次データベースの作成を行った。また、超重泥水の充填施工性評価実験装置と液圧測定のできるタクトイルセンサシステムを用いて超重泥水の充填施工性および安定性を検討し、水ポテンシャル測定装置により覆土材の保水性能を定量評価した。上記の成果を、各材料の仕様に応じて整理し、廃炉プロセス技術シナリオを支援するための新技術メニューを作成した。具体的な内容は、以下の通りである。

- (1) 各超重泥水のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベースの構築
- (2) 各覆土材料のガンマ線・中性子線遮蔽性能の一次データベースの構築
- (3) タクトイルセンサシステムを用いた超重泥水の充填施工性および安定性評価 (図 1 および図 2 参照)
- (4) 水ポテンシャル測定装置を用いた覆土材料の保水性能評価
- (5) 廃炉プロセス技術シナリオを支援するための新技術メニューとしての超重泥水および覆土材の活用方法と層厚設計法の構築 (図 3 および図 4 参照)

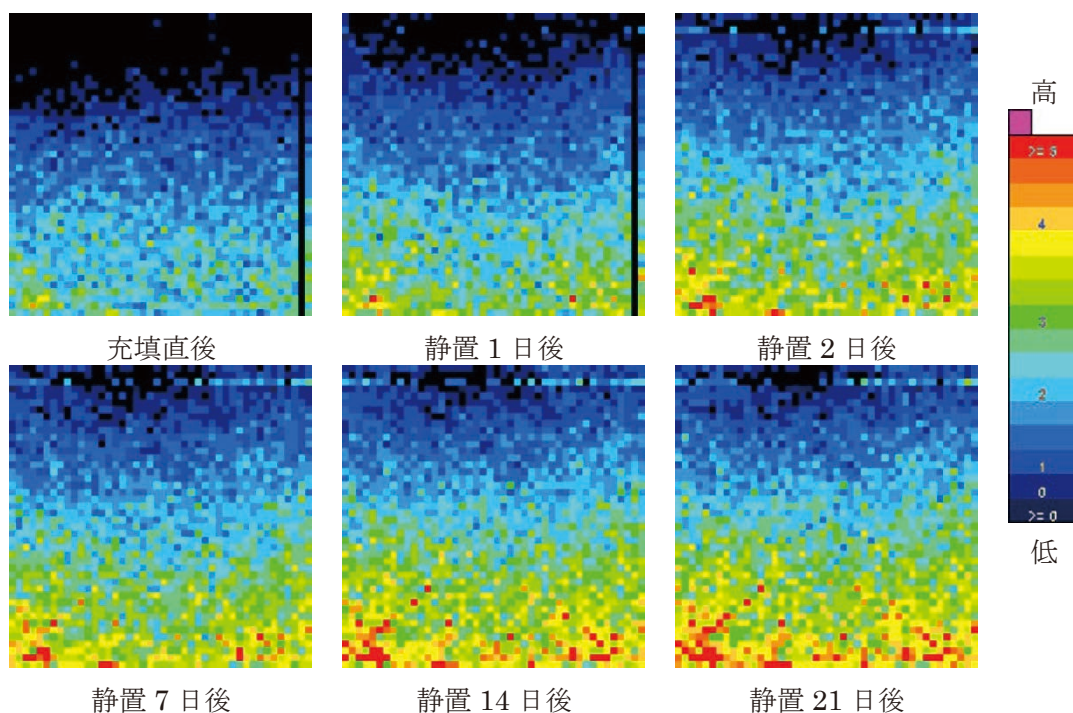


図1 タクタイルセンサによる $G_s=1.8$ の圧力分布の経時変化

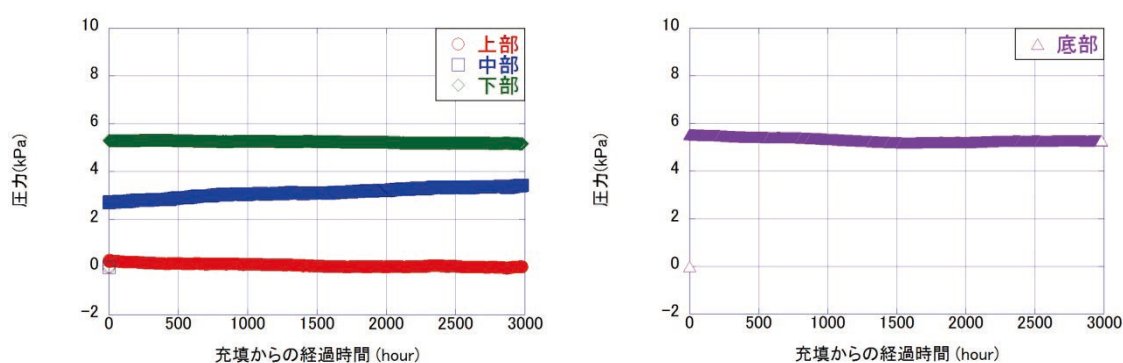


図2 容器側面における圧力の経時変化

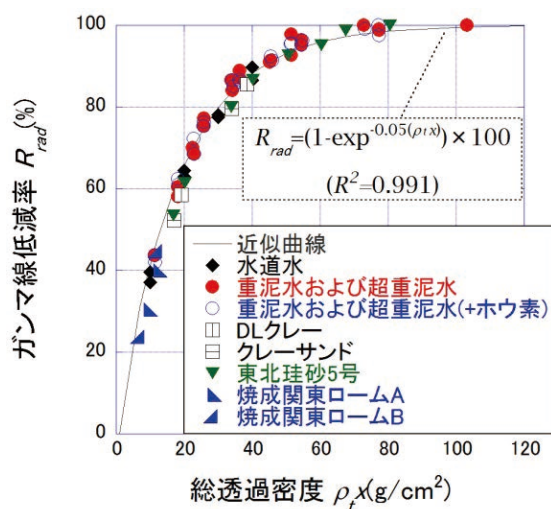


図3 ガンマ線低減率と土質材料の総透過密度の関係

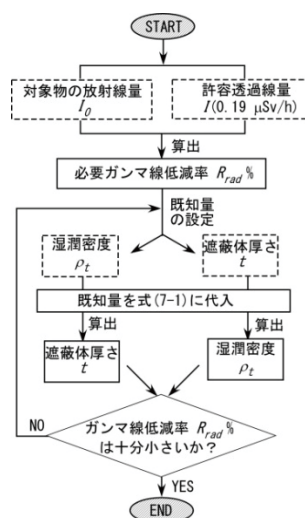


図4 ガンマ線遮蔽設計フロー

3. 共同研究者

後藤 茂 (理工学研究所・招聘研究員)

渡邊保貴 (創造理工学部 社会環境工学科・非常勤講師／電力中央研究所)

吉川絵麻 (創造理工学研究科 博士後期課程 1 年)

那須郁香 (創造理工学研究科 博士前期課程 2 年)

瀬川一義 (創造理工学研究科 博士前期課程 2 年)

伊藤大知 (創造理工学研究科 博士前期課程 2 年)

神田皓城 (創造理工学研究科 博士前期課程 1 年)

宮路将人 (創造理工学研究科 博士前期課程 1 年)

今井健人 (創造理工学研究科 博士前期課程 1 年)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 吉村貢, 鈴木聡彦, 成島誠一, 新井靖典, 氏家 伸介, 佐古田又規, 長江泰史: 土質系材料の放射線遮蔽性能の定量評価, 土木学会論文集(地圏C), Vol. 73, No. 4, pp. 342-354, 2017.
- 2) 小峯秀雄, 小山田拓郎, 尾崎匠, 磯さち恵: 締固めた粉体状ベントナイト各種の水分移動特性と膨潤圧挙動に関する考察, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 74, No. 1, 63-75.
- 3) 那須郁香, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 新井靖典, 氏家伸介, 吉村貢: 各種土質材料の放射線遮蔽性能の実験的研究, 第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 145-150, 2017.
- 4) 伊藤大知, 小峯秀雄, 諸留章二, 関口高志, 三浦玄太: ベントナイト原鉱石の膨潤特性・透水係数の測定結果に基づく膠結作用による物理特性への影響評価, 第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.547-552, 2017.
- 5) Ema Yoshikawa, Hideo Komine, Shigeru Goto, Yuma Saito: The evaluation for radiation shielding ability of the soil materials and application to design for construction, 19th ICSMGE, TC308-6, Seoul, Korea, (September 2017).
- 6) Shigeru Goto, Hideo Komine, Yuma Saito, Ema Yoshikawa, Makoto Suzuki, Yasutaka Watanabe: Needs for the decommissioning geotechnical engineering for Fukushima daiichi nuclear power plant, 19th ICSMGE, TC308-6, Seoul, Korea, (September 2017).

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

- 1) Hideo Komine: Geotechnical engineering approach on radioactive contaminated wastes in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, The Research Conference on Cementitious Composites in Decommissioning and Waste Management (RCWM2017), 2017/06/20.

4.4 受賞・表彰

- 1) 吉川絵麻, 小野梓記念学術賞, 2018.
- 2) 那須郁香, 第 52 回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞, 2017.

- 3) 伊藤大知, 第 52 回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞, 2017.
- 4) 今井健人, 地盤工学会関東支部発表会 Geo-Kanto2017 優秀発表者賞, 2017.
- 5) 吉川絵麻, 土木学会第 72 回年次学術講演会優秀講演者賞, 2017.
- 6) 小峯秀雄: 2017 年度 (公社) 地盤工学会・論文賞 (和文部門), 2018.

4.5 学会および社会的活動

- 1) 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 氏家伸介, 成島誠一, 長江泰史, 吉村貢: 超重泥水の粘度に影響を及ぼす配合割合とそのメカニズムに関する研究, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋, p.317-318, 2017 年 7 月
- 2) 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 吉村貢, 氏家伸介, 成島誠一, 長江泰史: 超重泥水のガンマ線遮蔽性能に関するスペクトル分析とエネルギー依存性評価, 土木学会平成 29 年度年次大会第 72 回年次学術講演会, 福岡, pp.127-128, 2017 年 9 月
- 3) 瀬川一義, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 中村朋弘, 氏家伸介, 吉村貢: 放射線遮蔽性能を有する超重泥水のホウ素濃度による中性子線低減効果の評価, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋, p.2075-2076, 2017 年 7 月
- 4) 瀬川一義, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂: B 型粘度計を用いた超重泥水の粘度測定結果の評価, 土木学会平成 29 年度年次大会第 72 回年次学術講演会, 福岡, pp.437-438, 2017 年 9 月
- 5) 伊藤大知, 小峯秀雄, 諸留章二, 関口高志, 三浦玄太: ベントナイト原鉱石の膨潤圧特性から観た緩衝材における膠結作用の定量評価の試み, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋, pp.2067-2068, 2017 年 7 月
- 6) 伊藤大知, 小峯秀雄, 諸留章二, 関口高志, 三浦玄太: ベントナイト原鉱石の固結が高圧圧密実験による透水係数測定に及ぼす影響, 土木学会平成 29 年度年次大会第 72 回年次学術講演会, 福岡, pp.111-112, 2017 年 9 月
- 7) 那須郁香, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 新井靖典, 氏家伸介, 吉村貢: 所沢地区の関東ロームを対象とした覆土材の放射線遮蔽性能の評価, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋, pp.635-636, 2017 年 7 月
- 8) 那須郁香, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂, 新井靖典, 氏家伸介, 吉村貢: 関東ロームを対象とした焼成品と現地発生土の放射線遮蔽性能の評価, 土木学会平成 29 年度年次大会第 72 回年次学術講演会, 福岡, pp.21-22, 2017 年 9 月
- 9) Ema Yoshikawa, Hideo Komine, Shigeru Goto: Study on Characteristics of Heavy Bentonite-based Slurry with Radiation Shielding Capabilities and Water Impermeability, The Research Conference on Cementitious Composites in Decommissioning and Wasete Management (RCWM2017), 2017 年 6 月 21 日
- 10) Daichi Ito, Hideo Komine: Influence of Consolidation in Bentonite Ore on Measurement of Hydraulic Conductivity by High-pressure Consolidation Test, The Research Conference on Cementitious Composites in Decommissioning and Wasete Management (RCWM2017), 2017 年 6 月 21 日
- 11) Ayaka Nasu, Ema Yoshikawa, Hideo Komine, Shigeru Goto: Evaluation on Radiation Shielding Capabilities of Kanto Loam as Covering Soil Materials, The Research Conference on Cementitious Composites in Decommissioning and Wasete Management (RCWM2017), 2017 年 6 月 21 日

- 12) 今井健人, 大瀧修平, 小峯秀雄, 鈴木誠, 後藤茂, 菱岡宗介: 福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラムポスター発表, IRID シンポジウム 2017, 2017 年 8 月 4 日
- 13) 宮路将人, 吉川絵麻, 小峯秀雄, 後藤茂: 放射線遮蔽性能・遮水性能を有する超重泥水の昇圧時の排水特性に関する評価, NDEC-3, 2018 年 3 月 19 日
- 14) 篠崎由梨, 掛川直樹, 小峯秀雄, 山田淳夫: 福島第一原子力発電所構内で発生した除染廃棄物の仮置き・処分に適用可能な低透水性覆土の締固め特性, NDEC-3, 2018 年 3 月 19 日
- 15) 倉持隼斗, 小峯秀雄, 後藤茂: 燃料デブリ移送における輸送効率の上昇と安全性の確保における一考察, NDEC-3, 2018 年 3 月 19 日

5. 研究活動の課題と展望

デブリ取出し補助のためのガンマ線と中性子線両方の遮蔽性能を有する超重泥水や, 構内除染廃棄物の一時仮置き施設のためのガンマ線遮蔽性能と遮水性能の両方を保有する覆土材の仕様設計に資するため, 各材料仕様に依じて取得した放射線遮蔽データの一次データベースの拡張を行う. また, 各材料仕様に依じた施工性を評価するため, 平成 29 年度までに導入した超重泥水の充填施工性評価実験装置とタクトイルセンサシステムを活用するとともに平成 30 年度に導入するテクスチャーアナライザーでは詳細な超重泥水の充填施工性と安定性を, 平成 29 年度までに導入した保水性試験装置および水ポテンシャル測定装置では覆土材の保水性をそれぞれ定量測定し, 一次データベースの作成を行う. 上記の成果については各材料の仕様に依じて整理し, 廃炉地盤工学委員会で進める廃炉プロセス技術シナリオを支援するための新技术メニューへの導入を行う.

単一細胞解析のための生体分子ハンドリング技術の研究

研究代表者 庄子 習一

(基幹理工学部 電子物理システム学科 教授)

1. 研究課題

本研究では、「マイクロスケール～サブミクロンスケールの柔らかい（壊れやすい）生体分子の選択的ハンドリングと処理をマイクロ流体デバイス技術により行う事」を目的とする。具体的には、多数の同種の微小サンプルのうち特異的な機能を発現する希少サンプルのみをピックアップし、次工程での利用・応用が可能となるような「特異的サンプルピックアップ用マイクロ流体デバイス」の開発、およびピックアップされた特定サンプルに対して「選択的に薬物処理等が可能なマイクロ流体デバイスシステムの開発」を行う。本研究の遂行により、従来技術では困難であった、特異的機能を持つ単一細胞内オルガネラの機能解析や、特殊な微量たんぱく質等の分析・解析が可能となり、いままで不明であった各種微小器官や細菌等の働きの解明が飛躍的に進むことが期待される。

2. 主な研究成果

2.1 液体クロマトグラフィの高機能分離カラムの作成技術

液体クロマトグラフィ（LC: Liquid chromatography）の分離カラムとしてシリコンマイクロピラーを用いたデバイス開発を続けている。カラムの分離効率向上にはシリコンピラー表面の多孔質化が有効であるが、従来は陽極化成や化学気層成長法（CVD）が用いられてきた。これらシリコン表面の多孔質化はマイクロチップの製作工程を複雑にする上に、マイクロ構造の再現性に問題がある。そこで、シリコンピラー構造作成に用いる Deep Reactive Ion Etching (Deep-RIE) 装置を用いて、ピラー構造作成後に表面ポーラス化を行う新しい方法を開発した。印加電力、エッチングガスの流量、チャンバ内圧力等の条件を最適化することで、所望のポーラス構造形成が可能になった。この方法で作成した分離カラムを用いた蛍光試料の分析において保持時間の改善を確認した。

2.2 液体クロマトグラフィカラムとポストカラムミキサーの改良

昨年度に引き続き小型基板上の分離用カラムの下流にポストカラムミキサー（PCM: Post-column mixer）を設け分析対象と誘導体化試薬をオンラインで混合、反応させ自動的に検出する技術を LC に適用する研究を進めた。LC 用カラムに加えて、誘導体化試薬インレットと試薬チャンネル、PCM を付加した集積化チップを作製した。その際、COMSOL Multiphysics®（COMSOL 社、Ver. 5.2a）を用いて数値流体力学（CFD: Computational Fluid Dynamics）解析を行った結果を基にデバイス構造の設計を行った。PCM のダイヤモンドピラー構造の形状を変えてデバイスを作製し、混合効率の変化を評価した。具体的にはダイヤモンド構造のアスペクト比に

より、混合効率と横方向分散の違いを計測してピラー構造の最適化をはかった。

2.3 マイクロ液滴ソーティング技術の開発

マイクロ流体デバイスを用いた生体分子のハンドリングには、生体分子を包含した微小液滴を用いることが有効である。生体分子の抽出には、液滴内の生体分子の検出に基づき外的な力を液滴に加えて分離するアクティブソーティングと液滴の形状や物理的性質により自動的に分離するパッシブソーティングがある。これまで我々は並行レール構造を用いた独自のパッシブソーティングを開発し、液滴分離を行ってきたが、レール構造によって生じる液滴の変形により分離精度が十分とは言えなかった。そこで並行レール構造のかわりにドット状のドットレール溝構造を一部用いることにより、分離精度の向上をはかった。また、2分岐分離行動を3段接続することにより、大きさにより液滴を8つのグループに分離するデバイスを作製し評価を行った。これにより従来よりも4倍程度の分離精度の向上が実現できた。

2.4 積層マイクロ流体デバイスを用いた機能性マルチファイバー技術

昨年に引き続き、血管や筋繊維などの繊維状人工組織形成の足場としてマイクロファイバーの研究を進めた。これまで、コア形状を変化させることで中空型ファイバーとキャンディ型ファイバー等複雑な断面形状を持つマイクロファイバーを作成できる可能性を示してきた。さらに、コアの形状を固定し各材料の導入流速を制御することにより、様々な内部断面形状のアガロースファイバーの作成が可能であることを証明した。

3. 共同研究者

東京大学・大学院・教授	船津 高志
早稲田大学・理工学術院・教授	本間 敬之
早稲田大学・研究員・教授	関口 哲史
早稲田大学・研究院・助教	尹 棟鉉

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. 中西完貴、簗城森幸、尹棟鉉、関口哲志、庄子習一、「二重凹角構造ピラーアレイを応用した超撥水性表面の低コスト量産プロセスの開発」、電気学会論文誌E Vol. 137 No. 6 (2017) pp. 165-168, DOI: 10.1541/ieejsmas.137.165 (電子版掲載日: 6/1)
2. D.H. Yoon, Z. Xie, D. Tanaka, T-Sekiguchi, S. Shoji, “A High-Resolution Passive Droplet-Phase Sample Sorter Using Multi-Stage Droplet Transfer”, RSC Advances 2017, 7 (2017) pp.36750-36754, DOI: 10.1039/C7RA05556K (電子版掲載日: 7/25)
3. D. Tanaka, S. Sawai, D.H. Yoon, T. Sekiguchi, T. Akitsu, S. Shoji, “Synthesis of an Azo-Mn(II) Complex with Mild pH Control Using a Microfluidic Device”, RSC Advances 2017, 7 (2017) pp.39576-39582, DOI: 10.1039/C7RA06089K (電子版掲載日: 8/14)
4. W. Kawakubo, D. Tanaka, D.H. Yoon, T. Sekiguchi, K. Takahashi, T. Akitsu, S. Shoji, “Extremely Efficient and Non-Hazardous Bromo Group Addition Reaction Using Simple Microfluidic Devices”, The 3rd Conference on Microfluidic Handling Systems (MFHS 2017), 2017.10.04-06, Enschede, The Netherlands (2017) pp.144-147 (発表日: 10/5)

5. D. Tanaka, W. Kawakubo, D.H. Yoon, T. Sekiguchi, T. Akitsu, S. Shoji, “Crystallization of Zinc(II) Complex Containing Lysozyme by Super Water Repellent Doubly Reentrant Structure Umbrella Pillar Array”, The 3rd Conference on Microfluidic Handling Systems (MFHS 2017), 2017.10.04-06, Enschede, The Netherlands (2017) pp.132-135 (発表日 : 10/6)
6. M. Isokawa, K. Nakanishi, T. Kanamori, H. Zhuang, H. Yamazaki, T. Sugaya, D.H. Yoon, T. Sekiguchi, T. Funatsu, S. Shoji, M. Tsunoda, “A Micromachined Liquid Chromatography Chip with a Pillar Array Mixer for Post-Column Derivatization in the Analysis of Neurotransmitters”, The 21st International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (μ TAS 2017), 2017.10.22-26, Savannah, Georgia, USA (2017) (発表日 : 10/23)
7. D.H. Yoon, D. Tanaka, T. Sekiguchi, S. Shoji, “Mechanical Reinforcement of Low-Concentration Alginate Fibers by Microfluidic Embedding of Multiple Cores”, Macromolecular Materials and Engineering 2018 (2018) 1700516 (5 pages), DOI: 10.1002/mame.201700516 (電子版掲載日 : 1/15)

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

1. 「IEEE-NEMS 2017 Best Student Paper Award」、坂本暁祐、“Highly Bendable Transparent Electrode Using Mesh Patterned Indium Tin Oxide for Flexible Electronic Devices”
2. 「IEEE CPMT Japan Chapter Young Award of ICEP 2017」、上林拓海、“Fabrication of Self-Standing Curved Film with Pillar Arrays by Large Area Spherical Soft-UV Imprint Lithography”

4.5 学会および社会的活動

1. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems 2017 (Transducers'2017) 国際論文委員会委員長
2. マイクロマシンセンター 国内外技術動向調査委員会 委員長
3. 電子情報技術産業協会 センシング技術専門委員会委員

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、引き続き MEMS やナノ／マイクロ流体工学の研究を通して、化学・生化学分野で実際に応用できるシステムの開発を行っている。単一細胞解析の要求に即したの技術開発を進め、さらに新たな機能を持つデバイス開発を行う必要がある。実用化を目指す上では集積システム化の研究が重要となり、マイクロ流体デバイス間の整合性に関する研究をさらに進める必要がある。

ナノ・エネルギー研究

研究代表者 西出 宏之
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

次々世代のエネルギー課題に対し、研究者らが本学で培ってきたナノ材料を活用して、解決に挑戦するいくつかの道筋を提示することを目的とする。研究組織としては、本学 SGU (スーパーグローバル大学創成支援プログラム) ナノ・エネルギー拠点でのグローバルかつ高水準の研究活動を起点に、リーディング理工学博士プログラム「エネルギー・ネクスト」研究や J X T G エネルギーとの共同研究 (理工総研・包括連携協定) などにおける若手人材育成を通じた研究展開も取り込み、国際的な共同研究にも力点を置き展開している。

具体的には、ユビキタスで環境適応な次世代二次電池として注目されている有機柔軟電池やポケットに入れて運べるプラスチック水素キャリア、ポスト有機 EL ディスプレイとして期待されているフレキシブル・省エネ照明デバイスである LEC 素子 (発光電気化学セル) などを共同研究開発しており、2017 年度の成果は以下に列挙した。なお、これらの研究成果は、国際共同・産学協同の枠組み作りとしても取りまとめ、SGU、リーディング理工学博士プログラムに反映させ、理工総研で本学に波及させる。

2. 主な研究成果

2. 1. 電荷および水素を輸送・貯蔵できる有機高分子 (研究代表者: 西出宏之)

超分子構造体を与えるシクロヘキサジアミンに、電荷授受席となる TEMPO ラジカルを導入した有機分子を新しく合成し、電解質を含んだ凝固体ゲルを形成させた。電荷 (電子) 輸送能もつバンドルが 3 次元にネットワークを構成しており、電荷の拡散定数は $10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ と均一溶液での一桁上となった。カーボンなどの導電補助剤の添加無しに、 $50 \mu\text{m}$ 厚み超えて働く純有機の導電体となった。加熱によりゲルは均一溶液となり、冷却により可逆的に超分子導電体に戻った。電極材として充放電セルも実証した[1]。

水素を安全かつ効率高く貯蔵・運搬・放出できる材料の研究開発は水素エネルギー技術の喫緊のテーマのひとつである。芳香族キノンポリマーが容易に水添しアルコールポリマーとなり、加温により水素を放出して水素保持・放出可能なキャリアとして働くことを発見した。不揮発、無毒、安全、軽量、成形可能なプラスチックが広く水素キャリアの対象となりうるための分子設計をとりまとめ提言した[2]。

2. 2. 光や熱エネルギーを機械的エネルギーに変換するフォトメカニカルおよびサーモメカニカル結晶 (研究分担者: 朝日透)

光エネルギーや熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できる物質としてフォトメカニカル結晶及びサーモメカニカル結晶が注目されている。フォトメカニカル結晶であるキラルアゾベンゼン結晶が 145°C で相転移し、わずかに屈曲することが分かった。さらに、細長い板状結晶

を転移温度を挟んで加熱・冷却を繰り返すと、結晶も屈曲を繰り返し、尺取り虫のようにゆっくりと歩いているような動きをすることを見出した[3]。

2. 3. 省エネプロセスによる高性能高分子の創製と有機ポリマー太陽電池の機能向上 (研究分担者：小柳津研一)

ジフェニルジスルフィドの酸化重合により結晶性の高いポリフェニレンスルフィド樹脂が生成することを明らかにし、分岐・欠陥のない直鎖構造を明確にした[4]。また、安定ラジカル種であるニトロキシドラジカルの酸化体に相当するオキソアンモニウムカチオンが、ペロブスカイト太陽電池のホール輸送層を形成するトリアリルアミンポリマーの酸化ドーパントとして有用であることを明らかにし、高い光電変換効率と長い寿命を実証した[5]。

2. 4. 実用化目指した有機発光デバイスの展開 (研究分担者：錦谷禎範)

発光電気化学セル(LEC)は駆動電圧が低く、単純な素子構造で低コストであるため、有機ELに続く次世代の有機発光素子と目されている。白色発光するLEC素子を具体化する一法として、銀ナノクラスターを用いた色変換層(青⇒赤)が有効であることを実証するとともに、その波長変換機構を明らかにした[6]。また、青色発光共役高分子電解質にドーパントとして赤色発光燐光材料を添加することにより、演色性の非常に良い白色発光を得ることができた[7]。

2. 5. 高機能ナノ構造体形成とエネルギーデバイス応用 (研究分担者：本間敬之)

大規模太陽電池形成のためのシリコン薄膜電析プロセスの高度化のため、その析出反応過程を詳細に検討した。軌道放射光源を用いたX線反射率計測を中心とした手法を用いた解析により、まず基板表面にSi-Cl多量体が形成され、これが前駆体となり薄膜形成が進行するメカニズムを明らかにした[8]。また革新型蓄電池として着目されているZn二次電池電極反応における微細構造形成状態を詳細に解析し、種々の因子の相関性を明らかにした[9]。さらに電極表面の高度解析のため、プラズモンセンサを用いたラマン顕微鏡による微細孔内の反応種挙動のその場解析手法を確立した[10]。

2. 6. 共役高分子を光トリガーとする電気化学有機素子 (研究分担者：Winther-Jensen, Bjorn)

導電性高分子ポリ(エチレンジオキシチオフェン)(PEDOT)被覆した乳酸ポリマー繊維からなる膜を作成し、その三次元的な繊維ネットワークを実証した。生体適合性ある有機電極としての可能性を提示した[11]。同じくPEDOTおよびポリチオフェンを、光照射下で導電性が増減するセンサーとして組み込んだトランジスタゲートとしての試験を実証し、ナノ構造もつ有機高分子の新しい適用を示した[12]。

3. 共同研究者

朝日 透 (先進理工学部・生命医科学科・教授)

小柳津 研一 (先進理工学部・応用化学科・教授)

錦谷 禎範 (先進理工学研究科・先進理工学専攻・教授)

本間 敬之 (先進理工学部・応用化学科・教授)

WINTHER-JENSEN, Bjorn (先進理工学研究科・先進理工学専攻・教授)

また、SGU ナノ・エネルギー拠点としてジョイントアポイント教授である ADVINCULA, Rigoberto(米ケースウェスタンリザーヴ大学、教授)、LONG, Timothy(米バージニア工科大学、教授)をいずれも 3 ヶ月滞在で受け入れ、米国での最近の研究動向を直接密度高い交流により反映させた。

4. 研究業績

- [1] Y. Sasada, R. Ichinoi, K. Oyaizu and H. Nishide, "Supramolecular Organic Radical Gels Formed with 2,2,6,6-Tetramethylpiperidin-1-oxyl-Substituted Cyclohexanediamines: A Very Efficient Charge-Transporting and -Storable Soft Material", *Chem. Mater.*, **29**, 5942-5947 (2017).
- [2] R. Kato and H. Nishide, "Polymers for Carrying and Storing Hydrogen", *Polym. J.*, **50**, 77-82 (2018).
- [3] T. Taniguchi, H. Sugiyama, H. Uekusa, M. Shiro, T. Asahi and H. Koshima, "Walking and Rolling of Crystals Induced Thermally by Phase Transition", *Nat. Commun.*, **9**, 538 (2018).
- [4] F. Aida, N. Takasu, Y. Takatori, H. Nishide and K. Oyaizu, "Synthesis of Highly Crystallized Poly(1,4-phenylene sulfide) via Oxygen-oxidative Polymerization of Diphenyl Disulfide", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **90**, 843-846 (2017).
- [5] H. Maruo, S. Tanaka, M. Takamura, K. Oyaizu, H. Segawa and H. Nishide, "Oxoammonium Cation of TEMPO: A Very Efficient Dopant for Hole-transporting Triaryl Amines in a Perovskite Solar Cell", *MRS Commun.*, **8**, 122-126 (2018).
- [6] Y. Nishikitani, D. Takizawa, S. Uchida, Y. Lu, S. Nishimura, K. Oyaizu and H. Nishide, "Ag Nanocluster-Based Color Converters for White Organic Light-Emitting Devices", *J. Appl. Phys.*, **122**, 184302 (2017).
- [7] Y. Nishikitani, K. Suga, S. Uchida, S. Nishimura, K. Oyaizu and H. Nishide, "High-color-rendering-index White Polymer Light-emitting Electrochemical Cells based on Ionic Host-guest Systems: Utilization of Blend Films of Blue-fluorescent Cationic Polyfluorenes and Red-phosphorescent Cationic Iridium Complexes", *Org. Electron.*, **51**, 168-172 (2017).
- [8] Y. Tsuyuki, T. Fujimura, M. Kunimoto, Y. Fukunaka, P. Pianetta and T. Homma, "Analysis of Cathodic Reaction Process of SiCl₄ during Si Electrodeposition in Ionic Liquids", *J. Electrochem. Soc.*, **164**, D994-D998 (2017).
- [9] T. Otani, Y. Fukunaka and T. Homma, "Effect of Lead and Tin Additives on Surface Morphology Evolution of Electrodeposited Zinc", *Electrochim. Acta*, **242**, 364-372 (2017).
- [10] T. Homma, A. Kato, M. Kunimoto and M. Yanagisawa, "Direct Observation of the Diffusion Behavior of an Electrodeposition Additive in Through-silicon via Using in situ Surface Enhanced Raman Spectroscopy", *Electrochem. Commun.*, **88**, 34-38 (2018).
- [11] J.B. Marroquin, H.A. Coleman, M.A. Tonta, K. Zhou, B. Winther-Jensen, J. Fallon, N.W. Duffy, E. Yan, A.A. Abdulwahid, J.J. Jasieniak, J.S. Forsythe and H.C. Parkington, "Neural Electrodes Based on 3D Organic Electroactive Microfibers", *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1700927 (2018).
- [12] B. Kolodziejczyk, C.H. Ng, X. Strakosas, G.G. Malliaras, and B. Winther-Jensen, "Light Sensors and Opto-logic Gates Based on Organic Electrochemical Transistors", *Mater.*

Horiz., **5**, 93-98 (2018).

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトで得られた知見をナノ・エネルギー研究として発展させ、また、海外企業も含め連携活動を推進していく。

人間の認知行動の顕在的・潜在的過程の研究

研究代表者 渡邊 克巳
(基幹理工学部 表現工学科 教授)

1. 研究課題

人間や情報システムの表層にありながら必ずしも意識されない潜在的な情報が、顕在的行動に与える影響の科学的解明と活用を目指した実験・調査研究を行う。認知科学では従来、自覚的な言語報告や身体動作の測定に重きが置かれてきたが、我々のこれまでの研究により、むしろ自覚的でない情報が人間の行動や意思決定に決定的な影響を持つことが分かってきた。そこで本研究では、過去 10 年間、渡邊研究室で用いられてきた研究手法（身体動作、認知行動や自律神経応答の計測）を継承し、人間が五感情報を知覚・認知する際の注意過程、意思決定プロセス、行動への変換過程などを、潜在・顕在過程の両面から解明することを目的とする。特に、人間の無自覚的あるいは潜在的な反応が人間の自然な認知・行動に及ぼす影響を焦点に当て研究を行う。

2. 主な研究成果

今年度は、1)我々が開発しオープンソース公開も行っている、人が話している時に音声に感情表現を与えることのできるデジタルプラットフォーム（Da Amazing Voice Inflection Device: DAVID）を用いた感情変調による知覚・認知の変容、2)身体誘導による知覚運動学習の変容、3)顔認知・記憶の潜在処理と顕在処理（スイスとの国際共同研究）に関する研究を主として行った。

1のプラットフォームは、被験者が音読している時に、「楽しい」「悲しい」「怖がっている」ように聞こえる感情フィルタをかけながら自身の声を聞かせると、自分の声の変化に気づかない時でも、自身の感情を変化させることが可能とさせるものである。従来の感情誘導の方法では、感情を引き起こすような記憶を思い出させたり、感情表現を強いたりしていたために、純粋に外部からの操作で感情を変化させることが可能であるかは分からなかった。既に基礎的な検討として、自己の感情知覚における音声フィードバック効果を示してはいるが、それがどの程度継続するものか、あるいは自然に（純粋に自発的に）誘発される感情とどのように異なるかは未だ不明であり、継続的に研究を進めている。

2の身体誘導による知覚運動学習の変容では、熟達者と同一の動きを被験者に運動デバイスを装着させることで追体験させるものである。基礎的な検討を進めているが、特許取得と関連するので詳細は割愛する。

3の顔認知・記憶の潜在処理と顕在処理はスイスとの国際共同研究として行われている。顔に含まれる潜在的な情報が対象人物の印象やアイデンティティ知覚に与える影響のみならず、それを見る側の知覚・認知・精神状態に与える影響について、国際共同研究によってその人

種を問わないヒトという種に共通した普遍性と、文化による差異とを明確に区別することが目的である。既にスイスを複数回訪問し、国際顔データベースの構築に向けている他、今後の足がかりとしてこれまで我々と先方の研究室で確かめられている知見を二国間で比較する試みを行っている。

3. 共同研究者

北村美穂（高等研究所・准教授）

松吉大輔（理工学術院総合研究所・次席研究員）

田中観自（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会特別研究員）

村田藍子（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会特別研究員）

福田めぐみ（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会特別研究員）

Elena Knox（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会外国人特別研究員）

佐々木恭志郎（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会特別研究員）

中村航洋（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会特別研究員）

陳娜（基幹理工学部・表現工学科・日本学術振興会外国人特別研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Ueda, H., Yamamoto, K., & Watanabe, K. (2018) Contribution of global and local biological motion information to speed perception and discrimination. *Journal of Vision*, 18 (3), 2.
- Rachman, L., Liuni, M., Arias, M., Lind, A., Johansson, P., Hall, L., Richardson, D., Watanabe, K., Dubal, S., & Aucouturier, J. J. (2018) DAVID: An open-source platform for real-time transformation of infra-segmental emotional cues in running speech. *Behavior Research Methods*, 50 (1), 323-343.
- Takao, S., Murata, A., & Watanabe, K. (2018) Gaze-cueing with crossed eyes: asymmetry between nasal and temporal shifts *Perception*, 47 (2), 158-170.
- Sen, S., Daimi, N. Watanabe, K. Bhattacharya, J., & Saha, G. (2017) Decoding mental states in bistable perception by using source based wavelet features. *Proceedings of 2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON) IEEE Xplore digital library.*, 144-149.
- Takahashi, K., Fukuda, H., Watanabe, K., & Ueda, K. (2017) Psychological influences of animal-themed food decorations *Food Quality and Preference*, 64, 232-237.
- Duan, F., Yoshimura, Y., Kikuchi, M., Minabe, Y., Watanabe, K., & Aihara, K. (2017) Detection of atypical network development patterns in children with autism spectrum disorder using magnetoencephalography *PLOS ONE*, 12 (9), e0184422.
- Tanaka, K., & Watanabe, K. (accepted) Effects of model types in observational learning on implicit sequential learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Tanaka, K., & Watanabe, K. (2017) Effects of an additional sequence of color stimuli on visuomotor sequence learning. *Frontiers in Psychology*, 8:937.

4.2 総説・著書

- 渡邊克巳（共著）（2017/10/3）日常と非日常からみる こころと脳の科学, 宮崎 真/阿部 匡

樹/山田 祐樹【ほか編著】，コロナ社.

4.3 招待講演

- Watanabe, K. (2018/3/11) Teaching and learning from a cognitive scientific view: Innerpersonal and interpersonal understanding of education. 3rd International Conference on Educational Neuroscience, Bab Al Qasr Hotel, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Watanabe, K. (2018/2/19) Behavioral/Emotional Contagion: Ambient information goes implicitly. École Normale Supérieure, Paris, France.
- Watanabe, K. (2018/2/9) Ambient information goes implicit. On what is between: an interdisciplinary dialogue around MA (間), Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Japan..
- 渡邊克巳 (2018/1/18) 多文化をつなぐ顔と身体表現 (指定討論) 日本視覚学会 2018 年冬季大会大会企画シンポジウム, 工学院大学アーバンテックホール (東京都新宿区) .
- 渡邊克巳 (2018/1/20) 顔から読む—音声・印象・視線の知覚研究 (指定討論) 日本基礎心理学会平成 29 年度第 2 回フォーラム 「顔から読む—音声・印象・視線の知覚研究」, 愛媛大学総合情報メディアセンター (愛媛県松山市) .
- Watanabe, K. (2017/12/16) Keynote: Animacy Perception & Implicit Ambient Contagion Art Sonje Center for Contemporary Art, Seoul, South Korea.
- 渡邊克巳 (2017/12/12) 無意識の世界：認知科学の視点から 異才発掘プロジェクト ROCKET『トップランナートーク』, 東京大学生産技術研究所 S 棟(60 年記念館) (東京都目黒区) .
- Watanabe, K. (2017/12/7) Implicit processes for crossmodal and intramodal interaction. Symposium on Synesthesia, Expertise, and Multisensory Perception, Sino-Danish Center (SDC) for Education and Research (Beijing, China).
- 渡邊克巳 (2017/12/2) 潜在的な顔身体コミュニケーションと個人差 公開シンポジウム「トランスカルチャー状況下における顔身体学の構築 (第 2 回)」, 東京外国語大学アジア・アフリカ言語文化研究所 (東京都調布市) .
- 渡邊克巳 (2017/11/30) 意識 vs 無意識：知らずにやっていること、知っててやらないこと『夕学五十講』, 丸ビル 7 階 丸ビルホール (東京都千代田区) .
- 渡邊克巳・本田学・長神風二・檜山聡・橋本亮太・高山文博・萩原一平 (2017/7/20-23) 産学連携シンポジウム：人間情報ビッグデータ産学共同研究の可能性について 第 40 回日本神経科学大会, 幕張メッセ (千葉県千葉市) .
- Watanabe, K. (2017/7/13-17) Dynamics of attractiveness judgments (Symposium: Attractiveness and bodily interactions at implicit levels – Reading social evaluation from eyes and/or bodily interactions). The 13th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV 2017), Tainan, Taiwan.
- 渡邊克巳 (2017/6/21) アフェクティブ・コンピューティングの進化と人間の感情・選好 けいはんな「エジソンの会」, 国際高等研究所 (京都府木津川市) .

4.4 学会および社会的活動

- Knox, E. & Watanabe, K. OMIKUJI 御御籤: A better version of you @ 798 Art District Beijing, Beijing, China & Miraikan, Odaiba, Tokyo (2018/3/25-2018/4/1)

- Knox, E. & Watanabe, K. OMIKUJI 御御籤: A better version of you @ Art Sonje Center for Contemporary Art, Seoul, South Korea & Miraikan, Odaiba, Tokyo (2017/12/12-17)
- Supermanoeuvre, UNSW, Black Dog Institute, & Watanabe, K. Catch the Tiger@ The Big Anxiety: Festival of Arts + Science + People, UNSW Art and Design, University of New South Wales, Sydney, Australia (2017/9/20-2017/11/11)
- 早稲田 Weekly 人がアンドロイドの夢を見る日 玉城絵美×笠原俊一×渡邊克巳 VR 鼎談 (2017/11)
- 『SBS Japanese』「Catch the tiger」(2017/10/17)
- 『DM week 2017』「無意識にその気にさせるメカニズム」(2017/4/22)

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトでは、人間や情報システムの表層にありながら必ずしも意識されない潜在的な情報が、顕在的行動に与える影響の科学的解明と活用を目指している。次年度以降の課題としては、DAVIDをはじめとする潜在的情報呈示の範囲と限界を見定めるため、より現実的なインタラクション状況などにおける効果の検討を継続するとともに、国際共同研究を通じて、日本やアジアに留まらず、普遍性のある知見を導出することを目指す。また、神経生理学計測などを援用しつつ、視聴覚刺激処理過程における潜在的反応の測定に取り組む。

生物制御機構のモデリングと治療戦略確立への応用

研究代表者 内田 健康
(先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授)

1. 研究課題

生物には様々な制御機構が働いている。①個体レベルの脳の運動制御、②臓器レベルのホメオスターシス、③細胞レベル遺伝子発現や代謝の制御など、生物のあらゆる種、あらゆるレベルでさまざまな生体機能を支えている。制御が機能を果たすことが出来なくなったときに人間は病気に犯され、場合によっては死の危機に直面する。従って、病気の発生、その重篤化、さらに死へのプロセスを解明し、それを防ぐ合理的な治療戦略を確立するには、生物の制御のメカニズムとダイナミクスを定量的に理解することが必要である。生物制御、特に人間の健康保持のための制御には、自律神経系、内分泌系、免疫系の三つのシステムがあり、これらが相補い合って活動している。これらの三つの制御系が機能を分担し適切な相互作用を通して作用機序が統合するネットワークを構成している。この制御のネットワークを定量的に解析するためには、人間の全体的な統合生理モデルを構築することが不可欠である。統合生理モデルは、検査の当否、投薬効果の予測や治療法の選択など個々の疾病へ治療戦略確立に極めて有用であるだけでなく、病態進行の遅い高齢者の場合は個人ごとのモデルを治療経験や検査データにもとづいて逐次時間をかけて更新し、遠隔治療への道を切り開くことが出来る。モデルの利用による診断と治療の高度化はシステム医療への重要な一里塚であり、「技」に頼ることの多い労働集約的な医療の現場を改変することを目標としている。本研究プロジェクトでは以下の課題に取り組む。

- ① 敗血症の動態解析モデルの投薬戦略確立への展開：すでに申請者らが確立した敗血症の動態解析モデルを用いて治療戦略を確立する。統合モデル構築のための具体例として検討する。
- ② 統合生理モデルの構築：従来の生理モデルは各臨床科別、疾病個々に対応した部分モデルのみしか存在せず、循環系、消化系、呼吸系、温熱系、血糖系などを結び付けた統合モデルは必要性が高いにも拘わらず存在しない。数理科学と臨床医学での循環系、消化系、呼吸系、温熱系、血糖系の各系融合による「人体統合モデル」を構築し、疾病の発生と進行メカニズム解明へ繋げる。
- ③ 自律神経系、内分泌系、免疫系の統合制御モデルを統合生理モデルの上に構築し、臨床データによるその実証を行う。
- ④ 高齢者の遠隔医療システムへの適用：高齢者の場合病気が急性でなく、慢性化して進行が穏やかである場合が多く、ケアに十分時間を掛ける余裕があり時間を掛けた日常的な生理状態の計測検査により、モデルを精密化できる。これにより要介護者の生理機能の変化に応じモデルを進化させる方法を検討する。

2. 主な研究成果

一昨年度に、心循環系、神経系、免疫系の3つの系を統合した非線形数理モデルを用いて敗血症の治療戦略の確立に向けた研究を開始した。敗血症は感染によって過剰な免疫反応が働き急激な低

血圧などを招く疾患である。全身を巻き込みながら進行していくため、患者は多臓器不全や最悪の場合死に至る。先進国でも 25%程度という高い致死率であり、社会的な問題でもある。しかし、敗血症への診察指針は明確な基準で作られたものは少なく医師の経験則による面が強い。そのため、合理的な治療のガイドラインを作ることが求められている。そこで、本研究では数理モデルを用いた解析により、定量的な治療プロトコルの提案を目指した。

数理モデルを用いた敗血症の研究は盛んに行われているが、それらの多くは心臓循環系に限定されており、疾病解析に必要な薬理、免疫については考慮されていない。さらに生命現象を正確に表現するためには、初期条件やパラメータによって平衡点が変わる非線形モデルを用いる必要がある。

一昨年度は、実際の生体反応との比較および患者実データを用いた従来モデルの改良を行った。更なる治療戦略、患者個々に合わせたオーダーメイドの治療プロトコル提案には、敗血症患者において共通の特徴を再現する標準的な数理モデル構築と、患者の個体差を表現するパラメータの同定が必要不可欠である。具体的には、炎症を原因とした血圧降下メカニズムの改良と患者の個体差の再現を目指し基礎疾患（糖尿病）の導入検討を行った。

昨年度は、従来モデルの改良に加え、臨床データとのキャリブレーションを行った。これまで定性的な表現に留まっていた治癒効果を定量的に表現することを目指し、尿生成システムの導入とドパミンの薬理効果の導入を行った。その結果、シミュレーションによって約 1 2 時間における実データの血圧変化の特徴を再現可能であることが確認された。

本年度は、引き続き従来モデルの改良を行い、重症度別治療プロトコルの再現とバソプレッシン薬理効果の導入を行った。

具体的には、免疫系に含まれていた変数を 5 つから 4 つへと減らし、モデルを簡略化した。従来モデルにはダメージに関与する変数として 2 つの変数（組織ダメージと心不全度）を定義していたが、心不全度のみにした。

この簡略化後、敗血症治療ガイドラインに定められた重症度別治療プロトコルの再現を行った。敗血症は重症度に応じて以下の通り、治療プロトコルが異なる。mild であれば自然治癒、medium であれば輸液のみ、severe であれば輸液＋ノルアドレナリンである。先行研究では病原体の増殖率を敗血症の重症度と捉え、先の治療プロトコルの必要性が確かめられた。さらに、心不全を基礎疾患に持つ患者では、自然治癒はしないこと、同じ増殖度でも症状が深刻になることが確かめられた。

また、共同研究先では敗血症患者が増加傾向にあり、バソプレッシンを以前より利用するようになった。そこで、従来モデルに含まれていた輸液、ノルアドレナリン、ドパミンの薬理効果に加え、バソプレキシンの薬理効果を導入した。シミュレーションにより、導入したバソプレキシンの薬理効果は適切であることも確認した。

さらに、上記の課題と並行して、一昨年度から新たな取り組みとして 1 型糖尿病患者の血糖制御に関する研究を開始した。1 型糖尿病は、生活習慣が主因である 2 型糖尿病と異なり、自己免疫疾患により膵臓 β 細胞が破壊され、体内のインスリン量が絶対的に不足することで発症する。インスリンの血糖維持に対する役割は大きいため、1 型糖尿病患者が血糖を維持するためにはインスリンを投与するしか方法がないと考えられてきた。しかし、近年レプチンの脳への作用が血糖を正常化する働きを持っていることが明らかになり、レプチンが新たな 1 型糖尿病治療薬として注目されている。そのため、本研究ではインスリンとレプチンを用いた治療のシミュレーション解析により、最適投薬量を決定することを目指した。

昨年度は、レプチンのインスリン依存と非依存の 2 種類の血糖降下作用をモデル化し、レプチン

の薬理効果を含む1型糖尿病数理モデルを構築した。

本年度は、レプチンの薬理効果を含む1型糖尿病数理モデルに対して、制御対象の変化に適応する制御手法 (adaptive MPC) を適用してその性能を精査した。加えて、adaptive MPC 適用時のレプチン投与の有無による血糖制御性能の違いを比較した。そして adaptive MPC が血糖制御に適していること、またレプチンを加えることにより、食事量の変化やインスリン投与量の変化に対して血糖変動の幅を抑えることが出来るという結果を得た。

3. 共同研究者

木村英紀 (理工学研究所 招聘研究教授) 柴田重信 (理工学術院 教授)

4. 研究業績

4.1 学会発表

明石百佳, 内田健康, 木村英紀 “Mathematical model of sepsis for clinical use”, SICE ライフエンジニアリング部門シンポジウム (第31回生体・生理工学シンポジウム), 大阪, 2016年11月5日
 門田玲, 内田健康, 木村英紀 “A mathematical model of type 1 diabetes including leptin effects on glucose metabolism” SICE ライフエンジニアリング部門シンポジウム (第31回生体・生理工学シンポジウム), 大阪, 2016年11月5日

杉田一真, 内田健康, 木村英紀 “レプチンの効果を含む1型糖尿病数理モデルの血糖制御”, 第5回制御部門マルチシンポジウム, 東京都市大学, 2018年3月10日

5. 研究活動の課題と展望

敗血症を対象とした研究における今後の課題は、さらなる標準的な数理モデルの構築感染時期の推定が挙げられる。本年度の研究成果を踏まえて、来年度は検体数を増やし、この課題に取り組む。同時に、適切な治療方針を定められるためには感染時期の推定が肝要であるため、症状や投薬効果を予測するだけでなく、感染時期を推定できる数理モデルを作成する。

また糖尿病を対象とした研究における今後の課題としては、本年度の研究とは異なる設定でのシミュレーションを重ね、より深くロバスト性について検討することや、レプチン・インスリン併用治療における最適投薬量計算アルゴリズムの構築などが挙げられる。

震災復興のためのコンクリート技術開発

研究代表者 清宮 理
(創造理工学部 社会環境工学科 教授)

1. 研究課題

東北地方での大震災のように，陸・海路の輸送手段が大きな被害を受けた沿岸地域においては，緊急復旧工事に要する材料の調達や作業員の確保が課題となる．このような条件下でコンクリートを製造・施工する場合，できるかぎり施工場所の近傍で調達可能な海水や未洗浄の海砂などの材料を使用すること，コンクリートの構成材料の種類を最小限に抑え，容易に製造できること，また，自己充填性を有するコンクリートを使用し，締固め作業を省力化することで施工速度を向上することなどが求められる．これまでに現地で調達可能な海水および石灰岩骨材を用いた高流動コンクリートを開発し，コンクリートの基本的な諸特性について実験的検討を進めてきた．なお，当該コンクリートを鉄筋コンクリート構造物に適用する場合には，鋼材腐食を防止するためにステンレス鉄筋の使用を想定しており，埋設鉄筋の腐食特性に関する検討も進めている．2017年度の研究では，海水および石灰岩骨材を用いたコンクリートとステンレス鉄筋で構成されたコンクリート梁の載荷試験を実施し，力学特性について普通骨材を用いたコンクリートとの比較，また既往の計算式の適用性について検討した．

2. 主な研究成果

2017年度では，全長の異なる2種類の試験体を各配合1体製作し，曲げ載荷試験およびせん断載荷試験を行った．試験体に用いたステンレス鉄筋（SUS410-SD345）は，引張鉄筋にD19（0.2%耐力387N/mm²），圧縮鉄筋およびせん断補強鉄筋にD13（0.2%耐力420N/mm²）とした．なお，鉄筋の0.2%耐力は，引張試験（JIS Z 2241）により得た値である．載荷試験における計測項目は，荷重，梁中央変位，鉄筋ひずみとした．

なお，曲げ載荷試験においては，曲げモーメント一定区間の試験体下面にパイ型変位計を設置し，ひび割れの開口変位（以下，開口変位）を計測した．

表1 コンクリートの強度特性

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー※ (N/mm)
	JIS A 1108	JIS A 1149	JIS A 1113	JCI-S-001-2003
SW-CA	55.4	27.6	4.12	0.135
SW-NA	52.0	29.3	5.87	0.345

※切欠きはりの3点曲げ載荷の荷重－ひび割れ開口変位曲線から算出

コンクリートの配合で SW-CA は海水および石灰岩骨材を用いた配合で、SW-NA は海水および普通骨材（大井川水系産陸砂、青梅産硬質砂岩碎石）を用いた配合とした。水セメント比は 45%，単位粗骨材量は $0.315\text{m}^3/\text{m}^3$ で一定とし、スランプフロー $600\pm 50\text{mm}$ ，空気量 $4.5\pm 1.0\%$ となるように，単位水量および単位混和剤量を調整した。石灰岩骨材は内部空隙を多く有しており，粗骨材は吸水率およびすりへり減量が大きいという特徴を有している。

図-1 に荷重試験体の概要を示す。本検討では，全長の異なる 2 種類の試験体を各配合 1 体製作し，曲げ荷重試験およびせん断荷重試験を行った。試験体に用いたステンレス鉄筋（SUS410-SD345）は，引張鉄筋に D19（0.2%耐力 $387\text{N}/\text{mm}^2$ ），圧縮鉄筋およびせん断補強鉄筋に D13（0.2%耐力 $420\text{N}/\text{mm}^2$ ）とした。なお，鉄筋の 0.2%耐力は，引張試験（JIS Z 2241）により得た値である。荷重試験における計測項目は，荷重，梁中央変位，鉄筋ひずみとした。なお，曲げ荷重試験においては，曲げモーメント一定

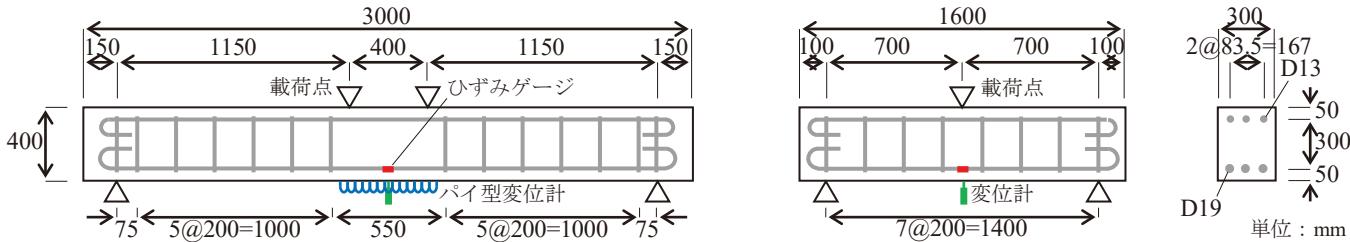


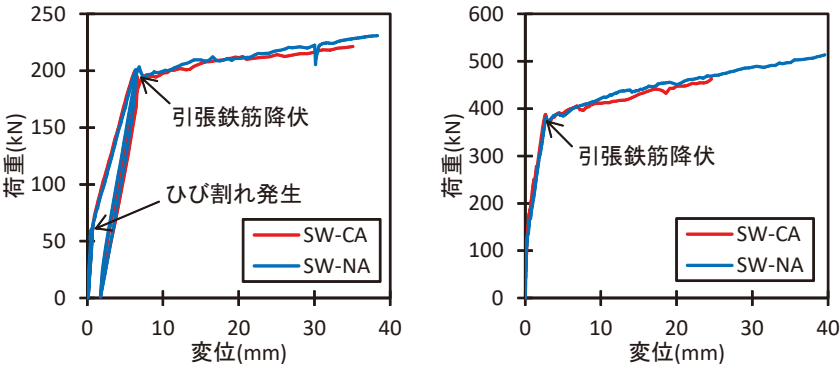
図-1 荷重試験体概要（左：曲げ荷重用，中：せん断荷重用，右：断面）

区間の試験体下面にパイ型変位計を設置し，ひび割れの開口変位（以下，開口変位）を計測した。

表-1 に管理供試体による強度試験結果を示す。なお，供試体は梁試験体と同じ養生条件（型枠脱型材齢 21 日）で保存し，荷重試験と同時に試験を行った。

破壊エネルギーの値から，SW-CA のひび割れ抵抗性は SW-NA に比べて劣ることが確認された。

図-2 に曲げ荷重試験およびせん断荷重試験による荷重と変位の関係を示す。最大荷重は SW-CA に比べて SW-NA の方が大きかったものの，両者は同じような挙動を示した。



(a) 曲げ荷重試験結果 (b) せん断荷重試験結果

図-2 荷重－変位関係

表 2 実験値と計算値の比較

配合	曲げ耐力($\text{kN}\cdot\text{m}$)		せん断耐力(kN)	
	実験値	計算値	実験値	計算値
SW-CA	127.3	112.4	231.2	218.0
SW-NA	132.7	112.2	256.7	218.0

この結果から、石灰岩骨材を用いた場合でも、普通骨材を用いたコンクリート梁と同程度の力学特性を有すると考えられる。曲げ載荷においては曲げひび割れが、せん断載荷においては曲げおよび斜めせん断ひび割れが分散して発生した。なお、SW-NA のひび割れ発生状況や破壊形態は、SW-CA と同様であった。

断面破壊の照査式により算定した計算値（設計断面耐力）と実験値の比較を表-2 に示す。実験値は計算値よりも大きい値となっており、既往の計算式により設計断面耐力を算定できることが確認された。

SW-CA の曲げ載荷試験によるパイ型変位計により取得した開口変位と引張鉄筋ひずみの関係を図-3 に示す。開口変位 0.1mm 以下では、計算値と同程度であった。鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値の目安である 0.2mm においては、若干ばらつきはあるものの、既往の計算式により曲げひび割れ幅を推定できると考えられる。

石灰岩骨材を用いたコンクリート梁は、普通骨材コンクリート梁とほぼ同程度の力学特性を有していることが確認された。また、設計断面耐力および曲げひび割れ幅の算定にあたっては、既往の計算式を用いることが可能であることを示した。

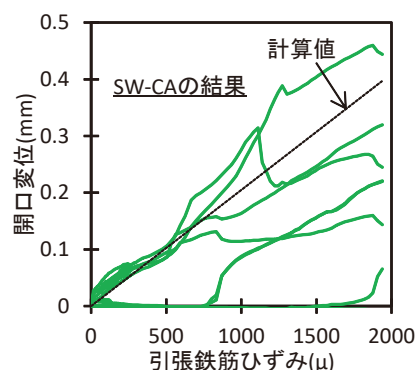


図-3 開口変位と鉄筋ひずみの関係

3. 共同研究者

山路 徹（港湾空港技術研究所材料研究チームチームリーダー早稲田大学客員教授）
 佐野 清史（東洋建設株式会社 技術本部 早稲田大学客員教授）
 末岡 英二（東洋建設株式会社 美浦研究所長（工博））
 内 藤 英晴（五洋建設株式会社 （工博）早稲田大学客員教授）
 羽瀧 貴士（東亜建設工業(株)技術研究開発センター（工博）早稲田大学客員教授）
 安 同祥（早稲田大学 理工学術院 客員教授）

4. 研究業績

- 1) 竹中 寛, 谷口 修, 山路 徹, 清宮 理: 海水および石灰岩由来の石灰石骨材を用いた自己充填型コンクリートの諸特性, 日本コンクリート工学会、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.1, 2017, pp.1567-1572
- 2) 竹中 寛, 佐野清史, 谷口 修, 田中亮一, 山路 徹, 清宮 理: 海水および石灰岩由来の石灰岩骨材を用いた自己充填型コンクリートの諸性状日本沿岸域学会, 第30回全国大会「研究討論会, 2017」
- 3) 羽瀧貴士, 川端雄一郎, 河村直哉, 忽那 惇, 清宮 理, 海水を用いた高流動コンクリートの ASR 膨張とその抑制対策に関する実験的検討, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Vol.72, No.5, 2017, pp1203-1204,

- 1) 竹中寛、末岡英二、佐野清史、清宮理：海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートへのフライアッシュの適用性、コンクリート工学年次論文集、Vol.37, No.1、2015.7、pp.1453-1458
- 2) 酒井貴洋、山路徹、清宮理：海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの実用化に関する基礎的研究、土木学会論文集, 2015.
- 3) 末岡英二、竹中寛、酒井貴洋、田中亮一、山路徹、清宮理：海水・海砂を用いた自己充填コンクリートへのフライアッシュ適用の効果、第5回コンクリート技術大会(盛岡)、2015.10、
- 4) 酒井貴洋、竹中寛、田中亮一、小山広光、山路 徹、清宮 理：海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの基礎特性、コンクリート工学Vol.5,3No.12、2015.12、pp.1038-1045
- 5) Takashi Habuchi, Yuichiro Kawabata, Naoya Kawamura, Ryouichi Tanaka, Jun Kutsuna, Toru Yamaji and Osamu Kiyomiya : Study on ASR Expansion and its Suppressing Measures of Self-compacting Concrete using Sea Water, 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 2015.5
- 6) Hiroshi Takenaka, Takahiro Sakai, Hiromitsu Koyama, Toru Yamaji and Osamu Kiyomiya : Fundamental Properties of Self-Compacting Concrete Using Sea water and Sea Sand, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS), 2015
- 7) Takahiro Sakai, Hiroshi Takenaka, Ryoichi Tanaka, Toru Yamaji, and Osamu Kiyomiya : Characteristics and Applicability to Underwater Concrete of Self-Compacting Concrete Using Sea Water and Sea Sand, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS), 2015
- 8) Takashi HABUCHI, Toru YAMAJI, Ryoichi TANAKA, Takahiro SAKAI, Takumi SAWADA, Yoshikazu AKIRA, Kiyofumi SANO and Osamu KIYOMIYA : SITE INVESTIGATION AND CORROSION PREVENTION CAPACITY OF CONCRETE USING SEA WATER AND UNW ASHED SEA SAND, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS), 2015

5. 研究活動の課題と展望

海水や海砂を使用した自己充填型コンクリートは、地震被災地での現地での状況を勘案して各種性状を考慮して有効な活用が期待できるが、塩分を多量に含むことから、鉄筋コンクリートに適用する場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋を併用するなど耐久性への配慮が必須である。3年間の共同研究により所期の目的は達成できたが、筆者は早稲田大学を2017年度で退職をしたが今後も継続して研究をを別途継続する予定である。

エジプトの文化財保存修復・管理の学際的研究

研究代表者 近藤 二郎
(文学学術院 教授)

1. 研究課題

エジプト・アラブ共和国における古代エジプトの文化財の保存修復・管理の問題をエジプト現地において、国際協力のもとに実践すること目的としている。具体的には科研費の助成を受けたエジプト・ルクソール西岸アル＝コーカ地区における岩窟墓の保存・修復、カイロ近郊アル＝ギーザ地区のクフ王の第2の太陽の船などの作業を中心として展開している。

2. 主な研究成果

2017年度においては、エジプト・アラブ共和国において、いくつかのフィールド調査を実施した。主要なものでは、2016年度と同様、カイロ近郊のアル＝ギーザ台地において、クフ王の第2の太陽の船の復元調査、ルクソール西岸アル＝コーカ地区岩窟墓調査、サッカラにおける考古学調査、ダハシュール北遺跡の発掘調査などを実施した。

クフ王の第2の太陽の船の調査では、2016年度と同様にピット内の船の部材の位置測定、取り上げ作業、取り上げ部材の保存・修復作業、取り上げ部材の図面化作業などを継続して実施した。長さの長い大型部材の取り上げ作業を実施することができた。部材の保存修復・強化作業などは、これまで継続して作業を実施してきたことで、作業の効率化や問題点の認識などがエジプト人作業員・修復家などにも共有されるようになり作業は円滑に実施された。

2017年度も、科学研究費・基盤研究(A)海外学術・研究課題「エジプト、ルクソール西岸の新王国時代岩窟墓の形成と発展に関する調査研究」、研究課題番号:15H02610の助成を受け、ルクソール西岸アル＝コーカ地区で、2017年12月～2018年1月に、さらには2018年3月の2回にわたり調査を実施することができた。当該地区には、第18王朝アメンヘテプ3世治世末期の高官ウセルハトの墓(TT47)の大規模な前庭部を中心として、数多くの岩窟墓が存在している。しかしながら厚い堆積砂礫に覆われていたため、未発見の岩窟墓が存在していることが想定された。これまでの調査によって、ウセルハト墓の前庭部の南側から KHT01 と KHT02(コンスウエムヘブ墓)が、そして前庭部北東部から KHT03(コンスウ墓)の3基の岩窟墓を新たに発見することができ、従来の当該地区における岩窟墓の立地に関して新知見を得ることができた。2017年度の調査によって、さらに KHT02(コンスウエムヘブ墓)前庭部の南側と TT47(ウセルハト墓)の前室南側上部の2か所において、新たな岩窟墓の存在を確信する箇所を確認することができた。これら2か所には、周辺の岩窟墓の状況から、いずれも第18王朝トトメス4世時代に属する岩窟墓の存在が予想される。そのため今後の調査により、この地区における岩窟墓の造営の変遷が一層明確になることが期待される。

2017 年度には、KHT02(コンスウエムヘブ墓)を中心として、岩盤工学の専門家と壁画の修復家の協力を受け、岩窟墓内部の壁面の保存修復作業を重点的に実施し、大きな成果をあげることができた。この結果、今後の岩盤脆弱で発掘作業が困難な部分の調査に対する目途を立てることを可能にした点でも意義は大きいと考えられる。

サッカラの新王国時代の調査では、斜面に厚く堆積する砂礫の除去作業が困難を極めたが、3次元計測などで遺構や遺物の測量・記録作業は効率よく実施することができた。ダハシュール北遺跡では、これまで遺跡で発見された木棺の修復作業の点検を行い木棺修復の問題点について検討した。

3. 共同研究者

吉村作治（東日本国際大学・学長）
西本真一（日本工業大学・教授）
馬場匡浩（早稲田大学高等研究所・准教授）
中井 泉（東京理科大学・教授）
前川佳文（東京文化財研究所・研究員）
河合 望（金沢大学・准教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

近藤二郎「エジプト、アル＝コーカ地区ウセルハト墓（TT 47）出土の葬送用コーンについて」『二十一世紀考古学の現在』（山本暉久先生古稀記念論集）、山本暉久編、六一書房、663-669 頁、2017 年 4 月、
近藤二郎「ネクロポリス・テーベの考古学の現状と課題」『季刊・考古学』141 号、79-82 頁、2017 年 11 月
近藤二郎「古代エジプトのピラミッド」『世界の眼でみる古墳文化』国立歴史民俗博物館、30-33 頁、2018 年 3 月
近藤二郎・吉村作治・菊地敬夫・柏木裕之・河合望・高橋寿光
「第 10 次ルクソール西岸アル＝コーカ地区調査概報」『エジプト学研究』24 号、11-35 頁
2018 年 3 月

4.2 総説・著書

近藤二郎「エジプトの宗教」月本昭男（編）『宗教の誕生』133-165 頁、山川出版社、2017 年 8 月

4.3 招待講演

KONDO, Jiro

“The Tomb of Amenhotep III (KV 22) and KV A in the Western Valley of the Kings”,
Valley of the Kings: 200 years of discoveries, research, and preservation, Basel
スイス・バーゼル大学（2017 年 10 月）

近藤二郎「ネクロポリス・テーベ研究の地平—エジプト・ルクソール岩窟墓プロジェクト」
早稲田大学考古学会、2017 年 12 月、早稲田大学戸山キャンパス

4.4 学会発表

近藤二郎「ルクソール西岸、アル＝コーカ地区出土の葬送用コーンについて」日本オリエント

学会 59 回大会、2017 年 10 月、東京大学本郷キャンパス
 近藤二郎「アル＝コーカ地区出土の葬送用コーン－エジプト、アル＝コーカ地区第10次
 (2016-17年) —2017年3月、日本西アジア考古学会、古代オリエント博物館、2018年3月

5. 研究活動の課題と展望

エジプト・アラブ共和国における文化財の保存修復および管理の問題については、従来の形にはまった画一的な考え方ではなく、新たな方法論やコンセプトの導入が近年、急速に議論の対象となっている。私たちの調査対象地域であるルクソール西岸アル＝コーカ地区は、数多くの新王国時代の岩窟墓の存在する地域であるが、岩窟墓の造営されている岩盤は、質的に極めて脆弱であり、しばしば発掘調査が困難な点が多い。そのため、調査においては積極的に岩盤工学や保存修復、保存科学などの専門家の協力を得て、安全な環境を維持しつつ、発掘作業を積極的に取り込んでいく。

発掘調査をするだけでなく、今後の遺跡の保存と活用を崩十分考慮していくために、エジプト考古省当局と常に密接な連携・協議をおこなうことで、遺跡の保存・修復、および安全管理などにおいても十分に組み込んでいきたい。そのために、遺跡周囲の砂礫の崩落を防ぐための石積みの構築、夜間の管理のための照明施設の整備なども調査研究と併行して実施していくことが求められるであろう。

相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計

研究代表者 中井 浩巳
(先進理工学部 化学・生命化学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究では、理論的手法を用いて元素の特性を理解し、革新的な機能を持つ物質・材料を設計することを目的とする。また、必要となる理論的基盤の構築も目指す。

元素の特性を理解するためには、ある元素が種々の環境下においてどのような電子状態を取ろうとするかを正確に決定する必要がある。本プロジェクト研究では、この特性理解のアプローチとして量子化学計算を活用する。元素戦略では希少元素の使用を極力控え、ユビキタス元素を活用することを目指している。元素戦略に沿った機能設計には、さまざまな組成・スピン状態・分子サイズに対する豊富な知見が必要となる。不安定物質や仮想的な材料に対して容易に構造予測・物性評価ができることが、量子化学計算を用いる最大の利点である。しかし希少元素や規制元素の多くは重元素であり、相対論的效果が無視できないため、元素戦略を理論的に推進するためには、相対論的な量子化学理論へのパラダイムシフトが不可欠である。

2. 主な研究成果

本プロジェクトでは、重元素を含む系を取り扱う実用的な高精度 2 成分相対論法の開発を行ってきた。特に、4 成分法と同等の精度である無限次 Douglas-Kroll-Hess (IODKH) に対して、相対論的效果の局所性に着目した局所ユニタリー変換 (LUT) -IODKH 法を開発し、大幅な効率化に成功した。さらに内殻電子の効率的な取り扱いを可能にする凍結内殻ポテンシャル (FCP) 法や、量子化学計算の土台でもある分子積分に関して、重元素の特徴を考慮して高速化するアルゴリズムの開発を行ってきた。これらの拡張により、これまで困難であった数百原子系の電子状態計算が可能となった。さらにこれらすべての理論を含み、ゼロから作成するオリジナルの次世代相対論的量子化学計算プログラム Relativistic And Quantum Electronic Theory (RAQET) を開発してきた。本年度における研究成果を以下に示す。

2-1 2 成分相対論法の密度汎関数理論 (DFT) への拡張

2 成分相対論法の密度汎関数理論 (DFT) への拡張を行った。この拡張を行う際に、4 成分から 2 成分へと変換することに伴う電子密度の描像の変化 (Picture Change; PC) が問題となる。実際に、現在広く用いられている量子化学計算パッケージにおけるすべての 2 成分相対論的 DFT では、この PC が考慮されてきない。そこで我々は IODKH 変換を用いて、電子密度の PC 補正を行う手法を開発した[学術論文(1)]。表 1 に SVWN 交換相関汎関数を用いた希ガス原子の全電子エネルギーを示す。比較として、非相対論 (NR) および参照となる 4 成分法(4C)の値も載せた。この結果、PC を考慮していない手法 (w/o PCC) は Rn 原子で 4C と 6 hartree 以上の差があるが、PC を考慮すること (w/ PCC) で 4C を再現することが確認された。

表 1. 希ガス原子における全電子エネルギー (hartree). 括弧内は 4C からの差を示す.

	NR		IODKH				4C
			w/o PCC		w/ PCC		
He	-2.8272	(0.0001)	-2.8274	(0.0000)	-2.8273	(0.0000)	-2.8273
Ne	-128.1413	(0.1433)	-128.2904	(-0.0058)	-128.2846	(0.0000)	-128.2846
Ar	-525.9081	(1.8581)	-527.8025	(-0.0364)	-527.7662	(0.0000)	-527.7662
Kr	-2750.1176	(36.7948)	-2787.2293	(-0.3168)	-2786.9128	(-0.0003)	-2786.9125
Xe	-7228.0802	(213.8568)	-7443.1072	(-1.1701)	-7441.9391	(-0.0020)	-7441.9371
Rn	-21860.5787	(1709.3307)	-23576.1209	(-6.2114)	-23569.9241	(-0.0147)	-23569.9095

2-2 重元素のための電子間反発積分に対する高速な微分アルゴリズムの開発

量子化学計算において頻繁に用いられる機能の一つ、分子構造最適化の高速化を行った。本研究では、その計算律速となる電子間反発積分の各座標微分について、重原子で用いる基底関数の特徴を考慮した、高速なアルゴリズムを開発した[学術論文(16)]。図 1 に本手法 (GC-ACE-TRR) の金クラスターにおける計算時間のクラスターサイズ依存性を示す。比較として、2 つの汎用的な量子化学計算パッケージ (GAMESS, Molpro) の結果も載せた。この結果、GC-ACE-TRR はこれまで最も高速であった Molpro よりも、計算時間が 10 倍以上小さいことが確認された。したがって、重元素を含んだ化合物に対して、従来よりも高速な構造最適化ができることが示された。

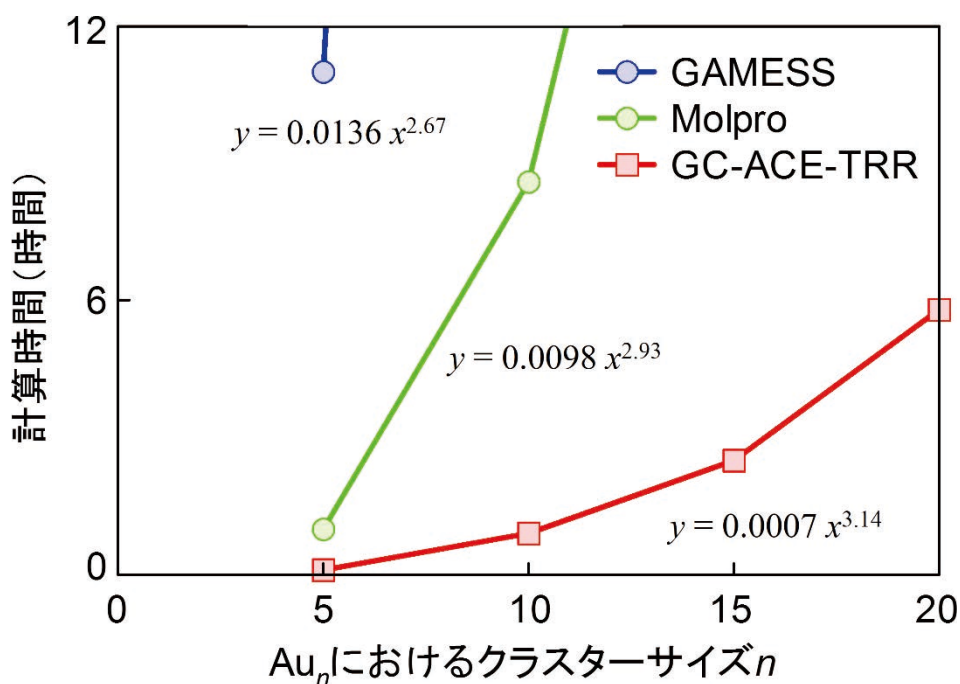


図 1. Au クラスターにおける計算時間のクラスターサイズ依存性.

2-3 RAQET プログラムの公開

また RAQET プログラムの公開を行った。RAQET で搭載されている機能を図 2 に示す。本プログラムはゼロから作成しているため、我々が開発してきた新規理論の他に、従来の量子化学計算プログラムで用いられている様々なオプションを、相対論的量子化学計算用にカスタマイズして導入

した．並列化については OpenMP によるノード内並列が完成した．また多くのユーザーが RAQET を容易に使うことができるように，量子化学計算のための Graphical User Interface (GUI)の一つである Winmostar と連携し，インプットファイル作成の補助や計算結果の可視化を可能にした（図 3）．また物質科学シミュレーションのポータルサイトである MateriApps にて公開した（<http://ma.cms-initiative.jp/ja/listapps/RAQET>）．さらに現在 RAQET に関する論文を Journal of Computational Chemistry 誌の Software News and Updates に投稿中である．

Contents	Details
HF	R, U, RO, KR, KU, KRO, G (disk, direct)
MP2	R, U, RO, KR, KU, KRO, G (disk, direct)
DFT	R, U, RO, KR, KU, KRO, G (collinear, non-collinear, PCC)
高次電子相関	MPn, CI, CC
励起状態	EOM-CC, TDDFT(R, U, G)
ハミルトニアン	NR, DKHn/NR, IODKH/NR(SF/SD, LUT), IODKH/IODKH (SF/SD, LUT)
初期軌道・電子密度	Hcore, Extended Hückel, Atomic density, Small basis, MO read, DM read
ハミルトニアン微分	NR, IODKH/NR(SF/SD, LUT), IODKH/IODKH (SF/SD, LUT)
HFグラジエント	R, U, RO, KR, KU, KRO, G
MP2グラジエント	R, U, RO, KR, KU, KRO, G
基底関数種類	Cartesian, Spherical harmonics
一電子積分	Overlap, Kinetic, V, pVp (derivative)
二電子積分	ERI, pVp, ppVpp (derivative), FMM
積分アルゴリズム	ACE-RR, ACE-TRR (GC/SC), Gauss-Rys, PH+MD (SMASH)
内殻ポテンシャル	MCP, AIMP, FCP, FCP-MP
SCF収束	C1-DIIS, C2-DIIS, E-DIIS, SO-SCF, Level shifting, Fock extrapolation, Damping, FON
大規模計算	DC-SCF, DC-correlation
構造最適化	BFGS, RFO, Cartesian coordinate, Redundant coordinate, G-DIIS, Hessian
その他	Expectation values, Electric/Magnetic properties, Solvent effect

赤は近日実装予定

図 2. RAQET の搭載機能

Figure 3 displays the Winmostar graphical user interface (GUI) for quantum chemistry calculations. The interface is divided into several panels:

- Input File (インプットファイル):** The left panel shows the 'RAQET Setup' dialog box with various configuration options for the calculation, including the method (HF, MP2, DFT), basis set, and convergence criteria.
- Calculation Conditions Setting (計算条件の設定):** The top center panel shows the 'RAQET Setup' dialog box with various configuration options for the calculation, including the method (HF, MP2, DFT), basis set, and convergence criteria.
- Output (アウトプット):** The right panel shows the output of the calculation, including the molecular structure, energy levels, and other relevant data.
- Spin Spectral Visualization (スピンスペクトルの可視化):** The bottom right panel shows a visualization of the spin spectrum, with energy levels and transitions plotted.

The Winmostar logo and 'XA-CHEM-SUITE' text are visible at the bottom center of the interface.

図 3. Winmostar によるインプット作成，アウトプットの可視化支援

3. 共同研究者

清野 淳司（理工学術院・理工学術院総合研究所・理工総研が募集する次席研究員）
 五十幡 康弘（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 王 祺（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 西村 好史（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 小野 純一（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 周 建斌（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 吉川 武司（理工学術院・化学・生命化学科・助教）
 大越 昌樹（理工学術院・化学・生命化学科・助手）
 Toni Maier（日本学術振興会（JSPS）・外国人特別研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, T. Oyama, Y. Ikabata, S. Seino, H. Nakai, *Chem. Phys. Lett.*, **680**, 37-43 (2017). (DOI: [10.1016/j.cplett.2017.05.023](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.05.023))
- (2) “Near-infrared absorption of π -stacking columns composed of trioxotriangulene neutral radicals”, Y. Ikabata, Q. Wang, T. Yoshikawa, A. Ueda, T. Murata, K. Kariyazono, M. Moriguchi, H. Okamoto, Y. Morita, H. Nakai, *npj Quantum Materials*, **2**, 27 (2017). (DOI: [10.1038/s41535-017-0033-8](https://doi.org/10.1038/s41535-017-0033-8))
- (3) “Electrocatalytic synthesis of ammonia by surface proton hopping”, R. Manabe, H. Nakatsubo, A. Gondo, K. Murakami, S. Ogo, H. Tsuneki, M. Ikeda, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, *Chemical Science*, **8** (??), 5434-5439 (2017). (DOI: [10.1039/c7sc00840f](https://doi.org/10.1039/c7sc00840f))
- (4) “Density functional theory analysis of elementary reactions in NO_x reduction on Rh surface and Rh clusters”, F. Deushi, A. Ishikawa, H. Nakai, *J. Phys. Chem. C*, **121** (28), 15272-15281 (2017). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b04526](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04526))
- (5) “Computerized implementation of higher-order electron-correlation methods and their linear-scaling divide-and-conquer extensions”, M. Nakano, T. Yoshikawa, S. Hirata, J. Seino, H. Nakai, *J. Comput. Chem.*, **38** (29), 2520-2527 (2017). (DOI: [10.1002/jcc.24912](https://doi.org/10.1002/jcc.24912))
- (6) “Divide-and-conquer density-functional tight-binding molecular dynamics study on the formation of carbamate ions during CO₂ chemical absorption in amine solutions”, A. Sakti, Y. Nishimura, H. Sato, H. Nakai, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **90** (11), 1230-1235 (2017). (DOI: [10.1246/bcsj.20170142](https://doi.org/10.1246/bcsj.20170142))
- (7) “Parallel implementation of efficient charge-charge interaction evaluation scheme in periodic divide-and-conquer density-functional tight-binding calculations”, Y. Nishimura, H. Nakai, *J. Comput. Chem.*, **39** (2), 105-116 (2017). (DOI: [10.1002/jcc.25086](https://doi.org/10.1002/jcc.25086))
- (8) “Catalytic performance of Ru, Os, and Rh nanoparticles for ammonia synthesis: A density functional theory analysis”, A. Ishikawa, T. Doi, H. Nakai, *J. Catal.*, **357**, 213-222 (2017). (DOI: [10.1016/j.jcat.2017.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.11.018))
- (9) “Rigorous pK_a estimation of amine species using density-functional tight-binding-based metadynamics simulations”, A. Sakti, Y. Nishimura, H. Nakai, *J. Chem. Theory Comput.*, **14** (1), 351-356 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jctc.7b00855](https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b00855))

- (10) “Density-functional tight-binding molecular dynamics simulations of excess proton diffusion in ice I_h, Ice I_c, Ice III, and melted ice VI phases”, A. Sakti, Y. Nishimura, C. Chou, H. Nakai, *J. Phys. Chem. A*, **122** (1), 33-40 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpca.7b10664](https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b10664))
- (11) “Electron-hopping brings lattice strain and high catalytic activity in low temperature oxidative coupling of methane in an electric field”, S. Ogo, H. Nakatsubo, K. Iwasaki, A. Sato, T. Yabe, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, *J. Phys. Chem. C*, **122** (4), 2089-2096 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b08994](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b08994))
- (12) “Semi-local machine-learned kinetic energy density functional with third-order gradients of electron density”, J. Seino, R. Kageyama, M. Fujinami, Y. Iwabata, H. Nakai, *J. Chem. Phys.*, **148** (24), 241705 (13 pages) (2018). (DOI: [10.1063/1.5007230](https://doi.org/10.1063/1.5007230))
- (13) “Theoretical analysis of carrier ion diffusion in superconcentrated electrolyte solutions for sodium-ion batteries”, M. Okoshi, C.-P. Chou, H. Nakai, *J. Phys. Chem. B*, **122** (9), 2600-2609 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpcb.7b10589](https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.7b10589))
- (14) “Gauge-origin independent formalism of two-component relativistic framework based on unitary transformation in nuclear magnetic shielding constant”, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, *J. Chem. Phys.*, **148** (11), 114109 (8 pages) (2018). (DOI: [10.1063/1.5016581](https://doi.org/10.1063/1.5016581))
- (15) “Simulations of synthesis of the boron-nitride nanostructures in a hot, high pressure gas volume”, P. S. Krstic, L. Han, S. Irle, H. Nakai, *Chemical Science*, in press (2018). (DOI: [10.1039/c8sc00667a](https://doi.org/10.1039/c8sc00667a))
- (16) “Derivative of electron repulsion integral using accompanying coordinate expansion and transferred recurrence relation method for long contraction and high angular momentum”, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, *J. Comput. Chem.* in press (2018). (DOI: [10.1002/qua.25640](https://doi.org/10.1002/qua.25640))

4.2 総説・著書

- (1) “量子化学計算のコツ（基礎編）”, 中井浩巳, *応用物理*, **86** (8), 720-724 (2017).
- (2) “量子化学計算のコツ（実用編）”, 中井浩巳, *応用物理*, **86** (9), 802-807 (2017).
- (3) “調和溶媒和モデル(HSM)を用いた凝縮系の自由エネルギー計算” (Harmonic solvation model (HSM) for evaluation of condensed-phase free energy), 中井 浩巳, *J. Comput. Chem. Jpn.*, **16** (4), 83-88 (2017). (DOI: [10.2477/jccj.2017-0038](https://doi.org/10.2477/jccj.2017-0038))
- (4) “基礎研究と応用研究～理論化学の社会実装に向けて”, 中井浩巳, *化学と工業*, **70** (10), 928-930 (2017).
- (5) “インフォマティクスとの融合による理論化学研究”, 清野淳司, 中井浩巳, *化学工業*, **69** (1), 53-58 (2018).
- (6) “ジブチルヒドロキシトルエンにおける遠赤外吸収 ～測定と量子化学計算によるスペクトル同定～”, 遠藤滉士, 香西拓哉, 吉川武司, 中井浩巳, 大木義路, *電気学会誘電・絶縁材料研究会資料*, **DEI-17-100**, 23-28 (2017)
- (7) “分割統治型密度汎関数強束縛 (DC-DFTB) 法に対する最近の開発と応用”, 西村 好史, 中井 浩巳, *分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”*, **20** (1), 18-23 (2018).
- (8) “A perspective on density-functional tight-binding parameterization towards transition metals”, C.-P. Chou, H. Nakai, *分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”*, **20** (1), 8-17 (2018).
- (9) “特集「DFTB」:「特集にあたって」”, 中井 浩巳, *分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”*, **20** (1), 7 (2018).

4.3 招待講演

(海外学会)

- (1) “Chemical Reaction Simulations treated by Linear-Scaling Divide-and-Conquer type Density-Functional based Tight-Binding Molecular Dynamics (DC-DFTB-MD) Method”, H. Nakai, *253rd ACS National Meeting & Exposition*, San Francisco (California, USA), April 2-7, 2017.
- (2) “Large-Scale Chemical Reaction Simulations by Divide-and-Conquer Density-Functional Tight-Binding Molecular Dynamics Method”, H. Nakai, *2017 Korea-Japan Molecular Science Symposium ‘Frontiers in Molecular Science: Structure, Dynamics, and Function of Molecules and Complexes’*, Haeundae Tivoli Hotel (Busan, Korea), July 10-12, 2017.
- (3) “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, H. Nakai, *17th International Conference on Density-Functional Theory and its Applications (DFT2017)*, Tällberg (Dalarna, Sweden), August 21-25, 2017.
- (4) “Chemical Reaction Simulations on CO₂ Chemical Absorption Process”, H. Nakai, *11th Triennial Congress of the World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC 2017)*, (Munich, Germany), August 27-September 1, 2017.
- (5) “Quantum Chemistry Meets Artificial Intelligence”, H. Nakai, *Eighth Asia-Pacific Conference of Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC 8)*, (Mumbai, India), December 15-17, 2017.

(国内学会)

- (1) “インフォマティクスとの融合による理論化学研究の推進”, 中井浩巳, 日本化学会関東支部主催講演会「マテリアルズ・インフォマティクスとAIを用いたものづくり」, 化学会館(お茶の水), 2017年9月29日.
- (2) “データ科学は理論化学に何をもたらすか”, 中井浩巳, 日本コンピュータ化学会 2017 秋季年会 プレシンポジウム, 熊本大学黒髪キャンパス(熊本), 2017年10月20日.
- (3) “元素戦略のための相対論的量子化学”, 中井浩巳, MEXT-JST 元素戦略合同シンポジウム ～元素戦略研究の歩みと今後～, JP タワーホール(東京), 2018年2月20日.

4.4 受賞・表彰

- (1) 日本化学会第97春季年会 優秀講演賞(学術), 西村 好史(次席研究員), “Linear-scaling quantum mechanical molecular dynamics simulations with divide-and-conquer density-functional tight-binding method”.
- (2) 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 日本コンピュータ化学会(SCCJ)奨学賞, Aditya Wibawa Sakti (D3), "Accurate pKa Evaluation by Metadynamics Simulation at the Density-Functional Tight-Binding Level".
- (3) 第11回分子科学討論会 2017 分子科学会優秀講演賞, 大山 拓郎 (M2) 「局所ユニタリー変換を用いた効率的な2成分相対論的密度汎関数理論の開発」.
- (4) 第7回CSJ化学フェスタ 2017 優秀ポスター発表賞, 影山 椋 (M1) 「Orbital-free 密度汎関数理論のための機械学習を用いた運動エネルギー汎関数の開発」.
- (5) 第31回分子シミュレーション討論会 学生優秀発表賞, 河本奈々 (B4) 「分割統治型励起状態密度汎関数強束縛法を用いた光活性イエロータンパク質に関する理論的研究」.

- (6) APCTCC8, Best Poster Award (ACS Omega) Minori Imai (M2), “DC-DFTB-metadynamics simulations for the primary proton transfer of bacteriorhodopsin”.
- (7) 早稲田大学先進理工学部化学・生命化学科 2017 年度卒業研究発表賞, 河本奈々 (B4) 「光受容タンパク質の機構解明に向けた分割統治型時間依存密度汎関数強束縛法の開発」.
- (8) 第 121 回触媒討論会 学生ポスター発表賞, 平井貴裕 (M2) 「Rh 表面での NO-CO 反応の温度・圧力依存性に関する理論的検討」.

4.5 外部資金

- (1) 科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業(CREST) 『元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出』“相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計”, (研究代表, 平成 24-29 年度).
- (2) 日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金 基盤研究(A), 「ユビキタス水素の機能とダイナミクスに関する理論的研究」 (研究代表, 平成 26-30 年度).
- (3) 日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究, 「凝縮系の熱力学量に対する高精度量子化学計算法の開発」 (研究代表, 平成 27-29 年度).
- (4) 文部科学省 元素戦略プロジェクト 研究拠点形成型『京都大学 実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点』「触媒及び電極の電子状態計算のための理論開発」, (分担研究代表, 平成 29 年度).

5. 研究活動の課題と展望

本年度までに, 本プロジェクトの理論基盤である 2 成分相対論法に関して種々の手法を開発し, 独自の 2 成分相対論プログラム RAQET を公開した. 現在 RAQET で計算できる機能は, 分子のエネルギー計算や構造最適化, 一部の磁気的分子物性のみである. 今後は多くの分子物性や解析手法を実装することで, 様々なユーザーが種々の用途で RAQET を使用できるように機能拡充を行う.

非線形問題に対する精度保証法の確立

研究代表者 大石 進一
(基幹理工学部 応用数理学科 教授)

1. 非線形問題に対する精度保証法の確立

本プロジェクトは非線形問題に対する精度保証付き数値計算理論を発展させ、モデリングの信頼性や現象との整合性を数値的に検証できるようにする精度保証理論を用いた方法論を確立する。具体的には次の目標を達成する。

- ・並列計算法の高速性を保持した1億次元程度の大規模スパース系の高効率な精度保証付き数値計算法を開発

- ・モデル方程式の信頼性を検討するための精度保証理論の発展

数値計算に生じるすべての誤差を考慮し、数学的に正しい結果を数値計算によって導く計算法を「精度保証付き数値計算」と呼ぶ。本研究計画者はモデリングの信頼性を与えるための基礎となる精度保証付き数値計算理論および高精度計算アルゴリズムの開発を行ってきた。本プロジェクトではこれを発展させ、現代のシミュレーションの最前線で計算されているような1億次元程度の連立方程式の解を求めるような大規模の問題を扱う。この規模になると良条件問題でも計算誤差が累積して、解の精度が一桁も正しくない現象が多々生じてくる。そこで誤差の蓄積に対して本研究計画者らの高精度計算法を導入し、高速・高効率な精度保証付き数値計算法を開発する。

さらに精度保証付き数値計算理論の基盤を応用することにより、現代のモデル方程式の信頼性を検討する。そして実問題を扱う中で精度保証理論をも開拓していく。例えば、物質の反応・拡散を記述する反応拡散方程式の一つであるFitzHugh-Nagumo方程式に対して、近似解の近傍での解の存在検証を精度保証付き数値計算によって実現する。本研究では各種の数理モデルに対する計算機援用解析理論を構築し、モデル方程式の信頼性を検討するための精度保証理論を発展させる。

2. 主な研究成果

2.1 発展作用素を用いた半線形熱方程式の解の精度保証付き数値計算法の確立

昨年時の成果で構築した半群理論による半線形熱方程式の解の精度保証付き数値計算法を改良する。ラプラシアンに摂動を加えた微分作用素に対して、半群理論の応用である「発展作用素」を用いて精度保証法の定式化を行った。その結果、以前の手法と比較して3倍ほど解の検証手法の精度を上げることができた。

2.2 Sobolev の埋め込み定数の定量的な評価法の提案

ソボレフの埋め込み定数の定量的な評価を考える。今年度は昨年度に比べて適応できる領域の範囲を広げて境界に条件を加えないソボレフの埋め込み定数の評価法を提案した。そして以前に我々が提案した一般のソボレフの埋め込み定数の評価法に比べて、断然シャープな結果が得られた。

2.3 線形問題の鞍点に対する高速な数値的検証法の確立

数理計画法においてその問題の最適値を求めるために必要な鞍点の解析が進んでいる。本研究では、対称な鞍点行列を係数に持つ連立一次方程式の解を高速にかつ、精度保証付きで計算する方法を提

案した．さらにその方法は離散化した偏微分方程式に対して，効果的に応用された．

2.4 疎行列の固有値問題に対するロバストな精度保証法の確立

本研究の目的は，次の行列の一般化固有値問題

$$Ax = \lambda Bx \quad (A: n \times n \text{ の実対称行列}, B: n \times n \text{ の実対称正定値行列})$$

のある特定の固有値 λ とその大きさの順位まで込めて，厳密に評価する方法の構築である．申請者は，Lehman-Goerisch の方法とブロック修正コレスキー分解の事前誤差評価に基づき，従来法の欠点である数値安定性が確保されていない，計算コストが大きいなどを克服することで，大規模な疎行列に適用する高速かつ高精度な新しい解法を構築した．

3. 共同研究者

南畑 淳史 (早稲田大学 次席研究員)， 柳澤 優香 (早稲田大学 次席研究員)，
田中 一成 (早稲田大学 助教)， 水口 信 (早稲田大学 次席研究員)，
内海 晋弥 (早稲田大学 助手)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] Makoto Mizuguchi, Akitoshi Takayasu, Takayuki Kubo, and Shin'ichi Oishi, "A method of verified computations for solutions to semilinear parabolic equations using semigroup theory", SIAM J. Numer. Anal., Vol. 55, No.2, pp. 980-1001, 2017
- [2] Akitoshi Takayasu, Makoto Mizuguchi, Takayuki Kubo, and Shin'ichi Oishi, "Accurate method of verified computing for solutions of semilinear heat equations", Reliable computing, Vol.25, pp. 74-99, 2017
- [3] Ryo Kobayashi, Takuma Kimura, and Shin'ichi Oishi, "A method for verifying the accuracy of numerical solutions of symmetric saddle point linear systems", Numerical Algorithms, Volume.76, Issue.1, pp.33-51, September 2017
- [4] Makoto Mizuguchi, Kazuaki Tanaka, Kouta Sekine, and Shin'ichi Oishi: Estimation of Sobolev embedding constant on a domain dividable into bounded convex domains, Journal of Inequalities and Applications, 299 (2017).
- [5] Makoto. Mizuguchi, Akitoshi. Takayasu, Takayuki. Kubo, and Shin'ichi Oishi: "Numerical verification for existence of a global-in-time solution to semilinear parabolic equations", J. Comput. Appl. Math., Vol. 315, pp. 1-16, May 2017
- [6] Akitoshi. Takayasu, Kanae. Matsue, Takiko. Sasaki, Kazunari. Tanaka, Makoto. Mizuguchi, and Shin'ichi Oishi: "Numerical validation of blow-up solutions of ordinary differential equations", J. Comput. Appl. Math., Vol. 314, pp. 10-29, Apr. 2017.

4.2 総説・著書

- [1]大石 進一 編，精度保証付き数値計算の基礎，コロナ社，2018 年 6 月発行予定．

4.3 招待講演

- [1] 内海 晋弥，Lagrange-Galerkin 法における諸問題とその解決策：計算可能性・粘性係数依存性・流入境界条件，数値解析セミナー (UTNAS)，東京大学大学院数理科学研究科，2017/4/11.
- [2]内海 晋弥，高次要素を用いる圧力安定化 Lagrange-Galerkin スキームによる流れ問題の有限要素計算，第 6 回岐阜数理科学研究会，岐阜大学サテライトキャンパス，2017/6/21.
- [3]柳澤 優香，劉 雪峰，大石 進一，スパース行列に対する固有値の厳密計算手法の開発，京都大学

数理解析研究所・RIMS 共同研究(公開型) 数値解析学の最前線 ---理論・方法・応用---, 京都大学数理解析研究所, 2017/11/9.

[4] S. Oishi, Verified Numerical Computation and Large Scale Computing, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, Nishi Waseda Campus, Waseda University, Japan, 2018/3/7.

[5] 大石進一, 精度保証付き数値計算の理論の進展と応用, CREST・さがけ数学関連領域合同シンポジウム「数学パワーが世界を変える2018」, アキバホール, 2018/1/21.

[6] 内海 晋弥, 高次要素を用いる圧力安定化有限要素法の解析と高レイノルズ数流れ問題への応用, RIMS 共同研究(公開型) 数値解析学の最前線 ---理論・方法・応用---, 京都大学, 2017/11/9.

[7] 内海 晋弥, 圧力安定化有限要素法による流体問題の数値計算と誤差解析, 数理人セミナー, 早稲田大学, 2017/12/8.

[8] S. Uchiumi, A pressure-stabilized finite element method with higher-order elements
The 15th Japanese-German International Workshop on Mathematical Fluid Dynamics, Waseda University, 2018/1/10.

[9] S. Uchiumi, A pressure-stabilized FEM using higher-order elements with application to some channel flows, Numerical Analysis: Applications to Biomedical Problems and Foundations

The University of Tokyo, 2018/2/21.

[10] Y. Yanagisawa, L. Xuefeng, S. Oishi, Robust guaranteed eigenvalue evaluation method, Dagstuhl seminar 17481, Germany, 2017/12/1.

[11] A. Minamihata, T. Ogita and S. Oishi, A note on error bounds for large linear systems, Dagstuhl Seminar 17481, Germany, 2017/12/1.

4.4 受賞・表彰

特になし

4.5 学会および社会的活動

[1] SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP18) 実行委員

[2] The International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM) 2023 年大会を早稲田大学に招致成功(日本初)。

[3] 東京都立戸塚高等学校で開催された The 4th Symposium for Women Researchers(2017/11/5)に参加し, ポスター発表を行った。「コンピューターが計算間違い!? 信頼できる数値計算とは」

5. 研究活動の課題と展望

本研究は 2016 年 4 月に発足したプロジェクト研究であり, この 2 年の間に様々な成果をあげた。来年度は, 主に以下の 2 点について研究を進める予定である。

1) 現在, 精度保証付き数値計算が「不可能」とされている, 縮退した固有値(代数的重複度と幾何的重複度が異なる場合)を持つ固有値問題の精度保証法を研究している。数値計算だけでなく, 純粋数学を専門とする有識者を集め, 解決へのアプローチを模索している。

2) 偏微分方程式の解に対する精度保証付き数値計算法は格段に進歩しており, 放物型方程式の解の検証までできるようになってきた。しかし長い時間が経過したときの解を検証しようとするとき厳密解と近似解との誤差が大きくなりすぎてしまう。そのため長時間における解の検証ができなくなる欠点を抱えている。その欠点を取り除く手法を模索中である。

新電磁探査法の研究

研究代表者 斎藤 章
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題 電磁探査技術の海底鉱物資源開発への適用

日本の排他的経済水域内で発見が続く海底熱水鉱床の、実用的な電磁探査装置を開発し、実際の海底資源の調査に使用し、精度や能力を高めることが第一の研究課題である。

2. 主な研究成果

2.1 はじめに

近年相次いで発見されている海底鉱物資源は、輸入に依存している日本の資源供給に新しい可能性を示すものとして注目され、文部科学省、経産省をはじめとする政府機関が中心となって研究が進められている。早稲田大学は平成 21 年度から文部科学省の予算を獲得し、これまで全く未知であった海底での電磁探査技術の研究開発に取り組み、実用性を JOGMEC (独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構) に認められ、沖縄周辺海域を中心として多くの実用レベルの海底調査を実施してきた。

2.2 早稲田式時間領域海底電磁探査装置 (WISTEM) の開発

日本ではあまり知られていないが、海外での陸域での鉱山調査の主流である時間領域の電磁探査法を海底で実施する技術の開発を目指した。これは GPS などが使えず、位置の精度が劣る海底下での物理探査の実施を考え、送受信一体型として、探査精度に極めて重大な影響を及ぼす送受信機間隔を除外するためである。さらに大きなノイズ源でありかつ極めて電導性の高い海底ロボット (ROV, Remotely Operated Vehicle) から、測定装置を離す曳航式の装置が現在までの最も新しい測定システムであり、WISTEM (Waseda Integrated Seafloor TEM) と呼んでいる。一辺が 3.5m の矩形の送信ループを使用し、受信はループや早稲田大学で開発してきた MI (磁気インピーダンス) 磁力計を使用している。Fig.1 に、測定装置を折りたたんで ROV (黄色の浮力体の潜水ロボット) の前部に取り付けた測定装置を示す。Fig.2 に海底に置いた測定装置を示す。実際の測定はこの装置を曳航索で ROV から約 10m 下に吊り下げて海底から 4m 程度のところで曳航する。こうすることで ROV からの 60Hz のノイズや揺れを軽減でき、精度の高い測定に成功している。

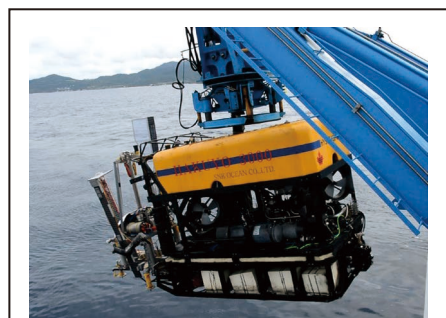


Fig.1 ROV による WISTEM の投入



Fig.2 海底の置かれた WISTEM

海底熱水鉱床地帯は、マウンドやチムニーと呼ばれる特殊な地形が発達し、曳航型測定において海底から 4m を維持するのは困難であるばかりでなく、海底やチムニーへの測定器の衝突という事故も多く、その解決のために ROV にマルチビームソナーを取り付けて前方の地形を確認しながらの曳航を行うことにより、衝突事故を回避できるようになった。ソナーの熱水鉱床域での画像例を Fig.3 に示す。上方の横に線上の画像が送受信ループ（一辺が 3.5m）であり、その上に載っている四角の部分が送受信機やバッテリーなどである。下方の複雑な画像が海底のチムニーなどを表しており、こうしたソナー画像をリアルタイムにモニターしながら調査を進めることで、事故を防いでいる。

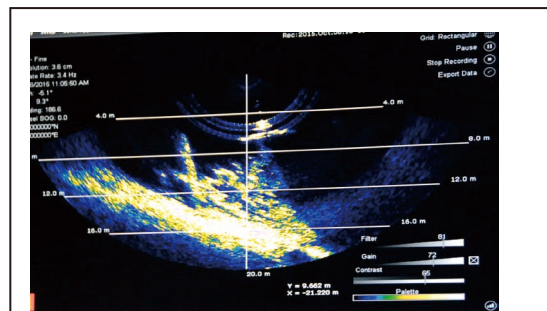


Fig.3 マルチビームソナー画像

2.3 沖縄海域での調査

早稲田大学の WISTEM は、現在も研究開発や改良がおこなわれているが、極めて実用性の高い測定が可能になり、JOGMEC などの依頼で特に沖縄海域で多くの調査を実施してきた。多くの海域で調査を行ってきたが、ここでは経産省などから発表の許可を得た海域について、その論文からの引用で示す。

Fig.4 には、沖縄での調査例を示す。緑の点が海底から 4m の高度で 4 秒ごとに取得したデータ点を示している。海底は SMS（海底硫化鉱物）マウンド以外ではほぼフラットで、図の下部は、海底下の低比抵抗の部分を 3 次元的に示している。マウンドは、硫化鉱のチムニー（熱水の海底での噴出によって、急に低温になったことなどによる円柱上の沈殿物で、時には 30m 以上の高さになる）が崩壊して丘状になったもので、多くは硫化鉱物でできている。我々の調査結果で、2 つのマウンドとその周辺の深さ 20m 程度にわたって低比抵抗の構造が分布していることが分かった。この調査結果は、この後に実施されたボーリング結果とも良い一致が見られる。

Fig.4 沖縄海域での調査例 1

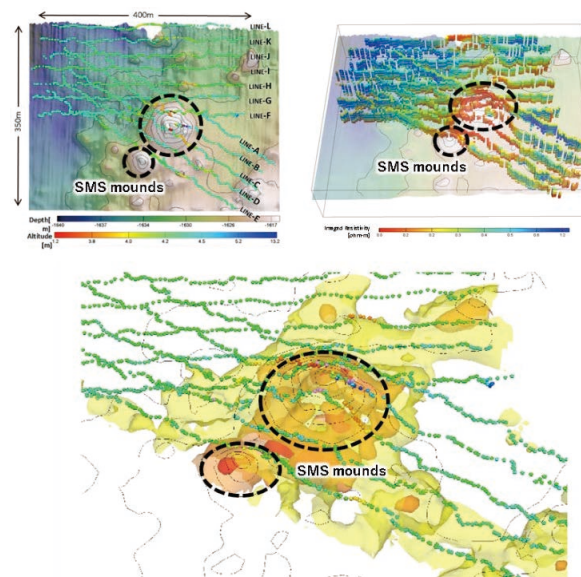


Fig.5 には、沖縄海域の別の場所での調査結果を示す。曳航体の速度 1 ノット、25 測線、95, 105 点の測定を 1.5 日で終えており、効率的な測定が可能になっている。図の黒い線で囲まれた部分は、事前の海底観察、海底からのサンプリングなどで鉱床と考えられていた部分を示し、我々の電磁探査と良い一致が見られる。図の北（上）の部分では黒線で囲まれたところ以外にも低比抵抗（暖色系で示す）が認められている。

WISTEM は、人工磁場の減衰状態から、海底下の電気の流れやすさ（電気伝導度）を測定するが、減衰が終了した後は、事前状態の海底付近の磁場を測定している。従って同じ測定で磁気探査も実施できるのが大きな特徴である。従来からの海底での磁気探査は、AUV（自立航法型潜水装置）を使って、海底から 80m～200m くらいの高度で実施されているが、WISTEM では海底から 4m と、極めて海底に近い部分での調査が可能になっている。3 次元インバージョンプログラムなども開発し、実用的な磁気探査技術についても開発中である。Fig. 6 に従来の高度約 70m で取得されたデータによる調査結果

(Honsho, 2016)を左に、我々の WISTEM による調査結果を右に示す。沖縄の同じ海域での調査結果で、1～6 の位置はボーリングの位置を示す。海底から 4m で、曳航型測定による密なデータであり、WISTEM の優位性は明白である。

Fig.5 沖縄海域での調査例 2

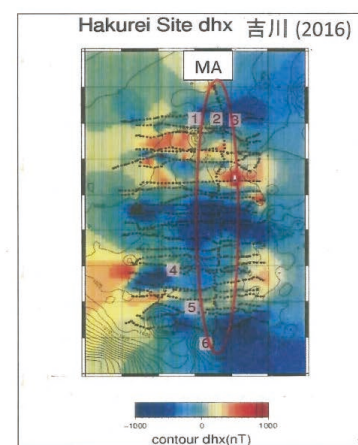
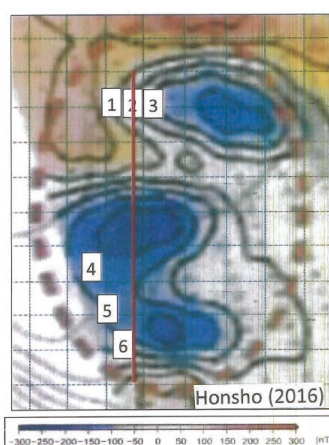
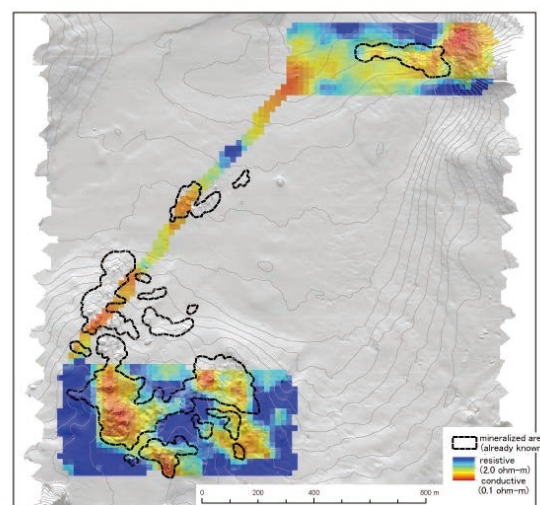


Fig. 6 WISTEM による磁気探査と、従来の技術の比較

2.4 海底 IP 調査技術の研究開発

探査の対象となる鉱石は、ほとんどの場合電氣的に良導体であるが、閃亜鉛鉱のように不良導体であったり、鉱石の胚胎の仕方によって電気が流れにくくなる場合もある。複雑な地形、地質構造を考えて、複数の調査手法を組み合わせることが鉱山調査の基本である。陸域の鉱山調査では、電気の流れやすさ（導電率）の測定に加えて IP 法という技術が普及している。これは金属鉱物に電流を流すと、金属鉱物がイオン化して溶け出し、一種の充電作用を示し、電流遮断後は鉱体がバッテリーとして放電現象を起こすことに着目している。金属鉱物に特有の現象であり、普通の石英などの岩石では生じないため、金属鉱物の存在を示す有力な指標である。海域での IP 法はまだ新しい分野であり、理論的検討や水槽実験なども行って、特に電気の流れやすし環境での IP 法の解明に努めてきた。Fig. 7 に沖縄海域で WISTEM

によってとらえられた IP 現象を示す。コインシデント測定と呼ばれる送受信に同じループを使用する測定では、通常は測定電圧の符号は変

化しないが、IP 効果のある場合は符号が反転することが理論的にも示され、沖縄での測定でも明瞭な符号の反転が認められ（中央のグラフ）、IP 効果と考えられる。今後は IP 効果も含む数値シミュレーションやインバージョン処理技術を開発して、海底 IP 法を確立する必要がある。

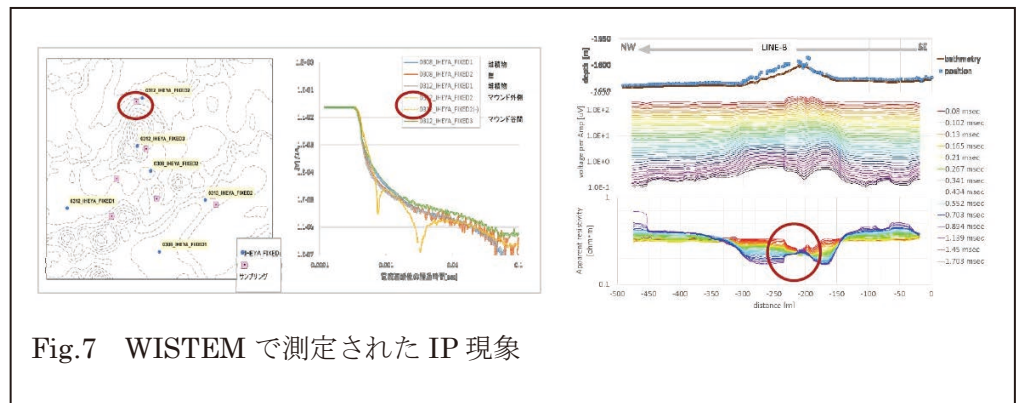


Fig.7 WISTEM で測定された IP 現象

3. 共同研究者

- 斎藤 章 (創造理工学部・環境資源工学科・特任教授)
 徳山 英一 (理工学研究所・客員教授、高知大学特任教授、東大名誉教授)
 中山 圭子 (理工学研究所・招聘研究員)
 羽藤 正実 (理工学研究所・上級研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 斎藤章、中山圭子 (2018)、曳航方式の時間領域海底電磁探査法の開発、海洋調査技術 30(1)、23-27
 中山圭子、斎藤章(2011)、ROV などを用いた時間領域 EM 法，物理探査 64(4)，255-266.
 K.Nakayama, A.Saito(2016), The Seabed TEM Towed by ROV for the Ocean Bottom Hydrothermal Deposits, Near Surface Geoscience, Barcelona, EAGE, DOI:10.397.
 K.Nakayama, A.Saito(2014), Development of new marine TEM systems for the ocean bottom hydrothermal deposits, Denver, SEG 850-854.
 K.Nakayama, A.Saito(2016), Practical Marine TDEM Systems using ROV for the Ocean Bottom Hydrothermal Deposits, Techno Ocean, IEEE, Kobe.
 黒川誠弘、中山圭子、斎藤章 (2015)、海底熱水鉱床を対象とした TDEM 法探査における ROV による影響の除去、物理探査学会第 133 回学術講演会論文集
 高橋 直人、中山 圭子、斎藤 章(2014)、フィードバック回路を用いた広ダイナミックレンジ MI 磁力計の開発、物理探査学会 第 131 回学術講演会論文集
 中村駿佑、中山圭子、斎藤章(2013)、海底熱水鉱床を対象とした電磁探査法における地形の影響の考察、物理探査学会 第 129 回学術講演会論文集
 武田哲明、斎藤章、中山圭子(2012)、時間領域の海底電磁探査装置の開発、物理探査学会第 127 回学術講演会論文集

本居正幸、佐野成哉、木佐貫寛、武田哲明、持地真平、波多野努、安井万奈、中山圭子、齋藤章、山下善弘、佐野康、佐柳敬造、笠谷貴史(2012), ROV を用いた小笠原海域での TDEM 法による海底熱水鉱床の調査, ブルーアース 2013

木佐貫寛、齋藤章、中山圭子(2012)、電磁誘導現象を用いた Square-Array 法の基礎研究、物理探査学会第 127 回学術講演会論文集

真行寺泰輔、齋藤章、中山圭子(2011)、海底熱水鉱床の電気的特性に関する考察、物理探査学会第 124 回学術講演会論文集

山下善弘、東宏幸、田子公一、並木久、齋藤章(2010)、海底資源探査を目的とした Square-Array 電気探査の基礎実験、物理探査学会第 122 回学術講演会論文集

4.2 総説・著書

著書 齋藤 章 (2013), 3. 電磁気、海底鉱物資源の産業利用、シーエムシー出版

総説 齋藤 章 (2015), 海底熱水鉱床の電磁誘導探査技術の実用化、海洋鉱物資源広域探査システム開発シンポジウム
齋藤 章 (2014), 電磁気学的手法を用いた高精度海底下地質構造探査技術の実用化、第 53 回海中海底フォーラム

4.3 招待講演

齋藤 章(2013), 海底電磁探査法の基礎と応用、海洋鉱物資源探査の民間技術移転セミナー

齋藤 章(2011), 海底磁気探査及び電気・電磁探査技術について、第 7 回海洋資源・産業ラウンドテーブル

4.4 受賞・表彰

齋藤 章、物理探査学会功労賞

4.5 学会および社会的活動

齋藤 章 (2014~2017), 海底熱水鉱床の電磁・電気探査技術、講習会講義、国際資源開発研修センター

齋藤 章、日経新聞(2012-6-5)に研究概要の掲載(右図)。



5. 研究活動の課題と展望

9年にわたる研究開発の結果、実用性の高い海底電磁探査装置が開発された。文科省のプロジェクトとしてスタートし、本年度末(2018年3月末)でそのプロジェクトは終了した。極めて実用性が高いというJOGMECの評価を受けて、沖縄海域を中心に調査を続けながら研究開発を進め、現在の曳航型システムに至った。これまでの9年間で獲得した外部資金は6億円弱であり、早稲田大学に多少なりとも貢献できたと自負している。2018年度以降も調査の

依頼がある予定で、さらなる研究開発を進める必要がある。現在までの課題を列举すると、

- ① 測定効率
- ② 調査コスト
- ③ 測定システムの改良
- ④ 解析システムの開発
- ⑤ 調査技術者の養成

などがあげられる。

海域での調査のコストは、ほとんどが傭船費であり、システムのさらなる改良で、効率の良い、短時間で広範囲の測定が可能なシステムに改良してゆく必要がある。現在は1～1.2ノットで曳航しており、さらに高速で曳航できるような装置の形状や安定板、揺れを計測する安価なジャイロの搭載などがまず考えられる。現在はオプティカルジャイロという極めて高価な装置を使用しているが、我々のシステムにはオーバースペックであり、使いやすいジャイロの導入が必要である。ROVを使用するシステムのため、使える調査船が極めて限られてしまう。現在は国のプロジェクトとして運用しているが、基本的に鉱山開発は民間の鉱山会社が実施すべきもので、国としても10年をめどに民間移転を考えている。本システムもみんかん中心で実施できるようなシステムや調査体制を作っていくことが、持続的に早稲田大学の開発したシステムが使われていくために必要と考える。

私（斎藤 章）自身は2018年3月末で定年を迎えた。これまでお世話になった本学の多くの関係各位に心よりの感謝の意を表したい。

ロボティック・センス・オブ・ムーブメント

研究代表者 高西 淳夫
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

2足ヒューマノイドロボットの開発を通して、ヒトの脳機能や運動制御のメカニズムを解明することを本研究の長期的目標とし、災害対応にも利用可能な高い移動能力を持つ超人ロボットの開発を目指し研究を進めている。昨年度までにヒトの走歩行運動を計測・解析・モデル化し、ヒト走行運動モデルに基づいた2足走行ロボット WATHLETE (WAseda aTHLETE)を開発した。今年度はWATHLETEを改良し、実機での走行運動実現に向けた走行運動制御を開発する。また、ヒトの走歩行運動のメカニズムを応用し、極限環境においても自由に動き回ることができるような高い移動能力を持つ災害対応ロボットも開発する。

2. 主な研究成果

2.1 2足走行ロボットの広範囲剛性可変機構

昨年度までに開発した2足走行ロボットは膝関節に剛性可変機構を有していたが、現状の機構では5.0~6.6[m/s]の走行速度に対応した剛性しか実現できていなかった。さらに、剛性を変化させる速度も遅く、単に板ばね全長を長くして剛性範囲を拡大しても跳躍中に剛性変化を完了できないという課題があった。そこで本年度は、人間の走行運動の模倣が可能な2足走行ロボットの開発を目指し、低速走行(2.0[m/s])から高速走行(6.6[m/s])への遷移に対応した膝関節剛性を模倣するために、広い剛性範囲を持ち遊脚期間中に最低剛性から最高剛性まで能動的に変化可能な剛性可変機構を開発した。まず、人体計測に関する先行研究および人体計測データから要求仕様を決定した。そして、CFRP板ばねを弾性要素とし、図1に示すような板ばねの固定点位置を能動的に変化させる方式により広い剛性範囲を実現した。ボールねじと高耐荷重直動ガイドによりこの方式を実現する剛性可変機構を開発した(図2)。その後、剛性範囲とトルク強度、可変速度を確認する実験を行った。実験により、機構が要求仕様に対応した剛性範囲とトルク強度、剛性可変速度(図3)を満たすことを確認した。

2.2 2足走行ロボットの角運動量を考慮した跳躍時体幹制御

人間の走行運動の模倣に向けて、跳躍中の上半身の動きに着目した角運動量制御を開発した。人間の走行時には、跳躍中に腰部姿勢が水平に維持されるといわれており、2足走行ロボットにおいても跳躍中の腰部姿勢を水平に維持することは跳躍から立脚に切り替わる際に同じ条件を維持することになるため、安定した走行に有効であると考えられる。そこで、腰部姿勢を水平に維持することを目標とし、下半身の運動により生じる角運動量を算出し、腰部姿勢のずれに応じて全身の角運動量を制御するよう上半身の運動を決定する角運動量制御を開発した。動力学シミュレーションによる評価実験において、開発した制御を用いることで動作継続時間を延長できることを確認した(図4)。

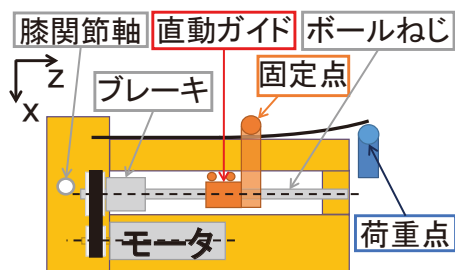


Fig. 1 剛性可変機構の機構図

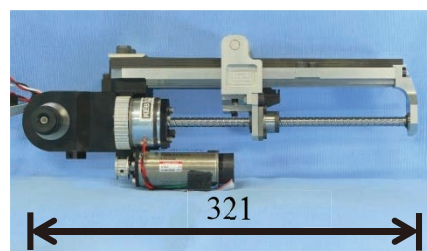


Fig. 2 開発した剛性可変機構

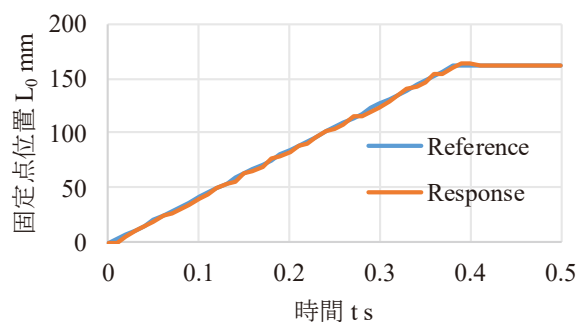


Fig. 3 剛性可変速度の評価実験結果

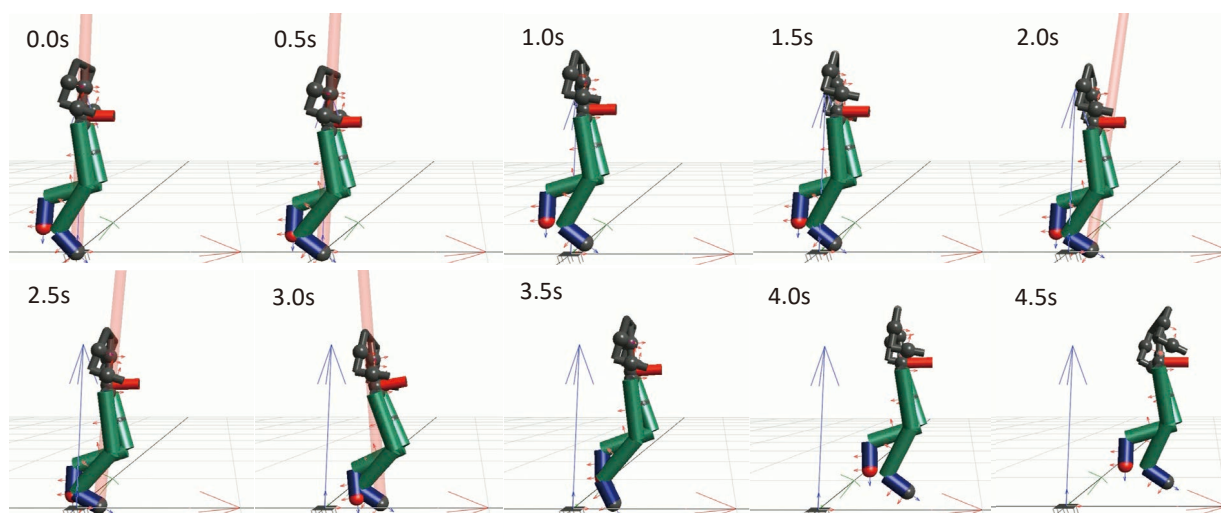


Fig. 4 角運動量制御の効果を検証するため動力学シミュレーション

3. 共同研究者

橋本 健二 (高等研究所 准教授)

Aiman Musa Mohamed Omer (理工学術院 助教)

大谷 拓也 (創造理工学部 総合機械工学科 助手)

林 憲玉 (理工学研究所 客員教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Shunsuke Miyamae, Hiroki Ueta, Akira Natsuhara, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, "Upper-Body

Control and Mechanism of Humanoids to Compensate for Angular Momentum in Yaw Direction based on Human Running,” Applied Sciences, Vol. 8, No. 1, 16 pages, 2018.

4.2 総説・著書

橋本健二，高西淳夫，“ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジにおける脚ロボットの研究開発,” 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 10, pp. 707-710, 2017 年 12 月.

橋本健二，高西淳夫，“極限環境下で移動・作業可能な 4 肢ロボットー電動モータを利用した WAREC-1 の課題と油圧化への期待,” 油空圧技術, Vol. 56, No. 8, pp. 19-22, 2017 年 8 月.

4.3 招待講演

“ヒューマノイドロボット研究と災害対応ロボット,” 日仏会館科学講座 日仏ヒューマノイドロボットとその応用, 日仏会館ホール, 2018 年 1 月 27 日.

“ヒューマノイドにおけるハードウェア技術の研究動向,” ヒューマノイド・ロボットの研究動向と将来展望 (日刊工業新聞社主催), 東京ビッグサイト 会議棟 7F 703 会議室, 2017 年 11 月 29 日.

“力学モデリングを利用した脚ロボットのハード・制御系設計と災害対応ロボット,” 第 6 回 Mathematics for Industry シンポジウム (サイバネットシステム株式会社主催), 秋葉原ダイビル, 2017 年 10 月 18 日.

4.4 受賞・表彰

競基弘学術業績賞, 2018 年 1 月.

4.5 学会および社会的活動

日本 IFToMM 会議 実行委員長

4.6 国内学会における発表

夏原彬，張春宇，大谷拓也，橋本健二，阪口正律，川上泰雄，林憲玉，高西淳夫，“骨盤運動に着目した 2 足走行ロボットの開発 (第 19 報: CFRP 重ね板ばねによる弾性関節機構の小型化),” 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 2543-2547, 宮城県, 2017 年 12 月.

大谷拓也，磯道貴矢，橋本健二，林憲玉，高西淳夫，“骨盤運動に着目した 2 足走行ロボットの開発 (第 18 報: 角運動量を考慮した跳躍時体幹制御),” 第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3L1-06, 埼玉県, 2017 年 9 月.

赤堀孝太，大谷拓也，橋本健二，磯道貴矢，夏原彬，植田大貴，尾原睦月，阪口正律，川上泰雄，林憲玉，高西淳夫，“骨盤運動に着目した 2 足走行ロボットの開発 (第 16 報: 広範囲剛性関節機構のための台形 CFRP 重ね板ばね),” 第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3L1-04, 埼玉県, 2017 年 9 月.

尾原睦月，大谷拓也，橋本健二，磯道貴矢，夏原彬，植田大貴，赤堀孝太，阪口正律，川上泰雄，林憲玉，高西淳夫，“骨盤運動に着目した 2 足走行ロボットの開発 (第 17 報: 低速走行から高速走行への遷移に対応した広範囲剛性可変機構),” 第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2L1-03, 埼玉県, 2017 年 9 月.

5. 研究活動の課題と展望

本年度は，2 足走行ロボットの広範囲剛性可変機構を開発し，角運動量を考慮した跳躍時体幹制御を考案した. 2018 年度は，広範囲剛性可変機構の実機への搭載と，角運動量制御を実機にて検証するとともに，跳躍瞬間の角運動量を低減する立脚時の運動生成法を開発する.

国際宇宙ステーションにおける高エネルギー宇宙線観測 (CALET)

研究代表者 鳥居 祥二
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

宇宙線の研究は、粒子の生成・消滅という素粒子・原子核物理学と、粒子の加速・伝播という宇宙物理学の2つの側面を持っており、観測される宇宙線の組成やスペクトルは両者が複雑にかみあった現象である。そのため、宇宙線の正確な理解のためには、組成やスペクトルの高精度な観測により各々の側面を正確に切り分ける必要があり、地球に降り注ぐ宇宙線を大気の希薄な高い高度で直接捉えることが不可欠である。このような飛翔体を用いた宇宙線の直接観測は、これまでに国内外で様々な装置が考案されて実施されて来た。

本研究では、早稲田大学-JAXA の共同研究として、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム (JEM-EF) において高エネルギー宇宙線観測装置 CALET (Calorimetric Electron Telescope) により、日本初の本格的な宇宙線観測を宇宙空間で実施している。CALET により、従来の直接観測では得られなかった高エネルギー領域での全電子 (電子+陽電子) 成分 (1 GeV-20 TeV) と陽子・原子核成分 (数 10 GeV-PeV)、及びガンマ線 (1 GeV-10 TeV) の観測を高精度で行うことにより、宇宙線物理学の基本的課題である加速・伝播機構について定量的な解明を目指している。さらに、原因がまだ未解明な「陽電子・電子フラックスにおける”過剰”」や「陽子・ヘリウムスペクトルの”硬化”」といった、これまでの観測結果を高精度に検証し、それらの原因を解明することを目指している。宇宙物理学上の最大の謎である暗黒物質や新たな宇宙線加速源 (パルサー風星雲など) などが、それらの原因の有力な候補としてあげられているが、いずれの場合であっても起源が解明されれば宇宙物理学に大きなインパクトを与えることになる。さらに、本研究の主目的である、TeV 領域の全電子観測による近傍加速源 (SNR) の検出ができれば、初めて荷電粒子の加速源を直接的に検証が可能となり、加速と伝播について決定的な理解が得られる。

2. 主な研究成果

CALETは観測開始以来、現時点まで約2.5年にわたって極めて順調な観測が継続的に行われている。主要な観測モードである高エネルギー (>10 GeV) トリガーによる観測は、観測実時間 (live time) の割合が約85%で安定的かつほぼ一定の条件で極めて順調に行われており、これまでの総観測量は6億イベント以上に達している。このような安定的運用に加えて、装置性能の長期変動を定期的に較正することにより、観測の基礎となる軌道上データのエネルギー測定について、(1) 電子エネルギー分解能 (>100 GeV): < 2%、(2) エネルギー測定領域: 1 GeV-1 PeV、(3) エネルギー測定系統誤差: 約1% 等を達成している。

早稲田大学CALET Operations Center (WCOC) において、軌道上の観測データ (L1) からエネルギーなどの較正を行ったデータ (L2) を継続的に作成して、国内外の研究チームと共同してデータ解析を実施することにより、以下の研究実績を挙げている。1) 主要目的である高エネルギー電子 (>10 GeV) 観測では、入射粒子の電子/陽子識別により TeV 領域に及ぶ観測を達成し、論文発表 (PRL2017)

を行なった。2) 陽子・原子核に関しては、入射粒子の電荷決定を $Z=1-40$ において達成し、主要な一次核について100TeV近辺までエネルギースペクトル、B/C比のエネルギー依存性、及び鉄核より重い超重核のフラックスを国際会議(ICRC2017)と日本物理学会等にて発表している。3) ガンマ線観測では、銀河内拡散成分やVela, Crab, Gemingaなどの代表的なソースや変動天体(CTA102)が検出し、解析手法とともに論文を投稿中である。さらに、4) 重力波発生天体における電磁波成分の検出やガンマ線バーストの観測結果についても現在論文を投稿中である。

3. 共同研究者

長谷部信行(理工研/物理学科 教授)

小澤俊介(先進理工学部 物理学科 次席研究員)

浅岡陽一(理工研 次席研究員)

Holger Motz(国際教育センター 助教)

笠原克昌(芝浦工業大学 名誉教授 招聘研究員)

田村忠久(神奈川大学 工学部 教授 招聘研究員)

清水雄輝(神奈川大学 工学部 准教授 招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) "Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", O.Adriani, Y. Asaoka, H.Motz, S. Torii, et al. (CALET Collaboration), Physical Review Letters, 119 (2017) 181101.
- 2) "On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS", Y.Asaoka, S.Ozawa, S.Torii et al. (CALET Collaboration), Astroparticle Physics, 100 (2018) 29-37.
- 3) "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", B.P. Abotto, S.Torii, Y.Asaoka, S.Ozawa, et al., Astrophysical Journal Letters 848, L12, 2017.
- 4) "Decaying Fermionic Dark Matter Search with CALET", S. Bhattacharyya, H.Motz, S.Torii, Y.Asaoka, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017 (2017) 1-19.
- 5) "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October 2015", S.Tori et al., (CALET collaboration), Proceedings of Science (ICRC2917), ID: 1092 (2017) 1-16.

他、国際会議 Proceedings 論文 12 件。

4.2 総説・著書

該当なし。

4.3 招待講演

- 1) "The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the ISS: Preliminary Results from the On-orbit Observation since October 2015", 35th International Cosmic Ray Conference, July 12-20, 2017 (Busan, Korea)
- 2) "Calorimetric Electron Telescope (CALET): Summary of the First Two-Year on Orbit",

International Symposium on Cosmology and Astroparticle Physics (CosPA 2017) December 11-15, 2017 (Kyoto)

3) 「国際協力による高エネルギー電子・ガンマ線観測 (CALET)」, ISS 利用 NASA-JAXA ジョイントワークショップ、丸の内オアゾ フクラシア Hall A、2018 年 1 月 24, 25 日

4.4 受賞・表彰

該当なし。

4.5 学会および社会的活動

1) 理工学術院総合研究所講演会 「加速器と先端計測を駆使して宇宙の謎を探る」

2017 年 6 月 20 日 早稲田大学国際会議場井深大記念ホール

CALET で宇宙を見る -国際宇宙ステーション「きぼう」での宇宙線観測-

5. 研究活動の課題と展望

CALET による観測はすでに 2.5 年を経過して、今後 JAXA との共同研究として 2020 年までの観測が予定されている。観測の主要目的である TeV 領域での電子観測による暗黒物質及び近傍加速源の探索が実施されており、現在すでに初期的な 3TeV までの観測結果について論文発表を行っている。その他のガンマ線、陽子・原子核観測の結果についても数ヶ月内に論文発表が予定されている。宇宙科学観測として大変難しい課題である長期間に亘る安定的な軌道上運用が実現されており、WCOC における 24 時間体制による運用モニターや国際共同研究によるデータ解析も順調に実施されている。このため、2018 年度内には観測全般に関わる成果を国内外で公表するとともに、主要な雑誌に発表を予定している。今後の課題としては、鳥居が代表者として早稲田大学を中心に実施している JAXA との共同研究体制を維持しながら、研究継続を実現することにより所期の観測目的を達成することにある。

サステイナブル・デザインプロセス研究

研究代表者 高口 洋人
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

建築や都市設計の分野では、新築や既築を含め、大幅な省エネルギーや創エネルギー、資源循環的取組など、持続可能な社会形成に向けた取組みが強く求められている。このような課題の解決には技術者だけではなく、行政関係者や金融、不動産市場関係者なども含め、多様なステイクホルダーの協力が不可欠であるが、これらのコミュニケーションの場の設置方法や合意形成を円滑に行うデザインプロセス論は甚だ未成熟な状況にある。また、建物所有者が所有する建築物の性能向上に取り組むにたいと思う動機には、行政の規制や市場の要請といった、社会的経済的要因が強く作用するが、その相互作用や社会をどのように変えていくのかといった時間軸を持たせた社会変容管理の理解は十分ではない。

本研究の目的は、持続可能な社会を実現するために、より環境性能の高い建物を社会に普及させるためのソーシャルデザイン手法を完成することにある。ソーシャルデザイン手法は多様なステイクホルダーの協働による、より質の高いデザインを実現するデザインプロセス管理と、その建物を普及させるためのトランジション管理の開発に分けられるが、それぞれを追求しながらも最終的には統合した手法構築を目指す。

2. 主な研究成果

2.1. アジアにおけるエネルギー消費量データベース (BELDA) の構築

本年度は、2015 年度から始まった環境省環境研究総合推進費「アジアの民生用エネルギー需要構造と将来予測に関するプラットフォーム構築」の最終年度に当たり、そのとりまとめと情報発信に努めた。

BELDA (Building Energy use and Lifestyle Database of Asia) はタイ、ベトナム、カンボジアを中心とする東南アジアにおける民生部門のエネルギー消費実態及びその住まい手に関するデータベースである。民生家庭分野における二酸化炭素排出量を削減するためのシナリオと、発展段階に応じた段階的方策の効果検証ができるプラットフォームすべく開発を行った。

2 ヶ年にわたり、カンボジア、タイ、ベトナムの 3 カ国における中核都市及び都市近郊地域の約 1600 世帯を対象に、世帯属性、住宅属性、家電製品の保有状況・使用状況、エネルギー消費量、ライフスタイルなどの 7 つの大項目及び 38 つの小項目についてアンケート調査を実施した。調査結果によると、タイやベトナムの都市部の電気消費量 (照明・コンセント、冷房、調理用消費) は日本とほぼ等しく、多くの先進国と同等、あるいはそれ以上の水準に達していることがわかる。また、東南アジアは共働きが多く屋台などでの外食が多いといわれているが、世帯員数が多いこと、日中の在宅率が高いことから調理の習慣が根強く残っている。そのため、調理用 LP ガス消費量も多い。冷水シャワーを 2 回程度浴びるのが一般的で

あり、温水シャワーはハノイ等の冬期を除き、ほとんど使用されていない。また、バンコクの場合は、健康意識、政治への関心・満足、省エネ意識が一定以上に高くなることにつれ、エネルギー消費量が少ない傾向が見られた。ハノイとホーチミンでは、室内温熱環境・換気・日当たりなど現住まいへの満足度が高くなることにつれエネルギー消費量が減少する傾向が現れており、ベトナムの両地域では、住環境を改善することにより、住民の健康を保つことができ、また生活の質を低減させず省エネに繋がる可能性があることがわかった。

これらの成果は、誰もがアクセス可能で活用できるデータベースにするため、Cloud 上で構築した。まず BELDA 専用 HP を構築した。BELDA には本研究で実施したエネルギー消費実態調査と同様のアンケート回答機能を盛り込んでいる。さらに充実させることが可能な仕様とした。

2.2. 熊野市における林業・林産業の垂直・水平協業に関する調査

熊野材利用推進協議会とは 2013 年度から早稲田大学の社会連携事業として協業を行ってきたが、2017 年度からは共同研究に切り換え研究を行っている。熊野市においても、他の林産地域と同様、戦後に植林された大量の人工林（スギ・ヒノキ）が伐期を迎えようとしている。国としても木材の利用促進に様々な支援を行っているが、建築需要が伸び悩む中で供給が増えれば価格が低迷するのは市場の自然の流れで、かえって林業の疲弊を招いている。

共同研究の目的は、熊野市における林業・林産業と他産業の連携、ならびに熊野地域の持つポテンシャルを活かしたまちづくりによって「木のまち熊野」を表現することである。社会連携事業時にまとめたまちづくりのアイデアを社会に実装し、運営していくための方法論をまとめた。2017 年度は以下の 5 つの活動を行った。

(1) オール熊野世界 No.1 フェスティバルへの出展

地域のイベントである「オール熊野世界 No.1 フェスティバル」に参加し、地域の若手林産業関係者と共同で子供向けの木工イベントを主催した。

(2) 「木のまち」熊野ベンチプロジェクトの現状調査

熊野古道トレッカー向けの休息場所として、沿道に熊野材を使用したベンチをデザインしている。すでにベンチが設置してある場所及び設置可能な場所の調査を行い、ベンチMAPとして整理した。

(3) 空き家改修プロジェクトの実測調査

中心市街地にある空き家を対象に、木材を多用した改修を目指してフィールド調査を実施した。

(4) 熊野サミット 2017 の開催

熊野地域で活動している大学や団体の情報交換を目的とし、合同報告会を 2016 年度より開催している。2017 年度も三重大学や近畿大学ともの合同報告会を開催し、現地関係者など合計 110 名が参加して意見交換を行った。

(5) ふるさと納税の返礼品の検討

熊野材利用による地域活性化を目指すという観点から、林産業関係のふるさと納税の返礼品の検討を行った。

3. 研究業績

3.1 学術論文

Mohammed Abdalmajeed, Takaguchi Hiroto, STUDY OF KHARTOUM SINGLE FLOOR HOUSE LAYOUTS USING GOOGLE SATELLITE HIGH RESOLUTION IMAGES, *Journal of Environmental Engineering, AIJ*, 83, 744, 205-213, 2018.2

角尾 怜美, 島村 知弥, 中川 純, 小林 恵吾, 田辺 新一, 高口 洋人, 浅野 寛人, 池川 隼人, 伊原 さくら, 小松 昇平, 丸山 賢人, 三好 諒, 万木 景太, 若山 麻衣, エネマネハウス 2015 における『ワセダライブハウス』の提案と実証, *日本建築学会技術報告集*, 54, 545-550, 2017.6

木原 己人, 伊原 さくら, 谷葉 留佳, 高口 洋人, 新虎通りにおける CVM を用いた街路樹事業の費用便益分析, *日本建築学会技術報告集*, 54, 687-692, 2017.6

角尾 怜美, 清瀬 英人, 高口 洋人, 外断熱改修のための不燃外断熱システムの開発, *日本建築学会技術報告集*, 56, 281-286, 2018.2

張田 谷 凌央, 西村 響, 謝 慧珊, 高口 洋人, 高島平地区におけるゼロエネルギー街区の形成に関する研究, *日本建築学会関東支部研究報告集*, 88, 169-172, 2018.3

清水 卓哉, 謝 慧珊, 松本 知華, 高口 洋人, プノンペンのタウンハウスにおける空気汚染の実態調査と屋内空気質の改善提案, *日本建築学会関東支部研究報告集*, 88, 207-210, 2018.3

内田 瑞生, 矢口 彰久, 馬場 芳樹, 高口 洋人, マルチエージェントシステムを用いた立地適正化計画の最適化手法, *日本建築学会関東支部研究報告集*, 88, 403-406, 2018.3

沖汐 友弥, 島村 知弥, 清瀬 英人, 高口 洋人, 集合住宅 ZEH の普及による東京都の CO₂ 排出量将来予測 その 1 集合住宅 ZEH 達成のための環境性能パラメトリック・スタディ, *日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II*, 87-88, 2017.8

島村 知弥, 沖汐 友弥, 清瀬 英人, 高口 洋人, 集合住宅 ZEH の普及による東京都の CO₂ 排出量将来予測 その 2 集合住宅 ZEH 普及による東京都の CO 排出量削減効果の検証, *日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II*, 89-90, 2017.8

曹 未偉, 角尾 怜美, 島村 知弥, 清瀬 英人, 高口 洋人, タウンハウス型集合住宅の温熱環境実測とその評価, *日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II*, 547-548, 2017.8

3.2 総説・著書

ゼロ・エネルギーハウス—新しい環境住宅のデザイン、共著、萌文社、2017.11

3.3 招待講演

関東学院大学 国際交流シンポジウム 講演 蒸暑アジアの建築デザインと生活、2017.11.10

3.4 受賞・表彰

内田 瑞生 第 18 回 MAS コンペティション優秀賞（主催：株式会社構造計画研究所）、マルチエージェントシステムを用いた立地適正化計画の最適化手法、2018.3

4. 研究活動の課題と展望

2018 年度はプロジェクト研究二期目の最終年度となることから一層のアウトプットに務めたい。現在、Elsevier から研究成果の一部を活かした出版を予定しており、その刊行を目指す。

次世代ヒートポンプ技術に関する研究

研究代表者 齋藤 潔

(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 研究課題

省エネルギー性が極めて高いヒートポンプのさらなる高効率化, 利用拡大を実現することは, 省エネルギー社会構築のために重要である. 本研究では, このヒートポンプ内で生じる気液二相流現象の解明からシステム全体の制御までを統合的に捉えることで, 従来とは異なるアプローチでのシステムの高性能化, 高効率化の実現を目指す. 本年度は, 次世代ヒートポンプの冷媒の有力な候補である混合冷媒の熱物性の計測, ヒートポンプシステムの制御特性の検討, 水平円管内を流れる気液二相流現象の解明に関する検討を行った. 以下に, それぞれの成果について報告する.

2. 主な研究成果

2.1 冷媒の物性計測と状態方程式の作成

ヒートポンプの作動媒体である冷媒の熱物性は, ヒートポンプの性能・特性を決定する本質的な要因の一つである. 現在, 次世代のヒートポンプに向けて, 様々な冷媒が提案されているものの, それぞれ一長一短があり, また, 異なる冷媒を使用した場合のヒートポンプシステムの性能の違いを公平な条件で企画する手法も確立されていないのが現状である. 本研究では, これらの検討を行う上で基盤となる, 冷媒の熱物性, 特に PVTx 性質の測定を行い, それによって得られたデータをもとに状態方程式の作成することを目的とした. 対象とした冷媒は, HC 系冷媒である R600a と HFC 系冷媒である R134a を混合したものである.

Fig. 1 に, 組成比別の測定結果を示す. この結果は, 温度と圧力の関係を, 等密度線に沿って計測したものである. これにより, これまで理論的な混合側でしか示せなかった対象混合冷媒の PVTx 性質を計測によって明らかにすることができた. これらの基礎的なデータは, 次世代ヒートポンプに関するさまざまな検討において基盤情報となるといえる.

2.2 ヒートポンプの非定常特性評の解明

これまで, ヒートポンプの性能評価は, 主に定常状態で行われてきた. しかし, 実際にヒートポンプが設置される状況においては, 定常状態とみなせる場合は少なく, かなり多くの時間を非定常状態が占められているのが現状である. 本研究では, このような現状に注目し, ヒートポンプの非定常状態の特性把握が, 実負荷環境において性能を発揮する制御検討を行う上で必要不可欠であると考えた. そこで, 数年をかけてヒートポンプの非定常特性評価を行うための試験装置の構築をしてきた.

具体的には, Fig. 2(1)に示すように, 熱交換器から排出された室内への供給する空気の水湿度の変動をセンシングし, PC により任意の仮想的な室内負荷変動を演算し, 負荷装置を制御して室内からの戻り空気を作り, 再び熱交換器に戻す仕組みを構築した. これにより, PC 上に仮想的な部屋やその負荷変動を入力することで, あたかも任意の部屋がそこにあるかのように, ヒートポンプの非

定常特性を知ることができるというものである。

本年度は、ヒートポンプの圧縮機の回転数がステップ上に上昇した場合に、ヒートポンプと、一次遅れ系の温度特性を持つ部屋からなる系の時間応答を調べた。結果として、Fig. 2(3) (黒線：PCでの演算結果、赤線：負荷装置によって作られた空気状態)を見ると、室内戻り空気をよく再現できていることが分かる。その他の様々な条件での実験も行い、本装置の有効性を確認できたといえる。

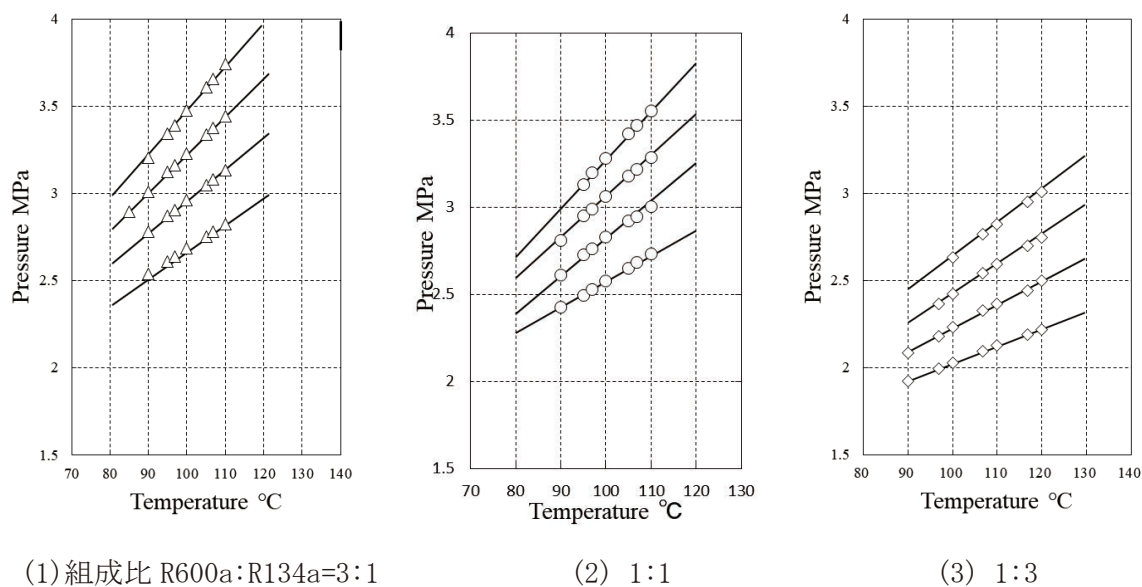


Fig. 1 R600a と R134a の混合冷媒の PVTx 性質測定結果

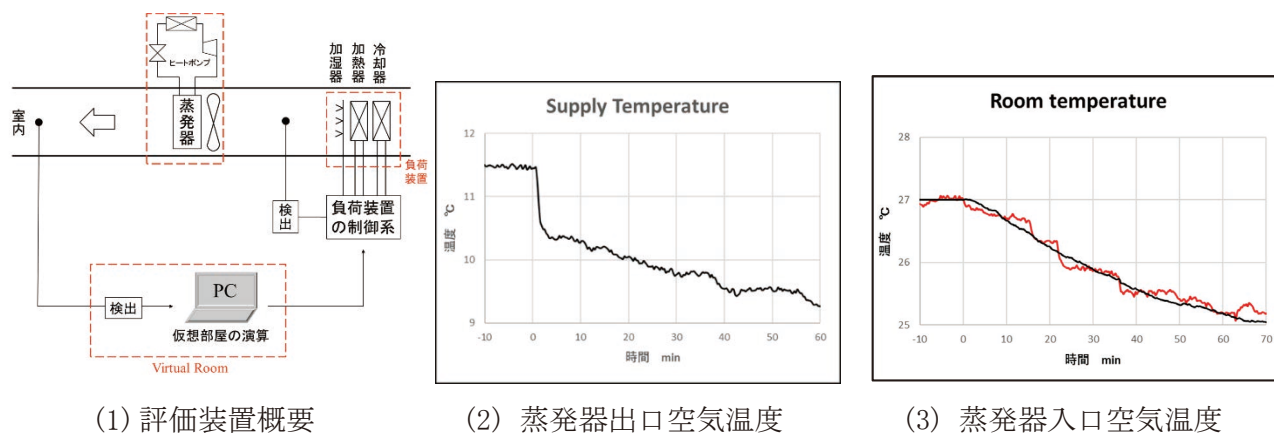


Fig. 2 試験装置概略と非定常特性評価試験の結果例

2.3 気液二相流の相分離現象の解明

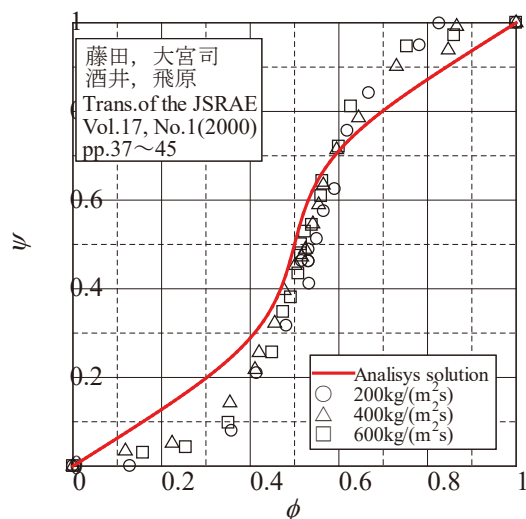
ヒートポンプの内部においては、気液二相流の相分離、分流、分配などがいたるところで見られる。また、これらの現象は、熱交換器の性能やシステム全体の性能、さらにはその制御特性に大きな影響を与えることが分かっている。本年度は、理論的検討として、一般的な分岐管路（2分岐）

を対象に、流体の管摩擦による散逸エネルギーが最小となるように分流、相分離が起こる、との仮定の下で、いくつかの仮定を設けることで、相分離特性を表す解析解を算出した。

昨年までに取得した分岐部の可視化画像と解析結果と実験データを Fig. 3 に示す。解析結果と実験結果の比較（2）を見ると、全体としてよく一致していることが分かる。一部若干乖離があるのは、本解析において、気液速度が同じである均質流の仮定を設けているからであり、実際には気液速度比が大きくなる点において差が表れたと推定される。



(1) 相分離現象の可視化画像



(2) 相分離特性解析解と実験閣下との比較

3. 共同研究者

山口 誠一（基幹理工学部 機械科学・航空学科 准教授（任期付））

ニコロ ジャンネッティ（基幹理工学部 機械科学・航空学科 講師（任期付））

井上 修行（理工学研究所 招聘研究員）

鄭 宗秀（理工学研究所 客員准教授）

粥川 洋平（理工学術院 客員准教授）

東條 健司（理工学研究所 招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文（Journal papers）

[1] Research Paper with peer review: N. Giannetti, A. Rocchetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Analytical solution of film mass-transfer on a partially wetted absorber tube”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 118, pp. 176-186, August 2017

[2] Research Paper with peer review: A. Lubis, N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, N. Inoue, “Experimental performance of a double-lift absorption heat transformer for manufacturing-process steam generation”, Energy Conversion and Management, Vol. 148, pp. 267-278, September 2017

[3] Research Paper with peer review: N. Giannetti, A. Milazzo, A. Rocchetti, K. Saito, “Cascade refrigeration system with inverse Brayton cycle on the cold side”, Applied Thermal Engineering, Vol. 127, pp. 986-995, December 2017

- [4] Research Paper with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Annular flow stability within small-sized channels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 1153-1162, January 2018
- [5] Research Paper with peer review: J. Jeong, A. Lubis, K. Saito, S. Karng, S. Kim, K. Kim, “Start-up behaviour of a combined air-conditioning system in cooling and heating operating modes”, *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 1346–1357, January 2018

4.2 発表（国際）(International conferences)

- [1] International Meeting Plenary Lecture: K. Saito, “Latest R&D of Heat Pump Technologies”, ERDT / AESEAP / ICSEE JOINT CONFERENCE 2017, Cebu, Philippines, October 18th-20th 2017
- [2] International Meeting with peer review: R.J. Varela, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “ Numerical Simulation of a Transcritical CO₂ Heat Pump under Intermittent Operation for Energy Savings in Vending Machine”, ERDT / AESEAP / ICSEE JOINT CONFERENCE 2017, Cebu, Philippines, October 18th-20th 2017
- [3] International Meeting with peer review: N. Giannetti, A. Milazzo, A. Rocchetti, K. Saito, “Thermodynamic modelling of humid-air expansion within an R717/R729 cascade refrigeration system for cold store applications”, 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, South Korea, April 23rd–26th 2017
- [4] International Meeting with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Numerical simulation of Marangoni convection within absorptive aqueous Li-Br”, 2017 International Sorption Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, August 7th–10th 2017
- [5] International Meeting with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Simplified expressions of the transfer coefficients on a partially wet absorber tube”, 2017 International Sorption Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, August 7th–10th 2017
- [6] International Meeting with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Numerical simulation of Marangoni convection within horizontal tube falling film absorbers”, 28th International Symposium on Transport Phenomena, University of Peradeniya, Sri Lanka, September 22th-24th 2017
- [7] International Meeting with peer review: A. Lubis, J. Jeong, K. Saito, H. Yabase, “Effect of solar energy on high operation performance of single-double-effect absorption chiller”, International Sorption Heat Pump Conference 2017, Tokyo, Japan, August 7th -10th 2017
- [8] International Meeting with peer review: R.J. Varela, S. Yamaguchi, N. Giannetti, K. Saito, M. Harada, H. Miyauchi, “Correlations for the Heat and Mass Transfer Coefficients in a Structured Packed Bed Regenerator”, International Sorption Heat Pump Conference 2017, Tokyo, Japan, August 7th -10th 2017
- [9] International Meeting with peer review: A. Lubis, J. Jeong, K. Saito, H. Yabase, M.I. Alhamid, Nasruddin, “Single-double-effect absorption chiller performance by adjusting the combination of the solution mass flow rates”, 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, South Korea, April 23rd – 26th 2017
- [10] International Meeting with peer review: M.A. Redo, N. Giannetti, J. Jeong, K. Enoki, I. Ota, K. Saito, H. Kim, “Experiment and Visualization of R410A Flow Distribution within the Vertical Header of Microchannel Heat Exchanger”, 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, South Korea, April 23rd – 26th 2017

[11] International Meeting with peer review: M.A. Redo, M. Berana, K. Saito, “Ejector Refrigeration System Driven by Renewable Energy and Waste Heat”, 12th Int. Energy Agency Heat Pump Conference 2017, Rotterdam, Netherlands, May 15th -18th 2017

4.2 発表（国内）（Domestic conferences）

[1] National Meeting: 齋藤 潔, “基調講演：シミュレーションによるエネルギー利用システムの技術開発革新”, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館, April 19th-21st 2017

[2] National Meeting: 奥村健太、大野慶祐、山口誠一、齋藤潔、宇田川陽介、二渡直樹、木幡悠士, “ガスインジェクション圧縮式ヒートポンプの制御特性に関する研究”, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館, April 19th-21st 2017

[3] National Meeting: 八橋元、山口誠一、齋藤潔、蓮池宏、坂本隼人、松本悟、原田政利, “液式デシカントと水冷媒ヒートポンプの組み合わせによる高効率空調システムの開発(第 1 報)”, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館, April 19th-21st 2017

[4] National Meeting: レド マーク, ジャンネッティ ニコロ, 鄭 宗秀, 榎木 光治, 太田 育秀, 齋藤 潔, 金 鉉永, “マイ クロチャンネル垂直ヘッダーにおける R410A の二相流分配特性” (Two-phase flow distribution of R410A within the vertical header of a microchannel heat exchanger), 第 27 回 環境工学総合シンポジウム, 静岡県浜松市, Japan, July 10th -12th 2017

[5] National Meeting: Arnas , J. Jeong , H. Yabase , K. Saito, “一重二重吸収式冷凍機の溶液流量と溶液分配比制御による高効率化” (Performance improvement of single-double-effect absorption chiller by solution mass flow rate and distribution ratio controls), 第 27 回 環境工学総合シンポジウム, 静岡県浜松市, Japan, July 10th -12th 2017

[6] National Meeting: ジャンネッティ ニコロ, 山口 誠一, 齋藤 潔, “流下液膜式吸収器の熱・物物質移動係 数に関する解析的検討” (Simple expressions of the heat and mass transfer coefficients for horizontal-tube falling film absorbers), 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[7] National Meeting: 乾 はなこ, ジャンネッティ ニコロ, 山口 誠一, 齋藤 潔, “フィンチューブ接触器に おける流下液膜の濡れ性の解明” (Wetting Characteristics of falling films on a fin-tube contactor), 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[8] National Meeting: M.A. Redo, N. Giannetti, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “Annual Performance Evaluation of Refrigerated Display Cabinets”, 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[9] National Meeting: 岩崎 伸亮, 大野 慶祐, 山口 誠一, 齋藤 潔, 中山 浩, “着霜を伴うヒートポンプシステムの 部分負荷特性に関する研究”, 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[10] National Meeting: 野村 貴大, 太田 育秀, 山口 誠一, 齋藤 潔, “開放型冷凍冷蔵ショーケース におけるエアカーテンの 熱侵入特性の把握”, 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[11] National Meeting: M.A. Redo, N. Giannetti, J. Jeong, K. Enoki, I. Ota , S. Yamaguchi, K. Saito, H. Kim, “マイクロチャンネル熱交換器の垂直ヘッダーに おける広範囲流量分配特性” (Two-phase Flow Distribution at Wider Flow Range within the Vertical Header of Microchannel Heat Exchanger), 2017 年度

日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

5. 研究活動の課題と展望

今後の展望としては、これまでに得られている、気液二相流現象、デバイスの特性、システムの非定常特性などの知見を融合し、これまでの評価基準ではなく、より実負荷環境に即したシステムの評価・設計・制御を行っていく予定である。特に、システム制御においては、これまで経験的・試行錯誤的に決定されていた部分の一般理論化を試みる。また同時に、現代制御、さらには AI のシステム制御への適用も行っていく。

計算科学による原子炉過酷事故メカニズムの解明と安全性の向上研究

研究代表者 山路 哲史
(先進理工学研究科 共同原子力専攻 准教授)

1. 研究課題

原子力発電に対する信頼を取り戻すためには着実に福島原子力発電所の廃炉を進める必要がある。このため、福島事故進展解析および他の研究開発の成果、事故時の圧力・温度等の測定データの分析、現場から得られた情報からの推定を実施し、これらの情報を俯瞰的に統合することで、炉内状況の総合的に把握に資することが求められている。一方で、同様な事故を繰り返さぬよう、原子力発電（特に軽水炉発電）の安全性を向上させる必要がある。本研究の目的は最先端の計算科学技術を駆使・発展させ、原子炉過酷事故メカニズムを解明し（理解の深化を図り）、万が一の事故時における原子力発電所のより一層の安全性を確保することである。そのために、以下を実施する：

- (1) 原子炉過酷事故解析プログラム（SA 解析コード）による炉心崩壊過程の感度解析により福島の実機プラントデータとの整合性を評価し、炉心崩壊メカニズムの理解を深め、福島各号機の炉内状況の把握に関わる不確かさを低減する。
- (2) 伝熱・流動・相変化を機構論的にモデル化できる MPS 法（粒子法的一种）により、そもそもの原理・基本現象の理解に戻り、原子炉過酷事故メカニズムを解明し、SA 解析コードの高度化に資する知見を得る。
- (3) 炉心冷却機能喪失時の炉心崩壊までの裕度（grace time）を向上する事故耐性燃料（Accident Tolerant Fuel: ATF）の候補を軽水炉燃料ふるまい解析により検討し、実機導入に向けた課題を明らかにする。

2. 主な研究成果

原子炉過酷事故解析コード（MELCOR）を用いて得られた福島第一原子力発電所 2 号機（1F2）の原子炉圧力容器（RPV）圧力と原子炉格納容器圧力（PCV）の推移を図 1 に示す。解析結果とプラントデータの差は主に、MELCOR-2.2 の炉心崩壊モデルの特性上、炉心部の熱がガス透過に伴い過大に輸送されている（溶融プールが形成されない）ことに起因していると考えられる。

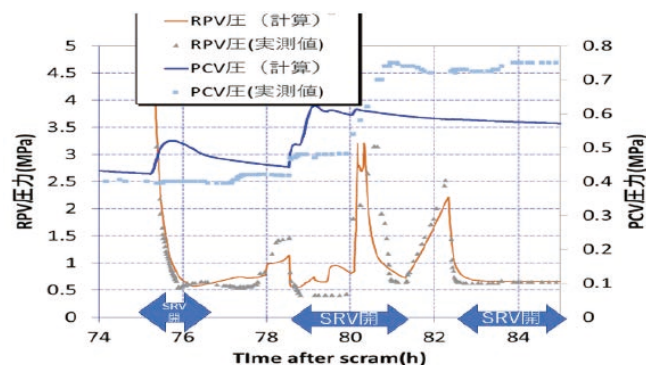


図 1：RPV・PCV 圧力のプラントデータと計算値

溶融物を計算点（粒子）で離散化するラグランジュ法に基づく MPS 法を改良し、空間に計算メッシュを固定する従来のオイラー法に基づくシミュレーションでは困難であった溶融物中の液相と表面に形成されるクラスト相の相互作用を機構論的にモデル化した解析により、仏国で実施された VULCANO VE-U7 実験データを精度よく予測することに成功した。改良 MPS 法による同実験の溶融物 spreading 予測結果と、spreading 停止時の様子を図 2 に示す。また、MPS 法の将来の抜本的な解析精度向上に向けた周期渦列の崩壊過程のベンチマーク解析により、前年度に提案した新アルゴリズムの妥当性を示した。

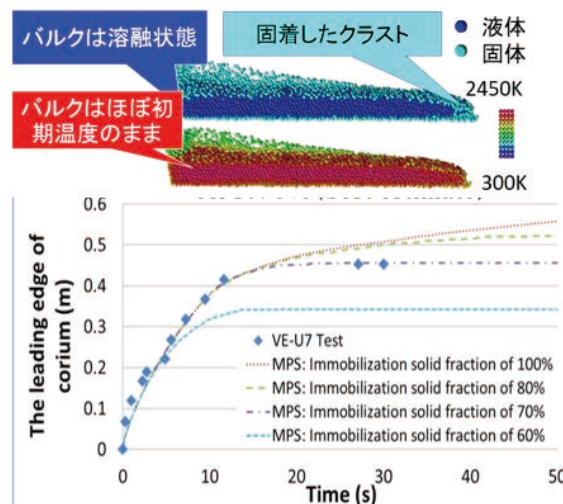


図2：改良MPS法による溶融物spreading予測結果と停止時の様子

事故耐性燃料の候補被覆管のノルウェーHalden 炉での照射計画に資するために、Halden 炉照射試験において、FeCrAl-ODS 鋼被覆燃料の仕様や照射条件が燃料ふるまいに及ぼす影響を、燃料ふるまい解析コード FEMAXI-7 を用いて予測解析した。ODS 被覆燃料ふるまいの要点は、燃料ペレットと被覆管の間のギャップ熱伝達及び、被覆管のクリープ変形の正確な予測である。そこで、解析により、これらの影響は以下のケースの比較によりとらえられることを示した：

- 設計ターゲット相当ケース（基準ケース）
- 被覆管クリープダウンケース（ギャップ熱伝達検証を含む）
- 高ペレット-被覆管機械的相互作用（PCMI）ケース（ギャップ熱伝達検証を含む）

これらにより、限られた照射条件下で新被覆管を用いる燃料のふるまいの特徴を示すデータを得る方法を明らかにした。

3. 共同研究者

松本 潔（理工学術院・総合研究所・次席研究員）

ドゥアン グアンタオ（理工学術院・総合研究所・次席研究員）

柴田 良弘（理工学術院・数学科・教授）

鈴木 幸人（理工学術院・数学科・主任研究員）

及川 一誠（理工学術院・数学科・次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) Y. Yasumura, A. Yamaji, M. Furuya, Y. Ohishi, G. Duan, "Investigation on influence of crust formation on VULCANO VE-U7 corium spreading with MPS method", Annals of

Nuclear Energy Vol107(2017) 119-127

- (2) X. Li, A. Yamaji, "Three-dimensional numerical study on the mechanism of anisotropic MCCI by improved MPS method", Nuclear Engineering and design Volume 314, 1 April 2017, Pages 207-216
- (3) Y. Suzuki "Bracket formulations and energy-and helicity-preserving numerical methods for incompressible two-phase flows," Journal of Computational Physics 356(2018)64–97.

4.2 学会および社会的活動

- (1) K. Sakamoto, M. Hirai, S. Ukai, A. Kimura, A. Yamaji, K. Kusagaya, T. Kondo, S. Yamashita, "Overview of Japanese Development of Accident Tolerant FeCrAl-ODS Fuel Claddings for BWRs," 2017 Water Reactor Fuel Performance Meeting September 10 (Sun) ~ 14 (Thu), 2017 Ramada Plaza Jeju, Jeju Island, Korea.
- (2) A. Yamaji, D. Yamasaki, T. Okada, K. Sakamoto, S. Yamashita "FEMAXI-7 Prediction of the Behavior of BWR-Type Accident Tolerant Fuel Rod with FeCrAl-ODS Steel Cladding in Normal Condition," 2017 Water Reactor Fuel Performance Meeting September 10 (Sun) ~ 14 (Thu), 2017 Ramada Plaza Jeju, Jeju Island, Korea.
- (3) T. Noju, A. Yamaji, K. Matsumoto, X. Li "Sensitivity Study of Accident Scenarios on MCCI for Fukushima Daiichi Unit-1 by MELCOR," Proceedings of ICAPP 2017 April 24-28, 2017 - Fukui and Kyoto, Japan.
- (4) 山路哲史, "MPS 法による原子炉過酷事故時の溶融物挙動解析の必要性と課題", Prometech Simulation Conference 2017, 2017/9/8, 招待講演
- (5) 坂本 寛, 平井 睦, 鶴飼 重治, 木村 晃彦, 山路 哲史, 草ヶ谷 和幸, 近藤 貴夫, 井岡 郁夫, 山下 真一郎, 加治 芳行 "安全性向上に資する新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた研究開発", 日本原子力学会 2017年秋の大会, 2017/9/15, 講演番号 3M02
- (6) 山路 哲史, 古谷 正裕, 大石 佑治, 段 広濤 "Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化", 日本原子力学会 2017年秋の大会, 2017/9/15, 講演番号 3F05
- (7) 山路 哲史, 古谷 正裕, 大石 佑治, 段 広濤, "Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化 (2) 全体概要と MPS 法による Spreading 解析の高度化," 講演番号 3J08, 日本原子力学会 2018年春の年会, 2018/3/26-28

5. 研究活動の課題と展望

福島第一原子力発電所の各号機の事故当時のプラントデータと整合するシナリオの解析により、事故当時に放出された溶融燃料の状態を推定し、現在の炉内状況の推定に資することができる。但し、MELCOR コード等の過酷事故解析コードの解析により導出されるシナリオが唯一のシナリオとは言えない。計算結果と測定データが一致した／しなかったときに、どこまで物理現象に立ち戻って議論できるかが重要な課題となる。その上で、現実的な計算コストで巨大な発電システムの事故進展を予測するために、どのようにモデルを簡素化できるかを異なる分野の専門家で認識共有して、協力して取り組む必要がある。

流動に伴う自由界面の変化をラグランジュ法に基づいて離散化する MPS 法（粒子法）は自由界面の機構論的な追跡に加え、流体の熱物性の正確な追跡と物性およびエンタルピーの変化に基づく固液相変化モデルにより、伝熱・流動・相変化を機構論的にモデル化することが可能であり、上述の

物理現象に立ち戻った計算結果と測定データの相違の議論を可能にする。本研究の成果により、例えば大規模シミュレーションにより、MPS 法を用いて実機の溶融物挙動の推定が可能になると考えられる。あるいは、より現実的な計算コストで実機の溶融物挙動を推定するために、既存の過酷事故解析コードに用いられている近似モデルや経験式の妥当性を MPS 法による多数の計算機実験で確認することや、修正案を提案することが可能になると考えられる。

福島事故のような原子炉過酷事故に対する耐性を従来よりも高めた事故耐性燃料の開発には、プロトタイプ燃料の照射実験等に大きな費用と時間を要する。限られた開発資源と時間を有効活用するために、燃料ふるまい解析によって今後重点的に得るべきデータや取り組むべき新規研究開発要素を明確にすることで、研究開発コストと時間の大幅な削減が期待されている。

資源鉱物を原料とする高機能性環境浄化素材の開発

研究代表者 山崎 淳司
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究では、各種産業プロセスから大量に排出される鉱物質廃棄物や未利用の天然鉱物資源と、現実的なコストおよびマスパフォーマンスで投入可能な無機原料組み合わせにより、新規の環境調和型の高機能性素材を創製し実用化を目指す。具体的には、これらを原料として既存のイオン選択性や分配係数、触媒活性と異なる（または補完する）物性を有する規則的ナノメソ細孔質材料を開発し、さらにこれらの材料を効果的に用いることで、低コストで現実的な新規の土壌、排水、生活空間環境の浄化技術を提案する。さらに、本研究から2次的に產生することが予想されている物質の有効利用や、さらに他素材とハイブリッド化してさらに高機能性素材を作成するための原料とすることを検討するなど、極力環境に低負荷で省エネルギーの資源循環プロセスを提案することにより、地球環境および生活環境に調和した持続的な社会発展へ要素技術の確立に資することを研究課題としている。

2. 主な研究成果

Ag-M (M=Fe, Ni, Cu, Co) / セピオライト複合体の過酸化水素分解触媒の調製

生命・医療・半導体等で用いられる装置（アイソレーター、クリーンベンチ等）や施設（クリーンルーム等）では、近年、過酸化水素ガスによる滅菌が普及している。濃度 1000ppm 以上のガスで滅菌処理後には、滅菌剤を迅速に 0.1ppm 以下まで除去（除染）する必要があるが、現在主に用いられている Pt 系分解触媒では 3~12 時間かかることから、医療作業や製造工程の律速要因になっている。

そこで今年度は、高活性かつ安価な過酸化水素分解触媒として期待される Ag-M 系複合金属ナノ粒子 (M=Fe, Ni, Cu, Co) とセピオライトの複合体を作製して触媒性能評価を行い、その触媒活性発現の機序を、XPS、TEM/EDX 等により検討した。実験に供する Ag-M 系試料として、Ag と遷移金属の無機塩を溶解・中和共沈させることで高い過酸化水素分解活性を持つ物質が得られた (図 1)。

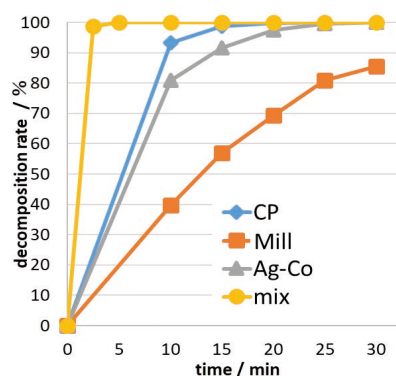
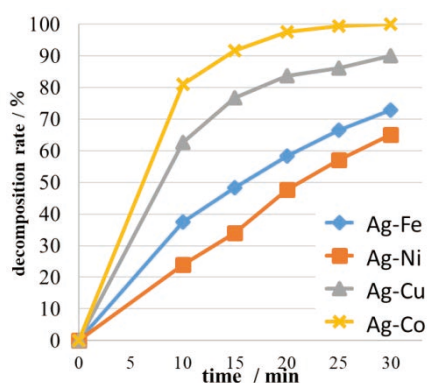


図1 Ag-M (M=Fe, Ni, Cu, Co)触媒の過酸化水素分解活性

を示す複金属酸化物であり、XPS 測定で Ag は 0~+1 間の複数価数を有し、微粒子表面で過酸化水素分解・触媒再生処理による価数分布の変化（電価移動）が認められた。また、Ag-Co 系複金属酸化物を繊維状粘土鉱物であるセピオライトと混錬して複合化させることで活性向上が認められた（図2）。

さらにこの複合体は、TEM 明視野像で Ag-Co 系複金属酸化物の単結晶ナノ粒子がセピオライト上にほぼ均一に担持されていることが観察された（図3）。

本複合体触媒は、既存の Pt 系触媒を上回る過酸化水素ガスの分解活性を示すことがわかった。

図2 Ag-Co/セピオライトの各種複合方法ナノ粒子による過酸化水素触媒分解活性の変化

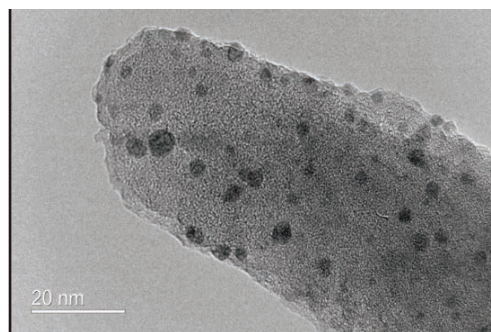


図3 セピオライト上に分散した Ag-Co 系複金属酸化物の TEM 明視野像

3. 共同研究者

福田 恭彬（理工学研究所 招聘研究員）

安井 万奈（創造理工学部 環境資源工学科 客員次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

日本ゼオライト学会 編集委員

日本粘土学会 監事

無機マテリアル学会 理事

5. 研究活動の課題と展望

本材料に関しては、分解対象物質の吸着担体であるセピオライト（繊維状のナノ細孔質含水マグネシウムケイ酸塩）表面と Ag-M 系複合酸化物ナノ粒子の分散機構、相互作用から、触媒活性が増幅される機序の解明が未解決である。また社会実装には、本複合材のフィルター化、成形体化等のモジュール作製や、分解生成物の系外への迅速な除去、繰り返し再生の寿命制御が行えれば、滅菌処理操作への寄与が期待できる。

ナノ材料の実用的合成プロセス開発と応用展開

研究代表者 野田 優
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

ナノテクノロジーは広範な技術革新が可能と十数年来期待され、素晴らしい材料・デバイスが実験室規模で沢山生み出されてきた。反面、実用は未だ限定的とされ、実用的な規模とコストでの製造が本格的実用化の鍵となる。化学工学は生産の工学だが、ナノ材料に関しては微細構造制御とスケールアップの両立に必ずしも成功していない。本プロジェクト研究では、その両立を目指しプロセス開発を中心に推進する。具体的には、カーボンナノチューブ(CNT)を対象に、蓄電デバイス、薄膜デバイス、電子デバイスに向け、流動層による長尺 CNT の大量合成、浮遊触媒法による高結晶性 CNT の連続合成、担持触媒法によるデバイス基板上 CNT 合成と、カスタム合成法を開発する。さらに多孔質シリコンの急速蒸着と蓄電応用、大粒径多結晶シリコン膜の急速蒸着と太陽電池応用など、シリコン材料・製膜技術も開発する。合成と応用を同時に進めることで「役立つものを実用的につくる」とともに、産学協働により技術開発と移転をシームレスに推進する。

2. 主な研究成果

(1) Al シート上へのミリメートル長 CNT 垂直配向膜の直接合成 (Miura, et al., Carbon 2018)

株式会社デンソーとの共同研究により、Al シート上への CNT 直接合成技術を開発した。Al は高い電気伝導率、熱伝導率と、低密度、良好な成型加工性を有し、電気配線や電池電極、放熱部材、構造材など多様な用途に用いられている。成型加工の微細化も進んでいるが、サブミリメートル以下の機械加工は難しい。一方で、CNT も高い電気伝導率、熱伝導率と、低密度を有し、しかも自己組織的に集合形態を制御可能である。そこで Al 基材上に触媒を担持し化学気相成長(CVD)法により CNT 垂直配向膜を直接形成する技術の開発を目的とした。Fig. 1 左に、CNT 高さ と CVD 時間の関係を示す。既往研究 (●) では CNT 高さは 0.1 mm までに留まっていることが分かる。Al は融点が 660 °C と低く CVD 温度も 600 °C 程度と低く保つ必要があり、CNT の成長速度が 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度と小さいこと、また CVD 時間を増やすと触媒が失活してしまうことが原因である。我々も未処理の Al シート上にスパッタで Fe を平均膜厚 2.2 nm 担持し通常の CVD を行ったところ同様の結果を得たが (△)、CVD ガスに CO₂ を添加することで触媒寿命を大きく伸ばせることを見出した (○)。10 時間の CVD にて 1 mm 超の CNT 高さを実現した (Fig. 1 右)。

CVD 時間を変えることで、サブ μm から 1 mm まで CNT 高さを自在に制御ができる。放熱部材応用では CNT を液体で濡らし乾燥することで、CNT 膜を壁状に収縮しサブ mm 間隔でフィン構造を作れることを確認している。また、CNT 垂直配向膜は内部にサブ μm の空隙を有しているため、リチウムイオン電池での 3 次元正極集電体としての応用も有望である。CVD 時間が長いことが実用上の課題だが、高濃度炭素源と触媒原料の同時供給により CNT 成長の高速化と持続が可能であることを確認している。

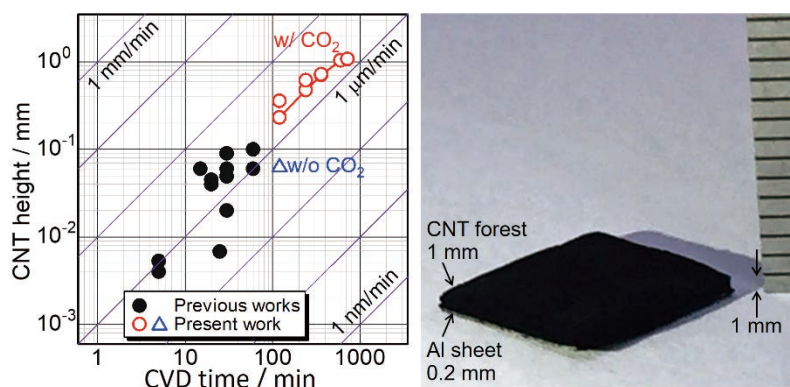


Fig. 1 – Al シート上での CNT 成長の高さと CVD 時間の関係 (左) および本研究で実現した Al シート上の高さ 1 mm の CNT 垂直配向膜 (右) (Miura, et al., Carbon 2018).

(2) 良質なグラフェン合成の低コスト・短時間化 (Nagai, et al., ACS Omega 2017)

グラフェンはグラファイトの一原子層にあたる 2 次元ナノ材料で、膨大な注目を集めてきた。近年、Cu 箔を触媒に 1000 °C 前後の高温化で CH₄ を分解する CVD 法により、単層グラフェンを任意サイズで合成可能となった。しかし得られるグラフェンは多結晶膜であり、Cu 箔も多結晶のためグラフェンの結晶子の方位も面内方向にランダムである。そこで、単結晶触媒を用いた良質のグラフェン合成も盛んに研究されている。単結晶 Cu は高価なため、c 面サファイア上に Cu をエピタキシーする技術が開発され、それを触媒とした CVD により面内結晶方位の揃った良質なグラフェンの合成が実現している。しかし、スパッタ法等の従来法でのエピタキシーには通常 1 時間程度の長時間が必要で、高価なサファイア基板は使い捨てで、研究用サンプルの合成に留まっている。

我々は良質なグラフェンをより実用的に合成すべく、高速エピタキシーとサファイア基板の再利用技術を開発した。真空蒸着では通常は蒸着源の Cu を融点 1085 °C の近傍まで加熱するが、我々は融点より大幅に高温の 1700 °C 以上に加熱し蒸気圧を高め、高い製膜速度を得る急速蒸着(RVD)法を提唱している。この方法で 10–30 s で 1–3 μm の Cu 膜を蒸着、c 面サファイア基板を 400 °C に加熱しておくことで Cu のエピタキシーを実現した (Fig. 2)。この Cu 膜上に CVD 法でグラフェンを合成、SiO₂/Si 基板へ転写した。サファイア基板上の Cu 膜を H₂O₂/H₂SO₄ 溶液でエッチング除去し、空気酸化処理をして基板を再生、Cu のエピタキシーに 5–6 回の再利用を実現した。

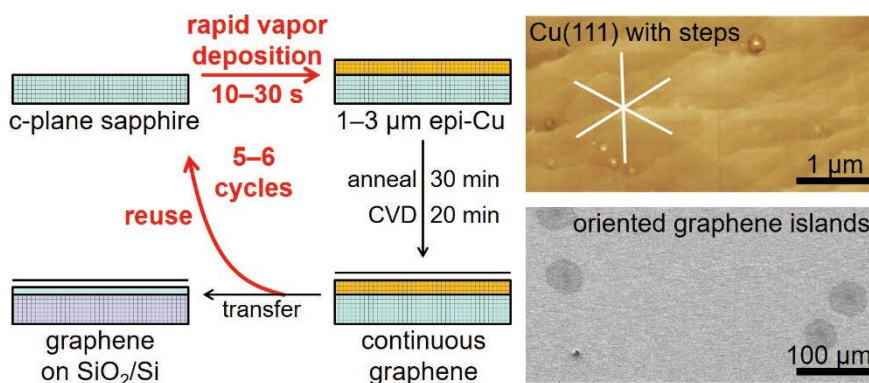


Fig. 2 – サファイア基板上への Cu 膜高速エピタキシー、グラフェン CVD 合成、グラフェン転写とサファイア基板再利用サイクル (左) および得られたエピタキシャル Cu 膜表面の AFM 像と面内方位の揃ったグラフェンドメインの SEM 像 (右) (Nagai, et al., ACS Omega 2017).

(3) ガス中蒸発法による Si 粒子の数秒合成および CNT との複合化によるリチウム二次電池負極の開発 (Kowase, et al., J. Power Sources 2017)

リチウムイオン電池の負極として黒鉛は長らく用いられてきたが、 LiC_6 と少量の Li しか取り込めず理論容量が 372 mAh/gc と限られ、電池の高容量化に限界がある。それに対し Si は $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ や $\text{Li}_{22}\text{Si}_5$ と多量の Li を取り込み 10 倍の理論容量を持つため、盛んに研究されてきた。Si 負極は充放電時に 4–5 倍もの体積変化を示すため構造が崩壊し易く、ナノ構造化による長寿命化が図られてきた。 SiH_4 を原料とした CVD 法が広く検討されてきたが、本来、半導体デバイス用の技術であり、 SiH_4 は高価で爆発性で扱いが難しい課題も抱えている。加えてナノ材料は充填密度が低く、Si 質量基準では高容量なものの、電極質量・面積・体積あたりの容量は低い課題を抱えている。

本研究ではこれらの課題解決に取り組んだ。安価に入手可能なバルク Si を原料に、ガス中蒸発法により Si ナノ粒子を数秒で 20–60% と高収率に合成、雰囲気 Ar 圧の制御によりナノ粒子の粒径制御も実現した。また、Si ナノ粒子を自前の流動層法長尺 CNT とともにアルコール中に分散、吸引ろ過によりスポンジ状の CNT 自立膜中に Si ナノ粒子を閉じ込めた複合膜を作製した。さらに CVD 法で薄く炭素被覆することで、充放電 100 サイクル後に電極質量・面積・体積基準で 618 mAh/g, 0.644 mAh/cm², 230 mAh/cm³ と高い放電容量を実現した。

今後はこの CNT スポンジ集電体を他の正負極活物質へと適用し、セル質量・体積基準で容量・出力に優れたフルセルの開発へと取り組んでいく。

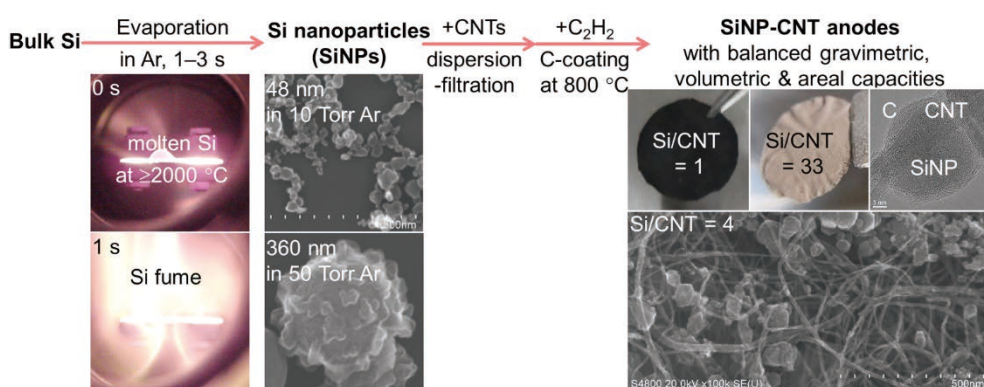


Fig. 3 – ガス中蒸発法による Si 粒子の数秒合成（左）および CNT との複合化によるリチウム二次電池負極作製（右）(Kowase, et al., J. Power Sources 2017).

3. 共同研究者

大沢利男（ナノ・ライフ創新研究機構・次席研究員）
 杉目恒志（高等研究所・助教）
 花田信子（応用化学科・講師）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- K. Hasegawa*, C. Takazawa, M. Fujita, S. Noda, and M. Ihara*, "Critical effect of nanometer-size surface roughness of a porous Si seed layer on defect density of epitaxial Si films for solar cells by rapid vapor deposition," CrystEngComm 20 (13), 1774-1778 (2018) (inside front cover). DOI:10.1039/c7ce02162c
- T. Liu, B. Lee, M. J. Lee, J. Park, Z. Chen, S. Noda, and S. W. Lee*, "Improved capacity of

- redox-active functional carbon cathode by dimension reduction for hybrid supercapacitors," *J. Mater. Chem. A* **6** (8), 3367-3375 (2018). DOI:10.1039/C7TA10881H
- S. Miura, Y. Yoshihara, M. Asaka, K. Hasegawa, H. Sugime, A. Ota, H. Oshima, and S. Noda*, "Millimeter-tall carbon nanotube arrays grown on aluminum substrates," *Carbon* **130**, 834-842 (2018). DOI:10.1016/j.carbon.2018.01.075
 - Y. H. Kwon, J. J. Park, L. M. Housel, K. Minnici, G. Zhang, S. R. Lee, S. W. Lee, Z. Chen, S. Noda, E. S. Takeuchi, K. J. Takeuchi, A. C. Marschilok*, and E. Reichmanis*, "Carbon nanotube web with carboxylated polythiophene "assist" for high-performance battery electrodes," *ACS Nano* **12** (4), 3126-3139 (2018). DOI:10.1021/acsnano.7b08918
 - L. Cui*, Y. Xue, S. Noda, and Z. Chen*, "Self-supporting S@GO-FWCNTs composite films as positive electrode for high-performance lithium-sulfur battery," *RSC Adv.* **8**, 2260-2266 (2018). DOI:10.1039/C7RA10498G
 - T. Kowase, K. Hori, K. Hasegawa, T. Momma, S. Noda*, "A-few-second synthesis of silicon nanoparticles by gas-evaporation and their self-supporting electrodes based on carbon nanotube matrix for lithium secondary battery anodes," *J. Power Sources* **363**, 450-459 (2017). DOI:10.1016/j.jpowsour.2017.07.115
 - Y. Nagai, A. Okawa, T. Minamide, K. Hasegawa, H. Sugime, and S. Noda*, "Ten-second epitaxy of Cu on repeatedly used sapphire for practical production of high-quality graphene," *ACS Omega* **2** (7), 3354-3362 (2017). DOI:10.1021/acsomega.7b00509

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

- 野田 優 「長尺カーボンナノチューブの流動層合成と二次電池三次元電極の創製」 第 23 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, アクトシティ浜松, 静岡県浜松市, 2017 年 12 月 7 日 (invited).
- 野田 優 「挑戦的技術の研究開発と評価の試み: 太陽電池の省資源・簡易製造」 化学工学会 関東支部 イブニングセミナー, 東京理科大学 森戸記念館, 東京都新宿区, 2017 年 11 月 17 日 (invited).
- Suguru Noda, "Practical production and functionalization of carbon nanotubes for energy devices," 2017 International Conference on Functional Carbons (ICFC), 2B-4, National Taiwan University of Science and Technology (NTUST), Taipei, Taiwan, Nov. 2, 2017 (invited).
- 野田 優 「できかたを理解しうまく作る: カーボンナノチューブと蓄電デバイス」 東京大学 応化談話会, 東京大学 本郷キャンパス, 東京都文京区, 2017 年 5 月 10 日 (invited).
- Suguru Noda, "Single-wall carbon nanotubes from supported and floating catalysts on substrates, in fluidized bed, and in gas-phase," Guadalupe Workshop VIII: Workshop on Nucleation and Growth Mechanisms of Single Wall Carbon Nanotubes, Bandera, TX, USA, Apr. 23, 2017 (invited).

4.4 受賞・表彰

- 永井 款也, 杉目 恒志, 野田 優 "Fast synthesis of graphene in three-dimensional reaction field by chemical vapor deposition," 化学工学会第 83 年会, PE388, 関西大学 千里山キャンパス, 大阪府吹田市, 2018 年 3 月 15 日 (優秀学生賞).
- 並木 克也, 杉目 恒志, 大沢 利男, 野田 優 "Gas-phase synthesis of single-wall carbon nanotubes by floating catalysts and analysis of reaction/flow fields," 化学工学会第 83 年会, PE383, 関西大学 千里山キャンパス, 大阪府吹田市, 2018 年 3 月 15 日 (優秀学生賞).
- 北川 紗映, 杉目 恒志, 野田 優 「カーボンナノチューブ-銅複合体の集合形態制御と、電子エミッタ応用」 "Fabrication of morphology controlled carbon nanotube-Cu composite for field electron emitter application," 化学工学会第 83 年会, PC254, 関西大学 千里山キャンパス, 大阪府吹田市, 2018 年 3 月 14 日 (学生奨励賞).
- 佐藤 俊裕, 杉目 恒志, 野田 優 「CO₂ 添加によるカーボンナノチューブ合成の均一化と高収率化」 化学工学会 東京大会 2017, E105, 早稲田大学 西早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2017 年 8 月 9 日 (優秀学生賞).
- 前田 陽平, 岡田 翔平, 大沢 利男, 杉目 恒志, 堀越 蓉子, 伊藤 哲哉, 野田 優 「アセチレンブラック・カーボンナノチューブ複合体の気相連続合成プロセスの開発」 化学工学会 東京大会 2017, E101, 早稲田大学 西早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2017 年 8 月 9 日 (学生奨励賞).
- 葛原 颯己, 野田 優 「カーボンナノチューブと MnO₂ の複合化による電気化学キャパシタ電極開発」 化学工学会 東京大会 2017, C116, 早稲田大学 西早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2017 年 8 月 9 日 (学生特別賞).

4.5 学会および社会的活動

- 第 54 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 実行委員, 2018 年 3 月.
- 化学工学会 第 49 秋季大会 第 1 回 化学工学ビジョンシンポジウム「原料多様化・低炭素化時代の化学産業の将来像」オーガナイザー, 2017 年 9 月.
- 化学工学会 東京大会 2017 実行委員, 2017 年 8 月.
- 化学工学会 東京大会 2017 シンポジウム「エネルギー・資源の有効利用技術と社会実装」オーガナイザー, 2017 年 8 月.
- 早稲田応用化学会「第 5 回 未来社会創成フォーラム—低炭素社会に貢献する材料技術の最前線と展望—」主管, 2017 年 6 月.

5. 研究活動の課題と展望

当プロジェクトの研究内容は、以下の 4 項目に大別される。科研費などの公的プロジェクトおよび民間企業との産学共同研究により、積極的に推進する。

①CNT の低コスト・大量合成を目指した三次元プロセスの開発：

流動層 CVD 法、浮遊触媒 CVD 法、火炎合成法、浮遊担持触媒 CVD 法などに取り組んでいる。プロセスの高温化による結晶性と生成速度の向上、触媒粒子形成の精密制御による CNT 直径の低減、触媒導入量の向上と触媒の長寿命化による CNT 合成収率の向上、および触媒の高速担持によるプロセス全体での生産性向上に、引き続き取り組む。

②CNT のデバイス基板上直接合成とデバイス応用を目指した二次元プロセスの開発：

熱界面材料、熱交換部材、異方性導電膜、電子エミッタなどの平面型電子デバイスは、CNT の使用量が少なく半導体/金属制御などの精密制御も不要なため、実用化に近い応用先である。しかし CNT の集合形態で特性が大きく変わるため、デバイス基板上に CNT 構造体を短時間に直接形成する技術の開発に引き続き取り組む。

③CNT、グラフェン、シリコン膜の作製と太陽電池への応用：

CNT およびグラフェンの薄膜は透明性と導電性を両立する。CNT およびグラフェンの結晶性の向上と接合抵抗の低減により、より導電性に優れた薄膜を開発する。また、上述の急速融液蒸着・その場結晶化法による大粒径シリコン膜の作製にて、シリコン膜を成長基板から分離し成長基板を再利用する技術を開発する。これらの技術をあわせ、安定・柔軟・軽量なフレキシブル結晶シリコン膜太陽電池の実現を目指す。

④CNT 厚膜を用いた電気化学キャパシタ・二次電池の開発：

CNT スポンジ膜による電極開発を、チタン酸リチウム、オリビン酸鉄リチウム、硫黄、シリコンなど多様な活物質で推進する。これらを用いフルセルを開発、セルのトータル性能向上を目指す。特に、飛躍的に高容量な硫黄正極とシリコン負極を用いた高容量フルセルに、電池の専門家の協力を得て挑戦する。

共生環境化学研究

研究代表者 中尾 洋一
(先進理工学部 化学・生命化学科 教授)

1. 研究課題

伝統的発酵食品の発酵過程で生じる代謝産物がどのようにわれわれの体の健康維持にかかわるかについての詳細はまだ明らかになっていない。しかしながら、発酵微生物によって生産されるこれらの代謝産物が、われわれの腸内に共生している微生物に対して何らかの影響を与え、その結果としてわれわれの体の健康維持に影響をおよぼしていることは十分に予想しうることである。

また、海洋生物に含まれる様々な天然化合物は、海洋生物に共生している微生物がその生産に関わっていることが明らかになりつつあり、海洋生物内の共生環境が医薬品素材として価値の高い天然化合物の産生にも影響すると考えられている。

一方、土壤に生息している土壌菌や根粒菌などの共生微生物の状態が農地の生産性に深く影響することも知られている。

以上いずれのケースにおいても、環境（発酵食品、腸内環境、海洋生物体内、土壤）－共生微生物の関係がカギとなっている。そこで、これらの共生環境を維持するための機構を理解することはサプリメントや医薬品などの開発、および高機能農産物の生産、農作物の生産力アップに貢献しうる知見となりうるため、さまざまな環境－共生関係を対象として、その関係を成立させている機構を分子レベルで解明することを目的として研究を行っている。

2. 主な研究成果

われわれが味噌の抗ストレス成分として見出したフェルラ酸エチルについて、作用メカニズムの解析研究を行っている。これまでに標的分子を絞り込むことに成功しており、2018年度中の論文投稿を行う予定である。また、国内の味噌メーカーと協力して、フェルラ酸エチルを増強した味噌の作成試験を継続して行い、製法に関する知見を得た。ここで得られた知見をもとに仕込みを行った味噌は2018年に実施予定の呈味試験に供する予定である。

広島大学青井義輝准教授との共同研究で行った成果をもとに、海洋生物由来難培養微生物の培養法開発研究について、第69回日本生物工学会大会においてシンポジウム『未培養微生物（微生物ダークマター）の培養、解析、利用に関する研究開発の最前線と展望』をオーガナイズした。

3. 共同研究者

青井義輝（広島大学）
曾根秀子（横浜薬科大学、国立環境研）
木村宏（東京工業大学）

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. Machida, K.; Araib, D.; Katsumata, R.; Otsuka, S.; Yamashita, J. K.; Ye, T.; Tang, S.; Fusetani, N.; Nakao, Y. Sameuramide A, a new cyclic depsipeptide isolated from an ascidian of the family Didemnidae. *Bioorg. Med. Chem.*, **26**, 3852-3857, (2018). doi: 10.1016/j.bmc.2018.06.042
2. Nakamura, F.; Maejima, H.; Kawamura, M.; Arai, D.; Okino, T.; Zhao, M.; Ye, T.; Lee, J.; Chang, Y.-T.; Fusetani, N.; Nakao, Y. Kakeromamide A, a new cyclic pentapeptide inducing astrocyte differentiation isolated from the marine cyanobacterium *Moorea bouillonii*. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **28**, 2206-2209, (2018). doi: <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2018.04.067>.
3. Nakamura, F.; Kudo, N.; Tomachi, Y.; Nakata, A.; Takemoto, M.; Ito, A.; Tabei, H.; Arai, D.; de Voogd, N.; Yoshida, M.; Nakao, Y.; Fusetani, N. Halistanol sulfates I and J, new SIRT1-3 inhibitory steroid sulfates from a marine sponge of the genus *Halichondria*. *J. Antibiot.*, **71**, 273-278, (2018). doi: 10.1038/ja.2017.145.
4. Machida, K.; Matsumoto, T.; Fusetani, N.; Nakao, Y. Dolabellol A, a new halogenated diterpene isolated from the opisthobranch *Dolabella auricularia*. *Chem. Lett.*, **46**, 1676-1678, (2017). doi:10.1246/cl.170756.
5. Ito, A.; Noritsugu, K.; Nakao, Y.; Yoshida, M. Identification of zinc finger transcription factor EGR2 as a novel acetylated protein. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **489**, 455-459, (2017). DOI:10.1016/j.bbrc.2017.05.170.
6. Vong, K. K. H.; Tsubokura, K.; Nakao, Y.; Tanei, T.; Noguchi, S.; Kitazume, S.; Taniguchi, N.; Tanaka, K. Cancer cell targeting driven by selective polyamine reactivity with glycine propargyl esters. *Chem. Comm.*, **53**, 8403-8406, (2017). DOI:10.1039/c7cc01934c
7. Takase, S.; Kurokawa, R.; Arai, D.; Kanto, K.K.; Okino, T.; Nakao, Y.; Kushiro, T.; Yoshida, M.; Matsumoto, K. A quantitative shRNA screen identifies ATP1A1 as a gene that regulates cytotoxicity by aurilide B. *Scientific Rep.*, (2017). DOI:10.1038/s41598-017-02016-4.
8. Tsubokura, K.; Vong, K. K. H.; Pradipta, A. R.; Ogura, A.; Urano, S.; Tahara, T.; Nozaki, S.; Onoe, H.; Nakao, Y.; Sibgatullina, R.; Kurbangalieva, A.; Watanabe, Y.; Tanaka K. In vivo gold complex catalysis within live mice. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **56**, 3579-3584, (2017). DOI: 10.1002/anie.201610273

4.2 総説・著書・報告書

1. 松原英祐、本多芳孝、嶋川淳、新井大祐、中村文彬、加藤妙子、中野京子、大池昶威、中尾洋一、一条範好、今崎眞司、小林玲、本田茂俊、林田眞二郎、山田勝男、上畑裕、味噌に含有する抗ストレス物質の探索及び FAEE 高含有みその製法について、中央味噌研究所研究報告、38、34-48、(2017)。

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

第 69 回日本生物工学会大会 シンポジウム『未培養微生物（微生物ダークマター）の培養、解析、利用に関する研究開発の最前線と展望』オーガナイザー

5. 研究活動の課題と展望

食品の機能性成分については引き続き順調に研究が進んでいる。マウス認知症モデルを用いて、抗認知症効果の検証試験を開始したいと考えている。これらの成果については発信と社会実装に向けた取り組みをおこなう予定である。難培養性の共生微生物についても効果的な培養法が見つかりつつあるため、今年度中に論文にまとめたいと考えている。

微生物機能高度活用プロジェクト

研究代表者 木野 邦器
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

微生物や酵素による反応は、常温・常圧において進行可能であり、高い立体選択性や位置選択性が発揮される。本研究課題では、微生物や酵素の機能を高度に利用することで、有用性の高い水酸化化合物やペプチド、さらには、バイオマスを原料とした汎用化成品の合成プロセスを開発することを目的としている。本稿では、主に水酸化芳香族化合物の合成法の開発ならびにペプチド合成酵素と有用ジペプチドの生産法の開発研究について報告する。

2. 主な研究成果

2.1 ピセアタンノール合成活性を有する酸化酵素遺伝子の探索と同定

レスベラトロールの水酸化物であるピセアタンノールは、抗酸化作用や抗癌作用等の多様な生理活性を示す有用なポリフェノールであり、機能性食品や医薬品、化粧品の原料として有用な化合物である。我々はこれまでに、*Pseudomonas aeruginosa* PAO1 株由来の二成分型フラビン依存性モノオキシゲナーゼ HpaBC を発現させた大腸菌細胞を用いて、レスベラトロールからピセアタンノールを合成可能なことを明らかにしている (*Tetrahedron Lett.*, **55**, 2853 (2014))。HpaBC は 4-ヒドロキシフェニル酢酸を生理基質としてオルト位の水酸化反応を触媒する酵素であり、Fig. 1 に示すような反応機構で作用するモノオキシゲナーゼである。一方、昨年度、レスベラトロールからピセアタンノールへの変換活性を有する微生物 KSH1 株を自然界から新たに取得した。系統解析の結果、KSH1 株はこれまで報告のない非病原性の *Ensifer* 属に属するグラム陰性細菌と同定された。我々は KSH1 株にレスベラトロール水酸化を担う HpaBC 類似タンパク質が存在するという作業仮説を立て、KSH1 株から *hpaBC* 相同遺伝子を主軸とした遺伝子探索と、当該候補遺伝子が大腸菌内で発現させてその活性評価を行った。

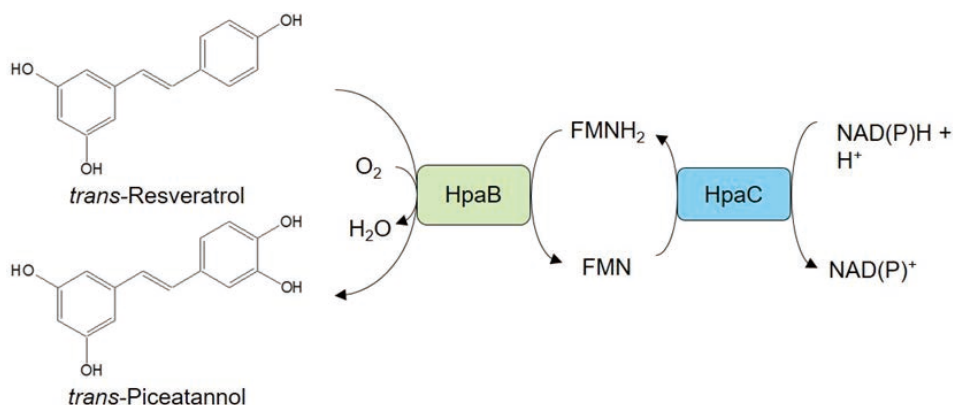


Fig. 1. HpaBC による *trans*-レスベラトロールから *trans*-ピセアタンノールの合成

PCR クローニングを検討した結果、Fig. 2 に示す KSH1 株由来の *hpaBC* 相同遺伝子の取得および全塩基配列の同定に成功し、既報の *P. aeruginosa* PAO1 由来 *hpaB* および *hpaC* とアミノ酸レベルでそれぞれ 61%、46% の相同性を有することを明らかにした。また、KSH1 株由来の *hpaBC* 相同遺伝子発現大腸菌を用いて、30 mM のレスベラトロールから 12 時間で 25.9 mM のピセアタンノール合成を達成した。

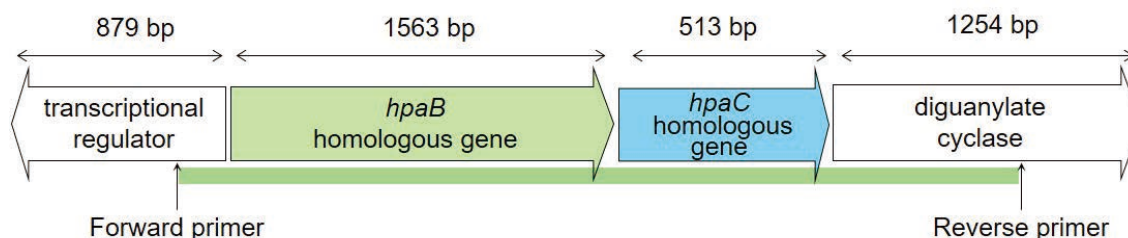


Fig. 2. *Ensifer* sp. KSH1 株由来 *hpaB* および *hpaC* 相同遺伝子の塩基配列

2.2 バニリン高生産に向けたバイオプロセスの開発

フレーバーやフレグランスとして有用なバニリンはバニラビーンズからの抽出により得られるがその量は限られており、代替製法として微生物や酵素を利用したバイオプロセスに関心が寄せられている。これまでに、バイオマス資源のフェルラ酸を原料としたバニリン合成が試みられているが、既報の経路は補酵素を必要とするためその供給が高生産を阻む一因となっている。我々はこれまでに、補酵素非依存性の脱炭酸酵素 Fdc と酸化酵素 Cso2 からなる新規バニリン合成経路を設計し、これらの酵素を発現させた組換え大腸菌を利用してバニリンを合成可能なことを実証している (Fig. 3) (*ChemBioChem*, **15**, 2248-2254 (2014))。

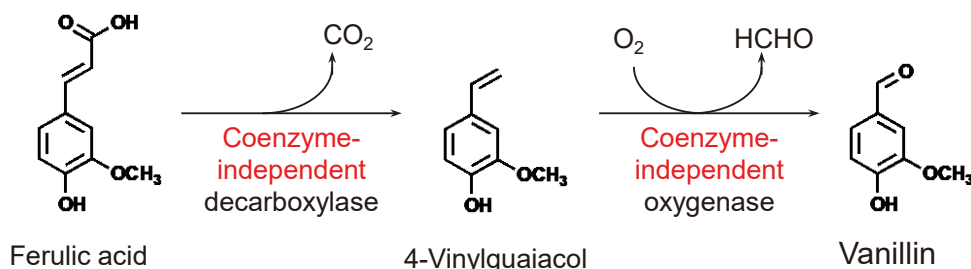


Fig. 3. 補酵素非依存性の脱炭酸酵素 Fdc と酸化酵素 Cso2 を用いるバニリン合成

この二つの酵素の最適反応条件が異なっており、一段階目の脱炭酸酵素 Fdc は pH6.0 から pH9.0 の広範な領域で高い活性を示したのに対し、二段階目の酸化酵素 Cso2 は pH9.0 から pH10.5 のアルカリ性領域で高い活性を示すことがわかった。そこで、それぞれの遺伝子を大腸菌で別々に発現させて二段階の反応プロセスを採用することにした。また、基質や生成物の菌体に対する毒性や酵素に対する阻害を回避するために、油水二相系での反応を検討したところ、酢酸ブチルの添加が効果的であることが明らかになった。その結果、一段階目の反応では、75 mM のフェルラ酸が 2 時間で 4-ビニルグアヤコール (4-VG) に変換された。さらに、二段階目の反応を行ったところ、4-VG が 24 時間でバニリンにほぼすべて変換された。この方法により、52 mM (7.8 g/L) のバニリン合成に成功した。

酸化酵素 Cso2 が補酵素非依存性であるため、酵素反応系による 4-VG からの高濃度生産系を考えた。しかしながら、Cso2 は安定性が低く反応中の活性低下が大きな課題であった。Cso2 の反応を行う pH であるアルカリ性領域において Cso2 はマイナスに荷電していることに着目し、陰イオン交換樹脂による Cso2 の固定化を検討した。若干の活性低下抑制効果が認められ、固定化による酵素の回収と併せ、遊離酵素を用いる方法に比べ、生産性向上を達成することができた。

一方、酵素反応系にカタラーゼを添加すると合成量が向上することを見出した。過酸化水素を分解するカタラーゼの添加効果は、酸化反応で生成する活性酸素種による Cso2 への悪影響を示唆する結果と推察した。Cso2 発現大腸菌の細胞破碎液を用いたバニリン合成において、カタラーゼの添加効果はほとんど認められなかったが、これは宿主大腸菌に内在するカタラーゼが機能しているためであり、これらの結果から、Cso2 を利用するバニリン生産では、菌体反応系が適していると判断した。これまでに、アルギン酸カルシウムゲルによって包括した組換え大腸菌を用いた繰り返し利用による生産性の向上を確認している (Fig. 4)。

現在、さらなる高生産を目指して初の連続プロセスによるバニリン生産を検討中である。

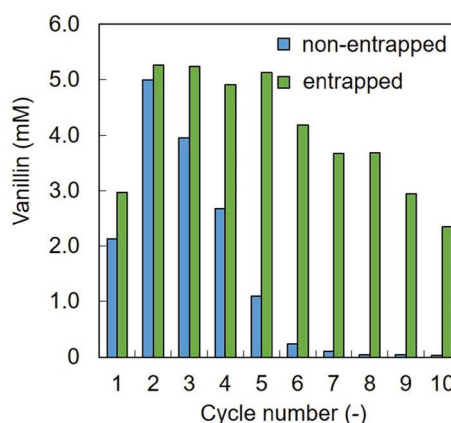


Fig. 4. Cso2 高発現大腸菌によるバニリン合成におけるアルギン酸カルシウムゲル包括の影響

2.3 アデニル化酵素を利用したアミド化合物合成の拡張

アミド化合物は化成品や医薬品、機能性食品などとして利用される有用化合物である。我々は昨年度までに、非リボソーム型ペプチド合成酵素 (NRPS) のアデニル化ドメイン (A ドメイン) や fatty acyl-AMP ligase (FAAL) といったアデニル化酵素に属する酵素を利用したアミド化合物合成法を開発している (Fig. 5)。これまでに、アミノ酸アミドや脂肪酸アミドの合成に成功している。今年度は合成可能なアミド化合物の拡張を目指し、D-アミノ酸を含むジペプチドをはじめ、芳香族カルボン酸アミドおよびβ-アスパルチルアミドの合成法の開発を検討した。

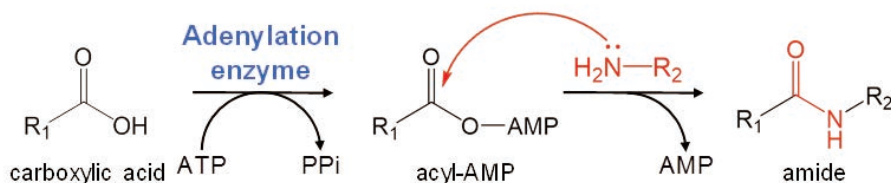


Fig. 5. アデニル化酵素と化学的求核置換反応がドッキングしたアミド化合物合成

(1) D-アミノ酸を含むジペプチドの合成

Fig. 5 で示される新規アミド化合物合成法においてジペプチドを合成する場合、その N 末端側基質はアデニル化酵素 (A ドメイン) の基質特異性による制限を受けるが、C 末端側はキラリティに関係なく求核活性を有する任意のアミノ酸が導入可能になる。*Brevibacillus parabrevis* IAM1031 由来 tyrocidine synthetase A の A ドメイン (TycA-A) を用いると、生理基質の L-Phe を N 末端基質として認識するが、Pro を求核剤とすると C 末端には L-Pro と D-Pro を同程度に基質として認

識・配置され、L-Phe-L-Pro と L-Phe-D-Pro を生成する。

また、TycA-A は L-Phe のみならず、L-Trp、L-Met、L-Tyr、L-Val、L-Leu もアデニル化し、さらに興味深いことに、それらアミノ酸の D-体も基質となることを見出した。この結果を踏まえると、TycA-A を用いると、L-L-体、D-L-体、L-D-体、D-D-体のキラリティが混在した多様なジペプチド合成が可能となることを明らかにした。これまでに、TycA-A の他にも L-Lys (D-Lys) をアデニル化する A ドメインを見出しており、今後、D-体も L-体も認識する A ドメインを発見することにより、合成可能なジペプチドが大幅に拡張されるものと思われる。さらには、光学異性体の起源や酵素機能との関わりにおいて学術的にも重要な知見を得るヒントが見出されるものと期待される。

(2) 芳香族カルボン酸アミドの合成

NRPS の A ドメインは一般的にアミノ酸を基質とするが、一部は芳香族カルボン酸を基質とすることが知られている。例えば、*Bacillus subtilis* 168 が産生する bacilibactin と呼ばれるシデロフォアには構造中に 2,3-ジヒドロキシ安息香酸(2,3-DHB)が含まれ、A ドメインである DhbE の基質となることで導入される。そこで、DhbE を用いた芳香族カルボン酸アミドの合成を検討した。

初めに、DhbE がどのような芳香族カルボン酸をアデニル化可能か明らかにするため、ヒドロキシルアミンを用いた比色分析を利用して基質特異性評価を行った。最も単純な芳香族カルボン酸である安息香酸および 7 種類の置換基(OH, NO₂, NH₂, Cl, F, CH₃, COOH)で異なる位置(σ , m , p 位)が置換された安息香酸一置換体(サリチル酸を除く)の計 21 種類の基質に対して試験を行った。その結果、安息香酸および、アミノ基、フルオロ基、メチル基での σ , m , p 位置換体、ヒドロキシ基での m , p 位置換体、ニトロ基、クロロ基、カルボキシ基での m 位置換体の 15 種類の芳香族カルボン酸が基質となることを明らかにした (Fig. 6)。

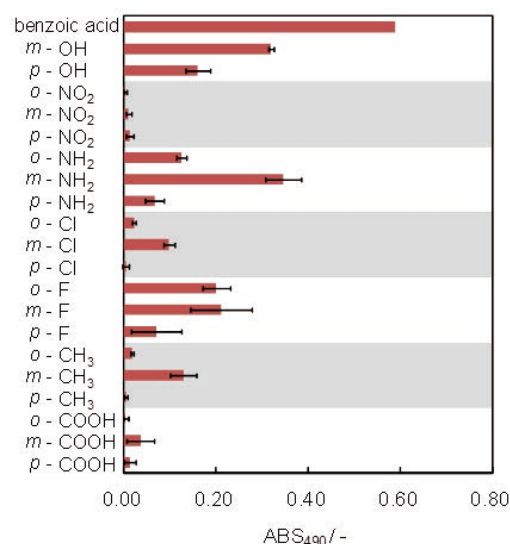


Fig. 6. DhbE の比色分析による基質特異性評価

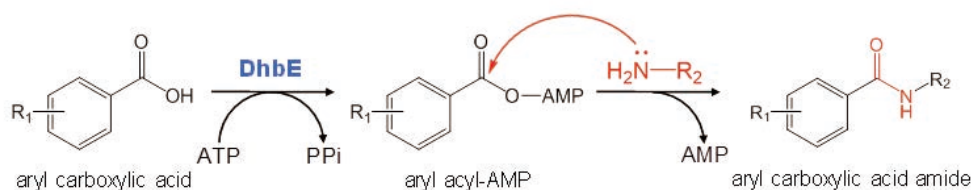


Fig. 7. DhbE を利用した芳香族カルボン酸アミドの合成

続いて、比色分析で判明した 15 種類の芳香族カルボン酸およびサリチル酸を基質、ヒドロキシルアミンおよび L-Pro を求核剤としてアミド合成反応を行った。HPLC 分析の結果、ヒドロキシルアミンとの反応では 16 種類すべてで、また、L-Pro との反応では 12 種類で新規ピークを検出した。

さらに新規ピークの MS 分析を行ったところ、対応するアミド化合物の分子量のピークを確認す

ることができた。以上より、DhbE を用いることで多様な芳香族カルボン酸アミドが合成可能であることが実証できた (Fig. 7)。

(3) β -アスパルチルアミドの合成

β -アスパルチルアミドはアスパラギン酸 (L-Asp) の β -カルボキシ基がアミド化された化合物である。最も単純な β -アスパルチルアミドであるアスパラギンはアデニル化酵素であるアスパラギン合成酵素により L-Asp とアンモニアから合成されることが知られている。そこで、アデニル化酵素によるアミド合成の知見から、アスパラギン合成酵素を利用することで同様の反応機構により β -アスパルチルアミドが合成可能であると推測した (Fig. 8)。

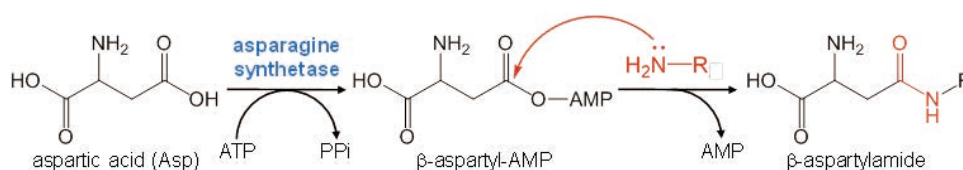


Fig. 8. アスパラギン合成酵素による β -アスパルチルアミドの合成

Escherichia coli BL21 (DE3) 由来のアスパラギン合成酵素 (AsnA) を利用した。AsnA の基質として L-Asp、求核剤として本来のアスパラギン合成反応を起こす塩化アンモニウムに加えて、ヒドロキシルアミン、メチルアミン、トリプトファンを用いて反応を行った。HPLC 分析の結果、塩化アンモニウムを用いた際にはアスパラギンが生成し、他の求核剤を用いた場合にも新規ピークが検出された。さらに、新規ピークの成分について MS 分析を行ったところ、求核剤に対応した β -アスパルチルアミドの分子量に一致するピークを確認することができた。これらの結果より、予想通り、アスパラギン合成酵素を用いるとアスパラギンはもとより、多様な β -アスパルチルアミドの合成も可能であることを示した。

2.4 アミノ酸リガーゼの高機能化と機能性ジペプチド合成法の開発

(1) ポリ- α -グルタミン酸合成酵素 RimK の高機能化

RimK は大腸菌のリボソーム S6 タンパク質 RpsF の C 末端の Glu 残基に対して 1~4 個の Glu を付加する修飾酵素である。また、遊離の Glu を基質として ATP の加水分解反応と共役して poly- α -Glu (α -PGA) を合成可能であること、また Glu-Glu や C 末端残基が Glu であるペプチドに対し広範な特異性でアミノ酸を連結可能であることを既に報告している。昨年度、RimK の結晶構造解析を実施し、反応機構の解明と基質特異性の改変検討を行った。その中で、今年度は RimK を利用してタンパク質やペプチドの C 末端をアミド化する汎用的な技術の開発を検討した。タンパク質の C 末端のアミド化は当該タンパク質の安定性維持や活性発現に重要であるが、その簡便な方法が開発されていない。結晶構造解析と D-アラニン-D-アラニン合成酵素変異体における D-アラニンアミド合成活性の発現情報を踏まえて、C 末端側基質として Glu-CONH₂ や NH₄Cl を認識する RimK 変異体の創製を検討した。これまでに、ある変異酵素において目的の活性を有する可能性を示す結果を得ており、現在鋭意検討中である。

(2) イミダゾールジペプチド合成法の開発

イミダゾールジペプチド（カルノシン、アンセリン、バレニン）は、疲労軽減効果や認知症予防効果などの生理機能を有する食材として広く注目されており、社会的背景を受けてその需要の増大が見込まれている。鶏肉や魚肉などからの抽出法に依存しない安定供給可能な低コスト型生産プロセスの開発を目指して、これまでにアミノ酸リガーゼを利用する合成法を開発している。昨年度は、L-アミノ酸リガーゼである YwfE の結晶構造情報とこれまでに知見を踏まえて、合成収量（変換効率）が大幅に向上した変異型酵素の創製に成功した。その結果、精製酵素反応において 90%以上収率でカルノシン（ β -Ala-L-His）の合成に成功し、アンセリン（ β -Ala-3-methyl-L-His）においても高収率合成を達成することができた。

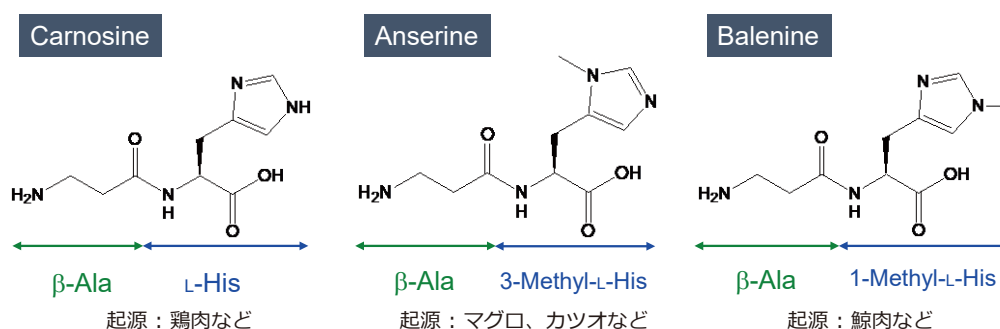


Fig. 9. 抗酸化効果や疲労軽減効果を有するイミダゾールジペプチド

しかし、本反応は等モルの ATP を必要とするため、工業的生産プロセスとして ATP を添加するプロセスは大きな課題となっている。そこで、今年度は宿主大腸菌の糖代謝系による ATP 再生を期待して菌体反応系でのイミダゾールジペプチド合成の可能性を検討した。菌体利用の場合、多くのペプチド分解酵素の影響が無視できないことが知られている。カルノシンなどのジペプチド分解に関与すると思われる *pepD* 欠損株を作製し、野生株と比較したところ、野生株においてもイミダゾールジペプチドの分解活性は低く、*pepD* 欠損株においてさらに分解が抑制されることが判明した。そこで、グルコース添加による菌体反応を実施したところ、ATP 無添加系でもカルノシンやアンセリンが高収率で合成した。最適反応条件を詳細検討中であるが、今回の検討で発酵生産の可能性も強く示唆された。

3. 共同研究者

胡桃坂 仁志(先進理工学部・電気・情報生命学科・教授)

原 良太郎(理工学術院・理工総研・次席研究員)

古屋 俊樹(理工総研・招聘研究員、東京理科大学・理工学部・応用生物科学科・講師)

有村 泰宏(先進理工学部・電気・情報生命学科・助教)

鈴木 伸(先進理工学部・応用化学科・助手)

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. Toshiki Furuya, Mari Kuroiwa, Kuniki Kino, "Biotechnological production of vanillin using immobilized enzymes", *Journal of Biotechnology*, **243**, 25-28 (2017).

2. Ryotaro Hara, Kai Yamagata, Ryoma Miyake, Hiroshi Kawabata and Kuniki Kino, “Discovery of lysine hydroxylases in the Clavaminic Acid Synthase-like superfamily for efficient hydroxylysine bioproduction”, *Appl. Environ. Microbiol.*, September 2017 vol.83 no.17 e00693-17 doi:10.1128/AEM.00693-17
3. Ryotaro Hara, Kengo Hirai, Shin Suzuki, and Kuniki Kino, “A chemoenzymatic process for amide bond formation by an adenylating enzyme-mediated mechanism”, *Scientific Reports* **8**, 2950 (2018). doi:10.1038/s41598-018-21408-8
4. Shin Suzuki, Ryotaro Hara, and Kuniki Kino, “Production of aminoacyl prolines using the adenylation domain of nonribosomal peptide synthetase with class III polyphosphate kinase 2-mediated ATP regeneration”, *J. Biosci. Bioeng.*, Available online 1 February 2018. doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.12.023

4.2 総説・著書

1. 古屋俊樹, 木野邦器, 解説 (査読有) “微生物・酵素を利用したバニリンの合成”, *日本醸造会誌*, **113**(2), 64-70 (2018).
2. 木野邦器 (査読有) (分担執筆): 中分子医薬開発に資するペプチド・核酸・糖鎖の合成・高機能化技術, 監修: 千葉一裕, 第II編ペプチド, 第6章ペプチド合成酵素を利用した触媒的アミド合成, pp.67-pp.78, シーエムシー出版, 東京, 2018年2月. ISBN978-4-7813-1320-7
総頁数: 317 頁

4.3 招待講演

1. 木野邦器, “有用物質生産に向けた酵素の探索と利用研究、そして展望”, *日本生物工学会第24回九州支部沖縄大会*, 琉球大学, 2017.12.9.
2. 木野邦器, “有用微生物酵素の探索と物質生産プロセスへの展開”, *不二製油株式会社招待講演*, 不二製油株式会社不二サイエンスイノベーションセンター, 2017.12.12.

4.4 受賞・表彰

無し

4.5 学会および社会的活動

1. Toshiki Furuya, Masahiko Sai, and Kuniki Kino, “Regioselective Hydroxylation for the Synthesis of Biologically Active Stilbenes”, *BioTrans2017 (13th International Symposium in Biocatalysis and Biotransformations)* (abstract p.103), 9-13 July 2017, Budapest, Hungary.
2. Ryotaro Hara, Kai Yamagata, Ryoma Miyake, Hiroshi Kawabata, and Kuniki Kino, “Discovery of Lysine Hydroxylases in the Clavaminic Acid Synthase-like Superfamily for Efficient Hydroxylysine Bioproduction”, *BioTrans2017 (13th International Symposium in Biocatalysis and Biotransformations)*, 9-13 July 2017, Budapest, Hungary.
3. Shin Suzuki, Ryotaro Hara, and Kuniki Kino, “Aminoacyl Proline Production Coupled with ATP Regeneration System from AMP”, *BioTrans2017 (13th International Symposium in Biocatalysis and Biotransformations)*, 9-13 July 2017, Budapest, Hungary.
4. 古屋俊樹, 中尾友美, 木野邦器, “*Mycobacterium* 属細菌のアセトンのアセトールに変換する酸

- 化酵素の同定”,環境微生物系学会合同大会 2017, (講演要旨集 P-021)、東北大学川内北キャンパス, 8/29-8/31
5. 川村駿介,岡本姫佳,古屋俊樹,木野邦器,“生体触媒を利用した 2-フェニルエタノールの位置選択的水酸化によるチロソール及びヒドロキシチロソールの合成”,日本生物工学会大会, 2P-H105, 要旨集: p.140, 早稲田大学 (東京)
 6. 賀野壮一郎, 鈴木伸, 鈴木亮平, 原良太郎, 木野邦器,“非リボソーム型ペプチド合成酵素のアデニル化ドメインを利用した D-アミノ酸含有ジペプチド合成”,日本生物工学会大会, 2P-G038, 要旨集 p.123, 早稲田大学 (東京)
 7. 原良太郎, 栢沢遼, 広川安孝, 木野邦器,“芳香族ヒドロキシカルボン酸生産に有用な脱炭酸酵素の探索”,日本生物工学会大会, 2P-G052, 要旨集 p.127,早稲田大学 (東京)
 8. 鈴木伸, 木野邦器,“非リボソーム型ペプチド合成酵素のアデニル化ドメインの利用に向けた pyruvate phosphate dikinase による AMP からの ATP 再生系の構築”,日本生物工学会大会, 2P-G039, 要旨集 p.124,早稲田大学 (東京)
 9. 駒林卓磨, 橋田紋佳, 木野邦器,“酵素法によるイミダゾールジペプチド生産と発酵法への展開”,日本化学会第7回 CSJ フェスタ, タワーホール船堀 (東京), 2017 年 10 月 17-19 日
 10. 重井宏介,古屋俊樹,木野邦器,“*Ensifer* 属細菌のピセアタンノール合成活性をコードする酸化酵素遺伝子の同定”,日本化学会第7回 CSJ フェスタ, タワーホール船堀 (東京), 2017 年 10 月 17-19 日
 11. 宮本智也, 原良太郎, 木野邦器, 三宅良磨, 川端潤, 後藤勝,“*Niastella koreensis* 由来 L-リジン-4-水酸化酵素の結晶構造解析”,日本結晶学会平成 29 年度年会, 講演要旨集, 広島 JMS アステールプラザ (広島), 2017 年 11 月 23-24 日
 12. 佐々木楓, 鈴木伸,木野邦器,“アデニル化酵素を利用した芳香族カルボン酸アミドの合成”,日本農芸化学会 2018 年度大会, 2A10a01, 名城大学 (名古屋) 2018.3.16.
 13. 鈴木伸, 宇留野樹生, 木野邦器,“アスパラギン酸合成酵素を利用したβ-アスパルチルアミド合成”,日本農芸化学会 2018 年度大会, 2A10a02, 名城大学 (名古屋) 2018.3.16.
 14. 村瀬諒大, 原良太郎, 栢沢 遼, 広川安孝, 木野邦器,“*Arthrobactersp.* K8 由来オルセリン酸脱炭酸酵素の特性解析と当該酵素を利用した有用芳香族ヒドロキシカルボン酸合成”,日本農芸化学会 2018 年度大会, 2A10p19, 名城大学 (名古屋) 2018.3.16.

5. 研究活動の課題と展望

これまで微生物の有する多様な機能を高度に活用した有用物質生産に向けた研究を展開してきた。従来の技術や知見を踏まえつつ、新たな酵素機能を見出し、従来にない革新的なプロセスを開発することもできた。

非リボソーム型ペプチド合成酵素 (NRPS) のアデニル化ドメイン (A ドメイン) や fatty acyl-AMP ligase (FAAL) といったアデニル化酵素を構成するアデニル化酵素を利用したアミド化合物合成法は、微生物酵素の機能と化学的な求核置換反応をドッキングさせた革新的なアミド結合形成反応の開発であり、創薬や機能性化成品などの製造技術としてバイオ産業に貢献するものと考えられる。また、RimK の改変によってタンパク質やペプチドの C 末端をアミド化する技術は、ペプチド性の中分子医薬品や抗体医薬品の開発に有効であり、キラリティに関係しない任意のペプチド合成技術の開発と併せ、実用的プロセスの開発に向けて研究に注力する予定である。

疲労軽減効果や認知症予防効果等を有するイミダゾールジペプチドの安価で安定供給が可能なバイオプロセスの開発は、現代社会において強く求められており、今年度の研究で明らかになったように発酵生産の可能性も見出されており、今後も企業との共同研究を推進して工業化を達成させる予定である。カルノシン(β -Ala-L-His)生産に関する開発戦略は明確であるが、現在最も求められているアンセリン(β -Ala-3-methyl-L-His)の生産に関しては、ヒスチジンのメチル化プロセスの開発が律速になっている。動物等で報告されているカルノシンを直接メチル化してアンセリンに変換する酵素をモデルとして、実現性の高いバイオプロセスの開発を鋭意検討する予定である。現代社会において問題となっている精神的疾患に対応可能な食品素材として期待されているイミダゾールジペプチドの安価な提供は健康社会増進に貢献するものと期待できる。なお、本プロセスは遺伝子組換え技術を適用しているため、企業サイドの当該官庁への申請と社会的理解をえるための作業が実用化における課題であると考ええる。

非酸化的脱炭酸酵素の可逆的炭酸固定活性を利用した芳香族カルボン酸生産の研究に関しては、今回詳細な報告は省略したが、低炭素化社会の要請に応える革新的な技術として引き続き推進していく予定である。

微生物機能の利用による高機能物質の創出や有用物質の革新的な生産技術の開発は、第5期科学技術基本計画(Society 5.0)に合致するものであり、OECDが提唱しているバイオエコノミーの実現に大きく貢献するものである。人類が直面している地球規模で起きている喫緊の課題に対し、国連はSDGsを推進しているが、その多くのゴールに対して解決のカギを握るバイオテクノロジーを実効性のある具体的なツールとしてブラッシュアップしていくことは我々の使命であると考えている。そうした意識を持ちながら、本研究PGを着実に推進していくつもりである。

バイオプロダクション

研究代表者 桐村 光太郎
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

バイオテクノロジーは 21 世紀の基盤技術であり、とくに環境負荷低減型のプロセスにより選択的に有用物質生産を行うために必要不可欠な要素技術として認識されている。本プロジェクトは、資源循環型社会の構築に資する新規なバイオテクノロジーによるものづくりを基礎と応用の両面からの研究展開により構築することを目的としている。より具体的には、有用物質生産を支える技術として、圧倒的に高い生産効率を示す「スーパー生体触媒」さらにはマイクロ生産工場といえる「細胞型反応装置（セルファクトリ）」の開発を軸に、再生可能資源である植物系バイオマスからの有用物質生産技術体系の構築を図る。

2. 主な研究成果

(1) 可逆的脱炭酸酵素の機能改変による「スーパー生体触媒」の開発

現行のサリチル酸類生産の工業的製法では、金属を触媒として高温高压条件下でフェノール類に二酸化炭素を反応させる Kolbe-Schmitt 反応が利用されている。しかし、副生成物を伴うなど環境負荷低減のために改善すべき点も多く、代替法が求められている。我々は、新規な可逆的脱炭酸酵素として salicylate decarboxylase (EC 4.1.1.91、以下 Sdc と略) を世界で初めて発見し、Sdc によるフェノールからサリチル酸への「酵素的 Kolbe-Schmitt 反応」が可能なことを示した。さらに、これまでに改変型 Sdc を作製し酵素的諸性質の検討を行った。本研究では、「スーパー生体触媒」の開発を目指し、酵素活性中心近傍以外の場所への変異導入による改変型酵素での基質特異性の拡大の検討を行った。

Sdc は 40 kDa の単一サブユニット 4 量体から成る酵素で、すでに数種の基質を使用して酵素的諸性質や速度論的パラメータ (k_{cat} や K_m 値等) を決定している。また、1050 bp から成る遺伝子も同定し、大腸菌を宿主とした高発現にも成功している。そこで、本研究では、医薬中間体や機能性高分子モノマーとしての用途がある 3-メチルサリチル酸をモデル化合物とし、部位特異的変異により基質および生成物の出入り口を拡大した改変型 Sdc を作製し、 α -クレゾールから 3-メチルサリチル酸の合成について検討した (図 1 参照)。データベースに登録された情報を基盤として Sdc のモデリング (SWISS-MODEL 等による推定立体構造) を構築し、Sdc の基質が活性中心へ到達する前の段階で通る入口に位置すると考えられた 23 番目のリジン残基 (K) に部位特異的変異を導入することとした。部位特異的変異導入の妥当性を評価するため、23 番目のリジン残基 (K) をアラニン残基 (A) に置換した K23A-Sdc の構造について SWISS-MODEL を用いて推定した。予想した設計通り、Sdc と比較すると基質の入口と考えられる構造が K23A-Sdc において拡張されていることを確認した (図 2 参照)。本来の基質であるサリチル酸およびフェノールに対する脱炭酸活性および炭酸固定活性

の比活性を評価し、K23A-Sdc では両活性ともに野生型 Sdc の 1.6 倍に向上していることを明らかにした。さらに、野生型 Sdc では α -クレゾールに対する 3-メチルサリチル酸の合成活性は検出されなかったが、改変型酵素 K23A-Sdc においては α -クレゾールに対する 3-メチルサリチル酸の合成活性が検出された。以上より、従来の活性中心近傍への部位特異的変異導入ではなく「基質流入口の拡張による Sdc の機能改変」の新規な発想に基づく基質特異性の拡大の成功例を提示しえたものと考えている。

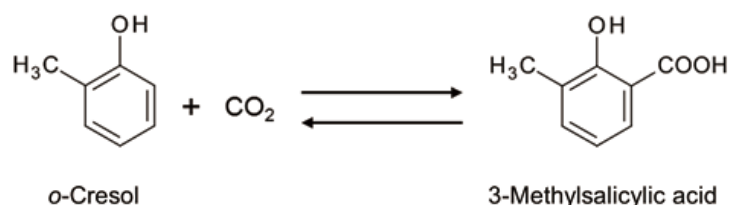


図1 σ -クレゾールから 3-メチルサリチル酸の合成

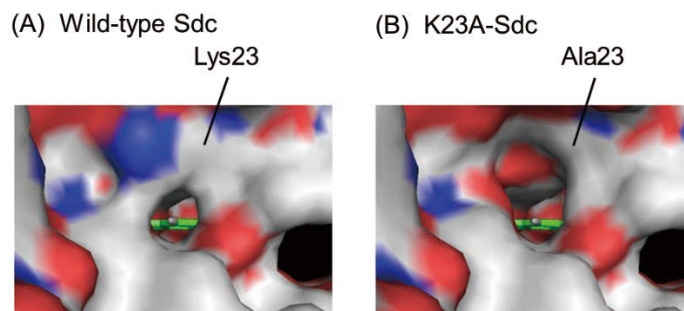


図2 Sdc および改変型酵素 K23A-Sdc の基質入り口付近の立体構造

(2) 寒天分解酵素 β -アガラーゼの精製と諸性質の検討

近年、寒天オリゴ糖の様々な生理活性機能が明らかになり、医薬品や機能性食品などへの利用が盛んになっている。寒天の主成分であるアガロースは、D-ガラクトースと 3,6-アンヒドロ-L-ガラクトースが β -1,4 結合と α -1,3 結合で交互に結合した直鎖構造を有する。アガロース中の α -1,3 結合を切断して得られるオリゴ糖はアガロオリゴ糖と呼ばれる。一方、 β -1,4 結合を切断して得られるオリゴ糖は、ネオアガロオリゴ糖と呼ばれる(図 3 参照)。これらの寒天オリゴ糖のうち、ネオアガロオリゴ糖は、デンプン老化防止作用が強く、加熱処理により静菌作用を生じることや、低カロリー性等の面から食品分野で高機能性食品の原料として有用であるに加え、高い保湿性と美白作用を兼ね備え、化粧品素材として有用である。また、ネオアガロオリゴ糖を酵素的に加水分解して得られる 3,6-アンヒドロ-L-ガラクトースは、キシリトールに代わる抗う食性糖質として有用である。ネオアガロオリゴ糖の製法には、 β -アガラーゼを用いた酵素加水分解法でネオアガロオリゴ糖を選択的に生成することが可能であるが、酵素の基質特異性の問題から 1 種類の酵素でアガロースから低分子量のアガロオリゴ糖を生成するのは困難であり、その生産量も未だ工業生産レベルには至っていない。本研究では、寒天あるいは未利用の寒天成分を含む海藻残渣から寒天オリゴ糖の生産技術の開発を目指し、特に β -アガラーゼおよびネオアガロオリゴ糖加水分解酵素、あるいはその生産微生物を利用して、ネオアガロオリゴ糖、ネオアガロビオースおよび 3,6-アンヒドロ-L-ガラクトースの生産技術の開発を目的とする。前年度

までに、寒天オリゴ糖の生産技術の要素技術開発について、ネオアガロオリゴ糖加水分解酵素の 1 つであるネオアガロビオース加水分解酵素 (NAH) の諸性質について検討し、当該組換え大腸菌を使用したネオアガロビオースからの 3,6-アンヒドロ-L-ガラクトースの生産について検討した。本年度は、寒天からネオアガロオリゴ糖を生成する寒天分解酵素 β -アガラーゼの精製ならびに諸性質について検討した。

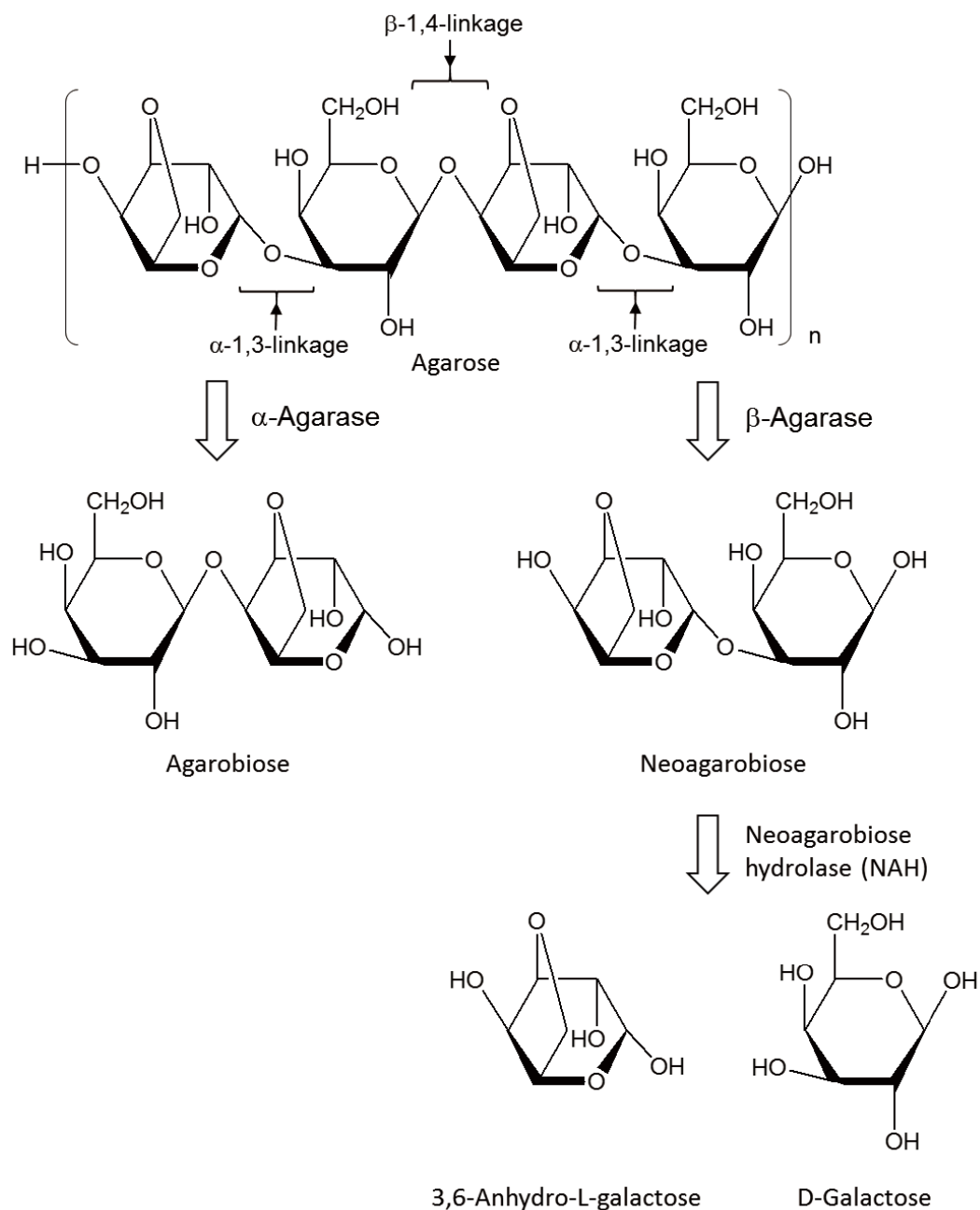


図3 寒天からの寒天オリゴ糖および関連有用物質生産

我々は、寒天を唯一の炭素源として利用可能な微生物の探索により、 β -アガラーゼおよび NAH 活性を有する *Cellvibrio* sp. WU-0601 を単離した。今回、*Cellvibrio* sp. WU-0601 から 4 段階の精製工程を経て、ネオアガロビオース (NA2) 生成型 β -アガラーゼ (AgaX) を SDS-PAGE で単一のバン

ドになるまで精製し、諸性質を検討した。さらに、得られた精製酵素の N-末端アミノ酸配列情報を基に、AgaX をコードする遺伝子を取得した。精製した AgaX は、SDS-PAGE およびゲルろ過による分子量はそれぞれ約 82kDa および約 87kDa であり、モノマー酵素であることを確認した。至適 pH は 7.5、至適温度は 40℃であった。また、当該酵素遺伝子は、798 残基のアミノ酸をコードする 2,394 bp の ORF から成る配列を有していた。しかし、遺伝子開始コドン(ATG)から 31 番目のアミノ酸残基を精製酵素は欠失しており、この領域は疎水性アミノ酸に富むシグナルペプチドで、切断されて成熟型となり活性を示すものと考えられる。当該酵素のアミノ酸配列は、*Saccharophagus degradans* 2-40 の Aga50A および *Vibrio* sp. strain JT0107 の AgaB とそれぞれ 48%と 41%の相同性を示した。

3. 共同研究者

木野 邦器（先進理工学部・応用化学科・教授）

石井 義孝（理工学研究所・バイオプロダクション研究プロジェクト・招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) Purification, characterization and gene identification of a α -neogaroooligosaccharide hydrolase from an alkaliphilic bacterium *Cellvibrio* sp. WU-0601, T. Watanabe, K. Kashimura, and K. Kirimura, *J. Mol. Catal. B: Enzym.*, **133**, S328-S336(2017).
- (2) Electrodialytic separation of levulinic acid catalytically synthesized from woody biomass for use in microbial conversion, H. Habe, S. Kondo, Y. Sato, T. Hori, M. Kanno, N. Kimura, H. Koike, and K. Kirimura, *Biotechnol Prog.*, **33**(2), 448-453 (2017).

4.2 総説・著書

- (1) Enzymatic Kolbe-Schmitt reaction for the syntheses of value-added compounds: use of biocatalysts for carboxylation of organic compounds and bioproduction in “Future Directions in Biocatalysis, 2nd ed.”, (T. Matsuda ed), K. Kirimura, and Y. Ishii, pp.135-147, Elsevier, London (2017).
- (2) 食品に添加する有機酸をつくる微生物,「食と微生物の事典」(北本勝ひこ編), 桐村光太郎, p.158-159, 朝倉書店, 東京 (2017).

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

- (1) シアン非感受性呼吸系酵素遺伝子とオキサロ酢酸加水分解酵素遺伝子を高発現させた *Aspergillus niger* によるシュウ酸生産, 吉岡 育哲, 小林 慶一, 桐村 光太郎, 日本農芸化学会 2018 年度大会 (名古屋), 講演要旨集 2A07a14, 2018 年 3 月.
- (2) 比較トランスクリプトーム解析による *Pseudomonas* 属細菌由来レブリン酸代謝系酵素遺伝子

の取得と機能解析, 羽部 浩, 小池 英明, 佐藤 由也, 飯村 洋介, 稲葉 知大, 堀 知行, 菅野 学, 木村 信忠, 桐村 光太郎, 日本農芸化学会 2018 年度大会 (名古屋), 講演要旨集 2A12p06, 2018 年 3 月.

- (3) *Xanthomonas campestris* WU-9701 由来のグルコース転移酵素を利用した ethyl α -D-glucopyranoside の高収量生産, 恩田 裕, 渡邊 理沙, 中里 美穂, 桐村 光太郎, 日本農芸化学会 2018 年度大会 (名古屋), 講演要旨集 3A10a11, 2018 年 3 月.
- (4) 好アルカリ性細菌 *Cellvibrio* sp. WU-0601 由来ネオアガロビオース生成型 β -アガラーゼの精製と酵素の諸性質の検討および遺伝子の同定, 樫村 佳奈, 岡本 真歩, 石井 義孝, 桐村 光太郎, 日本農芸化学会 2018 年度大会 (名古屋), 講演要旨集 3A26a06, 2018 年 3 月.
- (5) *Pseudomonas* 属細菌の *trans*-アコニット酸資化性に必須なアコニット酸イソメラーゼ, 滝口 有沙, 平磯 一輝, 桐村 光太郎, 日本農芸化学会 2018 年度大会 (名古屋), 講演要旨集 3A26a09, 2018 年 3 月.
- (6) *Pseudomonas* 属細菌の ABC 輸送体基質結合タンパクと推定されていた新規なアコニット酸イソメラーゼの発見, 平磯 一輝, 滝口 有沙, 丸海老 純也, 桐村 光太郎, 第 69 回日本生物工学会大会 (東京), 講演要旨集 4P-G008, 2017 年 9 月.
- (7) *Xanthomonas campestris* WU-9701 由来 α -グルコース転移酵素を用いた ethyl α -D-glucopyranoside の選択的な高収量生産, 恩田 裕, 中里 美穂, 桐村 光太郎, 第 69 回日本生物工学会大会 (東京), 講演要旨集 4P-G009, 2017 年 9 月.
- (8) 糸状菌 *Aspergillus niger* における alternative oxidase 遺伝子高発現によるシュウ酸生産速度の向上, 吉岡 育哲, 小林 慶一, 桐村 光太郎, 第 69 回日本生物工学会大会 (東京), 講演要旨集 4P-G062, 2017 年 9 月.

5. 研究活動の課題と展望

可逆的脱炭酸酵素の機能改変による「スーパー生体触媒」の開発については、立体構造モデリングを駆使して活性向上に有効な変異箇所をさらに選定し、多重変異を導入した「超」優良型の改変型 Sdc を作製する。一方、今回取得した *Cellvibrio* sp. WU-0601 由来の寒天加水分解酵素 β -アガラーゼ (AgaX) 遺伝子を導入した組換え大腸菌を用いて、寒天からのネオアガロビオース生産について検討を継続する。 β -アガラーゼ AgaX のアガロース分解様式の解析などの諸性質の検討も継続する。さらに、以前取得した *Cellvibrio* sp. WU-0601 由来のネオアガロビオース加水分解酵素を利用することで、寒天あるいは未利用寒天を含む海藻残渣からのネオアガロオリゴ糖および 3,6-アンヒドロ-L-ガラクトース生産について検討する。

自動車技術と持続可能なモビリティに関する研究

研究代表者 草 鹿 仁

(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

自動車は、人の移動と物流に関わる高い利便性を提供する一方で、大気汚染の悪化、石油の大量消費、ひいては地球温暖化に関わる多量の CO2 排出など、環境・エネルギーに関わる極めて深刻な社会問題を招いている。そこで本研究では、各種の環境対応車（低排出ガス車、石油代替燃料車、低燃費車など）と燃料・エネルギーの開発・性能評価、さらに情報技術（自動運転、IOT、AI、BigData など）を通じてこれらの諸問題の解決方を追究し、その成果を社会に提示することを目的とする。具体的には、ガソリン車、クリーンディーゼル車、ハイブリッド車、プラグイン・ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車、各種燃料、水素、電気を対象とし、その性能と低環境性や情報技術の活用、環境と安全に関わるヒューマンファクターを含めた技術の調和による効果等を評価する。また、実際に環境対応車の製作や性能・走行シミュレーション、自動車用動力システムの開発・評価を行いその有効性を明らかにすることを狙いとする。さらにこれらを通じて 2020 年から 2050 年を見据えた抜本的な CO2 削減のあり方について検討する。

2. 主な研究成果

2.1 急速圧縮膨張装置を用いた副室天然ガス機関の燃焼特性に関する研究

本研究では、希薄燃焼に伴う燃焼速度の低下といった欠点を改善する方法として、副室式の燃焼方法に着目した。実験では、空気過剰率や副室諸元を変えた場合の副室噴流特性と副室燃焼による燃焼特性を調べるために、燃焼観察が可能な急速圧縮膨張装置（以下 RCEM: Rapid Compression and Expansion Machine）を用いた。RCEM では、アクリル製のシリンダーヘッドと高速度ビデオカメラ (MEMRECAM GX-8) を用いることで燃焼室内の火炎の挙動を撮影することができるだけでなく、ピストンヘッド先端を交換することにより、圧縮比や燃焼室形状を変えることが可能となっている。以下の図 1~4 及び表 1, 2 に装置図、仕様、可視化範囲、副室キャップ図、シリンダーヘッド断面図を示す。

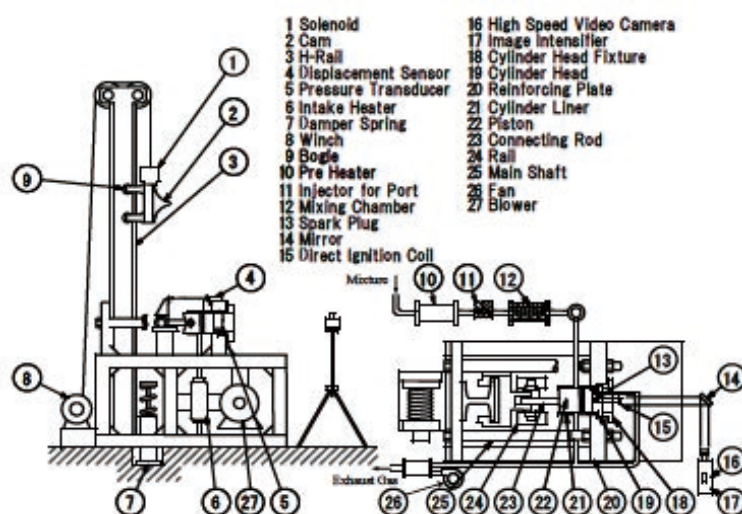


Fig.1 Schematic of RCEM

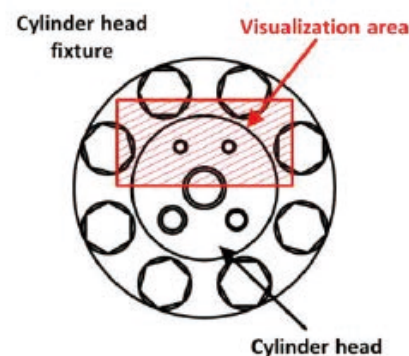


Fig.2 Visualization area

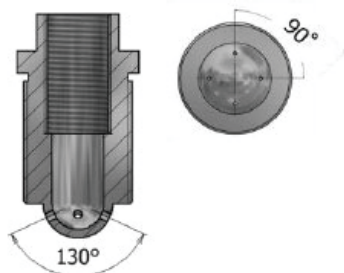


Fig.3 Pre-chamber cap

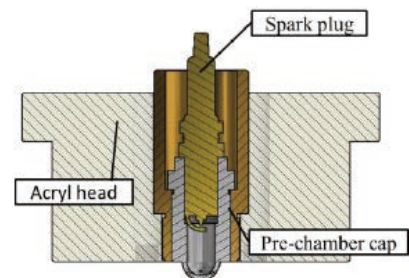


Fig.4 Cross-sectional view of cylinder head with pre-chamber

Table 1 RCEM's specifications and conditions

Bore×Stroke mm	125×140
Displacement cc	1718
Compression ratio	15
Engine speed rpm	800
Cylinder liner temp K	383
Intake gas temp K	383
Fuel	CNG(13A)

Table 2 Pre-chamber cap specification

Volume cc	2.60		
Volume ratio % ($V_{\text{pre-chamber}}/V_{\text{TDC}}$)	2.14		
Hole diameter mm	1.00	2.00	3.00
Number of holes	4		

2.1.1 空気過剰率が燃焼に与える影響の調査

連絡孔径2.0mmの副室キャップを用いて、空気過剰率を変化させたときの実験条件を表3に示す。また圧力履歴と熱発生履歴を図5に示し、各条件の燃焼画像を図6~8に示す。

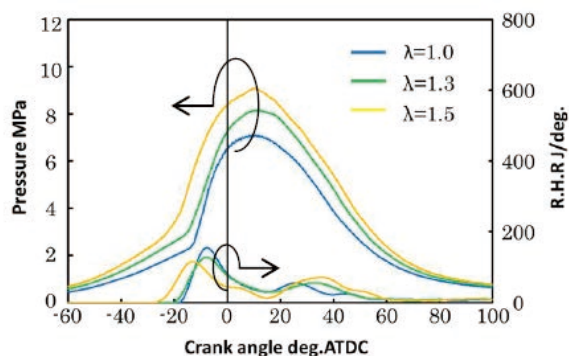


Fig.5 Pressure traces and released heat rates (Comparison of excess air ratios)

Fig.6 Images of pre-chamber combustion ($\lambda=1.0$)Fig.7 Images of pre-chamber combustion ($\lambda=1.3$)Fig.8 Images of pre-chamber combustion ($\lambda=1.5$)

Table 3 Test conditions (Comparison of excess air ratios)

Excess air ratio	1.00	1.30	1.50
Initial pressure kPa	113	144	164
CA50 deg. ATDC	5~10		
Ignition timing deg. ATDC	-20	-24	-35
Swirl ratio	1.80		
Input energy kJ	5.05		
Hole diameter mm	2.00		

図 5 から、熱発生率が二段になっていることがわかる。燃焼画像から、いずれの空気過剰率においても、一つ目の熱発生生のピークは、副室噴流が壁面に到達した時期であり、二つ目のピークは、主燃焼室内の混合気の火炎伝播が生じている期間であることが確認される。また、予混合気が希薄になるにつれて、一つ目の熱発生生の立ち上がりが低くなる傾向がある。次に、得られた燃焼画像から、副室からの噴流火炎が画像として確認できる位置から、壁面に至るまでの噴流の平均速度を測定した。その結果を図 9 に示す。また総熱発生量に対する積算熱発生量割合が 10~80%の期間を燃焼期間として計算した結果を図 10 に示す。

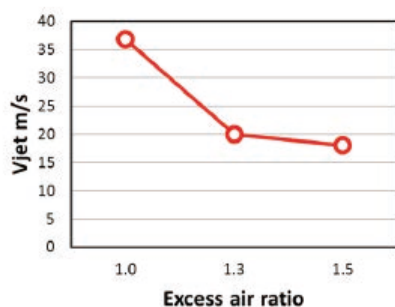


Fig.9 Mean pre-chamber jet velocity
(Comparison of excess air ratios)

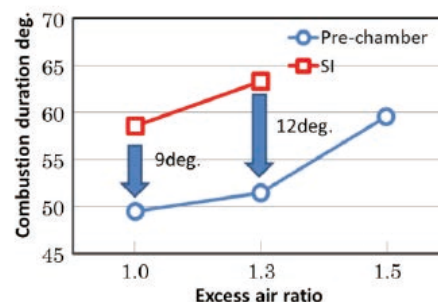


Fig.10 Combustion duration
(Comparison of excess air ratios)

図 9 より、空気過剰率が増加すると、副室噴流速度が低下することがわかる。これは、混合気が希薄になると、副室内での火炎による温度・圧力が低下し、副室と主室の差圧が低くなり、連絡孔付近の噴流速度が減少することと、主室での燃焼速度が減少するためと考えられる。この噴流速度の低下により、主室での乱流混合の促進が弱まり、上述の熱発生生の立ち上がりが低くなったものと考えられる。また図 10 より、通常の火花点火では、 $\lambda=1.5$ の希薄条件では燃焼が生じなかったのに対して、副室燃焼では、同条件でも燃焼が発生したことがわかる。この要因としては、副室内は主室よりも温度が高いため点火しやすい条件となることとも考えられる。また、いずれの希薄条件でも、副室燃焼の方が火花点火より、燃焼期間が約 10deg.減少していることがわかる。これより副室燃焼は希薄限界を伸ばす効果があることと、燃焼期間を短縮する効果があることがわかった。

2.1.2 連絡孔径が燃焼に与える影響

$\lambda=1$ の条件において、初期圧を 113 kPa と一定にしたうえで、副室の連絡孔径を 1.00, 2.00, 3.00 mm と変化させ、他の条件は表 3 に揃えた場合の圧力と熱発生履歴を図 11 に示す。図 11 では比較のために、点火時期-35deg.ATDC における火花点火における圧力・熱発生履歴を併記する。また、各条件の燃焼画像を図 12~14 に示す。

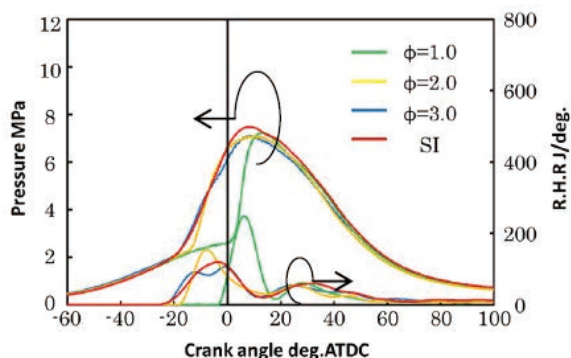


Fig.11 Pressure traces and released heat rates
(Comparison of hole diameter)

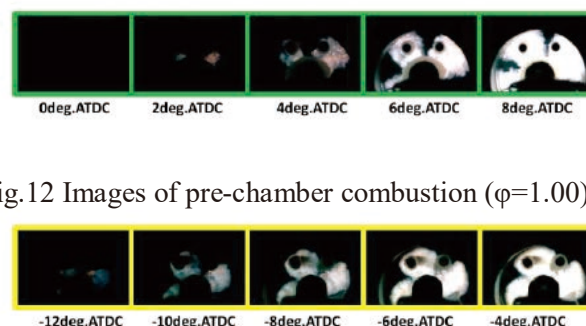


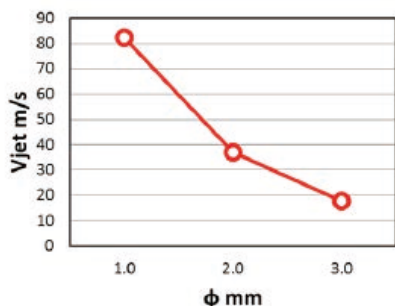
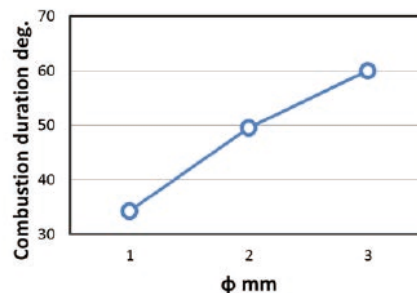
Fig.12 Images of pre-chamber combustion ($\phi=1.00$)



Fig.13 Images of pre-chamber combustion ($\phi=2.00$)

Fig.14 Images of pre-chamber combustion ($\phi=3.00$)

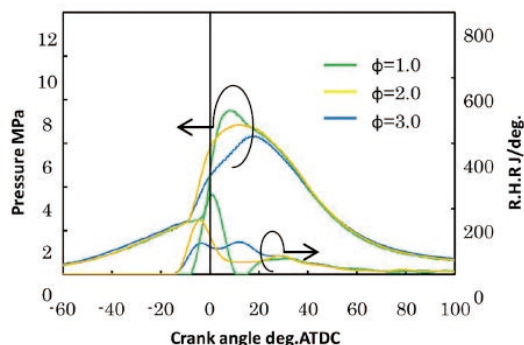
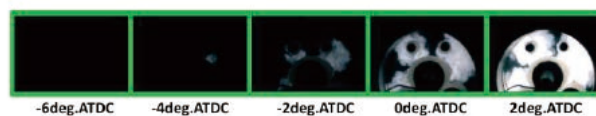
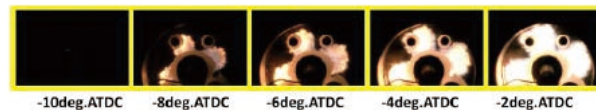
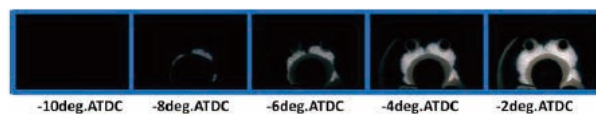
副室連絡孔径による圧力・熱発生率の違いを見ると、孔径が小さくなるほど圧力の立ち上がりが急峻になり、同時に熱発生も急峻で高くなる傾向がみられる。これは、副室噴流の燃焼画像からも見てとれる。孔径が小さいほど、副室と主室との差圧が大きくなり、副室噴流が勢いよく噴出しているためだと考えられる。次に副室噴流平均速度と燃焼期間をそれぞれ図 15, 16 に示す。

Fig.15 Mean pre-chamber jet velocity
(Comparison of hole diameters)Fig.16 Combustion duration
(Comparison of hole diameters)

連絡孔径のよる副室噴流速度への影響を見ると、連絡孔径が小さくなると噴流速度は大きくなっていることがわかる。これは連絡孔径が小さいほど、副室と主室との絞りが大きくなり、より大きな差圧が生じることが要因と考えられる。連絡孔径を変化させた場合も、噴流速度が高いほど、主燃焼室の混合気の燃焼が促進され、急峻な圧力・熱発生となり、燃焼期間が短縮される効果がある。

2.1.3 点火時期一定での調査

$\lambda=1$ の条件において、初期圧及び点火時期をそれぞれ 113 kPa, -14 deg. ATDC として、副室の連絡孔径を 1.00, 2.00, 3.00 mm と変化させ、他の条件は表 3 に揃えた際の圧力と熱発生の履歴を図 17 に示し、各条件の燃焼画像を図 18~20 に示す。

Fig.17 Pressure traces and released heat rates
(Ignition time is constant)Fig.18 Images of pre-chamber combustion ($\phi=1.00$)Fig.19 Images of pre-chamber combustion ($\phi=2.00$)Fig.20 Images of pre-chamber combustion ($\phi=3.00$)

点火時期一定にした時の圧力・熱発生率を見ると、孔径 1.0mm の熱発生の上り上がりは、点火時期から遅れていることがわかる。燃焼画像からもわかる通り、孔径 1.0mm の噴流が確認できる時期は、それより大きい孔径の時よりも遅い。これは、連絡孔径が小さいと噴出速度は増す反面、噴出量自体が減少するためと考えられる。孔径 2.0, 3.0mm の場合は、このような噴流の遅れは見られない。孔径 2.0, 3.0mm の圧力・熱発生の上り上がり時期は同じであるが、孔径 3.0mm の方が熱発生の上り上がりピークが小さく緩慢な燃焼となっている。

2.1.4 共同研究者

田那村 正志（草鹿研究室・修士）

関 尚人（草鹿研究室・修士）

村川 周平（草鹿研究室・修士）

喜久里 陽（草鹿研究室・助教授）

大聖 泰弘（理工学術院・教授）

草鹿 仁（理工学術院・教授）

2.2 燃料電池ごみ収集車の環境性能および実用性に関する研究

地球温暖化や石油の枯渇化などの環境問題が深刻化する中で、温室効果ガスであるCO₂ 排出量削減や省エネルギー化が急務となっている。自動車産業では自動車の電動化が盛んに開発されている中、運輸部門のCO₂ 排出の3割以上を占める貨物自動車の電動化は比較的遅れている。水素と酸素を燃料とする燃料電池（以下、FC）自動車はそのエネルギー密度の高さから、長距離走



Fig. 1 Fuel Cell Garbage Truck

行をする乗用車や重量制限のある貨物自動車への適用が期待されている。FC 自動車は Well to Wheel（以下、WTW）で CO₂ 排出量を削減できるだけでなく、大気汚染の原因となる有害ガスを排出せず走行音が静かである。本研究では、住宅街を走行するごみ収集車において、より FC の導入効果が高いと考え、図 1 に示すような燃料電池ごみ収集車（以下、FC 車）を開発し、山口県周南市の関門・今宿南の2つのごみ収集ルートに2016年10月から2017年9月まで導入し実証試験を行った。本年度は、実証試験に基づき、既存のディーゼルごみ収集車（以下、Diesel 車）を FC 車に代替することによる CO₂ 排出量削減効果を算出した。また、空調に着目して季節変動が電費に与える影響を明らかにした。さらに、FC システムの出力制御方法を改善することで更なる CO₂ 排出量削減を検討した。

2.2.1 燃料電池ごみ収集車

実証試験の対象地域として水素循環型社会へ関心があり中国地方で唯一水素ステーションがある山口県周南市の関門・今宿南ルートを選定した。周南市の Diesel 車のごみ収集ルート調査から、一般的な走行に対してごみ収集時は停発車頻度が多く低速運転であるごみ収集走行があることが確認され、ごみ収集走行時間は全運行時間の約半分ほどであった。したがって、ごみ収集車は一般的な重量車両に対して低出力運転の割合を多く占めるという特徴を持つ。また、ごみ袋回収時にはごみ収集車は停車されるため、アイドル運転時のエネルギー消費が大きい。さらに、架装部にごみ袋を積み込むための回転板や押出板があり、これらを駆動させる架装部駆動エネルギーが生じる。

本研究では、周南市のごみ収集ルートや地形、過去の運行実績に基づいて FC 車の設計をした。航続距離 100 km、最高速度 65 km/h、ごみ満載時に勾配 20 %の登坂を目標とし、ディーゼル 4 トントラックをベース車両として FC 車に改造した。開発した FC 車の諸元を表 1、FC 車システム構成図を図 2 に示す。キャビンの後ろに FC 関連装置を搭載し、FC システム(FC)や水素タンク H_2 Tank)、各種配管などを内蔵した。FC システムは出力に依存して作動効率が変動する。FC システムを高効率で作動させるために 10 kW 付近の一定で出力し、バッテリー SOC に合わせて ON-OFF 制御を行った。ただし、季節によって空調利用に伴う要求出力の増加が予想されたため、空調利用に合わせて FC システムの出力の調整を行った。また、ベース車両からエンジンや燃料タンクなどを取り除き、モータ(Motor)、インバータ(IVT)、昇圧コンバータ(DC)などを新たに搭載した。FC システムの出力値は一定であるため車両要求出力の変動をバッテリーで補う必要があり 26.5 kWh のリチウムイオン電池 (Li-Batt)を搭載した。リチウムイオン電池は減速時などにおけるモータの逆起電力からエネルギーを回生できるようになっている。さらに、運行中は特徴が異なる一般走行とごみ収集走行があるため、各走行に対応した2段の変速機(T/M)に改造した。なお、Loading Hopper は架装部、PTO は動力取出し機構、 P_{AUX} は車両の補機電力、Pb-Batt は鉛電池を示す。

Table 1 Specifications of Fuel Cell Garbage Track

Size	L7080mm × W2190mm × H2560mm
Gross Weight	6140 kg
Payload Weight	1750 kg
Powertrain	PMSM Motor
Max Power	150 kW
Max Torque	400 Nm
Transmission	2 Speed AMT
Battery	LTO/ 26.5 kWh
Fuel Cell	PEMFC/ 33kW
H2 Tank	36L/70MPa×2

2.2.2 実証試験概要

2016 年 10 月から 2017 年 9 月まで山口県周南市の関門・今宿南ルートを対象に実証試験が実施され、133 日間運行された。関門ルートは月曜日と木曜日、今宿南ルートは火曜日と金曜日の運行で各日可燃ごみの収集が行われた。ただし、祝日や運休日、FC 車のメンテナンス日は従来の Diesel 車でごみ収集作業が行われた。1 日あたりの平均走行距離は 82.7 km、平均収集ごみ重量は 4,211 kg であった。

実証試験が行われた周南市の地図を図 3 に示す。FC 車の 1 日の運行は、まず、徳山ビルサービス事務所の車庫(Garage)からその日の収集エリアまで移動しごみ収集作業を行う。ごみが満載になったら恋路クリーンセンター(Incineration plant)でゴミを降ろす。その後、水素の残量次第で水素ステーション(H₂ station)で水素を充填しごみ収集を再開する。このサイクルを 1 日の運行中に 2~3 回繰り返す。最後に徳山ビルサービス事務所に戻り、洗車などのメンテナンスをして 1 日の運行を終える。

1 年間の実証試験中で走行距離や平均速度などを考慮して最も平均的であった 2016 年 11 月 29 日、今宿南ルートの FC 車の 1 サイクルの速度パターンと FC 車のごみ積載量の推移を図 4 に示す。速度パターンから FC 車においても速度域が高い一般走行と速度域が低く停発車頻度が多いごみ収集走行があることが確認できる。一般走行の平均速度は 22.9 km/h、ごみ収集走行の平均速度は 5.6 km/h であった。また、FC 車全体の走行時間に対して一般走行が 51.7 %、ごみ収集走行が 37.5 %であった。

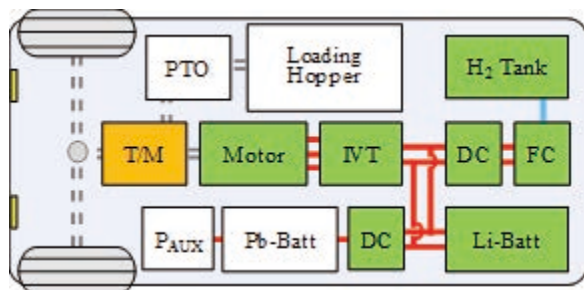


Fig. 2 FC vehicle system configuration



Fig. 3 Map of garbage collection route of Shunan city

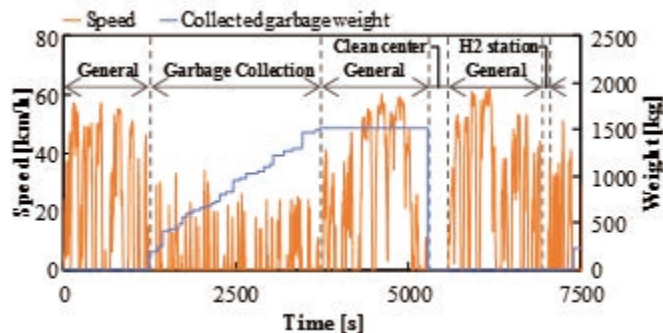


Fig. 4 Speed and garbage weight pattern of Imajuku-Minami route (1 cycle)

2.2.3 CO₂排出量削減効果

1 年間の実証試験の実績から周南市における従来の Diesel 車の運行に対する FC 車の WTW での CO₂ 排出量削減効果を明らかにする。Diesel 車と FC 車の CO₂ 排出量は式(1)に基づいて算出した。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = \text{燃料の CO}_2 \text{ 排出係数} / \text{燃費} \quad (1)$$

Diesel 車は、2015 年 11 月から 1 年間の運行実績から Diesel 車の燃費を算出し、軽油の CO₂ 排出係数は 2.83 kg-CO₂/L を用いた。FC 車は、測定した水素流量より、CO₂ 排出係数 0.89 kg-CO₂/Nm³ を用いて算出した。Diesel 車と FC 車の月別 CO₂ 排出量を図 5 に示す。月別の FC 車 CO₂ 排出の傾向として冬季と夏季に CO₂ 排出量が多くなっており 2 つのピークが存在している。実証試験を通した年間平均の CO₂ 排出量は Diesel 車で 0.83 kg-CO₂/km, FC 車で 0.52 kg-CO₂/km だった。FC 車は Diesel 車に対して CO₂ 排出量を 20.1 %~47.2 %, 年間で 37.3 %削減したことが確認された。

2.2.4 燃料電池ごみ収集車の電費

季節変動が FC 車のエネルギー消費に与える影響を明らかにする。ただし、FC 車は FC システムとバッテリーから電力を供給しているので、ここでは水素燃費ではなく電費で評価を行った。FC 車の電費を走行電費、空調電費に分類して月別の電費推移を図 6 に示す。なお、2016 年 10, 11, 12 月は空調による消費エネルギー増加に伴う FC 車の航続距離の低下を懸念し、空調を使用しなかった。FC 車の電費は 1 月と 8 月に 2 つのピークがあることが分かる。FC 車の年間平均電費は 0.71 kWh/km であった。

走行電費は年間を通して変化が小さく一定を保っており季節変動による影響は確認されなかった。一方、空調系電費は冬季と夏季に電費が悪化しており、最も電費の良かった 2017 年 3 月 0.03 kWh/km に対して最も電費が悪かった 2017 年 1 月は 0.07 kWh/km であった。山口県周南市の月別平均気温に対するヒータとエアコンの平均出力を図 7 に示す。暖房平均出力は気温の低い冬季に多く、気温の高い夏季に冷房の出力が高いことが確認できる。FC 車は気温に応じた空調の使用がされており、冷暖房の使用によって FC 車の電費が悪化し、図 5 の冬季と夏季の CO₂ 排出量増加に起因したと言える。

2.2.5 燃料電池システムの平均出力と効率

FC システムの特性上、FC システムを 10 kW 付近で出力させることで、効率よく水素を消費することができる。空調システムを含む走行に要求された平均出力と実際に FC システムが発電した平均出力と FC システムの作動効率を図 8 に示す。図より、年間を通して FC システムは車両要求を超える出力をしていた。特に 1 月や夏季において著しく超過した。これは、空調を使用していない 2016 年 10, 11, 12 月は 12 kW 付近に設定していたが、空調の使用のために出力を上げたためであ

る. しかしながら, 図 9 より, 実際の空調システムの出力は最大 1.1 kW 程度で 1 月の車両が要求した平均出力は 12.0 kW であったが, 1 月の平均出力は 17.0 kW だった. また, 空調使用がない 10, 11, 12 月の FC システムの平均効率²⁾は 52.5 %であったが, 空調のための出力調整後の 1 月から 9 月は平均 48.5 %であり, 約 4 ポイント作動効率が低下していたことが判明した. よって, FC システムは必要以上に高い出力かつ低い効率領域で発電していたと言える.

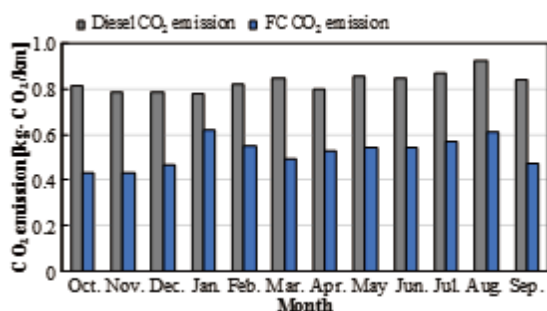
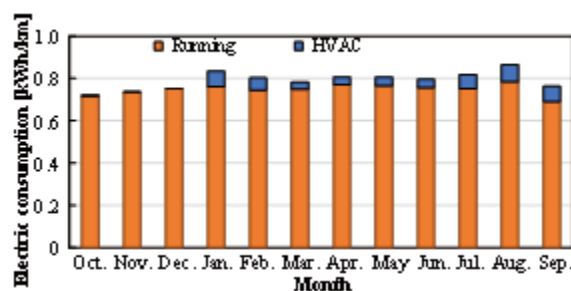
Fig. 5 Reduction of CO₂ emission

Fig. 6 Seasonal variation of energy consumption

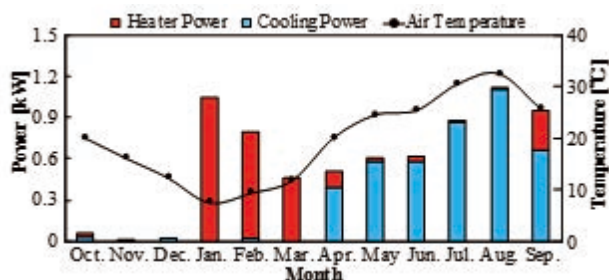


Fig. 7 HVAC power

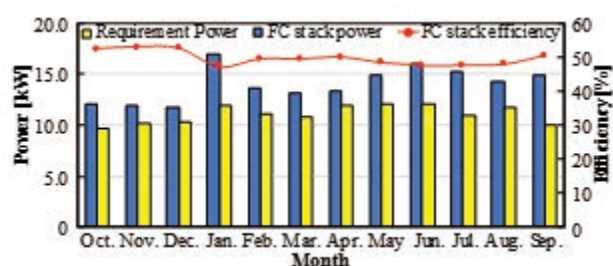


Fig. 8 Vehicle traveling average power and FC system output

2.2.6 共同研究者

中作 祥太 (紙屋研究室・修士)

金 秉炫 (紙屋研究室・修士)

李 鎬式 (紙屋研究室・博士)

廣田 壽男 (紙屋研究室・客員教授)

紙屋 雄史 (紙屋研究室・教授)

井原 雄人 (株早稲田アカデミックソリューション)

山浦 卓也 (株フラットフィールド)

3. 研究業績

3.1 学術論文

田那村正志, 関尚人, 村川周平, 喜久里陽, 草鹿仁, 大聖泰弘, 急速圧縮膨張装置を用いた副室式天然ガス機関の燃焼特性に関する研究, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

三輪善裕, 永塚勇斗, 周ベイニ, 草鹿仁, 船用中速ディーゼル機関の混合気形成シミュレーション, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

永塚勇斗, 三輪善裕, 周ベイニ, 草鹿仁, 詳細素反応過程を考慮した三次元流体シミュレーションによる船用ディーゼル機関の排出ガス性能向上に関する研究, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会講演会.

石手雄大, 八幡萌, 中山隆雄, 小島啓, 草鹿仁, ガソリンエンジンにおける 1 次元燃焼モデルの高精度化に関する研究, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会講演会.

高橋克仁, 草鹿仁, 宮内祐輔, 田辺光昭, 急速圧縮装置を用いた HCCI の可視化及び数値計算による生成化学種の検討, 第 55 回燃焼シンポジウム論文集, B311.

山口恭平, 喜久里陽, 草鹿仁, 大聖泰弘, 燃料改質を適用した圧縮着火エンジンに関する数値解析, 自動車技術会論文集 49 巻 2 号.

畑裕登, 滋野豪規, 滋野玄規, 植西徹, 福岡隆雄, 草鹿仁, Diesel Oxidation Catalyst 内部での Hydro Carbon 酸化反応に及ぼす活性サイト密度の影響に関する研究, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

滋野豪規, 畑裕登, 滋野玄規, 植西徹, 福岡隆雄, 草鹿仁, 複数炭化水素の競争吸着が酸化反応挙動に及ぼす影響の実験的解明, 第 28 回内燃機関シンポジウム.

薄井陽, 大橋禅, 森元溪, 草鹿仁, 福岡隆雄, 北村高明, 松野真由美, 武田好央, 木下幸一, ディーゼルパティキュレートフィルタ内のアッシュ堆積・輸送に関する研究(第一報)~X 線 CT 線形によるアッシュ堆積密度分布の定量化~, 自動車技術会論文集.

卯滝舜, 塚本佳久, 草鹿仁, NH₃ 選択還元型触媒をコートした Diesel Particulate Filter の内部輸送現象の研究~PM 堆積と燃焼が NO_x 浄化に及ぼす影響解析~, 日本機械学会四国中国支部第 56 期総会・講演会.

Shota Nakasaku, Byunghyun Kim, Hosik Lee, Toshio Hirota, Yushi Kamiya, Yuto Ihara, Takuya Yamaura, A Study on Environmental Performance and Commercialization of a Fuel Cell Garbage Truck (Forth Report), JSAE KANTO International Conference of Automotive Technology Engineers (ICATYE), B3-2, pp.1-4 (2018).

4. 研究活動の課題と展望

運輸交通問題改善には, 機械工学をはじめ, 電気工学, 運輸交通システム, 環境工学, 情報通信技術等にわたる幅広い分野における研究が必要とされる. 今後はパワートレイン変革への備えをも意識し, トータルモデリングの方法を思索ながらも, 当面求められる効率向上及び, 排ガスのクリーン化を目指し, 有効な技術の具体的な評価を行うことで, 運輸交通分野の CO₂ を 2020 年で 30%, 2030 年で 50%, 2050 年で 70%~80% の削減を実現する方策を提示したい.

建築デザインを介した生活空間支援の実践的研究

研究代表者 小林 恵吾
(創造理工学部 建築学科 准教授)

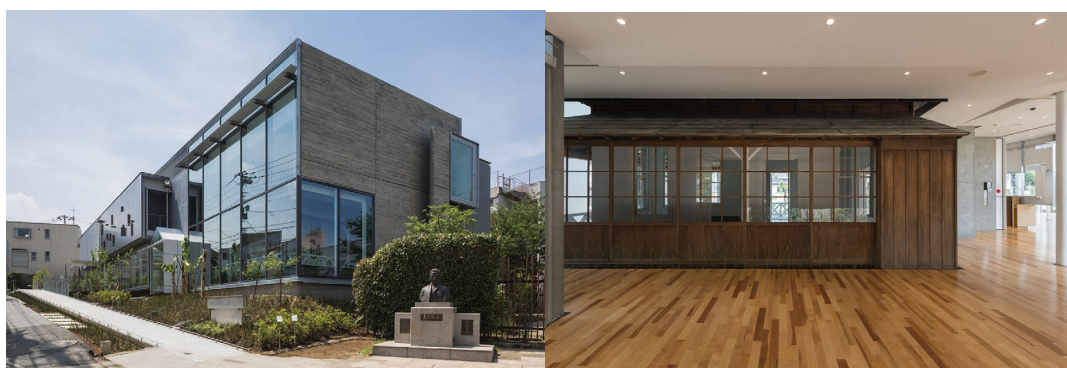
1. 研究課題

時代の変革期において、建築の概念も変化してきており、その自覚のもとに建築デザインを介して、社会における多様で、新しいニーズにどのように対応していくかが問われている。建築的遺構の修復・再生とそれに伴う街の活性化支援、地方歴史的都市の街づくり支援、また都市の文化的施設の多様な展開における記念館等建築の今日的在り様、さらに幼児・初等教育環境の空間的在り方などをキーワードとして、当該研究は建築デザインが社会におけるニーズ動向に対応して、多様で、新しい生活空間要求に支援という視点で、それらの課題をどのように実現できるかを、問うものである。

2. 主な研究成果

2.1 漱石山房記念館

日本で唯一の夏目漱石に関する記念館として2017年9月24日に開館した。建築デザインの指導、それに伴う設計監理の指導、また漱石が関わった庭の造園デザインの指導、展示デザインへの協力等を充当した。主研究として開館まで、新宿区主催の「漱石山房記念館設計プロポーザルコンペティション」の一位作品で、2016年4月に着工し、2017年に建築工事竣工、以降展示工事が9月まで継続し、当該月末に開館を迎える。本計画の設計監理指導を年度初めから今日まで行ってきた。2017年9月24日の開館まで、展示に関するこれからの作業も見守りながら作業を進めているところです。



2.2 人間生活遺構研究

九州、佐賀県鹿島市を対象に街づくり提案を行うとともに、江戸時代から続く酒蔵のある歴史都市である本市のさまざまな研究を行ってきた。7年目に入った今年度は、昨年につき“観光”をキーワードとして、観光の見方を新しい角度で捉えること、今年度は外国人から見た観光の在り方を問うことということで、これまでの歴史的な建築遺構、自然景観に依拠した象徴的認識に対して、鹿島の市民の日常生活圏自身が観光対象になりうることの見方を示すことができた、と考える。

2.3 学会梗概集

山村健、入江正之、美学者パウ・ミラ・イ・フンタナルスの美学について (1)、アントニ・ガウディ・イ・コルネット研究、日本建築学会大会郊外集建築史・意匠、福岡、2017 年 8 月、9401.

3. 共同研究者

入江正之（理工学研究所名誉研究員、早稲田大学名誉教授）

小松幸夫（創造理工学部・建築学科・教授）

長谷見雄二（創造理工学部・建築学科・教授）

田辺新一（創造理工学部・建築学科・教授）

輿石直幸（創造理工学部・建築学科・教授）

山村健（創造理工学部・建築学科・専任講師）

吉川由（創造理工学部・建築学科・専任助手）

和久田幸祐（理工学研究所・招聘研究員）

早田大高（理工学研究所・招聘研究員）

4. 研究業績

4-1 建築作品

- 入江正之、入江京、和久田幸祐、早田大高、フォーカス[建築] 漱石山房記念館（東京都新宿区）、日経アーキテクチャー、2017 年 10 月、No.1106,p.p.28~35。

- 入江正之、入江京、和久田幸祐、早田大高、新宿区立 漱石山房記念館〈内〉と〈外〉の間 XXVI、新建築、2017 年 12 月号、p.p. 第 92 巻 15 号、p.p.120~129。

- 入江正之、入江京、和久田幸祐、早田大高、新宿区立 漱石山房記念館〈内〉と〈外〉の間 XXVI、建築技術、2018 年 3 月号、No.818,p.p.16~41。

- 入江正之、入江京、和久田幸祐、早田大高、新宿区立 漱石山房記念館、ディテール 季刊 - 春季号、No.216,p.p.81~92。

4-2 フィールドワーク

- 入江正之、入江京、和久田幸祐、人見将敏、早田大高、三角俊喜、刃物ミュージアム回廊 基本設計・実施設計等業務委託に係る公募型プロポーザル、2017 年 8 月。

- 入江正之、入江京、人見将敏、早田大高、三角俊喜、六甲山最高峰トイレ新築工事設計業務 公募型簡易プロポーザルコンペティション、2017 年 12 月。

- 入江正之、入江京、人見将敏、早田大高、(仮称)坂本こども園建築設計委託業務公募型プロポーザルコンペティション、2018 年 2 月。

4-3 講演

; 入江正之

- 早稲田大学エクステンションセンター中野校秋季講座

第 1 回、ガウディが生きたカタルーニャの近代。2017 年 10 月 13 日。

第 2 回、ガウディという建築家の登場、カザ・バツリョ。2017 年 10 月 20 日。

第 3 回、カザ・ミラはバルセロナという都市のディテールである。2017 年 10 月 27 日。

第 4 回、グエイ公園、快樂の機械。2017 年 11 月 10 日。

第 5 回、コロニア・グエイ教会の制作態度。2017 年 11 月 17 日。

第6回、サグラダ・ファミリア贖罪聖堂と、今日的な作品の意味。2017年11月24日。

；入江正之

-第95期一橋フォーラム21「魅惑の世紀末」、ガウディ、天空への誘い、2017年11月21日、如水会館、一般社団法人如水会主催。

；入江正之

-前橋工科大学専門講座、まちに浸透する幼稚園、2017年12月14日、前橋工科大学1号館1階、多目的ホール。

；入江正之

-「漱石山房記念館」の建築について（漱石山房記念館と建築巡り）、日本建築家協会関東甲信越支部新宿地域会主催、新宿区榎町地域センター多目的ホール、2017年3月24日。

4-4 記事

- 入江正之、設計メモ・重厚、気品ある存在感を表出、文豪、漱石の息吹を未来に伝承、建設通信新聞、2017年（平成29年）9月25日（月曜日）第18354号、p.7.

- 入江正之、設計メモ、新宿区立 漱石山房記念館、建設経済新聞、平成29年10月4日、第3140号、p.3.

-入江正之、夏目漱石の世界を建築全体に表現する、新建築、2017年12月号、第92巻15号、p.125。

-入江正之、漱石山房記念館の設計の方法、建築技術、2018年3月号、No.818,p.p.30~31。

-入江正之、漱石の世界を建築全体に統べる、ディテール、p.83

5. 研究活動の課題と展望

建築デザインは社会動向（政治、経済、文化、生活等全般）に直催に関わる事象であるがゆえに、常態が本質的に変容を旨としている。現在という状況は、ある傾向を不変として継続、維持していこうとしがちであり、建築デザインの本質的様態を時間の急速な展開の内に見逃してしまいかねない。社会の動向にあるニーズを改めてとらまえ、建築デザインの概念を生活支援に向けて、常に更新していくことが望まれる。生き生きとした取り組む姿勢が必要とされよう。その意味で、この1年間は夏目漱石の存在を建築に表現するという難しい課題を通して、社会に向けて作品を訪れた方に向けてメッセージを送ることができたように思う。

各種建築物の制振構造デザイン手法の高度化

研究代表者 曾田 五月也
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究の目的は、想定を大幅に超えるような地震動が発生した場合にも建物内部や構造体に大きな損傷を与えることなく機能を維持し続けることが可能な構造システムを、パッシブかつ安定した機構を組み合わせてローコストで実現する技術を開発するものである。開発を目指す構造システムは上部構造の高減衰化、損傷集中の抑制、過大応答の防止等の機能を発揮し、大地震動の繰り返しに対しても建物の機能を維持し続けることを可能とするものである。

我が国における戸建て住宅を含む低層建物の建設はそのほとんどが、木造軸組み工法およびツーバイフォー、軽鋼構造(薄板を含む)のいずれかを用いて行われる。これらの建物の構造的な特徴はスリップ型の復元力特性を有していることであり、バイリニア型の復元力特性を発揮する鉄骨ラーメン構造等と比べると、エネルギー吸収能力が低く、繰り返しによる耐力低下が顕著な点にある。一方で、現行の耐震設計法においては建物の耐震安全限界性能を確認する場合の地震動強さは地表面での最大速度 50cm/s が目安とされているが、近年日本各地で記録されている震度 7 クラスの地震動では 100cm/s を超えるものも少なくない。このような過酷な地震動に対しても人や財産に致命的な被害を及ぼすことの無いことはもとより建物の機能を維持出来ることも重要であり、そのためには在来の構造法にとらわれることなく新しい技術を積極的に取り込むことが必須である。

そこで、本研究プロジェクトでは 4-5 階建て程度までの低層建物を主な対象として、単純な機構を構造システムに組み込むことで飛躍的に耐震性能を向上させるローコストな手法の開発を目指した。目指す構造システムでは、摩擦機構を内蔵した耐力壁等を上部構造の耐震要素として組み込むことで靱性とエネルギー吸収能力を大幅に向上させたうえで、層間変形制御装置を設置することで特定の層への損傷集中を抑制すると共に地震エネルギーを建物全体で効率よく消費する。さらに、上部構造と基礎との間に滑り材を挿入する滑り基礎構造を適用することで、過酷な地震動が作用した場合にも、上部構造の応答層間変形及び加速度を頭打ちにするといった 3 種類の異なる機能を組み合わせて構築されるものである。これら 3 種類の異なる要素技術を適切に組み合わせることで、例えば想定を大幅に超えるような地震動が発生した場合にも、建物内部や構造体に大きな損傷を与えることなく機能を維持し続ける構造システムの供給が可能となる。

従来のパッシブ制振構造の多くはダンパもしくは免震部材そのものの機構に工夫を加えることで、意図する振動制御効果を実現することを目指しているが、本プロジェクト研究で開発を目指す構造システムは、摩擦力という安価で安定した力学機構を利用したパッシブデバイス個々の特性を活かし、さらにそれらを組み合わせた構造システムとしてより高度で合理的かつ経済的な「耐震＋制振＋免震」構造の実現を目指すものである。また、本研究では提案する構造システムの理論的な検討に留まらず、具体的かつ実用的なデバイスの開発を行い、実大試験体による性能検証を踏まえた解析手法および構造設計法の構築までを行っている点も大きな特徴である。本研究成果は直

接に低層軽量住宅の耐震安全性向上に資するものであり、社会が求める省資源化に関しても、住宅の長寿命化促進として有効である。また、低層住宅を対象とする実大振動台実験の成果を踏まえて、さらに多様な構造物への応用の途を開き、都市の地震防災体制の強化に寄与する事を目指して実施した。

2. 主な研究成果

■摩擦式エネルギー吸収機構を内蔵する薄板軽量形鋼造耐力壁による中層建築物の耐震設計

薄板軽量形鋼造耐力壁は履歴ループに強いスリップ性状を有しているため、バイリニア型の復元力特性を持つ鉄骨ラーメン構造等に比べるとエネルギー吸収能力が低く、繰り返し振幅による耐力の低下も顕著である。本研究では薄板軽量形鋼造耐力壁に摩擦式エネルギー吸収機構を内蔵することで、地震時の変形と加速度を同時に抑制し、繰り返しの地震動に対しても高い耐震性を維持し続ける構造システムを提案している。今年度は摩擦機構内蔵耐力壁を設置した実寸2層フレームの振動台実験を実施し、種々の地震波入力に対する耐震性について詳細な検討を行った。(図1)

■リンク式流体慣性ダンパによる建築物の制振に関する研究

直下型の地震動にともなって発生することの多い指向性パルス波は構造物の相対的に弱層となる層に損傷集中を発生させる可能性が非常に高い。特定層のみが倒壊に至る層崩壊を防止する機構として、油圧式リンク機構を用いた層間変形制御機構の制振効果を検証するために振動台実験を行った。油圧式リンク機構はリンク式流体慣性ダンパにより構成しているため、変形制御だけでなく負剛性制御による絶対加速度の低減効果や粘性減衰効果による応答値の全般的な低減効果にも期待できるシステムである。振動台実験では試験体の耐力分布によらず2層構造物の変形分布を概ね一様化できること実証し、高い制振効果を発揮することを明らかにした。(写真1)

■接着技術の建築構造への応用 - DIY 制振補強に関する研究 -

本研究では低コスト且つ簡易な施工で実現可能な接着剤接合を用いた「DIY」制震補強工法の開発を目指しており、非専門家であっても設計、施工可能な簡易マニュアルの提案を行っている。2017年度は接着剤接合部の設計法を提案すべく、単純応力下での接着強さの推定方法、及び組合せ応力が作用した場合における接着強さの評価方法を明らかにすることで、ダンパ取付け用金物における矩形接着面の設計法を提案した。また、接着剤接合の施工方法を提案すべく、接着面の不陸や圧縮圧の影響などを明らかにするとともに、上向き作業などにより実際の施工時に発生する問題点などの検証を行い、施工性に優れ、安定した接着強さが発揮される施工方法の提案を行い、接着剤接合を制振補強工法に取り入れる上での実用性を示した。(写真2)

■粘弾性仕口ダンパによる軽量鉄骨造の制振補強に関する研究

本研究では木造軸組構法の耐震補強用に開発された粘弾性仕口ダンパを、かさ上げ用部材を介して鉄骨造建築物の柱梁仕口部に設置することで、低コストながらも高い地震応答低減効果を発揮し、低層鉄骨造建築物の耐震補強促進に極めて有効であることを提案している。2017年度は、既存の3階建て鉄骨造ラーメンを対象として、粘弾性仕口ダンパを弱層の仕口部にかさ上げ設置することによる制振補強効果を、増分解析や地震応答解析により解析的に示した。(図2)

■過酷な地震動の定量的評価と建物の最大応答予測

建築物の耐震性能評価において最大応答変形を予測することは極めて重要である。本研究ではVDRS Format により建物の地震時応答に関わる地震動のエネルギーと建築物の吸収エネルギーとの関係を定量化し、最大応答変形を予測する手法を提案している。今年度は各層の半サイクル吸収エネルギーおよび塑性変形時のモード性状を考慮した増分解析手法の提案を行い、これを用いた各層の最大層間変形の予測手法の提案を行った。

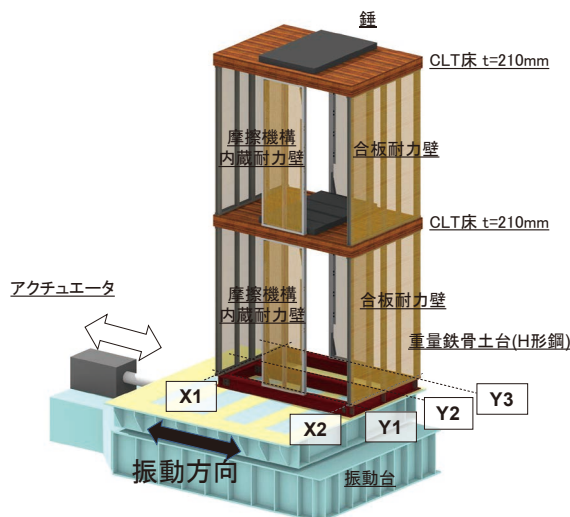


図1 摩擦機構内蔵耐力壁を設置した
実寸2層フレームの振動台実験

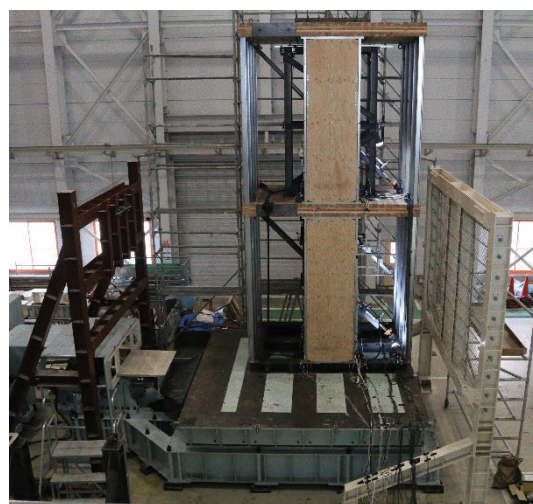


写真1 リンク式流体慣性ダンパを設置した
実寸2層フレームの振動台実験



写真2 接着剤接合部の施工試験

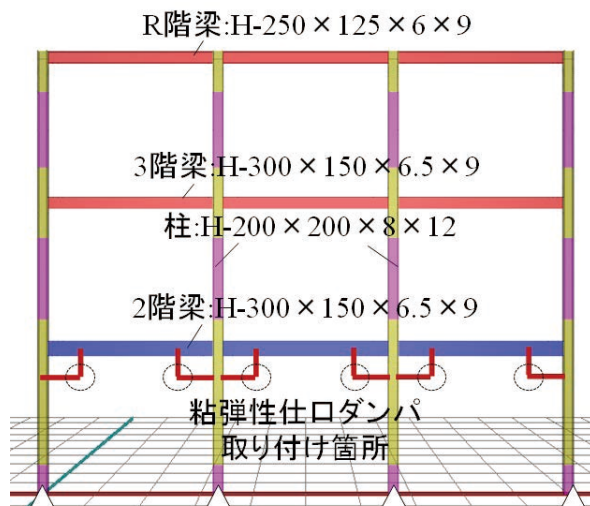


図2 粘弾性仕口ダンパによる軽量鉄骨造の
制振補強の解析モデル図

3. 共同研究者

関谷英一（(株) 鴻池組）、袖山博（三和テッキ（株））、細見亮太（(株) 構造計画研究所）、平田裕一（三井住友建設（株））、岡野照美（光陽精機（株））、山崎久雄、品川亙（ユニオンシステム（株））、武市英博（(株) ハウジングソリューションズ）、中村美咲（(株) 川金コアテック）、渡辺力（日新製鋼（株））、宮津裕次（広島大学）、脇田健裕、渡井一樹（早稲田大学）

4. 研究業績

■学術論文

日本建築学会構造系論文集

- ・リンク式流体慣性ダンパの性能設計法に関する実験的研究, 渡井 一樹、曾田 五月也, 日本建築学会構造系論文集 Vol82., No.725, pp.991-1001, 2017 年 7 月
- ・高靱性・高減衰薄板軽量形鋼造耐力壁の開発とその基本力学性能, 曾田 五月也、脇田 健裕, 日本建築学会構造系論文集 Vol83., No.743, pp.201-210, 2018 年 1 月
- ・部分空間法による 2 層木造軸組工法住宅の振動特性同定, 宮津 裕次、曾田 五月也, 日本建築学会構造系論文集 Vol83., No.745, pp.409-419, 2018 年 3 月

日本鋼構造協会鋼構造論文集

- ・摩擦機構内蔵耐力壁を適用した薄板軽量形鋼造建築物の構造特性係数に関する検討, 脇田 健裕、曾田 五月也, 日本鋼構造協会鋼構造論文集 第 25 巻第 97 号, pp.39-46, 2018 年 3 月

■学会講演

日本建築学会大会(広島)

- ・滑り基礎構造における基礎の過大滑り防止対策 その 1. 解析的検討, 牟田神遼平、曾田五月也、高橋篤史, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.395-396, 2017 年 8 月
- ・滑り基礎構造における基礎の過大滑り防止対策 その 2.上部 1 層試験体を用いた振動台実験, 高橋篤史、曾田五月也、牟田神遼平, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.397-398, 2017 年 8 月
- ・VDRS Format を用いたエネルギー授受に基づく建築物の最大地震応答変形予測に関する研究 その 3.最大層間変形予測手法の提案, 古島優希、曾田五月也, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅱ, pp.151-152, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 6. 摩擦力導入に用いるトルシア形高力ボルトの締付軸力管理, 大岩奈央、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1117-1118, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 7. 潤滑皮膜を持つ溶融 Zn-Al-Mg 合金めっき鋼板を用いた摩擦機構部の単体性能試験, 渡邊力、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1119-1120, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 8. ボルト締付軸力を变化させた実大耐力壁の静的加力試験と 2 次元フレームモデルによる解析的検証, 脇田健裕、曾田五月也、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央、渡辺力, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1121-1122, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 9. 摩擦機構内蔵耐力壁を有する 2 層薄板軽量形鋼造の振動台実験, 斎藤健寛、曾田五月也、脇田健裕、菅原良太、大岩奈央、渡辺力, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1123-1124, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 10. 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した 3 階建て建築物の地震応答解析, 菅原良太、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、大岩奈央, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1125-1126, 2017 年 8 月

- ・油圧式変位増幅機構を用いたパッシブマスドライバーの開発, 渡井一樹、曾田五月也, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.667-668, 2017 年 8 月
- ・軽量鉄骨造ラーメンの粘弾性仕口ダンパによる制振補強に関する研究 -その 3- 実大振動台実験結果を用いた解析的検討, 渡辺啓太、曾田五月也、袖山博、大入慎也、西川翔太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1307-1308, 2017 年 8 月
- ・軽量鉄骨造ラーメンの粘弾性仕口ダンパによる制振補強に関する研究 -その 4- 滑り基礎構造の上部構造用制振ダンパとしての応用, 西川翔太、曾田五月也、袖山博、渡辺啓太、大入慎也, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1309-1310, 2017 年 8 月
- ・低層鉄骨造の DIY 制震補強に関する技術開発 その 14 養生期間中の湿度環境の影響に関する実験的検討, 大入慎也、曾田五月也、花井勉、皆川隆之、渡辺啓太、西川翔太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp. 1311-1312, 2017 年 8 月
- ・低層鉄骨造の DIY 制震補強に関する技術開発 その 15 接着剤の接着強さの寸法効果低減に関する実験的検討, 花井勉、曾田五月也、皆川隆之、大入慎也、渡辺啓太、西川翔太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1313-1314, 2017 年 8 月
- ・超高層建築物のリンク機構による振動モード制御手法に関する研究, 金井佳吾、曾田五月也、渡井一樹, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.723-724, 2017 年 8 月

日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017

- ・リンク式流体慣性ダンパによる構造物の層間変形制御システムの動力学特性に関する研究, 渡井一樹、曾田五月也, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017, USB 論文集 205, 2017.8

■シンポジウム

- ・早稲田大学創造理工学部建築学科曾田研究室主催：第 6 回 制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウムー過酷な地震動にどう備えるかー, 早稲田大学西早稲田キャンパス 57 号館 2 階 201 教室, 2017 年 9 月 22 日

5. 研究活動の課題と展望

今期のプロジェクト研究で取り組んできた制振構造デザイン手法の高度化に関する研究の経過と成果とを要約して記した。いうまでもなく、地震動と建物との組み合わせは極めて多様であり、今回の検討結果を利用して耐震性向上を必要とする全ての事例に対応できるわけではないが、喫緊の課題である低層建物への取り組み方としては整理が進んだと考えている。一方で、他種に対応方法も含めて、過酷な地震動に向けての対応事例が増えない状況にある。これは、対象となる建物の数が余りにも多いことや、人件費を主として工事費用がかさむことが原因であると考え。低層・軽量・小型の建物であれば、構造の施工の専門家ならずとも、場合によれば建物所有者自らがダンパ類の設置工事を行う方法も考慮に値すると思う。実際にシンポジウムでは木造や軽量の鉄骨造を対象として DIY 方式による補強工事が実施可能であることを検証した成果を報告してきている。今後も、積極的に取り組むべき課題と思う。

次世代宇宙システム技術開発

研究代表者 鳥居 祥二
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

本研究では、理工学研究所のメンバーを中心とした早稲田大学側と「次世代宇宙システム技術研究組合」(経産省認可)との共同研究を中心に、広く学内外の研究者・技術者の参加により、具体的に小惑星探査等をターゲットとして、以下の研究目的を達成する。

- ◇ 喜久井町キャンパスの理工研施設を利用した小型衛星の研究・技術開発
- ◇ 技術開発用装置・設備を活用した宇宙機搭載コンポーネントの開発・性能試験
- ◇ 小型衛星による小惑星探査衛星(群)の提案及び概念設計

これにより、これまで JAXA や大メーカーに依存していた、宇宙システムの研究開発を最先端要素技術開発と民生品・既存技術の活用をうまく融合して、宇宙システムの小型・軽量・低消費電力化を図り、低コスト化により超小型衛星の利用を国内外に飛躍的に拡大することを目指している。

2. 主な研究成果

小惑星探査や宇宙科学観測を目的とした、宇宙機器の開発を行うため以下を実施した。

(1) 極低温冷却が必要な赤外線検知器の開発と、試験方法の開発

ペルチェ(電子冷却素子)を用いて -100°C 以下の CCD 冷却を実現するための検知器構造の開発及び冷却制御方式の開発を実施した。

(2) 極低温環境における機器や材料物性計測のための試験設備の開発

将来の惑星探査や、月・火星などにおける基地建設においては、極低温環境下における断熱の技術や、機器の熱制御が不可欠である。また、地上において現在開発が進められている、液体水素タンクや超電導ケーブル、超電導マグネットを宇宙環境において成立させるためには、これらの極低温技術が不可欠であるが、100K 以下の極低温領域における定量的な設備や試験ノウハウは確立していないのが現状である。

本研究において、液体窒素温度(100K)を機器実験や物性測定に使用するための実験設備(液体窒素によるコールドプレート)の開発を実施し、上記(1)の開発に用いるとともに、将来的に物性測定を行うための装置特性の評価、改良を実施した。

(3) 民生技術を利用するための環境試験の実施

宇宙用機器の低コスト化を進めるためには、最先端の民生電子デバイス技術を積極的に利用していく必要があるが、宇宙環境下では使用温度範囲や、真空環境下といった宇宙固有の耐環境性が必要である。本プロジェクトでは、技術開発用装置・設備を利用し、温度サイクル試験・真空試験を利用し、民生マイコンボードやカメラ、通信デバイス等の耐環境性の確認試験と対策を進めていくことで、将来の超小型衛星に必要な技術の確立を進めた。

3. 共同研究者

長谷部 信行（理工研/物理学科 教授）
宮下 朋之（総合機械工学科 教授）
小沢 俊介（物理学科 次席研究員）
浅岡 陽一（理工研 次席研究員）
中須賀 真一（東京大学 工学研究系 教授、招聘研究員）
山口 耕司（次世代宇宙システム技術開発組合 代表理事、招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文（ポスター）

「小型 JASMIN 赤外検出器の冷却システムの開発」第 16 回宇宙科学シンポ 2017/1/5
「太陽電池兼用小型 SAR アンテナの熱設計」第 16 回宇宙科学シンポ 2017/1/5

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

平成 28 年度 神奈川県ものづくり技術交流会超「小型衛星の技術と利用技術」2016/10/28

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

公開セミナー「宇宙探査・衛星システムに関する講演会」開催 2017 年 3 月 16 日
主催：宇宙科学観測研究所 共催：理工学研究所、次世代宇宙システム技術研究組合

5. 研究活動の課題と展望

近年世界的に宇宙産業の活性化が進んでおり、日本においても複数の宇宙ベンチャーが立ち上がっている。産業化に向けて重要なことは、国際競争力維持のための宇宙用基盤技術と人材の育成である。

宇宙用基盤技術は、電気電子デバイス技術・メカトロニクス技術・材料技術、熱制御・構造技術などの要素技術のほか、それらを組み合わせ開発製造していく過程における、製造・組立のための技術や、その性能や品質を保証するための試験技術も大切である。

宇宙特有である熱真空環境を模擬できる熱真空試験チェンバやクリーンブースを利用可能とした本プロジェクトの開発環境は、他の大学や企業にない産学連携の場として非常に有用であり、本プロジェクトで培われた技術や人材が、今日の日本の宇宙ベンチャーの出現や育成のベースとなっていることは大きな成果と言える。

望むべき方向として、開発設備や教育人材の充実を行い、より産学連携を進めることで、国際的な宇宙産業化の流れの中での日本の技術の優位性を確立していくことに貢献できると考えている。

天然物化学を基盤としたケミカルバイオロジー研究

研究代表者 中尾 洋一
(先進理工学部 化学・生命化学科 教授)

1. 研究課題

海洋天然化合物にはユニークな構造や強い生物活性を有するものが数多く知られているが、その作用メカニズムについての報告例はまだ限られている。天然化合物の分子・原子レベルでの作用メカニズム解析がすすめば、医薬品などへの応用・開発研究上、非常に有力な情報を与えてくれるため、これからの天然物化学が進むべき主要な方向性のひとつである。われわれはこれまで海洋生物から広く生物活性物質を探索してきたが、今後このような方向性に沿って研究を展開するためにも、単に新規構造を探索し、構造－活性相関を調べる段階にとどまらず、詳細な作用メカニズムの解析のための取り組みを行っている。

2. 主な研究成果

理化学研究所吉田稔主任研究員らとの共同研究にて、shRNA スクリーニングシステムを使用して、海洋細胞毒性物質の **aurilide B** の標的遺伝子の探索を行い、ATP1A1 を標的遺伝子として同定した（学術論文 5、理研プレスリリース）。また、さまざまな生理作用の制御に関わる機構として各種タンパク質のアセチル化が注目されている。今回、新たなアセチル化標的タンパク質として末梢神経のミエリン形成や T 細胞の免疫不応答を制御するジンクフィンガー転写因子である EGR2 を同定した（学術論文 3）。また、タンパク質脱アセチル化酵素 SIRT1-3 阻害剤として、新規化合物を含む海綿由来の硫酸化ステロイドであるハリスタノールサルフェート類を同定した。酵素との複合体の結晶を用い、X 線結晶構造解析を行って阻害様式を原子レベルで解明した（学術論文 1）。

理化学研究所田中克典主任研究員らとの共同研究では、ポリアミンの選択的反応性を用いたがん細胞ターゲティングを行い、論文発表した。（学術論文 4）

東京大学後藤康之准教授らとの共同研究で、海洋生物由来抗リーシュマニア活性物質の探索研究を、また、帯広畜産大学菅沼啓輔特任助教との共同研究では海洋生物由来抗トリパノソーマ活性物質の探索研究を行った（いずれも論文投稿準備中）。

また、新たな海洋天然化合物の探索研究を行い、海洋性軟体動物 *Dolabella auricularia* から新規化合物 **dolabellol A** を単離・構造決定した（学術論文 2）。

3. 共同研究者

吉田稔（理研、東京大学）
田中克典（理研）
後藤康之（東京大学）
菅沼啓輔（帯広畜産大学）

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. Nakamura, F.; Kudo, N.; Tomachi, Y.; Nakata, A.; Takemoto, M.; Ito, A.; Tabei, H.; Arai, D.; de Voogd, N.; Yoshida, M.; Nakao, Y.; Fusetani, N. Halistanol sulfates I and J, new SIRT1-3 inhibitory steroid sulfates from a marine sponge of the genus *Halichondria*. *J. Antibiot.*, **71**, 273-278, (2018). doi: 10.1038/ja.2017.145.
2. Machida, K.; Matsumoto, T.; Fusetani, N.; Nakao, Y. Dolabellol A, a new halogenated diterpene isolated from the opisthobranch *Dolabella auricularia*. *Chem. Lett.*, **46**, 1676-1678, (2017). doi:10.1246/cl.170756.
3. Ito, A.; Noritsugu, K.; Nakao, Y.; Yoshida, M. Identification of zinc finger transcription factor EGR2 as a novel acetylated protein. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **489**, 455-459, (2017). DOI:10.1016/j.bbrc.2017.05.170.
4. Vong, K. K. H.; Tsubokura, K.; Nakao, Y.; Tanei, T.; Noguchi, S.; Kitazume, S.; Taniguchi, N.; Tanaka, K. Cancer cell targeting driven by selective polyamine reactivity with glycine propargyl esters. *Chem. Comm.*, **53**, 8403-8406, (2017). DOI:10.1039/c7cc01934c
5. Takase, S.; Kurokawa, R.; Arai, D.; Kanto, K.K.; Okino, T.; Nakao, Y.; Kushiro, T.; Yoshida, M.; Matsumoto, K. A quantitative shRNA screen identifies ATP1A1 as a gene that regulates cytotoxicity by aurilide B. *Scientific Rep.*, (2017). DOI:10.1038/s41598-017-02016-4.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

なし

5. 研究活動の課題と展望

海洋生物由来の天然化合物については標的遺伝子を見出すことに成功した。また、さまざまな機能制御に関与するタンパク質リン酸化についての新たな知見を得ることができた。抗原虫（リーシュマニア・トリパノソーマ）活性物質についても同様に作用メカニズムの解析を行ってゆきたい。

地域再生デザイン研究

研究代表者 古谷 誠章
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

近年、日本の社会では、産業構造の変化、少子高齢化の進展、人口移動による地域社会の高齢化等の社会経済情勢の変化に従う地域社会構造の変化が見られる。2009 年、本研究室で行った都市再生プロジェクト推進調査の対象である島根県、雲南市は、人口減少により 6 町村の合併により誕生した市である。雲南市、特に市の周辺部となる地域では、地域社会構造の変化により官庁舎や公立学校舎など遊休公有施設が多く生じている。また市内全域で、公有施設の利用率の低下も問題になっている。このような住民の生活から分離していく地域環境の変化は地域社会の沈滞や住民の居住環境の悪化につながる。また、地域社会構造変化と共に計画される新たな施設は既存の施設との関係を持たないまま建設され、既存施設が立地する地域の孤立、機能の重複による資源浪費による環境問題も考えられる。

これらについては旧町村界を超えた広域的な地域づくりの推進、住民の生活構築の観点から当初の公有施設の目的を見直しながら地域住民のニーズを踏まえた効果的な用途転換及び活用する観点からとらえた具体的設計指針の改革が不可欠となっている。

本研究では、今後のこの問題に意欲的に取り組もうとする地方都市からの委託により、具体的な実践を伴いながら、社会経済情勢の変化と共に地域がもっている価値を見直しながら住民の生活が続けることが可能な地域再生デザイン手法の模索と提案を行う。

2. 主な研究成果

- 2-1. 新潟県上越市 月影小学校 / 千葉県鋸南町 保田小学校における廃校リノベーションの研究 提案
- 2-2. 島根県雲南市 中山間地域での地域と大学生等による交流ゾーン形成事業
- 2-3. 金網を使った身体スケールの空間デザインの研究
- 2-4. 香川県小豆郡 空き家活用モデル事業
- 2-5. 奈良県 吉野材(スギ・ヒノキ)を活かした木質空間デザインの提案
- 2-6. 高知県宿毛市 林邸再生・活用事業研究
- 2-7. 岐阜県美濃加茂市 旧伊深村役場庁舎再生活用基本デザイン策定業務

2-1. 新潟県上越市 月影小学校 / 千葉県鋸南町 保田小学校における廃校リノベーションの研究提案

月影プロジェクトは2017年度で13年目を迎えた。地域再生のために「宿泊体験交流施設/月影の郷」における継続的な関わりと周辺地域・学生を巻き込んだ活動を目指した。

特に継続年数が10年を超えた現在、今後どのように地域との関係を築いていくかが課題となった。鋸南プロジェクトは2017年度で5年目を迎えた。廃校になった旧保田小学校は改修され、2015年12月に、「都市交流施設・道の駅保田小学校」として開業した。2017年度は建築学科として空間活用やまちづくりなどより実践的な課題に取り組んだ

2-1-1

月影プロジェクト

(1) 「宿泊体験交流施設/月影の郷」のファサードルーバーの交換

ルーバーを交換することで、月影の郷は夏の風通しを良く、冬は雪の入り込みを防ぎ、建物内部を快適にすることが可能になる。地域住民と交換を行う事で今年もより深い関係を築く事ができた。

fig.1 植樹を行い夏の日差しを遮るカーテンを作る fig.2 ルーバー交換後の様子



(2) 月影の郷 サイン計画、看板交換 「かまくら交流フェスタ」への参加

2017年8月からはインバウンド需要に向けて、英語併記や分かりやすいデザインなどを工夫した月影の郷内のサイン計画、看板作りを行った(fig.3)また2018年2月には月影の郷で開催される地域の祭り「かまくら交流フェスタ」に参加し、雪を使ったドームの製作などを行った。(fig.4)

(fig.3)サイン計画、看板作り

(fig.4)「かまくら交流フェスタ」の様子



(プロジェクトチーム撮影)

2-1-2

鋸南プロジェクト

(1) 廃校利用を核とした生涯活躍のまちづくり実施計画への応募

・本プロジェクトでもこれまで関係してきた道の駅保田小学校の存在も踏まえ、廃校活用を軸としたまちづくり計画策定業務に取り組んだ。

(2) 廃校利用を核とした生涯活躍のまちづくり実施策定後の取り組み

実際にまちづくりに関わる過程で、町内関係者が今後のまちづくりに関してどのように捉えているかヒアリングを行った。また鋸南町の住民を対象としたワークショップにも取り組み、ヒアリングと合わせて実際に必要とされる公共建築改修後の機能や、現在町で課題となっているものはなにか明確にしていく作業を行った。住民との対話の中で、町の中でも地区別に抱える問題が異なることや、廃校活用が望まれていることなどが分かった。

・

fig.1 ワークショップのフライヤー fig.2 ワークショップの様子



(プロジェクトチーム作成・撮影)

2-2. 島根県雲南市 中山間地域での地域と大学生等による交流ゾーン形成事業

島根県雲南市と早稲田大学古谷誠章研究室の連携、平成 29 年度遊休施設を活用した交流促進ゾーンの形成を目的とし、雲南市の様々な場所で遊休施設の調査・地元学生、住民とのワークショップ・提案を行う。昨年度に引き続き木次町でのさくら祭りにおけるメインストリートの空間形成の提案、吉田町の商工会館を中心に周辺の空き家や地域資源を調査、その他、他地域においても、祭りやワークショップなどに参加することで、中山間地域での交流を図る。

2-2-1. さくら祭り2017

2017年度のさくら祭りでは市役所の方々と様々な議論を通してさくら祭りを盛り上げることに真摯に取り組んだ。また、今までの活動で作成に取り組んだ建具を活用するなど蓄積を活用した取り組みも行った。



fig.1 祭りの様子（古谷誠章研究室 撮影）

2-2-2. UCC キックオフ合宿

雲南市全体をキャンパスと考え、大人チャレンジ・若者チャレンジ・子供チャレンジを行うことができるような体制を整備していく事業の一環として、全国から大学生が集まり1泊2日で自分のことを振り返り、雲南市で何ができるか、自分がしたことは何かを考える合宿に参加した。今年度の早稲田大学の学生チームとしては10年間携わる中でどの様に雲南市の状況が変化し、今何が求められているのか明らかにすることを通年の目的として掲げていた。そのような状況を一緒に調査することで地域活動で協議していきたいという趣旨の元、UCC合宿の中で他大学学生からの協力を募集した。



fig3. UCC ミーティング時の様子
（古谷誠章研究室 撮影）

2-3. 金網を使った身体スケールの空間デザインの研究

現在、金網の多くは「商品」ではなく、「資材」として出回っているのが現状である。7割が土木工事用資材、残りの1~2割が建築用資材として。「資材」としての金網には、発注時の製作寸法の自由度や工場での高い生産性などのポテンシャルが見込まれている。一方、専門性のない一般利用者にとってその優位性は自分たちの生活とは遠い存在となっており、金網製品の認知度は低いと言わざるを得ない。今回「資材」ではなく「商品」としての金網の使い方を課題とした背景には、大量販売が可能であり、なおかつ将来の販路拡大が見込める「商品」にこそ、今までとは異なる新たな金網の価値があるという製作者の強い意志が込められている。技術者たちが積み重ねてきた厚い歴史の中で凝り固まってしまった従来のマーケットを変えるような提案を期待する。

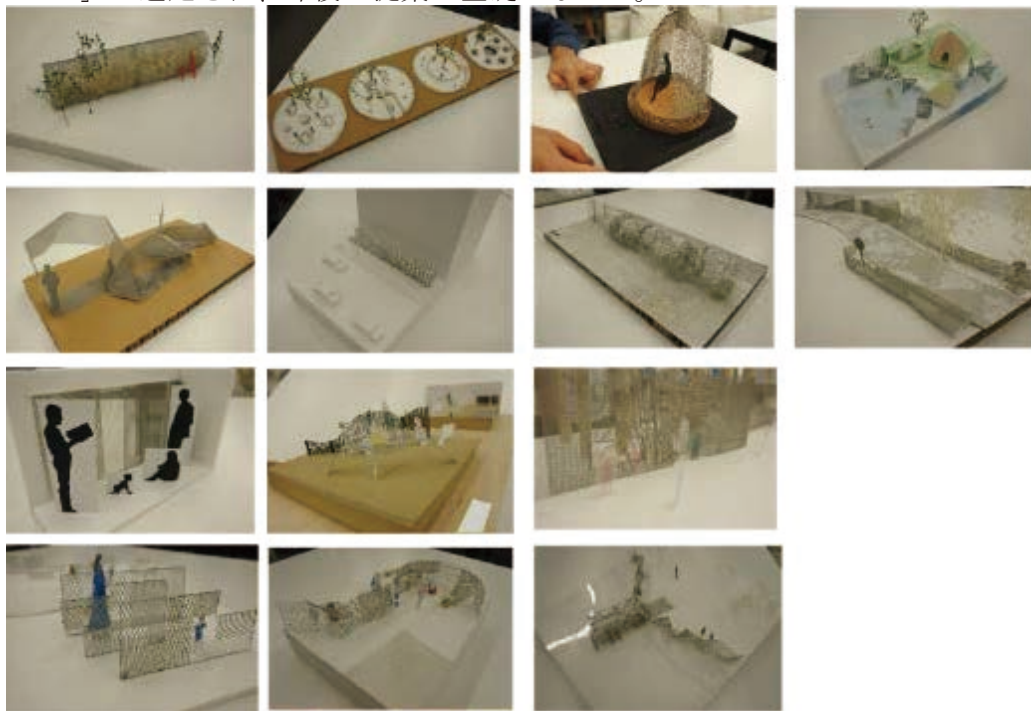
2-3-1. コンペティションを通した提案

金網を使った身体スケールの空間デザインの研究において、製作するアイデアを選定するため、『金網を使った「みんなが集まる柵」のデザイン提案』という課題のもと、産学コンペティションを開催した。

課題内容は、「柵」というと、一般的には何かを囲んで外に出ないように閉じこめたり、人が近づかないようすにするものであったりと、何かと何かを隔てるもの、つまり基本的には何かを“排除”する考えが根本にはあるように思います。しかし、ここでは隔てたり、排除したりするだけではなく、むしろみんなが集まることで、「柵」が本来の役目を果たすことを考えること。例えば、山と民家の間に設けるイノシシの獣害柵では、人が柵の周りに集まることで、イノシシは人やその匂いを嫌い柵に近づきません。公園の遊び場に設置されているこども用の柵であれば、柵の近くに大人が集まることで、こどもの見守りも同時に行われます。どのようなところで使われるのか、何のための柵か、常設か仮設かなどは、各自が設定して、デザインして下さい。

この課題を考えるヒントとして、金網という素材や形の利点について考えること、「柵」に人が集まるためには、「柵」としてだけではなく、人が集まるための他の機能を付加させ「あぁもなる・こうもなる柵」も考えてみて下さい。」というものである。

各学生により、合計14組（うち個人9名、グループ5組）の発表が行われた。その中より「風ニモ波ニモ」が選定され、今後の提案の基礎となった。



（古谷誠章研究室 撮影）

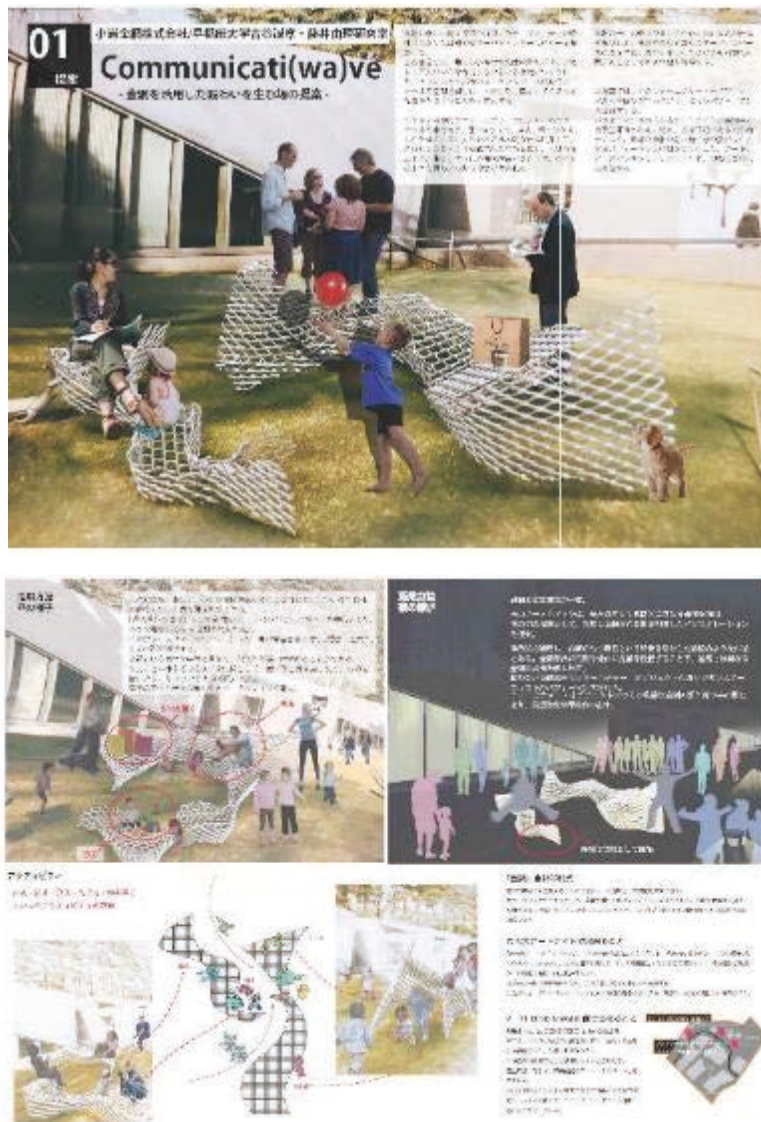
2-3-2. 産学コンペティションにおける学生の提案

金網を使った「みんなが集まる柵」を企画、同時に企画書(A3 片面印刷7枚)、を作成した。金網を使った「みんなが集まる柵」は、金網の新しい利用方法の再発見をテーマに、素材の特性を生かした曲線的なアーバン・ファニチャーとして提案した。この作品では、柔らかい波の様な曲線的なデザインインによって人の所作を誘発するいろいろな場所づくり出した。それによって都市のオープンスペースに身体スケールの空間を創出し、人が自然と集まってくる小さな場所をつくることを目的とした。

作品名は Communicati(wa)ve- 金網を活用した賑わいを生む場の提案 - とした。

企画書は、1枚目にタイトルと目次、2枚目にメインパスと概要の説明、3枚目に昼夜の活用方法とアクティビティ、場所性の説明、4枚目に図面、5枚目/6枚目/7枚目に活動紹介、という構成にした。

以下にその内容の概要を示す。



(企画書：Communicati(wa)ve- 金網を活用した賑わいを生む場の提案 - 古谷誠章研究室 作成)

2-4. 香川県小豆郡 空き家活用モデル事業

高齢化、空き家の増加が進む一方で移住者の転入が見られる香川県小豆郡小豆島町堀越地区において、堀越地区が今後どのような地区になっていくべきかを住民と検討し、現在全国的な問題となっている空き家活用の手法やデザイン提案を行うことを目的としている。

2-4-1. 未来の堀越分校プロジェクトへの取り組み

本年度も堀越地区をモデルとして空き家活用の可能性を継続的に調査し、堀越、ひいては小豆島全体の文化・資源の継承を主目的として、以下の3点を重視した活動を行った。

- ①既存のリソースを失う危機の回避
- ②島宿真里の堀越参入による、堀越への来訪者増と小豆島の文化発信の契機
- ③来訪者増によって堀越地区および小豆島全体に生じる移住希望者や利益と相乗効果

堀越地区には、「壺井繁治の生家」「教員住宅」「分教場跡」という三つの壺井栄に関するリソースがある。しかし、これらは堀越住民のみでは維持・管理しきれておらず、いずれ朽ちて失われてしまうことが予想される。「教員住宅」を、小豆島町が継承・活用していく価値があると考え。さらには壺井繁治の生家や分教場跡も、今後の整備・活用が好ましい。上述のような継承・活用を目指すにあたって、今年度の島宿真里の堀越参入がそのバックアップになりうる。現状、自立した経済の流れや集客力の低い堀越に、島宿真里が参入することで、一定の集客が期待される。そしてその観光客や来訪者にとって、このような施設群は小豆島の文化に触れる良い機会となる。更にはそれが堀越地区の魅力増になり、集客力増・移住促進が相乗効果によりさらに高まりうる。

上記の内容をふまえ、今年度は住民とのワークショップによる教員住宅の活用方法の検討、住民へのヒアリングに基づく空き家調査、島宿真里との意見交換や弊研究室の活動の共有等を行なった。



fig.1 堀越地区住民とのワークショップ



fig.2 堀越地区空き家調査（古谷誠章研究室 撮影）



fig.3 堀越地区マスタープラン提案

2-4-2. 地区行事への参加

四季に合わせて開催される各地区行事に参加し、各祭事の魅力を引き立てるような制作物の提案・制作を行った。

古谷研究室では、平成 26 年度から堀越地区の地区行事への参加や提案を継続して行なってきた。本年度は、これまでの成果や、祭りの概要や来歴、発見した魅力などをまとめ、これから堀越地区に入ってくる島宿真里へと伝えるためのシートを作成した。このように、活動の蓄積やそこからわかったことをアーカイブ化していくことで、将来的な移住者や観光客へ、堀越の文化を発信・継承するツールとなることを展望とし、今後も継続を試みる。



fig.5 納涼祭の誘導灯となる竹キャンドル
(古谷誠章研究室 撮影)



fig.7 敬老会で配布した堀越の風景ポストカード

2-5. 奈良県 吉野材(スギ・ヒノキ)を活かした木質空間デザインの提案

吉野材の魅力を最大限に活かした新しいブランドづくりを推進し、県の林業・木材産業の振興を図ることを目的とし、吉野材の魅力を最大限に引き出す木質空間としての新しい用途の調査及びデザイン開発を行う。昨年度に引き続き首都圏に重点を置き、吉野材（スギ・ヒノキ）の空間デザインの提案を行う。奈良県内での木材活用として吉野以外の地域の林業や奈良県産材の視察を行うことで、吉野材だけではなく奈良県全体で抱えている林業・木材の知見を得る。

2-5-1. HOUSE VISION 2016 東京展

吉野材の魅力を最大限に活かした新しいブランドづくりを推進し、県の林業・木材産業の振興を図ることを目的とし、吉野材の魅力を最大限に引き出す木質空間としての新しい用途の調査及びデザイン開発を行う。昨年度に引き続き首都圏に重点を置き、吉野材（スギ・ヒノキ）の空間デザインの提案を行う。奈良県内での木材活用として吉野以外の地域の林業や奈良県産材の視察を行うことで、吉野材だけではなく奈良県全体で抱えている林業・木材の知見を得る。

2-5-2. 代官山蔦屋書店 奈良の木フェア

代官山蔦屋書店で行われた「奈良の木」のある暮らし～森からの贈り物～において GARDEN GALLERY でデザイン発表の機会を頂いたことから、「普段吉野材に触れる 機会が少ない代官山に訪れる方々へどう発信するか」を学生間で議論し、工務店や 家具デザイナーなど様々な方にご協力いただき提案・製作を行った。「木でできた家」という設計コンセプトは、吉野材のもつ温もりや大らかさを容易に 想像でき、都心の多様な暮らしの中でより広域に接続できる媒体になり得ると考え、奈良県の吉野材、林業の素晴らしさを都会の日常の暮らしの中で体感できる提案となった。



fig.1 制作物



fig.2会場の様子 (古谷誠章研究室 撮影)

2-5-3. 上北山村での天然林活用提案

上北山村の天然林や林業、木材を視察し吉野地方以外の県産材についての知見を深めることで、吉野材の位置づけを再認識できた。これは吉野材、ひいては奈良県産 材を活用したデザイン提案の可能性を研究する足掛かりとなった。上北山村に対しては、天然林含め周辺の視察を経て、吉野の人工林とは違う、奈良 県南部に広がる山間部の自然林や木材の活用、更にはそれによる村の活性化を狙い とした提案を行った。現地調査や住民の方々と意見交換会を行いながら、上北山村の魅力や課題を対話の 中で整理してゆき、特有の地形が生み出す資源と、生業、文化を結びつけ山と村を 横断しながら構想を練った。また、熊野文化や信仰など、地域ならではの要素を現 代に活かしながら地域の問題を解決する手法を模索した。

2-6. 高知県宿毛市 林邸再生・活用事業研究

①概略

宿毛プロジェクトは宿毛市商工観光課の依頼を受け、宿毛市林邸の改修・活用計画を行うものである。「林邸」(fig.1)は、政治家林有造の邸宅として明治22年に建築され、近代日本で初めて3代続けて大臣を輩出、建築学的にも隆盛だった自由民権運動の系譜を物語る建物として宿毛市民に親しまれているが、築後130年以上が経過し老朽化が著しい状況(fig.2)にある。

そこで、建物の歴史的価値を尊重した改修を行いながらも、本市の観光拠点、市民の交流拠点として日々活用できるような再生計画の研究・実現を行った。



fig.1: 林邸正面玄関



fig.2: 林邸1階天井現状(古谷誠章研究室 撮影)

②再生活用デザイン(機能)

改修にあたっては現代の仕様に耐えうる機能・耐震性能を付加しながらも、林邸に残る建材・家財道具や風格を出来る限り尊重することで、その歴史的・文化的な価値を次代に継承することを目指した。改修方針としては、林邸を大きく二つに分け、1階西側と2階を「文化的改修」部分、1階東側を「現代的改修」部分とした(fig.3)。

「文化的改修」とは、現代の使い方に耐えられるように耐震改修や最低限の変更を加えながら、古材を最大限活かし歴史的空間を復元的に改修することである。この部分はコミュニティースペースや展示スペース、事務室などとして使われる。

「現代的改修」とは、現代の新しい使われ方に必要な新たな機能を付加するために大幅な改修、増築を行うことである。この部分は飲食物販スペースやキッチンスペース、トイレなどとして使われる。



fig.3: 改修方針を示した平面図(古谷誠章研究室 作成)

その提案過程においては、市民の方との意見交換・ワークショップを頻繁に行った(fig.4)。その中で得られた意見を設計案に取り込むこと、竣工後に市民の方が林邸の使い方を自発的に提案し活用していくことがねらいである。また、「志国高知 幕末維新博」第二幕開幕までの極めて短い工期の中で、こうした成果が反映されるようデザイン監修することも古谷研究室の大きな役割として担った(fig.5)。

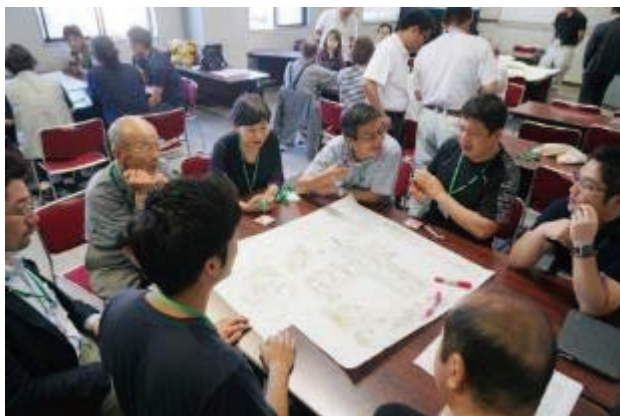


fig.4 : ワークショップの様子



fig.5 : 林邸正面（改修後）（古谷誠章研究室 撮影）

③再生活用デザイン（構造）

現在の建築基準法の耐震基準に合わせるには大掛かりな耐震補強が必要であったが、むやみに壁を増やすと広々とした雰囲気損なわれる懸念があった。そこで、東京大学大学院木質材料学研究室の稲山正弘教授とその学生と共に、透明な強化ガラス耐力壁(fig.6)と、新たな伝統的空間を創出する組子細工耐力壁(fig.7)の研究を行い、両者を使い分けることで、林邸の持つ開放感を活かす耐震改修を行った。



fig.6 : 強化ガラス耐力壁



fig.7 : 組子細工耐力壁（古谷誠章研究室 撮影）

④竣工・オープン

2018年4月21日には、林邸の一般オープンを迎えることができた。当日、地元の住民や地方建築家など多くの人が訪れ、林邸の展示や歴史的・文化的な痕跡を見るだけでなく、各自が自由に居場所を見つけ、くつろぐ姿が多くみられた。改修された林邸が地域の方々に自然に利用されることで、林邸を自分たちにとって愛着のある居場所として認識し、使いこなしていただけることが期待出来る (fig.8-13)。



fig.8 : オープン当日の様子 (縁側)



fig.9 : オープン当日の様子 (カフェ)



fig.10 : 林邸の新しい顔となる飲食、物販スペース



fig.11 : 林邸にまつわる資料のある展示スペース



fig.12 : 北庭 座敷、展示スペースが取り囲む



fig.13 : 南庭 キッチンスペースと一緒に使える

(古谷誠章研究室 撮影)

2-7. 岐阜県美濃加茂市 旧伊深村役場庁舎再生活用基本デザイン策定業務

昭和11年に伊深村(現伊深町)の村役場として建設された役場庁舎は、町村合併後、地元民がサークル活動などで利用する集会場として活用されたが、2014年に施設の老朽化により一般の利用が禁止された。今後も地元住民や外部の人々が集まり、まちに賑わいをもたらす場となるよう、旧村役場の活用方法ならびに基本デザインを提案する。

2-7-1. 旧伊深村役場庁舎 活用を考えるワークショップ

地域の人々の意見を計画に取り入れるためワークショップを数回にわたり開催し、改修計画の参考とした。基本設計の段階では、古写真を収集し、かつての役場の姿や使われ方を調査した。あわせて他地域の事例を紹介しながら、現在の伊深地域にとってどのような機能が必要か意見を抽出した。実施設計の段階では、イベントの運営や施設の愛称な、施設の使いこなし方について地域住民と案を出し合い、実際の設計にフィードバック。また施設に併設されるカフェの運営者とも話し合いを行い、地域の要望を伝え、それを最大限受容できる施設運営を可能とするための設計を心掛けた。

2-7-2. 改修デザイン提案

地域の文化財として価値ある歴史的な要素を抽出し、形を残すことで地域の記憶の継承を行った。また、老朽化した構造部には筋交いではなく、垂れ壁で耐震補強を施すことで、既存の空間の構成を維持した。そして施設一帯を地域の交流拠点となるカフェとして現代的に更新した。



fig.6 改修した役場の外観



fig.7 改修した役場の村長室



fig.8 改修した役場の執務室

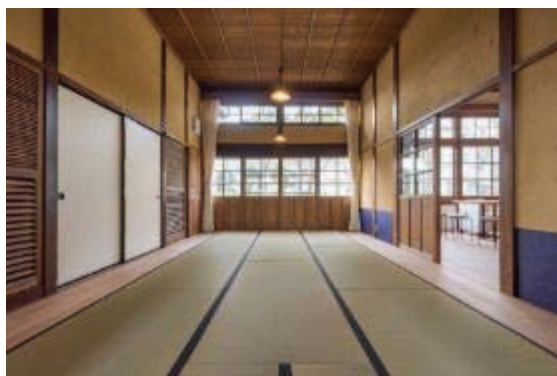


fig.9 改修した役場の会議室

(古谷誠章研究室 撮影)

3. 共同研究者

斎藤 信吾（創造理工学部・助教）
根本 友樹（創造理工学部・助手）
山田 浩史（創造理工学部・助手）
王 薪鵬（創造理工学部・助手）

4. 研究業績

特になし

5. 研究活動の課題と展望

5-1. 新潟県上越市 月影小学校 / 千葉県鋸南町 保田小学校における廃校リノベーションの研究提案

鋸南町は今年度まちづくり計画策定業務に関わったことで、よりまちづくりや建築改修など建築的な側面に関わることが可能となった。上越市では他校の学生との関係が築かれ、より地域に根ざした提案が可能となった。今後はより過疎化の進む上越市と、移住者が多く首都圏から近い鋸南町それぞれのまちづくりに対し長い年月を見据えた建築的協力や研究のありかたを検討していく予定である。将来的には2地域に学生を媒介としてなんらかの繋がりが生まれることも視野に入りたい。

5-2. 島根県雲南市 中山間地域での地域と大学生等による交流ゾーン形成事業

都市再生モデル調査以来、古谷研が雲南市に関わって10年目になる。昨年度までに築いてきた様々な関係性を発展させること、それを地域に還元することを目指して今年度の活動は行った。いつか古谷研が関わらなくなった際にも地域が更新されていくことを目指しているが、現状そのような活動は少ないと感じている。毎年行われている活動や行事はあるが、それらを連携・更新していく必要がある。さくらまつりは良い例として挙げられる。今後どのような関わり方をしていくのか、引き継いでいくのかを検討・実践していくことが課題として挙げられ、その先に地域活性化がある。

5-3. 金網を使った身体スケールの空間デザインの研究

本年度は新しい金網を使った柵の提案ということで、学生の幅広い発想を公募したことで、金網のイメージにとらわれない作品が出てきた。今後も金網だけでなく、様々な場面や素材で新たな使い方を発見し、実用化できるように取り組む必要がある。

5-4. 香川県小豆郡 空き家活用モデル事業

次年度以降教員住宅改修に向けて活動に取り組むべき行なっていくこととなる。住民・行政との意見交換会を行う中で今後の課題が明らかになっていった。

まず一つ目は「教員住宅の施設としてのあり方」である。将来的に教員住宅を改修していくにあたり、より地域の人々の需要に適した施設を作り上げていく必要が有る。そのため、適切に住民の方々からの要望を汲み取りながら、それを反映した施設を構想していくことが大切な課題となってくる。

次に空き家を利用しやすい仕組みづくりを行なっていくことも課題となった。移住者の方が移住をしやすい仕組みや、空き家の所有者が空き家を貸し出しやすい仕組みを小豆島町役場、NP0 法人、専門家の人たちと話し合いを進めながら模索していきたいと考えている。

最後に堀越地区の空き家の現状を把握することである。現状として今すぐに使えそうな空き家が堀越地区にどれだけあるのか、加えてそれらの空き家の所有者にアンケート調査を実施していくことで、現実的にその程度の数の空き家が本事業の計画の対象となりうるのかを明白なものとしていきたい。

5-5. 奈良県 吉野材(スギ・ヒノキ)を活かした木質空間デザインの提案

来年度以降も更に吉野材の魅力を活かし、より汎用性や専門性を高めた展示や空間を目指し研究を深めることで、吉野材の魅力や実空間への使用の利点を伝えることができると考える。首都圏等での吉野材展示キットや短期的なイベントブースの導入による普及は今後も販路拡大という意味では有効であるため邁進していきたいが、吉野材でできた空間の導入が可能となる提案として、上北山村での自然林活用した提案が、現実のものとなっていくことで木材を活用した建築デザイン提案の研究が可能となるのではないかと考える。今後も今年度と同様に「蔦屋 T-site gallery」等首都圏に重点をおいた活動と、奈良県内における PR 活動並びに空間提案を同時平行で重ねて行くことで、吉野材を取り巻く環境や吉野材のブランド力の向上、更には林山地の活性化を図り、その利用拡大につなげていきたい。

5-6. 高知県宿毛市 林邸再生・活用事業研究

林邸の再生活用デザインの目的や方針、また技術などを先駆的な取組として広く共有・発信することで、林邸の価値が認知されるのみならず、日本各地に点在する歴史のある他の建築が早計に取り壊されることなく活用されることを期待している。

5-7. 岐阜県美濃加茂市 旧伊深村役場庁舎再生活用基本デザイン策定業務

今年度開催したワークショップで伊深の方々から多くの意見をいただいた。改修に反映できたものがある一方で、北側のデッキなどハードとして反映していないもの、映画の上映会や音楽イベントなどソフトとして取り組みが必要なものも多々あるため、来年度以降これらの実現可能性を検討する必要がある。また、改修をしてオープンするカフェの運営に関して、市民との交流を促すような提案や補助、まちづくり活動が必要である。更に今年度ワークショップを行っていた伊深交流センターが今後改修される可能性があるため、機能分担を行いながら、旧伊深村役場庁舎のカフェを拠点とした、ここでしかできないまちづくり活動を検討する必要がある。

東日本大震災後の電力システム再構築

Reconstruction of Power System after the Great East Japan Disaster

研究代表者 岩本 伸一

(先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授)

1. 研究課題

東日本大震災後、電力不足が大きな問題となり、それを考慮した電気エネルギー技術の開発に注目が集まっている。同時に環境問題や都市問題などを背景に、電気エネルギー分野を中心に、持続可能な街づくりは世界共通の課題になっている。本プロジェクトでは、これらの問題を解決すべく、様々な角度から総合的な研究を行う。特に、①地球環境を考慮した電力システムの計画・運用の研究 ②電気絶縁材料の劣化診断に関する研究 ③CO₂ 削減を目指した超電導応用電力機器の基盤技術に関する研究 ④太陽光発電システムの運用最適化に関する研究 ⑤次世代エネルギーマネジメントシステム（EMS）技術に関する研究について実施する。

研究課題は、東日本大震災後、非常に重要であるエネルギー問題の中で、特に地球環境考慮下での電力供給の高信頼度化・低コスト化に焦点をあて、総合的に独特な組織の中で、学内・外の技術者が研究する。外部の協力として主要な電力会社、重電機メーカー、電線メーカーが加わる点で、先端の技術開発に寄与できると考えられる。

この研究プロジェクトは、本学が主体となり電力業界各社から構成される産学協同体「電力技術懇談会」（約30社がメンバー）と一体となった研究組織である点に特徴がある。本懇談会と連繫させながら推進し、有用な研究成果を挙げる。また、産学交流の発展のため、約2ヶ月おきに講演会が企画されている。これも含めて総合的に研究に当たる。

2. 主な研究成果

現在、電力システムへの再生可能エネルギーの大量導入が、CO₂ による地球環境問題の解決のために進められているが、電力システムは、この再生可能エネルギーの大量導入に適切に対応できるように技術的な整備がなされなくてはならない。そのため、「①地球環境を考慮した電力システムの計画・運用の研究」では、特に、太陽光発電大量導入時の、電力システムの変電所更新計画に関する研究、電力システムの発電機・蓄電池協調負荷周波数に関する研究、を行った。再生可能エネルギーの大量導入により、火力発電の出力を下げる必要が出てくるが、過渡安定度に関して、時間領域等面積法による過渡安定度高速スクリーニング手法も開発した。

また、「②電気絶縁材料の劣化診断に関する研究」では、とくに原子力発電所において、事故時に格納容器内部の温度や圧力をモニターするとともに、原子炉を安全に停止させるために、最後までその機能を全うすることが要求される、いわゆる「安全系ケーブル」に使われている、難燃架橋ポリエチレン、難燃エチレン・プロピレン・ディエン共重合体（ゴム）、シ

リコーンゴムに焦点をあて、これらのシート状試料やケーブル状試料が、高温あるいは高温下での放射線照射にさらされたときの劣化挙動を、テラヘルツ領域分光法、化学発光測定、示差走査熱量測定、複素誘電特性測定、インデントモデュラスによる表面硬度測定等を行って、実験的に解明した。また、原子炉格納容器電線貫通部について、長期健全性評価確認のために、通常運転時相当の劣化を付与した状態における重大事故（以下「SA」という。）時環境下での絶縁性能の検証を実施した。具体的には、電気ペネに接続されたケーブルについてのSA試験限界条件の検討として、種々の高温・高圧蒸気環境下において、未劣化および熱・放射線同時劣化した前述の安全系ケーブルの電気抵抗測定を実施し、全てのケーブルが事故時の動作要求に対する十分な絶縁性を保持していることを確認した。

「③CO₂削減を目指した超電導応用電力機器の基盤技術に関する研究」では、275kV系統における高温超電導ケーブルの短絡事故時の振舞いについて解析・評価を行った。高温超電導ケーブルに関する先行研究において、一度短絡事故が発生するとケーブルから放出される熱により、冷媒である液体窒素の温度はケーブルの下流部に沿って徐々に上昇していくことが確認された。そこで本研究では275kV系統用REBCO高温超電導ケーブルを対象として、絶縁層が厚く、複流路型であるという特徴を考慮して、短絡電流通過時におけるケーブル内の温度及び冷媒である液体窒素の挙動を解析・評価するための計算機プログラムの開発を行った。そして先行研究で実施された20m超電導モデルケーブルの試験結果を、開発してきたプログラムで解析することにより、実験値との比較を通してプログラムの妥当性の検証を行うとともに、実験における温度圧力分布の振る舞いを明らかにした。加えて、実規模級長尺ケーブルを想定した解析・評価を行い、長尺化に伴って必要となる課題やその対応策などを検討した。

「④太陽光発電システムの運用最適化に関する研究」では、昨年度に引き続き、配電系統における実負荷電流の予測手法に関する検討に取り組んだ。配電系統への太陽光発電（PV）システムの大量連系に伴い、系統運用のための必須情報である実負荷電流の把握が困難となる。今年度は、JITモデリングに基づく実負荷電流予測において、特に、精度改善手法の開発に焦点をあてた。具体的には、JITモデリングにおける入力の詳細化や、支配的な高圧需要家の契約高から想定される最大電流値に応じて予測値を補正する方法について検討を行い、実測データとの比較に基づき開発手法の有効性を明らかにした。

「⑤次世代エネルギーマネジメントシステム（EMS）技術に関する研究」では、地球温暖化対策となる風力発電をさらに電力系統に連系できるよう、発電量の急変に対する予測と、予測と組み合わせた蓄エネルギー制御技術開発をNEDO技術開発機構の委託事業として進めている。本年度は次世代エネルギーマネジメントにおいて重要となる風力発電量の予測精度の向上を目的として、深層学習を実現する基盤技術であるConvolutional Neural Network(CNN)を用いた気象場データの特徴量抽出手法の開発を行い、抽出した特徴量を活用することで、次元縮約を行わない場合や従来手法であるPCA(Principal Component Analysis)と比較して精度が改善されることを検証した。また、CNNによる特徴抽出結果の可視化を行い、本抽出器が風力発電量予測に重要な特徴量を能動的に抽出できていることを確認した。また、蓄エネルギー制御技術開発では、予測を用いた出力の急変を蓄エネ設備による緩和だけで行う方式について、実証設備に搭載しての検証を行い、アルゴリズムの有効性を確認した。また、風力発電電力がFIT期間終了後には市場で売買されることを想定すると、発電出力の計画値同時同量達成が必要となるが、この状況に対応した計画値の作成方法

として、時間前市場（売買の1時間前ゲートクローズ）での取引を前提に、計画値作成時刻での SOC 値から計画値運用開始時刻の SOC を推定し、推定された SOC が目標値に近づくよう計画値を作成する手法を開発した。本手法は風力発電量予測値をそのまま計画値とする場合、また、計画値作成時刻の SOC 値と目標 SOC 値のみを使用して計画値を作成する場合と比較して、年間計画逸脱量に削減効果があることが検証された。なお、上述の各検証においては、過去の一定期間における風力発電実データ、既存手法による風力発電予測データを利用した。

3. 共同研究者

大木 義路（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）
 石山 敦士（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）
 若尾 真治（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）
 林 泰弘（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- ・ J. Kobayashi, Y. Koyanagi, and S. Iwamoto, “A Fast Screening Method for Transient Stability Considering Multi-Swing Step-Out Using Pattern Recognition with Machine Learning and Clustering”, IEEJ Transactions on Power and Energy, 137, 8, p. 559-565, 2017
- ・ Yoshimichi Ohki and Naoshi Hirai, “Successful Detection of Insulation Degradation in Cables by Frequency Domain Reflectometry”, Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, pp. 77-85, 2017.8
- ・ Yoshimichi Ohki, Naoshi Hirai, Daomin Min, Liuqing Yang, and Shentao Li, “Degradation of Silicone Rubber Analyzed by Instrumental Analyses and Dielectric Spectroscopy”, Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, pp. 107-116, 2017.8
- ・ Shugo Hanada, Maki Miyamoto, Naoshi Hirai, Liuqing Yang, and Yoshimichi Ohki, “Experimental Investigation of the Degradation Mechanism of Silicone Rubber Exposed to Heat and Gamma Rays”, High Voltage, Vol. 2, No. 2, pp. 92-101, 2017
- ・ Y. Yokoo, T. Yasui, N. Takeda, K. Agatsuma, A. Ishiyama, X. Wang, M. Yagi, and T. Takagi, “Temperature Simulation of a 20 m HTS Power Model Cable System in a Fault Current for 275 kV Transmission Lines”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 27, 4, 7828107, 2017
- ・ 糸川奈穂, 本間隼人, 若尾真治, 「翌日 PV 発電出力における 10 秒単位変動の信頼区間推定」電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）138 巻 1 号, p. 5-13 (2018)
- ・ Yuka Takahashi, Yu Fujimoto, and Yasuhiro Hayashi, “Forecast of Infrequent Wind Power Ramps Based on Data Sampling Strategy” Energy Procedia, Vol.135, pp.496-503 Oct. 2017

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

Liuqing Yang, Yoshimichi Ohki, Naoshi Hirai, and Shentao Li, “Degradation Behavior and Mechanisms of Several Polymeric Insulating Materials Exposed to Heat and Radiation”, 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, Rupnagar, India, pp. 98-103, (2017.11.17)

4.4 受賞・表彰

受賞者：

大木義路、2017 年早稲田大学リサーチアワード

林 泰弘、2017 年早稲田大学リサーチアワード

東山和寿、藤本悠、林泰弘、平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会 YPC 優秀発表賞

4.5 学会および社会的活動

・ Yuta Mori, Yasukuni Nagakawa, Yuta Aihara, and Shinichi Iwamoto, “Study on Upgrade and Renewal of Transformers Using Safety-First Model of the Optimal Portfolio Selection”, IEEE TENCON 2017, Nov. 2017

・ Takato Otani, Ryu Tanabe, Yui Koyanagi, and Shinichi Iwamoto, “Cooperative Load Frequency Control of Generator and Battery Using a Recurrent Neural Network”, IEEE TENCON 2017, Nov. 2017

・ Tomomi Sadakawa, Ako Sato, Ryu Tanabe, and Shinichi Iwamoto, “Transient Stability Evaluation by the Time Domain Equal-Area Criterion Using the Taylor Series Expansion”, IEEE TENCON 2017, Nov. 2017

・ Yusuke Yokoo, Natsuko Takeda, Daichi Horita, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama, Xudong Wang, Tomohiro Takagi, and Masashi Yagi, “Safety Verification of 275kV HTS Cable System in Short-Current Accidents”, European Conference on Applied Superconductivity, 2017

・ M. Oda, and S. Wakao, “Storage Battery Management in Photovoltaic Systems Based on Prediction Interval Estimation of Electric Power Demand”, PVSEC 27 - The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Nov. 16, 2017, Otsu Japan

・ N. Koura, and S. Wakao, “Transition Pattern Analysis of PV Output Based on Prediction Interval Estimation”, PVSEC 27 - The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Nov. 16, 2017, Otsu Japan

・ Masakazu Ito, Yu Fujimoto, Masataka Mitsuoka, Hideo Ishii, and Yasuhiro Hayashi, "An Evaluation of a Control Method of Energy Storage Systems for Scheduled Generation by Wind Power Systems for an Electricity Market under a Grid Code Defining Maximum Change of Wind Power Output in a Time Interval," WVEC2017, Jun. 2017

・ Kazutoshi Higashiyama, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, "Feature Extraction of Numerical Weather Prediction, Results Toward Reliable Wind Power Prediction", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, Sep. 2017

・ Kazutoshi Higashiyama, Yu Fujimoto, and Yasuhiro Hayashi, "Feature Extraction of NWP Data for Wind Power Forecast by Using 3D-Convolutional Neural Network", 12th International Renewable Energy Storage Conference, Mar. 2018

5. 研究活動の課題と展望

環境問題や東日本大震災後に顕著に現れた電力不足は喫緊の課題である。本プロジェクトでは電力系統運用・計画、材料の劣化診断、超伝導、発電量予測、エネルギーマネジメントの5つに焦点を当て、幅の広い総合的な研究アプローチを開始した。本年度実施した研究成果をベースに、世界共通の課題となっている環境問題や都市問題などの電気エネルギー分野を対象とした研究開発を進め、「電力技術懇談会」と連繋させながらこれらの問題の解決を目指す。

スペーシャル・プランニング研究

研究代表者 後藤 春彦
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

本研究は単独の都市圏の範域をこえる広域的圏域 (City Region) を研究対象とする一連の研究の理論的成果を踏まえ、将来の法制化 (『都市・農村計画法 (仮称)』) を視野に入れつつ、都市計画と農村計画を一体的に進めるための広域計画において重要な「計画単位」「計画主題」「計画運用」に関して具体的なフレームワークを提示するもので、以下に示す2点を目的とする。

【目的1】日本版『都市・農村計画 (Town and Country Planning)』の導入のための理論的枠組みの提示

【目的2】都市圏を超える広域圏を一体的な単位とする City Region 計画の実証

従来の上記の目的に、

【目的3】高齢化社会を背景に、健康・福祉・医療に関する広域的圏域の計画的運用を加える。

以上の成果を理論にフィードバックするとともに、具体的な制度および政策への展開をめざし、わが国の各地において実装可能なものとする。

2. 主な研究成果

(1) ふたたび「生き物」として都市を捉えること

都市計画の対象は「都市」に他ならない。しかしその「都市」が意味するものは社会の変化に呼応するかのように移ろっている。

産業革命を背景に近代都市計画が誕生した頃は、都市は「生き物」そのものであった。あらためて近代都市計画の草創期を振り返れば、都市を経営する上での大命題は「公衆衛生」の確保であり、都市計画学は、医学や生物学の分野と密接な関係をもっていた。近代都市建設の途上の段階において、医学や生物学の分野の成果を基礎とする都市計画が世界各地でこころみられていたことは想像に難くない。

そしてその後、上下水道や公園緑地などのインフラストラクチャの整備、建築規制による日照や通風の確保により、都市の衛生状況は大幅に改善される一方、急速な経済成長を支える市場の役割を都市が担う時代に至ると、機能主義に基づく都市は、「生き物」というよりは、メカニカルな機械仕掛けのものへと変貌し、医学や生物学の分野と都市計画学の間の距

離は徐々に広がっていった。

機械仕掛けの都市に対しては、物理的空間の制御と機能の純化が都市計画の主要な方法となった。風土や歴史といった場所固有のしがらみを取り除き、真っ白なキャンバスのような無垢の下地を創出することにより、効率の良い機能のコピー&ペーストを可能とした。

しかし、現在、わが国の都市は、衰退著しい中心市街地の再生、国際的な産業構造転換への対応、市街地の環境負荷の低減、密集市街地の防災性能向上、大都市の都心構造の再構築などの課題が山積するとともに複合化しており、これに高齢化社会が暗雲のように重くのしかかっている。これらの課題に対応するためには、都市計画の大きな転換が求められていることは言うまでもない。

それは、ふたたび「生き物」として都市を捉えることである。都市とは物理的空間と機能によって定義されるものではなく、ひとびとの振る舞いやうごめき、それらの絡みあいによって生じる「生き物」とみなすべきものである。

(2) 多様なふるまいをする「生き物」としての都市

しかしながら、現代の「生き物」としての都市は、「生物学の原則」や「診断」と「処置」という考え方のもとで、唯一絶対の処方箋で対応できるものではなくなった。すなわち、都市はひとつの生命体ではなく、いくつもの多様なふるまいをする社会的な「生き物」の＜群れ＞として捉えられなくてはならない。

今日、持続可能な都市をめざすにあたって、「多様性」が極めて重要な概念になってきている。一口に「多様性」と言っても、生物学的な多様性をはじめ、遺伝的、人類学的、人種的、性的、文化的、言語的、民族的、地域的、社会的多様性など、「多様性」に冠される表現自体が多様であり、つかみどころがなくなっている。

特に、わが国の都市計画分野では、貧困、教育の欠如、疾病や障害、薬物中毒、家庭崩壊などの状況下にあり社会的に孤立しがちで社会的排除を余儀なくされている少数派のひとびとにいかに向き合うかが問われている。これが、今特集の中心的な命題に違いない。そして、これに加えて早晩、日本でも難民問題が俎上に上がることだろう。

いずれにせよ、単に、少数派のひとびとをケアの対象に位置づけるのではなく、地域社会の構成員としてその存在を認め合うことが全ての基本となる。そのためには、共同体験を通じて関係性を醸成するプログラムや居場所が地域社会に存在することが求められる。しかも、その多様なひとびとの交流は、施設内や敷地内に留まることなく、都市空間へ溢れ出すことによって、はじめて社会を豊かなものにしていくことへと展開する。地域社会が多様性を受け入れることによるアウトカムを「分かち合える価値」の創出と位置づけてみたい。

そして、多様性を受け入れることの先にあるのは、インテグレーション（統合）ではなく、インクルージョン（包摂）であることを強調したい。統合は多数派の論理で、排除とコインの裏表の関係にあり、あらたな社会的孤立を助長しかねない危険性を構造的に孕んでいる。したがって、多様性の未来にあるのは、外発的な力による統合ではなく、内発的な力による包摂に他ならない。包摂とは地域社会の構成員として少数派の存在をデフォルトで認めるものである。多様性は保護の対象であり、つねに多様性の議論は地域社会の内側から湧き上がることが求められる。経済の活性化とは位相の異なる、多様性の保護こそが地域社会を豊かなものとするとの認識の共有が大切である。

（３）ひとびとの活動の質を計画的に担保すること

人口増加を背景とする経済成長の時代は、「人口フレーム」と呼ばれるように、人口が計画の「枠組み」であったが、現在のような人口減少の時代は、まさに、『まち・ひと・しごと創生本部』が総合戦略で求めたことが象徴しているように、人口は計画の「ビジョン」となった。したがって、人口のような量ではなく、市民ひとりひとりの活動の質をいかに計画的に担保していくかが求められている。

多様性を背景とする地域社会における市民活動の質の向上の一例として、ドイツのフライブルク郊外のヴォーバン住宅地を紹介してみたい。持続可能なまちを目指すヴォーバンは、ソーシャル・エコロジー住宅地の先進事例として有名で、エネルギー自立やカーフリーなどがわが国でも多数紹介されているが、それだけでなく、現在ではさまざまなインクルージョン・プロジェクトが試みられている。

軽度から重度まであらゆる段階の介護が必要なひとびとと、異なる年齢層や家族型の多世代が共に暮らし働く環境のみならず、インクルージョン教育の環境も整えられている。そこでは、共同体験によって多様なひとびとを結びつける関係性が自然に醸成されるプログラムが存在する。さらに、インクルージョンの取り組みはヴォーバン住宅地内で止まることなく、周囲のインクルージョン活動団体と連携して多様な地域社会の形成を促進するプロジェクトを積極的に展開している。まさに、まちづくりや都市計画の主要なテーマにインクルージョンが掲げられているのである。

持続可能な社会の追求は、当然のことながらハードとソフトの連携が求められる。フライブルク郊外のヴォーバン住宅地の事例から、「環境保全」と「多様性保護」はきわめて相性の良い組み合わせであることが伺える。翻ってみれば、SDGs として掲げられた地球規模の持続可能な開発目標も「環境保全」と「多様性保護」に集約される。

（４）家族の役割をコミュニティは担うことができるのか

人口増加の時代とは異なり、人口減少の時代において社会が抱えている課題はより複雑なものとなってきた。単純な課題に対してはいわゆる縦割りで対症療法的に効率良く個別対応できたが、複合的な課題に対してはヴォーバン住宅地の事例のような横断的な対応が求められるようになる。また、地方自治も団体自治がフルセットで対応する時代から、団体自治と住民自治との相互補完が求められる時代に転換している。そのため、市民の立ち場は社会のニーズにあわせて公共的なサービスを提供する側にも位置づけられることになった。

人口減少社会では、個人と社会集団の関係も大きく変化してきている。今や、核家族は社会の最小単位ではなくなり、特に、一人暮らしの高齢者が増加している。また、女性の晩婚化に伴って出産年齢が高齢化することにより、育児と親の介護が同時に進行する「ダブルケア」も深刻な課題となってきた。

世帯や親戚関係などの家族構造が大きく変化するなか、これまで家族が担っていた福祉や介護等の役割の一部をコミュニティが担わなければならない時代になっている。しかし、そのコミュニティ自体が、人間関係の希薄化により崩壊の危機を迎えていることも事実である。今後、社会関係資本をどうやって再編、再構築していくのかが問われている。

さらに、毎年高騰する国民医療費は、2016 年度には 43 兆円を超え、日本の経済を圧迫している。特に、そのうち 65 歳以上の医療費が全体のおよそ 6 割を占めている。こうした背景のもと、厚生労働省では、団塊の世代（約 800 万人）が 75 歳以上となる 2025 年を目途に、在

宅医療、在宅介護へ大きくシフトさせることを目指して、地域の特性に応じて、住まい・医療・介護・予防・生活支援を一体的に提供する「地域包括ケア」を推進している。中学校区程度を「地域包括ケア」の空間的単位とするとしながらも、都市計画的な発想に乏しく、住まいを中心に、医療と介護と生活支援・介護予防を担う個々の施設が矢印で結ばれたダイアグラムが示されているにすぎない。都市計画分野から地域固有の都市構造に即した地域包括ケアシステムの提案が出されることが望まれる。

また、医療費の削減のためには、中年層の「未病」を治す取り組みが効果的だとされている。未だ発症していない病を改善するために、セルフメディケーションの普及とともに、生活環境自体が個々人の健康を下支えするように整えられることが期待される。

このように、高齢化社会への対応は、決して高齢者への対応ではない。市民、NPO、企業も巻き込んだ「新しい公共」と呼ばれるいくつかの主体が、交流と共生を通じて、それぞれの持つノウハウや特性を相互に活用することにより複合化した課題解決を図り、持続可能で活力ある地域づくりに資することが期待される。

政府も社会保障政策についてこれまでの高齢者中心から「全世代型」に見直しをはじめている。「地域包括ケア」を高齢者の在宅医療や在宅介護に限定するのではなく、孤立しがちな不安や悩みを抱えた青少年や若者、子育て世代、中高年などの多世代に広げていく発想とそれを下支えする都市計画のあり方が求められている。

(5) 家族をこえて、「社區」と「社群」

地縁の「社區」とは異なり、選択可能なインターネットやカフェを介したネットワーク縁による「社群」は、参加しやすく、離脱もしやすいコミュニティで、今後の「まちづくり」の担い手となりえるのではないかと期待するところ大である。

すなわち、家族が担っていた役割の一部をコミュニティに移していく必要がある中で、包括的なテーマを担う「社區」的コミュニティは硬直的で閉鎖的になりがちで、特に、現代の日本では多くを期待することは望めないが、個別的なテーマを担う「社群」的コミュニティの潜在力には大きな期待がある。特に、子育てや福祉、コミュニティビジネスなどの分野の担い手として成果も上がっている。いかにすれば、こうした「社群」的な浮遊するコミュニティを都市計画は下支えすることができるのだろうか？

都市計画分野は幅広く他の領域との連携を強化しなければならない。否、都市計画分野が基本ソフトになり、アプリケーションとしての他領域を受け止める役割を担わなくてはならない。それを英国の都市計画理論の権威であるパッツイ・ヒーリーは「場所のガバナンス」と呼び、以下のように述べている。

『人類が生き続けるために不可欠な環境、現在、そして未来、また限られた人々にとってだけでなく、多くの人々が暮らしやすい環境を持続させるための関心を引き出すような、計画的志向を持つ場所のガバナンス。こうした場所のガバナンスの概念を用いて私が問うているのは、人間や物事が時空間上でどうつながっているか、そして、場所のガバナンスを通じて培われる知恵が地域に暮らすコミュニティの知性をどのように拡大しうるかという問題である。』

都市計画は、社会的な「生き物」の＜群れ＞の多様な活動を調整するための場所を介した

戦略づくりを担わなくてはならない。

3. 共同研究者

山村崇（理工学術院 助教）

4. 研究業績

4.1 学術論文（査読付き）

吉江俊、後藤春彦「都心回帰下の首都圏における住環境のイメージの空間構造とその遷移」日本建築学会計画系論文報告集 第 738 号 pp. 1955-1965 2017.11.

林廷玟、後藤春彦、山村崇「近代化産業遺産の集会的保存におえる「認定外遺産要素」の位置付けと価値 足尾銅山関連遺産を代表事例として」日本都市計画学会学術研究論文集 No.52-3 pp.762-768 2017.11.

松本慎、後藤春彦、山村崇「高齢者の外出行動と親世帯・子世帯の近接性に関する研究 埼玉県坂戸市にき居住する高齢者への対面式調査を通して」日本都市計画学会学術研究論文集 No.52-3 pp.1316-1322 2017.11.

渋谷健太、後藤春彦、森田椋也、山崎義人「都市近郊における村落単位でみた農業基盤と催事運営基盤の変容の関係 埼玉県三郷市を事例として」日本都市計画学会学術研究論文集 No.52-3 pp.1177-1184 2017.11.

下山萌子、後藤春彦、馬場健誠「新宿ゴールデン街における新旧店舗の混在とその更新の実態に関する研究 店舗更新時の旧店主からのアドバイスに着目して」日本都市計画学会学術研究論文集 No.52-3 pp.1074-1080 2017.11.

柳田桃子、後藤春彦、田口太郎、柳田良造「小規模漁業集落における地域づくりの展開 ～徳島県美波町伊座利地区での取り組み～」日本建築学会計画系論文報告集 第 742 号 pp. 3121-3130 2017.12.

蔵田夏美、後藤春彦、吉江俊「首都圏における趣味の手作りクラフト市場を構成する場の体系と参加者の活動実態 複数の展示即売会でのヒアリング調査を通して」日本建築学会計画系論文報告集 第 743 号 pp. 33-43 2018.1.

石綿朋葉、後藤春彦、吉江俊「東京区部における飲食店立地と食情報の地域特性に関する研究」日本建築学会計画系論文報告集 第 744 号 pp. 251-261 2018.1.

4.2 総説・著書

後藤春彦（筆頭）、鈴木輝隆、鞍打大輔「「日本上流文化圏研究所」の設立と地方での下河辺淳の活動」UED レポート 開発構想研究所 2017 夏号 pp.78-95 2017.7.

後藤春彦「温泉とまちづくり 城崎温泉・木屋町小路プロジェクトを通じて」建築と社会 日本建築協会 vol.99 No.1150 pp.44-45 2018.1.

後藤春彦「分かち合える価値を内包する都市像をめざして ～多様性の保護と包摂～」都市計画（日本都市計画学会）vol.67 No.1 pp.30-33 2018.1.

後藤春彦（筆頭）、園田真理子、藤井多希子、東恵子「担い手不足、超高齢化、ダブルケア社会におけるまちづくりの役割」都市計画（日本都市計画学会）vol.67 No.1 pp.20-29 2018.1.

後藤春彦「地方分権が降ってくる？ 住民自治への分権、その受け手は誰か」地方自治職員研修（公職研）通巻 707 号 pp.1-2 2018.2.

4.3 招待講演

後藤春彦「総合計画の策定プロセスと その先の住民自治」熊本県氷川町 氷川町文化センター 2017.4.22.

後藤春彦「市民がまちの経営に参画する時代を拓く」全国地域リーダー養成塾 地域活性化センター 大手町サンスカイルーム 2017.5.11.

後藤春彦「景観まちづくりについて」雑司が谷景観まちづくりワークショップ 豊島区 雑司が谷地域文化創造館多目的ホール 2017.5.13.

後藤春彦「地域活性化プラットフォームによる地方創生の現場最前線」日経地方創成フォーラム 日本経済新聞社 日経ホール 2017.6.5.

後藤春彦「吉阪隆正所追尋的都市計画與有形學（吉阪隆正のめざした都市計画と有形学）」吉阪隆正冥誕 100 週年臺日社區營造經驗交流紀念會 台北・市長官邸藝文沙龍表演廳 2017.7.1.

後藤春彦「役に立つ過去にまなび、懐かしい未来を描く」南砺市役所 南砺市熟年まちづくりリーダー養成事業「五十の手習い塾」2017.7.16.

後藤春彦「まちづくりオーラルヒストリーを学ぶ」滝上町 滝上町文化センター 2017.7.22.

後藤春彦「地域の人材育成／「子ども記者クラブ」を通じたとりくみ」全国地域リーダー養成塾修了者研修 アルカディア市ヶ谷 2017.8.31.

後藤春彦「地域の再生とデザイン」全国地域リーダー養成塾 地域活性化センター 大手町サンスカイルーム 2017.10.4.

後藤春彦「少子高齢化社会の多様な働き方・暮らし方を支援するまちづくり」日本都市計画学会 会議室「都市計画」誌 2018. 1. 所収 2017.10.30.

後藤春彦「ひとがつなぐ都市の魅力と地域の創生戦略～新しい風をつかむまちづくり～」第79回全国都市問題会議 沖縄県立武道館 2017.11.10.

後藤春彦「有形学から無形学へ」早稲田都市計画フォーラム 早稲田大学西早稲田キャンパス 55 号館大会議室 2018.1.6.

後藤春彦「人も元気に、まちも元気に」早稲田大学研究ブランディング事業キックオフシンポジウム 早稲田大学西早稲田キャンパス 63 号館 2018.2.27.

後藤春彦「地域資源の伝承と新たな価値創造：過去から何を学び、将来に何を遺すのか」科学技術振興機構（JST）社会技術研究開発センター（RISTEX）持続可能な多世代共創社会のデザイン研究開発領域 京都国立博物館 平成知新館 講堂 2018.3.2.

後藤春彦「人も元気に、まちも元気に 多世代型地域包括ケアの視点から」台北医学大学高齢健康管理学部 2018.3.13.

後藤春彦「人も元気に、まちも元気に 高齢者介護の視点から」台中竹山秀伝病院 2018.3.14.

後藤春彦「人も元気に、まちも元気に ビックデータと医療ヘルスシステムの視点から」台湾国防医学院公共衛生学系及研究所 2018.3.15.

4.4 学会および社会的活動

日本建築学会農村計画本委員会・委員

日本建築学会賞選考委員会論文部会・専門委員

Member, the World Society for Ekistics

日本学術振興会科学研究費委員会・専門委員
 内閣府地方分権改革有識者会議・議員
 内閣府地方分権改革有識者会議・地域交通部会・部会長
 内閣府地域活性化プラットフォームワーキングチーム・主査
 世田谷区都市計画審議会・委員
 豊島区景観審議会・会長
 新宿区景観まちづくり審議会・会長
 東京都調布市景観審議会・会長
 新宿歌舞伎町・屋外広告物を使ったエリアマネジメント広告表示自主審査委員会・委員長
 奈良県高取町医療ツーリズム推進協議会・委員
 全国町村会人口減少に関する有識者懇談会・委員
 (一社) 地域環境資源センター技術検討委員会・委員
 (一社) 公園緑地研究所・研究顧問
 (一社) 都市計画コンサルタント協会 認定都市プランナー審査員
 (社) 東京バス協会広告付きバス停留所第三者評価委員会・委員長
 全国地域リーダー養成塾(財団法人地域活性化センター)・主任講師
 (一社) 第一生命財団・評議員
 (財) 森記念財団・評議員
 総務省地域力創造アドバイザー
 新宿区まちづくり相談員
 宮城県加美町政策アドバイザー
 早稲田大学・参与

5. 研究活動の課題と展望

これまでの方法論は「分ける」であった。「分ける」ことにより課題を単純化し、そこへ向けて最適な解を与えることが最も効率的な方法であった。例えば、土地の用途を区分する土地利用や、いわゆる縦割り組織など、これまで「分ける」ことを良しとしてきた。そして、「分ける」ことを実行するための権力とリーダー的な役割が存在した。

それに対して、現在の方法論は「分かち合う」ことである。フラットな関係性に基づいて、価値や課題を他者と共有することにより、多様性の保護と包摂が可能となり、多主体が参画する地域社会が形成される。

そのためには、

- ① 多主体の相互補完、相互依存の関係に着目すること
- ② 交流・共生のための共有されるべき資源を発見すること
- ③ ネットワーク縁による「社群」を含む住民自治を醸成・強化すること

が大切であり、これらをファシリテートすることによって複合的な課題を多主体が協働して解くことが可能となる。

「分ける」という外発的行為に対して、「分かち合う」という内発的行為への転換が求められている。分かち合える価値とは、多様性の保護と包摂のもとで、現代を生きるひとびと、世代をこえたひとびと、将来のひとびとと共有できる生活像、空間像、社会像からなる将来都市像の提示に他ならない。

エネルギーキャリアのための非在来型触媒

研究代表者 関根 泰
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

再生可能エネルギー利用拡大を視野に入れた、水素を運ぶエネルギーキャリアのための触媒開発を進めている。とりわけ、水素ステーション向けの脱水素触媒については、石油企業と共同で開発を行い、現在早大触媒の実証化に向けて詳細な検討を行っている。すでに基礎学理を固めつつあり、今後さらなる性能向上、長寿命化、高い選択性の確立が望まれる。そのための研究を鋭意進めている。

2. 主な研究成果

水素は常温常圧において気体であるため体積あたりのエネルギー密度が低く、また燃焼速度が速く、燃焼範囲が広いという高い燃焼特性を持っていることから、大規模かつ安全に取り扱うことが困難である。現在の水素の貯蔵方法である液体水素や圧縮水素は、低温や高圧を必要とすることから、ハンドリング性が低い。効率的な水素の貯蔵・運搬方法として、有機ハイドライド法を検討してきた。MCH-トルエンの系は、シクロヘキサン-ベンゼンの系やデカリン-ナフタレンの系と比較して、178 K~374 K という広い温度域で液体状態として存在できることから、有機ハイドライドとして最も適していると考えられる。MCH からトルエンへの従来型の脱水素反応触媒としては、高い活性を示す Pt/Al₂O₃ 触媒が知られるが、劣化の問題や副生成物などの課題がある。一方で、昨年までに早大では Mn を修飾した触媒が飛躍的に高い選択性と安定性を発現することを見出した。TEM や XAFS といったキャラクタリゼーションの結果から、Mn は Pt の近傍に存在するが合金化していないことが分かった。このことから、MnO_x 種が Pt/Al₂O₃ 触媒の脱メチル反応活性サイトを選択的に被覆することで、脱メチル反応の進行を抑制したのではないかと考えられた。

そこで本年は、計算化学的手法によって、Mn 添加による触媒性能向上の要因を解明することを目指した。これまでに脱メチル副反応に対する検討例はない。Mn の被覆効果を明らかにするために、各 Pt 露出面および担体である Al₂O₃ について、MnO_x 種被覆による安定度の違いを検討した。

Pt 露出表面の検討は以下の方法で行った。各 Pt 結晶面の表面エネルギーの算出には、計算パッケージとして、平面波基底を採用した DFT に基づく第一原理計算パッケージである CASTEP を用いた。交換相関汎関数には Generalized Gradient Approximation (GGA) Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) 交換相関汎関数、擬ポテンシャルには Ultrasoft 型擬ポテンシャルを用いた。カットオフエネルギーは 300 eV とし、*k* 空間の分割は約 0.04 Å⁻¹ とした。この計算では、Pt が常磁性を持つことからスピンを考慮した。

表面エネルギーを算出するために、Pt のスラブモデルを作成した。このスラブモデルの層数は、層を増やしたときの全エネルギーの増加量が、0.05 eV/layer 以下となったときの層数

を採用した。真空層は上下に 20 Å とした。得られた表面エネルギーから、ウルフの理論を用いて Pt 粒子の構造を推定した。

トルエンの吸着、脱メチル反応および脱水素反応の検討は以下の方法で行った。計算パッケージには、DFT に基づいた全電子第一原理計算プログラムである DMol³ を用いた。交換相関汎関数には GGA-PBE 交換相関汎関数を用い、Pt にのみ DFT Semicore 擬ポテンシャルを用いた。基底関数には Double Numerical plus polarization (DNP) を用いた。 k 空間の分割は約 0.04 Å⁻¹ とした。またこの計算でも、Pt が常磁性を持つことからスピンを考慮した。

触媒表面を擬似的に表現するために、Pt のスラブモデルを作成した。スラブモデルの層数は Pt(111) 面および Pt(100) 面では 3 層、Pt(110) 面および Pt(311) 面では 4 層とし、バルクの状態を表現するために、下側 2 層を固定した。真空層は 15 Å とした。

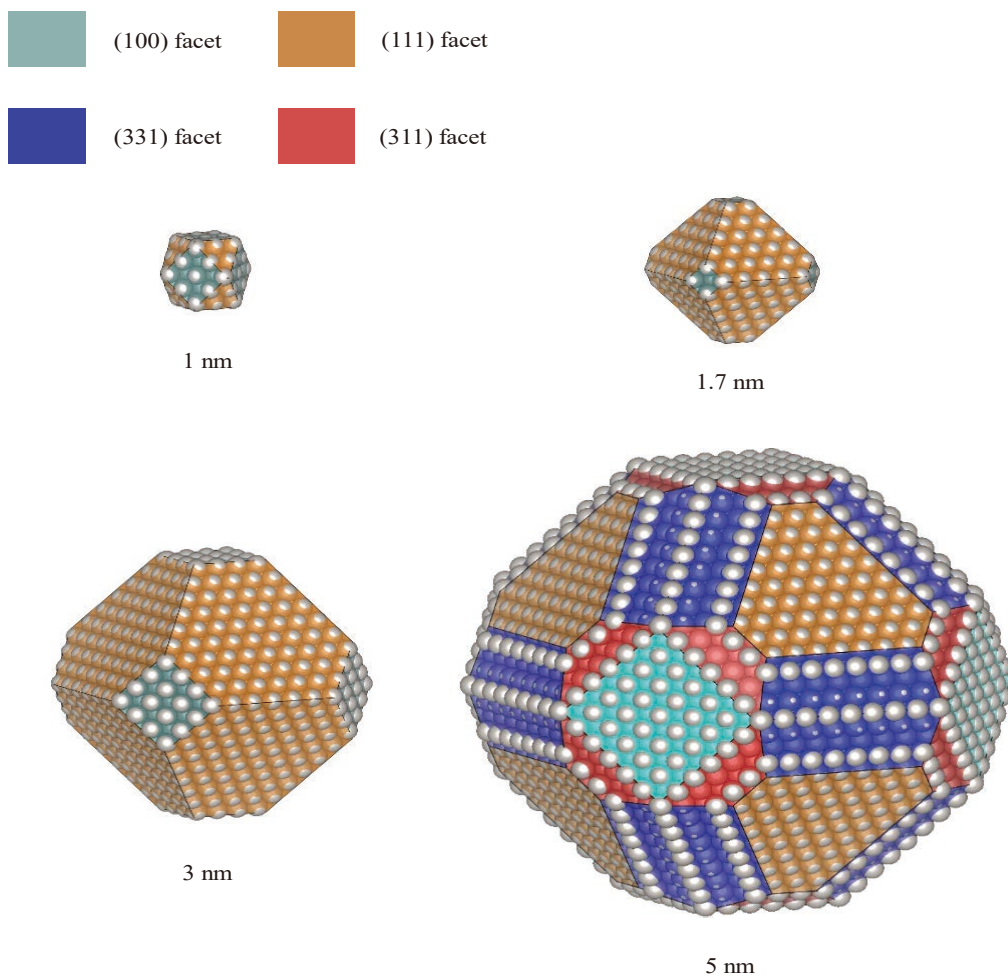


Fig. 1 Calculated optimized structure of Pt particle.

各 Pt 結晶面の表面エネルギーの算出結果をウルフの理論に適用して Pt 粒子の構造を推定した。粒子径を 1 nm, 1.7 nm, 3 nm, 5 nm としたときの推定した Pt 粒子構造を Fig. 1 に示す。この結果より、粒子径が 5 nm より小さい場合、Pt 粒子は(111)面や(100)面といったテラス面のみで構成されていることが分かった。一方で、粒子径が 5 nm よりも大きくなると、それらのテラス面のほかに、(311)面や(331)面といった配位不飽和なステップ面が露出することが分かった。ここで、673 K で焼成したときの Pt/Al₂O₃ 触媒の平均粒子径は 1.7 nm なので、このときの Pt 粒子は主に(111)面や(100)面で構成されていると考えられる。各面におけるト

ルエンの最安定吸着状態を検討した。(111)面,(100)面,(110)面,(311)面におけるトルエンの最安定吸着サイトは,それぞれ Bridge 0° , HCP 30° , HCP 30° , Bridge short 60° となった。また,そのときの吸着エネルギーは,それぞれ $-145.6 \text{ kJ mol}^{-1}$, $-215.3 \text{ kJ mol}^{-1}$, $-218.1 \text{ kJ mol}^{-1}$, $-187.1 \text{ kJ mol}^{-1}$ となった。これらの結果から,テラス面である(100)面と(111)面においてトルエンは異なる吸着状態をとり,ステップ面である(110)面と(311)面でも吸着状態が異なることが分かった。このことから,トルエンの吸着状態はテラス面同士,ステップ面同士で同じになるわけではなく,表面のPt原子の並び方の違いに強く影響を受けると考えられる。また,吸着エネルギーもテラス面同士,ステップ面同士でそれぞれ同じ傾向を示していないことから,表面のPt原子の並び方に影響を受けていると考えられる。

次に,各Pt結晶面の最安定吸着サイトに吸着したトルエンの脱メチル反応について検討を行った。吸着したトルエンのメチル基が切れて,フェニル基とメチル基がPt原子に結合する状態($\text{C}_6\text{H}_5\text{-Pt-CH}_3$)に至る反応の遷移状態を求めた。メチル基が切断される際に,表面のPt原子がトルエン側に引き寄せられて浮き上がることが分かった。(111)面ではトルエン吸着エネルギーよりも脱メチル反応活性化エネルギーの方が大きく,(100)面ではトルエン吸着エネルギーと脱メチル反応活性化エネルギーの大きさが同程度となった。一方,(110)面と(311)面ではトルエン吸着エネルギーの方が脱メチル反応活性化エネルギーよりも大きくなった。このことから,(110)面や(311)面といった配位不飽和なステップ面では,MCHの脱水素反応によって生成したトルエンが脱離せず,脱メチル反応を起こしてしまう可能性があることが考えられる。

続いて,各Pt結晶面の最安定吸着サイトに吸着したトルエンの水素化反応について検討を行った。トルエン水素化反応の活性化障壁の大きさにおいて,テラス面とステップ面との間で大きな差は生じなかった。また,吸着したトルエンが並行して起こしうる反応である脱メチル反応と水素化反応の活性化障壁の差を比較すると,テラス面では約 110 kJ mol^{-1} ,ステップ面では約 65 kJ mol^{-1} だけ脱メチル反応の活性化障壁の方が大きくなった。このことから,ステップ面の方がテラス面よりも水素化反応に対する脱メチル反応の活性化障壁が小さいので,トルエンの脱メチル反応が進行しやすいと考えられる。これらをダイアグラムにしたものをFig. 2に示す。

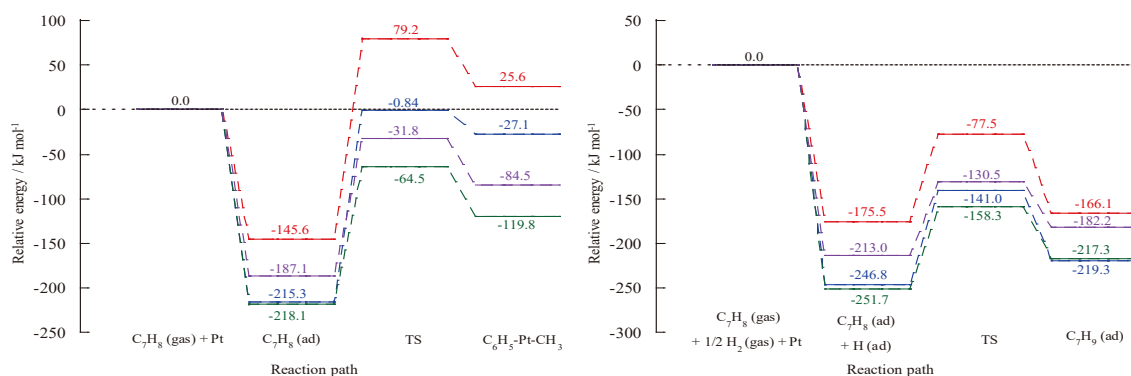


Fig. 2 Reaction diagram of toluene demethylation (right) and hydrogenation (left).
Red : Pt(111) facet, Blue : Pt(100) facet,
Green : Pt(110) facet, Purple : Pt(311) facet.

これらより, Pt(110)面やPt(311)面といった配位不飽和なステップ面では,トルエン吸着エネルギーの方が脱メチル反応活性化エネルギーよりも大きくなることから,生成したトル

エンが脱離せずに、脱メチル反応を起こしてしまうが、トルエン水素化反応の活性化障壁は、テラス面とステップ面でほぼ同じ大きさとなり、ステップ面の方が水素化反応に対する脱メチル反応の活性化障壁が小さいので、トルエンの脱メチル反応が進行しやすいと考えられる。Pt-Mn/Al₂O₃ 触媒において、MnO_x種はPt(110)面やPt(311)面といった配位不飽和なPtステップ面を被覆しているために高性能を発現しうることがわかった。

3. 共同研究者

小河脩平助教, 矢部智宏研究員助教, 比護拓馬助手

4. 研究業績

4.1 学術論文

K. Ogino, Y. Sasaki, Y. Kurosawa, S. Ogo, T. Yabe, W. Kondo, T. Ono, K. Kojima, Y. Sekine, Hydrogen production by water decomposition through redox reaction of Ce-based metal oxide systems in electric field

Chemistry Letters, in press. doi: [10.1246/cl.180055](https://doi.org/10.1246/cl.180055)

T. Suzuki, K. Shiono, S. Manabe, T. Yabe, T. Higo, S. Ogo, Y. Sekine, Selective Adsorption of Toluene on Perovskite-type Oxide
J. Jpn. Petrol. Inst., in press.

S. Ogo*, H. Nakatsubo, K. Iwasaki, A. Sato, K. Murakami, T. Yabe, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, Electron-Hopping Brings Lattice Strain and High Catalytic Activity in Low Temperature Oxidative Coupling of Methane in an Electric Field,
J. Phys. Chem. C, 122 (4), 2089–2096, 2018.

R. Manabe, S. Stub, T. Norby, Y. Sekine*, Evaluating surface protonic transport on cerium oxide via electrical impedance spectroscopy measurement,
Solid State Communications, 270, 45-49, 2018.

H. Saito, S. Inagaki, K. Kojima, Q. Han, T. Yabe, S. Ogo, Y. Kubota, Y. Sekine*, Preferential dealumination of Zn/H-ZSM-5 and its high and stable activity for ethane dehydroaromatization,
Appl. Catal. A: Gen. 549, 76-81, 2018.

S. Ogo*, K. Iwasaki, K. Sugiura, A. Sato, T. Yabe, Y. Sekine, Catalytic oxidative conversion of methane and ethane over polyoxometalate-derived catalysts in electric field at low temperature,
Catal. Today, 299, 80-85, 2018.

- K. Murakami, R. Manabe, H. Nakatsubo, T. Yabe, S. Ogo, Y. Sekine*,
Elucidation of the role of electric field on low temperature ammonia synthesis using isotopes,
Catal. Today, 303, 271-275, 2018.
- S. Okada, R. Manabe, R. Inagaki, S. Ogo, Y. Sekine*,
Methane dissociative adsorption in catalytic steam reforming of methane over Pd/CeO₂ in an electric field,
Catal. Today, 307, 272-276, 2018.
- H. Saito, R. Terunuma, K. Kojima, T. Yabe, S. Ogo, H. Hirayama, Y. Tanaka, Y. Sekine*,
Non-oxidative ethane dehydroaromatization on Co/H-ZSM-5 catalyst,
Chem. Lett., 46(11), 1646-1649, 2017.
- Y. Sugiura, T. Nagatsuka, K. Kubo, Y. Hirano, A. Nakamura, K. Miyazawa, Y. Iizuka, S. Furuta, H. Iki, T. Higo, Y. Sekine*,
Dehydrogenation of Methylcyclohexane over Pt/TiO₂-Al₂O₃ catalysts,
Chem. Lett., 46(11), 1601-1604, 2017.
- S. Ogo*, Y. Okuno, H. Sekine, S. Manabe, T. Yabe, A. Onda, Y. Sekine,
Low-temperature direct catalytic hydrothermal conversion of biomass cellulose to light hydrocarbons over Pt/zeolite catalysts,
Chemistry Select, 2(22), 6201-6205, 2017
- A. Nakano, S. Manabe, T. Higo, H. Seki, S. Nagatake, T. Yabe, S. Ogo, T. Nagatsuka, Y. Sugiura, H. Iki, Y. Sekine*,
Effects of Mn addition on dehydrogenation of methylcyclohexane over Pt/Al₂O₃ catalyst
Appl. Catal. A: Gen., 543, 75-81, 2017.
- R. Manabe, H. Nakatsubo, A. Gondo, K. Murakami, S. Ogo, H. Tsuneki, M. Ikeda, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine*,
Electro-catalytic synthesis of ammonia by surface proton hopping,
Chemical Science, 8, 5434 - 5439, 2017.
- S. Ogo, Y. Sekine*,
Catalytic reaction assisted by plasma or electric field,
The Chemical Record, 17(8), 726-738, 2017.
- T. Oguri, K. Sugiura, T. Yabe, S. Ogo, Y. Sekine*,
Combustion suppression in tri-reforming of methane over Ni supported catalysts at low temperatures in electric field,

J. Jpn. Petrol. Inst., 60(5), 232-240, 2017.

T. Yabe, Y. Kamite, K. Sugiura, S. Ogo, Y. Sekine*,
Low-temperature oxidative coupling of methane in an electric field using carbon dioxide
over Ca-doped LaAlO_3 perovskite oxide catalysts,
J. CO₂ Utilization, 30, 156-162, 2017.

H. Saito, S. Maeda, H. Seki, S. Manabe, Y. Miyamoto, S. Ogo, K. Hashimoto, Y. Sekine*,
Supported Ga-oxide catalyst for dehydrogenation of ethane,
J. Jpn. Petrol. Inst., 60(5), 203-210, 2017.

K. Takise, S. Manabe, K. Muraguchi, T. Higo, S. Ogo, Y. Sekine*,
Anchoring effect and oxygen redox property of $\text{Co/La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{AlO}_{3-d}$ perovskite catalyst on
toluene steam reforming reaction,
Appl. Catal. A: Gen., 538, 181-189, 2017.

S. Ogo*, S. Maeda, Y. Sekine,
Coke resistance of Sr-hydroxyapatite supported Co catalyst for ethanol steam reforming,
Chem. Lett., 46(5), 729-732, 2017.

T. Yabe, K. Mitarai, K. Oshima, S. Ogo, Y. Sekine*,
Low-temperature dry reforming of methane to produce syngas in an electric field over
La-doped Ni/ZrO_2 catalysts,
Fuel Processing Technology, 158, 96-103, 2017.

T. Higo, H. Saito, S. Ogo, Y. Sugiura, Y. Sekine*,
Promotive effect of Ba addition on the catalytic performance of Ni/LaAlO_3 catalysts for
steam reforming of toluene,
Appl. Catal. A: Gen., 530, 125-131, 2017.

K. Mukawa, N. Oyama, T. Shinmi, Y. Sekine*,
Nano-structural control of the formation of carbon particles by application of a moderate
electric field,
Chem. Lett., 46(1), 19-21, 2017.

4.2 総説・著書

瀧瀬 賢人、稲垣 玲於奈、関根 泰
触媒利用による水素製造,
防錆管理, 62(2), 63-68, 2018.

関根 泰,

シフト反応における貴金属系触媒のシンタリング,
触媒劣化-原因、対策と長寿命触媒開発-, シーエムシー出版、p. 58-61, 2018.

小河 脩平、矢部 智宏、関根 泰,
メタン・二酸化炭素・水素のための触媒,
化学と教育, 2, 68-71, 2018.

村上 洸太、関根 泰,
表面プロトニクスによる低温アンモニア合成,
ファインケミカル, 12, 15-22, 2017.

小河 脩平、佐藤 綾香、矢部 智宏、関根 泰,
メタンと空気から低温で C2 炭化水素を作り出す,
触媒, 59(6), 319-324, 2017.

真鍋 亮、関根 泰,
低温でオンデマンドに駆動するアンモニア合成プロセス,
クリーンエネルギー, 11, 46-51, 2017.

矢部 智宏、関根 泰*,
中低温域で作動する固体イオニクス材料と触媒反応,
化学, 72(8), 70-71, 2017.

真鍋 亮、関根 泰*,
電場を利用した化学反応,
現代化学, 553, 20-24, 2017.

4.3 招待講演

2018/3/21 東京 日本化学会 春季年会
電場触媒反応を利用した温和な条件下でのアンモニア合成技術
○関根 泰

2018/1/26 東京 高難度選択酸化反応研究会シンポジウム
電場触媒反応による低温メタン酸化カップリング
小河 脩平、佐藤綾香、関根 泰

2017/11/10 神奈川 革新的触媒シンポジウム
メタン転換のための触媒反応のこれまでと今後
関根 泰

2017/10/26 東京

アンモニア合成の新手法

関根 泰

2017/09/30 新潟 触媒学会 第二回キャタリシスセミナー

非在来型触媒反応による天然ガス転換と水素製造

関根 泰

2017/09/28 東京 石油学会 新エネルギー部会講演会

CO₂ 化学的転換利用の現状と今後

関根 泰

2017/9/12 愛媛 触媒学会 第 120 回触媒討論会

天然ガスからの水素・化学品製造のための低温触媒反応プロセス

小河脩平、渡部 綾、関根 泰

2017/06/27 横浜市講演会

水素のこれまでとこれから

関根 泰

2017/05/09 東京

水素をつくる これまでとこれから

関根 泰

4.4 受賞・表彰

2018/3/22 触媒学会 第 121 回触媒討論会 学生優秀講演賞

Pd 担持 CeO₂ 触媒を用いた低温でのメタン水蒸気改質における表面プロトニクスの役割○真鍋亮、岡田篤樹、稲垣玲於奈、小河脩平、(オスロ大)SINDRE, Stub、(オスロ大)NORBY, Truls、

関根 泰

2017/12/4 第 37 回水素エネルギー協会 (HESS) 大会 学生優秀発表賞

触媒表面のプロトン伝導特性評価と水素製造への寄与

上手裕紀子、真鍋 亮、久井雄大、矢部智宏、小河脩平、関根 泰

2017/9/14 触媒学会 第 120 回触媒討論会

天然ガスセッション最優秀賞

電場印加反応場における Ce 酸化物系触媒を用いたメタン酸化カップリング

佐藤綾香・小河脩平・岩崎晃聖・中坪秀彰・石川敦之・中井浩巳・関根 泰

2017/9/14 触媒学会 第 120 回触媒討論会

天然ガスセッション優秀賞

新型エタンクラッカー用の脱水素触媒開発

関 裕文・斎藤 晃・前田 駿・小河脩平・(クボタ)橋本国秀・関根 泰

2017/5/23 石油学会 第66回研究発表会 最優秀ポスター賞

ヘテロポリ酸担持触媒を用いた電場印加反応場におけるメタン酸化カップリング
佐藤綾香, 岩崎晃聖, 小河脩平, 関根 泰

2017/5 石油学会論文賞

2017/5/15 第16回日韓触媒シンポジウム Oral presentation award

Low-Temperature Catalytic Oxidative Coupling of Methane over Supported
Heteropolytungstate Catalysts in an Electric Field

Ayaka Sato, Shuhei Ogo, Kousei Iwasaki, Kei Sugiura, Yasushi Sekine

4.5 学会および社会的活動

Elsevier "Fuel"誌 Editor

JST さきがけ「反応制御」領域総括

触媒学会理事

石油学会石油化学部会 部会長

水素エネルギー協会 理事

触媒学会天然ガス研究会 代表

Natural Gas Conversion Board Member (国際天然ガス転換会議理事)

TOCAT8 Treasurer

日本化学連合 理事

日本化学連合運営委員会副委員長・政策提言WG委員

JST さきがけ「革新的触媒」領域アドバイザー

JST-CREST「革新的反応」領域アドバイザー

日本学術会議 特任連携会員 (第三部)

石油学会 60周年記念大会副実行委員長

Fuel Processing Technology (Elsevier) Editorial Board Member

JACI (新化学技術推進協会) フロンティア連携委員

触媒学会国際交流委員会委員

触媒学会水素の製造と利用のための触媒技術研究会 世話人

触媒学会参照触媒部会委員

触媒学会工業触媒研究会世話人

石油学会海外協力分科会委員

石油学会会員拡大委員会委員

Frontiers Board Member

水素エネルギー協会企画委員会委員

水素エネルギー協会評議員

日本エネルギー学会企画委員

静電気学会諮問委員

日本エネルギー学会ガス化部会幹事

日本エネルギー学会石炭科学部会幹事

化学工学会反応工学部会分科会副代表

プラスチックリサイクル化学研究会幹事・事務局東京分室長

5. 研究活動の課題と展望

開発中の触媒を用いて、実環境領域における活性・選択性を評価し、炭素析出特性・副生成物生成特性にどういった影響が現れるかを詳細に検討する。併せて、反応前後の触媒の詳細なキャラクターゼーション（XPS による担持金属電子状態変化，BET による担体比表面積変化の評価，TPO による炭素質の蓄積量の評価，TEM-EDX による金属並びに担体の構造変化，*in-situ* IR による反応中間体吸着挙動評価，SPring-8 での EXAFS 測定による担持金属の微細構造評価）を行い、より高い性能の触媒を構築するための指針を得る。開発された高性能触媒担体の長期安定性、とりわけ高転化率での構造安定性や副生成物生成挙動などについて詳細に解析し、計算化学を併用して、PDCA サイクルによる改良を進め、企業での実証を進めていただく。

大都市圏の環境と安全性向上研究PJ

研究代表者 長谷見 雄二
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

東日本大震災以降、首都圏では、直下型地震・洪水等の大規模な自然災害が危惧され、自立性、機能持続性を有する「BCP対応型自立分散型エネルギー供給システム」の導入検討が不可欠となっている。特に3大都市圏では、世界的な都市間競争を視野に、国際ビジネス・生活環境、大規模災害に対応するためのエネルギーセキュリティと防災・減災のための業務継続地区（BCD）の構築が喫緊の課題となっている。一方で、COP21のパリ協定におけるCO2削減に向けた取り組みも加速させる必要があり、自立分散型エネルギー導入による安心・安全で低炭素な都市づくりのための積極的な取り組みが急務となっている。

政府も、「国際競争拠点都市整備事業」を推進し、業務中枢拠点に本格的に整備すべきインフラとして自立分散型エネルギー供給システムの導入促進に取り組んでいることから、今年度は、東京圏・関西圏・中部圏を代表する地区における、BCD構築を課題として研究を行った。

2. 主な研究成果

2.1 東京圏における病院・公共施設等の災害時業務継続街区（BCD）の形成

板橋区の大山駅周辺地区には、災害拠点病院に該当する4000床規模の医療施設が集積し、東京都第二次保健医療圏内の「区西北部保健医療圏」での中心的役割を果たすとともに、都心の災害時医療等のバックアップ機能も期待されている。また同地域には、区役所・警察署等行政中枢機能も集積しており、大規模震災等の非常時において重要な役割を果たす拠点として、BCDの整備推進が求められる。そこで同地域における病院・公共施設等のBCD形成のあり方とその実現の可能性について研究し、以下の成果を収めた。

- ①災害時業務継続街区形成への国、都等の施策動向と方向性
- ②板橋区大山駅周辺地域の立地特性並びに主要施設の実態
- ③板橋区大山駅周辺地域の地域特性と災害時業務継続街区形成のあり方
- ④災害時業務継続街区形成に向けた自立分散型エネルギー供給計画 (Fig. 1)
- ⑤今後の課題と方向性

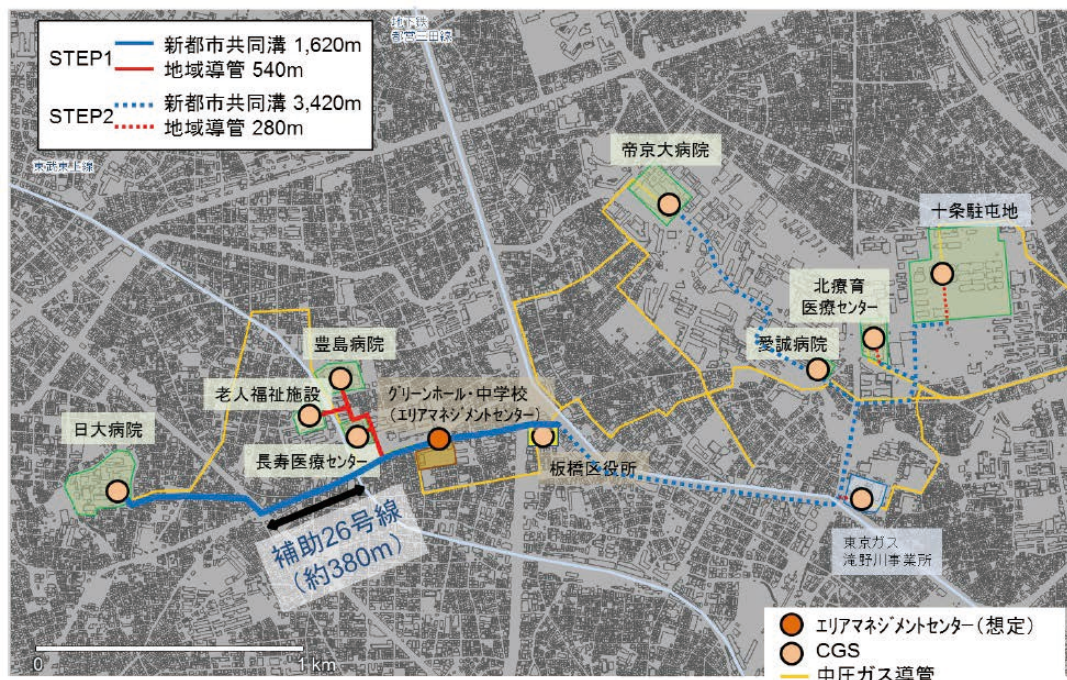


Fig. 1 自立分散型エネルギー供給計画のイメージ

2.2 関西圏における業務継続街区形成に向けた自立分散型エネルギーシステム構築

大阪御堂筋・船場地区は関西を代表する市街地で、業務中枢機能の集積が進んでいるが、今後は国際都市間競争の拠点として、業務継続街区の形成が不可欠であり、そのために自立分散型エネルギーシステムや新都市共同溝の整備によるインフラの強靱化が求められている。本研究は、こうした視点から、御堂筋・船場地区における具体的な計画モデルを提案し、当該地区における今後の業務継続街区形成に資する以下の成果をあげた。

- ①大阪市都市再生緊急整備地区等大阪市の都市開発施策動向
- ②御堂筋・船場地区の都市開發現状と動向
- ③御堂筋・船場地区におけるBCD形成のコンセプト (Fig. 2)
- ④御堂筋地区のモデル街区におけるBCD計画
- ⑤今後の課題と方向性の検討

2.3 中部圏における災害時業務継続街区（BCD）形成のためのコンセプト構築

近年名古屋駅周辺部では、活発な都市開発に伴う高層高密度化が進行し、業務中枢施設の集積が加速している。2027年にはリニア新幹線の開業も予定されているが、地下街・地下道等の地下空間が錯綜し、安全性の確保が緊急な課題となっている。また、エネルギー供給や情報システムが個別に形成されており、地域連携による自立分散型エネルギー供給ネットワーク構築によるBCDの形成は不可欠である。本研究では、安全・

安心面から当該地区の地下街等の実態を把握することにより、ＢＣＤ形成に関する情報の集積など、以下の成果をあげた。

- ①名古屋駅周辺の開発状況
②地下街、地域冷暖房施設、導管ネットワーク、安全確保施設等の実態
③BCD形成のためのオフサイトセンターの構築 (Fig. 3)

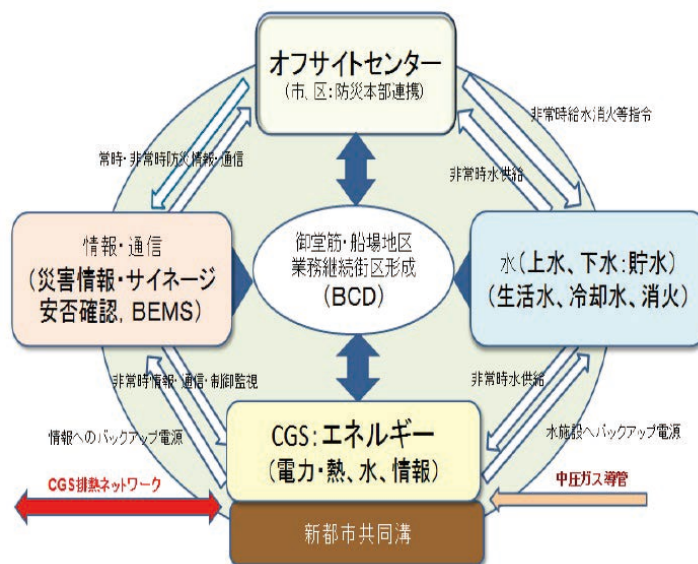


Fig.2 災害時業務継続街区（BCD）形成の基本コンセプト

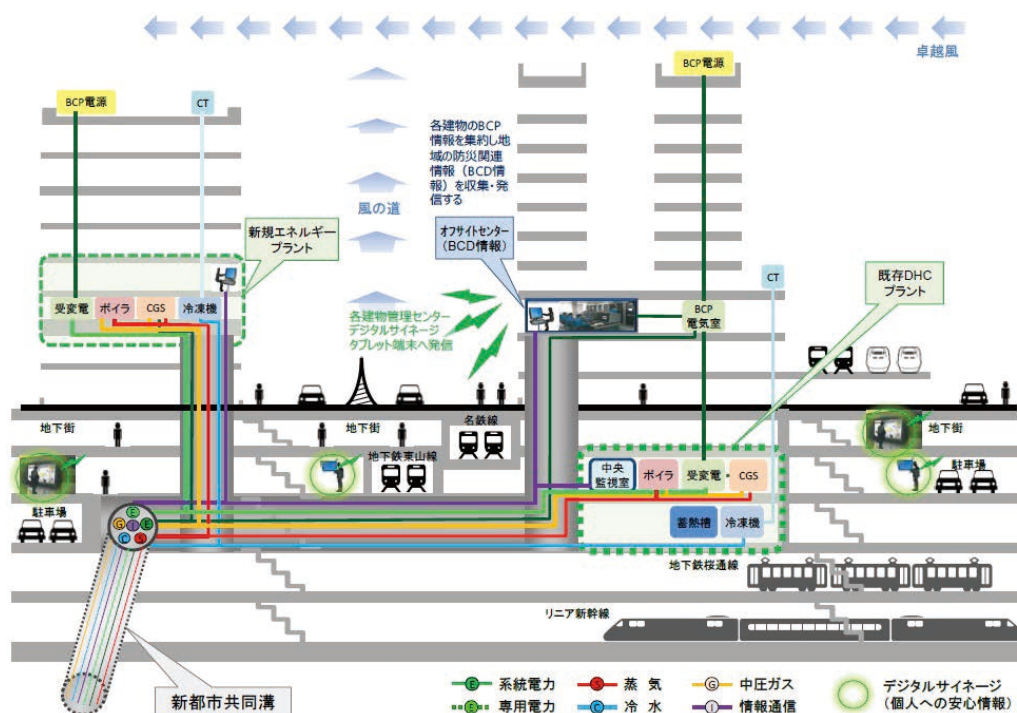


Fig.3 オフサイトセンターの構築イメージ

3. 共同研究者

市川 徹（理工学研究所・客員准教授）、中嶋浩三（理工学研究所・招聘研究員）、
相田康幸（理工学研究所・招聘研究員）、小林紳也（理工学研究所・招聘研究員）
堀 英祐（近畿大学・特任講師）

4. 研究業績

4.1 学術論文

市川徹，堀英祐，中嶋浩三他，都内某区役所周辺地区における自立分散型エネルギー導入可能性の検討 その1 業務継続街区形成に向けた検討概要，その2 導入計画と効果の試算，日本建築学会，日本建築学会大会学術講演梗概集，2017.8

4.2 総説・著書

東京新創造3 超高層建築と地下街の安全，2017.8，早稲田大学出版部
東日本大震災による都市ガスの被害と首都圏における備え，基礎工，総合土木研究所，2017.12

4.3 招待講演

大都市圏における業務継続街区（BCD）の抽出とモデル街区におけるCGS等導入に関する調査，平成29年度（第6回）調査研究成果普及発表会，一般社団法人都市環境エネルギー協会，2017.7

4.4 受賞・表彰 なし

4.5 学会および社会的活動

大阪地区再生緊急整備地域における事業継続街区構築に向けて ～御堂筋・船場地区での実現を目指して～，第24回都市環境エネルギーシンポジウム，一般社団法人都市環境エネルギー協会，国土交通省，大阪市，2017.11

5. 研究活動の課題と展望

2017年度は、東京都板橋区、大阪市御堂筋・船場地区、名古屋市中心部を対象として、災害時を考慮した生活継続・事業継続と、地域のエネルギー負荷を低減するための自立分散型エネルギーシステムの検討を行った。また名古屋地区については、リニア新幹線の新駅を含めた地域全体の防災機能を強化するオフサイトセンターの構築を提言した。こうした地域・街区スケールでの取り組みを具体的に推進するためには、事業全体を推進・運営管理する事業主体の決定、インフラ整備に掛かる費用負担や地域開発に対するステークホルダーとの調整などが課題となっているため、2018年度も継続して研究を行

う。

ハイパースクール研究

研究代表者 古谷 誠章
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

先の東日本大震災では、都市における地域コミュニティ存続のあり方や都市における近隣コミュニティの衰退などの問題が顕在化し、改めて地域住民同士のつながりや日常的な居場所としての建築の必要性が改めて見直されている。本研究では小学校を単に児童のものだけではなく、社会にとって不可欠な地域の「核」と捉え直し、ひとつの学校が都市におかれることで、地域社会そのものが変化していくような「ハイパースクール（学校を超えた学校の意）」の研究を行う。全国に「森の学校」や「まちの学校」、「海の学校」、「里の学校」などといった地域にとっての中心となる「ハイパースクール」のモデルを構想する。改めて自然・環境が人間の本質的な人格形成に必要な不可欠なものであることを考え、子供たちの育成環境や地域住民の生活環境を整えるために必要な「都市・建築・教育・環境」の相互関係を見直し、来るべき日本全国、世界各地に必要な不可欠で具体的な処方箋を提案する。

2. 主な研究成果

- 2-1. 都市型環境住宅のプロトタイプモデルの研究
- 2-2. 次世代医療施設の研究（地域包括ケア病棟）
- 2-3. 森が学校計画産学共同研究会
- 2-4. 都市における「森が学校」モデルのための木育家具の研究開発

2-1. 都市型環境住宅のプロトタイプモデルの研究

2-1.1 研究課題

近年、木質空間への関心は高まってきている。新しく作られる建築にも、木質空間を取り入れようとする動きがあり、また、木質空間が人に与える好影響も明らかになってきている。その中で、大型木質パネルを使用した戸建て住宅を提案することができれば、住環境を今まで以上に快適にデザインすることができるのではないだろうか。

木質パネルの使用に平行し、昨年度まで研究してきたALCパネルも使用する。それぞれ長所の異なる素材を、適当な場所に使用することで、今まで以上に快適な戸建て住宅を実現することを目的とする。これまで研究、実用化を目指して実験を行ってきたALCパネルを使った住宅の環境的利点だけでなく、木質パネルを使用することで、さらに快適な住空間を実現することを目的とした。

2-1.2 主な研究成果

今までどのような木質パネルの使用の実例があるか知ることで、木質パネルの基本性質と使用の可能性を探った。それをもとに、鉄骨構造躯体が片持ち梁でせり出すような構造を実現できることから、木質パネルを配置した箱が顔を出すようなデザインを持った住宅を提案する。木の持つ温かなイメージや調湿性、ALCのもつ蓄熱性や光の反射などを十分に発揮できる場所に、それぞれの素材を配置した。古谷研究室で全体のデザイン、部屋の配置の提案をし、旭化成ホームズでは収まりやパネルの割り付けの検討を行って頂き、その結果をフィードバックする手順を踏んだ。

今回の研究では、直線階段を持つ住宅、またはUターン階段を持つ住宅の二種類を提案している。階段まわり以外は全て同じ間取りや家具配置を持ち、階段部分のみを取り替えることで違った形の住宅となる提案とした。

直線階段を持つ住宅については、玄関を入ると正面に直線階段が現れる。この階段は、縦方向に同一に重なるように配置され、三階まで続いている。面積に対して効率的に階段部分をとることで、一階の水回りに余裕ができ、三階には小さな家族のための学習やお茶を飲めるようなスペースを取ることが出来る。

Uターン階段を持つ住宅においては、同じく玄関を入ると正面にUターン階段が現れる。こちらは直線階段とは異なり、下層の階段に重ならないように、縦方向にずらして階段を重ねている。そのため、三階から一階の玄関まで視線や風、光が抜けるようになっており、住宅が階段を中心に、全ての層が一体となる構成を取ることが出来る。

また、2つの案に共通し、魅力的な間取りを実現した。一階部分は、玄関上に吹き抜けを配置することで、木質パネルの内装が右手に二層分大きく広がり、木質パネルならではの魅力を感じられるとともに、とても暖かみを感じる空間となっている。二階部分には、夫婦と子供のための個室が配置され、それぞれが木質パネルを内装に持つ空間となっている。片持ちで外部に飛び出したような外観のテラスと寝室も配置し、開放的な場所となるようにした。三階部分では、ダイニング・キッチン・リビングが一続きになるような、大きな空間を作っている。キッチンは、長いテーブルを配置することで、朝食はキッチンの隣に続くテーブルでとることが出来るなど、様々な使い方に発展できる構成とした。



(左：北西側外観模型写真、右：南東側外観模型写真)



(模型：内観及び外観部分写真)



(左：Uターン階段内観、右：直線階段内観) (古谷誠章研究室 撮影)

2-2. 次世代医療施設の研究（地域包括ケア病棟）

本研究は、医療建築の現状を研究しつつ次世代の医療空間の提案を行う、大成建設との共同研究である。

現代の日本の医療は少子高齢化により医療財源の不足が深刻化しており、その対応策として高度急性期から療養、慢性、在宅と明確な役割分担を図ることで経営の効率化を促している。

人口減少、少子高齢化社会の対応策が練られる中で、平成26年度の診療報酬改定において新設された「地域包括ケア病棟」は、急性期治療を経過した患者、在宅において療養を行っている患者の受け入れ、患者の在宅復帰支援を行う機能を有した地域包括ケアシステム（=重度な要介護状態となっても住み慣れた地域で自分らしい暮らしを人生の最後まで続けることができるよう、住まい・医療・介護・予防・生活支援が一体的に提供されるシステム）を支える役割を担う病棟である（fig. 1）。この地域包括ケアを導入することにより、急性期機能の維持、慢性期から在宅までの橋渡しなど上手く患者を振り分けることができるようになり、一定の医療の質を確保できる。

平成26年度に廃止となった亜急性期病床を転換して地域包括ケア病棟を開設した病院も多く、今後も更なる地域包括ケア病棟の増加が見込まれる。

そこで、平成 28 年度本研究会では地域包括ケア病棟の最適な病棟プランの提案を行い、また都市における病院の地域への開き方を模索した。

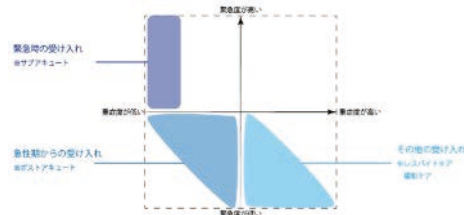


fig.1 地域包括ケア病棟が受け入れる患者

2-2-1. 地域包括ケア病棟に求められる3つの指標

地域包括ケア病棟が受け入れる患者層を踏まえた上で、「在宅に近い環境」、「QOLの向上」、「まちとのつながり」、の3つを地域包括ケア病棟に求められるものであると考え、提案を行った（fig. 2）。

- ・「在宅に近い環境」…スムーズに在宅復帰ができるように、入院中にも日頃生活の中で行う動作ができる環境や積極的に身体を動かしたくなるような機能が必要である。
- ・「QOLの向上」…最大60日という長い入院生活の中で患者が施設内で快適に過ごせるように、QOLを向上させる癒しや娯楽といった機能が必要である。
- ・「まちとのつながり」…退院後も自分の住む地域で豊かな暮らしができるように、入院中でも患者がまちとのつながりや地域のネットワークを構築できる機能が必要である。また今は医療の提供を受ける必要がない地域住民も病院に親しみ、病院を日常的な空間と感じられるような機能も必要である。

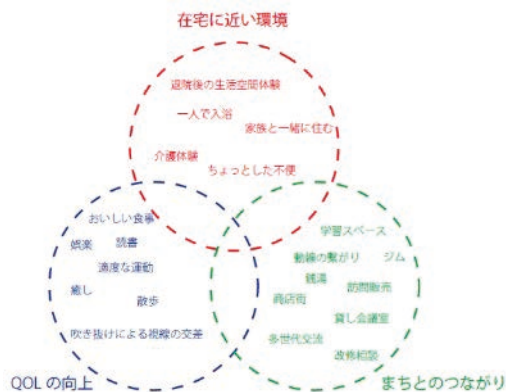


fig.2 地域包括ケア病棟に求められる3つの指標

2-2-2. 地域包括ケア病棟における中間領域の提案

地域包括ケア病棟は看護配置13対1以上と、スタッフの使用する専有面積が少ないという特徴がある。同じ階面

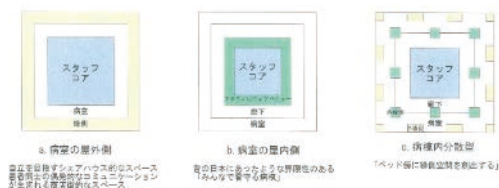


fig.3 病棟における中間領域の設計パターンのパターン

（古谷誠章研究室 作成）

積でも急性期病棟に比べ、患者の使用できるスペースを大きくとることが可能である。この余剰のスペースを「中間領域」とし、地域包括ケア病棟における中間領域のとりかたのスタディを行った (fig. 3)。

2-2-3. ヒアリング調査の成果を踏まえた提案の振り返り

芳珠記念病院にて地域包括ケア病棟協会会長の仲井培雄氏をはじめとした実際に病院で働いている方々に、本研究会で提案した地域包括ケア病棟の平面図をお見せし、現場からの意見をいただくヒアリング調査を行った (fig. 4)。

ヒアリング調査成果を踏まえ、中間領域を病室の屋外側にとる案 (fig. 5)、病室の屋内側にとる案 (fig. 6)、病棟内に分散させる案 (fig. 7) それぞれについて、以下の 5 つの評価軸から評価を行った。

① 治す病院から治し支える生活支援型病院

残存機能を活かした在宅・復帰支援を行う地域包括ケア病棟では、自宅に近い環境のリハビリスペースを提供する等の工夫が必要。

② 多様な患者に対応

地域的特性や患者個人の症状、身体的条件、家族的条件を踏まえたケア環境が必要。

③ 認知症患者が主な患者層

高齢者の割合が多い地域では認知症の入院患者も多い。認知症を併発する患者に対応しうる治療・居住空間を提供する必要がある。柱や家具等の突起物を無くし、認知症患者の転倒リスクを減らすなどといった工夫が必要。

④ 病棟における家族との共働

在宅復帰という目標を「病院スタッフ+患者」だけではなく、日常生活を共にする家族と共有し、退院後の持続可能で継続的なケア体制を組み立てる空間が必要。

⑤ 地域開放スペースのあり方

在宅の人と入院している人をつなぐスペースが必要（入院前の患者が相談に訪れる暮らしの保健室など）。

病院を地域に開かせる（感染・セキュリティー面を考慮の上）。



fig.4 ヒアリングの様子

(古谷誠章研究室 撮影)

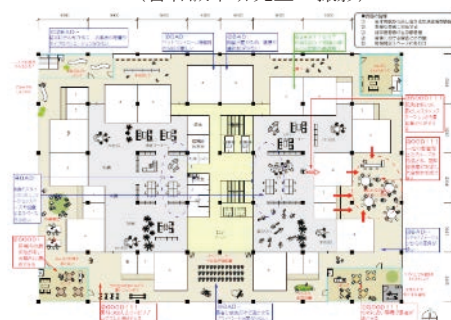


fig.5 中間領域：病室の屋外側案

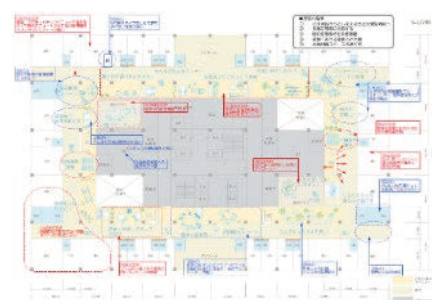


fig.6 中間領域：病室の屋内側案



fig.7 中間領域：病棟内分散型案

(古谷誠章研究室 作成)

2-3. 森が学校計画産学共同研究会

2-3-1. 研究テーマの細分化と展開

自然環境を人間の本質的な人格形成に必要な不可欠なものと定義付け、子ども達の育成環境を整えるために必要な「都市・建築・教育・環境」の相互関係を見直し、来るべき日本全国、世界各地に必要な不可欠となる『森が学校』のあり方を研究した。「都市・建築・教育・環境」研究領域を中心に、学内外、研究会員による総会・講演会を各1回、研究定例会7回を開催した。本年度は、下記の研究項目に従い、研究を進めていった。

A. 「森が学校」の環境づくり

A-1. 森の中や校内に設置する教育施設・設備の研究

A-2. 自然と融合した校舎の研究

A-5. 全国において地域全体を学校と捉え、計画する研究

B. 「木をつかう」世代育成と保護者育成

B-1. 木造の校舎や家具が子どもの心身に及ぼす効果の研究

C. こどもに与える影響の調査

C-1. 公立の調査対象校における比較調査・研究

D. 推進組織、組織体制の調査・研究

D-1. 全国への展開へ向けた、PPP (Public Private Partnership) のあり方の研究

E. 「森が学校」の教育の在り方

E-1. 自然と融合した授業の調査・研究

東松島市宮野森小学校の教員を対象に、復興の森及び周辺自然環境をどのように授業に取り入れていくかを考えるワークショップを行った。また、埼玉県立越谷市教育委員会と研究調査に関する協議を行った。

2-3-2. 研究会定例会・総会

平成28年度は、「都市・建築・教育・環境」研究領域を中心に、学内外の研究会員による幹事会・総会を各1回、研究定例会を7回行った。研究においては、下記の研究計画案に則って担当者を決めて研究を行い、とりわけA-1、A-2、A-5、B-1、C-1、D-1、E-1について、毎度の研究定例会で議論を行った。(fig.1, 2)

また、実践的な取り組みとして、平成28年7月27日に、東松島市宮野森小学校の教職員の方を対象に、「第一回 東松島市立宮野森小学校・復興の森での授業の活用を一緒に考える研修会」を行った。昨年度から継続して行っているアンケート調査においては、東松島市立宮野森小学校からは一定の回答を得られたが、世田谷区立等々力小学校からは回答を得ることができず、今後の調査も難しくなることが想定される。



fig.1 研究定例会



fig.2 総会

(古谷誠章研究室 撮影)

2-3-3. ワークショップ

2017 年夏に「森の劇場」(fig. 3)が竣工することで、復興の森の一連の施設が完成する。その節目となる年を前に、東松島市立宮野森小学校の教職員が復興の森や周辺自然環境をどのように授業に取り入れるべきなのか、不安を感じているという意見があると第一回定例会（2016 年 6 月 24 日実施）で声があがった。そこで 2016 年 7 月 26 日、東松島市宮野森小学校の教員を対象に、復興の森及び周辺自然環境をどのように授業に取り入れていくかを考えるワークショップ形式のセミナーとして、「東松島市立宮野森小学校・復興の森での授業の活用を一緒に考える研修会」を行った。

宮野森小学校の教職員の方に対して、学習指導要領の中でどのように「森の学校」として、復興の森をはじめとした地域の周辺環境を授業に取り込んでもらうかを考えてもらうことを目的とする。「授業」の科目は総合の時間や理科などに限定せず、すべての教科を対象として取り込んでもらうためのきっかけとしてももらう。また、今回の研修会を契機に、来年度以降の学習指導要領に実際に周辺環境との応答の中で子どもたちが自発的に学ぶことのできる授業環境を提示できるようにする。(fig. 4)

「森の学校」と研究会としても呼び、新聞などにも公表されている。それに対して、森の学校のイメージが先行しているのではないかという意見があった。自分たち自身のカリキュラムを行って、どのように研究会とも一緒にやっていけるかを気にされていた。森の学校と呼ばれるが、学校の方針としては東松島の海や森や川、田んぼなどあらゆる自然がある中で、どのように統合的に地域を見ていけるかを考えている。



fig.3 森の劇場（古谷誠章研究室 作成）



fig.4 教員向けワークショップ（古谷誠章研究室 撮影）

2-4. 都市における「森が学校」モデルのための木育家具の研究開発

「自然・地域社会・建築・教育」の相互関係を見直し、森自体を学校として考える「森が学校」を都市部においても実現するために森の分身である木の家具のあり方を加工技術と組み合わせて研究した。又、様々な樹種を使用した家具で環境授業にも活用できる家具をデザインし、都市における「森が学校」モデルのための木製家具の開発を行った。今年度においては、実際に「木育家具」として、都会の子ども達が木に触れることにより、木に対する親しみや理解を深め、木を生活に取り入れ、自ら森作りに貢献する意識づけの出来る家具づくりを研究するため、研究会を9回、視察を1回、ワークショップを1回行った。また、研究する対象を具体化させるために、研究テーマにある「木育」というキーワードに関するコンセプトメイクを行った。

2-4-1. ワークショップ

財団法人 C. W. ニコル・アフアンの森財団の、長野県黒姫町にある新設事務所兼馬房である【ホースロッジ】内に設置する棚に用いる棚板を製作するために、2016 年 4 月 14 日～ 4 月 15 日、6 月 27 日～ 7 月 1 日に二度のワークショップを行った。これらのワークショップは直接研究会と関係するものではないが、これら二度のワークショップで身につけた知識や手法・技術を用い、2016 年 11 月 21 日に実施した、棚板作成ワークショップにて、組み替えパーティションに用いる棚板を作成した。



fig.1 ワークショップ

2-4-2. エコプロ 2016

平成28年12月8日～12月10日に行われたエコプロ2016にて実際に共同開発した家具を3件、その他金具を1件に関して試作品の作成および展示・発表を行った。一部家具の部材に関しては外部発注を行わずに自分たちの手で製材から加工まで行い、加工方法を研究会で検討した上でワークショップにて確立させた。



fig.2 エコプロ 2016

(古谷誠章研究室・株式会社オカムラ 撮影)

3. 共同研究者

斎藤 信吾（創造理工学部・助教）
 根本 友樹（創造理工学部・助手）
 山田 浩史（創造理工学部・助手）
 王 薪鵬（創造理工学部・助手）

4. 研究業績

特になし

5. 研究活動の課題と展望

5-1. 都市型環境住宅のプロトタイプモデルの研究

木質パネルと ALC パネルを同時に使用した本年度の研究においては、木質パネルと ALC パネルのそれぞれの良い点を考慮し、最大限に効果的な場所に配置することを重要な点としている。さらに、環境配慮型住宅として、いかに風通しを良くするか、いかに明るく快適な空間を実現していくかということ敷地に応じて検討していくことも重要な点である。本年度は、都市型住宅モデルとして、様々な敷地へ適応可能な建物を考えた。今後、実際の敷地においた際には、環境的側面から、どのように木質パネルと ALC パネルを配置することが最適化、検討していくことができる。

5-2. 次世代医療施設の研究（地域包括ケア病棟）

地域包括ケア病棟で受け入れるさまざまな患者のニーズに応えるための空間を提案したが、ヒアリングの結果入院患者の多くが高齢者であり、特に認知症の患者を多く抱えているという事がわかった。認知症患者のケアを行いやすくするために病棟内に死角を無くす、看護動線を短くする等の工夫が必要である。また、地域によって受け入れる患者層も異なるため、それぞれの地域で求められる機能や空間も変化する。

病院を地域に開かせる手法については、medical な空間と social な空間を分ける「結界」となる部分を感染リスクやセキュリティー面の問題を考慮した上で計画する必要があることがわかり、本研究の中で行った提案の課題の一つといえる。

本研究成果を活かし、今後も医療施設が全体として大きな住居ないしは都市空間となり得るような新しい施設計画の理念を模索していきたい。

5-3. 森が学校産学共同研究会

昨年度に引き続き継続してアンケート調査等では定量的な一定の成果を得ることはできた。しかし、環境授業による影響だけを測定できるような条件設定は困難であり未だ課題が多いことが分かった。今後継続して研究を進めていくことで、こどもへの影響や効果を測定する方法について知見を深めていきたい。自然の多い地域・少ない地域での「森が学校」をモデルケースとして具体的な要素を産学共同で研究提案した。特に全国への展開を目指し研究成果をコンセプトブックとしてまとめた。今後全国の各教育委員会に配布し、「森が学校」実現のため研究協力が可能な調査対象校

を増やすとともに、全国へ知見を広めていきたい。研究成果は各自治体へ具体的にフィードバックし、実現へ向けての参考となるよう研究を進めている。研究成果は各自治体へ具体的にフィードバックし、実現へ向けての参考となるよう研究を進めている。今までの研究会の活動をまとめ、JIA ゴールデンキューブ賞に応募した。また、宮野森小学校において環境授業前後の子どもの理解度を調べるためのアンケート調査を行い、集計をした。

5-4. 都市における「森が学校」モデルのための木育家具の研究開発

今年度は実現可能性（精度、コスト、安全性など）の検討や、ビジネス面での展開などが考えられなかったという意見があった。一方で、コンセプトメイクに関しても十分に行うことができたとはいえず、「木育」というテーマで家具開発を行うにはまだ曖昧な定義でしか研究会内では吟味しきれていない。より具体的な提案を行うために、研究会テーマについても十分に吟味をしながら、研究を行っていきたい。

今後の展開として、エコプロ2016後の3度の研究会にて、本年度の活動の振り返りおよび次年度研究会で行うことの検討を行い、次年度初頭に関しては小中学校のオープンスペースに用いるための家具提案について検討していくことにした。また、エコプロ終了後の3回の研究会では、本年度の活動の統括および次年度の活動に関して議論を行った。

組織再生機能に優れた複合足場材料の開発研究

研究代表者 山崎 淳司
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

再生医療において、特に組織再生を安全かつ高効率に行うためには、生体適合性に優れ、抗感染性細胞との親和性と構造的・機械的特性を両立した、細胞活性因子の複合足場材料基材が不可欠である。本研究では、アパタイト系物質、非晶質ケイ酸、窒化物、酸化物、金属、高分子などの適切な物性を有する基材を選択・創成し、これに細胞活性化因子、DNAなどの有機シグナル物質や光熱変換などの機能性物質を複合化して、目的細胞の増殖・分化や局所的高選択死滅を設計でき、かつ組織再生やがん治療に有効な機能を付与した足場材料の開発を行う。

2. 主な研究成果

光熱変換物質／メソポーラスシリカ複合体の合成

光熱療法は、正常細胞に比べて相対的に熱に弱い性質を持つがん細胞のみを死滅させるために、生体透過性に優れる近赤外線により、がん細胞付近を局所的に温度上昇させて、がん細胞のみを選択的に死滅させる治療法である。本年度は、免疫療法用アジュバントとしての利用も期待されるメソポーラスシリカに、近赤外線に応答して熱を発する炭素や金を複合した粒子を作製し、免疫療法と光熱療法を複合させた、副作用の少ない治療法のための粒子の調製を試みた。

メソポーラスシリカは、既報に従って、p-トルエンスルホン酸ヘキサデシルトリメチルアンモニウムとトリエタノールアミンを 70℃の純水に溶解し、続いてテトラエトキシシランを加えて、白色ゲルができるまで攪拌した後、遠心分離で沈殿物を回収し、純水とエタノールで洗浄後、数日室温乾燥した。次に、空気中もしくはアルゴン雰囲気にて 550℃で焼成を行い、メソポーラスシリカ(MS)および炭素を含むメソポーラスシリカ(C-MS)を得た。

また、純水に溶解した 0.2 M のグルコースを 180℃で水熱処理して得られた炭素ナノ球を、上記の白色ゲル分散液に添加し、アルゴン雰囲気焼成することで、炭素ナノ球を核に持つメソポーラスシリカ(C@MS)を得た。3種類の試料の SEM および TEM 像を図 1 に示す。

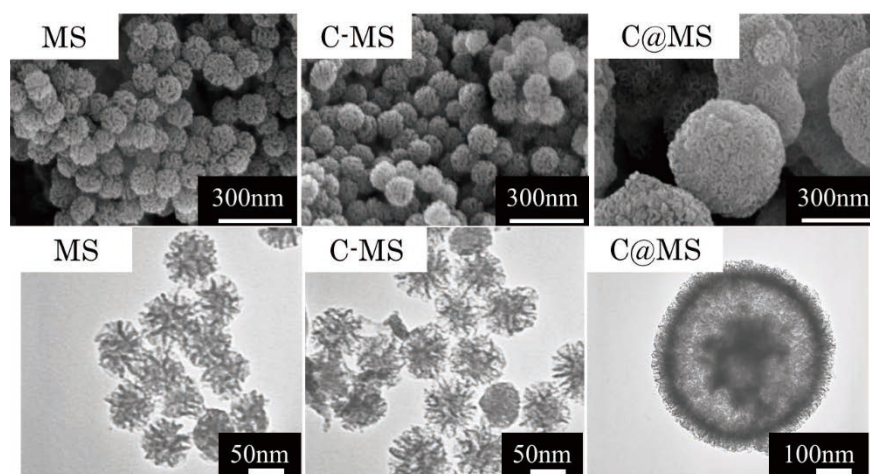


図1 メソポーラスシリカ試料 MS, C-MS および C@MS の SEM 像 (上段) および TEM 明視野像 (下段)

純水中に分散した各試料に対して近赤外線レーザーを 2 W/cm^2 で 5 分間照射したところ、C@MS 及び C-MS を含む純水の温度はそれぞれ 65.5°C 、 42.5°C まで上昇したが、MS では温度上昇が確認されなかった（図 2）。また、3 試料を所定量食食させた LLC（Lewis Lung Carcinoma）細胞の生存率を測定したところ、C@MS は $100\mu\text{g/mL}$ 以上で細胞毒性を示したが、MS と C-MS は $200\mu\text{g/mL}$ でも有意な細胞毒性を示さなかった（図 3）。

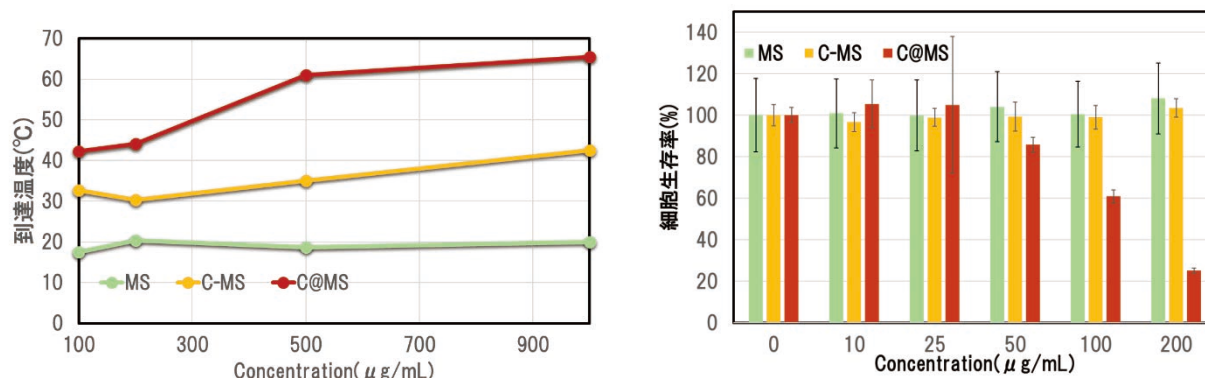


図 2 純水分散試料への近赤外レーザー照射による到達温度変化

図
LLC

そこで、 $50 \mu\text{g/mL}$ 以下の所定濃度の 3 試料を食食させた LLC 細胞に近赤外線レーザーを 2 W/cm^2 で 5 分間照射したところ、C@MS について溶液濃度と到達温度および細胞生存率に顕著な相関性が認められた（図 4）。

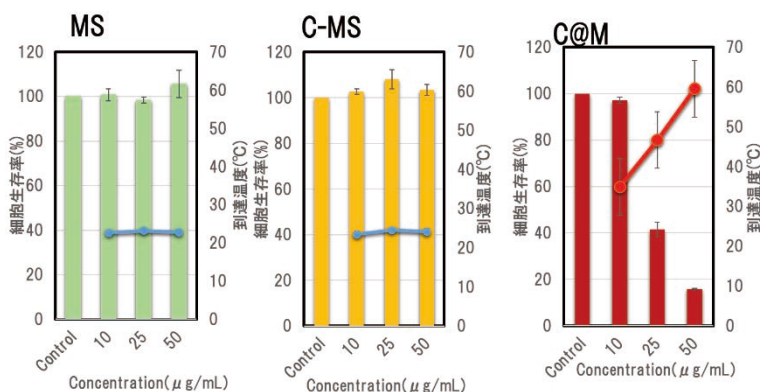


図 4 所定濃度試料を食食させた LLC 細胞へ近赤外レーザー照射による到達温度と細胞生存率の変化

3. 共同研究者

一ノ瀬 昇（理工学術院総合研究所 顧問研究員）

安井 万奈（理工学術院総合研究所 客員次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

X.Wang, X. Li, A. Ito, Y. Sogo, Y. Watanabe, K. Hashimoto, A. Yamazaki, T. Ohno, and N. M. Tsuji, Synergistic effects of stellated fibrous mesoporous silica and synthetic dsRNA analogues for cancer immunotherapy, Chem. Communi., 154, 9, 1057-1060 (2018)

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、免疫療法用アジュバントとしても期待されるメソポーラスシリカと炭素化合物との複合体を合成し、近赤外線応答による発熱でがん細胞を選択的に死滅させる効果を確認できたが、その機能発現機構の解明は十分とはいえない。また、さらに金属導入等によって効果を高め、近赤外レーザーを照射したことにより破壊されたがん細胞に含まれる特異的な抗原に免疫反応を起こす機序を解明し、原発のがんだけでなく、再発や転移したがんに対する効果についても検討を進めて、新規のがん治療法構築への寄与を目指す。

物理・コミュニケーション音響学

研究代表者 及川 靖広
(基幹理工学部 表現工学科 教授)

1. 研究課題

これまで、研究代表者らは光を用いた音響計測手法や物理音響信号処理の提案とそれを用いた空中・水中・地中での音の伝搬現象の理解、音によるコミュニケーションを円滑にするための道具の開発（歯からの骨伝導を用いた音情報受聴／収録システムなど）等の研究を行ってきた。本プロジェクト研究では、それら研究成果を高度化・発展させ、快適なコミュニケーションの実現を目標として、音を中心とした波動場と其中で生活する人間のコミュニケーションの厳密な計測・観測・理解、さらに時間・空間および個々の人間と関わる条件/制約に関わらず円滑なやり取りができるコミュニケーションを支える技術の研究開発を進める。本年度は、偏光高速度カメラを用いた光学的音響計測技術を用いた流れと音の同時可視化、物理音響信号処理に基づく楽器の解析と合成、Mixed Reality 技術を利用した直感的な音場情報表示システムに関する研究を行なった。

2. 主な研究成果

2.1 光学的音響計測技術を用いた流れと音の同時可視化

我々はこれまで、偏光高速度干渉計を用いた音場可視化計測手法を提案してきた。光学干渉計と偏光高速度カメラにより、非接触かつサブミリメートル間隔での高密度音場イメージングを実現するものである。本年度は提案手法を流れと音場の同時計測に適用し、その有効性を示した。計測結果の一例を図-1に示す。流れと音が発生する様子が確認できた。

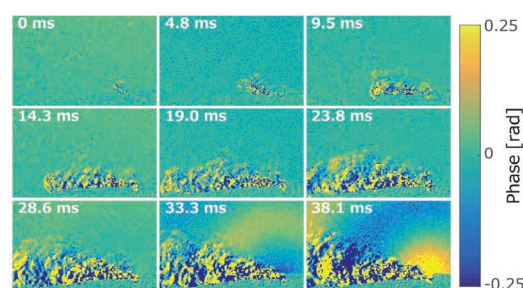


図-1 偏光高速度カメラを用いた流れと音場の非接触イメージング計測

2.2 物理音響信号処理に基づく楽器の解析と合成

楽器音の解析において、モードの解析は盛んに行われている。楽器音のモード分解ではバンドパスフィルタが広く用いられているが、位相遅延やプリリングングといった課題が発生する。そこで、制約付き最適化によって位相遅延とプリリングングを同時に解消したモード分解手法を提案した。モード数の多い実楽器音に適用する場合、計算時間と分解性能が課題となっていた。本研究では交互方向乗数法 (ADMM) を用いた高速な解法を実現し、分解性能向上のための重みの改善

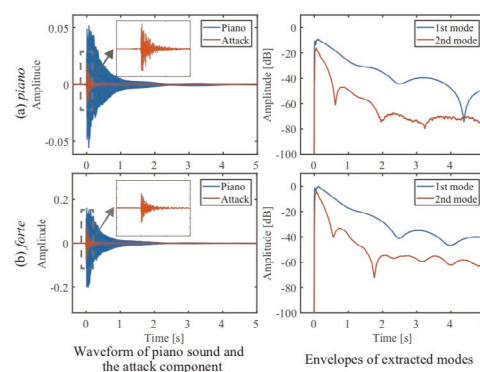


図-2 ピアノ音のモード分解

を提案した。ピアノ音をモード分解した結果の一例を図-2に示す。

2.3 音場データの Mixed Reality 表示

音源位置推定や音空間情報を知る手段として、様々な方法が研究されている。その一つとして近接4点法が提案されている。近接4点法とは、同一平面上にない4点のマイクロホンでインパルス応答を測定し、短時間相関やインテンシティの手法により空間情報を得ようというものである。最近では、Mixed Reality(複合現実)技術を実現する光学透過型HMD (Microsoft HoloLens など) が発表されている。複合現実技術とは、現実空間と仮想空間を混合し影響し合う技術であり、その応用に注目が集まっている。本研究では、近接4点法で得られた室内の仮想音源分布、指向性パターンを、複合現実技術を用いて実空間に重ね、仮想音源分布と指向性パターンを任意の視点、大きさで表示可能なシステムを構築した。複数データ表示による比較も可能で、音場情報の提示に有効であることが示された。会議室の仮想音源分布と指向性パターンのMixed Reality表示の結果を図-3に示す。

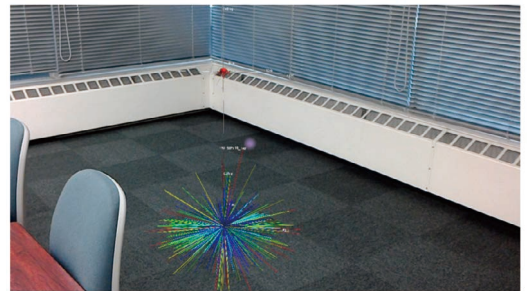


図-3 会議室の仮想音源分布と指向性パターンの Mixed Reality 表示

3. 共同研究者

白井 克彦 (早稲田大学 名誉教授)

山崎 芳男 (東京都市大学総合研究所 特任教授／早稲田大学 名誉教授)

小林 哲則 (理工学術院 教授)

菊池 英明 (人間科学学術院 教授)

菅野 由弘 (理工学術院 教授)

小川 哲司 (理工学術院 准教授)

矢田部 浩平 (理工学術院 講師)

小野 隆彦 (総合研究機構 波動場・コミュニケーション科学研究所 客員上級研究員／研究院 教授)

藤森 潤一 (総合研究機構 波動場・コミュニケーション科学研究所 招聘研究員)

池田 雄介 (東京電機大学 助教)

中島 武三志 (東京工芸大学 助教)

4. 研究業績

4.1 学術論文

[1] Kenji Ishikawa, Risako Tanigawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, and Hayato Niwa, "Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry," Optics Letters, Vol.43, Iss.5, pp.991-994, March.2018.

[2] Takayuki Inoue, Yusuke Ikeda and Yasuhiro Oikawa, "Hat-type hearing aid system with flexible sound directivity pattern," Acoust. Sci. & Tech., Vol.39, No.1, pp.22-29, 2018.1.

[3] Jun Kuroda, Yasuhiro Oikawa, "Piezoelectric transducer with resonant modes control for parametric speaker," Acoust. Sci. & Tech., Vol.39, No.1, pp.1-10, 2018.1.

[4] Yuji Koyano, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, "Infinite-dimensional SVD for revealing

microphone array's characteristics," Applied Acoustics, Vol.129, pp.116-125, Jan.2018.

[5] R.Tanigawa, K.Ishikawa, K.Yatabe, Y.Oikawa, T.Onuma and H.Niwa, "SIMULTANEOUS VISUALIZATION OF FLOW AND SOUND USING PARALLEL PHASE-SHIFTING INTERFEROMETRY," Proc. Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP11-031, Dec.2017.

[6] Kohei Yatabe, Kenji Ishikawa, Yasuhiro Oikawa, "Hyper ellipse fitting in subspace method for phase-shifting interferometry: Practical implementation with automatic pixel selection," vol.25, no.23, pp.29401-29416, Optics Express, Nov.2017.

[7] Kenji Ishikawa, Risako Tanigawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, "Experimental Visualization of Flow-induced Sound using High-speed Polarization Interferometer," Proc. Int. Conf. Flow Dynamics, pp.746-747, Nov.2017.

[8] Ryouzi Saitou, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, "Noise mapping system with acoustical measurement blimp robot," Proc. InterNoise2017, pp.1451-1459, Aug.2017.

[9] Kotoyo Nozaki, Yasuhiro Oikawa, Yusuke Ikeda, Yoh-Ichi Fujisaka and Masahiro Sunohara, "Blind Reverberation Power Estimation Using Exponential Averaging with Attack and Release Time Constants for Hearing Aids," Proc. International Workshop on Challenges in Hearing (CHAT-2017), pp.37-41, Aug.1017.

[10] Atsuto Inoue, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Yusuke Ikeda, "Visualization of 3D Sound Field using See-Through Head Mounted Display," SIGGRAPH, Jul.2017.

[11] Yuki Tamura, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, "Least-squares estimation of sound source directivity using convex selector of a better solution," Acoust. Sci. & Tech., Vol.38, No.3, pp.128-136, 2017.5.

[12] 小森智康, 都木徹, 及川靖広, "空間的なマスキングリリースを利用した高齢者にも聞きとりやすい音響再生方法の検討," 映像情報メディア学会誌, Vol.71, No.5, pp.J172-J178, 2017.5.

[13] Kohei Yatabe, Kenji Ishikawa, Yasuhiro Oikawa, "Acousto-optic back-projection: Physical-model-based sound field reconstruction from optical projections," Journal Sound and Vibration, Vol.394, No.28, pp.171-184, April.2017.

4.2 総説・著書

[1] 及川靖広, 矢田部浩平, 石川憲治, "音を撮影するカメラ～偏光高速度干渉計," RION ShakeHands, Vol.5, pp.8-9, 2017.9.

4.3 招待講演

[1] 矢田部浩平, 石川憲治, 及川靖広, "[招待講演] レーザ干渉計による音圧分布の非接触計測 ～これまでの動向と近年の発展～," 信学技報, Vol.117, No.399, EA2017-89, pp.33-40, 2018.1.

4.4 受賞・表彰

- [1] 日本音響学会第13回独創研究奨励賞板倉記念 受賞 (矢田部 浩平)
- [2] 指導した学生2名が日本音響学会第16回学生優秀発表賞 受賞
- [3] 指導した学生1名が ICFD2017 Best Presentation Awards 受賞
- [4] 指導した学生2名が日本音響学会第42回栗屋潔学術奨励賞 受賞

[5] 指導した学生 1 名が日本音響学会第 15 回学生優秀発表賞 受賞

4.5 学会および社会的活動

[1] 第 15 回 1 ビット研究会開催 (2017.6.21)

[2] 第 16 回 1 ビット研究会開催 (2017.12.7)

[3] 日本音響学会 理事 (及川靖広)

[4] 日本音響学会サマーセミナー実行委員長 (及川靖広)

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトにおいては、光学的音響計測手法、物理音響信号処理、音場データの Mixed Reality 表示などの世界的にもユニークな研究成果を上げてきた。今後はそれらの高度化と実環境下における諸問題への適用について取り組む。

リニアセルを用いた高速無線通信および高精度レーダーに関する研究

研究代表者 川西 哲也
(基幹理工学部 電子物理システム学科 教授)

1. 研究課題

直線上に並べたミリ波送受信ユニットを光ファイバで接続したシステムであるリニアセルを用いた高速無線通信と高精度レーダーの性能向上に関する研究を行う。リニアセルシステムの基礎概念は研究代表者らが中心となって提案したものであり、空港滑走路や鉄道線路上の障害物を検知するためのレーダーシステムや、新幹線などの高速鉄道向けの通信システムへの実用展開を公的研究機関、民間企業などと連携して進める予定である。大学側としては、これらの複数の送受信ユニットが光ファイバネットワークで接続されたシステムの、設計理論、動作原理の詳細の解明などに注力し、光無線融合システム研究を新たな分野として確立し、実用性のみならず、学術としての成果を目指す。また、当該分野の学生指導を通して、国際的に広がり期待される分野で活躍できる人材輩出につなげたいと考えている。

2. 主な研究成果

多数のアンテナユニットからなるリニアセルシステムのさらなる性能向上と電波資源の有効利用を目指し、FMCW 方式レーダーアンテナユニット間で発生しうる干渉の影響の検討と、協調動作による干渉の影響の抑圧手法の開発を行った。以下に主な研究成果について具体的に述べる。

FMCW 方式では周波数が一定速度で減少または増加する周波数掃引信号（チャープ信号）を発信し、対象物からの反射波を検出するという方式である。反射波はその距離に応じた遅延を持ち、また、振幅も距離やレーダー断面積に大きく依存して変化するが、その周波数変化の速度は送信波と全く同じである。つまり、送信波と反射波の周波数差は距離による遅延時間にだけ依存することになり、送信波と受信波をミキシングすることで得られる中間周波数帯信号の周波数が一定値になる。これが、FMCW 方式による距離測定の原理であるが、不要波が受信信号に混入した場合、中間周波数帯信号をある程度の時間、積分することで抑圧が可能である。一般に妨害波が送信波と同じ周波数変化を持つ周波数掃引信号となることはなく、時間平均すると妨害波の周波数は中間周波数帯で大きく変動するという現象が起きるためである。しかし、リニアセルレーダのように複数のアンテナ装置を同時に動作させる場合、同じ速度で周波数変化する信号が妨害波として混入する恐れがあるが、これは偽像となり原理的に除去することが不可能である。本開発では、妨害波の混入が起こりえる隣接するアンテナ装置の間で周波数掃引速度に一定の差をもうけることで、偽像の発生を避けるとともに、不要放射が混入していることを検知する技術の検討を行った。

まず、干渉発生程度の基本的条件を把握するために図 1 に示すような簡単なモデルで、滑走路をはさんで対向するアンテナ装置からの妨害について数値的に検討した。現在、成田国際空港にて実証実験が行われているリニアセルレーダシステムを干渉検討のモデルとして、表 1 に示すような性能を持つものと仮定した。検知する対象は 500m の距離においたレーダー断面積(RCS: Radar Cross Section)が-20dBsm(およそ直径 1 インチ、高さ 1 インチの金属円柱)の物体であるとした。

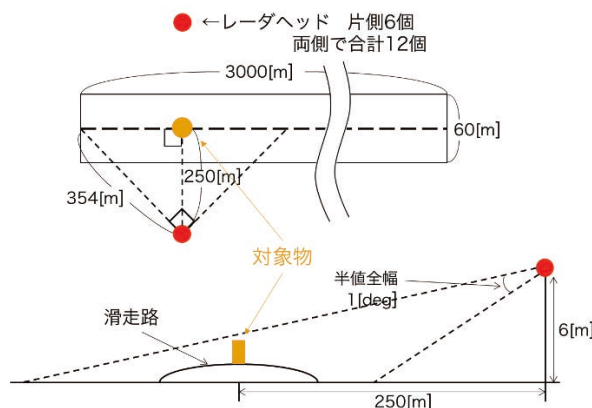


図 1 対向するアンテナ装置からの妨害波のモデル

表 1 リニアセルレーダシステムの諸元

周波数掃引波形	三角波
周波数	92-100 (GHz)
変調方式	FM-CW
アンテナ半値幅	1 (deg)
繰り返し周波数	1.25 (KHz)
回転数	15 (RPM)
測定距離	500 (m)
検知能力 (RCS)	-20dBsm (500m)
想定滑走路	60 X 3000 (m)

アンテナはピークゲインが 1 で、半値幅 1° のガウシアンビームであると仮定した。サイドローブは考えないとする。するとそのアンテナのゲイン G は、向かい合うアンテナの水平方向相対角を θ_x 、縦方向の差を θ_y とすると(1)のように表される。

$$G = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\theta_x}{\frac{\theta_{1/2}}{2\sqrt{2\ln 2}}} \right)^2 + \left(\frac{\theta_y}{\frac{\theta_{1/2}}{2\sqrt{2\ln 2}}} \right)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 $\theta_{1/2}$ は半値幅 (G が半分となる θ) である。レーダー方程式より、所望波である物体からの反射波の受信電力 $P_{r,d}$ は次式で表すことができる。

$$P_{r,d} = \frac{G_d^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_d^4} P_t \quad (2)$$

ここで、 R_d : 物体との距離、 G_d : アンテナゲイン、 σ : 物体の有効反射面積 (RCS) であるとした。向かいのアンテナからの非所望波である干渉波の受信電力を $P_{r,u}$ は、

$$P_{r,u} = \frac{G_u^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R_u^2} P_t \quad (3)$$

であたえられる。ここで、 R_u : 向かいのアンテナとの距離、 G_u : アンテナゲインである。所望波(反射波)と非所望波(干渉波)受信電力の比である D/U 比は次のように表される。

$$\frac{D}{U} = 10 \log \left\{ \frac{P_{r,d}}{P_{r,u}} \right\} [\text{dB}] \quad (4)$$

アンテナの水平方向相対角を変化させたときの D/U 比は図 5.3.1.1-2 のようになる。
 $R_d: 250.072[\text{m}]$ 、 $R_u: 500[\text{m}]$ 、 $\sigma: -20[\text{dBsm}]$ 、 $G_u: 1$ 、 $\theta_y: 1.37[\text{deg}]$ とした。相対角を 1° 程度以内では D/U 比が悪化し干渉の影響が見られることがわかる。

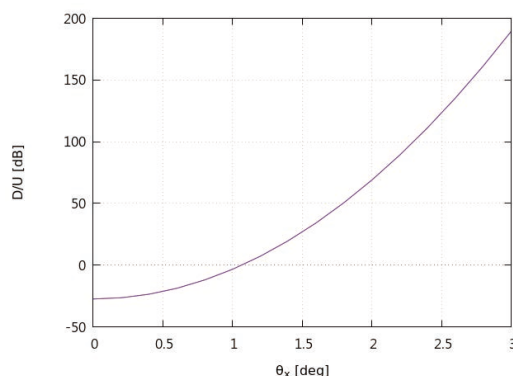


図 2 アンテナ方向と D/U 比の関係

次に、相対角度が 1 度以内となって干渉の影響が生じるときにおいても、偽像の発生を抑えるために、隣接するアンテナ装置において、周波数掃引速度に差をつける構成についての検討を行った結果について述べる。今年度は中間周波数帯信号に対して干渉を模擬する実験系を構築し、掃引速度差と干渉の影響の関係について調査した。

図 3 に FMCW レーダーの基本構成を示した。信号源の出力の一部を局発として用いて、対象物から受信した信号を周波数変換し、スペクトラムアナライザ(SA: Spectrum Analyzer)で周波数弁別する。周波数軸のプロファイルが、レーダー像となる。実際のレーダーでは空中に電波を放射し、対象物からの散乱波を受信するが、この場合、対象物の状況や、実験環境によって受信信号の強度が大きく変動する。この研究では、信号処理、変調方式による差異を求めるのが主目的であるために、ファイバ無線技術を用いた。対象物からの反射を模擬するためにはケーブルによる遅延を利用するという方法が考えられるが、周波数が高い領域ではケーブルによる損失が非常に大きくなるという課題があった。光ファイバで無線信号波形を伝送するファイバ無線技術では、簡単に大きな遅延を得ることができるため、レーダーの動作を正確に模擬することができる。今回用いた構成を図 4 に示した。EO(Electric-to-Optical)変換器は信号源からの電気信号を光に変換する。これの一部を OE(Optical-to-Electric)変換器により局発信号源(LO)を得る。一方、対象物からの散乱波は所定の長さ($x[\text{m}]$)の光ファイバによる遅延で模擬する。

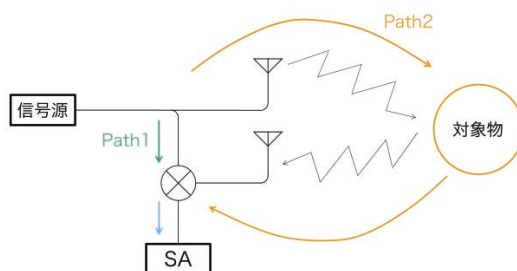


図 3 FMCW レーダーの基本構成

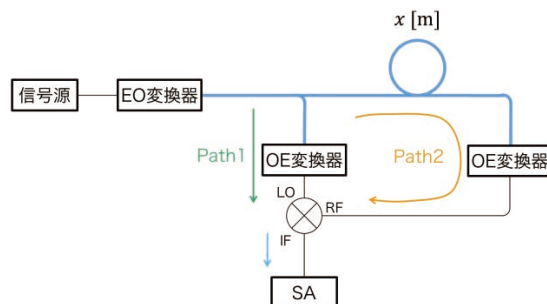


図 4 FMCW レーダー模擬系

図 5 に干渉波(妨害波)を導入する模擬系の構成を示した。送信波は中心周波数 f_c :2GHz、掃引幅 f_w :1GHz、掃引時間 ΔT :50 μ sとし、干渉波は送信波と中心周波数、掃引時間は同一とし、掃引幅を1.1~1.5GHzで変化させた。またファイバ長差 x は100mとした。干渉波の強度は受信波と比べ+10dBほどになるように設定されている。また、今回は信号源 1 と信号源 2 はそれぞれ、任意信号発生器の CH1 と CH2 から出力されているため、送信波と干渉波が時間的に完全に同期している。実際にはミキサにおいては経路の違いから若干の時間差を持つがそれは数十 ns のオーダーであり掃引時間50 μ sより十分小さいため、干渉波は送信波、受信波に十分重なりと考えられる。

図 6 に干渉波がない場合のスペクトログラムを示した。対象物の距離に対応する周波数(20MHz)に一定のビート信号が発生していることがわかる。これが所望信号に相当する。図 7 と図 8 に干渉波がある場合のスペクトログラムを示した。それぞれ妨害波の影響が所望信号を横切る形で V 字型に発生することがわかる。掃引速度差がより大きい図 7 の場合がより急峻で、所望信号を横切っている時間が短いことがわかる。

図 8 にレーダー像に相当するスペクトルを示した。いずれの場合にも偽像の発生はないことが確認できる。干渉の影響がある場合にはノイズフロアが全体として上昇していることがわかる。これは、ノイズフロアの変化から他のアンテナ装置からの不要波を受信していることを検出できることを示している。ノイズフロアの変化が発生した場合に隣接するアンテナ装置に指令を出して、回転方向を変えるなどの対処が可能である。来年度以降、システム全体としての性能の最適化を目指した検討を進める予定である。

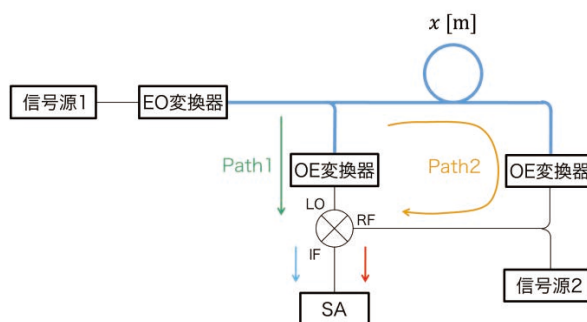


図 5 FMCW レーダー干渉模擬系

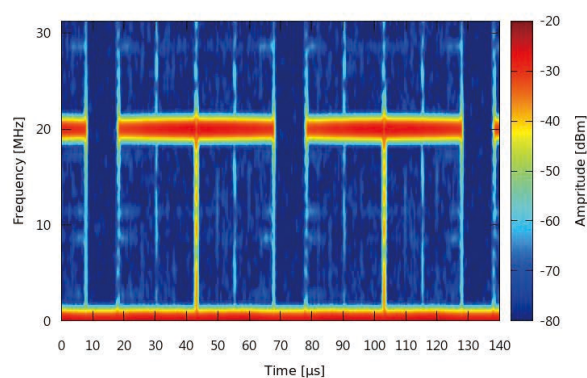


図 6 FMCW レーダー復調波のスペクトログラム(干渉波なし)

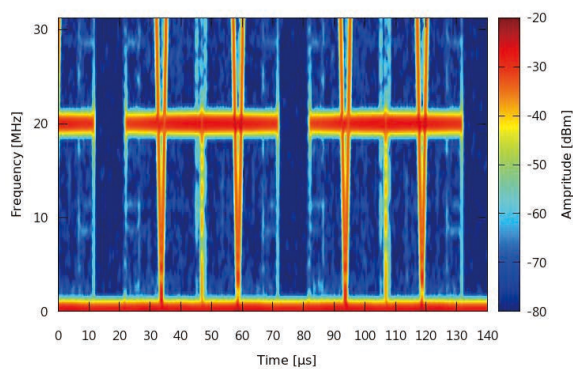


図 7 FMCW レーダー復調波のスペクトログラム(干渉波の f_w : 1.5GHz)

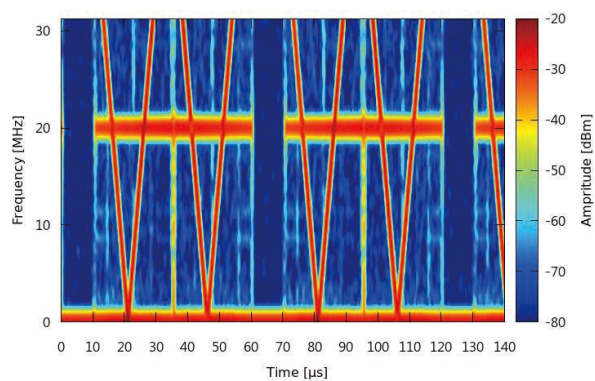


図 8 FMCW レーダー復調波のスペクトログラム(干渉波の f_w : 1.1GHz)

3. 共同研究者

理工学術院総合研究所 招聘研究員 稲垣恵三

4. 研究業績

4.1 学術論文

Atsushi Kanno, Pham Tien Dat, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, “Millimeter-Wave Radio-Over-Fiber Network for Linear Cell Systems,” Journal of Lightwave Technology Vol. 36, Issue 2, pp. 533-540 (2018)

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, “Instantaneous frequency measurement for broadband radio signals using optical single sideband modulation,” 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), Phuket, Thailand, October 30 – November 2, 2017

Tetsuya Kawanishi, “Sensor over fibres and its application to high resolution millimeter-wave radar,” The 3rd Int'l Conference on Remote Sensing Technologies and Applications (ICRSTA 2018), Bangkok, Thailand, January 5-7, 2018

Tetsuya Kawanishi, Kei Akama, Atsushi Kanno and Naokatsu Yamamoto, “Interference Assessment of Linear Cell Radar Remote Antenna Units,” 6th Workshop on Convergence of Radio and Optical Technologies (CRO-WS 2018), Kuala Lumpur, Malaysia, February 22, 2018

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

IEEE Photonics Society 理事

クアラルンプール国際空港における実証実験

5. 研究活動の課題と展望

今年度は干渉検出、自動回避システムに関する研究に着手する。また、成田国際空港、クアラルンプール国際空港における実証実験に参画し、様々な環境下での電波伝搬に関する調査も平行して行う予定である。国際標準化への貢献も継続し、研究成果の社会実装を目指す。

地下エネルギー資源の増産手法の開発

研究代表者 栗原 正典
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

原油の三次回収法あるいは EOR (Enhanced Oil Recovery) の 1 つとして、近年、低塩分濃度水攻法 (LSWF: Low Salinity Water Flooding) が注目されている。この手法は、低塩分濃度 (1000 ~ 5000 ppm) の水 (LSW: Low Salinity Water) を油層に圧入して油を回収するものであるが、圧入水の濃度が通常の水攻法で使用するものよりも低いこと以外は、通常の水攻法と同じである。従って、他の EOR よりも操業コストは安く、また、化学薬品等を使用しないため、環境への負荷も少ないという利点があり、現在多様な研究が進められている。しかしながら、この手法については様々な増油メカニズムが提唱されているにもかかわらず、現時点では決定的なメカニズムの解明には至っていない。また、砂岩と炭酸塩岩の油層では、LSWF による原油の回収メカニズムは異なると考えられている。

本研究では、LSWF のメカニズムの解明を目的とし、コアを用いた掃攻実験および回収水の分析、微小モデルによる LSWF 挙動の観察、LSWF の挙動予測数値シミュレータの開発・改良を実施した。また、EOR の挙動予測に広く適用される 3 相混在下における相対浸透率を、非定常状態の実験結果から数値計算によって推定するプログラムも作成した。

2. 主な研究成果

2.1 コアを用いた実験

昨年度までに実施したベレア砂岩コアによる実験に替えて、実油田コア、(粘土鉱物含有量を自由に調整可能な) サンドパックコアを用いて LSW による掃攻実験を実施した。その結果、実油田コアの 1 つでは、図 1 に示すように、地層水を 30 倍に希釈した LSW の圧入により 18.73 % の増油を達成し、LSWF の効果を確認するとともに、排出水中の各イオンの濃度から、LSWF のメカニズムとして MIE (Multi-component Ionic Exchange) が有力であるとの示唆を得た。しかしながら、他の掃攻実験では、LSWF による顕著な増油は計測されず、粘土鉱物と LSW との接触、原油中の極性成分と陽イオンの結合、イオン交換等の複雑な現象の定量的な解析が必要であることが確認された。

2.2 微小モデルによる LSWF 挙動の観察

上記で示唆された複雑な現象を可視化して解析するために、粘土板に付着させた油滴の上に LSW を流動させてその形状を観察する装置、および孔隙形状を模したハッチングを施したシリコン板によるマイクロモデルを作製し、微視的な現象を把握することを試みた。その結果、LSWF によって孔隙媒体の濡れ特性が oil wet から water wet に変化すること、それに伴って油 - 水の相対浸透率が変化することが確認された。

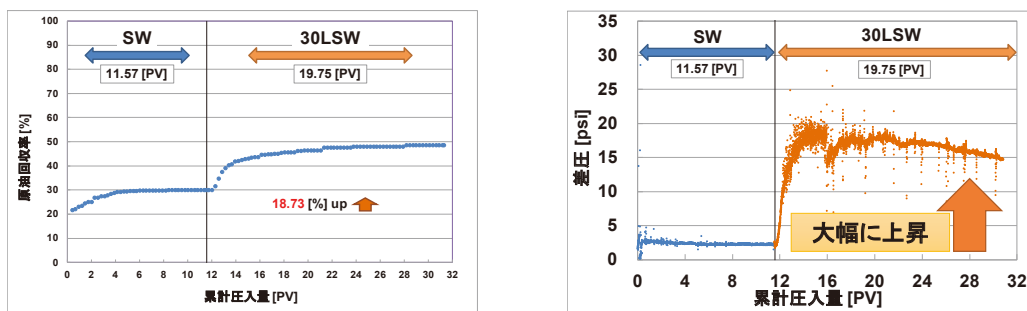


図1 実油田コアを用いた LSEF 掃攻実験結果例 (左：油回収量；右：差圧)

2.3 LSWF の挙動予測数値シミュレータの開発・改良

LSWF のコア掃攻実験結果を定量的に解析し、さらにはフィールドスケールの LSWF 挙動を予測するために、以下の機能を有する数値シミュレータを構築・改良した。

- 4 相（油、水、吸着油、吸着水）、13 成分（非極性油、極性油、 H_2O 、 NaCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、 HCl 、 H^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 OH^- 、 Cl^- ）の移流・拡散
- 速度論に基づく電離反応
- 速度論に基づく陽イオンの吸脱着反応
- 速度論に基づく陽イオン交換反応
- 濡れ性の変化に伴う相対浸透率の変化
- 水相、油相の組成変化による粘度の変化

本シミュレータは、以下のように導出した支配方程式を、電離反応、吸脱着反応、相対浸透率変化等を記述した構形式と共に離散化して、数値的に解くものである。

流動油相（非極性油、極性油）

$$F_{lc} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_l x_c k k_{rl}}{\mu_l} (\nabla p_l - \rho_l g \nabla D) \right] + \hat{q}_c + v_{adc} - \frac{\partial(\rho_l x_c \phi S_l)}{\partial t} = 0$$

流動水相（ H_2O 、 NaCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、 HCl 、 H^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 OH^- 、 Cl^- ）

$$F_{lc} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_l y_c k k_{rl}}{\mu_l} (\nabla p_l - \rho_l g \nabla D) \right] + \hat{q}_c + v_{adc} + \sum_{j=1}^5 r_{cj} + d_c - \frac{\partial(\rho_l y_c \phi S_l)}{\partial t} = 0$$

吸着油相（極性油）

$$F_{lc} = -v_{adc} - \frac{\partial(\rho_l \phi S_l)}{\partial t} = 0$$

吸着水相（ H^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）

$$F_{lc} = -v_{adc} - \frac{\partial(\rho_l z_c \phi S_l)}{\partial t} = 0$$

上記で構築したシミュレータを用いて、過去に実施した LSWF の掃攻実験の再現を試みた。その結果、図2に示すように、実験結果と計算結果の良好な一致を得ることができ、本シミュレータの有効性が検証された。

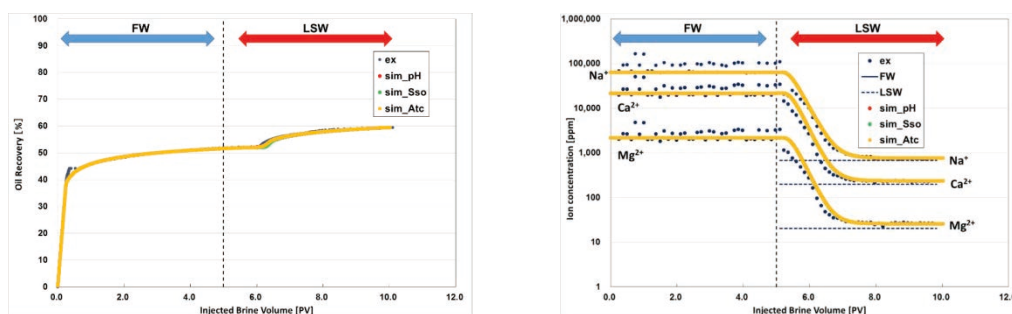


図2 実験結果とシミュレーション結果の比較例（左：油回収量；右：排出イオン濃度）

2.4 3相混在における相対浸透率を推定するプログラムの作成

EORの挙動予測においては、3相混在化での相対浸透率を正しく推定することが極めて重要である。この相対浸透率は定常状態での流動実験を行うことで測定できるが、時間がかかり過ぎるために実践的でなく、簡便式による推定を行わざるを得ないのが現状である。本研究では、比較的短時間に実施することが可能な非定常流動実験の結果と流動シミュレーションの結果をマッチングすることで、3相混在化での相対浸透率を正しく推定するプログラムを作成した。最適化手法として、従来採用していた勾配法に替わって、繰り返しラテン超方格法および遺伝的アルゴリズムを採用し、良好な結果を得ることができた。

3. 共同研究者

ウトモ・プラタマ・イスカンドル（創造理工学部 環境資源工学科 助手）

4. 研究業績

4.1 学術論文

Takamatsu, N., Ishiwata, T., Miyagawa, K., Kurihara, M., Morishita, R. and Watanabe, J.: "Development of Numerical Simulator for Low Salinity Water Flooding Process," WORKSHOP & SYMPOSIUM IEA-EOR, 2017

Utsunomiya H., Kurihara, M., Taniguchi, H.: "Development of Optimization Program for Estimation of Three-Phase Relative Permeability from Unsteady-State Coreflood Experiments," 22th Formation Evaluation Symposium of Japan, 2016

4.2 学会および社会的活動

石油技術協会会長

日本地層評価学会（SPWLA Japan）会長

5. 研究活動の課題と展望

本研究により、砂岩油層におけるLSWFのメカニズムの解明にはある程度成功したが、未だに十分に説明できない現象も観察されている。また、炭酸塩岩油層におけるLSWFのメカニズムの解明には至っていない。今後は炭酸塩岩油層を含め、未だに未解明の現象の解明を意図した実験およびシミュレータの開発を継続する。

精緻な解析手法による東京都 23 区のリアルタイム浸水予測システムの開発

研究代表者 関根 正人
(創造理工学部 社会環境工学科 教授)

1. 研究課題

地球規模での気候変動が進み、気象が極端化してきている状況下で、我々はこれまでは経験することのなかったような規模の豪雨に備えなければならなくなっています。本研究では、東京都 23 区(あるいは他の高度に都市化されたエリア)が巨大台風や集中豪雨に襲われた時に、どのような規模の浸水がどのようなプロセスで発生するのかを、リアルタイムで正確に予測するシステムを開発することを目指しています。また、これを社会実装し、計算結果が広く人々に伝達され、被害軽減に向けて有効に活用されるようにしていきたいと考えて取り組んでおります。

2. 主な研究成果

2.1 精緻な浸水予測手法の精度検証

浸水予測手法の精度検証に当たっては、当然のことながら豪雨時の浸水状況を記録した計測値やデータが必要です。ところが、発生した被害に対処するのに終始してしまい、このような情報は限られた数しか得られていないのが最近までの状況でした。こうした中で、近年、実際に生じた浸水の状況を撮影した画像が残され、共有されるようになってきました。この中には真に信頼できるものが多く存在することから、これらを浸水実態の把握に活用することにしました。具体的には、このような画像を活用して「撮影当時の浸水深」を読み取る方法を確認しました。ここでは、2013 年 7 月 23 日に東京都目黒区・大田区・世田谷区に大きな浸水被害を引き起こした豪雨を対象に、国土交通省が観測した XRAIN による降雨データを入力値とした再現計算を行いました。この XRAIN によれば、地上の空間分解能が約 250m、時間的には 1 分毎の降雨の強さがわかります。

再現計算の結果の一例が図-1 です。この図には、東京都 23 区のうちの隅田川より西に位置する 18 区分のエリアについての結果がまとめられています。左側の図は二つの時刻における降雨強度の計測値をまとめたものであり、オレンジ・赤・紫の色で塗られているエリアでは下水道ならびに河川の処理能力を超えた雨が降っていることになります。これに対して、中央の図は、それぞれの時刻における浸水の深さ(浸水深)を値に応じて色分けして塗り分けた図です。さらに、右側の図は、同時刻における下水道内の状況を表したものであり、赤色で描かれている下水管はすでに水で満たされ、高圧力状態の流れとなっていることを意味します。

この再現計算の結果と前述のように算定した実際の浸水深とを比較したところ、その差は最大で 5cm 程度であることがわかりました。これは、これまでの期待を大きく上回る高精度な予測計算が可能となったことの証であり、同じ分野を専門とする研究者からも驚きをもつ

て受け入れられました。また、東京都 23 区を流れる都市河川には、東京都建設局によって設置された水位計が多数存在し、場所毎の河川水位の値が自動計測されています。図-2 は、目黒川で計測された水位データと、予測計算結果の値とを比較したものです。赤色の実線が実測値の時間変化を表し、青色の実線が予測値を表します。両者を見ると、発生した洪水の水位の最大値ならびにその発生時刻まで極めてよく予測できていることがわかります。

以上は、検証結果の一例であり、これ以外の日時あるいは地点の値を比較しても同様の精度であることがわかっています。このことから、この手法による予測計算結果は、十分に信頼に値する浸水リスク情報であると結論づけることができました。これは、関連分野の研究者集団の中での共通認識になっているものと考えています。なお、精度検証については今後も引き続き行っていく予定です。

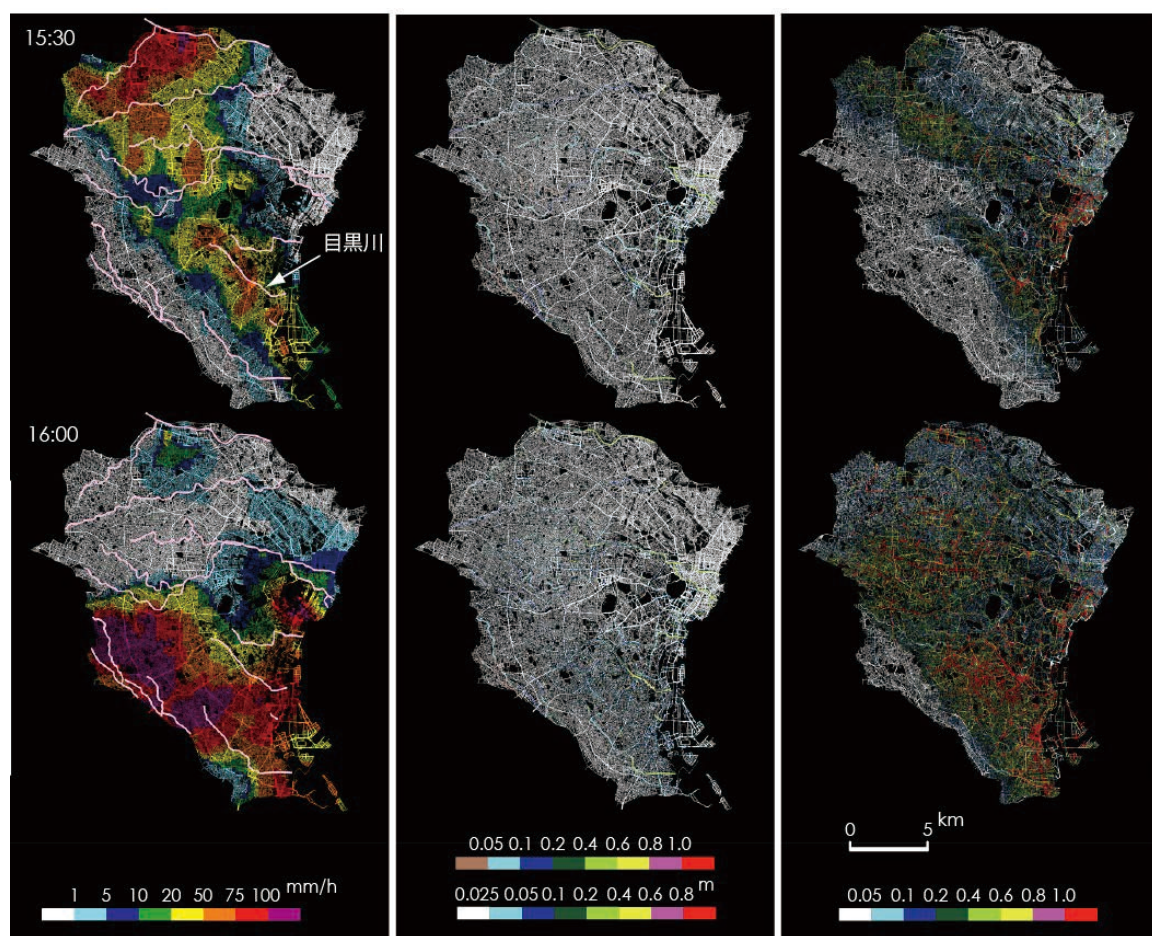


図-1 2013 年 7 月 23 日豪雨時に発生した都市浸水の再現計算結果(上段が 15:30、下段が 16:00):左側が XRAIN による降雨強度のコンター図、中央が道路浸水深のコンター図、右側が下水道満管率のコンター図を表す。中央の図の凡例は、上段が水深を河床から護岸天端までの高さで除した無次元量に対応するものであり、下段が浸水深を表す。

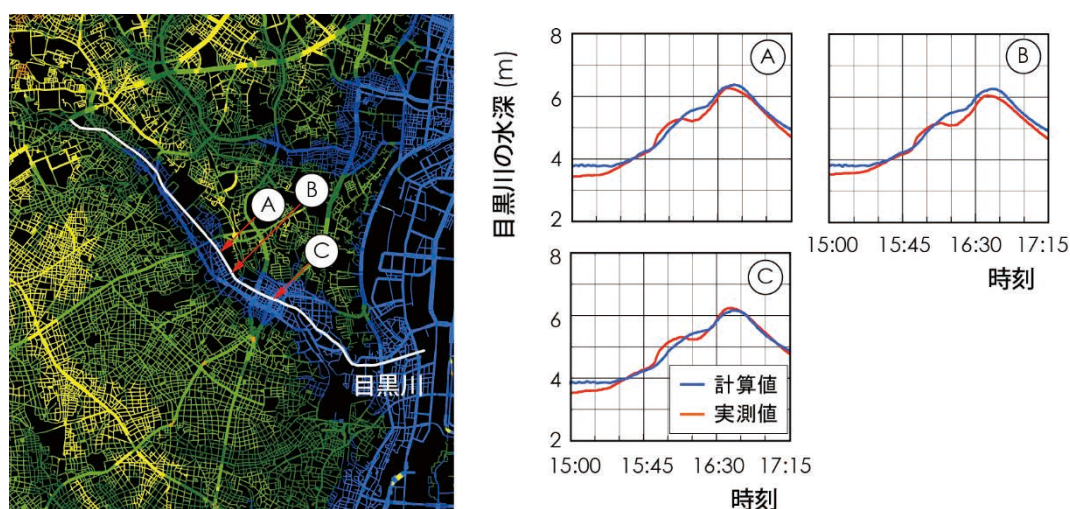


図-2 豪雨中の目黒川の水位変動に関する予測精度検証：左側の図は目黒川流域内の道路標高のコンター図上に目黒川的位置を併記したもの。黄・黄緑・緑・青の順に標高が低い。

2.2 交通渋滞に伴い深刻化する浸水状況の評価

豪雨発生時に道路で自動車渋滞が発生していないということ是不可能的。道路渋滞が発生すると、道路上の空間が自動車により占有されることになる結果として、浸水の状況が悪化することは容易に想像されます。道路渋滞が都市浸水の状況にどの程度の影響を及ぼすのかについてもあわせて研究を行いました。道路の交通渋滞の状況を表している情報として、国土交通省の「道路交通センサス」のデータがあります。これによると、交通量の多い幹線道路上の自動車の流れや渋滞の状況を把握することができます。本研究は、2016年度にまとめられたデータのうち夕方時間帯に注目し、交差点毎の自動車の通過台数・移動速度などのデータを踏まえて計算を行いました。

図-3に計算の結果の一部をまとめて示しました。この計算は、前掲の図-1とは異なる強さの雨を対象に行われたものであり、図-1と同じエリアを1時間当たり100mmの強さの豪雨が襲うと想定しました。地点によっては0.8mを超える浸水となる地点が現れることがわかります。図-3上段の(a)および(d)には、道路に自動車が存在しない場合の結果と、通常生じている渋滞時のものとを比較できるように、浸水深コンター図が示されています。また、図-3下段の(b)には、注目した二地点における浸水深の時間変化を表すハイドログラフが示されています。この結果から、道路渋滞は浸水の規模をより大きなものとし、被害を深刻化させることが明らかです。道路冠水がある深さを超えるようになると、自動車は移動不可能となり、渋滞をさらに深刻化させることになることから、事態は好転せず、負のスパイラルに入り込んで危機的な事態を招くことになります。深刻な冠水が発生することになる「アンダーパス」に関しては、事前に通行止めとして迂回させるような対策が必要となりますが、この判断には、次に説明する浸水のリアルタイム予測の結果を活用することが望まれます。

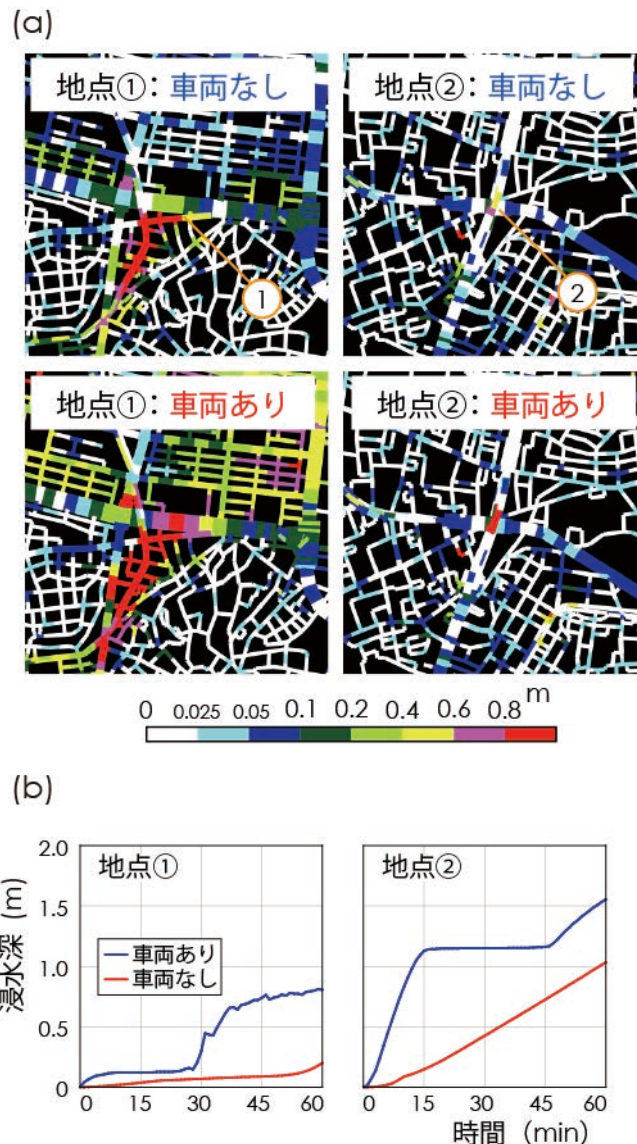


図-3 道路渋滞が都市浸水に及ぼす影響：(a) 主要道路上の車間距離のコンター図、(a) 降雨開始 60 分後の注目した二地点（地点①板橋区高島平六の橋交差点周辺、地点②：練馬区高野台谷原交差点周辺）周辺の浸水深コンター拡大、(b) 二地点における浸水深の時間変化を表すハイトグラフ。

2.3 リアルタイム予測に向けた取り組み

基本となる予測手法 S-uiPS によりリアルタイム浸水予測を可能とするためにはいくつかの越えなければならない壁があります。そのうちの 하나가計算の高速化です。一例を挙げると、30 分後の豪雨予報データを受信し、これを入力値とした浸水計算の結果を 10 分後には配信するということになります。かなり精緻に組み立てた手法であり、膨大なデータを扱う計算であるため、このような高速化はそれほど容易ではありません。しかし、文部科学省の DIAS (Data Integration and Analysis System) のプロジェクトに採択されてから、着実に取り組みが進んでおり、これも 2018 年度中には達成できる見通しになってきました。

3. 共同研究者

平松 裕基 (理工総研・次席研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) 関根正人, 児玉香織: 東京都 23 区を対象とした豪雨時浸水リスク評価とアンダーパスの冠水事前予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 4, pp. I_1543-I_1548, 2018.
- (2) 関根正人, 斎藤涼太: 交通渋滞が道路冠水に及ぼす影響に関わる数値計算による検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 4, pp. I_1309-I_1314, 2018.
- (3) 関根正人, 柴田祐希, 小方公美子, 中山裕貴: 東京東部低平地を対象とした大規模浸水予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 4, pp. I_1531-I_1536, 2018.
- (4) 関根正人, 児玉香織, 斎藤涼太, 中森奈波: 集中豪雨による東京都心部の浸水プロセスと都市河川の洪水に及ぼす下水道の効果, 日本下水道協会第 54 回下水道研究発表会, pp. 158-160, 2017.
- (5) 関根正人, 中森奈波, 近藤恭平: 豪雨域の移動方向が下水道ならびに都市河川への雨水集中と都市浸水に及ぼす影響, 日本下水道協会第 54 回下水道研究発表会, pp. 164-166, 2017.
- (6) 関根正人, 中山裕貴, 小方公美子, 柴田祐希: 街路ネットワーク浸水・氾濫解析モデルを用いた東京東部低平地の浸水危険度評価, 日本下水道協会第 54 回下水道研究発表会, pp. 161-163, 2017.
- (7) 関根正人: 力学原理に忠実に創られた精緻な都市浸水予測手法と東京で発生する都市浸水現象, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol. 37, No. 1, pp. 11-18, 2018.

4.2 総説・著書

関根正人: 地下空間の浸水被害を科学の力で防ぐ・軽減する一浸水予測システムとそれを活用した避難経路の確保、都市問題, Vol. 109, No. 6, pp. 75-83, 2018.

4.3 招待講演

「精緻な手法を基礎とした豪雨時リアルタイム浸水予測システムとその社会実装による被害軽減」、信州・気候変動適応プラットフォーム全体会議 (長野県), 2018 年 1 月 23 日.

4.4 受賞・表彰

特にありません。

4.5 学会および社会的活動

土木学会・日本下水道協会にて各種委員を務めるとともに、この分野の研究をリードする業績を上げてきたほか、東京都・神奈川県をはじめとした自治体が被害軽減に向けた対策を講じるに当たっての科学的な裏付けを与えつつアドバイスを行ってきました。

5. 研究活動の課題と展望

東京都 23 区全域を対象とした「リアルタイム浸水予測システム」の中核部分は既に完成しており、現在、計算の高速化に向けた取り組みを進めているところです。文部科学省の DIAS

のプロジェクトに採択されて以降は、関連分野の研究者とともに並列化を含めたコードの高速化・効率化を進めており、**2019** 年夏までに **DIAS** 上でリアルタイム予測計算ができ、その結果が広くお伝えできるようにしていく予定です。このシステムを社会実装し、**2020** 年の東京オリンピック・パラリンピックまでには予測計算の情報が活用されるようにしていくという目標に向かって着実に前進してきていると考えています。

機能性ナノシートを用いた生体情報モニタリングシステムの開発

研究代表者 武岡 真司
(先進理工学部 生命医科学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究では、生体情報や環境情報を持続的にモニタリングする薄膜型センサの開発を関連企業と共に行うことを目的としている。測定対象としては、筋電、心電、脳波、脈拍、血圧、温度、pH、酸素、そのほか乳酸値などのバイオマーカーなどであり、要素技術として、皮膚貼付型電極、歪センサ、アンテナコイル、機能性蛍光プローブなどを期間内に確立して新しいバイオエレクトロニクスを開拓する。具体的には、皮膚に貼付するのみで生体信号を計測可能な導電性高分子ナノシート「電子ナノ絆創膏」を用いた、①手のひら・足裏のような未踏領域の筋電位の計測と②繊細な皮膚感覚を有するアスリートが姿勢維持・走行・投球等の運動時に生じる筋活動情報および皮膚変形量（歪み）の計測、および電子ナノ絆創膏と Bluetooth 端末を接続することで、アスリートの運動量を無線かつリアルタイムに計測可能なシステムの構築を目指す。他方、機能性蛍光分子を導入した外部環境応答性ナノシートを用いた温度、酸素、pH などの蛍光マッピングを実現する。

2. 主な研究成果

2. 1. インクジェット印刷を用いたナノシート型歪みセンサの開発

導電性高分子および金属ナノ粒子をエラストマーからなる高分子ナノ薄膜上にインクジェット印刷することで、ナノシート型歪みセンサを構築し、皮膚の微小な変形を検出することに成功した [特願 2017-17228 (2017 年 6 月 29 日)、Appl. Phys. Expr., 10, 087201 (2017).]。具体的には、熱可塑性エラストマーであるスチレン-ブタジエン-スチレンブロック共重合体(SBS)からなる膜厚約 300 nm のナノシートをロール・ツー・ロール方式のグラビア印刷法にて調製し、インクジェットプリンタ (Dimatix 2831、富士フィルム) を用いてその上に導電性高分子 PEDOT:PSS (CleviosTMP Jet 700、Heraeus) および Au ナノ粒子 (DryCure-AuJB、C-INK Co., Ltd.) を印刷することで、総膜厚 1 μm 以下のナノシート型歪みセンサを作製した。このナノシート型歪みセンサは、接着剤・粘着剤を用いずに皮膚表面に密着・追従させることができ、皮膚そのものの伸展・収縮に影響を与えずに微小な変形(2%程度の歪み)を検出可能であることを実証した。

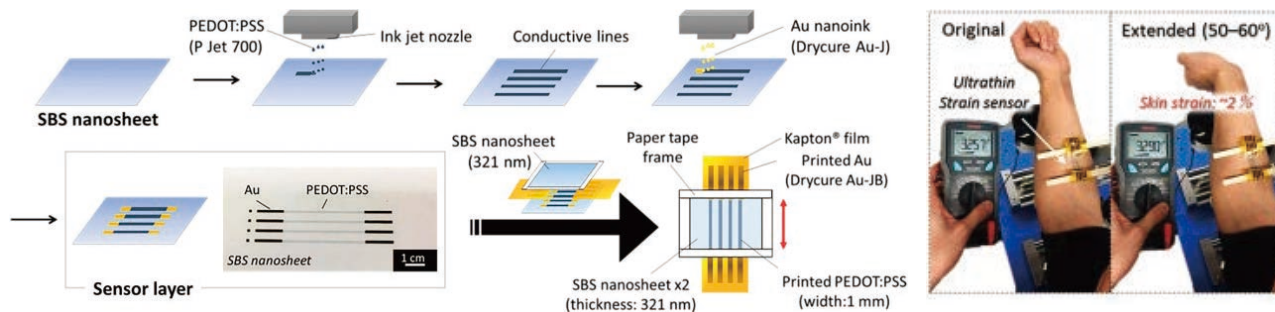


Fig. 1 ナノシート型歪みセンサの構築と皮膚の微小変形の計測

2. 2. ナノシート用伸縮配線の開発

ナノシート表面に導電性高分子や金属ナノ粒子を印刷することで、生体組織への密着・追従性に優れたナノシート型生体電極を用いて筋電計測をする際にデバイスと電極間を繋ぐ配線と接続部の強度が課題となった。その解決に向けたアプローチとして、“切り紙”構造を持つ伸縮配線を企業(株朝日 FR 研究所)と共同で開発した[特願 2017-246182 (2017 年 12 月 22 日)]。この配線は伸縮させても接続部に殆ど応力がかからない。具体的には、切り紙構造に加工した金属薄膜導体をシリコンゴムで完全被覆することで絶縁化した伸縮配線(伸縮率 150%以上)を作製した。この伸縮配線を、手のひらや足の裏に貼付した電子ナノ絆創膏と手首や足首に固定した Bluetooth 式ワイヤレス筋電計とを接続するための配線として用いることで、激しい運動(投球・走行)時にも安定した筋電位情報を取得することに成功した[論文投稿準備中]。



Fig. 2 電子ナノ絆創膏と伸縮配線を用いた無線筋電計測

2. 3. ナノシート型 pH イメージングセンサの作製と植物葉の pH マッピング

ナノシートの貼付性および蛍光色素の外部環境に対する素早い応答性を利用した pH イメージングセンサを開発した。具体的には、交互積層法を用いて化学的・物理的安定性と pH 感受性を両立したナノシートを調製し、膜厚と pH 変化に対する応答速度の関係を明らかにした。また、調製した pH 感受性ナノシートに pH 非感受性色素を内包したナノシートを一体化させることで、レシオメトリック測定用ナノシート型 pH イメージングセンサ(膜厚: 約 250 nm)を作製した。この pH センサを、表皮組織を剥離した葉に貼付し、葉柄から塩化ナトリウム水溶液(100 mM)を浸透させたところ、NaCl ストレスによるアポプラスト pH の上昇をイメージングすることに成功した。

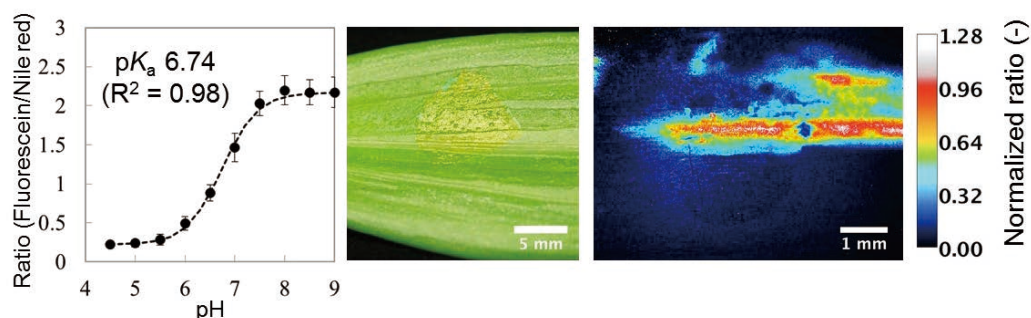


Fig. 3 ナノシート型 pH イメージングセンサによる植物葉の pH マッピング

3. 共同研究者

彼末 一之 (スポーツ科学部・教授)
 永見 智行 (北里大学・講師)
 藤枝 俊宣 (高等研究所・准教授)
 新井 敏 (理工学研究所・研究院講師)
 朝日 FR 研究所

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] Taccola, S., Pensabene, V., Fujie, T., Takeoka, S., Pugno, N.M., Mattoli, V., “On the injectability of free-standing magnetic nanofilms” , *Biomedical Microdevices*, 19, 51 (2017).
- [2] Tetsu, Y., Yamagishi, K., Kato, A., Matsumoto, Y., Tsukune, M., Kobayashi, Y., Fujie, M.G., Takeoka, S., Fujie, T. “Ultrathin epidermal strain sensor based on an elastomer nanosheet with an inkjet-printed conductive polymer” , *Applied Physics Express*, 10, 087201 (2017).
- [3] Hayata, H., Okamoto, M., Takeoka, S., Iwase, E., Fujie, T., Iwata, H., “Printed high-frequency RF identification antenna on ultrathin polymer film by simple production process for soft-surface adhesive device” , *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 05EC01 (2017).

4.2 総説・著書 (MS 明朝体、11 ポイント)

- [1] 藤枝 俊宣, 武岡 真司, “高分子ナノ薄膜とバイオ・エレクトロニクスの融合”, *化学と工業*, 70, 494 (2017).
- [2] 武岡真司, 鉄祐磨, 山岸健人, “有機材料 (薄膜型生体デバイス)” , *人工臓器*, 46, 173 (2018).

4.3 招待講演 (MS 明朝体、11 ポイント)

- [1] Shinji Takeoka, “Luminescent Nanosheets for Ratiometric Temperature Mapping”, European Advanced Materials Congress, Stockholm, Sweden, 2017/8/22-24.
- [2] Shinji Takeoka, “Introduction of nanomedicine research in Takeoka Laboratory”, 19th German-Japanese Joint Symposium between the University of Bonn and Waseda University, Bonn, Germany, 2017/9/18.
- [3] Shinji Takeoka, “Development of Nanomaterials Functionalized by 3D Collaboration”, 4th Core-to-Core International Symposium "3D Lab-Exchange Program", Bonn, Germany, 2018/3/6-8.

4.4 受賞・表彰

- [1] 藤枝俊宣. 日本バイオマテリアル学会 2017 年度バイオマテリアル科学奨励賞: 「生体計測・制御システムに向けたプリンテッドナノ薄膜の創製」 (2017 年 11 月).

4.5 学会および社会的活動

- [1] 第 24 回日本血液代替物学会年次大会, 大会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 2017/12/7-8.

5. 研究活動の課題と展望

今後は、2017 年度に得られた研究成果をスポーツ科学分野に応用するために、電子ナノ絆創膏及び伸縮配線を繊細な皮膚感覚を有するアスリートの手のひら・足裏に貼付することで姿勢維持・走行・投球等の運動時に生じる筋活動情報を取得し、野球・マラソンなどのパフォーマンス評価に応用する。そのためには、取得した筋電情報をリアルタイムに PC やスマホに送達するための無線通信技術や、長期間計測・記録を可能にするデータロガーの開発が必須である。これらを企業と共同で進めることで、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックに向け、我が国の健康医療の増進を支援する先端計測技術の開発を目指したい。また、ナノシート型 pH イメージングセンサに温度や酸素のイメージングセンサを組合せて代謝に関するパラメータをマッピングする生体情報モニタリングセンサの開発につなげたい。

計算化学の社会実装

研究代表者 中井 浩巳
(先進理工学部 化学・生命化学科 教授)

1. 研究課題

計算化学は、量子化学計算、分子シミュレーション、さらに、ケモインフォマティクスなどの計算機を用いた化学研究技術の総称である。近年、計算化学の高精度化・高速化・汎用化が進み、大学における研究のみならず、企業における研究開発に活用できる段階に来ている。実際に、すでに計算化学を導入し、成果を収めている企業もあるが、導入の検討段階の企業も数多くあるように見受けられる。本プロジェクト研究では、そのような産業界のニーズに応えるべく、共同研究を通して実際の研究成果を挙げ、計算化学を企業に根付かせることを目的とする。また、我々の研究室で開発した独自の理論的手法や計算プログラムに関しても、広く普及させるための取り組みを進める。さらに、具体的な応用研究を実施することにより、今日の計算化学の問題点を明らかにし、計算化学のさらなる発展を目指す。官が進める本プロジェクト研究に関連した大型プロジェクトにも積極的に参加する。本プロジェクト研究を通して企業研究者や大学院生、若手研究者を育成し、次世代の「計算化学の社会実装」の担い手として社会に輩出する。

2. 主な研究成果

我々はプロジェクト研究「相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計」内で、任意の元素を含んだ化合物に適用可能な大規模分子計算を実現する独自の理論、およびプログラム RAQET を開発した。また文部科学省のプロジェクト内で、「京」コンピュータなどを用いて 100 万原子の計算が実現可能な、量子化学計算/分子動力学シミュレーションプログラム DC-DFTB-K を開発した。本プロジェクト研究ではこれらのプログラムを企業に根付かせることを目標とする。RAQET に関する成果は、上述のプロジェクト研究と共通であり、同年次報告を参照されたい。

また DC-DFTB-K は密度汎関数強束縛 (DFTB) 法を DC 法へと拡張し、MPI と OpenMP を用いたハイブリッド並列計算により、大規模分子系のシミュレーションを実現するプログラムである。本年度における研究成果を以下に示す。

2-1 DC-DFTB-K プログラムの高速化

DC-DFTB-K プログラムの高速化に関して、大規模分子系の計算において最もコストを要するプロセスの一つである、長距離性を持つ電荷間相互作用の計算に対する高速化を行った。そのために多重極展開法と補間法の併用に基づく手法を開発し[学術論文(7)], 十分な計算精度を保ちつつ高効率な演算を実現した。さらなる性能改善のため、配列の連続アクセス化やキャッシュブロック化によるチューニングを適用した。その結果を図 1 に示す。これにより 100 万以上の原子を含む系で 2 倍以上の高速化を実現した。

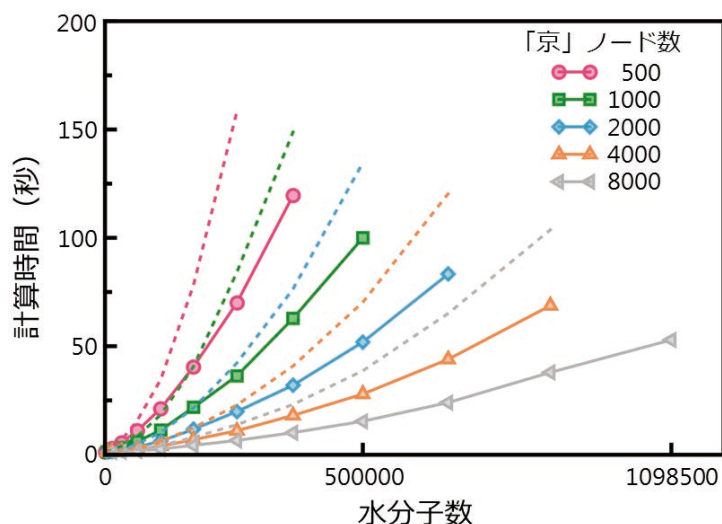


図 1. 純水系（立方体セル）におけるチューニング前（破線）およびチューニング後（実線）の計算時間のサイズ依存性

2-2 DC-DFTB-K プログラムを用いたアミン水溶液中の CO_2 吸収反応の速度論解析

DC-DFTB-K を用いた応用計算として、アミン水溶液中で起こる CO_2 吸収反応の速度論に関する解析を行った．具体的には、素反応に対する速度論モデルを構築し、シミュレーションにおける反応物・中間体・生成物の分子数の時間変化へフィッティングすることで速度定数を算出した[学術論文(6)]．対象としたアミンとして、モノエタノールアミン (MEA), 2 アミノ 2 メチル 1 プロパノール (AMP), ピペラジン (PZ), 2 イソプロピルアミノエタノール (IPAE) の 4 種類のアミン水溶液モデルを用いた．図 2 に CO_2 吸収シミュレーションに用いたアミン水溶液モデルと用いたアミン化合物を示す．また図 3 にシミュレーションから得られた化学種の時間変化（実線），および速度論を用いたフィッティング結果（破線）を示す．この結果，図 4 に示すように速度論解析から見積もったアミンの $\text{p}K_a$ が実験値とよく一致することが確かめられた．また双性イオンを経由したカルバメート生成反応経路について，AMP や IPAE の速度定数が MEA や PZ よりも小さくなり，速度論解析が CO_2 吸収性能のアミン化合物依存性を理解する糸口となり得ることが示唆された．

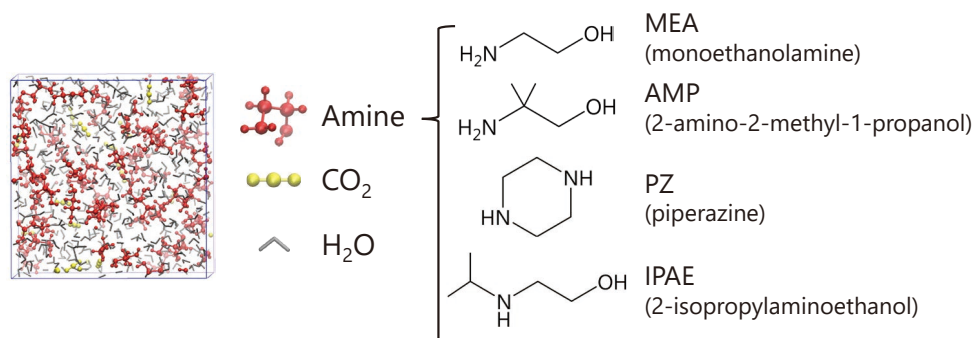


図 2. アミン水溶液モデルとシミュレーションに用いたアミン化合物

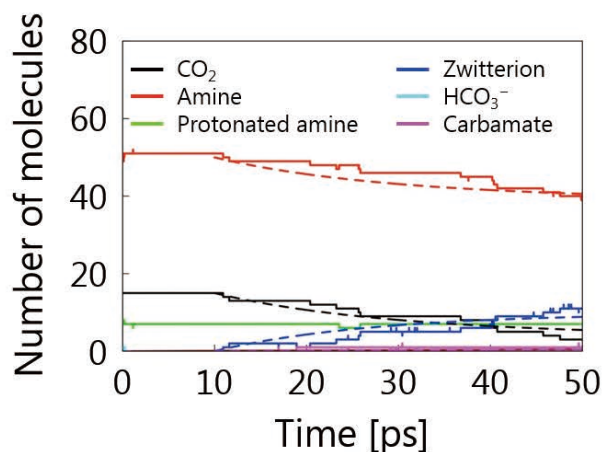


図3. 化学種の時間変化（実線）および速度論を用いたフィッティング（破線）

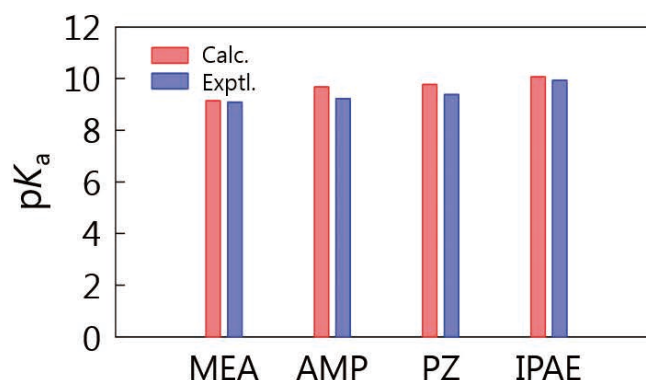


図4. アミンの pK_a の計算値と実験値の比較

2-3 企業との共同研究

企業との共同研究として、参画した企業1社の専任研究者に対して以下の流れで共同研究を進めた。(1)研究対象について計算化学の適用可能性を議論し、(2)研究の遂行に最適であるDC-DFTB-Kプログラムを提示、(3)研究室に直接訪問してもらい、そのプログラムの理論概要や使用方法などについての講習を行い、(4)技術や研究の進め方の面でサポートを行いながら、専任研究者が中心となり計算・解析を実行した。4回の訪問により、現在本格的な計算を実行するフェーズに入った。

3. 共同研究者

清野 淳司（理工学術院・理工学術院総合研究所・理工総研が募集する次席研究員）
 五十幡 康弘（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 王 祺（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 西村 好史（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 小野 純一（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 周 建斌（理工学術院・理工学術院総合研究所・次席研究員）
 吉川 武司（理工学術院・化学・生命化学科・助教）
 大越 昌樹（理工学術院・化学・生命化学科・助手）
 Toni Maier（日本学術振興会（JSPS）・外国人特別研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, T. Oyama, Y. Ikabata, S. Seino, H. Nakai, *Chem. Phys. Lett.*, **680**, 37-43 (2017). (DOI: [10.1016/j.cplett.2017.05.023](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.05.023))
- (2) “Near-infrared absorption of π -stacking columns composed of trioxotriangulene neutral radicals”, Y. Ikabata, Q. Wang, T. Yoshikawa, A. Ueda, T. Murata, K. Kariyazono, M. Moriguchi, H. Okamoto, Y. Morita, H. Nakai, *npj Quantum Materials*, **2**, 27 (2017). (DOI: [10.1038/s41535-017-0033-8](https://doi.org/10.1038/s41535-017-0033-8))

- (3) “Electrocatalytic synthesis of ammonia by surface proton hopping”, R. Manabe, H. Nakatsubo, A. Gondo, K. Murakami, S. Ogo, H. Tsuneki, M. Ikeda, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, *Chemical Science*, **8** (??), 5434-5439 (2017). (DOI: [10.1039/c7sc00840f](https://doi.org/10.1039/c7sc00840f))
- (4) “Density functional theory analysis of elementary reactions in NO_x reduction on Rh surface and Rh clusters”, F. Deushi, A. Ishikawa, H. Nakai, *J. Phys. Chem. C*, **121** (28), 15272-15281 (2017). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b04526](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04526))
- (5) “Computerized implementation of higher-order electron-correlation methods and their linear-scaling divide-and-conquer extensions”, M. Nakano, T. Yoshikawa, S. Hirata, J. Seino, H. Nakai, *J. Comput. Chem.*, **38** (29), 2520-2527 (2017). (DOI: [10.1002/jcc.24912](https://doi.org/10.1002/jcc.24912))
- (6) “Divide-and-conquer density-functional tight-binding molecular dynamics study on the formation of carbamate ions during CO₂ chemical absorption in amine solutions”, A. Sakti, Y. Nishimura, H. Sato, H. Nakai, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **90** (11), 1230-1235 (2017). (DOI: [10.1246/bcsj.20170142](https://doi.org/10.1246/bcsj.20170142))
- (7) “Parallel implementation of efficient charge-charge interaction evaluation scheme in periodic divide-and-conquer density-functional tight-binding calculations”, Y. Nishimura, H. Nakai, *J. Comput. Chem.*, **39** (2), 105-116 (2017). (DOI: [10.1002/jcc.25086](https://doi.org/10.1002/jcc.25086))
- (8) “Catalytic performance of Ru, Os, and Rh nanoparticles for ammonia synthesis: A density functional theory analysis”, A. Ishikawa, T. Doi, H. Nakai, *J. Catal.*, **357**, 213-222 (2017). (DOI: [10.1016/j.jcat.2017.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.11.018))
- (9) “Rigorous pK_a estimation of amine species using density-functional tight-binding-based metadynamics simulations”, A. Sakti, Y. Nishimura, H. Nakai, *J. Chem. Theory Comput.*, **14** (1), 351-356 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jctc.7b00855](https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b00855))
- (10) “Density-functional tight-binding molecular dynamics simulations of excess proton diffusion in ice I_h, Ice I_c, Ice III, and melted ice VI phases”, A. Sakti, Y. Nishimura, C. Chou, H. Nakai, *J. Phys. Chem. A*, **122** (1), 33-40 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpca.7b10664](https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b10664))
- (11) “Electron-hopping brings lattice strain and high catalytic activity in low temperature oxidative coupling of methane in an electric field”, S. Ogo, H. Nakatsubo, K. Iwasaki, A. Sato, T. Yabe, A. Ishikawa, H. Nakai, Y. Sekine, *J. Phys. Chem. C*, **122** (4), 2089-2096 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b08994](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b08994))
- (12) “Semi-local machine-learned kinetic energy density functional with third-order gradients of electron density”, J. Seino, R. Kageyama, M. Fujinami, Y. Ikabata, H. Nakai, *J. Chem. Phys.*, **148** (24), 241705 (13 pages) (2018). (DOI: [10.1063/1.5007230](https://doi.org/10.1063/1.5007230))
- (13) “Theoretical analysis of carrier ion diffusion in superconcentrated electrolyte solutions for sodium-ion batteries”, M. Okoshi, C.-P. Chou, H. Nakai, *J. Phys. Chem. B*, **122** (9), 2600-2609 (2018). (DOI: [10.1021/acs.jpcc.7b10589](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10589))
- (14) “Gauge-origin independent formalism of two-component relativistic framework based on unitary transformation in nuclear magnetic shielding constant”, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, *J. Chem. Phys.*, **148** (11), 114109 (8 pages) (2018). (DOI: [10.1063/1.5016581](https://doi.org/10.1063/1.5016581))
- (15) “Simulations of synthesis of the boron-nitride nanostructures in a hot, high pressure gas volume”, P. S. Krstic, L. Han, S. Irle, H. Nakai, *Chemical Science*, in press (2018). (DOI: [10.1039/c8sc00667a](https://doi.org/10.1039/c8sc00667a))
- (16) “Derivative of electron repulsion integral using accompanying coordinate expansion and transferred recurrence relation method for long contraction and high angular momentum”, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, *J. Comput. Chem.* in press (2018). (DOI: [10.1002/qua.25640](https://doi.org/10.1002/qua.25640))

4.2 総説・著書

- (1) “量子化学計算のコツ（基礎編）”, 中井浩巳, *応用物理*, **86** (8), 720-724 (2017).
- (2) “量子化学計算のコツ（実用編）”, 中井浩巳, *応用物理*, **86** (9), 802-807 (2017).
- (3) “調和溶媒和モデル(HSM)を用いた凝縮系の自由エネルギー計算” (Harmonic solvation model (HSM) for evaluation of condensed-phase free energy), 中井 浩巳, *J. Comput. Chem. Jpn.*, **16** (4), 83-88 (2017). (DOI: [10.2477/jccj.2017-0038](https://doi.org/10.2477/jccj.2017-0038))
- (4) “基礎研究と応用研究～理論化学の社会実装に向けて”, 中井浩巳, *化学と工業*, **70** (10), 928-930 (2017).
- (5) “インフォマティクスとの融合による理論化学研究”, 清野淳司, 中井浩巳, *化学工業*, **69** (1), 53-58 (2018).
- (6) “ジブチルヒドロキシトルエンにおける遠赤外吸収 ～測定と量子化学計算によるスペクトル同定～”, 遠藤滉士, 香西拓哉, 吉川武司, 中井浩巳, 大木義路, *電気学会誘電・絶縁材料研究会資料*, **DEI-17-100**, 23-28 (2017)
- (7) “分割統治型密度汎関数強束縛 (DC-DFTB) 法に対する最近の開発と応用”, 西村 好史, 中井 浩巳, *分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”*, **20** (1), 18-23 (2018).
- (8) “A perspective on density-functional tight-binding parameterization towards transition metals”, C.-P. Chou, H. Nakai, *分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”*, **20** (1), 8-17 (2018).
- (9) “特集「DFTB」:「特集にあたって」”, 中井 浩巳, *分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”*, **20** (1), 7 (2018).

4.3 招待講演

(海外学会)

- (1) “Chemical Reaction Simulations treated by Linear-Scaling Divide-and-Conquer type Density-Functional based Tight-Binding Molecular Dynamics (DC-DFTB-MD) Method”, H. Nakai, *253rd ACS National Meeting & Exposition*, San Francisco (California, USA), April 2-7, 2017.
- (2) “Large-Scale Chemical Reaction Simulations by Divide-and-Conquer Density-Functional Tight-Binding Molecular Dynamics Method”, H. Nakai, *2017 Korea-Japan Molecular Science Symposium ‘Frontiers in Molecular Science: Structure, Dynamics, and Function of Molecules and Complexes’*, Haeundae Tivoli Hotel (Busan, Korea), July 10-12, 2017.
- (3) “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, H. Nakai, *17th International Conference on Density-Functional Theory and its Applications (DFT2017)*, Tällberg (Dalarna, Sweden), August 21-25, 2017.
- (4) “Chemical Reaction Simulations on CO₂ Chemical Absorption Process”, H. Nakai, *11th Triennial Congress of the World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC 2017)*, (Munich, Germany), August 27-September 1, 2017.
- (5) “Quantum Chemistry Meets Artificial Intelligence”, H. Nakai, *Eighth Asia-Pacific Conference of Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC 8)*, (Mumbai, India), December 15-17, 2017.

(国内学会)

- (1) “インフォマティクスとの融合による理論化学研究の推進”, 中井浩巳, 日本化学会関東支部主催講演会「マテリアルズ・インフォマティクスとAIを用いたものづくり」, 化学会館(お茶の水), 2017年9月29日.
- (2) “データ科学は理論化学に何をもたらすか”, 中井浩巳, 日本コンピュータ化学会 2017 秋季年会 プレシンポジウム, 熊本大学黒髪キャンパス(熊本), 2017年10月20日.
- (3) “元素戦略のための相対論的量子化学”, 中井浩巳, MEXT-JST 元素戦略合同シンポジウム ～元素戦略研究の歩みと今後～, JP タワーホール(東京), 2018年2月20日.

4.4 受賞・表彰

- (1) 日本化学会第97春季年会 優秀講演賞(学術), 西村 好史(次席研究員), “Linear-scaling quantum mechanical molecular dynamics simulations with divide-and-conquer density-functional tight-binding method”.
- (2) 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 日本コンピュータ化学会(SCCJ)奨学賞, Aditya Wibawa Sakti (D3), "Accurate pKa Evaluation by Metadynamics Simulation at the Density-Functional Tight-Binding Level".
- (3) 第11回分子科学討論会 2017 分子科学会優秀講演賞, 大山 拓郎 (M2) 「局所ユニタリー変換を用いた効率的な2成分相対論的密度汎関数理論の開発」.
- (4) 第7回CSJ化学フェスタ 2017 優秀ポスター発表賞, 影山 椋 (M1) 「Orbital-free 密度汎関数理論のための機械学習を用いた運動エネルギー汎関数の開発」.
- (5) 第31回分子シミュレーション討論会 学生優秀発表賞, 河本奈々 (B4) 「分割統治型励起状態密度汎関数強束縛法を用いた光活性イエロータンパク質に関する理論的研究」.
- (6) APCTCC8, Best Poster Award (ACS Omega) Minori Imai (M2), “DC-DFTB-metadynamics simulations for the primary proton transfer of bacteriorhodopsin”.
- (7) 早稲田大学先進理工学部化学・生命化学科 2017 年度卒業研究発表賞, 河本奈々 (B4) 「光受容タンパク質の機構解明に向けた分割統治型時間依存密度汎関数強束縛法の開発」.
- (8) 第121回触媒討論会 学生ポスター発表賞, 平井貴裕 (M2) 「Rh 表面での NO-CO 反応の温度・圧力依存性に関する理論的検討」.

4.5 外部資金

- (1) 科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業(CREST)『元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出』『相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計』, (研究代表, 平成 24-29 年度).
- (2) 日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金 基盤研究(A), 「ユビキタス水素の機能とダイナミクスに関する理論的研究」 (研究代表, 平成 26-30 年度).
- (3) 日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究, 「凝縮系の熱力学量に対する高精度量子化学計算法の開発」 (研究代表, 平成 27-29 年度).
- (4) 文部科学省 元素戦略プロジェクト 研究拠点形成型『京都大学 実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点』『触媒及び電極の電子状態計算のための理論開発』, (分担研究代表, 平成 29 年度).

5. 研究活動の課題と展望

今後も DC-DFTB-K および RAQET の機能拡充を継続することで、常に最新で、かつユーザーが使用しやすい環境を整える。これらのプログラムを用いた様々な応用計算の結果を示すことで、プログラムの有用性や使用方法を提示する。また社会実装を実現するために、参画している企業との共同研究を進めてプロジェクトの礎を確立する。この成功体験を通して、新たな参画企業を募集し、拡大させる予定である。

地球外天体におけるジャイロ応用システムの開発

研究代表者 長谷部 信行
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

ジャイロスコップはセンサーとしての利用が良く知られているが、動力源としての利用はあまり知られていない。しかし、モータなどの動力源に比べてジャイロスコップの回転数に比例した大きな力を発生することが可能である。一方、モータは回転方向と力の発生方向が同一なのに比べて、回転方向と 90 度の方向に力が発生するという性質のため、その扱いは容易ではない。

しかし、この課題を解決することにより、ドローンへの応用、輸送システム（2 輪車・自動車・航空機・ロケット・人工衛星）、ロボット、建築物（揺れ止め・振じれ止め）、産業機械（クレーン）など多くの分野での活用が期待できる。

申請者らは独自開発の 2 段独楽の理論を使って、ジャイロアクチュエータ搭載のロボットバイクを開発した。また、独楽の運動方程式を基にしてドローンに関する基本的な運動方程式を導出している。

本研究では、この結果を基に地球外天体における飛行体の開発、また既に開発している自立走行 2 輪車をベースにして、ローバとしての 2 輪車の基盤開発を行う。

2. 主な研究成果

2.1 2 段独楽の動的解析

高速で回転するフライホイールの軸の方向を自由に変えることができる装置（ジャイロアクチュエータ）は、主に 2 つの特徴的な性質を有する。

- ① “外部からの力がないとき、回転軸は一定方向を指す”（慣性の法則）
- ② “外部から回転軸に力が加えられると回転軸はその力と 90° 方向に回転する”（プリセッション）

このようなジャイロ効果を利用した動力源は、船の揺れ止め、クレーン吊り荷の振れ止め、また 2 輪車の自立走行制御、人工衛星の姿勢制御などに利用されている。さらに、ジャイロアクチュエータを用いたドローンの姿勢制御の開発を目標とする。

そこで、初めに、これらの研究のベースとなる独楽のモデリング、さらに独楽が 2 段に重なった 2 段独楽(Fig.1)のモデリング及び動作解析を行った。Fig.2 に、自転速度一定、独楽に一定の傾きを持たせた場合のシミュレーション結果を示す。独楽の重心の軌跡より、独楽の回転によるジャイロ効果としての歳差運動が再現されていることがわかる。また Fig.3 には 2 段独楽のシミュレーション結果を

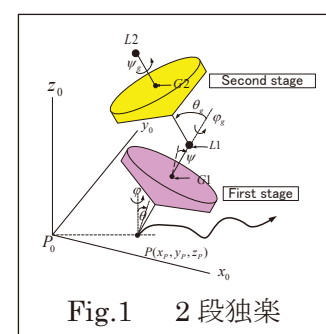
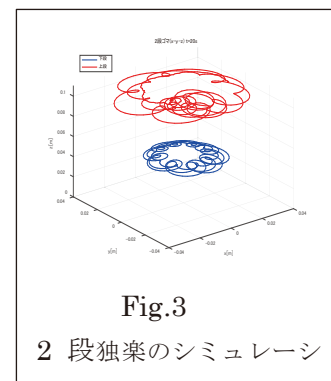
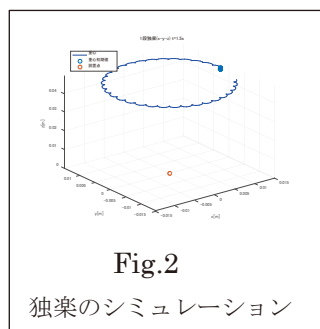


Fig.1 2 段独楽

示す。青が独楽の一段目、赤が2段目の独楽の重心の軌跡を示している。

これらの知見は、船、クレーン、2輪車、人工衛星さらにドローンのモデリング及びジャイロアクチュエータを用いたこれら構造体の制振制御の基礎を与えるものである。



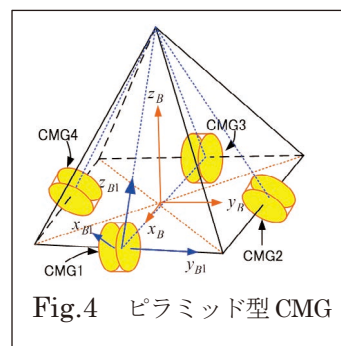
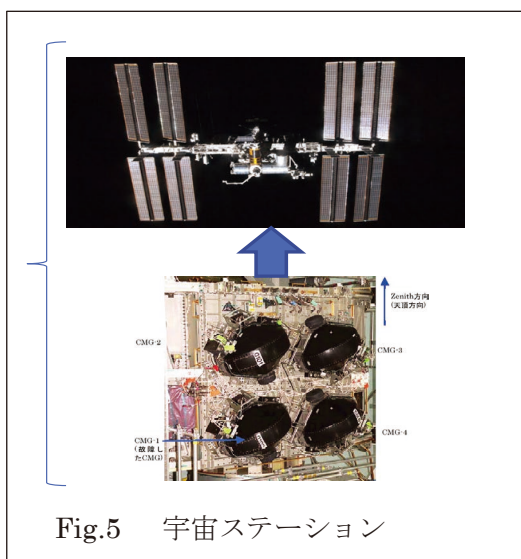
2.2 ピラミッド型CMGによる人工衛星の姿勢制御

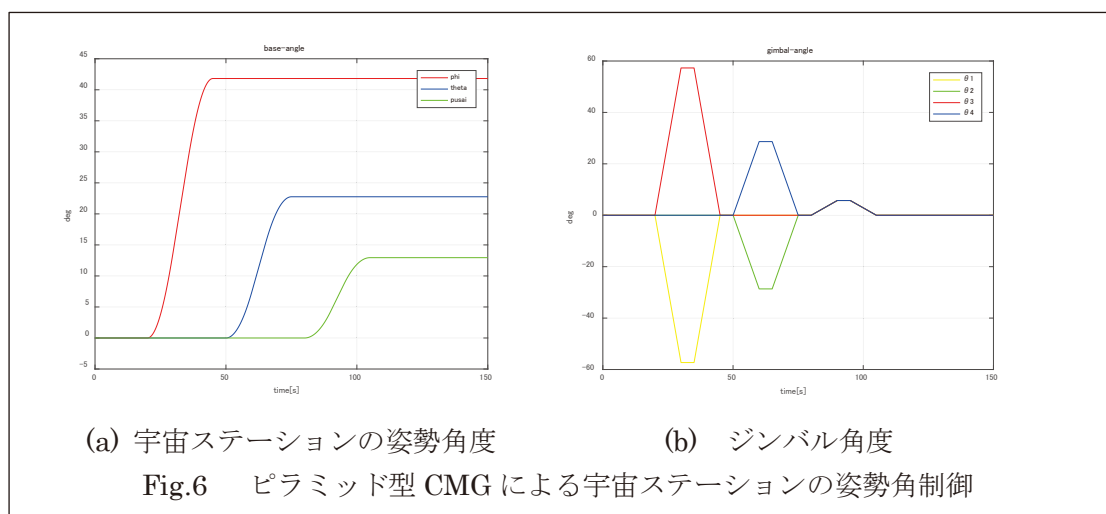
CMG(コントロールモーメントジャイロ)は、ジンバル軸によりフラーホイールを回転した場合、トルクがゼロとなる特異点が存在するが、4つのCMGをFig.4のようにピラミッド型に配置することにより特異点の発生を最小限にすることができることが知られており、宇宙ステーション(Fig.5)の姿勢制御等に使用されている。

本研究では、月や火星等の地球外天体におけるジャイロ応用システムとしてドローンや2輪車の開発を目指しているが、それに先立ち宇宙ステーションに使用されているピラミッド型CMGの厳密なモデル(Eq.1)の開発を行い、Fig.6に示すシミュレーションにより、その動作を確認した。

$$\begin{aligned}
 & J_{G1} \begin{bmatrix} \sin \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & 0 & -\sin \beta \\ \cos \beta & \cos \beta & \cos \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + J_{G2} \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 \cos \beta & \sin \theta_2 & \cos \theta_3 \cos \beta & -\sin \theta_4 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_2 \cos \beta & \sin \theta_3 & \cos \theta_4 \cos \beta \\ \cos \theta_1 \sin \beta & \cos \theta_2 \sin \beta & \cos \theta_3 \sin \beta & \cos \theta_4 \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi}_1 \dot{\theta}_1 \\ \dot{\psi}_2 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\psi}_3 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\psi}_4 \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \\
 & + \left(\begin{bmatrix} 0 & (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos \beta & -(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin \beta \\ -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos \beta & 0 & (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin \beta \\ (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin \beta & -(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin \beta & 0 \end{bmatrix} J_{G1} + \begin{bmatrix} 0 & \delta_3 & \delta_2 \\ -\delta_3 & 0 & \delta_1 \\ \delta_2 & -\delta_1 & 0 \end{bmatrix} J_{G2} \right) \Omega_B \\
 & + e_B \sum_{i=1}^4 I_i^T \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \psi_i - \sin \beta \cos \theta_i \sin \psi_i \\ \sin \theta_i \sin \psi_i \\ -\sin \beta \cos \psi_i - \cos \beta \cos \theta_i \sin \psi_i \end{bmatrix} \tau_i \\
 & \begin{cases} \delta_1 := -(\dot{\psi}_1 \sin \theta_1 - \dot{\psi}_3 \sin \theta_3) \cos \beta - \dot{\psi}_2 \cos \theta_2 + \dot{\psi}_4 \cos \theta_4 \\ \delta_2 := \dot{\psi}_1 \cos \theta_1 - \dot{\psi}_3 \cos \theta_3 - (\dot{\psi}_2 \sin \theta_2 - \dot{\psi}_4 \sin \theta_4) \cos \beta \\ \delta_3 := (\dot{\psi}_1 \sin \theta_1 + \dot{\psi}_2 \sin \theta_2 + \dot{\psi}_3 \sin \theta_3 + \dot{\psi}_4 \sin \theta_4) \sin \beta \end{cases}
 \end{aligned}$$

Eq.1 ピラミッド型CMGによる人工衛星の姿勢制御モデル

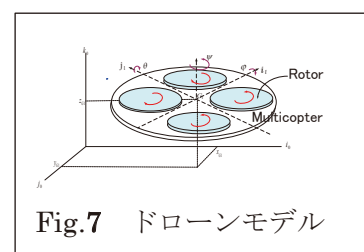
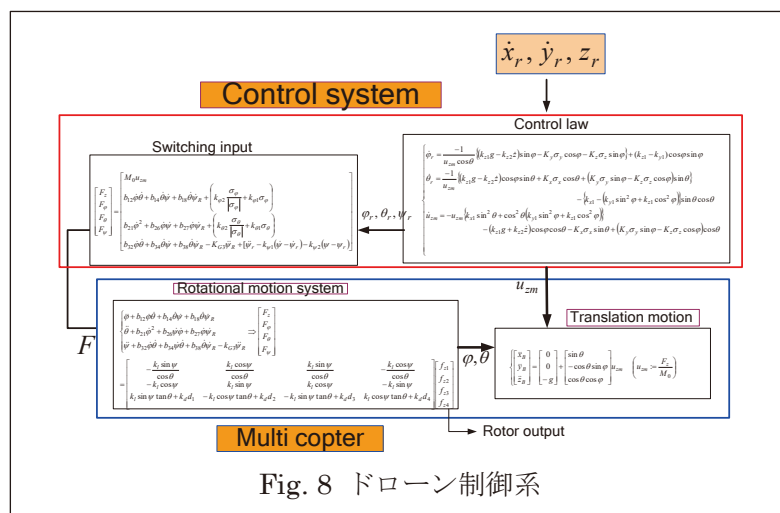


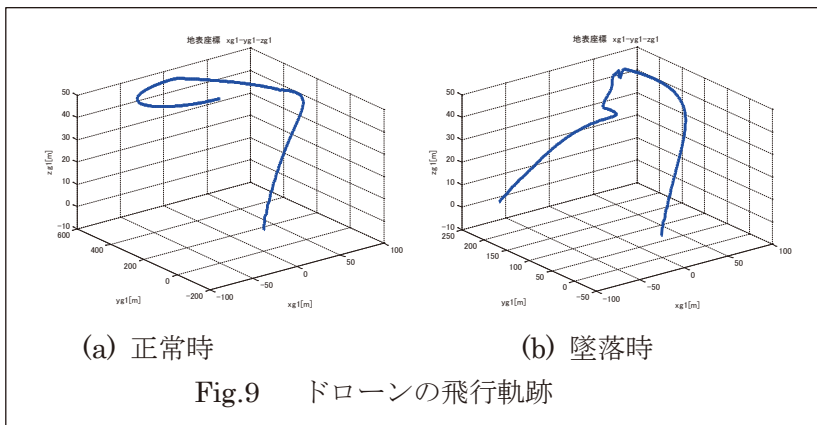


2.3 CMG によるドローンの姿勢制御

近年、複数のロータの回転により浮力を得て飛行する小型飛行体としてのマルチコプタが注目されており、物資運搬、農薬散布、航空写真撮影、構造物点検、災害調査、動画撮影など、その用途は多岐に渡っている。しかし、航続時間、天候などの使用環境や軽量化、制御性能など多くの問題が存在する。これらの問題を解決するためには、マルチコプタの構造を厳密に定量的に理解することが重要である。しかし、現状では、上昇下降、左右方向、前後方向の飛行に対して、複数のロータの回転数、回転方向をどうすれば良いかなどの定性的な議論がほとんどであり、訓練による操縦の上達が求められているという状況である。

本研究では、人工衛星の姿勢制御に用いられる設計法であるピラミッド型 CMG 設計法に基づいてドローンの運動モデルとその制御系の設計を行った。Fig.7 は機体のモデル図、Fig.8 は制御系である。Fig.9 は x 方向の速度 5[km/h]、 y 方向の速度 10[km/h]、高度 50m で飛行中、100 秒後に x 方向に風速 [2m/s]、 y 方向に風速 15[m/s] の突風を与えた場合の (a) 正常時と (b) 墜落時のシミュレーションである。(a) はフィードバックが良好な場合、(b) はフィードバックが適正でない場合を示している。(a) は、突風に流されながらも飛行を継続しているが、(b) では突風時には墜落していることがわかる。





3. 共同研究者

大内茂人(研究院客員教授), 清水創太(研究院客員準教授)
 長岡 央(研究員講師), 内藤雅之(研究院助手)
 氣賀 信太郎(院生M1), 長谷部隆崇道(B4)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) S.Kiga,S.Ouchi, N.Hasebe, N.Kodani ,Y.Takamoto and M.Mubin: Attitude Control of Drones by Back-stepping Control, SICE Annual Conference 2017
- (2) T.Yamazaki,S.Shimizu,N.Hasebe:Considerations about Saliency Map from Wide Angle Fovea image,26th IEEE International Symposium on Industrial Electronics

4.2 総説・著書

クレーンの振れ止め制御, ロボット制御学ハンドブック, pp26. 4. 4(大内)

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

- (1) S.Kiga, S.Ouchi, N.Hasebe:Attitude Control of Drones by back-stepping method :Application of the Pyramid Type CMG System,27th Workshop on JAXA
- (2) S.Kiga, S.Ouchi, N.Hasebe: Self Sustaining Drive Control of Gyro-Bike, Workshop in South Korea
- (3) 大谷, 大内: 無人二輪車の旋回自立走行制御, 平成 29 年度神奈川県ものづくり技術交流会

5. 研究活動の課題と展望

今後は, CMG 搭載ドローンに関する運動方程式及び制御系の導出を行い, 得られた結果に基

づいたシミュレーションさらに実機による飛行実験を目指していく。また、ツイン CMG 搭載 2 輪車の開発を行う。

災害情報データベースの継続的構築及び社会安全への活用に関する研究

研究代表者 長谷見 雄二
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究は、本研究は、負の遺産ともいうべき事故や災害の教訓が社会の共有財産となることを目指し、事故・災害に関わる情報を継続的に収集・整理しデータベース化すると共に、社会の安全に寄与するために如何に活用していくかを、実践的に研究することが目的である。

2. 主な研究成果

2.1 災害情報データの継続的構築と情報発信

幅広い分野を対象とした「災害情報データベース」は、事故・災害事例をインデックスとして、事例毎に関連する報道資料や事故調査報告書、裁判資料等の文献を管理し、継続的に収集しているため、効率的に必要な文献情報が収集でき、事故の経過が把握しやすいのが特徴である。また、ソーラス化されたキーワードにより分野横断的な検索が可能であるため、同種の原因による他分野の事例等の検索も容易である。収録されているデータは、2018年3月末現在、事例総数13万8264件、文献総数75万523件が収録され、様々な分野を対象とした事故災害データベースとしては国内外でも有数のものであると同時に最大規模となっている。

2.2 「難波桂芳災害・事故事例資料」のアーカイブ化

本資料は、産業災害・爆発・化学火災等に関し、故難波桂芳博士(東京大学名誉教授)が蒐集した調査資料であり、約7割が早稲田大学に保管されている。本資料は、第二次世界大戦後の日本で発生した主要な産業災害の殆どを網羅するうえ、災害・事故直後に作成された報告や災害発生施設・装置の情報等を含む詳細な一次資料を豊富に含む点等、産業災害等に関する事例研究、対策等の基盤資料としての活用が期待できる。今年度は昨年度に引き続きWEBデータベースシステム開発に関する検討を行った。

2.3 雑誌、書籍の発刊による情報提供

1) 月刊「災害情報」の発行

広く社会に事故・災害に係る情報を提供するために、安全分野に係る問題を連載したコラム(長谷見雄二他)、毎月の特徴的な事故・災害コメント、事故・災害概要リスト、災害対策関連情報等を記載した月刊「災害情報」を毎月計12回発行し情報提供を行った。

3. 共同研究者

田村 昌三(理工総研・招聘研究員)	小川 輝繁(理工総研・招聘研究員)
若倉 正英(理工総研・招聘研究員)	井田 敦之(理工総研・嘱託研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

4.2 総説・著書

長谷見雄二:「災害と建築設備 : 大規模物流倉庫火災を手がかりに考える (特集 防災)」,建築設備士 49(10), 2-6, 2017 年

長谷見雄二:「アスクル火災の本質とは? 想定超える使われ方に盲点 (炎の死角 : 高層建築火災や倉庫火災から考える設計の落とし穴)」,日経アーキテクチュア (1100), 37-39, 2017 年

長谷見雄二:「宅配型物流倉庫の出現とその防災対策」,月刊災害情報,2017 年 4 月

長谷見雄二:「温泉街のタイプと災害リスク」,月刊災害情報,2017 年 5 月

長谷見雄二:「ロンドンの高層住宅火災」,月刊災害情報,2017 年 6 月

長谷見雄二:「アスクル倉庫火災の教訓—施設やシステムの巨大化と災害リスク」,月刊災害情報,2017 年 7 月

長谷見雄二:「木造密集地区の防災改修」,月刊災害情報,2017 年 8 月

長谷見雄二:「線路際の火災リスク」,月刊災害情報,2017 年 9 月

長谷見雄二:「台湾の文化財防災」,月刊災害情報,2017 年 10 月

長谷見雄二:「金門島」,月刊災害情報,2017 年 11 月

長谷見雄二:「製材工場の火災」,月刊災害情報,2017 年 12 月

長谷見雄二:「高齢者居住の災害安全性」,月刊災害情報,2018 年 1 月

長谷見雄二:「静脈系の防災対策」,月刊災害情報,2018 年 2 月

長谷見雄二:「類似度判定」,月刊災害情報,2018 年 3 月

田村昌三:「産業安全の確保・向上のための安全環境の醸成と人材育成」,JREA60 (6) 41310-41313,2017 年

田村昌三編著:「産業現場の事故・トラブルをいかにして防止するか」,化学工業日報社,2017 年

田村昌三監訳:「ERG2016 版 緊急時応急措置指針」,日本規格協会,2018 年

田村昌三:「製造業における安全の確保・向上に向けて一経営トップの役割と現場力の強化—」,安全と健康 19 (1) 17-21,2018 年

田村昌三:「安全工学創立 60 周年記念事業「安全工学会 10 年のビジョン」について」,安全工学 57(2)93-100,2018 年

田村昌三:「産業安全の確保・向上に向けた産業安全の経済的効果と社会的評価の重要性」,月刊災害情報,2016 年 8 月

田村昌三:「製造業安全対策官民協議会の設立と活動について」,月刊災害情報,2017 年 8 月

若倉正英:「充実が進む ARIA の事故データベース」,月刊災害情報,2017 年 4 月

若倉正英:「自然災害に起因される化学災害」,月刊災害情報,2017 年 10 月

若倉正英:「2017 年の重大な工場火災と爆発を振り返る」,月刊災害情報,2017 年 12 月

若倉正英:「産業保安での AI 活用 1 背景」,月刊災害情報,2018 年 1 月

若倉正英:「高圧ガス保安協会事故データベースに見る廃棄物処理施設での事故」,月刊災害情報,2018 年 3 月

4.3 招待講演

田村昌三:「産業保安の向上に向けた事故情報の活用」,産総研関西センター2017 年 7 月 13 日(大阪)

田村昌三:「産業保安の向上に向けた事故情報の活用」,産総研臨海副都心センター2017 年 7 月 20 日(東京)

田村昌三:「これからの産業安全を考える一経営層の役割―」, 安全衛生トップセミナー2017 年 7 月 26 日(横浜)

田村昌三:「製造業における安全の確保・向上に向けて一経営トップの役割と現場力の強化―」, 全国産業安全衛生大会特別プログラム「製造業安全対策官民協議会特別セッション」2017 年 9 月 9 日 (神戸)

田村昌三:「製造業安全対策における官民協議会の動き一経営トップの役割と現場力の強化―」, (一社) 日本化学工業協会環境安全委員会 2018 年 2 月 9 日 (東京)

田村昌三:「製造業における安全の確保・向上に向けて」, (一社) 日本鉄鋼連盟平成 29 年度全国安全衛生大会 2018 年 3 月 9 日 (東京)

4.4 受賞・表彰

田村昌三:(特非) 安全工学会玉置功労賞受賞 (2017 年 5 月)

田村昌三:自治体消防制度 70 周年記念式典総務大臣感謝状受領 (2018 年 3 月 7 日)

4.5 学会および社会的活動

長谷見雄二:(公社)日本火災学会会長

長谷見雄二:総務省消防庁「埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会」委員

田村昌三:(特非)災害情報センター理事長

田村昌三:(公財)総合安全工学研究所理事長

田村昌三:(一財)化学物質評価研究機構評議員

田村昌三:日本保安円筒工業会相談役

田村昌三:(公社)日本煙火協会顧問

田村昌三:(一社)日本煙火芸術協会名誉会員

田村昌三:日本溶剤リサイクル工業会顧問

田村昌三:(一社)全国危険物安全協会評議員

若倉正英:特定非営利活動法人安全工学会保安力向上センター長

若倉正英:特定非営利活動法人災害情報センター理事

井田敦之:歴史的価値を有する大規模木造宿泊施設の安全性能確保特別調査委員会委員・防火小委員会

5. 研究活動の課題と展望

分野を限定した事故・災害を対象としたデータベースは各方面に存在するが、1986 年に各分野の専門家が集まり、事故・災害事例の分析・整理から始まった「災害情報データベース」は、幅広い分野の事故・災害事例を対象として継続的に収集・整理しており、2018 年 3 月現在、国内外でも有数のデータベースとなり、最大規模に成長している。大事故の背景には 300 の類似事故が隠れていると言われるが、事故・災害の傾向を探り、経験を生かした安全対策を策定するには、本データベースを分野横断的に分析することが有効である。そのために、今後も事故・災害事例の収集と分析を継続し、データを充実させていくとともに、社会のニーズに対して利用しやすく有効性を目指したデータベースのあり方について実践的な検討をすすめる。

水力ターボ機械システムの高性能化、高信頼性化研究

研究代表者 宮川 和芳

(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 1 研究課題

本研究での水力ターボ機械システムは、優良な再生可能エネルギー源である水力タービン、推進機として重要な役割を担うロケットターボポンプや船舶ジェットなどの推進機、生活インフラとして不可欠な上下水道用ポンプ、洪水対策用ポンプ、更には、将来のエネルギー源として重要な海流・潮流発電、水素エネルギーの輸送に使用されている。本研究では、それらの水力ターボ機械システムに関して流体力学、ロータダイナミクスを基礎とした要素研究、開発研究を実施し、性能、信頼性の改善を達成する。本年度は、流動解析（CFD）をベースとした最適設計による水力機械の性能向上と流体、構造連成問題に基づく信頼性向上の解明を主に実施した。

2. 主な研究成果

2.1 水力機械の内部流れの解明、最適設計による性能向上

水力機械の高性能化には、内部流れの解明に基づく設計コンセプトの構築が重要なテーマであり、また、内部流れの評価、設計ツールとして解析手法の高度化、詳細な実験による検証が不可欠である。本年度は、多くの水力タービンおよびポンプの高性能化に取り組み、成果を得た。

水力タービンの性能開発においては、電力会社の共同研究として中比速度フランシス水車の高性能化に取り組み、CFD を組み込んだ多目的最適化手法を用い、従来開発を実施してきた比速度 160m-kW 級シュラウドレス水車の高効率化を実施、模型試験装置による性能の検証を実施した。検証結果により、性能向上のアプローチ手法の妥当性が確認でき、他の水力機械設計への展開を図ることができた。図 1 に開発したシュラウドレス水力タービンの 2 種類の羽根車および CFD による羽根車内のキャビテーション領域の予測結果を示す。水力タービンに関しては、資源エネルギー庁の補助研究でも 300kW の実機設計を開始し、従来、羽根車出口ドラフトチューブ（ディフューザ）内での不安定流動により最低流量が約 50%の流量であったものを、全く違う型式の羽根車、出口ディフューザを考案することにより 30%の低流量からの運転を可能とするコンセプトを構築した。この低流量からの運転を可能にすることで、再生可能エネルギーの太陽光、風力などの不安定電源での出力を安定で即応性のある水力発電で補うことができるようになる。引き続き、低流量域での更なる不安定流動の抑制と効率改善を図る。水力タービンに関しては、電力会社の既設 10 プラントのタービンについて、CFD を用いて診断し、更に部分回収、全面改修による性能改善を定量的に予測した。本プロジェクトは、昨年度に引き続き 20 プラント目であり、更なる 10 プラントを引き続き検討する。メーカーからの依頼では、中比速度のフランシスタービンの高性能化に取り組み、2017 年 5 月に模型試験を実施し、設計の妥当性を確認した。他、プロペラタービン、フランシスタービンの高性能化もメーカーと一緒に取り組んでいる。

ポンプの性能開発は、多くの機種を手がけている。JAXA およびメーカーとは次世代のロケット

ターボポンプ羽根車の高性能化についての取り組みを実施し、圧縮性を考慮した水素解析までも含め高度な予測を駆使し、高性能羽根車の開発を実施した。図2に遠心ポンプ内での液体水素の圧縮性解析による静温分布、密度分布を示す。また、メーカーとの船舶推進用ポンプの開発を実施し、解析および大学での模型試験で効率アップを達成した。メーカーでの実機試験では大学での結果と乖離した結果となり、現在、その原因を解明中である。上下水道用のポンプでは、メーカーと斜流ポンプの開発を実施、低流量域での右上がり特性の改善を図ることができる形状を見出した。引き続き、模型試験により検証を実施していく。SIP(内閣府戦略的イノベーション創造プログラム)のエネルギーキャリアの研究では、レシプロ、ターボ型の液体水素ポンプの設計開発の検討を実施し、CFDにより実現性を確認した。

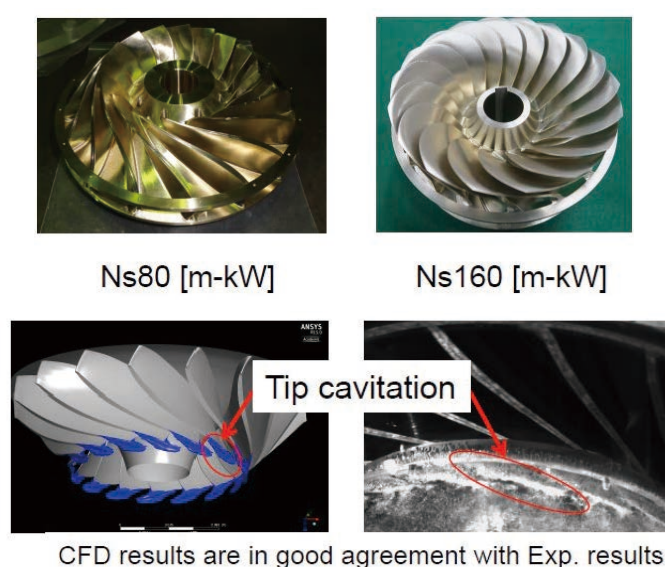


Fig. 1 水力タービン羽根車と内部流れ解析

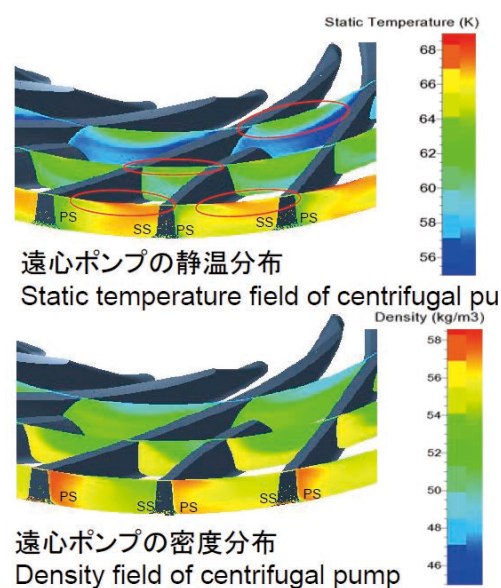


Fig.2 液体水素の圧縮性解析による遠心ポンプの内部流れ

2.2 水力機械での流体励振力の予測と評価、流体-構造干渉問題の解明

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究において、相反転プロペラ式での海洋、潮流タービンの開発を実施した。本プロジェクトではタービン、ロータの不安定、励振力の予測を担当した。課題となる翼列干渉、キャビテーションによる励振力に関して、キャビテーション水槽、翼列試験装置を用いて、その励振力の減衰特性を把握し、また、撥水、親水コーティングの効果についてキャビテーションの初生、生長の影響を明確にした他、LDV 計測による翼面近傍の速度分布を詳細に計測することに成功し、コーティングの差異による摩擦損失の差も明確にした。図3に親水、撥水コーティング翼に発生するキャビテーションの様子を示す。本タービンは、エネルギー密度の低い海流・潮流では大型化が必須であり、また、非金属材料の適用も検討されているため、自励振動であるフラッターの発生の可能性もある。本研究では、フラッターの発生メカニズムを明確にし、流動-構造の連成解析により失速フラッターの予測を実施、キャビテーション水槽中での発生の検証を実施し、予測技術の有用性を検証した。

メーカーとの上下水道ポンプの開発においては、紐や布などの異物の閉塞が問題となるが、要素、ポンプ実験およびCFDと個別粒子法（DEM）の連成解析を用いて、紐の閉塞メカニズムを明確に

し、また、異物通過のシミュレーションを可能とすることにより、ポンプの異物通過性の性能評価を可能とした。さらには布の異物通過シミュレーションを実施中である。

回転機械を支えるロータは各種軸受で支えられているが、ジャーナル軸受、ティルティングパッド軸受について、CFD を用いた静特性、動特性の評価を実施した。本課題では、ロータを半径方向に任意に振動させ、流体力の応答により特性の評価ができる磁気軸受試験装置を構築し、CFD により予測したジャーナル軸受特性の検証に用いた。軸受特性を考慮したロータ解析の応用例として前述の相反転タービンの信頼性を評価している。図 4 に潮流タービンのロータダイナミクス評価結果を示す。

ロケットターボポンプでは、ポンプ、タービンの軸方向推力の釣り合わせにバランスピストンという軸方向推力の自動調心機構を用いている。ポンプの作動条件により、軸方向の強制振動、自励振動を発生することがあるため、CFD により振動特性を評価し、空気モデルによる要素試験により検証を行った。さらには、上述の磁気軸受を用いて軸方向加振を行い、予測の検証を実施中である。

前述の水力タービンに関しては、羽根車下流ドラフトチューブ内での流動不安定が問題となるが、CFD のうち LES (Large Eddy Simulation) を用いた高精度解析による内部流れの解明とドラフトチューブの空気試験装置での PIV を用いた流れ場の把握により、そのメカニズムと CFD での予測誤差の解明を実施した。

Cavitation number σ : 1.04 angle of attack α : 14deg

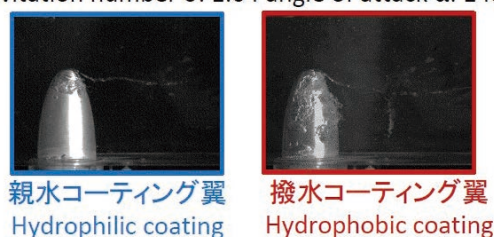


Fig.3 親水、撥水コーティング翼のキャビテーション発生状況

Transient response analysis

Eigenvalue analysis

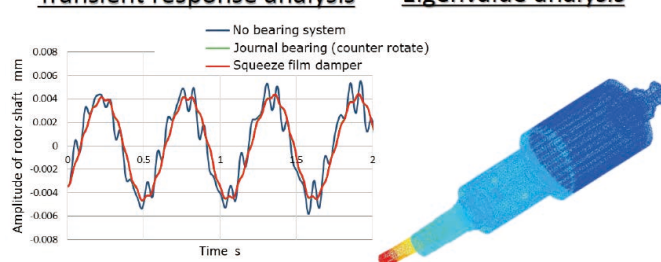


Fig.4 潮流タービンのロータダイナミクス解析

3. 共同研究者

川田 宏之 (基幹理工学部機械科学・航空学科・教授)
 細井 厚志 (基幹理工学部機械科学・航空学科・准教授)
 須賀 健雄 (先進理工学部応用化学学科・専任講師)
 平田 邦夫 (理工総研・客員上級研究員)
 斉藤 純夫 (理工総研・客員上級研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) T.Takamine,D.Furukawa,S.Watanabe,H.Watanabe,K.Miyagawa, Experimental analysis of diffuser rotating stall in a three-stage centrifugal pump, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 11, 1, p. 77-84(Jan. 2018).

- (2) T.Takamine,D.Furukawa,S.Watanabe,H.Watanabe,K.Miyagawa, Experimental investigation on diffuser rotating stall in a three-stage centrifugal pump, *Pumping Machinery. American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, Vol. 1A-2017(2017)

4.2 発表（国際）

- (1) Z.Liu, M.Shinji, K.Miyagawa、Internal flow and loss mechanism of specific speed 160 m-kW shroudless hydro turbine、*In the 1st symposium of Asian Working Group of IAHR Committee on Hydraulic Machinery and Systems (AWG-IAHR)*, Beijing, November 2017
- (2) H.Kanno, Y.Imasaka, S.Saito, K.Miyagawa, M.Nohmi, M.Isono, H.Uchida, M.Kawai, Behavior prediction of fibrous materials for clarifying clogging mechanism in waste water pumps, The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP), Japan (2017-12)
- (3) K.Onishi, K. Matsuda, K.Miyagawa, Influence of Hydrophilic and Hydrophobic Coating on Hydrofoil Performance, 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), 2017-12
- (4) K. Takenaka, T. Hayashi, K. Miyagawa, Application of CFD analysis for static and dynamic characteristics of hydrodynamic journal bearing, 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), 2017-12

4.3 発表（国内）

- (5) 今坂大和、金井裕明、菅野仁史、斉藤純夫、宮川和芳、能見基彦、磯野美帆、打田博、川井政人、無閉塞ポンプ閉塞メカニズム解明のための繊維状物質の挙動予測、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (6) 進士昌史・劉志豪・宮川和芳、比速度 160 m-kW シュラウドレス水車の内部流れおよび損失メカニズム、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (7) 吉村真美子、木村徳夫、宮川和芳、圧縮性を考慮した液体水素解析による遠心羽根車の内部流れに関する検討、ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (8) 氏家隆太郎、小牧秀太郎、宮川和芳、遠心形ディフューザポンプの動静翼列間距 離による性能と内部流れの変化、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (9) 古川大地、高峯大輝、渡 邊 聡、渡邊啓悦、宮川和芳、三段遠心ポンプにおける回転 - 静止系間隙間が軸スラストに及ぼす影響、第 77 回ターボ機械協会総会講演会、東京、2017 年 5 月
- (10) 湯川達人・進士昌史・惣中康太・宮川和芳、水車ドラフトチューブの内部流れの予測と評価、第 78 回ターボ機械協会富山講演会、2017 年 9 月
- (11) 市之瀬飛馬、木村徳夫、吉村真美子、林智之、宮川和芳、ディフューザポンプ内部流れの構造評価、第 78 回ターボ機械協会富山講演会、2017 年 9 月
- (12) 吉村真美子、木村徳夫、市之瀬飛馬、林智之、宮川和芳、遠心形ディフューザポンプにおけるディフューザ設計指針の検討、ターボ機械協会 第 78 回総会講演会、2017 年 9 月
- (13) 木村徳夫、吉村真美子、宮川和芳、遠心形ターボ機械における軸方向推力調整機構の動特性予測の高精度化、第 78 回ターボ機械協会富山講演会、2017 年 9 月

4.4 総説・著書

水力機械の流体関連振動（巻頭言）、電業社機械、第 41 巻第 2 号、通巻第 81 号、2017 年 1 月

4.5 招待講演

“Understanding of Unsteady Flow in Radial Turbomachines using Experimental and Computational Approaches”, The 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIF) , Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Okinawa, 2017-5

“Flow instability in the draft tube of a radial turbine under steady and pulsating flow conditions” , 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), 2017-12

4.6 受賞・表彰

5 件：ターボ機械協会若手優秀講演賞、中村揚平（D2）、進士昌史（M2）,今坂大和（M1）、氏家隆太郎（M1）,吉村真美子（M1）、ターボ機械協会総会講演会、2017 年 5 月、東京

Best Presentation Award, 隆志豪（M1）、the 1st AWG-IAHR's Symposium on Hydraulic Machinery and Systems、2017 年 11 月、北京

4.7 プレス発表

News Release、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、協和コンサルタンツ、アイム電機、前田建設、九州工業大学、早稲田大学、“双反転プロペラ式潮流圧電技術を開発（実海域での曳航試験で発電性能と安全性を検証）”、2017 年 11 月 17 日発表、http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100873.html

プレス発表、科学技術振興機構（JST）、産業技術総合研究所、岡山大学、東京都市大学、早稲田大学、“大型発電用、高出力・高熱効率・低 NO_x 水素エンジンの燃焼技術を開発）地球温暖化など大気環境保全への貢献も期待）”、“平成 30 年 5 月 18 日、<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20180518-2/index.html>

4.8 理工総研主催行事

理工総研第三種行事：イブニングセミナー「圧縮機・タービンの性能と内部流れ、日時：平成 29 年 10 月 19 日～12 月 14 日（12 回）、早稲田大学西早稲田キャンパス

4.9 学会および社会的活動

国際会議組織委員、17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery(ISROMAC), USA, 2017-12

“水車・ポンプ水車の基礎知識”、ターボ機械協会第 131 回セミナー、水車、2017 年 4 月

“ターボ機械非定常内部流れの計測と開発への応用”、流体工学部門企画 EFD ワークショップ：EFD と CFD の得手不得手－EFD の立場から、日本機械学会年次大会、埼玉、2017 年 9 月
ターボ機械協会特別理事

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、社会インフラにとって重要でありニーズの多い水力ターボ機械の性能、信頼性向上を、国家プロジェクトや会社との共同研究により、解析、実験の要素技術をベースに実際の設計開発に役立てることができる最適設計技術に展開し、新しいコンセプトの設計手法を構築、従来の機械システムの性能、信頼性向上を図ることを引き続き目的とする。次年度は、詳細な実験技術に基づく解析手法の高度化、新しい設計コンセプトに基づく水力機械の性能向上に注力する。

次世代宇宙構造物開発に関する研究

研究代表者 宮下 朋之
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

宇宙構造物は、宇宙空間での活動を支える基盤として必要不可欠なものである。より軽量で大型な構造物が、宇宙空間での無重力・放射線暴露・太陽輻射環境を考慮して開発する必要がある。大型な宇宙構造物は、太陽光からの発電量を増大させることが可能となることが見込まれ、また、伝送波を効率よく受信できるため、電波観測や情報通信への高効率化を実現するためにも必要となる。宇宙空間へ構造物を輸送するためには、ロケットなどの推進機構が必要となる。一般には、搭載容積の制限を制約条件として、収納・展開機能が構造物には求められる。このような状況より、将来において以下の特性を備える構造物の開発が必要と考えられる。

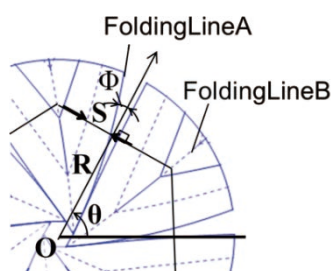
- (1) 要求領域に効率を高く収納可能であること
- (2) 伸展・展開が精度を高く動作可能であること
- (3) 組立・分解を容易とすること
- (4) 民生品部品を活用した人工衛星・探査装置・探査機のダウンサイジング

これらのため、しわや折り目が平面・鏡面精度に影響が少ない折り畳み方法、摺動要素の管理技術や構造様式の多様性の管理した設計技法が必要であり、民生品による費用逓減・打ち上げ機会を活用した費用便益の高い各種の実証研究の実施が必要である。

2. 主な研究成果

(1) 膜面の収納技術

円筒領域へ膜面（曲面）を折り畳み収納し、さらに、しわの発生源である膜厚の影響を考慮した折り目の算出方法を考案した。図1は折り目を示しており、山・谷折りに従って機械構造物の基本形状の一つである円筒形状に折りたたむことが可能である。膜厚を考慮することが可能であり、しわの発生が低減できることに加え、膜面状の敷設構造物が存在する状況において、円筒形状に収納することが可能である。



$$\tan \phi = \frac{R d\theta}{dR}$$

$$\frac{dS}{d\theta} = -S \tan \phi + \frac{db}{\cos \phi d\theta}$$

$$\frac{\pi r dr}{(kR - NR \tan \gamma) dR} = \frac{t}{S \cos \phi}$$

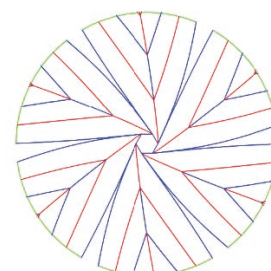




図1 折り目支配方程式の定式化と算出した折り目

折り畳みが可能となることにより、地上応用として、腹腔鏡を使用して、膜面状の医療材料を体内に容易に輸送し、展開することにより、付着対象物へ、短時間に貼付することが可能である。また、自動車用エアバックの円筒形状への収納も可能である。

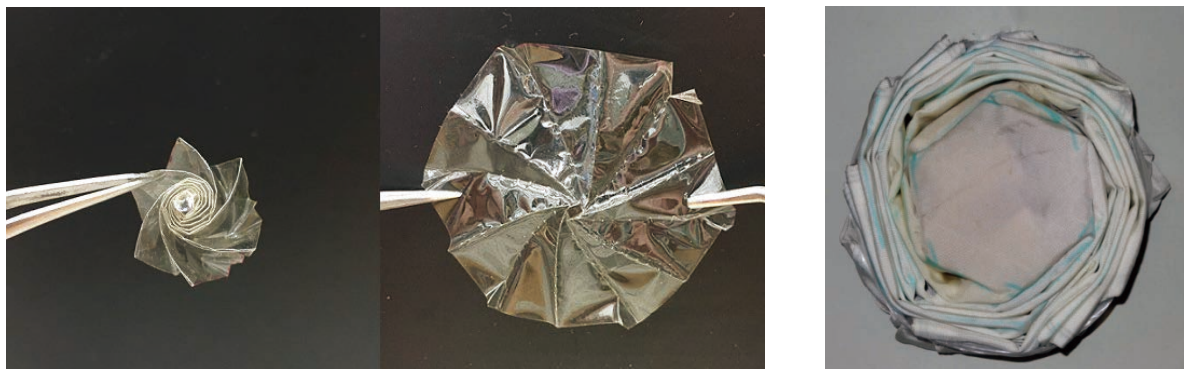


図2 らせん折り絆創膏（左）と自動車用エアバック（右）

(2) 収納架台の伸展技術

収納を可能とするために、一定の隙間を機械要素間に定義することが必要である一方、摺動面には、摩擦が生じ、摩擦特性に応じた挙動が構造物に現れる。隙間が存在することにより力学的安定点は、寸法に対して広く存在する。このため、いくつかの摩擦特性に応じた構造形状の挙動の影響を調査した。架台には宇宙空間における太陽光の輻射熱の影響を考慮した。架台の摺動部のすべてに摩擦特性を定義し、実験値と比較した。実験では温度依存性が観測されたが、摩擦モデルを使用した解析結果において、特定の摩擦モデルにおいて整合性が認められることが明らかになった。

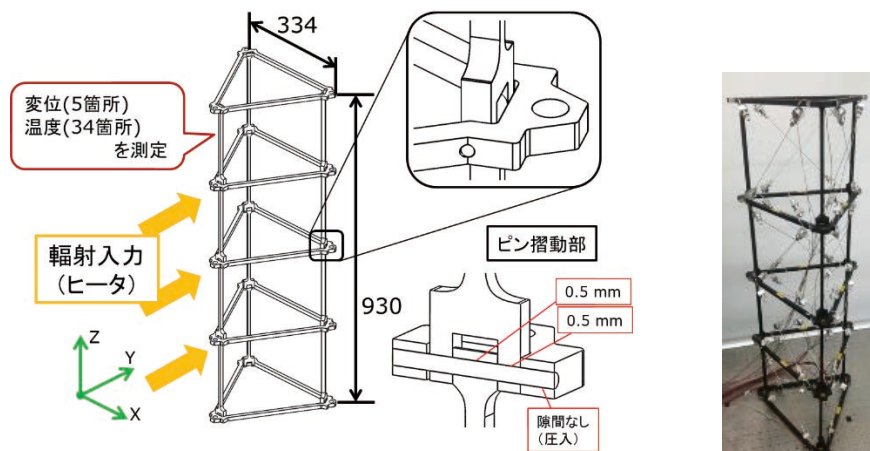
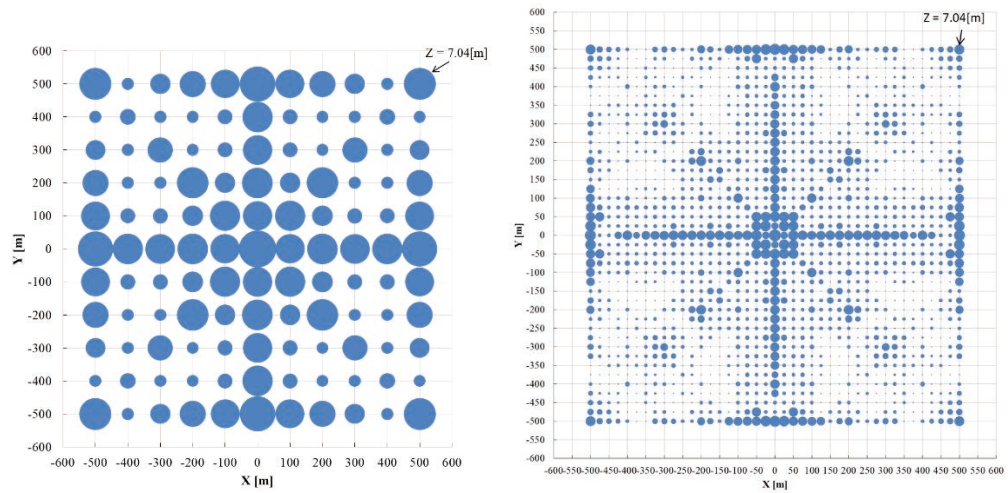


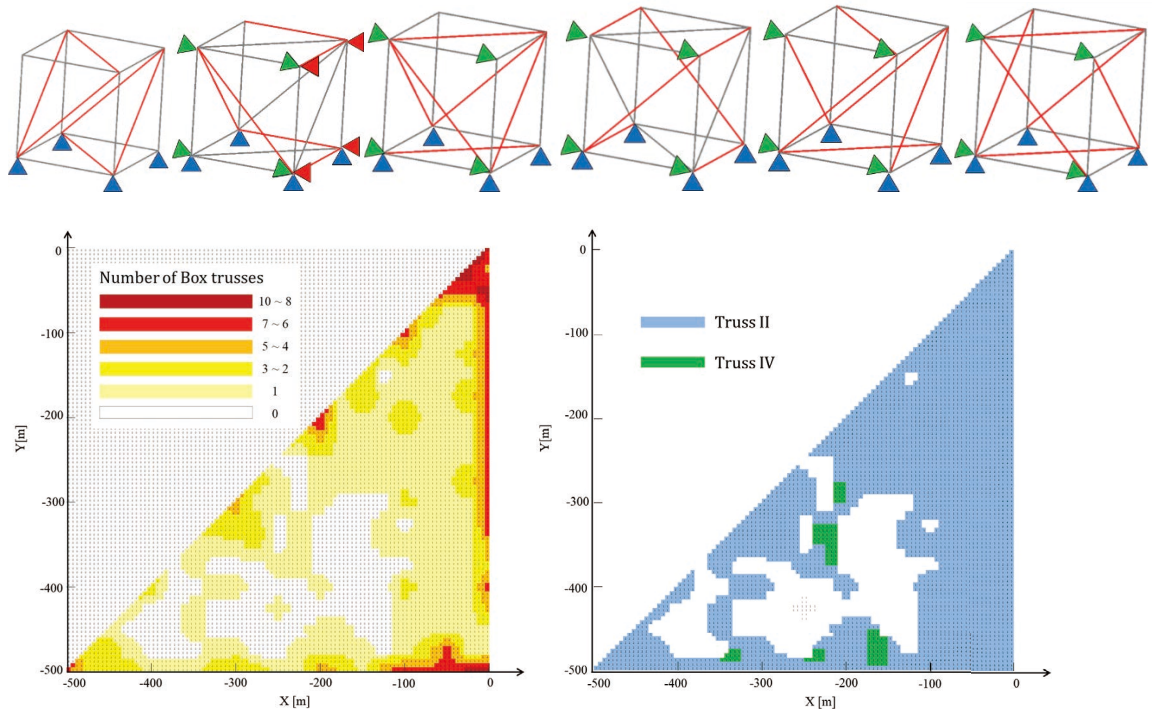
図3 伸展架台の摺動特性解析・実験

(3) 組立・分解性を考慮した宇宙構造物設計

大型構造物の輸送・展開・組立を一定の剛性を確保する条件下で実現するための設計技法を検証した。モジュールの概念を構造寸法より定義し、いくつかの次元を相違する段階を経て設計する技法を提案した。宇宙太陽光発電システム（SSPS）などでの利用を想定した活動である。



(a) 600m 領域での質量・剛性制約下での剛性配分



(b) 収納可能トラス形状の一覧と構造への割り当て

図4 超大型平面宇宙構造物

(4) 次世代探査機的设计

民生部品の最大限の活用を前提に、Hayabusa-1, 2, Unisec-1, Hodoyoshi, Proxion の活動を

参考にし、科学ミッションの側面より、資源探査や放射性デブリの調査をミッションとした衛星設計を実施した。搭載素子の性能検証を進めた。

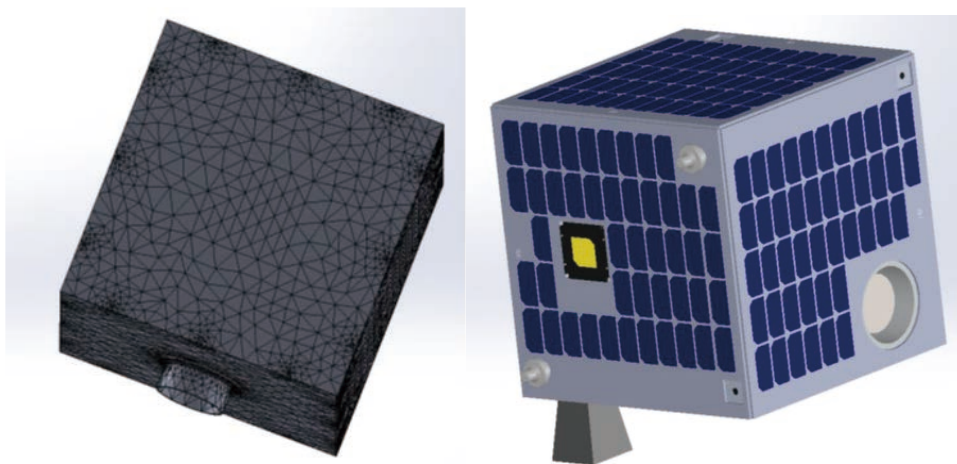


図5 Waseda-SAT X

(5) その他

他に以下のような研究テーマを実施しています。

- ① 平面アンテナの形状最適化と実験検証
- ② 分光計のダウンサイジング
- ③ デブリ除去技術の開発
- ④ リアクションホイールの利用技術

3. 共同研究者

嶋本薫
鳥居祥二
長谷部信行

4. 研究業績

4.1 学術論文

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表時期
Energy calibration of CALET onboard the International Space Station	Y. Asaoka, Y. Akaike, Y. Komiya, R. Miyata, S. Torii, et al.	Astroparticle Physics Vol. 91 pp.1-10	2017.3
An Investigation of Elemental Composition of Martian Satellites by Gamma-ray and Neutron Spectrometer	Nubyuki Hasebe, Tohru Ohta, Yoshiharu Amano, Masayuki Naito, Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, Kohei Yoshida, Takuto Adachi, Timothy J. Fagan, Haruyoshi Kuno, Eido Shibamura, Akira Hitachi, José A. Matias Lopes, Jesus Martínez-Frías, Tomoki	JPS. Conference Proc. 11, 040006	2016.11

	Nakamura, Shingo Kameda, Yuichiro Cho, Naoki Shirai, Hideaki Miyamoto, Takafumi Niihara, Takashi Mikouchi, Tatsuaki, Okada, and Yuzuru Karouji		
Current Development Status of an X-ray Generator for X-ray Fluorescence Analysis on Space Mission	Hiroki Kusano, Nobuyuki Hasebe, Hiroshi Nagaoka, Masayuki Naito, Miho Mizone, Yoshiharu Amano, Eido Shibamura, and Haruyoshi Kuno	JPS. Conference Proc. 11, 040005	2016.11
Instrumental Overview of an Active X-ray Spectrometer for Future Lunar Landing Mission	Hiroshi Nagaoka, Nobuyuki Hasebe, Hiroki Kusano, Yoshiharu Amano, Eido Shibamura, Toru Ohta, Timothy J. Fagan, Masayuki Naito, Haruyoshi Kuno, and José A. Matias Lopes	JPS. Conference Proc. 11, 040004	2016.11
Development of Gas Ionization Chambers with Coplanar Electrode for Alpha-ray Spectrometry	Kenta Iwasaki, Naomichi Tanaka, Kohei Murakami, Kusano Hiroki, Eido Shibamura, Nobuyuki Hasebe, and Mitsuhiro Miyajima	JPS. Conference Proc. 11, 010003	2016.11
Gamma-ray Emission from the Surface of Martian Satellites as a Function of Elemental Composition	Kouhei Yoshida, Masayuki Naito, Nobuyuki Hasebe, Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, Junya Ishii, and Daisuke Aoki	JPS. Conference Proc. 11, 040007	2016.11
Neutron Fluxes from Martian Satellites as a Function of Chemical Composition and Hydrogen Content	Masayuki Naito, Nobuyuki Hasebe, Kouhei Yoshida, Junya Ishii, Daisuke Aoki, Hiroshi Nagaoka, Hiroki Kusano, and Eido Shibamura	JPS. Conference Proc. 11, 050003	2016.11
A study on the design of deployable cable-panel structure	Seino, K., Parque, V., Miyashita, T.	2017 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, 2017	2017.1
Expansion and measurement of spiral folded membrane by small satellite	Miyashita, T., Yamakawa, H., Katsumata, N., Natori, M.C.	2017 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, 2017	2017.1
Missions of Small Satellite with Deployable Membrane Using Spiral Folding Lines	Tomoyuki MIYASHITA, Nobuhisa KATSUMATA, Hiroshi YAMAKAWA, Michihiro NATORI	International Symposium on Solar Sailing	2017.1
A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement	3. M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, J. Ishii, D. Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías	Proc. SPIE 10392 (2017) 103929C. DOI: 10.1117/12.2273735	2017
Improved pyroelectric X-ray generator for planetary active	M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, Y. Oshima, M.	Proc. SPIE 10392 (2017) 1039215.	2017

X-ray spectroscopy	Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frias	DOI: 10.1117/12.2273773	
Iron distribution of the Moon observed by the Kaguya gamma-ray spectrometer: Geological implications for the South Pole-Aitken basin, the Orientale basin, and the Tycho crater	M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, E. Shibamura, M. ohtake, K.J. Kim, C. Wöhler, A.A. Berezhnoy	Icarus 310 (2018) 21-31. DOI: 10.1016/j.icarus	2017.12
A Unique Power Control Algorithm using Game Theory in Dense Networks	ゴスワミ メガリー , カン カン , パン ジェニー , 嶋本 薫	電子情報通信学会 信学技報 117(456)	2018-02
Dynamic Power Allocation in Parallel Interference Cancellation based NOMA Receiver	ダバリ ビカス , エルナワン モハメド エリック , パン ジェニー , 劉 江 , 嶋本 薫	電子情報通信学会 信学技報 117(456)	2018-02
Game-Theory-Based Distributed Power Splitting for Future Wireless Powered MTC Networks	Kang, K., Ye, R., Pan, Z., Liu, J., Shimamoto, S.	IEEE Access, Volume 5, 23 September 2017, Article number 8049261, Pages 20124-20134	2017-09
Development of X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science	H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K.J. Kim	Transaction of JSASS, Aerospace Technology	2018

4.2 招待講演

発表した場所	発表者氏名	発表した時期
西安電子科技大学	宮下朋之	2018-03

4.3 学会および社会的活動

発表した成果	発表者氏名	発表場所	発表時期
Fairness-aware hybrid resource allocation with cross-carrier scheduling for LTE-U system	Dong, Y., Pan, Z., Kang, K., Liu, J., Shimamoto, S., Wicaksono, R.P., Kunishige, S., Chang, K	IEEE 4th iCatse Conference on Mobile and Wireless Technology	2017-06
Novel UE RF condition estimation algorithm by integrating machine learning	Dong, Y., Pan, Z., Ernawan, M.E., Liu, J., Shimamoto, S., Wicaksono, R.P., Kunishige, S., Chang, K.	IEEE 4th iCatse Conference on Mobile and Wireless Technology	2017-06
Numerical Estimation of	M. Naito, J. Ishii, D. Aoki, H.	31st ISTS, Ehime,	2017-06

Gamma-ray Spectroscopy for Deep Space Microsatellite” 31st I	Nagaoka, E. Shibamura, N. Hasebe	Japan	
A game theory based power control algorithm for future MTC NOMA networks	Kang, K., Pan, Z., Liu, J., Shimamoto, S.	IEEE 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2017	2017-07
Partnership and data forwarding model for data acquisition in UAV-aided sensor networks	Say, S., Inata, H., Ernawan, M.E., Pan, Z., Liu, J., Shimamoto, S.	IEEE 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2017	2017-07
伸展式架台の軌道上におけるサーマルスナップの低減に関する研究	浅沼典宏, 宮下朋之	日本航空宇宙学会 第59回構造強度に関する講演会	2017-08
A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement	Naito, M.a, Hasebe, N., Nagaoka, H., Ishii, J.a, Aoki, D., Shibamura, E.b, Kim, K.J., Matias-Lopes, J.A., Martínez-Frías, J.	Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering	2017-08
Improved pyroelectric x-ray generator for planetary active x-ray spectroscopy	Naito, M, Hasebe, N, Nagaoka, H, Oshima, Y, Mizone, M, Shibamura, E, Kuno, H, Kim, K.J, Matias-Lopes, J.A, Martínez-Frías, J.	Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering	2017-08
A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement	M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, J. Ishii, D. Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías	SPIE Optics + Photonics 2017, San Diego, USA	2017-08
Waseda SAT-X: --- Miniaturized Deep Space Probe ---	T. Miyashita, N. Hasebe, S. Torii, S. Shimamoto, T. Ohta, T. J. Fagan, H. Nagaoka, M. Naito, and Y. Sato	Committee on Space Research Symposium	2017-09
Thermal Snap on the Bench of a Telescope for Small Satellites	Asanuma N., Miyashita T.	Committee on Space Research Symposium	2017-09
Improved pyroelectric X-ray generator for planetary active X-ray spectroscopy	M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías	Committee on Space Research Symposium	2017-09
The Kaguya Gamma-ray	M. Naito, N. Hasebe, H.	SELENE	2017-09

Spectrometer (KGRS) products and their scientific overviews	Nagaoka, E. Shibamura	Symposium 2017, Tokyo, Japan,	
伸展マスト構造でのサーマルスナップ現象における摩擦特性の影響	清水慎之介, 浅沼典宏, 山川宏, 宮下朋之	第61回宇宙科学技術連合講演会	2017-10
周期的熱荷重による試験環境変動にロバストな熱変形試験法の成立性評価	宮崎, 石村康生, 佐藤, 宮下朋之	第33回宇宙構造・材料シンポジウム	2017-12
キネマチックカップリングにおける熱変形時の界面の滑りについて-温度変化の特性に対する依存性の評価	浅沼典宏, 石村康生, 佐藤, 宮下朋之	第33回宇宙構造・材料シンポジウム	2017-12
Improved Lunar Iron Map Obtained by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer	M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, E. Shibamura, M. Ohtake, K.J. Kim, C. Wöhler, A.A. Berezhnoy	New Views of the Moon 2, Aizuwakamatsu, Japan	2018-04

5. 研究活動の課題と展望

火星探査や惑星探査など次世代宇宙構造物開発では、機械を着実に稼働可能な状態で宇宙空間に提供することが求められる一方で、有人探査としての利用も望まれている。生命維持に直接的に必要とされる構造物となり、観測機器を含めた総合的な設計技法を着実に成熟させていく必要がある。今後の継続的な研究活動及び創造理工学研究科/惑星探査・衛星システム専修コースと連動した教育活動へ貢献し、宇宙政策・企業活動と積極的に連携していきます。

共感的な場の創出原理とそのコミュニケーション技術への応用

— 其の2 共創学の体系化 —

研究代表者 三輪 敬之
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

2011 年 3 月に起きた東日本大震災以降、モノの復興と並んで、人と人、人と自然との関係性の創出、すなわちコトの復興としての居場所づくりが急務とされている。そのため、申請者(三輪, 西)は、先のプロジェクト研究の 2 期から 3 期 (2011-2016 年)にかけて、被災地である石巻市や東松島市を月 1 回訪問し、共同研究者の西をファシリテータとした身体表現ワークショップ(WS)を継続して開催してきた。さらに、プロジェクト研究のなかで開発された、表現メディアシステムや表現インタフェースを現場に持ち込み、それらの有用性について検討してきた。この WS は、被災家族のみならず、重度の発達障害児(自閉症児ら)が数多く参加しており、多様で異質な人々の集まりからなることに大きな特徴がある。その結果、このような集まりに居場所が生成されるためには、異質な他者を受け入れる場を生み出し、場を耕していく技術が今後、必要かつ重要になることを実践的、実験的に確かむことができた。そこで本研究では、3 期にわたるプロジェクト研究で得られた知見を被災地や支援学校などの教育現場で検証するとことを目的とする。さらに、我が国で生まれた「共創」の知を拡げ、深めていくための拠点として共創学会を創設し、共創学の体系化を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 みんなの影メディアシステム

自身の身体と影との非分離性に着目し、形状や色を人工的に変化させた影画像を自身の影として呈示する影メディアシステムの開発をこれまで進めてきた。そして昨年 6 月に、宮城県立石巻支援学校において影メディアを用いた身体表現の授業を生徒 70 名に対して 3 回に分けて実施し、影メディア空間のなかで、重度の発達障害児が自発的に身体で表現しようとすることや、面識のない学生らとの間に共存在的なつながりが自ずと生まれてくることを見出した。また、本年 8 月には、府中市美術館にて一般体験展示を行い、300 名近くの多様な市民に新たに開発した影メディアシステムを自由に体験してもらった。その結果、実際の影(実影)とメディア影のあいだで追いかけてっこをしたり、体験者同士で影を創り合ったりするなど、影メディアには、その場で即興的に表現を次々と生み出す働きがあることを確認した。以上のような現場での実践的研究を通じて、影メディアには、年齢や性別、障害の有無などによらず、多様な身体表現の創出を促すと同時に、影で出会い、影でつながることによって他者とのコミュニケーションを拡げる働きがあることが分かった。

一方、このような影メディアシステムを家庭や教育現場に持ち込み、継続的に使用したいという要望が現場の教職員をはじめ多くの体験者から数多く寄せられた。しかし、現行システムでは、装置の設営が大規模であることやソフトの操作性の悪さなどから、一般ユーザーが自由に使用することは困難である。そこで本研究では、専門的な知識を持たない利用者でも容易に影メディアを体験できる「みんなの影メディアシステム」を設計、開発した(図 1)。すなわち、現行システムではメ

メディア作成に必要な身体情報の取得を行う Kinect v2 (Microsoft 社), メディアの処理を行う PC, メディアの投影を行うプロジェクタ, 及びスクリーンの設置がそれぞれ必要となるが, これらを本研究ではパッケージ化し, 設営を簡易化することにした。

また, 影メディアシステムでは呈示する影メディアの足の位置と体験者の足の位置を一致させるキャリブレーションが必要になる。しかし, 現行システムではアルゴリズムを理解せずにキャリブレーションを行うことは困難であるため, 自動でキャリブレーションを行う機能を考案, 開発して搭載した。これにより, 照度 0.82 [lx] の環境において, 処理時間 1518 [ms], 最大誤差 420 [mm] でのキャリブレーションの自動化を実現した。さらに, 石巻支援学校での身体表現授業の経験を活かし, 体験者らに影メディアに親しんでもらうための表現プログラムを作成した。加えて, GUI 上で利用者が事前に投影するメディアの種類と順序を登録することにより, 表現プログラムを容易に作成することを可能とした。

本システムを, 影メディアシステムを操作した経験がない人に使用してもらったところ, 「タッチパネルでの操作なのでスマートフォンアプリのようで簡単だった」, 「キャリブレーションが簡単なので一人でも使えそう」などのコメントを得た。以上により, 誰もが影メディアシステムをゲーム機や家電のように簡単に扱うことがはじめて可能になった。

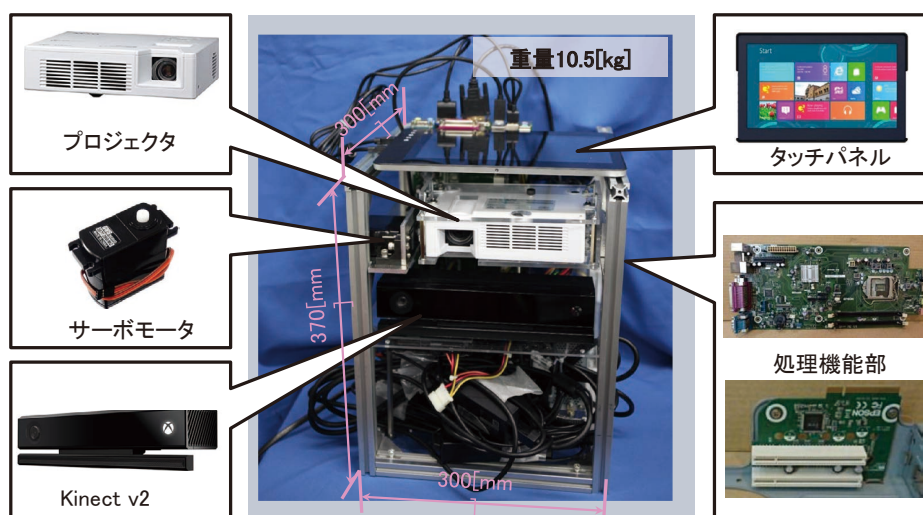


図1 「みんなの影メディア」装置の概要

装置中央に Kinect v2、装置背面に GPU やマザーボードなどの処理機能を設置。プロジェクタには, スクリーンから 3 [m] 離れた際, 100 インチで投影可能なものを選定。サーボモータにより投影角度の調節が可能。さらに, タッチパネルを搭載し, スマホ的な感覚での操作を実現。

2.2 共創学の体系化に向けて

西と三輪らがはじめた, 東日本大震被災地で被災した発達障害児・者をコアとした手合わせ表現ワークショップは, 参加者がこの 6 年間で累計 3000 人を超え, 2017 年 4 月には, 現地の有志によって運営団体が組織化されるまでに成長し, 今では, 共創するアートのコミュニティ再生に向けた社会実装モデルになりつつある。このような現場での実践をふまえて, 互いの手のひらを触れ合わせて身体全体で即興的に表現を創りあっていく「手合わせ表現」を共創のミニマムモデルとして位置づけ, 異質な他者との出会いによる自己の深化と生命的な創造についてこれまで研究を行ってきた。そして本年度は, 図 2 に示すような, 手首の回転動作を組込んだ手合わせ表現計測システム

を新たに開発することにより，他者性を促す共創インタフェースの設計要件について研究を行った。

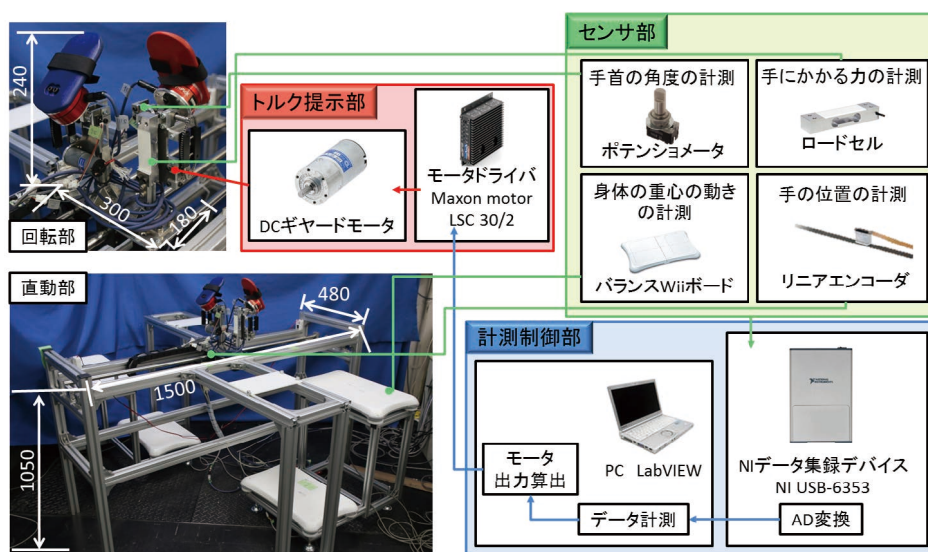


図2 手首動作を組み込んだ手合わせ表現システム

そんななか，共創をより広げ，深化させていくためには，新しい知としての共創学の創造が必要になるとの思いから，2017年4月に三輪，西，郡司らが中心となり「共創学会」を立ち上げた。そして，同年12月には第1回年次大会「スキマをつくる，スキマにはいる」を早稲田大学にて開催した。三輪と郡司はそこでそれぞれ基調講演を行い，三輪は，共創学の創造に向けては，実践家と理論家がつれあうような場(隙間)を生み出していくことが必要であり，そのためには，場を耕すファシリテーション技術が重要になることを示した。他方，郡司は，決定論・自由意志・局在性が成すトリレンマを，Dumettの議論から掘り起こし，その拡張によって3つの意識構造が得られることを示し，局所性を捨てることで，脳内の私と脳内他者の関係が，区別されながら表裏一体でもつれた存在様式(エンタングルメント)となることを示し，他者と私の共創が意味するものを数理的に解説した。また，西は，共同(collaboration)と共創(co-creation)の違いを実践的研究により明らかにした。

共同研究者

橋本周司 (先進理工学部・応用物理学科・教授) 郡司幸夫 (基幹理工学部・表現工学科・教授)
上杉 繁 (創造理工学部・総合機械工学科・教授) 西 洋子 (理工学研究所・客員上級研究員)

3. 研究業績

3.1 学術論文

- T. Takahashi, T.Soma, Y.Miwa, H. Nishi, Design of Hand Contact Improvisation Interface Supporting Co-creative Embodied Expression, Human-Computer Interaction International, Part I, LNCS 10273, pp.631-639. (2017)
- Y.P. Gunji, M. Minoura, K. Kojima, Y. Horry, Free will in Bayesian and inverse Bayesian inference-driven endo-consciousness, Progress in Biophysics and Molecular Biology, Vol.131, pp. 312-324. (2017)
- H. Murakami, Y.P. Gunji, Autonomous change of behavior for environmental context: An

intermittent search model with misunderstanding search pattern, Mathematical Methods in the Applied Sciences, Vol.40, Issue18, pp.7013-7021 (2017)

- T. Horiuchi, Y. Yamada, S. Wesugi, Development of a Tool that Increases / Reverses the User's Binocular Parallax with Optical Elements to Change the Feeling of Depth of a Physical Object, Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2017), pp.358-363. (2017) (Toshio Fukuda Best Paper Award in Mechatronics)
- J. Maeda, H. Shinohara, S. Wesugi, Development of Thin-type Rocking Device Mounted on Office Chair for Supporting Falling Asleep, Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2017), pp.1543-1548, (2017)
- T. Miwa, Y. Sakai and S. Hashimoto, Learning Four-dimensional Spatial Representations through Perceptual Experience with Hypercubes, IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, Vol.10, Issue 2, pp.250-266. (2017)
- T. Sasaki, G. Enriquez, T. Miwa, S. Hashimoto, Adaptive Path Planning for Cleaning Robots Considering Dust Distribution, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.30, No.1, pp.5-14. (2018)

3.2 基調講演・招待講演

- 三輪敬之, 西洋子, 共創に他者は必要かー実践と理論のあいだ(1)ー, 共創学会第1回年次大会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 2017.12. (基調講演)
- 郡司ペギオ幸夫, 中村恭子, 脳の中の曾長ーエンタングルメントとしての意識ー, 共創学会第1回年次大会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 2017.12. (基調講演)
- 上杉繁, 麻痺を体験するー損傷でしかなかった麻痺が新たな意味を開設ー, 共創学会第1回年次大会シンポジウム, 2017.12. (招待講演)
- 西洋子, 三輪敬之, 身体的共創から社会的共創へー宮城県石巻市での「てあわせ」ワークショップの5年間ー, 第27回日本呼吸ケア・リハビリテーション学会学術集会, 2017.11. (特別講演)
- Y. Miwa, H. Nish, Future of Co-creation Expression ~Guided by Hand-Contact Expression Interfaces, Festival della Scienza 2017, Parallzo della Borsa, Genoa, Italy, 2017.11. (Invited lecture)

3.3 展示発表

- 光る自分の影と遊ぼう！ー未来の洞穴（ほらあな）でー, 府中市美術館・市民ギャラリー, 2017.8.19-20.

3.4 学会および社会的活動

- 共創学会の設立（会長；三輪敬之，副会長；郡司幸夫，西洋子）
- 身体表現 WS の開催などによる定期的な被災地（石巻市，東松島市など）での復興支援活動

4. 研究活動の課題と展望

共創学の体系化に向けて，他者性や異質性，さらには外部との交流を促すファシリテーション表現などについて実践的，理論的，技術的に問いかけていくことが今後，必要になると考えている．

結合切断科学と革新的分子合成技術の開発

研究代表者 山口 潤一郎
(先進理工学部 応用化学科 教授)

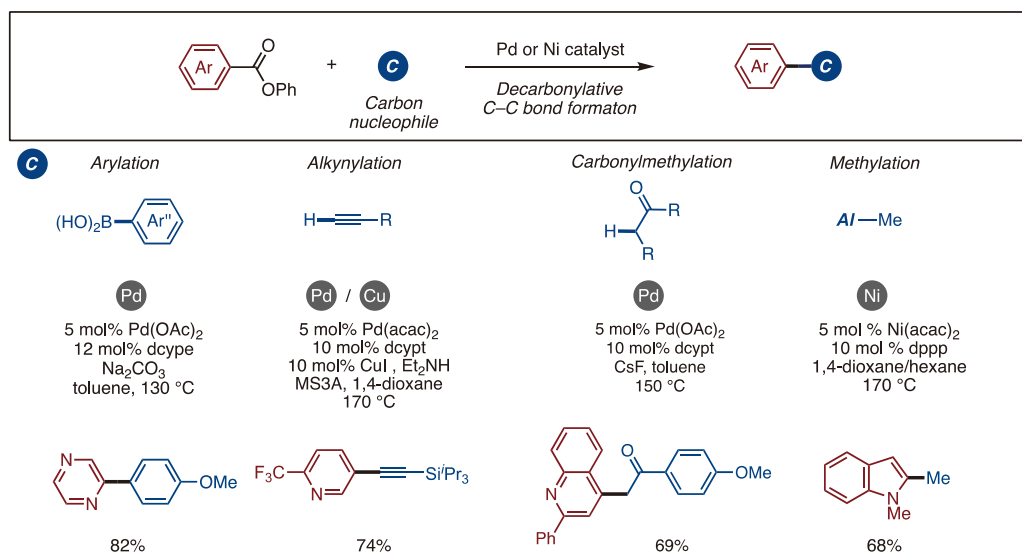
1. 研究課題

本研究は炭素-炭素結合切断反応を起点とする、触媒的カップリング反応・付加反応・酸化反応という革新的な有機合成反応およびそれを促進する新規触媒の開発を目的とする。今回は触媒的カップリング反応に焦点を当て、芳香族エステルの脱カルボニル型カップリング反応の開発に着手した。我々は、過去にニッケル触媒を用いた脱カルボニル型 C-H アリール化反応、アルケニル化反応、鈴木-宮浦カップリング反応の開発に成功している。本研究では芳香族エステルを求電子剤とした求核剤の探索および、それを促進する触媒検討を行い、新奇炭素-炭素結合形成反応・炭素-ヘテロ原子結合反応を開発した。

2. 主な研究成果

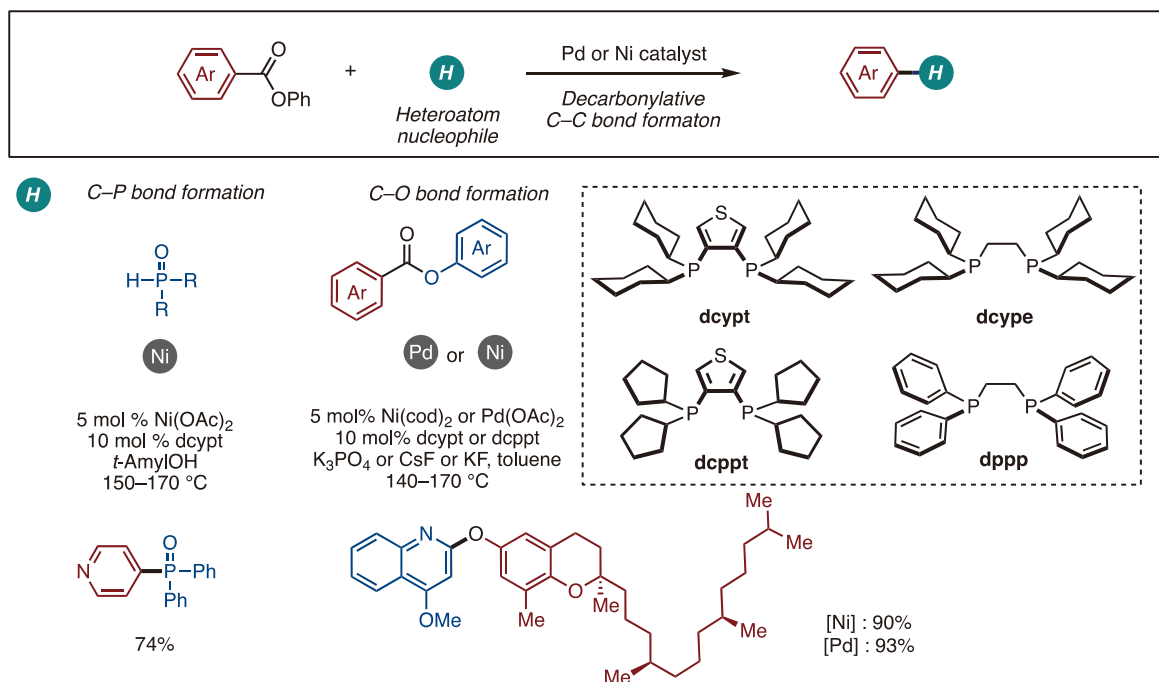
芳香族エステルを用いた炭素-炭素結合形成反応

Ni 触媒によるエステル鈴木-宮浦クロスカップリングでは 2-アジンカルボキシレートは反応が進行しないという基質制限があった。それに対して、Pd 触媒(Pd/dcype)を用いると各種アリールボロン酸との脱カルボニル型カップリング反応が進行した^{3a}。また、Pd/Cu 触媒による芳香族エステルの脱カルボニルを伴う末端アルキンとのアルキニル化反応を見出した^{3b}。独自に開発した dcyp 配位子が最も効果的である。さらに、ケトン求核剤として用いて、芳香族エステルをアリール化剤とした α -アリールカルボニル化合物合成法を開発した^{3c}。ごく最近 Me₂AlCl をアルキル化剤に用いて、Ni 触媒による芳香族エステルの脱カルボニル型アルキル化反応の開発に成功した。興味深いことにジアルキル塩化アルミが最も効率的なアルキル化剤として働く。



芳香族エステルを用いた炭素-炭素結合形成反応

Ni 触媒による芳香族エステルとリン求核剤との脱カルボニル型炭素-リン結合形成反応を開発した。リン求核剤はジアリールホスフィンオキシドやジアルキル亜リン酸が適用できる。さらに、Pd/Ni 触媒を用いたエステルからの脱カルボニル型エーテル合成を世界で初めて発見した。2-アジンカルボキシレート限定ではあるものの複雑な骨格を有する芳香族エステルにおいてもジアリールエーテルに導くことができる。



3. 共同研究者

武藤 慶 (先進理工学部・応用化学科・講師)

4. 研究業績

4.1 学術論文

Rh-Catalyzed Regiodivergent Hydrosilylation of Acyl aminocyclopropanes Controlled by Monophosphine Ligands, Kondo, H.; Itami, K.; Yamaguchi, J. *Chem Sci.* **2017**, *8*, 3799–3803.

Catalytic α -Arylation of Ketones with Heteroaromatic Esters, Isshiki, R.; Takise, R.; Itami, K.; Muto, K.; Yamaguchi, J. *Synlett* **2017**, *28*, 2599–2603.

Decarbonylative C-P Bond Formation using Aromatic Esters and Organophosphorus Compounds, Isshiki, R.; Muto, K.; Yamaguchi, J. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 1150–1153.

Decarbonylative Aryl Thioether Synthesis by Ni Catalysis, *Chem. Lett.* **2018**, *47*, 756–759.

4.2 総説・著書

Cross-coupling of Aromatic Esters and Amides, Takise, R.; Muto, K.; Yamaguchi, J. *Chem. Soc. Rev.* **2017**, *46*, 5864–5888.

Synthesis of Fully Arylated (Hetero) arenes by Coupling Reaction, Asako, T.; Muto, K.; Yamaguchi, J.

J. Synth. Org. Chem. Jpn. **2018**, 76, 98–110

4.3 招待講演

Synthesis of Fully Arylated Arenes, Acenes, and Benzoheteroles, J. Yamaguchi, ISPAC 2017, 2017.6.9 (Viet Nam), 国際学会, 基調講演

Decarbonylative transformation of aromatic esters and multi-arylation of arenes, J. Yamaguchi, Gordon Research Conference "Heterocyclic Compounds", 2017.6.19, Salve Regina University, Newport, RI, USA, (招待講演)

芳香族分子の新奇カップリング法・合成法の開発, 山口潤一郎, 2017.7.13, 岐阜薬科大学大学院講義、岐阜 (招待講演)

Making bonds by breaking bonds: An unconventional approach to making molecules, 山口潤一郎, 2017.12.9, 東日本スクrips会、東京 (招待講演)

結合切断に着目した合成反応の開発, 山口潤一郎, 2018.1.25, 大阪大学工学研究科, 大坂 (招待講演)

結合切断化学に基づいた分子合成研究, 山口潤一郎, 2018.3.16, 早稲田大学 理工学術院総合研究所・サイエンス・サロン談話会 (第45回), 東京 (招待講演)

Modular Synthesis of Multiarylated Aromatics, Junichiro Yamaguchi, 2018.3.22, 日本化学会第98春季年会 (2A6-49: Asian International Symposium), 日本大学船橋キャンパス 千葉 (招待講演)

ヘプタアリールインドールの網羅的合成法の開発, 山口潤一郎, 2018.3.23, 日本化学会第98春季年会 (4S9-06: CSJ カレントレビュー「天然物の全合成」講演会)、日本大学船橋キャンパス 千葉 (招待講演)

4.4 受賞・表彰 (MS 明朝体、11 ポイント)

2017 年 文部科学大臣若手科学者賞

2017 年 アジア化学連合 (FACS) ディスティンクティッシュ若手化学者賞

2017 年 科学技術への顕著な貢献 2017 (ナイスステップな研究者)

2018 年 日本化学会第42回化学教育賞

4.5 学会および社会的活動

日本化学会プログラム編集委員

有機合成化学協会事業委員

5. 研究活動の課題と展望

引き続き炭素-炭素結合切断反応を起点とする、触媒的カップリング反応・付加反応・酸化反応という革新的な有機合成反応およびそれを促進する新規触媒の開発を行う。

建設産業における BIM 技術の開発

建築工事における施工シミュレータ

研究代表者 嘉納成男
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

近年、BIM 導入の機運が高まっており、設計 BIM とともに施工 BIM を用いて建築工事を 3 次元的に検討しようとする動きが始まり、その中で 4D シミュレーションの重要性が指摘されている。

本研究では、建築工事の進捗状況を着工前にコンピュータ上で再現することによって、工事計画の問題点の把握やその改善策の立案に役立たせるとともに、工事計画の内容に対する関係者の情報共有と合意形成のツールとすることを目的としている。本年度は、研究プロジェクトの最終年度と位置付け、「施工シミュレータ」をめぐる方法論の確立、プロトタイプシステムの開発、更にはその開発課題を明らかにした。そして、これを書籍「建築工事における施工シミュレーション」(早稲田大学出版部)として出版した。

2. 主な研究成果

2.1. 施工シミュレータの必要事項

施工シミュレータは、工事現場における様々なオブジェクトの動きを正確に表現し、工事の進捗をできるだけ忠実に再現した上で、工期、コスト、品質にどのように影響を与えるかを調べる必要がある。

以上の要件を可能にするには、以下に示す事項を施工シミュレーションで実装する必要がある。

- (1) 施工モデル作成の容易性
- (2) 施工モデルにおけるさまざまな属性の変数としての取り扱い
- (3) 工事現場における動きを表すオブジェクト指向
- (4) ワークパッケージとしての最小作業単位の表現
- (5) 繰返し作業や複数班で行う作業の表現
- (6) 作業の進捗状況に対応した作業の開始・終了
- (7) 作業、資材、仮設資材、工事用機械の動きの表現
- (8) 作業期間や作業速度が作業対象に基づいて定まる仕組み
- (9) 工事現場の詳細な動きについては、アルゴリズム化してシミュレーション実施中にその計画を立案し実行する仕組み
- (10) 部材情報の 3 次元 CAD モデルとの連携

2.2. シミュレーションを動かす施工モデル

シミュレーションを動かすには、実世界をコンピュータ内に再現するモデルが必要になる。このモデルは、工事現場の状況を表すオブジェクト(要素)と、それらの要素がどのように関連し合い工程が進むかを表す要素間の関係で表現する。

施工シミュレータは、工事計画に基づいて着工前にコンピュータ上で工事の進捗を再現して、工事に関連する問題点や改善点を見出すことが目的である。このため、工事を実施する主体、すなわ

ち総合工事業が施工シミュレータを運用することが考えられる。

施工モデルを作成するために必要な情報は、工事着工前の工事計画が、その基盤となる。総合工事業が作成する工事計画では、階や工区単位の纏まり作業工程、採用する工法や作業方法、使用する工事用設備、スケジュールなどがある。しかし、施工シミュレーションを実施するには、工事全体を俯瞰したこれらの工事計画とともに、工事現場における作業方法の計画や、資材の運搬経路など、また日々、時々刻々と変化する仮置き場の状況など、微細な工事現場の動きを捉える必要がある。これらの作業に関連する計画は工事着工前には計画されていることは少なく、工事が進捗していく過程において総合工事業と専門工事業が協力して立案し、他の専門工事業と調整していくことになる。このため施工シミュレータには、このような詳細な作業内容については、システムが自律的に作業方法や手順を定めるアルゴリズムが必要になる。

2.3. 施工モデルの表現の仕組み

施工モデルは、複雑な工事現場の状況を簡潔に表現することを目指して、全体として矛盾が生じないように、さまざまな工夫を取り入れている。図1は、施工モデルの仕組みを概念的に示した図である。この仕組みは5つのモデル化の方法を用いており、それぞれが有機的に役割を果たすことによって、複雑な工事現場の状況を簡潔にモデルとして表現している。

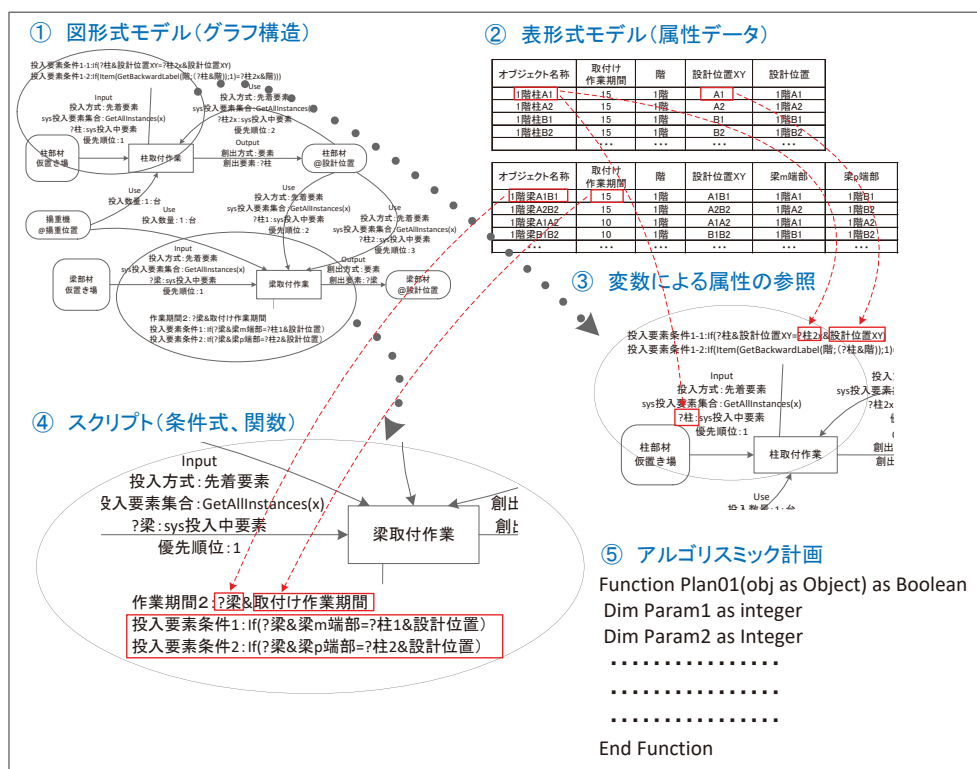


図 1 施工モデルを構成する 5 つの仕組み

① 図形式モデル(グラフ構造)による表現

工事現場に存在するさまざまな資材、仮設資材、工事用機械、また従事する作業者がどのような関連性を持って、工事が実施されているかを概念的に示している。グラフ構造で表現することによって、施工モデルを視覚的に分かり易くしている。図1では、柱梁の取付け作業の概要をグラフ構造を用いて表現している。

② 表形式モデル(属性データ)による表現

工事現場に存在するさまざまな資材、仮設資材、工事用機械、また従事する作業者の固有の内容(数量、存在位置など)を属性データとして表現することによって、資材や作業者の詳細な情報を施工モデルに組み込むことを可能にしている。図 1 では、個々の柱梁の属性(位置、取付け作業期間、など)として表形式モデルを用いて表現している。

③ 変数による属性の参照

表形式でモデル化された資材や作業者の詳細な属性データを、図形式モデルの中で参照することによって、施工モデルが工事現場を概略的に表現するとともに、工事現場の進捗状況を詳細に表現することを可能にしている。図 1 では、変数を用いて、表形式の属性データ(例えば、各部材毎に決まっている取付け作業期間)を用いて、図形式モデルの中で作業の作業期間に代入して、工事の進捗をより詳細に表現している。

④ スクリプト(条件式、関数)による表現

図形式モデルにおいて、作業の開始条件、投入資材の組み合わせ条件などをスクリプトとし表現し、また関数を用いて施工モデルのさまざまな情報を図形式モデルに取り込むことを可能にしている。複雑な作業の開始・終了の動きや工事用設備の動きをモデル化することができる。図 1 では、条件「梁の取付け作業を開始するには、梁の両端に位置する 2 本の柱が既に取付け済みであること」を、スクリプト、関数、変数を用いて、簡潔に表現している。

⑤ アルゴリズム計画(自律的計画)による表現

施工モデルの作成時点では、まだ決まっていない微細な計画(作業者の移動経路、仮置き場における資材の仮置き位置、部材の取付け順序など)について、施工モデルの中で自律的に適正な計画を立案して、その計画に従って自律的な施工シミュレーションを行うことを可能にする。図 1 では、施工シミュレーションの実施中に、システムが自律的にさまざまな作業計画(Plan01)を立案するアルゴリズムを VBA などプログラム化して施工モデルに組み込んでいる。

2.4. シミュレーション結果の出力

施工シミュレータを実行するには、工事現場の状況を時分割することによって、進捗状況をシステムの中で再現していく。システムの中で再現される将来の工事現場の状況を見るには、以下に示す 2 種類の方法がある。

(1) 施工 CG・アニメーション(3 次元、2 次元)

(2) 工程表

工事の進捗状況が最もわかりやすい方法は、施工 CG・アニメーションである。この方法では、工事現場で取付けられる部材について、部材の形状、取付け位置を 3 次元 CAD モデルで表現し、各時期についてのコマ落としの 3 次元画像を作成する(工事現場の部材の出来形の進捗など)。

3 次元表示はわかりやすいものの、その位置関係はほぼ水平方向から投影して見ているため、奥行きと寸法と左右の寸法との関係が感覚的にしか捉えられない難点がある。工事の内容を正確な位置と寸法で把握したい場合は、2 次元平面図を用いる方法がかえってわかりやすい場合(作業者の移動経路など)もある。

施工 CG・アニメーションによる工事進捗の把握は、将来の工事現場の状況や状況変化を目で見ることができるため、その内容を感覚的に捉えることができるが、進捗状況全体が絵として表現されるため、概略はわかるものの、具体的な情報(例えば、作業時間、使用資材名称、取付け時刻、作業員や工事設備の稼働率など)を施工 CG・アニメーションから得ることはできない。

具体的な情報を取り出す方法が工程表である。工程表の仕組みを以下に示す。

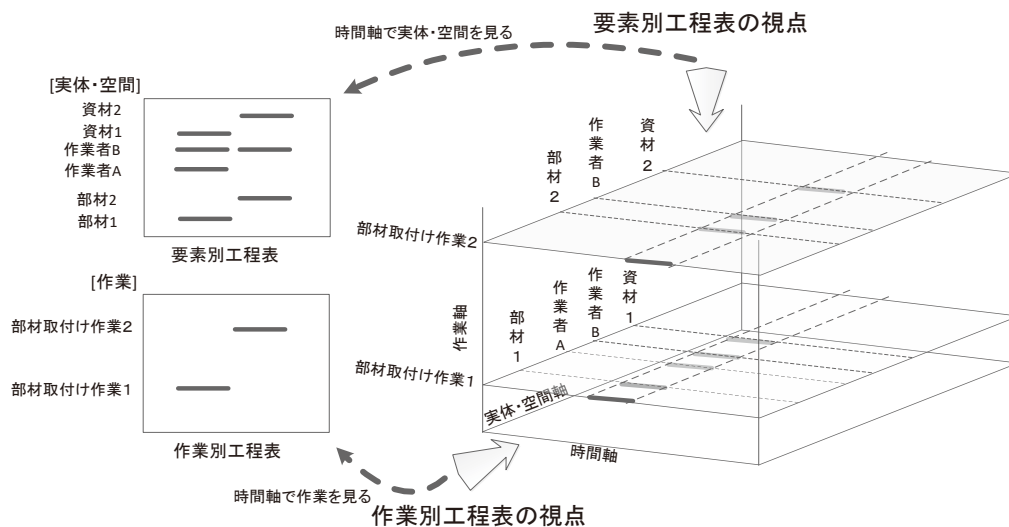


図 2 2 種類の工程表の相異の概念

施工モデルでは、作業、実体(作業者、資材、機材など)、空間、時間の 4 つの要素(オブジェクト)から構成されている。この要素を用いて図 2 に示すように、作業の軸、実体・空間の軸、時間の軸の 3 軸によって工事現場の動きを表すことができる。

図 2 では、3 軸の立体を横方向から見ると、横軸に時系列を取り縦軸に作業を取った工程表(作業別工程表)になる。また、同立体を上から下に見ると、横軸に時系列を取り縦軸に実体・空間を取った工程表(実体別工程表、空間別工程表)となる。作業別工程表は各作業がいつ開始していつ終了するかをより具体的に示しており、また、その枠の中には作業が対象とする実体や空間の名称を記載することができる。実体別工程表(または空間別工程表)は、各作業や資材が時系列的にどのような作業と関わっているかを明確に示すのに役立つ。このとき工程表の枠の中には、作業や資材が関わっている作業名称を記載することも可能である。

3. 研究業績

3.1. 学術論文

- (1) 嘉納成男:作業の活動を中心とした施工モデルの表現方法、施工シミュレーションモデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.736、pp.1569-1579、2017 年 6 月
- (2) 嘉納成男:物流を中心とした施工モデルの表現方法、施工シミュレーションモデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.742、pp.3205-3215、2017 年 12 月
- (3) 嘉納成男:纏まり作業工程における作業者の配分計画、混合整数計画法を用いた最適化の方法、日本建築学会計画系論文集、No.745、pp.493-503、2018 年 3 月
- (4) 嘉納成男:作業者の動きを中心とした施工モデルの表現方法、施工シミュレーションモデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.749、pp.1305-1315、2018 年 7 月

3.2. 著書

嘉納成男：建築工事における施工シミュレータ、早稲田大学出版部、2018 年 3 月 30 日

人間特性計測に関する研究

研究代表者 菅野 重樹
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

本研究では人間特性計測システムを用いて、人の動作状態の計測や人の動作意図を反映する生体指標の解析をすることにより、人の機能を補填し、人が自由に操作可能なロボット技術の開発を目指す。本研究室では人間特性計測について、「電動義手制御のための手関節角度推定」の研究があり、本年度の研究成果を次節より報告する。本項では、その研究の社会背景、特徴、及び課題点を下記に述べる。

上肢切断者の生活支援を目的に、アクチュエータを搭載した電動義手が研究開発されている。2013 年の調査では、身体に障害を有する人が 393 万人おり、そのうち四肢の一部を自由に動かすことができない肢体不自由の人が 176 万人、事故や病気で上肢の一部を欠損している上肢切断者は約一万人いる。電動義手は、ハードウェアとしての機能性やソフトウェアとしての操作性を持ち、将来的に上肢切断者の切断肢を代替する可能性を有する。現在市販されている電動義手は、手部を開閉するだけの低自由度のものから手首や指の関節の動作が可能な多自由度のものが実現されている。しかし、市販されている義手の多自由度化が進む一方で、各関節自由度の角度を意図どおりに操作する技術は搭載されていない。したがって、切断者が意図どおりに関節の角度を操作可能な電動義手を開発するために、生体信号から筋活動状態を推定することで動作意図を精確に抽出する技術が必要である。

人の身体から計測される生体信号から操作者の動作意図を抽出する技術は、大きく動作パターンを推定するものと、動作量を推定するものに分けられる。前者の動作パターンを推定する方法は、おもに動作に応じて変化する生体信号の特徴的なパターンを見つけ出すパターン識別手法である。パターン識別に使用される生体信号として最も多く使用されているものは筋電である。筋電は、人が動作を生成する際に筋に与えられる指令信号を、皮膚表面において電気信号として捉えるものである。複数の筋から発せられる電気信号を皮膚表面で計測するため、操作者が意図する各関節自由度の動作に対応する特徴量を抽出することによるパターン識別手法が研究されている。一方で、生体信号から意図する動作量を推定する手法として、筋電だけでなくさまざまな生体信号が使用されている。まず、筋電を利用した関節動作量推定手法として、筋骨格モデルを使用した動力学計算などを用いる研究がなされている。また、体内の筋の変形量を捉えるために、超音波を使用する研究やひずみゲージ等を利用した皮膚表面形状の変化に着目した研究がある。しかし、筋電や超音波を利用する方法はセンサと皮膚の位置関係の変化により計測値が大きく変化し、誤差が増大されてしまう。皮膚表面形状の変化では、操作者の意図した動作に対応した筋の収縮を捉えることが難しい。切断者が意図どおりに関節角度を操作するためには、意図した動作に直接的に対応する生体信号を使用したうえで高精度な角度推定を実現することが必要である。そこで、筋収縮状態に基づく筋形状の変化による皮膚表面の隆起位置が意図する関節角度に直接対応すると仮説を立てた。

2. 主な研究成果

手関節角度推定における筋隆起位置の有用性検証として、非切断者 5 名において手関節屈伸動作時の関節角度に対する筋隆起位置の信号特性を明らかにし、手関節角度の推定を行った。

2.1 計測装置

図 1 に実験装置の構成を示す。手関節角度の計測にはゴニオメータ (SG 150, Biometrics Ltd., Newport, UK) を使用し、8 ch アナログ出力アンプ (K800, Biometrics Ltd., Newport, UK) を経由し、筋隆起計測デバイスとともにマイクロコントローラ ArduinoUNO (ARDUINO, Ivrea, Italy) に接続した。ゴニオメータの計測誤差は ± 2 [°], 中継用アナログ入出力アンプの分解能は 13 [bit], 計測精度が 0.5% 以上である。筋隆起計測デバイスに搭載される 12 個の距離センサの値は Arduino にアナログ入力されており、ゴニオメータも同様にアナログ入力することで、手関節角度と筋隆起位置の同時計測を行った。Arduino の分解能は 10 [bit] であり、サンプリング周期は 50 [ms] とした。

2.2 実験手法

被験者は前腕を前腕用手台と手首用金属棒の上に置き、ペットボトルを把持した状態で手関節を屈曲・伸展する動作を行う。被験者ごとの前腕長に応じ、手首用金属棒を x 軸ステージにより調節した。前腕を設置する位置は、計測対象筋の収縮によるセンサ-皮膚間の距離変化を阻害しないよう、短橈側手根伸筋の起始である上腕骨外側上顆を前腕用手台の最前部に設置し、さらに手首部で突起をもつ尺骨茎状突起が手首用金属棒に一致するよう指示した。指示動作は水平位置を 0 [°] とし 60 [°] まで手関節を伸展し、そのあとに 0 [°] まで屈曲する動作とし、80 [bpm] のメトロノームに合わせ等速で行うよう指示した。メトロノームによって角度を調整する速度を規定することで、手関節屈曲動作時において、脱力により重力のみを使用した非随意的な運動ではなく、随意的に角度を調整する運動とした。ここで、60 [°] とは手関節の最大伸展角度である。この動作を 1 回とし、5 回屈伸するタスクを試行とし、各被験者 2 試行ずつ行った。さらに、手関節にかかる負荷を変化させるため、片手のみで把持する物体として 500 [ml] ペットボトルを選定した。ペットボトルの重さの設定は容器の重さをのぞき、空の状態を 0 [g] とし、すべて満たした 500 [g] を含め、0, 200, 400, 500 [g] と変化させた。ペットボトルの重さによる筋への疲労の影響を排除するため、各試行におけるペットボトルの重さの条件を、試行目は軽い条件から重い条件の順番で行い、一度前腕を計測装置から外し、5 分間の休憩のあと、2 試行目は重い条件から軽い条件となるよう設定し、全 8 試行とした。

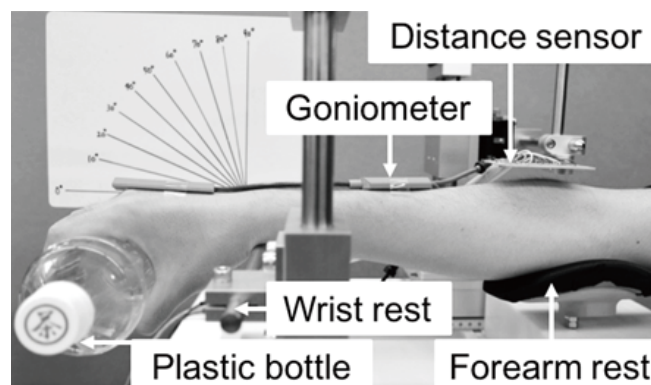


図 1 実験装置の構成

2.3 解析手法

計測した各条件における手関節角度と筋隆起位置の値を用いて信号特性を明らかにするための解析手順を以下に示す. 12 個の距離センサの値から得た筋隆起位置を, 試行ごとに正規化した. 被験者ごとの全試行における筋隆起位置の最大値 X_{Cmax} [mm] を 100% と設定し, 最小値 X_{Cmin} [mm] を 0% として計算することで正規化筋隆起位置 $X_{CN}\%$ とした (図 2). つぎに正規化した X_{CN} の値と, 計測した手関節角度 θ_M の関係を示す関数を導出する. 筋隆起位置を手関節角度の推定に用いることの有用性を明らかにするため, 手関節角度の推定による誤差を算出する. 筋隆起位置により手関節角度を導出する関数を用いて推定した手関節角度 θ_E と, 計測した角度 θ_M との二乗平均平方根誤差 (以下, RMSE) を算出した.

2.4 実験結果

5 名の被験者のうち, 近似式の決定係数が最も大きくなった被験者 D における結果を代表例として, 1 試行の手関節角度と正規化後の筋隆起位置をプロットしたものを図 3 に示す. また, 表 1~3 に, 各条件における手関節角度推定の RMSE と関節にかかる負荷の条件ごとの平均値を示す. これらすべての RMSE のなかで最も誤差が小さくなった試行は 2.57 ± 2.56 [°], 最も誤差が大きくなった試行は 31.9 ± 12.7 [°] であり, 全試行における平均の角度推定誤差は 8.05 [°] であった. 各試行における標準偏差の値は角度と推定角度の誤差のばらつきを表す. また, RMSE のうち収縮過程のみの平均値は 7.84 [°], 弛緩過程のみの平均値は 8.27 [°] となり, 収縮弛緩過程それぞれにおいて推定に使用する関数を区別したことによる特定の傾向は認められなかった. また, Fig. 9 に最も誤差が小さくなった試行の計測および推定した手関節角度の時系列変化を示す.

Table 4 は, 各被験者が行った同一の負荷条件の 2 試行のうち 1 つの試行を関数算出のための教師データに利用し, もう 1 つの試行をテストデータに用いて RMSE を算出した結果の条件ごとの平均値である. 各負荷条件において推定誤差に大きな違いは認められなかった. Table 5 と 6 は, 異なる負荷条件の試行から算出した関数を用いた際の RMSE を負荷条件ごとにまとめた結果である. つまり, 0 [g] の条件を教師データに用いた場合, 200, 400, 500 [g] の各条件の 2 試行ずつ計 6 試行をテストデータとして角度の推定を行った結果である. Table 5 は教師データが 0, 200 [g] の場合, Table 6 は教師データが 400, 500 [g] の場合の角度推定結果を示している. 結果として, 異なる負荷条件を用いて算出した関数を利用した角度推定においても, 負荷条件による違いはなく, RMSE の平均値は 7.00~9.00 [°] を得た. したがって, 関節にかかる負荷は筋隆起位置を用いた手関節角度の推定に影響を与えないことが分かった.

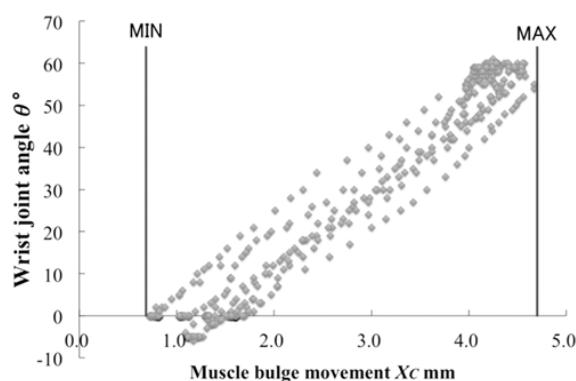


図2 筋隆起の正規化方法

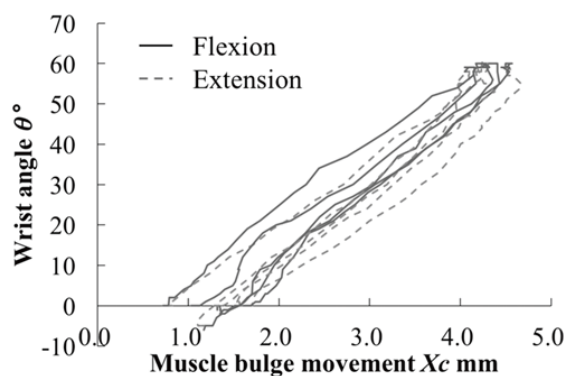


図3 筋隆起移動量と関節角度の関係

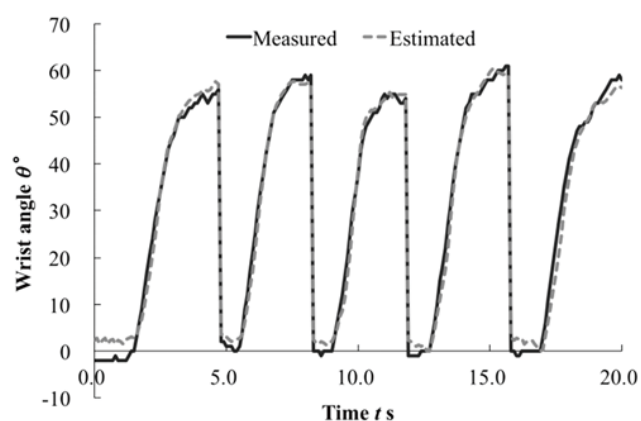


図4 推定した関節角度の時系列データ

表1 二乗平均平方根誤差の平均

RMSE	Load g			
	0	200	400	530
Extension	9.14	8.03	8.77	6.63
Flexion	9.94	6.41	10.2	7.84
Average	9.58	7.22	9.52	7.23

表2 各負荷における二乗平均平方根誤差 (0, 200)

RMSE	Load condition of teaching data g					
	0			200		
Test data g	200	400	530	0	400	530
Extension	8.27	10.3	7.24	7.03	7.44	6.97
Flexion	9.32	9.64	8.41	7.48	8.09	8.03
Average	8.86			7.51		

表3 各負荷における二乗平均平方根誤差 (400, 520)

RMSE	Load condition of teaching data g					
	400			530		
Test data g	0	200	530	0	200	400
Extension	8.95	7.91	6.93	7.33	8.29	7.44
Flexion	8.88	8.33	7.50	7.56	8.40	7.60
Average	8.08			7.77		

3. 研究業績

3.1 学術論文

- [1] 加藤陽, 松本侑也, 小林洋, 藤江正克, 菅野重樹, 電動義手制御に向けた前腕皮膚表面における長軸方向の筋隆起位置変化に基づく意図する手関節角度の推定, 看護理工学会誌, 5 巻, 1 号, pp. 12-21, 2017.
- [2] 三浦智, 鈴木智裕, 小林洋, 藤江正克, "タイピング支援装置の開発のための動作速度と筋疲労度の最適化問題", 日本機械学会論文集, Vol.83, No.850, 2017.
- [3] Yang Cao, Satoshi Miura, Quanquan Liu, Yo Kobayashi, Shigeki Sugano and Masakatsu G. Fujie, "Probabilistic neural network applied to eye tracking control to alter the direction of an endoscopic manipulator", Mechanical Engineering Journal, Vol.4, No.4, pp. 15, 2017.
- [4] Satoshi Miura, Junichi Takazawa, Yo Kobayashi, Masakatsu Fujie, "Accuracy to Detection Timing for Assisting Repetitive Facilitation Exercise System Using MRCP and SVM", Robotics and Biomimetics Journal, Vol.4, No.12, 2017.
- [5] Naomi Okamura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, "Evaluation of Multiple Muscles Hardness Change due to Static Stretching Using Wearable Indentation Testers: A Pilot Study," Proc. of IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS2017).
- [6] Naomi Okamura, Yo Kobayashi, Shigeki Sugano, Masakatsu G. Fujie, "Change Detection Technique for Muscle Tone during Static Stretching by Continuous Muscle Viscoelasticity Monitoring using Wearable Indentation Tester," Proc. of IEEE 15th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR2017), London, UK, July 17-20, pp. 1686-1691, 2017.
- [7] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, and Shigeki Sugano, "Timing of Intermittent Torque Control with Wire-driven Gait Training Robot Lifting Toe Trajectory for Trip Avoidance," Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2017), London, UK, July 17-20, 2017.
- [8] Satoshi Miura, Junichi Takazawa, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Motor Command Detection for a Repetitive Facilitation Exercise Assistance System", Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR'17), Okinawa, July 14-18, 2017.
- [9] Jing-Chen Hong, Yuta Fukushima, Shigeru Suzuki, Kazuhiro Yasuda, Hiroki Ohashi, Hiroyasu Iwata, "Estimation of Ankle Dorsiflexion Ankle during Loading Response Phase for Spring Coefficient Identification," Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2017 (ROBIO2017), Macau, China, Dec. 5-8 2017.

3.2 学会および社会的活動

- [10] Naomi Okamura, Massimiliano Zecca, Matthew T.G. Pain, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, "Muscle hardness measurement during stretching exercise: An easy way to sense relaxation of your muscle," The 1st ECSS Science Slam at the 22th Annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS2017).
- [11] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, and Shigeki Sugano, "Wire-Driven Gait Training Robot Assisting Both Hip and Knee Motion with One-DOF Intermittent Force

Control", IROS 2018 workshop on Adaptive Control Methods in Assistive Technologies, Sep. 28, 2017.

[12] Akira Kato, Masato Hirabayashi, Yuya Matsumoto, Yo kobayashi, Masakatsu G. Fujie and Shigeki Sugano, "Continuous Wrist Joint Control Muscle Deformation on Forearm Skin," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2017).

[13] 三宅 太文, 小林 洋, 菅野 重樹, 藤江 正克, "つまずき予防のためのワイヤ駆動型歩行訓練ロボットによる短期的トルク印加手法の構築", 第 56 回日本生体医工学会大会, 仙台, 2017 年.

[14] 杉原壮一郎, 三浦智, 宮下朋之, "痙縮の発症した片麻痺患者用の円筒型タイピング支援装置の開発", 生活生命支援工学系学会連合大会 (LIFE2017), お茶の水女子大学, Sep. 15-17, 2017.

[15] 岩木将一郎, 齋地健太, 安田和弘, 岩田浩康, "急性期片麻痺患者の下肢リハビリにおける随意機能の誘発を目的としたマスタスレーブ式両足協調デバイスの開発", 第 35 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ,17) Sep. 11-14, 2017.

4. 研究活動の課題と展望

本研究により, 筋収縮時の筋肉の機械的な変形を捉える皮膚表面上の筋隆起位置を用い, 精確かつ簡易的な関節角度推定を可能とした. 筋隆起位置は手関節角度に対する 1 次近似により 0.94 と高い決定係数を示したことから, 両者の関係は直線による近似が可能であることが分かった. さらに 1 次近似により得た関数を用いて手関節角度を推定した結果, 全体の手関節角度推定誤差は平均 $8.05 [^{\circ}]$ となり, 表面筋電位を用いる手法と同程度の推定誤差を得た. この結果を用いて, 今後は, 上肢切断者において, 関節角度を意図どおりに操作可能な電動義手を実現するために, 筋隆起位置に基づく手関節角度推定手法を用いた電動義手制御手法を検討する. そして, 介護支援を期待される装着型ロボットや, 看護分野における非侵襲治療のための身体計測技術に対しても本手法の適用を提案する.

首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上のためのデータ収集・整備と 被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用の検討

研究代表者 西谷 章
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

首都圏は今後数十年の間に巨大地震に遭遇すると予測されており、首都圏を中心としたレジリエンスの向上は喫緊の課題となっている。

東京都市圏の迅速な災害復旧・復興にあたっては、重要施設や密集市街地の住宅群を対象に、巨大地震下における速やかな被害推定（地震による損傷レベル・危険度の同定）や機能継続可否・機能損失度・崩壊余裕度判定（事業継続や災害対策拠点利用の可否判断）を可能とする技術が求められる。現代のセンシング技術を取り入れた構造ヘルスマニタリング・スキームの確立に向けて、「データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討」を実施する。

2. 主な研究成果

2017年度は、以下の①～④のテーマを中心に研究を実施した。

- ① これまで防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターの大型震動台（Eーディフェンス）において行われてきた実験結果を再処理し、種々のセンサ記録の再検証や安全性評価・崩壊余裕度評価に有効なデータ処理方法を検討する。
- ② 大都市圏の多くの高層建物にセンサが配置されたときの効率的な広域危険度判定のスキームを検証する。
- ③ 2018年度以降に実施されるEーディフェンス振動台実験に向けて、適切なセンシングデータ収集システムの検討、実験に適用するセンサの選定・購入・性能把握試験を行う。
- ④ 既設の地盤－建物系の計測データを利用して、地震応答評価精度の向上に向けた取り組みを進める。

順に、その成果を述べる。

<① Eーディフェンス実験データの整理・検証>

2005～2018年に実施されたEーディフェンス加振実験52件の公開データの整理を行った。52件のうち建物系の実験28件について、構造種別・階数・非構造部材の有無・試験体最終状態を確認し、全階に加速度センサ・変位センサが設置されていて、計測条件が確実に把握できる13試験体（S造4、RC造5、木造系4）の実験データを抽出し、健全性評価の検証に向けたデータの分析を行った。

安全度・崩壊余裕度に相関が深いのは、層間変位データである。理想は層間変位の直接計測であるが、現状のモニタリング実装では加速度センサがもっとも普及していること、限定層へのセンサ

設置が現実的であることを念頭において、(i) 限定層のデータからの全層加速度応答の推定、(ii) 積分計算による層間変位算出、という手順を想定して、限定層の加速度データからの全層層間変位データへの変換手法を検証した。

対象を鉄骨造に限定すれば、簡易なモデルによっても、層間変位データをもとに（直接計測あるいは加速度データからの算出による）損傷梁位置の推定が可能であることを、鉄骨 18 層建物 1/3 モデルの付加計測による層間変位データを用いて検証した。

<② 地震直後の広域的な危険度判定>

首都圏の多くの建物最上階への加速度センサ設置を前提とした、地震直後の広域的な危険度判定スキームを提案した。データが自動的に収集されるシステムがあれば、特別な計算を経ずに、固有周期（あるいは建物高さ情報から算出）と加速度応答最大値の組合せをプロットするだけで、地域別の（たとえば、23 区ごとの）簡易的な「加速度応答スペクトル」評価およびそれに基づいた応急的な広域危険度判定が可能となることを提示した。

<③ センシングシステムの検討・選定・購入・性能把握>

2018 年度以降予定されている E-ディフェンス実験に設置するセンシングシステムを検討し、センサの選定・購入・性能把握試験を行った。今後のモニタリング普及のカギとなる無線センサの設置も積極的に検討した。センサの性能把握を目的として、清水建設技術研究所の大型振動台上に「せん断型建物模型」を置き、購入したセンサ、購入予定のセンサを設置して加振実験を行った。サーボ型加速度センサによる計測結果を基準として比較した結果、同等の性能が期待できることを確認した。無線センサについては、相互の時刻同期性能に関する検証も行っている。Fig. 1 は振動台実験の様子（2017 年 12 月）である。



Fig. 1 センサ性能検証振動台実験（写真提供：清水建設）

また、早稲田大学で開発済みの層間変位センサの改良を試みている。センサ設置位置の相対傾斜角も同時に計測可能とするセンサを大学内で試作した。設置位置の傾斜角データが得られると、より精度よく層間変位を計測できる。この試作品の性能検証を継続して行い、必要な改良を加える。

<④ 地盤－建物系の地震観測記録の収集・整備と地震応答解析>

以前より、地盤と建物の観測記録を継続的に収集している三建物（自由学園、成蹊学園、豊洲小学校）の地震計データを利用して、解析技術の向上を目的に、地盤－建物連成系のモデル化を行った。2017 年度に計測されたデータをもとに、地盤－建物系の伝達関数を

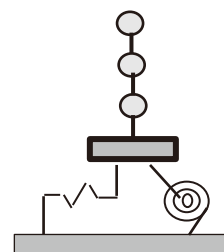


Fig. 2 建物－地盤連成系解析モデル

求め、上部構造を多質点曲げせん断棒、基礎・地盤をスウェイロッキング(Sway-Rocking)ばねによって表した解析モデル(Fig. 2)を構築した。構築したモデルによる計算結果と実計測記録との比較を行った。

以上に加え、熊本地震の設備被害をもとに、これまでほとんど検討がなされていなかった地震発生時の設備被害確率予測モデルを構築した。

3. 共同研究者

西谷 章(創造理工学部・建築学科・教授) 谷井 孝至(基幹理工学部・電子物理システム学科・教授)
高口 洋人(創造理工学部・建築学科・教授) 仁田 佳宏(足利工業大学・工学部・准教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

小寺健三、西谷章、沖原有里奈、限られた層の加速度記録のみに基づく 3 次元スプライン補間による建物全層の応答推定、日本建築学会構造系論文集 No.746 (2018).

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

防災科学技術研究所・首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト、サブプログラム (c) 研究統括

日本学術振興会産学協力委員会「制震(振)構造技術第 157 委員会」委員長

5. 研究活動の課題と展望

本年度の成果は、2018 年度から行われる E-ディフェンス実験におけるセンシングシステムの設置、計測されたデータの危険度判定、余裕度判定に向けて有効活用される。研究のメインとも言える E-ディフェンス実験に向けて、引き続き研究を継続していく。

次世代 e-learning に関する研究

研究代表者 後藤 正幸
(創造理工学部 経営システム工学科 教授)

1. 研究課題

本研究では 2017 年度は以下の B から N までの 5 つの部会による研究課題を扱った。

部会 B : 「クラウド時代の協働学習ツールとそのユーザビリティ」

部会 C : 「英語教育と e ラーニング」

部会 G : 「ICT を用いた教育・学習などの地域社会への貢献」

部会 H : 「コンテキストウェアネスと学習分析方法」

部会 N : 「ラーニングアナリティクスに基づく ICT 教育の次世代モデルに関する研究」

2. 主な研究成果

2017 年度の研究成果の発表・報告内容は下記の 4 分野に大別される。

- (1) 学習者の脳波・視線追跡などの生体情報と WEB 上の閲覧・編集などの学習過程の履歴を解析する**学習分析**を行った。
- (2) 上記(1)と同様, 学習者の学習履歴・小テスト結果とアンケート結果を用いて学習者の学習効果を推定し, 反転授業におけるグループ化などの**授業改善**を行った。
- (3) サイバーゼミナールにおける通信品質を考慮した授業運営方法について報告した。
- (4) 高大連携における ICT の活用可能性について分析した。

ここでは, 主として(1), (2)の中から例を挙げて説明する。

[例 1] 学習状態の推定方法

学習教材の閲覧時間が短いという場合は, 学習者にとって学習内容が簡単すぎるために短

時間で学習が終わったということも考えられるが、学習内容が難しすぎたために学習教材を見ることすら放棄してしまったために閲覧時間が短くなったという場合もあり得る。また閲覧時間が長い場合も、学習内容が難しくてより多くの時間がかかったという場合もあるが、そもそも学習に集中しておらず学習教材を閲覧して勉強しているのではなく、ただ学習教材が画面に表示されているだけで思考していないということも考えられる。このように閲覧履歴だけのログ情報では正確な学習者の状況を把握することは難しい場合がある。

そこで、図1に示す学習状態判定アルゴリズムを提案した。まず、脳波計測による集中度が低い状態があらかじめ設定された閾値（今回は5秒に設定）より長く続く場合、「学習に集中していない状態」とする。それ以外の場合は、脳波熟考度と教材閲覧時間との関係から「学習内容が簡単すぎる」か否かを判定する（条件1）。さらに脳波熟考度と教材閲覧時間とから「学習内容が難しすぎる」か否かを判定する（条件2）。最後に、「部分的に理解できない箇所がある」か否かを判定する（条件3）。すべての条件に該当しない場合は、「標準的な理解をしている状態」と判定する。

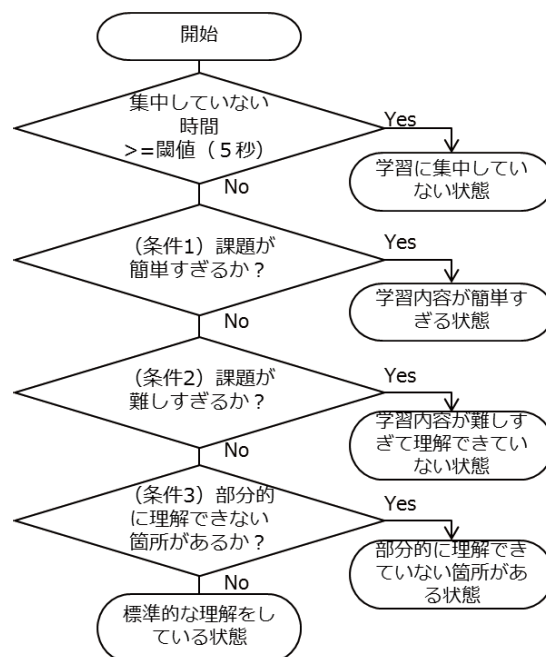


図1：学習状態判定アルゴリズム

この提案アルゴリズムに基づき実験を行った。実験結果として得られたログを図2に示す。このログを基に図1に示した学習状態判定アルゴリズムで学習者の学習状態を判定した。学習状態の判定結果を図3に示す。

閲覧履歴		脳波履歴		
date	page	注意力	リラックス	(low) β /(low) α
2016/08/18T11:31:01	7			1.10
2016/08/18T11:31:02	7			13.94
2016/08/18T11:31:03	7			0.37
2016/08/18T11:31:04	8			0.77
2016/08/18T11:31:05	8			3.12
2016/08/18T11:31:06	8			1.34
2016/08/18T11:31:07	8			0.09
2016/08/18T11:31:08	8			0.28
2016/08/18T11:31:09	8			0.48
2016/08/18T11:31:10	8			0.75
2016/08/18T11:31:11	8			0.69
2016/08/18T11:31:12	8			0.12
2016/08/18T11:31:13	8			0.96
2016/08/18T11:31:14	8			12.63
2016/08/18T11:31:15	8			0.51
2016/08/18T11:31:16	8			11.87
2016/08/18T11:31:17	8			0.22
2016/08/18T11:31:18	8			2.76
2016/08/18T11:31:19	8			1.85
2016/08/18T11:31:20	8			1.38

図 2：閲覧履歴と脳波履歴のログの例

ID	閲覧時間	閲覧時間の偏差	平均熟考度の偏差	熟考度の偏差	偏差の和	頁戻回数	判定		
ma001	154	-46.44	1.70	32.64	-13.81	3			標準
ma002	247	46.56	1.14	-23.56	23.00	11		部分理解	
ma003	225	24.56	1.45	7.84	32.40	4			標準
ma004	241	40.56	1.86	48.68	89.23	5		困難	
ma005	177	-23.44	0.94	-43.76	-67.21	4	簡単		
ma006	231	30.56	1.37	-0.10	30.45	7		部分理解	
ma007	199	-1.44	1.32	-5.60	-7.05	0			標準
ma009	134	-66.44	1.88	50.56	-15.88	0			標準
ma011	98	-102.44	1.02	-35.54	-137.99	0	簡単		
ma013	147	-53.44	1.16	-21.79	-75.23	0	簡単		
ma014	168	-32.44	1.28	-9.32	-41.77	0			標準
ma015	243	42.56	1.34	-3.59	38.97	0			標準
ma016	219	18.56	1.36	-1.20	17.36	8		部分理解	
ma021	211	10.56	1.47	9.88	20.43	0			標準
ma022	283	82.56	1.26	-11.39	71.17	0		困難	
ma023	283	82.56	1.26	-11.39	71.17	1		困難	
ma024	133	-67.44	1.67	29.22	-38.23	7		部分理解	
ma026	215	14.56	1.26	-11.57	2.99	6		部分理解	

図 3 学習状態の判定結果

本提案アルゴリズムによって学習者 (ID) ごとの学習状況を判定することができた。今回は学習教材全体で学習状況の判定を行ったが、教材のページ毎に判定を行うことによって学習教材の作成指針にもつなげることができると考える。また、編集を伴う学習の場合の編集履歴との統合も今後の課題である。

[例 2] 反転授業におけるグループ化による授業改善

昨年度までは、反転授業の新たな方法を提案してきた。具体的には、反転授業の自習時の e-ラーニングの学習ログを取得し、自習時の理解度が高い学生のグループ、自習に

時間をかけなかったために理解度が低い学生のグループ、自習に時間をかけたが理解度が低い学生のグループに分けて教場での対面授業を行う「グループ分け反転授業」を提案してきた。これにより学生の自習時における理解度別に対面授業を進めることができ、学生の理解度の向上を図ることができることを示した。

本年度は、上述のグループ分け反転授業の方式を 2017 年度後期における 16 週間の実授業に適用し、その有効性の評価を行った。図 4 に提案する反転授業の全体アプローチを示す。

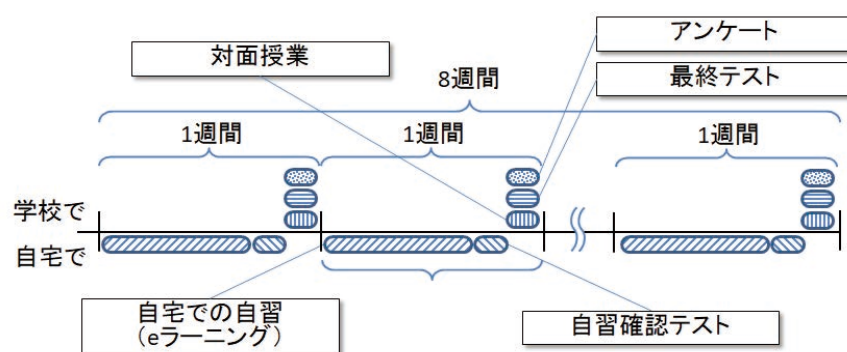


図 4 反転授業アプローチの全体構成

図 4 に示すように、授業が行われる前日の 23:55 を締め切りとした自習確認テストの終了後から翌日の授業が始まる時間までの間に自習時間と自習確認テストによる理解度の関係から学生を 3 つのグループに分ける作業を行う必要がある。この作業を効率化するためにグループ化ツールを開発した。グループ化ツールの外観を図 5 に示す。図中、

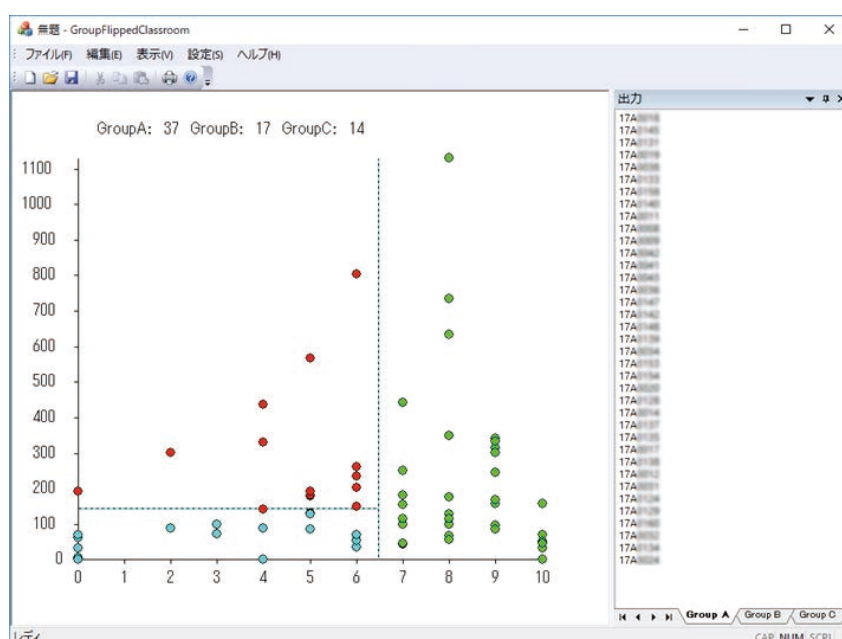


図 5 グループ化ツール

縦軸は自習時間（単位：sec），横軸は自習確認テストの結果（10 点満点）を示す。

図 6 に学生群 1 の，図 7 に学生群 2 の自習確認テストの点数と最終テストの点数の変化の様子を示す．両学生群ともにグループ A の学生に関しては，自習確認テストの点数が満点近くに達しており，最終テストでさらに点数が高くなるということにはなかったが，グループ B と C に関しては，明らかに自習確認テストの点数よりも最終テストの点数の方が高くなった．なお，図 4 と図 5 に示した矢印は， t -検定によって 5% の有意水準で平均値に差があるという結果を得たデータを示している．

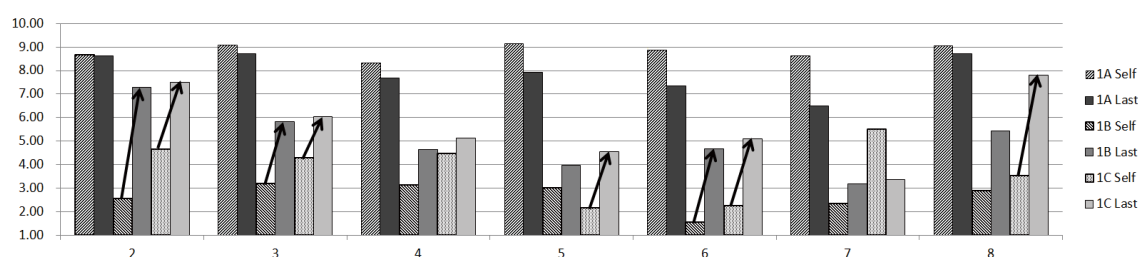


図 6： 学生群 1 のグループ毎の自習確認テストと最終テストの点数の変化

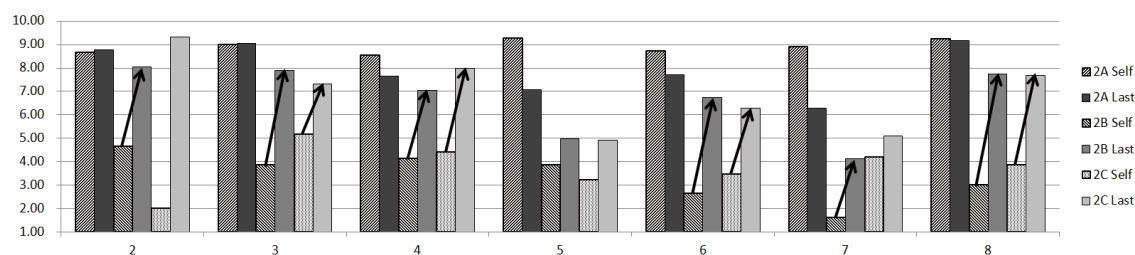


図 7： 学生群 2 のグループ毎の自習確認テストと最終テストの点数の変化

今年度は，グループ分け反転授業を 16 週間の実授業に適用し，適用結果とその有効性を評価した．具体的には，(1)理解度の低い学生に対して授業前と授業後で理解度が統計的にも高くなった．また，(2)従来型の対面授業と比較してグループ分け対面授業に効果があることも示した．自習確認テストを実施する際の不正（他の学生に教えてもらう等）や，自習時間のカウント方法の周知の徹底などいくつかの課題も浮き彫りになった．これらを解決しながら次年度の授業にも適用していきたい．

3. 共同研究者

新目 真紀（青山学院大学 ヒューマンイノベーション研究センター・客員研究員）
 石井 雄隆（早稲田大学 大学総合研究センター・助手）
 石田 崇（高崎経済大学 経済学部・准教授）

Enriquez, Guillermo (早稲田大学 先進理工学部・助教)
梅澤 克之 (湘南工科大学 情報工学科・准教授)
大谷 康介 ((合)binary lab・代表社員)
小椋 則樹 (ユニアデックス (株) エクセレントサービス創生本部
未来サービス研究所・所長)
加藤 泰久 (NTT サービスエボリューション研究所・主幹研究員)
隈 裕子 (湘南工科大学 情報工学科・専任講師)
雲居 玄道 (早稲田大学 創造理工学研究科・博士後期課程在学中)
小林 学 (湘南工科大学 情報工学科・教授)
近藤 知子 (ソフトバンクテレコム株式会社 IT イノベーション本部)
近藤 悠介 (早稲田大学 グローバルエデュケーションセンター・准教授)
榎藤 俊彦 (青山学院大学 ヒューマンイノベーション研究センター・客員研究員)
後藤 裕介 (岩手県立大学 ソフトウェア情報学部・准教授)
斉藤 友彦 (湘南工科大学 情報工学科・専任講師)
佐藤 一裕 (アドソル日進株式会社 セキュリティ・ソリューション推進部)
須子 統太 (早稲田大学 社会科学部・准教授)
玉木 欽也 (青山学院大学 経営学部・教授)
中澤 真 (会津大学 短期大学部・教授)
中野 美知子 (早稲田大学 教務部参与 (英語教育担当)・名誉教授, 大学総合研究
センター・招聘研究員)
平澤 茂一 (早稲田大学 理工学総合研究所・名誉教授)
福島 康夫 (ユニアデックス (株)・取締役常務執行役員)
松田 健 (長崎県立大学 情報システム学部・准教授)
吉田 諭史 (早稲田大学 グローバルエデュケーションセンター・助教)
薮 潤二郎 (早稲田大学 本庄高等学院・事務長)
(五十音順, 敬称略)

4. 研究業績

4.1 学術論文

梅澤克之, “効果的な反転授業の提案と実験による評価,” 湘南工科大学紀要, 第 52 巻, 第 1 号, pp.37-52, Feb. 2018.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.3.1 その他の学会発表（海外発表）

Katsuyuki Umezawa, Tomohiko Saito, Takashi Ishida, Makoto Nakazawa and Shigeichi Hirasawa, "Learning State Estimation Method by Browsing History and Brain Waves During Programming Language," The 6th World Conference on Information Systems and Technologies (World CIST'18), Conference Proceedings *, Napoli, Italia, March 27-29, 2018.

* Álvaro Rocha, Hojjat Adeli, Luís Paulo Reis and Sandra Costanzo, Ed. Trends and Advances in Information Systems and Technologies, Volume 2, pp.1307-1316, Springer International Publishing AG.

Katsuyuki Umezawa, Manabu Kobayashi, Takashi Ishida, Makoto Nakazawa, and Shigeichi Hirasawa, "Use of Student Grouping to Make Flipped Classroom More Effective," Proceeding of the 16th Hawaii International Conference on Education, p.p. 1249-1250, Jan. 2018.

Tomohiko Saito, Katsuyuki Umezawa, Takashi Ishida, Makoto Nakazawa and Shigeichi Hirasawa, "Collection and analysis of the history of brain wave during programming language learning for high school students," Proceeding of the 16th Hawaii International Conference on Education, p.p. 1671-1676, Jan. 2018.

Katsuyuki Umezawa, Manabu Kobayashi, Takashi Ishida, Makoto Nakazawa, and Shigeichi Hirasawa, "Experiment and Evaluation of Effective Grouped Flipped Classroom," Proceeding of the 5th International Conference on Applied Computing & Information Technology (ACIT 2017), pp.71-76, July 2017.

Katsuyuki Umezawa, Tomohiko Saito, Takashi Ishida, Makoto Nakazawa and Shigeichi Hirasawa, "An Electroencephalograph-based Method for Judging the Difficulty of a Task given to a Learner," Proceeding of the IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies (IEEE ICALT 2017), pp.384-386, July 2017.

Hikari Nakamura, Brenda Bushell, Masayuki Goto: "Awareness and Opinions of Nepalese Citizens on Gender Inequality in Nepal", Canadian Student Research

Conference 2017 (CSRC2017), Ryerson University, Toronto, Canada, July 2017.

Hirotake Arai, Haruka Yamashita, Manita Shrestha, Masayuki Goto, Brenda Bushell: "A Study of the Present and Future Utilization of ICT in Nepal", Canadian Student Research Conference 2017 (CSRC2017), Ryerson University, Toronto, Canada, July 2017

Megumi Asada, Haruka Yamashita, Manita Shrestha, Masayuki Goto, Brenda Bushell: "An Investigation into the Awareness of the Need for Quality Education in Nepal", Canadian Student Research Conference 2017 (CSRC2017), Ryerson University, Toronto, Canada, July 2017

Makoto Nakazawa, and Michiko Nakano, "On the Influence of Network Quality upon International Distance Learning," 2018 International Conference on Big Data and Education (ICBDE '18), International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning (IJEEEE) in press, March. 2018.

4.3.2 その他の学会発表（国内発表）

後藤裕介，市川尚，小西良尚，櫻井敬士，“回遊行動シミュレーションを題材とした高校におけるシミュレーション教育の検討，” 経営情報学会 2018 年春季全国研究発表大会，東京，(2018.3)

梅澤克之，小林学，石田崇，中澤真，平澤茂一，“グループ分け反転授業の実授業への適用，” 電子情報通信学会 教育工学研究会（ET）予稿集，pp.199-204, (2018.2)

中野美知子，“学習とは何か？，” 関東支部特別企画シンポジウム 第 56 回大学英語教育学会、青山学院大学、(2017.8)

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

- 「次世代 e-learning」公開フォーラム（第 9 回）
日時：平成 30 年 1 月 30 日（火）15:00～19:00

場所：早稲田大学早稲田キャンパス 7 号館 307 教室

プログラム：

開会挨拶：後藤 正幸（早稲田大学 理工学術院教授）

【第Ⅰ部：テクニカルセッション】

司会：石井 雄隆（早稲田大学 大学総合研究センター助手）

(1) 「グループ分け反転授業の実授業への適用について」

梅澤 克之（湘南工科大学 工学部情報工学科准教授）

(2) 「英語学習者の発話自動採点システムの開発」

近藤 悠介（早稲田大学 グローバルエデュケーションセンター准教授）

(3) 「トポロジカルデータアナリシスによる状態推定と教育データ解析」

松田 健（長崎県立大学 情報システム学部情報セキュリティ学科准教授）

(4) 「初等教育におけるプログラミング教育の現状」

中澤 真（会津大学 産業情報学科准教授）

【第Ⅱ部：招待講演】

司会：服部 令（早稲田大学 大学総合研究センター事務長）

(1) 「MOOCs による高等教育のイノベーション」

森田 裕介（早稲田大学 大学総合研究センター副所長 人間科学学術院准教授）

(2) 「教育分野における e ポートフォリオに関する最新動向」

森本 康彦（東京学芸大学 情報処理センター教授）

開会挨拶：早稲田大学 DCC 会長 大野 高裕（早稲田大学理事 理工学術院教授）

5. 研究活動の課題と展望

2017 年度は主として前年度までの成果発表を行った。すなわち、国際会議や国内学会での発表、フォーラム（第 9 回）における報告などである。昨年度スタートした「早稲田大学と NTT との産学連携に係る包括協定に基づく共同研究」の成果も含まれる。これらの成果は夏・冬の 2 回の合宿形式による研究ワークショップにより、メンバー相互の情報交換・共有を図り、同時に今後の方向として「e ポートフォリオ」の強化、次年度以降の高大連携による「プログラミング教育」・「英語教育」を取り上げた。

今後の課題と展望として、上述の通り具体的に早稲田大学本庄高等学院の高校生を対象に、高大連携を図るような人材の発掘と講座運営方法を検討している。例えば課外講座としてプログラミングコンテストに興味を持つ生徒に対しプログラミングスキルを向上させるような仕組みを導入し、これを AI コーチにより援用する方法である。また

今後、高大直結の e ポートフォリオの構築も大切な課題である。

長期大型プロジェクト研究

建築・空調におけるエネルギー有効利用計画に関する研究

研究代表者 田辺 新一
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

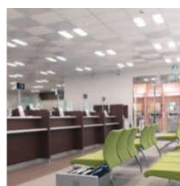
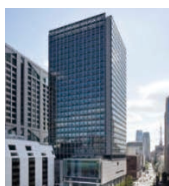
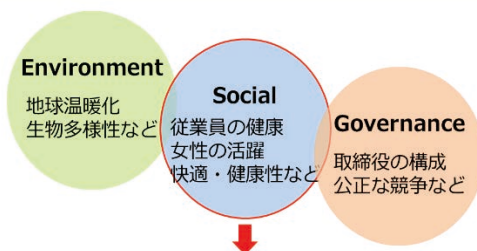
本研究の目的は、建築環境を維持する上で消費される種々のエネルギーの種類や量について調査・分析を行い、省エネルギーや自然エネルギー利用によってそれがどの程度抑制可能となり、環境負荷削減にどの程度寄与するのかを定量的に明らかにすることにある。具体的には、オフィス、駅、学校など様々な空間における実測・実験を行い省エネルギーの可能性に関して検討を行っている。特に ZEB（ゼロ・エネルギービル）、ZEH（ゼロ・エネルギーハウス）に関する研究を精力的に行った。また、調査を通して、空調の省エネルギー手法や熱源の最適化検討を行う。放射空調、デシカント空調、パーソナル空調、床暖房など新しい空調システムの開発を行うことにより環境負荷の小さな空調・換気システムの実現を図る。WEB-P を含めたエネルギーシミュレーションを行い、それぞれの要素技術の寄与率に関して把握している。

2. 主な研究成果

- 2.1 ZEH（エネマネハウス）に関する研究
- 2.2 放射空調システムに関する研究
- 2.3 省エネビルの室内環境評価
- 2.4 ZEB（ゼロ・エネルギービル）に関する研究本文
- 2.5 不動産の ESG 投資に関する研究

投資の際に企業の価値を測る材料

定量的な財務情報
(利益率など) + 未財務情報
→ ESG要素



3. 共同研究者

木村 建一	(名誉教授・顧問研究員)、
針ヶ谷 純吉	(招聘研究員)
金 炫兌	(山口大学・助教・招聘研究員)
尾方 壮行	(早稲田大学・助手)
長澤 夏子	(お茶の水女子大学・招聘研究員)
秋元 孝之	(芝浦工業工大・教授・招聘研究員)
中野 淳太	(東海大学・准教授・招聘研究員)
望月 悦子	(千葉工大・教授・招聘研究員)、
山田 裕巳	(長崎総合科学大学・教授・招聘研究員)
舟木 理香	(建材試験センター・招聘研究員)
西原 直枝	(聖心女子大学・准教授・招聘研究員)、
堤 仁美	(昭和女子大学・講師・招聘研究員)
富樫 英介	(工学院大学・准教授・招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

・角尾怜美、島村知弥、中川純、小林恵吾、田辺新一、高口洋人、浅野寛人、池川隼人、伊原さくら、小松昇平、丸山賢人、三好諒、万木景太、若山麻衣、エネマネハウス 2015 における『ワセダライブハウス』の提案と実証、日本建築学会技術報告集、54、pp.545-548、2017.6、

10.3130/aijt.23.545

・山田裕巳、林基哉、田辺新一、大澤元毅、長谷川兼一、本間義規、繊維系断熱材中の真菌の移動性状に関する基礎的研究、日本建築学会環境系論文集、No.740、863-871、2017.1

4.2 総説・著書

・田辺新一、長澤夏子、高口洋人、小林恵吾、中川 純、ゼロ・エネルギーハウス ―新しい環境住宅のデザイン、早稲田大学理工研叢書 シリーズ No.27、萌文社、2017 年 9 月、ISBN : 978-4-89491-337-0

4.3 招待講演

- ・デンマーク工科大学、2017 年 5 月 2 日
- ・シンガポール建設局、2017 年 9 月 7 日
- ・北海道建築環境フォーラム、2017 年 9 月 19 日
- ・日経セミナー、2018 年 1 月 11 日
- ・BELCA セミナー、2018 年 1 月 16 日
- ・日本ビルジング協会、2018 年 1 月 30 日
- ・メルボルン王立工科大学、2018 年 2 月 8 日
- ・住まいと環境 東北フォーラム公開シンポジウム、2018 年 2 月 21 日
- ・名古屋商工会議所、2018 年 3 月 6 日
- ・東京都環境局、2018 年 3 月 13 日

4.4 受賞・表彰

「この郊外の片隅にーわたしと家の約 80 年のものがたりー」優秀賞、チャレンジ賞

4.5 学会および社会的活動

- ・ Daisuke Nakamura, Mari Nagoshi, Moe Matsuda, Tetsuya Sato, Haruno Ishikawa, and Shinichi Tanabe, Field Survey for Environmental Performance of Public Schools Gymnasium in Urban Area, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Misa Imazu, Shin-ichi Tanabe, Jiannan Liu, Kazuki Furumoto, Riho Matsuzaki, Miki Iijima, Kenji Fujino, Daisuke Hatori, Nobuhiro Hirasuga, Shun Kato, Shiori Sasahara, Hiroki Iwata, Evaluation of task air conditioning system with convection, conduction, and radiation, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Yuka Mruyama, Kei Utsumi, Akihiro Takimoto, Shuhei Takahashi, Moe Matsuda, Shin-ichi Tanabe, Feasibility Study of Zero Energy Building for Different Configurations of Existing Office Buildings, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Tianshu XU, Ayane Shibutani, Jiannan Liu, Shin-ichi Tanabe, Tadasu Ooishi, Thermal Comfort of Radiant Cooling Systems in Homes under Hot and Humid Climates with Different Operation Methods, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Junta Fujisawa, Sayana Tsushima, Anri Itoh, Shuhei Takahashi, Ryutaro Kubo, Shin-ichi Tanabe, Proposal of Environmental Assessment Index for Office Buildings Considering the Wellness of Workers, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Sayana Tsushima, Shuhei Takahashi, Emi Takai, Junta Fujisawa, Shin-ichi Tanabe, Hiromasa Tanaka, Hisataka Kitora, Effects of reducing internal heat load on the operation of multi-split type air conditioning system in an office, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Jun Shinoda, Jiannan Liu, Miki Iijima, Kazuki Furumoto, Riho Matsuzaki, Shin-ichi Tanabe, Hiroki Iwata, Nominal Cooling Capacity of Radiant Ceiling Panels in Hot and Humid Regions, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Shin-ichi Tanabe, Zero Energy Building - What is happening in Japan?, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ 石川春乃、中村大介、酒井健太、田辺新一、地方部の公立小学校の実態に関する調査研究、その 1 : S 市における建築概要およびエネルギー消費実態、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1183-1184、2017
- ・ 中野淳太、山口真吾、古本一貴、中村大介、池田佳樹、坪内啓一、大石洋之、田辺新一、駅空間における熱的快適性実測調査 その 40 : 寒冷地における小規模駅舎の利用実態、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.325-326、2017
- ・ 山口真吾、中野淳太、古本一貴、中村大介、池田佳樹、坪内啓一、大石洋之、田辺新一、駅空間における熱的快適性実測調査 その 41 : 寒冷地における小規模駅舎の実測調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.327-328、2017
- ・ 野元彬久、浅賀潤一、尾方壮行、宮嶋祐基、田辺新一、小型測定機器を用いた都市温熱環境評価手法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.357-358、2017
- ・ 陳佳樟、中川純、宮嶋裕基、田辺新一、宇山直樹、清田健、冬季室内環境の潜熱蓄熱材の足接触快適性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.499-500、2017
- ・ 金ジョンミン、渋谷彩音、丸山由香、常岡優吾、藤澤順太、森戸直美、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その 7）予熱運転による快適性及び自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.551-552、2017
- ・ 酒井健太、中村大介、石川春乃、田辺新一、都市部の公立小学校の実態に関する研究 その 5 : 空調導入校における換気方式の違いが空気環境に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、

pp.773-774、2017

・中村大介、酒井健太、石川春乃、田辺新一、都市部の公立小学校の実態に関する研究 その6：空調利用下における換気方式ごとの環境調節の実態調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、

pp.775-776、2017

・篠田純、古川亮哉、今津文沙、劉建楠、對馬聖菜、飯嶋美希、田辺新一、岩田博樹、輻射空調とチルドビームを併用した居室の室内環境に関する研究（その1）冷暖房稼働時の経時変化、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1023-1024、2017

・古川亮哉、篠田純、今津文沙、劉建楠、對馬聖菜、飯嶋美希、田辺新一、岩田博樹、輻射空調とチルドビームを併用した居室の室内環境に関する研究（その2）敷設率を変更した条件における室内環境、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1025-1026、2017

・劉建楠、古川亮哉、篠田純、今津文沙、對馬聖菜、飯嶋美希、田辺新一、岩田博樹、輻射空調とチルドビームを併用した居室の室内環境に関する研究（その3）サーマルマネキンを用いた快適性の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1027-1028、2017

・加藤駿、今津文沙、篠田純、徐天舒、青柳大気、劉建楠、飯嶋美希、對馬聖菜、田辺新一、平須賀信洋、笹原詩織、岩田博樹、冷暖パネルとタスクファンを用いたデスク組み込み型タスク空調の開発 その5 実測調査概要および夏季エネルギー消費量調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1031-1032、2017

・今津文沙、加藤駿、篠田純、徐天舒、青柳大気、劉建楠、飯嶋美希、對馬聖菜、田辺新一、平須賀信洋、笹原詩織、岩田博樹、冷暖パネルとタスクファンを用いたデスク組み込み型タスク空調の開発 その6 夏季物理環境実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1033-1034、2017

・青柳大気、今津文沙、加藤駿、篠田純、徐天舒、劉建楠、飯嶋美希、對馬聖菜、田辺新一、平須賀信洋、笹原詩織、岩田博樹、冷暖パネルとタスクファンを用いたデスク組み込み型タスク空調の開発 その7 夏季アンケート調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1035-1036、2017

・田中宏昌、高井映見、對馬聖菜、藤澤順太、丸山由香、田辺新一、木虎久隆、郊外の業務ビルの経済的観点を踏まえた ZEB 化に向けた検討 その4：個別分散空調システムの運用方法変更に伴う室内環境と執務者の快適性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1073-1074、2017

・高井 映見、田中 宏昌、對馬 聖菜、藤澤 順太、丸山 由香、田辺 新一、木虎 久隆、郊外の業務ビルの経済的観点を踏まえた ZEB 化に向けた検討 その5：個別分散空調システムの最適運転方法の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1075-1076、2017

・徐天舒、常岡優吾、渋谷彩音、丸山由香、市川真帆、藤澤順太、金ジョンミン、田辺新一、林泰弘、住宅における快適性を考慮した自立的運用に関する研究 その1：シミュレーション概要およびモデル妥当性検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1195-1196、2017

・常岡優吾、徐天舒、渋谷彩音、丸山由香、市川真帆、藤澤順太、金ジョンミン、田辺新一、林泰弘、住宅における快適性を考慮した自立的運用に関する研究 その2：自立的運用の実現可能性に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1197-1198、2017

・丸山由香、徐天舒、常岡優吾、渋谷彩音、市川真帆、藤澤順太、金ジョンミン、田辺新一、林泰弘、住宅における快適性を考慮した自立的運用に関する研究 その3：複数の建物特性における検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1199-1200、2017

・安田岳之、下白木諒、笹本太郎、奥田篤、野部達夫、田辺新一、再生可能エネルギーを活用したアースビル立川の省エネルギー性能に関する研究（その4）エネルギー消費実績とその分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1265-1266、2017

- ・下白木諒、安田岳之、笹本太郎、奥田篤、野部達夫、田辺新一、再生可能エネルギーを活用したアースビル立川の省エネルギー性能に関する研究（その 5）エネルギー消費性能計算プログラムによる評価結果の比較と考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1267-1268、2017
- ・藤澤順太、對馬聖菜、丸山由香、高井映見、田辺新一、奥田篤下、白木諒、再生可能エネルギーを活用したアースビル立川の省エネルギー性能に関する研究、（その 7）夏期・中間期の室内環境に関するアンケート調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1271-1272、2017
- ・片岡えり、佐藤孝輔、吉田亘佑、田辺新一、篠田純、外断熱建物における躯体蓄熱利用放射システムに関する研究（第 4 報）冬期実測およびアンケート調査の報告、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp97-100、2017.9
- ・酒井健太、中村大介、石川春乃、田辺新一、冷暖房設備を導入した公立小学校における換気方法が空気環境に与える影響、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 4 巻、pp101-104、2017.9
- ・山口真吾、中村大介、大石洋之、中野淳太、田辺新一、駅空間の快適な温熱環境制御に関する研究、（第 23 報）寒冷地における小規模駅舎の温熱環境評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp165-168、2017.9
- ・中村大介、山口真吾、大石洋之、中野淳太、田辺新一、駅空間の快適な温熱環境制御に関する研究、（第 24 報）大規模ガラス屋根を有する駅舎における温熱環境評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp173-176、2017.9
- ・安田岳之、武田晃成、笹本太郎、奥田篤、下白木諒、田辺新一、野部達夫、再生可能エネルギーを活用したアースビル立川の省エネルギー性能に関する研究 第 5 報エネルギー消費実績とその分析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 8 巻、pp229-232、2017.9
- ・藤澤順太、對馬聖菜、丸山由香、高井映見、奥田篤、下白木諒、田辺新一、再生可能エネルギーを活用したアースビル立川の省エネルギー性能に関する研究 第 7 報 夏期の室内環境および快適性に関するアンケート調査、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 8 巻、pp237-240、2017.9
- ・篠田純、古川亮哉、劉建楠、今津文沙、岩田博樹、對馬聖菜、田辺新一、放射空調の熱負荷特性に関する居室実験（第 1 報）熱負荷計算方法と物理環境測定結果、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp317-320、2017.9
- ・古川亮哉、篠田純、劉建楠、今津文沙、對馬聖菜、岩田博樹、田辺新一、放射空調の熱負荷特性に関する居室実験（第 2 報）熱平衡式を用いた貫流熱の評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp321-324、2017.9
- ・田村夏美、太田恵大、飯田隆義、浮穴朋興、藤澤順太、田辺新一、天井チャンバー型空気式放射空調システムにおける PMV 制御方式の評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp329-332、2017.9
- ・今津文沙、藤野健治、羽鳥大輔、平須賀信洋、加藤駿、笹原詩織、岩田博樹、劉建楠、篠田純、徐天舒、田辺新一、青柳大気、對馬聖菜、次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証 その 7 通年物理環境実測結果、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp333-336、2017.9
- ・青柳大気、青柳大気、今津文沙、篠田純、徐天舒、對馬聖菜、劉建楠、田辺新一、藤野健治、羽鳥大輔、平須賀信洋、加藤駿、笹原詩織、岩田博樹、次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証 その 8 通年アンケート調査結果、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp337-340、2017.9

- ・羽鳥大輔、藤野健治、平須賀 信洋、加藤駿、笹原詩織、岩田 博樹、劉建楠、今津文沙、篠田純、徐天舒、青柳大気、田辺新一、對馬 聖菜、次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証 その 9 建物のエネルギー消費量、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp341-344、2017.9
- ・高井映見、對馬聖菜、藤澤順太、丸山由香、田中宏昌、木虎久隆、田辺新一、郊外の事務所ビルにおける ZEB 化に向けた空調運用に関する検討 (その 3) 個別分散空調システムにおける外気導入方法、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp401-404、2017.9
- ・党姚澤、陳佳樟、田辺新一、ZEB Ready ガイドライン中規模事務所ビルを対象とした外皮性能が空調 エネルギー・冷暖房負荷に与える影響の検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 5 巻、pp189-192、2017.9
- ・金ジョンミン、丸山由香、徐天舒、常岡優吾、田辺 新一、森戸直美、温熱快適性に配慮した太陽光発電の自家消費に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 10 巻、pp289-292、2017.9
- ・常岡優吾、丸山由香、徐天舒、市川真帆、藤澤順太、林泰弘、田辺新一、快適性を考慮したゼロ・エネルギーハウスの自立的運用に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 10 巻、pp293-296、2017.9
- ・田辺新一、省エネマークで家を選ぶ、日本経済新聞 (住宅ナビ)、2017.4.2
- ・田辺新一、コンクリ住宅 熱中症警戒、日本経済新聞 (住宅ナビ)、2017.7.5
- ・田辺新一、シックハウス換気で防ぐ、日本経済新聞 (住宅ナビ)、2017.9.6
- ・田辺新一、採光で健やか家も心身も、日本経済新聞 (住宅ナビ)、2017.11.8
- ・田辺新一、省エネで、快適・健康になろう、神奈川新聞 (Dr.タナベの我慢しないで快適生活)、2017.6.3
- ・田辺新一、住まいの環境性能とお金の話、神奈川新聞 (Dr.タナベの我慢しないで快適生活)、2017.7.22
- ・田辺新一、夏の遮熱と断熱、神奈川新聞 (Dr.タナベの我慢しないで快適生活)、2017.8.25
- ・田辺新一、省エネと創エネ、神奈川新聞 (Dr.タナベの我慢しないで快適生活)、2017.9.27
- ・田辺新一、住まいの断熱で冬を快適に、神奈川新聞 (Dr.タナベの我慢しないで快適生活)、2017.10.26

5. 研究活動の課題と展望

2017 年度が最終年となった。5 年間で大きな成果が得られた。

非臨床評価の確立による先進医療実現の加速化に関する医工学的研究

研究代表者 梅津 光生
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題 :

我が国では、日本再興戦略のもと、真の健康長寿社会の実現と高い研究開発環境の整備を、医薬品、医療機器等及び医療技術分野において、積極的に推進していくことを目指している。そして、1943年施行の薬事法が2014年末に70年ぶりに大改訂され、“医薬品・医療機器等の品質・有効性及び安全性の確保に関する法律”と、法律の名称も変更された。さらに、2017年には「革新的医療機器条件付早期承認制度」の具体的な方針が公表されたことで、医療機器は医薬品とは異なった独自の評価のもとに有効性・安全性の科学的根拠を提示することが求められるようになっていく。

特に、我々が5年前より設定してきた本プロジェクト内で推進してきた医工学融合実験に基づくヒト病態モデルシミュレータの開発と機器性能の定量化に関する研究は、市販前の治験段階での限定的なデータでは分析困難な事象や市販後に生じた事象に対する迅速な要因の分析を実現可能とする時代のニーズに合致した取り組みであることがわかる。

このプロジェクトでは2018年度に創立10周年を迎える早稲田大学・東京女子医科大学連携教育施設(TWIns)において、従来の動物や臓器、組織を用いたWETラボに対して、非臨床・動物実験代替システムをコンセプトとし、血行力学、生体適合性、耐久性シミュレーション装置と、その解析機器が並ぶDRYラボを構築してきた。医学領域で用いられてきた医療効果の評価手法である生物統計をベースとしたEvidence Based Medicine(EBM)に対して、我々のアプローチをEngineering Based Medicine(Another EBM)と称して社会への貢献に努めている。モデリング・シミュレーションを駆使した医療への挑戦は、医学部のない早稲田大学において、社会のニーズに合致した早稲田らしいアプローチと言える。

本研究では、医療機器・医療行為の非臨床評価技術の確立することを目指しており、本報告では、拍動流性能と応力解析を用いたステントレス僧帽弁の医工学的性能試験法の確立について報告する。

2. 主な研究成果 :

拍動流性能と応力解析を用いたステントレス僧帽弁の医工学的性能試験法の確立

僧帽弁疾患の新たな治療法として、当研究室では加瀬川医師考案のもと、腱索機能を有するステントレス僧帽弁(以下、Normo弁)を開発した(図1)。Normo弁の特徴は、①生来の僧帽弁に類似した弁輪から腱索、そして乳頭筋へと続く構造的な連続性を有する、②患者に適したサイズの弁が製作可能である、③患者の自己心膜を用いるため抗凝固剤の内服が不要となるという3つの特徴が挙げられる。このNormo弁は弁輪および乳頭筋を縫合するため、患者の左心室形態、特に僧帽弁輪と乳頭筋の相対的位置が弁機能に及ぼす影響を明らかにするこ

とがより安全に適用するうえで重要となる．そこで，本研究では研究所員である加瀬川医師と榊原記念病院の馬原医師の協力のもとで 10 例の 3D 心エコーデータから左心形状を抽出できた 7 例のデータを用いて心臓の収縮末期の左心室形態から前・後乳頭筋距離を計測し，これらの一データを基に Normo 弁の性能を評価するモデルを構築した．また，弁輪 - 乳頭筋間距離としては，25 mm，30 mm，35 mm の 3 条件を選定し，組合せとして計 12 通りについて，弁閉鎖時の弁接合長さを実験的に計測する試験法を開発した．また，有限要素解析を行い，弁閉鎖時の弁膜に生じる応力解析を行った(図 2)．その結果，弁中央部の弁接合長さは，前・後乳頭筋間距離が 36 mm で弁輪 - 乳頭筋間距離が 25 mm という組み合わせの条件を除くすべての条件で 10 mm 以上となるという結果が得られた．前・後乳頭筋間距離が 36 mm で弁輪 - 乳頭筋間距離が 25 mm という組み合わせは実患者では想定しにくく，多様な左心室形態において対応できることがわかった．また，解析結果から，圧力負荷 120 mmHg を作用させた際の弁閉鎖時の弁膜に生じる Mises の最大応力は，上記の 11 条件において，ヒト心膜の破断応力の 1/10 以下と十分に低値となることが明らかとなった．Normo 弁の脚部間距離は 25 mm に設計されており，設計を反映して，前・後乳頭筋間距離が 24 mm および 30 mm の場合には，弁膜に生じる応力集中部位がないことも明らかになった．

(参考文献) 高田淳平，加瀬川均，馬原啓太郎，朱曉冬，熊澤亮，梅津光生，岩崎清隆，Normo 弁の性能試験：拍動流性能と応力解析，第 6 回ステントレス僧帽弁臨床研究学術集会，p.9，東京，2017 年 9 月 2 日)

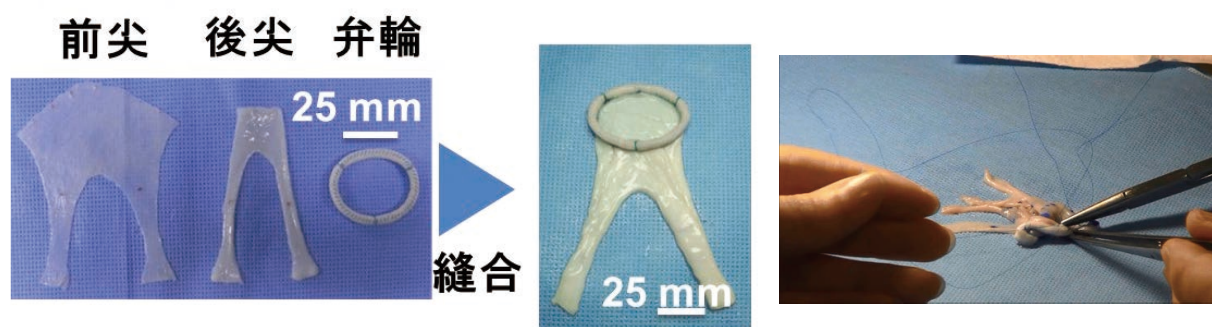


図 1 加瀬川医師考案の Normo と呼ばれる僧帽弁と製作の様子

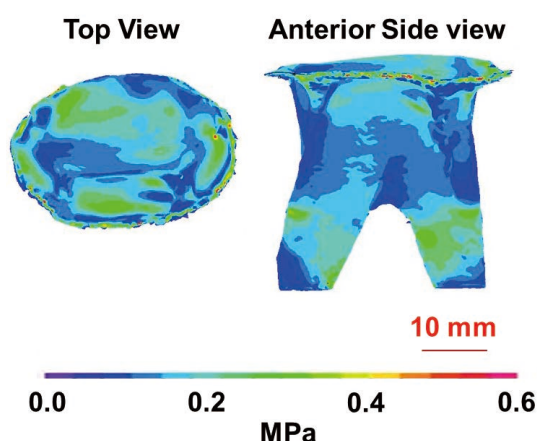


図 2 有限要素解析を用いた弁閉鎖時の弁膜に生じる応力解析の一例

3. 共同研究者 :

岩崎清隆	(理工学術院・教授)	八木高伸	(理工研・客員准教授)
坂口勝久	(理工研・主任研究員 (准教授))	宗田孝之	(理工学術院・教授)
錢逸	(理工研・招聘研究員)	大和雅之	(理工学術院・客員教授)
高西淳夫	(理工学術院・教授)	白石泰之	(理工研・招聘研究員)
馮忠剛	(理工研・主任研究員 (准教授))	本村禎	(理工研・招聘研究員)
加瀬川均	(理工研・客員教授)	小坂眞一	(理工研・客員教授)
		松橋祐輝	(理工学術院・助教)

4. 研究業績 :

4.1 学術論文

- (1) A.Takahashi, X.Zhu, Y.Aoyama, M.Umezu, K.Iwasaki, Three-dimensional strain measurements of a tubular elastic model using tomographic particle image velocimetry, Cardiovasc Eng Tech, <https://doi.org/10.1007/s13239-018-0350-5>, 2018
- (2) Y. Tanaka, S. Saito, S. Sasuga, A. Takahashi, Y. Aoyama, K. Obama, M. Umezu, K. Iwasaki, Quantitative assessment of paravalvular leakage after transcatheter aortic valve replacement using a patient-specific pulsatile flow model. Int J Cardiol 258 , 313–320, 2018
- (3) T.Shida, M.Umezu, K.Iwasaki, Investigation of adverse events associated with an off-label use of arterial stents and CE-Marked iliac vein stents in the iliac vein: Insights into developing a better iliac vein stent, J Artif Organs, DOI:10.1007/s10047-018-1023-8, 2018
- (4) M.Yamawaki, K.Iwasaki, M.Araki, T.Ito, Y.Ito, N.Tada, K.Takagi, F.Yamanaka, Y.Watanabe, M.Yamamoto, S.Shirai, K.Hayashida, A proctoring system to manage the learning curve associated with the introduction of transcatheter aortic valve implantation in Japan, Heart and Vessel, doi: 10.1007/s00380-017-1098-9, 2017
- (5) Y.Matsuhashi, K.Sameshima, Y.Yamamoto, M.Umezu, K.Iwasaki, Real-time visualization of thrombus formation at the interface between connectors and tubes in medical devices by using optical coherence tomography,PloS ONE 12(12), e0188729 doi:10.1371/journal.pone.0188729, 2017
- (6) J.Ormiston, G.Kassab, G.Finet, Y.S.Chatzizisis, N.Foin, T.J.Mickley, C.Chiastra, Y.Murasato, Y.Hikichi, J.J.Wentzel, O.Darremont, K.Iwasaki, T.Lefevre, Y.ouvard, S.Beier, H.Hojeibane, J.Wooton, A.Netravali, B.Cowan, M.W.Webster,G.Stankovic, Bench testing and coronary artery bifurcations: A consensus document from the European Bifurcation Club, EuroIntervention, DOI:10.4244/EIJ-D-17-00270, 2017
- (7) A.Takahashi, S.Suzuki, Y.Aoyama, M.Umezu, K.Iwasaki, A three-dimensional strain measurement method in elastic transparent materials using tomographic particle image velocimetry, PLoS ONE 12(9), e0184782 doi: 10.1371/journal.pone.0184782, 2017
- (8) T.Kitano, K.Iwasaki, Long-term durability test for the left ventricular assist system EVAHEART under the physiologic pulsatile load, ASAIO J 64(2), 168-174, 2018

- (9) Y.Matsushashi, K.Sameshima, Y.Yamamoto, M.Umezu, K.Iwasaki, Investigation of the fluid dynamics influence on a thrombus-growth at the interface between a connector and a tube, J Artif Organs 20(4) 239-302, 2017
- (10) Y.Otsuka, Y.Imoto, Y.Katsuki M.Kawahara K.Nakamura S.Kodama, H.Noguchi, K.Iwasaki, Prolonged inflation technique using a scoring balloon for severe calcified lesion –creep phenomenon –, Int Heart J 6, 982-987,2017

4.2 受賞・表彰

- (1) 機械学会若手フェロー賞, 奥田慶也, 伊藤匡史, 岡村昭慶, 八木優大, 梅津光生, 加藤善治, 岡崎賢, 岩崎清隆, ヒツジ膝前十字靱帯再建に3ヶ月使用した脱細胞化ウシ組織のコラーゲン線維の生体内リモデリングの解明に向けた研究, 第28回バイオフィロンティア講演会, 1C33, 徳島, 2017年10月28日

4.3 学会および社会的活動

- (1) K.Iwasaki, Y.Hikichi, 3 times kissing balloon technique, European Bifurcation Club 2017, Porto,13-14 Oct.2017(1) Y.Hikichi, K.Node, K.Iwasaki, Maximization of DES performance in bifurcation lesion, EBC 2017, Porto,13-14 Oct.2017
- (2) X.Zhu, M.Umezu, K Iwasaki, Finite Element Analysis of Self-Expanding Nitinol Stent under Torsion and Shortening Conditions of superficial femoral Artery, 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, July 2017
- (3) Y.Mizutani, K.Izumi, X.Zhu, M.Umezu, K.Iwasaki, Investigation of an optimal deployment method of polymer BRS to gain acute expansion using a stenotic mechanically-equivalent coronary artery model, EURO PCR 2017 The World-Leading Course in Interventional Cardiovascular Medicine, May 2017 (Oral presentation, Paris)
- (4) S.Sasuga, Y.Tanaka, K.Obama, A.Takahashi, Y.Aoyama, U.Mitsuo, S.Saito, K.Iwasaki, Influence of calcification shape around aortic valve annulus on paravalvular leak after TAVI: investigation using patient specific pulsatile circulation model, EURO PCR 2017 The World-Leading Course in Interventional Cardiovascular Medicine, May 2017 (e-poster, Paris)
- (5) Sasuga, Y.Tanaka, A.Takahashi, K.Obama, Y.Aoyama, U.Mitsuo, S.Saito, K.Iwasaki, Quantification of Incompletely-apposed Gap after Transcatheter Aortic Valve Replacement Using Patient-specific Models for Understanding the Mechanism of Paravalvular Leak, Journal of the American college of cardiology,Vol.69-16-S88, 22nd Cardiovascular summit TCTAP2017, Seoul, April 2017
- (6) 岩崎清隆, 伊藤匡史, 井桁浩貴, 高野和也, 岡村昭慶, 奥田慶也, 八木優大, 吉本伸之, 梅津光生, 脱細胞化腱を用いたヒツジ膝前十字靱帯による生体内での細胞浸潤の評価, 第32回日本整形外科学会, p.S1507, 那覇, 2017年10月26日
- (7) 岩崎清隆, 持続的血液濾過器の血栓性評価 in vitro 試験法の提案, 第28回日本急性血液浄化学会学術集会, p.68, さいたま, 2017年9月24日
- (8) 岩崎清隆, 流体力学からみた分岐部病変, 第26回日本心血管インターベンション治療学会学術集会, 京都, 2017年7月6日

- (9) 岩崎清隆, 伊藤匡史, 井枿浩貴, 高野和也, 岡村昭慶, 奥田慶也, 八木優大, 梅津光生, 脱細胞化組織を用いたヒツジ膝前十字靱帯再建実験による生体内での細胞浸潤に関する検討, 第 40 回日本バイオレオロジー学会, p.100, 岡山, 2017 年 5 月 28 日
- (10) 山崎健二, 本村禎, 岩崎清隆, EVAHEART2 承認とチップレスカニューラ: 今後の展開, 第 46 回人工心臓と補助循環懇話会学術集会, 熱海, 2018 年 2 月 9 日
- (11) 水谷泰之, 和泉恒平, 高橋啓明, 松原海斗, 杉山航太, 朱曉冬, 梅津光生, 岩崎清隆, 生体吸収性スキャフォールドの経時的拡張保持特性と分解特性に関する研究, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会, p.348, 京都, 2017 年 12 月 15 日
- (12) 鮫島啓, 松橋祐輝, 青山祐介, 熊谷直紀, 保延慶紀, 頼卓然, 梅津光生, 石井暁, 岩崎清隆, 機械的血栓除去デバイスの回収速度が血栓回収性能に及ぼす影響の検討, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会, p.183, 京都, 2017 年 12 月 14 日
- (13) 頼卓然, 松橋祐輝, 鮫島啓, 青山祐介, 熊谷直紀, 保延慶紀, 梅津光生, 石井暁, 岩崎清隆, 機械的血栓除去デバイスの血栓回収性能を検証するための血栓モデルの作成, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会, p.182, 京都, 2017 年 12 月 14 日
- (14) 青山祐介, 松橋祐輝, 鮫島啓, 熊谷直紀, 頼卓然, 保延慶紀, 梅津光生, 岩崎清隆, コネクタ先端の形状がチューブとの接合部での局所流れと血栓形成に及ぼす影響, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会, p.179, 京都, 2017 年 12 月 14 日
- (15) 水谷泰之, 松原海斗, 朱曉冬, 鮫島啓, 杉山航太, 挽地裕, 梅津光生, 岩崎清隆, 粒子イメージ流速計測法を用いたステントデザインが分岐狭窄病変における血流に及ぼす影響の検討, 第 28 回バイオフィロンティア講演会, 2B31, 徳島, 2017 年 10 月 29 日
- (16) 奥田慶也, 伊藤匡史, 岡村昭慶, 八木優大, 梅津光生, 加藤善治, 岡崎賢, 岩崎清隆, ヒツジ膝前十字靱帯再建に 3 ヶ月使用した脱細胞化ウシ組織のコラーゲン線維の生体内リモデリングの解明に向けた研究, 第 28 回バイオフィロンティア講演会, 1C33, 徳島, 2017 年 10 月 28 日
- (17) 青山祐介, 松橋祐輝, 鮫島啓, 熊谷直紀, 保延慶紀, 頼卓然, 梅津光生, 岩崎清隆, 数値流体解析を用いたコネクタ接合部の血栓形成に影響を及ぼす流体力学的因子の検討, 第 28 回バイオフィロンティア講演会, 徳島, 1B34, 2017 年 10 月 28 日
- (18) 鮫島啓, 松橋祐輝, 青山祐介, 熊谷直紀, 保延慶紀, 頼卓然, 梅津光生, 岩崎清隆, ヒト血液を使用可能な抗血栓性試験回路の評価, 第 28 回バイオフィロンティア講演会, 1B33, 徳島, 2017 年 10 月 28 日
- (19) 山家弘雄, 梅津光生, 岩崎清隆, 詳細な論文報告調査による脳動脈ステントの安全使用に向けた検討, 第 7 回レギュラトリーサイエンス学会学術大会, p.73, 東京, 2017 年 9 月 8 日
- (20) 宿澤孝太, 岩崎清隆, 埋植型治療機器の不具合報告の効率的分析手法の構築に向けた大動脈ステントグラフトの不具合報告の分析, 第 7 回レギュラトリーサイエンス学会学術大会, p.60, 東京, 2017 年 9 月 8 日
- (21) 志田卓哉, 梅津光生, 岩崎清隆, 腸骨静脈ステントの開発に必要な非臨床試験項目の抽出に関する研究: 血管内ステントに関するガイドンス・規格, 及び臨床研究の調査・分析によるアプローチ, 第 7 回レギュラトリーサイエンス学会学術大会, p.59, 東京, 2017 年 9 月 8 日
- (22) 朱曉冬, 梅津光生, 岩崎清隆, 有限要素法を用いた屈曲変形時における冠動脈ステン

トの応力解析, 日本機械学会 2017 年度年次大会, さいたま, 2017 年 9 月 4 日

(23) 梅津光生, 岩崎清隆, 伊関洋, 笠貫宏, 医療レギュラトリーサイエンスの大学院と研究所の開設による人材育成, 第 55 回日本人工臓器学会大会 (人工臓器第 46 巻第 2 号 2017 年), p.S-11, 東京, 2017 年 9 月 2 日

(24) 高田淳平, 加瀬川均, 馬原啓太郎, 朱曉冬, 熊澤亮, 梅津光生, 岩崎清隆, Normo 弁の性能試験: 拍動流性能と応力解析, 第 6 回ステントレス僧帽弁臨床研究学術集会, p.9, 東京, 2017 年 9 月 2 日

(25) 松橋祐輝, 鮫島啓, 前田真宏, 梅津光生, 岩崎清隆: 拍動循環可能な小容量抗血栓性試験回路の開発, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会プログラム・抄録集, pp100, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会, 岡山, 2017 年 5 月 28 日

(26) 赤岡拓, 宿澤孝太, 藤井智也, 伊藤大輝, 梅津光生, 大木隆生, 岩崎清隆: 腹部大動脈瘤モデルを用いたステントグラフトの留置形態に関する検討, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会プログラム・抄録集, pp101, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会, 岡山, 2017 年 5 月 28 日

(27) 奥田慶也, 岡村昭慶, 八木優大, 軽部裕代, 梅津光生, 岩崎清隆: 脱細胞化処理及び滅菌処理が組織のコラーゲンに及ぼす影響の検討, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会プログラム・抄録集, pp107, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会, 岡山, 2017 年 5 月 28 日

(28) 八木優大, 岡村昭慶, 奥田慶也, 梅津光生, 岩崎清隆: 脱細胞化処理溶液への浸透時間が脱細胞化腱と靱帯の力学特性に及ぼす影響検討, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会プログラム・抄録集, pp108, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会, 岡山, 2017 年 5 月 28 日

(29) 朱曉冬, 橋本雅也, 梅津光生, 岩崎清隆: 浅大腿動脈のねじり短縮複合負荷に対する自己拡張型 Ni-Ti 合金製ステントの有限要素解析, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会プログラム・抄録集, pp126, 第 40 回日本バイオレオロジー学会年会, 岡山, 2017 年 5 月 28 日

5. 研究活動の課題と展望 :

革新的医療機器を迅速かつ安全に開発・普及させてゆくためには, ① 個々の医療機器の特性に対応した性能, 使用法, 適応病態の三つの影響を考慮した性能試験法の開発, ② 有効性と安全性を科学的かつ合理的に検証し, また, リスクを低減する指針取得に資する評価方法の確立, が必須となる. 本研究では, 生体のモデリング・シミュレーション技術を発展させ, 特に動物, 小規模の症例数のヒトによる評価が困難で科学的評価法の開発が期待される.

自然と共生する知能情報機械系に関する基盤研究

研究代表者 橋本 周司
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

地球環境の未来を考えると自然を大きく捉えて理解することが必要である。そのためには未踏地域用のロボットと情報ネットワークの活用が不可欠であり、人間共存ロボットとは異なる視点からの研究が必要であるということが本研究の基本的な立場であり特徴である。本研究は、情報機械系と自然との共生を目指し、最終的に機械を介在した人間と自然の共生を実現するための研究開発であり、情報工学、ロボット工学の新しい適用分野を開拓し新しい社会基盤をつくることを目指すものである。そこで、人体を含む自然を対象とした知能情報機械系の基盤技術の確立を目的として、対象の変化に適応して働くセンサ・アクチュエータ系の理論的および実験的研究を行なう。また、既存の研究課題の深化に加えて、ロボット製作の新しい方法、より柔軟なモビリティの探求、自然の中で働くロボットのための多自由度ヒューマンインタフェースなど新しい研究分野にも挑戦する。

2. 主な研究成果

本プロジェクトは多くの研究者が参加していることから、多種多様な研究成果が生れている。プロジェクトの最終年度にあたって、当初の研究目的に沿ってプロジェクトを振り返れば、能動的なセンサ・アクチュエータネットワークおよび自然環境ロボットについては、災害対応ロボット「OCTOPUS」、環境および野生動物のモニタリングを行うロボット「WAMOT」および「WABEC」の開発とネットワーク運用において研究が進展した。また、エネルギー管理を含めた自律ロボットの群制御に関しては、多腕ロボットを制御するためのインタフェース、水中ロボットのエネルギー循環制御、モニタリングロボットのための充電ステーションの開発などを行った。これらはいずれもネットワークで接続された屋外全天候型の知能ロボットにかかわるものである。

以下では本年度の新しい研究成果を紹介する。その他の主な成果については、研究業績を参照されたい。

2.1 複合エアチェンバー型ソフトロボット

通常のロボットは構成するパーツの多くが硬く、変形性の乏しいものであるため、外部環境に関係なく一定の形を有するものが多い。一方、ソフトロボットは柔らかい素材で構成されているため、自然環境にも相性が良いとされている。このタイプのロボットは生物の機能を参考にしたものが多く、魚から毛虫に至るまで様々な動物を模倣したソフトロボットの開発が進んでいる。本研究では、空気の注入と排出により変形し移動するソフトロボットの製作を試みた。ロボットの体はシリコン製なので、軟らかい体で内部の機器を衝撃から守ることができる。

作製したロボットを図1上に示す。ボディはシリコンのエアチェンバーで構成されており、ロボット内部の空気量をミニエアポンプとミニバルブによって制御することで駆動する。コントロール

システムはロボット内部に取り付けた。これにより、制御に用いる電子部品は外部環境に晒されず、耐久性が高まる。駆動には、ロボット上部のエアタンク内の空気のみを使用しているため、外部環境の空気に依存せず、塵埃環境でも駆動可能である。ロボット下部は、ロボットの移動を実現する箇所であり、六つのエアチェンバーと四つのブレーキ（下向のストッパ）で構成されている。

本ロボットは、各チェンバーの空気を調節することで移動する。移動効率を高めるために、ブレーキで摩擦をコントロールして、前進や後退、または旋回を達成する。ブレーキ部分の詳細画像を図1下に示す。この部分はロボット前後に四つあり、シリコンで構成されている。ブレーキが作動していない時には、地面から約 10mm 離れており、作動すると地面と接触する構造になっている。ブレーキには鉾が付いており、作動すると地面に刺さることでロボットを動きを止めるアンカーの役割をする。

ロボットが前進する際のロボット下部及びブレーキ部分の制御の様子を図2の左に示す。まず最上部の図のようにロボット後部のブレーキをかけ、後部を固定する。次に前のエアチェンバーから順番にポンプと電磁弁で空気を入れる。その後、前のブレーキをかけ、後ろのブレーキを外す。こうすることで、ロボットの前の部分が固定される。最後に、後ろからエアチェンバーで順に空気を排出することで前進する。前進の手順を逆にすると、ロボットは後退する。

また、左に旋回する際の制御の様子を図2の右図に示す。左旋回には、右側のエアチェンバーとブレーキを使用する。制御の手順は、通常の前進や後退のアルゴリズムと同様のものである。また、同様に右旋回は左のエアチェンバーとブレーキを制御することで実現可能である。

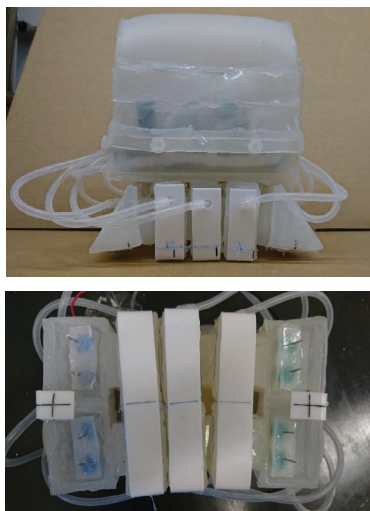


図 2.1 ソフトロボットの外観
上) 側面、下) 底面

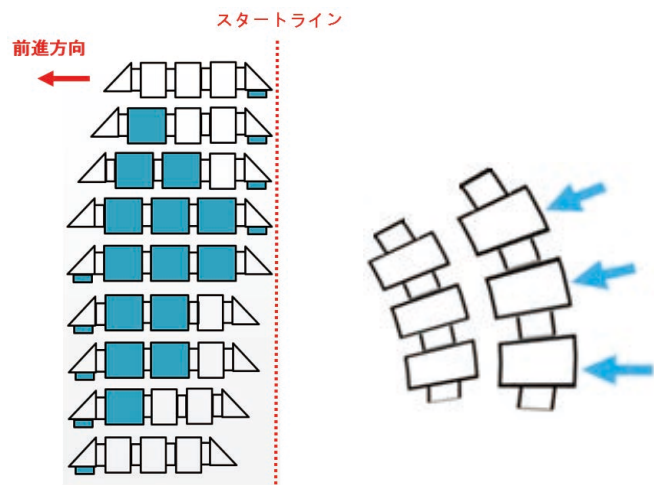


図 2.2 エアチェンバーによる移動制御
左) 直進 右) 旋回

開発したソフトロボットの移動を検証するため動作実験を行った。用意した実験フィールドはビーズを散布して滑りやすくした粘土面である。バラツキはあるもののエアチェンバーの制御を系統的に行うことによって、身体が伸縮して移動できることが判る。また、移動実験を他の地面環境でも行った。用意した環境は木材、コンクリートおよび土のフィールドである。これらの環境ではアンカーの鉾が効かず移動が逆方向になることもあり、環境に応じた制御が必要であることが判った。

今回は複合エアチェンバーによる移動を試みたが、同じ道具立てでロボットの形状の制御も可能であり、起伏のある壁面などに密着するような形状制御も検討している。

表 2.1 実験結果

	一回目	二回目	三回目	四回目	五回目	平均値
前進距離 (mm)	20	15	11	13	12	14.2
後退距離 (mm)	22	20	12	15	15	16.8
時計回り (°)	5	6	10	5	8	6.8
逆時計回り (°)	5	5	5	10	7	6.4

2.2 塵埃の分布を考慮した回収ロボットの経路計画

環境に分散したものを回収し集めることはロボットに求められる基本的な人力代替の機能と言える。その代表的な例は掃除ロボットであり、これまでも数多くの開発例がある。それらの多くは、いかにして一度の掃除で掃除対象領域全体を漏れなくかつ効率的に移動するかという観点から行われてきた。しかしながら、実際の環境では、塵埃は領域内に均一に分布しているわけではなく、その環境特有の偏りがある。したがって、掃除ロボットが環境特有の塵埃の分布の傾向を把握し、掃除経路の計画に取り入れることにより効率化が図れる。ここでは、市販の埃センサ (GP2Y1023AU0F) を取り付けた掃除ロボット (Roomba 537J) に掃除対象領域を掃除させて塵埃の分布を取得し、その結果から環境の塵埃分散傾向を推測する手法を検討した。また、推測結果を考慮した掃除経路計画の効果を実機により確認した。

経路提示のための環境地図として、対象領域を掃除ロボットと同じ大きさのセルに分割したグリッドマップを用いる。ロボットが移動できるのは、ロボットの存在するセルに隣接する周囲 8 セルである。掃除ロボットが消費するエネルギーは、セル間の移動距離と転回動作にのみで決まるものとする。本手法は、塵埃の分布取得、塵埃の分布の予測、予測された塵埃の分布に基づいた経路計画の三つにより構成される。

1) 塵埃の分布は、掃除ロボットに取り付けた埃センサを用いて、掃除対象領域全体を巡回して掃除することで取得する。

2) 塵埃の分布の予測は、過去の掃除で得た塵埃の分布から、その環境特有の塵埃の拡散の傾向を各層のユニット数を対象領域のセル数とした 4 層のニューラルネットワーク (以下 NN) で学習することにより行われる。これは、塵埃の蓄積と拡散が繰り返すにより最終的な分布が形成されるという仮説に基づいている。そこで、NN の入力を拡散前の塵埃の分布 (前回掃除後の塵埃の分布全体に、均一な塵埃を加えたもの)、出力を拡散後の塵埃の分布 (ロボットが取得した塵埃の分布) とした。

3) 掃除経路の計画では、四段階のプロセスにより塵埃の分布を考慮した効率的な掃除経路を決定する。まず、加法的重み付き重心離散ボロノイ図法に Newton 法による重みの最適化を組み合わせた手法を用いて、掃除対象領域を各部分領域内の塵埃の量が均一になるよう分割する。次に、遺伝的アルゴリズムを用いて、分割された各部分領域の通過順を塵埃の密度が高い部分領域を優先的に移動するように決定する。その後、タブーサーチを用いて、各部分領域内を効率的に移動する経路を決定する。最後に、このタブーサーチを経路全体に適用することで、移動経路を最適化する。



(a) ロボット本体



(b) センサ部

図 2.3 使用したロボット

図 2.3 に実機ロボット(a)と埃センサ(b)の外観を示す。このロボットを用いて、塵埃の分布を認識できるか、また、認識した塵埃の分布を用いて、NN により塵埃の分布の傾向を学習できるかを実験的に検証した。掃除対象領域は縦横 3.6m(12*12 セル)の屋内床面である。ロボットの位置情報取得には、HTC Vive を使用した。塵埃の分布は、掃除対象領域の一部(図 2.4 の赤枠内)に、人為的に塵埃を撒くことで作成した。実際に掃除ロボットが取得した塵埃の分布の例を図 2.4 に示す。図中で輝度値が低いセルは、塵埃が多く検出されたことを意味する。赤枠で囲った範囲に多くの塵埃が検出されていることから、実際の環境と一致しており埃センサが正しく塵埃の分布を取得したことが確認された。実測データで学習した NN に、領域全体に均一に塵埃が蓄積した分布を入力し、塵埃の分布を予測した結果の例を図 2.5 に示す。図 2.4 の赤枠で囲われた範囲と同じ範囲で塵埃が多く分布するような分布が予測されていることから、塵埃の分布の傾向を学習できていることが判る。

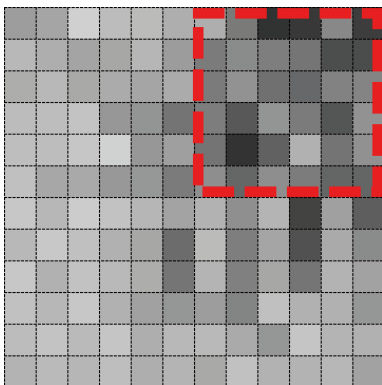


図 2.4 掃除対象領域

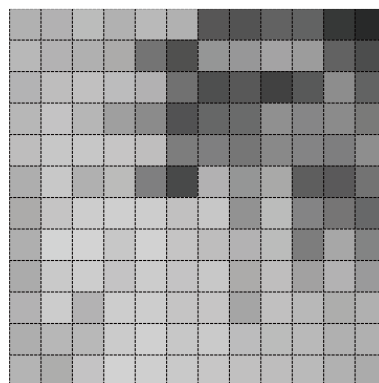


図 2.5 塵埃分布予測結果

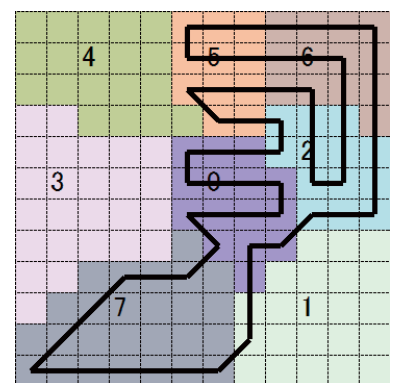


図 2.6 掃除経路

上の実験で予測した塵埃の分布に対して前述の経路計画アルゴリズムを適用し、実際に掃除ロボットに掃除させたときの結果を確認する実験を行った。図 2.5 の塵埃の分布に対して前述の経路計画アルゴリズムを適用して得られた掃除経路を図 2.6 に示す。実機に、提案手法(図 2.6 の経路)と従来手法(塵埃の分布を考慮せず、領域全体を掃除)で掃除させたときの結果を表 2.2 に示す。この結果から、環境特有の塵埃の分布の傾向を掃除経路に反映させ、効率的に塵埃を収集する掃除経路が生成されていることが確認できる。掃除ロボットが同じ環境を繰り返し掃除する状況において、本手法によれば粉塵の収集率を下げることなくより効率的に掃除を遂行できることが判る。

表 2.2 掃除効果の比較

手法 評価指標	提案手法	従来手法
塵埃収集率[%]	85.6	86.2
掃除時間[s]	240.7	421.3

2.3 ニューラルネットワークを用いた倒立振子のブラインドバランス制御

ロボットを正確に制御するためには、ロボットの各部位の寸法や重量などに依存する制御パラメータの決定が必要である。しかしながら、対象のモデルが明確に得られないなど、制御パラメータを得ることが難しい場合には、制御パラメータの決定には試行錯誤や経験的な知識が要求される。これに対してベイズ最適化を用いて制御パラメータを自動的に決定する手法が提案されているが、学習に時間がかかるため、リアルタイムには制御パラメータを調整できない。このため、システムが変化すると制御が不能になってしまう。そこで、ロボットの動作状態と制御パラメータの関係をニューラルネットワークに学習させることで、パラメータが未知のロボットの制御パラメータをリアルタイムに調整することを考えた。ここでは、フライホイールによる倒立振子のバランス制御を例題として、この方法の実現性を検証した結果を述べる。

フライホイールを用いた倒立振子のバランス制御では、一般に制御入力トルク u を以下の式で与えることにより、制御を行う。

$$u = -(k_1 \theta_p + k_2 \dot{\theta}_p + k_3 \ddot{\theta}_w) \quad (1)$$

ここで、 θ_p 、 $\dot{\theta}_p$ および $\ddot{\theta}_w$ は、それぞれ振子が鉛直方向となす角度、振子の角速度、フライホイールの角速度である。また、 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]$ はフィードバックゲインを表し、これが倒立振子の制御に必要な制御パラメータである。

フィードバックゲインは振子ごとに最適値があり、振子の密度が均一であれば、長さ L と質量 M の値を元に、線形二次レギュレータを用いて求めることができる。しかしながら、ここでは振子の長さや質量が未知であるとして、振子の制御中に適切なフィードバックゲインを推定することを考える。そのために、振子の各時刻の運動状態とフィードバックゲインの間の関係をニューラルネットワークに学習させ、制御システムに組み込む。これにより、パラメータ未知の振子に対しても制御を試みつつ、運動状態を取得することで制御が可能となる。

ニューラルネットワークの入力は、振子の角度、角速度、制御入力トルクで、出力はフィードバックゲインである。瞬時の角度、角速度、トルクだけでは安定的にフィードバックゲインを推定できない。そのため、その時々々の運動状態から過去 N ステップ分の角度、角速度、制御入力トルクの時系列データを入力とする。 N を 10、20、50、100 と変化させて学習させた結果を比較したところ、 N が増えれば増えるほど推定精度が上がるということが分かった。そこで、以下の実験では 100 ステップ分を入力とした。

ニューラルネットワークは入力層 300、中間層 500、出力層 3 の 3 層構造である。活性化関数には $\tanh$ を使い、誤差逆伝播法により学習を行った。

ニューラルネットワークの学習データはMATLAB/Simulinkを用いて収集した。学習に用いたフライホイールは質量 228g、半径 0.100m、慣性モーメント $2.16 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、モータは質量 204g、最大回転数 1350rpm、最大トルク 0.452Nm である。この条件は、およそ長さ 1m までの振子を倒立制御できるものである。それぞれバランスを保てる範囲で振子の長さを 0.1m ごとに 0.2 m~1.0m、質量を 0.1kg ごとに 0.1 kg~1.5kg、振子の初期角度を 1° ごとに $1^\circ \sim 10^\circ$ で変化させた。振子の角度、角速度、入力トルクの 3 つを過去 100 ステップ分取得したものを 1 セットとして入力とし、最適なフィードバックゲインを教師データとして学習を行う。ここでは 1 ステップを 0.01 秒としているため、100 ステップ分で 1 秒間のデータが入力となる。ただし、初期段階では過去のデータが取れないため、初めの 1 秒間はフィードバックゲインを一定値とした。

制御中に振子の長さや質量が変化しても、適応的に制御できるかを確認するために、制御中に振子の長さや質量を変化させるシミュレーション実験を行った。制御開始時の振子を、長さ 0.64m、質量 0.82kg とし、1.5 秒後に長さ 0.96m、質量 0.82kg に変化させた。ニューラルネットワークを用いて制御した結果と、フィードバックゲインを制御開始時の長さや質量に最適化した値で制御した結果を比較した。どちらの制御も初期角度は 2° である。目標は振子の角度を 0 にすることである。

図 2.7、図 2.8 にそれぞれの制御方法による振子角度、フィードバックゲインの結果を示す。図 2.7 より、フィードバックゲインを固定した制御 (lqr) では、振子の長さが変化するとバランスを崩してしまうが、ニューラルネットワークを用いた制御 (NN) では安定することが示された。また、図 2.8 からニューラルネットワークを用いた制御では、制御中に振子の長さや質量が変化しても、概ね適切なフィードバックゲインに近い値で追従したことが示されている。これらから、ニューラルネットワークを用いてフィードバックゲインを適応的に調整することで、振子のパラメータ変化に対してロバストな制御ができたといえる。

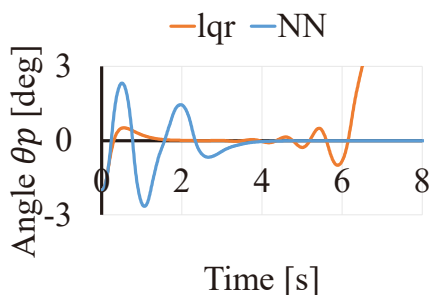


図 2.7 振子の角度

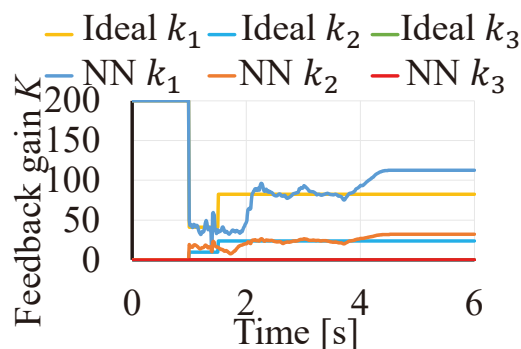


図 2.8 フィードバックゲイン

実機による制御実験を行ったところ振動的な倒立となった。そこで、実機のクーロン摩擦を調べたところ、シミュレーションでは無視していたクーロン摩擦の影響が無視できないことが分かった。今後はこの問題を解決すると共に、制御の範囲を二次元に拡張し、どのような形状の物体でもバランスが取れる取り付け型の姿勢安定化デバイスにすることを考えている。

3. 共同研究者

山川 宏 (早稲田大学 名誉教授)、三輪 敬之 (理工学術院 教授)、高西 淳夫 (理工学術院 教授)、小林 哲則 (理工学術院 教授)、菅野 重樹 (理工学術院 教授)、藤江 正克 (早稲田大学 名

誉教授)、梅津 光生 (理工学術院 教授)、岩田 浩康 (理工学術院 教授)、石井 裕之 (理工学術院 准教授)

4. 研究業績

< 主要な学術論文 >

- 1) Sasaki, T., Enriquez, G., Miwa, T. & Hashimoto, S., "Adaptive Path Planning for Cleaning Robots Considering Dust Distribution." *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.30, No.1, pp.5-14, 2018.
- 2) Miwa, T., Sakai, Y. & Hashimoto, S., "Learning Four-dimensional Spatial Representations through Perceptual Experience with Hypercubes," *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2017.
- 3) Shigemune, H., Kuwajima, Y., Matsushita, Y., Maeda, S., Cacucciolo, V., Cianchetti, M., Laschi, C., Sawada, H., Hashimoto, S. & Sugano, S., "Swinging Paper Actuator Driven by Conduction Electrohydrodynamics," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2017.
- 4) Shigemune, H., Maeda, S., Hashimoto, S. & Sugano, S., "Simultaneous printing of multiple origami structures," *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, 2017.
- 5) Miwa, T., Nakai, Y., Sawada, H. & Hashimoto, S., "4-D Space Visualization with Hidden Hypersurface Removal," *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 381-384, 2017.
- 6) Manawadu, U. E., Kamezaki, M., Ishikawa, M., Kawano, T. & Sugano, S., "A multimodal human-machine interface enabling situation-Adaptive control inputs for highly automated vehicles," 28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 1195-1200, 2017.
- 7) Murata, S., Hirano, K., Arie, H., Sugano, S. & Ogata, T., "Analysis of imitative interactions between humans and a robot with a neuro-dynamical system," *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 343-348, 2017.
- 8) Chen, K., Kamezaki, M., Katano, T., Ishida, T., Seki, M., Ichiryu, K. & Sugano, S., "Analysis of operation strategy in a multi-operator control system for four-arm disaster response robot OCTOPUS," *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 514-519, 2017.
- 9) Chen, K., Kamezaki, M., Katano, T., Kaneko, T., Azuma, K., Uehara, Y., Ishida, T., Seki, M., Ichiryu, K. & Sugano, S., "A preliminary study on a groping framework without external sensors to recognize near-environmental situation for risk-tolerance disaster response robots," 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 181-186, 2017.
- 10) Sato, R., Kamezaki, M., Niuchi, S., Sugano, S. & Iwata, H., "A pre-offering view system for teleoperators of heavy machines to acquire cognitive maps," 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Conference. Institute of Electrical and

Electronics Engineers Inc., p. 61-66, 2017

- 11) Okamura, N., Kobayashi, Y., Sugano, S. & Fujie, M. G., "Change detection technique for muscle tone during static stretching by continuous muscle viscoelasticity monitoring using wearable indentation tester," International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR 2017, p. 1686-1691, 2017.
- 12) Murata, S., Yamashita, Y., Arie, H., Ogata, T., Sugano, S. & Tani, J., "Learning to Perceive the World as Probabilistic or Deterministic via Interaction with Others: A Neuro-Robotics Experiment," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 28, 4, p. 830-848, 2017.
- 13) . Tomo, T. P., Schmitz, A., Enriquez, G., Hashimoto, S. & Sugano, S., "Wayang robot with gamelan music pattern recognition," Journal of Robotics and Mechatronics. 29, 1, p. 137-145, 2017.
- 14) Tanaka, K., Zhang, D., Inoue, S., Kasai, R., Yokoyama, H., Shindo, K., Matsuhira, K., Marumoto, S., Ishii, H. & Takanishi, A., "A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), p. 1503-1508, 2017.
- 15) Hashimoto, K., Matsuzawa, T., Teramachi, T., Uryu, K., Sun, X., Hamamoto, S., Koizumi, A. & Takanishi, A., "A four-limbed disaster-response robot having high mobility capabilities in extreme environments", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 5398-5405, 2017.
- 16) Otani, T., Hashimoto, K., Miyamae, S., Ueta, H., Sakaguchi, M., Kawakami, Y., Lim, H. O. & Takanishi, A., "Angular momentum compensation in yaw direction using upper body based on human running", IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), p. 4768-4775, 2017.
- 17) Matsuzawa, T., Hashimoto, K., Sun, X., Teramachi, T., Kimura, S., Sakai, N., Yoshida, Y., Imai, A., Kumagai, K., Matsubara, T., Yamaguchi, K., Tan, W. X. & Takanishi, A., "Crawling gait generation method for four-limbed robot based on normalized energy stability margin," IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, p. 223-229, 2017.
- 18) Matsuzawa, T., Koizumi, A., Hashimoto, K., Sun, X., Hamamoto, S., Teramachi, T., Sakai, N., Kimura, S. & Takanishi, A., "Crawling motion and foot trajectory modification control for legged robot on rough terrain," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), p. 1976-1982, 2017.
- 19) Nomura, K., Sato, M., Takeuchi, H., Minoru, K., Ryoichi, T., Ishii, H. & Takanishi, A., "Development of in-pipe robot with extension hose and balloons," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), p. 1481-1486, 2017.
- 20) Tanaka, K., Okamoto, Y., Ishii, H., Kuroiwa, D., Mitsuzuka, J., Yokoyama, H., Inoue, S., Shi, Q., Okabayashi, S., Sugahara, Y. & Takanishi, A., "Hardware and control design considerations for a monitoring system of autonomous mobile robots in extreme environment," IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics,(AIM), p. 1412-1417, 2017.
- 21) Li, C., Shi, Q., Li, K., Zou, M., Ishii, H., Takanishi, A., Huang, Q. & Fukuda, T., "Motion evaluation of a modified multi-link robotic rat," IEEE/RSJ International Conference on

Intelligent Robots and Systems, p. 2397-2402, 2017.

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトでは、情報ネットワークに組み込まれたロボット技術とその地球環境全体への親和性の確保に必要とされる技術とその方法論について種々の確度から研究を進めてきた。長期大型プロジェクトとしては 2017 年が最終年度であるが、プロジェクト期間中における IoT の進展とビッグデータの普及と AI の進化には目覚ましいものがあった。

プロジェクトの計画時に想定していたセンサばかりでなくアクチュエータも繋がることによる柔軟かつ物理的な作用を伴うネットワークの構築にはまだ課題が残されているが、これまでの成果によりその最終的な姿が見えてきたと考えている。(図 5. 1)

- Robot = Computer + Body = AI with mobility
- Robot = Mobile Sensor
- Robot = Actuator-Sensor Complex
- “Robots make IoT more flexible and richer”
- “Distributed sensors (Upward stream)”
- “Distributed actuators (Downward stream)”

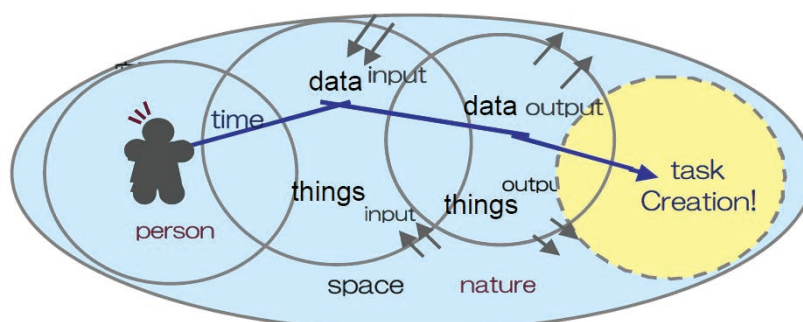


図 5.1 ビッグデータ、IoT とロボット

従来、自律ロボットという名ですべてをロボットの機体に搭載する独立性がロボット研究のひとつの目標であったが、最近の情報ネットワークの発展とクラウド上の AI の出現は、ロボット開発の方向性を大きく変えた。つまり、計算的に大きな負荷のかかる情報処理的な仕事は、ネットワーク上のコンピュータ群に任せることが可能になったことから、「自律」の意味が変わってきたのである。AI は知的なロボットにとって必須であるが、ロボット研究者の注力すべきことは、ロボット動作を生成するための知的な情報処理機構の開発というより、人間あるいは自然環境とのインタラクションに直接関係するインタフェースとアクチュエーションの物理的な機構とその制御になるように思われる。また、これらの物理的な実体を持つロボットが多数結合したネットワークが環境に作用する際の総体としての影響評価と分散と集中の融合したシステム設計の問題も大きな課題となってきた。さらに、自己組織型組立によるロボット新しい制作方式の確立、ソフトウェアで実現されている機械学習に対応して身体構造の自己増殖・進化の機構を実体のロボットで実現することもロボット工学のフロンティアと言える。

これらの新しい課題の理論的研究と同時に、災害対応ロボット、医療ロボット、環境維持モニタリングなどの社会実装からのバックキャスト思考も自然と共生する知能機械の研究には重要である。本プロジェクトの成果を引き続き発展させる中でこれらに対する解答を用意したい。

量子ビームが可能にする高分子ナノ構造体の創製

研究代表者 鷲尾 方一
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

高分子材料は、その軽量性、耐薬品性、絶縁性、生体分子適合性等多くの特性を備えている。本研究ではこれらの特性を持つ種々の高分子材料に対し、イオンビームや電子線等のいわゆる量子ビームを利用し、マイクロメートルスケールからナノメートルスケールの3次元構造体の創製技術を開発するとともに、その応用開発を行い、本研究によりもたらされる新しい機能性材料の実用化も目指す。高分子のマイクロおよびナノ構造体は種々のメンブレンフィルター、反射防止膜、MEMS（マイクロマシン）、創エネデバイス作製技術等への応用が期待されているが、現在、ナノ構造体を効率良く作製する実用的な技術は非常に限られており、本研究開発では、汎用性の高い種々の量子ビームを縦横に駆使し、望まれる構造体を安価かつ大量に創製する技術の開を目指すものである。

本研究では、高分子を材料として、放射線照射による化学反応に対する基礎的知見の取得と、応用研究として燃料電池用の空間制御機能材料の創製を目的としている。すなわち、高分子に対する電子線やイオンビーム誘起の放射線化学に関して、基礎から応用に至る非常に多岐に渡る先端科学分野に貢献する基礎的研究を行っている。具体的には、量子ビームからの固体材料へのエネルギー付与や放射線場で使用される材料の健全性、材料への機能付与や加工等に関する研究を行う。空間制御機能材料に関しては、電子ビームやイオンビームによって、マイクロ・ナノ空間でのエネルギー付与量を制御し、空間的な分布を持ったラジカルを誘起する。この材料をグラフト反応させることで、機能性材料を創製することができる。このような技術を縦横に駆使し、今年度は先進的な燃料電池用電解質膜開発を目的とした空間制御機能材料の創製を行った。なお、温度応答性の医療用デバイス開発についても研究を継続しているが、それについては次年度以降まとめて報告する。

2. 主な研究成果

本年度は、主に燃料電池用電解質膜の親水／疎水部機能制御技術を応用し、付与領域を微細制御された固体高分子型燃料電池用電解質膜の作製を試みた。フッ素系高分子の共重合体(PFA)に対して、中エネルギー照射室にてビームサイズ $\phi 23 \pm 2$ mm に制御した各種イオン(ここでは Ne と Ar イオン照射の結果について説明する)を室温真空中(5×10^{-4} Pa 以下)で照射した。照射試料は、厚さ 50 μ m 及び 25 μ m の PFA フィルムを SRIM コードによるそれぞれの種イオンの飛程分の膜厚になるように重ねあわせて、スタック構造とし Ni メッシュ(200mesh, 開口幅:72 μ m, 線幅:50 μ m)を上被せて照射したものと Ni メッシュをかぶせない通常の照射試料を作成した。本研究では、25 μ m の PFA については、傾斜が大きい Layer2 をサンプルとして用いた。この照射により、試料内にラジカルを誘起し、後グラフト反応を利用して、空間的に機能制御された燃料電池用電解質膜を合成した。(図 1 にそれぞれの厚さの膜に対するエネルギー付与の様子を示した)

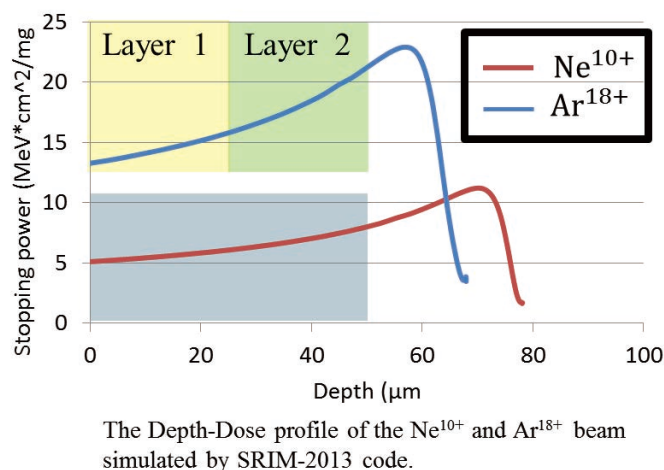


図1 PFA に対する Ne 及び Ar 照射時のエネルギー付与分布 (Ne 照射については 50 μm 、Ar 照射については 25 μm の PFA2 層のうち第 2 層目 (Layer2) を用いた)

本研究の基本的なコンセプトは、燃料電池の動作時に膜の膨潤による電極との大きな応力発生が、長期にわたるオンオフを含む運転に際して界面の剥離などの大きな問題を生じることを防ぐため、電解質膜の平面方向の寸法安定性を重イオンビームによる微細構造を導入することで確保するものである。また以前の研究において、膜の深さ方向に電解質の濃度を適度に制御することで、運転中のフラiddiングによる出力低下を防ぐことが可能であることがわかっており、これらの技術を複合的に導入し、実用性の高い微細構造電解質膜を創製することを目指した。

具体的には前述のように Ne イオン及び Ar イオン照射時に図2のように Ni メッシュを高分子の照射に際し表面にセットした微細加工膜と、メッシュを置かない通常膜を準備し、これらに対してイオン交換基を導入してそれぞれを燃料電池用の電解質膜として、MEA (微細加工膜 (M-PEM)、通常膜 (N-PEM)) を作成しそれぞれについて発電性能を確認した。

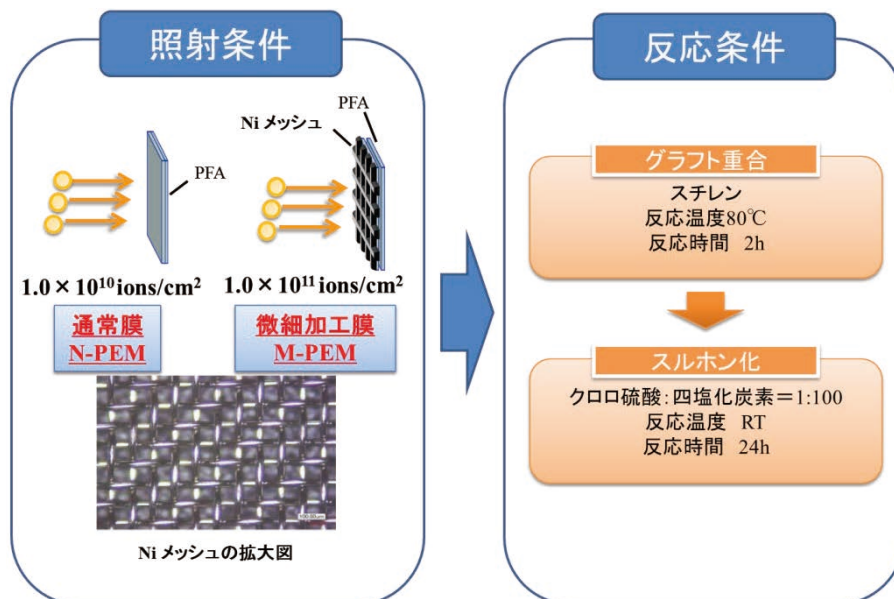


図2 HIMAC における PFA の照射イメージと反応条件

その結果、図 3 に示すように微細加工膜において発電性能の低下がみられた。

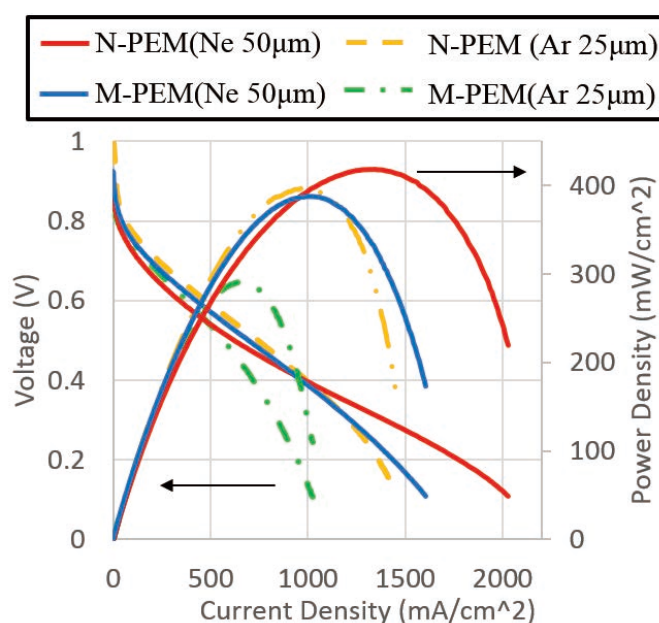


図 3 製作した電解質膜を用いた発電試験結果

これは電解質部分の相対的な量が通常膜に比べて少なく、しかも表面に凹凸ができてしまっていることによる界面の抵抗値の上昇による影響であると推論される。そこで少なくとも凹凸についての対策を別途施した。具体的にはM-PEM(Ne50µm)の表面にあらかじめ低エネルギー電子線(UL-EB)を50kV 及び60kVの条件で照射し、凹凸を除去した微細加工膜を新たに作成した。その結果を図 4 に示す。

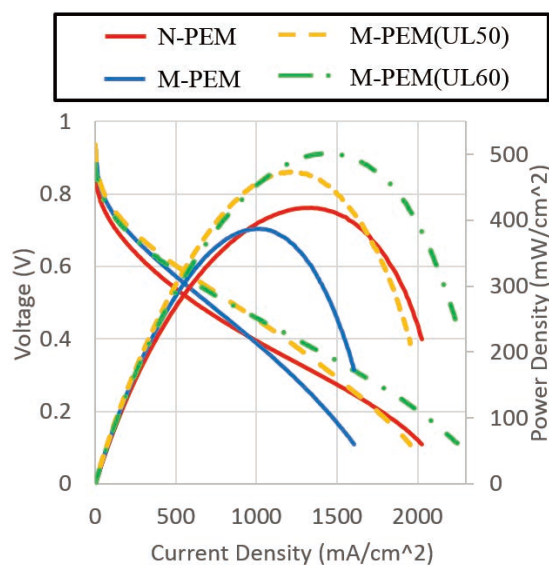


図 4 表面平滑化 M-PEM の発電性能の結果

この結果、あらかじめ 60kV の低エネルギー電子線を照射し表面処理を行った微細加工膜において、大きな性能向上を確認した。これらから微細加工を施した膜において、まず潜在的に非常に長期のオンオフを含む運転に対して性能劣化が少ないと思われる膜について、機能傾斜と表面処理によって、従来を凌駕する性能の確保が可能であることを見出した。

3. 共同研究者

篠原 邦夫 (理工学研究所・招聘研究員)	坂上 和之 (高等研・助教)
伊藤 政幸 (理工学研究所・招聘研究員)	三浦 喬晴 (理工学研究所・招聘研究員)
佐々木 隆 (理工学研究所・招聘研究員)	保坂 勇志 (理工学研究所・招聘研究員)
大山 智子 (理工学研究所・招聘研究員)	長澤 尚胤 (理工学研究所・招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

4.2 総説・著書

横田龍輝「放射線グラフト重合法を利用した高分子アクチュエータの開発」 放射線と産業第142号 P26、2017年7月

4.3 招待講演

Masakazu Washio,

“Fabrication of Functional Polymer Materials using Radiation-induced Grafting Technology” ACRR2017 Aug.2017, Astana, Kazakhstan

4.4 受賞・表彰

三上翔平 「DDS 構築へ向けた電子線グラフト重合による pH 応答膜の作成」
第 54 回アイソトープ放射線研究発表会、若手優秀講演賞

西留武宏, JSRC Young Scientist Grant Award for ACRR2017

“Development of Organic/Inorganic Hybrid Micro-functional low-humidity Proton Exchange Membranes for PEFCs fabricate by using Ion Beam irradiation and sol-gel method”

4.5 学会および社会的活動

日本放射線化学会や日本アイソトープ協会、日本加速器学会等の活動を通じ、本プロジェクトの成果を種々の場で発信するとともに、実用に際する共同研究も視野に入れた活動を強化する。

5. 研究活動の課題と展望

イオンビームや、種々のエネルギーの電子線、更には良く制御された（空間的、時間的に）X線などを用い、微細な構造を持つ、種々の先端デバイスの創製について、一層の期待がもたれている。また実用化を目指すため、電子線を用いた微細加工についてもさらに検討を加える。2018年度は、これら量子ビームを組み合わせた実用的なナノデバイス創製に向けた研究を継続する。

生理活性物質科学

研究代表者 竜田 邦明
(早稲田大学 栄誉フェロー 名誉教授)

1. 研究課題

多様な生理活性をもつ天然生理活性物質（天然物）においては、ある活性が他の活性の副作用として働き、実用化に問題を生じる場合が少なくない。したがって、それらの活性発現機構を明らかにすることによって、活性を構造ユニット別に分離することができれば、副作用の低減のみならず望みの活性を増強できる可能性がある。それはナノレベル以下で精密に分子設計・合成することにより初めて成し遂げられる。

そこで、本研究は多様な活性をもつ天然物の実践的な全合成を完成することを第一の目的とする。つぎに、その合成手法を用いて種々の構造ユニットを合成して、構造-活性相関研究をナノレベルで行い、それぞれの活性発現に必要な最小ユニットを明らかにすること（活性分離）を第二の目的とする。さらに、天然物より優れた生理活性や新しい活性をもつリード化合物を創製して創薬に資することを第三の目的とする。すなわち、全合成は最終目的ではなく、基礎研究から応用研究までを包含して学際領域を広く活性化することから、つぎの科学への出発点であるという概念“すべては全合成から始まる”を例証する。

社会問題にもなっている生活習慣病（がん、糖尿病、高血圧症など）に有効な医薬品を主に指向して研究対象の天然物を選択してきた。

2. 主な研究成果のまとめ

1) これまで 102 種の天然生理活性物質（天然物）の全合成の達成に成功したが、そのうち 96 種については世界最初の全合成である。その完成数は世界的にも傑出しており、平成 24 年 10 月の朝日新聞に「神の業、世界初連発」と報道されるなど特筆すべきである。また、その合成研究において、新規の反応も見だし、独創的な合成法も確立している。

2) 特に、主要な医薬品として実用されている四大抗生物質群の全合成研究において多大の功績を挙げている。特異な構造と抗菌活性を示すことから、アミノグリコシド系、マクロライド系、テトラサイクリン系およびペニシリン系抗生物質は四大抗生物質群と称されているが、それぞれの代表物質の世界最初の全合成を含むすべての光学活性な天然型の全合成に世界に先駆けて成功し、国内外に極めて大きいインパクトを与えた。五大大陸の最高峰制覇に匹敵すると報道された。中でも、テトラサイクリンの全合成（平成 12 年に完成）は、発見以来約 50 年ぶりの世界初の完成であった。

3) 再生可能な糖質を原料に用いる合成法を開拓して、多種多様な天然物の全合成を完成し、絶対構造のみならず生理活性をも確認した。特に、上記の光学活性体の全合成は、すべて糖質を不斉炭素源に用いて達成されたものであり、その他の約 60 種の天然物の全合成にもその方法論と概念の有用性と重要性を例示したことから、糖質を不斉炭素源として用いる天然物の合成法は有機合成化学の重要かつ一般的な方法となり、有機合成化学の発展に貢献した。

抗生物質を始め自然界に存在する天然物の多くは不斉炭素原子を含み、ほとんどの場合その立体異性体はもとの生理活性を示さないので、天然物と同じ立体配置を持つ化合物を合成し、天然物の構造と生理活性の確証を得るには、立体配置の確定している物質を原料として、立体特異的な反応を組み合わせて目的の天然物のみを合成することが重要となる。

そこで、立体配置が確定している糖質を出発原料（不斉炭素源）に選び、目的の天然物のみを合成する立体特異的合成法を開拓して、多種多様な天然物の全合成に成功した。また、天然物の全合成や関連物質の合成に有用な数々の新しい有機合成反応も創出した。これら一連の研究によって、糖質を不斉炭素源に用いる方法は多種多様な構造を有する複雑な天然物の合成にも極めて有用であることを示し、有機合成の重要な一つの方法論としての基礎を築いた。

4) 天然物の全合成研究をさらに発展させ、その知見と方法論を駆使、結集して構造-活性相関研究を行って、活性発現の最小ユニットを明らかにし、多くの天然物の活性発現機構を化学的に解明した。特に、糖尿病、肥満症、がん転移ウイルスなどに関与する糖質分解酵素の阻害物質の研究において、阻害活性を示す天然物を全合成した後、構造-活性相関研究を分子レベルで行い、それらが相当する酵素に拮抗的に作用して阻害することを見だし、理論的にすべての糖質分解酵素（グリコシダーゼ）阻害物質の創製が可能であることを初めて例証した。このことは、抗糖尿病薬の開発に寄与すると共に、糖質分解酵素を多用する糖鎖工学、生化学などの発展にも貢献した。

5) さらに、実用化にも力を注ぎ、構造-活性相関研究により天然物より強力な活性を示す多くの新規化合物を創製した。中でも、アドリアマイシンの誘導体の構造-活性相関研究を徹底的に行った結果、従来の心臓毒性、脱毛などの副作用が極めて低く、制がん活性が強力である THP-アドリアマイシンを創製し、抗腫瘍剤（ピラルビシン）として実用に供した。これは、特に膀胱がんの特効薬として評価されている。また、歯周病菌検出薬（ペリオチェック）も開発・実用化した。

6) 全合成の知見を活用して基礎的な新規合成法のみならず工業化可能な実践的合成法を数多く開発し、いくつかの実用化を実現している。中でも、独自の骨格転位反応を用いて開発したセフェム系抗生物質（ファーストシン）の側鎖部分の合成法の工業化は、有機合成化学のみならず有機工業化学の発展にも貢献した。また、有害な塩素系有機溶剤の代替溶剤としてチアジアゾールを実用化した。

3. 研究業績等

3.1 著書等

竜田邦明, “対称性を利用したヒバリマイシノンの収束的全合成”, *天然有機化合物の全合成*, 日本化学会編 (化学同人), 2018, 2018 年 3 月.

3.2 科学者のことば

竜田邦明, 100 個の条件検討をしても思うように進まなければ 101 個目をやればよい. *元素手帳* (化学同人), 1 (2018).

3.3 論文, 新聞報道等

竜田邦明, すべては全合成から始まる, *HARIMA QUARTERLY* (ハリマ化成), **131**(4), 2 (2017).

Kuniaki Tatsuta, Foreword celebrating the career of Professor Satoshi Ōmura, *J. Antibiot.*, **70**(5), 455 (2017).

竜田邦明, “知の創造と活用”, *薬事日報*, 2018, 2018 年 3 月 7 日.

竜田邦明, 「試薬の日」記念講演会, *化学工業日報*, 2018 年 3 月 8 日.

竜田邦明, 「試薬の日」記念講演会, PHARM TECH JAPAN ON LINE, 2018 年 3 月 9 日.

竜田邦明, 日本試薬協会会長との特別対談, 化学工業日報, 2018 年 3 月 9 日.

竜田邦明, 早稲田大学歴史館展示「糖質を原料に四大抗生物質の全合成」, 2018 年 3 月 20 日.

竜田邦明, 「精留塔」, 試薬の信頼性, 化学工業日報, 2018 年 3 月 14 日.

3.4 特別講演・特別講義

“自然に学び自然を超す－知識を知恵に”, 早稲田大学理工学術院 先進理工学部応用化学科 応用化学総論, 東京, 2017 年 5 月.

“自然に学び自然を超す－知識を知恵に”, 早稲田大学理工学術院 理工文化論, 東京, 2017 年 7 月.

“すべては全合成から始まる”, 静岡県立大学薬学部 特別講演, 静岡, 2017 年 9 月.

“すべては全合成から始まる”, 第 49 回 有機合成セミナー (大阪工研協会)「健康と環境に貢献する有機合成ならびに新材料の開発」特別講演, 大阪, 2017 年 10 月.

“知の創造と活用”, 早稲田大学 地域交流フォーラム 特別講演, 大阪, 2017 年 11 月.

“知識を知恵に～くすりを創る”, 早稲田大学理工学術院 先進理工学部生命医科学科 特別講義, 東京, 2017 年 12 月.

“知の創造と活用”, 私立成城高校 特別講演会, 東京, 2017 年 12 月.

“知の創造と活用”, メディカル・サイエンスセミナー (日本感染症医薬品協会) 特別講演, 東京, 2018 年 1 月.

“知の創造と活用”, 日本試薬協会 特別講演, 東京, 2018 年 3 月.

3.5 学会活動その他

“Editor-in-Chief, The Journal of Antibiotics”, Springer Nature.

“International Advisory Board, Tetrahedron”, Elsevier

“International Advisory Board, The Chemical Record”, The Chemical Society of Japan.

“編集委員長, 化学と工業”, 日本化学会

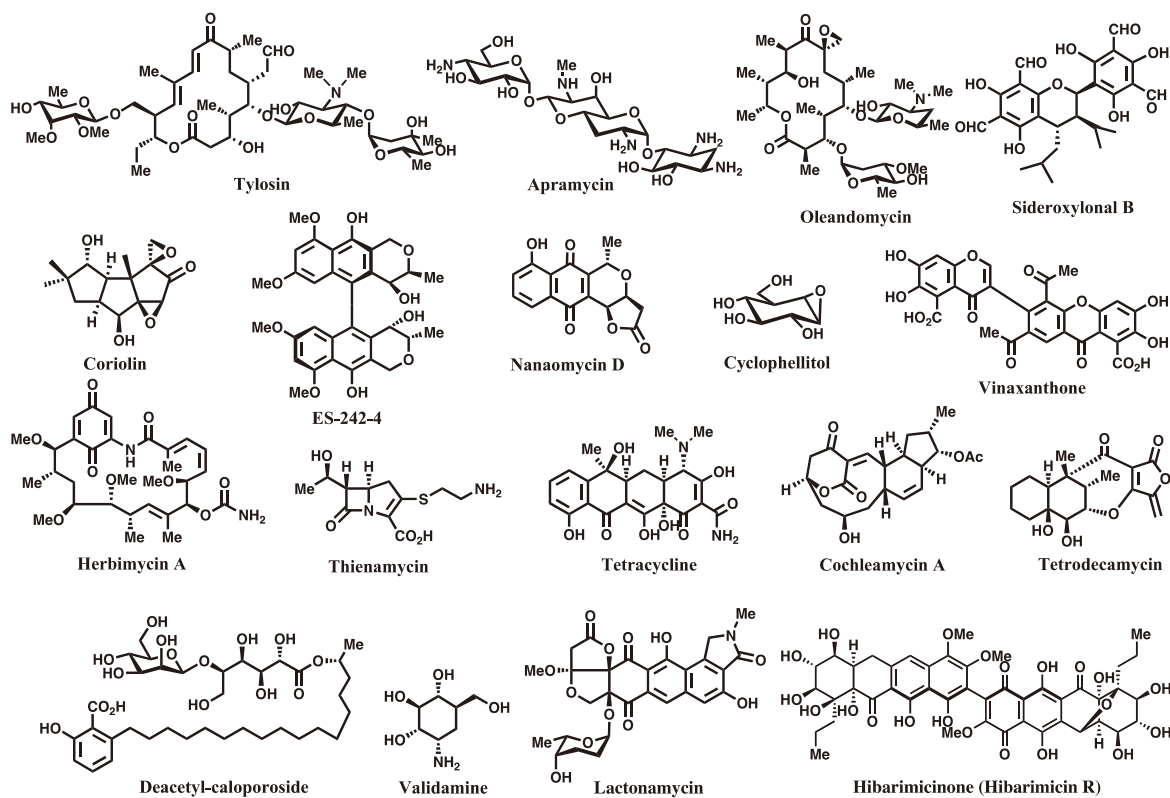
“Guest Editor, Journal of Organic Chemistry”, The American Chemical Society

4. 研究活動の課題と展望

「科学者の使命は、広く一般に科学の重要性和有用性を知らしめることである」という考えのもとに今後も科学の普及活動を行う。具体的には講演や講義を通じて研究者はもちろん、小学生から大学生、一般の人々も対象にして研究の楽しさとそこから得た生きるための知恵を紹介する。

特に、「自然に学び自然を超す」と「知識を知恵に」を主軸にした「知の創造と活用」をテーマに、これまでの研究成果について解説するとともに、学生らとの対話から会得した「個」の発見と強化の重要性および研究者やリーダーとしての心構えなどを喧伝する。

5. 世界最初の全合成を達成した天然生理活性物質の例（下図参照）



住宅・建築の快適性と健康性に関する研究

研究代表者 田辺 新一
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

地球温暖化対策に関しては、IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）の第5次報告書に述べられているように省エネルギーなどの緩和策に加えて温暖化に適応する対策も行うことが重要である。適応可能な環境手法に関して人体側の知見を整理する必要がある。環境適応策を検討するために住宅・建築環境における快適性・知的生産性評価に関する研究を行う。これまでの長期大型プロジェクトで申請者は「室内空気質と熱的快適性に関する研究」としてシックハウス・シックビル問題、東日本大震災後の節電環境下の室内環境に関する研究、病院における感染制御などに関する研究を行って来た。これらの研究にウェルネスという視点を新たに加え展開する。例えば、オフィスでは知識創造活動が行われており、ワーカーの知的生産性を低下させることなく、建築物の低炭素化を実現する手法を開発することが望まれる。快適性・健康性の低減要素だけではなく、健康を増進させる住宅や建築のウェルネスに関する提案を行うことを目的とする。これらの研究は、社会的意義が大変高いと考えている。

2. 主な研究成果

- 1) 人体体温調節モデルに関する研究
- 2) 放射空調の快適性に関する研究
- 3) ウェルネスオフィスの概念整理に関する研究

3. 共同研究者

(研究代表者)

田辺 新一 理工学術院・建築学科・教授

(研究分担者)

木村 建一	早稲田大学・名誉教授
秋元 孝之	理工学研究所・招聘研究員（芝浦工業大学・教授）
岩田 利枝	理工学研究所・招聘研究員（東海大学・教授）
長澤 夏子	理工学研究所・招聘研究員（お茶の水女子大学・准教授）
山田 裕巳	理工学研究所・招聘研究員（長崎総合科学大学・教授）
中野 淳太	理工学研究所・招聘研究員（東海大学・准教授）
望月 悦子	理工学研究所・招聘研究員（千葉工業大学大学・准教授）
西原 直枝	理工学研究所・招聘研究員（聖心女子大学・准教授）
舟木 理香	理工学研究所・招聘研究員（(財) 建材試験センター）

堤 仁美	理工学研究所・招聘研究員（昭和女子大学・専任講師）
金 政秀	理工学研究所・招聘研究員（武蔵野大学・准教授）
金 炫允	理工学研究所・招聘研究員（山口大学・助教）
對馬 聖菜	建築学科講師
尾方 壮行	建築学科・助教

4. 研究業績

4.1 学術論文

- ・秋山雄一、三宅絵美香、松崎里穂、尾方壮行、都築和代、田辺新一、夏季の自宅寝室における温熱環境が睡眠段階を考慮した睡眠の質に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、No.745、pp.277-284、2018.3、10.3130/aije.83.277
- ・尾方壮行、市川真帆、堤仁美、有賀隆男、堀賢、田辺新一、模擬咳発生装置による飛沫沈着量分布の測定、日本建築学会環境系論文集、No.743、pp.57-64、2018.1
- ・山田裕巳、林基哉、田辺新一、大澤元毅、長谷川兼一、本間義規、繊維系断熱材中の真菌の移動性状に関する基礎的研究、日本建築学会環境系論文集、No.740、863-871、2017.1
- ・S.Tsushima, Pawel Wargocki, S.Tanabe, Sensory evaluation and chemical analysis of exhaled and dermally emitted bioeffluents, Indoor Air, pp.1-18, 2017.9.1, DOI:10.1111/ina.12424
- ・S.Tanabe, International Standards for Better Indoor Air Quality, ASHRAE JOURNAL, pp.86-90, 2017
- ・Hyun-tae Kim, Tae-woo Kim, Won-hwa Hong, Shin-ichi Tanabe, Concentration of Formaldehyde, Acetaldehyde, and Five Volatile Organic Compounds in Indoor Air: The Clean-Healthy House Construction Standard (South Korea), Journal of Asian Architecture and Building Engineering (JAABE), Volume 16 (2017) Issue 3, 633-639, 2017.9, 10.3130/jaabe.16.633
- ・Hyun-tae Kim, Shin-ichi Tanabe, Measuring Degree of Contamination by Semi-volatile Organic Compounds (SVOC) in Interiors of Korean Homes and Kindergartens, Journal of Asian Architecture and Building Engineering (JAABE), Volume 16 (2017) Issue 3, 661-668, 2017.9, 10.3130/jaabe.16.661

4.2 総説・著書

- ・田辺新一、長澤夏子、高口洋人、小林恵吾、中川 純、ゼロ・エネルギーハウス ―新しい環境住宅のデザイン、早稲田大学理工研叢書 シリーズ No.27、萌文社、2017 年 9 月、ISBN : 978-4-89491-337-0

4.3 招待講演

- ・デンマーク工科大学、2017 年 5 月 2 日
- ・シンガポール建設局、2017 年 9 月 7 日
- ・北海道建築環境フォーラム、2017 年 9 月 19 日
- ・日経セミナー、2018 年 1 月 11 日
- ・BELCA セミナー、2018 年 1 月 16 日
- ・日本ビルジング協会、2018 年 1 月 30 日
- ・メルボルン王立工科大学、2018 年 2 月 8 日
- ・住まいと環境 東北フォーラム公開シンポジウム、2018 年 2 月 21 日
- ・名古屋商工会議所、2018 年 3 月 6 日
- ・東京都環境局、2018 年 3 月 13 日

4.4 受賞・表彰

「この郊外の片隅にーわたしと家の約 80 年のものがたりー」優秀賞、チャレンジ賞

4.5 学会および社会的活動

- ・ Daisuke Nakamura, Mari Nagoshi, Moe Matsuda, Tetsuya Sato, Haruno Ishikawa, and Shinichi Tanabe, Field Survey for Environmental Performance of Public Schools Gymnasium in Urban Area, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Maho Ichikawa, Miki Iijima, Masayuki Ogata, Hitomi Tsutsumi, Shin-ichi Tanabe, Satoshi Hori, Evaluation of the risk for infection via three transmission routes using droplet deposition and tracer gas from a cough machine, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Yuichi Akiyama, Riho Matsuzaki, Akihiro Takimoto, Emika Miyake, Masayuki Ogata, Kazuyo Tuzuki, Shin-ichi Tanabe, Effect of Thermal Environment on Sleep in the Bedroom Considering Sleep Stages Using Polysomnography, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Junta Fujisawa, Sayana Tsushima, Anri Itoh, Shuhei Takahashi, Ryutaro Kubo, Shin-ichi Tanabe, Proposal of Environmental Assessment Index for Office Buildings Considering the Wellness of Workers, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Masayuki Ogata, Hitomi Tsutsumi, Shin-ichi Tanabe, Satoshi Hori, Evaluation of Hand Hygiene and Cleaning Efficacy with Contact Behavior During a Medical Examination, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Mika Saito, Moeko Tagawa, Chaichang Chen, Yuka Sakurai, Tomoko Matsubasa, Sachiko Kono, Shin-ichi Tanabe, Thermal Comfort Zone of Radiant Cooling System in Residential Buildings in Hot and Humid Regions, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ Jun NAKAGAWA, Keigo KOBAYASHI, Hiroto TAKAGUCHI, Shin-ichi TANABE, Designing of Human Behavior, Thermal Comfort and Ceiling on Energy, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・ 田辺新一、藤澤順太、国内外のオフィスの健康性評価手法に関するレビュー、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1205-1208、2017
- ・ 高橋幹雄、田辺新一、野崎尚子、高橋祐樹、和田一樹、中川純、浅賀潤一、篠田純、篠山拓真、これからのワークスタイルに対応した **Active Design** に関する研究 その 1: オフィスレイアウトがワークスタイルに与える影響ー研究概要、物理環境、ウェルネスー、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1217-1220、2017
- ・ 篠山拓真、高橋幹雄、田辺新一、野崎尚子、高橋祐樹、和田一樹、中川純、浅賀潤一、篠田純、これからのワークスタイルに対応した **Active Design** に関する研究、その 2 オフィスレイアウトがワークスタイルに与える影響ー知的生産性ー、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1221-1224、2017
- ・ 高橋祐樹、篠山拓真、高橋幹雄、田辺新一、野崎尚子、和田一樹、中川純、浅賀潤一、篠田純、これからのワークスタイルに対応した **Active Design** に関する研究 その 3 オフィスレイアウトがワークスタイルに与える影響ー座席利用とコミュニケーションー、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1225-1229、2017
- ・ 尾関義一、尾方壮行、野元彬久、宮嶋祐基、浅賀潤一、田辺新一、人間ー熱環境系快適性数値シミュレータ、(その 58) 非定常部位別温冷感予測モデル開発のための被験者実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.251-252、2017
- ・ 宮嶋祐基、尾関義一、尾方壮行、野元彬久、浅賀潤一、田辺新一、人間ー熱環境系快適性数値シ

ミュレータ、(その 59) 非定常部位別温冷感予測モデル開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.235-254、2017

・浅賀潤一、尾関義一、尾方壮行、野元彬久、宮嶋祐基、田辺新一、人間—熱環境系快適性数値シミュレータ、(その 60) 体温調節モデル JOS-2 の予測結果を用いた全身温冷感検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.255-256、2017

・斎藤実佳、新木由美子、田川萌子、陳佳樟、今津文沙、田辺新一、鍵屋慎一、松葉佐智子、床冷暖房居室における冷え性者の生理心理反応に関する研究 その 1 : 実験概要と温熱環境測定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.289-290、2017

・新木由美子、斎藤実佳、田川萌子、陳佳樟、今津文沙、田辺新一、鍵屋慎一、松葉佐智子、床冷暖房居室における冷え性者の生理心理反応に関する研究 その 2 : 床冷暖房が冷え性者の生理心理反応に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.291-292、2017

・田川萌子、斎藤実佳、新木由美子、陳佳樟、今津文沙、田辺新一、鍵屋慎一、松葉佐智子、床冷暖房居室における冷え性者の生理心理反応に関する研究 その 3 : 冷え性の細分類と温冷感評価指標、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.293-294、2017

・秋山雄一、井上莉沙、竹内悠香、松崎里穂、尾方壮行、浅賀潤一、斎藤実佳、田辺新一、都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その 9 : 自宅寝室における脳波測定による睡眠実測調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.309-310、2017

・井上莉沙、秋山雄一、竹内悠香、松崎里穂、尾方壮行、浅賀潤一、斎藤実佳、田辺新一、都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響 その 10 : 睡眠時における体動が着衣量変化に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.311-312、2017

・竹内悠香、秋山雄一、井上莉沙、松崎里穂、尾方壮行、浅賀潤一、斎藤実佳、田辺新一、都築和代、寝室における温熱環境が睡眠に及ぼす影響、その 11 : 睡眠段階を考慮した睡眠の質が午前と午後の知的生産性に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.313-314、2017

・堤仁美、田辺新一、堀賢、辻裕次、町田晃一、中田純一郎、濱田千江子、人工透析室における患者と医療スタッフの熱的快適性に関する研究 その 9 : 天井放射冷暖房システムをもつ透析室における 2015 年夏季実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.343-344、2017

・塚本真由、堤仁美、田辺新一、堀賢、辻裕次、町田晃一、中田純一郎、濱田千江子、樋口ひなの、人工透析室における患者と医療スタッフの熱的快適性に関する研究 その 10 : 天井放射冷暖房システムをもつ透析室における 2016 年冬季実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.345-346、2017

・樋口ひなの、塚本真由、堤仁美、田辺新一、堀賢、辻裕次、町田晃一、中田純一郎、濱田千江子、人工透析室における患者と医療スタッフの熱的快適性に関する研究 その 11 : 天井放射冷暖房システムをもつ透析室における 2016 年夏季実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.347-348、2017

・野元彬久、浅賀潤一、尾方壮行、宮嶋祐基、田辺新一、小型測定機器を用いた都市温熱環境評価手法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.357-358、2017

・陳佳樟、中川純、宮嶋裕基、田辺新一、宇山直樹、清田健、冬季室内環境の潜熱蓄熱材の足接触快適感に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.499-500、2017

・飯嶋美希、市川真帆、尾方壮行、堤仁美、田辺新一、堀賢、医療・福祉施設における感染リスク低減に関する研究 その 35 : 病室における環境表面の汚染実態、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.625-626、2017

- ・市川真帆、飯嶋美希、尾方壮行、堤仁美、田辺新一、堀賢、医療・福祉施設における感染リスク低減に関する研究 その 36：病室における接触を考慮した手指汚染度評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.627-628、2017
- ・尾方壮行、市川真帆、飯嶋美希、堤仁美、田辺新一、堀賢、橋本果歩、秋山雄一、医療・福祉施設における感染リスク低減に関する研究 その 37：大学研究室における顔面接触行動の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.629-630、2017
- ・橋本果歩、尾方壮行、市川真帆、飯嶋美希、堤仁美、田辺新一、堀賢、秋山雄一、医療・福祉施設における感染リスク低減に関する研究 その 38：模擬電車内における顔面接触行動の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.631-632、2017
- ・對馬聖菜、Pawel Wargocki、田辺新一、皮膚および呼吸由来の生体発散物質が知覚空気質に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.675-676、2017
- ・對馬聖菜、田辺新一、Pawel Wargocki、皮膚および呼吸由来の生体発散物質に関する知覚空気質評価および化学 分析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 7 巻、pp9-12、2017.9
- ・尾関義一、尾方壮行、浅賀潤一、野元 彬久、田辺新一、人体温冷感・快適感予測モデルに関する研究（その 10）非定常環境における局所温冷感予測モデル開発のための被験者実験、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp101-104、2017.9
- ・尾方壮行、尾関義一、浅賀潤一、野元 彬久、田辺新一、人体温冷感・快適感予測モデルに関する研究（その 11）非定常環境における局所温冷感予測モデルの開発、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp105-108、2017.9
- ・秋山雄一、井上莉沙、竹内悠香、尾方壮行、都築和代、田辺新一、寝室内温熱環境が睡眠の質に及ぼす影響（第 1 報）寝姿勢及び寝具を考慮した着衣熱抵抗の測定と予測、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp141-144、2017.9
- ・井上莉沙、秋山雄一、尾方壮行、田辺新一、竹内悠香、都築和代、寝室内環境が睡眠の質に与える影響、（第 2 報）着衣量変化を考慮した温 熱環境が睡眠の質に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp145-148、2017.9
- ・竹内悠香、秋山雄一、井上莉沙、尾方壮行、都築和代、田辺新一、午前と午後の知的生産性に影響を及ぼす睡眠段階を考慮した睡眠の質に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻、pp153-156、2017.9
- ・陳佳樟、中川純、田辺新一、清田 健、宇山直樹、足裏の接触熱移動モデルに関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 2 巻、pp277-280、2017.9
- ・田村夏美、太田恵大、飯田隆義、浮穴朋興、藤澤順太、田辺新一、天井チャンバー型空気式放射空調システムにおける PMV 制御方式の評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp329-322、2017.9
- ・高橋幹雄、田辺新一、野崎尚子、高橋祐樹、和田一樹、中川純、浅賀潤一、篠田純、篠山拓真、執務空間における Active Design がワークスタイルに与える影響に関する研究（その 1）研究概要、物理環境、ウェルネス、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 8 巻、pp21-24、2017.9
- ・篠山拓真、田辺新一、高橋幹雄、野崎尚子、和田一樹、高橋祐樹、中川純、篠田純、浅賀潤一、執務空間における Active Design がワークスタイルに与える影響に関する研究 その 2 知的生産性、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 8 巻、pp25-28、2017.9
- ・高橋祐樹、田辺新一、高橋幹雄、野崎尚子、和田一樹、中川純、浅賀潤一、篠田純、篠山拓真、執務空間における Active Design がワークスタイルに与える影響に関する研究 その 3 座席利用

とコミュニケーション、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第8巻、pp29-32、2017.9

- ・田辺新一、省エネマークで家を選ぶ、日本経済新聞（住宅ナビ）、2017.4.2
- ・田辺新一、コンクリ住宅 熱中症警戒、日本経済新聞（住宅ナビ）、2017.7.5
- ・田辺新一、シックハウス換気で防ぐ、日本経済新聞（住宅ナビ）、2017.9.6
- ・田辺新一、採光で健やか家も心身も、日本経済新聞（住宅ナビ）、2017.11.8
- ・田辺新一、省エネで、快適・健康になろう、神奈川新聞（Dr.タナベの我慢しないで快適生活）、2017.6.3
- ・田辺新一、住まいの環境性能とお金の話、神奈川新聞（Dr.タナベの我慢しないで快適生活）、2017.7.22
- ・田辺新一、夏の遮熱と断熱、神奈川新聞（Dr.タナベの我慢しないで快適生活）、2017.8.25
- ・田辺新一、省エネと創エネ、神奈川新聞（Dr.タナベの我慢しないで快適生活）、2017.9.27
- ・田辺新一、住まいの断熱で冬を快適に、神奈川新聞（Dr.タナベの我慢しないで快適生活）、2017.10.26

5. 研究活動の課題と展望

- 1) 国土交通省、資源エネルギー庁、NEDO、東京都などの施策においてウェルネスは重要な要素となっている。
- 2) 研究・開発が行われる測定評価方法に関しては、新規性が高く特許取得などが考えられること。
- 3) 科学研究費、NEDOなどの国費以外に民間企業が注目する分野であり、資金導入が期待できること。
- 4) 建築分野のみの知見ではなく、エネルギー工学、機械分野、電気分野などの領域を含み極めて学際的な研究であること。
- 5) デンマーク工科大学、カリフォルニア大学バークレー校、アーヘン工科大学、香港大学、シンガポール大学などとの国際交流。

今年度開始したプロジェクトであるため、今後の進展のために努力している。

規則性ナノ空間の化学

研究代表者 松方 正彦
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

エネルギー・化学関連の産業における省エネルギー化は極めて重要な課題である。化学産業において、もっとも多くエネルギーを消費するプロセスである蒸留分離は、様々な省エネルギー化技術が検討されているが、その省エネルギー効果については現行の技術では大きな改善は難しい。本研究では、分離工程の大規模な省エネルギー化を図るため、規則性ミクロ多孔体材料（ゼオライト）がもつ規則性ナノ空間の物理的・化学的特性を活かした、分子レベルの分離を可能とする分離膜と、それを用いた膜分離技術の研究開発を行うことを目的とした。様々な分離対象に適したゼオライト種を選定し、高透過率・安定性を併せ持つゼオライト膜の開発を行う。当該研究期間においては、様々な細孔構造と組成を有するゼオライト種の合成方法と合成された膜構造と透過分離性能の評価方法に関する学理の構築を目指す。

2. 主な研究成果

これまでに様々なゼオライト種について膜の合成方法および膜構造解析手法を検討してきた。今回は、その中でも新規ゼオライト膜として **CHA 型アルミノフォスフェート**の膜化についての検討、および **Silicalite-1** 膜への炭化水素による細孔修飾について報告する。

2. 1 金属ドーパルミノフォスフェート (MAPO) の合成と膜化検討

アルミノフォスフェート ($\text{AlPO}_4 \cdot n$) は Al と P が O を介して結合することにより骨格を構成している。一般的なゼオライトであるアルミノシリケートでは合成報告例がない（あるいは合成が難しい）構造も多く、規則性ミクロ多孔体分離膜の棚ぞろえを充実させるために重要な材料である。これまでに我々は $\text{AlPO}_4 \cdot 18$ (AEI 型) や $\text{AlPO}_4 \cdot 34$ (CHA 型) の薄膜化を行い、 CO_2 や H_2O 等の小分子混合物分離へ応用してきた。本年度は、新たに金属をドーパしたアルミノフォスフェート (Metal AlminoPhosphate = MAPO) の合成に着手した。アルミノフォスフェートへヘテロ金属をドーパし、分離対象と強く相互作用する場を作り出すことができれば、親和性の差を利用した分離膜として機能することが期待できる。また、金属添加により、触媒機能等を付与することも可能であり、触媒膜としての応用も期待される。

表 1 の条件で、各種金属酸化物あるいは硝酸塩を添加し、 $\text{AlPO}_4 \cdot 18$ 膜の調製を試みた。その結果、**図 1** に示すとおり、全ての金属種で $\text{AlPO}_4 \cdot 18$ 膜が製膜されていることを確認した。得られた膜を空気分離に応用した結果を **表 2** に示す。いずれの膜も酸素選択性を示し、特に透過度は既往の高分子膜や無機膜に比べ高い値を示した。今後、製膜法をブラッシュアップすることで、選択性を向上させることが課題である。

表 1 各種 MAPO-18 膜の調製条件

MeAPO-18	Me	Metal source	Composition	Membrane weight / g m ⁻²
AlPO ₄ -18	-	-	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	32.6
MgAPO-18	Mg	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1MgO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	23.5
CaAPO-18	Ca	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1CaO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	19.0
VAPO-18	V	V ₂ O ₅	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.05V₂O₅ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	40.4
CrAPO-18	Cr	Cr ₂ O ₃	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.05Cr₂O₃ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	40.3
FeAPO-18	Fe	Fe(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.05Fe₂O₃ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	39.6
CoAPO-18	Co	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1CoO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	28.2
NiAPO-18	Ni	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1NiO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	21.3
CuAPO-18	Cu	Cu(CH ₃ COO) ₂ ·H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1CuO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	26.3
ZnAPO-18	Zn	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.12ZnO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	26.6
GaAPO-18	Ga	Ga(NO ₃) ₃ ·8H ₂ O	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.05Ga₂O₃ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	43.9
GeAPO-18	Ge	GeO ₂	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1GeO₂ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	42.9
YAPO-18	Y	Y ₂ O ₃	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1Y₂O₃ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	38.9
NbAPO-18	Nb	Nb ₂ O ₅	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.05Nb₂O₅ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	39.1
MoAPO-18	Mo	MoO ₃	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1MoO₃ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	37.5
SnAPO-18	Sn	Sn(CH ₃ COO) ₂	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1SnO₂ : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	40.2
PbAPO-18	Pb	Pb(NO ₃) ₂	1Al ₂ O ₃ : 1P ₂ O ₅ : 0.1PbO : 2.8DIPEA: 180H ₂ O	31.5

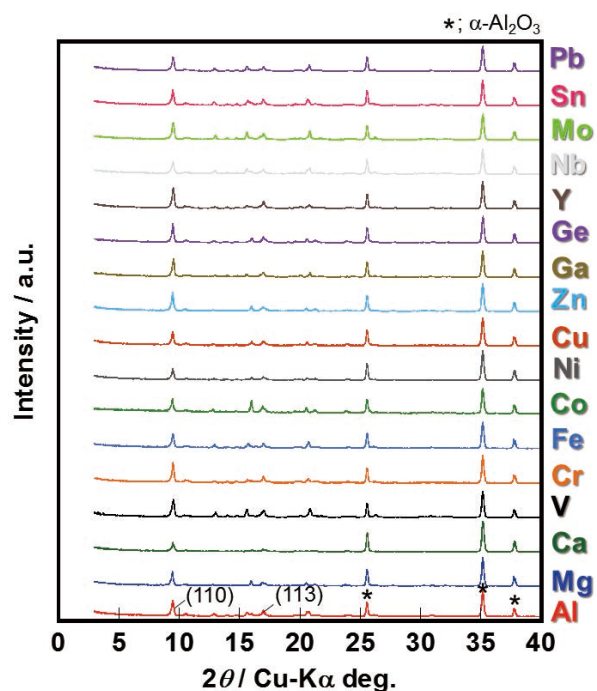


図 1 各種 MAPO-18 膜の XRD 測定結果

表 2 MAPO-18 膜による空気分離試験結果

Membrane	Permeance / $10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$		S.F. / -
	O ₂	N ₂	
VAPO-18	1.61	1.05	1.52
FeAPO-18	1.62	1.04	1.54
GaPO-18	2.11	1.48	1.41
NbAPO-18	1.71	1.31	1.49
MoAPO-18	1.69	1.10	1.51
Knudsen diffusion*	-	-	0.94

2. 2 炭素修飾による細孔制御と細孔構造評価手法開発

MFI 型ゼオライトである Silicalite-1 は、高い耐熱性・化学的安定性を有しており、炭化水素分離膜の素材として期待できる。MFI 型のゼオライトは細孔径が 0.55 nm であり、細孔入口付近を炭素により修飾し細孔径を制御することができれば、より小さな分画領域を有する分子ふるい膜としての適用が期待できる。これまでに我々は、熱分解炭素が膜の透過分離性能に与える影響を検討し、原料炭化水素種、供給濃度、熱分解時間などを精査することにより、炭素を細孔入口付近に析出させ分離性能を向上させることに成功している。本年度は、この炭素修飾ゼオライトのマイクロ孔構造を解析するための手法として、ゼオライトからの窒素の脱離挙動測定を試みた。

測定フローを図 2 に示す。あらかじめ所定の条件で窒素を吸着させたゼオライトの周囲を真空引きし、その際の脱離挙動を環境の圧力変化から観察した。その結果を図 3 に示す。ゼオライト粉末無しの際は速やかに真空度が增加する（圧力が低下する）が、ゼオライト粉末がある場合は圧力が徐々に低下していく挙動が見て取れた。これは、ゼオライト粉末からの窒素脱離が比較的遅いためであり、この圧力低下速度よりマイクロ細孔内の窒素の拡散・脱離

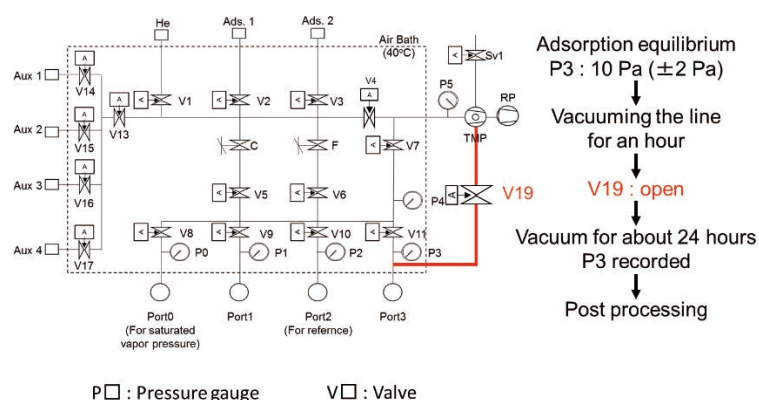


図 2 窒素脱離挙動測定装置図と測定フロー

挙動を推察することが可能である。今後は、炭素修飾等によってミクロ孔構造が変化したと考えられるサンプルに対しこれらの測定を行い、ミクロ孔構造の評価に繋げていく予定である。

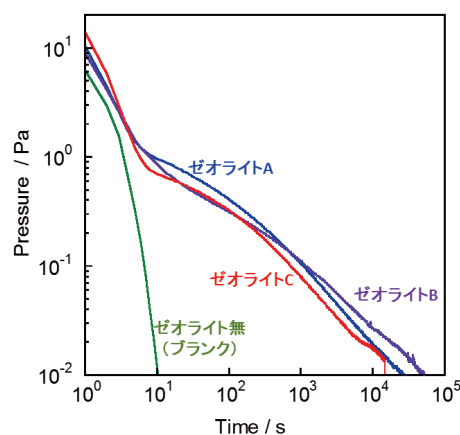


図 3 窒素の脱離挙動測定結果

2. 3 Pt と Fe を交換したゼオライトによるプロパン脱水素

ゼオライトは細孔内にイオン交換サイトを有しており、金属イオンを交換することでゼオライト自身とは異なる触媒特性を発揮することが可能である。当研究室では図 4 に示すように 12 員環細孔を有する*BEA、MOR、LTL、EMT、FAU 型のそれぞれの構造のゼオライト内に、イオン交換された Pt と Fe 種が共存することで、プロパン脱水素に対して優れた触媒活性を示すことを見出した。また、この PtFe 交換ゼオライトは活性・選択性・耐久性に優れた脱水素触媒で知られている Pt-Sn 合金触媒よりもさらに高い触媒性能を示し、これまでに Pt と Fe とゼオライトを組み合わせた脱水素触媒は報告例がなく、非常に興味深い。今後は Pt と Fe の共存による脱水素活性向上の要因について検討していく。

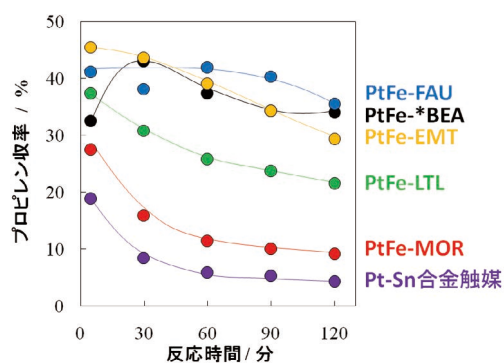


図 4 プロパン脱水素に対する PtFe 交換ゼオライトと Pt-Sn 合金触媒の活性試験結果

3. 共同研究者

酒井 求 (ナノ・ライフ創新研究機構 次席研究員)
 瀬下 雅博 (公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE))

4. 研究業績

4.1 学術論文

4.2 Hu, Y., Wu, Y., Devendran, C., Wei, J., Liang, Y., Matsukata, M., Shen, W., Neild, A., Huang, H., Wang, H. Preparation of nanoporous graphene oxide by nanocrystal-masked etching: Toward a nacre-mimetic metal-organic framework molecular sieving membrane, *Journal of Materials Chemistry A*, 5(11), 16255-16262(2017)

4.3 総説・著書

Motomu Sakai, Masahiro Seshimo, Masahiko Matsukata, 9. Membranes with zeolites and MOFs: how, where, and why. "Zeolites and Metal-Organic Frameworks – From lab to industry, Ed. By V. Blay, L.F. Bobadilla, A. Cabrera, Atlantis Press-Amsterdam University Press", in press

瀬下雅博、吉田大輝、松方正彦、ゼオライト膜を用いたメタノール合成用膜反応器、*ペトロテック*、40(9), 751 - 757 (2017)

松方正彦、2. 1章 石油化学プロセスと脱水プロセス、化学工学の進歩シリーズ「化学プロセス強化 (PI) の最新技術」(2017)

M. Sakai, K. Yoshihara, M. Seshimo, M. Matsukata, 9. Zeolite membrane for gas separation "Advanced Materials in Membrane Fabrication and Modification, Ed. S. Gray, L.W. Jye, T. Tsuru, Y. Cohen, CRC Press Taylor & Francis", in press.

4.4 招待講演

松方正彦、化学産業原料多様化、炭素循環の必要性について、ボトルネック課題研究会 公開ワークショップ「CO₂ からの化学製品生産~ボトルネックと展望~」、東京、2018..2.14

松方正彦、酒井求、NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム成果報告：ガス分離膜技術の展望、化学工学会第 83 年会、大阪、2018.3.13

酒井求、松方正彦、親和性の違いに基づくゼオライト膜による炭化水素分離、化学工学会第 83 年会、大阪、2018.3.13

松方正彦、原料多様化時代の革新的化学プロセスの展望、化学工学会第 49 回秋季大会、名古屋大学、2017.09.20-22

松方正彦、ガス分離膜による CO₂ 等の分離・回収の技術の現状と将来展望、一般社団法人日本産業機械工業会、環境装置部会環境ビジネス委員会、東京、2017.9.25

松方正彦、蒸留、膜、吸着操作の ハイブリット化への期待、分離技術会第 45 回「夏季研究討論会」、静岡、2017.8.25 - 26

Masahiko Matsukata, Grand Design of Future Chemical Industry for Carbon Recycling Society, The 8th International Conference on Green and Sustainable Chemistry, The Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, 2017.07.23-26

4.5 受賞・表彰

4.6 学会および社会的活動

2015 年 4 月～2018 年 3 月	化学工学会エネルギー部会 部会長
2016 年 6 月～	International Zeolite Association (IZA), Council Member
2016 年 4 月～	日本ゼオライト学会会長
2011 年 5 月～	GSCN (グリーンサステイナブルケミストリーネットワーク) 運営委員会委員長
2012 年 5 月～	公益法人石油学会理事
2015 年 5 月～	日本膜学会理事
2017 年 4 月～	公益法人化学工学会理事・部会 CT 長
	経済産業省
	総合資源エネルギー調査会石油・天然ガス小委員会委員
	産業構造審議会地球環境小委員会化学・非鉄金属WG委員
	ISO TC28/SC7 (液体バイオ燃料分科会) 国内委員会委員長
	一般財団法人石油エネルギー技術センター
	技術企画委員会技術開発推進会議委員
	自動車及び燃料研究委員会 (JATOP II) 委員
	一般財団法人国際石油交流センター (JCCP) 事業検討分科会委員長
	国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)
	SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「エネルギーキャリア」運営・評価委員

5. 研究活動の課題と展望

新規金属ドーパアルミノフォスフェート (MAPO) の合成と膜化検討においては、いずれの膜も酸素選択性を示し、特に透過度は既往の高分子膜や無機膜に比べ高い値を示した。今後、製膜法をブラッシュアップすることで、選択性向上させることが課題である。また、炭素修飾による細孔制御と細孔構造評価手法開発においては、今後は、炭素修飾等によってマイクロ孔構造が変化したと考えられるサンプルに対しこれらの測定を行い、マイクロ孔構造の評価に繋げていく予定である。

プロパン脱水素触媒に関しては、Pt と Fe を交換したゼオライトによるプロパン脱水素今後は Pt と Fe の共存による脱水素活性向上の要因について検討していく。

獎勵研究

国際宇宙ステーションにおける高エネルギー宇宙線実験 (CALET)

－ Waseda CALET Operations Center (WCOC) の運用と科学成果発信 －

研究代表者 浅岡 陽一
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

宇宙線電子線望遠鏡実験(CALET)は、JAXA と早稲田大学の共同プロジェクトである。国際宇宙ステーション(ISS)に大面積カロリメータを有する高機能粒子検出器を搭載することで、GeV–TeV(10^9 – 10^{12} eV)にわたる広いエネルギー領域で電子線とガンマ線流束の精密測定を行い、太陽系近傍の宇宙線加速源や暗黒物質を探索することを第一の目的としている。CALET は JAXA プロジェクトとして宇宙科学研究所による科学成果審査、及びプロジェクトを所掌する有人宇宙技術部門の技術評価審査を受けて遂行されている。2015 年 8 月には H2-B ロケットによる CALET の打ち上げが成功し、HTV5 号機にて ISS へ輸送され日本実験棟の船外実験プラットフォームへ設置された。その後、機能確認のためのチェックアウト期間を経て 10 月より軌道上での観測を開始した。2 年間の定常観測終了後には、フルサクセスの評価を受けて、「後期運用」が 5 年を目標に開始された。その観測データから、暗黒物質対消滅等の可能性が指摘されている sub-TeV での陽電子(+電子)過剰問題に決着をつけ、さらに 20TeV までの電子スペクトルの精密測定により近傍加速天体の証拠を発見することが強く期待されている。

CALET 検出器の最大の特徴は非常に分厚い、撮像型と全吸収型を組み合わせた高性能カロリメータである(図 1 参照)。30 放射長の物質量を誇るカロリメータは TeV 領域の電子シャワーを完全に吸収することができ、その分厚いカロリメータで撮像されるシャワー像の発達の違いから、電子成分の観測に際して多大なバックグラウンドとなる陽子事象を排除することができる。sub-TeV 領域での陽電子過剰問題に決着をつける上では、この分厚い高性能カロリメータによって実現される 2%のエネルギー分解能と十分なバックグラウンド除去能力が特に鍵となる。さらに 20TeV までの電子スペクトルを得るには、これらの特徴に加えて ISS 搭載によって可能となる大面積化と長期観測が非常に重要となる。宇宙線の主成分である陽子・ヘリウム等の核子成分に関しては、PeV (10^{15} eV) までの測定が可能であり、電子・ガンマ線も含めて、これまでの直接測定の限界を大きく更新するユニークな観測が実現できる。なお、反粒子の識別を主目的とした AMS-02 が陽電子比等

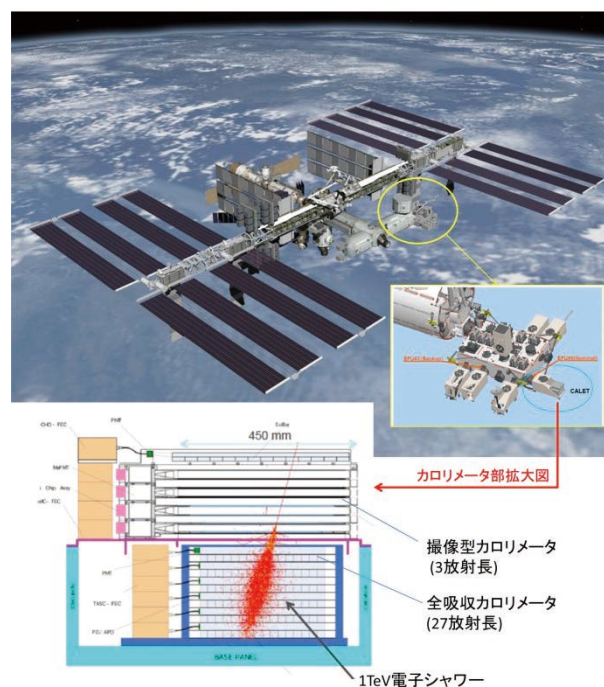


図 1： 国際宇宙ステーション搭載
CALET 検出器の概要

で高精度の結果を発表しているが[L. Accardo et al., PRL 113 (2014) 121101 等], 各サブ検出器がマグネットスペクトロメータの限界である約 1TeV をターゲットとして最適化されているため, AMS-02 では $\sim 1\text{TeV}$ がエネルギー決定の限界となる. 一方の CALET は, 電荷の正負を判定できないものの PeV までのエネルギー決定が可能であり, かつ高エネルギー領域では AMS-02 を大きく凌駕する面積立体角を有するため, AMS-02 と相補的な検出器となっている. 今後は, 共に ISS をプラットフォームとする両者が宇宙線の直接観測を牽引すること期待されている.

統計量や精度の限界に挑むことでユニークな物理目的を達成する CALET にとって, 長期間に渡る軌道上観測において測定器の性能を確保し高効率で観測を遂行することは欠くことのできない重要事項であると言える. 早稲田大学には, この目的でミッション運用やデータ解析を司る Waseda CALET Operations Center (WCOC) が設置されている(図 2 参照).

2015 年 10 月に ISS にて観測を開始した CALET は, 現在に至るまで順調に軌道上運用を継続している. 2016 年にはトランジェント事象に関連する観測結果を 2 編報告し, CALET による科学成果発信の口火を切ることができた. 2017 年初頭には CALET の軌道上エネルギー較正方法とその精度を詳説した論文を発表しており, 特にエネルギー測定精度が重要となる宇宙線スペクトル測定結果の報告に向けた準備が整った. 2017 年 11 月には主目的である全電子スペクトルを, 10GeV から 3TeV のエネルギー範囲で Physical Review Letter にて報告することができた. 2018 年 2 月に CALET の科学運用と WCOC におけるデータ処理に関する論文を発表している. 本研究の目的は, 早稲田大学に設置した Waseda CALET Operations Center (WCOC) の機能を駆使して高効率運用を継続すると共に, さらにデータ解析を進めて科学成果を発信することである.

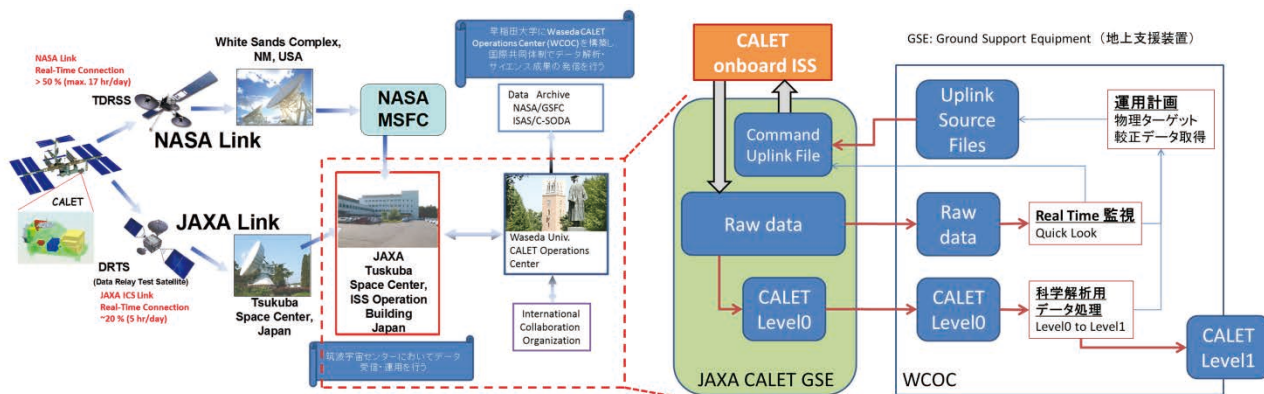


図 2: CALET データフローと地上システムの概要

2. 主な研究成果

CALET の軌道上運用が開始された現在では, JAXA に設置された地上システムと協力して WCOC での 24 時間体制での運用を行っており, 図 3(左)に示すように順調に実観測時間を蓄積している. 2013 年度から 2015 年度に実施した開発の成果が発揮され, WCOC はリアルタイム監視, 運用計画, 科学データ処理の 3 つの役割を十全に果たしている.

科学解析用の生データに相当する Level0 データは JAXA の地上システムにて作成され, WCOC に配信される. WCOC ではこれを科学解析用の基礎データである Level1 データに変換して国内外の共同研究者に配信している. Level1 データを用いて検出器の較正が行われ, 物理解析用の Level2 データが作成される. 各データセットを用いた解析は各機関で独立に行われるが, 論文に使用される公式なデータセットは WCOC で作成することが決定されており, WCOC は CALET のデータ

解析において中心的な役割を担っている．現在まで Level1 データの国内外への自動配信を継続している．Level2 データに関しても装置較正や再構成アルゴリズムを更新して PASS-03 (第3版)までの作成を完了し物理解析に供している．以下に 2017 年度の主な研究成果をまとめる．

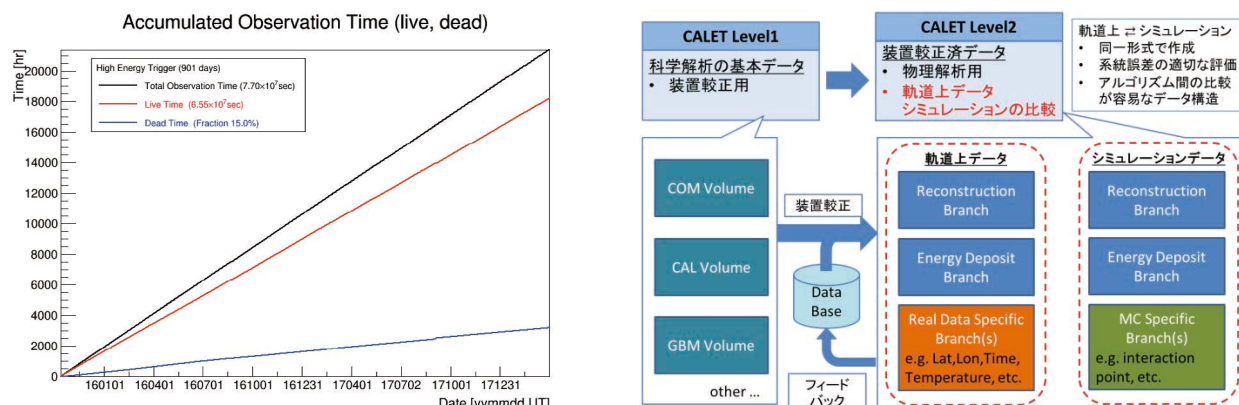


図3：(左) 2018年3月末までの実観測時間の積算，(右) 高次データ作成のデータフロー

(1) 全電子スペクトル：(研究業績 4.1.4).

CALET は, TeV 領域を含む全電子スペクトルの精密測定による, 近傍加速源の発見及び暗黒物質の探索を第一の目的としている．CALET 検出器は (i) 電磁シャワー初期発達の特徴を活用した高効率飛跡再構成, (ii) TeV 電子シャワーの全吸収による 2% のエネルギー分解能, (iii) シャワー像の 3 次元可視化による 10^5 以上の陽子除去性能, の 3 点に特徴づけられる, TeV 領域を含む全電子(電子+陽電子)観測に最適化された検出器である(図4(上)参照)．我々は 2017 年 6 月までの軌道上データを用いて 10GeV—3TeV までの全電子スペクトルを求め(図4(下)参照), Physical Review Letters にて出版した [Adriani et al. (CALET collaboration), Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 181101]．CALET は電子観測において高い測定精度をもち, データ解析の精度が即スペクトル測定結果に反映されるため, 慎重な取り扱いが必須である．系統誤差の見積りも含めて本解析を中心的に行い, 代表研究者鳥居祥二教授とともに本論文の主著者となっている．本論文は CALET にとって初の本格的なエネルギースペクトル測定結果であり, 最も重要な観測対象に対する結果でもある．

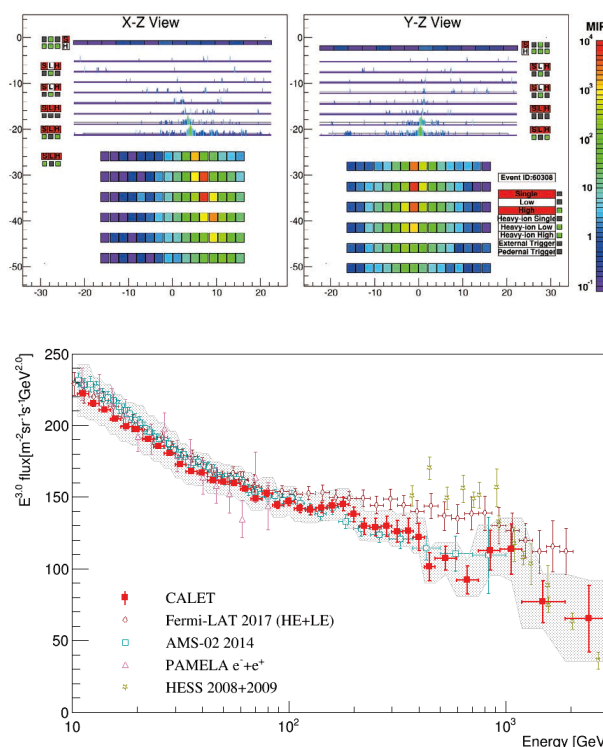


図4(上) 1TeV 電子候補. 検出器内でのシャワー発達が可視化され全吸収されている, (下) CALET による 10GeV—3TeV までの全電子スペクトル [Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 181101]. 最近の宇宙からの直接測定結果と地上からの間接測定結果を比較している．

(2) 科学運用：（研究業績 4.1.1）.

WCOC には運用計画，リアルタイム監視，物理解析用データ処理の3つの役割があり，これらを通して科学運用を実施する．次席研究員として採用されてからの3年間で，早稲田大学における CALET 専用地上システムである WCOC の開発を完了した．WCOC では，運用開始から常に24時間のシフト体制で CALET の運用状態を監視しており，JAXA と協力して CALET の安定稼働を支えている．現在は，観測スケジュールの策定とごくまれに発生する運用に関するトラブルへの対応，データ処理を中心的に行っている．2018年初頭には，WCOC における科学運用の詳細と実績をまとめた論文を出版することができた[Asaoka et al., *Astropart. Phys.* 100 (2018) 29].

(3) トランジェント観測：（研究業績 4.1.2, 4.1.3）.

2016年初頭に重力波の初の直接検出が LIGO チームにより発表された．今後は重力波事象に対する電磁波対応天体の同定が非常に重要なテーマとなっており，重力波と継続時間の短い GRB の同時観測が鍵を握っている．CALET は GW151226 の X 線・ガンマ線領域における対応天体を探索し，その潜在能力を示した[Adriani et al. (CALET collaboration), *ApJL* 829 (2016) L20]. 本論文において，申請者はカロリメータの解析を担当し，1GeV 付近の低エネルギー側のガンマ線観測手法を確立して GeV ガンマ線流束に対して制限を与えた．この成果が科研費獲得(基盤研究B)に繋がっている．本課題では，重力波や GRB に同期した GeV ガンマ線をはじめ，低エネルギー電子や宇宙天気に関するトランジェント現象の観測を目的として，高次データ作成をリアルタイム化し，データ取得から1時間程度の間ガンマ線事象探索を行うトランジェント探索システムを開発している．LIGO/Virgo の重力波観測 Run2 においても，GW151226 に対する解析手法を発展させ，新規開発したトランジェント探索システムに組み込むことで，全ての重力波トリガーに対して探索を行った．Virgo との初の同時観測イベント GW170814 や中性子星連星の合体で電磁波放射との同時観測が達成された GW170817 に関しても1日以内に解析結果をチーム内に報告している．これらは共に視野外であったが，特に GW170817 に関しては CGBM の観測は行われており，GW170817 に対応する電磁波観測に関する歴史的な論文の共著者となっている[Abbott et al., *ApJL* 848 (2017) L12].

3. 共同研究者

鳥居祥二（理工学研究所・教授），小澤俊介（先進理工学部・研究院講師），笠原克昌（理工学研究所・招聘研究員），Holger Motz（国際教育センター・助教），田村忠久（神奈川大学・教授），清水雄輝（神奈川大学・准教授），赤池陽水（CREST/NASA/GSFC・海外特別研究員），他 CALET 共同研究者

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. “On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS”, *Y.Asoka S.Ozawa, S.Torii et al. (CALET collaboration; reminding 89 co-authors in alphabetical order), *Astroparticle Physics*, vol. 100 (2018) pp. 29-37. [Refereed].
2. “Detection of the thermal component in GRB 160107A”, Yuta KAWAKUBO, Takanori SAKAMOTO, Yoichi Asoka (6th) et al. (in total 17 authors), *Publ. Astron. Soc. Japan* 70 (2018) 6 (1-10) [Refereed].

3. “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger”, B.P.Abbott, Y.Asaoka (3142th) et al. (in total 4103 authors), *Astrophysical Journal Letters* 848 (2017) L12. [Refereed].
4. “Energy Spectrum of Cosmic-ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, O.Adriani, *Y.Asaoka (4th), *S.Torii (81th) et al. (CALET collaboration; 91 co-authors in alphabetical order), *Physical Review Letters* {¥bf 119}, 181101 (2017).
5. “Decaying Fermionic Dark Matter Search with CALET”, *S.Bhattacharyya, H.Motz, S.Torii, Y.Asaoka, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 08 (2017) 012.

(注: 主著者には*を示した)

4.2 総説・著書 該当なし

4.3 招待講演

1. 浅岡陽一他, CALET 共同研究者, 「CALET による 2 年間の宇宙線観測成果」, 2018 年 2 月, 平成 29 年度 ISEE 研究集会ー太陽圏宇宙線シンポジウム, 名古屋大学.
2. Yoichi Asaoka for the CALET collaboration, “CALET preliminary results on the cosmic ray observations for the first two-years on the ISS”, The 2017 Cosmic Ray Anisotropy Workshop (CRA 2017), October 2017, Guadalajara, Mexico.

4.4 受賞・表彰 該当なし

4.5 学会および社会的活動

1. Yoichi Asaoka for the CALET collaboration, “Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events with CALET”, *Gravitational wave physics and astronomy: Genesis*, March 2018, Kashiwa, Japan.
2. Shoji Torii, Yoichi Asaoka (presenter) for the CALET collaboration, “CALET : Summary of the First Two-Years on Orbit”, *TeV Particle Astrophysics 2017 (TeVPA 2017)*, August 2017, Columbus, Ohio, USA.
3. Yoichi Asaoka (Presenter) for the CALET collaboration, “Analysis and Preliminary Results for the Cosmic Ray Electron Spectrum from CALET”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 205.
4. S. Ozawa and Y. Asaoka for the CALET collaboration, “CALET on-orbit operations and data analysis system at the Waseda CALET Operations Center”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 16.
5. R. Miyata, Y. Asaoka and S. Torii for the CALET collaboration, “Full Dynamic Range Energy Calibration of CALET onboard the International Space Station”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 207.
6. S. Komiya, G. Bigongiari, S. Torii and Y. Asaoka for the CALET collaboration, “MIP Calibration and the Long-term Stability of CALET onboard the International Space Station”, *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, July 2017, Busan, Korea; *Proceedings of Science (ICRC2017)* 206.

7. M. Mori and Y. Asaoka for the CALET collaboration, "Search for gamma-ray emission from electromagnetic counterparts of gravitational wave sources with the CALET calorimeter", 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), July 2017, Busan, Korea; Proceedings of Science (ICRC2017) 637.
8. H. Motz, Y. Asaoka, S. Bhattacharyya and S. Torii for the CALET collaboration, "Searching for Anisotropy in Electron+Positron Cosmic Rays with CALET", 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), July 2017, Busan, Korea; Proceedings of Science (ICRC2017) 265.
9. S. Bhattacharyya, H. Motz, S. Torii and Y. Asaoka for the CALET collaboration, "Searching Fermionic DM Decay Signal with CALET", 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), July 2017, Busan, Korea; Proceedings of Science (ICRC2017) 919.
10. 浅岡陽一(発表者), 鳥居祥二, 赤池陽水, 宮田諒平, 小澤俊介, 笠原克昌, 宮崎美有, 他 CALET チーム, 「CALET による 10GeV–3TeV の全電子スペクトル観測結果」, 2018 年 3 月, 25pK202-7, 日本物理学会, 東京理科大学.
11. 浅岡陽一他, CALET 共同研究者(ポスター), 「CALET による 10GeV から 3TeV の全電子スペクトル観測」, 2018 年 1 月, 宇宙科学シンポジウム, JAXA/ISAS.
12. 鳥居祥二, 浅岡陽一(発表者), 「飛翔体観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究～CALET 2 年間の軌道上観測成果～」, 2017 年 12 月, 東京大学宇宙線研究所共同利用発表会, 東京大学宇宙線研究所.
13. 浅岡陽一(発表者), 鳥居祥二, 小澤俊介, 笠原克昌, 宮崎美有, 宮田諒平, 赤池陽水, 他 CALET チーム, 「CALET の電子観測性能と初期観測結果」, 2017 年 9 月, 13aU31-2, 日本物理学会, 宇都宮大学.

5. 研究活動の課題と展望

研究活動の課題は軌道上運用とデータ解析に大別される。

【軌道上運用】WCOC を継続的に運用する。これまでの成果をもとに、2017 年度から科研費基盤(B)「CALET データ解析のリアルタイム化によるトランジェント現象の観測」(研究代表者:浅岡陽一)が採択されている。ISS 船外実験プラットフォームという高エネルギー宇宙線実験にとって貴重な実験の場で最大限の成果を挙げられるように、主目的である高エネルギー電子観測を最優先しながらも、重力波や GRB の GeV 領域ガンマ線対応天体探索や AGN 等のフレア等に起因するガンマ線トランジェントの観測、太陽変調・超重粒子および REP 現象(MeV 領域電子の雪崩現象)の観測を実施し、サイエンス成果の最大化を目指す。

【データ解析】高統計の精密観測に見合う緻密な解析を実施する。データ解析においては、海外の共同研究者との協力および競争が重要なファクターとなる。ISS 搭載装置開発, WCOC の開発及び軌道上運用といった、日本及び早稲田大学の非常に大きな成果を強調しつつ、データ解析でも国際チームを牽引していくことが重要と考えている。

世界的にも注目度の高い CALET 実験で、効率的な運用を長期間継続し、適切なデータ解析を行うことで、検出器のポテンシャルを最大限活用した物理成果を挙げることが最大の目標である。

アストロサイト分化活性を持つ食品由来化合物の研究

研究代表者 新井 大祐
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

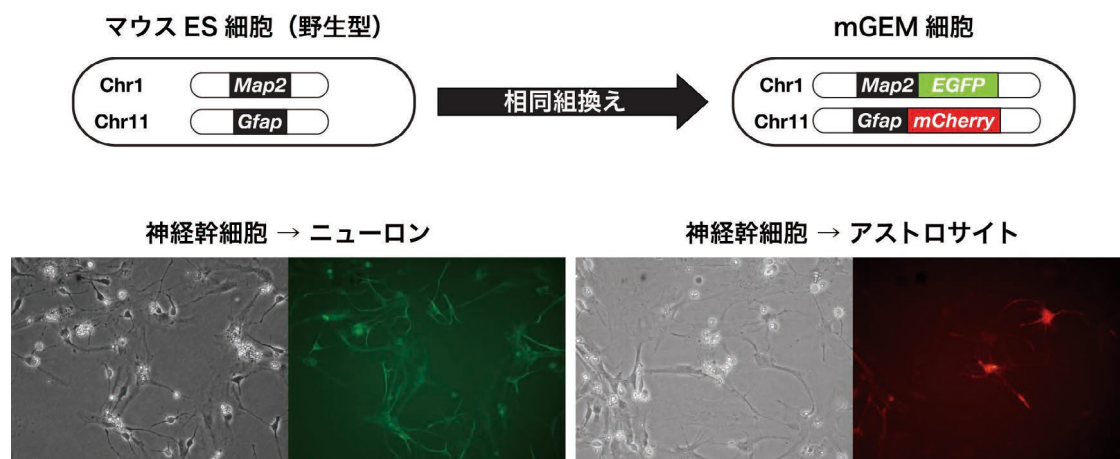
1. 研究課題

食品には様々な生理活性物質が含まれており、既知の物質であっても未だ知られない機能を持つケースが多々存在する。研究代表者は最近、ポリフェノール的一种であるピセアタンノールが神経幹細胞からアストロサイトへの分化を促進することを見出した。アストロサイトは中枢神経系を構成する主要な細胞であり、その増減が記憶形成やストレス、精神疾患と深く関わる事が明らかにされつつある。脳機能を改善させる食品由来化合物を見出しその機能を明らかにすることは、「ストレス社会」とも言うべき現代において非常に重要な研究課題である。

そこで本研究では、神経幹細胞の分化制御活性を評価する新たなシステムを開発し、活性物質の探索やメカニズム研究に取り組む。

2. 主な研究成果

これまでは神経幹細胞の分化状態を免疫染色法により評価していたが、これは高価な抗体を用いるうえ、染色作業に2日間を要するため、ハイスループットな解析の妨げとなっていた。そこで CRISPR/Cas9 法を活用し、内在性のニューロンマーカー遺伝子 (MAP2) に緑色蛍光タンパク質 (GFP) の、アストロサイトマーカー遺伝子 (GFAP) に赤色蛍光タンパク質 (mCherry) の遺伝子を結合させた double knock-in ES 細胞 (mGEM 細胞) を作出した。この細胞はニューロンに分化すると緑色、アストロサイトに分化すると赤色の蛍光を発するため、二種類の細胞系譜への分化状態を生きたまま観察することができ、評価に要する時間とコストを大幅に削減する。



mGEM 細胞を用いて様々な食品抽出物の分化制御活性を評価した結果、いくつかの食品にアストロサイト分化誘導活性を見出した。特に強い食品 A から、所属研究室において活性成分の単離が行われ、天然化合物 X が同定された。X はピセアタンノールよりも格段に強いアストロサイト分化誘導活性を示し、食品機能性成分としてだけでなく、再生医療分野への応用も期待できる（投稿準備中）。

3. 共同研究者

中尾 洋一（先進理工学部・化学・生命化学科・教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

Nakao Y, Nakamura F, Kudo N, Tomachi U, Nakata A, Takemoto M, Ito A, Tabei H, Arai D, de Voogd N, Yoshida M, Fusetani N. Halistanol Sulfates I and J, New SIRT1-3 Inhibitory Steroid Sulfates from a Marine Sponge of the Genus Halichondria. *J Antibiot (Tokyo)*, **71**, 273-278, 2018.

Takase S, Kurokawa R, Arai D, Kanto KK, Okino T, Nakao Y, Kushiro T, Yoshida M, Matsumoto K. A quantitative shRNA screen identifies ATP1A1 as a gene that regulates cytotoxicity by aurilide B. *Sci. Rep.*, **7**, 2002, 2017.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

“Piceatannol promotes neural stem cell differentiation into astrocytes”, Food, exercise and technology for health promotion. Jan 5, 2018, Biopolis, Singapore.

5. 研究活動の課題と展望

これまでにアストロサイト分化誘導活性を有する活性化合物 X ならびに複数の有望な食品抽出物の同定に成功した。今後はこれらの作用機序解明に取り組んでいく。転写因子やシグナル伝達に加え、エピジェネティクスにも注目し解析を進めていく。X をはじめ顕著な活性を示した単離成分については、*in vivo*での活性を確認するためにマウス投与実験を行っていく。

機械操作者のプランニング技能の定量化に関する研究

研究代表者 亀崎 允啓
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

操作型機械を操作して作業を効率的かつ安全に行うためには、機械を思い通りに操作できる「操作技能」だけでなく、安全な操作手順や効率的な操作内容を決定できる「プランニング技能」が重要になる。プランニング技能とは、一般的には、「目的のために、物事をどのような順序で行えば良いかを定めるための技能(段取り力)」であり、本課題においては、「効率的な手順や操作の際に意識する内容を導出する思考に関する技能」と捉えられる。プランニングは、先を予測することによって導出された選択肢を評価して、より良い選択をする行為であることから、プランニングの質に応じて作業のパフォーマンスは大きく左右されることが予想される。例えば、アームを有する作業機械を操作して、ある作業空間に散らばった物体を所定の位置に収納するというタスクを行う場合、物体や収納スペースの位置、自身の大きさなどを考慮していなければ、先に収納した物体が邪魔になってアームが届かず、再度運びなおすといった工数の増加(つまり、効率の低下)を招いてしまう。これまでに、プランニングというキーワードのもと、自動機械の動作スケジューリングや、ロボットアームの軌道計画などの研究が行われているが、操作型機械における操作者のプランニング技能を定量的に評価する枠組みに関する提案はほとんど存在しないのが現状である。そこで本研究では、プランニング技能を定量化するための基礎研究として、プランニング技能の構成要素である「操作手順」と「操作意識」に着目し、プランニング技能の特徴量抽出に必要な実験系の設定方法の提案、および機械操作者に共通した基本特徴量の抽出を行う。

2. 主な研究成果

2.1. プランニング技能の構成要素と特徴量

作業を遂行することを操作者の技能視点で整理すると、大枠の作業目的が与えられた場合、「その作業を完遂するための適切な動作群を抽出し、それらの実行順序を決定する。さらに、各動作を実現する適切な操作方法を決定し、その判断に基づいて動作を実行する」と記述することができる。この記述によれば、プランニング技能は、操作に関する「手順(Procedure)」と「意識(Attention)」によって構成されていることが分かる。「手順」とは、効率的な手順や安全を優先した手順など、作業目的に合わせた動作群の適切な実行順序のことである。もう1つの「意識」とは、その手順を実行する場合に意識(注意)することで作業を有利に進められるような操作に関する意識内容のことである。本研究では、前者を「操作手順」、後者を「操作意識」と呼び、この2点に着目したプランニング技能の定量化を図る。プランニングとは思考することであるため、その思考を直接的に抽出することはできない。そこで、その結果が計測可能な量として明確に表れるよう、抽出の手助けとなる「仕掛け」を用意する。プランニング技能として分類した操作手順と操作意識それぞれを抽出しやすくすることを考慮して、以下のように仕掛けを設定した。

(1)操作手順:動作群の順番を変えさせる仕掛けをタスク側に設定する。まず、その仕掛けを攻略できるかどうかでタスク完了の可否に直結するようなものと、攻略できなくてもタスク完了自体は可能だが、攻略

したほうが効率的になるようなものを設定する。プランニング技能が低い操作者はタスク完了までにやり直しや無駄な行程が生じ、プランニング技能が高い操作者より著しく作業時間が伸びるように設定する。案出した仕掛けを以下に示す(図 1)。

- 死角: 操縦席から見えない作業位置のこと。
- 優先: 特定の対象を優先して運ぶこと。
- まとめ運び: 対象をまとめて運ぶこと。
- 仮避け: 邪魔な移動対象を別の邪魔にならない位置に避けること。
- 距離感把握: 距離感を掴む指標を設定することで軌跡イメージを具体化すること。
- 姿勢修正: 移動物体の姿勢を変えること。
- 分別運び: 物体を別々に運ぶこと。

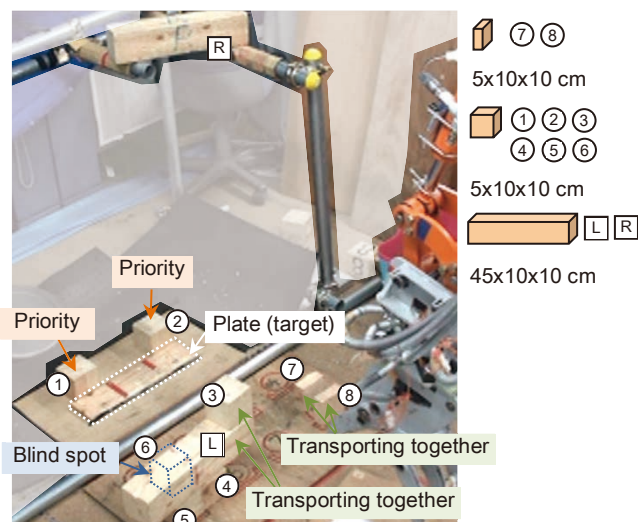


Fig. 1 Experimental tasks (piling objects on plate)

(2)操作意識: 意識に応じて動作を変えさせる仕掛けを操作者側に設定する。攻略することで作業効率が高まるものを設定した。動作を変えるとは、動作のイメージを変えるということであり、コツを掴むことも言い換えられる。作業状態ごとに意識すべき操作のコツは異なることから、仕掛けは、作業状態ごとに案出した。

- 直線軌道: 最短距離となるよう現在地から目標まで一直線で向かう。
- 重心把持: 持ち直しや滑り落ちないように手先の位置を調整して把持する。
- 垂直把持・設置: 把持, リリースがしやすいように地面と垂直になるように手先の角度を調整する。
- 限界関節角度の回避: 関節自由度を拘束しないよう腕全体を使用して、各関節角度を調整する。
- 次動作の前準備: 次動作に必要でできることを前もってやっておく。
- 次動作認識: 常に次動作を意識して作業の流れを止めないで作業を行う。

2.2. 実験条件

プランニング技能抽出実験を行う被験者の傾向に偏りが生じないように、操作技能に差がある被験者を選出した。無作為に選出した 8 名の被験者に、プランニング技能を必要としないような単純な作業を行ってもらった。手前に 8 つの木製ブロック(一辺 10cm)が 1 列当たり 4 つ×2 列に分かれて置かれている。奥には木製プレートが同じく 2 列になって置かれている。手前に置かれた 8 つのブロックを奥の 2 列のプレートに移動させるというタスクである。作業時間が大きく減少する習熟の影響を極力取り除くため、実験は計 5 日間にわたって行った。被験者群を比較するため、5 日目の安定作業時間を比較し、最短の人を 1 名(No.7: A), 中間程度の人 2 名(No.8: B, No.6: C), 最長の人 1 名(No.2: D), の合計 4 名を被験者として選出した。

2.3. 実験結果

(1)操作手順変更実験: 各実験モデルの仕掛けをすべて攻略できた最短手順と、できなかった最長手順を設定し、これらの手順で各実験を被験者に行ってもらった。実験は各手順 5 回ずつ。データを取った 5 回の作業時間に操作技能基準化実験で算出した基準化係数をそれぞれかけ、最速回のデータと 5 つのデータを平均したデータを算出し、最短手順と最長手順を比較した。図 2(a)に最短手順と最長手順で行った実験結果を示す。実験の結果、最短手順の方が、作業時間が短くなること、さらに、操作手順によって生じる時間差は、総移動距離に表れることが分かった(図 2(b))。図 2(c)には、実際の手先軌道を示す。

(2)操作意識変更実験: 次に、既述した操作意識をすべて口頭で被験者に伝え、実践してもらった。実験

は各パターン10回ずつ、データを取った10回の作業時間に操作技能基準化実験で算出した基準化係数をそれぞれかけ、最速回のデータと5つのデータを平均したデータを算出、最短手順のみと最短手順+操作意識を比較した。図3(a)に、操作意識を意識したときと、していないときの実験結果を示す。実験を行った結果、CおよびDは最短手順+操作意識が最も作業時間が短く、AおよびBは、最短手順のみ(操作意識なし)の方が、最も作業時間が短くなることが分かった。操作手順によって生じる差は、動作実現のための操作であるレバー操作に現れることが分かった(図3(b))。実際の複軸操作量を図3(c)に示す。図から分かるように、最短手順では、無駄な動きがなくスムーズな軌道となっていることが分かる。

(3)実験結果のまとめと考察: 2つの実験から、最短手順下では、タスクや被験者によらず作業時間が大きく改善されること、操作意識の改善支援の結果、操作技能が低い被験者ほど作業時間の改善が図れることが分かった。特徴量レベルでは、総移動距離が短いほど(操作手順)、複軸操作量頻度が多いほど(操作意識)、効率的作業が実現できることが分かった。手順と意識の違いが作業効率に与える影響を詳細に分析するため、作業フェーズごとに分類を行った。ここでは、意識の違いで作業時間に有意差がなかった被験者Aと、有意差のあったDを比較した。情報支援の提供により、被験者Dにおいては意識が改善された直線移動や移動中の準備によって、ふらつきや微調整時間が減り、運搬や把持フェーズにおける作業時間が大きく減少することが分かった。これに対して、Aにおいては、今までできていたことを改めて意識してやったために、かえって無駄な(不慣れなで非効率な)軌道が増えたり、過度に慎重になって速度が落ちたりしたのではないかというアンケート結果も得られた。こういった支援と技能のミスマッチを定量化できれば、より効果的な支援システムを構築できると考えられる。

3. 共同研究者

菅野 重樹(創造理工学部 総合機械工学科・教授)

岩田 浩康(創造理工学部 総合機械工学科・教授)

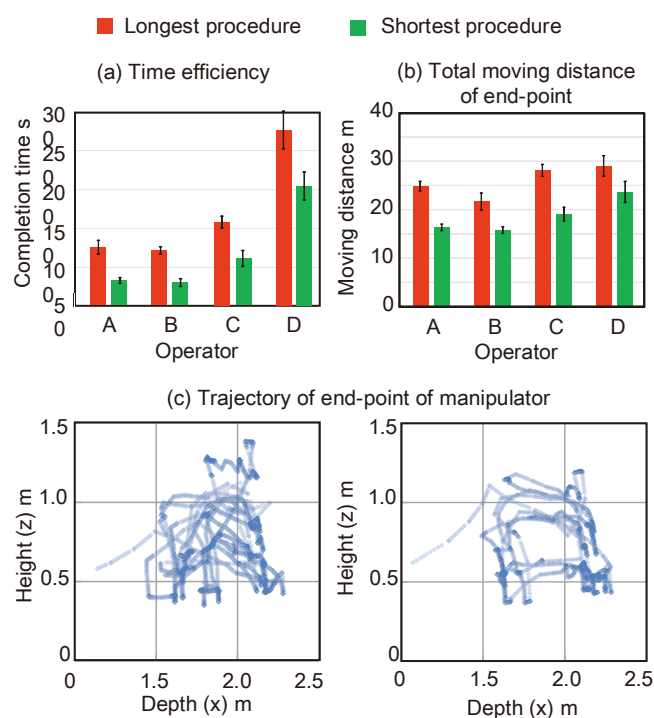


Fig. 2 Operation procedure

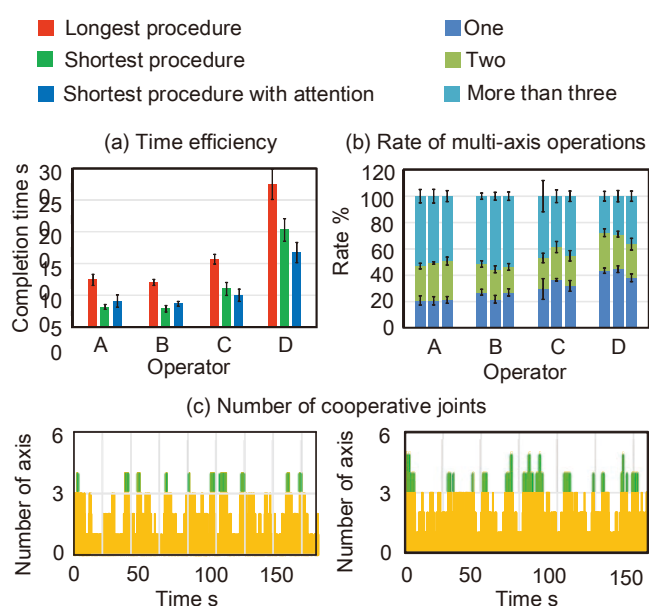


Fig. 3 Operation attention

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] 仁内, 亀崎, 佐藤, 菅野, 岩田, “重機の遠隔操作性向上のためのマルチカメラ最適配置に関する研究－第一報 パン・チルト角による作業性への影響の検証－”, 第 21 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2016 年 3 月.
- [2] 佐藤, 亀崎, 仁内, 菅野, 岩田, “遠隔操作導入前の映像提示システムによる直接描画法を用いた操作者の認知地図への影響分析”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会論文集(SI2017), 2017 年 12 月.
- [3] R. Sato, M. Kamezaki, S. Niuchi, S. Sugano, and H. Iwata, “A Pre-offering View System for Teleoperators of Heavy Machines to Acquire Cognitive Maps,” in Proc. IEEE Int. Symp. Safety, Security, and Rescue Robotics 2017 (SSRR 2017), pp. 61-66, Oct. 2017.
- [4] 佐藤, 亀崎, 仁内, 菅野, 岩田, “ヒトの認知構造に基づいた事前の環境把握映像提示による災害対応遠隔重機作業の効率化に関する研究”, 第 17 回建設ロボットシンポジウム論文集(SCR2017), paper no. O3-2, 2017 年 8 月 28～30 日.
- [5] R. Sato, M. Kamezaki, S. Niuchi, S. Sugano, and H. Iwata, “Pre-offering Work-Site Views to Acquire Spatial Knowledge from Survey and Route Perspective for Advanced Teleoperation of Construction Machines,” Proc. 2017 Int. Symp. Automation and Robotics in Construction (ISARC2017), June 2017.
- [6] 亀崎, 佐藤, 三矢, 岩田, 菅野, “機械操作者のプランニング技能の定量化に関する研究～操作手順と操作意識に着目した特徴量の抽出～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 論文集(Robomec'17), paper no. 1P2-A03, 2017 年 5 月 10～13 日.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

- [7] 重機ロボットのための操作インタフェース, ROBOMECH2017 ImPACT プログラム合同ワークショップ「ロボットイノベーションのためのヒューマン・インタフェース」, 2017 年 5 月 13 日, 福島.

4.4 受賞・表彰

- [8] 優秀講演賞, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017 年 12 月.
- [9] 優秀講演賞, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017 年 12 月.

4.5 学会および社会的活動

- [10] プログラム副委員長, 第 17 回建設ロボットシンポジウム, 2017 年.
- [11] 委員(ロボット学会), 平成 29 年度建設ロボット研究連絡協議会, 2017 年

5. 研究活動の課題と展望

次のステップとして, 多種多様な作業環境で, 総移動距離や複軸操作量の閾値をどのように設定するのか, また, 技能不足と評価された操作者に, どのような支援を, どのようなタイミングで, どれくらい時間をか

けて行うか検討する必要がある. そのためにも他のプランニング特徴量を含め, 作業効率にどれほど影響を持っているかを分析し, それぞれ対応する支援を構築することを考えている.

ベトナム阮朝期建築生産組織に関する史料調査研究

研究代表者 木谷 建太
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

ベトナム中部都市フエは、ベトナム全土を、現在の形で統治した最初で最後の王朝である阮朝（1802～1945）の都であり、碁盤目状の構造を有する中国的な街区を、フランス的なヴォーバン式城郭が囲む構成にみられるように、多様な文化が一定の秩序のもと融合している。しかし、阮朝崩壊後の混乱や、続くベトナム戦争によって多くの文化や技術体系が失われた。残存している遺構から阮朝の王宮都市における宮殿建築の中心要素と骨格を見出し、史資料の情報を繋ぎ合わせていき往時の建築文化、ひいてはフエの都市全体の復原像を描くことが、研究の動機である。

これまでの研究により、ベトナムの歴代王朝で公定尺とされてきたものは、1 尺あたり、424 ミリメートル近傍であったことが明らかとなっており、中国、韓半島、日本のそれとは異なる。これは、中国・雲南やタイの少数民族に残る尺度に近いことがわかっており、この地域の基層文化の一つとみることができる。また、魯班尺という吉凶尺を用いた家屋（宮殿）の設計がなされるが、いわゆる風水とよばれる体系とともに、ベトナムへ伝来している。特に陵墓に用いられる陰宅風水における魯班尺の使用法が、台湾や沖縄など南シナ海を介した地域で共通しており、海洋アジア文化圏の存在を示唆している。阮朝は、漢字文化を中国から受容する一方で、前身となる広南国の時代に攻略したチャンパの文化・技術を取り込んで、腋尺という正三角形のもののさしを用いて設計を行う、登り梁ケオを合掌組にした独自の架構形式を宮殿に用いたことは明らかにしたが、その発生過程についてはなお課題となっている。以上、周辺地域との比較研究を進めることにより、阮朝の、ひいてはベトナムの建築生産組織の史的評価を与えることを研究の目的とする。

2. 主な研究成果

2.1 フランス極東学院・国立海外文書館への史料調査

これまで、『大南會典事例續編後次』について、チュオン・ディン・ホエによる目録（Đình-Hoè, Truong. Inventaire n° 1 : fonds Hán-Nôm de l'E.F.E.O (Paris), Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient. 1986, Tome 75, pp. 270-294.）などにより、フランスのフランス極東学院（École française d'Extrême-Orient、パリ）に所蔵されることが知られていたが、実見に至っていなかった。2017 年 10 月、同院図書室にて、資料調査を行い、同書の一部（「目録」1 巻、「工部」4 巻、「國史館」2 巻）について、撮影することができた。同書については、2017 年度日本建築学会大会の報告において、『大南會典事例』や『大南會典事例續編』との関連お

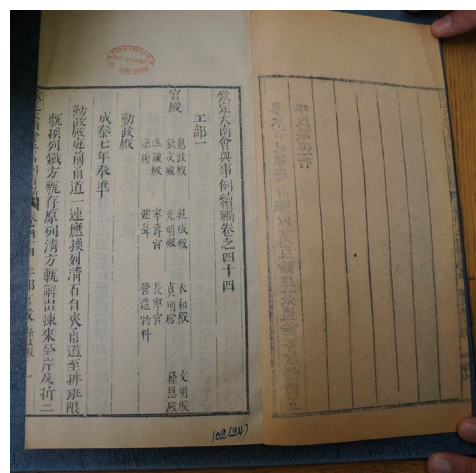


Fig.1 『大南會典事例續編後次』

よび編纂の経緯を明らかにし、さらに、ほかの欽定漢喃文献に無い、建築史的に重要な記述の存在を示した。また、国立海外文書館（Archives nationales d'outre-mer:ANOM、エクス＝アン＝プロヴァンス）で、資料調査を行い、フランスが植民地統治時代に収集した史料のうち、デジタル化されていないカード式目録の存在を確認し、写真による記録を行った。

2.2 周辺地域の比較調査研究：ベトナム中南部（旧チャンパ王国）

研究協力者として参加する、日本学術振興会・科学研究費補助金（基盤研究（A）・海外学術調査）「歴史環境都市ベトナム・フエの持続的発展のための技術指針と文化遺産保存活用学の構築」（研究代表者：中川武）による研究調査の一部である。当該研究は、これまで 20 年以上の研究成果の上に立って、文化遺産を静的なモノとしてだけでなく、周辺環境や社会を含めたコトとして捉えて、その動的な様相を明らかにして、実践的・総合的に文化遺産保存活用学の構築を企図するものであり、本研究との直接の関連を持たない。ただし、ベトナム・フエを対象とした同一の研究成果をもとに構想されたものであり、一方で得られた知見が、もう一方へ何らかの示唆を与えることは明白であり、相乗効果が期待できるため、ここで得られた知見の一部を本研究の成果として報告する。

当該研究が対象とするベトナム阮朝の版図の南側半分は、元は、チャンパ王国の領土であったため、阮朝の造営をはじめとして、文化や諸制度について影響が少なくないことは、これまでも指摘している。今年度は、現在残されている、旧チャンパ王国の痕跡を確認すべく、3つの博物館を訪問し、それぞれの学芸員に現状に関するインタビューを行い、研究協力について要請した。また、チャンパの遺構について悉皆調査を行い、現状を把握した。



Fig.2 チャンパ文化遺産センター

【博物館】

Bảo tàng Nghệ thuật điêu khắc Chăm Đà Nẵng（チャム彫刻博物館）

Bảo Tàng Bình Định（ビンディン博物館）

Trung Tâm Nghiên Cứu Văn Hóa Chăm（チャム文化研究センター）

【遺構】

Tháp Phú Diên（フー・ディエン塔）

Trà Kiệu（チャ・キェウ）

Tháp Bằng An（バン・アン塔）

Mỹ Sơn（ミソン）

Tháp Đông Dương（ドン・ジュオン塔）

Ngũ Hành Sơn（五行山）

Tháp Chiên Đàn（チェン・ダン塔）

Tháp Khương Mỹ（クウン・ミー塔）

Tháp Cánh Tiên（カン・ティエン塔）

Tháp Phú Lộc（フー・ロック塔）

Tháp Bánh Ít（バン・イット塔）

Tháp Dương Long（ズウン・ロン塔）

Tháp Thủ Thiện（トゥー・ティエン塔）

Tháp Bình Lâm（ビン・ラム塔）

Tháp Đồi（ドイ塔）

Tháp Nhạn（ニャン塔）

Tháp Po Nagar（ポー・ナガル塔）

Tháp Hòa Lai（ホア・ライ塔）

Tháp Po Rome（ポー・ロメ塔）

Tháp Po Klongarai（ポー・クロンガライ塔）

Tháp Po Dam（ポー・ダム塔）

Tháp Pô Sah Inur（ポー・サー・イヌ塔）

Cát Tiên（カッティエン）

2.3 周辺地域の比較調査研究：中国東南沿海部（広西壮族自治区）

2.2 と同様、研究協力者として参加する、日本学術振興会・科学研究費補助金（基盤研究（A）・

海外学術調査)の一部である。

ベトナムと隣接する中国の広西壮族自治区は、ヤオ(瑤)族と呼ばれる少数民族が両国に跨がって暮らしているほか、現在も文化的背景を多く共有している。建築における技術や空間構成についても、共通点を明らかにすべく、遺構について調査を行った。

【遺構】

梅庵	馬殷廟	八江風雨橋
徳慶学宮	富川瑤族風雨橋	馬胖鼓楼
化州学宮	恭城文廟・武廟	三江鼓楼
大士閣	周渭祠	程陽風雨橋
真武閣	獅塘神亭	靖江王陵
賀州客家圍屋	龍脊大瑤寨	

3. 研究業績

3.1 学術論文

木谷建太、中川武「阮朝建築の営繕に関する官吏と工匠 ヴィエトナム・フエ阮朝王宮の復元的研究(その200)」『日本建築学会大会学術講演梗概集 F-2』、広島、2017年8月、日本建築学会、853～854頁

KITANI Kenta. "The Architecture System of the Nguyen Dynasty, Vietnam, and Its Selective Acculturation to Foreign Cultures", EAAC 2017, China, Oct 2017

3.2 学会および社会的活動

日本建築学会：[若手奨励] 特別研究委員会・委員

「西洋文明圏外の古代・中世における建築書と建築理論の文献調査・研究」

4. 研究活動の課題と展望

のフランス極東学院(École française d'Extrême-Orient、パリ)図書室にて、資料調査を行い、写真記録を行った、『大南會典事例續編後次』(「目録」1巻、「工部」4巻、「國史館」2巻)について、実際の遺構の寸法との関係、あるいは、既往研究において、皇帝陵の寝殿は、宮殿とは異なる遺構尺を導出している点については、本史料の記述のさらなる読解を含めて総合的に考察することを今後の課題としたい。

パイオニア転写因子による標的ヌクレオソーム認識機構の解析

研究代表者 小山 昌子
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

パイオニア転写因子は、クロマチンの基本構造単位であるヌクレオソームの中に存在する DNA 塩基配列に結合して、他の転写因子群やクロマチンリモデリング因子を呼び込むとともに近傍のクロマチンの構造変換を誘起する。本研究では、細胞の初期化に重要なパイオニア転写因子である Oct4 に着目し、Oct4 が標的ヌクレオソームに結合するメカニズムを生化学的・構造生物学的解析により明らかにすることを目的とする。

2. 主な研究成果

Oct4 が標的ヌクレオソームに結合するメカニズムを生化学的・構造生物学的手法により解析するために、まずは Oct4 の標的となるヌクレオソームを作製した。そのために、先行研究の結果から Oct4 が結合してかつヌクレオソームが形成されることが分かっているゲノム領域の DNA 断片を、PCR 法によって大量に増幅し精製した。精製した DNA と、リコンビナントタンパク質として精製したヒトの 4 種類のコアヒストン (H2A, H2B, H3, H4) を用いて、塩透析法によって標的ヌクレオソームを試験管内で再構成した。再構成したヌクレオソームを分取用電気泳動装置 (プレップセル) によって高純度に精製した。さらに、ヒトの Oct4 をリコンビナントタンパク質として大腸菌で発現させ、高純度に精製した。精製した Oct4 と標的ヌクレオソームを用いて、ゲルシフト法による結合解析を行った結果、Oct4 は標的ヌクレオソームに効率的に結合することを確認した。

Oct4 のヌクレオソーム上での結合位置を明らかにするために、さまざまな DNA 断片やヌクレオソームを競合相手として、Oct4 と標的ヌクレオソームとの結合解析を行った。その結果、Oct4 が結合する DNA 領域を絞り込むことができた。さらに、Oct4 とヒストンとの結合解析を行い、Oct4 がヒストンに結合するという結果を得た。これらの結果から、Oct4 は標的ヌクレオソーム中の標的塩基配列 DNA とヒストンとの両方に協調的に結合することで、標的ヌクレオソームに結合するという可能性が示唆された。さらに、標的ヌクレオソームの DNA 配列上でのポジショニングと、Oct4 の結合が標的ヌクレオソームのポジショニングに与える影響を解析するために、ケミカルマッピング法により試験管内でヌクレオソームポジショニングを解析する系を立ち上げた。この方法により、標的ヌクレオソームのポジショニングを明らかにし、さらにこのヌクレオソームポジショニングは Oct4 の結合によって変化しないことを明らかにした。以上の結果から、Oct4 はゲノム上に無数に存在する標的塩基配列の中から、標的ヌクレオソームの特定の部位を認識して、高い親和性で結合すると考えられる。

Oct4 の標的ヌクレオソームへの結合メカニズムを原子レベルで解明するために、Oct4-標的

ヌクレオソーム複合体の立体構造の解明を目指した。X線結晶構造解析を行うために、Oct4-標的ヌクレオソーム複合体の結晶化を行い、SPRING-8 および Photon Factory において X 線照射実験を行い、8 Å 分解能程度の回折データを得た。また、クライオ電子顕微鏡による解析を行うために、サンプルの調製条件の検討を行った。

3. 共同研究者

胡桃坂 仁志（先進理工学部・教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

Y. Takizawa, H. Tanaka, S. Machida, M. Koyama, K. Maehara, Y. Ohkawa, P. A. Wade, M. Wolf, and H. Kurumizaka, Cryo-EM structure of the nucleosome containing the ALB1 enhancer DNA sequence, *Open Biol.*, **8**, 170255 (2018).

Koyama, M., Hirano, H., Shirai, N. and Matsuura, Y. Crystal structure of the Xpo1p nuclear export complex bound to the SxFG/PxFG repeats of the nucleoporin Nup42p, *Genes Cells*, **10**, 861-875 (2017).

Koyama, M., Sasaki, T., Sasaki, N. and Matsuura, Y. Crystal structure of human WBSCR16, an RCC1-like protein in mitochondria, *Protein Sci.*, **26**, 1870-1877 (2017).

Koyama, M. and Matsuura, Y. Crystal structure of importin- α 3 bound to the nuclear localization signal of Ran-binding protein 3, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **491**, 609-613 (2017).

4.2 総説・著書

M. Koyama and H. Kurumizaka, Structural diversity of the nucleosome, *J. Biochem.*, **163**, 85-95 (2018).

小山昌子, 胡桃坂仁志 パイオニア転写因子によるクロマチン構造変換（特集：核内イベントの時空間制御）, *生体の科学*, **68**, 229-232 (2017).

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

Koyama, M., Nagakura, W., Kuroda, A. and Kurumizaka, H. Biochemical analyses using purified *S. pombe* histones, EMBO CONFERENCE, The Nucleosome: From Atoms to

Genomes., 2017 年 9 月, ドイツ・ハイデルベルク.

小山昌子, 水上優夏, 胡桃坂仁志, パイオニア転写因子の結合が標的ヌクレオソームに与える影響の解析, 生殖エピゲノム・クロマチン動構造合同若手勉強会, 2017 年 6 月, 和歌山県.

小山昌子, 水上優夏, 島林秀伎, 胡桃坂仁志, Oct4 がヌクレオソーム構造中の標的塩基配列に結合する機構の解析, 新学術領域研究クロマチン動構造第 5 回班会議, 2017 年 7 月, 北海道.

5. 研究活動の課題と展望

Oct4-標的ヌクレオソーム複合体の立体構造を解明するために、高分解能まで回折する複合体の結晶を作製する。そのために、DNA 配列や Oct4 断片のコンストラクトや精製条件を検討する。また、並行してクライオ電子顕微鏡による構造解析も行う。これらの解析により、Oct4 が標的ヌクレオソームを特異的に認識して結合するメカニズムを明らかにする。

インフォマティクスと融合させた高精度・高効率な

相対論的量子化学理論の開発

研究代表者 清野 淳司
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

これまで量子化学の多くの場面で、データに潜む規則性・法則性を利用した高精度化・高速化が実現されてきた。例えば我々は、有機化合物に対して、非相対論的波動関数理論における高精度な手法および完全基底関数極限のエネルギーを推定する手法を開発した。また、電子密度の汎関数のみを用いて波動方程式と同等の形に変換して解く密度汎関数理論 (DFT) では、汎関数を構築する際に幾つかの化合物に対する分子物性を再現するようにパラメータ決定がされてきた。

本研究では相対論的量子化学とインフォマティクスを融合し、高精度化・高速化を達成することで、任意の元素を含んだ化合物のための、より実用性の高い手法とすることを目的とする。これにより実社会で求められるメソスケール領域まで踏み入れることができる相対論的量子化学計算を実現させる。さらに開発する手法が導入された、独自のプログラム **Relativistic And Quantum Electronic Theory (RAQET)** を用いて、本プロジェクト内での企業と共同研究を通して、材料設計・開発が加速されることを示す。最終的には産業界に根付かせることを目標とする。

2. 主な研究成果

2-1 磁氣的分子物性に対する量子化学計算手法の確立

我々は理工総研のプロジェクト研究「相対論的電子論が拓く革新的機能材料設計」(研究代表：中井浩巳教授)において、任意の元素を含んだ化合物に適用可能な大規模分子計算を実現する独自の理論を含んだプログラム **RAQET** を開発してきた。このプログラムの社会実装を実現するためには、さらなる機能拡充が不可欠である。そのために本研究では相対論的量子化学に基づく種々の分子物性計算の理論開発および実装を行う。本年度は、相対論効果の寄与が大きな分子物性の一つである磁氣的物性に着目し、理論開発を行った。

磁氣的物性の計算において、磁場のゲージ原点の違いにより値が変わること(ゲージ原点依存性)は大きな問題である。これまで非相対論的量子化学において、この問題を解消する方法が幾つか報告された。一方、**RAQET** で実装されている 2 成分相対論法において、現在もこの問題は多くの議論がなされている。本研究では、磁場の効果を含んだ 4 成分 **Dirac** ハミルトニアンに対して、ゲージ原点不変因子を含んだユニタリー変換を適用することで、この問題を解消する手法を開発した(学術論文[4])。

図 1 に **HI** 分子の核 **I** における核磁気遮蔽定数のゲージ原点依存性の結果を示す。分子の重心における値を 0 とし、ゲージ原点を平行移動したときの本手法 (**IODKH/GF-UT**) の値を示す。つまり、正しくゲージ原点依存性の問題が解消されていれば、常に 0 となる。比較として非相対論 (**NR**) および 2 成分相対論法 (**IODKH**) における、ゲージ原点依存性を考慮していない手法 (**CGO-O**)、

考慮した手法（GIAO）、従来の 2 成分相対論法におけるゲージ原点依存性を考慮した手法（IODKH/UT-GF）を用いた。この結果、CGO-O や UT-GF ではゲージ原点が平行移動するにしたがって値が大きくなる。一方、IODKH/GF-UT は NR/GIAO と同様に平行移動をしても常に 0 となり、ゲージ原点依存性の問題が解消されていることが確認された。

また表 1 に幾つかの分子に対する、IODKH における各原子核の核磁気遮蔽定数の結果を示す。比較として、非相対論（NR）の結果も示す。この結果から、原子番号が大きな元素を含んだ分子ほど NR と IODKH との差が大きく、相対論効果が重要であることがわかる。

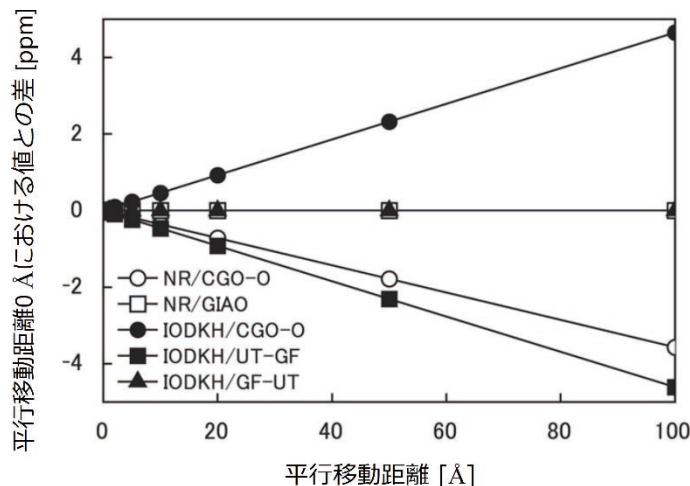


図 1. HI 分子の核 I における核磁気遮蔽定数のゲージ原点依存性

表 1. 分子の核磁気遮蔽定数（ppm）.

Molecule	Nucleus	NR	IODKH	Molecule	Nucleus	NR	IODKH
HF	F	414.0	418.2	Br ₂	Br	2154.2	2453.3
	H	28.1	28.2		I	4299.1	5463.8
HCl	Cl	922.1	955.3	H ₂ O	O	319.8	322.5
	H	29.2	30.2		H	29.8	29.8
HBr	Br	2633.8	2954.2	H ₂ S	S	744.2	744.1
	H	30.7	36.4		H	30.8	31.2
HI	I	4535.9	5819.9	H ₂ Se	Se	2165.0	2431.8
	H	31.1	49.6		H	30.3	33.5
F ₂	F	-170.9	-164.9	H ₂ Te	Te	3671.7	4733.9
Cl ₂	Cl	695.2	729.1		H	29.7	41.5

2-2 機械学習を用いた半局所運動エネルギー密度汎関数の構築

本研究では、インフォマティクスの手法を用いて、従来よりも圧倒的に高速な DFT 計算手法を開発することを目指す。DFT における電子エネルギー E の表式は、電子密度 ρ の汎関数として次のように定義される。

$$E[\rho] = T_s[\rho] + E_{\text{EXT}}[\rho] + E_{\text{CL}}[\rho] + E_{\text{XC}}[\rho] \quad (1)$$

ここで、 T_s は運動エネルギー、 E_{EXT} は核-電子引力、 E_{CL} は古典的な電子間クーロン反発、 E_{XC} は量子的な交換・相関エネルギーである。ここで式(1)の T_s と E_{XC} は汎関数形が未知である。特に E_{XC} では実用計算に耐えうる精度での種々の近似的汎関数が開発されてきた。一方、 T_s でも様々な汎関

数が提案されたが、特に原子・分子などの孤立系に対する計算精度が低いことが知られている。そこで軌道の概念を導入することで、実用的な精度での T_S 計算を可能とするコーンシャム (KS)-DFT が発展してきた。近年用いられる DFT 計算の大部分は KS-DFT である。しかし、軌道を用いずに式(1)を解く DFT (OF-DFT) は、計算時間の次数やプレファクターが小さい。そのため、 T_S を実用的な精度で与える汎関数の構築が望まれている。本研究ではこの T_S に対する汎関数を機械学習により構築する手法を開発する。

DFT ではホーヘンベルグ・コーンの定理により、電子密度の情報だけでエネルギーが表現できることが保証されている。一方、インフォーマティクス手法の一つである機械学習では、記述子と目的変数との間に成り立つ関数形を大量のデータにより陰に構築することができる。そこで我々は、まず空間をグリッドで区切り、そのグリッド内の局所的な運動エネルギー密度や電子密度などの情報から機械学習により汎関数を構築する手法を開発した (図 2)。ここでは目的変数として KS-DFT による運動エネルギー密度を用いた。この運動エネルギー汎関数は、原理的に原子種や座標に依らず、同一の関数形となる。そこでデータベースはあらゆる分子系に対する任意のグリッド点での電子密度情報および運動エネルギー密度により構築した。

結果を図 3 に示す。比較のため、これまで提案されてきた 33 つの運動エネルギー汎関数の結果も載せた。この結果から、機械学習による手法 (ML3) は従来のすべての運動エネルギー汎関数よりも高い精度で KS-DFT による運動エネルギーを再現できることが示された (学術論文[3])。

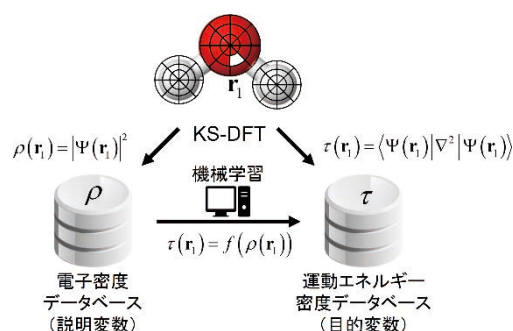


図 2. 機械学習による運動エネルギー汎関数の構築

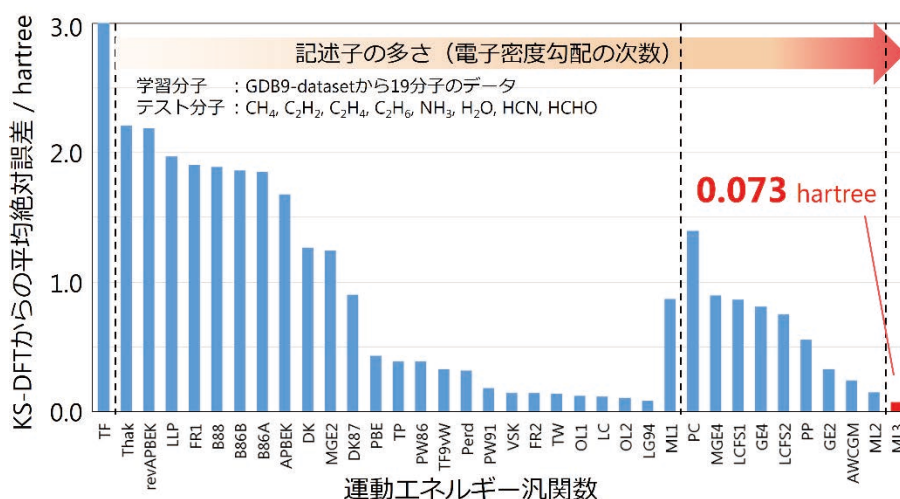


図 3. 8 個のテスト分子に対する運動エネルギーの平均絶対誤差

3. 共同研究者

中井 浩巳 (先進理工学部 化学・生命化学科・教授)

五十幡 康弘 (理工学術院総合研究所・次席研究員)

吉川 武司 (先進理工学部 化学・生命化学科・助教)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] T. Oyama, Y. Ikabata, J. Seino, and H. Nakai, “Relativistic density functional theory with picture-change corrected electron density based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, *Chem. Phys. Lett.* **680**, 37 (2017).
- [2] M. Nakano, T. Yoshikawa, S. Hirata, J. Seino, and H. Nakai, “Computerized implementation of higher-order electron-correlation methods and their linear-scaling divide-and-conquer extensions”, *J. Comput. Chem.* **38**, 2520 (2017).
- [3] J. Seino, R. Kageyama, M. Fujinami, Y. Ikabata, and H. Nakai, “Semi-local machine-learned kinetic energy density functional with third-order gradients of electron density”, *J. Chem. Phys.* **148**, 241705 (2018).
- [4] M. Hayami, J. Seino, and H. Nakai, “Gauge-origin independent formalism of two-component relativistic framework based on unitary transformation in nuclear magnetic shielding constant”, *J. Chem. Phys.* **148**, 114109 (2018).
- [5] M. Hayami, J. Seino, and H. Nakai, “Derivative of electron repulsion integral using accompanying coordinate expansion and transferred recurrence relation method for long contraction and high angular momentum”, *Int. J. Quant. Chem.*, in press.

4.2 総説・著書

- [1] 清野 淳司, 中井 浩巳, 「インフォマティクスとの融合による理論化学研究」, *化学工業*, **70**, 53 (2018).

4.3 招待講演

- [1] J. Seino, M. Hayami, Y. Nakajima, M. Nakano, Y. Ikabata, T. Yoshikawa, T. Oyama, K. Hiraga, H. Nakai, “RAQET: Large-Scale Two-Component Relativistic Quantum Chemistry Program Package”, International Symposium “Theoretical Design of Materials with Innovative Functions Based on Element Strategy and Relativistic Electronic Theory”, Tokyo Metropolitan University, 2017/12/8.
- [2] 清野 淳司, 「次世代相対論的量子化学プログラム RAQET の紹介と理論化学研究の情報学との融合」, 新化学技術推進協会 先端科学・材料技術部会・コンピュータケミストリ分科会 次世代 CCWG 講演会, 新化学技術推進協会会議室, 2018/3/2.

4.4 受賞・表彰

- [1] 第 11 回分子科学討論会 2017 分子科学会優秀講演賞, 大山 拓郎 (M2): 共同発表者.
- [2] 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017 優秀ポスター発表賞, 影山 棕 (M1): 共同発表者.

4.5 学会発表

- [1] 影山 棕, 藤波 美起登, 清野 淳司, 五十幡 康弘, 中井 浩巳, 「インフォマティクスを用いた運動エネルギー汎関数の開発」, 第 20 回理論化学討論会, 京都大学, 2017/5/16, ポスター.
- [2] 棚嶋 拓朗, 五十幡 康弘, 清野 淳司, 影山 棕, 中井 浩巳, 「インフォマティクスを用いた交換相関汎関数の開発」, 第 20 回理論化学討論会, 京都大学, 2017/5/17, ポスター.

- [3] 速水 雅生, 清野 淳司, 中井 浩巳, 「ユニタリー変換を用いた二成分相対論法におけるゲージ原点非依存な核磁気遮蔽定数計算手法の開発」, 第 20 回理論化学討論会, 京都大学, 2017/5/17, ポスター.
- [4] Q. Wang, Y. Iwabata, J. Seino, H. Nakai, Y. Shoji, T. Fukushima, “Room-Temperature Phosphorescence in Heavy-Metal-Free Molecules”, 第 20 回理論化学討論会, 京都大学, 2017/5/17, ポスター.
- [5] 影山 椋, 藤波 美起登, 清野 淳司, 五十幡 康弘, 中井 浩巳, 「軌道非依存密度汎関数理論のための運動エネルギー汎関数の開発: 機械学習によるアプローチ」, 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 東京工業大学, 2017/6/8, ポスター.
- [6] Q. Wang, Y. Iwabata, J. Seino, H. Nakai, Y. Shoji, and T. Fukushima, “Theoretical Investigations on Room-Temperature Phosphorescence of Arylboronic Esters”, 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 東京工業大学, 2017/6/9, ポスター.
- [7] 棚嶋 拓朗, 五十幡 康弘, 清野 淳司, 影山 椋, 中井 浩巳, 「インフォマティクスの交換相関汎関数開発への応用」, 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 東京工業大学, 2017/6/9, ポスター.
- [8] Y. Iwabata, T. Oyama, K. Hiraga, M. Hayami, J. Seino, H. Nakai, “Two-component relativistic density functional theory based on infinite-order Douglas-Kroll-Hess method”, 11th Triennial Congress of the World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC 2017), Germany, 2017/8/28, Poster.
- [9] Q. Wang, Y. Iwabata, J. Seino, Y. Shoji, T. Fukushima, H. Nakai, “Phosphorescent mechanism of arylboronic esters at room temperature”, 11th Triennial Congress of the World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC 2017), Germany, 2017/8/28, Poster.
- [10] M. Fujinami, J. Seino, H. Nakai, “Reaction-prediction scheme based on quantum chemical information and machine learning”, 11th Triennial Congress of the World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC 2017), Germany, 2017/8/28, Poster.
- [11] 棚嶋 拓朗, 五十幡 康弘, 清野 淳司, 中井 浩巳, 「ABC アルゴリズムを用いた密度汎関数理論におけるパラメータ最適化」, 第 13 回進化計算学会研究会, 立命館大学, 2017/9/1, ポスター.
- [12] 長門 澄香, 清野 淳司, 中井 浩巳, 「人工蜂コロニーアルゴリズムを用いたアミン - CO₂ 吸収反応に関する化学種濃度の予測」, 第 13 回進化計算学会研究会, 立命館大学, 2017/9/2, ポスター.
- [13] 大山 拓郎, 速水 雅生, 五十幡 康弘, 清野 淳司, 中井 浩巳, 「局所ユニタリー変換を用いた効率的な 2 成分相対論的密度汎関数理論の開発」, 第 11 回分子科学討論会, 東北大学, 2017/9/15, 口頭.
- [14] 長門 澄香, 清野 淳司, 佐藤 裕, 中井 浩巳, 「群知能を用いたアミン-CO₂ 系吸収反応に対する反応シミュレータの開発」, 第 11 回分子科学討論会, 東北大学, 2017/9/15, ポスター.
- [15] 影山 椋, 藤波 美起登, 清野 淳司, 五十幡 康弘, 中井 浩巳, 「Orbital-free 密度汎関数理論のための機械学習を用いた運動エネルギー汎関数の開発」, 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017, タワーホール船堀, 2017/10/17, ポスター.
- [16] 棚嶋 拓朗, 五十幡 康弘, 清野 淳司, 中井 浩巳, 「インフォマティクスによる交換相関

- 汎関数の開発」, 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017, タワーホール船堀, 2017/10/17, ポスター.
- [17] 長門 澄香, 清野 淳司, 佐藤 裕, 中井 浩巳, 「群知能によるアミン - CO₂ 吸収反応シミュレータの開発と熱力学量の算出」, 第 7 回 CSJ 化学フェスタ 2017, タワーホール船堀, 2017/10/19, ポスター.
- [18] M. Fujinami, J. Seino, H. Nakai, “Chemical Reaction Prediction and Analysis Based on Informatics with Quantum Chemical Descriptors”, International Symposium “Theoretical Design of Materials with Innovative Functions Based on Element Strategy and Relativistic Electronic Theory”, Tokyo Metropolitan University, 2017/12/9, Poster.
- [19] R. Kageyama, M. Fujinami, Y. Iwabata, J. Seino, H. Nakai, “Semi-local machine learned kinetic energy functional for orbital-free DFT”, International Symposium “Theoretical Design of Materials with Innovative Functions Based on Element Strategy and Relativistic Electronic Theory”, Tokyo Metropolitan University, 2017/12/9, Poster.
- [20] T. Oyama, M. Hayami, Y. Iwabata, J. Seino, H. Nakai, “Two-Component Relativistic Density Functional Theory with Picture-Change Corrected Electron Density”, International Symposium “Theoretical Design of Materials with Innovative Functions Based on Element Strategy and Relativistic Electronic Theory”, Tokyo Metropolitan University, 2017/12/9, Poster.
- [21] M. Fujinami, J. Seino, H. Nakai, “Machine Learned Reaction-Prediction System Based on Quantum Chemical Descriptors”, The Eighth Asia Pacific Conference in Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC8), India, 2017/12/15, Poster.
- [22] T. Oyama, M. Hayami, Y. Iwabata, J. Seino, H. Nakai, “Picture Change Correction for Two-component Relativistic Density Functional Theory”, The Eighth Asia Pacific Conference in Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC8), India, 2017/12/16, Poster.

4.6 学会および社会的活動

- [1] 日本コンピュータ化学会 2017 春季年会, 座長.

4.7 外部資金

- [1] 科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (さきがけ) 『理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築』 “量子化学と情報学との融合による次世代密度汎関数理論と均一系触媒における反応予測システムの開発”, (研究代表, 平成 29-32 年度).

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、相対論的量子化学における最新の理論・手法が実装された RAQET プログラムを用いて、大学/企業問わず様々な研究者が研究を進めることができるように、今後も引き続きプログラムの機能拡充を行う。また機械学習を用いた運動エネルギー汎関数において、化学結合や分子物性を記述できる手法とするためには、記述子のさらなる拡張などが不可欠である。次年度では実用的な量子化学計算を実現できる精度 (1 kcal/mol 程度の誤差) の手法とすることを目標として、研究を進める。

次期月着陸探査搭載能動型蛍光X線分光計の研究開発

研究代表者 長岡 央
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

本研究課題は、将来の惑星探査機への搭載に向け、元素分析装置の開発を行うことである。探査機には厳しいリソース制限と観測時間のなかで、より多くの元素情報を取得可能である高性能元素分析装置の開発・搭載が必須である。本報告書では、着陸探査車に搭載可能な小型X線発生装置を備えた能動型X線分光計の開発に焦点を当てている。

惑星探査における蛍光X線分析を用いたその場観測では、能動型のX線発生装置の搭載が必須である。特にリソースの限られた探査車への搭載には、発生装置の小型軽量化と低消費電力化を達成する必要がある。そこで焦電結晶 (LiTaO_3) を惑星探査用のX線発生装置に応用することで、小型・軽量・低消費電力化を達成する。焦電結晶型の発生装置は高压電源や放射性物質が不要な点も宇宙機の搭載には有利である。

焦電結晶型のX線発生装置は、“焦電結晶”、“結晶に温度変化を与えるためのペルチェ素子”、“金属ターゲット”から構成され(図1)、焦電結晶に温度変化を与えることで自発分極が引き起こされ、結晶表面に高い電場を形成する。装置内の電子がその電場で加速され、金属ターゲットもしくは結晶に衝突することで、X線が発生する。この発生X線を励起源として、試料に対し蛍光X線分析を行う。しかし、現状市販品の焦電結晶X線発生装置(COOL-X, Amptek 社)は、得られるX線の強度が弱く、元素の定量分析を行うことになると、十分な統計を得るのに非常に時間がかかってしまう。これはリソースや観測時間が厳しく制限される惑星探査において、解決すべき大きな問題点である。そこで、本研究ではいまだに十分とはいえない焦電結晶のX線発生機構の物理的理解を含めて、焦電結晶型X線発生装置のX線強度の“安定化”と“高輝度化”の実現を目指した。

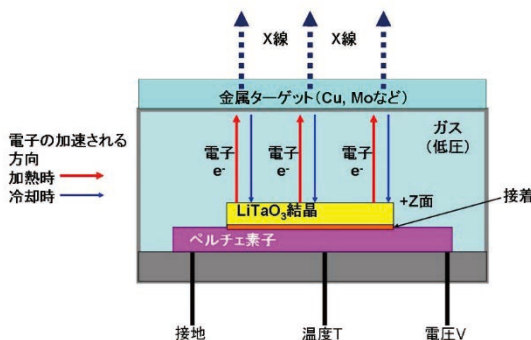


図1. 焦電結晶型X線発生装置の模式図（図は長岡他, 2015 より引用）

2. 主な研究成果

1) 焦電結晶型 X 線発生装置の高輝度化に関わる研究成果 (2016 年度～)

2016 年度の研究成果を以下に簡単にまとめる。金属ターゲット周辺の電場を強くし、電子の収集効率を上昇させる目的で円筒型の金属ターゲットを作成し、従来の平板型と円筒型の金属ターゲット（ターゲット部は銅薄膜）それぞれを用いて、発生する X 線量を計測した。この実験ではすべて封入気体（N₂）の圧力は 1Pa のもと実験を行った。それぞれの実験結果を比較すると、検出された X 線量は円筒型ターゲットを用いたほうが、平板型のものより増加した。最も高い強度が得られた条件は、CLT 型焦電結晶 LiTaO₃（結晶直径 7.1 mm、厚さ 4mm）と円筒型ターゲット（銅薄膜直径 10 mm、厚さ 10 μm）を用いて、ターゲットー結晶間距離を 9mm とした場合である。以上の条件下、結晶を 50 秒間加熱し、100 秒間自然冷却させる温度サイクルを 1 サイクルとして、計 10 サイクルで得た X 線の計数率（ 3.0×10^4 cps）は、過去長谷部研にある市販品 COOL-X を用いて計測した計数率（ 4.5×10^2 cps）と比較して、60 倍以上高い結果が得られた。2017 年度は、2016 年度の実験結果を取りまとめ必要な追加実験を執り行い、得られた研究成果を査読付学術誌（Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan）に投稿し、論文として掲載された。

2) カーボンナノチューブを用いた X 線発生装置の開発 (2017 年度～)

焦電結晶型 X 線発生装置のバックアップとして、カーボンナノチューブ（CNT）を用いた X 線発生装置を検討した。CNT 型 X 線発生装置を惑星探査に応用するため、その基礎研究を行った。特に焦電結晶型 X 線発生装置では、低濃度元素を測定するには十分な強度の励起 X 線が得られない、低エネルギー側の特性 X 線を励起するために、CNT を電子エミッターとして用いた。CNT から放出された電子を高圧電源で加速し、金属ターゲットに衝突させ、金属ターゲットから放出される特性 X 線を励起源とする（図 2）。集束電極は効率よく金属ターゲットに電子を収集する役割である。

実験では CNT、ゲート、金属ターゲットを真空チャンバー内に配置した。高圧電源で加速した電子（Max 3 keV 程度）が衝突する金属ターゲットには、薄い Mo 箔を使用し、Mo の L 線（2.29 keV）を X 線検出器 SDD で計測した。この X 線により、Si（ケイ素）以下の軽元素の測定を効率的に行うことが狙いである。CNT 型発生装置から得られた X 線量は、同条件で検出した焦電結晶型 X 線発生装置のものよりも強い強度を示した。今後は発生装置の設計にかかわるパラメータについて系統的な実験を行い、CNT 型発生装置の最適条件を導くことで、より高強度の X 線が得られると期待される。

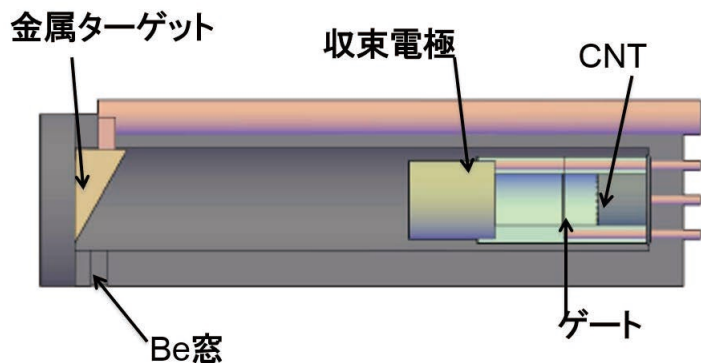


図 2. CNT 型 X 線発生装置の模式図（図は長谷部他, 2016 より引用）

引用文献

長岡央, 長谷部信行, 草野広樹, 大山裕輝, 内藤雅之, 柴村英道, 久野治義 “惑星探査期搭載に向けた蛍光 X 線分光計の焦電結晶 X 線発生装置の基礎開発” *X 線分析の進歩*, **46**, 347-354, 2015
 長谷部信行, 草野広樹, 長岡央 “惑星探査における蛍光 X 線分光” *X 線分析の進歩*, **47**, 59-77, 2016 (総説)

3. 共同研究者

長谷部 信行 (先進理工学部・物理学科・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文 (査読有)

- H. Nagaoka**, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K.J. Kim “Development of X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science” *Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan*, vol. 16, No. 2, 137-142, 2018.
- M. Naito, N. Hasebe, **H. Nagaoka**, E. Shibamura, M. Ohtake, K.J. Kim, C. Wöhler, A.A. Berezhnoy “Iron distribution of the Moon observed by the Kaguya gamma-ray spectrometer: Geological implications for the South Pole-Aitken basin, the Orientale basin, and the Tycho crater” *Icarus* 310, 21-31, 2018.
- M. Kayama, N. Tomioka, E. Ohtani, Y. Seto, **H. Nagaoka**, J. Götze, A. Miyake, S. Ozawa, T. Sekine, M. Miyahara, K. Tomeoka, M. Matsumoto, N. Shoda, N. Hirao, T. Kobayashi “Discovery of moganite in a lunar meteorite as a trace of H₂O ice in the Moon’s regolith” *Science Advances* 4, eaar4378, 2018.
- M. Naito, N. Hasebe, **H. Nagaoka**, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A.M. Lopes, J. Martínez-Frías “Improved pyroelectric x-ray generator for planetary active x-ray spectroscopy” *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering* 10392, 1039215-8, 2017.
- M. Naito, N. Hasebe, **H. Nagaoka**, J. Ishii, D. Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A.M. Lopes, J. Martínez-Frías “A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement” *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering* 10392, 103920C, 2017.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

代表コンビーナ, 「月の科学と探査」セッション, “日本地球惑星科学連合 連合大会”, 2017 年 5 月, 幕張大会

5. 研究活動の課題と展望

CNT は焦電結晶と比較して、高強度の X 線が得られるという点で惑星探査に非常に有利である。一方で、CNT 型は電子を加速する高圧電源の搭載が必要となり、リソースの観点から増大する重量と消費電力が惑星探査機搭載には不利な点である。今後はこれらの課題を解決しつつ、より小型軽量を目指した X 線発生装置の開発を進めていく。今回の研究活動で高輝度化に成功した Cu 泊を金属ターゲットに使用した比較的重い元素 (Si から Fe までの元素) の分析に特化した焦電結晶型 X 線発生装置と、Mo の金属箔を用い軽元素 (Al 以下の元素) の分析に特化した CNT 型を併用することで、リソースの削減を目指す。

微生物由来アミノ酸修飾酵素の探索と物質生産への応用

研究代表者 原 良太郎
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

現代社会における環境、食糧、エネルギーなどの問題解決に向け、バイオテクノロジーへ寄せられる期待は大きい。化学工業においても、従来型の化石資源に依存したプロセスからの脱却の必要性が求められる中、生物が有する高度な機能を産業に利用する動きが活発化してきている。本研究では、触媒機能を有するタンパク質（酵素）に着目し、医薬品やその合成原料、化成品として求められているアミノ酸誘導体、特にヒドロキシアミノ酸の生産に有用な酵素の探索と解析を行うとともに、ヒドロキシアミノ酸の効率的合成プロセスへの応用を検討した。

2. 主な研究成果

2. 1. *trans*-3-ヒドロキシプロリン生産プロセスの検討

これまでに、エクトイン水酸化酵素がプロリン水酸化活性を有していることを報告している(2015年度年次報告書)。本年度は、当該酵素発現大腸菌を菌体触媒として利用した *trans*-3-ヒドロキシプロリン (*trans*-3-Hyp) の生産プロセス開発を実施した。いくつかの反応系を検討した結果、ジャーファーメンターを利用したプロセスにおいて最も効率が良い *trans*-3-Hyp の生産が可能であった。酵素特性の解析結果を踏まえ、pH、温度、攪拌条件、基質濃度、菌体量などの条件を最適化し、*trans*-3-Hyp の生産を実施したところ、30 mM の L-プロリンから 27 mM の *trans*-3-Hyp を合成した (Fig.1)。

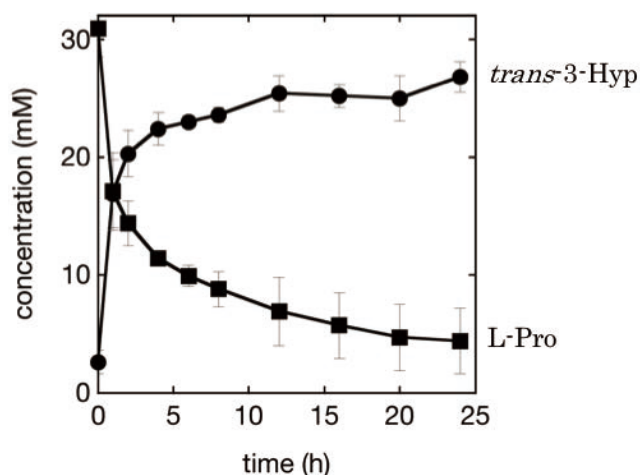


Fig. 1. 菌体反応系によるL-プロリンからの *trans*-3-Hyp 生産.

2. 2. 新規アミノ酸水酸化酵素の開発

前年度、ゲノム情報を利用して構築した 37 種類のタンパク質から成るクラバミニン酸合成酵素ライブラリーにおいて、6 種類のリジン水酸化酵素を見出した (2016 年度年次報告書)。しかし、残りのタンパク質の機能は未解明なままであった。本年度は、リジン以外のアミノ酸を水酸化する酵素を探索すべく、機能未知タンパク質を用いて多様なアミノ酸水酸化能を

評価した。その結果、ヒスチジンを水酸化する酵素を取得した。当該酵素の反応特性を解析したところ、ヒスチジンのみならず、グルタミンも水酸化する活性も有していた (Fig. 2)。一般的に、酵素は構造が類似する化合物を認識することは知られているが、本酵素のようにヒスチジンとグルタミンのような明らかに構造が異なる化合物を基質とし、しかも同程度の親和性と活性を示すことは稀であり、生化学的にはきわめて興味深い。さらに、異なるタンパク質においてアルギニン水酸化活性を見出した。アルギニン水酸化酵素は既知であるが、取得した酵素により合成されたヒドロキシアルギニンは、既知化合物である(2*S*,3*S*)-3-ヒドロキシアルギニンとは明らかに異なる性質を示した。構造解析の結果、(2*S*,4*S*)-4-ヒドロキシアルギニンが生成していることが判明した。

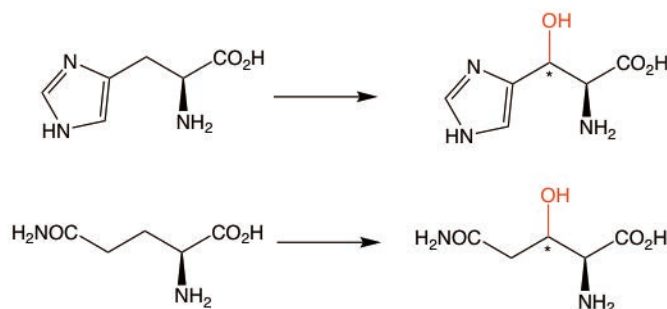


Fig. 2. 酵素によるヒスチジンとグルタミンの位置・立体的水酸化反応.

3. 共同研究者

木野 邦器 (先進理工学部・応用化学科・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

Ryotaro Hara, Kai Yamagata, Ryoma Miyake, Hiroshi Kawabata and Kuniki Kino, “Discovery of lysine hydroxylases in the clavaminic acid synthase-like superfamily for efficient hydroxylysine bioproduction”, *Appl. Environ. Microbiol.*, **83**(17), e00693-17, (2017).
Ryotaro Hara, Kengo Hirai, Shin Suzuki, and Kuniki Kino, “A chemoenzymatic process for amide bond formation by an adenylating enzyme-mediated mechanism”, *Sci. Rep.*, **8**(1), 2950 (2018).

Shin Suzuki, Ryotaro Hara, and Kuniki Kino, “Production of aminoacyl prolines using the adenylation domain of nonribosomal peptide synthetase with class III polyphosphate kinase 2-mediated ATP regeneration”, *J. Biosci. Bioeng.*, in press.

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

Ryotaro Hara, Kai Yamagata, Ryoma Miyake, Hiroshi Kawabata, and Kuniki Kino, “Discovery of Lysine Hydroxylases in the Clavaminate Synthase-like Superfamily for Efficient Hydroxylysine Bioproduction”, BioTrans2017 (13th International Symposium in Biocatalysis and Biotransformations), 9-13 July 2017, Budapest, Hungary.

Shin Suzuki, Ryotaro Hara, and Kuniki Kino, “Aminoacyl Proline Production Coupled with ATP Regeneration System from AMP”, BioTrans2017 (13th International Symposium in Biocatalysis and Biotransformations), 9-13 July 2017, Budapest, Hungary.

村瀬諒大, 原良太郎, 梶沢 遼, 広川安孝, 木野邦器, “*Arthrobacter* sp. K8 由来オルセリン酸脱炭酸酵素の特性解析と当該酵素を利用した有用芳香族ヒドロキシカルボン酸合成”, 日本農芸化学会 2018 年度大会, 2A10p19, 名城大学(名古屋)

原良太郎, 梶沢遼, 広川安孝, 木野邦器, “芳香族ヒドロキシカルボン酸生産に有用な脱炭酸酵素の探索”, 日本生物工学会 2017 年度大会, 2P-G052, 要旨集 p.127, 早稲田大学(東京)

5. 研究活動の課題と展望

本年度は *trans*-3-Hyp の効率的生産プロセスの検討と, 新規アミノ酸水酸化酵素の開発を実施した。*trans*-3-Hyp の生産において, 90%以上のモル収率で *trans*-3-Hyp が合成可能となったが, 実用化のためには基質濃度を高める必要がある。しかし, 基質 L-プロリン濃度を高めると生産性が低下することが判明している。今後, 人工的に酵素を改変し, 活性を高めるなどの改良をすることで実用生産につなげていけると考えている。また, 新たに見出したヒスチジン/グルタミン酸水酸化酵素は既知酵素とは基質特異性が明らかに異なるため, 新規化合物の生産への応用展開が期待できるのみならず, 基質認識メカニズムの解明に向けた X 線結晶構造解析などをおこない, 生物におけるアミノ酸水酸化酵素の意義を分子レベルで解き明かしていきたい。

スペイン、カタルーニャにおける建築の 近代化過程に関する理論的研究と実践的展開

研究代表者 人見 将敏
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

本研究は、今日の建築デザインを考えるにあたり、その背景となる過去の事象、特に地域固有の建築・都市の近代化過程を再検証しデザインの本質的・理念的様態を捉えることで、現代の多様な要求へと実践的に応えることを目的とする。

まず理論的研究としては、スペイン・カタルーニャ地方の建築・都市の近代化過程を対象に建築論・存在論的研究を行う。本研究では建築家集団 G.A.T.C.P.A.C. (現代建築の発展を目指すカタルーニャの建築家技術者集団 Grup d'Arquitectes i Tècnics Catalans per al Progrés de l'Arquitectura Contemporània、1930-39) の活動を中心に扱うことで、地理的・文化的背景の影響を受けヨーロッパの中でも独自の発展を遂げた当該地域の建築思潮の一端を明らかにする。当該集団は、工業化に起因する地域固有の都市問題に対し、人々の生活環境改善を目指し建築設計や都市計画提案からの解決を試みた。その際、産業発展に伴う建築生産体系の技術的展開だけでなく当該地域の伝統的民家・集落の特質へと遡及することで物質と精神の両面から人々の住まいの在り様を問い、より人間的で豊かな建築・都市の近代化を志向したという点がこれまでの研究により明らかにされている。当時のヨーロッパに流布していた新しい建築概念の受容に留まらず自国の文化的背景との調和を模索した様子がその活動から窺える。研究課題としては、当該集団の言説や計画提案から、都市と自然が近接する当該地域の環境における住まうことの在り方を包括的に捉える。また上述の理念的研究と併行して実践的研究を行い、今日的な様々な問題や高度化する技術発展を建築デザインとしてどのようにまとめ活用するのかを課題として取り組む。

2. 主な研究成果

2.1 ハーバード大学ロエブ建築デザイン図書館における調査



当該集団に関する一次資料は主にスペインとアメリカに存在する。筆者はこれまでに前者、特にバルセロナ市にあるカタルーニャ建築家協会 Col·legi d'Arquitectes de Catalunya の資料室において継続的に調査を行いその成果を随時まとめてきた。今年度は新たに後者において調査を行い、具体的にはアメリカ・ハーバード大学ロエブ建築デザイン図書館 Loeb Design Library (左写真) 内の資料を対象とした。同館の特別資料室にはジュゼプ・リュイス・セ

ルト Josep Lluís Sert (1901-83、以下セルト) に関する資料が所蔵されている。セルトは当該集団のリーダー的存在であり、またスペイン内戦 (1936-39) の影響によるアメリカ亡命後に同大学デザイン学部の学部長に就任した人物である。今回の調査ではその保管資料から当該集団の活動に関わる資料を対象として選出・複写を行いデジタル・アーカイブ化した。同資料には未発表のものも含まれており、その整理・分析により、主にスペイン内で行われている当該集団の既往研究に新たな知見をもたらすことが期待される。

2.2 公募型プロポーザルへの提案を通じたケーススタディ

プロジェクト研究「建築デザインを介した生活空間支援の実践的研究」(研究代表者: 小林恵吾) の協力者として、年間を通じ四点の公募型プロポーザルへの作品提案を行った。二点は保育、もう二点は観光という今日的な課題をテーマとしており、対象敷地である地方都市の現状をふまえ、生活者への支援と場所の活性化の観点から計画を進めた。また木材利用の促進についても建築環境デザイン的視点からの提案を行い、同材利用技術の新たなモデルとなることを目指した。

2.2.1 八幡浜市保内総合児童センター (仮称) デザイン設計競技



愛媛県八幡浜市における、子ども・子育て支援の核となる保育所・児童センターの計画提案。地域内には豊かな自然環境と明治からの産業遺構や街並みが残り、また敷地周辺は市街地として文化・行政・福祉施設が広がる。自然・歴史・文化に根ざしながら新しい時代への知のインフラとして保育の場が創出されることを目指した。「日土小学校」など日本近代を代表する木造学校建築を地域に残した建築家松村正恒の思想も継承しながら、保育の家並み・街並みが作り出す多色彩による賑わいと交わりの場を提案した。

2.2.2 (仮称) 坂本こども園建築設計委託業務に係る公募型プロポーザル



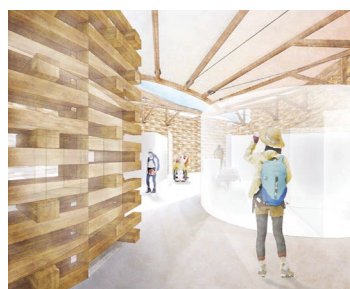
岐阜県中津川市坂本地域における公設認定こども園の計画提案。将来リニア中央新幹線が開通予定である同地域では、今後の発展と子育てニーズの高まりが見込まれる。今後地域の様相が変化する中での幼・保育の骨格を問う際に、周囲を360° 囲む山々や自然の風景が子供たちの変わらぬ原風景となり得ることを主題として捉えた。周辺環境と呼応するように円環状に保育室や子育て支援室等を配し、地域の核となるよう場を目指した。

2.2.3 刃物ミュージアム回廊基本設計・実施設計等業務委託に係る公募型プロポーザル



岐阜県関市における「刃物ミュージアム回廊」と称された整備事業を展開する中での、刃物会館の建替えと地域交流施設、広場等の計画からなる複合拠点の提案。地場産業の中心である刃物産業の歴史文化・技術・情報等の受発信と、産業・観光振興への連携が継続的に行われるよう、周辺の関連施設や自然環境へと広がる回遊性を主題として、起・終点となる場を提案した。

2.2.4 六甲最高峰トイレ新築工事設計業務公募型簡易プロポーザル



兵庫県神戸市の六甲山最高峰における登山者のための休憩所兼トイレの提案。高地という条件化での施工性・耐久性・維持管理だけでなく、木材利用や、瀬戸内海国立公園区域の指定に応える建築デザインが問われた。最新のバイオマス浄化システムの利用やビオトープの設置、間伐材の組み合わせによる構造壁の提案等により、生態系の循環を主題とし可視化する装置としての場の創出を目指した。

3. 共同研究者

小林 恵吾 （創造理工学部 建築学科・准教授）
入江 正之 （創造理工学部 建築学科・名誉教授）

4. 研究業績

4.1 学術講演

人見将敏、「近代建築運動体 GATCPAC による機関誌『A.C.』について（4） -1930 年代カタルーニャ近代建築運動研究」、日本建築学会大会（中国）学術講演梗概集 F-2、2017 年 8 月、pp.945-946

5. 研究活動の課題と展望

本年度では、研究課題の内、理念的研究については新たな入手資料により一定の成果を得、今後はその精査により、既往研究に対し統合的・建築論観点から新たな指針を提示したい。また実践的展開としては、現代社会の喫緊の問題に対する建築デザインの提案を行い、今後同様のスタディを継続していく。建築とは関わる人々・地域・自然の運動の総体の表出であると捉えるならば、それは常に過程の中に存在する。故に、過去と現在とを連関させながら、今後も建築理念の構築に向けて研究を進めていきたい。

異なる密度をもつ材料からなる模擬河床上で生じる土砂移動現象

研究代表者 平松 裕基
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

研究代表者らは、これまで川底（河床）を構成する材料の粒径の幅が極端に広い場で生じる土砂移動現象に着目した実験的検討を行ってきた。このような現象は、例えばダムの下流の河川区間などで確認されている。ダムが建設されると下流側への土砂の供給量が極端に減少してしまう結果、河床材料に含まれていた大きな礫が河床表面に露出する状態になる。このような状況が長期間にわたって維持されると、河床の高さの低下や材料の粗粒化といった問題が生じてくる。これらを改善するために排砂や置き砂といった対策がなされているが、それらの効果を定量的に評価することはできていないのが現状である。このような河川管理や防災に対する情報を提供することを目指して研究を進めてきた。

河床材料は一般に、洪水時でも移動することのない大粒子、掃流砂として移動する中粒子、浮遊砂として移動する小粒子の三つの粒径集団に分けることができる。ここで、掃流砂とは河床近傍を、浮遊砂とは河床から水面にまで幅広く輸送される土砂の輸送形態のことを指す。これまで、これらの粒径集団をそれぞれ一つの粒径で代表させるとした基礎的な水理実験を行ってきた。その結果、図-1 (a)に示すように大粒子群の間隙内で顕著な鉛直分級が生じ、河床表面下に中粒子のみからなる層が形成されることがわかった。しかし、この層の厚さや層内の粒子の構造がどのように決まっているのかについては未だ検討の余地が残されている。なお、図中のグレーの円が大粒子、黒の円が中粒子、黄色の部分が珪砂と空隙を表している。

この現象をさらに深く理解する突破口として、これまでとは異なる観点からも検討することが必要である。そこで、河床の構成材料の密度の違いによって生じる分級現象に着目した。例えば、静岡県鮎沢川流域に位置する小山町では密度が小さな火山砕屑物の一種であるスコリアを含む山腹斜面が台風によって崩壊した。このような土砂が河道に供給されると、土砂の密度の大小によって移動のしやすさが異なるため、土砂移動は複雑になる。このような現象に着目することによって分級のメカニズムを明らかにし、河川管理や防災に役立つ情報を発信することが本研究の目的である。

2. 主な研究成果

2.1 実験の概要

実験では、球状の材料である比重 2.5 のガラスビーズと比重 1.04 のポリスチレン粒子を用いることにした。スコリアの比重に比べるとポリスチレン粒子のものが小さいが、土砂移動によって生じる分級のメカニズムの本質を捉えるため比

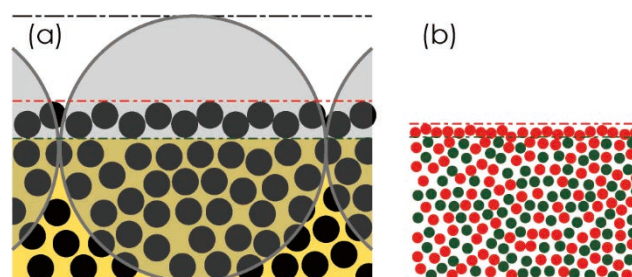


図-1 平衡状態における河床の模式図

重差を大きくした．この異なる密度をもつ二つの材料はいずれも粒径を $D = 2 \text{ mm}$ ，その混合比率を 1:1 とした初期河床を作成した．ここに通水することにより到達する静的平衡状態における河床の鉛直構造に着目した．ここで，静的平衡状態とは，上流側から土砂が供給されてくることのない条件下で到達する平衡状態（河床が時空間的に変化しなくなる状態）のことを指す．この実験を **Case A** と呼ぶことにする．実験条件としては，水路の単位幅当たりの流量が $q = 0.013, 0.025 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ となるよう設定した．河床に作用するせん断力を速度の次元をもつ量に換算した摩擦速度の平衡状態における値は $u^* = 0.031, 0.046 \text{ m/s}$ であった．

また，これ以外にも大粒子として粒径 50 mm のアルミナ製の球（比重 3.98），中粒子として 5 mm のガラスビーズ（比重 2.5），小粒子として 0.21 mm の珪砂（比重 2.65）を用いた静的平衡状態に関する実験も行っている．この実験を **Case B** と呼び，格子状に配置した大粒子群の間隙に充填する中粒子と小粒子の混合比率と流量を異なる値に設定した．中粒子と小粒子の総和に占める中粒子の体積比率を R_M と定義し，この値を $0.1 \sim 0.5$ の範囲内の値とした．また，摩擦速度は $u^* = 0.06 \sim 0.13 \text{ m/s}$ であった．

2.2 河床の鉛直構造

まず，**Case A** の結果について説明する．平衡状態に到達した後，水面と河床の高さを計測した．その結果に基づいて概ね等流状態にある区間を判断し，その河床に作用する摩擦速度が $u^* = 0.031, 0.046 \text{ m/s}$ であることがわかった．この状態の河床を水路側方から見た模式図が **図-1 (b)** である．図中の赤の円がガラスビーズ，緑のものがポリスチレン粒子を表している．この図を見ると，河床表面下にはガラスビーズのみからなる層が形成されることがわかる．これは，ガラスビーズとポリスチレン粒子が同一のせん断力を受けたとしても輸送される量が異なるために生じたものである．すなわち，ガラスビーズの移動が停止した後もポリスチレン粒子は移動し続けるため，両者の上面の位置が異なる．このようにして形成されたガラスビーズの層の厚さが大きくなるにつれて，ポリスチレン粒子に作用するせん断力が小さくなる．この現象を「遮蔽効果」と呼ぶ．ポリスチレン粒子上面に作用するせん断力が移動限界に等しくなると平衡状態に到達する．これが平衡状態に到るまでのメカニズムである．

また，平衡状態におけるガラスビーズの層の厚さ L_M を計測した．その結果，河床に作用するせん断力が大きくなると，ガラスビーズの層の厚さも大きくなることがわかった．これは，ガラスビーズ上面に作用する摩擦速度が大きくなると，ポリスチレン粒子上面に作用する値を低減させるために必要な層の厚さも大きくなるためである．

しかし，**Case B** では，河床に作用するせん断力の値に応じてガラスビーズの層の厚さ L_M はほとんど変わることはなかった．この結果を示したのが **図-2** である．これらの図の縦軸は L_M をガラスビーズの粒径 D_M で除した値と，(a) せん断力を無次元量に換算した掃流力の平均値 τ^* ，(b) ガラスビーズ上面に実際に作用する掃流力 τ_M^* の関係を表したものである．なお， τ_M^* は当研究室で提案されてきた関係を用いて算出された値である．(a)の図を見ると L_M/D_M は概ね $1 \sim 2$ の範囲内の値となり， τ^* にはよらないことがわかる．一方，(b)のように横軸に τ_M^* をとって結果を整理すると，混合比率 R_M に応じて τ_M^* ならびに L_M の値が概ね決まっていることが見て取れる．これは，大粒子が与える遮蔽効果によるものである．

このように，異なる密度をもつ材料が河床に含まれる場合の実験を通して，移動することのない大粒子が河床材料に含まれるか否かが河床の分級現象に与える影響についての理解につながる結果が得られた．

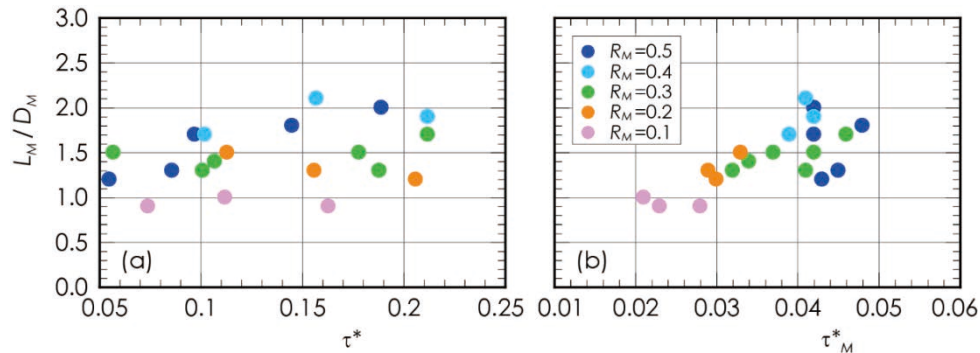


図-2 平衡状態における河床の鉛直構造

3. 共同研究者

関根 正人（創造理工学部・社会環境工学科・教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

関根正人・平松裕基・中川裕貴：骨格が大礫により構成される河床上で生じる鉛直分級のメカニズム，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.4 pp.I_1069-I_1074，2018.

4.2 総説・著書

特にありません

4.3 招待講演

特にありません

4.4 受賞・表彰

特にありません

4.5 学会および社会的活動

関根正人・中川裕貴・平松裕基・鎌田遼・興水康二：掃流砂礫の粒度分布の違いが粒径幅の大きな河床の鉛直構造に及ぼす影響，土木学会第 72 回年次学術講演会，pp.307-308，2017.

本合弘樹・関根正人・平松裕基・中川裕貴：骨格が大礫により構成された河床に生じる鉛直分級とその構造，砂防学会研究発表会，pp.313-314，2018.

5. 研究活動の課題と展望

本研究の第二段階として，材料が上流側から供給されてくる条件下で到達する動的平衡状態における河床の鉛直構造に着目した実験を行い，河床表面下の材料の粒度構成などを調べていく．その結果として得られたメカニズムを組み込んだ数値計算を行うことにより妥当性を確認した上で，河川管理や防災に貢献する情報の礎となるよう努めていく予定である．

非侵襲脳活動制御による認知機能向上

研究代表者 松吉 大輔
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

これまでの申請者の研究では、物体や顔の視覚認知・記憶において不全が生じる認知神経メカニズムを検討してきた。しかし、不全の研究は飽くまでそれを健全に戻すという目標の前段階に位置づけられるべきであり、完全ではないにせよある程度メカニズムの理解が得られた現段階において、不全を健全に戻すための応用的・臨床的な試みを積極的に行っていくべきである。そこで本研究では、物体や顔の認知・記憶を向上させることを目標に、経頭蓋脳刺激・制御を用いた認知神経科学研究を行う。

視覚認識における重要な単位である物体の認知・記憶の減退は、我々の日常生活の活動の質を有意に低下させるほか、他者の顔が分からない相貌失認をはじめ、顔認知の不全は社会生活に甚大な影響を及ぼす。本研究では、ヒトの頭皮に取り付けた電子回路（負性抵抗）から、神経細胞外のインピーダンスを制御し、神経突起電流を変化させることによって認知・行動に影響を与える経頭蓋細胞外インピーダンス制御（transcranial extracellular impedance control: tEIC）により、物体や顔の認知・記憶の向上の可能性を検討する。

tEIC はこれまで自発電位にはほとんど影響を与えないまま誘発電位のみを変化させることができる（≒何か認知・活動が生じたときにのみ、脳波・神経活動に影響を与えられる）ことが分かっている（Matani et al., 2014）。しかし、これまでより高次な認知過程に対してどのような影響を与えるかというは未だ分かっていない。そこで本研究では、これまでの申請者が蓄積してきた顔研究・記憶研究を基礎として、tEIC による 1) 記憶、2) 顔認知という 2 つの認知機能向上の可能性を探る。

これまでも、経頭蓋に脳の神経活動に影響を与える方法には、経頭蓋磁気刺激（transcranial magnetic stimulation: TMS）や経頭蓋直流刺激（transcranial direct current stimulation: tDCS）などがあるが、いずれも高価であったり、サイズが大きかったりといった実用上の問題のみならず、結局のところそれらは脳の活動を邪魔する「外乱」であるという原理的問題を抱えており、認知・行動を向上させるデバイスとなるには至っていない。しかし、tEIC は脳の自然な活動を邪魔する事なく「変調」させるものであり、なおかつ小型化や安価な生産も可能であることから、原理的にも実用的にも大きな可能性を秘めている。

2. 主な研究成果

2016 年度内に基礎的な実験環境・装置の整備と課題の選定が終了。2016 年度後半にはヒト被験者を対象として tEIC が視覚記憶に与える実験を開始し、2017 年度も引き続いて実験を行っ

た。

視覚記憶を定量的に測定するため、本研究では変化検出課題を用いた。この課題では、被験者は瞬間的に呈示されるサンプル刺激（色パッチや形など）を記憶し、一定の遅延期間の後に呈示されるテスト刺激が、先に呈示されたサンプル刺激と同一であるか否かを答えるというものである（図 1）。このような課題を行うと一般的に 4 個程度の物体しか記憶出来ず、ヒトの視覚記憶容量は極めて限られていることが示されてきた（Luck & Vogel, 1997; Cowan, 2001）。もちろん、この 4 個という数字はあくまで平均値であり、ヒトの記憶容量には大きな個人差が存在することが筆者の研究も含めて示されてきているが（Vogel et al., 2005; Matsuyoshi et al., 2014）、頭頂間溝（intraparietal sulcus）と呼ばれる頭頂葉の一領域の活動は人によって異なる視覚記憶容量をよく反映することが知られており（Todd & Marois, 2004; Matsuyoshi et al., 2010）、この変化検出課題によって測定される視覚記憶容量が神経生物学的にも妥当な実体を持つものであると推測される。

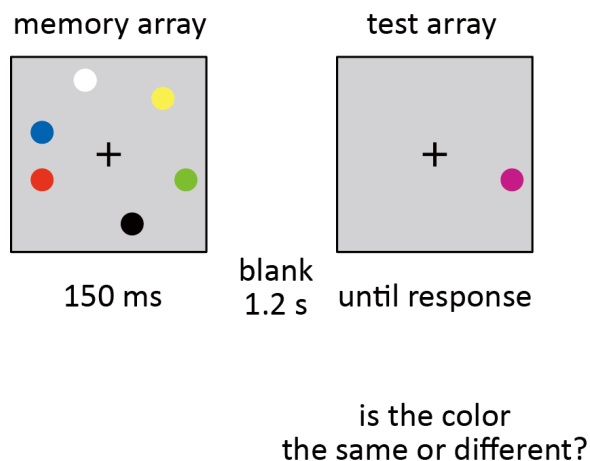


図 1 視覚記憶を測定する変化検出課題

本研究（特に 2017 年度）では、このような現状を踏まえ、視覚記憶を担うと考えられる頭頂葉を tEIC のターゲットとする研究を展開した。これまでに、1) サンプル刺激呈示中にタイムロックした tEIC 適用、2) 記憶刺激保持中（遅延期間中）にタイムロックした tEIC 適用、3) タイムロックなしで課題実行中（1 試行中）の tEIC 適用という 3 タイプの実験を行い、tEIC 適用による視覚記憶成績の変調が生じるか否かを検討した。その結果、条件 1・2 においては特段 tEIC 適用有無による記憶成績の変化は確認されなかったものの、条件 3 において tEIC 適用有無による記憶成績の変化が確認されたので、本稿ではその一部を報告する。

条件 3 において tEIC による記憶成績の変化の有無を検討するため、記憶領域からは離れているため tEIC による影響が観察されないであろう統制位置として Fz-A2、tEIC により記憶成績に（正の）影響を与えるであろう接続として頭頂間溝を含む Oz-A2、左右半球間干渉により記憶成績に（負の）影響を与えるであろう接続として C3-C4 の 3 位置を対象とした実験を行った。その結果、事前の予測通り Fz-A2 では tEIC 適用の有無による記憶成績の変化は観察されなかったものの、頭頂間溝を含む Oz-A2 では記憶成績の向上傾向、半球間を跨ぐ接続の C3-C4 では記憶成績の有意な低下が確認された（未発表のため図は省略）。現在実験を進行中であり、今後さらに被験者を追加する。

3. 共同研究者

渡邊克巳（基幹理工学部・表現工学科・教授）
眞溪歩（東京大学・情報理工学系研究科・准教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Matsuyoshi, D., & Watanabe, K. (2018). Huge intrinsic correlation between developmental prosopagnosia questionnaires: A comment on Shah et al. (2015). bioRxiv: 267351.

4.2 総説・著書

- 松吉大輔（印刷中） 「視覚的記憶」 日本視覚学会（編） 『図説視覚の事典』 朝倉書店

4.3 招待講演

- 松吉大輔（2018年3月23日） 「ヒト顔記憶のマジカルナンバー10」 2017年度京都大学文学部心理学教室読書会，京都大学文学部心理学教室（京都市左京区）
- Matsuyoshi, D. (Aug 21-25, 2017). The magical (universal) number 10 in human face recognition. The 17th Biennial Conference of the International Society for Theoretical Psychology, Tokyo, Japan.

4.4 学会発表

- 萩原彰文・堀正明・松吉大輔・入江隆介・神谷昂平・鎌形康司・前川朋子・クリスティナ＝アンディカ・越野沙織・中澤美咲・上田亮・堀田萌子・武中祐樹・阿部修・青木茂樹（2017年9月14日ー17日） 「MRIにて異なる撮像法で得られるミエリンマップの比較検討」 第45回日本磁気共鳴医学会大会，栃木県総合文化センター/宇都宮東武ホテルグランデ（栃木県宇都宮市） [ポスター発表]
- Matsuyoshi, D., & Watanabe, K. (July 13-17, 2017). The magical number 10 in face recognition. The 13th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV 2017), Tainan, Taiwan. [口頭発表]

4.5 学会および社会的活動

- 顔認知 N=855 の研究データならびに解析コードの公開
<https://github.com/dicemt/matsuyoshi2018dp>

5. 研究活動の課題と展望

新たな原理に基づいて装置を開発し、その効果を検討しようとする本研究は、既存のパラダイムやツールを用いる研究と比較して格段に挑戦的な内容となっている。現在認識している課題には tEIC を設置・適用する時空間的な組み合わせの爆発がある。これに対しては、設置の空間位置は既存の研究・モデルを元にしつつ、時間窓を操作により1つずつ（尤もらしいものか順に）効果の有無を探索する現行のアプローチを取る。今後視覚記憶課題について被験者を追加して効果の確かさを確認しつつ、さらに可能であれば、従来計画通り顔認知課題についても tEIC の効果を探りたい。

知覚支援装置－神経リハビリテーションの融合による機能回復戦略

研究代表者 安田 和弘
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

本邦において脳血管障害の罹患者は約 130 万人と多く、後遺症である運動、感覚麻痺や高次脳機能障害は日常生活への復帰を著しく阻害する。身体障害のなかでも、立位バランスおよび歩行障害は生活自立を制限する主たる要因のため、リハビリテーションを効率良く進めることが求められる。また、高次脳機能障害である半側空間無視 (USN) は、脳卒中の約 40% に観察される症状で、脳損傷の反対側の空間を無視することで移動中に障害物に衝突する等、生活自立の阻害原因となっている。これらの日常生活自立を妨げる障害に対して、本研究では、1) 脳卒中患者の立位バランス・歩行における足圧中心の時間的、空間的变化を有効に体性感覚フィードバックする装置の開発、2) USN に対する仮想空間 (VR) を用いたリハビリテーション支援システムの開発、およびリハビリテーションにおける効果検証を目的とする。

2. 主な研究成果 (1)

2.1 システムの開発

本研究で取り組むバランス支援 RT の構成図を図 1 に示した。バランス支援 RT は大きく足圧取得用 Wii ボードと骨盤ベルト、タブレット PC (ソフトウェア・通信) の 3 つから構成されている。本装置では、センサで取得した足圧位置情報を体幹に配置した振動子に伝達することで、異常な身体の偏りを感知させる。さらに本システムでは、体幹へのバイオフィードバック (BF) を療法士へも伝達することで教示や褒め等のフィードバックを効率化することができる (図 1-B)。

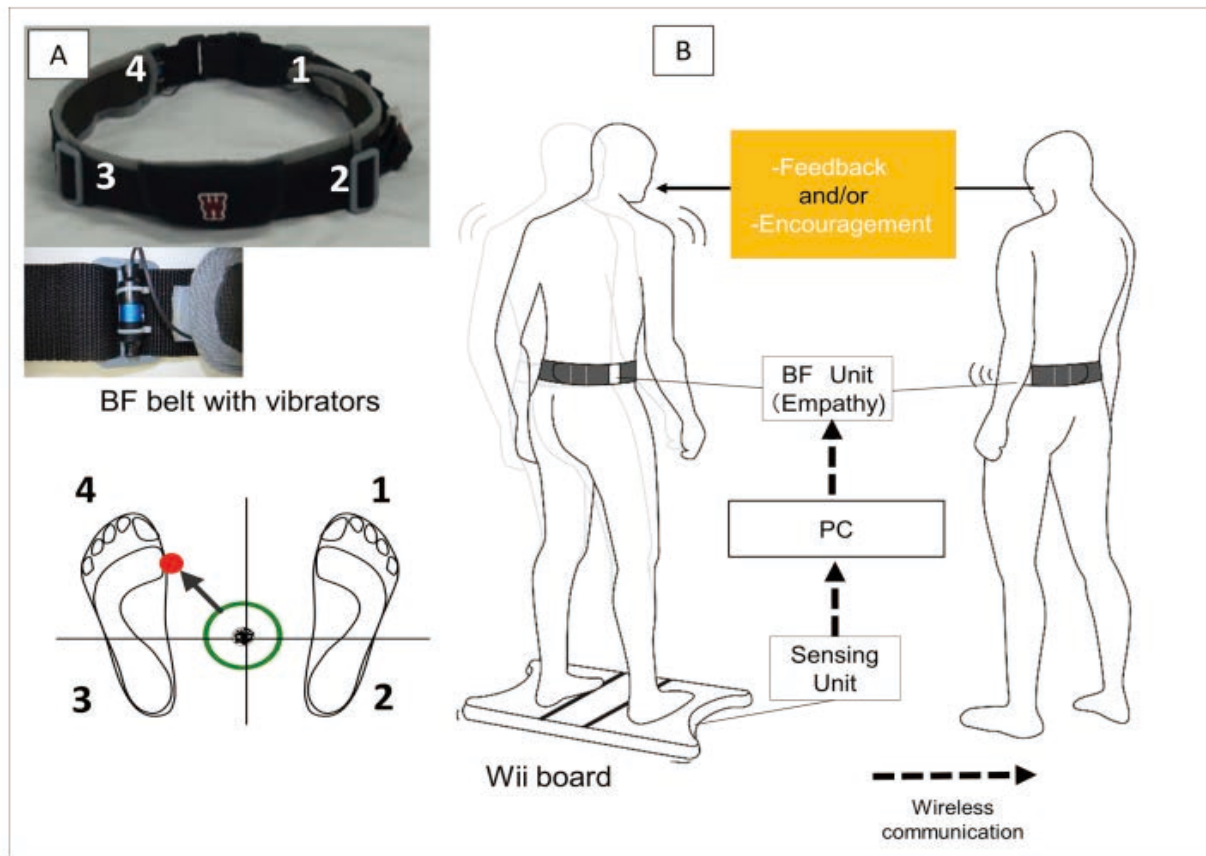


図 1 バランス支援 RT の構成図 (Yasuda,2018 より引用)

2.2 臨床試験

2.2.1 目的

本バランス支援 RT を用いた 1 か月間のバランストレーニングによる立位バランス改善効果を検証する。特に身体動揺量と前後左右移動量を評価するために、それぞれ足圧中心における 95%信頼楕円面積と前後左右平均移動距離に関してプレーポストテストで比較し、バランス改善効果を示す。

2.2.2 対象

発症より 6 か月以上経過した脳卒中片麻痺者 9 名。患者の選定基準は、a) 下肢ブルンストロームステージⅢ～Ⅴ、b) 高次脳機能障害なし、c) 試験を行う上で一定の理解力を有していること(認知症がない)、d) バランス能力に対して影響を及ぼす重大な疾患が脳卒中以外にないこと、であった。

2.2.3 方法

バランス支援 RT による立位バランス改善効果を検証するために、介入群 (9 名) において介入前後の立位姿勢制御能力を測定し、前後比較を行った。試験デザイン全体に関しては図 2 に示す。また介入に関しては 15 分間のトレーニングを週 2 回 1 か月間実施した。

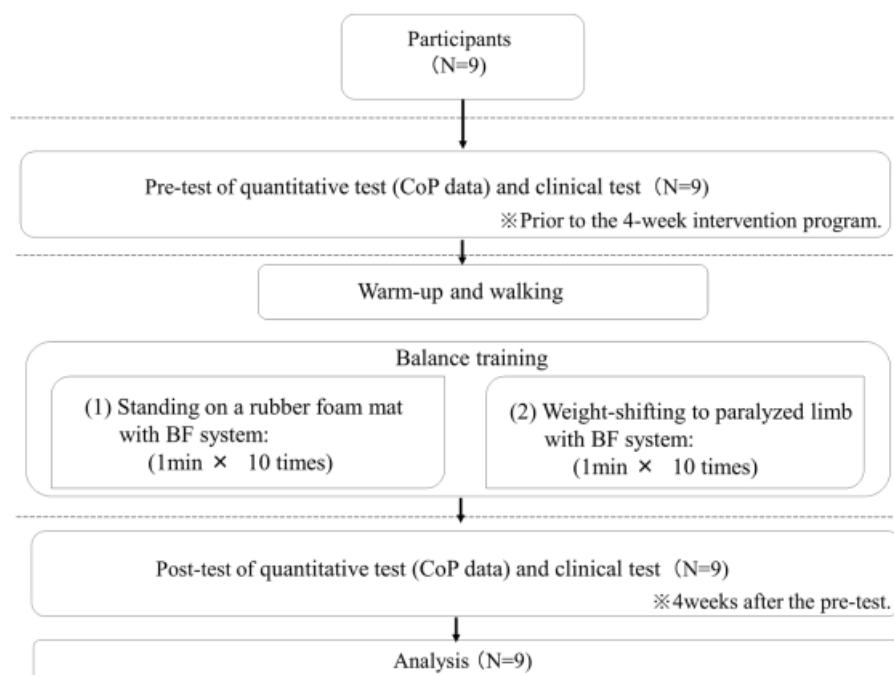


図2 試験デザイン (Yasuda,2018 より引用)

プレーポストテストでは床反力計で立位姿勢動揺測定を6回行う。介入群では片麻痺者がバランス支援 RT を装着して療法士からのフィードバックを受けながらトレーニングを実施する。バランス支援 RT を用いたトレーニングについてはトレーニングプロトコル (30 秒間×10 セッション) を15 分間行う。BF 情報の利用の仕方については担当療法士からベルトの振動子と身体動揺の関係を教示し、それに基づいて患者はトレーニングにフィードバックを利用する。

片麻痺者のバランスにおけるパフォーマンスの評価として足圧中心における 95%信頼楕円面積 (身体動揺面積)、前後左右の動揺評価として前後左右平均移動量、前後左右距離標準偏差を測定する。さらに臨床的バランス評価項目として、Berg Balance Scale (BBS)、Functional Reach Test (FRT)、Timed Get up and Go Test (TUG) を測定する。前後比較のために平均値を算出し、ウィルコクソン符号順位検定にて比較検証した。

2.2.4 結果

姿勢動揺量・臨床的バランス評価項目の前後比較結果を表1に示した。

(1) 姿勢動揺量の評価

95%信頼楕円面積で前後間に有意傾向があり、事後測定にて動揺量が減少した ($p<0.1$)。その他の変数では前後間に有意差は認めなかった。

(2) 臨床的バランス評価

BBS, FRT, TUG にて前後間で有意差を認めた ($p<0.01$)。一方で BBS のみ臨床的に意義のある差 (Minimal Detectable Change ;MDC) には至らなかった。

表 1 各変数のプレーポスト比較 (Yasuda,2018 より引用)

Comparison of specific tests at pre- and post-training intervention.

Variable	Pre (n = 9)	Post (n = 9)	^b p-value	^c Average score change during clinical testing
95% elliptical area (cm ²)	13 (10–18)	9 (7–15)	0.086 [†]	–
Total sway distance (cm)	182 (147–281)	178 (157–226)	0.59	–
X-axis of total sway distance (cm)	55 (45–91)	61 (47–76)	0.85	–
Y-axis of total sway distance (cm)	161 (130–249)	150 (149–198)	0.68	–
X-axis of standard deviation	0.04 (0.03–0.06)	0.04 (0.03–0.05)	0.77	–
Y-axis of standard deviation	0.12 (0.10–0.19)	0.12 (0.10–0.15)	0.52	–
BBS score	46 (44–49)	48 (46–52)	0.011 [*]	–2.0 ± 1.2
FRT score	21 (18–25)	28 (22–30)	0.012 [*]	–4.2 ± 2.8
TUG score	25.6 (10.0–30.0)	22.7 (9.3–27.1)	0.008 ^{**}	–3.6 ± 3.3

2.2.5 結論

- ・ バランス支援 RT を作成し、片麻痺者のリハビリテーションにおける効果を検証するために 1 か月間の介入試験を実施した。
- ・ バランス支援 RT を用いたトレーニングによる立位バランス能力の改善効果を明らかにするため、介入前後の比較を行った。その結果、身体動揺面積で有意傾向、臨床的バランス評価で有意にバランス能力が改善した。しかしながら、複合的バランス検査である BBS は臨床的に意義のある変化までは至らなかった。
- ・ 1 か月のバランス支援 RT による介入は、6 か月以上経過した慢性期脳卒中患者の立位姿勢制御の効率性を高める運動力学的変化を導きだした。臨床的バランス指標も改善したことから、脳卒中患者でのバランス障害に対して、本装置は運動（再）学習を促進することにおいて有利性が期待される。
- ・ 複合的なバランス能力のみに効果の制約が見られたために、BF 呈示あるいはトレーニング手法の再考を要する。

3. 主な研究成果（2）

3.1 システムの開発

これまで説明してきたバランス支援 RT では、姿勢安定性向上を目的としてきたが、脳卒中患者では歩行能力を向上させる必要性が高い。臨床では歩行トレーニングが頻繁に実施されているが、脳卒中患者は動作に努力を要する課題では、過剰な筋緊張からつま先接地を誘発することがある。しかしながら、麻痺患者は感覚麻痺を有することが多く、自己修正ができないケースが大半である。このような異常な筋緊張や感覚麻痺による修正不全を避けるために、本研究では、新たに開発した歩行用知覚支援 RT を用いて足底接地感覚を代行する機構を案出した。本装置では足底に圧力センサを挿入し、接地部位を背部に振動フィードバックする。さらに、療法士にも振動フィードバックする共感型システムを付与することで、適切な教示や褒めを患者に提示できる。

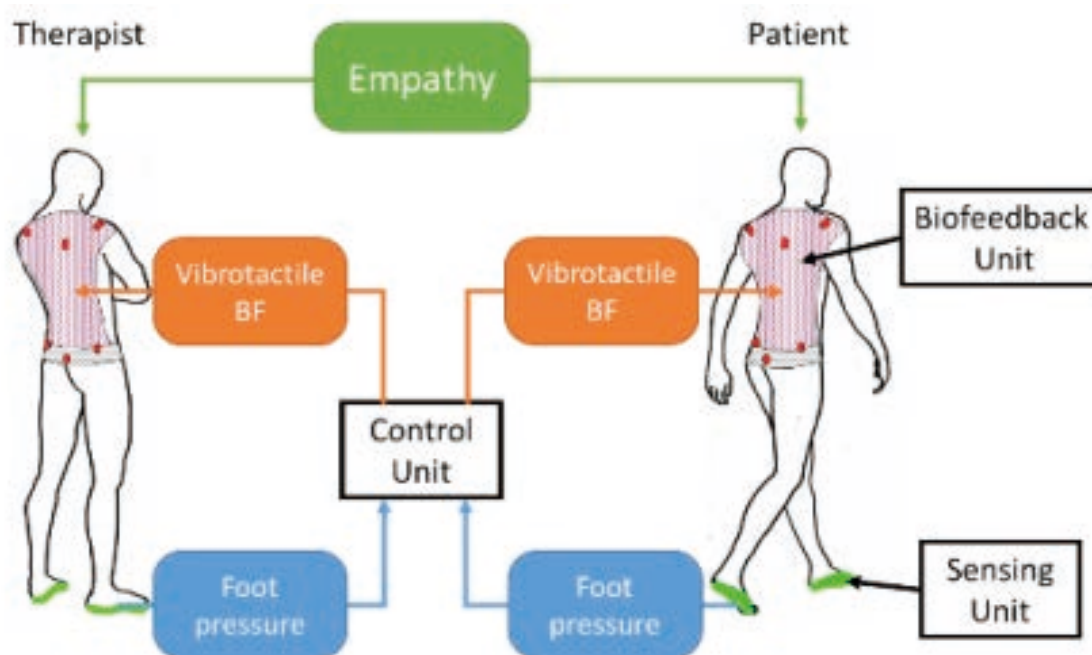


図3 歩行用知覚支援 RT の構成図 (Saichi, Yasuda and Iwata, 2016 より引用)

3.2 基礎試験

3.2.1 目的

歩行用知覚支援 RT の中期に及ぶ実行可能性検証として 1 名の片麻痺患者に対して 2 週間の介入を実施し影響を検証する。

3.2.2 対象

実験参加者は、本研究の趣旨を理解し、紙面上で同意の得られた回復期の脳卒中片麻痺患者 1 名であった（年齢 56 歳，ブルンストロームステージ V，重度の感覚麻痺患者）。

3.2.3 方法

回復期の片麻痺者 1 名を対象に、合計 2 週間の介入を行った。介入は知覚支援 RT を用いた 20 分間の歩行訓練を各週 3 回ずつ、合計 6 回実施した。歩行訓練では、患者及び療法士が知覚共感ウェアを着用し、歩行中の患者の麻痺側足底圧を背部へ振動バイオフィードバックした。これにより、患者は接地状態を知覚しながら歩行し、それに対して療法士はバイオフィードバックに基づいて動作指導を行った。測定は介入開始前、介入開始 1 週間後、介入開始 2 週間後の計 3 回行った。各測定日で歩行パフォーマンスの評価指標として 10m 歩行速度、麻痺側の蹴り出しの評価指標として床反力計 P-walk (BTS 社) を用いて健足重複歩距離を測定した。

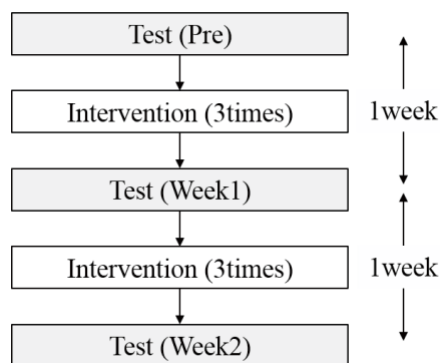


図4 中期介入試験の手順

3.2.4 結果

健足重複歩距離の結果を図5（左）に示す．各測定日の結果は Steel-Dwass 法を用いて多重比較を行った．介入前と比べて介入 1 週目，介入 2 週目ともに健側重複歩距離は有意に上昇した ($p=0.046$, $p=0.017$)．10m 歩行速度は週毎に低減する傾向が得られた．

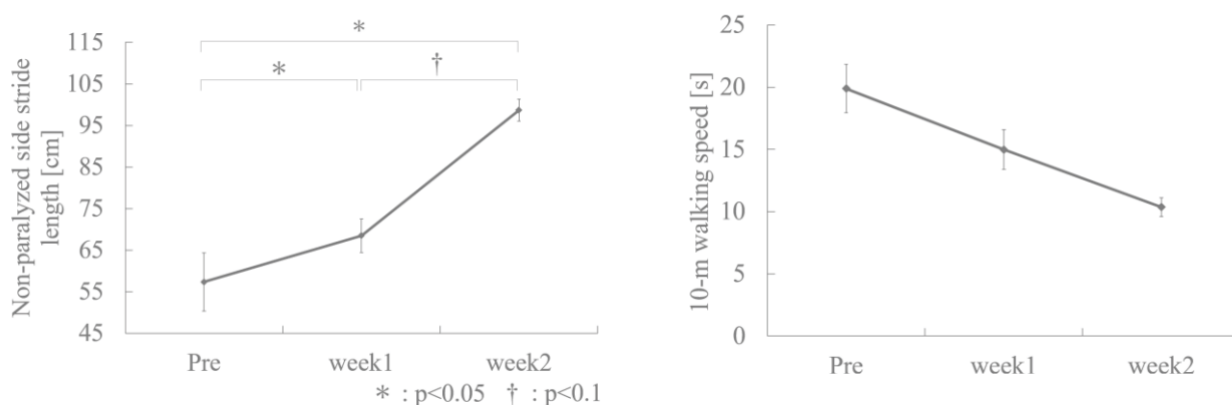


図5 重複歩距離・歩行速度の推移

3.2.5 結論

- ・歩行用知覚支援 RT を開発し，感覚障害によって運動修正が困難な症例を対象として 2 週間の介入を行い，歩行学習効果を検証した．
- ・健足重複歩距離が上昇した結果から，知覚支援 RT による歩行能力の改善を認めた．また，10m 歩行速度についても向上したことから，運動修正の結果を歩行パフォーマンスに反映することができた．
- ・試験結果より本装置により感覚麻痺が重度の患者に対して運動学習効果が見られ，歩行パフォーマンスの向上にも繋がることを示唆した．
- ・より多くの症例に対する知覚支援 RT の効果を明らかにするとともに，効果の持続性についても検証する必要がある．

4. 主な研究成果（3）

4.1 半側空間無視（USN）治療システムの開発

機器は、ヘッドマウントディスプレイ（Oculus Rift Development Kit 2, Oculus VR, Inc.）、および手指モーショントラッキング（Leap Motion, Leap Motion, Inc.）から構成される（図 6）。システムではセンサとモーショントラッキングによって頭部と手指の運動をトラッキングしているため、VR 空間内に患者の動きを反映できる。

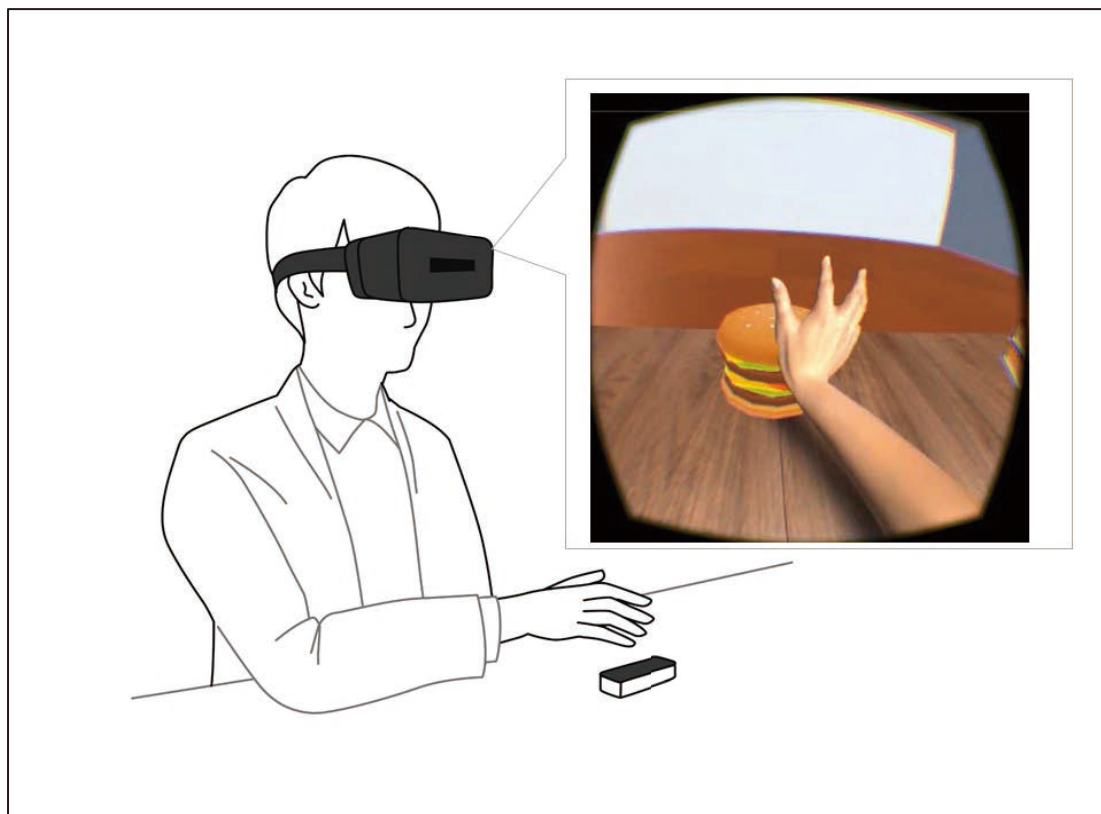


図 6 USN 治療システムの全体像（Yasuda,2017 から引用）

VR 環境はソフトウェア（Unity, Unity Technologies）を用いて開発された。近位・遠位空間の無視の治療を行うため、2 種類の環境を開発した。近位遠位治療に用いる共通した仮想空間の部屋（20 m×20 m×8 m）を用意し、その中に机を用意した（図 7）。

遠位無視治療環境では、部屋の奥の壁面に 7 つの視覚刺激を設置した（図 7）。視覚刺激は、時間経過とともに順に左方へと点滅していき、各視覚刺激の点滅時間は 6 秒であった。近位無視治療環境では、机の上の手指モーショントラッキングによる参加者の手の移動範囲内に 3 つのオブジェクトを設置した。参加者が自身の手を動かすことで VR の手を移動させることができ、VR の手が設置したオブジェクトに接触すると赤く着色される（図 8）。

遠位・近位 VR 環境で注意を左方へ誘導するために、移動するスリットを付加し、患者が見える映像を徐々に左方へ誘導した（図 9）。スリットの動きは時間経過とともに参加者を中心として 155°回転する（回転スリットの認識可能角度を 45 deg, 回転速度を 2.58 deg/s と一定にした：1 分間で 155°回転）。

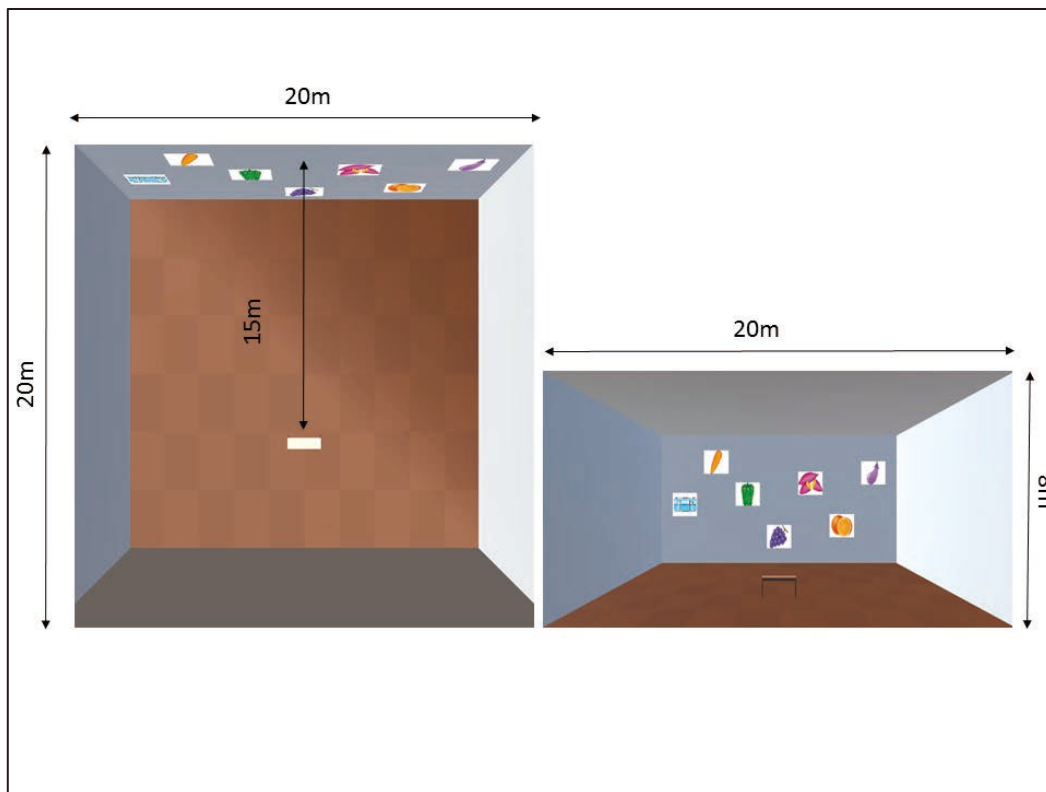


図7 実験に用いたVR環境 (Yasuda,2017 から引用)

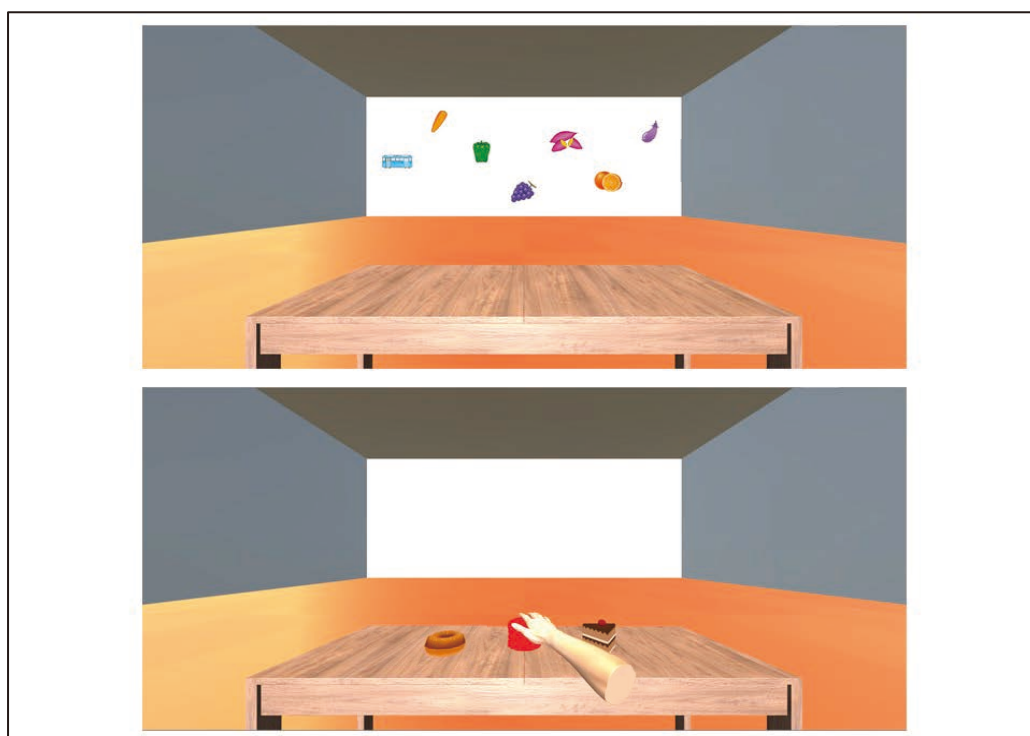


図8 遠位・近位空間課題 (Yasuda,2017 から引用)

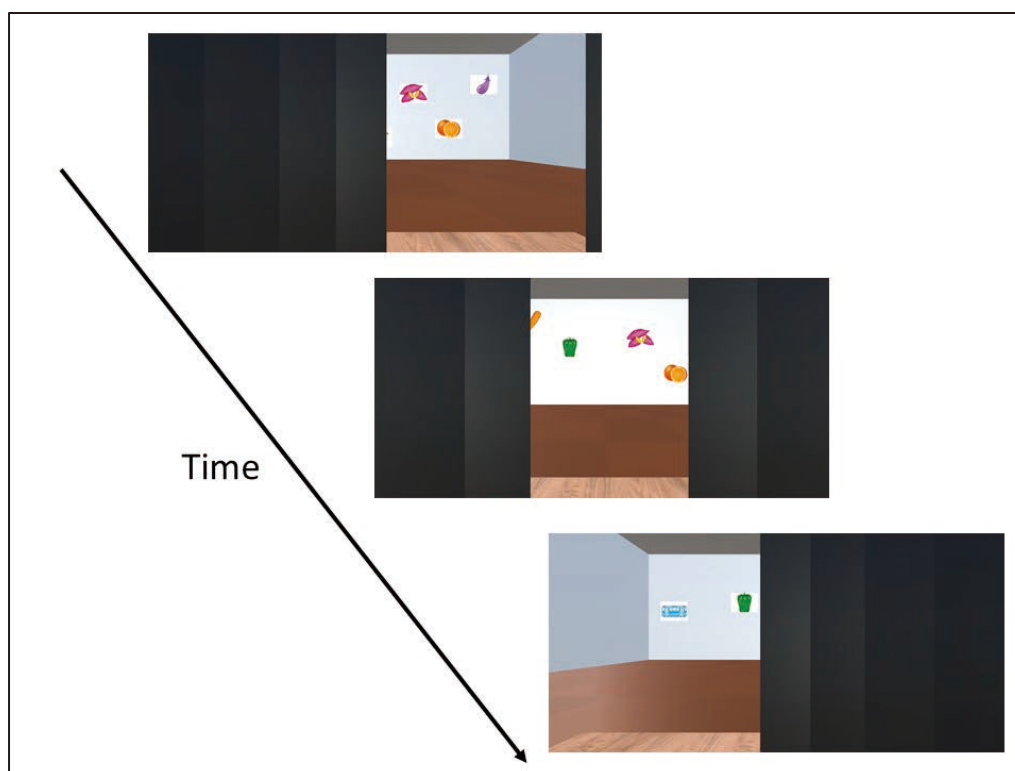


図9 可動式スリット (Yasuda,2017 から引用)

4.2 臨床試験

4.2.1 目的

USN 治療支援システムを用いたトレーニングプロトコルによる無視症状の改善効果を検証する。USN の評価バッテリーである行動性無視検査日本版(Behavioural inattention test: BIT)に基づいた線分抹消課題、星印抹消課題、文字抹消課題、線分二等分課題を用いて、遠位・近位空間における成績をプレテストとポストテストで比較して無視改善効果を示す。また、日常生活における無視を評価する CBS (Catherine Bergego Scale) を併せて計測することで紙面上の無視と日常生活無視への影響を議論する。

4.2.2 対象

対象は 70 代男性, 右利き。右中大脳動脈領域の脳梗塞を発症し, 紙面での検査にて USN を認めた。

4.2.3 方法

介入は ABA デザインにて実施した。従来法(A)・VR 法(B)での介入を 6 週間ずつ, さらに従来法(A)を 3 週間継続した。

介入中に参加者は椅坐位姿勢をとった。介入は 2 つのプログラムで構成された。最初の“点滅刺激回答”プログラムでは, 遠位無視治療環境を用いた。参加者は時間経過とともに順に点滅していく壁面に存在する 7 つの視覚刺激に目を向け, 声に出して回答した。次の近位無視治療環境ではオブ

ジェクトに対するリーチ課題を実施した。参加者は VR の手を机の上に存在する 3 つのオブジェクトに伸ばすことで触れた。各プログラムは 1 分間 (1 走査) × 3 セット行い、プログラム間では 30 秒のインターバルを設けた。

介入前および各期終了時に紙面(近位)、およびスクリーン(遠位)での評価 (線分二等分試験, 線分抹消試験) を実施した。参加者は, BIT 行動性無視検査日本版に基づいた線分抹消課題, 星印抹消課題, 文字抹消課題, 線分二等分課題を介入の直前と直後に近位空間 (紙面上), 遠位空間 (プロジェクターにより画像が投影されたスクリーン) で行った。患者からスクリーンまでの距離は約 2.5 m であった。線分抹消課題, 星印抹消課題, 文字抹消課題では, BIT の計算方法に基づき, 抹消した個数を計算した。線分二等分課題では, 二等分点から真の midpoint までの偏倚率を計算し, これをもとに BIT 得点を算出した。また, 各期の検査と併せて CBS を測定した。

4.2.4 結果

表 2 に各変数の推移を示す。近位・遠位空間の BIT では, 線分抹消試験・線分二等分線において改善を認めたが, CBS において変化を認めなかった。

表 2 介入経過における各指標の推移 (Yasuda, 2018 より引用)

Table 1 Scores on the CBS and primary neuropsychological measures in near and far space, pre-VR and post-VR programme					
	(Near) Line cancellation; (omission rate)	(Far) Line cancellation (omission rate)	(Near) Line bisection	(Far) Line bisection	CBS
Baseline (6W before)	15 (58%)	6 (83%)	74	86	14
Pre-VR	6 (83%)	6 (83%)	86	87	15
Post-VR	23 (36%)	29 (19%)	72	76	15

4.2.5 結論

- ・ USN に対して, 仮想空間を用いて非無視側の情報を遮断する治療支援システムを開発し, 近位空間, 遠位空間における無視症状を有効に改善させるための課題を案出した。
- ・ 無視症状を有する患者 1 名に開発したシステムおよび課題を 6 週間に渡り適応し, 効果検証した。
- ・ 開発したシステムによる介入で遠位・近位空間無視は紙面上で改善を示したが, 日常生活上の無視は変化を認めなかった。
- ・ 日常生活で改善がみられなかった原因追及およびシステムへの反映を実施する必要がある。

5. 共同研究者

岩田 浩康 (創造理工学部・総合機械工学科・教授)

齋地 健太 (創造理工学部・総合機械工学科・修士 2 年)

原島 宏明 (総合東京病院・リハビリテーション科・課長)

貝吹 奈緒美 (総合東京病院・リハビリテーション科・理学療法士)

北地 雄 (総合東京病院・リハビリテーション科・理学療法士)

室井 大佑 (亀田リハビリテーション病院・理学療法士)

大平 雅弘 (横浜新緑総合病院・作業療法士)

6. 研究業績

学術論文

- ・ 福島勇太, 安田和弘, 鈴木慈, 大橋洋輝, 岩田浩康, 「脳卒中片麻痺歩行に対するばねと人工筋肉を用いた背屈支援装置の開発ー踵接地時の膝折れ挙動に対する影響の検証ー」, ライフサポート学会誌 (印刷中)
- ・ Yasuda K, Saichi K, Iwata H. Haptic-based perception-empathy biofeedback enhances postural motor learning during high-cognitive load task in healthy older adults, *Frontiers in Medicine* (in press)
- ・ Yasuda K, Saichi K, Kaibuki N, Harashima H, Iwata H. Haptic-based perception-empathy biofeedback system for balance rehabilitation in chronic stroke patients: Concepts and initial feasibility study, *Gait and Posture*. (in press)
- ・ Yasuda K, Muroi D, Hirano M, Saichi K, Iwata H. Differing effects of an immersive virtual reality program on unilateral spatial neglect on activities of daily living, *BMJ Case Report*, Mar 9;2018. pii: bcr-2017-222860. DOI:10.1136/bcr-2017-222860
- ・ Yasuda K, Saichi K, Kitaji Y, Harashima H, Iwata H. Development of an Implicit Method for Directing Weight Shifting to the Affected Side in Patients with Stroke: A Proof of Concept Study. *ROBOMECH Journal* vol4(26).DOI:10.1186/s40648-017-0094-2
- ・ 河田 俊, 安田 和弘, 岩田 浩康, フリースロー初心者のための BF 型セット・フォーム習得支援 RT の 開 発 , 日 本 機 械 学 会 論 文 集 ,Vol.83, No.851, p16-00515, 2017. DOI: 10.1299/transjsme.16-00515
- ・ Yasuda K, Muroi D, Ohira M, Iwata H, Validation of an immersive virtual reality system for training near and far space neglect in individuals with stroke: a pilot study. *topics in stroke rehabilitation*. Vol. 24, no. 7, 533-538.DOI:10.1080/10749357.2017.1351069
- ・ Yasuda K, Kaibuki N, Harashima H, Iwata H, The effect of a haptic biofeedback system on postural control in patients with stroke: an experimental pilot study, *Somatosensory and Motor Research*, vol34;2,pp65-71,2017. DOI: 10.1080/08990220.2017.1292236

総説・著書

- ・「感覚増幅技術を用いたリハビリテーションの新展開」日本支援工学理学療法学会ホームページ特集テーマ 「リハビリテーションと工学連携の実践」, 日本支援工学理学療法学会
- ・ Kinovea : Motion Capture Software (日本語版マニュアル), Research Gate に公開 https://www.researchgate.net/profile/Kazuhiro_Yasuda2

招待講演

- ・ 日本神経理学療法学会 参加型フォーラム 2017 指定討論者「感覚代行 / 補完技術を応用した工学的支援技術ーバランス・歩行リハビリテーションへの応用ー」主催: 日本神経理学療法学会, 2017 年 11 月 4 日

受賞・表彰

- ・ SCF 計測展 2017 大学・高専テクニカルアカデミー研究発表コンテスト最優秀賞
「在宅脳卒中患者のための知覚共感型遠隔リハビリテーションシステム」2017 年 12 月 1 日 : 共同発表者

学会発表

- ・ Jing-Chen Hong, Yuta Fukushima, Shigeru Suzuki, Kazuhiro Yasuda, Hiroki Ohashi, Hiroyasu Iwata.

- "Estimation of Ankle Dorsiflexion Ankle during Loading Response Phase for Spring Coefficient Identification", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2017, Dec. 5~8, 2017, Macau, China
- Kazuhiro Yasuda, Kenta Saichi, Naomi Kaibuki, Hiroaki Harashima, Hiroyasu Iwata, Clinical Effectiveness of a haptic-based perception-empathy biofeedback system for balance rehabilitation in patients with chronic stroke. 10th World Congress for NeuroRehabilitation (WCNR). 7-10 Feb, The Renaissance Mumbai Convention Centre Hotel, Mumbai, India
 - Kentarou Kodama, Kazuhiro Yasuda, Kouhei Sonoda, Behavioral strategy of stepping-over: differences in obstacle's height and individuals, Forth International Workshop on Skill Science, 13 Nov, 2017.
 - Kentarou Kodama, Kazuhiro Yasuda, Kouhei Sonoda, How does stepping-over behavior change depending on the obstacle height? , 23th International conference. International Society for Posture & Gait Research, 25-29 June, Fort Lauderdale, Florida, USA
 - 平野瑞樹, 室井大佑, 安田和弘, 齋地健太, 萩原晨功, 岩田浩康, 「右中大脳動脈領域の脳梗塞により半側空間無視が遷延化した事例に対する没入型 VR を用いた介入の適応」, 第 55 回日本リハビリテーション医学会, 2018 年 6 月 28~7 月 1 日, 福岡
 - 齋地健太, 安田和弘, 岩田浩康, 「知覚支援 RT の効果機序分析に基づく歩行能力質的評価手法の構築」, 第 27 回ライフサポート学会フロンティア講演会, E5-1, 2018 年 3 月 9 日~10 日, 東京
 - 齋地健太, 安田和弘, 北地雄, 原島宏明, 岩田浩康, 「触覚バイオフィードバックに基づく歩行リハビリ支援システム-第 14 報: 知覚共感ウェアによる中期介入効果検証-」, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017 年 12 月 20-22 日, 宮城
 - 児玉謙太郎, 山際英男, 安田和弘, 「動的身体適応力のトレーニングと評価に関する予備的検討」, 日本機学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 2017 年 11 月 9-11 日, 石川
 - 齋地健太, 鈴木慈, 安田和弘, 福嶋勇太, 岩田浩康: 「片麻痺歩行リハビリにおける運動支援及び感覚支援を両立する運動・知覚統合支援装置の開発」, 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, 2017 年 11 月 4~5 日, 大分
 - 大西哲平, 相原伸平, 安田和弘, 岩田浩康: 「バットスイング時の運動連鎖における体幹動作を支援する振動型 BF デバイスの開発」, 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, 2017 年 11 月 4~5 日, 大分
 - 齋地健太, 安田和弘, 岩本晃, 室井大佑, 岩田浩康, 「半側空間無視の注意誘導を促す 3D-VR 型可動スリットの動的環境への適応」, LIFE2017, 2017 年 9 月 15~17 日, 東京
 - 平井大智, 福嶋勇太, 安田和弘, 大橋洋輝, 岩田浩康, 「没入型 VR による下肢運動錯覚がミラーニューロンシステムに与える影響」, LIFE2017, 2017 年 9 月 15~17 日, 東京
 - 萩原晨功, 安田和弘, 室井大佑, 大平雅弘, 齋地健太, 岩田浩康, 「半側空間無視の物体中心無視に対する 3D-VR 型 cueing システムの開発」, LIFE2017, 2017 年 9 月 15~17 日, 東京
 - 岩木将一郎, 齋地健太, 安田和弘, 岩田浩康: 「急性期片麻痺患者の下肢リハビリにおける随意機能の誘発を目的としたマススレーブ式両足協調デバイスの開発」, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会 RSJ 2017, 2017 年 9 月 11~14 日, 埼玉
 - 齋地 健太, 安田 和弘, 岩田 浩康, 「触覚バイオフィードバックに基づく歩行リハビリ支援システム-第 13 報: 歩行訓練と加重移動訓練を実施可能な統合的知覚支援システムの提案-」, 日本機

械学会 2017 年度年次大会, 2017 年 9 月 3～6 日, 埼玉

- ・平野瑞樹, 室井大佑, 安田和弘, 齋地健太, 萩原晨功, 岩田浩康, 近位・遠位空間無視を統合的に治療可能な没入型 VR システムにおける中期介入効果の事例検討, 第 41 回日本高次脳機能障害学会学術総会, 2017 年 12 月 15-16 日, 埼玉
- ・児玉謙太郎, 安田和弘, 園田耕平, 「身体でスケール化された高さの障害物の跨ぎ越え: 行為安定性の変化に関する予備的検討」, 日本認知科学会第 34 回大会, 2017 年 9 月 13～15 日, 石川
- ・安田 和弘, 室井 大佑, 太平 雅弘, 岩田 浩康, 3 次元仮想空間内における右方空間のブラックアウトによる半側空間無視に対する注意誘導効果 身体近傍・身体外空間および課題特異的効果に基づいたシステムデザイン-, 第 52 回日本理学療法学会大会, 2017 年 5 月 12～14 日, 千葉

社会活動・その他

- ・「脳卒中後のリハビリに VR を！」日経デジタルヘルス (デジタルヘルス事例), Nikkei Business Publications, Inc, 2018 年 1 月 17 日公開
<http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/feature/15/327441/011600293/?ST=health>
- ・[Featured article]として掲載: Yasuda K, Saichi K, Kitaji Y, Harashima H, Iwata H. Development of an Implicit Method for Directing Weight Shifting to the Affected Side in Patients with Stroke: A Proof of Concept Study. ROBOMECH Journal vol4(26), 2017 年 12 月
- ・「ニューロリハビリテーションと工学」, オーガナイズドセッション企画, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2017) 第 33 回ライフサポート学会大会, 第 17 回日本生活支援工学会大会, 日本機械学会 福祉工学シンポジウム 2017

7. 研究活動の課題と展望

バランス支援 RT (安定性) においては基礎試験が完了しているため, 今後はインソール型の圧力センサへ移行を進め, ユーザビリティを高める. また, 歩行用知覚支援 RT においては適応患者数を増やし効果の妥当性を検証する. USN 治療支援システムは, 特に日常生活に有効となる課題の再検討が必要であり, さらに患者数を増やし頑健な試験を実施する. 加えて, 無視の定量評価が可能な評価システムの案出に着手する予定である.

高速かつ高精度な一般化固有値問題に対する精度保証付き数値計算法の確立

研究代表者 柳澤 優香
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1 研究課題

線形計算とは、行列に関する数値計算のことであり、連立一次方程式と固有値の問題の二つに大別され、科学技術計算の基礎を担う有用な技術である。近年の科学技術計算は、計算機の演算能力やメモリが増大するにつれ、ますます大規模な問題を高速に解く方向へ発展しているが、四則演算などの基本演算を計算機上で実行すると、それぞれの演算は丸め誤差を伴った浮動小数点演算によって近似されるため、計算の際にどのくらいの丸め誤差が発生し累積し伝播するかを考慮する必要がある。例えば、密行列で100万円を超えるような大規模な行列を扱う場合、理論的には倍精度では計算精度が不足し、十分な有効桁数が得られなくなる可能性がある。また、特異に近い(悪条件)行列の場合、ごく小さな誤差による摂動に対して解の相対変化が大きくなり不安定である可能性が高い。何らかの方法で得られた数値計算の結果が一体どの程度の許容誤差の範囲内で正しいかということを示すことは計算自体と同様に重要であるのだが、例えば、演算桁数を多くして再度試すことで、丸め誤差の見当を大雑把につけることはできるかもしれないが、計算時間とメモリの両面でコストが大きい。それが大規模な問題に対してであれば莫大な計算時間がかかると予想できる。

「精度保証付き数値計算」とは、得られた近似解の周りに真の解が存在すること、及びその誤差範囲を保証する数値計算手法を言う。具体的には、通常の数値計算によって近似解を得た後に、区間演算によってその近似解の精度を保証する。これまで「計算複雑度(計算量)」、「計算精度」などの観点で改良が重ねられてきた。特に近年、非線形偏微分方程式をはじめとする関数方程式の解に対する数値的検証法の過程で微分作用素の固有値問題が現れ、その離散化として行列の一般化固有値問題における固有値の厳密な評価が不可欠である。さらに固有値の存在と非存在の範囲を検討するとき、固有値の順位を確定するのも重要である。従って、一般化固有値問題の数値解に対する高品質な評価を実用的な計算時間で安定的に得られる方法の開発が急務である。

本研究の目的は、次の行列の一般化固有値問題

$$Ax = \lambda Bx \quad (A: n \times n \text{ の実対称行列}, B: n \times n \text{ の実対称正定値行列}) \quad (1)$$

の特定の固有値 λ_i とその大きさの順位まで込めて、厳密に評価する方法の構築である。計算機による一般化固有値問題の近似解法は既に複数存在している。例として、全ての近似固有値を得るコレスキーQR法や、特定の近似固有値を得る二分法や、大規模実対称疎行列向けのランチョス法がある。これらの方法は実用的であるが、得られる結果は丸め誤差と反復による切り捨て誤差があるので、計算結果は厳密には正しいとは言えない。

そこで、ある近似の固有対が与えられたとき、演算の結果を包含する区間演算を用いて、固有値の存在範囲を精度保証付き数値計算によって厳密に確定する方法を紹介する。例えば、大石らの方

法[2]はゲルシュゴリンの定理を利用して全ての固有値を精度保証することを目的としており、問題が小規模、かつ、(1)式のBが悪条件でない疎行列であれば、十分実用的である。

しかしながら、実際の応用上、例えば、有限要素法を利用して非線形微分方程式の解を検証するとき、メッシュ分割が細くなるほど数万次元など大規模な行列が現れる場合が多く、大石らの方法のように全ての固有値の厳密な評価を行うには莫大な計算コストが必要である。実際の問題では特定の固有値のみ評価すれば十分であり、現れる問題のほとんどは疎行列(成分のほとんどが零である行列)であるが、大石らの方法は逆行列を経由するため疎行列には適用できない。また、修正コレスキー分解の事前誤差評価に基づいた方法[2]は高精度な結果を得ようとすると2分法のようにシフト量を何度も変更し試す必要があるのと、修正コレスキー分解は数値的に非常に不安定である手法と言う問題がある。また、Behneの方法[3]はLehmann-Goerischの定理を基本としたものだが、それらの定理を用いる上での前情報(ある固有値 λ_{i+1} の下限)をどのように得るかなど手法が明確でないと言う問題があった。本研究では、従来法の欠点である数値安定性が確保されていない、計算コストが大きいなどを克服することで、大規模な疎行列に適用する高速かつ高精度な新しい解法を構築する。

[1] K. Maruyama, T. Ogita, Y. Nakaya, and S. Oishi: Numerical inclusion method for all eigenvalues of real symmetric definite generalized eigenvalue problem, IEICE Trans., J87-A (2004), pp. 1111-1119, (in Japanese).

[2] N. Yamamoto: A simple method for error bounds of eigenvalues of symmetric matrices, Linear Algebra Appl., 324 (2001), pp. 227-234.

[3] H. Behnke: The calculation of guaranteed bounds for eigenvalues using complementary variational principles, Computing, 47 (1991), pp. 11-27.

2 主な研究成果

2.1 実対称行列に対する最小固有値の下限の数値計算手法の確立

実対称行列に対する最小固有値の下限値を高速に保証することは、連立一次方程式の解の精度保証、一般化固有値問題の精度保証法(2.2を参照)などに応用できる。従来法としてRumpの方法があり、INTLAB(MATLABの区間演算ライブラリー)に含まれていた。非常に実用的な方法であるが、高精度な値を得るにはCholesky分解のシフト量を何度も変更し試す必要があった。本研究ではCholesky分解の誤差解析を用いて適切なシフト量を導出し、コレスキー分解の事前誤差評価を用いて、1回の計算で実用的な結果を得る計算方法を開発した。本研究成果はスペインの学会でポスター発表を行い、一般化固有値問題の精度保証法(2.2を参照)に応用している。

[4]Y.Yanagisawa, X.LIU, S.Oishi, Accurate and Stability method for computing smallest eigenvalue of A with symmetric positive definite, International Workshop on Industrial Mathematics 2017, May.2017, Spain.

2.2 ある近似固有値に対する精度保証付き数値計算法の確立

本研究の方針としては、修正コレスキー分解に基づく方法[2]からLehmann-Goerischの定理に必要な固有値 λ_i の粗い評価を得る。計算を何度も試行せずに済む、非常に効率的な計算手法であり、ソースコードを開発した。具体的な計算手法は、次のような手順である。

- 1) (1)式のBの最小固有値の下限を高速に算出(多少粗い評価でも問題ない)
- 2) 数値的に安定したピボット付きブロック修正コレスキー分解を用いて、[2]に基づく方法から(1)式の近似固有値 λ_i の近傍にある真の固有値の粗い評価と大きさの順位を得る。この時、計算は

何度も試行せずに計算は一回のみで粗い評価を許容することとする.

3) 2 で得た前情報から Lehmann-Goerisch の定理を実行し, 真の固有値を含むシャープな区間を得る

これらの手法をテスト行列に適用した結果, 計算精度, 計算時間, 計算複雑度の観点から有用性を示すことができた.

3 共同研究者

大石進一 (早稲田大学 理工学術院 教授), Nicholas Higham (マンチェスター大学 教授)

劉雪峰 (新潟大学 准教授)

4 研究業績

4.1 学術論文

[1]柳澤優香, 任意精度演算を用いた反復改良による数値計算手法とその応用, 応用数理学会論文誌, to appear.

4.2 総説・著書 特になし

4.3 招待講演

[1]柳澤 優香, 劉 雪峰, 大石 進一, スパース行列に対する固有値の厳密計算手法の開発, 京都大学数理解析研究所・RIMS 共同研究 (公開型) 数値解析学の最前線 ---理論・方法・応用---, 京都大学数理解析研究所, 2017/11/9.

[2]Y. Yanagisawa, L. Xuefeng, S. Oishi, Robust guaranteed eigenvalue evaluation method, Dagstuhl seminar 17481, Germany, 2017/12/1.

[3] Y. Yanagisawa, T. Fukaya, R.Kannan, Y.Nakatsukasa, Y.Yamamoto, Shifted CholeskyQR for Computing the factorization of ill-conditioned matrices, SIAMPP 2018, Tokyo, Mar.2018.

4.4 受賞・表彰 特になし

4.5 学会および社会的活動

[1] SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP18)実行委員

[2] The International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM)2023 年大会組織委員. 日本で初めて招致に成功. 会場は早稲田大学早稲田キャンパスである.

[3] 東京都立戸塚高等学校で開催された The 4th Symposium for Women Researchers(2017/11/5)に参加し, ポスター発表を行った. 「コンピューターが計算間違い!? 信頼できる数値計算とは」

[4] 応用数理学会 代表会員

5 研究活動の課題と展望

主に以下の2点について研究を進める予定である.

1) 一般化固有値問題に対する精度保証付き数値計算法に関する応用

2 章の通り, 計算手法が確立したので, 実際に現れる問題に対して適用し, 有効性を検証する.

2) 任意精度演算を用いた計算手法の開発

半精度 (16 ビット), 倍精度 (64 ビット), 四倍精度 (ソフトウェアでのみ使用可能な 128 ビット) などの浮動小数点演算を組み合わせ, 計算時間を短縮し, エネルギー消費を最小限に抑え, 数値的に解き難い悪条件性の問題を精度良く解く数値計算法の開発を行う.

3) 重複した固有値に対する制度保証付き数値計算の検討

現在, 精度保証付き数値計算が「不可能」とされている, 縮退した固有値 (代数的重複度と幾何的重複度が異なる場合) を持つ固有値問題の精度保証法を研究する.

高靱性・高減衰耐力壁を用いた薄板軽量形鋼造の中層化に関する研究

研究代表者 脇田 健裕
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

薄板軽量形鋼造(通称: スチールハウス)は、板厚 2.3mm 未満の薄板軽量形鋼に、構造用合板等の面材をドリルねじで留め付けた耐力パネルを用いて、壁及び床を構成する構法である。20 年ほど前より我が国への導入が始まり、現在では主に 2 階建て以下の低層建築物に適用されている。薄板軽量形鋼造は各部の仕様が簡素かつ省資源であり、設計・生産・施工が簡易で、高い経済性・耐久性を発揮する等の特徴を持つが、わが国では未だ一般的な認知度は低く普及には至っていない。壁式構造である薄板軽量形鋼造建築物の耐震性能は耐力壁のせん断性能に依存し、耐力壁に作用するせん断力は主に面材と枠材のドリルねじ接合部の耐力によって負担される。このドリルねじ接合部は耐力壁の変形角がおおよそ $1/30[\text{rad}]$ に達すると、ねじの破断及びパンチングによって急激に耐力を失うため靱性に乏しい。また、ドリルねじ接合部は面材へのめり込みにより、履歴ループに強いスリップ性状を有しているため、紡錘型の復元力特性を持つ鉄骨ラーメン構造等に比べると、薄板軽量形鋼造耐力壁のエネルギー吸収能力は極めて低く、繰り返し振幅による耐力低下も顕著である。

2012 年の国土交通省告示第 1641 号の改定により、薄板軽量形鋼造は 4 階建て迄の建築が可能となった。しかし、現行の耐力壁(合板+石膏面材)を用いて、4 階建て建築物の試設計を行うと、低層階には相当量の壁数が必要となるため、建築計画の自由度は大きく阻害されることが分かる。また、従来のような剛性・強度型の耐力壁を用いて 4 階建て建物の耐震性能を確保しようとする、加速度応答が過大となるだけでなく、耐力壁を支えるたて枠や金物、基礎に作用する応力が非常に大きくなるため、これに対応するための各部仕様が大型・複雑化することとなる。その結果、生産性・施工性の大幅な低下とコスト増大が避けられないものとなり、スチールハウスの省資源かつ簡素な仕様という長所を大きく減ずる結果となる。

そこで、本研究ではスチールハウスの長所を減ずることなく、耐震性能を飛躍的に向上させる手法として、摩擦式エネルギー吸収機構を内蔵する薄板軽量形鋼造耐力壁(摩擦内蔵型耐力壁(図 1、2、3))を用いて、中層建築物にも適用可能な建築構造システムを構築することを目的とした検討をおこなっている。

2. 主な研究成果

■摩擦機構部に使用する高力ボルトの締付軸力管理に関する検討

摩擦機構内蔵耐力壁の摩擦機構に使用する高力ボルトについて、トルクコントロール法による初期締付力の導入と締付力のゆるみ量の予測に関する検討を行った。その結果摩擦機構に使用する高力ボルトの初期締付力 F_{ini} は締付トルクの管理によって概ね正確に導入することが可能であることが分かった。また、初期締付力 F_{ini} の目標値の算出には、高力ボルトのゆるみを初期ゆるみ ΔF_s 、リラクセーションによるゆるみ ΔF_r 、外力によるゆるみ ΔF_e に分解して評価しすることで予測可

能であることが明らかとなった。(図 4)

■実寸 2 層小型薄板軽量形鋼造を主構造とする制振建物の振動台実験

摩擦機構内蔵耐力壁を適用した実寸 2 層小型立体フレームを試験体とした、地震動入力による振動台実験を実施した。その結果、摩擦機構内蔵耐力壁のみで層せん断力を負担する基本架構モデルは、繰り返しの地震動入力に対し極めて安定したバイリニア型の荷重変形関係を示すとともに、上階での加速度応答の増大を効果的に抑制することが分かった。また、実験結果より摩擦機構内蔵耐力壁の復元力特性を模擬するトリリニアモデルの各諸元を同定した。解析モデルの各諸元は摩擦機構部のボルト締付トルクと線形の相関関係を有しており、この関係式を用いることにより任意の降伏耐力を発揮する耐力壁の設計が可能となった。また、作成した解析モデルを用いた地震応答解析の結果は実験結果と概ね良く対応しており、本解析モデルを用いることにより地震時の応答を精度よく解析可能であると考えられる。(図 5)

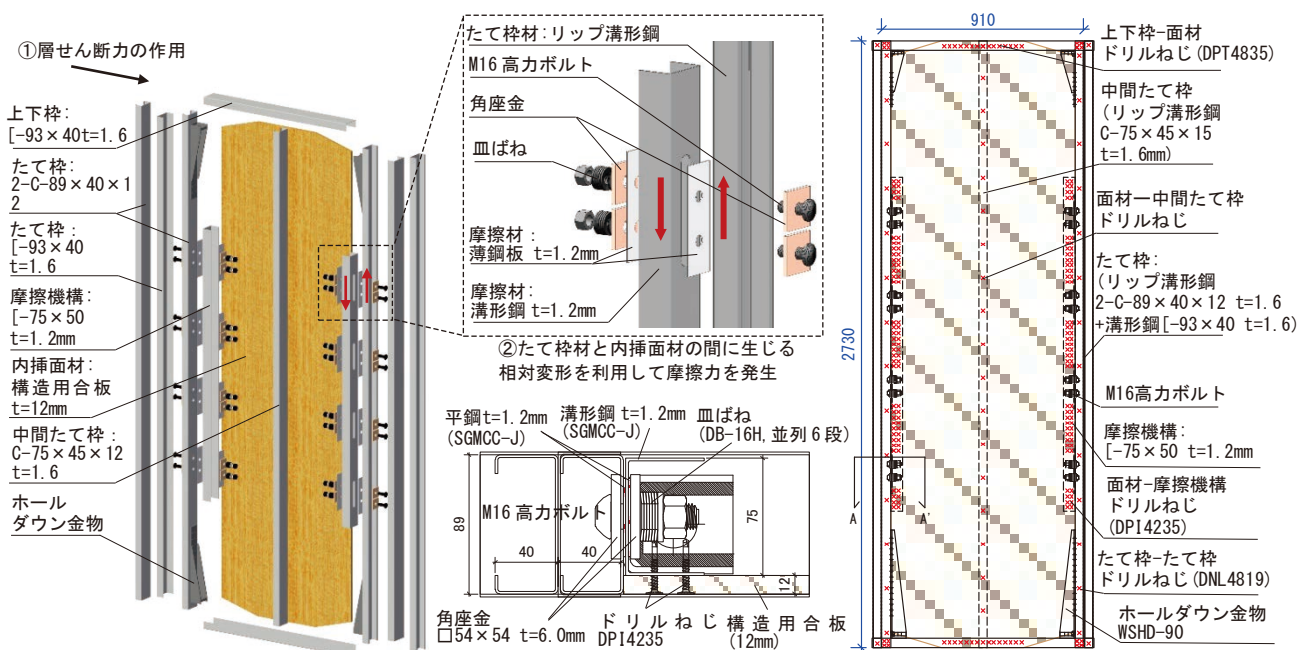


図 1 摩擦機構内蔵耐力壁構成

図 2 A-A' (図 3 中) 断面図

図 3 摩擦機構内蔵耐力壁構成詳細図

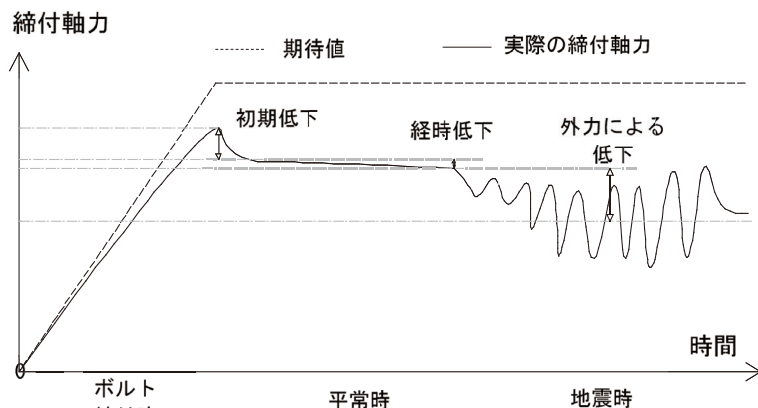


図 4 高力ボルトのゆるみ概念図

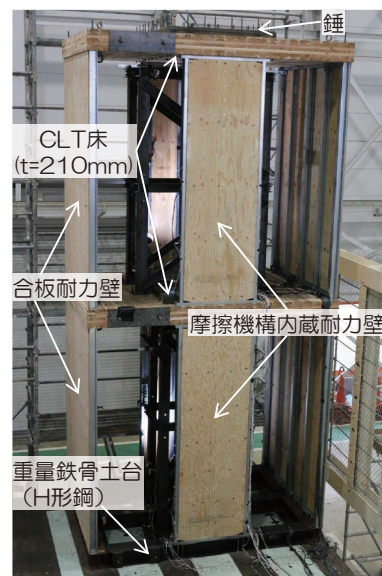


図 5 実寸 2 層フレームの振動台実験

3. 共同研究者

曾田五月也(早稲田大学)、西村信男(ワークスタッフ)、渡辺力(日新製鋼)、中西伸行(NoBu 建築エンジニアリング)、糸井清顕(ITEC 構造)、藤倉均(ケーシーフレーム)、八木英剛(東京日釘)、青柳明(メッツ)、木林英二郎(扇産業)、遠藤陽一(ガイアフィールド)、米長信(C-net)、宮田雄二郎(宮田構造設計事務所)

4. 研究業績

■学術論文

日本建築学会構造系論文集

・高靱性・高減衰薄板軽量形鋼造耐力壁の開発とその基本力学性能, 曾田 五月也、脇田 健裕, 日本建築学会構造系論文集 Vol83., No.743, pp.201-210, 2018 年 1 月

日本鋼構造協会鋼構造論文集

・摩擦機構内蔵耐力壁を適用した薄板軽量形鋼造建築物の構造特性係数に関する検討, 脇田 健裕、曾田 五月也, 日本鋼構造協会鋼構造論文集 第 25 巻第 97 号, pp.39-46, 2018 年 3 月

■学会講演

日本建築学会大会(広島)

- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 6. 摩擦力導入に用いるトルシア形高力ボルトの締付軸力管理, 大岩奈央、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1117-1118, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 7. 潤滑皮膜を持つ溶融 Zn-Al-Mg 合金めっき鋼板を用いた摩擦機構部の単体性能試験, 渡辺力、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1119-1120, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 8.ボルト締付軸力を変化させた実大耐力壁の静的加力試験と 2 次元フレームモデルによる解析的検証, 脇田健裕、曾田五月也、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央、渡辺力, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1121-1122, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 9. 摩擦機構内蔵耐力壁を有する 2 層薄板軽量形鋼造の振動台実験, 斎藤健寛、曾田五月也、脇田健裕、菅原良太、大岩奈央、渡辺力, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1123-1124, 2017 年 8 月
- ・高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その 10. 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した 3 階建て建築物の地震応答解析, 菅原良太、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、大岩奈央, 2017 年学術講演梗概集 DVD.構造Ⅲ, pp.1125-1126, 2017 年 8 月

5. 研究活動の課題と展望

提案する摩擦機構内蔵耐力壁の実用化に向けた具体的な検討を、各種単体試験に加え実寸フレームによる振動台実験の実施により進めることが出来た。今後は、実建物での使用を想定した構造設計法に関する検討を進めると共に実建物への適用を図っていく。

特別推進研究

エネマネハウスに関する研究

研究代表者 田辺 新一
(創造理工学部 建築学科 教授)

1. 研究課題

本研究の目的は、政府のエネルギー基本計画 2014 にも記載されている住宅のゼロ・エネルギー化に関する研究を行うことである。個々の研究開発は E 系のプロジェクトとして行われているが、それらを結実させた実際の住宅をデモンストレーションして行くことには大きな意義がある。E 系の最先端技術を統合化する。具体的には、経済産業省資源エネルギー庁が主催する「エネマネハウス」に応募し、大学対抗のコンテストで実験住宅を建設する。これまで、エネマネハウス 2014 (2013 年度事業) では応募 13 校から 5 校が選拔され、早稲田大学はビッグサイトに「Nobi-Nobi HOUSE」を建設した。その住宅は、移築を行い継続的な実験研究が行われている。また、エネマネハウス 2015 に早稲田大学チームは再度採択され、2015 年度秋季に横浜みなとみらい地区に「WASEDA LIVE HOUSE」という新たな提案を行う。また、2017 年度に大阪で開催されたエネマネハウス 2017 に参加する。個々の教員によるプロジェクトとしてではなく、E 系の総力を上げて重点的に取り組むことで、日本における ZEH (ゼロ・エネルギー住宅) の実現に貢献する。

2. 主な研究成果

- 1) エネマネハウス 2015 において実験住宅「WASEDA LIVE HOUSE」を横浜に建設した。建設のための計画、研究開発を行うとともに、大会期間中の計測・制御作業を行った。「WASEDA LIVE HOUSE」は最優秀賞を受賞した。
- 2) エネマネハウス 2014 において建設した実験住宅「Nobi-Nobi HOUSE」を新富士市に移築した。その住宅を用いて年間エネルギー性能、室内環境、快適性・健康性に関する実験を行った。また、燃料電池を導入して住宅負荷とのバランスに関して実測データを取得した。企業との共同研究や公的資金による研究に繋がっている。
- 3) 「Nobi-Nobi HOUSE」、「WASEDA LIVE HOUSE」に関するシンポジウム、展示会を行うとともに、ゼロ・エネルギーハウスに関する理工叢書を「ゼロ・エネルギーハウス」として萌文社から 2017 年に出版した。
- 4) エネマネハウス 2017 に応募し、大阪に実験住宅を建設した。芝浦工業大学と共同して提案を行った。「この郊外の片隅に ーわたしと家の約 80 年のものがたりー」と題して、郊外に建つ築 40 年の鉄骨工業化住宅の改築提案を行った。公開期間中 1 万人を超える来場者があり、優秀賞、チャレンジ賞を受賞した。断熱改修技術、エネルギーハーベスト技術、エネマネ技術、天気予報技術などを結集したデザインとした。雑誌、新聞、メディアなどに多く取り上げられた。期間中の測定結果なども論文として発表予定である。

3. 共同研究者

研究代表者

田辺 新一 理工学術院・建築・教授 (エネマネハウス 2014、2017 代表)

研究分担者

長谷見 雄二 理工学術院・建築・教授

古谷 誠章 理工学術院・建築・教授

後藤 春彦 理工学術院・建築・教授

高口 洋人 理工学術院・建築・教授 (エネマネハウス 2015 代表)

小林 恵吾 理工学術院・建築・准教授

研究協力者

林 泰弘 理工学術院・電気・情報生命専攻・教授 (エネマネシステム)

若尾 真治 理工学術院・電気・情報生命専攻・教授 (太陽光発電)

4. 研究業績

4.1 学術論文

・長澤夏子、渋谷彩音、松永知大、田辺新一、古谷誠章、渡辺直哉、広橋亘、林泰弘、ゼロエネルギーハウスの設計・建設と四季の計測－早稲田大学『Nobi-Nobi HOUSE ～重ね着するすまい』－、日本建築学会技術報告集、52、pp.1049-1052、2016.1、10.3130/aijt.22.1049

・角尾怜美、島村知弥、中川純、小林恵吾、田辺新一、高口洋人、浅野寛人、池川隼人、伊原さくら、小松昇平、丸山賢人、三好諒、万木景太、若山麻衣、エネマネハウス 2015 における『ワセダライブハウス』の提案と実証、日本建築学会技術報告集、54、pp.545-548、2017.6、10.3130/aijt.23.545

4.2 総説・著書

・田辺新一、長澤夏子、高口洋人、小林恵吾、中川 純、ゼロ・エネルギーハウス ―新しい環境住宅のデザイン、早稲田大学理工研叢書 シリーズ No.27、萌文社、2017 年 9 月、ISBN : 978-4-89491-337-0

4.3 招待講演

- ・第 35 回 早大モビリティシンポジウム、2015 年 11 月 14 日
- ・日本経済新聞、第 3 回 先端繊維素材シンポジウム、2016 年 6 月 2 日
- ・エネルギー・資源学会、2016 年 6 月 6 日
- ・BL・ALIA 研究成果合同発表会、2016 年 7 月 13 日
- ・埼玉県環境ビジネスセミナー、2016 年 11 月 15 日
- ・横浜市、2016 年 11 月 28 日
- ・デンマーク工科大学、2017 年 5 月 2 日
- ・シンガポール建設局、2017 年 9 月 7 日
- ・北海道建築環境フォーラム、2017 年 9 月 19 日
- ・BELCA セミナー、2018 年 1 月 16 日
- ・日本ビルジング協会、2018 年 1 月 30 日
- ・メルボルン王立工科大学、2018 年 2 月 8 日
- ・住まいと環境 東北フォーラム公開シンポジウム、2018 年 2 月 21 日
- ・名古屋商工会議所、2018 年 3 月 6 日

- ・東京都環境局、2018 年 3 月 13 日

4.4 受賞・表彰

- ・「WASEDA LIVE HOUSE」最優秀賞
- ・「この郊外の片隅に一わたしと家の約 80 年のものがたりー」優秀賞、チャレンジ賞

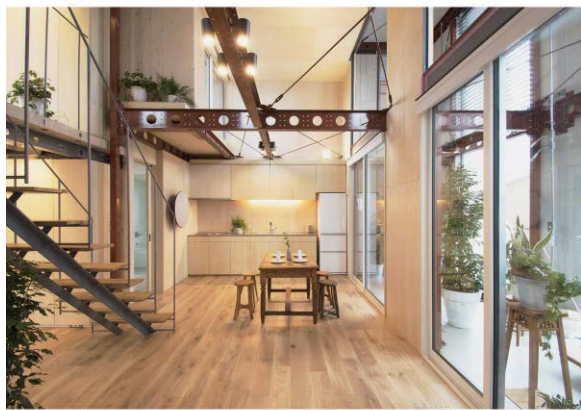
4.5 学会および社会的活動

- ・Jun NAKAGAWA, Keigo KOBAYASHI, Hiroto TAKAGUCHI, Shin-ichi TANABE, Designing of Human Behavior, Thermal Comfort and Ceiling on Energy, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・Tianshu XU, Ayane Shibutani, Jiannan Liu, Shin-ichi Tanabe, Tadasu Ooishi, Thermal Comfort of Radiant Cooling Systems in Homes under Hot and Humid Climates with Different Operation Methods, Healthy Buildings EUROPE 2017
- ・Ayane Shibutani, Shin-ichi Tanabe, Natsuko Nagasawa, Tomohiro Matsunaga, Kei Utsumi, Marina Ebe, Energy Consuming Behavior of the Occupants in a Zero-Energy House, Proc. of Indoor Air 2016
- ・Tomohiro Matsunaga, Shin-ichi Tanabe, Natsuko Nagasawa, Yasuhiro Hayashi, Naoya Watanabe, Creating a net zero energy house in Japan, Healthy Buildings EUROPE 2015
- ・松永知大、長澤夏子、内海慧、渋谷彩音、渡辺直哉、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究、その 3 実測調査による住宅性能の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.503-504、2015
- ・渋谷彩音、松永知大、劉建楠、徐天舒、大石匡、林泰弘、広橋亘、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究、その 4 熱的快適性を考慮した HEMS 制御の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1155-1156、2016
- ・徐天舒、渋谷彩音、劉建楠、松永知大、大石匡、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究、その 5 放射冷房導入時の温熱環境と運転状況、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1157-1158、2016
- ・松永知大、渋谷彩音、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究、その 6 太陽光発電・蓄電池導入住宅における自家消費率の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1159-1160、2016
- ・金ジョンミン、渋谷彩音、丸山由香、常岡優吾、藤澤順太、森戸直美、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究、その 7 予熱運転による快適性及び自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.551-552、2017
- ・中川純、小松昇平、島村知弥、角尾怜美、高口洋人、田辺新一、ゼロ・エネルギー・ハウスの提案と実証、(第 3 報) ヒューマンファクターを考慮したエネルギー制御システムの提案と実装、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1089-1090、2016
- ・松永知大、石井義章、竹中大史、原田尚侑、内海慧、江部真里奈、渋谷彩音、長澤夏子、田辺新一、渡辺直哉、ゼロ・エネルギー・ハウスの実現に向けた実証研究 (第 2 報) 対象住宅の断熱性能・室内環境実測および年間エネルギー予測、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 6 巻 pp153-156、2015.9
- ・徐天舒、渋谷彩音、劉建楠、松永知大、大石匡、田辺新一、ゼロ・エネルギー住宅における放射冷房の快適性に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 3 巻、pp301-304、2016.9
- ・金ジョンミン、丸山由香、徐天舒、常岡優吾、田辺 新一、森戸直美、温熱快適性に配慮した太陽光発電の自家消費に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 10 巻、pp289-292、2017.9

・常岡優吾、丸山由香、徐天舒、市川真帆、藤澤順太、林泰弘、田辺新一、快適性を考慮したゼロ・エネルギーハウスの自立的運用に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 10 巻 pp293-296、2017.9

5. 研究活動の課題と展望

本研究は特別推進研究として 2015 年 9 月～2018 年 3 月までで終了した。一応の成果が得られた。今後も ZEH（ゼロ・エネルギーハウス）に関する研究は社会的関心も高く、理工総研プロジェクト研究あるいは、早稲田大学スマート社会技術融合研究機構において継続する。



2017 年度
理工研年次報告 ASTE Vol.A25

2019年3月1日 初版 1 刷

編集・発行者	早稲田大学理工学術院総合研究所
発行所	早稲田大学理工学術院総合研究所 〒 169 - 8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 電話 (03) 3203-7613

印刷・製本 ナカバヤシ株式会社
ISSN : 2188-9619