

カーボンニュートラル社会に資するエネルギー・ナノマテリアル技術の開拓

研究代表者 小柳津 研一
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

本研究は、2014 年度から 10 年間に亘って行われた早稲田大学スーパーグローバル大学 (SGU) 創成支援事業「Waseda Ocean 構想」における理工系 3 拠点の一つ「ナノ・エネルギー拠点」の研究成果を基盤として、その活動を SGU 支援期間終了後も継続するための研究面での受け皿として設置した。次世代のエネルギー・ナノマテリアル研究が貢献しうる多様な社会課題に対し、これまでナノ・エネルギー拠点の研究者が培ってきた国際的かつ高水準の研究活動を起点に、学内での若手人材育成に係る多様な取組みを包含させながら、国内外の連携先との受託・共同研究の推進や成果発信を展開した。

具体的には、ジョイントスーパービジョンプログラム (JSP) に関する協定を締結している大学の中で、高麗大、ウプサラ大、ボン大、国立台湾大との若手・院生交流、ジョイントアポイントメント教員や訪問教員の受入実績のある IMDEA, CNRS, イタリア技術研、アーヘン応用科学大、高麗大などとの継続的な教員受入れなどを通して、これまでの SGU 活動と同等のアクティビティを継続しながら多様な国際共同研究を推進した。さらに、JSP から博士学生共同学位プログラム (JD) への格上げが検討されている国立台湾大や、新たな連携先として協議中のミュンヘン工科大などとの連携について協議し、研究の国際化を一層推進させた。これらの基礎研究活動に新たに理工総研の場を活用した産学協同の枠組みを導入することで、社会実装を意識した展開をはかった。

2. 主な研究成果

2-1. JA, 訪問教員等による国際的な教育・研究システムの維持と発展

訪問教員 (ゲント大)、短期招聘教員 (チューリヒ工大、国立台湾大、長春応用化学研、遼寧大、アーヘン応用科学大、ニューヨーク大、香港理工大、南洋理工大、アールト大、ブランダイス大、高麗大、フェラーラ大、バーミンガム大、清華大、パデュー大、CNRS、バレンシア理工大) および JSPS 外国人特別研究員 (天津大、ウプサラ大) を受け入れて研究交流し、講演会・セミナーなどによる情報共有や実験活動を行った。主なテーマの例として、① 海綿共生微生物のゲノム解析、生合成遺伝子の取得と生理活性天然物の検出・可視化技術、② キノイド系有機電極活物質の基礎的性質と電極活物質への応用、③ AI を用いた造形技術の方法論とその広範な可能性、④ 動的結晶の基礎と機械学習による材料展開、⑤ イリジウム錯体をクロモフォアとする共役系高分子錯体の基礎と有機系太陽電池への応用 などが挙げられ、将来的な共同研究の発足に向けて基盤となる成果を集積した。また、ジョイントワークショップやシンポジウムなどの機会を捉えて教員・研究者を招聘 (ナント大、テネシー大、ドルトムント工大、カンザス州立大) し、国際的な教育・研究システムの維持・発展に務めた。

2-2. JD, JSP 等への発展を目指した海外大学等との連携

JSP 協定大学からの教員招聘（高麗大，ボン大，国立台湾大）を通して，共同教育・研究指導，今後の連携に関する意見交換，ジョイントシンポジウム開催などで成果を集積した。また，将来的な JSP 締結を目的としてミュンヘン工大の教員を招聘し，今後の連携について協議した。その他，南チリ大，Flinders 大などから教員を招聘し，共同指導体制の枠組みについて議論した。

このような JSP 制度等を通じて連携を発展させてきた協定大学（ボン大，国立台湾大）の学生を受け入れ，共同教育・研究指導を行うと共に，JSP 制度による博士学生受け入れ（高麗大）も実施し，共同研究指導や学位審査等への学外指導者としての参画，共著論文の執筆指導などを通して，教育上の成果を挙げた。

2-3. 若手人材交流

学生派遣（テネシー大，デンマーク工大，シドニー大，ゲント大，ボン大，フリンダース大，ハーバード大，リヨン第一大，常州大）を通じて，先方での実験活動や国際会議発表などにより成果を集積した。主な研究テーマの例に，配電系統における短周期電圧変動に対応する SVR 制御手法の開発，プラズマ反応場における CO₂ 水素化反応などが挙げられる。

2-4. 国際広報と成果発信

共同シンポジウム開催（早大・高麗大・吉林大との協定ジョイントシンポジウムなど），ウェブ媒体，早稲田オープン・イノベーション・フォーラム 2024 等を活用し，共同研究の成果報告と情報交換，広報活動を行った。

3. 共同研究者

朝日 透 （早稲田大学・理工学術院・教授）
大木 義路 （早稲田大学・理工学術院・特任研究教授）
大久保將史 （早稲田大学・理工学術院・教授）
川原田 洋 （早稲田大学・理工学術院・教授）
菅原 義之 （早稲田大学・理工学術院・教授）
関根 泰 （早稲田大学・理工学術院・教授）
武岡 真司 （早稲田大学・理工学術院・教授）
竹山 春子 （早稲田大学・理工学術院・教授）
多辺 由佳 （早稲田大学・理工学術院・教授）
中井 浩巳 （早稲田大学・理工学術院・教授）
西出 宏之 （早稲田大学・理工学術院・招聘研究教授）
野田 優 （早稲田大学・理工学術院・教授）
林 泰弘 （早稲田大学・理工学術院・教授）
本間 敬之 （早稲田大学・理工学術院・教授）
松方 正彦 （早稲田大学・理工学術院・教授）
村田 昇 （早稲田大学・理工学術院・教授）
門間 聰之 （早稲田大学・理工学術院・教授）
若尾 真治 （早稲田大学・理工学術院・教授）

4. 研究業績（研究代表者の業績のみ記載）

4.1 学術論文

1. S. Hasebe, K. Hatakeyama-Sato, K. Oyaizu, T. Asahi, H. Koshima, “Prediction of Photochromism of Salicylideneaniline Crystals Using a Data Mining Approach”, *ACS Omega*, **9**, 1463-1471 (2024). DOI: 10.1021/acsomega.3c07859 (Open Access)
2. S. Watanabe, Y. Tsunekawa, T. Takayama, K. Oyaizu, “Diverse Side-chain Transformation of High Refractive Index Methylthio-substituted Poly(phenylene sulfide)s”, *Macromolecules*, **57**, 2897-2904 (2024). DOI: 10.1021/acs.macromol.4c00054
3. A. Chiba, K. Hatakeyama-Sato, K. Oyaizu, “Sulfur-containing Soft Lewis Base Polymers for Improved Lithium-ion Conductivity under Polymer-in-salt Conditions”, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* (Selected Paper), **97**, uoae048 (2024). DOI: 10.1093/bulcsj/uoae048 (Open Access)
4. Y. Igarashi, K. Hatakeyama-Sato, K. Kitagawa, R. Shinozaki, K. Oyaizu, “Precise Potential Tuning for Polymer-mediated Aqueous Redox Flow Battery with Lithium Iron Phosphate as Target Cathode”, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **6**, 10113-10120 (2024). DOI: 10.1021/acsapm.3c01723
5. S. Watanabe, L. M. Cavinato, V. Calvi, R. van Rijn, R. D. Costa, K. Oyaizu, “Polarizable H-bond Concept in Aromatic Poly(thiourea)s: Unprecedented High Refractive Index, Transmittance and Degradability at Force to Enhance Lighting Efficiency”, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2404433 (2024). DOI: 10.1002/adfm.202404433 (Open Access)

4.2 総説・著書

1. K. Oyaizu, “Organic Radical Systems”, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, ed by J. Garche, Second Edition, Elsevier (2025), vol. 4, pp. 941-948. DOI: 10.1016/B978-0-323-96022-9.00255-3
2. K. Oyaizu, “Energy Conversion Materials”, Functional Macromolecular Complexes, ed by K. Yamamoto, H. Nishihara, Royal Society of Chemistry (2024), chapter 13, pp. 252-270.

4.3 招待講演

1. 「有機反応を用いて電気を貯める：非金属蓄電に向けた基盤技術」, 化学物質評価研究機構 (CERI) 寄附講座, 2024.5.25, 博多.
2. “Effect of Polymers in Organic Redox Flow Batteries”, Organic Battery Days, 2024.6.19-21, Suwon (Korea).
3. 「分子間相互作用による含硫黄芳香族高分子の高屈折率化」, 高分子学会 24-1 フォトニクスポリマー研究会, 2024.6.26, 横浜.
4. 「有機ポリマーを用いた非電解型水素貯蔵」, 日本 MRS 水素科学技術連携研究会 2024 年度前期研究会, 2024.6.27, 甲府.
5. 「水素の高密度・可逆的貯蔵を担う有機高分子材料」, 第 43 回無機高分子シンポジウム,

2024.7.5, 東京.

6. “Electroactive Molecular Systems for Organic Materials and Devices”, MST Seminar, Flinders University, 2024.11.21, Adelaide (Australia).
7. 「水素貯蔵高分子の設計と水素キャリア材料としての展開」, 24-6 ポリマーフロンティア 21, 「カーボンニュートラル実現に貢献する高分子材料 ~水素エネルギーと二次電池関連技術の動向~」, 2025.3.7, オンライン.

4.4 受賞・表彰

1. 優秀ポスター賞 (高分子学会), 「溶解度とエネルギー密度を両立したポリマー活物質の合成とレドックスフロー電池への適用」, 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台, 2024.6.
2. 優秀ポスター賞 (高分子学会), 「窒素を水素貯蔵席に含むポリマーの可逆的水素化」, 第 73 回高分子学会年次大会, 仙台, 2024.6.
3. Best Poster Award, “Synthesis of TEMPO-substituted Polymers with Ammonium Pendant Group and Their Application to Aqueous Redox Flow Batteries”, Organic Battery Days, Suwon (Korea), 2024.6.
4. Best Poster Award, “Soft Lewis Base-containing Aliphatic Polymers for Highly Ionic Conductive Solid Polymer Electrolyte under Polymer-in-Salt Conditions”, Organic Battery Days, Suwon (Korea), 2024.6.
5. 最優秀ポスター発表賞 (CSJ 化学フェスタ賞), 「可溶性ポリチオエーテルの合成と固体電解質としての性質」, 第 14 回 CSJ 化学フェスタ, 東京, 2024.10.

4.5 学会および社会的活動

1. *ACS Applied Polymer Materials*, Editorial Advisory Board, 2022.1-2024.12
2. *Macromolecular Chemistry and Physics* (Wiley), Guest Editor, Special Issue: In Honor of Prof. Hiroyuki Nishide's 77th Birthday, 2025.2
3. 日本化学会第 14 回化学フェスタ実行委員会, 実行委員
4. 高分子学会超分子研究会, 第 37 期運営委員
5. 高分子学会水素・燃料電池材料研究会, 第 37 期運営委員
6. 高分子学会関東支部, 第 37 期常任幹事

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクト研究では, SGU ナノ・エネルギー拠点がこれまで高い評価を得てきたことに基き, 高い国際展開力を特色とした多様な国際共同研究を広範囲に継続推進した。一方, 将来のカーボンニュートラル社会実現に資する研究成果を「エネルギーとナノマテリアル」をキーワードとして一般向けに分かりやすい形で示すことが今後の課題となっている。その方策として, (1) ナノサイエンスからエネルギー・マテリアル, 電力システムまで, エネルギー

一とマテリアルに関わる新産業の創出に資する技術を提示すること、(2) 海外大学・研究機関、企業等との新たな共同研究を開拓すること、(3) エネルギーに係る理工系若手人材養成に、SGU の継続プログラムとして貢献すること、(4) 次世代のエネルギー技術を本学オリジナルのナノ材料をもとに提示することなどが考えられ、今後具体的に取り組む。