

# JST news

未 来 を ひ ら く 科 学 技 術

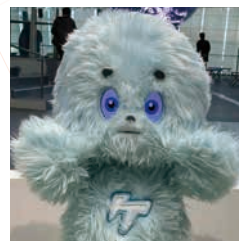
3 | 2024  
March

人に寄り添って家事や医療・福祉を支援  
スマートロボットでつなぐAIと社会



光を制御できる動的フォトニック構造体  
異方性の追究でソフトマテリアルを革新





日本科学未来館のケバラン



### 03 特集1

人に寄り添って家事や医療・福祉を支援  
スマートロボットでつなぐAIと社会



### 08 特集2

光を制御できる動的フォトニック構造体  
異方性の追究でソフトマテリアルを革新



### 12 新事業紹介

革新的GX技術創出事業がスタート  
オールジャパン体制で研究開発を推進

### 14 NEWS & TOPICS

≫ 新たな数理モデルでAIを悪意から守る  
≫ 環境に優しいSF<sub>4</sub>アセチレン合成に成功

ほか

### 16 さきがける科学人

材料の電磁場や電荷を原子レベルで観察  
電子顕微鏡で新たな「目」を作り出す

東京大学 大学院工学系研究科  
総合研究機構 特任助教

遠山 慧子



## 未来社会創造事業 第2回公開成果報告会開催

近年「DX(デジタルトランスフォーメーション)」に関連した情報技術は、科学実験、医療、自動運転、計測、ロボティクス、材料、五感の拡張などの多岐にわたる分野で広がりを見せています。JSTの未来社会創造事業は、2023年12月12日にDXをテーマとした第2回公開成果報告会を開催し、5人の研究開発代表者が研究成果や今後の展望、その先にある実現したい未来社会について講演しました。



現地・オンライン合わせて約500人が参加し、会場では研究成果のポスターや動画のほか、スマートロボットによる研削作業、香り反応予測ツールなどの研究内容のデモを展示し、来場者と研究者間で活発な意見交換が行われました。発表資料や講演動画はウェブページにて公開していますので、ぜひご覧ください。

[https://www.jst.go.jp/mirai/jp/evaluation/others/event-231212\\_01.html](https://www.jst.go.jp/mirai/jp/evaluation/others/event-231212_01.html)



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に積極的に貢献していきます。



▶ P.12,15下



▶ P.3,12,16



▶ P.12

■ 編集長  
安孫子 満広  
科学技術振興機構(JST)広報課

■ 制作  
株式会社エフビーアイ・コミュニケーションズ

■ 印刷・製本  
株式会社丸井工文社



## 菅野 重樹

*Sugano Shigeki*

早稲田大学 理工学術院 学術院長・教授

2020年よりムーンショット型研究開発事業

目標3 プロジェクトマネージャー

特集

OVERVIEW

# 人に寄り添って家事や医療・福祉を支援 スマートロボットでつなぐAIと社会

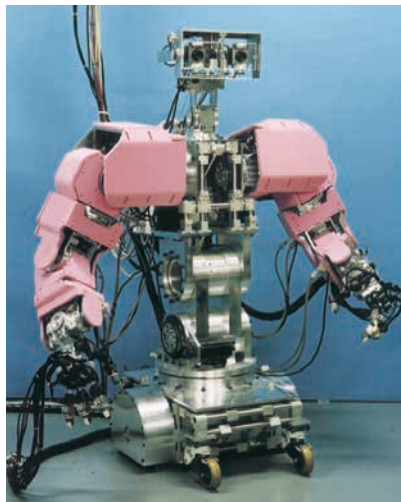
ロボットが人と協調しながら、家事や接客、医療、福祉など、さまざまな仕事を行う。小説や映画で描かれたそんな世界が、現実のものになりつつある。早稲田大学理工学術院の菅野重樹教授は「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」という目標を掲げたプロジェクトを先導している。多種多様なタスクを1台で行える「スマートロボット」実現の現在地と展望を聞いた。

## 「アトム」で描かれた未来世界 40年以上にわたり脈々と研究

手塚治虫の代表作「鉄腕アトム」で描かれた「ロボットが人に寄り添い、共生していく社会」。未来世界の姿として、誰もが一度は想像したことがあるのではないだろうか。ロボットが人とコミュニケーションをとりながら、家事や接客など、さまざまな仕事を行ってくれる。特に少子高齢化の進行により労働人口が減少し、さらなる人材不足が課題となっている福祉・医療分野においては、人と共に活動し、支援を行ってくれるロボットの実用化に大きな期待が寄せられている。

しかし、現在のロボットを見てみると、自動車などの製造現場のオートメーションのほか、受付や売り場などでの案内、レストランの配膳などでの案内、レストランの配膳など、特定の業務や物事を行う機能で

図1 菅野さんが開発を手掛けたロボットたち



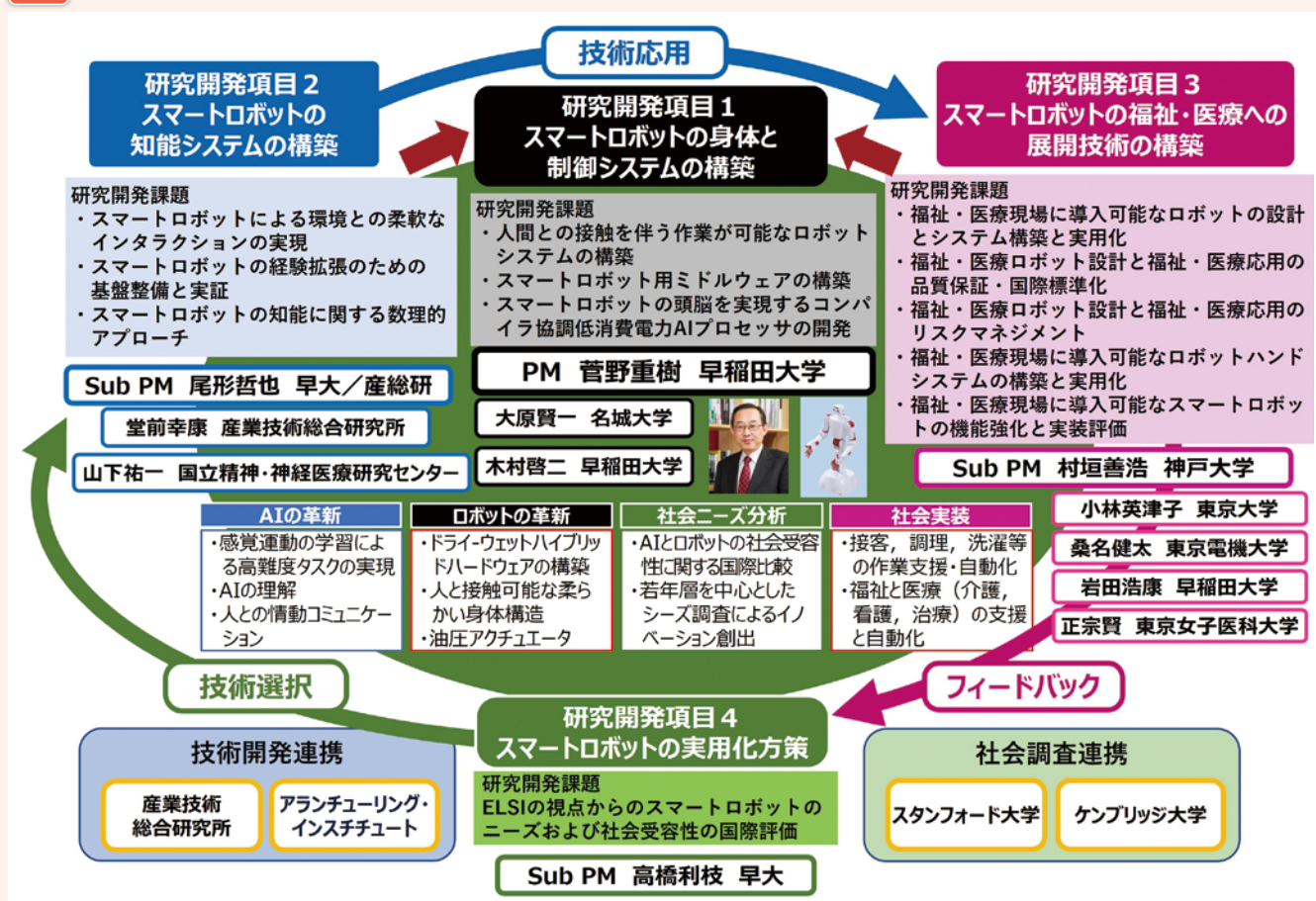
WENDYは胸部各関節に受動的な柔軟性を搭載し、世界で初めて卵をきれいに割ることに成功したロボットだ(左)。その後開発されたTWENDY-ONEは、受動柔軟性による人や環境への追従機能と人の体を支えられるパワーが強化され、家事や介護現場での活躍が想定されている(右)。



は大きな進化を遂げてきた一方、1台で異なる複数のタスクをこなすまでには至っていないのが実情だ。また、ロボットが真に「人と触れ合える」よ

うになるには、素材はもちろん、人に触れたときの力の入れ具合といった動作における「柔らかさ」「繊細さ」も求められる。

図2 プロジェクトの構成





これらの課題を解決し、2050年までにビジネスから家事、そして介護、看護、治療を自律的に行うロボットの実現に挑んでいるのが、早稲田大学理工学術院の菅野重樹教授だ。1973年、世界初の二足歩行可能な人間型ロボット「WABOT-1」が開発されたニュースを見て、ロボット研究を志したという。WABOT-1は、日本のロボット研究の創始者とも言える故・加藤一郎教授が早大在籍当時に開発したものだ。「人間に近いロボットを研究する加藤先生の下で学びたいと決意し、早大に進学しました。念願叶い、先生の研究室に入ることができました」と振り返る。

同大学の大学院へ進学した菅野さんは、加藤教授の下で国際科学技術博覧会にも出展した鍵盤楽器演奏ロボット「WABOT-2」開発チームに参加。その後も、世界初の卵を割れるロボットハンドを備えた「WENDY」、原始的な知能・感情を持つロボット「WAMOEBA」、そして07年には、人間共存ロボット「TWENDY-ONE」と数々のロボットを開発し、世に送り出してきた(図1)。40年以上にわたって、人間と関わるロボットの実現をテーマに研究を脈々と続けてきたことになる。

## 1台にあらゆる機能を搭載 カギはコミュニケーション力

そして現在、菅野さんはJSTのムーンショット型研究開発事業の目標3「一人に一台一生寄り添うスマートロボット」のプロジェクトマネージャーとして、新たなロボットの開発に取り組んでいる。この事業は、日本が抱える少子高齢化や地球温暖化、大規模災害といったさまざまな課題解決に向け、国内発の破壊的イノベーションを創出することで、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を行うというコンセプトの下、創設されたものだ。「社会」「環境」「経済」の3つの領域において、医療、環境、AIやロボットなど、9つの目標を掲げている。

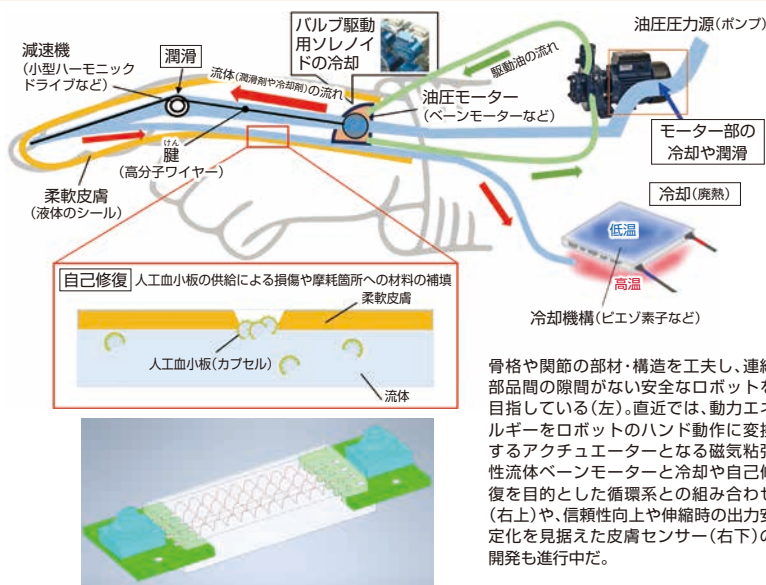
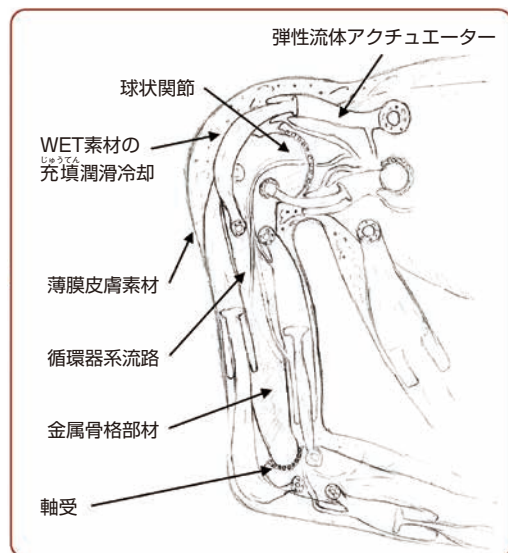
プロジェクトの究極の目的は、さまざまな現場で自律的に実行可能で、人間に寄り添いながら複数のタスクを行えるロボットの実現だ。例えば、福祉や介護の現場では多種多様な自動化ツールがあり、それを機能ごとにロボット化していくという手段も考えられる。「しかし、そうしたアプローチでは、ロボットの数が増えすぎてしまうことになります」とロボット社会に向けた問題を語る。

現在、菅野さんが開発に取り組んでいるのは「AIREC(AI-driven Robot for Embrace and Care)」というロボットである。これは、スマートフォンと同じように1台にあらゆる機能が備わった「スマートロボット」と言えるだろう。菅野さんは、21世紀に入りAIや制御機構が大きく進化している現状を前向きに捉えている。「これまでの技術と新たに開発したハードウェアを結びつけることで、これまでにないロボットを開発できると考えています。プロジェクトでは、単なる既存のバージョンアップに留まらない、全く新しいロボットの世界へとたどり着くことを目指しています」。

菅野さんはスマートロボットの実現に向け、AIによる高い環境適応性を実現するソフトロボティクスと人を含む実空間に柔軟に働きかける身体知と相互誘導型コミュニケーション知能の開発に取り組んでいる。また、実施体制として、研究開発項目ごとに、①スマートロボットの身体と制御システムの構築②スマートロボットの知能システムの構築③スマートロボットの福祉・医療への展開技術の構築④スマートロボットの実用化方策の4つを定めている(図2)。

図3 ドライ・ウェットハイブリッドスマートロボットの開発

### ロボットの腕のメカニズム



骨格や関節の部材・構造を工夫し、連結部品間の隙間がない安全なロボットを目指している(左)。直近では、動力エネルギーをロボットのハンド動作に変換するアクチュエーターとなる磁気粘弾性流体ペーンモーターと冷却や自己修復を目的とした循環系との組み合わせ(右上)や、信頼性向上や伸縮時の出力安定化を見据えた皮膚センサー(右下)の開発も進行中だ。

図4 人共存型ドライロボット「Dry-AIREC」



プロジェクトにおける学習や人のスキル獲得の研究開発のため開発されたDry-AIRECは、東京ロボティクス社(東京文京区)にハードウェアを特注。各関節には高分解能のトルクセンサーを内蔵、表面には人肌ゲル素材が用いられている(左)。動き自体も柔らかく、人が外から動かしてもきれいに追隨できる、世界最高水準の人共存型ドライロボットだ(右)。

### 「硬い・重い」を「柔らかく」 安全で自己修復機能も備える

スマートロボットの実現に向けた目標の1つが、これまでの「硬い」「重い」ロボットを安全な「柔らかい」ものへと進化させることだ。現在のロボットは耐久性などの観点から、表面や内部の制御機構に金属や強化プラスチックが用いられているが、硬いロボットでは人と密に触れ合う場面において危険な時がある。加えて人と触れ合うためには、状況に応じて力を加減できることも重要だ。そうした柔らかいロボットを実現するための取り組みの1つが、人の生体を模した新しい「ドライ・ウェットハイブリッドスマートロボット」の開発

である(図3)。

ドライとは従来のロボットのような、体や内部の制御機構が硬質な素材で組み上げられたものを指す。対して、ウェットとは人間や動物のような生体の「柔らかさ」を備える材質を示す。表皮や関節、筋肉などに該当するロボットの機構を、化学系・流体系ベースに移行させることで、柔らかさを実現する。また、油剤や冷却剤、潤滑剤といった体液を体に循環させることにより、人間や動物のような「自己修復機能」も備えることが特長だ。

このドライとウェットの長所、すなわち従来の機械の強みと生体の強みを兼ね備えたものが、ドライ・ウェットハイブリッドスマートロ

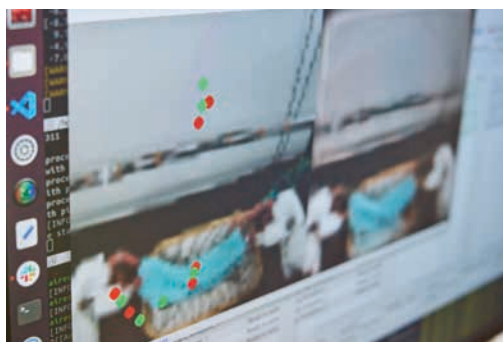
ボットである。例えば、人間の骨に該当する部位を金属素材で作れば、強い衝撃を受けてもほぼ折れない。「一方、生体のような循環系を持つので、不具合が生じた場合でも修復材を自身で供給するなど、自己修復が可能です」と菅野さんは説明する。このロボットの実現に向け、現在では、ロボットハンドのアクチュエーターに磁気粘弾性流体を取り入れた油圧モーターや自己修復用カプセルといった要素技術の開発を進めている。

### 「深層予測学習」を発展 現実との誤差を最小に

菅野さんらは、家事を支援するロボット知能を構築するために「深層予測学習」を発展させた。従来の機械学習では、大量のデータを用いて最適な予測モデルを構築し、ロボットが多様なタスクを行えるようにしてきた。しかし、現実的にはロボットが想定外の事象に遭遇する場面が多々あり、その全てに対応できる予測モデルを構築するのは困難である。「一方、深層予測学習は、視覚や触覚情報に基づいて予測し、現実との誤差を最小とるように次の動作を指令します。これにより、ロボットはタスクの内容や周囲の環境が変化しても柔軟に対応できます」と説明する。

現在はプロジェクトで開発した人共存型ドライロボット「Dry-AIREC」を基に、人間の手作業、特に家事を支援するロボット知能の実現に取り組んでいる(図4)。ロボットハンドの両腕を協調させる

図5 Dry-AIRECによる洗濯補助動作学習



独ミュンヘン工科大学と共同で、深層予測学習と注意機構を用いた双腕協調による洗濯物ハンドリング実験を行っている。干し方や位置が異なる洗濯物を認識し、腕の曲げ伸ばしや洗濯物をつかむ・持ち上げるなどの動作を実行する。



ことで、すでに洗濯物を干したり、衣類を畳んだりするといった家事タスクも実現している(図5)。しかし、衣類でも肌触りが異なる絹やウールの扱いは難しい。また、多種多様な食材を使ったさまざまな調理スキルの獲得、ゴミ処理や床拭きといった環境に適応した掃除法など、家事作業だけでも難しい課題は膨大であり、何でもできるロボットの実現は容易ではない。

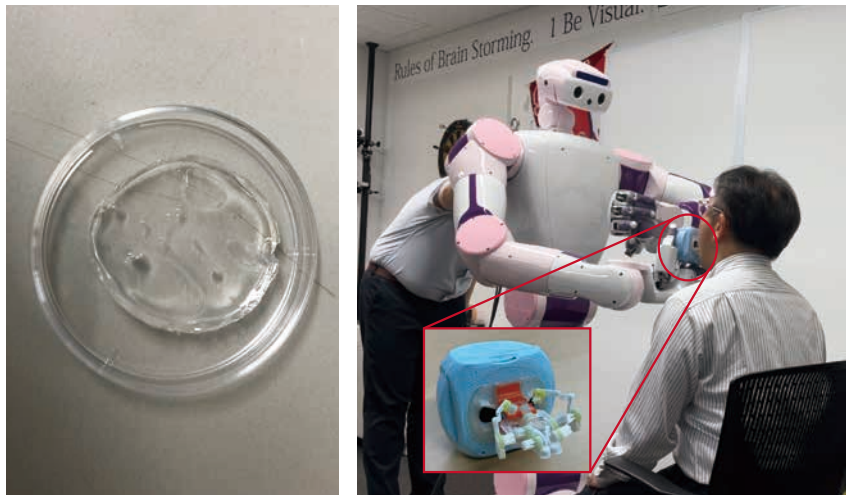
医療や介護の現場で、人を支援して作業を行うスマートロボットを実装するにあたり、人に決して危害を与えないよう、安全かつ優しく動作するようにしなければならない。そこで、人に寄り添いながら支えることを可能とする「バイオハイブリッド型ロボットスキン」の開発をはじめ、触診や手当などの診察を行える専用のロボットハンドの開発に向けた取り組みも進めている。これらの技術開発のほか、人間に物理的に触れる作業が行えるロボットシステムの構築に向けたさまざまな動作実験も実施されている(図6)。

### 「身体知の実現」が重要課題 ソフトとハードの統合不可欠

これまで説明してきた項目以外にも、ムーンショット型研究開発事業ではAI、ミドルウェア、ハードウェアの領域において、さまざまな研究開発が進行中だ。理想のスマートロボットを実現するためには、まだまだ解決すべき課題は山積みだと菅野さんは指摘する。他分野の研究と異なり、ロボットは1つイノベーションがあれば、一足飛びに次のステージに上げられるわけではないからだ。

菅野さんは重要な課題の1つに「身体知の実現」を挙げる。身体知とは、自転車をこぐなど、無意識に自分の体の特徴を生かした動きができる知能のことで、従来のAIでは扱いにくい対象とされてきた。「私はAIをソフトウェアから『ソフトウェア+ハー

図6 人に寄り添い、支えるロボットハンドスキンの開発



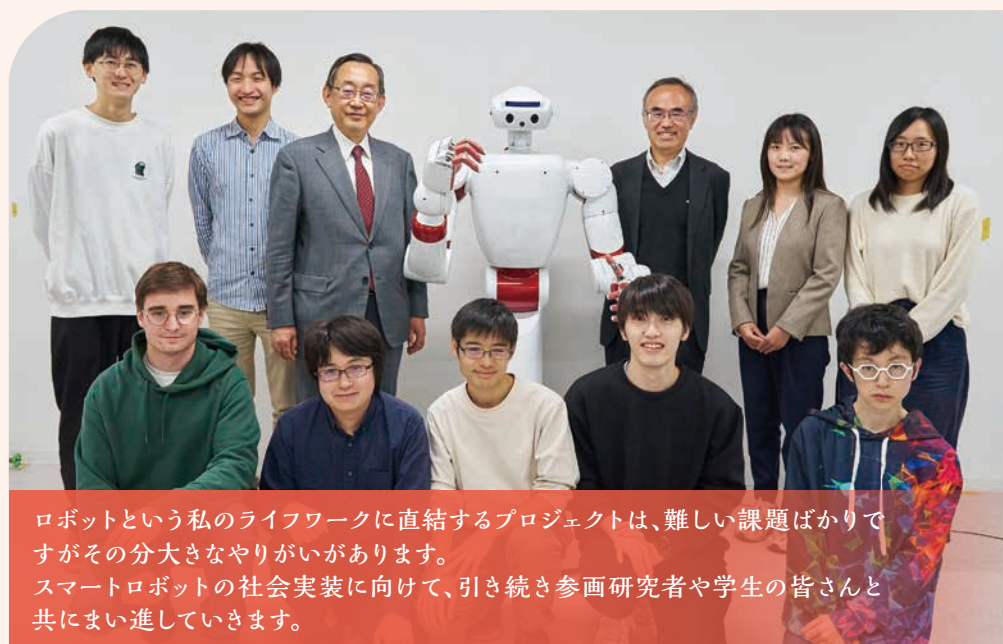
人の手に代わるロボットハンドスキンの実現に向けて、弾性や接着力、高い伸展性や自己修復性を持つゲル材料(左)の開発や、口腔ケアを想定したシナリオ作成と実機テストの実施(右)など、医療・介護現場での実際の使用を見据えた実証実験が展開されている。

ドウェア』として変革させていかなければならないと考えています。そうしたAIの革新や新たなスキルを獲得するためには、ハードウェアも進化していく必要があります。また、スマートロボットを実現するためには、単に新技術を開発すれば良いのではなく、それらを最適に組み合わせる「インテグレーション(統合)」も不可欠だという。

「インテグレーションによって組み合わせられたものができて、そ

こで次の課題が明らかになり、その改善に向け次のインテグレーションに取り組んでいかなければなりません。スマートロボットの開発はこの繰り返しなのです。菅野さんの強い意思の下には、プロジェクトの参画研究者はもちろんのこと、多くの学生たちも集う。立ちふさがる課題を1つ1つ解決しながら、スマートロボットの社会実装への道を着実に開こうとしている。

(TEXT: 佐宗秀海、PHOTO: 伊藤彰浩)



ロボットという私のライフワークに直結するプロジェクトは、難しい課題ばかりですがその分大きなやりがいがあります。スマートロボットの社会実装に向けて、引き続き参画研究者や学生の皆さんと共にまい進していきます。

## 石田 康博 *Ishida Yasuhiro*

理化学研究所 創発物性科学研究センター  
超分子機能化学部門  
創発生体関連ソフトマター研究チーム チームリーダー  
2017年よりCREST研究代表者

医療や生命科学などの多分野において、軽量かつ柔軟で生体に優しい「ソフトマテリアル」が注目されている。しかし、現在の人工ソフトマテリアルは、構成ユニットの配向方向がバラバラで制御できていないため、骨や筋肉などの天然ソフトマテリアルが示す優れた機能を発揮できていない。理化学研究所創発物性科学研究センターの石田康博チームリーダーらは、配向によって物理的性質が変化する異方性にフォーカスし、光を制御できるソフトマテリアル「動的フォトニック構造体」の開発とその応用に取り組んでいる。

特集

OVERVIEW

# 光を制御できる動的フォトニック構造体 異方性の追究でソフトマテリアルを革新

## 伸縮性や弾性を操れる魅力 「整った構造」が応用のカギ

液体と固体の中間の性質を持つ「ゲル」。高分子やコロイド粒子からなる網目構造に水などの液体を閉じ込め、半固体ないし固体の状態になったゼリー状の物質である。柔らかく、引っ張るとゴムのように伸び縮みする。「ゲルなどソフトマテリアル研究の魅力は、そうした伸縮性や弾性を自在に操れ、かつその結果を直接確かめられることです」と語るのは、理化学研究所創発物性科学研究センターの石田康博チームリーダーだ。

東京大学大学院工学系研究科で有機合成化学の研究に携わっていた石田さんは、2009年の理化学研究所

着任を機に、ソフトマテリアルの道に進んだ。「有機合成化学は合成の工程ごとに不純物の除去や反応の保護などをきめ細かく、かつ丁寧に行わなければなりません。その手法を応用すれば、ソフトマテリアル合成の可能性が大きく広がるのではないかと考えました」と話す。その研究の中で石田さんが着目したのが「異方性」だ。異方性とは、弾性や屈折率などの物理的特性が方向や回転によって変化する性質のことである。

近年、ソフトマテリアルはバイオ医療分野をはじめとする多分野で注目されており、異方性は人工臓器など生体組織への応用において避けては通れない。ソフトマテリアルの多くは構成ユニットがさまざまな方向を向いた構造を持つが、筋肉や骨な

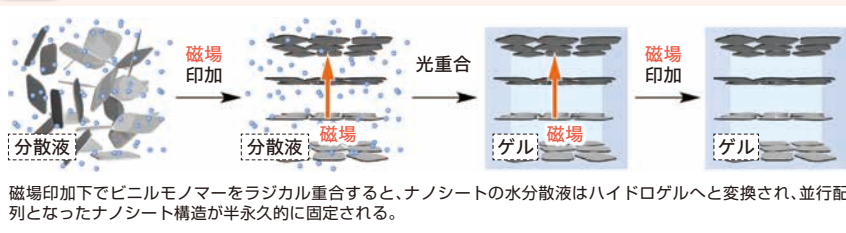
どは一軸配向に整っている。この配列によって、特定の方向への強度や伸縮性が高まる。「この異方性を合成の中で生み出していくことが1つのカギになるのではと考えました」と石田さんは研究の端緒を語る。

## 磁力を利用したユニット配列 ナノシート間距離の謎を検証

研究に際し、石田さんはまず構成ユニットの配列を検討した。これまでも材料内の配向を整える手法は試みられてきたが、いずれも表面だけを整列させたり、薄く細い物のみを並べたりするなど条件が限られたものがほとんどだった。「ソフトマテリアルの場合、合成や反応などで物に『触る』ことで配向情報を伝える必



図1 異方的な静電反発力を内包したハイドロゲル材料



要があります。しかしその過程で物の性質が変わってしまうため、直接触れることなく配列を指示できる方法を探しました」。

解決策として見いだしたのは「磁場」である。方位磁石が地磁気に沿って並ぶように、この世の物質は一般的に、磁場の中で特定の方向に配向する。この現象を利用すれば、分厚い材料の中まで構成ユニットの向きをそろえられるのではないかと思います。石田さんは、ゲルの内部構造を磁場で整えるアプローチで挑んだ。材料として選んだのは、酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )ナノシートだ。厚さが0.75ナノ(ナノは10億分の1)メートル、幅が数マイクロ(マイクロは100万分の1)メートルとアスペクト比の大きい2次元物質で、表面に高密度の負電荷を帯びている。

石田さんは、水中に分散した $\text{TiO}_2$ ナノシートに磁場を印加し、配向情報を伝達した。その結果、全てのシートを磁場に対して垂直に配向させることに成功した。加えて、シート同士が面を向き合うと、その間に巨大かつ異方的な静電反発力が現れることも明らかにした(図1)。このシートを水に分散させると、縦方向の荷重に耐えつつ、横方向には容易に変形する力学物性を示すハイドロゲルになる。研究の目標である材料の異方性を早くも見いだした格好だ。

ただ、疑問点も残った。「水中のナノシート同士の距離を計測してみると、シート自身の厚さの約70倍という等間隔になっていました。この構造は『ラメラ構造』と呼ばれるものですが、なぜ薄いシートが自ら距離を規定できるのかがわかりませんで

した」と石田さんは振り返る。検証を重ねた結果、ナノシートの距離が引力と斥力の拮抗によって決まることを突き止めた。さらに、材料合成時に使われるイオンを合成後に除くことで、シート間の距離が変化することも判明した。

### 素材の99パーセントが水分散液は鮮やかな構造色に

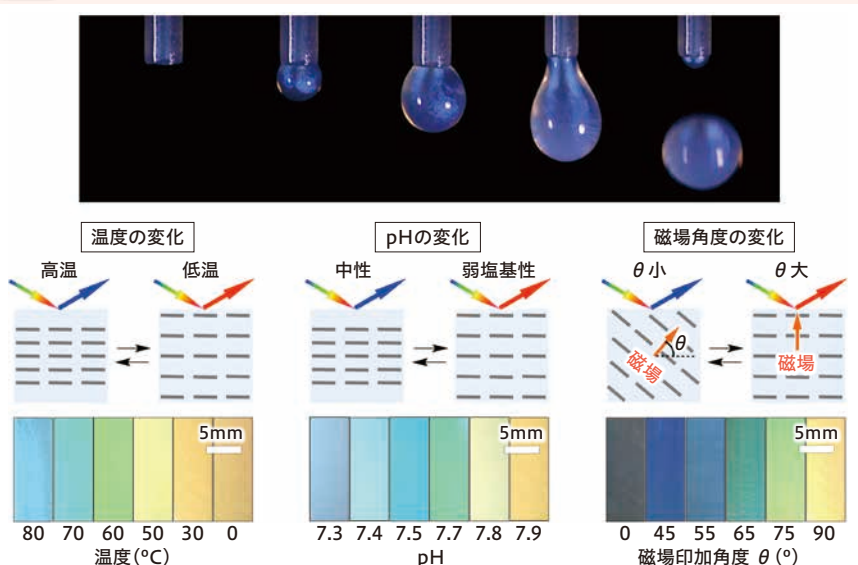
引力と斥力の拮抗により、ナノシートの距離が決まることを明らかにした成果をもとに、石田さんは「フォトニック結晶」の開発に成功した。フォトニック結晶は数百ナノメートル周期の高秩序構造を持つ構造体で、周期長に対応した波長の光を選択的に反射し、鮮やかな色を呈する。光の閉じ込めや取り出しなど、光を自在に操れることから、次世代

光学材料の有力候補に挙げられている。

フォトニック構造体が発色する色は「構造色」と呼ばれている。それを制御するのは、最新のナノテクノロジーをもってしても非常に難しい。しかし、自然界にはルリスズメダイやカメレオンなど自身の動的フォトニック構造体を使って体色を変える生き物が数多く存在している。「そこで、水中の $\text{TiO}_2$ ナノシートを制御する材料開発で得た知見を活用すれば、従来の結晶の概念を覆す『動的フォトニック構造体』ができるかもしれないと考えました」と石田さんは語る。

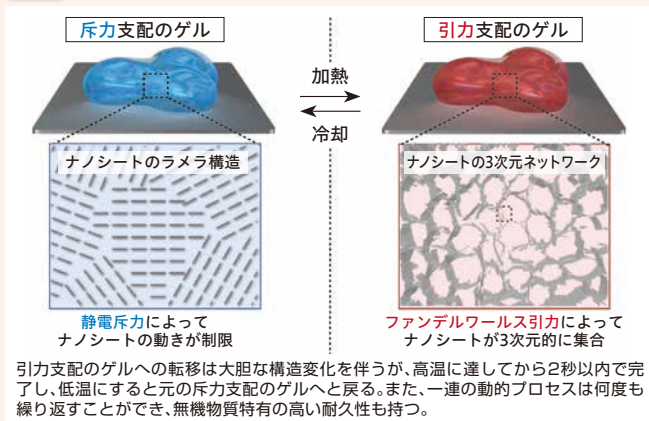
研究では、99パーセント以上の水と1パーセント未満の微量な $\text{TiO}_2$ ナノシートを用い、シート間の静電反発力を高めることで、数百ナノメートル周期で規則正しく配列させた。これにより、ほぼ水からなり、鮮やかな構造色を呈する動的フォトニック構造体を得ることに成功した。 $\text{TiO}_2$ ナノシートの水分散液中には、ナノシートと相互作用しなかった余剰イオンが含まれており、余剰イオンは静電反発力を著しく遮蔽する。そこで、この分散液を徹底的に脱イオン

図2 開発した動的フォトニック構造体と構造色の変化



余剰イオンを除去した後の $\text{TiO}_2$ ナノシートの水分散液(ナノシート濃度0.45パーセント)は、鮮やかな紫色の構造色を示す(上)。温度やpH、磁場に応じてナノシートの間隔や角度を変えることができ、これに伴い、可視光領域にわたって瞬時に構造色を変化させる(下)。

図3 刺激応答性ハイドロゲルの力学物性の変化



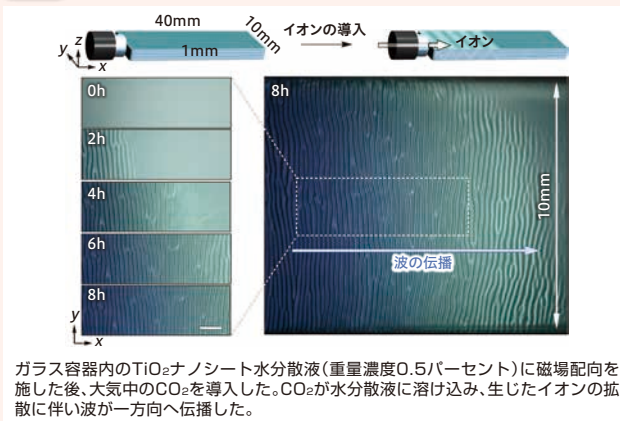
化したところ、分散液は鮮やかな構造色を示した(図2)。

完成した動的フォトニック構造体は、環境に応じシート角度や距離を瞬時に変え、可視光全域にわたって構造色を変化させることが可能だ。成果発表後、光を制御できる新材料として基礎・応用の双方の研究者や企業関係者から非常に大きな反響があった。この成果を携え、石田さんは17年にJSTのCREST「殆どが水よりなる動的フォトニック結晶の開発と応用」の採択を受け、研究を開始した。

## ウェーブのような美しい動き 大きな粒子の精密輸送も可能

CRESTでは、 $\text{TiO}_2$ ナノシートのさらなる構造制御に取り組んだ。ソフトマテリアルを生体組織へ組み込むには、柔軟性はもちろん、温度などの外部刺激に反応する刺激応答性が欠かせない。従来、高分子ポリマーなどの有機物質が付与してきたこの性質を、無機物の $\text{TiO}_2$ ナノシートと水だけで開発するべく試行錯誤した。「シート間の引力と斥力を上手く活用できないかと話し合う中で浮かんだテーマでした。斥力を極端に弱くしたり、強くしたりすればきっと構造が変わる。それを無機物と水だけでできたら、とても面白い研究になる確信がありました」と自信をのぞかせる。

図4 ナノシートの協働による波運動



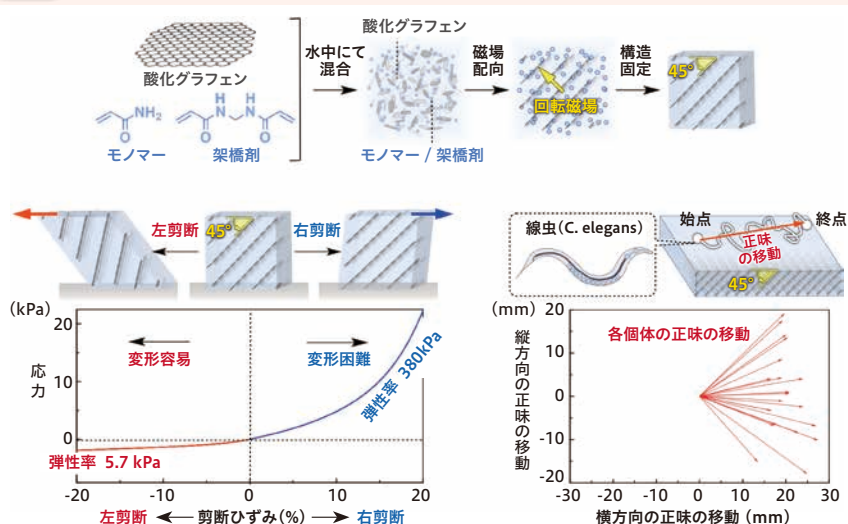
石田さんはまず、25度の室温下で水中のナノシート濃度を徐々に上げていった。すると、重量濃度8パーセント以上でシートの動きが強い静電斥力によって制限され、柔らかいゲル性質を形成することがわかった。この「斥力支配のゲル」の温度を90度まで上昇させていくと、55度付近で柔らかいゲルから硬いゲルへと転移した。55度付近のハイドロゲルを分析したところ、シート間の斥力が弱まっており、斥力支配のゲルから「引力支配のゲル」に転移したことが確認された。

さらに、引力支配のゲルは斥力支配のゲルに比べて約23倍も硬くなっており、外部の刺激にตอบสนองして力学物性を動的に変えていることも証明された(図3)。無機物製でありな

が柔軟性と刺激応答性を実現した材料として、ソフトマテリアル設計における新たな道を示した。また、ナノシートの研究では、構造色をきっかけとするユニークな発見ももたらされた。配向をそろえた無機ナノシート数十億枚が水中で協働する不思議な現象である。

フォトニック結晶を開発する中で、容器のキャップ側からナノシートに波が生じて、他のシートへ次々と伝播していく動きを見つけたという。「それは、まるでスタジアムで観客が行うウェーブのように規則的で美しい動きでした。当初はその原因がわからず、チームで延々と議論したことを覚えています」と石田さんは笑う。解明のヒントとなったのが、

図5 力学極性ゲルの合成と線虫の走行誘起



一方向にのみ変形する力学極性ゲル(上)は、右剪断を加えた場合、左剪断に比べて約67倍の弾性率を持つ(左下)。力学極性ゲルの上面で線虫の群れを40分間走行させたところ、全ての個体が右方向に走行した(右下)。



フォトニック構造体の機能だ。波の出現と伝播に合わせて、ナノシートの構造色が緑から青に変化していったのだ。

石田さんはこの色から、ナノシートの距離が縮まったことを特定し、開栓時に空気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が溶けてイオンがシート内に入っていたことを突き止めた。その後も、窒素など他の気体由来のイオンでの実験も重ね、シートが運動して集団的に動くことで、巨視的な波運動が起こることを確認した(図4)。この波運動を応用すれば、シートよりも大きな粒子などを精密機械のように輸送できる可能性がある。フォトニック構造体から広がった成果が、次代のソフトマテリアルへの扉を開き始めている。

## 「エントロピー増大」に逆らう左右非対称の極性ゲルを合成

石田さんの構造制御研究は、材料の概念を打ち破る成果も生み出している。それが「エントロピーの増大」に逆らう力学極性を示す材料の開発だ。世の中に存在する物質系は通常、秩序の高い状態から低い状態へ推移するエントロピー増大の法則に従う。「中には、力学極性を示し、一方向にしか電流を流さない整流ダイオードなどの例もあります。しかし、そうした『道具』はあるものの、『材料』については存在すら想定されていませんでした」と振り返る。

前人未踏の難題に対し、石田さんは酸化グラフェンのナノシートを磁場印加で斜めに配向し、水中に溶解させたポリマー分子を重合反応させることで「力学極性ゲル」を合成した。ゲルの内部は左右非対称となっており、左向き剪断には容易に変形する一方、右向き剪断には強固に抵抗する。つまり、ゲルそのものを非対称に振動させるだけでなく、ゲル上の物体を任意の方向へ移動させたり、反射したりすることが可能とな

る(図5)。

人工ソフトマテリアルにおいて初めてとなる特性を作ることになった石田さん。力学極性ゲルの開発は、今後のマイルストーンにもなると総括する。「次は、ナノシートの構造の階層性を究めていきたいです。1つ1つの階層がどんな役割を持ち、どのよう

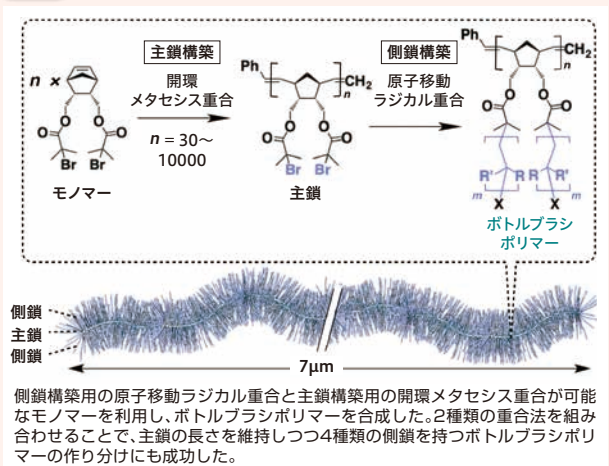
にすることができるのか。こうした工程の積み重ねが、新しい材料とその応用を実現していくのだと思います」とその可能性を力説する。

## 最長ポリマーもとに材料開発「見て触って理解」を大切に

22年、石田さんは新たにCREST「エントロピー増大に逆らう革新材料『力学極性ゲル』による物質・エネルギー・生物の整流化」の採択を受けた。現在進行中の課題に続くものとして、エントロピー増大に逆らうゲルの機能実証を進める予定だ。また、動的フォトニック構造体に不可欠なナノシートについても新たな展開を目指しているという。「既存のTiO<sub>2</sub>ナノシートに限らず、自分たちでナノシートを作ることが目標です。シート内の構造をさらに作り込むことで、マテリアルの特性を一段と磨くことができるかもしれません」。

この取り組みの第一歩として、石田さんは20年に史上最長のボトルブラシポリマーを発表した。水筒用のブラシ

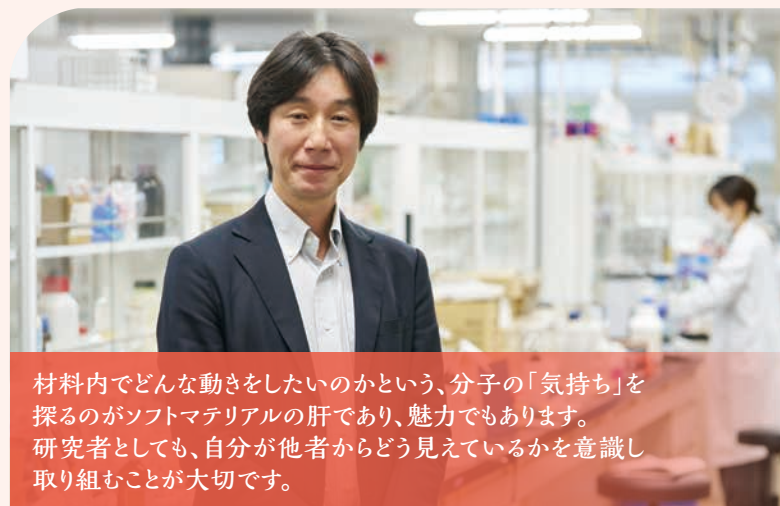
図6 史上最長のボトルブラシポリマー



スポンジに似たこのポリマーは、1本の主鎖と複数の側鎖から構成され、長さはこれまでの最長値の3.8倍に相当する7マイクロメートルに及び(図6)。将来的にはこのポリマーの長さを生かして、柔軟性と低摩擦性を兼ね備えた材料開発も視野に入れているという。

有機合成からソフトマテリアルの世界に飛び込み、数々の開発を手掛けてきた石田さん。「着任当初は上手くいくか不安もありましたが、チームが一体となり、オンリーワンの研究を続けられています。これからも『見て』『触って』『理解する』開発を大切にして、次なるステージに挑戦していきたいと思っています」と抱負を語っている。石田さんの今後の活躍からますます目が離せない。

(TEXT:横井まなみ、PHOTO:伊藤彰浩)



材料内でどんな動きをしたいのかという、分子の「気持ち」を探るのがソフトマテリアルの肝であり、魅力でもあります。研究者としても、自分が他者からどう見えているかを意識し取り組むことが大切です。

新事業  
紹介

# 革新的GX技術創出事業がスタート オールジャパン体制で研究開発を推進



全体統括

魚崎 浩平

Uosaki Kohei

北海道大学 名誉教授／物質・材料研究機構 名誉フェロー／JST 上席フェロー  
GteX プログラムディレクター／革新的GX技術推進委員会 委員長



蓄電池領域

桑畑 進

Kuwabata Susumu

大阪大学 大学院工学研究科 工学研究科長・教授  
GteX 蓄電池領域 プログラムオフィサー

## 3領域で社会実装に向けた 新技術シーズ創出

**魚崎** GteXの特色は、日本のアカデミアにおける基礎研究力のポテンシャルと蓄積を最大限に活用し、日本の経済成長とカーボンニュートラルの達成に貢献する研究開発を推進することにあります。具体的には「蓄電池」「水素」「バイオものづくり」の3領域を設定し、トップレベルの研究者が連携するチーム型研究体制で最終システムを意識した研究開発を進めます。

GteXでは、研究開発の目標に向けた進捗を確実なものとし、研究体制の新陳代謝を図り、早期に社会実装につなげるために「ステージゲート評価」を導入しました。これは3年度目、5年度目に研究の進捗状況の評価を行い、継続・中止・体制見直しなどを判断するものです。この段階で有望な技術シーズが創生されていれば、NEDO事業への展開や企業への技術移転を図ることで、速やかな社会実装につなげます。

こうした研究開発を効率的に展開するため、研究機器の

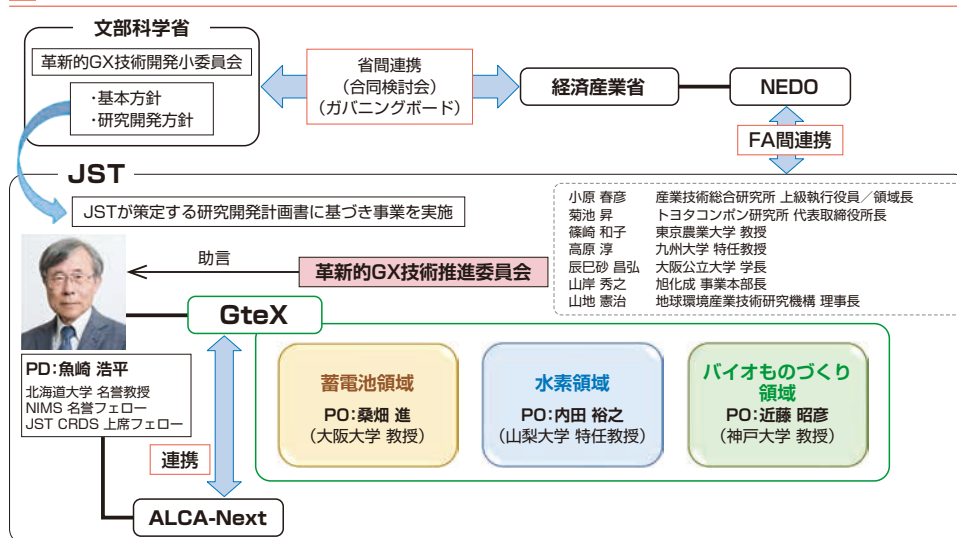
共用化、研究データの集約と利用、放射光設備やスーパーコンピュータなど大型設備の利用、社会実装に備えたオープン・クローズ戦略、知的財産マネジメントなども積極的に進めます。JSTでは2010年から「先進的炭素化技術開発(ALCA)」を推進してきました。その精神を受け継ぎ、ゲームチェンジングテクノロジーの創出を目的とする「ALCA-Next(先進的カーボンニュートラル技術開発)」とも連携し、若手研究者の参画・育成、国際連携などに努め、GteXがGX(グリーントランスフォーメー

ション)推進におけるグローバル・ネットワークの核になることを目指します。

## 電池の創製からDB構築まで

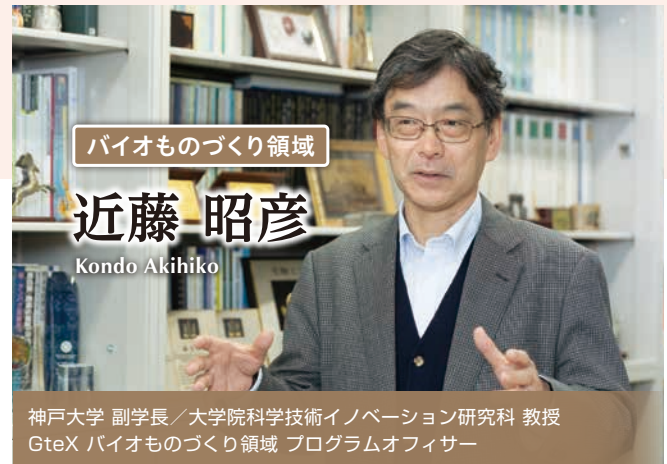
**桑畑** 次世代蓄電池の開発は、太陽光・風力発電の電力貯蔵、EV、モバイル機器の高性能化など、2050年カーボンニュートラル実現のための最重要技術の1つです。蓄電池領域では、世界最先端にある日本の技術蓄積をベースに、新たな学理の構築と産業界における技術課題の解消に

## 革新的GX技術創出事業(GteX)の運営体制





JSTは、日本の将来の経済成長と2050年カーボンニュートラルを達成する上で重要な技術領域である「蓄電池」「水素」「バイオものづくり」について、トップレベルの研究者によるチーム型研究体制で早期社会実装を目指す「革新的GX技術創出事業(GteX)」を開始した。魚崎浩平プログラムディレクターと3領域のプログラムオフィサーからのメッセージとともに、GteXの方針や展望を紹介する。



シームレスに取り組むチーム型開発を推進します。材料開発や電池の創製からトータルシステムとしての電池の性能評価まで一貫して行い、新電池系探索のためのデータベースも構築します。

今回の募集では、先進リチウムイオン電池の開発、高安全性を実現する電池、資源制約フリーを実現する新概念の電池、軽量・小型・大容量化を実現する電池、新電池探索のためのデータベース構築など、斬新なアイデアに基づくチーム型研究7件、次世代蓄電池の基盤技術を確認するための革新的要素技術研究6件を採択しました。

今後の展開では、早期の社会実装につながる成果をあげると共に、広い視野を持ち展開力のある人材の育成・輩出を目的として、産学双方の視点からチーム間連携を深めるためのアドバイスを行いつつ、成果の最大化を目指します。

### 製造・貯蔵・利用を早期に展開

**内田** 日本では、1970年代より太陽光利用による水素製造、燃料電池開発など約50年にわたる研究蓄積があります。水素領域では、こうした

先人たちの研究成果を生かし、再生可能エネルギーによる水素製造・貯蔵・利用にわたる先進技術の開発と産業界への早期展開を目指します。

具体的には、水電解・水素貯蔵・燃料電池をテーマとし、それぞれで高効率・高密度、高耐久、低コストを兼ね備えたシステムの構築を可能とするチーム型研究で、社会実装可能なスケール化の実現性、若手研究者の育成を主眼においた公募を実施しました。革新的要素技術研究では、独自性・革新性に加え、チーム型研究に合流して貢献できる可能性を重視しました。

この結果、チーム型研究は水電解、水素貯蔵、燃料電池で各1件、革新的要素技術研究では水電解関連1件、燃料電池関連2件、水素貯蔵関連2件の5件を採択しました。事業開始後は、領域アドバイザーと共に課題解決のアドバイス、共通課題に関するチーム間連携の促進など領域マネジメントに力を注ぎ、早期社会実装につなげていきたいと考えています。

### 微生物・植物の先端機能を追求

**近藤** 化学、繊維、食品飲料をはじめ幅広い産業で、バイオ技術による新

素材や持続可能な航空燃料の製造など革新的な技術の開発競争が世界的に進められています。バイオものづくり領域では、GXと経済成長を両立する革新的技術として、微生物、植物、生物間の相互作用、バイオものづくりのための評価技術・解析技術などを公募しました。

選考では、産業競争力の向上や温室効果ガスの削減につながる革新的な技術の創出、社会実装に向けたロードマップ、チーム型研究の推進体制とチーム間連携によるシナジーの可能性などを評価しました。情報科学によるデータ活用、ロボットによる多検体・自動処理技術の活用なども考慮しました。

この結果、微生物機能を開拓するDesign-Build-Test-Learn技術、先端的植物バイオものづくり基盤、微生物・植物の相互作用育種、超並列たんぱくプリンターシステム、高度オミクス計測・解析基盤のチーム型研究5件と革新的要素技術研究5件を採択しました。領域全体を「ワンチーム」と捉えてチーム間連携を深め、早期開発とともに人材輩出も視野において領域マネジメントを展開していきます。

(TEXT:森部信次, PHOTO:石原秀樹)

## 新たな数理モデルでAIを悪意から守る

社会との共存に向けた安全な開発・実装に貢献

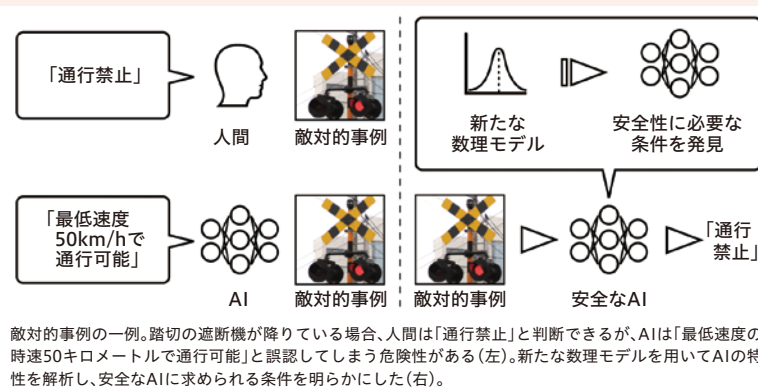
近年、画像診断やスマート農業など、人工知能(AI)の活用が広がり始めています。しかし、AI技術にはいくつかの課題があります。特に、悪意を持ってAIに誤った認識を引き起こさせる「敵対的事例」は、人命にも関わる大きな脅威です。例えば、自動運転車が遮断機の下りた踏切を「最低速度さえ守れば通行可能」と誤認識することで重大事故に至ってしまうかもしれません。敵対的事例への防御手法として、事例に対し正しい認識ができるようAIを訓練する「敵対的訓練」がありますが、そのメカニズムの理論的な理解は道半ばの状況でした。

東京大学大学院情報理工学系研究科の熊野創一郎大学院生、山崎俊彦教授らの研究グループは、AIの中核を担うニューラルネットワークの特性をマクロな視点で解析する「平均場理論」に着目。解析で見通せる範囲の制限をなくした新たな数理モデルを提案しました。これにより、ネットワーク全体の情報伝達が簡単な式で表現でき、敵対的訓練によるネットワークの変化が

解析可能となりました。

AI技術は、ニューラルネットワークの階層を増やした構造に基づく「深層学習」により、高い性能が発揮されます。一方で、新しい平均場理論を用いた解析の結果、敵対的訓練には、ネットワークの各層における「幅」を広くすることが重要であると見いだされました。

この研究で考案した平均場理論は、敵対的訓練の解析だけでなく、さまざまな深層学習手法の解析への応用が可能です。社会とAIの安全な共存に向けて、より進化したAI開発と実装への貢献が見込まれます。



## 話題

日本科学未来館

## ロボット、古い、地球環境 4つの新常設展示 社会問題を「自分ごと」として考える契機に

日本科学未来館は2023年11月22日にロボット、古い、地球環境をテーマに制作した、新しい常設展示を4つオープンしました。最新の科学的知見を通じて現在や未来の社会問題を体験でき、各展示の最後には他の来館者と意見を共有する機会を提供します。

「ハロー！ロボット」では、6つの最新ロボット研究の展示や未来館オリジナルパートナーロボット「ケバラン」など4種類のコミュニケーションロボットとのふれあいを通して、開発が進むロボットの現状を知ることができます。シナリオ体験型の「ナナイロクエストーリーロボットと生きる未来のものがたり」では、専用タブレットを使って、人とロボットが共に生活する未来のまち「ナナイロシティ」を探索し、ロボットとの共生について考えます。「古いパーク」では、目、耳、運動器、脳の老化を6つの体験型展示で疑似体験し、全ての人に訪れる「古い」とどのように付き合うかを探していきます。

地球環境をテーマにした「プラネタリー・クライシス これからもこの地球でくらすために」では、気候変動の影響に直面するフィジー共和国の暮らしを体感

できる大型映像シアターや、各国の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量を実感できる展示があり、自分の暮らしを見つめ直すことができます。国産木材で制作した展示は簡単に組み替えられる構造で、展示終了後には再利用可能です。また、製作中に発生した木材の切れ端から、テーブルの脚やパネルを作成するなど、展示を行う上で環境に負荷をかけない趣向が凝らされています。

社会問題を「自分ごと」として捉えるのは難しいことですが、未来館では各体験を通して私たちにできることを考える「きっかけづくり」を提供します。新しくなった未来館にぜひ足を運んでみてください。

### 「プラネタリー・クライシス」の展示空間



輸送時のCO<sub>2</sub>の排出量を削減し環境負荷を抑えるために、木材の調達には鳥取県、加工・組み立ては関西地域で行われた。また、展示棚に設置されたミニパネルは、製造過程で発生した木材の切れ端で作成した(写真中央)。

未来館のYouTubeでは、この展示が完成するまでを記録した映像を公開しており、制作の過程を知ることができる。



<https://www.youtube.com/watch?v=Wfeywbe7A7g>



## 環境に優しいSF<sub>4</sub>アセチレン合成に成功

### PFAS代替品へ、農薬開発などに貢献

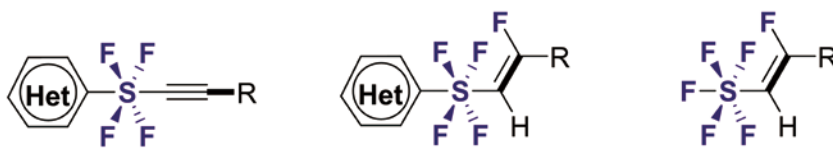
フッ素原子と炭素原子から構成される有機フッ素化合物「PFAS」は、耐薬品性、不燃性、防水性や撥油性などの特徴を持つことから、暮らしに関わる広範囲な製品で幅広く使用されています。しかし、高い安定性のため自然環境での分解が難しく、生物体内に蓄積されるなど環境や人体に有害な影響を及ぼすため、欧米を中心に製造・使用規制が進んでおり、PFASに代わる物質の需要が高まっています。

名古屋工業大学大学院工学研究科の柴田哲男教授らの研究グループは、6価の硫黄原子に4つのフッ素原子が結合したテトラフルオロスルファニル(SF<sub>4</sub>)化合物がPFASに代わる環境負荷の低い有機フッ素化合物になりうると考えました。強力な電子求引性と高い脂溶性を持つSF<sub>4</sub>部位は、有機化合物に組み込むことでPFASに類似した特性を示します。また炭素フッ素結合を持たず、分解が容易であることから、環境に優しいPFAS代替品として機能する可能性があります。これまで

SF<sub>4</sub>化合物の合成手法には限りがありましたが、銅触媒と芳香族ジアゾニウム塩を組み合わせたクロスカップリング反応を応用することで、50種類超のSF<sub>4</sub>アセチレン物質の合成に成功しました。反応に要する時間はわずか30分で、得られた化合物はより複雑なSF<sub>4</sub>化合物群への分子変換も可能です。

さらに柴田教授らは、この手法を基にSF<sub>4</sub>アセチレンからSF<sub>4</sub>-とSF<sub>5</sub>-フッ化ビニルの合成にも成功しています。PFASの規制に該当せず、フッ素高分子として幅広い用途が期待される一連の成果は、環境に優しい高分子材料や農薬の開発に貢献できます。今後は産業界との共同研究による革新的な製品の創出と、持続可能な社会の実現を目指していきます。

この手法で合成できるSF<sub>4</sub>アセチレン(左)、SF<sub>4</sub>-フッ化ビニル(中央)、SF<sub>5</sub>-フッ化ビニル(右)



SF<sub>4</sub>化合物およびSF<sub>5</sub>化合物は、PFASの定義である「完全にフッ素化されたメチル基、あるいはメチレン基」を持たない。環境に優しい代替品として期待できる。

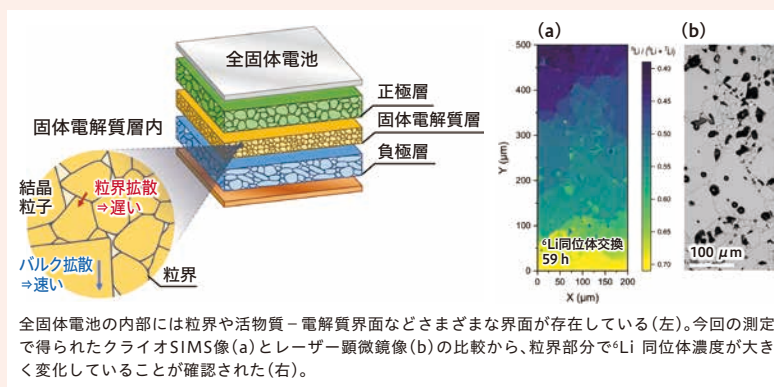
## リチウムイオン移動速度を可視化・定量化 エネルギー密度低下の要因を特定、全固体電池の高性能化に道

スマートフォンや電気自動車など、さまざまな電子機器の稼働を支える蓄電池は、私たちの暮らしには欠かせない存在です。その中で、電解液の代わりに固体の電解質を用いる「全固体電池」は、より安全かつ高いエネルギー密度を実現できる次世代蓄電池として注目されています。全固体電池は、リチウム(Li)イオンが固体電解質を通して正極・負極間を移動することで電気の流れが生まれます。しかし、電解質内の粒子同士の界面(粒界)でLiイオン移動により生じる抵抗がエネルギー密度低下の一因となっているため、ボトルネックとなるイオン移動障壁の界面を特定する手法の開発が求められていました。

物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センターの桑田直明主幹研究員らの研究グループは、クライオSIMS法を用いて、固体電解質内の粒界におけるLiイオン移動を可視化しました。同法はイオンを入射した試料の温度をマイナス100度以下まで冷却し、イオンの動きを凍結させたまま定性・定量を行う手法です。研究ではリチウムランタンチタン酸化物の多

結晶をモデル試料とし、試料端へ<sup>6</sup>Li同位体をイオン交換により導入。全体のLi濃度(<sup>6</sup>Li+<sup>7</sup>Li)に対する<sup>6</sup>Li同位体濃度を測定しました。その結果、粒界部分で<sup>6</sup>Li濃度が大きく変化している、つまり粒界部分でLiイオンの抵抗が生じていることがわかり、Liイオン移動を妨げている粒界を特定することができました。

この手法により、固体電解質内のLiイオンの移動速度の可視化・定量化に世界で初めて成功しました。他の電池材料の界面測定やイオン移動を妨げない界面の設計にも応用が可能で、将来的な全固体電池の高性能化への貢献が期待されます。



## 遠山 慧子 Toyama Satoko

東京大学 大学院工学系研究科  
総合研究機構 特任助教

### Profile

神奈川県出身。2023年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年より現職、ERATO「柴田超原子分解能電子顕微鏡プロジェクト」研究員。



娘の誕生6カ月記念での家族写真です。どんどん成長していく姿に驚き、喜びを分かち合う毎日です。

### Q1. 研究者を目指したきっかけは？

#### A1. 日常生活の「物」の科学に興味のカメラと共通する魅力

日常生活において何気なく存在する「物」の材料に、実は深遠な科学があるということに感銘を受け、材料工学の道に進みました。その後、研究室選択の際に興味のカメラの話になり「それなら、ここでの研究がきっと好きになる」と勧められたことが、現在の専門でもある電子顕微鏡との出会いです。

対象に可視光線を当てて拡大する光学顕微鏡に対し、電子顕微鏡はその名の通り電子線を用いて観察を行います。中でも、走査透過電子顕微鏡法(STEM)は、0.1ナノ(ナノは10億分の1)メートルスケールという非常に細かな観察が可能です。条件をこだわって詰めることで、今まで見えなかったものが見えてくる魅力が、光学カメラを用いた撮影とも共通していたこともあり、ますますSTEMの研究にのめり込んでいきました。

### Q2. STEMで何に取り組んでいる？

#### A2. 物質界面の電場・磁場を計測 構造内のひずみを局所的に解析

ERATO 柴田プロジェクトでは、STEMを用いて材料内の局所電磁場を高分解能で観察する手法の開発に取り組んでいます。現在、材料の特性向上を目指して、ナノスケール以下の電磁場や電荷分布制御が試みられています。しかし、そのようなごく小さな領域の測定は非常に難しく、これまでではより広い領域の平均的な情報からの類推しか行われていません

でした。原子構造と同時に界面局所の電磁場や電荷をナノスケール以下で計測できれば、半導体デバイスなどのものづくりに生かすことができます。

直近では、原子分解能磁場フリー電子顕微鏡(MARS)を用いて、窒化ガリウム系半導体のヘテロ接合界面に局在する2次元電子ガスの直接観察と定量化を達成しました。2次元電子ガスは半導体デバイスの重要な要素ですが、試料内部に存在するひずみの影響が大きく、STEMによる局所観察が困難でした。そこで、ひずみの影響を効果的に低減する手法開発に取り組み、解析を行いました。見たことがないものを新しい手法で見るという過程は困難も数多くありました。しかし、理論計算や間接的な測定でしかわからなかった2次元電子ガス分布を直接見る「目」を作り出したことは、電子顕微鏡開発やものづくりへの貢献はもちろん、自身にとっても大きな弾みになったと感じています。



MARSでの電磁場観察実験の様子。物質を原子レベルで観察するために、細かな調整が欠かせません。

### Q3. 今後の目標と後進へのエールを

#### A3. 新しい物理現象を見つけたい 自分で進める研究を楽しんで

人類の歴史において、望遠鏡や顕微鏡の発明は科学技術の発展に大きく寄与しました。今まで見えなかったものを観察できるようになることは、人類の世界が大きく広がるきっかけになります。今後は顕微鏡メーカーやデバイス開発の技術者とも連携しながら研究開発に励み、将来は、誰も見たことがない電磁場構造を捉えて、新しい物理現象の発見にも挑戦していきたいです。

出産を経験した現在は、公私問わず隙間時間を使った情報収集や試行錯誤を意識しています。研究を始めた当初は目的意識が曖昧で苦しいこともあると思

いますが、自分で進めてアウトプットしていく研究は、それまでのインプットが主体の勉強とは別次元の楽しさがあります。学生の皆さんには、成功も失敗も余さず吸収して、オンラインの研究を楽しんでいてほしいと願っています。

(TEXT:横井まなみ)

材料の電磁場や電荷を原子レベルで観察  
電子顕微鏡で新たな「目」を作り出す

