

## 1 研究成果

戦略的創造研究推進事業ERATO  
「川原万有情報網プロジェクト」

### 印刷技術で薄くてやわらかいモーターを実現

ロボットというと金属製の硬いボディを思い浮かべますが、生物に似た動きや、人にぶつかった場合の安全性などに注目して、やわらかな体を持つ「ソフトロボット」の研究が急速に進んでいます。ただし、これまでのソフトロボットにおいても、関節を曲げ伸ばしする駆動源は、電気モーターや圧縮空気ポンプなど金属製の重い部品で構成されており、その小型化、軽量化には多くの課題が残

されていました。東京大学大学院情報理工学系研究科の川原圭博准教授、新山龍馬講師らは、構成部品がすべてやわらかく軽量なモーターを印刷技術で作ることに成功しました。このモーターは電気や圧縮空気の代わりに熱を用います。低温で沸騰する液体が入ったプラスチックの袋を、導電インク技術で印刷した薄くてやわらかいヒーターで加熱することで、袋の内部で液体が気化・膨張し、モーターの駆動力を得る仕組みです。自

然冷却によってモーターは繰り返し動きます。また、配線やタッチセンサー、アンテナなどもモーターと一緒に印刷すれば、簡単に一体化できます。

作製したモーターは、大きさ80ミリメートル×25ミリメートル、重量が約3グラムと非常に軽量でありながら、実験では小指程度の曲げ力に相当する最大約0.1ニュートン・メートルの回転力を発生でき、最大動作角度は90度に達しました。

やわらかく薄い特徴に加えて、装置が安価で作業時間が短くて済むため、工業用途だけではなく家庭や学校教育現場など、さまざまな場所での活用が期待されます。



ソフトロボットにより植物のやわらかさと動きを再現した例。タッチセンサーとモーターの一体化によってハエトリソウを模したソフトロボットを作製した。

## 2 研究成果

イノベーションハブ構築支援事業  
採択課題「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ」  
戦略的創造研究推進事業CREST  
研究領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」  
研究課題「メカノ・サーマル機能化による多機能汎用熱電デバイスの開発」

### 機械学習により熱流を制御するナノ構造物質の最適設計に成功

材料の内部にナノスケールの構造を作製して、熱輸送を制御する技術が注目されています。これらの進展には熱輸送の計算科学の発展が望まれていましたが、最適な構造を設計する試みは行われていませんでした。

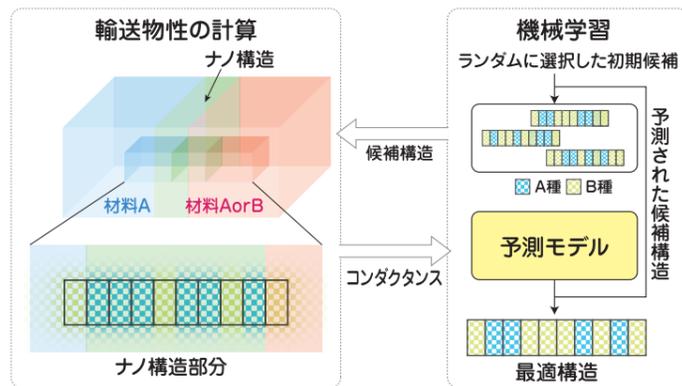
東京大学大学院工学系研究科の塩見淳一郎准教授と同大学院新領域創成科学研究科の津田宏治教授（ともに物質・材料研究機構（NIMS）情報統合型物質・材料研究拠点兼任）らは、熱抵抗を最大または最小にする最適なナノ構造を、従来の数パーセントの計算量で特定する計算手法を開発し、非直感的な新規ナノ構造を設計することに成功しました。

塩見准教授らが研究するナノ構造の熱輸送を計算する手法と、津田教授らが開発した「ベイズ最適化」という手法を使った物性の予測や結晶構造の最適化などを高速に行えるソフトウェア（COMBO）を組み合わせることによって、ナノ構造を最適化する新しい手法を

開発しました。シリコンとゲルマニウムから構成される材料を用いることで、すべての候補を計算せずに、数パーセントの数で計算するだけで最適構造を特定できることを明らかにしました。

この成果により、材料科学とデータ科学を融合したマテリアルズ・インフォマティクス（MI）が熱機能ナノ材料の開発に役立つことがわかりました。イノベーションハブ構築支援事業では、NIMS情報統合型物質・材料研究拠点に100名

を超える材料科学者とデータ科学者が集結し、データ駆動型の研究手法の開発に取り組んでいます。また、コンソーシアムを発足させ、MI分野のハブ拠点化をめざしています。さらに、CRESTなどの支援を活用した応用研究も行われています。今後、光や電子デバイスなどの放熱、熱遮蔽による機器保護、熱電変換素子の効率向上などへの応用が期待されます。



熱抵抗が最大または最小になるナノ構造を同定する計算手法の概略図。

## 3 研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST  
研究領域「ライフサイエンスの革新を目指した構造生命科学と先端的基盤技術」  
研究課題「小胞体恒常性維持機構：Redox、Ca<sup>2+</sup>、タンパク質品質管理のクロストーク」

### 細胞内でたんぱく質の不良品を分解するメカニズムを解明 神経変性疾患の原因解明に貢献

人間の体内では絶えずたんぱく質が作られています。細胞内では、正常なたんぱく質を作ると同時に、異常なたんぱく質を速やかに分解・除去する巧妙な品質管理が行われています。

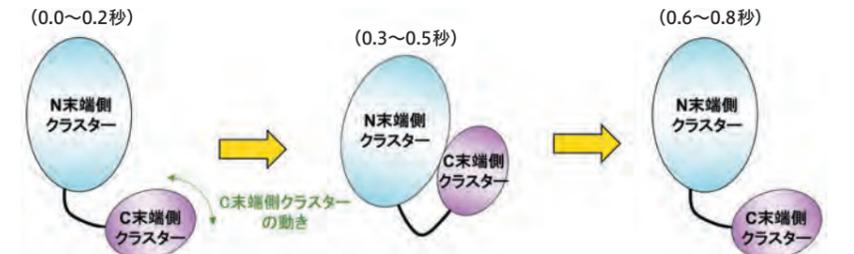
たんぱく質は、多くのアミノ酸が組み合わさった「複雑な立体構造」を持ち、正常な立体構造を形成するためには、システインというアミノ酸同士が結びつく「ジスルフィド結合」が非常に重要であると考えられています。一方で、まれに誤ったシステイン間でジスルフィド結合が形成され不良品の「構造異常たんぱく質」ができることがあります。これを分解する上で重要な働きをするのが、ERdj5と呼ばれる「ジスルフィド結合開裂酵素」です。

しかし、さまざまな大きさやジスルフィド結合の数を持つ構造異常たんぱく質に対して、どのように効率よくジスルフィド結合を還元するのかはわかっていま

せんでした。東北大学多元物質科学研究所の稲葉謙次教授らは、X線結晶構造解析という手法を用いて、ERdj5のクラスター間の配向が異なる2つの状態の構造を高分解能で決定しました。さらに、分子の動きを1分子レベルで観察できる高速原子間力顕微鏡（高速AFM）を用いて、C末端側クラスターが、N末端側クラスターに対して高速に動いている様子を世界で初めて観察しました。この結果から、

ERdj5のC末端側クラスターの動きが、不良品たんぱく質のジスルフィド結合を効率的に還元し、分解する重要な役割をしていることを明らかにしました。

このような神経変性疾患の主要な要因の1つとして、細胞内に不良品たんぱく質が過剰に蓄積することが挙げられますが、本研究がこれらの疾患に対する分子構造レベルでの原因解明につながると期待されています。



高速原子間力顕微鏡（高速AFM）により観察したERdj5のクラスターの動きの経時変化の模式図。0.0~0.2秒のイメージではC末端側クラスターが開き、0.3~0.5秒のイメージではC末端側クラスターが閉じ、0.6~0.8秒のイメージではC末端側クラスターがまた開く様子を表している。

## 4 研究成果

戦略的創造研究推進事業さきがけ  
研究領域「分子技術と新機能創出」  
研究課題「協同効果的にがん集積可能な超分子メタルフリー造影剤の開発」

### ナノ微粒子ががん組織だけに集まる仕組みを開発

副作用なしにがん治療を受けられることは、多くのがん患者や家族の願いです。正常細胞を傷つけることなく、がん細胞にのみ薬剤を運んで治療するドラッグデリバリーシステム（DDS）の研究が進んでいます。

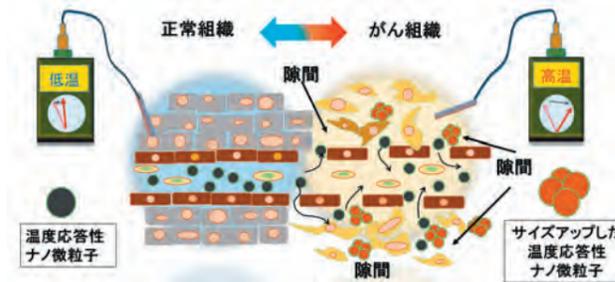
がん組織内に生じた数十～数百ナノメートルの隙間に、ちょうど合うナノ微粒子に薬剤をくっつけて運搬し、集積さ

せる方法がDDSの鍵として注目されています。しかし、多くのナノ微粒子は、がん細胞の活動で生じる隙間にサイズは合っているものの、がん組織だけでなく正常な組織にも広がってしまい副作用を発症するなどの問題がありました。

九州大学大学院薬学研究院の唐澤悟准教授（現・昭和薬科大学教授）らは、温度が変わると分子が集まって形やサ

イズが変化する「温度応答性ナノ微粒子」を使って、がん組織に分子を集めて留める方法を開発しました。このナノ微粒子は、ヒトの体温よりも少し高い温度域になると自ら集合して大きなサイズになります。蛍光分子を取り付けたナノ微粒子をがんを持つマウスへ投与したところ、がん細胞の温度に応じ、がん組織に集積する様子が蛍光を使って観察できました。

将来は、効率的に、すばやく微粒子をがん組織へ集める方法が可能になり、従来のDDSが抱えていた、がん細胞以外への副作用を解決するだけでなく、低い投与量で負担が少ない、新たながん診断や治療に役立つことが期待されます。



正常組織とがん組織との形態と温度の違い。開発された温度応答性ナノ微粒子（緑色の球）はがん組織の隙間に入り込んで大きくなり（茶色の球）、がんの中に留まるように設計された。