

JST news

未来をひらく科学技術

Feature

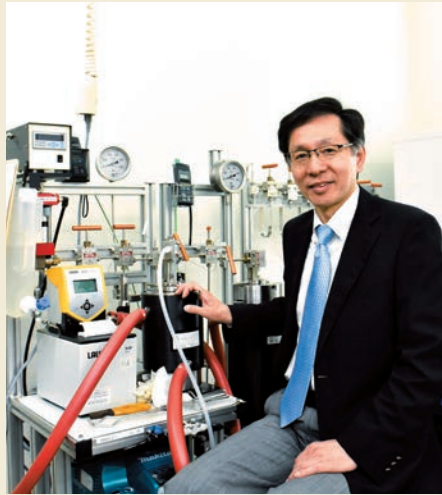
超低摩擦で 機械製品の革新に挑む

6

June
2017



3 Feature
**超低摩擦で
 機械製品の革新に挑む**
 環境・エネルギー技術としての「トライボロジー」



表紙写真

鎖状の有機化合物であるポリマーを、基板材料の表面にナノサイズのブラシ状に垂直に生やした「濃厚ポリマーブラシ」。開発者である京都大学化学研究所の辻井敬巨教授は、この新素材を機械製品の可動部に生じる摩擦の低減に応用する研究をしている。辻井さんが触れているのは、超高圧環境下で濃厚ポリマーブラシを生成する装置。

4 Feature 01
**摩擦の科学で支える
 日本のものづくり**

8 Feature 02
**柔らかいナノサイズのブラシで
 機械の摩擦を低減**

12 はかる 第1回
新たな分野を開く新たなモノサシ

14 NEWS & TOPICS
**世界初となるオンサイトアンモニア生産の実用化をめざす新会社を設立
 道路からインホイールモーターへの走行中ワイヤレス給電に成功** ほか

16 さきがける科学人 Vol.62
**「理解したい」という強い気持ちの研究の支えに
 平山 朋子**
 同志社大学理工学部 教授

経済・社会的インパクトを生む、未来社会価値の創造へのチャレンジ
 ~未来社会創造事業平成29年度公募テーマ決定~

JSTは平成29年度より「未来社会創造事業」を開始しました。本事業では、新しい試みに果敢に挑戦するハイリスク・ハイインパクトな研究開発の推進によって、経済・社会的にインパクトのある非連続なイノベーションを積極的に生み出す取り組みを推進します。研究開発の成果が経済・社会へのインパクトをもたらすためには、科学技術の難しい課題に果敢に挑戦し、社会や産業のニーズを的確に捉えることが重要です。そこで、「探索加速型」^{※1}では、「社会・産業が望む新たな価値」を募集したところ1,000件を超える提案が寄せられました。それらの提案や専門家などの議論を踏まえ、6つの重点公募テーマを決定しました。また、「大規模プロジェクト型」^{※2}は文部科学省にて3つの技術テーマが設定されました。これらのテーマのもとに、平成29年6月7日(水)から研究提案を募集します。困難であっても実現すれば大きな価値を生む新しいアイデアを含む提案が多く応募されることを期待します。公募の詳細、募集説明会のお申込はwebサイトをご覧ください。
<http://www.jst.go.jp/mirai>

未来社会創造事業 平成29年度公募テーマ

探索加速型

- 「超スマート社会の実現」領域(運営統括:前田 章)
 - 多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築
- 「持続可能な社会の実現」領域(運営統括:國枝 秀世)
 - 新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新
 - 労働人口減少を克服する“社会活動寿命”の延伸と人の生産性を高める“知”の拡張の実現
- 「世界一の安全・安心社会の実現」領域(運営統括:田中 建一)
 - ひとりひとりに届く危機対応ナビゲーターの構築
 - ヒューメインなサービスインダストリーの創出
- 「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域(運営統括:橋本 和仁)
 - 「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現

大規模プロジェクト型 (運営統括:林 善夫)

- 粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術
- エネルギー損失の革新的な低減化につながる高温超電導線材接合技術
- 自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術

※1「探索加速型」は、比較的少規模の研究プロジェクトを多数採択した上で、段階的によりよいプロジェクトには重点化、集中投資して研究開発を加速する仕組みによって研究開発を推進します。 ※2「大規模プロジェクト型」は、将来の基盤となる技術に係る研究開発に投資します。

**超低摩擦で
 機械製品の革新に挑む**
 環境・エネルギー技術としての
 「トライボロジー」

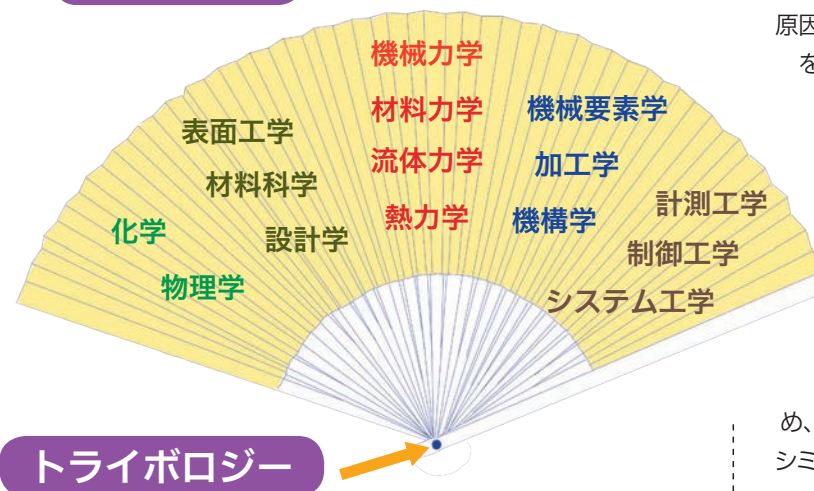
日常生活では、「摩擦」という言葉は「人間関係の摩擦」「経済摩擦」など「不一致から起こる不和」といった意味でよく用いられる。あるいは単にこすり合わせることを指し、物理的な意味での摩擦、接触面で働く力を意識することは少ないかもしれない。しかし、生活の中で物理的な摩擦は大きな役割を果たしている。道路を転ばずに歩けるのは、滑ることなく、かつ路面に引っかかり過ぎることもないように、道路と靴底の間に適切な摩擦が働くよう靴が作られているからだ。このように身の回りの摩擦を調節してうまく利用することは、安全で快適な生活に欠かせない。

摩擦の調節が特に重要となるのが、生活を支える家電製品や自動車など工業製品、工場機械、部品などの可動部分だ。摩擦が大きければ、その部分で熱が発生して、機械を動かすためのエネルギーが無



摩擦を利用した日用品やおもちゃなど。例えばテフロン加工のフライパンは、鉄製のものより材料との摩擦が小さく調理しやすい。滑り止め加工があると働く摩擦が大きくなり、しっかり物をつかんだり置いたりすることができる。快適で安全な生活のためには、目的に合った、大き過ぎず小さ過ぎない適度な摩擦が重要となる。

機械設計の扇



トライボロジー

トライボロジーは扱う対象が幅広いため、関連する学問領域も多岐にわたる。機械工学だけでなく、物理、化学、材料、電気などさまざまな分野の融合が必要となる。図は4ページからの記事に登場する東北大学大学院工学研究科の足立幸志教授によるもの。「トライボロジーは扇の要のような存在。扇では絵や大きさに目がいきますが、要がないと扇になりません。トライボロジーも目立たないけれど、なくてはならない重要な分野です」と説明する。

駄になってしまう。ガソリンで走る自動車では、燃料から得られるエネルギーの30～40パーセントが摩擦によって失われるとされる。

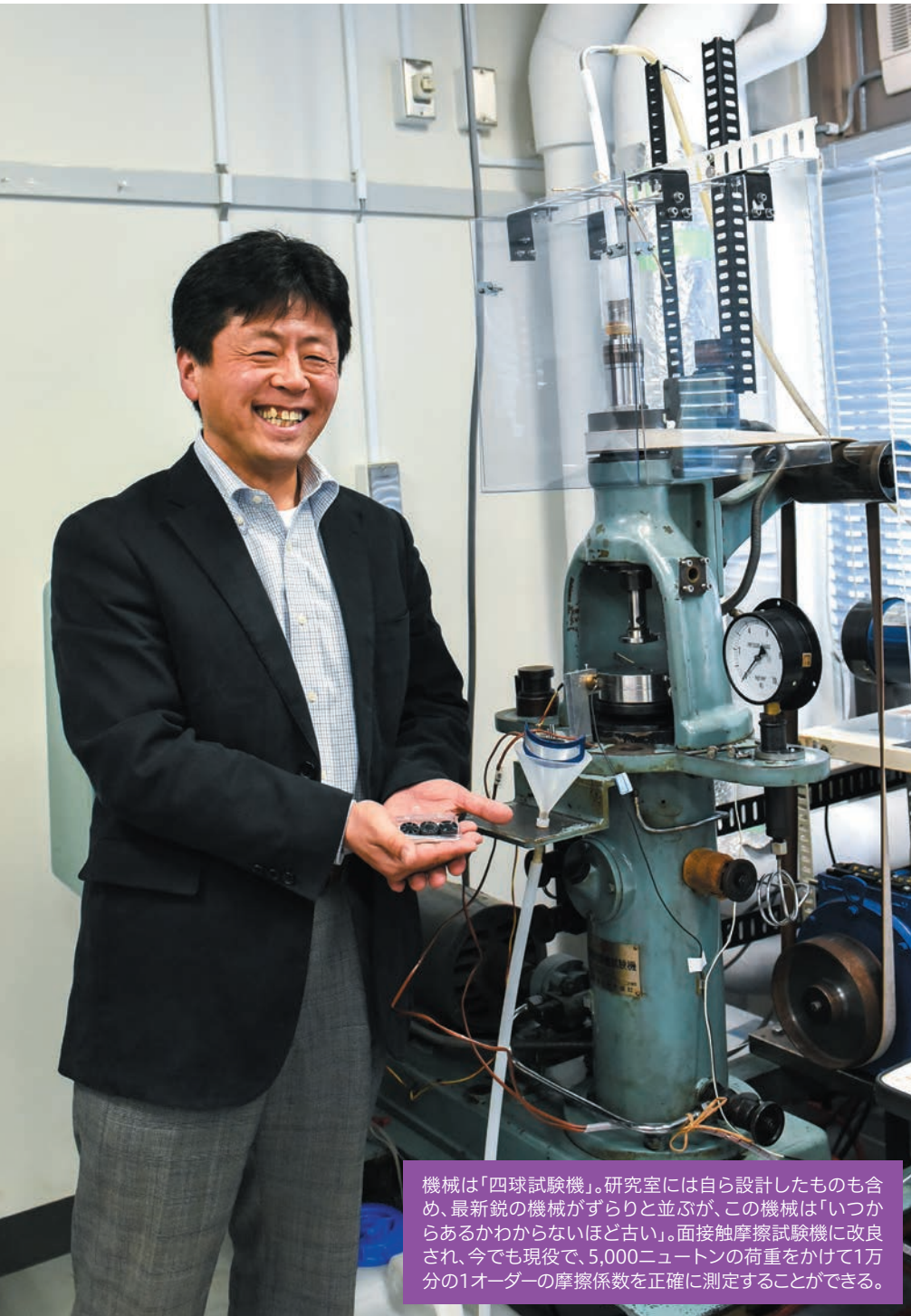
摩擦が繰り返されることで接触面が摩耗し、性能が劣化したり、故障したりすることも問題だ。機械・装置の故障や寿命の原因の75パーセントは摩擦に起因すると考えられている。摩擦を低減することは省エネルギー化につながり、摩耗のメカニズムを理解し低減することも、製品を永く使い、省資源化を図るという意味でグリーンイノベーションに寄与する。

接触面における摩擦や摩耗、潤滑などの現象を扱う学術領域を「トライボロジー」という。その対象は幅広く、原子・分子レベルでの現象の解明から機械システム、人工関節や補助人工心臓など医療機器、人工衛星、地震予知まで多岐にわたる。多くの要素が絡まり合う「複雑系」のため、十分な理解が進んでいなかったが、先端的な観測技術や、シミュレーション技術の進歩、そして材料科学の進展によって、この分野にナノ科学の光が当たり、メカニズムの理解が大きく進展しつつある。

ナノスケールで摩擦や摩耗を解明し、新たな発想で革新的な機械システムの構築をめざす東北大学大学院工学研究科の足立幸志教授と京都大学化学研究所の辻井敬巨教授の研究を紹介する。

摩擦の科学で支える 日本のものづくり

摩擦を制御する技術は省エネルギーや機械の長寿命化をめざすうえで重要だ。しかし、摩擦や摩耗の詳細なメカニズムには不明な部分も多く、これらを科学的に解明することで、効率的な摩擦制御技術や超低摩擦技術の開発が飛躍的に進むと期待される。摩擦面で起きている現象をナノレベルで解明しようとする、東北大学大学院工学研究科の足立幸志教授の研究を紹介する。



機械は「四球試験機」。研究室には自ら設計したものも含め、最新鋭の機械がずらりと並ぶが、この機械は「いつからあるかわからないほど古い」。面接触摩擦試験機に改良され、今でも現役で、5,000ニュートンの荷重をかけて1万分の1オーダーの摩擦係数を正確に測定することができる。

物と物の接触面で生じる摩擦や摩耗、それらの制御を表す潤滑を扱う学術・技術領域を「トライボロジー」という。東北大学大学院工学研究科の足立幸志教授はトライボロジー研究の重要性をこう話す。「摩擦は快適で安全な生活に必要な不可欠のもので、必ずしも小さければ良いというわけではありません。しかし、摩擦によるエネルギーの損失は大きいので、機械産業分野において摩擦の低減が実現できれば、エネルギー利用の飛躍的な高効率化が期待できます。また、機械機器の故障や寿命の75パーセントは摩擦に伴う摩耗が原因だと考えられます。低摩擦の実現は機械の信頼性を保証し、能力を性能通り発揮させることにもつながるのです」。

ものづくりの現場では、これまでも摩擦を制御する技術の開発が進められ、品質の高い製品がつくられてきた。これらの技術には、技術者の試行錯誤の積み重ねによる経験則に基づいた「詳細な原理は不明だが低摩擦状態が実現できている」という技術も多い。足立さんはその背

あだち こうし 足立 幸志

東北大学大学院工学研究科教授
東北大学機械系トライボベースト
デザイン研究センター長

1990年 東北大学大学院工学研究科修士課程修了、同年 東北大学工学部助手。98年 工学博士。2001年 東北大学大学院工学研究科助教授。准教授を経て11年より現職。02～03年 イギリス・ケンブリッジ大学客員研究員。10年 フランス国立中央理工科大学院リヨン校客員教授。04年 東北大学機械系トライボベーストデザイン研究センター長。13年よりCREST「エネルギー高効率利用のための相界面科学」研究代表者。

景を次のように説明する。「摩擦は材料の特性や形だけでなく、環境や潤滑剤、機械や部品にかかる荷重などさまざまな因子が複雑に絡み合って起こる現象で、ほんの少しの条件の変化で結果は大きく変わります。エンジンの中の摩擦は実際のエンジンの中でしか起きません。エンジンに似せた装置では再現できないので、原理・原則を見いだして理論的に設計することが難しいと考えられてきたのです」。

トライボロジーは、なぜその現象が起きるのかを解明する科学と、問題を解決する手法としての技術が結び付きにくい分野だったのだ。

この状況を打破しようと、足立さんは低摩擦状態の界面のナノスケールでの構造や、摩擦による化学反応(トライボ化学反応)、摩擦により自己形成される界面の発現機構などを解明しようとしている。それにより界面を制御する技術を開発し、超低摩擦を実現するナノ界面層を創成することが目標だ。

「なじみ」を解明し 科学と技術をつなぐ

「経験則で語ることの多かったトライボロ

ジーの技術に、科学の光を当てたいと考えています」。そう話す足立さんが鍵になると考えているのは、「なじみ」と呼ばれる現象だ。身の回りの多くの機械では、はじめのうちは摩擦が大きいですが、接触する面がこすり合わされていくと次第に摩擦が小さくなっていく。このような現象が「なじみ」で、表面が一度なじむと、摩擦が小さい状態が長く続くことが多い。しかし、詳しいメカニズムは謎のままだ。

「従来、『なじみ』は摩擦の初期に、こすることにより表面を滑らかにし、油膜がうまく機能するようにする過程だと説明されていました。表面の形状がつるつるになっていく過程というわけです。しかし、さまざまな実験結果から、単に形状が変化するだけではなく、自ら摩擦の小さい面を形成するような化学変化も起きていると考え、この現象の解明と新しい低摩擦の機械システムの設計をめざすことにしました。トライボロジーの科学と技術とを橋渡しするのが『なじみ』だと考えています」。

共同研究のメンバーである東北大学金属材料研究所の久保百司教授は計算化学シミュレーションを駆使し、摩擦やなじみが起こる際に物質の表面でどのような反

応が起きているのかを理論的に解明していく。九州大学工学研究院の杉村丈一教授は高純度の水素や酸素などの気体が摩擦に及ぼす効果について研究し、物質の周りの環境によるナノ界面の制御を行う。岐阜大学工学部の上坂裕之教授はプラズマ加工技術によって、特殊な機能を持った高精度の薄膜で低摩擦をめざす。それぞれの研究者が得意分野を生かしてチームとして連携することで、摩擦によって物質の表面でどのようなことが起こるのかをナノ(10億分の1)メートル単位で明らかにし、技術開発に生かしていくのだ。「実験や計算の結果をもとにして活発に意見交換し、お互いの研究のヒントを与え合い、摩擦の本質に迫るための刺激し合える関係をつくり上げています」。

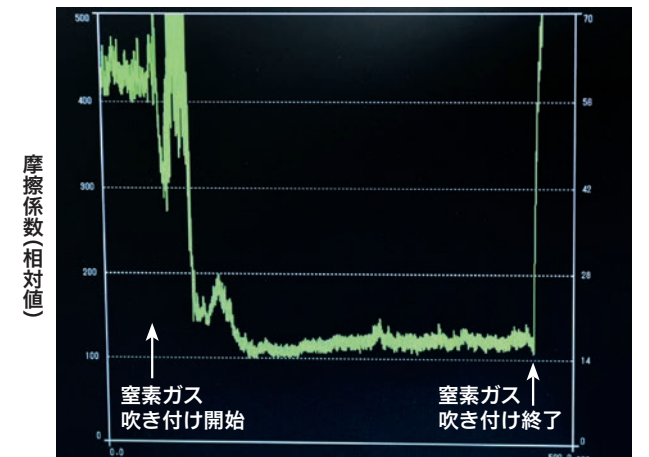
窒素ガス吹き付けで 低摩擦を実現

経験的に、摩擦は物質の表面の形状や接触する物質の流動性などによって小さくなることが知られている。そのため、工業



図 1	条件	摩擦係数(μ) (2,000~10,000回の平均)
①	<p>Si₃N₄ 大気 ← Si₃N₄</p>	0.83
②	<p>Si₃N₄ 大気 CNx ← Si₃N₄</p>	0.18
③	<p>Si₃N₄ 窒素ガス CNx ← Si₃N₄</p>	0.02

潤滑剤のない状態での摩擦特性を調べた実験結果。摩擦係数の値が低いほど摩擦が小さい。①は窒化ケイ素(Si₃N₄)のボールを固定し、窒化ケイ素のディスクを回転させて摩擦特性を調べたもの。②は回転させるディスクの表面を窒化炭素膜(CNx)で覆ったもので、摩擦係数は大幅に小さくなっている。③は②にさらに窒素ガスを吹き付けたもので、摩擦係数は1桁小さくなっている。



窒素ガスを吹き付ける実験の様子(上)とその時の摩擦係数を映し出したモニター(下)。縦軸は摩擦係数、横軸は秒単位での時間の経過を表す。窒素ガスを吹き付け始めると摩擦係数はすぐに下がり、窒素ガスの吹き付けを停止すると一気に上がる。

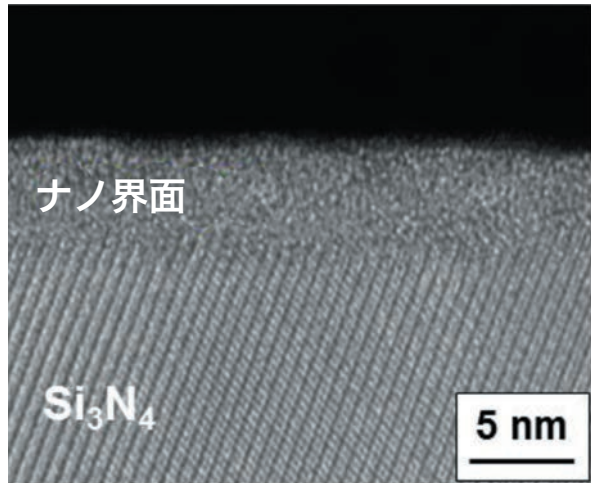


図 2
窒化ケイ素 (Si₃N₄) のボールを固定し、水素含有窒化炭素膜で覆ったディスクを回転させて摩擦した結果、潤滑剤のない状態で大気中でこすり続けても超低摩擦状態が保たれていた。このときの窒化ケイ素のボールの表面構造を透過型電子顕微鏡で観察したところ、表面に厚さ5ナノメートルの炭素成分を有するナノ界面が自己形成されていた。

的には機械などの摩擦を下げるために、物質と物質の接する境界面に潤滑油を差す方法が主流となっている。潤滑油の原料は原油だ。現在、産出されている原油の約2パーセントが潤滑油として使われる。

足立さんらは潤滑油を使わず、ガスや水を利用した新しい低摩擦の潤滑システムを開発するため、摩擦面の特性に注目した研究に力を注いでいる。潤滑油を使わずに摩擦が低減できれば、地球環境にかかる負荷が大きく減り、省エネルギー、省資源につながる。また、従来にない新しい概念の低摩擦システムが実現できる。

摩擦の特性、および摩擦面で何が起きているのかを調べるため、さまざまな基礎実験と理論シミュレーションを行ってきた。

摩擦や摩耗の実験法の中に、セラミックスや金属などのボールやリングとディスクをこすり合わせて摩擦の大きさを調べたり、摩擦表面を観察したりするものがある。足立さんらは、窒化ケイ素や炭素系硬質薄膜（窒化炭素膜）を用いて摩擦の特性を調べた。窒化ケイ素は高温下でも衝撃に強く、絶縁性が高いなどの優れた特性から、エンジンなどに欠かせないセラミック材料だ。窒化炭素膜は硬くて摩耗しにくいいため、実用化が期待されている。

潤滑剤のない状態での実験では、窒化ケイ素でできたボールとディスクをこすり合わせたときには摩擦は大きい（図1①）、ディスクの表面を窒化炭素膜で覆うと摩擦は小さくなる（図1②）。ボールとディスクの間に窒素ガスを吹き付けると、摩擦はさらに小さくなった（図1③、写真）。摩擦初期のなじみの条件を変えることで、その後の摩擦特性が変わることも見いだした。

界面での反応に水素が重要な役割

同じ素材を用い、ガスを吹き付けずに大気中で行った実験では、表面温度が20度程度ではそれほど小さいとはいえなかった摩擦が、温度を上げていくと70度程度までは摩擦が小さくなっていくなど、摩擦特性に温度が影響することを確認した。また、そのまま温度を上げていくと、湿度条件にもよるが80～100度で摩擦が一気に大きくなる現象が観察された。

低摩擦が実現しているときのボール表面を分析すると、ディスク側の炭素がところどころボールの摩擦面に移り、炭素構造の変化した膜をつくっていることがわかった。また、他の実験やシミュレーションの結果から、大気中の水分子に由来する水素原子 (H) やヒドロキシル基 (OH) が摩擦面末端の炭素に結合し、発生する水素が界面に影響を与えて低摩擦が実現していると推測できた。温度を上げていったときに摩擦が急激に大きくなるのは、大気中の水がその時点で蒸発し、摩擦面末端に結合するHやOHがなくなるためだと考えられる。

そこで、湿度にかかわらず摩擦面に水素を供給し続けられるよう、ディスクの窒化炭素膜に水素を結合させ（水素含有窒化炭素膜）、摩擦実験をしたところ、温度を上げ続けても摩擦が急激に大きくなることはなく、表面温度が150度に達しても摩擦が低い状態が持続した。実験後に窒化ケイ素のボールの摩擦面を分析、観察すると、表面に炭素が存在し、厚さ5ナノメートルの層（ナノ界面）が形成されていた（図2）。

これら一連の実験から、低摩擦が実現し持続するためには摩擦面での炭素系物質の存在、ナノ界面の形成、および摩擦面末端へのHやOHの結合などが必要だということが見いだされた。

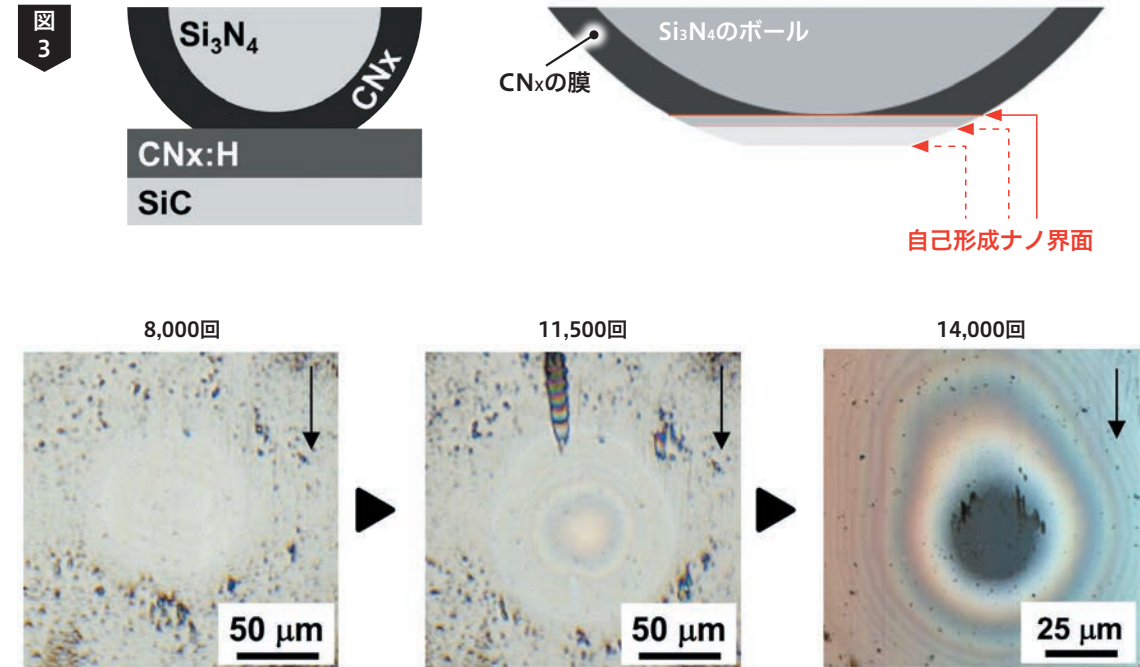
「なじみ」を利用したナノ界面の自己形成

「同様に水素含有窒化炭素膜を用いた別の実験で、表面温度100度の試験片を1,000回程度こすった後、さらに摩擦を続けながら29度まで温度を下げていったところ、摩擦は小さいまま安定していました。また、内部の窒化ケイ素に達するまでボールの摩耗が進んでも、摩擦面を分析すると全体に炭素が存在し、厚さ5ナノメートルのナノ界面が形成されていることがわかりました（図3）。摩擦初期から表面温度の低い試験片をこすり続けてもこのような安定した低摩擦はみられません。この結果は100度の時に形成されたナノ界面が低温時にも強固に維持されているのではなく、むしろなじみにより界面の性質が変わり、低温になっても低摩擦発現ナノ界面が自己形成され続けているとみるのが自然です」。

これまでの研究結果からナノ界面が形成されるためのいくつかの条件が明らかになり、水素を利用することで自己形成し続ける超低摩擦界面を実現できる可能性があることもわかった。「水素ガスは次世代のエネルギー源として注目されていますが、次世代の『潤滑剤』にもなり得ます。酸素と混ざること爆発的な反応を起こすので取り扱いには細心の注意を払う必要がありますが、安全に研究を進められる施設も完成したので、水素ガスを使った潤滑技術の開発を本格化させていきます」。

なじませ方と表面加工で水潤滑が可能に

足立さんは、水を用いたセラミックスの水潤滑システムの研究も進めている。水は潤滑油と比べると粘性が低いので、潤滑油の代わりに用いると摩擦をさらに低くできる可能性がある。反面、耐えられる荷重が小さいため、低い荷重で2つの物質がくっつき（焼き付き）、途端に摩擦が大きくなってしまふ。水潤滑では、低摩擦と



左の図のように、窒化ケイ素 (Si₃N₄) を窒化炭素膜 (CN_x) で覆ったボールを固定し、水素含有窒化炭素膜 (CN_x:H) で覆った炭化ケイ素 (SiC) のディスクを回転させて摩擦特性を調べた。上の右側の図は、摩耗が進んでいってもナノ界面が自己形成されていく様子を表したものの。下の画像は、それぞれ8,000回、11,500回、14,000回こすったときのボールの摩擦面を共焦点顕微鏡で観察したもの。ボールの表面がどんどん削られていき、14,000回では中央部に窒化ケイ素が見えているが、分析によりこの部分にも炭素が存在していることがわかった。

耐荷重性の両立が重要なのだ。

足立さんは、摩擦初期のなじみの手法を改善することで、この両立が可能であることを確かめた。さらに摩擦面の表面を加工して大小の凹凸をつけることで、摩擦特性が改善されることを見いだした。凹凸が摩擦により削られていく過程で表面に摩擦の低い界面が自己形成されるためだと考えられる。表面加工の形状を工夫することで、摩擦低減だけではなく耐荷重性の向上につながることも明らかになってきた（図4）。「水は人体や環境に害がありませんから、水潤滑は医療機器や食品などの幅広い産業への応用が期待されます。廃油の問題もなく排水をまた潤滑に利用できるなど非常に重要な技術で、ポンプなどにも使われています。現象の科学的な原理がわかっ

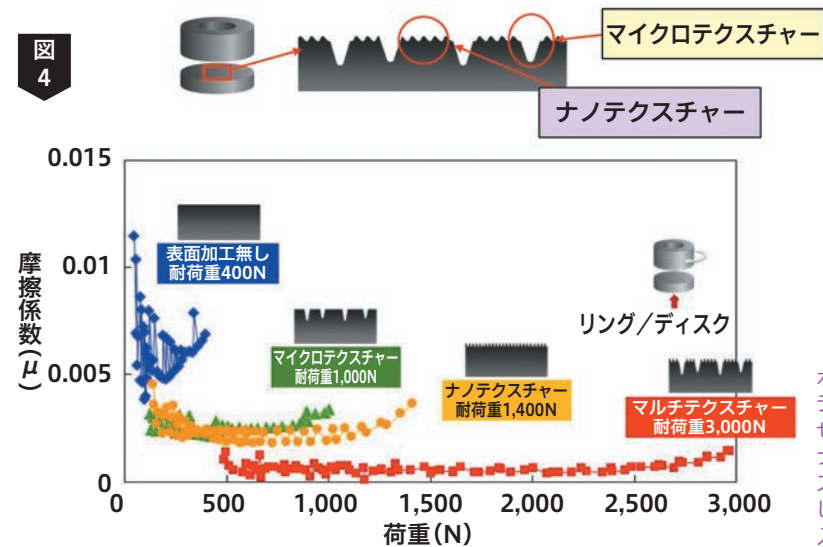
てきたこともあり、高い荷重でも低摩擦を常に維持できるような仕組みをつくりあげつつあります。水潤滑において非常に有効となる新しいコーティング材を開発するなど、研究が進んでいます」。

ものづくりにおけるトライボロジーの潜在力

摩擦の問題は、機械のエネルギー効率や生産性に大きく関係する。接触面での現象が解明され、潤滑油を使わずに超低摩擦な界面を自己形成する技術が広がれば、ランニングコストの低減や寿命の伸びにより、機械システムの省資源、省エネルギーへの貢献がさらに進むだろう。そのような期待感から、企業との共同研究も活発に行っている。

「見えない接触面に少し手を加えるだけで全く異なる結果になるのが摩擦の面白いところです。摩擦初期のなじみを制御して摩擦の中で自己形成、自己修復できる超低摩擦発現ナノ界面を創成するだけでなく、実際に機械が定期的に使われる状態においてナノ界面が自己形成し続けるようなシステムを設計したいと考えています。そうすれば摩耗による機械の故障を減らし、寿命を大きく伸ばすことができます。ある意味『寿命』という概念がなくなり、全く新しい発想の機械システムができるかもしれません。日本は世界的に、『壊れにくいものをつくる国』と評価されています。日本の知見や経験の蓄積を生かして日本のものづくりを支えるのはトライボロジーだと自負しています」。

足立さんの取り組みは摩擦に科学的な視点を持ち込み、経験則を科学的に解説して日本のものづくりを大きく前進させる潜在的な力を持つ。その効果は私たちの身の回りにまで及ぶだろう。安全で故障の心配なく安心して使え、エネルギー損失もない長寿命の機械——そんな「夢」の実現に向けた挑戦が続く。



水潤滑特性に表面加工が及ぼす影響を調べたもの。炭化ケイ素のディスクに表面加工し、水中で炭化ケイ素のリングとこすり合わせた。マイクロテクスチャーはマイクロメートルレベルの表面加工を、ナノテクスチャーはナノメートルレベルの表面加工を、マルチテクスチャーは両方のレベルの表面加工を施したもの。表面加工の施し方により摩擦係数や耐荷重が異なり、マルチテクスチャーを導入することで超低摩擦と耐荷重性が両立していることがわかる。

★ Feature 02

超低摩擦で機械製品の革新に挑む

柔らかいナノサイズのブラシで 機械の摩擦を低減

機械製品の燃費向上や省エネの鍵を握る技術として、急速に注目を集めている「トライボロジー」。摩擦や潤滑を取り扱う学問分野で、「摩擦学」と呼ばれることもある。そんなトライボロジーの視点で高分子化学の分野から機械製品の低摩擦化に挑戦し、「濃厚ポリマーブラシ」という新素材を開発しているのが、京都大学化学研究所の辻井敬亘教授だ。

つじい よしのぶ
辻井 敬亘

京都大学化学研究所教授

1988年 京都大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。89年 京都大学化学研究所に入所。2008年より現職。高分子薄膜の合成と物性、ポリマーブラシの基礎と応用、機能性高分子の材料設計を主に研究してきた。09年よりCREST「濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製」研究代表者。15年よりACCEL「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」研究代表者。



濃厚ポリマーブラシをつくる実験装置。辻井さんが手にしたバルブの下の黒い円筒の内部にある超高压環境下で濃厚ポリマーブラシが生成する。

材料の表面にブラシを作り 摩擦低減に挑む

自動車のエンジンやモーター、冷蔵庫やエアコンのコンプレッサー、スピーカーなど、生活に身近な機械製品には部品同士が組み合わさって動く「可動部」がある。ここで生じる摩擦が原因でエネルギーを損失していることが多い。

トライボロジーは、これまで機械工学分野を中心に研究開発が進められてきた。これに対し、高分子化学の視点から摩擦の低減に挑戦し、「濃厚ポリマーブラシ(CPB: Concentrated Polymer Brush)」を開発しているのが、京都大学化学研究所の辻井敬亘教授である。

「濃厚ポリマーブラシとは、鎖状の有機化合物であるポリマーを、基板材料の表面にブラシのように垂直に生やした高分子材料のことです(図1)。極めて高密度であることから、『濃厚』ポリマーブラシと呼んでいます」。

2つの濃厚ポリマーブラシを向き合わせても、ブラシの「毛」が相手のブラシに入り込まず、摩擦抵抗を格段に減らすことができる。

ブラシの毛に相当するポリマー1本1本は超微細で柔軟だ。しかも、これが一定の長さで高密度にびっしりと生えているので、基板材料の表面を覆う「薄膜」に近い。表面に特殊な膜を作ることで、材料の性質を劇的に変えようという発想が、辻井さんの研究の原点である。ポリマーの長さ、つまり薄膜の厚みは、用途に応じて100ナノメートル(ナノは10億分の1)から数マイクロメートル(マイクロは100万分の1)程度まで調整できる。

「濃厚ポリマーブラシの表面を触ってみる

と、非常にツルツルしていて、滑りがよいことがわかります。低摩擦性や高潤滑性に優れているからです。機械部品の可動部で摩擦する両方の面を濃厚ポリマーブラシで覆えば、摩擦を低減できるのではないかと考えました」と辻井さんは語る。

これまで機械工学分野では、機械部品の可動部の摩擦を低減するため、部品の表面を研磨するなど金属加工技術に頼ってきた部分が大きかった。濃厚ポリマーブラシを使えば、そういった高度な金属加工技術がほとんど不要となるため、製造コストの削減につながる。可動部の摩擦を低減できれば、省エネだけでなく、身近な家電製品の長寿命化、小型軽量化、騒音の低減などが期待される。

モノマーが縦方向に結合して ポリマーブラシに

濃厚ポリマーブラシはどのように作られるのだろうか。まず、金属やガラスなどの基板材料を、「シランカップリング剤」と呼ばれる薬剤で処理する。シランカップリング剤は、無機材料と有機材料を結合させる役割を果たす薬剤として、広く一般に使われているもので、無機材料と相性の良い加水分解基と、有機材料と反応しやすい有機

官能基との両方の手がついている。そのため、片方の手で金属やガラスなどの無機材料と結合し、もう片方の手でポリマーなどの有機材料と結合することができる。

シランカップリング剤を反応させた基板材料の上に、ポリマーの原料となるモノマーを投入すると、シランカップリング剤の各点にモノマーがそれぞれ結合する。これらの点を始点に、さらに新たなモノマーがどんどん化学結合し、縦方向に伸びてポリマーブラシが形成されていく(図3)。

5,000気圧の高圧下で実現

モノマーとは、ポリマーを構成する基本的な分子のことで、モノマーが多数結合した高分子がポリマーである。モノマー同士が化学結合し、ポリマーを形成することを特に「重合」という。

「ポリマーの長さが揃っていること、高密度であることが濃厚ポリマーブラシの特長で、そのための重合方法として、『リビングラジカル重合』を採用しています。従来用いられてきたラジカル重合という方法では、成長するポリマー1本1本の反応やその停止がまちまちで、長さが異なったポリマーができてしまいます。これに対しリビ

ングラジカル重合では、ポリマー1本1本がどれも同じように成長するので、長さの揃ったポリマーができるのです」。

従来の方法では、ポリマーの密度は濃厚ポリマーの10分の1程度だった。しかも、ポリマーの長さを揃えるといった高分子の構造を精密に制御することが困難で、1本1本のポリマーは糸まり状に丸まっていた。リビングラジカル重合では、ポリマーの長さを揃えるだけでなく、モノマーをあらかじめうまく設計することで途中で枝分かれさせ、あるポリマーの先に別の種類のポリマーを化学結合させるといった精密な制御が可能なのだという。

さまざまな材料の表面に高密度で成長させることもできる。密度が高い濃厚ポリマーブラシは、溶媒がポリマーの間に入り込もうとする浸透圧が大きく、ポリマーはほぼピンと伸びた状態になる。

「さらに、高圧下で重合することによってブラシを飛躍的に長くできることが、理論的に明らかになりました。そこで、5,000気圧という高圧下でリビングラジカル重合を試みた結果、現在のような高密度でマイクロメートルにも達する『厚い』膜を作製することに成功したのです」。

リビングラジカル重合により、しっかり



まつかわ きみひろ
松川 公洋

JST ACCELプログラムマネージャー

1983年 大阪府立大学大学院工学研究科博士課程修了。84年 大阪市立工業研究所に入所。企業との共同研究を幅広く実施し、企業の技術支援、産学連携プロジェクトの経験を豊富に持つ。2015年よりACCELプログラムマネージャー。

図1

濃厚ポリマーブラシのイメージ。実際の長さ(図では天地)は、100ナノメートル(ナノは10億分の1)~数マイクロメートル(マイクロは100万分の1)。

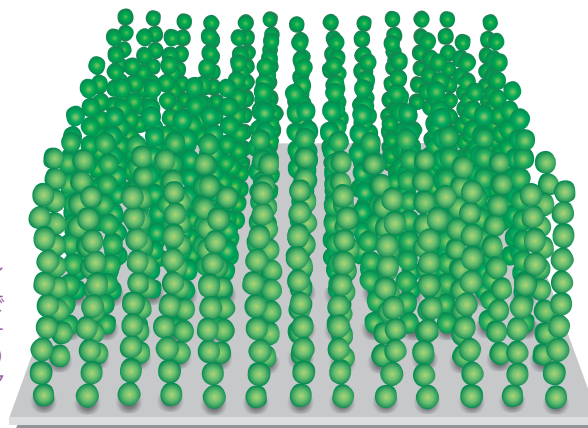
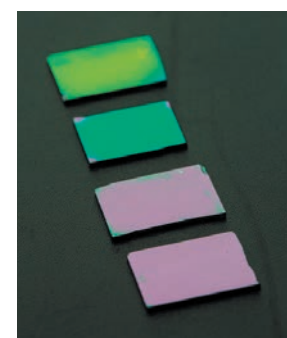


図2

表面の濃厚ポリマーブラシの厚みを変化させたサンプル。濃厚ポリマーブラシ自体には色がついていないが、膜上下面での光の多重反射(干渉)の影響によって、その厚みに応じてさまざまな色に見える。



と構造のわかった物質や表面、界面を作れるようになり、一定の長さで、しかも真っ直ぐ伸びているのに柔らかい濃厚ポリマーブラシを実現できた。

強靱性と低摩擦性を兼ね備える

辻井さんが研究開発を進めるACCELは、戦略的創造研究推進事業（CREST、さきがけ、ERATOなど）で得られた研究成果を発展させて、社会的・経済的な有効性を検証し、企業やベンチャーなどに研究開発の流れをつなげるプログラムである。

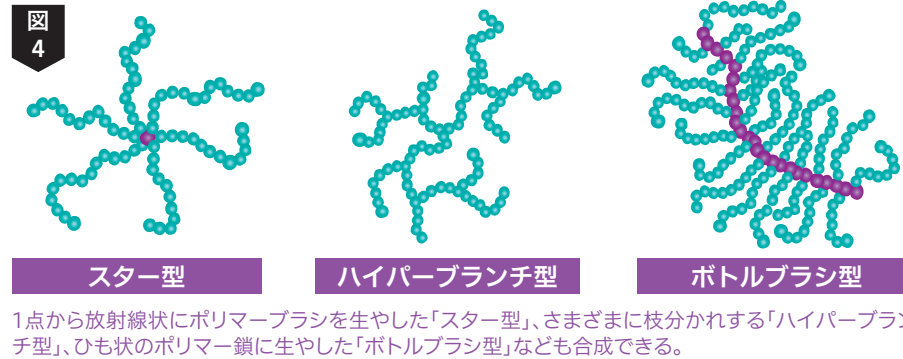
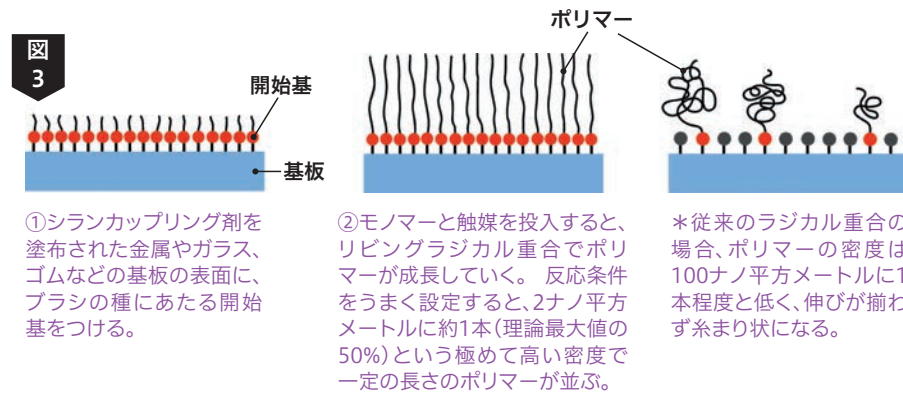
低摩擦性や高い潤滑性や弾性、さらには高い生体適合性など、濃厚ポリマーブラシの優れた特性を実社会でも応用するための研究開発にCRESTでは取り組んだ。「生体適合性を生かしたバイオセンサーや、高潤滑性を生かした蓄電池の電解質材料の研究開発に挑戦したところ、実用化に向けて耐久性を上げるためには、厚みを上げる必要があることに気づきました。CRESTでの最大の成果は、濃厚ポリマーブラシを『階層化』するという技術を確認できたこと」と辻井さんは振り返る。

階層化とは、ナノメートルサイズのポリマーブラシを階層構造にして積み上げていくことで、マクロサイズの構造体を構築する技術である。何層にも重ねていくことで厚みを上げられ、製造工程もより簡便になる。

当初開発した濃厚ポリマーブラシの膜は100ナノメートル程度で、実際の応用で大きな異物が入り込めば、剥がれてしまう可能性があった。そこで、膜厚を厚くして同等の特性を生み出すことを考えた。ブラシ自体を長くするだけでなく、ひも状のポリマー鎖に生やした「ポトルブラシ型」や、1点から放射線状に生やした「スター型」でも、濃厚ポリマーブラシと同様の特性を発揮できることを確かめた（図4）。

「用途に応じてこれらを使い分けていくことで、より応用範囲が広がると考えています」と未来を見据える。

CRESTと並行して、文部科学省が主導する大学発グリーンイノベーション創出事業「グリーン・ネットワーク・オブ・エク



1点から放射線状にポリマーブラシを生やした「スター型」、さまざまに枝分かれする「ハイパーブランチ型」、ひも状のポリマー鎖に生やした「ポトルブラシ型」なども合成できる。

セレンス（GRENE）「グリーントライボイノベーション・ネットワーク（代表研究者：東北大学 栗原和枝教授）」では、実用化の課題として、機械製品の低摩擦化が設定され、ブラシの実用可能性が向上した。「GRENEで初めて機械工学の研究者との共同研究が始まりました。GRENEとCRESTの研究成果が、ACCELにつながったのです」。

研究者と、開発や事業化・製品化の経験を持つプログラムマネージャー（PM）との二人三脚の体制がACCELの特色である。プログラムマネージャーは、研究内容を深く理解した上で、その研究成果が社会の課題をどのように解決するかを示し、特許など知的財産の獲得・活用、研究成果の企業へのスムーズな橋渡しなど、事業化への道を切り開く役割を担っている。

辻井さんは「ソフト&レジリエント・トライボ（SRT）」というコンセプトをACCELで掲げ、金属に比べて柔らかいながらも、強靱性（レジリエンシー）と低摩擦性を兼ね備えた濃厚ポリマーブラシの特長を実社会に生かそうとしている（図5）。

プログラムマネージャーには、研究成果の実用化に豊富な知識と経験を持つ松川公洋さんを迎え、2015年から二人三脚がスタートした。松川さんはこう説明する。「レジリエントには、同じ強靱という意味の『ストロング』に比べて、柔軟性が高い、



復元力や耐久力があるといったニュアンスが含まれています。実際の機械に適用できるシステムを検証し、機械製品の長寿命化、省エネ化の実現をめざしているのです。

材料化学、機械工学、計算科学の知恵で実用化をめざす

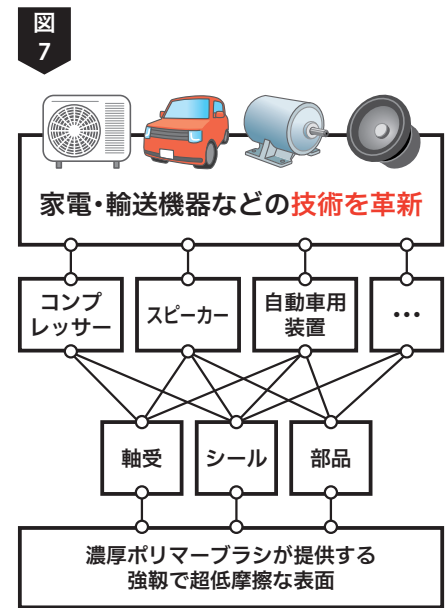
プロジェクトには、辻井さんを中心に濃厚ポリマーブラシの合成を担う京都大学に加え、摩擦や潤滑に関する機械計測をする横浜国立大学（中野健教授グループ）、電解質にもなる濃厚ポリマーブラシの効果を使って安全・安心な電池をめざす鶴岡工業高等専門学校（佐藤貴哉教授グループ）など、12の研究機関がそれぞれの強みを持ち寄り、研究開発に当たっている。

また、実用化に向けた検証では、コンピューター・シミュレーションによる機械部品上での特性の解析や、ノイズに埋もれたデータの中から真のシグナルを抽出してメカニズムの深い理解につなげるデータマイニングなど、計算科学を専門とする研究者も複数参画している。幅広い分野の研究者が集まり、知恵を出しあうことで、機械製品の低摩擦化に取り組んでいる。

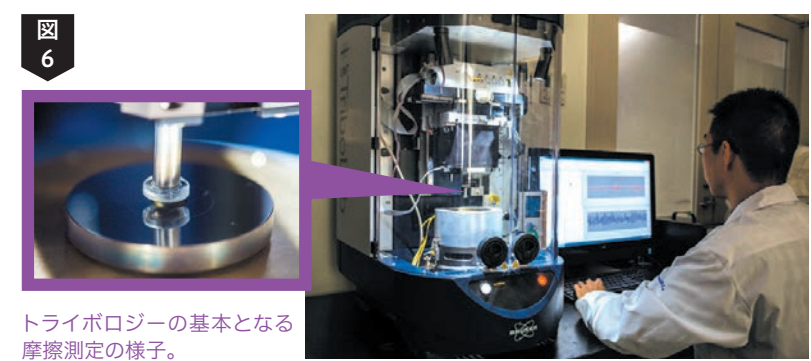
プロジェクトに参画する6企業には、機械製品の材料メーカーからシステム化するメーカーまで幅広い企業が含まれており、めざす製品もすべて異なる。研究体制や狙いについて、松川さんは次のように解説する。

「1企業に対して1製品を想定し、それぞれの企業が自社の製品に特化した濃厚ポリマーブラシの応用研究を進めています。参画している企業同士が製品開発で競合することがないため、常にオープンな議論が実現できています。それによって、面白いアイデアや新たな応用先も見つけ始めています。他の企業や大学の技術やアイデアなどを活用して新たな価値を生み出す『オープンイノベーション』の枠組みとして、濃厚ポリマーブラシの基礎研究の底上げと、実用化の加速の両方を狙っています」。

辻井さんは実用化へのビジョンを明確に語った。「ACCELで学んだことは、オールマイティな材料の製造技術を確認するのは至難の業だということです。実用化には、応用先を明確にすることが大切だと感じています。具体的な課題が明らかになり、解決策も見いだされ、新たな知見を得られるからです。基礎研究と応用研究の両方のバランスを上手にとることの重要性を実感しています。その点で、プログラムマネージャーの



濃厚ポリマーブラシの応用が期待されている分野と製品。



トライボロジーの基本となる摩擦測定の様子。

松川さんには、応用に向けた企業の研究開発体制を整えてもらうなど大変助けていただいています。プロジェクトは3年目に突入しました。実用化に向けた現在の課題は、機械部品への密着性と耐久性の向上です。密着性については、機械部品と濃厚ポリマーブラシとの界面の強化を図るなど化学的アプローチと、機械部品の表面に微細な溝を彫るなど機械工学的アプローチの両面で研究を進めている。耐久性に関しては、機械が稼動中に濃厚ポリマーブラシが摩擦ですり減っても新たに材料を加えることで自己修復するという方法を検討中だ。

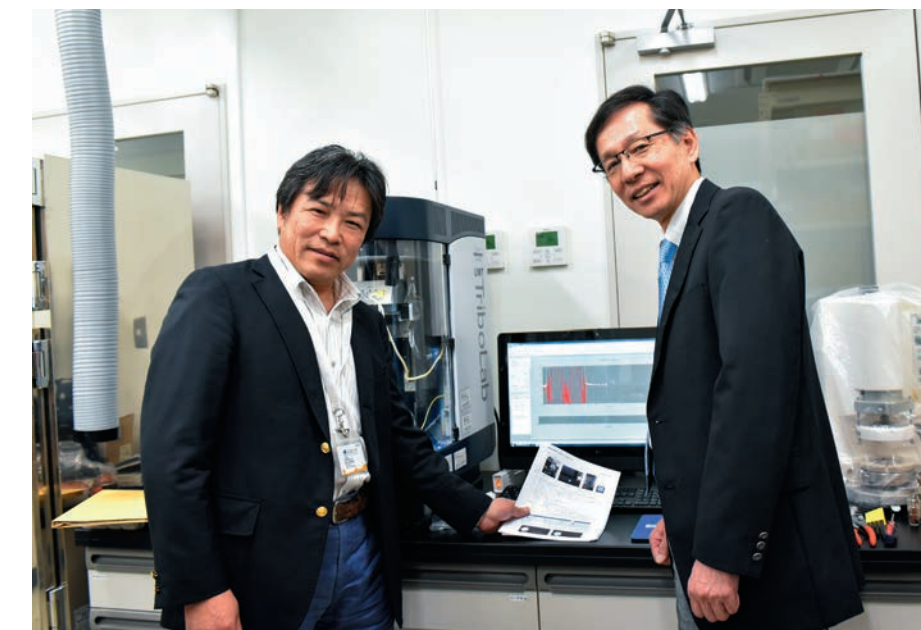
世界をリードする異分野融合のトライボロジー

これまでの研究を振り返り、さらに近未来を視野に辻井さんは、こんな確信を口にする。「トライボロジーは新しい学問です。これまで結果的に潤滑がよくなったけれど、そのメカニズムはわからなかったといった現象が、理論的に理解できるようになりまし

た（図6）。この理解を基に、材料の分野からも摩擦や潤滑にアプローチできるようになりました。そのときに重要なのは、機械、材料化学、計算科学など幅広い分野の人たちが融合して研究に取り組むことです。こうした異分野融合は、世界的にも先進性のあるものだと思います。摩擦・潤滑というと主に金属など硬いものが扱われてきましたが、柔らかい濃厚ポリマーブラシはトライボロジーの新しい地平を切り開きつつあります。そこにACCELとして研究者と企業が力を合わせていることは、国内のみならず広く世界にもインパクトを与えるものだと実感しています」。

濃厚ポリマーブラシで摩擦を低減すれば、あらゆる機械製品が小型・軽量化し、燃費向上、省エネによる環境負荷も低減が実現して、大きな恩恵を受けるだろう（図7）。「濃厚ポリマーブラシの研究開発を加速させ、1日も早い実用化をめざします」。

異口同音にこう語る辻井さんと松川さんの眼差しのすぐ先に、多くの人が待ち望む確かな成果が待っている。



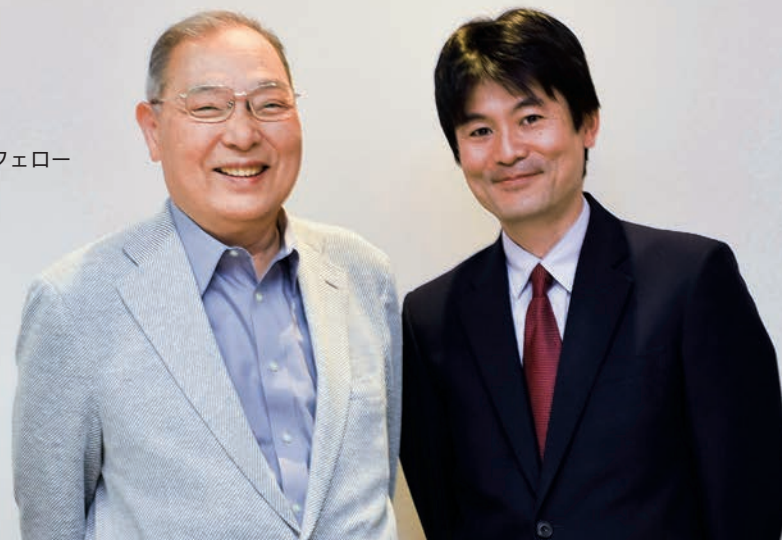
新たな分野を開く 新たなモノサシ

「科学の母 Mother of Science」と呼ばれる計測技術。科学研究や技術開発は、計測技術の進化なしには成り立たない。今月からスタートするこの連載では、さまざまな計測技術を紹介していく。

第1回は、日本の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析や戦略提案をする研究開発戦略センター（CRDS）で計測分野の調査を続けてきた佐藤勝昭フェローと中山智弘企画運営室長に、計測技術の現在を概観してもらった。

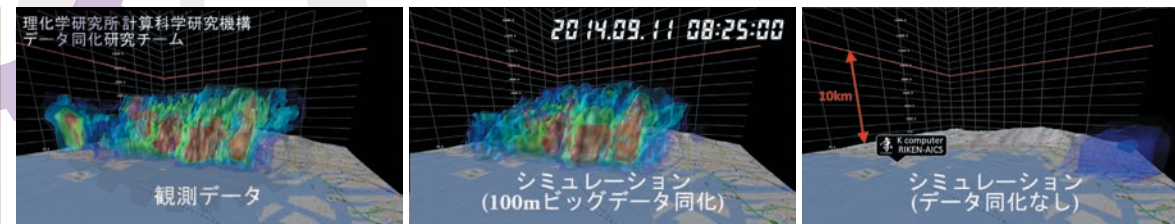
さとう かつあき
佐藤 勝昭
研究開発戦略センター フェロー
研究広報主監

1966年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。NHK放送科学基礎研究所、東京農工大学工学部教授、副学長、JSTさきがけ研究総括などを経て、現職。17年より文部科学省ナノテクノロジープラットフォームプログラムディレクターも務める。工学博士。



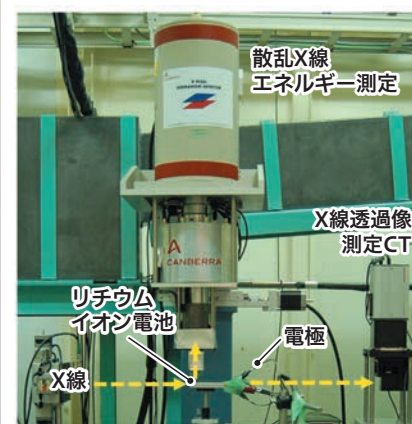
なかやま ともひろ
中山 智弘

研究開発戦略センター 企画運営室長/フェロー
企業での研究開発を経て2002年にJSTへ。研究開発戦略センターでナノテク・材料分野の研究開発戦略立案に従事。その後、内閣官房政策参与、JST経営企画部次長などを経て、現職。文部科学省技術参与として研究プロジェクトのプログラムオフィサーも務める。博士(工学)。

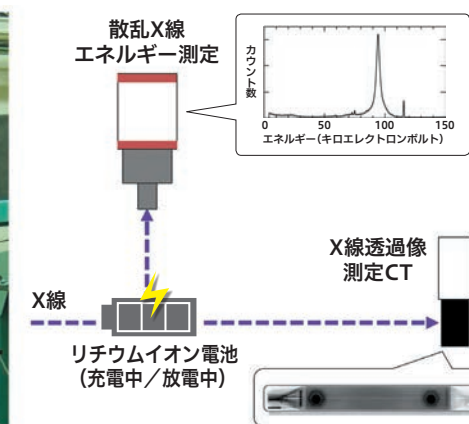


図版提供: 理化学研究所

▲「ビッグデータ同化」によるゲリラ豪雨予測の例。最新鋭の気象レーダーにより100mの分解能で30秒ごとに観測される3次元降水分布と、解像度100mの高精細シミュレーションを組み合わせ、積乱雲内部の30分後の状態を詳細に計算できる。赤色は雨が最も強い部分。



図版提供: トヨタ自動車 山重寿夫氏



◀リチウムイオン電池のオペランド計測の様子。電池に電極をつなぎ、放電中や充電中の電池内部の状態をリアルタイムで計測している。

暮らしを支える計測技術

中山 身の回りの製品には計測技術が詰まっていますが、あまりにも生活に浸透して気づかない人が多いでしょうね。

佐藤 最近のエアコンは、人の体温を計測して最も快適になるように温度調節するものがあります。天気予報がよく当たるようになったのも、時々刻々と変化する気象状況を気象衛星などで高精度に観測し、シミュレーションと併せて高度な予測ができるようになったからです。

中山 車の自動ブレーキも急速に普及が進んでいますが、車載のレーダーやカメラで障害物までの距離を正確に測定できるようになった成果ですね。今後登場が予想される自動運転車も、さらに進化した計測技術が鍵となるでしょう。遠隔診断などこれからの暮らしを豊かにしてくれるものには、ほとんど計測技術が埋め込まれているといえそうですね。その面白さを、ぜひ知っていただきたいと思います。

最先端分野を開く計測技術

中山 最先端の科学技術開発の基盤として、ナノテクノロジーや材料開発が挙げられますが、それらを支えているのも計測技術です。最先端の計測技術といえば、まず何を思い浮かべますか。

佐藤 オペランド（実動作環境下）計測はまさに旬の技術ですね。外からは見えない材料やデバイスの内部を実際に作動している環境下で計測する技術です。例えば、蓄電池や燃料電池の放電中や充電中に正極や負極、セパレーターなどの内部で何が起きているのか、その様子がだんだんわかるようになってきました。電池の技術は日本が世界をリードする分野ですが、オペランド計測は蓄電池や燃料電池の技術開発に大き

く貢献しています。それが現在の日本の自動車産業を支えているともいえます。こうした計測技術のおかげでエンジン内の燃焼の様子も詳しく調べられるようになり、燃焼をコンピューター制御することによって自動車の燃費が驚くほど向上しました。

中山 ライフサイエンス関連ではクライオ（低温）電子顕微鏡法が注目株ですね。生体分子を染色することなく急速に凍結させて電子顕微鏡で解析する手法です。従来の方法では試料を真空中に置くので水分は失われ、細胞の構造は壊れてしまいます。しかし、クライオ電子顕微鏡法では生体分子を氷に閉じ込めてそのまま観察できる点が画期的です。試料づくりには高い技術が必要ですが、撮影した画像データを最新の情報通信技術（ICT）を用いて解析する研究も進み、たんぱく質など複雑な分子の立体構造を画像化できるようになりました。

佐藤 走査型プローブ（探針）顕微鏡の進歩も著しいですね。これは、ナノメートルサイズの鋭利な針を試料上で動かし、針と試料との間に働くさまざまな力を検出して画像を得る方法です。中でも高速原子間力顕微鏡では、溶液中で起こる反応や構造変化をリアルタイムで動画観察できるようになりました。金沢大学理工研究域の安藤敏夫教授、古寺哲幸准教授らは、歩くたんぱく質と呼ばれるミオシンが筋繊維に沿って移動する様子を動画撮影するのに成功しています。

社会インフラの維持管理にも活用される 新開発の放射線イメージング技術

中山 社会インフラの中にも新たな計測技術が活用されていますよね。老朽化が問題となっている橋やトンネルなどで、コンクリート内にできたすきまや水、中性子線を用いて測定する非破壊の検査法が開発されています。古い橋を全部架け替えていたら、いくらお金があっても足りないの、こういう技

術の社会的ニーズは高いと思います。

佐藤 福島第1原子力発電所では、炉心が溶けて冷え固まった燃料デブリが残っていないかを調べるために、宇宙線的一种であるミュオン粒子を使った炉内調査が行われました。ミュオン粒子の透過力は高いが、核燃料は透過できないという性質を利用しています。これは廃炉のために必要な技術ですよ。また、同じ技術を使って、火山内部のマグマだまりの位置やマグマの動きを計測する技術も発表されています。将来は噴火予知に役立つかもしれませんね。

新しい発想とビッグデータで 計測の世界を深め広めるICT

中山 ICTは最先端の計測技術の精度を高めています。それだけではなく、以前から知られているありふれた計測技術であっても、ICTと組み合わせることによって従来は得られなかったデータが得られるのが、現在の計測の特徴といえるでしょう。交通系ICカードから得られるビッグデータは人々の動きをすべて記録します。そのため、従来の交通量調査は減ってきています。電車の乗降客がスマートフォンなどで電車の運行状況・遅延情報・混雑状況・混み具合を報告し合い、大人数のユーザーで共有することによって通勤通学に役立つアプリもあります。物理量ではなく人間の抱く印象をデータとして収集している点は、これまでの計測技術にはなかった新しい発想ですね。
佐藤 従来のように物理量をただ計測するのではなく、そこから意味を取り出していく点も、ICT活用の新たな発想です。監視カメラの画像から人物を特定する技術が急速に進んでいます。顔がわからなくても、歩き方や速さなどの情報からパターンを抽出し、人物を特定できるのです。自動車のナンバープレートの再現技術も同様で、人の目には不鮮明であっても、ICT

を利用して数字のぼやけ方の規則性を学習し、文字を読み取ることが可能になっています。

今、なぜ計測か

佐藤 計測技術の下支えがなくては、科学の発展はありえません。これまで計測は重要だと考えられていましたが、最近は新しいフェーズに入ってきたと感じています。

中山 今だからできる計測技術が出てきましたよね。オペランド計測やクライオ電子顕微鏡など道具立てが整ってきてより詳細、正確に計測できるようになったこと、ICTの活用が進んだことの2つが大きいです。「動作状態を非破壊で」、「リアルタイムで高速に」、「ICTで情報に意味を」というのが今後の計測のキーワードでしょうか。

佐藤 道具立てを整えるという意味では、放射光施設などいろいろな科学技術の進歩に加えて、最先端機器の共有が進んだことも重要です。文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業のように、高価な機器を共同利用することによって、より安価に最先端の研究が行えるようになりました。

中山 こうしたインフラ整備以外にも、ヘルスケア分野などで計測に対する社会的ニーズが高まっていますよね。

佐藤 スマートウォッチなどのウェアラブルデバイスによる健康管理はかなり浸透してきました。さらに、これらを含めさまざまな方法で人の動きやつながりを測る「社会計測」も、新たな動きとして興味深いですね。防災などにも役立つそうです。

中山 計測技術は最先端の研究開発だけでなく、社会課題の解決でも、けん引役になっているといえますね。

佐藤 次号からは、ミクロからマクロまでさまざまな計測技術を具体的に紹介します。どの分野のどんな計測技術が登場するか、その開発者はどんな思いを抱いているか、どうぞ楽しみに。

1

話題

戦略的創造研究推進事業(ACCEL)
研究開発課題「エレクトライドの物質科学と応用展開」

世界初となるオンサイトアンモニア生産の実用化をめざす新会社を設立

窒素肥料の原料としても使われるアンモニアは、化学工業では窒素源として化成品/医薬品/食品などの製造に使用されています。最近では、水素を運ぶエネルギーキャリアとしても注目されています。

工業的な製造法として、100年以上前に鉄系触媒を用いた「ハーバー・ボッシュ法」が開発され、現在も使用されていますが、高温高压で製造するため、大型プラントで大量生産した後、アンモニアを使用する拠点へ輸送する必要

があります。またアンモニアは、特定悪臭物質、劇物のため輸送・保管には、特別の設備も必要です。

東京工業大学の細野秀雄教授、横山壽治プログラムマネージャーらのグループは、より低温・低圧条件でもアンモニアを効率よく合成できる新しい触媒を発見し、開発中です。この触媒を使って従来よりも小型のプラントで製造するだけでなく、アンモニアを使う場所で製造するオンサイト生産を実現するシステムの実用化をめざす新会社を設

立しました。

ユニバーサル マテリアルズ インキュベーターと味の素は、つばめBHBを設立し4月25日に事業を開始しました。味の素は、グルタミン酸をはじめとするアミノ酸などの生産でアンモニアを原料として利用しており、つばめBHBと協力して自社工場でのオンサイトアンモニア生産の実現を図ります。アンモニアのオンサイト生産が実現されれば、将来的には味の素に加えさまざまな企業に技術を展開し、プラント小型化による設備コスト低減のほか、エネルギー消費を抑えることによる環境負荷の軽減、劇物保管・輸送のリスクを減らす安全性の向上など、環境に配慮した生産システムの実現を通じて社会への貢献が期待されます。

※詳しくは、<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20170427/index.html>



JST東京本部で実施された記者会見の様子。(左)細野秀雄教授の発表、(右)集合写真。

2

研究成果

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」
研究課題「エネルギー消費行動の観測と分散蓄電池群の協調的利用に基づく車・家庭・地域調和型エネルギー管理システム」

道路からインホイールモーターへの走行中ワイヤレス給電に成功

自動車のホイール内部に駆動モーターを配置するインホイールモーター(IWM)タイプの電気自動車は、その優れた運動性能により、安全性、環境性、快適性のあらゆる面でメリットがあります。しかし、従来のIWMではモーターを駆動する電力を送るため車体とIWMをワイヤでつなぐ必要があり、このワイヤが断線するリスクがありました。

一方、電気自動車の普及が進んでいない一番の課題は、従来のガソリン車などに比べ充電1回あたりの走行距離が短いことです。そこでバッテリーの搭載量を最小限にして、走行中に足りない分のエネルギーを道路に設けたコイルからワイヤレスで送って補う走行中給電の実現に向けて、世界で多くの研究が行われています。これまで検討してきた方法の多くは、道路に設けたコイ

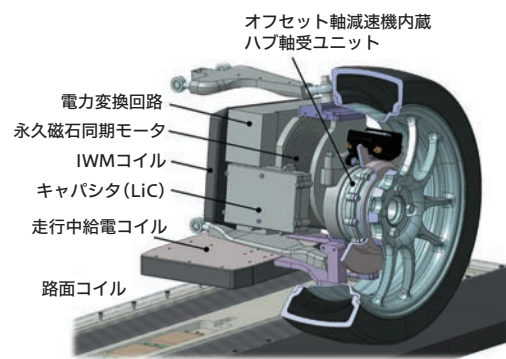
ルから車体の底に装着した受電コイルに電力を送り、車載バッテリーへ給電をするものでした。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の藤本志准教授らの研究グループは、東洋電機製造株式会社、日本精工株式会社と共同で、道路のコイルから車体ではなくIWMに直接、走行中に給電できる第2世代ワイヤレスIWMを開発し、世界で初めて実車での走行に成功しました。

この方式では、車体に上下運動が生じることによる効率の低下を防止できます。また、IWMに蓄電デバイスを内蔵し、これを適切に使用するための高度なエネルギーマネジメント技術も開発しました。さらに、IWMの走行中給電では個々のモーターが電力を受け取れるので、道路側コイルから送る電力

を小さくでき、道路側設備の簡易化にもつながります。

これにより、電気自動車の課題である走行距離の短さを解決できます。IWMに適した新たな走行中給電のかたちが提案されたことで、電気自動車の普及や地球環境の保全への貢献が期待されます。



開発された第2世代ワイヤレスIWMの構成図。

3

研究成果

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)
研究領域「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」
研究課題「エピゲノム制御ネットワークの理解に基づく環境ストレス適応力強化および有用バイオマス産生」

生きた植物細胞で初めて遺伝子の活性化を観察

細胞核にあるDNA配列の変異に関係なく、DNAや真核生物の染色体を作る主要なたんぱく質であるヒストンが化学的な作用を受け、DNAが発現しやすくなったり不活性化したりする遺伝子の動きを決める変化のことをエピジェネティクス変化といいます。例えば、三毛猫がほぼメスであることにもこの現象が深く関わっています。

東京理科大学理工学部の松永幸大教授らは、理化学研究所や東京工業大学との共同研究で、マウスの抗体の一部を植物細胞で発現させ、植物のエピジェネティクス変化を生きたまま解析する

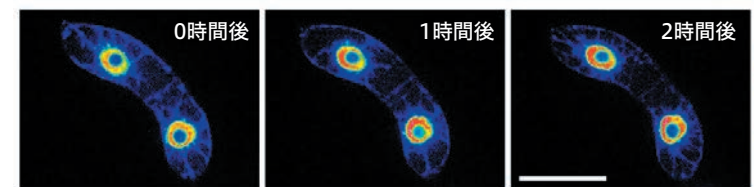
方法を開発しました。

エピジェネティクスの指標の1つに、ヒストン修飾があります。DNAに結合する塩基性たんぱく質であるヒストンの末端部分が化学的に修飾されるもので、アセチル化、メチル化があります。一部に蛍光たんぱく質を結合させた細胞内抗体を動物細胞で発現させて、生きた動物細胞でヒストン修飾の観察が可能になりました。

しかし、植物には抗体の遺伝子がないことから、植物細胞内で細胞内抗体を発現させてもヒストン修飾を正常に認識できるかは不明でした。研究グルー

プはタバコ培養細胞を用い、細胞内抗体が生きた植物細胞で正常に構造を保持し、ヒストンのアセチル化リジン残基を認識していることを証明しました。また、単一の植物細胞レベルで低温や塩ストレスによるエピジェネティクス変化を捉えることに世界で初めて成功しました。

この研究により、ヒストン修飾イメージング技術が確立され、エピジェネティクスにより制御される植物の環境応答や環境記憶メカニズム解明の進展、植物科学や農学研究への貢献などが期待されます。



ミントボディを発現させたタバコ細胞(2個)の蛍光イメージング像。左から、低温ストレスを与えてから0、1、2時間後の像。中央のまるく抜けている領域が細胞核で、ヒストンが存在する。暖色系の色ほど蛍光の強度が強い。時間の経過に伴って核内のミントボディの蛍光が増えてきていることから、低温ストレスに応答してヒストンのアセチル化が増えていることがわかる。スケールは100マイクロメートルを示す。

4

研究成果

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)
研究領域「(日本-フランス共同研究)分子技術」
研究課題「配位高分子結晶の分子配列を利用した相転移メモリ素子の開発」

イオンの流れを光によってスイッチングできる固体材料の合成に成功

固体状態で高いイオン移動度を示す物質を、固体イオン伝導体といいます。例えばリチウムイオンを固体中で伝導させる材料や、プロトンと呼ばれる水素イオンを伝導する材料はそれぞれ、リチウム電池や燃料電池の性能、安全性を飛躍的に向上させることが期待されています。

イオン伝導体は、ある温度で電圧を加えるとイオンを流し始めますが、電圧だけでなく、光のような刺激によってイオンの流れを任意にスイッチできれば、電池用途にとどまらないデバイス応用の可能性が生まれます。しかし従来は固体の状態では刺激に応答するイオン伝導体の設計は困難でした。

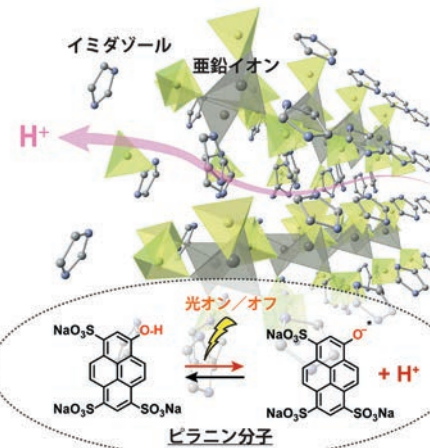
京都大学高等研究院の堀毛悟史准教授、北川進教授、フランスIRCELYONのオード・デメッセンスCNRS研究員らの研究グループは、金属イオンと有

機物が結合してできる、配位高分子と呼ばれる結晶中でイオンの流れを光でスイッチングできる新たな材料の合成に成功しました。

光に応答するイオン伝導性を固体中に持たせるには、固体全体でイオンが伝導できる特性と、光に応答してその伝導の流れを変えられる分子の両方が存在する必要がありました。

研究グループは配位高分子の中から、亜鉛イオンとリン酸、イミダゾールが結晶中でネットワークを組む結晶を用いました。結晶は、160度で安定な液体となる性質があります。この結晶を160度で融解させ、プロトンを放出・再結合する有機分子を溶液中に分散させた後、冷却して固体に戻すことで結晶全体に分散させた光応答性イオン伝導体の固体材料の合成に成功しました。合成した固体材料に光を当てるとプロ

トンを伝導するようになり、光を止めるとその伝導も停止します。この機構を応用すれば、不揮発性のメモリーや電気を蓄えるコンデンサー、あるいは光駆動するトランジスターなどの研究開発に大きく貢献すると期待されます。



亜鉛イオン、リン酸、イミダゾールからなる配位高分子結晶の構造。

平山 朋子

同志社大学理工学部 教授

2001年 京都大学大学院工学研究科博士課程中退、龍谷大学理工学部助手。03年 博士(工学)。05年 同志社大学工学部専任講師。同准教授を経て、14年より現職。10~11年 スイス連邦工科大学チューリッヒ校客員教授(兼任)。3歳、0歳のママ。「ママ友との出会いなどもあって、世界が広がりました」。左の写真で手にしているのは、放射光実験のために設計した思い出の装置。



「理解したい」という強い気持ちが研究の支えに

「カッコいい!」子供の頃、自宅の電化製品を修理する父親を見て、そう思っていました。動かなくなった電化製品を父親が分解して組み立てると、元通りに動くのです! 子供心にそれが面白くて、すっかり機械好きになりました。私が機械系に進んだのはエンジニアだった父親の影響です。

大学院で出会った「トライボロジー」

現在の研究領域との出会いは、修士課程のときでした。「トライボロジー」って聞き慣れない言葉ですよ? 私も学部生の頃にはよくわかりませんでした。簡単に言えば、物の接触面での摩擦、摩耗、潤滑に関する問題を扱う学問領域です。

例えば、機械や部品の動く部分には、固体同士、あるいは固体と潤滑油などの液体が触れ合っている接触面があります。接触面での摩擦が小さい方が機械を動かすのに必要なエネルギーも小さくて済みます。しかし接触面で起こっている現象はよくわかっていないことも多いので、これを解明することによって、摩擦を制御して機械の省エネルギー化、高性能化、高効率化が図れると考えてトライボロジーの研究を進めています。

大学院では軸受について理論的な研究をしました。一から勉強し直すつもりで研究に打ち込みました。研究が面白かったことに加え、指導教官の矢部寛先生がとても魅力的だったのです。理論でも計算でも解析でも超一流。近寄りたがたいほど偉大に思え、「懸命に勉強しないと先生の域には達しないのだ」と痛感しました。

失敗に次ぐ失敗を乗り越えて

次の転機は龍谷大学で助手をしていた頃でした。実験中に、ある分子を潤滑油に添加すると摩擦が激減することに気づきました。この現象を追ってみたい、界面で何が起き

ているのか見たい。強い思いが湧き上がり、現象を解明するための研究を新たにスタートしました。

界面を見る手法として選んだのが、中性子でした。中性子実験の第一人者であった龍谷大学の井上和子先生(当時)とお話したのがきっかけです。中性子には界面を直接見られる、見たい物質をマーキングできるという利点がありますが、当時、摩擦の研究に中性子を使う研究は世界でも行っていませんでした。手探りで実験を始め、相当、勉強もしましたが、数えきれないほど失敗をしました。失敗して協力して下さった先生方のがっかりした顔を見て反省し、また実験して失敗して……。琵琶湖が近かったので、行きづまると琵琶湖の周りを車で回ったりもしました、1周200キロあるんですけどね。ある日、以前失敗したと思っていた中性子実験データを見直してみ、初めて潤滑油に加えた添加剤の効果を確かめることを見いだしたのです。

界面で起こっている現象は非常に複雑で面白いものです。今後これらの現象をうまく分析し、物理としてすべて理解したいと考えています。そして摩擦をコントロールできるようになる、というのが究極の目標です。

苦しかった時期に私を支えていたのは、現象を見たい、理解したい、自分の立ち上げた新しい手法で研究を続けたい、という強い気持ちでした。時代のニーズとも合っていました。でも結果が出ないまま終わった可能性もあったわけで、縁と幸運に恵まれたと思っています。

私が駆け出しの研究者だった頃と比べると、今の時代の若い方はすぐに成果を求められ、いわゆる「あそび」をする余裕がなくなっているように感じます。それでも失敗を恐れず、自分の感性や、好き、知りたい、実現したい、そういう気持ちを大事にして頑張ってほしいです。心から応援しています。

(TEXT:寺田千恵/ PHOTO:吉田三郎(上))



「研究生生活で得た最大のものは、学生さんも含めた素晴らしい研究仲間です」。研究室のメンバーとともに昨年3月の送別会にて。

戦略的創造研究推進事業 個人型研究(さきがけ)

研究課題 「超低摩擦摺動メカニズムの解明と新規相界面の創成」

ガソリンエンジンの内部や軸受などの摩擦と、その摩擦によって起こる摩耗は重要な問題です。本研究では、独自の最新機器を用いて摩擦の生じる摺動面を直接観察し、超低摩擦となる摺動面の表面の構造と摩擦が生じるメカニズムの関係を明らかにします。さらに超低摩擦を発現する摺動界面(相界面)の設計指針を提示するとともに、新しい相界面の創成をめざします。

