

★ 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。

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。

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、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。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ブラシの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る、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

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)。

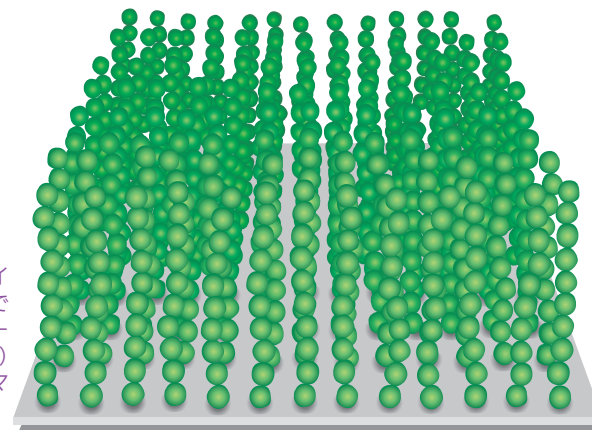
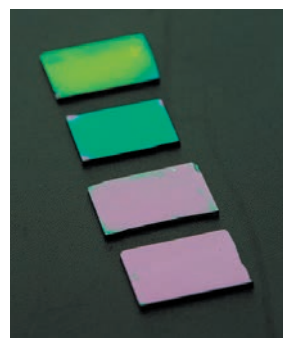


図2

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。



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に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。

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。

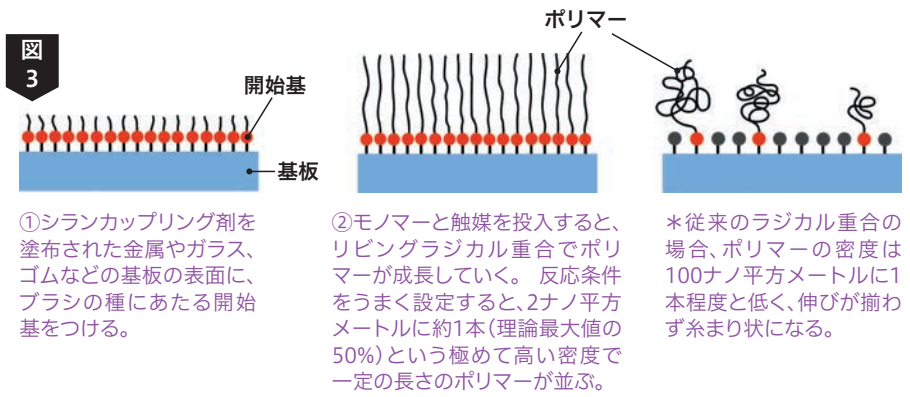
低摩擦性や高い潤滑性や弾性、さらには高い生体適合性など、濃厚ポリマーブラシの優れた特性を実社会でも応用するための研究開発にCRESTでは取り組んだ。「生体適合性を生かしたバイオセンサーや、高潤滑性を生かした蓄電池の電解質材料の研究開発に挑戦したところ、実用化に向けて耐久性を上げるためには、厚みを上げる必要があることに気づきました。CRESTでの最大の成果は、濃厚ポリマーブラシを「階層化」するという技術を確認できたこと」と辻井さんは振り返る。

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「ボトルブラシ型」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「ボトルブラシ型」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。

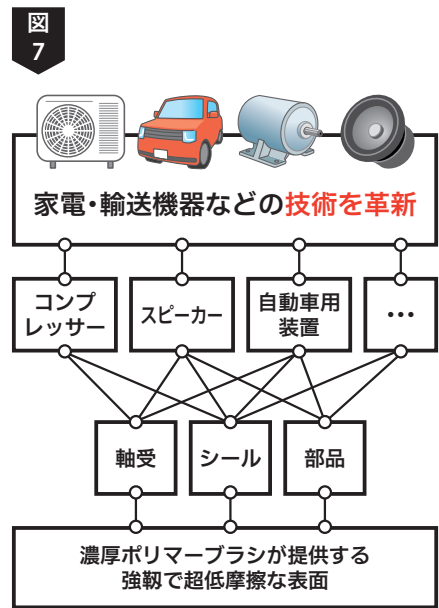
また、実用化に向けた検証では、コンピュータ・シミュレーションによる機械部品上での特性の解析や、ノイズに埋もれたデータの中から真のシグナルを抽出してメカニズムの深い理解につなげるデータ・マイニングなど、計算科学を専門とする研究者も複数参画している。幅広い分野の研究者が集まり、知恵を出しあうことで、機械製品の低摩擦化に取り組んでいる。

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。

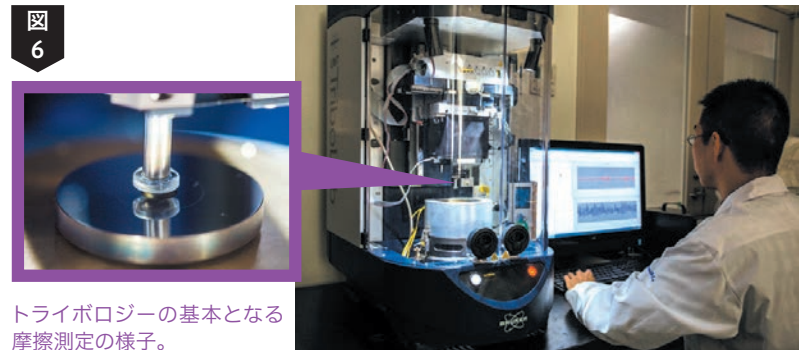
「1企業に対して1製品を想定し、それぞれの企業が自社の製品に特化した濃厚ポリマーブラシの応用研究を進めています。参画している企業同士が製品開発で競合することがないため、常にオープンな議論が実現できています。それによって、面白いアイデアや新たな応用先も見つかり始めています。他の企業や大学の技術やアイデアなどを活用して新たな価値を生み出す『オープンイノベーション』の枠組みとして、濃厚ポリマーブラシの基礎研究の底上げと、実用化の加速の両方を狙っています」。

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った方法を検討中だ。

世界をリードする異分野融合のトライボロジー

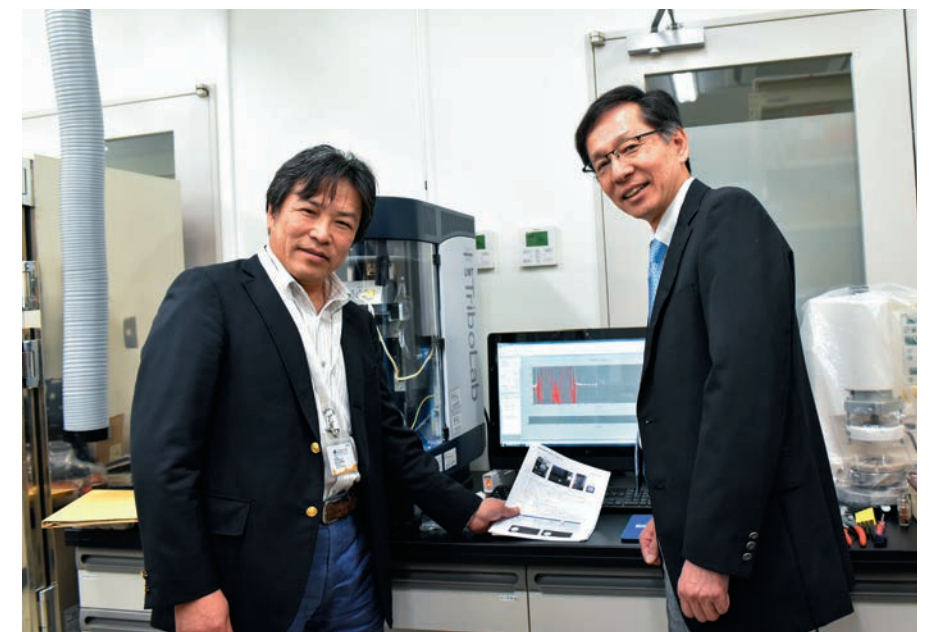
これまでの研究を振り返り、さらに近未来を視野に辻井さんは、こんな確信を口にする。

「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。



辻井さんと松川さんは実験室でも気の合ったところを見せる。