無断転載・複写禁止©㈱日刊工業新聞社

広がる 分野融合研究

低摩擦技術の進展に向けて

グリーントライボロジー特集

目に見えにくい摩擦現象をナノレベルでとらえ、低摩擦技術の開発につなげる取り組みが進んでいる。材料や計測、機械など各分野の研究者がネットワークを構築。分野融合研究による「摩擦を科学する」学問領域となるトライボロジーの進展が期待されている。新規潤滑システムへの応用を目指すポリマーブラシやゲルなどの軟らかい素材、無機酸化物コーティングなどの界面評価による実用化に向けた新たな設計指針が生まれてもいる。エネルギーの最大活用に向けた分野融合研究が広がりつつある。

機械システムに新しいシナリオを

11研究室が参画

機械の性能劣化、損傷、寿命の原因はその大部分が表面・接触面に由来するという。摩擦や摩耗の制御は機械システムのエネルギー効率向上、長寿命化につながる。ただ複雑な摩擦減現象を解明していくには、多分野の研究者が手を組むのが欠かせない。

エネルギーの最大活用に向けた「グリーントライボロジー」の先端技術開発において、2015年度末には一つの融合研究プロジェクトが5年間の取り組みを終えた。文部科学省の「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE）」事業の一環として、「グリーントライボ・イノベーション・ネットワーク」が立ち上がり、材料科学分野と機械工学分野の融合研究が進んだ。

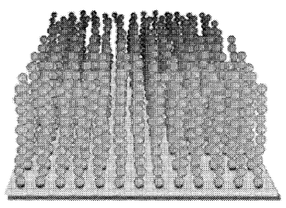
同ネットワークに参画したのは、東北大、物質・材料研究機構（NIMS）、岩手大、山形大、鶴岡高専、横浜国大、京都大、同志社大の11研究室。融合研究ネットワークを通じて、界面科学を基盤とした低摩擦技術の進展に向けたさまざまな方向性が示された。

ポリマーブラシ厚膜化

潤滑システムへ応用進む

「（機械系との連携で）実際に機械システムに使えるんじゃないか。機械分野での新しいシナリオが見えてきた」―。異分野のネットワークによる成果について、京都大学化学研究所の辻井敬亘教授はこう指摘する。辻井教授らはポリマーブラシの厚膜化による機械潤滑システムへの応用に取り組んでおり、リビングラジカル重合と呼ぶ方法で基板に長さをそろえてポリマーを成長させることを可能にした。従来法よりポリマー鎖を10倍以上伸ばすことに成功した。膜厚は最新のデータでは5マイクロメートルを達成している。

濃厚ポリマーブラシ（CPB）を溶媒に膨潤させ、向かい合わせて摺動（しゅうどう）すると摩擦係数は境界潤滑領域で優れた特性を示す。機械システムに使うには、ポリマーの厚膜化は、ブラシが削り取られることを防ぐことにつながる。東北大学多元物質科学研究所の栗原和枝教授グループとの連携では、厚膜化したCPBがマクロ接触下でも低摩擦性と耐久性があることを実証試験から確認した。試験からは300メガパスカルの面圧に耐える結果を得た。摺動回数は1万回を達成した。シール材やすべり軸受など機械要素としての適用を検討する"入り口"が見えてきた。



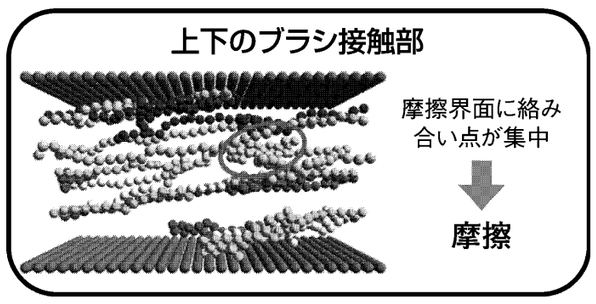
濃厚ポリマーブラシ

機械設計につなげるCPBの特性評価は各視点から進んだ。同志社大学の平山朋子教授らとは、潤滑油の中で使えるCPBを開発した。ラウリル基を持つモノマーを重合することでポリマーブラシに親油性を付与し、潤滑油となじむようにした。この親油性ポリマーブラシのトライボロジー特性を確かめるため、平山教授らは、中性子反射率法による構造解析と各種摩擦試験を実施した。結果からは親油性ポリマーブラシを形成することで、潤滑油下での摩擦係数が大幅に低下することなどが分かった。将来に向けてはハードディスクドライブの消費電力低減などに役立つ技術としての進化が見込めるという。

ポリマーブラシの機能・構造評価では、計算科学との連携も深まっている。東北大金属材料研究所の久保百司教授らは、摩擦現象解明を計算科学シミュレーションにより材料・実験チームを支援した。久保研究室では分子動力学シミュレーションによる摩擦プロセスの研究を進めており、今回のプロジェクトでは濃厚ポリマーブラシの分子動力学シミュレーションでの評価に取り組んだ。注目する点はポリマーの摩耗現象。シミュレーションでは二つのポリマーブラシを向かい合わせて一方を移動させる計算を行い、摩擦界面（上下のブラシ接触部）におけるポリマー鎖の絡み合いが摩耗の原因であり、ブラシ密度が大きい濃厚ポリマーブラシでは絡みが減少するためにポリマー鎖の切断が起こりにくく、摩耗しにくいことが分かった。現状は溶媒のない条件での計算結果で、今後はイオン液体などを溶媒にした場合の計算を進める考えで、低摩擦に最適な条件の探索に乗り出す。

濃厚ポリマーブラシの機械潤滑システムへの応用は、実用化を見据えて新たなステップに入りつつある。昨年8月には科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（ACCEL）に採択された。テーマは「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」。このテーマの研究代表者である辻井教授は「耐久性など『産』とも連携してより実用化に近づけていきたい」としている。

摩擦計算によるポリマー鎖切断のメカニズム



世界最高強度ゲル

多角的に特性評価し改善

ソフトかつウエットな材料のゲル。水を含むゲルは低い摩擦係数を持つことが知られている。ダブルネットワークゲル（DN）は、性質の異なる2種類のゲルを組み合わせた世界最高強度のゲル。90%以上の水を含んでいても車で踏んでも壊れない強度を持つ。

ネットワークによる分野融合研究では、単に研究者が興味を持つ材料から、実際に機械分野の実機に使えるための知見を得ることにあった。融合研究では、ゲルの専門家である山形大学の古川英光教授らがDNゲルを調製し、各研究グループにサンプルを供給。多角的にゲルの摩擦特性評価を進めた。各種評価からは、「ゲルを機械に適用するさまざまな問題も見えてきた」（古川教授）という。

材料の改良では、溶媒を従来の水から蒸発しないイオン液体に変更した。ゲルが乾燥に弱いという弱点に対応した。イオン液体と複合した新規DNゲルの開発は、鶴岡高専の佐藤貴哉教授らと取り組んだ。イオン液体ゲルは80度C、1000回の繰り返し測定後も低摩擦を維持。従来のゲルでは難しかった高温使用、真空使用の可能性を実証した。

ゲルシール材の評価に特化した摺動・回転トルク同時測定装置

古川研究室と佐藤研究室との共同で、ゲルを摩擦材料として使うための最大の問題だったゲルを基板（ガラス、金属など）に固定する技術も開発した。基材に固定化したケイ素アンカーと共有結合によりDNゲルを固定化する技術を確立した。特許も取得し、ゲルの適用範囲を広げている。佐藤教授は「実用化に向けた連携に力を入れていきたい」としている。

ダブルネットワークゲル

ゲルの機械応用展開では、古川研究室と横浜国大の中野健教授らと連携で、3Dプリンターにより試作したゲルシール材を用いて、シリンダー・ピストン系モデルを試作した。これを踏まえ、東北大の足立幸志教授らと共同で、ゲルシール材の評価に適した摺動・回転トルク同時測定装置も開発した。足立研究室では高強度ゲル表面に対して、レーザー処理を施すことで、摩擦特性が改善し、数十%から一ケタほど減少し得る可能性も実証した。分野融合研究が進む中、足立教授は「ゲルの可能性は広がろうとしている」と話す。

東北大の中嶋健准教授（現 東工大教授）らは、原子間力顕微鏡（AFM）を用いた「ナノ触診」技術を開発しており、DNゲル表面の摩擦特性評価に取り組んだ。高分子材料の内部構造や物性を測定し、表面の硬さや接着・粘着特性をナノサイズでマッピングすることにすでに成功していた。こうした評価手法のノウハウを踏まえ、今回のネットワークでは、ゲルの摩擦特性向上に向けた試験結果をフィードバックした。

ゲルの機械応用展開で試作モデルづくりに協力した中野研究室では、独自のスマートな潤滑システムも提案している。粘度を自律制御する液晶潤滑システムで、将来は風力発電のタービンなどへの利用を目指しているという。

無機酸化物コーティング

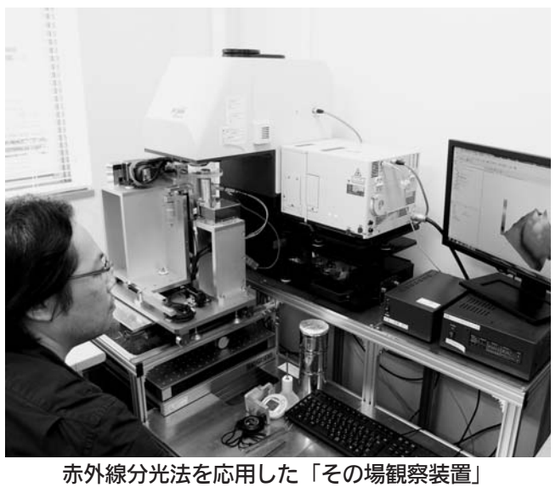
ベアリングに適用し発電機に

酸化亜鉛（ZnO）は、高温・高湿度・真空中などの厳しい環境でも安定で、地球上に豊富に存在する材料。酸化亜鉛コーティングの結晶配向制御による低摩擦発現を示す実験データが物質・材料研究機構（NIMS）にすでにあった。

分野融合研究ネットワークに加わったNIMS構造材料研究拠点トライボロジーグループの土佐正弘グループリーダーらは、酸化亜鉛コーティングの創製から機械システムへの応用に道筋をつけた。具体的にはベアリングシステムへの適用、タービン発電機への導入になる。

酸化亜鉛コーティングを施したベアリングボールを用いたボールベアリング

NIMSの後藤真宏主席研究員と佐々木道子NIMSポスドク研究員、東北大多元研の栗原教授らは、酸化亜鉛を使った低摩擦で耐熱性能に優れるコーティング技術を開発した。ボールベアリングに適用し、摩擦係数がコーティングしない場合に比べて3分の2に減り、800度Cの耐熱性を確認した。今回のグリーントライボ・イノベーションネットワークの成果でもある。



赤外線分光法を応用した「その場観察装置」

またこのベアリングを小型ジェットエンジンに搭載した災害時用の発電機を企業と共同で開発。燃料消費量を1%削減できることを確認した。成果は6月に発表し「多くの問い合わせを受けている」（後藤主席研究員）という。

酸化亜鉛コーティングのメカニズム解明でも、ネットワークの各種評価が生かされた。その一例では、岩手大の森誠之名誉教授らは、赤外線分光を応用した「その場観察装置」で、酸化亜鉛コーティングと潤滑油添加剤との化学反応による低摩擦化での知見をフィードバックした。

森研究室では、接触場におけるさまざまな潤滑油の化学的特性を明らかにしてきており、潤滑設計の提案につなげている。その場観察に関するノウハウの蓄積をベースに多方面での共同研究を展開しているという。

INTERVIEW

東北大学 多元物質科学研究所教授

栗原 和枝氏

材料から機械まで「つながる研究」に

文部科学省のGRENE事業の一環として、15年度末に分野融合研究による「グリーントライボ・イノベーション・ネットワーク」の5年間の取り組みが終了した。代表研究者を務めた東北大学多元物質科学研究所の栗原和枝教授に総合的な成果などを聞いた。

―このネットワークのミッションはどこにあったのでしょうか。

「界面超潤滑による低摩擦革新技術の開発と人材育成を目指すネットワークを構築することにあった。ネットワークを通じて、界面科学を基盤として材料と機械システムを統合的に理解し、研究開発を展開できる人材育成を目指した」

「また背景としては、低炭素社会への貢献があった。家庭によるエネルギー消費の約1割が摩擦損失で失われているとの報告もある。目立ちにくいが摩擦や摩耗の制御は、経済効果が大きい。機械システムのエネルギー向上、保守作業の軽減にもつながる」

―総合的な成果は。どのように見ていますか。

「材料と機械が融合する低摩擦の成果が生まれ、基礎から技術までつながる研究が可能であることを示すことができたのではないかと思っている。これまでにない科学的な材料設計や分子レベルの機構解明に基づく、実機モデルの製作や各種の試験が展開された。分野融合研究により、今後のイノベーションに向けて期待が広がった」

―人材育成については。

「分野融合のネットワークによる『インターンシップ』や『夏（冬）の学校』を開き、学生はじめ企業の若手研究者や技術者の教育に活用された。特に産業界からの参加者も多く、産業界における再教育の場としても貢献できたのではないか」

―構築したネットワークの今後については。

「各分野でトップクラスの研究室が集まったので、今後も年に数回の情報交換の場などを設けていきたいと考えている」