



SRT 材料の潤滑機構の階層的理解と新機能開拓

大久保 光 Hikaru OKUBO

地球環境問題を背景に、機械システムの効率・寿命の劇的な向上が求められており、機械要素の「トライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑）」技術のより一層の高度化が課題となっている。課題解決に向けて、高分子構造に起因する「柔軟性」と「強靱性」を兼備した「ソフト&レジリエント・トライボロジー（SRT）材料」の社会実装に期待が寄せられている。本稿では、SRT 材料の潤滑機構の階層的理解と新機能開拓に関する取り組みについて紹介する。

はじめに

未来社会構想の実現に向けて、革新的な機械システムの開発が求められている。これらの根幹をなす基盤技術として、トライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑）技術がある。汎用から特殊機械まで、すべての機械が歯車・軸受等の摺動機械要素を有しており、その摩擦・摩耗特性はシステムの高効率化と安全安心を担保する長寿命化に直結する。したがって、トライボロジー技術のより一層の高度化が求められている。

このような背景から、筆者らは、高分子構造に起因する柔軟性と強靱性を兼備した「ソフト&レジリエント・トライボロジー（SRT）材料」に着眼し、本材料群の社会実装に向けた研究を進めている。とりわけ、「濃厚ポリマーブラシ（Concentrated polymer brush: CPB）」は、鉄鋼材等の基材に高密度に修飾された高分子鎖が良溶媒中で伸びきり鎖となることで、超低摩擦性（摩擦係数：0.001）を発現する¹⁾。しかし、ソフトマター故の耐久性の乏しさから、社会実装は実現していない。

そこで筆者らは、SRT 材料の階層構造に着眼し、摩擦場の力学・空間・分子情報を可視化する「マルチ

モーダル・オペランド（多因子・その場）計測法」を開発することで、より一層の高機能化に向けて、CPB の潤滑機構を階層的に捉える研究に取り組んできた²⁾。

SRT 材料の階層構造計測

筆者らの開発装置による計測イメージを図 1 に示す。本装置は、圧縮・摩擦場で力信号（法線力・接線力）と粘弾性（加振応答と力学応答の位相差）計測を可能とする「動力学計測ユニット」と 2 種の分光計測を実施可能な「マルチモーダル光学系」から構成される装置である。本光学系は、層厚と分子情報を計測可能な光干渉分光とラマン分光の 2 種の分光法が統合された光学系である。本装置により、実機を想定した接触場における静・動力学応答（sub-mm スケール）、固

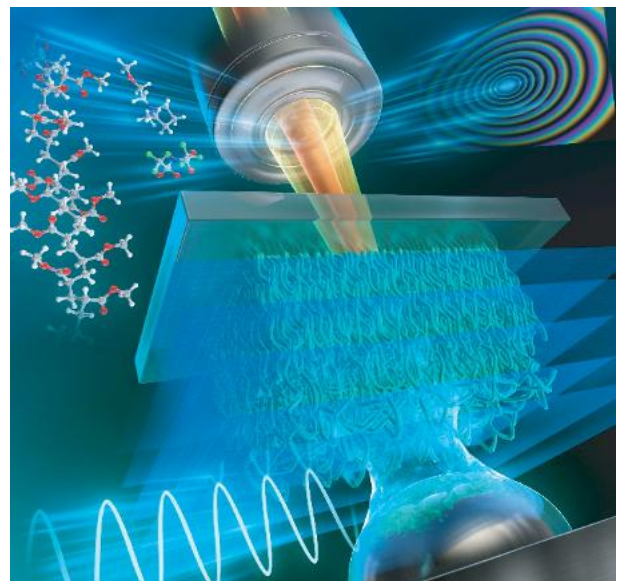


図 1 計測イメージ

おおくぼ・ひかる

横浜国立大学・環境情報研究院 准教授

〔経歴〕2019 年東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了、博士（工学）。日本学術振興会特別研究員（DC1）、JST・ACCEL 研究員、NEDO 研究員を経て、22 年より現所属にて助教、25 年より現職。現在、JST・ERATO や JST・FOREST 等で研究員を兼任。〔専門〕トライボロジー、オペランド計測、高分子物性。

E-mail: okubo-hikaru-xp@ynu.ac.jp



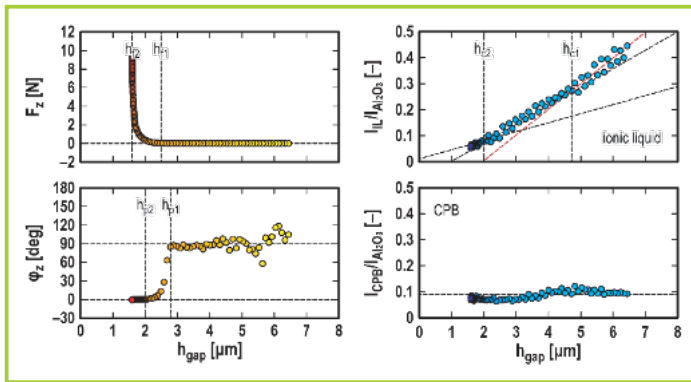


図2 圧縮過程における力学情報（法線力：左上，粘弾性：左下）と分子濃度（溶媒：右上，CPB：右下）の層厚依存性

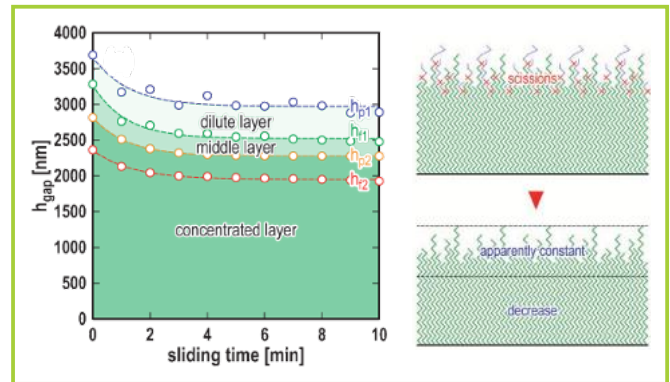


図4 層選択的な摩擦挙動（左）とCPBの摩擦画像（右）

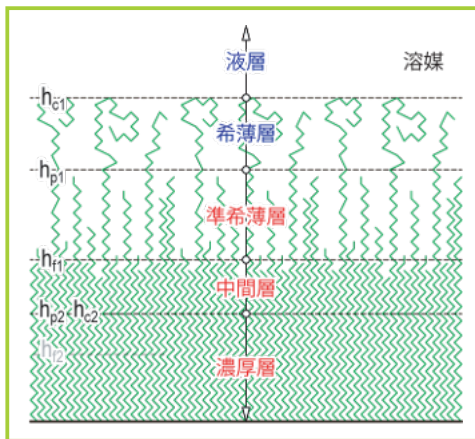


図3 CPBの層構造の概要図

液界面の層厚（sub- μm ~ μm スケール），材料・潤滑剤の分子情報（ \AA ~ nm スケール），すなわち，力学応答・空間情報・分子情報に紐づくトランススケールな界面構造因子を力学場（圧縮場・摩擦場）で同時に計測可能である。本装置により，15パラメータ以上の因子（法線力・摩擦力・粘弾性・層厚・分子濃度・分子歪み・分子秩序性・界面温度等）を時間分解で同時計測することができる。計測情報より，CPBの力学情報（法線力・粘弾性）・分子情報（溶媒濃度・CPB濃度）の層厚依存性を計測し，各応答の力学的遷移点（ h_{f1} ， h_{f2} ， h_{p1} ， h_{p2} ）と濃度遷移点（ h_{c1} ， h_{c2} ）に紐づく層厚から（図2），CPBの階層構造：濃厚層・中間層・準希薄層・希薄層（図3）を可視化できる。本計測結果は，CPBの表面占有面積から推定される伸びきり鎖長を捉えており，従来指摘されていたポリマーブラシ系の分子密度プロファイルに紐づく力学的挙動を捉えている。

本計測技術は，ポリマーブラシ系のみならず，ハイドロゲル等の他ソフト材料の階層性の可視化にも成功

している。本装置を市販製品（コンタクトレンズ，カテーテル等）に応用したケースでは，その階層性が摩擦性能と結び付くことがわかっている。

SRT 材料の摩擦機構の階層的理解

本層構造計測を摩擦場で実施することで，各層の摩擦挙動を層選択的に追跡することができる（図4）。本結果より，CPBの摩擦現象は，希薄層が継続的に生成・維持されながら，濃厚層の割合が減少しながら進行していくことがわかっている。本プロセスは，摩擦場においてCPB鎖がランダムに切断されていることを意味する。スペースの都合で割愛するが，このランダムな鎖切断の主要因は，摩擦場で生じるCPBのガラス相転移であることが実験結果より示されている。この相転移に紐づくCPBの摩擦現象は，架橋鎖の導入や基板への微細構造（液だまり）付与等の階層構造制御により大幅に抑制可能であることが明らかになりつつある。

おわりに

本稿では，超低摩擦ソフトマターを実現するSRT材料を対象として，階層構造の可視化技術とそれに基づく潤滑機構の理解に関する研究の概要を紹介した。本計測技術は，多様な材料に適用可能であり，潤滑機構の階層的理解のみならず，摩擦材料の設計最適化に際して，階層構造の制御指針を与えるものと期待される。本稿が，摩擦の学理の深化と新たな材料開発に向けたブレイクスルーの契機となることを期待する。

- 1) Y. Tsujii, A. Nomura, K. Okayasu, W. Gao, K. Ohno, T. Fukuda, *J. Phys.:Conf. Ser.* **2009**, *184*, 012031.
- 2) H. Okubo, D. Kagiwata, K. Nakano, Y. Tsujii, *Langmuir* **2023**, *39*, 18458.