

トランススケールオペランド計測に基づくソフト界面構造の階層的な理解

Hierarchical understanding of soft interface structures based on trans-scale operando measurements

横国大（正）*大久保 光 （学）鍵渡 創生 （学）竹内 徹 （正）中野 健 京大（正）辻井 敏亘

Hikaru Okubo*, Daiki Kagiwata*, Toru Takeuchi*, Ken Nakano*, Yoshinobu Tsujii**

*Yokohama National University, **Kyoto University

1. はじめに

持続可能社会の構築に向けて、エネルギー問題は喫緊の課題となっている。有効な解決手段として、未だ大きな切りしろのあるエネルギーロスの低減と安全安心を担保する機械システムの長寿命化に向けて、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。近年、トライボロジー技術のさらなる高度化を志向して、高分子構造に起因する「柔軟性：ソフト」と超低摩擦性に起因する「強靱性：レジリエンシー」を兼備した「ソフト&レジリエント・トライボロジー（SRT）材料」が提案されている。とりわけ、生物の筋骨格系の滑らかな運動を実現する生体関節に範を得た「濃厚ポリマーブラシ（concentrated polymer brushes: CPBs）」は、高密度に修飾された柔軟な高分子の鎖が良溶媒中において伸長する事で、「超低摩擦特性、高压縮抵抗、サイズ排除効果」を発現するSRT材料であり、その特徴を生かした摺動機械要素（すべり軸受・メカニカルシール）の研究開発が進められている[1,2]。しかしながら、現状のCPBはソフトマター故に耐久性に乏しく、「劇的な高耐久化」に向けたシステム・材料設計指針の獲得が強く求められている。一方、機械要素で生じる現象を真に把握するためには、実際の運転状態に則した評価システムを構築し、このようなシステムに「オペランド（実動作下）」で捉える計測技術を取り入れる必要がある。とりわけ、摺動機械要素の潤滑性能はスケールを超越した「トランススケール」な種々の因子、具体的には、「接触力学で定まる接触領域の代表長（ $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ ）における力学応答」、「界面層や薄膜の厚みに起因する階層的構造（ $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ ）」、「固液界面における分子動態（ $\text{\AA} \sim \text{nm}$ ）」等が複雑に相互作用することで決定される。従って、トランススケールな因子で構成される摩擦界面構造をオペランドで計測することは、SRT材料の潤滑機構を階層的に明らかとし、それに基づく材料・システム設計の最適化により、次世代摺動機械要素の実現を加速できるものと考えた。

本報では、筆者らが取り組む「ソフト界面構造のトランススケールなオペランド計測」について、CPBを対象とした計測例を取り挙げ、現在までの取り組みと将来展望について述べる。

2. 方法

ソフト界面構造計測に向けて、表面力顕微鏡（surface force apparatus: SFA）をベースとして、種々の機構を組み込んだ新たな計測系を構築した。図1に計測系の概要図を示す。図1に示すように、本装置は、上部に2種の光学計測ユニット、下部に力学計測ユニットを備えた装置構成となっている。光学系は超薄膜光干渉顕微鏡及びレーザー走査型Raman顕微鏡ユニットを切り替え可能な光学系を備えることで、界面における潤滑油厚みの計測と分子情報計測を可能とする。力学計測ユニットは、高精度駆動が可能な開口型ピエゾステージによりCPBが成膜されたガラス基板が保持されており、その対向面には、鉄鋼球が保持されている。なお、ガラス基板と鉄鋼球の間には溶媒が液架橋を形成して存在している。また、鉄鋼球の下部に3次元フォースセンサを備え、法線力・接線力の計測が可能である。上述し

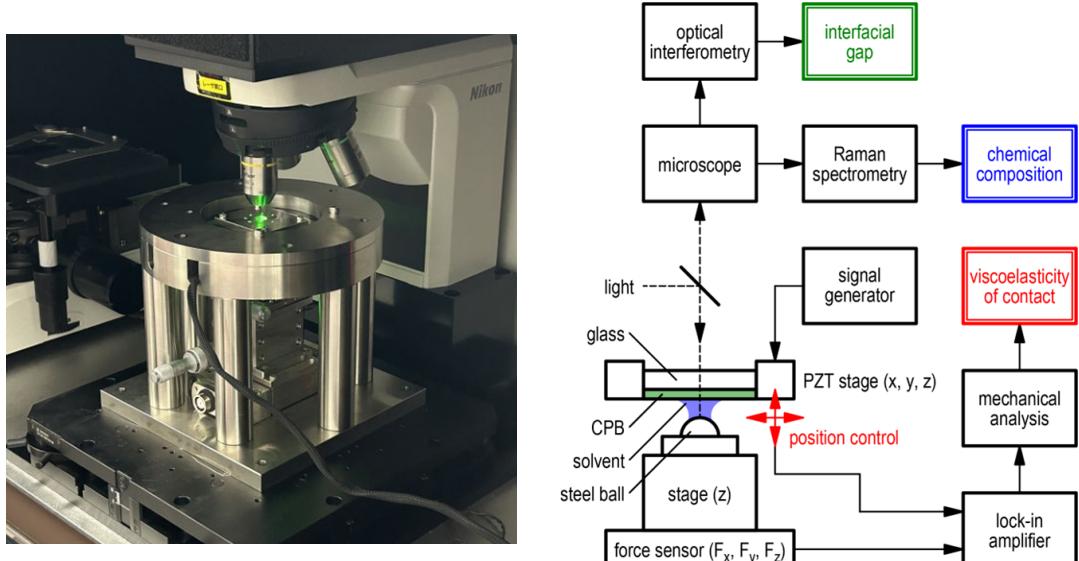


図1 ソフト界面計測装置の外観図（左）と概要図（右）

た力計測に加えて、本力学計測ユニットでは、基板に微小加振を入力することで、入力した微小加振と固液界面を通して伝わる基板の微小加振から生じる力応答の位相差を検出し、接触部の固液界面構造に起因する粘弾性を計測する。本装置を用いて、接触試験及び摩擦試験を実施することで、CPB の層構造と潤滑機構を検討した。

3. 結果

接触試験より得られる計測情報の時系列データを図 2 に示し、各計測情報と計測膜厚の関係を図 3 に示す。図 2 と図 3 より、各計測情報と膜厚の関係から、各物性の変曲点に基づいて、CPB の層を分類するための境界線($h_{p1}, h_{p2}, h_{f1}, h_{f2}, h_i$)を引くことができる。図 4 に推定される CPB の層構造を示す。本装置は、ソフト界面の階層的な構造を明らかとし、各種物性との相関を議論可能である。

4. おわりに

本報では、トランススケールなオペラント計測に基づくソフト界面構造の階層的な理解に資する計測装置とその計測例について紹介した。会議当日は、本装置の詳細と将来展望も含めて報告する。

文献

- [1] H. Okubo , D. Kagiwata , S. Sasaki , Y. Tsujii & K. Nakano: Operando tribo-Raman spectroscopic observation for wear processes of superlow frictional concentrated polymer brushes at frictional interface, Polymer Testing, 127 (2023) 108170.
- [2] H. Okubo, D. Kagiwata, K. Nakano, & Y. Tsujii, Layered Structure and Wear Mechanism of Concentrated Polymer Brushes, Langmuir, 39, 50(2023) 18458-18465.

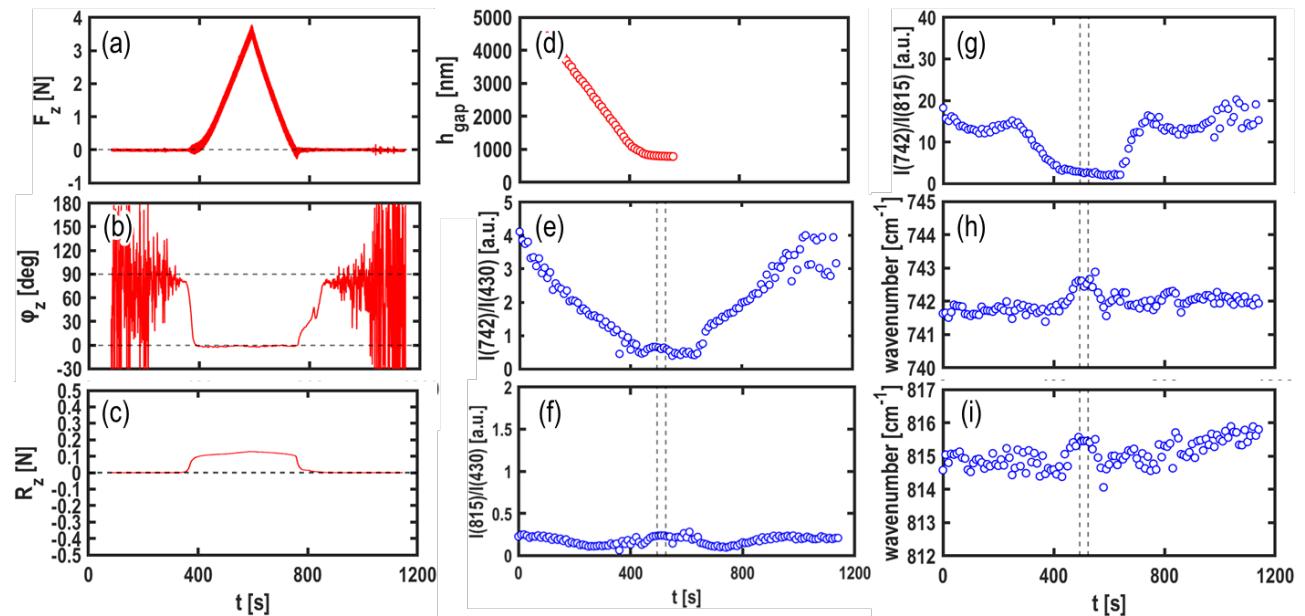


図 2 本装置による計測情報：(a)法線力、(b)位相応答、(c)振幅応答、(d)界面厚み、(e)溶媒濃度、(f)CPB 濃度、(g)溶媒と CPB の濃度比、(h) Raman シフト（溶媒）、(i) Raman シフト（CPB）

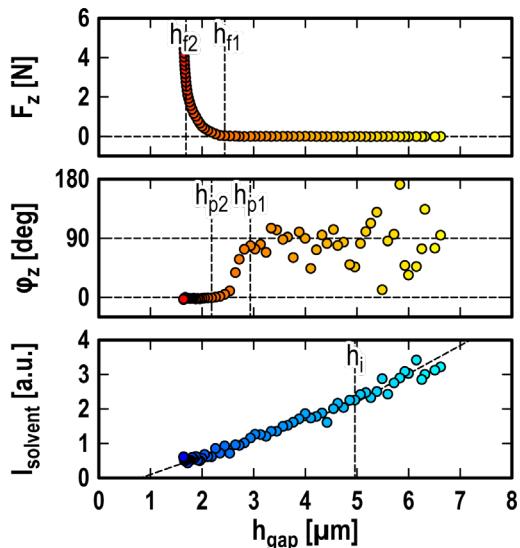


図 3 各計測情報と計測膜厚の関係

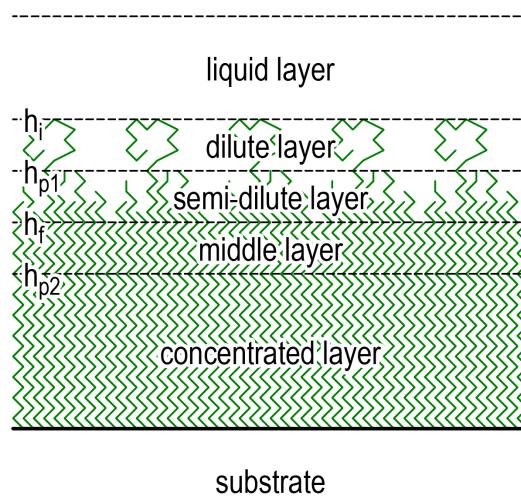


図 4 推定される CPB の層構造