

2023 年度年次報告書

革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明

2021 年度採択研究代表者

辻井 敬亘

京都大学 化学研究所

教授

超低摩擦ポリマーブラシの摩耗現象の階層的な理解と制御

主たる共同研究者:

荒船 博之 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科 准教授)

大谷 優介 (東北大学 金属材料研究所 准教授)

大野 工司 (大阪公立大学 大学院工学研究科 教授)

中野 健 (横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授)

## 研究成果の概要

摩耗分析に特化した基盤技術の確立に向けて、「ものづくり」「精密計測」「理論/シミュレーション」に取り組むとともに、濃厚ポリマーブラシ(CPB)系の摩耗仮説の共有により、グループ間の連携をはかった。主な研究成果は、以下のとおりである。

- CPB の摩耗耐久性を向上すべく、高圧条件下における表面開始原子移動ラジカル重合の反応解析と CPB の厚膜化を達成するとともに、マクロ摺動部における圧力粘度効果の検証、デザインされたヘテロ構造構築、位置制御型摩擦試験機の装置設計に取り組んだ。加えて、CPB 層の低着氷因子・機構の解明とコーティング展開に向けたボトルブラシ架橋系の最適化を行った。
- 3 色の蛍光色素を階層ごとに導入する新規合成手法を確立し、CPB の摩耗伸展における摩耗深度変化を詳細に追跡可能なマルチカラー蛍光性ブロック型 CPB を開発した。またこれを活用し摺動時のすべり速度・膨潤溶媒の粘度の違いによって CPB に 2 種類の異なる摩耗形態が存在し、これらが協奏的に生じていることを実証した。
- 理論研究と実験研究を並行して進めた。理論研究では、CPB の摩擦と摩耗の時空間発展を記述可能な粘弾性ファンデーション理論(力学理論)を高度化し、辻井 G(マクロ実験)ならびに大谷 G(ナノ計算)との連携を通して、CPB に発現する特異なストライベック曲線のメカニズムを解明した。実験研究では、接触力学試験機にラマン分光分析装置を組み込んだトライボロジー実験系を高度化し、CPB の摩耗現象の時空間発展を調査している。
- 粗視化分子動力学シミュレーションからマイクロな高分子鎖切断メカニズムを解析し、高分子鎖の切断が集中的に起こる摺動条件と、CPB の欠陥を起点として高分子鎖が切断するプロセスを明らかにするとともに、中野 G が行うメソモデルの構築に必要なマイクロなデータの抽出を行った。
- 架橋型ポリマーブラシを合成するための基盤技術の構築に関して、オキセタニル基含有ポリマーブラシを合成し、オキセタニル基を開環させてグラフト鎖を化学的に架橋することに成功した。また、複合微粒子系添加剤の設計に関して、イオン液体に良好に分散するポリマーブラシ付与シリカナノ粒子を合成し、潤滑液添加剤としての機能を評価した。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) H. Okubo, D. Kagiwata, K. Nakano, Y. Tsujii, “Layered structure and wear mechanism of concentrated polymer brushes”, *Langmuir* **39**, 18458-18465 (2023).
- 2) Z. Liu, Y. Ootani, S. Uehara, J. Zhang, Q. Chen, Y. Wang, N. Ozawa, M. Kubo, “Coarse-grained molecular dynamics simulation of the effect of cross-linking on the wear mechanism of polymer brush”, *Chem. Lett.* **53**, upae035 (2024).
- 3) T. Watanabe, K. Nakano, “Two origins for bell-shaped velocity-dependent friction coefficient: Kelvin-Voigt or standard linear solid viscoelasticity”, *Tribology Online*, **19**, 167-177 (2024).