

2024 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

足立 幸志

東北大学 大学院工学研究科
教授

トライボケミカル協奏反応の制御による超低摩擦界面の継続的創成と長期信頼性機械の設計基盤
の構築

主たる共同研究者:

久保 百司 (東北大学 金属材料研究所 教授)

七尾 英孝 (岩手大学 理工学部 准教授)

平山 朋子 (京都大学 大学院工学研究科 教授)

研究成果の概要

2024 年度は、超低摩擦界面の継続的自己形成の鍵となる以下 3 つの項目に着目し、表面設計としての新たな視点となる研究成果を得た。その概要は以下の通りである。

(1) 超低摩擦界面及びその形成のためのトライボケミカル反応の解明

開発したニューラルネットワーク分子動力学シミュレータにより、鉄界面における摩擦低減剤 MoDTC と摩耗防止剤 ZnDTP の共存環境におけるトライボ化学反応について検討を行った。まず MoDTC は、ZnDTP の分解により鉄表面に吸着した $P(OR)_2$ (R:炭化水素基) に O 原子を供給することで、新たに PO_4 を形成し、一方で ZnDTP は、MoDTC の分解により鉄表面に吸着した $Mo_2S_6O_2$ に S 原子を供給することで、新たな Mo-S 結合を生成し、 MoS_2 膜の形成を促進した。MoDTC は O 原子、ZnDTP は S 原子をお互いに供給し合うことで、それぞれリン酸亜鉛耐摩耗被膜と MoS_2 潤滑被膜の形成を促進させていることが示唆された。

真空中、100°Cにおける水素含有窒化炭素膜を用いた摩擦システムにおいてメタンおよびエチレンの導入により、水素ガスの発生と摩擦面でのグラファイトライクな生成物が確認され、膜もしくは雰囲気ガスからの脱水素を伴うトライボケミカル反応の存在が示唆された。

(2) 継続的超低摩擦界面形成のためのトライボケミカル協奏反応機構の解明

摩擦によって時々刻々と変化する摩擦表面における、トライボフィلمの形成過程のリアルタイム分析のため、XAFS 分析ビームラインに摩擦試験機を組み込んだシステムを構築し、摩擦の低減に伴う摩擦面のトライボフィلم形成の検出に成功した。

(3) トライボケミカル協奏反応を発生させる場の設計と創成

水素含有窒化炭素膜を用いた摩擦システムにおいて、大気中無潤滑においても超低摩擦を発現し、水分子及び酸素分子の相対量が一定条件下を満たす時に超低摩擦発現界面の継続的自己形成が可能であることを実験的に明らかにした。これは、大気中無潤滑下での超低摩擦発現界面の継続的自己形成、すなわちトライボケミカル協奏反応のための必要条件を明示する世界初の結果である。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Kazuya Kuriyagawa, Tatsuki Tamagawa, Koshi Adachi, Impact of Relative Humidity on the Formation of Low-Frictional Interface and its Continuity in Tribological Systems with Hydrogenated Carbon Nitride Coatings, *Tribology Letters*, **72**, 100, (2024).
- 2) J. Zhang, Y. Wang, Q. Chen, Y. Su, S. Bai, Y. Ootani, N. Ozawa, K. Adachi, and M. Kubo, Environment-Dependent Tribochemical Reaction and Wear Mechanisms of Diamond-like Carbon: A Reactive Molecular Dynamics Study, *Carbon*, **231**, 119713, (2025).
- 3) Haiyang Gu, Tomoko Hirayama, Naoki Yamashita, Jimin Xu, Masako Yamada, Relationship between Friction Reduction Effect and Solubility in Base Oil of Organic Friction Modifiers, *Tribology International*, **202**, 110304, (2025).
- 4) M. Kawaura, Y. Ootani, S. Fukushima, Y. Su, N. Ozawa, K. Adachi, M. Kubo, Continuous Formation and Removal Mechanism of Tribolayer on Silicon Carbide under Water Lubricated

Conditions: A ReaxFF Reactive Molecular Dynamics Study, *Tribology International*, **206**, 110579, (2025).

- 5) Naoki Yamashita, Tomoko Hirayama, A Method for Simultaneously Measuring Friction and Gap at Metal-Lubricant Interface by Combined Use of Atomic Force Microscopy and Line-and-Space Patterned Metal Films, *Frontiers in Mechanical Engineering*, **10**, 1470775, (2024).