

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18756

研究課題名（和文）理想ナノすきまにおける境界／流体潤滑場での原理的摩擦力学特性の取得

研究課題名（英文）Principle Friction Properties in Boundary and Fluid Lubrication in an Ideal Nano Gap

研究代表者

平山 朋子（Hirayama, Tomoko）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：00340505

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、潤滑油で湿潤された二固体間を対象場とし、ナノすきまを形成する二面をせん断（＝摩擦）するのに必要なせん断応力（＝摩擦力）の実計測を目指す。具体的には、「境界潤滑」および「流体潤滑」のそれぞれの状態を模擬した2種類のMEMS計測デバイスを創成し、可能な限り物理の素過程を模す形態で摩擦力の計測を試みた。MEMS計測デバイスを用いた実験により、境界潤滑および流体潤滑状態にあるナノすきまでの潤滑油挙動を把握することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の更なる省エネルギー化の流れに伴って低摩擦摺動実現の必要性は日増しに高まっており、特に自動車業界を中心として、更なる低摩擦摺動面（新材料・潤滑油設計含む）の開発、および、Model-Based Development（MBD）の確立に向けた摩擦係数の精密予測が強く求められている。本研究によってナノすきまにおける境界／流体潤滑下での潤滑油の挙動の一端が明らかになったことから、本成果は潤滑モデル構築に貢献し得るものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to measure the shear stress (= friction force) required to shear (= friction) two surfaces forming a nano-gap between two solids sandwiching lubricant. We measured the behavior of lubricant in the boundary lubrication and fluid lubrication with nano gap through experiments using the MEMS devices. The experiments using the MEMS device succeeded in understanding the behavior of lubricants in boundary lubrication and fluid lubrication.

研究分野：トライボロジー

キーワード：摩擦係数 ナノすきま 境界潤滑 流体潤滑

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

機械における多くの摺動面は粗さを有しており、そのすきまは潤滑油で湿潤されている。潤滑油には「添加剤」が含まれており、その添加剤が表面吸着層を形成することで摩擦を緩和する。摺動面を微視的に見ると、固体間が添加剤吸着層を介して触れ合っている状態(『境界潤滑状態』)と、二面が潤滑油膜を介して非接触にある状態(『流体潤滑状態』)が混在している。しかしながら、原理的な摩擦係数値の把握に際しては、これらの状態を正確に分けて計測する必要がある。一方で、そのように境界潤滑状態と流体潤滑状態に正確に切り分けて潤滑特性を測定した研究は未だ多くなく、潤滑現象のモデル化に際して、ナノすきまにおける正確な潤滑特性の把握が強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、潤滑油で湿潤された二固体間を対象場とし、理想的なナノすきまを形成する二面をせん断(=摩擦)するのに原理的に必要なせん断応力(=摩擦力)の実計測を目指す。具体的には、「境界潤滑」および「流体潤滑」のそれぞれの状態を模擬した2種類のMEMS計測デバイスを創成し、可能な限り物理の素過程を模す形態で摩擦力の計測を試みる。特に、潤滑油中に含まれる添加剤によって表面に形成される添加剤吸着層に焦点を当て、その層間摩擦(境界潤滑)および流体との壁面摩擦(流体潤滑)の正確な取得と理解を目指す。最終的に、理想的な状態で原理的に達し得る最小摩擦係数を提示するのみならず、「トライボロジーにおける分子性と連続性の架橋」、さらには、「潤滑摺動場における『摩擦』とは何か」という根源的な問いの解に迫ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

「境界潤滑」状態におけるナノすきまでのせん断応力計測には「ナノすきまざりデバイス」を用いた。具体的には、MEMS創成技術を用いて静電チャックデバイスを新たに開発することにより、静電気力で密着させた二面の純せん断応力を計測した。片方の面を柔らかいフィルム状の材質で作製すればその面は静電気力によってもう片方の面に倣うことができるため、nmオーダーで均質なすきまを有する二面を得ることができる。

また「流体潤滑」状態におけるナノすきまでの流量特性計測には「ナノ流路デバイス」を用いた。MEMS創成技術を用いて深さが500nm程度の流路を作製し、そこに高分子系添加剤を含む潤滑油を流すことにより、添加剤がナノすきまに及ぼす効果を確認した。

### 4. 研究成果

「境界潤滑」状態におけるナノすきまでのせん断応力計測においては、潤滑油分子の構造の違いに伴う摩擦挙動の差異を明確に捉えることに成功した。

また「流体潤滑」状態におけるナノすきまでの流量特性計測においては、ナノ流路に高分子系添加剤を含む潤滑油を流したところ、添加剤が表面に吸着して徐々に流路を塞ぐことが分かった。しかしながら、最後に添加剤を混入していない基油のみを流したところ、一定量の吸着層が剥がされ、流量も一定値に落ち着くことを確認した。

以上の2種類の実験により、境界潤滑および流体潤滑状態にあるナノすきまでの潤滑油挙動を把握することに成功した。

なお以上の成果を、下記学術論文にて公開した。

[1] Adsorption Characteristics and Mechanical Responses of Lubricants Containing Polymer Additives under Fluid Lubrication with a Narrow Gap

Tomoko Hirayama, Naoki Yamashita, Waka Yamamoto, Kenta Shirode, Akira Okada, Naoya Hatano, Toshiyuki Tsuchiya, and Masako Yamada

Langmuir 2024 40 (12), 6229-6243

DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c03725

具体的な成果：

ポリメタクリル酸メチル(PMA)をベースとした高分子添加剤の吸着挙動と、狭ギャップにおける流体潤滑下での機械的応答について、中性子反射率法、マイクロチャンネル装置、狭小すきま摺動試験機を用いて調べた。中性子反射率法で調べた定常場における高分子添加剤が形成する

表面吸着層の厚さはわずか3nm程度であった。一方、深さ約500nmの流路を持つマイクロチャネル装置(図1)に高分子添加剤を含む試料油を流すと、吸着層は長時間かけて成長し、最終的には100nm以上の厚さに見える層が形成された。狭小すきま摺動試験機を用いて、ギャップ長を一定にして一方向に回転させたときの機械的応答を測定した。その結果、低せん断速度領域で有効粘度が上昇することがわかった。また、往復回転試験でも同様の挙動が見られ、せん断速度が0rpm付近の低速の場合にのみ、機械的応答に特徴的な歪みが見られた。狭小すきま摺動試験機を組み込んだ中性子反射率計の結果は、大面積の均質層の構造に関して回転速度の影響を示さなかった。しかし、反射率プロファイルとフィッティングカーブとの不一致は時間とともに徐々に顕著になり、時間の経過とともに不均質な構造が形成されることが確認された。最終的に、不均一構造はPMA分子による局所的な凝集体の形成によるものであり、低せん断速度においてのみ流動抵抗として作用し、その結果、有効粘度が増加することが示唆された(図2)。

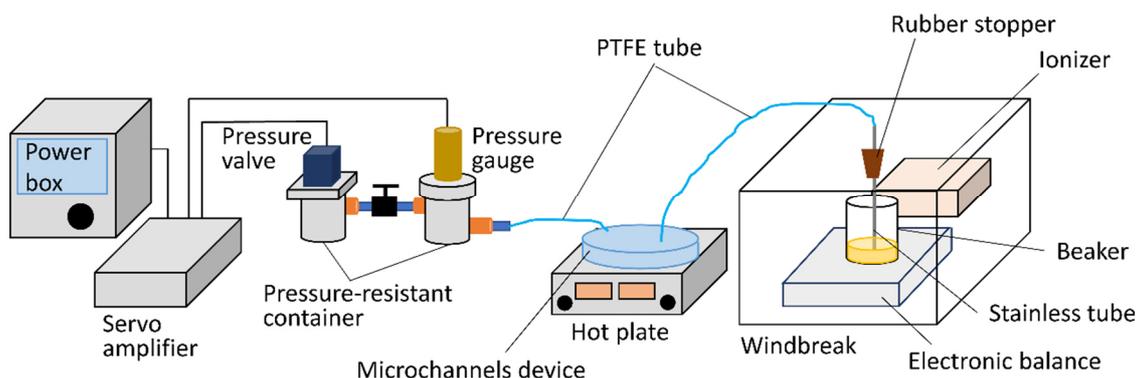


図1 マイクロチャネル装置の全体像[1]

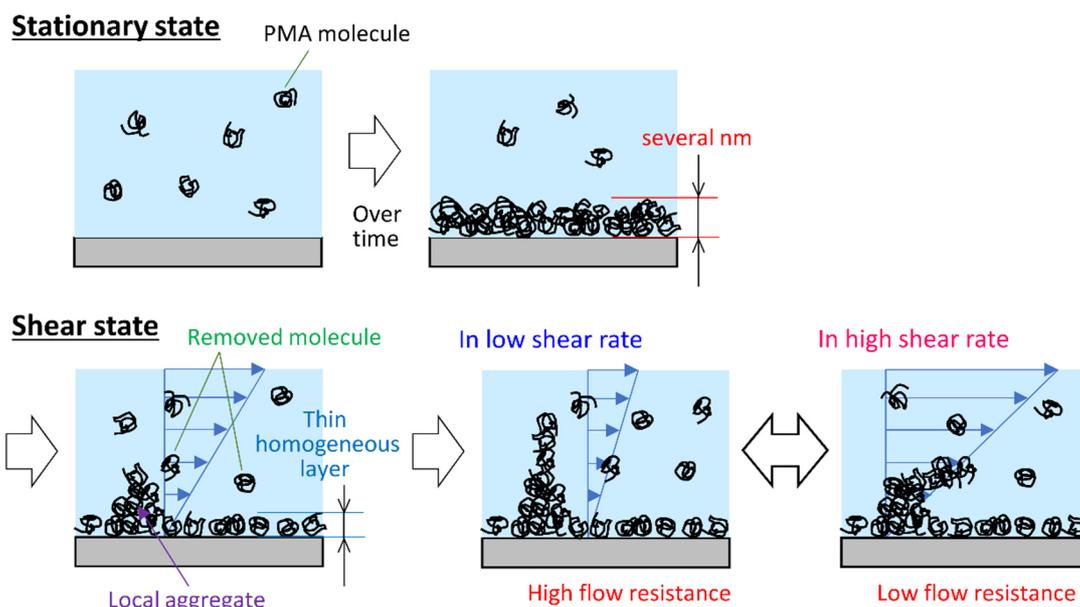


図2 最終的に得られた高分子系添加剤の凝集体形成とそれによる機械的応答への影響[1]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirayama Tomoko, Yamashita Naoki, Yamamoto Waka, Shiode Kenta, Okada Akira, Hatano Naoya, Tsuchiya Toshiyuki, Yamada Masako	4. 巻 40
2. 論文標題 Adsorption Characteristics and Mechanical Responses of Lubricants Containing Polymer Additives under Fluid Lubrication with a Narrow Gap	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 6229 ~ 6243
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.langmuir.3c03725	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Wataru Yagi, Yuanlin Xia, Toshiyuki Tsuchiya and Tomoko Hirayama
2. 発表標題 Intrinsic Friction Behaviour Originated from Molecular Structure of Lubricant in Nanoscale Gap Fabricated by MEMS
3. 学会等名 TRIBOCHEMISTRY BEAUNE 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平山朋子
2. 発表標題 マルチスケール論的視点に基づくトライボロジー現象の理解
3. 学会等名 日本材料学会 第2回マルチスケールマテリアルモデリングシンポジウム（第7回マルチスケール材料力学シンポジウム）（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 機械機能要素工学研究室  
http://www.elem.me.kyoto-u.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山下 直輝  (Yamashita Naoki)  (50847746)	京都大学・工学研究科・特定助教   (14301)	
研究分担者	土屋 智由  (Tsuchiya Toshiyuki)  (60378792)	京都大学・工学研究科・教授   (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------