

ラウリン酸ピレンメチルの有機摩擦添加剤としての吸着特性の蛍光観測 および摩擦低減効果の検証

Fluorescence observation of the adsorption properties of pyrenemethyl laurate as an organic friction additive and evaluation of its friction reducing effect

名大・情（院）*孫 燁杉 名大・情（正）宋 玉璽 名大・工（正）東 直輝
名大・情（非）安藤 和志 名大・情（非）塚本 眞幸 名大・情（正）張 賀東
名大・工（正）福澤 健二 名大・工（正）伊藤 伸太郎

Sun Yeshan*, Song Yuxi*, Naoki Azuma*,

Kazushi Ando*, Masaki Tsukamoto*, Zhang Hedong*, Kenji Fukuzawa*, Shintaro Itoh*

*Nagoya University

1. はじめに

近年、機械システムのエネルギー利用効率を向上させるため、潤滑油の低粘度化による摩擦損失の低減が試みられている。潤滑剤の流れにより摺動面を分離する流体潤滑において、分離する動圧力の大きさは粘度に比例する。低粘度化により流体潤滑が十分機能しなくなるため、先端的な機械システムの潤滑は、流体潤滑から境界潤滑や混合潤滑へと移行しつつある。境界潤滑では、固体間で直接接触が生じることで摩擦力が急増する。これを解決するために、潤滑油に摩擦調整剤を添加する方法が提案されている。摩擦調整剤は、接触面に吸着膜を形成することで固体間の直接接触を防ぎ、摩擦係数を低減することはできる。

しかし、ナノメートルのすきまでは、摩擦調整剤が形成する吸着膜と潤滑油の区別が難しいため、吸着膜の測定は困難である。本研究では、ピレン蛍光で標識された新しい有機摩擦添加剤であるラウリン酸ピレンメチルを設計した。蛍光顕微鏡観察法を用いて、ラウリン酸ピレンメチルの吸着特性をその場で計測した。また、ラウリン酸ピレンメチルの吸着特性と摩擦特性の関係を調べた。

2. 潤滑油試料

ピレン蛍光で標識された有機摩擦添加剤であるラウリン酸ピレンメチルの分子構造は Fig. 1 に示す。図中の点線で囲まれた四つのベンゼン環はピレン蛍光標識である。本研究では、0.5wt%、1.0wt%、1.5wt%の3種類の濃度のラウリン酸ピレンメチル溶液を使用した。溶媒（基油）はヘキサデカンを使用した。

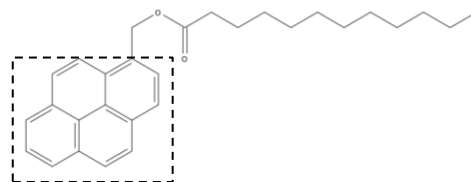


Fig.1 Molecular structure of pyrenemethyl laurate

3. 実験方法

3.1 摩擦実験機による摩擦係数測定

摩擦実験機の概略図を Fig. 2 に示す。ディスクは回転容器に固定され、潤滑油に浸漬された。本摩擦試験機は、モータで回転するディスク（SUS304, 3 cm×3 cm, Ra: 1.16 nm）の上方に、鋼球（SUS304, ϕ 16 mm, Ra: 4.34 nm）を取り付け、鋼球からディスクに荷重を負荷する構造となっている。本研究では荷重 5 N、回転速度 20.4 mm/s、溶液温度 40℃とした。摩擦係数の経時変化を測定した。

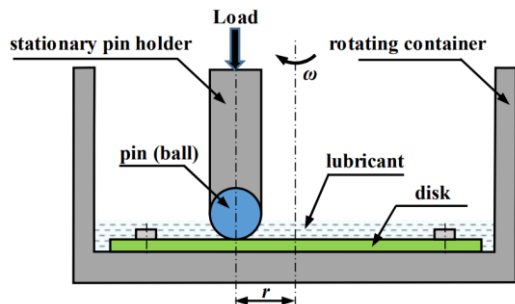


Fig.2 Schematic illustration of the Pin-on Disk type Tribometer

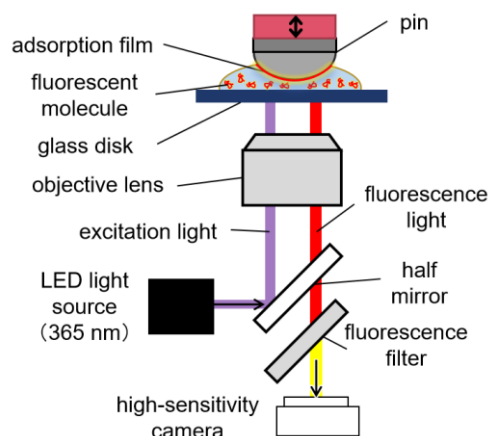


Fig.3 Schematic illustration of the fluorescence microscope

3.2 蛍光顕微鏡による蛍光観察

蛍光顕微鏡の概略図を Fig.3 に示す。本研究では、波長 365nm の励起光をピンと基板の接触領域に照射し、ピン表面に吸着されたラウリン酸ピレンメチルは発光した。発光された蛍光は、蛍光フィルターを通過してカメラへと入射された。蛍光強度は蛍光分子の数に比例するため、本研究で測定された蛍光強度は、ピン表面に吸着されたラウリン酸ピレンメチルの量を推定できる²⁾。本研究では、ピンは平凸レンズで、厚さ 53 nm のステンレス鋼をスパッタリングでコーティングして作られたものを使用した。基板は厚さ 0.7 mm のガラスを使用した。蛍光フィルターは波長が 400nm から 600nm までの光を通過できるフィルターを使用した。

実験手順は以下である。まず、ピンとガラスを接触させて、ラウリン酸ピレンメチル溶液をピンとガラスのすきまに注入する。その後、ピンをガラスから離し、添加剤をピンの表面に吸着させる。分離は 3 分間を保持する。その後、ピンとガラスを再び接触させて、蛍光強度を測定する。この手順を 10 回繰り返し、蛍光強度の経時変化測定する。

4. 結果と考察

Figure 4 は、摩擦試験機を用いて測定した異なる潤滑油における摩擦係数の経時変化を示している。ヘキサデカンの場合、摩擦係数は約 0.4 であり、最も高い値を示した。ラウリン酸ピレンメチル濃度が 0.5 wt% の場合、摩擦係数は約 0.3 であり、1.0 wt% の場合には初期摩擦係数が約 0.15 であったが、800 秒後には 0.3 に達した。1.5 wt% の場合、摩擦係数は約 0.11 で安定した。これらの結果から、ラウリン酸ピレンメチルの濃度が高くなるにつれて、摩擦係数の改善効果が顕著に向上することが示された。基油のみの場合と比較すると、1.5wt% のラウリン酸ピレンメチル添加により、摩擦係数の低下効果が最も大きく、その効果も最も持続的であった。

Figure 5 は、蛍光顕微鏡を用いて測定した異なる潤滑油におけるピン表面の蛍光強度の経時変化を示している。この図から、ラウリン酸ピレンメチル濃度が高くなるにつれて、蛍光強度、すなわち表面に吸着する蛍光分子の量が増加することが示されている。基油のみの場合と比較して、全濃度において蛍光強度の増加傾向は類似しており、増加速度は徐々に減少し、最終的に安定した。その中でも、1.5wt% の濃度において、蛍光強度の増加速度が最も速く、安定後の蛍光強度も最も高かった。また、1.5wt% の濃度では、蛍光強度が安定に達する時間も最も早かった。

本研究で使用したラウリン酸ピレンメチルは摩擦試験機による実験から、その潤滑性能が確認された。ラウリン酸ピレンメチルの濃度が高いほど、吸着膜の形成速度が速くなり、表面に吸着するラウリン酸ピレンメチルの量も増加した。従来の摩擦調整剤と異なり、ラウリン酸ピレンメチルは蛍光部分を持ち、これにより、蛍光顕微鏡観察において基油分子と明確に区別することが可能である。また、蛍光強度から蛍光分子の吸着量を推定することができる。

5. おわりに

本研究では、異なる濃度のラウリン酸ピレンメチル溶液の摩擦係数を測定することで、ラウリン酸ピレンメチルの濃度が摩擦係数に与える影響を明らかにした。ピレン分子の濃度が高いほど、摩擦係数の改善効果が高まることが確認された。また、蛍光顕微鏡を用いて、固体表面に吸着したラウリン酸ピレンメチルの蛍光強度を測定した。ラウリン酸ピレンメチル濃度が高いほど吸着量が多いことを確認された。

謝辞

本研究は、JSPS KAKENHI 24H00282, 23H05448 及び 24K22927 の支援を受けたものである。

文献

- 1) 葛谷光平, et al. "潤滑油中における有機摩擦調整剤の作用メカニズム解明のための表面吸着特性計測." IIP 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集 2021. 一般社団法人 日本機械学会, 2021.
- 2) Petrova, Dina, et al. "Fluorescence microscopy visualization of the roughness-induced transition between lubrication regimes." *Science advances* 5.12 (2019): eaaw4761.

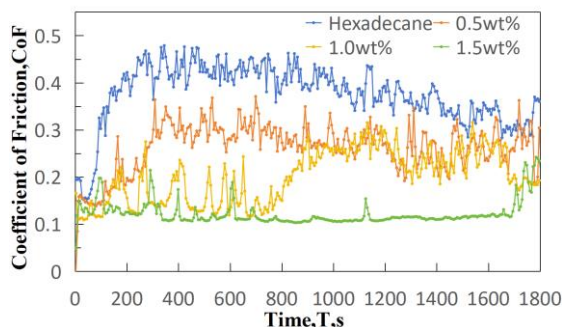


Fig.4 Measured coefficient of friction of pyrenemethyl laurate solutions with different concentrations

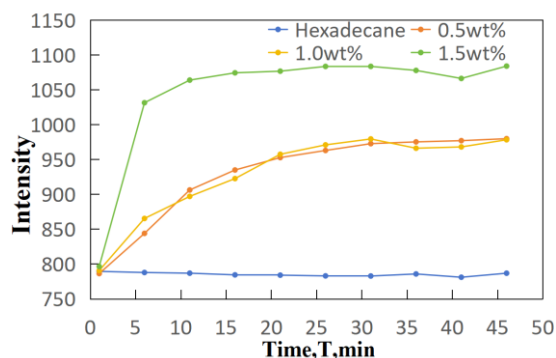


Fig.5 Fluorescence intensity of adsorbed pyrenemethyl laurate on the surface of pin formed by solutions with different concentrations