

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289025

研究課題名(和文) 固体二面に挟まれた境界潤滑被膜の構造解析と超低摩擦摺動メカニズムの解明

研究課題名(英文) Structure and Low Friction Mechanism of Soft Boundary Layers in Narrow Clearance

研究代表者

平山 朋子 (Hirayama, Tomoko)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：00340505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：低摩擦特性を有する摺動界面には、摩擦を低減する何らかの境界潤滑被膜が形成されていると言われているが、その物性および挙動はほとんど明らかになっていない。そこで本申請では、サブミクロンオーダーのすきまを保ちながら二平板を平行に対向する機構を有する装置を開発し、ストライベック曲線を得ることによって境界潤滑層が潤滑下でどのような働きをしているかを詳細に調査することとした。その結果、試料油に表面吸着層を形成する添加剤を混入して試験を行ったところ、すきまが狭くなるほど試料油の見かけ粘度が下がる傾向が見られた。これより、固液界面に形成された添加剤吸着層が界面すべりをもたらしている可能性が高いことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Understanding of the real situation of solid-liquid interface under sliding condition is quite important to clarify the tribology phenomena under lubrication. Particularly, though the soft molecular chains, called as 'boundary layers', are believed to form onto the top of low friction surfaces, their structures and physical properties are still unknown. From these backgrounds, the lubrication properties of boundary layers formed by additives in narrow clearance on sub-micrometer order were investigated in the study using a newly-developed plate-on-plate tribometer. The experimental results showed that the apparent viscosity of sample lubricant with additive decreased compared as that without additive. It indicated that the boundary layer formed by additive may induce the interfacial slip, thus resulting in decrease of apparent viscosity.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー 境界潤滑 固液界面 添加剤

1. 研究開始当初の背景

機械工学技術において、要素間の摩擦およびそれに伴う摩耗の発生に関する諸問題は極めて重要な課題であり、トライボロジー分野において多くの研究が進められている。機械における摩擦の形態は乾燥摩擦と潤滑摩擦に大別することができ、さらに潤滑摩擦は一般的に、境界潤滑状態、混合潤滑状態、流体潤滑状態（弾性流体潤滑状態含む）の三態に分類できる。このうち、機械の約 60%の摺動部が「境界潤滑状態」にあるとされており、高効率な低摩擦摺動の実現を目指す上で境界潤滑摩擦の現象理解は決して避けて通ることができない。

境界潤滑状態を表す摩擦モデルが初めて公に提示されたのは 1930 年代であり、その歴史は極めて古い。境界潤滑状態においては、固体間に形成される何らかの「被膜」の存在がキーとなっていることは周知の事実であり、これまで、それら被膜の形成メカニズムに関する多くの議論がなされてきた。それら被膜形成の素となるのは、主として、潤滑剤中に混入されている添加剤である。中でも、「油性剤」は脂肪酸、アルコール、アミン、エステルなどの有機分子から成り、摩擦面に吸着し、その結果形成される吸着被膜によって固体同士の直接接触を防ぐ役割を持つ。この形成メカニズムを把握し、より良い境界潤滑被膜の形成を促すことは、機械の性能向上にとって極めて重要な課題である。

このような背景から、添加剤による境界潤滑被膜の形成メカニズム解明の重要性は従来から認識されており、これまでもいくつかの大きなプロジェクトが立ち上げられてきた。近年では、例えば、「低摩擦損失高効率駆動機器のための材料表面制御技術の開発（平成 14～18 年度、代表：岩手大・岩淵明教授）」と題す NEDO プロジェクトが実施され、機械要素におけるトライボフィルム形成条件が綿密に調査されるとともに、TOF-SIMS、XPS 等の境界潤滑被膜の分析技術の有用性が確認された。また、現在、「グリーントライボ・イノベーション・ネットワーク（平成 23～27 年度、代表：東北大・栗原和枝教授）」と題す文部科学省グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業が実施されており、主に境界潤滑下で使用される新規材料の模索が行われている。これら境界潤滑被膜に関わる研究の気運が一気に高まった理由として、適切な被膜形成の有無に応じて、摺動部の摩擦・摩耗挙動が大きく異なるとの認識が広く一般的となったこと、分析機器技術の発展に伴い、化学分析が比較的容易に行えるようになったこと、環境問題、CO₂削減問題などの世論の動きから、いっそうの摩擦低減が望まれるようになったこと、LoHS 規制の強化に伴い、これまで使用が許可されてきた添加剤に対しても使用制限が課せられる可能性が高まってきたこと、等が挙げられる。そして今なお、境界潤滑被膜の形成メカニ

ズムの更なる理解と被膜形成促進を目指し、新しい分析手法およびそれに基づく新しい表面被膜創成指針の提案が強く望まれている。

2. 研究の目的

申請者らは、これまで、中性子反射率法、水晶振動子微量天秤法、赤外分光法、X 線光電子分光法等の in-situ、ex-situ 手法を駆使して、固液界面における添加剤吸着層の物理化学物性の定量化に取り組んできた。その結果、固体表面に形成される添加剤吸着層は極めて薄く、にもかかわらず、摩擦係数を大幅に低減する役割を果たすことを実験的に証明してきた。しかしながら、それらが巨視的な潤滑特性にどのように作用しているのか、その詳細は明らかとなっていない。

そこで本研究では、サブミクロンオーダのすきまを保ちながら 2 平板を平行に対向する機構を有する装置を開発し、流体～混合～境界潤滑下におけるその潤滑特性を調査することとした。またそれら一連の研究を通じて、より良い境界潤滑被膜形成のための添加剤設計指針の提示を目指すこととした。

3. 研究の方法

本研究では、中性子反射率法、FT-IR 等の手法を駆使して、添加剤によって形成される境界潤滑層の構造解析を行った。また、動圧軸受式および静圧軸受式の二種類の平板間摺動試験機を設計・開発することにより、サブミクロンオーダの狭小すきまにおける潤滑特性の調査を行った。その際、潤滑油中の添加剤の有無に応じて特性が変化するかどうかに焦点を当てることとした。最後にそれら一連の研究結果をまとめ、機械の低摩擦摺動の実現により効果的な境界潤滑層および添加剤設計指針の提示を行った。

4. 研究成果

開発した動圧軸受式および静圧軸受式の二種類の二平板摺動試験機を用いて、摺動試験を行った。動圧軸受型試験機においては、光干渉法を用いて二平板間のすきまを直接測定したところ、二平板間のすきまがほぼ理論通りに構成されており、最小すきまが数百ナノメートルとなるまで平行を保って作動していることを確認した。静圧軸受型試験機（図 1）においては、二平板間のすきま長さは静圧軸受の仕様によって決まり、測定試料の粘度に依存しないことを確認した。その上で、試料油に表面吸着層を形成する添加剤を混入して試験を行ったところ、すきまが狭くなるほど試料油の見かけ粘度が下がる傾向が見られた。これより、固液界面に形成された添加剤吸着層が界面すべりをもたらしている可能性が高いことが分かった（図 2）。これら一連の研究により、境界潤滑層の形成が摺動特性を向上させるメカニズムとして、(1)固体二面間の凝着力の抑制（表面力顕微鏡によって別途実証）、(2)せん断時における

界面すべりの発現、が主として効果的に作用していることが分かった。

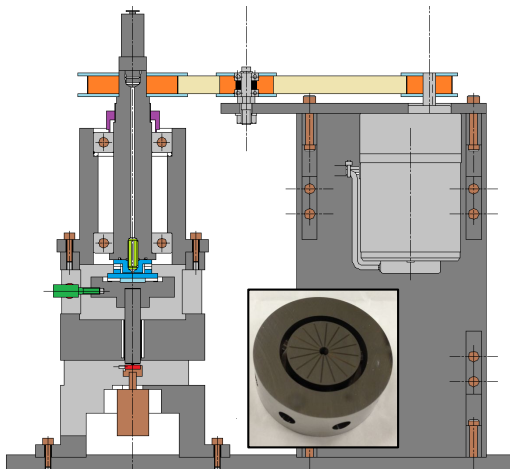


図 1 静圧軸受式狭小すきま平板間摺動試験機 (右下の写真は静圧軸受パッドを中央に配した下部試験基板)

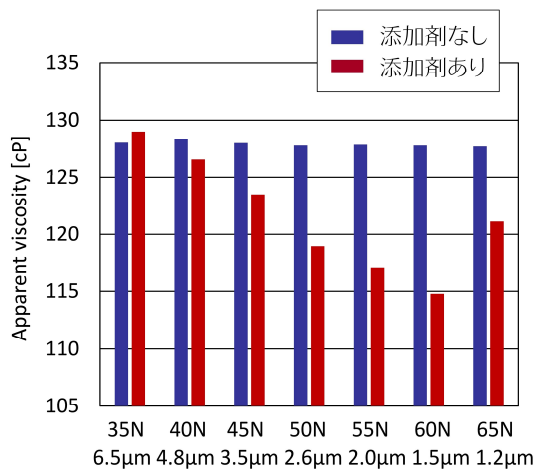


図 2 狭小すきま摺動試験機を用いて実験を行った結果。添加剤ありのときはすきまが縮まるにつれて見かけ粘度が低下している様子が見て取れる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Adsorbed Film Structure and Tribological Performance of Aqueous Copolymer Lubricants, B. Lin, H. Zhu, A. K. Tieu, T. Hirayama, B. Kosasih, O. Novareza, *Wear*, Vols. 332-333 (2015) pp. 1262-1272. 【査読あり】
doi:10.1016/j.wear.2015.01.042

Hydrodynamic Performance Produced by Nanotexturing in Sub-micrometer Clearance with Surface Roughness, Tomoko Hirayama, Heinosuke Shiotani, Kazuki Yamada, Naoki Yamashita, Takashi Matsuoka, Hiroshi Sawada, Kosuke Kawahara, *ASME, Journal of*

Tribology, Vol. 137, No. 1 (2014) Paper No. 011704. 【査読あり】
doi: 10.1115/1.4028736

Effect of Nano-Texturing on Increase in EHL Oil Film Thickness, Tomoko Hirayama, Mitsutaka Ikeda, Toshiteru Suzuki, Takashi Matsuoka, Hiroshi Sawada, Kosuke Kawahara, *ASME, Journal of Tribology*, Vol. 136, No. 3 (2014) Paper No. 031501. 【査読あり】
doi:10.1115/1.4027286

Fatty Acid Adsorption on Several DLC Coatings Studied by Neutron Reflectometry, Rok Simic, Mitjan Kalin, Tomoko Hirayama, Panaqiotis Korelis, Thomas Geue, *Tribology Letters*, Vol. 53, No. 1 (2014) pp. 199-206. 【査読あり】
doi:10.1007/s11249-013-0257-0

Neutron-Reflectometry Study of Alcohol Adsorption on Various DLC Coatings, Mitjan Kalin, Rok Simic, Tomoko Hirayama, Thomas Geue, Panaqiotis Korelis, *Applied Surface Science*, Vol. 288 (2014) pp. 405-410. 【査読あり】
doi:10.1016/j.apsusc.2013.10.047

〔学会発表〕(計 10 件)

Structure of Boundary Layers at Solid-Liquid Interface (Invited talk), Tomoko Hirayama, International Tribology Conference Tokyo 2015 (2015). [2015/9/19, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都)]

Structure and Shear Properties of Boundary Layers for Friction Reduction, Tomoko Hirayama, Ryota Kawamura, Koichi Saeki, Kazuki Yamada, Yusuke Hashimoto, Naoki Yamashita, Shota Akimoto, Takashi Matsuoka, Extended Abstract of ICMDT2015 Okinawa (2015). [2015/4/25, 沖縄コンベンションセンター(宜野湾市)]

Lubrication Properties of Lubricants Containing Oiliness Additives in Nanometer Clearance Evaluated by Resonance Shear Measurement, Koichi Saeki, Takashi Matsuoka, Tomoko Hirayama, Motohiro Kasuya, Kazue Kurihara, Extended Abstract of 1st International Conference on Engineering Tribology Technology (2014). [2014/11/22, 台北(台湾)]

Cross-Sectional Imaging of Interfacial Liquid Structure on Metal Surface by Means of Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy, Ryota Kawamura, Tsubasa Kiriya, Takashi Matsuoka, Tomoko

Hirayama, Hiroshi Onishi, Extended Abstract of 1st International Conference on Engineering Tribology Technology (2014). [2014/11/22, 台北(台湾)]

Rheological Properties of Boundary Layers Evaluated by a New Rheometer for Sub-Micron Clearance, Yusuke Hashimoto, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Abstract of Tribology Frontiers Conference 2014 (2014). [2014/10/25, デンバー(アメリカ)]

ATR-IR 法による摩擦条件下における油性剤吸着層の形成・成長プロセスの把握, 山下健志, 秋元翔太, 松岡敬, 平山朋子, トライボロジー会議秋予稿集博多 2013 (2013). [2013/10/24, アクロス福岡(福岡市)]

Oiliness Additive Adsorption onto Metal Surface Analyzed by Infrared Reflection, Absorption Spectroscopy, Ryota Kawamura, Masato Nakashima, Tomoko Hirayama and Takashi Matsuoka, Extended Abstract for 5th World Tribology Congress in Torino (2013). [2013/9/11, トリノ(イタリア)]

ATR-IR 法による金属表面上の油性剤吸着層の化学物性測定, 山下健志, 松岡敬, 平山朋子, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集 (2013) S114045. [2013/9/10, 岡山大学津島キャンパス(岡山市)]

Increase of Film Thickness by Nano-Texturing under Elastohydrodynamic Lubrication, Tomoko Hirayama, Mitsutaka Ikeda, Toshiteru Suzuki, Takashi Matsuoka, Hiroshi Sawada, Kosuke Kawahara and Shunji Noguchi, Extended Abstract for 5th World Tribology Congress in Torino (2013). [2013/9/10, トリノ(イタリア)]

Neutron Reflectometry of Adsorbed Additive Layers on (a-C) DLC, Rok Simic, Mitjan Kalin and Tomoko Hirayama, Extended Abstract for TribLyon 2013, 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology (2013). [2013/9/5, リヨン(フランス)]

〔図書〕(計1件)

はじめてのトライボロジー, 佐々木信也, 平山朋子 他, 講談社, 2013.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

同志社大学 機械要素・トライボロジー研究

室 ホームページ

<http://www1.doshisha.ac.jp/~tribolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平山 朋子 (HIRAYAMA, Tomoko)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号: 00340505

(2) 研究分担者

松岡 敬 (MATSUOKA, Takashi)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号: 80173813