

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00215

研究課題名（和文）量子ビームトライボオペランド分析によるストライベック曲線のナノスケール学的再整理

研究課題名（英文）Nanoscale Reconstruction of Stribeck Curves by Tribo-Operando Analysis Using Quantum Beam

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） 34,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では摺動面を対象場として量子ビーム分析を行い、ナノスケールからの潤滑現象の把握を行った。具体的には、トライボ環境を実現する「トライボオペランド機構」を量子ビームラインに組み込み、実動条件下で分析を行うことによって摺動場で生じているマイクロ挙動を明らかにした。対象課題として「スラストすべり軸受」を選定し、境界潤滑下での摺動面の状態把握には「中性子反射率法（NR）」を、流体潤滑下にあるせん断流れ場の状態把握には「中性子位相イメージング法（NPI）」を適用し、トライボ環境下での摺動界面およびすきま内潤滑油のナノスケール構造の動的挙動把握に挑んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実施課題 においては境界潤滑下での摩擦係数を大きく支配するナノスケール潤滑層の動的構造変化の挙動を、実施課題 においては軸受すきま内せん断場にある潤滑油分子の局所構造をナノスケール学的視点で追うことができた。近年、このようなナノスケールの挙動を積み上げてマクロなトライボロジー性能を予測しようとする流れはより色濃くなっており、そのような近年の動向にマッチする研究成果を上げることができた。

研究成果の概要（英文）： In this study, quantum beam analysis was conducted for a sliding surface as the target field to understand lubrication phenomena from the nanoscale. Specifically, the "tribo-operando mechanism," which realizes a tribological condition, was incorporated into the quantum beamline, and the analysis was conducted under actual operating conditions to clarify the micro-behaviour occurring in the sliding field. The "thrust sliding bearing" was selected as the target subject, and the "neutron reflectometry (NR)" was applied to understand the state of the sliding surface under boundary lubrication, and the "neutron phase imaging (NPI)" was applied to understand the shear flow field under fluid lubrication, in order to understand the dynamic behavior of the nano-scale structure of the sliding interface and the lubricating oil in the gap under the tribological condition.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー ストライベック曲線 潤滑 量子ビーム分析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

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』は通常、「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。それを摺動条件と摩擦係数の関係として示したものが『ストライベック曲線』である。

近年、特に自動車業界を中心として、①更なる低摩擦摺動面の開発、および、②Model-Based Development (MBD) に向けた摩擦係数の精密予測、の2点が強く求められている。①は摺動面材料および形状、表面処理、潤滑油等の最適化がキーであり、各社が凌ぎを削って開発に打ち込んでいる。一方で②は、ストライベック曲線に実摺動面での摺動条件を時々刻々当て嵌めて各時刻での摩擦係数を予測し、その積分値を最小化することでトータルの摩擦損失を抑えようとするアプローチであり、ストライベック曲線をいかに精密に予測するかが最重要となる。しかしながら、トライボロジーにおいては、摺動面でのナノスケールの現象が巨視的な摩擦係数に大きく影響を及ぼすことを誰も認識しているにも関わらず、その現象の複雑さと分析の困難さからマイクロでの現象把握がなかなか進んでいない。よって、ストライベック曲線の予測に関してもマクロな設計式からの第一義的算出に留まり、ナノスケール現象を考慮に入れた「精密予測」と言えるレベルには決して至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、ストライベック曲線への展開を意識したメカノオペランド量子ビーム分析課題として「スラストすべり軸受」を挙げ、以下に掲げる2つの実施課題により「境界潤滑下」および「流体潤滑下」でのナノスケール現象の把握と展開を目指す。

<実施課題①：境界潤滑下> オペランドNR およびNSEによるトライボ摺動面構造の時分割分析

<実施課題②：流体潤滑下> オペランドNPIによる軸受すきま内潤滑油分子の局所構造解析

実施課題①においては境界潤滑下での摩擦係数を大きく支配するナノスケール潤滑層の動的構造変化の挙動を、実施課題②においては軸受すきま内せん断場にある潤滑油分子の局所構造をナノスケール学的視点で追う。そして最終的に得られたマイクロ構造と摩擦係数と対比させることで更なる「精密予測」に向けたストライベック曲線の再整理を行う。両課題はトライボ摺動面の更なる高効率化に繋がるものであり、省エネルギー社会の構築を目指す現在の産業動向にもよく合致している。機械の巨視的な性能評価結果と合わせることでより良い最適設計に活かす道筋を付けることができれば、次代の新しいアプローチとして高い波及効果が期待できる。

3. 研究の方法

<実施課題①：境界潤滑下> オペランドNR およびNSEによるトライボ摺動面構造の時分割分析

巨視的なトライボロジー特性を左右する摺動界面の境界潤滑摩擦モデルが初めて公に提示されたのは1920年代であり、その歴史は極めて古い。事実、潤滑油中の添加剤が摺動面に薄く柔らかい分子鎖層を形成すれば、場合によっては摩擦係数が0.001にまで低減するが、トライボ環境下におけるそのナノメートルオーダーの潤滑層の動的挙動（厚み・密度変化、粘弾性挙動、吸脱着挙動）は全く分かっていない。

本研究では、JRR-3 およびJ-PARC内のNRビームライン（MINE, SOFIA）およびNSEビームライン（MIEZE, VIN ROSE）に「トライボ摺動試験機」を組み込むことにより、巨視的なトライボロジー特性を支配する界面潤滑層の動的挙動分析を試みる。具体的には、スラスト式摺動試験機を各ビームライン内に組み込み、様々な速度・荷重条件で摺動試験を行いつつ下側基板側方から中性子線を入射することによって、摺動界面の時分割分析を行う。通常、潤滑油内の添加剤分子が摺動界面に吸着して摩擦低減に有効な分子鎖層を形成するとされるが、潤滑油中での分析が困難であること、分子鎖層がナノメートルオーダーと極めて薄いことから、潤滑界面の分析は後手となってきた。本研究ではさらにそれを摺動条件下での分析に発展させることにより、より実系に近い状態での摺動界面構造の時分割分析に挑戦する。これまでの研究の結果、界面に存在する分子鎖層の密度や配向が摩擦係数に大きく影響することが分かっており、本分析の実施は摺動面の更なる低摩擦設計に指針を与え得る。

<実施課題②：流体潤滑下> オペランドNPIによる軸受すきま内潤滑油分子の構造解析

近年、自動車の更なる燃費向上に向け、自動車用エンジンオイルの低粘度化が加速的に進行

している。オイルが低粘度化すれば粘性によるせん断抵抗は小さくなる反面、油膜切れが生じやすくなり、起動停止時の焼付きが問題となる。そのようなシビアな潤滑環境下での油膜切れを防ぐため、オイルには粘度指数向上剤（Viscosity Index Improver (VII)）が添加されている。一般的に VII 分子は基油中で高温膨潤することによって粘度低下を抑制するとされているが、油中でのそのサイズや構造を分析し、粘度特性との相関を議論した例は極めて少ない。しかしながら、摺動すきま内におけるこの VII 分子の挙動がストライベック曲線の精密予測を妨げているとの見方もある。

本研究では、京大複合原子力科学研究所および J-PARC 内の NPI ビームライン (CN-3, RADEN) に「スラスト軸受試験機」を組み込むことにより、VII 分子を含む潤滑油分子の局所構造解析を試みる。具体的には、オペランド計測用に設計したスラスト軸受試験機を各ビームライン内に組み込み、様々な速度で摺動試験を行いつつ面垂直方向から透過的に中性子線を入射することによって摺動面の 2 次元ビジビリティコントラスト像を得る。ビジビリティコントラスト像からは、すきま内の各場所における潤滑油分子のサイズと構造が推定できる。これまでの研究の結果、少なくとも VII 分子は局所的な温度・圧力によって構造を変え、潤滑油の局所粘性に大きく影響を及ぼすことが分かっている。

<比較とまとめ：ストライベック曲線の「精密予測」に向けたマイクロマクロブリッジング>

最後に本研究のまとめとして、上述の実施課題①および②で得られたトライボ現象を支配する「摺動界面」および「潤滑油」のマイクロ構造と軸受のマクロな摩擦特性を対比させることにより、ナノスケール構造がどのように巨視的なトライボ特性に影響を及ぼしているのかについて詳細にまとめる。さらに、これまでに設計式から組み立てられてきた「理論ストライベック曲線」との比較を行うことにより、精密予測のキーとなるパラメータや指標を見出す。最終的に、本研究で提案するような『トライボオペランド量子ビーム分析』の有効性を示すとともに、ナノスケール構造とマクロ特性の相関をストライベック曲線として示すことで更なる低摩擦摺動面設計に向けた設計指針の確立と提示を目指す。

4. 研究成果

本研究により得られた成果の概要を以下に述べる。

<実施課題①：境界潤滑下>

- ・オペランド NR によるトライボ摺動面構造の時分割分析を目指し、その装置開発と動作確認およびデータ取得を行った。1 μm 以下の極めて薄い油膜を形成しながら摺動するリングオンディस्क式摺動試験機（以下、狭小すきま摺動試験機）を開発し、さまざまな種類の添加剤入り潤滑油を用いて摺動試験を行ったところ、極性の強い添加剤を含む潤滑油において低速で増粘するという目新しい傾向が得られた。
- ・狭小隙間摺動試験機を NR ビームラインに組み込んで実験を行ったところ、回転時であっても吸着層の厚さと密度を取得できることを確認した。さらに、ポリマー系添加剤について回転時の吸着層構造を調べたところ、回転数に応じて添加剤吸着膜の厚さが変化することが分かった。
- ・ステアリン酸から成る添加剤吸着層の動的挙動を NSE で調査した。その結果に関しては、現在も解析を遂行中である。

<実施課題②：流体潤滑下>

- ・京都大学複合原子力科学研究所の CN-3 ビームラインにおいて、Talbot-Lau 型干渉計の中性子位相イメージング装置を用いてトライボロジー環境における中性子イメージング測定のための整備を行った。低ノイズかつ高量子効率の CMOS カメラをベースとした高空間分解能中性子カメラを新たに開発し、中性子位相イメージングシグナルの取得にも成功した。
- ・NPI を用いてすべり軸受内の油膜挙動を調査したところ、回転数に応じて軸受端における油膜形状が大きく変化することが分かった。また、数値解析の結果、軸受端での油膜の形状によってすべり軸受内の圧力分布が変化することを確認した。
- ・油膜内の構造解析を行うために位相イメージングを行ったが、空間解像度が足りず、分子レベルの構造解析を行うのは困難であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Shen Weiqi, Han Dongjiang, Hirayama Tomoko, Yamashita Naoki, Oshio Tadashi, Tsuneoka Hideo, Tagawa Kazuo, Yagishita Kazuhiro	4. 巻 17
2. 論文標題 N-Oleoyl Sarcosine as an Engine Oil Friction Modifier, Part 1: Tribological Performance of NOS+ZDDP Mixture at 100 °C	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 216 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2474/trol.17.216	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 -

1. 著者名 Shen Weiqi, Han Dongjiang, Hirayama Tomoko, Yamashita Naoki, Oshio Tadashi, Tsuneoka Hideo, Tagawa Kazuo, Yagishita Kazuhiro	4. 巻 17
2. 論文標題 N-Oleoyl Sarcosine as an Engine Oil Friction Modifier, Part 2: Elucidation of Friction-Reducing Mechanism at Room Temperature Focusing on Contribution of NOS in NOS+ZDDP Mixture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 227 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2474/trol.17.227	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 -

1. 著者名 Yamashita Naoki, Hirayama Tomoko, L. Yamada Norifumi, Shimizu Yutaro, Oda Kazuhiro, Kawamoto Hideki	4. 巻 17
2. 論文標題 Interfacial Structure and Tribological Property of Adsorbed Layer Formed by Dibasic Acid Ester Derivative	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 246 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2474/trol.17.246	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3件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 平山 朋子, 吉田 尚輝, 小宮 広志
2. 発表標題 狭小すきまレオメータを用いたグリースの粘弾性特性評価
3. 学会等名 トライボロジー会議2020秋別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoko Hirayama
2. 発表標題 In-Situ Observation of Solid-Liquid Interface and Its Nanotribological Property
3. 学会等名 7th World Tribology Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoko Hirayama
2. 発表標題 Boundary Lubrication Derived from Interfacial Structure
3. 学会等名 IndiaTrib2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学 機械機能要素工学研究室 http://www.elem.me.kyoto-u.ac.jp/</p>
--

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)	

6. 研究組織（つづき）

	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	日野 正裕 (Hino Masahiro) (70314292)	京都大学・複合原子力科学研究所・准教授 (14301)	
研究分担者	篠原 武尚 (Shinohara Takenao) (90425629)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究主幹 (82110)	
研究分担者	關 義親 (Seki Yoshichika) (90585209)	東北大学・多元物質科学研究所・准教授 (11301)	

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