

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04247

研究課題名（和文）電場における潤滑油のトライボロジー特性に関する研究

研究課題名（英文）Electric Field Effects on the Tribological Properties of Lubricants

研究代表者

呂 仁国（Lu, Renguo）

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：90758210

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、急増する電気自動車分野を背景とし、電場・電流における潤滑油のトライボロジー特性の解明を目的とした。通電なしの場合と比べ、摺動面の静止側を正極に、摺動側を負極に繋いで通電した場合は、摩擦係数が上昇することが確認された。これは電流が摺動面の表面活性を変化させたと考えられる。また、電場が印加されると、潤滑油分子配向が起因となった低摩擦が維持出来なくなったことが、通電時の摩擦係数の上昇をもたらした。通電によるチャージされた潤滑油分子が不安定となり、新生面との反応が強くなったが、トライボ化学分解より遥かに少ないため、電気的な分解を無視することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、潤滑油のトライボロジー特性に及ぼす電流・電場の影響を調べた。学術的意義は、表面電位法による電流が摺動面の表面活性への影響を明らかにしたこと、FT-IRその場観察法による潤滑油分子挙動への電場の影響の明確ができたこと、潤滑油分子の電気的な分解を解明することで、分子の吸着や分子配向などの分子レベルでの摩擦・摩耗メカニズムを明らかにしたこと、の三点が挙げられる。本研究で得た成果は、電場の有効利用を促し、摩擦・摩耗特性を改善でき、産業界が悩まされてきた水素脆化型の早期転動疲労剥離の問題解決が可能となるほか、EV車や電気制御機械などの更なる性能向上への貢献も期待できる。

研究成果の概要（英文）：The electrical failure of bearings has become a critical issue that restricts the lifetime of electric vehicles. This study aimed to explain the electrically induced tribological properties of lubricants. The direction of the electric current influenced friction coefficient, with a rapid increase observed when the cathode was connected to the sliding surface. The surface potential analysis showed that applying an electric current by connecting the friction surface to the cathode decreased surface activity, indicating that the effect of electric current on tribological properties depended on surface activity change. When an electric field was applied, low friction caused by molecular orientation could not be maintained, resulting in an increase in friction coefficient. Lubricant molecules charged by energization became unstable and reacted easily with the nascent surface, but it was far less than tribochemical decomposition, so electrical decomposition can be ignored.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー 電気自動車 摩擦の電気制御 摩耗の電気制御 潤滑油の分解

1. 研究開始当初の背景

自動車業界では、CO₂ 排出量削減に向けての様々な取り組みが求められており、電気自動車 (Electrical Vehicle: EV) が急展開されている。EV 車はエンジンやトランスミッションなどの部分が不要のため、部品は 1 ~ 2 割減っているが、電気制御に依存する機能が増えている。EV 車を支える主幹技術の一つはインバーターを搭載されている電気モーターである。インバーターはバッテリーの直流を電気モーター駆動するための交流に変換する役割を担い、ほとんどの EV 車は H ブリッジを拡張した三相インバーターが使用されている。三相インバーターでは、超高速で小刻みにスイッチングすることにより、単位時間あたりの電流量で交流の曲線に相当する出力を得る。しかし、超高速のスイッチングに伴うシャフト電圧の発生が避けられない。シャフト電圧はスイッチングレートに依存するが、大体 8 ~ 15V に達する。結果として、発生したシャフト電圧は、軸受の内輪・転動体・外輪間に電場を発生させ、油膜を貫通すると電流の流れも発生する。

一方、EV 車の駆動用モーターは、小型・軽量化のため高速回転の要求が高まっている。そこで、モーターに用いられている軸受の水素脆化型の早期転動疲労剥離が問題となっている。この剥離では、き裂形態が粒界き裂であり、粒界き裂に沿った白色組織変化を伴うことが多い。このような水素脆化型の早期転動疲労剥離の原因は、潤滑油の分解から侵入する水素であることが分かった。通常、金属材料の表面は金属酸化物と有機汚染物の被膜に覆われており、安定な状態になっている。荷重が負荷された状態で摩擦すると、これらの被膜が破壊・摩耗され下地の素材の表面が現れ、金属酸化物から金属の新生面が露出し、化学的な性質が大きく変化する。また、力学的に作られた表面には多数の格子欠陥やダングリングボンドが作られるため高い活性を持っている。このような新生面では潤滑油がトライボケミカル反応を起こしやすい。EV 車に対し、シャフト電流の発生は、摩擦面間の相対運動による機械的擾乱に加えて電氣的擾乱、つまりジュール熱・放電・荷重の増加などを受け、新生面の活性がさらに増加する可能性がある。したがって、潤滑油の分解や接触面での摩擦・摩耗が悪化することが予想されるため、潤滑油のトライボロジー特性に及ぼす電場/電流の影響の検討は必要となった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、潤滑油のトライボロジー特性に及ぼす電場・電流の影響を調べるとともに、潤滑油のトライボ化学分解・電気分解メカニズムを解明し、その抑制方法を確立する。さらに、電場での潤滑油の分子挙動を明らかにすることで、電場の効果を有効利用することにより、摩擦・摩耗特性を制御することができる。この研究より、電場・電流の有効利用によって、摩擦・摩耗特性を改善でき、産業界が悩まされてきた水素脆化型の早期転動疲労剥離の問題は解決が可能となるほか、EV 車や電気制御機械などの更なる性能向上への貢献も期待できる。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、摩擦試験機に電流印加回路を導入し、印加電流の方向、電流の大きさなどが摩擦係数と摩耗に及ぼす影響を調べるとともに、表面電位法による摺動面表面活性を評価し、電子顕微鏡 (SEM) や X 線分光法 (XPS) などの表面分析法を用い、潤滑油分子の吸着挙動とトライボフィルムの形成状態を明確し、トライボロジー特性への電流の影響の本質を解明する。

(2) 電場印加されたボールオンディスク小型摩擦試験機を顕微 FT-IR 装置に取り込んで、その場観察システムを構築し、電場における分子配向と摩擦特性の関係を検討する。

(3) 真空中に設置する摩擦試験機に質量分析計を取り込み、摩擦面での反応により発生する気体について、質量分析計で成分ごとの圧力変化をモニターする。さらに、摩擦試験機に電流印加回路を取り組むことによって、電流印加時の潤滑油の分解メカニズムの解明、気体生成物特に水素発生の定量化への評価が可能である。

4. 研究成果

(1) 潤滑油トライボロジー特性に及ぼす電流の影響

Fig.1 に示したリングオンディスク摩擦試験機を用いた。潤滑油はリングの回転によって巻き込まれる形で摩擦面に補給される。

例として、Fig.2 にポリアルファオレフィン (PAO) の摩擦係数の経時変化を示す。通電なしの場合と比べ、摺動面の静止側 (試験機のディスク) を正極に、摺動側 (試験機のリング) を負極に繋いで通電した場合、摩擦係数の上昇が確認された。一方、摺動面の静止側 (試験機のディスク) を負極に、摺動側 (試験機のリング) を正極に繋いで通電すると摩擦係数の上昇が見られなかった。つまり、正の電流が印加された時に摩擦係数が上昇したことが分かった。

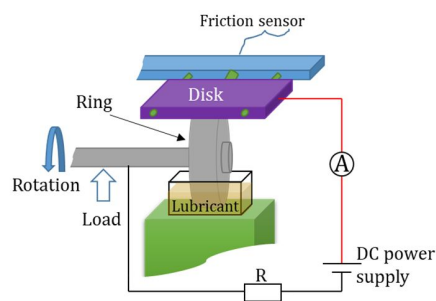


Fig.1 Schematic of disk-on-ring friction tester incorporating an electrical circuit

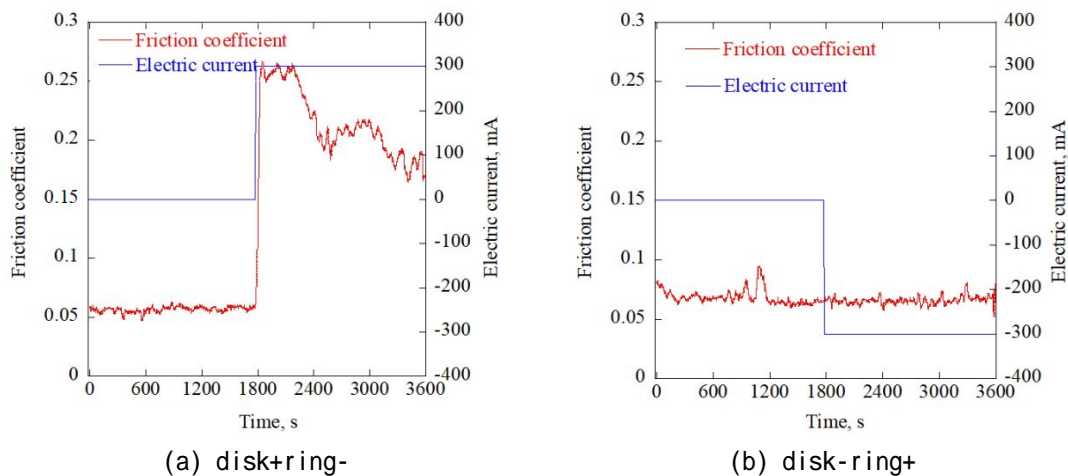


Fig.2 Temporal evolution of friction coefficients after applying electric current

では、なぜリング側が負極に繋がると摩擦係数が上昇したのか。そこで、表面活性の変化に原因があると予想される。摩擦中に潤滑油分子の吸着挙動や、トライボ化学分解、トライボフィルムの生成などのトライボ化学反応が金属新生面の活性によって発生するため、通電時の新生面の活性を推定することが必要となる。金属をはじめとする固体の表面には、酸素などの気体や脂肪酸分子などは吸着するが、電気双極子モーメントを有する分子が吸着することにもない、固体の仕事関数も変化する。同一金属の清浄な表面のものと吸着などにより表面状態を異にするものとの仕事関数の差を表面電位と言う。よって、表面電位が変化することにより、吸着速度や吸着量が測定できるので、表面の反応活性度が推定できることになる。Fig.3に表面活性の結果を示す。正の電流が印加される、つまりリング側が負極に繋がった際に、表面活性が明らかに低くなった。Fig.4に示すように、本実験では、リングの回転による摺動面への潤滑油を提供するため、表面活性の低いリング表面への潤滑油の吸着が減少することで摺動面に流入する潤滑油が減り、摩擦係数が上昇したと考えられる。

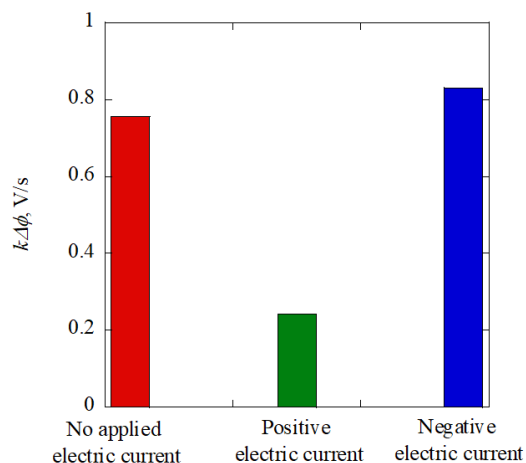


Fig.3 Effect of electric current on surface activity

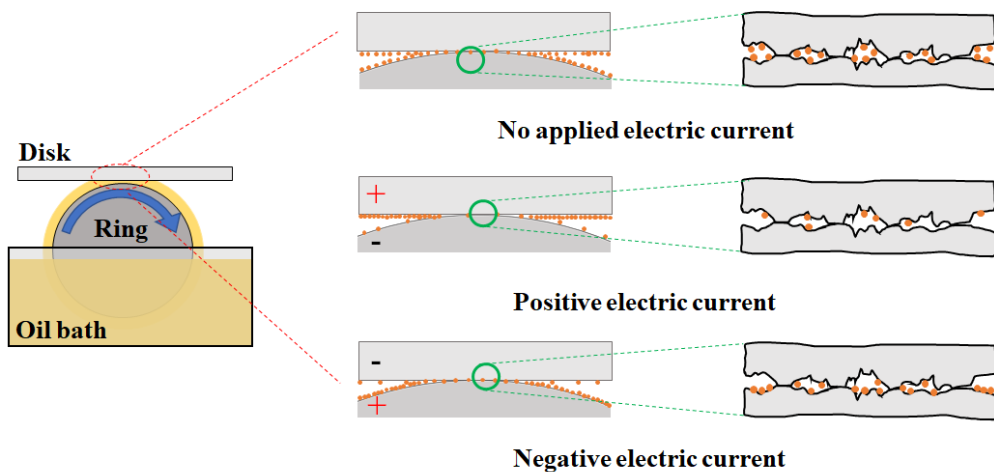


Fig.4 Adsorption mechanism of lubricant molecules onto charged friction surfaces

上記の結果はPAOで示したが、ボールオンディスク摩擦試験機でポリフェノールエーテル(PPG)

の評価も類似な結果が観察された。Fig.5 にボールとディスクの摩耗痕写真を示す。通電した場合は、負極と繋いだ摺動面にトライボフィルムの生成が僅かになった。X線分光法(XPS)を用いた表面分析の結果では、ディスク側を正極に繋ぐと、炭素濃度が無通電と比べ上昇した。ディスク側を負極に繋ぐと炭素濃度が減少した。トライボフィルムは正極側の摺動面に生成しやすいと考えられる。

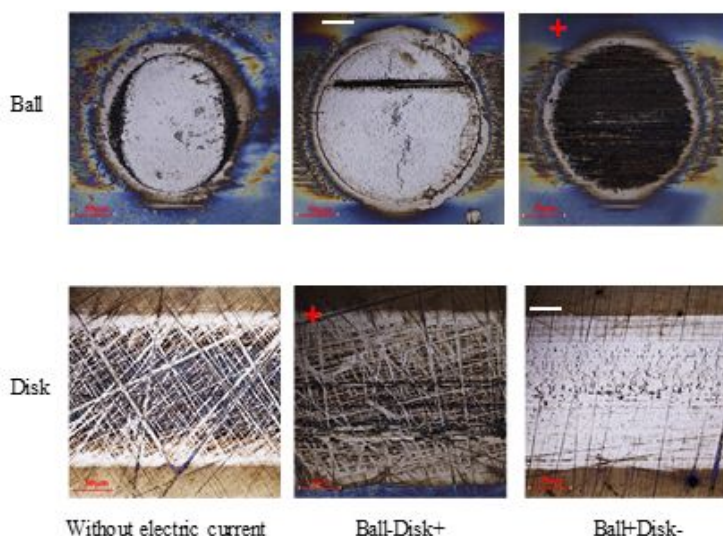


Fig.5 Worn surface morphology of ball and disk

そこで、摩擦係数の上昇は抑制できないだろうか。環式カルボン酸(シクロプロパンカルボン酸(CpCAc))を添加剤として用いて実験を行ったところ、油性剤としての潤滑効果を示し、更にグラファイトが生成されたことが確認された。そこで本研究では更に摩擦の低減効果を実現するために、摺動面に通電することによって脂環式カルボン酸の分解を促し、グラファイトの in-situ 生成を促進させる可能性を検討した。Fig.6 に示すように CpCAc を添加した PAO の摩擦係数は電流値の増加によって減少していることが分かった。メカニズムとして、通電によって添加剤が分解され、生成されたグラファイトが摩擦係数の減少をもたらしたのではないかと考えられる。

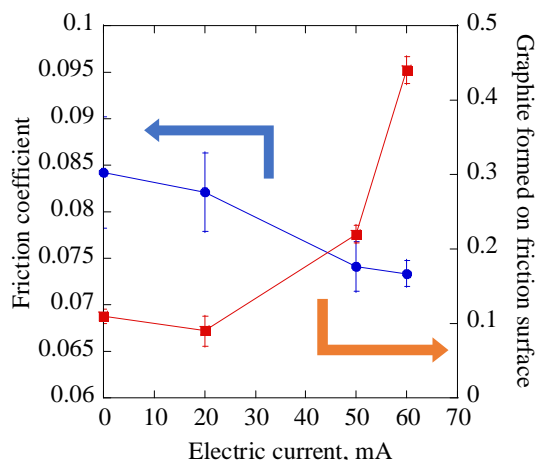


Fig.6 Effect of electric current on friction coefficient of CpCAc

(2) 電場での潤滑油分子挙動のその場観察

Fig.7 に示したその場観察システムを構築し、電場印加される時潤滑油分子挙動を観察した。電場が印加されないとき、摩擦係数は摩擦時間とともに徐々に減少し、なじみ期間が過ぎると安定になったことが見られた。ディスク側に直流電源の正極、ボール側に負極を繋げる(Disk+ Ball-)と、摩擦係数は急激に上昇した。一方、ディスク側に直流電源の負極、ボール側に正極(Disk- Ball+)にした場合は、摩擦係数の変化はあまり見られなかった。つまり、摩擦係数は摺動面にかけた電場の向きに依存することが確認された。FT-IR のその場の分析結果を Fig.8 に示す。2800~3000cm⁻¹ にオレイン酸主鎖の C-H の伸縮振動、1600~1800cm⁻¹ に末端官能基 C=O の伸縮振動が現れた。FT-IR で検出された各ピークの面積は、そのピークが現れる官能基の強度を示す。Table1 に C-H の伸縮振動、C=O の伸縮振動のピークの面積を示す。通電なしと比べ、ディスク側に直流電源の正極、ボール側に負極を繋げた(Disk+ Ball-)場合は、C=O の伸縮振動強度が強くなったのに対して、C-H の伸縮振動が弱くなった。C-H の伸縮振動が弱くなったのは、摺動面に介在する油膜が薄くなったことを示唆する。C=O の伸縮振動が強くなった、または、C=O の伸縮振動と C-H の伸縮振動の比率は大きくなるのは、摺動面に介在する末端官能基が増えたからと考えられる。一方、ディスク側に直流電源

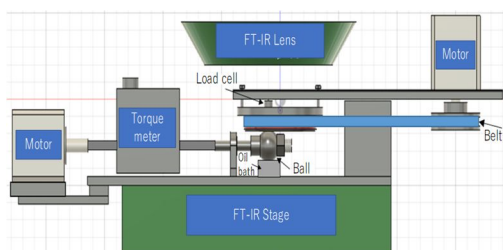


Fig.7 In-situ FT-IR observation for lubricant molecules

Table1 Intensity Ratio

	$I_{\nu(C=O)}/I_{\nu(C-H)}$
Without electric field	1.9
Connected to positive electrode	1.9
Connected to negative electrode	2.9

の負極、ボール側に正極(Disk-Ball+)にした場合は、C-Hの伸縮振動、C=Oの伸縮振動の変化はあまり見られなかった。

さらに、C=Oの伸縮振動に着目すると、無通電、通電(Disk-Ball+)時のピークが 1704cm^{-1} に対して、通電 (Disk+ Ball-) のピークが 1709cm^{-1} で、高周波数へシフトしていることが分かった。これは、通電時で摺動面の潤滑膜にオレイン酸の単量体が多く存在することを示している。

上記述べたように、ディスク側に直流電源の正極、ボール側に負極を繋げた(Disk+ Ball-)場合、油膜が薄くなったとともに、単量体存在が多くなった。実は、ボール側は負極に繋がると、オレイン酸はボールの方面に吸着しにくくなり、巻き上げる方法で摺動面に潤滑油を供給する本摩擦システムでは、潤滑油の流入量が減ると考えられる。これは摩擦係数が高くなった原因の一つである。一方、オレイン酸は通常二量体で存在し、分子構造に水素結合で形成された8員環はせん断に対し配向ができ、摩擦係数が低くなる。単量体に解離することで、分子配向による低摩擦が維持できなくなり、摩擦係数が高くなると考えられる。

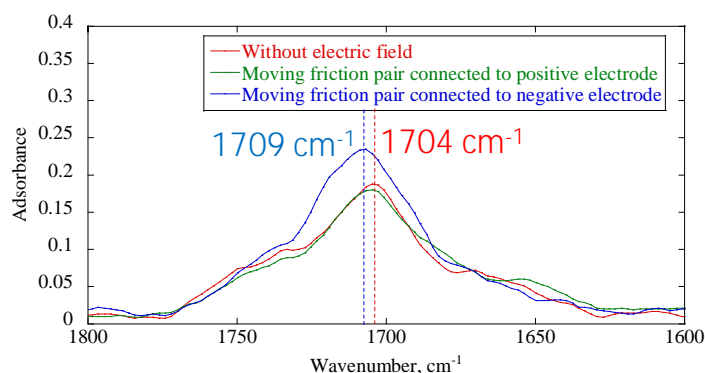


Fig.8 In-situ FTIR spectra

(3) 潤滑油のトライボ分解に及ぼす電流の影響

潤滑油分解量を測定するために、真空中に設置する電流印加可能な摩擦試験機に質量分析計を組み込み (Fig. 9) 摩擦面での反応により発生する気体を、質量分析計で成分ごとの圧力変化をモニターした。質量計の作動条件は真空のため、潤滑油に低蒸気圧を有する炭化水素油のMACを使用して実験を行った。電気的な分解とトライボ化学分解を区別するために、電気的な分解を調べる時、摩擦は行わない。潤滑油分解による生成した水素の発生速度は Fig. 10 に示す。電気的な分解による発生した水素は $4.99 \times 10^{17} \text{ molec. / mm}^2$ であるのに対し、トライボ化学分解のほうは $5.84 \times 10^{19} \text{ molec. / mm}^2$ までに上昇した。潤滑油分子が電子チャージされると、シミュレーション上ではやや不安定になるはずだが、摺動面新生面の活性と比べ、電流の影響はほぼ無視できる。なお、添加剤が利用された際に、電流を流すと、添加剤は新生面との反応が激しくなることが分かった。言い換えると、印加電流はトライボファイルの生成を促進でき、基油のトライボ化学分解を抑制できた。

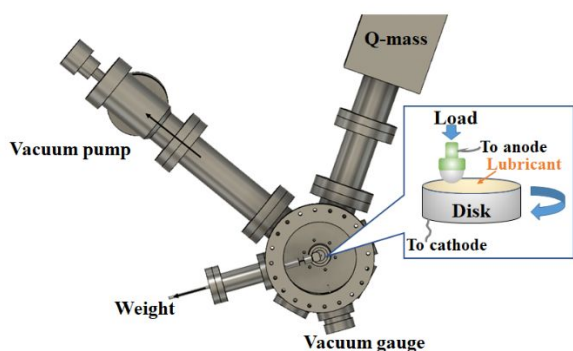


Fig.9 Schematic of measurement system for evaluating lubricant degradation

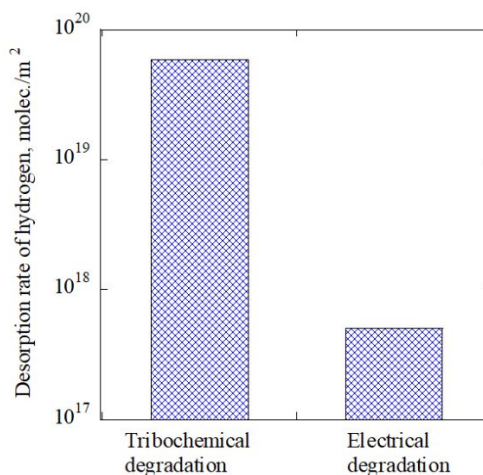


Fig.10 Hydrogen evolution during degradation of lubricant

上記で述べたように、本研究では、摺動面の表面活性に対する電流の影響、潤滑油分子挙動への電場の影響及び、潤滑油分子の電気的な分解を解明した。国内外のトライボロジー分野において、分子の吸着や分子配向などのように分子レベル視点から、潤滑油の電気的な摩擦摩耗に関するメカニズムを明らかにした。今後、電場・電流で摩擦摩耗の制御技術の研究を行う必要性を示唆してくれるほか、EV車や電気制御機械などの更なる性能向上への貢献も期待できると思われる。

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 1件）

1. 著者名 Renguo Lu, Shouhei Kawada, Hiroshi Tani, Shinji Koganezawa	4. 巻 -
2. 論文標題 The Influence of Electric Current on the Friction Behavior of Lubricant Molecules	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Chencheng Wu, Kazufumi Kontani, Renguo Lu, Shohei Kawada, Hiroshi Tani, Shinji Koganezawa
2. 発表標題 In-Situ Observation of Electric-Field-Driven Behavior of Lubricant Molecules
3. 学会等名 9th international tribology conference, Fukuoka 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Imai, Renguo Lu, Shohei Kawada, Hiroshi Tani, Shinji Koganezawa
2. 発表標題 In-situ Observation of Electric-Current-Induced Decomposition of Lubricants
3. 学会等名 9th international tribology conference, Fukuoka 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Renguo Lu, Kazufumi Kontani, Hiroshi Tani, Shohei Kawada, Shinji Koganezawa, Norio Tagawa
2. 発表標題 EFFECT OF ELECTRIC CURRENT ON FRICTION BEHAVIOR OF LUBRICANT MOLECULES
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紺谷和史, 古陳誠, 呂仁国, 川田将平, 谷弘詞, 小金沢新治
2. 発表標題 ToF-SIMSによるポリフェニルエーテルのトライボ反応膜の解析
3. 学会等名 2023 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井健人, 呂仁国, 川田将平, 谷弘詞, 小金沢新治
2. 発表標題 潤滑油のトライボ化学分解に及ぼす摺動面電流の影響
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古陳誠, 紺谷和史, 呂仁国, 川田将平, 谷弘詞, 小金沢新治
2. 発表標題 電場における油性剤分子挙動のその場観察
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 紺谷和史, 呂仁国, 川田将平, 谷弘詞, 小金沢新治, 多川則男
2. 発表標題 摺動面の電流制御によるポリフェニルエーテルのトライボロジー特性の評価
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 秋 福井
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紺谷 和史, 工陳誠, 呂 仁国, 川田 将平, 谷 弘詞, 小金沢 新治, 多川 則男
2. 発表標題 電流印加時の潤滑油分子挙動のその場観察
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紺谷和史, 呂仁国, 谷弘詞, 小金沢新治, 多川則男
2. 発表標題 通電時の潤滑特性に及ぼす潤滑油構造の影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 紺谷和史, 宮本 隆之介, 呂仁国, 川田 将平, 谷弘詞, 小金沢新治, 多川則男
2. 発表標題 摺動部の通電による脂環式カルボン酸減摩効果の向上
3. 学会等名 日本機械学会情報知能精密機械部門講演会 (IIP2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱田 昂幸, 呂 仁国, 谷 弘詞, 多川 則男, 小金沢 新治
2. 発表標題 通電電流が潤滑油の潤滑特性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱田昂幸, 呂仁国, 谷弘詞, 多川則男, 小金沢新治
2. 発表標題 潤滑油のトライボロジー特性に及ぼす電場の影響
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	紺谷 和史 (Kontani Kazufumi)		
研究協力者	濱田 昂幸 (Hamada Takayuki)		
研究協力者	ゴ 陳誠 (Wu Chencheng)		
研究協力者	今井 健人 (Imai Kento)		
研究協力者	宮本 隆之介 (Miyamoto Ryunosuke)		

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
---------	---------