

令和元年6月24日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06045

研究課題名(和文)高精度 圧力・温度・膜厚分布計測に基づく弾性流体潤滑油膜挙動の解明

研究課題名(英文) Investigation of EHL film behavior based on high precision pressure, temperature and film thickness distribution measurement

研究代表者

西川 宏志 (NISHIKAWA, Hiroshi)

九州工業大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40208161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：転がり軸受などの機械要素の潤滑状態である弾性流体潤滑(EHL)下における油膜挙動を把握することを目的とし、球と円板からなるEHL接触下の計測法改良および挙動解明を進めた。接触面に垂直な運動での油膜閉込め現象の油膜厚さと速度、等価半径、弾性係数、油性状等の関係を調査し、膜厚計算式を提案した。グリースは極低垂直運動で、増ちょう剤による厚膜を形成すること、その膜を介した滑り運動の摩擦係数は増ちょう剤種によって大きく異なることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

垂直運動EHL下の油膜厚さの計算ができることで機械要素の作動状態を予測でき、機械の設計における事前評価が可能になる。グリースが極低速で厚膜を形成すること、極低速垂直運動で増ちょう剤膜の特性を評価することでグリース評価、開発に貢献することができる。潤滑下で作動する機械要素の性能を左右する油膜挙動の把握を行うことで、省エネルギー・省資源につながる機械要素の性能向上・寿命改善が可能になる。

研究成果の概要(英文)：Mechanical elements such as rolling bearings operate under elastohydrodynamic lubrication (EHL). We improved the measurement method under EHL contact consisting of a ball and a disc and researched its behavior. The relationship between the entrapped oil film thickness and the approach speed, ball radius, elastic modulus and oil property etc. under impact motion was investigated and a film thickness equation was proposed. The grease formed a thick film at very low speed rolling or vertical motion, and the sliding friction coefficient was largely different depending on the thickener type.

研究分野：機械工学、トライボロジー

キーワード：弾性流体潤滑 油膜厚さ 摩擦係数 グリース

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

転がり軸受など機械要素の多くが作動している弾性流体潤滑（EHL）下において、油膜厚さは分解能 1nm での精密な計測が可能であるが、圧力・温度に関する計測は不十分である。このため、油潤滑下で作動する機械要素の性能を左右する油膜挙動の把握が重要であるが明確になっていない点も多く、摩擦摩耗低減など省エネルギー・省資源につながる機械要素の性能向上・寿命改善にとって問題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、EHL 下での精密な圧力・温度・膜厚分布計測法を改良し、微細凹凸形状表面を用い、多様な運動条件、実機相当の高荷重条件での圧力・温度・膜厚分布計測を行うことで EHL 下での油膜挙動を解明し、機械要素の性能・寿命向上の指針を得ることである。

3. 研究の方法

高精度な油膜挙動の把握を目的として、図 1 の球と円板からなる点接触 EHL 実験における膜厚分布計測、温度分布計測、圧力分布計測の改良を行う。転がり/滑り運動試験、垂直運動による油膜閉込め試験等を行い、接触表面のテクスチャ、多様な潤滑剤、油膜形成能力を有する添加剤などの EHL 下での挙動に関して、実機相当の高荷重・高面圧下までの広範囲な条件で実験を実施し、数値解析を併用して弾性流体潤滑下での油膜挙動メカニズムを解明する。

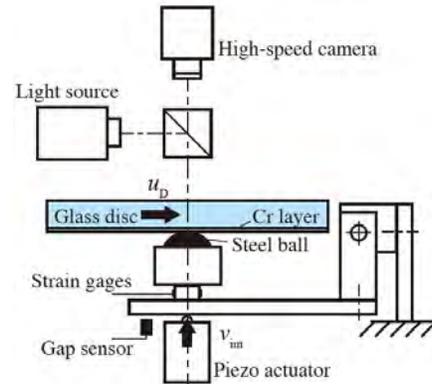


図 1 実験装置

4. 研究成果

(1) 閉じ込め膜厚 図 2 のように、垂直運動を行うと 2 面間に油膜が閉じ込められる。このときの中央部の最大になる膜厚を中央膜厚 h_c^* とした。油種を変えて閉じ込め実験を行った結果を図 3 に示す。使用した鋼球直径は 25.4 mm、円板はガラスである。衝突速度 v_{im} の増加に伴い閉じ込め中央膜厚 h_c^* は指数関数的に増加することがわかる。縦軸に閉じ込め中央膜厚 h_c^* の値と横軸に $\alpha^{1.8} \times \eta_0 \times v_{im}$ の値を両対数グラフに表したものを図 4 に示す。大気圧下での粘

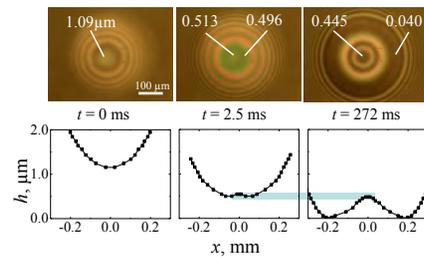


図 2 油膜の閉じ込め

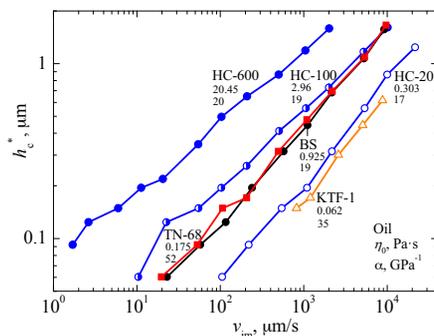


図 3 膜厚に及ぼす速度の影響

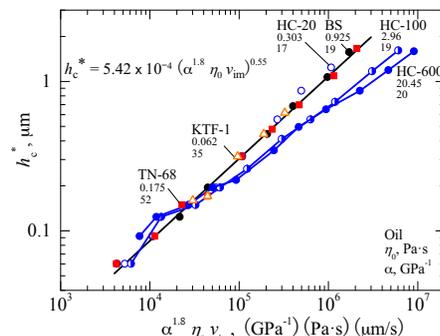


図 4 膜厚と速度パラメータの関係

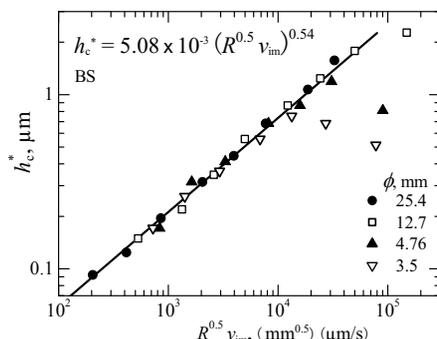


図 5 膜厚と $R^{0.5} v_{im}$ の関係

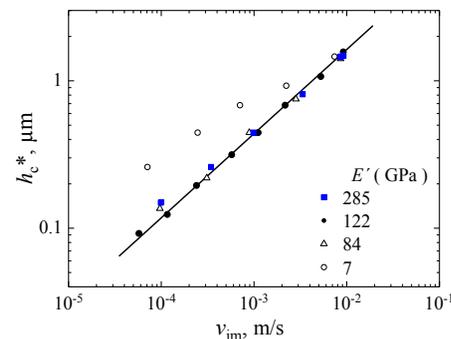


図 6 等価弾性係数の影響

度 η_0 が $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下の低い場合は一本の直線状になるが、 $2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以上の高い場合は傾きが小さくなるのがわかる。これは、大気圧下での粘度 η_0 が高いほどスクイズ効果が大きく、接近時の支持部等の弾性変形が大きくなるので、相対速度が低下するためと考えられる。機械の潤滑に用いられることの多い潤滑油粘度は $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下であるので膜厚算出に影響はないと考えられる。

図5は、鋼球径を変更した場合であるが、直径 25.4 mm 以下の場合にはほぼ同一直線状になる。また、接触材料の弾性係数を変えた場合の等価弾性係数の影響を図6に示したが、 7 GPa 以外の場合には、膜厚に対する等価弾性係数の影響はほぼないことがわかる。さらに研究を進め、広範囲な条件で使用することのできる膜厚計算式を提案できると考えている。膜厚計算式を使用して、測定が困難であり測定可能な研究施設が限られている粘度圧力係数を求めることが可能である。これらの試験は極微量の試料で実施可能であり、化学合成による基油や添加剤の開発に有用である。

(2) 閉じ込め油膜の流出 図7, 8に溝付き鋼球を用いて実験を行った場合のHC-100とKTF-1の干渉像および溝を除く接触域内の最大膜厚 h_{\max} の変化を示す。溝は深さ約 $0.25 \mu\text{m}$ 、溝の半値全幅約 $35 \mu\text{m}$ である。溝を導入することで、粘度圧力係数 α が大きく平滑鋼球では h_{\max} の減少が見られなかったKTF-1も、衝突直後から h_{\max} が減少していることが分かる。またHC-100も衝突直後から h_{\max} が減少しているが、 $t = 100 \text{ s}$ のとき、KTF-1のほうが h_{\max} が大きい。これは、 α が大きいため η_p が高いためと考えられる。高粘度油、高 α 油は接触圧下での粘度が高いが、溝を導入することで流動が生じ、高圧粘度を測定できる可能性がある。

図9は、アクリル円板を使用した場合の閉じ込め最大膜厚の時間変化を示したものである。接しく圧力が低いため、粘度の上昇が比較的小さいので粘度圧力係数が大きな試料油であっても連続的に流出が生じており、この方法でも粘度圧力係数が高い試料油の粘度圧力係数計測に利用できると考えられる。

(3) グリースは低速転がり条件で厚膜を形成することが知られている。従来行われていたよりも更に低速条件の $1 \mu\text{m/s}$ 以下の条件で実験を実施し、 1 mm/s では厚膜を形成しないグリースも、極低速条件下では厚膜を形成することを見出した。(図10)また、転がりではなく垂直接近運動でも極低速条件で厚膜を形成することを見出した。これらの速度膜厚関係の最低値をとる領域は、両面の接近速度で整理すると膜厚の値自体は異なるものの転がり、接近ともに同じ接近速度領域にあたるのがわかった。すなわち油膜の形成は2面の接近速度による影響が大きいといえる。低速で形成される厚膜は、閉じ込め後に時間変化がなく凹凸の大きい形状であることなどから、基油成分が流出し増ちょう剤割合がグリース初期状態より高くなっている

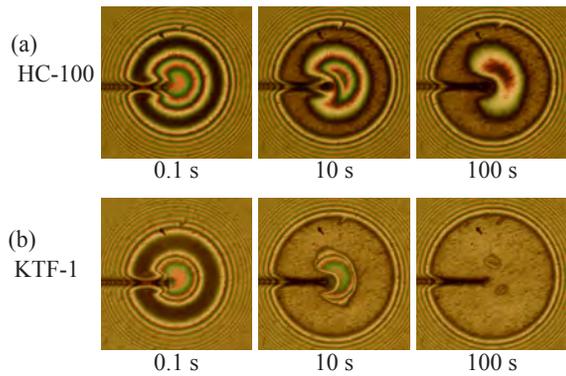


図7 溝がある場合の流出状況

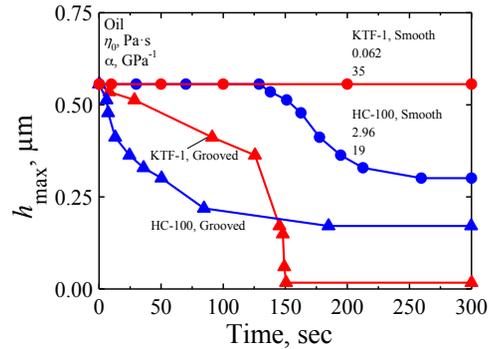


図8 最大膜厚の時間変化

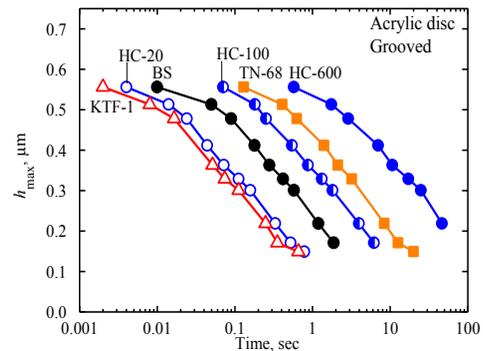


図9 最大膜厚の時間変化 (アクリル円板)

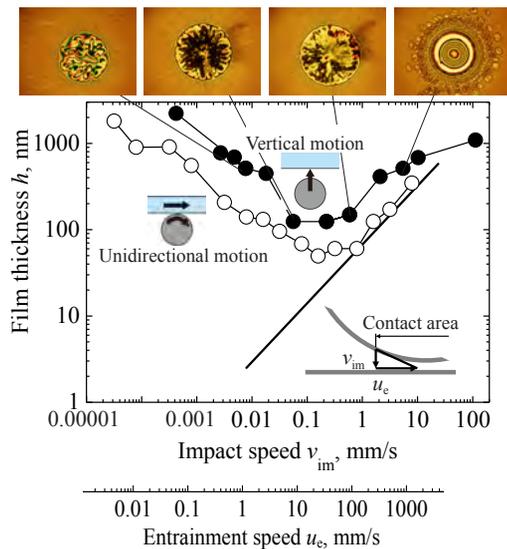


図10 転がり・閉じ込めでのグリース膜

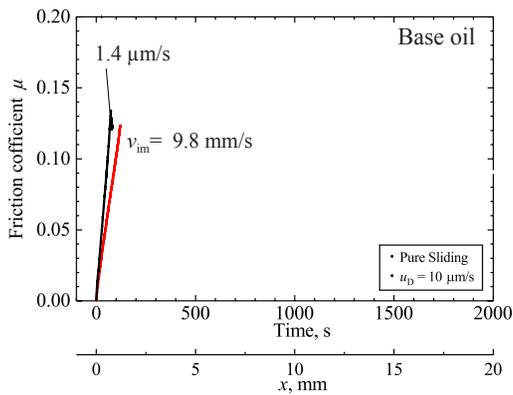


図 11 閉じ込め滑りの摩擦係数変化 (基油)

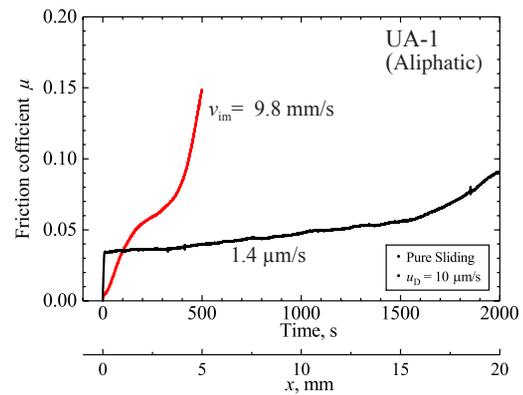


図 12 閉じ込め滑りの摩擦係数変化 (UA-1)

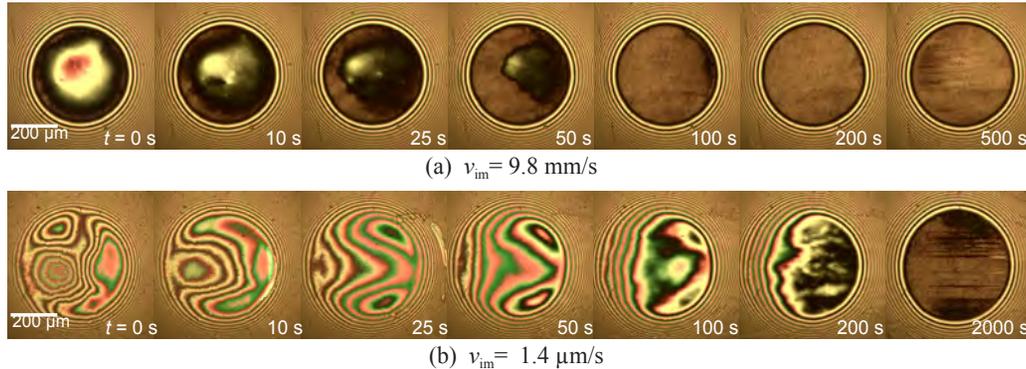


図 13 干渉像の時間変化 (UA-1)

と考えられる。

閉じ込め後に滑り運動させたときの摩擦係数の時間変化を基油とグリースについてそれぞれ図 11, 12 に示す。基油の場合は油膜が流出するため短時間で摩擦係数が上昇する。グリース UA-1、 $v_{im} = 9.8$ mm/s の場合には、初期の摩擦係数は低い徐々に上昇する。閉じ込め膜の厚い $v_{im} = 1.4 \mu\text{m/s}$ では、摩擦係数は滑り運動開始時に急激に立ち上がり 0.035 程度の低い値を示し時間経過による上昇は小さい。図 12 に対応する干渉像を図 13 に示す。 $v_{im} = 9.8$ mm/s の場合には 100 s でグリース膜が接触域から排出され、摩擦係数の上昇と対応している。 $v_{im} = 1.4 \mu\text{m/s}$ では 200 s まで膜厚は大きく低下しているため、せん断速度は上昇すると考えられるが、この間の摩擦係数の上昇は小さいことから、濃度が高い状態の増ちょう剤が固体潤滑剤の挙動をしていると考えられる。

脂環式ウレアグリース UA-2 を用いた場合の摩擦係数の時間変化を図 14 に示す。 $v_{im} = 1.3 \mu\text{m/s}$ では 2 μm 以上の非常に厚い膜厚を示したが、摩擦係数は初期から非常に高く、100 s の時点で比較すると、UA-1 の同条件と比較して 3 倍以上の値になっている。このことから、UA-2 は増ちょう剤間の結合力が強く厚膜を形成するが、せん断抵抗が大きいと考えられる。すなわち、転がり軸受内には滑りが存在することなどから UA-2 は増ちょう剤が摩擦を支配する条件では軸受トルクが大きいことが予測される。増ちょう剤単体での摩擦係数、せん断応力の測定は、グリースからの分離などの工程が必要であるが、本研究の手法を利用すれば、短時間で増ちょう剤特性を測定することができる。

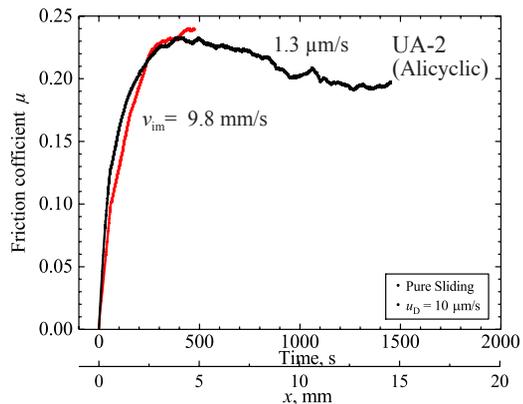


図 14 閉じ込め滑りの摩擦係数変化 (UA-2)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ivan Krupka, Martin Hartl, Kenji Matsuda, Hiroshi Nishikawa, Jing Wang, Feng Guo, Peiran Yang, Motohiro Kaneta, Deformation of Rough Surfaces in Point EHL Contacts Deformation of Rough Surfaces in Point EHL Contacts, Tribology Letters, 査読有, 67 巻 2 号, 2019 年.
DOI: 10.1007/s11249-019-1145-z
- ② Shun Cui, Hiroshi Nishikawa, Jing Wang, Qian Zou, Numerical study of surface dimple phenomenon by starvation in simple sliding contact, Industrial Lubrication and Tribology, 査読有, 69 巻 6 号 pp. 980-989, 2017 年.

〔学会発表〕(計 28 件)

- ① Hiroshi Nishikawa, Behaviour of Entrapped Grease Film under Low Speed Sliding Motion, ECOTRIB 2019(7th European Conference on Tribology), 2019 年 .
- ② 河本拓哉, 西川宏志, 大野信義, 垂直運動 EHL 下における閉じ込め油膜に及ぼすヤング率の影響, トライボロジー会議 2018 秋 伊勢, 2018 年 .
- ③ Hiroshi Nishikawa, Yuma Mita, Nobuyoshi Ohno, Observations of oil film behaviour in impact EHL, NORDTRIB 2018 (The 18th Nordic Symposium on Tribology) THE FINNISH SOCIETY FOR TRIBOLOGY, 2018 年 .
- ④ Hiroshi Nishikawa, Friction behavior of squeezed grease film, 45th LEEDS-LYON SYMPOSIUM on TRIBOLOGY, 2018 年 .
- ⑤ 小野佑樹, 松本謙司, 西川宏志, 三原雄司, 金属ベルト式無段変速機におけるベルト / プーリー間の油膜解析, トライボロジー会議 2018 春 東京, 2018 年 .
- ⑥ 上西健太, 砂原賢治, 北崎訓, 山口裕, 山本正治, 石田雄二, 佐々木巖, 西川宏志, 松田健次, 洗濯板状電食痕のピッチ決定ルールの考察～チューリングパターンとの類似性～, トライボロジー会議 2018 春 東京, 2018 年 .
- ⑦ 山下大輝, 砂原賢治, 北崎訓, 山口裕, 山本正治, 石田雄二, 佐々木巖, 西川宏志, 松田健次, 洗濯板状電食痕の形成～ごく初期における放電箇所の特定制～, トライボロジー会議 2018 春 東京, 2018 年 .
- ⑧ 田中龍太郎, 砂原賢治, 北崎訓, 山口裕, 山本正治, 石田雄二, 佐々木巖, 西川宏志, 松田健次, 外部スイッチング電源による洗濯板状電食痕の形, トライボロジー会議 2018 春 東京, 2018 年 .
- ⑨ 西川宏志, 仲摩綾香, グリース閉じ込め膜の摩擦挙動, トライボロジー会議 2018 春 東京, 2018 年 .
- ⑩ Kenji Sunahara, Satoshi Kitazaki, Yutaka Yamaguti, Masaharu Yamamoto, Yuji Ishida, Iwao Sasaki, Hiroshi Nishikawa, Kenji Matsuda, Pitch of washboard/ fluting pattern due to electrical pitting, 第9回日中トライボロジー先端フォーラム, 2018 年 .
- ⑪ 三田雄真, 西川宏志, 大野信義, 垂直運動下における EHL 閉じ込め油膜挙動に及ぼす溝の影響(第3報), トライボロジー会議 2017 秋 高松, 2017 年 .
- ⑫ Ayaka Nakama, Yuma Mita, Hiroshi Nishikawa, Observation of EHL Grease Film Behavior in very low speed, トライボロジー会議 2017 秋 高松, 2017 年
- ⑬ Hiroshi Nishikawa, Yuma Mita, Nobuyoshi Ohno, Hiroshi Nishikawa, Influence of Lubricant Properties on Impact EHL, トライボロジー会議 2017 秋 高松, 2017 年 .
- ⑭ Hiroshi Nishikawa, Behaviour of entrapped oil film in point contact EHL, WTC2017 (The 6th World Tribology Congress) Chinese Tribology Institute, CMES Beijing(China), 2017 年 .
- ⑮ Hiroshi Nishikawa, Naoya Ikeda, Behaviour of grease EHL films at very low speed , WTC2017(The 6th World Tribology Congress), CMES Beijing(China), 2017 年 .
- ⑯ Yuma Mita, Hiroshi Nishikawa, Effect of groove on behavior of point contact EHL film under vertical motion, 44rd LEEDS-LYON SYMPOSIUM on TRIBOLOGY Leeds Trinity University (United Kingdom), 2017 年 .
- ⑰ 西川宏志, 池田直哉, 三田雄真, 米原匡亮, 村上 雄一, 極低速一方向運動および垂直運動下のグリース EHL 膜挙動, トライボロジー会議 2017 春 東京, 2017 年 .
- ⑱ 三田雄真, 米原匡亮, 村上 雄一, 池田直哉, 西川宏志, 垂直運動下における EHL 閉じ込め油膜挙動に及ぼす溝の影響 (第2報), トライボロジー会議 2017 春 東京, 2017 年 .
- ⑲ 米原匡亮, 村上 雄一, 三田雄真, 池田直哉, 西川宏志, 大野信義, 垂直運動下における EHL 閉じ込め油膜厚さ計算式の検討 (第2報), トライボロジー会議 2017 春 東京, 2017 年 .
- ⑳ 池田直哉, 三田雄真, 西川宏志, 極低速域におけるグリース EHL 膜の観察, トライボロジー会議 2016 秋 新潟, 2016 年 .
- ㉑ 三田雄真, 村上雄一, 西川宏志, 垂直運動下における EHL 閉じ込め油膜挙動に及ぼす溝の影響, トライボロジー会議 2016 秋 新潟, 2016 年 .
- ㉒ 村上雄一, 三田雄真, 西川宏志, 大野信義, 垂直運動下における EHL 閉じ込め油膜厚さ計算式の検討, トライボロジー会議 2016 秋 新潟, 2016 年 .
- ㉓ Naoya Ikeda, Hiroshi Nishikawa, Observation of Grease EHL Films in Reciprocating and Impact Motions, 43rd LEEDS-LYON SYMPOSIUM on TRIBOLOGY Leeds Trinity University (United Kingdom), 2016 年 .
- ㉔ Kenji Sunahara, Satoshi Kitazaki, Yutaka Yamaguti, Yuji Ishida, Iwao Sasaki, Hiroshi Nishikawa, Kenji Matsuda, Effect of Lubrication Regime on Washboard/Fluting Pattern Formation due to Electrical Pitting, 43rd LEEDS-LYON SYMPOSIUM on TRIBOLOGY Leeds Trinity University (United Kingdom), 2016 年 .
- ㉕ Yuma Mita, Hiroshi Nishikawa, Behavior of Point Contact EHL Film under Vertical Motion, 43rd LEEDS-LYON SYMPOSIUM on TRIBOLOGY Leeds Trinity University (United Kingdom), 2016 年 .
- ㉖ Hiroshi Nishikawa, Nobuyuki Ohno, Behaviour of EHL Films under Impact Loading, NORDTRIB 2016 (The 17th Nordic Symposium on Tribology), 2016 年 .

⑳ 池田直哉, 西川宏志, 往復運動下におけるグリース EHL 油膜の挙動, トライボロジー会議 2016 春 東京, 2016 年.

㉑ 三田雄真, 漆原光太郎, 池田直哉, 西川宏志, 大野信義, 衝撃運動下における点接触 EHL 膜の挙動, トライボロジー会議 2016 春 東京, 2016 年.

[その他]

ホームページ

<https://nishikawah.wixsite.com/kit-nishikawa>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 兼田 楨宏

ローマ字氏名: (KANETA, Motohiro)

研究協力者氏名: 大野 信義

ローマ字氏名: (OHNO, Nobuyoshi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。