

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686019

研究課題名（和文） 10nmオーダーすきまでの流体潤滑性能に及ぼす添加剤吸着層の影響

研究課題名（英文） Effect of Adsorbed Additive Layers to Hydrodynamic Lubrication Performances with 10nm-Level Clearance

研究代表者

平山 朋子（HIRAYAMA TOMOKO）

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：00340505

研究成果の概要（和文）：ナノテクスチャリングを施した基板を用いることにより、10～100nmオーダーでのすきまを保ったまましゅう動する平行平板摩擦試験機を開発した。それを用いて実験を行い、ストライベック曲線を得たところ、油性剤を混入しない場合は理論曲線に極めてよく一致するが、油性剤を混入すると界面すべりが生じ、摩擦係数が理論曲線より大幅に下回る傾向を示すことが分かった。

研究成果の概要（英文）：To investigate the friction properties of sliding surfaces under hydrodynamic lubricated condition, we designed a disk-on-disk friction tester. In the experiments, we used the disks with spiral grooves of hundreds nanometer depth on the surface to keep the two disks in parallel during the friction test by the generation of hydrodynamic pressure. We used poli-alpha-olefin mixed with palmitic acid and stearic acid as lubricant with oiliness additives. As a result, the friction coefficient under hydrodynamic lubrication became obviously lower when we used the additive-mixed lubricant than that when we used the lubricant without any additives.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2011年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2012年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	20,100,000	6,030,000	26,130,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー・流体潤滑

## 1. 研究開始当初の背景

機械しゅう動面における潤滑状態は、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。境界潤滑状態においては、表面突起間で生じる真実接触部での潤滑油・添加剤の挙動がその摩擦特性を大きく支配することは周知の事実である。しかしながら、近年、しゅう動部材の加工精度の向上に伴って非

真実接触部における二面間のすきまも狭くなる傾向にあり、非真実接触部での潤滑特性の影響が相対的に大きくなっていることが指摘されている。そのような非真実接触部、すなわち、非接触領域での油膜の挙動計算には、従来より、レイノルズ方程式が用いられており、トライボロジー分野で対象とするような粘性流体特性が支配的な系では、その計算結果は実現象と比較的によく一致する。しか

しながら、例えば近年、固液界面での流体のすべり（流体スリップ）を示唆するような現象が観察されるなど、従来の非すべり境界条件下でのレイノルズ方程式のみでは説明できない現象が幾例か報告され、注目を集めているのも事実である。そのような固液界面の状態が流体潤滑域での油膜挙動に及ぼす影響は、対象とするすきまが狭くなるにつれて顕著となると推測できる。

狭いすきまでの潤滑現象を対象とする研究は、多くはないものの、すでに国内外でいくつか存在する。そしてその研究方式は、大きくは、トップダウン式とボトムアップ式に分けることができる。トップダウン式の研究とは、マクロな特性（摩擦係数等）からミクロな固液界面状態を推測するものであり、先に述べた流体スリップの報告などがその典型的な例である。しかしながらこの手法では、摩擦係数等の値の微小な変化から固液界面の状態を推定するしか方法がなく、実現象の把握には限界がある。また、安定した結果を得るため、そのほとんどが球と平板ですきまを形成する実験系を採用しているが、得られる情報には必然的にすきまの広い部分での特性も混じるため、感度が鈍いという大きな欠点がある。一方、ボトムアップ式の研究とは、nm オーダで正確に調節したすきまを用い、その片面を微小に動かした場合の流体挙動を調べる手法であり、例えば、ナノ共振器測定法による水溶液のレオロジー特性の把握等がある。しかしながら、そのしゅう動条件は高々100 $\mu\text{m}$  のすべり距離での往復動に留まっており、その情報からだけでは実際の機械のしゅう動面で生じている現象を予想するのは困難である。

## 2. 研究の目的

1 の背景を踏まえ、本研究では 10nm～100nm のメゾすきま領域に焦点を当て、固液界面の状態が流体潤滑性能に及ぼす影響を詳細に調べることを目的とした。特に、本研究では固液界面における添加剤吸着層の存在に着目し、その存在がメゾすきま領域での流体潤滑特性にどのような影響を及ぼすかを定量的に調査することとした。なお、本研究で提案した実験システムの新規性および特長を以下に述べる。

- (1) 平板－平板で構成されるすきまを対象とし、高感度な情報が抽出できる。
- (2) nm オーダですきまを変化させることにより、信頼性の高いデータが得られる。
- (3) 別の手法を相補的に駆使することによって得た吸着層の厚み・密度情報と照らし合わせることで、しゅう動特性に及ぼす吸着層の役割を定量的に調査することができる。

## 3. 研究の方法

### (1) ナノテクスチャ形状の最適設計とそれに基づく実験システムの構築

これまでの研究から、動圧効果を発揮するすきまのオーダは、表面テクスチャの溝深さおよび溝形状に密接に関連することが分かっている。よって、ナノテクスチャを適切に設計すれば、10～100nm オーダの安定した薄い動圧油膜の形成が可能であると言える。

そこで、本課題では、平行平板の摩擦試験を実現する実験システムを設計・開発する。本システムの特長は以下である。

- ・平板間で 10～100nm の平行すきまを形成できるよう、片面にナノテクスチャを加工し、動圧発生による自動すきま調整機構を採用する。片側平板を球面静圧軸受で支持することにより、二面が自動的に平行すきまとなるようにする。
- ・超精密空気圧制御弁によって、軸方向の負荷を制御する。これにより、すきまの 1nm オーダ制御を可能とする。

### (2) 流体潤滑条件下における添加剤吸着層厚みのその場計測

申請者らは、中性子反射率法を用いることにより、固液界面での添加剤吸着層の厚みを直接計測できることをすでに確認している。それを応用して、さまざまな添加剤における吸着層厚みを計測する。

### (3) 添加剤吸着層が流体潤滑性能に及ぼす影響の把握とまとめ

(1)の実験装置で得られたメゾすきま領域での流体潤滑性能の結果および(2)で得られたしゅう動動作中での添加剤吸着層の厚み測定結果を元に、添加剤吸着層の有無によって 10～100nm のすきま領域での流体潤滑性能がどのように変化するかを実験的に調べる。レイノルズ方程式から算出される解と比較することにより、レイノルズ方程式の適用範囲の同定およびその修正方針に関して検討を行い、本研究のまとめとする。

## 4. 研究成果

### (1) 実験システムの設計・開発

本申請課題で開発した実験システムの写真を図 1 に示す。潤滑油粘度の影響、基板表面粗さの影響などを詳細に調べた結果、適切な条件下であれば、表面粗さの大小に関わらずナノテクスチャリングによる流体潤滑状態の維持は可能であり、混合潤滑状態への遷移は最小すきまの値で決まる（本実験では 200～300nm 程度）ことを実験的に証明した。



図1 開発した平行平板しゅう動試験機。ナノテクスチャによる傾き剛性の効果により、極めて狭いすきままで二面を平行に保ちながらしゅう動試験を行うことができる。

(2) 中性子反射率法による添加剤吸着層の厚み・密度計測

中性子反射率計 SOFIA@J-PARC を用いて各種脂肪酸による吸着層の厚みおよび密度を計測した。その結果、吸着層の厚みは、脂肪酸の鎖長に応じて厚くなることが分かった。また摩擦をするとその吸着層の厚みは徐々に厚くなることが分かった。

(3) 油性剤吸着層が流体潤滑特性に及ぼす影響の把握

図2に、(1)で設計・開発したしゅう動試験機によって得たストライベック曲線を示す。ベースオイル（この場合はPA0）のみの場合は理論曲線とその挙動が極めてよく一致しているが、そこに油性剤（この場合はステアリン酸とパルミチン酸）を加えると理論曲線より大幅に摩擦係数が小さくなる傾向を示すことがわかった。これは、吸着層の形成によって界面すべりがもたらされたためと考えることができる。

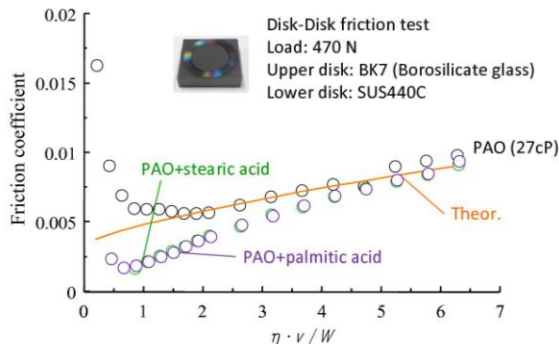


図2 開発したしゅう動試験機によって得たストライベック曲線。油性剤を混入すると摩擦係数が大幅に低減する傾向を示すことが見て取れる。

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7件)

①中西裕信, 山中佑資, 徳岡伶哉, 平山朋子, 松岡敬, O/W エマルション圧延におけるロール/ストリップ間の導入油膜形成メカニズムの把握, トライボロジスト, 査読あり, Vol. 58, No. 6 (2013) 印刷中.

②Tomoko Hirayama, Takashi Torii, Yohei Konishi, Masayuki Maeda, Takashi Matsuoka, Kazuko Inoue, Masahiro Hino, Dai Yamazaki, Masayasu Takeda, Thickness and Density of Adsorbed Additive Layer on Metal Surface in Lubricant by Neutron Reflectometry, Tribology International, 査読あり, Vol. 54 (2012) pp. 100-105.

③ Atsushi Sugimoto, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Katsumi Sasaki, Nano-Motion X-Y Stage by Pneumatic Servo Spherical Bearing Actuators, Key Engineering Materials, 査読あり, Vol. 516 (2012) pp. 281-286.

④ Yusuke Tanaka, Kazuma Okada, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Hiroshi Sawada, Kosuke Kawahara, Shunji Noguchi, Lubricated Friction Reduction by Spiral-Groove-Shape Nano-Texturing, Key Engineering Materials, 査読あり, Vol. 516 (2012) 431-436.

⑤ Atsushi Sugimoto, Hiroki Danjo, Takakazu Kitagawa, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Katsumi Sasaki, Development of Ultraprecise Positioning X-Y Stage Composed of Pneumatic Servo Bearing Actuators, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 査読あり, Vol. 225, No. 5 (2011) pp. 1-8.

⑥平山朋子, 鳥居誉司, 小西庸平, 前田成志, 松岡敬, 井上和子, 日野正裕, 山崎大, 武田全康, 中性子反射率法を用いた金属表面における添加剤吸着層の厚みおよび密度測定とそのトライボロジー特性, 日本機械学会論文集C編, 査読あり, Vol. 77, No. 779 (2011) pp. 2884-2893.

⑦ Shinichi Ikeda, Yo Arakawa, Noriaki Hishida, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Hiroshi Yabe, Herringbone-Grooved Bearing with Non-Uniform Grooves for Higher Speed

Spindle, Lubrication Science, 査読あり,  
Vol. 22, No. 9 (2010) pp. 377-392.

[学会発表] (計 5 件)

①塩谷平之助, 山田一輝, 平山朋子, 松岡敬, 沢田博司, 川原公介, 流体潤滑下におけるナノテクスチャリング特性に及ぼす表面粗さの影響, トライボロジー会議春 2013, 2013/5/22, 東京.

②池田光孝, 鈴木俊輝, 平山朋子, 松岡敬, 沢田博司, 川原公介, 弾性流体潤滑下での油膜厚さに及ぼすナノテクスチャリングの効果 (続) トライボロジー会議春 2013, 2013/5/22, 東京.

③ Tomoko Hirayama, Yusuke Tanaka, Mitsutaka Ikeda, Takashi Matsuoka, Hiroshi Sawada, Kosuke Kawahara, Shunji Noguchi Nano-Texturing for Expansion of Hydrodynamic Lubrication Regime, ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference, 2012/10/10, Denver, USA.

④ Heinosuke Shiotani, Yusuke Tanaka, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Effect of Surface Roughness on Hydrodynamic Lubrication with Nano-Texturing, ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference, 2012/10/9, Denver, USA.

⑤Tomoko Hirayama, Masayuki Maeda, Masato Nakashima, Takashi Matsuoka, Masahiro Hino, Physical and Chemical Properties of Fatty Acids as Oiliness Additives, ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference, 2012/10/10, Denver, USA.

[図書] (計 1 件)

①佐々木信也, 平山朋子ら, 講談社, はじめてのトライボロジー, 2013, pp. 46-104.

[その他]

ホームページ等

<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・准教授

研究者番号: 00340505

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号:

(3) 連携研究者  
なし ( )

研究者番号: