

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01243

研究課題名(和文)流れ計測に基づいたナノすきま流体潤滑の理論体系の構築

研究課題名(英文) Construction of theoretical system for nano-gap fluid lubrication based on flow measurement

研究代表者

福澤 健二 (Fukuzawa, Kenji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60324448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、潤滑剤分子の流れに着目し、ナノすきまの流体潤滑現象を解明することを目的とした。マイクロ流体デバイスを用いたナノすきまの潤滑剤分子の流れを計測する方法を提案し、原理確認に成功した。また、ナノすきまのせん断力・すきま同時計測法では、エリプソメトリーに基づいた計測系の構築と原理確認に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノしゅう動すきまにおいては、流体潤滑作用の本質である潤滑剤分子の流れの解明は困難で、その理論体系確立の大きな障害となっていた。そして、潤滑剤分子の流れとしては、局所的な圧力差による圧力流れとしゅう動面のせん断によるせん断流れの解明が必須だが、いずれもナノすきまでの計測は困難だった。本研究では、新規な計測法の提案と実証に取り組み、その原理確認に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the fluid lubrication phenomenon of nano-sliding gaps by focusing on the flow of lubricant molecules. We have proposed a method for measuring the flow of lubricant molecules in a nano-gaps using a micro fluidic device, and have successfully confirmed the principle. In addition, we have succeeded in constructing a measurement system based on ellipsometry and confirming the principle of simultaneous measurement of shear force and gap for nano-gap lubrication.

研究分野：マイクロ・ナノトライボロジー計測

キーワード：ナノトライボロジー 潤滑

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の精密加工技術の進展に伴う加工精度の向上はめざましい。とくに、加工面の平滑さ(面精度)の向上により、相対運動する機械部品間のすきま(しゅう動すきま)の微小化が可能となってきた。そして、流体潤滑可能なしゅう動すきまは、従来の μm オーダから nm オーダへと、さらなる微小化が要請されている。この微小しゅう動すきまを活かして、革新的な機械性能を実現するための潤滑システムの実現が期待されている。例えば、情報化社会の進展に伴い発生する膨大なデジタル情報を保存するデータセンタにおけるハードディスクドライブ(HDD)では、ナノメートルスケールのすきまを介したヘッド・ディスク間の潤滑性能向上が情報の記録密度増大に必須となり、各社は技術開発にしのぎを削っている。また、自動車エンジンにおいても、近年の超低燃費化の社会的要請により、潤滑剤低粘度化による粘性摩擦削減が試みられており、各社の競争力の源泉となっている。そして、粘度が低いほどピストンとシリンダヘッド間のしゅう動すきまは微小となる。これらの例のように、産業界において、微小すきま潤滑はより重要となっており、今後の加工精度向上により、さらに重要になるものと考えられる。

一方、潤滑剤を含め多くの液体では、すきまが分子サイズに近い nm オーダになると、粘度が増加するなど、これまでの μm 以上のマクロなすきまの液体とは異なる流体特性を持つことが明らかになってきた。そのため、ナノすきまの流体潤滑については、従来のマクロすきまの流体潤滑とは異なる理論体系の確立が必須と考えられている。しかし、ナノすきまの流体潤滑については、計測の困難さゆえ現象把握さえ十分でなかった。

こうした背景の下、われわれはナノすきま潤滑現象の定量化のための新しい計測技術の確立を試みてきた。流体潤滑では、潤滑方程式を用いて、すきまに対する潤滑剤分子の発生する圧力を算出する。このように潤滑計測では、すきまを精密に規定した水平力(摩擦力など)と鉛直力(動圧力など)の計測が重要である。とくに、微小すきまでは、すきま変動が現象に大きく影響する。そこで、すきまを精密に規定した力計測法に加え、ナノすきま分布(形状)を計測する方法の確立を進めてきた。

2. 研究の目的

流体潤滑作用の本質である、ナノすきまの潤滑剤分子の流れの解明は、計測の困難さゆえ手つかずで、理論体系確立の大きな障害となっていると考えた。潤滑剤分子の流れとしては、局所的な圧力差による圧力流れとしゅう動面のせん断によるせん断流れの解明が必須だが、いずれもナノすきまでの計測は困難だった。そこで、本研究では、新規な計測法の基盤を確立することとした。具体的には、

- (1) マイクロ流体デバイスを用いたナノすきまの圧力流れ計測法
- (2) 力・すきま同時計測を用いたナノすきまのせん断流れ計測法

3. 研究の方法

研究目的で掲げた(1)および(2)については、以下の方法を提案し、原理的な可能性を実験的に検証した。

(1) マイクロ流体デバイスを用いたナノすきまの圧力流れ計測法

微小すきままでの流体特性は、すきまに大きく依存するため、流れ計測には、すきま一定のしゅう動面が必須である。そこで、すきま一定の流路から成るマイクロ流体デバイスを設計し、マイクロマシン技術を用いて作製を試みた。フォトリソグラフィーを用いた反応性イオンエッチング法を用いて流路構造を作製し、さらに集束イオンビーム(FIB)エッチング法によりシリコン

基板に微小深さの溝(段差)を設けた。このマイクロ流路構造を設けたシリコン基板に、陽極接合法を用いてガラス基板を接合し、溝を封止することで、微小深さ(すきま)の流路を有するマイクロ流体デバイスを作製した。流路の設計・作製については、学内の微細加工施設を利用した。

そして、作製したマイクロ流体デバイスの流路を蛍光分子を溶かした液体で満たし、蛍光分子の運動を計測した。蛍光分子の運動計測法としては、1分子レベルの蛍光分子の蛍光強度の時間変化を計測した。さらに、マイクロ流体デバイスに圧力流れを発生させるのに必要な、ポンプ、圧力制御系等を付加した計測系を構築した。

(2) 力・すきま同時計測を用いたナノすきまのせん断流れ計測法

本計測においても、すきまの把握が重要である。エリプソメトリーは偏光を利用し、ナノメートルオーダーの膜厚計測を可能とする方法である。我々は独自の光学系を用いることで、本原理を用いてナノすきま分布を定量化することを可能とし、これを垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡と呼んでいる。本顕微鏡では、偏光状態の分布を輝度に変換し明暗像として得ることにより、すきま形状をリアルタイムに計測する。この垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡を用いたせん断力・すきま同時計測系の構築に着手した。また、しゅう動子を、水平・鉛直方向に変形する二組の板ばねで支持する構造とし、板ばねの変位をレーザ干渉変位計で測定し、せん断力と荷重を得た。

4. 研究成果

研究目的で掲げた(1)および(2)については、以下の成果を得た。

(1) マイクロ流体デバイスを用いたナノすきまの圧力流れ計測法

得られる蛍光強度は、蛍光分子の拡散により変化する。この時間変化から流路内の液体の粘度を算出することを試みた。そして、蛍光分子を適切に選定すれば、本原理を用いたマイクロ流路における粘度の定量化が原理的に可能であることを確認できた。さらに、ナノ深さ流路に適用するには、信号対雑音比の向上が重要であることも明らかになった。蛍光分子の吸着の対策を検討し、蛍光分子の選定を含めた計測系の見直しを実施した。自然拡散状態の分子の運動を計測しているため、吸着する分子が多くなった可能性があると考え、構築した圧力印加による流れ計測系の適用を試みた。圧力流れを利用することで、吸着が抑えられ、ナノ深さの流路について粘度を得ることが可能であることを確認できた。また、これを応用することで、蛍光分子すなわち潤滑剤の流れも計測できる。以上のように、提案した方法によりナノすきまにおける圧力流れ計測の原理確認に成功した。

(2) 力・すきま同時計測を用いたナノすきまのせん断流れ計測法

構築した計測系によりせん断力・すきま同時計測が原理的に可能であることを明らかにした。当初、せん断流れ計測をねらいとしていた。しかし、構築した計測系の結果は、ナノすきまでの潤滑剤分子は、マクロすきまと異なり、単純な粘性流体でない挙動を示した。これは、ナノすきまにおいてはマクロな連続流体とは異なる流体特性を示唆するものであり、今後さらなる特性解明が必要であることがわかった。

以上のように、本研究では、ナノすきまの圧力流れ計測およびせん断流れ計測について、新規な方法を提案し、実際に計測系を構築し、原理的な可能性の確認に成功した。今後、提案した方法を発展させることで、ナノすきま潤滑の理論体系確立のために有用な知見をもたらすことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Katsuya Namba, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Naoki Azuma	4. 巻 142
2. 論文標題 Extension of measurement range of lubrication gap shape using vertical-objective-type ellipsometric microscopy with two compensator angles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 105980 (8pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2019.105980	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 Katsuya Namba, Yusuke Sasao, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Hedong Zhang	4. 巻 13
2. 論文標題 Validation of correction method for gap shape measurement by vertical-objective-type ellipsometric microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 0025 (13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0025	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 -
1. 著者名 Kenji Fukuzawa, Yusuke Sasao, Katsuya Namba, Chihiro Yamashita, Shintaro Itoh, and Hedong Zhang	4. 巻 122
2. 論文標題 Measurement of nanometer-thick lubricating films using ellipsometric microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 8-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2018.02.016	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 Shintaro Itoh, Yuya Ohta, Kenji Fukuzawa, Hedong Zhang	4. 巻 120
2. 論文標題 Enhanced Viscoelasticity of Polyalphaolefins Confined and Sheared in Submicron-to-nanometer-sized Gap Range and Its Dependence on Shear Rate and Temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 210-217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2017.12.022	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 Kenji Fukuzawa, Ken Miyata, Chihiro Yamashita, Shintaro Itoh, Hedong Zhang	4. 巻 53
2. 論文標題 Real-time Observation of Molecularly Thin Lubricant Films on Head Sliders Using Rotating-Compensator-Based Ellipsometric Microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8300404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2017.2694443	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15件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 木本 貴幸, 福澤 健二, 伊藤 伸太郎, 東 直輝, 張 賀東
2. 発表標題 マイクロ流体デバイスと蛍光相関分光法の組み合わせによる一様微小隙間での潤滑剤粘度計測
3. 学会等名 IIP2020 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 難波克也, 福澤健二, 山中魁人, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡を用いたナノすきま潤滑における潤滑膜の状態 変化の観測
3. 学会等名 トライボロジー会議2019春 東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuya Namba, Kenji Fukuzawa, Kaito Yamanaka, Shintaro Itoh, Hedong Zhang
2. 発表標題 Observation of Lubrication Films in Nanometer-Gap under Reciprocating Sliding by Vertical-Objective-Type Ellipsometric Microscopy
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Itoh, K. Kamiya, K. Fukuzawa, H. Zhang
2. 発表標題 Measurement of temperature dependence of lubricant viscosity in nano gaps by fiber wobbling method combined with laser heating
3. 学会等名 Information Storage and Processing Systems and Micromechatronics for Information and Precision Equipment 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuya Namba, Yusuke Sasao, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Hedong Zhang
2. 発表標題 Correction Method for Measurement of Gap Shape by Vertical-Objective-Type Ellipsometric Microscopy with Rotating-Compensator Ellipsometry
3. 学会等名 6th Asia International Conference on Tribology
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shintaro Itoh, Ryosuke Aoki, Kenji Fukuzawa, Hedong Zhang
2. 発表標題 Viscoelasticity of Polyisobutylene-added Polyalphaolefin Sheared in Submicron-to-Nanometer-Sized Gap Range
3. 学会等名 2018 STLE Tribology Frontiers Conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 難波克也, 福澤健二, 笹尾優介, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡による往復しゅう動時のすきま形状の観測
3. 学会等名 トライボロジー会議2018 秋 伊勢
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福澤健二
2. 発表標題 エリブソメトリー顕微鏡によるナノ潤滑現象の可視化
3. 学会等名 2019年第1回極限ナノ造形・構造物性研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 伸太郎
2. 発表標題 ナノスケールのすき間でせん断される液体のレオロジー計測
3. 学会等名 IIP2019情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenj Fukuzawa, Ken Miyata, Chihiro Yamashita, Shintaro Itoh, Hedong Zhang
2. 発表標題 Real-time Observation of Molecularly Thin Lubricant Films on Head Sliders Using Rotating-Compensator-Based Ellipsometric Microscopy
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG Europe 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji FUKUZAWA, Yusuke SASAO, Shintaro ITOH, Hedong ZHANG
2. 発表標題 Measurement of shape of nm-sliding gaps by using ellipsometric microscopy
3. 学会等名 The 6th World Tribology Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji FUKUZAWA
2. 発表標題 Real-time visualization of nm-thick liquid films by ellipsometric microscopy
3. 学会等名 ISPlasma2018 / IC-PLANTS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福澤健二
2. 発表標題 ナノ厚さ液体膜を介した摺動における摩擦の計測
3. 学会等名 日本学術振興会 ナノプローブテクノロジー第167委員会第85回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 難波克也, 笹尾優介, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 回転補償子法を用いた垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡によるナノすきまの定量化
3. 学会等名 トライボロジー会議2017 秋 高松
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笹尾優介, 難波克也, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡によるナノしゅう動すきま形状の定量計測
3. 学会等名 トライボロジー会議2017 秋 高松
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 福澤健二ほか（分担執筆）	4. 発行年 2017年
2. 出版社 株式会社テクノシステム	5. 総ページ数 1192
3. 書名 数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御	

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学 福澤研究室 http://ayame.fukuzawa.nuem.nagoya-u.ac.jp/
--

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	伊藤 伸太郎 (Shintaro Itoh) (50377826)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	