

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03164

研究課題名(和文) マルチスケールシミュレーションとQCM実験の融合による添加剤含有潤滑現象の解明

研究課題名(英文) Elucidation of lubrication phenomena involving additives by multiscale simulations and QCM measurements

研究代表者

張 賀東 (Zhang, Hedong)

名古屋大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：80345925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：粗さをもつ固体二面間の微小な摺動すきまにおける添加剤含有潤滑現象の解明をねらいとし、これまでに開発したシミュレーション法を一層発展させ、ナノすきまにおける添加剤分子吸着膜の形成・せん断剥離・修復の粗視化分子動力学シミュレーション、およびマイクロスケールの接触面やその近傍における潤滑油の流動のシミュレーションを実現した上で、両者を接続・統合するマルチスケールシミュレーション法を確立した。シミュレーションから得た知見を基に、新規な添加剤分子を設計・合成し、その優れた吸着性能を水晶振動子マイクロバランス法(QCM)で明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ナノすきま潤滑の設計に役立つ実用性の高いマルチスケールシミュレーション法を確立した上で、高性能の添加剤分子を新規に設計・合成した。これらの成果は、文部科学省が決定した2019年度戦略目標および研究開発目標「ナノスケール動的挙動の理解に基づく力学特性発現機構の解明」に合致し、トライボロジー分野の学術発展や、自動車などに適用可能な摩擦損失を軽減する高度な潤滑技術の確立に寄与することが期待される。摩擦損失の18～40%の低減は、世界エネルギー使用量を8.7%まで削減可能と予測されており、本研究により省エネ・低炭素社会の実現に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Aiming at elucidation of additives containing lubrication phenomena between corrugated sliding surfaces, we established coarse-grained molecular dynamics simulations for formation, shear-induced desorption, and replenishment of adsorbed films of additives in nanoscale spacings, and simulations for the flow of lubricating oil within and near microscale contacting surfaces. Integrating the two types of simulations, we established multiscale simulations. Based on the knowledge obtained from the simulations, we designed and synthesized a new type of additive molecules and verified its excellent adsorption performance with the quartz crystal microbalance method.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー 分子シミュレーション 境界潤滑

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球環境と調和した持続可能な社会の実現のため、自動車をはじめとした機械システムには省エネや環境負荷低減が強く求められており、摩擦損失を極限まで低減できるグリーン潤滑技術の確立が世界的な重要課題である。固体摺動面間のすきまが大きい場合は、摩擦損失低減の方法として、潤滑油の低粘度化がある。しかし、自動車のエンジンスタート・ストップ時のように固体二面の相対運動速度が低い場合、低粘度の潤滑油が固体二面を十分に分離できないため、固体同士の直接接触により摩擦摩耗が急増し、システムの耐久性が損なわれる。解決策として、硫黄・リン系物質や有機摩擦調整剤 (Organic Friction Modifier: OFM) とよばれる脂肪酸などを潤滑油に添加する方法が用いられてきた。しかし、環境保全のため、硫黄・リン系物質含有率の削減の要請が高まっている。一方 OFM については、利用開始から一世紀が経った今なお、作用機構は十分に解明されず、高性能化指針の構築が困難である。すなわち、OFM を添加した場合の微小摺動すきまにおける潤滑現象の解明が、有効なグリーン潤滑技術を確立するための鍵を握っている。

OFM 分子が摺動面に吸着し、固体接触を防ぐ被膜を形成することが、摩擦低減の要因と推測されている。この検証には、OFM 吸着膜の厚さは単分子から数分子層で極めて薄いため、超高分解能計測法が必須である。中性子反射法や原子間力顕微鏡などが試みられてきたが、基本的には静的あるいはマイルドな摺動条件で、かつ粗さの極めて小さい理想的な表面に限定されていた。一方、分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) シミュレーションは、実験的観測が困難な動的分子描像を解き明かせるため、近年では固体二面の微小すきまにおける OFM 吸着膜のせん断特性解析に適用され始めた。しかし、一般的に用いられている全原子モデルの MD は、原子個々の運動を計算するので、計算コストが極めて高く、空間スケールが大きい固体表面粗さの表現や時間スケールが大きい吸着過程の計算は非現実的である。すなわち、粗さをもつ固体摺動面間の微小すきまにおいて、OFM 吸着による被膜形成などの動的過程を含む潤滑現象を解明するための実験法とシミュレーション法が欠如している。

### 2. 研究の目的

シミュレーションと実験の融合により、潤滑油に OFM 分子を添加した場合について、粗さをもつ固体二面の微小摺動すきまにおける潤滑現象の解明をねらいとした。粗さをもつ固体摺動面間では、OFM 分子は、潤滑油中の移動→摺動面への吸着による被膜形成→せん断による被膜の部分的剥離→剥離部分への再吸着による被膜修復、という極めて動的な過程を繰り返すと考えられる。粗さの突起間のすきまおよび OFM 吸着膜の厚さはナノスケールである一方で、実摺動面の粗さや接触面の大きさはマイクロスケールである。そこで本研究では、これまでに開発したシミュレーション法を一層発展させて、ナノすきまにおける吸着膜の形成・せん断剥離・修復の粗視化 MD シミュレーション、およびマイクロスケールの接触面やその近傍における液体の流動のシミュレーションを実現した上で、両者を接続・統合するマルチスケールシミュレーションの確立を目的とした。また、水晶振動子マイクロバランス法 (Quartz Crystal Microbalance: QCM) を用いた測定により、吸着現象の定量的評価の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

各研究項目で用いた方法を以下に述べる。

#### (1) ナノすきまにおける粗視化 MD シミュレーション

実摺動面のような表面粗さをもつ系を対象にした大規模な MD シミュレーションを可能とするために、計算コストの削減が必須である。そこで本研究では、汎用の全原子モデルの代わりに、複数の原子を1つのビーズに置き換え、ビーズ同士をばねで結合した計算効率の高い粗視化モデルを独自に構築した。固体摺動面に酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、潤滑油にドデカン ( $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ )、OFM にステアリン酸 ( $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ ) とオレイン酸 ( $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ ) の2種類を用いた。粗視化モデルの構築には、原子からビーズへのマッピングスキーム、ビーズ間の相互作用ポテンシャル、および粗視化で省略された自由度によるエネルギー散逸を補正する摩擦係数、の決定が必要である。については、下記3つの条件を満たすように行った。a) 対象物質のバルク密度を再現できること、b) ビーズ間のすり抜けが生じないこと、c) ステアリン酸とオレイン酸の分子構造の差異を表現できること。とについては、全原子 MD シミュレーションから抽出した系の静的・動的挙動を特徴づける物理量 (結合長・結合角・二面角の分布関数、動径分布関数、密度に対する圧力変化、および拡散係数) を粗視化 MD シミュレーションで再現するように決定した。との精度の確保には、高精度の全原子モデルの構築も必須である。本研究では、全原子モデルにおける原子間相互作用の記述には、高精度な汎用力場 COMPASS (Condensed Phase Optimized Molecular Potentials for Atomistic Simulation Studies) II を適用した。ただし、鉄と酸素間の結合長・結合角相互作用が含まれていないため、独自に構築・実装した。

ビーズの運動の記述には、散逸粒子動力学 (Dissipative Particle Dynamics: DPD) を適用した。とくに、固液界面に平行な方向における液体ビーズの運動エネルギー散逸を記述可能にするため、ビーズ中心間ベクトルに平行な方向のみでなく、垂直な方向にも散逸力と揺動力を与える標準 DPD を拡張した Transverse DPD を用いた。モジュール化した Transverse DPD プログラムを開発し、並列計算とメモリの有効利用に優れたオープンソースの MD シミュレータ LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) に組み込んだ。そして、粗視化 MD シ

ミュレーションを実施し、ナノすきまにおける吸着膜の形成・せん断剥離・修復の分子論的解明を試みた。

(2) マイクロスケールの流体シミュレーションおよびマルチスケールシミュレーション

これまでに実施してきたピンオンディスク摩擦試験の結果と比較できるように、液体がピンとディスクのマイクロスケール接触領域を流れるシミュレーションを行った。方法としては、まず液体を粒子の集合体として離散化する粒子法の一つである Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法を用いた。この方法は、メッシュフリーで、自由表面の表現に優れ、接触領域に流入する前方で液体の堆積など複雑な分布を解析できるなどの利点をもつ。本研究では、圧力擾乱を抑制するために Corrected Moving Particle Semi-implicit with High Source-term (CMPS-HS) 法を、また実験で用いた液体の物性を再現するために粒子間ポテンシャル力による表面張力モデルを導入した。しかし、粒子法では、粒子のサイズをナノすきまより小さく設定することが必要なため、マイクロスケールの接触面にわたる広領域の三次元計算には、多大なコストが見込まれた。そこで、計算コストを削減するために、レイノルズ方程式と固体弾性変形を連立した弾性流体潤滑理論 (Elasto-hydrodynamic Lubrication: EHL) の方程式を数値解析で解く方法を用いた。ただし、流入端前方の膜厚が不明のため、境界条件の設定が難しいという問題があった。そこで、MPS の計算結果を基に流入端への液体供給量を設定するモデルを構築するとともに、流入端から流出端までの全計算領域に Elrod キャビテーションアルゴリズムを適用することにより、境界条件の設定を可能とした。

ナノスケールのすきまとマイクロスケールの接触面を有する潤滑現象では、マイクロスケールにわたる液体の流れによる動圧力効果に加えて、ナノすきまへの液体閉じ込めによる表面力の効果が出現し、両者の混在が特徴と考えた。この特徴を反映するように、ナノすきまにおける粗視化 MD シミュレーションから固体二面間に発生する表面力を求め、その力法則を表す解析式を導出した上で、接続関数を通して、動圧力を記述する EHL 理論に組み込むマルチスケール計算スキームを提案して、プログラムを開発した。

(3) QCM を用いた測定

実験では、主として、QCM を用いた吸着膜上の液体の界面スリップ計測法の確立および摺動が伴わない静的条件における吸着膜形成の測定に取り組んだ。前者は、EHL 理論に基づくマイクロスケールの流体シミュレーションにおいて、添加剤分子吸着膜とその上の流動層との境界条件の設定に有用であり、後者は、粗視化 MD シミュレーションにおける添加剤分子の初期配置の設定に有用である。QCM は、水晶板を薄膜電極で挟み交流電圧を加えることにより共振させて、電極上に試料を導入する前後の共振周波数変化や半値幅変化を測定する。電極上に吸着した弾性膜と液体の界面については、適切な振動モデルを用いれば、測定値から吸着膜の質量および界面スリップ長を求めることが可能である。しかし、研究開始当初は、共振周波数 9 MHz に対して 100~1000 Hz 程度のふらつきが生じ、高精度な測定が困難であった。そこで、水晶板を格納するセルを新規に設計・試作するとともに、温湿度や液体試料の導入方法など、実験環境・方法について、測定安定性への影響を綿密に調査し改良を重ねた。その結果、共振周波数のふらつきを 2 Hz 以内に抑えることに成功し、スリップ長と吸着膜の密度に換算するとそれぞれ 0.2 nm と 11 ng/cm<sup>2</sup> の測定精度を達成した。

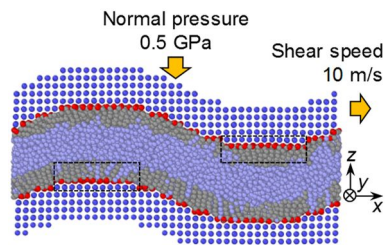


図 1 粗視化シミュレーションの実施例のスナップショット。固体表面と潤滑油を構成するビーズは、それぞれ青と水色の球で、添加剤を構成する極性と無極性ビーズは、それぞれ赤と灰色の球で表す。

4. 研究成果

各研究項目の主な研究成果を以下に述べる。

(1) ナノすきまにおける粗視化 MD シミュレーション

項目 3 の(1)で述べた方法により、潤滑油と OFM 分子について、炭素原子 3 つと結合している原子を 1 つのビーズにマッピングし、前者をビーズ 4 個、後者をビーズ 6 個で粗視化した。カルボキシ基を含むビーズのみが極性ビーズで、その他は無極性ビーズである。酸化鉄摺動面については、固体ビーズを格子定数  $a = b = 5.714 \text{ \AA}$  および  $c = 5.814 \text{ \AA}$  の単純正方格子状に配置することで粗視化した。また、ビーズ間の相互作用ポテンシャルと摩擦係数を決定し、粗視化 MD シミュレーションが全原子 MD シミュレーションから抽出した系の静的・動的挙動を特徴づける物理量を精度よく再現していることを確認した。これにより、全原

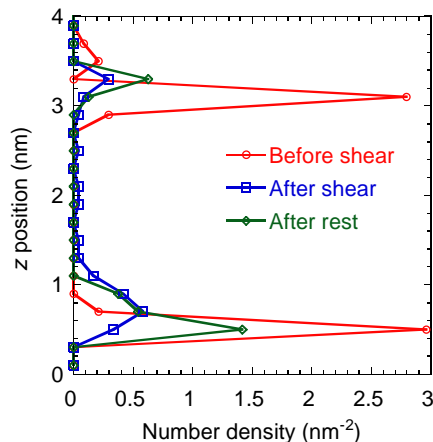


図 2 表面粗さの凸部(図 1 中の破線の四角枠で囲まれた領域)における吸着した添加剤分子の数密度分布。

子 MD シミュレーションに比べて、計算精度が同程度で、かつ計算時間を 1/50 とした粗視化 MD シミュレーションを実現した。

潤滑油中に添加剤分子を含んだ摺動系について、実施した粗視化 MD シミュレーションのモデル例を図 1 に示す。簡単のために、摺動面の粗さを一次元正弦波で表現し、振幅を 1.7 nm、周期を 12.0 nm または 24.0 nm とした。ステアリン酸単分子膜を被覆した摺動面間にドデカン分子を満たし、0.5 GPa の垂直圧力を加えながら上側摺動面を  $x$  方向に 10 m/s の速度で 12 ns 駆動して、その後 100 ns 静置した。表面粗さの周期にかかわらず、摺動面の凹部では吸着膜が維持されていたのに対して、凸部ではせん断により吸着膜が剥離し、また 100 ns の静置で剥離したステアリン酸分子の一部が再吸着した(図 2)。一方、平滑な摺動面では、せん断による吸着膜の剥離は見られなかった。すわなち、実摺動面に存在している表面粗さが添加剤の動的挙動に大きな影響を与えることを明らかにした。剥離現象を詳細に解析した結果、粗さの凸部の両端にある吸着分子が剥離する確率が高く、一部の吸着分子の剥離に伴い残りの吸着分子がせん断方向に横滑りすることを見出した。これより、凸部の両端では吸着分子の位置が上下にずれて、炭素鎖同士の横方向の相互作用が弱まることで剥離のきっかけで、OFM 分子の吸着強度の不足によって剥離が一層進むことを明らかにした。

### (2) マイクロスケールの流体シミュレーションおよびマルチスケールシミュレーション

EHL 理論に基づいたマイクロスケールの流体シミュレーションとナノすきまにおける粗視化 MD シミュレーションを接続したマルチスケールシミュレーションの結果の一例を図 3 に示す。これは、厚さ 5.3 nm のフッ素系無極性潤滑膜を塗布したディスクおよび直径 15.0 mm の摺動ピンを用い、垂直荷重を 1.0 mN に固定し、せん断速度を 1 ~ 100 mm/s に変化させた場合である。図中の赤線で示すマルチスケールシミュレーションの結果は、表面力に起因する成分(緑色の  $\times$  印)と動圧力に起因する成分(青色の  $\square$  印)の合計値である。広いせん断速度範囲にわたって、シミュレーション結果は黒色の点で示す摩擦力の実験結果とよく一致している。また、せん断速度 10 mm/s 以下では、表面力に起因する成分が摩擦力への寄与が支配的で、10 mm/s 以上では、動圧力に起因する成分の寄与が無視できないほど増大し、80 mm/s 以上では、動圧力に起因する成分の寄与が表面力に起因する成分の寄与を上回った。これらの結果により、ナノスケールのすきまとマイクロスケールの接触面を有する潤滑現象を対象としたマルチスケール計算スキームの確立に成功したといえる。また、添加剤含有潤滑現象の本質の理解には、添加剤分子吸着膜の減耗・修復特性がナノスケールの表面力法則に与える影響を解明することが最も重要と突き止めた。

### (3) QCM を用いた測定

本研究では、前述の粗視化 MD シミュレーションで得た知見を基に、ラジカルを含む環状構造末端をもつ高性能な OFM 分子  $C_{12}$ TEMPO を新規に設計・合成した。一例として、摺動が伴わない静的条件において、銅表面への  $C_{12}$ TEMPO 吸着膜の形成を QCM で測定した結果を図 4 に示す。比較のため、市販のステアリン酸も測定した。これらの OFM 分子をアルキルジフェニルエーテル潤滑油 LB-15 に 0.01 mol/L で添加して使用し、測定時の温度を 30 °C に設定した。横軸の時間は、添加剤を含まない潤滑油から添加剤を含む潤滑油に切り替えた時刻を時間のゼロとした。縦軸は、添加剤を含まない潤滑油から添加剤を含む潤滑油に切り替えた後の共振周波数の変化値を示す。共振周波数が変化しなくなる時間から、 $C_{12}$ TEMPO の吸着がステアリン酸より 1 時間速いことが分かる。また、定常状態における共振周波数の変化量から吸着量を計算した結果、 $C_{12}$ TEMPO とステアリン酸はそれぞれ 0.87 と 0.13  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  であった。このように、新規に設計・合成した添加剤分子は、金属表面への吸着特性が優れていることを明らかにした。

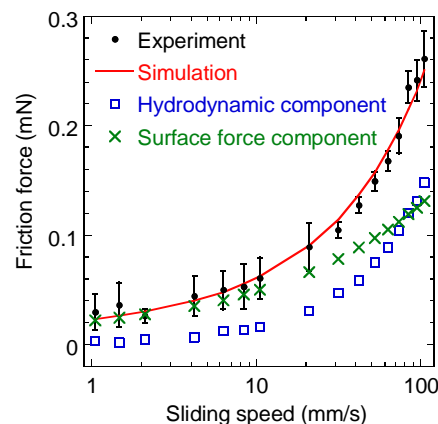


図 3 ナノ厚さ液体膜を塗布したディスクとピンとの摩擦力に関するマルチスケールシミュレーション結果と実験結果の比較。

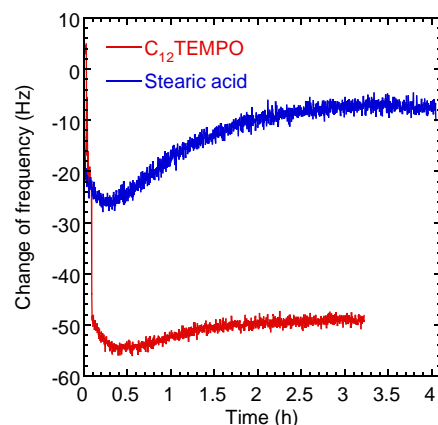


図 4 新規に設計・合成した添加剤分子  $C_{12}$ TEMPO と市販のステアリン酸の吸着を QCM で測定した結果。

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 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Zhang, T. Yoshimi, K. Fukuzawa, S. Itoh	4. 巻 119
2. 論文標題 Is the Trend of Stribeck Curves Followed by Nano-lubrication with Molecularly Thin Liquid Lubricant Films?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 82～87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.triboint.2017.10.028	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 H. Zhang, Y. Takeuchi, W. W. F. Chong, Y. Mitsuya, K. Fukuzawa, S. Itoh	4. 巻 127
2. 論文標題 Simultaneous in situ Measurements of Contact Behavior and Friction to Understand the Mechanism of Lubrication with Nanometer-thick Liquid Lubricant Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 138～146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.triboint.2018.05.043	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 該当する

1. 著者名 X. Zhang, M. Tsukamoto, H. Zhang, Y. Mitsuya, S. Itoh, K. Fukuzawa	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental Study of Application of Molecules with a Cyclic Head Group Containing a Free Radical as Organic Friction Modifiers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0044	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 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 H. Zhang, Y. Mitsuya, Y. Takeuchi, K. Fukuzawa, S. Itoh
2. 発表標題 Simultaneous In Situ Measurements of Contact State and Friction to Understand the Mechanism of Lubrication with Nanometer-thick Liquid Lubricant Films
3. 学会等名 World Tribology Congress 2017
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Kobayashi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh
2 . 発表標題 Temperature Dependency of Shear Properties of Nanometer-thick Liquid Lubricant Films: A Molecular Dynamics Study
3 . 学会等名 World Tribology Congress 2017
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Zhang, S. Washio, K. Fukuzawa, S. Itoh
2 . 発表標題 Coarse-grained Molecular Dynamics Simulation of Fatty Acid Additives in Lubricating Oil Sheared by Corrugated Solid Surfaces
3 . 学会等名 Information Storage and Processing Systems and Micromechatronics for Information and Precision Equipment 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Zhang, K. Kawai, T. Kobayashi, N. Koga, K. Fukuzawa, S. Itoh
2 . 発表標題 Possibility of Mechano-chemical Decomposition of Perfluoropolyether Lubricants in Heat-assisted Magnetic Recording: A Molecular Dynamics Study
3 . 学会等名 The Asia-Pacific Magnetic Recording Conference 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Uchida, Y. Li, H. Zhang, Y. Mitsuya, K. Fukuzawa, S. Itoh
2 . 発表標題 In Situ Measurement of Contact State between Two Sliding Surfaces Lubricated with Nanometer-thick Liquid Films
3 . 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 W. W. F. Chong, H. Zhang, Y. Mitsuya
2. 発表標題 A Numerical Study on the Tribological Conjunction Lubricated with Nanometer-thick Non-polar PFPE Film
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Zhang, T. Kobayashi, K. Fukuzawa, S. Itoh
2. 発表標題 Coarse-grained Modeling for Molecular Dynamics Simulation of Thin Film Lubrication
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tang, S. Washio, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh
2. 発表標題 Molecular Dynamics Simulation of Adsorption of Fatty Acid Additives in Lubricating Oil to Iron Oxide Surface
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鷺尾翔, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 酸化鉄表面への脂肪酸分子の吸着に関する分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 トライボロジー会議2017春 東京
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 葛谷紘澄, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 水晶振動子マイクロバランス法を用いた吸着膜上の液体の界面スリップ計測
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内田悠斗, 張賀東, 三矢保永, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 ナノ厚さ潤滑膜が摺動面間に形成する液架橋の動的挙動に関する研究
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 鷺尾翔, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 粗さをもつ摺動すきまにおける潤滑油中の脂肪酸添加剤の粗視化分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 IIP2018 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川合健斗, 鷺尾翔, 小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 ヘッドディスクインターフェイスにおける潤滑剤移着現象の分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 張賀東, 横山隼大, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 分子動力学法を用いたナノ閉じ込めが紫外線硬化樹脂膜の粘度特性に及ぼす影響の解明
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 葛谷紘澄, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた吸着膜と液体の界面スリップ計測
3. 学会等名 IIP2019 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田悠斗, 張賀東, 三矢保永, 福澤健二, 伊藤伸太郎
2. 発表標題 ナノ厚さ液体膜の潤滑メカニズム解明のための固体二面接触状態のその場計測
3. 学会等名 IIP2019 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部祥太郎, 内山知実, 張賀東, 高牟禮光太郎, 出川智啓
2. 発表標題 MPS法によるナノ厚さ液体膜を介したピンオンディスク摺動の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳星宇, 川合健斗, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 東直輝
2. 発表標題 反応分子動力学による熱アシスト磁気記録におけるPFPE潤滑膜のメカノケミカル分解解析
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学 大学院情報学研究所 複雑系科学専攻 張研究室 <a href="http://www.is.nagoya-u.ac.jp/dep-cs/nanosurf/">http://www.is.nagoya-u.ac.jp/dep-cs/nanosurf/</a>
---

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	三矢 保永  (Mitsuya Yasunaga)  (10200065)	公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員    (73905)	
研究分担者	内山 知実  (Uchiyama Tomomi)  (90193911)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授    (13901)	
研究分担者	古賀 伸明  (Koga Nobuaki)  (80186650)	名古屋大学・情報学研究所・教授    (13901)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	渡邊 崇 (Watanabe Takashi)  (40182927)	名古屋大学・情報学研究科・教授  (13901)	
研究 協力者	漢字氏名なし 漢字氏名なし (Chong William Woei Fong)	マレーシア工科大学・School of Mechanical Engineering・ Senior Lecturer	
研究 協力者	塚本 眞幸 (Tsukamoto Masaki)  (10362295)	名古屋大学・情報学研究科・講師  (13901)	