

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289027

研究課題名(和文) 微細機能性凹凸パターンを付与したナノ液体膜のトライボ特性とそのメカニズム

研究課題名(英文) Tribological properties and the underlying mechanism of nanometer-thick liquid films with fine functional concavo-convex patterns

研究代表者

張 賀東 (Zhang, Hedong)

名古屋大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80345925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：微小な摺動すきまにおける薄膜潤滑技術の確立に向けて、フォトマスクを介した紫外線照射によりナノ厚さ液体膜に微細な機能性凹凸パターンを付与する方法を提案し、その有効性を確認した。本研究では、これまでに開発してきた計測装置および粗視化分子シミュレーション法を一層高機能化し、ナノ厚さ液体膜のトライボ特性について、高精度な評価・解析を可能とした。実験とシミュレーションの結果から、摺動方向と平行なパターンより直交するパターンのほうが摩擦力が小さく、減耗した箇所の膜修復が速いことなど、パターンの形状や寸法がナノ厚さ液体膜のトライボ特性に与える効果を明らかにし、そのメカニズムに関して重要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Aiming at establishing thin film lubrication for sliding surfaces separated by a nanoscale gap, we proposed a method to impart fine functional concavo-convex patterns to nanometer-thick liquid films by masked ultraviolet irradiation, and we confirmed its effectiveness. In this research, we improved and added new functions to our previously developed measuring equipment and coarse-grained molecular simulation method. This allowed us to evaluate and analyze tribological properties of nanometer-thick liquid films with high precision. From the results of experiments and simulations, we clarified the effects of pattern shape and dimension on tribological properties of nanometer-thick liquid films. For instance, films patterned orthogonally to the sliding direction exhibit low friction and fast replenishment of depleted portions, as compared with those patterned parallel to the sliding direction. Other important findings were also obtained, helping us to unveil the underlying mechanism.

研究分野：ナノトライボロジー，光応用計測

キーワード：トライボロジー マイクロ・ナノデバイス 磁気記録 薄膜潤滑

1. 研究開始当初の背景

微細加工技術の進展に伴い、マイクロ・ナノスケールにおける機械工学の新領域が開拓されつつある。この領域では、ナノすきまを隔てた固体二面間の相対運動を精確かつ安定に実現することが必須であり、このためナノ厚さの液体潤滑膜(ナノ潤滑膜)を用いた薄膜潤滑技術に関心が高まっている。薄膜潤滑では、潤滑剤が潤沢に供給される一般の潤滑とは異なり、耐久性を確保するために、接触摺動に対してナノ潤滑膜が減耗・破断しない自己保持機能、かつ減耗・破断箇所を修復する自己修復機能をもつことが要求されている。これらの相矛盾する要求条件を両立させながら、固体二面間の円滑な相対運動を阻害しない低凝着・低摩擦性をナノ潤滑膜に付与することが、薄膜潤滑技術を確立するための重要課題である。

薄膜潤滑の特性は、基本的には液体潤滑剤分子と固体表面の相互作用に支配される。そのため、固液相互作用を人為的に制御すれば、潤滑特性を制御・調整する効果が期待できる。これまでの方法としては、潤滑剤の分子設計や面内一様な紫外線照射処理が利用されてきた。いずれも相互作用の強度のみを制御するために、実現できる機能・性能には限界がある。そこで研究代表者と分担者は、固液相互作用の強度と分布を同時に制御する方法として、ナノ潤滑膜のパターニング法を世界で初めて提案した。この方法は、固体表面上のナノ潤滑膜に、フォトマスクを介して紫外線を選択的に照射することにより、固液相互作用強度をパターン状に分布させるものである。照射領域では相互作用が増強されるため、自己保持機能が支配的で、一方非照射領域では相互作用が弱いため、自己修復機能が支配的である。ナノ潤滑膜を照射・非照射領域ごとに異なる機能をもつ機能性パターンに分割することによって、自己保持と自己修復の調整が可能となる。また、非照射から照射領域に分子流動が生起されるため、潤滑膜の非照射領域が窪み照射領域が盛り上がるという自己組織化凹凸パターンが形成されることを発見した。凹凸パターンにより、接触摺動時の真実接触面積を低減させ、ナノ潤滑膜に低凝着・低摩擦性を付与する効果も期待できる。さらに、パターン形状や寸法の最適設計により潤滑特性の制御・調整の可変範囲が拡大されるため、潤滑剤の固有特性を凌駕する新しい機能・性能をもつ機能性薄膜潤滑表面の創成が期待される。

2. 研究の目的

これまでに、研究代表者と分担者は、計測法と分子シミュレーション法を開発し、それらを用いてナノ潤滑膜のトライボ特性に及ぼすパターニング効果の評価に取り組んできた。その結果、凹凸パターンは接触摺動に対して形状記憶機能を有することや、微細パターンの付与によりナノ潤滑膜の摩擦力と

減耗面積が減少することなどを確認し、提案したパターニング法の有効性を明らかにした。しかし、パターニングによる機能性薄膜潤滑技術を確立するためには、パターンの設計パラメータとトライボ特性との関係性やそのメカニズムを解明することが、重要な課題として残されていた。

そこで本研究では、ナノ厚さ液体膜のトライボ特性の評価・解析を一層深めるため、これまでに開発してきた計測装置および分子シミュレーション法を高機能化することとした。そして、実験と分子シミュレーションの両面から、ナノ厚さ液体膜のトライボ特性とパターン形状・寸法などの設計パラメータとの関係性や、そのメカニズムを解明することを目指した。

3. 研究の方法

目的達成のために、3 項目の研究を進めてきた。各項目で用いた方法を以下に述べる。

(1) トライボテストの高機能化

これまでに、ナノ潤滑膜のトライボ特性評価装置として、潤滑膜の存在形態への擾乱が小さい軽微荷重(数 mN 以下)において、摩擦力を超高感度で測定できるピンオンディスク式トライボテストを開発してきた。この装置は、実用条件に近い高速摺動(0.1 m/s オーダ)かつメソスケール摺動面(μm^2 オーダ)における面積平均的特性の評価には有効である。しかし、トライボ特性の測定時に摺動ピンと固体基板との接触状態が不明という欠点があった。トライボ特性のメカニズム解明には、接触状態をその場観測し、荷重・速度条件および測定したトライボ特性との関係性を明らかにすることが極めて重要である。

そこで、図 1 に示すように、干渉顕微鏡を新たに設計・構築し、既存のトライボテストに統合した。顕微鏡の光源からの光は、レンズやビームスプリッターなどを通して対物レンズの後焦点に集光され、さらに対物レンズを経由し、平行光として摺動ピンに入

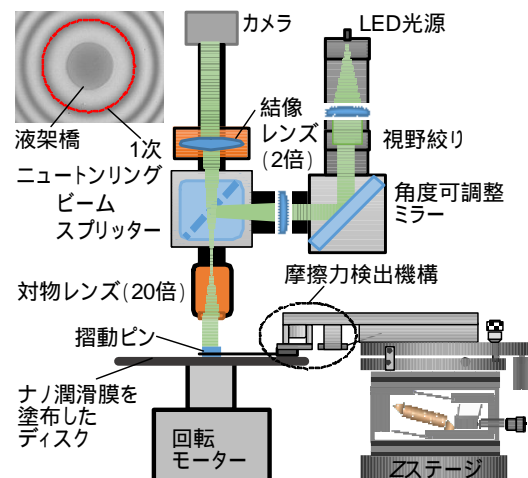


図 1 開発した高機能化トライボテストの概略図。

射する。摺動ピンとディスクとの接触領域は、対物レンズと結像レンズによって 40 倍に拡大された後に、カメラで撮影される。図 1 に例示したような撮影画像から、ディスク表面に塗布したナノ潤滑膜によって形成される液架橋の動的挙動をその場観測するとともに、摺動前と摺動中の 1 次ニュートンリングの半径を測定し、摺動ピンの垂直変位を求めることができる。

(2) トライボ特性の測定

まず、紫外線照射パターンングをしていない場合について、ナノ厚さ液体膜を用いた潤滑メカニズムを解明することとした。そのため、バルク粘度の異なるフッ素系潤滑剤を用いて、広い速度範囲にわたってトライボ特性を測定した。低速領域 ($1 \mu\text{m/s} \sim 1.4 \text{ mm/s}$) では既存の走査型プローブ顕微鏡 (scanning probe microscope: SPM) を、高速領域 ($0.21 \sim 105 \text{ mm/s}$) ではトライボスタを用いた。つぎに、パターンングしたナノ潤滑膜について、パターンの線幅や形状をパラメータとして、減耗・修復特性および摩擦特性を測定し、トライボ特性を向上させる主要因子の特定を試みた。

(3) 分子シミュレーション

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、ナノ潤滑膜の特性解析やそのメカニズムの解明には不可欠である。実現象に対応するため、シミュレーション系では、固体表面にランダムな粗さを付与し、かつ面内方向のスケールをミクロンオーダーとすることが望ましい。このような系に、個々の原子の運動を計算する全原子シミュレーションを適用することは、計算コストの問題で現実的ではない。このため、原子数個の集団を 1 つのビーズに置換して計算量を削減した粗視化シミュレーションを用いることが必須である。しかし、粗視化モデルは汎用のものがなく、分子構造および解析対象の物理量に合わせて構築する必要がある。とくに、極性分子の粗視化モデルの構築にあたって、無極性相互作用より強くかつ異方性をもつ極性相互作用を精度良く記述することが課題であった。

本研究では、この課題の解決策として、まず量子化学計算を行い、その結果を再現するように全原子モデルを構築し、つぎに全原子 MD シミュレーションを行い、その結果から極性相互作用の特徴を抽出し、粗視化モデルに反映するアプローチを考案した。全原子 MD シミュレーションや実験で得られた系の静的特性 (構造の分布関数や熱力学量) のみでなく、動的特性 (拡散係数や粘性係数) も粗視化 MD シミュレーションで再現するように、transverse DPD (dissipative particle dynamics) 法の導入を試みた。また、固体表面にランダムな粗さを付与するとともに、トライボスタを用いた実験と同様な荷重一定条件での計算を可能とするために、固体表面を垂直方

向に変位するばねに接続するプログラムを開発した。さらに、パターンングしたナノ潤滑膜にも粗視化 MD シミュレーションを適用可能とするために、紫外線照射により潤滑剤分子の極性末端基が固体表面に結合する現象を表現できるように、粗視化モデルに新たな結合ポテンシャルを追加することとした。そして、粗視化 MD シミュレーションを実施し、ナノ潤滑膜の流動やせん断特性に及ぼすパターンの形状・線幅の影響、およびそのメカニズムを分子論的に解明することを試みた。

4. 研究成果

各項目における主な研究成果は以下のとおりである。

(1) トライボスタの高機能化

干渉顕微鏡の設計・構築にあたって、測定分解能を向上するための様々な工夫を重ねた。具体的には、高輝度短波長の光源および高感度の白黒カメラの搭載や、視野絞りの設置、角度可調整ミラーの導入などが挙げられる。また、摺動ピン垂直変位の測定分解能を向上するために、摺動ピンとしては、従来の半径 1 mm の半球から曲率半径が大きい平凸レンズに変更する方法を試みた。新しい摺動ピンおよびそれを装着するための支持ばね機構を設計・試作し、トライボスタに搭載した。そして、分解能テストチャート 1951 USAF などを用いて、設計・構築した干渉顕微鏡の性能を定量的に評価した。その結果、面内分解能は $0.78 \mu\text{m}$ 、摺動ピン垂直変位の測定分解能は 0.62 nm であり、とくに後者を開発当初の 16.5 nm から大幅に向上できた。このように、干渉顕微鏡を設計・構築し、トライボスタに統合した結果、ナノ厚さ液体膜を介した固体二面間摩擦力の測定と同時に、接触領域の高精度なその場観測を実現し、トライボスタの高機能化という研究目標の達成に成功した。

(2) トライボ特性の測定

紫外線照射していないナノ潤滑膜について、広範囲の速度領域にわたって摩擦特性を

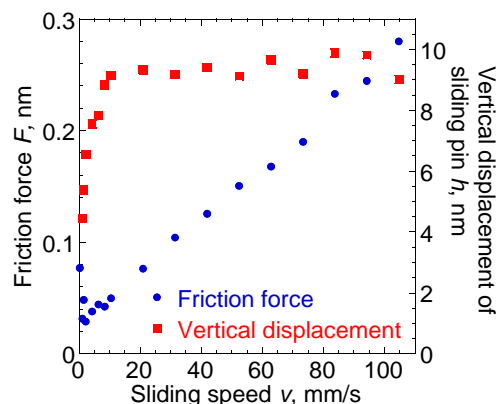


図 2 厚さ 5.3 nm の潤滑膜について、摺動速度に対する摩擦力と摺動ピン垂直変位を同時に測定した結果。

測定した結果、垂直荷重に対して摩擦力が線形に増加することや、摩擦力が摺動速度の増加に対して一旦減少したのちに増加に転じること(図 2)、摩擦力の減少から増加に転じる摺動速度は潤滑剤のバルク粘度の増加とともに減少することが分かった。すなわち、潤滑膜がナノ厚さであるにもかかわらず、バルク液体を用いた潤滑現象を記述するストライベック曲線に従うことを明らかにした。摩擦力測定時の接触領域を干渉顕微鏡を用いて観測した結果、a) 摺動していない静止時では、液架橋が形成されていること、b) 低速摺動時では液架橋が摺動ピンの後方に伸びるように変形し、摺動距離の増加とともに成長していくこと、c) 摺動速度の増加に伴い、液架橋は破断し、筋状となって摺動ピンの下から後方に流れていくこと、d) 摺動ピンのさらに後方では筋状構造が消失し、摺動ピン通過後に潤滑膜が再び初期の平坦膜に戻ることを分かった。上記の摩擦力が摺動速度に対して一旦減少する結果については、液架橋の形成・成長→破断という挙動の変化により、垂直荷重の成分である凝着力の減少が原因であることを明らかにした。また、摺動ピンの垂直変位については、摺動速度の増加とともに急激に増加したのちに定常値に漸近すること(図 2)や、潤滑膜の厚さあるいはバルク粘度の増加とともに増加する結果が得られた。これらの結果により、ナノ厚さの液体膜は固体二面間の摺動部に介在して、上向きの動圧を発生し、流体潤滑的な作用を示すことを明らかにした。

紫外線照射パターンニングしたナノ潤滑膜について、接触摺動に対する減耗・修復特性に及ぼすパターンの形状・線幅の影響を評価した結果、a) パターン形状によって耐摩耗性が大きく変化しないこと、b) パターン線幅の微細化により耐摩耗性が大幅に向上すること、c) 円周状パターンより放射状パターンのほうが、すなわちパターンが摺動方向と平行な場合より直交する場合のほうが、減耗した箇所への潤滑膜の流動が速く、修復特性の向上には有利であること、d) パターン線幅が 500 nm 以上の場合では、線幅による潤滑膜の流動・修復特性の変化が顕著でないこと、などが分かった。摩擦特性については、パターン線幅が小さいほう、またパターンが摺動方向と平行な場合より直交する場合のほうが摩擦力が小さいことを明らかにした。

(3) 分子シミュレーション

フッ素系極性潤滑剤を対象として、3 節の項目(3)で述べた方法を用いることにより、全原子 MD シミュレーションで得られた分布関数と等温圧縮率を再現する高精度な粗視化モデルを構築できた。また、transverse DPD 法の導入により、実験で得られた拡散係数と粘性係数を精確に再現する粗視化 MD シミュレーション法を確立できた。全原子 MD シミュレーションに比べ、粗視化シミュレーションでは、計算精度は同程度で、計算時間は 2

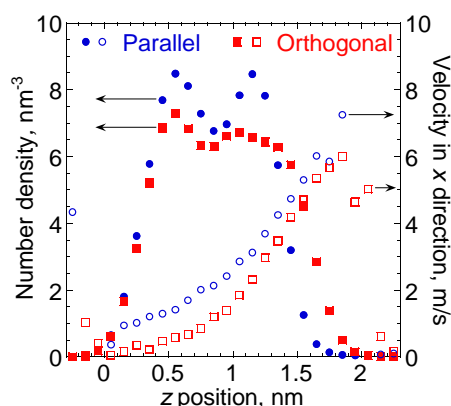


図 3 粗視化 MD シミュレーションにより得られた潤滑膜の厚さ方向(z 方向)における潤滑剤ビーズの数密度分布と速度分布。青色と赤色は、それぞれパターンがせん断方向と平行な場合および直交する場合を表す。

桁以上短縮された。さらに、固体表面にランダム粗さの付与や、荷重一定条件での計算、パターンニングしたナノ潤滑膜を対象とした計算を可能とした。以上のように、極性潤滑膜の特性解析やそのメカニズムの解明を可能とする高精度・高効率・高機能な粗視化シミュレーションを実現した。

パターンニングしたナノ潤滑膜について、粗視化 MD シミュレーションを用いた解析により、パターンが固体二面のせん断方向と直交する場合は、平行な場合に比べて、せん断力が小さく、減耗箇所を修復するための流動が速いことや、実験で用いたパターンの線幅範囲では、流動特性の線幅依存性が小さいことなどを明らかにした。これらの結果は、項目(2)で述べた実験結果と一致していることから、シミュレーションの妥当性を確認できた一例として、シミュレーション結果から求めた潤滑膜の厚さ方向(z 方向)における粗視化した潤滑剤ビーズの数密度分布およびせん断方向の速度分布を図 3 に示す。なお、垂直応力は 50 MPa とし、潤滑膜の上側にある固体表面を x 方向に 10 m/s の速度で駆動した。パターンがせん断方向と平行な場合に比較して、直交する場合は、潤滑膜が広い範囲内に存在し、また潤滑膜の速度が遅いことが分かる。すなわち、直交する場合は、紫外線照射により下側の固体表面に結合して固定された潤滑剤分子が結合せずに流動する潤滑剤分子の流れをせき止めることに起因して、固体二面間すきまが拡大し、せん断力が低減した。このように、パターンニングによる潤滑膜構造・運動の変化の動的分子描像、およびそれが流動特性・せん断特性などの物理量との関係をシミュレーションにより明らかにした。

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)

T. Kobayashi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh, Molecular Dynamics Simulations of Diffusion of Submonolayer Polar Liquid Lubricant Films on Solid Surfaces, *Microsystem Technologies*, 査読有, Vol. 22, 2016, pp. 1285-1290

DOI: 10.1007/s00542-015-2734-x

張賀東, ガスクラスタイオンビーム加工によるガラス面の表面特性の変化, *精密工学会誌*, 査読無(依頼解説), Vol. 82, 2016, pp. 325-328

H. Zhang, M. Fukuda, H. Washizu, T. Kinjo, H. Yoshida, K. Fukuzawa, S. Itoh, Shear Thinning Behavior of Nanometer-thick Perfluoropolyether Films Confined between Corrugated Solid Surfaces: A Coarse-grained Molecular Dynamics Study, *Tribology International*, 査読有, Vol. 93, 2016, pp. 163-171

DOI: 10.1016/j.triboint.2015.09.002

T. Kobayashi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh, Coarse-grained Molecular Dynamics Simulation of Nanometer-thick Polar Lubricant Films Sheared between Solid Surfaces with Random Roughness, *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, Vol. 51, 2015, pp. 3300704

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2435023

三矢保永, 張賀東, 難波克也, 福澤健二, 伊藤伸太郎, ボールオンディスク試験用の高速しゅう動子アセンブリの開発と分子潤滑膜の速度依存摩擦特性の測定, *トライボロジスト*, 査読有, Vol. 60, 2015, pp. 144-152

張賀東, 粗視化分子動力学シミュレーションを用いたナノ厚さ液体潤滑膜の凝着特性解析, *分子シミュレーション研究会誌 アンサンブル*, 査読無(依頼解説), Vol. 17, 2015, pp. 24-29

張賀東, ナノ厚さ液体潤滑膜の微細テクスチャリングによる新規なトライボ表面の創成, *潤滑経済*, 査読無(依頼解説), No. 595, 2014, pp. 2-7

〔学会発表〕(計20件)

張賀東, 竹内勇介, 三矢保永, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 接触領域のその場観測によるナノ厚さ液体膜の潤滑メカニズム解明, IIP2017 情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, 2017年3月15日, 東洋大学白山キャンパス(東京都)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 分子動力学法によるナノ厚さ液体潤滑膜のせん断特性の温度依存性解析, IIP2017 情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, 2017年3月15日, 東洋大学白山キャンパス(東京都)

T. Kobayashi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh, Effect of Molecular Chemical Structures

on Shear Properties of Nanometer-thick Liquid Lubricant Films: A Coarse-grained Molecular Dynamics Study, 2016 STLE Tribology Frontiers Conference, 2016年11月13日, Chicago (USA)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 局所加熱されたナノ厚さ潤滑膜のせん断現象の粗視化分子シミュレーション, *トライボロジー会議* 2016秋, 2016年10月12日, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター(新潟市)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 粗視化分子シミュレーションにおける動的せん断特性を再現するための散逸粒子動力学法, *日本機械学会第29回計算力学講演会*, 2016年9月23日, 名古屋大学東山キャンパス(名古屋市)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 粗視化分子動力学シミュレーションにおける固体表面モデルがナノ厚さ液体膜の拡散流動に与える影響, *日本機械学会2016年度年次大会* 2016年9月14日, 九州大学伊都キャンパス(福岡市)

横山隼大, 小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 粗視化分子動力学法によるパターンニングしたナノ厚さ極性液体膜の流動特性解析, *日本機械学会2016年度年次大会*, 2016年9月14日, 九州大学伊都キャンパス(福岡市)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, ナノ厚さ潤滑膜の拡散・せん断 MDシミュレーションに及ぼす Transverse DPD 熱浴の影響, *トライボロジー会議* 2016春, 2016年5月23日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)

H. Zhang, T. Yoshimi, K. Fukuzawa, S. Itoh, Is the Trend of Stribeck Curves Followed by Molecularly Thin Liquid Lubricant Films? The 7th Advanced Forum on Tribology 2016, 2016年4月10日, 商工経済会館(榎原市)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, ナノ厚さ液体潤滑膜のせん断特性に及ぼす分子化学構造の影響(粗視化分子動力学法による解析), IIP2016 情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, 2016年3月15日, 東洋大学白山キャンパス(東京都)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 粗さをもつ固定表面間でせん断されるナノ厚さ極性潤滑膜の粗視化分子動力学シミュレーション, 第7回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2015年10月28日, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター(新潟市)

竹内勇介, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太郎, ナノ厚さ潤滑膜を介した固体二面間摺動時の接触状態と凝着・摩擦特性に関する研究, *日本機械学会2015年度年次大会*, 2015年9月16日, 北海道大学(札幌市)

張賀東, 駒田俊, 福澤健二, 伊藤伸太郎,
紫外線照射パターンの形状最適化による
単分子層潤滑膜の減耗・修復特性の向上,
日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年
9 月 14 日, 北海道大学(札幌市)

T. Kobayashi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S.
Itoh, Molecular Dynamics Simulations of
Diffusion of Submonolayer Polar Liquid
Lubricant Films on Solid Surfaces, 2015
JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International
Conference on Micromechatronics for
Information and Precision Equipment
(MIPE2015), 2015 年 6 月 17 日, 神戸国際
会議場(神戸市)

T. Yoshimi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh,
Friction Properties of Nanometer-thick
Liquid Lubricant Films Measured with
Dual-axis Micromechanical Probes, 2015
JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International
Conference on Micromechatronics for
Information and Precision Equipment
(MIPE2015), 2015 年 6 月 15 日, 神戸国際
会議場(神戸市)

張賀東, 小林敬之, 福澤健二, 伊藤伸太
郎, 粗視化分子動力学法によるナノすき
まに閉じ込められた極性潤滑膜の剪断特
性解析, トライボロジー会議 2015 春, 2015
年 5 月 27 日, 姫路商工会議所(姫路市)

T. Kobayashi, H. Zhang, K. Fukuzawa, S.
Itoh, Coarse-grained Molecular Dynamics
Simulation of Nanometer-thick Polar
Lubricant Films Sheared between Solid
Surfaces with Random Roughness, IEEE
International Magnetism Conference, 2015 年
5 月 15 日, Beijing (China)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太
郎, サブモノレイヤー極性液体潤滑膜の
表面拡散に関する分子動力学シミュレ
ーション, 第 6 回マイクロ・ナノ工学シン
ポジウム, 2014 年 10 月 21 日, くにびき
メッセ(松江市)

小林敬之, 張賀東, 福澤健二, 伊藤伸太
郎, 分子動力学法を用いた固体表面にお
けるサブモノレイヤー液体潤滑膜の拡散
現象の解明, 日本機械学会 2014 年度年次
大会, 2014 年 9 月 9 日, 東京電機大学東
京千住キャンパス(東京都)

Y. Mitsuya, H. Zhang, K. Namba, K.
Fukuzawa, S. Itoh, Measurements of
Speed-Dependent Friction Characteristics of
Thin Lubricant films Coated on Magnetic
Disks Using a Novel Sliding Ball-
Suspension Assembly, IEEE International
Magnetism Conference, 2014 年 5 月 8 日,
Dresden (Germany)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.is.nagoya-u.ac.jp/dep-cs/nanosurf/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

三矢 保永 (MITSUYA, Yasunaga)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究

部・上席研究員

研究者番号: 10200065

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

該当なし