

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「エネルギー高効率利用のための相界面  
科学」  
研究課題「超低摩擦機械システムのためのトライボ  
化学反応を制御したナノ界面創成」

## 研究終了報告書

研究期間 2013年10月～2019年3月

研究代表者：足立 幸志  
(東北大学大学院工学研究科 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

#### 【研究実施内容】

本研究は、摩擦現象を「摩擦界面における化学反応」と捉え、トライボ化学反応の視点から超低摩擦の発現原理を解明し、その理論限界を実現するための技術開発により、エネルギーの利用効率を極限まで高めた機械の実現、ならびに、これまで実現することが不可能であった稼働条件や環境条件での超低摩擦機械システムの構築を目指したものである。

中でも従来経験的に扱われていた摩擦初期のなじみ現象をトライボ化学反応の視点から科学的に着目することにより、定常状態時の摩擦面の形成原理を理解し、その基本原理に基づき低摩擦発現ナノ界面を形成するための初期表面設計を含む技術開発を目標とした。

これらを実現するためにトライボ化学反応を制御した低摩擦ナノ界面創成を主題とするナノ界面創成グループ(機械分野:足立グループ)、計算化学によるトライボ化学反応の設計を主題とする計算化学設計グループ(化学分野:久保グループ)、高純度ガス雰囲気を用いたナノ界面の摩擦機構探求と制御を主題とする高純度環境を利用した高精度計測グループ(物理分野:杉村グループ)、高精度な低摩擦・炭素系硬質膜形成法の開発を主題とする高精度摩擦表面の作製グループ(材料分野:上坂グループ)を組織し、以下の4つを主要な研究項目とし、(1)-(3)により得た知見をもとに(4)の開発を行った。

- (1) 低摩擦発現ナノ界面構造およびトライボ化学反応の解明
- (2) トライボ化学反応によるナノ界面の形成・創製機構の解明
- (3) ナノ界面による低摩擦発現機構の解明
- (4) 低摩擦発現のためのトライボ化学反応制御技術・ナノ界面最適化技術の開発

具体的には、4つのグループが実環境における実験に基づいた現象の工学的追求に加え、高純度環境での実験、高分解能を有する高精度な観察・分析とトライボ化学反応シミュレータによる計算に基づいた現象の科学的追求を同時に展開し、工学的知見と科学的知見の双方のアプローチを逐次融合することにより「超低摩擦発現のためのトライボ化学反応を制御したナノ界面の創成」を目指した。

#### 【得られた成果】

##### 1. 新規炭素系硬質薄膜を用いた低摩擦発現ナノ界面の継続的自己形成による大気中低摩擦システム

大気中に存在する水分及び酸素とのトライボ化学反応の積極的な利用により新規開発した窒化炭素膜が低摩擦発現界面を自己形成させ得ることを明らかにし(右図)、従来不可能であった高湿度下での超低摩擦発現に成功した。この基本原理に基づけば、特別な潤滑剤を用いることなく機械機器が稼働する環境を利用した「超低摩擦発現ナノ界面の継続的自己形成に基づく安定した低摩擦発現技術」に発展し得ることを明示した。

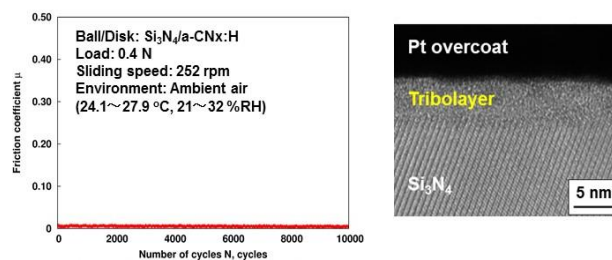


図 ナノ界面の自己形成による無潤滑下の超低摩擦発現

##### 2. 表面テクスチャを用いた低摩擦発現ナノ界面の継続的自己形成による水中低摩擦システム

従来経験的に扱われていたなじみ現象をケイ素系材料と水とのトライボ化学反応の視点から科学的・実験的に着目し、超低摩擦を発現させるための理想的ナノ界面の科学的理解、それを創成するための技術開発ならびにそのなじみ過程を明らかにするための解析・分析手法開発を4つのグループの連携にて実現し、水中境界潤滑下において10000分の1の極めて低い摩擦係数を発現し得るナノ界面の継続的自己形成に成功した。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. なじみの科学的理解とその制御による超低摩擦システム設計

概要: 従来経験的に扱われていたなじみ現象をトライボ化学反応の視点から科学的に着目することにより、「超低摩擦発現ナノ界面の継続的自己形成に基づく安定した低摩擦の発現とその持続の可能性」を実証した。低摩擦界面設計における、世界に類を見ない画期的な成果であると考えられる。なじみの科学的解明となじみの制御技術開発は、従来、摩擦研究、摩擦制御技術開発のボトルネックとなっている「摩擦の科学と技術のギャップ」を埋めるための重要なアプローチである。

### 2. 反応分子動力学法に基づく摩擦シミュレータの開発

概要: 反応分子動力学法に基づく摩擦シミュレータを開発し、スーパーコンピュータを活用することで、大規模モデルを用いた摩擦シミュレーションに成功した。これにより、従来は計算規模の観点から不可能であった潤滑雰囲気制御した摩擦のシミュレーションが可能になった。またこれにより摩擦粒子の生成を伴う摩擦過程のシミュレートが可能となり摩擦を伴うナノ界面形成やなじみの機構解明に向けたシミュレーション技術の基盤を確立したといえる。

### 3. 超低摩擦発現ナノ界面の継続的自己形成の実証

概要: 摩擦面に発生する摩擦エネルギーにより引き起こされた摩擦雰囲気中の酸素分子や水分子の乖離が、炭素系硬質薄膜の構造変化や摩擦面への終端をともなうトライボ化学反応を誘起し超低摩擦を発現するナノ界面を継続的に自己形成し続けることを見出した。これにより大気中無潤滑下において 0.01 オーダの低摩擦係数を長期間保証する安全安心を支える自己再生可能な超低摩擦システムという新しい概念の摩擦システム設計の可能性を明示した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. 水中超低摩擦発現ナノ界面創成のための表面テクスチャ設計

概要: 水中におけるケイ素系セラミックスにおいて、摩擦に誘起される加水分解反応に代表されるトライボ化学反応により耐荷重性を有し、かつ、超低摩擦を発現する2層構造を有するナノ界面が継続的に自己形成し得ることを実験と計算により明らかにした。この結果をもとに、なじみ過程における2種類のトライボ化学反応の制御を可能にする表面テクスチャのあり方を明示した。環境に優しい水による超低摩擦システムを大幅に推進する成果である。

### 2. 水素ガス及び窒素ガスを用いたオイルフリー潤滑システム設計

概要: 窒化炭素膜を主とした炭素系硬質薄膜への水素含有制御ならびに水素ガス及び窒素ガス環境下での摩擦において、大気中における広範囲な湿度、温度条件下での超低摩擦の実現、低摩擦発現のための許容荷重の大幅な向上に成功するとともに、低摩擦発現ナノ界面を継続的に自己形成し得る可能性を実験と計算により明らかにした。水素ガス、窒素ガスを用いた従来の潤滑油を使用しないオイルフリー潤滑システムを大幅に推進する成果である。

### 3. 炭素系硬質薄膜の低摩擦発現ナノ界面形成のための金属の触媒作用

概要: 純度を精密に制御したガス雰囲気中における炭素系硬質薄膜と純金属との摩擦において、摩擦界面における水素終端に加え、構造化アモルファスカーボンの移着膜の形成が必要であることを明らかにした。さらに超低摩擦を発現する移着膜は仕事関数が高く、そのような移着膜の形成には標準電極電位の高い金属の触媒作用が関与していることを実験的に明らかにした。この結果に基づき、触媒作用を期待する金属を含有した炭素系硬質薄膜を提案し、その有効性を実証した。

<代表的な論文>

- (1) Naohiro Yamada, Tomomi Watari, Takanori Takeno and Koshi Adachi, Role of Water and Oxygen Molecules in the Lubricity of Carbon Nitride Coatings under a Nitrogen Atmosphere, *Tribology Online*, 11, 2, 308-319, 2016. (DOI: 10.2474/trol.11.308)
- (2) Y. Wang, J. Xu, Y. Ootani, S. Bai, Y. Higuchi, N. Ozawa, K. Adachi, J. M. Martin, M. Kubo, Tight-Binding Quantum Chemical Molecular Dynamics Study on the Friction and Wear Processes of Diamond-Like Carbon Coatings: Effect of Tensile Stress, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 34396–34404, 2017. (DOI: 10.1021/acsami.7b07551)
- (3) Yoshihiro Kurahashi, Hiroyoshi Tanaka, Masaya Terayama and Joichi Sugimura, Effects of Environmental Gas and Trace Water on Friction of DLC Slid with Metals, *Micromachines*, 8, 217, 1-14, 2017. (DOI: doi:10.3390/mi8070217)

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「足立」グループ

- ・研究代表者: 足立 幸志 (東北大学大学院工学研究科 教授)
- ・研究項目
  - ・低摩擦を発現するナノ界面構造の分析・解析手法の開発
  - ・ナノ界面の特性分布評価システムの開発
  - ・摩擦面のその場観察・分析手法の開発
  - ・種々因子の摩擦係数とトライボ化学反応に及ぼす影響の実験的説明
  - ・トライボ化学反応制御・ナノ界面最適化技術の開発
  - ・プラズマイオン注入成膜装置を用いたナノ界面最適化のための製膜設計指針の構築
  - ・水素を潤滑剤とする低摩擦システムの構築

#### ② 「久保」グループ

- ・主たる共同研究者: 久保 百司 (東北大学金属材料研究所 教授)
- ・研究項目
  - ・トライボ化学反応ダイナミクスの理論的説明
  - ・トライボ化学反応が摩擦係数に影響を与えるメカニズムの理論的説明
  - ・潤滑膜構造、潤滑雰囲気、なじみプロセスの理論的設計

#### ③ 「杉村」グループ

- ・主たる共同研究: 杉村 丈一 (九州大学大学院工学研究院 教授)
- ・研究項目
  - ・低摩擦を発現するナノ界面構造の分析・解析手法の開発
  - ・高純度ガス雰囲気における微量不純物の摩擦に及ぼす影響の実験的探求
  - ・高純度ガス雰囲気における超低摩擦発現機構の実験的探究
  - ・高純度ガス雰囲気におけるトライボ化学反応を制御したナノ界面創成

#### ④ 「上坂」グループ

- ・主たる共同研究者: 上坂 裕之 (岐阜大学工学部 教授)
- ・研究項目
  - ・低摩擦 DLC 膜の超高速成膜条件の確立
  - ・超高速 DLC 成膜プロセス中のプラズマ内部パラメータの計測
  - ・超高速 DLC 成膜プロセス中のプラズマ内部パラメータと摩擦特性の関係の解明
  - ・超高速 DLC 成膜プロセス中のプラズマ内部パラメータ制御指針の提案

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

ナノ界面制御に関する共同研究進行中の国外研究者

- ・フランス、Ecole Centrale de Lyon の Philippe Kapsa 教授、Julien Fontaine 博士  
(欧州最大のトライボロジーグループ(Tribology and System Dynamics Laboratory))
- ・韓国、延世大学の Dae-Eun Kim 教授  
(Center for Nano Wear(ナノ摩耗センター)のリーダー)

ナノ界面制御のためのその場計測技術開発に関する共同研究打ち合わせ中の国外研究者

- ・英国、Southampton 大学の Robert Wood 教授  
(National Centre for Advanced Tribology(国立先端トライボロジーセンタ)のリーダー)

ナノ界面制御に基づく低摩擦システム開発に関する共同研究実施企業

- ・5社