

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360072

研究課題名(和文) トライボコーティング潤滑膜の超低摩擦発現機構の解明と
宇宙機器への応用研究課題名(英文) Super-low Friction Mechanisms of Tribo-coating Films
and its Application to Space Mechanisms

研究代表者

足立 幸志 (ADACHI KOSHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10222621

研究成果の概要(和文)：超低摩擦を発現するトライボコーティング膜は、摩擦初期に摩擦対材料により形成される硬質物質中に潤滑剤となる軟質金属がナノオーダーサイズで分散した構造を有する固体膜であり、その構造ゆえに低摩擦を与え得る極薄軟質金属潤滑膜が自己形成されることを明らかにした。さらにこの構造を模した新しいナノ複合潤滑膜を創成し、従来、宇宙機器で最も多く使用されている二硫化モリブデン膜より低い摩擦を発現することを実証した。

研究成果の概要(英文)：Tribo-coating films formed by tribo-coating process have nano composite structure in which the soft-metal of nano size are distributed in the hard matrix composed of friction pair materials. Due to the structure of the films thinner lubricious film is easily self-formed during friction. It is the reason why tribo-coating films can give super-low friction. On the basis of the understanding the low friction mechanisms of tribo-coating films, new composite coating that represents the structure of tribo-coating film is created. The newly introduced composite coating films provide friction reduction to one half of that of molybdenum disulfide, which is the most popular solid lubricant for space mechanisms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

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：固体潤滑，摩擦制御，低摩擦機構，摩擦支援，表面自由エネルギー，
ナノコンポジット，スパッタリング

1. 研究開始当初の背景

宇宙機器の故障及び寿命は、ほとんどの場合、接触面における潤滑不良、潤滑剤の消耗

によるものである。宇宙開発 50 年の歴史における多くの失敗例は、これら接触面の摩擦制御の重要性を浮き彫りにしており、革新的

な潤滑法が研究開発当初のみならず現在でも強く求められている。

機械要素の多くは、一般に油やグリースを用いて潤滑される。しかし、それらの蒸発が問題となる宇宙環境を代表とする真空環境で稼動する機械要素においては、鉛などの軟質金属や二硫化モリブデンなどの層状構造を有する固体膜により潤滑される。しかし、固体潤滑は液体による潤滑と比較して相対的に高摩擦であり、さらに予め被覆した固体膜の摩擦による寿命が存在するという本質的に避けられない欠点を有している。

このような状況に対し、研究開発当初において当研究グループは宇宙機器のための新しい潤滑法として「超高真空中トライボコーティング法（摩擦支援型蒸着膜形成法）」を世界で初めて提案し、従来の軟質金属を用いた固体潤滑では実現不可能な低摩擦を半永久に持続できる潤滑法として、その有効性を明らかにしていた。

この超高真空中トライボコーティング潤滑は、宇宙のトライボロジー技術において日本が誇り得る世界ではじめての独創的な技術であり、宇宙航空研究開発機構においても本トライボコーティングを施した試験片が、宇宙環境における材料曝露実験の試験片として採用されるなど実用への期待は大きかった。

一方、宇宙機器への応用を目指すためにはトライボコーティングシステムの簡素化を含めたシステムとしての信頼性の確保が必要不可欠であり、トライボコーティング法そのものの改良とともに、トライボコーティングで実現される超低摩擦の発生機構の解明をもとにした信頼性の高い、従来法では実現不可能な低摩擦を与える宇宙機器用潤滑システムの構築が強く求められていた。

2. 研究の目的

宇宙機器のための新しい潤滑法として当研究グループが提案している「超高真空中トライボコーティング法（摩擦支援型蒸着膜形成法）」により発生する超低摩擦発生機構と低摩擦を実現するための必要条件の解明ならびに、解明する低摩擦発生機構にもとづいた従来法では実現不可能な低摩擦を確実に与える宇宙機器用潤滑システムの構築が本研究の最終目的である。具体的な目的は以下の2点である。

(1) トライボコーティングにおいて低摩擦発現時に形成される摩擦表面層の分析を中心に材料学的視点からトライボコーティング膜の構造とそれによる低摩擦発生機構を明らかにする。そのようなトライボコーティング膜の形成に影響を及ぼす表面の清浄度と摩擦条件の関係を実験的に明らかにするこ

とにより真空中において低摩擦を実現するための必要条件を明らかにする。

(2) 従来宇宙機器に最も広く使用されている二硫化モリブデンの摩擦を下回る新しい潤滑膜として、本研究で解明する低摩擦を発現するトライボコーティング膜の構造に基づいた新しい潤滑膜を創成する。

3. 研究の方法

(1) 当グループが提案している高真空中トライボコーティングシステムを有するボール・オン・ディスク型すべり摩擦試験機（図1(a)）ならびに玉軸受用摩擦試験機（図1(b)）により、摩擦特性に及ぼす表面の清浄度と摩擦条件の関係を実験的に明らかにする。走査電子顕微鏡(SEM)、透過電子顕微鏡(TEM)、電子線マイクロアナライザ(EPMA)分析により、低摩擦が発生する摩擦表面の特徴を材料学的視点から明らかにする。さらにトライボコーティング膜の形成に影響を及ぼす表面の清浄度の影響を明確にすることにより、低摩擦を発現する摩擦表面のための必要条件を明らかにする。

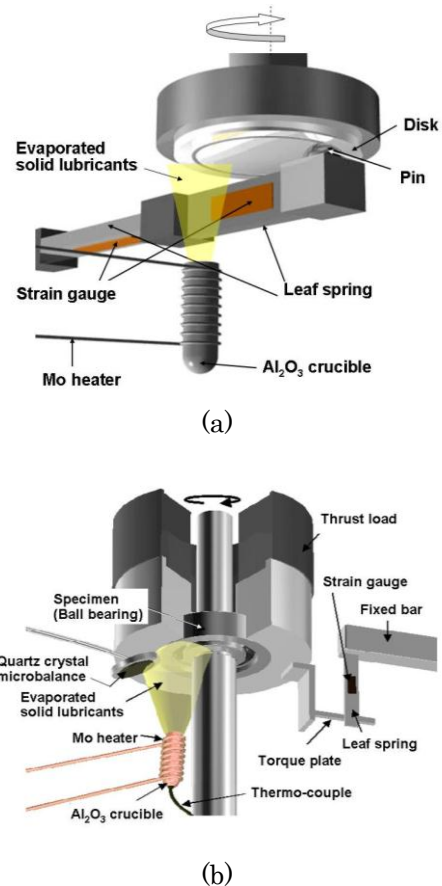


図1 トライボコーティング装置を有するボール・オン・ディスク型すべり摩擦試験機 (a)及び玉軸受用摩擦試験機(b)。

(2) 高周波プラズマ CVD によるダイヤモンドドライクカーボン(DLC)の成膜とスパッタリングによる二硫化モリブデン(MoS_2)の成膜を同時に行なうことにより MoS_2 -DLC ナノ複合膜成膜の可能性を明らかにする。また真空中ボール・オン・ディスク型すべり摩擦試験機により従来宇宙機器に最も広く使用されている MoS_2 より低い摩擦発現の可能性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 超低摩擦を発現するトライボコーティング膜は、摩擦初期に摩擦対材料により形成される硬質物質中に潤滑剤となる軟質金属がナノオーダーサイズで分散した構造を有する固体膜であり (図 2), その構造ゆえに低摩擦を与え得る極薄軟質金属潤滑膜が自己形成されることを明らかにした。

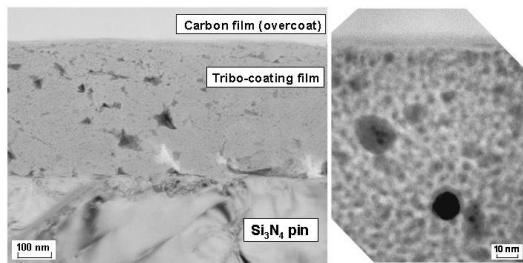


図 2 超低摩擦を発現するトライボコーティング膜の TEM 像

(2) 事前の玉軸受の洗浄度がトライボコーティングの潤滑特性に極めて大きな影響を及ぼすことを実験的に明らかにした。得られた具体的な結果は以下の通りである。

- ① 洗浄度の相違により、玉軸受に形成されるトライボコーティング膜はトライボコーティング膜が観察されない場合、塊状の膜が点在する場合、一様な膜が形成されているが部分な脱落が見られる場合及び内輪上に一様な膜が形成される場合の 4 種類に分類されることを明らかにした。
- ② 4 種類のトライボコーティング膜の形態において、内輪上に 50nm 程度の厚さを有する一様なトライボコーティング膜が形成されている場合 (図 3) において安定した低摩擦が得られることを示した。
- ③ この内輪上に一様な膜が形成されるための形成条件を実験的に明らかにした。具体的には 60 分間の超音波洗浄、その後 200°C 20 分の加熱による試験片の洗

浄を行い、スラスト荷重 16N 以上、供給膜厚 300nm 以上の条件でトライボコーティングを行うことで、低摩擦を発生させるためのトライボコーティング膜が形成されることを明らかにした。

- ④ 十分な洗浄を行なうことにより、従来より低摩擦を実現するトライボコーティング膜形成の可能性を実証した。

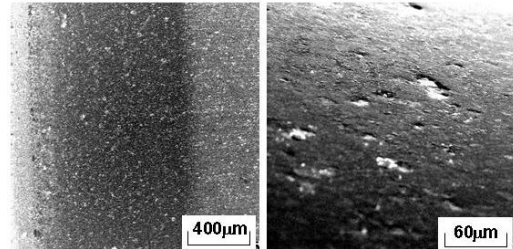


図 3 玉軸受において低摩擦を発現するトライボコーティング膜の SEM 像

(3) 低摩擦を発生するトライボコーティング膜を模したナノ構造を有する新しい宇宙機器用潤滑膜を提案し、その有効性を実験により明らかにした。得られた具体的な結果は以下の通りである。

- ① 高周波プラズマ CVD 法およびスパッタリング法を併用して炭化ケイ素基板上に二硫化モリブデン含有ダイヤモンドドライクカーボン (MoS_2 -DLC) 膜の成膜を試み、非晶質の DLC 母相中に大きさが 5-6 nm 程度の MoS_x クラスタが分散した MoS_x -DLC 膜の成膜に成功した (図 4)。

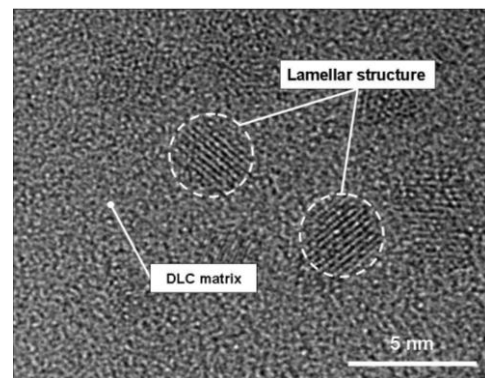


図 4 成膜に成功した二硫化モリブデン含有ダイヤモンドドライクカーボン (MoS_2 -DLC) ナノ複合膜の TEM 像

- ② スパッタリング電力およびメタンガス流量を調整することで 5 種類の MoS_x -DLC 膜を成膜し、含有される MoS_x の量を 0.3-33.4 at.% に変化させることに成功し

た。また、含有される MoS_x の S/Mo の値は平均で 0.87 であることを明らかにした。

- ③ 厚さ 0.48 μm の MoS_2 膜のオーバーコートに MoS_x -DLC 膜を施すことによって、従来の MoS_2 膜と比較して摩擦係数を 3分の2 から 6分の1 程度に低減できることを示し、新たに提案した潤滑膜の有効性を実証した (図 5)。

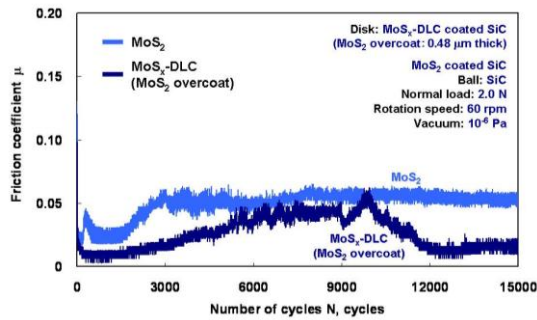


図 5 二硫化モリブデン膜と二硫化モリブデン含有ダイヤモンドライクカー (MoS₂-DLC) ナノ複合膜の摩擦特性

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 3 件)

- ① Takanori Takeno, Shingo Abe, Koshi Adachi, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Deposition and structural analyses of molybdenum-disulfide (MoS_2)-amorphous hydrogenated carbon (a-C:H) composite coatings, *Diamond and Related Materials*, 査読有, Vol. 19, 2010, 548-552.
- ② Koshi Adachi and Koji Kato, SM/SEED space exposure experiment of ball bearing lubricated by tribo-coating, *Proc. of International Symposium on "SM/MPAC & SEED Experiment"*, 査読無, 2009, 121-125.
- ③ K. Adachi, K. Kato, In situ and on-demand lubrication by tribo-coating for space applications, *Proc. IMechE, Journal of Engineering Tribology*, 査読有, Vol. 222, 2008, 1031-1039.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 足立幸志, 超潤滑ナノ界面最適化技術の

研究開発, 第 2 回ナノテク・低炭素化材料技術シンポジウム, 平成 22 年 9 月 2 日, 仙台.

- ② 安部慎吾, 竹野貴法, 三木寛之, 足立幸志, 高木敏行, 真空中における低摩擦発現のための二硫化モリブデン含有ダイヤモンドライクカーボン膜の創成, 日本機械学会東北支部 第 44 期総会・講演会, 平成 22 年 3 月 12 日, 仙台.
- ③ Yusuke Fujii, Koshi Adachi, Yoshihiko Dan, Yoshitaka Seki, Frictional Vibration Properties of Ball Bearing Lubricated by Tribo-coated Ag Films, *World Tribology Congress 2009*, 9th Sept. 2009, Kyoto, Japan.
- ④ Shingo Abe, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Friction Properties of MoS_2 -containing DLC in Ultra High Vacuum, *World Tribology Congress 2009*, 9th Sept. 2009, Kyoto, Japan.

- ⑤ Koshi Adachi, Tribology for Space Applications: In-situ and on-demand Tribo-coatings, *Int. Conf. on Advances in Mechanical Engineering*, 4th July, 2008, Indian Institute of Science, Bangalore, India.

[図書] (計 1 件)

- ① 足立幸志, テクノシステム, MEMS/NEMS 工学大全 (桑野博喜 監修), 第 4 章 MEMS/NEMS 応用基盤技術, 第 9 節 トライボロジー, 2009, 577-584.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

足立 幸志 (ADACHI KOSHI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10222621

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 研究連携者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

三木 寛之(MIKI HIROYUKI)
東北大学・流体科学研究所・講師
研究者番号：80325943

竹野 貴法 (TAKENO TAKANORI)
東北大学・国際高等研究教育機構・助教
研究者番号：00451617