

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656113

研究課題名(和文) 微細表面構造によるダイヤモンド膜の揚力発生機構と制御

研究課題名(英文) The lift generating mechanism of a diamond film and control by fine surface structure.

研究代表者

三木 寛之 (Miki, Hiroyuki)

東北大学・国際高等研究教育機構・准教授

研究者番号：80325943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は微結晶ダイヤモンド膜表面の平坦部と微細な凹凸の混在により、優れた滑り特性を示す現象について、摩擦低減条件ならびに表面微細形状の関係性の観点から定量的に評価を行った。具体的には、適度な研磨を施した多結晶ダイヤモンド膜が超低摩擦無潤滑を示す現象における接触と浮上の安定状態の境界領域について詳細に検証した。その結果、摺動要素としての研磨ダイヤモンド膜が混合潤滑の低速摺動から流体潤滑領域の高速摺動の全ての領域で安定し、連続的な接触状態遷移を生じることを見出した。さらに、現象のモデル化に取り組み、平坦部と未研磨部の比率により、流体潤滑遷移が制御可能であることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：This research evaluated quantitatively the relationship of friction reduction conditions and surface fine shape by the flat part of the polishing diamond film surface, and mixture of fine asperity about the phenomenon which shows the outstanding sliding characteristic. I verified in detail about the boundary domain of the stable state of contact and surfacing, and, specifically, the poly-crystal diamond film which gave moderate polishing showed clearly that super-low friction dry is shown. As a result, it was shown that the polishing diamond film as a sliding component produces the stable contact change state in all the domains of high-speed sliding of a fluid lubrication domain from low-speed sliding of mixture method lubrication. Furthermore, I was able to tackle modeling of the phenomenon and was able to show clearly that fluid lubrication changes are induced by the ratio of a flat part and an unpolished part.

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：トライボロジー 表面テクスチャ ダイヤモンド 潤滑状態遷移

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者等の先行研究により、本研究で提案している研磨ダイヤモンド膜においては、気相合成ダイヤモンドの粒成長を制御するとともに研磨時に鏡面部と微細な凹凸を混在させることで、優れた滑り特性を示すことを明らかにしている。この現象はダイヤモンドの固体潤滑と、接触面に介在する気体分子(空気など)による流体潤滑が組み合わされた境界潤滑の状態になるためと考えられる。さらに、接触面圧が小さい場合にはステンレス鋼などの加工面上を空気浮上のような滑走することが特徴であり、金属とダイヤモンドの組み合わせによって潤滑油が必要ない軸受機構が設計可能となる。

一連の研究により、研磨ダイヤモンド膜について(1)境界潤滑の低速摺動における実験的検証、(2)計算機シミュレーション援用による高速摺動における流体潤滑(浮上)について知見を得ている。従って、接触と浮上の安定状態との境界領域について研究を進めることによって、無潤滑摺動要素としての研磨ダイヤモンド膜が低速(摺動)から高速(浮上)の全ての速度領域で安定した低摩擦を実現するメカニズムを明らかにすることが出来ると考え、本研究を着想するに至った。

### 2. 研究の目的

表面に微小な構造(テクスチャ)を持つ平滑な微結晶ダイヤモンド膜を用いて、潤滑油を必要とせずに低摩擦(摩擦係数 $<0.1$ )であり、なおかつ一定以上の動作速度では摩擦係数がほとんど零となる摺動現象を明らかにする。本研究では、境界潤滑 混合潤滑 流体潤滑へと連続的に推移する無潤滑摩擦現象のマクロな摺動特性を接触表面のミクロ構造により現象論的に解明し、潤滑の新たな可能性を検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)高速回転摩擦試験機(図1)を用いて研磨状態の異なるダイヤモンド膜の金属板上での浮上特性について評価する。(2)雰囲気条件を制御し、面間を流れる気体分子を変化させて、浮上過程(摺動から浮上の間)を定量的に分析する。この結果と摺動

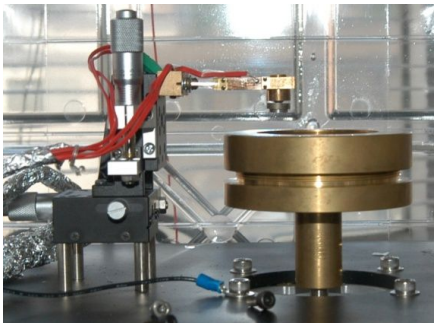


図1 高速回転摩擦試験機

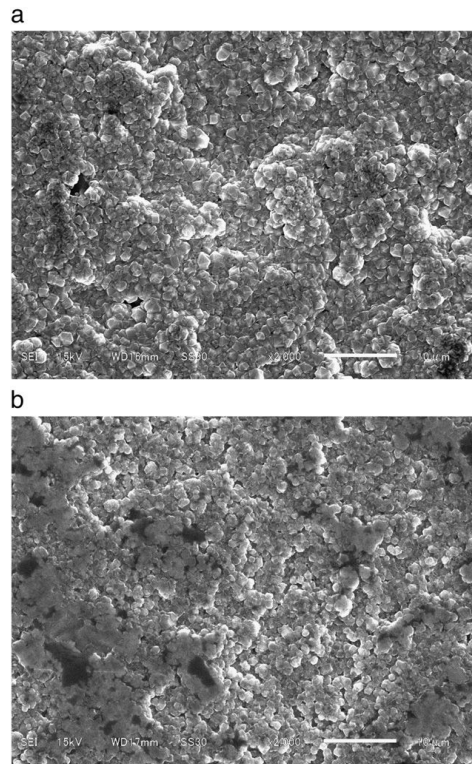


図2 製膜されたダイヤモンド(a)と研磨後のダイヤモンド膜(b)の走査電子顕微鏡写真

(相対)速度の影響を分析し、浮上への寄与が大きい形状因子および浮上の制御性について検証する。(3)研磨ダイヤモンドの表面形状が揚力と摩擦応力に及ぼす影響を定量化して、表面を適度に研磨された微結晶ダイヤモンド膜の浮上メカニズムを明らかにする。

### 4. 研究成果

研磨ダイヤモンドの流体潤滑遷移(浮上)特性の表面形状依存性評価を目的として、摩擦試験機を用いて研磨状態の異なるダイヤモンド膜(図2)の金属板上での摺動・浮上特性について評価した。各試験片の摺動試験には、凹凸のあるダイヤモンド膜と相手材の金属の間で安定した面接触(接触面圧)が維持されるように改良を加えたPin-on-Disk試験法を適用した。浮上特性試験には表面粗さが異なる半鏡面研磨多結晶ダイヤモンド膜と接触面を鏡面研磨( $Ra=0.04\mu\text{m}$ )した円筒形のSUS440Cピンの組み合わせを用いた。

#### (1) 接触圧と摩擦係数の相関の定量的評価

研磨されたダイヤモンド膜とSUS440C間の摺動試験では、接触圧 $5\text{kPa}$ 以下の場合には摺動速度 $1\text{m/sec}$ 以上の相対速度条件で2面間を流れる気体流によって発生する揚力と接触面圧が均衡を取ることによって安定した流体潤滑が発現することが分かった。一方、 $6\text{kPa}$ 以上の接触圧が加わると揚力が十分にピンを支持できず、一部で摺動面が直接接触する混合潤滑状態になることが分かった。そのために摩擦係数が高くなり、場合によって

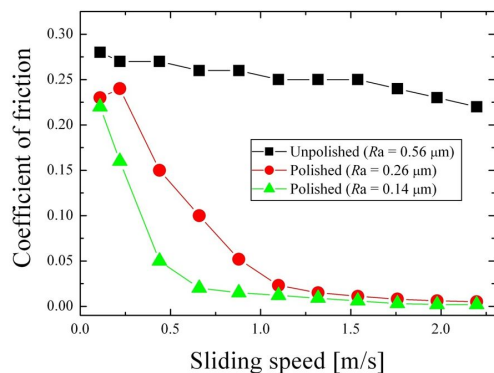


図3 摩擦係数の摺動速度依存性

は不安定な接触状態が現れることも明らかになった。以上のことから、表面形状や摺動速度、接触面圧が摩擦特性に影響を与え低摩擦に遷移するための重要なパラメータであることを示すことが出来た。

#### (2) 摺動速度と摩擦係数の相関の定量的評価

研磨ダイヤモンドの浮上特性と表面形状の関係性について、研磨ダイヤモンドと金属の間の相対（摺動）速度の観点から評価した（図3）。さらに、研磨ダイヤモンドの常温大気雰囲気における低摩擦摺動から超低摩擦（浮上）に至る過程について、接触面圧と摺動速度を制御パラメータとして用い、研磨状態（表面粗さ）が摺動に与える影響を定量的に明らかにした。

同時に、安定した試験条件を得るため、ダイヤモンド製膜における良好な密着性を確保する技術の開発を行った。

(3) 潤滑状態の遷移を誘起する研磨ダイヤモンドの微細表面形状（研磨パラメータ）と発生する揚力、および摺動（相対）速度との相関を定量的に分析した。半鏡面状に研磨することによって得られる不規則微細形状を従来の表面粗さに加えて、研磨面積率を導入し、摩擦低減（揚力発生）効果が大きい表面形状パラメータを抽出することができた。

その結果、研磨ダイヤモンド膜の浮上特性が摺動時の荷重条件・雰囲気条件および研磨によって得られるダイヤモンド膜の表面微細形状に大きな影響を受けることを明らかにし、研磨面積率を用いた制御・評価の可能性を見出した。また、浮上発生に関わる重要なパラメータとして、特に接触状態から浮上が始まるまでの段階において平滑部の形状が重要であることを明らかにすることができた。

以上のことから、研磨ダイヤモンド膜の摺動において低摩擦に遷移するための重要なパラメータならびに浮上モデルを明らかにすることが出来た。

## 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 1 件）

Hiroyuki Miki, Atsushi Tsutsui, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Friction properties of partially polished CVD diamond films at different sliding speeds, *Diamond & Related Materials*, 査読有, 24, 2012, 167-170  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2012.01.004>

〔学会発表〕（計 25 件）

内藤 恭平, 三木 寛之, 小助川 博之, Michel Belin, 高木敏行, 研磨ダイヤモンド膜の表面微細形状と潤滑状態遷移の関係性評価, 日本機械学会東北支部 第49期講演会, 2014年03月14日, 東北大学

Michel Belin, Hiroyuki Miki, Characterization of low-friction diamond coatings thanks to the relaxation tribometer technique: the effect of diamond coating roughness, 2014 Annual ELyT Workshop, 2014年02月20日, Frejus, フランス

Hiroyuki Miki, Takanori Takeno, Hiroyuki Kosukegawa, Toshiyuki Takagi, Development of the Functional Hard Carbon Coating for Machine and Structural Materials, Tenth International Conference on Flow Dynamic (ICFD2013) (招待講演), 2013年11月27日, 仙台

Yoshiaki Kawagoe, Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Study on Micro-/Nanoscale Gas-Film Lubrication of Sliding Surface with Three-Dimensional Structure, Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013), 2013年11月25日, 仙台

Kyohei Naito, Hiroyuki Miki, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, Mixed-Lubrication of Fine Textured Polycrystalline CVD Diamond Surface, Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013), 2013年11月25日, 仙台

内藤恭平, 三木寛之, 高木敏行, Michel Belin, 研磨ダイヤモンド膜の摺動特性に及ぼす表面微細形状と潤滑の影響, 第27回ダイヤモンドシンポジウム, 2013年11月20日, 日本工業大学

三木寛之, 竹野貴法, 高木敏行, 機械・構造材料のための機能性硬質炭素コーティング, 日本機械学会年次大会(招待講演), 2013年09月11日, 岡山大学

Hiroyuki Miki, Yosuke Nakayama, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Adhesion and Friction Properties of Partially Polished CVD Diamond Films on Steel Substrates, The 2013 New Diamond and Nanocarbon (NDNC2013), 2013年05月21日, シンガポール

Michel Belin, Hiroyuki Miki, A new insight on characterization of low friction diamond coatings, thanks to the relaxation tribometer technique, ELYT Workshop 2013 in Zao To-o-gatta, 2013年02月20日, 蔵王, 宮城

Hiroyuki Miki, Atsushi Tsutsui, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Friction and Hydrodynamic lubrication transition properties of partially polished CVD diamond films, International Workshop on Biomedical and Nano-micro Engineering related to Flow Dynamics, 2013年01月11日, 上海, 中国

Michel Belin, Hiroyuki Miki, Maria-Isabel De Barros-Bouchet, Julien Fontane, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Toward Super-low Friction with Carbon-Based Coatings, The Ninth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2012) (招待講演), 2012年09月21日, 仙台

Hiroyuki Miki, Yosuke Nakayama, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Adhesion and Friction Properties of Partially Polished CVD Diamond Films on Steel Substrates, The Ninth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2012), 2012年09月21日, 仙台

Hiroyuki Miki, Atsushi Tsutsui, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Hydrodynamic lubrication transition of partially polished CVD diamond film, The 6th International Conference on Technological Advances of Thin Films & Surface Coatings (ThinFilms2012), 2012年07月15日, シンガポール

Yosuke Nakayama, Hiroyuki Miki, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, Friction Properties Between Stainless Steel and Partly Polished Polycrystalline Diamond Film with Ti Interlayer, Eighth International Conference on Flow Dynamics, 2011年11月10日, 仙台

Susumu Isono, Shigeru Yonemura, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Effects of Gas Properties on Molecular Gas-Film Lubrication, Eighth International Conference on Flow Dynamics, 2011年11月10日, 仙台

三木寛之, 筒井淳司, 竹野貴法, 高木敏行, 研磨ダイヤモンド膜と金属の間の低摩擦摺動における速度依存性評価, 日本機械学会 2011年度年次大会, 2011年9月14日, 東京

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三木 寛之 (MIKI, HIROYUKI)  
東北大学・国際高等研究教育機構・准教授  
研究者番号: 80325943

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

米村 茂 (YONEMURA, SHIGERU)  
東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号: 00282004