

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630032

研究課題名(和文) 高速微小振動によるダイヤモンド膜の超低摩擦摺動制御

研究課題名(英文) Super low friction of the diamond film by the high-speed microvibration

研究代表者

三木 寛之 (MIKI, Hiroyuki)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・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

研究成果の概要(和文)：多結晶ダイヤモンド膜の表面を適度に研磨することによって得られる、表面に微小な構造を有する平滑なダイヤモンド膜は、摺動速度に依存して連続的に潤滑状態が遷移し、高速摺動時にはゼロ摩擦が発現することが特徴である。研磨されたダイヤモンド膜は金属との間の高速摺動による摩擦低減効果が報告されているが、本研究では微小振動との組み合わせによる局所的な同効果発現の可能性を検証した。具体的には、ボールオンディスク試験機および微小振動を与えられる摩擦試験機によりダイヤモンド膜の金属板上での摩擦低減効果について実験的に評価し、寄与が大きい因子と効果の制御性について数値計算の援用により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The smooth diamond film which has minute structure on the surface is obtained by polishing the surface of the polycrystalline diamond film moderately. As for this film, lubrication state changes depending on sliding speed continually and has the characteristic that zero friction occurs in the high speed sliding region. The friction reduction effect by high speed sliding between the metal and the polished diamond film is reported in the previous study. We studied the possibility of the local friction reduction effect by the combination of the film and micro-vibration in this study. In particular, we experimentally evaluated about the friction reduction effect between a diamond film and the metal plate by ball on disk testing equipment and friction testing equipment given micro-vibration. As a result, we clarified dominant factor and control feature of the friction reduction effect by support of the computer simulation.

研究分野：機能性材料学

キーワード：超低摩擦遷移 研磨ダイヤモンド 流体潤滑 希薄気体潤滑モデル テクスチャ

## 1. 研究開始当初の背景

人工ダイヤモンド膜は一般に表面粗さが大きく、摩擦係数を低くするためには長時間の研磨により平滑な表面に上げる必要がある。これに対して、研究代表者等が提案している適度に研磨したダイヤモンド膜（以下、研磨ダイヤモンド膜）は容易に研磨可能であり、ゼロ摩擦遷移と直動軸受摺動面への実用研究が実施されている。

鏡面ではないダイヤモンド膜が低摩擦を示すことは新たな発見であり、摺動速度が速くなると摩擦係数が急激に下がり、浮上することによって摩擦係数がほぼゼロになることが特徴である。これは、ダイヤモンドの表面に残る微小溝構造とダイヤモンド膜と対向面とのわずかな隙間にトラップされる気体流によってナノスケールの気体潤滑が起こっているものと考えている。

研磨ダイヤモンド膜による摺動では、接触時の低摩擦と浮上時のゼロ摩擦を両立することが可能であるため、可動時には音がしない「静かな滑り」が実現し、潤滑油を必要としないクリーンなメンテナンスフリー機構を実現することができる。さらに、これまで複雑なエアシール機構を必要としていた気体軸受や汚染防止のため潤滑油の飛散を抑える機構などを有していたベアリング軸受などが単純な仕組みの滑り軸受に置き換えることが期待出来る。従って、機械全般についての生産コストや維持・補修のコストが削減され、産業の効率化がもたらされる。

## 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、複雑な機械機構を用いずに、ある振動状態では摩擦係数がほとんど零となるフローティング原理を開発する。本研究で提案する平滑な微結晶ダイヤモンドでは、摺動速度に依存した境界潤滑 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が発現するが、高速摺動あるいは微小振動と組み合わせることによって局所的に摩擦低減効果を生み出す機構の可能性を検証する。

## 3. 研究の方法

ボールオンディスク試験機および微小振動を与えられる摩擦試験機により、研磨状態（表面微細形状）の異なるダイヤモンド膜の金属板上での摩擦低減効果について評価する。このうち浮上への寄与が大きい形状因子を明らかにし、摩擦低減効果の制御性について検証する。また、表面形状が揚力と摩擦応力に及ぼす影響を検証して微結晶ダイヤモンド膜の摩擦低減メカニズムを明らかにする。

(1) 摺動における摩擦低減効果の定量的評価

研磨ダイヤモンド膜表面の1次元形状

（凸凹）と2次元形状（表面テクスチャ構造）の摩擦係数の関係を定式化する。ミクロスケールには光学顕微鏡による組織観察、原子間力顕微鏡による微細形状の直接観察とクロススケールの表面粗さ評価により膜のうねりや凸凹による形状パラメータと摩擦挙動特性についてマトリックス化する。ダイヤモンド膜の凹みの分散度（表面テクスチャ構造因子）を膜表面の組織パラメータとして抽出し、規則度を非常に小さくした不規則形状制御パラメータが摺動に与える影響を評価する。

(2) 微小振動摺動によるダイヤモンド膜の金属板上での摩擦低減効果

板バネにより支持されるボールに微小振動を与える機構を用いて、研磨ダイヤモンドの常温大気雰囲気における振動摩擦係数の定量的評価を行う。研磨ダイヤモンドの常温大気雰囲気における高速往復摺動の経時変化から摩擦影響因子の定量的評価を行う。ここでは潤滑の状態遷移を支配するパラメータ（振動数や振幅など）を抽出する。

(3) 摺動境界面の接触・摩擦モデルの構築

摩擦低減領域においては潤滑状態の過渡現象が重要であり、研磨ダイヤモンドのゼロ摩擦を考える上でこれらの境界領域のダイナミクスは非常に重要である。そのため、実験結果を基にした理論的考察と計算機の援用により、研磨ダイヤモンドに固有の動的接触状態を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 摺動における摩擦低減効果の定量的評価

未研磨ダイヤモンド膜（図1左）と研磨ダイヤモンド膜（図1右）に対して荷重や雰囲気圧力などの摺動条件を変化させた際の浮上特性への影響に関しての評価を行った。その結果、荷重を変化させた場合のダイヤモンド膜の浮上の挙動は、発生する気体による揚力が変化しない状態で荷重が増加したため、荷重に拮抗するために必要な力および完全に接触しなくなるまで相対面を引き離すエネルギーが大きくなることから、摩擦状態が遷移する境界摺動速度が高速側に移動する影響がみられた。

しかし、同じデータをストライベック曲線に適用した結果、得られた曲線は荷重に依存することなく、差異は非常に小さなものであ

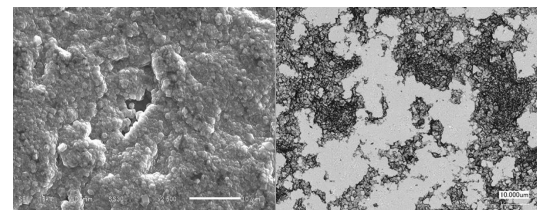


図1：ダイヤモンド膜の走査電子顕微鏡写真（左：未研磨、右： $Ra=0.3\mu\text{m}$  研磨仕上げ（試験片D））

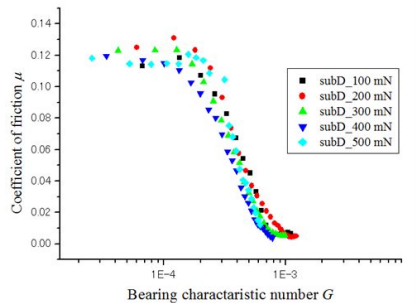


図 2：試験片 D に ( $Ra=0.3\ \mu\text{m}$  研磨仕上げ) におけるストライベック曲線 (ベアリング数  $G = (\text{粘度}) \times (\text{摺動速度}) \div (\text{荷重})$ )

ったため(図 2)、ダイヤモンド膜の摺動において荷重変化は浮上特性に影響を与えず、ストライベック曲線を用いることで摩擦特性を評価することが可能であることが示された。

また、雰囲気圧力を変化させた場合のダイヤモンド膜の浮上の挙動には、浮上のために必要な揚力を発生させる気体分子の数が少なくなることによる影響がみられた。しかし、浮上している状態で摺動速度を一定にして摺動雰囲気を減圧した場合には、低い摩擦係数を保ち続けた。これは、ダイヤモンド膜表面の凹部における作動気体の保持によって十分な浮上高さを維持できたものと思われる。しかし、減圧した初期状態から摺動速度を増加させる試験においては、浮上後の摩擦係数に対しても初期減圧が影響を与えることが示された。

## (2) 微小振動摺動によるダイヤモンド膜の金属板上での摩擦低減効果

相対する 2 面間の動摩擦挙動を評価する目的で、板バネにより支持されるボールに微小振動を与える機構により摩擦の緩和過程を計測した。

摩擦の過程を質量-ばね-減衰の 1 自由度減衰自由振動のモデルで記述し、摩擦力を速度依存項と非依存項に分離することにより、時間応答性を評価した。静止した初期状態から振動し、最終的な停止に至るプロセスを図 2 に示す。振幅の減衰成分が厳密には線形でない(クーロン-タイプ摩擦)であることが見て取れる。この減衰特性は研磨ダイヤモンド面の表面粗さとの間に相関があり、研磨ダイヤモンド面と金属の間の摩擦が速度依存成分を有していることが示された。従来の摩擦

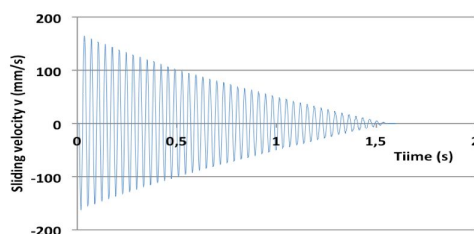


図 3：典型的な研磨ダイヤモンド膜の振動摩擦プロファイル

試験では摩擦係数が低い領域の摩擦挙動の分析が困難であったが、本研究により研磨ダイヤモンド面と金属の間の低摩擦摺動を定量的に示すことが出来た。

## (3) 摺動境界面の接触・摩擦モデルの構築

研磨ダイヤモンド膜表面の構造を模擬した 2 次元周期的表面構造に起因する揚力発生モデルを 3 次元領域に拡張し、モンテカルロ直接法を用いた数値計算により有効性を検証した。

実験で使用された研磨されたダイヤモンド膜の表面は、ランダムな結晶成長に由来した非常に複雑な構成を持っている。そのため、簡略化された周期的三角溝構造に代わって、研磨ダイヤモンド膜の表面形状を実測し奥行方向を考慮した表面形状モデルを新たに用いて、3 次元流れ場解析を行った。相対 2 面間のマイクロ・ナノ気体流は複雑化することが予想されていたが、結果として 3 次元モデルが 2 次元モデルを非常によく再現することを明らかにした。さらに、2 面間のクリアランスが小さくなるにしたがって溝部の圧力が増大し、高圧状態が平坦部で維持される、つまり大きな揚力が得られること、その反対にクリアランスが大きくなると揚力が急激に減衰して消滅することが分かった。(論文)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Yoshiaki Kawagoe, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Mechanism of Levitation of a Slider with a Micro/Nanoscale Surface Structure on a Rotating Disk, Tribology Letters, Vol.55, No.3, 2014, 437-454  
DOI: 10.1007/s11249-014-0368-2

Yoshiaki Kawagoe, Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Numerical analysis of micro-/nanoscale gas-film lubrication of sliding surface with complicated structure, AIP Conference Proceedings, 1628, 2014, 856-861  
DOI: 10.1063/1.4902683

Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Yoshiaki Kawagoe, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, A study of floating of a slider with micro/nanoscale surface structure on a rotating disk, AIP Conference Proceedings, 1628, 2014, 778-784  
DOI: 10.1063/1.4902672

〔学会発表〕(計 12 件)

Michel Belin、Hiroyuki Miki、  
Characterization of low-friction  
diamond coatings thanks to the  
relaxation tribometer technique、2015  
Annual ELYT Workshop、2015 年 2 月 20  
日、松島センチュリーホテル(宮城郡、  
宮城県)

三木 寛之、内籾 恭平、小助川 博之、  
高木 敏行、化学気相成長法によるダイ  
ヤモンド膜の表面微細形状と潤滑状態  
の関係性評価、第 28 回 ダイヤモンドシ  
ンポジウム、東京電機大学(東京都)、  
2014 年 11 月 20 日

Shigeru Yonemura、Vladimir Saveliev、  
Masashi Yamaguchi、Susumu Isono、  
Yoshiaki Kawagoe、Takanori Takeno、  
Hiroyuki Miki、Toshiyuki Takagi、A  
Study of Micro/Nanoscale Gas  
Lubrication Based on Molecular Gas  
Dynamics、Eleventh International  
Conference on Flow Dynamics、2014 年  
10 月 9 日、仙台国際センター(仙台市、  
宮城県)

Shigeru Yonemura、Susumu Isono、  
Masashi Yamaguchi、Yoshiaki Kawagoe、  
Takanori Takeno、Hiroyuki Miki、  
Toshiyuki Takagi、A Study of Floating  
of a Slider with Micro/Nanoscale  
Surface Structure on a Rotating Disk、  
29th International Symposium on  
Rarefied Gas Dynamics、2014 年 7 月 18  
日、Xi'an (中国)

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 3 月 14 日、東北  
大学(仙台市、宮城県)

小林 飛翔、三木 寛之、小助川 博之、  
高木 敏行、多結晶ダイヤモンド膜の局  
面形状への成膜と摩擦特性の評価、日本  
機械学会東北学生会 第 44 回卒業研究発  
表講演会、2014 年 3 月 11 日、山形大学  
(米沢市、山形県)

Hiroyuki Miki、Michel Belin、  
Characterization of low-friction  
diamond coatings thanks to the  
relaxation tribometer technique: the  
effect of diamond coating roughness、  
2014 Annual ELYT lab Workshop 2014、  
2014 年 2 月 20 日、Frejus (フランス)

Julien Fontaine、Hiroyuki Miki、  
Ryoichi Hombo、Thierry Le Mogne、  
Takanori Takeno、Kosuke Ito、Minoru  
Goto、Koshi Adachi、Toshiyuki Takagi、  
Carbon Coat: Tribologically-based  
design strategies for advanced carbon  
coatings、2014 Annual ELYT lab  
Workshop 2014、2014 年 2 月 21 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、10th  
International Conference on Flow  
Dynamics (ICFD 2013)、2013 年 11 月 26  
日、仙台国際センター(仙台市、宮城県)

Kyohei Naito、Hiroyuki Miki、Michel  
Belin、Toshiyuki Takagi、  
Mixed-Lubrication of Fine Textured  
Polycrystalline CVD Diamond Surface、  
10th International Conference on Flow  
Dynamics (ICFD 2013)、2013 年 11 月 25  
日、仙台国際センター(仙台市、宮城県)

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、10th  
International Conference on Flow  
Dynamics (ICFD 2013)、2013 年 11 月 25  
日、仙台国際センター(仙台市、宮城県)

Michel Belin、Hiroyuki Miki、Fida  
Majdoub、Detailed Characterization of  
Microcrystalline Diamond Coatings、  
Thanks to the Relaxation Tribometer  
Technique、5th World Tribology  
Congress (WTC 2013)、2013 年 09 月 12  
日、Trino (イタリア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 寛之 (MIKI, Hiroyuki)  
東北大学・学際科学フロンティア研究所・  
准教授  
研究者番号: 80325943

(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