

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560184

研究課題名(和文) 希薄気体力学効果を利用した新しい気体潤滑システムの開発

研究課題名(英文) Develop of a New Gas Lubrication System using a Rarefied Gas Effect

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：大気中において部分研磨ダイヤモンド膜を摺動面に用いた場合、摩擦係数が摺動速度の回転に伴い劇的に低減する。また、表面上に施した微細なテクスチャー構造により大気環境下においても摩擦性能が向上することも知られている。以上の現象では、微細な表面構造により両面間のマイクロ・ナノスケールの空気流れに揚力が発生したものと考えられる。しかしその理解は十分ではなく、従来の研究は試行錯誤的であった。そこで本研究では、数値シミュレーションだけでなく、基礎式に基づいた理論的な解析により、圧力発生メカニズムを解明した。その知見をもとに、潤滑システムとして最適な形状を明らかにした。また実験により理論の妥当性を確かめた。

研究成果の概要(英文)：It was reported that in the case where partially-polished diamond-coated surface is used for sliding, the friction coefficient is drastically reduced as sliding speed increases. It was also reported that the surface texturing results in good tribological performance of sliding surfaces. The reason of their good tribological performance may be because the lift force is induced by the surface structure in micro/nanoscale gas flow between sliding surfaces. However, the understanding of these phenomena is not enough, and, the past researches were performed by the trial-and-error method. In the present work, in order to understand these phenomena clearly, the mechanism of high gas pressure generation induced by the micro surface structure was theoretically clarified. Using the knowledge obtained here, we clarified the optimal shape of surface structure. Our theory was validated by the sliding experiment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：希薄気体力学 気体潤滑 トライボロジー ボルツマン方程式 分子流体力学

1. 研究開始当初の背景

部分研磨ダイヤモンド膜と回転金属円盤の間で超低摩擦が得られる興味深い現象が報告されている。このダイヤモンド膜は、熱フィラメント CVD により SiC 基板上に成膜し、共擦りにより研磨したものであり、表面に平坦部と溝部が共存している。研究代表者らは、この現象がダイヤモンド膜と対向面の間に挟まれた空気に高圧力が発生して両面が非接触となり、超低摩擦が実現したことを数値解析により示し、面間距離がマイクロからナノへと至ると現象が顕著になることを示している。

また、1996 年頃から、平坦な摺動面に微細なテクスチャー構造を作ることによって、トライボロジカルな性質が向上することが報告されており、ほとんどの研究は液体を潤滑剤として用いたものであり、その圧力発生は低圧部においてキャピテーションの発生によって圧力低下が抑えられるからだと説明されていた。一方で、気体を潤滑剤として用いた場合にもトライボロジカルな性質が向上することが実験および数値シミュレーションにおいて示されていた。これらの研究では、気体でも液体と同様に高圧力が発生する数値シミュレーション結果は示されていたが、その理論的な説明はなかった。液体と気体では圧縮性の有無やキャピテーションの発生の有無など全く性質が異なる。同じように高圧力が発生する結果が得られたとしてもメカニズムは全く異なるものと考えられる。

以上の二つの現象はともに希薄気体力学効果が現れるマイクロ・ナノスケールの気体潤滑現象である。表面の形状や物性などは大きく異なるものの、本質的には同じメカニズムによって発生しているように推測されるが、その理論的な究明は不十分であった。

2. 研究の目的

本研究では、希薄気体力学的な扱いが必要となるマイクロ・ナノスケールの凹凸を持つ気体潤滑現象について、そのメカニズムを理論的に解明し、また、そこで得られた知見から、最適な形状および条件を予測し、気体潤滑システムとして提案することを目的としている。

3. 研究の方法

上述したように、本研究で取り扱う気体潤滑現象は、マイクロ・ナノスケールで顕著となる。大気中の分子の平均自由行程は 60nm 程度であり、流れのスケールがこれの 10 倍程度まで小さくなると、気体は連続体として取り扱うことができず、希薄気体力学によって取り扱わなければならない。このような流れの支配方程式はナビエ-ストークス方程式ではなく、ボルツマン方程式である。そこで本研究ではボルツマン方程式の確率解法である Direct Simulation Monte Carlo

Method (DSMC 法)を用いて数値シミュレーションを行い、圧力発生を再現し、そのメカニズムを調べる。しかし、数値シミュレーションにおいては、現象を再現できても、理解できたことにはならない。このため、従来なされてきた研究では、数値シミュレーションにおいても、実験においても、その手法は試行錯誤的であった。そこで本研究では、流れが平行流であるなどの仮定を用いて、ボルツマン方程式に基づいた理論的な解析を行い、それにより現象を分析、考察することにより、そのメカニズムを理論的に解明し、理解を深める。また、摩擦実験を行うことによって、理論解析や数値シミュレーションから得られた知見の妥当性を確認する。

4. 研究成果

図 1 に部分研磨したダイヤモンド膜を原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) で計測した表面形状を示す。この図からも分かるように、表面は研磨された平坦な部分と、溝のような凹みにより構成されていることが分かる。熱フィラメント CVD により蒸着したダイヤモンド膜にはマイクロメートル程度のデコボコが出来るが、その出っ張りを研磨により削ぎ落とすため、このような構造となっている。

ダイヤモンド膜は高い潤滑性能を示すことが知られているが、蒸着したままの状態では摩擦係数は高く、溝部と平坦部が残るように研磨すると摩擦係数が急激に低下し、さらに研磨して平坦になると、摩擦係数はまた一転して高くなってしまふ。このことは、溝部と平坦部が混在することが摩擦性能向上のために重要であることを暗示している。

まず本現象を理解するため、数値シミュレーションにより、現象を再現した。この現象を再現するためには、3次元の DSMC シミュレーションが必要であるが、流体モデルと異なり、分子の運動を追跡する DSMC 法の計算負荷は非常に大きい。そこで、高効率な並列計算を出来る DSMC コードを開発し、それにより数値シミュレーションを行った。

図 2 に、実際に AFM で計測された表面形状を用いて計算した圧力分布の結果の一例を示す。図の下部に示したのは表面の形状を表しており、その表面に 4 か所の凹みがあることが分かる。この凹みのある表面の 0.028 μm 上側に完全な平板を平行に置き、それを x 軸方向に速度 $u = 10 \text{ m/s}$ で動かした場合の圧力発生を示している。図 3 に摺動速度 $u = 2.5, 10 \text{ m/s}$ の場合の凹み中央を通る断面における圧力分布を示している。摺動速度の増加とともに、正圧も負圧も大きくなるが、平均として得られる正の圧力は正であり、それが摺動速度の増加とともに大きくなり揚力が働いていることが確認出来る。

このように本研究の数値シミュレーションにおいては、表面に 3 次元的な微小構造を作って、圧力が発生することを確認し、その

形状を変化させることにより、発生させる圧力に強めたり弱めたりすることができた。しかし、そのプロセスは試行錯誤的な手法によっていた。試行錯誤的な手法を用いたのはこの現象の本質的な理解が得られていないためである。そこで、系は2次元と単純化するが、数値シミュレーションではなく、ボルツマン方程式に基づく基礎式によって、現象を解析的に分析し、現象を引き起こしているメカニズムおよび現象を支配している因子を説明することを試みた。

図4にDSMCシミュレーションと、ボルツマン方程式に基づく分子気体潤滑(Molecular Gas Lubrication, MGL)方程式による数値解析によって得られた2次元的な流路における圧力分布の例を示している。図の下部に凹みを持つ面と対向する平面の形状を示している。下部の平面が右に速度 U で動いている。圧力は空間的に変動し、周囲圧力である 1atm より下がる負圧と 1atm より高い正圧の部分が現れている。平均すると 1atm より高いため全体としては揚力が得られる。ここで重要なのは、摺動方向に向かって、溝部で圧力が負から正に大きく単調増加すること、平坦部において、左側の溝部の出口から右側の溝部の入口に向かって上に凸な曲線を描きながら単調に減少することである。この平坦部における上に凸な圧力分布の形のために正の平均圧力が得られているのである。本研究では、理論解析において、基礎式に基づいてこの分布の形を明らかにし、その分布の形を支配している因子を明らかにした。この成果は、トライボロジーの分野で最も権威ある雑誌の一つである Tribology Letters に投稿中である。また、この理論解析によって得られた、圧力変動の性質に対する知見をもとに、揚力発生のために最適な形状についても明らかにした。

上述の論文においては、摺動速度が大きい場合に、あるいは平坦部の面積が大きい場合に、より大きな揚力が得られることを理論的に示している。このことを確認するために、熱フィラメントCVDで蒸着し、部分研磨したダイヤモンド膜を用いて摩擦実験を行った。実験においては、粗さ計を用いて表面の十数力所測定し、代表長さに対する平坦部長さの割合を平均して、その面積率とした。摩擦実験では、研磨したダイヤモンド膜と平面を有するステンレスピンを用いて、数値シミュレーション、理論解析と同様に、摺動速度 u や面積率を変化させて摩擦係数を測定した。

大気環境中で行った摩擦実験において、摺動速度 u の増大とともに、ある閾値を境に摩擦が急激に減少することを確認した。これは理論で示されたメカニズムによって、摺動速度の増大とともに鉛直上向きの揚力が大きくなり、試験片全体の重量程度まで揚力が大きくなったときに摩擦が境界潤滑領域から気体潤滑領域に遷移し剪断力が急激に低減したためであると考えられ、理論を裏付けて

いる。次に平坦部面積率と摩擦特性について検討したところ、同じ摺動速度に対し、平坦部面積が大きいほど、大きい荷重に対して低摩擦を維持できることがわかった。上述したように、この現象も理論により予見されており、本研究の理論の妥当性が確認された。

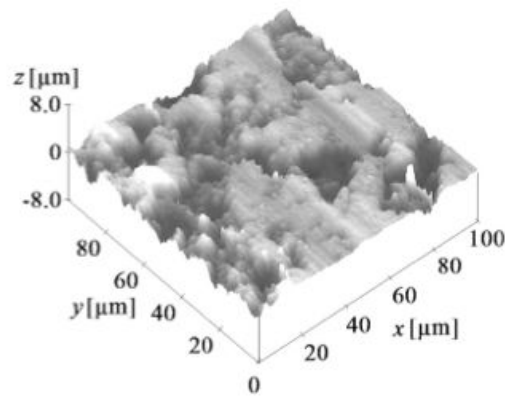


図1 部分研磨ダイヤモンド膜の表面形状

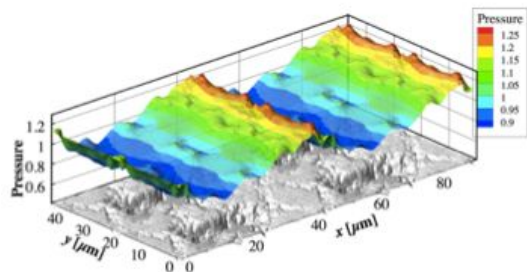


図2 圧力分布

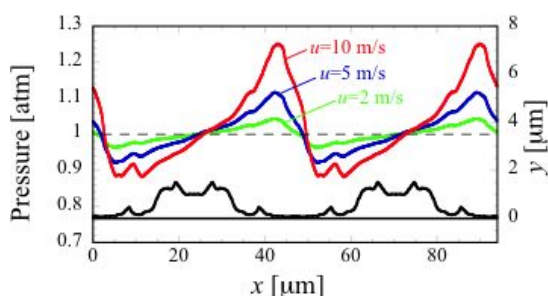


図3 溝中央を通る直線上の圧力分布

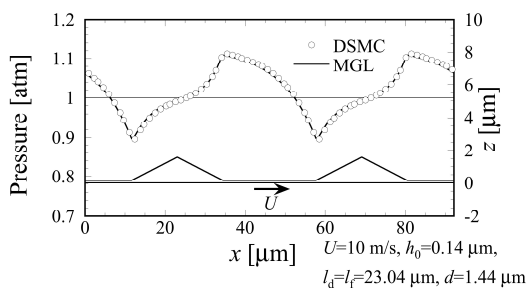


図4 DSMC と MGL による圧力分布

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)

V. L. Saveliev and S. Yonemura, New Forms of Two-Particle and One-Particle Kinetic Equations, AIP Conference Proceedings, Vol. 1501, (2012), pp.175-182, 査読有.
DOI: 10.1063/1.4769498

[学会発表](計 12 件)

川越吉晃, 米村 茂, 磯野 晋, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 複雑な微細構造を持つ摺動面のマイクロ・ナノ気体潤滑に関する研究, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 17 日, 名古屋大学(名古屋市).

Yoshiaki Kawazoe, Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi, Study on Micro-/Nanoscale Gas-Film Lubrication of Sliding Surface with Three-Dimensional Structure, Tenth International Conference on Flow Dynamics, Nov. 26, 2013, Sendai, Japan.

川越吉晃, 米村 茂, 磯野 晋, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 三次元的な摺動面のマイクロ・ナノ気体潤滑に関する研究, 日本流体力学会年会 2013, 2013 年 9 月 12 日, 東京農工大学(小金井市).

川越吉晃, 米村 茂, 磯野 晋, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 三次元表面形状を持つ摺動面のマイクロ・ナノ気体潤滑に関する研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 10 日, 岡山大学(岡山市).

米村 茂, マイクロ・ナノスケールで現れる気体潤滑(招待講演), 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 9 日, 岡山大学(岡山市).

米村 茂, 磯野 晋, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, マイクロ・ナノスケールで現れる気体潤滑機構(招待講演), 日本機械学会第 4 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2012 年 10 月 24 日, 北九州国際会議場・西日本総合展示場(北九州市).

米村 茂, 磯野 晋, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, マイクロ・ナノスケールで現れる気体潤滑のメカニズム, 日本流体力学会年会 2012, 2012 年 9 月 17 日,

高知大学(高知市).

磯野 晋, 米村 茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 分子気体潤滑の流れパラメータによる分析, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学(金沢市).

米村 茂, マイクロ・ナノスケールで現れる気体潤滑のメカニズム(招待講演), 研究集会「複雑流動現象のダイナミクス」, 2012 年 6 月 9 日, 大阪大学(吹田市).

Shigeru Yonemura, Gas Lubrication at Micro/Nanoscale, Workshop on Micro-Nano Flow Engineering, Dec. 13, 2011, Nagoya, Japan.

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, Nov. 10, 2011, Sendai, Japan.

磯野 晋, 米村 茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, マイクロ・ナノスケールの気体潤滑に関する研究, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学(東京都目黒区).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

竹野 貴法 (TAKENO Takanori)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 00451617

(3) 連携研究者

高木 敏行 (TAKAGI Toshiyuki)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号: 20197065

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