

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560146

研究課題名（和文） 分子気体力学的アプローチによるナノ気体潤滑のメカニズムの解明

研究課題名（英文） Investigation of the mechanism of nano-scale gas lubrication via molecular gas dynamics approach

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、2～3m/s 程度まで摺動速度を増加させることによってダイヤモンド膜と金属円盤の摩擦係数が急激に低減される現象に注目し、その潤滑機構を数値シミュレーションにより明らかにした。本現象は、微細構造を持つダイヤモンド膜表面と対向面の間を流れるマイクロ・ナノスケールの気体流れによって発生する高い圧力がダイヤモンド膜を浮上させる気体潤滑であり、マイクロ・ナノスケール流れ特有の新しい現象であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we paid attention to the low friction which appeared when the sliding speed of diamond coating on a rotating metal disk was increased to 2-3 m/s. We solved the lubrication mechanism of this low friction by way of numerical simulation and showed that the diamond coating was floated by high pressure induced by micro/nano-scale gas flow between the diamond coating with micro/nano-scale surface structure and the counter metal surface. We also showed that this was a new phenomenon peculiar to micro/nano-scale gas flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：トライボロジー、気体潤滑、分子気体力学、DSMC 法

1. 研究開始当初の背景

ごく最近になって、部分研磨したダイヤモンド膜と回転金属円盤間で潤滑剤を用いることなく動摩擦係数 0.01 以下という低摩擦が得られることが報告された。このダイヤモンド膜は CVD により SiC 基板上にバラストダイヤモンドを蒸着し作成されている。蒸着した状態では表面に微細な凹凸があるが、共擦りすることにより、適度に研磨したダイヤモンド膜を接着したスライダと回転金属円盤を摺動させた場合に相対速度の増加とともに動摩擦係数が急激に低減した。この低摩擦状態では両面が擦り合わされることにより発生する音が消えたことから、相対速度の増加に伴い、両面間の気体膜によってスライダが浮上し、ナノスケールの気体潤滑が起こっているものと考えられるが、その揚力発生メカニズムは解明されていなかった。

2. 研究の目的

本研究ではダイヤモンド薄膜を用いたナノスケールの気体潤滑現象を数値シミュレーションにより再現し、種々の因子の影響を調べることにより、圧力発生メカニズムを解明して、ダイヤモンド薄膜の摺動面への実用化に資することを目的としている。

3. 研究の方法

本現象が確認された実験において、摺動させたダイヤモンド膜も金属円盤も表面に微細な粗さがあるものの、マクロに見ると平面である。両面間の距離が分子の平均自由行程よりも十分大きい場合には反対方向に運動する平行平板間の流れであり、圧力発生は起こらない。このことから考えると、気体潤滑が起こるためには、少なくとも両面間の距離は分子の平均自由行程程度に小さい必要がある。流れの代表長さが平均自由行程程度となると、気体は連続体として取り扱うことができず、分子気体力学（希薄気体力学）によって取り扱わなければならない。ナノスケールの気体潤滑には、一般的に用いられるレイノルズ方程式を用いることはできず、分子の粒子性を取り込むために、ボルツマン方程式に基づいて導出された分子気体潤滑方程式を用いる必要がある。しかし、この方程式も対向する両面が局所的に平行であるという平板間流れを仮定しており、本研究で取り扱うような凹凸のある面間流れには適用できない。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、圧力発生メカニズムを解明する。

4. 研究成果

低摩擦を示すダイヤモンド膜の表面を AFM により観察したイメージを図 1 に示す。表面には研磨された平坦部と溝部が共存している。この形状を模擬し、図 2 に示す 2 次元流路において数値シミュレーションを行った。左右の境界は周期境界であり、スライダと対向面に囲まれた領域が左右に周期的に広がっている。スライダの三角形の凹みはダイヤモンド膜の溝部を表している。対向面は右方向に速さ u で運動している。スライダと対向面の距離は一定値 h に固定して流れの数値シミュレーションを行い、圧力発生メカニズムを調べた。

図 3 に典型的な圧力分布を示す。流路には初期状態において 1 気圧の空気が存在し、対向面の運動とともに流れが生じ、空間的に圧力が変動するが、対向面の速さ u は数 m/s 程度であるので、ガス圧の空間平均としては 1 気圧のままである。図 2 の上部にスライダの底面が示されているが、スライダの本体はその鉛直上側にあり、さらにその上面は大気にさらされている。このため、両面間の圧力が 1 気圧より大きい場合にはスライダを押し上げ、1 気圧より小さい場合にはスライダを引き下げる力が働く。図 3 の下部には流路の形状を示している。対向面が右に動くため、流れも左から右に誘起される。

図 3 において、まず水色の楕円で囲んだ溝部の圧力変動に注目する。溝部の左端から空気が流入し、右端から流出する。このとき、一部の空気は流出せず、旋回して溝部で渦をまく。溝部の左側では平坦部から空気が流入するが、対向面の運動により気体分子が右に運び去られるため分子数密度が低下し、圧力が 1 気圧より低くなる。溝部の右側では対向面の運動により輸送された気体分子が集まり分子数密度が高まり、圧力が 1 気圧より高くなる。この低気圧と高気圧によりスライダに下向きの力と上向きの力が働くが、その力の大きさがほぼ等しく相殺している。

次に緑色の楕円で囲んだ平坦部の圧力変動に注目する。平坦部はその左側の溝部の流出口（高気圧）と右側の溝部の流入口（低気圧）を接続する役割を担っている。平坦部の圧力分布は上に凸な曲線を描いて、流れに沿って左から右に、初め緩やかに後に急激に低下する。この曲線的な低下により、1 気圧より高い圧力を示す領域が大きくなり、高気圧部による上向きの力の方が低気圧部による下向きの力より優勢となり、スライダの底面には平均として 2097Pa の揚力が発生している。

図 4 に面間距離 h の圧力変動への影響を示す。面間距離 h を小さくすると溝部における

圧力変動は大きくなり、平坦部においても、より長い距離にわたって高い圧力が維持される。このことにより、面間距離 h が小さいほど大きな揚力が得られる。また、一方で面間距離 h を大きくすると、溝部における圧力変動は小さくなり、平坦部における圧力分布も直線に近くなる。ここでは結果を示さないが、さらに面間距離 h を大きくすると、揚力は消滅する。このことから、本現象はマイクロ・ナノスケール流れ特有の潤滑現象であると言える。本研究の成果は、アメリカで開催された第 27 回国際希薄気体力学会やロシアで開催された 15th International Conference on Methods of Aerophysical Research (招待講演) などで発表され、大きな反響を得ている。

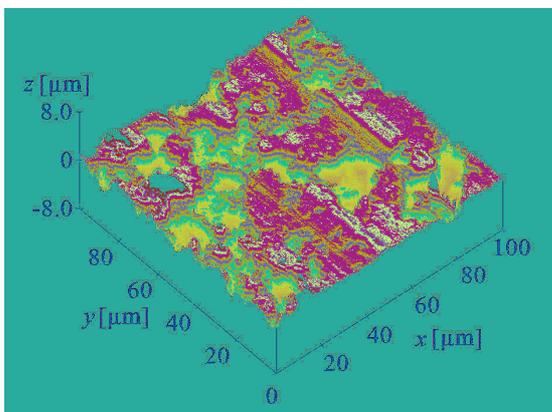


図 1 ダイヤモンド膜表面

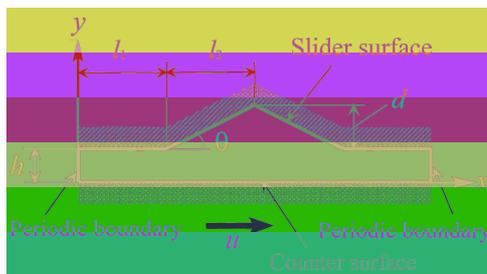


図 2 計算領域

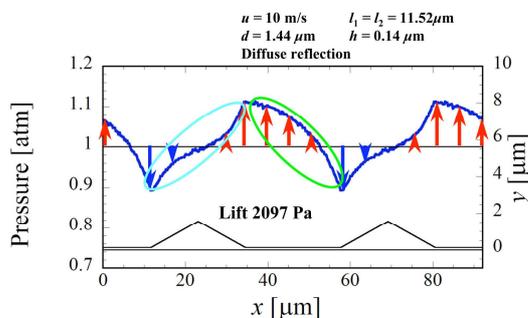


図 3 圧力分布

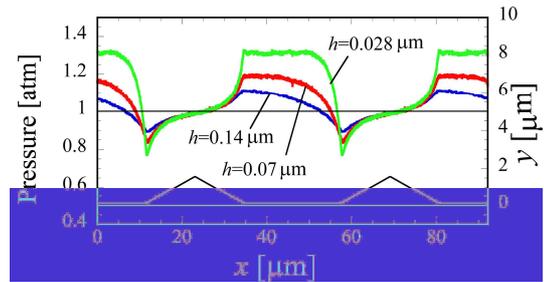


図 4 面間距離の圧力分布への影響

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 7 件)

1. Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Shigeru Yonemura, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi, "Effect of Configuration of Micro-/Nanoscale Structure on Sliding Surface on Molecular Gas-Film Lubrication", AIP Conference Proceedings, (2011), in press. 査読有
2. Ko Tomarikawa, Shigeru Yonemura, Takashi Tokumasu and Tetsuya Koido, "Numerical Analysis of Gas Flow in Porous Media with Surface Reaction", AIP Conference Proceedings, (2011), in press. 査読有
3. V. L. Saveliev, S. A. Filko, K. Tomarikawa and S. Yonemura, "Kinetic Force Method with Quasiparticle Pairs for Numerical Modeling 3D Rarefied Gas Flows", AIP Conference Proceedings, (2011), in press. 査読有
4. Tetsuya Koido, Daigo Ito, Takashi Tokumasu, Ko Tomarikawa, and Shigeru Yonemura, "Molecular Dynamics Study of the Dissociation of H₂/D₂ on Pt(111) Including Thermal Motion Compared with Molecular Beam Experiments", ECS Transactions, Vol. 25, (2010), pp. 59-68. 査読有
5. Takashi Tokumasu and Daigo Ito, "A Molecular Dynamics Study for the Dissociation Phenomena of Gas Molecule on Metal Surface", e-Journal of Surface Science and

Nanotechnology, Vol. 8, (2010), pp. 211-216. 査読有

6. S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki, and T. Takagi, "Effect of Micro Gas Flow on Low Friction Properties of Diamond Coating with Partly Polished Surface", AIP Conference Proceedings, RAREFIED GAS DYNAMICS, Vol. 1084, (2008), pp. 1153-1157. 査読有
7. Takashi Tokumasu, Kanako Hara, and Daigo Ito, "Molecular Dynamics Study for Dissociation Phenomena of a Gas Molecule on a Metal Surface", Heat Transfer-Asian Research, Vol. 37, (2008), pp. 485-497. 査読有

[学会発表] (計 26 件)

1. S. Yonemura, S. Isono, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi, "A Gas Lubrication Expressed at Micro- and Nanoscales", 15th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, November 2, 2010, Novosibirsk, Russia.
2. Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Shigeru Yonemura, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi, "Effect of Configuration of Fine Structure on Sliding Surface on Micro-/Nanoscale Gas-Film Lubrication", Seventh International Conference on Flow Dynamics, November 2, 2010, Sendai, Japan.
3. V. L. Saveliev, S. A. Filko, K. Tomarikawa and S. Yonemura, "Kinetic Force Method with Quasiparticle Pairs for Numerical Modeling Micro Gas Flow in a Vacuum Pump", Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, November 2, 2010, Sendai, Japan.
4. 磯野晋, 山口雅志, 米村茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 「マイクロ・ナノスケール気体潤滑における摺動表面微細構造の形状の影響」, 日本機械学会第 88 期流体工学部門講演会, 2010 年 10 月 31 日, 山形大学 (米沢市) .

5. 泊川晃, 米村茂, 徳増崇, 小井戸哲也, 「表面反応を伴った多孔質体内を流れる気体の熱流動解析」, 日本流体力学会年会 2010, 2010 年 9 月 9 日, 北海道大学 (札幌市) .
6. 磯野晋, 山口雅志, 米村茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 「分子気体潤滑における摺動表面の微細構造の形状の影響」, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋工業大学 (名古屋市) .
7. 泊川晃, 米村茂, 徳増崇, 小井戸哲也, 「多孔質体内を流れる気体の熱流動解析」, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋工業大学 (名古屋市) .
8. V. L. Saveliev, S. A. Filko, K. Tomarikawa and S. Yonemura, "Kinetic Force Method with Quasiparticle Pairs for Numerical Modeling 3D Rarefied Gas Flows", 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 14, 2010, Pacific Grove, California, USA.
9. Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Shigeru Yonemura, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi, "Effect of Configuration of Micro-/Nanoscale Structure on Sliding Surface on Molecular Gas-Film Lubrication", 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 12, 2010, Pacific Grove, California, USA.
10. Ko Tomarikawa, Shigeru Yonemura, Takashi Tokumasu and Tetsuya Koido, "Numerical Analysis of Gas Flow in Porous Media with Surface Reaction", 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 11, 2010, Pacific Grove, California, USA.
11. 米村茂, 「マイクロ・ナノスケールで現れる気体潤滑機構」, 研究集会「複雑流動現象のダイナミクス」, 2010 年 6 月 12 日, 大阪大学 (大阪府吹田市) .
12. Takashi Tokumasu and Daigo Ito, "The Dependence of Motion of Atoms on Dissociation Probability of Gas Molecule", 2nd ASME Micro-Nanoscale

- Heat & Mass Transfer International Conference (MNHMT09), December 20, 2009, Shanghai, China.
13. 磯野晋, 山口雅志, 米村茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 「マイクロ・ナノスケールで発現する気体潤滑」, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月 18 日, 仙台.
 14. S. Isono, S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi, “A Gas Lubrication Expressed at the Micro- and Nanoscales”, 10th Workshop on Fine Particle Plasmas, November 27, 2009, Toki, Japan.
 15. Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi, “A Molecular Gas-Film Lubrication Expressed in Micro Gas Flow”, Sixth International Conference on Flow Dynamics, November 5, 2009, Sendai, Japan.
 16. Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi, “Mechanism of a Molecular Gas-Film Lubrication of Micro-Structured Surface”, The Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, November 5, 2009, Sendai, Japan.
 17. Tetsuya Koido, Daigo Ito, Takashi Tokumasu, Ko Tomarikawa and Shigeru Yonemura, “Molecular Dynamics Study of the Dissociation of H₂/D₂ on Pt(111) Including Thermal Motion Compared with Molecular Beam Experiments”, 216th ECS Meeting, October 6, 2009, Vienna, Austria.
 18. 磯野晋, 山口雅志, 米村茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 「マイクロ・ナノスケール微細構造を持つ摺動面における分子気体潤滑に関する研究」, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009 年 9 月 14 日, 盛岡.
 19. 徳増崇, 伊藤大吾, 「白金表面上の水素分子解離現象に関する分子論的解析」, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009 年 9 月 14 日, 盛岡
 20. S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi, “A Molecular Gas-Film Lubrication of Sliding Surface with Micro/Nano Structure”, Eighth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, December 20, 2008, Sendai, Japan.
 21. Daigo Ito and Takashi Tokumasu, “Molecular Dynamics study on dissociation probability of H₂ on Pt(111) surface”, Eighth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, December 20, 2008, Sendai, Japan.
 22. S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi, “Effect of Micro Gas Flow on Tribological Properties of Diamond Coated Surface”, 19th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides (Diamond 2008), September 9, 2008, Sitges, Spain.
 23. 山口雅志, 米村茂, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行, 「微細表面構造を持つ摺動面の摩擦特性におけるマイクロ気体流動の影響」, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008 年 8 月 4 日, 横浜.
 24. 伊藤大吾, 徳増崇, 「白金表面における水素分子の解離確率に関する分子動力学的研究」, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008 年 8 月 4 日, 横浜.
 25. S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi, “Effect of Micro Gas Flow on Low Friction Properties of Diamond Coating with Partly Polished Surface”, International Workshop on Molecular Gas Dynamics, July 29, 2008, Sendai, Japan.
 26. S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi, “Effect of Micro Gas Flow on Low Friction Properties of Diamond Coating with Partly Polished Surface”, The 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 22, 2008, Kyoto, Japan.

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

徳増 崇 (TOKUMASU TAKASHI)
東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：10312662

(3) 連携研究者

()

研究者番号：