

平成21年 5月25日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560132
 研究課題名（和文） ナノクラスタダイヤモンドー金属間のドライ低摩擦摺動機構の解明
 研究課題名（英文） Research of the low friction and low wear phenomenon between nano cluster diamond and metal
 研究代表者
 三木 寛之（MIKI HIROYUKI）
 東北大学・流体科学研究所・助教
 研究者番号：80325943

研究成果の概要：

研磨しやすい気相合成ダイヤモンド薄膜を成膜し、この膜を適度に研磨することにより得られる金属との間の低摩擦・低摩耗摺動について定量的に評価した。ダイヤモンド膜は研磨により、相手材金属と接触する平坦部と接触に寄与しない非周期的な溝構造が形成され、潤滑油がなくても相手材金属を摩耗しない摺動を実現することが明らかになった。また、研磨により得られた構造では摩擦係数がほとんど零になる摺動条件があることを計算機シミュレーションにより導き出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：トライボロジー、ダイヤモンド、直接シミュレーション・モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

物体を滑らせるため必要な力が摩擦力であり、摩擦力によって滑らせる物体の表面が擦り減ることが磨耗である。摩擦はエネルギーの浪費と固体接触している材料の磨耗につながるため、摩擦や磨耗は製品やシステムの性能、寿命、信頼性を大きく左右する。従って、低摩擦技術は省エネルギー、省資源および安全性を高めるなど、私たちの生活を豊かにする技術であるといえる。

この摩擦問題をクリアする技術の一つとして、ダイヤモンドをコーティングした面同

士の滑りがある。この機構では、ダイヤモンドの持つ高い硬度のため、無潤滑油条件下においても低摩擦、耐摩耗性の特性を持っていることが判明している。

しかし、天然のダイヤモンドは稀有な材料のため価格も高く、高い硬度のため加工が難しいため、近年ではメタンガスなどから作る安価な人工ダイヤモンドを基材にコーティングする技術が工業的に広く用いられている。ところが、ダイヤモンドをコーティングすると、膜は極めて硬い凸凹した表面形状になることから摺動部に用いるには長時間研

磨して使用する必要があり、天然ダイヤと同様に製造コストに見合わない。

そこで、研究代表者等は半鏡面状に膜表面を研磨可能な、適度に軟らかい微結晶人工ダイヤモンド膜を成膜する条件を確立し、研磨後の摩擦係数が0.1程度の低摩擦を実現するダイヤモンド膜を開発した。

大気中におけるダイヤモンドにおける低摩擦現象は、ダイヤモンドの超硬度表面に吸着した小さいせん断強度を持つ化学物質（酸素、水素、炭化水素など）が潤滑膜としての機能を果たすため、耐摩耗・低摩擦摺動が実現することが知られているが、半鏡面状に研磨したダイヤモンド膜では摺動速度条件により境界潤滑から流体潤滑へ連続的に推移するなど、特徴的であることから結晶性ダイヤモンドとは異なる潤滑機構解明の必要があった。

2. 研究の目的

従来は現象論的なアプローチにより低摩擦摺動機構について研究を行ってきたが、本研究により現象の定量評価と数値計算を融合的に用いることによって、特異な低摩擦現象の発現機構の解明を進め、本技術の工業的な適用範囲を広めることによって、新しい「滑り」軸受け技術を世界に先駆けて発信することを目指した。

気相合成法により作製したナノクラスターダイヤモンド膜の算術表面粗さを約 $2\mu\text{m}$ に研磨し、(1) 動作音が非常に静かであり、潤滑油を必要としない摺動機構及び(2) ガス雰囲気や真空環境において潤滑油を必要としない低摩擦摺動機構（摩擦係数0.1以下）を定量的に評価し、そのメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 膜表面形状と摩擦係数の関係の定式化

ミクロスケール評価とマクロスケール評価の双方を照らしあわせ、膜表面の微細構造、表面の算術平均粗さの特性量を組織パラメータとして摩擦係数との相関関係について検討する。巨視的な摩擦係数を膜の平面率あるいは表面粗さの微視的パラメータの関数として表し、最終的に摺動時の摩擦係数が0.1以下で動作する形状因子を定量的に明らかにする。

(2) 気体分子と固体壁面の形状を取り込んだシミュレーションモデル構築

ナノレベルにおける低摩擦ダイヤモンド膜の現象論的な機構解明を目的として、ダイヤモンド膜と金属間のミクロな時空間スケールにおける流れをモンテカルロ直接法（Direct Simulation Monte Carlo Method, DSMC 法）によって解析する。

4. 研究成果

(1) 研磨ダイヤモンド膜と汎用構造金属材料の間の低摩擦摺動現象の動作環境依存性評価

接触面を半鏡面状に研磨したナノクラスターダイヤモンド膜と汎用構造金属材料の間の低摩擦摺動現象の動作環境依存性を評価した。研磨した膜の表面には不規則的な3次元形状を有し、光学顕微鏡によるミクロスケール組織観察及び表面粗さ計によるマクロスケールの評価によって膜表面のうねりや凸凹形状の定式化などの微視的形状の特徴評価を行い、摩擦磨耗現象に直接的に影響を与える形状パラメータを抽出した。図1に研磨による表面形状の変化を示す。研磨後のダイヤモンドでは平坦な島状の領域が出現していることが分かる。

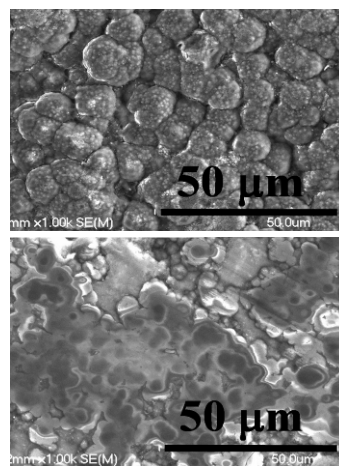


図1 未研磨（上： $Ra=0.74\mu\text{m}$ ）及び研磨後（下： $Ra=0.20\mu\text{m}$ ）のダイヤモンド膜表面の走査電子顕微鏡像

(2) 研磨ダイヤモンドによる摺動及び摺動性能の湿度依存性評価

ガス種及び湿度の異なる環境下で表面粗さの異なる研磨ダイヤモンド膜と材質の異なる金属の間のピンオンディスク摩擦磨耗試験を行い、摺動性能の環境依存性を評価した。

その結果、比較的研磨度の高い（表面粗さの小さい）膜面では湿度を低く設定することで、長時間安定した低摩擦磨耗状態が得られることが示されたが、研磨度の低い（表面粗さの大きい）膜面においても相対湿度40～60%程度の環境下において、安定した摩擦磨耗状態が実現することが明らかになった。この2つの安定低摩擦状態は接触面の解析により、双方のトライボフィルムの形態が異なることが示され、研磨ダイヤモンド膜の低摩擦低磨耗状態のメカニズムが明らかになった。

図2に表面粗さ $0.2\mu\text{m}$ の研磨ダイヤモンド基板と汎用鋼材間の摩擦係数の雰囲気ガス及び相手材金属依存性を示す。

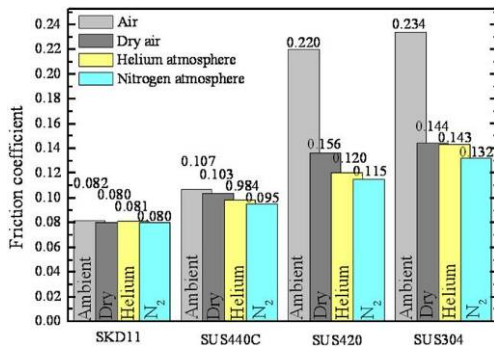


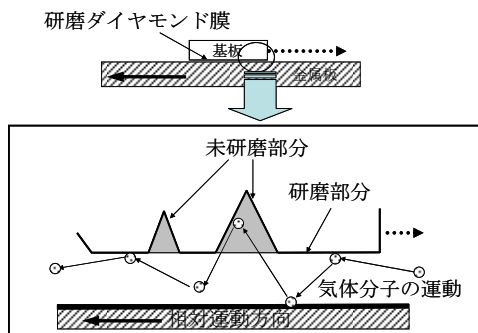
図2 摩擦係数の雰囲気ガス及び相手材金属種依存性評価

(Ref: H. Miki, N. Yoshida, K. Bando, T. Abe, T. Takeno, T. Takagi, Diam. Relat. Mater. 17(2008) 868-872)

(3) 低摩擦現象の現象論的数値解析モデルの構築

(1) によって明らかにされた物理的モデルに基づき、気体分子と固体壁面の形状と材質を取り込んだコンピュータシミュレーションを行った。ここでは、ナノレベルにおける低摩擦ダイヤモンド膜のミクロな時空間スケールにおけるエネルギーの伝搬現象とマクロな気体分子との相互作用によって決定されるメカニズムに基づく DSMC 法(Direct Simulation Monte-Carlo Method)による数値シミュレーションにより解析を行った。

図3に計算に用いた研磨ダイヤモンド膜と金属の形状モデルを示す。



DSMC 法による解析の結果、研磨ダイヤモンド面と平板間の摺動においては、相対する2面間の間に希薄な気体が流れ込むことにより境界潤滑から流体潤滑状態へ接触の状態が遷移することによって、摩擦係数が更に低く、ほとんどゼロになることが示された。

実験的には2面間の相対速度が 1m/s 程度でこの効果が現れることが予想されたが、解析によってもその有効性が検証された。

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2件)

① H. Miki, N. Yoshida, K. Bando, T. Takeno, T. Abe, T. Takagi
Atmosphere Dependence of the Frictional Wearing Properties of Partly-Polished Polycrystalline Diamonds
Diamond and Related Materials, 査読有, 17, 2008, 868-872.

② S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki, T. Takagi
Effect of Micro Gas Flow on Low Friction Properties of Diamond Coating with Partly Polished Surface
AIP Conference Proceedings, RAREFIED GAS DYNAMICS, 査読有, 26, 2008, 1153-1157.

[学会発表] (計14件)

① 阪東広太郎, 三木寛之, 竹野貴法, 阿部利彦, 高木敏行
部分的に研磨したCVDダイヤモンド薄膜と金属間の摩擦特性の湿度依存性
第22回ダイヤモンドシンポジウム, 2008.10.23, 東京.

② S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki, T. Takagi
Effect of micro gas flow on tribological properties of diamond coated surface
Diamond2008
2008.9.9, Sitges(スペイン).

③ H. Miki, N. Yoshida, T. Takeno, T. Abe, T. Takagi, T. Sato
Tribological behaviour of partly abrasive finished CVD diamond coatings against steel: the effect of load, environmental pressure
ThinFilms2008, 2008.7.15, Singapore (シンガポール)

④ S. Yonemura, M. Yamaguchi, T. Takeno, H. Miki, T. Takagi
Effect of Micro Gas Flow on Low

Friction Properties of Diamond Coating with Partly Polished Surface
26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 2008. 6. 22, 京都

研究者番号 : 00451617

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

- ⑤ 阪東 広太郎, 三木 寛之, 竹野 貴法, 阿部 利彦, 高木 敏行, 佐藤武志
部分的に研磨した気相合成ダイヤモンド薄膜と金属間の摩擦特性に表面微細構造が及ぼす影響の評価
第21回ダイヤモンドシンポジウム, 2007. 11. 21, 新潟.
- ⑥ 米村茂, 山口雅志, 竹野貴法, 三木寛之, 高木敏行
ダイヤモンドコーティングにおける摺動特性の希薄気体力学的考察
日本機械学会流体工学部門講演会講演, 2007. 11. 17, 広島.
- ⑦ H. Miki, N. Yoshida, T. Takeno, T. Abe, T. Takagi, T. Sato
Friction and wear characteristics of partly polished CVD diamond film
Diamond2007, 2007. 9. 10, Berlin, Germany.

[図書] (計 1 件)

- ① T. Takagi, H. Miki
Tohoku University Press
Nano-Mega Scale Flow Dynamics in Highly Coupled Systems
2007, 21-56.

[その他]

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/asel/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

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