

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560160

研究課題名（和文） 超低摩擦発現条件の解明

研究課題名（英文） Clarification of conditions for ultra-low friction

研究代表者

安藤泰久（ANDO YASUHISA）

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00344169

研究成果の概要（和文）：異種金属同士を摩擦させたときに、それぞれの原子間距離の差が大きいほど摩擦係数が低くなるという仮説を立て、高真空中、微小荷重下の摩擦実験により、検証を行った。Si 基板に対して Ag, Al, Au, Cu, Ni, Pb, Pd, Ta の金属ピンを、Pt または Au をスパッタ蒸着した基板に対して、Ag, Cu, Ni ピンを摩擦させたところ、上述の仮説を裏付ける結果が得られた。また、原子間相互作用が摩擦に影響を与えていることを摩擦異方性により確認した。

研究成果の概要（英文）：The friction coefficients of different metal pairs are determined by the difference in the interatomic distance between each metal material under low load conditions. Here, eight types of metal pins were rubbed against Si (111) substrates that were covered with a native oxide film. Results showed that the friction coefficient increased when the interatomic distance of the metal approached the interatomic distance of SiO₂. A similar relationship was found between pairs of Ag/Cu/Ni and Au/Pt/Si (100). The combination of Au (111) and Si (111) exhibited clear friction anisotropy, which confirmed the above-mentioned relationship that was determined by interaction between the crystal structures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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

1. 研究開始当初の背景

二硫化モリブデン (MoS₂) やダイヤモンドライクカーボン (DLC) の膜が、摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦を示すことが報告され

ている。これらの物質が超低摩擦を示す理由として、(DLC の場合は一部がグラファイト化しているため) 層構造を有していることが指摘されている。層構造の物質が超低摩擦を

示す理由については、結晶方位によって格子間隔の比が無理数（インコメンシュレート）になると摩擦力が全く作用しない「超潤滑」の状態が存在するという仮説によって説明されている。しかし、層構造を有しない窒化炭素（CN_x）膜や、セラミックスとプラチナ（Pt）の組合せでも、0.01以下の超低摩擦が得られている。しかし、固体間の摩擦係数を何が支配しているのかについて、明確な理論は提案されていなかった。

2. 研究の目的

MoS₂やDLCなどの限られた物質だけでなく、多様な金属や酸化物などの材料の組合せの中から、摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦を示す材料の組合せを探索する指針を提案し、超低摩擦を実現する摩擦条件を明らかにすることを目的とする。試行錯誤によって低摩擦材料を見つけようとすると、（酸化安定性の悪いアルカリ金属や希土類を除いた）金属だけでも 30 種類以上あり、酸化物やセラミックスまで含めると、さらにその何倍にもなる。これらの材料の組合せを全て調べるためには膨大な量の実験を行う必要がある。したがって、超低摩擦材料の探索を効率的に行うためには、異種材料の摩擦係数を支配する特徴的な因子をまず明らかにした上で、候補となる材料の組合せを選択し、それに対して超低摩擦が発現する条件を検討する必要がある。

本研究においては、「格子定数の離れた材料の組合せでは、摩擦係数が低くなる」という仮説に基づき、まず理想的な条件下での実験を進めることでその検証を行う。本研究において、超低摩擦材料の探索指針が得られ、その実現方法が明らかにされた場合、2つの大きな意義を持つ。学術的な面では、新しい超低摩擦材料を探索・開発しようとする研究が活性化される。社会的な面では、CO₂排出削減が焦眉の急となっている現在において、低摩擦化によるエネルギー消費削減への取り組みにも、有効な道筋を示すことになる。

3. 研究の方法

ピンオンプレート式の超微小荷重用高真空マイクロトライボロジーテスター（図1、図2）を用いて、異種金属の組合せを中心に、微小垂直荷重で摩擦を行い、摩擦力を測定する。また、引離し力（凝着力）を測定することで、摩擦面に作用する実効的な垂直荷重を評価し、それを用いて微小な摩擦係数を正確に求める。次に、摩擦係数と、組み合わせた金属の格子定数を比較し、超低摩擦を得るための条件を明らかにする。また、試験片としては、単結晶のほか、多結晶金属や金属等を蒸着したプレートも用いる。実験によって得られた摩擦係数について、試験片ごとにまとめ、結格子定数と摩擦係数の関係を検討し、

「摩擦係数の支配的因子は格子定数である」という仮説の妥当性について検証する。

また、測定を行った実験条件で、原子間の相互作用（原子の幾何学的な相対位置）が摩擦力に影響を与えていることを確かめるために、単結晶同士を摩擦させ、そのときに相対的な結晶方位を変化させてその影響について明らかにする。

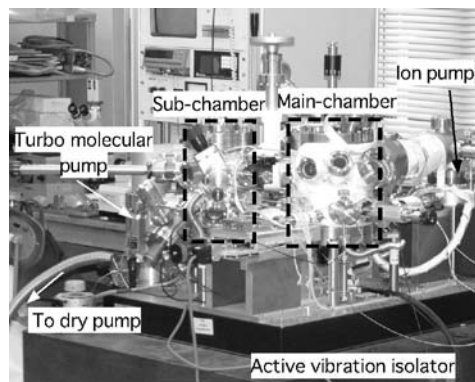


図1 高真空マクロトライボロジーテスター

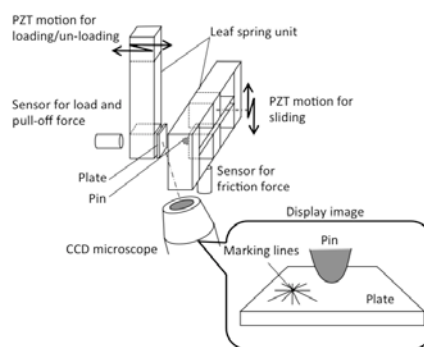


図2 摩擦測定主要部概要

4. 研究成果

(1) 自然酸化膜に覆われた単結晶シリコンに対して複数種類の多結晶金属を摩擦させ、原子間隔と摩擦係数の関係を検討した。金属の原子間隔を横軸にとり、摩擦係数をプロットすると、原子間隔が 3.1Å に近づくにつれて、摩擦係数が増加していく傾向が認められた（図3）。シリコン自然酸化膜中でのシリコンの原子間距離が 3.1Å（文献値）付近にあることから、金属の原子間隔がシリコンの原子間隔に近いほど、摩擦係数が高くなることが明らかになった。この結果は、本研究の計画時に立てた「異種金属間の摩擦係数は、それぞれの金属の格子定数の差に支配されている」という仮説を裏付ける結果である。

さらに、Pt または Au をスパッタ蒸着した基板に対して、Ag, Cu, Ni ピンを摩擦したときに測定された摩擦係数も含めて、格子定数の差と摩擦係数の関係について検討

を行った。その結果を図4に示す。横軸はそれぞれの材料の原子間隔の差で、SiについてはSiO₂におけるSi-Siの原子間隔を採用してプロットを行っている。図3より明らかのように、原子間隔の差が大きいほど摩擦係数が低くなることが明らかになった。

(2) 本研究で採用している摩擦条件において、格子間の相互作用が摩擦係数に影響を与えていることを確認するために、単結晶シリコン基板に対して、単結晶の金属ピンを摩擦させた。そのさい、シリコン基板を回転させることで、相対的な結晶方位を変化させることを試みた。その結果、シリコンの(111)面に対して、金の(111)面を摩擦させると、図5に示すように、約60度周期で摩擦係数が5倍程増減し、格子間の相互作用が摩擦に影響を与えていることを確認した。これは、金属を含む異種材料の摩擦で、格子間相互作用によって摩擦力の異方性が発現することを確認した最初の実験である。また、この結果から、(2)で述べた「摩擦係数の原子間隔」仮説の妥当性の検証が、より確実なものになったことになる。

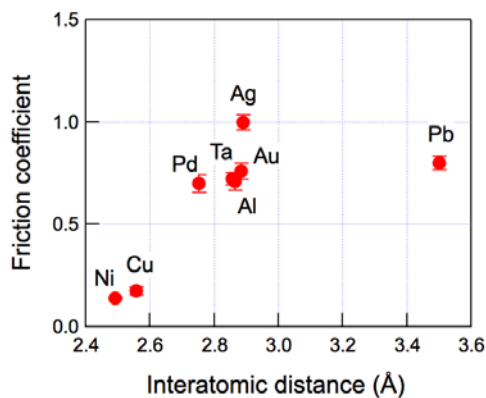


図3 酸化膜付きシリコン基板上で測定された摩擦係数と原子間距離の関係

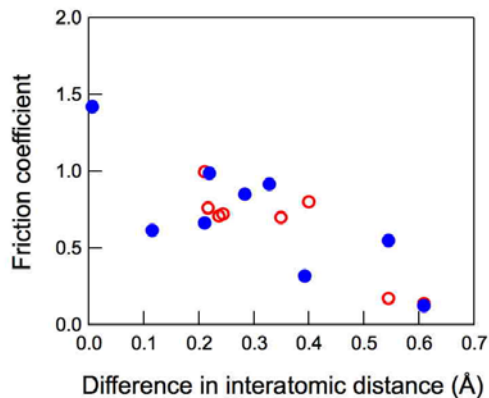


図4 17通りの材料の組合せにより得られた摩擦係数と原子間距離の関係

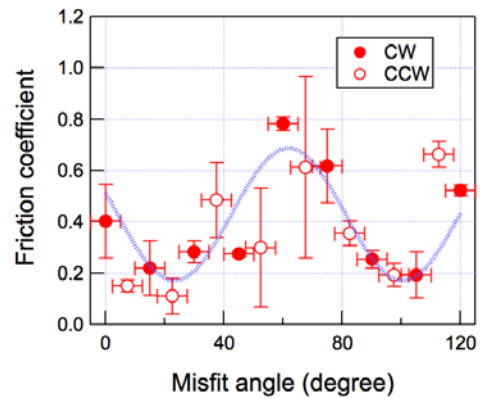


図5 単結晶の金とシリコン基板間で測定された摩擦係数を結晶の相対角度の関係

(3) 本研究の結果から、低摩擦を示す材料の組合せを探索するときには、原子間隔の差が大きい材料を組み合わせれば良いという新しい知見が得られた。この知見から、これまで報告されているMoS₂やDLCがなぜ低摩擦をしめすのか、新しい視点から解釈を与えられる可能性もある。また、DLCなどの低摩擦材料を利用したときに、材料の原子間隔を調整することで、より一層の低摩擦が得られる可能性も示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Y. Ando, Y. Tamura, H. Takahashi, K. Hiratsuka, Experimental studies on revealing a dominant factor in friction coefficient between different metals under low load conditions, Tribology Letters, 査読有, Vol. 47, 2012, 43-49, DOI: 10.1007/s11249-012-9960-5
- ② Y. Ando, K. Miyake, M. Nakano, A. Korenaga, H. Mano, A. Mizuno, A Novel Fabrication Method of Nanopatterning: Nanostripe, Proceedings of the 6th International Conference on MicroManufacturing, 査読有, 2011, 67-71,

[学会発表] (計4件)

- ① Y. Ando, Y. Tamura, H. Takahashi, K. Hiratsuka, What is the dominant factor in friction coefficient between different metals under low loads?, International Nanotribology Forum: The Hoi An Discussions 2011, Hoi An, Viet Nam, 2011/5/24
- ② Y. Ando, K. Miyake, A. Korenaga, M. Nakano, A. Mizuno, Nanostripe Structure: Fabrication and Friction

Characteristics, International
Tribology Congress-ASIATRIB 2010,
Perth, Australia, 2010/12/7

- ③ 安藤泰久、高橋秀享、田村悠、平塚健一、
格子間相互作用が摩擦に及ぼす影響、第2
回マイクロ・ナノ工学シンポジウム、島根
県松江市、2010/10/14
- ④ 安藤泰久、是永敦、水野顕、中野美紀、三
宅晃司、面接触条件下での起動・停止摩擦
特性、トライボロジー会議 2010 秋福井、
福井県福井市、2010/9/16

[図書] (計1件)

- ① 安藤泰久、米田出版、マイクロトライボロ
ジー入門 (A5 判, 224 頁)、2009

[その他]

ホームページ等

[http://www.tuat.ac.jp/~y-ando/lab/Top.h
tml](http://www.tuat.ac.jp/~y-ando/lab/Top.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 泰久 (ANDO YASUHISA)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00344169

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

平塚 健一 (HIRATSUKA KEN' ICHI)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：30181168