

令和元年6月6日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14141

研究課題名(和文) マイクロデバイスを利用した原子間相互作用による摩擦制御

研究課題名(英文) To control friction force owing to atomic interaction using micro devices

研究代表者

安藤 泰久 (Ando, Yasuhisa)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00344169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：弾性歪みにより原子間隔を変化させた部分の摩擦力を測定して、応力分布と摩擦力分布の関係を明らかにすることを目的として研究を行った。静電アクチュエータにより駆動されるマイクロデバイスをAFM(原子間力顕微鏡)の試料台に設置し、マイクロデバイスの一部に応力を加え、その表面の摩擦力を測定した。応力の加えられていない表面と比較した時、応力が作用している表面では15%程度の摩擦係数の低下が測定された。次に、分子動力学法によるシミュレーションにより、共有結合性のポテンシャルでSi原子が配置された面の摩擦を調べた。原子間隔を2%歪ませたSi表面と摩擦させると、20%程度摩擦力が低下した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

摩擦力の発生要因の一つが、エネルギー散逸によるものであるということは、最近広く受け入れられつつある。その考えに基づいて、低摩擦の理由が説明されることも行われている。しかし、異なる結晶構造の材料が摩擦されたとき、それぞれの材料のどのような物理的あるいは化学的性質が摩擦に影響を与えているかについては、調べるのが困難であった。本研究では原子間隔のみに着目し、同一材料を用いて応力歪みの影響を調べることで、純粋に摩擦を支配するパラメータを明らかにすることが可能になった。学術的には、摩擦現象の理解が進むことになり、社会的には低摩擦材料の開発につながるため、省エネルギーやCO2排出削減に貢献する。

研究成果の概要(英文)：In order to determine the relationship between the inter-atomic distance and the friction force, we measured the friction force on Si surface with stress distribution. A microdevice driven by an electrostatic actuator was placed on a sample stage of an AFM (atomic force microscope), a part of the microdevice surface was stressed, and the friction force of the surface was measured. A decrease in the coefficient of friction of as much as 15% was measured on the stressed area as compared to the unstressed area. The friction force on the surface was investigated by molecular dynamics simulation, where Si atoms were arranged according to covalent potential. The friction force decreased by 20% when it was rubbed against the Si surface in which the atomic spacing was distorted by 20%.

研究分野：トライボロジー、MEMS

キーワード：摩擦係数 原子間隔 AFM MEMS 静電アクチュエータ 分子動力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

二硫化モリブデン (MoS_2) やグラファイトなどの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Ptの組合せでも、0.01以下の超低摩擦が得られている。低摩擦の条件については層構造や化学的特性などについて説明されることが多い。それに対して、格子定数の差が摩擦係数に影響を与えている可能性が指摘されている。

固体同士の摩擦における原子間の相互作用を直接的に調べる方法として、AFM（原子間力顕微鏡）などを用いて単結晶を回転させて摩擦の異方性を測定する実験が行われている。この場合、同一の表面を利用することになるので、結晶の相対角度が摩擦力に与える影響を純粋に調べられると期待出来る。

格子定数の差が摩擦力に与える影響を調べようとしたとき、摩擦材料の組合せを変えると、仮に同じ結晶構造であっても、ヤング率や化学的な性質も同時に変化してしまうため、格子定数の差だけを抽出してその影響を調べることが困難となる。そこで、純粋に格子定数の差が摩擦力に与える影響を明らかにするための実験手法の開発が求められていた。また、MD（分子動力学法）によるコンピュータシミュレーションを利用することでも、格子定数の差の影響だけを明らかにできると期待される。もし、原子間隔や結晶性の程度が摩擦に与える影響が明らかになり、摩擦制御が可能になれば、任意の摩擦係数を示す材料の探索が容易になり、微妙な摩擦係数の制御を必要とする機構の開発にもつながっていく。

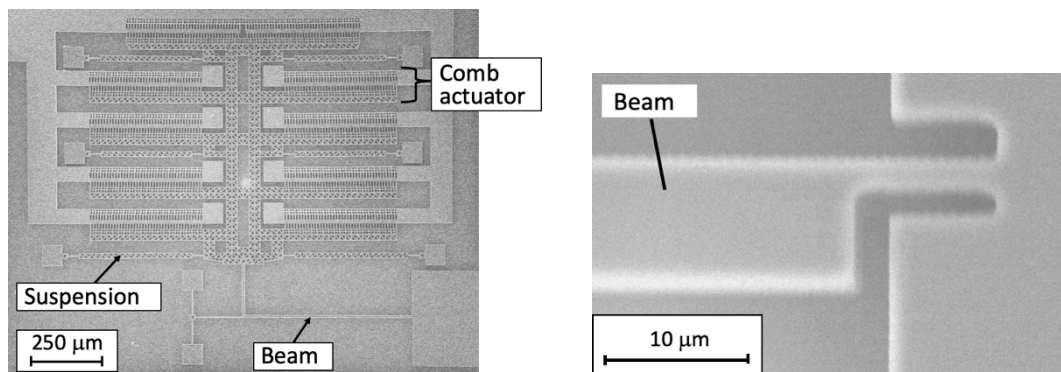
2. 研究の目的

格子定数の差が摩擦係数に与えることを検証するために必要な実験手法を開発し、原子間隔の差と摩擦係数の関係を明らかにすることを目的とする。そのために、結晶に力を加えて歪みを与え、その上で摩擦係数を測定する。しかし、材料の弾性限界は1~2%程度であることが多く、感度の高い摩擦力の測定方法が必要となる。そこで、MEMS技術により作製されたマイクロデバイスをAFMに組み込み、歪みが一律でない表面で摩擦力分布を計測することで、高感度で摩擦係数の変化を確認することを目指す。それに加えて、AFMに組み込まれたマイクロデバイスとプローブ間の接触を模擬した系について、MDシミュレーションを行い、原子間隔の差が摩擦係数に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

SOI (silicon on insulator) ウェハを用いてDRIE (deep reactive ion etching) プロセスによりマイクロデバイスを作製した。このマイクロデバイスは、静電アクチュエータに電圧を印加することで、測定面に引っ張り力を加えることが可能である。測定面に1%の歪みを生じさせるために、応力集中を利用することにした。実験に利用したマイクロデバイスの例を図1に示す。使用したSOIウェハは(100)面である。

AFMによる摩擦力測定にはSII ナノテクノロジー社製のSPA300HVを利用した。測定に用いたカンチレバーはOLYMPUS 社製の単結晶Si カンチレバー（ばね定数 1.8 N/m）である。同AFMはターボ分子ポンプに接続された真空チャンバを備え、中に試料ステージが設置されている。ステージ上にセラミックヒーターを介して応力集中マイクロデバイスを固定した。このときカンチレバーとデバイスの結晶方位が同じ方向になるように設置した。デバイス表面の凝縮水を取り除くため、 3.6×10^{-5} Pa の真空下において200°Cで1時間加熱した後、160°Cに維持して摩擦力測定を行った。応力集中の有無を比較するため、梁が細くなっている部分の領域Aと十分離れた固定部上の領域Bの2箇所を測定した。



(a) マイクロデバイスの構造

(b) 応力集中部

図1 SOIウェハ上に作製されたマイクロデバイスのSEM像

MD法によるシミュレーションでは、図2に示す3次元のモデルを利用した。マイクロデバイス基板に相当する部分は、共有結合のポテンシャルで配置されたSi単結晶で、計算を安定化させるために3層に分かれている。摩擦させるTipは、AFMのプロープに相当し、原子間隔を変化させるために、Siの結晶構造を与えた剛体化したモデルを用いた。Tipの格子定数を変化させたときの摩擦力について検討を行った。

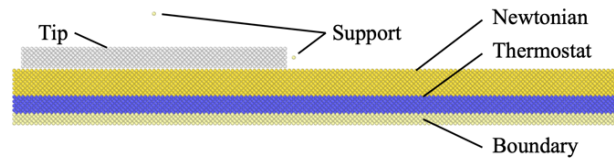


図2 MD計算に用いたSi単結晶のモデル

4. 研究成果

マイクロデバイスをAFMに取り付け、往復走査を行ったときに計測された摩擦力の平均値を図3に示す。図3(a)は応力集中が生じる領域Aで測定された摩擦力、図3(b)は構造的に応力の影響が現れない領域Bにおける摩擦力を示している。それぞれの領域において、荷重を変化させ、それぞれの荷重において摩擦速度も変化させて、静電アクチュエータに電圧を印加した状態と、印可していない状態で摩擦力測定を行っている。摩擦力に変動が見られるのは、プロープ先端やマイクロデバイス上の測定範囲における摩耗の影響の可能性がある。また速度が高いときに、摩擦力が高くなる傾向があるのは、加熱処理によって凝縮水が十分に排除されていなかったことが考えられる。領域Aと領域Bそれぞれにおける電圧印加による摩擦力の変化を比較すると、領域Aにおいては125Vの電圧を印加すると、摩擦速度が低い時に摩擦力の低下が認められる(図3(a))。一方、領域Bでは応力が作用していないために、電圧印加の影響はほとんど認められない(図3(b))。図4は、電圧印加による摩擦力の変化を整理したものである。荷重が高く、速度が低いときに歪み(原子間隔の変化)によって、摩擦力の低下が認められる。

図4に、MDシミュレーションの結果を示す。Tipを構成するSi原子間の間隔を+2%~-2%の範囲で変化させた時の摩擦力を示している。原子間隔を狭くしたときに摩擦力が低下している。

Si(100)面同士の摩擦において、それぞれの面の原子間隔の差が1~2%程度になることで、摩擦係数が10~20%程度低下することを、AFMとマイクロデバイスを組み合わせた実験、及び、MDシミュレーションによって明らかにすることに成功した。この結果より、低摩擦を示す材料の探索においては、格子定数差の大きな組み合わせを用いるという指針が得られたことになり、低摩擦材料の探索が容易になった。また、既存の摩擦材料を他の材料に代替する必要が生じたときに、その候補を効率的に探索できる事になり、産業面での効果も大きいと考える。

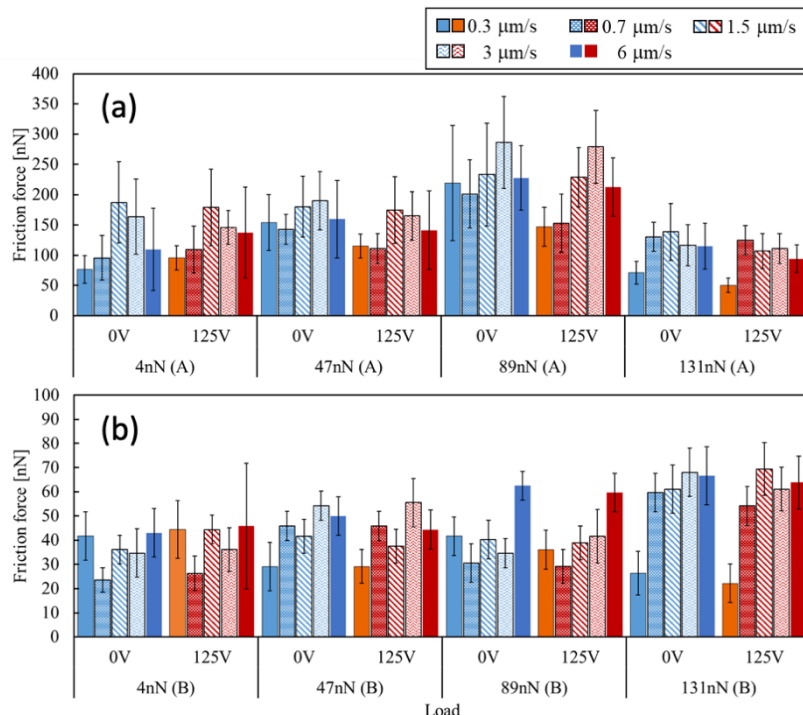


図3 電圧印加による摩擦力の変化 (a)応力変化が生じる領域 A での摩擦力 (b)応力変化が生じない領域 B での摩擦力

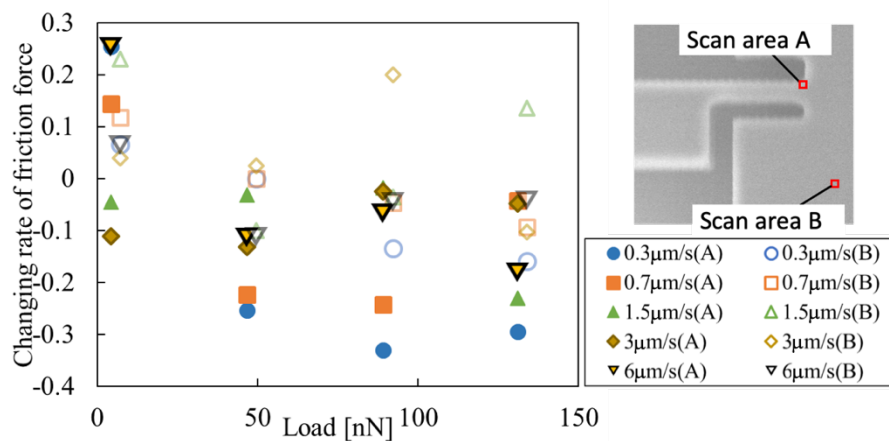


図3 電圧印加による摩擦力の変化率の比較

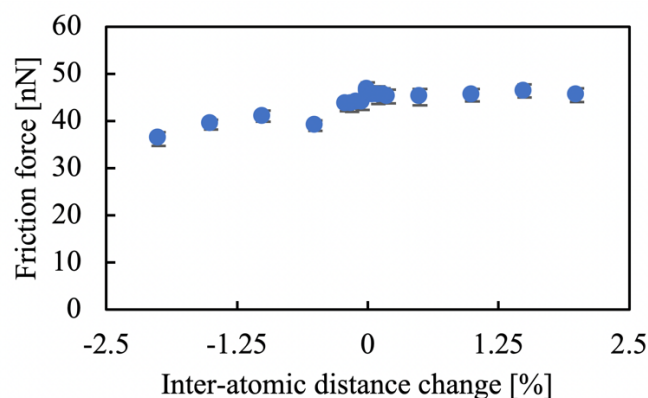


図4 MD計算による格子歪みと摩擦力の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 件)

〔学会発表〕(計 7件)

1. 島倉拓海, 安藤泰久, 分子動力学法による原子間隔が摩擦力に与える影響の検討, 関東学生学生会第58回学生員卒業研究発表講演会, 2019/03/18
2. 大沢尚吾, 安藤泰久, カンチレバー一体型3次元マイクロステージを用いたナノトライボロジー計測, 第9回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2018/11/01
3. 木村柊, 安藤泰久, 原子間隔変化が摩擦力に及ぼす影響に関する研究, 第9回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2018/10/30
4. 木村柊, 安藤泰久, マイクロデバイスを用いた応力分布のある固体表面上での摩擦力分布測定, トライボロジー会議 2017 秋高松, 2017/11/15
5. 木村柊, 安藤泰久, 格子定数変化が摩擦力に及ぼす影響に関する研究, 第8回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2017/11/01
6. Yasuhisa Ando, Effects of Lattice Interaction on Friction Coefficient, The 8th Advanced Forum on Tribology 2017, Zhenjiang, 2017/09/16 (招待講演)
7. 木村柊, 安藤泰久, 格子定数変化が摩擦力に及ぼす影響に関する研究, 2017年度日本機械学会年次大会, 2017/09/04

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。