

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630032

研究課題名(和文)原子直視法による摩擦実験法の開発

研究課題名(英文)Development of friction experiments by direct atomic observation

研究代表者

木塚 徳志 (KIZUKA, Tokuji)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：10234303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦が生じている、そのときの原子配列と力学応答を“その場”で観察し、摩擦のダイナミクスを直接解析するために、これまででない摩擦の実験手法を、ピエゾ駆動試料操作を組み入れた「その場電子顕微鏡法」を基盤として、申請者が世界に先駆けて開発した。摩擦の素過程を実験的に原子レベルで初めて観察して、その機構を解明した。さらに、ナノ接点の摩擦に注目し、本手法をナノサイズの機械素子開発へ応用する基礎を構築した。つまり、原子世界の摩擦に対し、その場で観て、操り、測る材料力学実験を展開し、摩擦を原子的視点から実験研究する基礎を確立し、摩擦に関連するナノテクノロジー研究へ応用した。

研究成果の概要(英文)：We developed for the first time a new type of experimental method based on in situ high-resolution transmission electron microscopy to investigate atomic motion and mechanical response during friction. We observed elemental processes of friction at the atomic scale and elucidated the mechanism. In addition, we focused the friction of individual nanometer-sized contacts, and established the application method to the fundamental study and the development of nanometer-sized mechanical devices. Thus, we performed the mechanics of materials in the atomic world, i.e., in situ atomistic structural observation, the manipulation, and measurements. We established the experimental methodology of study on atomic scale friction and applied to nanotechnology relating to friction.

研究分野：ナノ工学

キーワード：摩擦 摩耗 電子顕微鏡 その場観察 ナノマシン 凝着 剪断能力 垂直抗力

1. 研究開始当初の背景

物質同士が接触して生じる摩擦は、材料加工、回転軸、材料の固定をはじめ機械工学の全ての分野に關与する基礎的な現象である。こうした摩擦は、摩擦に関わる2つの物体表面全体が原子レベルで接触するのではなく、真実接触境界と呼ばれる表面上の微細突起間の接触が集合的に作用して現れる。また、最近の精密機械工学で利用される微細構造素子の接触や、走査プローブ顕微鏡の探針操作で起きる接触も、ナノメートルサイズの接触である。したがって、こうした微細な接触の摩擦に対する理解は、摩擦学の基礎を理解する上でも、摩擦を利用する従来の機械学と最先端微細構造機械学の背景を確立する上でも本質的なものである。しかし、こうした微細接触の構造ダイナミクスについての研究は、これまで専ら計算機シミュレーションが頼りであって、実験では全く手つかずの状態である。これは摩擦が接触面両側の数原子層厚さの局所構造で生じ、しかも動的な現象であり、こうした摩擦のダイナミクスを解析するための「動く摩擦面を、原子レベルで動的観察する手法」がこれまでになかったためである。つまり、こうした実験法を開発し、この問題を解決する必要があった。

2. 研究の目的

本研究は、従来の摩擦研究のように、摩擦前後の構造を静的に観察し、摩擦中のダイナミクスを推測するのではなく、あくまでも摩擦が生じている、そのときの原子配列と応力変化を“その場”で観察し、摩擦のダイナミクスを直接解析する。そのために、これまでにない摩擦の実験手法を、ピエゾ駆動試

料操作を組み入れた「その場電子顕微鏡法」を基盤として、申請者が世界に先駆けて開発する。摩擦の素過程を実験的に原子レベルで初めて観察して解明するとともに、ナノ接点の摩擦に注目し、本手法をナノサイズの機械素子開発へ応用する基礎を構築する。つまり、原子世界の摩擦に対し、その場で観て、操り、測る材料力学実験を展開し、摩擦を原子的視点から実験研究する基礎を確立し、摩擦に關連するナノテクノロジーへ応用する。

3. 研究の方法

ピエゾ駆動試料操作を組み入れた「その場電子顕微鏡法」を基盤として、摩擦のダイナミクスを直接解析する手法を申請者が世界に先駆けて開発した。具体的には、これまでの申請者の手法を発展させ、ナノチップを接触させて真実接触境界を作製し、その後、これを材料面と平行に移動させて、摩擦を起こすことができるようにした。この結果、まず、摩擦の構造ダイナミクスを動的に原子レベルで“その場”観察し、さらに、この構造観察と同時に摩擦面にかかるサブニュートンレベルの力を測定できるようにした。また、摩擦時の構造変化とともに、摩擦後の摩擦を原子レベルで観察できるように機構の最適化を図った。通常の摩擦と同様に、材料同士を長く移動させるときの接触部の歪みや摩擦の累積、および潤滑を明らかにして、各条件における摩擦の機構を解明するとともに、摩擦の構造ダイナミクスを研究するための実験手法を開発した。

4. 研究成果

摩擦研究用の試料ホルダーを設計・製作

し、申請者がこれまで開発してきたナノ物質の変形をその場観察できる電子顕微鏡に組み込み、摩擦の構造ダイナミクスを原子直視観察して調べられる装置を完成させた(図1)。

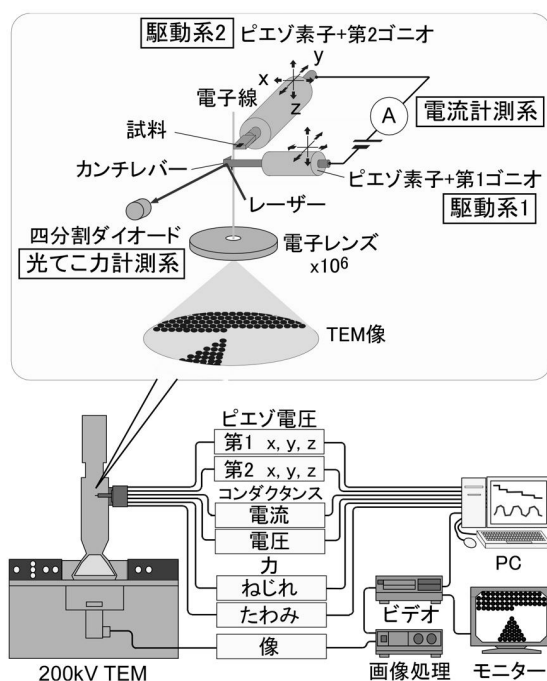


図1 摩擦の原子直視型観察法

具体的には、電子顕微鏡試料室内で、ピエゾ駆動を利用し、原子間力顕微鏡用のマイクロカンチレバー上に取り付けられたナノメートルチップを対向する試料(基板)に接触させて、ナノ接点を形成させ、基板表面に平行に動かして摩擦を起こすことが可能になった。このときの構造変化は、その場で、動的に観察することができ、そのときの空間分解能は原子配列レベルに達することが確認された。この摩擦観察では、摩擦を起こしているときに、まずモニターで把握し、同時にビデオやパソコンのメモリ上に記録できるようにした。こうした構造観察と同時に、摩擦時の垂直抗力と面と

平行な方向に作用する力、つまり摩擦力を実測できるようにした。前者の垂直抗力は、原子間力顕微鏡で用いられている光てこ方式でも測定したが、本実験では、カンチレバーのたわみを電子顕微鏡画像から測定し、垂直抗力を見積もった。後者の摩擦力も、同様に、摩擦方向の無負荷時からのナノチップの変位を電子顕微鏡画像から測定し、摩擦力を見積もった。これが本手法の独創的な点になった。すなわち、電子顕微鏡を用いた摩擦研究では、従来不可能であった摩擦力を実測することができるようになった。これによって、ナノメートルサイズの真実接触点で生じる構造ダイナミクスを原子配列レベルで直接観察し、そのときの垂直抗力と摩擦力の力学応答を実測する手法が本研究によって確立した。

この完成したこれまでにない摩擦解析手法を、シリコンやカーボン材料に応用して、原子・ナノスケール摩擦における凝着原子挙動、垂直抗力、摩擦力、および凝着部の剪断応力の変化とそれぞれの相関関係を明らかにすることができた。この結果、従来手がつけられていなかったナノメートル、もしくは原子スケールの摩擦におけるアモントン-クーロンの法則の成立と破綻、摩擦における凹凸説、および凝着説などの理論とその成立が実現する条件を見出すことができた。

以上、本研究期間に実施された研究成果は、実験手法の開発と応用によって得られた摩擦の根本に関わる物理現象の解明の両面において、本研究申請当初に予定された目標を大幅に上回るものとなった。

今後は、この手法を工学材料や一般の摩

擦など、様々物質間で、多様な表面状態における摩擦に応用し、その条件と結果を対応させて摩擦の機構を解明していくことが可能になった。さらに、研究代表者らは、摩擦の構造ダイナミクスを研究するための実験手法を普及させ、本研究で開発した手法とその応用研究の成果を基に、摩擦研究において新たな分野を開拓していく予定である。特に、ナノサイズのマカトロニクスに関する種々の材料の摩擦の特徴をまとめ、本手法が、ナノ電気機械システムなどに応用できる機械・構造材料を開発できる研究手法になるように対応し、摩擦が関わる基礎研究と工学の発展に貢献していく。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Transformation from slip to plastic flow deformation mechanism during tensile deformation of zirconium nanocontacts

Kohei Yamada and [Tokushi Kizuka](#)

Sci. Rep. 7, 42901 (2017) [9p].

doi: 10.1038/srep42901 (査読有)

Atomistic structural dynamics and current density variations during the transformation from crystalline to amorphous states in tantalum nanocontacts

Satoshi Murata and [Tokushi Kizuka](#)

J. Phys. Soc. Jpn. 86(3), 034601(2017) [5p]

doi: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.034601>

(査読有)

Development of 2000 K class high temperature *in situ* transmission electron microscopy of nanostructured materials via resistive heating

Tomo-o Terasawa, Shogo Kikuchi, Manabu Tezura, and [Tokushi Kizuka](#)

J. Nanosci. Nanotechnol. 17(4), 2848–2851 (2017)

doi: 10.1166/jnn.2017.13437 (査読有)

Plastic flowlike deformation and its relation to aperiodic peaks in conductance histograms of molybdenum nanocontacts

Kohei Yamada and [Tokushi Kizuka](#)

J. Phys. Soc. Jpn. 85(10), 104601 (2016)

[4p] (Editor's Choice paperに選定)

doi: 10.7566/JPSJ.85.104601

Bias voltage dependence of silver and molybdenum single-atom-width wire formation

Kohei Yamada and [Tokushi Kizuka](#)

Nanosci. Nanotechnol. Lett. 8(8), 702–704 (2016)

doi: 10.1166/nnl.2016.2211 (査読有)

Structures and electrical properties of single nanoparticle junctions assembled using LaC₂-encapsulating carbon nanocapsules

Manabu Tezura and [Tokushi Kizuka](#)

Sci. Rep. 6, 29708 (2016) [9p]

doi: 10.1038/srep29708 (査読有)

Free-Space Nanometer Wiring via Nanotip Manipulation

[Tokushi Kizuka](#) and Shin Ashida

Sci. Rep. 5, 13529 (2015)

doi: 10.1038/srep13529 (査読有)

Atomistic Breaking Processes via Electromigration in Platinum Nanocontacts

[Tokushi Kizuka](#) and Satoshi Kodama

J. Phys. Soc. Jpn. 83(10), 104602 (2014)

[4p]

doi: 10.7566/jpsj.83.104602 (査読有)

[学会発表](計 9 件)

In situ high-resolution transmission
electron microscopy of deformation of
copper nanocontacts

Koichi Onda and Tokushi Kizuka

International Workshop on Science and
Patents (Univ. Tsukuba, 2016) 2016, 9, 2

In situ transmission electron microscopy of
friction via piezomanipulation

Koichi Onda and Tokushi Kizuka

International Workshop on Science and
Patents (Univ. Tsukuba, 2016) 2016, 9, 2

Critical shear stress of copper nanocontacts

Koichi Onda and Tokushi Kizuka

International Workshop on Science and
Patents (Univ. Tsukuba, 2015) 2015, 9, 4

その場電子顕微鏡法による Si/Si 摩擦原
子過程の観察

音田光一、福田めぐみ、木塚徳志

日本物理学会秋季大会、金沢大(石川県
金沢市) 2016, 9, 14

Si/Si 間摩擦のその場高分解能電子顕微
鏡観察

音田光一、福田めぐみ、木塚徳志

第 63 回応用物理学会春季学術講演会、
東工大(東京都目黒区) 2016, 3, 19

銅ナノ接点の変形過程のその場電子顕
微鏡観察

音田光一、木塚徳志

日本物理学会秋季大会、関西大(大阪府
吹田市) 2015, 9, 16

銅ナノ接点の変形過程と臨界剪断応力

音田光一、木塚徳志

日本金属学会春期大会、東大駒場(東京
都目黒区) 2015, 3, 19

その場電子顕微鏡法による銅ナノ接点
の観察

音田光一、木塚徳志

日本 MRS 年次大会、横浜市開港記念会
館(神奈川県横浜市) 2014, 12, 11

原子直視法によるナノメートル級微細
銅配線の力学特性解析

音田光一、木塚徳志

日本銅学会第 54 回講演大会、横浜国大
(神奈川県横浜市) 2014, 11, 9

[その他]

ホームページ

http://www.ims.tsukuba.ac.jp/~kizuka_lab/index.html

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

木塚 徳志 (KIZUKA, Tokushi)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号 : 52019963