

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26390064

研究課題名(和文) エネルギー散逸像とトポ像の同時測定による動摩擦機構の解明

研究課題名(英文) Elucidation of dynamic friction mechanism by simultaneous measurement of the energy dissipation and topography images

研究代表者

鈴木 勝 (Suzuki, Masaru)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20196869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、エネルギー散逸像とトポ像の同時測定によりナノ接触面での表面構造や表面分子の運動性と動摩擦のエネルギー散逸の関係を明らかにすることを目的とする。本研究により、(1)HOPGのステップ構造の動摩擦のエネルギー散逸はすべり距離が格子定数以上で増加すること、(2)MoS₂のアイランド構造の摩擦力は構造サイズがマイクロメートル以下で減少すること、(3)Au表面の動摩擦のエネルギー散逸は温度依存性を示すこと、が明らかになった。以上の研究から、ナノ接触面での摩擦は表面構造と表面分子の運動性が重要であること、特に表面微細加工による摩擦フォノンを閉じ込めを利用し低摩擦を実現できる可能性を示された。

研究成果の概要(英文)：We have studied the relation between the dynamical friction and the surface structure/the mobility of surface molecules by simultaneous measurement of the energy dissipation and topography images. We found as follows: 1. the energy dissipation increases at the step structure of HOPG when the sliding distance is larger than the lattice constant. 2. the friction on MoS₂ submicron islands drastically due to the phonon confinement. 3 the energy dissipation of Au surface shows a large temperature dependence from room temperature down to LN₂ temperature. Especially, from the present study, we demonstrate that the superlubrication can be realized by phonon confinement.

研究分野：物性物理学

キーワード：ナノトライボロジー 動摩擦 エネルギー散逸

1. 研究開始当初の背景

『固体-固体間での動摩擦』は真実接触点と呼ばれる微小な接触面により支配される。このようなナノ接触面での動摩擦は、表面構造や表面分子の運動性等により大きく変化すると考えられ興味深い。しかしながら、研究開始当時、動摩擦のエネルギー散逸を直接に測定することは困難であり、ナノ接触面での動摩擦に関する研究はほとんど行われていなかった。

2010年、申請者・鈴木と三浦は、水晶振動子上の試料にAFM探針を接触させることで、格子間隔以下のすべり距離でも動摩擦のエネルギー散逸を測定できることを示し、ナノ接触面での動摩擦の研究を可能とした。

2. 研究の目的

本研究は、『エネルギー散逸像とトポ像の同時測定』により、表面構造や表面分子の運動性等と動摩擦のエネルギー散逸の関係を明らかにすることを目的とする。実験では、申請者・鈴木と三浦が開発した原子間力顕微鏡(AFM)探針と水晶マイクロバラン(sQCM)を組合わせたナノすべりの動摩擦のエネルギー散逸測定装置を、トポ像と同時測定を可能となるように改良して利用する。表面構造とエネルギー散逸の関係の研究では、グラファイトのステップ構造や微細加工表面を試料として用意し実験を行う。また表面分子の運動性の研究では、室温から液体 N₂ 温度までの温度依存性の測定を行う。

3. 研究の方法

これまでナノスケールの摩擦力測定の多くは、原子力顕微鏡(AFM)が利用されてきた。AFMでは、探針が試料表面を走査するときの水平力のヒステリシスループから摩擦力が求められる。この方法はナノ接触での動摩擦のエネルギー散逸を直接に測定するものではない。

一方、ナノすべりの動摩擦の測定として、水晶振動子を利用した実験が行われている。BergとJohannsmannは、2003年に、直径5mmの金蒸着した窒化シリコン球を金電極の水晶振動子に接触させ、振動の自然減衰から摩擦特性を測定した。この方法は、すべり距離を制御した動摩擦特性の測定ができる特徴を持つ。しかし接触域の半径が10-50μmと大きく、ナノ接触での測定ではない。

申請者の鈴木と三浦は、すべり距離を試料表面の格子以下から、それを超える距離まで制御しながら、ナノ接触での動摩擦のエネルギー散逸を試料表面のトポ像と同時測定を目標として、AFM探針と水晶振動子を組み合わせた装置を開発した。この装置は、これまでのAFMでの測定とは異なり、ナノすべりでの動摩擦のエネルギー散逸を直接に測定ができ、また基板格子以下のすべり距離でも動摩擦力の測定を可能とである。

図1に光てこ方式のAFMを備えた測定装置の模式図を示す。動摩擦のエネルギー散逸は、ずれ振動をするAT-カットまたはSC-カット水晶振動子にAFM探針を接触させたときにQ値の

変化から以下の式で求められる。

$$\Delta E = 2\pi E (1/Q) \tag{1}$$

ここで、 ΔE は1サイクルあたりのエネルギー散逸、 E は振動による水晶振動子に蓄えられるエネルギーである。水晶振動子の駆動は透過回路を利用し、発振器の信号振幅を変化させることで水晶振動子の振動振幅を制御できる。一方、AFMは荷重制御とトポ像測定で利用する。

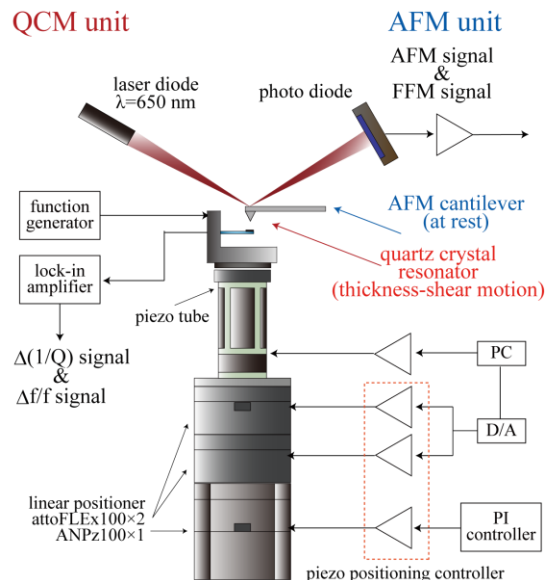


図1:測定装置の模式図。

4. 研究成果

以下では3の主要な研究成果を説明する。

(1) HOPGのステップ構造でのエネルギー散逸
ナノ構造での動摩擦のエネルギー散逸がどのように変化するかを明らかにするために、グラファイトのナノステップ構造での動摩擦のエネルギー散逸をトポ像との同時測定を行った。

図2に典型的な測定結果を示した。試料は3MHz SC-カット水晶上にグラファイトを接着して用意した。走査範囲は500nm×250nm、探針荷重3nN、基板振幅は0.24nmである。図2(a)から試料表面に4nmのステップ構造が観察される。これに対応して、(b)で示される動摩擦のエネルギー散逸像と(c)接触の有効ばね定数像にも変化が観察される。

引き続き、ステップ構造で観察されるエネルギー散逸と有効ばね定数のナノすべり距離依存性を明らかにするために、基板振幅を変えて測定を行った。測定の結果、エネルギー散逸と有効ばね定数はともに平坦なHOPGと比較して、大きな基板振幅依存性を示すことが明らかになった。エネルギー散逸は、基板振幅の増加に対して単調に増加し、大きな振幅ではほぼ一定値の8eV/cycleになる。一方、有効ばね定数は、基板振幅の増加に対して単調に減少する。また、これらが大きな依存性を示す振幅の範囲は、ほ

ば格子定数程度であることが明らかになった。
 これらの測定の結果は、グラファイトのステップ構造は大きな動摩擦を与える領域であること、動摩擦を与える機構は探針とステップ構造上の分子(原子)との結合を切ることにより発生することが明らかになった。

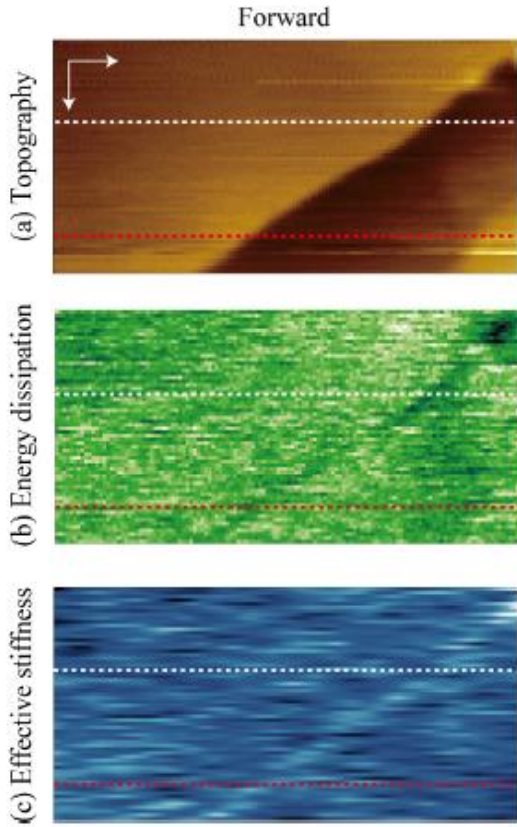


図2:HOPG 表面の観察像。(a)トポ像, (b) 動摩擦のエネルギー散逸像, (c)接触の有効ばね定数像。

(2) MnS₂ 微細加工面での超潤滑

表面構造が動摩擦のエネルギー散逸にどのように関係するかを明確に観察するために、MnS₂ 表面上で微細加工を行い、AFM測定と動摩擦のエネルギー散逸測定を行った。図3は

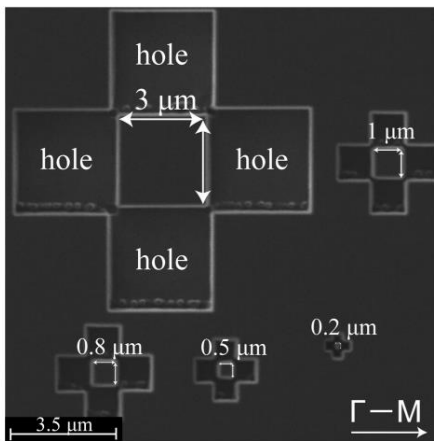


図3:MnS₂の微細加工後の表面形状

MnS₂ の加工後の写真である。微細加工は電子線により行い、サイズを変えた正方形のアイランドを作製した。

測定の結果、AFM測定で得られる水平力(摩擦力)のヒステリシスループの大きさと、動摩擦のエネルギー散逸の基板振幅依存性に大きなアイランドサイズ依存性が観測された。図4にヒステリシスループのアイランドサイズ依存性の測定結果を示した。アイランドサイズが 10 μm 以下になると、ヒステリシスループの大きさが急激に減少する。これは、AFM探針にはたらく水平力(摩擦力)が減少したことに対応する。

エ水平力(摩擦力)とエネルギー散逸の基板振幅依存性に現れるアイランドサイズ依存性は、アイランド内で探針の運動により発生するフォノンの閉じ込めにより説明される。

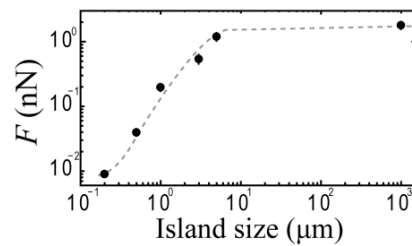


図4:AFM探針の水平力(摩擦力)のアイランドサイズ依存性。

(3) Au 基板のエネルギー散逸の温度依存性

表面分子の運動性を明らかにするために、Au 基板の有効ばね定数とエネルギー散逸の温度依存性の測定を行った。低温では表面分子の運動性が低下する。

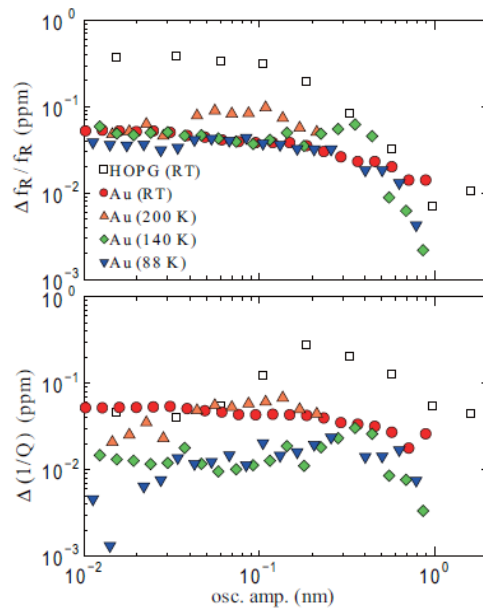


図5:Au 基板の共振振動数変化(有効ばね定数)と Q 値の変化(エネルギー散逸)の基板振幅依存性。

図5に、室温から液体 N₂ 温度までの有効ばね定数とエネルギー散逸の基板振幅依存性の測定結果を示した。有効ばね定数はの基板振幅依存性は温度により大きくは変化しない。一方、エネルギー散逸は 200 K と 140 K の間で大きく振る舞いを変える。高温域では、基板振幅の増加に対して単調に変化するのに対して、低温ではおよそ 0.3 nm の基板振幅で極大となり、また低振幅側では室温より大きく低下する。

この振る舞いは、低温で表面分子の運動性が低下したことより、AFM 探針が表面のポテンシャルにトラップされたことによると説明される。

以上の研究から、ナノ接触面での動摩擦は表面構造に大きく依存することが明らかになった。特に表面を微細加工し、摩擦フォノンを閉じ込めることで低摩擦を実現できる。また、表面分子の運動性も動摩擦を決める重要な因子である。

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 4 件)

- ① “Superlubrication by phonon confinement”
N. Wada, M. Ishikawa, T. Shiga, J. Shiomi, M. Suzuki, K. Miura
Physical Review B **97** (2017) 161403(R)-1, 5 (査読あり)
- ② “Experimental observation of phonon generation and propagation at a MoS₂(0001) surface in the friction process”
M. Ishikawa, N. Wada, T. Miyakawa, H. Matsukawa, M. Suzuki, N. Sasaki, K. Miura
Physical Review B **93** (2016) 201401(R)-1,4 (査読あり)
- ③ “Friction and Stiffness Surface Image using a Quartz Crystal Microbalance”
S. Tanahara, D. Inoue, S. Machida, Y. Ikada, J. Taniguchi, M. Suzuki, M. Ishikawa, K. Miura
e-J. Surf. Sci. Nanotech. **13** (2015) 164-167 (査読あり)
- ④ “Dynamic Friction of Nanoscale Sliding on a C₆₀ Deposited Film”
Y. Ikada, S. Tanahara, T. Oyamada, D. Inoue, S. Machida, J. Taniguchi, M. Suzuki, M. Ishikawa, K. Miura
e-J. Surf. Sci. Nanotech. **13** (2015) 135-138 (査読あり)

[学会発表] (計 23 件)

- ① 『グラファイトのナノステップ構造における動摩擦のエネルギー散逸像測定』
鈴木達朗, 棚原翔平, 谷口淳子, 佐々木成朗, 鈴木勝, 石川誠, 三浦浩治
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018年),

東京理科大, 2018年3月22日

- ② “Surface Mapping of the Dynamic Friction and Elastic Stiffness of Nanoscale Contact”
T. Suzuki, S. Tanahara, J. Taniguchi, M. Suzuki, N. Sasaki, M. Ishikawa, K. Miura
International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces, (UEC, Japan, 2017.10.29).
- ③ 『音叉型水晶振動子によるフラーレン蒸着膜上のナノすべり測定』
吉川由華, 鈴木達朗, 谷口淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
日本物理学会 2017 秋季大会, 岩手大学, 2017年9月21日
- ④ 『金表面のナノ滑り摩擦の温度変化 II』
笠原奈央, 小林卓也, 谷口淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
日本物理学会 2017 秋季大会, 岩手大学, 2017年9月21日
- ⑤ 『MoS₂(0001)表面ドット内でのフォノン潤滑』
和田範之, 石川誠, 鈴木勝, 佐々木成朗, 三浦浩治
日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17日
- ⑥ 『音叉型水晶振動子によるナノすべり実験』
吉川由華, 鈴木達郎, 谷口淳子, 鈴木勝
電通大-理科大合同シンポジウム「ナノ構造が拓く新奇な物性物理学-広がるナノトライボロジーの世界-」電通大, 2017年3月8日
- ⑦ 『ナノすべり摩擦の温度依存性』
笠原奈央, 小林卓矢, 谷口淳子, 鈴木勝
電通大-理科大合同シンポジウム「ナノ構造が拓く新奇な物性物理学-広がるナノトライボロジーの世界-」, 電通大, 2017年3月8日
- ⑧ 『MoS₂(0001)表面ドット内での摩擦によるフォノン分散』
和田範之, 石川誠, 鈴木勝, 佐々木成朗, 三浦浩治
日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016年9月13日
- ⑨ 『音叉型水晶振動子を利用したグラファイト基板での AFM 探針のナノすべり測定』
鈴木達朗, 棚原翔平, 谷口淳子, 佐々木成朗, 鈴木勝, 石川誠, 三浦浩治
日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016年9月13日
- ⑩ 『グラファイト基板ステップ構造におけるナノ滑り摩擦』

上條将彦, 棚原翔平, 谷口淳子, 鈴木勝,
佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院
院大学, 2016 年 3 月 19 日

- ⑪ 『金表面のナノすべり摩擦の温度変化』
小林卓矢, 小山田知弘, 棚原翔平, 谷口
淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦
浩治
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院
院大学, 2016 年 3 月 19 日
- ⑫ 『MoS₂(0001)アイランドにおける摩擦の散
逸エネルギー』
和田範之, 石川誠, 鈴木勝^A, 佐々木成
朗^A, 三浦浩治
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院
院大学, 2016 年 3 月 19 日
- ⑬ 『金のナノすべり摩擦の温度依存性の測
定』
小林卓矢, 小山田知弘, 棚原翔平, 谷口
淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦
浩治
「合同若手研究－表面・界面現象の新展
開:吸着・物質移動・エネルギー散逸－」,
東京理科大, 2016 年 3 月 14 日
- ⑭ 『水晶マイクロバランスを利用したすべり摩
擦のエネルギー散逸像の測定』
棚原翔平, 上條将彦, 谷口淳子, 鈴木勝,
佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
「合同若手研究－表面・界面現象の新展
開:吸着・物質移動・エネルギー散逸－」,
東京理科大, 2016 年 3 月 14 日
- ⑮ 『ナノスケール滑りのダイナミクス』
鈴木勝
日本表面科学会第 86 回表面科学研究会,
日本真空学会 2016 年 1 月研究会「ナトラ
イボロジー:現在と未来」, 東京大学, 2016
年 1 月 22 日 (invited)
- ⑯ 『ナノアイランド MoS₂(0001)表面における摩
擦の散逸エネルギー』
和田範之, 石川誠, 宮川貴彦, 鈴木勝,
佐々木成朗, 松川宏, 三浦浩治
日本物理学会 2015 年秋季大会(関西大
学)2015 年 9 月 18 日
- ⑰ 『MoS₂(0001)表面における摩擦の散逸エネ
ルギーのフォノン分散曲線 III』
石川誠, 和田範之, 宮川貴彦, 松川宏,
佐々木成朗, 鈴木勝, 三浦浩治
日本物理学会 2015 年秋季大会(関西大
学)2015 年 9 月 16 日
- ⑱ “Atomic-Scale Control of Friction and
Energy Dissipation of Carbon and Silicon
Nanocontacts”

N. Sasaki, S. Imamura, M. Motohashi, N.
Itamura, H. Fijita, M. Suzuki, K. Miura
ITC2015 Tokyo (Tokyo Univ. of Science,
Tokyo, 2015.9.17)

- ⑲ “Energy Dissipation in Friction Process on
MoS₂(0001)”
M. Ishikawa, N. Wada, T. Miyakawa, H.
Matsukawa, M. Suzuki, N. Sasaki, K. Miura
ITC2015 Tokyo (Tokyo Univ. of Science,
Tokyo, 2015.9.17)
- ⑳ “Measurements of Nanoscale Dynamic
Friction at a Low temperature”
T. Oyamada, S. Tanahara, J Taniguchi, M.
Suzuki, N. Sasaki, M. Ishikawa, K. Miura
ITC2015 Tokyo (Tokyo Univ. of Science,
Tokyo, 2015.9.16) (poster award)
- ㉑ “Surface Mapping of the Dynamic Friction
and the Effective Elastic Stiffness of
Nanoscale Contact”
S. Tanahara, J Taniguchi, M. Suzuki, N.
Sasaki, M. Ishikawa, K. Miura
ITC2015 Tokyo (Tokyo Univ. of Science,
Tokyo, 2015.9.16)
- ㉒ “Superlubricity of Fullerence Molecular
Bearings”
S. Imamura, K. Itoh, N. Itamura, M. Suzuki,
K. Miura, N. Sasaki
ITC2015 Tokyo (Tokyo Univ. of Science,
Tokyo, 2015.9.16)
- ㉓ “Dynamic friction of nanoscale sliding”
M. Suzuki
International Meeting on Friction - from
atomic to geophysical scales- (Earthquake
Research Institute, Tokyo, 2015.9.15)
(invited).

[その他]

ホームページ等

<http://ns.phys.uec.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 勝 (Masaru Suzuki)
電気通信大学・大学院情報理工学研究所・
教授 研究者番号: 20196869

(2) 研究分担者

佐々木 成朗 (Naruo Sasaki)
電気通信大学・大学院情報理工学研究所・
教授 研究者番号: 40360862

(3) 研究分担者

三浦 浩治 (Kouji Miura)
愛知教育大学・教育学部・教授
研究者番号: 50190583