

## 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 5 月 11 日現在

機関番号：13902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009 年度 ～ 2011 年度

課題番号：21654041

研究課題名（和文）

動摩擦エネルギー散逸顕微鏡の開発によるナノトライボロジー研究

研究課題名（英文）

Nanotribology study using the dynamical frictional force microscope

研究代表者 三浦 浩治(Miura, Kouji)

(愛知教育大学・教育学部・教授)

研究者番号：50190583

研究成果の概要（和文）：

本研究では、原子間力顕微鏡のカンチレバーによる荷重測定と水晶マイクロバランスによるエネルギー散逸測定を組み合わせ、ナノスケール領域での固体-固体間の動摩擦のエネルギー散逸を測定できるシステムを開発した。さらに開発した測定システムを利用して、グラファイト基板および C60 蒸着膜と探針間の動摩擦力を測定し、動摩擦力はすべり距離が基板の格子間隔より長いときは一定になるのに対して、格子間隔以下ではすべり距離に比例することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have developed the measuring system of the energy dissipation due to the dynamical frictional force at a small contact. The system is consisted of a combined atomic force microscope (AFM) with a quartz crystal microbalance (QCM) resonator. We measured the dynamical frictional force acting on graphite and C60 substrates with the AFM tip, and found that the force does not depend on the sliding distance in the case when the sliding distance is larger than the lattice constant, while it is proportional to the sliding distance at a small sliding distance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	0	1,700,000
2010 年度	500,000	0	500,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,900,000	210,000	3,110,000

研究分野：ナノトライボロジー

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：動摩擦、エネルギー散逸、QCM、AFM

## 1. 研究開始当初の背景

摩擦で失われるエネルギーは国民総生産 (GNP) の約数パーセント (10 数兆円) に上り、エネルギー利用の効率化には摩擦の軽減・潤滑が求められている。しかし、摩擦現象の理解は必ずしも十分ではなく『動摩擦によるエネルギー散逸のメカニズムはどのようなものか?』の問いは工学的にも理学的にも重要

である。特に固体-固体間の動摩擦によるエネルギー散逸は、見かけの接触面で一樣に起こることはなく、ナノスケール領域での固体間距離 (または荷重) と物性に依存し、どこで、どのように起こるかを答えなければならない。そのためには、ナノスケールの分解能を持って界面のエネルギー散逸を直接に測定することが必要となる。しかし技術的な困難

さもあり、ほとんど行われていない。

本研究グループの研究開始当初におけるナノ摩擦の研究状況は以下の通りであった。研究代表者・三浦は、グラファイト基板上的C60膜を始めとして原子間力顕微鏡(AFM)を利用して水平力の測定を行っていた。AFMでは探針によってナノスケールの分解能を持って準静的な水平力の測定が可能である。しかし、摩擦力によるエネルギー散逸は水平力のヒステリシスループより求められるため間接的であった。

一方、研究分担者・鈴木は、水晶マイクロバランス(QCM)を用いて低温でHe吸着膜のすべり摩擦の研究を行っていた。鈴木は水晶マイクロバランスの測定を改良し、さまざまな吸着基板と吸着膜の動摩擦力のエネルギー散逸を高精度に測定する技術を確立した。しかし、この測定では試料全体の平均摩擦力の測定であるという制限があった。

## 2. 研究の目的

三浦・鈴木は、原子間力顕微鏡(AFM)と水晶マイクロバランス(QCM)の2つの測定法の組み合わせることにより、ナノスケールの位置分解能とnNの荷重制御もとで、エネルギー散逸の測定が可能となるとの着想を得た。

本研究の第一の目的は、AFMとQCMを組み合わせ、動摩擦によるエネルギー散逸を直接測定できるエネルギー散逸顕微鏡を開発することにある。さらに第2の目的として、開発した動摩擦エネルギー散逸顕微鏡を、ナノトライボロジー研究に利用してナノスケールでの摩擦の機構を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

エネルギー散逸顕微鏡は、原子間力顕微鏡(AFM)と水晶マイクロバランス(QCM)を組み合わせることにより実現される。測定システムの模式図を図1に示す。

AFMでは探針をナノスケールの位置分解能とnNの荷重分解能を持って制御することが可能であり、一方、QCMではpWのエネルギー散逸を測定できる。これら2つを組み合わせることで、AFM探針を試料上で荷重を制御して操作し、同時にそのときのQCMのエネルギー散逸として共振振幅の変化(Q値の変化)を測定し、動摩擦力換算でサブnN(エネルギー散逸としてpW)のナノスケールのエネルギー散逸像を得ることが可能である。また、併せてAFM探針制御信号は試料の凹凸像となる。

本研究に先立つ先行研究として、1994年、SasakiらはSTM探針による水晶振動子の周波数変化を観測し探針の摩擦(測定精度15nN)の測定を行った。しかし、その後の大き

な発展はない。エネルギー散逸顕微鏡の技術的な挑戦は、水晶振動子の安定性・制御性の問題である。それらの確保には室温付近においては水晶振動子の温度制御を行った。その他の測定システムに利用した工夫を示す。

### (1) QCM測定について：

通常の測定ではQCMの水晶振動子を用いた発振回路の共振振動数等を測定するが、この方法では水晶振動子の振幅の制御が困難である。本研究では発振器から信号を水晶振動子に透過させ、その信号をRFロックインで受信する。これにより振幅制御が可能となり、またエネルギー散逸を高精度に測定できた。

### (2) AFM探針について：

多くのAFM探針の変位の測定は光てこを用いて行われる。大気中・室温の測定においては通常的光てこの利用が容易である。低温を含む広い温度環境や真空環境での測定に可能とするためにひずみゲージ自己検知型AFM探針を利用した。

その他、試料駆動機構は通常AFM、STMで用いられるピエゾ駆動機構を利用した。

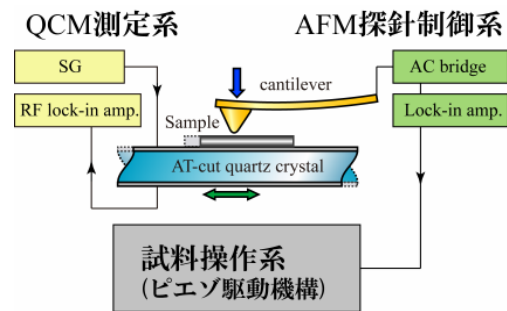


図1：エネルギー散逸顕微鏡の模式図。

AFM探針を制御することでナノスケールの位置制御と荷重制御を行い、また動摩擦のエネルギー散逸はQCMのQ値の変化から求める。

## 4. 研究成果

測定装置の性能評価として、基板にグラファイトおよびC60蒸着膜を選び、水晶振動子の振動振幅を0.01-3nmと変化させて動摩擦力のエネルギー散逸を測定した。測定に用いたAFM探針の先端径は20nm程度、また探針の荷重は数-1000nNの測定条件である。水晶振動子の共振振幅の変化(Q値の変化)から得られる動摩擦力のエネルギー散逸と振動振幅から、探針の平均すべり距離あたりのエネルギー散逸(動摩擦力)を求めた。

荷重400nNの条件での振動振幅に対する共振振動数とQ値の変化、動摩擦力を図2に示した。図2(a)は共振振動数、(b)はQ値の

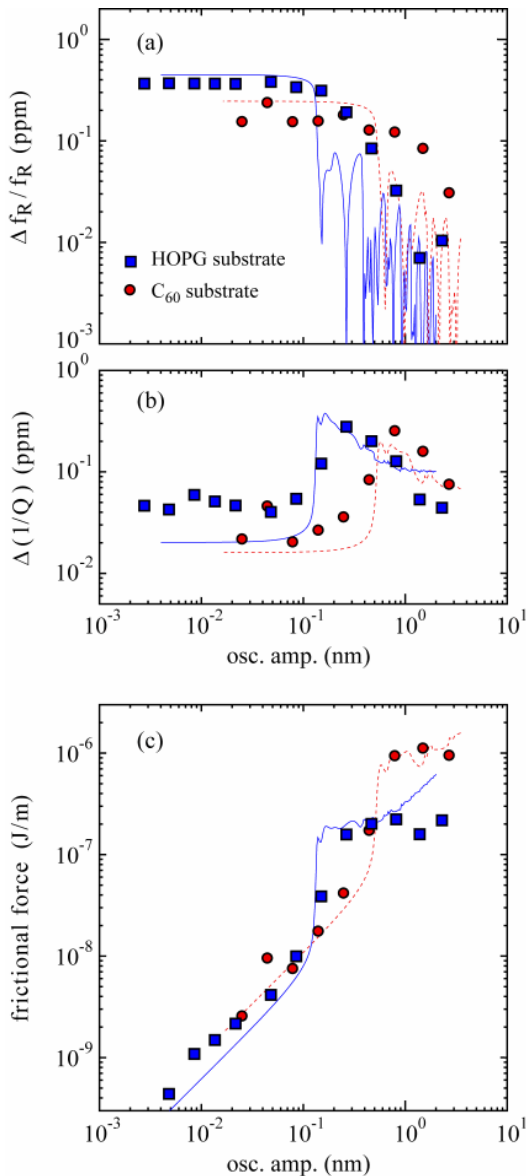


図2：荷重 400 nN における共振振幅に対する (a) 共振振動数、(b) Q 値、(c) 動摩擦力の变化。図の四角記号がグラファイト基板、丸記号が C60 蒸着膜を示す。また図中の曲線は 1 次元トムリンソンモデルでの数値計算の結果である。

変化である。ここで、グラファイト基板の格子定数は、0.25nm、C60 蒸着膜は 1.0 nm である。図から分かるように、探針のすべり距離が格子定数より短いとき、共振振動数は荷重が加えられていないときと比較して一定の増加を示し、すべり距離が格子定数程度からその増加は緩やかに減少する。Q 値は荷重が加えられていないときと比較して減少し、すべり距離が格子定数より短いときは一定の減少を示すのに対して、格子定数の程度で Q 値の減少は最大値を示し、その後は減少す

る。これらの振舞いは、格子定数が異なるグラファイト基板でも C60 蒸着膜でも同様である。図 2 (c) に動摩擦力を示した。動摩擦力は探針のすべり距離が格子定数より小さいときはすべり距離に比例し、格子定数より大きいときはほぼ一定となる。

これらの振舞いは定性的に次のように理解できる。すべり距離が格子定数より小さいときは、探針（表面の原子）が基板ポテンシャルの障壁を越えず振動する。このときのエネルギー散逸は基板に与える変形に比例すると考えられ、動摩擦力がすべり距離に比例することが期待される。一方、すべり距離が格子定数より大きいときは、エネルギー散逸の大きさは探針（表面の原子）が超える基板ポテンシャルの障壁の数に比例し、すべり距離あたりでは一定になる。

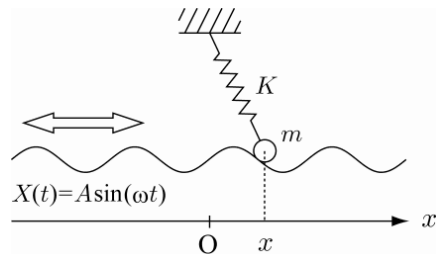


図3：1次元トムリンソンモデル

本研究では測定結果の振舞いを定量的に評価するために、図3に示す1次元トムリンソンモデルとの比較を行った。図2の曲線はモデルの数値計算である。測定結果をよく再現することが分かる。ここで、モデルでのエネルギー散逸は探針のすべり速度に比例する粘性項を仮定したのみである。これは、動摩擦の主要な機構は、すべり距離に依らないことを示している。

以上、本研究ではナノスケール領域の動摩擦力のエネルギー散逸を直接に測定できるシステムを開発し、それをナノトライボロジー研究に利用した。グラファイト基板、C60 蒸着膜と探針間の動摩擦力はすべり距離が格子程度で振舞いに変化することが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① D. Inoue, J. Taniguchi, M. Suzuki, M. Ishikawa and K. Miura  
“Dynamic Friction of Nano-Sliding between Graphite”  
e-J. Surf. Sci. Nanotech. **10** (2012) 100-102.  
(査読あり)
- ② D. Inoue, N. Hosomi, J. Taniguchi, M.

Suzuki, M. Ishikawa, and K. Miura  
“Development of a combined atomic  
force microscope with an AT cut quartz  
resonator”  
J. Phys. Conference Series **258**, (2010)  
012019-1,-5.(査読あり)

[学会発表] (計6件)

- ① 井上大輔, 谷口淳子, 鈴木勝, 石川誠,  
三浦浩治  
『グラファイト基板上のナノ滑り摩擦』  
第11回日本表面科学会中部支部・学術  
講演会, 豊田工大, 2011年12月24日
- ② 井上大輔, 細見斉子, 谷口淳子, 鈴木勝,  
石川誠, 三浦浩治  
『AFM-QCMによるグラファイトの摩  
擦力測定Ⅱ』  
日本物理学会 2011年秋季大会, 富山大  
学, 2011年9月23日
- ③ 井上大輔, 細見斉子, 谷口淳子, 鈴木勝,  
石川誠, 三浦浩治  
『AFM-QCMによるグラファイトの摩  
擦力測定』  
日本物理学会第66回年次大会, 新潟大学,  
2011年3月27日
- ④ 井上大輔, 谷口淳子, 鈴木勝, 石川誠,  
三浦浩治  
『AFM-QCMによるグラファイトの摩  
擦力測定Ⅲ』  
日本物理学会第66回年次大会, 新潟大学,  
2011年3月25日
- ⑤ D. Inoue, N. Hosomi, J. Taniguchi, M.  
Suzuki, M. Ishikawa, and K. Miura  
“Development of a combined atomic  
force microscope with an AT cut quartz  
resonator”  
ICSF2010 (Ise-Shima, Mie, 2010.9.15)
- ⑥ D. Inoue, N. Hosomi, K. Mikami, K.  
Noda, T. Mouri, J. Taniguchi, M.  
Suzuki, M. Ishikawa, and K. Miura  
“Loading force dependence in the  
resonance frequency and Q-value of the  
AT-cut quartz resonator by a small  
contact”,  
ICSF2010 (Ise-Shima, Mie, 2010.9.15)

[その他]

ホームページ

三浦研究室 <http://miuralab.com>

鈴木研究室 <http://ns.phys.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

三浦 浩治 (MIURA KOUJI)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号 : 50190583

(2)研究分担者

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