

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05054

研究課題名(和文) 摩擦制御を目指したナノ滑りでのエネルギー散逸の研究

研究課題名(英文) Study of the energy dissipation in nano-sliding aiming at frictional control

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ナノすべりでのエネルギー散逸や接触点の有効弾性力が、表面分子やその運動性と、どのような関係があるかを明らかにすることを目的として、水晶振動子上の試料表面にAMF探針を接触させたときの摩擦特性の測定とモデル計算を行った研究である。本研究から、ナノすべり摩擦について次の点が明らかになった。1) 金表面上でのナノすべりの有効粘性係数がはじめて求められた。2) C60単結晶のナノすべり摩擦では、探針のすべりによるC60分子の回転のエネルギー散逸が観測された。3) ナノすべりのエネルギー散逸の温度依存性は、探針が表面ポテンシャルをクリープで定性的に説明できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微細加工技術の進歩により、ナノ・マイクロマシンの作製が可能となり、『固体-固体間が触合うときの動摩擦の制御は？』の問いが、工学的にも理学的にも興味を持たれている。一方、ナノスケールの視点からの動摩擦によるエネルギー散逸の機構の理解と制御は必ずしも明らかでない。本研究は、これらの問題にひとつの知見を与えるために、制御された表面でのナノすべりでの摩擦特性、特に動摩擦のエネルギー散逸を測定し、モデル計算と比較を行った。本研究は、ナノスケールの視点から動摩擦の制御に知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the relationship between the energy dissipation in nano-slide and the effective elastic force at the contact point with the surface molecules and their motility. In this study, we measured the frictional characteristics and calculated the model when the AMF probe was brought into contact with the sample surface on the crystal oscillator. From this study, the following points were clarified regarding nano-friction. 1) The effective viscosity coefficient of nano-friction on the gold surface was obtained for the first time. 2) In the nano-friction of the C60 single crystal, the energy dissipation of the rotation of the C60 molecule due to the slip of the probe was observed. 3) It was clarified that the temperature dependence of energy dissipation of nano-friction can be explained qualitatively by creep of the surface potential of the probe.

研究分野：物性物理学・ナノトライボロジー

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

微細加工技術の進歩により、ナノ・マイクロマシンの作製が可能となり、『固体-固体間が触合うときの動摩擦の制御は？』の問いが、工学的にも理学的にも興味を持たれている。固体-固体間の接触は真実接触点と呼ばれる小さな部分が触合うに過ぎず、動摩擦の理解には微小な接触面での測定が重要である。さらに動的な振舞いの理解には、滑り運動を格子間隔以下に分解したナノ滑りの微小ステップごとの知見も必要であるしかしながら、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、原子間力顕微鏡(AFM)の探針と水晶マイクロバラン(s(QCM))を組み合わせた測定装置(AFM-QCM)を開発し、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た。

2. 研究の目的

『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、接触面の表面状態により大きく変化する。本研究は『摩擦制御を目指したナノ滑りでのエネルギー散逸の研究』と題して、表面状態を制御した微小な接触面を利用して、ナノ滑りが起きるときの「エネルギー散逸や有効弾性力」と「表面分子やその運動性」の関係を調べ、いつ・どこで・どのように動摩擦が起こるかを明らかにするものである。具体的には、これまでに開発したAFM-QCM装置を利用して、滑り運動を分解したナノすべりでのエネルギー散逸と有効弾性力を測定し、それらとモデル計算の比較により動摩擦を決める因子を決定し、摩擦の機構とその制御の知見を得る。

3. 研究の方法

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、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る。しかし水平力は、探針が基板ポテンシャルにトラップされているときの水平向の力に対応し、ヒステリシスループはナノすべり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。

これまでに、ナノすべりの動摩擦の直接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水晶振動子の金電極に接触させ、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かった。

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測定することを目標として、AFM探針と水晶振動子を組み合わせた装置(AFM-QCM)を開発した。この装置は、BergとJohannsmannと異なりナノ接触を作ることができ、またAFMと異なり、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る。また、基板格子以下のすべり距離でも動摩擦の測定を可能とである。

図1に実験に使用したAFM-QCM装置の模式図を示す。振動子は10kHz域の音叉型水晶振動子またはMHz域のATカットまたはSCカット水晶振動子を利用した。10kHz域の音叉型水晶振動子は高精度なエネルギー散逸が容易に測定できること、MHz域の水晶振動子はナノすべり距離を容易に制御できることの特徴を持つ。動摩擦のエネルギー散逸は、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 は振動により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。

本研究では試料と測定環境を変えてナノすべりでの動摩擦のエネルギー散逸の測定を行った。

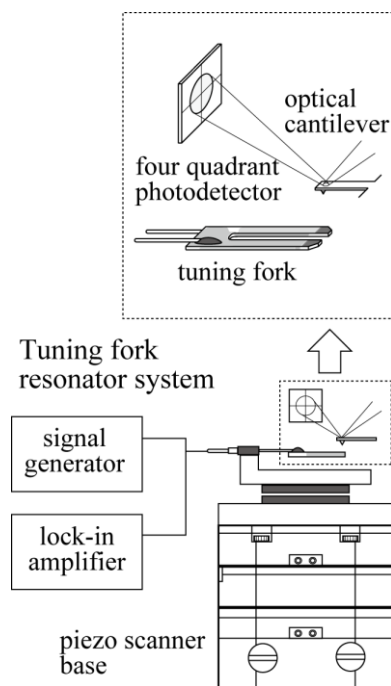


図1 : AFM-QCM装置の模式図

4. 研究成果。

(1) 金表面のナノすべりによるエネルギー散逸：

金属表面のナノすべりのエネルギー散逸を明らかにするために典型的な試料として金表面を選び、高精度にエネルギー散逸を測定できる音叉型水晶振動子を用いて実験を行った。

図2にAFM探針を図中の荷重で金表面に押し付けたときの水晶振動子の振動振幅に対する(a)水晶振動子の共振振動変化、(b)Q値の変化を示した。図から明らかなように、共振振動数は振動振幅がおおよそ0.1 nm付近から変化量が小さくなり、またナノすべりのエネルギー散逸に関係するQ値の逆数はおおよそ0.13 nmで極大をとり、その後、振動振幅の-1乗で現象する。

これらの振舞いは、振動振幅がおおよそ0.1 nm以下では、探針が金表面のコラゲーションポテンシャルにトラップされ、それ以上の振動振幅では探針のすべりが起こることを意味する。さらに水晶振動子と探針を質点とばねとし、粘性摩擦項を含む1次元トムリンソンモデルを構築することで、共振振動数とQ値の逆数の振動振幅依存性から、金表面のコラゲーションポテンシャルの振幅とエネルギー散逸を決める粘性摩擦の係数を求めることができる。この解析により金表面のコラゲーションポテンシャルはNaCl表面についてAFMの測定された値と近いことが明らかになった。また本研究によってナノすべりによるエネルギーが定量的にはじめて求められた。

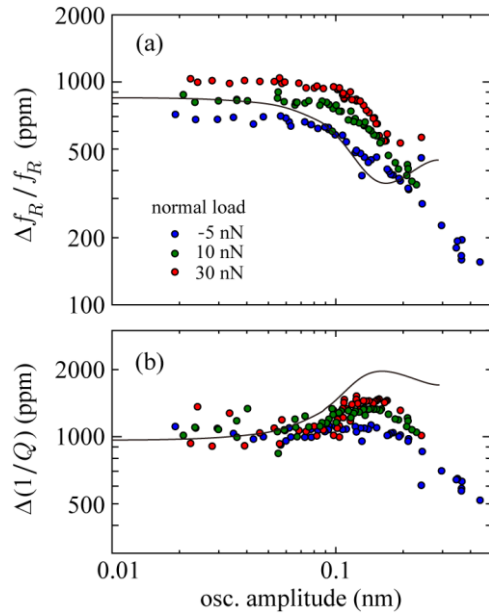


図2：金表面での振動新福と(a)共振振動数と(b)Q値の逆数の変化。

(2) C60 単結晶表面のナノすべりによるエネルギー散逸：

C60結晶は室温ではfcc構造をとり結晶中のC60分子は自由に回転している。本研究ではC60分子の回転がナノすべりによるエネルギー散逸に与える影響を明らかにすることを目的としてAFM-QCMの測定を行った。

本研究ではC60単結晶は昇華法で作製し、おおよそ0.3 mmの単結晶をHz域のATカット水晶振動子に接着することで試料とした。図3は(111)面のAFM探針を荷重10 nmで押し付けたときの水晶振動子の振動振幅に対する(a)水晶振動子の共振振動変化、(b)Q値の変化を示した。共振振動数は振動振幅がおおよそ0.1 nm付近から変化量が立ち上がり、1 nm付近で急激な落ち込みが観測される。また同様に、Q値の逆数は極大をとり0.1 nm付近から変化量が立ち上がり、1 nm付近で急激な落ち込みが観測される。

図中の実線と破線は1次元トムリンソンモデルの計算結果である。実線と破線はモデル計算での表面ポテンシャルの違いであり、実験データを定性的に再現するためには急峻な表面ポテンシャルであることが必要である。急峻なポテンシャルの存在は、探針によって表面C60分子が安定配置間を回転することよると説明される。本研究により表面分子の運動性がナノすべりによるエネルギー散逸に大きな影響を与えることが明らかになった。

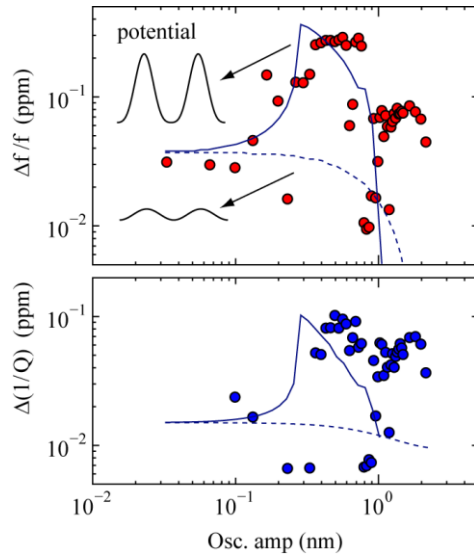


図3：C60(111)表面での振動新福と(a)共振振動数と(b)Q値の逆数の変化。

(3) 金表面とHOPG表面のナノすべりによるエネルギー散逸の温度依存性：

表面分子の運動性がナノすべりによるエネルギー散逸に与える影響を明らかにするために液体窒素温度から室温までの温度範囲でHOPG表面での測定を行った。測定の結果、金表面とHOPG表面に関わらず、それぞれの格子距離より大きい基板振幅においてエネルギー散逸に大きな温度依存性が観測された。観測された温度依存性は、探針が表面ポテンシャルをクリープすることで定性的に説明できる。本研究により表面分子の熱運動がナノすべりによるエネルギー散逸に大きな影響を与えることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 N. Wada, M. Ishikawa, T. Shiga, J. Shiomi, M. Suzuki, K. Miura	4. 巻 97
2. 論文標題 Superlubrication by phonon confinement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 161403(R)-1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.161403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Okamoto, K. Yamasaki, N. Sasaki	4. 巻 2
2. 論文標題 New potential model for atomic-scale peeling of armchair graphene: toward understanding of micrometer-scale peeling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mater. Chem. Front.	6. 最初と最後の頁 2098-2103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4991790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Okamoto, N. Sasak	4. 巻 58
2. 論文標題 Effect of size and shape of graphene sheet on nano-scale peeling process by atomic-force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys. (Rapid Comm.)	6. 最初と最後の頁 110901-1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 D. Damiron, P. E Allain, D. Kobayashi, N. Sasaki, H. Kawakatsu	4. 巻 59
2. 論文標題 Bottom-Tracking: The possibilities and physical meaning of keeping the bottom of the frequency shift in Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SN1012-1, -6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9231	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐々木凌一, 鈴木勝, 谷口淳子, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 AT-cut 水晶振動子を利用した C60 単結晶のナノすべり摩擦II
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤塚聡, 谷口淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 低温での金基板とグラファイト基板のナノ滑り摩擦の測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和泉達也, 梶皓彦, 渡邊章嗣, 鈴木勝, 三浦浩治, 佐々木成朗
2. 発表標題 フラーレン/グラフェン超潤滑界面におけるエネルギー散逸
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木凌一, 仙海翼, 谷口淳子, 鈴木勝, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 ATカット水晶振動子を利用したC60単結晶のナノすべり摩擦の測定
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仙海翼, 佐々木凌, 一谷口淳子, 鈴木勝, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 音叉型水晶振動子を用いたフラーレン単結晶のナノすべり摩擦の測定
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田範之, 石川誠, 鈴木勝, 志賀琢摩, 塩見淳一郎, 三浦浩治
2. 発表標題 表面ナノ構造でのフォノン超潤滑
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川由華, 谷口淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 音叉型水晶振動子による金表面のナノすべり測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田範之, 石川誠A, 鈴木勝B, 柳澤亮人C, 野村政宏C, 三浦浩治
2. 発表標題 マイクロピラー表面の超潤滑
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 (第73回年次大会・東京理科大)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Suzuki, S. Tanahara, J. Taniguchi, M. Suzuki, N. Sasaki, M. Ishikawa, and K. Miura
2. 発表標題 Surface Mapping of the Dynamic Friction and Elastic Stiffness of Nanoscale Contact
3. 学会等名 International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 (2017秋季大会, 岩手大学)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金表面笠原奈央, 小林卓也, 谷口淳子, 鈴木勝, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 金表面のナノ滑り摩擦の温度変化
3. 学会等名 日本物理学会 (2017秋季大会, 岩手大学)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	佐々木 成朗 (Sasaki Naruo) (40360862)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612)	
研究 分担者	三浦 浩治 (Miura Koji) (50190583)	愛知教育大学・教育学部・特別教授 (13902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------