

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820030

研究課題名(和文) マイクロナノマシンとTEMを組み合わせた実験系による真実接触面のリアルタイム観察

研究課題名(英文) Real-time observation of actual contact area using MEMS-in-TEM experimental setup

研究代表者

佐藤 隆昭 (Sato, Takaaki)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：80624840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：1)MEMSを新たに開発することで、単突起にかかる摩擦力・垂直抗力を計測しながら接点の形状変化を観察できた。梁の寸法を適切に設計することで、サブnNの精度で計測できた。

2)Agの単突起の摩擦をナノスケールで観察した。力の変化と真実接触面積の変化を直接関係づけることで、摩擦係数がいかにして決まるかを微視的なアプローチから考察した。ただ、計測したナノスケールの計測結果をそのままマクロスケールに拡張すると、矛盾が生じることも分かった。

3)Fe, PTFE, Pt, Ruなど様々な材料を観察した。摩擦力/垂直抗力/真実接触面積といったパラメータに注目し、定量的な違いを得た。

研究成果の概要(英文)：1) MEMS fabrication : We have fabricated MEMS device and built custom-designed experimental setup which can measure friction/normal forces while observing actual contact area.

2) Single nano-asperity friction: The setup enabled us to observe single nano-asperity friction.

3) Another materials : We observed the actual contact area of Fe, PTFE, Pt and Ru and obtained the difference.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー ナノコンタクト 電子顕微鏡 マイクロマシン

## 1. 研究開始当初の背景

MEMS(Micro Electro Mechanical System)とは、半導体微細加工技術を応用してシリコンウェハにマイクロ寸法の機械を集積する技術であり、近年では携帯電話やTVゲームの人体動作検出センサーや、デジタルカメラの手ぶれ補正用ジャイロセンサー等で応用されている。MEMSの働く微小領域においては、長さの3乗に比例する体積の効果(慣性力や重力)は大きく減少し、応答速度や駆動速度などの性能が顕著に向上する。一方、長さの2乗に比例する面積の効果、例えば摩擦の効果が支配的になる。MEMSやナノマシンでは可動部と固定部の接点を必要とするため、そこでの摩擦や摩耗の低減が重要課題である。すなわち低摩擦でエネルギー損失が小さく信頼性の高いMEMS開発には、ナノサイズの潤滑機構の解明や潤滑材の特性向上が急務である。

摩擦とは2つの物体の界面で実際に接触している真実接触面(図.1の拡大図)のせん断破壊の総和である。摩擦現象をより深く理解するためにはこの微小なせん断変形を観察する必要がある。しかし、広く用いられている原子間力顕微鏡(AFM)によるナノ摩擦の研究では、接触界面の変形をリアルタイムで観察できない。このため、転位論や量子力学といった材料科学の観点から摩擦の現象に直接解釈を与えられない問題があった。

## 2. 研究の目的

研究の目的は、実接触面の変形をナノスケールで観察できる実験系を構築し、その実験系を用いた摩擦機構の解明することである。すなわち摩擦を考察する上で広く用いる摩擦係数に関して、より深い理解を得ることである。本実験系は接触箇所をリアルタイムで観察できるため、従来の実験装置では不可能だったナノ接合のせん断応力対歪特性や変形に伴う構造変化などの計測が可能である。こうしたナノ構造の効果を微視的レベルで直接観察するアプローチによって、ナノトライボロジーに新たな知見が獲得することが目的である。

## 3. 研究の方法

マイクロマシン(MEMS)を組み込めるTEMホルダーを開発する。さらにサブnmの精度で駆動できるマイクロマシンを作製し、これをTEMの内部で駆動させることで接触界面の変形を観察する。作製したMEMSの探針先端部分に固体潤滑剤を成膜する事で、任意の固体潤滑剤の接触界面を観察する。

## 4. 研究成果

研究成果を大きく分けると、(1)MEMSの開発、(2)ナノ単突起摩擦の観察、(3)材料比較の3

つあった。

4-1 MEMSの開発：2つの梁を集積したMEMSを新たに開発した(図.1がマイクロマシンの拡大図、2つの細い梁が集積されてある)。このMEMSを組み込んだ実験系を用いることで、2つの梁の働きで、単突起にかかる摩擦力・垂直抗力を計測しながら接点の形状変化を観察できた。さらにそれぞれの梁の寸法を適切に設計することで、サブnNの精度で計測できるようになった。目標にしていた精度を備えた実験系の開発に成功した。この結果は、トライボロジストにて解説記事として投稿した。またトライボロジー学会奨励賞を受賞した。

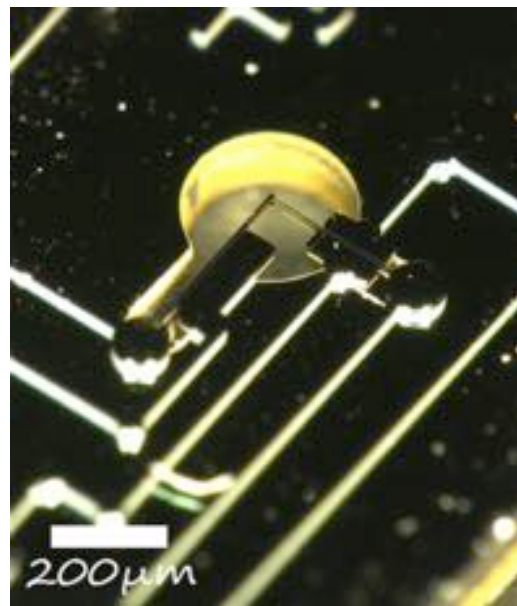


図.1 新たに開発したマイクロマシン(デバイスの顕微鏡写真)

4-2 ナノ単突起の摩擦の観察：ナノスケールに尖らせたAgの突起同士を接触させることで、Agの単突起の摩擦をナノスケールで観察した(図.2)。摩擦力/垂直抗力を計測しながら、真実接触面積の変化を計測できた(図.3)。力の変化と真実接触面積の変化を直接関係づけることで、摩擦係数がいかにして決まるかを微視的なアプローチから考察できた。ただ、計測したナノスケールの計測結果をそのままマクロスケールに拡張すると、矛盾が生じることも分かった。さらに実験結果をJKRモデルという今まで広く用いられてきたモデルでシミュレートしようと試みた。しかしナノスケールの接点は常温でも接着することが今回の実験で分かり、JKRモデルはこの常温接合の効果を含んでいないので、JKRモデルだけではナノスケールの実験結果を再現できないことを実証した。

この結果は、国際学会 MNE2016 および MIPE2016 にて発表した。

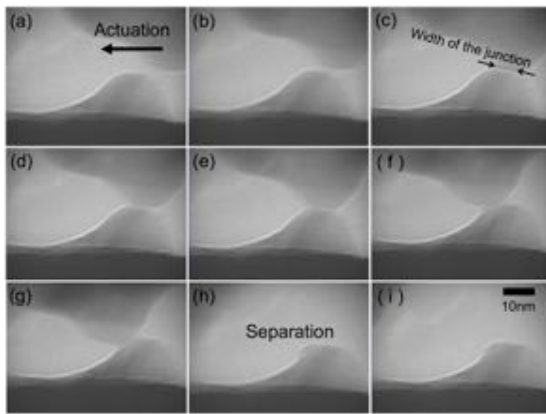


図. 2 Ag ナノ摩擦の実時間観察

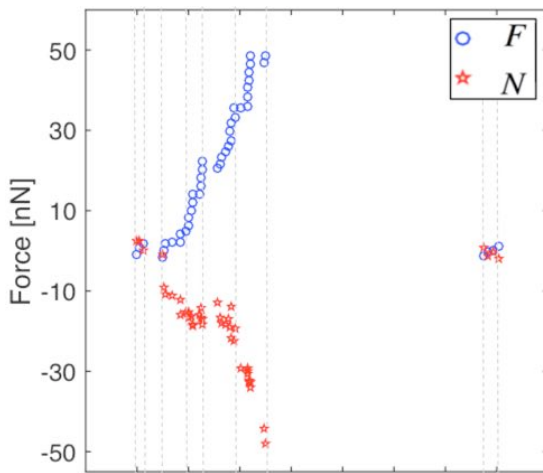


図. 3 摩擦力と垂直抗力の計測結果

(3) 材料比較 (Fe, PTFE など) : Ag 以外にも Fe, PTFE, Pt, Ru など様々な材料を観察した。摩擦力/垂直抗力/真実接触面積といったパラメータに注目し、定量的な違いを獲得できたが、今回の実験結果はマクロスケールにおいてどこまで一般的かまだ十分に解明できていない。

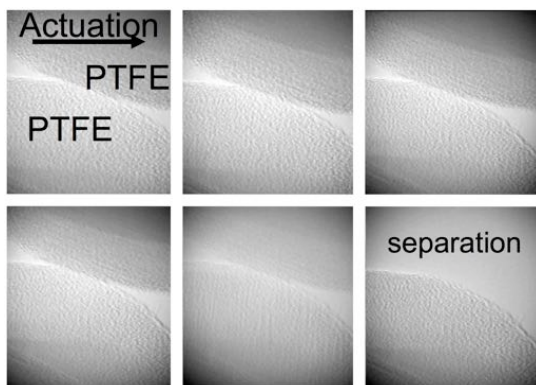


図. 4 PTFE のナノ突起同士の摩擦の観察(画面幅は 200nm)

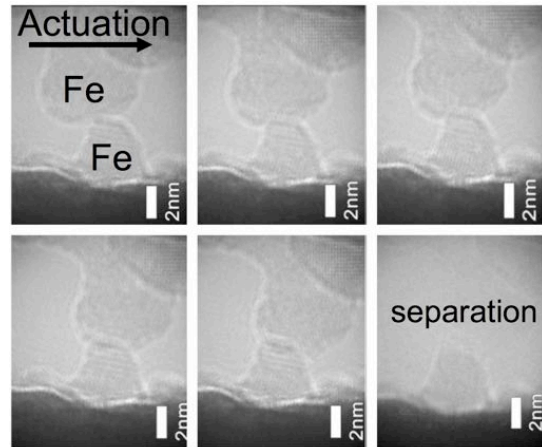


図. 5 Fe のナノ突起同士の摩擦の観察結果

以上のように多くの成果を得てきたが、同時に多くの課題を新たに発見した。

## 5. 主な発表論文等

学術論文(査読付の専門誌掲載論文)(計 2 件)

1) T. Ishida, **T.Sato**, T. Ishikawa, M. Oguma, N. Itamura, K. Goda, N. Sasaki and H. Fujita, "Time-Lapse Nanoscopy of Friction in the Non-Amontons and Non-Coulomb Regime" **Nano Letters**, Vol. 15, pp. 1476-1480, 2014

2) **T. Sato**, L. Jalabert and H. Fujita, "Development of MEMS Integrated into TEM Setup to Monitor Shear Deformation, Force and Stress for Nanotribology" **Microelectronic Engineering**, Vol.10, Num.1016, 2013

国際会議発表論文(査読つき)(計 1 件)

1) **T. Sato**, L. Jalabert, Y. Takayama, H. Fujita, 'Real-time TEM observation of single-asperity nanofriction' Gordon research conference (tribology) 2014, Waltham, MA, USA, 2014

国内会議発表論文(査読つき)(計 2 件)

1) **佐藤隆昭**, L. Jalabert, 高山由貴, 藤田 博之, 「MEMS と TEM を組み合わせた実験系による単接点 Pt ナノ摩擦のリアルタイム観察」 第 31 回「センサ・マイクロマシンとその応用」シンポジウム, 松江, 10 月, 2014 年

2) **佐藤隆昭**, L. Jalabert, 高山由貴, 藤田 博之, 「単一接点摩擦のリアルタイム TEM 観察」 トライボロジー会議 2014 春東京, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 代々木, 東京, 2014,

学術雑誌等又は商業誌における解説総説

(計 2 件)

1) 佐藤 隆昭, “固体潤滑の機構解明を目指すナノせん断破壊の実時間 TEM 観察”トライボロジスト, 2015, 2 月

2) 佐藤隆昭, 鍋屋信介, 石田忠, 高山由貴, 藤田博之, “見るは知るにつながる! 摩擦界面のその場観察” 高分子, Vol.63, No.5, 299-301 項, 2014

招待講演 (2 件)

1) 佐藤 隆昭 “ナノ接点摩擦のリアルタイム TEM 観察”, 日本機械学会 2015 年年次大会, 北海道大学工学部 B 棟, 札幌, 9 月, 2015 年 [招待講演]

2) 佐藤隆昭, 「マイクロマシン技術を応用した実時間 TEM 観察によるナノ機械試験」、日本機会学会 2014 年度年次大会、東京電気大学 東京千住キャンパス, 東京, 9 月 2014 年

[その他]

ウェブサイト <http://wakateb.dev-env.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 隆昭 (SATO, Takaaki)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号: 80624840