

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：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630039

研究課題名(和文) マイクロ駆動機構付きプローブによる高精度すきま制御型摩擦力顕微鏡

研究課題名(英文) Friction force microscope with a highly accurate gap control by integrating a driving mechanism to probe

研究代表者

福澤 健二 (Fukuzawa, Kenji)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60324448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：微細加工技術の進展に伴い、極小しゅう動すきまを介した機械要素間の潤滑技術が求められている。微小すきまの潤滑現象の解明に必須な、すきまを精密に規定して摩擦力および荷重を測定する方法の確立を目的として、従来の荷重制御型の摩擦力顕微鏡ではなく、すきま制御型の摩擦力顕微鏡の確立を試みた。プローブに駆動機構を付与するという新規な着想に基づき、高精度すきま制御可能な摩擦力顕微鏡を提案し、原理確認に成功した。

研究成果の概要(英文)：With the development of micro fabrication technology, lubrication technology between mechanical elements with a small sliding gap is required. Aiming at establishing a method for measuring the frictional force and load with a precise definition of the gap, which is essential to elucidate the lubrication phenomena at small gaps, we tried to establish friction force microscopy (FFM) at a constant gap rather than usual FFM at a constant load. Based on the novel idea of integrating a driving mechanism to the probe, we proposed FFM with a highly accurate gap control and successfully demonstrated its feasibility.

研究分野：マイクロナノ計測工学

キーワード：摩擦力顕微鏡 トライボロジー 走査型プローブ顕微鏡 ナノトライボロジー マイクロマシン

1. 研究開始当初の背景

微細加工技術の高度化に伴い、機械の微小化や精密化が進展している。機械要素が長期間安定動作するには、機械要素がこすれ合う部分（しゅう動部）の潤滑が必須である。

半導体の微細加工技術を用いて作製される微小機械、MEMS/NEMS (Micro/Nano Electro Mechanical Systems)などにおいては、機械の微小化に伴い、機械要素間のしゅう動すきまも微小化する。しかしながら、潤滑技術が確立しておらず、MEMS/NEMS に長期間の耐久性を付与する汎用的な潤滑技術はいまだ確立していない。

また、現在精密化が最も進んでいる機械の一つとして、ハードディスクドライブがある。ハードディスクドライブは、サーバやパーソナルコンピュータにおいて情報を記憶する装置として用いられている。近年は、データセンターに極めて多数のサーバとともに設置され、ネットワーク社会の進展を支えている。ハードディスクドライブでは、ヘッドとディスク間のしゅう動すきまが小さいほど記録密度が向上し、1 台当たりの記憶容量を大きくできる。そのため、現状で nm オーダとなっているしゅう動すきまについて、産業界ではさらなる微小化にしのぎを削っている。

このように微小機械においては、潤滑剤を満たした微小すきまを介して、微小な機械要素のしゅう動面が相対運動する際の現象を解明し、潤滑技術を確立することが求められている。しかしながら、微小すきまの潤滑現象は、計測の困難さゆえに解明が進んでいない。

一般に、潤滑現象はしゅう動すきまに応じて、流体潤滑、混合潤滑、境界潤滑と現象が本質的に変化する（図1）。そのため、微小すきまの潤滑現象の解明には、すきまを精密に規定して潤滑現象を定量化することが必須である。さらに、微小機械の潤滑現象を扱うためには、機械要素の微小化に対応して、局所的特性の定量化も必須である。

一方、走査型プローブ顕微鏡の一種である摩擦顕微鏡は、局所的な摩擦力を定量化する方法として広く用いられている。摩擦顕微鏡では、プローブと呼ばれる微細加工技術により作製されたマイクロ構造体を用いて、摩擦力と荷重をナノスケールの面内分解能で計測する。具体的なプローブ構造としては、カンチレバー（片持ちはり）と呼ばれる短冊形の微小構造に、先端をナノメートルスケールに先鋭化した探針と呼ばれる構造を取り付けたものが用いられる。試料からの荷重など鉛直方向の力は、カンチレバーの鉛直方向の変形（たわみ）を検出して得る。また、摩擦力など水平方向の力は、カンチレバーのねじれを検出して得る。そして、プローブへの押し付け荷重が一定となるように制御しながら探針を試料面上で走査し、摩擦力の2次元分布を得る。

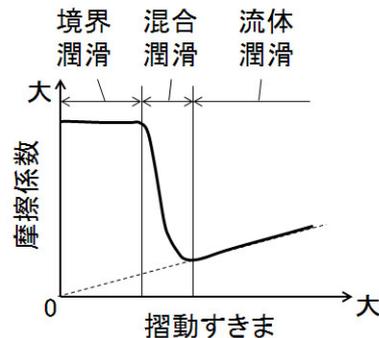


図1. しゅう動すきまの微小化に伴う潤滑モードの変化。微小化にともない、流体潤滑から境界潤滑へと遷移する。両者の中間状態は混合潤滑と呼ばれる。

このように鉛直方向の力の検出には、プローブの鉛直方向の変形が必須であるため、探針と試料のすきま（しゅう動すきま）が変化してしまう。そのため、微小すきまの潤滑現象解明に必須なすきまを精密に規定して摩擦力および荷重を測定することは、原理的に困難であった。

プローブ顕微鏡を含めて、力の検出では、検出部の変形から得ているものが多い。精密なすきま制御のためには剛性の高いプローブが必要である。一方、高感度な力検出には剛性の低いプローブが必要である。すなわち、従来の一般的な考え方に基づいた力検出法では、鉛直方向の剛性について相反する要求が求められ、原理的に実現困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、力の検出に関して、これまでの力の変形を利用した一般的な考え方でなく、新規な着想に基づく方法論を、摩擦顕微鏡において試みることとした。これにより従来の荷重一定型でない、すきま制御型という新しい摩擦顕微鏡を提案することを目的とした。具体的には、高精度すきま制御と高感度鉛直力検出を両立させる方法として、鉛直方向の駆動機構を付与した新規な構造のプローブを提案し、それを用いた高精度すきま制御可能な摩擦顕微鏡を提案することをねらいとした。

3. 研究の方法

本研究で提案した摩擦顕微鏡の構成の概念図を図2に示す。プローブ部はねじりはりを支点とするシーソ構造とし、探針に加わる鉛直力によりねじりはりを軸として回転する構造とする。また、水平力に対して平行板ばね部がたわみ、探針が水平方向に変位する。プローブ部先端に光を反射する微小パターンを設け、レーザー照射により位置検出器上にその像を投影する。この微小パターン像の鉛直変位からプローブ先端の鉛直変位を、

微小パターン像の水平変位からプローブの水平変位を同時に得る。鉛直・水平変位に、それぞれプローブの鉛直・水平方向のばね定数を乗じて、鉛直力と水平力を得る。

変位検出系の分解能から、プローブのばね定数は 1 N/m のオーダーとする必要があった。また、試料からの微弱な力を検出するために環境からの機械振動を抑える必要がある。環境からの機械振動は、一般に 100 Hz 以下である。共振周波数付近で最も機械振動を拾いやすくなるので、プローブ部の共振周波数としては数 kHz 以上とした。 1 N/m 程度のばね定数と数 kHz の共振周波数を両立するには、質量は μg オーダーとする必要があるため、マイクロメートルスケールの構造が必須であった。そこで、プローブ部の作製には、半導体の微細加工技術を微小機械加工技術に応用したマイクロマシン技術を用いた。特に加工精度に優れたドライエッチング法とし、その中でもシリコン基板を垂直に深掘り可能な Deep-RIE (Reactive Ion Etching) 法を用いて、プローブ部を一括して形成することを試みた。

また、十分な静電駆動力を発生させるためには電極の面積をできるだけ大きくする必要があり、一方、応答速度を高くするためにはプローブ部はできるだけ小さく軽くする必要があり、そのため、プローブ部の電極としては図 2 に示したような電極膜をプローブにのせた構造とした。この電極膜形成のために、やや特別な基板である、上下のシリコン層の間に酸化シリコン層が埋め込まれている SOI (Silicon On Insulator) 基板を用いた (図 3)。酸化シリコン層は、エッチングされずエッチ・ストップ層となるため、上面と下面からエッチングすることで、上下面で異なる構造の形成を可能とした。

図 2 のように、プローブに対して、その先端と後端面に対向する電極を有する電極構造を付加し、すきま制御用の静電駆動機構を構成した。静電気力は引力しか働かないため、二対の静電駆動機構の静電力を制御することにより、試料からの引力と斥力の両方を補償できる構造とした。電極部としては、導電性シリコンをプローブ電極とすきまを空けて対向させる構造とした。静電駆動機構が発生する静電力は、電極間隔の 2 乗に反比例するため、電極間隔を小さく設定することが必要である。摩擦力顕微鏡で検出する力のオーダーは通常 nN オーダーで、最大でも μN オーダーである。数十 V 程度の印加電圧とすると、すきま制御に十分な μN オーダーの静電力を発生させるには、電極とプローブ部のすきまを $10 \mu\text{m}$ オーダーとする必要があった。そこで、プローブ部と電極部を別々に形成し、その後、顕微鏡下で組み合わせることとした。組み合わせの際、プローブに設けた電極と電極部の間隔が $10 \mu\text{m}$ オーダーとなるように、電極部にスペーサとなる構造をあらかじめ作製した。

すきま制御系としては、鉛直方向のプロー

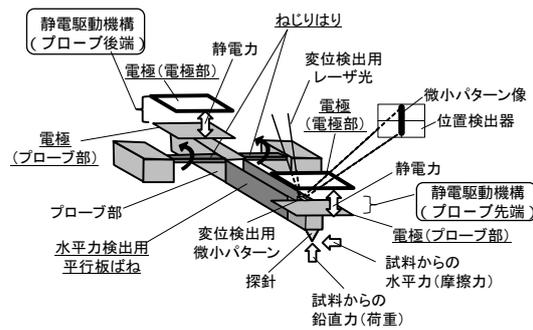
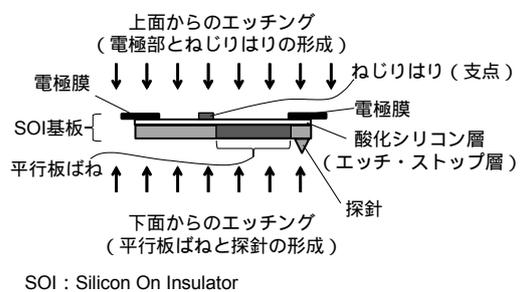


図 2. 提案する高精度すきま制御型摩擦力顕微鏡。荷重など鉛直力によりねじりはりを軸としてプローブ部が回転する。先端と後端の静電駆動機構の静電引力により、回転角が一定となるように制御することで、探針・試料間のすきまを制御する。



SOI : Silicon On Insulator

図 3. SOI 基板を用いた電極つきプローブの作製法。埋め込まれた酸化シリコン層をエッチ・ストップとして、上下両面から別々の形状を形成した。

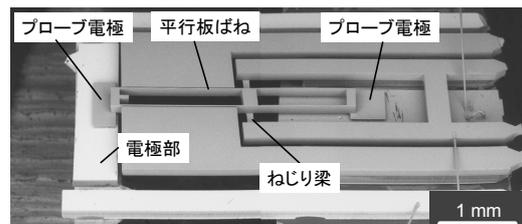


図 4 マイクロマシン技術を用いて作製した静電駆動機構付き摩擦力顕微鏡用マイクロプローブ。図 2 とはプローブの上下が逆になっている。

ブ変位と設定値との差を 0 とするように、二対の静電駆動機構の印加電圧を調整する制御系とした。制御方法としては、PID (Proportional Integral Differential) 制御法とし、制御系を構築した。試作したプローブを市販の摩擦力顕微鏡装置に搭載し、プローブの鉛直変位信号を用いて、静電駆動力を制御した。

4. 研究成果

試作したプローブの電子顕微鏡写真を図 4 に示す。当初構想していたプローブ作製法において、酸化シリコン層をエッチングする際に、プローブに形成した電極がはがれる問題が生じたため、これを克服するプローブ構造とした。これらの検討により、マイクロマシン技術を用いて、摩擦力検出用の平行板ばねおよび荷重検出用のねじりはり、また両端に電極を有するマイクロプローブを形成することができた。また、スペーサ部を有する電極部もマイクロマシン技術により形成した。さらに、形成したプローブ部と電極部を組み合わせることで、ねらいとしていた 10 μm オーダの電極間すきまを達成できた。これにより μN オーダの静電力の発生に成功した。

試作したプローブを摩擦力顕微鏡装置に搭載したところ、微小パターン像の変位を検出することで、それぞれ水平・鉛直力検出が可能であることを確認できた。すなわち、摩擦力顕微鏡としての動作を確認できた。

試作したプローブと構築した制御系を用いて、プローブに試料から外力が加わった際にすきま制御が可能であることを調べた。鉛直方向の変位を制御しながら、プローブに鉛直方向のステップ状外力を加えたときのプローブの鉛直変位の時間応答の測定例を図 5 に示した。ステップ状の外力は、静電駆動機構により与えた。この際、制御系によりプローブの鉛直方向の変位（偏差）を常に 0 とするように静電力を加えた。図 5 に示したように、外力による鉛直方向の偏差を 10 ms 以内に補償できることを示した。すなわち、試料から鉛直方向の力がプローブに加えられたとき、静電駆動機構が、試料からの力をリアルタイムに補償するような力をプローブに加えることで、すきま制御が可能であることを示した。

以上のように、ねらいとしていたすきま御型摩擦力顕微鏡が、駆動機構を集積化する新規な構造のプローブにより原理的に可能であることを明らかにした。

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 0 件)

[学会発表](計 1 件)

福澤健二、高橋幹人、伊藤伸太郎、張賀東、静電駆動機構を付与したすきま制御可能な摩擦力顕微鏡プローブの開発、日本機械学会情報・知能・精密機器部門(IIP 部門)講演会(IIP2016)、2016.3.15、東洋大学(東京都)

[図書](計 0 件)

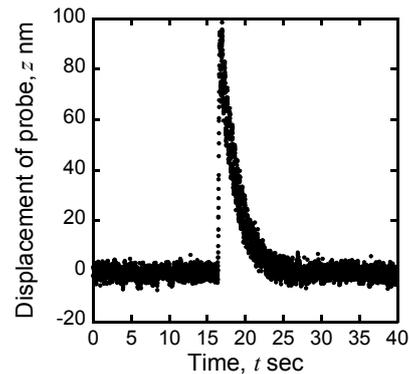


図 5 プローブ制御の測定例。ステップ状の鉛直方向の外力に対するプローブの応答を示した。プローブは常に変位が 0 になるように制御されている。

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://ayame.fukuzawa.nuem.nagoya-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

福澤 健二 (FUKUZAWA Kenji)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60324448

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし