

水平力顕微鏡によるナノ領域でのフレッチング摩擦特性

本田 知己*

Frictional Properties in Nano-scale Fretting with a Lateral Force Microscope

Tomomi HONDA*

(Received February 2, 2026)

This study investigates the effects of normal load, sliding velocity, and sliding displacement on lateral forces. Lateral forces were measured using atomic force microscopy (AFM) under controlled relative humidity conditions. The test involved single-crystalline <111> silicon plates, which were rubbed against a spherical glass tip under normal loads ranging from 20 nN to 80 nN. Results showed that at low sliding velocities, lateral forces increased substantially. Additionally, lateral force exhibited a linear relationship with normal load. When comparing the tangential micro-displacement of the spherical tip with the Mindlin model for fretting, the experimental data aligned well with the theoretical predictions, where the load was represented as the sum of the normal load and pull-off force.

Key Words : LFM, Fretting, Lateral force, Nano/micro tribology, Mindlin theory

1. 緒言

近年の社会の関心はマイクロマシンと呼ばれていた微小機械要素から微小な基板上に電気配線と機械構造を集積した部品である MEMS(Micro Electro Mechanical Systems:微小電気機械システム)に移っている。一方、生物のようなダイナミックな動きをする微小機械要素はあまり発展していない。この理由の一つとして、微小機械要素の可動部における凝着、摩擦、摩耗などのトライボロジー特性の解明とその制御がされていないことが挙げられる。自然界において昆虫や微生物が機敏に動き回っていることを考えれば、同程度のサイズの微小機械要素が高速で動いても、不思議なことではない。相沢はバクテリアのべん毛モータの機構を解析することによって、微小領域における潤滑設計法を構築しようとした^[1]。一般的に微小機械要素などの微小領域環境下で発生する摩擦では、スケール効果により重力や慣性力な

どの体積に比例する力はほとんど問題にならないが、表面積に比例する力、すなわち凝着力の影響が支配的になるため、従来の摩擦法則がそのまま適用できない。安藤は微小領域での摩擦では凝着力が垂直荷重の働きをするため、外部から負荷した垂直荷重が 0 の時でも摩擦力が働くことを報告している^[2]。マイクロ・ナノの世界においては、凝着力は表面同士を吸着し、摩擦や摩耗を増加させる。したがって、微小領域環境下では、これらの力を抑制し、逆にうまく利用するような設計が必要となる。今後、複雑な構造を有した機械の製作が進められていく中、微小領域におけるトライボロジー特性の解明は必須となる。ナノトライボロジーに関する研究では走査型プローブ顕微鏡 (SPM : Scanning Probe Microscope) が多く利用されている。1981 年の走査型トンネル顕微鏡 (STM : Scanning Tunneling Microscope) の発明に始まり、1985 年の原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope) の発明により SPM の利用が一般的になった。SPM は探針と試料間に働く様々な相互作用を検知する。この相互作用として、探針と試料との間の静電力、磁気力、コンダクタンス、電流、

*機械・システム工学科

* Department of Mechanical and System Engineering

粘弾性、摩擦力、近接場光等があり、これらを検知して表面の特徴を知ることができる。そのため、SPMは基礎研究の分野だけではなく、半導体や情報記録デバイスなどを中心とした電子デバイスなどや高分子分野などの産業界でも利用されている。トライボロジーの分野においてもSPMは広く用いられており、水平力顕微鏡(LFM: Lateral Force Microscope)による摩擦実験が行われている。安藤は探針先端が平坦なカンチレバーを使用し、パターン形状を形成したSiウェハ上を走査させた結果、Siウェハにパターン形状を形成させることで摩擦力を制御できると報告している^[3]。極小領域での摩擦に大きな影響を与える凝着力を制御する研究も行われており、メニスカス力、静電気力^[4]などの低減法が提案されている。一方、AFMは微細加工にも使用されており、金ら^[5]はAFMを用いたナノスケールの加工に関する研究を行っている。また、Siウェハ上にAFM探針を走査することにより、Siウェハ表面が隆起、もしくは除去される事例も報告されている。

本研究では、SPMを利用したナノオーダーでの摩擦機構の解明を目的とし、機械しゅう動部の振動によって μm の振幅で生じるフレッチング現象が nm の振幅においても生じるのか調べた。振動数や垂直荷重が水平力に及ぼす影響を明らかにし、その結果に基づいてMindlin理論^[6]との比較検討を行った。

2. 試験方法および供試材料

2.1 水平力顕微鏡(LFM: Lateral Force Microscope)

本研究では試験装置として(株)島津製作所製SPM(SPM-9500J)を使用した。SPMの測定原理をFig.1に示す。SPMでは探針と試料表面間に作用する力を測定し、それを一定に制御させながら試料表面上を探針で走査する。Fig.1に示すように、ばね定数の

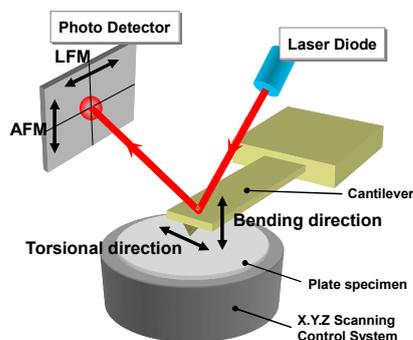


Fig. 1 Schematic of the SPM units.

非常に小さい板状のばね(カンチレバー)の先端に探針がついており、カンチレバーのたわみ方向の変位から原子間力(AFMモード)を、ねじれ方向の変位から水平力(LFMモード)を検知することができる。

2.2 環境制御装置

LFMを覆うチャンバー内の相対湿度を制御するために環境制御装置を使用した。コンプレッサーで圧縮した空気をオイルフィルターに通した後、予備室にてエアドライヤーと超音波加湿器により目標の湿度に調節した空気を供給する。ただし、実際の湿度はカンチレバー付近にて測定され、一定に制御された。

2.3 供試材料および試験条件

摩擦試験には鏡面仕上げした単結晶Siウェハの(111)面($R_a = 0.07 \text{ nm}$)を用いた。また、カンチレバーにはピラミッド型探針を持つオリンパス社製カンチレバーと、同カンチレバーの先端に半径 $10 \mu\text{m}$ のガラス球(バリウムチタネートガラス, JIS試験用粉体II-1)を取り付けて球形探針としたカンチレバーを用いた。Fig.2にカンチレバーの二次電子像を示す。ガラス球を取り付けたカンチレバーのバネ定数は、材料力学のたわみの式とフックの法則から算出した。

垂直荷重を 80 nN に設定して振動数を変化させたときの水平力と、振動数を 2 Hz に設定して垂直荷重を変化させたときの水平力を測定した。走査範囲は $40 \times 40 \text{ nm}^2$ である。試験中は環境制御装置を用いて温度 26°C 、相対湿度 $40\% \text{ RH}$ に保持した。

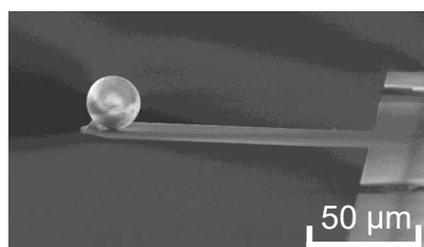


Fig. 2 SE image of the cantilever.

3. 試験結果及び考察

3.1 振動数が水平力に及ぼす影響

振動数を変化させた場合の変位と水平力の関係をFig.3に示す。振動数 0.1 Hz の場合は 7 nm までずべることなくカンチレバーがねじられる。その後、カ

ンチレバーがねじられながら水平方向にすべり出し、変位が 9 nm 以上になったとき、カンチレバーのねじれがほぼ一定の状態ですすべりへと移行する。本研究では、ねじれだけが生じる領域を *stick* 領域、ねじれとすべりが混在する領域を *partial slip* 領域、ねじれがほぼ一定の状態ですすべる領域を *gross slip* 領域とした。振動数 2 Hz の場合は *gross slip* への移行変位が 8 nm であった。振動数の増加にともなって *gross slip* へと移行する変位が小さくなり、水平力のすべり速度依存性が見られた。Fig. 4 は振動数と *gross slip* 状態における水平力および凝着力との関係を示す。この範囲の振動数では、振動数の増加にともない水平力がやや減少する傾向が見られた。

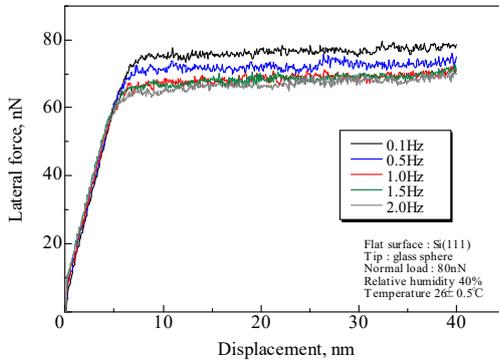


Fig. 3 Variations of lateral force as a function of the displacement for frequency.

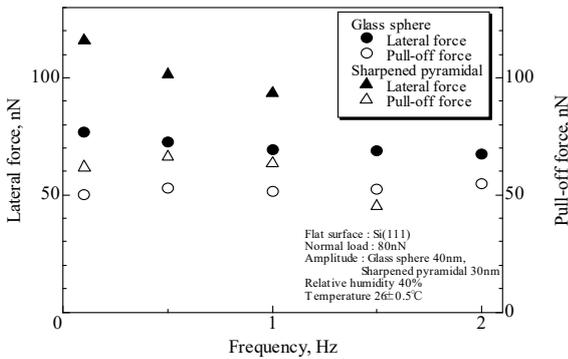


Fig. 4 Relationships among frequency, lateral force and pull-off force.

3.2 垂直荷重が水平力に及ぼす影響

Fig. 5 に垂直荷重を変化させた場合の変位と水平力の関係を示す。stick 状態での水平力の変化は垂直荷重に関係なくほぼ同じ値を示しているが、垂直荷重が大きくなるほど、すべり出すまでの距離が長くなった。振動数 2 Hz、振幅 40 nm、相対湿度 40 %RH

において垂直荷重を 20, 40, 50, 60, 80 nN と変化させたときの垂直荷重と水平力および凝着力との関係を Fig. 6 に示す。水平力は垂直荷重の増加にともなって増加した。

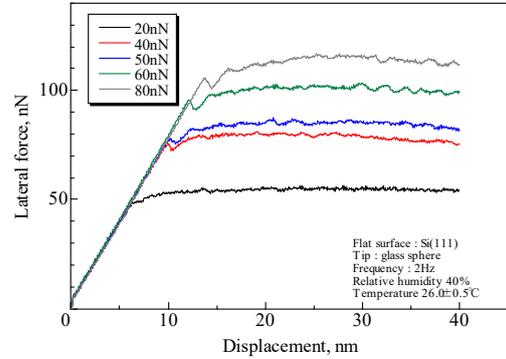


Fig. 5 Variations of lateral force as a function of the displacement for normal load.

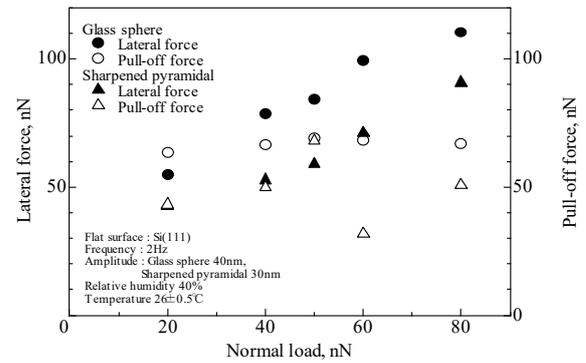


Fig. 6 Relationships among normal load, lateral force and pull-off force.

垂直荷重と変位の関係における摩擦係数の変化を Fig. 7 に示す。変位と水平力の関係を近似式で表し、計算から *gross slip* に移行する変位を求めた。●は計算より求めた条件を表す。○はそれぞれの実験点を示し、その横にその条件での摩擦係数を併記した。変位の増加に伴う摩擦係数の増加と、Mindlin ら^[6]による弾性接触に基づいたすべり出し変位の理論との比較を試みた。式(1)は巨視的なすべりが生じる臨界相対変位 δ_c と荷重 W の関係を示している。

$$\delta_c = CW^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$C = \frac{3}{8} \mu K \left[\frac{3E'}{4R} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$K = \frac{(1 + \nu_1)(2 - \nu_1)}{E_1} + \frac{(1 + \nu_2)(2 - \nu_2)}{E_2}$$

ここで、 δ_c は臨界相対変位[μm]である。 C は、ヤング率 $E[\text{GPa}]$ やポアソン比 ν 、球の曲率半径 $R[\mu\text{m}]$ 、摩擦係数 μ によって決まるが、ここでは試験結果より $C=1.70$ として計算した。図のように、式(1)では実験結果を説明できなかつた。緒言でも述べたとおり、これまでの研究により微小摩擦では、凝着力が垂直荷重と同様の働きをしていると報告されていることから、凝着力の影響を考慮して実験結果との相関を確かめた。垂直荷重に凝着力を加えて(1)式を(2)式に変更した。

$$\delta_c = C(F_N + W)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

ここで、 F_N は凝着力であり、測定の結果 90.4 nN であった。 C は 0.66 として計算した。

Fig. 7に示すとおり、式(2)と **gross slip**に移行した変位がほぼ一致した。したがって、ナノ領域におけるすべり出しの場合、Mindlinの理論式における垂直荷重に凝着力を考慮する必要があることがわかった。

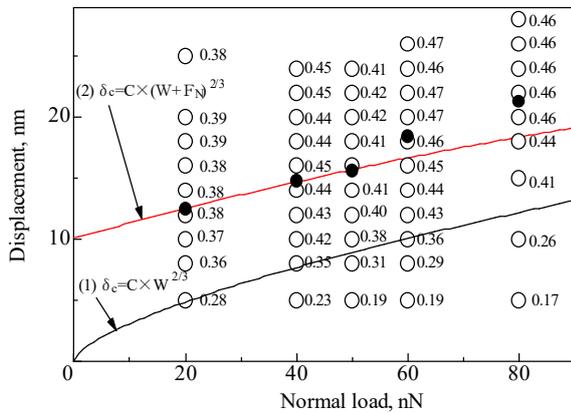


Fig. 7 Variation of the friction coefficient in the relation between normal load and displacement.

4. 結 言

カンチレバーに取り付けたガラス球探針と通常探針を Si ウェハ上でフレッチング摩擦させた結果、以下の結論を得た。

- (1) ナノオーダーにおいてもフレッチング摩擦が発生し、stick 領域と slip 領域が存在する。
- (2) マクロな領域でのフレッチング摩擦の説明に用いられる Mindlin の理論式における垂直荷重

に凝着力を加えることで、ナノ領域での垂直荷重と変位の関係における **gross slip**に移行する位置(すべり出し変位)を説明できる。

謝 辞

本研究における測定の多くは福井大学大学院生の田中伸寛氏により実施された。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 相沢慎一：バクテリアのべん毛モータとナノトライボロジー，トライボロジスト，45-2, 126-131 (2000).
- [2] 安藤泰久：マイクロ荷重下のトライボロジー，トライボロジスト，46-6, 463-468 (2001).
- [3] 安藤泰久，伊能二郎，石川雄一，北原時雄，角田和雄：微細な凹凸を有する表面の摩擦力と引き離し力の測定，日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集，1996-5 (1996).
- [4] 藤澤悟，安藤泰久，榎本祐嗣：マイクロスケール摩擦と表面間力，トライボロジスト，44-6, 409-413 (1999).
- [5] 金鍾得，三宅正二郎，渡部修一：ホウ素系薄膜およびシリコンの摩擦による隆起現象，日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集，1999-5 (1999).
- [6] R. D. Mindlin : J. Appl. Mech, 16-3, 259-268 (1949).