タッピングスタイルスにおける計測力の一推定法*

高橋 健** 早瀬 仁則*** 初澤 毅***

A Measurement Force Estimation Method of Tapping Stylus

Ken TAKAHASHI, Masanori HAYASE and Takeshi HATSUZAWA

A new technique to estimate the measurement force caused by a topographic measurement system using a microfork (tapping stylus) is proposed. Although Hertz model has been used to estimate the repulsive force of AC-mode AFM probes, precise constants such as Young's moduli and radius of the probe tip are required to calculate the force. In this paper, the microfork is modeled by a spring-dumper system with an effective mass. Samples are also modeled by a passive spring-dumper system. Then experimental results of the near field characteristics and the motion of the microfork obtained by a numerical simulation are compared. The spring constant and the dumping coefficient obtained from the simulations are fitted to those of experimental results. Then the tapping force can be estimated by numerical simulations using the two parameters.

Key words: tapping stylus, tapping force, near field characteristics, numerical simulation

1. 緒 言

近年の微小機械デバイスのように、微小な構造とある程度の大きさをあわせ持った形状評価には、nm オーダの高い分解能と広い走査範囲、さらに非破壊的な計測が必要とされている。このような背景から、我々の研究グループでは水晶振動子や PVDF フィルムを用いたタッピング式表面形状計測装置¹⁾²⁾、さらにマイクロフォークを用いたタッピングスタイルス³⁾の試作を行ってきた。マイクロフォークを用いたタッピングスタイルスでは、レジストにより製作した高さ 0.35 μm のステップを持つ試料形状の計測を行い、触針式表面形状計測装置（東京精密 サーフコム 480A 計測力 0.2mN）で計測不可能なソフトサンプルの形状計測が可能であることを示した。しかし、計測により試料はレジストのエッジ部分が破壊されることが確認された。

本論文では、図 1 に示すマイクロフォークを用いたタッピングスタイルスが計測中試料に与える力（タッピング力）の大きさを推定することを目的としている。従来、タッピングモード AFM などのタッピング力の推定には、ヘルツの接触論を用いた推定方法⁴⁾ が用いられてきた。しかし、ヘルツの接触論は静的な接触現象に関する理論であり、数 kHz で探針と試料とが接触を繰り返すタッピング現象においてもこの理論が成立するかどうかの検証はなされていない。またこの理論を用いた場合、力の導出には探針や試料に関する詳しい物理量や形状パラメータも必要となり、nm オーダの領域でこれらの値が一定であるとは限らない。

本論文ではヘルツの接触論を用いずにタッピング力を推定することを目的とする。はじめに、タッピング力の推定原理について述べ、次にマイクロフォークの近接特性曲線を求める実験を行う。さらに試料をばね、ダンパから構成される受動系として仮定し、実験から得られたデータとマイクロフォークの近接特性に関

する数値計算を組合せることによって、測定試料表面のばね定数と減衰係数を求める。最後に、得られたばね定数と弾性係数を用いて、タッピング力の大きさの推定を行っている。

2. 物 理 モ デ ル

2.1 原 理

振動状態のマイクロフォークに対し試料を徐々に近づけると、マイクロフォークの脚先端に固定された探針と試料が機械的に干渉するため、マイクロフォークの振幅は小さくなる。ここで、試料の送り量に対する振幅の変化を近接特性と定義する。近接特性は試料の硬さなど、試料表面付近の物性によって異なるため、近接特性を計測すれば試料表面近傍の物性を得られると考えられる。

まずマイクロフォークのタッピング現象を数値計算によってシミュレートする。このとき、フォーク自身の形状として計算するには非常に長い時間を要するため、マイクロフォークを片持ち

Fig. 1. A sketch of the piezo-driven microfork

* 原稿受付 平成 12 年 7 月 21 日

** 学生会員 東京工業大学大学院（横浜市緑区長津田町 4259）

*** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所

Fig. 2 A numerical simulation model of the microfork and the sample

はりに置き換え、さらにこの片持ちはりを図2のようなばね定数 k_f 、有効質量 m_f および減衰係数 c_f をもったばね-マス-ダンパ振動系によってモデル化する。さらに、試料表面付近のモデル化としてばね k_s 、ダンパ c_s を並列に配置した受動系に置き換え、マイクロフォークの近接特性に対するシミュレーションを行う。マイクロフォークの近接特性は k_s と c_s により決定されると考えられるが、このモデルを用いることにより k_s と c_s がマイクロフォークの近接特性に与える影響についての具体的な考察を行うことができる。

試料形状計測中のタッピング力を推定するためには、実際の試料の k_s と c_s を求める必要がある。そこで、様々な試料に対して実験的に近接特性を計測し、得られた近接特性を再現できる k_s と c_s をシミュレーション結果から推定することにより、タッピング力の大きさを推定している。

2.2 運動方程式

ばね-マス-ダンパ振動系に置き換えられたマイクロフォークの振動を表す方程式は次のようになる⁵⁾⁶⁾。

$$x''(t) + 2\gamma\omega_0 x'(t) + \omega_0^2 x(t) = x_{st}\omega_0^2 \sin(\omega t) + F_s(t) \quad (1)$$

ただし、 x_{st} は物体に力 F_0 が静的に作用したときの x の値、 $F_s(t)$ は試料から受ける力である。

$$x_{st} = \frac{F_0}{k_f} = \frac{A_0}{Q} \quad (2)$$

$$2\gamma = \frac{1}{Q} = \frac{c_f}{\sqrt{m_f k_f}} \quad (3)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_f}{m_f}} \quad (4)$$

ここで A_0 は初期振幅、 Q はマイクロフォークの Q 値である。マイクロフォークのヤング率を E 、断面二次モーメントを I 、幅、厚さ、長さおよび密度を b 、 h 、 l 、 ρ とすると、

$$\omega_0 = \left(\frac{\lambda}{l}\right) \sqrt{\frac{EI}{\rho b h}} \quad (5)$$

が成立する。 λ は片持ちはりの1次の振動であることから、

$$\lambda = 1.8751 \quad (6)$$

である。

タッピング力 F_{tap} の推定を行うとき、マイクロフォーク先端のタングステン探針は材料に比べて十分硬く、剛体と仮定する。このことは、3.2節で示すように、近接特性実験においてセラミッ

Fig. 3 A schematic construction of the experimental setup

Table 1 Characteristics of the microfork obtained from experimental results

Width / Thickness / Length	1.8 / 0.65 / 12.9 mm
Density	$8.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Young's modulus	$1.8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Resonant frequency	2965 Hz
Q factor	2000

クのように弾性に乏しい試料を安定してたたけなかったことから妥当であると考えられる。このような仮定の下では、式(1)中の $F_s(t)$ は次のように与えられる。

$$F_s(t) = \begin{cases} -k_s\{x(t) - (-A_0)\} - c_s x(t) & x < -A_0 \\ 0 & x \geq -A_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(2)、(3)、(5)、(6)、(7)を式(1)に代入すれば、タッピング現象を含めた運動方程式が得られる。

3. 近接特性曲線

3.1 実験

近接特性は図3に示すように、パーソナルコンピュータによって送り速度を制御したピエゾアクチュエータを用いて、振動状態のマイクロフォークを固定された試料に対して徐々に近づけることによって得られる。マイクロフォークの先端部分には、タングステンの電解研磨⁷⁾によって製作した探針を取り付けており、探針の先端半径は約50nmである。探針を取り付けた状態での振動特性から計算されたマイクロフォークの諸元を表1に示す。 Q 値は加振周波数に対するマイクロフォークの振動振幅の大きさから得られた値とし、密度とヤング率はカタログ公称値である。マイクロフォークの送り速度 v_f は $0.02 \mu\text{m/s}$ とした。ピエゾアクチュエータはひずみゲージを備えており線形性が補償されている。試料として天然ゴム、エポキシ樹脂、ジュラルミンおよびセラミックを用いた。

本実験は、タッピングによるマイクロフォークの振幅変化を計測することを目的としている。そこで、まずドップラー振動計(小野測器 LV-1100)を用いてマイクロフォークの先端付近の振幅と、検出用圧電素子から出力される電圧の関係を実験的に求めた。近接特性実験では圧電素子の出力信号を計測して振動振幅に変換している。計測した電圧信号は、ロックインアンプ、16bit A/Dボードを介して、アクチュエータ制御用のパーソナルコンピュータによってサンプリング(サンプリング周波数200Hz)される。近接特性実験は、各試料に対して5回ずつ行い、各測定点は水平方向に約 $1 \mu\text{m}$ 離れた。マイクロフォークが試料から十分離れているときの振動振幅(初期振幅 A_0)は約 $0.5 \mu\text{m}$ 、

Fig. 4. Near field characteristics of the microfork

Fig. 5. Parameter definition of d_s and α

0.6 μ m, 0.7 μ m, 0.8 μ m の 4 通りを選び、近接特性曲線を実験的に求めた。

3.2 実験結果

試料をセラミックとしたとき、マイクロフォークは試料上を安定してタッピングすることはできず、フォークがはねるような挙動を示したために、近接特性を計測することはできなかった。セラミックを除く 3 種類の試料に対する近接特性実験の結果の例を図 4 に示す。このように試料が柔らかくなるに従い、マイクロフォークの振動振幅は減少しにくくなることが確認された。この実験結果を基に、タッピングによりマイクロフォークの振動振幅が初期振幅 A_0 の 90% になったときの近接特性曲線の傾き α と押し込み深さ d_s (図 5 参照) を求めた。この振幅は参考文献 3) において、表面形状計測時の動作点を初期振幅の 90% としたことに由来する。図中の直線 A は、マイクロフォークが試料に接触した点を実験結果から読みとり、その点を通る傾き 1 の直線である。すなわち、直線 A はステージの移動を示している。従って、点 B は探針と試料が接触し始めた点のステージ位置、点 C はタッピング振幅が初期振幅の 90% になったときのステージ位置を表している。図中の距離 z は、振幅が 90% になるまでのステージ移動量を示している。押し込み深さ d_s は、振幅が 90% に

Fig. 6. Inclination dependence on the amplitude

Fig. 7. Depth dependence on the amplitude

Table 2. Experimental results of the near field characteristics

Sample	Amplitude m	α	d_s m	z m
Rubber	5.04×10^{-7}	0.344	2.05×10^{-7}	2.55×10^{-7}
	5.92×10^{-7}	0.343	2.33×10^{-7}	2.92×10^{-7}
	6.99×10^{-7}	0.339	2.77×10^{-7}	3.47×10^{-7}
	7.95×10^{-7}	0.337	3.38×10^{-7}	4.07×10^{-7}
Epoxy	5.06×10^{-7}	0.706	7.10×10^{-8}	1.22×10^{-7}
	5.96×10^{-7}	0.696	8.08×10^{-8}	1.40×10^{-7}
	7.04×10^{-7}	0.719	1.02×10^{-7}	1.73×10^{-7}
	8.01×10^{-7}	0.708	1.13×10^{-7}	1.93×10^{-7}
Duralumin	4.91×10^{-7}	0.801	2.36×10^{-8}	7.27×10^{-8}
	6.01×10^{-7}	0.817	2.55×10^{-8}	8.55×10^{-8}
	7.03×10^{-7}	0.780	2.43×10^{-8}	9.47×10^{-8}
	8.01×10^{-7}	0.808	2.59×10^{-8}	1.06×10^{-7}

なった時のステージ位置と特性曲線の位置との差として求めた。各試料、各振幅に対する実験結果 α および d_s を図 6 および図 7 に、平均値を表 2 に示す。傾き α は、振幅がタッピングにより初期振幅の 90% になった時のステージ位置に対し、 $\pm 1 \times 10^{-8}$ m の範囲の実験データを最小二乗法により直線化して求めている。この実験結果から、各試料とも振幅による傾き α の変化は小さ

Fig. 8. Simulation results for rubber sample

く、押し込み深さ d_s は初期振幅 A_0 に応じて変化する傾向があることがわかる。

4. シミュレーション

4.1 近接特性に対するシミュレーション

各試料に対する近接特性実験時の初期振幅 A_0 を式 (1) に与え、タッピング現象のシミュレーションを行った。運動方程式中の加振周波数 ω は ω_0 に等しいとし、運動方程式 (1) はルンゲクッタフェルベルク公式⁸⁾を用いて近似解を求めた。ばね定数 k_s と減衰係数 c_s は、天然ゴム、エポキシ樹脂およびジュラルミンの近接特性実験での初期振幅 A_0 に対し、

$$k_s = 1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 2.0^7 \text{ N/m} \quad (8)$$

の範囲で、

$$c_s = \begin{cases} 0, 1, 3, 5, 7 \text{ Ns/m} & (\text{天然ゴム}) \\ 0, 5, 10, 15, 20 \text{ Ns/m} & (\text{エポキシ樹脂}) \\ 0, 50, 100, 150, 200 \text{ Ns/m} & (\text{ジュラルミン}) \end{cases} \quad (9)$$

を与えた。

各試料に対するシミュレーション結果を図 5 のような送り量と振幅の関係を示す図にまとめ、表 2 に示す送り量 z における α と d_s をプロットした結果の一例を図 8～図 10 に示す。図中の点線は実験値を示している。この実験から k_s が大きくなるにつれて押し込み深さが小さくなり、近接特性曲線の傾きは大きくなる (1 に近づく) ことがわかる。また、 c_s も大きくなるにつれて押し込み深さが小さくなり、近接特性曲線の傾きは大きくなる (1 に近づく) ことがわかる。さらに、 k_s が小さくなると、減衰の影響が大きくなる (1 に近づく) ことがわかる。つまり、タッピングによる計測において、試料が柔らかくなればなるほど試料の減衰の効果が大きくなり、タッピング力の推定において、減衰を無視できなくなることを示している。

4.2 k_s と c_s の同定

図 8～図 10 中において、シミュレーションから得られた曲線と実験値との交点での (k_s, c_s) は、押し込み深さ d_s または傾き α に対して、シミュレーションと実験値とを等しくすることができる組合せである。この組合せは、押し込み深さと傾きのグラフそれぞれから得られるが、いずれの実験値も 1 つの近接特性実

Fig. 9. Simulation results for epoxy sample

Fig. 10. Simulation results for duralumin sample

験結果から得られたものであるため、 (k_s, c_s) の組合せは各試料、各振幅に対して 1 パターンのみ存在する。すなわち試料表面のばね定数、減衰係数 (k_{s0}, c_{s0}) は、押し込み深さから得られる (k_s, c_s) と傾きから得られる (k_s, c_s) の両方を同時に満たしていなければならない。従って、図 11～図 13 のように、横軸を減衰係数、縦軸をばね定数とするグラフに、押し込み深さおよび傾きのグラフから得られた (k_s, c_s) の組合せをプロットしたとき、求める (k_{s0}, c_{s0}) は両曲線を同時に満たす点、すなわち 2 曲線の交点となる。図中の各点は、それぞれ図 8～図 10 の k_s - d_s 曲線と実験値との交点 (▲) および k_s - α 曲線と実験値との交点 (■) から得られた点である。曲線は各点に対し、二次曲線をフィットしている。表 3 には、各振幅に対する k_s - c_s 曲線の交点から得られた天然ゴム、エポキシ樹脂のばね定数と減衰係数をまとめたものを示している。このように、天然ゴムやエポキシのように柔らかい試料に対して試料のばね定数と減衰係数を求めることができた。初期振幅が異なると押し込み深さや傾きが異なるが、それにもかかわらずこれらの定数が変化しないことから、試料表面を線形なばねと減衰で置き換える数学モデルは妥当であると考えられる。

Fig. 11 c_s - k_s dependence on rubber sample Fig. 12 c_s - k_s dependence on epoxy sample Fig. 13 c_s - k_s dependence on duralumin sample

ジュラルミンの場合、初期振幅が大きくなったとき、 k_s - c_s 曲線で交点を求めることができなかった。また、初期振幅が小さい場合でも、他の2つの試料とは異なる傾向を見せている。これは、ジュラルミンでは表2に示すように、押し込み深さが20nm程度と非常小さく、探針の軸方向への変形が無視できないことや、マイクロフォークの先端に大きな力が作用するために振動モードが変化し、ばね-マス-ダンパ振動系で近似した数値解析モデルが成立しなくなっていることなどが考えられる。

4.3 タッピング力の導出

このようにして得られた (k_{s0} , c_{s0}) を式(7)に代入して、式

Sample	Amplitude m	k_{s0} N/m	c_{s0} Ns/m
Rubber	5.04×10^{-7}	3.13×10^5	3.74
	5.92×10^{-7}	3.05×10^5	4.21
	6.99×10^{-7}	2.96×10^5	4.21
	7.95×10^{-7}	3.02×10^5	3.66
Epoxy	5.06×10^{-7}	2.27×10^6	2.90
	5.96×10^{-7}	2.23×10^6	6.53
	7.04×10^{-7}	2.17×10^6	2.56
	8.01×10^{-7}	2.28×10^6	1.61
Duralumin	4.91×10^{-7}	4.64×10^6	1.28×10^5
	6.01×10^{-7}	5.15×10^6	1.54×10^5
	7.03×10^{-7}	—	—
	8.01×10^{-7}	—	—

Fig. 14 Tip amplitude of the microfork and tapping force for rubber

Fig. 15 Tip amplitude of the microfork and tapping force for epoxy

(1) からマイクロフォークの近接特性をシミュレートした。また、タッピング力 F_{tap} の最大値 F_{max} は押し込み深を d_s を用いて、

$$F_{tap} = k_{s0} \times d_s \quad (10)$$

として求めた。天然ゴムとエポキシ樹脂に対するシミュレーション結果を図14と図15に示す。いずれも初期振幅 A_0 が $0.7 \mu\text{m}$

Table 4 Maximum and mean values of the tapping force

Sample	Amplitude m	F_{max} N	Mean value N
Rubber	5.04×10^{-7}	6.47×10^{-2}	1.36×10^{-2}
	5.92×10^{-7}	7.19×10^{-2}	1.49×10^{-2}
	6.99×10^{-7}	8.31×10^{-2}	1.73×10^{-2}
	7.95×10^{-7}	1.00×10^{-1}	2.13×10^{-2}
Epoxy	5.06×10^{-7}	1.60×10^{-1}	1.92×10^{-2}
	5.96×10^{-7}	1.79×10^{-1}	2.12×10^{-2}
	7.04×10^{-7}	2.20×10^{-1}	2.70×10^{-2}
	8.01×10^{-7}	2.56×10^{-1}	3.10×10^{-2}

で、タッピングによってその90%になったときの振動状態とタッピング力を示している。図中の矢印は試料表面の位置を示している。また、表4には各試料、各初期振幅に対するタッピング力のピーク値および平均力 ($= \frac{1}{T} \int_0^T F_{tap} dt$) を示している。

図14と図15のようにばね定数の大きいエポキシ樹脂の方が探針と試料との接触時間が短くなることと、ばね定数の小さい天然ゴムの試料は相対的に減衰の効果が大きくなるため、2.7倍以上 (例 $2.20 \times 10^{-1} / 8.31 \times 10^{-2} = 2.65$) の開きがあったタッピング力のピーク値に対し、平均力で比較をしたときにはその差は約1.6倍 (例 $2.70 \times 10^{-2} / 1.73 \times 10^{-2} = 1.56$) にまで縮小されている。

探針が接触状態を保って表面形状計測を行う従来の触針式表面形状計測装置では、計測力が数百 μN であるのに対して、タッピングスタイラスでは平均力であっても数十 mN に達し、触針式表面形状計測装置の計測力の100倍以上となることが本研究により示唆された。タッピングスタイラスは、計測中試料に大きな力を与えているにもかかわらず、触針式表面計測装置よりも試料のダメージが小さい。これは、試料をタッピングすることによりひっかき力を小さく抑さえ、試料へのダメージを軽減しているためと考えられ、タッピングがソフトサンプルなどの形状計測に有用な計測手法であることを示している。

5. ま と め

本論文では、機械的試料表面の形状計測を行うために試作した

タッピングスタイラスが、計測中に試料に与えている力の大きさ (タッピング力) を推定するための手法を提案した。タッピング力の推定のために、まず振動しているマイクロフォークが徐々に試料表面に近づきタッピングを行うときの、振幅の変化である近接特性を計測し、試料により特性が異なることを明らかにした。次に、マイクロフォークを片持ちばりに置き換え、さらにばね、マスおよび減衰器からなる振動系に置き換え、マイクロフォークのタッピング現象のシミュレーションを行った。試料を、ばねと減衰器とを並列に配置した受動モデルに置き換え、シミュレーションにおいてばね定数、減衰係数を変化させることにより、実験結果から得られた近接特性とシミュレーションから得られた近接特性とが一致する試料のばね定数と減衰係数を求めた。このようにして得られた値を基に数値計算することによってタッピング力を推定し、その最大値は数100 mN に達することを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 初澤 毅, 入江礼子, 小池関也, 丸山一男: 時計用水晶振動子を用いた表面形状計測用タッピングスタイラス, 計測自動制御学会論文集, **34**, 7 (1997) 714.
- 2) 初澤 毅, 綾部和明, 高橋 健, 早瀬仁則: PVDFのバイモルフ構造を用いたタッピングスタイラス, 計測自動制御学会論文集, **35**, 9 (1999) 1141.
- 3) 高橋 健, 初澤 毅: マイクロフォークを用いたタッピングスタイラス, 精密工学会誌, **65**, 12 (1999) 1751.
- 4) J. Chen, R. K. Workman, D. Sarid and R. Hoper: Numerical Simulations of a Scanning Force Microscope with a Large-amplitude Vibration Cantilever, Nanotechnology, **5**, (1994) 199.
- 5) A. Kuhle, A. H. Sorensen and J. Bohr: Role of Attractive Forces in Tapping Tip Force Microscopy, J. Appl. Physics, **81**, 10 (1977) 6562.
- 6) 近藤恭平: 工学基礎 振動論, 培風館, (1993) 12.
- 7) 高橋 健, 早瀬仁則, 初澤 毅: 電解研磨によるタングステン探針製作における再現性向上, 電気学会論文誌 E, **120**, E4 (2000) 156.
- 8) 渡部 力, 名取 亮, 小国 力: Fortran77による数値計算ソフトウェア, 丸善, (1993) 167.