表面形状測定用タッピングスタイラスの研究

正員 初澤 毅 (東工大精研)
 学生員 高橋 健 (東工大大学院 総理工)

A Study on Tapping Styluses for Surface Profilometry

Takeshi Hatsuzawa, Member (P & I Lab, Tokyo Inst. of Tech.), Ken Takahashi, Student Member
 (Graduate School at Nagatsuta, Tokyo Inst. of Tech.)

New sensors for surface profilometry - tapping styluses, have been developed. During measurements, they tap surface to reduce scratching force of stylus and enable non-destructive measurements like AFMs. Micro-vibrators such as a quartz resonator, a micro-fork and a PVDF bimorph are used for the tapping and force sensing. This paper describes the principle of the tapping stylus, measurement characteristics of the three styluses, measurement results and features of the tapping styluses.

キーワード：tapping stylus, AFM, surface profilometry, quartz fork, micro-fork, PVDF bimorph

1. はじめに

表面形状の精密測定を行うツールとしては、触針式表面粗さ計、光学式表面形状測定器、原子間力顕微鏡 (AFM) など様々の装置が、目的とする分解能、走査範囲、測定対象物などに応じて使い分けられている。

触針式表面粗さ計は、触針 (スタイラス) を使用する最も素朴かつ信頼性の高い測定器として用いられ、機械加工面などの数 nm 以上の凹凸を数十 mm の範囲で測定可能である。しかし、スタイラスに数 mN の測定力が加わるため、材料にひっかき傷を与える場合が多く、破壊的な測定手法といえる。触針の接触力を低減する試みとして、水晶振動子を測定面に近づけここから放射される音場を用いる走査型近接場音響顕微鏡が開発されているが⁽¹⁾、音場検出の分解能が十分でなく、横方向の分解能が光学顕微鏡程度に留まっている。

共焦点顕微鏡光学系などを応用した光学式表面形状測定器は、非接触測定が可能であり、垂直方向に数十 nm の分解能をもっている。しかし、水平方向については対物レンズの焦点位置のエアリーディスク径により制限を受け、サブ μm のスポット領域の平均的な高さ情報となる。さらに、測定物に急激な段差や反射率、透過率の変化があると、測定自身が困難になるなどの問題もある。

AFM は、測定力が nN 以下と極めて小さいため非破壊測定が実現できるが、得られる情報が単原子の力学的応答であるため、機械的な表面を問題とする場合、情報の解釈についての注意が必要である。すなわち、機械部品などの工学的な意味での表面は、接合面やすべり面など他の面との

接触による微小変形を前提とした情報が重要であり、AFM で得られるような無荷重に近い表面原子レベルの凹凸ではなく、接触点の周辺や下層を含めた数千レベルの原子集団の力学的な応答により表面を定義したほうが、より実際の使用状況に近い評価を与えると考えられるからである。

筆者らのグループはこのような背景に対し、粗さ計の信頼性と簡便性を持ち、測定力の小さなスタイラスとして使用可能なタッピングスタイラスについて、研究を進めてきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。このスタイラスは図1に示すように、1) 探針、2) 梁、3) 振動子、4) 振動センサの4つの基本要素から構成され、タッピングモード AFM のように表面を周期的にたたきながら走査することにより、スタイラスの接触力を低減するとともに、比較的アスペクト比の大きな試料も測定可能であるという特長を持つ。本論文では、はじめにタッピ

図1 タッピングスタイラスの基本要素
 Fig. 1. Elements of the tapping stylus

ングスタイラスの触針圧力について考察を行い、次に、各種スタイラスの構成と特長を示すとともに、測定系と測定結果についても示し、本スタイラスの表面形状測定における有用性を示す。

2. 触針圧の推定と横方向分解能

タッピングスタイラスは、探針と表面を周期的に接触させ(タッピング)、反発力が一定になるようにスタイラス高さを制御することにより、ひっかき力を低減するとともに、振動振幅の範囲内で急峻な凹凸にも十分追従することを目的とする。この際、梁振動の下死点において最大接触力が働くが、これを測定試料の弾性範囲内で一定にとどめながら試料上を走査すれば、一定の硬さを持つ表面の形状を求めることが出来る。そこで、以下では探針の接触力と表面の力学的作用について考察する。

はじめに、探針を用いた接触式表面形状計測の究極の原理は、AFMにおける探針先端の原子1個と無限半平面中の原子の相互作用により説明される。すなわち、先端の原子1個から距離 r だけ離れた試料中の原子との2点間に働く力は、Lennard-Jones型ポテンシャル $P(r)$

$$P(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \dots\dots\dots (1)$$

を用いて計算することが出来る⁽⁵⁾⁽⁸⁾。ここで、 σ は平衡距離、 ϵ は平衡距離における最小エネルギーであり、前半の項は斥力、後半はファンデルワールスを表している。(1)式を無限半平面について積分すれば先端原子の無限半平面に対するポテンシャルが計算でき、これを高さ方向に微分することにより距離と力の特性曲線、いわゆるフォースカーブを求めることが出来る⁽¹¹⁾。しかし、タッピングスタイラスでは、探針先端が原子数十から数千個分あるため、上記積分が複雑になるうえ、接触力による格子の弾性変形を考慮しながらポテンシャルを求めなければならない⁽⁵⁾。また、上記解析は真空中での清浄表面等の場合に適用できるモデルであり、本研究のような空気中での機械加工面に対しては、表面吸着層の問題⁽⁶⁾などを考慮する必要がある。さらに、探針先端の凹凸によるマルチチップ現象⁽⁶⁾なども考えあわせると、本モデルの適用は極めて難しいと考えられる。

そこでより簡便で大域的なモデルとして、ヘルツの弾性理論による探針と表面の変形状態の解析が用いられており⁽⁷⁾、ここでもタッピングスタイラスの接触力のおおよその見積もりを行うためこのモデルを用いる。探針と表面が図2に示すように弾性的に変形する場合、接触円半径 a 、圧縮による接近量 δ は以下のように与えられる⁽⁹⁾。

$$a = \left\{ \frac{3}{4} RW \left(\frac{1-\nu_p^2}{E_p} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \right) \right\}^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = \left(\frac{9}{16R} \right)^{\frac{1}{3}} \left\{ \left(\frac{1-\nu_p^2}{E_p} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \right) W \right\}^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (3)$$

図2 接触による弾性変形
Fig. 2. Elastic deformation by the contact

図3 探針先端半径と各種パラメータの関係
(a) 接触半径 a , (b) 圧縮による接近量 δ ,
(c) 原子1個あたりにかかる力平均 F_a
Fig. 3. Parameter dependance on probe radius R.
(a) Contact radius a , (b) compressive deformation δ
and (c) average force per atom F_a

ここで、 W は探針の接触力、 E_p は探針のヤング率、 ν_p は探針のポアソン比、 E_s は測定面のヤング率、 ν_s は測定面のポアソン比である。また、単位表面積あたりの原子個数を N_s として、接触力 W により原子1個あたりに加わる平均的な力 F_a を求めると、

$$F_a = \frac{W}{\pi a^2 N_s} \dots\dots\dots (4)$$

により計算される。

図3は、タングステン製の探針 ($E_p = 4.11 \times 10^{11} \text{Pa}$, $\nu_p = 0.28$) をシリコン単結晶の (111) 面 ($E_s = 1.9 \times 10^{11} \text{Pa}$, $\nu_s = 0.46$, $N_s = 7.92 \times 10^{18} \text{個}/\text{m}^2$ ⁽¹⁰⁾) に対して、接触力 $W=10^{-5} \text{N}$ ($\approx 1 \text{mgf}$), 10^{-6}N , 10^{-7}N で圧接した場合の前記3式の計算例を示す。(a)は接触円の半径であるが、接触力と探針径の広い範囲で 17nm 以下の半径に収まり、このとき (b) の接近量も 8nm 以下であることがわかる。さらに (c) においてプローブ径は $50 \mu\text{m}$ 程度では、原子1個あたりの平均力は 2.5nN 以下に収まっている。これは、AFMにおいて原子押し込みが生じる単原子荷重限界の概略値 1nN とほぼオーダ的に等しい値であり ⁽¹¹⁾、この領域では塑性変形が生じない可能性を示唆している。従って、探針先端半径が数十 nm で測定力が数十 nN 以内であれば、シリコン等の硬い物質については非破壊的な表面測定が可能であると考えられる。また柔らかい物質についても、先端径を大きくし接触力を小さくおさえることにより非破壊測定が可能であると考えられる。

本スタイラスの横方向の分解能については、探針の反発力が接触円内の平均になっているため、 $2a$ と同等以下であると考えられるが、よりマクロ的には探針形状と表面形状の影響を受ける ⁽¹²⁾。また、タッピングによる間欠的なデータサンプリングにより表面形状の高周波域の空間周波数成分が欠落する恐れがあるが、タッピングスタイラスの振動数 f_t は数 kHz 以上であるため、表面形状の周波数分布に対して十分な帯域であると考えられる。すなわち、横方向走査速度 V_s でタッピングスタイラスを走査したときのナイキスト空間周波数 F_n は、

$$F_n = f_t / (2V_s) \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。これは通常、数千/ μm 以上の値であり、原子レベルの凹凸分布が十分にサンプリング可能な帯域である。

3. 各種タッピングスタイラスの構成と特性

これまでに原理を示してきたタッピングスタイラスを、

- 1) 時計用音叉型水晶振動子
- 2) 電子回路用マイクロフォーク
- 3) PVDF(ポリフッ化ビニリデン) バイモルフ構造

を用いて実現した。以下、個別に構成と特性を示す。

〈3・1〉 時計用水晶振動子 時計用の水晶振動子は、図4に示すような音叉型をしており、 $32.768 (=2^{15}) \text{kHz}$ で発振し、先端は約 $1 \mu\text{m}$ の振幅で振動する。C-MOS 回路に

図4 時計用音叉型水晶振動子
Fig. 4. A quartz fork resonator for watches

図5 水晶振動子を用いたタッピングスタイラスの近接特性

Fig. 5. An approaching characteristics of the quartz tapping stylus

図6 電子回路用マイクロフォーク
Fig. 6. A micro-fork for electrical oscillation

図7 先端に取り付けたタングステン探針
Fig. 7. A tungsten probe fixed at a beam end

よりドライブすると、先端のタッピング状態により発振電圧高さが変化し、図5に示すような近接特性が得られるので、これを高さ制御系のフィードバック信号として用いる。1節で示した、梁、振動子、振動センサが一体になった構造で、一方の脚先端に市販のAFM用探針を接着することにより、全体をタッピングスタイラスとして構成している。共振時の Q が50000と大きいのでセンサとして高い感度を得られ、図5の特性曲線の肩の部分の動作点に取った場合、 $5\text{V}/\mu\text{m}$ 程度のゲインが得られる。しかし、いったん共振からはずれると発振回復に時間がかかり、 50nm 程度の変位に対するステップ応答は 260ms 程度と遅く、トータルの測定時間が増大する原因となっている。タッピング力は数 nN 以下(推定値)と小さく、非破壊的な測定に向いているが、表面電極の剥離等、長期的な使用に関しては課題が残っている。

〈3・2〉 電子回路用マイクロフォーク 電子回路用マイクロフォークは、水晶振動子に代わる低周波発振素子として用いられており、図6に示すように、Fe-Ni-Cr系合金製の音叉と、その側面に貼り付けられた2枚のPZT素子から構成される。このPZTは、振動子あるいはセンサとして可逆的な使用が可能である。マイクロフォーク専用ICを用いて発振させると、水晶振動子の場合と同様の近接特性が得られ、 $0.5\text{V}/\mu\text{m}$ 程度のゲインが得られる。共振周波数 3kHz のとき、先端振幅は約 $3\mu\text{m}$ で、 Q は1000程度と水晶に比べて小さく、 100nm の変位に対するステップ応答の安定時間は 80ms と速くなっている。図7に示すようにマイクロフォークの先端には、直流電界研磨により作製した先端半径が約 50nm のタンゲステン探針⁽¹³⁾を接着剤でモールドしてあり、横方向の空間分解能を高めている。本スタイラスは、振動振幅、梁質量とも大きいので、タッピングスタイラスの中では接触力が大きく、数百 nN 程度と推定される。

〈3・3〉 PVDF バイモルフ構造 前述のタッピングスタイラスは、いずれも音叉構造を用いていたが、 Q が低く(応答が速い⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾)、接触力が小さいスタイラスを実現するため、図8に示すPVDFフィルムのバイモルフ構造を考案した。これはPVDFバイモルフを湾曲させて支持し、中央部に取り付けた探針を上層のPVDFで加振し、タッピング力を下層のPVDFにより検出する構造で、前2者に比較すると各要素が個別に設定できる特長がある。PVDFはエポキシ接着剤を用いて幅 5mm のバイモルフに加工し、アルミ製のフレームに固定している。支点間長さ 20mm に対してバイモルフを 0.5mm たるませることにより探針側に凸形状を実現しており、共振周波数 2.9kHz を得ている。このときの Q は100程度と低いため、 $1.5\mu\text{m}$ のステップ入力に対する応答は 30ms と速い。また、近接特性のゲインとして、最大 $17\text{mV}/\mu\text{m}$ 程度が得られている。接触力はフィルムたるみによりかなり緩和されると考えられ、数十 nN 以下であると推定される。PVDFフィルムの特性として、光や音に対しても感応性を持つため、本スタイラスの使用

図8 PVDF バイモルフによるスタイラス構造

Fig.8. A PVDF bimorph tapping stylus

図9 PVDF タッピングスタイラスの外観

Fig.9. An outlook of the PVDF bimorph stylus

図10 表面形状計測系の構成

Fig.10. Construction of the profilometry system

環境は、静粛で暗いことが望ましい。図9にPVDFタッピングスタイラスの外観を示す。

4. 測定系の構成と測定例

図10は、タッピングスタイラスを用いた表面形状計測系の構成で、走査型プローブ顕微鏡に用いられる系とほとんど同様である。タッピングスタイラスは種類に応じて専用のドライバにより励振されるが、タッピング状態(反発力)が一定になるようにZ軸高さがフィードバック制御される

図 11 回折格子の測定例
(a) 時計用水晶振動子, (b) マイクロフォーク,
(c) PVDF バイモルフの各方式による

Fig. 11. Measurement examples for diffraction gratings (a) by the quartz, (b) by the microfork and (c) by the PVDF bimorph

ことは共通である。タッピング状態の検出にはセンサ出力電圧を用い、

- 1) サンプルホールド回路を用いて振動電圧のピークを検出、
- 2) ロックインアンプを用いて、振動電圧を同期的に検出

の2つの方法を用いている。前者のほうが回路構成が簡単になるが、後者はパラメータの設定自由度が大きいので、汎用性がある。XYZの各軸は、ストレインゲージによる変位

図 12 レジストパターンの測定
(a) 測定結果の3D表示, (b) マイクロフォークによる損傷, (c) 粗さ計による損傷

Fig. 12. A measurement example of resist pattern (a) 3D display of the measurement, (b) damage by the microfork and (c) damage by a stylus profiler

センサを備えた圧電アクチュエータにより駆動され、

- 1) オペアンプを用いたアナログ PI 制御系、
- 2) パソコンによるデジタル PI 制御系

のいずれかにより Z 軸の制御を行っている。コントローラのパラメータは、限界感度法⁽¹⁶⁾を用いながら、実験的に決定している。圧電アクチュエータの送り量は、XY 軸方向には 60 μm、Z 軸方向には 15 μm であり、各軸のストレインゲージの出力を位置情報として用いている。

図 11 にピッチ 1.7 μm の回折格子の空気中での測定例を示す。(a) は水晶振動子+AFM カンチレバー、(b) はマイクロフォーク+タングステン探針、(c) は PVDF バイモルフ+タングステン探針による測定結果である。格子の高さは (a), (b) が 0.19 μm、(c) のみ 0.46 μm のものを用いている。本回折格子はエポキシ樹脂にアルミを蒸着したもので、粗さ計ではパターンが破壊されて計測することが出来ないが、タッピングスタイルスでは各方式とも格子形状

表1 各種タッピングスタイラスの特性一覧
Table 1. Characteristics of the tapping styluses

	Quartz-fork	Micro-fork	PVDF bimorph
Contact force	~1nN	~100nN	~10nN
Step response	260ms/50nm	80ms/100nm	30ms/1.5μm
Resonant Freq.	32.768kHz	3kHz	2.9kHz
Q factor	50000	1000	100
Vertical resolution	~nm	~5nm	~10nm
Measurement speed	321ms/point	141ms/point	52ms/point
Remarks	Disability for long-term use	Large contact force	Sensitive for noise

がとらえられており、非破壊的な表面計測手法として有用であることがわかる。

図12は、マイクロフォークによりフォトレジストを測定した場合のスタイラスによる試料損傷を示すが、(a)の3D表示ではエッジ部分に若干のダレを生じた薄針型のパターンとして測定されていることがわかる。同じ場所を電子顕微鏡で観察した写真が(b)であり、エッジ部分に若干の損傷を生じていることが観察される。しかし(c)に示すように、0.2mNの接触力をもつ粗さ計ではパターンが完全に破壊されるのに比べると、非破壊測定に近い計測が実現されている。

各種タッピングスタイラスの特性については、表1に一覧としてまとめた。接触力と垂直分解能は、実際の測定結果から概略値を推定している。水晶振動子によるスタイラスは、AFMレベルの接触力が実現できるが、測定時間がかかるのと、長期安定性に難点がある。マイクロフォークを用いたスタイラスは、接触力が比較的大きいが、逆にこれを加工に応用できる可能性がある。また、PVDFバイモルフでは接触力が水晶とマイクロフォークの中間レベルであるが、ノイズを拾いやすいため使用環境に注意が必要である。

5. ま と め

非破壊的で高分解能な測定を実現するセンサヘッドとして、タッピングスタイラスを提案し、その構成、特性と測定結果等について示した。スタイラスの物理モデルの完全な提示には至っていないが、工業的な測定への応用において、本スタイラスの有用性を実証した。今後、より現実的なモデルを構築して特性の把握に努めるとともに、高機能なタッピングスタイラスを製作する手法として、微細加工技術による探針、梁、センサ等の一体的な成形に取り組み、性能改善を図っていきたいと考えている。

文 献

- (1) P.Günther, U.C.Fischer and K.Dransfeld: "Scanning Near Field Acoustic Microscopy", Appl.Phys., B-48, 89~92(1989)
- (2) 初澤毅, 入江礼子, 小池関也, 丸山一男:「時計用水晶振動子による表面形状測定用タッピングスタイラス」, 計測自動制御学会論文集, 34, 714~718(1991-7)
- (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, 掲載確定(1999-12)
- (4) 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表面形状測定用タッピングスタイラス」, 計測自動制御学会論文集, 35, 1141~1145(1999-9)
- (5) R.Weisendanger and H.J.Güntherodt(Eds.): "Scanning Tunneling Microscopy II", Springer,118-124(1995)
- (6) Chunli Bai: "Scanning Tunneling Microscopy and its Application", Springer, p.29, p114(1992)
- (7) J.Chen, R.K.Workman, D.Sarid and R.Höper: "Numerical simulations of a scanning force microscope with a large-amplitude vibrating cantilever", Nanotechnology, 5,119~204(1994)
- (8) 木原太郎:「分子間力」, 岩波書店, p.80(1976)
- (9) 吉田善一:「マイクロ加工の物理と応用」, 夢華房, p.111(1998)
- (10) 高橋潔:「物質の構造」, コロナ社, p.130(1983)
- (11) 森田清三:「原子間力顕微鏡のすべて」, 工業調査会, p.37(1995)
- (12) 中村取, 坂野憲幾:「走査プローブ型微細形状計測におけるプローブ先端径の影響の除去」, 計測自動制御学会論文集, 29-9, 1050~1054(1993)
- (13) K.Takahashi, M.Hayase and T.Hatsuzawa, "Optimum Shape Fabrication of Tungsten Probe using DC Electropolishing", Transducer'99 Digest of Technical Papers, 1,552~555(1999)
- (14) 小野崇人, 江刺正喜:「ナノメートル加工の応用(2) ナノメカニクスへの応用」, 応用物理学会誌, 67-12, p.1396(1998)
- (15) 志村正道:「電子回路I リニア編」, 昭晃堂, p.112,(1979)
- (16) 茅陽一:「自動制御工学」, 共立出版, p.150(1977)

初澤 毅 (正員) 1958年4月28日生まれ。1983年3月東京工業大学大学院修士課程修了。通商産業省工業技術院計量研究所を経て、1995年4月より東京工業大学精密工学研究所助教授。表面形状計測、微細加工応用デバイス関連研究に従事。博士(工学)。電気学会、計測自動制御学会、精密工学会、応用物理学会、米国精密工学会などの会員。

高橋 健 (学生会員) 1973年8月17日生まれ。1999年3月東京工業大学大学院修士課程修了。同大学総合理工学研究科博士課程在学中。タッピングスタイラスを用いた表面形状計測関連研究に従事。