走査型力顕微鏡のための三次元駆動 圧電マイクロカンチレバー*

片岡憲一** CHU Jiaru*** 前田龍太郎† 伊藤寿浩†† 須賀唯知††

3-dimensional Piezodriven Microcantilever for Scanning Force Microscope

Kenichi KATAOKA, Jiaru CHU, Ryutaro MAEDA, Toshihiro ITOH and Tadatomo SUGA

A new type piezoelectric microcantilever which can be actuated in three orthogonal directions and can detect its deflection is proposed for the application for scanning force microscopy. A "T-shaped" cantilever with one piezoelectric layer is designed. Calculations show that the cantilever has a scanning area larger than $1 \times 1 \mu\text{m}$ and vertical resolution smaller than 1 nm. The microfabrication process including the deposition of $3\text{-}\mu\text{m}$ -thick PZT film by sol-gel method is developed, and a test device is successfully fabricated.

Key words: scanning force microscopy, self-actuation, 3-dimensional driving, self-detection, piezoelectric microcantilever, PZT thin film, MEMS, micromachine.

1. 緒 言

走査型力顕微鏡 (SFM) は、試料表面とプローブに働く力を検出して、試料の表面形状を測定するため、走査トンネル顕微鏡 (STM) と違って観察対象が制約されず、非常に広い分野で応用されている。特に生体試料の観察が可能であるという点は SFM の大きな利点である。

我々はこれまでに、圧電体を内蔵した SFM のマイクロカンチレバーを開発してきた。圧電カンチレバーは、レバーの変位を電荷に変換でき、また、外部から加えられた電界によってひずみを発生することができる。これによって、自己変位検出および自己駆動が可能である。

自己変位検出機能を持つことによって、外部に検出機構が不要になり、これによって、SFM の小型化、簡素化に成功した¹⁾。また、圧電定数の高い PZT 薄膜を用いて、より高性能な圧電カンチレバーを開発した²⁾。

圧電体を内蔵したカンチレバーの応用としては、液中 SFM³⁾、高真空中 SFM⁴⁾ が開発されている。また、自己変位検出と、 z 方向 (試料表面に垂直な方向) での自己駆動を行って SFM の複数プローブでの同時走査像を得ることに成功している⁵⁾。

また、圧電カンチレバーは、自己駆動、自己変位検出機能を持つことから、マルチプローブへの応用が容易であるという利点がある。マルチプローブは、複数のカンチレバーを並列に用いて走査を行うことにより、SFM の高速化、大面積化に対応する手法で、SFM プローブによる超高密度メモリーの実用化のために有効な手段と考えられているものである。これには、カンチレバーの自己変位検出が不可欠である。

この圧電カンチレバーに横方向の駆動機能を持たせることがで

ければ、SFM に必要なすべての機能、すなわち試料表面の走査と探針-試料間距離の制御、および試料との相互作用によるカンチレバー変位の検出機能を、マイクロデバイスに集積することになる。これを我々は「マイクロ SFM」と呼んでいる。マイクロ SFM は、これまでにない小型でコンパクトな SFM である。光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡に組み込むことが容易になり、簡単に nm スケールの表面観察を行うことが可能になる。また、近年、マイクロマシンの研究の一環として、狭い管内で作業を行うマシンが研究されているが、マイクロ SFM を用いればこのようなマシンに SFM を搭載することが可能になり、例えば細い配管内などで、表面の組織を nm スケールで観察することが可能になる。

マイクロ SFM の最大の問題は水平方向の走査範囲である。SFM では、通常は光学顕微鏡あるいは走査型電子顕微鏡を用いて観察範囲を定め、観察を行っている。これらの顕微鏡との視野の大きさの連続性を保ち、場所を正確に選んで観察を行うためには、SFM スキャナには少なくとも $1\mu\text{m}$ 程度の走査範囲が必要である。

これまでに、Quate らによって、圧電マイクロカンチレバーを用いて 3 次元駆動を実現し、これを STM のスキャナとして利用した例は報告されている⁶⁾。

しかし、Quate らの例では走査範囲は数十 nm であり、SFM の走査範囲としては不十分である。これは、レバーの軸方向 (x 方向) の剛性が y, z 方向にくらべて大きく、 x 方向の最大変位が他の方向に比べて極端に小さいという構造上の問題であった。

この問題を克服するためには、 x 方向剛性を小さくした構造を用いればよい。我々はその一つとして図 2 のような T 型構造のカンチレバーを採用し、レバーの設計製作、動作実験を行った。

本稿では、T 型圧電マイクロカンチレバーの動作解析、特に走査範囲と最小検出変位について述べ、本方式のカンチレバーが SFM として利用可能な特性を持つことを明らかにする。デバイスの製作プロセスおよび製作したデバイスの特性測定についても述べる。

2. カンチレバーの構造と設計

圧電マイクロカンチレバーで 3 次元駆動を得る構造としてこれ

*原稿受付 平成 11 年 10 月 15 日

**学生会員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

***正会員 機械技術研究所 (つくば市並木 1-2)

†機械技術研究所

††正会員 東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区駒場 4-6-1)

Fig. 1 Structure of 3D piezodriven microcantilever. (I-shaped lever with 2 piezoelectric layers)

Fig. 2 Structure of 3D piezodriven microcantilever (T-shaped lever with one piezoelectric layer)

までに、図1に示すようなタイプが提案されている⁶⁾。これは、2つの圧電層を持ったカンチレバーで、それぞれの圧電層の外側の電極がx軸方向に2つに分割されている。これによって、圧電カンチレバーの上下左右の4つの部分に独立の外部電圧をかけることができる。右の2つの部分に同じ電界を印加し、左の二つの電極にこれとは逆方向の電界をかけると、左右のひずみの差により、レバーは左右に曲がる。これによってレバー先端のy変位が起こる。同様に、上の2つの部分と下の2つの部分の圧電体に逆向き電界をかけると、z方向の変位が起こる。x方向の変位は、4つの部分すべてをレバーの軸方向に伸張または収縮させることによって発生する。しかし、このタイプでは、x方向の変位がyおよびz方向の変位に比べて小さく、SFMとして適用できる視野(走査範囲)の大きさを確保することが難しいという問題がある。

これに対して、今回我々が提案するのは、図2に示すような構造である。これは、圧電体と弾性層によって構成されるバイモルフレバーをT字型に組み合わせたものである。中央のレバーをカンチレバー部、左右に延びたレバーをブリッジ部と呼ぶ。カンチレバー部でzおよびy方向の変位を、ブリッジ部でx方向の変位を発生する。x方向の変位がブリッジ部の曲げ変位として得られ

るため、図1のタイプに比べると、特にx方向の変位を大きくできるという特性がある。これによって、SFMに必要な変位検出能力と大きな走査範囲を兼ね備えたマイクロカンチレバーを設計することが可能である。

以下、図1のタイプ(「I型-2層タイプ」と呼ぶ)と、図2のタイプ(「T型-1層タイプ」と呼ぶ)について、それぞれの駆動能力、変位検出能力の計算について述べ、両者を比較することによって、T型-1層タイプの有効性を示す。

2.1 駆動

圧電カンチレバーのy方向の変位は $\delta y = (L_c^2 M_{py}) / (2 K_{fy})$ で表される。ただし、 L_c はカンチレバー (T型カンチレバーの場合はカンチレバー部) の長さ、 K_{fy} 、 M_{py} はそれぞれ横方向の曲げ剛性および圧電体で発生する横方向の曲げモーメントであり、I型-2層タイプ(添字に $-2L$ をつけて示す) および T型-1層タイプ(添字に $-1L$ をつけて示す) の場合、それぞれ、

$$M_{py-2L} = \frac{1}{8} d_{31} Y_p (V_1 + V_3 - V_2 - V_4) w^2 \quad (1)$$

$$K_{fy-2L} = \frac{1}{4} t_m w^3 Y_m + \frac{1}{6} t_p w^3 Y_p \quad (2)$$

$$M_{py-1L} = \frac{1}{8} d_{31} Y_p (V_1 - V_2) w^2 \quad (3)$$

$$K_{fy-1L} = \frac{1}{6} t_m w^3 Y_m + \frac{1}{12} t_p w^3 Y_p + \frac{1}{12} t_e w^3 Y_e \quad (4)$$

のようになる。ただし、 d_{31} は圧電体の圧電ひずみ定数、 V_1 、 V_2 はそれぞれの電極にかかる電圧、 Y_p 、 Y_m 、 Y_e 、 t_p 、 t_m 、 t_e はそれぞれ圧電体、電極、弾性体のヤング率および厚さ、 w はレバーの幅である。ここで、左右の電極間のすきまの幅は無視した。

同様に、z方向の変位はz方向の曲げ剛性 K_{fz} および圧電体で発生する曲げモーメント M_{pz} を用いて $\delta z = (L_c^2 M_{pz}) / (2 K_{fz})$ で与えられる。I型-2層タイプおよびT型-1層タイプの M_{pz} 、 K_{fz} は次式で与えられる。

$$M_{pz-2L} = \frac{1}{4} d_{31} Y_p (V_1 + V_2 - V_3 - V_4) w (t_p + t_m) \quad (5)$$

$$K_{fz-2L} = \frac{2w}{3} \left[Y_m \left(\frac{t_m}{2} \right)^3 + Y_p \left\{ \left(\frac{t_m}{2} + t_p \right)^3 - \left(\frac{t_m}{2} \right)^3 \right\} + Y_m \left\{ \left(\frac{3t_m}{2} + t_p \right)^3 - \left(\frac{t_m}{2} + t_p \right)^3 \right\} \right] \quad (6)$$

$$M_{pz-1L} = \frac{1}{2} d_{31} (V_1 + V_2) w Y_p (t_e + t_m + \frac{t_p}{2} - z_n) \quad (7)$$

$$K_{fz-1L} = \frac{w}{3} \left[Y_e \{ (t_e - z_n)^3 + z_n^3 \} + Y_m \{ (t_e + t_m - z_n)^3 - (t_e - z_n)^3 \} + Y_p \{ (t_e + t_m + t_p - z_n)^3 - (t_e + t_m - z_n)^3 \} + Y_m \{ (t_e + 2t_m + t_p - z_n)^3 - (t_e + t_m + t_p - z_n)^3 \} \right] \quad (8)$$

ここで、 z_n はひずみゼロ面のレバー下面からの距離である。

x変位 δx はI型2層タイプでは、カンチレバーの長手方向の伸縮による変位で、圧電体によるx方向の応力の断面全体での積分値 F_x と、レバーの縦方向の剛性 K_x を用いて、

$$\delta x = \frac{F_x}{K_x} L_c = \frac{d_{31} Y_p (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)}{2(2 Y_p t_p + 3 Y_m t_m)} L_c \quad (9)$$

と表される。

Fig. 3 y deflection of piezoelectric 3D microcantilever

Fig. 4 z deflection of piezoelectric 3D microcantilever

これに対し、T型1層タイプの x 変位はブリッジ部の横方向の曲げ変位である。これは、両端を固定したはりの中央の変位として求めることができる。

$$\delta x = \frac{(a L_b - a^2) M_{px}}{2 K_{fx}} \quad (10)$$

ただし、 M_{px} はブリッジ部の圧電体で発生する横方向の応力のモーメント、 K_{fx} はブリッジ部での横方向の曲げ剛性であり、式(3)、式(4)と同様に求められる。 L_b はブリッジ部の長さ（両端から中心までの距離）である。また、 a はブリッジ部上で電極がレバーを覆っている部分の長さであり、電極のない部分は圧電体による曲げモーメントの発生はないものとする。 δx は $a = L_b/2$ のとき最大になり、その値は $\delta x = M_{px} L_b^2 / (8 K_{fx})$ である。

ブリッジ部の z 変位は、式(10)において、 M_{px} に式(7)、 K_{fx} に式(8)をそれぞれ代入して求められる。ブリッジ部での z 変位を0に保ちながら、 x 方向に変位させるためには、 $V_2 = -V_1$ という条件でカンチレバーへの電圧印加を行う必要がある。

走査型力顕微鏡としての応用を考えると、視野は通常正方形であるので、 x 方向と y 方向の最大変位量は等しいことが望ましい。カンチレバー部とブリッジ部の幅が同じである場合、 $\delta x = \delta y$ とするためには $L_b = 2L_c$ であればよい。以下の計算では、T型カンチレバーのカンチレバー部とブリッジ部の長さの比として、この関係を用いるものとする。

図3および図4に y および z 方向の変位と圧電層の厚さ t_p との関係を示す。 y 変位は L_c^2/w 、 z 変位は L_c^2 で除した値を示す。T型1層タイプについては、弾性層の厚さ t_e の変化による変位の違

Fig. 5 Required lever length for given scanning range of piezoelectric cantilevers.

いも示した。ここで、圧電体をPZT（ヤング率72.5 GPa、圧電ひずみ定数 $d_{31} = 93.5 \text{ pC/N}^7$ ）、電極をPt（ヤング率168 GPa⁸）、弾性体をSiO₂（ヤング率73 GPa⁹）とし、電極の厚さは、0.3 μmとした。電極にかけることのできる電圧は、圧電体材料の抗電界によって決まる。ゾルゲル法で作製したPZT薄膜の抗電界は4.3 V/μmであるが、ここでは、最大印加電界を3 V/μmとして計算した。

図3により、 δy を大きくするためには、圧電層の厚み t_p を大きくすればよいことがわかる。また、弾性層の厚み t_e は小さいほど δy は大きくなるが、T型1層タイプの場合、 t_e が小さくなると、圧電層とひずみゼロ面の平均距離（式(7)の右端の（ ）内）が減少するため、 δz が0に近づく。このため、弾性層はある程度の厚さが必要である。これ以降の議論では $t_e = 1.0 \text{ μm}$ に固定して計算を行うものとする。また、幅は70 μmとした。

この結果を用いて、図5には、与えられた走査範囲に対して必要なレバーの長さを、I型2層タイプとT型1層タイプについて示す。ここで、走査範囲とは、顕微鏡としての最大の正方形の視野の一辺の長さとし、 δx と δy のうちの小さい方に等しいとする。 z 方向の変位は、カンチレバーの構造から、 x 、 y 方向に比べて十分大きくなるので、図に示す範囲では設計に制限を加える要因とはならない。T型1層タイプでは、ブリッジ部の長さを調整して $\delta x = \delta y$ としているため、走査範囲は $M_{py} L_c^2 / (2 K_{fy})$ で計算される。また、I型2層タイプでは、本稿で問題としている大きさの範囲では常に δx が δy よりも小さいため、走査範囲は δx に等しく、式(9)によって計算される。

図5より、同じ大きさの走査範囲を得るために必要な長さはT型のほうがI型より小さい。これは、I型の x 変位が L_c に比例するのにに対し、T型では L_c の2乗に比例するため、走査範囲を大きくするほど、T型が有利であることがわかる。また、圧電層の厚さ t_p を大きくすると必要な長さは小さくなる。

同じ変位を得るために必要なレバーの長さが小さいということは、単にデバイスを小型化できるだけでなく、変位検出における特性に対して大きな効果がある。次節ではこの点について述べる。

2.2 変位検出

圧電マイクロカンチレバーを用いた走査型力顕微鏡では、カンチレバーを共振させて用いる動的モードによる測定が一般的である。動的モードは静的モードに比べて試料に与えるダメージが少なく、生体試料などの柔らかいものの観察に適している。また、探針の摩耗も少ない。動的モードには非接触モードと周期的接触モード

Fig. 6 Relation between scanning range and resonance frequency

があるが、非接触モードでは空気中での安定した測定が困難であるため、本研究では周期的接触モードを測定法として用いる。

図6に、走査範囲と共振周波数の関係を示す。これは、図5によって求められたレバー長さをもつモデルについて共振周波数を計算したものである。I型カンチレバーの共振周波数は、はりの曲げ振動の解析式を用い、T型カンチレバーの振動解析は、有限要素法による弾性シェルのモード解析を利用した。

走査範囲を大きくすると、必要な長さが大きくなるため共振周波数は低下するが、この傾向はT型-1層タイプにくらべてI型-2層タイプの方が大きく、 $t_p = 1 \mu\text{m}$ では、走査範囲が $1 \mu\text{m}$ 以上で両者の間に10倍以上の開きが出る。また、特にT型では圧電層の厚さ t_p を大きくすると共振周波数を大きくすることが可能であることがわかる。

次に、検出特性として、 z 方向の解像度について述べる。マイクロカンチレバーの最小検出変位はレバーで発生するノイズによって決まる。熱振動ノイズとジョンソンノイズによって決まる最小検出変位を、それぞれ $\Delta z_{\text{min-th}}$ 、 $\Delta z_{\text{min-jn}}$ とすると、

$$\Delta z_{\text{min-th}} = \sqrt{\frac{4k_B T Q B}{k \omega}} \quad (11)$$

$$\Delta z_{\text{min-jn}} = \sqrt{\frac{4k_B T B}{\omega^2 R S_q^2}} \quad (12)$$

である¹⁰⁾。ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度、 B は測定のパンド幅、 R は圧電層の抵抗値、 k はばね定数である。また、 S_q は、圧電レバーによる出力電荷の単位先端振幅あたりの値である。全体のノイズは $\Delta z_{\text{min}} = \sqrt{\Delta z_{\text{min-th}}^2 + \Delta z_{\text{min-jn}}^2}$ で求められる。走査範囲と最小検出変位の関係を図7に示す。ここで、 $Q = 100$ 、 $T = 300 \text{ K}$ 、PZTの抵抗率 $1 \times 10^4 \Omega\text{m}$ ¹⁰⁾とした。

最小検出変位は一般的にレバーを長くすることによって大きくなるため、走査範囲を大きくすると最小検出変位は大きくなる。 $t_p = 1 \mu\text{m}$ では、走査範囲が $0.3 \mu\text{m}$ 以上でT型の方が最小検出変位が小さくなる。また、 t_p を大きくすると最小検出変位を小さくすることができ、 $t_p = 5 \mu\text{m}$ では $1 \mu\text{m}$ のときにくらべて最小検出変位が1/20程度になる。

図6、図7が示すように、同じ走査範囲を得るために必要な長さを持つカンチレバーと比較するとT型-1層カンチレバーがI型-2層カンチレバーよりも共振周波数を大きくでき、また、変位検出の解像度を向上することができる。また、圧電層の厚さを大きくすることで、これらの特性をさらに良くすることが可能である。

T型カンチレバーによって、実際にSFMとして使用できる特性を持ったデバイスを設計することができる。たとえば、カンチ

Fig. 7 Relation between scanning range and minimum detectable displacement

Fig. 8 Fabrication process for T-shaped cantilever including deposition of 3-μm-thick PZT film by sol-gel method

レバー部分長さが $500 \mu\text{m}$ 、ブリッジ部分の長さが $1000 \mu\text{m}$ のT型-1層タイプカンチレバーは、走査範囲最大 $1.2 \mu\text{m}$ 平方、共振周波数 3.6 kHz 、最小検出変位が 0.65 nm である。これによって、T型-1層構造が3次元自己駆動、自己変位検出が可能なSFM用マイクロカンチレバーに有効であることが示された。

3. 製作プロセス

図8に圧電3次元駆動マイクロカンチレバーの製作プロセスを示す。圧電層としてPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)を用い、これをゾル-ゲル法²⁾によって作製する。上述のように、マイクロSFMには厚い圧電層が望ましいため、ゾル-ゲルプロセスの塗布-焼成の繰返し回数を増やして $3 \mu\text{m}$ の厚さをもつPZT薄膜を作成した。製作プロセスは以下の通りである。

- (1) 熱酸化によってシリコン基板の表と裏に $1.8 \mu\text{m}$ 厚さの SiO_2 の膜を作製する。
- (2) 裏面の酸化膜をパターニングし、後のKOH溶液によるウエットエッチングのマスクパターンを形成する。

Fig. 9 SEM image of T-shaped microcantilever device

- (3) 下部電極となる Pt/Ti を RF スパッタにより蒸着する。
- (4) ゼル-ゲル法によって PZT の薄膜を作製する。
- (5) 熱蒸着によって、上部電極 Au/Cr の膜を蒸着する。
- (6) ECR によって Au/Cr および PZT 膜をパターニングする。
- (7) ECR によって下部電極 Pt/Ti 膜をパターニングする。
- (8) 保護層として、LPCVD により SiO₂ 膜を作製し、RIE によるエッチングを行う。
- (9) 配線層となる Au/Cr の膜を蒸着し、ECR によってパターニングを行う。
- (10) 表側の SiO₂ をパターニングしてカンチレバーの外郭形状を作成する。
- (11) KOH 水溶液によって裏面から Si を異方性エッチングする。
- (12) RIE によって残りの Si を取り除く。

図 9 に、完成したデバイスの SEM 像を示す。デバイスのチップをワイヤボンディングした後、120℃、10V のもとで分極処理を行った。

4. デバイスの特性

製作したデバイスの共振周波数は 6.45 kHz、Q 値は 60 であった。

図 10(a) は、作製したデバイスを用いて Au 薄膜表面の走査型力顕微鏡像を測定したものである。変位検出はカンチレバーの自己検出によって行い、 z 変位制御および xy 方向の走査は市販の AFM コントローラを用いて行った。図の走査範囲は 2 μm である。次に、カンチレバー部に電圧を印加して x 方向の変位を起こして同様の像を測定したものが図 10(b) である。同図 (a) にくらべて図中矢印で示した白い部分（付着物）が移動しているのがわかる。移動量は 700 nm で、印加した電圧が 9.6 V であるから x 方向の駆動能力は 73 nm/V であることがわかる。同様に、図 10(c) はブリッジ部に電圧を印加して y 方向の変位を起こした状態で SFM 像を測定したものである。 y 方向の移動量は 813 nm、駆動効率 は 83 nm/V であった。

以上の実験により、作製したデバイスが水平方向の 2 次元の駆動能力を持つことが確認された。

5. 結論および展望

SFM の小型化を目指し、圧電薄膜を用いて、自己 3 次元駆動、自己変位検出が可能なマイクロカンチレバーを提案した。デバイスの形を従来の 2 層 PZT-I 型から 1 層 PZT-T 型にすることにより、変位を大きくするのに伴う検出感度と共振周波数の低下を抑えることができることを示した。作製したデバイスは、振動モードによる自己変位検出が可能で、816 nm $\times$ 700 nm の水平方向の

Fig. 10 SFM images taken with fabricated T-shaped microcantilever (1-layered type). (a) is the image obtained when no actuation voltage is applied. (b) is the image obtained when 9.6 V was applied for actuation in x direction. (c) is the image obtained when 9.6 V was applied for actuation in y direction.

駆動機能を持ち、走査型力顕微鏡に応用することが可能であることがわかった。

今後は、作製したデバイスを用いて実際に走査型力顕微鏡を構成してその応用性を確かめるとともに、先端に鋭利な探針を持つデバイスを作製して解像度の向上を図ることなどが必要である。また、製作誤差などによるブリッジ部における水平方向と垂直方向の変位の干渉量を測定し、それを補償するための制御法についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) T. Itoh, T. Ohashi and T. Suga: Scanning Force Microscope Using Piezoelectric Excitation and Detection, IEICE Trans. Electron., Vol. E78-C (1995) 146.
- 2) Ch. Lee, T. Itoh and T. Suga: Micromachined Piezoelectric Force Sensors Based on PZT Thin Films, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 43 (1996) 553.
- 3) T. Itoh, J. Chu, I. Misumi, K. Kataoka and T. Suga: New Dynamic Scanning Force Microscopes Using Piezoelectric PZT Microcantilevers, Proc. Transducers '97, Vol. 1 (1997) 459.
- 4) J. Chu, T. Itoh, Ch. Lee, T. Suga and K. Watanabe: Frequency Modulation Detection High Vacuum Scanning Force Microscope with a Self-oscillating Piezoelectric Cantilever, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 15 (1997) 1647.
- 5) T. Itoh, Ch. Lee, J. Chu and T. Suga: Independent Parallel Scanning Force Microscopy Using Pb(Zr,Ti)O₃ Microcantilever Array, Proc. MEMS '97 (1997) 78.
- 6) S. Akamine, T. R. Albrecht, M. J. Zdeblick and C. F. Quate: A Planar Process for Microfabrication of a Scanning Tunneling Microscope, Sensors and Actuators, A21-A23 (1990) 964.
- 7) 岡崎 清: セラミック誘電体工学, 第 3 版, 学術社, (1983) 334.
- 8) 東京天文台編: 理科年表 (1985) 438.
- 9) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進: マイクロマシーンとマイクロメカトロニクス, 培風館, (1992) 18.
- 10) T. Itoh and T. Suga: Minimum Detectable Force Gradients of Piezoelectric Microcantilever, J. Micromech. Microeng., Vol. 5 (1995) 231.