

原子間力顕微鏡の力制御の多自由度化

Force Control of Atomic Force Microscopy with Multidegrees of Freedom

川 勝 英 樹*・川 合 稔*・渡 邊 道 仁*・西 沖 暢 久**
Hideki KAWAKATSU, Minoru KAWAI, Michihito WATANABE and Nobuhisa NISHIOKI

1. 要 旨

本研究の目的は原子間力顕微鏡 (atomic force microscope, AFM)¹⁾の探針に作用する力を試料面の法線方向と接線方向の2自由度で検出し、検出された2方向の力の値を制御に用いてより正確な像を取得することや、試料のマニピュレーションや加工を実現することにある。期待される利点としては、(i)接線力の変動量の低減による探針の姿勢変動の抑制や試料への影響の低減、(ii)探針の姿勢をリアルタイムに計測できることから、探針先端の軌跡を生成してより実際に近い像を得ること、(iii)試料に作用する力を制御することによって試料のマニピュレーションを行うこと、などである。現在、100nNオーダーの斥力モードで試料の走査を行った場合に、接線力と法線力の自乗和を一定に保つことができたり、接線力の制御における重み付け係数を大きくすると接線力の変動幅を小さくできることを確認している。

2. 緒 言

AFMでは、通常100 μm 程度のカンチレバーの先端に探針を固定し、その探針先端で試料表面を走査することによって像を得ている。探針に作用する力はカンチレ

バーの変位として検出される。変位検出方法としては、トンネルギャップ¹⁾、光てこ^{2)~4)}、レーザー干渉法などの変位検出方法が通常用いられている。図1に光てこ式変位検出機構の図を示す。図1でXYZ軸を定義する。一般的に用いられている、Z方向の法線力(F_n)を一定に保つ制御では、2分割型フォトダイオードを用いてカンチレバーのたわみを検出し、たわみ量が一定に保たれるようにZ方向に変位するピエゾ素子(以下、 P_z)を用いてカンチレバー全体を変位させる。このような検出機構を用いて原子分解能が確認されている。

探針に作用する力の検出と制御は、表面の摩擦の研究に関するいくつかの研究例^{5)~8)}を除いて、通常図1に示したような法線力 F_n の制御に限られている。本研究では、走査中に接線力 F_t が変動していることに着目し、接線力と法線力を同時に検出し、制御に用いるべきであると考えた。2方向の力、 F_n と F_t を同時に検出できるAFMを用いて、法線力を一定に保つ制御と、法線力と接線力の自乗和を一定に保つ制御の実験を行った。その結果、構想を裏付けるデータが得られている。本報告では、AFMにおける1自由度のみの力制御の問題点、基本構想、および実験結果について述べる。

3. 基 本 構 想

AFMでは、試料表面と探針の形状などの影響で法線方向だけでなく、接線方向にも探針と試料の間に力が作用していると考えられる。通常は、カンチレバーのたわみがXY方向へのラスタスキャン中に一定に保たれるようにピエゾ素子 P_z を制御する。しかし、このような1自由度制御では、走査中の接線力 F_t が任意に変動してしまうことになり、さまざまな問題が生じると考えられる。図2に考えられる問題点を表した模式図を示す。図2(a)はサブストレートに固定したバイオサンプルの上を探針で走査するときバイオサンプルを切断してしまったり、観察範囲から掃き清めてしまう可能性があることを説明する図である。このような現象は F_n のみの

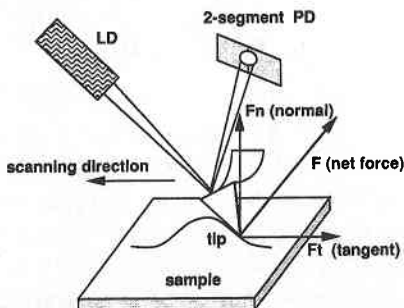


図1 光てこ式変位検出機構を用いたAFM。

*東京大学生産技術研究所 第2部

**㈱ミットヨ

制御では探針が試料側面に衝突することから予想されることである。このような現象はバイオサンプルの観察で報告されている⁹⁾。図 2(b)は走査方向によって像がヒステリシスを示すことを説明する図である。走査によってカンチレバーがねじれるため、カンチレバーと探針先端の相対位置は走査中変動するものと考えられる。図 1 のようにトライポッド型の XYZ ピエゾ素子にカンチレバーを固定している場合、通常はカンチレバー付け根の変位をもって像を生成している。この方法では、探針先端の軌跡を生成したことにならず、ねじれに起因する像のヒステリシスが生じると考えられる。図 2(c)は、走査中のカンチレバーのねじれによって生じる探針の姿勢変動によって像のコントラストが悪くなることを説明する図である。

本研究では、上記の諸問題の解決方法として、 F_n と F_t を同時に検出し、その値に基づいてピエゾ素子を制御しようとするものである。ピエゾ素子の制御において、XYZ 素子の駆動電圧の内のいずれか、もしくはすべてを制御対象とすることが考えられる。本研究では、とりあえず簡便性の点から、ピエゾ素子 P_z の駆動電圧のみを制御対象とした。積分制御を用いて以下の力制御を実現する回路を作製した。信号処理にはアナログ演算素子を用いた。

- (1) F_n を一定に保つ制御。
 - (2) F_t を一定に保つ制御。
 - (3) $|F| = (a \times F_t^2 + b \times F_n^2)^{1/2}$ (式 1)
- と定義した場合、 $|F|$ を一定に保つ制御。

上記の内で(3)に新規性がある。 $|F|$ を一定に保つ制御では、 F_n 、 F_t の描くりサージュは a、b の重み付けによって定まる楕円上に存在することになる。この制御では、 F_n 、 F_t はそれぞれ独立に制御されるものとはなっていないが、 F_t の重み付け係数 a を大きくすることによってカンチレバーのねじれによって生じる探針の姿勢

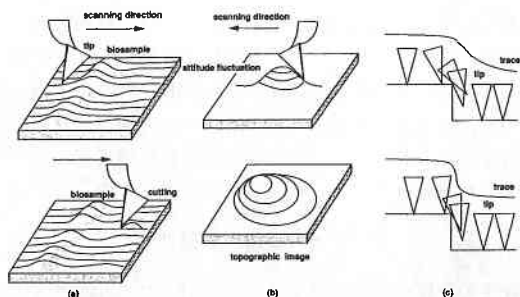


図 2 法線方向の力 F_n のみを制御した場合の問題点。

変動の大きさや F_t の変動幅を制限することが可能となる。このことは、先に述べた AFM の問題点の解決方法の一つであると考えられる。また、探針の姿勢変動に起因する像の走査方向依存性については、カンチレバーのねじれ量とたわみ量、ピエゾ素子 P_z の変位量を記録することにより探針先端の走査中の軌跡が生成可能であることから低減できるものと考えられる。ただし、この場合、探針先端において試料表面に接触しているという条件が前提となる。

4. 実 験

図 3 に実験に用いた AFM の構造図を示す。光てこ変位拡大機構と、4 分割型フォトダイオード (quad position sensitive detector, QPD) を用いてカンチレバーのねじれとたわみを検出している。このような検出機構は他の研究者らによっても用いられている^{5)~7)}。試料台は縦型の粗動機構に XYZ トライポッドを介して固定してある。カンチレバーと光学系は縦型のベースの側面に固定してある。4 分割フォトダイオードは XY 方向の直交型粗動機構に固定してあり、遠隔的に光軸調整が行えるようになっている。カンチレバーには短冊型のもので、ねじれ方向のコンプライアンスの比較的高いものを用いた¹⁰⁾。

なお、各粗動機構にはピエゾ素子による衝撃力を用いたものを用いている¹¹⁾。

図 4 に制御回路の略図を示す。4 分割型フォトダイオードの出力は電流電圧変換の後、足し算と引き算素子によってフォトダイオード検出面上のレーザスポットの X、Y 方向の変位に変換される。得られた 2 チャンネル

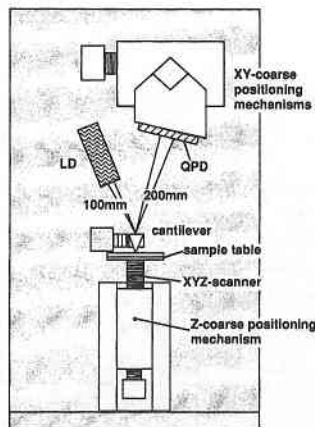


図 3 実験に用いた F_n と F_t の検出可能な光てこ式 AFM。カンチレバーからレーザ光源とフォトダイオードまでの距離はそれぞれ 200mm と 100mm である。

研 究 速 報

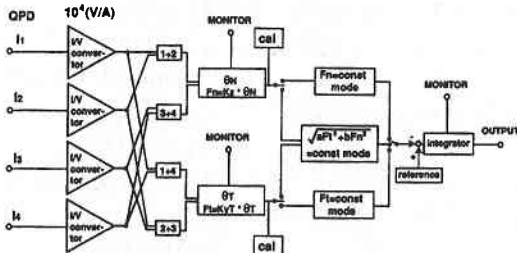


図4 制御回路の構成。Fn一定制御，Ft一定制御，|F|一定制御を積分制御を用いて実現しようとするものである。

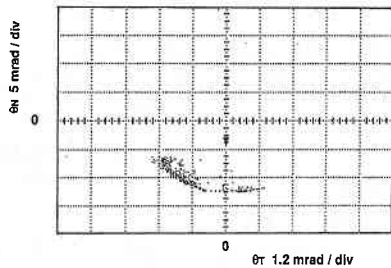


図5 ワンラインスキャンを0.5μmの段差の前後で行った時のFnとθtの軌跡。楕円の一部分に軌跡があることから、自乗和一定制御が行われていることを示している。図の第3，第4象限は斥力モードに対応する。

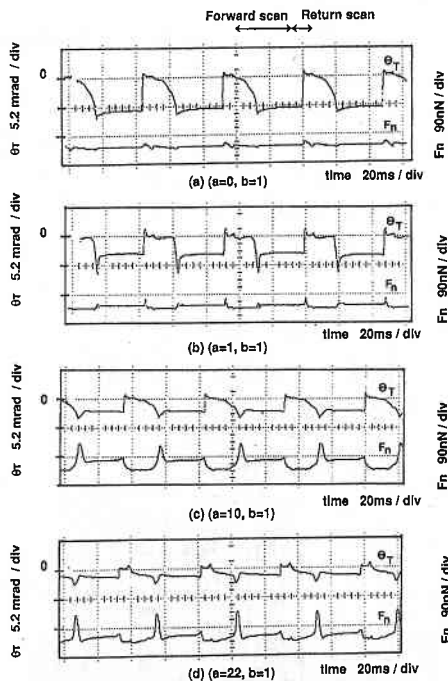


図6 ワンラインスキャンを0.5μmの段差の前後で行い，FtとFnの重み付け係数a，bを変化させた場合の影響。Ft(θt)の重み付け係数aを大きくするとFt(θt)の変動幅が小さくなることが観察できる。

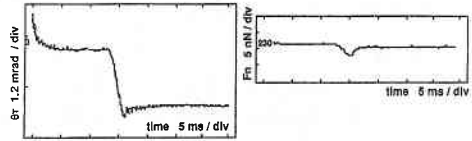


図7 法線力Fnを一定に保つ制御を行った上でワンラインスキャンを0.5μmの段差の前後で行った場合のFnとθtの変化。Fnは過渡的に変動するが、積分制御によって制御目標値の近傍に収束している。それに対し、カンチレバーのねじれθtは変化したままとなっている。

の信号はFnとFtに対応する。FnもしくはFtと制御目標値を積分器に入力することによってFnやFtの一定制御回路が構成される。また、自乗演算素子と根演算素子を用いることにより式1の|F|を計算し、その出力と制御目標値を積分器に入力することにより|F|一定制御回路が構成される。積分回路の出力はピエゾ素子Pzに接続される。試料にはピッチ2μm，深さ0.5μmの金蒸着を行ったグレーチングを用いた。制御には|F|一定制御回路を用い、探針がグレーチングの段差を通過する際のFtとFnの変化を観察した。

図5にFnとFtのリサージュを示す。各軸の絶対値は校正されていない。図5では、リサージュが楕円上に存在することが確認される。このことは、|F|一定制御がほぼリアルタイムで実現していることを示している。なお、この実験では、式(1)でa=0とした場合にFnの制御目標値が約200nNとなる値を積分器の制御目標値としている¹²⁾。

図6に式(1)の重み付け係数aとbを変化させ、グレーチングの段差の周りを探針で走査した場合のθnとθtの値を示す。制御目標値は図5の場合と同様に定めた。Ft(θt)に関する重み付け係数aを大きくするほどFtの変動幅が小さくなることが観察される。これは、楕円状のリサージュの横幅がaを大きくするほど小さくなることに対応している。係数a，bの重み付けを変化させることによって試料に与える探針の影響を変化させ得ると考えられる。

図7はFn一定制御中、探針でグレーチングの段差を通過した場合のθtの変化を示している。Fnは過渡的には変動するが、積分制御によって制御目標値の近傍に収束している。それに対して、θtの変化はそのまま残っている。つまり、カンチレバーが何らかの過渡的な影響でねじれたとしても、たわみ量が制御目標値近傍に達すると、ねじれはそのまま残ってしまうことを表している。

6. 今後の課題と問題点

今後の課題を以下に列挙する。

- (1) サブストレート上に捕捉したバイオサンプルなどを

走査し, a , b の重み付け係数の影響を調べる.

(2) ピエゾ素子 P_z の駆動電圧, θ_x , θ_y のデータから探針先端の軌跡を生成するソフトウェアを作製する. このソフトウェアによる像補正の効果を調べる.

(3) 今までのピエゾ素子 P_z のみの制御に加えて, ラスタスキャンに用いている X もしくは Y スキャナの駆動電圧を制御対象とする. この場合は可変速度の走査を構成することになる. ただし, F_c と F_n がそのような制御によって独立に制御し得るかどうかは検討を要する.

(4) 制御された接線力 F_c を用いて試料のマニピュレーションを行う.

(5) より小さい制御目標値で同様の実験を行う.

以下に装置の問題点や注意すべき事項について述べる.

(1) カンチレバーを交換すると, カンチレバーのねじれとたわみによる光てこのレーザースポットの変位方向が変化する. 現在は 4 分割フォトダイオードを手で回転させることによって光軸の変位方向とフォトダイオードの検出軸のアライメントを行っている. 0.1% オーダの干渉が手による合わせ込みでは残ってしまう. 今後, 遠隔操作の可能なフォトダイオード回転位置決め機構を導入し, カンチレバーの交換ごとに信号分離の確認を簡便に行えるようにする.

(2) 今までの実験ではカンチレバーのたわみ特性とねじれ特性が正確には同定されていない. そのため, 測定値の絶対値に対する正確な議論はまだ行われていない.

(3) $|F|$ 一定制御では, カンチレバーのたわみとねじれが動的に変動するため, ピエゾ素子 P_z の駆動電圧を XY 平面にプロットしただけでは F_n 一定制御でピエゾ素子 P_z の駆動電圧をプロットした場合よりもむしろコントラストの悪い像が得られる. これは先に行ったシミュレーション結果からも予想された結果である¹³⁾. これは $|F|$ 一定制御の根本的問題点ではないが, 今後の課題(3)で示したソフトウェアによる像補正の必要性を示唆するものである.

7. 結 言

原子間力顕微鏡において探針に作用する力のうち, 試料の法線方向の成分のみを検出して制御するだけでは接線方向の力が任意に変動しうる. 好ましくない結果としては, 探針による試料の破損や移動, 像の操作方向依存性, 力制御の厳密な追試性の問題点, などが挙げられる. 本研究では光てこ式変位拡大機構と 4 分割型フォトダイオードを用いてカンチレバーのねじれとたわみをリアルタイムで計測し, 得られた信号に基づいて法線力と接線力の自乗和が一定に保たれる制御回路を構成した. 力の自乗和の増減に応じてピエゾ素子 P_z の駆動電圧の制御

を行ったところ, (1)自乗和一定制御が動的にはほぼ実現されていること, (2) F_c の重み付けを増すと F_c の変動幅が小さくなること, (3) F_n 一定制御では, 探針の段差通過などでカンチレバーがねじれても, その後ねじれが解放されるとは限らないことが観察された.

謝 辞

本実験装置の試作にご協力いただきました株式会社ミツトヨの山口靖之氏にお礼申し上げます. 本実験では接線力方向の検出のため, 横方向によりコンプライアントなカンチレバーを用いる必要があります. カンチレバーをご提供いただいたオリンパス光学工業株式会社の戸田明敏氏にお礼申し上げます. また, AFM に関する数々の議論をしていただいたニコン株式会社の藤井透氏にお礼申し上げます. 本実験の位置決め機構には東京大学工学部樋口俊郎氏の開発された“インパクト機構”が用いられています. ありがとうございます.

本研究の研究費の一部は生産技術研究奨励会の選定研究費によって賄われています. (1993年 3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett., 56, 930, (1986).
- 2) G. Meyer and N. M. Amer, Appl. Phys. Lett. 53, 1045, (1988).
- 3) S. Alexander, L. Hellemans, O. Marti, J. Schneir, V. Elings, P. K. Hansma, J. Appl. Phys. 65, 164 (1989).
- 4) R. C. Barret and C. F. Quate, J. Vac. Sci. Technol. A8, 400 (1990).
- 5) G. Meyer, and N. M. Amer, Appl. Phys. Lett. 56, 21 (1990).
- 6) R. Kaneko, J. of Microscopy, 152, 363, (1988).
- 7) M. Hipp, H. Bielefeldt, J. Colchero, O. Mart and J. Mlynek, in Proc of STM '91, Ultra Microscopy/ 1898 (1992).
- 8) R. A. Buser, J. Brugger and N. F. de Rooij, in Proc of STM '91, Ultra Microscopy, 1476 (1992).
- 9) B. Drake, C. B. Prater, A. L. Weisenhorn, S. A. C. Gould, T. R. Albrecht, C. F. Quate, and P. K. Hansma, Science, V243, 1586 (1989).
- 10) オリンパス光学工業, $200\mu\text{m} \times 40\mu\text{m} \times 0.8\mu\text{m}$, 0.09N/m.
- 11) T. Higuchi, M. Watanabe, and K. Kudoh, J. Jpn. Soc. of Prec. Engg., 54, 2107 (1988).
- 12) この実験では使用したカンチレバーのねじれ弾性係数が同定されていないため, 接線力に関する議論は光てこから検出されるねじれ方向の角度 θ_c を示すにとどめた. F_n の制御目標値に関しては, 計算より求めた弾性係数から求めている.
- 13) 川勝英樹, 川合稔, 渡邊道仁, 西沖暢久, 1992年度精密工学会秋季大会講演論文集, 263 (1992).