



遅延帰還を用いたダイナミックモード原子間力顕微鏡のカンチレバー振動の安定化

Stabilization of Cantilever Oscillation in Dynamic-mode Atomic Force Microscopy Using Time-Delayed Feedback

山末 耕平^{a, b}, 引原 隆士^a

Kohei Yamasue and Takashi Hikihara

^a京都大学大学院工学研究科

^b東北大学電気通信研究所

要旨 ダイナミックモード原子間力顕微鏡において、探針-試料表面間相互作用の非線形性に起因して生じるカンチレバー振動の不安定化を抑制するため、市販装置に時間遅れフィードバック制御と呼ばれる振動制御法を実装した。磁場を用いたカンチレバー励振系とともに試作コントローラを実装することで、カンチレバーにおける不規則振動の発生を抑制し、安定な周期振動を維持することに実験的に成功した。

キーワード：原子間力顕微鏡 (AFM), カンチレバー, 非線形振動, フィードバック制御

1. はじめに

ナノスケールの科学・工学を支える基盤として、ナノスケール計測・評価・加工技術が広範な研究分野で要求されている。原子間力顕微鏡技術 (Atomic Force Microscopy; AFM と略す。以下同様) は、1986 年、IBM の Binnig らにより発表された走査型プローブ顕微鏡技術 (Scanning Probe Microscopy; SPM) の一種であり¹⁾、現在でも、特にダイナミックモード AFM と呼ばれる動作モードを主体として活発な装置開発が進められている²⁾。

ダイナミックモード AFM の動作原理は、共振する微小なカンチレバーによる分子間力などの探針-試料表面間相互作用の高感度検出およびフィードバック機構による探針-試料表面間の精密な距離制御に基づいている。ダイナミックモード AFM では、試料環境・雰囲気に関する制約が大きく緩和され、特に大気中、溶液中における絶縁試料のナノスケール非破壊観察が可能となる。このため、ダイナミックモード

AFM の応用領域は、近年、大きな広がりを見せている。走査型トンネル顕微鏡などでは測定困難な分子スケールでの有機薄膜の物性評価や液中バイオ試料の機能評価が実現されるため、ダイナミックモード AFM は、SPM の応用領域を生命科学や有機エレクトロニクスにまで広げるものと見込まれている^{2~4)}。

したがって、今後、ダイナミックモード AFM を用いて、未知の多種多様な表面形状や物性を探りたいというニーズがますます強まるものと考えられるが、その一方で、ダイナミックモード AFM による表面像の解釈は、必ずしも容易ではない。得られた表面像を解釈するためには、探針-試料表面間相互作用の理解が重要であることは明らかであるが、現状では、相互作用と強く関連するカンチレバーの表面近傍でのダイナミクスが、十分に理解されているとは言いがたい。現実には、カンチレバーの多様かつ複雑な振動が実験的に観察されるにも関わらず、調和振動子など単純なモデルで理解できない現象に関しては、多くの場合、見過ごされている。

このような問題意識の下、早いものでは 1990 年代後半から、いくつかの研究グループが探針-試料表面間相互作用の非線形性に注目した先駆的な検討を行っている^{5~12)}。その結果、非線形性に起因して、カンチレバーの周期振動が不安定化することが明らかにされた。特にいわゆるタッピングモードでは、非線形性の影響が顕著に表れ、双安定性に起因する探針のジャンプ挙動¹¹⁾ や分数調波成分を含む振動、カオスと呼ばれる不規則振動が生じることが実験的に確認されている^{13,14)}。カオス振動が生じた場合、その不規則性により実効的に雑音が増加し、S/N 比が低下すると考えられ、実際、タッピングモード AFM の分解能が低下することが実験的に明らかにされている¹⁴⁾。図 1 に、カンチレバーに生じる様々な振動状態の中から 2 つの例を示す。図 1 (a) は周期振動であり、タッピングモード AFM による測定では、このような安定な周期振動が得られることが前提である。しかしながら、特に柔軟なカンチレバーを大振幅で振動させる場合に、周期振動が不安定化し、図 1 (b) に示すように、不規則振動を生じることが明らかにされている¹⁴⁾。不規則振動が生じると、例えば、図 2 で比較するように、本来、表面ステップ以外では原子レベルで平坦な HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) の表面形状を測定した場合においても、周期振動で取得した場合に比較して、表面の粗さが増した像が得られてしまう。そればかりか、振動の不規則化は、結果として、試料走査のためのフィードバック機構の不安定化をも招きうるため、カンチレバーの非線形振動がダイナミックモード AFM の性能に及ぼす影響は無視できない。

そこで筆者らは、カンチレバーの非線形振動およびその制御手法に関して研究を進め、現在、カオス発生にともなう不規則振動の安定化手法を新規に提案している¹⁵⁾。カンチレバーの振動を安定化し、共振状態を維持できれば、カオス振動にともなう分解能低下を抑制でき、従来、安定な試料走査が困難であった領域でも、安定かつ高速な試料走査が実現す

^a 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

^b 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

2010 年 3 月 24 日受付

る可能性がある。また、非線形振動の制御は、古くから、非線形振動論あるいは非線形動力学といった分野で扱われており、それらの知見をナノ工学に応用する意味でも興味深い。以下では、時間遅れフィードバック制御 (Time-Delayed Feedback Control; TDFC) と呼ばれる制御手法¹⁶⁾を市販のAFMに実装し、タッピングモードにおける不規則振動の安定化を試みた結果¹⁷⁾について紹介する。

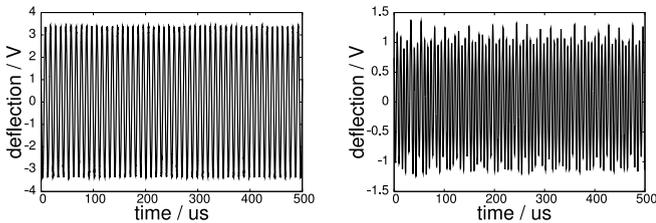
2. 時間遅れフィードバック制御とその実装

探針一試料表面間相互作用の下で、カンチレバーの1次モード振動を記述する運動方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x - \frac{\omega_0}{Q} \dot{x} + f(Z) + A \cos \omega t + \eta(t) + u(t) \quad (1)$$

ここで $x(t)$ はカンチレバーの変位、 ω_0 は共振周波数である。 Q はカンチレバーの Q 値、 $A \cos \omega t$ は強制励振を表す。 $f(Z)$ は、探針一試料間距離 Z における相互作用、 $\eta(t)$ 、 $u(t)$ は、それぞれ雑音および制御入力を表す。 $f(Z)$ は、例えば、Lennard-Jones ポテンシャルなどで記述されることも多いが^{6,9)}、現実には、例えば大気中観察では、探針一試料間に生じるメニスカスの形成なども考慮する必要がある⁸⁾。

TDFC は 1992 年に連続時間のカオス制御手法として提案されて以来¹⁶⁾、非線形力学分野ではよく知られている。マクロな系ではあるが、類似した力学構造をもつカンチレバー系に生じるカオス振動に適用され、実験的に安定化が達成されており¹⁸⁾、その知見に基づいて、ここでは速度を出力にとると制御則は次式で与えられる。



(a) 周期振動 (b) 不規則振動

図1 カンチレバーの振動状態¹⁷⁾

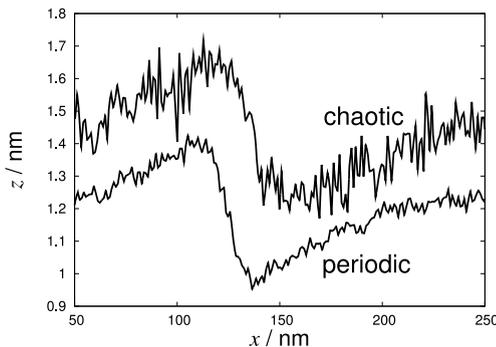


図2 異なる振動状態で測定した HOPG 表面形状の比較 (断面プロファイル)

$$u(t) = K[\dot{x}(t - \tau) - \dot{x}(t)] \quad (2)$$

ここで $\dot{x}(t)$ は変位の時間微分、すなわち速度を表す。 K はフィードバックゲインである。 τ は時間遅れと呼ばれるパラメータで、安定化したい周期振動の周期に調整される。タッピングモード AFM では、カンチレバーの共振状態を維持するため、 $\tau = 2\pi/\omega$ とすればよい。通常のフィードバック制御では、所望の目標値を与え、目標値と出力の差を入力にフィードバックするが、式 (2) に示すように、TDFC は時間 τ だけ過去の出力を目標値のかわりに用いるものとみなせる。フィードバックゲインを適当に調整すれば、目標値を与えることなく、周期振動の安定化が達成可能である。TDFC の重要な特徴は、その適用に際して、モデルやパラメータ同定は不要であり、制御則が単純なことである。カンチレバーは数 10 kHz から 300 kHz 程度と比較的高い共振周波数を持つうえ、安定化したい共振状態は、カンチレバーのパラメータのバラツキや実験条件によって大きく異なるが、TDFC は、カンチレバーの励振周波数さえ既知であれば適用可能であり、複雑なアルゴリズムを計算機実装して高速でオンライン計算する必要はない。

図3にTDFCの実装を示す¹⁷⁾。信号の遅延を実現するため、A/Dコンバータ、FIFO (First-In First-Out) メモリ、D/Aコンバータを用いたデジタルディレイラインが搭載されている。カンチレバーの変位信号は、微分回路により、速度信号に変換された後、A/Dコンバータで、デジタルデータに変換され、FIFOメモリに保存される。その後、所定の時間が経過したデータから順に、D/Aコンバータに出力され、所望の一定時間だけ遅延した信号がアナログ信号として出力される。微分演算や出力の差分、フィードバックゲインはオペアンプなどを用いたアナログ電子回路で容易に実装できる。

TDFCの実装における大きな課題は、カンチレバー励振系における伝達特性の改善である。市販装置で典型的に用いられる圧電素子を用いた励振の場合、カンチレバーは、支持部を介して、間接的に力を受けるため、伝達特性は複雑となる。このような場合、コントローラの生成する制御入力は、意図した通りにカンチレバーに作用する力として伝達されないた

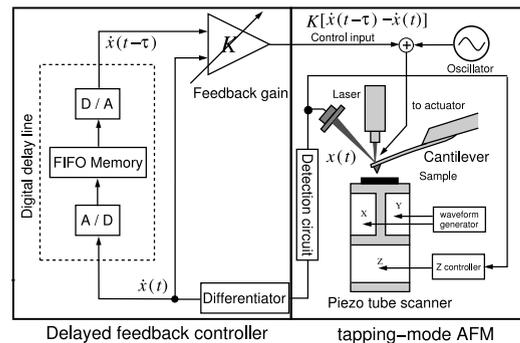


図3 時間遅れフィードバック制御のダイナミックモード原子間力顕微鏡への実装¹⁷⁾

め、制御効果を得ることは難しい。そこで、本研究では、カンチレバーに、直接、力を加えることが可能な磁場励振法¹⁹⁾を用いている。図4に励振スペクトルの比較を示す。図4(a)は圧電励振、図4(b)は磁場励振法を用いて、同一のカンチレバーを励振した場合の励振スペクトルである。圧電励振の場合、カンチレバーの共振の他、多数のスプリアスピークがみられ、位相応答は複雑である。一方、磁場励振法を用いた場合、カンチレバーに、直接、力が作用するため、スプリアス応答のない理想的な振幅および位相特性が得られる。また、フィードバック制御の適用に必要な周波数帯域を確保するため、市販 AFM の改造を行い、カンチレバーの変位検出系を広帯域化している²⁰⁾。

3. カンチレバー振動の安定化

図5に、上述の通り TDFC を実装した市販装置上で、カンチレバーに生じる不規則振動を安定化させた実験結果を示す²¹⁾。サンプルとして HOPG を用い、大気中で測定を行った。磁場励振法を適用するため、磁性薄膜コートされたカンチレバー (Agilent Technologies, MAC lever Type I:ばね定数 0.6 N/m, 共振周波数 75 kHz; いずれも名目値) を使用した。試料表面に探針を近づけていくと、自由振幅から振幅が8割程度減衰する表面近傍では図5(a)に示すような不規則な振動が生じる。このとき、制御を投入すると、図5(b)に示すようにカンチレバーは周期振動を回復した。本結果は、不規則振動が安定化され、分解能の低下や応答速度の低下を TDFC により抑制できる可能性を明らかにしている。

4. おわりに

本稿では、TDFC とよばれる振動安定化手法を用いた、タッピングモード AFM におけるカンチレバー振動の安定化につ

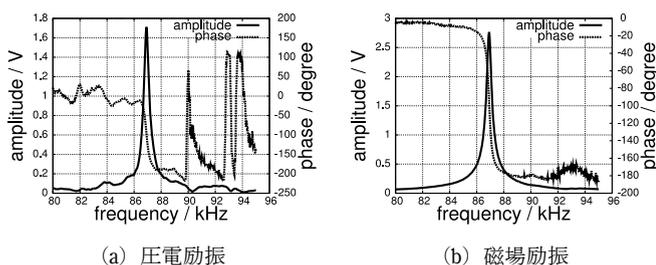


図4 励振スペクトルの比較

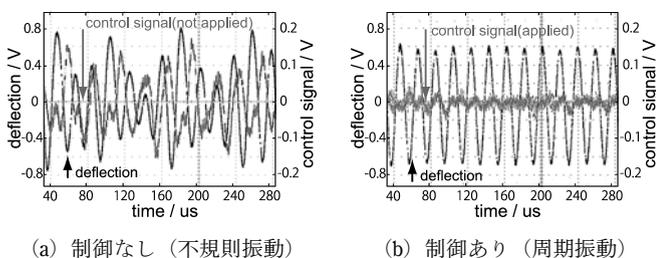


図5 カンチレバー振動の安定化²¹⁾

いて紹介した。ダイナミックモード AFM の応用領域が広がりを見せる中で、近年、非線形領域を活用した新たな測定手法の開発が進められつつある。その中で、今後、カンチレバーに生じる非線形振動の制御手法の重要性は増していくものと考えられる。また、本研究は、非線形力学分野やシステム制御分野の知見を応用したものともみなせる。SPM のみならず、関連分野の研究者の新たな参加・検討を促したい。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり有益な御助言、御示唆を頂いた京都大学大学院工学研究科 松重和美教授、山田啓文准教授、京都大学産官学連携センター 小林圭助教に深く感謝致します。本稿に関わる研究の一部は科学研究費補助金(20760238)および文部科学省グローバル COE プログラム「光・電子理工学の教育研究拠点形成」の助成を受けています。

文 献

- 1) Binnig, G., Quate, C.F. and Gerber, C.: *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 930-933 (1986)
- 2) 森田清三 (編): 原子・分子のナノ力学, 丸善, 東京 (2003)
- 3) García, R. and Pérez, R.: *Surf. Sci. Rep.*, **47**, 197-301 (2002)
- 4) Fukuma, T., Kobayashi, K., Matsushige, K. and Yamada, H.: *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 034101-034103 (2005)
- 5) Anczykowski, B., Krüger, D. and Fuchs, H.: *Phys. Rev. B*, **53**, 15485-15488 (1996)
- 6) Ashhab, M., Salapaka, M.V., Dahleh, M. and Mezić, I.: *Nonlinear Dynam.*, **20**, 197-220 (1999)
- 7) van de Water, W. and Molenaar, J.: *Nanotechnology*, **11**, 192-199 (2000)
- 8) Berg, J. and Briggs, G.A.D.: *Phys. Rev. B*, **55**, 14899-14908 (1997)
- 9) Rützel, S., Lee, S.I. and Raman, A.: *Proc. R. Soc. Lon. Sea-A*, **459**, 1925-1948 (2003)
- 10) Aimé, J.P., Boisgard, R., Nony, L. and Couturier, G.: *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3388-3391 (1999)
- 11) García, R. and SanPaulo, A.: *Phys. Rev. B*, **61**, R13381-R13384 (2000)
- 12) Sasaki, N., Tsukada, M., Tamura, R., Abe, K. and Sato, N.: *Appl. Phys. A-Mater.*, **66**, S287-S291 (1998)
- 13) Jamitzky, F., Stark, M., Bunk, W., Heckl, W.M. and Stark, R.W.: *Nanotechnology*, **17**, S213-S210 (2006)
- 14) Hu, S. and Raman, A.: *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 036107-1-036107-4 (2006)
- 15) Yamasue, K. and Hikiyama, T.: *Rev. Sci. Instrum.*, **77**(5), 053703-1-053703-6, (2006)
- 16) Pyragas, K.: *Phys. Lett. A*, **170**, 421-428 (1992)
- 17) Yamasue, K., Kobayashi, K., Yamada, H., Matsushige, K. and Hikiyama, T.: *Phys. Lett. A*, **373**, 3140-3144 (2009)
- 18) Hikiyama, T. and Kawagoshi, T.: *Phys. Lett. A*, **211**, 29-36 (1996)
- 19) Han, W., Lindsay, S.M. and Jing, T.: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4111-4113 (1996)
- 20) Fukuma, T., Kimura, M., Kobayashi, K., Matsushige, K. and Yamada, H.: *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 053704-1-053704-8 (2005)
- 21) 山末耕平, 引原隆士: 第 58 回理論応用力学講演会 講演論文集, 235-236 (2009)