

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20760238

研究課題名(和文)

ダイナミックモード原子間力顕微鏡におけるカンチレバーの非線形振動制御

研究課題名(英文)

Control of nonlinear cantilever oscillation in dynamic-mode atomic force microscopy

研究代表者

山末 耕平 (YAMASUE KOHEI)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：70467455

研究成果の概要(和文)：

ダイナミックモード原子間力顕微鏡は、現代のナノ科学・工学に必須の計測機器の一つであり、原子・分子スケールの表面形状観察や物性評価を目的として、幅広い分野の研究開発で利用されている。同顕微鏡は、マイクロカンチレバーと呼ばれる極めて高感度な力センサを原子・分子間に働く力の検出に利用するものである。しかしながら、一方で、近年になり、測定中のセンサに生じる不規則な振動に起因して、DFMの性能が低下する場面があることが明らかにされていた。本研究課題は、このようなセンサの不規則な振動を抑制して、DFMが本来持つ性能を引き出す振動安定化手法を新規に提案したものである。研究期間中に実機に適用可能なコントローラの開発を推進すると同時にその有効性の実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：

Dynamic-mode atomic force microscopy has been a fundamental tool for research and development in the fields of nanoscience and nanotechnology. This microscopy enables us to observe topography and physical properties of sample surfaces by utilizing cantilever sensors that are extremely sensitive for tiny force at the atomic and molecular level. On the other hand, it has been recently reported that significant performance degradation can occur during measurement due to the irregular oscillation of cantilever sensors. In this research project, we proposed a novel control method for overcoming the performance degradation and newly developed a prototype controller for cantilever oscillation. The control performance was successfully demonstrated in an actual dynamic-mode atomic force microscope.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：非線形動力学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：カオス制御、マイクロ・ナノデバイス、制御工学、振動制御、時間遅れフィードバック制御、表面・界面物性、走査プローブ顕微鏡・非線形動力学

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ナノ領域における科学・工学の果たすべき役割はますます重要性を増しており、これらの領域の研究・開発を支える基盤技術として、ナノスケール計測・評価技術が必要とされている。そのなかで、ダイナミックモード原子間力顕微鏡(Dynamic-mode atomic force microscopy; 以下DFMと記す)は、数々の優れた特徴から、既に様々な分野で不可欠な計測装置として普及している。DFMの測定原理は、機械的に共振する微小なカンチレバー(片持ち梁)による分子間力などの探針-試料表面間相互作用の力学的検出に基づいている。このため、DFMは先行して発明された走査型トンネル顕微鏡と異なり、原理的に導電性試料に対象が制限されることはない。また、真空中・大気中・溶液中など様々な試料環境・雰囲気での絶縁性試料のナノスケール非破壊観察がDFMを用いて実現されている。さらに、DFMは汎用性と多機能性に優れており、その応用領域は、近年、大きな広がりを見せている。特に、分子スケールでの有機薄膜の物性評価や液中生体試料の機能評価が活発に研究されており、DFMの有機エレクトロニクスや生命科学などへの広範な応用が期待されている。

しかしながら、その一方で、DFMによる観察結果の評価・解釈には、常に慎重さが求められてきた。その大きな要因となったのは、DFMの測定原理に強く関わるカンチレバーの表面近傍でのダイナミクスの理解が必ずしも十分に進んでいなかったことである。従来、調和振動子などの単純なモデル化がなされてきたが、現実のカンチレバーにはそのような単純化されたモデルからは理解できない多様かつ複雑な振舞が観察されることが知られるようになった。これまでに、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着目した検討を行い、非線形性に起因して、カンチレバーの振動が不安定になる場合があり、その結果として力感度や分解能劣化、ひいてはDFM像の劣化が引き起こされることを明らかにしている。カンチレバーの不規則な振動は、従来から実験的には観察されていたものの、原因が不明で多くの研究者に見過ごされてきた。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現れ、双安定性を伴う探針のジャンプ・ヒステリシス挙動や分数調波成分を含む振動、カオスと呼ばれる不規則・不安定な振動が生じることが実験的に確認されている。カンチレバー振動の不安定化は、結果として試料走査の不安定化を引き起こすため、これら非線形振動がDFMの性能に及ぼす影響は無視できない。特に、柔軟なカンチレバーを大振幅で動作させる場合には振動が不規則化しやすいことが知られているが、その一方で、

このようなカンチレバーの動作は、損傷しやすく段差の大きなポリマーや生体試料の観察にしばしば用いられる。

## 2. 研究の目的

研究代表者らは、上記背景に基づき、以前から、カンチレバーの非線形振動の研究を進めており、その中で、上述の不規則振動が引き起こす分解能の低下に対して、非線形動力学に基づく振動安定化手法の適用を新規に提案した。本研究課題は、提案手法を実現するコントローラの開発、実機への適用およびその有効性の実証を目的にしたものである。振動制御により、分数調波振動、カオス振動の発生を抑制し、安定な周期振動を実現できれば、従来、カンチレバー振動の不安定化に起因して測定が難しかった非線形領域での安定な試料走査、感度向上が可能になる。すなわち、本研究課題の進展は、さらに広汎な環境、雰囲気中で、しかも高速測定可能な高性能DFMを実現する糸口となる可能性がある。

## 3. 研究の方法

### (1) 振動安定化コントローラの試作

回路技術の観点から、所望の制御効果を得るためのコントローラの回路構成・設計の検討を行った。特に、フィードバックループに生じるむだ時間は、制御性能が劣化する大きな要因となるため、むだ時間を最小化する入出力インターフェース回路の構成、使用する素子の最適化を行った。

### (2) 実機への試作コントローラの適用による振動安定化の実証

実機DFMをタッピングモードで動作させ、報告されているカンチレバーの不規則振動を実験的に再現した。次に、試作したコントローラを適用して、不規則振動の安定化を実証した。

### (3) デジタル化によるコントローラの高機能化・高性能化の推進

実用化に向けて試作コントローラを上回る機能および性能を達成するため、FPGAを用いたコントローラのデジタル化を推進した。

### (4) 振動制御に最適なカンチレバー励振法および高速変位検出系の適用

制御系設計の観点から、制御効果を最大限に引き出すため、カンチレバーを直接励振可能な磁場励振法を適用した。またカンチレバーの高速変位検出を可能とするため、協力研究者らのグループの開発したDFMヘッドおよび広帯域低ノイズ検出系を応用した。

#### 4. 研究成果

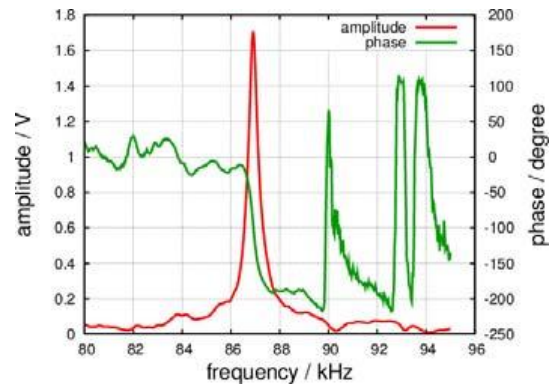
##### (1) 振動制御に適した磁場アクチュエータ

および広帯域検出系のDFMへの実装

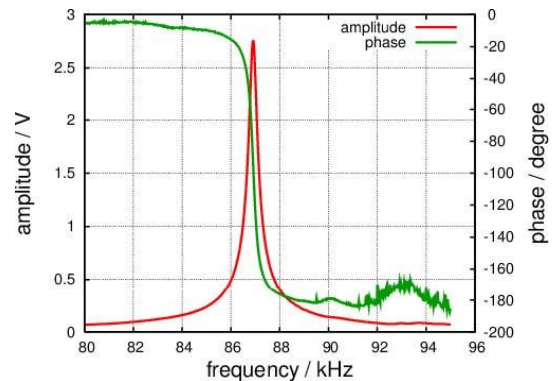
典型的な市販のDFM装置では、カンチレバーに機械共振を生じさせるためのアクチュエータとして、圧電素子の薄片が用いられている。このため、カンチレバーは支持部材を介して間接的に励振され、その結果として、励振スペクトルはカンチレバーの共振周波数以外に様々な不要応答を持つことになる。制御系設計の観点から、不要応答の抑制が本研究課題の目標とする振動安定化達成のキーであるため、本研究課題ではカンチレバーに直接力を作用させることが可能な磁場励振法および磁性薄膜カンチレバーを用いることとした。実験系では、市販の表面実装用途の小型コイルを既存の試料ホルダに組み込み、交流磁場を発生させることで、カンチレバーを励振した。また、コイルを電流駆動することで、コイル駆動系における位相遅延を必要帯域内で最小限に抑制することに成功した。さらに、協力研究者のグループが開発した広帯域低ノイズカンチレバー変位検出系を適用し、検出系における位相遅延の抑制にも成功した。図1に磁場励振法を適用した結果を示す。図1(a)、図1(b)はそれぞれ、圧電励振、磁場励振による励振スペクトルである。圧電励振の場合には多数の不要応答が発生するのに対して、磁場励振では、カンチレバーの共振ピークのみが得られていることがわかる。また、上述の通り、励振系および変位検出系における位相遅延を最小限に抑制することに成功した結果、共振ピークでの位相遅延がほぼ $90^\circ$ となる理想的な周波数特性を実現した。

##### (2) 時間遅れフィードバック制御則に基づくコントローラの開発

時間遅れフィードバック制御と呼ばれる不規則振動の振動安定化手法を実機のDFMに適用するため、コントローラを新規に開発した。時間遅れフィードバック制御は、カオスアトラクタに埋めこまれた不安定周期軌道を安定化する、連続時間のカオス制御法であり、1992年の提案以来、様々な実験系に適用され、その有効性が実証されている。同制御法では、制御出力の現在の値およびある一定の時間だけ遅延させた値の差を入力にフィードバックすることで所望の不安定周期軌道を安定化する。時間遅延は、安定化の対象とする不安定周期軌道(目標軌道)の周期に調整され、DFMの場合はカンチレバーの共振を維持するため、励振周期に調整される。DFMのカンチレバーは、典型的には数10kHz~数100kHzの共振周波数を持つが、時間遅れフィードバック制御は、過去に様々な実験系に適用されているにも関わらず、上記の周



(a) 圧電励振 (従来法)



(b) 磁場励振

図1 磁場励振法による励振スペクトルにおける不要応答の抑制

[出展: 雑誌論文1]

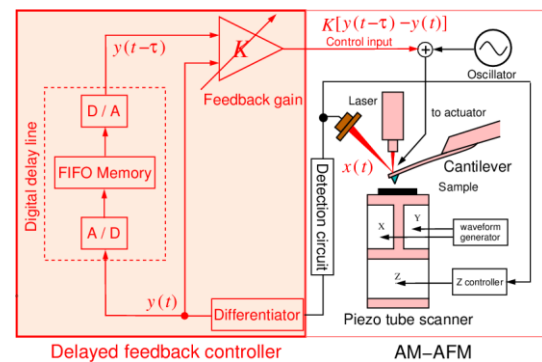


図2 コントローラの構成

[出展: 雑誌論文3]

波数帯域に適用可能なコントローラは、これまで報告されていなかった。特に、カンチレバーは様々な共振周波数を持つものが市販されているが、幅広い周波数領域で柔軟に時間遅延が設定可能なコントローラを開発することを見据え、本研究課題では、高速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図2に示す回路構成とした。図3にプリント基板上に実装したコントローラを示す。最大動作周波数は40MHz、量子化ビット数は12ビットであり、

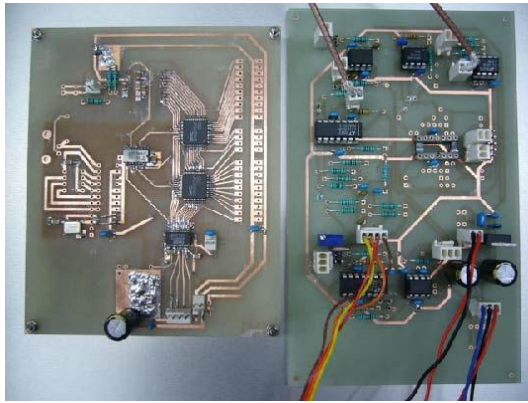
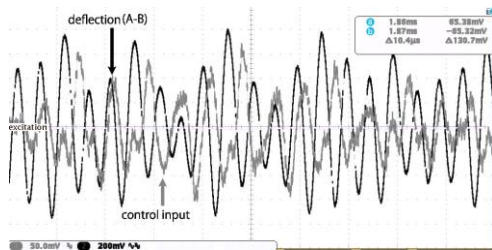
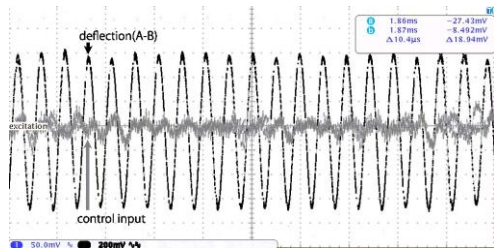


図 3 試作したコントローラ



(a) 制御適用前 (不規則振動)



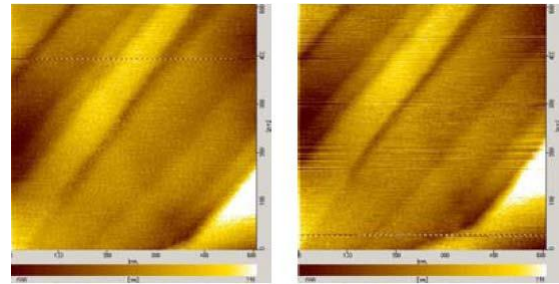
(b) 制御適用後 (周期振動)

図 4 時間遅れフィードバック制御によるカンチレバー不規則振動の安定化 [出展: 学会発表 4]

10 kHz から 100kHz 程度の共振周波数を持つカンチレバーに適用可能なコントローラを開発できた。

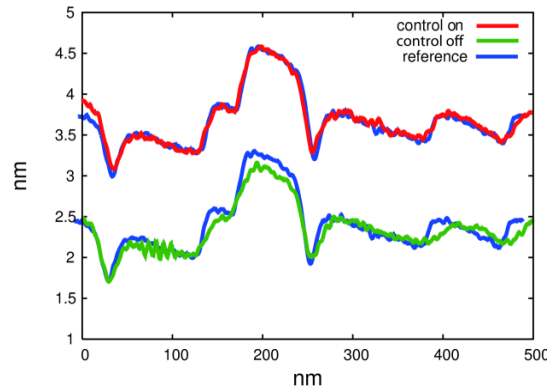
(3) 試作コントローラによるカンチレバー不規則振動安定化の達成

(1) および (2) に述べた磁場アクチュエータ, 広帯域低ノイズ変位検出系, コントローラを市販 DFM に実装した。まず, 先行研究で報告されているカンチレバーの不規則振動の再現実験を行い, その安定化を試みた。図 4 に結果を示す。図 4(a) は制御適用前のカンチレバーの不規則振動であり, 図より振動の周期性が失われて不規則化していることがわかる。一方, 図 4 (b) に示すように制御を適用すると, カンチレバーの振動が周期性を



(a) 制御適用前 (不規則振動時)

(b) 制御適用後 (周期振動時)



(c) 断面プロファイル

赤: 制御あり, 緑: 制御なし, 青: 参照形状

図 5 時間遅れフィードバック制御の適用による DFM 像における分解能の回復

[図 5(a) 出展: 図書 1]

回復した。振動の不規則化および周期性の回復が, 制御をオン・オフすることで繰り返し達成できること, かつ, 制御適用後の制御入力がかつてほぼゼロに収束したことから, 初めて実機 DFM におけるカンチレバーの不規則振動の安定化を実証することができた (なお, 時間遅延はカンチレバーの励振周期に調整されているため, 安定化が達成されると, 制御入力はノイズのない理想的な条件ではゼロに収束する)。本成果は国内外で注目され, システム制御工学分野, 顕微鏡分野の学会における解説論文 [雑誌論文 1, 2] や 2010 年に Wiley-VCH から出版された「Nonlinear dynamics of nanosystems」 [図書 1] に成果が収録されるに至った。

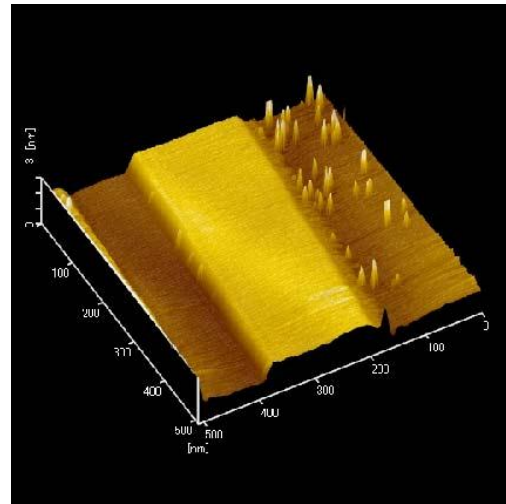
(4) 振動制御による DFM 像の分解能回復

(3) に述べた通り, 実機 DFM においてカンチレバーに生じる不規則振動の安定化が実証された。その結果, 不規則振動により低下した分解能の回復に成功した。図 5(a) に制御適用前, 図 5(b) に適用後の DFM 像を示す。試料は HOPG であり, 走査範囲は 500nm であ

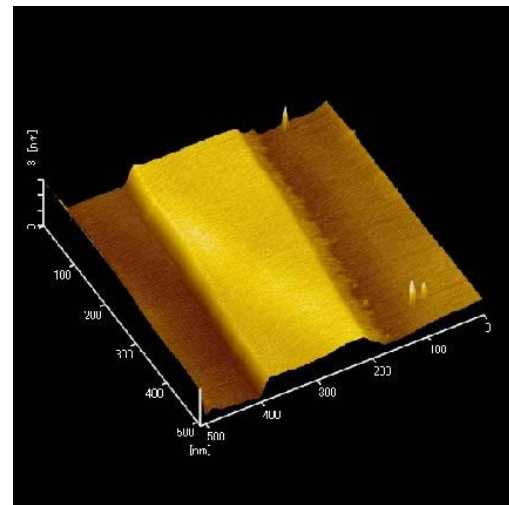
る。比較のため、図 5(c)に断面プロファイルを示す。制御あり(赤色)および制御なし(緑色)のプロファイルをそれぞれ参照形状(青色)と比較すると、前者は参照形状によく一致しており、制御適用後の方が、探針はより正確に表面形状をトレースしていることがわかる。また、図 4 のように定常的に不規則振動が継続する場合とは異なり、間欠的にカンチレバーが周期振動と異常な跳躍的挙動を繰り返すケースも存在した。この場合、図 6(a)に示すように、表面ステップ以外では原子レベルで平坦な HOPG の表面に、跳躍的挙動に起因した多数のアーティファクトが観察される。図 6(b)に制御適用後の像を示す。走査領域は図 6(a)と同一であるにも関わらず、アーティファクトがほぼ完全に抑制され、正確な表面形状が得られたことがわかる。以上の結果から、開発したコントローラの適用によりカンチレバーの周期振動を維持することが可能となった。これにより、従来、動作が困難であった非線形領域まで DFM の動作領域が拡張できることが示された。なお、近年では、探針-試料表面間の非線形相互作用を無視するのではなく、むしろ積極的に表面観察に活用する新たな DFM の測定モードの研究が活発になっている。本研究の成果は、これらの測定モードでカンチレバーの安定動作を確保するうえで有用な基礎技術になると考えられる。

#### (5) デジタル化によるコントローラの高機能化・高性能化

開発したコントローラを用いてカンチレバーの振動安定化が実証されたことを受けて、実用化に向けてコントローラのさらなる高機能化・高性能化を数値計算、実験の両面から推進した。時間遅れフィードバック制御された系における目標軌道の安定性は、フィードバックループに含まれるむだ時間が目標軌道の周期に対して約 5 パーセントより大きい場合には失われやすい。このため、より高い制御効果を得るため、むだ時間を目標軌道の周期の 1%程度まで抑制することとした。そのため FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたコントローラを開発した。その結果、既存のコントローラは、量子化ビット数 12 ビット、サンプリングレートが 40 MSPS であったのに対して、新規コントローラでは量子化ビット数 14 ビット、サンプリングレートで 150 MSPS を達成し、さらに、最終的に 200 MSPS までの高速化が可能であることを実験的に明らかにした。また、FPGA を用いたことで、ソフトウェア的な制御パラメータの設定が可能となり、(1)に述べた試作コントローラに比較して、性能、機能とも大幅に向上させることができた。



(a) 制御適用前



(b) 制御適用後

図 6 不規則振動の安定化によるアーティファクトの抑制 [出展: 雑誌論文 3]

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 山末 耕平, 引原 隆士, 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, 顕微鏡 45(2), 137-139 (2010). [査読有]
2. 山末 耕平, 引原 隆士, 原子間力顕微鏡における制御応用とその展望, システム/制御/情報 53(6), 236-242(2009) [査読有]
3. Kohei Yamasue, Kei Kobayashi, Hirofumi Yamada, Kazumi Matsushige, and Takashi Hikiyara, Controlling chaos in dynamic-mode atomic force microscope, Physics Letters A 373(35), 3140-3144(2009). [査読有]

[学会発表] (計 6 件)

1. Kohei Yamasue, Kei Kobayashi, Hirofumi Yamada, Kazumi Matsushige, and Takashi Hikiyara, Chaotic cantilever oscillation and its control in amplitude modulation atomic force microscopy, 2nd Multifrequency AFM Conference, Holiday Inn Madrid, Madrid, Spain, June 15-16 (2009).

2. Kohei Yamasue, Kei Kobayashi, Hirofumi Yamada, Kazumi Matsushige, and Takashi Hikiyara, Control of chaotic sensor oscillation in dynamic-mode atomic force microscopy, The 5th International Conference on Nonlinear Science (Dynamics Days Asia Pacific 5), Nara, Japan, Sep. 11 (2008).

3. 山末 耕平, 小林 圭, 山田 啓文, 松重 和美, 引原 隆士, タッピングモード AFM におけるカンチレバー非線形振動に関する実験的検討, 2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 8a-E-8, 富山大学 五福キャンパス, Sep. 8 (2009).

4. 山末 耕平, 小林 圭, 山田 啓文, 松重 和美, 引原 隆士, 時間遅れフィードバック制御の振幅変調型原子間力顕微鏡への応用, 第 58 回理論応用力学講演会, OS24-1, カオスとその応用, 日本学術会議, June 10 (2009).

5. Kohei Yamasue, Kei Kobayashi, Hirofumi Yamada, Kazumi Matsushige, and Takashi Hikiyara, Experimental study on stabilization of chaotic cantilever oscillation in AM-AFM by time-delayed feedback control, 11th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy (NCAFM-2008), HOTEL Rafael-Atocha, Madrid, Spain, Sep. 17, (2008).

6. Kohei Yamasue, Kei Kobayashi, Hirofumi Yamada, Kazumi Matsushige, and Takashi Hikiyara, Stabilization of cantilever oscillation in tapping-mode AFM using time-delayed feedback control, 2008 年秋季 第 69 回応用物理学会学術講演会, 中部大学, Sep. 4 (2008).

[図書] (計 1 件)

1. Kohei Yamasue and Takashi Hikiyara, Nonlinear dynamics in atomic force microscopy and its control for nanoparticle manipulation, Chapter 9 in

Nonlinear Dynamics of Nanosystems 267-286 (2010, Wiley-VCH), Eds. by G. Radons, B. Rumpf, and H. G. Schuster, (共著, 分担執筆).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山末 耕平 (YAMASUE KOHEI)  
東北大学・電気通信研究所・助教  
研究者番号: 70467455

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし