

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560225
 研究課題名（和文） 非線形性の発現・操作によるナノ・マイクロマシンの高性能・高機能化に関する研究
 研究課題名（英文） RESEARCH ON ADVANCED NANO-MICRO MACHINE BY EMERGENCE AND ACTUATION OF NONLINEARITY
 研究代表者
 藪野 浩司（YABUNO HIROSHI）
 慶應義塾大学・理工学部・教授
 研究者番号：60241791

研究成果の概要（和文）：近年，ナノマイクロマシーン技術が注目され，これまでにないセンサーやアクチュエータの開発が進み，幅広い分野でその利用が期待されている．本研究ではナノマイクロマシンの重要な基本要素の一つであるカンチレバー（片持ち梁）の特性をコントロールする手法を提案した．このときカンチレバー自体が持つ非線形性によるダイナミクスへの影響やその非線形特性の積極的な利用により，カンチレバーの高機能化（たとえば振幅を自在に制御すること）が可能であることを理論的並びに実験的に明らかにした．

研究成果の概要（英文）：Recently, nano-micro machines are very attractive to many scientific fields and various applications are expected and investigated. In this research, dynamic control of micro-cantilever as an important mechanical element are treated. It is shown that the inherently existing nonlinearity of the nano-micro machine essentially affects the performance and based on the emergence and actuation, some nonlinear control methods are proposed for realizing high-performance micro-cantilever.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：非線形力学，原子間力顕微鏡，分岐現象，分岐制御，非線形制御

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の背景をまとめると，以下のとおりである．

(1) マイクロマシーンが受ける力（分子間力

など）の非線形特性を考慮した制御法が存在せず，マイクロマシンの高性能化には，そのような制御法の開発が急務である．

(2) ダウンサイジングによりマイクロマシ

ーン自身の非線形特性が増加する（長さに比べて大きなたわみが生じやすく曲げの非線形性が増加する）がそれに注目した研究がほとんど存在せず、マイクロマシンの高性能化への障害になっている。

(3)ダウンサイジングによるマイクロマシン自身の高剛性化（固有周波数の増加）に注目した制御法が存在せず、従来スケールのシステムに対する制御法がマイクロマシンに適用されていて、技術革新が遅れている。

(4)ダウンサイジングにより体積力に比較して表面力が増大する点に注目した制御法が存在せず、マイクロマシンならではの制御法が存在しない。

2. 研究の目的

(1)ナノマイクロマシンの高性能・高機能化を目的とした、新しい制御法（システムにもともと存在する非線形性を積極的に利用した制御法）を提案するし、ナノマイクロマシンの高機能・高性能化に向けた、ブレークスルーを見出す。

(2)具体的には、マイクロマシン（原子間力顕微鏡、原子・分子マニピュレーションシステム、ケミカル・バイオセンサなど）の基本構成要素であるマイクロカンチレバーの振動制御法を提案し、実際にマイクロビームおよびマクロビームを加振するシステムを製作してその有効性を実験的に検討する。

(3)特に生体試料観察において解決しなければならない二つの点、すなわち高粘性環境下におけるマイクロカンチレバーの固有周波数同定法とマイクロカンチレバープローブの低振幅制御法を新たに提案する。高周波信号を扱うためノイズに強い制御法の開発が中心課題である。

3. 研究の方法

(1)カンチレバー自身が持つ非線形特性については代表者らの研究を進展させて同定する。すなわち、分子間力などカンチレバーに作用する力の同定にはレナードジョーンズポテンシャルなどの平衡点周りの近似式を用いてマイクロカンチレバーの支配方程式（非線形微積分方程式）を定式化する。研究目的で指摘した、生体試料観察における2つの困難な点を克服するため、以下の(2)で述べる制御法により、解決策を見出す。

(2) 代表者が提案した分岐制御理論（Yabuno, Bifurcation Control of Parametrically Excited Duffing Systems by a Combined Linear - Plus - Nonlinear Feedback Control, Nonlinear Dynamics, 12, 1977, 263-274）

を進展させ、システムが持つ非線形性の大きさを操作することによってさまざまな分岐現象をシステムに発生させる手法を提案する。

(3)上記手法を利用したマイクロカンチレバーの原子間力顕微鏡や粘度計への応用方法を理論的に提案し、実験によりその有用性を検討する。理論解析においては非線形偏微分方程式の定性的な解析法として知られている、多重尺度法の適用を試みる。多重尺度法の適用には、フィードバックゲインおよび解の適切なオーダー評価が必要であるが、曲率の非線形性を考慮した梁に関する運動方程式に対するオーダー評価法を参考にして、適切なオーダー評価を見出す。多重尺度法による解析結果より、振幅および位相のゆっくりした時間変動を支配する方程式が、システムのパラメータを記号のまま含んだ形で導出されるとが期待され、線形および非線形フィードバック制御のゲインと応答振幅の関係がパラメータ表示できると考えられる。

(4)(3)で得られる振幅および位相に関するゆっくりとした時間変動を表す方程式を解き定常状態における振幅および周波数を求め、線形および非線形フィードバックゲインの大きさとそれに依存した、応答振幅および応答振動数の関係を理論的に明らかにする。

(5)以上の理論計算に加えて本研究では実験を行う。
理論的に提案する制御を実現するため、アナログ電気回路を製作する。さらに、マイクロカンチレバープローブの発振特性の定性的な検討を容易にするため、プロトタイプAFMを試作し、製作した電気回路により、カンチレバーの自励発振特性を観察する。とくに線形フィードバックゲインの変化による自励発振の発生、非線形フィードバックによる自励発振したマイクロカンチレバープローブの振幅の低減化の可能性について、定量的に明らかにする。

さらに、空気中および液中（水中）における、マイクロカンチレバーの自励発振特性の比較を行う。従来法すなわち強制加振法と比較して、提案する自励発振型の優位性を周波数応答曲線およびFFT解析により検討する。さらに、試料とカンチレバーの距離の変化に対するマイクロカンチレバープローブの等価的固有周波数の変化（試料表面の原子とマイクロカンチレバープローブの探針上の原子との原子間力の変化）を定量的に観察する。また非線形フィードバックゲインを変えことによって、自励発振の応答振幅を変化させて、試料とカンチレバーと間隙に注目した実験を行い、振幅の大きさがマイクロカンチレバーの等価的固有振動数変化へどのような影響を与えるかを実験的に明らかにする。このとき、静的平衡状態におけるマイ

クロカンチレバーと試料表面の間隙に対する応答振幅との関係を定量的に求めることにより、液中における非接触観察の可能性を検討する。

4. 研究成果

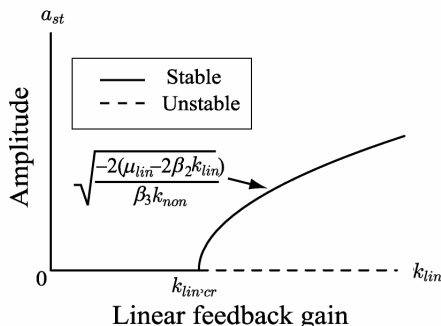
(1) マイクロカンチレバーの非線形特性すなわち、大たわみ状態での曲率の非線形性を考慮に入れて支配方程式を導いた。すなわち、オイラーベルヌーイの仮定のもとに弾性エネルギーを導出し、さらに大たわみ運動を考慮した運動エネルギーを導出し、ハミルトンの原理によって、運動方程式をたてた。ここで中立面は曲げによって伸びが生じないと仮定し、変分に際してはこの仮定をLagrange乗数を利用して考慮した。この結果、マイクロカンチレバースロープの支配方程式（非線形偏微分積分方程式）を定式化した。

(2) カンチレバーの応答振幅を自由に制御するために、著者がこれまでに提案してきた「非線形現象の積極的な利用」を考える。自励振動状態は、線形動的不安定状態であり、理論的には時間とともに振幅は無限度まで成長する。

一方、古くから電気回路の分野で van der Pol 振動子と呼ばれる、自励発振系が知られている。この系には非線形減衰効果が含まれ、自励発振の振幅は有限な大きさに収まり、相平面上には有限半径のリミットサイクルが発生することが知られている。

本研究ではこの非線形特性を積極的に利用することを考えた。負減衰を速度正帰還の線形フィードバックで実現して自励発振を発生させ、さらに非線形フィードバックにより van der Pol 振動子と同様なダイナミクスを作り出す。この結果非線形フィードバックゲインの増減により、自由に自励発振状態の定常振幅の大きさを調整できるものと考えた。本手法は、往復振動型の粘度計に容易に適用可能であり、その手法を特許出願した。

(3) 適切なフィードバックゲインを理論的に明らかにするため、解析的近似解析によって、フィードバック制御化でのマイクロカンチレバーのダイナミクスの解析を行った。多



重尺度法を用いて解析するに当たり、線形および非線形フィードバックの効果、振幅および位相を支配する方程式（いわゆる

modulation equation）に反映させられるように、フィードバックゲインのオーダーを決

図1 分岐図

定したのち、多重尺度法により解析した。

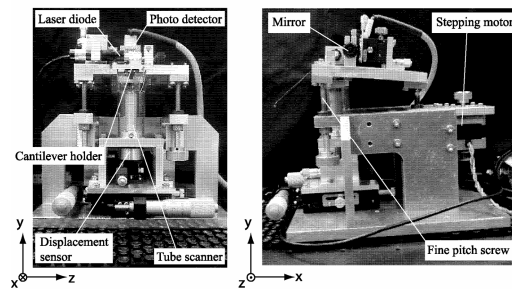
(4) (3)で得られた modulation equation から定常振幅の大きさとその安定性を解析し、分岐図として表したものが図1である。

同図からわかるように、ある線形フィードバックの値を超えると自励発振が生じ、この時の定常振幅は非線形フィードバックゲインの増加に伴い減少することが明らかになった。すなわち非線形フィードバックの調整によって、自由に応答振幅の大きさを設定可能であり、振幅をできるだけ小さくしたい生体試料観察の場合は、ハイゲインの非線形フィードバックを施せばそれが可能になることを理論的に指摘した。

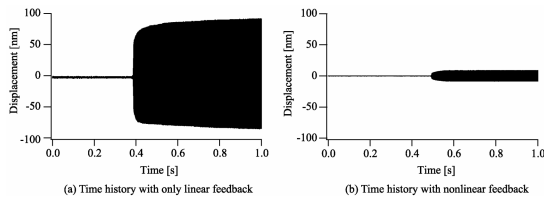
(5) 理論的に提案する手法の妥当性の検討に向けたパラメータスタディーを容易にするため、図2に示すようなAFMのプロトタイプを自作した。装着するマイクロカンチレバースロープは市販のものを用い、光てこによりそのたわみ角度を検出し、その値に応じてマイクロカンチレバースロープの支持点につけられたピエゾアクチュエータの変位を操作するように作られている。さらに本研究では、高周波ノイズの影響を極力抑えるため、微分制御ではなく積分制御により、同様な効果が発生できることを理論的に指摘した（特許を出願した）。

以上により、カンチレバーに van der Pol 振動子と等価なダイナミクスを発現させることを可能にし、低振幅定常自励発振するマイクロカンチレバースロープを実現した。

(6) プロトタイプAFMを用いた実験により、非線形フィードバックによる振幅低減効果に関して実験的に検証した。この結果を図3に示す。横軸は時間、縦軸が光てこによって測定されたたわみ角をカンチレバーの先端変位に変換した値である。(a)が非線形フィードバックを与えず、線形フィードバックのみで自励振動をさせた場合、(b)は線形フィードバックに非線形フィードバックをさらに加え、van der Pol 型の自励発振をさ



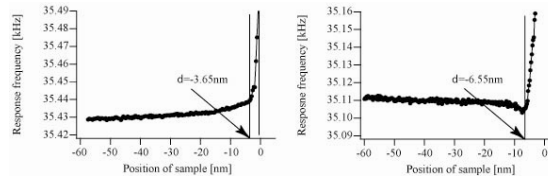
せた場合である。この実験結果からわかるように、非線形フィードバックによって、定常振幅が大幅に低減され、5nm以下の自励振動が



実現した。

図2 プロトタイプAFM

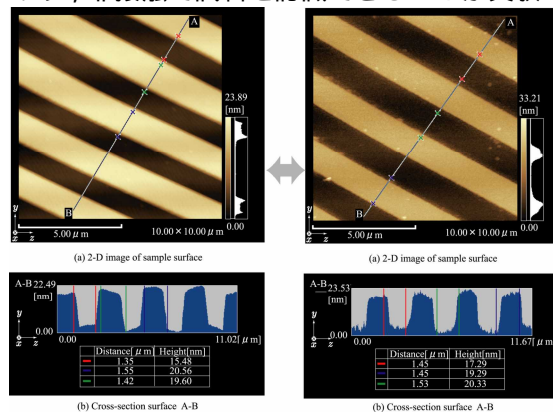
次に、カンチレバーを試料に徐々に近づけた場合の固有周波数変化を観察した。特に応図3時刻歴波形



答振幅の大小により、試料の存在の認識に対する、カンチレバーと試料との距離にどのような影響を及ぼすかを実験的に調べた。その結果を図4に示す。左の図は励振振幅が大きい場合(15.5nm)、右は小さい場合(4.4nm)

図4 間隙と固有周波数の関係

である。左の場合、3.65nmの間隙で試料を認識した。一方右の場合は6.55nmで認識しており、非接触で試料を認識できることが実験



によって明らかになった。次に3次元画像の取得を試みた。左がコンタクトモード(従来法)、右が提案手法でノンコンタクトモードである。非接触でも従来法と同等の鮮明な画像が得られた。

図4 3次元画像の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

(1)東祐司, 藪野浩司, 黒田雅治, 西村健太郎, 積分制御による van de Pol 型自励発振カンチレバー, 日本機械学会論文集 C 編, 76-765, pp. 1346-1352. 1

(2)Amplitude Control in a van der Pol-Type

Self-excited AFM Microcantilever, M. Kuroda, H. Yabuno, K. Hayashi, and K. Ashida, Journal of System Design and Dynamics, 2-3, pp.886-897, 2008. (査読あり)

〔学会発表〕(計4件)

(1) Development of van der Pol-type Self-excited FM-AFM (vdP-AFM), M. Kuroda, H. Yabuno, T. Someya, R. Kokawa, and M. Ohta, International Workshop on Advanced Atomic Force Microscopy Techniques Karlsruhe Institute of Technology (Campus North), Germany, 2010/03/01. (査読あり)

(2) ファンデルポール型自励発振方式 FM-AFMによる液中観察, 黒田雅治, 染谷貴司, 藪野浩司, 日本機械学会2009年度年次大会, 岩手大学, 2009/09/14. (査読なし)

(3) Noncontact observation in liquid with van der Pol-type FM-AFM, 黒田雅治, 藪野浩司, 染谷貴司, 粉川良平, 大田昌弘, 12th International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy (NC-AFM 2009), Yale Univ. (New Haven), 2009/08/12. (査読あり)

(4) Amplitude reduction of self-excited micro-cantilever probe of atomic force microscope, H. YABUNO, M. Kuroda, K. Ashida, and T. Kobayashi, XXII ICATM, Adelaide, Australia, 2008/08/29. (査読あり)

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

(1)名称: 粘度の測定方法

発明者: 藪野浩司, 黒田雅治

権利者: 慶應義塾大学, 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願2010-008402

出願年月日: 平成22年1月18日

国内外の別: 国内

(2)名称: カンチレバー装置およびカンチレバー制御方法

発明者: 藪野浩司, 黒田雅治

権利者: 筑波大学, 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願2008-299838

出願年月日: 平成20年11月25日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

藪野 浩司 (YABUNO HIROSHI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：60241791

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし