

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656074

研究課題名（和文） 共振を利用したナノ・マイクロ機構の操作及び微小エネルギーの収集機構の開発

研究課題名（英文） Development of mechanism for operating nano/micro structure and scavenging micro-energy

研究代表者

引原 隆士 (HIKIHARA TAKASHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70198985

研究成果の概要（和文）：

本研究課題は、電界、磁界を用いてこれまでに確立されてきた電気機器の動作原理を非電磁的作用力を用いたナノ・マイクロ領域のアクチュエータに適用することを試みたものである。マイクロ機構の操作とエネルギー収集だけでなく、エネルギーを振動モードの切り替えにより一方向に伝搬する機構、すなわちラチェット機構の開発に繋がれることを明らかにし、演算機能を有する機械共振メモリの開発の可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The research topic focused on application of principles of electro-magnetic apparatuses to non-electro-magnetic force in nano/micro scale actuators. As results, the operation of micro mechanism and the possibility of energy scavenging was confirmed. These results can be extended to micro mechanical structure for energy propagation in one direction, that is ratchet mechanism. In addition, the possibility of functional memory is figure out based on mechanical resonators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	0	1,800,000
2010年度	800,000	0	800,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	180,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学，電力変換工学，電気機器

キーワード：共振，ナノ・マイクロ機構，微小エネルギー，MEMS，カンチレバー，Arnoldの舌，パラメトリック共振

1. 研究開始当初の背景

近年、ナノ、バイオナノに関連する基礎研究が進み、ナノファブリケーションや遺伝子工学に関する研究が工学の重要な対象分野

となりつつある。ナノ工学では対象とする材料の表面改質や機能性創成の研究が進み、ナノバイオ工学では化学的手法に基づくDNAの解析とその統計的、数理解析手法による分

析は、ゲノム解析において華々しい成果を上げている。これらの分野は、材料物理、化学、および生命科学の基礎分野と考えられているが、主として化学的手法によっており、物理に基づく工学的手法とは遠い分野と見られて来た。一方、ナノバイオ系において、タンパク質等の分子を物理的に非接触支持したり、分子を含むナノ粒子をその場で質量分離し、搬送後、特定の対象に対して作用させる技術が、今後工学の技術として不可欠となることが予想される。またこのような技術は、原子・分子配列を操作するメモリに関する基本操作としても重要視されている。

ナノ科学の領域では、主として計測と微粒子のマニピュレーションを可能とする機構として AFM を中心とするプローブ技術が知られている。このマイクロカンチレバースプローブは微細化が進み、数 nm のサイズの粒子まで分子間力、原子間力による作用が可能になっている。システム工学において、これらのセンシング技術と制御技術は表裏一体の関係であり、ナノ計測技術の確立が同時にナノ領域の操作技術となりうる。物質表面のナノ粒子をマニピュレートする技術は、原子間力顕微鏡のプローブ技術を用いて実現できることが昨今実験的に示された。また、生体高分子の種々のダイナミクスを非線形力学に基づきシミュレートする研究、DNA と RNA の接着現象を力学的に捕らえ、その制御を検討する研究が既に海外でなされている。この研究は、バイオナノ系の現象を従来の化学反応系の定常状態を中心とする取り扱いから、構造力学および非線形力学の振動論を用い、ナノサイズの力学を古典的に扱う技術の検討と捕らえることができ、上述の原子間力顕微鏡のプローブによる操作原理と同様に検討することが可能である。しかしながら、これらの研究は、原子・分子等のナノ粒子を搬送するアクチュエータなどの検討には至っておらず、物理的視点の重要性が認識されつつも、基礎研究の領域に留まっている。

電気機器の分野では、特にハードディスクのヘッドの駆動系は数百ナノの記録領域の読み取り、書き込みを実現している。これらの技術はさらに数十ナノレベルのストロークを実現する方向に進むものと考えられ、究極的には原子 1 個分の位置制御によるメモリが実現される可能性がある。このような駆動技術の確立が、上述のナノ、バイオナノ系へ駆動技術導入の可能性を与えるものと考えられる。同時に、ピエゾ素子などによる振動要素とカンチレバースプローブによる新たな駆動系の提案もなされており、今後益々、ナノ領域における微粒子の駆動の実現が、現実のものとなる状況が整いつつある。

以上のように、申請当初に置いて、当該分野は研究の萌芽期にあった。

2. 研究の目的

本研究課題は、電界、磁界を用いてこれま

でに確立されてきた電気機器の動作原理に立脚し、分子間力、原子間力などの非電磁的作用力を用いたアクチュエータに適用することを試みる。対象とする微粒子（原子、分子）は真空中ではなく、大気雰囲気中存在する場合を想定している。従来これらの微粒子はイオン化することができなければ直接駆動する方法は無かった。直接駆動として、MEMS のピンセット機構を利用した接触による補足などが提案されているが、特にバイオ系の高分子ではそれによる分子が傷を受ける等の問題がある。このような分野では、分子の非接触な支持および搬送法の開発は重要な課題となる。非接触支持・搬送の基本原理は、プローブの振動によって微粒子の固有振動との共振を利用するもので、振動スペクトルによる選択的分離およびエネルギー注入を実現し、力学的な制御が可能な方法を提案することにより、新たな機能を有するナノアクチュエータの駆動原理・制御原理を検討することを目的としている。

3. 研究の方法

本申請の研究は、申請者が研究代表者として推進し、機関内研究分担者、米国 Colorado State University の Professor Vakhtang Putkaradze および米国内他研究機関の研究者、申請者の機関の博士課程学生、Colorado State University の博士課程学生も加え、国際的な連携の下に推進した。

本研究は(1) Prof. Putkaradze らが推進して来た溶液中の微粒子の凝集現象に関する理論的研究、(2) 申請者のグループが微粒子をマイクロカンチレバースプローブを用いて非接触支持する原理、さらには(3) ダイナミックモード原子間力顕微鏡 (Dynamic-mode AFM) の非線形振動制御に非線形力学で確立した手法を適用した AFM の機能向上成果、(4) マイクロカンチレバースプローブを用いた、微粒子の非接触搬送に向けた、振動子の ILM 振動伝搬制御に関する研究成果、最後に(5) 微粒子のマニピュレーションに関する理論的検討の研究成果に基づいて実施した。

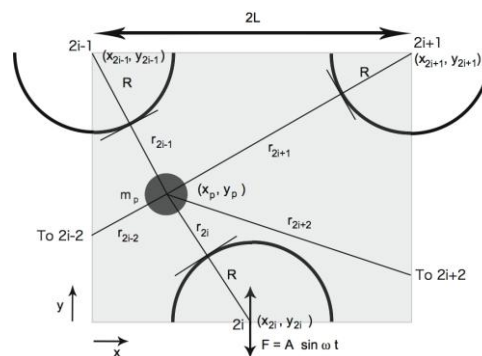


図1 アクチュエータ原理図

これらの研究成果を有機的に連携するとことにより、微粒子をカンチレバーアレーで非接触に操作・支持し、駆動する可能性(図1参照)を理論的に示すと同時に、カンチレバーを用いた微粒子の駆動に必要なカンチレバーの局在振動を空間的に移動させることが可能であることが得られた。このような理論的研究を一層進めると同時に、微粒子の非接触支持・搬送を実現する MEMS デバイスの設計・製作を実施した。

また、微小機構においてはその駆動エネルギーをどのように供給するかは大きな課題である。微小エネルギー回収機構に関しては、様々な研究があるが、特にアクチュエータの構造を利用したエネルギー回収の可能性を検討することは、微小アクチュエータの駆動において重要な観点である。以上から、種々の微小振動子(アクチュエータ)が外乱からエネルギーを回収するのに適した構造についても、理論的及び実験的に検討を加えた。

4. 研究成果

平成 21 年度は、理論的にカンチレバーによる原子・分子の機械的パラメトリック共振による操作の可能性を検討し、国際共同研究を実施した。その成果は時宜を得た研究と評価され、*Physical Review Letters* に採択された。この理論的検討に基づき、原子間力顕微鏡のプロープ系により、原子・分子との機械的共振を実現するための構造等を検討したが、機械振動だけでは任意の周波数で実現することが難しいとの知見を得た。一方で、電場や磁場励振を利用したプロープ系を検討し、プロープの制御系の検討をすすめる、理論的には Arnold の舌状の共振領域が存在することをエネルギーの閾値から確認し、実験的に原子・分子操作の作用を実現できる可能性を検討した。逆に、共振によりエネルギーを収集する系の構造をマクロな実験系を組み、平成 22 年度以降に実験を行う準備を行った。

平成 22 年度は、平成 21 年度に実施したカンチレバーによる微小粒子の機械的パラメトリック共振による操作の可能性の結果を踏まえ、MEMS 共振器の振動モードの検証とその共振切り替え制御の検討、及びマクロなパラメトリック振子を用いた振動からエネルギーを回収する機構のメカニズムについて実験的検討を行った。その結果、非線形 MEMS 共振器において特異なヒステリシス特性存在し、広い解の共存領域を持つデバイスの製作が可能である事を示した。これを受けて、共存する共振解が制御入力により切り替え可能である事を数値的に示し、メモリ等への機械共振機構の利用が可能であることを示すと共に、構造に適

した制御法の検討を行った。一方エネルギー回収機構に関しては、マクロな系において、上記切り替えと同じ時間遅れフィードバックによりパラメトリック振動子の共振モードの切り替えを実現し、より大きなエネルギーの回収が可能なモードを励振することが可能である事を示した。これらにより、非線形振動子に共存する解の切り替えによりエネルギー回収を実現する機構の開発への手がかりを得た。

平成 23 年度は、平成 21~22 年度に実施した、カンチレバーによる微小粒子の、機械的パラメトリック共振による操作の可能性の結果、MEMS 共振器の振動モードの検証と、その共振切り替え制御の検討、及びマクロなパラメトリック振子を用いた、振動からエネルギーを回収する機構のメカニズムに基づき、MEMS におけるラチェット機構の開発が、これらの研究成果を適用した新しい機構の開発につながるとの結論に至った。そのため、ラチェット機構を結合 MEMS 共振器で実現すると同時に、局在モードの切り替えを実現する制御法、およびその実現に関して数値的および実験的に検討を進めた。その結果、平成 22 年度に製作した、ヒステリシス特性を有する非線形 MEMS 共振器を用いて、MEMS 共振メモリの開発に着手した。

MEMS 共振メモリは、その振動モードを保存状態とするメモリである。本研究では、特にその読み出し、書き込みの実現が、本研究課題がこれまでに達成してきた成果の適用により可能となることを明らかにし、その可能性を数値的および実験的に示した。MEMS メモリの状態測定系は、従来工学測定が主として用いられて来たが、メモリ状態への作用が生じるなどの問題があることから、MEMS 共振器の対称構造を考慮した駆動系による差動、セルフセンシングが適することを示した。また、平成 22 年度に提案した制御手法に、変位測定の結果を適用し、メモリの状態書き換えが可能であることを初めて示した。

これらの結果により、本申請課題が目指すマイクロ機構の操作とエネルギー収集だけでなく、エネルギーを振動モードの切り替えにより一方向に伝搬する機構、すなわちラチェット機構の開発に繋がることが明らかとなった。さらにその振動を利用することにより、ナノ・マイクロ機構のアクチュエータ開発にもつながる成果を得ることができた。

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 8 件)

1. Masayuki Kimura, Takashi Hiki-hara, Experimental manipulation of intrinsic localized modes in macro-mechanical system, NOLTA IEICE (査読有), 3, 233-245 (2012), DOI: 10.1588/nolta.3.233
2. Suketu Naik, Takashi Hiki-hara, et al., Characterization of Synchronization in a Unidirectionally Coupled System of Nonlinear Micromechanical Resonators, Sensors and Actuators A: Physical (査読有), 171, 361-369 (2011).
3. Suketu Naik, Takashi Hiki-hara, Characterization of a MEMS resonator with extended hysteresis, IEICE ELEX (査読有), 8, 291-298 (2011).
4. Yuichi Yokoi, Takashi Hiki-hara, Tolerance of start-up control of rotation in parametric pendulum by delayed feedback, Physics Letters A (査読有), 375, 1779-1783 (2011).
5. 横井裕一, 引原隆士, パラメトリック振子の周期回転への始動制御, システム制御情報学会論文誌 (査読有), 24, 54-60 (2011).
6. 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キャンチレバー振動の安定化, 顕微鏡 (査読有) 45, 137-139 (2010).
7. Kohei Yamasue, Kei Kobayashi, Hirofumi Yamada, Kazumi Matsushige, Takashi Hiki-hara, Controlling chaos in dynamic-mode atomic force microscope, Physics Letters A (査読有), 373(35), 3140-3144 (2009).
8. Byungsoo Kim, Vakhtang Putkaradze, and Takashi Hiki-hara, Manipulation of single atoms by atomic force microscope as a resonance effect, Physical Review Letters (査読有), 102, 215502 (2009).

〔学会発表〕 (計 5 件)

1. A. Yao, T. Hiki-hara, Switching control between stable periodic vibrations in a nonlinear MEMS resonator, International Symposium on Nonlinear Theory and its Application (NOLTA 2011), Kobe, Japan (2011).
2. 奥拓郎, 横井裕一, 引原隆士, エネルギー・スキャベンジングへのパラメトリック振子の応用 — 散逸エネルギーに基づく評価, 電気学会全国大会, 大阪大学 (2011. 3. 17).
3. 八尾惇, 引原隆士, 機械共振器における安定周期振動間の切り替えに関する数値

的検討, 電気学会全国大会, 大阪大学 (2011. 3. 17).

4. 八尾惇, ナイク スケト, 引原隆士, 非線形 MEMS 共振器の共存解切り替えに関する一検討, 電子情報通信学会技術報告, 東京理科大学 (2011. 3. 10)
5. Takashi Hiki-hara, Resonant manipulation of particles in nanosystems, RANM2009, Kuala Lumpur, Malaysia, (2009. 8. 25).

〔図書〕 (計 1 件)

1. Kohei Yamasue and Takashi Hiki-hara, Nonlinear Dynamics of Nanosystems, (WILEY-VCH, 2010) 465p (267-286).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

引原 隆士 (HIKIHARA TAKASHI)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号: 70198985

(2) 研究分担者

佐藤 宣夫 (SATO NOBUO)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：70397602

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：