

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28日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560263

研究課題名（和文） 非線形弾性力により従来比1万倍の力を発生する静電マイクロアクチュエータ

研究課題名（英文） Electrostatic microactuator which produces power of ratio 10,000 times than conventional electrostatic microactuator by using non-linear elastic force.

研究代表者

南 和幸 (MINAMI KAZUYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00229759

研究成果の概要（和文）：

電極間に発生する静電気力と非線形な特性を持つバネとを協働させる駆動方式を考案し、この方式により動く静電マイクロアクチュエータを提案した。有限要素法を用いた詳細なシミュレーションにより、以前よりも931倍も高出力な静電マイクロアクチュエータを設計した。更なる形状・寸法の改善や加工技術の高精度化ができれば、以前のものより1万倍以上高出力になることが分かり、新方式の優秀性を証明した。また、試作の実施により、実際に製作する上での問題点も実験的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The novel drive principle, that makes electrostatic force collaborate with the non-linear spring, and the electrostatic microactuator driven by that principle were proposed. By the detailed simulation using the finite element method, the electrostatic microactuators which had the output of 931 times higher than the previous one were designed, and it was seen that the output of more than 10,000 times higher was possible if shape and dimensions of structure, and micromachining technique were improved. They proved the excellence of novel drive principle and structure of the microactuator. In addition, the problems on the fabrication were clarified experimentally by trial manufacture.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：MEMS、マイクロアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

(1) MEMS分野で一般的に使用されている静電マイクロアクチュエータは、a.対向させ

た平行平板電極に電圧を印加して静電引力を発生させ、その力と電極板の移動を直接利用する方式、b.相互に入り込んだ櫛歯状電極

に電圧を印加して、相互に引き込む静電引力と櫛歯電極の相対移動を直接利用する方式がある。a の典型例はテキサスインスツルメンツ社の画像表示素子である DMD がある。この例のように微細で軽量の鏡であれば高速で動かすことができるが、発生力は大きくないため大きな物を大きく動かすことはできない。一方、b の櫛歯電極方式でも同じである。一例では印加電圧 30V の時に移動できる最大距離は僅か 1.4 μm 程度であり、この時発生している力は 55 μN 程度である。

(2) この場合においても、電極のために大きな面積をアクチュエータが占有しており、スペース効率が極めて悪くマイクロ化するメリットが小さい。

2. 研究の目的

新規な駆動原理=エネルギー変換型静電-弾性協働駆動原理を用いた静電マイクロアクチュエータについて、

- (1) 理論解析やシミュレーションによる設計手法（特に非線形バネ）の確立
- (2) 原理を確認できるアクチュエータの全体設計と製作プロセス開発
- (3) 試作品の製作、その駆動性能評価による発生力 1 万倍以上の可能性の実証を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 設計手法の確立

非線形バネ、摩擦、接触などの機械工学的要素、技術を効果的に組み込んだアクチュエータ構造体を考案する。その機械特性と性能向上の妥当性を評価するために、接触を含んだ有限要素法による構造解析手法の検討を行い、構造体の適切な解析手法を明らかにする。例えば、非線形バネの形状や接触、摩擦力の発生状況は、使い方や製作方法によりいくつかの種類が考えられるので、それぞれ構造や動作について適した解析手法を確立する。

(2) アクチュエータの設計と製作プロセス開発

(1) の手法により、より詳細な非線形バネの形状や接触部位の機械特性評価を行い、それらの適切な形状を設計する。さらに、非線形バネ等に加え、配線や電極を組み込んだ静電マイクロアクチュエータ構造全体の設計を行う。これと同時に、特殊な形状を持つ非線形バネやアクチュエータ構造全体の製作プロセスを設計する。製作プロセスと製作する構造体の整合性を検討して、構造と製作プロセスの双方を修正して、製作可能な構造と製作プロセスを決定する。特殊な構造を製作する必要があるため、新たなマイクロマシニング技術を開発する。微細加工に必要な基本的装置であるライナー、蒸着装置、RIE 装

置を保有し、厚膜レジスト SU-8 の使用経験もあるので、これらの設備を用いて新しい製作プロセスの開発を進める。

(3) 試作と駆動性能評価

自作のマイクロアクチュエータの発生力測定装置も保有しているので、(2) で設計したマイクロアクチュエータを試作し、マイクロアクチュエータの発生力等を評価する。設計値との比較から、駆動原理、設計手法および製作プロセスの妥当性を評価する。

4. 研究成果

(1) 非線形バネの有限要素法シミュレーション

① 基板と平行に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータの発生力シミュレーション

図 1 に基板と平行に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータの概略図を示す。可動電極と固定電極で発生する静電気力による仕事を 4 個の接触型非線形バネに蓄える。その仕事を後で外部に取り出す。接触型非線形バネの有限要素法解析モデルを図 2

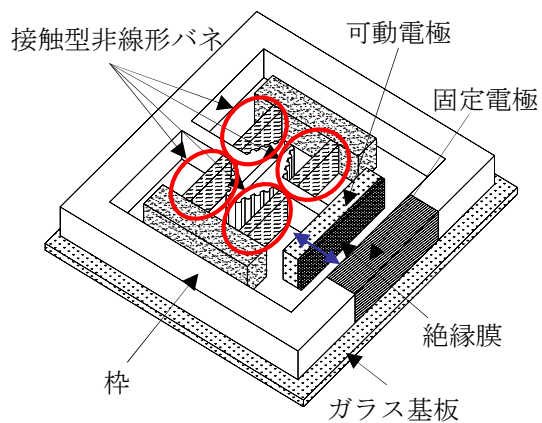


図 1

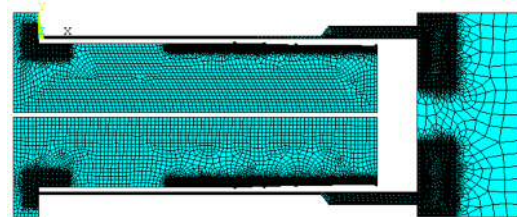


図 2

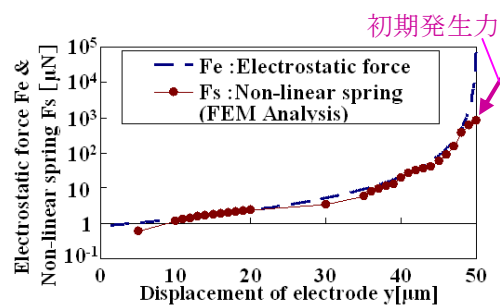


図 3

に示す。板バネが接触して非線形性を発揮する方式であり、構造解析に接触を組み合わせた解析を行っている。図3に静電気力とシミュレーションで求めた非線形バネのバネ力の関係を示す。非線形バネは設計通りに非線形性を示しており、初期発生力は $820\mu\text{N}$ である。以前の方式よりも931倍の力を発生させることが出来ることが確認できた。図3より、非線形バネの形状、寸法変更によりさらに静電引力に近づければ初期発生力を $10^4\mu\text{N}$ にすることが可能であり、従来比1万倍の高出力化が可能であることが分かった。

②基板表面に垂直に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータの発生力シミュレーション

図4に基板表面に垂直に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータの概略図を示す。このタイプは基板と可動電極が平行であり、製作上電極面積を大きくすることが容易で、高出力が期待できる。図5に有限要素法によるシミュレーション結果を示す。非線形バネ特性はまだ十分に静電引力特性に近づいていない。設計形状がまだ適切でないためである。しかしながら、電極面積を大きくできるため、初期発生力は $10^4\mu\text{N}$ を越えており、さらに1桁大きくできる余裕があることが分かった。

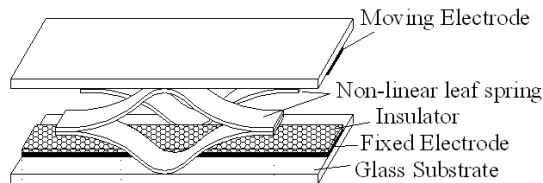


図4

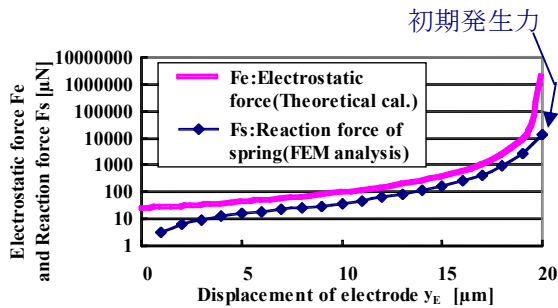


図5

③非線形バネと可動電極が一体になったアクチュエータの発生力シミュレーション

図6に非線形バネと可動電極が一体になった

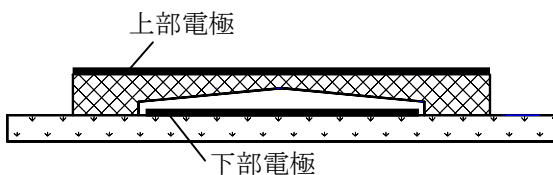


図6

ったブリッジ状の静電マイクロアクチュエータの概略図を示す。ブリッジ部が非線形バネとして作用する。静電場と接触を含む構造体の複雑な連成解析を行った。まだ十分な解析を行ったとは言えないが、単純な均一厚さのブリッジと比較して約8倍のエネルギーを蓄えることが分かった。すなわち8倍の出力が期待されると言うことであり、非線形なバネの有効性が確認できた。

(2) 製作プロセス開発

①基板と平行に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータの製作に必要な高アスペクト比加工の開発

図7に基板上に貼り付けたポリイミドフィルムを酸素RIEにより加工してアクチュエータ構造を製作した例を示す。板バネの部分は幅 $20\mu\text{m}$ 程度で高さ(厚さ)は $50\mu\text{m}$ である。ほぼ形状が出来ているが、底の部分のエッチングが十分進まずに残渣が残った。残渣が残る条件について検討を行った。

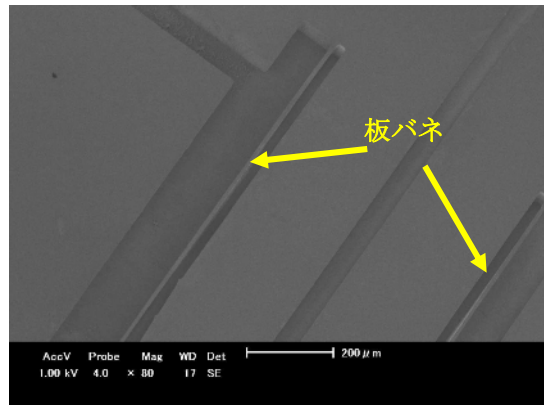


図7

②基板表面に垂直に変形する非線形バネの製作に必要な立体的微細加工技術の開発

非線形バネの製作には、基板表面から浮き上がり、湾曲した形状を持つ特殊な非線形バネの製作が必要である。本研究ではグレイトーンリソグラフィを用いてバネ形状の山型を製作し、その上に薄膜を形成してバネ形状にしてから山型を犠牲層として除去するプロセスの開発に成功した。開発したプロセスで上半分の非線形バネを製作した例を図8に示す。山型の犠牲層を除去した段階であるが、山型に加工されていることが分かる。しかし、この板バネの片端を自由にするると板バネがそり上がってしまい、必要な形状が得ら

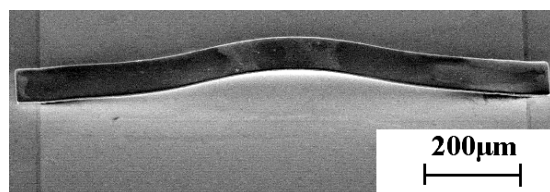


図8

れなかった。製作プロセス途中の加熱プロセス時に残留応力が残ってしまったと思われる。詳細な製作プロセス条件の検討が必要であることが分かった。

③非線形バネと可動電極が一体になったアクチュエータの製作プロセスの開発

一様な厚さの単純な構造のブリッジ状アクチュエータ構造を製作するプロセスを開発し、試作した。製作例を図9に示す。

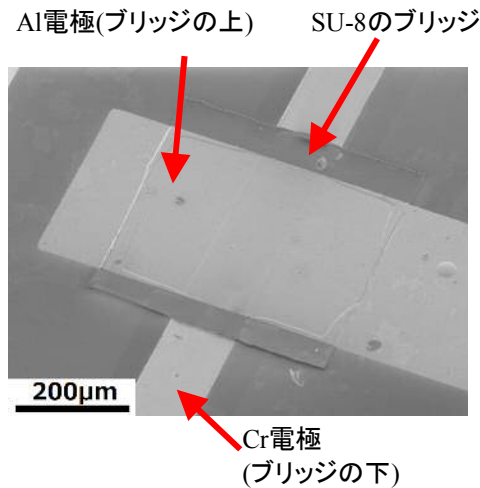


図9

(3) 試作と駆動性能評価

①基板と平行に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータと②基板表面に垂直に変形する非線形バネを持った静電アクチュエータは、製作プロセスで問題が発生し、アクチュエータを完成させることができなかった。このため、駆動評価も行うことが出来なかった。

③のブリッジ形状を持つ非線形バネと可動電極が一体になったアクチュエータについては単純なブリッジ形状の物が製作できたので駆動評価を行った。図10に印加電圧（駆動電圧）とブリッジ中央の変位量の測定結果と有限要素法によるシミュレーション結果を示す。ブリッジの長さが45µmと60µmの物の結果である。試作品の特性とシミュレーション結果が良く一致していることが分

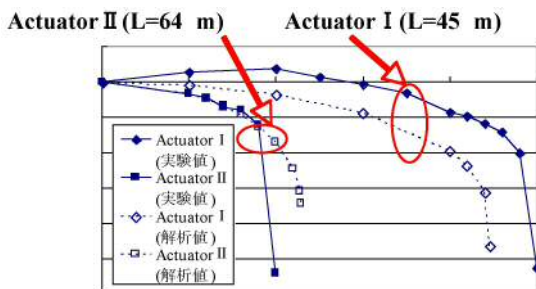


図10

かり、設計値通りに駆動できることが確認できた。しかし、非線形バネの効果による発生力の向上までは評価できなかった。

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)

[学会発表] (計4件)

① HAYASHI Tomohiro, Design and Evaluation of High Performance Electrostatic Microactuator having Diaphragm-Electrodes Structure, The 3rd International Symposium on Digital Manufacturing 2011, 2011.11.30、リーガロイヤルホテル小倉(北九州)。

② 益本寛之、垂直可動型静電-弾性協働マイクロアクチュエータの構造および製作プロセスの検討、日本機械学会 2011 年度年次大会、2011. 9. 13、東工大・大岡山(東京)。

③ 益本寛之、垂直可動型非線形板バネの提案とFEMシミュレーションによる設計、IIP2011 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会、2011 年 3 月 22 日、東京電機大学(東京)。

④ 津山 奏、グレイトーンリソグラフィによる立体微細形状板バネの製作プロセスの開発、日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会、2011 年 3 月 5 日、岡山理科大学(岡山)。

[その他]

ホームページ等

<http://mems.mech.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南 和幸 (MINAMI KAZUYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 00229759

(2) 研究分担者

中島 雄太 (NAKASHIMA YUTA)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 70574341

(H22→H23)

木下 勝之 (KINOSHITA KATSUYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・講師

研究者番号: 80325240

(H21)