

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560263

研究課題名(和文) MEMS に生じる電界 - 構造 - 流体連成振動現象のモデリングと連成効果の検討

研究課題名(英文) Modeling and consideration on electrostatic-structural-fluid coupled vibration of MEMS structure

研究代表者

堀江 知義 (Horie, Tomoyoshi)

九州工業大学・情報工学研究院・教授

研究者番号：40229224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000 円、(間接経費) 1,230,000 円

研究成果の概要(和文)：マイクロ片持はり構造の機械的な振動時に生じる、電界、変形、流れの連成振動挙動を明らかにするために、静電気力 - 構造 - 流体連成解析コードを開発し、連成効果に及ぼす支配因子の影響を検討し、モデルの妥当性を検証した。さらに、マイクロ片持はり構造を作成し、真空中における駆動実験から非線形連成効果特性を確認した。大気中における振動実験と電界 - 構造 - 流体 3 連成解析により、流体との連成効果によってプルイン特性が変化することを示した。

研究成果の概要(英文)： To clarify the characteristics of coupled mechanical vibration behavior among electric field, deformation and fluid for a cantilever micro beam structure, an electrostatic-structural-fluid coupled finite element analysis code was developed. By considering the influence of governing parameters on the coupled phenomenon, the validity of the coupled model was verified. Micro cantilever beams were fabricated for the vibration experiment, non-linear coupled effect of which was observed in the vacuum environment. Comparing the vibration characteristics in the air with those obtained by the three phenomenon on coupled analysis, the pull in characteristics change was shown due to the coupled effect.

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：静電気力 - 構造 - 流体連成現象 3 連成現象効果 MEMS 連成解析

1. 研究開始当初の背景

MEMS (Micro electro-mechanical systems)には静電界、流れ、磁場などの環境下で機械的な動きや変形が生じるため、マイクロ・スイッチやマイクロ・プローブなどの駆動機構の開発および設計には、複数の物理現象が相互に影響を及ぼしあう連成現象の定量的な評価が不可欠である。

連成現象の代表例として、流体 - 構造連成現象、電磁 - 構造連成現象、熱 - 流体連成現象などがあり、近年、計算機性能の飛躍的な向上と計算力学手法の発展により、連成現象、連成解析の研究が進められてきている。特に、MEMSの連成解析としては、F. Shiら¹⁾によるマイクロ・ピンセットのアーム構造に生じる静電場と変形が連成する連成振動解析の研究があり、高精度に解析できる連成アルゴリズムを提案している。小寺ら²⁾は両端支持マイクロ・メンブレン構造に対して、静電界・構造・隙間の流れ(修正レイノルズ方程式)を連成させて解析し、静電気力による変形に及ぼす隙間の効果について議論している。最近、N. R. Aluruら³⁾によるNavier-Stokes方程式により圧縮性粘性流体を考慮したマイクロはりの電界・構造・流体解析、およびS. Mukherjeeら⁴⁾によるStokes方程式により非圧縮性粘性流体を考慮したマイクロはり解析が報告されている。

特定のMEMS構造を対象に連成解析が試みられてはいるが、MEMSに生じる静電気力 - 構造連成効果、静電気力 - 構造 - 流体連成効果、電磁 - 構造 - 流体連成効果などの連成現象に対して、それぞれのモデル化の方法の適用限界や、複数の現象が連成する際の、連成効果の扱い方と精度の関係、連成効果と支配因子の定量的な評価などについて、体系的な研究はほとんど行われていない。MEMSの中には静電気力のほか、マイクロ・プローブなどのように電磁力で高速に駆動するものや、磁場環境下で駆動されるものもあるが、電磁力の発生とMEMS構造の変形の連成解析も行われていない。

文献

1) F. Shi, et. al., Dynamic analysis of micro-electro-mechanical systems, Int. J. Num. Meth. Eng., 39, 4119, 1996.

2) H. Kotera, et. al., A study on the effect of air on the dynamic motion of a MEMS device and its shape optimization, Lecture Notes in Computer Science 1940, 573, 2000.

3) K. D. Sudipto, N. R. Aluru, Coupling of hierarchical fluid models with electrostatic and mechanical models for the dynamic analysis of MEMS, J. Micromech. Microeng., 16, 1705-1719, 2006.

4) R. Ghosh, S. Mukherjee, Fully Lagrangian modeling of dynamics of MEMS with thin beams-Part II: Damped vibrations, J. Applied Mech., 76, 051008,

2009.

2. 研究の目的

空気中で静電気力によって動的に変形(振動)するマイクロはり構造に対して、静電気力-構造連成効果に及ぼす、たわみ、速度、空気抵抗、サイズなどの支配因子の影響、さらに、流体(空気)-構造連成効果に及ぼす、たわみ、変形速度、気圧、サイズなどの影響について、解析および実験により、連成現象のモデル化の妥当性を検証する。負の付加剛性効果と各パラメータの依存性、形状の不均一性およびばらつきが連成効果に及ぼす影響、端部に生じる電界の集中と静電気力分布の影響などを明らかにする。

個々の相互作用のモデル化と連成解析手法の組み合わせの整合性、解の精度、解析時間、数値的な不安定性を比較・検討し、これらを組み合わせた多重連成解析手法について、一体型解法、分離型解法およびそれらの組み合わせ、さらには大規模並列解法との適合性から、それぞれの連成解析モデルに応じた最適な並列連成解析手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) マイクロ片持はりの作成と駆動実験

SOIウェハを用いて、活性層Siにはり形状のパターニングを行い、Deep-RIE(Deep Reactive Ion Etching)によって活性層Siのエッチングを行う。その後、BOX層SiO₂をHFによりエッチングし、超臨界乾燥によってマイクロ片持はりが完成する。

Fig.1に実験装置の概要を示す。実験装置は直流電源装置、レーザ干渉変位計、除振台、A/D変換器、PCから構成されている。流体の連成効果の影響を検討するために、真空チャンバー内で減圧実験を行う。ロータリーポンプによりチャンバー内の気圧を10Pa以下まで減圧した上で、直流電源装置により電流導入端子を通じてステップ電圧を印加して、マイクロ片持はり(Fig.2参照)を駆動させる。チャンバー上部ののぞき窓からはりの振動変位をレーザ干渉変位計により測定する。

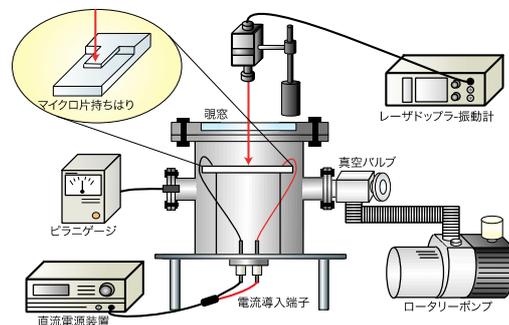


Fig.1 実験装置と測定法の概要

作成した1000μmの長さのマイクロ片持はりをFig.3に示す。マイクロ片持はりの長さ、幅、厚さに関しては設計値との誤差は小さい。

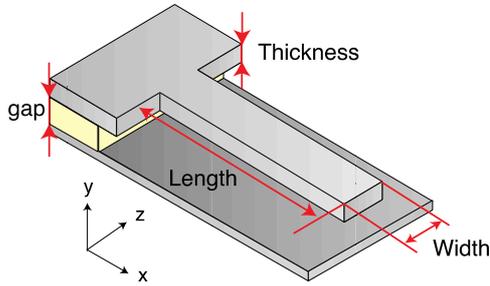


Fig.2 マイクロ片持り



Fig.3 作成したマイクロ片持り

(2) 連成解析手法

構造，流体の有限要素式はそれぞれ，

$$M^s a^s + K u^s = g^s \quad (1)$$

$$M^f a^f + N v^f + C^f v^f - G^f p = g^f \quad (2b)$$

$$T G v^f = 0 \quad (2a)$$

とする．ここで， M, K, N, C, G はそれぞれ，質量，剛性，移流項，拡散，勾配の行列， a, u, g, v, p はそれぞれ，加速度，変位，外力，流速，圧力のベクトルであり，上付き添字 s, f はそれぞれ，構造および流体の成分，左下付き添字 T は行列の転置を表す．次に静電界の有限要素方程式は次式となる．

$$L\Phi = b \quad (3a)$$

$$E = G\Phi \quad (3b)$$

$$f^{es} = -\frac{\epsilon}{2}(E \cdot n)^2 n \quad (3c)$$

ここで， E は電界， n は物体表面の法線ベクトル， ϵ は誘電率， L はラプラス演算行列， b は境界条件に由来する右辺ベクトル， Φ は電位を表す．(3a)より電位 Φ を求め，次に(3b)より電界 E ，最後に(3c)より静電力 f^{es} が求まる．

構造-流体-静電界の境界上で連成条件が次式で表される．

$$v_c^s = v_c^f \quad (4a)$$

$$q_c^s + q_c^f = q_c^{sf} = f^{es}(u_c^s) \quad (4b)$$

q は等価節点力ベクトルであり，式(1)，(2a)の左辺に対応している．添字 c は構造と流体の連成自由度であることを表している．また静電力 f^{es} は，構造変位 u_c^s に依存して変化する．各時間ステップ内の反復計算ステップ k において，次式に基づき構造-流体連成場と静電場を分離して解析する．

$$q_c^{sf(k)} = f^{es}(u_c^{s(k-1)}) \quad (5)$$

流体は空気(質量密度 1.18 kg/m^3 ，粘性率 $1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，誘電率 $8.859 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

(26)とする．解析領域はYZ面に関する対称性を考慮して半分とするが，静電界領域ははりと底面の間のみとし，また流体領域は片持ちはりの周囲を覆う直方体とし，解析結果に影響を及ぼさない最小の広さとした．構造解析の要素は六面体 20 節点要素，静電界解析の要素は六面体 1 次要素，流体解析の要素は四面体 1 次要素とする．

4. 研究成果

(1) 構造-静電界連成現象における非線形性の検討

真空中静電駆動実験で得られた電圧と振動周期の関係を Fig.4 に示す．電圧が上昇するにつれ，振動周期が増大していることが確

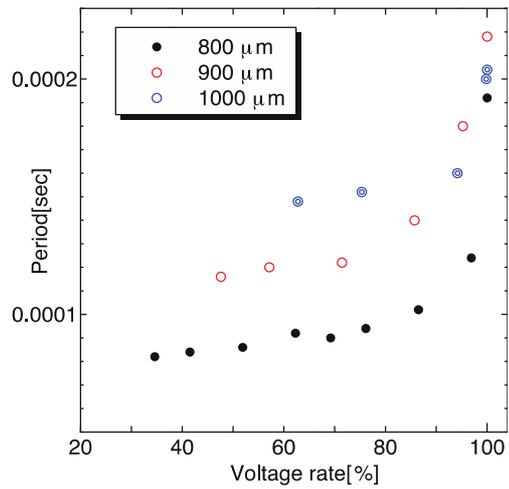


Fig. 4 印加電圧とはりの震動周期

認できる．これは電圧が上昇するにつれ静電界連成効果により剛性が低下し，その結果周期が増大するためである．また，プルインの直前では急激に周期が増大していることが確認でき，静電界の非線形性が顕著に現れている．

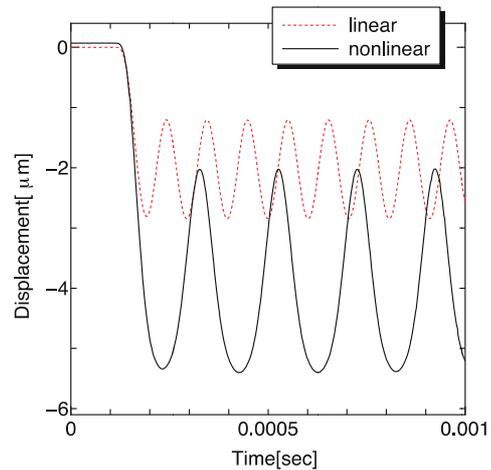


Fig.5 真空中における変位の非線形性

真空中静電駆動実験の変位時刻歴を Fig.5 に示す．高電圧時には振動波形の谷の幅が大きく，山の幅が小さくなっており，静電界の非線形連成効果が顕著に現れている．また，Fig.6 に横軸に変位，縦軸に速度をとった

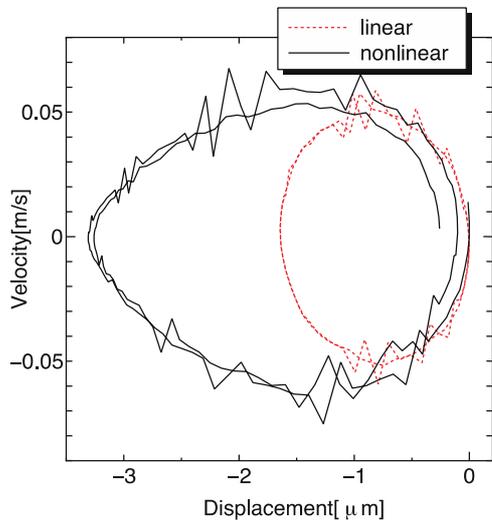


Fig.6 連成振動における変位と速度

ポアンカレマップを示す。静電界非線形連成現象における変位と速度の関係は低電圧時は楕円形を示し、高電圧時の場合はグラフが左右非対称なたまご形をしている。

長さ 1000 μm のマイクロ片持ちはりを対象として 1 自由度連成振動理論モデルより求めた振動波形を Fig.7 に示す。実験結果と同様に 8.04V では振動周期と振幅が大幅に増大しており、静電界連成効果による非線形性が現れている。印加電圧をわずかに上昇させ、8.05V にするとプルインが生じ、振動しなくなる。なお、理論式から求めたプルイン電圧の 7.58V と一致しないのは、静電気をテイラー展開した際に線形近似を行ったこと、理論において片持ちはりを簡易な平板の 1 自由度モデルに近似しているためと考えられる。

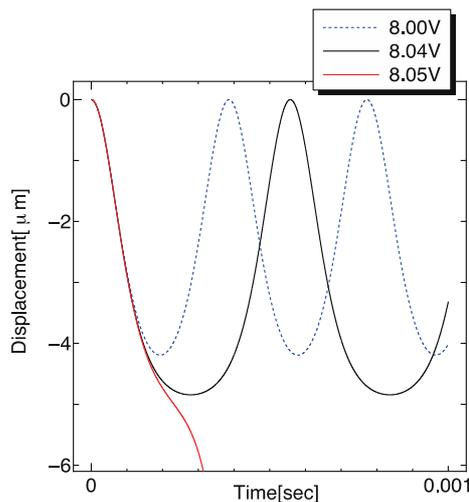


Fig.7 印加電圧と変位波形

(2) 解析手法の検証

空気中において 5V の電圧を印加した際のはりの自由端の y 方向速度時刻歴を Fig.8 に示す。解析結果と実験結果は周期、振幅、減衰の傾向ともによく一致している。この結果から本解析手法は構造-流体-静電界連成現象の特徴をよく捉えており妥当といえる。

(3) 連成効果の検証

はりに 0.8~4.0 V と電圧を変えて印加した際の、自由端の y 方向最大変位と電圧の関係を図.9 に、また、振動周期と電圧の関係を図.10 に示す。変形に伴う静電界の変化を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果、および 1 自由度連成振動理論モデルによる結果を比較している。変形と静電界の連成効果を考慮すると、変位、振動周期ともに増加している。これは静電界の変化によって静電気力が増大し、変形が大きくなるためであり、見かけの剛性低下として現れる。また 1

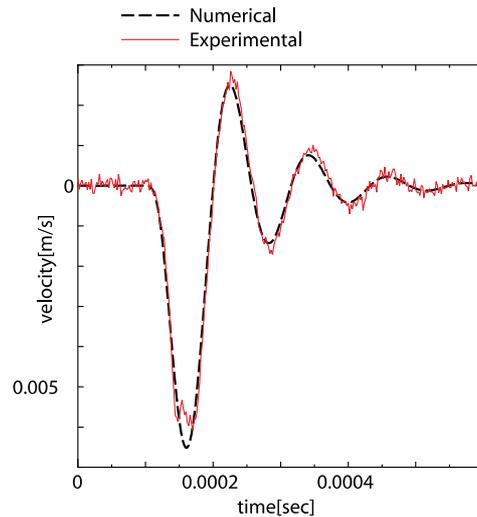


Fig.8 連成振動時の速度履歴

自由度連成振動理論の曲線と連成解析結果は 3.5V を越えると一致しなくなる。これは 1 自由度連成振動理論において、連成による変形効果の高次の項を無視しているためである。さらに電圧を上げると連成解析による変位は底面に達する。これはプルイン現象に対応している。

次に、連成解析において、はりに 2~8 V の電圧を印加し、極板間距離を 4.0~5.0 μm

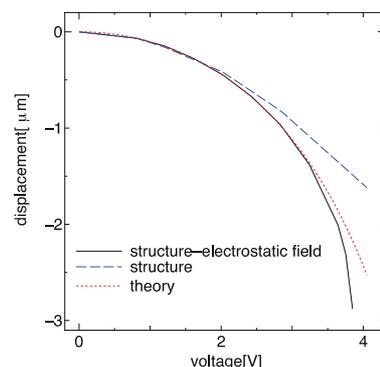


Fig.9 連成振動時の電圧と最大変位

と変化させて得られた対数減衰率を Fig.11 に示す。流体との連成効果は振動振幅の減衰として現れるが、極板間距離が大きいくほど対数減衰率は小さくなっている。これはすきま流れによる流体力が極板間距離の 3 乗に反比例することに対応している。また、電圧の増加に伴い対数減衰率は大きくなっているが、これは変形速度の増大によって流体と連成するためである。

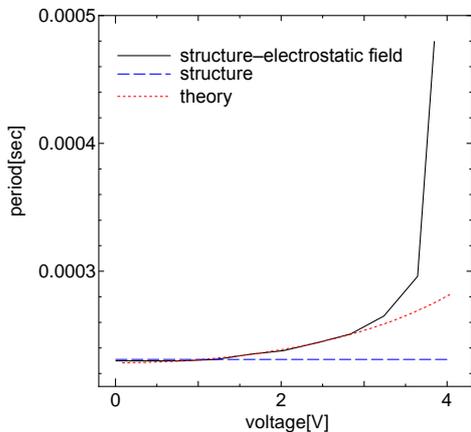


Fig.10 電圧と連成振動周期の関係

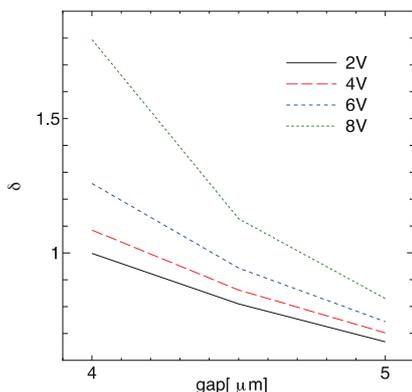


Fig.11 ギャップ間隔と減衰率の関係

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 3 件)

(1) 石原大輔, 堀江知義, 非圧縮性流体-弾性体連成のプロジェクトン解法に関する収束性評価, 日本計算工学会論文集, 査読有, Vol.2013, 20130017, 2013.

(2) 石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 馬場昭好, MEMS 構造要素における構造 流体 静電界連成の階層的分解による有限要素解析, 日本機械学会論文集 A 編, 査読有, 79 巻 804 号, pp. 1291-1302, 2013.

(3) 石原大輔, 堀江知義, 流体構造連成の整合プロジェクトン解法, 日本機械学会論文集 A 編, 査読有, 79 巻 804 号, pp. 1161-1170, 2013.

〔学会発表〕(計 8 件)

(1) 堀江知義, 複合連成現象の V&V, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会論文集, 11 月 3 日, 2013, 佐賀.

(2) 二保知也, 原田祐造, 堀江知義, 假屋翔太, 山川大祐, 松永賢一, 鋼板間に隙間を有する抵抗スポット溶接の接触・電流・熱伝導 3 連成有限要素解析, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会論文集, 11 月 3 日, 2013, 佐賀.

(3) 石原大輔, 堀江知義, 非圧縮性流体 弾性体連成のプロジェクトン解法に関する性能評価, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, No.13-3, 論文番号 2512 (2 ページ), 11 月 3 日, 2013, 佐賀.

(4) 宿輪雄介, 石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 馬場昭好, MEMS 構造要素における構造 流体 静電界連成現象の有限要素解析, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, No.13-3, 論文番号 2513 (2 ページ), 11 月 3 日, 2013, 佐賀.

(5) D. Ishihara, T. Horie, A consistent projection method for monolithic fluid-structure interaction systems, Proceedings of Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering V (COUPLED PROBLEMS 2013) (CD-ROM), 1 page, 6 月 17-19 日, 2013, Barcelona.

(6) 石原大輔, 堀江知義, 非圧縮性流体-構造連成の整合プロジェクトン解法, 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, 3 月 6-8 日, 2013, 東京.

(7) Daisuke Ishihara, Tomoyoshi Horie, Tomoya Niho, Akiyoshi Baba, Finite element analysis for interaction problems of structure, fluid and electrostatic field in micro cantilever beams, Proceedings of KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, 9 月 12 日, 2012, Kanazawa.

(8) 二保知也, 森田雄祐, 堀江知義, 山川大祐, 初井信之, 3 枚重ね抵抗スポット溶接における弾塑性接触・電流・熱 3 連成現象の検討, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会講演論文集, 10 月 8 日, 2011, 岡山.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀江 知義 (HORIE, Tomoyoshi)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号：40229224

(3) 連携研究者

二保 知也 (NIHO, Tomoya)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教
研究者番号：60295011

石原 大輔 (ISHIHARA, Daisuke)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号：80363399