

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760078

研究課題名(和文)ハイブリッド強連成解析に基づくマイクロマシンの汎用マルチフィジクスシミュレータ

研究課題名(英文)Multi-physics simulator for micromachines based on new hybrid strongly coupled analysis

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、マイクロマシンの研究開発に寄与するために、一体型解析と分離型解析の利点を兼ね備えた新しいハイブリッド強連成解析に基づくマイクロマシンの汎用マルチフィジクスシミュレータを開発した。本ハイブリッド強連成解析は、構造・流体・静電界連成を流体・構造連成と静電界に分離し、さらに流体・構造連成を圧力場と速度場へと階層的に分解する新しい有限要素解法である。本シミュレータを典型的なマイクロマシンに適用し、実験との比較に基づき、その信頼性を定量的に確認した。さらに本シミュレータを用いて、マイクロマシンの振動特性が連成効果により定量的はもちろん定性的にも変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, a finite element (FE) analysis using hierarchical decompositions for the interaction of structural, fluidic and electrostatic fields is applied for vibration analyses of a MEMS structural component. The interaction is partitioned into the electrostatic field and the fluid-structure interaction (FSI) using the block Gauss-Seidel method. The FSI is split into the pressure and velocity fields using a projection method. The developed FE analysis is applied for a micro cantilever beam actuated by the step electrostatic force in vacuum and air. It was demonstrated from the comparisons among the numerical and experimental results that the proposed analyses provide the results consistent with the experimental results. It follows from the present results that the numerical analyses taking into account the interaction of the structural, fluidic and electrostatic fields are required for the accurate predictions of the vibration characteristics of the MEMS structural components.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：計算力学 マイクロマシン マルチフィジクス 有限要素法 シミュレーション 振動解析

1. 研究開始当初の背景

マイクロマシンの寸法は、 $1\mu\text{m}$ から 1mm までの範囲にあり、スケール効果により、体積力よりも表面力が支配的となる。ゆえにマイクロマシンの典型的な駆動力は静電力であり、空気中であっても強い粘性減衰を受ける。そして静電力と空気減衰の大きさは、構造の運動に依存して変化する。ゆえにマイクロマシンと周囲の流れおよび静電界の連成（構造流体 静電界連成）が生じる。ゆえにマイクロマシンの重要な設計パラメータである共振周波数や減衰率などの振動特性が構造流体 静電界連成の影響を強く受ける可能性がある。ゆえにマイクロマシンの合理的設計のためには、構造流体 静電界連成（マルチフィジクス）を考慮した振動解析を正確かつ汎用的に行うことのできるシミュレータが必要である。

2. 研究の目的

本研究ではその実用化を目的として、階層的分解に基づく構造流体 静電界連成解析（ハイブリッド強連成解析）手法を新たに提案し、それを汎用的な有限要素解析プログラムとして実装する。その実用性を検証するために、空気中で静電駆動されるマイクロ片持ちばりの振動解析を行い、実験結果との比較に基づき、定量的な精度検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 支配方程式 3次元の非圧縮性ストークス方程式と弾性体方程式を用いる。流体は、ニュートン流体を仮定し、壁面で滑り無しとする。構造は、有限変形を考慮するが、ひずみは十分小さいとして、応力ひずみ関係の線形性を仮定する。流体と構造の方程式を有限要素離散化し、境界面条件により結合して、次の一体型方程式を得る：

$$\mathbf{L}\mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{q}(\mathbf{u}) - \mathbf{G}\mathbf{p} = \mathbf{g}(\mathbf{u}) \text{ and } \tau\mathbf{G}\mathbf{v} = \mathbf{0}.$$

行列 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{G}$ は質量、拡散、発散の各行列、ベクトル $\mathbf{q}, \mathbf{g}, \mathbf{a}, \mathbf{v}, \mathbf{u}, \mathbf{p}$ は弾性内力、外力、加速度、速度、変位、圧力の各ベクトル、下付き添え字 \mathbf{L} は行列の対角集中化、下付き添え字 τ は行列の転置を表す。 \mathbf{g} は静電力であり、 \mathbf{u} による領域の変化を考慮して、静電界の有限要素解析により求める。

(2) 階層的分解に基づく連成解法 時間積分法の各時刻に設けた非線形反復を利用して、ブロックガウスザイデル法により、上式の中の機械的現象である構造流体連成と電気的現象である静電界を分離する。さらにプロジェクション解法を用いて、構造流体連成を速度場と圧力場に分割する。以上のように系を階層的に分解することにより、解析を効率化する。

(3) 問題設定 図 1 に示すように、SOI ウェハ（上下層：Si、中間層：SiO₂）のチップに、マイクロ片持ち梁（長さ $L = 1000\mu\text{m}$ 、

幅 $W = 36\mu\text{m}$ 、板厚 $H = 3.0\mu\text{m}$ 、梁底面と基部の間の距離 $G = 5.0\mu\text{m}$ ）を作成した。ステップ状の供給電圧 V_s （収束値 V_{sc} ）を上下 Si 層に印可する。接触抵抗の低減のため、金電極を用いる。 V_s は、梁の固有周期約 $200\mu\text{sec}$ と比べ、同程度の立ち上がり時間約 $50\mu\text{sec}$ を持つので、その実測値を解析で用いる。 V_s により梁と下層の間に電位差 V_g が生じ、静電力により梁が励振される。1 次たわみ振動を仮定して、梁自由端の面外方向速度 v_{tip} をレーザードップラー振動計（スポット径 $3\mu\text{m}$ 、速度分解能 $0.05\mu\text{m}/\text{sec}$ ）により測定する。

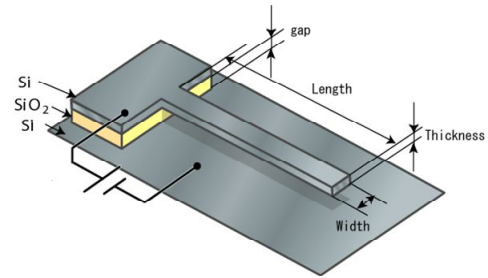


Fig. 1 Schematic view of the problem setup.

(4) 物性値 スケール効果により、薄膜材料のヤング率 E^s は、バルク材と異なる。そこで真空中における梁の自由振動から、梁の固有振動数（固有周期）を求め、それと Euler-Bernoulli 梁の固有振動数の理論解から、 $E^s = 185\text{GPa}$ と算出した。構造質量密度 ρ^s は、バルク材と同じ $\rho^s = 2.33 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。空気の物性値は、質量密度 $\rho^f = 1.18 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、粘性係数 $\mu^f = 1.82 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m sec})$ とした。空気の誘電率 ϵ は、 $\epsilon = 8.859 \times 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$ とし

(5) チップ内の電気回路による電圧低下 上下の Si 層は、中間の SiO₂ 層により、絶縁されていることが期待されるが、ほこりの付着などにより、通電が起こりうる。実際、本研究で用いたチップにおいて、上下層間と上層内の中で分圧が生じて、 V_g は V_s から低下した。その割合を電圧低下率 γ_{vr} と定義する。電氣的測定によるその評価は困難である。そこで真空中での励振実験において、静電界からの連成効果が無視できるとき（振動周期の変化が 1% 以下未満）、振動速度振幅の測定値 U_{exp} と、このときの V_s を V_g とする有限要素構造解析による解析値 U_{num} を用いて、 $\gamma_{vr} = V_g/V_s (U_{exp}/U_{num})^{1/2}$ により求めた

4. 研究成果

(1) 解析設定 図 2 に解析領域全体を示す。同図に示すように、yz 面に関する対称性を考慮した。流体領域は、 x, y 方向 $23\mu\text{m}$ 、 z 方向 $1023\mu\text{m}$ であり、壁面は滑り無しとした。静電界領域において、下面に 0V 、上面に V_g [V] を課す。ここで V_s の実測値に γ_{vr} を乗じて V_g を得る。

(2) 解析結果と考察 $V_{sc} = 5.0\text{V}$ に対する v_{tip} の時刻歴を図 3 に示す。同図から、空気減衰が顕著であることが判る。同図に示すように、実験と構造流体 静電界連成解析の結

果がよく一致している。同図において、構造流体連成解析よりも、構造流体静電界連成解析の結果の方が、振動周期と振動振幅が大きい。これは静電界からの連成効果による見た目の剛性低下が原因であり、固有振動特性に質的な違いが生じた。また同図に示すように、構造流体連成解析結果は、不足減衰であるのに対し、構造流体静電界連成解析結果は、過減衰である。構造流体静電界連成解析結果の変位平衡点の大きさ(1.36 μm)は、構造流体連成解析結果の変位平衡点の大きさ(0.899 μm)よりも約1.5倍大きい。すきま流れの理論から、梁底面と基部との距離が小さくなると急激に減衰が大きくなるので、この変位の差により、減衰振動特性に質的な違いが生じた。

以上から、マイクロマシンの振動特性が構造流体静電界連成により定量的のみならず定性的にも変化すること、及び、それが本方法により高精度に予測できることが示された。ゆえにマイクロマシンの構造流体静電界連成(マルチフィジクス)を正確かつ汎用的に行うことのできるシミュレータの基礎技術が確立できたといえる。

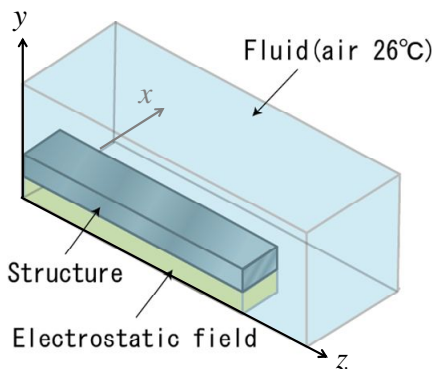


Fig. 2 Schematic view of the whole analysis domain, where the symmetry with respect to the yz-plane was taken into account.

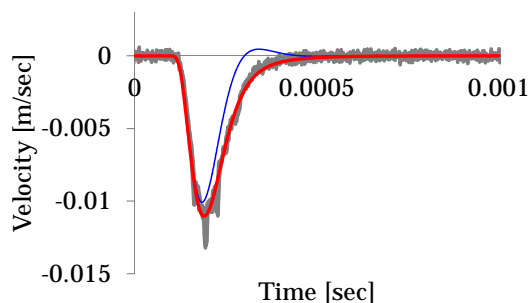


Fig. 3 Time histories of the tip velocities and displacements in air (red: interaction of structure, fluidic, and electrostatic field, blue: interaction of structural and fluidic field, grey: experiment).

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計11件)

石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 昆虫飛行の受動的ピッチング動力学における空気効果の数値的検討, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 812, 2014, No.13-00836, 査読有.

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, Vol. 2013, No. 20130017 (7 pages), 査読有.

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, Vol. 79, No. 804, 2013, pp. 1291-1302, 査読有.

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 A 編, Vol. 79, No. 804, 2013, pp.1161-1170, 査読有.

石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 昆虫羽ばたき飛行における流体付加質量効果の数値的検討, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, No. 13-1, 2013, No. J027042 (5 ページ), 査読無.

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), 2013, 1 page, 査読無.

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 計算力学講演会 CD-ROM 論文集, No. 13-3, 2013, No. 2512 (2 ページ), 査読無.

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 計算力学講演会 CD-ROM 論文集, No. 13-3, 2013, No. 2513 (2 ページ), 査読無.

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論文, 2013, OS09-01 (2 ページ), 基調講演, 査読無.

D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, A. 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, 2012, pp. 225-260, invited paper, 査読無.

宿輪雄介, 石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 馬場昭好, マイクロ片持ちはりの構造流体静電界連成有限要素解析と実験との比較, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, No. 11-3,

2011, pp.80-81, 査読無.

〔学会発表〕(計7件)

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 計算力学講演会, 2013 年 11 月 02 日~2013 年 11 月 04 日, 佐賀.

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 計算力学講演会, 2013 年 11 月 02 日~2013 年 11 月 04 日, 佐賀.

石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 昆虫羽ばたき飛行における流体付加質量効果の数値的検討, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 09 月 08 日~2013 年 09 月 11 日, 岡山.

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), 2013 年 06 月 17 日~2013 年 06 月 19 日, Ibiza (Spain).

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, 2013 年 03 月 06 日~2013 年 03 月 08 日, 東京, 基調講演.

D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, A. Baba, Finite element analysis for interaction problems of structure, fluid and electrostatic field in micro cantilever beams KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics &CAE 2012, 2012, 225-260 2012 年 09 月 12 日~2012 年 09 月 12 日 Kanazawa, Japan invited paper.

宿輪雄介, 石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 馬場昭好, マイクロ片持ちはりの構造 流体 静電界連成有限要素解析と実験との比較, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会, 2011 年 10 月 8 日~2011 年 10 月 10 日, 岡山.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

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