

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390133

研究課題名(和文) 1mmの2.5次元構造は飛翔できるか?～マルチフィジクス計算力学による挑戦

研究課題名(英文) Can 1mm-scale 2.5-dimensional structure fly? - Challenge using multi-physics computational mechanics

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：昆虫羽ばたき飛行を規範とする微小飛翔ロボットの可能性は、マルチフィジクスの複雑さと加工技術の限界から未だに十分明らかになっていない。そこで本研究では、最初に、マルチフィジクス計算力学手法を開発し、それにより昆虫羽ばたき飛行の力学を精緻化した。次に、それらを用いて、昆虫羽ばたき飛行を規範とする1mmスケールのモデル翼を2.5次元設計空間内で探索し、満足解の集合(デザインウィンドウ)が存在することを示した。最後に、MEMSプロセスに基づくマイクロマシニングを開発し、それを用いて、モデル翼を実空間で作成した。以上により、微小飛翔ロボットの可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, a numerical method for the multi-physics problem was proposed, and the detailed mechanics of the insect flapping flight was investigated using the proposed method. Then, the satisfactory design solutions of the model wing mimicking the insect flapping flight were found in the 1mm-scale and 2.5-dimensional design space using the proposed method and the investigated mechanics. Finally, the model wing was fabricated using the MEMS processing.

研究分野：計算力学

キーワード：昆虫羽ばたき飛行 マルチフィジクス MEMS

1. 研究開始当初の背景

昆虫羽ばたき飛行は、流体構造連成 (FSI) を中心とするマルチフィジクスの巧みな利用により、1mm スケールまでの微小化を達成している。ゆえに、それを規範とすることにより、微小飛行ロボットの実現が期待されている。しかしながら、マルチフィジクスの複雑さと加工技術の限界から、その可能性は未だ明らかになっていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、マルチフィジクス計算力学手法を開発し、それにより MEMS プロセスで作成可能な 1mm スケールの 2.5 次元構造を有する昆虫羽ばたき飛行を規範とするマイクロ柔軟翼を設計し、それを半導体エッチングプロセスに基づくマイクロマシニングを用いて、作成・評価することにより、微小飛行ロボットの可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

3. 1 流体構造強連成解析手法

翼の変形と周囲の空気との相互作用を記述するために、弾性体の平衡方程式、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式、および、流体構造境界における連続条件と平衡条件 (境界面条件) を用いる。有限要素法を total Lagrangian 定式化された弾性体方程式と ALE 表記された流体方程式に適用し、離散化方程式を得る。これらを境界面条件により境界面自由度に関して結合し、線形化することにより、以下の一体型方程式を得る。

$$\mathbf{M}^* \Delta \mathbf{a} - \mathbf{G} \Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{g} \quad (1a)$$

$$\gamma \Delta t_r \mathbf{G} \Delta \mathbf{a} + \mathbf{G}_e \Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{h} \quad (1b)$$

但し、圧力と弾性体内力を未知の状態量により陰的に評価し、Newmark 法の関係式を既に適用している。 \mathbf{M}^* は一般化質量行列、 \mathbf{G} は圧力勾配行列、 \mathbf{G}_e は圧力安定化行列、 $\Delta \mathbf{a}$ は加速度増分ベクトル、 $\Delta \mathbf{p}$ は圧力増分ベクトル、 $\Delta \mathbf{g}$ と $\Delta \mathbf{h}$ はそれぞれ平衡方程式と非圧縮性条件の残差ベクトル、 Δt は時間増分、左下添え字 τ は行列の転置を表す。時間積分には予測子多重修正子法を用いる。

一体型解法では、式 (1) を直接解くことにより、境界面条件が満足される。ゆえに数値的不安定の原因となる境界面での虚偽の数値的パワーを回避できる。しかしながら、その定式化は解くべき線形方程式の係数行列の悪条件化を招く。そこでこの困難さを回避するために、新しい代数的分割によるプロジェクトン解法を用いる。既知の圧力に対する線形化された一体型平衡方程式

$$\mathbf{M}^* \Delta \mathbf{a}^* = \Delta \mathbf{g} \quad (2)$$

を解いて、予測子としての中間状態変数を求める。ここで $\Delta \mathbf{a}^*$ は中間加速度増分ベクトルである。式 (1a) と式 (2) の辺々を引き、両辺左から行列 ${}_{\tau} \mathbf{G}_L \mathbf{M}^{-1}$ をかけると、次式を得る。

$$\gamma \Delta t_r {}_{\tau} \mathbf{G}_L \mathbf{M}^{-1} \mathbf{G} \Delta \mathbf{p} = {}_{\tau} \mathbf{G} \mathbf{v} - {}_{\tau} \mathbf{G} \mathbf{v}^* + {}_{\tau} \mathbf{G}_L \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{M}^* - \mathbf{L} \mathbf{M}) (\mathbf{v} - \mathbf{v}^*) \quad (3)$$

ここで \mathbf{v} は速度ベクトル、 \mathbf{v}^* は中間速度ベクトル、左下添え字 L は行列の集中化を表す。圧力ポアソン方程式

$$\gamma \Delta t_r {}_{\tau} \mathbf{G}_L \mathbf{M}^{-1} \mathbf{G} \Delta \mathbf{p} = -{}_{\tau} \mathbf{G} \mathbf{v}^* \quad (4)$$

を解くことにより、式 (3) は次式となる。

$${}_{\tau} \mathbf{G} \mathbf{v} + {}_{\tau} \mathbf{G}_L \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{M}^* - \mathbf{L} \mathbf{M}) (\mathbf{v} - \mathbf{v}^*) = 0 \quad (5)$$

非線形反復の中で、状態変数の収束が期待できるので、 \mathbf{v}^* は \mathbf{v} と漸近的に一致する。ゆえに、式 (5) の第 2 項は漸近的に消えて、未知の流速に対する非圧縮性条件

$${}_{\tau} \mathbf{G} \mathbf{v} = 0 \quad (6)$$

が満たされる。

幾何学的分割を用いる類似研究では、定式化の中でシュアーコンプリメントの発生が不可避であり、その近似が課題となる。一方、本定式化では、シュアーコンプリメントを発生させることなく、一体型方程式が幾何学的に分割されて、最初に平衡方程式 (2)、次に圧力ポアソン方程式 (4)、最後に平衡方程式 (1a) の順に解かれる。

3. 2 昆虫羽ばたき翼を規範とするマイクロ柔軟翼とその設計方法

図 1 に示すように、本研究では、昆虫羽ばたき翼を規範とするマイクロ柔軟翼を提案する。非定常流体力の発生に必要なピッチング運動を生み出すために、実際の昆虫のように、積極的に流体構造連成を利用する。同図に示すように、2.5 次元構造を採用することにより、後述の半導体エッチングに基づくマイクロマシニングで作成できるようにする。マイクロアクチュエータを考慮して、翼基部に設置された板バネの共振によりストローク角を増幅できるようにする。

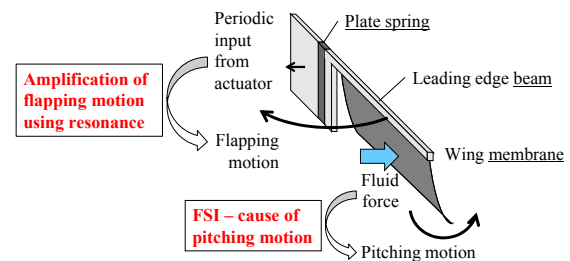


Fig. 1 Schematic view of the micro flexible wing mimicking insect flapping flight.

実際の微小昆虫に基づき、翼スパン方向長さ L_w と翼弦方向長さ c_w をそれぞれ 2.5mm と 0.8mm とする。マイクロマシニングを考慮して、以下の設定が用いられる。翼膜はポリイミド (PI) で作成される。感光性ポリイミド前駆体をスピニングして成膜するので、その厚さ t_w は 1~2 μm とする。支持構造である翼前縁は、MEMS 材料としてよく用いられる単結晶シリコン (SCS) で作成され、その断面は 100 μm × 50 μm である。エッチングプロセスを考慮して、板バネを翼膜と同一の PI 層で作成し、その長さ l_s を曲げ変形のために 50 μm 以上とする。翼基部への正弦波状入力の振幅 u_0 と周波数 f_ϕ は次のように仮定される。 u_0 は実際のマイクロアクチュエータに基づき 100 μm 以下である。 f_ϕ は実際の昆虫の羽ばたき周波数に基づき、100~1000Hz である。設計目的は実際の小型のハエの自重 (7 μN) よりも大きな揚力 F_L を生じる解 (満足設計解) を得ることである。

翼の有限要素メッシュには、MITC シェル要素 (節点数: 225, 要素数: 196), 流体領域の有限要素メッシュには、PIP1 要素 (4 面体 1 次要素による流速圧力同次補間) (節点数: 46911, 要素数: 254352) を用いる。流体解析の数値的安定化のため、SUPG 法と PSPG 法を用いる。 Δt は羽ばたき周期 $1/f_\phi$ の 5000 分の 1 の大きさとする。

3.3 翼形状ハイブリッド微小構造の MEMS プロセス

本マイクロ柔軟翼の基本構造は、無機材料の SCS と有機材料の PI から構成されるハイブリッド構造 (翼形状ハイブリッド微小構造) である。そのような構造のマイクロマシニングは非常に困難である。ゆえに本研究では、翼型ハイブリッド微小構造の MEMS プロセスを新たに提案し、それによるマイクロマシニングで、翼形状ハイブリッド微小構造が作成可能であることを実証する。

本研究では、図 2 に示すような以下の MEMS プロセスを提案する。

- (a) 構造用 SCS 基盤上に、感光性 PI 前駆体をスピニングする。
- (b) フトリソグラフィを用いて、(a) の PI 膜に柔軟構造の形状をパターンニングする。そして PI 膜のキュアリングを行う。
- (c) (b) の PI 膜上に支持用 SCS 基盤を接着する。
- (d) (c) を上下逆にする。そして構造用 SCS 基盤上に、フォトレジスト (PR) をスピニングする。
- (e) フトリソグラフィを用いて、(d) の PR に支持構造の形状をパターンニングする。
- (f) (e) の PR をマスクとして、構造用 SCS 基盤に D-RIE を適用する。
- (g) PR のマスクを除去する。
- (h) ウェットエッチングを用いて、完成した翼形状ハイブリッド微小構造を支持基盤からリリースする。

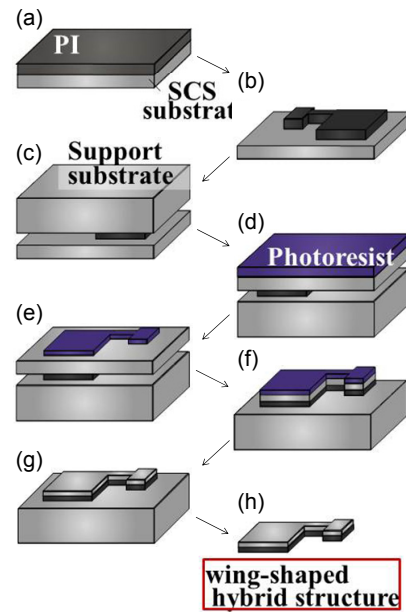


Fig. 2 Process flow of the wing-shaped hybrid microstructure.

4. 研究成果

4.1 昆虫羽ばたき飛行を規範とするマイクロ柔軟翼の流体構造連成設計

3.1 節の本流体構造解析を用いて、3.2 節の本設計問題に対する満足設計解を探索した。その結果、以下のように満足設計解が見出された。設計パラメータ空間を絞るため、 u_0 , l_s , および、 t_w をそれぞれ 80 μm , 50 μm , および、1.6 μm に設定した。ここでこれらの値は 3.3 節のマイクロマシニングを考慮したものである。一方、実際の昆虫でも範囲が広く、実装上也設定が容易な f_ϕ を設計パラメータとして、満足設計解の探索を行った。 $f_\phi = 428\text{Hz}$ の場合、おおよそ最大の揚力が得られて、その平均は実際の小型のハエの自重 7 μN よりも大きかった。 f_ϕ を様々変化させたときの平均揚力の変化を図 3 に示す。同図に示すように、 $f_\phi = 428\text{Hz}$ を中心として、おおよそ 410Hz から 460Hz の範囲において、揚力の平均値が 7 μN よりも大きい満足設計解が存在した。この設計パラメータ空間における満足解の存在範囲は、デザインウィンドウ (DW) と呼ばれる。本 DW が存在することにより、昆虫羽ばたき飛行を規範とするマイクロ柔軟翼の可能性を示すことができた。

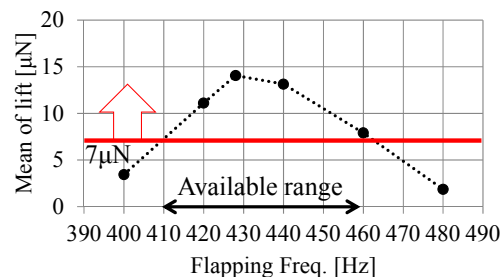


Fig. 3 Lift variation for flapping frequency.

4. 2 翼形状ハイブリッド微小構造の作成結果と評価

3. 3節の本プロセスにおいて、PI膜を翼形状に成膜するためのスピニング、フォトリソグラフィ、キュアリング、および、SCSによる支持構造を作成するためのD-RIEに関する諸条件を探索した。その結果、図4に示すような翼形状ハイブリッド微小構造を作成することができた。

作成された翼形状ハイブリッド微小構造が本マイクロ柔軟翼の基本構造として適切に機能するためには、PIによる翼膜の十分な柔軟性とSCSによる支持構造(翼前縁)の十分な剛性を確認する必要がある。そこで図5に示すような曲げ試験を行った。その結果、PIによる翼膜の十分な柔軟性とSCSによる支持構造(翼前縁)の十分な剛性を確認することができた。以上から、本マイクロ柔軟翼の基本構造を実際に作成できることが示された。

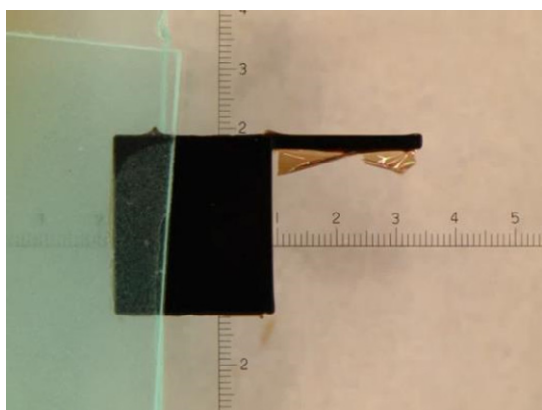


Fig. 4 Photo of the microfabricated wing-shaped hybrid structure.

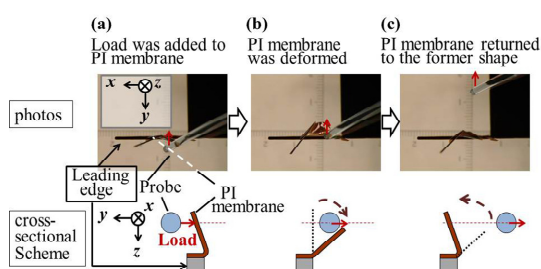


Fig. 5 Bending test of PI membrane of hybrid structure.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

- ① D. Ishihara, T. Horie, Passive mechanism of pitch recoil in flapping insect wings, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 12, 016008 (15 pages), 2017 (査読有).
- ② S. Murakami, D. Ishihara, M. Araki, T. Horie, N. Ohira, T. Ito, Microfabrication of hybrid structure composed of rigid silicon and flexible polyimide membranes,

Proceedings of the 12th IEEE Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2017), pp. 824-825, 2017 (査読有).

- ③ D. Ishihara, N. Ohira, M. Takagi, S. Murakami, T. Horie, Fluid-structure interaction design of insect-like micro flapping wing, 6 pages, *Proceedings of VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2017)*, pp. 870-875, 2017 (査読有).
- ④ P. C. Ramegowda, D. Ishihara, T. Niho and T. Horie, A Finite element approach for a coupled numerical simulation of fluid - structure - electric interaction in MEMS, 9 pages, to appear in *Proceedings of VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2017)*, pp. 999-1007, 2017 (査読有).
- ⑤ D. Ishihara, S. Murakami, M. Araki, T. Horie, Fluid-structure interaction design of micro flexible wing mimicking insect flapping flight, *Proceedings of the 12th World Congress on Computational Mechanics*, Paper No. 151142 (1page), p. 1764, 2016.
- ⑥ P. C. Ramegowda, D. Ishihara, T. Niho, T. Horie, Performance evaluation of finite element coupled algorithms for structure-electric interaction analysis of MEMS actuator, *Proceedings of the 12th World Congress on Computational Mechanics*, Paper No. 151142 (14page), pp. 1137-1150, 2016.
- ⑦ D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, A. Baba, Hierarchical decomposition for the structure - fluid - electrostatic interaction in a microelectromechanical system, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 108, No. 6, pp. 429-452, 2015 (査読有).
- ⑧ D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, A. Baba, Finite element analysis using a hierarchical decomposition for the interaction of structure, fluid and electrostatic field in MEMS, *Proceedings of the VI International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering*, 1023-1028, 2015 (査読有).
- ⑨ D. Ishihara, T. Horie, T. omoya Niho, Fluid-structure interaction analysis for the aerodynamic contribution to the passive pitching motion of dipteran flapping wings, *Proceedings of the 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics*, p. 66, 2015.
- ⑩ D. shihara, T. Horie, T. Niho, Hierarchically decomposed finite element analysis of the structure-fluid-electrostatic interaction,

Proceedings of the KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2015, No. 15-231, pp. 20-21, 2015.

- ⑪ 石原大輔, 堀江知義, 二保知也, 昆虫羽ばたき翼の受動的ピッチング動力学における空気力効果の数値的検討, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No.812, 論文 No. 13-00836, 2014 (査読有).
- ⑫ D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, An experimental and three-dimensional computational study on the aerodynamic contribution to the passive pitching motion of flapping wings in hovering flies, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 9, 046009 (23 pages), 2014 (査読有).
- ⑬ D. Ishihara, T. Horie, A projection method for the interaction of an incompressible fluid and a structure using new algebraic splitting, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 101, No. 6, pp. 421-440, 2014 (査読有).

[学会発表] (計 2 2 件)

- ① D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, Fluid-structure interaction analysis for the aerodynamic contribution to the passive pitching motion of dipteran flapping wings, *The 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics*, 2015, Hokkaido Univ., Sapporo, (Invited).
- ② D. Ishihara, T. Horie, T. Niho, Hierarchically decomposed finite element analysis of the structure-fluid-electrostatic interaction, *The KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2015*, 2015, Waseda Unive., Tokyo, Invited.
- ③ D. Ishihara, N. Ohira, M. Takagi, S. Murakami, T. Horie, Design of micro flexible wing mimicking insect flapping flight using fluid-structure interaction analysis, *The KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2017*, Busan, Korea, (Invited).

他, 国際学会発表 6 件, 国内学会発表 1 3 件.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 変位変換装置及び変位変換装置を備えた羽ばたき機構並びに変位変換装置の製造方法

発明者: 石原大輔

権利者: 九州工業大学

種類: 特許

番号: 2016-177645

出願年月日: 2016 年 09 月 12 日

国内外の別: 国内

(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: 80363390

(2) 研究分担者

村上 直 (MURAKAMI, Sunao)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教

研究者番号: 90443490

6. 研究組織