

令和元年6月19日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18012

研究課題名(和文) チョウの飛翔メカニズムの解明と超小型飛翔体への応用

研究課題名(英文) Investigation on the mechanism of the flapping flight of butterflies and its application to micro air vehicles

研究代表者

鈴木 康祐 (SUZUKI, Kosuke)

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：10735179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超小型飛翔体への応用を目指し、蝶を模擬した簡単な数値計算モデルを用いて、蝶の飛翔メカニズムの研究を行った。まず、翼の形状、翼の質量、翼の柔軟性といった、翼を構成する基本的な要素が、飛行性能に与える影響を調べた。また、翼の羽ばたき方を変えることによる、揚力・推力向上や姿勢制御の検討を行った。その結果、簡単なモデルであっても、適した要素、羽ばたき方であれば、実際の蝶の質量を支えるだけの揚力や、実際の蝶の巡回速度を達成するほどの推力を発生でき、かつ姿勢制御も可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間内に実施した研究はいずれも、蝶の飛翔メカニズムを解明するための基礎的な研究であり、実際のモノ(超小型飛翔体)への応用はまだできていない。しかしながら、本研究を通して、蝶の飛翔メカニズムに関して多くのことが明らかになるとともに、蝶の飛行性能を超えるデザインも可能であることが示唆されている。これらの知見を用いて超小型飛翔体を設計できれば、今までにない小型・軽量でかつ俊敏なドローンが開発できると期待される。

研究成果の概要(英文)：I investigated the mechanism of the flapping flight of butterflies by the simulations using a simple butterfly-like flapping wing-body model in order to apply the numerical results to the development of micro air vehicles. At first, I investigated the effects of the fundamental wing factors of the wings, such as wing shape, wing mass, and wing flexibility, on the flight performance of the model. In addition, I attempted to enhance the lift and thrust forces and to control the attitude of the model by changing the wing kinematics. As a result, I found that appropriate wing factors and kinematics give enough lift force to support the mass of an actual butterfly and enough thrust force to achieve the cruising speed of an actual butterfly even for a simple model, and that the model can control its attitude.

研究分野：数値流体力学

キーワード：羽ばたき飛翔 格子ボルツマン法 埋め込み境界法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

昆虫は非常に俊敏に飛び回る。止まっていたかと思えば急に動き出し、ある方向を飛んでいたかと思えば急に方向を変え、落下するかと思えば急に上昇する。こういった優れた運動特性は、羽ばたいて飛ぶという「羽ばたき飛翔」によってなせる業であり、従来の航空機には見られない画期的なものである。そのため、近年注目されている昆虫サイズのドローンである超小型飛翔体に、羽ばたき飛翔の利用を検討する研究が国内外問わず盛んに行われている。

昆虫の中でも、チョウはひらひらと不規則で不安定な飛翔をすることから、他の昆虫に比べてその羽ばたき飛翔のメカニズムは極めて複雑で、十分に解明されていない。また、「不安定な飛翔」が出来るのは、不安定で落下しそうな姿勢からすぐに回復する能力があることを示しており、これを工学的に応用できれば、より俊敏かつ安全な超小型飛翔体の開発につながると予想される。

研究代表者はこれまでに、数値計算を通してチョウの羽ばたき飛翔の研究を行ってきた。その中で、チョウを模した羽ばたき翼 - 胴体モデルを独自に考案し、このモデルを系統的に調べることで、より深くチョウの羽ばたき飛翔の本質に迫ってきた。このモデルは、翼は二枚の正方形の板であり、胴体は一本の棒で表される単純なものであり、羽ばたき方は実際のチョウを模擬している。このような単純なモデルであっても、実際のチョウが作る渦と似た構造の渦を作り、実際のチョウの重さでも重力に打ち勝ち上昇飛翔できることが明らかにされている。

一方で、このモデルは理想化しすぎており、翼は正方形であり質量を持たず（ただし胴体は質量を持つ）、しかも変形しないという、実際のチョウからかけ離れたものである。しかし、逆にこれらの要素を順に実際のチョウに近づけていくことで、個々の要素が揚力の発生や姿勢の安定性に与える影響を調べることが出来る。さらに、個々の要素を、飛行性能の最も優れた最適なものにすれば、チョウの飛行性能を超えることも期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、チョウを模した羽ばたき翼 - 胴体モデルを、より実際のチョウに近づけることで、チョウの羽ばたき飛翔を解明することを目的としている。また、モデルの各要素において、飛行性能の最も優れた最適なものを探索し、その知見を応用して、不安定な姿勢からの高い回復能力を有する新しい超小型飛翔体を開発することを目指している。

### 3. 研究の方法

本研究では、翼を構成する種々の要素が飛行性能に与える影響を明らかにするために、チョウを模した羽ばたき翼 - 胴体モデルにそれぞれの要素を付与して洗練化するという方法をとった。また、この方法を通して、各要素において、最も飛行性能の優れた最適なパラメータを明らかにし、実際のチョウと比較した。さらに、その知見を用いて、超小型飛翔体の開発を目指す。具体的には、以下の二つの研究を行った：

- ・研究(A) 翼の形状、質量、柔軟性が羽ばたき飛翔における飛行性能に与える影響の数値解析
- ・研究(B) チョウを模した羽ばたき機械の設計・作製およびその飛行性能の調査

### 4. 研究成果

・翼の形状について：台形翼、長方形翼、実際の蝶の翼形状に対する飛行性能を計算し、テーパー比が大きくなるほど、またアスペクト比が大きくなるほど、揚力・推力は増大するものの、消費エネルギーも増加することが分かった。また、実際の蝶の翼形状が最も効率よく飛翔できることが分かった。さらに、実際の蝶の翼形状と同等の飛行性能を持つ台形翼を作製できることを示した。

・翼の質量について：全体の質量を一定にしたまま、翼の質量を大きくすると、羽ばたいている最中に胴体が大きく上下に振動してしまい、そのせいで揚力が小さくなってしまふことを明らかにした。また、実際の蝶の翼質量（全体の質量の10パーセント程度）でも、その影響は非常に大きく、蝶のひらひらとした不安定な飛翔形態に影響を与えていることが示唆された。

・翼の柔軟性について：翼に翼弦方向の柔軟性を与えると、剛体翼の場合よりも揚力・推力が増大しうることが分かった。これは、剛体翼では揚力が得られないタイミング（打ち上げ時）でも、柔軟翼ならば翼のたわみによって揚力が得られるというメカニズムのためであることが分かった。

・羽ばたき機械の設計・作製について：2つの往復スライダ機構とそれをつなぐクランクシャフトによって、羽ばたき角と迎角を変化させる機構を設計・作製した。また、小型のモータを接続することで、継続的に羽ばたかせることを可能にした。しかし、揚力・推力の測定に関して、電気的な高周波のノイズが確認され、測定が困難であることがわかった。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

[1] Suzuki Kosuke, Yoshino Masato, A trapezoidal wing equivalent to a Janatella leucodesma's wing in terms of aerodynamic performance in the flapping flight of a butterfly model, *Bioinspiration & Biomimetics* 14, 2019, 036003. 査読有 .

[2] Suzuki Kosuke, Yoshino Masato, A stress tensor discontinuity-based immersed boundary-lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids* 172, 2018, 593-608. 査読有 .

[3] Suzuki Kosuke, Kawasaki Tsuyoshi, Furumachi Naoki, Tai Youming, Yoshino Masato, A thermal immersed boundary-lattice Boltzmann method for moving-boundary flows with Dirichlet and Neumann conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 121, 2018, 1099-1117. 査読有 .

[4] Suzuki Kosuke, Yoshino Masato, Numerical Simulations for Aerodynamic Performance of a Butterfly-Like Flapping Wing-Body Model with Various Wing Planforms, *Communications in Computational Physics* 23, 2018, 1099-1117. 査読有 .

[5] Suzuki Kosuke, Yoshino Masato, Aerodynamic comparison of a butterfly-like flapping wing-body model and a revolving-wing model, *Fluid Dynamics Research* 49, 2017, 035512. 査読有 .

[6] Suzuki Kosuke, Aoki Takaaki, Yoshino Masato, Effect of wing mass in free flight of a two-dimensional symmetric flapping wing-body model, *Fluid Dynamics Research* 49, 2017, 055504. 査読有 .

[7] Suzuki Kosuke, Okada Iori, Yoshino Masato, Accuracy of the laminar boundary layer on a flat plate in an immersed boundary-lattice Boltzmann simulation, *Journal of Fluid Science and Technology* 11, 2016, 16-00488. 査読有 .

[8] Nakatani Yuichi, Suzuki Kosuke, Inamuro Takaji, Flight control simulations of a butterfly-like flapping wing-body model by the immersed boundary-lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids* 133, 2016, 103-115. 査読有 .

〔学会発表〕(計10件)

[1] Kosuke Suzuki, Effect of chord-wise wing flexibility on flapping flight by a butterfly-like flapping wing-body model: immersed boundary-lattice Boltzmann simulations, 27th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics 2018, 2018.

[2] 中井史也, 鈴木康祐, 吉野正人, 埋め込み境界 - 格子ボルツマン法を用いた蝶を模した羽ばたき翼 - 胴体モデルの推進力向上とピッチング回転制御, 第32回数値流体力学シンポジウム, 2018 .

[3] 加藤武志, 鈴木康祐, 吉野正人, Mitsunori Denda, 三次元羽ばたき飛翔解析における渦法と埋め込み境界{格子ボルツマン法の比較研究, 第32回数値流体力学シンポジウム, 2018 .

[4] Kosuke Suzuki, An immersed boundary-lattice Boltzmann method using discontinuities of stress tensor and heat-flux vector on boundaries, 26th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics 2017, 2017.

[5] 鈴木康祐, 蝶の翼形状と同程度の空力性能を持つ台形翼: 埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による数値計算を用いた探索, 第31回数値流体力学シンポジウム, 2017 .

[6] 鈴木康祐, 蝶の羽ばたき飛翔のモデル化とその進展, 2017年度研究集会「生物流体力学における基礎問題と応用問題」, 2017 .

[7] Suzuki Kosuke, Effect of wing mass in free flight by a butterfly-like 3D flapping wing-body model, APS 69<sup>th</sup> Annual DFD Meeting, 2016.

[8] Suzuki Kosuke, Immersed boundary-lattice Boltzmann simulations for aerodynamic performance of a butterfly-like flapping wing-body model with various wing planforms, 26th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics 2016, 2016.

[9] 鈴木康祐, 応力テンソルの不連続条件を用いた埋め込み境界 - 格子ボルツマン法の提案,

第 30 回数値流体力学シンポジウム，2016．

[10] 鈴木康祐，応力テンソルの不連続条件を用いた埋め込み境界 - 格子ボルツマン法，第 29 回計算力学講演会，2016．

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/kosuzuki/>

## 6．研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：吉野正人

ローマ字氏名：YOSHINO, Masato

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。