

令和 4 年 6 月 11 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14885

研究課題名（和文）超小型飛翔体開発のブレイクスルーを目指したチョウの不安定な飛翔メカニズムの解明

研究課題名（英文）Elucidation of the unstable flight mechanism of butterflies aiming at a breakthrough in the development of 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・准教授

研究者番号：10735179

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：蝶がどのように速い前進速度と巧みな姿勢制御を実現しているか、という問題の解明に取り組んだ。ハイスピードカメラを用いて蝶の飛び立ち時や前進飛翔時の動きを撮影し、画像データから蝶の軌跡や関節の角度の時系列データを抽出した。それらのデータから、実際の蝶の形状や動作を忠実に模擬した数値計算モデルを作成した。埋め込み境界-格子ボルツマン法を使って、計算モデルと周囲空気の運動の連成計算を行い、飛翔中の蝶が受ける空気力や慣性力と運動の関係を明らかにした。また、形状や動作を単純化したモデルにより、腹部の運動、前後翼の位相差、翼のリード・ラグ運動による姿勢制御法を検討したが、実際の蝶から大きな差異が見られた。

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、蝶の巧みな姿勢制御を応用できる可能性が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）：We investigated the flapping flight of butterflies to elucidate how butterflies achieve their fast forward speed and skillful attitude control. We captured the motion of a butterfly in take-off or in forward flight by using high speed cameras, and we obtained time series data of its trajectory and joint angles. By using these data, we constructed a numerical butterfly model which faithfully reflects the shape and movement of the actual butterfly. We clarified the relationship between the motion and the aerodynamic and inertial forces through coupling simulations of the butterfly model and ambient air by using the immersed boundary-lattice Boltzmann method. In addition, we attempted some attitude control schemes by abdominal motion, phase shift between fore- and hind-wings, and lead-lag motion of wings through simulations using a simplified model, but the results had a large difference from the motion of an actual butterfly. A realistic attitude control remains for future work.

研究分野：数値流体力学

キーワード：羽ばたき飛翔 数値流体力学 超小型飛翔体

1. 研究開始当初の背景

蝶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」ができるのは、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(昆虫サイズのドローン)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、翼の動きと周りの流れ場の相互作用を効率よく計算できる手法(埋め込み境界 - 格子ボルツマン法)を開発し、数値計算を通して蝶の羽ばたき飛翔の研究を行ってきた。その中で、蝶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、より深く蝶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、翼を真下に打ち下ろし後ろに打ち上げるといふ、蝶の羽ばたき方を単純化している。このような単純なモデルであっても、実際の蝶が作る渦と似た構造の渦を作り、実際の蝶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。

さらに、研究代表者は、この単純なモデルを徐々に実際の蝶に近づけていくという、「ボトムアップ」的アプローチによって、蝶の羽ばたき飛翔を構成する様々な要素を個別に勝つ系統的に調べてきた。しかし、このアプローチだけでは解決できない問題がいくつか浮上してきた。具体的には、前進速度が実際の蝶の半分以下になってしまうこと、および、姿勢制御を実際の蝶ほどうまく行えないことである。こういった問題を解決するためには、実際の蝶の動作を精密に計測するという、「トップダウン」的なアプローチも必要である。このトップダウン的に計測した動作を、数値モデルに反映させ再びボトムアップ的に調べることで、その効果を系統的かつ定量的に調べることができる。こうした二つのアプローチを繰り返すことで、上記の二つの問題を解決できると期待される。

2. 研究の目的

本研究は、蝶の不安定な飛翔メカニズムを解明することを目指し、実際の蝶の動作を計測するとともに、調べた動作を数値モデルに反映させ、その効果を系統的かつ定量的に調べることで、蝶がどのように速い前進速度と巧みな姿勢制御を実現しているかを明らかにすることが目的である。また、羽ばたき機械を用いて超小型飛翔体への応用も検討する。

3. 研究の方法

本研究では、蝶がどのように速い前進速度と巧みな姿勢制御を実現しているか、という問題を解明することを目的として、実際の蝶の飛翔を動画で撮影し、翼を前後に振る運動や前後2枚の翼の動作の遅れを始めとした特徴的な動作を抽出した(トップダウン的アプローチ)。さらにその動作をモデルに搭載し、流体力学の観点からその効果を考察した(ボトムアップ的アプローチ)。また、蝶の動きを模した羽ばたき機械の作製を通して、超小型飛翔体への応用を検討した。

4. 研究成果

2019年度は、(1)前翼と後翼のリードラグ角の影響を調べる数値計算、(2)前翼と後翼の迎角差の影響を調べる数値計算、および(3)実際の蝶の飛翔を撮影・解析するための予備実験を行った。(1)と(2)については、ボトムアップ的に、蝶を模した単純な羽ばたき飛翔モデルを使って、リードラグ角や前翼と後翼の迎角差を様々に変えたパラメトリックスタディを行った。結果として、後翼を後ろに傾げるにつれて、平均推力・揚力共に大きくなることがわかった。一方、前翼を前に傾げるにつれて、平均推力・揚力が共に小さくなることがわかった。また、前翼の最大迎角を大きくすると平均揚力が増加することがわかった。さらに、自由飛翔においてピッチング角への影響が大きい前翼のリード・ラグ角を動的に変えることによって制御を試みた。その結果、姿勢を崩すことなく安定的な飛翔が実現できた。しかしながら、速い前進速度との両立は難しいことがわかった。(3)については、トップダウン的に、実際の蝶の飛翔をハイスピードカメラを使って計測した。その結果、飛び立ち時のヨーイング角、ピッチング角、羽ばたき角、迎角、リードラグ角の時系列データを取得することができた。またそれを数値計算に取り込むことによって、実際の蝶の動きに対して生じる流れを計算することができるようになった。

2020年度は、(1)実際の蝶の前進飛翔時の複数周期にわたる計測実験、(2)計測結果の数値モデルへの反映を行った。(1)においては、複数の蝶に対して複数回の計測を行い、蝶の前進飛翔

時における翼の動きや胴体の動きについて、その一般的な特徴を明らかにした。また、前年度に行った飛び立ち時の計測結果と比較して、腹部の振りが抑制され、結果としてピッチ角および迎角も抑制されていることが分かった。さらに、(2)においては、これまでの他の研究では考慮されていなかった点まで数値計算に反映させ、より詳細に蝶の飛び立ち時の飛翔メカニズムを調べた。具体的には、これまでの研究では、前翼と後翼を区別せず一枚の板として翼を近似していたが、本研究では前翼と後翼の迎角差も考慮している。また、これまでの研究では、蝶の全質量が重心に集中しているとして質点の並進の方程式しか解いていなかったが、本研究では前後左右の翼4枚、胸部、腹部の計6つの剛体系からなる方程式を解いている。その結果、前翼・後翼の区別には大きな影響はなかったものの、翼の慣性力と腹部の慣性力は、蝶の数値モデルの運動に大きな影響を与えることが分かった。しかし、質点として近似する従来のモデルと、剛体系からなる本研究のモデルでは、軌跡に大きな違いはなかった。これは、翼の慣性力と腹部の慣性力が概ね釣り合っていることを示唆している。

2021年度は、(1)前進飛翔時の計測結果の数値モデルへの反映、(2)超小型飛翔体への応用の検討を行った。(1)においては、前年度に構築した飛び立ち時の計測結果の数値モデルへの反映方法に基づいて、前進飛翔時の数値モデルを構築した。周期的な前進飛翔をさせるために、計測結果をフーリエ級数で近似することで、翼と胴体の動きを周期関数で表し、それを数値モデルに取り入れることで、モデルの周期的な前進飛翔を可能にした。胴体の回転運動を与えて、並進運動を計算した結果、モデルは実際の蝶と同様の階段状の渦構造を作りながら、前進・上昇飛翔する様子が再現できた。しかし、回転運動まで計算すると、モデルはすぐに姿勢を崩して、墜落してしまうことが分かった。これは、並行して調べていた単純化したモデルでも見られたことであり、腹部の振りによる姿勢制御が有効であることも分かっているものの、実際の蝶がどのように姿勢制御を行っているかは、未解決な問題である。(2)においては、導電性高分子人工筋肉や形状記憶合金型人工筋肉を用いた、蝶を模した羽ばたき機構の試作を行った。その結果、どちらの人工筋肉においても、モータを使った同様の機構に比べて、軽量で動作時の振動も小さいものとなったが、羽ばたき振幅、羽ばたきによる発生力の面で大きく劣るものとなった。これは人工筋肉の材料的な制限であり、現時点では、既存の人工筋肉を用いた蝶の羽ばたき機構は難しいと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Kosuke, Kato Takeshi, Tsue Kotaro, Yoshino Masato, Denda Mitsunori	4. 巻 32
2. 論文標題 Comparative study between a discrete vortex method and an immersed boundary?lattice Boltzmann method in 2D flapping flight analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics C	6. 最初と最後の頁 2150005 ~ 2150005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0129183121500054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Suzuki K., Okada I., Yoshino M.	4. 巻 877
2. 論文標題 Effect of wing mass on the free flight of a butterfly-like model using immersed boundary-lattice Boltzmann simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 614 ~ 647
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2019.597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Kosuke, Aoki Takaaki, Yoshino Masato	4. 巻 100
2. 論文標題 Effect of chordwise wing flexibility on flapping flight of a butterfly model using immersed-boundary lattice Boltzmann simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.100.013104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Kosuke, Nakamura Masashi, Kouji Masaya, Yoshino Masato	4. 巻 11
2. 論文標題 Revisiting the flight dynamics of take-off of a butterfly: experiments and CFD simulations for a cabbage white butterfly	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biology Open	6. 最初と最後の頁 1 ~ 15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1242/bio.059136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Kosuke, Ishizaki Kou, Yoshino Masato	4. 巻 33
2. 論文標題 Local force calculations by an improved stress tensor discontinuity-based immersed boundary?lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 047104 ~ 047104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kosuke Suzuki
2. 発表標題 Numerical simulations of a butterfly-like flapping wing-body model: effects of wing planform, mass, and flexibility
3. 学会等名 Interdisciplinary Online Seminar Series on Bioloocomotion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石崎攻, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 蝶を模した二次元羽ばたき翼におけるwing-wake interactionによる影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村優志, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 蝶の飛び立ち時における動きの計測およびその動きを反映した計算モデルを用いた数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仁科稔, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 トンボを模した羽ばたき翼-胴体モデルによる任意点でのホバリングへの目標飛翔の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Suzuki, Takaaki Aoki, Masato Yoshino
2. 発表標題 Effect of chord-wise wing flexibility on the flapping flight by a butterfly-like 3D flapping wing-body model
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日置文弥, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 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 - 胴体モデルの羽ばたき飛翔に対する前翼・後翼の動作の差の影響
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津江耕太郎, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 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 - 胴体モデルの羽ばたき飛翔における翼長方向の翼の柔軟性の影響
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日置文弥, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 蝶を模した羽ばたき翼 - 胴体モデルの空力性能に対する前翼・後翼の動作の差の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津江耕太郎, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 蝶を模した羽ばたき翼 - 胴体モデルの空力性能に対する翼長方向の翼の柔軟性の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎攻, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 蝶を模した羽ばたき翼 胴体モデルにおける腹部の運動による胸部角の動的制御
3. 学会等名 第19回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 椛真哉, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 異なる飛翔形態における蝶の飛翔解析: 計測実験と計算モデルを用いた数値計算
3. 学会等名 第19回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石崎攻、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 蝶を模した羽ばたき翼 - 胴体モデルの飛翔時における胸部と腹部の運動の関係
3. 学会等名 日本流体力学会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 糺真哉、中村優志、木村晃樹、鈴木康祐、吉野正人
2. 発表標題 前進飛翔時における蝶の飛翔解析：計測実験と計算モデルを用いた数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kosuke Suzuki、Masaya Kouji、Masato Yoshino
2. 発表標題 Fight Dynamics in Forward Flights of a Cabbage White Butterfly
3. 学会等名 The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kosuke Suzuki
2. 発表標題 Some attempts to reproduce the pitching attitude control of butterflies through immersed boundary-lattice Boltzmann simulations
3. 学会等名 JSPS/SAC SEMINAR ON GAS KINETIC/DYNAMICS AND LIFE SCIENCE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 稲室 隆二、吉野 正人、鈴木 康祐	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 176
3. 書名 格子ボルツマン法入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	吉野 正人 (Yoshino Masato)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Rutgers University		