

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03969

研究課題名（和文）種によって異なる蝶の翅形状とその飛翔特性の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the different wing shapes and flight characteristics of butterflies among species

研究代表者

藤川 太郎（Fujikawa, Taro）

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：40618394

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：旋回性や加速性に優れたアゲハチョウ科と長距離飛翔に優れたタテハチョウ科の蝶の運動解析およびそれぞれの翅の3Dモデルに対する数値流体力学解析を行った。また、自由飛翔が可能な1.8gの蝶型はばたきロボットを開発し、それぞれの蝶をモデルとした翅を実装した飛翔運動解析を行った。その結果、タテハチョウ科の翅形状の方が揚抗比が高いこと、アゲハチョウ科の方が自由飛翔時の上下動の振幅が大きい傾向にあることが明らかになった。これより、飛翔中により上昇しやすいのはアゲハチョウ科の翅形状であり、低い周波数で上下動少なく飛翔するためにはタテハチョウ科の翅形状が優れていることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「飛翔能力が違う蝶の種によって翅形状が異なる工学的な意味は何か」ということが本研究の核心をなす学術的問いである。

本研究では、より上昇しやすい翅形状はアゲハチョウ科のような後翅の幅が狭いものであり、低い周波数でほぼ水平に飛翔させるためにはタテハチョウ科のような後翅が幅広く丸みを帯びた翅形状が適しているということ、蝶の運動解析および実機による検証実験により明らかにした。これは、これまで困難であった昆虫サイズの小型はばたきロボットの自由飛翔の実現に寄与したという意味で大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the flight characteristics of butterflies of the Papilionidae family, which excels in turning and acceleration, and the Nymphalidae family, which excels in long-distance flight. We also performed numerical fluid dynamics analysis on the 3D models of each butterfly's wings. In addition, we developed a 1.8 g butterfly-style flapping robot that can fly freely and analyze flight motion using each butterfly's wing model.

Our findings revealed that the wing shape of the Nymphalidae family demonstrated a higher lift-drag ratio, indicating its efficiency in flight. On the other hand, the Papilionidae family's wing shape exhibited a larger amplitude of up-and-down movement during free flight, suggesting its agility in maneuvering. These results indicate that the wing shape of the Papilionidae family is more easily raised during flight and that the wing shape of the Nymphalidae family is superior for flying at low frequencies with less vertical movement.

研究分野：ロボティクス

キーワード：蝶 はばたきロボット 翅形状 飛翔メカニズム 数値流体力学解析 運動解析 アゲハチョウ科 タテハチョウ科

1. 研究開始当初の背景

日本国内でよく見られる蝶として、タテハチョウ科のアサギマダラやオオゴマダラ、アゲハチョウ科のナミアゲハなどが挙げられる。その翅形状に着目すると、タテハチョウ科の後翅は開いた扇のように後縁部が幅広く丸みを帯びているが、アゲハチョウ科の後翅は前翅に比べて幅が狭く、後縁部はギザギザしており、尾状突起と呼ばれる突起がついているものも多い。飛行能力の違いとしては、アサギマダラは「渡り」を行う蝶として、1,000km 以上の長距離移動を可能としているのに対し、アゲハチョウは高い敏捷性や加速性を有した飛行が特徴的である。しかし、これらの翅形状がどのように飛行特性に影響を与えているかは明らかになっていない。

申請者はこれまで、蝶をモデルとした手のひらサイズの小型はばたきロボットを開発しており、初速 0m/s からの飛び立ちを実現している。この機体を自由飛行させるためには、フラッピング角やリード・ラグ角といった設計パラメータだけではなく、他の飛行昆虫よりも大きな翅そのものの形状にも着目する必要がある。そのため、飛行能力が異なる蝶の翅形状がもつ特性を明らかにすることで、これまで困難であった昆虫サイズの小型はばたきロボットの自由飛行を実現することが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、手のひらサイズの小型はばたきロボットの自由飛行を実現するため、種によって異なる蝶の翅形状とその飛行特性を明らかにすることを目的とする。また、開発した機体の飛行運動解析を行うことにより、翅形状が異なる実際の蝶と同様の飛行特性を示すのかを検証する。

3. 研究の方法

第一に、飛行特性が異なるアゲハチョウ科とタテハチョウ科の蝶の自由飛行の様子を複数の高速度カメラで撮影し、得られた画像から 3 次元運動解析を行う。これにより、種の違いと飛行特性との関係を明らかにする。第二に、蝶の翅形状を 3D モデルで再現し、数値流体力学 (CFD) 解析により翅自体の空力特性を明らかにする。第三に、蝶の運動解析結果をもとに、自由飛行が可能な蝶型はばたきロボットを開発する。この機体の運動解析を行うことにより、翅形状の違いが飛行特性に与える影響を検証する。

4. 研究成果

(1)蝶の運動解析

足立区生物園にご協力いただき、複数種の蝶の飛行の様子を 3 台の高速度カメラ (DITECT, HAS-U2, 800×600 pixels, 500fps) で撮影した。得られた画像のうち、アゲハチョウ科のナミアゲハ、タテハチョウ科のオオゴマダラについて 3 次元運動解析を行った結果、水平飛行時のフラッピング周波数は、それぞれ平均 11Hz, 7Hz ほどであり、そのときのフラッピング角の範囲はいずれも 65deg から -30deg 程度であることがわかった (図 1)。ナミアゲハに関しては、これまでの研究結果から、飛び立ち時のフラッピング角の範囲は平均して 80deg から -60deg であることがわかっており、水平飛行時の方が小さな角度であることが明らかになった。また、翅サイズがより大きなオオゴマダラは、ナミアゲハと比較してフラッピング周波数が低いことも明らかになった。

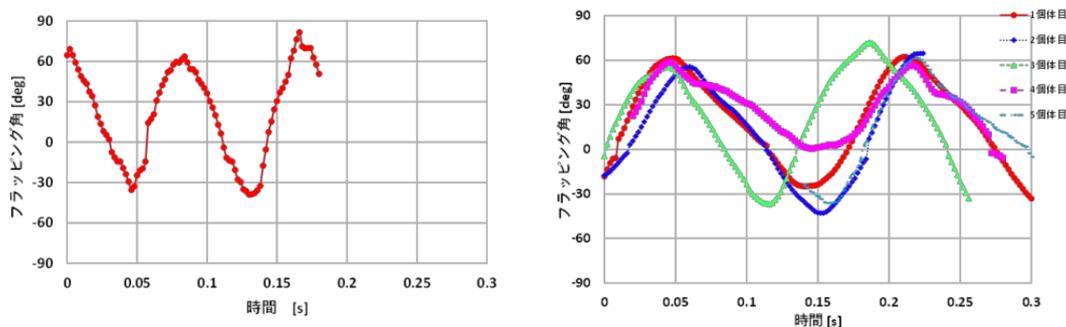


図 1 フラッピング角の推移：(左) ナミアゲハ、(右) オオゴマダラ

(2)数値流体力学 (CFD) 解析による翅の空力特性の調査

アゲハチョウ科とタテハチョウ科の蝶の翅の空力特性を調べるため、ナミアゲハとジャコウアゲハ、アサギマダラとオオゴマダラの翅 (図 2) について、オープンソースのソフトウェアである OpenFOAM を用いて CFD 解析を行い、迎角の違いにおける揚抗比を求めた。解析に用いたそれぞれの翅の 3D モデルおよび解析結果をそれぞれ図 3, 4 に示す。ここでは、4 種の蝶の

翅の翼幅長をナミアゲハの 55mm に統一して解析を行った。実際に飛翔していた速度である 1.5m/s の流速を与えた際の解析の結果、いずれの翅も迎角 10deg において揚抗比が最大となった。このときの値を種ごとに比較すると、アゲハチョウ科よりもタテハチョウ科の翅は 10%ほど揚抗比が高くなることが明らかになった。これより、タテハチョウ科の翅形状はアゲハチョウ科の翅形状に比べて長距離飛行に適していることが示唆された。

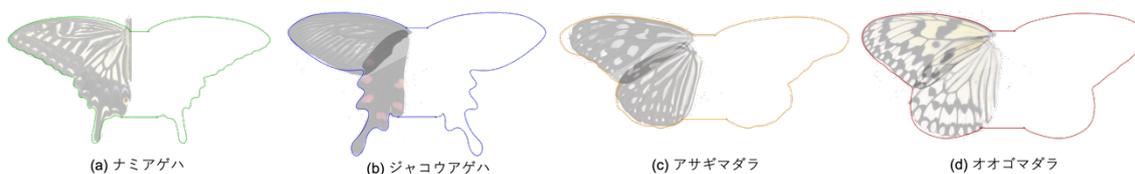


図 2 アゲハチョウ科 2 種 (a, b) とタテハチョウ科 2 種 (c, d) の翅形状

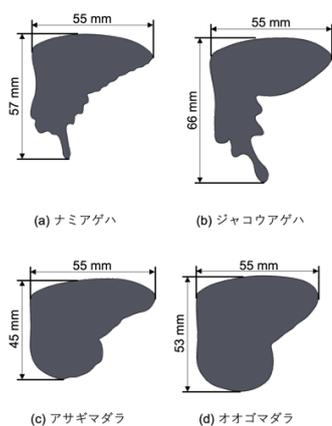


図 3 4 種の蝶の翅の 3D モデル

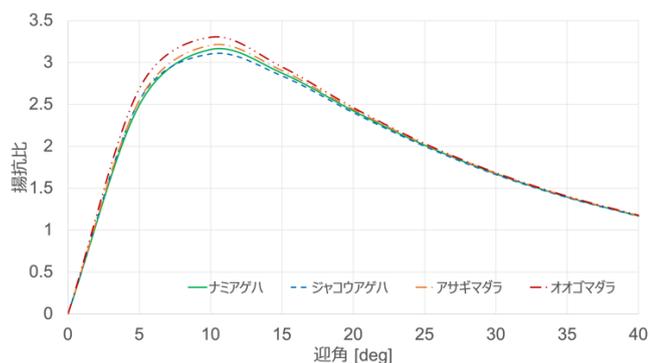


図 4 4 種の蝶の揚抗比の比較

(3) 水平飛翔可能な蝶型はばたきロボットの開発と飛翔運動解析

蝶の運動解析結果をもとに蝶型はばたきロボットを開発した (図 5)。機体は主に、モータ (MK04S-10) とバッテリー (日本ガイシ, EC382204P-C)、翅, ギア (減速比 1:122)、翅への動力伝達用リンク、モータブラケットから構成される。翅のフレームとリンクの材料には Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) を使用し、ギアとモータブラケットは光造形機で製作した。翅膜には厚さ $3\mu\text{m}$ の PET フィルムを用いている。この機体を用いて、図 2 に示す 4 種の蝶をモデルとした翅を実装し、運動解析を行う。なお、実際の蝶は質量 0.5g ほどであるが、モータとバッテリーの質量から翼面荷重を検討し、いずれも翼幅長 110mm, 質量 1.8g で機体を製作している。フラッピング角は 50deg から -30deg とし、周波数はアゲハチョウとのスケールを考慮して 7Hz としている。

高さ 1.6m から初速 0.3m/s で機体を水平投射し、その飛翔の様子を 3 台の高速度カメラ (DITECT, HAS-U2, 1920×1080 pixels, 250fps) で撮影し、3 次元運動解析を行った。飛翔の様子の一例として、アゲハチョウを模した翅を実装した機体の連続写真を図 6 に、4 種の蝶それぞれを模した翅を実装した機体の飛翔軌跡の比較結果を図 7 に示す。いずれも 200mm ほど降下したのち、一定の高度を保ちながら飛翔することが可能となった。実際の蝶と同様に、上下動を繰り返しているその様子は、他の飛翔昆虫には見られない特徴的なものであり、本研究で開発した蝶型はばたきロボットでも再現できていることが確認できた。各モデルの飛翔開始直後の降下距離の平均値は、ナミアゲハが約 250mm, ジャコウアゲハが約 235mm, アサギマダラが約 190mm, オオゴマダラが約 190mm であった。また、降下後の上昇距離に着目すると、ナミアゲハが約 140mm, ジャコウアゲハが約 120mm, アサギマダラが約 70mm, オオゴマダラが約 90mm であった。2 つの科の蝶の翅形状で比較すると、アゲハチョウ科の翅形状を模した機体は、タテハチョウ科の翅形状を模したのものよりも降下後により上昇する傾向にあり、タテハチョウ科の翅形状を模した機体は、飛翔開始直後の降下距離がアゲハチョウ科の翅形状の機体よりも短い傾向にあることが明らかになった。

以上の結果から、より上昇しやすい機体を製作するためにはアゲハチョウ科のような後翅の幅が狭い翅形状が適しており、より低い周波数で上下動の少ない飛翔をさせるためにはタテハチョウ科のような後翅が幅広く丸みを帯びた翅形状が適していることが示唆された。

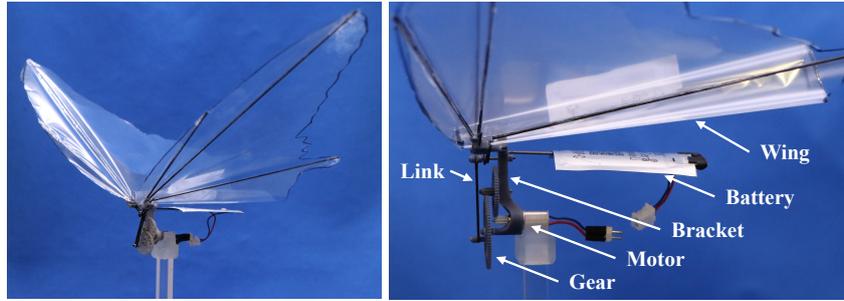


図 5 開発した蝶型はばたきロボット

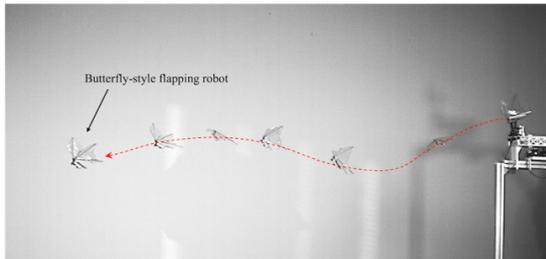


図 6 蝶型はばたきロボットの飛翔の一例

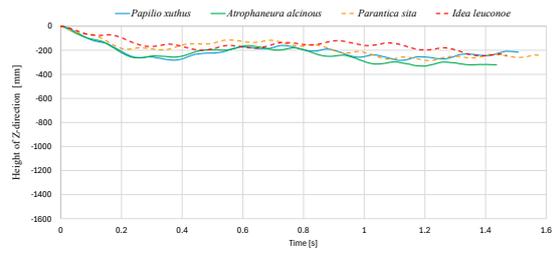


図 7 4 種のモデルの飛翔軌跡の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujikawa Taro, Teranishi Yuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Development of a 2g butterfly-style flapping-wing micro aerial vehicle	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Robotics & Automation Journal	6. 最初と最後の頁 1~3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15406/iratj.2024.10.00275	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大宮駿佑, 竹下啓嗣, 藤川太郎
2. 発表標題 フラッピング角の異なる蝶型はばたきロボットの飛翔解析
3. 学会等名 日本設計工学会 2023 年度春季研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺西悠稀, 藤川太郎
2. 発表標題 翅形状の異なる蝶型はばたきロボットの揚力測定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川優, 喜岡輝, 河合悠登, 藤川太郎
2. 発表標題 翅形状の異なる種の蝶の運動解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺西悠稀, 小倉拓人, 遠藤一, 藤川太郎
2. 発表標題 自律飛翔可能な 2g の蝶型はばたきロボット
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 須田芽衣子, 寺西悠稀, 小倉拓人, 遠藤一, 藤川太郎
2. 発表標題 フェザリング角の違いにおける蝶型はばたきロボットの自由飛翔運動解析
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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

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