

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02060

研究課題名(和文) 昆虫飛行のロバストネスの統合的研究：運動、力学及び制御

研究課題名(英文) Integrated study of robustness in insect flights: dynamics, aerodynamic and control

研究代表者

劉 浩(Liu, Hao)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40303698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、昆虫がなぜ外乱環境の中で安定飛行を実現できるのか、その外乱に強い空気力学と飛行制御のロバストネスがどう実現されているのかという「問い」に焦点を当て、風外乱模擬可能な低速風洞実験と昆虫羽ばたき飛行の柔軟翼・胴体の運動・力学・制御の多力学連成シミュレーションによる統合的な研究を実施した。その結果、コンピュータシミュレーションにより風外乱環境下の昆虫羽ばたき飛行乃至羽ばたき飛行ロボットのフライト性能を評価するとともに、昆虫の翼・胴体の柔軟構造と飛行ロバストネスの相関を解明した。さらに昆虫翼・胴体の柔軟構造機構は羽ばたき翼と柔軟胴体を介してロバストな飛行制御則を生み出すことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、外乱に強い昆虫羽ばたき飛行の空気力学ロバスト性(なぜ失速しないのか)と飛行制御ロバスト性(なぜ安定飛行できるのか)を解明したことにより、様々な自然環境に強く、“墜ちない”生物規範型羽ばたきロボットやドローンなど次世代“安全安心”無人航空機の研究開発に、一つのバイオミメティクス設計指針を提供した。また、昆虫のもつ翼と胴体と筋骨格系の柔軟構造が知能構造として生み出す飛行制御則は、小型飛行体の安定性・操縦性トレードオフを打破する一つのキーになる可能性を示唆し、それが生物飛行制御のロバスト性の解明だけでなく、次世代ドローンや空飛ぶ車に革新的な設計指針をもたらすことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Insects power and control their flight by flapping their wings. Insect flights are diverse but robust relying on the integration of different flexible structures including wings, exoskeletal elements, wing-hinges, musculoskeletal elements, and sensors. In this study, to unlock how insects execute complex maneuvers in turbulent environments, we developed an integrated computational platform of insect-inspired flight systems and explored unraveling a passive and active mechanism strategy of how flexible wing-body structures work interactively to achieve a systematically efficient and robust flapping-wing dynamics and aerodynamics as well as flight control. An extensive investigation was further undertaken on the insect flight strategies in terms of robustness, intelligence and flexible-structure-based multi-functionalities. Our results provide a novel biomimetic design of the insect-inspired micro air vehicles / drones with capabilities to perform a variety of complex maneuvers.

研究分野：生物流体、生物飛行、バイオメカニクス、バイオミメティクス

キーワード：昆虫飛行 空力ロバストネス 飛行制御ロバストネス 力学シミュレーション 擬似乱流風導実験

1. 研究開始当初の背景

近年生物に学ぶ機械系バイオメティクス研究の中で、災害時の空撮、農薬散布や沿岸監視、テロ現場での情報収集や火星探査等を目的とした無人小型飛行体及びドローンの研究開発の究極な目標とされる、昆虫や鳥の生物飛行の研究は、最も飛躍的に発展を遂げたバイオロボット分野の一つとして注目されている。ところが、無人飛行体は飛行安定性・操縦性、環境認識能力や知能性、安心安全等、どの面においても、昆虫や鳥には遠く及ばない。その中、近い将来市街地を飛び回るドローンや空飛ぶ車の研究開発において、安心安全を保証するロバスト飛行を実現可能な設計指針の創出が喫緊課題であった。

これまでの生物飛行の研究は、風洞実験や力学シミュレーションにおいて無風状態での静止飛行や一様流中の前進飛行に限定するものであり、自然界において空間的且つ時間に乱れている空気中を自由自在に飛び抜ける昆虫や鳥の飛行とは本質的に異なっている。本研究では、昆虫がなぜ外乱環境の中で常に安定飛行を実現できるのか、生物飛行の空気力学ロバスト性と飛行制御ロバスト性がどう実現されているのかという「問い」に焦点を当てて生物飛行ロバストネスの本質を求める。申請者が世界に先駆けて昆虫飛行の力学シミュレータを開発し、生物飛行を一つの「システム」として系統的に昆虫や鳥の羽ばたき飛行の運動、流体、構造及び安定性と制御の研究を遂行して生物規範飛行システムを提唱している。最近では、昆虫柔軟翼の流体構造連成解析や翼柔軟筋骨格系連成解析などにより昆虫の“柔らかい”構造が空力性能と飛行安定性の両方を向上させることが明らかになった。これが昆虫翼・胴体の柔軟構造が胴体主導の飛行制御則を可能にして飛行ロバストネスを実現させるのではないかとという着想に至った本研究の学術的背景となっていた(図1)。

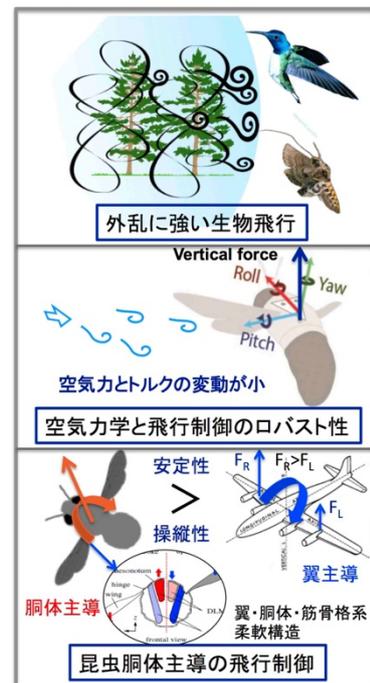


図1 外乱に強い昆虫飛行のロバストネスと胴体主導の制御則

2. 研究の目的

本研究では、前項に記述した学術的「問い」に答えるために、自然外乱を模倣可能な低速風洞での昆虫飛行時の翼・胴体の運動と変形の同時計測と昆虫飛行の柔軟翼・胴体の運動・力学・制御の多力学連成解析を統合することにより昆虫飛行の翼・胴体の柔軟構造と飛行ロバストネスの相関を明らかにする(図2)。これは、これまでに無風や一様流など理想化された条件下で行われた生物飛行の研究とは本質的に違い、長い自然淘汰の結果昆虫が獲得してきた外乱に強くロバストな飛行制御の本質を解き明かすものとなる。本研究の学術的特徴は、1)超低速風洞での擬似外乱環境の構築と昆虫自由飛行時の翼・胴体の運動と変形の高速同時計測・解析を可能にする擬似自然外乱環境アリーナの構築、2)風洞実験に基づいた昆虫飛行の柔軟翼・胴体の運動・力学・制御の多力学連成統合シミュレータの構築、そして3)本研究の最大なねらいとしての柔軟翼・胴体構造による「胴体主導の飛行制御則」の検証と確立などが挙げられる(図2)。とくに3)では柔軟な翼・胴体が胴体主導の飛行制御を行って飛行ロバストネスを実現する学説を確立できれば、胴体の能動的回転による姿勢制御、すなわち従来の翼による飛行制御を基本とする人工飛行体とは全く異なる革新的な飛行制御学理の創出にもつながる。昆虫のもつ翼・胴体・筋骨格系の柔軟構造が知能構造として生み出す胴体主導の飛行制御則は、小型飛行体の安定性・操縦性トレードオフを打破する一つのキーになる可能性が極めて高く、そのメカニズムを解明すれば生物飛行制御のロバスト性の解明だけでなく、次世代ドローンや空飛ぶ車に革新的な設計指針をもたらす可能性が大きい。これは、これまでの飛行制御理論とは全く逆転な発想になる独自性と、小型飛行体の飛行制御的革新にもつながる優れた創造性を有する提案であった。

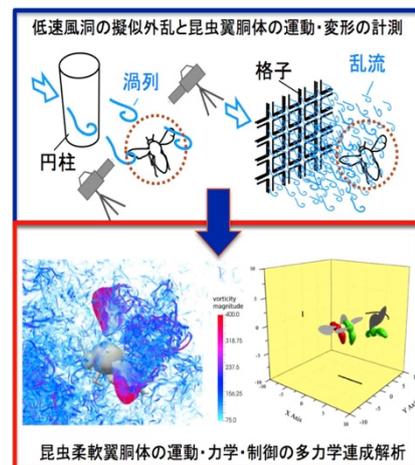


図2 昆虫飛行の翼胴体の運動・変形の計測と多力学連成解析

3. 研究の方法

本研究では、昆虫飛行の翼・胴体の柔軟構造と飛行ロバストネスの相関を運動・力学・制御の統合的研究により解明することで、“墜ちない”安全安心なドローンなど無人飛行体のバイオメティクス基本設計指針の創出を最終目標として、1)擬似外乱環境を有する超低速風洞での昆虫飛行の翼・胴体の運

動と変形の同時計測、2)昆虫飛行の柔軟翼・胴体の運動・力学・制御の多力学連成統合シミュレータ構築、3)翼胴体の柔軟構造による胴体主導の昆虫飛行制御則の確立など3つの研究課題を3年間(H31-H33)にわたり実施した。

方法・課題1:【昆虫飛行の翼・胴体の運動と変形の同時計測】 外乱を受けた自由飛行昆虫の翼・胴体の運動・変形の同時撮影・計測を含む運動学的応答の定量化。

方法・課題2:【昆虫柔軟翼胴体の運動・力学・制御の多力学連成解析】 外乱を受けた自由飛行昆虫の柔軟翼・胴体を有する羽ばたき昆虫の流体・構造・飛行ダイナミクス・制御の統合力学シミュレーションによる力学的応答の解析。

方法・課題3:【昆虫柔軟翼胴体構造による胴体主導の昆虫飛行制御則】 昆虫飛行の運動・力学・制御の多力学連成統合シミュレーションによる昆虫飛行の空気力学ロバスト性、飛行制御ロバスト性及び柔軟構造機構と飛行ロバストネスの相関の検討。

4. 研究成果

課題1: 昆虫飛行の翼・胴体の運動と変形の同時計測

外乱を受けた自由飛行昆虫の運動学的応答の定量化、すなわち翼・胴体の運動・変形の同時撮影・計測が被写体昆虫のサイズや動きの素早さ等で極めて挑戦的な課題であった。本研究課題では、以下のような成果が得られた。

超低速風洞の中に、円柱及び格子網による渦流れや乱流を発生する装置を製作し、様々な擬似外乱を人工的に発生できる擬似自然外乱環境アリーナを構築した。さらに高速カメラ数台を設置し昆虫の自由飛行時の翼・胴体の運動や姿勢変化及び変形を同時撮影する多機能運動計測システムを構築した。さらに昆虫翼と胴体の半自動追跡解析ソフトにより画像解析を行って、マルハナバチ、蛾、甲虫など数種類の昆虫の翼・胴体の3次元幾何学・運動学モデルを構築した。本課題の関連成果の一部は、自由飛行昆虫における翼・胴体の幾何学と運動学のモデリングに関して、学術論文(文献1, 3, 4, 8, 11, 12)にて発表されている。

課題2: 昆虫柔軟翼胴体の運動・力学・制御の多力学連成解析

外乱を受けた自由飛行昆虫の力学的応答の解析、すなわち柔軟翼・胴体を有する羽ばたき昆虫の流体・構造・飛行ダイナミクス・制御の統合力学シミュレーションが多力学連成解析であるため大きな挑戦でもあった。本研究では、昆虫自由飛行での流体と胴体ダイナミクスの連成、翼胴体柔軟構造と流体の連成、筋骨格系と流体の連成、胴体ダイナミクスと飛行制御の連成を弱連成の手法で統合するとともに、様々な外乱における大規模な統合力学シミュレーションを行った(文献10)。本研究課題では、以下のような成果が得られた。

柔軟翼ヒンジを持つ羽ばたき翼の非線形動力学モデル、6自由度の胴体モデル、自由飛行モデルを構築し統合するとともに、高精度且つ短時間で非定常羽ばたき翼空気力の予測を可能とする計算流体力学データ駆動型の昆虫飛行力学モデル(CDAM:CFD-driven aerodynamic model)を開発し、静止飛行及び各速度の前進飛行においてその有効性を確認した(文献5、[図3](#))。さらに proportional-derivative (PD)制御則に基づき、Laplace 変換と root locus 手法を用いて構築された6軸飛行制御コントローラにより、3種類昆虫の飛行制御に適用した結果、飛翔昆虫は胴体姿勢の復元時間を最速に実現する飛行安定性戦略を行なっていることを明らかにした(文献5、8)。このシミュレータにより、3軸ねじりバネによる柔軟翼ヒンジモデルの導入された羽ばたき翼は、エネルギーの蓄積と放出により、羽ばたき翼運動や空気力の発生のロバストネスを、バネ剛性の広範囲に亘って高効率を維持しながら、向上させることができることを解明した(文献3、12)。

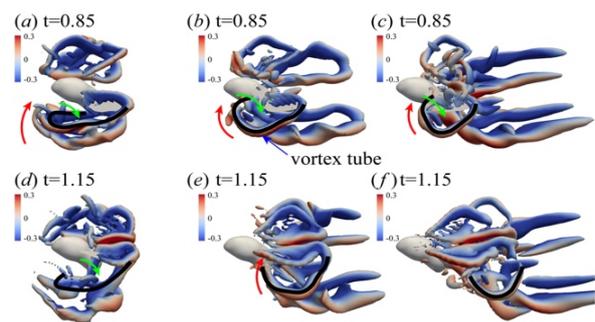


図3 CFD-driven aerodynamic model により計算された前進飛行中のマルハナバチ周りの流れの様子(Cai et al JFM (2021)より)

課題3: 昆虫柔軟翼胴体構造による胴体主導の昆虫飛行制御則

昆虫飛行の運動・力学・制御の多力学連成統合シミュレーションを行い、総合的に昆虫飛行の空気力学ロバスト性、飛行制御ロバスト性、そして柔軟構造機構と飛行ロバストネスの相関を検討した。本研究課題では、以下のような成果が得られた。

これまで謎に包まれていた、体長わずか $395 \mu\text{m}$ の羽毛甲虫([図4](#): *Paratuposa placentis*)の飛行性能を解明した。この昆虫は鞘翅(しょうし:硬いはね)と羽毛状の翅とをもち、なぜ3倍の大きさの昆虫アザミウマと同速度・同加速度で飛行できるかについて、国際共同研究により、胴体や翅の忠実な形態モデ

ル、高速度ビデオ撮影による翅の羽ばたき運動モデル、固体力学と流体力学の計算手法を用いた飛行力学モデルを構築して羽毛甲虫の飛行性能を統合的に解析した。その結果、この羽毛昆虫が膜状の翅と比べて8割も軽い羽毛状の翅により、独特な運動で抗力を巧みに利用して飛行していることを明らかにした(文献1、12)。つまり、超軽量の羽毛状の翅と抗力利用に適した独特な羽ばたき運動は、この羽毛昆虫が長い進化の結果獲得した超小型飛翔体の究極の飛行デザインであることを示唆する。この成果は、国際科学雑誌「Nature」(表紙論文)にて発表された。

スズメ蛾自由飛行の翼・胴体の形状・運動及び力学の統合モデルを構築し、大規模シミュレーションをおこなうことにより、静止飛行と各種速度での前進飛行における空気力学性能およびエネルギー損失について、特に羽ばたき翼と胴体の相互作用を総合的かつ定量的に評価した。その結果、(1)全ての飛行速度では、前縁渦が主に揚力の発生に起用していること、(2)飛行速度 3 m/s 前進飛行において、胴体が最も揚力の発生に寄与すること(つまり、機械的パワーが飛行速度に対して J-shaped 分布を示す)、そして(3)飛行速度 2m/s 前進飛行では、消費パワーが最も小さいことが分かった。さらに、高い翼 AR(aspect ratio)がこの翼胴体の干渉を有利に働かせるが、翼胴体の質量比の増大がパワー消費を低減させることを明らかにした。本成果(文献2)は、Physics of Fluids (図 5)にて発表され、また Editor's pick (featured) と AIP Scilight(<https://doi.org/10.1063/10.0011624>)に選ばれた。今後の昆虫を規範とした羽ばたき飛行ロボットに対して、有益な設計指針を与えることになる。

昆虫羽ばたき飛行の形態学インテリジェンスについて、昆虫の翼胴体質量比(WBMR: wing-to-body mass ratio)が広範囲にわたって変化し羽ばたき翼の慣性力と空気力の両方を左右することに着目し、3種類の飛翔昆虫ホバリングの飛行力学シミュレーションにより、WBMR が胴体ピッチ振動を最小に抑制しながら低レベルのメカニカルパワーを維持することを突き止めた(文献4)。この翼胴体質量比効果は、羽ばたき翼ダイナミクスの最適化を示唆するとともに、昆虫や小鳥サイズの羽ばたき飛行ロボットのバイオメタリックデザインの究極な指針を提供することができる。昆虫羽ばたき飛行の運動学インテリジェンスについて、マルハナバチの飛翔筋駆動の間欠制御戦略(ICS: intermittent control strategy)が羽ばたき飛行冗長性(ロバストネス)への影響を飛行力学解析と制御モデルを用いて検討した。従来の連続的制御モデルより、ICS モデルは、角速度ベストの飛行制御を実現するとともに、センシング遅れや減衰強度などにおいて飛行安定性を向上できることを解明した(図 6)。また、甲虫の離陸について、高速度カメラによる撮影、羽ばたき翼及び胴体姿勢の運動解析及び飛行力学シミュレーションを統合することにより、その離陸飛行制御は胴体ロールが支配的であることで、飛行方向の制御だけでなく、後退飛行から前進飛行への円滑な遷移を巧みに実現できることを明らかにした(文献11)。

一方、これらの解析により得られた知見を、昆虫や鳥を規範とした飛行ロボットとマルチロータードローンへの柔軟構造を有するバイオメタリクス設計方針設計指針についても検討を行った。昆虫の筋骨格系を規範とした柔軟・冗長な羽ばたき機構の創製を目指して、昆虫の筋骨格系の柔軟性と冗長性を規範とした羽ばたき機構(図 7)を作製し、羽ばたき機構の柔軟性が羽ばたきロボットの飛行性能に及ぼす影

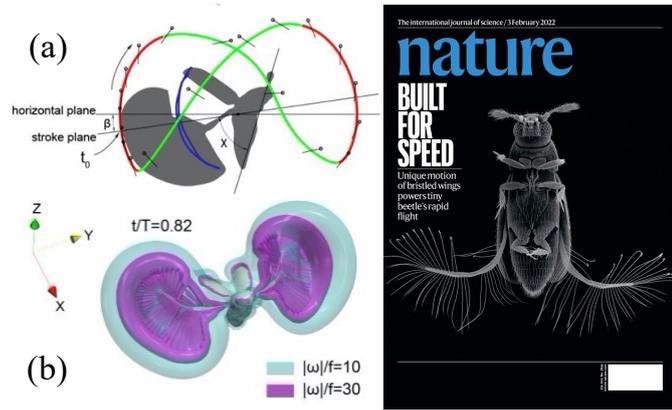


図 4 (a) 羽毛甲虫の翅の大きな羽ばたき運動と鞘翅の小さな振動。(b)シミュレーションにより可視化されたホバリング時の渦流れ。(Farisenkov et al. Nature (2022)より)

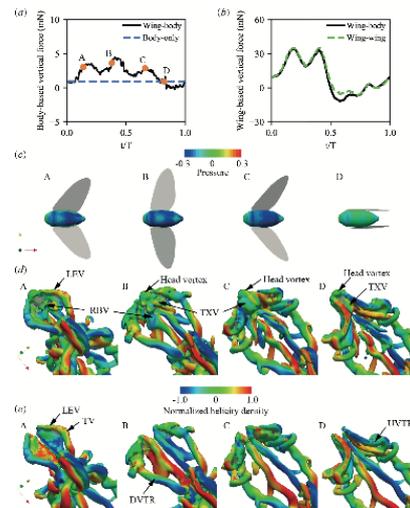


図 5 色な飛行速度でのスズメが周りの渦流れの様子。(Xue et al. PoF (2022)より)

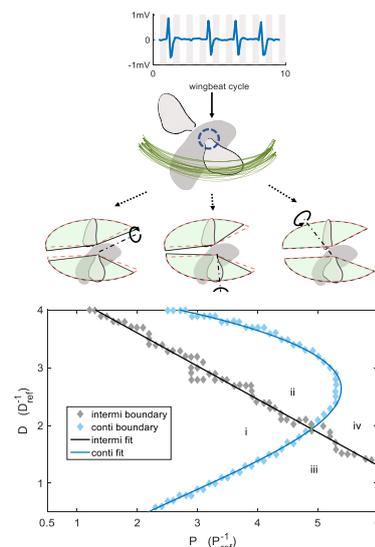


図 6 マルハナバチの飛翔筋駆動の間欠制御戦略(Xu et al. BB (2020)より)

響を評価した。ここで、昆虫の柔軟な筋骨格系が、外乱に対するロバスト性に及ぼす影響を調べるために、ねじりバネや柔軟ヒンジ、翼根本の曲げバネ、リンク機構といった柔軟な機構を有する羽ばたきロボットを作製し、翼運動と揚力の測定、風洞実験を行った。作製した機体は、ねじりバネ剛性と羽ばたき周波数を適切な組み合わせにすることで、振幅と平均翼端速度が増加し、自重以上の揚力を発生させることが分かった。また、昆虫の筋骨格系に近い、リンク機構によって左右の翼を接続した場合、外乱の強さによってねじりバネの剛性を変化させることで、ロバスト性を向上できることが分かった。さらに前縁全体が柔軟な翼は、外乱によって変形することで、左右の翼の振幅差が大きくなり、ロバスト性の低下に繋がる。これらの知見は、高性能な羽ばたきロボットの実現にとって重要な設計指針を与えることを示唆した(文献6)。また、鳥の羽根を規範とした柔軟翼を用いたカイトプレーンの外乱応答特性について、風洞実験を行い、適切な柔軟性の翼膜を用いることで、外乱流中でのロバスト性を向上させることを確認した(文献7)。

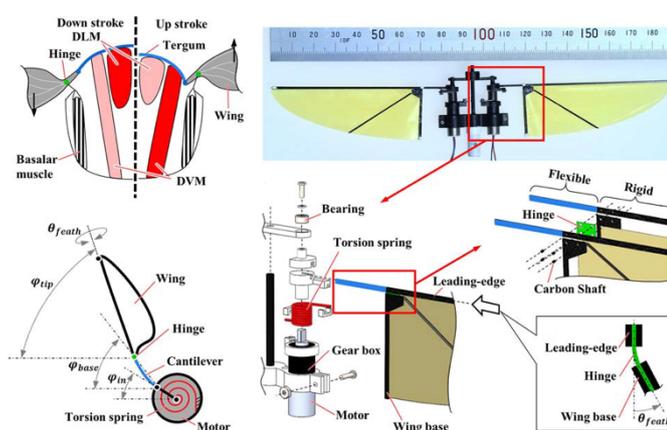


図7 昆虫の筋骨格系の柔軟性と冗長性を規範とした羽ばたき機構 (Koizumi et al. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (2021)より)

参考文献： 本研究の成果として発表した査読付論文

1. S. E. Farisenkov, D. Kolomenskiy, N. A. Lapina, P. N. Petrov, T. Engels, F-O Lehmann, R. Onishi, H. Liu, A. A. Polilov. Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles. *Nature* **602**, 96-100 (2022). (IF: 49.96)
2. Y. Xue, X. Cai, H. Liu. Effects of Wing-body Interaction on Hawkmoth Aerodynamics and Energetics at Various Flight Velocities. *Physics of Fluids* **34**, 051915(2022). (IF: 3.521, selected as featured and AIP Scilight: <https://doi.org/10.1063/10.0011624>)
3. X. Cai, Y. Xue, D. Kolomenskiy, R. Xu, H. Liu. Elastic Storage Enables Robustness of Flapping Wing Dynamics. *Bioinspiration & Biomimetics* **17**(4), 045003(2022). (IF: 3.13)
4. R. Xu, X. Zhang, H. Liu. Effects of wing-to-body mass ratio on insect flapping flights. *Physics of Fluids*. **33**, 021902(2021). (IF: 3.521)
5. X. Cai, T. Nakata, D. Kolomenskiy, H. Liu. A CFD Data-Driven Aerodynamic Model for Fast and Precise Prediction of Flapping Aerodynamics in Various Flight Velocities. *Journal of Fluid Mechanics*. **915**, A114 (2021). (IF: 3.354)
6. S. Koizumi, T. Nakata, H. Liu. Effects of the flexibility of flapping mechanisms inspired by insect musculoskeletal system on the flight performance of flapping wing robot. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612183> (2021). (IF: 5.89)
7. Y. Murayama, T. Nakata, H. Liu. Flexible flaps inspired by avian feathers can enhance aerodynamic robustness in low Reynolds number airfoils. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612182> (2021). (IF: 5.89)
8. X. Cai, H. Liu. A six-degree-of-freedom proportional-derivative control strategy for bumblebee flight stabilization. *Journal of Biomechanical and Science Engineering*. **16**(4), 21-00113(2021).
9. D. Kolomenskiy, S. Farisenkov, T. Engels, N. Lapina, P. Petrov, F-O Lehmann, R. Onishi, H. Liu, A. Polilov. Aerodynamic performance of a bristled wing of a very small insect. *Experiments in Fluids*. **61**, 194(2020). (IF:2.79)
10. H. Liu. Simulation-based Insect-inspired Flight Systems. *Current Opinion in Insect Science*. **42**: 105-109(2020). (invited, IF:5.186)
11. R. Xu, T. Nakata, X. Cai, H. Liu. Intermittent control strategy can enhance stabilization robustness in bumblebee hovering. *Bioinspiration & Biomimetics*.**16**:016013(2020). (IF:3.13)
12. D. Kolomenskiy, S. Ravi, R. Xu, K. Ueyama, T. Jakobi, T. Engels, T. Nakata, J. Sesterhenn, M. Farge, K. Schneider, R. Onishi, H. Liu. The dynamics of passive feathering rotation in hovering flight of bumblebees. *Journal of Fluid and Structure*, **91**, 102628(2019). (IF:3.070)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Cai Xuefei, Kolomenskiy Dmitry, Nakata Toshiyuki, Liu Hao	4. 巻 915
2. 論文標題 A CFD data-driven aerodynamic model for fast and precise prediction of flapping aerodynamics in various flight velocities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 p. A114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.68	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 Xu Ru, Zhang Xiangdong, Liu Hao	4. 巻 33
2. 論文標題 Effects of wing-to-body mass ratio on insect flapping flights	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 021902 ~ 021902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0034806	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 Xu Ru, Nakata Toshiyuki, Cai Xuefei, Liu Hao	4. 巻 16
2. 論文標題 Intermittent control strategy can enhance stabilization robustness in bumblebee hovering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 016013 ~ 016013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-3190/abbc65	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 Liu Hao	4. 巻 42
2. 論文標題 Simulation-based insect-inspired flight systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Current Opinion in Insect Science	6. 最初と最後の頁 105 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cois.2020.10.001	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 Kolomenskiy Dmitry, Farisenkov Sergey, Engels Thomas, Lapina Nadezhda, Petrov Pyotr, Lehmann Fritz-Olaf, Onishi Ryo, Liu Hao, Polilov Alexey	4. 巻 61
2. 論文標題 Aerodynamic performance of a bristled wing of a very small insect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 ID.194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-020-03027-0	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 該当する

1. 著者名 Kolomenskiy Dmitry, Ravi Sridhar, Xu Ru, Ueyama Kohei, Jakobi Timothy, Engels Thomas, Nakata Toshiyuki, Sesterhenn Jorn, Schneider Kai, Onishi Ryo, Liu Hao	4. 巻 91
2. 論文標題 The dynamics of passive feathering rotation in hovering flight of bumblebees	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 102628 ~ 102628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfluidstructs.2019.03.021	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 Ravi Sridhar, Noda Ryusuke, Gagliardi Susie, Kolomenskiy Dmitry, Combes Stacey, Liu Hao, Biewener Andrew A., Konow Nicolai	4. 巻 30
2. 論文標題 Modulation of Flight Muscle Recruitment and Wing Rotation Enables Hummingbirds to Mitigate Aerial Roll Perturbations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 187 ~ 195.e4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cub.2019.11.025	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 該当する

1. 著者名 Panta Ashim, Fisher Alex, Mohamed Abdulghani, Marino Matthew, Xu Ru, Liu Hao, Watkins Simon	4. 巻 99
2. 論文標題 Low Reynolds number aerodynamics of leading-edge and trailing-edge hinged control surfaces: Part I statics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 105563 ~ 105563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ast.2019.105563	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 D. Kolomenskiy, S. Ravi, R. Xu, K. Ueyama, T. Jakobi, T. Engels, T. Nakata, J. Sesterhenn, M. Farge, K. Schneider, R. Onishi, H. Liu	4. 巻 8(1)
2. 論文標題 Wing morphology and inertial properties of bumblebees	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms	6. 最初と最後の頁 41-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Farisenkov Sergey E., Kolomenskiy Dmitry, Petrov Pyotr N., Engels Thomas, Lapina Nadezhda A., Lehmann Fritz-Olaf, Onishi Ryo, Liu Hao, Polilov Alexey A.	4. 巻 602
2. 論文標題 Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 96 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-04303-7	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 該当する

1. 著者名 Cai Xuefei, Xue Yujing, Kolomenskiy Dmitry, Xu Ru, Liu Hao	4. 巻 17
2. 論文標題 Elastic storage enables robustness of flapping wing dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 045003 ~ 045003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-3190/ac6c66	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 Xue Yujing, Cai Xuefei, Liu Hao	4. 巻 34
2. 論文標題 Effects of wing?body interaction on hawk moth aerodynamics and energetics at various flight velocities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 051915 ~ 051915
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0087161	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 Koizumi Sakito, Nakata Toshiyuki, Liu Hao	4. 巻 9
2. 論文標題 Flexibility Effects of a Flapping Mechanism Inspired by Insect Musculoskeletal System on Flight Performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2021.612183	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 Murayama Yuta, Nakata Toshiyuki, Liu Hao	4. 巻 9
2. 論文標題 Flexible Flaps Inspired by Avian Feathers Can Enhance Aerodynamic Robustness in low Reynolds Number Airfoils	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2021.612182	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 CAI Xuefei, LIU Hao	4. 巻 16
2. 論文標題 A six-degree-of-freedom proportional-derivative control strategy for bumblebee flight stabilization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 21-00113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jbse.21-00113	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16件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 日高航輔、中田敏是、劉浩
2. 発表標題 深層学習を用いた昆虫羽ばたき翼の高精度な自動追尾手法の開発
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xue Yujin、劉浩
2. 発表標題 生物規範飛行のマクロ空気力学スケーリング法則について A Macroscopic Aerodynamic Scaling of Biological Flights
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戎佳欣、劉浩
2. 発表標題 クロウ翼を規範とした後縁フリンジが騒音低減と空力性能に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会、
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原将太、中田敏是、劉浩
2. 発表標題 昆虫飛行を規範としたデュアルコプターの創製
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉咲人、中田敏是、劉浩
2. 発表標題 羽ばたき機構の柔軟性が羽ばたきロボットの飛行性能に及ぼす影響
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村山友太(若手優秀講演フェロー賞)、中田敏是、劉浩
2. 発表標題 鳥の羽根を規範とした柔軟翼を用いたカイトブレーンの外乱応答特性
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hao Liu
2. 発表標題 Bioinspiration of Bio-inspired Flight Systems in Micro Aerial Vehicles
3. 学会等名 The 6th International Conference of Bionic Engineering (ICBE2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao Liu
2. 発表標題 Insect-inspired innovation for micro-and nano-flight systems: opportunities and challenges
3. 学会等名 10th International Conference of the Chinese Society of Micro-Nano Technology (CSMNT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao Liu
2. 発表標題 Multi-mechanical Interactions in bio-inspired flight systems: from insect flights to micro air vehicle
3. 学会等名 International Symposium on Smart Aircraft 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao LIU, Sakito KOIZUMI, Yuta. MURAYAMA, Toshiyuki NAKATA
2. 発表標題 Intelligence in flexible body and wings can enhance passive stability and robustness in flapping flights of insect-size MAVs
3. 学会等名 Workshop on Flapping-wing Aerial Robots (ICRA2020) (postponed due to COVID19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hao Liu
2. 発表標題 Passive mechanisms enhance robustness in bio-inspired flight systems
3. 学会等名 Mathematical Methods in Biofluid Mechanics- a RIMS Satellite Seminar in 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xuefei Cai, Hao Liu
2. 発表標題 Active body control of fruit fly in evasive maneuver: a computational model
3. 学会等名 SEB Seville 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ru Xu, Nakata Toshiyuki, Hao Liu
2. 発表標題 Body flexion in hawkmoth hovering plays a crucial role in flight stability and maneuvering
3. 学会等名 SEB Seville 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 友己, 中田 敏是, 劉浩
2. 発表標題 低レイノルズ数における羽ばたき翼と回転翼の外乱応答
3. 学会等名 本機械学会第30回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 友己, 野田 龍介, 中田 敏是, 劉 浩
2. 発表標題 物を規範とした羽ばたき翼と回転翼の外乱応答
3. 学会等名 日本機械学会第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村山友太, 中田敏是, 劉浩
2. 発表標題 鳥の羽根を規範とした柔軟構造が翼の外乱応答特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ドローン用柔軟ロータ	発明者 劉浩、石橋健太、中 田敏之	権利者 未定
産業財産権の種類、番号 特許、出願中	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

(1)千葉大学大学院工学研究院生物機械工学研究室
<http://www.em.eng.chiba-u.jp/~liu/index.php?Home>
 (2)千葉大学大学院工学研究院附属インテリジェント飛行センター
<https://caiv.chiba-u.jp/index.html>
 (3)Google Scholar (Hao LIU)
<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=u1e9bcgAAAAJ>
 (4)ResearchMap (Hao Liu)
<https://researchmap.jp/HRyu-19630307>

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 分 担 者	中田 敏是	千葉大学・大学院工学研究院・准教授	
	(Nakata Toshiyuki)		
	(80793190)	(12501)	

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