

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04838

研究課題名（和文）生物の柔軟多機能設計を規範とした羽ばたき型超小型飛翔体の複合領域解析技術の確立

研究課題名（英文）Bio-inspired Multidisciplinary Design of Flapping-wing Micro Air Vehicle with Flexible, Multifunctional Structures

研究代表者

永井 弘人（Nagai, Hiroto）

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50510674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：生物の飛翔を模倣した羽ばたき型ドローンは、人間親和型のドローンとして注目されているが、その性能を生物の飛翔能力に比べると未だ大きな隔りがある。そのギャップを埋める技術として、生物的な柔軟多機能でコンパクトなシステム設計に注目した。本研究では、生物の柔軟多機能システムの設計を実現するために、機体の翼・構造・駆動・制御の複合、および流体/構造/機構/運動/制御の多分野を達成させた複合領域解析手法を確立し、そのシステム間の連成効果を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の回転翼を用いた飛翔ドローンは人間との親和性が低く、都市空間での自由な飛行は制限されている。生物の柔軟で多機能な設計を取り入れた羽ばたき型ドローンは、高い安全性と静音性を有し、人間親和型ドローンとして、人々の生活に溶け込んだ運用が期待されている。本研究は、剛なパーツの組み合わせから成る従来の機械的な設計から脱却し、より生物に近い柔軟な設計を目指すことで、人とドローンとの共生社会の実現に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Biomimetic flapping-wing type micro air vehicles (FWMAVs) have been developed around the world as a human-friendly small drone. However, there is still a large gap of flight performances between the FWMAVs and flying animals, such as birds and insects. The key technologies to fill the gap are a biological design, which has flexible, multifunctional, compact structural systems. To attain such a biological flexible design in FWMAVs, it is important to consider the highly coupled phenomena among the configured systems, such as aerodynamics around the flapping wings, elastic deformation of the structures, flapping actuating mechanisms, flight dynamics and controls. In this study, we have developed the multidisciplinary design analysis for the coupling phenomena among the components of a FWMAV.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：羽ばたき翼 飛行制御 Micro Air Vehicle 複合領域設計解析 ドローン 生物規範工学 空力弾性学 柔軟構造

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

無人航空機「ドローン」の登場によって航空機は人々の身近な存在となり、空撮や物流など空を利用した様々な用途が生み出されている。しかし、現状のドローンサイズ(数10cmから数m程度)では、墜落時や衝突時に及ばず被害は決して許容できるものではなく、人口集中地区での自由な飛行は航空法で規制されている。ドローンをもっと人々の身近な存在にするためには、安全性・人間親和性・携帯性などの観点からも、より小型化した超小型飛行体(MAV, Micro Air Vehicle)の開発が望まれている。しかし、従来の航空機を手の平サイズまで小さくしていくと、空気の粘性の影響が相対的に増大する(レイノルズ数の低下)ため、翼周りのスムーズな流れは阻害され、空力性能は著しく悪化する。また、機体サイズの小型化は突風などの外乱に対する安定性を著しく低下させる。最近では、手の平サイズのマルチロータ型ドローンも登場しているが、やはり屋外での飛行は困難であり、航空機の更なる小型化のためには、従来とは異なる新たな機体コンセプトが求められている。

一方、昆虫は小型サイズにもかかわらず屋外を自由に飛行しており、羽ばたき飛行は超小型飛行体における最適解の1つであることは明らかである。これまでの多くの研究により、羽ばたき飛行の基本的なメカニズムが解明されてきた[1,2]。羽ばたき翼は、積極的に剥離渦を発生させ、それを効果的に利用することで、粘性の影響が強い低レイノルズ数流れにおいても、大きな空気力を発生させる。そのため、羽ばたき翼の運動速度は回転翼よりも低く抑えることができ、静音性・安全性の観点からも優れている。また、左右の翼の羽ばたき運動を様々に変化させることで、回転翼機よりも大きな制御空気力を発生させることができ、その結果、昆虫は野外での安定した飛行を可能にすると同時に、ホバリングから高速飛行、急旋回などの俊敏な飛行を実現している。

生物の羽ばたき飛行を工学的に応用しようとする場合の最大の課題は、高速かつ複雑な羽ばたき運動を、いかに小型かつ軽量のシステムで実現するかにある。生物の羽ばたき運動は、翼の上下運動であるフラッピング運動と、翼のスパン軸まわりの回転運動であるフェザリング運動の組み合わせから成り、両運動の大きさやタイミングを制御することで高性能な飛行を実現している。この複雑な羽ばたき運動をコンパクトなシステムで実現するために、現在の羽ばたき機は膜翼の受動的な空力弾性変形を利用することが主流となっている。AeroVironment社が開発したNano Hummingbird(翼幅16cm, 重量19g)[3]や、デルフト工科大が開発したDelFly Nimble(翼幅33cm, 重量29g)[4]では、膜翼の空力弾性変形を利用することで、世界に先駆けて安定した自由飛行を実現した。しかし、それらの機体を以ってしても、生物の優れた飛行能力にはまだ遠く及んでおらず、生物と羽ばたき機との間には、未だ大きな隔たりが存在している。

極端な軽量化が要求される超小型飛行体では、その構造は必然的に柔軟となり、翼/胴体/駆動系/制御系などの構成システムは、お互いに強く連成するようになる。しかし、そのような相互連成効果は明らかとされておらず、現状の羽ばたき機は、独立な要素を組み合わせた従来の機械設計概念に留まっており、実際の羽ばたき機的设计開発は未だ試行錯誤による実験的手法に依存している[3]。一方、生物的设计は、構成要素の柔軟性および要素間の相互連成を利用することで、少ない構成要素で多くの機能を実現する柔軟多機能システムとなっており、その無駄の無い設計によって全体の軽量化と高効率化を実現している。

このような生物の柔軟多機能設計を工学的に応用する場合、設計の初期段階から流体/構造/機構/運動/制御などの多分野を融合させた全機的な解析が求められる。しかし、このような多分野にまたがる解析は、従来は翼のみを対象とした流体・構造連成解析に限られており、全機的な統合解析は行われていない。極端な軽量化が求められる羽ばたき機では、翼/胴体/駆動系/制御系などのシステム間の相互連成の影響を受けやすいが、現状の研究は各システム単体を対象としたものに留まっており、システム間にどのような連成効果があるのかはほとんど分かっておらず、実際の設計では全く考慮されていない。

2. 研究の目的

本研究では、羽ばたき型超小型飛行体設計に、生物の柔軟多機能システムの考え方を導入し、そのための複合領域解析手法を確立する。すなわち、翼や胴体などの機体構造は、その本来の役割だけではなく、駆動・制御などの他のシステムにも貢献する多機能性を与えるべく、積極的な弾性変形を行う柔軟構造として考える。そのような羽ばたき機の柔軟多機能設計を解析的に行うために、翼/構造/駆動/制御の複合システム、および流体/構造/機構/運動/制御の多分野を連成させた複合領域解析手法を確立する。また、そのシステム間の連成効果を評価し、柔軟多機能設計の有効性と実現可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 羽ばたき型ドローンの開発

本研究は、本研究グループで開発した羽ばたき型ドローン(図1)を対象として、それへの適用を目指した複合領域解析技術の開発を行った。対象とする機体の詳細を以下に示す。機体には尾翼が無く、両翼サイズ18cmの2枚の羽ばたき翼によって飛行し、全機重量は20.5gである。

図 2 に示すように、頭部に取り付けられた推力モータの回転運動を、胸部羽ばたき機構によって水平方向の往復運動（フラッピング運動）に変換し、翼根を強制加振する。翼は前縁スパーと翼根の 2 辺で支持された膜構造であり、フラッピング強制加振によって発生する流体力と慣性力により、翼面には受動的な弾性変形が生じる。翼を適切に設計すれば、その弾性変形の結果、翼のスパン軸周りのねじれ変形（迎角変化）が受動的に発生し、生物と同様の羽ばたき運動が簡単な機構で実現される。また、機体尾部には電池が搭載され、2つのアクチュエータにより電池の取付け角を前後左右に変化させることができる。この尾部電池の動きにより、機体重心位置を変化させることで、フィードバック制御により飛行中の姿勢角を自律的に安定化させている。以上の技術により、本機体は 30 秒間のホバリング飛行に成功した（図 3）。開発した機体の詳細については文献[5]に述べる。



図 1 羽ばたき型ドローン

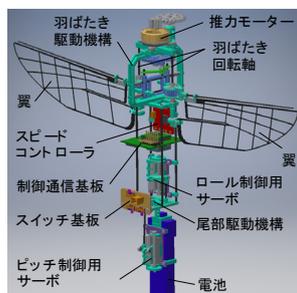


図 2 ドローンの機体構成



図 3 ドローンの飛行の様子

(2) 構造非線形性を伴う膜型弾性羽ばたき翼の流体構造連成解析

羽ばたき型ドローンの機体設計に対して、その飛行性能を数値解析によって得るためには、羽ばたき翼の弾性応答挙動を高い精度で解析する技術が必要となる。しかし、現在の羽ばたき機の主流である膜型弾性羽ばたき翼の変形は、膜応力による剛性強化、飛び移り座屈、大回転などを伴う構造非線形現象であり、それを流体構造連成解析によってシミュレーションすることは容易ではない。本研究では、上述の構造非線形性をモデル化し、線形理論の振動モード法に組み込んだ準非線形振動モード法を開発し、粘性流体の支配方程式である 3 次元ナビエ・ストークス方程式と連成させて、構造非線形性を伴う膜型弾性羽ばたき翼の流体構造連成解析手法を確立した。その解析手法の詳細については文献[6]に述べる。

(3) 機体運動・制御と弾性羽ばたき翼との複合領域解析

(2)で述べた膜型弾性羽ばたき翼の流体構造連成解析を用いて、飛行中の羽ばたき型ドローンの機体運動解析を行い、機体姿勢を安定化させる制御則の検討を行った。翼の羽ばたきによる変動と機体運動とを完全に連成させた全機モデルの数値解析は、計算コストが高く実用的では無い。そのため本研究では、羽ばたき 1 周期内の力の変動や、翼と胴体の空力干渉効果を無視し、定常飛行状態からの機体微小変動に対する羽ばたき 1 周期の平均空気力の変化を(2)の数値解析を用いて計算し、機体変動量と空気力変動量との関係性（安定微係数）を得た。ただし、安定微係数の計算では、機体運動が羽ばたき翼の弾性変形に与える影響が考慮されている。得られた空力安定微係数を、線形化した機体運動方程式に代入して解くことにより、定常飛行状態から微小擾乱を受けたときの機体応答を計算し、それを安定化させる姿勢制御則について検討を行った。その詳細については文献[7]に示す。

(4) 駆動機構と弾性羽ばたき翼との複合領域解析

胴体の弾性変形を利用する生物の羽ばたき駆動メカニズムを参考にして、羽ばたき駆動のためのスライダ機構に弾性バネを導入した場合（図 9）に、弾性羽ばたき翼の空力性能に与える効果を、翼・駆動系を一体とした複合領域解析として行った。議論を単純化するために、弾性翼は連続体モデルでは無く、等価なバネに置き換えた 2 自由度振動モデルで表現し、駆動系の自由度と併せた 3 自由度振動モデルで表現した（図 10）。設計変数は、翼の慣性モーメント、スパン方向の曲げ剛性とねじり剛性、スライダの慣性とスライダを支持するバネ定数として、駆動部の弾性が羽ばたき翼の空力特性に与える効果を計算した。その詳細については文献[8]に示す。

(5) 弾性羽ばたき翼の複合領域最適設計

羽ばたき翼は非常に多くの設計変数に支配されるため、その最適設計には数値最適手法の適用が求められる。しかし、羽ばたき型ドローンの設計の場合、複数の分野を横断した複合領域解析が求められ計算コストが高くなるため、本研究では、ベイズ最適化の手法を用いて高効率な最適化手法の構築を行った。数値解析には(2)で述べた流体構造連成解析を用いた。議論を簡単にするため、剛体羽ばたき翼の入力運動パターンへの最適化と、構造非線形性の影響が小さい板型弾性羽ばたき翼の寸法・形状・運動最適化を行った。その詳細については文献[9]に示す。

4. 研究成果

図 4 に示す膜型弾性羽ばたき翼に対して、その構造非線形性を考慮した流体構造連成解析を

行い、羽ばたき1周期間に翼に働く空気力変動と、翼の弾性応答を計算した。図5は、羽ばたき振動数に対する時間平均揚力の変化を表し、実験と解析とで定性的な結果は一致している。図6は、翼が水平に羽ばたいた時の、打ち上げストローク時の翼の変形応答を表し、実験と解析でその挙動はよく一致していることが分かる。以上より、膜型弾性羽ばたき翼に対する数値シミュレーションは、実際の羽ばたき翼の現象を完全に再現できていないが、羽ばたき型ドローンの機体設計に資する十分な精度を有していることが証明された。以下では、この解析技術を用いて、機体運動や機体駆動系の複合領域解析を行った。

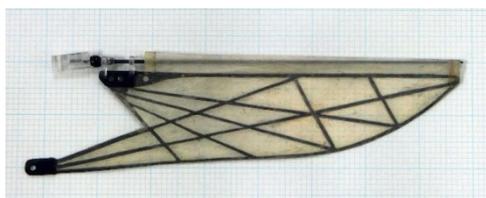


図4 膜型弾性羽ばたき翼

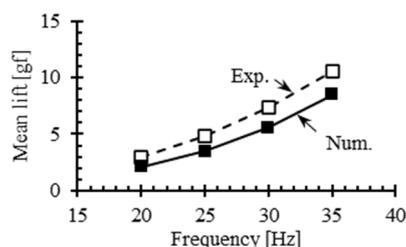
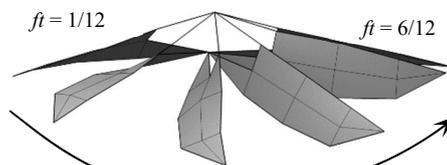
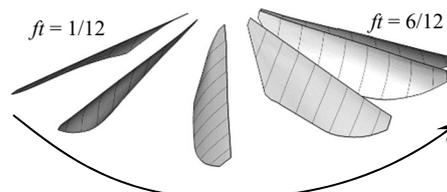


図5 羽ばたき翼の振動数と平均揚力の関係



(a) 実験結果 (打ち上げ時)



(b) 数値解析結果 (打ち上げ時)

図6 羽ばたき時の弾性変形の様子と比較

図7は羽ばたき型ドローンの機体運動座標系で、ホバリング時では機体軸 (z 軸) は鉛直方向と一致し、翼スパン方向を y 軸、機体の前後方向を x 軸として、 xy 面内で翼は羽ばたく。本研究では、ホバリング平衡状態からの微小擾乱に対する羽ばたき翼の空力性能の変化 (安定微係数) を流体構造連成解析で求め、ホバリング時の機体応答を計算した。図8は、機体の縦運動の無次元速度 (u は x 方向速度、 w は z 方向速度、 q は y 軸まわりの角速度) を表す。図8aは機体の姿勢制御を行わない場合であり、機体は不安定となることが分かる。次に、実機と同様に機体尾部の電池の取付角の変化によって、機体には姿勢制御トルクが発生するものとして、PID 制御により機体姿勢の安定化を図った。図8bは制御時の機体運動応答で、ゲインの適切な調整によって機体の姿勢を安定化できた。以上より、構造非線形性を有する膜型弾性羽ばたき翼の変形を考慮した上で、羽ばたき型ドローンの機体運動についての数値解析を行い、その複合領域解析によって制御系の設計を行った。しかし、実機では制御用アクチュエータに制約があり、実機の制御系の設計に向けては、それらを反映した解析が求められる。

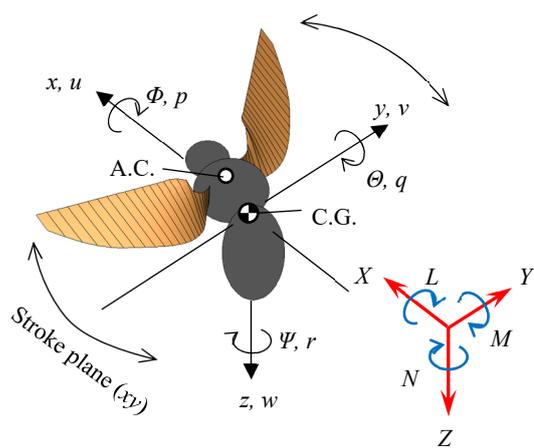
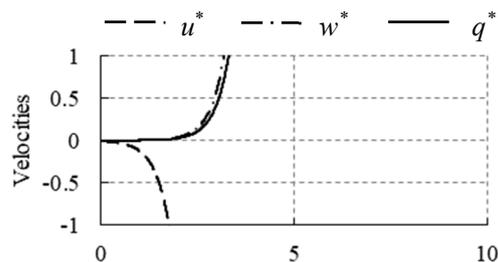
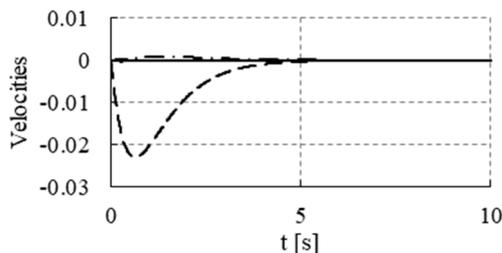


図7 羽ばたき型ドローンの機体運動の座標系



(a) 制御無し時の機体縦運動応答



(b) PID 制御時の機体縦運動応答

図8 羽ばたき機のホバリング時の機体運動解析結果

柔軟な胴体変形を利用した生物の羽ばたき駆動システムを参考に、図9のように実機の羽ばたき機構部にあるスライダー機構をバネで支持したモデルを考え、2自由度の羽ばたき翼モデル

と駆動系を併せた3自由度振動系モデル(図10)として、翼と駆動系の複合モデルを構築した。本研究では、スライダの支持バネである K_s の変化に対して、ホバリング時の翼の空力特性の変化を、流体構造連成解析を用いて解析した。図11にバネ定数 K_s に対する単位パワー当たりの発生揚力を示す。図11より、 $K_s=0.25$ のときに効率が最大になっていることが分かるが、大幅な性能の向上は見られなかった。翼および駆動系は多くの設計変数に支配されているため、現状では翼と駆動系との最適な組み合わせになっていない可能性が高い。その探索のため、今後は数値最適設計を用いた翼と駆動機構とのマッチングが求められる。

羽ばたき翼の数値最適化として、剛体翼に入力する羽ばたき運動パターンの最適化を行った。また、翼の流体と構造との相互作用を考慮した複合領域最適化として、構造非線形性が弱い板型羽ばたき翼を対象にして、その平面形状、板厚、スパー直径、入力フラッピング振動数、入力フラッピング角振幅を設計変数とし、駆動アクチュエータのトルク制約とスパーロッドの強度制約を考慮して、ホバリング時の揚力を最大化する最適設計を行い、効率の向上が見られた[9]。

本研究では、生物の柔軟多機能設計を羽ばたき機に適用することを目指して、構造非線形性を有する膜型羽ばたき翼の流体構造連成解析、翼の変形と機体運動および制御との相互作用を考慮した複合領域解析、翼の変形と駆動系との相互作用を考慮した複合領域解析、および翼の変形と流れ場との相互連成を考慮した翼構造の複合領域最適設計を行った。今後の課題として、本研究の成果を羽ばたき型ドローンの実機設計へと適用し、実機開発と数値解析の両面から研究することで、羽ばたき飛行メカニズムの解明および生物型飛翔ドローンの技術開発を行う予定である。

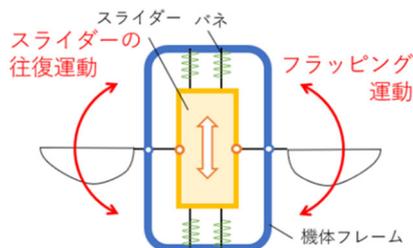


図9 弾性を利用した羽ばたき駆動機構

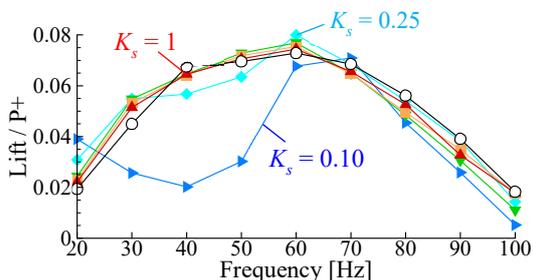


図11 駆動系バネ定数と翼効率の関係

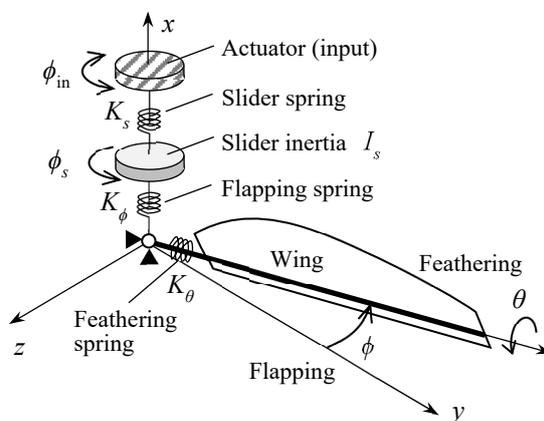


図10 駆動系の弾性・慣性を考慮した3自由度羽ばたき翼モデル

<参考文献>

- [1] C. P. Ellington et al., "Leading-Edge Vortices in Insect Flight", Nature, 384, 1996, pp. 626–630.
- [2] M. H. Dickinson et al., "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", Science, 284, 1999, pp. 1954–1960.
- [3] M. Keennon et al., "Development of the Nano Hummingbird: A Tailless Flapping Wing Micro Air Vehicle", 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2012-588, 2012.
- [4] M. Karásek et al., "A Tailless Aerial Robotic Flapper Reveals that Flies Use Torque Coupling in Rapid Banked Turns", Science, 361, 6407, 2018, pp. 1089-1094.
- [5] H. Nagai et al., "Development of Tailless Two-Winged Flapping Drone with Gravity Center Position Control", Sensors and Materials, 33, 3, 2021, pp. 859–872.
- [6] H. Nagai et al., "Quasi-nonlinear Aeroelastic Analysis of a Membrane-type Flapping Wing Utilizing Structural Nonlinearity", The proc. 2nd Int'l Symp. on Flutter and its Applications, pp. 248-257.
- [7] 桑園慎太郎 他, "羽ばたき翼型ドローンのホバリング時の固有安定性に関する研究", 第59回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2021-5187, 2021, 8pp.
- [8] 松尾賢成 他, "駆動機構の弾性・慣性が羽ばたき翼の空力特性に与える効果", 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2022)講演集, JSASS-2022-S028, 2022, 5pp.
- [9] 金子宗瑚 他, "高精度空力モデルと応答曲面を用いた弾性羽ばたき翼の構造最適化", 第62回構造強度に関する講演会, JSASS-2020-3010, 2020, pp. 28-30.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 Minoda Takeshi, Nagai Hiroto, Yashiro Shigeki, Uda Nobuhide	4. 巻 60
2. 論文標題 Aeroelastic Effect of Corrugation for an Insect-Sized Flapping Wing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3180 ~ 3193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J061027	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 永井 弘人, 中村 和敬, 藤田 浩輝, 長崎 秀司, 金城 寛	4. 巻 56
2. 論文標題 生物を規範とした羽ばたき型ドローンの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 41 ~ 44
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 無
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 Nagai Hiroto, Nakamura Kazutaka, Fujita Koki, Tanaka Issei, Nagasaki Shuji, Kinjo Yutaka, Kuwazono Shintaro, Murozono Masahiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Development of Tailless Two-winged Flapping Drone with Gravity Center Position Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 859 ~ 872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2021.3222	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 Nagai Hiroto, Fujita Koki, Murozono Masahiko	4. 巻 57
2. 論文標題 Experimental Study on Forewing-Hindwing Phasing in Hovering and Forward Flapping Flight	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3779 ~ 3790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J058335	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17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松尾賢成、永井弘人、有園仁、長崎秀司、藤田浩輝
2. 発表標題 駆動機構の弾性・慣性が羽ばたき翼の空力特性に与える効果
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑園慎太郎、永井弘人、藤田浩輝、長崎秀司、有園仁
2. 発表標題 羽ばたき翼型ドローンのホバリング時の固有安定性に関する研究
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 甲斐悠希雄、永井弘人
2. 発表標題 羽ばたき運動の高調波成分が空力特性に与える影響と最適化
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroto Nagai, Kazutaka Nakamura, Masahiko Murozono, Koki Fujita, Hitoshi Arizono, Shuji Nagasaki, Shigeki Yashiro
2. 発表標題 Quasi-nonlinear Aeroelastic Analysis of a Membrane-type Flapping Wing Utilizing Structural Nonlinearity
3. 学会等名 The Second International Symposium on Flutter and its Application (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子宗瑚、永井弘人、矢代茂樹
2. 発表標題 高精度空力モデルと応答曲面を用いた弾性羽ばたき翼の構造最適化
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井弘人
2. 発表標題 柔軟な羽ばたき翼システムを用いた自然調和型ドローンの設計開発
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2020（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井弘人、中村和敬、室園昌彦、宇田暢秀、矢代茂樹、有園仁
2. 発表標題 スナップスルー座屈を利用した受動的モーフィング羽ばたき翼の空力弾性解析
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田浩輝、大濱憲一、永井弘人、室園昌彦、中村和敬
2. 発表標題 弾性変形を考慮した空力モデルに基づく2枚翼型無尾翼羽ばたき機の姿勢安定化の研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

長崎大学工学研究科構造工学コース永井研究室ホームページ
<https://www.st.nagasaki-u.ac.jp/laboratories/nagai/>

日本経済新聞2022年10月23日付サイエンス面（26ページ）「生物に学ぶ（2）羽ばたく小型ドローン」にて研究内容の記事が掲載

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	長崎 秀司 (Nagasaki Shuji) (00304741)	九州大学・工学研究院・助教 (17102)	
研究分担者	藤田 浩輝 (Fujita Koki) (00315110)	日本文理大学・工学部・教授 (37501)	
研究分担者	有園 仁 (Arizono Hitoshi) (00371097)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	

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
---------	---------