

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04844

研究課題名(和文) 昆虫の翅の形態的特徴が非定常空力特性に及ぼす効果の研究

研究課題名(英文) Study of effects of insect wing morphology on unsteady aerodynamic properties

研究代表者

岡本 正人 (Okamoto, Masato)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：70462124

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)：飛翔昆虫は、翅の羽ばたき運動によって推進力と非定常空力を利用した高い運動性能を持つ。これらの翅は、断面などにおいても独特の形状を持つ。そこで、一様流中で運動する翼の非定常空力特性を、風洞実験により明らかにすることを研究の目的とした。本研究では、翼模型を静止させた状態で風洞にヒューイング運動を与える「ヒューイング風洞装置」を開発した。その結果、翼の運動による慣性力の影響を受けずに、翼に作用する空気力やモーメントの計測に成功した。さらに、流れの可視化や圧力分布計測から、その非定常翼特性を捉えることができた。同時に、CFD(数値流体力学)解析を進め、実験結果と比較してその有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した風洞装置は、一様流中で運動する翼に作用する空気力の計測だけでなく、垂直突風を受ける翼の突風応答特性に対しても有効な実験方法として提案できる。この装置による実験結果は、論文としてまとめると共に学会において発表してきた。また、飛翔昆虫の翅には航空機とは異なった多くの形態的特徴があり、その流体力学的な解明は、生態の解明に貢献できるだけでなく、バイオミメティクス(生物模倣技術)として工学的応用が期待できる。航空機では、現在開発が盛んになってきた超小型無人航空機や、地球よりも低密度環境の火星で飛行する火星探査無人航空機のような低レイノルズ数航空機の空力特性として応用が可能である。

研究成果の概要(英文)：Many insects fly with propulsion by flapping their wings and this method can achieve high performance in their flight. In addition, an insect wing has a unique cross-sectional shape. The objective of this study is to ascertain the unsteady aerodynamic forces and moment acting on a heaving wing in uniform flow using a wind tunnel.

In the present study, we developed a small wind tunnel that oscillates with heaving motion, which will be referred to as "heaving wind tunnel" in this study. In the test section, the airflow oscillates around the wing model which is placed in steady state. Under these conditions, the mass of the wing model barely affect the aerodynamic measurements. The aerodynamic forces and moment acting on heaving wings were measured using this wind tunnel. The flow visualizations and pressure distributions revealed the unsteady aerodynamic characteristics of the wing. At the same time, the verification of CFD (computational fluid dynamics) solutions were investigated.

研究分野：流体力学

キーワード：昆虫の翅 ヒューイング運動 突風応答 低レイノルズ数 風洞実験 CFD

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

飛翔昆虫は、翅の羽ばたき運動によって推進力を得ると共に、高い運動性能を持っている。さらに、大きさが小さいために突風を受けやすく、外乱に対しても対応できる飛行能力を有している可能性がある。これに対して、本研究の申請者は昆虫の翅の形状に着目し、風洞実験によって翼に作用する微小空気力を計測することで、翼の空力特性を研究してきた(科研費課題 25630395, 16K06894)。一方、飛翔昆虫は翅の羽ばたき運動によって、その翅には大きな非定常空気力が作用する。これは突風などの外乱を受けた場合も、急激な迎角変化によって大きな非定常空気力が作用すると考えられる。昆虫はこの非定常空気力を積極的に利用して高度な飛行を実現している可能性がある。このことから、静止流体中で昆虫の翅の平面形を真似た模型に羽ばたき運動を与え、翼まわりの流れや非定常空気力を計測する研究が過去に行われてきたり。これらの実験の多くは、羽ばたき周波数が小さくても計測できるように密度の大きな水(またはオイル)中で実験された。これらの実験は特にホヴァリング飛行の解明に成果があり、CFD(Computational fluid dynamics)による研究結果もある²⁾。しかし、前進飛行において翼に運動を与えた場合の風洞実験結果は少なく、昆虫の翅の独特の断面形状や平面形状の非定常翼における効果についてはその成果は少ない。これに対して本研究の申請者は、上述の固定翼による定常翼特性と同様に、風洞実験により調べることを試みてきた³⁾。しかし、固定翼の実験のように、風洞の一樣流中で翼に運動を与えて非定常空気力を測定する風洞実験では、質量の大きな翼を運動させた場合に慣性力が大きく作用し、空気力成分を抽出することが難しくなるという問題点があった。そこで、今回の実験では、これらの問題点を解決するための風洞装置を考案した。具体的には、翼模型は静止させた状態で、小型風洞に運動を与えて流れを変化させることで、翼が運動している状態を作り出す方法である。本研究はその風洞装置の開発から始めた。

近年、昆虫サイズの超小型無人航空機が開発されるようになり⁴⁾、さらに地球よりも遙かに低密度の大気が存在する火星での飛行を目指した火星探査無人航空機⁵⁾でも、その翼のレイノルズ数は非常に小さくなることが知られている。そのため、近年、生物のような低レイノルズ数領域における翼の空力特性の研究が増加したが、同時に羽ばたき翼による非定常空力特性の解明も注目されている。特に、飛翔昆虫の翅には航空機とは異なった翼の構造や多くの形態的特徴があることから、固定翼としての定常翼特性と共に、羽ばたき翼や突風応答などの非定常翼特性の流体力学的な解明が必要と考えられる。これらの成果は、生態の研究に利用できるだけでなく、バイオミメティクス(生物模倣技術)としての工学的応用が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、背景で述べた新たな風洞実験装置を開発し、一樣流中で運動する翼の非定常空力特性を、昆虫に相当するレイノルズ数で得ることを研究の目的とする。この目的を達成するための課題は以下ようになる。

- ① 本研究専用の小型の風洞装置を開発し、その性能について明らかにする。
- ② 一樣流中でヒーヴィング運動する翼の空力特性について、翼型(二次元翼)の空力特性を明らかにする。
- ③ 同様の条件で三次元翼の空力特性について明らかにする。
- ④ 実験と並行してCFD解析を進め、実験の妥当性とCFDの有効性について明らかにする。
- ⑤ 本風洞装置の応用(翼の突風応答特性)について検討する。

3. 研究の方法

本研究課題を達成するため、新たに考案した「ヒーヴィング風洞装置」について開発を行い、その装置の性能の把握と翼模型による空力特性の解明を行う。具体的に行った研究は以下の通りである。

- ① 研究に先だって、超小型の風洞装置による予備実験を行い、これを基に小型風洞装置の設計・製作を行う。予定通の流れが再現できているかを流れの可視化を中心に検証を行い、風洞装置の改良を実施する。
- ② 完成した風洞装置を使用して、二次元翼、及び三次元翼の空力特性を計測する。
- ③ CFDは、BCM(Building Cube Method)による解析を研究分担者を中心に進め、実験結果と比較する。
- ④ 本風洞装置は、突風を受ける翼の突風応答特性を得る方法として応用できるため、その検証を行う。

4. 研究成果

研究成果については、特に本研究の主題である風洞装置の開発とその実験結果を中心に説明し、その応用研究をまとめて紹介する。

(1) 「ヒーヴィング風洞装置」の開発

本研究の目的である一樣流中で一定の運動を行う翼の非定常空気力を計測するにあたって考案した風洞は、翼模型は静止した状態で、風洞自体が運動する風洞装置である。すなわち、静止した翼のまわりに変化する気流を作ることで、翼に作用する空気力を計測する方法である。この方法によって、翼を

運動させた場合に生じる翼模型の質量による慣性力の影響を受けることなく、翼に作用する空気力成分だけを取り出すことが可能になる。今回は、羽ばたき翼を翼素の運動として見た場合に、最も慣性力が大きくなるヒーヴィング運動に着目し、風洞装置をサイン関数状にヒーヴィング運動させることで、一様流中でヒーヴィング運動する翼に作用する空気力の計測を目指した。

過去に例のない風洞装置を開発するに当たって、簡単な超小型風洞装置にヒーヴィング運動を与えて、基礎的な特性を調べた。その結果、新たに開発する風洞装置は、測定部断面の大きさが 150mm×200mm の小型風洞装置とし、二次元翼模型の場合、翼弦長 30mm 翼幅 150mm の矩形翼模型を計測することを想定して風洞の設計を行った。また、測定部の気流の動きを観察する必要があったため、予め風洞装置には流れの可視化装置を組み込んだ。

図 1 は今回開発した風洞装置である。送風部には空気を溜める箱状の大きなチャンバを設置し、チャンバにはファンによって空気を送り込む。風洞整流部と測定部は、このチャンバと独立してヒーヴィング運動を行うが、大きなチャンバを固定して設置したのは、この中に流体粒子の発生装置を組み込むためである。この構造により、可視化用の流体粒子は、ファンによる気流の乱れを受けることなく測定部に流すことが可能になる。風洞気流は、アルミハニカムと 4 枚の 40 メッシュナイロンスクリーンによって整流され、6:1 の絞り部を通して 200mm(W)×150mm(H)×200mm(L)の測定部に導かれる。測定部の後方には僅かに拡大部を持つディフューザを取り付けているが、この長さは測定部の気流を観察しながら、さまざまな寸法のものを試作し、最終的には測定部の長さの 2 倍の長さのディフューザを接続した。風洞を静止したときの測定部気流の乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ は 0.4% 以下であった。

図 2 は、測定部の流れの可視化方法を示している。チャンバに設置した気流発生装置によって、測定部に薄い層状の流体粒子を流し、そこにレーザーシート光を当てることで、渦を強調する可視化方法をとった。渦は三次元流れが大きいいため、流体粒子はシート光から外れてその部分が黒く撮影されるために渦が強調される。

以上の計測装置は、翼が静止していることのメリットとして、力計測だけではなく、流れの可視化や圧力分布計測にも有効であることが分かった。図 3 は圧力分布計測中の様子である。圧力分布を多数の微差圧センサと圧力チューブを組み合わせた多点圧力分布装置で調べているが、翼模型が静止しているためにこのような計測が可能であった。

一方、本風洞装置の問題点も判明した。その一つが、風洞をサイン関数状に運動させても、気流の変化は完全なサイン関数にはならないことである。そのため、その気流方向は三孔ピトー管を使って計測し、その迎角変化に対する空力係数でその結果を表した。また、迎角変化は風洞の振動数と流速から決定されるため、迎角変化を自由に設定することが難しいという問題点のあることが判った。

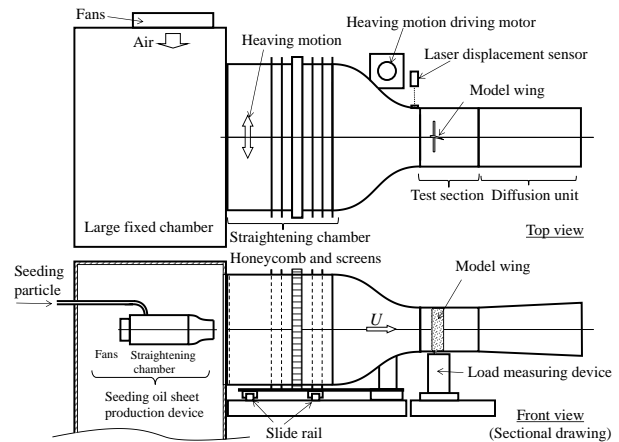


図 1. 本研究で開発した「ヒーヴィング風洞装置」

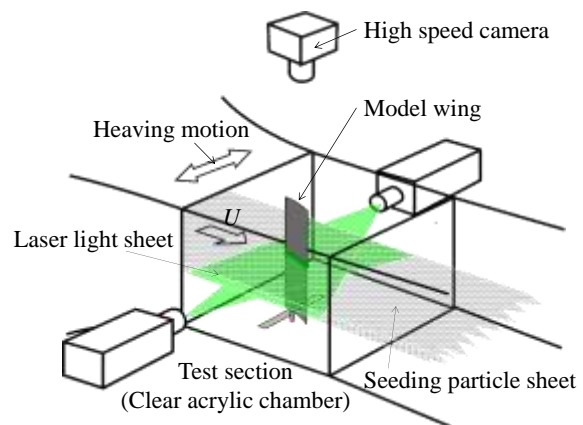


図 2. 流れの可視化方法

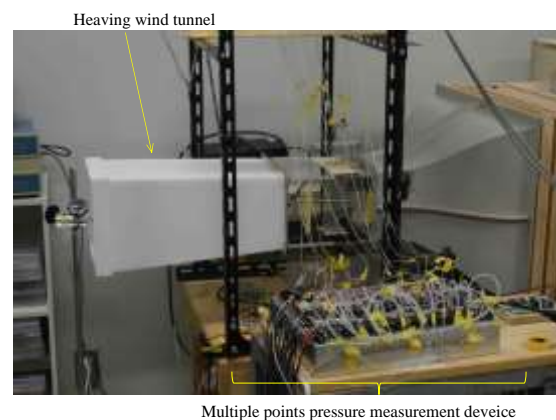


図 3. ヒーヴィング風洞装置による翼の圧力分布計測の様子

(2) 計測結果

実験結果は3種類の翼型について実験を行ったが、ここでは、典型的な翼型の非定常空力係数について紹介する。図4は、昆虫の翅に相当する低レイノルズ数領域で性能のよいキャンバ6%*c*の円弧薄翼について、ヒーヴィング運動による垂直力係数 C_n 、推進力係数 C_t 、ピッチングモーメント係数 C_m の迎角 α に対する変化を示している。実験の条件は、レイノルズ数 $Re = 4000$ で昆虫の翅に相当する。運動の周波数 $f=3\text{Hz}$ で、これを非定常性を表すパラメータである無次元周波数 $k = \pi fc/U$ で表すと $k = 0.25$ になる。翼模型の取付角 θ は $-18^\circ \leq \theta \leq 18^\circ$ で、 6° ずつ変化させている。このとき、各取付角に対して変化する迎角 α の範囲は $-13^\circ < \alpha < 13^\circ$ である。これらの空力係数は、 α の変化に対して大きなヒステリシスループを描き、 C_n の最大値は、固定翼における最大揚力係数の2倍以上になる。一方、 C_t を見ると、推進力は小さな迎角範囲で部分的に正になるだけで、ヒーヴィング運動だけでは、正の推進力を得るのは難しいことが分かる。 C_m は C_n と同様に、高迎角では定常翼の2倍以上の負の値を示した。この大きな空気力とヒステリシス現象を確かめるため、圧力分布が計測可能な少し厚い平板翼を使って、圧力分布計測と流れの可視化を行った。圧力分布結果は、前縁付近上面に大きな負圧が生じ、 α の増加と共に負圧範囲が大きくなる様子とその後の急激な減少を捉えている。圧力分布の積分値は、力計測で得られた空力係数と比較的一致し、さらに流れの可視化は、前縁付近の渦の成長と急激な剥離を捉えていた。図5は、平板翼による圧力分布と流れの可視化結果で、前縁に生じた渦が成長すると大きな C_n が発生し、その後剥離すると C_n は急激に減少し、 C_m もまた急激に負の値に増加することが分かる。いわゆるダイナミックストール現象を表す空力係数の変化と、原因となる非定常渦を捉えることができたため、これらの成果は論文としてまとめた⁶⁾。本論文では、得られた結果と共に、上述したような本風洞装置の長所と問題点についても言及した。その後、三次元翼特性についても本実験装置によって調べ、特にアスペクト比の小さい翼がヒーヴィング運動したときの計測結果について学会発表を行った⁷⁾。

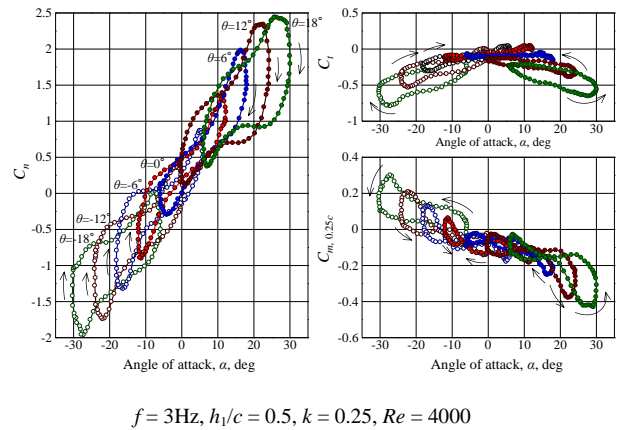


図4. ヒーヴィング運動を行う円弧薄翼の空力特性

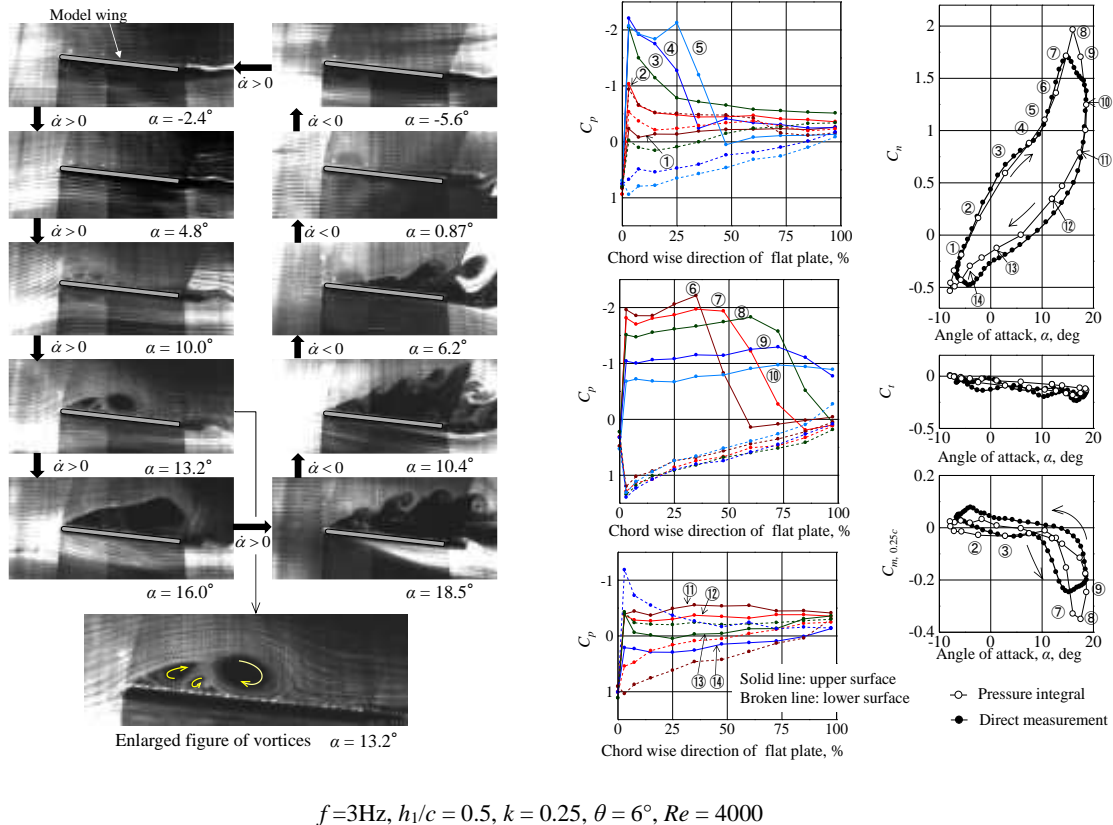


図5. 平板翼における流れの可視化結果と圧力分布および各空力係数の比較

(3) CFDによる検討

CFDは研究分担者を中心に、直交格子積み上げ法(BCM: Building-Cube Method)をヒーヴィング運動する非定常翼に拡張した解析を進めた⁸⁾。ここでは、トンボの翅に見られるコルゲート翼の定常翼特性を、ヒーヴィング運動を行う非定常翼特性に拡張した。この中で、平板翼の流れの可視化において実験との整合性が得られたが、翼の空力係数による比較においてはさらに検討が必要と考えられる。

(4) 風洞装置の応用実験

この風洞の原理は、羽ばたき翼以外にも一様流に対して垂直突風を受けた翼の非定常空力特性の実験に応用できることは、上述した通りである。そこで、風洞にサイン関数状の繰り返し運動ではなく、瞬間的な変化を与えることで突風を再現する試みを行った。翼は固定された状態であるため、変形を伴う翼の観察が容易で、実際の生物翼(アルソミトラマクロカルパ)や変形を伴う翼模型を使用してその計測を試みた。その結果、突風を受けた翼の応答特性は、翼型による影響は小さく、むしろ変形による減衰効果が大きいことが分かった⁹⁾。

参考文献

- 1) Dickinson, M. H., "The Effects of Wings Rotation on Un-steady Aerodynamic Performance at Low Reynolds Numbers," J. Exp. Biol, 192, 1994, pp. 179-206.
- 2) Nakata, T., Liu, H., Bomphrey, R. J., "A CFD-informed quasi-steady model of flapping-wing aerodynamics," J. Fluid Mech., 2015, vol. 783, pp. 323-343.
- 3) Okamoto, M., Azuma, A., "Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Unsteady Wings in Low Reynolds Number Flow," AIAA J., 43, 12, 2005, pp.2526-2536.
- 4) Wood, R. J., Finio, B., Karpelson, M., Ma, K., Perez- Aranci-bia, N. O., Sreetharan, P. S., Tanaka, H., and Whitney, J. P., "Progress on pico air vehicles," Int. J. Robot. Res. 31, 11, 2012, pp.1292-1302.
- 5) Michelson, R.C., Naqvi, M., "Extraterrestrial Flight (Entomopter-based Mars Surveyor)," von Karman Institute for Fluid Dynamics RTO/AVT Lecture Series on Low Reynolds Number Aerodynamics on Aircraft Including Applications in Emerging UAV Technology, 2003, pp. 24-28.
- 6) Okamoto, M., Fukatsu, S., Sasaki, D., "Measurement of Unsteady Aerodynamic Characteristics of a Heaving Wing in a Low Reynolds Number Flow", T. J S A S S, vol. 64, 3, 2021, pp. 147-155.
- 7) 水本 魁星, 岡本 正人, "低レイノルズ数において振動する翼の非定常空力特性," 第52回流体力学講演会/第38回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2020
- 8) Naganuma, R., Sasaki, D., Takahashi, S., Okamoto, M., "Computational Fluid Analysis of Corrugated Wing in Unsteady Motion Using Cartesian Grid," AIAA AVIATION Forum, August, 2021
- 9) 林尚央人, 岡本正人, "変形を伴う翼の空力突風応答," 第59回 飛行機シンポジウム, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 OKAMOTO Masato, FUKATSU Shota, SASAKI Daisuke | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Measurement of Unsteady Aerodynamic Characteristics of a Heaving Wing in a Low Reynolds Number Flow | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 147 ~ 155 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.147 | 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 YAMAGUCHI Yuya, SASAKI Daisuke, OKAMOTO Masato, SHIMOYAMA Koji, OBAYASHI Shigeru | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Numerical investigation of geometrical corrugation influence to vortex flowfields at low Reynolds number | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 JFST0018 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2019jfst0018 | 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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naganuma Ryuta, Sasaki Daisuke, Takahashi Shun, Okamoto Masato |
| 2. 発表標題 Computational Fluid Analysis of Corrugated Wing in Unsteady Motion Using Cartesian Grid |
| 3. 学会等名 AIAA AVIATION Forum (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------|
| 1. 発表者名 林 尚央人, 岡本 正人 |
| 2. 発表標題 変形を伴う翼の空力突風応答 |
| 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 水本 魁星, 岡本 正人 |
| 2. 発表標題 低レイノルズ数において振動する翼の非定常空力特性 |
| 3. 学会等名 第52回流体力学講演会/第38回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020オンライン |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Mizumoto Kaisei, Fukatsu Shota, Okamoto Masato |
| 2. 発表標題 Unsteady Aerodynamic Characteristics of AR=1 Wing with Heaving Motion at Low Reynolds Number |
| 3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Tohoku University (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 深津 翔太, 岡本 正人 |
| 2. 発表標題 ヒューイング風洞による非定常翼空力特性の計測 |
| 3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 岡本正人, 林 尚央人, 深津 翔太 |
| 2. 発表標題 翅果 (アルソミトラ マクロカルパ) の飛行における翼の柔軟性の空力効果 |
| 3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 深津 翔太, 岡本 正人 |
| 2. 発表標題 振動翼空力特性と低レイノルズ数航空機への応用 |
| 3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム |
| 4. 発表年 2019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 |
|-------|--|--------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 佐々木 大輔 (Sasaki Daisuke) (60507903) | 金沢工業大学・工学部・教授 (33302) | |

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 |
|---------|---------|