

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14343

研究課題名（和文）羽ばたかずに羽ばたくー非定常空気力学に基づく能動的気流制御システムの確立ー

研究課題名（英文）Unsteady flow generation without moving motion -development of active flow control system based on unsteady aerodynamics-

研究代表者

佐藤 慎太郎（Sato, Shintaro）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：60869650

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：固定翼に可動部を持たない気流制御デバイスである Plasma Actuator (PA) を取り付けることで、羽ばたき動作によって誘起されるような非定常な流れ場を制御する手法の確立に向けた数値的・実験的研究を実施した。まず、数値シミュレーションにより、PA が生成する電気流体力を流れ場に付与することによって、翼の羽ばたき動作によって生じる流れ場と類似した流れの構造が再現できることを示した。さらに、実証実験として、PA を従来とは逆方向に取り付けることで、数値シミュレーションと同様の流れ場を誘起し、流れを意図的に剥離させることで、非定常な揚力を生成できる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

これまでの PA を用いた流れの制御は、剥離流れを抑制することに重きを置いていたことに対し、本研究では、剥離の促進によって流れ場を制御する手法の構築に取り組んだ。本研究課題で得られた知見を活用することで、既存の固定翼機に PA を取り付けるだけで安定な飛行が可能になるだけでなく、飛翔生物のような機動性の高い運動を可能にする技術の確立に繋げることが期待される。また、本研究課題は従来とは大きく異なる手法を用いて非定常な流れ場の制御を試みるものであり、非定常空気力学に新たな知見を与えることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Numerical and experimental studies have been carried out to induce an unsteady flow field, typically induced by the motion of the airfoil, using a plasma actuator (PA) attached to a fixed wing. Numerical simulation has shown that a similar flow field to that induced by the pitching motion of the airfoil can be reproduced by adding an electrohydrodynamic force to the surface of the fixed wing. It has been experimentally demonstrated that a similar flow structure to that obtained by numerical simulation and unsteady aerodynamic lift generation can be achieved by operating the PA to induce an ionic wind upstream (in the opposite direction to the conventional method of PA operation).

研究分野：流体工学

キーワード：プラズマアクチュエータ 流体制御 非定常空気力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気象観測や物資輸送などの様々な分野への無人航空機の活用が期待され、普及に向けた研究が精力的に行われている。無人航空機は旅客機よりも小型で飛行速度が小さいため、突風等の外乱の影響が相対的に大きくなり、意図しない機首上げによって失速に至り、墜落事故に繋がる危険性がある。その一方で、飛翔生物も類似した環境下で飛行するが、飛翔生物は定常的な揚力生成ではなく、羽ばたき動作に伴う非定常的な揚力の生成によって安定した飛行を実現している。生体模倣に基づく羽ばたきロボットの開発が進められており、飛行実証例も数多く存在するが、飛翔生物の運動を人工的な機械的可動部を用いて正確に再現することは難しい。これらのことから、翼を動かさずに非定常揚力を生成・制御する技術を確立できれば、現在の固定翼を用いた無人航空機の飛行性能を大幅に向上させることができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、固定翼に可動部を持たない気流制御デバイスである Plasma Actuator (PA) を搭載し、非定常的に発生する揚力の生成・制御技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

まず、数値シミュレーションを用いた研究を実施し、PA を用いて翼に働く揚力の非定常的な生成および制御ができることを確認する。数値シミュレーションの結果に基づいて、実験環境を構築し、風洞試験を実施する。翼に働く力の計測および粒子画像流速測定法に基づく流れ場の可視化を介して、PA によって誘起される非定常的な流れ場を詳細に調査する。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーションを用いた研究

まず、2次元の対称翼周りの流れの数値シミュレーションを行い、PA の効果を模擬した体積力場を翼表面に付加することで、流れ場の制御を試みた。PA が生成する電氣流体力場は簡易的な代数モデルを用いて表現した。その結果、翼の前縁部付近に PA を取り付け、かつ従来とは逆方向、すなわち上流に流れを誘起する方向に PA を駆動することで、翼前縁部において渦構造が形成される様子を確認した。PA の駆動によって、渦構造の形成、成長、崩壊、移流のプロセスが繰り返され、渦構造の成長時に翼に大きな揚力が発生することが明らかになった。この現象は、従来の PA では効果が得られなかった低迎角条件においても発現し、迎角が小さい時でも大きな揚力が発生できることを示唆している。また、渦構造形成に伴う揚力増加量の迎角依存性は比較的小さいことも明らかになった。

(2) PA の性能向上に関する研究

数値シミュレーションの結果より、翼の羽ばたき動作によって誘起される流れ場と類似した流れを誘起するためには、従来よりも大きな電氣流体力を生成できる PA を開発する必要性が示唆されたため、実証実験と並行して PA の性能を向上させる研究も実施した。

開発した PA は3つの電極で構成され、最も上流側の電極は流れに対して露出しており繰り返しナノ秒パルス電圧を印加する。残りの2つの電極は誘電体中に埋め込まれており、上流側の電極は接地し、最も下流側の電極は AC 電圧を印加する。従来の3電極構成の PA では、最も下流側に位置する電極は気流に対して露出しており、さらに DC 電圧が印加されていたことに対し、本研究で提案した PA では、埋め込み電極に AC 電圧を印加したことが大きな特徴である。このことによって、従来よりも大きな振幅の電圧を印加することができるようになり、実際に誘起されるイオン風の流速が大幅に向上することを粒子画像流速測定法を用いた流れ場の可視化によって明らかにしている。また、本研究の遂行によって、PA の性能を向上させる方策として、荷電粒子の生成と加速を分離し、それぞれの役割に適した電極配置および印加電圧波形を考案することの有用性を示すことができた。さらに、提案した3電極構成の PA を発展させ、全ての電極を誘電体中に埋め込んだ新しい PA の提案も行った。これは、co-planar 放電を荷電粒子の生成に採用することによって実現できた。従来、露出電極の存在によって流れ場に意図しない擾乱が加えられたり、露出電極の酸化によって PA が劣化したりすることが課題として挙げられていたが、提案した PA を用いることでこれらの課題を克服することができた。

(3) 実証実験

実証実験として、風洞を用いた試験を行い、翼周りの流れの可視化および翼に働く力の計測を実施し、PA を従来とは逆方向に取り付けることで、低い迎え角の条件においても揚力の上昇を確認した。これは、翼前縁部付近に形成された渦構造が原因であると考えられる。さらに、形成された渦構造が翼表面付近に位置している時は大きな揚力が生成される一方で、渦構造が翼から離れ、下流に移流すると揚力が減少することも確認した。このような現象は、翼のピッチング運動によって引き起こされる流れ場の特徴と類似している。このことは、翼のピッチング運動をさせた時の流れ場の可視化および力計測試験を行い、同様の特徴を有していることを確認している。

さらに、従来とは逆向きに取り付けた PA による流れの制御効果を評価するために、従来の駆動手法によって制御される流れ場との比較を実施した。その結果、特に翼の迎え角が低い時に、従来の PA の駆動によって達成される揚力増加量よりも、本研究で提案した手法によって意図的に渦構造を形成することによって達成される揚力増加量の方が大きいことが明らかになった。

以上のことから、固定翼に PA を取り付けることによって、羽ばたき動作によって引き起こされる非定常的な揚力生成とよく一致する揚力を生成することに成功したと判断できる。

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 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sato Shintaro, Sakurai Mahoro, Ohnishi Naofumi	4. 巻 132
2. 論文標題 Enhancement of electrohydrodynamic force with AC bias voltage in three-electrode dielectric barrier discharge plasma actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 113301 ~ 113301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0100696	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 Sato Shintaro, Yoshikawa Tomoki, Ohnishi Naofumi	4. 巻 11
2. 論文標題 The Effect of SiC-MOSFET Characteristics on the Performance of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators with Two-Stroke Charge Cycle Operation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 333 ~ 333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act11110333	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 Tamura Hideto, Sato Shintaro, Ohnishi Naofumi	4. 巻 56
2. 論文標題 Numerical simulation of atmospheric-pressure surface dielectric barrier discharge on a curved dielectric with a curvilinear mesh	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 045202 ~ 045202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/aca61d	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 Sato Shintaro, Sakurai Mahoro, Ohnishi Naofumi	4. 巻 13
2. 論文標題 Ionic wind generation through coplanar discharge: A plasma actuator without exposed electrodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 065001-065001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0150335	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 Sato Shintaro and Ohnishi Naofumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Towards Development of a Plasma Actuator without External Power Supply for Unmanned Aerial Vehicle	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 57
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 桜井まほろ、佐藤慎太郎、大西直文
2. 発表標題 プラズマアクチュエータによる非定常揚力生成に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤慎太郎、冨江響、大西直文
2. 発表標題 ナノ秒パルス放電を用いた翼周りの剥離流れ制御に関する数値計算
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桜井まほろ、佐藤慎太郎、大西直文
2. 発表標題 プラズマアクチュエータを用いた非定常揚力生成による無人航空機飛行制御の試み
3. 学会等名 第61回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 C. Y. Ho, S. Sato, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Numerical study on leading-edge vortex generation using plasma actuator with reversed operation
3. 学会等名 APISAT 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Y. Ho, 佐藤慎太郎, 大西直文
2. 発表標題 Leading-edge vortex generation by plasma actuator flow control on a steady airfoil
3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会第8回シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井まほろ、佐藤慎太郎、大西直文
2. 発表標題 完全埋没型プラズマアクチュエータの開発
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富江 響, 佐藤 慎太郎, 大西直文
2. 発表標題 ナノ秒パルス駆動プラズマアクチュエータの剥離制御過程に関する数値計算
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Sakurai, S. Sato, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Development of Fully Covered Plasma Actuator
3. 学会等名 ICRP-11/GEC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 まほろ, 佐藤慎太郎, 大西直文
2. 発表標題 プラズマアクチュエータを用いた非定常揚力 生成による無人航空機飛行制御の試み
3. 学会等名 第61回 飛行機シンポジウム
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