

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03882

研究課題名(和文) 多様な風況に順応可能な発電用風車を実現する能動的剥離制御技術の確立

研究課題名(英文) Active flow control for wind turbines capable of adapting to various wind condition

研究代表者

佐藤 允 (Sato, Makoto)

工学院大学・先進工学部・准教授

研究者番号：50648897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：多様な風況に順応可能な発電用風車の実現に向けて、流体制御デバイスであるDBDプラズマアクチュエータ(PA)を用いた翼周り流れの剥離制御技術の検証を数値解析を用いて行った。PAを翼のスパン方向に設置したスパン型PA(SP-PA)および翼のコード方向に設置したボルテックスジェネレータ型PA(VG-PA)を用いた剥離制御を静的な翼周り流れと動的な翼周り流れに対して行った。結果より、SP-PAとVG-PAそれぞれにおける効果的な剥離制御手法と剥離制御メカニズムに関する知見を得た。特に、SP-PAとVG-PAを併用する併用型PAを使用することで単体のPAに比べて高い剥離制御効果が得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風力発電は再生エネルギーの一つとしてその利用拡大が大きく期待されている。一方で、風況の変化が大きい日本での風力発電においては、発電効率のさらなる向上のために多様な風況への順応が可能な発電用風車が必要となる。本研究で得られたDBDPAを用いた剥離制御に関する知見は、多様な風況に順応可能な風車を実現する能動的剥離制御技術の確立に大いに役立つことが期待され、持続可能なエネルギー社会の実現に貢献するものである。加えて、各種PAを用いた剥離制御における制御メカニズムとその流体现象を数値解析により明らかにしたことは、流体力学分野の学術的進展の一助となった。

研究成果の概要(英文)：In order to develop wind turbines capable of adapting to various wind conditions, numerical analyses have been conducted to investigate flow separation control techniques around airfoils using a DBD plasma actuator (PA). Flow separation control using the spanwise-type PA (SP-PA), installed along the span direction, and the vortex generator-type PA (VG-PA), installed along the chord direction, has been examined under both static and dynamic flow conditions. The numerical analyses clarify effective separation control methods and mechanisms for SP-PA and VG-PA, respectively. In particular, the combined use of SP-PA and VG-PA shows higher separation control effectiveness compared to using each PA individually.

研究分野：流体工学

キーワード：流体制御 DBDプラズマアクチュエータ 動的翼周り流れ 風車 数値解析

1. 研究開始当初の背景

風力発電の世界的な需要増加に伴い、様々な風況に順応可能な風車翼が求められている。例えば、突風によって翼周りの流れが剥離すると翼性能は低下し、発電量が急激に減少する。加えて、翼荷重の急激な変化は風車翼の疲労破壊にもつながる。近年、風車翼にスラットやフラップ等の装置を組み込んだスマート風車翼が検討されているが、機械的可動部の複雑さや装置の重量、コスト等の問題があり実用化には至っていない。

一方で、DBD プラズマアクチュエータ(PA)やシンセティックジェット等のマイクロデバイスを用いた剥離制御技術に大きな注目が集まっている[1]。これらのデバイスはスラットやフラップのような機械的可動部を持たず、局所的な領域に局所的な変動を能動的に加えることで流れを制御する。特に、PA は設置の簡便性や応答性などの観点から、流体制御デバイスとして強く有望視されている。PA は剥離制御の実現に極めて適した流体制御デバイスであるが、例えば風車周りの流れのように、流れの状況が時々刻々変化する場における効果的な PA 配置や駆動方法に関する明確な設計指針は得られていない。

我々はこれまでに、翼周り流れにおいて PA を流れ方向に垂直に配置する「SP-PA」と流れ方向に平行に配置する「VG-PA」(図1)を用いた剥離制御に関する研究を行ってきた。当該研究から、SP-PA を用いた剥離制御に関して効果的な制御技術の知見を多数得ており[2-3]、また、VG-PA を用いた剥離制御に関して制御メカニズムの一端を明らかにしている[4]。

特に、SP-PA では「スパン渦の間欠的な誘起」が、VG-PA では「縦渦の誘起と合体」が効果的な剥離制御の鍵となる。しかし、SP-PA と VG-PA を組み合わせた制御の有効性は未知数である。

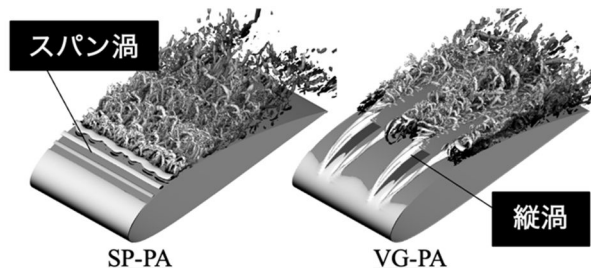


図1. SP-PA, VG-PA による翼周り剥離制御.

2. 研究の目的

本研究の目的は、SP-PA と VG-PA を用いた剥離制御に関する大規模な数値流体解析を行い、既存の単一 PA 制御では不可能な SP-PA/VG-PA 併用による剥離制御技術の有効性を静的および動的な翼周り流れで実証することである。本研究では、様々な翼周り剥離流れにおいて各 PA の組み合わせや配置、駆動方法の影響を調査する。結果より、動的な翼周り流れにも対応可能な PA 条件と剥離制御メカニズムに関する知見を得る。

3. 研究の方法

本研究では、高精度非定常流体解析手法である Large-eddy simulation(LES)を用いた大規模な数値流体解析を行った。本数値解析手法を用いることで、非定常な流体現象を詳細に調べることができる。本研究では LES を用いて、流れに応じて各時間・各場所で誘起されるスパン渦および縦渦が促す非定常流体現象を明確に把握しつつ制御効果を検証した。

数値解析は主に以下の3つを対象に行った。

- (1) 幅広いレイノルズ数における静的な翼周り流れに対する VG-PA を用いた剥離制御
風車周りの流れでは風車ブレードの翼根から翼端にかけてレイノルズ数(Re)が変化する。本研究では VG-PA を用いた静的な翼周り流れの剥離制御に関する LES を $5,000 < Re < 1,600,000$ の範囲で行い、効果的な剥離制御手法に対するレイノルズ数効果について調べた。
- (2) 風車周りの流れを模擬した動的な翼周り流れにおける各種 PA を用いた剥離制御
実験室スケール風車のレイノルズ数である $Re=256,000$ における動的なピッチング翼周り流れを対象に、VG-PA, SP-PA および SPVG 併用型 PA を用いた剥離制御の LES を行った。特に、(1)の結果を基に動的流れにおける VG-PA の間欠駆動効果を調べた。
- (3) 高レイノルズ数・動的翼周り流れにおける各種 PA を用いた動的失速制御
(2)の結果を基に、より実用的な風車のレイノルズ数に近い $Re=1,000,000$ における動的なピッチング翼周り流れの LES 結果を解析し、VG-PA, SP-PA および SPVG 併用型 PA の制御効果を調べた。本制御では Ramp 型の動的モーションを採用し、主に動的失速の遅延を実現する制御手法に関して調べた。

4. 研究成果

(1) 幅広いレイノルズ数における静的な翼周り流れに対する VG-PA を用いた剥離制御

本研究では、レイノルズ数 5,000($Re5k$), 10,000($Re10k$), 63,000($Re63k$), 260,000($Re260k$), 1,600,000($Re1600k$)において静的翼周り剥離流れに対する VG-PA を用いた剥離制御の LES を行った。本制御では、SP-PA で用いられている間欠駆動を VG-PA にも適用し、VG-PA における間欠駆動制御の効果を調べた。間欠駆動パラメータ等の詳細は別文献[5]を参照されたい。

図 1 の縦軸は制御時の翼の揚力係数と非制御時の揚力係数の差分を示したものである(ΔC_L)。横軸は VG-PA の間欠駆動のバースト比(BR)を示しており、BR0.5 は VG-PA を間欠駆動した条件の結果を、BR1.0 は連続駆動の条件の結果を示している。また、点線は SP-PA を用いた際の結果である。図 1 より、 $Re63k$ 以外のレイノルズ数においては VG-PA を間欠駆動した場合に揚力係数が著しく増加していることがわかる。 $Re63k$ では連続駆動と間欠駆動でほぼ同程度の制御効果となっている。

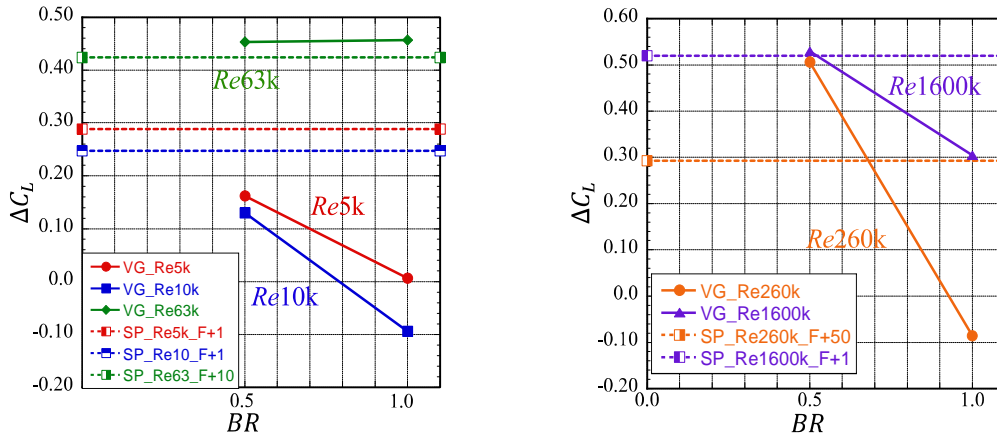


図 2. 各レイノルズ数における揚力係数[5].

図 3 は各レイノルズ数において効果的な制御が実現できた間欠駆動条件の流れ場(翼コード方向速度で色付けされた Q 値)と乱流運動エネルギー(TKE)分布を示している。比較のため、SP-PA の結果も合わせて示した。 $Re5k$ の流れ場では間欠駆動により生成された大規模な 2 次元的渦構造の移流が確認できる。一方で、TKE 分布より翼面付近に高い TKE 領域は確認できず、本レイノルズ数では大規模な 2 次元的渦構造の移流が主要な制御メカニズムである。また、 $Re1600k$ においては翼後縁付近に 2 次元的な渦構造が確認でき、本レイノルズ数でも 2 次元的渦構造の生成が主要な制御メカニズムである。これに対して、 $Re63k$ と $Re260k$ では大規模な 2 次元的渦構造は確認されず、翼前縁付近に高い TKE 領域が観察される。これは本レイノルズ数域においては高周波数の間欠駆動による乱流遷移の促進と流れの再付着が主要なメカニズムであることを示している。また、 $Re10k$ では、大規模な 2 次元的渦構造とともに翼面付近に高い TKE 領域が存在していることから、2 次元的渦構造の生成に加えて、乱流遷移の促進による流れの再付着の両者が主要な制御メカニズムとなっている。

SP-PA と VG-PA の流れ場および TKE 分布は良く一致しており、VG-PA 間欠駆動による制御メカニズムは SP-PA 間欠駆動の制御メカニズムと同様であることが明らかとなった。

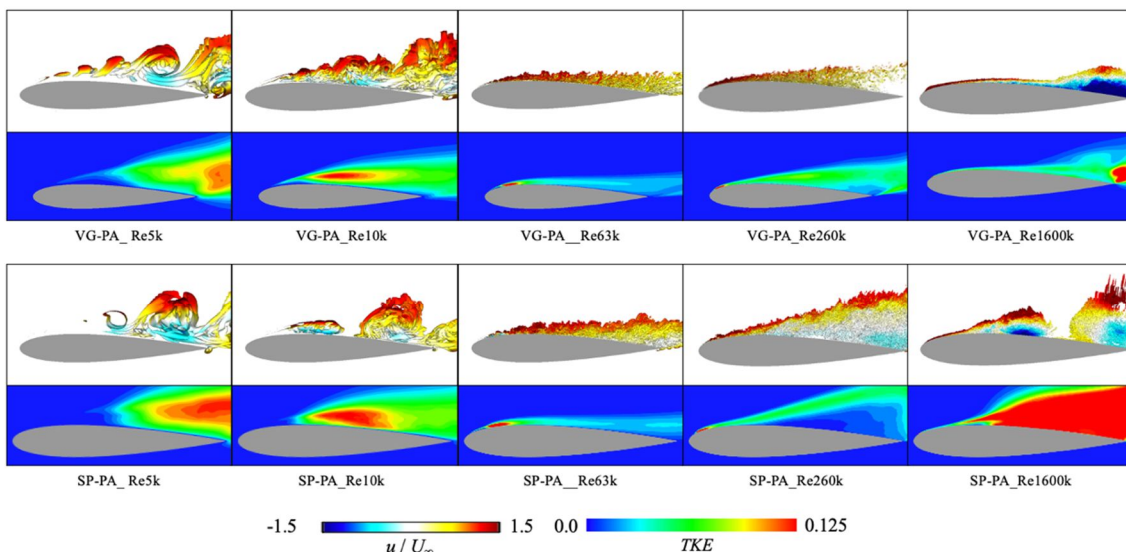


図 3. 各レイノルズ数における VG-PA, SP-PA による静的な翼周り剥離制御の流れ場と TKE 分布[5].

(2) 風車周りの流れを模擬した動的な翼周り流れにおける各種 PA を用いた剥離制御

本研究では、 $Re=256,000$ の動的翼周り流れにおける各種 PA を用いた剥離制御の LES を行った。計算対象には NACA0012 翼を用い、迎角 5 度から 25 度のピッチングモーションにより動的流れ場を表現する。ピッチングモーションや間欠駆動パラメータ等の詳細は別文献[6]を参照されたい。

図 4(a)は VG-PA における揚力係数(C_L)と抗力係数(C_D)の迎角による変化を示している。図 4(a)より、VG-PA の全ケースで再付着の促進が得られた。VG-PA 連続駆動においては動的失速の遅延やピッチダウン時の揚力増加効果は小さいが、間欠駆動で間欠駆動周波数($F+$)が $F+5$ と $F+50$ の条件で顕著な動的失速の遅延を確認できた。これは、翼面の層流剥離泡に高周波で変動を与えることで層流剥離泡の崩壊を抑制できるためである。また、ピッチダウン時の揚力増加効果も VG-PA による制御で確認できた。ピッチダウン時には $F+0.5_BR0.1$ の条件で高い揚力が得られた。本条件ではピッチダウン時の揚力が迎角 20 度から 10 度付近にかけて大きく山なりに数回増加しているが、これは翼付近に大規模な渦構造が生成されることによる負圧の影響である。この渦構造は、翼前縁付近で小さい縦渦が発生し、後縁に移流していく過程で大規模なスパン渦へと変化している。再付着促進の効果が大きいのは $F+5$ と $F+50$ の条件であり、制御なしと比較して約 6° 再付着を早めることができた。これは剥離せん断層の乱流遷移を促進することにより、乱流再付着が早まったためである。図 4(b)は SP-PA の結果である。SP-PA の主な効果は先行研究[7]と同様の結果が得られた。すなわち、動的失速の遅延、ピッチダウン時の揚力増加、再付着の促進である。SP-PA を用いた制御では、 $F+50$ の条件で最も動的失速の遅延効果があり、約 5 度遅延させることができた。VG-PA で失速の遅延効果があった $F+5$ および $F+50$ の条件と比較しても大幅に遅延が増加した。図 4(c)は SP-PA, VG-PA 併用型 PA の結果を示している。併用型 PA の結果は SP-PA 単体の制御効果が支配的となる結果となった。一方で、VG-PA の効果としては、SPVG2 のケースにおいてピッチダウン時の迎角 22 度において揚力係数の増加が確認できる。

本解析条件($Re=O(10^5)$)のように比較的低いレイノルズ数においては前縁付近に形成される層流剥離泡の崩壊の抑制と、前縁付近での再付着の促進が極めて効果的である。このような条件では、前縁に設置した SP-PA による制御効果が支配的となる。一方で、VG-PA の効果として、ピッチダウン時における揚力係数の増加も確認されており、本レイノルズ数域においても併用型 PA のメリットが明らかとなった。

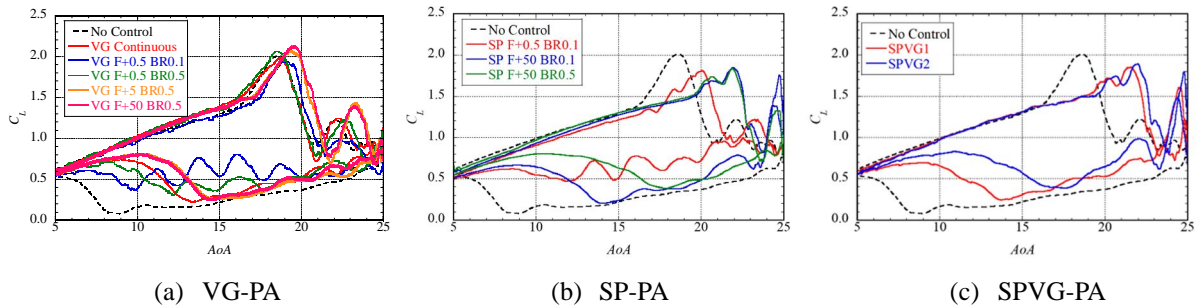


図 4. VG-PA, SP-PA および併用型 PA による動的翼周り流れの剥離制御における揚力係数の変化[6].

(3) 高レイノルズ数・動的翼周り流れにおける各種 PA を用いた動的失速制御

本研究では、実風車スケールのレイノルズ数($Re=O(10^6)$)における動的翼周り流れを対象とし、VG-PA および SP-PA を用いた動的失速制御の LES 結果に関する検討を行い、制御効果と制御メカニズムについて調べた。当初は実験室スケールの回転翼周り流れを対象として、各種 PA を用いた流体制御を行う予定であったが、(2)で得られた結果より実験室スケールの比較的レイノルズ数が低い条件($Re=O(10^5)$)では VG-PA の特徴的な制御効果が得られないことが明らかとなった。そのため、VG-PA の制御効果が期待できる高レイノルズ数の動的翼周り流れに研究対象を変更した。対象は $Re=1,000,000$ における動的なピッチング翼周り流れとし、VG-PA, SP-PA および SPVG 併用型 PA の制御効果を調べた。本制御では Ramp 型の動的モーションを採用し、動的失速制御に関して調べた。ピッチングモーションや各種 PA の設定条件の詳細は別文献[8]を参照されたい。

図 5 は非制御・制御の各ケースにおける動的失速付近での流れ場の時系列変化を示している。ここでは翼スパン方向に平均したスパン方向渦度を可視化している。図 5(a)より、非制御では迎角 22 度から 23.4 度で乱流剥離が前縁付近まで達している。迎角 24.9 度において前縁からの剥離で生成される前縁剥離渦 (LEV) と、より後方で生成される乱流剥離渦 (TSV) が観察され、両者が干渉していることがわかる。迎角 26.3 度では LEV と TSV が合体した動的失速渦 (DSV) が生成され、明確な動的失速へと移行している。図 5(b)より、VG-PA (VG_Norm_lp0.9_Dc1) では迎角 26.3 度においても TSV は観察されない。これは、VG-PA の駆動によって境界層の乱流強度が強められることで乱流剥離が抑制されているためである。迎角 27.7 度において LEV が観察

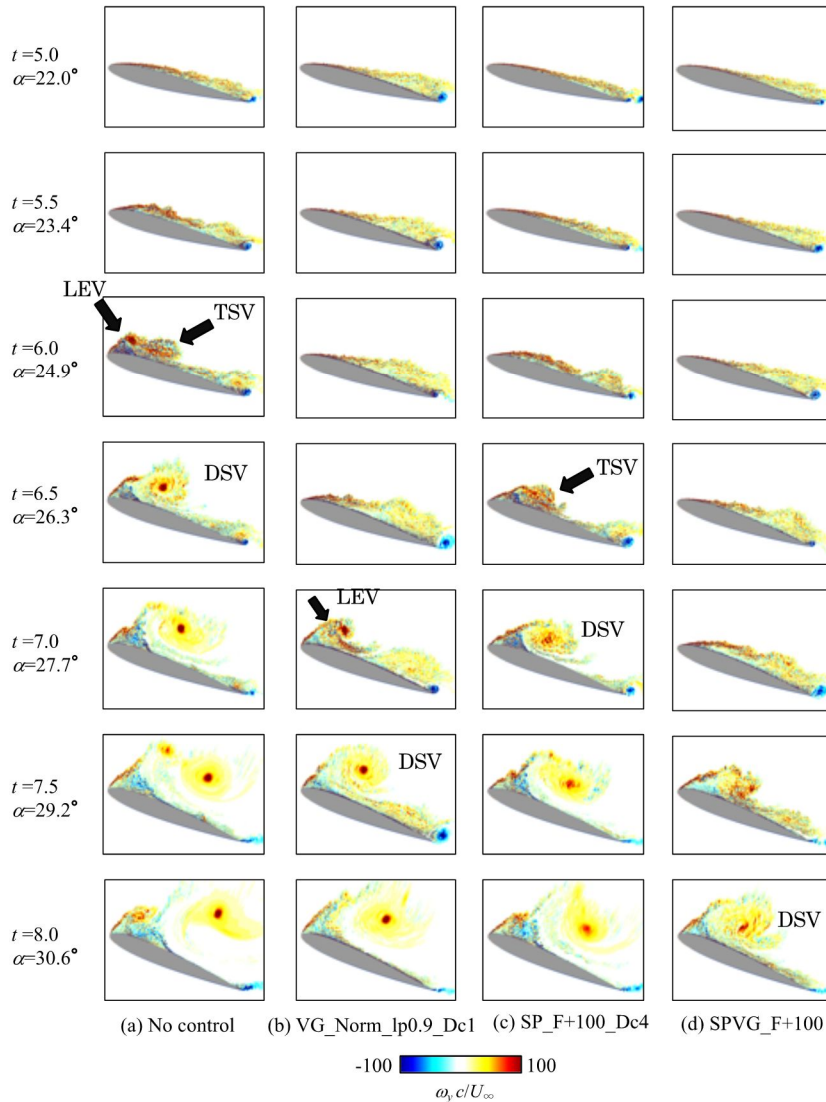


図 5. 各種 PA を用いた高レイノルズ数・動的翼周り失速制御における流れ場の変化[8].

され、この LEV により迎角 29.2 度において DSV が形成されている。これに対して SP-PA のケース (SP_F+100_Dc4) では、図 5(c)より、迎角 26.3 度において TSV が観察されるが、非制御の迎角 24.9 度や VG_Norm_lp0.9_Dc1 の迎角 27.7 度で観察されるような明確な LEV は観察されない。これは、SP-PA の高周波駆動で前縁付近の層流剥離泡にエネルギーが投入され剥離泡の崩壊が抑えられているためである。SPVG 併用型 PA では、迎角 27.7 度までは明確な大規模渦構造が観察されず、迎角 30.6 度において DSV の生成が確認できる。

以上より、高レイノルズ数・動的失速制御においては SP-PA と VG-PA の併用型 PA を用いることで、LEV と TSV の両方に対して生成迎角を増加させることができ、動的失速迎角が SP-PA 単体、VG-PA 単体よりも増加することが明らかとなった。

(4) 研究成果のまとめ

本研究課題を通して、VG-PA、SP-PA および SPVG 併用型 PA を用いた静的翼周り流れおよび動的翼周り流れの剥離制御を幅広いレイノルズ数に対して行い、各レイノルズ数における剥離制御効果と効果的な PA 配置・駆動条件に関する知見を得た。これらの知見は、多様な風況に順応可能な風車を実現する能動的剥離制御技術の確立に大きく役立つことが期待できる。一方で、実スケールの風車を対象とした高レイノルズ数・回転翼周り流れに対する PA を用いた剥離制御については実施できず、今後の課題となった。

<引用文献>

- [1] Corke, *et al.*, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 42, pp. 505-529 (2010). [2] Sato, *et al.*, Phy. Fluids, Vol.32, 025102 (2020). [3] 佐藤・青野, *ながれ*, 39 巻, pp. 200-207 (2020). [4] Sato and Kobayashi., 72nd APS-DFD (2019). [5] Mayahara and Sato, AIAA AVIATION Forum 2023, AIAA-2023-3283 (2023). [6] Takahama, *et al.*, AIAA AVIATION Forum 2024 (2024). [7] Fukumoto *et al.*, AIAA SciTech Forum 2018, AIAA-2018-1550 (2018). [8] Sato and Takahama, AIAA AVIATION Forum 2024 (2024).

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 0件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Makoto Sato | 4. 巻 34 |
| 2. 論文標題 Numerical investigation on streamwise vortex generation by plasma actuator | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physics of Fluids | 6. 最初と最後の頁 083611 ~ 083611 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0103435 | 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 0件 / うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 高浜健一, 佐藤允, 福本浩章 |
| 2. 発表標題 ピッチング翼周りの動的失速流れ制御におけるプラズマアクチュエータの配置・駆動方法の影響 |
| 3. 学会等名 第55回流体力学講演会 / 第41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 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高浜健一, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 高レイノルズ数の動的翼周り流れにおける各種プラズマアクチュエータを用いた乱流剥離制御 |
| 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 高浜健一, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 PAを用いた動的翼周り流れの流体制御におけるレイノルズ数効果 |
| 3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第10回シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤允 |
| 2. 発表標題 プラズマアクチュエータの間欠駆動による流体制御ー 数値解析の見地から ー |
| 3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第10回シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kenichi Takahama, Makoto Sato, Hiroaki Fukumoto |
| 2. 発表標題 Dynamic Stall Control using Spanwise-type and Vortex-generator-type Plasma Actuators around Pitching Airfoil |
| 3. 学会等名 AIAA AVIATION Forum 2024 (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Makoto Sato, Kenichi Takahama |
| 2. 発表標題 Large-Eddy-Simulations on Dynamic Stall Control using Plasma Actuators at Reynolds Number of 1.0×10^6 |
| 3. 学会等名 AIAA AVIATION Forum 2024 (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shota Mayahara, Makoto Sato |
| 2. 発表標題 Separation Control using Vortex-Generator-Type Plasma Actuator over Wide Reynolds Number Range |
| 3. 学会等名 AIAA AVIATION Forum 2023 (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐藤允 |
| 2. 発表標題 ボルテックスジェネレータ型PAを用いた翼周り剥離制御 |
| 3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第9回シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 馬屋原昇太, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 スパン型PAとボルテックスジェネレータ型PAを用いた翼周り剥離制御における制御効果と流れ場の比較検討 |
| 3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第9回シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高浜健一, 佐藤允, 福本浩章 |
| 2. 発表標題 ボルテックスジェネレータ型PAを用いた動的な翼周り流れの剥離制御 |
| 3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第9回シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 三瀬理衣 馬屋原昇太, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 ボルテックスジェネレーター型PAを用いた高効率な翼周り剥離制御 |
| 3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第9回シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 馬屋原昇太, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 ボルテックスジェネレータ型PAを用いた翼周り剥離制御効果におけるレイノルズ数依存性 |
| 3. 学会等名 2022年度日本機械学会年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 馬屋原昇太, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 ボルテックスジェネレータ型プラズマアクチュエータを用いた低レイノルズ数環境下での翼周り剥離制御 |
| 3. 学会等名 第54回流体力学講演会 / 第40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 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shota Mayahara, Makoto Sato |
| 2. 発表標題 Separation Control around NACA0015 Airfoil using Vortex Generator Type Plasma Actuator over Low Reynolds Number Conditions |
| 3. 学会等名 The 20th International Symposium on Advanced Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 馬屋原昇太, 佐藤允 |
| 2. 発表標題 ボルテックスジェネレータ型PAの連続駆動による翼周り剥離制御に関するレイノルズ数効果 |
| 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 秦智規, 佐藤允, 福本浩章 |
| 2. 発表標題 風車の翼周りの流れを模擬した動的流れ場における各種PAの剥離制御効果 |
| 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 Makoto Sato |
| 2. 発表標題 Mechanisms for Turbulent-Separation-Control at Reynolds Number of 1.6×10^6 using Vortex-Generator-Type Plasma Actuators - Comparison with Spanwise-Type Plasma Actuators - |
| 3. 学会等名 AIAA AVIATION Forum 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022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 |
|---------|---------|
| | |