

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03868

研究課題名（和文）プラズマアクチュエータを用いたタービン静翼・動翼の二次流れの能動制御

研究課題名（英文）Active flow control of secondary flows in turbine nozzle and rotor blades using dielectric barrier discharge plasma actuators

研究代表者

松沼 孝幸（Matsunuma, Takayuki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：40358031

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）：誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ（PA）による能動流体制御を用いて、タービン翼列の内部で発生する二次流れ（流路渦と翼先端漏れ渦）を抑制する研究に取り組んだ。粒子画像流速測定法（PIV）を用いて直線タービン翼列出口の速度場を計測して、翼列の壁面上流に取り付けたPAの駆動による流路渦の抑制効果を調べた。さらに、翼先端隙間がある場合に、翼列先端側の壁面に埋め込んだPAの駆動による翼先端漏れ渦の抑制効果も調べた。流路渦と翼先端漏れ渦の2つが存在する流れ場においては、PAを駆動して、どちらか片方の渦のみを抑制すると、もう一方の渦が増大してしまう現象を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマアクチュエータ（PA）の駆動によりタービン翼列内部の流路渦や翼先端漏れ渦を抑制する風洞実験から、PA設置位置・レイノルズ数（主流速度）・入力電圧・駆動波形（連続駆動とパルス駆動）・設置形状などの各種パラメータの影響を明らかにし、英文ジャーナル5報で発表した。さらに、1つの駆動電源で流路渦と翼先端漏れ渦の両方を同時に抑制できる複合型PAを開発し、特許1件を出願した。これらの研究成果を通して、PAをターボ機械へ応用する研究の発展に貢献した。

研究成果の概要（英文）：In this study, active flow control using dielectric barrier discharge plasma actuators (PAs) was applied to suppress the secondary flows (passage vortex and tip leakage vortex) generated inside the turbine blades. The velocity field at the outlet of a linear turbine cascade was measured using a particle image velocimetry (PIV) system to investigate the effect of reduction of the passage vortex by driving a PA mounted on the endwall upstream of the blades. In addition, when a gap between the blade tip and the endwall existed, the effect of driving a PA embedded in the endwall faced with the blade tip to suppress the tip leakage vortex was also investigated. When the passage vortex and the tip leakage vortex coexisted, the reduction in only one vortex by the driving the PA resulted in an undesired increase in the other vortex.

研究分野：流体工学

キーワード：空気力学 プラズマアクチュエータ ターボ機械 タービン翼列 二次流れ 流路渦 翼先端漏れ渦 能動流体制御

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

流体工学の分野において、誘電体バリア放電(DBD)を利用したプラズマアクチュエータ(PA)は、機械的可動部を持たず信頼性の高い次世代の流体制御素子として期待されており、自動車、高速鉄道、航空機、風車、ガスタービンといった流体機械の効率や騒音低減効果を飛躍的に向上するための研究開発が活発に行われている。

一方、航空用ジェットエンジンや発電用ガスタービンなどの各種ターボ機械の主要な構成要素であるタービン翼列では、一般的に空気力学的損失の約 40 - 60%が二次流れにより発生している。最新のタービン翼列設計では、エンジン重量・部品点数を減らすために、翼の高負荷化を目指しており、二次流れの影響がさらに大きくなる傾向にある。タービン翼列内部の二次流れは、流路渦・翼先端漏れ渦・馬蹄渦・コーナー渦など多様であるが、その中でも、翼列のハブ側(翼根側)およびチップ側(翼先端側)の両方の壁面上で、速度の遅い境界層が翼の正圧面と負圧面の圧力差によって巻き上がって発生する「流路渦」が最も大きな損失源となる。さらに、回転するタービン動翼では、静止した外側のケーシングと翼先端の間でできた隙間を通る「翼先端漏れ渦」も大きな損失源となる。図 1 に、タービン翼列内部で発生する二次流れ(流路渦と翼先端漏れ渦)の模式図を示す。これらの流路渦と翼先端漏れ渦を抑制することができれば、タービン翼列などのターボ機械の性能を飛躍的に向上できる。

しかし、これまでのターボ機械への PA の適用事例は、翼の負圧面側からの剥離流れの制御が大半であり、PA による二次流れ抑制に関する研究は少ない。そこで、PA をタービン翼列に適用した場合に二次流れをどこまで抑制することができるのかを検証する目的で、本研究を開始した。

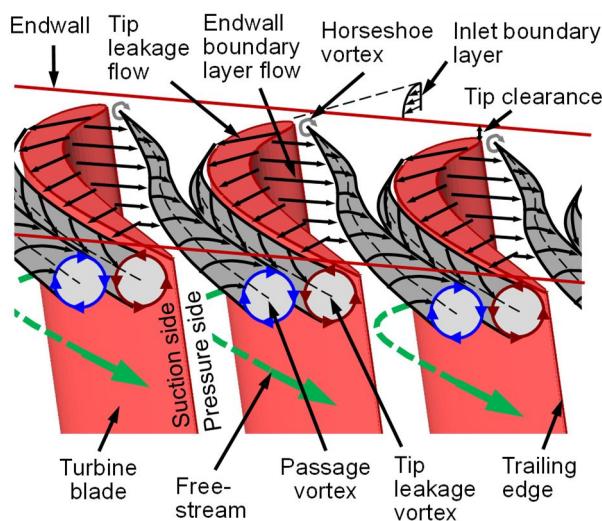


図 1 タービン翼列内部で発生する二次流れ(流路渦と翼先端漏れ渦)

### 2. 研究の目的

本研究では、タービン翼列内部で生じる二次渦を PA により抑制する効果を、風洞実験から実証する。流路渦を抑制する PA は、翼端の壁面に貼り付けて、壁面上の境界層を加速することにより、渦を弱める効果を発揮する。この流路渦抑制用の PA について、PA の設置位置、レイノルズ数(主流速度)、PA 駆動方法、PA 設置形状などの各種パラメータを変化させた実験を行い、空気力学的損失を最小限に抑える最適な制御方法を解明する。さらに、翼先端漏れ渦を抑制する PA(産総研で開発したリング型 PA)での実験も行い、翼先端漏れ渦を抑制するメカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

小型吹き出し風洞により直線タービン翼列を使った実験を行った。図 2 に測定部の概要を示す。翼 6 枚で構成される直線タービン翼列が測定部に設置されている。このタービン翼列は、環状タービン翼列の研究で使用していた轉向角 110.6 度の典型的な翼形状になっている。上流の送風機から送られてくる空気の流れは、縮流部を通して、測定部を流入する。直線タービン翼列の上流の上側壁面には、PA が貼り付けられている。直線タービン翼列出口の 3 流路分の幅を持つ断面(図中の緑色の領域、横 56.1mm × 縦 44.5mm)において、粒子画像流速測定法(PIV)を適用して空間速度分布を測定し、PA 駆動による二次渦の抑制効果を調査した。送風機の回転数を変更することにより、測定部出口の主流速度を 2.4m/s から 25.2m/s の広い範囲で変更した。翼弦長と出口主流流速を基準としたレイノルズ数は、 $1.0 \times 10^4$  から  $9.9 \times 10^4$  となっており、実

機タービン翼列において、空気力学特性が悪化する低レイノルズ数領域での作動条件に対応している。

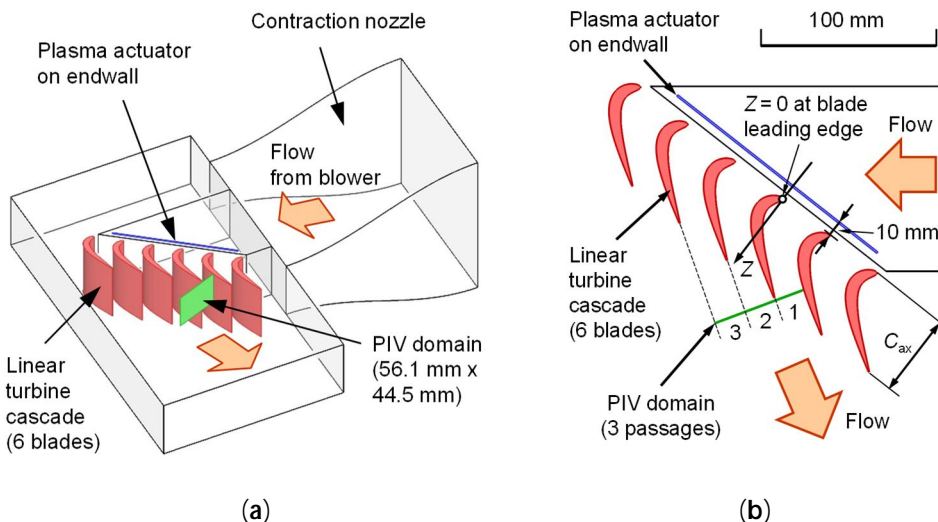


図2 直線タービン翼列の測定部，(a) 全体図，(b) 上面図と翼形状

図3に、PA駆動の概要を示す。図3(a)のように、ファンクションジェネレータから信号を入力することによって、高電圧パワーアンプがPAを駆動する。ファンクションジェネレータの信号を調整することにより、PAを任意の波形条件下で作動できる。図3(b)のように、PAの駆動方法は、連続駆動モード（定常駆動）と、バースト駆動モード（非定常駆動）に分けられる。

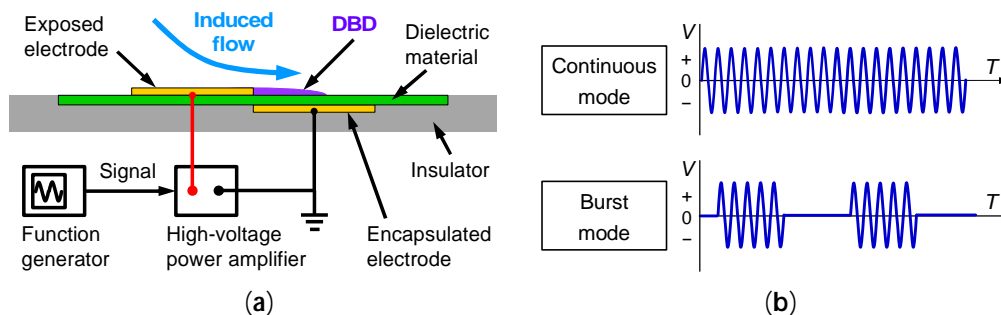


図3 PA駆動の概要，(a) 模式図，(b) 入力電圧波形（上：連続駆動，下：バースト駆動）

図4に、本研究で使用したPAシートの写真を示す。本PAは、プリント基板の技術で製作されている。両面銅張シリコン積層板のエッチング加工により、表面電極と裏面電極が形成されている。銅電極とシリコン樹脂絶縁体の厚さは、それぞれ0.018mmと0.44mmである。

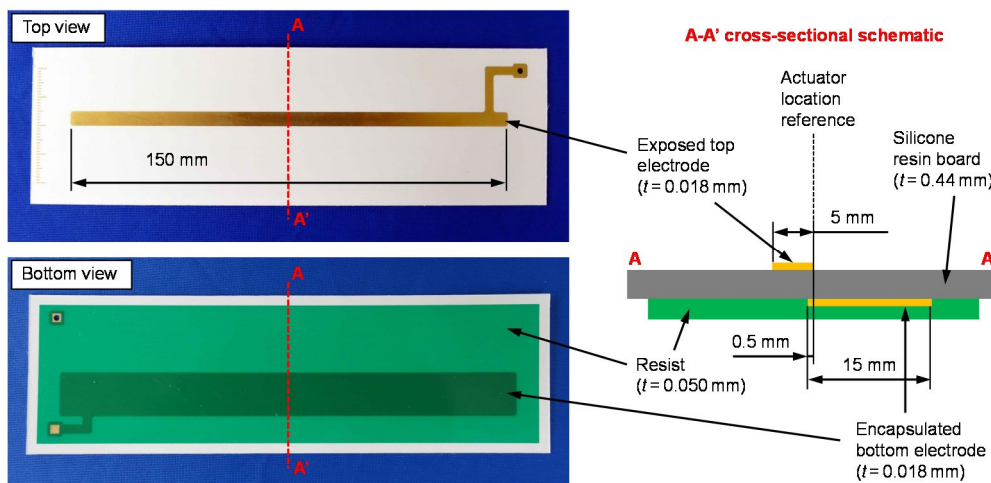


図4 使用したPA，左：PAの上面と下面，右：PA断面の模式図



#### 4. 研究成果

##### (1) 流路渦の抑制へのPA設置位置とレイノルズ数（流速）の影響（文献）

翼先端に隙間がない状態にして、翼先端漏れ渦が発生せず、流路渦のみが存在する条件にて、PAを駆動して、流路渦を抑制する実験を行った。PAの設置位置と主流の速度（レイノルズ数）を変更させて、流路渦の抑制効果を明らかにした。

設置位置に関しては、壁面に貼り付けるPAの位置を、タービン翼列の上流側から翼列内部まで7種類の設置場所に变化させた。図5に、実験結果の一例として、PA設置位置を変更した場合の翼列出口での渦度分布の変化を示す。それぞれの設置位置における流路渦の抑制効果をPIVで測定した結果、タービン翼列の前縁よりもう少し上流の壁面にPAを設置することが最も有効であることが分かった。また、翼前縁よりも上流側での設置位置では、位置変化の影響が緩やかであるのに対し、翼前縁よりも下流側での設置位置では、位置変化の影響が顕著に見られ、流路渦の抑制効果が急激に減少することに加え、翼正圧面側と壁面の角に、不必要な渦も発生した。

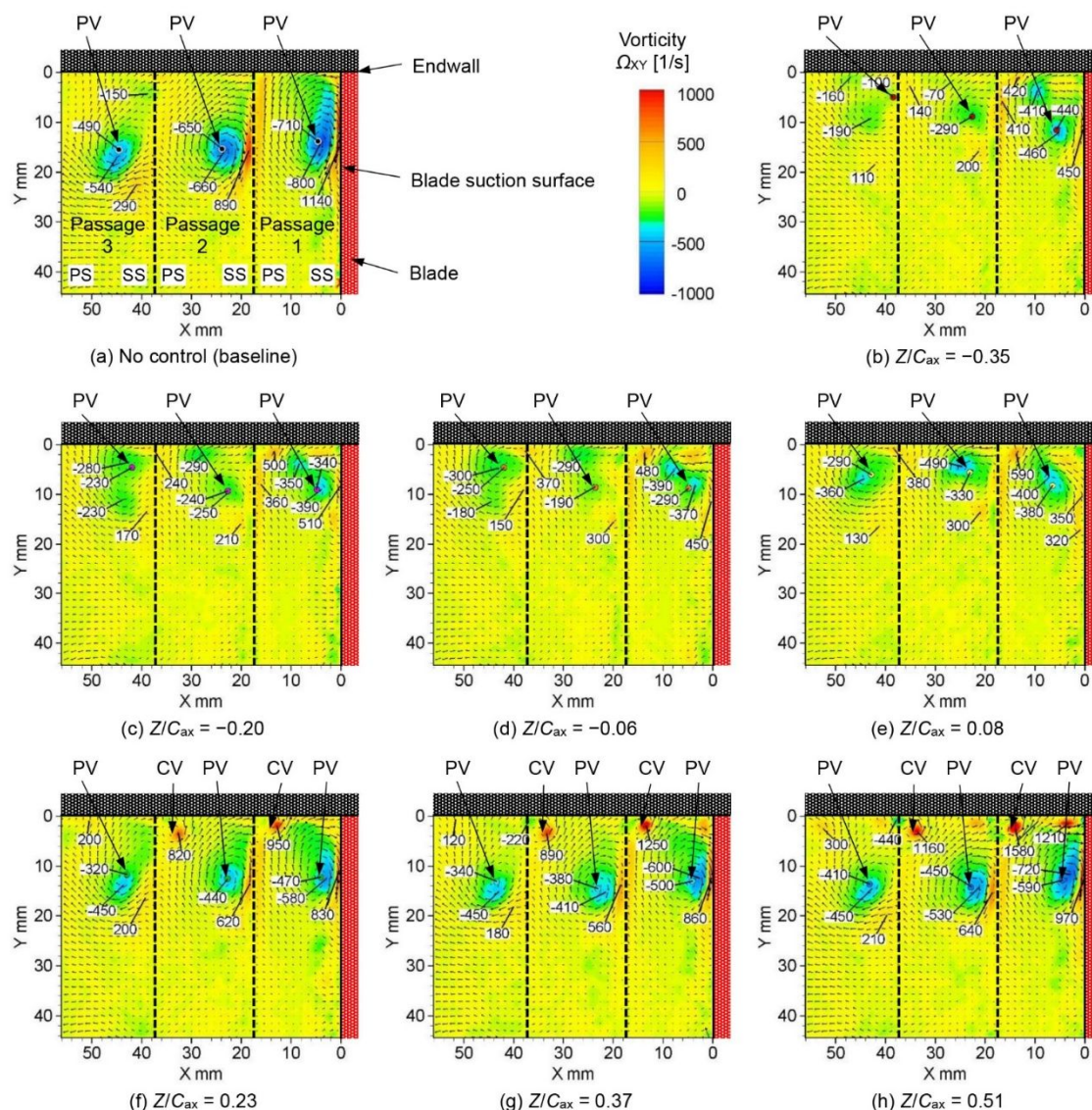


図5 直線タービン翼列出口の渦度分布へのPA設置位置の影響

次に、主流の速度を上げてレイノルズ数を高めた結果、レイノルズ数の増加にともない、PAによる流路渦の抑制効果が弱まるということが分かった。この原因は、主流の速度が高くなることにより、PAの誘起流速が相対的に低くなるためである。

##### (2) 流路渦の抑制へのPA駆動波形（連続駆動とバースト駆動）の影響（文献）

PAに入力する電圧を連続駆動（定常駆動）とバースト駆動（非定常駆動）の両方で制御した。基本的には、バースト比が高くなるほど流路渦が弱まるため、バースト比が最大となる連続駆動のほうが流路渦を抑制できる。しかし、消費電力と渦抑制効果の割合を考察したところ、エネルギー効率の観点からは、連続駆動よりもバースト駆動のほうが優れていることが明らかになった。

た。

(3) 流路渦の抑制への PA 設置形状の影響 (文献 )

タービン翼列先端に隙間がない場合で、流路渦のみが発生している流れ場において、PA の配置の違いによって流路渦の抑制効果がどのように変わるかを調査した。(1) 翼列入口での軸方向配置、(2) 翼列入口での斜め方向配置、(3) 翼列内部での斜め方向配置の 3 種類の PA の設置から、(2) 翼列入口での斜め方向配置が最も流路渦を抑制する効果が高いことを明らかにした。

(4) 翼先端隙間がある場合における流路渦の抑制 (文献 )

翼先端に隙間があって、流路渦と漏れ渦が同時に発生している流れ場において、PA による流路渦制御を行った場合の渦構造の変化を詳細に調査した。PA を駆動することにより、流路渦を効果的に減少させることができる一方で、翼先端漏れ渦が増大してしまうことが分かった。

(5) 翼先端漏れ渦の抑制 (文献 )

産総研で開発したリング型 PA において、翼先端漏れ渦を抑制するメカニズムを明らかにした。リング型 PA を駆動することによって、翼先端漏れ渦を効果的に減少させることができた。しかし、流路渦が強くなってしまいう望まない現象が観察された。

(6) 流路渦と翼先端漏れ渦を抑制する複合型 PA の開発

前述の 4.4 と 4.5 の実験において、流路渦と翼先端漏れ渦の両方が存在する場合には、PA の駆動でどちらか片方の渦を抑制すると、もう一方の渦が増大してしまう現象が観察された。そこで、タービン翼列の流路渦と翼先端漏れ渦を同時に抑制できる新しい複合型 PA を開発し、PIV 測定によって効果を実証して、国内特許の出願を行った。

< 研究成果を発表した文献 >

Matsunuma, T., Effects of the Installation Location of a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on the Active Passage Vortex Control of a Turbine Cascade at Low Reynolds Numbers, *Actuators*, 2022, 11, 129.

<https://doi.org/10.3390/act11050129>

Matsunuma, T., Effects of Burst Ratio and Frequency on the Passage Vortex Reduction of a Linear Turbine Cascade Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, *Actuators*, 2022, 11, 210.

<https://doi.org/10.3390/act11080210>

Matsunuma, T.; Segawa, T., Effect of Plasma Actuator Layout on the Passage Vortex Reduction in a Linear Turbine Cascade for a Wide Range of Reynolds Numbers, *Actuators*, 2023, 12, 467.

<https://doi.org/10.3390/act12120467>

Matsunuma, T.; Segawa, T., Active Flow Control for Passage Vortex Reduction in a Linear Turbine Cascade with Various Tip Clearance Sizes Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, *Aerospace*, 2023, 10, 641.

<https://doi.org/10.3390/aerospace10070641>

Matsunuma, T.; Segawa, T., Vortex structure for reducing tip leakage flow of linear turbine cascade using dielectric barrier discharge plasma actuator, *Aerospace Science and Technology*, 2023, 136, 108215.

<https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108215>.

## 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 5件）

1. 著者名 Takayuki Matsunuma	4. 巻 11-5
2. 論文標題 Effects of the Installation Location of a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on the Active Passage Vortex Control of a Turbine Cascade at Low Reynolds Numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 No. 129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act11050129	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 Takayuki Matsunuma	4. 巻 11-8
2. 論文標題 Effects of Burst Ratio and Frequency on the Passage Vortex Reduction of a Linear Turbine Cascade Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 No. 210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act11080210	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 Takayuki Matsunuma, Takehiko Segawa	4. 巻 136
2. 論文標題 Vortex structure for reducing tip leakage flow of linear turbine cascade using dielectric barrier discharge plasma actuator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 No. 108215
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ast.2023.108215	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 Takayuki Matsunuma, Takehiko Segawa	4. 巻 10-7
2. 論文標題 Active Flow Control for Passage Vortex Reduction in a Linear Turbine Cascade with Various Tip Clearance Sizes Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Aerospace	6. 最初と最後の頁 No. 641
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/aerospace10070641	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 Takayuki Matsunuma, Takehiko Segawa	4. 巻 12-12
2. 論文標題 Effect of Plasma Actuator Layout on the Passage Vortex Reduction in a Linear Turbine Cascade for a Wide Range of Reynolds Numbers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 No. 467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act12120467	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2件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松沼 孝幸, 瀬川 武彦
2. 発表標題 プラズマアクチュエータによるガスタービン翼列の二次渦制御
3. 学会等名 エネルギー技術シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松沼 孝幸
2. 発表標題 プラズマアクチュエータによるタービン翼列の二次流れの能動制御
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 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 プラズマアクチュエータおよび流体機械	発明者 松沼 孝幸	権利者 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-011371	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

2022年に本研究成果を発表した論文（下記）が、2024年4月に「Actuators 2024 Best Paper Award」を受賞した。

<受賞論文>

Takayuki Matsunuma, Effects of the Installation Location of a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on the Active Passage Vortex Control of a Turbine Cascade at Low Reynolds Numbers, Actuators, 2022, 11-5, No. 129.

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