

平成30年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289040

研究課題名(和文) リング型プラズマアクチュエータを用いたタービン翼列先端漏れ流れの能動制御

研究課題名(英文) Active Control of Tip Clearance Flow on Turbine Blade by Ring-type Plasma Actuator

研究代表者

瀬川 武彦 (SEGAWA, Takehiko)

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：50357315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：誘電体バリア放電を利用した種々のリング型プラズマアクチュエータを開発した。漏れ流れ2次元モデルでは、風洞試験部に挿入した平板の先端隙間を調整することで、漏れ流れの強さを変化させた。先端形状の影響をPIV解析で評価した結果、先端面エッジ形状が漏れ流れの出入り口で対称の場合に漏れ流れ抑制効果が高いことがわかった。直線タービン翼列および環状タービン翼列先端漏れ流れの能動制御もシリコン樹脂銅張板で試作したリング型プラズマアクチュエータにより実施した。タービン翼先端側およびハブ側の通過渦がReynolds数が低いほど減少することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Ring-type plasma actuators utilizing dielectric barrier discharge were developed in order to carry out active control of the tip leakage flow in turbine rotors. The strength of two-dimensional leakage flow was changed by adjusting the tip clearance of a flat plate inserted into the wind tunnel test section. As a result of PIV analysis for evaluating effects of tip shapes of the flat plate, it was found that the effect for mitigating the leak flow is improved when the shape of the entrance and exit edge of tip surface is symmetrical. Active control of the tip leakage flow of linear and annular turbine cascades were also conducted by ring-type plasma actuators made of silicone print-circuit board. The tip leakage flow and the tip and hub passage vortices were reduced under lower Reynolds number.

研究分野：流体工学

キーワード：プラズマアクチュエータ 誘電体バリア放電 タービン 翼列 漏れ流れ 流体制御 流れの可視化 圧力損失

1. 研究開始当初の背景

タービン翼列は、ガスタービンの主要な構成要素として航空推進用ジェットエンジンや発電用ガスタービンに全世界で広範に利用されているため、わずかな性能向上でも高い省エネルギー効果が期待できる。特に、タービン翼列の翼先端から発生する流れ (Tip clearance flow) は、空力性能を低下させる大きな原因の1つであり、例えばガスタービンにおける損失全体の20%から40%を占めるとされ、流体制御により抑制できれば高い省エネルギー効果が期待できる。

次世代流体制御素子として期待されているプラズマアクチュエータ (PA) は、図1(a)に示すように絶縁材の表裏両面に電極を配置しただけの極めてシンプルな構造であるが、表裏電極間に数 kV 程度の交流電圧を印加するだけで一方向水平ジェットや縦渦などの機能的な噴流を誘起できるため、ガスタービン、風車翼、航空機翼、パンタグラフといった流体機械のエネルギー効率向上や騒音低減を実現するための研究が活発に行われてきた。米国 Notre Dame 大学グループは、従来のシート型 PA を用いたブレード先端隙間の流れ制御を 2006 年から開始し、風洞試験部に設置したブレード先端面の正圧面側から負圧面側に向かう流れと反対方向に誘起噴流を生成することで、流れによる全圧損失のピークで 30%、損失全体で 9% 低減する結果を示している⁽¹⁾。しかし実際のターボ機械ではタービンブレードやケーシングが金属製である場合が多く、短絡防止策や回転場への電力伝送など多くの技術課題が残されていた。

一方、研究代表者らは、絶縁被覆電線を高電圧側電極、導電性筐体や補助電極を接地側露出電極とするひも型 PA を新たに開発し、金属表面や3次元曲面に対しても短絡せず柔軟に設置可能であることを示した⁽²⁾。本手法を流れ制御に適用するため、ひも型 PA を環状タービン翼列と同軸でケーシングに埋め込み可能なリング型 PA (図1(b), WO2014/024590) を新たに考案し、低速下ではケーシングの一部に埋め込まれたリング型 PA により流れに起因する乱れ度が低減することが明らかになった。しかし、流れの抑制が行われる条件や制御メカニズムは未解明であった。

2. 研究の目的

リング型 PA の駆動により翼先端とケーシングの隙間に誘電体バリア放電 (DBD) を誘起し、流れに与える影響を定量的に評価することで、流れ低減効果を向上させるための諸条件と制御メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

風洞試験部にタービン翼列先端隙間2次元モデル及び3次元モデルを構築する。ケーシ

ング側となる試験部壁面にリング型 PA をフラッシュマウントし、隙間距離、電極形状、印加する peak-to-peak 電圧、周波数などの制御パラメータの変化が流れの空間速度分布に与える影響を粒子画像流速測定法 (PIV) で解析する。また、リング型 PA を構成する絶縁被覆電線の配置構造や多チャンネル化、翼先端エッジ形状の変化に伴う誘電体バリア放電形成パターンを多様化し、流れ抑制効果を最大化するリング型 PA の配置様式や駆動条件を見出す。

4. 研究成果

(1) 平板を用いた流れ2次元モデル

研究開始直後に、小型吹出し風洞試験部に流れ2次元モデルを構築した (図2)。試験部は 200 mm × 200 mm の矩形断面を有しており、ブレードを模擬するため、高さ調整機構付アルミニウム製平板を試験部に挿入した。アルミニウム平板は片側端面が固定され、反対側の自由端面は流れが生じる先端面とした。また、先端面と対向する試験部平板に溝部を施し、外径 1.3 mm のシリコン被覆銅線を並列で埋め込んだ。さらに表面に薄膜シリコンシートを接着することで、図2上段右に示す凹凸のない2次元モデル用リング型 PA 構造を再現した。風洞試験部には流れを安定させるためにスリット構造から流れの一部をバイパスさせ、アルミニウム平板の先端面とシリコン被覆銅線が埋め込まれた試験部下部平板の間に隙間 (d_s) を設け、流れ強度を調節した。

基本特性を把握するため、 $d_s = 1.0$ mm の隙間から噴出される最大 8 m/s 程度の流れを強制的に作り出した。先端面エッジ形状に曲率を持たないアルミニウム平板 (図3(a)の FF 形) を接地電極として用い、シリコン被

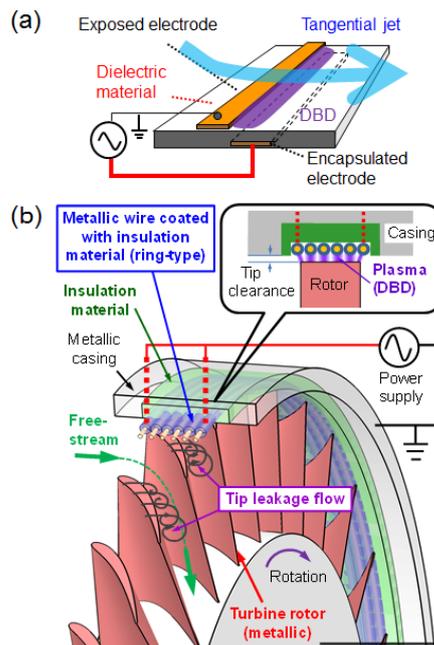


図1 プラズマアクチュエータ (PA)
(a) 従来型, (b) リング型

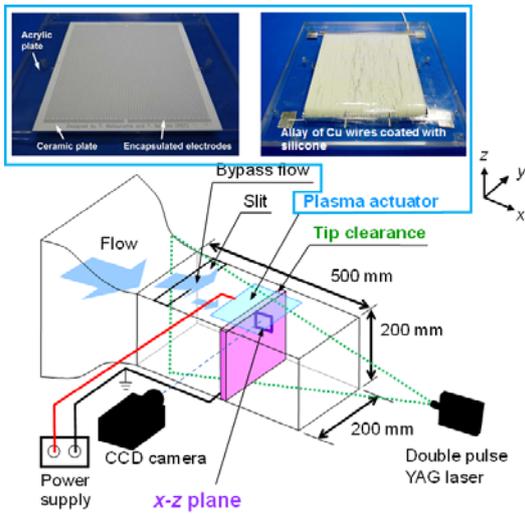


図2 漏れ流れ2次元モデル用PAおよび計測制御システム

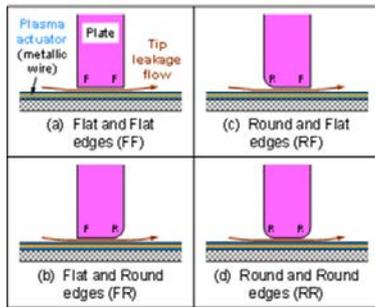


図3 アルミニウム製平板先端面の形状

覆銅線に高周波で高電圧を印加することで、隙間にDBDを発生させた。peak-to-peak電圧 (V_{p-p}) を $V_{p-p} = 12$ kVに固定し、PIV解析で漏れ流れの空間速度分布を300回平均した結果を図4に示す。図5(a)は図4の $x = 28.6$ mmにおける流速分布であり、駆動周波数 (f_p) の増加とともに $f_p \leq 14$ kHzで漏れ流れ抑制効果が大きくなり、 $f_p = 14$ kHzでは漏れ流れの最大流速が83%低減した。しかし、 $f_p = 15$ kHzでは漏れ流れが増大していることがわかる。一方、図5(b)は駆動周波数を $f_p = 8.6$ kHz固定のもので V_{p-p} を変化させた結果であり、印加電圧が $V_{p-p} = 8$ kVから12.8 kVに増加するとともに、漏れ流れ抑制効果が向上することが明らかになった。

次に、アルミニウム製平板の先端面エッジ形状の影響を調べるため、エッジに曲率を設定する場合は $R = 2.5$ mmとし、曲率を持たないエッジ (F) との組み合わせで、図3に示す4種類の供試体を試作した。本評価試験では、図2に示す隙間位置を上下反転させ、風洞試験部の下面に隙間とリング型PAを設置した。 $V_{p-p} = 12.8$ kV固定のもと、PA駆動周波数を $f_p = 14$ kHz (図6) および 16 kHz (図7) に設定し、先端エッジ形状が漏れ流れの空間速度分布に与える影響を調査した。図8(a)は $f_p = 14$ kHzのもとで $x = 28.6$ mmにおける速度分布を示しており、先端エッジ形状が両サ

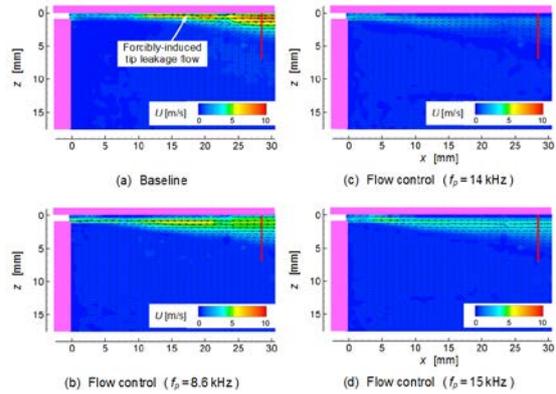


図4 漏れ流れのFF形PA駆動周波数依存性

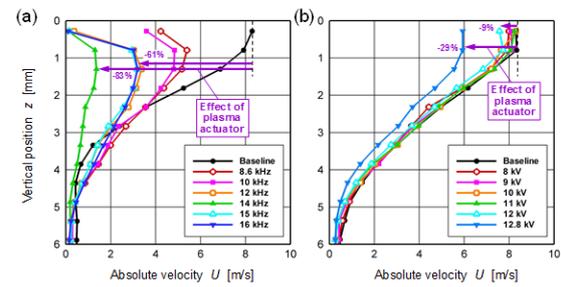


図5 漏れ流れのFF形PA駆動周波数依存性

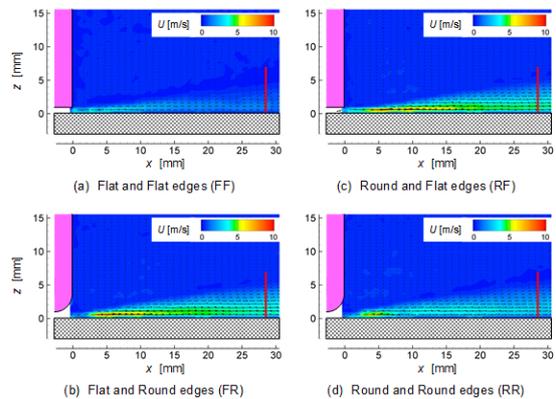


図6 漏れ流れのタービン先端エッジの影響 ($V_{p-p} = 12.8$ kV, $f_p = 14$ kHz)

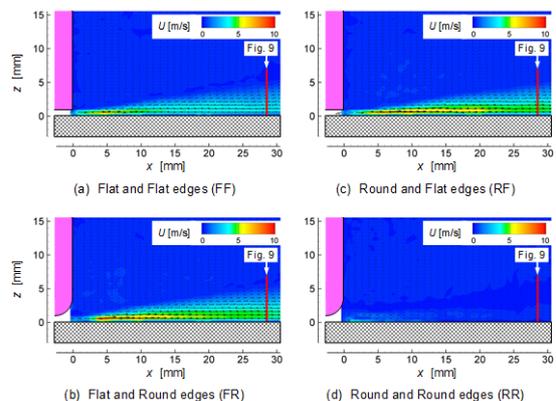


図7 漏れ流れのタービン先端エッジの影響 ($V_{p-p} = 12.8$ kV, $f_p = 16$ kHz)

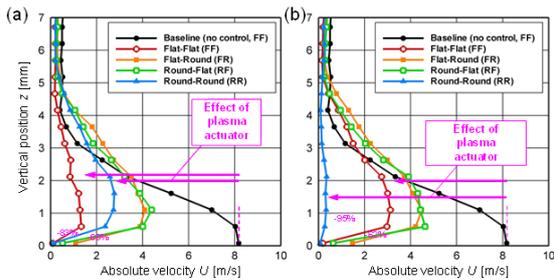


図 8 漏れ流れ制御効果のアルミニウム製平板エッジ形状依存性

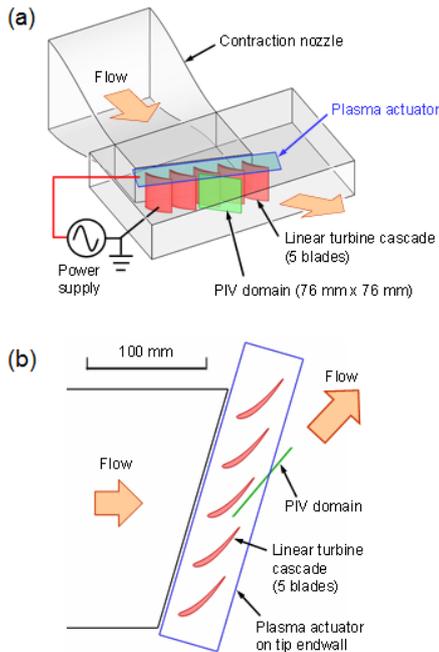


図 9 直線タービン翼列からの漏れ流れ制御

イド共に曲率を持たない FF 形が最も漏れ流れ抑制効果が高く、次いで両端に曲率を持つ RR 形の性能が高い。また、 $f_p = 16 \text{ kHz}$ では、RR 形、LL 形の順で性能が高い。特に RR 形では、図 8(b)に示すように制御なしの漏れ流れの最大流速に対して 95%の減速効果が確認された。一方、アルミニウム平板両端の形状が非対称である FR 形および RF 形を用いた場合は、これらの印加周波数の違いによらず漏れ流れ制御効果が低く、対称エッジ形状が効果的であることが明らかになった。

(2) タービン翼列からの漏れ流れ能動制御

平板を発展させ、直線翼列を用いた漏れ流れ制御実験を実施した(図 9)。シリコン被覆銅線の多線化で構築したリング型プラズマアクチュエータで問題となっていた微小な凹凸の減少を目的として、0.4 mm 厚シリコン両面銅張積層板の片面のみを電極パターンエッチングして高電圧印加用の裏面電極を形成し、タービン翼列先端面と対向する面の銅箔層はエッチングにより除去する方法を開発した。また、裏面電極は 50 μm 程度のレジストを厚膜で塗布し、裏面電極からタ

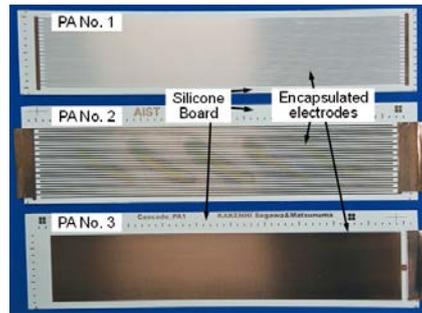


図 10 シリコン樹脂製リング型プラズマアクチュエータ

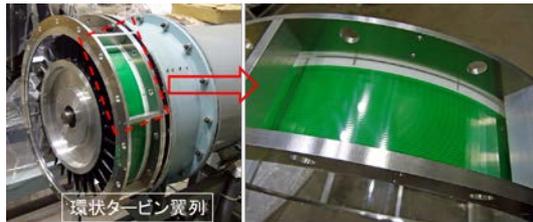


図 11 シリコン樹脂製リング型 PA のセクター化による環状タービン翼列風洞ケーシングへのフラッシュマウント

表 1 直線翼列諸元

Number of blades, N	5
Chord length, C (mm)	48.8
Axial chord length, C_{ax} (mm)	27.6
Blade height, H (mm)	75
Blade pitch, S (mm)	42.1
Inlet flow angle, α_1 (deg)	-16.2
Exit flow angle, α_2 (deg)	66.9
Turning angle, $\alpha_2 - \alpha_1$ (deg)	50.7
Stagger angle, ξ (deg)	55.9
Tip clearance, k (mm)	0.9

ービン先端面やケーシングへの沿面放電防止策を講じた。直線翼列の漏れ流れ抑制効果検証実験では、図 10 に示す 3 種類の裏面電極パターンを有するシリコン樹脂製リング型プラズマアクチュエータを用いた。本手法は図 11 に示すように環状タービン翼列風洞にも適用でき、リング型 PA のセクター化による性能評価が可能となった。

図 9(a)に示すように、吹出し風洞試験部の出口近傍に翼弦長 48.8 mm、高さ 75 mm のアルミニウム製の翼を 5 枚配置し、直線タービン翼列を形成した(表 1)。各翼の先端面とリング型 PA の隙間は $d_s = 0.9 \text{ mm}$ に設定し、翼中間流路出口における主流速度は $U_{out} = 2.2 \text{ m/s}$ および 4.4 m/s に設定した。 $U_{out} = 4.4 \text{ m/s}$ のもとで図 10 上段の PA (線幅 0.3 mm、間隔 1.0 mm) を使用し、図 9(b) に示す緑線部に導入されたレーザーシート光で可視化された流れ場断面の空間速度分布を解析した。周波数を $f_p = 10 \text{ kHz}$ に固定のもとで、制御なしと 4 条件の V_{p-p} について比較した結果を図 12 に示す。PA 非制御時に $60 \leq y \leq 70 \text{ mm}$ (タービン先端の出口近傍) に存在する低速領域は漏れ流れに起因する渦構造であり、印加電圧

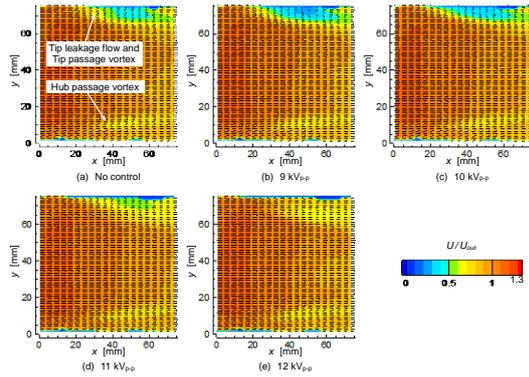


図 12 漏れ流れの印加電圧 (V_{p-p}) 依存性

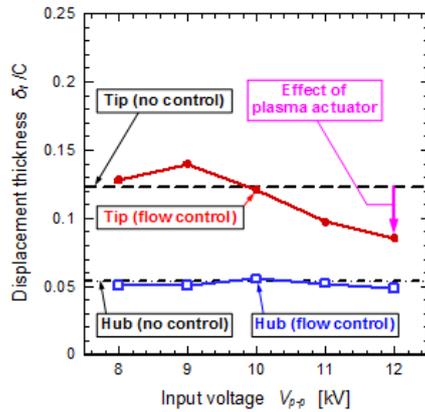


図 13 漏れ流れの印加電圧 (V_{p-p}) 依存性

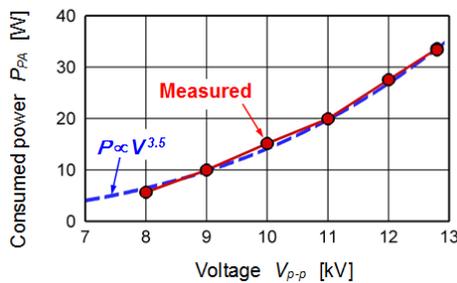


図 14 リング型 PA 消費電力の V_{p-p} 依存性

の増大とともに漏れ流れが抑制され、高い乱れ度低減効果が確認された。一方、ハブ側出口後流の $0 \leq y \leq 20 \text{ mm}$ には流路渦に起因する低速領域が存在するが、PA 駆動による影響はほとんど確認できない。図 13 は空間速度分布の PIV 解析結果から算出した排除厚さ (δ/C) の V_{p-p} 依存性であり、リング型 PA 駆動によってタービン先端側後流の排除厚さが著しく低減した。また、これらの制御効果は、主流速度が小さいほど高くなる傾向にあることが明らかになった。

(3) 漏れ流れ抑制効果の検証

タービン先端漏れ流れを抑制するための諸条件について考察する。2次元モデルにおいて、平板先端面のエッジ形状を図 3 に示す

4 条件に設定し、漏れ流れ出入口の形状が対称の場合に制御効果が高いことを示した。形状の違いにより、リング型 PA 構造が有する静電容量が変化する。本研究で使用した電源で出力される電圧は疑似矩形波であるが、FF 形で漏れ流れ抑制効果が認められた $V_{p-p} = 12.8 \text{ kV}$ 、 $f_p = 14 \text{ kHz}$ では電圧立ち上がり勾配 (dV/dt) が約 350 kV/ms 、制御効果が著しく低下した $V_{p-p} = 12.8 \text{ kV}$ 、 $f_p = 16 \text{ kHz}$ では $dV/dt > 400 \text{ kV/ms}$ であった。Nishida *et al.*によると、 $dV/dt = 300 \text{ kV/ms}$ 近傍で放電形態がコロナ型からストリーマ型に遷移し、高い電圧立ち上がり勾配では体積力が減少することが報告されている³⁾。よって、FF 型を駆動する周波数が $f_p > 14 \text{ kHz}$ では、漏れ流れを抑制するための体積力が減少したと考えられる。一方、RR 形では先端面エッジが丸められることで局所的な電界集中が FF 形と比較して弱められ、空間的に一応なプラズマが形成されたと推察される。その結果、均一で FF 型より大きな体積力が得られたため、周波数の増加とともに制御効果が高くなった可能性がある。

また、タービン翼列による漏れ流れ抑制効果の検証実験では、加工技術およびコストの問題から先端面エッジの形状は FF 形のみで評価を行った。ただし、翼列の場合は先端面の面積やエッジの総長さが平板よりも増加し、正弦波に近い印加電圧波形となった。最大印加電圧条件は、図 3 に示すように $V_{p-p} = 12.0 \text{ kV}$ 、 $f_p = 12 \text{ kHz}$ であるが、最大の電圧立ち上がり勾配は $dV/dt = 240 \text{ kV/ms}$ 程度であり、 $dV/dt = 300 \text{ kV/ms}$ より小さい値であった。そのため、体積力の減少が生じるストリーマ型放電には遷移しておらず、漏れ流れ効果は V_{p-p} 増大とともに高くなったと思われる。

次に、隙間の大きさによる制御効果の違いを考察する。これまで $d_s = 1.0 \text{ mm}$ の結果のみを報告したが、平板を用いた 2次元モデルにおいて $0.6 \leq d_s \leq 2.4 \text{ mm}$ 範囲で変化させた場合の制御効果を検証した。 $U_{out} = 10.0 \text{ m/s}$ においては、隙間が小さいほど同等の漏れ流れの減速効果が現れる印加電圧を低減でき、 $d_s = 1.0 \text{ mm}$ 以下では漏れ流れを完全に抑制できる条件も見出されたが、 $d_s > 1.0 \text{ mm}$ では制御が全くできることが多かった。これは、隙間に形成される電界が d_s の増大とともに小さくなるためであり、漏れ流れ抑制効果を向上させるためには、より大きな体積力を発生させる必要があることを示唆している。

d_s 一定のもとで漏れ流れを抑制するためには、より大きな V_{p-p} を印加することが有効である。発生する体積力と消費電力 (P_{PA}) はほぼ線形の関係にあり、本研究で用いたリング型 PA の消費電力実測値の V_{p-p} 依存性は図 14 に示すように $P_{PA} \sim V_{p-p}^{3.5}$ となり、従来型 PA と同様の傾向を示した⁴⁾。よって、より強い漏れ流れを抑制するためには、絶縁材厚みや V_{p-p} の増大に伴う電源出力の増加対策が必要である。一方、沿面放電や短絡防止策等の周辺技術を開発することも必要不可欠である。

<引用文献>

- (1) D. K. Van Ness, II *et al.*, Tip Clearance Flow Visualization of a Turbine Blade, *Proc. ASME Turbo Expo 2008*, GT2008-50703
- (2) 瀬川 武彦 他, ひも型プラズマアクチュエータ誘起噴流の流動特性, *ながれ*, 31, 479-482 (2012)
- (3) H. Nishida *et al.*, *World Academy Sci. Eng. Tech.*, 6, 254-258 (2012)
- (4) R. E. Hanson *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 115, 043301 (2014)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 松沼 孝幸, 瀬川 武彦, リング型プラズマアクチュエータによるタービン動翼の漏れ流れ制御に向けた平板基礎実験と消費電力測定, *日本ガスタービン学会誌*, 査読有, Vol. 44, No. 5, 2016, pp. 408-414, <http://www.gtsj.org/technical/contents/vol44no5-02.pdf>
- ② 松沼 孝幸, 瀬川 武彦, リング型プラズマアクチュエータを用いたタービン翼列の漏れ流れ制御における先端エッジ形状の影響, *日本ガスタービン学会誌*, 査読有, Vol.45, No.4, 2017, pp. 163-169, <http://www.gtsj.org/technical/contents/vol45no3-01.pdf>

[学会発表] (計8件)

- ① Takayuki Matsunuma, Takehiko Segawa, Influences of Tip Leakage Flow Velocity on Active Control Using a Two-Dimensional Model of Ring-Type Plasma Actuator, *Asian Congress on Gas Turbines 2014 (ACGT2014)*, August 19, 2014, Seoul National University (South Korea)
- ② 松沼 孝幸, 瀬川 武彦, リング型プラズマアクチュエータを用いたタービン翼列チップクリアランス流れ制御における壁面温度計測, *日本機械学会 2014 年度年次大会*, 2014 年 9 月 10 日, 東京電機大学 (東京都足立区)
- ③ 松沼 孝幸, 瀬川 武彦, リング型プラズマアクチュエータを用いたタービン翼列の漏れ流れ制御における先端形状の影響, 第 43 回日本ガスタービン学会定期講演会, 2015 年 9 月 9 日, 米子コンベンションセンター (鳥取県米子市)
- ④ 鈴木 大樹, 藤野 貴康, 松沼 孝幸, 瀬川 武彦, 流体機械への実装に向けたプラズマアクチュエータの開発, *プラズマアクチュエータ研究会第 3 回シンポジウム*, 2015 年 12 月 4 日, 鳥取大学鳥取地区キャンパス (鳥取県鳥取市)
- ⑤ 瀬川 武彦, 松沼 孝幸, コーティング技術を用いたプラズマアクチュエータの開発, *日本機械学会 2016 年度年次大会*,

2016 年 9 月 12 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)

- ⑥ 大橋 俊之, 石川 仁, 松沼 孝幸, 瀬川 武彦, リング型プラズマアクチュエータを用いた遠心圧縮機における漏れ流れ抑制効果の検証, 第 45 回日本ガスタービン学会定期講演会, 2016 年 10 月 26 日, ホテルリッチ&ガーデン酒田 (山形県酒田市)
- ⑦ 瀬川 武彦, 松沼 孝幸, 廣瀬 伸吾, 表面に段差のないフレキシブルプラズマアクチュエータの性能評価, *日本機械学会 2017 年度年次大会*, 2017 年 9 月 6 日, 埼玉大学 (埼玉県さいたま市)
- ⑧ Takayuki Matsunuma, Takehiko Segawa, Effects of Tip Clearance Size on Active Control of Turbine Tip Clearance Flow Using Ring-type DBD Plasma Actuators, *17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC 17)*, December 19, 2017, Hyatt Regency Maui (USA)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: リング型プラズマアクチュエータの先端形状

発明者: 松沼 孝幸, 瀬川 武彦

権利者: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2015-177086

出願年月日: 平成 27 年 9 月 7 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<https://staff.aist.go.jp/t-segawa/segawa.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀬川 武彦 (SEGAWA, Takehiko)

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: 50357315

(2)研究分担者

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