

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

Flat Plate Experiments and Consumed Power Measurements for Active Control of Tip Clearance Flow of a Turbine Rotor Using Ring-type Plasma Actuators

松沼 孝幸^{*1}
MATSUNUMA Takayuki

瀬川 武彦^{*1}
SEGAWA Takehiko

ABSTRACT

Innovative “ring-type” dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators have been developed to facilitate active control of the tip leakage flow of turbomachinery. The ring-type plasma actuators consisted of metallic wires coated with insulation material and embedded in a tip casing wall made of insulation material. In order to construct a two-dimensional model of the tip leakage flow, a flat plate was inserted with a certain clearance to the rectangular test section of a wind tunnel, and velocity distributions near the plate tip regions were analyzed by particle image velocimetry (PIV). The forcibly-induced tip leakage flow was successfully dissipated by means of the plasma actuator flow control at fixed peak-to-peak voltage, $V_{p-p} = 12.8$ kV, and various input frequencies from 8.6 kHz to 16 kHz. The most effective frequency for the reduction of the tip leakage flow was 14 kHz. The evaluation of consumed power was also carried out using V-Q Lissajous method. In the flat plate experiments, the consumed power for reducing tip leakage flow with 10 m/s tip leakage flow was estimated to be 55 Watts.

Key words : プラズマアクチュエータ, 誘電体バリア放電, 能動制御, タービン, 翼先端隙間, 漏れ流れ, 消費電力

Plasma actuator, DBD, Active flow control, Turbine, Tip clearance, leakage flow, Consumed power

1. はじめに

誘電体バリア放電 (DBD) プラズマアクチュエータは、絶縁体を挟んだ電極間に高周波の高電圧を加えることにより局所的にプラズマを発生させ、翼表面に沿った流れを誘起することができる。機械的な可動部を持たず、構造がシンプルかつ小型軽量であるため、次世代の能動制御デバイスとして有望視され、近年盛んに研究されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

一方、圧縮機やタービンの翼列は、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漏れ流れ (チップクリアランス流れ) は、空力性能を低下させる大きな原因の1つであるため、これまでの多くの研究が

行われている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。最近では、タービン翼列の漏れ流れを抑えるためにプラズマアクチュエータが用いられている⁽⁷⁾。圧縮機翼列でも、サージマージン改善や剥離抑制にプラズマアクチュエータを適用する研究が報告されている^{(8),(9)}。

産総研では、新たに開発した「リング型プラズマアクチュエータ」⁽¹⁰⁾ (図1) を用いて、チップクリアランス流れを抑制するための研究開発を実施している^{(11),(12)}。前報⁽¹²⁾では、低速の漏れ流れ (1 m/s) での実験から、漏れ流れを低減できることを示した。今回は、平板を用いた基礎実験において、漏れ流れの流速を10 m/sに増加させて、印加電圧と周波数を変化させた場合の漏れ流れ抑制効果を調べるとともに、V-Qリサーチ法を用いた消費電力の評価も実施した。

2. リング型プラズマアクチュエータ

リング型プラズマアクチュエータの概略図を図1に、断面図を図2に示す。このアクチュエータは、タービン動翼のチップ側壁面にリング状に設置されるもので、絶縁材料の中に絶縁被覆ワイヤを埋め込んだ内部構造に

原稿受付 2016年3月4日

校閲完了 2016年8月29日

*1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
省エネルギー研究部門
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

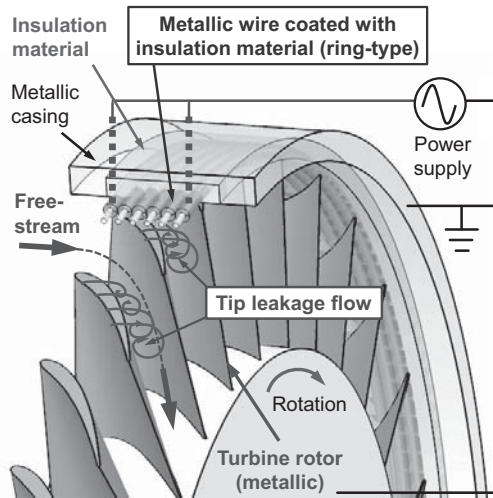


Fig. 1 Ring-type plasma actuator

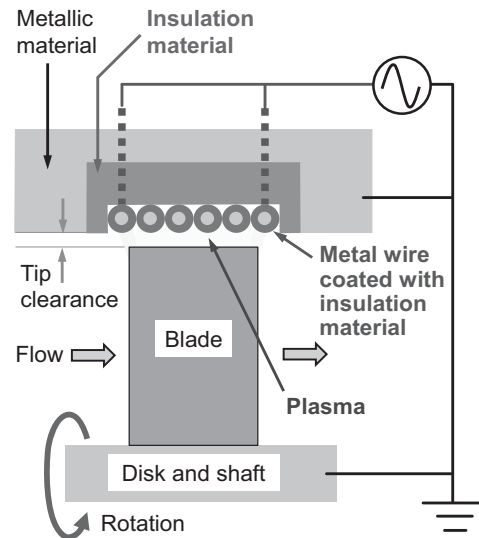


Fig. 2 Cross section of ring-type plasma actuator

なっている。安全性を確保するために、タービン動翼・軸・ケーシングなどの金属部品を接地する。絶縁被覆ワイヤに高周波・高電圧を加えることによって、タービン動翼先端が露出電極として機能する。その結果、絶縁被覆ワイヤとタービン動翼先端の間にDBDが発生する。チップクリアランスを通過する漏れ流れが抑制されると着想した理由として、(1) 漏れ流れは、翼の正圧面側から負圧面側に向かうケーシングに沿った流れであること、(2) DBDによりイオン化された空気には、翼先端からケーシング内の絶縁被覆ワイヤに向かう電気力線に沿って、半径方向の体積力が与えられること、(3) 半径方向の体積力は、漏れ流れに対して常に直角方向に作用するため、漏れ流れの抵抗となること、が挙げられるが、現段階では推論の域を出ないため、定量的な解析を進める必要がある。

なお、本プラズマアクチュエータは、軸流タービンのみでなく、ラジアルタービン、軸流圧縮機、遠心圧縮機など、様々なターボ機械の動翼に適用することができる。

3. 実験方法

リング型プラズマアクチュエータによる漏れ流れ抑制効果を検証するために、前報に続き、平板を用いて2次元モデルでの実験を行った。図3に、実験の概要を示す。小型の吹き出し式風洞に接続されたアクリル製の測定部（流路の幅200 mm × 高さ200 mm × 長さ500 mm）の中央に、上側に1 mmのチップクリアランスを開けた平板を設置し、チップクリアランスを通る漏れ流れを再現する。流路面積が少なすぎて風洞の流れが不安定になることを防止するため、上流にスリットを設けて流れをバイパスさせる。送風機の回転数を調整することにより、チップクリアランスを通過する流速10 m/s程度の漏れ流れを定常的に生成できる。この流速は、前報¹²⁾の流速（約1 m/s）より10倍程度速くなっている。

上側の壁面には、プラズマアクチュエータ（幅140

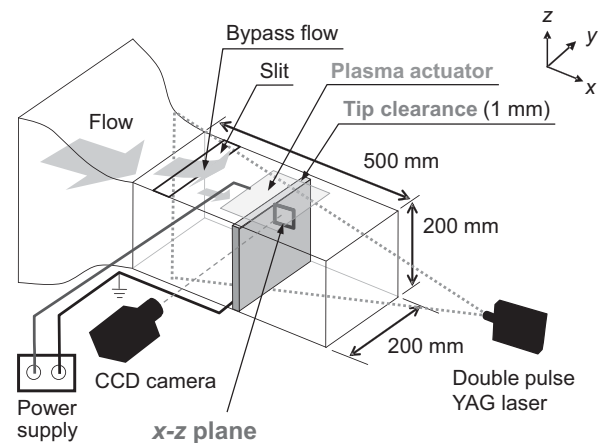
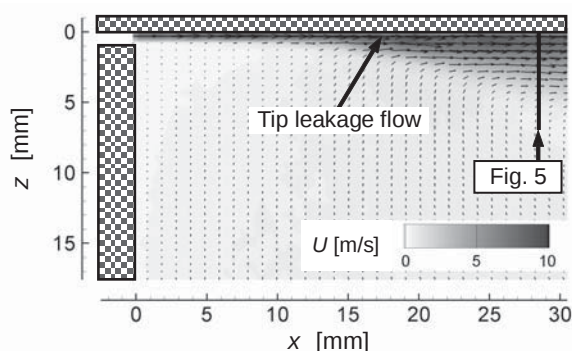


Fig. 3 Measurement system for flat plate with tip clearance

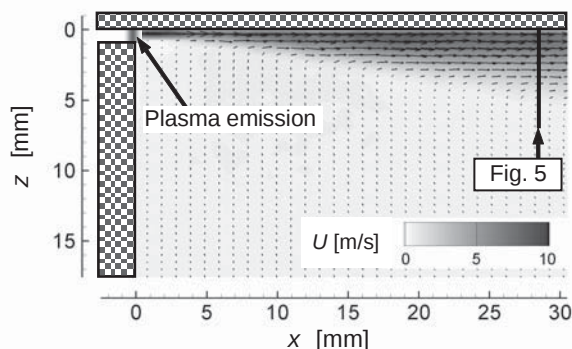
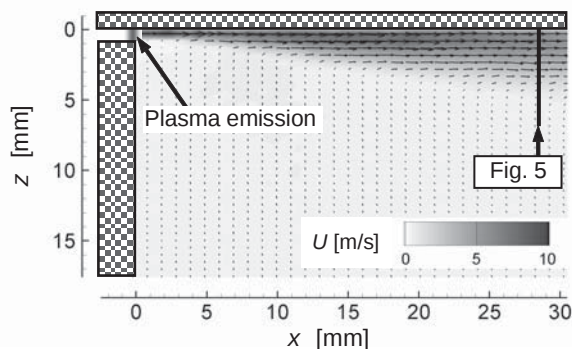
mm、長さ160 mm、絶縁被覆ワイヤ外径1.3 mm)を埋め込み、高電圧高周波パルス電源 (PSI製、PG-1040F)を用いて、電圧 $V_{p-p} = 8 \text{ kV} \sim 12.8 \text{ kV}$ (peak to peak)、周波数 $f_p = 8.6 \text{ kHz} \sim 16 \text{ kHz}$ の疑似矩形波を印加し、アクチュエータと平板先端の間にプラズマを生成する。まず、前報と同様に、 $f_p = 8.6 \text{ kHz}$ に固定し、電圧を $V_{p-p} = 8 \text{ kV}$ から12.8 kVに変化させたが、今回の実験では、流速の増加に伴って投入電力を増やす必要が生じたため、電圧を $V_{p-p} = 12.8 \text{ kV}$ (使用した電源の最大値)に固定し、周波数を変化させる。

x-z平面の平板先端付近の速度場を、粒子画像流速測定法 (PIV) により計測する。PIV計測は、風洞上流から注入した煙を、測定部下流に設置したダブルパルスNd:YAGレーザー (Litron Lasers製、NANO S 30-15 PIV, 15 mJ/pulse) により可視化し、測定部上部に設置したクロスコリレーションカメラ (TSI製、PIVCAM 13-8) により撮影する。今回の実験では、瞬時速度分布を200回測定し、平均値を求める。

なお、2次元PIVで測定できるのは「計測平面内の絶



(a) Baseline

(b) Flow control ($V_{p-p} = 12$ kV, $f_p = 8.6$ kHz)(c) Flow control ($V_{p-p} = 12.8$ kV, $f_p = 8.6$ kHz)Fig. 4 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various DBD-PA input voltages ($f_p = 8.6$ kHz)

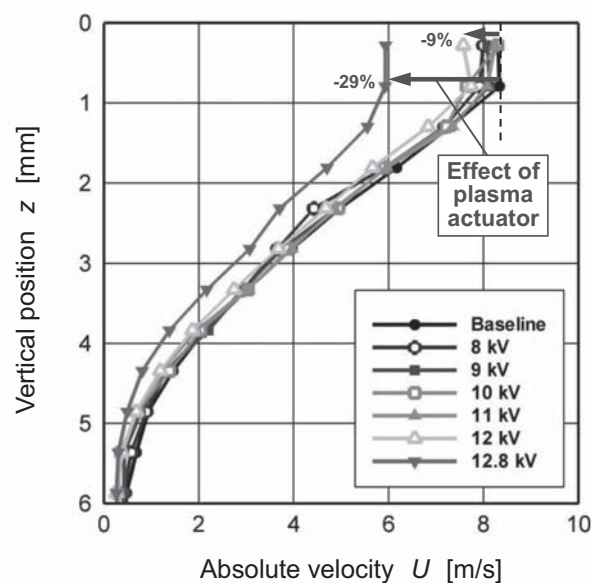
対速度」であるが、測定部の y 方向の対称性から、計測面に直交する速度成分 (y 方向速度成分) は無視できるほど少ないと考えて、「計測平面内の絶対速度」を、本論文では「絶対速度」と表現している。

4. 実験結果と考察

4.1 平板の漏れ流れ抑制実験

4.1.1 印加電圧の影響

前報¹⁾と同様に周波数を $f_p = 8.6$ kHz に固定し、印加する peak-to-peak 電圧を $V_{p-p} = 8$ kV から 12.8 kV まで変化させる。図 4 に、絶対速度分布を示す。図 4(a) は、基準 (制御なし) での速度分布であり、上側壁面と平板の間のチップクリアランスを通過した漏れ流れが観察できる。

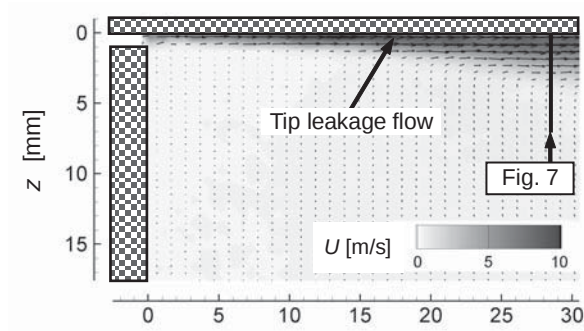
Fig. 5 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various DBD-PA input voltages ($f_p = 8.6$ kHz) at $x = 28.6$ mm

$V_{p-p} = 8$ kV から 11 kV の範囲でプラズマアクチュエータを駆動した場合、漏れ流れの変化は見られなかった。図 4(b) は、 $V_{p-p} = 12$ kV まで上昇させた場合の速度分布であり、漏れ流れがわずかに減少していることがわかる。図 4(c) は、 $V_{p-p} = 12.8$ kV の場合の速度分布であり、漏れ流れを減少させる効果が高くなっている。

印加電圧の違いによる変化を定量的に観察するため、図 4 の漏れ流れ出口から 28.6 mm 下流 (図 4 の赤線) における絶対速度の垂直方向 (z 軸方向) 分布を、図 5 に示す。最大流速は、流れ制御なしの場合 8.3 m/s であるが、 $V_{p-p} = 12$ kV では 7.6 m/s (9% 減少) となっている。最も効果が高かった $V_{p-p} = 12.8$ kV では、最大流速を 5.9 m/s (29% の減少) にまで抑制する。しかし、前報で得られた流速 1 m/s の漏れ流れを電圧 $V_{p-p} = 7$ kV、周波数 $f_p = 8.6$ kHz で完全に抑制できた結果と比べると、漏れ流れ低減効果が少ない。

4.1.2 印加周波数の影響

投入電力を増加させた場合に、漏れ流れ抑制効果を高められる可能性がある。本実験で使用した高電圧電源は、 $V_{p-p} = 12.8$ kV が最大であるため、周波数 f_p を増大させることで投入電力を増加させる。図 6 に、各入力周波数での絶対速度分布を示す。図 6(a) は、基準 (制御なし) での速度分布、図 6(b)~(g) は、プラズマアクチュエータによる流れ制御を行った場合の速度分布であり、プラズマアクチュエータへの印加周波数を 8.6 kHz から 16 kHz まで変化させた結果を示している。周波数 8.6 kHz の図 4(b) では、制御なしの図 6(a) と比べて、漏れ流れがわずかに減少している。周波数を 12 kHz に増大させた図 6(d) では、さらに漏れ流れが減少する。図 6(e) (周波数 14 kHz) では、漏れ流れの減少が顕著である。一方、さらに周波数を高くした図 6(f) (周波数 15 kHz) と図 6(g)



(a) Baseline

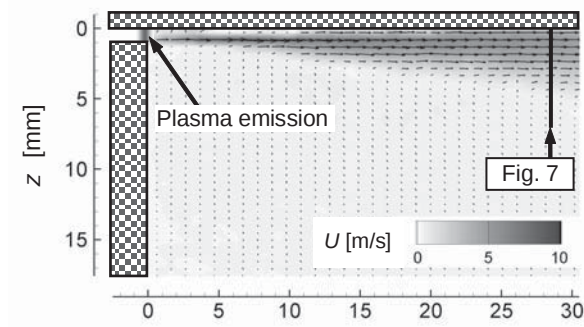
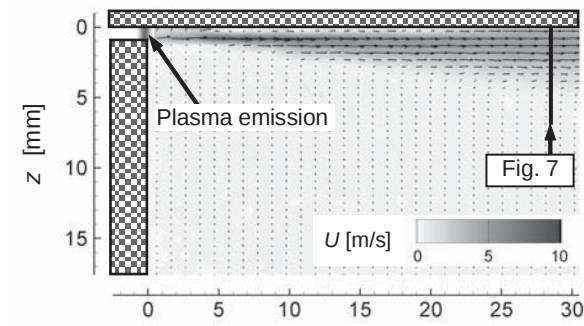
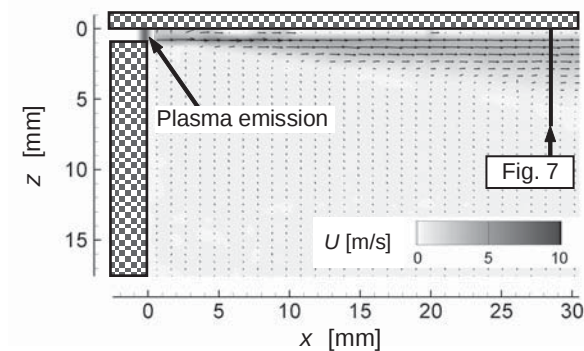
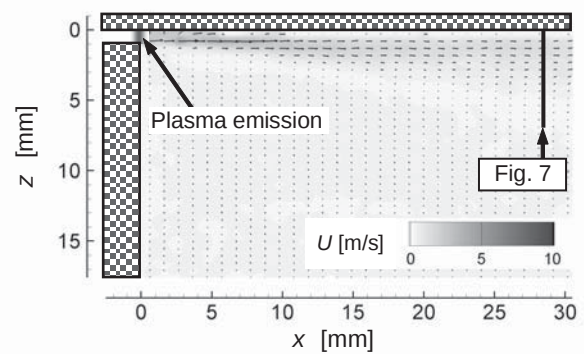
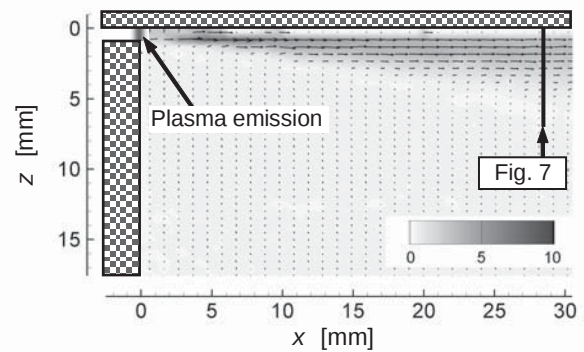
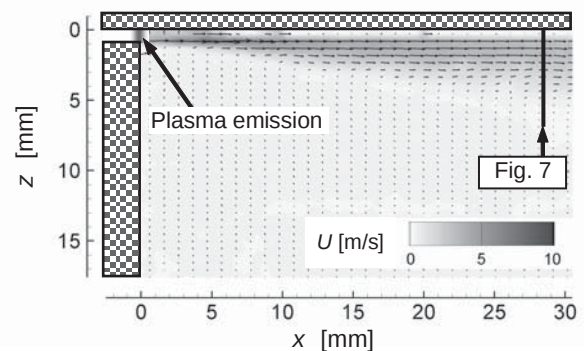
(b) Flow control ($f_p = 8.6$ kHz)(c) Flow control ($f_p = 10$ kHz)(d) Flow control ($f_p = 12$ kHz)(e) Flow control ($f_p = 14$ kHz)(f) Flow control ($f_p = 15$ kHz)(g) Flow control ($f_p = 16$ kHz)

Fig. 6 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various DBD-PA input frequencies ($V_{p-p} = 12.8$ kV)

(周波数16 kHz)では、漏れ流れの低減効果が減少していることがわかる。この原因は現時点では不明であり、今後さらなる調査が必要である。

周波数 f_p の違いによる変化を定量的に観察するため、図6の漏れ流れ出口から28.6mm下流(図6の実線)における絶対速度の垂直方向(z 軸方向)分布を図7に示す。流れ制御なしの場合、最大流速は8.3 m/sであるが、プラズマアクチュエータを駆動した場合、 f_p の増加とともに漏れ流れが抑制され、最も効果が高かった $f_p = 14$ kHzでは、最大流速を1.4 m/s (83 %の減少)にまで抑制することに成功している。一方、さらに高い周波数では、 $f_p = 16$ kHzで最大流速が3.2 m/s (61 %の減少)となり、 $f_p = 14$ kHzの時よりも漏れ流れの低減効果が少な

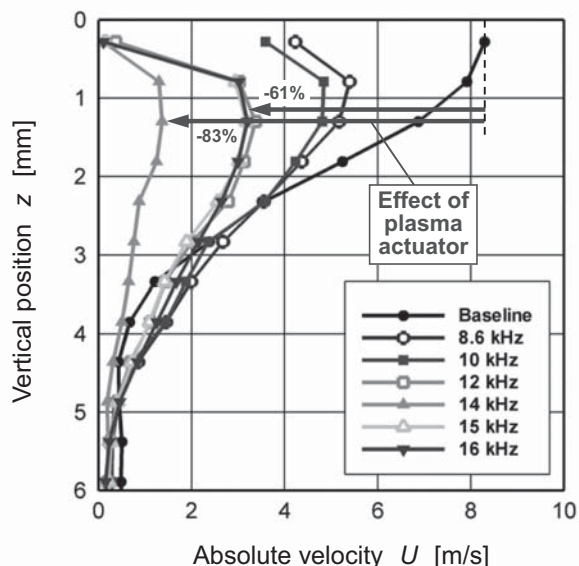


Fig. 7 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various DBD-PA input frequencies ($V_{p-p} = 12.8$ kV) at $x = 28.6$ mm

くなっている。

漏れ流れの制御効果が14 kHzで最大になる理由として、放電モードの変化が考えられる。Nishida *et al.*はシート型プラズマアクチュエータにおけるプラズマ進展シミュレーションを行い、電圧一定のもとで周波数を増加させた場合に、電圧立ち上がり勾配（正勾配）が $dV/dt \approx 300$ kV/msを境にプラズマ形態がコロナ型放電からストリーマ型放電に移り、 $dV/dt > 300$ kV/msでは体積力が一時的に減少することを報告している^[3]。本研究における印加電圧は図9に示すような疑似矩形波形であるため、 $V_{p-p} = 12.8$ kV, $f_p = 14$ kHzの印加電圧条件で計測した波形から電圧立ち上がり勾配を算出すると $dV/dt \approx 350$ kV/msとなり、Nishida *et al.*の結果と近い値となった。よって、 $f_p > 14$ kHzでは放電形態がコロナ型からストリーマ型に変化した結果、体積力の現象により漏れ流れ低減効果が低減した可能性がある。

4.2 消費電力の評価

誘電体バリア放電を誘起するために必要な電力は、V-Qリサージュ法を用いて評価する^[14]。消費電力計測システムの等価回路を図8に示す。絶縁被覆ワイヤとタービン翼先端の隙間に誘起される誘電体バリア放電は、時間空間的に非一様であると考えられるため、リング型PAの場合は単純な並行平板間に誘起される誘電体バリア放電の等価回路より複雑になるが、アクチュエータ全体静電容量 C_{PA} はLCRメータ（Agilent, UI733C）による簡易的な計測で26 pF程度であることが明らかになった。また、 C_{PA} に対して十分大きいコンデンサ（ $C_r \approx 100$ nF）を直列接続し、アクチュエータ全体の両端電圧 V_{PA} およびコンデンサの両端電圧 V_r を測定する。 C_{PA} にチャージされる電荷（ $Q_{PA} = C_{PA}V_{PA}$ ）は C_r にチャージされる電荷と同じであるため（ $Q_r = C_rV_r = Q_{PA}$ ）、図9に示す V_{PA}

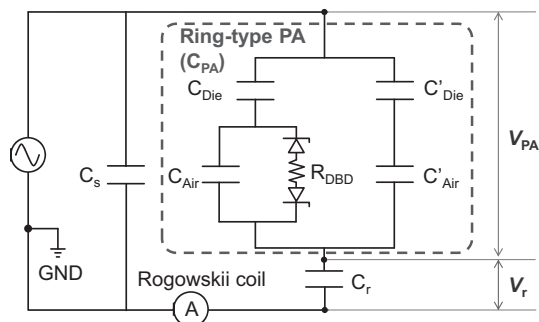


Fig. 8 Equivalent circuit for evaluation of power consumption

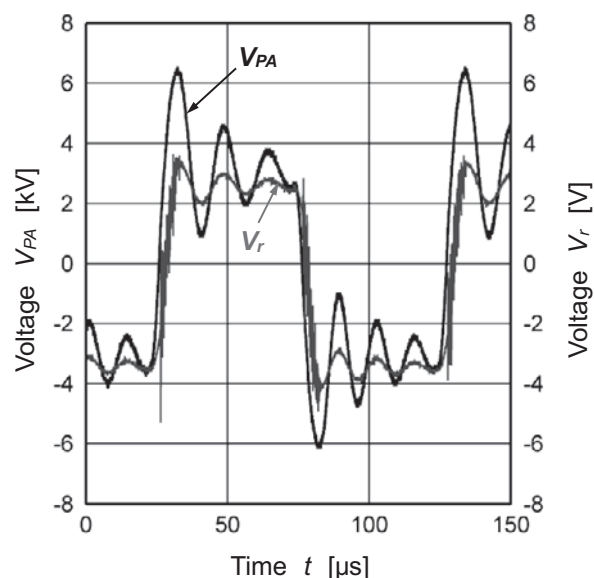


Fig. 9 Time series of voltages V_{PA} and V_r

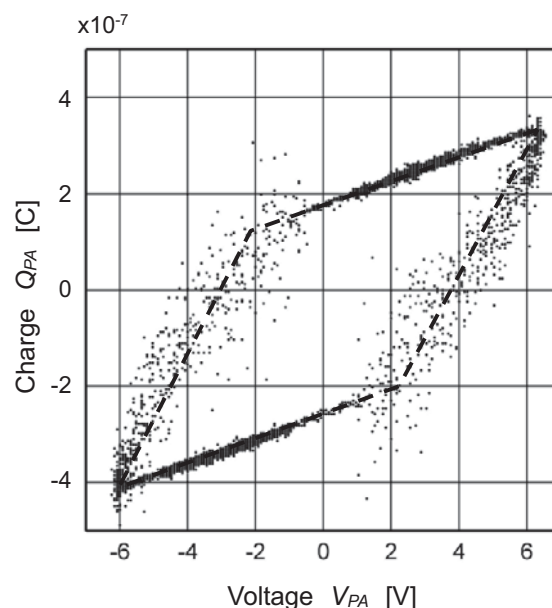


Fig. 10 V-Q Lissajous figure

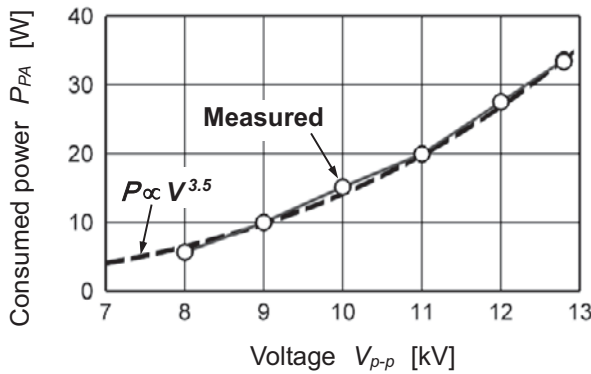


Fig. 11 Consumed power as a function of input voltage for $f_p = 8.6$ kHz

と V_r の時系列測定から V - Q リサージュ図形が得られ、消費電力は図10の破線で囲まれたリサージュ図形の面積と周波数の積として評価できる。

リング型プラズマアクチュエータに印加する周波数を $f_p = 8.6$ kHz に固定した場合の消費電力の入力電圧依存性を、図11に示す。消費電力は、電力の増大とともに増加する。従来のシート型プラズマアクチュエータでは、消費電力は電圧の3.5乗に比例すると報告されている¹⁵⁾ため、実験結果を近似する3.5乗の曲線を図中に示す。本研究のリング型プラズマアクチュエータでも、3.5乗則が適用できることがわかる。

次に、印加電圧を $V_{p-p} = 12.8$ kV に固定した場合の消費電力の周波数依存性を、図12に示す。消費電力は周波数の増大とともに単調増加するが、 $13 \leq f_p \leq 16$ kHz では増加率がやや減少している。一般的なシート型プラズマアクチュエータでは、消費電力は周波数の1乗～1.5乗に比例すると報告されている¹⁵⁾が、リング型プラズマアクチュエータは1乗に近い結果となる。図6のように、周波数 $f_p \leq 14$ kHz では周波数の増加とともに漏れ流れ抑制効果が高まることから認められるため、本実験条件で最大流速が約10 m/sの漏れ流れを抑制するのに必要な電力は、約55 Wと評価することができる。平板先端と対向する絶縁被覆ワイヤは全長1.07 mであったため、絶縁被覆ワイヤの単位長さ当たりの消費電力は51 W/mとなる。

5. まとめ

リング型プラズマアクチュエータの基本性能を把握するために、平板の漏れ流れ（チップクリアランス流れ）を抑制する基礎実験を行った。漏れ流れの流速を既報の10倍に増加させた条件（約10 m/sの漏れ流れ）において、PIV計測による速度分布から、印加交流電圧の周波数 f_p の違いによりリング型プラズマアクチュエータの漏れ流れ抑制効果がどのように変化するかを明らかにした。プラズマアクチュエータの印加電圧を $V_{p-p} = 12.8$ kV に固定し、周波数を変化させた結果、 $f_p = 14$ kHz の時に最も効果が高く、漏れ流れの流速ピークを83%減少させるこ

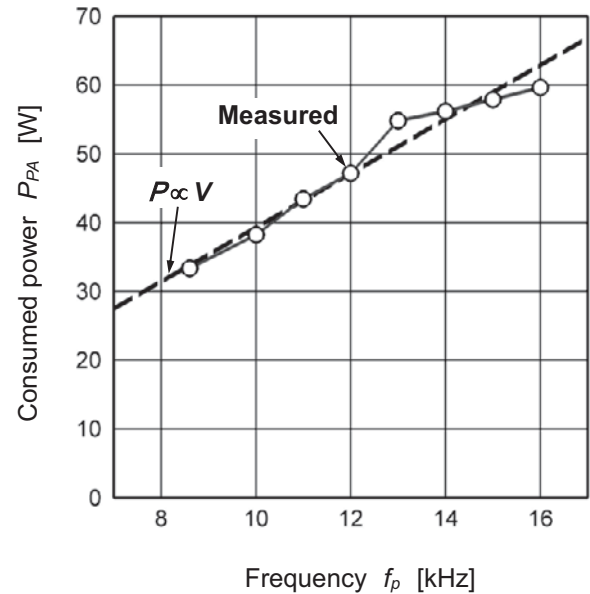


Fig. 12 Consumed power as a function of frequency for $V_{p-p} = 12.8$ kV

とができた。

さらに、 V - Q リサージュ法を用いた電荷測定からプラズマアクチュエータの消費電力を算出した。消費電力は、入力電圧の3.5乗、周波数の1乗に比例した。本実験条件において、最大流速が約10 m/sの漏れ流れを抑制するのに必要な電力は、約55 W（絶縁被覆ワイヤの単位長さ当たり51 W/m）と評価することができた。

謝 辞

本研究は、JSPS科研費（基盤研究（B）、26289040）の助成により行われた。消費電力の評価は、筑波大学大学院の鈴木大樹氏に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) Corke, T. C., Enloe, C. L., Wilkinson, S. P., "Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, (2010), pp. 505-529.
- (2) Roth, J. R., Sherman, D. M., Wilkinson, S. P., "Boundary Layer Flow Control with A One Atmosphere Uniform Glow Discharge," AIAA Paper, No. 98-0328, (1998).
- (3) 深瀬康二, 山田俊輔, 石川仁, "プラズマアクチュエータの基礎と研究動向", ながれ, Vol. 29, No. 4, (2010), pp. 243-250.
- (4) Morphis, G., and Bindon, J. P., "The Performance of a Low Speed One and Half Stage Axial Turbine with Varying Rotor Tip Clearance and Tip Gap Geometry," ASME Paper, No. 94-GT-481, (1994).
- (5) Sjolander, S. A., "Overview of Tip-Clearance Effects in Axial Turbines," von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1997-01, Secondary and Tip-Clearance Flows in Axial Turbines, (1997), pp. 1-29.

- (6) Matsunuma, T., "Effects of Reynolds Number and Freestream Turbulence on Turbine Tip Clearance Loss," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 128, No. 1, (2006), pp. 166-177.
- (7) Van Ness II, D. K., Corke, T. C., Morris, S. C., "Tip Clearance Flow Visualization of a Turbine Blade Cascade with Active and Passive Flow Control," ASME Paper, No. GT2008-50703, (2008).
- (8) De Giorgi, M. G., Pescini, E., Marra, F., and Ficarella, A., "Experimental and Numerical Analysis of a Micro Plasma Actuator for Active Flow Control in Turbomachinery," ASME Paper, No. GT2014-25337, (2014).
- (9) Saddoughi, S., Bennett, G., Boespflug, M., Puterbaugh, S. L., and Wadia, A. R., "Experimental Investigation of Tip Clearance Flow in a Transonic Compressor with and without Plasma Actuators," ASME Paper, No. GT2014-25294, (2014).
- (10) Segawa, T., Matsunuma, T., and Jukes, T., "Surface Plasma Actuator," 国際公開番号 WO/2014/024590 (2014).
- (11) Matsunuma, T., and Segawa, T., "Active Tip Clearance Control for an Axial-flow Turbine Rotor Using Ring-Type Plasma Actuators," ASME Paper, No. GT2014-26390, (2014).
- (12) 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環状タービン翼列チップクリアランス流れの能動制御", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 3, (2016), pp. 174-181.
- (13) Nishida, H., Nonomura, T., Abe, T., "Characterization of Electrohydrodynamic Force on Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator Using Fluid Simulation," World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, No. 11 (2012), pp. 254-258.
- (14) Kriegseis, J., Möllera, B., Grundmann, S., Tropea, C., "Capacitance and Power Consumption Quantification of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators," Journal of Electrostatics, Vol. 69, No. 4, (2011), pp. 302-312.
- (15) Murphy, J. P., Kriegseis, J., and Lavoie, P., "Scaling of Maximum Velocity, Body force, and Power Consumption of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators via Particle Image Velocimetry," Journal of Applied Physics, Vol. 113, 243301 (2013).