

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

Effects of Tip Edge Shapes on Turbine Tip Clearance Flow Control Using Ring-type Plasma Actuators

松沼 孝幸*¹
MATSUNUMA Takayuki

瀬川 武彦*¹
SEGAWA Takehiko

ABSTRACT

Ring-type dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators have been developed to facilitate active control of the tip leakage flow of a turbine rotor. For the fundamental experiments using flat plates with 1 mm tip clearance, particle image velocimetry (PIV) was used to obtain velocity distributions near the plate tip region. In this study, effects of tip shapes of the flat plate were examined using four plates with flat and flat edges (FF), flat and round edges (FR), round and flat edges (RF), round and round edges (RR). The forcibly-induced tip leakage flow was decreased by means of the plasma actuator flow control at constant input peak-to-peak voltage, 12.8 kV, and various frequencies from 10 kHz to 16 kHz. The most effective tip shapes were the FF-type under the frequency of 14 kHz, and the RR-type for the higher frequency of 16 kHz.

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, 先端形状

Plasma actuator, DBD, Active flow control, Turbine, Tip clearance, Leakage flow, Tip shape

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、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、構造が簡単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⁾。現状では、プラズマアクチュエータが誘起する流体力は他の能動制御デバイスと比較して低いことが課題であるが、電極構造や印加電圧波形の工夫により着実に改善・進歩を遂げている。例えば、三電極 (Trielectrode, TED) プラズマアクチュエータでは、露出電極より下流側にバイアス電圧を印加する電極を追加し、推力の増加や誘起ジェット噴出方向の制御に成功している^{(4),(5)}。また、プラズマアクチュエータには両極性の交流電圧を印加することが一般的であるが、DC電源を 1 kHz 程度の高周波で ON/OFF することで単極性パルス電圧を印加し、従

来の数十倍の推力が得られるという最新の報告⁽⁶⁾があり、プラズマアクチュエータの飛躍的な性能向上が期待されている。

一方、圧縮機やタービンは、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おり⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾、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を用いる研究も行われている⁽¹⁰⁾。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も行われ⁽¹¹⁾、遷音速圧縮機でも 4 % のサージマージン改善が報告されている⁽¹²⁾。

産総研では、新開発の「リング型プラズマアクチュエータ」(図 1) を用いて、タービン動翼の漏れ流れを抑制する実験を行っている。前報^{(13),(14)}では、環状タービン動翼と単独翼の実験で、プラズマ発光と漏れ流れ低減効果を調べた後、平板を用いた 2 次元モデルで 1 m/s から 10 m/s の範囲の漏れ流れを抑制できることを実証した。

原稿受付 2016 年 4 月 19 日

査読完了 2017 年 4 月 6 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

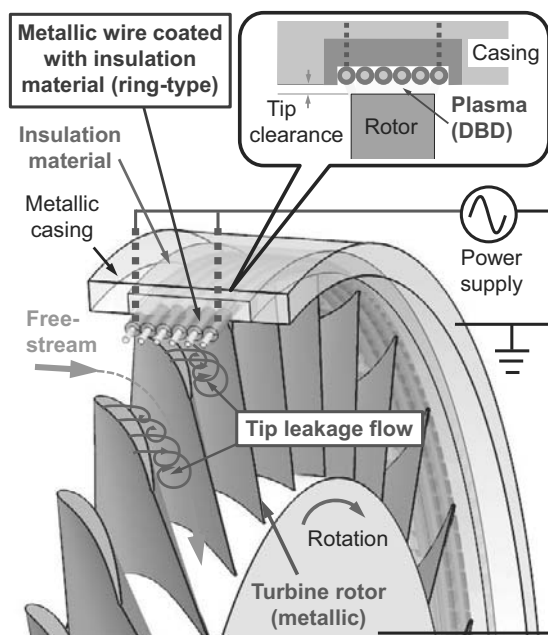


Fig. 1 Ring-type plasma actuator

今回は、平板を用いた2次元モデル実験において、平板先端のエッジを丸めた形状での実験を行い、先端エッジ形状が漏れ流れの抑制効果に与える影響を調べた。この背景として、米ペンシルバニア州立大学で行われたタービン翼の先端形状の影響を調べた研究⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾で、翼負圧面側（漏れ流れの出口側）を面取りした断面形状にすると、漏れ流れが低減したことが挙げられる。リング型プラズマアクチュエータでも、先端形状を変えることにより、正圧面側（入口側）と負圧面側（出口側）のプラズマの強度や空間分布に変化を与え、漏れ流れ低減効果を高められる可能性があることが、本研究を実施する動機となっている。

2. リング型プラズマアクチュエータ

図1に、リング型プラズマアクチュエータの構造を示す。このアクチュエータは、タービン動翼のケーシング（チップ側壁面）内にリング状に設置されるもので、絶縁材料に絶縁被覆ワイヤを埋め込んだ内部構造になっている。タービン動翼・軸・ケーシングなどの風洞全体は金属製であり、全体をグランド電極として接地する。絶縁被覆ワイヤに高周波・高電圧を加えることによって、絶縁被覆ワイヤとタービン動翼先端の間にプラズマ（誘電体バリア放電）が発生し、漏れ流れに体積力を与えることができる。プラズマによって生成される荷電粒子は、場の電界によって力を受け、電気力線に沿って移動する。これらの荷電粒子が存在する微小空間における力の総和として現れる体積力により、翼先端から壁面（絶縁被覆ワイヤ）に向かう流れを誘起するため⁽¹³⁾、漏れ流れに対して直角方向に働く力となり、漏れ流れを抑制する効果を生み出すと考えられる。プラズマは、チップクリアランスの中間部よりも電界が集中する端面に強く発生する

ことから、端面近くでのプラズマ発生が漏れ流れ抑制に大きな役割を果たしている。

3. 実験方法

図2に、平板を用いた基礎実験の概要を示す。吹き出し式小型風洞に接続されたアクリル製の測定部（流路の幅200mm × 高さ200mm × 長さ500mm）の中央にアルミ平板を設置し、下側に1mmの隙間を空けて、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、平板上流の上側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900rpmに設定し、チップクリアランスを通過する流速10m/s程度の漏れ流れを作り出す。なお、前報までは平板の上側にあったチップクリアランスを、今回からは下側に移動し、隙間を微調整できる構造に改良している。通常のチップクリアランス流れとは、先端と壁面の上下関係が逆になっていることに注意を要する。下側の壁面には、外径1.3mmの絶縁被覆ワイヤを流れ方向に100本ほど埋め込んだプラズマアクチュエータ（設置面積140mm × 140mm）を設置する。高電圧高周波パルス電源（PSI製、PG-1040F）を用い、アクチュ

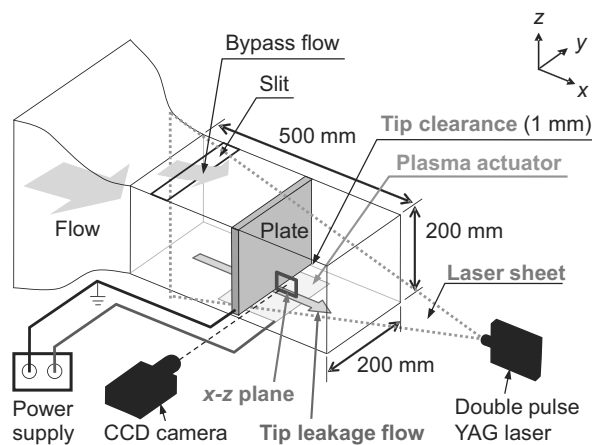


Fig. 2 Measurement system for flat plate with tip clearance

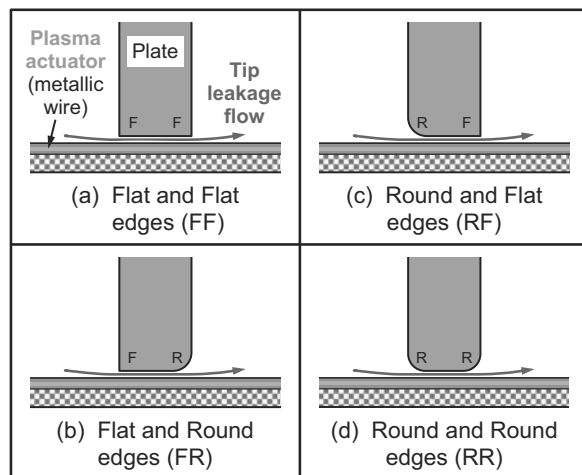


Fig. 3 Tip edge shapes of flat plates

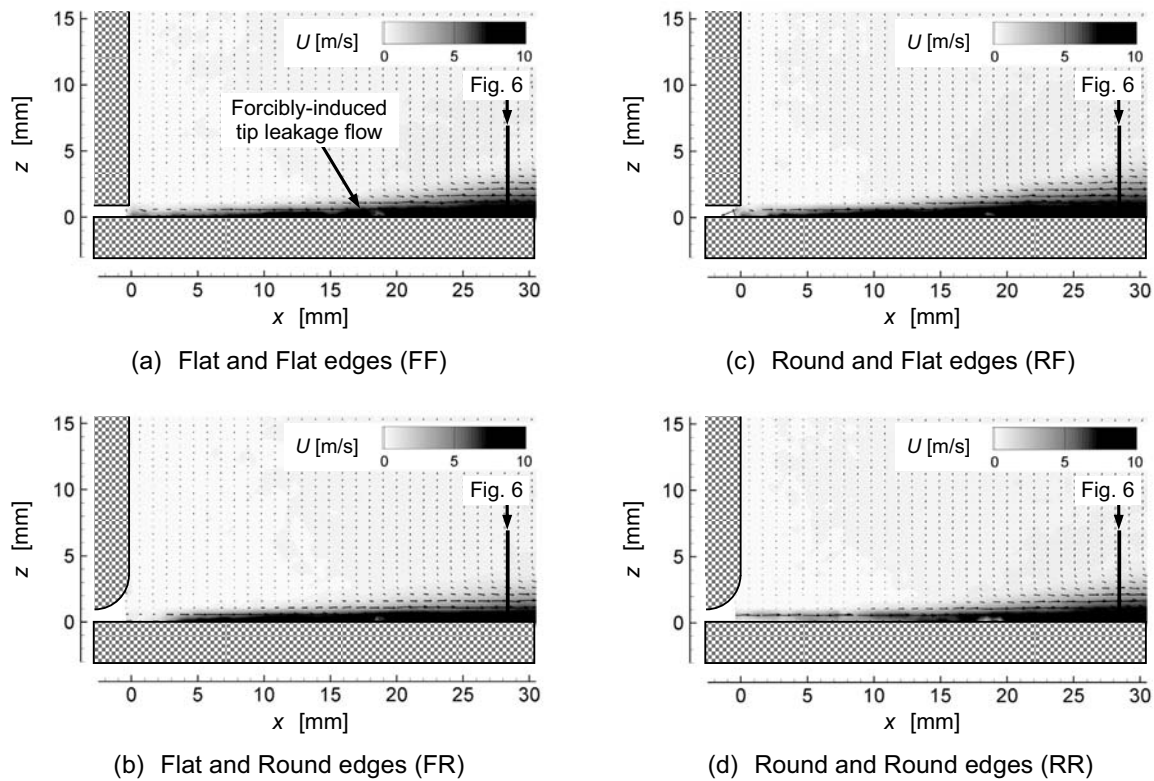


Fig. 4 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various plate edge shapes (no control)

エータと平板先端の間にプラズマを生成する。前報と同様、印加するpeak-to-peak電圧を本電源の最大値である $V_{p-p} = 12.8\text{kV}$ に固定し、周波数を $f = 10\text{kHz} \sim 16\text{kHz}$ の範囲で変化させることで、投入電力を増加させる。

平板先端付近の x - z 平面の速度場を、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オイルミストを、測定部下流に設置したダブルパルス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, PIV CAM 13-8) により撮影する。瞬時速度分布を200回測定して、平均値を算出する。

図3に、今回の実験で用いた平板の先端形状4種類を示す。平板の厚みはいずれも10mmで、隙間は1mmである。図3(a)は、平らな先端形状 (FF形) で、これまでの実験で使用してきた基本形である。図3(b)は、入口側が平面、出口側が曲面 (FR形)、図3(c)は、入口側が曲面、出口側が平面 (RF形)、図3(d)は、両方を曲面 (RR形) にしたものである (全ての曲面は、 $R = 2.5\text{mm}$ で製作)。これまでの実験から、平面端 (F) の角には電界が集中して強いプラズマが発生することが分かっている。曲面端 (R) には、丸みのために電界の集中が緩和されて弱いプラズマができると考えられる。

4. 実験結果と考察

4.1 漏れ流れ制御における先端形状の影響

4.1.1 漏れ流れへの先端形状の影響

まず、先端形状自体が漏れ流れに及ぼす影響を明らかにする。図4に、制御がない状態における各先端形状での絶対速度分布を示す。チップクリアランス出口から $x = 20\text{mm}$ 付近までの範囲では、漏れ流れが下流よりも低い流速になっている一方、 $x = 20\text{mm}$ より下流では、どの先端形状でも、流速10m/s程度の漏れ流れが徐々に広がっていく様子が観察される。この原因は、出口直後の漏れ流れは幅が狭く速度勾配の大きい剪断流れであるため、PIV計測では空間的・時間的に捉えきれないためと考えられる。

このことを定量的に確認するために、図4の漏れ流れにおける最大流速値の流れ方向への変化を、図5に示す。図中の太い破線は、2次元壁面噴流の最大流速の減衰に関する相関式¹⁸⁾を、本実験データに適用した線である。この図から、流れ方向位置 $x = 10\text{mm}$ 以前では、計測された最大流速は相関式よりもかなり低くなっており、PIV計測で正しい流速を計れていないことが分かる。一方、 $x = 20\text{mm}$ より下流では、どの先端形状でも最大流速が相関式に近い減衰傾向になっており、下流に行くほど漏れ流れが徐々に広がっていく様子をPIVで測定できている。

先端形状の違いによる変化を定量的に観察するため、図4のチップクリアランス出口から28.6mm下流 (図4

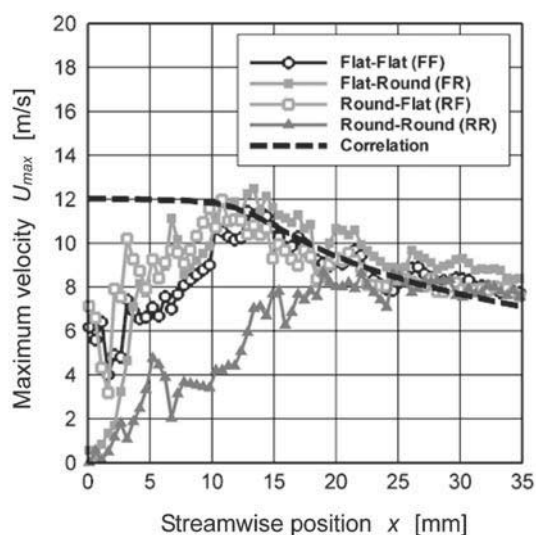


Fig. 5 Streamwise decay of maximum velocity of tip leakage flow (no control)

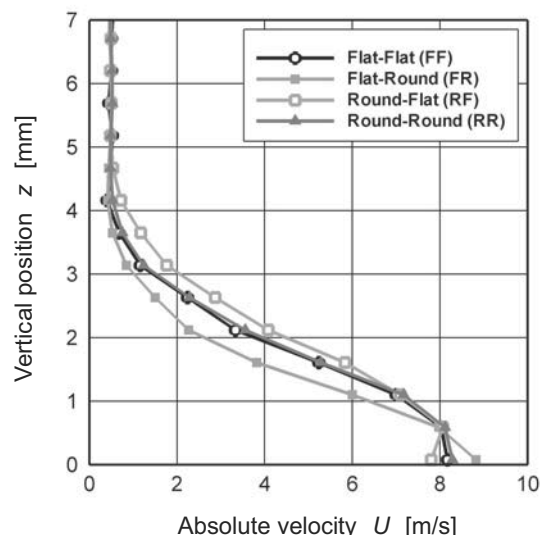
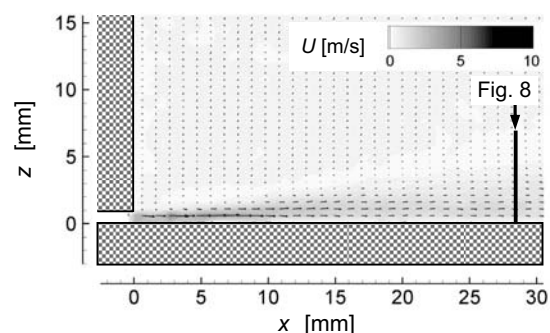
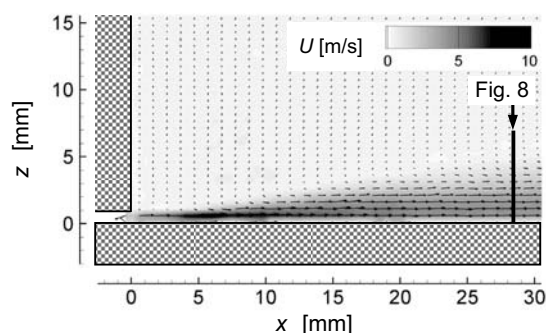


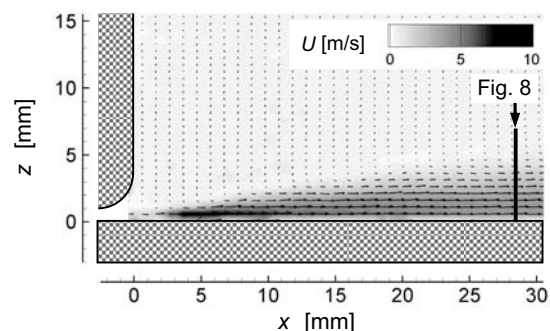
Fig. 6 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at $x = 28.6$ mm (no control)



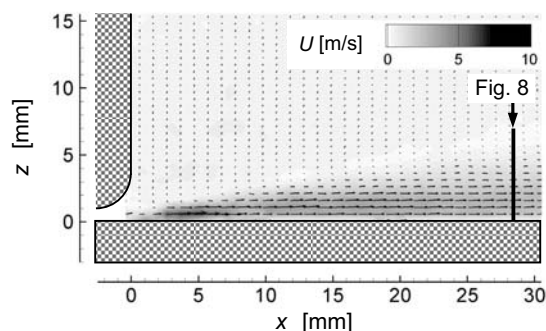
(a) Flat and Flat edges (FF)



(c) Round and Flat edges (RF)



(b) Flat and Round edges (FR)



(d) Round and Round edges (RR)

Fig. 7 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various plate edge shapes ($V_{pp} = 12.8$ kV, $f = 14$ kHz)

中に示す図6の位置)における絶対速度の垂直方向(z 軸方向)分布を図6に示す。この計測位置を選んだ理由は、前述のように下流のほうがPIVによる速度分布解析の精度が高いためである。FF形とRR形の速度分布はほぼ同じである(最大流速8.3m/s)。FR形の漏れ流れは、他の分布よりも、下側壁面近くの流速は高い(最大流速8.9m/s)が、垂直方向位置 $z = 0.6 \sim 4$ mmでの流速は低く、上側への広がりが少ない。RF形の漏れ流れは、他よりも $z = 1.5 \sim 4.5$ mmでの流速が高く、上側への広が

りが大きい。流量(速度を垂直方向に積分)は、FF形とRR形を基準とすると、FR形が7%少なく、RF形が8%多くなっている。先端形状の違いが漏れ流れに及ぼす影響は全体的に少なく、特に上流側と下流側が同形のFF形とRR形では、ほぼ同じ漏れ流れを得られている。

4.1.2 入力周波数14kHzでの漏れ流れ制御

図7に、入力周波数14 kHzでプラズマアクチュエータによる漏れ流れ制御を行った場合の各先端形状での絶対速度分布を示す。前報¹⁴⁾のFF形での実験では、この周

波数で最も高い制御効果が得られている。図7(a)のFF形で漏れ流れの低減が顕著である。次に効果があるのは、図7(d)のRR形であり、図7(b)のFR形と図6(c)のRF形では効果が少ない。

図8に、図7中に示す図8の位置 ($x = 28.6\text{mm}$) での絶対速度分布を示す。図中の黒丸●の実線は、FF形で制御なし場合の速度分布を比較基準として示している。制御なしの場合と比べて、どの先端形状でも、漏れ流れ

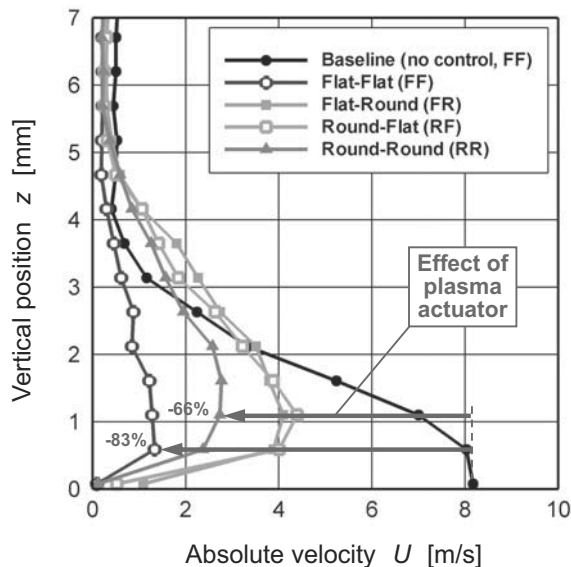


Fig. 8 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at $x = 28.6\text{ mm}$ ($V_{pp} = 12.8\text{ kV}$, $f = 14\text{ kHz}$)

の最大流速の位置が壁面から離れた位置に移動している。この理由は、チップクリアランス出口部でプラズマが発生した際に漏れ流れを上方に巻き上げる渦が発生して壁面に垂直な速度成分が増加するためである^[3]。FF形での制御では、最大流速を 8.3m/s から 1.4m/s まで抑制できている（83%の減少）。RR形では最大流速が66%減少するが、FR形とRF形では50%程度の減少になる。この結果から、FF形やRR形のように上流側と下流側の先端形状を同形にしたほうが、FR形やRF形のように異形な場合よりも効果が高いことが分かる。また、RR形のように丸い形状よりも、FF形のように角のある形状のほうが高い効果をえられる。

4.1.3 入力周波数16 kHzでの漏れ流れ制御

図9に、プラズマアクチュエータへの入力周波数を16 kHzまで上昇させた場合の各先端形状での絶対速度分布を示す。この周波数では、使用した電源の出力が限界に近い条件になっている。図9(d)のRR形で顕著な制御効果が得られ、漏れ流れをほぼ完全に止めることに成功している。一方、図9(a)のFF形では、14kHzの時よりも制御効果が減っている。また、図9(b)のFR形と図9(c)のRF形でも、14kHzの時より制御効果がわずかに減っている。

図10に、図9中に示す図10の位置 ($x = 28.6\text{ mm}$) での絶対速度分布を示す。RR形での制御では、最大流速を 0.4m/s まで抑制できている（95%減少）。FF形では最大流速が 3.2m/s （62%減少）となり、14kHzでの83%減

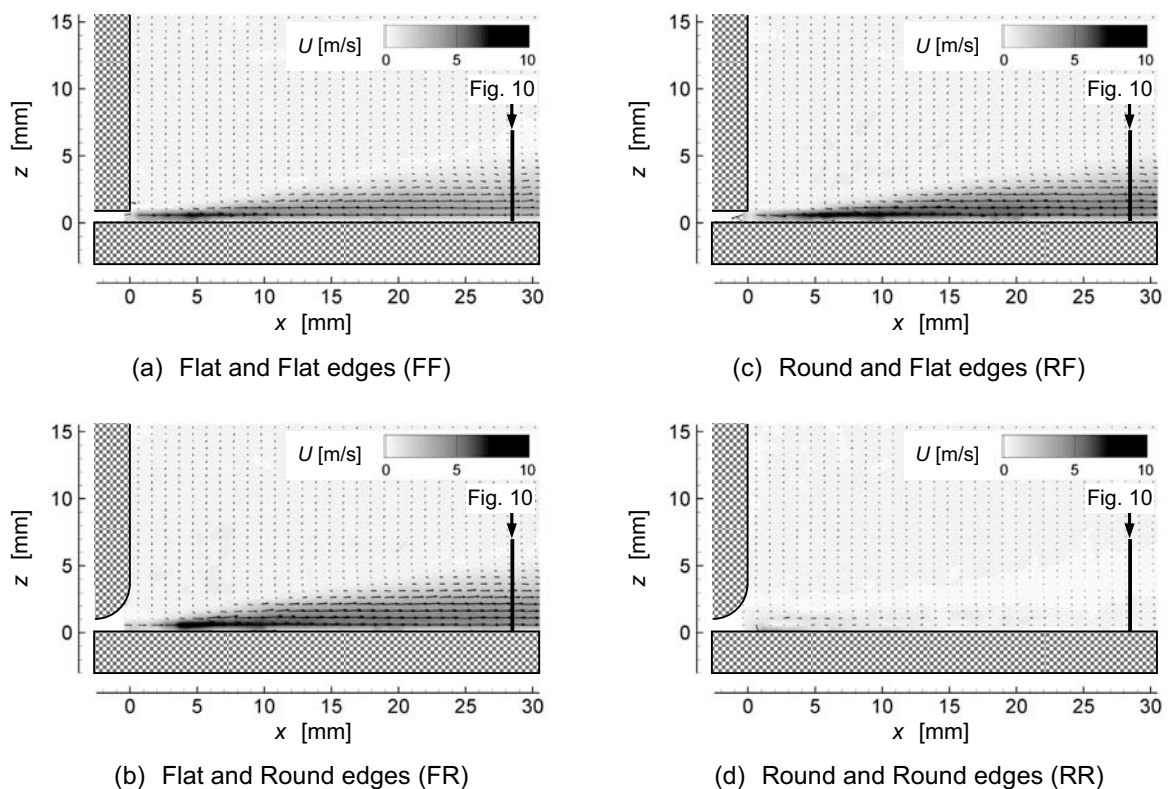


Fig. 9 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various plate edge shapes ($V_{pp} = 12.8\text{ kV}$, $f = 16\text{ kHz}$)

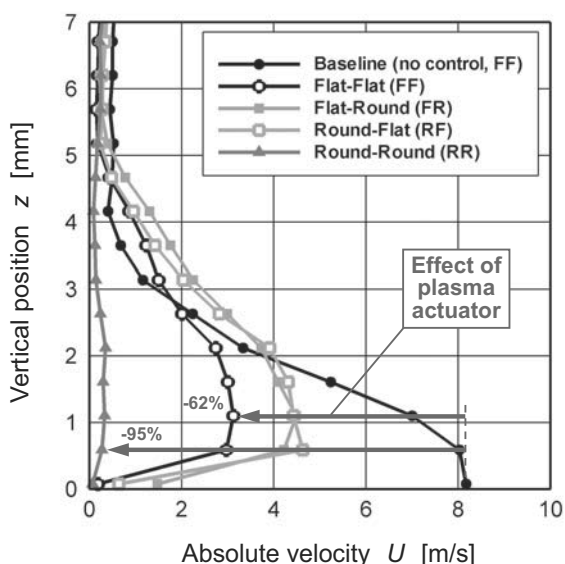


Fig. 10 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at $x = 28.6$ mm ($V_{pp} = 12.8$ kV, $f = 16$ kHz)

少と比べて、制御効果が減っている。FR形とRF形では47%程度の減少で、14kHzの時よりも数%効果が減る。これらの現象の原因を次節で考察する。

4.2 漏れ流れの流量低減

図11に、 $x = 28.6$ mmでの流れ方向速度成分を積分して算出した漏れ流れの流量をまとめる。図中の太い破線は、基準となるFF形で制御なしの場合の流量である。入力周波数10kHzでは、FF形では流量が約20%減少するが、他では制御効果が見られない。14kHzまでは、どの形状でも周波数の増加とともに流量が減少する。FF形が最も効果が高く、14kHzでは流量が80%減少する。その他は、RR形では54%減少、FR形とRF形では35%の減少である。周波数が15kHzに増えると、流量が増加し、プラズマアクチュエータが漏れ流れを減少させる効果が

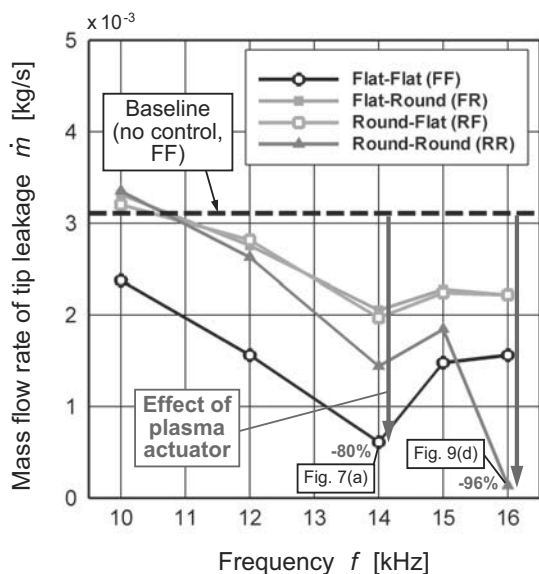


Fig. 11 Mass flow rates of tip leakage at various edge shapes of flat plate at $x = 28.6$ mm

弱くなる。さらに周波数が高い16kHzでの流量は、FF形では少し増加、FR形とRF形では横ばいなのに対し、RR形では大幅に減少し（流量96%減少）、漏れ流れをほぼ完全に抑えている。

FR形とRF形は、どの周波数でも漏れ流れ低減効果が低めである。この理由は、入口側と出口側の端面の形が違う場合に、角のある端面（F側）にプラズマが集中して出ることが考えられる。

14kHzを超えると漏れ流れ低減効果が弱まる理由として、放電モードの変化が考えられる。一般的なシート型プラズマアクチュエータの数値解析で、電圧一定で周波数を増加させると、電圧勾配が300kV/msを超える付近で、正電圧時のプラズマがコロナ型放電からストリーマ型放電に遷移し、誘起される流体力が一時的に減少することが報告されている¹⁹⁾。本研究での電圧 $V_{pp} = 12.8$ kV、周波数 $f = 14$ kHzでの電圧勾配を推算すると約350kV/msとなり、前述の文献に近い値なので、放電現象の変化による漏れ流れ低減効果の減少と考えられる。

16kHzの高周波数で、FF形よりもRR形のほうが高い効果が得られた理由としては、放電モードがストリーマ型放電に変わった場合に、角のある形状よりも丸い形状のほうが端面への電界集中を弱められて、空間的により一様な放電を得られることが考えられる。

5. まとめ

リング型プラズマアクチュエータでの先端形状の影響を調べるため、4種類の先端形状を持つ平板を用いて漏れ流れ（チップクリアランス流れ）を抑制する実験を行った。平板先端の隙間（1 mm）を通る漏れ流れの流速は、約10m/sに設定した。プラズマアクチュエータの印加電圧 V_{pp} を12.8kVに固定し、周波数 f を10kHzから16kHzまで変化させた。PIV計測による速度分布から、印加周波数の違いによって、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。

- (1)制御なしの場合、本実験の先端形状では、形の違いが漏れ流れに及ぼす影響は少ない。
- (2)漏れ流れの入口側と出口側の端面は、同じ形状のほうが漏れ流れ抑制効果が高い。
- (3)両端に角があるFF形は、周波数が14kHzよりも低い場合には、最も漏れ流れ抑制効果が高い（14kHzで漏れ流れが80%減少）。
- (4)両端が丸いRR形は、周波数が16 kHzになると効果が高くなり、漏れ流れをほぼ完全に抑制できる（16 kHzで漏れ流れが96%減少）。

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。

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) 深湯康二, 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) Sosa, R., Arnaud, E., Memin, E., Artana, G., "Study of the Flow Induced by a Sliding Discharge," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, Issue 2 (2009), pp. 305-311.
- (5) Matsuno, T., Fujita, N., Yamada, G., Kawazoe, H., Matsuno, S., Asaumi, N., Kouwa, J., "Vectored Jet Control by Trielectrode Plasma Actuator for Turbomachinery," Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power, No. AJCPP2014-155 (2014).
- (6) McGowan, R., Corke, T. C., "Pulsed-DC Plasma Actuator Characteristics and Application in Compressor Stall Control," AIAA Paper, No. 2016-0394 (2016).
- (7) Morphis, G., 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).
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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).
- (11) De Giorgi, M. G., Pescini, E., Marra, F., Ficarella, A., "Experimental and Numerical Analysis of a Micro Plasma Actuator for Active Flow Control in Turbomachinery," ASME Paper, No. GT2014-25337 (2014).
- (12) Saddoughi, S., Bennett, G., Boespflug, M., Puterbaugh, S. L., Wadia, A. R., "Experimental Investigation of Tip Clearance Flow in a Transonic Compressor with and without Plasma Actuators," ASME Paper, No. GT2014-25294 (2014).
- (13) Matsunuma, T., Segawa, T., "Active Tip Clearance Control for an Axial-flow Turbine Rotor Using Ring-Type Plasma Actuators," ASME Paper, No. GT2014-26390 (2014).
- (14) 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翼列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, Vol. 44, No. 5 (2016), pp. 408-414.
- (15) Tallman J., Lakshminarayana, B., "Methods for Desensitizing Tip Clearance Effects in Turbines," ASME Paper, No. 2001-GT-0482 (2001).
- (16) Tallman J. A., "A Computational Study of Tip Desensitization in Axial Flow Turbines Part 1: Baseline Turbine Computations and Comparisons with Measurement," ASME Paper, No. GT2004-53918 (2004).
- (17) Tallman J. A., "A Computational Study of Tip Desensitization in Axial Flow Turbines Part 2: Turbine Rotor Simulations with Modified Tip Shapes," ASME Paper, No. GT2004-53919 (2004).
- (18) 社河内敏彦, 噴流工学 - 基礎と応用 -, 森北出版 (2004), pp. 44-48.
- (19) 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.