表面微細電極構造を有する DBD プラズマアクチュエータの誘起噴流特性に関する実験的研究

萩原 浩貴^{*1}, 小方 聡^{*2}, 草野 浩俊^{*3}, 瀬川 武彦^{*4}

Experimental investigations of induced flow by DBD plasma actuators with fine structure electrodes

Hiroki HAGIWARA^{*1}, Satoshi OGATA^{*2}, Hiroto KUSANO^{*3} and Takehiko SEGAWA^{*4}^{*1,*2,*3} Tokyo Metropolitan University, Department of Mechanical Engineering

1-1 Minamiosawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397, Japan

^{*4} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8564, Japan

Received 29 February 2016

Abstract

Dielectric barrier discharge plasma actuators (DBD-PAs) have been developed for active flow control devices that do not contain mechanical moving parts. In this study, flow properties induced by DBD-PAs with fine structure exposed electrodes were investigated in experiment to accelerate the induced flow. We prepared the following four types of test actuators: (1) normal-type, with the conventional type of exposed electrode, (2) span-type, with fine exposed electrode of a width of 0.1 mm, (3) stream-type, with slot-type exposed electrode, into which many 0.15 by 1 mm slots were cut, and (4) porous-type, with porous-type exposed electrode, into which many holes of diameter 0.15 mm were cut. Analyzing the velocity distribution of the induced jet using particle image velocimetry, we found that at $V_{p-p} = 5\text{--}7$ kV, the velocity of the induced jet was increased for span-type and stream-type actuators, when compared with normal-type actuator. The largest increase of velocity was about 20% at 20 mm downstream from the electrode. In relation to the mechanism of the acceleration, we found that a dielectric barrier discharge (DBD) is generated not only at the downstream edge, but also at the upstream edge. By the Schlieren flow visualization, it could be seen that the DBD generated in the downstream direction produced an induced jet in the downstream direction as normal. However, the DBD generated in the upstream direction was found to have the effect of producing an induced jet in both the downstream and the upstream directions. In other words, it was qualitatively shown that the jet that was induced by the DBD generated on the upstream side of the fine exposed electrodes adds to the induced jet in the downstream direction, and as a result, the velocity of the downstream direction induced jet increases.

Key words : Dielectric barrier discharge plasma actuator, Flow control, PIV measurement, Fine structure electrode

1. 緒 言

近年、温室効果ガス排出やエネルギー資源枯渇問題を背景に、剥離制御手法や乱流摩擦抵抗低減手法に関する数多くの研究が行われている(Kasagi et al., 2009, Cattagesta and Sheplak, 2011). 例えば、ボルテックスジェネレータのような受動的な剥離制御デバイスは構造が簡易であるため、航空機などで多く取り入れられている実績がある。しかし、受動的な剥離制御デバイスは設計点において流れの制御に効果を及ぼす反面、設計点の条件を満たさない場合は抵抗を増加させてしまう欠点をもつ。それゆえ、抵抗低減が必要な場面においてのみ駆動できる能動流体制御デバイスの開発が重要になりつつある。これら能動流体制御デバイスを実用機械に適用するためには、高

No.16-00068 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00068], J-STAGE Advance Publication date : 13 May, 2016

^{*1} 首都大学東京大学院 理工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)^{*2} 正員, 首都大学東京大学院 理工学研究科^{*3} 首都大学東京 都市教養学部理工学系^{*4} 正員, 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 (〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1)

E-mail of corresponding author: ogata-satoshi@tmu.ac.jp

速応答するアクチュエータが求められる。例えば、シンセティックジェットなどのアクチュエータは、キャビティ内に収められた振動板を振動させることにより、開口部から流体の吹出し・吸込みを行うことができる(Cattagesta and Sheplak, 2011)。シンセティックジェットは高い応答性を持つが、十分なパフォーマンスを発揮するには共鳴点あるいはそれに近い周波数で駆動しなければならないため、機械的の不良を起こしやすい。近年、従来のアクチュエータが抱えていた駆動追従性を確保し、前述の機械的特性や適用範囲などの諸問題を解決する革新的な能動流体制御デバイスとして、誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ(Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators, DBD-PAs)が注目されている(深淵他, 2010, Corke et al., 2010)。

誘電体バリア放電は Siemens がオゾン合成する方法として考案したことから研究が始まり、オゾン生成、エキシマランプ、排ガス処理、有害物質の分解、除菌・殺菌、燃料改質など気相反応を中心に幅広く利用されている(Kogelschatz, 2003)。一方、DBD-PAs は 1990 年後半に Roth et al. によって考案され、表裏電極の非対称配置により、壁面近傍に一方向噴流を誘起する手法として開発されてきた(Roth et al., 1998)。典型的な DBD-PAs の構造は、テフロンやカプトンなどの絶縁材と、その表裏に配置された露出電極(exposed electrode)と絶縁被覆された裏面電極(encapsulated electrode)から構成され、可動部を持たないシンプルな構造を有していることが最大の特徴である(図 1)。電極間に高周波高電圧(通常、周波数 1-10 kHz、印加電圧 1-10 kV 程度の交流電圧)を印加すると、露出電極エッジの片側から裏面電極側に向かう方向へ進展する誘電体バリア放電が生じる。図 1 の写真に示すように、露出電極近傍に発生した誘電体バリア放電は青紫色の微弱光として観察される。誘起された噴流は入力に対して高い駆動追従性を有する。また、電極や絶縁材として柔軟性の高い材料を選択した場合、曲面上に設置できるなどの工業上多くの利点を有する。しかしながら、現状では DBD-PAs の投入した電力から運動エネルギーへの変換効率はわずか 0.1-0.2% 程度であることに加え、DBD-PAs を実用機械に適用するためには耐久性、沿面放電、装着性、段差などによる形状抵抗への影響など数多くの課題が残されている。特に DBD-PAs の最大流速およびエネルギー効率の向上については、本アクチュエータの実用化に向けて最も重視すべき課題であると考えられる(Benard and Moreau, 2014)。

この最大流速向上には印加電圧や駆動周波数を増加させる方法が一般的に用いられるが、印加電圧や周波数の増加によりアクチュエータの破損の可能性が高くなる。そこで電圧条件を変えずに最大流速を向上させる研究が必要となる。これに関連して、Forte et al. は裏面電極幅や露出電極と裏面電極の距離が噴流速度に及ぼす影響を実験的に調査した(Forte et al., 2007)。そして、裏面電極幅の増加とともに最大流速が増加するが幅 20 mm 程度で一定値に漸近すること、露出電極と裏面電極の距離を 5 mm 程度にした場合に 0 mm と比較し約 10% 流速が増加することを明らかにしている。また、プラズマ分布領域に着目して推力向上を目指した研究も行われている。Matsuno et al. はアクチュエータの下流側に高電圧の直流電圧を付加した電極を追加した 3 電極アクチュエータを用いてスライディング放電により噴流速度が向上することを示している(Matsuno et al., 2013)。さらに、電極を鋸歯にすることで 3 電極アクチュエータの推力向上を得ようとする研究も行われている(菅原他, 2015)。この 3 電極アクチュエータは推力向上が得られる反面、追加の電極や電源などが必要であるため、設置場所やコストの問題が依然として存在する。一方、射越らは露出電極幅が流れの方向や速度分布に与える影響を調査し、裏面電極サイズを変化させず露出電極幅のみを非常に細くした場合に流速が増加する現象を見出した(射越他, 2013)。しかしながら、現時点で露出電極構造のみに着目し最大流速向上を目指した研究は十分行われているとは言い難い。露出電極の微細構造化を除き、DBD-PAs の基本構造や印加電圧を同一にした条件で誘起噴流速度の増加を実現できれば、最大流速向上のための新たな電源の追加などが不要になり、高電圧化による破損確率の上昇も抑えることができるなど多くの利点があると考えられる。

よって、本研究はプラズマアクチュエータの誘起噴流速度の向上を得ることを目的として、様々な微細露出電極構造が誘起噴流特性に及ぼす影響を実験的に明らかにするものである。

2. 実験装置および方法

供試 DBD-PAs は、PTFE(厚み: 160 μm , 誘電率: $\epsilon' \approx 2$)の表裏電極に銅箔(35 μm)が圧延接着された両面銅張積層板を用い、CAD を用いて設計された電極形状を PCB プロセスにより両面位置合わせエッチングすることで作製する。電極の寸法に関する記号の定義および座標系を図 2 に示す。 W_i , W_b はそれぞれ露出電極および裏面電極

の x 軸方向の幅であり, d は表裏電極間のギャップ幅, W_t は z 軸方向(スパン方向)の幅とする. 露出電極形状は図 3(a)~(d)に示す 4 種類とし, 全ての DBD-PAs において電極間ギャップを $d=0$ mm, スパン方向幅を $W_t=40$ mm に統一する. 図 3(a)は従来型(normal-type)の DBD-PAs の模式図であり, $W_t=5$ mm, $W_b=10$ mm の電極幅を有する. 図 3(b)は細線型露出電極構造を有するスパン型(span-type)DBD-PAs の模式図を示しており, $W_t=0.1$ mm, $W_b=10$ mm である. 一方, 図 3(c)は長穴型露出電極構造を有するストリーム型(stream-type)DBD-PAs の模式図である. 図に示されるように, $W_t=6$ mm, $W_b=10$ mm の電極幅を有しており, 露出電極には x 軸方向に 1 mm, z 軸方向に 0.15 mm の長穴加工が 0.3 mm 間隔に施されている. 図 3(d)は多孔型露出電極構造を有するポーラス型(porous-type)DBD-PAs($W_t=6$ mm, $W_b=10$ mm)の模式図であり, 露出電極上に直径 0.15 mm の小孔が 0.3 mm 間隔に露出電極エッジ部から $x = -1$ mm の位置まで加工されている. 図 4(a)(b)に stream-type および porous-type に施された長穴および小孔の拡大写真を示す.

Fig. 1 Schematic of DBD-PAs

Fig. 2 Configuration of DBD-PAs

図 5 に実験装置の概略図を示す. DBD-PAs の誘起噴流の x - y 断面の速度ベクトル(u, v)を PIV 法(Particle Image Velocimetry)を用いて解析する. DBD-PAs はアクリル樹脂製の容器内に設置されたステージ上に両面テープで固定される. ラスキノズルにより $1\ \mu\text{m}$ 程度に微粒化された DOS(Dioctyl Sebacate)を可視化用のトレーサ粒子として, ダブルパルス Nd:YAG レーザー(Litron Lasers, NANO S30-15PIV, 15 mJ/pulse)で誘起噴流を可視化し, クロスコレーションカメラ(TSI, PIVCAM13-8, $1,280 \times 1024$ pixels)で短時間間隔の 2 枚の可視化画像を取得する. また, アクチュエータの中心位置(露出電極と裏面電極の間)を PIV 解析における原点(x, y) = (0, 0)とする. 電源には PSI-PG1040F(PSI)を用い, 周波数を $f_p = 5\ \text{kHz}$ 固定のもと, 印加する peak-to-peak 電圧 V_{p-p} を $4 \leq V_{p-p} \leq 9\ \text{kV}$ の範囲で変化させ, Duty 100 % で 5 秒間駆動させる.

Fig. 3 DBD-PA design

Fig. 4 Magnified photographs of stream-type and porous-type electrode

図 6 にシュリーレン法を用いた流体構造可視化を行うための実験装置概要を示す。卓上暗室内にコリメータレンズ、平面鏡やナイフエッジが一体となったシュリーレン装置(SS50, カトウ光研)を設けることで DBD-PAs 表面近傍に平行光束を照射する。供試 DBD-PAs は 3 軸ステージ上に設置されたプレートに両面テープで固定されている。シュリーレン像を撮影するカメラ(FASTCAM, Photron, 512×512 pixels)は、供試体上方に設置する。また、デジタルカメラ(Canon, EOS 6D)を用い、露出電極エッジ近傍に生成される誘電体バリア放電の空間分布を撮影する。

Fig. 5 PIV setup

Fig.6 Shlieren setup

3. 実験結果および考察

3・1 誘起噴流速度

図7に実験結果の代表例として, DBD-PAsの $z=20\text{ mm}$ (電極端を $z=0\text{ mm}$ とする)の位置における(a) normal-type, (b) span-type, (c) stream-type, (d) porous-typeのPIV解析結果を示す. PIVによる流れの可視化画像は $200\text{ }\mu\text{s}$ の短時間間隔で, 各DBD-PAsにつきサンプリングレート 3.75 Hz で約 6.7 秒間 (25組)取得される. 速度ベクトル(u, v)は $32\times 32\text{ pixel}$ (約 $1\times 1\text{ mm}$)の検査領域(interrogation area)の相互相関により算出されるが, DBD-PAs駆動直後の過渡的なジェット速度分布を排除するため, 図7では25組の可視化画像の最初の5組を除いた20組(約 5.3 秒間)の速度分布の平均値が算出されている. 印加電圧は $V_{p-p}=5\text{ kV}$, 印加周波数 $f_p=5\text{ kHz}$ である. 誘電体バリア放電が生成される露出電極エッジの位置を原点($x=0\text{ mm}$)としている. 図7より, いずれのDBD-PAsを用いた場合でも, 従来の報告と同様に, 露出電極上方で吸い込み流が生じ壁面近傍で一方向に加速された噴流を生成するが, 印加電圧が同じ場合でも噴流速度はアクチュエータにより異なることがわかる. 図7(b)および(c)より明らかなように, 露出電極構造がspan-typeおよびstream-typeの場合, 図7(a)のnormal-typeの電極と比較して噴流速度が明らかに増加していることが確認できる. 特にspan-typeでは露出電極エッジの 6 mm 程度下流からの速度増加が顕著であることがわかる. 一方, porous-typeは若干の噴流速度の増加が見られるが, 他の2種類の電極ほどの増加は認められない.

図8に $x=20\text{ mm}$ の位置における $4\leq V_{p-p}\leq 9\text{ kV}$ 印加条件下のnormal-type, span-type, stream-typeの誘起噴流の速度分布を示す. アクチュエータの表面位置が $y=0\text{ mm}$ となっている. 従来の報告と同様, 噴流は壁面近傍にピークを持つことが分かる. Normal-typeおよびstream-typeと比較し, span-typeの噴流速度のピーク位置はより壁面近くに存在する. $x=20\text{ mm}$ の位置において, $V_{p-p}=4\text{ kV}$ ではいずれの露出電極でも誘起噴流の流動特性に差が見られないが, $5\leq V_{p-p}\leq 9\text{ kV}$ の範囲では印加電圧の上昇とともに誘起噴流速度が増加する傾向が認められる.

印加電圧の変化が誘起流速の増加に及ぼす影響を明らかにするために, 流速増加が得られたspan-typeおよびstream-typeの最大誘起流速(U_{max})の印加電圧による変化を解析する. 図9に印加電圧を $5\leq V_{p-p}\leq 9\text{ kV}$ に変化させた場合にみられる $x=20\text{ mm}$ におけるnormal-type, span-type, stream-typeの U_{max} に及ぼす影響を示す. Span-typeの最大誘起噴流速度は $5\leq V_{p-p}\leq 7\text{ kV}$ の印加電圧においてnormal-typeと比較して約20%程度増加するが, $V_{p-p}=8\text{ kV}$ および 9 kV においては同程度の値となる. 一方, stream-typeでは $V_{p-p}=5\text{ kV}$ において約10%程度, $V_{p-p}=6\text{ kV}$ において20%と速度増加率のピークに達し, $V_{p-p}=7\text{ kV}$ では10%増加, $V_{p-p}>7\text{ kV}$ ではnormal-typeと同程度になる. 以上の結果, $5\leq V_{p-p}\leq 7\text{ kV}$ において, span-type, stream-typeの最大誘起流速はnormal-typeより増加することが明らかとなった.

速度分布測定結果より, 同じ印加電圧条件ではspan-typeおよびstream-typeの電極構造はnormal-typeと比較し誘起噴流速度が増加する傾向が示された. 次節以降ではspan-typeを取り上げて流速増加メカニズムの考察を行う.

3・2 誘電体バリア放電(DBD)の分布領域

Forte et al. は露出電極と裏面電極の距離を数 mm に設定することで誘電体バリア放電(DBD)の生成領域が広がり, 誘起噴流速度の増加につながることを示した(Forte et al., 2007). 一方, 本研究では, 露出電極と裏面電極の距離は $d=0\text{ mm}$ と固定したが, 露出電極の微細化によりnormal-typeと比較してDBDが生じる面積が増加し誘起ジェットの高速度が得られた可能性がある. DBDが生成される領域の変化が誘起噴流に与える影響を調査するため, デジタルカメラをDBD-PAsの上方に設置することで, 誘電体バリア放電の空間的な分布を可視化する. 供試DBD-PAsとしてnormal-typeおよびspan-typeを用いる. 図10(a)に上部より撮影したnormal-typeにおける各印加電圧のDBD, 図10(b)にspan-typeの各印加電圧のDBDの分布を示す. 露出電極エッジ近傍の青紫色部分はDBDが発生することに起因する窒素の自発光を撮像したものである. 全ての印加電圧に対してspan-typeのDBD生成領域はnormal-typeに比べ増大していることがわかる. 図11は, デジタルカメラで撮影したDBD可視化像について, 様々な印加電圧における $z=20\text{ mm}$ の露出電極近傍のDBDの輝度分布を解析した結果を示しており, いずれの電極を用いた場合でも印加電圧の増加に伴いDBDの生成領域が増加していることが確認できる. Span-type DBD-PAsの場合, normal-type DBD-PAsで見られる順流側(露出電極エッジ($x>0$)側)に生じるDBDに加え, 反対側

のエッジ($x < 0$ 側)にも DBD が生成され、順流側に生じる DBD と同様に印加電圧に伴って領域が拡大することが確認できる。また、normal-type に対して span-type を用いた場合の順流側と逆流側を合わせた DBD の輝度変化が観察された範囲は、 $V_{p-p} = 4$ kV では 30% 増加、 $V_{p-p} = 5$ kV および 6 kV においては約 2 倍程度増加でピークとなり、 $7 \leq V_{p-p} \leq 9$ kV では 50% 程度増加する。これらの結果、span-type では露出電極の細線化により露出電極近傍の両側エッジ近傍に誘電体バリア放電が発生し、生成されるイオンが増加した結果、誘起噴流速度が向上したと考えられる。

Fig. 7 Velocity distributions of flow induced by DBD-PAs with various fine structure exposed electrodes at $V_{p-p} = 5$ kV. For all electrodes, a jet accelerating in one direction was obtained in the vicinity of the wall. In the case of the span-type and stream-type DBD-PAs, the jet velocity was clearly faster than that for the normal-type actuator. The obvious enlargement of velocity magnitude was found in the downstream from the exposed electrode edge by using span-type DBD-PA. Accelerations of jet induced by the porous-type was not confirmed in comparison with span-type and steam-type.

Fig. 8 Velocity profiles of flow induced by DBD-PAs at $x = 20$ mm. When compared with normal-type and stream-type DBD-PAs, the location of peak jet velocity occurred closer to the wall by using span-type DBD-PA. In the range of $5 \leq V_{p-p} \leq 9$ kV, the induced jet velocity increased as the applied voltage increased.

Fig. 9 Effect of voltage on maximum velocity (U_{max}) at $x = 20$ mm. Maximum flow velocity of span-type and stream-type increases for $5 \leq V_{p-p} \leq 7$ kV in comparison with that of normal-type.

一方、速度増加が見られた stream-type の露出電極に設けられた孔部分でも DBD が観察された。Stream-type においても、この部分の DBD だけ DBD の生成領域が増加する。Span-type と同様、stream-type の速度増加も DBD の生成領域の広がりによるものと考えられるが、DBD が観察されない孔も多数存在するなど、stream-type の DBD の生成領域に関しては現時点では定量評価には至っていない。また、電極構造を変えたことにより、DBD の生成領域以外に電場や荷電粒子密度なども変化すると考えられる。しかしながら、本研究では電極構造とこれらの関係は不明であり、流速増加の詳細なメカニズムも含め今後の課題と考えている。

Fig. 10 Spatial distributions of dielectric barrier discharge (DBD). In the case of span-type actuator, DBD is generated not only at the edge of downstream side ($x > 0$), but also at that near the upstream side ($x < 0$). Area of DBD generated by span-type enlarges in comparison with that by normal-type.

Fig. 11 DBD propagation. Brightness distributions of DBD in the center of the exposed electrode (z axis). In comparison with the normal-type actuator, brightness increase 30% for $V_{p-p} = 4$ kV, 200% (maximum) for $5 \leq V_{p-p} \leq 6$ kV, and 50% for $7 \leq V_{p-p} \leq 9$ kV.

3・3 シュリーレン法による観察

Span-type の加速メカニズムを明らかにするためには、誘起噴流の詳細な流動特性を調べる必要がある。しかしながら、本研究では図 7 で示したような領域の PIV 解析に留まっており、壁面近傍の流れのダイナミクスをより詳細に観察することは難しい。よって、露出電極壁面近傍の誘起噴流特性をシュリーレン法を用いて観察する。供試 DBD-PAs はこれまで使用してきた①span-type 型(図 3(b))に加え、図 12 に示すように②span-type 型の露出側電極の順方向($x > 0$ 側)エッジ、③逆方向($x < 0$ 側)エッジそれぞれをカプトンテープで被覆し、②と③についてはエッジの片側のみ DBD が発生するようにする。シュリーレン法を用いた DBD 誘起噴流の観察では、可視化が可能であった最小印加電圧である $V_{p-p} = 9$ kV, $f_p = 5$ kHz とする。

図 13 (a)はエッジが被覆されていない①span-type 型電極に対する電圧印加から 0.4 秒後のシュリーレン像である。図中のシュリーレン像に密度変化が見られた領域は DBD 誘起噴流の領域を表していると考えられる(Aono et al., 2015)。図 13 (a)より、span-type は強い順方向($x > 0$ 方向)の噴流だけでなく壁面近傍領域で逆流方向($x < 0$ 方向)にも噴流が生じていることがわかる。一方、図 13(b)の順方向エッジを被覆した span-type の実験結果から、順方向エッジ近傍で発生する DBD を抑制して逆方向にのみ DBD を発生させた場合でも、順方向と逆方向の両方向に誘起噴流が生じることがわかる。また、図 13(c)の逆方向エッジを被覆し順方向にのみ DBD を発生させた場合では、逆方向に噴流は生じず、順方向の噴流は図 13(a)と比べて弱くなっている。本研究により、逆方向 DBD でも順方向の誘起噴流を生じさせる効果を持つことが明らかになった。よって、順方向 DBD による順方向噴流に、逆方向 DBD による順方向噴流が上乘せされたため、span-type の噴流速度は増加すると考えられる。シュリーレン法では速度分布の定量評価は出来ないため、図 13(b)や(c)の場合どの程度の噴流速度が生じているかは不明であるが、逆方向の DBD が順方向の噴流を加速させる効果を有することが定性的に明らかになった。

Fig. 12 Schematic view of DBD-PAs used for flow visualization by Schlieren method.

Fig. 13 Shlieren image of induced flow by span-type DBD-PA. Photographs are after 0.4 s from the voltage applied. Even if only the backflow side DBD are generated, induced jet occurs in both directions (2). In the case of the forward flow side DBD only, forward flow side jet is weak but reverse flow side does not occur (3).

4. 結 言

DBD プラズマアクチュエータの誘起噴流の加速化を目的として、露出電極構造を変えたアクチュエータを作製し誘起噴流の流動特性を調査した。供試アクチュエータは以下に示す 4 種類を用意した。①従来型の露出電極 (normal-type), ②0.1 mm 幅の細線型露出電極(span-type), ③0.15 × 1 mm の長穴が多数加工された長穴型露出電極 (stream-type), ④直径 0.15 mm の穴が複数加工された多孔型露出電極(porous-type)。印加電圧は $4 \leq V_{pp} \leq 9$ kV である。

誘起噴流の速度分布を PIV で解析した結果、 $V_{pp} = 5 - 7$ kV において span-type および stream-type で噴流速度が従来型の電極構造に比べ増加することが分かった。電極から 20 mm 下流における最大の増加率は 20%に達する。また、span-type の誘起噴流速度の増加のメカニズムに関連して、細線型露出電極の場合は順方向のエッジ部分だけでなく、逆方向のエッジ部分にも誘電体バリア放電が生じることを明らかにした。また、シュリーレン法によ

る密度変化の可視化観察から、順方向に生成された誘電体バリア放電は従来通り順方向に誘起噴流を生じさせるが、逆方向に生成された誘電体バリア放電も逆方向だけでなく順方向の誘起噴流を生じさせる効果を持つことが分かった。つまり、細線型露出電極の逆方向に生じる誘電体バリア放電による誘起噴流が順方向に生じる誘起噴流に上乗せされ、その結果、順方向の誘起噴流が加速させることが定性的に示された。

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）平成 23 年度先導的産業技術創出事業「能動流体制御技術を用いたバーチャルブレード構築による風力発電システムの飛躍的な始動性及び設備利用率向上に向けた研究開発（11B04022c）」により行われた。

文 献

- Aono, H., Sekimoto, S., Sato, M., Yakeno, A., Nonomura, T. and Fuji, K., Computational and experimental analysis of flow structures induced by a plasma actuator with burst modulations in quiescent air, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 2 (2015), DOI: 10.1299/mej.15-00233.
- Benard, N. and Moreau, E., Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 55 (2014), 1846.
- Cattagesta, N-L. and Sheplak, M., Actuators for active flow control, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 43 (2011), pp. 247–272.
- Corke, T.C., Enloe, C.L. and Wilkinson, S.P., Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 42 (2010), pp. 505–529.
- Forte, M., Jolobois, J., Pons, J., Moreu, E., Touchard, G. and Cazalens, M., Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control, *Experiments of Fluids*, Vol. 43 (2007), pp. 917–928.
- 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.
- 射越悠, 小方聡, 山谷亮太, 瀬川武彦, プラズマアクチュエータ誘起流の逆流特性に関する実験的研究, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 79, No. 807 (2013), pp. 2375–2383.
- Kasagi, N., Suzuki, Y. and Fukagata, K., Microelectromechanical systems-based feedback control of turbulence for skin friction reduction, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 41 (2009), pp. 231–251.
- Kogelschatz, U., Dielectric-barrier Discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23–1 (2003), pp. 1–46.
- Matsuno, T., Maeda, K., Yamada, G., Kawazoe, H. and Kanazaki, M., Improvement of flow control performance of plasma actuator using wind-tunnel test based efficient global optimization, *AIAA Paper 2013–2512* (2013).
- Roth, J.R., Sherman, D.M. and Wilkinson, S.P., Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge, *AIAA Paper*, 98–0328 (1998).
- 菅原正隆, 松野隆, 鋸歯多電極プラズマアクチュエータの噴流特性, *日本機械学会年次大会講演論文集*(2015), S0530204.

References

- Aono, H., Sekimoto, S., Sato, M., Yakeno, A., Nonomura, T. and Fuji, K., Computational and experimental analysis of flow structures induced by a plasma actuator with burst modulations in quiescent air, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 2 (2015), DOI: 10.1299/mej.15-00233.
- Benard, N. and Moreau, E., Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 55 (2014), 1846.
- Cattagesta, N-L. and Sheplak, M., Actuators for active flow control, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 43 (2011), pp. 247–272.

- Corke, T.C., Enloe, C.L. and Wilkinson, S.P., Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 42 (2010), pp. 505–529.
- Forte, M., Jolibois, J., Pons, J., Moreu, E., Touchard, G. and Cazalens, M., Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control, *Experiments of Fluids*, Vol. 43 (2007), pp. 917–928.
- Fukagata, K., Yamada, S. and Ishikawa, H., Plasma actuators: Fundamentals and research trends, *Nagare*, Vol. 29, No. 4 (2010), pp. 243–250 (in Japanese).
- Ikoshi, Y., Ogata, S., Yamatani, R. and Segawa, T., Experimental study on characteristics of backward jet induced by plasma actuator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 79, No. 807 (2013), pp. 2375–2383 (in Japanese).
- Kasagi, N., Suzuki, Y. and Fukagata, K., Microelectromechanical systems-based feedback control of turbulence for skin friction reduction, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 41 (2009), pp. 231–251.
- Kogelschatz, U., Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23–1 (2003), pp. 1–46.
- Matsuno, T., Maeda, K., Yamada, G., Kawazoe, H. and Kanazaki, M., Improvement of flow control performance of plasma actuator using wind-tunnel test based efficient global optimization, *AIAA Paper* 2013–2512 (2013).
- Roth, J.R., Sherman, D.M. and Wilkinson, S.P., Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge, *AIAA Paper*, 98–0328 (1998).
- Sugawara, M. and Matsuno, T., Induced jet flow of multi-electrode plasma actuators with sawtooth electrode, *Proceedings of JSME annual meeting* (2015), S0530204 (in Japanese).