プラズマアクチュエータを用いた噴流拡散制御の研究 -向心型アクチュエータによる噴流拡散制御-

Study of Diffusion control of jet using the centripetal type plasma actuator

○宮城 徳誠 (日大短大), 大西 真澄 (日大院), 朝倉 洵 (日大院)
佐用 健太郎 (日大院), 金 洪宇 (日大院), 木村 元昭 (日大理工)

Norimasa Miyagi, Nihon University junior collage, Noarashinoda- 7-24-1, Finabashi-city, Chiba, 274-8501

It was attempted to control of jet diffusion of round jet using centripetal type plasma actuator. It was visualized and analyzed by the PIV. It was obtained the following. By driving a steady plasma actuator, the induced flow convergence, has become a jet of volume flow rate $Q = 15 \sim 50 \text{ L/min}$. Induced flow which caused by the ionized area are concentric, the flow velocity becomes faster and boundary layer thickness becomes thicker, as ionized area larger. When applied to a circular jet, the velocity of primary jet becomes faster by the effect of contraction and the momentum of the induced flow. When the ionized area becomes narrower, the effect of contraction by the induced flow is increased.

Key Words: Jet, Mixing, Plasma actuator, PIV

1. 諸言

本研究では、円形噴流に対して DBD プラズマアクチュエータを適用するに当たり、ノズル出口垂直面に円形のプラズマアクチュエータを与え、外部からの誘起流れによって円形噴流に運動量を付加する方式(運動量付加方式, Fig.1)⁷⁾と、ノズル出口内壁面にプラズマアクチュエータを設置し、誘起流れによって噴出する流体運動量を拡散する方式(運動量拡散方式)⁸⁾と2種類の方式を適用している。本稿では、運動量付加方式について取り扱う。最初に噴流を与えない状態で、適用したプラズマアクチュエータによる誘起流れの流速と流量を計測した。次に、円形噴流に誘起流れを適用した場合の噴流構造を、可視化実験と PIV 解析を用いて解析を行った。

2. 実験装置

Table 1 に同心円型 DBD プラズマアクチュエータの仕様を示す。DBD プラズマアクチュエータは、両面に銅コーティングした厚さ $125 \mu\text{m}$ のポリイミドシートに対し、両面に銅エッチングによりそれぞれ表側(露出側: exposed electrode)電極と裏側(被膜側: covered electrode)電極を同心軸上に形成した。形成したシートは、ノズル噴出口を塞がないようノズルと同心軸上に貼り付け、DBD プラズマアクチュエータを設置している。ノズルはアクリル製として、絶縁しているものとする。ノズルは直径 $d=10\text{mm}$ の等速度ノズルとし、プラズマアクチュエータの電極は被膜側電極の外径と露出側電極の内径によって4種類とした。誘起流れは噴流に向かって外側から内側に流れるように設置している。プラズマアクチュエータの駆動は、高電圧電源(PSI 製 PG1040F)より、印加電圧 $E=3\sim5 \text{ kV}$ 、周波数 $f=4 \text{ kHz}\sim15 \text{ kHz}$ の交流電圧を印加し、プラズマを発生させている。バースト信号などによる周期的変動は行わず、誘起流れは定常流れとする。

Fig.2 に実験装置を示す。ノズルから噴出する気体に空気を加え、 $Re=1,000$ となるように、デジタルマスフローコントローラで流量を調整した(断面流量 $Q_0=7.4 \text{ L/min}$ 断面流速 $U_0=1.83 \text{ m/s}$)。噴流および誘起流れの可視化のために、ノズル噴出口を直径 300mm 高さ 530mm の透明アクリル円筒で覆い、円筒内に直径 $1 \mu\text{m}$ 程度のシード粒子(オンジナオイル)を充填してから実験を行った。可視化実験は、光源を Nd:YAG レーザ(Omicron 製 FK-LA5000: $\lambda=532 \text{ nm}$)を用いたレーザライトシート法により噴流軸中心上の可視化を行っている。撮

影にはハイスピードカメラ(Photron 製 FASTCAM SA1.1 : flame rate: 6,000fps, 576x1024 pixel)を用い、噴流の初期領域 $x/d=6$ 程度までの撮影を行う。ここで、 x はノズルからの噴出方向、 y を半径方向距離とする。

PIV 解析は西華産業社製の Koncerto II ver.0.3.70 を用いた。解析は検査領域 $32 \times 32 \text{ pixel}$ の正方グリッドとし、 x, y 方向に 6step(Overlap80%)ごとずらし、 161×91 の測定点にて解析を行う。解析アルゴリズムは初期値 $96 \times 96 \text{ pixel}$ の階層相関法を採用し、誤ベクトル除去には、空間バリデーションの最大値・分散値・メディアンそれぞれのフィルタを用いて内層補完し

Fig.1 Schematic diagram of Plasma actuator to jet control

Table.1 Specific configurations of concentric type Plasma Actuator.

Type	Covered Electrode		Exposed Electrode		Ionized Range y/r
	Inside diameter [mm]	Outside Diameter [mm]	Inside diameter [mm]	Outside Diameter [mm]	
①Small	20	30	31	33	2~3
②Midium_Wide		40	41	45	2~4
③Midium		40	41	43	2~4
④Large		60	61	63	2~6

ている。元画像は 6,000fps, 200 コマずつ取得し、解析データを 0.166msec ごとの瞬時データとして取り扱った。解析結果はその時間平均値としている。

3. 実験結果

向心型アクチュエータによる誘起流れを、円形噴流 (No_PA: 噴出直径 $d=10\text{mm}$, 噴出流量 $Q=7.8\text{L/min}$, 噴出速度 $U_0=1.85\text{m/s}$) に適用した場合の効果を示す。Fig.3 に、各電極を用いて、プラズマアクチュエータを印加電圧 $E=5\text{kV}$, 印加周波数 $f=12\text{kHz}$ で駆動した時の PIV 解析した結果を示す。同図(a)はプラズマアクチュエータを与えていない場合、同図(b)は③Medium の電極で与えた場合である。これらの図より、プラズマアクチュエータによって、誘起流れは主噴流に対して縮流を与える効果となり、主噴流のポテンシャルコア内の速度が増速させていることがわかる。Fig.4 に PIV 解析より求められた、誘起流れが収束された、 $x/d=3$ における流れ方向速度分布を示す。電離層が狭い電極では、ノズル付近で誘起流れが収束するため、付加された流量分は中心速度が増加する。電離層が広い場合は、噴流の幅が広いいため、主流速度の増加はほかの電極に比べて小さかった。

Fig.5 に、PIV 解析によって求められた、制御された噴流の各諸量の流れ方向分布を示す。同図(a)は制御された噴流の各断面における、式(1)より求めた体積流量を示す。体積流量の増加を示すため、主噴流流量 Q_0 と誘起流れの流量 Q_i の合算値は $x/d=1$ における体積流量とした。それぞれの電極において、誘起流れによって体積流量は $(Q_0+Q_i)/Q_0$ は①Small で 2.3 倍、②③wide, medium で 3.2 倍、④Large で 4.0 倍と増加している。同図(b)は噴流の中心速度 U_c , (c)は運動量厚さ θ を示す。今回の解析の範囲($x/d=1\sim5$)では、いずれの場合においても、アクチュエータを駆動させない場合に比べて、誘起流れによる運動量を付加と縮流の効果により、中心速度が速くなり、噴流の幅が広がった。体積流量 Q は、誘起流れが噴流に収束して以降、周囲の流体を巻き込むため、徐々に増加していった。しかし、電極④Large の場合、誘起流れが収束した後で噴流の幅が狭まるため、体積流量は減少していった。運動量厚さは、誘起流れが収束する $x/d=3$ 以降で、増加していった。それにしたがって、体積流量も周囲流体を巻き込む形で増加していった。しかし、④Large の場合、誘起流れにより、幅の広い噴流が形成されるため、運動量厚さも全領域で厚い傾向となった。

4. 結論

向心型プラズマアクチュエータを用いて、円形噴流の拡散制御を試みた。PIV 解析を行った結果、以下の知見を得た。

- ・ 円形噴流に適用した場合、誘起流れが主噴流に与える縮流効果と誘起流れの運動量により、主噴流の流速が速くなった。
- ・ 電離層の範囲が狭くなるほど、誘起流れによる縮流の効果は大きくなる。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号: 22560176)の支援を受けた。特記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Hongyu Jin, Tkashi Ono, Motoaki Kimura, "Jet Flow control by DBD Actuator -Effect of Electrode Dimensions on jet diffusion-", Proceedings of ASME-JSME-KSAME joint conference, AJK2011-25002, (2011)
- 2) 大西真澄, 朝倉洵, 金洪宇, 木村元昭 "同軸型 DBD プラズマアクチュエータを用いた噴流拡散制御", 日本機械学会 2012 年度年次大会講演会 S056021, (2012)

Fig.2 Experimental apparatus

Fig.3 PIV analysis result of controlled jet as plasma actuator changing ($E=5\text{kV}$, $f=12\text{kHz}$).

Fig.4 Velocity profile of controlled jet at $x/d=3$.

Fig.5 Properties of controlled jet at $x/d=3$.