

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月9日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560176

研究課題名（和文） プラズマアクチュエータを用いた噴流拡散制御

研究課題名（英文） JET DIFFUSION CONTROL USING A PLASMA ACTUATOR

研究代表者

木村 元昭（KIMURA MOTOAKI）

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：70204998

研究成果の概要（和文）：大気圧プラズマの一つである誘電体バリア放電による誘起流れを噴流出口に印加し噴流初期不安定性に影響を与えることで噴流拡散制御を試みた。電極は向心型と同軸型の2種類を用いて次の知見を得た。向心型では、印加する電圧の増大は噴流の縮流効果を強め、周波数の増大は拡散効果を拡大する。同軸型では、噴出直後より不安定性が増強され渦輪の形成と崩壊が早期に生じて拡散効果が増強し、噴流拡散を極端に短縮することができる。

研究成果の概要（英文）：Jet diffusion control was performed by giving induced flow of dielectric barrier discharge to the jet exit. Centripetal type and coaxial type were used as the electrode. The following findings were obtained. The centripetal type electrode, Increase of the voltage enhances the flow contraction effect, and Increase of the frequency expands the diffusion effect. The coaxial type electrode, it is possible diffusion effect is enhanced by the instability is enhanced, collapse and the formation of vortex rings occurs early and to shorten the diffusion jet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：乱流、噴流、プラズマ、拡散制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 噴流の渦構造の発生、成長、崩壊機構および制御に関する研究が進められて来た。先細ノズルの場合では、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性により渦輪列が形成され、その発生周波数を f_p （プリファード周波数）とすると、ストロハル数 $St = fd_p/U$ (d : 噴出口直径, U : 噴出速度) は 0.24～0.51 となる。さらに噴流の諸特性は噴流初期領域の渦輪の挙動に支配されるので、渦輪の発生・成長過程を操作することにより噴流拡散を制御

することができることが示されていた。

(2) 同軸流、音波、MEMS 微小フラップ等で噴出口付近の自由せん断層に攪乱を与え、流れの不安定性を増幅して渦輪の発達を促進し噴流初期領域の拡散混合を増大できることが報告されていた。

(3) 近年、プラズマアクチュエータが流体制御のデバイスとして注目を集め、壁面境界層制御では研究が盛んに行われていた。

(4) 本研究代表者は二次フィルム流を用いた噴流拡散制御の研究を実施し、主噴流と二次フィルム流の速度比と二次フィルム流に印加する音波の周波数を変化させ、噴流拡散を抑制する条件と拡散を促進させる条件を見出した。また、もともと拡散火炎の初期領域の研究を進めていた関係から、周囲と密度が異なる噴流（ヘリウムと二酸化炭素）の拡散混合特性に関しても実験的な研究を実施していた。

(5) 新たな制御手法はないかと調査する中、最近注目されているプラズマアクチュエータを用いて噴流拡散制御を試みることとなり、誘電体バリア放電 DBD (Dielectric Barrier Discharge) プラズマアクチュエータを用いた噴流制御の着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 噴流は基礎的な流れ場の一つであり、混合、燃焼、熱伝達などの工業分野に応用されると共に、工学的にも重要な流れである。本研究では主噴流ノズルの外周に誘電体を挟んだ2枚の電極を配し、高電圧高周波パルス印加することで DBD プラズマアクチュエータを生成し、これを噴流出口に作用させ、噴流初期領域の不安定性に影響を与え、噴流拡散の基となる渦輪発生を制御して噴流の拡散制御を試みる。

(2) 噴流にプラズマアクチュエータを適用した場合の噴流拡散特性に関して、電極と誘電体の形状と配置、印加する周波数と電圧、プラズマの連続生成と間欠生成等がいかに関与するかを実験的に求め、DBD プラズマアクチュエータの有効性を見出すと共に、各因子と噴流拡散との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 図1にプラズマアクチュエータ設置の一例を示す。誘電体の上下に電極を配して数 kHz、数 kV の交流を印加してプラズマを生成し、これにより生じる誘導流で噴流拡散を制御する。本研究は、最適なプラズマアクチュエータの設定条件の確立を目指す。プラズマアクチュエータを用いる場合、電極と誘電体の形状と配置、印加する周波数・電圧、プラズマの連続生成と間欠生成の条件による最適な組み合わせを実験的に見出す。電極には向心型電極と同軸型電極を用いた。

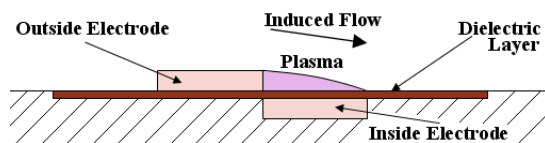


図1 DBD プラズマアクチュエータ

(2) 向心型電極とノズル

図2に向心型電極を示す。表1に向心型電極の仕様を示す。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 μm 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）電極と裏側（被膜側）電極を同心上に形成した。形成したシートは、ノズル噴出口を塞がないようにノズルと同心上に貼り付け、DBD プラズマアクチュエータを設置している。絶縁性を高めるためにノズルはアクリル製とした。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、電離層 (Ionized range) を変化させたものを3種類 (①Small, ③Medium, ④Big)、露出電極の幅を広げたもの (②Medium wide) の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: PSI-PG1040F) より、印加電圧 $E=3\text{ kV}\sim 5\text{ kV}$ 、周波数 $f_s=4\text{ kHz}\sim 15\text{ kHz}$ 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した。

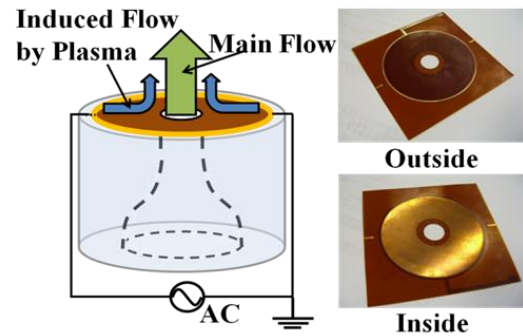


図2 向心型電極とノズル

表1 向心電極の寸法

NO.	Inside Electrode [mm]		Outside Electrode [mm]	
	Inside Diameter	Outside Diameter	Inside Diameter	Outside Diameter
①Small	20	30	31	33
②Medium Outside Wide			40	45
③Medium			40	43
④Big			60	63

(3) 同軸型電極とノズル

図3に同軸型電極を示す。外電極の高さは2 mm で統一し、内電極とポリイミドの高さを10 mm の電極を作成した。同軸型電極の内電極、外電極、ポリイミド誘電体および組み立てた状態を示す。同軸型電極は厚さ 1.0 mm の超耐熱ポリイミド成形体 (セプラ) と厚さ 0.5 mm の銅管とポリイミドテープを使用して製作する。ノズル噴出口を塞がないように

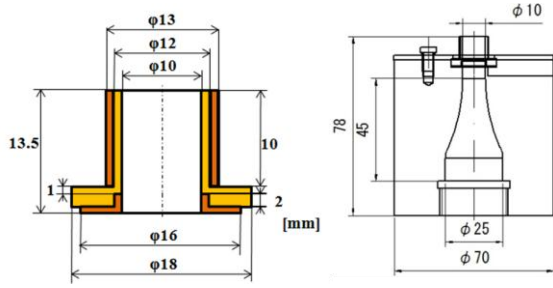


図3 同軸型電極とノズル

アクリル製ノズルと同軸に設置し、DBD プラズマアクチュエータを形成した。詳細は、図3のように円形ノズル出口にDBD プラズマアクチュエータを装着した。ノズルは出口内径 $d=10$ mm, 入口内径 $d=25$ mm のアクリル製軸対称速度均一ノズルである。DBD プラズマアクチュエータに電源 (PSI: PSI-PG1040F) より交流電圧を加えてプラズマを発生させ、ノズルから噴出する噴流の拡散制御を試みた。

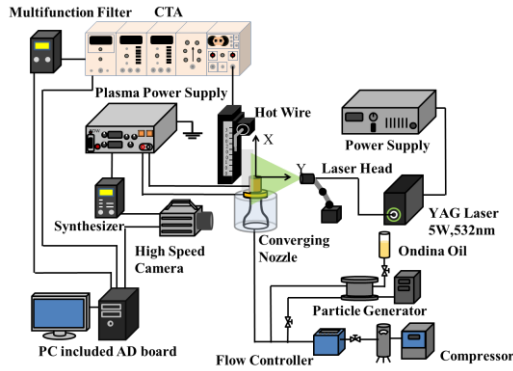


図4 実験装置

(4) 実験装置

空気を圧縮機からノズルに供給し、 $Re=1000$ および 2000 の条件で実験を行った。噴流の可視化には $1 \mu\text{m}$ 程度のシード粒子を空気に混入してからノズルより大気中、鉛直上方に噴出し、Nd: YAG レーザ (Omicron: LA-D40-CW) を用いたレーザライトシート法により噴流軸中心断面を可視化し、ハイスピードカメラ (Photron: FASTCAMSA1.1) を用いて噴流の初期領域 $x/d=6$ 付近までの影響を撮影した。I 型熱線を用いた熱線流速計で測定した出力からプラズマ発生によるノイズを除去する為にマルチファンクションフィルタ (NF: 3611) で 6 kHz に設定し、その出力から主噴流の速度を求めた。ここで、 x はノズル出口から噴出方向、 y はノズル中心から半径方向の距離を示す。さらに PIV 解析を行った。元画像は 6000 fps, 200 コマずつ取得し、解析データを 0.166 msec 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。

4. 研究成果

(1) 向心型電極による噴流制御

図5に表1の④の電極を用い、印加電圧、周波数をそれぞれ変化させ、主噴流に影響を与えた可視化画像を示す。DBD プラズマアクチュエータの電圧を 3 kV から 5 kV に上げた場合、主噴流を縮流させる流れを発生し、周波数を 4 kHz から 13 kHz に上げた場合は誘起流れに速度変動を生み出し主噴流を拡散させる効果を生み出すと考えられる。このことから最も主噴流に影響を及ぼすと考えられる高電圧、高周波数を印加する条件で電極

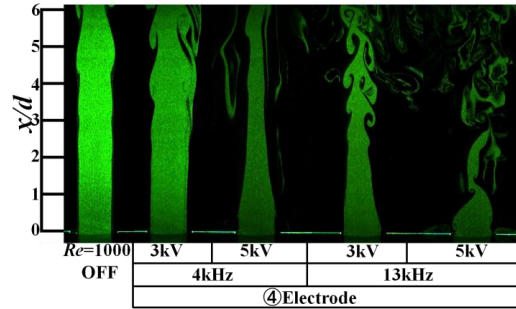


図5 印加電圧・周波数に対する噴流拡散の変化の可視化画像 ($Re=1000$)

番号①～④の電極を比較したものを図6に示す。この図から最も拡散効果が高いとみられるものは、①の最も直径の小さい電極であり、次に④の最も直径の大きい電極は効果があるとみてとれる。図6の条件に周囲にも可視化粒子を入れ撮影したのち、PIVにより解析

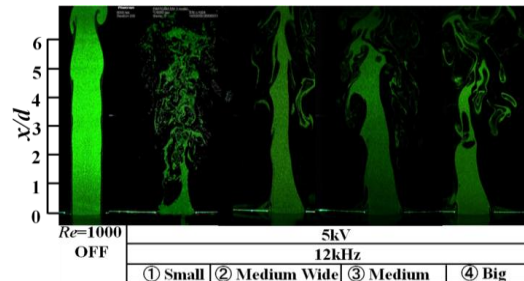


図6 向心型電極の寸法に対する噴流拡散の変化の可視化画像 ($Re=1000$)

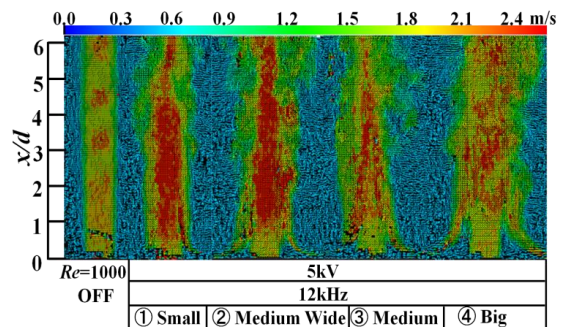


図7 向心型電極の寸法に対する噴流拡散の変化の PIV 解析画像 ($Re=1000$)

を行い、速度ベクトルを表したものを図7に示す。この図から①の最も小さい電極がノズル出口付近から主噴流を加速させているのに対し、最も大きな④の電極では $x/d=1.5$ から効果が始めている。よって電極の径が小さいほどノズル出口近傍から誘起流れが主噴流に影響を及ぼしていることが確認でき、またそれに伴う主噴流への誘起流れが当たる角度により縮流効果も電極の径が小さいほど効果が高いと考えられる。

(2) 同軸型電極による噴流制御
①連続パーストによる噴流制御

図8に $Re=1000$ のプラズマ off の可視化画像および印加周波数を 8 kHz に固定し、印加電圧 4.5 kV, 4.97 kV, 5.52 kV と増加させた場合の可視化画像を示す。off とプラズマをかけた場合を比較するとプラズマによる影響で噴流が早期に崩れ始め、4.5 kV は $x/d=4$ 付近、4.97 kV では $x/d=3$ 付近、5.52 kV では $x/d=3.5$ 付近から拡散している。これにより電圧を高くするとプラズマの発生が強くなり、誘起流れが増加し主噴流に与える乱れが大きくなるため、拡散し始める位置がノズル出口に近づくと考えられる。

図8の可視化画像を PIV 解析したものを図9に示す。同図より、off とプラズマをかけた場合を比較すると、プラズマの影響によって速度が減速しないポテンシャル領域が短くな

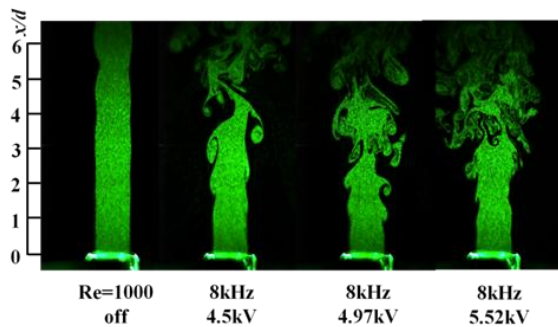


図8 印加電圧に対する噴流拡散の変化の可視化画像 ($Re=1000$)

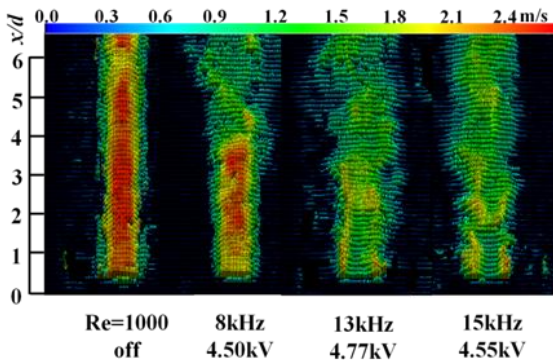


図9 印加電圧に対する噴流拡散の変化のPIV画像 ($Re=1000$)

ることが分かる、特に印加電圧を大きくするとノズル出口での噴流境界層が増速し、噴流中心の減速がみられた。これはノズル内壁面で発生した誘起流れの影響により噴流境界層が増速したと考えられる。

図10に $Re=1000$ のプラズマ off の可視化画像および電圧 4.5 kV に固定し、周波数を 8 kHz, 13 kHz, 15 kHz に変化させた場合の可視化画像を示す。off と 8 kHz の場合を比較すると 8 kHz では $x/d=4$ 、13 kHz では $x/d=3$ 、15 kHz を $x/d=2.5$ 付近から拡散している。13 kHz, 15 kHz では $x/d=1$ から渦輪が形成されていることが確認できる。これは周波数が高くなることで誘起流れが増加し主噴流に与える乱れが大きくなり、不安定性が増強し拡散位置がノズル出口に近付くと考えられる。

図10の可視化画像を PIV 解析したものを図11に示す。同図より、ノズル出口に注目すると、off と比べて 8 kHz では $x/d=4$ で噴流が崩れ始め、15 kHz をみると $x/d=1$ 付近で渦輪の発生がみられ、 $x/d=2.5$ 付近の位置で拡散している。このことから周波数を高くすることで低い電圧からでもプラズマが発生し、誘起流れが強いため、主噴流に与える影響が強く表れていると考えられる。

図12に $x/d=1$ の位置で、プラズマを発生させない場合および 4.5 kV 付近の電圧で周波数を 8 kHz, 13 kHz, 15 kHz に変えた場合

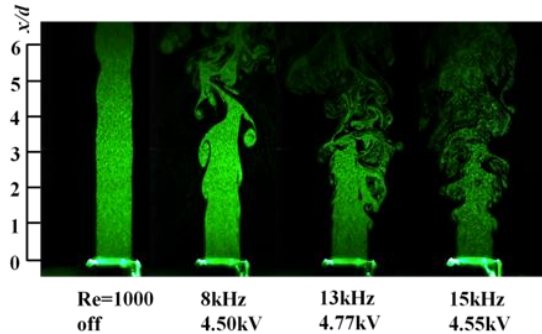


図10 印加周波数に対する噴流拡散の変化の可視化画像 ($Re=1000$)

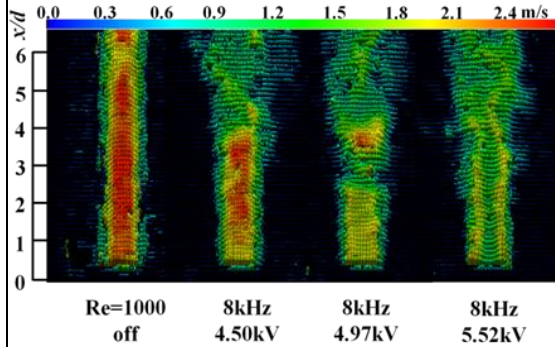


図11 印加周波数に対する噴流拡散の変化のPIV画像 ($Re=1000$)

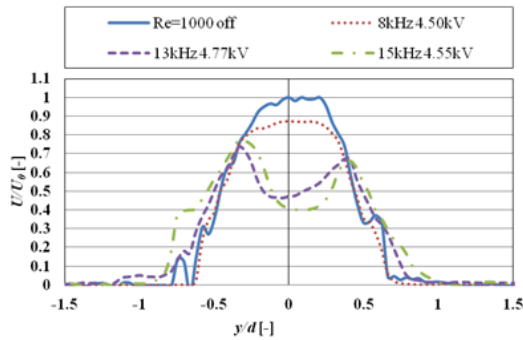


図 12 印加周波数に対する噴流断面速度分布の変化 ($x/d=1$, $Re=1000$)

の噴流断面速度分布を示す。同図からプラズマ off と比べてプラズマを発生させている場合は周波数が高くなるにつれ $y/d=\pm 0.4$ 付近の噴流の速度が速くなり、これに伴い中央部平均速度が遅くなることを確認できる。これはプラズマの発生により生じた誘起流れにより $y/d=\pm 0.4$ 付近の流れが加速したためである。また中心平均速度が遅くなったのは噴出させる流量が一定のため、噴流境界層が不安定になり噴流が膨らみ噴流の断面積が拡大したため速度が減少したと考えられる。

②間欠バーストによる噴流制御

図 13 は間欠周波数 $f_d=160$ Hz でプラズマ off, 間欠比 $duty=10\%$, 50% , 90% の噴流の可視化画像を示す。ここで、この噴流のプリファード周波数は $f_p \approx 160$ Hz であり、これに対応した値を間欠周波数とした。また、高電圧高周波数が印加/印加無の時間比を間欠比とした。この可視化画像から、プラズマ off と比べて間欠比 $duty$ が上昇するほど、 $x/d > 3$ における噴流の拡散範囲が広がることが確認できる。これは間欠比 $duty$ が上昇につれてプラズマの発生しない間隔が短く、渦輪と渦輪の間隔が非常に狭くノズル出口付近で渦輪と渦輪が重なり、拡散し始めたと考えられる。

図 13 の可視化画像を PIV 解析したものを図 14 に示す。プラズマ off と比べてプラズマを発生させることで噴出速度が保持される範囲：ポテンシャルコアが短くなることを確認できる。間欠比 $duty=10\%$ では $x/d=2.5$, $duty=50\%$ では $x/d=1$, $duty=90\%$ では $x/d=4.5$ から速度が落ち始めていることが確認でき、 $duty=50\%$ が一番早期に噴流が崩れ始めた。これは間欠比 $duty=10\%$ ではプラズマの発生時間が少ないため噴流の乱れが小さくなり、噴流の崩れる位置がノズル出口から遠くなったと考えられる。間欠比 $duty=90\%$ では前述したように、プラズマの発生しない時間が短いため渦輪の発生間隔が短くなり、渦輪が噴流中心まで到達する前

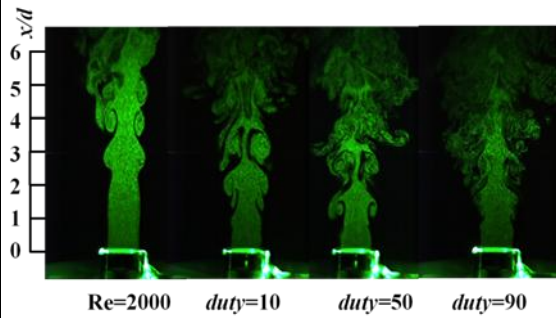


図 13 間欠比に対する噴流拡散の変化の可視化画像 ($Re=2000$)

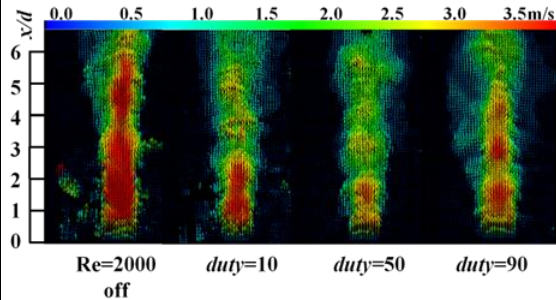


図 14 間欠比に対する噴流拡散の変化の PIV 画像 ($Re=2000$)

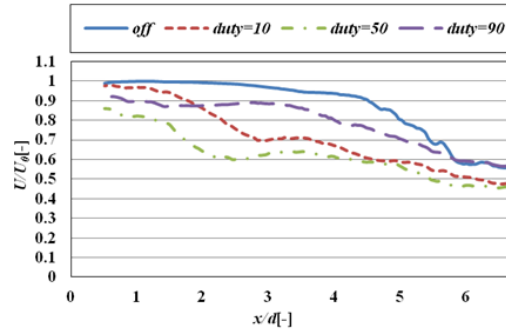


図 15 間欠比に対する噴流中心の速度分布の変化 ($Re=2000$)

に渦輪と渦輪が早期に重なりあったため中心速度が落ちにくくなったと考えられる。

図 15 に間欠周波数 160 Hz で間欠比 $duty=10\%$, 50% , 90% の噴流中心上の平均速度分布を示す。プラズマ off では $x/d=4.5$ 付近、間欠比 $duty=10\%$ は $x/d=2$ 付近、間欠比 $duty=50\%$ は $x/d=1.5$ 付近、間欠比 $duty=90\%$ は $x/d=3.5$ 付近から中心速度が急激に減速し始め、プラズマを発生させることでどの条件でも off に比べて早期に減速し始めた。これはポテンシャルコアが崩れ始めていることを示しており、その位置から噴流が完全に崩れ始めたことが確認できる。特に間欠比 $duty=50\%$ が $x/d=1.5$ 付近から落ちたのは、この条件が噴流初期の不安定性を早期に

増大させ、渦輪の発達を促進させ、これに続く渦輪の崩壊がノズル出口に近づいたと考えられる。

(3) まとめ

DBD プラズマアクチュエータは印加する電圧、周波数および間欠制御により誘起流れを操作することで、噴流拡散制御に有効な特性を備えていることが確認できた。その内容を次に列記する。

- ① 向心型電極では、電極に印加する電圧の増大は噴流の縮流効果を強め、周波数の増大は拡散効果を大きくする。また、電極直径を大きくすると縮流効果を与える位置がノズルから離れ、縮流効果が小さくなり、逆に外部円形電極直径が小さい場合、電極から発生する誘起流れがノズル近くに集中するため縮流効果が強くなる。
- ② 同軸型電極では、プラズマ発生により噴流が不安定となる位置がノズルに接近することから噴出後早期に拡散混合が行われる。また、印加周波数および印加電圧を高くすると拡散効果が強くなる。
- ③ 同軸型電極では、噴流のプリファード周波数と同期する間欠周波数 $f=160$ Hz を印加した場合、間欠比 $duty=90$ ではプラズマの発生しない時間が短いため渦輪と渦輪の重なりがノズル出口付近で起こり、噴流中心の流れが崩れにくい。
- ④ 同軸型電極では、噴流のプリファード周波数と同期する間欠周波数 $f=160$ Hz を印加した場合、間欠比 $duty=50$ が渦輪の発達を最も促進させ、ノズル出口付近で噴流が拡散する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 川井悠輝, 木村元昭, 噴出ガス密度と出口速度分布の影響によるプリファード周波数と噴流拡散の関係, 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 77巻775号, 2011, pp. 507-516

[学会発表] (計10件)

- ① Kimura, M., Asakura, J., Onishi, M., Sayo, K. and Miyagi, N., Initial Flow Structure Control of Jet Diffusion using A Coaxial DBD Plasma Actuator, 2nd Symposium on Fluid Structure Sound Interactions and Control, 2013, May 20-23, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

- ② 大西真澄, 佐用謙太郎, 朝倉旬, 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, 2012, 9/9-12, 金沢大学角間キャンパス
- ③ 大西真澄, 小野喬, 金洪宇, 木村元昭, 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 2011 年度年次大会, 2011, 9/11-14, 東京工業大学
- ④ Jin, H., Ono, T. and Kimura, M., Jet Flow Control by DBD Plasma Actuator (Effect of Electrode Dimensions on Jet Diffusion), ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011, July 24-29, Hamamatsu, Japan
- ⑤ 金洪宇, 小野喬, 高野智和, 木村元昭, DBD プラズマアクチュエータを用いた噴流の制御 (電極寸法による噴流拡散の変化), 日本機械学会流体工学部門講演会, 2010, 10/30-31, 山形大学

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 同軸型 DBD プラズマアクチュエータ及び噴流制御装置
発明者: 木村元昭, 金洪宇, 朝倉旬, 大西真澄
権利者: 学校法人日本大学
種類: 特許
番号: 特願 2012-248088
出願年月日: 平成24年11月12日
国内外の別: 国内

名称: 同軸型 DBD プラズマアクチュエータ及び噴流制御装置
発明者: 木村元昭, 金洪宇, 朝倉旬, 大西真澄
権利者: 学校法人日本大学
種類: 特許
番号: 特願 2011-254919 (基礎出願)
出願年月日: 平成23年11月22日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 元昭 (KIMURA MOTOAKI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 70204998