

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420132

研究課題名(和文) DBDプラズマアクチュエータを用いた浮力噴流の拡散制御とバーナー火炎への適用

研究課題名(英文) Diffusion Control of Buoyancy Jet using DBD Plasma Actuator and Application to a burner flame

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：誘電体バリア放電による誘起流れを噴流出口に印加して空気噴流と二酸化炭素噴流の拡散制御を試みた。また、層流火炎に同プラズマを印加した場合の火炎の挙動を調査した。

空気噴流および二酸化炭素噴流では共にバースト制御がプリファード周波数を増幅させるため不安定性を促進し、速度ポテンシャルコアが崩れることから噴流中心速度の減衰が増す。

層流火炎実験では、当量比 =0.80において、印加電圧を印加すると火炎の吹き飛びが抑えられた。さらに、高電圧を印加した場合、プラズマによる燃焼促進効果よりもプラズマアクチュエータの誘起流れによる境界層付近の速度が上昇し、火炎形状が不安定になり失火しやすくなる。

研究成果の概要(英文)：Induced flow of a dielectric barrier discharge is applied to the jet outlet, diffusion control of the air jet and the carbon dioxide jet have been studied. Moreover, the behavior of the flame in the case of applying a plasma to the laminar flame were investigated.

In the air jet and the carbon dioxide jet, burst control promotes instability order to amplify the Preferred frequency, velocity potential core from that collapse at an early stage, the jet center velocity is attenuated at an early stage. Also, in the laminar flame experiments, under the condition of equivalence ratio: 0.80, blowout of the flame is suppressed upon application of a plasma. Furthermore, when a high voltage is applied, than the combustion acceleration effect due to the plasma increases the velocity in the near of the boundary layer due to induced flow of plasma actuators, flame shape becomes unstable, it tends to misfire.

研究分野：工学

キーワード：乱流 噴流 プラズマ 拡散制御 燃焼

1. 研究開始当初の背景

噴流の渦輪構造の発生・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、その周波数を  $f$  (プリファード周波数) とすると、ストロハル数  $St = fd/U$  ( $d$ : 噴出口直径,  $U$ : 噴出速度) は 0.24~0.51 程度となる。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制御することができる。音波や 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る。

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国内外で注目を集め、壁面境界層制御では研究が盛んに行われている。しかし、噴流制御に適用した例が少ない中、本研究では、平成 21 年度より噴流に DBD (Dielectric Barrier Discharge) 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がいかに噴流拡散に影響するかを実験的に研究し、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して来た。また、空気噴流のみでなく、周囲と密度が異なる浮力噴流やバーナー火炎の制御につながるものと考え今回の着想に至った。

2. 研究の目的

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、工学的な問題点とも深い関連性を持つ重要な流れの一つである。本研究では主噴流ノズル出口内壁面に円筒状誘電体を挟んだ 2 つの円筒状電極を配して、同軸型 DBD プラズマアクチュエータを形成し、プラズマによる誘導流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て、周囲と密度が同一あるいは異なる浮力噴流(空気、ヘリウム、二酸化炭素)の拡散制御を実施すると共に、この制御方法をバーナー火炎の気体燃料の拡散混合の促進および火炎の安定化に適用することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に DBD 同軸型プラズマアクチュエータの一例を示す。円筒状誘電体の内外に電極を配して数 kHz、数 kV の交流を印加してプラズマを生成し、これより生じる誘導流で噴流拡散を制御する。本研究は、「フェーズ 1」DBD プラズマアクチュエータの周囲と密度の異なる噴流の拡散制御への適用」及び「フェーズ 2」拡散火炎の燃焼性能向上への適用」の二段階で行われ、フェーズ 1 は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

間欠周波数および間欠率の条件による最適な組み合わせを実験的に確立し、フェーズ 2 はフェーズ 1 と平行して実施して、予混合燃焼の安定化への適用を試み、燃焼性能の向上への有用性を見出す。

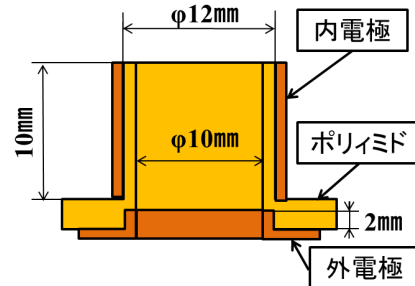
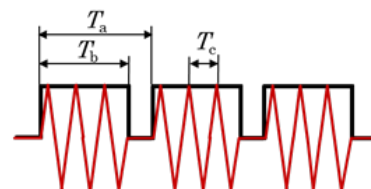


図 1 同軸型プラズマアクチュエータ

(2) 実験装置及び方法

空気噴流と二酸化炭素噴流実験

図 1 に実験で使用した同軸型電極の断面図を示す。ノズルは内径  $d = 10\text{mm}$ 、縮流比 6.25 のアクリル製軸対称速度均一型絞りノズルを使用し、図 1 の電極をノズル出口と同軸状に配置し DBD プラズマアクチュエータを形成した。電源(PSI:PSI-PG1040F)より電圧 4.8kV、6.0kV、周波数 8.0kHz、15kHz の交流電圧を印加し、電圧の on, off のバースト制御を行い、噴流のプリファード周波数に対して約 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍のバースト周波数  $f_d$  を入力する。その際に間欠比は  $\text{duty} = 0.1, 0.5, 0.9, 1.0$  とした。これによりノズル出口内面円周状にプラズマを周期的に発生させ、ノズルから噴出する噴流の拡散制御を試みた。図 2 に印加周波数:  $f$ 、バースト周波数:  $f_d$  および間欠比:  $\text{duty} = T_b/T_a$  の関係を示す。図 3 に実験装置概略を示す。本実験では空気と二酸化炭素の二種類の噴出気体を用いる。空気噴流は圧縮機からフローコントローラーに空気を供給し、 $Re=2000$  ( $3.1\text{m/s}$ ) の条件で円形ノズルから大気中に噴出させた。また、二酸化炭素噴流はボンベから二酸化炭素を供給し、 $Re=2000$  ( $1.65\text{m/s}$ ) の条件でノズルから噴出させた。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させノズルより大気中に鉛直上方に噴出させ、Nd:YAG レーザーを用いたレーザーライトシート法により噴流軸中心上を可視化し、初期領域:  $x/d = 6$  までの範囲をハイスピードカメラを用いて噴流への影響を撮影した。さらに PIV 解析により速度分布を得た。



$$f = 1/T_c, f_d = 1/T_a, \text{duty} = (T_b/T_a) \times 100\%$$

図 2 バースト周波数と duty 値

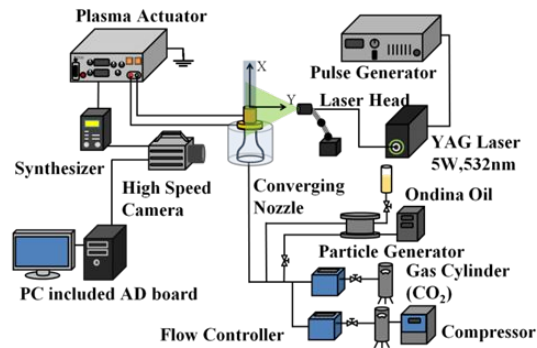


図 3 実験装置

### 層流火炎実験

バーナー火炎実験に使用する同軸型 DBD プラズマアクチュエータを図 4 に示す．誘電体の材質は絶縁性，耐熱性を考慮してマシナブルセラミックス(マコール)，外電極と内電極の材質は銅を使用する．噴流出口の内径は  $d=6\text{ mm}$  である．誘電体の厚さは  $1\text{ mm}$ ，内電極と外電極の厚さは  $0.5\text{ mm}$  である．バーナー出口内径を  $d=6\text{ mm}$  とした．電源(PSI 製: PSI-PG1040F)より印加電圧  $6\text{ kV}$ ,  $7\text{ kV}$ , 周波数  $4\text{ kHz}$ ,  $8\text{ kHz}$  の交流電圧を加えてプラズマを発生させ，誘起流れにより燃料に速度変化を生じさせ，火炎の制御を試みた．実験ではコンプレッサーから空気を供給し，ガスボンベから工業用純プロパンを供給する．それぞれデジタルマスフローコントローラーによって一定の流量を設定し，チャンバー内で混合させ，ノズルから噴出させ点火する．点火した後に同軸型 DBD プラズマアクチュエータに電圧を印加し，プラズマによる誘起流れを発生させる．この方法を各噴出流量および体積濃度で行い，プラズマ OFF 時と ON 時の火炎の安定限界を調べた．さらに各安定限界の火炎形状をハイスピードカメラで撮影した．

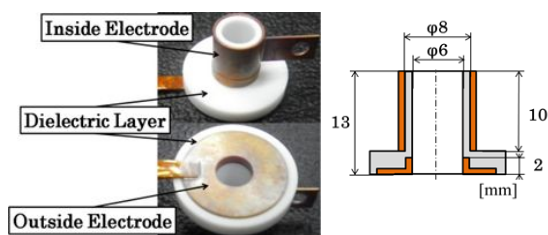


図 4 マコール製プラズマアクチュエータ

## 4. 研究成果

### (1) 空気噴流と二酸化炭素噴流

#### 空気噴流

印加電圧  $4.8\text{ kV}$ , 周波数  $15\text{ kHz}$  とした場合の空気噴流の結果に関して，図 5 に  $\text{duty}=0.1$  でプラズマ off とバースト周波数  $f_d=80, 160, 240, 320\text{ Hz}$  の可視化画像を示す．同図から， $f_d=160\text{ Hz}$ ,  $320\text{ Hz}$  において  $x/d=3$  付近で大きく渦を巻き，その後渦の崩壊が確認できる．図 6 に図 5 の PIV 解析画像を示す． $f_d=160\text{ Hz}$ ,  $320\text{ Hz}$  では  $x/d=3$  付近でポテンシャルコアが崩れているが， $f_d=80\text{ Hz}$  では  $x/d=5$  付近，

$f_d=240\text{ Hz}$  では  $x/d=4$  付近でポテンシャルコアが崩れている．これは  $f_d=160\text{ Hz}$ ,  $320\text{ Hz}$  がバースト周波数の等倍，2 倍であるためバースト制御がバースト周波数を増幅し，不安定性を促進させノズル近くで渦輪が大きく発達したと考えられる．図 7 に噴流の中心平均速度分布を示す． $f_d=160\text{ Hz}$  では  $x/d=1.5$  付近， $320\text{ Hz}$  では  $x/d=2.5$  付近で急激に速度が低下している．このことから  $f_d$  がバースト周波数を増幅させノズル付近で渦輪が崩壊することにより，速度が減衰したと考えられる． $f_d=160\text{ Hz}$  が  $320\text{ Hz}$  と比べ早期に速度が低下しているのは，バースト周波数の倍数のため効果が高いと考えられる．

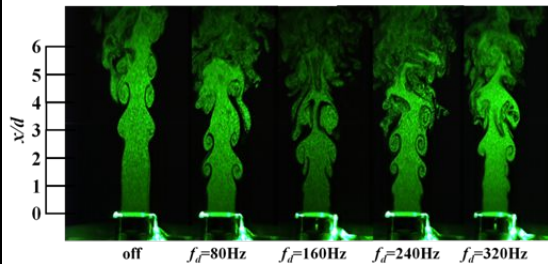


図 5 流れの可視化 ( $15\text{ kHz}$ ,  $\text{duty}=0.1$ )

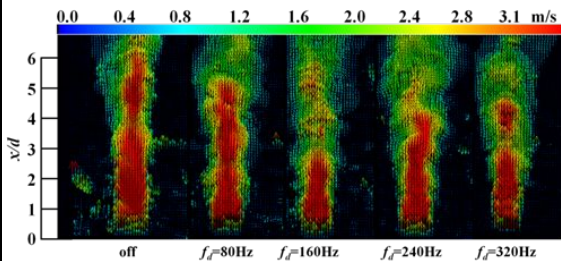


図 6 PIV による速度分布 ( $15\text{ kHz}$ ,  $\text{duty}=0.1$ )

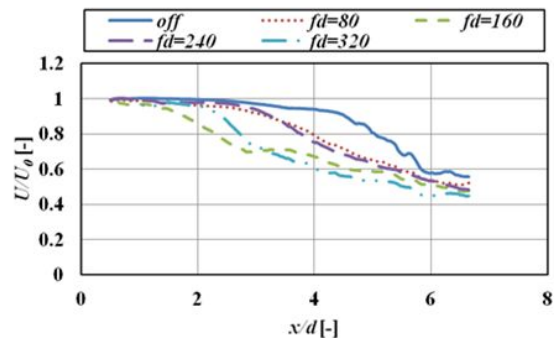


図 7 噴流軸上速度 ( $15\text{ kHz}$ ,  $\text{duty}=0.1$ )

### 二酸化炭素噴流

印加電圧  $6.0\text{ kV}$ , 周波数  $8.0\text{ kHz}$  とした場合の二酸化炭素噴流の結果に関して，図 8 に  $\text{duty}=0.1$  でプラズマ off，バースト周波数  $f_d=57.5, 105, 162.5, 210\text{ Hz}$  の可視化画像を示す．同図から， $f_d=57.5, 105\text{ Hz}$  は  $x/d=3.0$  付近で噴流形状が崩壊し， $f_d=57.5\text{ Hz}$  は渦輪の巻き込みが大きいことが確認できる．図 9 に図 8 の PIV 解析画像を示す．他に比べ  $f_d=57.5\text{ Hz}$  は  $x/d=2$  付近で速度分布が半径方向に広がっていることが確認できる．これは

$f_d=57.5\text{Hz}$  は他の間欠周波数よりも図 2 に示した間欠周期： $T_a$  が最も長いため、同じプラズマの印加割合でも印加時間の長い  $f_d=57.5\text{Hz}$  は噴流の持つ不安定性が増長し、噴流の拡散位置がノズル出口に近くなったと考えられる。図 10 に図 9 と同条件の中心平均速度分布図を示す。プラズマ off に比較しバースト制御時では中心速度が減少していることが確認できる。 $f_d=105\text{Hz}$  はバースト制御時の中で最も速度が減少している。これはプリファード周波数と等倍の値のため、バースト周波数がプリファード周波数を増幅し噴流の不安定性を増長させたことで速度が最も減少したと考えられる。

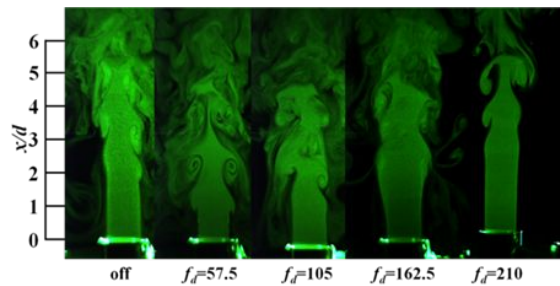


図 8 流れの可視化 (8kHz, duty=0.1)

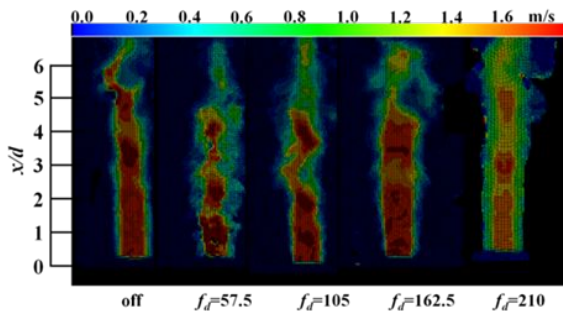


図 9 PIV による速度分布 (8kHz, duty=0.1)

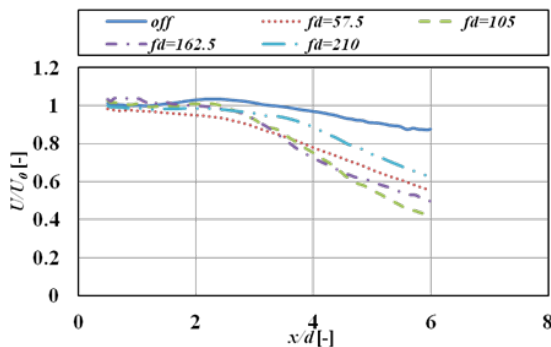


図 10 噴流軸上速度 (8kHz, duty=0.1)

## (2) 層流火炎 形状観察実験

当量比  $\phi=0.80$ , 周波数 4, 8kHz, 印加電圧 4~16kV をかけた際のプラズマ ON 時, OFF 時の予混合火炎の比較画像を図 11, 12 に示す。当量比 0.80 では、希薄燃焼のため、プラズマ OFF 時では火炎が吹き飛んでしまったが周波数 4, 8kHz は共通して 6kV, 8kV, 10kV を印加すると吹き飛びの抑制が行えることがわかる。また、当量比  $\phi=0.80$  の電圧が 4kV の場合は吹き飛び抑制の効果が得られな

った。電圧 6kV, 8kV, 10kV をかけた場合に火炎が燃焼したことから、プラズマによりラジカルが発生し燃焼が促進され、吹き飛びを抑制したと考えられる。電圧 12kV, 14kV, 16kV をかけた際には、燃焼促進効果よりも同軸型 DBD プラズマアクチュエータの誘起流れにより境界層付近の速度が上昇したため、火炎形状が不安定になったと考えられる。なお 4kHz, 4kV は失火を確認しており、8kHz, 14kV, 16kV は電源の安全性を考慮し、測定を行わなかった。

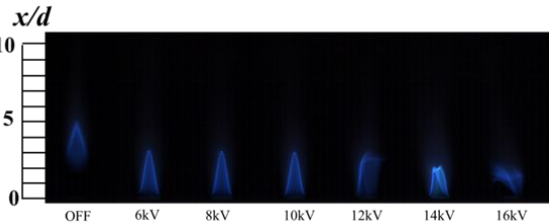


図 11 火炎形状観察  
( $Q=3.31 \pm 0.01\text{L/min}$ ,  $\phi=0.80$ ,  $f=4\text{kHz}$ )

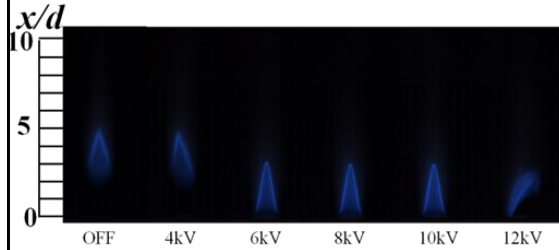


図 12 火炎形状観察  
( $Q=3.31 \pm 0.01\text{L/min}$ ,  $\phi=0.80$ ,  $f=8\text{kHz}$ )

## 分光測定実験

図 13 に  $Q=3.31 \pm 0.01\text{L/min}$ ,  $\phi=1.00$ ,  $f=8\text{kHz}$  でのプラズマ OFF 時, ON 時での分光実験の結果を示す。光の波長のピークが 310nm, 385nm, 430nm, 470nm, 520nm, 560nm にあり、310nm は OH, 385nm, 430nm は CH, 470nm, 520nm, 560nm は  $\text{C}_2$  だと考えられる。また、印加電圧を増加させると波長のピークも増加していることから、ラジカルが増加していることが推察できる。なお、 $\phi=0.80$  ではプラズマ OFF 時で失火してしまうため安定した状態での分光測定が不可能である。そのため  $\phi=1.00$  を掲載しているが  $\phi=1.00$  以下の分光結果も電圧印加に伴い波長の強度が上昇している傾向にある。

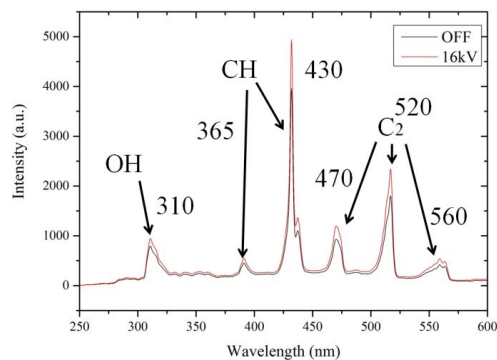


図 13 分光測定スペクトラム

### (3) まとめ

同軸型 DBD プラズマアクチュエータは印加する電圧、周波数およびバースト制御により発生する誘起流れの速度や乱れが変わるなど、有効な特性を備えており、以下の知見を得た。

- A) 空気噴流では  $duty = 0.1$ ,  $f_d = 160\text{Hz}$ ,  $320\text{Hz}$  はバースト制御がプリファード周波数を増幅させるため噴流の不安定性を促進し、ノズル近くで渦輪の発達が大きくなるため、速度ポテンシャルコアが崩れるのが早くなる。
- B) 二酸化炭素噴流では  $duty = 0.1$ ,  $f_d = 105\text{Hz}$  はプリファード周波数を増幅させ、噴流の不安定性を促進させ、噴流中心速度が最も減衰する。

同軸型 DBD プラズマアクチュエータを用いて層流火炎の制御を行う実験を試み、以下の知見を得た。

- A) 当量比  $= 0.80$  において、印加電圧  $6\text{kV}$ ,  $8\text{kV}$ ,  $10\text{kV}$  を印加すると火炎の吹き飛びの抑制が行えることがわかる。この抑制効果はラジカルによるものだと考察している。
- B) 予混合火炎に高電圧を印加した場合、プラズマによる燃焼促進効果よりも同軸型 DBD プラズマアクチュエータの誘起流れにより境界層付近の速度が上昇し、火炎形状が不安定になり失火しやすくなる。
- C) 分光実験より、光の波長のピークが  $310\text{nm}$ ,  $385\text{nm}$ ,  $430\text{nm}$ ,  $470\text{nm}$ ,  $520\text{nm}$ ,  $560\text{nm}$  に存在し、 $310\text{nm}$  は OH,  $385\text{nm}$ ,  $430\text{nm}$  は CH,  $470\text{nm}$ ,  $520\text{nm}$ ,  $560\text{nm}$  はそれぞれ  $\text{C}_2$  だと考えられるラジカルが存在する。電圧を印加すると、強度が増加するため、プラズマには火炎の燃焼促進効果があると考えられる。
- D) 印加電圧を増加させると波長のピークが増加していることから、ラジカルが増加していることが分かる。

### 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3件)

N. MIYAGI and M. KIMURA, Study of diffusion control in circular jet using concentric-type DBD plasma actuator, Bulletin of the JSME Journal of Fluid Science and Technology, Vol.9, No.4, (2014) 1-10, DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0065, 査読有り  
宮城 徳誠, 大西 真澄, 朝倉 洵, 佐用 謙太郎, 木村元昭, 同心円型 DBD プラズマアクチュエータを用いた円形噴流制御に関する研究(誘起流れによる運動量付加と拡散への影響), 日本機械学会論

文集(B編), 79巻 808号 (2013) 2704-2715, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/79/808/79\\_2704/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/79/808/79_2704/_pdf), 査読有り

宮城 徳誠, 大西 真澄, 朝倉 洵, 佐用 謙太郎, 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制御, 日本機械学会論文集(B編), 79巻 806号 (2013)2041-2052, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/79/806/79\\_2041/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib/79/806/79_2041/_pdf), 査読有り

#### [学会発表](計13件)

富田 健斗, 吉田 幸司, 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 バーストモードとプリファード周波数の関連性, 日本機械学会関東支部第22期総会・講演会, 2016 3月11日, 東京工業大学(東京都・目黒区)  
奥山航輝, 吉田幸司, 木村元昭, DBD プラズマアクチュエータによるバーナー火炎への影響, 日本機械学会 2015 年次大会, 2015, 9月13日~16日, 北海道大学(北海道・札幌市)

M. Kimura & K. Okuyama, Influence of nozzle exit velocity distribution on flame stability using a coaxial DBD plasma actuator, 2<sup>nd</sup> Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 2015, 5-9 July, Perth (Australia)

H. Ueki, N. Miyagi and M. Kimura, Diffusion Control of the Coaxial Jet by DBD Plasma Actuator, INT. CONF. ON JETS, WAKES AND SEPARATED FLOWS, 2015, JUNE 16-18, STOCKHOLM (SWEDEN)  
Asakura J and Kimura M, Influence on Jet Flame by a Coaxial DBD Plasma Actuator, INT. CONF. ON JETS, WAKES AND SEPARATED FLOWS, 2015, JUNE 16-18, STOCKHOLM (SWEDEN)

Motoaki Kimura, Hideo Ueki and Norimasa Miyagi, Jet Diffusion Control by DBD Plasma Actuator: Relationship between Preferred Frequency and Burst Mode, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2014, 17-19th December, Chiang Mai (Thailand)

Koki Okuyama, Motoaki Kimura and Koji Yosida, Study of Laminar Flow Flame using a Coaxial DBD Plasma Actuator, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2014, 17-19 December, Chiang Mai (Thailand)

植木英夫, 宮城徳誠, 木村元昭, 同軸型 DBD プラズマアクチュエータによる二酸化炭素噴流の拡散制御 日本機械学会第92期流体工部門講演会, 2014, 10月25日~26日, 富山大学五福キャンパス(富

山県・富山市)  
木村 元昭, 佐用 謙太郎, 植木 英夫,  
宮城 徳誠, DBD プラズマアクチュエータ  
を用いた噴流拡散制御 パーストモ  
ドとプリファ周波数の関連性, 第 42  
回可視化情報シンポジウム, 2014, 7 月  
21 日~22 日, 工学院大学(東京都・新  
宿区)

奥山航輝, 朝倉洵, 吉田幸司, 木村元昭,  
同軸型 DBD プラズマアクチュエータを用  
いた噴流火炎の研究, 日本機械学会熱工  
学コンファレンス, 2013, 10 月 19 日~  
20 日, 弘前大学(青森県・弘前市)

Motoaki Kimura, Jun Asakura, Masazumi  
Onishi, Kentaro Sayo, Norimasa Miyagi,  
Jet Diffusion Control by using A  
Coaxial Type DBD Plasma Actuator, 4th  
International Conference on Jets,  
Wakes and Separated Flows, 2013, Sep 17  
- 21, IB Building, Nagoya University  
(Nagoya, Chikusa-ku)

佐用謙太郎, 大西真澄, 奥山航輝, 宮城  
徳誠, 木村元昭, 同軸型 DBD プラズマ  
アクチュエータによる噴流拡散制御(間欠  
制御が及ぼす噴流への影響), 日本機械  
学会 2013 年度年次大会, 2013, 9 月 8  
日~11 日, 岡山大学(岡山県, 岡山市)

Motoaki Kimura, Jun Asakura, Masazumi  
Onishi, Kentaro Sayo, Initial Flow  
Structure Control of Jet Diffusion by  
Using Coaxial Type DBD Plasma  
Actuator, Second Symposium on  
Fluid-Structure-Sound Interactions  
and Control, 2013, 20-23 May, Hong Kong  
(China)

〔図書〕(計 2 件)

M. Kimura, K. Okuyama, Springer,  
Lecture Notes in Mechanical  
Engineering 2016  
Fluid-Structure-Sound Interactions  
and Control Proceedings of the 3rd  
Symposium on Fluid-Structure-Sound  
Interactions and Control, 2016,  
123-127

M. Kimura, J. Asakura, M. Onishi, K.  
Sayo, N. Miyagi, Springer, Lecture  
Notes in Mechanical Engineering 2014  
Fluid-Structure-Sound Interactions  
and Control Proceedings of the 2nd  
Symposium on Fluid-Structure-Sound  
Interactions and Control, 2014,  
235-239

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:

種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.mech.cst.nihon-u.ac.jp/studies/kimura/>

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