

令和元年5月14日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06131

研究課題名(和文) DBDプラズマアクチュエータ支援による噴流制御とバーナー火炎の安定性

研究課題名(英文) Jet control and burner flame stability assisted by DBD 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：噴流ノズル出口に同軸型DBDプラズマアクチュエータ：DBD-PAを形成し、プラズマによる誘導流により出口の速度分布を操作し噴流拡散を制御すると共に、予混合バーナー火炎に適用し、誘導流、活性化学種による火炎の安定性を調査した。

その結果、噴流にDBD-PAをバーストモードで使用した場合、出口での渦輪形成から崩壊に至る過程を操作し拡散制御できることを明らかにした。また、バーナー火炎では、DBD-PA(4kV-14kV連続駆動)の印加により低当量比で燃焼継続できることを確認した。14kV以上では誘導流の影響と活性化学種やオゾンを確認した。更に4kVでは電場の効果が顕著なことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特徴はDBD-PAによる誘導流とプラズマによる活性化学種の働きの相互作用で達成されることが考えられる、バーナー火炎の安定、変形、吹き飛び限界の拡張の要因を明らかにし、プラズマ支援燃焼プロセスの理解を深め、さらに、本手法を予混合燃焼と拡散燃焼に適用することで、工学的な特色のみならず産業への技術的な寄与に発展させることができる。

研究成果の概要(英文)：A coaxial DBD plasma actuator: DBD-PA was formed at the outlet of the jet nozzle, and the velocity distribution at the outlet was controlled by induced flow from plasma to control the jet diffusion. This was applied to a premixed burner flame to investigate the stability of the flame by induced flow and active species.

As a result, when DBD-PA was used in the burst mode for the jet, it was clarified that the process from the vortex ring formation at the exit to the collapse could be manipulated and diffusion controlled. In the burner flame, it was confirmed that the combustion could be continued at a low equivalence ratio by applying DBD-PA (4kV-14kV continuous drive). Above 14 kV, we confirmed the effects of induced flow and activated chemical species and ozone. Furthermore, it was confirmed that the effect of the electric field was remarkable at 4 kV.

研究分野：熱流体工学

キーワード：噴流 火炎 燃焼 DBDプラズマ 拡散制御

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

### 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きた。渦輪の発生・成長過程を操作する噴流拡散制御法が数多く提案され、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、DBD(Dielectric Barrier Discharge) プラズマアクチュエータ：DBD-PA が流体制御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る。噴流制御への適用例が少ない中、研究代表者は、平成 21 年度より噴流に DBD-PA 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、DBD-PA 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きた。一方、非平衡プラズマを用いた点火・燃焼支援技術の研究が進められており、自動車用ガソリンエンジン点火やマイクロガスタービンの低負荷運転時の燃焼の安定への応用が期待されている。基本的な燃焼形態であるバーナー火炎では、火炎面直前の速度分布、火炎基部の状態が火炎の安定、変形、吹き飛びに大きく関係している。バーナー火炎に DBD-PA を適用した場合、その特性を把握するためには、ノズル内から噴出直後の流れの構造を考察すると共に、プラズマにより活性化学種が増加して燃焼が促進されるプロセスを理解することが重要である。

### 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-PA を形成し、プラズマによる誘導流により、ノズル内壁面近傍の速度分布を操作し、浮力噴流(空気、ヘリウム、二酸化炭素)の拡散制御を実施し、また、この制御方法をバーナー火炎の予混合燃焼に適用すると共にプラズマにより促進されると考えられる、活性化学種の増加とバーナー火炎の安定、変形、吹き飛びとの関連性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究は、フェーズ 1「DBD-PA の噴流への適用」及びフェーズ 2「DBD-PA のバーナー火炎への適用」の二段階で行われ、フェーズ 1 は DBD-PA の電極と誘電体の形状と配置、印加する周波数・電圧・波形等の条件による最適な組み合わせを実験的に確立する。噴流初期領域の流動特性を評価するため、ノズル出口近傍で発生する渦輪の発生周期を高速カメラによる噴流断面可視化画像より数えて求め、噴流拡散に対して有効なバースト周波数を調査する。また、LDV による速度分布測定を実施した。フェーズ 2 では、分光学的手法を用い、火炎面からの自発光解析を行い活性化学種の同定と増加量を求め、さらに火炎の安定、変形、吹き飛び限界との関係を調査する。本研究に使用した同軸型 DBD-PA の概略図を図 1 に示す。電極に交流電圧を印加すると、ノズル壁面に DBD プラズマが発生する。DBD プラズマの発生に伴い誘起流れが発生し、それによってノズル内を流れる予混合気に対して変動を与える。電極と電源装置の接続方法を変えることで、主流に沿う方向、逆らう方向にそれぞれ DBD プラズマ(誘起流れ)が発生するように設計し、沿う方向を Case A、逆らう方向を Case B とした。誘電体の材質はマシナブルセラミックス(ホトベール)、電極の材質にはりん青銅に金メッキを施したものを使用した。ノズル内径は  $d = 6\text{mm}$ 、電極の厚さは  $0.5\text{mm}$ 、電極を遮る誘電体の厚さは  $1\text{mm}$  とした。このノズルを先細ノズルに取り付け、それぞれの実験をおこなった。実験装置全体の概略図を図 2 に示す。本研究では、コンプレッサから空気を、ガスボンベから工業用純プロパンを供給する。それぞれをデジタルマスフローコントローラによりチャンバ内に供給し予混合気を作成した後、ノズル出口にて点火を行った。混合気の当量比は  $\phi = 0.80 \sim 1.05$  の範囲で  $0.05$  ずつ変化させ、流量は  $Q = 3.31 \pm 0.01\text{L/min}$  ( $U_{ave} = 1.95\text{m/s}$ ) 一定として実験を行った。アクチュエータにファンクションジェネレータ高電圧増幅器を用いて交流電圧を印加し、DBD プラズマを発生させ、火炎などを観察した。

我々は DBD プラズマが火炎に与える変化を調べるためにハイスピードカメラを用いた火炎の直接写真の撮影実験、誘起流れによる予混合気の流れの変化を確認するために線香粒子を用いた可視化実験、さらにその速度変化を具体的な値で確認するために LDV を用いた流速測定実験の計 3 種類を行った。それぞれの実験での印加電圧の実験条件は印加周波数  $f = 4\text{kHz}$ 、印加電圧  $4\text{kV}$ 、 $10\text{kV}$ 、 $14\text{kV}$  とした。火炎の撮影実験では撮影速度を  $125\text{fps}$  とし、当量比と印加電圧

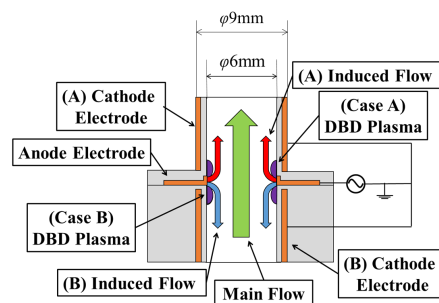


Fig. 1 同軸型 DBD-PA 断面

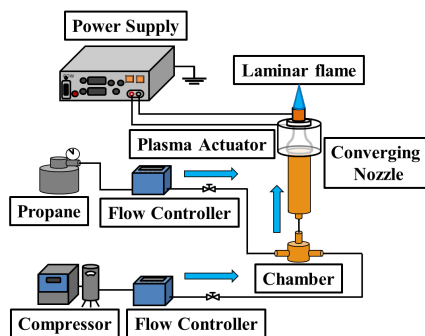


Fig. 2 実験装置概略図

を変化させて撮影を行った。流れの可視化実験では撮影速度を 12000fps、使用気体は空気のみで、当量比 = 1.00 と同じレイノルズ数  $Re = 870 (Q = 3.48 \pm 0.01 \text{L/min} (U_{ave} = 2.08 \text{m/s}))$  に合わせ実験を行った。LDV を用いた流速測定実験では、使用気体は空気のみ、トレーサ粒子として線香粒子を使用した。さらに分光器を用いた化学活性種の測定実験においては、未燃混合気プラズマを印加する、プラズマ自発光と火炎自発光の 2 種類行った。集光方法としてミラー、平凸レンズを 2 枚用いて、プラズマ自発光を光ファイバーに導き、焦点部分に分光器受光部を設置する。未燃混合気の当量比 = 1.10 において、印加周波数 4kHz 一定とし、電圧を 2kV から 16kV まで 2kV ずつ上昇させた。炭化水素の燃焼時に多く発生する青色の波長である CH ラジカルと考えられる波長 430nm 付近に着目して実験を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 無次元励起周波数と励起渦発生周波数の関係

DSD-PA をバースト駆動して誘起流を発生し、発生した渦の発生周波数を励起渦周波数  $f_{vortex}$  とする。このときの印加するバースト周波数を  $f_{burst}$  とする。図 3 に  $f_{vortex}$  と  $f_{burst}$  の関係を示す。同図より、 $f_{vortex} > f_{burst}$ ,  $f_{vortex} = f_{burst}$ ,  $f_{vortex} < f_{burst}$  の 3 区間が存在することが分かる。ここで、 $f_{vortex} = f_{burst}$  区間ではロックイン現象が生じ、この区間では入力した任意の周波数で渦輪を発生することで、噴流を制御することができる。噴流の自然渦発生周波数をバースト周波数とした場合、渦の発生がバースト周波数と同調するため、一定の周波数でノズル近傍より渦輪が発生する。二つの渦輪が安定的に一定の周期でペアリングして大規模渦輪が形成されるため、渦輪間の間隔が一定となり、渦輪間の縦渦の切繋がりが安定して行われ、縦渦が大きく成長する。一方、ロックイン現象が生じる周波数よりも低い周波数で励起した場合は、誘起流による渦輪とこの渦輪が及ぼすせん断層の不安定による渦輪が発生することでペアリングの周期が安定しない。そのため縦渦の切繋がりが安定せず、縦渦の成長が抑制される。さらに、ロックイン現象が生じる周波数よりも高い周波数で励起した場合は、渦輪の形成が不完全なため細かい渦が散乱する形となる。タイミングによっては渦輪が発生するが、渦輪のペアリングが非対称となり、非軸対称渦が形成される。

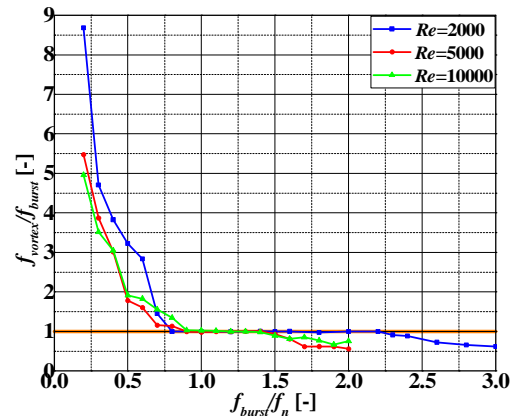


Fig.3 励起周波数と渦発生周波数の関係

##### (2) 火炎の直接写真の撮影実験

当量比 = 0.95, 印加周波数  $f = 4 \text{kHz}$ , での電圧印加時の予混合火炎の直接写真の撮影結果を CaseA, CaseB 共に図 4 にそれぞれ示す。OFF 時の火炎は比較用として当量比 = 1.05 のものを載せている。まず、本来では失火してしまう当量比 = 0.95 においても火炎の燃焼が継続できることが確認できた。また、OFF 時の火炎とそれぞれ比較してみると、印加電圧 4kV では変化は確認できず、10kV では若干の乱れを、14kV では大きな乱れを確認できた。変化の大きい印加電圧 14kV の時にそれぞれ着目してみると、CaseA では、火炎長が短くなり、横方向への揺れはあまり見られなかった。また、CaseB では、CaseA の時に比べ火炎が左右に激しく乱れているのが確認できた。これらの火炎面の変化は火炎面に突入する予混合気の流れが誘起流れによって変化したためだと考えられる。

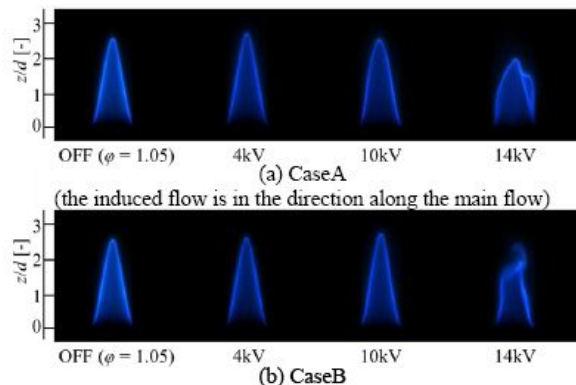


Fig.4 印加電圧の変化により火炎の比較

##### (3) LDV を用いた流速測定実験

LDV により測定されたノズル出口における速度分布と乱れ強さ分布 ( $Re = 870, f = 4 \text{kHz}, z/d = 0.5, U_p - p = 14 \text{kV}$ ) を図 5 に示す。同図より、CaseA, CaseB 共に印加電圧 14kV 時に速度分布、乱れ強さ分布がそれぞれ変化していることが確認できた。速度分布に着目してみると、CaseA では境界層付近の流速が増加し、ノズル中心速度が減少していることを確認できた。これは、主流に沿う方向に発生させた誘起流れによって、壁面近傍の流速が上がり、流量一定のため、ノ

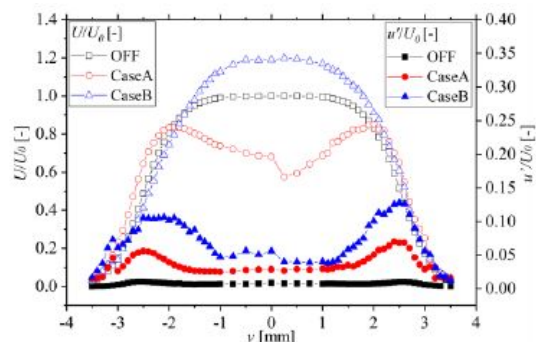


Fig.5 ノズル出口近傍の速度分布

ズル中心速度が低下したためと考えられる。また、このことから、図 4(a)の結果の火炎長が短くなったことは誘起流れによる速度分布の変化が原因だと考えられる。また、CaseB では境界層付近の流速が若干減少し、ノズル中心速度が増加していることを確認できた。これは、主流に逆らう方向に発生させた誘起流れによって壁面近傍の流速が抑えられ、ノズル中心の速度が増加したためと考えられる。次に乱れ強さ分布について着目してみると、CaseA では OFF 時に比べ全体的に増加し、特に境界層付近が増加していることが確認できた。CaseB では CaseA よりさらに大きな値を示した。これは、逆向きにする誘起流れによって、壁面近傍の流速が下がり、噴流内の速度差が CaseA より大きくなり渦が生成され始めたためと考えられる。また、このことから、図 4(b)の結果の火炎が激しく揺れたのは乱れ強さによるものだと考えられる。

#### (4) 分光器を用いた化学活性種の測定実験

化学活性種の増加の有無を調べるために分光器実験を行った。Case B における印加電圧 4kV, 10kV, 16kV の際のプラズマ自発光結果の全体波長を図 6 に示す。プラズマを印加することにより OH, CH ラジカルを始めとする種々の化学活性種が発生していることが確認できる。プラズマ自発光法結果から CH ラジカルと考えられる波長を抜き出した結果を各々図 7 に示す。プラズマ自発光結果より CH ラジカルは、電圧 OFF から 6kV まで 0 (ゼロ) となり、8kV, 10kV, 12kV, 14kV, 16kV を印加すると増加した。また、同様に火炎自発光結果 (CH) より 12kV, 14kV, 16kV においても増加を確認できることから 16kV における燃焼の継続は、化学活性種の増加による燃焼促進効果によって吹き飛びが抑制されたと考えられる。また、10kV はプラズマ自発光結果より化学活性種が増加しているが火炎自発光結果では増加しておらず差異が生まれた。これは、プラズマによって発生した化学活性種は非常に不安定であり、火炎面に到達する前に寿命を迎え、火炎面に影響を与えることができなかったためであると考えられる。

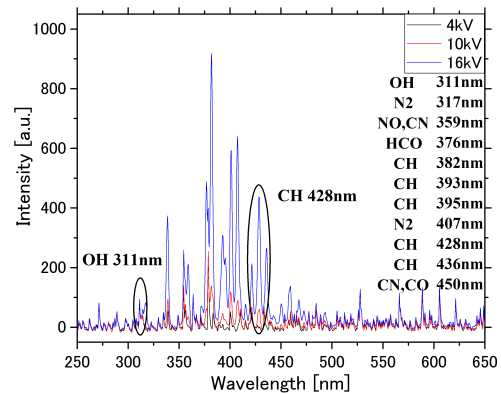


Fig.6 プラズマ自発光の全体波長

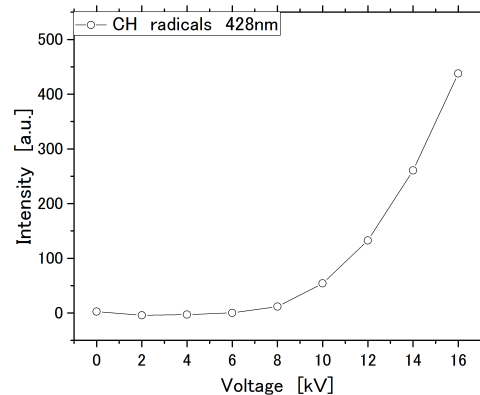


Fig.7 プラズマ自発光強度の増加

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計2件)

M. Akimoto, H. Matsumori, M. Kimura, Jet Control using the Coaxial Type DBD-PA by Burst Modulation, Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 査読有 2018, 75-80

Springer ISBN: 978-981-10-7541-4 (Print), 978-981-10-7542-1 (Online)

秋元 雅翔, 松森 大記, 木村 元昭, 同軸型 DBD プラズマアクチュエータによる噴流制御バースト駆動による噴流渦構造の変化, 可視化情報学会論文集, 査読有, Vol. 37, No. 6, 2017, 21-31

DOI: 10.3154/tvsj.37.21

### [学会発表](計10件)

土田 紘司, 秋元 雅翔, 吉田 幸司, 木村 元昭, 同軸型 DBD プラズマアクチュエータを予混合バーナーに用いた研究 -誘起流れによる速度分布変化の影響-, 第56回燃焼シンポジウム, 2018

秋元 雅翔, 木村 元昭, 同軸型 DBD プラズマアクチュエータによる噴流の拡散促進と抑制, 日本機械学会 2018 年度年次大会, 2018

Hiroshi Tsuchida, Shouta Kanai, Masato Akimoto, Kouji Yoshida, Motoaki Kimura, Study of Laminar Flow Premixed Flame using a Coaxial Type DBD Plasma Actuator -Behavior of Chemically Active Species and Ozone-, 6th Pacific-Asia Conference on Mechanical Engineering, 2017, 1-7

M. Akimoto, H. Matsumori, M. Kimura, Jet control using the coaxial type DBD-PA by burst modulation, 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 2017, 114-115, 査読有

H. Matsumori, M. Akimoto, M. Kimura, Effect of burst modulation by coaxial DBD-PA on jet, 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 2017, 70-71,

査読有

S. Kanai, H. Tsuchida, K. Yoshida, M. Akimoto, M. Kimura, Flame Control in Combustion Nozzle using a Coaxial Type DBD Plasma Actuator, 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 2017, 52-53, 査読有

金井翔太, 土田紘司, 秋元雅翔, 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燃焼バーナーノズルにおける燃焼制御, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017

秋元雅翔, 松森大記, 木村元昭, 同軸型 DBD プラズマアクチュエータのオリジナル駆動波形による噴流制御, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017

富田健斗, 金井翔太, 秋元雅翔, 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予混合バーナーの特性, 第 54 回燃焼シンポジウム

秋元雅翔, 松森大記, 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の拡散促進, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2016

〔図書〕(計 1 件)

秋元雅翔, 木村元昭, 宮城徳誠 他(分担著書), アクチュエータの新材料, 駆動制御, 最新応用技術, 2017, 247-257, 技術情報協会

ISBN: 978-4-86104-649-0

〔産業財産権〕

取得状況(計 1 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, 朝倉洵, 大西真澄

権利者: 学校法人日本大学

種類: 特許

番号: 特許第 6210615 号 (P6210615)

取得年: 平成 29 年

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 秋元 雅翔

ローマ字氏名: (AKIMOTO, Masato)

科研費による研究は, 研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため, 研究の実施や研究成果の公表等については, 国の要請等に基づくものではなく, その研究成果に関する見解や責任は, 研究者個人に帰属されます。