

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760184

研究課題名(和文) 微小噴流アクチュエータによるアクティブ燃焼制御機構に関する研究

研究課題名(英文) Study on active combustion control technology using miniature jet actuator

研究代表者

齋木 悠 (Saiki, Yu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60550499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：オンサイト発電用マイクロガスタービンで使用される小型燃焼器では、低レイノルズ数と高い出力変動に伴い、良好な燃焼特性の維持が極めて難しい。そこで本研究では、ガスタービン燃焼の典型的な熱流動であるメタン・空気同軸噴流火炎を対象として、同軸ノズル内壁に配備した微小噴流アクチュエータ群を用いた新たなアクティブ燃焼制御手法を構築した。火炎上流における渦運動およびメタン・空気の混合過程をアクチュエータにより柔軟に制御した結果、異なる出力条件において、保炎特性および燃焼排出ガス特性を著しく改善できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Micro gas turbines (MGT) for small-scale distributed generation systems are expected to play a major role in the future energy security with lower environmental impacts. However, small combustors for MGT are operated at low Reynolds numbers with a wide range of partial load, where it is difficult to maintain stable and clean combustion. In the present study, a methane-air coaxial jet flame, which is commonly used in gas turbine combustors, is actively controlled with miniature jet actuators installed on the inner surface of the coaxial nozzle. The periodic radial miniature jet injections are realized by using a rapid-response pneumatic servo-valve. By manipulating the large-scale vortical structures and the associated methane-air mixing with the actuators, it is demonstrated that flame holding and exhaust gas characteristics are drastically improved under different load conditions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：噴流 渦 混合 燃焼 能動制御 レーザー計測

1. 研究開始当初の背景

小型分散エネルギーシステムは、建設導入が容易で、様々な燃料を適用でき、またコージェネレーションも可能であるため、従来の大型発電所と比較し、エネルギーをより効率的かつ系統的に利用できる可能性を有する。ただし、機器の小スケール化に伴う要素効率の低下や環境汚染物質の増加は、克服すべき課題である。例えば、マイクロガスタービンで使用される小型燃焼器では、低レイノルズ数による混合不良と高い負荷変動に伴い、燃焼効率の低下、窒素酸化物排出量の増加および火炎の不安定化が懸念されている。負荷変動に伴う流量・当量比条件の変化に対し、スワラやブラフポディーなどの受動制御素子のみで対応するのは難しい。一方、燃焼現象は、分子レベルの化学反応と熱・物質の拡散・混合過程が深く干渉する現象であるため、流動を積極的に操作することで、負荷状況に応じて燃焼特性の改善を行う能動制御システムの構築が期待される。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では、ガスタービン燃焼器内の典型的な熱流動であるメタン・空気同軸噴流を主な対象とし、同軸ノズル内壁に備えた微小噴流アクチュエータ群により、同軸噴流初期せん断層に周期的な速度攪乱を投入することで、大規模渦構造およびそれに伴う二流体の混合を能動的に制御することを目的とした。さらに、混合制御実験の結果を踏まえ、本手法を燃焼場に適用し、異なる負荷条件の下で、燃焼特性の改善を行うことを目指した。

3. 研究の方法

(1) 能動制御用同軸ノズル

図1に、本研究で用いた能動制御用同軸ノズルを示す。環状ノズルの内径  $D_i$  および外径  $D_o$  は、それぞれ  $D_i=10\text{ mm}$  および  $D_o=20\text{ mm}$  である。同軸噴流の内外流体には、それぞれメタンおよび空気を使用し、テストセクション内に噴出した。1 kW クラスの火炎を想定し、環状噴流のバルク平均流速  $U_{m,o}(=1.56\text{ m/s})$  に基づくレイノルズ数  $Re(=U_{m,o}D_o/\nu_{air})$  は 2000、流量に基づく当量比  $\phi$  は、 $\phi=0.75$  に設定した。環状ノズル出口内壁に設けた微小噴流孔群 ( $D_p=1\text{ mm}$ ) からの周期的な空気の吹き出しにより、初期せん断層に速度攪乱を直接的に投じた。本実験では、24 個ある微小孔のうち 12 個をアクチュエータとして使用した。これは、12 個以上用いることで周方向に比較的一様な速度攪乱を投入でき、さらに後述する制御に伴う縦渦の発達を阻害しないようにするためである。微小噴流の周期制御には、高い応答周波数を有するサーボバルブ(MOOG 製, J814-0008)を用いた。全ての微小噴流は同位相で吹き出し、その平均流速  $U_{m,m}$  を  $U_{m,m}/U_{m,o}=0.75$  とした。主な制御パラメータは、サーボバルブの駆動周波数  $f_v$  で定義したス

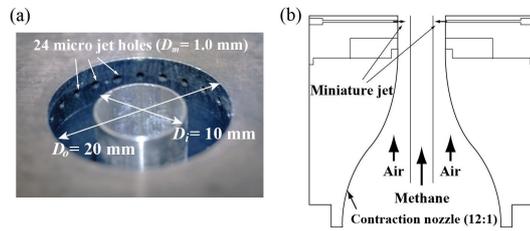


図1 微小噴流アクチュエータを備えた同軸ノズル: (a) 外観図, (b) 側面図

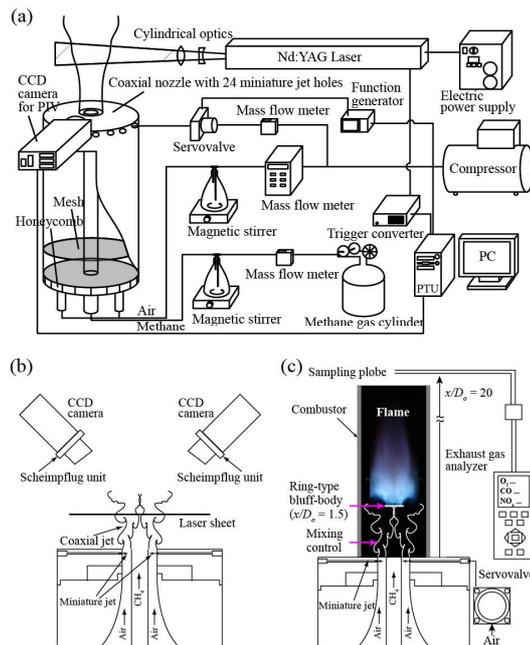


図2 実験・計測装置の概略図: (a)外観図, (b)ステレオ PIV, (c)燃焼特性評価システム

トローハル数  $St_v(=f_v D_o/U_{m,o})$  とし、 $St_v=0.1\sim 1.9$  ( $f_v=8\sim 148\text{ Hz}$ ) の範囲で変化させた。また、バルブの駆動信号波形として、1 周期に渡り吹き出しを行う正弦波および duty 比を設けたパルス波(有効 duty 比 20%)を採用し、渦の巻き上がりに及ぼす影響を調査した。

(2) 流れ場計測装置

図2aに、計測装置の概略図を示す。噴流中心軸を含む縦断面内での渦輪の定量評価には、アクチュエータの駆動信号の位相で固定した2成分粒子画像流速計(2C-PIV)を用いた。トレーサには、シリカ粒子( $d_p=1.2\text{ }\mu\text{m}$ , かさ密度  $\rho_p=215\text{ kg/m}^3$ )を選択した。光源には、Nd:YAG レーザーを使用した。粒子画像は、フレームストロリング CCD カメラ(1280 x 1024 pixels)で取得し、速度ベクトルの空間解像度は、 $1.5\times 1.5\text{ mm}^2$  (32 x 32 pixels)とした。2C-PIV の瞬時速度に含まれる不確かさ(包括度 95%)は、系統的な解析から、 $u=1.56\text{ m/s}$  に対し、 $u_{RSS95\%}=0.10\text{ m/s}$  と見積もられる。一方で、中心軸に垂直な横断面での縦渦の評価は、面外速度成分が大きいことを考慮して、ステレオ PIV により行った(図2b)。ステレオ画像は、シャイムフラグ配置した2台の CCD カメラで取得し、面外速度成分の測定精

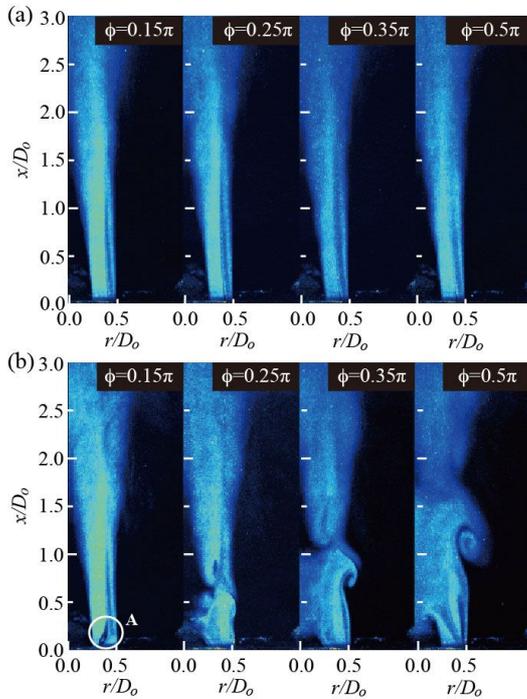


図3  $St_v=0.1$  の制御噴流の位相平均可視化像: (a) 正弦波, (b)パルス波

度を向上させるため、カメラ間の軸角度は  $90^\circ$  に設定した。速度ベクトルの空間解像度は、 $0.54 \times 0.54 \text{ mm}^2$  ( $32 \times 32 \text{ pixels}$ ) とした。ステレオ PIV の瞬時速度に含まれる不確かさ (包括度 95%) は、 $u=1.56 \text{ m/s}$  に対して  $u_{RSS95\%}=0.15 \text{ m/s}$  と見積もられる。

### (3) 燃焼特性評価装置

図 2c に、燃焼特性の評価装置を示す。同軸噴流火炎は、同軸ノズル上に設置したステンレス製モデル燃焼器内 ( $56 \times 56 \times 200 \text{ mm}^3$ ) に形成し、リング状ブラフボディー (外径 14 mm, 内径 8 mm) により保持した。保炎器の位置は、等温噴流の実験結果から、 $St_v$  の違いにより混合特性に大きな変化が現れると考えられる  $x/D_o=1.5$  とし、火炎上流での混合制御を通じて燃焼特性の改善を図った。

燃焼特性は、希薄保炎限界および  $CO/NO_x$  濃度により評価した。本実験では、火炎が 1 分間以上保持される場合を保炎の判定条件とした。また、燃焼排出ガスは、反応が凍結したと考えられる火炎長さの 2 倍程度下流 ( $x/D_o=20$ ) においてサンプリングし、ガス分析計に導き、 $CO/NO_x/O_2$  体積濃度を測定した。周囲空気による希釈の影響を除去するため  $CO/NO_x$  濃度値には、15%酸素濃度換算を施した。

## 4. 研究成果

### (1) 等温同軸噴流の能動制御

本研究では、周期的に変動する速度の瞬時値を式(1)に従い分解した。

$$u_i = \bar{u}_i + \tilde{u}_i + u_i' \quad (1)$$

ここで、右辺各項は、時間平均、位相平均および乱れ成分である。また以後の議論において、 $x$  および  $r$  をそれぞれ、流れ方向および半径方向とする。

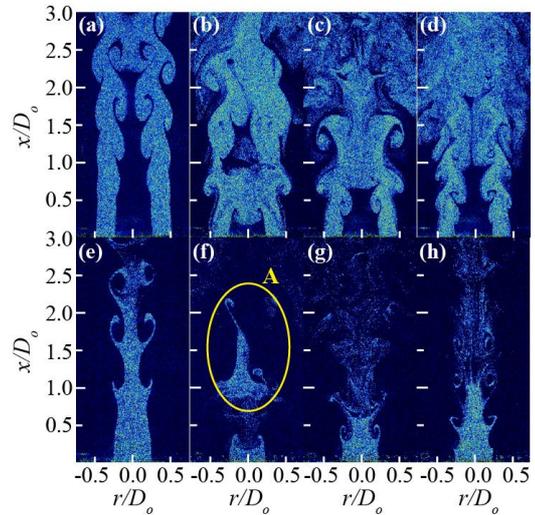


図4 自然・制御噴流の可視化像: (a,e)Natural, (b,f) $St_v=0.3$ , (c,g) $St_v=1.1$ , (d,h) $St_v=1.6$

### 制御に同期した渦輪形成

はじめに、微小噴流の吹き出し特性が大きく変化することが予想される、バルブ駆動波形が正弦波およびパルス波の条件において、制御に伴うせん断層の発達過程を調査した。図 3 に、 $St_v=0.1$  で取得した、正弦波およびパルス波条件における環状噴流の位相平均可視化像 ( $\phi=0.15\pi \sim 0.5\pi$ ) を示す。まず、正弦波の条件では、制御に伴うせん断層の変化が確認できず、環状噴流は自然噴流のそれに近い様相を呈する。一方で、パルス波の条件では、 $\phi=0.15\pi$  において外側せん断層に大きな変形が生じ (図 3 中 A)、その後、内外せん断層に大規模な渦輪が巻き上がる様子が分かる。これは、一周りに渡り吹き出しがある正弦波と比較し、duty 比を設け短時間に噴出するパルス波では、アクチュエータに供給する空気の流量が同じでもより強い速度攪乱を投入できるためと言える。そこで、本研究では、バルブ駆動波形にパルス波を採用し、 $St_v$  が渦構造に与える効果について詳細に検討することとした。

### ストローハル数 $St_v$ の効果

図 4 に、自然噴流および  $St_v=0.3, 1.1$  および  $1.6$  における制御噴流の、環状空気流・中心メタン流の瞬時可視化像を示す。自然噴流では  $x/D_o=1.0 \sim 1.5$  で緩やかに渦輪が巻き上がるが、制御噴流では、微小噴流の周期的な吹き出しに完全に同期して、早期に内外せん断層に渦輪が形成される。ただし、 $St_v=0.3$  の条件では、渦輪と次の周期の渦輪の流れ方向間隔が大きく、メタン流が流れ方向に分断され (図 4 中 A)、混合気の濃度は時間的に不均一になることが分かる。一方、 $St_v=1.1$  では、渦輪の放出が空間的に密になり、特に、内側せん断層の密な渦は、メタン・空気流体の輸送・混合促進に大きく寄与すると考えられる。また、 $St_v$  を変化させることで、メタン流のポテンシャルコア長さには違いが生じ、 $St_v=1.1$  および  $1.6$  において、それぞれ約

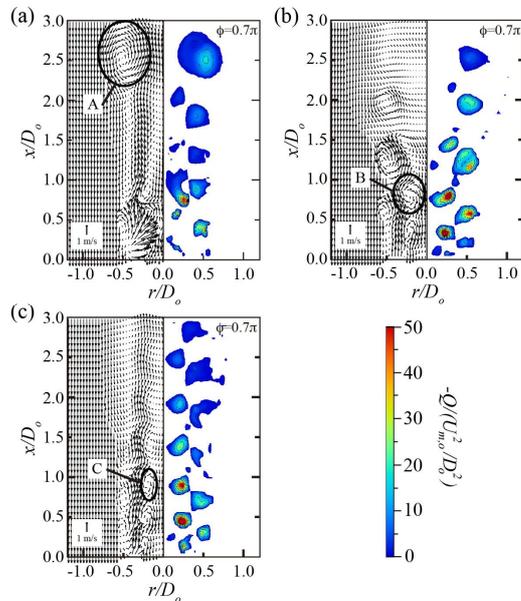


図5 制御噴流の位相平均速度場および  $Q$  の等値線図: (a)  $St_v=0.3$ , (b)  $St_v=1.1$ , (c)  $St_v=1.6$

$0.6D_0$  および  $1.1D_0$  となる。

本研究では、せん断層中に形成される渦構造を評価するために、式(2)で定義される速度勾配テンソルの第二不変量  $Q$  を用いた。

$$Q = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (i=1,2) \quad (2)$$

図5に、 $St_v=0.3$ ,  $1.1$  および  $1.6$  における制御噴流の位相平均速度場 ( $\phi=0.7\pi$ ) および渦運動を表す  $Q$  が負となる領域の等値線図を示す。まず、 $St_v=0.3$  では、流れ方向の渦径  $D_v$  が  $0.7D_0$  程度の大きな渦輪が形成されるものの(図5中A), 上述の通り、前後の周期で放出される渦の流れ方向間隔は大きい。一方、 $St_v=1.1$  では、渦生成が密になるのが明確に観察される。また、ここで、 $St_v=1.1$  および  $1.6$  の  $D_v$  は、それぞれ約  $0.5D_0$  および約  $0.36D_0$  であり(図5中B,C),  $St_v$  の上昇とともに  $D_v$  が小さくなるのが分かる。これは、 $St_v$  の上昇に伴い、制御一周期に投入される微小噴流の総流量が小さくなるためと考えられる。即ち、本制御手法では、 $St_v$  を変化させることで渦径を調整し、均一混合のみでなく混合層近傍で局所的に混合するなど、二流体の混合特性を柔軟に制御できると言える。

#### 制御に同期した縦渦形成

ここでは、流れ方向に垂直な横断面において、噴流の混合促進に重要な役割を担う流れ方向に軸を持つ縦渦について調査した。図6に、自然噴流の  $x/D_0=1.0$  および  $2.5$  における瞬時粒子画像を示す。自然噴流のせん断層の形状は、 $x/D_0=1.0$  においてほぼ円形である。そして、 $x/D_0=1.0\sim 1.5$  での渦輪の自然発生(図4ae)に伴い、 $x/D_0=2.5$  において一対の回転方向が異なるリブ構造が二次的に形成され始める。これに対し、図7aおよびbに、 $St_v=1.1$  の制御噴流における  $x/D_0=1.0$   $\phi=0.1\pi$

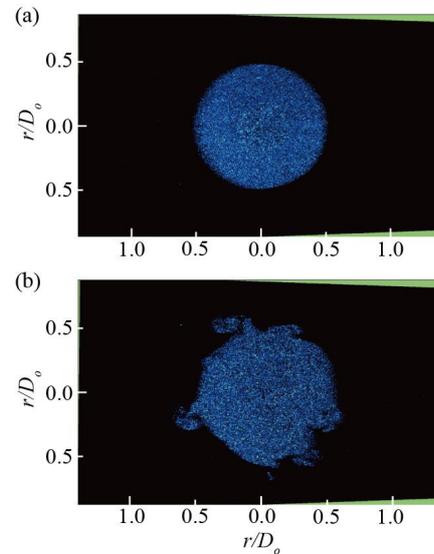


図6 自然噴流の流れ方向に垂直な横断面における瞬時可視化像: (a)  $x/D_0=1.0$ , (b)  $x/D_0=2.5$

での瞬時画像および位相平均速度場を示す。制御噴流では、自然噴流と比較し、外側せん断層の周方向に顕著な変形が生じ、アクチュエータの数と一致した12対のリブ構造が形成されることが分かる。このリブ構造の生成機構は次のように考えられる。まず、微小噴流が外側せん断層に衝突した際に、周囲流体が巻き込まれ、微小噴流を挟む位置に2つの渦が誘起される(図7a)。この結果、隣り合う微小噴流の間に誘起された回転方向が異なる渦が一対のリブ構造へと発達する。

図7cおよびdに、 $St_v=1.1$  の制御噴流における  $x/D_0=2.5$ ,  $\phi=0.1\pi$  での瞬時画像および瞬時速度場を示す。自然噴流(図6b)と比較して噴流幅は顕著に拡大し、瞬時速度場には、制御により形成されたリブ構造から発達したと考えられる数多くの縦渦が存在することが分かる。図8に、自然噴流および  $St_v=1.1$  の制御噴流の各位相における縦渦の平均数の流れ方向変化を示す。制御噴流では、自然噴流と比較し、 $x/D_0=1.0$  付近から早期に縦渦を形成できることが分かる。また、制御噴流における縦渦数は、下流に向かうにつれて急激に上昇すると共に位相変動が抑制され、 $x/D_0=2.5$  では自然噴流に対し4倍程度にまで増加する。従って、本手法では、渦輪のみでなく、縦渦の発達も促進可能と言える。これらの縦渦は、渦輪とともにメタン・空気流体の混合促進に大きく寄与すると考えられる。

#### (2) 同軸噴流火炎の能動制御

等温噴流の制御結果に基づき、本章では、火炎上流での混合制御を通じて、異なる負荷条件における燃焼特性の改善を試みた。

##### 火炎の観察

まず、図9に、自然噴流火炎および  $St_v=0.3$ ,  $1.1$  および  $1.6$  の制御噴流火炎の直接写真を示す。自然噴流火炎および  $St_v=0.3$  の制御火炎では、混合不良による煤の発生を示すオレ

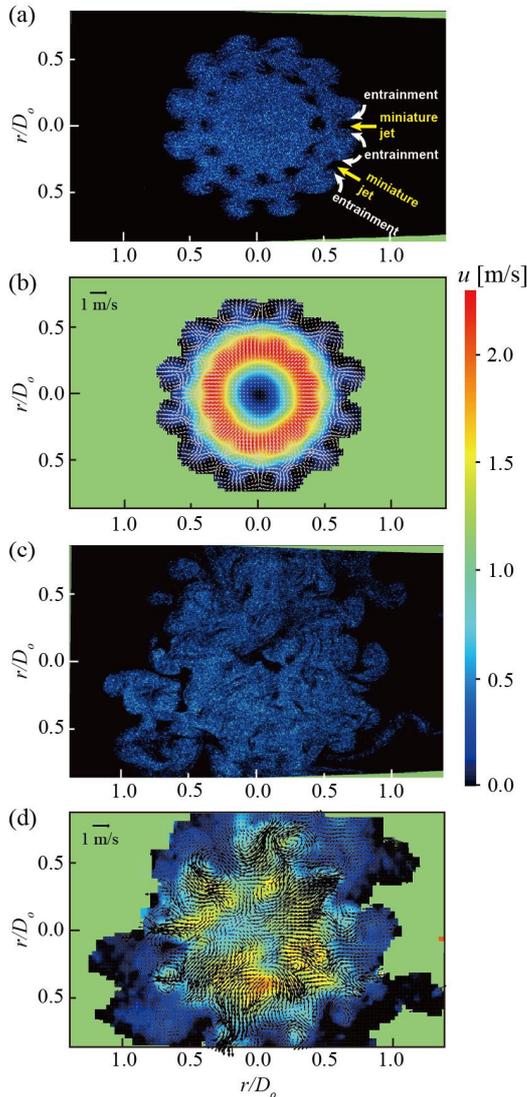


図7 制御噴流( $St_v=1.1$ )の横断面における瞬時可視化像および速度場: (a,b) $x/D_0=1.0$ , (c,d) $x/D_0=2.5$

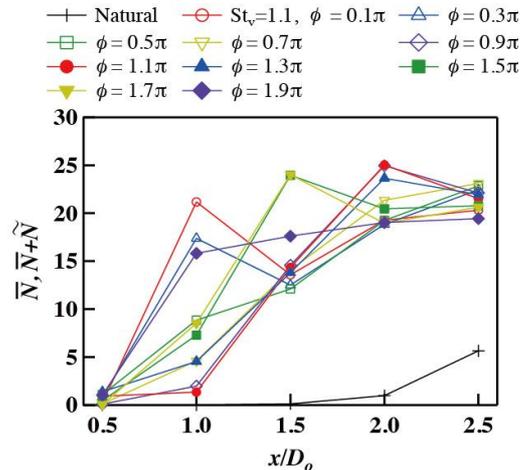


図8 自然・制御噴流( $St_v=1.1$ )の縦渦数の流れ方向変化

ンジ色の輝炎が頻りに観察される。これに対し、 $St_v=1.1$  および  $1.6$  の制御火炎では、空間的に密な渦により上流で混合が促進する

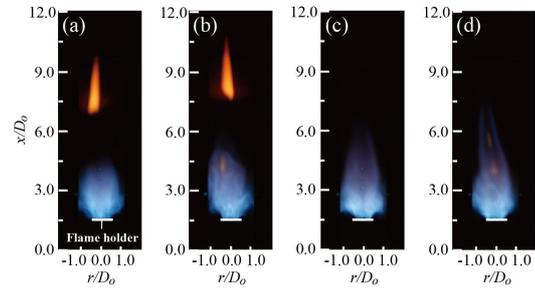


図9 自然・制御噴流火炎の直接写真: (a)Natural, (b) $St_v=0.3$ , (c) $St_v=1.1$ , (d) $St_v=1.6$

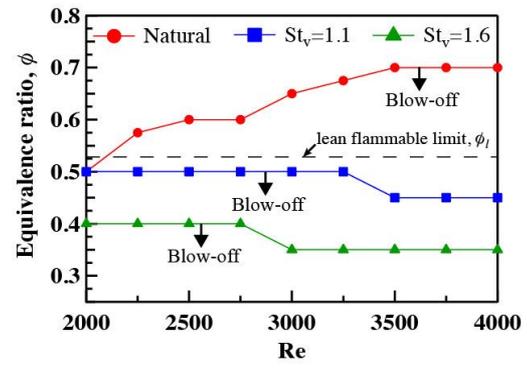


図10 自然・制御噴流火炎( $St_v=1.1, 1.6$ )の希薄保炎限界

ため、輝炎の発生が顕著に抑制される。特に、 $St_v=1.1$  では、大きなスケールの渦により、最も混合が促進することから、燃焼反応が速やかに進行し、火炎長さは約  $6D_0$  にまで短縮されることが分かる。

希薄保炎限界

図10に、各  $Re$  に対する、自然噴流火炎および  $St_v=1.1, 1.6$  の制御火炎の希薄保炎限界を示す。図中には、メタン・空気混合気の希薄燃焼限界 ( $\phi_l=0.526$ ) も併せて示した。自然噴流火炎では、 $Re=2000$  における保炎限界は  $\phi=0.5$  であるが、 $Re$  の増加に伴い、低当量比条件での保炎が難しくなることが分かる。これは、 $Re$  の上昇により自然発生的な渦輪が巻き上がり易くなり、火炎上流における燃料濃度変動が過大になるためと考えられる。一方、制御火炎では、全ての  $Re$  条件において、非制御時に対し、保炎限界が希薄側に大きく拡大する。特に  $St_v=1.6$  での保炎限界は約  $\phi=0.4$  であり、 $\phi_l$  よりも十分に低い当量比条件でも火炎を安定保持できる。これは、比較的小さな径の渦により、内側せん断層近傍で局所的に混合が進むことで、中心軸付近に可燃混合気を安定して形成し火炎に供給できると推測される。また、 $St_v=1.1$  での保炎限界は  $\phi_l$  とほぼ一致しており、この条件で均一に近い混合が進んでいることを示唆している。

排出ガス特性

ガスタービンの負荷変動を模擬した異なる当量比条件の下で、排出ガス特性の制御を試みた。当量比は、全負荷時を想定した  $\phi=0.75$  および部分負荷時を想定した希薄燃

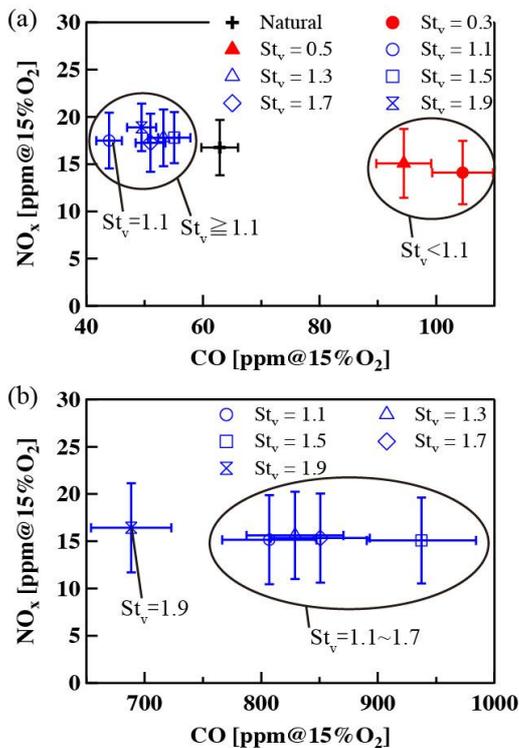


図 11 異なる負荷条件における自然・制御噴流火炎の CO/NO<sub>x</sub> 排出濃度: (a)  $\phi=0.75$ , (b)  $\phi=0.52$

焼限界近傍の  $\phi=0.52$  を選択した。図 11 に、 $\phi=0.75$  および  $\phi=0.52$  における各  $St_v$  での CO, NO<sub>x</sub> 体積濃度を示す。まず、 $\phi=0.75$  では、自然噴流火炎の CO 濃度が 62.9 ppm であるのに対し、 $St_v < 1.1$  においてその濃度は増大する。これは、間欠的な渦により、燃料濃度変動がより大きくなるためと考えられる。これに対し、 $St_v = 1.1$  では、混合が促進するため CO 濃度を改善できることが分かる。特に、 $St_v=1.1$  では、CO 濃度は 43.9 ppm となり、自然噴流火炎に対し 30%程度顕著に低減できる。一方、 $\phi=0.52$  では、 $St_v=1.1\sim 1.7$  において、CO 濃度が比較的高く平均して 855.9 ppm 程度となる。これは、混合が促進され、局所的に燃料濃度が過小な混合気形成され易いためと推測される。一方、 $St_v=1.9$  では、小さな渦により燃料豊富な可燃混合気を確実に火炎に供給できるため、CO 濃度は 688.6 ppm となり 20%程度低減される。なお、全ての条件において、NO<sub>x</sub> 濃度は約 16 ppm とほぼ一定であった。即ち、本手法では、負荷に応じて  $St_v$  を選択し、NO<sub>x</sub> 濃度を変えずに CO 濃度を 20~30%改善できると言える。NO<sub>x</sub> 濃度に変化が無い理由を明確にするには、火炎上流における燃料濃度の定量評価や火炎温度の精密測定が必要であり、今後の研究課題である。

### (3) 結論

本研究では、同軸ノズル内壁に配備した微小噴流アクチュエータ群を用い、メタン・空気同軸噴流の大規模渦構造およびそれに伴う混合の能動制御を行った。さらに、本制御

スキームを燃焼場に適用し、燃焼特性の改善を行った。以下に得られた知見を示す。

- 微小噴流の周期的な吹き出しに完全に同期して、せん断層に渦輪を早期に放出できる。特に、 $St_v = 1.1$  では渦輪の生成が空間的に密になり、 $St_v$  を変化させて渦径を調整し、二流体の輸送・混合特性を柔軟に制御できる。
- 制御に同期して、渦輪のみでなく流れ方向に軸を持つ縦渦構造を形成できる。この縦渦は、渦輪とともに混合促進に大きく寄与すると考えられる。
- 負荷に応じて、火炎上流の混合特性を  $St_v$  を変えて制御することで、保炎限界および CO 排出量を顕著に改善できることを実証した。

従来、噴流の能動制御は、音響スピーカーを用いた特定の周波数でのバルク加振により行われてきた。これに対し、本手法は、微小アクチュエータにより初期せん断層に攪乱を直接投じることで、制御に完全に同期して渦構造を形成し、混合特性の柔軟な操作を可能とする。さらに、それを通じて、高負荷変動火炎の燃焼特性を顕著に改善できる点が、本手法の大きな特色である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

齋木 悠, 田中 繁弘, 服部 駿也, 石野 洋二郎, ミニチュア噴流アクチュエータによるメタン・空気同軸噴流の混合および燃焼の能動制御, 日本機械学会論文集(B編) 査読有 79 巻 807 号 2013 2384-2396 DOI:10.1299/kikaib.79.2384

[学会発表](計6件)

齋木 悠, 名倉 香純, 石野 洋二郎, 渦構造と混合過程の操作によるメタン・空気同軸噴流燃焼の能動制御, 第 51 回燃焼シンポジウム, 東京, 2013, 2pp

齋木 悠, 田中 繁弘, 服部 駿也, 石野 洋二郎, 微小噴流アクチュエータ群によるメタン・空気同軸噴流の能動制御, 第 50 回伝熱シンポジウム, 仙台, 2013, 2pp

服部 駿也, 田中 繁弘, 齋木 悠, 石野 洋二郎, 微小噴流アクチュエータによるメタン・空気同軸噴流の大規模渦構造および混合の能動制御, 日本機械学会東海支部第 62 期総会・講演会, 三重, 2013, 2pp

田中 繁弘, 齋木 悠, 石野 洋二郎, マイクロ噴流群による単軸円形噴流の大規模渦構造および混合の能動制御, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012, 2pp

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋木 悠 (SAIKI, Yu)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60550499