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*

齋木 悠^{*1}, 田中 繁弘^{*2}, 服部 駿也^{*2}, 石野 洋二郎^{*1}

Active Control of Methane-Air Coaxial Jet Mixing and Combustion with Arrayed Miniature Jet Actuators

Yu SAIKI^{*1}, Shigehiro TANAKA, Shunya HATTORI and Yojiro ISHINO

^{*1} Nagoya Inst. of Tech. Dept. of Mechanical Engineering
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, 466-8555 Japan

Large-scale vortical structures and associated mixing in a methane-air coaxial jet are actively controlled by manipulating the initial jet shear layer with miniature jet actuators installed on the inner surface of the annular nozzle. The periodic radial miniature jet injections are realized by using a rapid-response pneumatic servovalve, and sinusoidal/pulsed flowing are employed in the present study. The spatio-temporal primary jet structures are investigated through phase-locked 2C-PIV (2 Component Particle Image Velocimetry) and Stereoscopic-PIV. In the pulsed configuration, it is found that intense vortex rings are produced in phase with the periodic control input regardless of the valve-driven frequency f_v examined. When the Strouhal number St_v , which is defined with f_v , is larger than unity, the vortex rings are densely-shed and thus methane/air mixing is prompted with low periodic fluctuation. The diameter of the vortices becomes small as St_v is increased, so that the transport range of the inner methane and outer air fluids can be controlled by changing St_v . In addition, the evolution of counter-rotating streamwise vortex pair is also confirmed. These streamwise vortices are formed as a result of the radial injection of the miniature jet, which leads to entrainment of the ambient fluid near the primary jet shear layer. They contribute the mixing enhancement in the downstream, where the vortex rings are broken down. Moreover, it is demonstrated that the coaxial jet flame characteristics such as flame holding are drastically improved by the present jet control scheme.

Key Words : Jet, Vortex, Mixing, Jet Flame, Active Control, Particle Image Verocimetry

1. 結 言

噴流は、ガスタービン燃焼器内における燃料・空気の混合、電子機器の冷却能の増進およびジェットエンジンにおける乱流騒音の低減をはじめとして、極めて幅広い産業機器に適用される流動現象である。噴流の能動制御技術は、機器の稼働状況に応じて、噴き出し流の特性を変化させ、熱・物質の輸送・混合現象の適切な制御を可能とするため、様々な熱機関・流体機器の一層の高性能化に寄与すると考えられる。例えば、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⁽¹⁾。負荷変動に伴う流量・当量比条件の変化に対し、スワラやブラフボ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、化学反応と燃料・空気の混合・拡散過程が深く干渉する現象であるため、噴流を積極的に制御することで、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。

噴流における物質の初期輸送に支配的な役割を果たすのは、K-H およびコラムモード不安定により巻き

* 原稿受付 2013 年 5 月 14 日

^{*1} 正員, 名古屋工業大学 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

^{*2} 名古屋工業大学

E-mail: saiki.yu@nitech.ac.jp

上がる渦輪であり、せん断層に周期的な攪乱を投入することで、その放出・合体を強化できる。そのため、従来、音響スピーカーを用いたバルク加振により、せん断層を励起し、噴流構造を動的に制御する試みが数多く行われてきた⁽²⁻⁶⁾。これに対し、近年、シンセティックジェット⁽⁷⁾、ミニチュア噴流アクチュエータ⁽⁸⁻¹⁰⁾、フラップ型アクチュエータ⁽¹¹⁻¹⁴⁾、プラズマアクチュエータ⁽¹⁵⁾などの制御素子を噴流ノズル出口に配備し、噴流初期せん断層に直接的に攪乱を投じることで、より高効率かつ多彩な噴流制御を可能とした研究報告がなされている。特に、ミニチュア噴流アクチュエータは、噴流ノズル近傍に機械的駆動部を持たず、また、流体の吸い込みを伴わず噴き出しのみで制御を投入するため、高温雰囲気さらさらされる実用燃焼器への適用も可能であると考えられる。Ibrahim et al.⁽⁸⁾は、単軸円形噴流を制御対象とし、ノズル円周部に設けたミニチュア噴流アクチュエータ群を非軸対称モードで周期的に駆動することで、噴流の発達を著しく促進できることを明らかにした。また、New and Tay^(9,10)は、ミニチュア噴流の定常的・周期的な噴き出しにより、単軸噴流中に、渦輪および流れ方向に軸を持つ一対の縦渦が誘起されることを平面レーザー誘起蛍光法により観察している。しかしながら、これらの研究では、単一の制御周波数における制御噴流の基礎的な統計量の取得や可視化のみに留まっている。また、ミニチュア噴流アクチュエータを燃焼場に適用し、混合の制御を通じて燃焼特性の改善を試みた研究例はこれまでにない。

そこで、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・空気同軸噴流を対象とし、環状ノズル内壁に備えたミニチュア噴流アクチュエータ群により、大規模渦構造およびそれに伴う二流体の混合を、アクチュエータの駆動周波数を主なパラメータとして能動的に制御することを目的とした。制御噴流の時空間的な発達様相は、アクチュエータの駆動信号の位相で固定した 2C-PIV および Stereoscopic-PIV により評価した。また、本噴流制御手法を燃焼場に適用し、保炎特性などの燃焼特性に与える効果についても検討を行った。なお、以後の議論において、座標系は、流れ方向および半径方向を (x, r) とする。

2. 実験装置・計測手法

2・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 $D_i = 10$ mm および $D_o = 20$ 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、高さ 700 mm、横断面 400×400 mm² のテストセクション内に噴出した。メタンは、高圧ボンベから供給され、ステンレス製直管 (外径 $D_i = 10$ mm、肉厚 $t = 0.3$ mm) 内で十分に発達した層流となり、中心噴流を形成する。空気は、圧縮機から供給され、除湿フィルタ、整流チャンバおよび収縮ノズル (面積収縮比 12:1) を通過した後、環状噴流を形成する。

1 kW クラスの火炎を想定し、環状噴流のバルク平均流速 $U_{m,o}$ ($= 1.56$ m/s) に基づくレイノルズ数 Re ($= U_{m,o} D_o / \nu_{air}$) は 2000、環状および中心噴流の運動量流束比 m ($= \rho_o U_{m,o}^2 / \rho_i U_{m,i}^2$) は 29、流量に基づく当量比は、 $\phi = 0.75$ に設定した。従って、本条件では、環状流の運動量が中心流よりも大きく、その場合は外側せん断層の渦構造が流れ場全体を支配する⁽¹⁶⁾。そのため、環状ノズル出口内壁に設けたミニチュア噴流孔群 ($D_m = 1$ mm) からの空気の噴き出しにより、初期外側せん断層に速度攪乱を直接的に投じた。なお、本実験では、24 個あるミニチュ

Fig. 1 Coaxial nozzle equipped with arrayed miniature jet actuators: (a) overview, and (b) side view.

Fig. 2 Schematic of experimental setup: (a) overview, and (b) measurement setup for Stereoscopic-PIV.

ア噴流孔のうち 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。ミニチュア噴流の周期的な制御には、応答周波数が約 300 Hz の高い応答性を有するサーボバルブ (MOOG 製, J814-0008) を用いた。全てのミニチュア噴流は、同位相で噴き出し、その平均流速 $U_{m,m}$ を $U_{m,m}/U_{m,o}=0.75$ とした。このとき、アクチュエータに供給する空気流量は、環状空気噴流の流量の 3% に相当する。主な制御パラメータは、サーボバルブの駆動周波数 f_v で定義したストローハル数 $St_v (=f_v D_o/U_{m,o})$ とし、 $St_v = 0.1 \sim 1.6$ ($f_v = 8 \sim 125$ 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 周期に渡り噴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比較した。

2・2 速度場計測

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構造の定量評価には、アクチュエータの駆動信号の位相で固定した 2C-PIV を用いた。トレーサには、 SiO_2 粒子 (鈴木油脂工業, ゴッドボール E-2C, $d_p = 1.2 \mu\text{m}$, かさ密度 $\rho_p = 215 \text{ kg/m}^3$) を選択した。粒子は、磁器攪拌器により浮遊させ、中心および環状流体にそれぞれ混入した。光源には、Nd: YAG レーザー (Continuum 社製, CLP10PIV) を使用し、円筒面レンズにより厚さ 1.0 mm のシート光を形成した後、テストセクションに導いた。パルス光間隔 Δt は、速度勾配に起因する測定精度の低下⁽¹⁷⁾に配慮して、 $\Delta t = 80 \mu\text{s}$ に設定した。粒子画像の取得には、フレームストロリング CCD カメラ (Lavision, Flowmaster3, 1280×1024 pixels) を用いた。相互相関法による速度ベクトルの算出は、Lavision 社製 Davis7 で行い、探索領域は、 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ (32×32 pixels) として、50% のオーバーラップを施した。誤ベクトルは、相互相関場の第一極大値と第二極大値の比である PVR (Peak Value Ratio) により判定し、 $\text{PVR} < 1.3$ となるベクトルを誤ベクトルとして除去した。なお、2C-PIV の瞬時速度に含まれる不確かさは (包括度 95%)⁽¹⁸⁾, 系統的な解析から、 $u = 1.56 \text{ m/s}$ に対して $u_{RRS95\%} = 0.10 \text{ m/s}$ と見積もられる。

一方で、中心軸に垂直な横断面での渦構造の評価は、面外速度成分が大きいことを考慮して、Stereoscopic-PIV により行った。図 2b に、Stereoscopic-PIV の概略図を示す。ステレオ画像は、シャイムフラグ配置した 2 台のフレームストロリング CCD カメラ (Lavision, Flowmaster3, 1280×1024 pixels) で取得し、面外速度成分の測定精度を向上させるため、カメラ間の軸角度は約 90° に設定した⁽¹⁹⁾。探索領域は、 $0.54 \times 0.54 \text{ mm}^2$ (32×32 pixels) として、50% のオーバーラップを施した。その他の設定は、2C-PIV と同様である。Stereoscopic-PIV の瞬時速度に含まれる不確かさは (包括度 95%), $u = 1.56 \text{ m/s}$ に対して $u_{RRS95\%} = 0.15 \text{ m/s}$ と見積もられる。

3. 実験結果

3・1 自然噴流

図 3a に、PIV により取得した自然噴流のノズル出口近傍 ($x/D_o = 0.2$) における流れ方向平均速度および乱れ強度の半径方向分布を示す。乱れ強度は、環状噴流の内側および外側せん断層付近 ($r/D_o \approx 0.25, 0.5$) で比較的高く、

Fig. 3 Characteristics of natural jet: (a) radial distributions of mean streamwise velocity and turbulent intensity at $x/D_o = 0.2$, and (b) instantaneous images of annular air and central methane jets.

Fig. 4 Energy spectrum for fluctuation of streamwise velocity in natural jet at $x/D_o = 4.0$, $r/D_o = 0.0$.

$0.18U_{m,o}$ 程度である．一方，中心噴流の速度分布は放物型であり，乱れ強度は約 $0.03U_{m,o}$ と小さい．このため，中心噴流は十分に発達した層流に近い流れであると言える．また，内側混合層における環状噴流の速度勾配は，中心噴流と比較して十分に大きいため，渦輪は環状噴流側から巻き上がる．図 3b に，自然噴流の瞬時可視化画像を示す．ここで，中心および環状噴流の可視化は，別々に粒子を混入することにより行った．自然噴流では， $x/D_o = 1.0 \sim 1.5$ において，コラムモード不安定⁽³⁾により内外せん断層に渦輪が巻き上がり，メタン・空気流体の混合は緩やかに進行する様子が分かる．

図 4 に， $x/D_o = 4.0$, $r/D_o = 0.0$ で取得した，流れ方向速度の変動スペクトルを示す．なお，流れ方向速度の変動は，線径 $5 \mu\text{m}$ の I 型熱線流速計により 1 kHz で取得した．速度変動スペクトルは $f_p = 23 \text{ Hz}$ で最大値を取ることが分かり，従って，自然噴流の大規模渦構造のプリファードモードは， $St_p = f_p D_o / U_{m,o} = 0.3$ と言える．

3・2 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次式(1)に従い分解した．

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

ここで，右辺各項はそれぞれ，時間平均，位相平均および乱れ成分である．

Fig. 5 Phase-averaged images of controlled jets with $St_v = 0.1$ at $\phi = 0.15\pi \sim 0.5\pi$: (a) sinusoidal flowing, and (b) pulsed flowing.

Fig. 6 Phase-averaged radial velocity of controlled jet (pulsed flowing) with $St_v = 0.1$ at $x/D_o = 0.2$.

3・2・1 制御に同期した渦輪の形成

はじめに、ミニチュア噴流の噴き出し特性が大きく変化することが予想される、パルス駆動波形が正弦波およびパルス波 (有効 duty 比 20%) の条件において、制御に伴う内外せん断層の発達過程を調査した。なお、ここでは、ストローハル数 St_v の条件を、自然噴流のプリファードモードである $St_p = 0.3$ よりも十分に小さい $St_v = 0.1$ に設定し、噴流の不安定モードに依らない制御に同期した渦輪の形成を調査した。図 5 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画像 ($\phi = 0.15\pi \sim 0.5\pi$) を示す。制御による速度攪乱は、正弦波およびパルス波において、それぞれ $\phi \doteq 0.5\pi$ および $\phi \doteq 0.2\pi$ で最大となる。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近傍に大きな変形が生じ (図中 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、一周期に渡り噴き出しがある正弦波と比較し、duty 比を設け短期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初期外側せん断層に投入できるためと言える。なお、ここでのストローハル数 St_v 条件では、自然噴流のプリファードモード St_p に対して長周期の制御に相当するため、制御一周期において、自然発生的な渦輪と制御によって誘起される渦輪の双方が形成されることを確認している。一方で、後述の $St_v \geq 0.3$ では、渦輪の発達はアクチュエータにより投げられる周期的な速度攪乱にのみ支配される。図 6 に、 $St_v = 0.1$ で取得したパルス波におけるノズル近傍 ($x/D_o = 0.2$) での位相平均半径方向速度を示す。外側せん断層には、最大で $1.3U_{m,0}$ 程度の強い半径方向速度が誘起されることが分かり、この速度攪乱が渦輪形成の起点になると考えられる。そこで、本研究では、パルス駆動波形にパルス波を採用し、 St_v が制御噴流の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。

Fig. 7 Instantaneous images of controlled jets: (a) $St_v = 0.3$, annular jet, (b) $St_v = 0.3$, central jet, (c) $St_v = 0.7$, annular jet, (d) $St_v = 0.7$, central jet, (e) $St_v = 1.1$, annular jet, (f) $St_v = 1.1$, central jet, (g) $St_v = 1.6$, annular jet, and (h) $St_v = 1.6$, central jet.

3・2・2 ストロウハル数 St_v の効果

図 7 に、 $St_v = 0.3, 0.7, 1.1$ 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。図 3b で示した通り、自然噴流では $x/D_0 = 1.0 \sim 1.5$ で緩やかに渦輪が巻き上がるが、制御噴流では、ミニチュア噴流の周期的な噴き出しに同期して、早期に内外せん断層に渦輪が形成される。ただし、 $St_v = 0.3$ および 0.7 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 7b 中 A, 図 7d 中 B)、混合気の濃度は、時間的に不均一になることが分かる。一方で、 $St_v \geq 1.1$ の条件では、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 $0.6D_0$ 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。

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

図 8 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 ($\phi = 0.3\pi \sim 1.9\pi$) 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。なおここでは、せん断層中を移流する渦輪を可視化するために、移流速度 ($U_c = 0.6U_{m,0}$) を計測した流れ方向速度から差し引いた⁽²⁰⁾。まず、 $St_v = 0.3$ では、流れ方向の渦径 D_v が $0.7D_0$ 程度 (図 8 中 A) の大きな渦輪が形成されるものの、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、 $St_v = 1.1$ および 1.6 の条件では、 D_v はそれぞれ約 $0.5D_0$ および $0.36D_0$ (図 8 中 B, C) である。ここで、 D_v と次の渦が放出されるまでの移流距離の比として、次式(3)で示される渦放出の長さスケール比 r_v を定義する。

$$r_v = \frac{D_v}{U_c / f_v} \quad (3)$$

Fig. 8 Phase-averaged velocity fields and corresponding contours of Q (< 0) for controlled jets: (a) $St_v = 0.3$, (b) $St_v = 1.1$, and (c) $St_v = 1.6$.

Fig. 9 Radial distributions of phase-averaged streamwise velocities and turbulent intensity for controlled jet with $St_v = 1.1$: (a) $x/D_o = 0.5$, and (b) $x/D_o = 3.0$.

式(3)に基づく r_v は、 $St_v = 0.3$ において $r_v \approx 0.35$ 、 $St_v = 1.1$ および 1.6 において $r_v \approx 1$ である。このことは、 $St_v \geq 1.1$ において、渦が空間的に密に形成されることを示している。また St_v の上昇に伴い渦径は小さくなるが、これは、

Fig. 10 Cross-sectional instantaneous images and corresponding velocity fields for natural jet at $x/D_o = 1.0$ and 2.5 : (a) instantaneous image at $x/D_o = 1.0$, (b) instantaneous image at $x/D_o = 2.5$, (c) instantaneous velocity field at $x/D_o = 1.0$, and (d) instantaneous velocity field at $x/D_o = 2.5$.

St_v の上昇に伴い、制御一周期に投入されるミニチュア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制御できると言える。

図8に示す通り、制御により形成された渦輪は、 $x/D_o = 0.5$ 付近で最も発達し、下流に向かうにつれて崩壊していく。図9に、 $St_v = 1.1$ における、 $x/D_o = 0.5$ および 3.0 での、位相平均流れ方向速度および乱れ強度の半径方向分布を示す。 $x/D_o = 0.5$ では、渦運動が活発であるため、各位相間での速度変動が大きく、また、乱れ強度は、内外せん断層付近でのみ大きい。これに対し、 $x/D_o = 3.0$ では、位相変動がほぼ無くなり、その一方で乱れ強度は、流れ場全域に渡って上昇していることが分かる。このことは、下流では渦輪が崩壊し、細かなスケールでの乱れの発達および混合促進が行われていることを示している。

3・2・3 流れ方向に垂直な横断面内の渦構造

本章では、流れ方向に垂直な横断面内において Stereoscopic-PIV を行い、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⁽²¹⁾の構造を調査した。図10に、自然噴流の $x/D_o = 1.0$ および 2.5 における瞬時粒子画像および瞬時速度場を示す。なお、瞬時画像は、撮影されたステレオ画像を計測平面の座標上に再構成したものを示している。自然噴流のせん断層の形状は、 $x/D_o = 1.0$ においてはほぼ円形である。そして、 $x/D_o = 1.0 \sim 1.5$ での渦輪の自然発生(図3b)に伴い、 $x/D_o \approx 2.5$ において一対の回転方向が異なるリブ構造⁽²²⁾が二次的に形成され始める(図10bd中A, B)。これに対し、図11a, c および e に、 $St_v = 1.1$ の制御噴流における $x/D_o = 1.0$ 、 $\phi = 0.1\pi$ での瞬時画

Fig. 11 Cross-sectional instantaneous images/velocity fields and phase-averaged velocity fields ($\phi = 0.1\pi$) for controlled jet with $St_v = 1.1$ at $x/D_o = 1.0$ and 2.5 : (a) instantaneous image at $x/D_o = 1.0$, (b) instantaneous image at $x/D_o = 2.5$, (c) instantaneous velocity field at $x/D_o = 1.0$, (d) instantaneous velocity field at $x/D_o = 2.5$, (e) phase-averaged velocity field at $x/D_o = 1.0$, and (f) phase-averaged velocity field at $x/D_o = 2.5$.

像、瞬時速度場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、図 11a 中に追記したように、ミニチュア噴流が外側せん断層に衝突した際に、周囲の流体が巻き込まれ、ミニチュア噴流を挟む位置に 2 つの渦構造が誘起される。この結果、隣り合うミニチュア噴流の間に誘起された回転方向が異なる渦が一对のリブ構造へと発達する。この現象は、New and Tay^{9, 10)}により、単軸円形噴流に対してミニチュア噴流の定常噴き出しを行った際にも確認されており、渦生成のメカニズムとしては、Jet in cross flow⁽²³⁾で観察される縦渦構造のそれに近いものと考えられる。なお、本実験では、

Fig. 12 Axial development of streamwise vortex for natural and controlled jet with $St_v = 1.1$: (a) mean counts of streamwise vortex for natural jet and controlled jet at each phase, and (b) mean intensities of streamwise vortex and vortex ring for natural and controlled jets.

Fig. 13 (a) Radial distributions of mean streamwise velocities for natural and controlled jet with $St_v = 1.1$ at $x/D_o = 2.5$, and (b) mean counts of streamwise vortex in each radial position for natural and controlled jet at $x/D_o = 2.5$.

内側せん断層において、外側せん断層で観察されたような明確なリブ構造は確認されなかった。これは、内側せん断層に対しては、制御入力の間隔が狭く、上記の渦構造の発達が抑制されるためと推測される。アクチュエータの数と内側せん断層のリブ構造の関係については、今後の研究課題である。

図 11b, d および f に、 $St_v = 1.1$ の制御噴流における $x/D_o = 2.5$, $\phi = 0.1\pi$ の瞬間画像、瞬間速度場および位相平均速度場を示す。自然噴流 (図 10b) と比較して噴流幅は顕著に拡大し、瞬間速度場には、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。また、図 11f に示す位相平均場には縦渦構造が確認されないことから、上述の通り下流では、周期的に変動する流れ場からランダムに変動する乱流場へと遷移していると考えられる。

縦渦について定量的に検討するため、図 12a に、自然噴流、および制御噴流 ($St_v = 1.1$) の各位相における縦渦の平均数の流れ方向変化を示す。図 12b には、各流れ方向距離における自然噴流の縦渦の強度および制御噴流の縦渦・渦輪の強度を併せて示した。なお、縦渦は各条件で取得した約 150 の瞬間速度場から渦度 ω を用いて検出し、渦の強度は各渦に対する ω の大きさの極大値と定義した。制御噴流では、自然噴流と比較し、 $x/D_o = 1.0$ 付近

Fig. 14 Direct photos for natural and controlled jet flames: (a) Natural, (b) $St_v = 0.3$, (c) $St_v = 1.1$, and (d) $St_v = 1.6$.

Fig. 15 Lean blow-off limits for natural and controlled jet flames.

から強度の高い縦渦を早期に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ともに各位相間での変動は抑制され、 $x/D_o = 2.5$ では自然噴流に対し4倍程度にまで増加する。このことから、本制御手法では、渦輪のみでなく、下流における縦渦の発達も促進可能と言える。さらに、図12bに示す通り、制御噴流の縦渦の強度は7~11であり、これは $x/D_o \approx 0.6$ における渦輪の最大強度と同程度である。また、 $x/D_o \geq 1.5$ において縦渦の強度は渦輪の強度を上回ることも分かる。従って、これらの縦渦は、渦輪崩壊後の下流における混合促進に大きく寄与すると考えられる。またここで、図13aおよびbに、 $x/D_o = 2.5$ での、自然・制御噴流における流れ方向平均速度の半径方向分布および各半径方向位置に存在する縦渦の平均数を示す。自然および制御噴流における内外せん断層の境界は、それぞれ $r/D_o \approx 0.3$ および0.4に位置する。これを踏まえると、図13bから、上述の制御に同期したリブ構造の形成により、主に外側せん断層近傍において縦渦数が顕著に増加することが分かるが、その一方で内側せん断層においても縦渦数の上昇が確認される。これは、内側せん断層において、制御により強い渦輪を形成することで、縦渦の二次的な発達を促進できるためと推測される。

3・3 同軸噴流火炎の能動制御

等温噴流の制御結果に基づき、ここでは、ノズル下流に設置した保炎器の後流に形成される火炎を対象として、保炎器上流での混合制御が火炎に与える効果を検討した。保炎器の形状は、制御された燃料濃度分布を持つ混合気を乱さず火炎に供給するために、外径14 mm、内径8 mmのリング状（肉厚1.5 mm）とした。また、設置位置

は、等温噴流の可視化実験の結果から St_v の違いにより混合特性に大きな変化が現れると予想される $x/D_o = 1.5$ とした。

図 14 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。自然噴流火炎では、火炎長さは約 $8.5D_o$ であり、混合不良による煤の発生を示す輝炎が頻繁に観察される。また、 $St_v = 0.3$ の制御火炎では、火炎基部下流での燃料濃度の位相変動が過大であることから (図 7b 参照)、輝炎が発生するとともに火炎は極めて不安定であり吹き飛びを生じやすい。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ため、輝炎の発生が顕著に抑制されることが分かる。特に、 $St_v = 1.1$ では、大きなスケールの渦により、調査した St_v 条件において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 $6.0D_o$ にまで短縮される。この制御条件は、均一な混合が求められるガスタービンの全負荷運転時に有効であると考えられる。

図 15 に、各 Re 条件に対する、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。また、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。なお、本実験では、火炎が 1 分間保持される場合を保炎の判定条件とした。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やすくなり、火炎上流における燃料の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、調査した全ての Re 条件において、自然噴流火炎に対し、保炎限界が希薄側に大きく拡大する。特に、 $St_v = 1.6$ の保炎限界は $\phi \approx 0.4$ であり、 ϕ_l より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ためと推測される。このことは、当量比が過小になりやすいガスタービンの部分負荷運転時においても、本手法により火炎を安定保持できる可能性を示している。また、 $St_v = 1.1$ での保炎限界は、 ϕ_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。

4. 結論

本研究では、同軸ノズル内壁に配備したミニチュア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。また、本噴流制御スキームが、燃焼場に与える効果についても検討した。以下に得られた知見を示す。

1. ミニチュア噴流の周期的な噴き出しに同期して、内外せん断層に渦輪を早期に放出できる。特に、 $St_v \geq 1.1$ の条件では渦輪の生成が空間的に密になり、 St_v を変化させることで渦径を調整し、二流体の輸送・混合特性を制御できる。
2. ミニチュア噴流の噴き出しに同期して、渦輪のみでなく、一対の回転方向が異なる縦渦構造を形成できる。この縦渦は、渦輪崩壊後の下流における混合促進に大きく寄与すると考えられる。
3. 同軸噴流火炎上流の混合過程を St_v を変えて制御することで、火炎長さの短縮や保炎限界の拡大を達成できることを実証し、本制御手法により、燃焼器の負荷変動に対応して燃焼特性を改善できる可能性を示した。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 若手研究 B (No. 23760184) の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Suzuki, Y., Kasagi, N., and Saiki, Y., "Active Control of a Jet Flame with Arrayed Micro Actuators", *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 110, No. 1059 (2007), pp. 124-127.
- (2) Crow, S. C., and Champagne, F. H., "Orderly structure in jet turbulence", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 48 (1971), pp. 547-591.
- (3) Zaman, K. B. M. Q., and Hussain, A. K. M. F., "Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 101 (1980), pp. 449-491.

- (4) Ho, C. M., and Huerre, P., "Perturbed free shear layers", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 16 (1984), pp. 365-424.
- (5) Tang, S. K., and Ko, N. W. M., "Experimental investigation of the structure interaction in an excited coaxial jet", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 8 (1994), pp. 214-229.
- (6) Wicker, R. B., and Eaton, J. K., "Near field of a coaxial jet with and without axial excitation", *AIAA Journal*, Vol. 32 (1994), pp. 542-546.
- (7) Glezer, A., and Amitay, M., "Synthetic Jets", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34 (2002), pp. 503-529.
- (8) Ibrahim, M. K., Kunimura, R., and Nakamura, Y., "Mixing enhancement of compressible jets by using unsteady microjets as actuators", *AIAA Journal*, Vol. 40 (2002), pp. 681-688.
- (9) New, T. H., and Tay, W. L., "Cross-stream radial fluid injection into a round jet", *AIAA Paper*, 2004-2403 (2004).
- (10) New, T. H., and Tay, W. L., "Effects of cross-stream radial injections on a round jet", *Journal of Turbulence*, Vol. 57 (2006), p. 20.
- (11) Suzuki, H., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Active control of an axisymmetric jet with distributed electromagnetic flap actuators", *Experiments in Fluids*, Vol. 36 (2004), pp.498-509.
- (12) Kurimoto, N., Suzuki, Y. and Kasagi, N., "Active control of lifted diffusion flames with arrayed micro actuators", *Experiments in Fluids*, Vol. 39 (2004), pp. 995-1008.
- (13) Saiki, Y., Suzuki, Y. and Kasagi, N., "Active control of swirling coaxial jet mixing with manipulation of large-scale vortical structures", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 86 (2011), pp. 399-418.
- (14) Saiki, Y., Kurimoto, N., Suzuki, Y. and Kasagi, N., "Active control of jet premixed flames in a model combustor with manipulation of large-scale vortical structures and mixing", *Combustion and Flame*, Vol. 158 (2011), pp. 1391-1403.
- (15) Samimy, M., Adamovich, I., Webb, B., Kastner, J., Hileman, J., Keshav, S., and Palm, P., "Development and characterization of plasma actuators for high speed jet control", *Experiments in Fluids*, Vol. 37 (2004), pp. 577-588.
- (16) Rehab, H., Villermaux, E. and Hopfinger, E. J., "Flow regimes of large-velocity-ratio coaxial jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 345 (1997), pp. 357-381.
- (17) Kean, R. D., and Adrian, R. J., "Theory of cross-correlation analysis of PIV images", *Journal of Applied Scientific Research*, Vol. 49 (1992), pp. 191-215.
- (18) ANSI/ASME PTC 19.1, "Measurement uncertainty. Supplement on instruments and apparatus, part1", ASME (1985).
- (19) Prasad, A. K., "Stereoscopic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol. 29 (2000), pp. 103-116.
- (20) Adrian, R. J., Christensen, K. T., and Liu, Z. C., "Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields", *Experiments in Fluids*, Vol. 29 (2000), pp. 275-290.
- (21) 豊田国昭, "噴流の渦", *ながれ*, Vol. 24 (2005), pp. 151-160.
- (22) Liepmann, D. and Charib, M., "The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 245 (1992), pp. 643-668.
- (23) Fric, T. F., and Roshko, A., "Vortical structure in the wake of transverse jet", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 279 (1994), pp.1-47.