

解説

マイクロ・アクチュエータ群による噴流火炎の能動制御

*東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻 鈴木 雄二†
笠木 伸英
斎木 悠

Active Control of a Jet Flame with Arrayed Micro Actuators

Yuji SUZUKI†, Nobuhide KASAGI and Yu SAIKI

*Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

1. はじめに

有限な資源と地球環境の保全に配慮した持続型エネルギーシステムの構築は、21世紀産業の命題である。小型分散エネルギーシステムは、建設導入が容易で、様々な燃料が利用可能であるため、従来の大型火力発電所と比較し、エネルギーをより多様にかつ高効率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。

特に、小型分散電源は電力利用者の近辺に導入されるため、 NO_x 排出量の低減は必須となる。例えば、マイクロガスタービン用の小型燃焼器では、一般に、低 NO_x 高効率燃焼を達成する希薄予混合燃焼方式が採用されている。しかしながら、予混合火炎の優位性は限られた流動・燃焼条件でのみ成り立ち、通常、部分負荷運転時には火炎を安定維持できず、拡散燃焼を主体とした運転方式に切り替える必要がある。拡散火炎は安定性に優れる一方で、火炎温度が高くなるため、部分負荷ではサーマル NO_x が増加してしまう欠点がある(図1⁽¹⁾)。小型分散エネルギーシステムの運転時には、大きな負荷変動を伴うと予想され、部分負荷条件下での環境負荷増大は、導入の障害となりうる。

燃焼現象は、分子レベルの化学反応と熱・物質・運動量の混合・拡散が深く関わり合った現象である。マイクロガスタービンなどの小型燃焼器で

は一般にレイノルズ数が低く、それに伴った混合不良が予想される。従来から、ロードノズル、TABなどの受動的デバイスにより噴流中に縦渦を導入し、混合を促進する研究が多く行われてきたが、上述のような負荷変動に伴う流量条件などの変化に対応することは難しい。そこで、流れを積極的に制御することで、混合・拡散過程を操作し、状況に応じて燃焼特性の改善を行う能動制御システムが期待される。以上の背景から、筆者らは、高負荷変動にさらされる小型燃焼器において、高効率、低 NO_x 排出および安定性に優れる火炎を維持するため、マイクロ・アクチュエータ群を用いた噴流能動制御システムの構築に取り組んでいる。

また、噴流能動制御の応用分野としては、燃焼器内流れだけでなく、衝突噴流による電子機器の冷却能の増進、ガスタービン翼の膜冷却技術における吹出し流の拡散増進、印刷機器における紙の冷却や乾燥能力の増大、プラントにおける化学物質の混合促進、ジェットエンジンにおける乱流騒音の低減、空調装置での住環境の快適性の向上、など極めて多岐にわたる。筆者らが開発している能動制御ノズルでは、アクチュエータの動作モードを適切に選ぶことによって、吹き出し流の特性およびそれに伴う輸送現象を制御目標に応じて変化させることが可能であり、幅広い産業機器に適用可能であると予想される。

2. 噴流制御用マイクロ・アクチュエータ

本研究では、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて、フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ ($9 \times 3 \text{ mm}^2$)⁽²⁾ を製作した。図 2a に示すように、ポリイミド基板上に形成された銅コイルに電流を流し、ノズル壁内部に固定した永久磁石との反発力により、上下に運動する。フラップ先端の変位は 0.3 mm である。そして、ガスタービン燃焼器内流れのモデルとして、同軸二重噴流を採用し、18 枚のアクチュエータを配備した同軸二重円管ノズルを開発した (図 2b)。ノズル内径 D_i および外径 D_o は、それぞれ 10 mm および 20 mm である。本研究の実験条件では、外側噴流の流速が内側噴流よりも速く、その場合には、外側せん断層に現れる大規模渦構造が流れを支配する⁽³⁾。そのため、フラップは、外側ノズルに取り付けられ、環状噴流外側せん断層に微少擾乱を直接与える。

図 3 にフラップ動作によって、噴流内外せん断層が時空間発展する様子を示す⁽⁴⁾。このとき、フラップの駆動周波数は $f_a=10 \text{ Hz}$ である。なお、以

下において、座標系は、軸、半径方向を (z, r) とする。外側噴流の可視化は、アセトン蒸気をトレーサとした平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) により行った。フラップは、位相 $\theta < \pi$ で中心軸へと徐々に向かい、最大変位 0.3 mm に達した後、位相 $\theta = \pi$ で急速に壁面へと戻る。このとき、外側せん断層には、せん断界面の急峻な変形が生じる (図中矢印)。そして、せん断界面の変形は、内外せん断層でそれぞれ 2 つの渦 ($A \cdot A'$ および $B \cdot B'$) に成長する。フラップの動作周波数によらず、渦発生はフラップ動作に完全に同期しており、大規模渦の生成を制御できることが分かる。

3. メタン・空気同軸二重噴流の混合能動制御

1 kW 程度の火炎への応用を想定し、メタン・空気混合特性の柔軟な制御を試みた⁽⁴⁾。メタンおよび空気は、それぞれ内側および外側ノズルから供給される。なお、外側噴流の平均流速 $U_{m,o}$ に基づくレイノルズ数 $Re (=U_{m,o}D_o/\nu_o)$ は 2400、運動量流速比 $m (= \rho_o U_{m,o}^2 / \rho_i U_{m,i}^2)$ は 42 である。すべてのフラップを同位相で駆動し、フラップ駆動周波数で定義されるストローハル数 $St_a (=f_a D_o / U_{m,o})$ を変化させた。また、制御機構の定量的検討には、二成分粒子画像流速計 (2C-PIV)、ステレオ画像を用いた三成分粒子画像流速計 (3C-PIV) および PLIF を用いた (図 4)。

図 5 に、自然噴流および制御噴流の可視化画像を示す⁽⁴⁾。自然噴流では、コラムモード不安定により $z/D_o \sim 1.5$ で内外せん断層に自然発生渦が巻き上がる。このため、内外流体の混合は緩やかに進行している。一方、制御噴流では、混合過程がストローハル数 St_a に大きく依存する。 $St_a = 0.3$ では、大規模渦が間欠的に生成され、半径方向への内側流体の輸送が促進される。ただし、渦の放出周期が長いため、内側噴流は流れ方向に分断され、混合が間欠的に行われる様子が分かる。一方、 $St_a = 1.0$ では、強い大規模渦が連続的に生成され、内側流体の輸送が著しく促進される。後述するように、この条件下において、混合は最も促進される。また、 $St_a = 1.7$ では、大規模渦の強度、直径は小さく内側流体の大きな巻き上がりは観測されず、混合促進が噴流中心軸付近で局所的に行なわれる。

図 6 に、 $St_a = 1.0$ の制御噴流における、速度分布および燃料濃度分布のフラップ動作 1 周期にわたる時空間発展の様子を示す⁽⁴⁾。ここで、噴流軸を含む縦断面における速度および燃料濃度は、2C-PIV およびアセトン PLIF を用いて計測した。フラップ動作 1 周期の間に、内外せん断層に 1 つずつ

渦が巻き上がる様子が分かる。これは、渦の放出周期が短く、図 3 に示した 2 つの渦 A と A' (あるいは B と B') が、前後の周期で重なるためである。渦の強度、直径は大きく、外側流体を中心軸付近まで流し込み、同時に内側流体を半径方向に大きく輸送する。渦の直径と次の渦が放出されるまでに渦が移流する距離はほぼ等しいため、内側噴流は連続的に縮流される。また、図 7 に 3C-PIV により計測した $z/D_o=1.0$ の流れと垂直な断面における瞬時速度場を示す⁽⁵⁾。内外せん断層内には、大規模渦の巻き上がりにより周方向不安定が発達し、縦渦の生成が観察される。図 8 に、外側せん断層内の縦渦の数およびその強度を示す⁽⁵⁾。 $St_a \sim 1.0$ において、縦渦の数および強度が最大であり、大規模渦の強度が強い条件で縦渦の運動が活発になり、混合促進に大きく寄与していると考えられる。

4. モデル燃焼器内の噴流燃焼能動制御

本研究では、上述の同軸二重噴流における混合制御の結果を踏まえ、これまでに浮き上がり火炎⁽⁶⁾およびブラフボディ型保炎器後流火炎⁽⁷⁾を対象とした能動制御を試みた。図 9 に示すように、浮き上がり火炎の制御では、フラップの駆動により渦放出を操作し、自然噴流火炎では不規則に変動する火炎面位置を、ノズル近傍に安定化できることを明らかにした。以下では、保炎器後流火炎の制御効果について解説する。

図 10 に、保炎器後流火炎を対象とした実験装置の概略図を示す。リング状保炎器上流のメタン・空気の混合特性を制御することで、負荷変動を模擬した異なる当量比条件下において、燃焼特性の改善を試みた。燃焼特性の評価は、CH ラジカルの自発光強度の変動値 (発熱率変動) と CO/NO_x 排出量 (15% O_2 換算) の測定値を用いて行った。ここでは、マイクロガスタービンにおける全負荷および部分負荷条件運転を想定して、当量比 $\phi=0.72$ と当量比 $\phi=0.48$ の火炎を制御対象とした。制御指針は当量比条件に合わせて以下の二通りである。まず、 $\phi=0.72$ の火炎では、希薄燃焼のために燃料と空気の迅速な混合が求められるので、 $St_a \sim 1.0$ 付近の制御により強い大規模渦を放出させ、混合を促進させる。一方、 $\phi=0.48$ の火炎では、当量比が過少であるため、過剰な混合を避ける必要がある。従って、 $St_a \sim 1.7$ の制御により、弱い大規模渦を放出し、混合を局所的に行う。これにより、噴流中心軸付近に可燃混合気を形成することができる。

表 1 に、自然噴流火炎と特徴的な制御効果が得られた制御噴流火炎の燃

焼特性を示す⁽⁷⁾. $\phi=0.72$ の火炎では $St_a \sim 1.0$ 付近の制御により, $\phi=0.48$ の火炎では $St_a \sim 1.7$ の制御により, いずれも燃焼特性が改善されることが分かる. $\phi=0.72$ においては, $St_a=0.7$ および $St_a=1.0$ の制御により, CO 排出量が改善され, 自然噴流火炎の 50%程度である. また $St_a=1.4$ の制御により, 発熱率変動が最も抑制される. 一方, $\phi=0.48$ においては, $St_a=1.7$ の制御効果が大きく, 最も成績が悪い $St_a=1.1$ の火炎に対して, 発熱率変動および CO 排出量を同時に 50%程度改善できる. 現在のところ, $\phi=0.72$ および $\phi=0.48$ の火炎ともに, St_a によらず NO_x 排出量は 20 ppm でほぼ一定であるが, 負荷変動を模擬した当量比の異なる火炎の発熱率変動および CO 排出特性を改善できることを明らかにした.

$\phi=0.72$ の火炎において, 燃焼特性が改善される詳細なメカニズムを検討するため, PLIF による OH ラジカル濃度計測を行った. OH ラジカルは燃焼場における既燃領域に広く分布し, その濃度分布は, 燃焼反応の強度や安定性の評価指標になるとされている. 図 11 に, 自然噴流火炎および制御噴流火炎における中心軸断面の瞬時 OH 分布を示す⁽⁷⁾. $St_a=0.7, 1.0$ の条件下では, OH 分布が広範に及び, その濃度値が高く, 燃焼反応が活発に起きている様子が分かる. また, OH は CO 酸化反応に寄与すると考えられ, CO 排出量が低減される一つの要因と考えられる. ここで, OH 分布の空間的な変動を評価するために, 各流れ方向距離における半径方向 OH 濃度の最大値を結んで火炎面を定義した. 図 12 に $z/D_o=3.0$ における火炎面位置の確率密度関数 (PDF) を示す⁽⁷⁾. 自然噴流火炎では, 火炎面位置が半径方向に大きく変動していることが分かる. 一方, $St_a=1.4$ の条件下では, PDF 分布がピークを持ち, 変動が抑制される (図中 A). これは, 燃焼場における速度変動が抑制され, 火炎の着火および伝播が乱されないことを示唆しており, 発熱率変動が低減する要因として考えられる.

5. まとめ

本稿では, フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ群を用いた, メタン・空気同軸二重噴流および保炎器後流火炎の能動制御について概説した. フラップ駆動周波数を制御することで, メタンと空気の混合特性を柔軟に操作でき, さらに負荷変動を模擬した当量比の異なる火炎の燃焼特性を著しく改善できることを明らかにした. 今後は, NO_x 排出量の抑制を目指すとともに, より実機に近い場での制御の試行, 高温雰囲気下でも駆動できる

アクチュエータの開発など、より実用的かつ効果的な能動制御手法の構築を目指す予定である。

前述のように、噴流の応用分野は燃焼器に限らず広範であり、熱流動の形態が機器の性能や安全性に密接に関連している。噴流の能動制御は、熱や物質の輸送、拡散、微粒化の自在な増進・抑制・パターン制御を通じてエネルギー関連工学、輸送機器工学、環境工学、アメニティ工学、プロセス工学などの広い分野に関連する新たな技術として発展する可能性が大きく、今後の研究の進展が期待される。

文献

- (1) 笠木伸英・浜名芳晴・奥田英信・三輪潤一・君島真仁, 28kW マイクロガスタービンの性能評価試験, 第 29 回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2001), 83-88.
- (2) Suzuki, H., Kasagi, N. and Suzuki, Y., Active control of an axisymmetric jet with distributed electro magnetic flap actuators. *Exp. Fluids*, 36(2004), 498-509.
- (3) Rehab, H., Villermaux, E. and Hopfinger, E. J., Flow regimes of large-velocity-ratio coaxial jets. *J. Fluid Mech*, 345(1997), 357-381.
- (4) 栗本直規・鈴木雄二・笠木伸英, マイクロ・アクチュエータ群による同軸二重噴流混合の能動制御, 日本機械学会論文集, 70-694, B(2004), 1417-1424.
- (5) Angele, K., Kurimoto, N., Suzuki, Y. and Kasagi, N., Evolution of the streamwise vortices in a coaxial jet controlled with micro flap actuators. *J. Turbulence*, (2006) in press.
- (6) Kurimoto, N., Suzuki, Y. and Kasagi, N., Active control of lifted diffusion flames with arrayed micro actuators. *Exp. Fluids*, 39(2005), 995-1008.
- (7) 齋木悠・栗本直規・高木大・鈴木雄二・笠木伸英, アクティブ制御下における保炎器後流火炎の OH LIF 計測, 第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2005), 397-398.

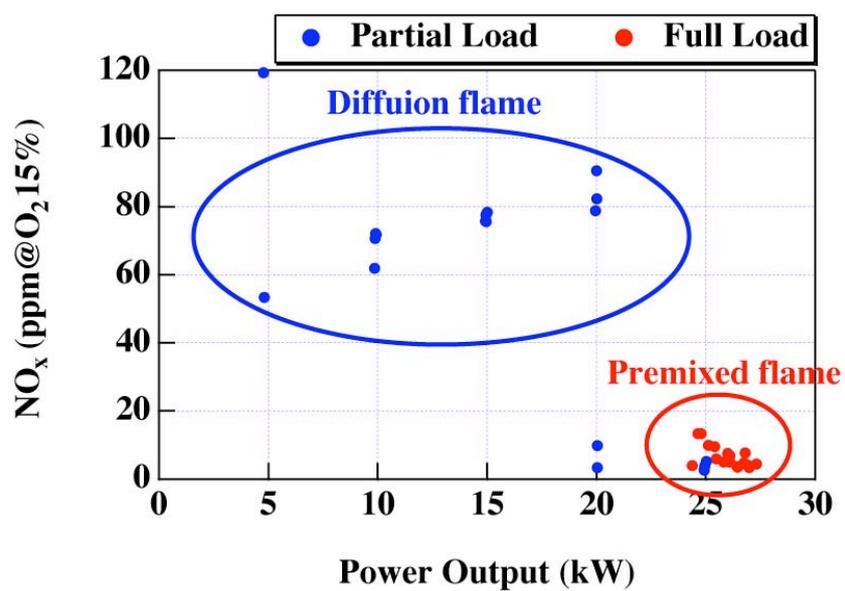


図 1 28 kW マイクロガスタービンの NO_x 排出特性⁽¹⁾

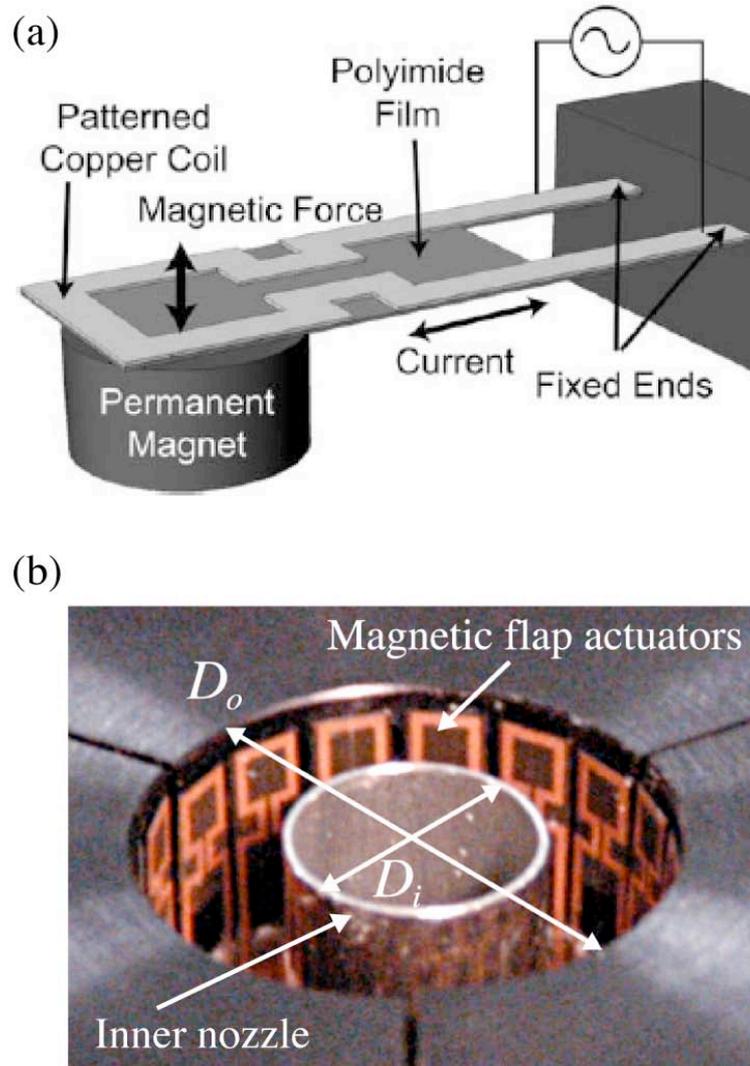


図 2 フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ
(a) 概略図⁽²⁾, (b) 同軸二重円管ノズル外観

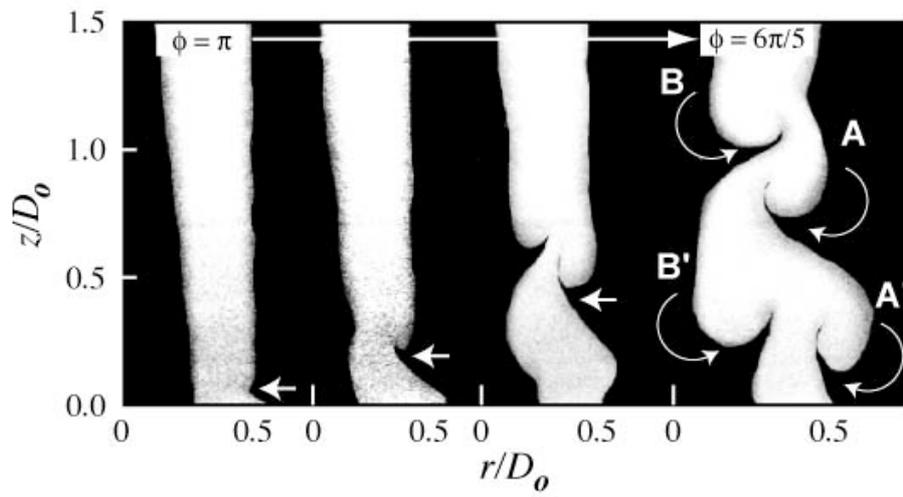


図 3 フラップ駆動による内外せん断層の時空間発展の様子⁽⁴⁾

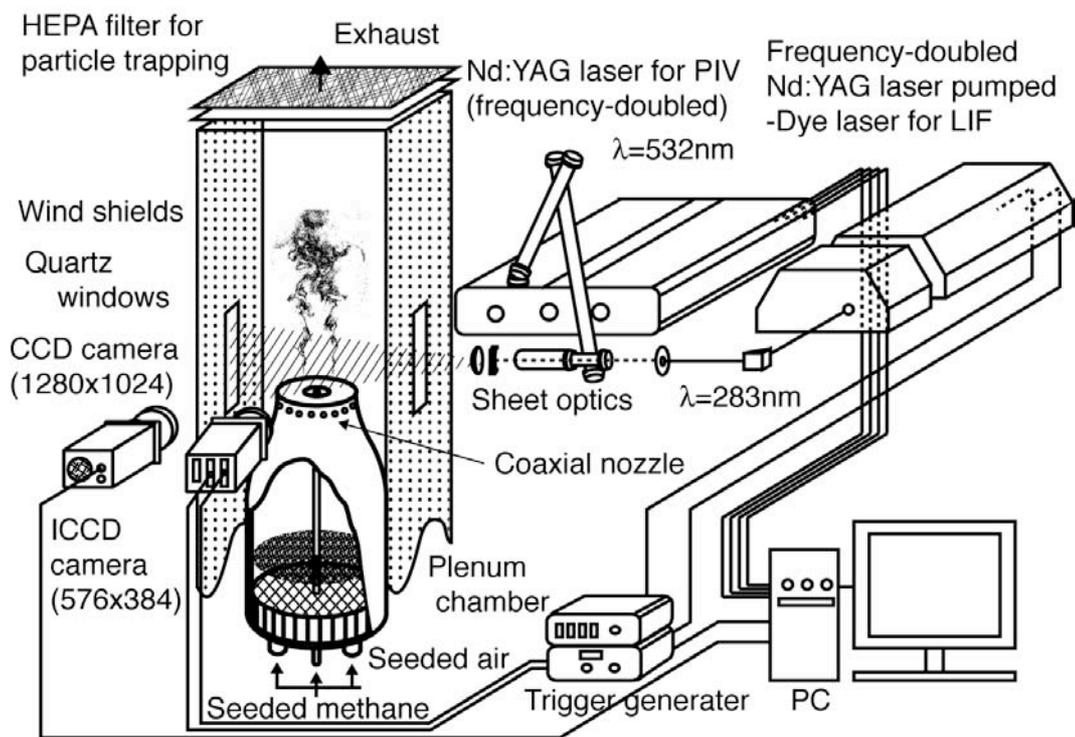


図 4 PIV/LIF 計測装置の概略図

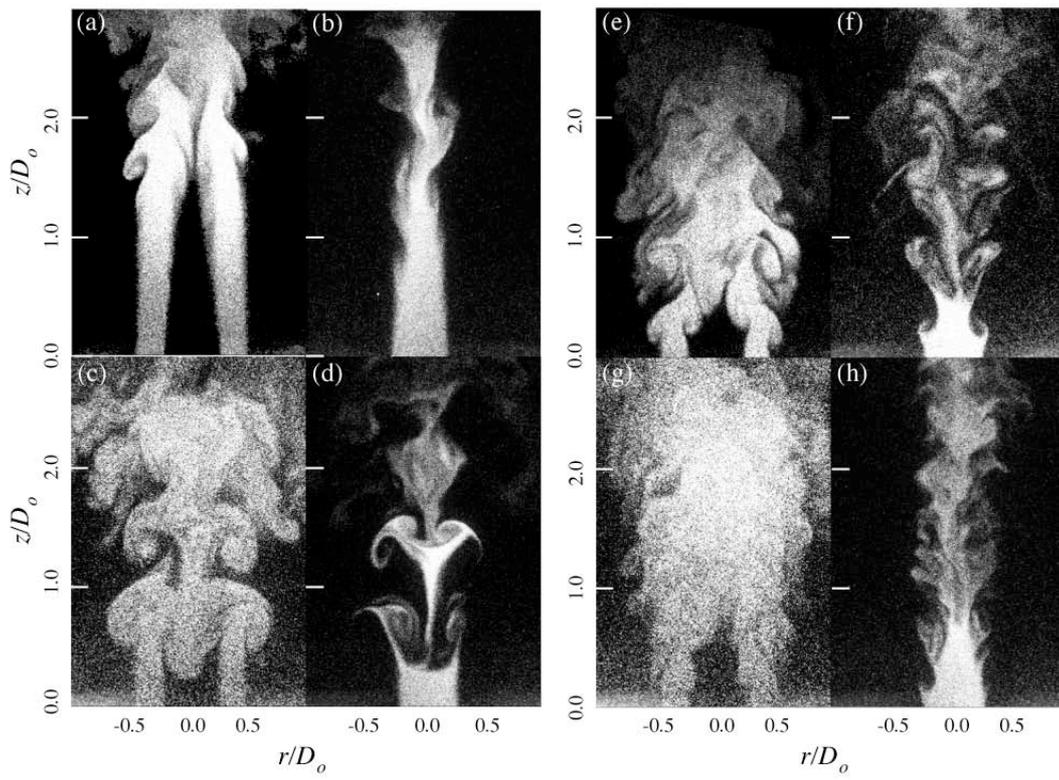


図 5 内外噴流の瞬時可視化画像⁽⁴⁾ (a,b) Natural jet, (c,d) $St_a = 0.3$, (e,f) $St_a = 1.0$ and (g,h) $St_a = 1.7$

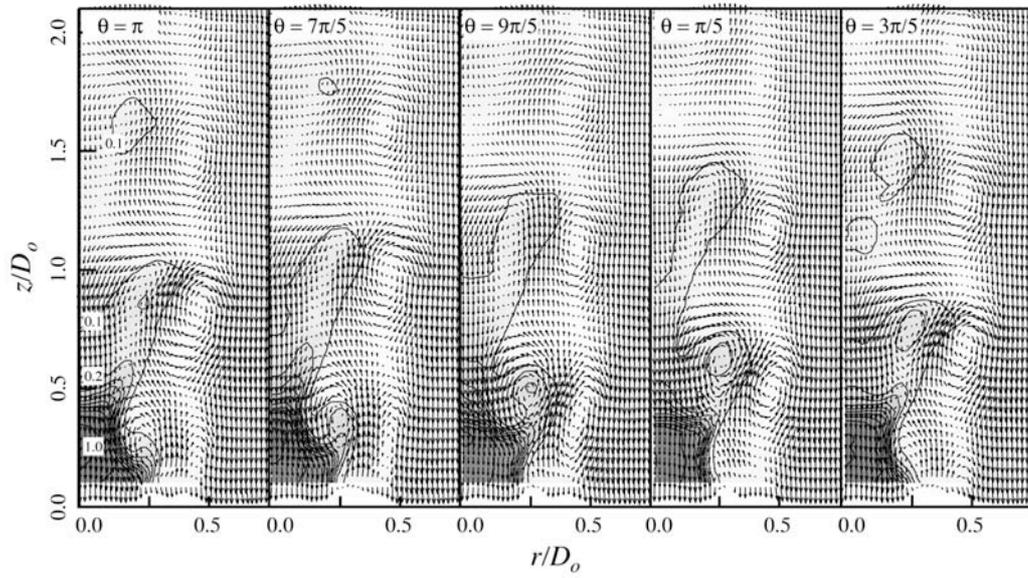


図 6 制御噴流 ($St_a = 1.0$) における速度分布および燃料濃度の等値面図⁽⁴⁾

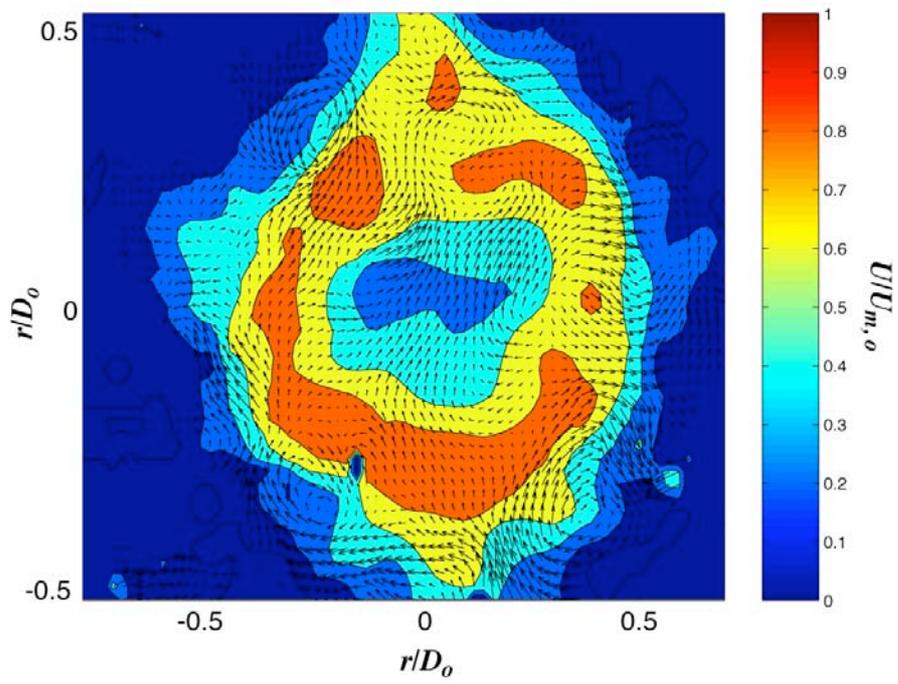


図 7 制御噴流 ($St_a = 1.0$) における
流れと垂直な断面 ($z/D_0=1.0$) の瞬時速度分布⁽⁵⁾

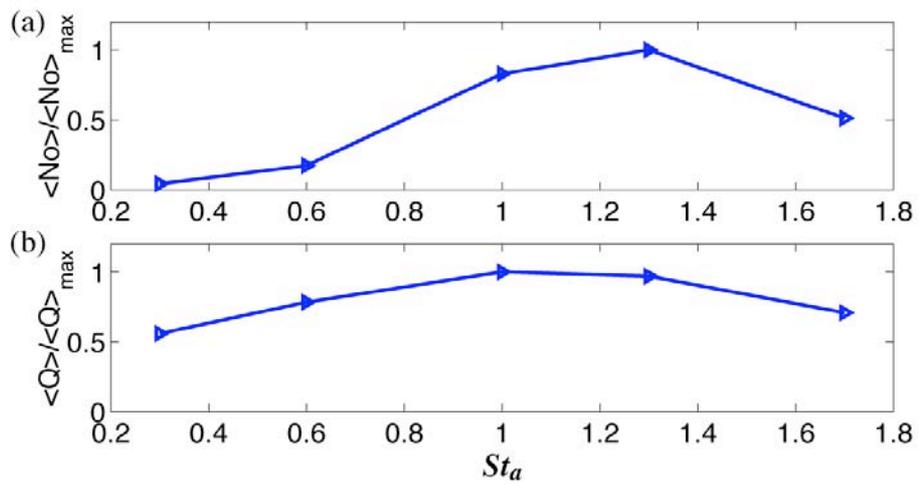


図 8 St_a による縦渦構造の変化⁽⁵⁾

(a) 渦の数, (b) 渦の強度

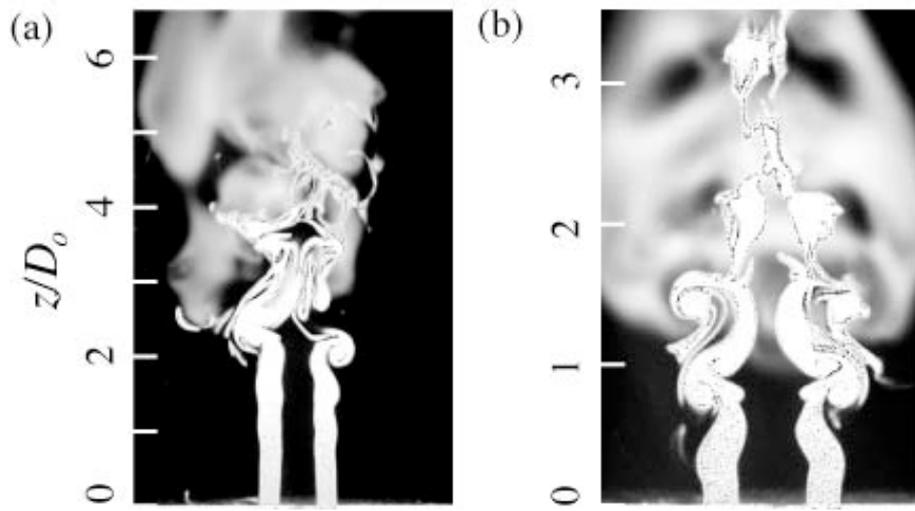


図9 火炎像および外側噴流の瞬時可視化画像⁽⁶⁾
(a) 自然噴流火炎, (b) 制御火炎

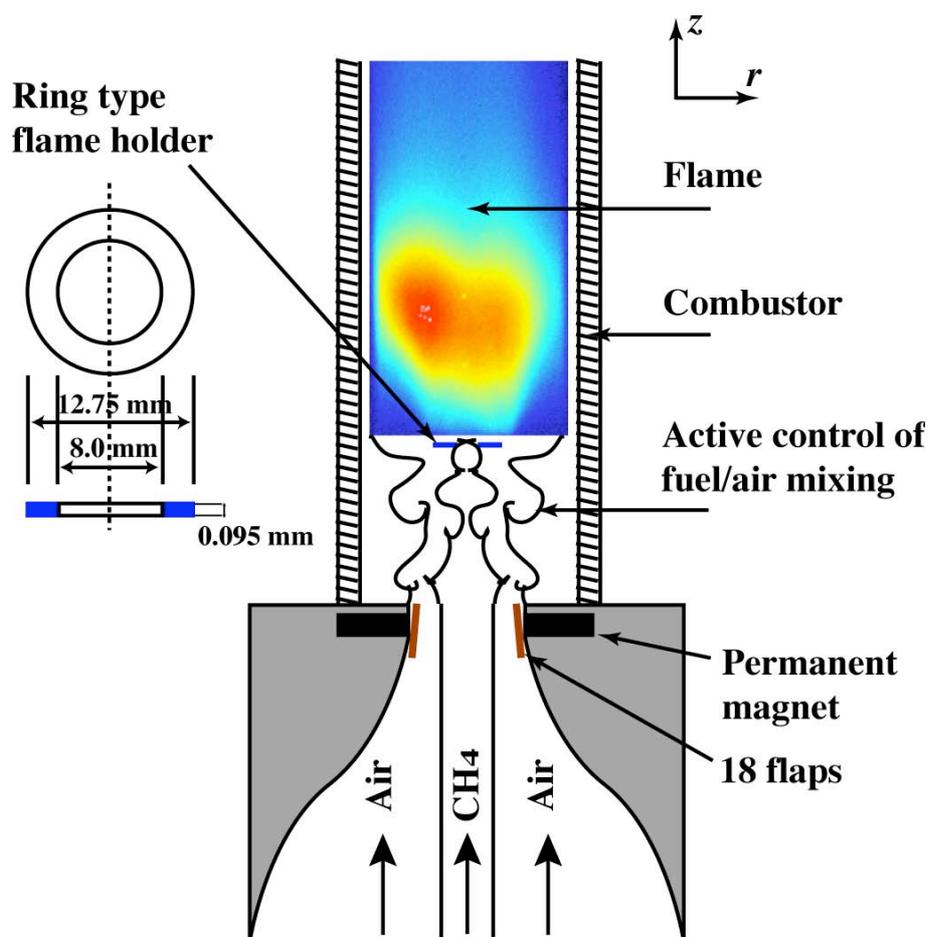


図 10 保炎器後流火炎の実験装置概略図

表 1 燃焼特性⁽⁷⁾ (a) $\phi = 0.72$, (b) $\phi = 0.48$

(a)

	Heat release fluctuation	CO [ppm@15%O ₂]	NO _x [ppm@15%O ₂]
Natural flame	1.0	151	23
$St_a = 0.7$	0.74	71	22
$St_a = 1.0$	0.78	85	22
$St_a = 1.4$	0.53	95	22

(b)

	Heat release fluctuation	CO [ppm@15%O ₂]	NO _x [ppm@15%O ₂]
$St_a = 1.1$	1.0	946 ± 18	16
$St_a = 1.7$	0.46	528 ± 14	19

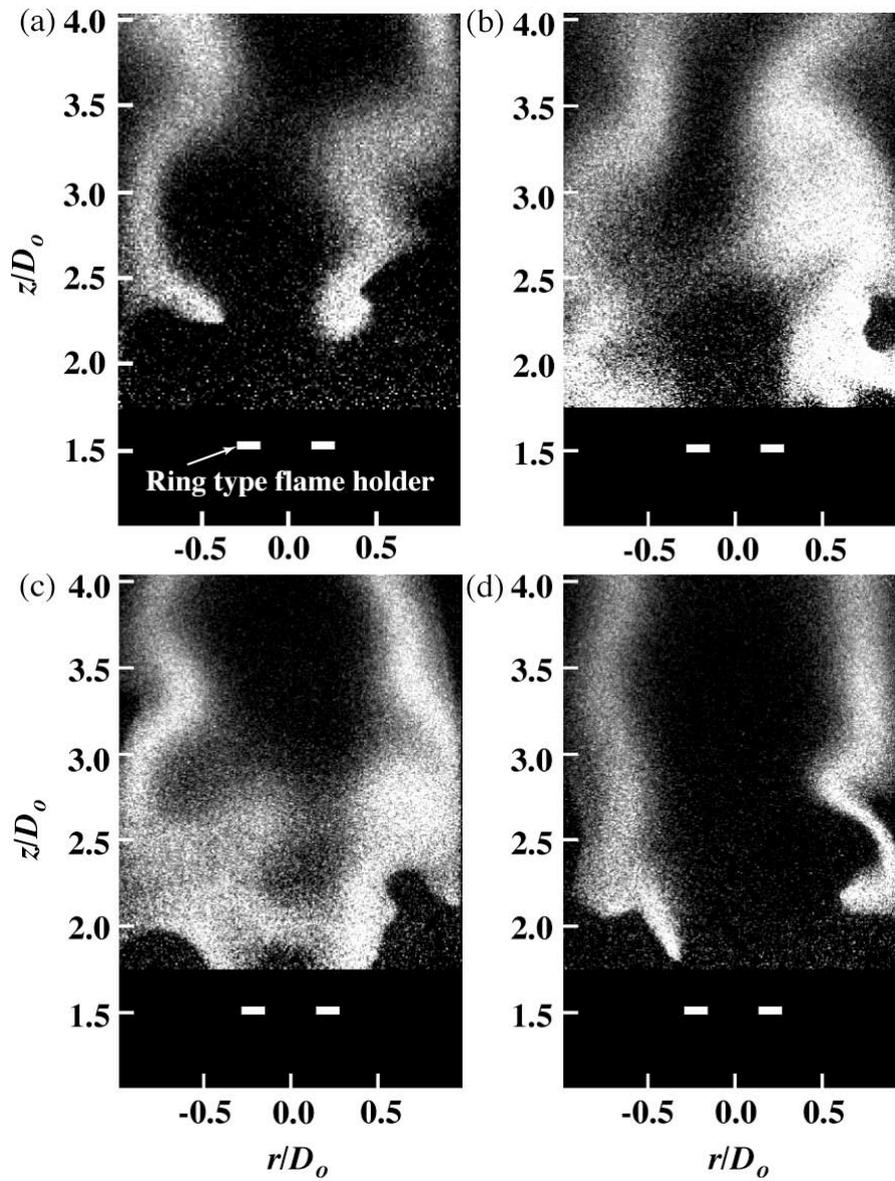


図 11 OH 瞬時分布画像⁽⁷⁾ (a) 自然噴流火炎, (b) $St_a = 0.7$, (c) $St_a = 1.0$, (d) $St_a = 1.4$

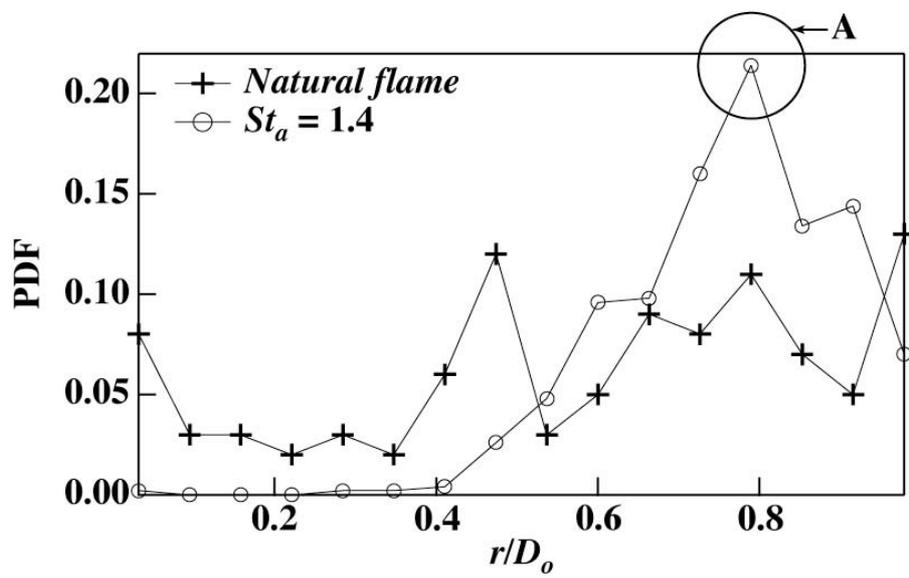


図 12 火炎面位置の確率密度関数 (PDF) 分布⁽⁷⁾