

乱流燃焼場における火炎構造と火炎の安定性に及ぼす旋回流の影響*

鈴木啓夢^{*1}, 山本和弘^{*2}

Effect of Swirl Flow on Flame Structure and Stability in Turbulent Combustion

Hiromu SUZUKI^{*1}, Kazuhiro YAMAMOTO^{*2}

^{*2} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In general, a turbulent flame is observed in most practical combustors. As for the premixed combustion, by controlling the equivalence ratio of fuel and air, it is possible to suppress the emission of harmful substances such as NO_x. However, the turbulent combustion process is very complex. Since there is unsteady flame and flow field interaction, it is very difficult to understand the combustion phenomena. To handle such a complex situation, the numerical cost may be too large. Then, by experiments, it is important to investigate turbulent combustion phenomena by laser diagnostics. In this study, we conducted a PIV/OH-PLIF simultaneous measurement of turbulent premixed flames. To focus on the effect of swirl flow on flame structure and stability, we used a cyclone-jet combustor. The extinction limit as well as CO and NO_x emissions was experimentally obtained. By changing the flow condition of cyclone nozzles, we discussed the flow field with turbulence and local flame extinction.

Key Words: Burner, Turbulent Combustion, Premixed Combustion, Combustion Products, Laser Diagnostics

1. 緒 論

通常、実用燃焼器で起こる現象のほとんどは乱流燃焼である。乱流予混合燃焼は燃料と酸化剤の混合に要する時間が不要なため高負荷燃焼に適し、混合比（当量比）によって火炎温度を制御できるため、NO_xなどの有害物質の排出を抑制することが可能である⁽¹⁾。しかしながら乱流予混合燃焼は火炎と流れが相互に干渉する複雑な現象であり、未だ解明されていない点が多い。Petersらは縦軸に乱れ強さ（速度変動の二乗平均値、rms値）と層流燃焼速度の比、横軸に火炎帯厚さと乱流の特性長さである積分スケールの比を用いることにより火炎形態を分類する火炎構造位相図（ダイアグラム）を提案した⁽²⁾⁽³⁾。このダイアグラムは乱流火炎の構造を議論する上で非常に有用であるが、基本的には一様等方性乱流の理論に基づいている。実際の乱流燃焼場が一様でもなければ等方でもない場合が一般的であることを考えると、実際の燃焼器に形成される火炎をこのダイアグラム上で正確に分類することは難しい⁽⁴⁾。

乱流現象はコンピュータを用いた数値計算の進歩により詳細に調べることができるようになり、数多くの研究成果が報告されている⁽⁵⁾⁽⁷⁾。しかしその複雑性ゆえに非常に微細な時間・空間スケールを考慮しなければならず、計算負荷が非常に大きくなる。したがって、理論と数値計算に加えて実験による研究がやはり重要である。

最近では、レーザ計測技術が発展してきていることから、PLIF（Planar Laser Induced Fluorescence、レーザ誘起蛍光法）やPIV（Particle Image Velocimetry、粒子画像流速計）などにより、火炎と流れの同時計測が可能となり、瞬時の乱流火炎構造や流れの詳細な検討が報告されている⁽⁸⁾⁽¹³⁾。例えば、SteinbergらはOH-PLIFとPIV同時計測を10kHzで行い、局所消炎により火炎内部が空洞になっている領域（Flame holes）での再着火現象を時系列の画

* 原稿受付 2013年 月 日

^{*1} 名古屋大学大学院（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

^{*2} 正員、名古屋大学大学院工学研究科

E-mail: kazuhio@mech.nagoya-u.ac.jp

像を取得することにより検討した。その結果、火炎内部に存在する空洞の再着火は火炎の伝播と火炎片の乱流輸送により起こり、その中でも火炎伝播が支配的な原因であることを明らかにした。

我々の研究グループでは、旋回噴流燃焼器を用いて乱流予混合火炎の構造や流れ場について検討してきた⁽¹⁴⁾⁽²⁰⁾。例えば、OH-HCHO 同時 PLIF 法により乱流予混合火炎の反応領域を可視化し、OH 蛍光強度と HCHO 蛍光強度を同時に計測することで、強い乱流場では予熱帯が厚くなること、また、局所消炎は OH 蛍光強度の画像をもとに判断できることを報告した。この旋回噴流燃焼器では、燃焼器の底部に旋回流火炎を形成させ、主噴流火炎を保炎するようになっている。これまでに行われた研究によれば、旋回流（渦流れ、回転流）を用いることにより火炎の安定範囲が広がることが明らかとなっている⁽²¹⁾⁽²⁵⁾。そこで本研究では、旋回噴流燃焼器に用いられている旋回流火炎の噴出速度を変えることで旋回流（旋回流れ）の影響を変化させ、乱流火炎の流れ場と火炎構造を調べることで、火炎の安定性と局所消炎について検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

2・1 燃焼器

図1に実験に用いた旋回噴流燃焼器の概略を示す。燃焼器は主噴流ノズル、四本の旋回流ノズル、保炎室から成っている。主噴流ノズルの口径は 12.7 mm であり、保炎室の下部より予混合気を流入させている。旋回流ノズルを用いて保炎室の接線方向より予混合気を流入させ、保炎室内部に旋回するリング状のパイロット火炎を形成させて、主噴流ノズルの乱流火炎を保炎する。これにより、乱流火炎を安定的に形成させることができる。保炎室内部の直径は 27 mm、高さ 23 mm の円筒形状であり、出口直径は 21 mm である。内壁には耐熱素材（Isolite Insulating Products, ISOTAP F16W）を使用した。座標系は燃焼器出口中心を原点とし、半径方向に r 軸、軸方向に z 軸（鉛直上方を正）とした。

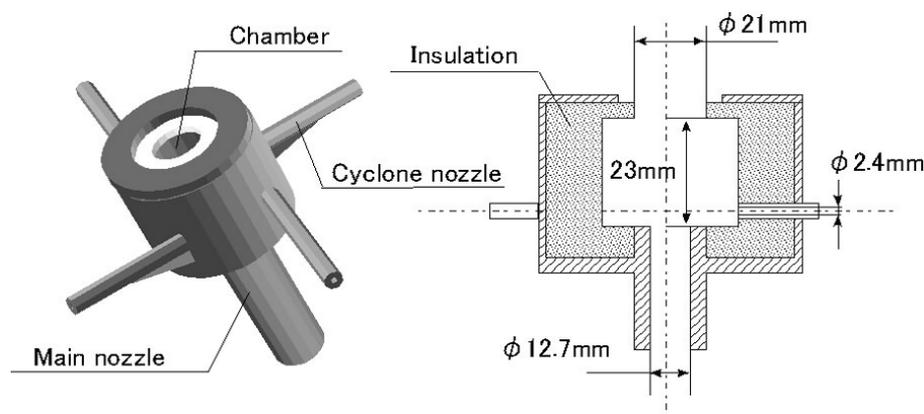


Fig.1 Cyclone-jet combustor

2・2 実験条件

今回は旋回流火炎の噴出速度を変えることで旋回流の影響を変化させた。 U_p を旋回流の流量を旋回流ノズルの断面積でわった旋回流の断面平均流速、 U_m を主噴流の流量を主噴流ノズルの断面積でわった主噴流の断面平均流速とする。 $U_p = 10, 15, 20, 25 \text{ m/s}$ の 4 条件とし、旋回流の流量と主噴流の流量の合計が一定となるように主噴流の流速（流量）を調整した。各流速条件に対して当量比 ϕ は 0.75, 0.90 の 2 条件とし、主噴流火炎と旋回流火炎の当量比は同じにした。表 1 に流量条件を示す。参考までに表中にスワール数を示している。スワール数 S_w は以下の式(1)により求めた。

$$S_w \equiv \frac{G_w}{G_A R} = \frac{Q_w U_w R}{Q_A U_A R} = \frac{Q_w U_w}{Q_A U_A} \quad (1)$$

ここで、 G_w は主噴流の角運動量、 G_A は主噴流の軸運動量、 R は主噴流のノズル径、 Q_w は周方向成分である旋回流の流量、 U_w は周方向の旋回流の平均速度、 Q_A は軸方向成分である主噴流の流量、 U_A は軸方向の主噴流の平均

速度を示す。燃料にはプロパンを用いた。本来スワール数は噴流断面における速度分布から求めるべきであるが、ここでは主噴流と旋回流の未燃ガスの速度（流量）からスワール数を算出した。これによると旋回噴流燃焼器の保炎室内部に供給される噴流のスワール数は非常に小さいことがわかる。

Table 1 Flow conditions

Equivalence ratio ϕ	Velocity of cyclone jet U_p (m/s)	Velocity of main jet U_m (m/s)	Swirl number (-)
0.75	10	30.0	0.016
	15	29.3	0.037
	20	28.6	0.070
	25	27.9	0.115
0.90	10	30.0	0.016
	15	29.3	0.037
	20	28.6	0.070
	25	27.9	0.115

2・3 計測方法

実験に用いた PIV/OH-PLIF 同時計測システムの概略を図 2 に示す。PIV 計測にはダブルパルス YAG レーザ (Quantel, Twins BSL 200) と CCD カメラ (JAI, CV-M2, 1600 pixel×1200 pixel) を使用し、レーザとカメラの制御は 2 台のデジタルディレイパルスジェネレータ (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, DG645) を使い、同時計測を 10 Hz で行った。トレーサ粒子を添加した火炎にレーザをシート状にして照射し、その散乱光をカメラにて取得しパソコンへ取り込む。粒子には酸化マグネシウムを用いた (平均粒径 $1.8 \mu\text{m}^{(16)}$)。シート光の厚さは約 1 mm であり、燃焼器の中心軸を通るように照射した。計測領域は $-3 \text{ mm} \leq r \leq 23 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} \leq z \leq 25 \text{ mm}$ で撮影した。レーザの波長は 532 nm であり、CCD カメラのレンズにバンドパスフィルタ (Andover Corporation, center wavelength : 532 nm, half bandwidth : 0.95 nm, transmittance : 55.87%) を取り付け、レーザ光以外の光を除去した。OH-PLIF 計測においては、Nd: YAG レーザ (Spectra Physics, PRO-230) の第二高調波 (532 nm) をポンプレーザとして、Dye レーザ (Spectra Physics, CSTR-SE) を使い、SHG (BBO 結晶) により更に倍波して励起光とした。レーザ光はハーモニックセパレータにより可視光成分を減衰させた後、1 枚の球面レンズ (焦点距離 900 mm) と 2 枚のシリンダリカルレンズにより平行なシートとし、二次元の計測を可能としている。これらのレーザシート光を火炎に照射することで、OH 分子を励起して蛍光を得る。CCD カメラのゲート時間は 200 ns である。本研究では、OH 分子を励起するにあたって、温度依存性の小さい電子エネルギー遷移における(1,0)バンド吸収線の $Q_1(7)$

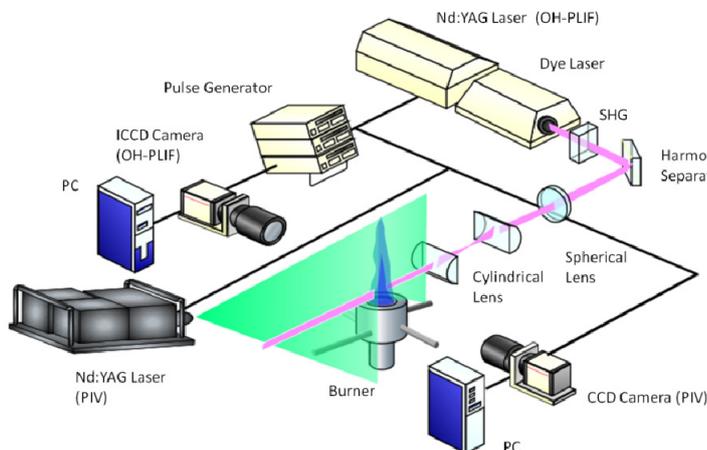


Fig.2 PIV/OH-PLIF system

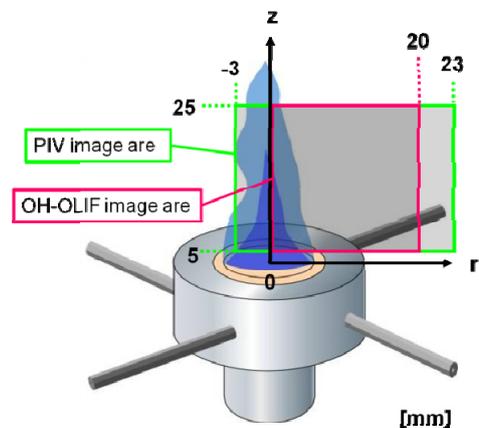


Fig.3 Image area in PIV/OH-PLIF system

を励起線とした（波長 283.2 nm）．この吸収線は 1000 K～2000 K の温度範囲における N_1^0/N_T の変化を 10 % 以内に抑えることができる⁽²⁰⁾．ここで、 N_1^0 は基底準位のエネルギーを持つ分子の数密度、 N_T は総数密度である．

2 枚のレーザシート光は互いに重なるよう向かい合う形で火炎に照射される．この時、OH 励起用レーザのシート光が PIV 用のレーザ照射口に入り込まないように、PIV 用のレーザ本体を傾けて斜め下向きにレーザ光を照射した．PIV の CCD カメラと OH-PLIF 法の CCD カメラは互いに対向するように設置し、それぞれのレーザシート光に垂直に設置する．PIV と OH-PLIF の計測範囲を図 3 に示す．PIV の計測領域は画像の中心と燃焼器の中心軸が一致するように調整し、撮影範囲を $-3 \text{ mm} \leq r \leq 23 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \leq z \leq 20 \text{ mm}$ とした．カメラの画素数は $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ である．一方 OH-PLIF の撮影範囲は、 $-0 \text{ mm} \leq r \leq 20 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \leq z \leq 20 \text{ mm}$ とし、 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ の画素数で計測した．

3. 実験結果および考察

3・1 火炎の様子

まず、旋回流火炎の流速を変化させたときの火炎の様子を調べた．図 4 に火炎写真を示す．条件は、 $U_p = 10 \text{ m/s}$ 、 $\phi = 0.75$ (図 4(a))、 $U_p = 25 \text{ m/s}$ 、 $\phi = 0.75$ (図 4(b))、 $U_p = 10 \text{ m/s}$ 、 $\phi = 0.90$ (図 4(c))、 $U_p = 25 \text{ m/s}$ 、 $\phi = 0.90$ (図 4(d)) である．撮影条件は、シャッタースピード 1/200 秒、F 値 3.5 である． $\phi = 0.75$ の場合に比べ $\phi = 0.90$ の方が火炎の輝度が明るいことがわかる．また、どちらの当量比でも旋回流火炎の流速を増加させると火炎高さがわずかではあるが小さく（z 軸方向の火炎長が短く）なり、半径方向の火炎幅（太さ）が大きくなっているように見える．特に、図 4(b) の $U_p = 25 \text{ m/s}$ 、 $\phi = 0.75$ の条件では、火炎先端の発光が非常に弱くなった．今回は全ての条件で流量（主噴流の流量＋旋回流の流量）を一定に設定にしていることから、火炎高さが小さくなった原因として、①火炎が形成されている燃焼場の流れが変化した、②乱流強度等の増加により火炎面積が増大して乱流燃焼速度が増加した、ことが考えられる．

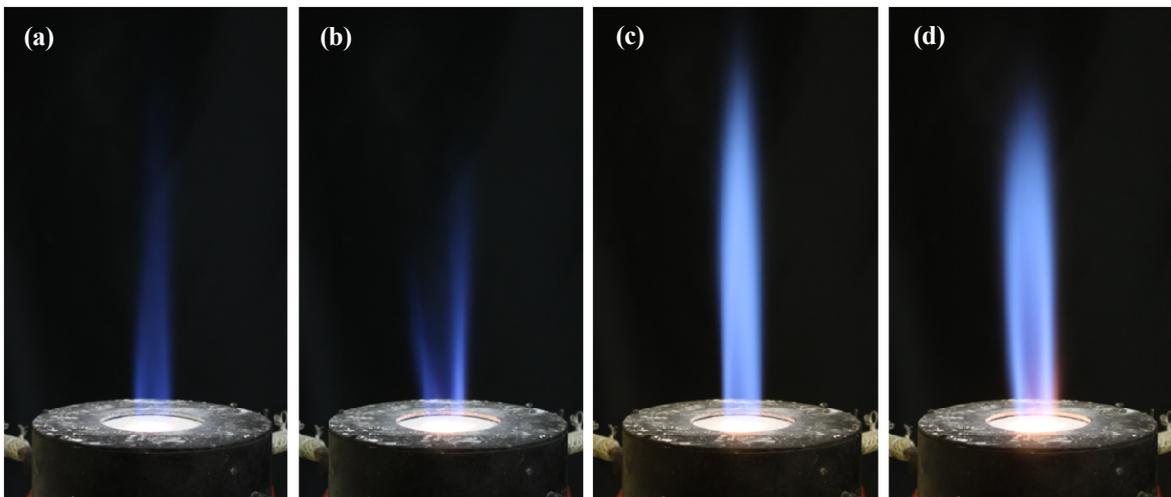


Fig.4 Photographs of flames in a cyclone-jet combustor;

(a) $U_p = 10 \text{ m/s}$, $\phi = 0.75$, (b) $U_p = 25 \text{ m/s}$, $\phi = 0.75$, (c) $U_p = 10 \text{ m/s}$, $\phi = 0.90$, (d) $U_p = 10 \text{ m/s}$, $\phi = 0.90$

3・2 瞬時の流れ場と火炎構造

図 5 に瞬時の PIV/OH-PLIF 同時計測結果の一例を示す．ここで、OH 蛍光画像のカラーバーは OH の蛍光強度 I_{OH} 、速度場のカラーバーは速度ベクトルの大きさ U ($= \sqrt{u^2 + v^2}$, u は軸方向速度、 v は半径方向速度) を表している． $\phi = 0.75$ の場合には図 5(a)に見られるように、OH の蛍光が存在しない領域が見られ、局部的に消炎していることがわかる．また、旋回流火炎の流速を $U_p = 25 \text{ m/s}$ と大きくした図 5(b)では、火炎面に相当する未燃側の OH の境界面が $U_p = 10 \text{ m/s}$ のときより複雑な形状を示すことが多く、流れが変化したことが予想される． $\phi = 0.90$ の場合には局所消炎はほとんど見られず、半径方向のより広い範囲に OH が存在していた．また図 5(c)と図 5(d)の OH 蛍光画像を比べると、旋回流火炎の流速が増加するにつれて火炎面の厚さ（ブラシの厚さ）が厚くなって

いるように見える。これは旋回流れが相対的に増えるため火炎の変動が大きくなったためである。速度場に関しては、旋回流火炎の流速が増加するにつれて流れが周囲へ広がり、渦流れと火炎の干渉が増えて流れもより複雑になっているように見える。ただし、速度変動（乱れの rms 値）については3・4節で議論する。

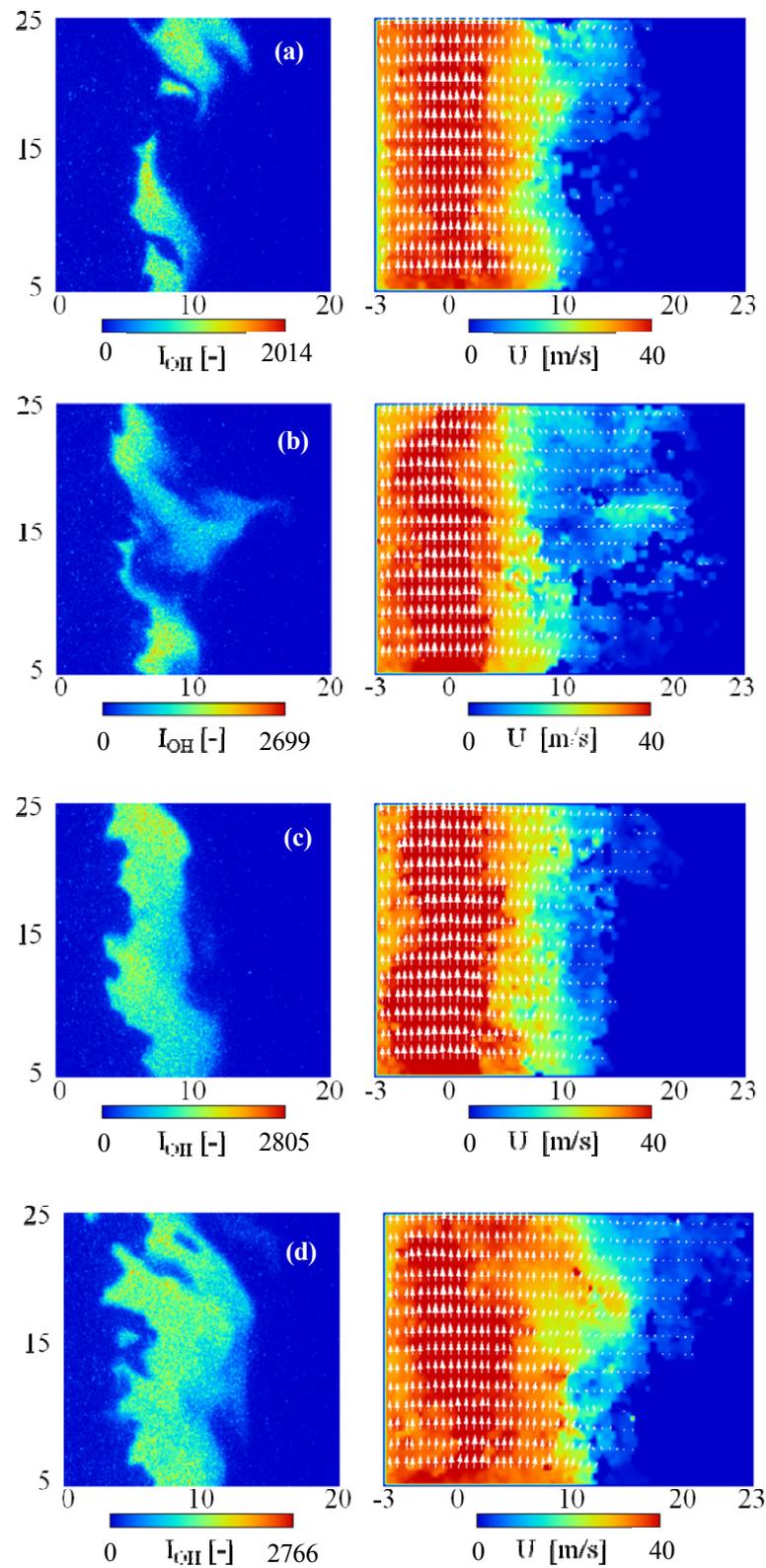


Fig.5 OH image and flow field with velocity vectors;

(a) $\phi = 0.75$, $U_p = 10$ m/s, (b) $\phi = 0.75$, $U_p = 25$ m/s, (c) $\phi = 0.90$, $U_p = 10$ m/s, (d) $\phi = 0.90$, $U_p = 25$ m/s

3・3 消炎限界と燃焼排出物の計測

ここでは旋回噴流燃焼器の安定範囲を調べた。今回は旋回流火炎の流速 (10, 15, 20, 25 m/s の4条件) と当量比 (0.75 と 0.90 の2条件) を固定し、主噴流火炎の流量を一定にして当量比を下げっていくことで消炎限界 (希薄側の限界) を測定した。この消炎限界の実験では、火炎全体が消炎したときの主噴流火炎の当量比を求めるために主噴流火炎の当量比を変化させたが、表1でも示したようにこれ以外の実験では、旋回流と主噴流の当量比は0.75あるいは0.90一定とした。その結果を図6に示す。プロットを線で結んだ範囲よりも当量比が高いと安定な燃焼が可能となる。これによると旋回流火炎の流速が大きい方が、より低い当量比でも燃焼が可能であった。特に、旋回流火炎の当量比が0.90の場合は主噴流火炎の当量比が0.40程度でも燃焼が維持された。旋回流火炎は主噴流火炎を保持するパイロット火炎であるので、旋回流火炎の流速を大きくすることにより主噴流火炎の安定性が高められるという妥当な結果が得られた。

次に、旋回流火炎の流速を変化させて既燃ガス中のCO濃度とEINOxを調べた。その結果を図7に示す。 $\phi=0.75$ の場合、 $U_p=10$ m/s から $U_p=25$ m/s に増加させるとCO濃度は1 ppmほど減少した。一方、EINOxは旋回流火炎の流速を大きくするにつれて増加している。 $\phi=0.90$ の場合もCO濃度は旋回流火炎の流速が大きくなるにつれて減少し、EINOxは増加した。CO濃度が減少したことから、旋回流火炎の流速を増加させることにより不完全燃焼が改善されたことになる。ただし、EINOxは増加しており、火炎温度が増加してThermal NOxが増えたためであると思われる。 $\phi=0.75$ に比べ $\phi=0.90$ の方がCO濃度とEINOxは高いが、これは当量比が高くなると反応する燃料が増えて高温の燃焼場となるためである⁽²⁰⁾。

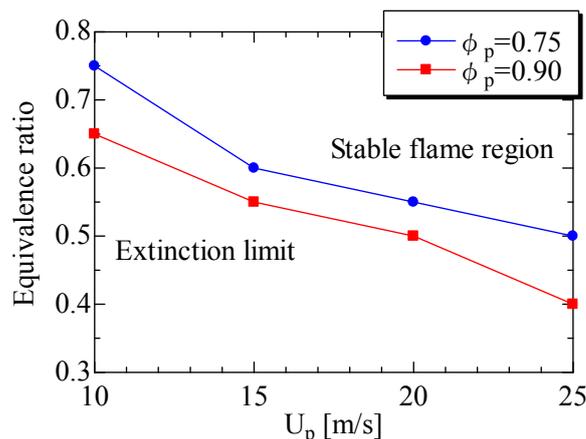


Fig.6 Extinction limit of the cyclone-jet combustor

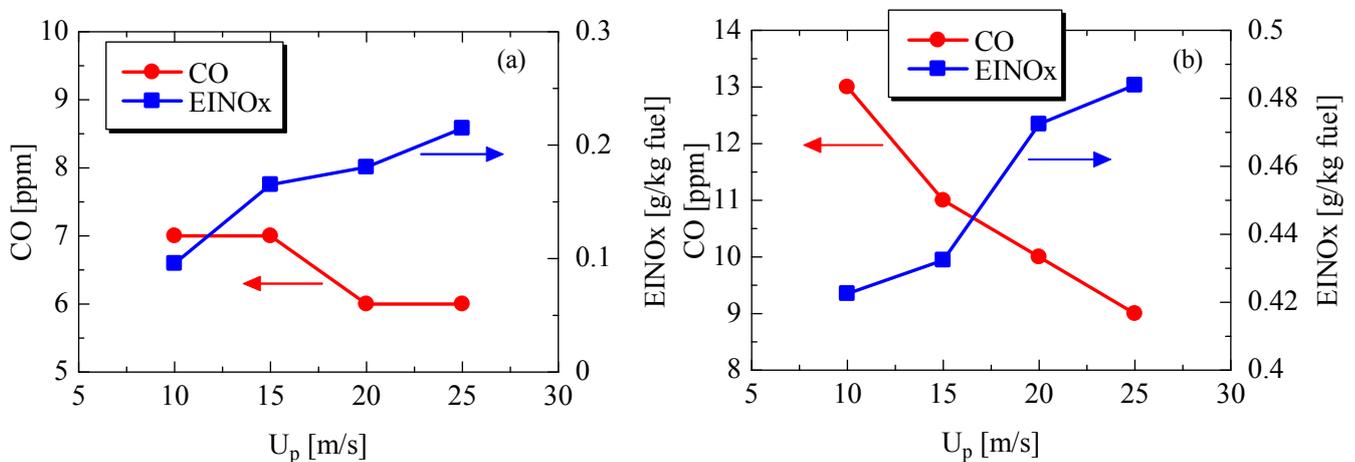


Fig.7 Variations of CO concentration and EINOx with U_p ; (a) $\phi = 0.75$, (b) $\phi = 0.90$

3・4 乱れの rms 値

軸方向速度の乱れの rms 値（速度変動の標準偏差, u' ）を求め、旋回流火炎の流速と乱れの関係について検討した。 $\phi = 0.75$ と $\phi = 0.90$ の $z = 10$ mm における u' の半径方向分布を図 8 にそれぞれ示す。 u' は PIV/OH-PLIF 同時計測の 1200 枚の画像を取得して求めた。 $\phi = 0.75$ の場合、 u' は $r = 10$ mm 付近で最大値をとる。 旋回流火炎の流速が大きいほど最大値が大きくなり、乱れも強くなっていくことがわかる。 各条件では主噴流と旋回流の流量の割合が異なるため、燃焼場の流れが変わったためであると思われる。 また旋回流火炎の流速が大きいほど、 u' が最大値をとる位置も外側に移動していた。 これはおそらく、旋回流火炎の流速が大きくなると火炎の径（火炎の太さ）が大きくなったことに対応しているものと思われる（図 4）。 当量比による違いを比較した場合、 $\phi = 0.90$ と $\phi = 0.75$ は似た分布をとるが、 u' の最大値は当量比が高いほうがわずかに大きくなることがわかった。

ただし現状では、実際の火炎挙動と u' との関係は明らかになっていない。 今後、旋回流火炎の流速を変えたときの乱流スケールや火炎厚さなども今後検討していく必要があると思われる。

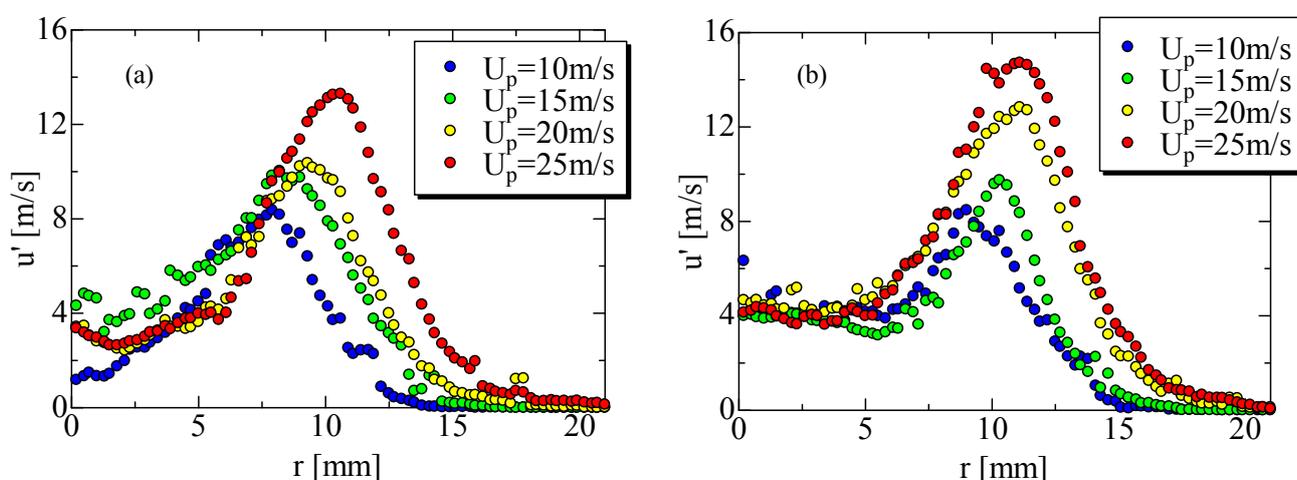


Fig.8 Radial distributions of rms axial velocity at $z = 10$ mm; (a) $\phi = 0.75$, (b) $\phi = 0.90$

3・5 OH 濃度ピーク値の頻度分布

旋回流火炎の流速に対する火炎の特性の変化について検討するために、 $z = 10$ mm における OH 蛍光強度のピーク値を調べ、OH のモル濃度を求めて統計的に検討した。 ここで OH モル濃度と OH 蛍光強度の間にはほぼ線形の関係があることがわかっており、今回はブゼン火炎の OH 蛍光強度を計測し、それと同じ条件の数値計算結果と比較することで蛍光強度を OH のモル濃度に変換した⁽¹⁹⁾。 得られた結果を図 9 に示す。 なお、OH 濃度が 0.009 mol/m^3 以下は消炎⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾していると判断し、その頻度も求めた。

$\phi = 0.75$ の場合の消炎の頻度を見ると、旋回流火炎の流速が大きい方が消炎の頻度が高いことがわかる。 これは、旋回流れが多くなることで乱れが増加するため、火炎が伸長の影響を受けて消炎の頻度が増えたと考えられる⁽²⁰⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。 しかし、OH 濃度が高い場合（例えば 0.021 mol/m^3 以上の値をとる場合）をみると、旋回流火炎の流速を大きくした方が高い頻度となっていることがわかる。 これは旋回流火炎の流速を大きくすることで旋回流火炎の保炎機構が強められた結果だと言える。

$\phi = 0.90$ の場合はほとんど消炎しないため、 $\phi = 0.75$ の場合よりも全体的に OH 濃度が高くなった。 また、旋回流火炎の流速を大きくするとわずかではあるが、OH 濃度が高い値をとる頻度が多くなっていることがわかる。 これも旋回流火炎により燃焼が強められた結果である。

ここで、3・3 節の消炎限界について議論する。 $\phi = 0.90$ の場合は旋回流火炎の流速を大きくすることで燃焼が強められるために、より低い当量比での燃焼を可能にしたと考えられる。 一方 $\phi = 0.75$ の場合は、旋回流の流速を大きくすると消炎する頻度も高くなるが、消炎限界付近では主噴流火炎より旋回流火炎の方が当量比は高いため燃焼が強められる場合が相対的に多くなり、全体として燃焼が可能な範囲が広がったものと思われる。

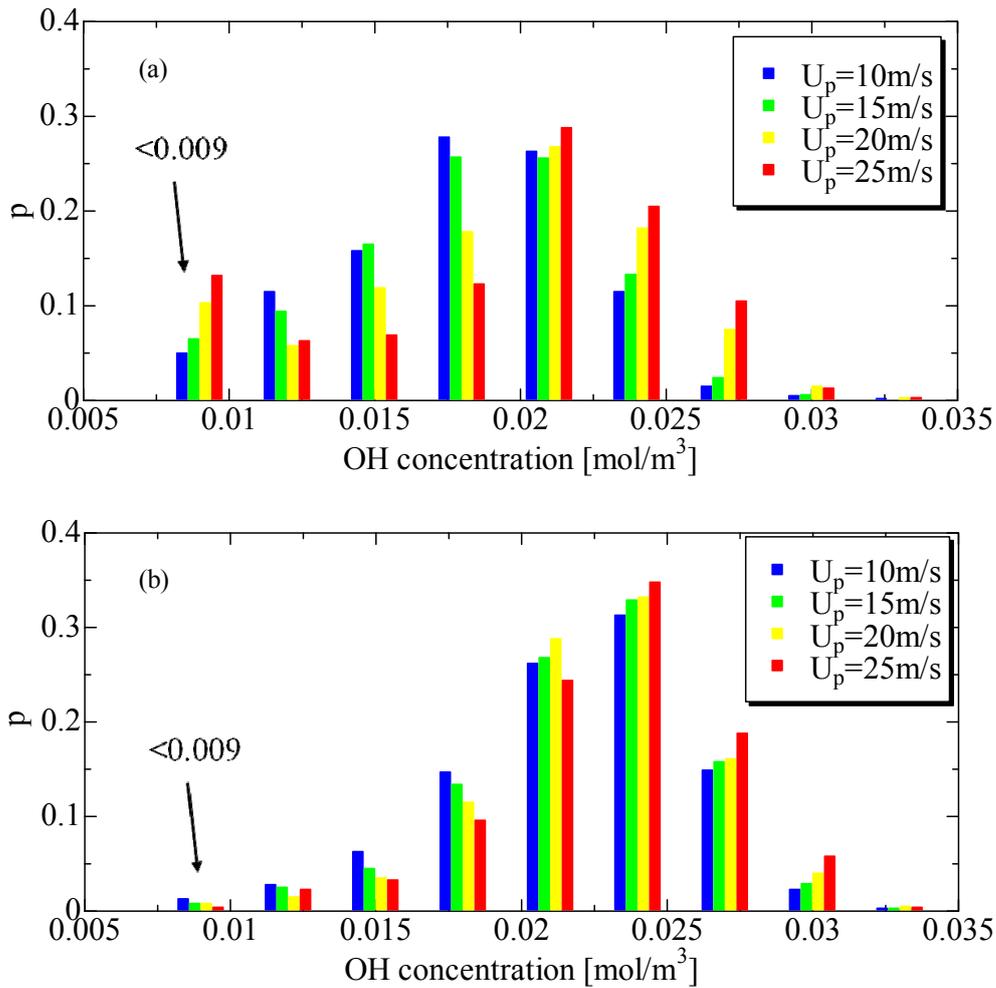


Fig.9 Frequency of OH concentration at $z = 10$ mm; (a) $\phi = 0.75$, (b) $\phi = 0.90$

4. 結 論

本研究では、PIV/OH-PLIF 同時計測により旋回噴流燃焼器により形成される燃焼場を調べた。今回は旋回噴流燃焼器に用いられている旋回流火炎の噴出速度を変えることで旋回流（旋回流れ）の影響を変化させ、乱流火炎の流れ場と火炎構造を可視化することで、火炎の安定性と局所消炎について議論した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 旋回流火炎の流速を大きくすると、火炎高さはわずかに小さくなり、火炎の幅は大きくなる。この場合、旋回流火炎の流量が相対的に増えるため、主噴流に対して垂直方向の流れが多くなり、火炎の変動も大きくなって火炎面の凹凸が増える。 $\phi = 0.75$ の場合は局所消炎の頻度が増えるが、 $\phi = 0.90$ では局所消炎はほとんど見られない。
2. 旋回噴流燃焼器の消炎限界は、旋回流火炎の流速を大きくすると広がる。特に旋回流の当量比が 0.90 の場合は、主噴流の当量比が 0.40 でも燃焼が可能である。また同じ流速と当量比であれば、旋回流火炎の流速が大きいほど CO 濃度は減少して EINO_x は増加する。
3. $\phi = 0.75$ の場合は、旋回流の流速を大きくすると消炎する頻度も高くなるが、消炎限界付近では主噴流火炎より旋回流火炎の方が当量比は高いため燃焼が強められる場合が相対的に多くなる。 $\phi = 0.90$ の場合は旋回流の流速を大きくすると OH が存在する範囲が広くなり、燃焼が強められる。乱れの rms 値 (u') は $\phi = 0.75, 0.90$ のどちらの場合も旋回流火炎の流速を大きくすると増加する。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号 23560223）により行われたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 新岡崇, 河野通方, 佐藤順一, “燃焼現象の基礎”, オーム社 (2001).
- (2) Peters, N., “Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.21, (1986), pp.1231-1250.
- (3) Peters, N., “The Turbulent Burning Velocity for Large-scale and Small-Scale Turbulence”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.384, (1999), pp.107-132.
- (4) 店橋護, “乱流予混合燃焼 II - 計測と直接数値計算 -”, 日本燃焼学会誌, Vol.52, No.159, (2010), pp.39-48.
- (5) Chakraborty, N., Klein, M., Swaminathan, N., “Effects of Lewis Number on the Reactive Scalar Gradient with Local Strain rate in Turbulent Premixed Flames”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.32, (2009), pp.1409-1417.
- (6) Shim, Y., Tanaka, S., Tanahashi, M., Miyauchi, T., “Local Structure and Fractal Characteristics of H₂-Air Turbulent Premixed Flame”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, (2011), pp.1455-1462.
- (7) Lee, D., Huh, D. Y., “DNS Analysis of Propagation Speed and Conditional Statistics of Turbulent Premixed Flame in a Planar Impinging Jet”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, (2011), pp.1301-1307.
- (8) Karlovitz, B., Denniston, D., Knapschaefer, D. H., WELLS, F. E., “Turbulent Flames”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.4, (1953), pp.613-620.
- (9) Jonathan, H. F., M.Lyons, K., B.Long, M., “Simultaneous Scaler/Velocity Field Measurements in Turbulent Gas-Phase Flows”, *Combustion and Flame*, Vol.107, (1996), pp.1-12.
- (10) 野口佳樹, 古川潤一, 平野敏右, “乱流予混合火炎における Flame-generated turbulence”, 燃焼の科学と技術, Vol.8, No.2, (2000), pp.97-106.
- (11) Furukawa, J., Hashimoto, H., Williams, F. A., “Flamelet Motion in Premixed Turbulent Axisymmetric Rod-Stabilized and Bunsen Flames”, *Combustion Science and Technology*, Vol.182, (2010), pp.1-38.
- (12) Shimura, M., Ueda, T., Choi, G. M., Tanahashi, M., Miyauchi, T., “Simultaneous Dual-Plane CH PLIF, Single-Plane OH PLIF and Dual-Plane Stereoscopic PIV Measurements in Methane-Air Turbulent Premixed Flames”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, (2011), pp.775-782.
- (13) Steinberg, A. M., Boxx, I., Arndt, C. M., Frank, J. H., Meier, W., “Experimental Study of Flame-Hole Reignition Mechanismus in a Turbulent Non-Premixed Jet Flame Using Sustained Multi-kHz PIV and Crossed-Plane OH PLIF”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, (2011), pp.1663-1672.
- (14) 山本和弘, 西澤泰樹, “強乱流予混合火炎の流れ場と構造”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.68, No.665, (2002), pp.238-245.
- (15) Yamamoto, K., Nishizawa, Y., Onuma, O., “Persistence of Laminar Flamelet Structure under Highly Turbulent Premixed Combustion”, *JSME International Journal, Series B*, Vol.47-6, (2003), pp.408-415.
- (16) 山本和弘, 井上聡, 山下博史, 下栗大右, 石塚悟, 小沼義昭, “乱流燃焼場の PIV 計測と乱れのスケールの算出”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.71, No.711, (2005), pp.129-132.
- (17) 山本和弘, 大西將博, 林直樹, 尾関賢宏, 山下博史, “OH-HCHO 同時 PLIF 法による乱流予混合火炎の可視化と火炎構造”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.73, No.733, (2007), pp.165-171.
- (18) Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S., “Flow Field of Turbulent Premixed Combustion in a Cyclone-Jet Combustor”, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 2, No.1, (2007), pp.90-101.
- (19) Yamamoto, K., Ozeki, M., Hayashi, H., Yamashita, H., “Burning Velocity and OH Concentration in Premixed Combustion”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.32, (2009), pp.1227-1235.
- (20) Yamamoto, K., Ishii, S., Ohnishi, M., “Local Flame Structure and Turbulent Burning Velocity by Joint PLIF Imaging”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, (2011), pp.1285-1292.

- (21) Yamamoto, K., Ishizuka, S., Hirano, T., "Effects of Rotation on the Stability and Structure of Tubular Flame", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.25, (1994), pp.1129-1135.
- (22) Yamamoto, K., Ishizuka, S., Hirano, T., "Effects of Pressure Diffusion on the Characteristics of Tubular Flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.26, (1996), pp.1129-1135.
- (23) 山本和弘, 浅井寛志, 石塚悟, 小沼義昭, "回転流中における火炎の安定機構", 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.64, No.624, (1998), pp.311-316.
- (24) Yamamoto, K., "Pressure Change and Transport Process on Flame Formed in a Stretched, Rotating Flow", *Combustion and Flame*, Vol.118, (1999), pp.431-444.
- (25) Shimokuri, D., Ishizuka, S., "Flame stabilization with a tubular flame", *Proc. Comb. Inst.*, Vol.30, (2005), pp.399-406.
- (26) Hwang, C.-H., Lee, S., Kim, J.-H., Lee, C.-E., "An Experimental Study on Flame Stability and Pollutant Emission in a Cyclone Jet Combustor", *Applied Energy*, Vol.86, (2009), pp.1154-1161.
- (27) Tseng, L.-K., Ismal, M. A., and Faeth, G. M., "Laminar Burning Velocities and Markstein Numbers of Hydrocarbon/Air Flames", *Combustion and Flame*, Vol.95, (1993), pp. 410-426.
- (28) Davis, S. G., Quinard, J., and Searby, G., "Markstein Numbers in Counterflow, Methane- and Propane-Air Flames: A Computational Study", *Combustion and Flame*, Vol.130, (2002), pp.123-136.