

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\*山本 和弘<sup>\*1</sup>, 大西 將博<sup>\*2</sup>, 林 直樹<sup>\*1</sup>  
尾関 賢宏<sup>\*2</sup>, 山下 博史<sup>\*3</sup>Flame Image and Flame Structure of Turbulent Premixed Flames  
Using Simultaneous OH-HCHO PLIF TechniqueKazuhiro YAMAMOTO<sup>\*4</sup>, Masahiro OHNISHI, Naoki HAYASHI,  
Masahiro OZEKI and Hiroshi YAMASHITA<sup>\*\*</sup> Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, using simultaneous OH-HCHO PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence) technique, we have obtained instantaneous two-dimensional flame images to investigate highly turbulent premixed combustion in a cyclone-jet combustor. On the phase diagram, conditions of  $U_m < 15$  m/s for  $\phi_m = 0.75$  and  $U_m < 20$  m/s for  $\phi_m = 0.90$  belong to the flamelet regime, and those of  $U_m > 20$  m/s for  $\phi_m = 0.75$  and  $U_m = 30$  m/s for  $\phi_m = 0.90$  belong to thin reaction zones regime. In combustion field, HCHO plays an important role at relatively earlier stage of reaction and there is HCHO region mostly in preheat zone at the temperature range of 400 K to 1400 K. On the other hand, OH exists in reaction zone or burned gas. From simultaneous images of these two species, we have discussed the local flame structure, based on flame length and number of flame regions. When the exit velocity is increased, more cusps appear on the flame front, with larger flame length. Interestingly, it is observed that the flame front is disconnected in some images, corresponding to the local flame extinction.

**Key Words:** Premixed Combustion, Flame, Extinction, Turbulent Flow, PLIF

## 1. 緒 論

近年、世界規模の膨大な化石資源の消費により、大気汚染や地球温暖化などの環境問題が指摘されている。このような問題を打開するための手段として、環境負荷の低い燃焼器の開発が求められている。一般に、実用燃焼器ではそのほとんどが乱流燃焼であるので、現象の解明が不可欠であるが、乱流燃焼は流れと反応が互いに干渉し合う複雑な現象である。燃焼器の設計を効率よく行うためには、現象をモデル化することが不可欠であり、実験により実際の乱流燃焼場の詳細な測定を行い、モデルの検証を行っていく必要がある。

近年、燃焼場を非接触で計測できるレーザ計測法が発展してきており、さまざまな研究例が報告されている<sup>(1)~(6)</sup>。特に PLIF 法(平面レーザ誘起蛍光法, Planar Laser-Induced Fluorescence)は、励起光をシ

ート状にすることにより火炎の二次元断面を計測できる。著者らはこれまでに、OH-PLIF 法により得られる OH 蛍光画像から火炎面曲率を調べ、火炎構造の検討を行った<sup>(7)</sup>。また PIV を用いて乱流燃焼場の流れ場についても調べている<sup>(8)</sup>。

一般に、火炎帯を可視化する方法として CH-PLIF 計測が行われるが、CH が存在する領域は非常に狭く、またその濃度も非常にわずかであるため、S/N 比のよいデータを得るためには高出力のレーザや高性能のカメラが必要であった。そこで中村らは、比較的低コストで火炎帯を可視化できる「アセトン-OH 同時 PLIF 計測法」を提案した<sup>(9)(10)</sup>。予混合気 to トレーサとしてアセトンを添加し、1 枚の蛍光画像からアセトンにより未燃領域を、OH により既燃領域を同時に可視化する。火炎帯は未燃領域と既燃領域に挟まれた蛍光のない領域として特定され、乱流予混合火炎の火炎帯厚さや燃焼速度について検討した。しかし、アセトンは燃料であるため燃焼場に与える影響を考慮しなければならない。

そこで本研究では、OH と HCHO の同時 PLIF 法を行うことにした。OH は温度が高い反応帯あるいは既燃ガス中に存在し、HCHO は燃焼初期の温度が増

\* 原稿受付 2007 年 3 月 5 日。

<sup>\*1</sup> 正員、名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋千種区不老町)。<sup>\*2</sup> 名古屋大学大学院工学研究科。<sup>\*3</sup> 正員、フェロー、名古屋大学大学院工学研究科。

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

加しはじめた予熱領域および反応領域に存在していると考えられる。この2種類の間生成物は燃焼場に多く存在するため、CHでは計測が困難な燃料希薄な条件においても測定が可能であり、いくつかの計測例がすでに報告されている<sup>(11)(12)</sup>。また、OHとHCHOの同時測定を行うことにより、特に複雑な火炎において未燃と既燃の判定が可能となるため、画像から火炎構造の検討を行ううえでも有利である。本実験では、まず、ブンゼンバーナにより形成させた火炎を測定し、層流火炎の計算結果と比較することにより計測の妥当性を確認した。また、旋回噴流燃焼器を用いて乱流予混合火炎を形成させ、火炎面長さと火炎構造について検討した。

## 2. 実験装置

**2.1 旋回噴流燃焼器** 乱流火炎の実験に使用した旋回噴流燃焼器の概略を図1に示す。燃焼器は主噴流ノズル、4本の旋回流ノズル、円筒状の保炎室からなる。主噴流ノズルの口径は12.7 mmであり、保炎室側壁底部に設置されている。保炎室内部にリング状のパイロット火炎を形成させ、安定な主噴流火炎を得る。実験では、主噴流出口平均流速  $U_m$  (混合気の体積流量をノズル断面積で割った平均流速) を10~30 m/sの範囲で5 m/sおきに变化させた。また、各流速条件に対し、当量比は  $\phi_m = 0.75, 0.90$  の2条件とした。なおパイロット火炎である旋回流は、全条件で出口平均流速10 m/s、当量比0.70に固定した。燃料にはプロパンを用いた。本実験条件をPetersの提案する火炎構造位相図<sup>(13)</sup>上に示す(図2)。実験条件が流速25 m/s以下ではCorrugated Flamelets領域に相当し、30 m/sではThin Reaction Zones領域に相当する。また、層流火炎の測定には、ブンゼンバーナを用いた。このときの流速は1.75 m/sとした。

**2.2 PLIFシステム** 次に、火炎の可視化を行ったPLIF計測システムについて説明する。その概略図を図3に示す。OHラジカルの励起光源として

Nd: YAGレーザーの第2高調波を用い、色素レーザー、SHG(BBO結晶)を用いることによりOH分子の  $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$  遷移における(1, 0)バンド吸収線の  $Q_1(7)$  を利用する<sup>(11)(14)</sup>。このときの波長は283.2 nmである。一方、HCHOの測定には別のNd: YAGレーザーの第3高調波を用い、 $AA_2-XA_14_0$  吸収バンドの回転遷移を励起線とした<sup>(11)</sup>。レーザーの発振間隔をともに10 Hzとし、2枚のシリンドリカルレンズによりシート状にして、燃焼場へ照射する。燃焼場から得られるOHとHCHOの蛍光はフィルタにより必要な波長だけを選択し、2台のICCDカメラを用いてパーソナルコンピュータに画像を取り込む。各条件について、画像は500枚撮影した。図4に測定領域を示す。計測する範囲は、バーナ出口から上方20 mmを画像の中心とし、画像の大きさは横25 mm×縦12.5 mmとした(空間分解能25  $\mu\text{m}/\text{pix}$ )。また2.3節で説明するが、火炎面長さを求める際は、横34 mm×縦26 mmを撮影範囲とした。座標はバーナ出口中心を原点とし、鉛直上方にz軸、半径方向にr軸とした。

**2.3 火炎面長さ** それぞれの画像から乱流火炎

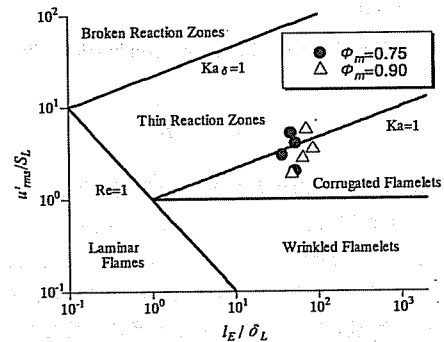


Fig. 2 Combustion diagram for turbulent premixed flames

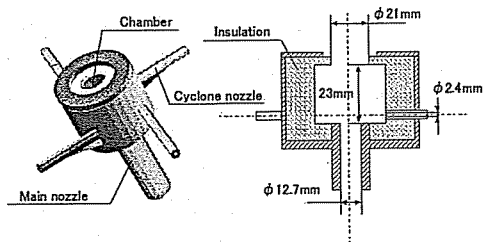


Fig. 1 Cyclone-jet combustor

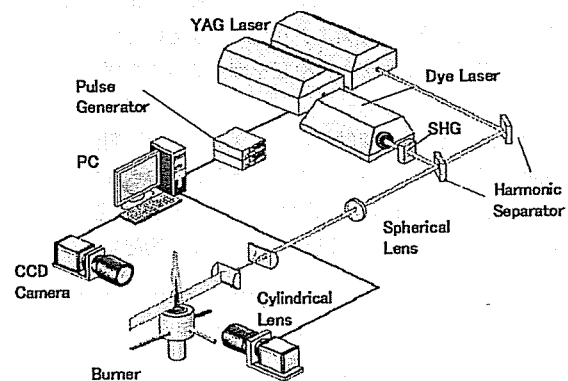


Fig. 3 Experimental setup

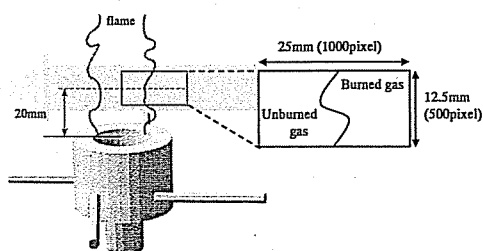


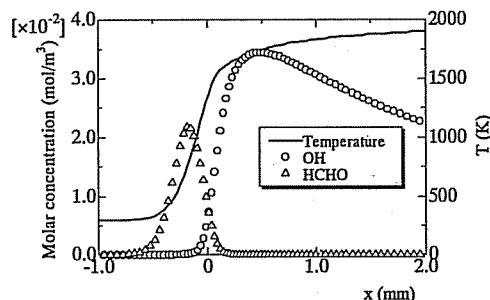
Fig. 4 Image area

の火炎面の長さを求めた。本実験では、得られた OH の蛍光画像から火炎面位置を特定することにした。すでに行った検討により、OH モル濃度の最大値の約 50% になる未燃ガス側の位置で CH 濃度が最大となることが確認されている<sup>(7)</sup>。そこで、燃料の種類や当量比によらず OH モル濃度の最大値の 50% をとる位置を火炎面位置とした。今回は OH と HCHO の同時測定を行っているため、特に複雑な火炎において既燃と未燃の判定が可能である。既燃ガス側でも周囲雰囲気の影響で OH 濃度は低下するため、OH モル濃度が最大値の 50% になる位置は存在するが、この位置は火炎面とみなさないように配慮した。

火炎面の長さの算出は、画像から火炎として特定された点を直線で連結し、線分の総和を求めることにより行った。ただし、隣接していない火炎面位置を単純に結ぶと、本来は連続した火炎でないものまでつなげる可能性がある。そこで、火炎面として特定された隣の点が、あるしきい値 (0.5 mm) よりも離れている場合は、同一の火炎に属していないとした。ただし、理論的な火炎帯厚さである Zeldovich Thickness<sup>(15)</sup> をしきい値としても結果は同じである。また、Mura-yama らが行ったフラクタル解析<sup>(16)</sup> から火炎面長さを求める方法でも火炎面の長さを求めたが、ほぼ同じ値になることを確認している。

### 3. 実験結果および考察

**3・1 HCHO の蛍光画像と層流一次元火炎との比較**  
今回は OH と HCHO の同時測定を行った。OH については、 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$  遷移における (1, 0) バンドの  $Q_1(7)^{(11)(14)}$  を利用することにより、蛍光強度が温度にほぼ依存せず、OH のモル濃度 (数密度) にほぼ比例することを確認している。ただし HCHO については、HCHO が予熱帯近傍に存在していることから、蛍光強度が HCHO のモル濃度 (数密度) に比例していることを確認する必要がある。そこで、層流一次元火炎の数値解析を行うことにより、計算された HCHO 濃度

Fig. 5 OH and HCHO concentrations and temperature distributions;  $\phi=0.75$ 

分布とブンゼン火炎の HCHO の蛍光強度分布を比較することにした。計算した当量比は 0.70~0.90 の範囲であり、火炎が定在するよう流入速度を調整することで層流一次元火炎の温度・濃度分布を求めた。反応機構には GRI-Mech 3.0<sup>(17)</sup> を用い、53 種の化学種、325 組の素反応を考慮した。詳細な計算方法については、これまでに行ったものと同じである<sup>(9)</sup>。燃料は実験と同じプロパンとした。

図 5 に層流一次元予混合火炎の温度分布および OH と HCHO の濃度分布を示す。当量比は 0.75 の結果である。HCHO は燃料が分解される比較的反応初期に生成されると考えられるが、この計算結果によると約 400 K から 1400 K の予熱帯から反応領域に HCHO は存在していることがわかる。また、他の当量比でも計算したが、HCHO が存在する温度範囲はほぼ同じであった。

次に、ブンゼンバーナにより形成された層流火炎の測定結果と比較した。図 6 および図 7 に当量比 0.75 における火炎の直接写真と PLIF により測定された OH および HCHO 蛍光画像を示す。図 6 には、図 7 に示した画像の撮影範囲を示している。これらの蛍光画像において、左側が未燃ガスであり、図 6 の直接写真から確認される火炎面 (青炎) が OH 蛍光画像の左側境界付近に存在する。一方、HCHO の蛍光は中央部の狭い領域に存在し、これより左側が未燃ガス、右側は OH が存在している領域に一部重なっている。

また、図 7 で示したブンゼン火炎の HCHO の蛍光強度分布を数値計算により得られた HCHO のモル濃度分布と比較した。その結果を図 8 に示す。今回は分布の形状について検討するため、数値解析により得られた HCHO のピーク位置を、測定された蛍光強度分布のピークの位置と合わせた。また、縦軸はそれぞれのピーク値 (最大値) で正規化して示している。これによると、蛍光強度分布と計算により得られた HCHO

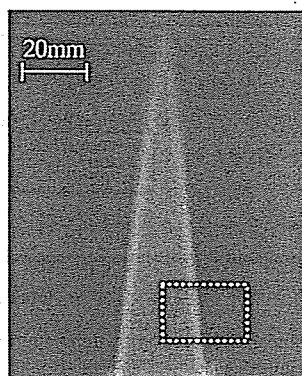
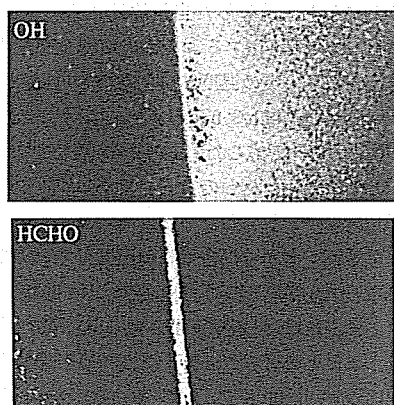
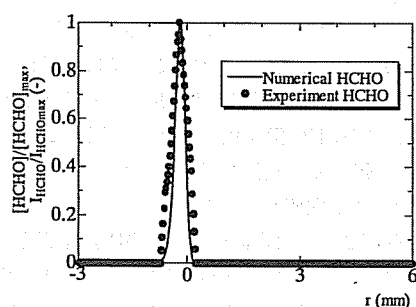
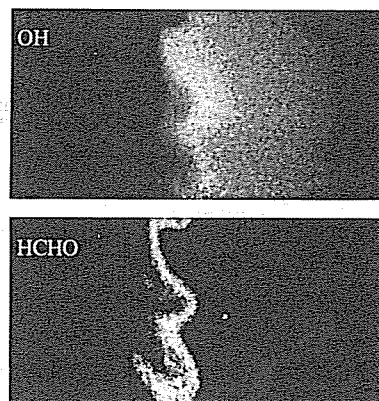
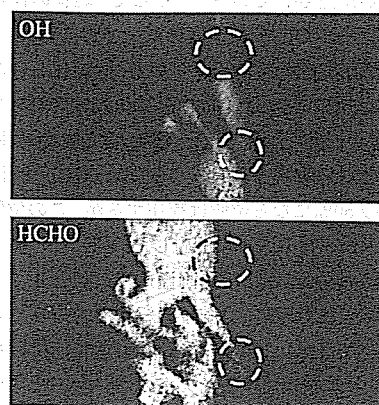


Fig. 6 Direct photograph and PLIF image area

Fig. 7 OH and HCHO images of Bunsen flame;  $\phi=0.75$ Fig. 8 HCHO fluorescence signal of Bunsen flame and numerical HCHO concentration;  $\phi=0.75$ 

の濃度分布はほぼ一致した。したがって、HCHOの蛍光強度はHCHOのモル濃度にほぼ比例していると考えられ、HCHOとOHの蛍光強度から火炎構造を十分議論できることが確認できた。

3.2 乱流火炎の火炎画像 次に乱流火炎の計測を行った。旋回噴流燃焼器により形成される当量比

Fig. 9 OH and HCHO images of turbulent flame;  $\phi_m=0.75$ ,  $U_m=10$  m/sFig. 10 OH and HCHO images of turbulent flame;  $\phi_m=0.75$ ,  $U_m=30$  m/s

0.75における流速  $U_m=10$  m/s と 30 m/s の同時撮影の結果を図9と図10に示す。画像の左端が燃焼器出口中央になるように撮影しているため、OHとHCHOの蛍光が計測されない左側の黒い部分は未燃ガスである。層流火炎の計算によれば、燃料が分解してHCHOが生成されるため、図9の乱流火炎の画像でも、まず未燃ガスが反応してHCHOの領域が観測され、その外側にOH濃度の高い領域が観察された。図2でも示したが、当量比0.75、流速10 m/sの条件は火炎構造位相図においてしわ状層流火炎領域に相当する。したがって、図9の画像は、凹凸をもつ1枚の火炎面が変動する典型的なしわ状層流火炎のものであると考えられる。

次に、流速が30 m/sの図10について検討する。図9の流速10 m/sと比較すると、流速が大きいほど火炎の凹凸が大きくなり、特に、HCHOの存在領域が広

くなった。当量比 0.75, 流速 30 m/s の条件は, 火炎構造位相図において Thin Reaction Zones の領域に相当する。Mansour<sup>(4)</sup> らの実験によれば, この領域の火炎は乱れにより予熱帯が厚くなることが報告されている。これ以外にも, レーザシートに対して火炎が傾く三次元性の影響<sup>(10)</sup> や乱れにより火炎が複雑に入り組んだ結果厚くなっている可能性もあるが, この条件でも反応帯は厚くなっていないことから<sup>(18)</sup>, HCHO 領域の拡大は, 予熱帯が厚くなったことによるものと考えられる。また非常に興味深いことであるが, 画像の点線で示した位置に, HCHO は存在するものの OH が消失している領域が存在した。これはおそらく, 乱流場の大きな火炎伸長により局所的に火炎が消失<sup>(19)</sup> したことを意味しているものと思われる。

通常, 1 組のレーザとカメラを用いた計測システム

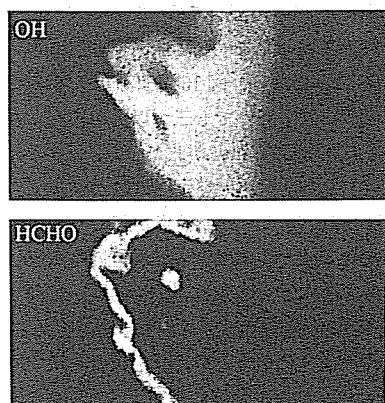


Fig. 11 OH and HCHO images of turbulent flame;  $\phi_m=0.90$ ,  $U_m=30$  m/s

では, この OH のない領域が局所的な火炎の消失なのか, 火炎が三次元の構造をもつためシート光から火炎が単に湾曲して部分的に計測されていないだけなのかを判別することはできない。今回は 2 組のレーザとカメラを用いており, 図 10 に示すように, OH が計測されない領域の近傍で HCHO が観察されていた。したがって点線で示した領域は, 火炎が乱れにより局所的に消失したものであると思われる。これ以外の画像も調べたが, OH が部分的に消失している領域でも HCHO は存在していた。したがって局所消失は, OH によりほぼ判定できることが推察されたが, より詳細な議論は 3・3 節で行うことにする。

一方, 同じ流速 30 m/s における当量比 0.90 の結果を図 11 に示す。図 10 の当量比 0.75 のものと比較すると, HCHO や OH の蛍光強度は高い値を示すことがわかった。また, OH 蛍光画像の中央部に空孔が確認できた。従来 OH 濃度のみの計測ではこの蛍光のない部分が未燃ガスなのか, 周囲雰囲気である既燃ガスを巻き込んだものなのかが判別できなかった。ここで, HCHO 蛍光画像を見てみると, OH の空孔の内側に HCHO が存在していることが確認できる。このことにより, この OH 蛍光画像の空孔は既燃ガスではなく, 予熱領域あるいは反応領域の一部であることがわかる。

3・3 火炎面長さと火炎領域 最後に, 二次元の画像から火炎面長さを求め, 火炎構造の変化について検討することにした。前述のように, 局所消失が起こる場合は OH の濃度のみが減少する。したがって, 火炎面を OH の蛍光画像から求め, 火炎面長さを求めた。また, 図 10 および図 11 に示したように, 画像内

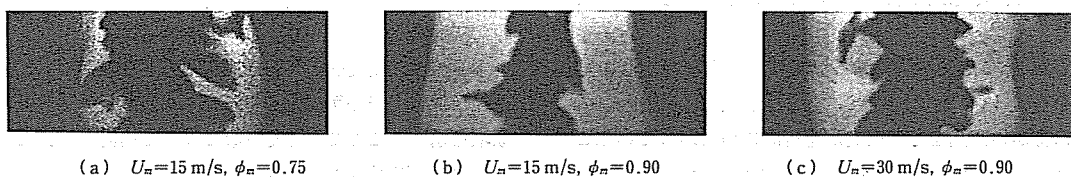


Fig. 12 OH image

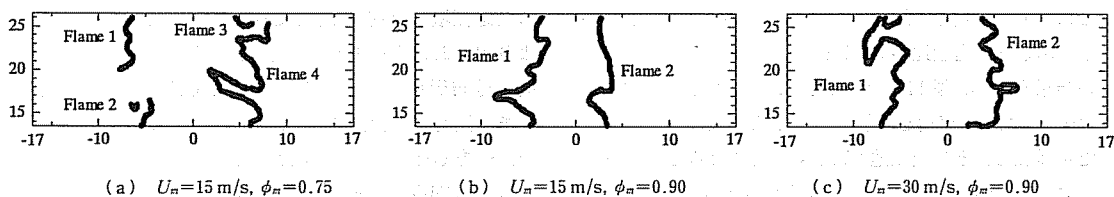


Fig. 13 Flame position obtained by flame image

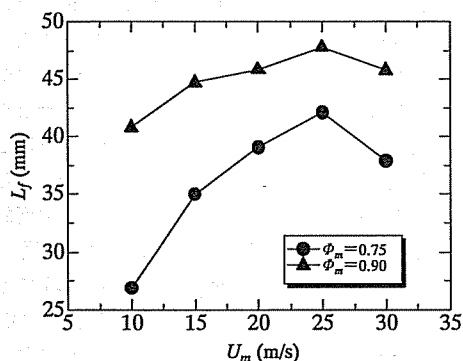


Fig. 14 Averaged flame length

には火炎の一部が局所的に存在しない部分や、分断されて島のように離れた火炎が観察され、画像内にいくつかの火炎が存在した。そこで、画像内にとらえられる火炎の数(火炎領域の数)を調べることにした。

PLIF法により測定されたOH蛍光画像の一例を図12に示す。旋回噴流燃焼器の中心軸が画像の中心になるように計測しており、撮影範囲は横34 mm×縦26 mmである。流速と当量比がそれぞれ図12(a)  $U_m=15$  m/s,  $\phi_m=0.75$ , (b)  $U_m=15$  m/s,  $\phi_m=0.90$ , (c)  $U_m=30$  m/s,  $\phi_m=0.90$ の各条件における画像である。図12において、画像中央部の蛍光強度のない黒い部分が未燃領域であり、白い部分がOHの存在する反応領域あるいは既燃ガスの領域に相当する。この結果によると、流速が大きくなると火炎面の凹凸が細くなっていることがわかる。流速が同じ場合は、当量比が低いほど蛍光強度が弱く、またOHの存在領域が狭くなった。特に図12(a)では、OHが一部存在しない消失した領域が観察された。ここではおそらく、火炎が部分的に消失しているものと考えられる。

次に、これらの画像から火炎面の位置を特定した結果を図13に示す。これによると、図13(b), (c)では細かい凹凸をもつ火炎が連続的につながっていることがわかるが、図13(a)の条件ではいくつかの火炎領域に分かれているようすが明確にとらえられている。

また、特定された火炎面位置を単純に直線で結ぶことにより、500枚の画像から火炎面長さの平均値  $L_f$  を算出した。当量比が0.75と0.90のそれぞれの場合の結果を求め、図14に示した。これによるといずれの当量比でも、流速を増加させると火炎面長さはいったん増加し、その後流速25 m/s以上になるとやや減少することがわかった。また当量比が高いほうが火炎面長さが大きいことがわかった。

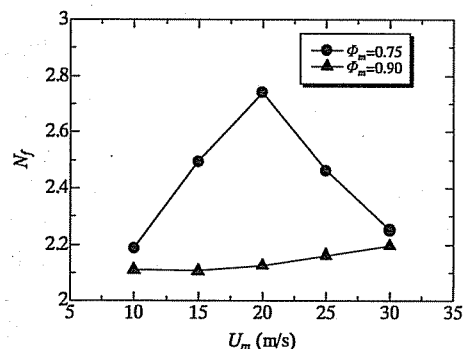


Fig. 15 Number of flame region

これらの条件において、OHの蛍光画像から火炎領域の数を求めた。各画像に存在している火炎領域の数の平均値  $N_f$  を各条件で求めた結果を図15に示す。ここで検討している画像では、未燃領域が中央になるように撮影しているため、画像内に左右二つの火炎をとらえることになる。図15によると、 $N_f$ は2よりも大きいため、どの条件でも三つ以上の火炎が存在した画像がいくつかあることがわかった。また、当量比が小さい0.75のほうが火炎領域の数が増加した。これは当量比が0.90より局所消炎が起こりやすいことを意味するものと思われる。特に、当量比0.75、流速20 m/sの火炎では、火炎領域の数が明らかに他よりも多いことがわかる。

この結果を図14の火炎面長さと比較すると、当量比が低い場合は火炎領域の数が大きく、逆に火炎面長さは小さな値となっていた。したがって、局所的に火炎が存在しない領域が多くなることで、火炎面長さが減少することになったものと思われる。

#### 4. 結 論

本研究では、OH-HCHO同時PLIF法を用いて、乱流予混合火炎の可視化を行った。火炎面長さや火炎領域を求めることで、火炎構造について検討した。これにより、以下のような結論が得られた。

(1) 層流一次元火炎の計算結果からHCHOは反応初期に生成され、約400 Kから1400 Kの予熱帯から反応領域に存在する。HCHOの蛍光強度を計算により得られたHCHOの濃度と比較したところ、ほぼ同じ分布形状になったことから、HCHOの蛍光強度がモル濃度(数密度)にほぼ比例していることを確認した。一方OHは、反応領域および既燃ガスに存在しており、HCHOとの同時測定を行うことで火炎構造を詳細に検討することができる。

(2) 位相図でしわ状層流火炎に対応する条件では、1枚の連続した火炎面が変動するようすが観察された。一方、Thin Reaction Zones 領域に対応する条件では、HCHO の領域が広くなり、予熱帯が厚くなったことが推察された。また、HCHO は存在するものの OH が消失している画像が得られ、火炎が局所的に消失したことが推察された。

(3) OH の蛍光画像から火炎面を特定し、火炎面長さを求めた。その結果、流速を増加させて乱れを強くすると、火炎面長さははじめ単調に増加するが、流速が 25 m/s 以上では逆に火炎面長さは短くなった。当量比が低いほど火炎領域の数が多くなったことから、局所的に火炎が存在しない領域が多くなることで、火炎面長さが減少することになったものと思われる。

#### 謝 辞

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会の科研費(18560196)の助成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) Dieke, G. H. and Crosswhite, H. M., The Ultraviolet Bands of OH, *Journal Quantitative Spectroscopy Radiative & Transfer*, Vol. 2 (1962), pp. 97-199.
- (2) Kohse-Hoinghaus, K., Laser Techniques for The Quantitative Detection of Reactive Intermediates in Combustion Systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 20 (1994), pp. 203-279.
- (3) Masai, A. M. et al., The Instantaneous Spatial Structure of the Recirculation Zone in Bluff-Body Stabilized Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27 (1998), pp. 1031-1038.
- (4) Mansour, M. S. et al., Investigation of Scalar Mixing in the Thin Reaction Zones Regime Using Simultaneous CH-LIF/Reyleigh Laser Technique, *Proceedings of the Combustion Institute*, No. 27 (1998), pp. 767-773.
- (5) Giezendanner, R. et al., Periodic Combustion Instabilities in a Swirl Burner Studied by Phase-Locked Planar Laser-Induced Fluorescence, *Combustion Science and Technology*, Vol. 175 (2003), pp. 721-741.
- (6) Tanahashi, M. et al., Simultaneous CH-OH PLIF and Stereoscopic PIV Measurement of Turbulent Premixed Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, No. 30 (2005), pp. 1665-1672.
- (7) Yamamoto, N. et al., Measurement of Flame Structure of Turbulent Premixed Flame by OH-LIF, (in Japanese), *Institute of Fluid & Heat Engineering*, Vol. 38 (2003), pp. 19-28.
- (8) Yamamoto, K. et al., PIV Measurement and Turbulence Scale in Turbulent Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71, No. 711 (2005), pp. 2741-2747.
- (9) Nakamura, Y. et al., Flame Diagnostics with Acetone-OH Simultaneous PLIF, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol. 47, No. 142 (2005), pp. 290-299.
- (10) Manome, S. et al., Study of Acetone-OH Simultaneous PLIF for Combustion Diagnostics of Turbulent Premixed Flames, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 73, No. 725 (2007), pp. 350-356.
- (11) Harrington, J. E. and Kermit, S. C., Laser induced fluorescence measurements of formaldehyde in a methane/air diffusion flame, Vol. 202, No. 3, 4, *Chemical Physics Letters*, Vol. 22 (1993-1), pp. 196-202.
- (12) Paul, P. H. and Najm, H. N., Planer Laser-Induced Fluorescence Image of Flame Heat Release Rate, *Proceedings of the Combustion Institute*, No. 27 (1998), pp. 43-50.
- (13) Peters, N., The Turbulent Burning Velocity for Large-Scale and Small-Scale Turbulence, *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 384 (1999), pp. 107-132.
- (14) Horie, R. et al., Measurement of OH in a Co-flow Diffusion Flame by PLIF, *Transactions of the Japan Society for Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 65 (1999), pp. 54-61.
- (15) Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., (1985), pp. 130-179, Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City, USA.
- (16) Murayama, M. and Takeno, T., Fractal-Like Character of Flamelets in Turbulent Premixed Combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, No. 22 (1988), pp. 551-559.
- (17) Kee, R. J. et al., CHEMKIN-II: a Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics, *Sandia Report*, SAND 89-8009 (1989).
- (18) Yamamoto, K. et al., Persistence of Laminar Flamelet Structure under Highly Turbulent Combustion, *JSME International Journal*, B 46-3 (2003), pp. 408-415.
- (19) Sivashinsky, G. I., Some Developments in Premixed Combustion Modeling, *Proceedings of the Combustion Institute*, No. 29 (2002), pp. 1737-1761.