

Two-sheet OH-PLIF 法による 乱流予混合火炎の火炎構造および局所消炎の検討

石井慎治^{*1}, 山本和弘^{*2}, 林直樹^{*2}, 山下博史^{*3}

Flame Structure and Local Extinction of Turbulent Premixed Flames Using Two-sheet OH-PLIF Technique

Shinji ISHII, Kazuhiro YAMAMOTO^{*4},
Naoki HAYASHI and Hiroshi YAMASHITA

^{*4} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, using two-sheet OH-PLIF technique, we have obtained instantaneous two-dimensional flame images to examine highly turbulent premixed combustion in a cyclone-jet combustor. Since OH plays an important role in the combustion reaction, it has been reported that the flame front can be determined for the discussion of flame extinction. Here, the circumferential flame length and probability of flame existing are evaluated at different turbulence intensity. From vertical and horizontal images, the local flame extinction is confirmed based on 3D flame structure. When the exit velocity (U_m) is increased, more cusps appear on the flame front. At $\phi_m = 0.90$, the circumferential flame length is monotonically larger. However, at $\phi_m = 0.75$, the flame length is decreased at $U_m > 20$ m/s. In this condition, the probability of flame existing is decreased. Thus, the reduction of flame length could be explained by the local extinction.

Key Words : Premixed Combustion, Flame, Extinction, Laser-aided Diagnostics, PLIF

1. 緒 言

近年, 先進国だけでなく発展途上国の急速な発展に伴い, 世界中で膨大な化石資源が消費されている。その影響で, 大気汚染や地球温暖化と言った環境問題が深刻化しており, 実用燃焼器はクリーンで高効率であることが求められている。一般に, 実用燃焼器のほとんどは乱流燃焼であり, 実用燃焼器の開発には, 乱流燃焼の解明が不可欠である。乱流燃焼場の数値シミュレーションでは, 非常に微細な時間・空間スケールを考慮する必要があり, 計算負荷が大

きくその実行は非常に困難である。そのため, 計測による火炎構造の検討が行われている。例えば, 乱流火炎中の流れ場を調べるために, LDV(レーザドップラー流速計)や PIV(粒子画像流速計)が用いられる。また, 火炎の可視化方法として, シュレーリン法やレーザトモグラフィ法, レーザ散乱法, PLIF 法(レーザ誘起蛍光法)がある。PLIF 法は, 原子・分子の持つ特有のエネルギー準位を利用することにより, 特定の化学種を測定することが可能である。最近では, 複数の化学種を同時に計測する研究⁽¹⁻⁷⁾や, PLIF と PIV の同時計測が行われている^(8,9)。

これまでに山本らは旋回噴流燃焼器により形成される強い乱流場の火炎を対象に PLIF 法を用いて OH ラジカルを計測し, 乱流予混合火炎の火炎構造と燃焼速度について検討してきた⁽¹⁰⁻¹²⁾。また, OH-HCHO 同時 PLIF 法の計測を行い, 予熱帯に存在する HCHO

*原稿受付 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。

^{*3}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.

と主に反応領域と既燃ガス中に存在する OH の分布を調べ、局所的に OH ラジカルが存在しない領域が局所消炎に対応することを指摘した^(13,14)。しかし、実際の火炎は3次元構造を持っているため、2次元画像だけでは消炎を議論できない可能性がある。

そこで本研究では、2枚のレーザをクロスするように燃焼場にほぼ同時に照射することで、水平方向と垂直方向の火炎の画像を取得した。これら2枚の画像を用いて、火炎の3次元構造と消炎について検討した。特に、水平方向の画像から円周方向の火炎特性を詳細に調べることにした。

2. 実験装置

2.1 旋回噴流燃焼器 本実験で用いた旋回噴流燃焼器を図1に示す。燃焼器は主噴流ノズル、4本の旋回流ノズル、円筒形の保炎室から成っている。主噴ノズルの口径は12.7mm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、円錐に近い安定した乱流予混合火炎を得る。実験では、

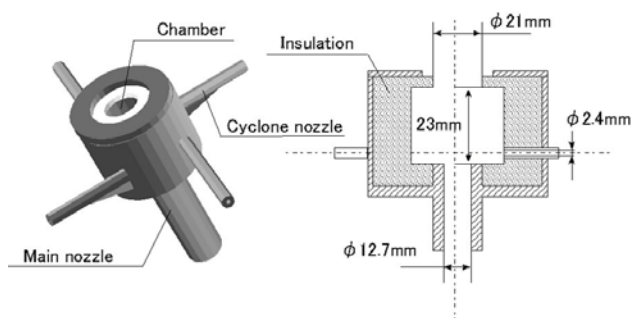


Fig.1 Cyclone-jet combustor

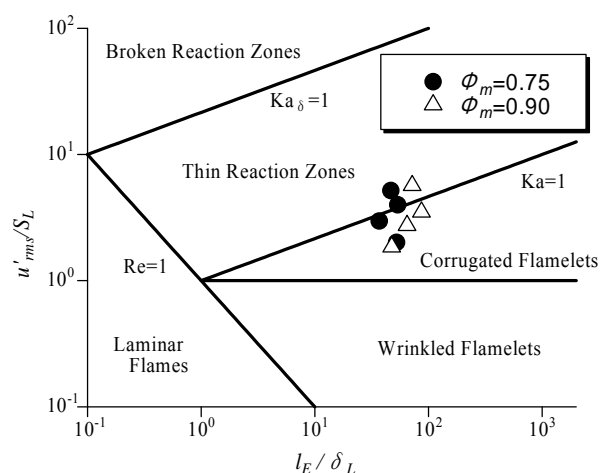


Fig.2 Phase diagram

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10~30m/sまで5m/sおきに変化させた。また当量比は、各流速条件に対し、 $\phi_m=0.75, 0.90$ 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10m/s、当量比0.70に固定した。本実験では燃料にプロパンを用いた。本実験条件をPetersの提案する火炎構造位相図上^(15,16)に示す(図2)。実験条件が流速20m/s以下ではCorrugated Flamelets領域に相当し、30m/sではThin reaction zones領域に相当する。

2.2 PLIF システム 図3にPLIFシステムの概略図を示す。OH ラジカルの励起光源に2台のNd:YAGレーザの第2高調波を用い、色素レーザ、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^(17,18)。この時の波長は283.2nmである。水平方向と垂直方向の2つの2次元断面におけるOHラジカルの蛍光強度を2台のカメラで別々に撮影するため、2台の励起光源のレーザ発振の間に100nsの時間差を与えた。発振間隔はともに10Hzとし、2枚のシリンダカルレンズによりシート状にして、燃焼場へ照射した。

燃焼場から得られるOHの蛍光強度は中心波長307nm、半値幅10nmのフィルターにより必要な波長だけを選択し、2台のICCDカメラを用いてパソコンに画像を記録した。図4(a)、図4(b)に示した太線で囲まれた四角が測定領域である。水平方向の計測では、図4(a)のようにLaser sheet 1をバーナ出口より20mmの高さに照射し、画像中心がバーナの中心軸になるようにした。真上からの撮影は難しいため、斜め上方より撮影し、カメラの傾斜角度を72.5°とした。画像の大きさは垂直方向が横18.3mm×縦18.3mm、カメラの画素数は1024×1024とし、水平方向が28.0mm×28.0mm、カメラの画素数は680×680とした。ただし、水平方向の画像が真上から見た画像になるよう補正した。一方、垂直方向の計測では、図4(b)のように、Laser sheet 2がバーナ中心軸上を通過するように照射し、画像の右端をバーナ中心軸上として、バーナ出口より13.5mm~31.8mmの高さを計測範囲とした。

次に、火炎位置の決定方法と火炎長さの算出方法について説明する。まず、画像の各断面における蛍光強度の最大値を求め、その半分の値をとる位置を火炎面とした⁽¹⁹⁾。火炎長さの測定にはフラクタル解析を用いた⁽²⁰⁾。このとき、全ての画像において暗電流補正、レーザ強度補正とスムージングとを行っている。

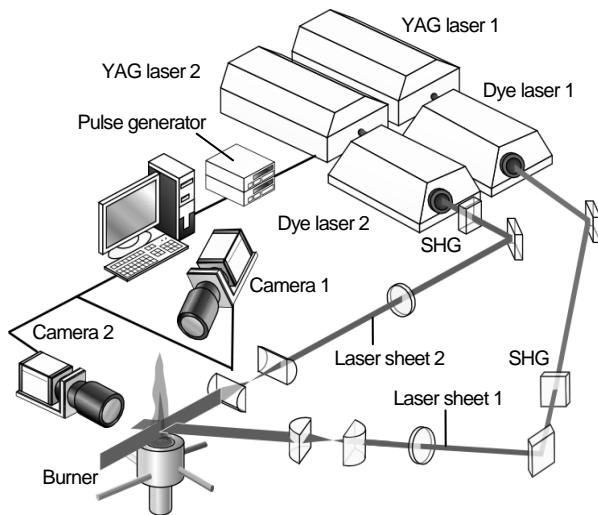
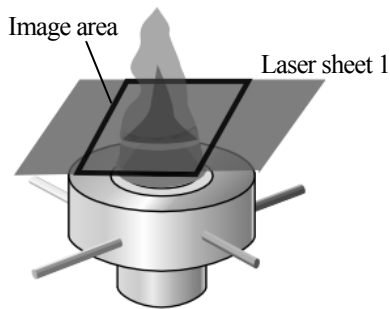
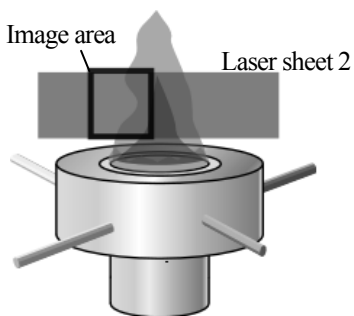


Fig.3 Two-sheet OH-PLIF system



(a) Horizontal plane



(b) Vertical plane

Fig.4 Image area

3. 実験結果

3・1 OH 蛍光強度分布 PLIF 法により測定された水平方向の断面の OH 蛍光画像の例を図 5 に示す。当量比が $\phi_m=0.75, 0.90$, 平均流速は $U_m=10\text{m/s}, 20\text{m/s}, 30\text{m/s}$ の蛍光画像である。(A-1)に示したが、画像の中心部分が未燃ガスの領域であり、その周り

の白い部分は OH が存在する反応領域と既燃ガス領域に相当する⁽¹³⁾。さらに外側は OH が存在しない周囲雰囲気である。蛍光強度が強いほど OH 濃度が高いが、同じ流速において当量比 0.75 と 0.90 を比較してみると、当量比が高いほど OH の蛍光強度が強くなり、また OH が広く存在していることが分かる。流速を増加させた場合、火炎に多くの凹凸が見られ、形状が複雑になっていることが分かる。また、(B-1)および(C-1)の条件では OH の蛍光強度が弱くなり、部分的に OH が存在しない領域が確認された。

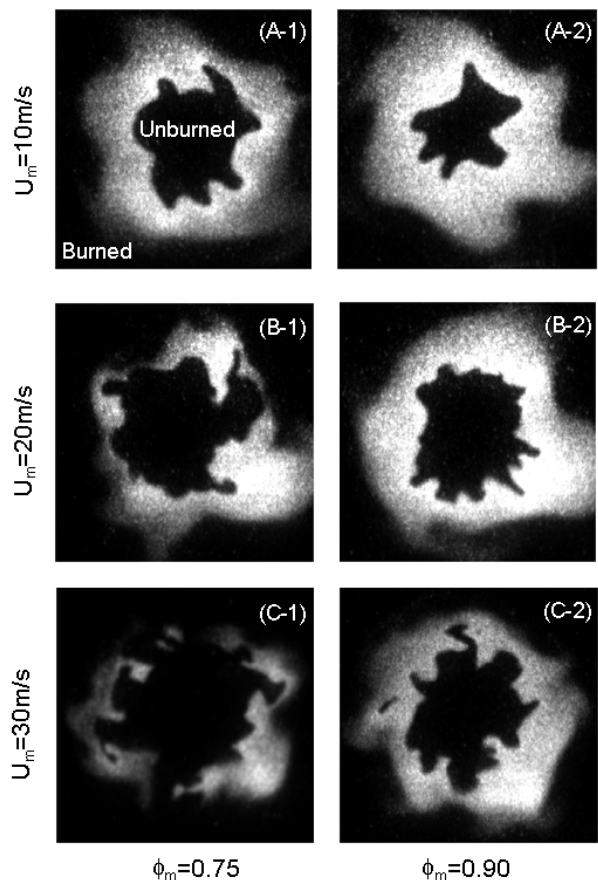


Fig.5 OH-PLIF images of horizontal plane

3・2 火炎の消炎特性 局所的に OH が存在しない領域が存在した場合、これまでは局所消炎か火炎が 3 次元構造を持つため 2 次元の画像内に写らないのか疑問視されることがあった。そこで、2 つの断面において得られた画像を用いて、火炎の 3 次元構造について検討した。図 6 はそれぞれ水平方向と垂直方向の断面における画像である。それぞれの画像中にある線はもう一方のシート光の入射位置を示している。図 6(a)を見ると、水平方向の画像において垂直方向の画像をとらえた位置で OH が存在してい

ないことが分かる. 図 6(b)を見ると, 水平方向の画像に対応する位置でも OH が存在していないことを確認した.

これ以外の画像においても同様の傾向が見られた. そのため, OH が存在していない領域では局所消炎が起こっていると断定してよいことが分かった. 以降は OH が存在しない場所を消炎領域とし, 円周方向の火炎構造を議論する.

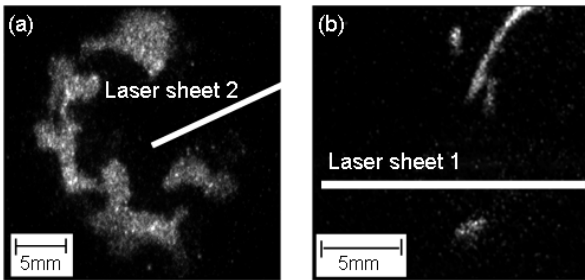


Fig.6 OH images in (a) horizontal plane, and (b) vertical plane; $\phi_m=0.75$, $U_m=30\text{m/s}$

3・3 火炎面の抽出と火炎長さ まず画像から火炎面を抽出し, 円周方向の火炎長さを調べた. 当

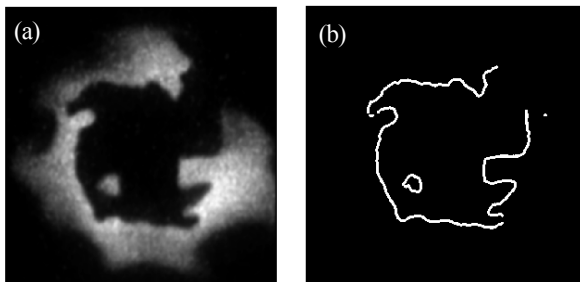


Fig.7 (a) OH image and (b) Flame front image extracted from (a)

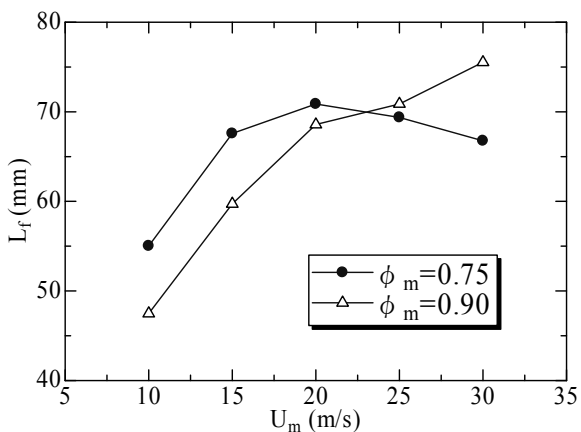


Fig.8 Flame length

量比 $\phi_m=0.75$, 流速 $U_m=30\text{m/s}$ の OH の蛍光強度分布から火炎面を抽出した一例を図 7 に示す. (a)が OH の蛍光強度分布の画像, (b)が火炎面を抽出したものである. 各条件において 500 枚の水平方向の画像から火炎の円周方向の長さ(L_f)を求めた結果を図 8 に示す. 流速 $U_m=10\sim 30\text{m/s}$ の間において, 当量比 $\phi_m=0.90$ の条件では火炎長さは単調に増加していることが分かる. しかし, 当量比 $\phi_m=0.75$ では流速が $U_m=20\text{m/s}$ 付近で最大となりその後火炎長さは減少した.

3・4 火炎の存在確率 当量比 $\phi_m=0.75$ において, 流速 $U_m=20\text{m/s}$ 以上になると火炎長さが減少することが分かったが, その理由を明らかにするために, OH 画像から部分的に火炎が消炎している領域を特定し, 火炎が存在する確率(P_f)を求めた. 方法を以下に示す. 画像中心から, 円周方向 360 度に亘って 1 度ずつ, 半径方向に火炎面を検索し, 火炎が存在する確率を求めた. その結果を図 9 に示す. これによると, 当量比 $\phi_m=0.90$ の場合, 火炎の存在確率はほぼ 1 であり, 火炎が存在しない部分はほとんど確認されなかった. しかし, 当量比 $\phi_m=0.75$ の場合は流速の増加とともに火炎の存在確率が減少し, 流速 $U_m=30\text{m/s}$ になると 0.8 付近まで低下した. 以上の結果から, 流速が大きくなると消炎する確率が増えることが分かった.

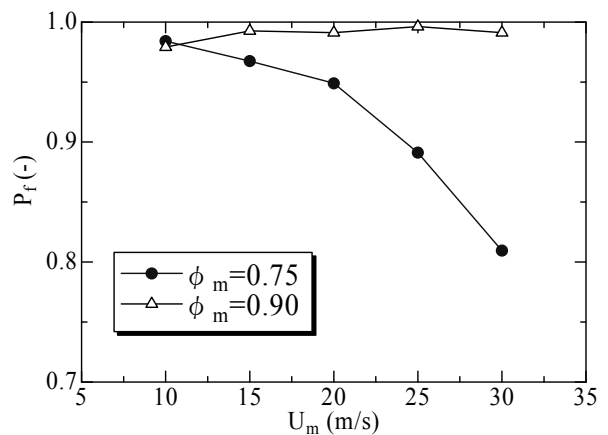


Fig.9 Probability of flame existing

4. 考 察

円周方向の火炎長さを調べた結果, 当量比 0.90 では流速を増加させると火炎長さが増加することが分かったが, 当量比 0.75 では 20m/s 以上で減少した. 流速を増加させると乱れにより火炎面積が増大するため, 火炎長さは増加すると考えられる. ただし,

局所消炎が起きれば火炎長さは短くなると思われる。局所消炎が起こる理由については、ルイス数効果、曲率、火炎伸長などにより説明できると思われるが、詳細な議論は本論では行わない。今回は火炎長さに及ぼす乱れの影響として、乱れによる火炎面積の増加というプラスの効果と消炎によるマイナスの効果について検討することにした。

まず、円周方向の火炎長さの確率密度分布 (PDF) を図 10 に示す。条件ごとに比較するために、(a)流速 $U_m=10\text{m/s}$, 当量比 $\phi_m=0.75$, (b)流速 $U_m=10\text{m/s}$, 当量比 $\phi_m=0.90$, (c)流速 $U_m=30\text{m/s}$, 当量比 $\phi_m=0.75$, (d)流速 $U_m=30\text{m/s}$, 当量比 $\phi_m=0.90$ の 4 条件を選んだ。はじめに、流速 $U_m=10\text{m/s}$ のときの当量比 $\phi_m=0.75$ と $\phi_m=0.90$ を比較する。両者のばらつきは同程度であり、 L_f が 30mm から 90mm とほぼ同じような分布をとっていることが分かる。次に、当量比 $\phi_m=0.90$ のときの流速 $U_m=10\text{m/s}$ と $U_m=30\text{m/s}$ を比較すると、火炎長さのばらつきは同程度であるが、流速 $U_m=30\text{m/s}$ では L_f が全体的に大きくなる確率が大きい。 $U_m=30\text{m/s}$ では乱れが大きいため、火炎の凹凸が増して L_f が大きくなったものと思われる。ま

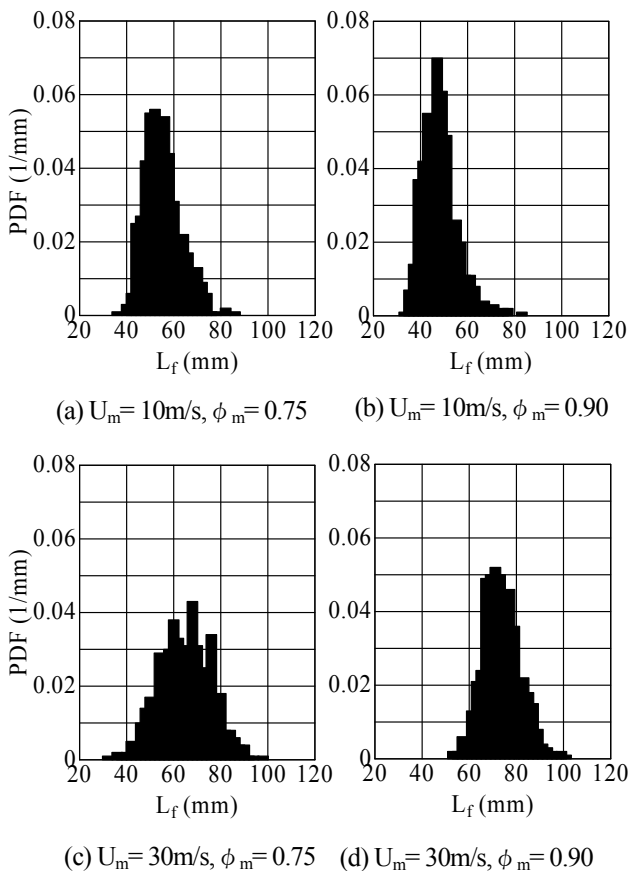


Fig.10 PDF of flame length

た、当量比 $\phi_m=0.75$ のときの流速 $U_m=10\text{m/s}$ と $U_m=30\text{m/s}$ を比較すると、流速 $U_m=30\text{m/s}$ では L_f が大きい頻度が増えたが、ばらつきが大きくなり、 L_f が小さい頻度が増加した。以上により火炎長さは乱れにより増加するが、図 9 で示したように局所消炎が起きる場合には火炎長さが短くなることが分かった。

さらに円周方向の火炎構造について調べるため、火炎の平均半径を調べた。火炎の位置を画像から算出して平均の火炎半径を求めた。ただし、消炎した部分は火炎半径を 0 とした。各条件で求めた平均の火炎半径 R_f を図 11 に示す。これによると当量比 $\phi_m=0.90$ においては、火炎半径がほとんど変化していない。一方、当量比 $\phi_m=0.75$ においては、火炎半径は流速が $U_m=20\text{m/s}$ 以上になると小さくなった。これは図 9 で示したように当量比 $\phi_m=0.75$ では流速を増加させると局所消炎が起こるためであると思われる。

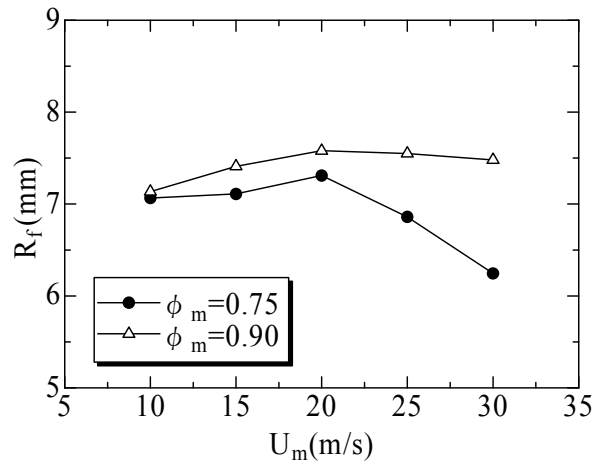


Fig.11 Mean flame radius

ただし火炎長さを考えた場合、平均半径が変わらない場合でも乱れにより火炎の凹凸が増加することで火炎長さが変化することが考えられる。すなわち、実際の乱流火炎では、図 12 の実線に示すように火炎は乱れにより波打っているため、火炎長さは点線で示す平均半径の円の周長と比較して大きくなっているはずである。そこで、平均半径の円の周長に対して実際の火炎が R 倍になっているとし、この R を以下の式により算出した。

$$R = \frac{L_f}{2\pi R_f}$$

1 枚の画像ごとに R を算出し、各条件で 500 枚を平均した結果を図 13 に示す。これによると、当量比

$\phi_m=0.75, 0.90$ の両条件において、流速が速くなると単調に増加する傾向が見られた。R の値は 1.1~1.7 となり常に 1 以上となったことから、乱れにより火炎の凹凸が増えると常に乱れによる火炎長さが増加することが分かった。ただし、同じ流速では、当量比 $\phi_m=0.75$ の方が、当量比 $\phi_m=0.90$ よりも常に大きくなった。

以上の結果、局所消炎がほとんど起こらない条件では、流速を増加させると乱れにより火炎面に多くの凹凸が現れ、火炎長さが増加する。しかし、 $U_m > 20\text{m/s}$ 、 $\phi_m=0.75$ では、乱れによる火炎長さの増加よりも局所消炎の影響が相対的に大きくなり、実際の火炎長さ L_f が減少したものと思われる。

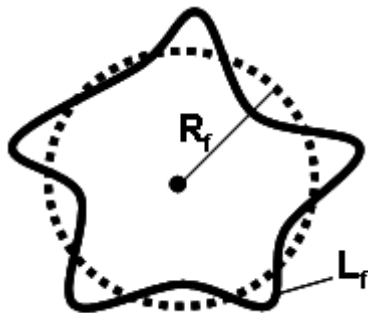


Fig.12 Flame wrinkling and flame increasing ratio of R

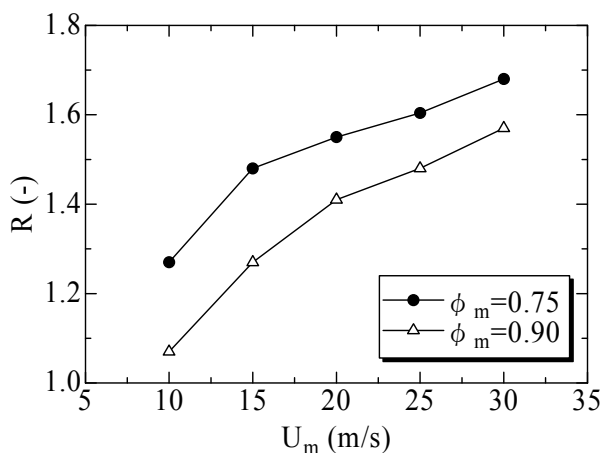


Fig.13 Flame increasing ratio of R

5. 結 言

燃焼場に2枚のレーザをクロスするように照射し、垂直方向と水平方向の OH 分布をほぼ同時に計測することにより、燃料にプロパンを用いた場合の乱流予混合火炎

の構造を可視化した。火炎中の OH 分布から火炎長さとお炎半径を求め、消炎特性について検討した。これにより以下の結論を得た。

- (1) 当量比 $\phi_m=0.75, 0.90$ のいずれにおいても、流速を大きくすると、火炎に多くの凹凸が見られ、形状も複雑なる。
- (2) 水平方向と垂直方向の両方の画像を比較したところ、OH が計測されない領域が存在し、局所消炎を確認することができた。
- (3) 平均半径の円の周長に対する実際の火炎長さの比は、1.1~1.7 となり、乱れにより常に火炎長さは増加する。
- (4) 当量比 $\phi_m=0.90$ の場合には、流速を増加させても平均の火炎半径はほとんど変わらないが、乱れによる火炎の変動で円周方向の火炎長さは単調に増加する。一方、当量比 $\phi_m=0.75$ の場合には、流速 $U_m=20\text{m/s}$ 以上において局所消炎が起こり、火炎長さは減少する。

文 献

- (1) Paul, P. H. and Najam, H. N., Planer Laser-Induced Fluorescence of Flame Heat Release Rate, *Proceeding of the Combustion Institute*, No.27 (1998), pp.43-50.
- (2) Ayoola, B. O., Balachandran, R., Frank, J. H., Mastorakos, E. and Kaminski, C. F., Spatially Resolved Heat Release Rate Measurements in Turbulent Premixed Flames, *Combustion and Flame*, Vol. 144 (2006), pp.1-16.
- (3) Dunn, M. J., Gordon, R., Masri, A. R. and Bilger, R. W., High resolution Temperature and OH Imaging in High Turbulent Premixed Flames, *Proceedings of 6th ASPACC* (2007), pp.146-149.
- (4) Mansour, M. S., Peters, N. and Chen, Y. C. Investigation of Scalar Mixing in the This Reaction Zones Regime Using Simultaneous CH-LIF/Rayleigh Laser Technique, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.27 (1998), pp.767-773.
- (5) Yung-Cheng Chen, Measurements of Three-dimensional Mean Flame Surface Area Ration in Turbulent Premixed Bunsen flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.32 (2009), pp.1771-1777.
- (6) Nakamura, Y., Manome, S., Satomi, T., Hayashi, N. and Yamshita, H., Flame Diagnostics with Acetone-OH Simultaneous PLIF, *Journal of Combustion Society of Japan, Series B*, Vol.47, No.142 (2005), pp. 290-299.
- (7) Shaddix, C. R., Williams, T. C., Blevins, L. G. and Schefer, R. W., Flame Structure of Steady and Pulsed Sooting Inverse Jet Diffusion Flames,

- Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30 (2005), pp.1501-1508
- (8) Kawanabe, H., Hargrave, G. K. and Williams, T. C., Analysis of Turbulence Production in a Jet Flame Using PIV and LIF, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No. 683 (2007), pp.138-143.
 - (9) Tanahashi, M., Murakami, S., Choi, G. M., Fukuchi, Y. and Miyauchi, T., Simultaneous CH-OH PLIF and Stereoscopic PIV Measurements of Turbulent Premixed Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (2005), pp.1665-1672
 - (10) Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S. and Konuma, Y., PIV Measurement and Turbulent Scale in Turbulent Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No. 711, (2005), pp.2741-2747.
 - (11) Yamamoto, K., Ozeki, M., Hayashi, N. and Yamashita, H., Burning Velocity and OH Concentration in Premixed Combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol.32 (2009), pp.1227-1235.
 - (12) Yamamoto, K., Ozeki, M., Hayashi, N. and Yamashita, H., Turbulent Burning Velocity and Flame Structure by PLIF Technique, *Proceedings of 6th ASPACC* (2007) pp.344-345.
 - (13) Yamamoto, K., Onishi, M., Hayashi, N., Ozeki, M. and Yamashita, H., PIV Measurement and Turbulent Scale in Turbulent Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No. 733, (2007), pp.1943-1949.
 - (14) Ohnishi, M., Ishii, S., Yamamoto, K., Hayashi, N., and Yamashita, H., A Study on Turbulent Premixed Flames in a Cyclone-jet Combustor Using OH-HCHO PLIF Technique, *Proceedings of 6th ASPACC* (2007), pp.340-341.
 - (15) Yamamoto, K., Nishizawa, Y. and Onuma, Y., Persistence of Laminar Flamelets Structure Under Highly Turbulent Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.47, No.6 (2003), pp.408-415.
 - (16) Peters, N., The Turbulent Burning Velocity for Large-Scale and Small-Scale Turbulence, *J. Fluid Mech.* 384 (1999), pp.107-132.
 - (17) Dieke, G. H. and Crosswhite, H. M., The Ultraviolet Bands of OH, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 2 (1962), 97.
 - (18) Horie, R., Ito, A., Nishioka, M., Zhu, X. L. and Takeno, T., Measurement of OH in a Coflow Diffusion Flame by PLIF, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.629 (1999), pp.54-61.
 - (19) Yamamoto, N., Nakamura, Y. and Yamashita, H., Measurement of Flame Structure of Turbulent Premixed Flame by OH-LIF, *Institute of Fluid & Heat Engineering*, Vol.38 (2003), pp.29-28.
 - (20) Murayama, M. and Takeno, T., Fractal-Like

Character of Flamelets in Turbulent Premixed Combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.22 (1988), pp.551-559.