

乱流予混合火炎の燃焼診断に対する アセトン-OH 同時 PLIF 計測手法の有効性の検討*

馬目 聡^{*1}, 中村 祐二^{*2}, 林 直樹^{*3}
山本 和弘^{*3}, 山下 博史^{*3}

Study of Acetone-OH Simultaneous PLIF for Combustion Diagnostics of Turbulent Premixed Flames

Satoshi MANOME, Yuji NAKAMURA^{*4}, Naoki HAYASHI,
Kazuhiro YAMAMOTO and Hiroshi YAMASHITA

^{**} Division of Mechanical and Space Engineering, Hokkaido University,
N 13 W 8 Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

This paper described an availability of acetone-OH simultaneous PLIF scheme for combustion diagnostics on turbulent premixed flame. Distinctive signal gap is found between acetone (seeded in the premixed gas) and OH (combustion product) with single excitation wavelength and single CCD camera to achieve relatively low cost measurement of flame zone. Flame zone thickness includes much flame information, e.g. the location of heat release region, local burning velocity. Considered turbulent condition throughout the present study is relatively weak and categorized in laminar flamelet regime. As the equivalence ratio of premixed mixture (acetone-seeded methane-air premixed gas) is varied from 0.64 to 0.90 (burning velocity is increased), measured local flame zone thickness (mode value) is decreased, however 3-D movement of the observed flame front makes the measured flame zone thickness wider than the laminar flame condition. In addition, results show that flame front curvature (convex toward unburned is positive) is positively correlated with flame zone thickness. It is ensured an applicability of the present scheme to survey the relation between flame zone thickness and flame front curvature in turbulent premixed flame.

Key Words: Premixed Combustion, Laser, Turbulent Flow, Acetone, OH, Flame Zone Thickness, Flame Front Curvature

1. 緒 言

燃焼の基礎研究だけでなく、環境負荷低減を目指した燃焼機器の開発においても、非接触で燃焼状態を診断できるレーザ計測が多く用いられる。レーザ計測の1つとして挙げられる平面レーザ誘起蛍光法(PLIF: Planar Laser-Induced Fluorescence)は燃焼で発生する特定の分子やラジカルなどの分布を可視化できる。特に、CH-PLIF計測は火炎面自体を直接2次元的に可視化できる魅力的なものである^{(1)~(4)}。最近ではCHを含む複数の物理量の多次元同時計測が行われ、現象が複雑で未解明な点も多い乱流燃焼に対する理解への貢献度は高い^{(4)~(6)}。しかし、発熱領域で発生するCHは極微量(最大12ppm程度⁽⁹⁾)であるため、CH-PLIF計

測を行うには高出力なレーザを必要とし、高コストである。

そこで、我々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計測手法」を提案した⁽⁷⁾。CH-PLIF計測は火炎面を可視化するが、本手法では未燃領域と既燃領域を同時に観察し、火炎帯を未燃領域と既燃領域に挟まれた蛍光の無い領域(無蛍光領域)として可視化する。未燃領域のトレーサには予混合気に添加するアセトン、既燃領域は高温場に存在する中間生成物のOHを用いる。本手法を層流予混合火炎に適用した場合、観察できる無蛍光領域の厚さが火炎帯厚さ(主に予熱帯厚さ)に相当することがこれまでに明らかとなっており、局所燃焼速度の算出および火炎構造の推定に利用できる可能性を示した⁽⁷⁾。

本報では、乱流予混合火炎の燃焼診断に対する本手法の有効性について検討する。まず、乱流予混合火炎の無蛍光領域の厚さ(火炎帯厚さ)を測定し、燃焼速度との関係を調べる。このとき、火炎面の3次元変動の影響による火炎帯厚さの変化についても検討する。その後、乱流予混合火炎の特性あるいは構造を決める要

* 原稿受付 2006年3月20日。

^{*1} 東邦ガス(株) (☎ 456-8511 名古屋市熱田区桜田町19-18)。

^{*2} 正員、北海道大学大学院工学研究科(☎ 060-8628 札幌市北区北13条西8)。

^{*3} 正員、名古屋大学大学院工学研究科(☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail: yuji-mg@eng.hokudai.ac.jp

素の1つである火炎面曲率⁽⁸⁾によって、無蛍光領域の厚さがどのように変化するか調べる。

2. 実験装置および方法

2.1 燃焼器およびアセトン供給系

本研究では、ブンゼンバーナ (図1: バーナ内径 27mm) により形成される乱流予混合火炎を計測対象とする。供給する予混合気は常温のメタン、空気、アセトンから構成される (総体積流量: 1000cm³/s)。アセトンは、一部のメタン-空気の予混合気を液体のアセトンに通じてバブリングすることにより添加した⁽⁷⁾。予混合気はスクリーンメッシュを通じて大規模な乱れが取り除かれ、ノズルで絞られることにより一様流となる。その後、予混合気はバーナ出口付近に設けた多孔板により強制的に乱れが加えられ、大気中に放出される。バーナ出口で形成される乱流予混合火炎は、火炎の吹き飛びを防ぐために設けたパイロット火炎 (燃料: 都市ガス) により保持される。このとき、乱れ強さは 0.13m/s、乱れの積分スケールは 3.5mm であり、Peters⁽⁹⁾ の火炎構造位相図における wrinkled flamelet (しわ状層流火炎) の領域に属する⁽¹⁰⁾。なお、比較として層流予混合火炎の計測も行うが、このときは多孔板を取り除いて実験を行う。

本研究では、燃料と酸化剤の混合比を変化させて計測を行う。ここで、アセトンは燃料として考慮する必要があるため、メタンとアセトンの混合燃料として「混

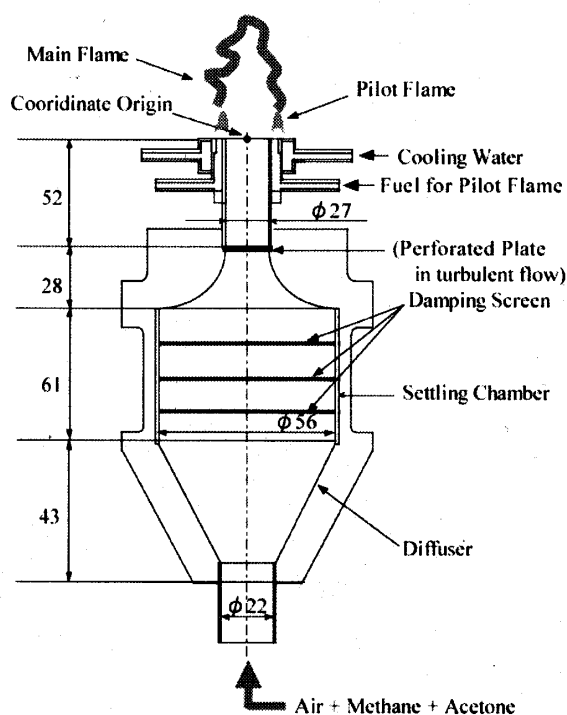


Fig. 1 Combustor

合当量比 ϕ 」を定義する。アセトンの添加量は 7.0×10^{-4} mol/s で一定とし、メタンの濃度を変えて混合当量比が $\phi=0.64, 0.68, 0.74, 0.81, 0.85, 0.90$ の場合について調べる。なお、考慮した混合当量比におけるアセトンに対するメタンの比率 (体積) は 1.76~3.21 の範囲である。なお、各当量比に対する層流燃焼速度 (実測値) はそれぞれ 9.8, 13.4, 16.8, 22.0, 27.0cm/s であり、メタン空気混合気の同一当量比に対して 1.3~3.3cm/s 程高い (分率として 5.06~32.7%の増加にあたる)。この違いは、アセトンの燃焼特性がメタンより高いことに起因し⁽¹¹⁾、当然、アセトンの比率が最も高くなる (=混合当量比が低い) ほど差が顕著となる。

2.2 レーザシステム

図2にレーザーシステムの概略図を示す。基本的には OH-PLIF とほぼ同様なシステムであり、Nd: YAG レーザ (Spectra Physics Inc., GCR-230: 10Hz, 5ns pulse) の第2高調波 (532nm) を、Dye レーザ (Lumonics Inc., HD-300) により 566.4nm に波長変換を行う。波長変換されたビーム光を BBO 結晶により倍波して励起光 (283.2nm) とする。この波長は OH 分子の $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ 遷移における振動準位 (1,0)Q₁(7) に相当するが、同時にアセトンの吸収波長の範囲内 (225-320nm⁽¹²⁾) でもあるため、アセトンの励起も可能である。燃焼場には様々な分子・ラジカルが混在するため、アセトンと OH 以外も励起される可能性があるが、前報にて他の分子・ラジカルの励起は背景ノイズ以下のレベルであることを確認した⁽⁷⁾。レーザーはレンズにより厚さ 1mm 以下、高さ 40mm 程度のシート状にし、バーナの中心軸を含む断面上に照射する。最終的に火炎に照射されるレーザー強度は約 7mJ/Pulse となる。なお、図中に示す通り、レーザーの進行方向を x、シートに対して垂直方向を y、バーナから予混合気の噴出方向を z 軸とする。

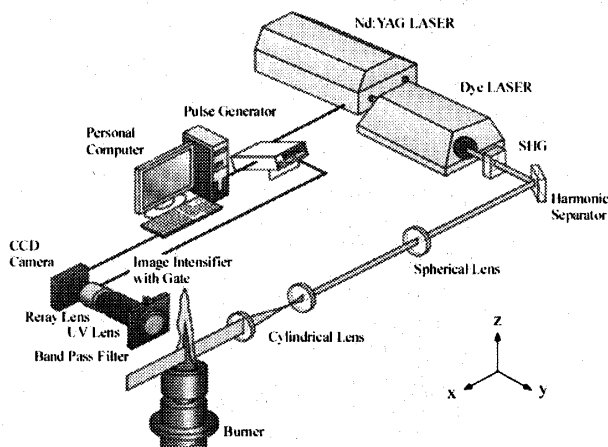


Fig. 2 Schematic of laser system

アセトンと OH の 2 次元蛍光強度分布は、 xz 平面に垂直に設置された ICCD カメラシステム（浜松ホトニクス, C4272 & C4274）により、 $z=20\text{mm}$ の位置を中心にて測定する（図 3）。測定面はバーナの中心軸を含む断面とする。測定領域は横 24.3mm × 縦 18.6mm である。ICCD カメラの pixel 数は 640×480 で、測定領域の蛍光強度分布は 8bit のデジタル画像としてパソコンに取り込まれる。カメラのゲート時間間隔は 200ns とし、火炎の自発光成分の影響を最小限に抑える。レーザー発振とカメラのゲート開放時間はパルスジェネレータ（SRS Inc., DG535）により同期制御する。また、アセトンと OH の蛍光を 1 台のカメラで検出して火炎帯（無蛍光領域）を明確に可視化するためには、両者の蛍光強度をフィルタにより同程度に調整する必要がある。本研究では、ICCD カメラシステムの前面にバン

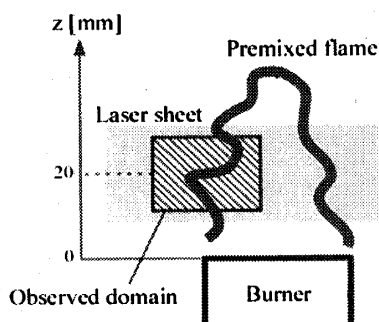


Fig. 3 Observed domain

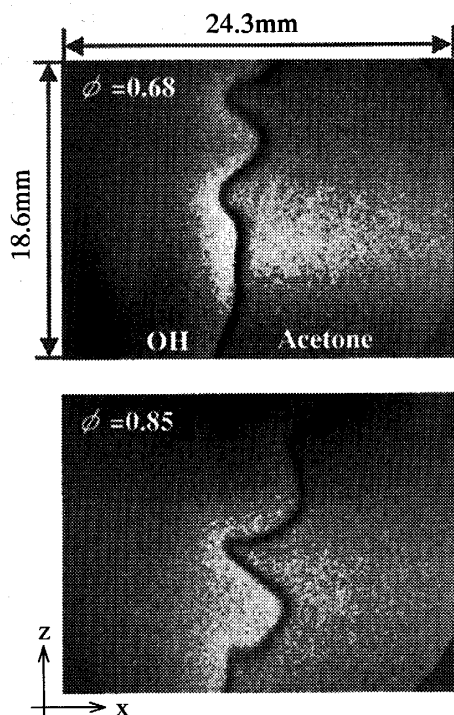


Fig. 4 PLIF images

ドパスフィルタ（Schott, BG12, 厚さ 0.5mm ⁽¹³⁾）を設け、上記の調整を行う。

3. PLIF 画像および諸量の定義

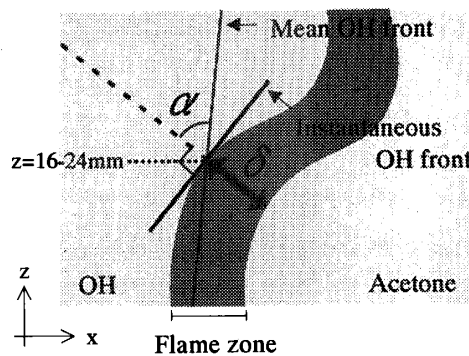
3・1 PLIF 画像 各混合当量比において、層流予混合火炎では 500、乱流予混合火炎では 1000 の PLIF 画像を取得した。得られた乱流の画像の一例を図 4 に示す。白色部分で右側が未燃領域に存在するアセトン、左側が既燃領域で高温場に存在する OH の蛍光強度分布を示す。また、図よりアセトンと OH の分布に挟まれた無蛍光領域を確認できる。

3・2 火炎帯厚さ 本研究では、上記で示したアセトン界面と OH 界面に挟まれた領域（無蛍光領域）を火炎帯と定義する⁽⁷⁾。各画像において、アセトン界面はアセトンの平均蛍光強度の 75%、OH 界面は OH 最大蛍光強度の 50% とする。このようにして定義される OH 界面は、火炎面の基準として知られる CH ピークに概ね一致する⁽¹⁰⁾。各画像に対する火炎帯厚さ δ の測定を $z=16, 18, 20, 22, 24\text{mm}$ に相当する 5 箇所の位置で行う。 δ は、該当する高さにおける OH 界面の位置を始点（測定点）とし、画像平面（ xz 平面）内の OH 界面に対して垂直方向上のアセトン界面に達するまでの距離とする（図 5）。

3・3 OH 界面の曲率および揺れ角 乱流予混合火炎の PLIF 画像においては、上記の測定点で火炎帯厚さの他、火炎面曲率に相当する OH 界面の曲率 h 、および火炎面の乱れの程度を表す指標として用いるため OH 界面の揺れ角 α も併せて測定する。

OH 界面の曲率 h は、界面形状が未燃側（アセトン側）に凸となる場合を正、既燃側（OH 側）に凸となる場合を負とする。曲率の絶対値が大きくなるにつれて、界面形状がより鋭くなることを示す。

OH 界面の揺れ角 α は、Chew ら⁽¹⁴⁾ や Yamamoto ら⁽¹⁵⁾ の検討を参考にし、各混合当量比において全画像を平

Fig. 5 Definition of flame zone thickness (δ) and angle of OH front (α)

均化して求められる OH 界面と、瞬時の OH 界面の垂線との角度差とする (図 5) . $\cos\alpha$ が 1 に近いほど、平均の OH 界面と瞬時の OH 界面で傾きの差が大きいことを意味し、火炎面の変動が大きいと判断できる。

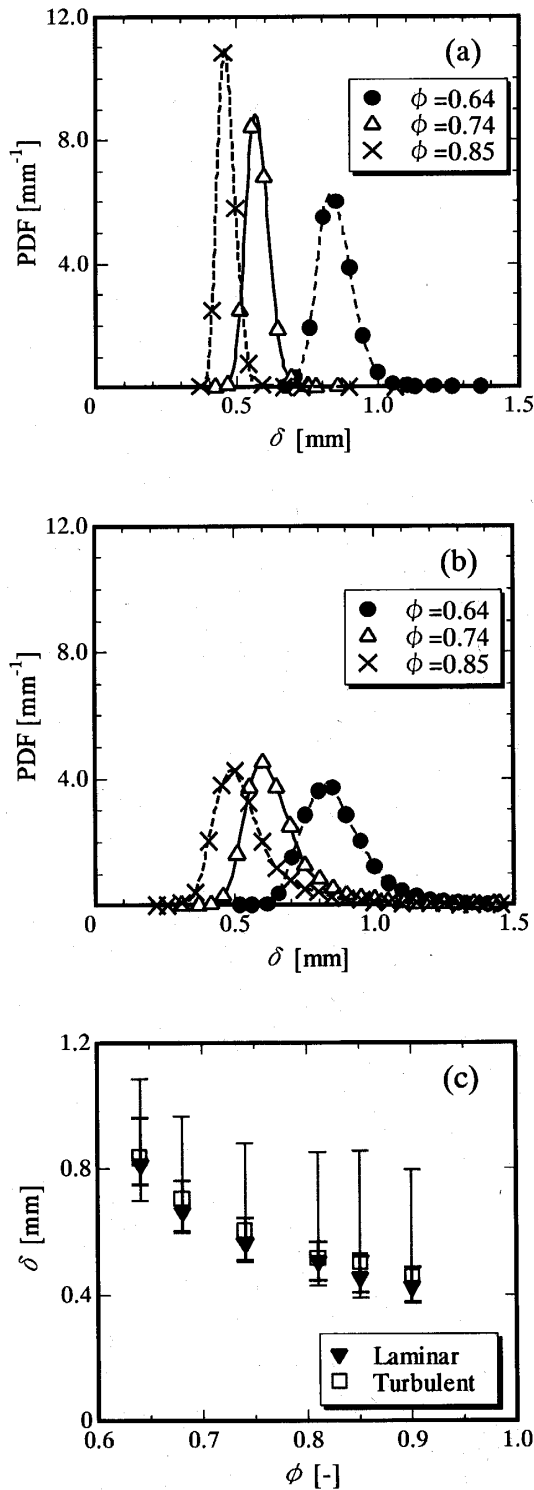


Fig. 6 Statistics of flame zone thickness, δ . (a) PDF of laminar premixed flame, (b) PDF of turbulent premixed flame and (c) effects of total equivalence ratio, ϕ .

4. 結果および考察

4.1 火炎帯厚さ 図 6 に、 $\phi=0.64, 0.74, 0.85$ の層流および乱流予混合火炎で測定された火炎帯厚さ δ の

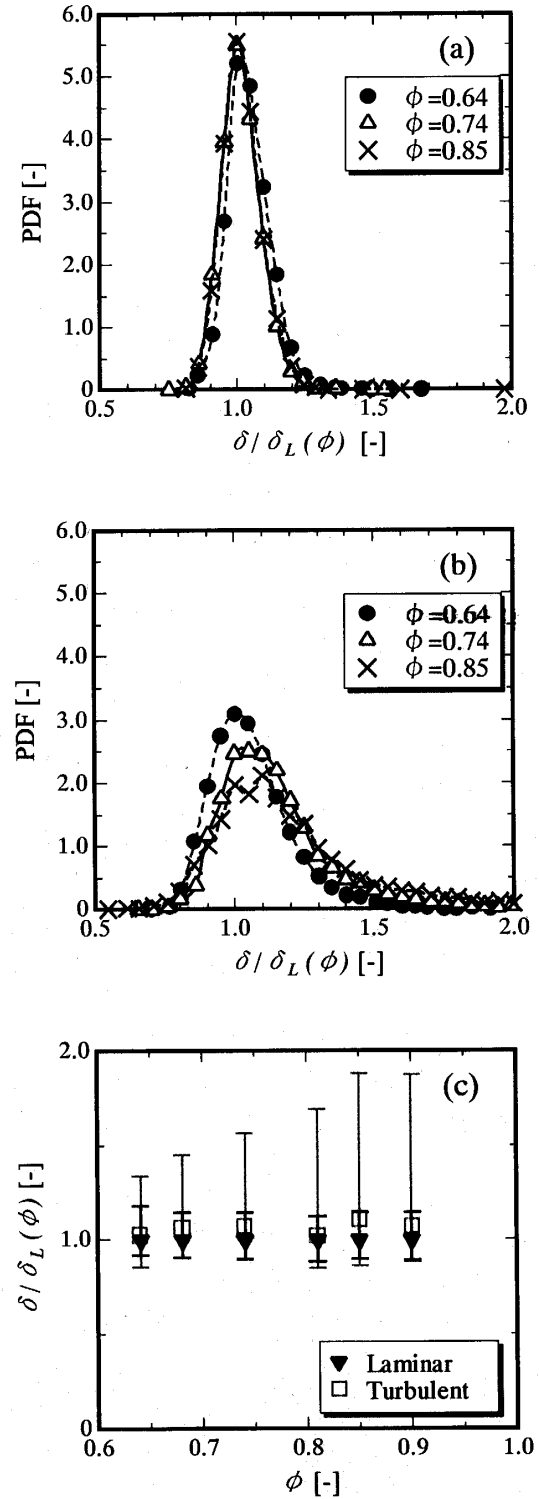


Fig. 7 Statistics of normalized flame zone thickness $\delta/\delta_L(\phi)$. (a) PDF of laminar premixed flame, (b) PDF of turbulent premixed flame and (c) effects of total equivalence ratio ϕ .

PDF 分布 (a), (b) と, 各混合当量比で PDF 分布から得られる最頻値および上下限 5% のデータを除いたばらつきの範囲 (c) を示す。図より, 混合当量比の増加に伴い火炎帯厚さが統計的に小さくなるのがわかる。これは, 希薄側において混合当量比の増加により燃焼速度が増加するためである。層流における火炎帯厚さの PDF 分布の形状 (図 6(a)) は, 混合当量比の増加に伴って形状が鋭くなるのに対し, 乱流 (図 6(b)) では層流より分布形状がなだらかで, 混合当量比の増加による形状の変化はほとんどない。図 6(c) では, 乱流におけるばらつきの範囲が最頻値より大きい側に幅広く, 火炎帯厚さが層流の場合よりも様々な値を示すことがわかる。しかし, 層流と乱流の場合における最頻値は, 混合当量比が同じであればほぼ等しい値を示す。この結果は, 本研究で用いた乱流予混合火炎がしわ状層流火炎に属しており, 局所的な構造が層流予混合火炎とほぼ同じであると推測できるためである。

そこで, 各混合当量比の層流予混合火炎で測定された火炎帯厚さの最頻値を $\delta_L(\phi)$ とし, 測定されたすべての火炎帯厚さ δ を $\delta_L(\phi)$ で正規化して $\delta/\delta_L(\phi)$, 図 6 で得られる結果を整理し直したものを図 7 に示す。層流における $\delta/\delta_L(\phi)$ の PDF 分布形状は, すべて同様な形状である。また, ばらつきの範囲も混合当量比によらずほぼ一定である。これにより, 層流予混合火炎における $\delta/\delta_L(\phi)$ は, 混合当量比に依存しない値であることがわかる。ただし, 定常な層流予混合火炎の場合では火炎帯厚さは常に一定であるはずである。測定された火炎帯厚さの値には 10% 程度のばらつきが存在し, 微小な火炎の揺れ (完全な定常状態を作ることができないため) や画像に含まれるノイズによる影響と考えられる。

一方, 乱流予混合火炎における $\delta/\delta_L(\phi)$ の PDF 分布形状は層流の場合よりなだらかで, その傾向は混合当量比の増加に伴い顕著になる。最頻値 (=1) より小さい

場合のばらつきの範囲は層流と同程度の広さで, 混合当量比による変化もほとんどないが, 最頻値より大きい場合の範囲は, 混合当量比の増加によってその範囲は広がることがわかる。この要因の 1 つとして火炎面の 3 次元変動の影響が挙げられる。定常の層流予混合火炎を計測する際には, xy 平面で火炎帯とレーザシートは必ず垂直に交わるが, 乱流 (非定常) の場合は, 図 8 のように火炎帯とレーザシートは必ずしも垂直に交わるとは限らない。火炎帯厚さが δ^* で一定とし, xy 平面における火炎帯とレーザシートとのなす角を β とすると, 測定される火炎帯厚さ δ は $\delta^*/\sin\beta$ となる。これより, 本研究で用いた乱流予混合火炎の火炎帯厚さが $\delta_L(\phi)$ で一定とすれば, $\delta/\delta_L(\phi)$ は $1/\sin\beta$ となって角度 β の情報を含むこととなる。従って 2 次元計測による火炎帯厚さの値は, 火炎面の乱れが大きいほど, xy 平面上におけるレーザシートと火炎帯の交わる角度の影響を大きく受けると推測される。

混合当量比により火炎面の乱れがどのように変化するか評価するため, 画像 (xz 平面) 上における OH 界面の乱れの程度を各混合当量比で確認する。OH 界面の乱れの程度を表す指標として, 3.3 節で示した瞬時の OH 界面の揺れ角 α を用いる。図 9 に各混合当量比のすべての画像から得られる $\cos\alpha$ の平均値 $\langle\cos\alpha\rangle$ を示す。混合当量比の増加に伴って $\langle\cos\alpha\rangle$ も増加しており, xz 平面上での OH 界面の乱れ (揺れ) が大きくなることを表す。これは cusp の生成メカニズムに代表されるように, 燃焼速度の増加に伴い火炎面が大きく湾曲することに一致する。このことから, xy 平面上における火炎の乱れも, 混合当量比の増加によって大きくなると考えられ, 火炎面の 3 次元変動の影響をより受けやすくなるのがわかる。従って, $\delta/\delta_L(\phi)$ が混合当量比の増加により 1 より大きくなる頻度が増加するのは, 火炎面の変動が大きくなるためと考えられる。

4.2 火炎帯厚さと OH 界面の曲率 図 10 に

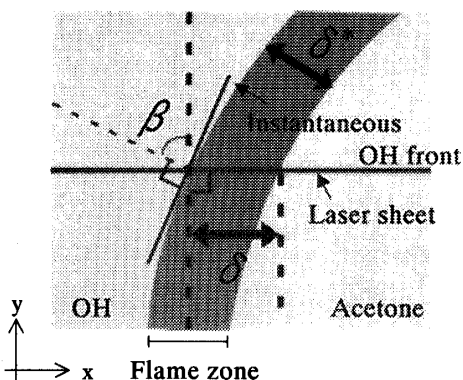


Fig. 8 Definition of tilted angle (β) and thickness (δ^* (actual), δ (observed)) in xy plane

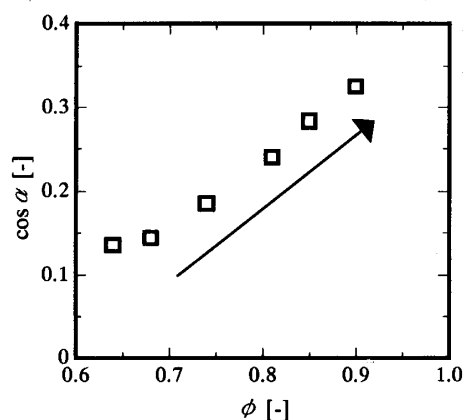


Fig. 9 Effect of total equivalence ratio, ϕ on $\langle\cos\alpha\rangle$

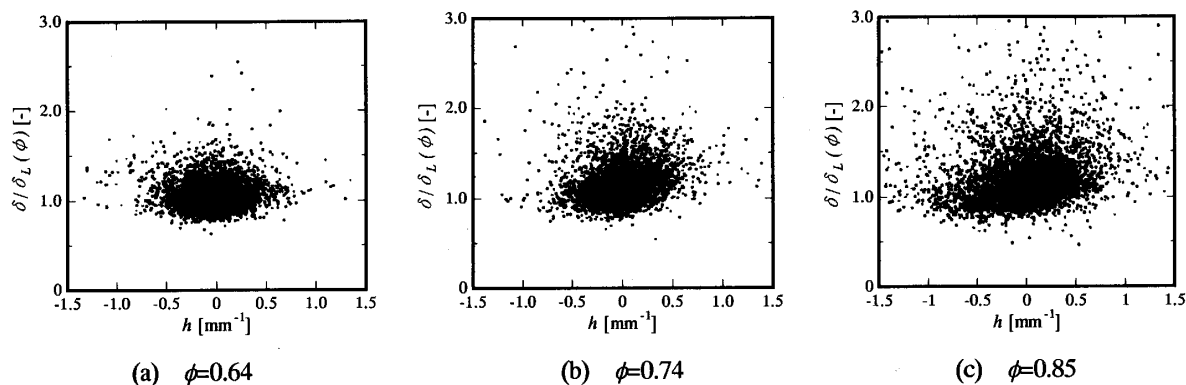


Fig. 10 Scatter plots of OH front curvature h and normalized flame zone thickness $\delta/\delta_L(\phi)$

$\phi=0.64, 0.74, 0.85$ における $\delta/\delta_L(\phi)$ と OH 界面の曲率 h との関係を示す散布図で示す。両者の値を示すプロットは $h=0 \text{ mm}$, $\delta/\delta_L(\phi)=1$ 付近を中心に分布するが、混合当量比の増加に伴って曲率や $\delta/\delta_L(\phi)$ が大きい値を示す頻度が増加する。これは、乱れが大きくなることにより $\delta/\delta_L(\phi)$ が 1 より大きくなるだけでなく、界面形状もより複雑となるために、曲率の絶対値も大きい値をとる場合が増えるためである。また、特に $\phi=0.74, 0.85$ において、 h と $\delta/\delta_L(\phi)$ には正の相関関係があることが推測される。そこで各混合当量比において曲率の値でデータを 10 分割 (各分類のデータ数は同じ) し、各分類での $\delta/\delta_L(\phi)$ の最頻値を図 11 に示す。横軸は各分類における曲率の平均値である。図より曲率 h と $\delta/\delta_L(\phi)$ は正の相関関係にあることが確認できる。

ここで火炎面の 3 次元変動の影響について検討する。曲率の絶対値 $|h|$ が大きい場合、界面形状は鋭く尖るため、火炎面の 3 次元変動の影響を大きく受けやすい。

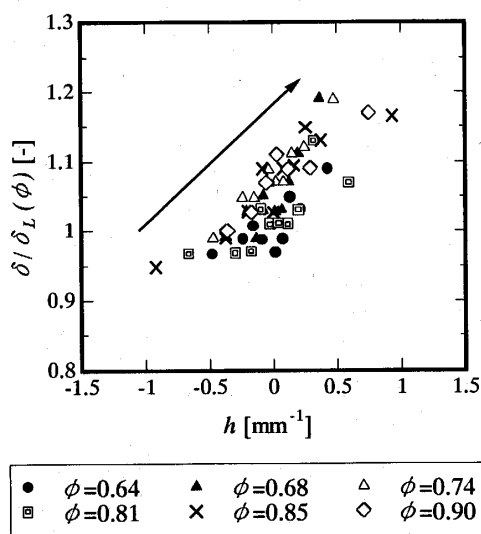


Fig. 11 Relation between curvature h and normalized flame zone thickness $\delta/\delta_L(\phi)$

これに伴い、測定される火炎帯厚さも大きくなる場合が増加すると予測される。よって、曲率 h と $\delta/\delta_L(\phi)$ の関係に火炎面の 3 次元変動の影響が出るならば、 $h=0 \text{ mm}$ で $\delta/\delta_L(\phi)$ は最も小さい値を示し、 $|h|$ が大きくなるにつれて $\delta/\delta_L(\phi)$ は大きくなると考えられる。したがって、曲率 h と $\delta/\delta_L(\phi)$ が正の相関関係を示すことは、火炎面の 3 次元変動では説明できない。むしろ、 $\delta/\delta_L(\phi)$ に対する最頻値を用いることで、統計的に 3 次元変動による影響は取り除かれると考えられる。

曲率 h と $\delta/\delta_L(\phi)$ の正の相関関係については、予熱の効果、およびレイ数 Le が 1 より大きい場合の効果から説明できると考えられる。まず予熱の効果⁽¹⁶⁾とは、火炎面曲率が負の場合、未燃予混合気は温度の高い既燃領域に囲まれることで予熱され、火炎が強められる (火炎の局所的な燃焼速度が大きくなる) ことを示す。この場合、火炎帯厚さは小さくなる。逆に正の曲率を持った場合は予熱の効果が小さくなり、火炎帯厚さは大きくなると考えることができる。

また、燃料のレイ数 (熱拡散係数 / 物質拡散係数) によっても火炎に与える曲率の影響が異なる⁽¹⁷⁾。今回は希薄予混合気であるので、レイ数が 1 より大きい場合、熱拡散が不足成分である燃料の拡散より支配的になる。火炎面が未燃側に凸 (曲率が正) の場合は、曲率を持たない場合の火炎に比べて反応が弱められ、既燃側に凸 (曲率が負) の場合は強められる。また、レイ数が 1 より小さい場合は物質拡散が熱拡散より支配的となり、レイ数が 1 より大きい場合と逆の効果が見られる。本研究では曲率が負の場合に火炎帯厚さが小さくなることから、反応が強められて燃焼速度が大きくなると推測され、この傾向はレイ数が 1 より大きい場合の効果と同様である。しかし、実際には曲率と火炎帯厚さの関係には、その他に非定常性や選択拡散の影響などを含むはずである⁽¹⁶⁾。また、層流燃

燃焼速度 (Su_0) と局所の層流燃焼速度 (Su) の比 Su/Su_0 は、火炎面曲率、ルイス数のほか、火炎伸長率、非定常項などを含む式で表される⁽¹⁸⁾。火炎帯厚さと層流燃焼速度に相関があることから、 $\delta/\delta_L(\phi)$ もこれらの影響を含む式で表されると考えられる。

以上のように、図 11 で示された OH 界面の曲率と $\delta/\delta_L(\phi)$ の関係とは、様々な要因の複合された結果であろう。しかしながら、無蛍光領域の厚さ (火炎帯厚さ) が OH 界面の曲率 (火炎面曲率) から何らかの影響を受けて変化することが本手法により確認できる。このような変化の観測から、火炎帯厚さと火炎面曲率の関係を調べるために本手法を用いることは有効であると考えられる。乱流予混合火炎における火炎面曲率の影響を調べる研究は様々なアプローチでなされており^{(17), (19)~(20)}、中には火炎帯厚さや燃焼速度について調べられる例もある^{(18), (21)~(22)}。火炎帯厚さと火炎面曲率の情報を同時に得ることのできる本手法がこのような研究に応用され、乱流予混合火炎の燃焼特性の解明に貢献することを期待したい。

5. 結言

乱流予混合火炎の燃焼診断に対するアセトン-OH 同時 PLIF 計測手法の有効性について検討した。本研究を通じて得られた知見を以下にまとめる。

1. 測定される火炎帯厚さは、燃焼速度の増加とともに統計的に小さくなる。
2. 測定される火炎帯厚さは、火炎面の 3 次元変動の影響を受け、大きく観測されやすい。そのため、火炎帯厚さの値の検討を行う際には注意を要する。
3. 火炎面の 3 次元変動の影響を考慮した上で、火炎面曲率と火炎帯厚さの間に正の相関関係が現れることを確認した。
4. 弱い乱れの予混合火炎の火炎面曲率と火炎帯厚さの関係を調べる上で、本手法が有効に働くことを示した。

謝辞

本研究は (財) 谷川熱技術振興基金の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Allen, M. G., Howe, R. D. and Hanson, R. K., *Opt. Lett.*, Vol. 11, No. 3 (1986), pp. 126-128.
- (2) Chen, Y. and Mansour, M. S., *Appl. Phys. B* 64, (1997), pp. 599-605.
- (3) Giezendanner, R., Keck, O., Weigand, P., Meier, W., Meier, U., Stricker, W. and Aigner, M., *Combust. Sci. and Tech.*, 175, (2003), pp. 721-741.
- (4) Han, D. and Mungal, M. G., *Combust. Flame* 132, (2003), pp. 565-590.
- (5) Watson, K. A., Lyons, K. M., Carter, C. D. and Donbar, J. M., *Proc. Combust. Inst.* 29, (2002), pp. 1905-1912.
- (6) Tanahashi, M., Murakami, S., Choi, G. M., Fukuchi, Y. and Miyauchi, T., *Proc. Combust. Inst.* 30, (2005), pp. 1665-1672.
- (7) Nakamura, Y., Manome, S., Satomi, S., Hayashi, N. and Yamashita, H., *J. Combustion Society of Japan*, Vol. 47, No. 142, (2005), pp. 290-299. (in Japanese)
- (8) Williams, F. A., *Combustion Theory*, (1985), pp. 411-440, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (9) Peters, N., *J. Fluid Mech.* 384, (1999), pp. 107-132.
- (10) Yamamoto, N., Nakamura, Y., Zhao, D. and Yamashita, H., *Fluid & Heat Eng. Res.* 38, (2003), pp. 19-28. (in Japanese)
- (11) Hikita, T. and Akita, K., *Nensyo-Gairon*, (1971), pp. 190-199, Corona-Sya. (in Japanese)
- (12) Lozano, B., Yip, B. and Hanson, R. K., *Exp. Fluids* 13, (1992), pp. 369-376.
- (13) http://www.schott.com/optics_devices/
- (14) Chew, T. C., Bray, K. N. C. and Britter, R. E., *Combust. Flame* 80, (1990), pp. 65-82.
- (15) Yamamoto, K., Nishizawa, Y. and Onuma, Y., *JSME International J.* B46-3, (2003), pp. 408-415.
- (16) Williams, F. A., *Combustion Theory*, (1985), pp. 349-372, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (17) Lee, J. G., Lee, T. W., Nye, D. A. and Santavicca, D. A., *Combust. Flame* 100, (1995), pp. 161-168.
- (18) Sun, C. J., Sung, C. J., He, L. and Law, C. K., *Combust. Flame* 118, (1995), pp. 108-128.
- (19) Echehki, T. and Chen, J. H., *Combust. Flame* 106, (1996), pp. 184-202.
- (20) Chakraborty, N. and Cant, S., *Combust. Flame* 137, (1996), pp. 129-147.
- (21) Goey, L. P. H. d., Plessing, T., Hermanns, R. T. E., Peters, N., *Proc. Combust. Inst.* 30, (2005), pp. 859-866.
- (22) Yokomori, T. and Mizumoto, M., *Proc. Combust. Inst.* 29, (2002), pp. 1511-1517.