

■原著論文 / ORIGINAL PAPER ■

アセトン-OH 同時 PLIF 計測による火炎帯構造の診断

Flame Diagnostics with Acetone-OH Simultaneous PLIF

中村 祐二^{1*}・馬目 聡²・里見 知彦³・林 直樹²・山下 博史²NAKAMURA, Yuji^{1*}, MANOME, Satoshi², SATOMI, Tomohiko³, HAYASHI, Naoki², and YAMASHITA, Hiroshi²¹ 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丁目
Hokkaido University, N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan² 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
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan³ トヨタ自動車(株) 〒471-8572 豊田市トヨタ町1
Toyota Motor Co., Ltd., 1 Toyota-cho, Toyota 471-8572, Japan

2005年5月31日受付; 2005年8月12日受理 / Received 31 May, 2005; Accepted 12 August, 2005

Abstract : Instantaneous, 2-D-sliced flame visualization scheme based on acetone-OH simultaneous PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence) concept is proposed and its applicability to flame diagnostics on premixed combustion is addressed. Acetone seeded in the fuel flow and flame-generated OH are visualized simultaneously via PLIF with one line (which corresponds to OH Q₁(7) (1.0) band absorption line: 283.2 nm) and fluorescence signals from acetone/OH are corrected by one detector; thus only conventional PLIF set (one laser and one detector combination) is required. In the present system, acetone and OH act as marker of unburned and burned zone, respectively. Qualitative behaviors of "no-signal zone (dark zone)" formed between these fluorescence signals are examined in methane-air flames (both laminar and turbulent conditions). Results show that the thickness of the dark zone varies depending on the equivalence ratio and the flame thickness experimentally defined as fuel 50 % -OH 50 % distance is well correlated to corresponding theoretical results (distance from starting point of preheated zone to heat release zone) in wide range of mixture conditions, indicating the validity of the present-proposed visualization scheme. Distinct dark zone can be clearly observed even in turbulent cases and some images show unburned 'island' flame structures, suggesting the applicability of this scheme to the complex turbulent combustion diagnostics. Under the condition of unity Le (Lewis number), this scheme may show the three-dimensional flame configuration through the difference of the dark zone thickness. Advantage and disadvantage of the present-proposed scheme are addressed and milestones for further study are pointed.

Key Words : PLIF, Flame structure, Combustion zone, Laser diagnostics

1. 緒言

燃焼の基礎研究目的だけでなく、燃焼機器の開発などにおいて、非接触かつ瞬時の燃焼形態を診断する手法のニーズは高い。特に最近では、低公害燃焼として希薄燃焼が着目されており[1-2]、局所消炎や熱発生不足による燃焼不安定性の原因を究明するための診断手法が望まれている。レーザー計測による燃焼診断は、非接触で瞬時かつ多次元の燃焼状態を把握することができ、そのような目的に適するものである。中でも1970年代より急速に発展した PLIF

(Planar Laser-Induced Fluorescence) 法 [3]は、燃焼で発生するラジカル (OH, CH, C₂, CN, NH, NO など[4-7]) 分布の可視化を可能とし、燃焼研究に大きなインパクトを与えている。

ところで、前述の希薄燃焼などで起こり得る局所消炎現象または熱発生状況を捉えるためには、いつどこで燃焼がどのように行われているかを正確に判断する必要がある。同時に燃焼強度を知る術があれば、燃焼装置からの総熱発生量の推定もできる。これらの情報は、例えば振動燃焼などを抑制するための設計に役立つ。燃焼反応は極めて薄い火炎帯内部で行われることを鑑みれば、これらの課題は「火炎帯構造の可視化を高い時間分解能と空間分解能で行うこと」に帰着される。

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

一般に、火炎帯の可視化には薄い火炎帯内部にのみ存在する CH ラジカルを追跡することが有効である。Hanson らのグループは CH-PLIF を試み、瞬時の火炎帯分布の可視化が可能であることを示した[5]。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ており、火炎帯を含む構造の詳細を理解するのに貢献している[5-8]。このように、CH-PLIF あるいはそれを含む複合計測はすでに確立された計測手法であるが、それは常に有効ではあるとは限らない。例えば、燃焼に起因する CH の発生量は一般に微量のため[6]、特に消炎付近では CH-PLIF 検出信号が極端に弱くなり、高精度で観察することが著しく困難となる。また複合計測には複数の光源と複数の検出系を用いることが常である。これらには強い光源あるいは高感度の検出系が複数必要となり、装置の高コスト化につながる。すなわち、CH-PLIF による火炎帯を含む燃焼構造の可視化は、装置コストに余裕があれば有効な手段といえるが、そうでない場合には利用条件が制限され、有効に働かない場合もある。もし余分な装置コストをかけずに火炎帯および燃焼構造の可視化が可能になり、しかも消炎付近での観察も容易な手法があれば、乱流燃焼研究あるいは新型燃焼器開発の進展につながると期待できる。

それを可能とするものとして、アセトン (CH₃COCH₃)-OH 同時 PLIF 計測による火炎帯の可視化手法を提案したい。ここで提案する計測手法は、基本的には OH-PLIF で使われる装置構成を主体とし、比較的安価で簡便に火炎帯の可視化を可能とする。本提案の最大の特徴は、CH-PLIF のように火炎帯に存在する分子・ラジカル (CH) を観察するのではなく、火炎帯の両側に存在する分子・ラジカル (ここでは燃料に混入するアセトンと燃焼で発生する OH) を観察することによって、火炎帯の抽出を試みる点にある。これにより上記で示した CH-PLIF 特有の欠点を回避できる。本報では、アセトン-OH 同時 PLIF の基本概念とシステム構成を述べ、予混合燃焼 (層流、乱流を含む) への適用性について言及する。得られた PLIF 画像の解析を通じて、本研究で提案する計測手法を用いてどのような燃焼特性を

把握できるのかについて述べる。

2. 計測概念

2.1. 火炎帯の抽出原理

図 1 に、メタン空気予混合気「アセトンを混入した」定常予混合火炎の火炎構造を示す。図の横軸は火炎面に対して垂直方向の位置を表しており、その方向に対する温度 (熱電対により計測) およびアセトン、OH からの相対濃度 (アセトン-PLIF または OH-PLIF による相対蛍光強度) 分布を重ねて表示した。なお、これらの物理量は別々に計測されたもので、同時に計測したものではないことに留意されたい。図によれば、予混合気中に混入したアセトン分子からの信号は温度の立ち上がり位置の手前で急激に減衰し、その後流の高温領域で OH が生成される。これから、アセトンは未燃場のトレーサとして働き、OH は既燃場のトレーサとして働くことがわかる。興味深いのは、アセトンと OH との蛍光強度分布の間に明確な「谷領域 (トレーサの存在しない領域)」が存在し、しかもそこは温度の立ち上がる狭い領域 (つまり火炎帯に準じるもの) に相当することにある。我々は、この「谷領域」の可視化を介して、火炎帯構造の診断を試みる。

2.2. 同時計測の可能性

上記の谷領域の可視化をするためには、おのずと瞬時のアセトンおよび OH 分布を同時に計測することが求められる。ここではその可能性について言及する。

PLIF では、外部から特定のエネルギーを加えて分子およびラジカルを励起する必要がある。OH の吸収帯は線構造を持つが、アセトンなどの高分子の吸収帯は幅広いバンド構造を持つ (図 2 参照、文献 9 より抜粋)。注目すべきは、OH-PLIF で用いられる励起波長範囲 (280 nm 付近) がアセトンの吸収帯の中に存在することである。このことは、原

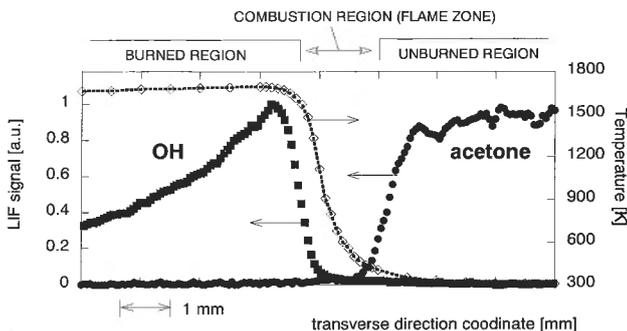


Fig.1 Example of measured 1-D flame structure (superimposed images of temperature by TC and fluorescence signals by acetone-PLIF and OH-PLIF)

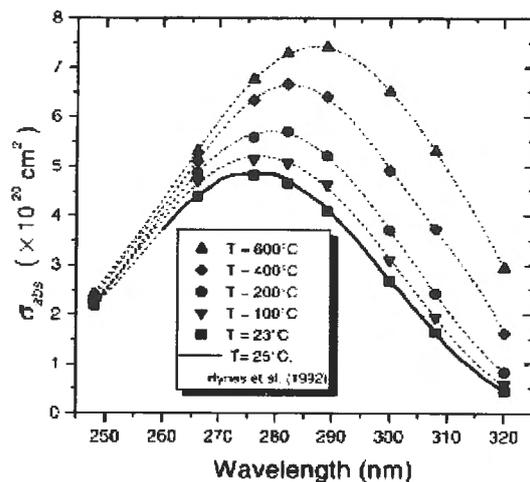


Fig.2 Absorption spectra of acetone [9]

理的にアセトンと OH を同時に励起できることを示唆する。

なお、アセトンからの蛍光スペクトルはバンド構造を持ち、その範囲は 350 nm ~ 550 nm である (詳細な構造は励起波長に依存する[9-11])。一方、OH の蛍光スペクトルは 310 nm 付近である。したがって、これらの両蛍光波長を採取するためのバンドパスフィルタ (透過波長域: 300 nm ~ 550 nm) を用いれば、1 台の検出装置で 2 種類の分子からの蛍光画像を得ることができる。こうして得られる蛍光信号には蛍光源の区別がないため、画像中の蛍光がアセトンあるいは OH のどちらから発せられているのかわからない。しかしながら、前節で述べたようにアセトンと OH は火炎帯を隔てて存在するため、「燃焼が適切に行われていれば」混在しない。逆に言えば、火炎帯としての信号が現れなければ、そこでは燃焼していないと判断することができる。

2.3. CH-PLIF との違い (本手法の利点)

上述したように、本報で提案する計測手法では、燃料流にトレーサガスとなるアセトンを混入し、未燃領域および既燃領域をアセトンおよび OH (燃焼生成物) で可視化することを基礎とする。OH は多くの燃焼素反応に参加するラジカルであり、濃度が比較的大きい (CH ラジカルより 2 オーダ以上大きい[12])。そのため、CH-PLIF では困難とされる消炎近傍の条件でも、計測が比較的容易に行えると期待される。また、蛍光強度が比較的強いため高感度の検出系を必要としない。加えて本手法では、1 組の光源と検出系 (これは OH-PLIF で用いるものに等しい) を用いて、「火炎帯厚さ」「火炎面形状」「燃焼強さ (OH-PLIF)」等の複数

の燃焼状態に関する診断が可能である。そのため、複合計測でしばしば生じるシステム同期に付帯する問題を回避できる。

3. 実験装置および実験方法

本報には 2 種類の実験結果を含む。一つはアセトンを含む予混合火炎からの蛍光成分の分光計測、もう一つはアセトン-OH 同時 PLIF 計測である。前者は、アセトン-OH 同時 PLIF 計測の信号成分が何を含むのかを確認するためのものであり、後者の有効性を支持するための検証実験である。

3.1. 実験装置概要

図 3 に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。光源には YAG レーザ (Spectra Physics Inc., GCR-230) の第 2 高調波 532 nm を用いる。Dye レーザ (Lumonics Inc., HD-300) により 566.4 nm に変換されたビーム光を BBO 結晶により倍波し (283.2 nm)、励起波長とする。この波長は $Q_1(7)(1,0)$ バンドにおける $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ 遷移の光に相当する。上記のシステムは、通常の OH-PLIF 計測で用いるものに等しい [13]。こうして作られたビーム光は、光学系を用いて厚み 1 mm 以下のレーザーシートにし、計測対象である火炎に照射される。レーザーシートはシリンドリカルレンズにより 40 mm の高さにし、強度分布の影響の少ない中央付近のみを用いる。なお、火炎直前のレーザー強度は 5 ~ 10 mJ である。

3.2. 分光計測実験

2.2 節で述べた通り、上記の励起波長を用いれば原理的にアセトンと OH を同時に励起することが可能である。しかし、燃焼場には様々な分子・ラジカルが混在するため、この励起波長を作用させた際に、アセトンと OH 以外の他の分子・ラジカルが励起されないとは限らない。そこで本研究で用いる予混合火炎 (アセトンを混入したメタン空気予混合火炎) に励起波長を作用させた際に得られる蛍光成分の分光計測を行う。本研究で選択した励起波長は上述の通り 283.2 nm である。得られる蛍光は分光器 (日本分光 CT100C, スリット幅 1 mm, 波長分解能 0.025 nm) により分割する。分光器に設置されたフォトマルからの信号は、高時間分解能を持つデジタルオシロスコープ (Iwatsu DS8631, 最小サンプリング時間 5 ns) により蛍光強度として検出される。分光計測の検査体積は約 10 mm³ であり、図 4 に示すような未燃場および火炎面付近の既燃場の各代表位置を対象に測定を行う。

3.3. PLIF 実験

PLIF 実験で対象とする測定範囲は図 5 に示す通りであり、実スケールにして横 36.0 mm × 縦 28.0 mm である。励起用のレーザーシートはバーナ中心部を通過するように設置する。火炎からの蛍光は ICCD カメラシステム (浜松ホ

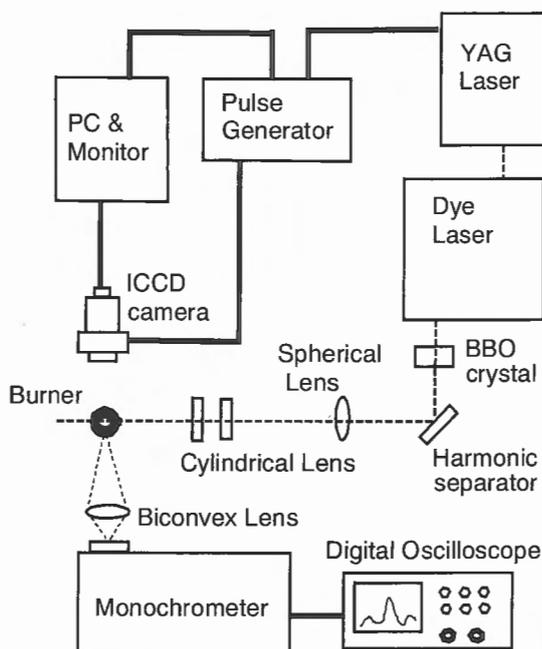


Fig.3 Schematics of experimental apparatus

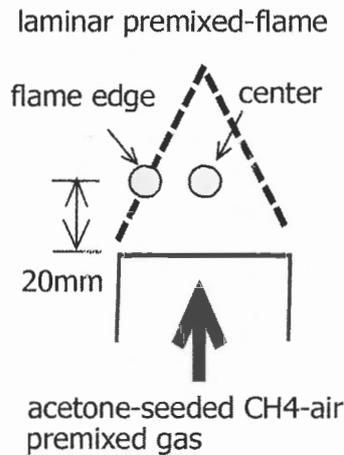


Fig.4 Focused locations for fluorescence spectroscopy

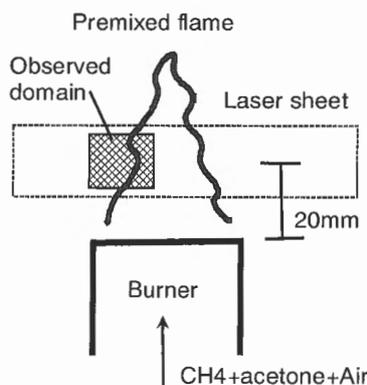


Fig.5 PLIF image zone

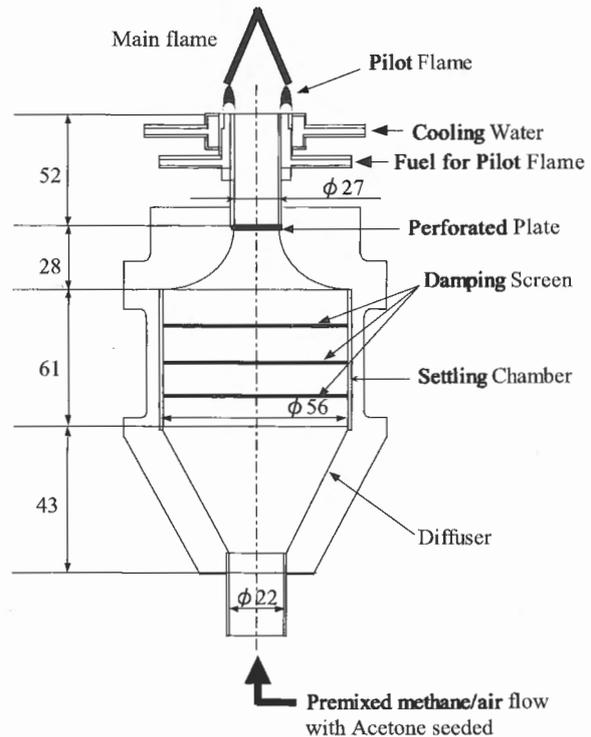


Fig.6 Burner system

トニクス製 C4272 & C4274) により電気信号に変換され、信号処理ソフト (浜松ホトニクス製 HiPic) により 640 × 480 のデジタル画像 (8bit) としてパソコンに取り込まれる。得られる画像の空間分解能は 0.06 mm/pixel である。ICCD カメラの前面には、蛍光信号を仕分けるためのバンドパスフィルタ (Schott Inc., BG-12) を取り付ける。カメラのゲート時間は 200 ns に設定し、自発光成分の影響を最小限に抑える。レーザ発振とカメラのゲート開放開始時間はパルスジェネレータ (SRS Inc., DG535) により同期制御する。

3.4. バーナおよびアセトン供給系

図 6 に本研究で用いたバーナの概略図を示す。メタン空気予混合気に加えられた燃料ガスは、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ってノズル出口から放出される。バーナ出口周囲には都市ガスによる保炎機構を設けて吹き飛びを防いでいる。保炎に用いる燃料量は上部の燃焼状態に殆ど影響を与えないことを確認している。バーナ内径は 27 mm とし、総体積流量は 1000 cm³/s で固定する (=平均流速 1.75 m/s)。予混合気の「混合当量比」は実験

パラメータとして 0.66 ~ 1.10 まで変化させる。なお、混合当量比とは、メタン+アセトン+空気の予混合気として計算したものを指す。バーナ上部には安定したブンゼン火炎が生じるため、これを用いて層流燃焼実験を行う。一方、乱流燃焼実験では、バーナ出口付近に多孔板 (通過率 30%) を取り付け、流れ場を強制的に乱して、バーナ上に乱流火炎を作り出す。相当する乱れ強さは 0.13 m/s、乱れの積分スケールは 3.5 mm である。これらの乱流特性値は、空気流場のバーナ出口を対象に熱線流速計 (ハヤカワ計測研究所製 HC-30) を用いて計測された値であり、半径方向に依存しない。多孔板および乱れ場の計測方法の詳細は文献 13 に譲る。

アセトン添加は、メタン空気予混合気の一部を液体のアセトンにバブリングさせることにより行う。ここではバブリング装置に導入するガス流量を制御することでアセトン添加量を制御した。図 7 は本研究で用いたバブリング装置の特性を示す。図から明らかなように、アセトンの添加量はバブリング流量で適切に制御できることが確認できる。この状態を達成するためには、バブリング流はアセトン飽和蒸気で満たされており、アセトン浴の温度の変動がないことが不可欠となる。そこで本研究ではバブリング開始後十分時間が経過し温度変化が一定となってから計測を行った。なお、本研究ではすべての実験条件においてバブリング流量を 45 cm³/s に固定した。これにより導入されるアセトン流量は 5.66 cm³/s であり、本研究で考慮する最小の混合当量比 0.66 におけるメタン流量 (64.83 cm³/s) の 8.7% に相当する。

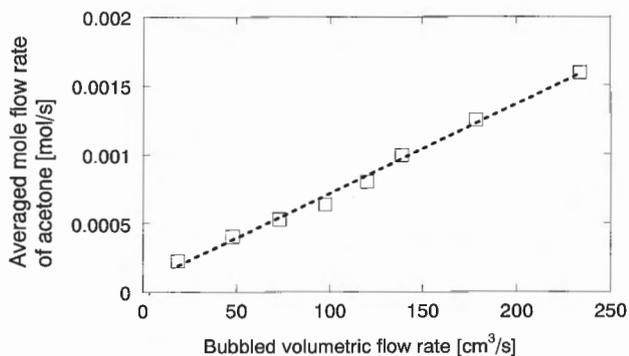


Fig.7 Bubbled volumetric flow rate vs. averaged mole flow rate of acetone

4. 実験結果および考察

4.1. 蛍光成分の分光実験

4.1.1. 蛍光成分スペクトル

図8に未燃場および火炎面付近の既燃場での火炎からの自発光スペクトルおよび蛍光スペクトルとを比較して示す。図(a)にはアセトンを追加した場合と添加しない場合をあわせて示した。これによれば、アセトン混入により火炎内側の未燃部からの自発光成分は変化しないが、蛍光信号(記号◇)は全ての自発光成分よりも強く、幅広い(350 nm ~ 500 nm)バンド構造として現れることがわかる。このバンド構造は励起波長 266 nm および 308 nm によるアセ

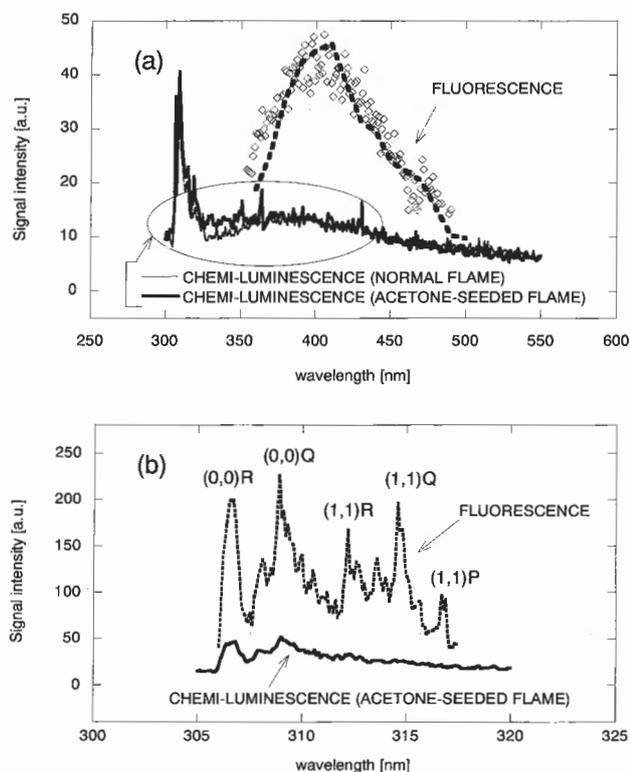


Fig.8 Fluorescence spectra of acetone and OH (excitation wavelength is 283.2 nm). (a) center region, (b) flame edge region

トンからの蛍光スペクトルによく似ている[10,11]. また、図中点線は 40 °C の温浴で作られるアセトン飽和蒸気を 283 nm で励起させた際に得られる蛍光スペクトル(実験値、縦軸は任意定数倍して表記)であり、記号◇の分布によく一致する。以上より、未燃場からの蛍光信号は主にアセトンによるものと判断できる。

図(b)に火炎面付近の既燃部からの特徴的な蛍光スペクトル部を拡大して示す。図には蛍光信号強度が強く現れる 310 nm 付近のみを示したが、これ以外での蛍光信号はここに比べて無視できるほど弱く、特徴的なスペクトルは見られなかった。310 nm 付近の蛍光信号は、細かく見ると幾つかの特徴的なピークを持ち、これらは全て OH の R, Q あるいは P 枝からの蛍光波長に相当することがわかる。つまり、既燃場からの蛍光信号は主に OH によるものであることが確認できる。

ところで、燃焼場では燃料の熱分解により様々な高分子が発生し、283.2 nm により励起され蛍光を発するものが少なくない。例えば PAH (多環芳香族炭化水素) などは未燃場で生成するその一例である[14]。そのため、本研究で得られた未燃場からの蛍光スペクトルには、それらの寄与が含まれている筈である。しかし炭化水素系の予混合燃焼の場合、PAH の発生量はせいぜい 100 ppm 程度あるいはそれ以下であり、本研究で混入したアセトンの量はそれに比べて数桁大きい。よって PAH などからの蛍光強度は(あるとしても)無視できる程小さいと考えられる。もしも混入するアセトンの量を少なくし、PAH のオーダに近づけば、PAH などからの蛍光スペクトルの影響を考慮しなくてはならないことを付記しておく。

4.1.2. 同時計測用バンドパスフィルタの選択

前述の通り、本研究で得られる蛍光信号は、未燃場からはアセトン、既燃場からは OH のもので構成される。そのため、300 nm ~ 550 nm の範囲の蛍光成分をフィルタにより選択的に透過すれば、他の自発光および散乱の寄与を取り除き、アセトンと OH からの蛍光信号のみを観察することができる。

本研究で目指すアセトン-OH 同時 PLIF 計測では、1 台の検出器 (ICCD カメラ) で両方の蛍光信号を同時に観測する。そのため、カメラに入射するアセトンおよび OH からの蛍光信号の光量はほぼ同程度であることが望まれる。本研究では図9に示すフィルタ透過特性を持つバンドパスフィルタ [15]を用いることにより、蛍光信号の強い OH の光量を抑え、アセトンからの光量と同一になるよう調整した。

アセトンおよび OH からの光量は、前述したアセトン混入量やフィルタ透過特性だけでなく、励起波長の選択、励起光のパワー、場の温度などにも依存する。本計測手法を用いる際は各装置に最適なシステムセッティングが必要であることを強調しておく。

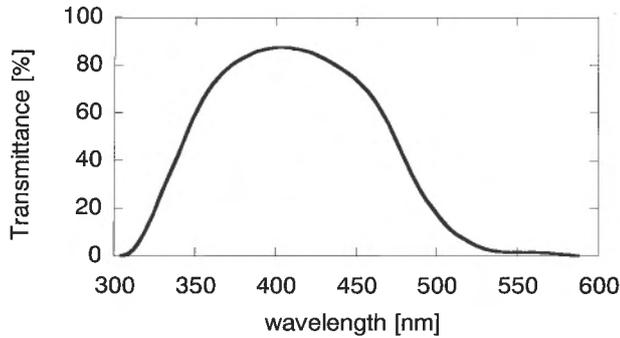


Fig.9 Transmittance spectra of selected wide band-passfilter (BG-12, Schott Inc. Product) [15]

4.2. PLIF 実験：層流火炎への適用

4.2.1. PLIF 画像

図 10 に様々な当量比 (当量比 $\phi = 0.66 \sim 0.96$) における層流火炎を対象に PLIF 計測を行った結果を示す。図で示される通り、アセトンからの蛍光は予混合部 (未燃焼部) 全域にわたり一様に観察され、OH は既燃部の高温領域に存在する。そしてどの条件においてもアセトンおよび OH からの蛍光信号の間に、厚さが一定の明確な「黒い帯」が観察できる。条件に依らず予混合気の体積流量は一定であるため、当量比に依存して火炎角度が変化する。それに応じて、観察される「黒い帯」の厚みも変化することがわかる。

4.2.2. 火炎に垂直方向の一次元分布

図 11 に代表的な当量比における火炎に垂直方向の蛍光信号強度の一次元分布を示す。条件に依存せずアセトン混入量は一定であるため、どの当量比でもアセトンの蛍光強度に変化はない。一方、OH の蛍光強度はピーク値のみならず蛍光範囲も大きく変化する。それとは無関係に、アセトン蛍光強度の急激な減少位置および OH 蛍光強度の急激な増加位置は明確に現れ、その中間領域は蛍光信号のない領域となる。

OH ラジカルは様々な燃焼素反応に参加するため、通常は OH ラジカルの濃度が高ければ、その生成・消滅速度も大きく、燃焼が盛んで燃焼強度が高いことを示す。すなわち OH 強度を正しく計測することは燃焼強度の変化を知ることと等しい。その際、蛍光強度分布にはレーザー発振毎のパワーのばらつきが含まれるため、正しい燃焼強度を知るにはその補正が必要となる。本手法ならばアセトンからの蛍光信号により強度補正を行うことが可能であり (未燃場に存在するアセトン量は一定)、常に正しい OH 相対強度分布を知ることができる。

4.2.3. 「黒い帯」の厚さの物理的解釈

図 12 に詳細反応モデルを用いた数値計算[16]による一次元予混合火炎における火炎構造を、実験で得られた蛍光信号強度の一次元分布とあわせて示す。両者の分布は OH のピークであわせてある。図より、OH 分布は高温側でよく一致し、アセトン蛍光強度の変化はメタンが分解される様子をよく再現していることがわかる。すべてのスカラー量

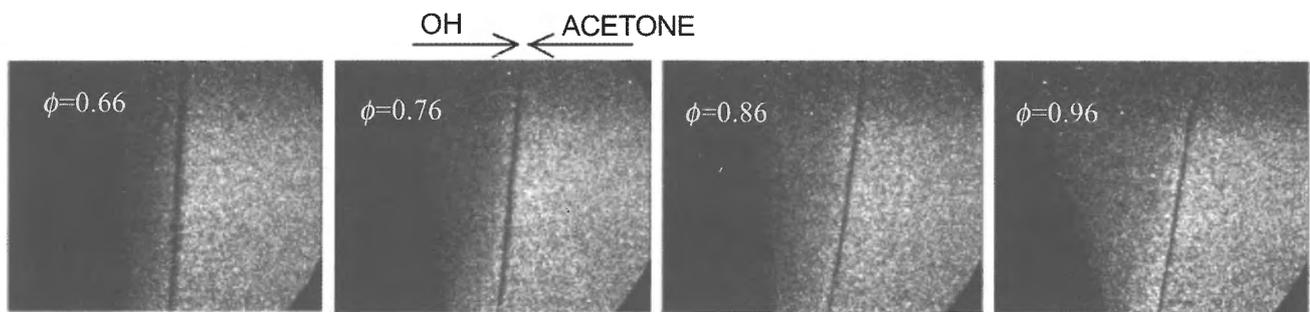


Fig.10 2-D PLIF images for laminar premixed flames ($\phi = 0.66, 0.76, 0.86, 0.96$)

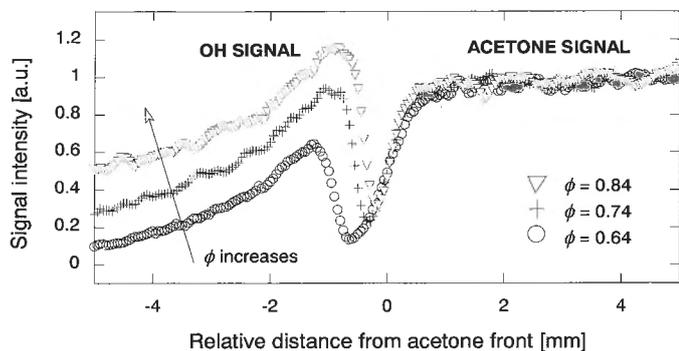


Fig.11 1-D PLIF signal normal to the flamefront ($\phi = 0.64, 0.74, 0.84$)

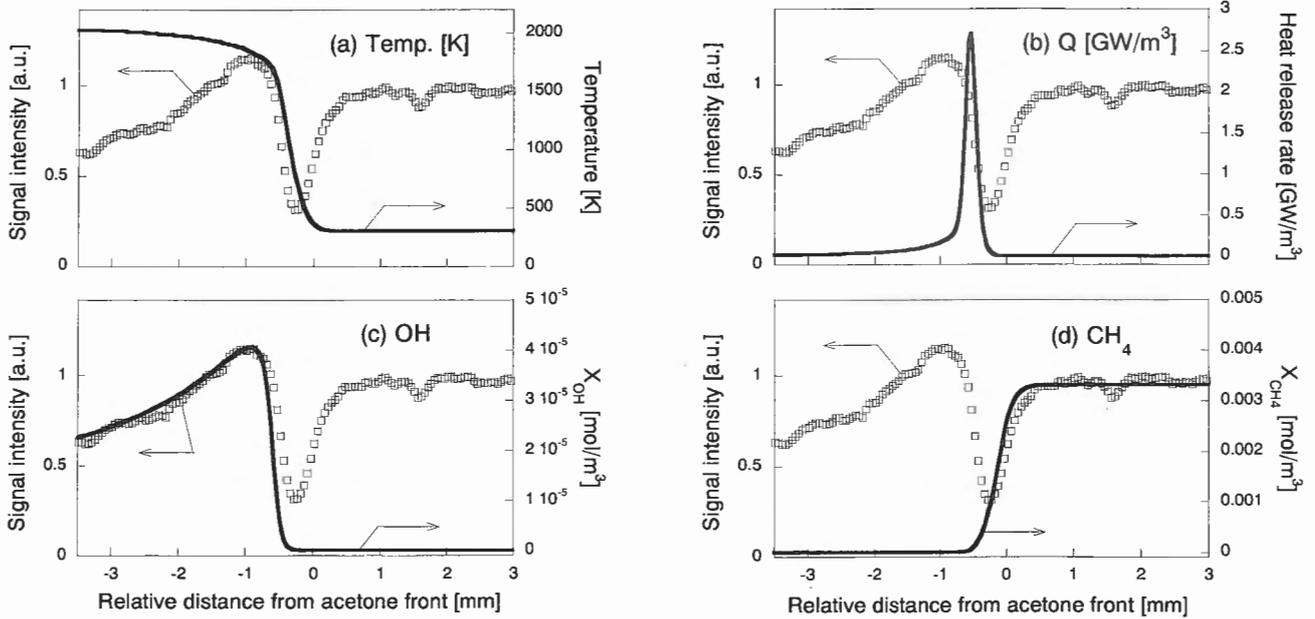


Fig.12 Comparisons of measured 1-D acetone-OH PLIF signal and numerically-obtained flame structure normal to the flame front. (a) temperature, (b) heat release rate, (c) OH radical mole concentration, and (d) methane mole concentration ($\phi = 0.84$)

において、数値計算結果の方が実験結果に比べて火炎帯内部でのスカラー勾配は大きくなるが、これは数値計算が理論的に一次元を仮定するためと考えられる。また「黒い帯」に相当する蛍光信号の弱い領域内で温度上昇が観察でき((a) 参照)、熱発生速度分布が最大となる位置は OH 側に寄っている((b) 参照)。このように、PLIF で得られる画像は、可燃成分の消費境界および発熱領域の情報を含むことがわかる。

「黒い帯」の厚さ(幅)を定量的に評価するために、その上流境界を「アセトンが一様に存在する領域の平均蛍光強度の 50% の位置」、その下流境界を「OH 最大蛍光強度の 50% の位置」と定義する。このとき、上流境界は図

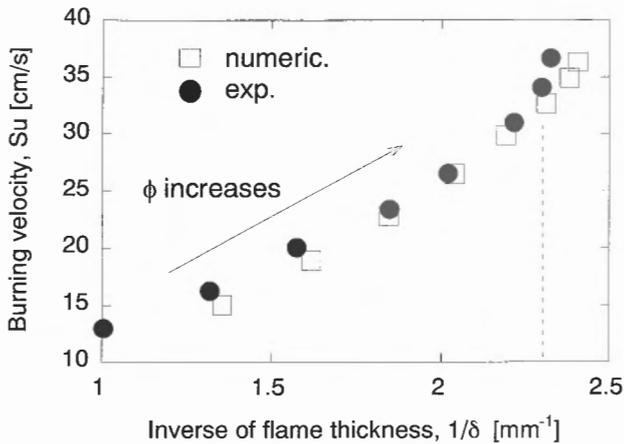


Fig.13 Comparison of S_u vs. δ^{-1} relationship between numerically defined and experimentally observed flame thickness, δ

12(a)(d) から燃料分解位置且つ温度上昇を開始する位置に相当し、いわゆる「火炎帯の始まり位置[例えば17]」に等しい。一方の下流境界は図 12(b) から発熱強度のピーク位置に相当し、いわゆる「発熱領域中心」に等しい。OH の存在領域の端は、火炎先端 (flame front) の目安となる狭い発熱領域 ([CH]や[CH₂O][OH]で代表される) に相当することは他の研究論文でも示されている[18,19]。このようにして抽出される「黒い帯」の厚さ(幅)は、火炎帯内部における予熱帯と反応帯の一部を含む領域に相当すると考えられる。以下、この定義に基づく「黒い帯」幅を δ とし、実験で得られる値の信頼性について検証する。

図 13 に各当量比における層流燃焼速度 S_u [cm/s] と δ^{-1} [mm⁻¹] の関係を、数値計算結果と実験結果とで比較して示す。数値計算結果による δ とは、前述の定義に従い CH₄50% -OH50% の距離とする。層流燃焼速度(実験値)は角度法によって求めた。熱理論によれば層流燃焼速度と火炎の代表厚さの逆数は比例関係にある。しかしながら、図に示される通り、ここで定義した δ の逆数は層流燃焼速度と比例関係にはなく、むしろ 2 次曲線となる ($y = 7.74x^2 - 9.63x + 14$, 近似誤差 0.1% 以内)。図には示していないが、火炎の代表長さとしてよく使われる温度で定義した火炎帯厚さ $[T_b - T_u] / [(dT/dn)_{max}]$ の逆数も、量論混合状態に近づくと層流燃焼速度との比例関係が崩れる。このことは、どのような定義であれ、火炎帯厚さに匹敵する量は拡散以外の様々な要因(詳細な化学反応過程、輸送係数の温度依存性など)により決定されることを意味している。

両者(理論値と実験値)の比較によれば、すべての条件において理論値の方が実験値よりも右寄り、すなわち δ が小さい傾向にある。これは前述の通り、一次元の理論解析で

は測定値よりも勾配を大きく見積もるためである。それを考慮すると $Su-\delta^{-1}$ 曲線は層流燃焼速度の大きな範囲 (当量比 0.9 以上) を除いてよく一致することがわかる。つまり、本測定手法で得られる「黒い帯」幅は、燃料消費開始点から発熱ピーク位置までの距離を表す指標 δ となり得ることが確認できる。また、予め数値解析により $Su-\delta^{-1}$ の校正曲線を求めておけば、実験で計測される「黒い帯」幅から、局所燃焼速度の推測が可能である。両者のずれが大きくなるのは、図中に加えた点線よりも右にあたる範囲であり、空間分解能の不足によるものと考えられる。点線よりも右の範囲は $\delta^{-1} > 2.3 \text{ mm}^{-1}$ すなわち $\delta < 0.44 \text{ mm}$ であり、画像から得られる幅が本実験システムの最小画像 pixel の 7.3 個分以下となる。本計測手法が有効に働くためには、ズームレンズなどを用いて「黒い帯」内部に 10 pixel 以上含むように空間分解能を向上させることが必要となろう。

4.3. PLIF 実験：乱流火炎への適用

4.3.1. PLIF 画像

図 14 に様々な当量比 (希薄条件のみ) における乱流火炎を対象に PLIF 計測を行った結果を示す。図から明らかなように、乱れにより火炎面が複雑な形状となる場合にも「黒い帯」は明確に観察できる。当量比の増加に伴い、予混合火炎特有のカスプ形状 (既燃側に火炎面が鋭く尖る) が見られるが、多くの場合、「黒い帯」幅は火炎面に沿ってほぼ一定となる。また、変動が大きくなる火炎上部では、流れ場の変化により火炎がちぎれる様子が観察できる (既燃領域に未燃予混合気の間が離れて存在する)。このような情報は、乱流強度の強い燃焼における構造解析に役立つ [20]。このように、本計測システムでは、複雑に火炎が変

動する乱流予混合火炎の瞬時の火炎帯構造を再現することができる。繰り返しになるが、本計測システムは通常の 1 成分 PLIF 計測システムとほぼ同様の仕様である。それに関わらず、「火炎形状 (カスプなどの再現)」、「火炎帯幅 (黒い帯の幅に相当)」、「燃焼強度 (相対 OH 蛍光強度)」という火炎帯構造に関する三つの重要な物理量の計測が一度で可能となる。これも本計測システムが有する利点の一つである。

4.3.2. 三次元的な火炎形状の再現

図 14 で示したように、多くの PLIF 画像では「黒い帯」幅はほぼ一定となる。つまり、火炎帯構造の火炎面曲率に対する依存性は低いことを示す。これは与えられた乱れ強さが弱いことに加え、予混合気のリイス数がほぼ 1 であるためと考えられる。最近ではこの条件でも曲率に対する火炎帯構造に若干の変化が現れるとの報告もあるが [13]、本検出系では分解能不足のためその僅かな変化を検出できないと考えられる。

もしも局所火炎帯構造が火炎面曲率に依存しない、すなわち火炎帯幅は常に一定という仮定が成立するならば、PLIF 画像から火炎の三次元的な形状を推測することが可能である。得られる PLIF 画像の中には、ときには図 15 のように「黒い帯」幅が著しく厚くなる場合がある。これは、火炎面がレーザーシートに垂直にはならない瞬間を得たものと解釈できる。なぜなら、「黒い帯」幅は火炎がレーザー進行方向に垂直方向であれば最も細くなり、それからずれる程、火炎内部をレーザーが通過する距離が増えるからである。

これを検証するため、層流ブンゼン火炎を対象に、レーザー照射位置をバーナ中心軸上とした場合【CASE (1)】、バ

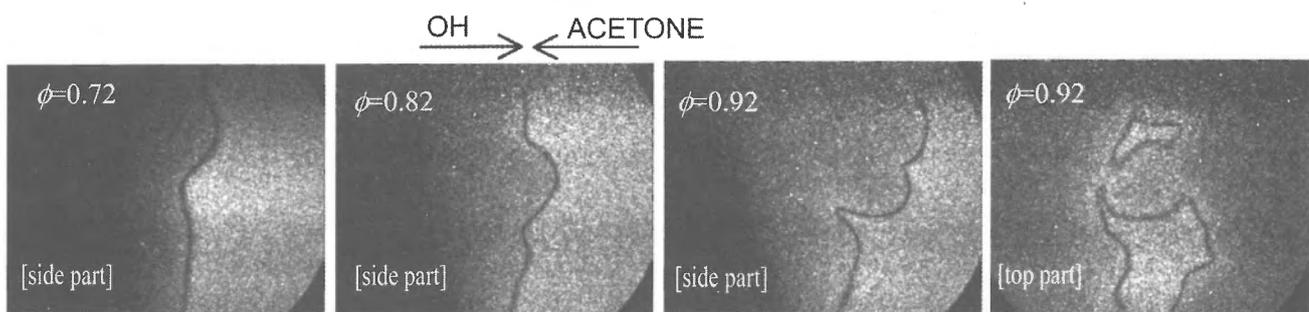


Fig.14 2-D PLIF images for turbulent premixed flames ($\phi = 0.72, 0.82, 0.92$). Last one is taken at flame top

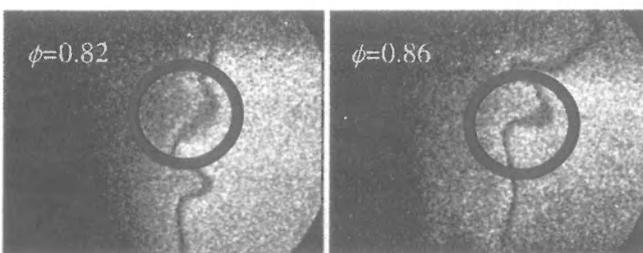


Fig.15 Example PLIF images with different dark zonethickness in turbulent conditions

一ナ中心軸から 4.5 mm ずらした場合、すなわちレーザー照射方向と火炎の垂直方向に角度が生じる場合【CASE (2)】の2通りの「黒い帯」幅の計測を行った。その結果を図16に示す。この図からわかるように、得られる「黒い帯」幅は、どの当量比においても中心からずれる程厚くなる。よって、局所燃焼速度が同一である燃焼条件下では、局所的な「黒い帯」幅が厚くなる部分は三次元的な火炎形状の効果を間接的に表すものと考えられる。

4.4. 本計測システムの応用に関する一考

以上、火炎帯構造の診断法に対する我々の提案する計測システムの特徴と有効性を挙げた。最後に本計測概念で問題になる点を列挙し、その対策について述べる。

<蛍光成分の確認とフィルタの選択>

本計測システムでは、複数の蛍光を観察するため、フィルタの透過波長範囲が広いものを用いる。そのため、本文でも示したが、興味の対象外の分子・ラジカルからの蛍光も観察信号の中に含まれている可能性が高い。この可能性は、検出精度に比例して高くなる。これらの確認を行うことは、得られる画像を議論するためには避けて通れない。

また、その影響を最小限にするには透過波長範囲を狭めることが望まれるが、これは観察した複数の蛍光強度とトレードオフの関係にある(もちろん検出系の精度にも依存する)。フィルタの選択は、これらの最適値となるよう慎重に行わなくてはならない。

<トレーサガス(アセトン)添加量の最小化>

本提案ではアセトンを予混合気中に混入するとしてしたが、アセトンそのものは可燃性であるため燃料として働く。そのため混入量ができるだけ少ないことが望ましい。この場合、283.2 nm によるアセトンの蛍光強度は弱くなるので、光量をかせぐために YAG レーザの第四高調波である 266 nm を 283.2 nm に加えて火炎に照射するとよい。第四高調波は高分子のみに吸収され OH には透明であり、Dye レーザを介さないために出力パワーが大きく、一桁以上のアセトン蛍光強度の増加をもたらす得る。

<トレーサガスの選定>

混入物はアセトンである必要はないので、用途に応じてトレーサガス種を選ぶことが賢明である。例えば本計測システムを予熱燃焼場[21]に適用する場合、アセトンよりも分解点の高い化学種(例えばベンゼンなど)を用いることが有効であろう。

<過濃予混合燃焼への適用>

本報では希薄～量論混合気条件の結果のみを示したが、単に「黒い帯」を観察する(=火炎面の位置を知る)だけならば、本手法は過濃予混合気燃焼にも適用できる。ただし、内炎と外炎の中間領域からの蛍光成分には両燃焼面で発生する OH の寄与が含まれることになる。そのため、「黒い帯」界面の解釈、あるいは蛍光強度を元に燃焼強度などを議論する場合には注意が必要である。

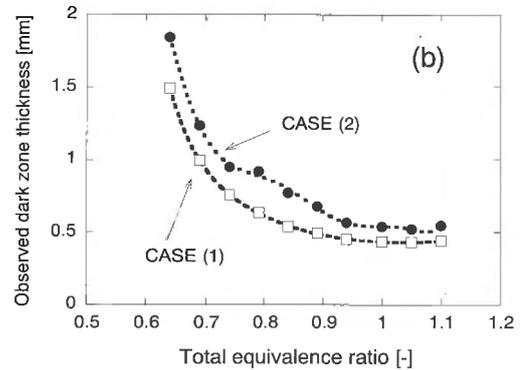
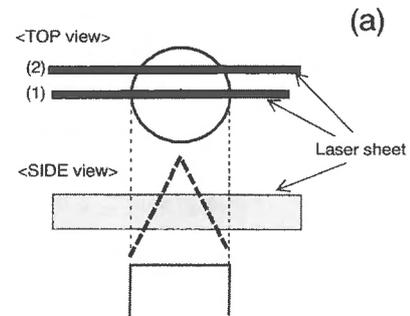


Fig.16 Effect of laser path position on visualized darkzone thickness

5. 結言

本報では、アセトン-OH 同時 PLIF 計測システムに基づく火炎帯構造の診断手法について提案し、その有効性について検証実験を行った。本計測手法で得られる「黒い帯」は、1) 適切な空間分解能を有し、2) 火炎面がレーザー方向に対して垂直に横切る場合には、予熱帯開始点から発熱ピークまでの火炎帯領域に相当し、局所燃焼速度がその幅計測から推測できる可能性を示した。また、複雑な乱流燃焼診断にも本計測手法が利用できることを示した。我々の計測システムは決して最新のものではない。最新の計測設備でも消炎付近での CH 計測は簡単ではないことを鑑みると、本計測概念の有効性は高く評価できると考える。

なお、本報で示した乱流 PLIF 画像の動画は、以下で公開中である。興味のある方はご参照いただきたい。

http://www.eess.mech.nagoya-u.ac.jp/AcetoneOH-PLIF_movie

謝辞

本研究は(財)谷川熱技術開発基金の支援を受けて行われた。アセトン PLIF について名古屋大学 新美智秀教授からは多くの助言をいただいた。計測システム構築には NIST の R. Bryant 博士に貴重なアドバイスをいただいた。レーザーシステムの導入には名城大学 竹野忠夫教授および筑波大学 西岡牧人助教授にご尽力いただいた。実験立ち上げおよび遂行には、三菱自動車株式会社 山本典史氏および名古屋

大学修士 1 年 大西将博氏, ヤマハ発動機株式会社 水谷浩幸氏の協力を得た。各位の支援に心より感謝する。

References

- Hayashi, S., Yamada, H., and Makida, M., *Proc. Combust. Inst.* 28: 1273-1280 (2000).
- Cabot, G., Vauchelles, D., Taupin, B., and Boukahalfa, A., *Exp. Thermal. & Fluid Sci.* 28: 683-690 (2004).
- Eckbreth, A. C., *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Abacus Press, Cambridge, 1988.
- Crosley, D. R. and Smith, G. P., *Opt. Eng.* 22: 545-553 (1983).
- Allen, M. G., Howe, R. D., and Hanson, R. K., *Optics Letter* 11: 126-128 (1986).
- Hirano, H., and Tsujishita, M., *Nensyokenkyu (in Japanese)* 109: 33-46 (1997).
- Watson, K. A., Lyons, K. M., Donbar, J. M., and Carter, C. D., *Combust. Flame* 117: 257-271 (1999).
- Tanahashi, M., Murakami, S., Choi, G.-M., Hukuchi, Y., and Miyauchi, T., *Proc. Combust. Inst.* 30: 1665-1672 (2005).
- Thunder, M. C., Grisch, F., Kirby, B. J., Votsmeier, M., and Hanson, R. K., *Applied Optics* 37: 4963-4978 (1998).
- Lozano, A., Yip, B., and Hanson, R.K., *Exp. Fluids* 13: 369-376 (1992).
- Bryant, R. A., Donbar, J. M., and Driscoll, J. F., *Exp. Fluids* 28: 471-476 (2002).
- Giezendanner, R., Keck, O., Weigand, P., Meier, U., Stiricker, W., and Aigner, M., *Combust. Sci. and Tech.* 175: 721-741 (2003).
- Yamamoto, N., Nakamura, Y., Zhao, D., and Yamashita, H., *Fluid & Heat Engineering Research* 38: 19-28 (2003) (in Japanese).
- Smyth, K.C., Shaddix, C.R., and Everest, D.A., *Combust. Flame* 111: 185-207 (1997).
- http://www.schott.com/optics_devices/
- Handbook for Numerical Fluid Dynamics* (Editor: Kobayashi, T.), Maruzen, 2003 (in Japanese).
- Gaydon, A. G., and Wolfhard, H. G., *Flames Their Structure, Radiation and Temperature.* (3rd Ed.), Chapman and Hall Ltd., London, 1970.
- Bockle, S., Kazenwadel, J., Kunzekmann, T., Shin, D.-I., Schulz, C., and Wolfrum, J., *Proc. Combust. Inst.* 28: 279-286 (2000).
- Vagelopoulos, C. M., and Frank, J. H., *Proc. Combust. Inst.* 30: 241-249 (2005).
- Dinkelacker, F., Soika, A., Most, D., Hofmann, D., Leipertz, A., Polifke, W., and Dobbeling, K., *Proc. Combust. Inst.* 27: 857-865 (1998).
- Katsuki, M., and Hasegawa, T., *Proc. Combust. Inst.* 27: 3135-3146 (1998).