多次元多変量光学計測による乱流予混合火炎の可視化*

店橋 護**, 志村 祐康***, 福島 直哉****

Visualization of Turbulent Premixed Flames by Multi-Dimensional/Multi-Variable Laser Diagnostics

Mamoru TANAHASHI, Masayasu SHIMURA and Naoya FUKUSHIMA

1. はじめに

自動車用エンジンや発電用・航空機用ガスタービンでは、乱流燃焼によってエネルギー変換が行われている。近年の地球環境問題を解決するには、これら燃焼器の更なる高効率化と低環境負荷化が求められているが、これには「乱流燃焼現象」そのものの解明が必要不可欠である。乱流燃焼は、幅広い時間・空間スケールを有する乱流と幅広い時間スケールを有する複雑な化学反応から成る燃焼が相互に干渉する複雑現象であるため、理論的なアプローチが非常に困難であるとともに、実験的にも数値的にも取り扱いが難しい。例えば、Fig. 1 は航空機用ガスタービン燃焼器の 1 / 100 程度の出力のモデル燃焼器に形成される乱流予混合火炎の直接写真を示している。ここで、予混合火炎とは燃料と酸化剤を予め良く混合しておき、その混合気を燃焼器内に噴射して燃やす燃焼形態であり、家庭用ガスコンロや自動車用ガソリンエンジンに一般的に用いられている。燃焼反応では特定の化学物質が光を発し、それらは自発光と呼ばれる。Fig. 1 に示した画像は、この自発光を物理現象の時間スケールに比べて長い露光時間で撮影したものであり、これは我々が肉眼で見られるものとほぼ同等である。このように乱流燃焼は我々の肉眼でも観察することが可能であるが、瞬時の現象は極めて複雑であり、これを解明するには高い時間・空間分解能での詳細な計測が必要となる。本稿では、乱流燃焼機構を解明するために開発されてきた最先端のレーザ計測法について解説する。

2. 二平面時系列ステレオ投影粒子画像流速計

前述のように、乱流燃焼は乱流と燃焼反応という二つの複雑現象から構成されている。このため、まず流体運動の正確な計測が必要である。流体速度の計測には、流

体中に混入した微小粒子にシート状のレーザ光を照射し、微小時間異なる粒子画像から流体速度を算出する粒子画像流速計 (PIV) が一般的に用いられている。近年では、比較的高い時間分解能の時系列 PIV (あるいはダイナミック PIV) が一般的になりつつある。気体の高速な流動を伴う乱流燃焼では、その動的特性を明らかにするには数 10 kHz 以上の時間分解能を有する時系列 PIV が必要となる。そのような時系列 PIV の開発については、以前に本誌¹⁾などにおいて紹介したので、ここでは最新の計測技術についてのみ紹介することとする。

最も基本的な PIV では、二次元平面の粒子画像からその平面内の粒子パターンの移動を求め、計測平面内の流体速度 2 成分の二次元分布が計測できる。粒子画像を異なる角度から二台のカメラで撮影し、それらから 3 成分目の速度を得るのがステレオ投影 PIV であり、二次元平面内の流体速度 3 成分が計測可能である。乱流現象は本質的に三次元であるとともに、乱流中の渦や歪みなど秩序構造を議論するためには速度の勾配に関する情報も必要であるので、計測平面を二平面に拡張した二平面ステレオ PIV や三次元空間の速度 3 成分が得られるホログラフィック PIV 等も開発されている。ここで、最新の二平面ステレオ PIV について紹介する。後ほど説明するが、二平面ステレオ PIV では、流体速度 3 成分とその全方向の速度勾配 (9 成分) の面情報を与える。乱流火炎の局所構造を議論する上で、速度勾配に関する情報は非常に重要である。

二平面ステレオ PIV では、微小距離異なる位置に平

Fig. 1 Direct photograph of turbulent methane-air premixed flame in a gas turbine model combustor.

* 原稿受付 2010 年 10 月 28 日

** 東京工業大学大学院 理工学研究科 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: mtanahas@mes.titech.ac.jp)

*** 東京工業大学大学院 理工学研究科

**** 東京工業大学大学院 理工学研究科

Fig. 2 Schematic of polarization-based dual-plane stereoscopic PIV system.

行なレーザーシートを照射し、それぞれの面の粒子画像をそれぞれ2台ずつ、合計4台のカメラで撮影し、二平面上での流体速度3成分を計測する。二平面の粒子画像を撮り分けるには、レーザー光の偏光の違いを利用する偏光型とレーザー光の波長の違いを利用する波長型がある。偏光型の場合、通常、二平面ステレオ PIV システムを構成するには、単一平面のステレオ PIV に、カメラ2台、シングルパルスレーザー2台（あるいは、ダブルパルスレーザー1台）を追加する必要があるが、計測システムは非常に高額となる。付加コストを低減するために開発された特殊光学系を用いた偏光型二平面時系列ステレオ PIV システムの例²⁾を Fig. 2 に示す。このシステムでは、2台の高繰り返しシングルパルス Nd:YAG レーザのみを用いて二平面時系列ステレオ PIV が実現されており、最高で 26.7 kHz での速度計測が可能となる。キーとなる装置は、Fig. 2 中の○で示した平行ビーム生成光学系であり、この光学系を用いることで、通常の単一平面ステレオ PIV システムにカメラ2台を追加するだけで二平面ステレオ PIV に拡張できる。実際に通常のダブルパルス Nd:YAG レーザ1台と 2048×2048 ピクセルの高解像度 CCD カメラ4台を用いて計測された結果³⁾を Fig. 3 に示す。ここでベクトルは速度を、各平面内の色は流体の回転量とその回転方向を表す渦度を示している。二平面間の距離は、560 μm であり、見やすくするために実際のスケール比の15倍で描かれている。乱流現象を解明するために、直接数値計算 (DNS) と呼ばれる高精度な数値計算が行われているが、この計測は DNS とほぼ同等な空間分解能 (通常 DNS では乱流運動の最小スケール、すなわちコルモゴロフスケールの約3倍以下の格子分解能が用いられる) である。Fig. 3 に示したように乱流運動に含まれる微細な渦運動を良く捉えており、すべての速度勾配について DNS 結果などと非常に良く一致する⁴⁾。

乱流燃焼の場合、流体運動による歪みが局所的な火炎の挙動に大きな影響を与えていると考えられている。このため、上述のような流体速度のみならず、速度勾配に関する詳細な情報を与える二平面ステレオ PIV は非常に有効であり、その応用例については第4章で紹介する。

Fig. 3 Typical velocity and vorticity distributions obtained by high spatial resolution polarization-based dual-plane stereoscopic PIV.

3. 多化学種同時平面レーザー誘起蛍光法

燃焼側の計測には、平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) が頻繁に用いられている。Fig. 1 に示した自発光は、火炎全体から発せられる光の光路積分として画像化されるため、局所的な火炎の構造を議論するには必ずしも適切ではない。PLIF ではシート状のレーザー光で分子を励起し、その後の電子準位の変化に応じて発せられる蛍光を高感度カメラ (通常はイメージインテンシファイア付き CCD (ICCD) カメラ) で撮影する。レーザー光が照射された平面内の情報のみが画像化されるため、自発光とは異なり詳細な火炎情報を与える。燃焼場では燃焼反応に関与する OH, CH, CH_2O 等の中間生成物 (ラジカル) を計測対象とする場合が多い。最も一般的な対象は OH であり、OH ラジカルは燃焼反応が終了もしくは終了段階にある部分で高い濃度を示すため、未燃領域と既燃領域を分離するには非常に便利である。CH ラジカルは、燃焼反応により結合エネルギーが熱エネルギーに急激に変換される熱発生領域で高い濃度を示すため、火炎面を特定するために頻繁に用いられている。ただし、CH ラジカルの濃度は、OH ラジカルに比べて低いため、PLIF 計測も容易ではない。

3.1 OH-CH PLIF とステレオ PIV の同時計測

実用燃焼器で用いられている乱流燃焼場は、極めて乱れた高レイノルズ数の条件にあり、OH ラジカルや CH ラジカルなど、単独の化学種を対象とした PLIF 計測では、必ずしも十分な情報を与えない。そこで、複数の化学種の同時 PLIF 計測が行われている。Fig. 4 は、OH ラジカルと CH ラジカルの同時 PLIF にステレオ PIV を組み合わせた2化学種濃度及び流体速度3成分の同時計測システムの一例を示している⁴⁾。この例では、それぞれの化学種に対応した波長の励起光を発振するために、

Fig. 4 Schematic of simultaneous OH-CH PLIF and stereoscopic PIV system

Nd:YAG レーザあるいはエキシマレーザと色素レーザから成る二組の PLIF 計測システムが用いられている。波長の異なる励起光はダイクロイックミラーと呼ばれる特殊なミラーを用いて一つの光軸上に導かれ、シート状のレーザ光に変換する光学系を介して、燃焼器内の同一の二次元断面に照射される。ラジカルに依って蛍光の波長も異なるため、燃焼器の両側に配置された ICCD カメラと特定の波長の光を透過される光学フィルターを組み合わせることで二つのラジカルからの蛍光を分離して画像化する。ここで、ICCD カメラのゲート時間（露光時間）は 30 ns であり、蛍光以外の光の混入を最小限に止めている。

流体速度の計測には、比較的発振周波数が低いダブルパルス Nd:YAG レーザが用いられているが、粒子画像の取得には高速 CMOS カメラ 2 台が用いられている。ここで、高速 CMOS カメラは、3 kHz 程度の高速で稼働されているが、実際に画像が取得されるのは数千画像のうちの 2 画像のみである。これは、火炎からの自発光が粒子画像に写り込むことを防止するための方策である。

Fig. 1 に示した乱流予混合火炎において OH-CH PLIF とステレオ PIV で同時計測した一例を Fig. 5 に示す。計測領域は Fig. 1 に示した白枠の領域であり、Fig. 5 の CH ラジカルと OH ラジカルからの蛍光イメージ中の白枠がステレオ PIV の計測領域に対応している。流体速度の計測結果はベクトルが計測面内の速度成分を色が面外方向の速度成分の大きさを示している。Fig. 1 の直接写真や我々の肉眼での観察とは異なり、乱流予混合火炎は火炎及び流体速度の極めて高速な変動を含んでおり、それらはこのような詳細な計測を通してのみ解析することができる。また、OH ラジカルと CH ラジカルを同時に計測することで、未燃領域と既燃領域の分離及び火炎面の位置が明確となり、極めて複雑な形状を有する火炎面の局所的な特性を議論することができる。例えば、Fig. 6 に示すように、CH ラジカルからの蛍光イメージから火炎位置を特定し、OH ラジカルからの蛍光イメージから火炎面の法線方向を特定することが可能である。一般に、極めて複雑な乱流中の火炎面であっても、その動的特性

Fig. 5 A typical result of simultaneous OH-CH PLIF and stereoscopic PIV

Fig. 6 Identification of flame fronts and flame-normal unit vectors from simultaneous OH-CH PLIF.

は火炎面の局所的な曲率と流体運動により火炎面の接線方向に作用する歪み速度（流体の速度勾配から算出される）から記述できると予測されており、実験的にそのような理論の検証やモデルの構築を行うために重要となる。

3.2 ダブルパルス CH PLIF 計測

前節で示したように、乱流火炎の平均的な特性（直接写真や肉眼で観察できる特性）と瞬間的な火炎の構造は大きく異なる。非常に高速で変動する乱流火炎の動的特性の解明は、乱流燃焼機構の解明とその高精度モデルの構築には必要不可欠である。前節、Fig. 4 に示した計測システムを応用することで、乱流中での火炎面の非定常特性を検討することができる。すなわち、OH ラジカルからの励起用に用いられている PLIF システムの色素レーザの色素を CH ラジカルからの励起波長（390.30 nm）の光を発振するものに変更し、ダイクロイックミラーの代わりに、390.30 nm の光に対応した偏光ビームスプリッターを用いる。こうすることで、偏光を利用して同一波長（390.30 nm）の光を一光軸上に導くことが可能となる。ICCD カメラの撮像は高精度に制御することが可能であるため、微小時間異なるタイミングで CH ラジカルからの PLIF 計測（ダブルパルス CH PLIF 計測）が可能となる。Fig. 7 は、ダブルパルス CH PLIF 計測の一例を示している⁵⁾。計測は、前節までと同様にガスタービン模擬したモデル燃焼器において行われており、時間間隔を 200 μ s とした計測から得られた典型的な結果を示している。このような計測から、既燃ガス中に孤立した未燃ガスが急速に燃焼する様子や比較的大きな未燃ガスの塊が主要な火炎面から分離する様子（Fig. 7 中の B 領域）が明らかにされている。このダブルパルス CH PLIF を用いることで、乱流中の火炎面の大域的なダイナミクスを検討することができる。ただし、この計測は単一平面において行われているため、三次元的に火炎面が本当に分離しているかどうかは、次節で紹介する多平面 PLIF などを用いない限り定かではない。

Fig. 7 Flame dynamics obtained from double-pulsed CH PLIF.

多くの実用的な燃焼器において乱流燃焼が用いられる最大の理由は、そのエネルギー密度の高さにある。乱流火炎の最も基本的な概念モデルでは、複雑な形状を示す火炎面であっても局所的には層流火炎と近似可能であり、複雑に折り畳まれることで面積が増加し、その面積増加によりトータルの燃料消費量が増加すると考える。局所的な火炎要素を層流火炎とするモデルは火炎片 (Flamelet) モデルと呼ばれている。このような考え方は、乱流と火炎面 (燃焼反応) との時間スケールの差が極めて大きい場合には正しいものとなるが、実際の燃焼器ではこの差はそれほど小さくなく、強い乱流と火炎面の干渉が生じているものと考えられている。上述のダブルパルス CH PLIF の時間間隔をさらに小さくすると、局所的な火炎要素のダイナミクスを検討することが可能となる。Fig. 8 は時間間隔を $30 \mu\text{s}$ とした場合の連続する CH PLIF イメージを示している。ここで、赤は第一イメージ、青は $30 \mu\text{s}$ 後の第二イメージである。ここで、局所的な火炎要素を同定し、PIVにおいて流体速度の算出に用いられている相互相関法を応用することで、局所火炎要素の移動速度を求めることができる。Fig. 8 中の白色ベクトルは、局所火炎要素の移動方向とその速さを示している。この計測法をさらに拡張すると、層流火炎片モデル等を実験的に直接検証することができる。これについては次章で簡単に紹介する。

近年では、4 台の Nd:YAG レーザを用いて 1 台の色素レーザを励起する方法⁹⁾や高繰り返しレーザを光源として特殊な色素レーザ⁷⁾や特殊な光学系を用いる時系列 PLIF 計測⁹⁾が提案されている。しかし、時系列 PLIF の時間分解能は 10 kHz 程度である。乱流火炎の動的特性を検討するには本来 20 kHz 以上の時間分解能 ($50 \mu\text{s}$ 以下) が必要と考えられるが、励起レーザの発振周波数、色素レーザの入力限界、励起レーザ強度などの限界から実現されていない。

3.3 多平面 PLIF 計測

乱流火炎の動的特性を記述するには、三次元的に変動する火炎面の三次元構造を明らかにする必要がある。予混合火炎の場合、火炎は自ら燃え広がる特性 (伝播特性) を有しており、層流中での伝播速度を層流燃焼速度という。仮に、火炎面が湾曲してある曲率を有した場合、火炎面面積の増加率は曲率に依存することになる。すなわち、伝播方向に凸の曲率を有していれば、火炎面面積

Fig. 8 Local flame displacement speed obtained from double-pulsed CH PLIF.

は増加し、伝播方向に凹の曲率を有していれば減少する。前節までの二次元平面内の PLIF 計測では、三次元曲面の曲率を計測することは不可能である。前節までの PLIF 同時計測をさらに拡張すると、乱流中の火炎面の三次元構造を検討することができる。Fig. 9 は、二平面 CH PLIF、単一平面 OH PLIF 及び単一平面ステレオ PIV の同時計測システムの一例である⁹⁾。この計測では、前節までの計測システムにもう一組の PLIF システムを組み合わせ、それぞれ PLIF の計測面を面外方向に微小距離異なる位置に設定することで三平面における PLIF 計測を実現している。OH PLIF の計測面を挟む二平面で CH PLIF 計測が行われる。異なる二平面における CH ラジカルの蛍光イメージは、前節と同様に対向に配置された二台の ICCD カメラによって撮影されるが、同時に同じ波長の蛍光を撮り分けることは不可能であるので、二平面の CH PLIF に 50 ns の時間差を与えている。乱流火炎の時間スケールを考慮に入れば、この時間差は同時と考えて良い。OH PLIF は最初の CH PLIF よりも 25 ns 後に行われている。OH ラジカルからの蛍光は、一方の CH ラジカル用 ICCD カメラの前に配置されたダイクロイックミラーにより分離され、三台目の ICCD カメラにより撮影される。

乱流噴流予混合火炎における代表的な計測結果を Fig. 10 に示す。図中の白と青はそれぞれの平面での CH ラジカルの蛍光イメージを、黄色は OH ラジカルの PLIF から得られた未燃ガス領域を示している。この計測例では、既燃ガスが未燃予混合気に取り込まれる様子 (Fig. 10 (a)) や未燃ガスが下流方向に分離して火炎面が

Fig. 9 Schematic of simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and single-plane stereoscopic PIV system.

Fig.10 Typical three-dimensional flame structures obtained from simultaneous dual-plane CH PLIF and single-plane OH PLIF.

分断される様子 (Fig.10 (b)) などが可視化されている。このような計測結果を用いれば、三次元的な火炎面の曲率をより正確に求めることが可能であり、乱流中での局所的な火炎構造を検討可能である。ここでは紙面の制約から詳細は省略する。

4. 乱流予混合火炎の多次元多変量光学計測

前章までは、乱流火炎を計測するために必要となる流体速度の計測法と火炎の計測法についてそれぞれ独立に紹介した。これまでも述べてきたように、乱流運動と火炎構造を同時に計測することで乱流燃焼の詳細が議論可能となる。本章では PLIF と PIV を組み合わせた最先端の多次元多変量光学計測について紹介する。

4.1 ダブルパルス CH PLIF, シングルパルス OH

PLIF 及び単一平面ステレオ PIV の同時計測

Fig.9 に示した三平面 PLIF 計測を同一平面上で時間差を付けて行えば、ダブルパルス CH PLIF とシングルパルス OH PLIF の同時計測が実現される。これにステレオ PIV を組み合わせると、火炎面の移動速度と火炎面における流体速度が同時に計測可能である。二次元断面内との制約条件があるが、これらの差を取ることで乱流中での局所火炎要素の燃焼速度を直接計測することが可能となる。Fig.11 は乱流噴流予混合火炎で得られた結果の一例¹⁰⁾を示している。図中の赤と青の線は連続する CH ラジカルの蛍光強度分布を、黒色ベクトルは流体速度の計測面内成分の変動ベクトルを、色は流体速度の面外成分の大きさを示している。白色ベクトルは計測結果から火炎片モデルが正しいと仮定して算出した局所燃焼速度を示している。このようにして得られた局所燃焼速度の最頻値は層流燃焼速度と一致するが、その分散は大きく、非現実的な負の局所燃焼速度を与える場合もある。その原因としては二次元平面に計測が限定されていることも考えられるが、DNS 結果との比較から火炎片モデルに非定常性を考慮に入れる必要があることなどが示唆されている。

4.2 二平面 CH PLIF, 単一平面 OH PLIF 及び二平面ステレオ PIV の同時計測

これまで紹介してきた乱流火炎における PLIF と

Fig. 11 A typical result of simultaneous double-pulsed CH PLIF, OH PLIF and single-plane stereoscopic PIV.

PIV の同時計測では、流体速度の計測は単一平面に限られている。第 2 章と第 3 章において一部触れたように、乱流火炎の局所火炎構造の動的特性を議論するには、火炎面近傍の流体速度により火炎面の接線方向に作用する歪み速度に関する情報が必要である。局所的な火炎面が接線方向に伸張を受けると、火炎面面積が増加し、それは燃焼速度の増加につながる。敢えて数式は使用しないが、火炎面面積の増加率は、曲率と接線方向の歪み速度の関数として記述できるのである。曲率を正確に計測するには、3.3 節で示した多平面 PLIF 計測が必要であり、歪み速度を正確に計測するには、第 2 章で示した二平面ステレオ PIV が必要である。これらを組み合わせた同時計測システムの例¹¹⁾を Fig.12 に示す。この計測システムでは、波長型二平面ステレオ PIV が採用されている。燃焼反応を伴わない気体の場合、微小液滴をトレーサー粒子として用いることが可能であり、液滴はほぼ球形であるので散乱光であっても偏光が保存され、偏光の違いで二平面の粒子画像を取り分けることが可能である。しかし、燃焼場において液滴粒子を用いると火炎面を通過した液滴は高温の既燃ガスにより蒸発してしまうため、既燃ガスの流速は計測不能となる。このため燃焼場の PIV では固体粒子が用いられるのが一般的であり、この場合入射光の偏光は保存されない。従って、計測システムは大がかりとなるが、波長型の二平面 PIV を用いる他はない。Fig.12 の例では、高出力 Nd:YAG レーザ 2 台からの 532 nm のレーザ光をそれぞれ偏光ビームスプリッターにより分離し、一部を色素レーザに入射して 560 nm のレーザ光に変換している。532 nm と 560 nm

Fig. 12 Schematic of simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and color-based dual-plane stereoscopic PIV system.

のレーザ光は種々の光学素子を駆使して二平面上に導いている。また、PIV 用のカメラも前出の例とは変更されており、自発光の混入を防ぐための高速液晶シャッターを装備した 2048×2048 ピクセルの CCD カメラ 4 台が用いられている。Fig.13 は、この計測システムを Fig. 1 のモデル燃焼器に適用した場合に得られた三次元火炎構造を示している。Fig.10 に示した乱流噴流予混合火炎に比べて極めて複雑な火炎面が形成されていることがわかる。Fig.13 中の中心付近に示した正方領域の二平面ステレオ PIV 結果から算出した歪み速度の分布を Fig.14 に示す。図中の濃淡は、OH ラジカルの蛍光分布を示している。通常の一平面ステレオ PIV から見積もられる歪み速度に比べて、その分布も大きさも異なり、二平面ステレオ PIV 計測の必要性が明らかにされている。

5. まとめ

本稿では、乱流火炎の詳細な構造を計測するために開発されてきた多次元多変量光学計測技術について紹介した。このような計測の最終的な理想型は、異なる二平面で CH と CH_2O のダブルパルス PLIF を、それに挟まれた平面において OH のダブルパルス PLIF を行い、

Fig.13 Typical three-dimensional flame fronts obtained by simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and color-based dual-plane stereoscopic PIV.

Fig.14 Distribution of strain rate obtained by simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and color-based dual-plane stereoscopic PIV.

これに波長型二平面ステレオ PIV を組み合わせたものである。計測には、カメラ 10 台、励起用レーザ 8 台及び色素レーザ 8 台が必要となる。これにより火炎面の曲率、火炎面に作用する歪み速度及び局所燃焼速度の同時計測が可能であるが、地震の多い我が国において、このような計測が実現できるかどうかは定かではない。

謝 辞

本稿の一部は、科学研究費補助金若手研究(S) (No. 20676004) により行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 店橋護, 崔敬民, 板倉正幸, 宮内敏雄: 時系列ステレオ PIV による乱流計測, 可視化情報, Vol.25, No.96 (2005) pp.8-13.
- 2) Tanahashi, M., Hirayama, T., Taka, S., Miyauchi, T.: Measurement of fine scale structure in turbulence by time-resolved dual-plane stereoscopic PIV, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol.29 (2008) pp.792-802.
- 3) Tanahashi, M., Hirayama, T., Shimura, M., Ueda, T., Miyauchi, T.: Direct measurement of coherent fine scale structure in turbulence by high spatial resolution dual-plane SPIV, Int. Symp. Turbulence, Heat and Mass Transfer (2009) CD-ROM.
- 4) Tanahashi, M., Murakami, S., Choi, G.-M., Fukuchi, Y., Miyauchi, T.: Simultaneous CH-OH PLIF and stereoscopic PIV measurements of turbulent premixed flames, Proc. Combust. Inst., Vol.30 (2005) pp.1665-1672.
- 5) Tanahashi, M., Taka, S., Shimura, M., Miyauchi, T.: CH double-pulsed PLIF measurement in turbulent premixed flame, Exp. Fluids, Vol. 45 (2008) pp.323-332.
- 6) Hulta, J., Meier, U., Meier, W., Harvey, A., Kaminski, C. F.: Experimental analysis of local flame extinction in a turbulent jet diffusion flame by high repetition 2-D laser techniques and multi-scalar measurements, Proc. Combust. Inst., Vol.30 (2005) pp.701-709.
- 7) Kittler, C., Dreizler, A.: Cinematographic imaging of hydroxyl radicals in turbulent flames by planar laser-induced fluorescence up to 5 kHz repetition rate, Applied Phys. B, Vol.89 (2007) pp.163-166.
- 8) Jiang, N., Patton, R. A., Lempert, W. R., Sutton, J. A.: Development of high-repetition rate CH PLIF imaging in turbulent nonpremixed flames, Proc. Combust. Inst., Vol.33, in press.
- 9) Ueda, T., Shimura, M., Tanahashi, M., Miyauchi, T.: Measurement of three-dimensional flame structure by combined laser diagnostics, J. Mech. Sci. Tech., Vol.23 (2009) pp.1813-1820.
- 10) Tanahashi, M., Taka, S., Hirayama, T., Minamoto, Y., Miyauchi, T.: Local burning velocity measurements in turbulent jet premixed flame by simultaneous CH DPPLIF/OH PLIF and stereoscopic PIV, Proc. 14th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech., (2008) CD-ROM.
- 11) 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, Proc. Combust. Inst. Vol.33, in press.