

〔特集〕 燃焼研究の最前線

## 乱流火炎構造研究の最先端 (DNS と先端レーザ計測)

\*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

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

店 橋 護†

福 島 直 哉

志 村 祐 康

由 川 格

A Leading Edge of Turbulent Flame Researches  
(DNS and Advanced Laser Diagnostics)

Mamoru TANAHASHI, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Naoya FUKUSHIMA, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Masayasu SHIMURA, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Itaru YOSHIKAWA, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

## 1 はじめに

近年のスーパーコンピュータの高速・大容量化とレーザ計測技術の進歩は、乱流燃焼研究の進展に大きく寄与している。乱流燃焼は火力発電や自動車エンジン等において熱エネルギーを取り出す重要な現象であるが、現象自体が持つ複雑さから未解明な部分が多く残されている。これは、乱流燃焼では乱流と火炎（燃焼反応）という二つの異なる物理現象が相互に干渉することに起因している。

気体燃料の燃焼様式は予混合と非予混合の二つに大別される。前者は予め燃料と酸化剤を混合しておき、その予混合気を燃焼させる。後者は燃料と酸化剤を流体力学的に混合させながら燃焼させる。本稿では、予混合燃焼を中心に最新の直接数値計算(DNS)とレーザ計測について紹介する。

## 2 乱流燃焼の DNS

## 2.1 乱流燃焼 DNS の特徴

乱流燃焼の DNS の歴史と展望については、幾つかの解説<sup>1-3)</sup>において記したので、ここでは乱流燃焼の

DNS の特徴と最新の DNS について簡単に紹介する。非燃焼乱流の DNS と乱流燃焼の DNS が最も異なる点は、燃焼反応を取り扱うことにある。燃焼反応は非常に複雑で、水素燃料では 10 種程度の化学種と 30 組程度の素反応を、メタンやプロパン等では 50 種程度の化学種と 300 組程度の素反応を考慮に入れる必要がある。ガソリン等に至っては、数百化学種と数千素反応が必要となる。これらの化学種と素反応の組み合わせを詳細化学反応機構と言う。化学種数の増加は、解析する化学種保存式数の増大に直結し、計算時間及び記憶容量も膨大となる。また、燃焼反応は大きな発熱を伴うため、温度、密度等の物理量の急激な変化とそれに伴う輸送係数・熱物性値の変化が生じるため、変物性の圧縮性解析となる。また、燃焼反応は非常に薄い火炎内で生じるため、格子点間隔も非常に狭くする必要がある（大気圧ならば 10 $\mu\text{m}$  のオーダー）。さらに素反応には非常に速い反応が含まれるため、完全陽解法であれば時間積分間隔は ns オーダーとなる。ただし、複雑な燃料の場合、完全陽解法では実質的に解析不可能となる場合もある。これらのことから、非燃焼非圧縮性乱流の DNS に比べて 10<sup>7</sup> 倍程度計算負荷が大きい。詳細は以前の解説<sup>1-3)</sup>を参照のこと。

燃焼場では燃料（厳密には、燃料種、温度、圧力、

\*〒152-8550 目黒区大岡山 2-12-1

† E-mail: mtanahas@mes.titech.ac.jp

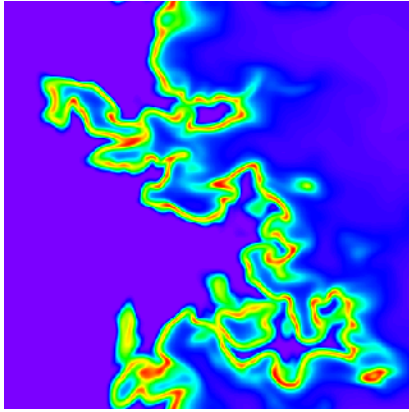


Fig.1 Heat release rate in high Reynolds number turbulent premixed flame.

当量比等の燃焼条件)を特定した段階で、乱流とは異なる特性スケールが規定される。乱流と火炎の特性スケールの比によって乱流燃焼特性を無次元空間で議論する試みも行われているが、未だ統一的な見解はない<sup>4)</sup>。予混合火炎の場合、層流状態での燃焼速度と火炎の厚さを代表スケールとする。なお、予混合火炎は自発的に燃え広がる伝播性を有しており、静止予混合気中の伝播速度を層流燃焼速度と呼ぶ。

## 2.2 高レイノルズ数乱流火炎の DNS

詳細化学反応機構を考慮に入れた世界初の三次元 DNS は 2000 年に発表された<sup>5)</sup>。10 年余りの歳月が経ち、現在三次元 DNS は乱流燃焼研究の強力な手段となっている。ただし、実燃焼器に比べて最新の DNS であってもレイノルズ数は低く、高レイノルズ数 DNS の実現が必要である。図 1 は、一様乱流中を自由伝播する水素・空気乱流予混合火炎の最近の DNS を示している<sup>6)</sup>。可視化されている物理量は、熱発生率(化学結合エネルギーから熱エネルギーに変換される量)を示している。この DNS のテイラー・マイクロスケールに基づくレイノルズ数( $Re_\lambda$ )は約 120 である。さらに高レイノルズ数( $Re_\lambda=220$ )の DNS も実行されており、約 16 億点の格子点が用いられている。純粋乱流の DNS に比べると、このレイノルズ数は低いと感じるかも知れないが、著者らの知る限り乱流燃焼の DNS では最もレイノルズ数が高い。現実の燃焼器はさらに高レイノルズ数条件であるが、そのような条件の DNS が実現されるのは、10 年以上先のことである。このようなことから、純粋乱流の研究に比べると 20 年程遅れているが、乱流燃焼の DNS も純粋乱流の場合とほぼ同じ道筋を辿っている。すなわち、実験では困難な乱流火炎の構造解明と DNS データを有効に用いた RANS や LES 用乱流燃焼モデルの構築と検証である<sup>7,8)</sup>。

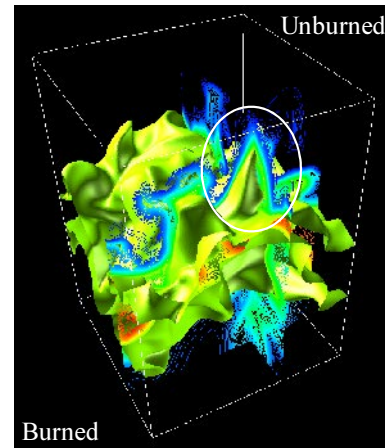


Fig.2 Radical fingering in high intensity turbulent premixed flame.

## 2.3 高強度乱流火炎の DNS

前節では単に高レイノルズ数との表現を用いた。しかし、乱流燃焼は乱流と火炎の二つの物理現象の干渉であるため、乱流側だけの条件を規定することは適切ではない。乱流の速度スケールを大きくして、特性長さを短くすれば同じレイノルズ数となるが、ここで干渉する火炎の特性が固定されていれば(燃焼条件を規定すれば、火炎の特性スケールは決まる)、当然ながら乱流火炎構造は異なる。火炎の特性速度に比べて乱流の速度スケールを極めて大きく、火炎の長さスケールに比べて乱流の長さスケールを短くした場合、乱流と火炎は極めて強い干渉を起こす。このような条件を高強度乱流火炎と言う。このような条件は実験室規模の燃焼器で形成することは困難なため、その火炎構造も明らかではない。

図 2 は最近行われた高強度水素・空気乱流予混合火炎の DNS 結果<sup>9)</sup>を示している。この条件では、乱流の微細渦構造の時間スケールと素反応の時間スケールが近くなるため、化学反応の絶妙なバランスで決定されている火炎内部の構造にまで乱流の影響が顕著に現われる。図 2 には水素が燃焼する過程で一時的に生成される  $HO_2$  分子の濃度分布が示されている。この分子は通常火炎の前縁(未燃側)で生成される。高乱流強度の条件では、このラジカルが通常ならば存在し得ない低温の予混合気中に乱流運動により輸送される。著者らは、このような構造をラジカル・フィンガリングと名付けている。

## 2.4 複雑燃焼場の DNS

一様乱流中を自由伝播する幾何形状が単純な乱流燃焼場から、乱流噴流火炎や高温ロッドで火炎が維持される V 型乱流火炎、さらにはガスタービンを模擬した矩形燃焼器内旋回乱流火炎、自動車用エンジ

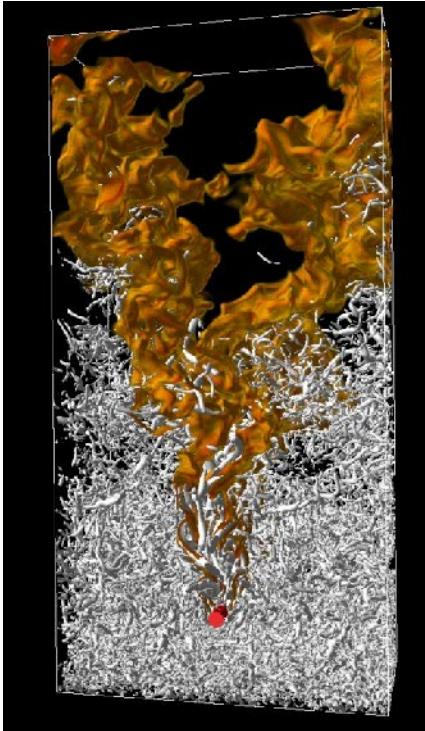


Fig.3 DNS of turbulent V-shape premixed flame.

ンを模擬する定容容器内予混合火炎伝播など、より現実的な燃焼場に乱流燃焼の DNS は拡張されている<sup>1,3)</sup>。図 3 は V 型乱流予混合火炎の DNS 例<sup>7)</sup>を示しているが、主流中の一様乱流と保炎ロッド後方の伴流の影響により火炎面は極めて複雑な構造となる。

乱流燃焼の DNS をより現実的な燃焼条件に近づけるには、圧力の問題を克服しなければならない。多くの燃焼器では数十気圧の高圧下で稼働されている。しかし、DNS のほとんどは大気圧下(0.1MPa)に限定されている。高圧下では動粘性係数が低下し、必然的に乱流場のレイノルズ数は上昇する。さらに、同じ予混合気であっても、圧力の上昇とともに火炎の厚さは薄くなるため格子分解能も上げざるを得ない。このような理由により、高圧力条件での DNS は非常に困難である。例えば、図 4 は圧力の異なる V 型乱流予混合火炎のある二次元断面内の温度分布を示している。図 4(a)は図 3 に示した 0.1MPa の条件を、図 4(b)は現在行っている 0.2MPa の条件を示している。0.2MPa の DNS には 0.1MPa の 3.4 倍、約 15 億点の格子点を用いており、このことだけからも圧力を上げることが乱流燃焼の DNS にとって大変なことであることが理解できるであろう。また、図 4 に示した温度分布の比較からも乱流と火炎の干渉が圧力条件によって異なり、結果的に形成される乱流火炎構造も大きく変化することがわかる。ただし、本来は乱流特性と火炎特性の影響を多角的な視点から議論しなければならない。

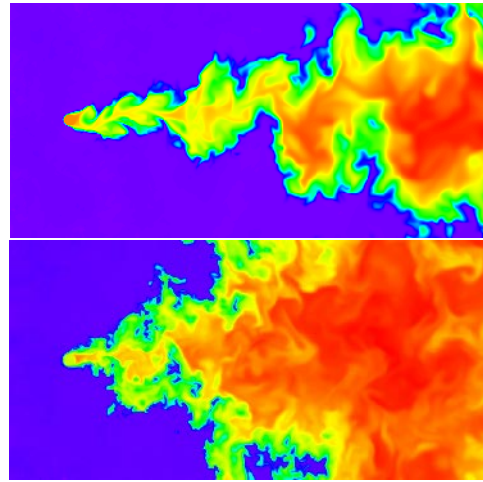


Fig.4 Pressure effects on flame structure in turbulent V-shape premixed flame.

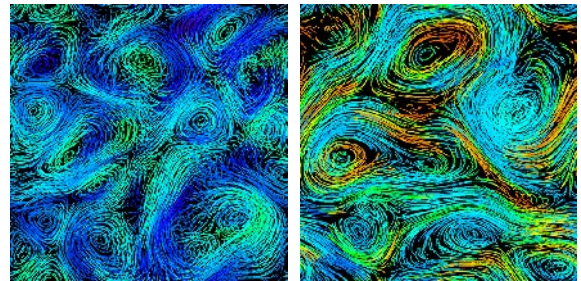


Fig.5 DNS of HCCI turbulent combustion.

## 2.5 DNS の新たな展開

乱流燃焼の DNS の更なる応用例として、均一圧縮自着火燃焼 (HCCI) の DNS が比較的多く報告されている。HCCI は高効率・低環境負荷が期待でき、ガスエンジンや自動車エンジンにおける新たな燃焼形態として期待されている。一部実用化されているが、自着火現象特有の制御性の悪さが問題となっている。図 5 は HCCI 燃焼機構を解明するために行われた DNS 例<sup>10)</sup>を示している。燃料はメタンであり、53 化学種 325 素反応の詳細化学反応機構が用いられている。圧力条件は実機に近い約 50 気圧である。HCCI 燃焼では予混合気を急速に高圧まで圧縮して自着火させるが、急激な燃焼を制御するために、温度や濃度に変動を与える。しかし、実際の燃焼形態は明らかにされていない。乱流状態でさらに局所的に温度や燃料濃度が異なる予混合気の燃焼形態を検討するために、図 5 の例では流体粒子を追跡するラグランジュ粒子が同時に解析されている。粒子上の物理量の時間履歴から初期の予混合気状態とその燃焼形態を解析できる。この解析は未だ二次元が限界であるが、近い将来三次元解析へと拡張される。

近年、分散型発電システム、ポータブル電源等のエネルギー源としてマイクロ燃焼技術が注目されている。マイクロ燃焼では流れは層流である場合が多

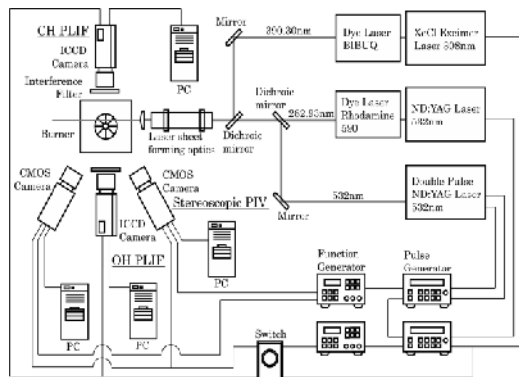


Fig.6 Schematic of simultaneous OH-CH PLIF and stereoscopic PIV system.

いが、乱流燃焼のDNSで用いられる高精度な解析は小型燃焼器の特性解明にも応用できる。マイクロ・ガスタービンのDNS<sup>11)</sup>もこの一例であるが、マイクロフローリアクターを模擬したDNSも行われている。

### 3 乱流燃焼の先端レーザ計測

#### 3.1 乱流燃焼の複合レーザ計測

非燃焼乱流の計測と同様、乱流燃焼においても速度計測には粒子画像流速計(PIV)が頻繁に用いられている。乱流燃焼では火炎構造も計測する必要があり、これには平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)が有効である。燃焼場ではOH, CH, CH<sub>2</sub>O等の燃焼過程で生じる中間生成物のPLIFが用いられる。最も良く用いられる化学種はOHであり、これは既燃ガスにおいて高い濃度を示す。OHでは火炎位置が多少曖昧になることから、火炎面において鋭いピークを示すCHもPLIF計測に頻繁に用いられる。ただし、CHの蛍光は微弱なため計測は難しい。

乱流火炎の火炎構造を実験的に明らかにするには、少なくとも流体速度3成分、可能であれば速度勾配9成分の計測と複数の化学種のPLIF計測を同時に行う必要がある。特に、実燃焼器のような極めて乱れた高レイノルズ数の条件では、OHやCHなどの単独の化学種のPLIF計測では、必ずしも十分な情報を与えない。図6はステレオ投影PIVと、CHとOHの同時PLIF計測を組み合わせた流体速度3成分と2化学種濃度の同時計測システムを示している<sup>12)</sup>。この計測は当時としては世界初であった。図7は計測例を示している。CHとOHの蛍光イメージ中の白枠がステレオPIVの計測領域である。流体速度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。乱流予混合火炎は火炎と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可能で

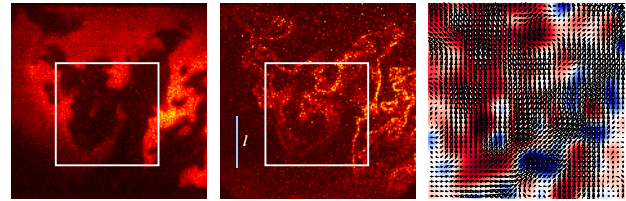


Fig.7 A typical result of simultaneous OH-CH PLIF and stereoscopic PIV.

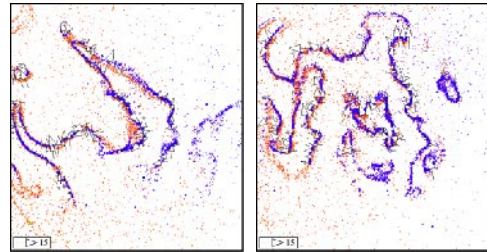


Fig.8 Local flame displacement speed obtained from double-pulsed CH PLIF.

ある。またOHとCH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特性を議論できる。乱流中の複雑な火炎面であっても、その動的特性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(流体速度勾配から算出)から記述できると仮定されている。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、このような複合レーザ計測は重要となる。

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。図6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可能である。すなわち、OH用PLIFシステムをCH用に変更し、偏光を利用して同一波長の光を一光軸上に導く。これにより、ダブルパルスCH PLIF計測が可能となる<sup>13)</sup>。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、解析は二次元平面内に限定される。

乱流火炎の最も基本的な概念モデルでは、複雑形状の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)モデルと呼ばれる。この考え方は、乱流と火炎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大きくない。上述のダブルパルスCH PLIFの時間間隔を非常に短くすると、局所火炎要素の動的特性を検討することが可能となる。図8は時間間隔を30 $\mu$ sとした場合の連続するCH蛍

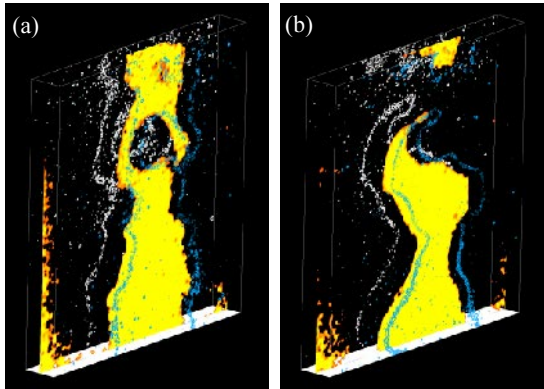


Fig.9 Typical three-dimensional flame structures obtained from simultaneous dual-plane CH PLIF and single-plane OH PLIF.

光イメージを示している。図 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。この計測法を応用すると、層流火炎片モデル等を実験的に直接検証可能である。

乱流火炎の動的特性を記述するには、火炎面の三次元構造を明らかにする必要がある。伝播特性を有する予混合火炎の場合、火炎面面積の増加率は曲率に依存する。二次元平面内の PLIF 計測では、三次元曲面の曲率を得ることは不可能である。上述の PLIF の三つ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 PLIF 計測が実現できる<sup>14)</sup>。乱流噴流予混合火炎における代表的な計測結果を図 9 に示す。この計測を用いれば、三次元火炎面の曲率をより正確に求めることができる。

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り<sup>15)</sup>、これらの差から、二次元断面内との制約はあるが、局所火炎要素の燃焼速度を直接計測できる。

### 3.2 多次元多変量レーザー計測

上述の PLIF と 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。局所火炎構造の動的特性を議論するには、流体運動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。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。曲率を正確に計測するには多平面 PLIF 計測が、歪み速度を正確に計測するには二平面ステレオ PIV が必要である。これらの同時計測システムを図 10 に示す<sup>16)</sup>。このシステムでは、波長型二平面ステレオ PIV が採用されている。燃焼場の PIV では

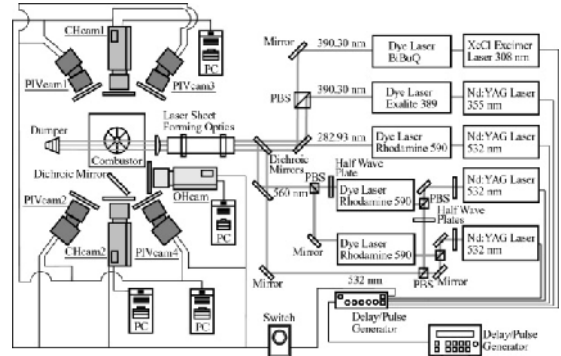


Fig.10 Schematic of simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and color-based dual-plane stereoscopic PIV system.

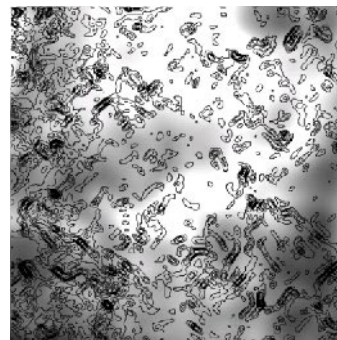


Fig.11 Distribution of strain rate obtained by simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and color-based dual-plane stereoscopic PIV.

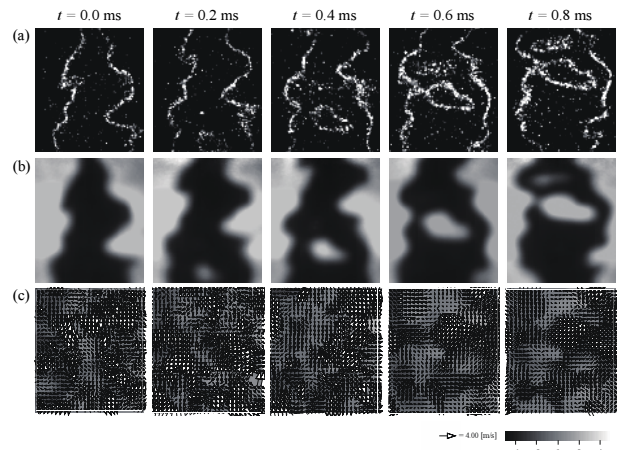


Fig.12 Example of sequential CH PLIF images (a), OH PLIF images (b) and fluctuating velocity vector map images (c).

固体粒子が用いる必要があり、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。この計測から算出した歪み速度の分布を図 11 に示す。図中の濃淡は、OH の蛍光分布である。多平面 PLIF から火炎面法線が算出できるため、火炎面に作用する接線方向歪み速度も全速度勾配 9 成分から求められる。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<sub>2</sub>O 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、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。

近年上述のような計測の高時間分解能化が試みられている。図 12 は著者らによる世界初の CH PLIF, OH PLIF 及びステレオ PIV の高時間分解能計測<sup>16)</sup>を示している。ここでは、10kHz で CH と OH の蛍光、流体速度 3 成分の面計測が行われている。このような計測をさらに発展させることで、乱流火炎の非定常特性を明らかにすることができる。

#### 4 まとめ

本稿では、乱流燃焼の最新の DNS とレーザ計測について紹介した。どちらも乱流火炎構造を明らかにするには未だ発展段階にあり、今後更なる研究が必要である。

**謝辞**：本稿の一部は、先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発支援プログラム）(No. GR038) によるものであり、ここに記して謝意を表す。

#### 引用文献

- 1) 店橋護, 福島直哉, 宮内敏雄: 乱流燃焼の大規模直接数値計算の現状と将来, *ながれ*, 29 (2010) 85-90.
- 2) 店橋護: 乱流予混合燃焼 II - 計測と直接数値計算一, *日本燃焼学会誌*, 52-159 (2010) 39-48.
- 3) 店橋護, 志村祐康, 福島直哉: エンジン内乱流燃焼機構の解明に向けて, *自動車技術*, 66-4 (2012) 82-85.
- 4) 店橋護: 乱流予混合燃焼 I - 乱流と予混合火炎の代表スケール, *日本燃焼学会誌*, 51-158 (2009) 295-302.
- 5) Tanahashi, M., Fujimura M. & Miyauchi, T.: Coherent fine scale eddies in turbulent premixed flames, *Proc. Combust. Inst.*, 28 (2000) 529-535.
- 6) Shim, Y.-S., Shimura, M., Fukushima, N., Tanahashi, M. & Miyauchi, T.: 3D flame structures in high Reynolds number turbulence, *Proc. 22nd Int. Symp. Transport Phenomena*, (2011) CD-ROM.
- 7) Minamoto, Y., Fukushima, N., Tanahashi, M., Miyauchi, T., Dunstan, T. & Swaminathan, N.: Effect of flow-geometry on turbulence-scalar interaction in premixed flames, *Phys. Fluids*, 23 (2011) 125107.
- 8) Yoshikawa, I, Shim, Y.-S., Nada, Y., Tanahashi, M. & Miyauchi, T.: A dynamic SGS combustion model based on fractal characteristics of turbulent premixed flames, *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2012) in press.
- 9) Shim, Y.-S., Fukushima, N., Shimura, M., Nada, Y., Tanahashi, M. & Miyauchi, T.: Radical fingering in turbulent premixed flame classified into thin reaction zones, *Proc. Combust. Inst.*, 34, accepted.
- 10) Katayama, M., Fukushima, N., Shimura, M., Tanahashi, M. & Miyauchi, T.: DNS on autoignition and flame propagation of methane-air mixture under high pressure condition, *Proc. KSME-JSME Thermal Fluid Eng. Conf.*, (2012), CD-ROM.
- 11) Tanaka, S., Shimura, M., Fukushima, N., Tanahashi, M. & Miyauchi, T.: DNS of turbulent swirling premixed flame in a micro gas turbine combustor, *Proc. Combust. Inst.*, 33 (2011) 3293-3300.
- 12) 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.*, 30 (2005) 1665-1672.
- 13) Tanahashi, M., Taka, S., Shimura, M. & Miyauchi, T.: CH double-pulsed PLIF measurement in turbulent premixed flame, *Exp. Fluids*, 45 (2008) 323-332.
- 14) Ueda, T., Shimura, M., Tanahashi, M. & Miyauchi, T.: Measurement of three-dimensional flame structure by combined laser diagnostics, *J. Mech. Sci. Tech.*, 23 (2009) 1813-1820.
- 15) 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.
- 16) 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.*, 33 (2011) 775-782.
- 17) Johchi, A., Tanahashi, M., Shimura, M., Choi, G.-M. & Miyauchi, T.: High repetition rate simultaneous CH/OH PLIF in turbulent jet flame, *Proc. 16th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, (2012).