レーザ応用画像計測を用いた渦と干渉する 正/逆火炎の動的挙動の可視化*

小宮山 正治¹⁾, 藤村 智也²⁾, 高城 敏美³⁾

Visualization of Normal/Inverse Diffusion Flame Behaviors Interacting with Vortex by Laser Imaging Techniques Masaharu Komiyama, Tomoya Fujimura and Toshimi Takagi

ABSTRACT

Instantaneous and simultaneous measurements of two-dimensional temperature and OH-LIF profiles by combining Rayleigh scattering with laser induced fluorescence (LIF) were demonstrated in a nitrogen-diluted hydrogen (H_2 30% + N_2 70%) laminar normal diffusion flame interacting with a large-scale vortex by oscillating central fuel flow or in an inverse diffusion flame by oscillating central airflow. The results obtained are described as follows. (1) The width of the reaction zone decreases remarkably, and decreasing in flame temperature and OH-LIF is seen with increasing central airflow in an inverse diffusion flame. OH-LIF increases, and temperature does not change with increasing central fuel flow in a normal diffusion flame. (2) When a remarkably large velocity fluctuation is given to the central airflow in the inverse flame, thinning of temperature and reaction zone starts at the convex and circumferential part of the vortex, and flame extinction completely occurs at the tail part of the vortex and makes the pair of edge flames. The outside edge flame reignites and connects with the upstream reaction zone.

Keywords: Diffusion flame, Laser imaging, Vortex, Flame extinction, Reignition

1. はじめに

乱流拡散火炎は局所的には渦によって非定常的に伸張の影響を受けた層流火炎片の集合であると考えられる^{1,2)}. このため、乱流拡散火炎の微視的な内部構造を基礎的に理解するためには、渦を伴う噴流拡散火炎の動的な挙動を制御し、渦の挙動と火炎内の化学反応との相互干渉を解析することが必要とされる. 渦と拡散火炎との干渉に関してはこれまでに幾つかの研究がなされている³⁾. 対象とする燃焼場としては平面拡散火炎に局所的な噴出流を与えて伸張及び曲率を変化させた場合がある. 火炎と渦との衝突の際に生じる渦前面での消炎は火炎面のひずみ速度の影響が大きいこと⁴⁾, また、火炎面の曲率に基づく選択拡散が定常および非定常水素/窒素火炎の消炎や火炎温度の特性に影響を与えることが明らかにされている^{5,6)}. 水素/窒素平面拡散火炎へ渦を衝突されたときに生じる渦前面の円周状の消炎は選択拡散と曲率

の影響によって生じると推察されている⁷⁾. また、別の燃焼場として音響励起によって中心流に流速変動を与えた噴流火炎場での渦と火炎との干渉を対象としたものがある. メタン拡散火炎におけるOH-LIF 計測によって伸張によって誘起されたOH 層幅の狭まりや消炎および渦後流部で火炎の圧縮に伴うOH 層幅の増加が明らかにされている⁸⁾. また、大規模渦が火炎の消炎を誘引することが指摘されている^{9,10)}. 水素/窒素拡散火炎ではその火炎温度特性に選択拡散の効果が大きいことが指摘されている^{11,12)}.

本研究では音響励起により中心ノズル流に速度変動を与え、火炎中に形成される制御可能な大規模渦と干渉する拡散火炎の挙動を対象とし、レーザ散乱法を用いた火炎の瞬時2次元温度分布測定と、レーザ誘起蛍光法を用いたOH-LIFの瞬時2次元蛍光強度分布の同時測定を行い、渦と火炎の相互干渉の時系列的挙動を考察する. 測定対象とする火炎は H_2 30%+ N_2 70%を燃料とし、中心燃料流と周囲空気流で形成される正拡散火炎(正火炎)とその逆に中心空気流と周囲燃料流の間に形成される逆拡散火炎(逆火炎)とする. 同軸流噴流拡散火炎の中心軸からみた燃料流と空気流の曲率が正負異なる2種類の火炎に着目し、渦とその火炎との干渉挙動を

* 原稿受付 2007 年 7 月 3 日

1) 正会員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, E-mail: komiyama@mech.eng.osaka-u.ac.jp)

2) 日産自動車㈱

3) 大阪産業大学工学部

Fig.1 Schematic view of the optical apparatus for simultaneous measurement of two-dimensional temperature and OH-LIF profiles.

Fig.2 Schematic view of the acoustic flame burner.

Table 1 Flame conditions

Case	Flame	Uc (m/s)	Us (m/s)	Amp (mV)	f (Hz)
A	NDF	10-30	0.2		
B	IDF	4.6-34.9	0.7		
C	NDF	10	0.2	600	200
D	IDF	5	0.7	500	200
E	IDF	14.4	0.7	900	200

解析する。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に光学系の概略図を示す。温度測定にはレーリ散乱法を、OH-LIF 測定にはレーザ誘起蛍光を用いて瞬時 2

次元温度・OH-LIF 分布同時測定を行う。圧力と有効散乱断面面積が一定の条件では気体の温度はレーリ散乱光強度に反比例するので、散乱光強度の瞬時 2 次元像を検出することで、瞬時 2 次元温度分布を求めることができる。OH-LIF 分布計測には $A^2\Sigma^+-X^2\Pi$ 電子エネルギー遷移における(1,0)振動バンド吸収線を使用する。この場合 OH の蛍光は(1,1), (0,0) 振動バンドが観察される。ここでは基底状態にある分子の数密度のうち、レーザと共振する準位にある分子の分率の変化が 900K から 1800K の範囲で比較的少ない $P_2(7)$ (1,0) 吸収線を用いた。また、本研究で用いる吸収線と燃料の場合にはその OH-LIF 強度と OH 数密度の関係がほぼ比例することを確認している¹³⁾。OH-LIF 測定においてレーザ出力のばらつきによる誤差は約 3%と考えられる。

レーリ散乱による 2 次元温度計測には Nd:YAG レーザ (Spectra-Physics, PIV400) の第 2 高調波 532nm (300mJ/pulse) を用いる。一方、OH-LIF には Nd:YAG レーザ (Continuum, Powerlite9010) 励起の色素レーザ (Lambda-Physik, ScanMate3) と高調波発生器 (Lambda-Physik, ScanMate UV) により、285.43 nm (10mJ/pulse) に調光された線幅が 0.13 cm^{-1} の入射励起光を用いる。それぞれのパルス光に対して 2 枚のダイクロイックミラーとシリンドリカルレンズを用いて測定体積部に厚さ 0.2 mm のシート光を形成する。測定対象からのレーリ散乱光および誘起蛍光を、入射光に対して直角方向からカメラレンズ (f/1.2) および UV カメラレンズ (f/3.5) を用いてそれぞれ集光する。さらに、3 台のデジタルディレイ (Stanford Research Systems, DG535) とカウンタ回路によりレーリ散乱光および誘起蛍光と 2 台のイメージ・インテンシファイヤ (浜松ホトニクス, C4273) のゲート時間とを同期させ、光強度増幅後 2 次元的に CCD カメラ (Photometrics, MXC200L) で別々に検知する。レーザの発振周波数はそれぞれ 10Hz に設定した。また各測定での受光強度を高く保つために、光学フィルタを利用して検出光を波長で分離する方法は用いずに、532nm および 285.43nm の各パルス光に 1 μs の時間間隔を設けた。本研究で対象とする火炎の測定条件においてこの 1 μs の時間間隔はほぼ無視でき、温度分布と OH 分布は同時に測定できるといえる。レーリ散乱および OH 誘起蛍光の検出のためのイメージ・インテンシファイヤにおける露光時間はそれぞれ 1 μs に設定した。どちらの場合も火炎からの自発光強度が暗電流のみの場合とほぼ同じであることを確認している。

Fig.2 には使用する燃焼器を表し、流れの配置は正火炎の場合を示している。これは上部の同軸噴流拡散バーナと、下部の燃料流音響励起部で構成される。音響励起部に導かれた中心ノズル流は、底部に配置されたスピーカにより加振され、内径 10 mm の 2 重管ノズル内管へと送られ、ノズル上部の縮流部で整流された後、内径 4.2 mm, 外径 6 mm のノズル出

Fig. 3 Variation of (a) temperature and (b) OH-LIF profiles with central fuel flow velocity of steady NDF of case A.

Fig.4 Variation of (a) temperature and (b) OH-LIF profiles with central air flow velocity of steady IDF of case B.

口から噴出される。また、ノズル出口内径7 mm、外径9 mm の2重管ノズル外管にはパイロット火炎用ガスを流す。バーナに導かれた周囲流はガラスビーズ、金網および縮流部で整流された後、内径50 mm (正火炎の場合)あるいは25 mm (逆火炎の場合)のノズル出口から噴出される。中心流の加振には正弦波信号を用いる。パワーアンプによって増幅された関数発生器からの正弦周波数信号によってスピーカを駆動する。関数発生器によって正弦波の周波数と振幅、外部トリガが入力されてから加振が開始されるまでの遅延時間を調整することにより、火炎内の渦の大きさ、位置、レーザパルスとの同期を制御する。本研究では駆動用アンプに最初の半周期分の正弦波を入力し、中心流速変動を与えている。燃料には、燃焼ガスの有効レーリ散乱断面積が空気と大きく変わらない体積分率 H_2 30% + N_2 70% の混合気を用いる¹⁴⁾。代表的な測定領域はノズル出口から平均高さ(x) 15 mm の位置で約10 x 26 mm (CCD カメラ上では190x500pixel) の範囲である。

3. 実験結果と考察

Table 1は火炎の流量条件を表している。表中、 U_c は中心流速、 U_s は周囲流速、Amp はスピーカを駆動するのに使

用したアンプ出力、 f は駆動アンプ出力の周波数をそれぞれ表している。条件AとCは中心燃料流と周囲空気で形成される正火炎(Normal Diffusion Flame, NDF)を、条件B,D,E は中心空気で周囲燃料流で形成される逆火炎(Inverse Diffusion Flame, IDF)を表している。逆火炎の場合にはパイロ

Fig. 5. Axial velocity fluctuation at the central axis of the nozzle exit.

Fig. 6. Two-dimensional (a) temperature and (b) OH-LIF profiles of unsteady NDF (time series) of case C.

Fig. 7. Radial profiles of temperature and OH-LIF of unsteady NDF of case C; (a) $t = t_0 + 7.8$ ms, (b) $t = t_0 + 10$ ms.

ット火炎を用いて火炎の保炎を行い、その際の燃料流速は0.17 m/sで行った。

Fig.3は条件Aの場合で、中心燃料流を増加させた場合の定常正火炎に関してノズル出口下流(x) 15 mmの断面における温度とOH-LIFの半径方向分布を表している。最高火炎温度はいずれの場合も約1700Kで、ピークの位置は中心燃料流速が増加するに従い、中心側に移動する。また、OH-LIF強度は燃料流速の増加に従い、増加する傾向がみられた。この実験条件で中心流速が増加するに従い、燃料の滞留時間が短くなり、それに伴い拡散時間が短くなるため、温度のピーク値は中心側により、また温度分布の幅が狭くなると考えられる。一方、OH-LIFに関しては反応の非平衡性が強くなり、中間生成物であるOHのピーク値が増加する傾向をもつ。また、火炎周辺部の温度が極大をとる領域では当量比が1に近いと考えられ、平衡の既燃ガスであるとする、散乱断面積は1に近く、温度誤差は2%程度であると考えられる。一方、正火炎の中心軸上では燃料過濃であると考えられ、断熱平衡であると仮定すると、散乱断面積は空気に対して0.8程度になり、約80K測定値を高く見積もることになる。

Fig.4は条件Bの定常逆火炎に関してその中心空気流速を増加させた場合のx=15 mm断面における温度とOH-LIFの半径方向分布を表している。Fig.4から空気流

Fig. 8. Two-dimensional (a) temperature and (b) OH-LIF profiles of unsteady IDF (time series) of case D.

Fig. 9. Radial profiles of temperature and OH-LIF of unsteady IDF of case D; (a) $t = t_0 + 8.3$ ms, (b) $t = t_0 + 10.2$ ms.

速の増加に伴い、温度とOH-LIFは単調に減少し、そのピーク位置は中心側に移動することがわかる。この逆火炎の場合には中心空気流速が34.9 m/sの時に消炎を生じていることが認められた。また、定常の逆火炎の場合はFig.3の正火炎の場合に比較して、OH-LIFのピークがより中心側に位置している。これは水素/窒素の燃料ではOH分子が燃料希薄側により多く存在するためと考えられる。本研究では逆火炎を形成する場合に同軸燃料と周囲大気間に外炎が形成されている。しかし、中心空気流速を変化させた場合において中心の逆火炎と外炎の間に温度がほぼ一定の領域が形成されていることから、対象とする逆火炎は外炎によりあまり影響を受けていないと考えられる。

Fig.5には条件DとEにおいて熱線風速計を用いて計測した中心ノズル出口での流速変動を表す。横軸はスピーカへの駆動信号を入力した時点 t_0 として、その時刻からの経過時間と縦軸は軸方向流速の関係を表している。

Fig.6は条件Cの非定常正火炎における2次元温度とOH-LIF分布を表している。各時刻における結果は2次元温度とOH-LIF分布の瞬時同時計測によるものである。それぞれの図の時刻は上から(i) $t = t_0 + 7.4$ ms, (ii) $t = t_0 + 7.6$ ms, (iii) $t = t_0 + 7.8$ ms, (iv) $t = t_0 + 8.0$ ms, (v) $t = t_0 + 10$ msの場合を表している。渦は火炎と干渉しながら、下流に流れていくことが認められる。大きな速度変動を中心流に与えた場合には温度とOH-LIFは周囲流に凸の形状をもつ渦の周辺上部の反応帯で

Fig. 10. Two-dimensional (a) temperature and (b) OH-LIF profiles of unsteady IDF of case E.

それらの幅が狭くなり、反応帯の温度が低下する。

Fig.7(a) では条件Cの非定常正火炎で、 $x=15\text{mm}$ 、 $t=t_0+7.8\text{ms}$ における温度とOH-LIF の半径方向分布を表している。Fig.7(a)は測定領域のほぼ中央を渦が通過するときの温度とOH-LIF 分布を示している。周辺上部反応帯の幅は狭くなり、反応帯の温度は1500K まで低下している。Fig.7(b)では条件

Cの非定常正火炎で、 $x=15\text{mm}$ 、 $t=t_0+10\text{ms}$ における温度とOH-LIF の半径方向分布を表し、渦が測定領域から下流に流れ出るときの温度とOH-LIF 分布を示している。反応帯の最高温度はFig.7(a) の渦周辺上部反応帯の温度より高く、ほぼ定常層流火炎の温度に回復している。また、反応帯の幅も定常層流火炎の状態に回復していることが分かる。

Fig. 11. Radial profiles of temperature and OH-LIF of unsteady IDF of case E; (a) $t = t_0 + 8.0$ ms, $x = 14.5$ mm (b) $t = t_0 + 8.1$ ms, $x = 16$ mm (c) $t = t_0 + 8.2$ ms, $x = 18$ mm.

Fig.8 は条件Dの非定常逆火炎における2次元温度とOH-LIF分布を表している。それぞれの図の時刻は上から(i) $t = t_0 + 7.9$ ms, (ii) $t = t_0 + 8.1$ ms, (iii) $t = t_0 + 8.3$ ms, (iv) $t = t_0 + 8.5$ ms, (v) $t = t_0 + 10.2$ msの場合を表している。2次元温度とOH-LIF分布結果は瞬時同時計測によるものである。大きな速度変動を中心流に与えた場合には温度とOH-LIFは周囲流に凸の形状をもつ渦の周辺上部反応帯でそれらの幅が狭

くなり、反応帯の温度が低下することがわかる。また、Fig.6の正火炎の場合と比較して、逆火炎の場合には渦の内側にOH-LIFが見られる場合がある。これは定常火炎の場合と同様に、この水素/窒素燃料ではOH分子が燃料希薄側により多く存在するため、火炎面より内側が燃料希薄となる逆火炎において、OH-LIFが渦の内側に存在する場合が確認されたものと考えられる。

Fig. 9(a) は条件Dの非定常逆火炎の場合で、 $x = 14$ mm, $t = t_0 + 8.3$ msにおける温度とOH-LIFの半径方向分布を表している。Fig. 9(a)は測定領域のほぼ中央を渦が通過するときの温度とOH-LIF分布を示している。渦の周辺上部反応帯でのOH-LIFの高い値をもつ層の幅は狭くなり、その反応帯の最高温度は1300Kまで低下している。Fig.9(b)では条件Dの非定常逆火炎で、 $x = 15$ mm, $t = t_0 + 10.2$ msにおける温度とOH-LIFの半径方向分布を表し、渦が測定領域から下流に流れ出るときの温度とOH-LIF分布を示している。反応帯の最高温度はFig.9(a)での渦周辺上部の反応帯の温度より高くなっているが、定常層流逆火炎の温度までには回復していない。また、反応帯の幅も定常層流逆火炎の状態までには回復していないことが分かる。OH-LIFのピーク位置は温度のピーク位置と比較して中心に近いことが分かる。

Fig.10 は条件Eの非定常逆火炎における2次元温度とOH-LIF分布を表している。火炎Dの場合よりもさらに強い速度変動を中心空気流に与えた場合である。各時刻における結果は2次元温度とOH-LIF分布の瞬時同時計測によるもので、 $x = 15, 20, 25$ mm中心ごとの平均高さ約10 mmの瞬時測定結果に基づいて得られた2次元分布図を表している。それぞれの図の時刻は上から(i) $t = t_0 + 7.8$ ms, (ii) $t = t_0 + 7.9$ ms, (iii) $t = t_0 + 8.0$ ms, (iv) $t = t_0 + 8.1$ ms, (v) $t = t_0 + 8.2$ ms, (vi) $t = t_0 + 8.3$ ms, (vii) $t = t_0 + 8.4$ msを表している。Fig.10の同時計測の結果から、この条件での火炎と渦の干渉による消炎・再着火現象は対称性、また再現性が良いと考えられる。大きな速度変動を中心流に与えた場合には温度とOH-LIFは周囲流に凸の形状をもつ渦周辺上部の反応帯でそれらの幅が狭くなり、反応帯の温度が低下する(領域A)。次にOH-LIFと温度の局所的に低い点が渦の後流側に移動する(領域B)、さらに渦の後流側で消炎が生じ(領域C)、一組のエッジ火炎が形成される。このうち、外側のエッジ火炎は再着火して(領域D, E)上流側の火炎と再度結合する(領域G, H)。一方、内側のエッジ火炎は外側のエッジ火炎によって燃料の供給を遮られるために最終的に消炎する(領域F)。これから、形成した一組のエッジ火炎は渦との干渉によって異なる過程を取ることが分かる。

Fig.11 には条件Eの2次元温度・OH-LIF計測(Fig.10)で見られた代表的な領域の半径方向分布図を表す。Fig.11 (a)では領域Cの渦後方で消炎が生じている。外側のエッジ火炎では温度が低下し、OH-LIFもほとんど見られない。一方、内側のエッジ火炎では相対的には火炎温度、OH-LIF共に高く、反

応が活発であることが分かる。Fig.11 (b)領域Dでは外側のエッジ火炎は再着火し、火炎温度・OH-LIFはともにFig.11 (a)の領域Cに比較して増加している。とくにOH-LIFの増加が著しい。一方、内側のエッジ火炎では温度の低下が見られる。Fig.11 (c)領域Eでは外側のエッジ火炎の温度はさらに回復していることが見られる。内側のエッジ火炎の温度・OH-LIFは領域Dの場合とほとんど変わらないことがわかる。

4. あとがき

- (1) レーリ散乱とレーザ誘起蛍光を用いた2次元同時温度・OH-LIF計測を正火炎および逆火炎と渦との干渉挙動の可視化に適用することを可能とした。
- (2) 逆拡散火炎に関して中心空気流速を増加させた場合には反応帯の幅の減少と温度とOH-LIFの低下が見られた。正火炎ではOH-LIFの増加は見られたが、温度の変化はほとんど見られなかった。
- (3) 中心流に大きな速度変動を与えた場合には周囲流に凸の形状をもつ渦の周辺上部反応帯において温度とOH-LIF層幅の狭まりとその局所的な低下が正火炎および逆火炎で認められた。
- (4) 正火炎に関して渦と干渉する反応帯幅とその温度は渦が通過後すぐに層流火炎の状態に回復するが、逆火炎に関しては渦が通過した後の反応帯幅とその温度は正火炎の場合に比べてその回復が遅れた。
- (5) 逆火炎の中心空気流に非常に大きな速度変動を与えた場合には周囲流に凸の形状をもつ渦の周辺上部反応帯において温度とOH層幅の狭まりが見られ、渦の後流部で消炎が生じ、一組のエッジフレームを形成した。この内、外側のエッジフレームは再着火し、上部の反応帯と結合したが、内側のエッジフレームは外側のエッジフレームにより燃料の供給を遮れるために最終的に消炎を生じる現象が認められた。また、これらの現象を再現性・対称性よく計測することを可能とした。

参 考 文 献

- 1) Peters, N. : Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion, Proc. Comb. Inst., Vol.21, (1986) pp.1231-1250.
- 2) Peters, N. : Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., Vol.10 (1984) pp.319-339.
- 3) Renard, P.-H., Thevenin, D., Rolon, J. C. and Candel S. : Dynamics of Flame/Vortex Interactions, Prog. Energy Combust. Sci., Vol.26 (2000) pp.225-282.
- 4) Thevenin, D., Renard, P. H., Rolon, J. C. and Candel, S. : Extinction Processes during a Non-Premixed Flame-Vortex Interaction, Proc. Comb. Inst., Vol.27 (1998) pp.719-726.
- 5) Takagi, T., Yoshikawa, Y., Yoshida, K., Komiyama, K. and Kinoshita, S. : Studies on Strained Non-premixed Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion, Proc. Comb. Inst. Vol. 26 (1996) pp.1103-1110.
- 6) Yoshida, K. and Takagi, T. : Transient Local Extinction and Reignition Behavior of Diffusion Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion, Proc. Comb. Inst., Vol. 27 (1998) pp.685-692.
- 7) Katta, V. R., Carter, C. D., Fiechtner, G. J., Roquemore, W. M., Gord, J. R. and Rolon, J. C. : Interaction of a Vortex with a Flat Flame Formed between Opposing Jets of Hydrogen and Air, Proc. Comb. Inst., Vol. 27 (1998) pp.587-594.
- 8) Mueller, C. J. and Schefer, R. W. : Coupling of Diffusion Flame Structure to an Unsteady Vortical Flow-Field, Proc. Comb. Inst., Vol.27 (1998) pp.1105-1112.
- 9) Katta, V. R., Hsu, K. Y. and Roquemore, W. M. : Local Extinction in an Unsteady Methane-Air Jet Diffusion Flame, Proc. Comb. Inst., Vol. 27 (1998) pp.1121-1129.
- 10) Takahashi, F and Katta, V. R. : Unsteady Extinction Mechanisms of Diffusion Flames, Proc. Comb. Inst., Vol. 26 (1996) pp.1151-1160.
- 11) Takagi, T. and Xu, Z. : Numerical Analysis of Laminar Diffusion Flames--Effects of Preferential Diffusion of Heat and Species, Combust. Flame, Vol.96 (1994) pp.50-59.
- 12) Takagi, T., Xu, Z. and Komiyama, M. : Preferential Diffusion Effects on the Temperature in Usual and Inverse Diffusion Flames, Combust. Flame, Vol.106 (1996) pp.252-260.
- 13) 小宮山正治, 宮藤 章, 高城敏美 : レーリ散乱画像流速測定法とOHレーザ誘起蛍光法による乱流拡散火炎内の局所挙動に関する研究, 日本機械学会論文集, B編, Vol.65, No.633, (1999) pp.1779-1785.
- 14) Komiyama, M., Takagi, T. and Matsunari, Y. : Simultaneous Multipoint Temperature Measurements by Laser Rayleigh Scattering in Turbulent Diffusion Flames, JSME Int. Journal, Series II, Vol.32, No.2 (1989), pp.260-264.