渦輪と予混合火炎の干渉の PLIF 法による可視化*

長谷川 達也**, 佐藤 太一***, 松谷 隆司†, 石野 洋二郎††, 大岩 紀生††

Planar Laser-Induced-Fluorescence Imaging of the Interaction between a Strong Vortex Ring and a Premixed Flame

Tatsuya HASEGAWA, Taichi SATO, Takashi MATSUTANI, Yojiro ISHINO and Norio OHIWA

ABSTRACT

The interaction of a strong vortex ring with a premixed flame was experimentally studied in order to understand how the flame is affected by an element of intensive turbulence. The interaction could be observed by sequential schlieren photographs and instantaneous OH-LIPF and CH-LIF images. As a result, two types of interacting behavior have been observed: One is that the flame becomes a mushroom shape, a pocket of unburned gas forms, and finally the pocket disappears by combustion. The other is that the flame becomes a mushroom shape but the mushroom flame intrudes into the burned gas region without entraining the unburned gas.

Key words: Intensive turbulence, Vortex ring, Laser-Induced-Fluorescence, OH-LIPF, CH-LIF

1. 緒言

乱流予混合火炎の構造は火炎の伝播速度、燃焼の効率、燃焼排出物の生成などに影響を及ぼすため、その構造を解明することは燃焼研究の重要な課題である。

比較的乱れの弱い領域においては、実験、数値計算、ともに数多くの研究が行われているが、装置や計測の困難のために乱れの強い領域の乱流予混合火炎の構造についての研究は少なく^{1),2)}、不明な点が多い。

本研究では高強度乱流予混合火炎の素過程の一つのモデルとして、層流予混合火炎面に対し正面から渦輪を高速で衝突させ、その干渉の様子を調べた。高速度シュリーレンシステムで火炎と渦輪の干渉の過渡的状态を可視化すると共に、その反応の様子を反応中間生成物 (OH, CH ラジカル) の平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) によりイメージインテンシファイア付き高感度 CCD カメラで可視化した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。スピーカやピスト

ンを用いる方法に比べて、高速で比較的スケールの小さい渦輪が生成できることから、本実験では衝撃波管を用いている。衝撃波管の高圧部と低圧部はセロハン膜で分離され、低圧部と縮流ノズル部及び燃焼容器は、0.5 mm のシリコンゴム膜で分離されている。衝撃波管の作動流体には窒素を用い、低圧部の圧力は、縮流ノズル部及び燃焼容器に充填される予混合気圧力に等しい。燃焼容器は 2,900 cm³ の円筒形で、ノズル出口 (内径 6.0 mm) から 68 mm 下流には点火プラグが取り付けられている。セロハン膜の破膜により発生した衝撃波はシリコンゴム膜を駆動し、ノズル部先端から渦輪を発生させる。また、着火は衝撃波管の破膜に同期させて行い、渦輪と層流火炎面との衝突位置を調節する。

2.2 測定装置

Fig. 2 に高速度シュリーレンシステムの光学系の概略

Fig. 1 Experimental Apparatus

* 原稿受付 1999 年 1 月 5 日

** 正会員 名古屋工業大学大学院 都市循環システム工学専攻

*** 名古屋工業大学大学院 生産システム工学専攻

† トヨタ自動車㈱

†† 正会員 名古屋工業大学 機械工学科

図を示す。また、Fig. 3 に PLIF (OH-LIPF, CH-LIF) の光学系の概略図を示す。シュリーレン法, PLIF いずれの撮影法でも、縮流部に設置された圧力トランスデューサで検出した圧力波をトリガとし、遅延時間の後キセノンフラッシュランプ、レーザー、CCD カメラを駆動する。

高速度シュリーレンシステムでは、高速連続閃光装置（田中産業社：HRL-10808 LD）を用いて、6 個のキセノンフラッシュランプ（浜松ホトニクス：L 2473、発光時間の半値幅：1 μ s）を任意の設定時間間隔で連続発光させることによって、6 枚の連続写真が得られる。

OH-LIPF ではチューナブルエキシマレーザー（Lambda Physik：LPX 150 t）を媒質を KrF として波長 248 nm で発振させた（パルス幅：21 ns）。CH-LIF では媒質 XeF のエキシマレーザー（発振波長 351 nm）を光源として色素レーザー（Lambda Physik：SCAN-MATE 2 E）を 387 nm で発振させた（パルス幅：20 ns 程度）。それぞれのレーザー光源はノズル中心軸上で幅約 50 mm、厚さ約 0.5 mm のレーザーシートになるようレンズを配置した。OH-LIPF では $A^2 \Sigma^+ - X^2 \Pi$ 遷移

Fig. 2 High-speed Sequential Schlieren System

Fig. 3 PLIF Optical System

の付近のバンドにあわせた色ガラスフィルタ（UG 11：中心波長 330 nm、半値幅 85 nm）を、CH-LIF では $B^2 \Sigma^- - X^2 \Pi$ 遷移の付近のバンドにあわせた干渉フィルタ（Andover 430 FS 10-50：中心波長 432 nm、半値幅 10.3 nm）を取り付けたイメージンテンシファイア付き高感度 CCD カメラ（LaVision：Streakstar II、カメラレンズ：UV-Nikkor、105 mm、F 4.5）を用い、渦輪中心断面上のラジカルの蛍光を撮影した。なお、イメージンテンシファイアのゲーティング時間は 0.1 μ s であり、本実験で撮影された PLIF の画像はすべて 1 パルスのレーザーにより撮影されたものである。

3. バーナー火炎による LIF の特性

LIF を実験に応用するにあたり、OH ラジカルと CH ラジカルの励起波長を決定する必要がある。そこで口径 6 mm のメタン-空気予混合気（当量比 1.0）を燃料とするブンゼンバーナーを用いて常圧において、励起波長の校正を行った。本論文の主目的である干渉実験は 1/3 気圧の低圧で行われるが、常圧のバーナー火炎とは火炎の性質が異なるものの、定性的な評価においては問題がないものと考えられる。

まずレーザーの発振波長を変化させながら、OH の場合はバーナー火炎後方の領域、CH の場合は火炎帯からの蛍光を検出し記録した。そのような手順で計測した励起波長と検出された蛍光強度の関係をそれぞれの場合について Fig. 4 に示す。横軸は励起波長、縦軸は蛍光強度を表している。OH-LIPF の場合は得られたスペクトル

(a) OH-LIPF with UG 11 Filter ($\lambda_{\max} = 330$ nm, $H_W = 85$ nm) ((3, 0) Band of the $A^2 \Sigma^+ - X^2 \Pi$ System of OH Radical in a Methane-air Premixed Burner Flame)

(b) CH-LIF with CH* Filter ($\lambda_{\max} = 432$ nm, $H_W = 10.3$ nm) ((0, 0) Band of the $B^2 \Sigma^- - X^2 \Pi$ system of CH Radical in a Methane-air Premixed Burner Flame)

Fig. 4 Excitation Spectra of OH and CH Radicals

図と確認されている励起スペクトル³⁾とを比較することで絶対波長に校正した。CH-LIF の場合は色素レーザーのステップモーターの波長校正が正確に行われている上、Garland ら⁴⁾による励起スペクトルとも良い整合性を示したので、表示された波長をそのまま使用した。この図から蛍光強度が強い波長を選び、実験での励起波長（それぞれの図の矢印）とした。

ブンゼンバーナー火炎の OH, CH ラジカルの分布の様子を Fig. 5 に示す。(a)はフィルタを取りつけていない CCD カメラによってイメージインテンシファイアのゲーティング時間 100μs で撮影された自発光画像で、内錘からの強い発光が観察できる。また(b)は OH-LIPF により撮影されたもの、(c)は CH-LIF により撮影されたものである。(b)から OH ラジカルは火炎面より下流に見られ、既燃気体の広い領域に分布していることがわかる。また(c)から火炎面に CH ラジカルの蛍光が現れており、CH ラジカルが反応帯にしか存在しないことがわかる⁵⁾。なお図の色は発光の強度を表したものであるが、それぞれの図は異なった方法で撮影されたので相対的な強度の対応はない。

4. 実験条件

渦輪と火炎の干渉実験における実験条件は燃料の種類および当量比、渦輪の強さすなわち衝撃波管圧力比によって設定した。

燃料は水素とメタンの2種類を用い、酸化剤には合成空気 (O₂: 20.8%, N₂: 79.2%) を用いた。衝撃波管で発生する衝撃波の速度は、作動気体および気体温度が一定であれば、高圧室圧力 p_4 と低圧室圧力 p_1 の圧力比 p_4/p_1 のみで決定される⁶⁾。したがって、渦輪の強さの調節は p_4/p_1 の値を変化させることにより行った。低圧室圧力と燃焼容器の圧力は共に 34.6 kPa[abs.]である。以上の圧力比と燃料および当量比 ϕ の組み合わせにより、Table 1 で示すように9通りの実験を行った。

5. 結果および考察

渦輪と火炎の干渉には、2種類の形態が現れた。それ

Fig. 5 Spontaneous Emission, OH-LIPF and CH-LIF from a Methane-air Flame of Equivalence Ratio of 1.0

ぞれ Type 1, Type 2 と名付ける。その代表として Case A, H を取り上げる。縮流部での圧力波検出からの時間とともに Fig. 6 に高速度シュリーレン写真を示す。また、Fig. 7 に OH-LIPF, Fig. 8 に CH-LIF (Case H) の画像を示す。

5.1 Type 1

Fig. 6 (Case A) では、干渉初期 ($t \leq 4.0\text{ms}$) において渦輪によってマッシュルーム状の火炎が形成されるが、やがて渦核に巻き込まれる形で既燃ガスが後部から内部に入り込み、ポケットを形成する。 $t = 4.9\text{ms}$ においてはポケット内部に完全に既燃ガスが広がり、前面での密度界面は消滅している。またその後部にひげ状の乱れが生じる。中心断面の OH ラジカル分布を可視化した Fig. 7(a)では、OH を含む既燃ガスが渦輪の後方から侵入し、マッシュルーム頭部を基部分から完全に分離して

Table. 1 Experimental Conditions

Case	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Fuel	H ₂ -air							CH ₄ -air	
ϕ	1.0		0.8		0.6			1.0	
p_4/p_1	1.2	2.0	1.2	2.0	1.1	1.2	2.0	1.2	2.0
Type	Type 1		Type 2		Type 1		Type 2

Case A (Type 1) Case H (Type 2)
(H₂-air, $\phi = 1.0$, $p_4/p_1 = 1.2$) (CH₄-air, $\phi = 1.0$, $p_4/p_1 = 1.2$)

Fig. 6 High-speed Sequential Schlieren Photographs of the Interaction of a Vortex Ring with a Flame

(a) Case A (Type 1)
(H_2 -air, $\phi = 1.0$, $p_4/p_1 = 1.2$)

(b) Case H (Type 2)
(CH_4 -air, $\phi = 1.0$, $p_4/p_1 = 1.2$)

Fig. 7 OH-LIF Images

未燃気体のポケットを形成する様子がはっきりと観察できる。

5.2 Type 2

Fig. 6 (Case H) では, Type 1 と同様に干渉初期 ($t \leq 7.0 \text{ ms}$) にマッシュルーム状の火炎が形成される。それ以降, マッシュルーム頭部が急速に小さくなり, 茎部分がモヤシ状に伸びてくる。Fig. 7(b) の OH-LIF でも同じ形態が観察できるが, 渦輪によって既燃ガスが渦後方に巻き込まれないことがわかる。Fig. 8 の CH-LIF をみると, 干渉の早い段階から渦輪前方部分で CH ラジカル濃度が下がり, やがてマッシュルームの頭部で CH ラジカルが消失していることがわかる。

Type 1 と Type 2 の違いはこの先端部分の挙動の違いにある。Type 1 ではマッシュルーム状火炎が分離し,

Case H (Type 2)
(CH_4 -air, $\phi = 1.0$, $p_4/p_1 = 1.2$)

Fig. 8 CH-LIF Images

分離したポケットの内部で反応が進行する。それに対し, Type 2 ではマッシュルーム後方で既燃ガスの巻き込みが起こらず, マッシュルームが小さくなっていく。そして先頭部で消炎が生じ, 渦は未燃ガスを伴ったまま進行していく。

6. 結言

本実験では渦輪と火炎の干渉の様子を高速度シュリーレンシステムにより観察し, またその反応の様子を平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF) により可視化した。その結果, 予混合気の種類とその当量比 ϕ , ショックチューブの圧力比 p_4/p_1 , つまり渦輪の強さを変えることにより, 渦輪と火炎の干渉において, 次のような 2 つの形態が観察された。

- (1) 火炎が, 既燃ガスを巻き込んでポケットを分離し, ポケット内で反応が生じるもの,
- (2) 火炎がマッシュルーム状に変形した後, 先端部が消炎し, 渦輪が未燃状態のまま既燃気体中を進行していくものである。

参考文献

- 1) 長谷川 他: 燃焼の科学と技術, Vol. 2 (1-2) (1994) 7.
- 2) Yoshida, A., Narisawa, M., Tsuji, H.: Preprints for the 16 th Toyota Conference, 23, in press, Elsevier Sci. Pub (1992).
- 3) LDS Instruction Manual, Lambda Physik (1992) V-7.
- 4) Garland, N. L., Crosley, D. R., Applied Optics, Vol. 24, No. 23 (1985) 4229.
- 5) Nguyen, Q. V., Paul, P. H.: The time evolution of a vortex-flame interaction observed via planar imaging of CH and OH, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, to be published (1998).
- 6) 倉谷, 土屋: 衝撃波の科学物理 (1968) 裳華房.