

## ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

## 三重管バーナに形成される浮き上がり火炎の実験的検討

## An Experimental Study on Lifted Flames in a Triple-Port Burner

奥 洋平・山本 和弘\*・林 直樹・山下 博史

OKU, Yohei, YAMAMOTO, Kazuhiro\*, HAYASHI, Naoki, and YAMASHITA, Hiroshi

名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町  
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

2014年3月7日受付; 2014年7月30日受理/Received 7 March, 2014; Accepted 30 July, 2014

**Abstract** : In case of diffusion combustion, a well-known “lifted flame” is formed. So far, we have focused on a combustion field in a triple-port burner. In the triple-port burner, since there are two boundaries of fuel and air, two flames are formed. Dependent on the flow condition, four flame configurations are observed, which are, (i) attached flames, (ii) inner lifted/outer attached flames, (iii) inner attached/outer lifted flames, (iv) twin lifted flames. Then, it is possible to study the interaction between two flames, which could give us useful information on turbulent flames. By changing flow conditions, we have investigated the transition between the attached flame and the lifted flame both by experimentally and numerically. In this study, by PIV/OH-PLIF simultaneous measurements, we examined the flow field and liftoff height of stationary and non-stationary flames. Results show that, as the liftoff height is larger, the minimum axial velocity around a base of the lifted flame increases. Also, the hysteresis characteristics of the inner and outer lifted flames are confirmed.

**Key Words** : Diffusion Combustion, Lifted Flame, Laser Diagnostics, PIV, PLIF

## 1. 緒言

拡散燃焼においては、燃料と空気の流速条件により、バーナのノズルから火炎が離れた浮き上がり火炎が形成されることが知られている。これまでにその火炎構造や流れ場が検討され、浮き上がり火炎の基部には三つの火炎から成るトリプルフレーム (Triple flame) の存在が確認されている [1-3]。希薄、過濃の予混合火炎と拡散火炎から成るトリプルフレームは、非定常の乱流拡散火炎構造の一部となると考えられており [4,5]、これまでに様々な実験 [1,2,6-13] と数値計算 [4,5,14,15] が行われてきた。

Chung ら [1] は浮き上がり高さが噴流火炎の重要な特性であり、浮き上がり火炎が保持されるかどうかはノズル径や流速条件に依存することを指摘した。Yamashita ら [5,15] は、トリプルフレームの火炎構造について素反応機構を考慮した数値解析を行っており、流入速度で定義される見掛けの燃焼速度がメタン-空気一次元予混合火炎の最大燃焼速度を大きく上回ることを指摘した。Nagai ら [11] は、矩形型のバーナを用いて実験的にトリプルフレームを形成し、その火炎先端の曲率を変化させて近傍における流れ場の変化を

調べた。その結果、火炎面曲率と火炎に垂直に流入する混合気流速が強い相関を持つことを報告した。Wason ら [13] は、二つの隣り合って形成されるトリプルフレームを対象に、PIV/OH-PLIF 同時計測を用いて火炎の相互干渉について検討を行っている。その結果、適当な濃度勾配を与えることにより、浮き上がり火炎の安定性が向上することを報告している。

我々の研究グループでは、燃料ノズルの内側と外側に空気ノズルを配置した三重管バーナを用いて、浮き上がり火炎の構造と燃焼特性について実験と数値計算による検討を行っている [16]。三重管バーナでは、燃料と空気の境界が内側と外側に 2 つ存在するため、火炎も内側と外側に 2 つ形成される。通常の噴流バーナでは単一の浮き上がり火炎が形成されるので、三重管バーナにより火炎同士の干渉を検討することができる [17]。流速条件を変えて三重管バーナに形成される火炎を調べた結果、両方の火炎が付着した付着火炎 (図 1a)、内側の火炎のみが浮き上がる内側浮き上がり火炎 (図 1b)、外側の火炎のみが浮き上がる外側浮き上がり火炎 (図 1c)、両方の火炎がともに浮き上がる二重浮き上がり火炎 (図 1d) の 4 つの火炎形態が観察された。矩形型のノズルを持つスリットバーナでもこれら 4 種類の火炎形態が形成されることを確認している [18]。ただし、本研

\* Corresponding author. E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

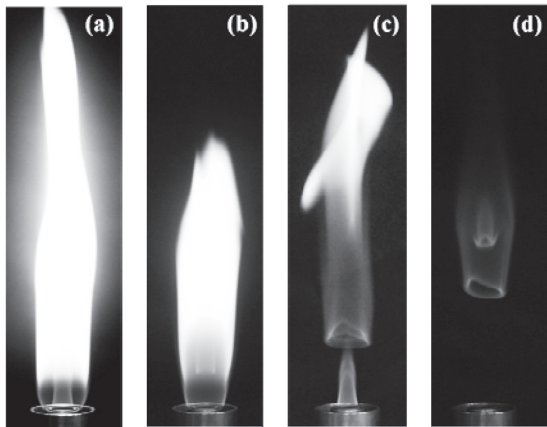


Fig.1 Photos of flames in a triple-port burner [16];  $U_{2F} = 0.6$  m/s, (a)  $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.2$  m/s (b)  $U_{1A}=0.6$  m/s,  $U_{3A}=0.4$  m/s (c)  $U_{1A}=0.6$  m/s,  $U_{3A}=0.7$  m/s (d)  $U_{1A}=0.8$  m/s,  $U_{3A}=0.7$  m/s.

究で対象とした軸対称の三重管バーナとは、これら 4 つの火炎が形成される流速条件が異なる可能性がある。また、文献 18 では流速条件を大きく変えておらず、検討が不十分であった。

本研究では三重管バーナにより形成される浮き上がり火炎を対象に、PIV/OH-PLIF 同時計測を行い、流れ場と浮き上がり高さについて実験的に検討した。また、内側あるいは外側の空気流速のみを変化させてヒステリシス挙動を調べた。これは、バーナ出口における噴流の構造が火炎の安定性に密接に関係しているために見られる現象であり、安定な燃焼を実現する上で重要である[19,20]。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1. 三重管バーナ

今回実験で用いた三重管バーナの概略図と座標系を図 2 に示す。三重管バーナの断面図を図 2a に、噴口形状を図 2b にそれぞれ示している。先に説明したとおり、三重管バーナは燃料ノズルの内側と外側に空気ノズルを配置した同軸三重管構造を有している。内側の空気ノズルは内径 10 mm、燃料ノズルは内径 14 mm、外側の空気ノズルは内径 27 mm の円形状であり、それぞれリムの肉厚は 1 mm である。座標系は、内側空気ノズルの出口の中心を原点とし、半径方向に  $r$  軸、高さ方向に  $z$  軸とした。内側の空気流速を  $U_{1A}$ 、燃料流速を  $U_{2F}$ 、外側の空気流速を  $U_{3A}$  とする。 $U_{1A}$  は 0.3 ~ 0.8 m/s の範囲で変化させ、 $U_{3A}$  は 0 ~ 1.2 m/s の範囲で変化させた。なお、今回は燃料にメタンを用い、 $U_{2F}$  を 0.6 m/s で一定とした。このとき、燃料の流量と空気の流量 (内側空気と外側空気の流量の和) から求めた総括当量比は 0.53 ~ 10.39 であった。

### 2.2. PIV/OH-PLIF 同時計測システム

PIV/OH-PLIF 同時計測システムにより流れ場と火炎形態

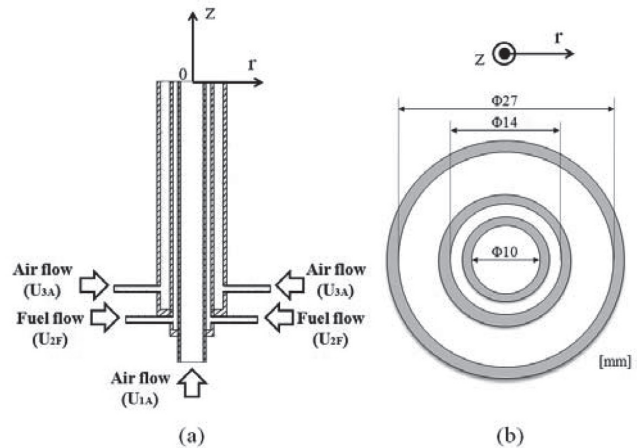


Fig.2 Schematic of the triple-port burner.

について検討した。システムの概略図を図 3 に示す。PIV と OH-PLIF を用いた計測方法については、文献[18]で説明しているため詳細は省略する。PIV で設定したダブルパルスの時間間隔は 100  $\mu$ s とし、トレーサ粒子には平均粒径 1.8  $\mu$ m の酸化マグネシウムを用いた。OH-PLIF の励起波長は 283.2 nm である。2 つのレーザー光は同一の平面を通過するように向かい合う形で火炎に照射される。流れ場と OH 蛍光強度の同時計測は 10 Hz で行った。PIV および OH-PLIF におけるそれぞれの計測領域を図 4 に示す。PIV の計測領域は撮影範囲を  $-26.7$  mm  $\leq r \leq 26.7$  mm,  $0$  mm  $\leq z \leq 40$  mm とした。また、流速の算出を行う検査領域は 533  $\mu$ m  $\times$  533  $\mu$ m とした。OH-PLIF の計測領域は、 $-20$  mm  $\leq r \leq 20$  mm,  $0$  mm  $\leq z \leq 40$  mm とした。このときの解像度は 39.1  $\mu$ m/pixel である。なお、どちらの撮影領域も燃焼器の中心軸が画像の中央にくるよう設定した。ただし、浮き上がり火炎がかなり下流に形成される場合は画像の高さを  $10$  mm  $\leq z \leq 50$  mm, または、 $20$  mm  $\leq z \leq 60$  mm に設定した。

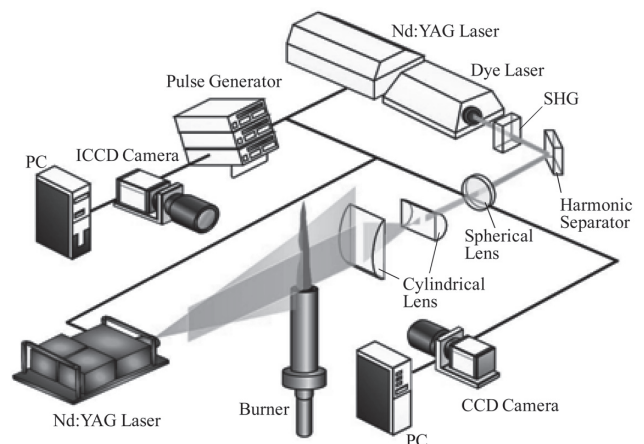


Fig.3 Experimental setup in simultaneous PIV/OH-PLIF.

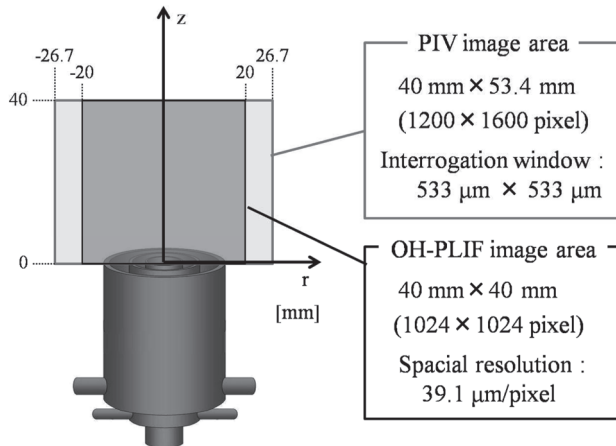


Fig.4 Image area in PIV/OH-PLIF system.

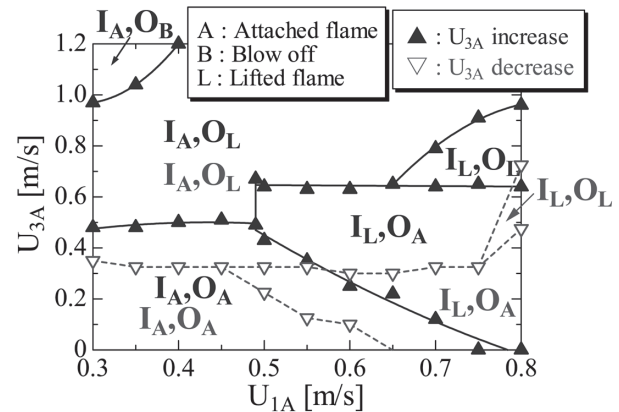
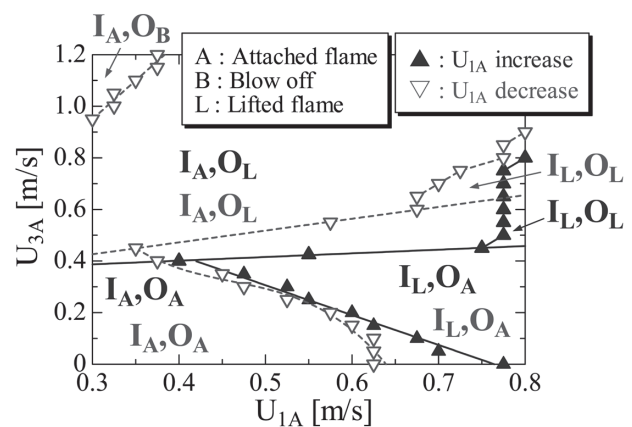
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. ヒステリシス挙動

噴流火炎では付着火炎と浮き上がり火炎の2つの火炎形態が見られるが、もう一方の火炎形態に遷移する場合にはヒステリシスの挙動を示すことが多くの浮き上がり火炎で確認されている[18-20]。すなわち、火炎の浮き上がり、もしくは火炎の再付着には、それぞれの火炎形態に遷移する前の履歴が影響する。本実験でも、同様な現象が見られるかどうかを確認するために、 $U_{2F}$  を 0.6 m/s で一定とし、 $U_{1A}$  と  $U_{3A}$  の増減の仕方を変えることにより三重管バーナの浮き上がり火炎および付着火炎に遷移する流速を調べた。

$U_{1A}$  を一定にして  $U_{3A}$  を変化させたときの火炎構造位相図を図5に、 $U_{3A}$  を一定にして  $U_{1A}$  を変化させたときの火炎構造位相図を図6に示す。ここで、IはInnerの略で内側火炎、OはOuterの略で外側火炎を意味する。空気流速を増加させて火炎形態が遷移したときの流速を三角で表し、空気流速を減少させて火炎形態が遷移したときの流速を逆三角で表している。図5を見ると、 $U_{3A}$  を増加させた場合より減少させた場合の方が火炎形態の遷移点が下側にプロットされている。すなわち、 $U_{3A}$  を減少させた場合は、増加させた場合よりもさらに小さい  $U_{3A}$  に設定しないと別の火炎形態に遷移しないことがわかった。したがって、流速の条件を変化させる前の火炎形態を保つ傾向が見られた。また図6も同様であり、 $U_{1A}$  を減少させた場合は、増加させた場合よりもさらに小さい  $U_{1A}$  に設定しないと別の火炎形態に遷移しないことがわかる。 $U_{1A}$  と  $U_{3A}$  の変化のさせ方により火炎が浮き上がる(もしくは再付着する)流速条件が異なっており、ヒステリシスの挙動を示すことがわかった。同様の傾向はスリットバーナ[18]でも見られている。ただし、同じ燃料流速でも図1で示した4つの火炎が形成される流速条件がスリットバーナとは異なることがわかった。

このヒステリシスの挙動は、燃料と酸素の分子拡散の過

Fig.5 Phase diagram by changing  $U_{3A}$  at  $U_{2F}=0.6$  m/s.Fig.6 Phase diagram by changing  $U_{1A}$  at  $U_{2F}=0.6$  m/s.

程と速度場の構造により説明できることが指摘されている[19]。また、空気流と燃料流の流れの変動[20]もその要因の一つであると考えられおり、今回のような速度場の計測だけでなくシミュレーションも同時に行い、さらに検討していく必要があるものと思われる。

#### 3.2. 各火炎形態におけるOH蛍光画像

図7に4つの火炎形態におけるOHの蛍光画像の計測結果を示す。図7aから図7dは順に、付着火炎、内側浮き上がり火炎、外側浮き上がり火炎、二重浮き上がり火炎の結果である。二重浮き上がり火炎については、浮き上がり高さが40 mmよりも大きくなるため、計測領域を他の火炎形態よりも高い位置にして計測した。OHは燃焼場において火炎帯および既燃領域に存在するラジカルとして知られている[21-23]。そこで、OHの蛍光画像をもとに浮き上がり火炎の基部の位置を特定し、内側浮き上がり火炎と外側浮き上がり火炎の基部近傍の流れ場を調べた。

#### 3.3. 流れ場とOH蛍光強度分布

##### 3.3.1. 内側浮き上がり火炎

内側浮き上がり火炎 ( $U_{1A} = 0.7$  m/s,  $U_{3A} = 0.4$  m/s) の2次

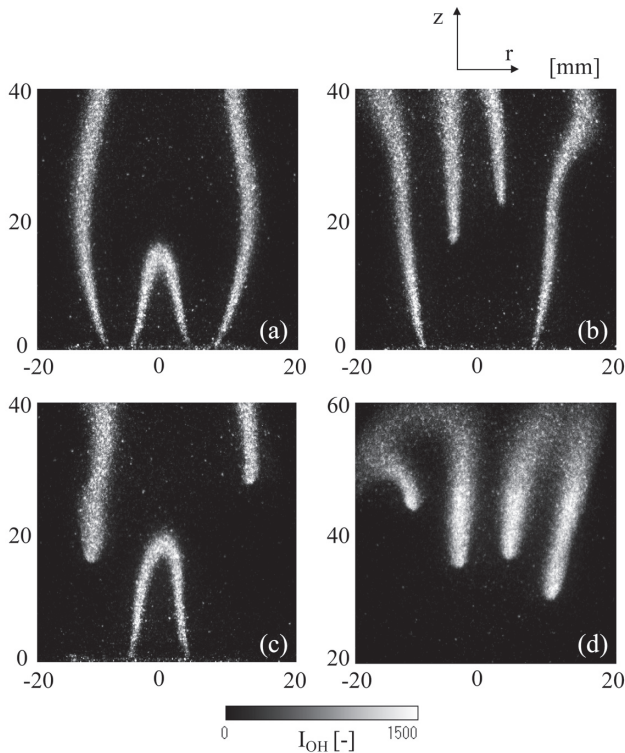


Fig.7 OH images of flames in the triple-port burner;  
 (a)  $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.4$  m/s (b)  $U_{1A}=0.7$  m/s,  $U_{3A}=0.4$  m/s  
 (c)  $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.8$  m/s (d)  $U_{1A}=0.8$  m/s,  $U_{3A}=0.7$  m/s.

元流れ場と OH 蛍光画像を図 8 に示す。内側火炎の下流域で速度が大きくなっている。また、浮き上がり火炎の基部近傍においては流れ場が大きく変化していることがわかる。

火炎基部近傍の流れ場について検討するため、浮き上がり火炎が形成される位置での一次元分布を算出した。また、このときの火炎は左右非対称であるため、画像内の右側の火炎を解析対象とした。ただし火炎基部の特定は、OH 蛍光強度の 2 次元画像をもとに行った。今回は蛍光強度のしきい値を 100 とし、この値を超えた位置を火炎基部 ( $r$  座標は  $r_f$ ,  $z$  座標は  $z_f$ ) とした。内側浮き上がり火炎の火炎基部が存在する高さ  $z_f = 20.3$  mm における軸方向速度  $V_z$  と OH の蛍光強度  $I_{OH}$  の半径方向分布を図 9 に示す。図 9 内には図 8b で示される浮き上がり火炎が存在する半径方向位置  $r_f = 3.6$  mm も示している。図 9 を見ると、外側火炎の燃焼反応により発生する OH ラジカルが存在する半径方向位置 ( $r \approx 10$  mm 付近) においては軸方向速度も大きくなっている。また、 $r = r_f$  においても内側火炎基部近傍での熱膨張の影響を受け始めているため、図 9 に示すように他の火炎帯が存在しない半径方向位置に比べて軸方向速度が大きくなっていることがわかった。

次に、同じ時刻での  $r = r_f$  における軸方向速度および OH 蛍光強度の軸方向分布を図 10 に示す。この図から、 $z = z_f$  の OH 蛍光強度が立ち上がり始める位置では軸方向速度がすでに増加している様子が確認できる。すなわち、軸方向

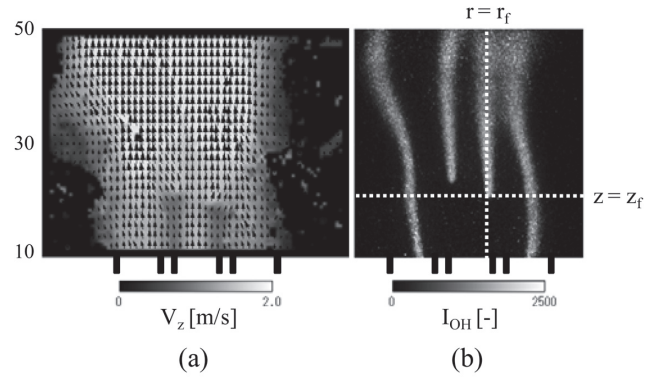


Fig.8 (a) Velocity field and (b) OH image of inner lifted/outer attached flames;  $U_{1A}=0.7$  m/s,  $U_{3A}=0.4$  m/s.

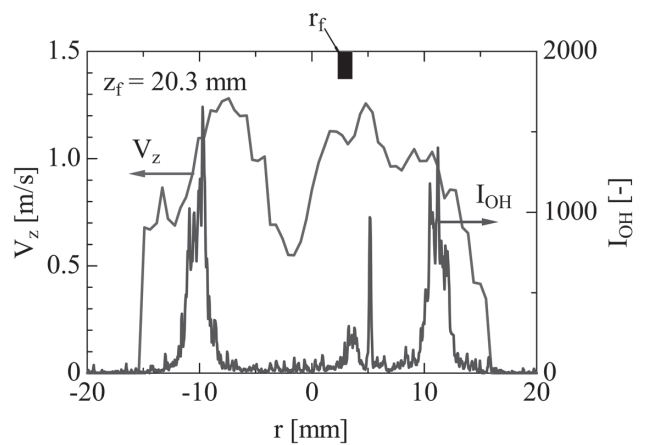


Fig.9 Radial distribution of  $V_z$  and OH fluorescence signal at  $z_f = 20.3$  mm;  $U_{1A}=0.7$  m/s,  $U_{3A}=0.4$  m/s.

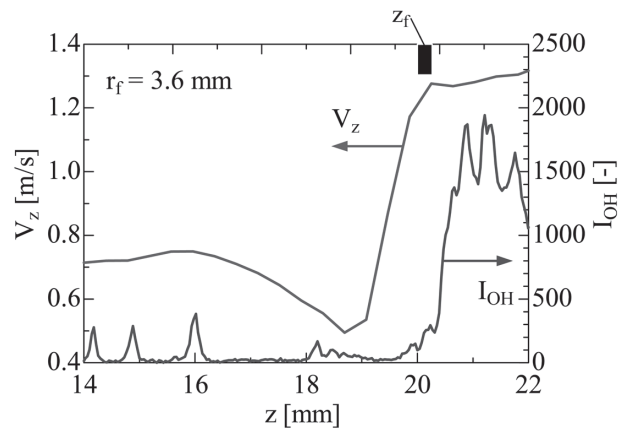


Fig.10 Axial distribution of  $V_z$  and OH fluorescence signal at  $r_f = 3.6$  mm;  $U_{1A}=0.7$  m/s,  $U_{3A}=0.4$  m/s.

速度は OH の立ち上がり位置よりも上流側で増加し始めることがわかる。これより上流での軸方向速度の変化を見ると、緩やかに減少した後いったん極小値をとっていることが確認できた。これは浮き上がり火炎の基部に近づくにつれて熱膨張の影響を受けて半径方向に流れが広がり、火炎基部に流入する流速が小さくなるためと考えられる [5,9,15]。以降では、この軸方向速度の極小値を  $V_{z,min}$ , OH

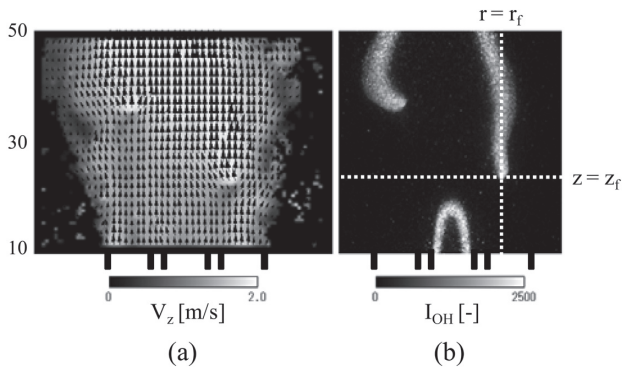


Fig.11 (a) Velocity field and (b) OH image of inner attached/outer lifted flames;  $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.8$  m/s.

の立ち上がり位置を浮き上がり高さ  $L_f$  とし、3.4 節で検討する。

### 3.3.2. 外側浮き上がり火炎

外側浮き上がり火炎 ( $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.8$  m/s) の2次元速度場と OH 蛍光画像を図 11 に示す。内側浮き上がり火炎と同様に、外側火炎の基部の上流側においては速度が小さい領域が存在している様子が確認できる。右側の浮き上がり火炎の基部が存在する高さ  $z_f = 23.2$  mm における軸方向速度および OH 蛍光強度の半径方向分布を図 12 に示す。図 12 を見ると、外側浮き上がり火炎が存在する半径方向位置  $r_f = 9.3$  mm では軸方向速度が大きい。内側浮き上がり火炎と同様に、 $r = r_f$  における軸方向速度と OH 蛍光強度の軸方向分布を調べた結果を図 13 に示す。この図からも、 $z = z_f$  における軸方向速度はすでに熱膨張の影響を受けて大きくなっていることがわかる。したがって、図 10 に示した内側浮き上がり火炎と同様に、外側浮き上がり火炎についても浮き上がり火炎基部に近づくにつれ、熱膨張により流れが半径方向に広がり、軸方向速度は緩やかに減少して一度極小値  $V_{z,min}$  をとり、その後軸方向速度は急激に増大する。

## 3.4. 軸方向速度の極小値と浮き上がり高さ

### 3.4.1. 定在火炎

浮き上がり火炎の安定化機構については、局所の流体の速度と火炎の燃焼速度のバランスによる機構、拡散火炎の消炎にもとづく機構、渦によって下流の高温既燃ガスが上流に運ばれることによる保炎機構などがある[3]。そこで、内側浮き上がり火炎と外側浮き上がり火炎について 10 Hz の PIV/OH-PLIF 同時計測を行い、浮き上がり火炎の基部近傍の極小値を調べた。 $V_{z,min}$  と  $L_f$  の時間履歴を調べた結果を図 14 と図 15 に示す。これらの図から、火炎の浮き上がり高さが時間的に変動している様子が確認できる。また、軸方向速度の極小値も時間的に変動しているが、浮き上がり高さと同じような変動ではない。したがって、浮き上がり高さが大きくなると軸方向速度の極小値も常に大きくな

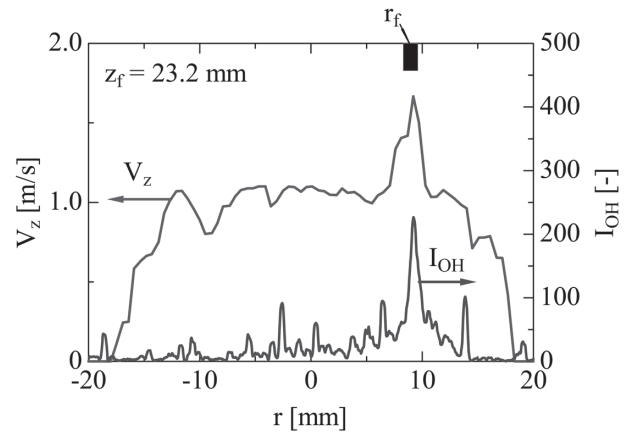


Fig.12 Radial distribution of  $V_z$  and OH fluorescence signal at  $z_f = 23.2$  mm;  $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.8$  m/s.

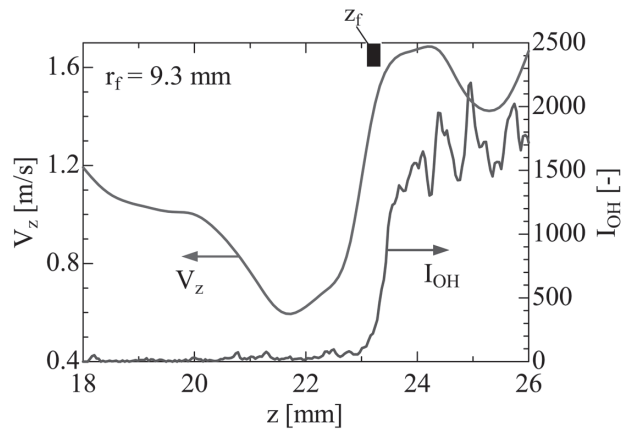


Fig.13 Axial distribution of  $V_z$  and OH fluorescence signal at  $r_f = 9.3$  mm;  $U_{1A}=0.4$  m/s,  $U_{3A}=0.8$  m/s.

るなどの単純な傾向をこの図からは確認できない。

さらに検討するため、内側と外側の浮き上がり火炎について、 $L_f$  と  $V_{z,min}$  の関係を図 16 に示す。このときの  $V_{z,min}$  の平均値を図内に内側浮き上がり火炎については破線で示し、外側浮き上がり火炎については実線で示している。この図から、 $L_f$  が大きくなると  $V_{z,min}$  も増加しているように見えるが、変動が大きいため明確な関係を得ることはできない。 $V_{z,min}$  の平均値は、内側浮き上がり火炎において 0.59 m/s、外側浮き上がり火炎において 0.80 m/s となり、どちらも室温におけるメタン-空気層流予混合火炎の最大燃焼速度である 0.39 m/s より大きいことがわかった。浮き上がり火炎近傍の流れが伸長流れ場になっているためであると考えられる[24,25]が、下流に位置する浮き上がり火炎に流入する燃料と空気が予熱されている可能性もあるため、今後検討する必要がある。

$U_{1A}$  を 0.4 m/s と 0.7 m/s とし、 $U_{3A}$  を 0.4 m/s から 1.0 m/s まで 0.1 m/s ずつ増加させたときの各流速条件における定在火炎について、PIV/OH-PLIF 同時計測を行い、各流速条件ごとに 30 組の同時計測結果から浮き上がり高さと同

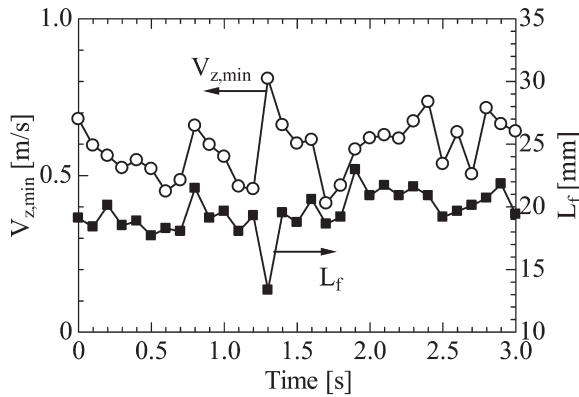


Fig. 14 Time variation of liftoff height and minimum axial velocity for inner lifted/outer attached flames;  $U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$ ,  $U_{3A} = 0.4 \text{ m/s}$ .

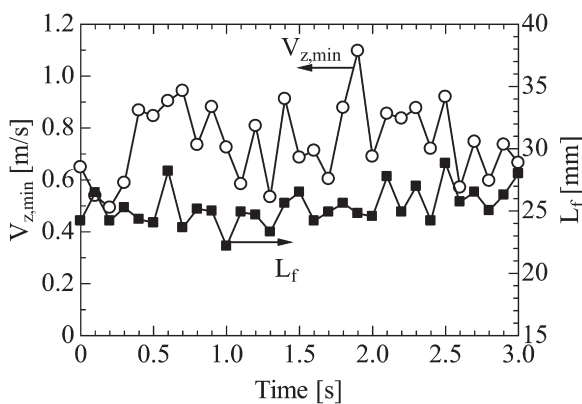


Fig. 15 Time variation of liftoff height and minimum axial velocity for inner attached/outer lifted flames;  $U_{1A} = 0.4 \text{ m/s}$ ,  $U_{3A} = 0.8 \text{ m/s}$ .

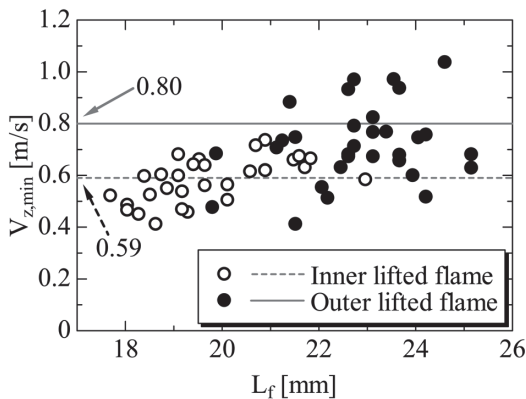


Fig. 16 Liftoff height and minimum axial velocity;  $U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$ ,  $U_{3A} = 0.4 \text{ m/s}$  and  $U_{1A} = 0.4 \text{ m/s}$ ,  $U_{3A} = 0.8 \text{ m/s}$ .

方向速度の極小値の平均値を算出した結果を図 17 に示すが、それぞれの変数に平均値の意味の横棒 (バー) を文字の真上に付けている。図 17a に  $U_{1A} = 0.4 \text{ m/s}$  の場合の結果、図 17b に  $U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$  の場合の結果をそれぞれ示している。これらの図を見ると、 $L_f$  の平均値と  $V_{z,min}$  の平均値の間には明確な相関があることがわかる。すなわち、浮き上がり高さの平均値が大きい値をとると軸方向速度の極小値の平均値も大きくなり、両者には線形的な関係があるとい

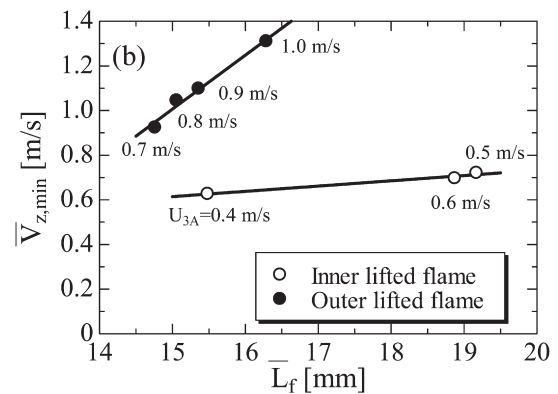
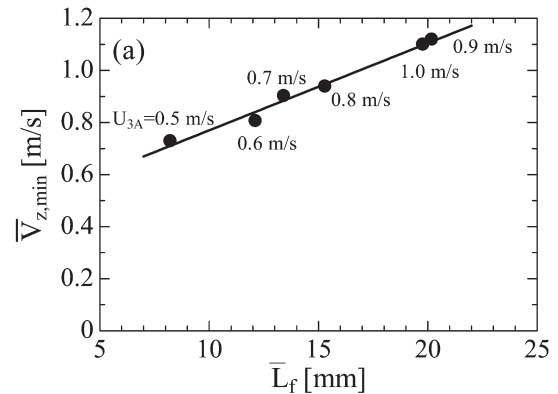


Fig. 17 Average of liftoff height and minimum axial velocity for  $U_{3A} = 0.4 \sim 1.0 \text{ m/s}$ ; (a)  $U_{1A} = 0.4 \text{ m/s}$  and (b)  $U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$ .

える。ただし、 $U_{3A}$  を増加させるとこれらの値が一律に増加するわけではない。また、同じ浮き上がり高さで比較すると、外側火炎のほうが内側火炎より軸方向速度の極小値は大きいことがわかった。

### 3.4.2. 非定在火炎

ここでは、流速の条件を変化させて、火炎形態が遷移する非定在火炎の流れ場と浮き上がり高さについて検討する。 $U_{1A}$  を  $0.6 \text{ m/s}$  一定として、 $U_{3A}$  を増加させた場合の検討を行った。8 秒間で  $U_{3A}$  を  $0.5 \text{ m/s}$  から  $0.8 \text{ m/s}$  まで変化させたので、流速の時間変化率は  $0.0375 \text{ m/s}^2$  である。今回は内側浮き上がり火炎から外側浮き上がり火炎へと遷移する流速条件、すなわち内側火炎が再付着する条件で検討した。計測開始時刻を  $t = 0 \text{ s}$  としたときの内側および外側火炎の  $L_f$  の  $t = 0 \sim 8 \text{ s}$  における時間変化を図 18 に示す。これらの図から、外側の空気流速を増加させるにつれ外側火炎は下流に流され、時刻  $t = 5 \text{ s}$  において内側火炎よりも下流側で形成された。その後、外側火炎の浮き上がり高さは増加し、内側火炎の浮き上がり高さは急激に減少して再付着した。同様の現象が数値計算[17]でも確認されている。

このときの  $V_{z,min}$  と  $L_f$  の関係を調べた。その結果を図 19 に示す。外側火炎の浮き上がり高さが大きくなると  $V_{z,min}$  も大きくなる傾向があることを確認した。一方、内側火炎の浮き上がり高さが小さくなるにつれ、軸方向速度

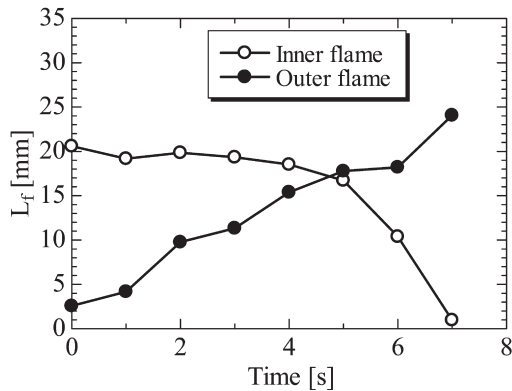


Fig.18 Time variation of liftoff height by increasing  $U_{3A}$  from 0.5 m/s to 0.8 m/s;  $U_{1A} = 0.6$  m/s,  $t = 0 \sim 8$  s

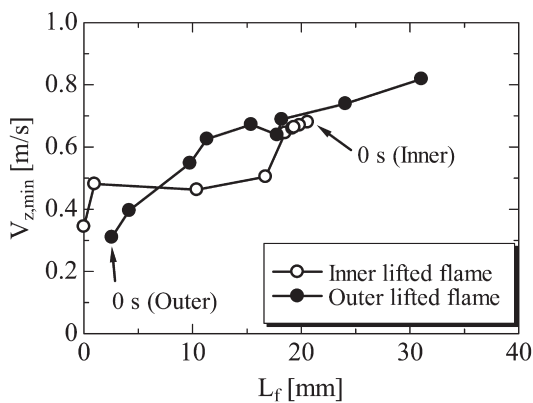


Fig.19 Time variation of liftoff height and minimum axial velocity by increasing  $U_{3A}$  from 0.5 m/s to 0.8 m/s;  $U_{1A} = 0.6$  m/s,  $t = 3 \sim 8$  s

の極小値も小さくなった。すなわち、どちらの浮き上がり火炎も下流に形成されるほど、軸方向速度の極小値は大きくなることがわかった。

#### 4. 結言

三重管バーナにより形成された浮き上がり火炎を対象に、PIV/OH-PLIF 同時計測を行い、定在および非定在の浮き上がり火炎の基部近傍での流れ場と浮き上がり高さについて実験的に検討した。これにより、以下のことがわかった。

- (1) 内側と外側の空気流速の増減の仕方を変えると、流速を変化させる前の条件の火炎形態を保つような傾向が見られ、浮き上がり火炎および付着火炎に遷移する流速が変わる。すなわち、ヒステリシスの挙動を示す。ただし、同じ燃料流速でも三重管バーナとスリットバーナではそれぞれの火炎が形成される流速条件が異なる。
- (2) 内側浮き上がり火炎および外側浮き上がり火炎の火炎基部近傍の軸方向分布を調べたところ、OHの蛍光強度の立ち上がり位置よりも上流側で軸方向速度は極小値をとる。また、軸方向速度の極小値の平均値は、室温

におけるメタン-空気層流予混合火炎の最大燃焼速度よりも大きい。

- (3) 定在する内側と外側の浮き上がり火炎を対象に浮き上がり高さや軸方向速度の極小値の関係を調べたところ、浮き上がり高さが大きいほど浮き上がり火炎基部近傍の軸方向速度の極小値は線形的に増加する。ただし、同じ浮き上がり高さで比較すると、外側火炎のほうが内側火炎より軸方向速度の極小値は大きい。
- (4) 内側浮き上がり火炎から外側浮き上がり火炎に遷移する非定在火炎の流れ場と浮き上がり高さについて検討したところ、内側火炎および外側火炎の浮き上がり高さが大きいほど、軸方向速度の極小値は大きくなる。

今後、単一の浮き上がり火炎との違いや2つの火炎の干渉のメカニズムの解明を数値シミュレーションにより行っていく予定である。

#### References

1. S. H. Chung, B. J. Lee, *Combust. Flame* 86: 62-72 (1991).
2. B. J. Lee, J. S. Kim, S. H. Chung, *Proc. Combust. Inst.* 25: 1175-1181 (1994).
3. Y. Mizobuchi, *Journal of the Combustion Society of Japan* 52-161: 206-212 (2010).
4. C. M. Muller, H. Breitbach, N. Peters, *Proc. Combust. Inst.* 25: 1099-1106 (1994).
5. H. Yamashita, A. Tada, *Journal of the Japan Society Computational Fluid Dynamics* 11-4: 137-148 (2003).
6. F. Takahashi, Q. J. Schmoll, *Proc. Combust. Inst.* 23: 677-683 (1990).
7. Y. S. Ko, S. H. Chung, *Combust. Flame* 118: 151-163 (1999).
8. M. Hirota, A. Matsuo, M. Mizomoto, *JSME Trans. B.* 66-646: 1557-1564 (2000).
9. J. Boulanger, L. Vervisch, *Combust. Flame* 130: 1-14 (2002).
10. M. Hirota, A. Matsuo, M. Mizomoto, *JSME Trans. B.* 69-677: 177-184 (2003).
11. Y. Nagai, M. Hirota, M. Mizomoto, *JSME Trans. B.* 70-691: 780-788 (2004).
12. M. S. Mansour, *Proc. Combust. Inst.* 28: 771-779 (2004).
13. A. Wason, W. F. Carnell, Jr., M. W. Renfro, *Combust. Sci. and Tech.* 178: 789-811 (2006).
14. J. Buckmaster, R. Weber, *Proc. Combust. Inst.* 26: 1143-1149 (1996).
15. H. Yamashita, S. Tsutsumitani, N. J. Choi, *JSME Trans. B.* 65-630: 775-782 (1999).
16. K. Yamamoto, S. Kato, Y. Isobe, N. Hayashi, H. Yamashita, *Proc. Combust. Inst.* 33: 1195-1201 (2011).
17. K. Yamamoto, Y. Isobe, N. Hayashi, H. Yamashita, *Journal of the Combustion Society of Japan* 54-170: 285-290 (2012).
18. Y. Oku, K. Yamamoto, N. Hayashi, H. Yamashita, *Journal of*

- the Combustion Society of Japan* 55-174: 395-402 (2012).
19. S. R. Gollahalli, O. Savas, R. F. Huang, J. L. R. Azara, *Proc. Combust. Inst.* 21 1463-1471 (1986).
  20. T. Nishimura, K. Kunitsugu, K. Morio, *Combust. Flame* 159-4: 1499-1502 (2012).
  21. R. Horie, A. Ito, M. Nishioka, X. L. Zhu, T. Takeno, *JSME Trans. B.* 65-629: 54-61 (1999).
  22. K. Yamamoto, T. Isayama, N. Hayashi, H. Yamashita, *Journal of the Combustion Society of Japan* 49: 181-186 (2007).
  23. K. Yamamoto, M. Ozeki, N. Hayashi, H. Yamashita, *Proc. Combust. Inst.* 32: 565-590 (2009).
  24. C. K. Law, *Proc. Combust. Inst.* 22: 1381-1402 (1988).
  25. N. Hayashi, H. Yamashita, *Journal of the Combustion Society of Japan* 50-154: 345-352 (2008).