

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

PIV/OH-PLIF 同時計測によるスリットバーナの燃焼場の検討

A Study on Combustion Field in a Slit Burner by PIV/OH-PLIF Simultaneous Technique

奥 洋平*・伊藤 雄貴・山本 和弘・林 直樹・山下 博史

OKU, Yohei*, ITO, Yuki, YAMAMOTO, Kazuhiro, HAYASHI, Naoki, and YAMASHITA, Hiroshi

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

2013年3月4日受付; 2013年6月24日受理/Received 4 March, 2013; Accepted 24 June, 2013

Abstract : Diffusion combustion (non-premixed combustion), which is formed by supplying fuel and oxidizer separately, is used in many practical combustors. However, we cannot control the flame temperature, because the diffusion flame is formed in the region at the stoichiometric condition. Hence, it is difficult to reduce the combustion products such as soot and NO_x. So far, we have investigated 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. Then, by changing 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. For further study, we investigated the slit burner which has air nozzles on both sides of a fuel nozzle, which is similar to the triple port burner. In experiments, we measured the flow field and flame structure by PIV/OH-PLIF simultaneous measurement. We also investigated hysteresis characteristic of the lifted flame in the slit burner.

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

1. 緒言

燃料と酸化剤を別々に供給する拡散燃焼(非予混合燃焼)は、火災爆発に対する安全性が高い燃焼方式であるために、実用燃焼器に広く用いられている[1]。しかしながら、拡散燃焼では量論的位置で火炎が形成されるため、火炎温度を制御できず、すすや NO_x といった燃焼排出物の低減が困難である[2]。一般に、燃料ノズルから火炎が浮き上がる場合に形成される火炎を浮き上がり火炎と呼ぶが、拡散燃焼においてこの浮き上がり火炎が形成される場合、火炎上流部において燃料と酸化剤の一部が混合する[3]。これにより、火炎の最高温度が低下し Zeldovich 機構に起因する Thermal NO_x が抑制される[4-6]。また、燃料と酸化剤の予混合化により、希薄および過濃の予混合火炎と拡散火炎のトリプルフレームができるなど興味深い現象が見られる[7-10]。このトリプルフレームは乱流拡散火炎における重要な火炎要素となることが指摘されており[11]、様々な実験[10,12-19]と数値計算[7-9,11,20,21]による研究が行われてきた。

たとえば、Ko ら[13]は燃料濃度勾配の変化や火炎伸長が

先端火炎の伝播速度に与える影響について言及しており、燃料濃度勾配と火炎伸長の増加に伴って先端火炎の伝播速度が減少することを指摘した。また、Yamashita ら[8,21]は、Triple flame 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、火炎基部の伝播速度は燃焼速度を大きく上回ることを指摘した。Mansour [16]は、スリットバーナを用いた単一の浮き上がり火炎を対象に、PIV/OH-PLIF 同時計測を用いて火炎基部近傍における流速について検討を行っている。これによると、浮き上がり火炎の先端部に近づくにつれて流速が減少し、火炎を通過すると流速が急速に増加することを報告した。

これまでに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を実験と数値計算をもとに検討した[22-24]。三重管バーナでは、燃料と空気の境界が2つ存在するため、火炎も内側と外側に2つ形成される。燃料と空気の流速条件により浮き上がり火炎を含む4つの火炎形態が見られることがわかっている。図1に火炎の直接写真を示す。両方の火炎がバーナに付着した付着火炎(Attached flames, 図1a)、内側の火炎のみが浮き上がる内側浮き上がり火炎 (Inner lifted/outer attached flames, 図1b)、

* Corresponding author. E-mail: oku.yohei@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

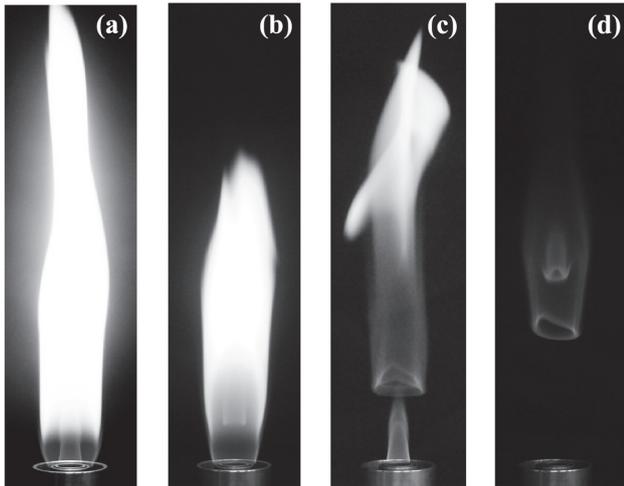


Fig. 1 Photographs of flames in a triple port burner;
 (a) $U_{1A}=0.4$ m/s, $U_{3A}=0.2$ m/s (b) $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.4$ m/s
 (c) $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.7$ m/s (d) $U_{1A}=0.8$ m/s, $U_{3A}=0.7$ m/s

外側の火炎のみが浮き上がる外側浮き上がり火炎 (Inner attached/outer lifted flames, 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 (Twin lifted flames, 図 1d) の 4 つの火炎形態が存在する。付着火炎では大部分が拡散火炎であるのに対し, 火炎が浮き上がると火炎先端付近に希薄予混合火炎, 過濃予混合火炎, 拡散火炎からなるトリプルフレームが存在することを確認した[23,24]。また, 火炎が浮き上がると, すすと NO_x の排出量が大きく減少することがわかっている。

一方, 矩形型の噴出口を有するスリットバーナにより形成した浮き上がり火炎の研究はこれまでに行われている [19,25-27]。そこで本研究では, 三重管バーナと同様, 燃料ノズルの両側に空気ノズルを配置したスリットバーナを製作し実験を行った。これによりスリットバーナでは 5 つの矩形型噴出口を有することになる。三重管バーナではノズル出口が円形であり, 噴出される燃料と空気の境界も円形の形状となるため曲率を持つ。一方, スリットバーナでは燃料と空気のノズルを平行に配置されており, 隣り合う燃料と空気を一次的に観察することができる。今回は, このスリットバーナ上に形成された浮き上がり火炎を対象に PIV/OH-PLIF 同時計測を行うことで, 流れ場と火炎形状を可視化し, 浮き上がり挙動について検討した。

2. 実験装置および実験方法

2.1. スリットバーナ

図 2 と図 3 にスリットバーナの概略と座標系を示す。図 2 はスリットバーナの断面図であり, 図 3 はスリットバーナのノズル出口の大きさを示している。図で示したように, バーナは 2 つの燃料ノズルと 3 つの空気ノズルの合計 5 つの矩形型のノズルを持つ。座標系は, 中央の空気ノズルの中心を原点とし, 鉛直上方を z 軸, それに直交する方向を

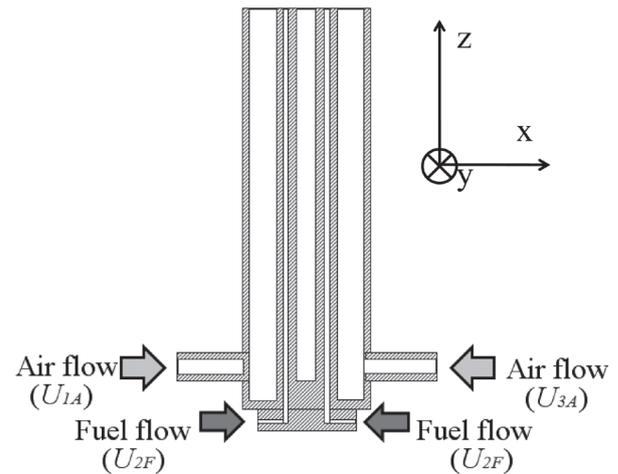


Fig. 2 Schematic of the slit burner

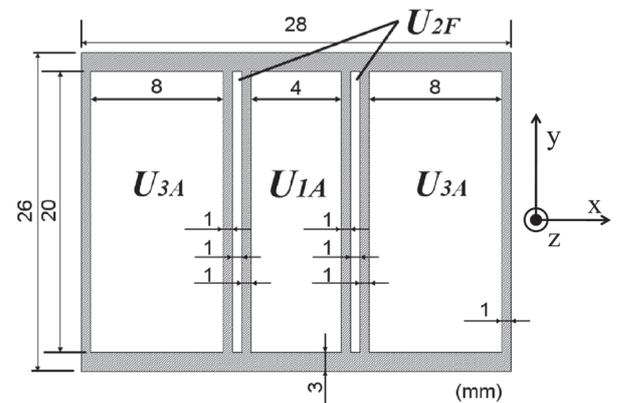


Fig. 3 Nozzle size of the burner and definitions of fuel and air flow velocities

それぞれ x 軸, y 軸とした。中央の空気ノズルの空気流速 (内側空気) を U_{1A} , それを両側から挟むように配置した燃料ノズルの燃料流速を U_{2F} , そのさらに外側の空気ノズルの空気流速 (外側空気) を U_{3A} とする。これらの流速は, 各ノズル出口における断面平均流速である。実験では燃料流速 U_{2F} を 0.6 m/s で一定とし, U_{1A} を $0.3 \sim 0.8$ m/s, U_{3A} を $0 \sim 1.2$ m/s の範囲で変化させた。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 ϕ は $0.51 \sim 9.52$ であった。燃料にはメタンを用いた。

2.2. PIV/OH-PLIF 同時計測システム

PIV/OH-PLIF 同時計測の概略図を図 4 に示す。2 つのレーザー光は同一の $x-z$ 平面になるよう向かい合う形で火炎に照射される。今回の実験では, 流れ場と OH 蛍光強度の同時計測をすべて 10 Hz で行った。以下に, PIV と OH-PLIF 法について詳しく説明する。

2.2.1. PIV システム

PIV のシステムは, ダブルパルス YAG レーザ (Quantel

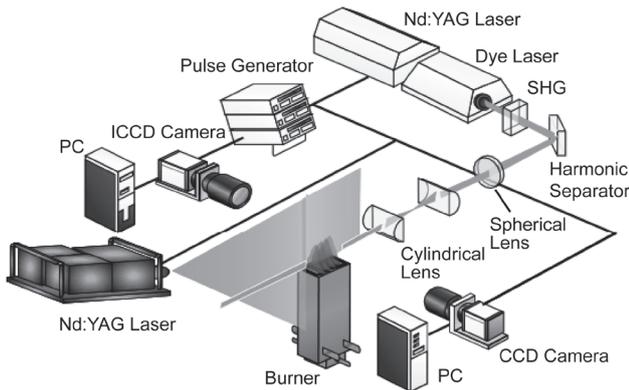


Fig. 4 Experimental setup in simultaneous PIV/OH-PLIF

製 Twins BSL200) と CCD カメラ (JAI 製 CV-M2) から構成される。レーザとカメラの制御は 2 台のデジタルディレイジェネレータ (SRS 製 DG645) を用いて行い、撮影した 2 枚の画像から流速を算出する。レーザの波長は 532 nm であり、シート光にして二次元計測を行った。シートの厚さは約 1 mm であり、スリットバーナの中央断面 ($y=0$) を通るように照射した。CCD カメラのレンズにはバンドパスフィルタ (日本真空光学: 中心波長 532 nm, 半値幅 0.95 nm) を取り付け、火炎の自発光等を除去した。相関領域は 16 pixel \times 16 pixel の矩形領域とし、50% のオーバーラップをとって計算した。このときの検査領域の大きさは 400 $\mu\text{m}\times$ 400 μm である。なお、トレーサ粒子として酸化マグネシウムを用いた。平均粒子径は約 1.9 μm である[28]。

2.2.2. OH-PLIF システム

次に、OH-PLIF システムについて説明する。OH ラジカルの励起には Nd:YAG レーザ (Spectra Physics: PRO-230) の第二高調波 (532 nm) をポンプレーザとした色素レーザ (Spectra Physics: CSTR-SE) を使い、SHG (BBO 結晶) によりさらに倍波して励起光とした。レーザ光はハーモニックセパレータにより可視光成分を減衰させた後、1 枚の球面レンズ (焦点距離 900 mm) と 2 枚のシリンドリカルレンズにより平行なシートとし、二次元計測に用いた。本研究では、温度依存性の小さい電子エネルギー遷移における (1,0) バンド吸収線の $Q_1(7)$ を励起線とした。この場合の励起光の波長は 283.2 nm である[29-31]。蛍光画像は、レーザシートと垂直な方向から高速ゲートイメージンスフィア (浜松ホトニクス C4274) つき CCD カメラ (浜松ホトニクス C9164-03) を用いて取得した。イメージンスフィアの前面には、ナローバンドパスフィルタ (日本真空光学: 中心波長 307 nm, 半値幅 12 nm, 最大透過率 19.5%) と紫外用カメラレンズ (日本光学: UV Nikkor 105 mm f4.5) を取り付けており、(1,1) バンド付近の蛍光を選択的に透過させるとともに、迷光の混入を防いでいる。

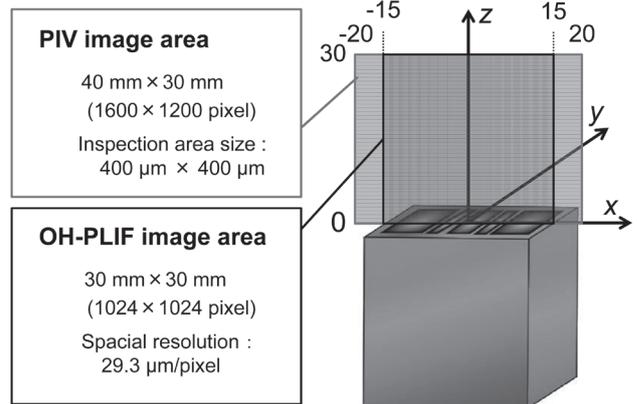


Fig. 5 Image area in PIV/OH-PLIF system

2.2.3. 計測領域

それぞれの計測領域を図 5 に示す。PIV の計測領域は画像の中心と燃焼器の中心軸が一致するように調整し、撮影範囲を $-20 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}$, $0 \text{ mm} \leq z \leq 30 \text{ mm}$ とした。カメラの画素数は 1600 pixel \times 1200 pixel であり、このときの解像度は 25.0 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。一方 OH-PLIF の撮影範囲は、 $-15 \text{ mm} \leq x \leq 15 \text{ mm}$, $0 \text{ mm} \leq z \leq 30 \text{ mm}$ とした。計測領域の大きさは 30 mm \times 30 mm であり、1024 pixel \times 1024 pixel の画素数で計測した。このときの解像度は 29.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。

3. 実験結果および考察

3.1. 火炎形態と火炎構造位相図

スリットバーナでは燃料と空気の境界が左右に 2 つずつ存在するため、燃料ノズルの両側に複数の火炎ができる。内側と外側の空気流速を変えた場合の火炎写真を図 6 に示す。内側と外側の空気流速により火炎が浮き上がるが、燃料と空気の境界にできた内側火炎と外側火炎が一部重なって見える。また、火炎が変動するため、火炎形態が明確で

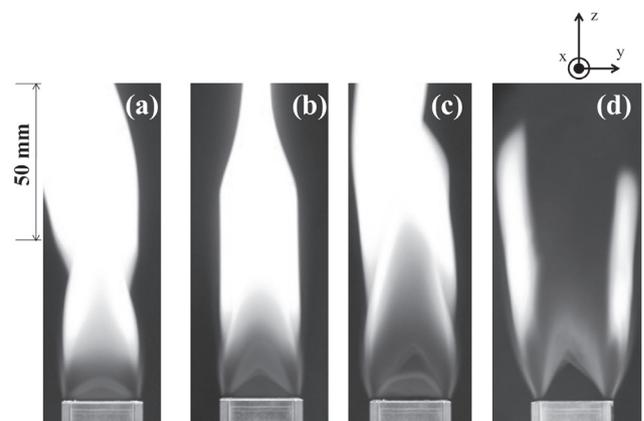


Fig. 6 Photographs of flame in a slit burner;
 (a) $U_{1A}=0.4 \text{ m/s}$, $U_{3A}=0.2 \text{ m/s}$ (b) $U_{1A}=0.6 \text{ m/s}$, $U_{3A}=0.4 \text{ m/s}$
 (c) $U_{1A}=0.6 \text{ m/s}$, $U_{3A}=0.7 \text{ m/s}$ (d) $U_{1A}=0.8 \text{ m/s}$, $U_{3A}=0.7 \text{ m/s}$

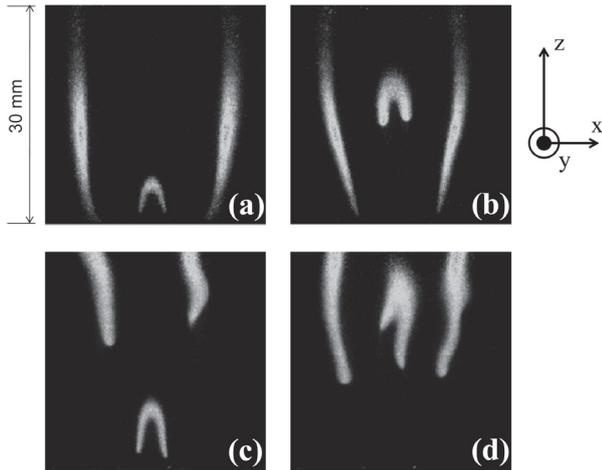


Fig. 7 OH images of flames in a slit burner; (a) $U_{IA}=0.4$ m/s, $U_{3A}=0$ m/s (b) $U_{IA}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.6$ m/s (c) $U_{IA}=0.4$ m/s, $U_{3A}=1.0$ m/s (d) $U_{IA}=0.8$ m/s, $U_{3A}=1.0$ m/s

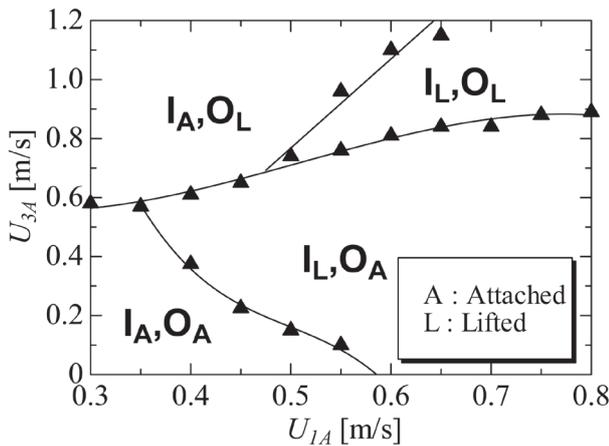


Fig. 8 Phase diagram of flames in a slit burner

はない。そこで、OH の蛍光画像から火炎の 2 次元断面を可視化した。その結果を図 7 に示す。内側と外側の火炎がバーナに付着した付着火炎 (図 7a), 内側の火炎のみが浮き上がる内側浮き上がり火炎 (図 7b), 外側の火炎のみが浮き上がる外側浮き上がり火炎 (図 7c), 両側の火炎がともに浮き上がる二重浮き上がり火炎 (図 7d) の 4 つの形態が観察されており、この傾向は三重管バーナと同様であった。

次に、それぞれの火炎形態へ遷移する過程を調べて火炎構造位相図を作成した。まず U_{IA} を 0.3 m/s から 0.8 m/s まで 0.05 m/s ごとに設定し、各条件において U_{3A} をゼロから 1.2 m/s まで増加させた。各火炎形態の範囲を調べた火炎の構造位相図を図 8 に示す。図中の I, O はそれぞれ内側、外側の火炎を表し、添え字の A, L はそれぞれ付着、浮き上がりの火炎形態を表す。 U_{IA} が比較的小さい場合、 U_{IA} を一定にして U_{3A} をゼロから増加させていくと付着火炎から外側浮き上がり火炎へと遷移した。一方、 U_{IA} が 0.35 m/s から 0.55 m/s の範囲では、 U_{3A} をゼロから増加させると、

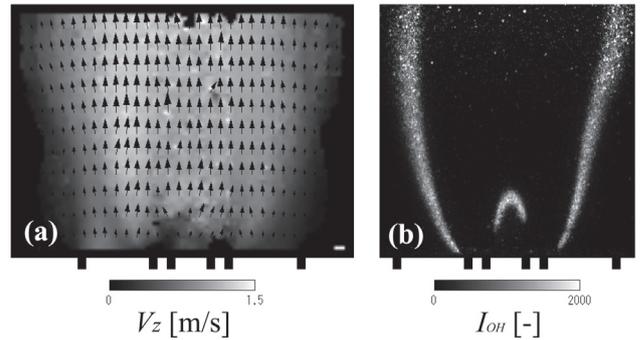


Fig. 9 Velocity field and OH image of attached flames; $U_{IA}=0.3$ m/s, $U_{3A}=0.3$ m/s

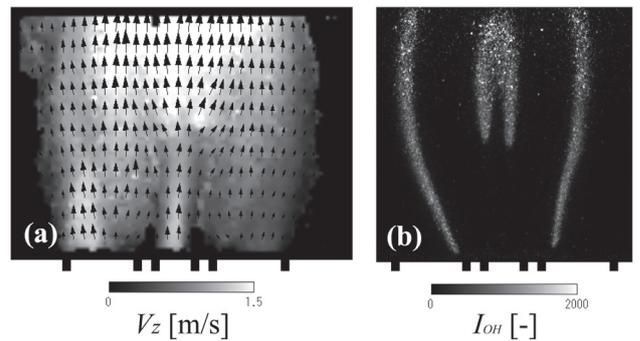


Fig. 10 Velocity field and OH image of inner lifted/outer attached flames; $U_{IA}=0.7$ m/s, $U_{3A}=0.5$ m/s

付着火炎から内側浮き上がり火炎へ遷移し、さらに U_{3A} を増加させると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。 U_{IA} が 0.55 m/s 以上では、 U_{3A} がゼロでも内側浮き上がり火炎が形成され、 U_{3A} を増加させると内側浮き上がり火炎から二重浮き上がり火炎となった。特に、 U_{IA} が 0.55 m/s から 0.6 m/s の範囲では、さらに U_{3A} を増加させると二重浮き上がり火炎から外側浮き上がり火炎へと遷移した。

3.2. 流れ場と火炎挙動

3.2.1. 付着火炎と内側浮き上がり火炎

付着火炎 ($U_{IA} = 0.3$ m/s, $U_{3A} = 0.3$ m/s) と内側浮き上がり火炎 ($U_{IA} = 0.7$ m/s, $U_{3A} = 0.5$ m/s) の瞬時の 2 次元速度場と OH 蛍光画像をそれぞれ図 9 と図 10 にそれぞれ示す。図にはリムの位置を示している。PIV と OH-PLIF を同時に計測した結果の一例を示しており、 V_z は軸方向速度を、 I_{OH} は OH の蛍光強度を表している。図 11 で再度検討するが、付着火炎では燃焼反応による熱膨張が見られ、下流に行くほど速度が加速される。これに対して内側浮き上がり火炎では、内側の火炎が浮き上がっているため、内側火炎の上流部の温度は低い。これにより、内側火炎の上流部では付着火炎よりも速度が小さくなっていった。

次に、火炎が浮き上がっている位置での流れ場について詳細に検討を行う。右側の内側浮き上がり火炎が存在する

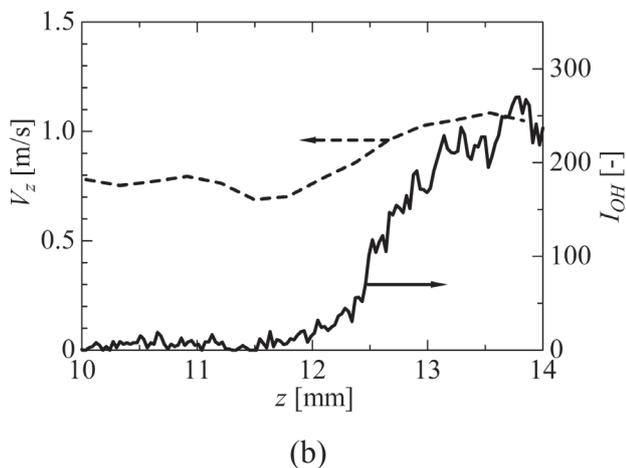
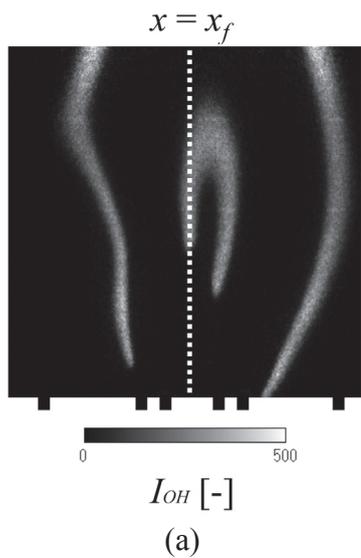


Fig. 11 (a) OH image of inner lifted/outer attached flames, (b) axial distribution of V_z and OH intensity; $U_{1A}=0.7$ m/s, $U_{3A}=0.5$ m/s

位置 $x_f=0$ mm (図 11a) における軸方向速度の軸方向分布を図 11b に示す. これによると, 軸方向速度は火炎に向かって緩やかに減少し, 火炎直前の予熱帯付近では熱膨張により加速される様子がわかる[24]. 浮き上がり火炎では, 火炎基部の速度が局所の燃焼速度に釣り合うことが指摘されている[3,9,10]が, 火炎基部近傍の軸方向速度の最小値を求めたところ 0.67 m/s であった.

同時計測を 10 Hz で行い, 連続した 20 枚の画像をもとに内側火炎の浮き上がり高さと同軸方向速度の最小値を求めた結果を図 12 に示す. これによると, 火炎の浮き上がり高さと同軸方向速度の最小値はある程度変動するものの, 両者の間には明確な相関は存在していない. 軸方向速度の最小値の平均値を算出すると 0.75 m/s であり, 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 (0.39 m/s) より大きくなった. これは, 対象とした場が伸長を受けており[32], また, 外側火炎により予混合気が予熱されたため[33]であると思われる.

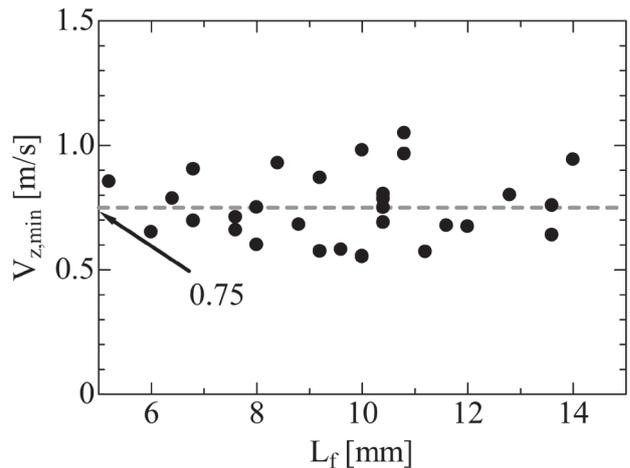


Fig. 12 Lift-off height and minimum axial velocity at flame base

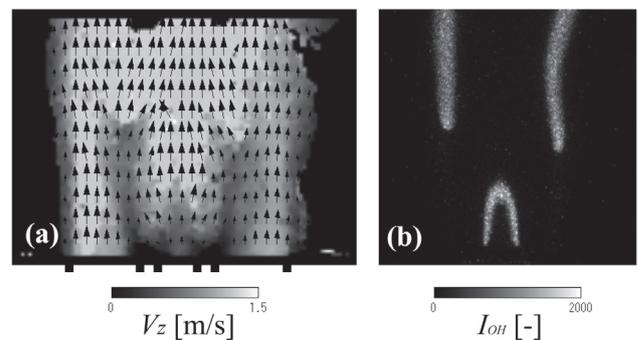


Fig. 13 Velocity field and OH image of inner attached/outer lifted flames; $U_{1A}=0.3$ m/s, $U_{3A}=0.8$ m/s

3.2.2. 外側浮き上がり火炎

次に, 外側浮き上がり火炎について調べた. 図 13 に外側浮き上がり火炎 ($U_{1A} = 0.3$ m/s, $U_{3A} = 0.8$ m/s) の PIV/OH-PLIF 同時計測の結果を示す. これによると, 内側に存在する付着火炎により流速が増加しており, 外側に存在する火炎を通過する際にも熱膨張により流速がさらに増加することになる.

速度場に関して詳細に検討するため, 外側浮き上がり火炎基部近傍の速度場について検討した. 図 14 に, OH の蛍光画像と外側浮き上がり火炎が形成されている高さ z_f における軸方向速度の x 方向分布の一例を示す. このときの火炎は左右非対称であるため, 右側の浮き上がり火炎の基部の高さである $z_f=8.8$ mm の位置において検討した. 浮き上がり火炎が形成される $x_f=5.8$ mm において軸方向速度の最小値を求めたところ, 0.78 m/s であった. したがって, 図 12 で示した内側浮き上がり火炎と同様, 火炎基部上流の軸方向速度の最小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大きくなった.

連続した 20 枚の画像をもとに外側火炎の浮き上がり高さと同軸方向速度の最小値を求めた. その結果を図 15 に示す. 図 12 の内側浮き上がり火炎と同様, 外側火炎でも浮

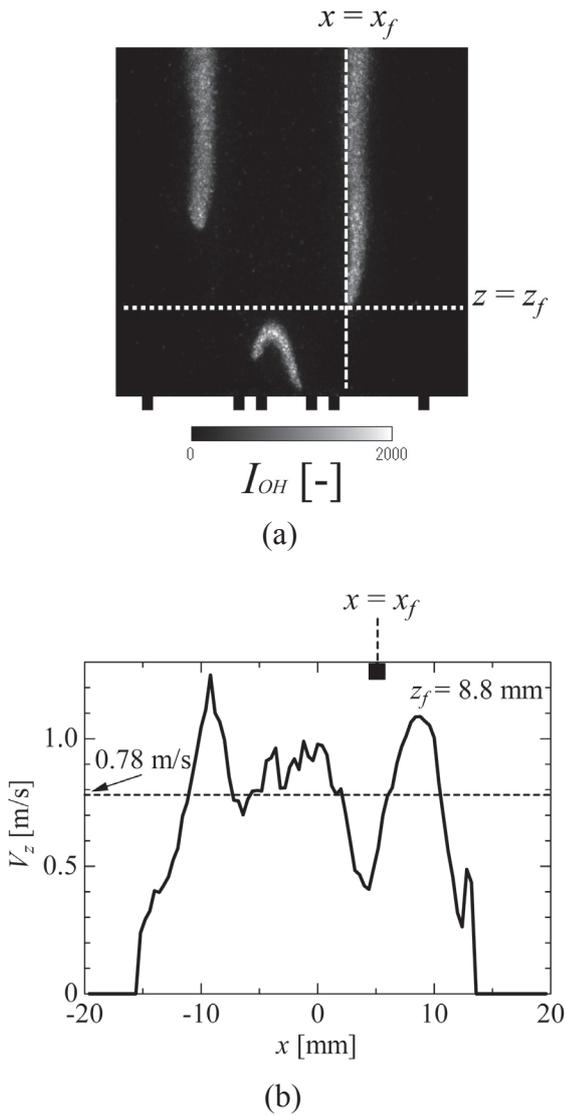


Fig. 14 (a) OH image (b) radial distribution of V_z of inner attached/outer lifted flames at $z=8.8$ mm; $U_{1A}=0.3$ m/s, $U_{3A}=0.8$ m/s

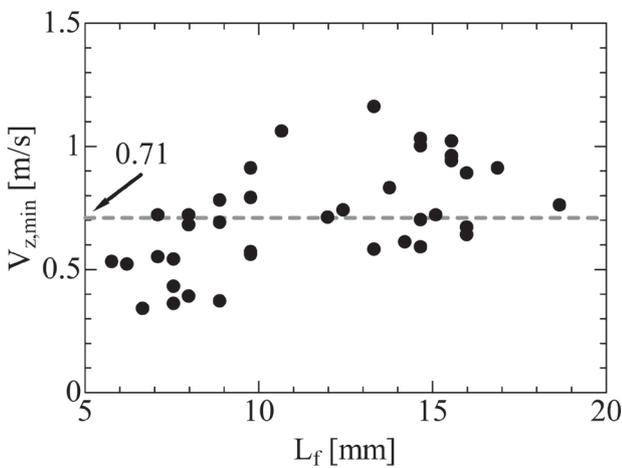


Fig. 15 Lift-off height and minimum axial velocity at flame base

き上がり高さ と軸方向速度の最小値の間には明確な相関は存在しない。その平均値を算出すると、0.71 m/sであった。したがって、内側火炎と外側火炎のいずれの場合も浮き上がり火炎基部における軸方向速度の最小値は、メタン-空気層流予混合火炎の最大燃焼速度より大きいことがわかった。

3.3. ヒステリシス挙動の検討

火炎が付着火炎から浮き上がりに遷移する際にはヒステリシスの挙動[34-36]を示すことが同軸バーナの拡散火炎で確認されている。そこで U_{2F} を 0.60 m/s 一定とし、 U_{1A} と U_{3A} の変化の仕方を変えることによりスリットバーナの浮き上がり挙動を調べた。 U_{1A} と U_{3A} を変化させる範囲については 3.1 節で示した火炎構造位相図と同じ $U_{1A} = 0.3\sim 0.8$ m/s, $U_{3A} = 0\sim 1.2$ m/s とした。

U_{1A} を一定にして U_{3A} を変えたときの火炎構造位相図を図 16 に、 U_{3A} を一定にして U_{1A} を変えたときの火炎構造位相図を図 17 に示す。空気流速を増加させて付着火炎から浮き上がり火炎に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浮き上がり火炎から付着火炎に遷移したときの流速を逆三角で表している。図 16 を見ると、 U_{3A} を増加させた場合より、 U_{3A} を減少させた場合は火炎形態の遷移点が下側にプロットされている。また図 17 を見ると、 U_{1A} を増加させた場合より、 U_{1A} を減少させた場合の方が左側にプロットされている。

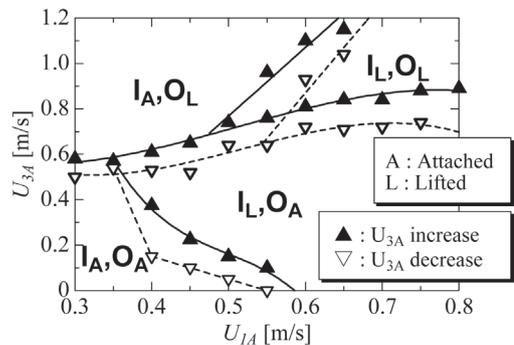


Fig. 16 Phase diagram by changing U_{3A} ; $U_{2F}=0.6$ m/s

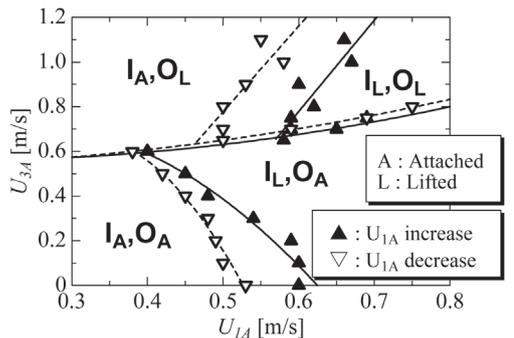


Fig. 17 Phase diagram by changing U_{1A} ; $U_{2F}=0.6$ m/s

以上により, U_{1A} と U_{3A} のどちらかを一定にしても火炎が浮き上が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. 流速条件を変化させたとき前の条件の火炎形態を保ち, 例えば, 浮き上がり火炎が再度付着火炎にもどりにくくなる傾向があると言える. このようなヒステリシス挙動の原因として, 燃料および空気の温度やバーナ本体の温度の影響も含め, さらに検討していく必要があるものと思われる.

4. 結言

スリットバーナにより形成された火炎の PIV/OH-PLIF 同時計測を行い, 浮き上がり火炎の基部近傍の流れ場と火炎挙動について検討を行った. これにより, 以下の結論を得た.

- (1) 内側と外側の空気流速を変化させると, 三重管バーナと同様, 両側の火炎がともにバーナに付着した付着火炎, 内側の火炎のみが浮き上がる内側浮き上がり火炎, 外側の火炎のみが浮き上がる外側浮き上がり火炎, 両側の火炎がともに浮き上がる二重浮き上がり火炎の4つの火炎形態が存在する.
- (2) 内側浮き上がり火炎の基部における軸方向速度の最小値の平均値は 0.75 m/s であり, また, 外側浮き上がり火炎の基部における軸方向速度の最小値の平均値は 0.71 m/s である. これらの値はいずれ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より大きい.
- (3) U_{1A} と U_{3A} のどちらかを一定にしても一方の流速を変え, 付着火炎から浮き上がり火炎へ遷移する流速を調べたところ, どちらかを一定にするかで遷移点異なる. また, 流速を増加あるいは減少させるという変化の仕方によっても付着火炎と浮き上がり火炎の境界線が変わり, ヒステリシスの挙動を示した. 前の条件の火炎形態を保ち, 例えば, 浮き上がり火炎が再度付着火炎にもどりにくくなる傾向が見られた.

References

1. T. Niioka, M. Kono, J. Sato, "Nensho-gensho-no-kiso", Ohmsha Ltd., (2001).
2. A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, *Combust. Flame*, Vol.156, No.10, (2009) 2010-2022.
3. Y. Mizobuchi, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.52, No.161, (2010) 206-212.
4. R. H. Chen, J. F. Driscoll, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.23, (1990) 281-288.
5. N. A. Rokke, J. E. Hustad, O. K. Sonju, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.24, (1992) 385-393.
6. T. Fujimori, D. Riechelmann, J. Sato, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.27, (1998) 1149-1155.
7. H. Yamashita, M. Shimada, T. Takeno, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.26, (1996) 27-34.
8. H. Yamashita, S. Tsutsumitani, N. J. Choi, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.630, (1999) 775-782.
9. Y. Mizobuchi, S. Tachibana, J. Shinio, S. Ogawa, T. Takeno, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.29, (2002) 2009-2015.
10. A. Joedicke, N. Peters, M. Mansour, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.30, (2005) 901-909.
11. C. M. Muller, H. Breitbach, N. Peters, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.25, (1994) 1099-1106.
12. F. Takahashi, Q. J. Schmoll, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.23, (1990) 677-683.
13. Y. S. Ko, S. H. Chung, *Combust. Flame*, Vol.118, No.1-2, (1999) 151-163.
14. A. Upatnieks, J. F. Driscoll, S. L. Ceccio, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.29, (2002) 1897-1903.
15. J. Boulanger, L. Vervisch, *Combust. Flame*, Vol.130, No.1-2, (2002) 1-14.
16. M. S. Mansour, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.28, (2004) 771-779.
17. A. Upatnieks, J. F. Driscoll, C. C. Rasmussen, S. L. Ceccio, *Combust. Flame*, Vol.138, No.3, (2004) 259-272.
18. K. M. Lyons, K. A. Watson, C. D. Carter, J. M. Donbar, *Combust. Flame*, Vol.142, No.3, (2005) 308-313.
19. A. Wason, W. F. Carnell Jr., M. W. Renfro, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.178, (2006) 789-811.
20. J. Buckmaster, R. Weber, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.26, (1996) 1143-1149.
21. H. Yamashita, A. Tada, *Journal of the Japan Society Computational Fluid Dynamics*, Vol.11, No.4, (2003) 137-148.
22. H. Oshima, K. Yamamoto, N. Hayashi, H. Yamashita, G. Okuyama, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.74, No.748, (2008) 2731-2736.
23. K. Yamamoto, S. Kato, Y. Isobe, N. Hayashi, H. Yamashita, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.33, (2011) 1195-1201.
24. K. Yamamoto, S. Kato, Y. Isobe, N. Hayashi, H. Yamashita, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.54, No.170, (2012) 285-290.
25. M. S. Mansour, *Combust. Flame*, Vol.133, No.3, (2003) 263-274.
26. C. R. Shaddix, T. C. Williams, L. G. Blevins, R. W. Schefer, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.30, (2005) 1501-1508.
27. S. Kostka Jr., W. F. Carnell Jr., M. W. Renfro, *Combust. Flame*, Vol.154, No.1-2, (2008) 82-95.
28. K. Yamamoto, S. Inoue, H. Yamashita, D. Shimokuri, S. Ishizuka, Y. Onuma, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.711, (2005) 2741-2747.
29. G. H. Dieke, H. M. Crosswhite, J. Quant, *Spectrosc. Radiat.*

- Transfer*, Vol.2, (1962) 97.
30. R. Horie, A. Ito, M. Nishioka, X. L. Zhu, T. Takeno, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.629, (1999) 54-61.
31. K. Yamamoto, M. Ozeki, N. Hayashi, H. Yamashita, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.32, (2009) 565-590.
32. N. Hayashi, H. Yamashita, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.50, No.154, (2008) 345-352.
33. O. Kurata, S. Takahashi, Y. Uchiyama, *Proceedings of Annual Conference of Gas Turbine Society of Japan*, Vol.23, (1995) 83-87.
34. S. R. Gollahalli, O. Savas, R. F. Huang and J. L. R. Azara, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.21, (1986) 1463-1471.
35. M. Hirota, M. Mizomoto, G. Masuya, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.691, (2004) 789-795.
36. T. Nishimura, K. Kunitsugu, K. Morio, *Combust. Flame*, Vol.159, No.4, (2012) 1499-1502.