

三重管バーナの流れ場と浮き上がり火炎の干渉

山本 和弘^{*1}, 加藤 慎也^{*2}, 林 直樹^{*1}, 山下 博史^{*1}

Flow field and interaction of lifted flames in a triple port burner

Kazuhiro YAMAMOTO^{*1}, Shinya KATO^{*2}, Naoki HAYASHI^{*1} and Hiroshi YAMASHITA^{*1}^{*1,2}Department of Mechanical and Science Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

Received 1 May, 2014

Abstract

In this study, we experimentally examined a combustion field in a triple port burner. There are four flame configurations, consisting of attached flames, inner attached/outer lifted flames, inner lifted/outer attached flames, and twin lifted flames. Focusing on the transition process of these flames, the flow field was investigated when the external air flow velocity was increased at constant internal air flow and fuel flow velocities. Results show that, except for the attached flame, when the flame is lifted, the axial velocity toward the leading-edge flame gradually decreases downstream, takes its minimum, and then increases very rapidly. This minimum velocity is larger than the so-called laminar burning velocity. It should be noted that, different from a single lifted flame, the inner or outer flame is affected by the other flame located more upstream. For example, the downstream lifted flame faces the flow induced by the upstream lifted flame. Resultantly, a unique behavior of flip-flop between inner and outer flames is observed.

Key words : Burner, Flame, PIV, Lifted flame, Gaseous fuel, Laser diagnostics

1. 緒 言

燃料と酸化剤である空気を別々に供給する拡散燃焼では、流速条件により燃料と空気の反応領域がバーナのノズルから離れ、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てきた。浮き上がり火炎の基部には希薄と過濃の予混合火炎および拡散火炎から成るトリプルフレーム (Triple flame) が存在し(Chung and Lee, 1991)(廣田他, 2010)(溝渕, 2010), このトリプルフレームに着目して乱流燃焼場をモデル化する試みが行われている(Muller, et al., 1994). 近年、コンピュータを用いた数値計算の技術が進歩し、数多くの研究成果が報告されている(Chakraborty, et al., 2009)(Lee and Huh, 2011)(Shim, et al., 2011). 理論と数値計算に加えて実験によるモデルの検証もやはり重要である(Peters, 1986)(Yamamoto, et al., 2003)(店橋, 2010).

我々は、図1のような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、数値計算と実験により燃焼排出物や浮き上がり火炎について検討してきた(Yamamoto, et al., 2011)(山本他, 2012)(Yamamoto, et al., 2012)(Yamamoto and Takemoto, 2013). 我々以外にも既に研究例がある(Blevins, et al., 2002)(Mikofski, et al., 2006)(Sze, et al., 2006). 三重管バーナでは、1つの燃料ノズルと2つの空気ノズルが存在するため、燃料と空気の境界も2つ存在し、火炎は内側と外側に2つ形成される。その結果、両方の火炎がバーナに付着した付着火炎 (Attached flames, 図2a), 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2b), 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2c), 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2d)の4つの火炎形態が存在することを確認した。これらの火炎が形成される流速条件については、これまでの実験において検討している(Yamamoto, et al., 2011). また数値シ

No.xx-xxxx [DOI: 10.1299/transjsme.2014xxx000x]

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail of corresponding author: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

ミュレーションにより、4つの火炎形態の遷移には浮き上がり火炎の基部近傍の流れ場が重要であることが示唆された。したがって、三重管バーナの流れ場を詳細に検討する必要がある。

最近では、レーザ計測技術が発展してきていることから、PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence, レーザ誘起蛍光法) や PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速計) などにより、火炎と流れ場の詳細な検討が可能になってきている(Yamamoto, et al., 2006)(Yamamoto, et al., 2007)(Shimura, et al., 2011)(Steinberg, et al., 2011)(鈴木, 山本, 2013)。そこで本研究では、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 を用いた速度場の計測を行い、浮き上がり火炎近傍の流れについて調べた。特に、三重管バーナでは2つの火炎が形成されるため、火炎同士の干渉について考察した。

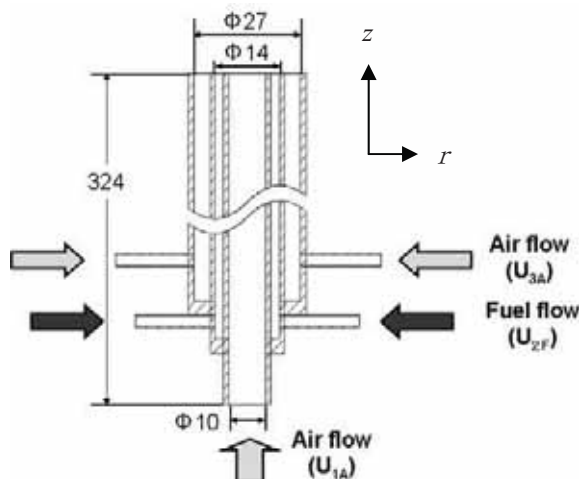


Fig. 1 Triple port burner

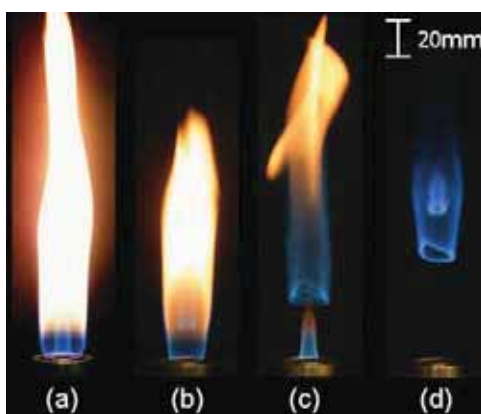


Fig. 2 Photographs of flames in a triple-port burner; $U_{2F} = 0.6$ m/s,
 (a) $U_{1A} = 0.4$ m/s, $U_{3A} = 0.2$ m/s (b) $U_{1A} = 0.6$ m/s, $U_{3A} = 0.4$ m/s
 (c) $U_{1A} = 0.6$ m/s, $U_{3A} = 0.7$ m/s (d) $U_{1A} = 0.8$ m/s, $U_{3A} = 0.7$ m/s

2. 実験装置および実験方法

2.1 三重管バーナと火炎形態

実験に用いた三重管バーナの概略図は既に図1に示した。同軸三重管構造をもち、中央から順に空気、燃料、空気を同軸で噴出させる。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であり、リムの厚さはそれぞれ1 mmである。燃料にはメタンを用いた。ここで、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。今回は U_{1A} を 0.4, 0.6, 1.1 m/s とし、 U_{3A} を 0~1.2 m/s の範囲で変

化させた。ただし、 U_{2F} は0.6 m/s一定とした。座標系は、内側の空気ノズルの中心を原点とし、半径方向に r 軸、高さ方向に z 軸とした。

我々はこれまでの研究において、図2に示した4つの火炎形態が形成される流速条件を調べている(Yamamoto et al., 2011)。 U_{1A} が比較的小さい0.4 m/sでは、 U_{3A} をゼロに設定すると内側火炎と外側火炎の両方が付着した付着火炎が形成される。その後 U_{3A} を増加させていくと、外側の火炎のみが浮き上がる外側浮き上がり火炎へと遷移する。一方 U_{1A} が0.6 m/sでは、別の遷移が見られる。 U_{3A} をゼロから増加させると $U_{3A}=0.25$ m/sにおいて内側の火炎が先に浮き上がる(内側浮き上がり火炎)。さらに U_{3A} を大きくすると $U_{3A}=0.65$ m/s以上の範囲では外側の火炎が浮き上がると同時に内側の火炎が再付着し、外側浮き上がり火炎へと遷移する。

ただし、 U_{1A} が1.1 m/sではさらに別の遷移が見られる。まず $U_{3A}=0$ m/sでは付着火炎が形成される。 U_{3A} を増加させると内側の火炎のみが浮き上がるころまでは $U_{1A}=0.6$ m/sと同じであるが、 $U_{3A}=0.65$ m/sで両方の火炎が浮き上がる二重浮き上がり火炎が形成された。ただし、さらに U_{3A} を増加させても内側火炎の再付着現象は見られなかった。そこで今回は、これらの火炎の遷移過程を流れ場をもとに考察した。

2・2 PIVと計測条件

PIVの概略を図3に示す。散乱光を得るためのダブルパルスYAGレーザー(Quantel製 Twins BSL200)と画像を撮影するCCDカメラ(JAI製 CV-M2)から構成される。レーザーの波長は532nmであり、シート光にして流れ場の二次元計測を行った。シートの厚さは約1mmであり、三重管バーナの中心軸を通るように照射した。レーザーとカメラの制御は2台のデジタルディレイ・パルスジェネレーター(STANFORD RESEARCH SYSTEMS製 DG645)を用いた。異なる時刻で撮影した画像をパーソナルコンピュータで解析することで、速度場を算出した。

PIVの計測条件を表1に示す。トレーサ粒子には酸化マグネシウム(平均粒径1.8 μ m)(Yamamoto, et al., 2006)(Yamamoto, et al., 2007)を用いた。撮影時には、CCDカメラのレンズにバンドパスフィルタを取り付け火炎の自発光や周囲からの迷光を除去した。撮影領域は画像の中心とバーナの中心軸が一致するように調整し、① $-44 \leq r \leq 44$ mm, $0 \leq z \leq 67$ mm, ② $-25 \leq r \leq 25$ mm, $0 \leq z \leq 39$ mmの2つの条件で行った。レーザーの時間間隔は①では300 μ sとし、②では100 μ sとした。撮影に用いたカメラの画素数は1600 pixel \times 1200 pixelである。PIVによる計測は最大15 Hzのサンプリング周期で行ったが、火炎形態の遷移過程における流れ場と火炎の変動を十分捉えることができることを確認している。相関領域は33 pixel \times 33 pixelの短形領域とし、50%のオーバーラップをとって速度場を求めた。この場合、速度を算出する格子間隔(相関領域のサイズ)は、条件①が0.89 mm、条件②が0.52 mmである。

Table 1 PIV measurement condition

Condition	Image area (mm)	Grid length (mm)	Interval of laser shot (μ s)	Sampling frequency (Hz)
①	$-44 \leq r \leq 44$ $0 \leq z \leq 67$	0.89	300	10
②	$-25 \leq r \leq 25$ $0 \leq z \leq 39$	0.52	100	15

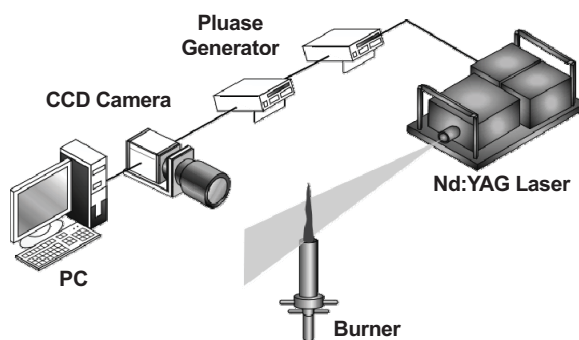


Fig. 3 PIV system

3. 実験結果および考察

3・1 付着火炎と浮き上がり火炎の流れ場

まず、付着火炎 ($U_{1A}=0.4$ m/s, $U_{3A}=0.2$ m/s) と内側浮き上がり火炎 ($U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.4$ m/s) の直接写真と瞬時の二次元速度場を図4と図5に示す。速度場は条件①で計測したものである。図4では中心軸付近 ($r=0$ mm) において内側火炎の燃焼反応による熱膨張が見られ、下流ほど速度が加速されていることがわかる。これに対し図5では、内側の火炎が浮き上がっているため、中央の温度が低い $z < 16$ mm までは速度が小さく、 $z=16$ mm を越えると流れが周囲に広がって速度も大きくなった。そこで、浮き上がり火炎が形成されている位置 (火炎の基部) で流れ場を詳細に検討した。

図5の内側浮き上がり火炎が形成されている位置での軸方向速度 v_z の半径方向分布を図6に示す。火炎は左右対称でないため、右側の浮き上がり火炎が形成されている $z=16$ mm において検討した。図中に示す $r=4.4$ mm 付近の斜線は、内側火炎の半径方向位置を表している。これによると、内側火炎が形成されている付近で流速が極小値をとることがわかる。この軸方向速度の極小値を求めたところ 0.47 m/s であった。

次に、軸方向速度が流れ方向にどのように変化するかを調べた。図7に $r=4.4$ mm における v_z の軸方向分布を示す。図中の斜線は火炎の位置を表している。これによると軸方向速度は、浮き上がり火炎の基部に近づくとわずかに減少し、 $z=16$ mm 付近で大きく増加した。内側の浮き上がり火炎は $z=16$ mm に形成されていることから、軸方向速度は浮き上がり火炎の予熱帯に入ると熱膨張により加速され、その後増加したものと思われる。この傾向は、これまでに我々が行った数値シミュレーションの結果(山本他, 2012)によく対応していた。浮き上がり火炎では、火炎基部 (edge flame) の速度と浮き上がり火炎の燃焼速度 (火炎基部における局所の燃焼速度) が釣り合うことが指摘されている(溝渕, 2010)が、浮き上がり火炎基部の速度を図7の軸方向速度の極小値から求めると 0.47 m/s となり、メタンの最大燃焼速度である 0.34 m/s(Lewis and von Elbe, 1987)より大きいことがわかった。なお、

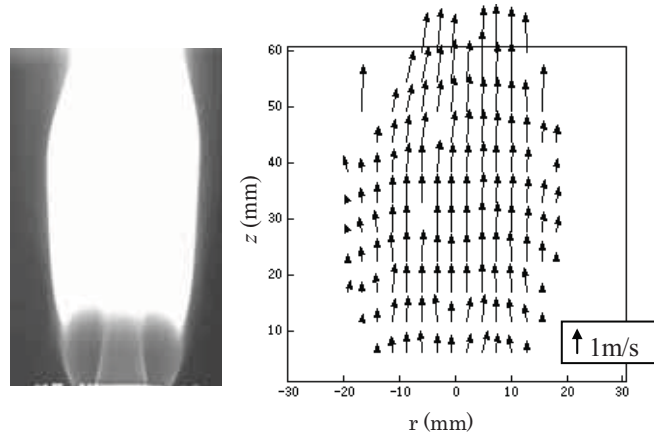


Fig. 4 Photo of attached flame and instantaneous velocity field;
 $U_{1A}=0.4$ m/s, $U_{3A}=0.2$ m/s

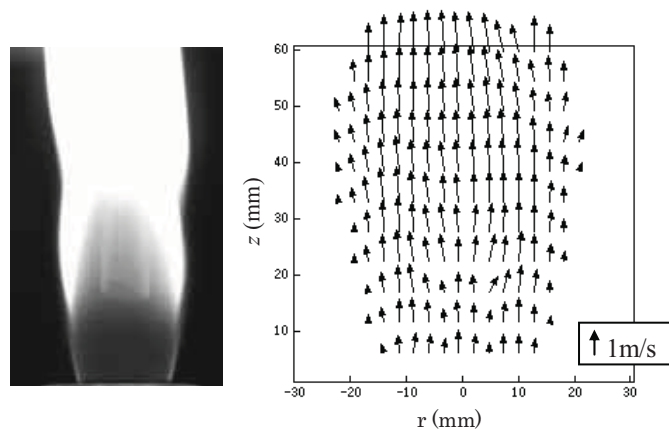


Fig. 5 Photo of inner lifted flame and instantaneous velocity field;
 $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.4$ m/s

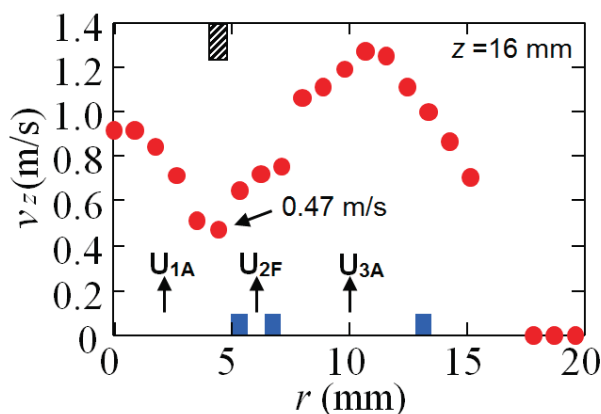


Fig. 6 Radial distribution of axial velocity at $z=16\text{mm}$;
 $U_{1A}=0.6\text{ m/s}$, $U_{3A}=0.4\text{ m/s}$

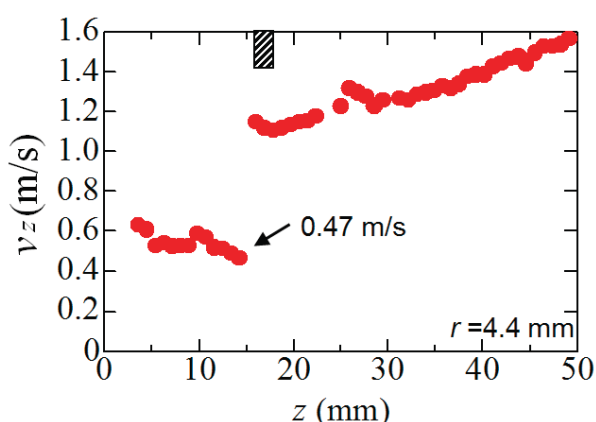


Fig. 7 Axial distribution of axial velocity at $r=4.4\text{ mm}$;
 $U_{1A}=0.6\text{ m/s}$, $U_{3A}=0.4\text{ m/s}$

この 0.34m/s はいわゆる層流燃焼速度であり、1次元火炎で再現される燃焼速度である。浮き上がり火炎が形成されている流れ場はこのような理想的な場と異っており、浮き上がり火炎基部における流速が層流燃焼速度より大きくなることが報告されている(Ko and Chung, 1999)(Kim, et al., 2007)。この理由としては、火炎面に沿う方向の濃度勾配や温度勾配の影響、火炎伸長率、火炎面曲率の影響があると考えられるが、実験によりこれらの検討を行うことはできないため、今後数値シミュレーションにより明らかにしていく予定である。

3・2 付着火炎から内側浮き上がり火炎への遷移時の速度場

続いて、付着火炎から内側浮き上がり火炎に遷移する際の流れの変化について検討する。 $U_{1A}=0.6\text{ m/s}$, $U_{3A}=0.25\text{ m/s}$ では付着火炎が形成されるが、ここから U_{3A} を僅かに増加させると内側火炎が浮き上がる。このときの速度ベクトルの変化をPIVで計測した。浮き上がり火炎の基部近傍の流れを詳細に検討するため、3・2節以降は速度場を条件②で計測した。各時刻における粒子の散乱画像(上の4つ)と得られた速度ベクトル(下の4つ)を図8に示す。速度場の測定は15Hzで行っているため、各画像は1/15秒間隔で得られたものである。 $U_{3A}=0.25\text{ m/s}$ から U_{3A} をわずかに増加させた瞬間を $t=0\text{ s}$ とした。火炎面の前後では密度が大きく異なることから、浮き上がり火炎が形成されている位置では散乱光の強度が大きく変化する。そこで、粒子の散乱光強度から内側浮き上がり火炎の基部の半径方向と軸方向の座標を図9のように特定し、基部の位置を図8に示した。 U_{3A} の増加にともない浮き上がり火炎は下流に移動するが、その半径方向位置は次第に中心方向に移動することがわかった。

次に、軸方向速度と半径方向速度の変化について考察した。図8における各時刻の軸方向速度と半径方向速度の二次元分布を図10と図11にそれぞれ示す。図に示した丸は内側火炎の基部が形成されている位置を示すが、

浮き上がり火炎の基部に流入する速度を図10の軸方向速度の極小値から求めたところ、 $t=0$ sでは0.18 m/s、 $t=1/15$ sでは0.30 m/s、 $t=2/15$ sでは0.34 m/s、 $t=3/15$ sでは0.35 m/sとなり、浮き上がり高さの増加とともに浮き上がり火炎の基部に流入する速度は増加することがわかった。また、図11の半径方向速度の結果から、どの時刻においても内側浮き上がり火炎の外側に半径方向の速度が負となる領域が存在した。内側の浮き上がり火炎の上流には外側の付着火炎が存在するが、この外側火炎により気体が膨張して流れが半径方向の正負の方向に押し広げられるためである。上流にある外側の付着火炎から下流にある内側浮き上がり火炎に向かう流れが存在することから、 U_{3A} を増加させると浮き上がり火炎の基部に流入する軸方向速度が増大し、浮き上がり火炎がより下流に形成されたことが示唆された。

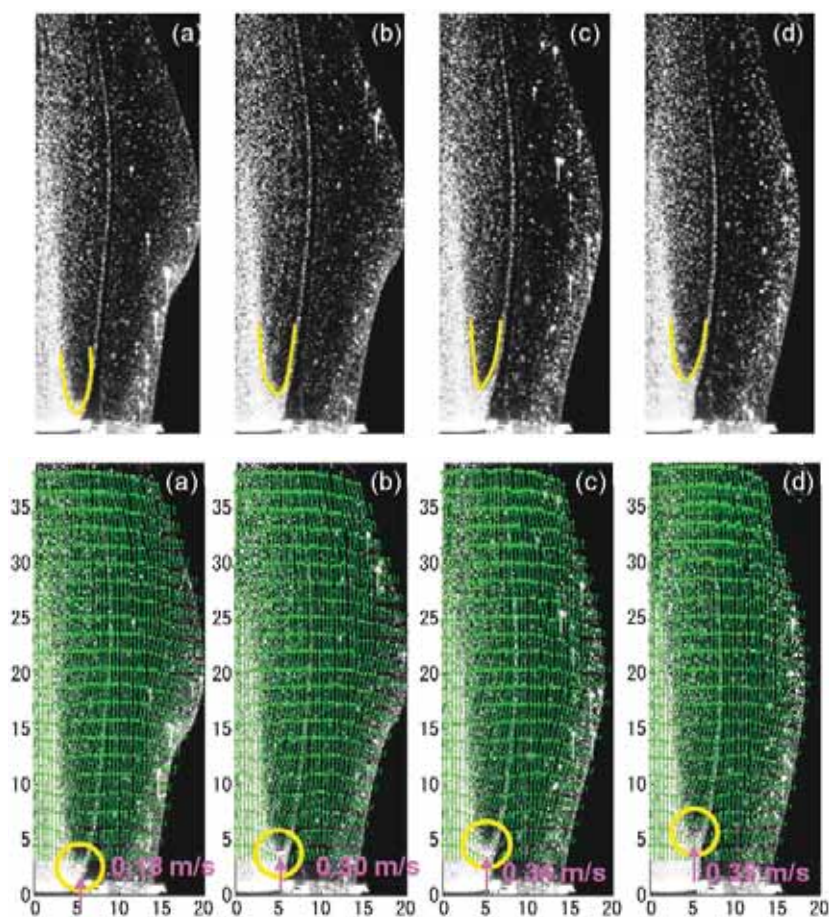


Fig. 8 Time variation of velocity vector with the particle scattering image (upper figure) by increasing U_{3A} slightly at (a) $t=0$ s, (b) $t=1/15$ s, (c) $t=2/15$ s, (d) $t=3/15$ s; $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.25$ m/s

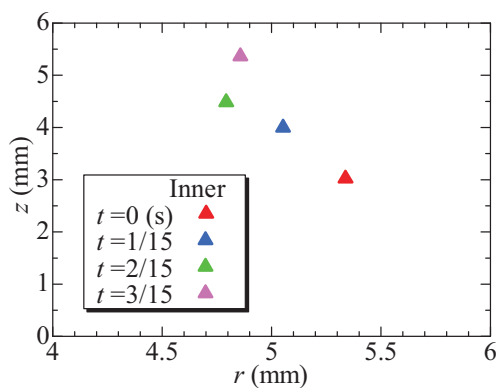


Fig. 9 Position of inner lifted flame at $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.25$ m/s

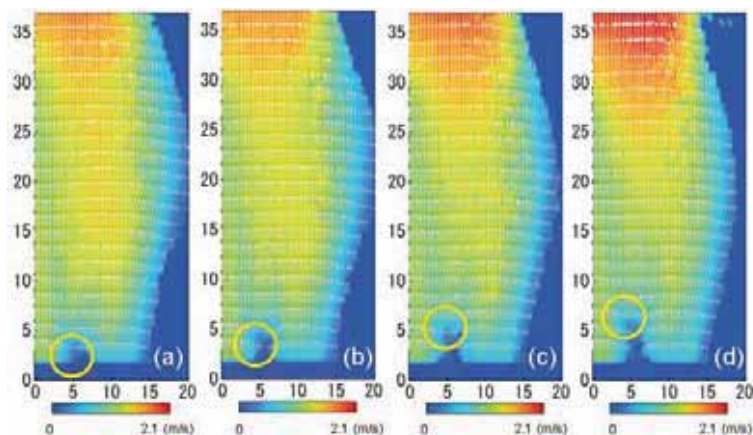


Fig. 10 Time variation of axial velocity distribution by increasing U_{3A} slightly at (a) $t=0$ s, (b) $t=1/15$ s, (c) $t=2/15$ s, (d) $t=3/15$ s; $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s

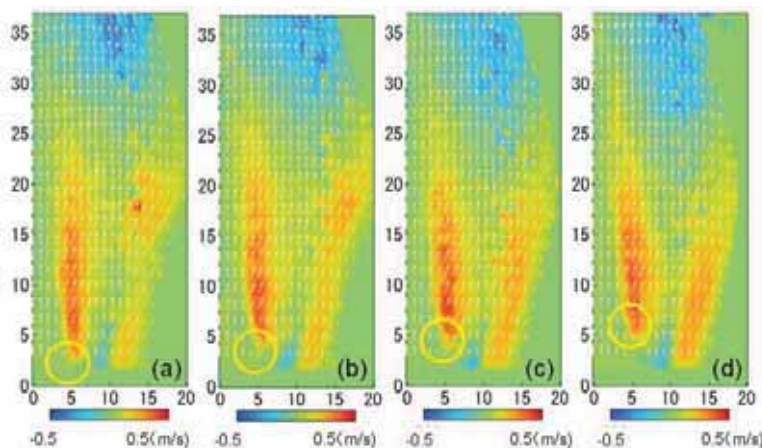


Fig. 11 Time variation of radial velocity distribution by increasing U_{3A} slightly at (a) $t=0$ s, (b) $t=1/15$ s, (c) $t=2/15$ s, (d) $t=3/15$ s; $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s

3・3 内側浮き上がり火炎から外側浮き上がり火炎への遷移時の速度場

次に、内側浮き上がり火炎から外側浮き上がり火炎へと火炎形態が遷移する際の流れ場の変化について検討する。 $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s では内側浮き上がり火炎が形成されるが、ここから U_{3A} を僅かに増加させると外側浮き上がり火炎へと遷移する。 $U_{3A}=0.65$ m/s から U_{3A} を僅かに増加させた時の各時刻における粒子の散乱光の画像（上の4つ）と得られた速度ベクトル（下の4つ）を図12に示す。図8と同様、散乱光強度の変化から浮き上がり火炎の位置を特定し、内側浮き上がり火炎の基部を黄色で、外側浮き上がり火炎の基部を赤色で図に示した。また、これらの火炎の半径方向と軸方向の座標を図13に示す。 $t=1/15$ s と $2/15$ s の間で内側火炎の浮き上がり高さとお外側火炎の浮き上がり高さが逆転していることがわかる。その後 $t=3/15$ s において内側火炎が再付着し、外側浮き上がり火炎に遷移した。外側の付着火炎が浮き上がるると同時に内側の浮き上がり火炎が再付着する現象を、我々は火炎の Flip-flop と呼んでいる(Yamamoto, et al, 2011)。

図12に示した各時刻の速度ベクトルの分布から、外側浮き上がり火炎の基部では流れが半径方向の正負の方向に押し広げられていることがわかる。 $t=0, 1/15$ s では外側火炎が内側火炎よりも上流にあるため、外側火炎から内側火炎に向かう流れが存在した。一方 $t=2/15, 3/15$ s においては、外側火炎が内側火炎よりも下流にあるので、内側火炎は外側火炎の影響を大きく受けないものと思われる。

図13をもとに、それぞれの火炎位置の時間変化を確認する。これによると、三角で示した内側の火炎は浮き上がり高さが小さくなるにつれ外側へ移動していることがわかった。同時に丸で示した外側火炎も、浮き上がり高さが大きくなると外側へ移動した。

そこで、軸方向速度と半径方向速度の時間変化を調べた。図 12 における各時刻の軸方向と半径方向の各成分の値の二次元分布を速度ベクトルと共に図 14 と図 15 に示す。内側火炎と外側火炎の基部に流入する速度を軸方向速度の極小値から求めたところ、内側火炎に流入する速度は $t=0$ s では 0.51 m/s, $t=1/15$ s では 0.34 m/s, $t=2/15$ s では 0.26 m/s となり、浮き上がり高さの減少とともに浮き上がり火炎の基部に流入する速度が低下することがわかった。一方、外側火炎に流入する速度は、 $t=0$ s では 0.37 m/s, $t=1/15$ s では 0.40 m/s, $t=2/15$ s では 0.52 m/s, $t=3/15$ s では 0.68 m/s となり、浮き上がり高さが大きくなるほど外側火炎の基部に流入する速度は増加することがわかった。

これらの値と浮き上がり火炎の基部の位置を図 12 に示す。これまでに行った数値シミュレーションの結果(山本他, 2012)から、 U_{3A} を増加させると外側火炎の浮き上がり高さが増加し、やがて両方の火炎の浮き上がり高さが等しくなると外側火炎から内側火炎に向かう流れの影響がなくなることがわかっている。これにより、内側火炎に流入する軸方向速度が小さくなり、内側火炎が上流に移動して再付着したと思われる。この場合、外側の浮き上がり火炎は内側の浮き上がり火炎より下流に位置することになる。内側火炎から外側火炎に向かう流れができるため、 U_{3A} を増加させると外側火炎の基部に流入する速度が大きくなり、浮き上がり火炎の火炎基部における燃焼速度と流入する速度がバランスする位置が下流に移動して、外側火炎の浮き上がり高さが増加したと思われる。

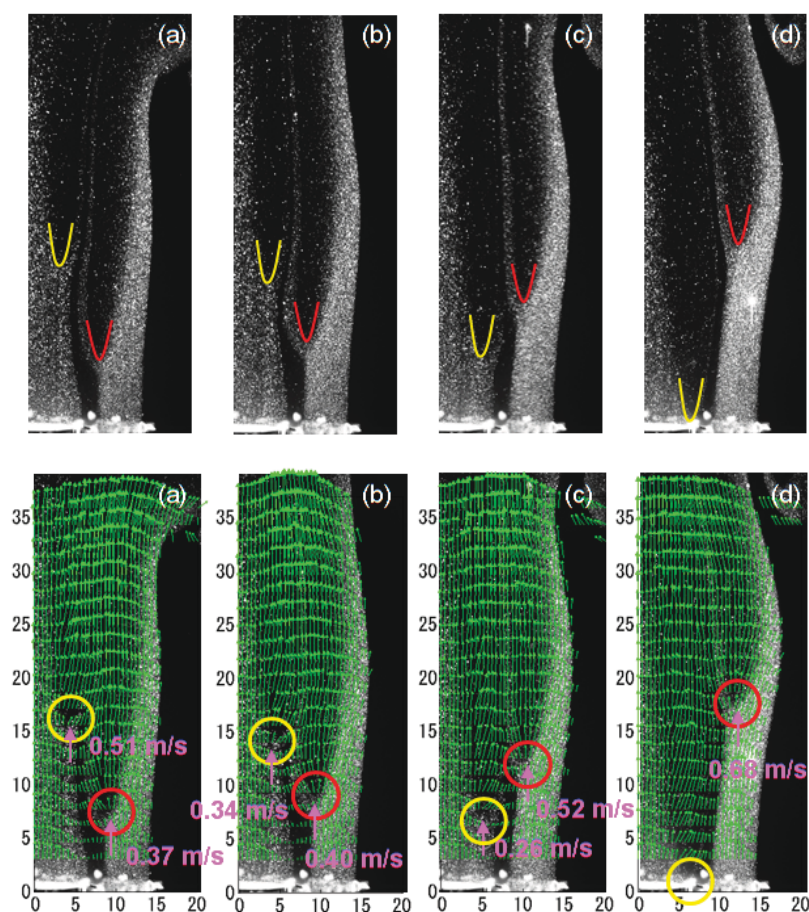


Fig. 12 Time variation of velocity vector with the particle scattering image (upper figure) by increasing U_{3A} slightly at (a) $t=0$ s, (b) $t=1/15$ s, (c) $t=2/15$ s, (d) $t=3/15$ s; $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s

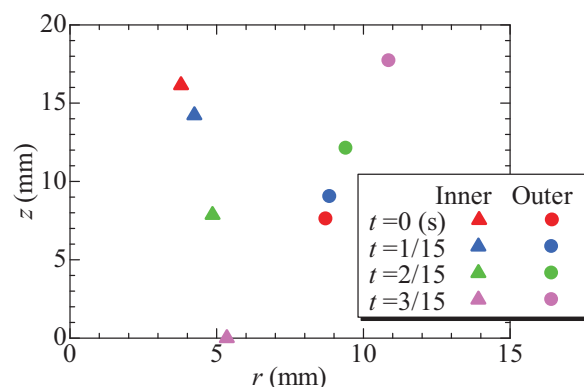


Fig. 13 Positions of inner and outer lifted flames at $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s

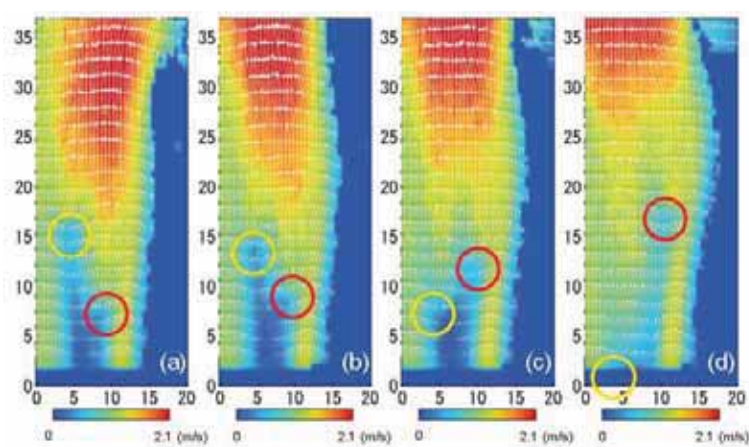


Fig. 14 Time variation of axial velocity distribution by increasing U_{3A} slightly at (a) $t=0$ s, (b) $t=1/15$ s, (c) $t=2/15$ s, (d) $t=3/15$ s; $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s

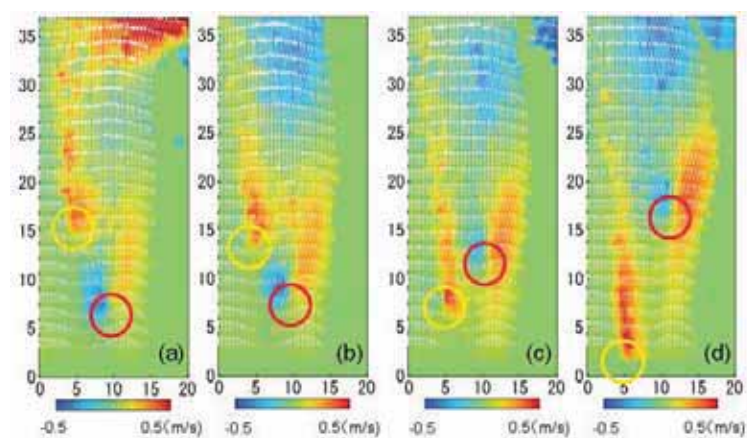


Fig. 15 Time variation of radial velocity distribution by increasing U_{3A} slightly at (a) $t=0$ s, (b) $t=1/15$ s, (c) $t=2/15$ s, (d) $t=3/15$ s; $U_{1A}=0.6$ m/s, $U_{3A}=0.65$ m/s

3・4 内側浮き上がり火炎から二重浮き上がり火炎への遷移時の速度場

2・1節でも述べたが、流速条件により火炎形態の遷移の仕方が異なることがわかっている。ここでは、内側火炎の再付着現象が見られなかった $U_{1A}=1.1$ m/s における火炎の遷移過程について検討した。 $U_{1A}=1.1$ m/s, $U_{3A}=0.75$ m/s に設定し、 U_{3A} を増加させたときの各時刻における粒子の散乱光の画像と得られた速度ベクトルを図 16 に示

す. 図には, 内側浮き上がり火炎の基部を黄色で, 外側浮き上がり火炎の基部を赤色で示した. これによると, $t = 0$ s および $1/15$ s において, 外側火炎から内側火炎に向かう流れが観察された. ただし, $t = 2/15$ s と $3/15$ s では外側の浮き上がり火炎が内側の浮き上がり火炎よりも下流に位置することから, 内側火炎から外側火炎に向かう流れがあることがわかった. これは, 上流にある内側の浮き上がり火炎により流れが半径方向の正負の方向に押し広げられるためである.

内側火炎の基部に流入する軸方向流速を求めたところ, $t = 0$ s では 0.78 m/s, $t = 1/15$ s では 0.58 m/s, $t = 2/15$ s では 0.52 m/s, $t = 3/15$ s では 0.47 m/s となり, 浮き上がり高さの減少とともに内側火炎の基部における軸方向速度が低下した. いずれの場合も軸方向速度の値はメタンの最大燃焼速度 (層流燃焼速度) である 0.34 m/s より大きくなった. ただし, 浮き上がり火炎は濃度勾配中に存在する火炎であり, 濃度勾配がない均一な予混合気を想定した層流燃焼速度と単純に比較することはできないが, 浮き上がり火炎の基部に流入する軸方向速度が大きい場合には内側火炎がバーナに再付着せず, 二重浮き上がり火炎が維持されることがわかった. 一方, 外側火炎の基部に流入する軸方向速度は, $t = 0$ s では 0.39 m/s, $t = 1/15$ s では 0.41 m/s, $t = 2/15$ s では 0.46 m/s, $t = 3/15$ s では 0.48 m/s となり, U_{3A} の増加とともに外側火炎に流入する速度は増加することがわかった. したがって, U_{3A} を増加させると外側浮き上がり火炎の基部に流入する軸方向流速が増加し, 外側火炎の浮き上がり高さが大きくなったものと思われる.

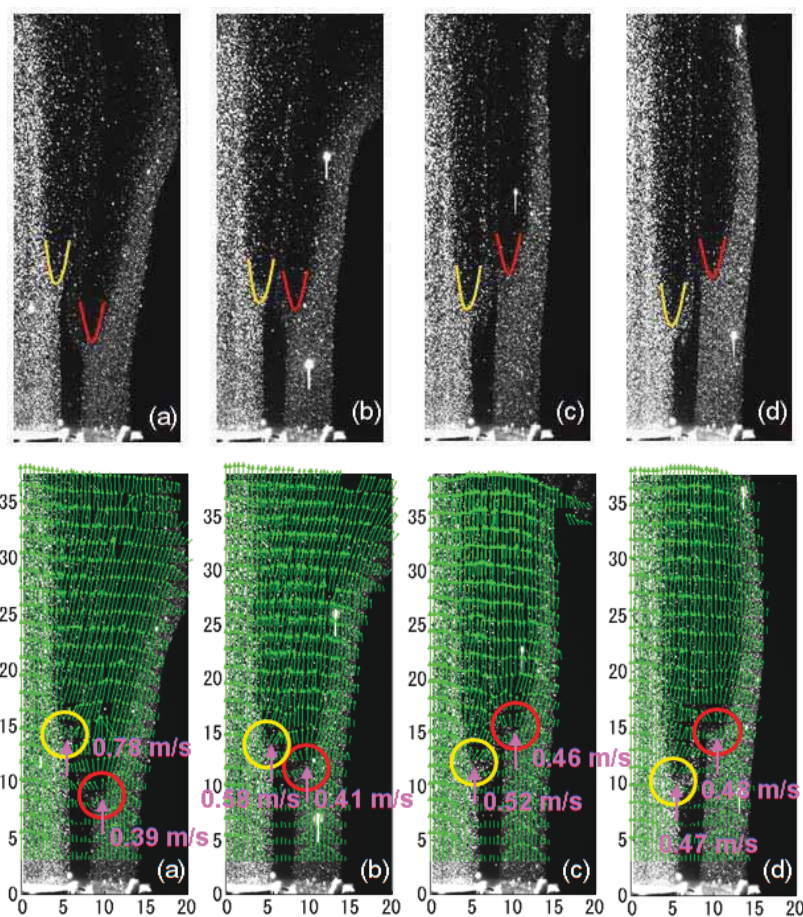


Fig. 16 Time variation of velocity field with the particle scattering image (upper figure) by increasing U_{3A} slightly at (a) $t = 0$ s, (b) $t = 1/15$ s, (c) $t = 2/15$ s, (d) $t = 3/15$ s; $U_{1A} = 1.1$ m/s, $U_{3A} = 0.75$ m/s

4. 結 言

浮き上がり火炎を対象に、PIV（粒子画像流速計）を行って流れ場を計測した。三重管バーナでは火炎が内側と外側に2つ形成されるため、それぞれの位置関係と流れ場をもとに、火炎の遷移過程について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 軸方向速度は浮き上がり火炎の基部に近づくといった減少するが、その後、熱膨張により増加する。これにより浮き上がり火炎の基部において、軸方向速度は極小値をとる。内側浮き上がり火炎基部の速度を軸方向速度の極小値から求めたところ 0.47 m/s となり、メタンの最大燃焼速度である 0.34 m/s より大きいことがわかった。
- (2) 付着火炎から内側浮き上がり火炎に遷移する際の流れの変化について検討した。 U_{3A} が大きいほど浮き上がり火炎は下流に移動するが、その半径方向位置は中心に移動する。このとき外側火炎は付着したままであるが、外側の付着火炎から内側の浮き上がり火炎に向かう流れが存在するため、内側の空気流速が一定でも外側の空気流速を増加させると浮き上がり火炎の基部に流入する速度が増大し、内側火炎の浮き上がり高さが大きくなる。
- (3) 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 Flip-flop 現象を考察した。 U_{3A} を増加させると外側火炎の浮き上がり高さは次第に大きくなる。やがて両方の火炎の浮き上がり高さが等しくなると外側火炎から内側火炎に向かう流れの影響がなくなる。その結果、内側火炎の基部に流入する軸方向速度が小さくなり、内側火炎が上流に移動して再付着する。
- (4) $U_{1A}=1.1 \text{ m/s}$ の場合は、 U_{3A} を増加させても内側火炎が再付着する現象が見られない。内側と外側の浮き上がり火炎の基部に流入する速度を求めたところ、いずれもメタンの最大燃焼速度である 0.34 m/s より常に大きいことがわかった。浮き上がり火炎は濃度勾配中に存在する火炎であり、濃度勾配がない均一な予混合気を想定した層流燃焼速度と単純に比較することはできないが、浮き上がり火炎の基部に流入する軸方向速度が大きい場合には内側火炎がバーナに再付着せず、二重浮き上がり火炎が維持される。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号 23560223）により行われたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- Blevins, L. G., Fletcher, R. A., Benner Jr., B. A., Steel, E. B. and Mulholland, G. W., The existence of young soot in the exhaust of inverse diffusion flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29 (2002), pp.2325-2333.
- Chakraborty, N., Klein, M. and Swaminathan, N., Effects of Lewis number on the reactive scalar gradient with local strain rate in turbulent premixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.32 (2009), pp.1409-1417.
- Chung, S. H. and Lee, B. J., On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet, *Combustion and Flame*, Vol.86 (1991), pp.62-72.
- 廣田光智, 尾曾洋樹, 升谷五郎, 気流の加熱初期における層流浮き上がり火炎の燃焼ガス特性, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.76, No.770 (2010), pp.1614-1619.
- Kim, M. K., Won, S. H. and Chung, S. H., Effect of velocity gradient on propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.31 (2007), pp.901-908.
- Ko, Y. S. and Chung, S. H., Propagation of unsteady Tribrachial flames in laminar non-premixed jets, *Combustion and Flame*, Vol.118 (1999), pp.151-163.
- Lee, D. and Huh, D. Y., DNS analysis of propagation speed and conditional statistics of turbulent premixed flame in a planar impinging jet, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33 (2011), pp.1301-1307.
- Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd Ed., Academic Press (1987), pp.395-417.
- Mikofski, M. A., Williams, T. C., Shaddix, C. R. and Blevins, L. G., Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames, *Combustion and Flame*, Vol.146 (2006), pp.63-72.
- 溝渕泰寛, 部分予混合火炎, *日本燃焼学会誌*, Vol.52, No.161 (2010), pp.206-212.

- Muller, C. M., Breitbach, H. and Peters, N., Partially premixed turbulent flame propagation in jet flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.25 (1994), pp.1099-1106.
- 奥洋平, 伊藤雄貴, 山本和弘, 林直樹, 山下博史, PIV/OH-PLIF 同時計測によるスリットバーナの燃焼場の検討, 日本燃焼学会誌, Vol.55, No.174 (2013), pp.395-402.
- Peters, N., Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, Proc. Combust. Inst., Vol.21 (1986), pp.1231-1250.
- Shim, Y., Tanaka, S., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Local structure and fractal characteristics of H₂-air turbulent premixed flame, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33 (2011), pp.1455-1462.
- Shimura, M., Ueda, T., Choi, G. M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and dual-plane stereoscopic PIV measurements in methane-air turbulent premixed flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33 (2011), pp.775-782.
- Steinberg, A. M., Boxx, I., Arndt, C. M., Frank, J. H. and Meier, W., Experimental study of flame-hole reignition mechanisms in a turbulent non-premixed jet flame using sustained multi-kHz PIV and crossed-plane OH PLIF, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33 (2011), pp.1663-1672.
- 鈴木啓夢, 山本和弘, 乱流燃焼場における火炎構造と火炎の安定性に及ぼす旋回流の影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.804 (2013), pp.1714-1723.
- Sze, L. K., Cheung, C. S. and Leung, C. W., Appearance, temperature, and NO_x emission of two inverse diffusion flames with different port design, Combustion and Flame, Vol.144 (2006), pp.237-248.
- 店橋護, 乱流予混合燃焼 II - 計測と直接数値計算 -, 日本燃焼学会誌, Vol.52, No.159 (2010), pp.39-48.
- Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D. and Ishizuka, S., Flow field of turbulent premixed combustion in a cyclone-jet combustor, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.2, No.1 (2007), pp.90-101.
- Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S. and Onuma, Y., PIV measurement and turbulence scale in turbulent combustion, Heat Transfer Asian Research, Vol.35, Issue 7 (2006), pp.501-512.
- Yamamoto, K., Kato, S., Isobe, Y., Hayashi, N. and Yamashita, H., Lifted flame structure of coannular jet flames in a triple port burner, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33 (2011), pp.1195-1201.
- Yamamoto, K., Nishizawa, Y. and Onuma, O., Persistence of laminar flamelet structure under highly turbulent premixed combustion, JSME International Journal, Series B, Vol.47, No.6 (2003), pp.408-415.
- 山本和弘, 磯部佑介, 林直樹, 山下博史, 三重管バーナに形成される浮き上がり火炎の挙動に関する研究, 日本燃焼学会誌, Vol.54, No.170 (2012), pp.285-290.
- Yamamoto, K. and Takemoto, M., Measurement of PAH and soot of diffusion flames in a triple port burner, Fuel Processing Technology, Vol.107 (2013), pp.99-106.

References

- Blevins, L. G., Fletcher, R. A., Benner Jr., B. A., Steel, E. B. and Mulholland, G. W., The existence of young soot in the exhaust of inverse diffusion flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29 (2002), pp.2325-2333.
- Chakraborty, N., Klein, M. and Swaminathan, N., Effects of Lewis number on the reactive scalar gradient with local strain rate in turbulent premixed flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.32 (2009), pp.1409-1417.
- Chung, S. H. and Lee, B. J., On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet, Combustion and Flame, Vol.86 (1991), pp.62-72.
- Hirota, M., Oso, H. and Masuya, G., Burned gas characteristics of laminar lifted flame at the beginning of stream heating, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.76, No.770 (2010), pp.1614-1619 (in Japanese).
- Kim, M. K., Won, S. H. and Chung, S. H., Effect of velocity gradient on propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.31 (2007), pp.901-908.
- Ko, Y. S. and Chung, S. H., Propagation of unsteady Tribrachial flames in laminar non-premixed jets, Combustion and Flame, Vol.118 (1999), pp.151-163.
- Lee, D. and Huh, D. Y., DNS analysis of propagation speed and conditional statistics of turbulent premixed flame in a planar impinging jet, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33 (2011), pp.1301-1307.
- Lewis, B. and von Elbe, G., Combustion, Flames and Explosions of Gases, 3rd Ed., Academic Press (1987), pp.395-417.
- Mikofski, M. A., Williams, T. C., Shaddix, C. R. and Blevins, L. G., Flame height measurement of laminar inverse diffusion

flames, *Combustion and Flame*, Vol.146 (2006), pp.63-72.

- Mizobuchi, Y., Partially premixed flames, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.52, No.161 (2010), pp.206-212 (in Japanese).
- Muller, C. M., Breitbach, H. and Peters, N., Partially premixed turbulent flame propagation in jet flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.25 (1994), pp.1099-1106.
- Oku, Y., Ito, Y., Yamamoto, K., Hayashi, N. and Yamashita, H., A study on combustion field in a slit burner by PIV/OH-PLIF simultaneous technique, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.55, No.174 (2013), pp.395-402 (in Japanese).
- Peters, N., Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.21 (1986), pp.1231-1250.
- Shim, Y., Tanaka, S., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Local structure and fractal characteristics of H₂-air turbulent premixed flame, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33 (2011), pp.1455-1462.
- Shimura, M., Ueda, T., Choi, G. M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and dual-plane stereoscopic PIV measurements in methane-air turbulent premixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33 (2011), pp.775-782.
- Steinberg, A. M., Boxx, I., Arndt, C. M., Frank, J. H. and Meier, W., Experimental study of flame-hole reignition mechanisms in a turbulent non-premixed jet flame using sustained multi-kHz PIV and crossed-plane OH PLIF, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33 (2011), pp.1663-1672.
- Suzuki, H. and K. Yamamoto, Effects of swirl flow on flame structure and stability in turbulent combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.79, No.804 (2013), pp.1714-1723 (in Japanese).
- Sze, L. K., Cheung, C. S. and Leung, C. W., Appearance, temperature, and NO_x emission of two inverse diffusion flames with different port design, *Combustion and Flame*, Vol.144 (2006), pp.237-248.
- Tanahashi, M., Turbulent combustion II – Measurements and direct numerical simulation, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.52, No.159 (2010), pp.39-48 (in Japanese).
- Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D. and Ishizuka, S., Flow field of turbulent premixed combustion in a cyclone-jet combustor, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.2, No.1 (2007), pp.90-101.
- Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S. and Onuma, Y., PIV measurement and turbulence scale in turbulent combustion, *Heat Transfer Asian Research*, Vol.35, Issue 7 (2006), pp.501-512.
- Yamamoto, K., Kato, S., Isobe, Y., Hayashi, N. and Yamashita, H., Lifted flame structure of coannular jet flames in a triple port burner, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33 (2011), pp.1195-1201.
- Yamamoto, K., Nishizawa, Y. and Onuma, O., Persistence of laminar flamelet structure under highly turbulent premixed combustion, *JSME International Journal, Series B*, Vol.47, No.6 (2003), pp.408-415.
- Yamamoto, K., Isobe, Y., Hayashi, N. and Yamashita, H., A study on flame behavior of lifted flames in a triple port burner, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.54, No.170 (2012), pp.285-290 (in Japanese).
- Yamamoto, K. and Takemoto, M., Measurement of PAH and soot of diffusion flames in a triple port burner, *Fuel Processing Technology*, Vol.107 (2013), pp.99-106.