

■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挙動に関する研究

A Study on Flame Behavior of Lifted Flames in a Triple Port Burner

山本 和弘*・磯部 佑介・林 直樹・山下 博史

YAMAMOTO, Kazuhiro*, ISOBE, Yusuke, 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-shi, Aichi, 464-8603 Japan

2012年5月30日受付; 2012年9月3日受理/Received 30 May, 2012; Accepted 3 September, 2012

Abstract : In this study, we simulated the 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 flame behavior and flow field were investigated when the external air flow velocity was increased at constant internal air flow and fuel flow velocities. 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 corresponds approximately to the burning velocity of the leading-edge flame. Since two flames are formed in the triple port burner, the inner or outer flame is affected by the other flame located more upstream. Due to the thermal expansion of the upstream outer flame, the downstream inner flame is pushed inward. Since the flame is stabilized at the position where the burning velocity of leading-edge flame and the incoming flow velocity are balanced, the axial velocity toward the leading-edge flame is important to discuss the transition of flames. The inner flame re-attachment is caused by the velocity change toward the leading-edge flame. As a result, the unique flame behavior of flip-flop between inner and outer flames occurs.

Key Words : Non-premixed Flame, Lifted Flame, Numerical Analysis, Leading-edge Flame

1. 緒言

一般に予混合燃焼においては、当量比を量論よりも小さくすることによって火炎温度を低下できるため、比較的容易に NO_x 排出量を低減できる。一方非予混合燃焼(拡散燃焼)は、燃料流量と空気流量によって求められる総括当量比を小さくしても、量論の位置で火炎が形成されることから火炎温度を制御できず、低 NO_x 燃焼を行うことは困難である。そこで、これまでに NO_x 排出量を抑制する様々な方法が検討されてきた。例えば、濃淡燃焼[1-4]、炉内循環渦を利用した燃焼[5-7]、振動燃焼[8]などが挙げられる。また最近では、管状火炎バーナ[9,10]や旋回噴流燃焼器[11]を利用した燃料と酸化剤の急速混合による NO_x 抑制技術の検討が行われている。また、間欠燃料噴射を利用した燃焼技術も研究されている。浮き上がり火炎が形成されると燃料と空気の予混合化が進み、低 NO_x 燃焼が実現できることが確認された[12]。火炎挙動を実験により観察したと

ころ、燃料の噴射停止中に火炎の一部がバーナの基部から浮き上がった位置に形成され、燃料と空気の予混合化が進んで火炎温度が低下したためであることがわかっている。

また我々は、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に着目し、NO_x やすすについて検討してきた[13-15]。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。その結果三重管バーナでは、両方の火炎がバーナに付着した付着火炎(Attached flames, Fig.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, Fig.1b)、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, Fig.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, Fig.1d) の4つの火炎形態が存在することがわかっている。これらの火炎が形成される流速条件については後で説明するが、実験によって計測できるデータには限りがあるため、三重管バーナにおける詳細な火炎構造の検討や Fig.1 のような火炎形態の変化の議論が不十分であった。

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

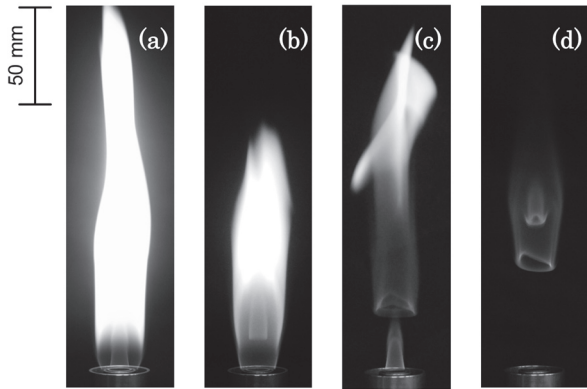


Fig.1 Photographs of flames in a triple port burner

そこで本研究では、三重管バーナの数値シミュレーションを行い、火炎構造について検討した。特に今回は、浮き上がり火炎が形成されている基部近傍の流れ場と火炎位置の時間変化を詳細に調べ、それぞれの火炎形態に遷移する過程を検討した。

NOMENCLATURE

- c_p specific heat at constant pressure
- D_i diffusion coefficient of species i
- g gravitational acceleration
- h_i enthalpy of species i
- m_i molecular weight of species i
- p pressure
- R^0 universal gas constant
- \mathbf{u} velocity
- T temperature
- w_i production rate of species i
- Y_i mass fraction of species i
- λ thermal conductivity
- ρ density

2. 解析モデルと計算方法

解析モデルと座標系を Fig.2 に示す。バーナは同軸三重管構造を持ち、中央から順に空気(ノズル1)、燃料(ノズル2)、空気(ノズル3)を鉛直上向きに噴出させる。これらの流速分布は、リムの壁面で速度がゼロとなるポアズイユ流れとした。燃料にはメタンを用いた。燃焼場は2次元軸対称とし、座標はバーナ出口の中心を原点に、半径方向に r 軸、高さ方向に z 軸としている。計算領域の大きさは、半径方向に 16.8 mm、流れ方向に $-1 \sim 200$ mm である。実際のバーナの大きさ[15]を参考に、内側の空気ノズルの内径を 5 mm、燃料ノズルの内径を 7 mm、外側の空気ノズルの内径を 13.5 mm とし、それぞれのリムの厚さを 1 mm とした。また、計算安定化のため一番外側に周囲流(流速 0.1

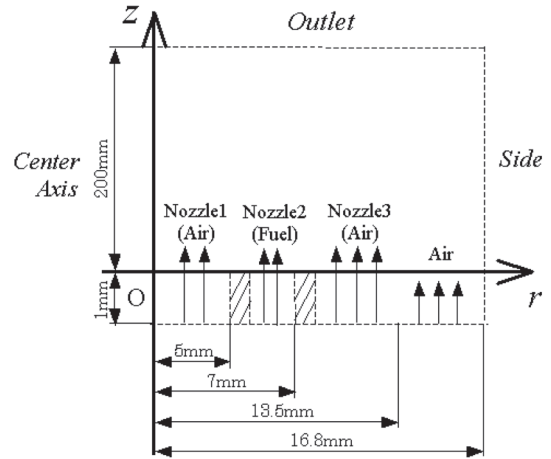


Fig.2 Analytical model and coordinate system

Table 1 Flow conditions

| | U_{1A} (m/s) | U_{2F} (m/s) | U_{3A} (m/s) |
|--------|----------------|----------------|----------------|
| Case A | 0.4 | 0.6 | 0.2 ~ 0.8 |
| Case B | 0.7 | 0.6 | 0.1 ~ 1.1 |

m/s の一様流)を配置した。なお、中心軸には対称条件、出口には自由流出条件、側面にはすべりなし壁面条件を適用した。今回は燃料流速 (U_{2F}) を 0.6 m/s 一定とし、内側の空気流速 (U_{1A}) および外側の空気流速 (U_{3A}) を変化させた場合の火炎形態について検討した。今回の解析条件を Table 1 に示す。ここで、 $U_{1A} = 0.4$ m/s を Case A、 $U_{1A} = 0.7$ m/s を Case B としている。どちらの条件でも、内側の空気流速と燃料流速を一定にし、外側の空気流速のみを増加させたシミュレーションを行った。

次に解析方法について説明する。まず、今回用いた質量、運動量、エネルギーおよび化学種の質量の保存式および理想気体の状態方程式を式(1)~(5)に示す。ここで、 ρ は密度、 T は温度、 c_p は定圧比熱、 λ は熱伝導率、 Y_i 、 D_i 、 h_i 、 w_i はそれぞれ成分 i の質量分率、拡散係数、比エンタルピー、質量生成速度を示す。化学種の保存式において Soret 効果(熱拡散)、圧力拡散は無視し、エネルギー保存式において Dufour 効果、輻射、粘性散逸および圧力仕事 Dp/Dt を無視している。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{P}) + \rho \mathbf{g} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) - w_i = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) - \frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i - \frac{\rho}{c_p} \sum_i (c_{p,i} D_i \nabla Y_i \cdot \nabla T) = 0 \quad (4)$$

$$p = \rho R^0 T \sum_i \frac{Y_i}{m_i} \quad (5)$$

これらの離散化には有限体積法を用い、対流項には一次風上法、圧力と速度のカップリングには SIMPLE 法を適用し、時間積分には一次精度陰解法を用いた。比熱などの物性値は JANAF table の値を参考にし、輸送係数については Smooke らの Simplified Transport Model を用いた[16,17]。反応機構には、16 種の化学種と 25 組の素反応から成る Smooke のメタン-空気系 Skeletal 素反応機構を用いた[17]。

3. 解析結果および考察

3.1. 火炎挙動と火炎構造

まず、Case B の $U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$ について行ったシミュレーション結果をもとに、三重管バーナに形成される火炎の挙動について説明する。 U_{3A} を 0.1 m/s から 1.1 m/s まで増加させたときの火炎構造の変化を調べた。Fig.3 に $U_{3A} = 0.1, 0.4, 0.8, 1.1 \text{ m/s}$ における熱発生速度の分布を示す。いずれも火炎位置がほぼ一定になったときの結果を示している。これによると、 $U_{3A} = 0.1 \text{ m/s}$ の Fig.3a では両方の火炎がノズル出口に付着した付着火炎が形成されているが、外側の空気流速をさらに増加させると Fig.3b に示すように内側の火炎がやがて浮き上がりはじめる。さらに外側の空気流速を増加させると、外側の火炎も浮き上がり二重浮き上がり火炎が形成される。その後は、両方の火炎の浮き上がり高さが増加していくが、内側火炎と外側火炎の浮き上がり高さが同じになると、外側の空気流速を増加させているにもかかわらず内側の火炎だけが上流に移動して再付着し、外側の火炎のみが浮き上がる外側浮き上がり火炎となった。

外側の空気流速のみを変化させているにもかかわらず、先に内側の火炎のみが浮き上がっている。また、外側の火炎が浮き上がるとやがて内側の火炎が上流に移動して再付着しており、我々はこの一連の火炎挙動を外側と内側の火炎の入れ替え (Flip-flop) とよんだ[15]。この興味深い火炎挙動を示す理由については、次節において詳細に検討する。

次に、これらの浮き上がり火炎の火炎構造について調べるため、Flame index [15,18]を求めて検討した。その結果、浮き上がり火炎の先端部には、希薄予混合火炎、拡散火炎、過濃予混合火炎から成るトリプルフレームが存在することがわかった。特に、Fig.3c で示した二重浮き上がり火炎では、燃料ノズルの下流に位置する二つの過濃予混合火炎が連結する構造が見られた。Mizobuchi らは、浮き上がり火炎の流れ場と火炎構造について詳細に検討しており、浮き上が

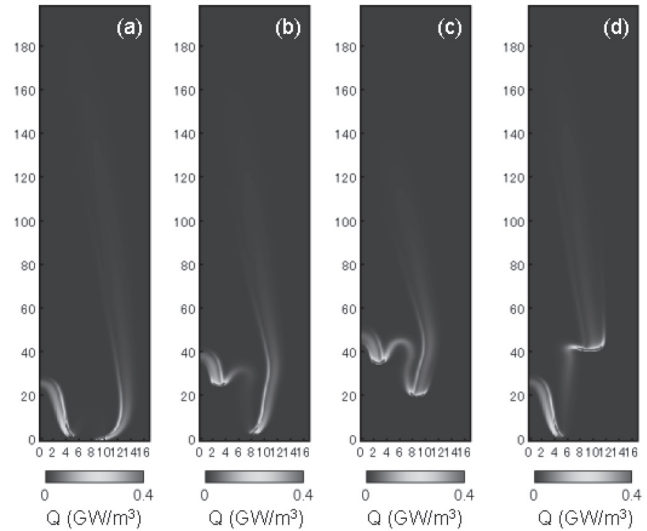


Fig.3 Distributions of heat release rate; $U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$; (a) $U_{3A} = 0.1 \text{ m/s}$, (b) $U_{3A} = 0.4 \text{ m/s}$, (c) $U_{3A} = 0.8 \text{ m/s}$, (d) $U_{3A} = 1.1 \text{ m/s}$

り火炎の基部近傍では、流入する混合気の流速と燃焼速度がほぼつりあっていることを確認している[19,20]。そこで次節において、火炎先端付近の流れ場に注目し、Case A と Case B のそれぞれの条件において火炎の遷移過程を考察した。

3.2. 火炎先端部の流れ場と火炎形態の遷移

3.2.1. Case A ($U_{1A} = 0.4 \text{ m/s}$)

まず、 $U_{1A} = 0.4 \text{ m/s}$ 一定とし、 U_{3A} を 0.2 m/s から 0.8 m/s まで増加させたときの火炎構造の変化を調べた。Fig.4 に $U_{3A} = 0.2, 0.5, 0.8 \text{ m/s}$ における熱発生速度の分布を示す。いずれも定常になったときの結果を示している。これによると、 $U_{3A} = 0.2 \text{ m/s}$ の場合は両方の火炎がノズル出口に付着した付着火炎が形成されているが、外側の空気流速を増加させると外側の火炎が浮き上がった。外側の空気流速を増加させると外側の火炎が単に浮き上がることから、浮き上がり火炎への遷移は付着火炎近傍の流れと燃焼速度のつり合いにより説明できるものと思われる[21]。さらに外側の空気流速を増加させると、浮き上がり高さが増加した。Flame index と Mixedness [18]をもとに火炎構造を調べたところ、この浮き上がり火炎の先端部に、希薄予混合火炎、拡散火炎、過濃予混合火炎から成るトリプルフレームが存在していることがわかった。

次に、浮き上がり火炎近傍の熱発生速度が極大値をとる最上流位置を火炎先端とし、 U_{3A} を増加させた場合の火炎の浮き上がり高さ L_f と火炎先端部での熱発生速度の最大値 Q_{max} を調べた。その結果を Fig.5 に示す。これによると、外側の空気流速を増加させて浮き上がり高さが増加すると、熱発生速度の最大値も増加することがわかった。したがって、外側の空気流速を増加させることにより火炎先端の燃焼が強められていると考えることができる。

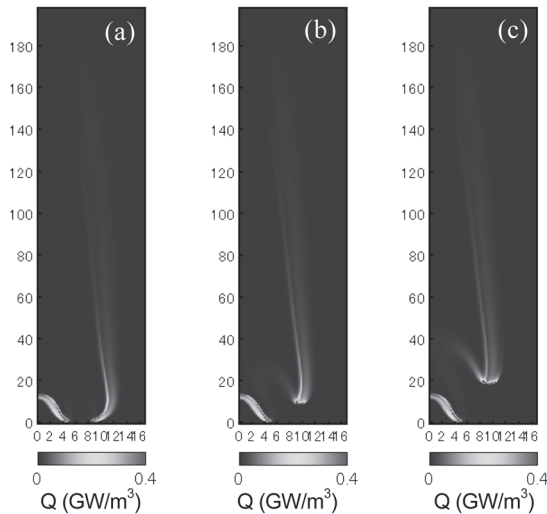


Fig.4 Distributions of heat release rate; $U_{1A}=0.4\text{m/s}$;
(a) $U_{3A}=0.2\text{m/s}$, (b) $U_{3A}=0.5\text{m/s}$, (c) $U_{3A}=0.8\text{m/s}$

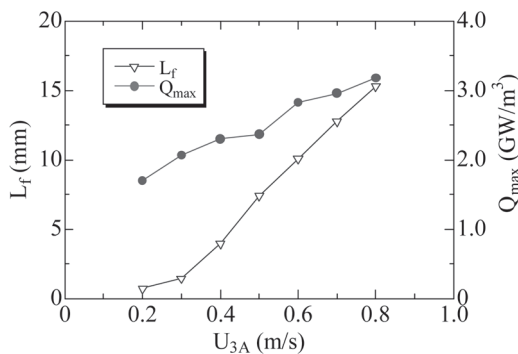


Fig.5 Liftoff height and heat release rate at $U_{1A}=0.4\text{m/s}$

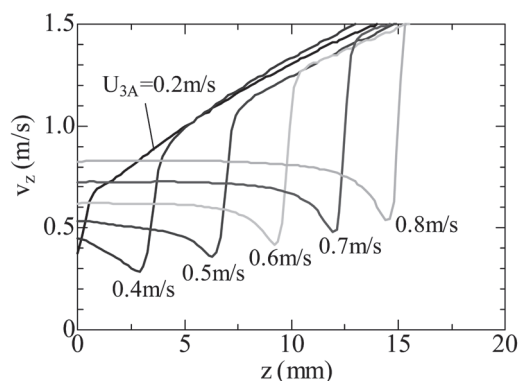


Fig.6 Distributions of axial velocity at $U_{1A}=0.4\text{m/s}$

また、火炎の先端が存在する半径方向位置において、軸方向速度の分布を調べた。外側の空気流速を増加させたときの各軸方向速度分布を Fig.6 に示す。これによると、付着火炎が形成されている $U_{3A} = 0.2 \text{ m/s}$ を除き、下流にいくにしたがい軸方向速度は次第に小さくなり、いったん極小値をとった後急激に増大していることがわかる。浮き上がり火炎の基部近傍では、予熱帯において熱膨張により流れ

が広がるため、火炎に近づくにつれて軸方向速度が次第に小さくなるためである。Fig.6 の軸方向速度の極小値を燃焼速度と考えると、外側の空気流速を増加させることにより燃焼速度が増加していることがわかった[22,23]。外側の空気流速を増加させると火炎の浮き上がり高さが増加し、燃焼速度は増加する。すなわち、火炎に流入する速度(火炎に対向する速度)と燃焼速度がバランスする位置が移動し、浮き上がり高さが増加したと考えることができる。

3.2.2. Case B ($U_{1A} = 0.7 \text{ m/s}$)

Fig.3 で示したように、Case B の条件では外側の空気流速を 0.1 m/s から増加させると、付着火炎→内側浮き上がり火炎→二重浮き上がり火炎→外側浮き上がり火炎へと遷移する。Case A では外側の空気流速を増加させると外側の火炎が浮き上がるが、Case B ではまず内側の火炎が浮き上がっていることから、内側の空気流速により異なる火炎形態をとることがわかる。そこで、それぞれの火炎形態の遷移過程に分けて、火炎挙動と流れ場を検討することにした。

①付着火炎から内側浮き上がり火炎への遷移

まず、半径方向および軸方向における内側火炎の先端位置を調べた。外側空気流速を 0.1 m/s から 1.0 m/s まで変化させたときの 0.1 m/s ごとの位置を Fig.7 に示す。これによると、内側火炎が浮き上がる際、火炎位置が中央へ移動していることがわかる。特に、 U_{3A} を 0.2 m/s から 0.3 m/s へ増加させたときの火炎の移動が顕著であった。

そこで半径方向速度について調べた。その結果、内側の付着火炎の外側(内側火炎が浮き上がった後は浮き上がり火炎の予熱帯より上流部)に、半径方向速度が負の内側に向かう流れが存在していることがわかった。また軸方向速度は、中心部ほど大きくなっていった。これは、内側空気の本流出口において、空気の流速分布をポアズイユ流れで与えているためである。これにより、中央へ近づくにつれて空気の噴出速度が大きくなる。したがって、 U_{3A} を増加させるとまず内側へ向かう流れにより火炎が形成される位置(量論的位置)が中央へと移動し、その後火炎先端の位置が下流に移動して内側浮き上がり火炎へ遷移したものと思われる。

②内側浮き上がり火炎から二重浮き上がり火炎への遷移

その後、 U_{3A} を約 0.4 m/s まで増加させると外側火炎も浮き上がる (Fig.3b→Fig.3c)。このときの U_{3A} の値は、メタンの最大燃焼速度にほぼ相当することから、 U_{3A} が 0.4 m/s 以上になると外側の火炎も燃焼速度とバランスできず、浮き上がって二重浮き上がり火炎が形成されたものと思われる[21]。さらに U_{3A} を増加させると浮き上がり高さは増加していく。 U_{3A} を増加させると、火炎先端部に流入する速度は大きくなるが、浮き上がり高さの増大に伴い火炎先端部の予混合化が進み燃焼速度も大きくなるため、両者の速度がバランスする下流の位置に火炎が移動することで浮き上

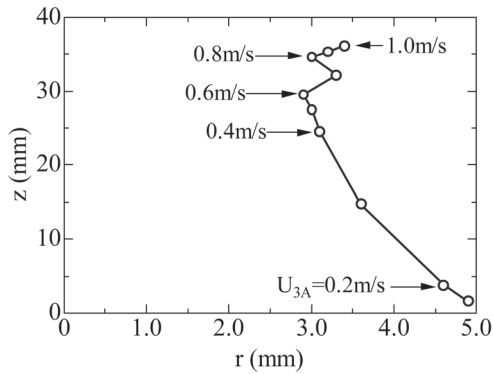


Fig.7 Positions of inner lifted flame at $U_{1A}=0.7\text{m/s}$

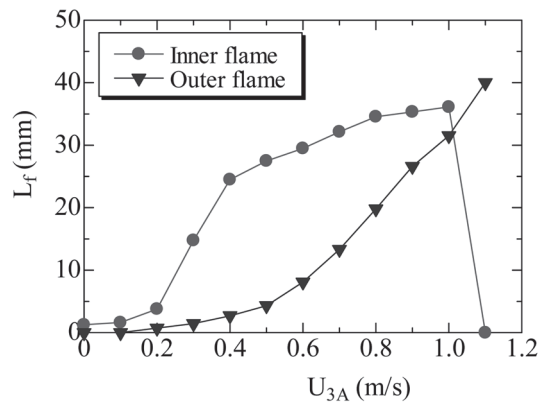


Fig.8 Variations of liftoff height by changing U_{3A}

がり高さが変化する。

③二重浮き上がり火炎から外側浮き上がり火炎への遷移

さらに U_{3A} を増加させ、約 1.1 m/s となると内側の浮き上がり火炎が上流側に移動し、再付着するという興味深い現象が見られた (Fig.3c→Fig.3d)。この現象について検討するため、内側と外側の火炎の浮き上がり高さ L_f を調べた。その結果を Fig.8 に示す。これによると、 U_{3A} が 1.0 m/s までは、内側火炎の浮き上がり高さが常に外側火炎の浮き上がり高さよりも大きいことがわかる。ただし、 U_{3A} を 1.0 m/s 以上にすると両者の浮き上がり高さが逆転し、内側の火炎が再付着することがわかった。

そこで、 U_{3A} が 1.0 m/s から 1.1 m/s の間における火炎の時間変化を詳細に検討した。既に報告[15]した温度分布の時間変化をもとに再度検討する。その結果を Fig.9 に示す。ここでは、外側の空気流速を 1.0 m/s から 1.1 m/s に変更したときの時刻をゼロ ($t=0$ ms) とし、その後 40 ms から 400 ms まで経過するまでの各時刻における温度分布を示している。また、内側火炎と外側火炎の先端部における最高温度を図に示した。これによると、約 120 ms 後に内側火炎と外側火炎の浮き上がり高さがほぼ等しくなり、その後、内側火炎が上流側に移動している様子がわかる。各時刻における内側火炎と外側火炎の先端部の温度を比較したところ、火炎が時間的に変動しているため数十度の温度変動はあるものの、火炎先端部の温度はそれほど大きく変化していないことがわかった。したがって、内側火炎の燃焼反応が大きく促進されて火炎が上流側に移動し、再付着したわけではないといえる。

そこで、Fig.9 で示した各時刻の火炎上流部における流れ場を調べた。経過時刻が $t=40, 120, 240$ ms における熱発生速度分布を速度ベクトルとともに示した図を Fig.10 に示す。浮き上がり火炎の基部近傍に流入する流れについて検討するため、火炎先端付近を拡大して示した。これによると、外側火炎が内側火炎よりも上流に存在する場合には、内側火炎は外側火炎によって誘起された流れにより中心軸側に押し付けられていることがわかった。

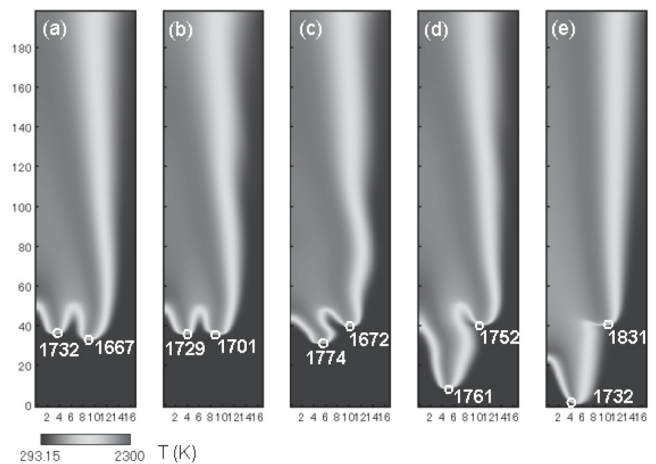


Fig.9 Distributions of temperature by changing U_{3A} from 1.0 to 1.1 m/s at (a) $t=40$ ms, (b) $t=120$ ms, (c) $t=240$ ms, (d) $t=300$ ms, (e) $t=400$ ms

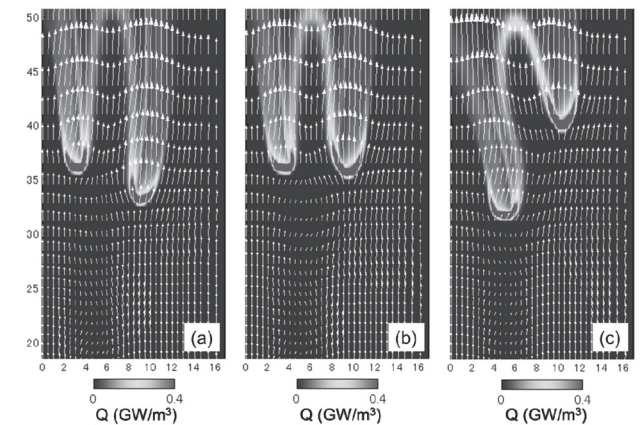


Fig.10 Distributions of heat release rate with velocity vector at (a) $t=40$ ms, (b) $t=120$ ms, (c) $t=240$ ms

ただし、 U_{3A} を 1.0 m/s 以上にすると両者の浮き上がり高さが逆転する。この場合、外側の火炎は内側の火炎よりも下流に位置しているため、内側の火炎に及ぼす外側火炎の影響がなくなることになる。これにより、内側火炎はより外側に移動する。その結果、ノズルリム部下流の流れのゆ

るやかな領域に内側火炎が入り込む。この後の火炎挙動を解析した結果、内側火炎はこの流れがゆるやかな領域に沿って上流に移動していた。したがって、 U_{3A} が 1.0 m/s より大きくなると内側火炎より外側火炎の浮き上がり高さが大きくなり、火炎先端部に流入する速度が著しく小さくなることで、内側火炎が再付着することがわかった。

4. 結言

本研究では、三重管バーナの数值シミュレーションを行い、外側の空気流速を増加させたときの火炎形態の変化と流れ場について検討を行った。その結果、火炎形態の遷移過程には、浮き上がり火炎の燃焼速度と火炎先端部に流入する流れのつり合いが重要であることが明らかとなった。また、内側火炎と外側火炎の相互作用により浮き上がり火炎の基部近傍の流れが変化し、浮き上がり火炎への遷移や火炎の再付着が起こることがわかった。

References

- Sogo, S., Homma, R. and Hase, K., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.617, 290-297 (1998).
- Watanabe, T. and Nakajima T., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.66, No.643, 904-910 (2000).
- Yasuda, H., Asato, K., Miyasaka, T., Hijikata, Y., Miyashita, T., Kurachi, S., Hagi, S., Umeda, Y., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.716, 1081-1088 (2006).
- Yasuda, H., Asato, K., Miyasaka, T., Kurachi, S., Hagi, S., Umeda, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.48, No.145, 241-249 (2006).
- Claypole, T. C., and Syred, N., *Proc. Comb. Inst.*, Vol.18, 81-89 (1981).
- Terasaki, T. and Hayashi, S., *Proc. Comb. Inst.*, Vol.26, 2733-2739 (1996).
- Noda, S., Inohae, J. and Saldi, Z. S., *Proc. Comb. Inst.*, Vol.31, 1625-1632 (2007).
- Kegasa, A., Miyafuji, A., and Tsujishita, M., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.675, 3219-3224 (2002).
- Munehiro, I., Okada, K., and Ishizuka, S., *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.48, No.145, 250-256 (2006).
- Ishizuka, S., Motodamari, T., Shimokuri, D., *Proc. Combust. Inst.*, Vol.31, 1085-1092 (2007).
- Hwang, C. H., Lee, S., Kim, J. H., Lee, C. E., *Applied Energy*, Vol.86, Issues 7-8, 1154-1161 (2009).
- Isobe, Y., Yamamoto, K., Yamashita, H., and Uejima, H., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.75, No.760, 2528-2534 (2009).
- Kanagawa, Y., Yamamoto, K., Oshima, H., Yamashita, H., and Uejima, M., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.74, No.738, 505-512 (2008).
- Oshima, H., Yamamoto, K., Oshima, Hayashi, N., Yamashita, H., and Okuyama, G., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.74, No.748, 2731-2737 (2008).
- Yamamoto, K., Kato, S., Isobe, Y., Hayashi, N., and Yamashita, H., *Proc. Comb. Inst.*, Vol. 33, 1195-1201 (2011).
- JANAF thermochemical tables*, Third Edition (1985).
- Smooke, M. D., *Reduced Kinetic Mechanism and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, Springer-Verlag 1-28 (1991).
- H. Yamashita, M. Shimada, and T. Takeno, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.26, 1226-1233 (1996).
- Mizobuchi, Y., Tachibana, S., Shinio, J., Ogawa, S., Takeno, T., *Proc. Combust. Inst.*, Vol.29, 2009-2015 (2002).
- Mizobuchi, Y., Shinio, J., Ogawa, S., Takeno, T., *Proc. Combust. Inst.*, Vol.30, 611-619 (2005).
- Takahashi, F., Schmoll, J. W., *Proc. Combust. Inst.*, Vol.23, 677-683 (1990).
- Santoro, V. S., Liñán, A., Gomez, *Proc. Combust. Inst.*, Vol.28, 2039-2046 (2000).
- Liñán, A., Fernández-Tarrazo, E., Vera M., Sánchez A., *Comb. Sci. Tech.*, Vol.177, 933-953 (2005).