

水平噴流放射状拡散火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究

出口幸治* 吉本隆光**

Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet diffusion Flame

Koji IDEGUCHI* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The radial horizontal jet diffusion flame is formed by gas fuel that is spout in the radial direction. The radial horizontal jet diffusion flame exposes to surrounding air more widely than the vertical diffusion flame. Therefore the size of the combustor is smaller, because the shorter flame is formed. It is important to investigate the stability and characteristics of combustion. The temperature of the inside flame is measured for researching the structure of the flame. The lifting or below-off velocity is measured with increasing the fuel or co-flow air velocity. The configurations and behaviors at the flame base are observed in detail and investigated by the high speed video camera with the method of Schlieren Photography. Then experiments and numerical computations by using PHOENICS are conducted to clarify the flame structure which dominates the flame holding and lifting mechanism.

Keywords : horizontal diffusion flame, hydrogen flame, low calorific

1. 緒言

水平噴流放射状拡散火炎は鉛直方向火炎⁽¹⁾よりも火炎面と周囲空気との接触面積が大きく、同燃料流量なら鉛直火炎よりも火炎長が短いといった特徴を有している。したがって、燃焼器を小型にすることが可能であると言える⁽²⁾。小型化によりコスト削減から移動用燃焼器として使用される場合もある。本研究では水平噴流放射状拡散火炎の基礎的研究として単純にノズルにスリットを施す。また水素、メタンを主燃料とし、希釈時には窒素を用いる。燃料噴出速度や周囲流速を変化させ火炎基部や形状、温度、浮き上がり・吹き飛び現象に至る過程や水平方向拡散火炎の火炎構造特性の調査を行う。

2. 実験装置

2.1 フロー図 ボンベより圧力調整器で圧力を減圧した燃料をフロート式流量計により、流量を調整する。図1にフロー図を示す。燃料を燃料噴出ノズルから水平方向に噴出させ、水平噴流放射状拡散火炎を形成する。また火炎挙動、形状は直接写真とシュリーレン写真により観察する。図2は作製したノズルの設計図である。ノズルスリット幅は 1.0 mm (φ3.66 mm に相当)、0.5mm(φ2.58mm に相当)、0.35mm(φ2.16mm に相当)を用意した。

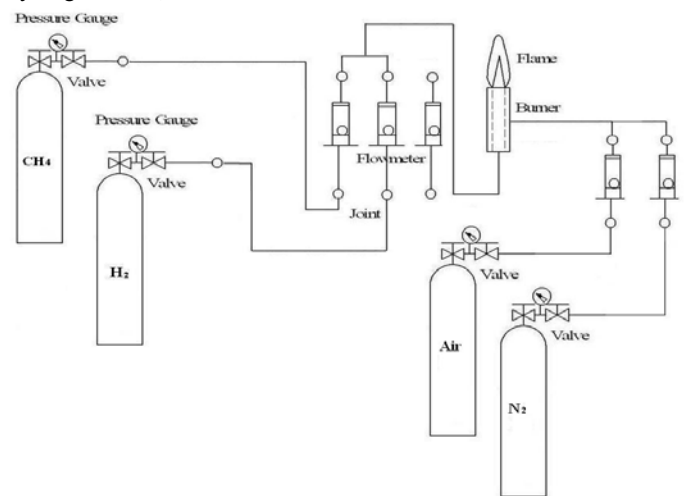


図1 フロー図

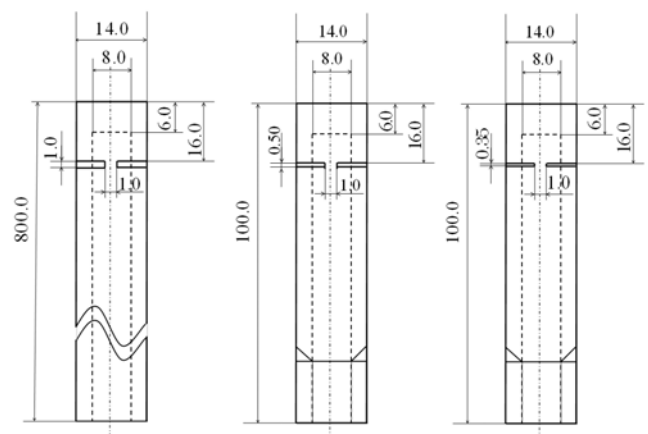


図2 製作ノズル設計図

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

2.2 火炎内温度分布測定器 火炎の温度測定には0.1mmのR型熱電対(Pt-PtRh13%)を用いる。熱電対を2本の円筒状絶縁材に通し、熱接点を直線にのばした簡易温度測定器である。なお、測定値に輻射損失等補正は行っていない。温度分布がどのようにになっているかに重点をおいて測定を行う。

2.3 シュリーレン写真 シュリーレン撮影法の原理は、透明体中で温度、圧力などにより密度が変化して、屈折率の場として与えられているとき、ここを通る光が曲げられ、それにより光の明暗として観察される。本研究では、火炎が形成され始める火炎基部が安定性に重要であると考え、その部分の挙動及び形状を詳細に観察、測定している。図3にシュリーレン撮影法の原理図を示す。点光源から凹面鏡M1に光が入射すると、反射光は平行光線となる。その光が測定対象を透過した後、凹面鏡M2に入射して、その反射光は収斂する。収斂した光の焦点をナイフエッジで切断し、その光を後方の高速度ビデオカメラで撮影する。

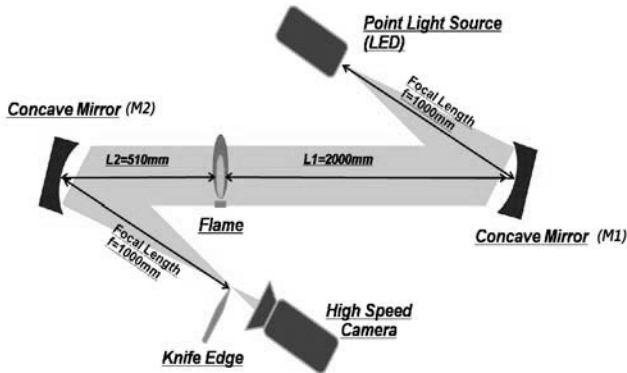


図3 シュリーレン撮影の装置概念図

ナイフエッジで収斂させられた光線の焦点を切断する原理図を図4に示す。図3でのナイフエッジ付近を真上から見た状態である。測定対象での屈折率により曲げられた光線は、ナイフエッジに近づく(A側)か、遠ざかる(B側)ことで切断される光の量が変化する。測定対象部分で屈折が起こり、ナイフエッジから遠ざかるように光線が屈折すると、ナイフエッジで遮られる部分が少なくなるので、その部分はスクリーン上で明るくなる。

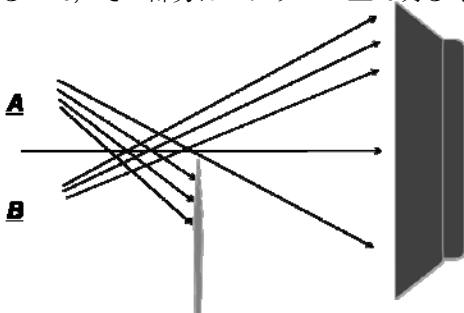


図4 密度分布発生の原理

また、ナイフエッジへ近づくように光線が屈折した場合では、ナイフエッジで遮られる部分が多くなり、その部分はスクリーン上で暗くなる。これらにより測定対象の密度分布が明暗のコントラストとして観察することができる。光源には白色LEDを用いている。

2.4 水冷式サンプリングプローブ 図5に水冷式サンプリングプローブの設計図と外観を示す。火炎内の化学測定の際に使用するが、水素などはサンプリングプローブの融点よりも火炎温度が高くなってしまふ。そこで管内に水を循環させ冷却を行った。

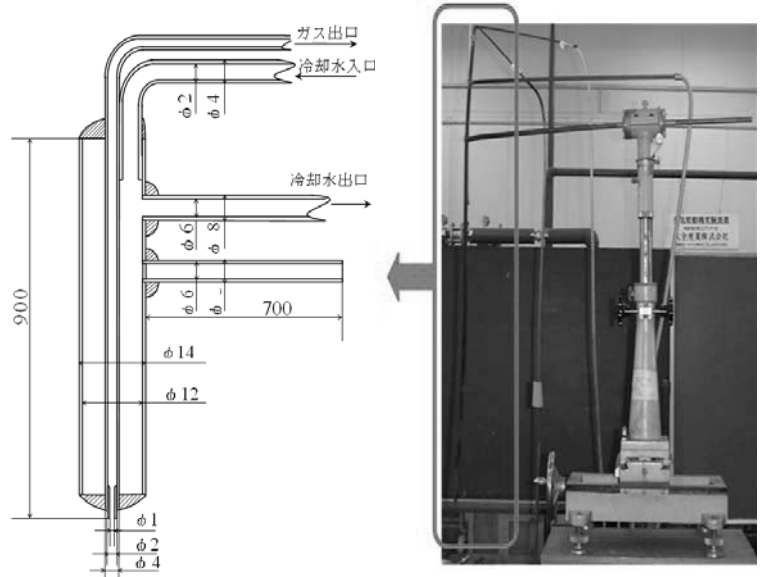


図5 サンプリングプローブ

3. 実験結果

3.1 単孔ノズルとの比較 図6は水平噴流火炎と鉛直噴流火炎において燃料噴出面積を変化させ、浮き上がりが発生する燃料噴出速度を示したものである。

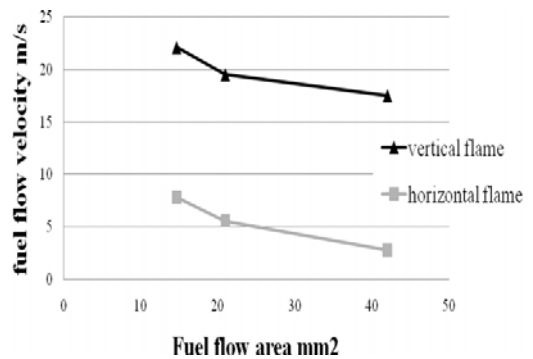
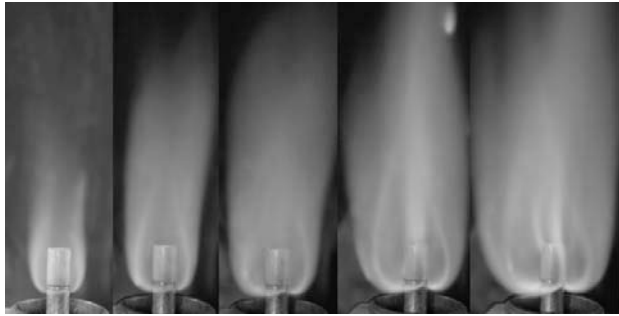


図6 浮き上がり速度と噴出面積の相関

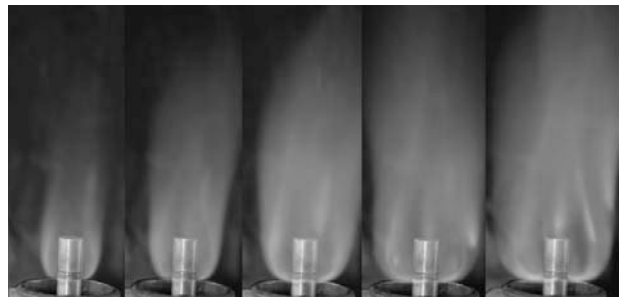
水平方向拡散火炎は鉛直方向拡散火炎に比べ、火炎を安定に保ちにくいと言える。また燃料の噴出方向に関わらず噴出面積の増加に伴い、火炎は浮き上がりやすいくことがわかる。

3.2 噴出速度の増加に伴う火炎形状変化 図7 (a)はSW(Slit Width)=0.35mm, (b)はSW=0.5mmの各流量における火炎形状を直接写真で示す。使用した燃料はどちらも純水素である。この流量範囲であれば、スリットの違いによる大きな影響はないと判断できる。(c)は共同研究者によって行われた、水素の数値計算による各噴出速度のOH分布⁽⁹⁾である。



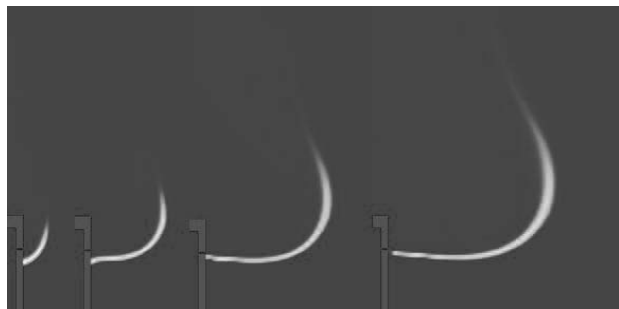
Q L/min	3	6	9	12	15
Vj m/s	3.40	6.80	10.2	13.6	17.0

(a) SW=0.35mm



Q L/min	3	6	9	12	15
Vj m/s	2.38	4.76	7.15	9.53	11.9

(b) SW=0.5mm



(c)OH濃度の数値計算結果

図7 燃料噴出速度増加に伴う火炎形状の変化

実際の火炎においても、数値解析においても燃料噴出速度の増加に伴い火炎面は半径方向への拡がりが見られ、また火炎のふくらみ部も大きくなるのがわかる。

3.3 非燃焼ガス流れ 図8はノズルスリット幅0.35mmを使用し、未燃焼状態を考慮するためHeを使用した。噴出流量を増加させた様子をシュリーレン写真で示す。

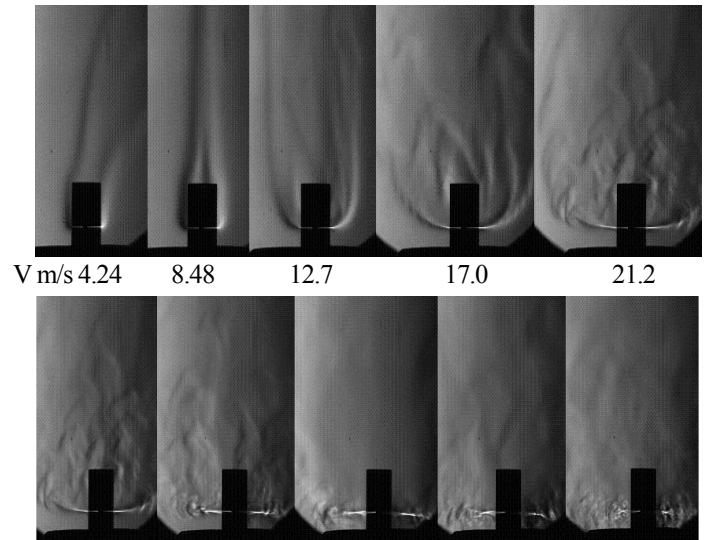
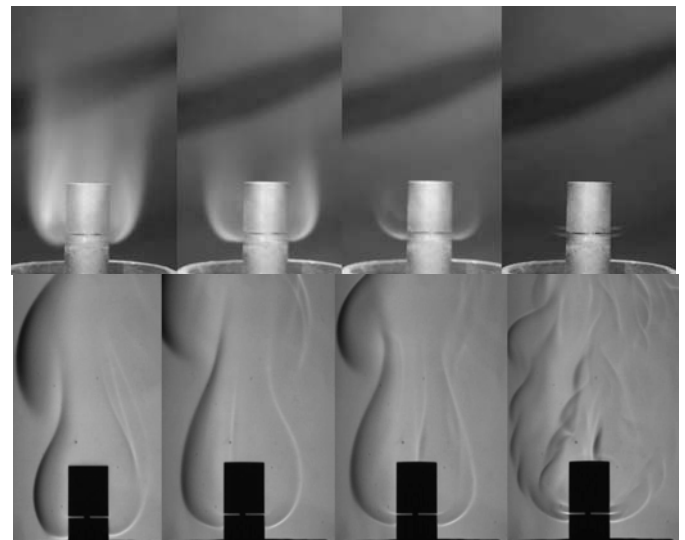


図8 噴出速度増加に伴うガス流れの可視化

半径方向への火炎の拡がりには、ガスの噴出流量が影響することがわかる。また、乱流域が火炎下流部から上流へ遷移していることもわかる。

3.4 希釈割合による影響 ノズルスリット幅0.35mmのものを使用し、燃料には水素、燃料速度2.38m/sと一定にした時の火炎の様子を図9に示す。窒素割合の増加に伴う様子を上段の直接写真、下段のシュリーレン写真で示す。水素混合割合の減少の伴い火炎長は短くなり、燃え切りも早くなる。



H₂:N₂ 10:0 7:3 5:5 3:7
図9 希釈割合の変化に伴う火炎形状の遷移

3.5 火炎面内の可視化 火炎内の挙動を可視化するため黒鉛の粉末(φ≒40μm)をガス燃料中に混合した。シャッター開放中での黒鉛の燃焼が流線として観測される。図10(a)は燃料に水素、ノズルスリット幅0.5mmを用い、噴出速度11.9m/sの乱流状態とし可視化を行った。

上段が直接写真, 下段がシュリーレン写真である. さらに火炎基部拡大図を(b)に示す.

図 10 (a)より乱流状態における水平噴流放射状拡散火炎の火炎形状は定常状態ではなく, 時間的, 周期的な変移が見られる. これは鉛直方向の拡散火炎には見られない現象であり, 水平方向拡散火炎特有の現象であると言える. また図 10 (b)は(a)でのある瞬間の写真である. これより火炎基部において循環している様子が黒鉛の燃焼による軌跡からわかる. 図では手前にスリット支え部があり周囲の空気はこの支え部を対称に左右で循環が見られる.

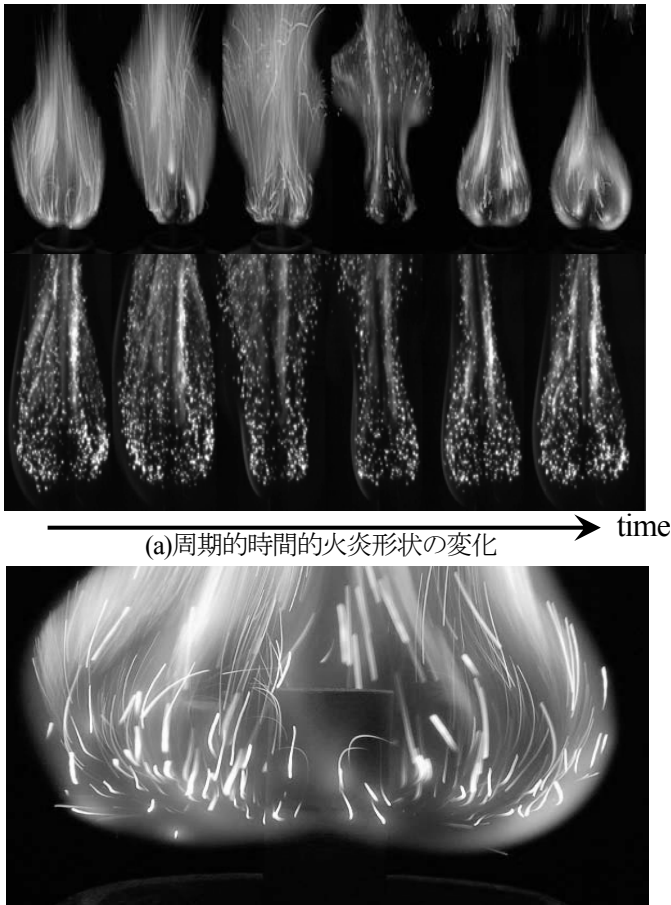


図 10 黒鉛により可視化した火炎形状

3.6 単孔ノズル流れとの比較 図 11 は単孔ノズルを鉛直方向に設置したときのシュリーレン写真である. 燃料に水素を使用し, 外形 $D=10\text{mm}$, 内径 $d=7.6\text{mm}$ のノズルを用い, 燃料噴出速度を 2.72m/s とした.

直接写真では鉛直方向拡散火炎に時間的な火炎外部形状の変化は見られない. またシュリーレン写真でも中心部の黒鉛の大部分が拡散することなくそのまま上昇していることから, 図 11 に見られる火炎外郭の変化は火炎自体の変化ではない. シュリーレン写真によって周囲よりも高温である火炎近傍に存在する空気との密度差によるためであると考えられる.

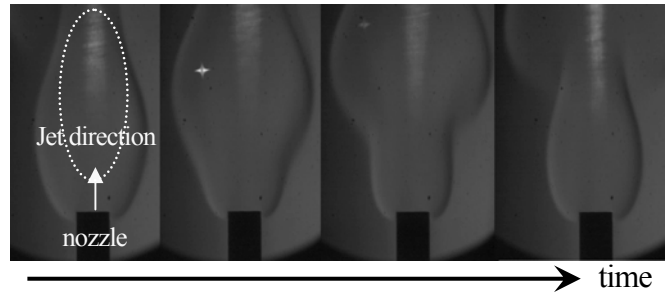


図 11 鉛直単孔ノズルでの時間的火焰形状の変化

図 12 は上記で使用した同単孔ノズルを水平方向に設置したものである. 上段が直接写真, 下段がシュリーレン写真である. 燃料噴出速度は 8.17m/s である. 水平方向に設置すると鉛直方向に設置した場合には見られなかった時間的で周期的な火炎形状(t_1, t_2, t_3, t_4)の変化が見られた. ノズルより噴出した黒鉛が火炎面に沿うように流れるが, t_3 では湾曲部で一部乱れが見られる. つまり水平方向の火炎の時間的火焰形状の変化は, 図中に示すように火炎面との衝突によって内部ガス流れに乱れが発生したためであると考えられる.

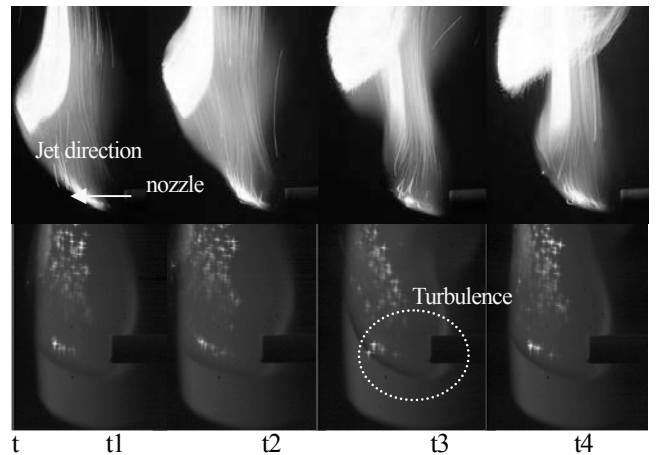


図 12 水平方向に単孔ノズルを設置した場合の時間的火焰形状変化

3.7 新しいノズルの製作 本研究で使用するノズルには図 13 に示すように内部にスペースが存在する. 燃料ガスは圧縮性流体であるため, このスペースも火炎に与える影響を考慮すべきと考えた. そこでノズルスリット幅を変化させずに, その位置を変化させた新たなノズルを製作した. 表 1 に作製したノズル寸法を示す.

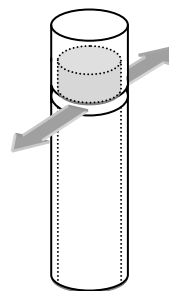


図 13 ノズル内部の概念

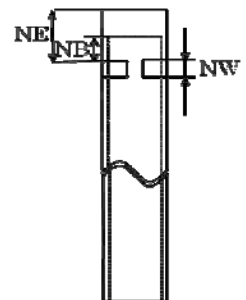


図 14 製作ノズル設計図

表1 ノズルの寸法

	NW [mm]	NE [mm]	NB [mm]
No.1	0.5	16	6
No.2	0.5	17	15
No.3	0.5	5	0

3.8 ノズル内部の違いによる火炎の影響 ノズル内部の影響を考慮するため、前項に記載したノズルを使用する。燃料にメタンを用い、各燃料噴出速度時の周囲流(Air)による浮き上がりの発生を図15に示す。本実験条件では、ノズル内部の余白による火炎浮き上がりの大きな違いは見られなかった。

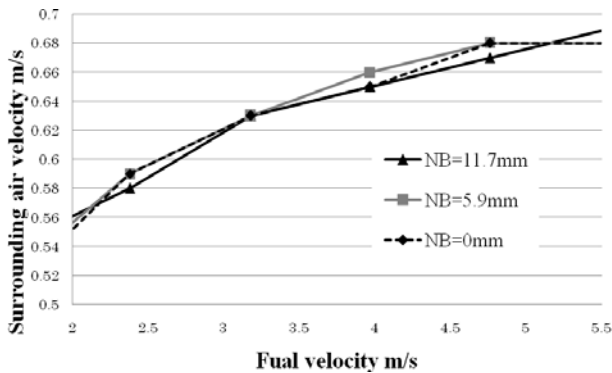
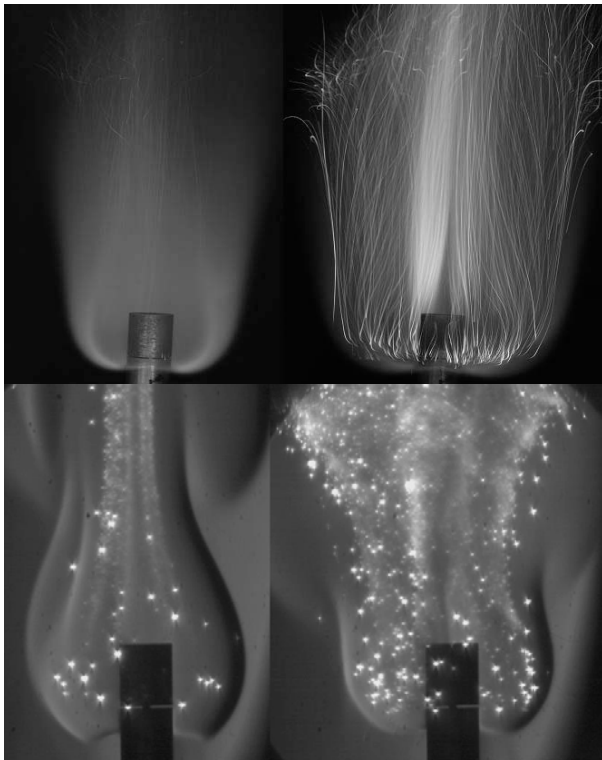
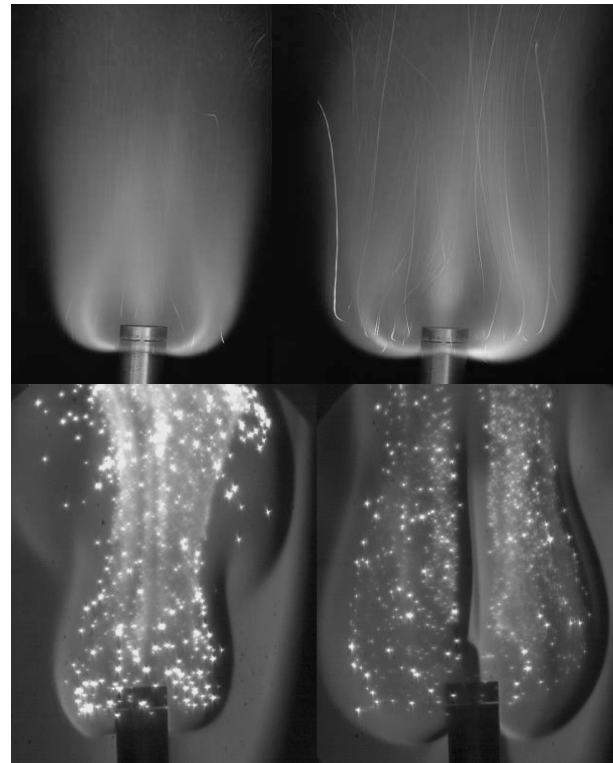


図15 ノズル内部の違いによる浮き上がり

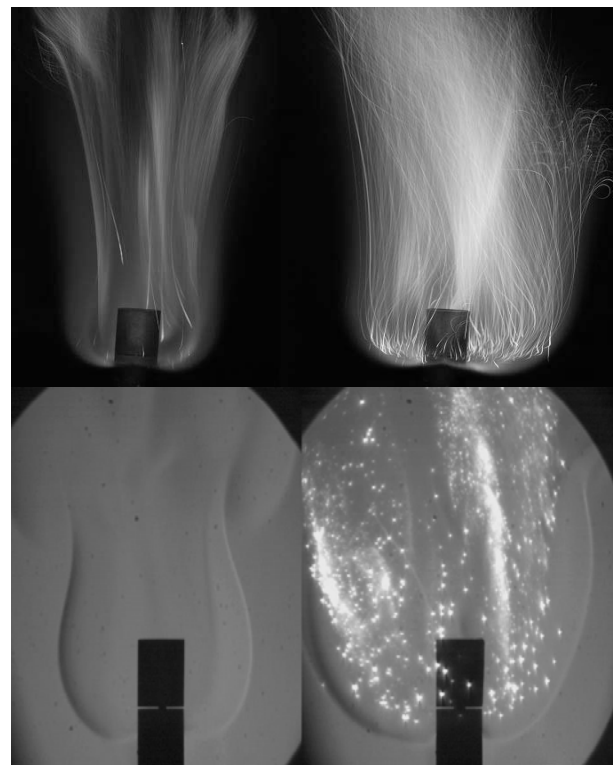
図16は各ノズルでの黒鉛を混合した火炎の様子を直接写真、およびシュリーレン写真で示した。燃料には水素を用い、燃料噴出速度は左図を2.38m/s、右図を3.97m/sとする。



(a) NW=0.5 mm, NE=15 mm, NB=17 mm



(b) NW=0.5 mm, NE=5 mm, NB=0 mm



(c) NW=0.5 mm, NE=16 mm, NB=6 mm

図16 ノズル内部の違いによる火炎

3.9 希釈割合による浮き上がり速度の違い 図17はNW=0.35mmのノズルを用い、燃料であるメタンと窒素の割合と速度を変化させたときの、周囲流(Air)により浮き上がりを表したグラフである。希釈割合の増加に伴い

火炎は不安定になる。また希釈割合に関係なく燃料噴出速度の増加に伴って不安定になることがわかる。

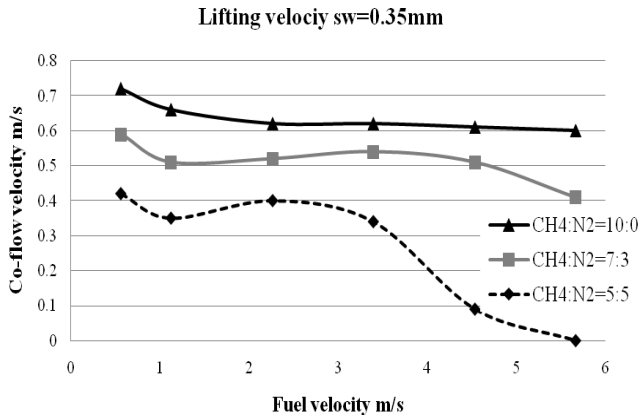
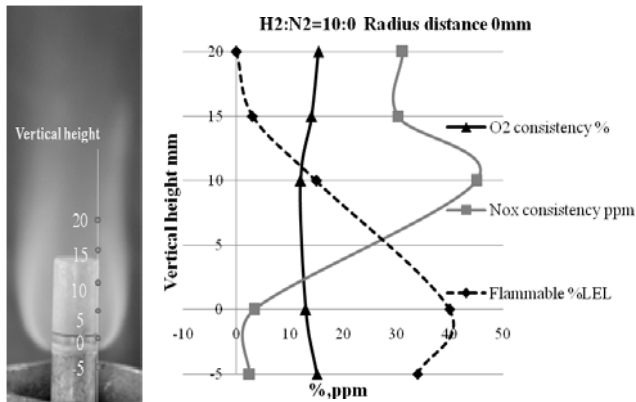


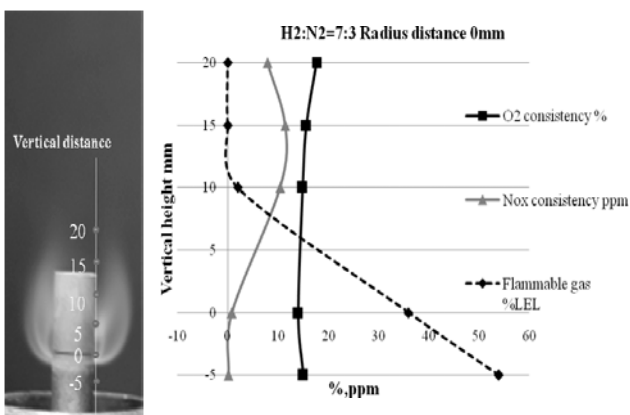
図 17 希釈割合による浮き上がり発生の違い

3.10 火炎中の化学種成分 図 18 は $NW=0.35\text{mm}$ のノズルを用い、燃料の水素を 3.40m/s で噴出させたときの火炎の様子を示したものである。ただし周囲流は流していない。ノズル壁面を半径方向 0mm とし、高さを変化させて各点で成分を測定した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図 18 (a) は燃料割合を $H_2:N_2=10:0$ とし、(b) は $H_2:N_2=7:3$ とした場合の各化学種ガス成分である。



(a) $H_2:N_2=10:0$



(b) $H_2:N_2=7:3$

図 18 火炎中の各化学種成分濃度分布

3.11 火炎内温度分布 図 19 に温度分布のグラフを示す。測定点は鉛直方向高さを $H[\text{mm}]$ 、噴出口からの半径方向距離を $R[\text{mm}]$ とする。 H は噴出口の下部を $0[\text{mm}]$ 、 R はノズル管外周面を $0[\text{mm}]$ とし、ノズル中央部を $-7[\text{mm}]$ とする。希釈水素火炎($H_2:N_2=50:50$)における噴出速度 $2.3[\text{m/s}]$ での各断面における半径方向火炎温度分布を示す。図からピーク点が火炎面に存在し、燃え切った火炎上部での火炎温度分布はほぼ一定であることがわかる。

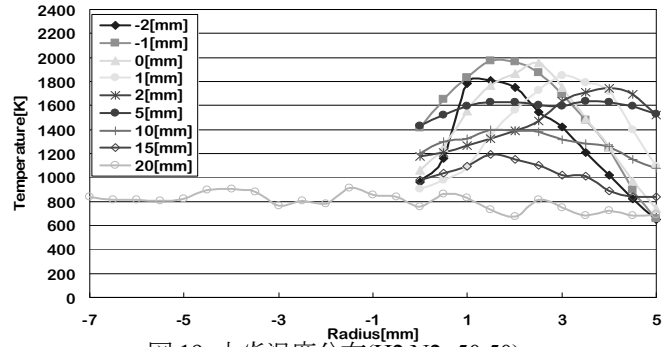


図 19 火炎温度分布($H_2:N_2=50:50$)

4. まとめ

- (1) 噴出方向に関係なく、噴出面積の増加に伴い火炎は浮き上がりやすく、不安定になりやすい。
- (2) 水平方向放射状拡散火炎は定常状態ではなく、その火炎形状は時間的に変化している。また火炎基部では循環が確認された。
- (3) ノズル内部は浮き上がりの観点からは、火炎の安定に大きな影響を及ぼすことはない。
- (4) 水平放射状拡散火炎内部では酸素が一定の割合で存在している。

参考文献

- (1) Takamitsu Yoshimoto, et al.: “Stability Limits and Behaviors of the Inverse Diffusion Flame”, Proceeding of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion Paper No.373, 2005
- (2) Hitoshi Shiotani, et al.: “Construction of Low NOx and High Stability Flames Aiming at Micro Gas Turbine Combustion”, ASME Paper No. GT-2002-30463, pp.731-737, 2002
- (3) 谷川涼一 他 3 名: 「水素逆拡散火炎挙動における安定限界と数値計算」, 可視化情報学会論文集 Vo.29, pp.117-118, 2009
- (4) 出口幸治 他 3 名: 「水平噴流放射状拡散火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究」, 日本機械学会関西支部第 86 期回定時総会講演会 講演論文集 No. 114-1, pp.2-29, 2011
- (5) Koji Ideguchi: “Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet diffusion Flame of Low Calorie Biomass Gas”, The 8th Meeting on Society of Solid Waste Management Experts in Asia and Pacific Islands (SWAPI), pp.136, 2011