

# 水平噴流放射状予混合火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究

原裕貴\* 吉本隆光\*\*

## Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet Premixed Flame

Hiroki HARA\* Takamitsu YOSHIMOTO\*\*

### ABSTRACT

Recently, effective utilization of the biomass gas is required as a part of the efficient utilization of energy. However, it is difficult to stabilize the flame of the biomass gas, when the heat release is low calorific. Therefore, the erection of the technique that maintains a steady state flame is needed, when the biomass gas is burned. The purpose of this research is the investigation of the flame behavior and the stability limit when the vertical and horizontal jet flame are formed. Moreover, the flame configuration depends on the nozzle shape. The temperature and chemical composition in the flame are measured and the flame behavior is observed by the schlieren photography. The results are shown as follows: (1)The flame is stabilized more when the slit width is narrow and the length from top portion to slit is shorter. (2)The flame length is shorter when equivalence ratio decreases. (3) There are two flame sheets which are formed on upper part and lower part from the nozzle, when the horizontal jet flame is formed.

*Keywords:* horizontal premixed flame, equivalence ratio,  $\text{NO}_x$

### 1. はじめに

現在、石油などの化石燃料に替わるエネルギーとしてバイオマスガスなど低カロリー燃料の利用が注目され、その安定な燃焼形態の保持は重要な課題である。

気体燃料の燃焼方法の一つであるバーナ燃焼は拡散燃焼、予混合燃焼、部分予混合燃焼に分けられる。その中でも予混合燃焼には燃焼負荷率を大きくとれる、サーマル $\text{NO}_x$ の発生を抑制できるといった利点があると言われている<sup>(1)</sup>。これまで垂直方向の噴流予混合火炎が検討され、火炎の浮き上がり・吹き飛び・安定・挙動などが研究されてきた。本報では水平方向に燃料と空気の混合気体を放射状に噴出し、水平噴流予混合火炎を形成した場合について、燃焼ノズル形状、当量比が火炎の安定に与える影響、また火炎内成分を測定する。合わせて鉛直予混合火炎との比較を行うことにより水平燃焼、予混合燃焼の有用性について調査する。

### 2. 実験装置

**2.1 フロー図** Fig.1 に実験装置の構成を示す。ボンベより圧力調整器で減圧した燃料（メタン）、空気それぞれをフロート式流量計で流量調整する。これらをノズル手前で混合、ノズル先端のスリットより噴出させ

水平噴流予混合火炎を形成する。

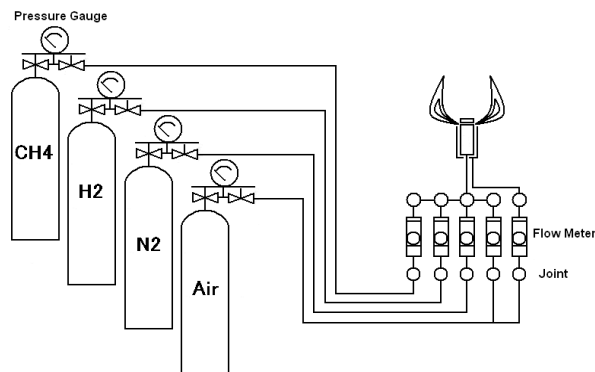


Fig.1 Flow diagram

火炎を形成するための燃料噴出ノズルは、スリット幅1.0, 0.5mm, 0.35mmの3種類を用意した。またスリットからノズル最上部までの長さが火炎の安定に与える影響を調べるため、スリット上部の長さが5mmのものと15mmのものを用意した。Fig.2に各ノズルの詳細を示す。

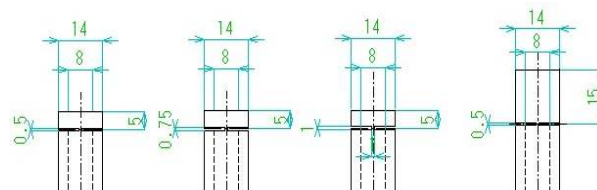


Fig.2 Type of nozzle

\* 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** 火炎内の温度測定には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、測定値に輻射等の補正は行わず温度分布の状態に重点をおいて行う。

**2.3 サンプリングプローブ** 中心に直径1mmのステンレス管を用い、その周囲を銅パイプで覆い間に水を流すことによってプローブを冷却する。ガスはダイヤフラムポンプによって吸引されサンプリングバッグに溜められる。

**2.4 シュリーレン撮影装置** 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。Fig.3に概要を示す。

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。その中で、水素やメタン予混合火炎の挙動において、裸眼では観察できない状態を調べている。Fig.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。

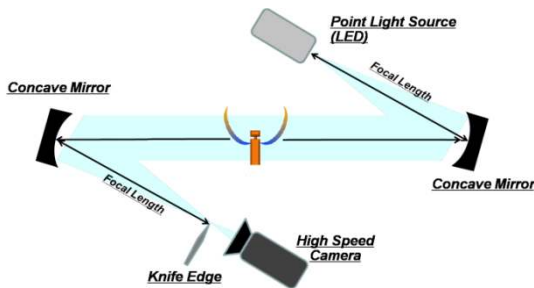


Fig.3 schlieren photography

**2.5 計測装置** 以下に計測装置の一覧を記す。

- (1) 流量計：KOFLOC 製、面積式（フロート式）流量計
- (2) 圧力計：NISSIN 製、測定範囲 0~0.6MPa
- (3) 酸素測定装置：理研計器製、OX-631A
- (4) 可燃性ガス測定装置：理研計器製、GP-631A
- (5) NO<sub>x</sub>測定装置：島津製作所製、NOA-7000

### 3. 算出方法

**3.1 当量比** 当量比とは理論空燃比 (=完全燃焼する燃料と空気の比(F/A)<sub>i</sub>) に対する実際の燃空比 (=実際に混合されている燃料と空気の比:(F/A)) の割合で、一般にφで表される。また当量比の逆数は空気比と呼ばれ、一般にλで表す。式(1)に当量比φの一般式、式

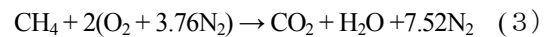
(2)に空気比λの一般式を示す。

$$\phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_i} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{\phi} \quad (2)$$

上式から分かるように拡散火炎では空気を混合していないので当量比φ=∞となる。

次に当量比φ=1、つまり完全燃焼時のメタンと空気の化学反応式を式(3)示す。



式(3)からメタンが燃焼する際の当量比φを求める式を示す。流量をそのまま mol 数と置き換えると

$$\phi \text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2) \quad (4)$$

となるため、

メタン流量：空気流量 = φ : 2(O<sub>2</sub>+3.76N<sub>2</sub>) = φ : 9.52 となり、

$$\phi = \frac{\text{メタン流量} \times 9.52}{\text{空気流量}} \quad (5)$$

となる。

## 4. 実験結果

**4.1 火炎形状** Fig.4~7にスリット幅0.5mmのノズルを使用し、燃料流量を固定し空気流量を増加させたときの火炎形状の変遷を示す。上が直接写真で、下がシュリーレン写真である。Fig.7はノズル周囲にニクロム線を巻き加熱することにより保炎している。使用燃料はメタンで、メタン流量2(l/min)固定、空気流量は0(l/min)から4.4(l/min)まで増加させた。尚、写真下部にそれぞれの場合の当量比を示している。

Fig.4~6より当量比が小さくなるほど火炎形状は高さ方向に短くなり、半径方向に広がる傾向が見られた。火炎高さに関しては、当量比が大きい場合は火炎下部にオレンジ色の光が見られ、これが火炎長を大きくしていた<sup>(2)</sup>。当量比が小さくなるにつれて下流部のオレンジ色の火炎が見られなくなり、火炎長が短くなった。このオレンジ色の火炎は不完全燃焼により生じた煤が燃焼しているものと考えられるので、当量比が小さい程燃料の燃えきりが早くなることが分かる。また、当量比が小さくなっていくとスリットから噴出される混合気の下下に火炎面が形成される様子が観察された。これより、火炎内部にも酸素が供給され燃焼が起きているものと考えられる。

直接写真より、当量比が小さくなると火炎基部がノズルから断続的に離れる現象が観られる。更に当量比

が下がると火炎基部が完全にノズルから浮き上がり、ノズルから離れた位置で火炎が形成される。これをシュリーレン写真と比較すると、この火炎においては火炎が浮き上がる時に燃料噴流下流に激しい乱れが生じておりこの部分で燃焼していることが分かる。また、火炎の浮き上がりと燃料噴流の乱れは同時に生じる。加えて、火炎浮き上がり時に轟音が聞こえるが、この音は燃料流量が大きくなる程高音となる。

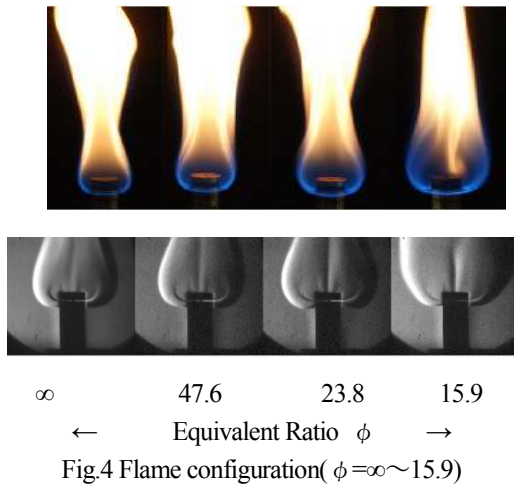


Fig.4 Flame configuration ( $\phi = \infty \sim 15.9$ )

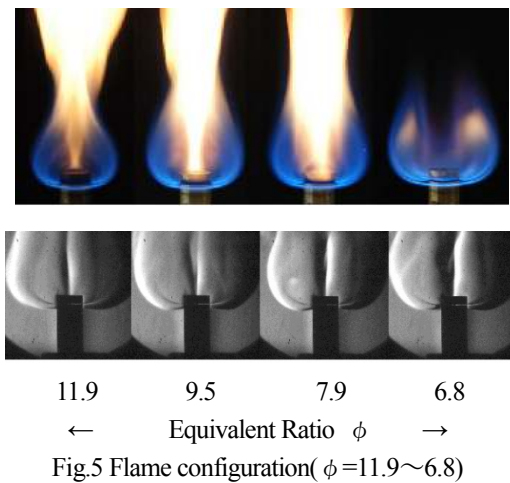


Fig.5 Flame configuration ( $\phi = 11.9 \sim 6.8$ )

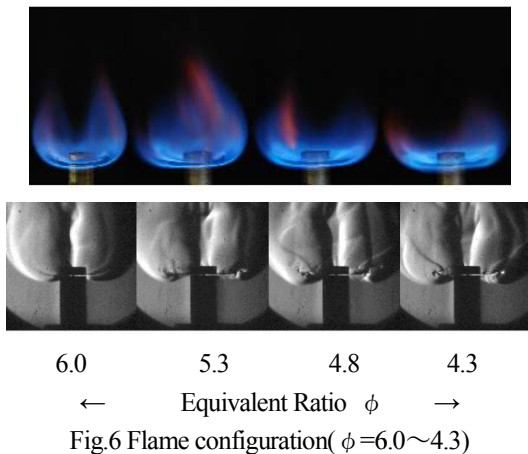


Fig.6 Flame configuration ( $\phi = 6.0 \sim 4.3$ )

次いで、保炎のためにノズル周囲にニクロム線を巻いて実験を行った。ニクロム線に電圧をかけスリット付近の温度を上昇させると火炎の浮き上がりが低減できた。シュリーレン写真をみると、保炎がない場合と比較して燃料噴流の乱れが抑制されていた。また、火炎長はニクロム線を使用しない時と比較すると火炎高さが高くなる傾向がみられた。

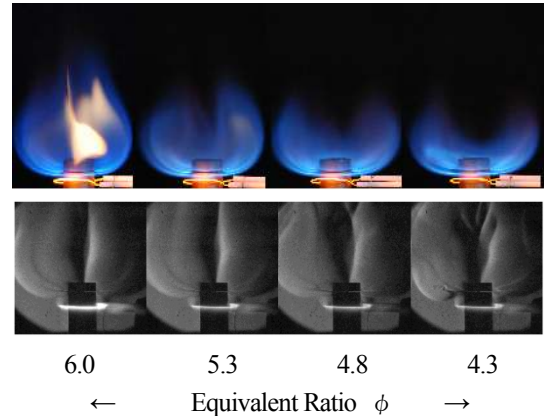


Fig.7 Flame configuration with heating by nichrome wire ( $\phi = 6.0 \sim 4.3$ )

水平火炎との比較として、Fig.8,9に鉛直火炎において空気流量を一定にし、空気流量を一定にした場合の火炎の変遷を示す<sup>3)</sup>。鉛直火炎では空気量を増加させていくと火炎長さは短くなっていくが、さらに空気量を増加させると、当量比 1.0 付近を境に再び火炎長さは伸びていく。また、空気量を増加させるほど火炎は細くなる傾向がみられる。水平火炎と鉛直火炎を比較すると、鉛直火炎は当量比が 1 以下でも保炎により火炎が形成できるが、水平火炎では保炎を行っても当量比が 1 以下になる前に火炎が浮き上がり吹き飛びに至る。

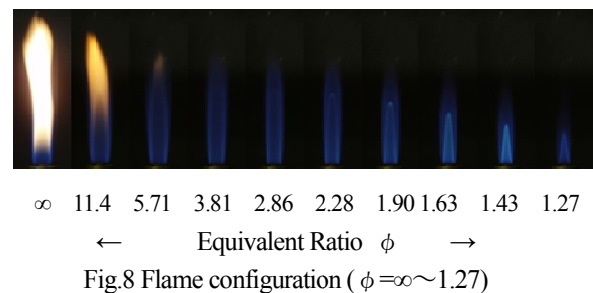


Fig.8 Flame configuration ( $\phi = \infty \sim 1.27$ )

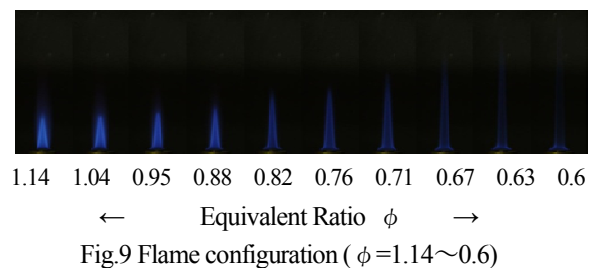
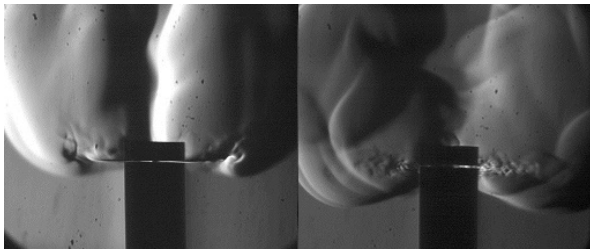
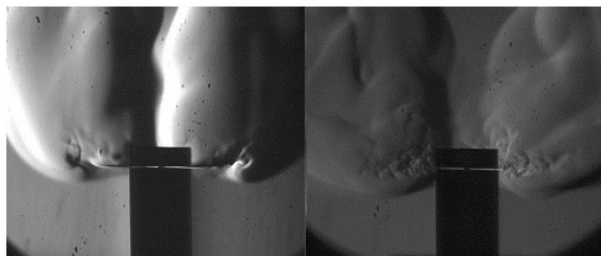


Fig.9 Flame configuration ( $\phi = 1.14 \sim 0.6$ )

**4.2 スリット幅と燃料噴流の流れ** Fig.10 にスリット幅 0.5mm, 1.0mm において, 同一の当量比と燃料・空気混合気の流速で浮き上がり火炎を形成したとき, Fig.11 にスリット幅 0.5mm の時に同一の当量比で燃料噴出流速を 4.1m/s と 8.2m/s とした時のシュリーレン写真を示す.



SW:0.5mm SW:1mm  
Fig.10 Schlieren photograph ( $v=4.1\text{m/s}$ ,  $\phi=5.6$ )



4.1(m/s) 8.2(m/s)  
Fig.11 Schlieren photograph (SW:0.5mm,  $\phi=5.6$ )

Fig.10 より流速が一定の場合, SW:0.5mm では, スリットから噴出されたガスはノズル近傍では層流で進み, ノズルから離れた位置で燃焼による乱れが発生していることがわかる. それに対して SW:1mm では噴出されたガスはスリットを出てすぐに上下に拡散する様子が見られ, ノズル近傍において既に乱流である. これらを直接写真と比較すると, SW:0.5mm では流れが乱れているところで燃焼が起きているのに対し, SW:1mm では燃焼していないところでも流れが乱れていることが分かる.

次に Fig.11 より, 流速が大きくなるとガスの流れはスリットを出てすぐに乱れる. この時流れの乱れは, 噴出されたガスの上部で主に観察され, 下部ではあまり見られなかった. また, SW:1mm の場合ではガスの噴出向きが上下に変化していたが, SW:0.5mm では噴出向きの変化は比較的少なかった.

**4.3 当量比と火炎の安定限界** Fig.12 のグラフにスリット幅が火炎の安定限界に与える影響を示す. スリット幅は 1mm, 0.75mm, 0.5mm のものを用意した. ついで Fig.13 のグラフにスリットからノズル上端までの長さが火炎の安定に与える影響を示す.

Fig.12 よりスリット幅が小さくなるほど高い流速で

も浮き上がりにくくなる. また, 流速が 4m/s 以上では同一流速ならばスリット幅が小さい方が浮き上がり時の当量比が小さい. よってスリット幅が小さい程火炎を安定に燃焼させる領域が広いと言える.

Fig.13 より燃料流速が約 5.1 m/s 以下であれば, スリットからノズル最上部までの距離による浮き上がり時の当量比の差はほとんど見られない. 流速が 5.7~6.2 にかけてはスリットからノズル最上部までの距離が 15mm のほうが浮き上がり時の当量比が小さく安定である傾向を示す. そして, 双方とも混合気流速 6.8m/s が浮き上がりのない火炎を形成できる最大の流速であったが, この時, スリットからノズル最上部までの距離が 5mm のほうが浮き上がり時の当量比が小さかった.

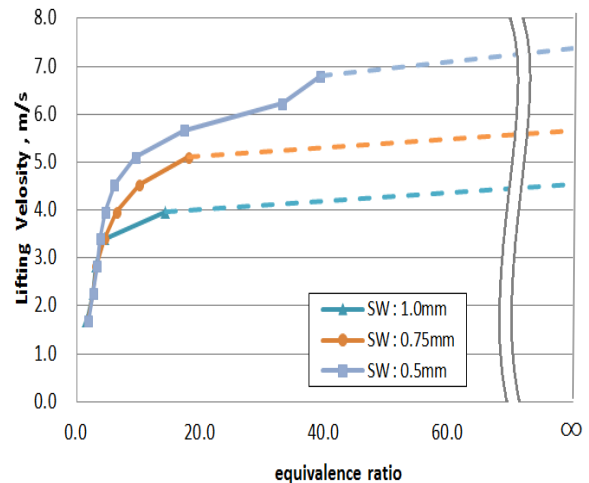


Fig.12 Lifting velocity for the slit width

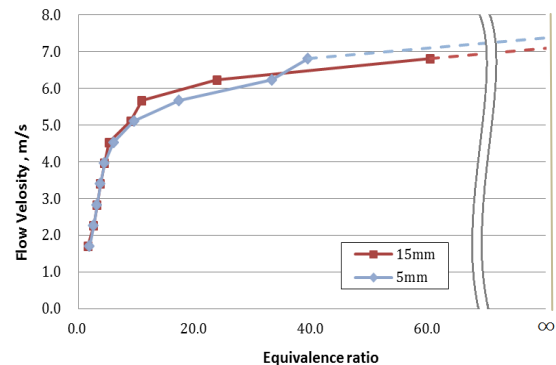


Fig.13 Lifting velocity for length from top portion to slit

**4.4 火炎内温度分布** 測定は鉛直方向高さを H[mm], 噴出口からの半径方向距離を R[mm]とする. H は噴出口の下部を 0[mm]とし, R はノズル管外周面を 0[mm]とし, ノズル中央部を -7[mm]とする.

Fig.14 にメタン流量 3l/min の水平拡散火炎 ( $\phi=\infty$ ) の温度分布, Fig.15 にメタン流量 3l/min, 空気流量 1l/min の水平予混合火炎 ( $\phi=28.6$ ), Fig.16 にメタン流量 3l/min, 空気流量 2l/min の水平予混合火炎 ( $\phi=14.3$ ) の温度分布

を示す。測定はスリットからの高さ 0mm, 5mm, 10 mmで半径方向に行った。次いで, Fig.18 にメタン流量 2(l/min)の時の拡散火炎と予混合火炎( $\phi=19.0$ )のノズル上部での温度分布を示す。測定はスリットからの高さ 8mm で半径方向に行った。

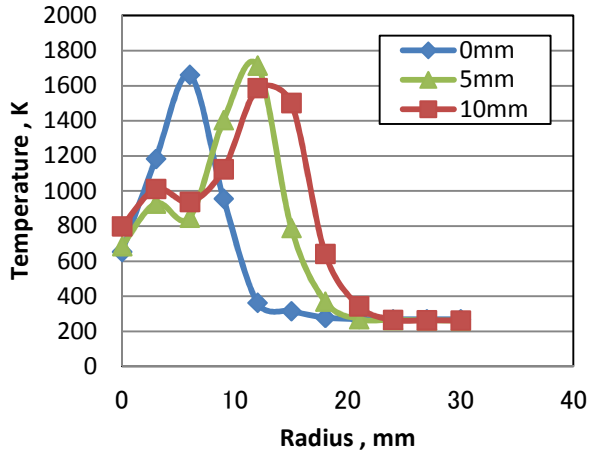


Fig.14 temperature distribution of diffusion flame( $\phi=\infty$ )

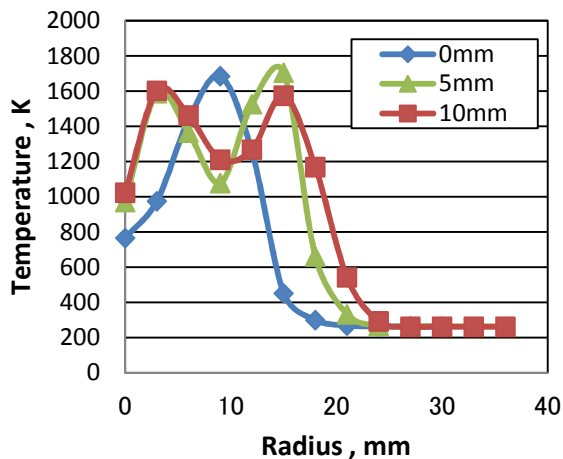


Fig.15 temperature distribution of premixed flame( $\phi=28.6$ )

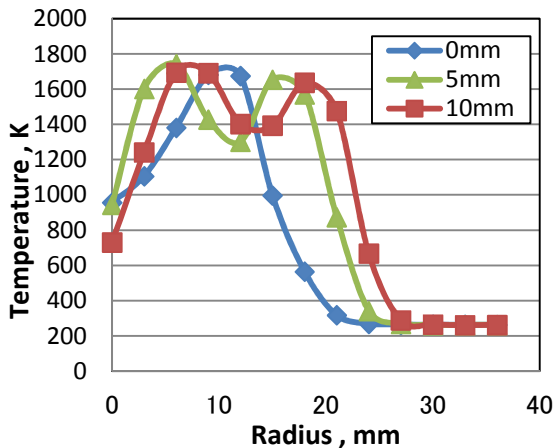


Fig.16 temperature distribution of premixed flame ( $\phi=14.3$ )

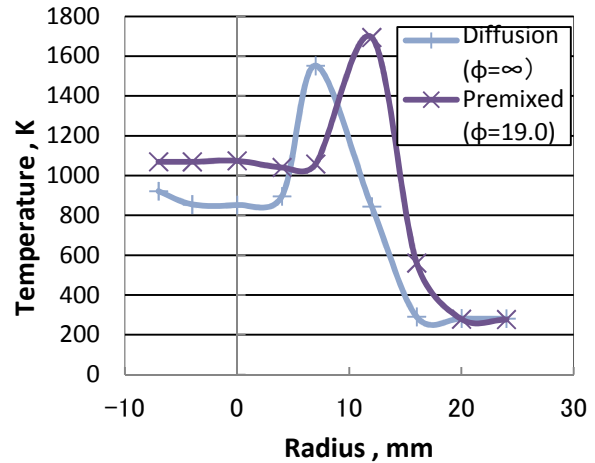


Fig.17 temperature distribution of diffusion and premixed flame

Fig.14～16 より全ての火炎においてスリットからの高さが上がるほど温度ピークは半径方向に広がる。また, スリットからの高さが 0mmの場所以外では温度ピークが二つ出る。これはスリットから噴出される燃料の上下に火炎面が出来ているためと考えられる。拡散火炎では直接写真ではスリット上部の火炎は確認できないが, 温度分布より拡散火炎においても噴出燃料の上下に火炎面が出来ている可能性がある。

各火炎の高さごとの最高温度を平均すると拡散火炎で 1654K,  $\phi=28.6$  の予混合火炎で 1664K,  $\phi=14.3$  の予混合火炎では 1706K と当量比が小さくなるほど火炎の最高温度は高くなった。また, 最高温度はいずれもスリットからの高さが 5mm の時に測定された。

拡散火炎では二つの温度ピークを比較すると外側のピークの方で温度が高い。これは内側では酸素量が十分でないため, 燃料が燃焼しきれていないためと考えられる。これに対して  $\phi=14.3$  の予混合火炎では内側のピークの方で温度が高い。

Fig.17 よりノズル上部では拡散火炎に比べて予混合火炎の方で 200K 程温度が高い。これは加熱された空気が周囲から巻き込まれている可能性が考えられる<sup>(4)</sup>。

**4.5 火炎内化学種成分** Fig.18 にメタン流量 3l/min の水平拡散火炎( $\phi=\infty$ )の  $\text{NO}_x$  濃度と酸素濃度, Fig.19 にメタン流量 3l/min, 空気流量 1l/min の水平予混合火炎( $\phi=28.6$ ), Fig.20 にメタン流量 3l/min, 空気流量 2l/min の水平予混合火炎( $\phi=14.3$ )の  $\text{NO}_x$  濃度と酸素濃度を示す。  $\text{NO}_x$  濃度の単位を ppm, 酸素濃度の単位を%とする。

Fig.18～20 どの火炎においても  $\text{NO}_x$  の最高値は火炎中心から離れたところでみられる。実際にはこれらのポイントは火炎面から離れた位置にあり,  $\text{NO}_x$  が生成されるとは考えにくい。火炎から離れた場所に存在す

る NO<sub>x</sub> は火炎上流で生成されたものが、下流に行くにつれ半径方向に拡散したものである。また、 $\phi = \infty$ 、 $\phi = 14.3$  ではどの高さにおいてもノズル近傍で O<sub>2</sub> が測定されたが、 $\phi = 28.6$  ではスリットからの高さ 5mm と 10mm では測定されなかった。

NO<sub>x</sub> のピークは外側の火炎面のさらに外側に出る。内側の火炎面付近でもピークがでる場合があるが外側と比較するとその値はわずかである。今回の測定範囲では NO<sub>x</sub> 濃度の最高値は当量比が一番小さい  $\phi = 14.3$  が最も小さかった。

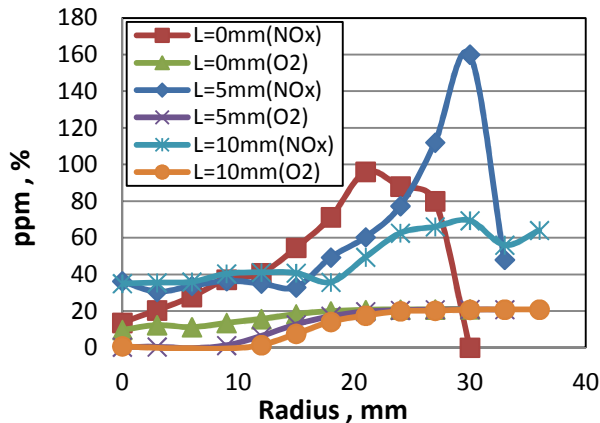


Fig.18 Chemical composition with diffusion flame

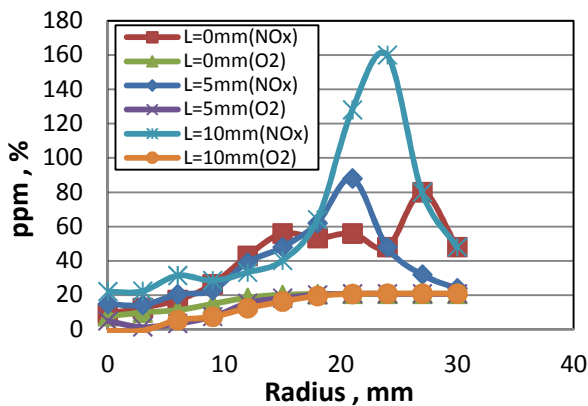


Fig.19 Chemical composition with premixed flame( $\phi = 28.6$ )

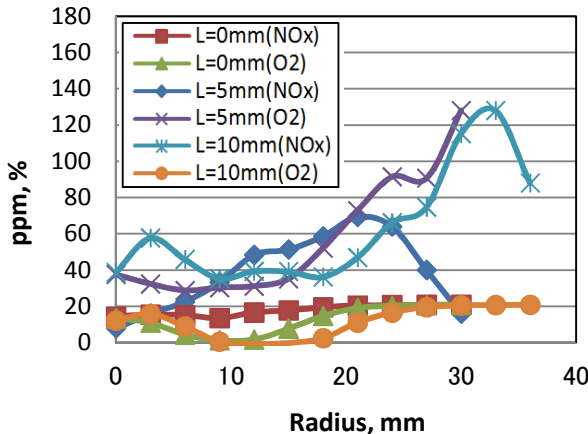


Fig.20 Chemical composition with premixed flame( $\phi = 14.3$ )

## 5. まとめ

これらの実験を通して以下の結論を得た。

- (1) 当量比が低くなるにつれ火炎長は短くなり、燃え切りが早くなる。これは燃料割合が減少したのに対して供給酸素量が多くなり燃焼を早く終えたためであると考えられる。
- (2) 水平噴流予混合火炎においてはスリットの幅が小さいほど、また、スリットからノズル上面までの距離が短いほど火炎は安定する傾向が見られた。しかし、燃料流量が比較的低い場合ではこれらの要因は火炎の安定にさほど影響を与えない。
- (3) 火炎の浮き上がりとは燃料噴流の乱れは同時に生じる。また、流速が比較的低い場合、火炎が浮き上がる位置と燃料噴流が乱れる位置は近い。
- (4) 水平噴流火炎においてはスリットから噴出する燃料の上下に火炎面が形成される。燃料流量が小さいときは二つの火炎面のうちノズルに近いほうの火炎面での温度はあまり高くないが、燃料流量が大きくなるとノズルからの距離が遠い火炎面と同程度まで火炎温度は上昇する。
- (5) NO<sub>x</sub> のピークは完全に火炎の外側でみられる。これは火炎で生成された NO<sub>x</sub> が下流に行くにつれ半径方向に拡散したためと考えられる。

## 参考文献

- (1) 水谷幸夫：「燃焼工学」，森北出版株式会社，2008
- (2) 溝渕泰寛，竹野忠夫，その他：「水素空気過濃予混合火炎の曲率が火炎構造に与える影響」，日本燃焼学会誌，第 54 巻，pp.41-48，2012
- (3) 正司悠介：「メタン・水素予混合燃焼における火炎構造と安定限界に関する研究」，第 84 回定時総会講演会講演論文集，No.094-1，pp.12-6，2009
- (4) Hara, H.：“Flame Behavior and Stability Limit on Radial horizontal Jet Premixed Flame of Low Calorie Biomass Gas” , Proceedings of ISME-Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (SPEC 2011), Summary or Paper-ISME520, 2011