

水平放射状噴流拡散水素火炎の燃焼特性と火炎構造

高島立至* 吉本隆光**

Flame Structure and Combustion Characteristics on Radial Horizontal Jet Diffusion Hydrogen Flame

Ryuji TAKASHIMA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

When the quantity of petroleum fuel resources is decreasing, substitutes for conventional petroleum fuel are needed. Therefore, there are various species of renewable fuel such as residual fuel of emission from the fuel cell and biomass gas. Now, there are assignments that the low-calorie fuel and the biomass gas are utilized for renewable energy. Various species of renewable fuel such as biomass gas which includes mainly methane, hydrogen and CO, are widely used for substitute fuel. Holding the flame is an important pole in the burning technique for taking out the energy effectively. It is found that the parameters for holding the diffusion flame are fuel velocity, co-flowing velocity, nozzle diameter (curvature), type of burner nozzle and condense of the fuel. The radial horizontal jet diffusion flame is formed by using slit type of nozzle. The object of the present study is to make clear of the flame structure and characteristic the stability limit of the horizontal jet radial diffusion flame, when the fuel is hydrogen and diluted hydrogen with nitrogen. The obtained result is as follows. (1)The flame length is shorter when dilute ratio increases. (2)The circulation occurs when the radius of the flame curvature is larger at the bottom of flame. (3)Flame configuration depends on the fuel velocity. (4)When the fuel is diluted, NO_x decreases. (5)The flame configuration according to time does not vary to depend on the interaction in the surrounding air.

Keywords: Radial Horizontal Jet Flame , Hydrogen , Flame Structure , Combustion Characteristics

1. 緒言

現在、燃焼技術の利用は環境問題やエネルギー問題が懸念され、エネルギーの有効利用と燃料消費量低減の燃焼技術に関する研究が重要課題となっている。気体燃料の燃焼方法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、拡散燃焼は火炎の安定範囲が広い、操作が容易、逆火の心配がないなどの利点がある。拡散火炎を安定に保つ燃焼形態は、燃焼技術において重要な要素である。拡散火炎の安定性の要因として、火炎が形成される根元の火炎基部の要素が大きく影響⁽¹⁾しているが、その火炎基部の構造において不明な点も多い。そこで、安定な拡散火炎の挙動を観察するとともに、その火炎の構造⁽²⁾や火炎形状⁽³⁾などが調べられてきた。

本研究では水素ガスを用いて、ノズルのスリット部から半径方向に燃料を放射状に噴出させ拡散火炎を形成し、水平放射状噴流拡散火炎の燃焼特性と安定性に関する基礎的研究を行った。パラメーターとして、燃料速度や周囲流速度を変化させた場合の火炎基部や形状を直接写真やシュリーレン写真を用いて調査し、浮き上がり・吹き飛び現象にいたる過程

や水平方向拡散火炎の火炎挙動や特性、また、燃料を鉛直に燃料を噴出させ形成する鉛直方向噴流火炎との違いを比較して火炎構造、火炎挙動の要因を明らかにする。得られた結果として、火炎の形状はスリット幅・ノズル上部・ノズル内部の影響はほとんどなく流速に依存する。火炎は水平方向より鉛直方向に燃料を噴出するほうが安定する。水平噴流燃焼では拡散燃焼でも火炎の中に酸素が存在し、一部予混合燃焼となっている。燃料を希釈するとNO_xの生成量は、低減する。周囲流により時間的、周期的形状変化の一連のサイクルはなくなる。

2. 実験装置

2.1 フロー図 図1に使用ノズルを示す。ノズルスリット幅は1.0mm(直径3.66mmに相当)、0.75mm(直径3.12mmに相当)、0.5mm(直径2.58mmに相当)を用意した。また、ノズルのスリット上部の長さを5mmと15mmになるように変化させたものも用意した。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2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。

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

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。

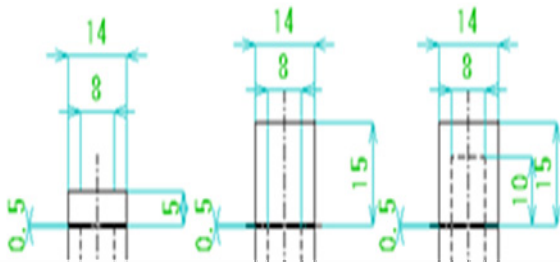


図1 製作ノズル設計図

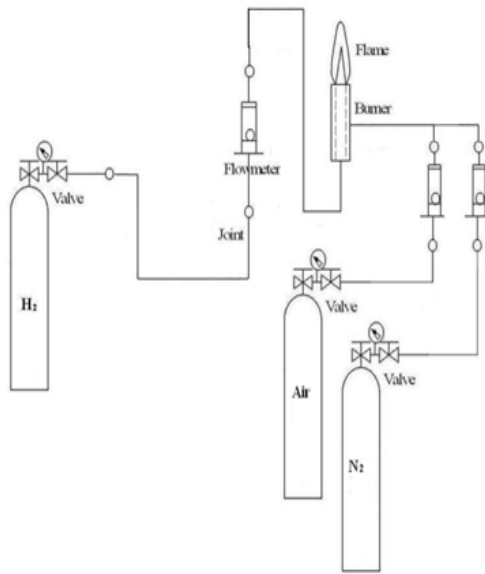


図2 フロー図

2.2 火炎内温度分布測定器 火炎の温度測定には素線径 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。

2.3 シュリーレン写真 図3にシュリーレン撮影法の原理図を示す。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。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遮断し、その透過光を後方の高速ビデオカメラで撮影する。

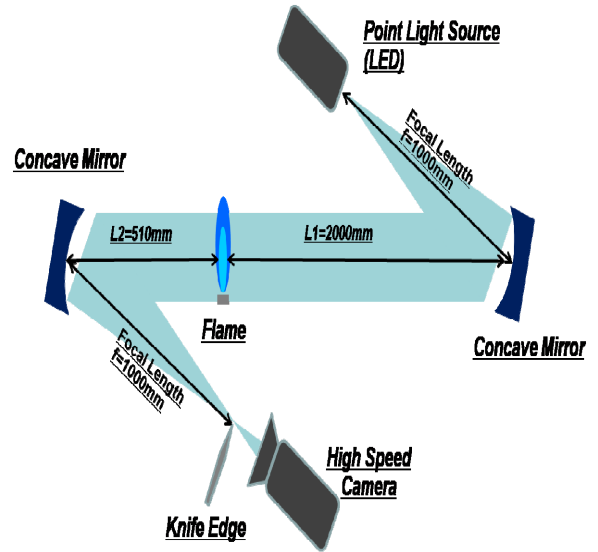


図3 シュリーレン撮影の装置概念図

ナイフエッジで収斂させられた光線の焦点を遮断する原理図を図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か(図4A部)、遠ざかる(図4B部)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。また、ナイフエッジへ近づくように光線が屈折した場合は、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。

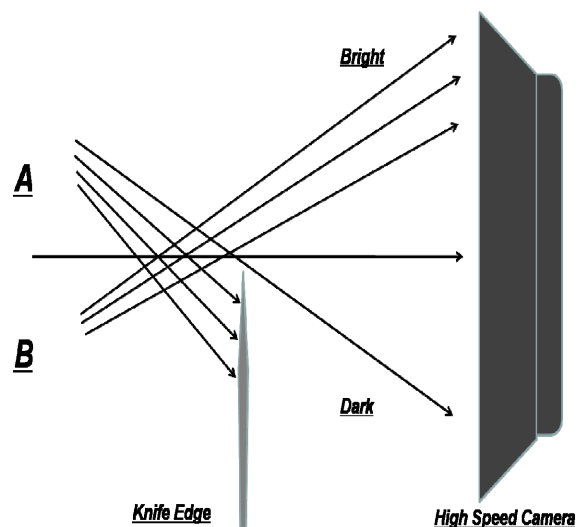


図4 ナイフエッジ付近の光の挙動

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。

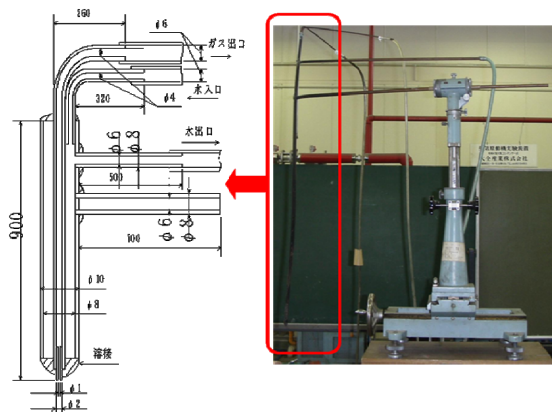


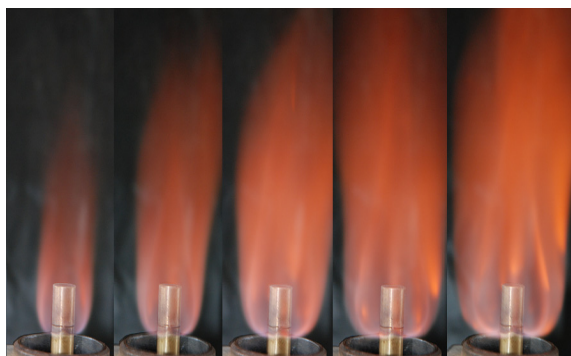
図5 サンプリングプローブ

3. 実験結果

3.1 噴出速度の増加に伴う火炎形状変化

図6はSW(スリット幅)=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。

実際の火炎において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ことわかる。

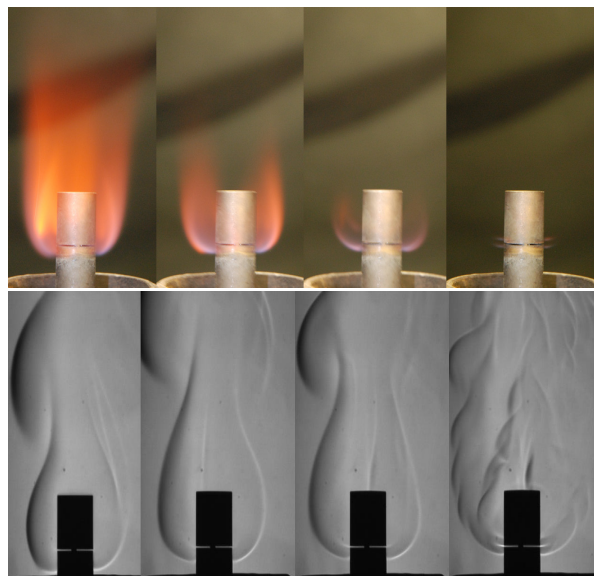


(L/min)	3	6	9	12	15
(m/s)	3.40	6.80	10.2	13.6	17.0

図6 燃料噴出速度増加に伴う火炎形状の変化 (SW=0.5)

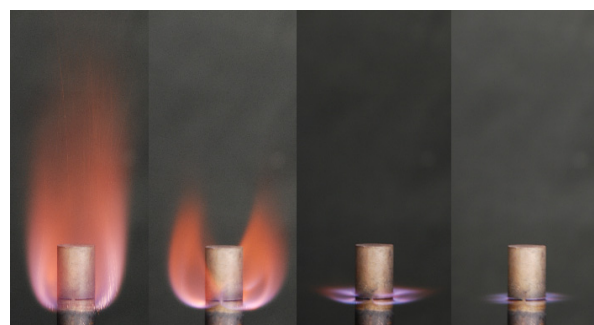
3.2 希釈割合による影響 図7に希釈割合の変化に伴う火炎形状の遷移を示す。ノズルスリット幅0.35mmのものを使用し、燃料には水素、燃料速度1.62m/s(燃料流量 Q=3l/min)と一定にした時の火炎の様子を図7(a)に示す。窒素割合の増加に伴う様子を上段の直接写真、下段のシュリーレン写真で示す。水素混合割合の減少の伴い火炎長は短くなり、燃え切りも早くなる。図7(b)に発熱量を一定としたものを示す。水素の噴出速度1.62m/s(Q=3l/min)として窒

素により希釈する。(a)と(b)を比較することで、火炎の形状は希釈の割合に依存することがわかる。



H₂:N₂ 10:0 7:3 5:5 3:7

(a) 燃料噴出速度一定



H₂:N₂ 10:0 7:3 5:5 3:7

(b) 発熱量一定

図7 希釈割合の変化に伴う火炎形状の遷移

3.3 ノズル形状の変化による火炎形状の比較

スリット上部の長さを5mm、15mmと変化させ火炎形状の変化を観察した。燃料には水素を用いた。図8に燃料の噴出速度を1.42m/sとし直接写真により比較した直接写真を示す。上部の長さにより火炎形状に大きな変化は見られなかった。

また、図9に周囲流を0m/s~1.52m/s流し、ノズル上部の変化における火炎形状を比較した直接写真を示す。水素と窒素を5:5の割合の希釈した燃料を用いた。燃料の噴出速度を3.79m/sとし直接写真により比較した。上段がスリット上部の高さが5mm、下段がスリット上部の高さが15mmである。周囲流速度V_sを上昇させたとき火炎はノズル壁面に近づいたが火炎基部に浮き上がりは見られなかった。またノズル上部のスリットからの長さにより火炎形状に大きな変化は見られなかった。

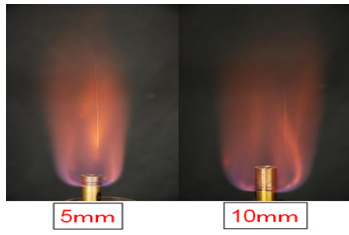


図8 スリット上部の長さにおける比較

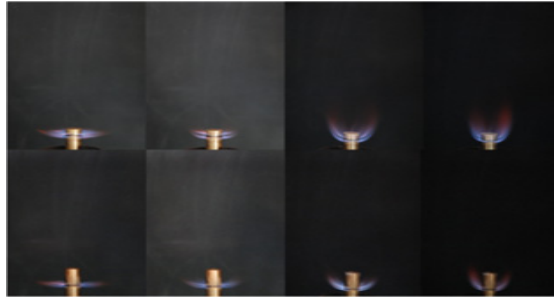


図9 希釈燃料における周囲流の影響
Vs 0.0 ←————→ 1.523 m/s

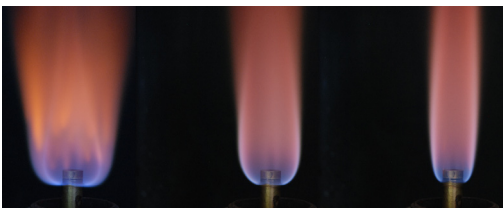
3.4 周囲速度の上昇による影響 図 10(a)(b)(c)に周囲流を 0m/s～0.846m/s 流し、燃料噴出速度を (a)1.14m/s (b)1.89m/s (c)3.79m/s とした時の直接写真を示す。燃料は純水素とする。周囲流速度が上昇すると火炎はノズル壁面に近づき細くなる。周囲流の上昇に伴い火炎の基部および火炎面はスリットの近づく。



(a) 1.14m/s



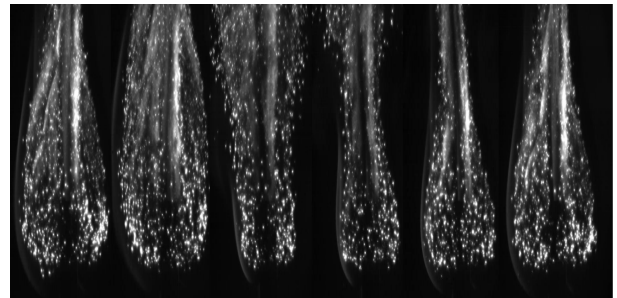
(b) 1.89m/s



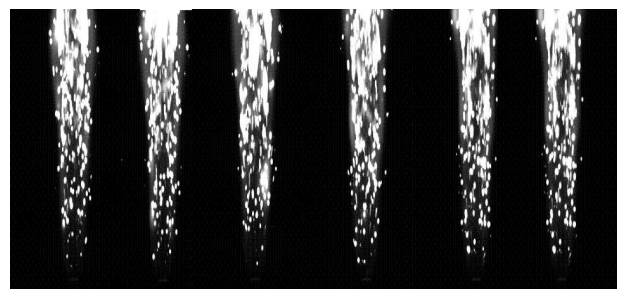
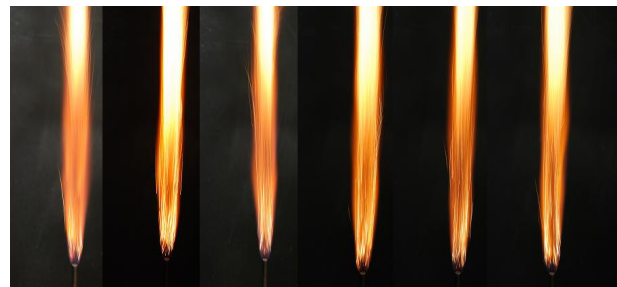
(c) 3.79m/s

Vs 0.0 0.423 0.846 m/s
図10 周囲流速度の上昇による火炎形状の変化

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（直径約 40 μ m）を純水素中に混合した。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。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。図 11 (a) は水平放射状噴流拡散で火炎上段が直接写真、下段がシュリーレン写真である。さらに図 11(b) に鉛直噴流火炎を示す。上段が直接写真、下段がシュリーレン写真である。



(a) 水平噴流火炎



(b)鉛直噴流火炎

図11 黒鉛により可視化した火炎形状

図 11(a) より水平噴流火炎の火炎形状は定常状態ではなく、周期的形状変化が見られ、この一連のサイクルを繰り返す。火炎基部に注目すると火炎下流部よりも変化は少ないことがわかる。このことから

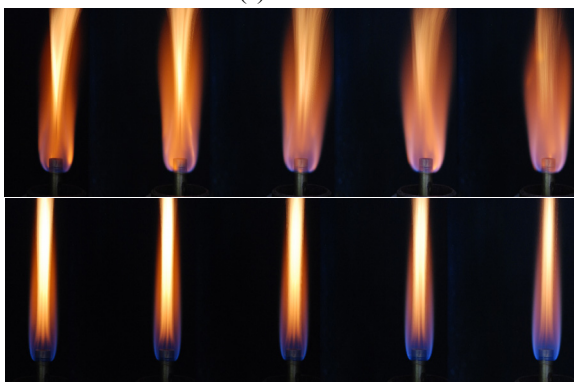
火炎の周期的形状変化は周囲の空気が温められ、下流部の空気が膨張し火炎が広がり火炎の上流部から空気が供給されることによって起こりうるのではないかと考える。

図 11(b)より鉛直噴流火炎の火炎形状は水平噴流火炎の火炎形状に比べ比較的定常状態である。これらより周期的形状変化の一連のサイクルは、鉛直方向の拡散火炎には見られない。

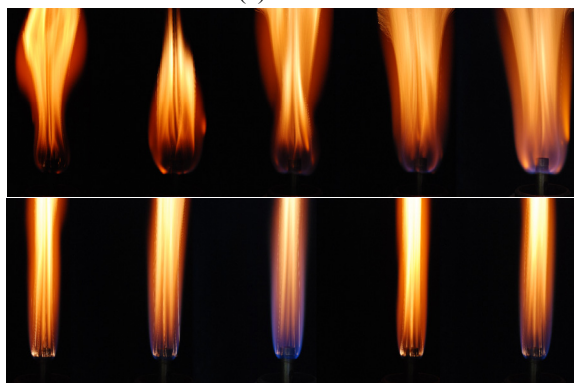
また、図 12 に周囲流速の上昇させたときの火炎の直接写真を示す。燃料は純水素、燃料噴出速度は (a)1.14m/s (b)1.89m/s (c)3.79m/s とする。直接写真の上段が周囲流速 0m/s、下段が周囲流速 0.846m/s である。



(a)1.14m/s



(b)1.89m/s



(c)3.79m/s

図 12 周囲流速上昇による時間的变化

周囲流速が上昇すると火炎基部は青くなってい

る。黒鉛の流線は、周囲流を流さないとき火炎の下流部で広がりがある。しかし周囲流速を上げるとほとんど時間的、周期的形状変化の一連のサイクルが見られなくなった。周囲の空気の影響が時間的、周期的形状変化の一連のサイクルに大きな変化を与えることがわかる。

3.6 数値計算における火炎形状 熱流体解析ソフト(Phoenics)を用い計算させた。ノズルスリット幅 0.5mm、燃料に水素と窒素の混合燃料を用いた。希釈割合は 5 : 5 とし、低カロリーエネルギーを想定し数値計算を行った。図 13 に燃料の噴出速度 3.0m/s と一定で噴出させたときの火炎内部の温度分布を示す。周囲流速を 5.0m/s と 2.0m/s に変化させたものである。周囲流速が 2.0m/s の時、火炎は基部から離れていないことが確認できる。しかし周囲流速が 5.0m/s の時火炎は基部から離れていることが確認できる。このことから燃焼速度が速く安定的に燃焼する水素でも希釈し、周囲流速を 5.0m/s まで上昇せると浮き上がる可能性があることが分かった。

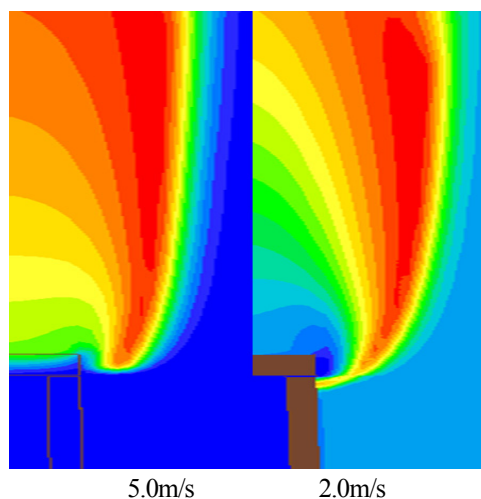
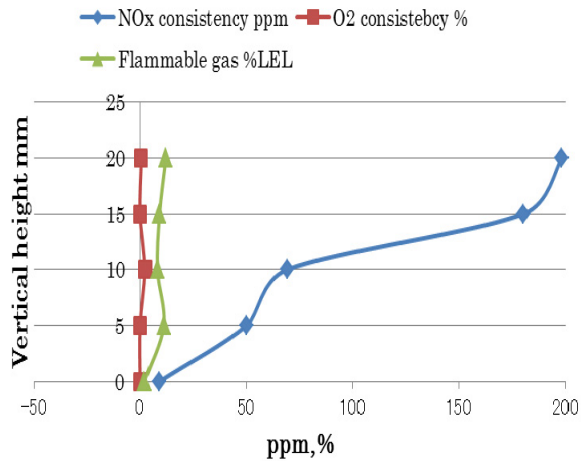


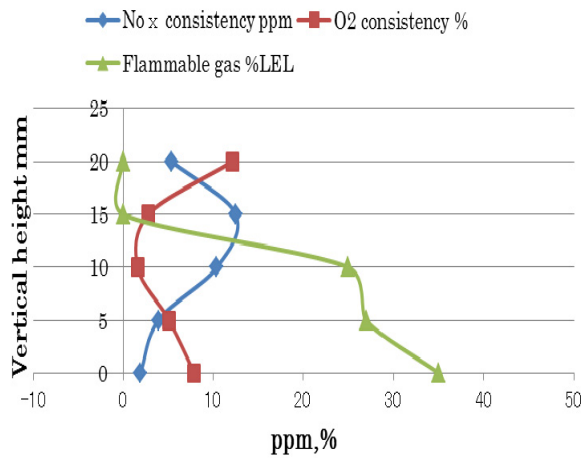
図 13 数値計算による温度分布

3.7 火炎内の化学種成分

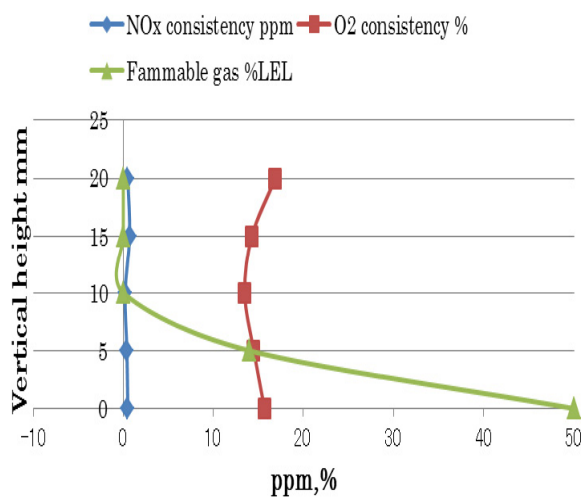
化学成分の測定では、ノズルスリット幅 0.5mm、燃料に水素を使用し、窒素を用いて希釈し低カロリー燃料を想定した。図 14 は燃料の噴出速度を 2.40m/s と一定で噴出させたときの火炎内部の化学成分を示したものである。なお、周囲流は流していない。図 14(a)は燃料の割合を水素:窒素=10:0 とし、半径方向は 0mm の点で高さ方向に 0mm~20mm までを測定したものである。図 14(b)は噴出速度やプロット点を変化させずに燃料の割合を水素:窒素=5:5 とした場合であり、また図 14(c)は燃料の割合を水素:窒素=3:7 とした時の化学成分の測定結果である。半径方向を 0mm と一定にし、ノズル側面に沿って各点をプロットした。図 15 は測定した点を示している。



(a) 水素:窒素=10:0



(b) 水素:窒素=5:5



(c) 水素:窒素=3:7

図 14 火炎内部の化学種成分

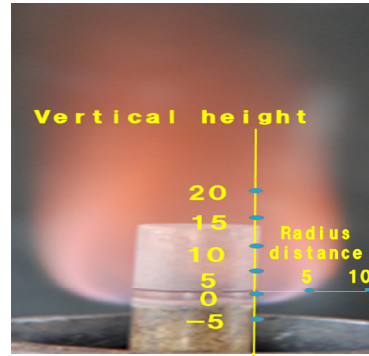


図 15 化学種成分の測定点

図 14(a)(b)(c)より火炎面内にもかかわらず酸素が存在していることがわかる.このことから予混合燃焼状態となっているのではないかと考えられる. また希釈割合が増え低カロリー燃料になるほど大幅にNOxが低減することがわかる. ノズルの上部のほうがNOxの値が大きくなっている.

4 結言

- (1) 燃料の噴出速度を上げると火炎は半径方向に広がる
- (2) 火炎の形状はスリット幅・ノズル上部・ノズル内部の影響はほとんどなく流速に依存している
- (3) 火炎は水平方向より鉛直方向に燃料を噴出するほうが安定する.
- (4) 拡散火炎は燃料を希釈することで短炎になることから,燃え切りが早くなっていることがわかる. また,希釈割合の増加に伴い火炎は不安定になりやすい.
- (5) 水平噴流燃焼では拡散燃焼でも火炎の中に酸素が存在し,一部予混合燃焼となっている.
- (6) 燃料を希釈するとNOxの生成量は,低減する.
- (7) 周囲流により時間的,周期的形状変化の一連のサイクルはなくなる.

参考文献

- (1) 吉本・影山・中嶋・谷川・芦田, 高温学会誌, 36-1, pp.13-17, 2010.
- (2) Ryuji Takashima, The 6th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, pp.3-5, 2011.
- (3) 高島・出口・谷川・吉本・高城, 日本機械学会, 第16回動力・エネルギー技術シンポジウム, pp.129-2, 6/2011.