各種水素拡散火炎形態の違いによる燃焼特性

谷川 涼一* 吉本 隆光**

Combustion Property with Difference in Various Types of Hydrogen Diffusion Flame

Ryoichi TANIGAWA * Takamitsu YOSHIMOTO **

ABSTRACT

In recent years, we have to think over seriously the efficient use of the heavily consumed energy. The mechanisms of stability and holding about the flame have been studied. It is found that the parameters for holding the IDF, the micro flame and the radial horizontal jet diffusion flame are fuel velocity, co-flowing velocity, nozzle diameter (curvature of nozzle), concentration of fuel etc. The flame structure and lifting mechanism are simulated by using the PHOENICS. The results of numerical computation are compared with the experimental data. The results are obtained as follows. (1) The flame base of the IDF is constantly formed at airy side. (2) The flame base of the radial horizontal jet diffusion flame is lifted bulging outward after it moves closely to a spout with an increase in the jet velocity. (3) When the flow rate of the fuel is very small, the flame structure becomes spherical shape. The factors about structure and

Keywords: IDF, Radial horizontal jet diffusion flame, Micro flame, Numerical calculation, Hydrogen diffusion flame

1. 緒言

内燃機関,ガスタービンなど様々な場面で燃焼技術は用いら れている.近年,再生可能エネルギーとしてのバイオマスガスの 開発に伴い,低カロリー燃料の燃焼技術も求められている.その ために多種多様の燃焼における火炎安定機構の解明が今まで 以上に重要課題となっている.

拡散燃焼は、火炎の安定範囲が広く操作が容易である.しかし、 低カロリー燃焼においては、火炎の安定範囲が狭くなるために取 り扱いが難しくなる. 拡散火炎の安定性には、火炎が形成される 火炎基部の構造が影響する. 火炎基部についての研究は現在も 盛んであるが、不明な点が多い. そこで、様々な条件下における 拡散火炎の挙動を調べる必要がある.

塩島らの過去の研究で,純水素及び低カロリー燃焼を想定し た希釈水素燃料を用いて正逆拡散火炎を形成し,火炎の安定 因子について実験しており,正拡散火炎については,数値計算 で解析的に検討されている(1).(2).その中で,正拡散火炎の安 定因子には,ノズルロ径(曲率)および火炎基部でのガス流れ状 態が大きく影響していることが明らかにされている.

** 機械工学科 教授

そこで、燃料噴出方法によって火炎形態は異なるので、汎用 CFD ソフト PHOENICS⁽³⁾を用いて各種火炎について数値計算を 行い、火炎基部でのガス流れ状態について実験及び数値計算 結果を比較・検討する.本報では、燃料と空気の噴出口を入れ 替えた逆拡散火炎、水平方向へ放射状に燃料を噴出して形成 する放射状水平噴流拡散火炎⁽⁴⁾および微小口径ノズルにより形 成されるマイクロフレームについての火炎内での燃焼特性を報告 する.

2. 実験装置·計算方法·計算条件

2.1 同軸流拡散火炎におけるノズルと配管図

Fig.1 にフローシート, Fig.2 にノズル断面図を示す. 燃料(水素)及び N₂, CO₂, 空気を流量計で流量調整し, 正拡散火炎 (NDF)では二重管の内側のノズルから燃料を噴出させて噴流拡 散火炎を形成する. 逆拡散火炎(IDF)では同軸中心の周囲ノズ ルから燃料を噴出させ噴流拡散火炎を形成し, 内側のノズルから 流量計で流量を調整した空気を噴出させ, 火炎を形成する. また, マイクロフレームは Fig.1 に示される NDF 用実験装置を用いる.

^{*} 専攻科 機械システム工学専攻



Fig.1 Flow sheet for experimental equipments

of NDF and IDF



Fig.2 Schematic configuration of nozzle of NDF and IDF

2.2 放射状水平噴流拡散火炎におけるノズルと配管図

Fig.3 に放射状水平噴流拡散火炎のフローシートを示す.流量 計で各種燃料及び空気,窒素の流量を調整し,燃料噴出ノズル から噴出させ,火炎を形成する.



Fig.3 Flow sheet for experimental equipments

of the radial horizontal diffusion flame

Fig.4 にノズル設計図を示す.ノズルスリット幅は 1.0[mm], 0.5[mm]の二種類のノズルを用いた.



Fig.4 Schematic configuration of nozzles of the radial horizontal diffusion flame

2.3 火炎内温度分布測定器

火炎の温度測定には 0.1[mm]の R 型熱電対 (Pt-PtRh13%)を 用いる. 温度分布がどのようになっているかに重点をおいて測定 を行う.

2.4 計算方法

PHOENICS は、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式を 一般化し計算する. 圧力・速度連成には SIMPLE 法を用いる. CHEMKIN から物性を参照し、化学種の生成速度係数はアレニ ウスの式より求める. 2 次元円筒座標系(半径方向一軸方向)を 用いて定常計算を行うため、y(半径方向), z(軸方向)の支配 方程式を用いる. 化学反応は水素燃焼の素反応式 16 式(Table 1)を考慮し、層流計算にはLAMINARモデル、乱流計算にはk-ε モデルを使用する. 以下に化学反応速度係数を求めるアレニウ

スの式を示す.ただし、 K_f :化学種の生成速度係数、R:ガス

定数, T:絶対温度とする.

 $K_f = AT^n \exp(-E/RT) \text{ [unit:mol, cal, s, cm, K]}$ (1)

Table 1 Chemical reaction equations and parameter of Arrhenius equation

		E	leme	ntal re	actio	ns			Α	n	Е
н	+	O ₂			=	он	+	ο	2.24E+	0	7030
о	+	H ₂			=	он	+	н	1.74E+	0	3960
H ₂	+	он			=	н	+	H ₂	2.19E+	0	2160
о	+	он			=	H_2	+	ο	5.75E+	0	3270
н	+	н	+	H ₂	=	H ₂	+	H ₂	9.20E+	-0.6	0
н	+	н	+	N ₂	=	H ₂	+	N ₂	1.00E+	-1	0
н	+	н	+	O ₂	=	H_2	+	O ₂	1.00E+	-1	0
н	+	н	+	H ₂	=	H ₂	+	H ₂	6.00E+	-1.2	0
о	+	0	+	N ₂	=	O ₂	+	N ₂	2.62E+	-0.8	0
о	+	н	+	м	=	H_2	+	м	1.17E+	0	0
н	+	O ₂	+	м	=	но	+	м	2.70E+	-0.8	0
н	+	но			=	он	+	он	2.50E+	0	7950
н	+	но			=	O ₂	+	H_2	2.50E+	0	2910
н	+	но			=	H ₂	+	ο	5.00E+	0	4190
о	+	но			=	он	+	02	4.80E+	0	4190
ο	+	но			=	H ₂	+	02	5.00E+	0	4190

2.5 **計算条件**

2.5.1 逆拡散火炎の計算条件

①希釈した水素を用いた逆拡散火炎

H2:N2=30:70 の希釈した水素を用いた逆拡散火炎の数値計 算を行う.計算条件を Table 2,計算領域を Fig. 5 に示す.

②リム厚と火炎基部安定性の関係

純水素を用いた逆拡散火炎において,実験が困難であるリ

ム厚が極めて薄い場合の数値計算を行う.計算条件を Table 2,計算領域をFig. 5 に示す.

Table 2	Computational	condition	of IDF
	r		

INLET1-Air velocity	0.6,5.0,10.0[m/s]
INLET2-Fuel velocity	0.6[m/s]
A(Radius)	2.4[mm]
B(Rim thickness)	0.1,0.2,0.3,0.5,1.5[mm]
MODELS	LAMINAR



Fig.5 Computational domain of IDF

2.5.2 放射状水平噴流拡散火炎の計算条件

希釈した水素を用いた放射状水平噴流拡散火炎の数値計算 を行う.計算条件を Table 3,計算領域を Fig.6 に示す.

Table 3 Computational condition

of radial horizontal jet diffusion flame

INLET1-Fuel velocity	0.5~15.0[m/s]
INLET2-Air velocity	0.1[m/s]
C(Slit width)	0.5,1.0[mm]
MODELS	κ- ε



of the radial horizontal jet diffusion flame

2.5.3 マイクロフレームの計算条件

純水素を用いた正拡散火炎におけるマイクロフレーム(ノズル 直径 1[mm]以下で形成される火炎)の数値計算を行い,実験結 果と比較する.計算条件を Table 4,計算領域を Fig. 7 を示す.

Table 4 Computational condition of micro flame

INLET-Air velocity	0.5~[m/s]
INLET-Fuel velocity	0.1[m/s]
A(Radius)	0.18,0.34,0.51,0.94[mm]
B(Rim thickness)	0.15[mm]
MODELS	LAMINAR



Fig. 7 Computational domain of micro flame

3. 実験結果

3.1 逆拡散火炎

3.1.1 希釈水素を用いた逆拡散火炎

Fig.8 に各断面のノズル半径方向の温度分布を示す.破線が 実験結果⁽⁵⁾,実線が数値計算結果である.実験において火炎長 さが 10[mm]となる燃料流速が 0.6[m/s]だったため,同流速にお ける数値計算を行った結果,ピーク(火炎面)の位置が実験結果 よりノズル中心側に寄った.さらに,高さ 6[mm]の断面では温度 分布は平坦となり,実験値よりも温度は低く燃え切りが早くなって しまう傾向がある.しかし,火炎形状に関して考えれば,相似的に 小さくなっているといえる.これらの結果から,完全なる一致はみ られないが火炎挙動・形状の予測は可能となる.



Fig.8 Radius profiles of temperature (H2:N2=30:70)

3.1.2 リム厚と火炎基部安定性の関係

Fig.9 に流速 5[m/s]における実験及び解析結果を示す. リムの 内側, つまり空気側に基部が形成されている. 数値計算結果も同 様の結果を示した.

Fig.10 に流速 10[m/s]で形成される火炎において,外側からリ ム厚を薄くした時の数値計算の OH 質量分率分布及び速度ベク トルを示す.図中の(5)から(4)ではリム厚が比較的厚みの大きい 状態から厚みを減らしており,この時はリム厚の減少に対して火 炎の安定性は変化していない.これは逆拡散火炎においては, 火炎基部がリムの内側の空気側に形成されるために,内側から 噴出する空気の影響を受け易いが,外側のリム厚減少は火炎基 部の安定性には寄与しない.しかし,図中の(4)から(1)への,リム 厚が極めて薄い状態での厚みの減少においては,リム厚が薄く なるにつれて火炎が浮き上がりやすくなっていることがわかる.こ れは,火炎基部における燃料と酸化剤の混合部(火炎基部より 下側)が希薄状態になり,浮き上がりやすくなると考えられる.





Fig.9 Flame behavior (V=5[m/s],OH mass fraction)

Fig.10 Transition of flame base (V=10[m/s],OH mass fraction)

3.2 放射状水平噴流拡散火炎

3.2.1 火炎基部の挙動

Fig.11 に水素火炎における噴出速度を上昇させた場合の直接 写真, Fig.12 に水素の数値計算による各噴出速度での OH 質量 分率分布を示す.火炎基部が噴出口より下部に形成する結果が 得られた.鉛直噴出において,火炎基部は空気側に存在してい ることから,水平噴出の場合も空気側,つまり下部に形成している. 噴出速度を上昇させるにつれて火炎基部形成位置が上昇し,火 炎形状は半径方向に膨らんでいく.火炎基部が噴出口に達する と,少し火炎基部の位置を下げて浮き上がり,不安定になる現象 が見られた.これらは実験結果と数値計算で定性的に一致する.



Fig.11 Flame configurations with increasing jet velocity (Vj:jet velocity) (experiment, H2:N2=30:70)



Fig.12 Profiles of OH mass fraction with increasing jet velocity (Vj:jet velocity)(computation, H2:N2=30:70)

3.2.2 実験および数値計算における温度分布の比較

Fig.13 に測定基準を示す. 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.噴出口の下部を H=0[mm], ノズル管外周面を R=0[mm], ノズル中央部を R=-7[mm]とする.

Fig.14 に希釈水素火炎(H2:N2=50:50)を用いた,スリット幅 0.5[mm],燃料噴出速度 2.3[m/s]の実測値の温度分布を示す. Fig.15 に数値計算での温度分布を示す.基部がノズル噴射口よ り下部に形成されるため、ノズル噴射口より低い断面も測定した. 実験結果において、下流部では開いた火炎になり、実験の方が 数値計算より早く燃え切っている.噴流速度が小さい状態では火 炎のサイズが小さいため、循環流による影響は見られなかった.



Fig.13 Position of measurement



Fig.14 Radius profiles of temperature (experiment, H2:N2=50:50)



(computation, H2:N2=50:50)

3.2.3 循環流の発生とその影響

循環流による影響を考えるため,噴出速度を上げた大きいサイズの火炎で検討する. Fig.16 にスリット幅 1[mm],燃料噴出速度30[m/s]の火炎における数値計算による速度ベクトル図及び等温分布を示す.この図より,火炎面の内側に大きい循環流が形成されていることがわかる.この循環流は,噴流が十分に半径方向に拡散した後に,燃焼ガスが上部に流れていく過程で形成される.

Fig.17 に各断面での半径方向の温度分布を示す. ノズルからの高さ 10[mm], 20[mm]の断面の温度分布で顕著に火炎面より内側に極小値(くぼみ)が発生している. これは, 循環流による対流の影響で, くぼみの位置より火炎中心側に熱が運ばれているためだと考えられる.



Fig.16 Contour of temperature with velocity vector



Fig.17 Radius profiles of temperature (computation)

3.3 マイクロフレームの火炎形状の比較

Fig.18 にノズル直径 0.51,0.94[mm], 燃料流速 1.0[m/s]のマイ クロフレームの直接写真⁽⁶⁾, Fig.19 に同様の条件の数値計算に よるOH質量分率分布と速度ベクトル図及び等温分布を示す. 拡 散火炎において, 極めて流量が小さいときは球状の火炎を形成 している. 火炎基部はノズル先端上面より上流側に存在し,ノズル の中心軸側に火炎基部が寄っている.また, 燃料噴出速度を増 すと, 火炎の下流部は尖った形状の閉じた火炎になり, 通常の火 炎形状に近づいていく.



d=0.51[mm],V=1[m/s] d=0.94[mm],V=1[m/s] Fig.18 Flame configurations of micro flame



Fig.19 Contour of OH mass fraction (left side) and temperature with velocity vector (right side)

Fig.20は、ノズルロ径 0.18[mm],0.34[mm],0.51[mm],0.94[mm] における水素の燃料噴出速度と火炎長さの関係を示したもので ある. 火炎長さは各ノズルロ径において燃料噴出速度とともに比 例して伸びている. また,実験範囲内で火炎の浮き上がり・吹き 飛びには至っていない.

Fig.21 はレイノルズ数 Reと火炎無次元長さとの関係を示したものである. ここで, 火炎無次元長さを求める式は

$$l/d$$
 (2)

l:火炎長さ[m] *d*:ノズル内径[m]

である. どのノズルロ径においてもl/dは, レイノルズ数とともに

伸び、いずれの線もほぼ一致している.

$$\frac{1}{d} \propto \operatorname{Re}\left(=\frac{\operatorname{vd}}{\nu}\right) \tag{3}$$

から

$$l \propto \frac{vd^2}{v}$$
 (4)

vd²:速度×断面積=流量

となり、火炎長さは流量によって決まることがわかる.数値計算で ノズル内径 d=0.94[mm]では実験値とほぼ一致している.



Fig.20 Flame length versus Fuel velocity



Fig.21 l/d versus Re

4. 結 言

各種火炎における安定要素に関する数値計算を行った. 拡散 火炎はその燃焼形態, パラメータの違いで大きく特徴が異なると いう知見を得た. その結果を以下に示す.

<逆拡散火炎>

(1)火炎基部形成位置は正拡散火炎ではリムの外側,逆拡散 火炎ではリムの内側,つまり空気側に形成され,空気速度に よる影響を受けやすい.リム厚が極めて薄い状態では火炎 基部における燃料と酸化剤の混合部(火炎基部より下側) が希薄状態になり,浮き上がりやすくなる.

<放射状水平噴流拡散火炎>

- (2)放射状水平噴流拡散火炎において、火炎基部形成位置は 実験及び数値計算で噴射口より下部に形成され、噴射速度 上昇とともに噴射口へ近づいた後、少し下部に膨らみながら 浮き上がる.
- (3)数値計算では,放射状水平噴流拡散火炎の温度分布には 循環流の影響がみられ,火炎中心軸で温度が上がってい る.

<マイクロフレーム>

(4)マイクロフレームは層流火炎となっており、極めて流量が小 さいときは、球状の火炎を形成している、火炎長さは燃料流 量に比例して伸び、火炎の大きさは流量に依存している.

参考文献

(1)Toshimi Takagi, Zhe Xu: "Numerical Analysis of Laminar Diffusion Flames-Effects of Preferential Diffusion of Heat and Species", COMBUSTION AND FLAME 96, pp.50-59, 1994.
(2)塩島史哉:「噴流拡散火炎の挙動における数値シミュレーショ

ン」,神戸市立工業高等専門学校研究紀要第 46 号, pp.43-48, 2007.

(3) PHOENICS Ver.2008 マニュアル, CHAM 社, 2008.

(4)出口幸治:「放射状水平噴流拡散火炎における火炎挙動と安 定限界に関する研究」,第 20 回環境工学総合シンポジウム, 2010.

(5)川見唯:「水素逆拡散における燃焼特性」,産学官フォーラム, 2007

(6)久保直志:「逆拡散火炎の安定と挙動に関する実験的研究」, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要第43号, pp.7-12, 2004