

CCDカメラを用いた噴流拡散火炎形状の計測

立石 学・矢野 利明・鳥居 修一
(受理 平成7年5月31日)

Measurement of Jet Diffusion Flame Shapes by CCD Camera

Manabu TATEISHI, Toshiaki YANO and Shuichi TORII

Abstract

The aim of this study is to provide a control for the blow off from a jet diffusion flame. An experimental study has been performed on propane and methane jet diffusion flames from a vertical circular nozzle burning in still air. A CCD camera was employed to investigate the shapes of jet diffusion flames. Emphasis was placed on the flame lift height, and on the flame base width at the flame base. It is revealed from the present study that (i) the flame lift height is dependent on each fuel, (ii) the flame base width is independent of the fuel and nozzle diameter and has a similar tendency in the fuel injection velocity, (iii) there is a proportional relationship between the non-dimensional flame lift height and the non-dimensional flame base width, and the gradient which characterizes the blow off property of jet diffusion flames for each fuel.

概 要

本研究の目的は、火炎形状を観察することにより、噴流拡散火炎の吹き消えを制御することである。静止空气中に垂直円形ノズルからプロパンとメタンを噴出させ、そこに形成される拡散火炎をCCDカメラで撮影した。特に、火炎基部の形状に着目し、浮き上がり火炎高さ、浮き上がり火炎基部幅について検討した。その結果、(i)浮き上がり火炎高さは、燃料噴出速度に対する増加傾向が燃料によって異なる、(ii)浮き上がり火炎基部幅は燃料およびノズル径に関係なく、燃料噴出速度に対して同様の増加傾向を示す、(iii)無次元浮き上がり火炎高さと同次元浮き上がり火炎基部幅の間には比例関係があり、その傾きは燃料によって異なり、メタンとプロパンでは浮き上がりの火炎形状が異なる、ことが明らかとなった。

1. 緒 論

各種の工業用燃焼装置においては、比較的燃焼制御

が容易であり、かつ火炎の安定性も良いことから噴流拡散火炎が多く用いられている。最近、燃焼器の発生すべき熱量が飛躍的に増大し、燃焼器に要求される熱負荷が極めて大きいものになっている。このため、高負荷燃焼を行う上で、燃料噴出速度の増加は不可欠な因子である。燃料噴出速度の増大に伴って、火炎はバーナーリムから離れ、噴出域下流へ浮き上がり、さらに吹き消えるといった現象を起こす。そこで、高負荷燃焼を行う際には噴流拡散火炎の吹き消えの抑制と制御が必要となる。

本実験では、メタンおよびプロパン燃料を使用し、薄肉の燃料噴出ノズルより静止空气中に噴流拡散火炎を作り、CCDカメラを用いてこの火炎を撮影した。さらに、画像の輝度分布の違いにより、これらの火炎の火炎形状、特に、浮き上がり高さ、浮き上がり火炎基部幅の計測を行った。その結果、噴流拡散火炎の吹き消えの抑制と制御の可能性を見いだし、プロパンとメタンの噴流拡散火炎の吹き消えの特性を明らかにすることができた。

2. 実験装置および実験方法

2.1 装置および火炎撮影の概要

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。燃料ポンプより燃料を流し、減圧弁により二次圧を 0.5kgf/cm^2 と一定にし、ニードルバルブで流量の調節を行った。オリフィス・マノメータの差圧より流量を測定し、燃料噴出ノズルから静止空気中へ垂直上方噴出の噴流拡散火炎を作った。さらに火炎の撮影を行うために、燃料噴出ノズルより約 1.5m 離れた位置に CCD カメラを設置した。

本実験においては、燃料としてプロパンとメタンを使用し、実験条件として 4 種類の異なるノズル径を使用した。この燃料噴出ノズルは、浮き上がり火炎および吹き消え現象を容易にとらえるために、低流速でも吹き飛びを起こす薄肉バーナであり、ノズル先端にはテーバをかけていない円管ストレートノズルを用いた。Table. 1 に本実験で使用した 4 種類のノズルの内径 d およびその肉厚 δ を示す。

プロパンおよびメタンの噴流拡散火炎の撮影には CCD カメラを用いた。実験では火炎の浮き上がりや吹き消え現象などの瞬時の火炎形状を明確にとらえることが重要であり、このためにはできる限りシャッタースピードをあげることが望ましい。しかし、シャッタースピードを $1/60$ 以上にして撮影すると輝度不足により火炎形状を明確にとらえることができなかった。これは、特にメタン火炎が乱流火炎となり、浮き上がると火炎全体がうすい青色を呈する不輝炎となり発光量が落ちるためである。このことはノズル径が小さくな

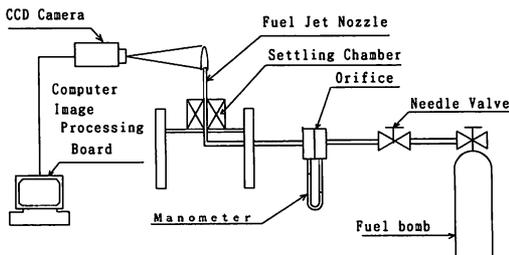


Fig. 1 Experimental apparatus

Table.1 Inside diameter and lip thickness

δ (mm)	d (mm)
0.21	1.69
	2.64
0.28	3.19
	4.01

るとさらに顕著に現れた。したがって、シャッタースピードは $1/60$ とし、絞りは使用したレンズの最大開放 1.2 を用いた。

2.2 火炎形状の測定

Fig. 2 に浮き上がり火炎の概略を示す。本実験では、CCD カメラで撮影したプロパンおよびメタンの火炎画像より、浮き上がり火炎高さ L_h 、浮き上がり火炎基部幅 B_w を得た。この火炎形状の測定には画像解析ソフトの中の“ヒストグラム・輝度グラフ表示”を用い、その決定には火炎とその周辺の RGB 値の違いを用いた。火炎形状の定義は、木村ら⁽¹⁾と同様に噴流拡散火炎が発光している部分を火炎とした。

Table. 2 と Table. 3 は $d=2.40\text{mm}$ のプロパンおよびメタンの浮き上がり火炎基部の RGB 値を示す。0 は燃料噴出速度 $u_j=0$ 、すなわち火炎がないときのノズル先端での RGB 値を示している。I ~ IV は u_j を増加させて測定した火炎の順番であり、I の火炎は既に浮き上がりしており、VI は吹き消え寸前の火炎である。プロパン火炎・メタン火炎ともに、火炎基部において

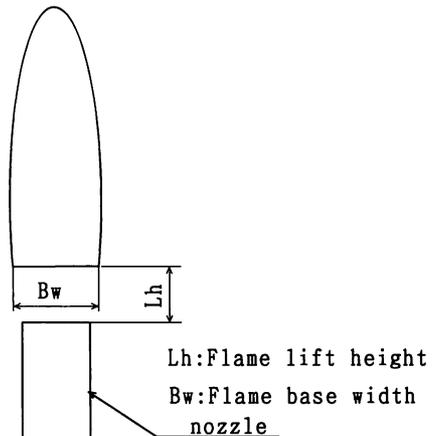


Fig. 2 Schematic diagram of lift flame

Table.2 RGB values at the flame tip and flame base for propane flame

No	u_j (m/s)	R値	G値	B値
0	0	54	43	45
I	16.8	81	55	114
II	23.4	76	64	112
III	32.5	45	48	118
IV	38.7	58	59	151
V	45.5	74	54	177
VI	54.7	45	52	192

Table.3 RGB values at the flame tip and flame base for methane flame

No	u_j (m/s)	R値	G値	B値
0	0	50	39	64
I	22.5	53	62	127
II	28.3	66	83	160
III	33.6	51	59	109
IV	53.7	45	53	143
V	60.5	44	55	133
VI	72.3	41	51	107

B値がバックグラウンドとの差が最も大きい。また、B値はR値、G値と比較してもかなり大きいことがわかる。

そのため火炎位置の決定はB値を用い、火炎基部のB値が100以上となる位置を火炎基部とした。

以上のことを元にプロパン・メタンの火炎形状の決定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 燃料噴出速度と火炎形状

Fig. 3はプロパンおよびメタンの $d=3.19\text{mm}$ における火炎画像である。燃料噴出速度 u_j は(a)(c)が 15.0m/s であり、(b)(d)が 40.7m/s である。

(a)と(c)および(b)と(d)の火炎形状を観察すると、これらはそれぞれ同じ流速であるにもかかわらず火炎形状はかなり異なる。またプロパンは輝炎、メタンは不輝炎である。プロパンは、火炎の大部分が黄橙色を呈している。これは火炎面に生じたすすが火炎

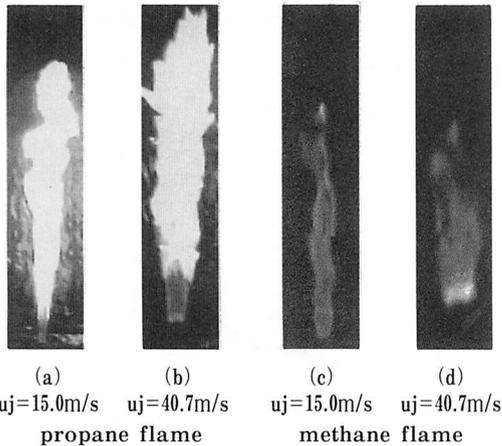


Fig. 3 CCD camera photograph of propane and methane jet flame ($d=3.19\text{mm}$)

により加熱され固体発光するためである。これに対してメタンの場合、火炎全体が青炎となっているのはプロパンに比べメタンの拡散係数が大きく、しかも理論空気量が小さいために周囲空気と燃料との混合が促進されているためである。

(a)と(b)を比較すると、プロパンは u_j の増加にともない火炎全体が大きくなり火炎長さも長くなっている。(c)と(d)を比較すると、メタンは火炎の幅が増大しているのに対して火炎長さは短くなっている。このようにプロパンとメタンの乱流拡散火炎の火炎色および火炎挙動はかなり異なっていることがわかる。

3.2 燃料噴出速度と浮き上がり高さ

Fig. 4とFig. 5はプロパンとメタンについて、燃料

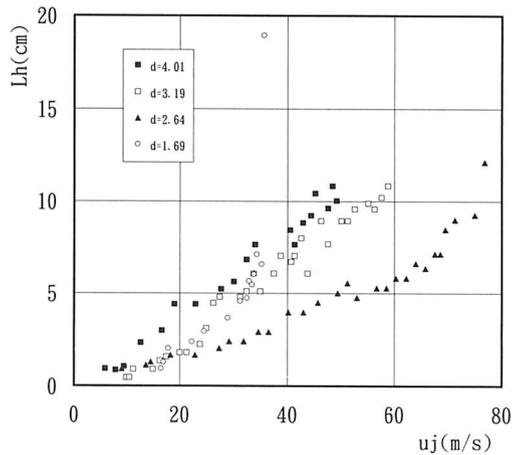


Fig. 4 Relation between fuel injection velocity and flame lift height for propane

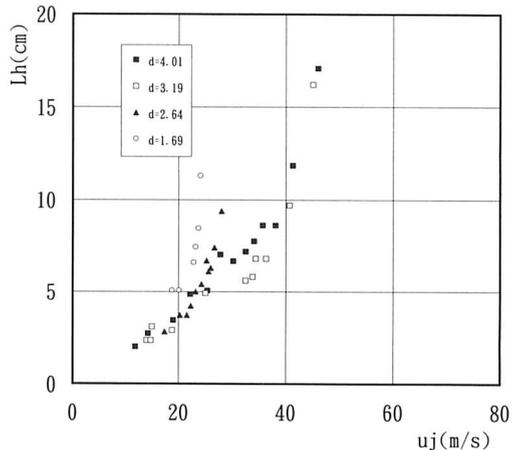


Fig. 5 Relation between fuel injection velocity and flame lift height for methane

噴出速度 u_j に対する浮き上がり火炎高さ L_h の関係である。

Fig. 4 のプロパン火炎では、 L_h は u_j に対して一次関数的な増加を示している。ただし $d=1.69, 2.64\text{mm}$ の吹き消え直前の火炎は非常に不安定なため L_h が u_j に対して直線的な増加傾向を示していない。このことからノズル径が小さいほど外部流体の巻き込みの影響を受けやすいといえる。特に、 $d=1.69\text{mm}$ のプロパン火炎は浮き上がり直後から不安定であるためその傾向が顕著に表れている。

u_j に対する L_h は、プロパン火炎、メタン火炎ともにノズル径の大きい方が長くなっている。プロパン火炎とメタン火炎の L_h をそれぞれ比較すると、プロパン火炎が一次関数的増加を示しているのに対してメタン火炎は二次関数的増加を示している。また、同じノズル径で L_h を比較すると、 u_j が増加するにつれてメタン火炎の方が L_h は急激に長くなるのがわかる。これはメタンの方がプロパンよりも燃焼速度が小さいために火炎基部での周囲空気の巻き込み速度が小さくなる⁽²⁾ことに起因すると思われる。つまり、巻き込み速度が小さくなるとコヒーレントな渦の支配よりも火炎面の内側の小さいスケールによる影響⁽³⁾が強くなり、火炎が消失する傾向が強くなる。その結果、プロパン火炎に比べてメタン火炎の L_h が長くなったものと思われる。以上の事から u_j に対する L_h は燃料の違いによる火炎の浮き上がりおよび吹き消えの特性を顕著に表しているといえる。

3.3 燃料噴出速度と浮き上がり火炎基部幅

Fig. 6 と Fig. 7 はプロパンとメタンの燃料噴出速度 u_j と浮き上がり火炎基部幅 B_w の関係である。

u_j に対する B_w は、プロパン火炎、メタン火炎ともにノズル径の大きい方がわずかに広がっている。プロパン火炎とメタン火炎の B_w をそれぞれ比較すると、浮き上がり火炎高さと同様にプロパン火炎は一次関数的増加を示している。また、メタン火炎の場合も L_h と u_j の関係の時とは異なり、 B_w は u_j に対してほぼ一次関数的に増加していることがわかる。さらに、同じノズル径で B_w を比較すると、 L_h と u_j の関係ほどプロパン火炎とメタン火炎では差がなく、ほぼ同じ直線上を変化している事がわかる。

3.4 無次元浮き上がり火炎高さ と無次元浮き上がり火炎基部幅

Fig. 8 と Fig. 9 にプロパンとメタンの無次元浮き上がり火炎高さ L_h/d と無次元浮き上がり火炎基部幅

B_w/d の関係を示す。Fig. 8 において、プロパン火炎の L_h/d に対する B_w/d の傾きはノズル径に関係なくほぼ等しくなっていることがわかる。ただし、 $d=1.69, 2.64\text{mm}$ における吹き消え寸前の L_h/d に対する B_w/d の値はこの傾きから大きくはずれている。これは吹き消えようとする瞬間の火炎形状が大幅に乱れていたことを示している。Fig. 9 において、メタン火炎の L_h/d に対する B_w/d の傾きもノズル径に関係なくほぼ等しくなっている。

L_h/d に対する B_w/d は、プロパン火炎、メタン火炎ともに傾きがノズル径に関係なく等しい。このことから噴流拡散火炎は燃料によって火炎基部における火炎形状が一定の相似性を持つといえる。

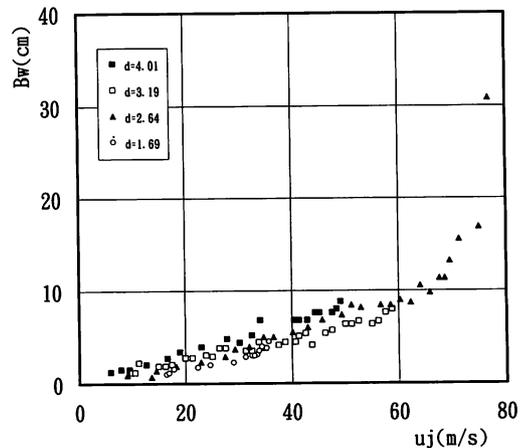


Fig. 6 Relation between fuel injection velocity and flame base width for propane

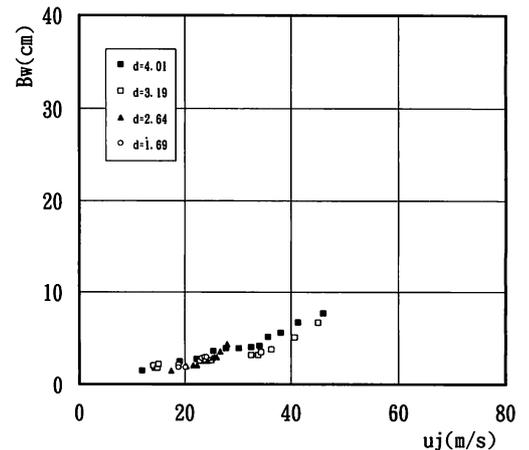


Fig. 7 Relation between fuel injection velocity and flame base width for methane

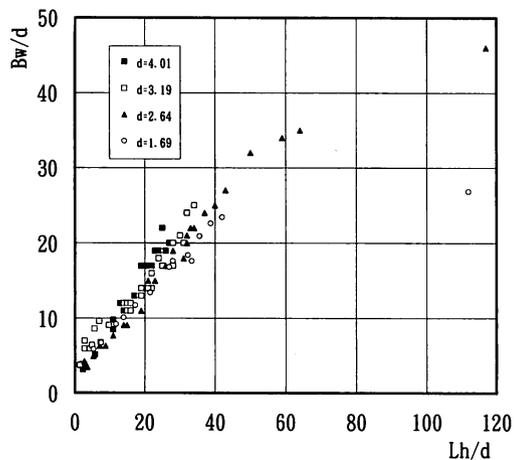


Fig. 8 Relation between non-dimensional flame base width and non-dimensional flame lift height for propane

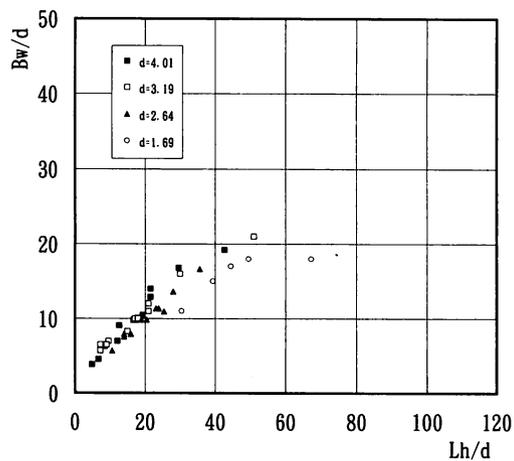


Fig. 9 Relation between non-dimensional Flame base width and non-dimensional flame lift height for methane

4. 結 論

プロパン火炎とメタン火炎をCCDカメラを用いて画像処理した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 浮き上がり火炎高さは、燃料噴出速度に対する増加傾向が燃料によって異なる。
- (2) 浮き上がり火炎基部幅は燃料およびノズル径に関係なく燃料噴出速度に対して同様の増加傾向を示す。
- (3) 無次元浮き上がり火炎高さと無次元浮き上がり火炎基部幅の間には比例関係があり、その傾きは燃料によって異なり、メタンとプロパンでは浮き上がりの火炎形状が異なる。

このような火炎基部の特性から吹き消えの予測が可能である。

5. 参考文献

- (1) 木村・右川, 日本機械学会論文集(B), 27-177, (1961), 763.
- (2) Takahashi, F., Schmoll, W. J., Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, pp. 677-683, The Combustion Institute, 1990.
- (3) Eickhoff, H., Lenze, B. and Leuckel, W., Twentieth Symposium (International) on Combustion, p.311, The Combustion Institute, 1985