

シュリーレン法を用いた水素噴流乱流拡散火炎の挙動解析

福 重 秀 一*・立 石 学*・矢 野 利 明**・
望 月 博 昭***・鳥 居 修 一**

Analysis of the Behavior of Jet Diffusion Flames of Hydrogen by Schlieren Method

Shuichi FUKUSIGE, Manabu TATEISHI, Toshiaki YANO,
Hiroaki MOCHIZUKI and Shuichi TORII

Abstract

The present study has been conducted to investigate the behavior of the flame base near the stability limits of a hydrogen jet diffusion flame. The color schlieren technique is employed to visualize the hydrogen flame, especially near the nozzle exit. The visible image makes clear two distinct types of stability behavior. One is the stabilized flame attaching to the burner exit, which occurs at or below the Mach number of unity. Another is the lifting flame which appears in the region of the Mach number of unity. The lift-off height and lift-off width at the flame base is calculated from the schlieren pictures and is related to the mass flow rate of hydrogen fuel.

1. 緒 論

世界のエネルギー需要は近年増加傾向にあり、年間約3.3%、発展途上国だけをみると5%以上の増加率となっている。一次エネルギーの大部分を占める石油資源の可採年数は約43年と言われており、石油需要が逼迫化していくことが懸念される。そのため、太陽エネルギーの導入や、廃熱の有効利用など、新エネルギー技術や、省エネルギー技術の開発が地球規模で大きな課題となっている。

一方、近年の地球環境問題の中では、地球規模でのCO₂削減が叫ばれている。現在、CO₂濃度は徐々に増加傾向にあり、この主な原因は化石燃料消費の増大にある。このままの状態で推移すると、21世紀中にはCO₂濃度は倍増し、地球気温の上昇により生態系へ大きな影響が生じると言われている。

水素は太陽や石油などのような一次エネルギー資源ではなく、それらのエネルギーを変換して水と作用させて

得られる二次エネルギーである。しかし、水素は各種のエネルギー資源から変換し易く、また多くの合成燃料へ誘導できるので「エネルギー変換の十字路にある水素」として評価できる。

地球の温暖化を緩和するには、二酸化炭素の低減および固定化が重要である。化石燃料の消費によってもたらされた二酸化炭素の軽減をはかるには排出速度以上の高速で二酸化炭素を固定しなければならない。二酸化炭素の迅速な固定を行うには、水素と反応させて、メタノール、炭化水素などの燃料に変換し、資源としてリサイクルする方法が最も有望である。水素エネルギーシステムなくして、二酸化炭素の削減および温暖化問題の解決はありえない。

本研究で取り扱う、燃料としての水素は極めて広い可燃範囲を有し、燃焼速度が速いことから内燃機関や工業窯炉といった工業用燃焼装置での高負荷で高い安定性をもつ燃焼器の設計が可能だと考えられる。燃焼装置は、燃焼制御の容易さ、火炎の安定性の良さから噴流拡散火炎が最も多く使用されている。噴流拡散火炎は燃料噴流速度を大きくすると火炎がノズルから離れ、火炎が浮き上がり、吹き消えるといった現象が起きる。つまり、噴流拡散火炎の制御には火炎の安定化が重要となる。

本研究では代替燃料として注目されている水素を用い

平成9年5月31日受理

*博士前期課程機械工学専攻

**機械工学科

***農学部生物環境学科

た噴流拡散火炎の浮き上がりや吹き消えといった現象を調べるために、ノズルより静止空气中に噴流拡散火炎を作り、カラーシュリーレン法で水素の可視化を試みた。さらに、その映像をハイスピードビデオカメラを用いて撮影し、水素の噴流拡散火炎の特性について実験的検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

水素燃焼の実験装置の概略を図1に示す。水素ポンプより燃料を流し、圧力制御弁により最大貯気室圧を20 kgf/cm²とした。流量は圧力制御弁により調節し、燃料噴出ノズルから静止空气中へ垂直上方へ噴出させ、噴流拡散火炎を作った。

ノズルと貯気室の接合部分、貯気室と耐圧チューブの接続部、ならびにガスポンプと耐圧チューブの接続部のガス漏れ検査は実験前に必ず行った。ノズル交換時にはノズルと貯気室の接合部分のガス漏れ検査を行った。ノズル出口の質量流量の測定に必要な貯気室内の圧力測定には半導体トランスデューサ（PMS-5M）を用いた。トランスデューサの設置位置は、燃料の流れによる貯気室内の圧力誤差を最小限にするため貯気室底面にした。貯気室内の圧力の測定方法を図2に示す。

不輝炎である水素炎の可視化はカラーシュリーレン法により行った。その映像をハイスピードビデオカメラにより撮影した。実験装置の周囲環境は、水素噴流拡散火炎の挙動を正確に撮影するために、室内を最大限暗くした。さらに、水素燃焼により発生する熱を逃がすよう実験中排気ダクトを回し続けた。

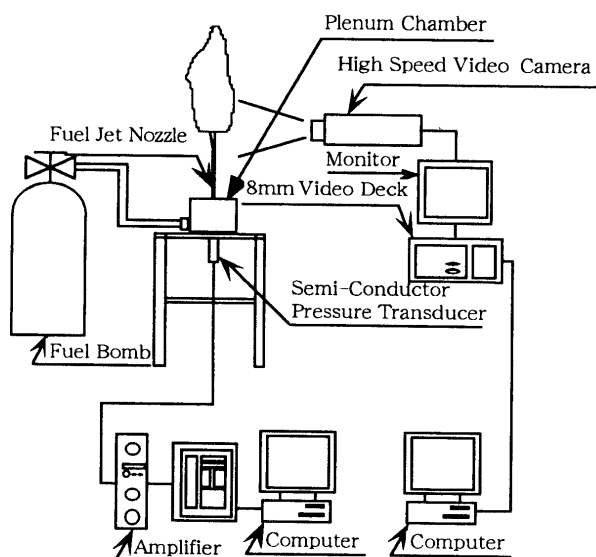


図1 実験装置

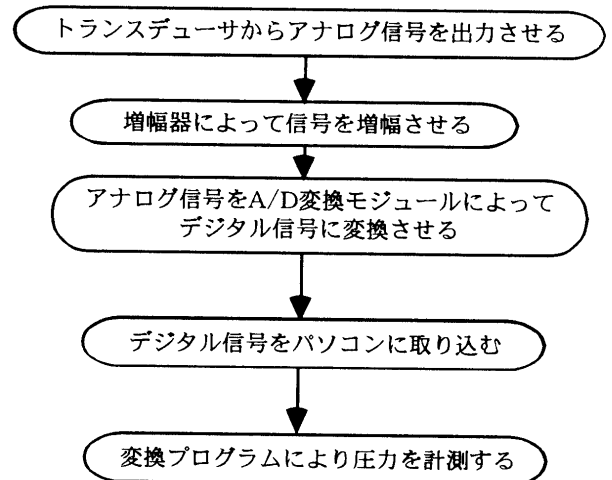


図2 貯気室内圧の測定方法

2.2 使用ノズル

本実験に使用したノズルは、薄肉のノズルで先端にはテーパをかけていない円管ストレートノズルを使用した。表1に本実験で使用した4種類のノズルの肉厚 δ 、内径 d 、全長 ℓ を示す。

表1 使用ノズル

δ (mm)	d (mm)	ℓ (mm)	ℓ/d
0.15	0.41	120	293
	0.58	120	207
0.18	0.9	120	133
	1.12	120	107
	1.25	120	96
	1.45	120	83

2.3 火炎の撮影条件

噴流拡散火炎の撮影は燃料ノズルからの噴流速度を増加させながらシュリーレン法を用いることにより、高速度ビデオカメラで行った。高速ビデオカメラの撮影条件は、絞り2.8、シャッターは開放状態にし、コマ送り速度を250コマ/秒とした。

本研究は静止空气中の火炎を観察する目的で行う実験であるため火炎の揺らぎを避ける様に室内で実験を行った。さらに火炎の撮影は夜間に行った。実験中、発生した熱を逃がすために排気ダクトを運転させたが、火炎現象に支障をきたす程の空氣の乱れは生じなかった。

2.4 マッハ数の算出

ノズル出口の流れが亜音速の時には、測定した貯気室内絶対圧 P_F と大気圧 P_∞ を用いて式(1)よりマッハ数 M を算出した。なお貯気室圧力を増加させ式(1)より算出したマッハ数 M が $M \geq 1$ になるものについては音速噴流とみなし $M = 1$ とした。また κ は水素の比熱比である。

$$M = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left\{ \left(\frac{P_F}{P_\infty} \right)^{(\kappa - 1)/\kappa} - 1 \right\}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

2.5 燃料質量流量の測定

燃料の質量流量は図2に示す方法で求めた貯気室圧力と大気圧を用い、また貯気室からノズル出口までを断熱流れとして算出した。

燃焼実験の際に測定した貯気室内圧力 P_F と大気圧 P_∞ 、大気温度 T_∞ を用いて式(2)、(3)より質量流量 m (kg/s) を求めた。

亜音速噴流時

$$m = \frac{AP_F}{\sqrt{RT_\infty}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left\{ \left(\frac{P_\infty}{P_F} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_\infty}{P_F} \right)^{(\kappa + 1)/\kappa} \right\}} \quad \dots (2)$$

音速噴流時

$$m = \frac{AP_F}{\sqrt{RT_\infty}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{(\kappa + 1)/(\kappa - 1)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$P_F = P_G + P_\infty$$

ここで m : 燃料流量 (kg/s)
 A : ノズル断面積 (m^2)
 P_F : 貯気室内絶対圧 (Pa)
 P_G : 貯気室内ゲージ圧 (Pa)
 P_∞ : 大気圧 (Pa)
 R : ガス定数 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
 T_∞ : 大気温度 (K)
 κ : 比熱比
 d : ノズル内径 (m)

2.6 浮き上がり・吹き消え燃料流量の決定

貯気室内圧力 P_F を増加させ、火炎が浮き上がりおよび吹き消え現象を示した時点における貯気室圧力を式(2)もしくは式(3)に代入し、その時の燃料流量をそれぞれ浮き上がり燃料流量、吹き消え燃料流量とした。

2.7 火炎形状解析の手順

本研究では、水素噴流拡散火炎のシュリーレン映像において大きく密度変化している部分をすべて火炎と判断した。

水素噴流拡散火炎のシュリーレン映像の概略図を図3に示す。図3(a)は、火炎が浮き上がる前の火炎がくびれた形状の概略図である。本研究では、火炎浮き上がり前は火炎のくびれ位置に着目して考察を行った。ノズル先端から火炎くびれまでの距離をくびれ高さ Ch 、火炎く

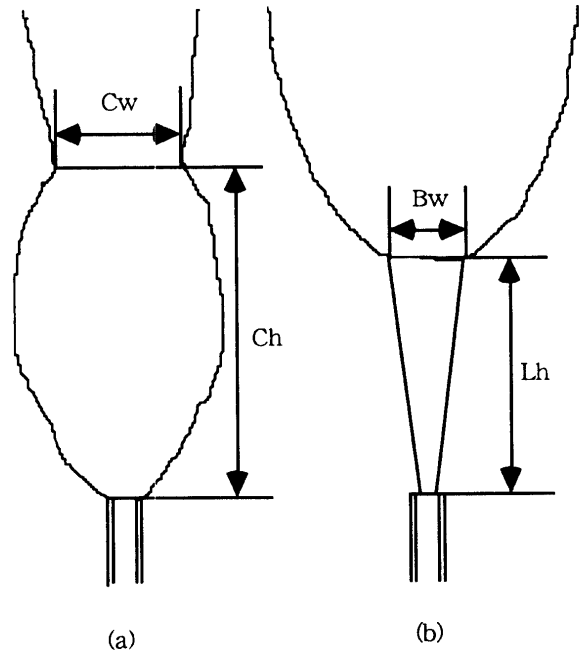


図3 浮き上がり前後の火炎の概略図

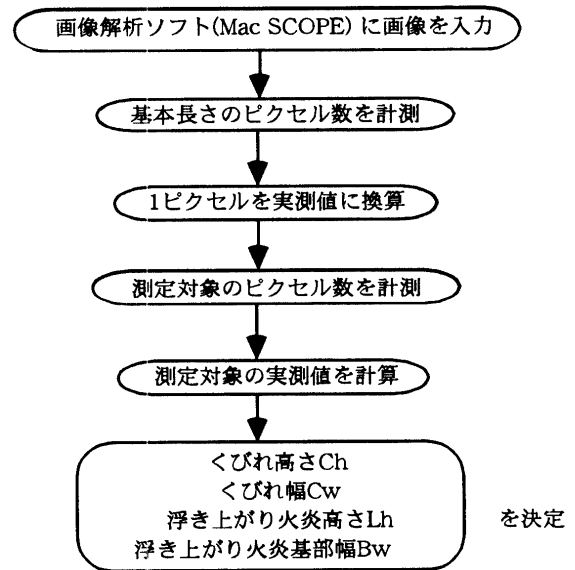
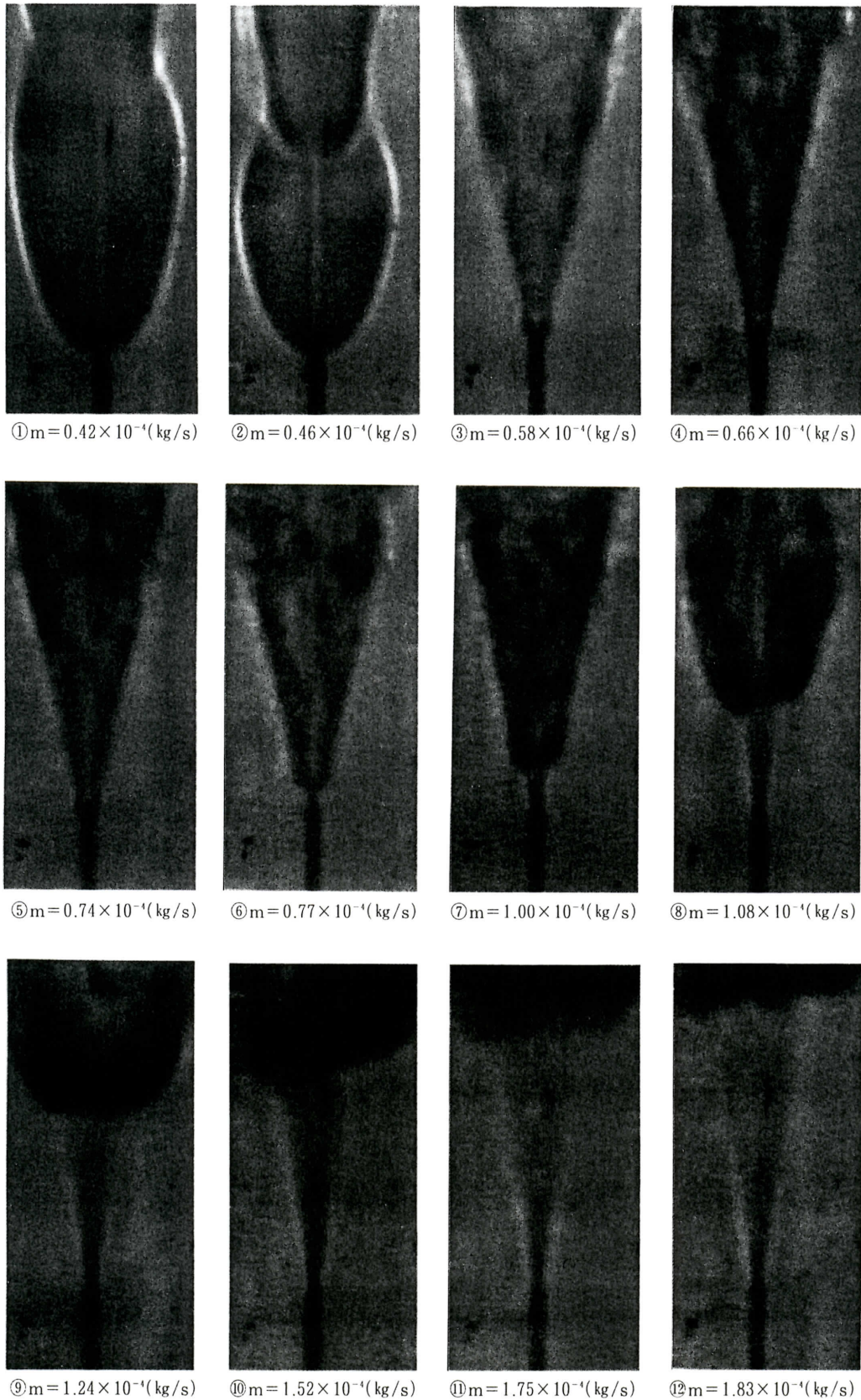


図4 火炎形状の解析の手順

びれ位置における水平方向の火炎幅をくびれ幅 Cw とした。図3(b)は、火炎が完全に浮き上がった時の概略図である。本研究では、火炎の浮き上がりに着目して考察を行った。ノズル先端から浮き上がり火炎の下端までの距離を浮き上がり火炎高さ Lh 、その場所での火炎水平方向の幅を浮き上がり火炎基部幅 Bw とした。ただし、この部分は吹き消え限界に近づくにつれて激しく上下に振動するので、この振動している火炎基部の平均位置を目視で判断して測定した。

図5 $d=0.90(\text{mm})$ における各質量流量に対する火炎形状

火炎形状解析の手順を図4に示す。ハイスピードビデオカメラに取り込んだ画像を画像解析用ソフト (Mac SCOPE) に入力する。次に火炎映像を撮影する前に取り込んでおいた基本長さ形状 (1 辺が 1 cm, 2 cm, 3 cm) のピクセル数を計測し、1 ピクセル当たりの単位長さを算出する。次に測定対象物のピクセル数を計測し、先ほど求めた単位ピクセル長さより測定対象物の実測値を算出した。

3. 実験結果および考察

図5は質量流量を大きくしていったときの火炎映像である。①～⑤は火炎にくびれの存在が確認できたものである。この間では質量流量の増加に伴ってくびれの位置がノズル先端に近づいていき、小さくなっていくことが確認できる。⑥は火炎の浮き上がりが開始したときの映像である。この時点で $M=1$ となった。⑦～⑫は火炎が浮き上がった時の映像である。この間では質量流量の増加とともに浮き上がり高さ L_h が増加していることが確認できる。⑫を確認した後に質量流量を増加させたところ火炎は吹き消えを起こした。

図6にノズル径 d に対する浮き上がり開始時の質量流量 m 、図7にノズル径と浮き上がり時のマッハ数 M の関係を示す。図6よりノズル径の増加に対して火炎が浮き上がりを開始する質量流量は1次関数的に増加している。また図7において、浮き上がり時のマッハ数は、ノズル径にかかわらず $M=1$ であることがわかった。ここで、ストレートノズルにおいては質量流量の増加に対してマッハ数は1以上にならないことは周知の事実である。すなわち、ノズル出口では、流れがチョークしてしまうために、燃料噴出速度は音速を保ったままである。この事実を考慮に入れると、マッハ数1以上でストレートノズルでは質量流量を増加させても速度は変化しないが、水素噴流拡散火炎の基部形状は変化する。この事については、今後更にその原因を検討する必要がある。これらの結果より、水素噴流拡散火炎の浮き上がりは他の燃料と区別して考えなければならない。

図8は、質量流量 m とくびれ高さ Ch の関係を示したものである。各ノズルにおけるくびれ高さの最大値はノズル径に反比例している。ただし、ノズル径 0.41 mm の最大くびれ高さは $d=0.58, 0.90, 1.12$ mm の最大くびれ高さより小さな値を取っている。その原因は、今回実験に用いたトランスデューサが小さなオーダーの信号を認識することができなかったことに起因すると思われる。次に、くびれ高さが 10 mm 以下になった後での質量流量とくびれ高さとの変化について観察してみる。吹き消えが起こったノズル ($d=0.41, 0.58, 0.90$ mm) と吹き消えが観測できなかったノズル ($d=1.12, 1.25, 1.45$ mm) の

2 種類に分けて図を見ると、相似的な変化を示している。しかしながら、各ノズルで見るとノズル径が大きくなるにつれて傾きは少しずつ小さくなっている事が分かる。どのノズルもくびれ高さが 2 mm 程度になり、それ以降浮き上がるまでは、流量の増加に対してくびれ高さはほぼ一定の値を取っている。

図9は、質量流量 m とくびれ幅 Cw の関係を示したものである。図よりくびれ幅は、ノズル径に関わりなく質量流量を増加させると小さくなっていくことが分かる。さらに質量流量を増加させると、くびれは確認できなくなることが分かる。各ノズルにおけるくびれ幅の最大値はノズル径に反比例している。ただし、ノズル径 0.41 mm の最大くびれ幅は $d=0.58, 0.90, 1.12$ mm の最大くびれ幅より小さな値を取っている。その原因は、先に述べたトランスデューサの信号に起因すると思われる。

図10は、質量流量 m と浮き上がり火炎基部高さ L_h との関係を示したものである。ここでの変化は、吹き消えの起こったノズル $d=0.41, 0.58, 0.90$ mm と吹き消えの起こらなかったノズル $d=1.12, 1.25, 1.45$ mm との2通りに大別できる。前者は、質量流量の増加に伴って L_h は1次関数的に増加し、ある点で吹き消えを起こしている。この直線は、ノズル径に関係なく1つの直線上に乗っている。それに対して後者は、質量流量の増加に伴って同一曲線上を移動し、ある一定値に収束している。しかし、前者と同様にそれぞれの曲線はノズル径に関係なく、1つの曲線上に乗っている。

一般的に燃料噴出速度の増加に伴い L_h は、浮き上がり火炎基部において局所乱流燃焼速度と局所燃料速度が等しくなるように、火炎基部は局所乱流燃料速度と局所燃料流速が再び等しくなる下流位置まで移動する。このため L_h は、ノズル径に関係なく燃料噴出速度の増加に伴い直線的に増加すると考えられている¹⁾。プロパン、メタンの噴流拡散火炎は、ノズル径 2 ～ 4 mm では、10 ～ 20 (m/s) で浮き上がりが起こっている^{2), 3)}。この流速は、プロパン、メタンともに亜音速領域であるので L_h と燃料噴出速度の関係は上記の理論に合致した直線的な増加傾向を得た。しかし、水素拡散火炎の浮き上がり現象は亜音速域では起こらないのでプロパン、メタンと同様に扱うことはできない。

図11は、質量流量 m と浮き上がり火炎基部幅 Bw との関係を示したものである。図中での変化は吹き消えの起こったノズル $d=0.41, 0.58, 0.90$ mm と吹き消えの起こらなかったノズル $d=1.12, 1.25, 1.45$ mm との2通りに大別できる。吹き消えの起こったノズルも起こらなかったノズルも個々のノズルでの変化に着目すると、直線ならびに曲線上を移動している。しかしながら、ノズル間でそれぞれの曲線を比較すると、同一曲線上を移動して

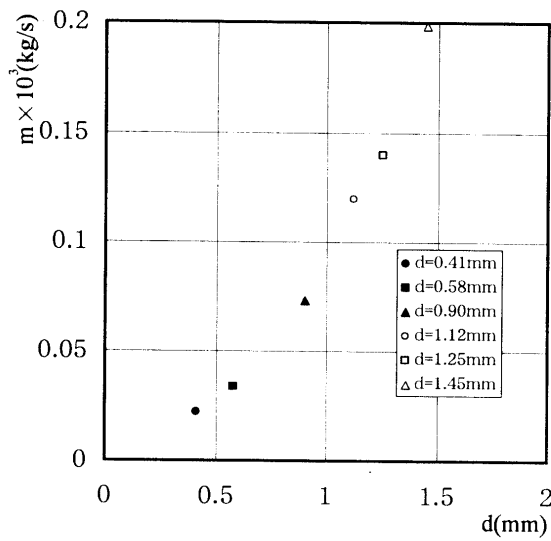


図6 ノズル径と浮き上がり燃料流量の関係

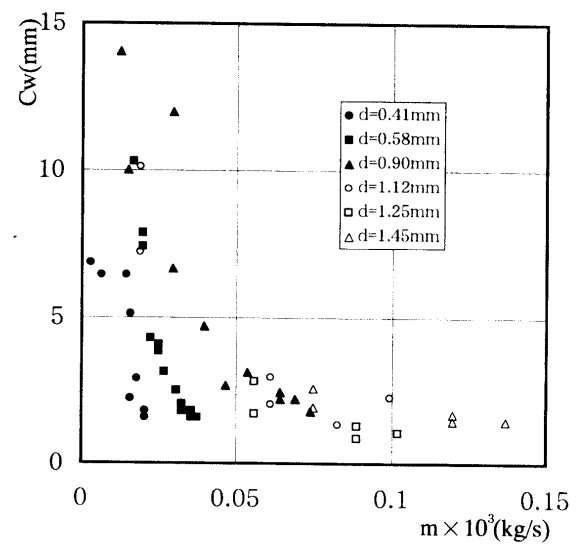


図9 質量流量とくびれ幅の関係

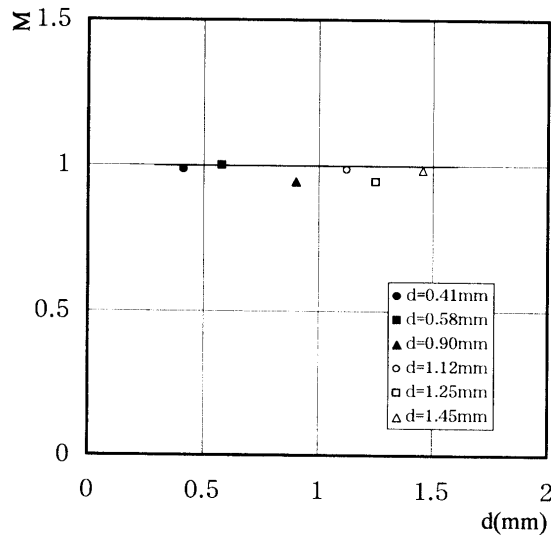


図7 ノズル径と浮き上がり時のマッハ数の関係

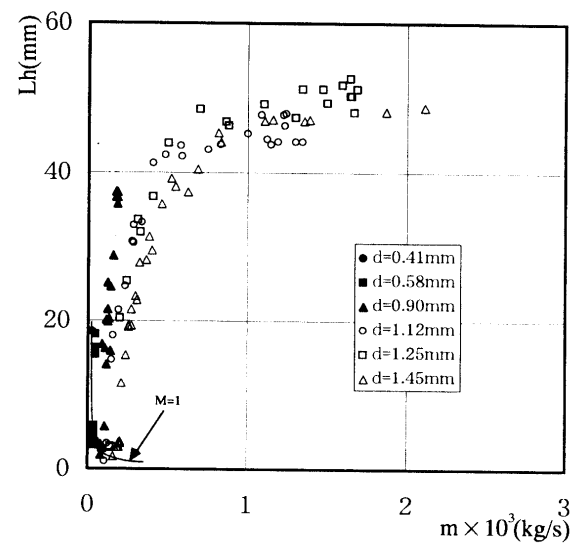


図10 質量流量と浮き上がり火炎高さの関係

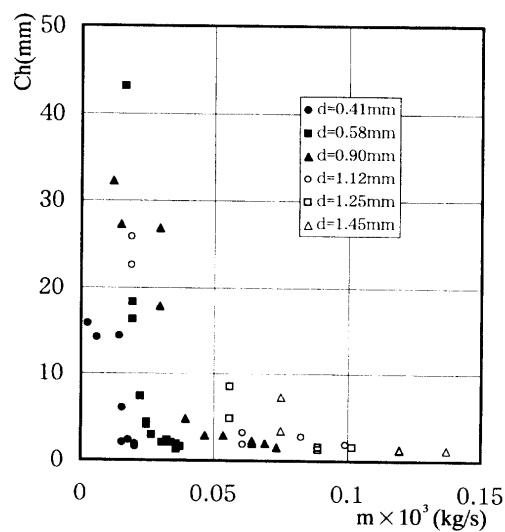


図8 質量流量とくびれ高さの関係

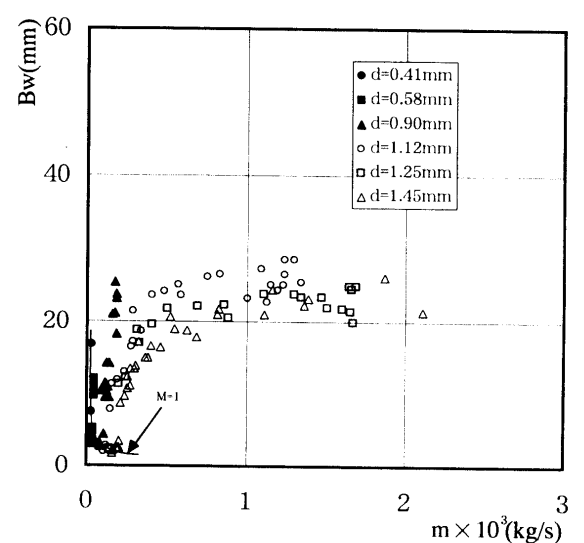


図11 質量流量と浮き上がり火炎基部幅の関係

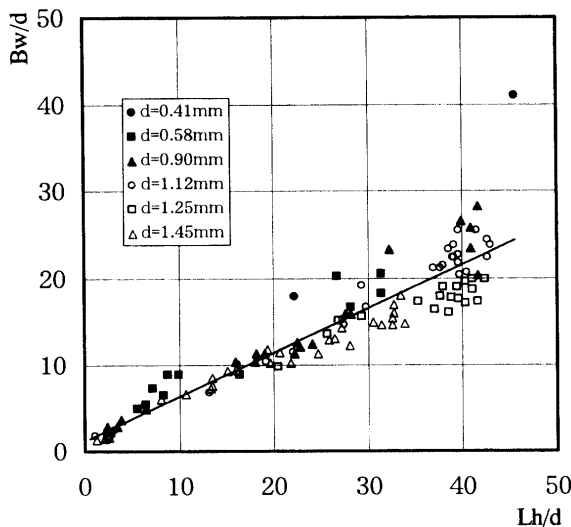


図12 無次元浮き上がり火炎高さ Lh/d と無次元浮き上がり火炎基部幅 Bw/d の関係

いない。これは、図10で考察した Lh の変化と異なる点である。

図12に無次元浮き上がり火炎基部高さ Lh/d と無次元浮き上がり火炎基部幅 Bw/d との関係を示した。図10ならびに図11では、 Lh 、 Bw の変化を見るときには2種類のノズルに大別して考察してきた。さらに Lh と Bw は多少異なった変化を示していた。しかし、 Lh/d と Bw/d の関係を探ってみたところノズル径に関係なく同一直線上に存在している事がわかる。ノズル径0.41mmでは1点だけ直線から突出している点を確認できる。その点は、吹き消え限界近くの点であったためである。今回の実験

ではノズル径が0.41mmの時にのみそのような現象が現れ、それ以外のノズルでは検出できなかった。この現象についての詳細は、まだ分かっておらず今後検討する余地がある。

4. 結 論

水素噴流拡散火炎の燃焼現象について実験を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 浮き上がりが開始するときのマッハ数は、ノズル径に関係なく $M=1$ である。
- (2) 水素噴流拡散火炎の浮き上がりは他の燃料と区別して考えなければならない。
- (3) くびれ高さの最大値はノズル径に反比例している。
- (4) 質量流量とくびれ幅の関係は、ノズル径には関係なく反比例し、同一の曲線上を移動する。
- (5) 質量流量と浮き上がり火炎基部高さならびに火炎基部幅を考えるときには、吹き消える場合と吹き消えない場合とに分けて考察した方がよい。
- (6) 無次元浮き上がり火炎基部高さ Lh/d と無次元浮き上がり火炎基部幅 Bw/d の関係はノズル径に関係なく同一直線上に存在している。

参考文献

- (1) Kalghatgi, G. T., Comb. Sci. Tech., 26, p233. (1981)
- (2) 西之原他 機講論 No. 940-30, p 130. (1994)
- (3) 立石他 機講論 No. 968-3, p158. (1996)