

ダブルット流を利用した火炎の吹き消え制御

陳仕敏サイモン*・荒木秀和**・矢野利明***・
鳥居修一***・飯野直子***

Enhancement of Flame Blowout Limits by Doublet Flow

Sze Man Simon CHAN, Hidekazu ARAKI, Toshiaki YANO,
Shuichi TORI and Naoko IINO

This paper deals with research on enhancement of the flame blowout limit by doublet flow. Doublet flow is formed by setting a burner with a coaxial circular air-intake pipe encompassing it. As fuel is being blown upwards from the burner while air is being sucked downwards into the air-intake pipe, the doublet flow is generated. It can drag down the base of the lifted-off flame which eventuates in flammability enhancement. The research also embraces the influence of burner rim thickness on flammability enhancement. This paper presents data derived from experiments using image processing devices which enabled visual analysis of the flammability enhancement mechanism.

1. 緒言

ボイラやガスタービン等のように、工業的に燃焼を利用する場合に、火炎を燃焼装置内に安定に存在させることは、装置を正常で安全に運転する上で重要である。工業用燃焼器においては、ほとんど噴流拡散火炎が用いられている。それは予混合火炎に比べ、噴流拡散火炎の方が燃焼制御が容易で取り扱い上安全であるからである。しかし、高負荷燃焼を達成させるために燃料流速を大きくし、レイノルズ数を増大させていくと、火炎は層流から乱流へと遷移する。さらに燃料流速を上げると、(1)火炎基部はバーナ先端から浮き上がる、(2)燃焼速度と流速の釣り合いが破れて火炎が下流に吹き飛ばされる、(3)バーナのリム厚後流の還流領域から火炎が吹き消されるといった現象が起こる。これらを防ぎ、保炎技術を高めることは高負荷燃焼での火炎安定化に必要である。実際の主な保炎技術には、パイロット火炎を利用した方法¹⁾、燃焼器の壁面にくぼみをつけ、比較的安定な渦を発生させる方法²⁾、旋回流を用いる方法等がある。³⁾

本論文では、バーナと同軸に空気管を設置し、内管に燃料の吹き出し、外管に空気の吸い込み流れがある同軸

円管噴流の拡散、混合を制御するダブルット流を用いた。それによって、噴出燃料と吸い込み空気との間に、せん断流れ場を生じさせ、浮き上がった火炎基部をバーナ出口端に引き下ろす効果が生じ、保炎能力が高まる。これまでの研究ではダブルット流を用いることにより、(1)空気吸い込み量が一定の場合、外周空気管内径の小さい方が保炎能力が高い⁴⁾。(2)ダブルット流を用いると、火炎基部高さは低くなり、火炎基部幅は小さくなる⁴⁾。(3)噴出燃料流速と吸い込み空気流速の比を4以上にすれば、吸い込み空気側への燃料の取り込みは生じない⁵⁾(4)吸い込み空気量の増大に伴い、保炎効果が向上する⁵⁾といったことを明らかにしている。

本論文ではダブルット流を用いた時のバーナ先端のリム厚の差による火炎保持の影響を調べる実験を行った。また、バーナ基部の保炎メカニズムを画像処理装置を用いて視覚的に解析を行った結果を報告する。

2. 実験装置および実験条件

実験装置の概略を図1に示す。予備実験としてまず、燃料流量 Q_f および空気(吸い込み)流量 Q_a の検定を行った。燃料はプロパンを使用し、ポンベの二次圧力は 1.1 kgf/cm^2 に設定した。燃料流量 Q_f はニードルバルブで調節し、オリフィス・マノメータで測定した。また、空気吸い込み流量 Q_a はスライダックにつないだブロワーの供給電圧を変化させることにより調節した。

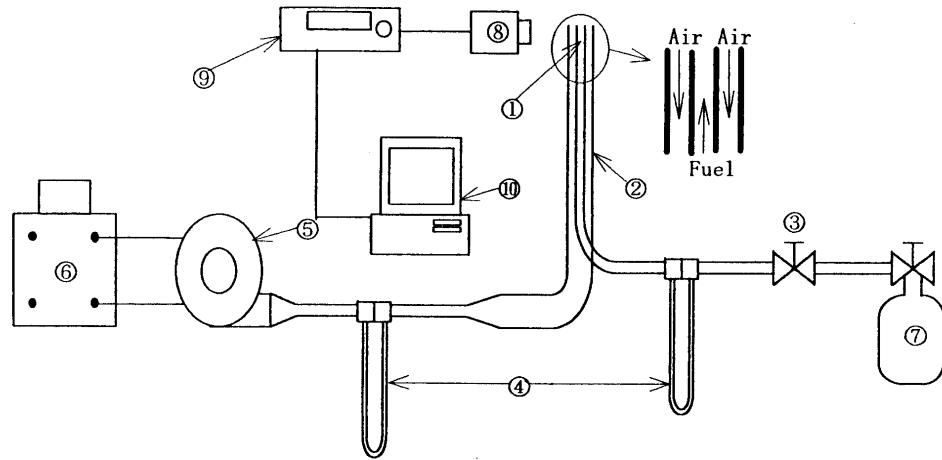
燃料量測定用のオリフィス径は 3 mm 、空気量測定用の

平成10年5月31日受理

*博士前期課程機械工学専攻

**日産車体㈱

***機械工学科



- ①バーナ
- ②吸込み管
- ③ニードルバルブ
- ④オリフィスマノメータ
- ⑤ブローア
- ⑥スライダック
- ⑦ガスボンベ
- ⑧ビデオカメラ
- ⑨ビデオデッキ
- ⑩コンピュータ (Win-ROOF)

図1 実験装置

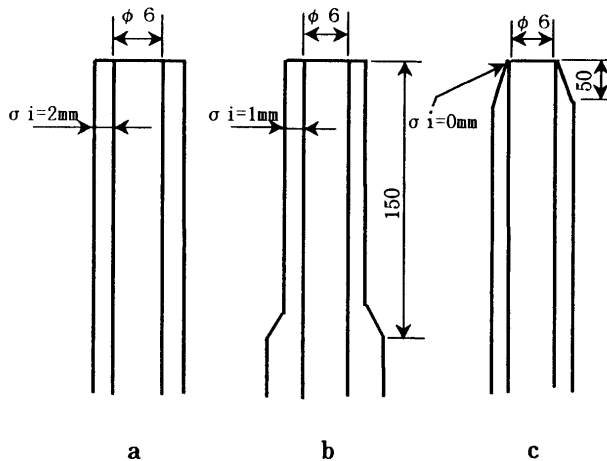


図2 バーナ先端の概略断面

オリフィス径は4.5mmを使用した。実験には図2に示す3種類のバーナを用いた。バーナは、内径 $d_i = 6\text{ mm}$ 、肉厚 $\sigma_i = 2\text{ mm}$ 、 1 mm 、 0 mm である。また、外周空気吸い込み管は内径 $d_s = 22.3\text{ mm}$ 、肉厚 $\sigma = 1.35\text{ mm}$ のアルミ管を用いた。事前に空気吸い込み管がある場合と空気吸い込み管がない場合の火炎の浮き上がりの違いについて調査した。吸い込み空気量 Q_a を3段階に変化させて、バーナ先端のリム厚が火炎の安定性におよぼす影響を解析した。

実験は、空気吸い込み流量 Q_a を一定に保ちながら、燃料流量 Q_f が任意の点に達した時点から、徐々に下げていく方法をとった。そのときの実験条件を表1に示す。火炎が安定してから、8ミリビデオカメラで撮影(シャッ

表1 実験条件

σ_i (mm)	空気吸い込み管の有無	吸い込み流量 (m^3/s)
2.0	無	
	有	$Q_a = 0$
	有	$Q_a = 1.5 \times 10^{-3}$
1.0	無	
	有	$Q_a = 0$
	有	$Q_a = 1.5 \times 10^{-3}$
0	無	
	有	$Q_a = 0$
	有	$Q_a = 1.5 \times 10^{-3}$

タースピード1/250, 明るさ13)した。燃料流量の差圧を約10mmずつ下げていった時の火炎を数秒間撮影した。また火炎と背景を識別しやすくするために黒色で塗った板を火炎後方に設置した。

表1の実験条件で撮影した火炎はMOディスクに保存し、画像処理ソフト Win ROOFにて画像解析を行った。

3. 火炎基部形状の画像解析

図3に火炎基部の形状および記号を示す。Lhは浮き上がった火炎の下端とバーナの先端との垂直距離であり、火炎基部高さとして定義する。Bwは浮き上がった火炎の下端の水平の距離であり、火炎基部幅として定義する。火炎基部形状の画像解析は、火炎の基部高さLhと幅Bwについて計測を行った。計測のプロセスは、流れ線図4に示したように、まず、8ミリビデオカメラで火炎の変動を

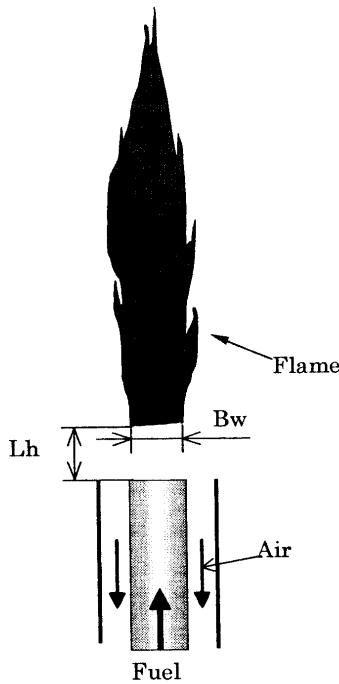


図3 火炎基部高さ Lh と Bw の位置

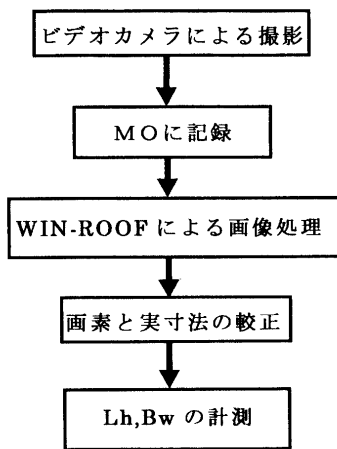


図4 計測プロセスの流れ線図

撮影した。吸い込み空気量を一定にして、燃料流量の差圧を約10mmずつ下げていったときの火炎をある測定時間間隔 T(s) で撮影した。各条件による T(s) の違いを表 2 に示す。次に、撮影した代表的な火炎の画像356個を MO ディスクに保存し、画像処理ソフト Win ROOF にて画素と実寸法を較正しながら火炎基部高さ Lh と幅 Bw を測定した。最後に吸い込み空気量 $Q_a = 0$, 0.5×10^{-3} および $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ とバーナの肉厚 $\sigma_i = 2 \text{ mm}$, 1 mm および 0 mm のそれぞれの場合について、燃料流速 $U_f = 20 \text{ m/s}$ における火炎の基部高さ Lh の度数分布

表 2 火炎基部形状の測定時間間隔

$\sigma_i(\text{mm})$	T(s)
2	37
	21
	23
1	19
	23
	22
0	19
	23
	18

を求めた。本論文では、吸い込み空気量 Q_a と肉厚 σ_i のそれぞれに対して、250個の画像データ（約 4 秒間の撮影）を使って、統計的処理を行った。さらに U_f に対する火炎基部高さ Lh および幅 Bw の関係を求めた。

4. 実験結果および考察

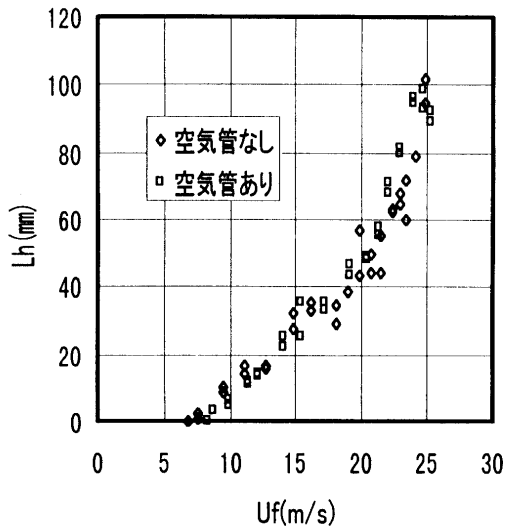
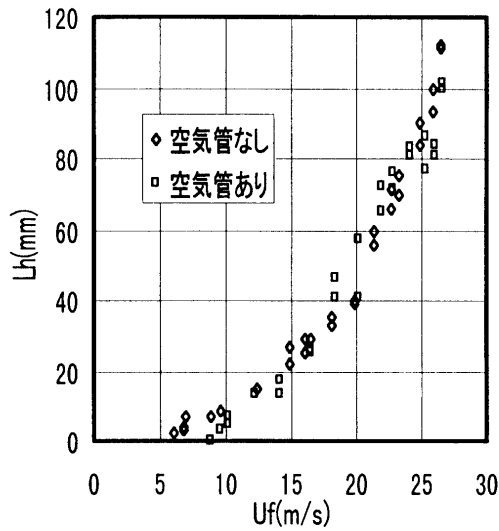
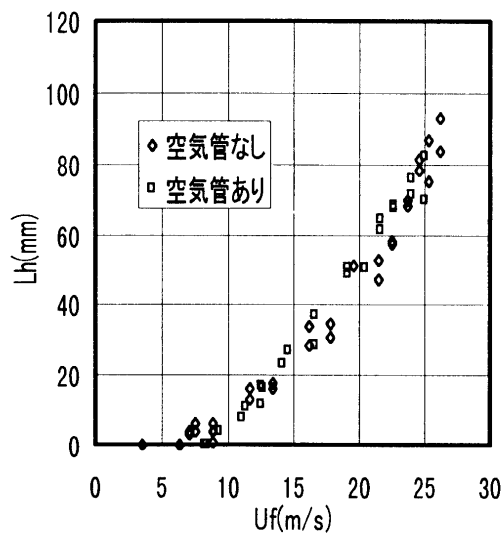
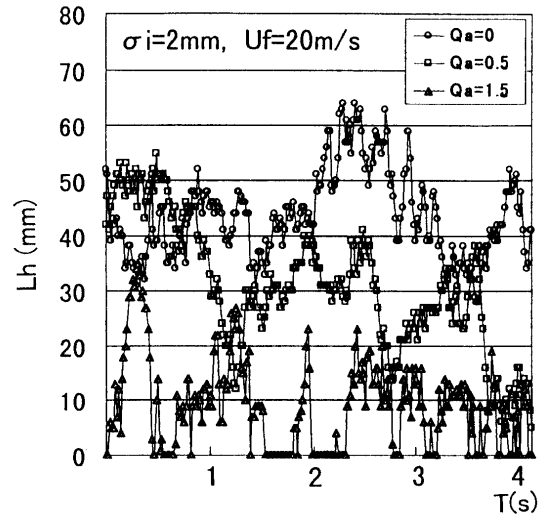
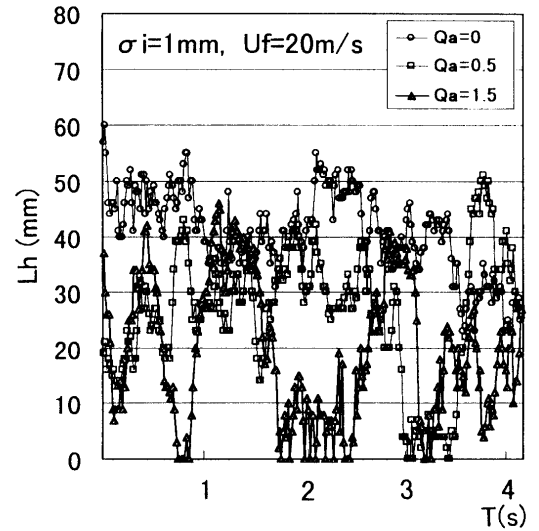
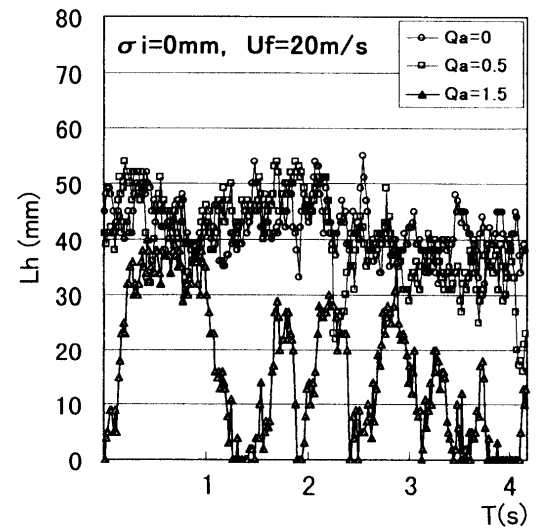
4.1 空気管の有無による影響

図5に空気管の有無が火炎基部高さにおよぼす影響を示す。ここに示した火炎基部高さは時間平均した値である。 $Q_a = 0$ すなわちダブレット流としない時に外周吸い込み空気管によって火炎の浮き上がりが異なるかどうかを調査した。燃料流速が増加していくにつれて基部高さ Lh は高くなっている。いずれの肉厚 σ_i に対しても燃料流速の小さいところで空気管の有無によって Lh にわずかな差が出ているように見えるが、空気管ありとなしでは Lh に顕著な差は見られない。よって、外周空気管の有無がバーナ先端での火炎基部、すなわち保炎におよぼす影響はないといえる。

4.2 火炎基部高さの時間変化

以前の研究より、ダブレット流を用いることにより、吸い込み空気量 Q_a が大きくなるにつれて火炎基部高さ Lh は低くなることわかった¹⁾。本研究では、燃料流速 $U_f \approx 20 \text{ m/s}$ 、吸い込み空気量 $Q_a = 0$, 0.5×10^{-3} および $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ にした時、測定時間 T(s) に対して、それぞれの肉厚 σ_i による火炎基部高さ Lh の時間変化を図6に示す。図に示した火炎基部高さ Lh の時間変化分布より、以下のような結果を得た：

- 1) 吸い込み空気量 Q_a が大きくなると、いずれの σ_i に対しても火炎高さ Lh は 0 に近付いて、バーナに付着するケースが多くなり、火炎基部を引き下ろす効果があらわれる。
- 2) $Q_a = 0$ と $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ に設定した時、肉厚 σ_i が小さくなるにつれて、Lh の変化は不規則振動の傾向を示し、振動の周期は小さくなるように見られる。 $Q_a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ に設定した時、それ

(a) $\sigma_i = 2 \text{ mm}$ (b) $\sigma_i = 1 \text{ mm}$ (c) $\sigma_i = 0 \text{ mm}$ 図5 空気管の有無による火炎基部高さ L_h (a) $\sigma_i = 2 \text{ mm}$ (b) $\sigma_i = 1 \text{ mm}$ (c) $\sigma_i = 0 \text{ mm}$ 図6 火炎基部高さ L_h の時間変動

それぞれの肉厚 σ_i により L_h の変化はパルスの振動形態になり、肉厚 σ_i が小さくなるほどパルスの周期は大きくなる傾向にある。

- 3) 肉厚 $\sigma_i = 0 \text{ mm}$ のとき、 $Q_a = 0$ および $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ にした場合、 L_h の変化はほとんど同じように見え、 $Q_a = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ すなわちダブルレット流を用いても、火炎基部を引き下ろす効果はあまり見られない。しかし、肉厚 $\sigma_i = 1 \text{ mm}$ および 2 mm のときは、 $Q_a = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ にしたことによる火炎基部を引き下ろす効果が高まる。一方、 $Q_a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ にした場合、それぞれの肉厚 σ_i の火炎基部高さは低くなり、火炎基部を引き下ろす効果がよく見られる。
- 4) 肉厚 $\sigma_i = 0$ のとき、空気吸い込みがある場合とない場合を比べると、 L_h の振幅は空気吸い込みがある場合の方が大きい。
- 5) $Q_a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ にすると、火炎基部はパルス振動的に浮き上がることが観察される。

4.3 火炎基部高さの度数分布

火炎基部高さ L_h の度数分布を図7、図8と図9に示す。これらの図より、以下のような火炎基部高さの変動傾向が認められた：

- 1) ダブルレット流にすることにより火炎基部高さの度数分布範囲が広がる。特に σ_i が小さくなると、その傾向が顕著である。
- 2) 火炎基部高さの度数分布傾向はダブルレット流を用いていない場合は、ある程度限られた L_h の範囲に集中しているが、ダブルレット流を用いる場合は L_h の広い範囲に平均的に分布している。
- 3) Q_a の増加に伴い、最大度数を示す L_h が小さくなる。特に $Q_a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ になると、 $L_h = 0$ の度数が著しく増大する。

4.4 火炎形状の解析

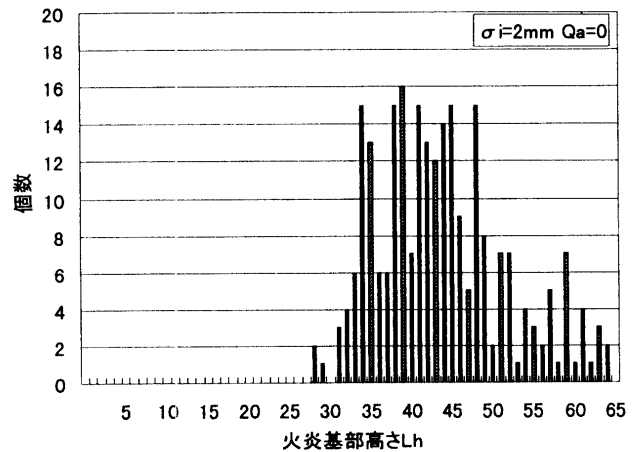
それぞれ肉厚の違うバーナを用いて、空気を吸い込ませ、 U_f を変化させた時の最も平均的な火炎画像を Win ROOF にて解析した。その時の(A)火炎基部高さ、(B)火炎基部幅について解析、検討した結果を以下に述べる。

(A) 火炎基部高さ L_h

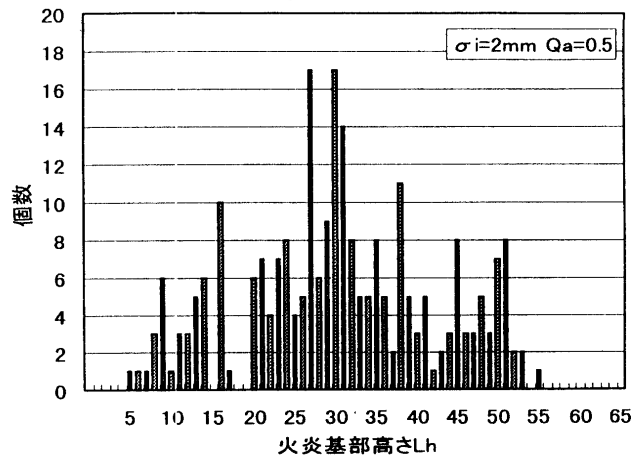
図10(a)(b)(c)は、バーナ先端肉厚 σ_i がそれぞれ同じである時の吸い込み流量 Q_a の違いによる L_h と U_f の関係を示す。また、グラフ中の矢印は火炎の浮き上がり開始点を示している。いずれの肉厚 σ_i に対しても U_f が増加するにしたがい L_h は比例的に増加している。また、 Q_a が $0 \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ となるにつれて火炎の浮き上がり開始点の燃料流量 U_f が大きくなっている。 U_f が

同じ点では Q_a が大きい方が L_h は小さくなっている。これは、吸い込み流量 Q_a が増加するに伴いバーナ先端のリム厚後流の循環流に乱れを生じさせ、火炎を安定化させているためと考えられる。

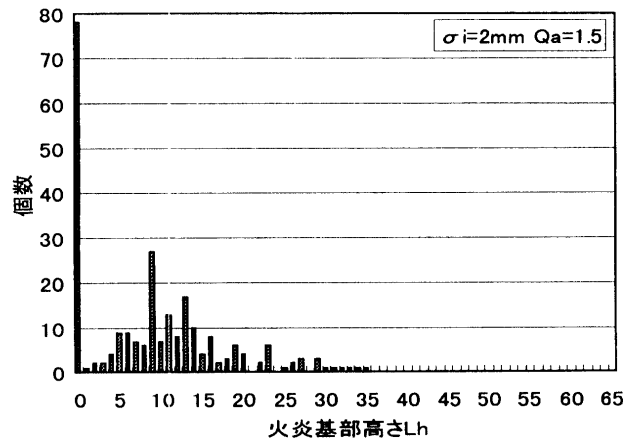
これらのことから、 Q_a を大きくすることにより火炎の浮き上がりを制御することが可能となり、燃料流速



(a) $Q_a = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

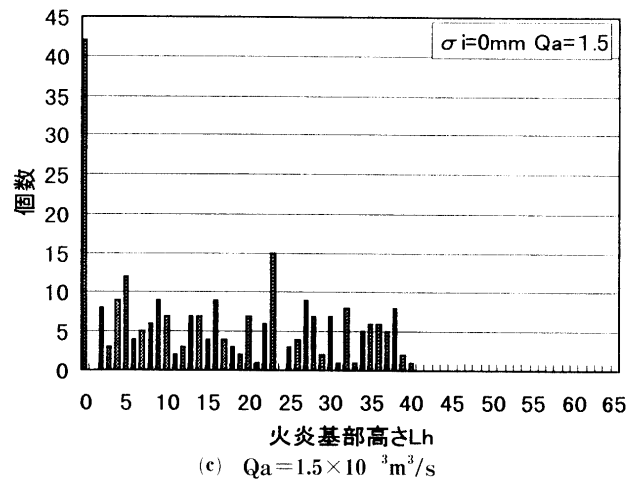
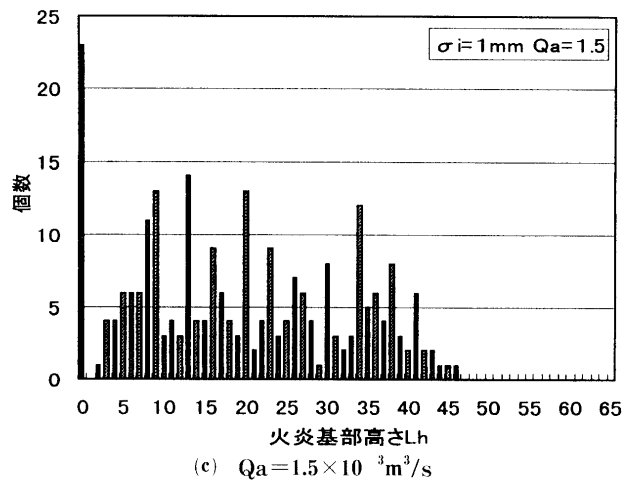
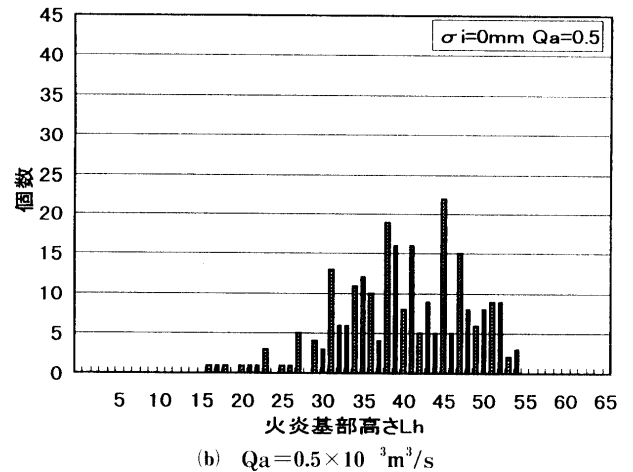
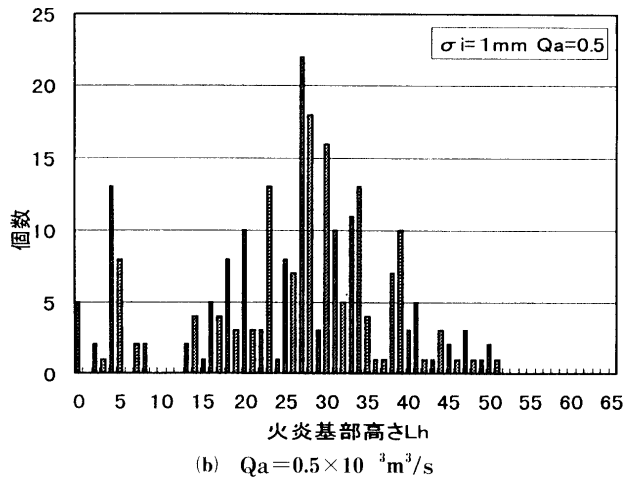
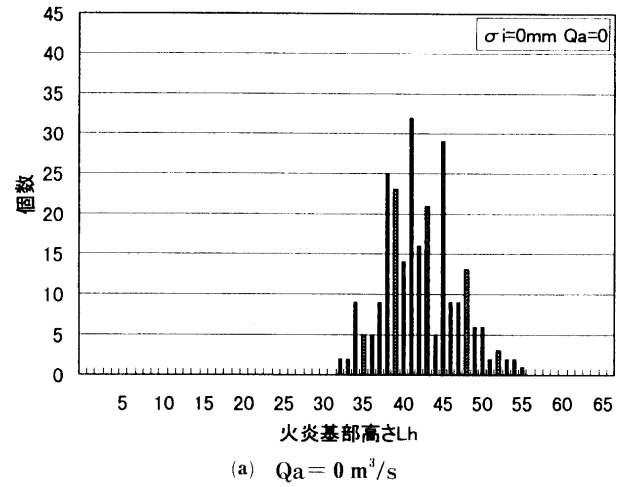
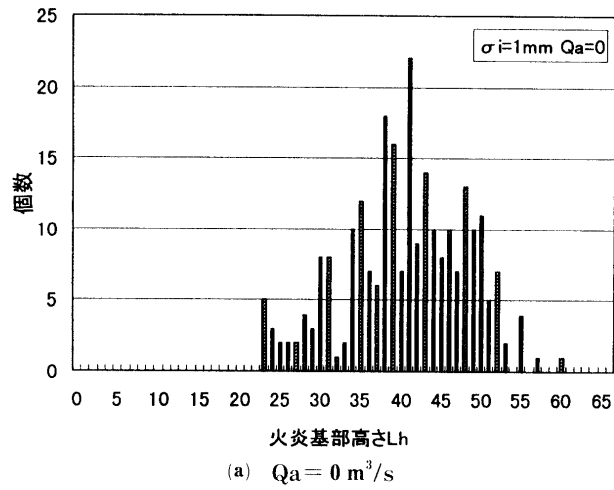


(b) $Q_a = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



(c) $Q_a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

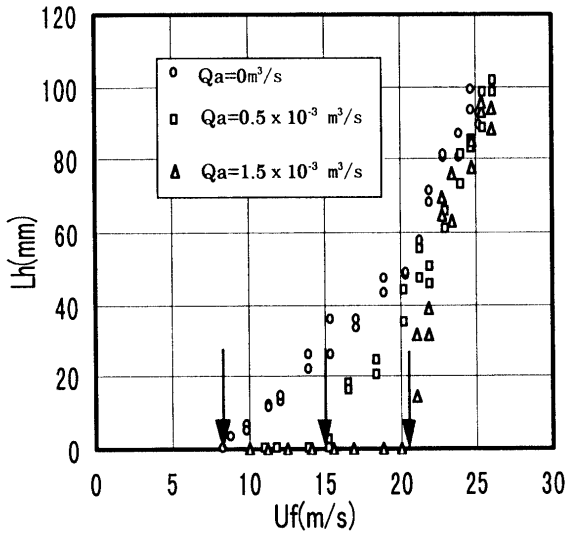
図7 火炎基部高さ L_h の度数分布 ($\sigma_i = 2 \text{ mm}$)

図8 火炎基部高さ L_h の度数分布 ($\sigma_i = 1 \text{ mm}$)図9 火炎基部高さ L_h の度数分布 ($\sigma_i = 0 \text{ mm}$)

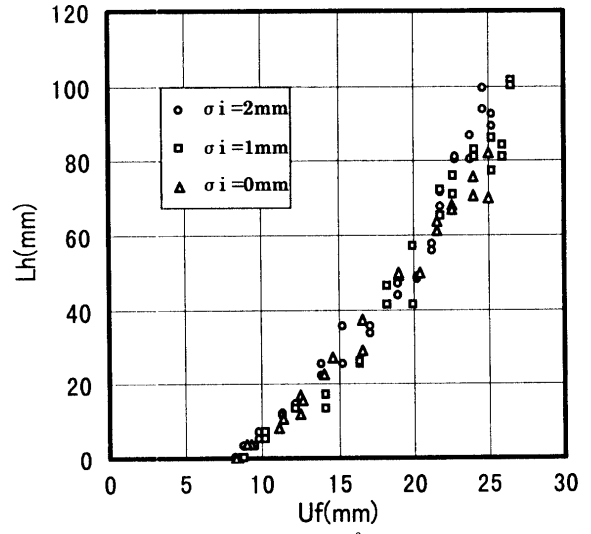
U_f を大きくすることが可能となる。

図11(a)(b)(c)に Q_a がそれぞれ同じ時のバーナ先端肉厚 σ_i の違いによる U_f と L_h の関係を求めた。図11(a)は $Q_a = 0$ のときのグラフであるが、 σ_i の違いによる変化は読み取ることができない。したがって、 $Q_a = 0$ のとき σ_i の違いによる L_h の影響はほとんどみあたらない。

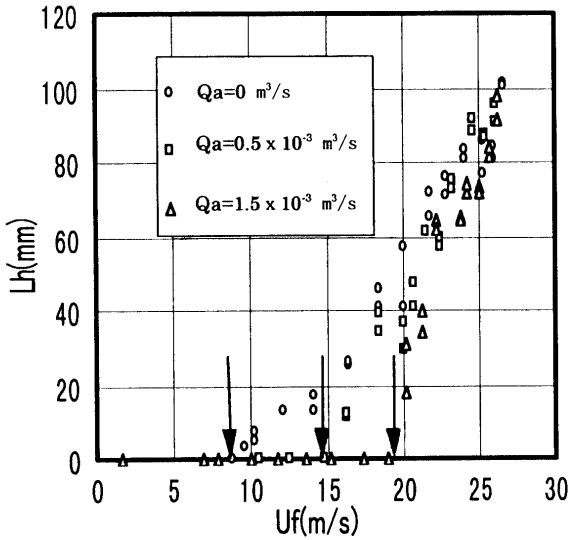
図11(b)(c)からは、火炎の浮き上がり開始点は肉厚 σ_i の小さいほうが燃料流速が小さい時に生じることが分かる。また、火炎が浮き上がり直後では σ_i の大きいほうが、 U_f が同じ点での L_h は小さくなっている。このことから、火炎が浮き上がり直後では σ_i による影響を受けているといえる。



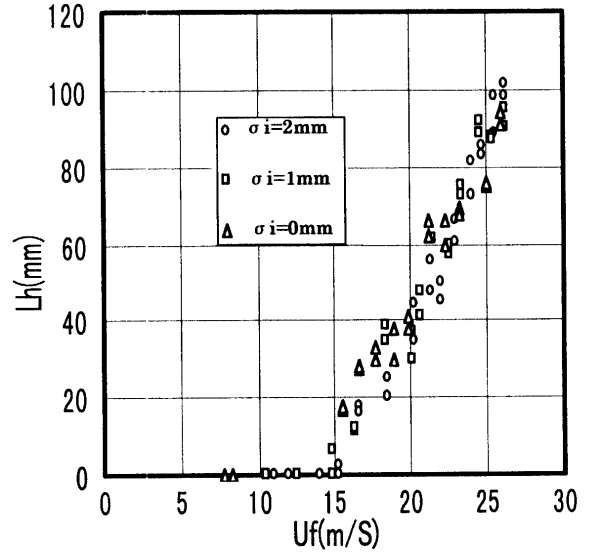
(a) $\sigma_i = 2 \text{ mm}$



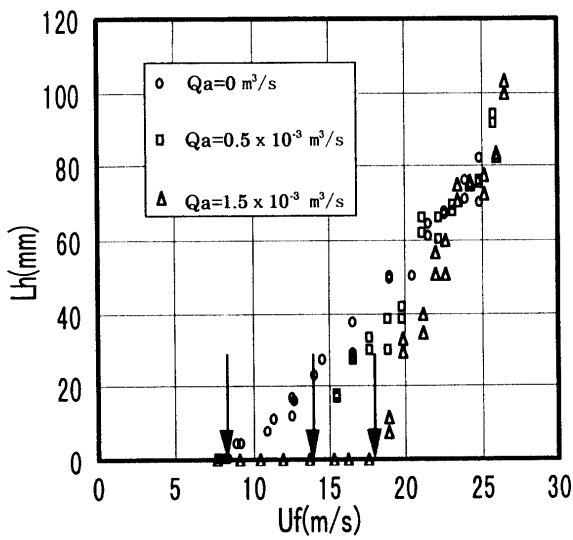
(a) $Q_a = 0 \text{ m}^3/\text{s}$



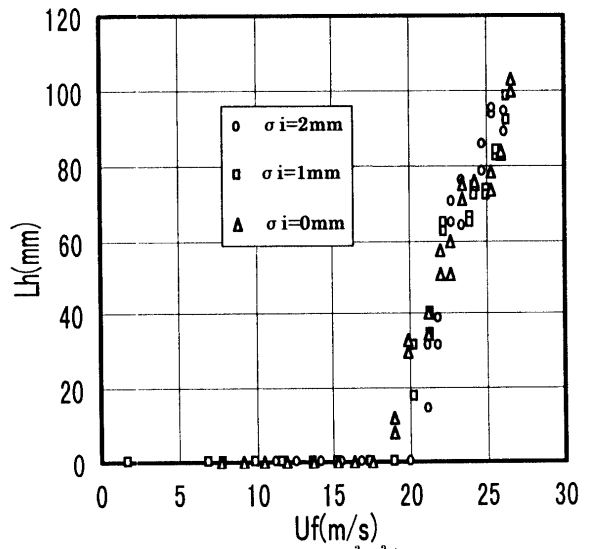
(b) $\sigma_i = 1 \text{ mm}$



(b) $Q_a = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



(c) $\sigma_i = 0 \text{ mm}$



(c) $Q_a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

図 10 火炎基部高さ L_h におよぼす吸い込み空気流の影響

図 11 火炎基部高さ L_h におよぼすリム厚の影響

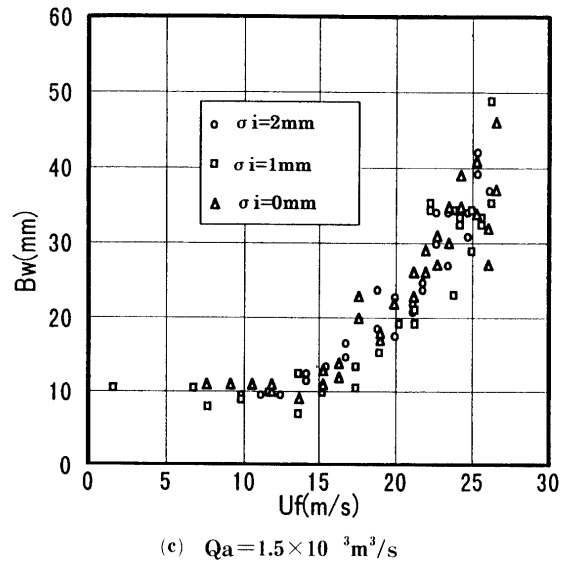
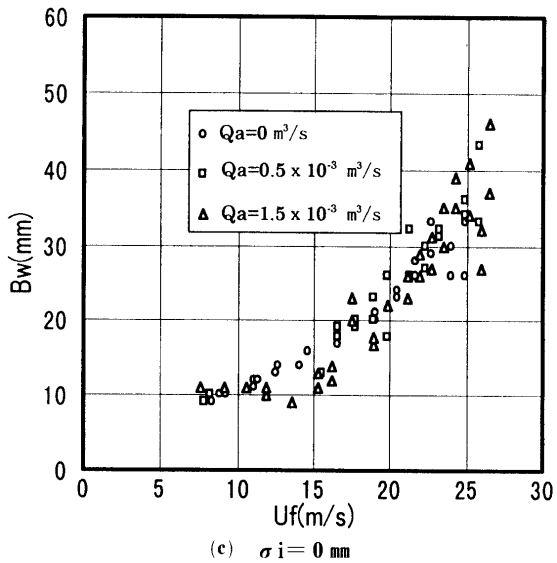
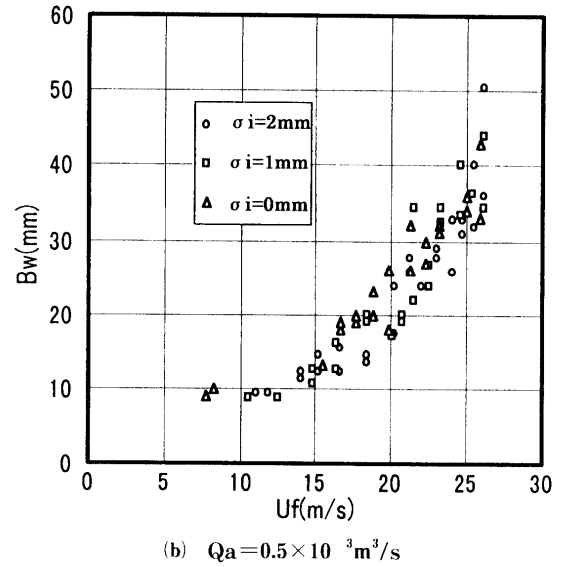
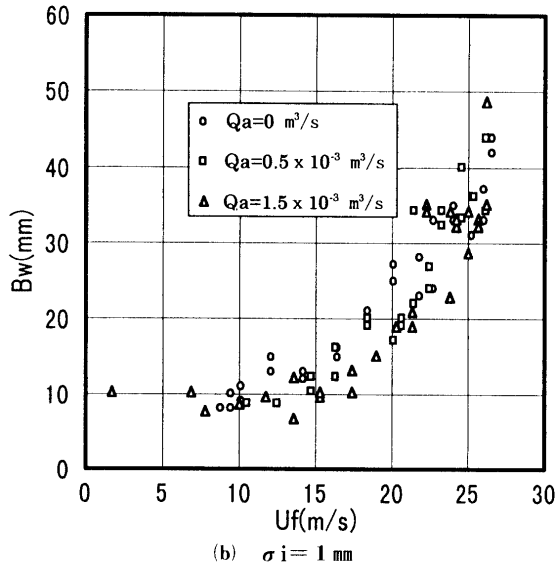
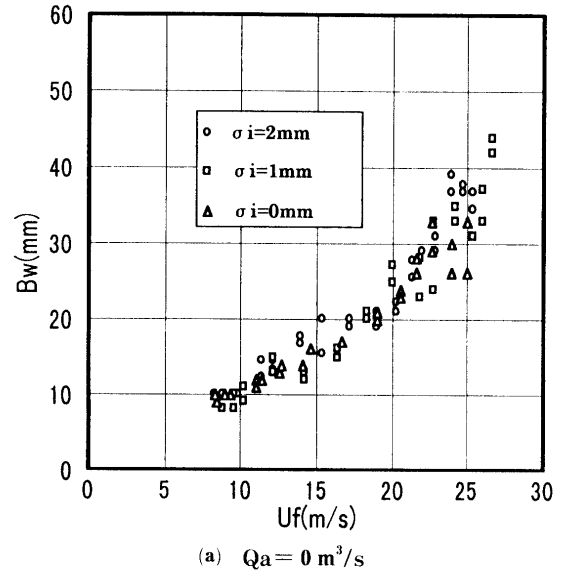
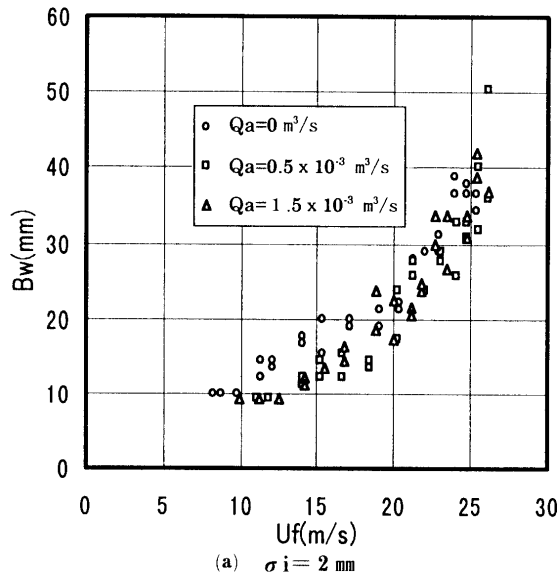


図12 火炎基部幅 B_w におよぼす吸い込み空気流の影響

図13 火炎基部幅 B_w におよぼすリム厚の影響

図11(a)(b)(c)から、いずれの σ_i に対しても $U_f=20\text{m/s}$ 時の L_h を比べると、 $Q_a=0$ では $L_h \doteq 50\text{mm}$ 、 $Q_a=0.5 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ では $L_h \doteq 40\text{mm}$ 、 $Q_a=1.5 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ では $L_h \doteq 30\text{mm}$ となっており、 Q_a を増加させることにより基部高さ L_h を低く保つことができる。その結果として、同じ L_h を維持するには燃料流速 U_f を上げることができるといことが分かる。

(B) 火炎基部幅 B_w

以前の研究ではダブルレット流を用いていることにより、火炎基部高さは低くなり、火炎基部幅は小さくなるということがわかった⁴⁾。本研究でも同様の結果が得られた。図12(a)(b)(c)にバーナ先端肉厚 σ_i がそれぞれ同じ時の吸い込み流量の違いによる U_f と B_w の関係を示したものである。火炎基部幅 B_w は U_f が増加するとともに広がっていくことが分かる。なお、3つのグラフを比較してみると、肉厚 σ_i の値に関係なく Q_a を増加させることにより同じ値の U_f の時に比べて B_w が狭くなっているのが分かる。

図13(a)(b)(c)は Q_a がそれぞれ同じ時の肉厚 σ_i の違いによる U_f と B_w の関係を示している。肉厚 σ_i による B_w の変化はあまり現れていなかった。よって、吸い込み流量が変わっても火炎基部幅 B_w は肉厚 σ_i の影響を受けないといえる。

5. 結 論

ダブルレット流を利用した噴流拡散火炎の保炎について、画像処理ソフトウェア Win ROOF を用いて、実験的に解析を行った結果、次のような結論を得た。

- 1) 吸い込み空気量がない場合、空気管の有無によってバーナの火炎基部高さにおよぼす影響は見られないので、空気管の有無による保炎におよぼす影響はない。
- 2) 肉厚が小さい場合、吸い込み空気量を小さくすると、火炎基部高さの変化はダブルレット流を用いていない場合と同じような傾向になり、保炎効果は低くなる。肉厚が大きい場合、吸い込み空気量の増加に伴い、バーナ先端のリム厚後流の循環流に

乱れを生じさせ火炎を安定化させていることにより、保炎効果が高まる。

- 3) 吸い込み空気量を今回の実験の最大値（すなわち $1.5 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ ）に設定したとき、肉厚が小さくなることに従い、火炎基部のパルス振動的な浮き上がり回数が大きくなり、火炎安定化に悪い影響をおよぼす。吸い込み空気量を $0.5 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ に設定すると、肉厚の違いがあるにもかかわらず、パルス振動的な浮き上がり現象が見られない。
- 4) 火炎基部高さの度数分布範囲はダブルレット流を用いると、用いていない場合に比べ、広くなり、火炎を安定化させる効果があらわれる。
- 5) 吸い込み空気量が大きくなると、火炎はバーナに付着する。すなわち、火炎基部高さは0に近付くことが多くなり、火炎基部高さを引き下ろす効果があらわれる。
- 6) 火炎基部幅は、吸い込み流量を増加させても肉厚の違いによる影響は見られない。

参考文献

- 1) W. P. JENSEN and C. W. SHIPMAN, Seventh Intern. Symp. on Combustion, Butterworths, London (1959), pp. 674~680.
- 2) P. R. CHOUDHURY and A. B. CAMBEL, Eighth Intern. Symp. on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore (1962), pp. 963~970.
- 3) 辻, 岡野, 東大航研集報3, 1 (1962), p78.
- 4) 寺師, 矢野, 鳥居, 日本機械学会講演論文集, No. 968-3, (1996. 11), pp. 161~163.
- 5) 飯野, 矢野, 鳥居, 寺師, 第35回燃焼シンポジウム (1997) pp. 7~9.
- 6) 水谷, 燃焼工学, p122, 森北出版.
- 7) 野崎, 園田, 李, 福原, 南田, 日本機械学会論文集 (B)62, 598, (1996), pp. 2208~2214.
- 8) 大竹, 藤原, 燃焼工学, p55, コロナ社.
- 9) 正田, 秋田, 燃焼概論, p79, コロナ社.
- 10) 須賀, 北村, 火炎と爆発, p39, 三共出版.