

渦流を用いた希薄燃焼に関する研究*

井上 剛*¹, 石塚 悟*², 平野 敏右*³

A Study on Lean Combustion in Vortex Flow

Go INOUE, Satoru ISHIZUKA and Toshisuke HIRANO

By using a glass tube into which a combustible mixture is tangentially injected from one end, the behavior of flames in vortex flow, especially the flame shapes and the flame forming range in fuel concentrations, has been experimentally investigated. To improve the controllability of combustion, an iris diaphragm is inserted in the tube. The results show that a tubular flame with a constant diameter is formed near the lean flammability limit, and that the combustion range in the concentration extends with an increase of the inner diameter in the glass tube. When the iris diaphragm is inserted, the flame changes into spindle- or bugle-shaped, and the length of the tubular flame is shortened with its extinction characteristics unchanged.

Key Words: Vortex Flow, Extinction, Burner, Iris Diaphragm, Recirculation, Tubular Flame

1. 緒 言

渦は、ガスタービンや内燃機関などの実用燃焼器において、高負荷燃焼や NO_x の排出低減などに頻りに利用されているが、希薄燃焼に対しても有効な手段であることが指摘され、これまでに多くの研究が行われている^{(1)~(3)}。

渦を用いた希薄燃焼では、いわゆるスワールという形で、再循環流を発生させ熱循環を促進したり滞在時間を長くする方法が一般的であるが、一方で、再循環を伴わない渦流を用いる方法もあり、非常に希薄な混合気まで燃焼可能なことが明らかになっている^{(4)~(6)}。これは、軸対称回転流場に管状の火炎が形成されるため、温度分布の対称性から火炎背後の熱損失はほとんどないこと、また、内部は密度の小さな高温の燃焼ガス、外部は密度の大きな未燃焼混合気であるため、流体力学的にすこぶる安定である(いわゆる Rayleigh Stability Criterion)こと、などに起因している^{(5)~(8)}。

しかしその反面、燃焼速度が極めて小さく、火炎長さが長くなるため、燃焼器が非常に長くなるという欠点がある。ここでは、渦流を用いた希薄燃焼方式に対し、燃焼管の直径を変えて火炎形成限界を調べたほか、絞りを挿入することにより、その欠点である火炎長さを制御することを試みた。

2. 実験装置

図1に、本研究で用いた実験装置を示す。装置は、大きく、①噴射部、②燃焼管部、③絞り部から成る。噴射部には、幅1mm、長さ30mmのスリットが8個外周に接するように設けられており[挿入図(a)参照]、可燃性混合気をこのスリットから燃焼管内に吹出すと、管内に、回転してかつ軸方向に流れる渦流れ(Vortex Flow)が形成される。管直径の大きさの影響を明らかにするため、内径 D の異なる3種類の石英管 ($D=29.0, 19.5, 10.5$ mm) を用意した。これに対応して、内径の異なる3種類の噴射部を製作した。燃焼管の長さは350mmである。

一方、燃焼を制御するため、渦流れ中に絞り[挿入図(b)参照]を置き、その背後に再循環流を形成させた。絞り装置としては、市販の絞り付シャッタ(COPAL, No. 1)を利用した。この場合、実際には絞りは7枚の

* 原稿受付 1995年10月26日。

¹ 学生員、東京大学大学院 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。² 正員、広島大学工学部 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)。³ 正員、東京大学工学部。

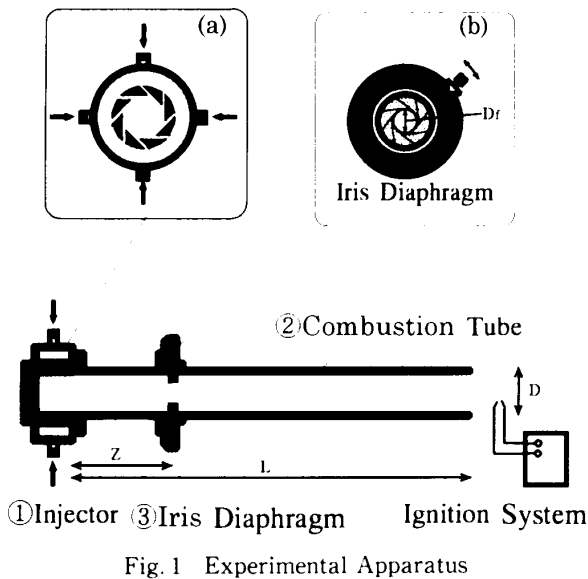


Fig. 1 Experimental Apparatus

羽根で構成されているため、内孔は完全な円形にはならない。ただし、実験が行われた範囲では、その多角状の影響は見られなかった。また、絞りが設置される位置の影響を調べるため、噴射部出口からの距離 $Z=100, 150, 250$ mm の三つの場合について実験を行った(スリット長さが 30 mm なので噴射端からの距離はそれぞれ 130, 180, 280 mm となる)。したがって、例えば $Z=100$ mm の場合、長さが 100 mm と 250 mm の石英管を用意し、全体の長さ L (噴射部出口から燃焼管出口まで)が、350 mm 一定となるようにした。

可燃性混合気としてメタン・空気混合気を用いた。空気は圧縮機から、メタンは高圧ボンベからそれぞれ供給され、流量測定用オリフィス、流量制御弁を経た後一様に混合されて装置に供給される。

なお、本実験では、すべての場合で、噴射部のスリット総断面積 $A_s (=1 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 8 \text{ 個} = 240 \text{ mm}^2)$ は一定である。したがって、回転方向噴射速度 $V_i (= \text{混合気流量 } Q / \text{スリット出口総面積 } A_s)$ は混合気流量 Q (l/min, NTP) のみに比例する。一方、管断面積 $A_c (= \pi D^2 / 4)$ は内径 D の変化とともに変化するため、管内軸方向平均速度 $V_m (= \text{混合気流量 } Q / \text{管断面積 } A_c)$ は、 Q だけでなく D の変化にも伴い変化する。

3. 実験方法および実験結果

3・1 絞りを入れない場合

3・1・1 火炎形状の変化 まずはじめに、 $D=29.0$ mm, $L=350$ mm 石英管を用いて形成される火炎を観察した。燃料濃度 $\Omega=6$ (vol% CH_4) (当量比 0.61) 程度にして開放端で点火すると、火炎が形成されて管内

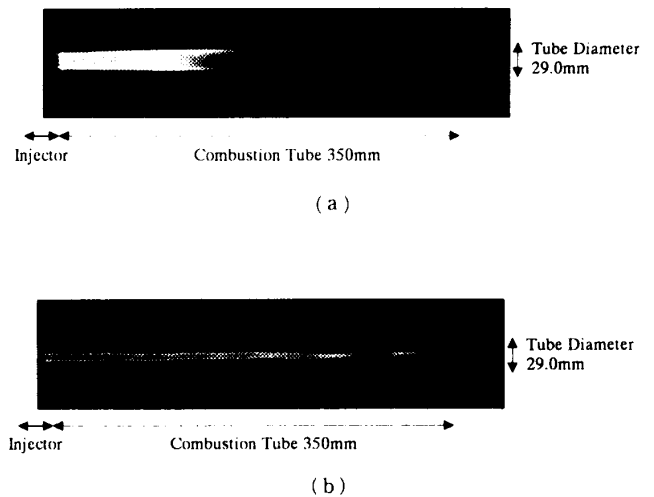


Fig. 2 Configurations of (a) the reversed conical flame and (b) the tubular flame [(a) $\Omega=5.84$ vol%, (b) $\Omega=4.82$ vol%]

を伝ばし、噴射部内に付着する。空気流量を一定に保ちつつ燃料流量を減らして燃料濃度を低くすると、火炎の一端は噴射部付近に固定されたまま、他端は噴射部から出て管壁に付着し、逆円すい状の火炎[“逆円すい状火炎”]と呼ぶことにする。図 2(a)]が形成される。さらに燃料流量を減らすと、火炎の管壁付着部は下流に移動し、ついには、開放端に達する。さらに燃料流量を減らすと、この先端は燃焼管外部に出てその後は先の閉じた火炎となり、管内には直径のほぼ一定な管状火炎が形成される[図 2(b)]。さらに燃料流量を減らすと火炎は細くなり、開放端付近から吹き消え、ついには消炎する。

3・1・2 火炎の安定範囲 本装置を用いると当量比の広い範囲で火炎を保持することが可能である。しかし、ここでは、希薄限界近くの燃焼に対応していると思われる逆円すい状火炎や管状火炎に着目し、これらの安定範囲を調べた。各種火炎の安定範囲を、燃料濃度 Ω [vol% CH_4]—混合気流量 Q [l/min, NTP] 線図上に表した結果を図 3 に示す。

図 3(a) の黒丸は、燃焼管として $D=29.0$ mm, $L=350$ mm の石英管を用い、適当な空気流量のもとで逆円すい状火炎を形成させ、燃料流量を減らしていったとき、逆円すい状火炎の端がちょうど燃焼管の開放端に達するときの燃料濃度を測定した結果である。白四角は、さらに燃料流量を減らしたときに形成される管状火炎が、消炎するときの燃料濃度を測定した結果である。図 3(a) から、逆円すい状火炎の端が開放端に達するときの燃料濃度は、流量の増大とともに大きくなること、また、管状火炎が消炎する限界でのメタン濃度は流量にかかわらずほぼ一定となり、この値 4.7

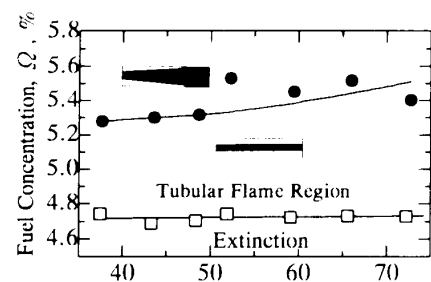
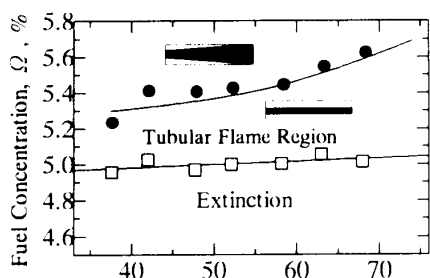
(a) The flow rate of mixture, Ω , l/min(b) The flow rate of mixture, Ω , l/min

Fig. 3 Mappings of the various flame configurations, [(a) $D=29.0$ mm, (b) $D=19.5$ mm] (● the reversed conical flame, □ extinction)

vol%は、希薄可燃限界の値より小さいことがわかる。

次に、内径の小さな $D=19.5$ mm, $L=350$ mm の石英管を用いて同様な実験を行った [図 3(b)]。その結果、逆円すい状火炎の端が燃焼管の開放端に達するときの燃料濃度は、 $D=29$ mm のときと同様、流量とともに増大した。一方、管状火炎が消炎するときの燃料濃度は流量にかかわらずほぼ一定値をとるが、この値は約 5.0 vol% であり、 $D=29$ mm のときに比べ大きくなった。これは、管径の減少により熱損失が増大したことに加え、同じ流量に対して軸方向平均速度 V_m が大きくなり火炎伸長率が増加したためと考えられる。

なお、燃焼管の内径をさらに小さくして $D=10.5$ mm とすると、開放端で着火しても火炎が噴射部にまで伝ばしにくく、伝ばさせるには理論混合気近くの燃料濃度を必要とした。また、このようにして形成させた火炎は噴射部に付着した状態であり、燃料濃度を減少させても、噴射部内にとどまり、明確な逆円すい状火炎や管状火炎が形成されることはなかった。しかし、一度形成させた火炎に対して燃料濃度を減少させ、消炎限界での燃料濃度を測定すると約 5.4 vol% と依然、希薄可燃限界に近い値が得られた。内径 9 mm, 水平伝ば火炎で測定された希薄限界は 7.8 vol% であるので⁽⁹⁾、本研究で用いている燃焼方式は、たとえ内径がわずか 10.5 mm でも十分希薄限界近くの混合気を燃

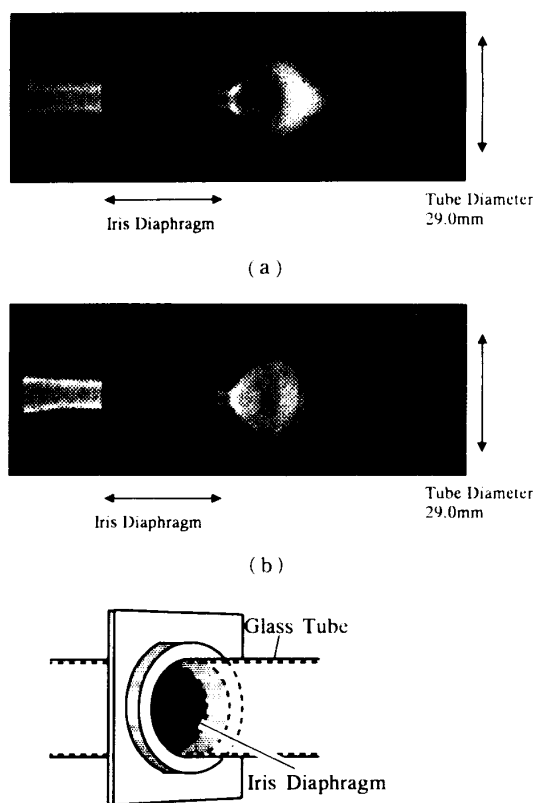


Fig. 4 Configurations of (a) the spindle shaped flame and (b) the bugle-shaped flame

焼させることができ、希薄燃焼に極めて有効な燃焼方式であることがわかる。

3・2 絞りを入れた場合 上記絞りを入れない場合の火炎は、すでに述べられたように希薄燃焼には有効であるが、その形状が長くなるため実用的でない。また、火炎が燃焼管の開放端の外まで伸びた管状火炎の場合、管内で未燃混合気が完全に燃焼し尽くされない恐れがある。そこで、渦流中に絞りを入れ、火炎を短くして、かつ、確実に未燃混合気を管内で燃焼させることを試みた。絞りを設置する位置として噴射部からの距離 Z [mm] をとり、絞り径を D_f [mm] とした。

3・2・1 火炎形状の変化 まずはじめに、内径 $D=29.0$ mm の燃焼管を用い、燃料濃度 5.2 vol%、混合気流量 51 l/min のときに形成される直径のほぼ一定な管状火炎を対象に、 $Z=100$ mm の位置に絞りを置き、絞り径 D_f を小さくしていったときの火炎形状の変化を観察した。その結果を図 4 に示す。絞り径を徐々に小さくしていくと、まずはじめに、絞り位置における管状火炎にくびれが生じる。次に、このくびれ下流で火炎が紡すい状となり、その後ろに間欠的に火炎の尾が形成される [図 4(a)]。さらに絞ると、尾は発生しなくなり、紡すい状火炎の下流側は消失して、ラッパ状の火炎形状となる [図 4(b)]。続いて、ラッパ状

火炎の絞り部での直径は小さくなり、同時に、ラッパ部の広がりも小さくかつ発光も弱くなる。さらに絞ると、絞り上流の管状火炎の部分を残して、ラッパ部が消失し、ついには上流部の管状火炎も消失する。

$D=29.0$ mm の燃焼管においては混合気流量 Q や絞り位置 Z を変えても同様な火炎形状の変化が観察された。しかし、 $D=19.5$ mm の燃焼管では、 $Z=100$ mm のときは混合気流量 Q をかえても観察されたが、 $Z=150$ mm、および 250 mm のときは紡すい状火炎もラッパ状火炎も明確には形成されなかった。

3・2・2 火炎の安定範囲 上記火炎形状の変化のうち、比較的明確に判定ができる、火炎下流端が完全に閉じて紡すい状となる限界、下流部が消失してラッパ状となる限界、および、絞りの上流にある管状火炎も完全に吹き消える限界を測定した。実験では、燃焼管内径 D 、絞り位置 Z 、それに空気流量を一定に保つことでおおよその混合気流量 Q を指定し、適当な燃料濃度で形成される管状火炎に対して、絞り径 D_f を小さくしていき、それぞれの限界における値を求めた。それら結果のうち、代表的なものを図5(a)～(d)

に示す。各図の条件は、

図5(a) $D=29.0$ mm, $Z=100$ mm,
 $Q=36$ l/min,

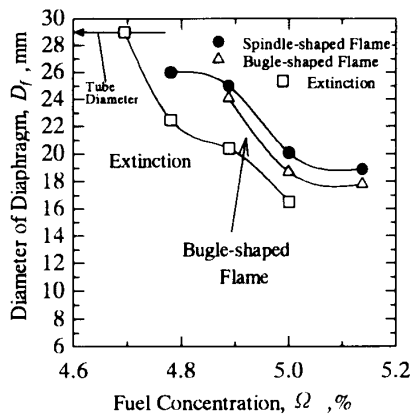
図5(b) $D=29.0$ mm, $Z=100$ mm,
 $Q=47$ l/min,

図5(c) $D=29.0$ mm, $Z=150$ mm,
 $Q=36$ l/min,

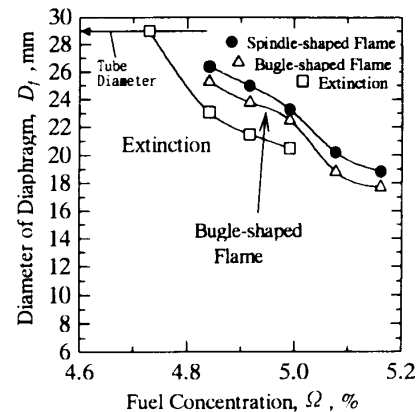
図5(d) $D=19.5$ mm, $Z=100$ mm,
 $Q=36$ l/min,

である。つまり、図5(a)の場合に対して、(b)は流量を増やした場合、(c)は絞り位置を噴射部から離れた場合、(d)は燃焼管内径を小さくした場合となっている。本実験で用いた絞り装置では、絞り径 D_f を誤差 ± 0.1 mm 程度まで測定することが可能であり、比較的再現性のよいデータが得られた。

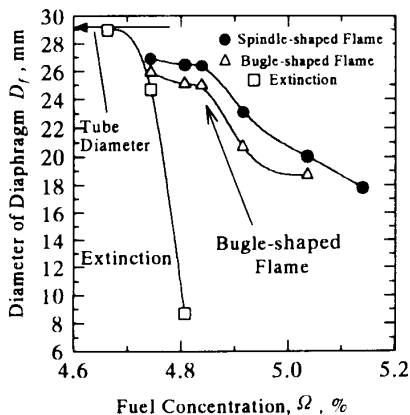
図5(a)は、燃焼管内径 $D=29.0$ mm、絞り位置 $Z=100$ mm のとき、混合気流量 Q をほぼ 36 l/min に保ちつつ燃料濃度 Ω [vol%] を変えて絞り径 D_f [mm] と火炎形状との関係を調べた結果である。消失は絞り径を小さくしていくと起き、これは、 D_f が小さくな



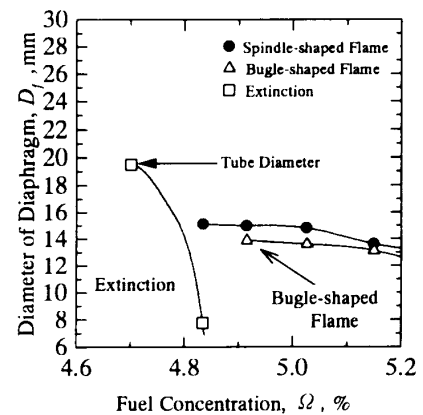
(a) ($D=29.0$ mm, $Z=100$ mm, $Q=36$ l/min)



(b) ($D=29.0$ mm, $Z=100$ mm, $Q=49$ l/min)



(c) ($D=29.0$ mm, $Z=150$ mm, $Q=36$ l/min)



(d) ($D=19.5$ mm, $Z=100$ mm, $Q=36$ l/min)

Fig. 5 Variations of flame shape with Ω and D_f

ると、絞り部での軸方向速度が増加し火炎伸長率が增大する効果と、絞りへの熱損失が増大するためと考えられる。なお、燃料濃度が少し大きくなるだけでこの絞り径 D_f は急激に減少し、絞り径を非常に小さくしなければ消炎は起こらなくなった。しかし、あまり絞り径を小さくしすぎると流れがせき止められてしまい、また、絞りの構造上の問題もあるため、 $D_f=2$ mm 以下は実験していない。一方、紡すい状火炎やラップ状火炎の形成される D_f の値は、燃料濃度の増加に伴い減少した。

流量がこれら火炎形状の変化に与える影響は、図 5(a) と図 5(b) を比べるとわかる。流量を増やすと消炎曲線は高濃度側に移行し、消炎領域が拡大することがわかる。これは、絞り部分での軸方向速度が増加し、火炎伸長率が增大するためと考えられる。また、紡すい状火炎やラップ状火炎の形成される限界も消炎曲線の移行に伴い高濃度側に移行している。

次に、絞り位置の影響は、図 5(a) と図 5(c) を比べるとわかるように、 Z の値が大きくなると消炎限界は低濃度側に移動し、絞りのない場合 [図 2(a)] に近づいている。一方、紡すい状火炎やラップ状火炎が形成される領域は Z の値の増大とともに若干 D_f の小さい方向に移動する。つまり、紡すい状火炎やラップ状火炎を形成させるには、絞り径を小さくして絞り込む必要があることがわかる。ラップ状火炎を形成する場合の絞り径 D_f は、燃料濃度の増加とともに減少するが、その減少の仕方は図 5(a) の場合に比べ緩やかになっている。 $Z=250$ mm で行った実験によれば、この減少の仕方はますます緩慢になり、燃料濃度にほとんど依存せず一定となる傾向にあった。

最後に、管径の影響であるが、図 5(a) と図 5(d) の比較より、管径が小さくなると火炎形成範囲は狭くなることがわかる。これは、絞りのない場合 [図 3(a) と図 3(b)] と同様である。また、 $D=19.5$ mm のときの紡すい状火炎やラップ状火炎の形状は $D=29.0$ mm のときに比べ完全ではないものの、その形成限界は燃料濃度にあまり依存せず一定で、絞り径のみに依存する傾向があった。先に述べたように、 $D=19.5$ mm の燃焼管では $Z=150$ mm と 250 mm のとき、紡すい状火炎やラップ状火炎が明確に形成されず、また、 $D=10.5$ mm の燃焼管では、きれいな管状火炎が形成されなかった。

4. 考 察

4・1 消炎限界 管内の渦流中での燃焼に関しては、先駆的な実験が Albright-Alexander⁽⁴⁾ によって

行われ、内径 0.512 in (約 13 mm) の燃焼管で天然ガス・空気混合気を空燃比 28.5 (燃料濃度で 3.3 vol%) まで燃焼させた記録がある。ただし、このときの天然ガスの組成はメタン 72.07%、エタン 9.82%、プロパン 4.25%、窒素 10.16% などとなっており、また、バーナは、空気は周囲から旋回をかけて吹出すが、燃料は中心から旋回をかけずに吹出す構造なので、今回の実験と直接比較することはできない。

著者の一人(石塚)がすでに行い報告した研究では、燃焼管全長にわたって設けられたスリットから可燃性混合気を接線方向に吹出す構造のスワール形伸長火炎バーナを用いて、回転伸長流れ場に形成される管状火炎の消炎限界を各種内径の燃焼管を用いて調べている⁽⁶⁾。この研究では、メタン・空気混合気の希薄限界として、内径 28 mm のとき 4.6 vol%、内径 21 mm のとき 4.8 vol%、内径 18 mm のとき 4.9 vol%、内径 13.6 mm のとき 5.3 vol% という結果を得ている。

今回のバーナは、一端から回転をかけて予混合気を吹出す構造となっているが、スワール形伸長火炎バーナと同様に管状火炎が形成され、その消炎限界は、内径 29.0 mm のとき 4.7 vol%、内径 19.5 mm のとき 5.0 vol%、内径 10.5 mm のとき(ただし、この場合、きれいな管状火炎ができたわけではない) 5.4 vol% であった。このように、前出のスワール形伸長火炎バーナとほぼ同様な結果が得られていることがわかる。

この両者のバーナは、どちらも未燃混合気を周囲から中心に向けて吹出す構造となっているため、スワール形伸長火炎バーナではその中央、今回のバーナでは噴射部付近によどみ点ができ、これを基点として対称な火炎が形成され、温度分布の対称性から火炎背後(燃焼ガス側、つまり中心部)がほぼ断熱となる。また、両者とも、中心部は高温で密度の小さな燃焼ガス、周囲は低温で密度の大きい未燃ガスという構造をとるため、回転により空気力学的にも安定化される。これらが、この二つのバーナで同じ消炎特性が得られた理由であると考えられる。

このことから、主として管状火炎の基礎研究に用いられていたスワール形伸長火炎バーナが、消炎特性を損なうことなしに、一端吹出しという、より実用的な形に拡張できることがわかる。

この消炎特性は、絞りを入れてもさほど損なわれることはない。例えば、 $D=29.0$ mm のとき、 $Z=100$ mm では絞りによる消炎が起こりやすいが、 $Z=150$ mm とすれば、消炎限界は絞りを入れない場合とほとんど変わらず、しかも、希薄限界(5.0 vol%) 以下で火炎をラップ状にして短くすることが可能である。した

がって、絞りを挿入する場合の消炎特性は、その絞り位置を噴射部から適当に離すことで改善できると考えられる。

4・2 逆円すい状火炎 絞りのない場合に逆円すい状火炎が形成されたが、これは、通常の一様予混合気流中に形成される火炎と同様に考えることができる。すなわち、軸対称を仮定し、混合気の軸方向速度を V_z 、軸方向に対して火炎のなす角を α 、混合気の層流燃焼速度を S_L とすれば、単純に

$$V_z \times \sin(\alpha) = S_L$$

が成り立つ。したがって、燃料濃度が減少して燃焼速度が小さくなると、傾き角 α は小さくなり、火炎端は下流に伸びることになる。結局、今回の全周から内側に向けて未燃ガスを吹出す方式では、先に述べたように噴射部で火炎が強力に保持され、その結果、火炎のもう一つの端は下流に伸び、逆円すい状火炎となったものと考えられる。

なお、逆円すい状火炎の一端が開放端に達するとき、 $\tan(\alpha) = 14.5/350 \approx 0.0414$ と一定値である。したがって、このとき V_z の増加に対して S_L は増加することになり、これが図3で、逆円すい状火炎の一端が開放端に達するときの燃料濃度が流量とともに増加した理由であると考えられる。

結局、今回、絞りのない場合に、逆円すい状火炎や管状火炎といった非常に長い火炎が形成されたが、これは本燃焼方式に起因するのではなく、燃焼速度の遅い混合気が安定化された場合に本質的に起こるべき現象といえる。ちなみに、厳密には空間的に一様ではないが平均的な V_m の値と α の値とから逆算すると、燃料濃度 5.3% の未燃混合気の燃焼速度は約 2 cm/s と非常に小さな値であった。なお、この値自身は、対向流バーナによる燃焼速度の測定値 (5.3 vol% CH₄ で約 5.5 cm/s)⁽¹⁰⁾ のほぼ半分である。

4・3 紡すい状火炎およびラッパ状火炎 今回、絞りを挿入することで紡すい状火炎やラッパ状火炎が形成されたが、これは、図6に示すように、絞り後流で再循環流が発生し、燃焼速度の極めて小さい火炎は、ほぼこの流線に沿って形成されているものと考えられる。また燃焼速度が極めて小さいため、不足している燃料成分の流線に対して垂直方向への拡散の効果がかなり大きく、火炎形状に影響を及ぼしていると考えられる。

この再循環流を発生させるには、適当な強さの回転が必要であるが、噴射部で与えられた回転は、軸方向に進むにつれ減衰し、この減衰は管径 D が小さくなるほど急激になると考えられる。したがって、 $D=29.0$

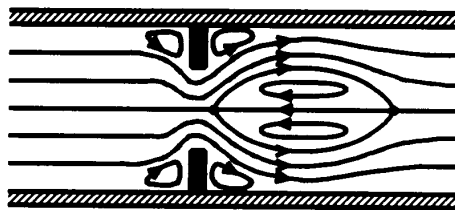


Fig. 6 The stream line near the diaphragm (The tangential velocity is not shown in this figure)

mm の燃焼管の場合に、 $Z=100, 150, 250$ mm のすべての場合で観察された紡すい状火炎やラッパ状火炎が、内径の小さな $D=19.5$ mm の燃焼管では、 $Z=100$ mm でしか観察されず、また、さらに内径の小さな $D=10.5$ mm の燃焼管では、管状火炎すら形成されなかったのは、噴射部で与えられた回転がすぐ減衰してしまったためと思われる。

紡すい状火炎で見られるような、再循環流が発生するには次式で定義されるスワール数が 0.6 以上となる必要があることが知られている⁽¹¹⁾。

$$\text{スワール数} : S \equiv \frac{G_\theta}{G_z \times D_f}$$

ただし、ここで、 G_θ は角運動量流量、 G_z は並進運動量流量、 D_f は絞り径である。最近の測定によれば、一端から混合気を回転をかけて吹出した場合、各断面における回転速度の最大値は、噴射部からの距離 Z の平方根にほぼ反比例して小さくなる⁽¹²⁾。したがって、角運動量流量 G_θ も、 Z が大きくなると減少すると考えられる。そこで、 Z の大きいところで同じスワール数を保つためには、絞り径 D_f を小さくする必要がある。

たしかに、 $\Omega=5.0$ vol%, $Q=36$ l/min, $D=29.0$ mm のとき、火炎がラッパ状となる絞り径を調べると、 $Z=100$ mm で 23.5 mm, $Z=150$ mm で 21.3 mm, $Z=250$ mm で 20.5 mm で、 Z の値が大きくなるにつれ D_f の値は小さくなった。試みに $G_\theta \propto Z^{-1/2}$ と考えると、

$$S \equiv \frac{G_\theta}{G_z \times D_f} \propto \frac{1}{(Z)^{1/2} \times D_f}$$

となるので、 $(Z)^{1/2} D_f$ の値を求めると、およそ 280 ± 40 mm^{3/2} で、ほぼ一定となった。これから、紡すい状火炎の発生は、絞り部における再循環流の発生と密接に関係しており、燃焼管内の渦の減衰と絞り部のスワール数でほぼ律せられているものと考えられる。ただし、再循環流が起きるスワール数の臨界値そのものは、中央に密度の小さな燃焼ガス、周囲に密度の大きな未燃ガスとなっている現在の流れでは、0.6 とは異

なると考えられる。

Z の値をなるべく小さくとれば、わずかに絞るだけで紡すい状火炎を発生させることができる。一方、消炎特性から考えると、絞りは噴射部から適当に離す、すなわち、 Z の値は大きくとったほうがよい。したがって、燃焼管内径 D や要求される条件に合わせて、最適な位置 Z が存在するものと考えられる。

5. 結 論

燃焼管の一端に噴射部を設け、メタン・空気混合気を燃焼管周囲から接線方向に吹出したときに形成される渦流れを用いて、希薄燃焼に関する実験を行った。その結果、(1)混合気が十分希薄な場合、管内には逆円すい状火炎や直径の一定な管状火炎が形成されること、(2)内径 29.0 mm の燃焼管で 4.7%、内径 19.5 mm の燃焼管で 5.0%、内径 10.5 mm の燃焼管では明確な管状火炎は形成されないものの 5.4%まで燃焼させることができること、などが明らかになった。このバーナは周囲から未燃ガスを軸対称に吹出す構造になっているため、温度分布の対称性から火炎背後にほぼ断熱と考えてよい状態が出現し、燃焼が安定する。また、中心部には密度の小さな燃焼ガスが、周囲には密度の大きい未燃ガスが存在するため、回転運動により空気力学的にも安定する。ただし、火炎は、燃焼速度が小さいという限界付近の混合気に本質的な特性のため非常に長くなる。

この欠点を補うため、絞りを挿入し制御することを試みた。その結果、噴射部から適当に離れた位置に絞

りを挿入すれば、消炎特性をさほど損なわずに火炎形成を紡すい状あるいはラッパ状の短いものに変えることができることが判明した。火炎を紡すい状あるいはラッパ状にするための絞りの最適な位置と大きさは、燃焼管内における渦の減衰と絞り部における再循環流発生に必要なスワール数を考慮することにより予測できる。

本研究は、財団法人谷川熱技術振興基金の助成により行われた。ここに、謝意を表する。

文 献

- (1) Syred, N., Dahmen, K. R., Styles, A. C. and Najim, S. A., *J. Inst. Fuel*, **50** (1977), 195-207.
- (2) Mizutani, Y. and Satomura, M., *Proc. 19th Symp. (Int.) Combust.*, (1982), 529-531.
- (3) 小沼義昭・ほか4名, *機論*, **61**-584, B (1995), 1534-1539.
- (4) Albright, L. F. and Alexander, L. G., *Jet Propuls.*, **26** (1956), 867-873.
- (5) Ishizuka, S., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 287-294.
- (6) Ishizuka, S., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **19** (1993), 187-226.
- (7) Lord, Rayleigh, O. M., *Proc. R. Soc., London, Ser. A*, **93** (1916), 148-154.
- (8) Chigier, N. A., Beer, J. M., Grecov, D. and Bassindale, K., *Combust. Flame*, **14** (1970), 171-180.
- (9) Payman, W. and Wheeler, R. V., *J. Chem. Soc.*, **113** (1918), 656-666, **115** (1919), 36-45.
- (10) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 1883-1892.
- (11) Beer, J. M. and Chigier, N. A., *Combustion Aerodynamics*, (1972), 121-122, Applied Science Publishers, London.
- (12) Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **82** (1990), 176-190.