

回転管内における火炎伝ば限界*

酒井 幸夫*¹, 金野 倫久*²
石塚 悟*³, 石原 敦*¹

Flame Propagation Limits in a Rotating Tube

Yukio SAKAI*⁴, Tomohisa KONNO,
Satoru ISHIZUKA and Atsushi ISHIHARA*⁴ Department of Mechanical Engineering, Saitama Institute of Technology,
1690 Fusaiji, Okabe-machi, Ohsato-gun, Saitama, 369-0293 Japan

A polycarbonate cylindrical tube of 32 mm inner diameter and 2 000 mm long is mounted horizontally on a lathe, and concentration limits of flame propagation are determined as a function of rotational speed up to 2 000 rpm. Mixtures of air and either of methane and propane, and their diluted mixtures with either of nitrogen and carbon dioxide are investigated. To prevent entrainment of ambient air, both ends are closed and the mixture is ignited at one end by an electric spark. Results show that with increasing the rotational speed, rich methane and lean propane limits remain almost constant, whereas lean methane and rich propane limits are varied away from the stoichiometry and the ranges of flame propagation are widened. It is interesting to note that the equivalence ratio at rich propane limit is increases from 2.05 at 0 rpm to 2.70 at 1 210 rpm, which exceeds the standard flammability limit of 2.5 determined with an upward propagation flame in a tube of 5 cm diameter. With increasing the rotational speed, the area of flame propagation in the ϕ (equivalence ratio) χ (added inert gas concentration) plane is widened. The equivalence ratios at lean limit are decreased in methane and those at rich limits are increased in propane. The maximum allowable dilution ratio χ is increased, and the equivalence ratio at which the maximum occur is shifted towards to lean side in methane, whereas rich side in propane. These aspects can be explained on the basis of diffusional stratification of species of different molecular weight in the field of centrifugal force of rotation.

Key Words: Flame Propagation, Propagation Limits, Rotational Field, Rotating Tube, Flammability Limits, Dilution Limits

1. ま え が き

火炎伝ばの問題は、エンジン内の燃焼や可燃限界に関し重要であるが、渦のように可燃性混合気が回転している場合、通常の化学反応に伴う火炎伝ばのほかに、いわゆるボルテックスバースティングによる火炎伝ば(高温燃焼ガスの移動)が起きることが最近の研究で明らかにされている⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾。

これら一連の研究で、この“火炎伝ば速度(高温燃焼ガスの移動速度)”が渦の最大周速度にほぼ比例して増大することが判明しているが、もう一つ重要なことは、火炎が伝ばできる濃度限界が、通常の標準的な方法、すなわち、垂直に設置された管内上方伝ば火炎

で測定される可燃限界を超え、この範囲外の燃料濃度でも火炎が見掛け上伝ばできることである。

著者らが以前行った回転円管を用いた実験によると、プロパン・空気混合気の過濃混合気の場合、標準的な方法で測定される2.5を超えて当量比の値が3.1まで伝ば可能であった⁽⁷⁾。しかしこの前回の実験では⁽⁷⁾、管の両端を開放した条件で実験を行ったため、周囲空気が流入し、その結果過濃伝ば限界が広がった可能性がある。そこで今回は管の両端を完全に密閉し、周囲空気の影響を遮断した条件で実験を行うことにした。これまでこのような条件下で火炎伝ば限界を詳しく調べた研究は見られない。また今回は、これら希薄・過濃火炎伝ば限界のみならず、不活性ガスによる希釈限界も調べ、回転流中における火炎伝ば限界について系統的に実験を行うことにした。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略と点火装置の拡大図を示す。

* 原稿受付 2003年12月22日。

*¹ 正員, 埼玉工業大学機械工学科(☎ 369-0293 埼玉県大里郡岡部町善濟寺1690)。*² 学生員, 埼玉工業大学大学院システム工学専攻。*³ 正員, 広島大学工学部(☎ 739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。

E-mail: mecsakai@sit.ac.jp

この実験でも、内径 32 mm、長さ 2 000 mm の透明なポリカーボネイト製の円管を用いた。円管は旋盤 (Yamazaki-2) のチャック部で水平に保持し、さらに円管全体の回転が円滑に行われるように、両端をボールベアリングで保持した。回転数 N は 0 rpm から 2 000 rpm まで、回転数比はほぼ 1.67 で十とおりに変化できる。また最高回転数 2 000 rpm のときの管壁周速度は 3.35 m/s であった。

燃料にはメタンおよびプロパンを使用した。燃料および空気、希釈剤はそれぞれオリフィス流量計(相対誤差 $\pm 0.5\%$ 以内)で計量し、所定の混合比および希釈率とし、この混合気を管内平均流速 10~20 cm/s で流した。まず円管内のパージを兼ねて、混合気を 2~3 min 流し、その後円管の両端をゴム栓で密閉し、所定の当量比および希釈率の混合気を管内に閉じ込める。次に円管を一定の回転速度で約 1 min 回転させ、管内に剛体渦流れ場をつくる。前回は開放端だったので、単純にトーチ火炎を用いて着火したが、今回は、両端を閉じたまま点火装置によって混合気に点火する。点火装置は図 1 のように電極を兼ねたカーボンブラシを銅リングに押しつけることによって通電させる。イグナイタと円管は一体となって回転する。このイグナイタによる点火エネルギーは 1 回の放電ごとに約 1.3 mJ であり、点火通電時間は 1 s であったので、

点火に際して供給したエネルギーは 1 回の点火ごとに約 65 mJ であった。

今回の実験では上述のように円管の両端を密閉したまま火炎を伝ばさせる。そこでゴム栓は点火端から遠いほうをやや緩くはめ込み、火炎が管端に接近し管内の圧力が上昇するとゴム栓が自然にはずれるように設定した。

伝ばする火炎のようすは目視によって観測し、火炎が点火位置から旋盤のチャック部まで管内を約 1 m 伝ばした場合を伝ば可能と判定した。

まず燃料と空気によって火炎の伝ば限界(可燃限界)を測定し、ついで希釈剤に分子量の異なる窒素および二酸化炭素を用いて希釈伝ば限界を調べる実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 火炎の伝ば限界 図 2 に燃料濃度(当量比 ϕ で表す)対円管の回転数 N [rpm] で火炎の伝ば限界を示す。過濃限界と希薄限界を与える当量比の範囲内で火炎の伝ばが可能であった。

まずメタン火炎について見ると、回転がない場合 ($N=0$ rpm)、過濃伝ば限界が $\phi=1.35$ 、希薄伝ば限界が $\phi=0.58$ であった。前回の⁷⁾実験では、それぞれ 1.58, 0.55 であったので、特に過濃限界が狭くなって

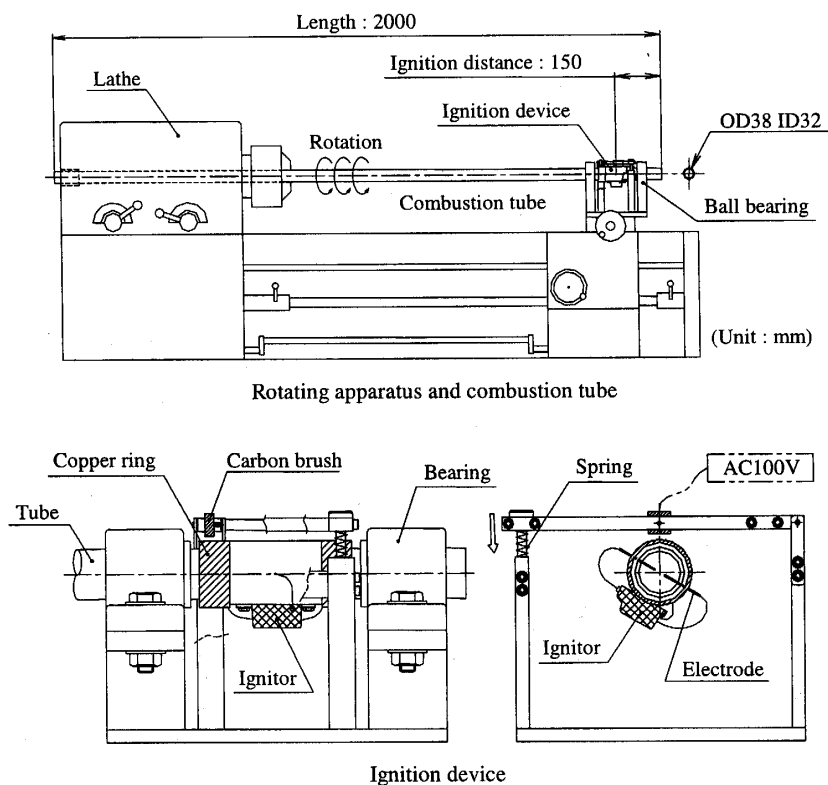


Fig. 1 Experimental apparatus

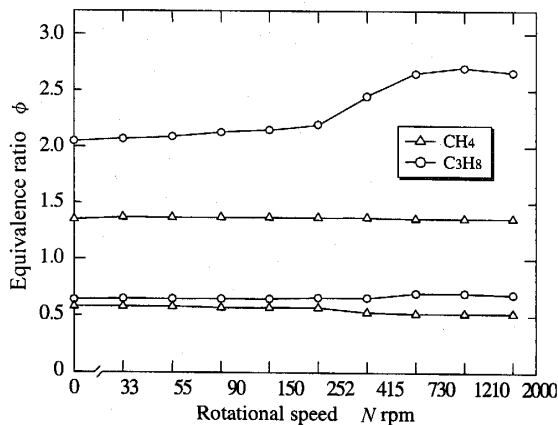


Fig. 2 Variation of the equivalence ratio ϕ at the propagation limit with the rotational speed N

いる。察するに、前回着火に用いたトーチ火炎に比べ今回の電気火花が弱いうえに、過濃側では開放端から流入する空気による支燃効果がないため、可燃範囲が狭くなったと考えられる。回転数を増大すると過濃限界は回転数によらずほぼ一定で希薄限界も $N=252$ rpm まではほとんど変わらなかったが、それ以上ではやや希薄側に伝ば限界が広がり、 $N=730$ rpm 以上では $\phi=0.52$ であった。

次にプロパン火炎では、 $N=0$ rpm のところで過濃限界は $\phi=2.05$ 、希薄限界は $\phi=0.64$ で、やはり前回⁽⁷⁾(過濃限界: 2.13, 希薄限界: 0.59) に比べ伝ば濃度範囲は狭くなっている。プロパン火炎では N の増大とともに過濃伝ば限界ははじめ徐々に過濃側に拡大していき、 $N=252$ rpm 以上ではやや急激に拡大し、 $N=730$ rpm で $\phi=2.70$ 程度の値となり、通常の過濃可燃限界の値 ($\phi=2.5$) より大きくなった。また希薄伝ば限界の値は $N=415$ rpm 程度までは 0 rpm のところとほぼ同じであったが、 $N=730$ rpm 以上ではこれよりやや過濃側の $\phi=0.70$ となり、いくぶん希薄側伝ば限界は狭くなった。

一般に、本実験のような回転系ではルイスの効果でプロパンの過濃可燃限界がやや大きくなることが知られている^{(11)~(13)}。さらに、以上の結果から、酸素に比して分子量の小さいメタンでは、回転数の増大とともに希薄側に伝ば限界が広がり、酸素に比して分子量の大きいプロパンでは、回転数の増大によりやや大きく過濃側に伝ば限界が広がった。この理由として回転数が大きくなると、回転遠心効果によって、火炎帯に流入する局所的な燃料濃度が、回転のない場合に比べメタンでは高く、逆にプロパンでは低くなることにより、火炎伝ば可能の領域が広がるものと考えられる。プロパンの希薄伝ば限界が回転数の大ききところ

でわずかに量論当量比側にシフトするのも同様の影響によるものと考えられる^{(7)(11)~(13)}。

前回の両端開放の場合には⁽⁷⁾、回転数の増大により過濃側の伝ば限界は、プロパン火炎では $N=2000$ rpm で当量比 $\phi=3.1$ まで広がり、またメタン火炎でも若干過濃側に広がった。しかし両端を閉じた今回の実験では、ここに図示したようにプロパン過濃限界は最大でも $\phi=2.7$ であり、メタンでは過濃伝ば限界はほとんど一定であった。したがって前報の結果には、周囲空気の影響が存在していたことが裏付けられた。

しかし、過濃限界の当量比 2.7 という値は、標準的な管径 5 cm、上方伝ば火炎で決定される過濃可燃限界値 $\phi=2.5$ に比べ依然大きく、また、管径 2.5 cm、水平伝ば火炎の過濃限界が $\phi=1.46$ (燃料濃度: 13.3%) であることを考慮すると [文献(14)の表 12]、著しく大きな値になっていることがわかる。したがって、本測定により、回転流中においては標準的な方法で決定される範囲を著しく超えて火炎が伝ばできることが起こり得ることが確かなものになった。

3.2 希釈限界 可燃限界や希釈限界は安全工学上重要であるため、古くから数多くの研究が行われてきた。中でも Coward-Jones⁽¹⁴⁾、Zabetakis⁽¹⁵⁾ の実験は有名である。これらの実験では内径 5 cm、長さ 150 cm 程度の垂直に置かれた管内を伝ばする火炎の伝ば限界を調べている。また、このようにして得られた値を一般に標準の可燃限界値および希釈限界の値と称している。

ここでは管を水平に設置し両端を閉じた本実験の結果 ($N=0$ rpm; 非回転) と、点火端を開放にして下方から上方に向かう火炎の伝ば限界を調べた Coward-Jones の結果を対比して示す。図 3 はメタン火炎の、また図 4 はプロパン火炎の結果である。ここで希釈率 χ は $\chi = [\text{希釈ガス}] / ([\text{空気}] + [\text{希釈ガス}])$: [] は体積流量割合、で定義した。

図 3 にはメタンに対する、当量比 ϕ 対希釈率 χ で示した希釈限界を示す。希釈剤には窒素と二酸化炭素を用いた。本実験の場合、希釈率 $\chi=0\%$ のとき、過濃限界が $\phi=1.35$ 、希薄限界が $\phi=0.58$ であった。希釈率を増大させると過濃限界の値は小さくなり、逆に希薄限界の値は大きくなって、火炎の伝ば範囲は狭くなり、最大希釈限界は窒素の場合、 $\chi=33.3\%$ 、 $\phi=0.97$ 、二酸化炭素の場合、 $\chi=21\%$ 、 $\phi=0.98$ であった。これに対して Coward-Jones の場合、 $\chi=0\%$ のとき、過濃限界 $\phi=1.57$ 、希薄限界 $\phi=0.53$ であり、やはり希釈率を上げていくと伝ば範囲は狭くなり、窒素の場合 $\chi=38\%$ 、 $\phi=0.99$ 、二酸化炭素の場合 $\chi=24\%$ 、 $\phi=$

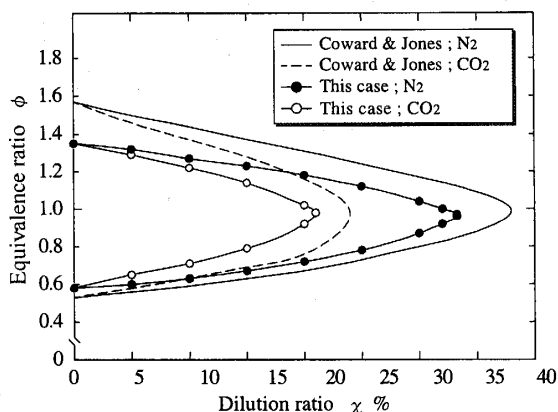


Fig. 3 Extinction limits of methane flames diluted with nitrogen and carbon dioxide

0.98で最大希釈限界を与えていた。内径5 cmの管を用い、管の一端を開放し、かつ上方へ火炎を伝ばさせた Coward-Jones の場合が、内径32 mm、水平伝ば火炎を用いた本実験の場合より全般に火炎の伝ば範囲が広く、特に過濃側での両者の相違は大きかった。ただし、最大希釈限界を与える当量比の値は本実験の場合にもまた Coward-Jones の実験の場合にも、ともに希薄側の $\phi=0.97\sim 0.99$ に存在していた。

一方プロパン火炎(図4)では、 $\chi=0\%$ の場合、本実験では過濃限界 $\phi=2.05$ 、希薄限界 $\phi=0.64$ であり、これに対して Coward-Jones の場合、過濃限界 $\phi=2.48$ 、希薄限界 $\phi=0.59$ であった。また最大希釈限界の値は、本実験の場合、窒素で $\chi=37.4\%$ 、 $\phi=1.29$ 、二酸化炭素で $\chi=25.5\%$ 、 $\phi=1.23$ であり、これに対応する Coward-Jones の結果は、窒素で $\chi=43\%$ 、 $\phi=1.28$ 、二酸化炭素で $\chi=30\%$ 、 $\phi=1.32$ であった。したがってプロパンの場合も火炎の伝ば範囲は Coward-Jones の結果が本実験の結果より広く、特に過濃側での相違が大きかった。しかしプロパンの場合にも、最大希釈限界を与える当量比の値は両者ともに、過濃側の $\phi=1.23\sim 1.32$ の付近に存在していた。

また一般に、窒素に比べて二酸化炭素の消炎効果が大きく、したがって、燃料の種類に無関係に二酸化炭素の消炎限界が窒素の消炎限界より狭かった。

3.3 回転を与えた場合の希釈限界 3.1節で述べたように、回転系では燃料の相違によるルイスの効果に加えて、分子量の相違による回転遠心効果(管内における特定成分の半径方向への偏在)、ボルテックススパーティングによる火炎伝ば速度の増大等によって火炎の伝ば限界が変化することが考えられる。そこでここでは回転数を変化させて希釈限界を調べることにした。希釈剤は3.2節と同様の窒素および二酸化炭

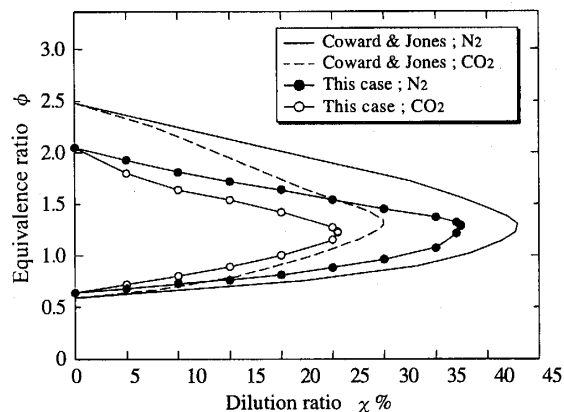


Fig. 4 Extinction limits of propane flames diluted with nitrogen and carbon dioxide

素とした。

図5(a), (b)はそれぞれ、燃料をメタンとし希釈剤を窒素とした場合 [図5(a)]、および二酸化炭素とした場合 [図5(b)] の、火炎伝ば範囲をそれぞれ、希釈率 χ 対当量比 ϕ で示した。パラメータには回転数を選んだ。

図5(a)から回転数にかかわらず、希釈率を増大していくと過濃限界の値は小さくなり、逆に希薄限界の値は大きくなって火炎の伝ば範囲は狭くなり、ついには最大希釈限界に達する。この場合、回転数を上げていくと過濃側の限界濃度はわずかに変化し、希薄側の限界濃度はかなり大きく低下する。希薄限界の値は、 $N=415$ rpm 以上では、最大希釈限界近傍を除いてほぼ同じような値を示した。最大希釈限界は $N=415$ rpm と 730 rpm では $\chi=34.5\%$ 、 $\phi=0.91$ であり、 $N=1210$ rpm では $\chi=35.4\%$ 、 $\phi=0.89$ 、 $N=2000$ rpm では $\chi=35.2\%$ 、 $\phi=0.88$ であり、 $N=1210$ rpm のとき最大希釈限界を与えた。図5(b)は燃料をメタンとし希釈剤を二酸化炭素とした場合の結果である。この場合も希釈率を増大していくと火炎の伝ば範囲は狭くなり、ついには最大希釈限界を与える。二酸化炭素の場合にも、回転数を上げていくと希薄側の限界濃度はかなり低下し、回転数の増大による希薄側への伝ば限界の広がりも顕著になる。最大希釈限界は、 $N=415$ rpm で $\chi=23.3\%$ 、 $\phi=0.93$ 、 $N=730$ rpm で $\chi=23.9\%$ 、 $\phi=0.94$ 、 $N=1210$ rpm で $\chi=24.8\%$ 、 $\phi=0.91$ 、 $N=2000$ rpm で $\chi=24.5\%$ 、 $\phi=0.90$ で $N=1210$ rpm のとき最大希釈限界の値は最も大きかった。

次に、燃料をプロパン、希釈ガスを窒素および二酸化炭素としたときの結果を図6(a), (b)に示す。

図6(a)で希釈率を増大させていくと火炎伝ば範囲

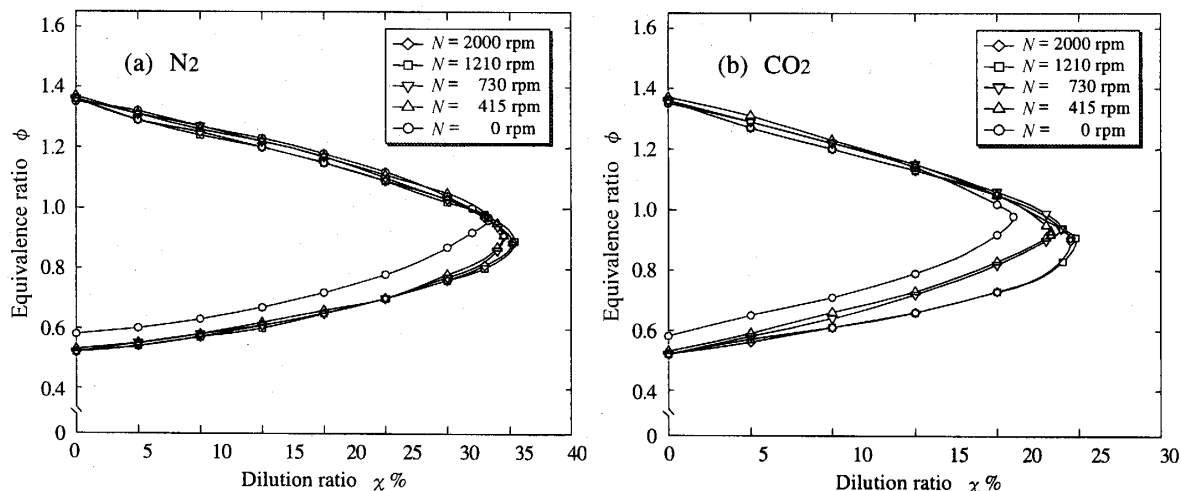


Fig. 5 Extinction limits of methane flames, (a) diluted with nitrogen, (b) diluted with carbon dioxide

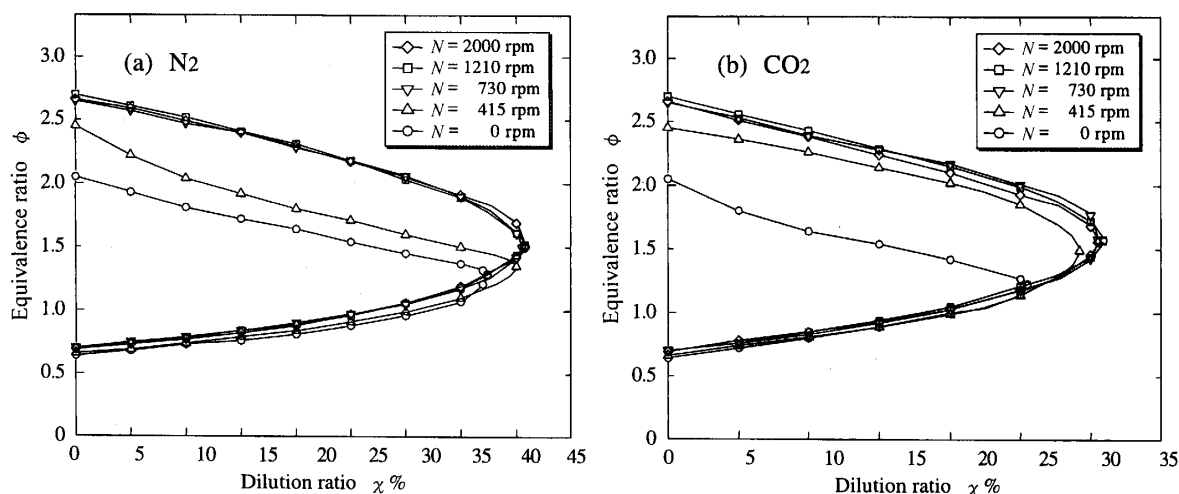


Fig. 6 Extinction limits of propane flames, (a) diluted with nitrogen, (b) diluted with carbon dioxide

は狭くなり、ついには最大希釈限界に達する。回転数を増大していくと、希薄側の限界濃度はやや減少し、過濃側の限界濃度は大きく増大する。 $N=730$ rpm 以上では回転数によらず、過濃側の限界濃度の値も、最大希釈限界の値も同じような値をとる。それらの最大希釈限界は $\chi=40.5\sim 40.8\%$ 、 $\phi=1.50\sim 1.52$ 程度の値をとった。この場合にも $N=1210$ rpm のとき最大希釈限界の値は最も大きかった。図6(b)は燃料をプロパン、希釈剤を二酸化炭素としたときの結果である。回転数の増大とともに過濃側の限界濃度は著しく大きくなり、 $N=415$ rpm の場合でも $N=0$ rpm の場合に比して、過濃側を中心として火炎伝ば範囲は大幅に広がった。最大希釈限界は $N=1210$ rpm の場合で、 $\chi=30.9\%$ 、 $\phi=1.57$ であった。

以上、図5(a), (b), 6(a), (b)を通じて、希釈剤が窒素の場合にもまた二酸化炭素の場合にも回転数の増大とともに、燃料がメタンの場合には、過濃側の限

界濃度がわずかに小さくなり、逆に希薄側の限界濃度がやや大きく低下する。これに対して燃料がプロパンの場合には、希薄側の限界濃度がわずかに大きくなり、逆に過濃側の限界濃度が非常に大きくなった。したがって希釈剤の種類によらず回転数の増大とともに、酸素より分子量の小さいメタンの場合には希釈限界曲線全体が ϕ の小さい方向にシフトしたことになる、逆に酸素より分子量の大きいプロパンの場合には希釈限界曲線全体が ϕ の大きい方向へシフトしたことになる。

この現象は次のように説明される。3・1節でも述べたように、円管に回転を与えることにより分子量の相違によって、局所的な濃度がメタンでは管中心付近で高くなり、酸素は逆に管壁付近で高くなると考えられる。したがって火炎の伝ばする管中心付近では相対的にメタン濃度が高くなり酸素濃度が低下すると考えられる。これにより回転数の増大によって、メタンの希薄側での火炎伝ばはより希薄側で可能となり、過濃側

もより酸素濃度の高いところ、すなわち ϕ の小さいところで伝ば可能となる。これによって回転数の増大につれて、希薄側・過濃側ともにより小さい ϕ の方向(低濃度側)へ伝ば限界がシフトすると考えられる。一方プロパン火炎では酸素に比してプロパンの分子量が大きく、メタンの場合と逆の現象となることが考えられ、限界曲線は全体に ϕ の大きい方向(高濃度側)へシフトしたものと解釈される。

次に希釈ガスの種類による影響は、窒素に比して二酸化炭素の反応抑止効果が大きいことに加え、二酸化炭素の分子量が窒素より大きく、回転数の増大によって、メタン、プロパン、酸素の管内半径方向偏在(濃度の分布)に二酸化炭素がより大きく影響し、それによって火炎の伝ば限界により大きく影響を及ぼすものと考えられる。

なお、今回の測定で、伝ば限界への回転の影響は、希釈率の広い範囲にわたり、メタンでは希薄側、プロパンでは過濃側で顕著となり、回転数が増すほど可燃範囲が広がる傾向があるのに対し、メタンの過濃側、プロパンの希薄側ではほとんど影響が現れないことが明らかになった。

この回転の影響であるが、すでに行われた多くの研究で、可燃性混合気の回転流中で燃焼が生じると、角運動量保存に基づき燃焼ガス側の渦心上の圧力が上昇し、圧力の高い燃焼ガスが圧力の低い未燃ガスに向かって移動することによって、結果的に、火炎伝ば(高温燃焼ガスの移動)が引き起こされることが明らかにされている^{(1)~(10)}。

この現象は、回転を伴って管内を流れる水流中やデルタ翼後方で起きるボルテックスバースティング現象と類似し、すなわち、何らかのじょう乱により偶発的に渦心上の圧力が上昇し、これが引き金となって流体塊が低圧の渦中に突進する現象と原理的には類似しているが、燃焼場においては、じょう乱などの偶発・突発的な要因は必要とせず、燃焼に付随する密度変化のため“必然的”に起きるという点では特異な現象となっている^{(1)~(10)}。

そのため、渦心上を進むバースティングの速度、つまり、火炎速度(燃焼ガスの移動速度)は、大まかには回転速度(最大周速度)にほぼ比例して増加するものの、燃焼が及ぶ空間的な範囲、特に、渦心からどのくらい離れた位置まで燃焼ガスで占められるようになるかということ、そもそもその回転流場で燃焼が可能かどうかという燃焼特性などに大きく影響を受けることが明らかにされている⁽¹⁰⁾。

今までの観察結果によると、回転速度が増加すると

火炎先端部はかなり影響を受け、当量比が1に近い火炎では著しく発光が弱くなり、ついには、火炎が維持できなくなって火炎が消滅してしまうことが明らかにされている^{(2)~(10)}。ただし、当量比が1から離れた希薄、あるいは、過濃混合気では、伝ばに伴う火炎形状の変化、すなわち、火炎が未燃ガスに対して凸な形状となることに付随して現れるルイス数効果のため、ルイス数が1より小さな(物質拡散が温度伝導度より大きな)混合気では化学エンタルピーの輸送が勝るため火炎先端の燃焼強度が強められ、回転が増加するとますますこの効果が顕著となるのに対し、ルイス数が1より大きな(物質拡散が温度伝導度より小さな)混合気では火炎先端から周囲未燃ガスへの熱放散のため燃焼強度が弱められ、ついには、消滅が起きて火炎伝ばが事実上不可能となることが判明している^{(2)~(10)}。

今回、ルイス数の1より小さなメタンの希薄混合気やプロパンの過濃混合気で回転による可燃範囲の増大が顕著であったのは、ボルテックスバースティングによる流れ場の変化と火炎形状の相互干渉により、先端部の燃焼が強められ、回転が強くなればなるほど伝ば限界がより広がる方向に動いた結果と理解できる。ただし、この効果が無限に続くわけではなく、バースティングに起因する流速の増加により燃焼強度が弱められ、ある限界以上では可燃範囲は広がらなくなると考えられる。事実、実験結果を見ると、730~2000 rpm で頭打ちの傾向が見られている。

一方、ルイス数の1より大きなメタンの過濃混合気やプロパンの希薄混合気で、回転による可燃範囲の増大がほとんど見られなかったのは、ボルテックスバースティングにより誘起された流れ場では、むしろ、火炎を維持することが困難となるため、まったくといっていいほど、可燃範囲の拡張が起きなかったと考えられる。

いずれにせよ、燃焼によって必然的に引き起こされるバースティング現象は、一定密度場で起きる通常のボルテックスバースティング現象とは異なり、特に、その起きる限界は、火炎の形成が可能かどうかという問題と表裏一体化しており、混合気の燃焼特性(燃料・酸化剤・希釈剤の種類、律速成分のルイス数、燃焼速度)と密接に関係するので、伝ば限界に及ぼす回転の影響を厳密に理解し把握するには、ボルテックスバースティングにより誘起された火炎先端付近の流れ場と火炎自身との相互関係について詳しい測定を行う必要があると思われる。

4. ま と め

両端を閉じて水平に設置した内径 32 mm, 長さ 2 000 mm の円管内に, 燃料(メタン・プロパン), 空気, 希積ガス(窒素・二酸化炭素)を所定の当量比, 希積率で閉じこめ, これに回転を加えながら火炎を伝ばさせる実験を行い, 次のような結論を得た。

[希薄・過濃限界]

(1) 回転数を増大すると, メタン・空気火炎の伝ば限界は過濃側ではほとんど一定で希薄側ではやや広がり, プロパン・空気火炎の伝ば限界は過濃側で大きく広がり希薄側でやや狭くなった。

(2) 特に, プロパンの過濃限界は当量比 $\phi=2.7$ と, 本実験より大きな内径 5 cm の管を用い, 上方伝ば火炎で決定される標準的な過濃可燃限界値 2.5 に比べても大きな値となった。

[希積限界]

(1) 非回転のときの窒素および二酸化炭素による希積限界は, 標準的な内径 5 cm, 上方伝ば火炎を用いて測定された希積限界に比べて狭くなり, 最大希積限界の値も小さくなったが, 最大希積限界を与える当量比の値は標準の方法とほとんど一致し, メタンで $\phi=0.97\sim 0.98$, プロパンで $\phi=1.23\sim 1.32$ に存在した。

(2) 回転数を増大するにつれ, 希積限界はメタンでは希薄側へ広がり, プロパンでは過濃側へ大きく広がった。また, 最大希積限界を与える当量比も, メタンでは低濃度側, プロパンでは高濃度側へシフトし, これにつれ最大希積限界もそれぞれ希薄側, 過濃側で大きくなった。

(3) 標準的な方法で測定される希積率 χ の最大値(窒素希積: メタン 38%, プロパン 43%, 二酸化炭

素希積: メタン 24%, プロパン 30%)と比較すると, 回転時の最大希積限界の値は, 窒素で希積した場合, メタンで 35%, プロパンで 40%となり, わずかに小さいが, 二酸化炭素で希積した場合は, メタンで 25%, プロパンで 31%と若干大きな値となった。

以上, 両端を閉じた回転円管による実験により, 回転流中においては標準的な方法で決定される範囲を超えて火炎伝ばが起こり得ることが確かなものになった。なお, 回転に伴う希薄限界や過濃限界の値の増減や最大希積限界を与える当量比のシフトは分子量の違いによる回転遠心効果によって説明できる。

文 献

- (1) Chomiak, J., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1977), 1665-1673.
- (2) Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **82** (1990), 176-190.
- (3) 安里勝雄・ほか 2 名, *機論*, **63**-605, B (1997), 847-853.
- (4) 村上高広・ほか 3 名, *機論*, **64**-620, B (1998), 1209-1215.
- (5) 濱崎孝志・ほか 4 名, *機論*, **65** 636, B (1999), 2881-2887.
- (6) 森本洋平・ほか 4 名, *機論*, **67**-653, B (2001), 219-225.
- (7) Sakai, Y. and Ishizuka, S., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, (1996), 847-853.
- (8) Ishizuka, S., ほか 3 名, *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, (1998), 727-734.
- (9) Ishizuka, S., ほか 2 名, *Proc. 28th Symp. (Int.) Combust.*, (2000), 1949-1956.
- (10) Ishizuka, S., *Prog Energy Combust Sci.*, **28** (2002), 477-542.
- (11) Sakai, Y. and Ishizuka, S., *Proc. 24th Symp. (Int.) Combust.*, (1992), 153-159.
- (12) Yamamoto, K., ほか 2 名, *Proc. 25th Symp. (Int.) Combust.*, (1994), 1399-1406.
- (13) Yamamoto, K., ほか 2 名, *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, (1996), 1129-1135.
- (14) Coward, H. F. and Jones, G. W., *Bull. US Bureau Mines*, 503 (1952).
- (15) Zabetakis, M., *Bull. US Bureau Mines*, 627 (1965).