

メタン・空気およびプロパン・空気混合気の渦輪内における火炎速度*

濱崎 拳志^{*1}, 長谷川 亮^{*2}, 甲村 公典^{*2}
石塚 悟^{*3}, 滝 史郎^{*3}

Flame Speeds in Vortex Rings of Methane/Air and Propane/Air Mixtures

Takashi HAMASAKI, Ryo HASEGAWA, Kiminori KOUMURA,
Satoru ISHIZUKA^{*4} and Shiro TAKI^{*4} Hiroshima University, Dept. of Mechanical Engineering,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527 Japan

The flame speed in vortex rings of methane/air and propane/air mixtures has been measured by a high speed video camera and the maximum tangential velocity in the vortex ring has been estimated from the hot-wire measurements on the cold-air vortex rings. Results show that in accordance with the back-pressure drive flame propagation mechanism the flame speeds increase almost linearly with the maximum tangential velocity and their slopes are around unity for all the lean, stoichiometric and rich mixtures investigated. However, it is found that the flame speed is lowered down when the flame diameter becomes small, and the flame can never propagate in lean mixtures if the flame diameter becomes less than the order of the laminar flame thickness. Also, it is found that in the near rich-limit methane/air mixture the flame speed becomes almost constant independently of the maximum tangential velocity. It would appear that the flame should propagate in the mixing zone with the ambient air.

Key Words: Flames, Flame Speed, Flame Propagation, Vortex Ring, Methane, Propane

1. ま え が き

渦心に沿う火炎の高速伝ば現象は、単に渦と火炎の相互干渉の問題としてばかりでなく、火炎伝ばそれ自身の問題として燃焼学上非常に重要な意味をもっている。この伝ば機構に関しては、すでにボルテックスバースティングメカニズム⁽¹⁾⁽²⁾が提出され、火炎速度は火炎面前後の圧力差 $\rho_u V_{\theta \max}^2$ が燃焼ガスの運動量流束 $\rho_b V_f^2$, あるいは運動エネルギー $\rho_b V_f^2/2$ に変換されるとして、次式で与えられる。

$$V_f = V_{\theta \max} \sqrt{\frac{2k_1 \rho_u}{\rho_b}} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、ここで $V_{\theta \max}$ は渦中の最大周速度、 ρ_u, ρ_b は、それぞれ、未燃ガス、既燃ガスの密度、 k_1 は定数で、文献(1)では1/2、文献(2)では無限半径の渦輪が燃える場合は1、剛体渦半径の2倍の渦輪が燃え、その断面内における平均圧力が作用すると考えた場合は約1/3で与えられている。要するに、 V_f は、 $V_{\theta \max}$ に比

例して、また、密度比 ρ_u/ρ_b の平方根に比例して増大することになる。最近では、火炎先端形状を考慮したモデルが Asato ら⁽³⁾、安里ら⁽⁴⁾ によって提案され、実験結果との比較が行われている。しかし、理論式と実験結果との間には定量的に大きな隔りがある。

一方、最近、燃焼前後の質量保存、軸方向運動量保存、角運動量保存を考慮した火炎伝ばモデルが提出され、回転円管内⁽⁵⁾ や渦輪内⁽⁶⁾ を伝ばする火炎の速度を定性的のみならず定量的にも記述することに成功している。ただし、前者では剛体渦、後者では渦核直径の2倍の組合せ渦を前提にして理論式が導出されていた。ごく最近、この理論は、任意の火炎太さや火炎先端形状をも考慮した一般理論(背圧駆動形火炎伝ば機構)に拡張され⁽⁷⁾⁽⁸⁾、メタンの理論混合気のみならず希薄・過濃混合気の場合でも定量的に正しく火炎速度を説明することに成功している⁽⁹⁾。しかし、水素・空気混合気の場合、最大周速度の正確な把握が難しいため、この理論の妥当性は希薄混合気の場合でしか確かめられていない⁽¹⁰⁾。

そこで、ここでは、背圧駆動形火炎伝ば機構⁽⁷⁾の妥当性を確かめるべく、あらたにプロパン・空気混合気について測定するとともに、メタン・空気混合気についても未測定の当量比まで対象を広げ、系統的に火炎

* 原稿受付 1999年1月20日。

^{*1} 川崎重工業(株)環境装置第一事業部 (☎ 650-8680 神戸市中央区東川崎1-1-3)。^{*2} 広島大学大学院 (☎ 739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。^{*3} 正員、広島大学工学部。

E-mail: ishizuka@mec.hiroshima-u.ac.jp

速度と最大周速度との関係を測定することにした。

なお、メタン・空気あるいはプロパン・空気混合気の渦輪の燃焼については、すでに Asato ら⁽³⁾、安里ら⁽⁴⁾によって実験が行われているが、理論で重要となる最大周速度の測定が行われておらず、Johnson⁽¹¹⁾が測定した渦核直径の値から、ラムの理論式とランキンの組合せ渦を前提にして推定されているにすぎない。ここでは、先の実験⁽⁶⁾で用いた方法、すなわち、空気の渦輪を用いてあらかじめ渦輪の移動速度 U と最大周速度 $V_{\theta\max}$ との関係を熱線流速計で測定し、この関係を利用して、可燃性混合気の渦輪内における最大周速度を推定する方法を用いた。

2. 実験装置および実験方法

実験には、前回⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と同じ装置を用いた。渦輪は、内径 100 mm のシリンダ内に満たしたプロパン・空気あるいはメタン・空気混合気を圧力駆動形ピストンよりオリフィスから吹き出すことにより作った。渦輪の強さを変えるため、オリフィス径 D_0 としては、30, 40, 50, 60 mm の 4 種類を用意し、駆動圧 P は、0.3~0.8 MPa の範囲で 0.1 MPa ごとに変化させた。渦輪およびその中を伝ばする火炎は、シュリーレン法を用いて可視化し、渦輪の移動速度 U と火炎伝ば速度 V_f を高速度デジタルビデオカメラ(ナック, MEMRECAMci, 最大 2000 こま/s)の撮影より求めた。一方、渦輪の移動速度 U と最大周速度 $V_{\theta\max}$ との関係は、空気の渦輪を対象に熱線流速計(Kanomax, Model-7104)を用いて求めた。過濃可燃限界における燃料濃度は、プロパン・空気混合気で約 9.5%、メタン・空気混合気でも 15%程度なので、空気の渦輪に対して求められた U - $V_{\theta\max}$ の関係はこれら可燃性混合気の渦輪に対してもほぼ成り立つものと思われる。可燃性混合気の渦輪の最大周速度 $V_{\theta\max}$ はこの関係式にシュリーレン画像から得られた移動速度 U を代入して算出した。

なお、実験装置および実験方法の詳細は文献(6), (9), (10)を参照されたい。

3. 実験結果

3.1 伝ば火炎外観 燃料としてプロパンを用い、オリフィス径 $D_0=40$ mm, 駆動圧 $P=0.8$ MPa, 当量比 $\phi=1.0$ の条件で得られた渦輪内を伝ばする火炎の様子を図 1 に示す。図 1 で渦輪は画面右から左へ移動する。よく知られているように⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾, コロナ放電により着火すると [図 1(a)], 先端のとがった二つの火炎が形成され [図 1(b)], 渦心に沿って二手に

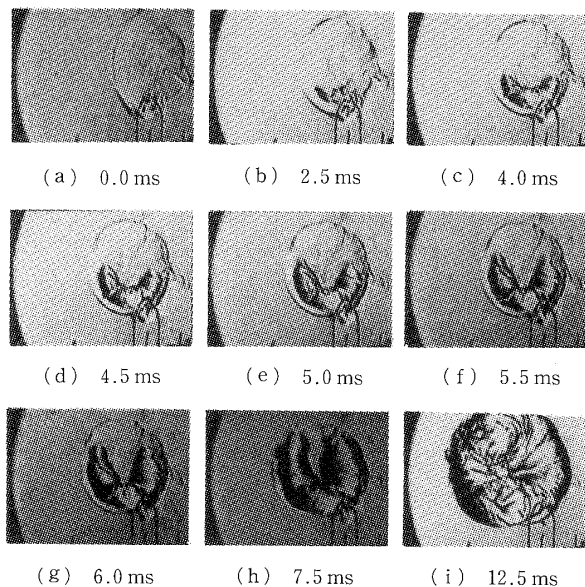


Fig. 1 Sequential photographs of the propagating flame in the vortex ring (Fuel: Propane, Orifice Diameter D_0 : 40 mm, Driving Pressure P : 0.8 MPa, Equivalence Ratio ϕ : 1.0)

分かれて伝ばし始め [図 1(c)], 最終的には反対側で出会って伝ばを終了する [図 1(i)]. このとき、渦心と垂直方向に、徐々にではあるが火炎が伝ばし燃焼ガスの太さが増大していることがわかる。

しかし、上記のような様な火炎伝ばがつねに起きるとは限らず、片側だけが伝ばしたり、衝突寸前に火炎面が急に乱れ伝ばが停止したり、また、伝ば途中でまったく火炎が進行しなくなったりすることがあった。そこで、ここでは、先の実験⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾で求めたように、全周を伝ばするときの平均速度 $V_{f,\text{mean}}$ のほかに、前半、あるいは後半の 1/4 周を伝ばするときの平均速度 $V_{f,1/4}$ も求めることにした。また、背圧駆動形火炎伝ば機構で重要となる燃焼範囲に関するパラメータの影響を調べるため、火炎がほぼ 1/4 周伝ばしたときのシュリーレン画像 [図 1(e)] において、火炎先端から後方の燃焼ガスの太さがほぼ一定になったところを火炎太さ d_f として測定することにした。

3.2 メタン・空気混合気の火炎速度 当量比 ϕ としてすでに測定されている 0.6, 1.0, 1.4⁽⁹⁾ のほかに、0.8, 1.2, 1.6 を選び、火炎速度 V_f と最大周速度 $V_{\theta\max}$ との関係を求めた。その結果をまとめて図 2(a)~(f) に示す。なお、各図の上には、火炎太さ d_f とランキン渦を仮定して求められた渦核直径 d_c との比 d_f/d_c の変化も示されている。また、図 2 中の実線は、ボルテックスバースティングメカニズムによる理論式(1)で、Chomiak⁽¹⁾の文献では $k_1=1/2$,

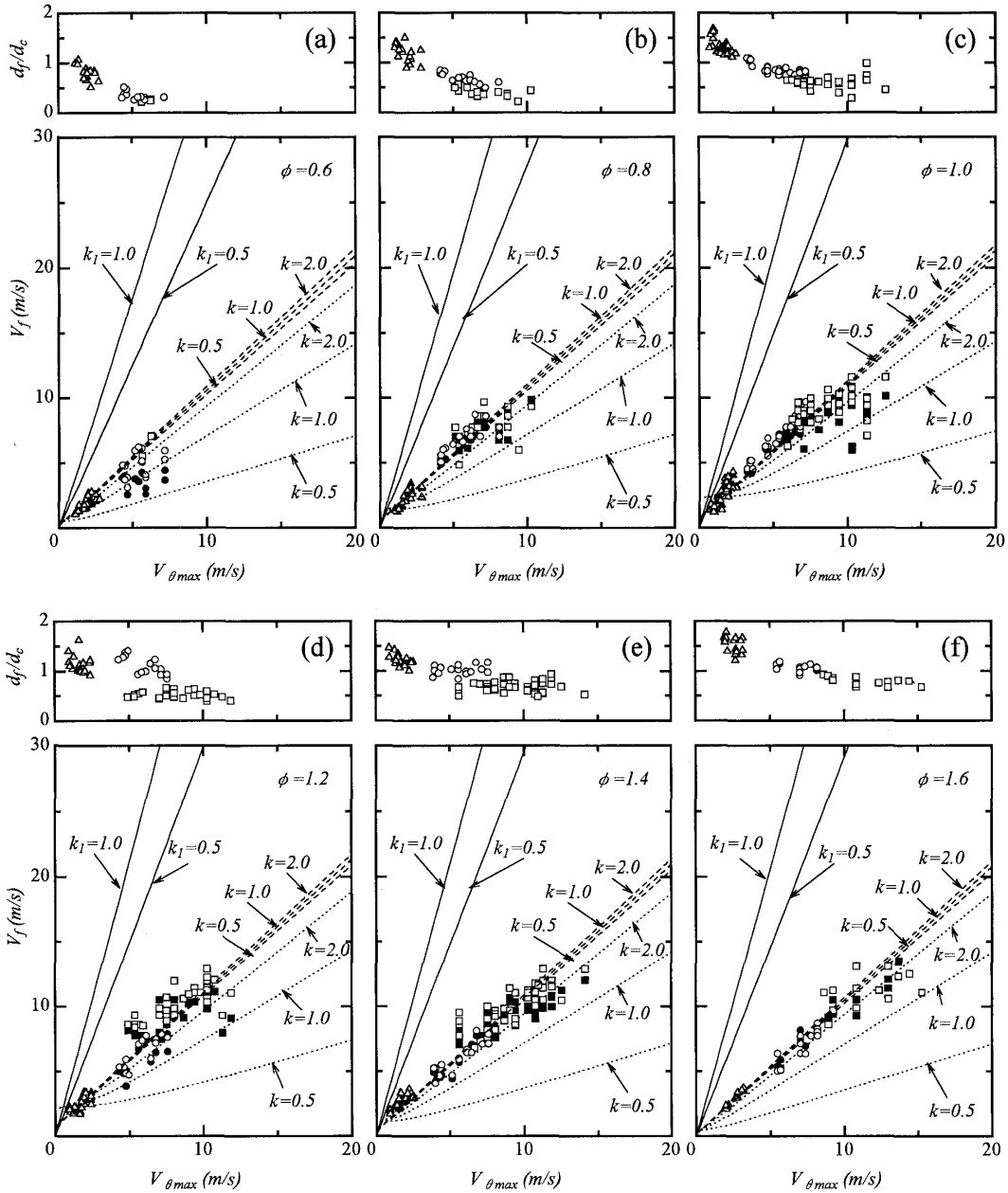


Fig. 2 Variations of the flame speed V_f and the ratio of the flame diameter to the core diameter d_f/d_c with the maximum tangential velocity $V_{\theta max}$ in various methane/air mixtures (Δ : $D_0=60$ mm, \circ : $D_0=40$ mm, \square : $D_0=30$ mm, solid symbols (\blacktriangle , \bullet , \blacksquare): full mean flame speed)

Daneshyar-Hill⁽²⁾ の文献では $k_1=1$ で与えられる。一方、破線と点線は背圧駆動形火炎伝ば機構による理論式で、それぞれ

(1) 渦心半径方向にのみ膨張する場合 ($\epsilon_r = \sqrt{\rho_u/\rho_b}$)

$$V_f = YS_u + V_{\theta max} \sqrt{1 + f(k) \frac{\rho_b}{\rho_u}} \dots\dots\dots (2 \cdot a)$$

(2) 渦心軸方向にのみ膨張する場合 ($\epsilon_r = 1$),

$$V_f = \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_b} (YS_u)^2 + f(k) V_{\theta max}^2} \dots\dots\dots (2 \cdot b)$$

で与えられる。ただし、ここで $f(k)$ は、

$$f(k) = \frac{1}{2} k^2 (k \leq 1), \quad 1 - \frac{1}{2k^2} (k \geq 1) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられ、 ϵ_r, k, Y はそれぞれ半径方向膨張割合、半径方向燃焼範囲、火炎面積割合を示すパラメータで、渦心に沿って燃焼する未燃ガス部分の半径を r_u 、その燃焼後の半径を r_b 、渦核直径を η_u 、火炎面積を A とすると

$$\epsilon_r \equiv r_b/r_u \dots\dots\dots (4)$$

$$k \equiv r_u/(\eta_u/2) \dots\dots\dots (5)$$

$$Y \equiv A / (\pi r_u^2) \dots \dots \dots (6)$$

で定義される⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、 S_u は燃焼速度で、式(2・a)、(2・b)の右辺第1項は燃焼速度 S_u に伴う火炎の移動を、第2項は回転速度 $V_{\theta \max}$ によって誘起される火炎速度を表し、実際の解としてはこの二つの極端な場合の解の適当な間の値をとるものと考えられる。なお、図2(a)～(f)の理論式の算出には、化学平衡計算⁽¹³⁾によって求めた密度比、および標準的な方法で測定された燃焼速度の値⁽¹⁴⁾を用いている。

さて、すでに明らかにされていることではあるが、火炎速度の実測値は、ボルテックスバースティングメカニズムによる理論式(1)よりはるかに小さく、背圧駆動形火炎伝ば機構の理論式のうち、特に燃焼ガスが渦心の半径方向に膨張すると仮定した理論式(2・a)(破線)によく一致している。

当量比の小さい順に見ていくと、 $\phi=0.6$ の場合、最大周速度 $V_{\theta \max}$ の増加につれ火炎速度は増加するが、 $V_{\theta \max}$ の値が5 m/sを超えると火炎が途中で停滞したり消滅したりして、特に全周平均火炎伝ば速度の落ち込みが顕著となり、 $V_{\theta \max}$ が8 m/s以上では、火炎はまったく伝ばしなくなった。一方、火炎太さと渦核直径の比 d_f/d_c は、最大周速度の増加とともに減少し、 $V_{\theta \max}$ が8 m/s付近では0.25とかなり小さくなって伝ば限界を迎えている。

当量比が0.8と大きくなると、火炎伝ば可能な最大周速度 $V_{\theta \max}$ の上限値は約10 m/sと増加し、この範囲で火炎速度は $V_{\theta \max}$ に対してほぼ直線的に増加している。しかし、 $V_{\theta \max}$ の増加とともに d_f/d_c の比は減少し、当量比0.6の場合と比べると若干大きいものの0.4程度となると式(2・a)の直線からはずれ、落ち込みが大きくなるのがわかる。

$\phi=1$ では、火炎速度の増加は $V_{\theta \max} \cong 12$ m/s付近まで伸びるが、これ以上の速度では、火炎が途中で停滞したり、あるいは着火そのものができなかつたりすることが頻繁に起き、その結果、火炎速度も式(2・a)より下回るようになる。ただし、 d_f/d_c の値は、 $V_{\theta \max} \cong 12$ m/sで0.5程度あり、火炎が完全に細くなって伝ばができなくなっているわけではない。なお、 $V_{\theta \max} \cong 11$ m/sで d_f/d_c の値が1程度の大きな値を取り、一方、火炎速度は直線からかなり落ち込んでいる点があるが、このとき、シュリーレンの画像で見ると火炎面はかなり乱れていた。

さて、当量比が1.2と混合気が過濃となっても、 V_f は $V_{\theta \max}$ に対してほぼ直線的に増加するが、 $V_{\theta \max}$ が4～8 m/sのあたりで d_f/d_c の値が大きい場合と小さい場合の二値的な測定結果が得られた。直径40 mm

のオリフィスを用いた場合(○印で示す)、 d_f/d_c の値はおよそ1と大きく、火炎速度は式(2・a)直線上にあるが、直径30 mmのオリフィスを用いた場合(□印で示す)、 d_f/d_c の値は0.5程度と小さく、火炎速度は式(2・a)で与えられる理論値より約1.3倍大きい値となっている。図3は、その様子を示すが、前者では火炎面が乱れているのに対し後者では滑らかで、明らかに伝ば状態が異なるのがわかる。この詳細は後で考察するが、火炎速度は大方の傾向として $V_{\theta \max} \cong 10$ m/s付近までほぼ直線的に増加し、その後、式(2・a)の直線を下回るような結果が得られた。ただし、このとき、 d_f/d_c の値は、当量比1の場合と同様、 $V_{\theta \max} \cong 12$ m/sで0.5程度あり、火炎が細くなったために伝ばが不可能になったというわけではない。

さて、当量比が1.4となると、二値的な傾向は $V_{\theta \max} \cong 6$ m/s付近で少し起きるもののほとんど見られず、火炎速度は $V_{\theta \max}$ の増加とともにほぼ直線的に増加している。 d_f/d_c の値も $V_{\theta \max}$ 値の増加とともに減少する傾向は変わらないものの全体的に大きくなり1程度の値となる。これは、周囲空気と余剰燃料との間で拡散燃焼が起きているためと考えられる。これから類推すると、先ほどの当量比が1.2の場合に、直径40 mmのオリフィスを用いると d_f/d_c の値が1程度となったが、これは拡散燃焼が起きている可能性がある。

さて、当量比1.6でも、火炎速度は理論式(2・a)に沿ってほぼ直線的に最大周速度の増加とともに増加するが、 $V_{\theta \max}$ の値が10～14 m/sの範囲で広くほとんど一定値13～14 m/s前後となる結果が得られた。これらの実験値は、直径30 mmのオリフィスを用い、駆動圧 P を逐次変えて行った実験で得られたものであるが、一つの特徴として、図3(a)の場合のように伝ばする火炎は太くかなり乱れていた。また、当量比は1.6と過濃可燃限界1.67に非常に近い。したがっ

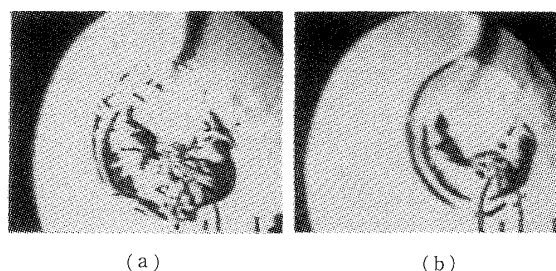


Fig. 3 Two different modes of flame propagation observed for (a) $D_0=40$ mm and for (b) $D_0=30$ mm in the methane/air mixture of $\phi=1.2$

て、これから推測すると、周囲空気と渦輪の可燃性混合気との間で激しい乱流混合が起き、この結果できた乱流予混合気中を火炎が伝ばするため、伝ば速度がほぼ一定となる結果が得られたものと思われる。

以上、総じていうと、火炎速度は最大周速度に対してほぼ直線的に増加しているが、その増加割合である傾きは、当量比に無関係にほぼ一定な値、すなわち、傾きが1という直線になっている。もし、ポルテックスパースティングメカニズムにより火炎が伝ばしているのであれば、その傾きは式(1)に示されるようにに密

度比の平方根に等しく、当量比により変化しなければならない。一方、背圧駆動形伝ば機構で半径方向に膨張する場合、式(2・a)に明確に示されているように、燃焼ガスと未燃ガスの密度比は1に比べ非常に小さいので傾きは当量比にほとんどよらず1に近い。このことから、渦輪中では、火炎は背圧駆動形火炎伝ば機構により伝ばしていることが裏付けられる。

3・3 プロパン・空気混合気の火炎速度 図4(a)～(f)に当量比 $\phi=0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6$ のプロパン・空気混合気の場合の火炎速度 V_f と

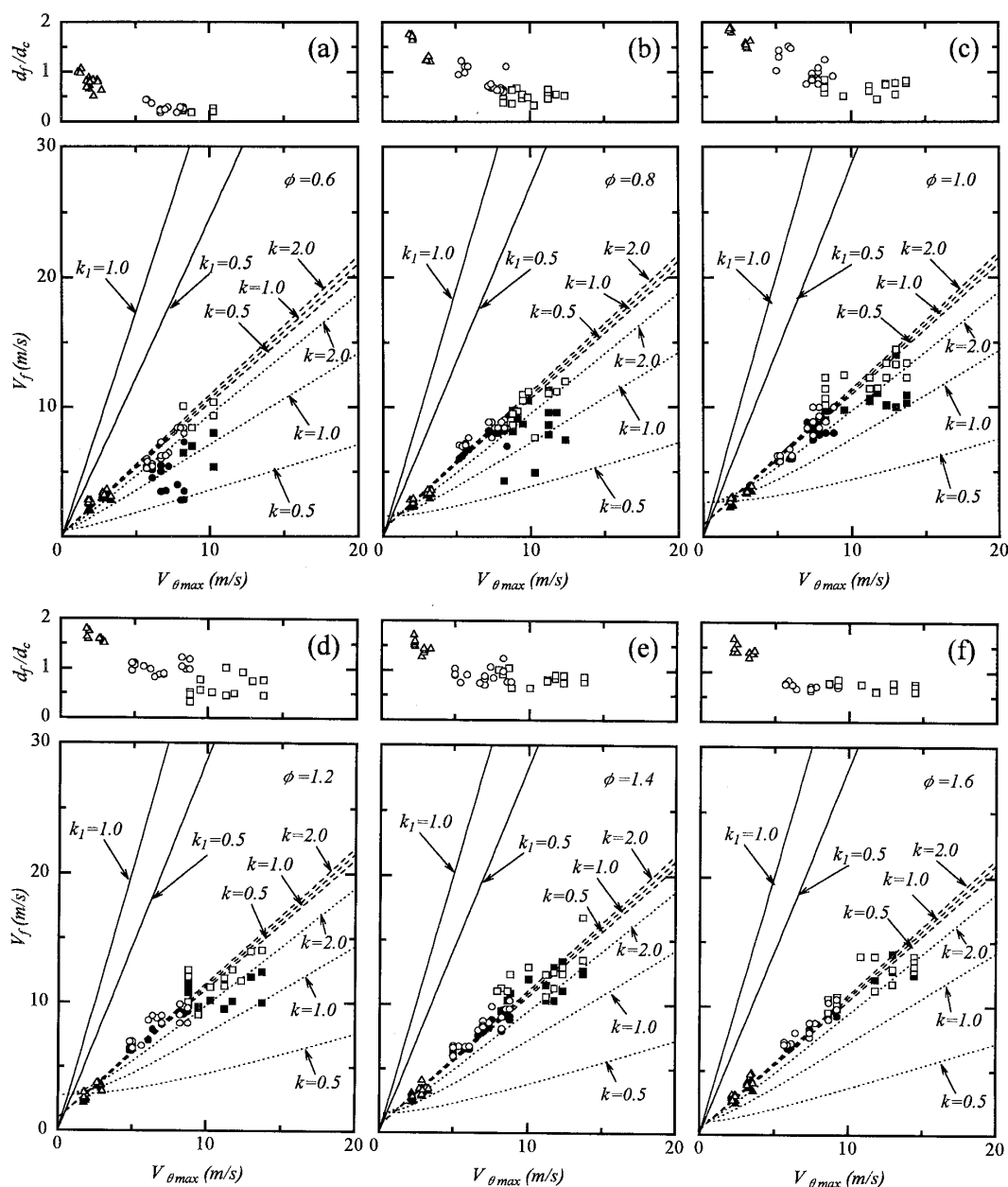


Fig. 4 Variations of the flame speed V_f and the ratio of the flame diameter to the core diameter d_f/d_c with the maximum tangential velocity $V_{\theta \max}$ in various propane/air mixtures (Δ : $D_0=60$ mm, \circ : $D_0=40$ mm, \square : $D_0=30$ mm, solid symbols (\blacktriangle , \bullet , \blacksquare): full mean flame speed)

最大周速度 $V_{\theta\max}$ との関係を示す。なお、理論式では、平衡計算によって求めた密度比⁽¹³⁾ および標準的な方法で測定された燃焼速度の値⁽¹⁵⁾ を用いている。

総じていえることだが、メタンに比べプロパンの混合気のほうがシュリーレン画像における渦輪と周囲空気との境界面および火炎面ともに滑らかで乱れが少なかった。

さて、当量比が小さい順に見ていくと、当量比が0.6の場合、メタンのそれに比べ、火炎伝ばできる最大周速度の値が10 m/sまで拡大している。ただし、最大周速度が5~10 m/sの間では全周の平均速度が1/4周の平均速度より低くなり、伝ばが一様でないことがわかる。また、 $V_{\theta\max} \geq 10$ m/s で d_f/d_c の値も0.2以下となり、火炎がかなり細くなって伝ばできなくなるのがわかる。

当量比が0.8の場合も、やはりメタンに比べ高い最大周速度まで伝ばしている。火炎が伝ばできなくなる一つの理由として、渦輪が周囲空気を巻き込み、はじめにもっていた可燃性ガスが希釈される効果が考えられるが、メタンに比べプロパンは拡散係数が小さいため、この希釈の進行が遅れ、これが一因となって大きな最大周速度の値まで火炎が伝ばできたものと考えられる。なお、 $V_{\theta\max} \cong 8 \sim 10$ m/s で全周平均速度が1/4周の平均速度より遅くなり、伝ばの停滞や火炎の消滅が頻繁に起きていることがわかる。

さて、当量比が1.0, 1.2, と大きくなるにしたがって達成される火炎速度の最大値も増加し、また、それぞれの値は、メタンのそれぞれの値に比べ大きくなっている。メタンの当量比1.2で見られた d_f/d_c の二値的傾向はプロパンでも見られたが、火炎速度のばらつきは少ない。また、火炎速度の値が最大周速度の大きな値でほぼ一定の飽和状態となる傾向も当量比1.6で若干見られるにすぎなかった。これは、プロパンの過濃可燃限界の当量比は約2.5と大きいので、当量比1.6では渦心上に予混合火炎が確実に形成されて伝ばするため、周囲空気との混合でできる混合気層を火炎が伝ばする現象は支配的にはなれなかったものと考えられる。

全体的に、測定された火炎速度は、半径方向の膨張を仮定した理論式(2・a)に一致し、火炎速度と最大周速度との関係における傾きも当量比によらずほぼ1に等しい。このことは、背圧駆動形伝ば機構の妥当性を裏付けている。

なお、メタン、プロパンの両混合気を通じて得られた火炎速度の最大値は、本渦輪発生装置(最大周速度12~14 m/s)の場合、約15 m/sであった。

4. 考 察

総じて、火炎速度の測定値は、渦心の半径方向の膨張を仮定した理論式(2・a)に一致したが、燃焼範囲を示すパラメータ k は、燃焼する部分の未燃ガス半径 r_u の渦核半径 $\eta_u/2$ に対する比で定義されていたので[式(5)参照]、半径方向に膨張する場合 d_f/d_c の値とはならず、密度変化を考慮して、

$$k = \frac{d_f}{d_c} \sqrt{\frac{\rho_b}{\rho_u}} \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。このことを考慮すると、例えば当量比0.6のメタンやプロパンの混合気では、かなり k の値の小さい火炎が伝ばしていることがわかる。しかし、あまり火炎が細くなると火炎速度は理論式(2・a)より減少し、ついには伝ばできなくなることがわかる。

Hasegawa ら⁽¹⁶⁾によれば、渦直径が層流火炎の厚みと同程度以上となって初めてボルテックスバースティングメカニズムによる火炎伝ばが可能となることが数値計算により示されている。ちなみに、当量比0.6の場合の伝ば限界における火炎太さは約1 mmであった。したがって、本実験において当量比0.6の場合、最大周速度が増加していくと伝ばできなくなるが、これは、火炎太さが層流火炎厚み程度以下になり、火炎前方に比べ後方の圧力が高いという回転流中特有の空気力学的構造⁽¹⁷⁾を作れなくなった結果生じているものと考えられる。

一方、火炎速度が理論式(2・a)に乗らない例として、(1)当量比1.2, 1.4のメタン・空気混合気で火炎速度が異常に速くなる現象と、(2)当量比1.6のメタン・空気混合気で火炎速度がほぼ一定の速度に飽和してしまい、最大周速度に対して直線的に増加しない現象が観察された。

本実験では、 $V_{\theta\max}$ の値は、空気の渦輪に対して測定された $U-V_{\theta\max}$ の結果から推定されていた。しかし、同じ $V_{\theta\max}$ の値でも図3のシュリーレン写真を見るとかなり異なる特性の渦輪が形成されていると思われる。一つの考え方として、 $D_0=40$ mmのオリフィスを用いた場合は、渦核直径の大きな、したがって、最大周速度の遅い渦輪が形成され、一方、 $D_0=30$ mmのオリフィスを用いた場合は、渦核直径の小さな、したがって、最大周速度の大きな渦輪が形成され、その結果、前者では火炎速度は遅く、後者では速くなったものと考えられることができる。しかし、熱線流速計の測定結果⁽⁶⁾を見ると、むしろ $D_0=30$ mmのオリフィスを用いた場合のほうが渦核直径の大きな渦輪が形成されている。もう一つの考え方として、 $D_0=30$ mmの

オリフィスの場合、何らかの理由で周囲空気の巻き込みが多く、その結果当量比が1に近い混合気が形成され、また、その乱流混合の際、火炎面積も増大し、式(2・a)の S_u や Y の値が増大して火炎速度が速くなり、一方、 $D_0=40$ mmの場合、周囲空気との混合が少なく、火炎はほぼ当量比1.2の混合気中を伝ばし、しかるに、周囲には余剰燃料と周囲空気との間で拡散燃焼が起き、その結果火炎が太く観察されたとも考えられる。この詳細を明確にするには不活性ガス雰囲気中で実験を行う必要がある。

一方、前述(2)の件であるが、混合気の組成が過濃可燃限界に近い場合、特に最大周速度が大きいと、渦心上の予混合火炎は消えやすく、一方、周囲空気と渦輪内の可燃性予混合気との乱流混合は促進されて新たな予混合気形成されるので、火炎はむしろこの混合気中を伝ばし、その結果、火炎速度がほぼ一定の13~14 m/sとなったものと考えられる。したがって、この場合の火炎伝ばは、背圧駆動形火炎伝ば機構によるものではなく、乱流予混合火炎の伝ばになっていると思われる。

5. 結 論

メタン・空気、および、プロパン・空気混合気の渦輪内を伝ばする火炎に関して当量比を変え系統的に火炎速度と最大周速度との関係を求め、以下の結論を得た。

- (1) 火炎速度は、最大周速度に対しほぼ直線的に増加する。
- (2) その傾きは、混合気の当量比にあまり依存せず、1に近い値となる。
- (3) また、火炎の太さは最大周速度の増加とともに減少する。
- (4) 総じて、火炎速度と最大周速度との関係は背圧駆動形火炎伝ばモデルで渦心半径方向に混合気が膨張すると仮定した理論式に一致し、ポルテックスパースティングメカニズムと比較して、特に傾きが一致しない。
- (5) 最大周速度の増加に伴って火炎は細くなり、希薄混合気では、層流火炎厚み程度となると伝ばできなくなる。
- (6) 過濃可燃限界に近い過濃混合気では、最大周

速度が大きくなると周囲空気との間で乱流混合が起き、その乱流予混合気中を火炎が伝ばする現象が支配的となる可能性がある。

(7) 本渦輪発生装置(最大周速度12~14 m/s)で観察された火炎速度の最大値は約15 m/sである。

本研究は、矢崎科学技術振興財団の研究補助金を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。また、実験の遂行にあたりご協力いただいた本学学生前川拓也君にも感謝の意を表す。

文 献

- (1) Chomiak, J., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1976), 1665-1673.
- (2) Daneshyar, H. and Hill, P. G., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **13** (1987), 47-73.
- (3) Asato, K., Wada, H., Himura, T. and Takeuchi, Y., *Combust. Flame*, **110** (1997), 418-428.
- (4) 安里勝雄・竹内秀隆・和田秀忠, 機論, **63**-605, B(1997), 317-322.
- (5) Sakai, Y. and Ishizuka, S., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1997), 847-853.
- (6) Ishizuka, S., Murakami, T., Hamasaki, T., Koumura, K. and Hasegawa, R., *Combust., Flame*, **113** (1998), 542-553.
- (7) 濱崎拳志・石塚悟, “渦心に沿う火炎の高速伝播モデル(背圧駆動型火炎伝播機構)”, 燃焼の科学と技術, **6**(1999), 195-209.
- (8) 濱崎拳志・石塚悟, 第36回燃焼シンポジウム講演論文集, (1998), 19-21.
- (9) Ishizuka, S., Hamasaki, T., Koumura, K. and Hasegawa, R., Measurements of Flame Speeds in Combustible Vortex Rings: Validity of the Back-Pressure Drive Flame Propagation Mechanism, to appear in *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1999), 727-734.
- (10) 村上高広・濱崎拳志・石塚悟・滝史郎, 機論, **64**-620, B(1998), 1209-1215.
- (11) Johnson, G. M., Research on the Propagation and Decay of Vortex Rings, *ARL TR 70-0093*, Aerospace Research Lab., Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, (1970).
- (12) McCormack, P. D., Scheller, K., Muller, G. and Tisher, R., *Combust. Flame*, **19** (1972), 297-303.
- (13) Gordon, A. and McBride, B. J., *NASA Spec. Publ.*, 273 (1971).
- (14) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1984), 1883-1992.
- (15) 酒井幸夫, 機論, **53**-508, B(1988), 3547-3552.
- (16) Hasegawa, K., Nishikado, K. and Chomiak, J., *Combust. Sci. Technol.*, **108** (1995), 67-80.
- (17) 石塚悟・平野敏右, 燃焼の科学と技術, **2** (1994), 15-26.