

定容容器内を伝ばする火炎面の不安定性* (水素-空気, メタン-空気, プロパン-空気火炎)

大八木 重治*¹, 松井 淳*², 吉橋 照夫*³

Instabilities of Flame Front Propagating in a Constant-Volume Chamber (Hydrogen-Air, Methane-Air, and Propane-Air Flames)

Shigeharu OHYAGI, Jun MATSUI and Teruo YOSHIHASHI

The present study aims to obtain a fundamental understanding of the mechanism of instabilities arising on a flame front propagating in a disk-shaped constant-volume chamber, by visualizing the flame front with Schlieren photography. The ignition was performed at the center or at a point on the periphery of the chamber to observe the effects of wall configuration. The mixtures selected were hydrogen-air, methane-air and propane-air with various equivalence ratios. As a result, it is found that the instabilities occur when the Lewis number of the unburned mixture is less than unity for the hydrogen-air and propane-air flames. This shows that instability is caused by the so-called "preferential diffusive instability". However, in the methane-air flame, for which the Lewis number is always near unity, an instability with very regular cells appears when the flame approaches the wall for any value of the equivalence ratio. This instability may be interpreted as a "hydrodynamic instability" affected by the presence of the wall.

Key Words: Combustion Phenomena, Premixed Combustion, Gaseous Fuel, Flame Instabilities, Internal Combustion Engine, Preferential Diffusion

1. 緒 論

予混合気体中を伝ばする火炎面には、混合気条件により、セル状の不安定性が生じることが知られている。これについては、Markstein⁽¹⁾により、詳細な研究がなされ、燃料の種類、当量比、初期圧により、セルの大きさが変化することが報告されている。この不安定性の原因の一つは、Sivashinsky⁽²⁾により、理論化された「拡散・熱的效果」である。火炎面上に何らかのじょう乱があるとき、不足成分の選択拡散により、局所的当量比が1に近づき、かつ周囲への熱伝導による火炎温度の減少がないとき、局所的燃焼速度の増加により、じょう乱が発達し、火炎が不安定になる。このほかにも、重力など外力の影響、密度の急激な変化による流体力学的不安定効果など、不安定メカニズムについて多くの研究がなされている。Groff⁽³⁾は、準球形容器を用いて、拡散・熱的效果については中立安定の条件において、流体力学的不安定による乱れが発生し、乱れ開始点のレイノルズ数が、火炎の膨張比に関係す

ることを示した。これらの研究においては、容器壁の影響を極力抑え、火炎そのものの性質を明らかにするため、比較的大きな容器を用いている。一方、内燃機関の燃焼室のような実用的燃焼器では、容器壁と火炎の干渉による不安定も考えられる。例えば、チューリップ火炎はく形容器において、火炎面と対向する壁との干渉により、火炎の形状が決定される⁽⁴⁾。

本研究では、ディスク形の小形容器を用い、3種類の混合気(水素-空気, メタン-空気, プロパン-空気)について、当量比, 点火位置(ディスク中心および外周)を変化させて、シュリーレン写真により、火炎面の形状を観察し、不安定の生じる条件、不安定の出現する位置など定容容器内の火炎の挙動を明らかにすることを目的とする。これらの燃料を選んだのは、後述のように、酸素の拡散係数に比べて、大きい値をとる水素、ほぼ等しいメタン、小さい値のプロパンを比較して、選択拡散の効果と容器壁の影響を観察するためである。

2. 実 験

図1に実験装置全体の概略を示す。装置は大別して、定容容器、配管系、点火系、圧力測定系、シュリーレン光学系から構成されている。

* 原稿受付 平成5年4月23日。

*¹ 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。

*² トヨタ自工(株) (〒471 豊田市トヨタ町)。

*³ 埼玉大学工学部。

混合気は水銀マンオメータで分圧を測定することにより混合比を調整し、予混合タンク内で12 h以上自然拡散による混合を行う。実験は、まず定容容器内を真空状態にし、それから、水銀マンオメータで予混合気を徐々に所定の初期圧力まで導入し、容器上のバルブを閉じた後、点火プラグにより点火し、燃焼させる。点火信号は同時に圧力測定と瞬間シュリーレン写真の光源発光のトリガ信号となる。容器内圧力信号はストレイン式圧力計(日本電気三栄社製、フラッシュダイヤグラム形 MODEL 9E02-P5-20、測定部直径 8 mm)から高周波ノイズフィルタを通り直流アンプにより増幅の後、最小サンプル時間 1 μ s のデジタルレコーダ(オートニクス社製、APC-204)に記録され、コンピュータで処理される。本実験は圧力がピークに到達する時間を燃焼時間と定義する。燃焼時間を約 10 等分するように撮影時刻を設定し、精度 1 μ s のデジタルディレイ回路(Hadland Photonics 社製、3-Channel Pulse Delay Generator)によって、点火からその時間だけ、発光時間 2 μ s のキセノンフラッシュランプ(菅原研究所、MS-230 形 Stroboscope)の作動を遅延させ、その瞬間の現象がカメラに記録される。つまり、一条件について、少なくとも 10 回の実験により、火炎伝ば過程を撮影する。実験の再現性は良好であった。

図 2 は実験に用いた定容容器の概略を示す。容器は、真ちゅう製で、直径 100 mm、厚さ 30 mm のディスク

形であり、圧力計、吸排気のためのポート部 (3.6 cm³) および点火プラグが取り付けられている。ポート部から火炎面に与える悪影響を避けるため、多孔性の金属が圧入されている。両側面には厚さ 20 mm の光学ガラスが設置され、容器内全領域が観察できる。点火位置は容器円周壁面の最上部(外周点火)および容器中心(中心点火)の 2 とおりとした。点火は「外周点火」の場合、外周壁中央部に自動車用点火プラグを取付け、「中心点火」の場合は、点火プラグに取付けた直径 ϕ 1.6 mm、長さ 50 mm の銅製の棒と対向する外周壁中央に同様に取付けた長さ約 50 mm の銅製の棒の間に火花を飛ばすことによって行った。容器は点火プラグを上にして実験室に設置されている。

実験条件を表 1 に示す。燃料は、水素、メタン、プロパンを用い、酸化剤は、空気(酸素-窒素混合気、1 : 3.76)とした。当量比は水素 10 条件、メタン 6 条件、プロパン 10 条件について実験を行った。容器内の初期圧は 101.3 kPa に固定し、初期温度は室温(約 298 K)である。混合気の当量比の最大誤差は約 1.6% である。

3. 結果

3.1 圧力波形 まず、各混合気の燃焼特性を調べるため、ストレイン式の圧力変換器を用いて、燃焼室内の圧力変化過程を調べた。各混合気の圧力波形の一例を図 3 に示す。横軸は点火からの時間、縦軸は初期圧 P_0 からの圧力上昇を示す。水素の場合、燃焼時間が極端に短く、プロパン、メタンのほぼ 10 分の 1 である。これは最大層流燃焼速度が、水素が 291 cm/s、プロパンが 43 cm/s、メタンが 37 cm/s⁽⁵⁾ であることに対応している。中心点火が外周点火に比べて燃焼時間が短いのは、点火プラグの位置からの伝ば距離の違いによるものである。当量比に対し、燃焼時間、最大圧力

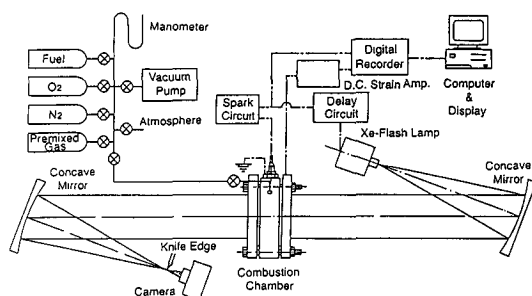


図 1 実験装置概略

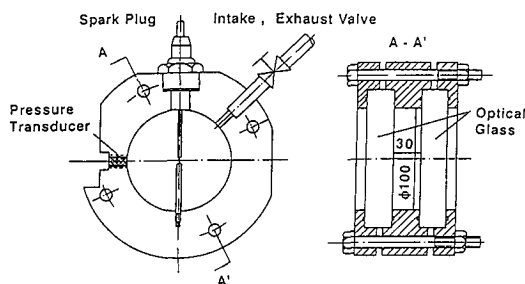


図 2 定容容器

表 1 実験条件

Igniter position	periphery, center
Mixture	hydrogen-air methane-air propane-air
Initial Pressure	101.3 kPa
Initial Temperature	Room Temperature
Equivalence Ratio ϕ	hydrogen 0.5, 0.75, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0
	methane 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3
	propane 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 1.6, 1.7, 1.8

P_f をまとめたものを、図4、5に示す。各混合気とも、化学量論比より、やや、過濃側で、燃焼時間が最小になり、圧力が最大になる。化学平衡計算⁽⁶⁾によると、最大圧力は化学平衡圧力の約60%であり、大きな熱損失が存在し、最大圧力の中心点火と外周点火の差を生じさせているが、詳細な議論は表面熱流束の測定によらなければならない。

3・2 シュリーレン写真 図6に水素-空気、中心点火、当量比0.5の、点火初期(a)、中期(b)、終期(c)のシュリーレン写真を示す。この場合、初期から、火炎面上にすじ状の乱れが出現し、中期、後期となる

につれ、細胞分裂のようにセルが増加し、微細な構造をもつ乱流火炎へ遷移している。図7に、当量比1.0の場合を示す。初期には、ほとんど乱れのない層流火炎であるが、中期になると、大きなスケールのセルが出現し、後期には、微細なセルに発達する。 $\phi=0.5$ に比べ、セルの構造は、やや規則的である。図8に $\phi=5.0$ の場合を示す。この場合は、初期から終期まで、点火プラグや、給排気ポートの影響を除き、ほとんど乱れのない層流火炎が得られた。つまり、水素-空気火炎の場合、当量比が小さいほど、すじ状の乱れの発生する火炎半径が小さく、スケールの小さな不規則な乱れ

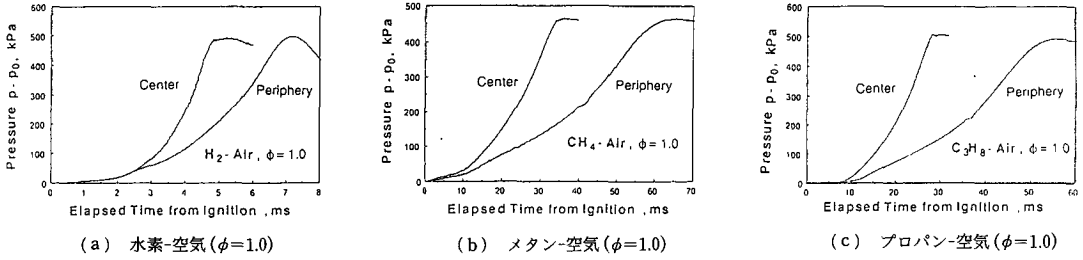


図3 圧力の時間的变化

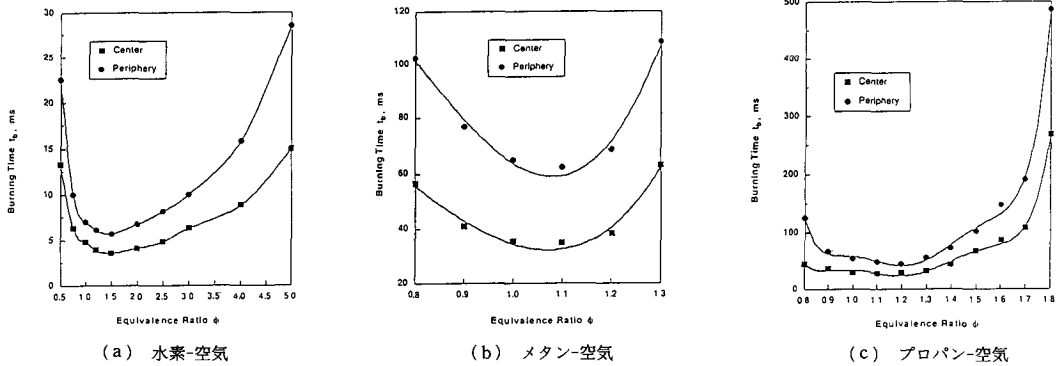


図4 燃焼時間と当量比

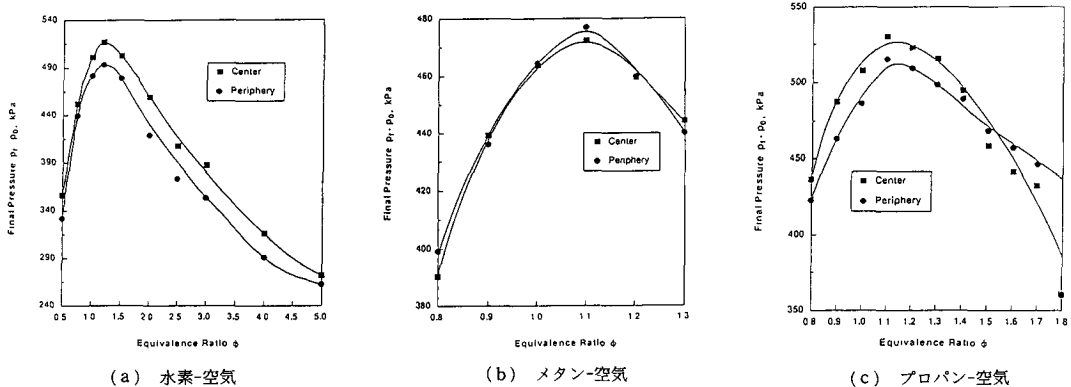


図5 最大圧力と当量比

へと発達する。点火位置を外周にしても、その傾向に変化はないが(図9)、乱れの形が、中心点火と若干異なっている。これらの写真で、既然焼領域に、黒いはん点が見えるが、これはガラス面に生成物の水分が凝縮したものと考えられる。

メタン-空気、中心点火の場合(図10)、各当量比において、点火プラグと給排気ポートによる大きなスケールの乱れだけである。外周点火の場合(図11)、初期には、乱れないが、中期に、まず、横方向に分割し、終期には、縦方向に、規則的に分割し、特徴的な火炎形状を示す。これは、当量比を変化させても、ほとんど変化しない。

プロパン-空気、中心点火(図12)の場合、初期、中期は、乱れが少なく、当量比によってもあまり変化しないので、終期と比較すると、水素の場合とは逆に、当量比が小さいほうが安定であることがわかる。外周点火の場合(図13)は、顕著に現れる。 $\phi=0.8$ のとき、横方向の分割だけであるのに対し、 $\phi=1.0, 1.5$ となるにつれて、縦方向の分割が多くなっていく。

4. 考 察

4.1 熱力学的モデル 3.1節で述べた圧力波形と3.2節のシュリーレン写真との整合性を調べ、火炎伝ば特性を明らかにする目的で、簡単な熱力学的モデ

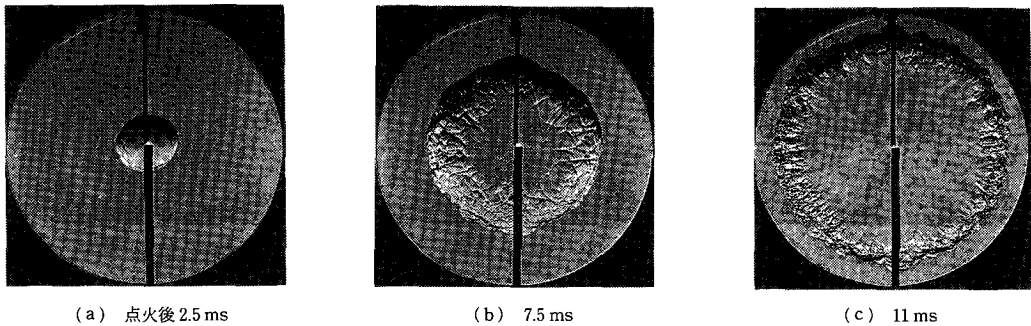


図6 水素-空気、中心点火、 $\phi=0.5$ のシュリーレン写真

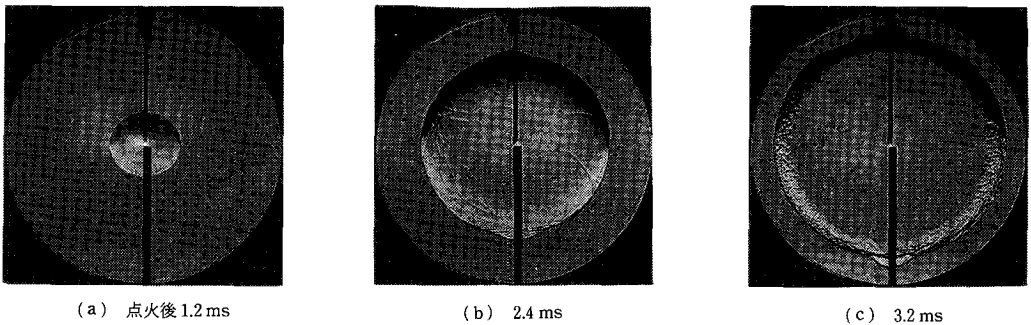


図7 水素-空気、中心点火、 $\phi=1.0$ のシュリーレン写真

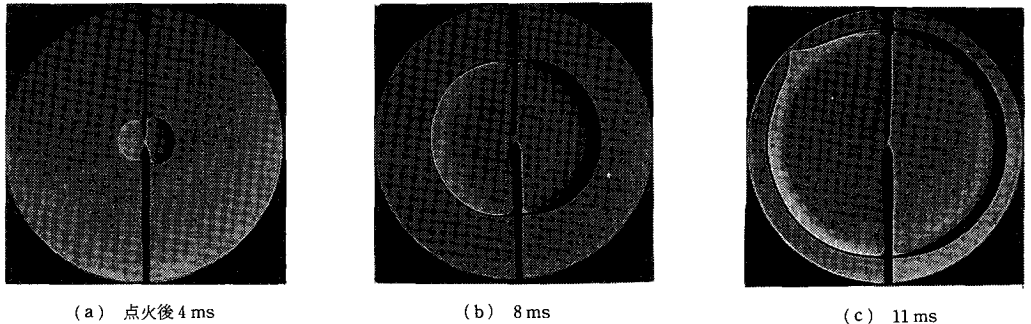


図8 水素-空気、中心点火、 $\phi=5.0$ のシュリーレン写真

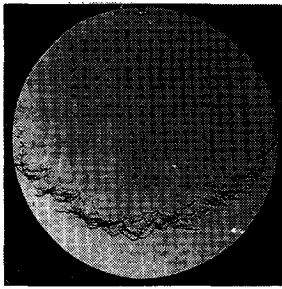
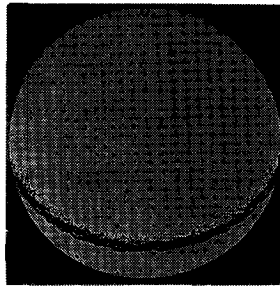
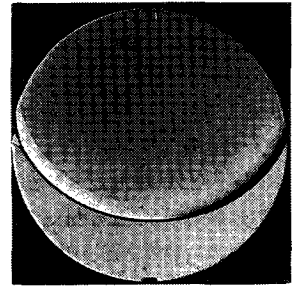
(a) $\phi=0.5, 16 \text{ ms}$ (b) $\phi=1.0, 4.8 \text{ ms}$ (c) $\phi=5, 17 \text{ ms}$

図 9 水素-空気, 外周点火

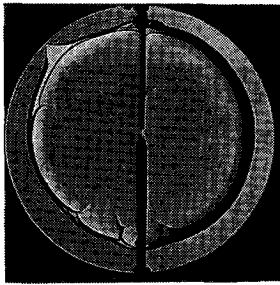
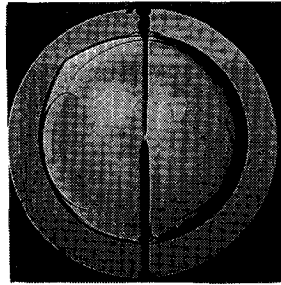
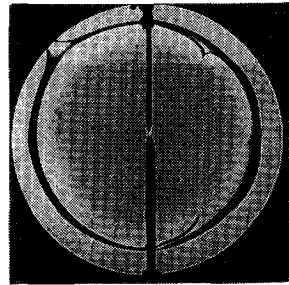
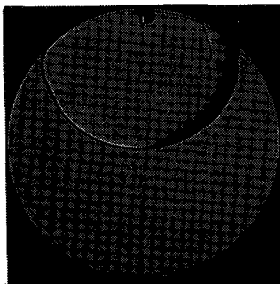
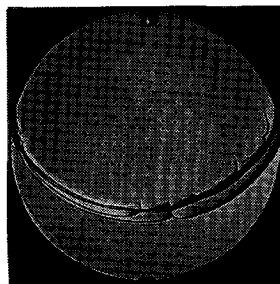
(a) $\phi=0.8, 30 \text{ ms}$ (b) $\phi=1.0, 18 \text{ ms}$ (c) $\phi=1.3, 36 \text{ ms}$

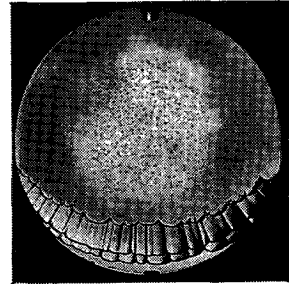
図 10 メタン-空気, 中心点火



(a) 16 ms



(b) 36 ms



(c) 51 ms

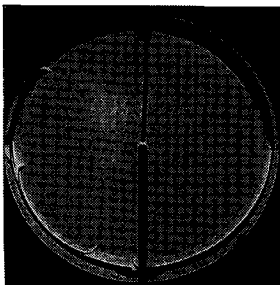
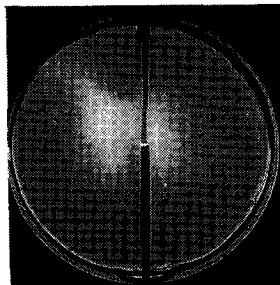
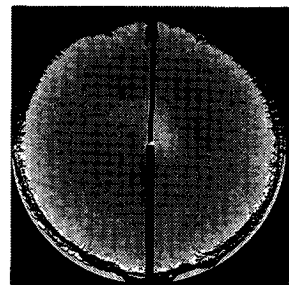
図 11 メタン-空気, 外周点火, $\phi=1.0$ (a) $\phi=0.8, 34 \text{ ms}$ (b) $\phi=1.0, 224 \text{ ms}$ (c) $\phi=1.5, 40 \text{ ms}$

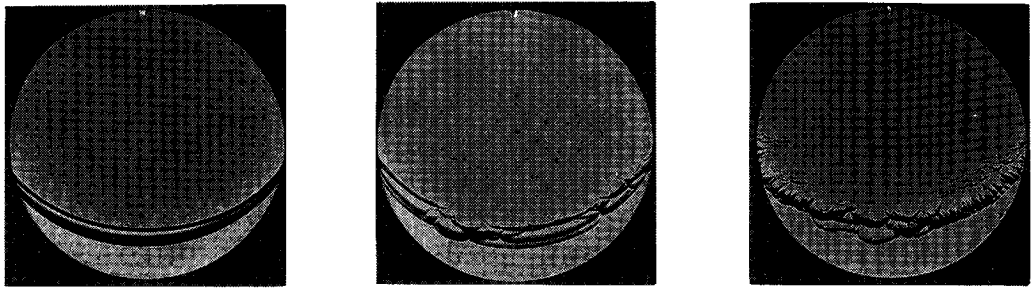
図 12 プロパン-空気, 中心点火

ル⁽⁷⁾を用いて、圧力変化から体積燃焼割合 Y_b を計算した。このモデルでは、未燃、既燃とも理想気体とし、未燃部からの熱損失を無視している。簡単な熱力学的計算により、

$$Y_b = 1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{-1/\gamma} \frac{P_f - P}{P_f - P_0} \dots\dots\dots(1)$$

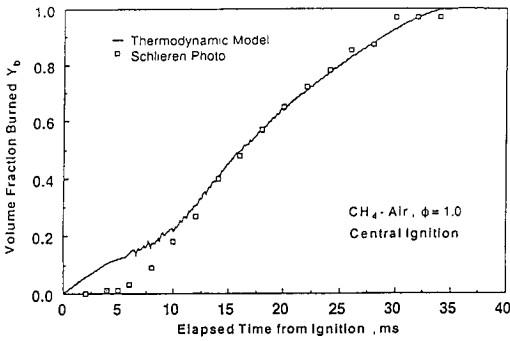
となる。ここで、 γ は、比熱比で一定値(1.4)、 P は燃焼中の圧力であり、時間の関数として測定され、コン

ピュータに取り込まれている。また、 Y_b は、容器内全容積で、既燃部容積を除いたものであり、シュリーレン写真からも近似的に計算できる。ここでは、火炎面を球面として計算し、式(1)の結果と比較したものを、メタン-空気火炎、中心および外周点火に対して、図14に示す。写真からのデータは、同一実験のものではないにもかかわらずこのように比較的よい一致を見せる。点火ノイズの影響が圧力波形に現れるため、点火

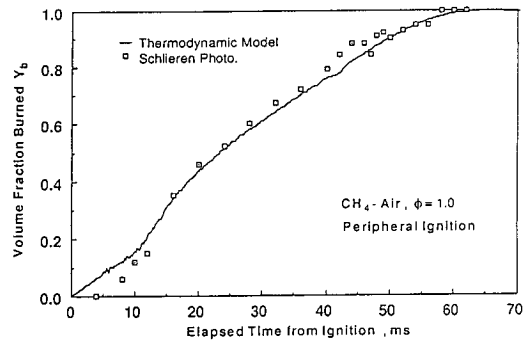


(a) $\phi=0.8, 84 \text{ ms}$ (b) $\phi=1.0, 42 \text{ ms}$ (c) $\phi=1.5, 60 \text{ ms}$

図13 プロパン-空気、外周点火

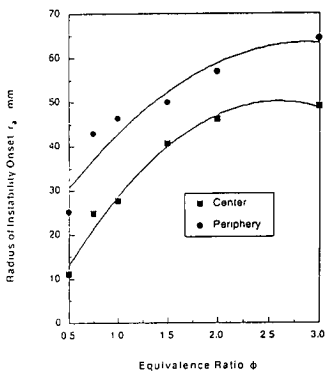


(a) 中心点火

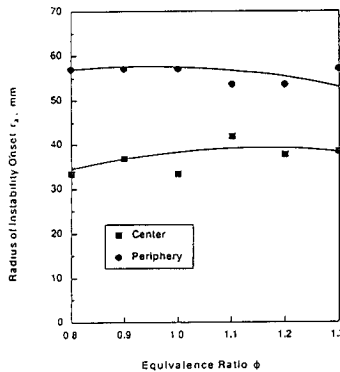


(b) 外周点火

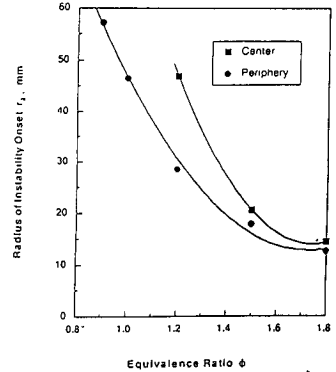
図14 メタン-空気火炎の体積燃焼割合



(a) 水素-空気



(b) メタン-空気



(c) プロパン-空気

図15 乱れ開始半径と当量比

直後の式(1)による値は、あまり信用できず、写真とのずれが大きい。他の条件においても点火付近を除いて、よく一致しており、圧力測定とシュリーレン写真との整合性が確認できた。また、このモデルにより、火炎前方の温度のような情報も得ることができる。ただし、式(1)の導出過程には多くの仮定を含み、あくまで近似的なものであること、また、シュリーレン写真からの既燃部容積の計算における火炎形状のモデルについての問題点のあることを付記しなければならない。

4・2 乱れの開始時間 3・2節で述べたシュリーレン写真から、火炎面が不安定となり、乱れが発生したと観察できる初めの火炎半径 r_a を求め、各燃料気体について当量比に対して整理したものを図15に示す。火炎は、必ずしも球形に伝ばしているわけではなく、容器壁や点火プラグの影響によりひずんでいるが、点火プラグを中心とする近似的な球と考えた火炎半径とした。明らかに、水素-空気火炎とプロパン-空気火炎では当量比に対する関係が逆である。すなわち、水素では、希薄側で r_a が小さく、プロパンは過濃側で小さい。メタン-空気火炎は当量比に対する依存性がほとんど見られない。中心点火では、最大火炎半径は50 mm なので、 r_a もそれ以下に抑えられ、外周点火では50 mm 以上になる。これは乱れの開始が火炎前方の容器壁の影響を受けていることを示す。火炎最大半径に対しては、むしろ外周点火のほうが早く乱れるといったほうがよい。

水素、プロパン火炎の不安定性の当量比に対する依存性から考えて拡散・熱的效果が、主要な原因である。つまり、火炎面に何らかのじょう乱で凸部が生じたとき、燃料気体と酸素の拡散速度の違いにより、局所的に、当量比の偏移が起きる。この偏移が燃焼速度の増加につながる場合には、そのじょう乱は発達し、逆の場合は、減衰する。燃焼速度は温度の関数でもあるので、その凸部からの熱伝導が拡散による集中より早ければ、このような現象は起きない。したがって、この現象を整理するためには、まず、不足成分($\phi \leq 1$ の場合は燃料、 $\phi > 1$ の場合は酸素)の拡散係数と未燃混合気の温度伝導率の比であるルイス数 Le を計算する必要がある。ここで、

$$\alpha \equiv \frac{\lambda}{\rho c_p} \dots\dots\dots (2)$$

$$Le \equiv \frac{\alpha}{D_{12}} \dots\dots\dots (3)$$

であり、 λ , ρ , c_p はそれぞれ混合気体の熱伝導率、密度、定圧比熱、 α は温度伝導率、 D_{12} は、不足成分と最

表2 各混合気の温度伝導率、不足成分の拡散係数およびルイス数(101.325 kPa, 298 K)

Fuel	Equivalence Ratio ϕ	Diffusion Coefficient (mm ² /s)	Thermometric Conductivity (mm ² /s)	Lewis Number
H ₂	0.5	75.959	31.684	0.417
	0.75	75.959	36.095	0.475
	1.0	75.959	40.211	0.529
	1.2	20.471	43.310	2.116
	1.5	20.471	47.662	2.328
	2.0	20.471	54.214	2.648
	2.5	20.471	60.014	2.932
	3.0	20.471	65.180	3.184
CH ₄	4.0	20.471	73.971	3.614
	5.0	20.471	81.185	3.966
	0.8	21.677	21.710	1.002
	0.9	21.677	21.696	1.001
	1.0	21.677	21.682	1.000
	1.1	20.471	21.669	1.059
	1.2	20.471	21.657	1.058
C ₃ H ₈	1.3	20.471	21.645	1.057
	0.8	11.161	20.826	1.866
	0.9	11.161	20.706	1.855
	1.0	11.161	20.588	1.845
	1.1	20.471	20.472	1.000
	1.2	20.471	20.357	0.994
	1.3	20.471	20.244	0.989
	1.4	20.471	20.134	0.984
	1.5	20.471	20.024	0.978
	1.6	20.471	19.915	0.973
1.7	20.471	19.811	0.968	
1.8	20.471	19.707	0.963	

大成分である窒素との2成分拡散係数である。これらの値は、圧力、温度、当量比を与えれば、気体分子運動論⁽⁶⁾より計算ができる。表2に、本実験で用いた各混合気体に対する計算結果を示す。水素の場合、水素-窒素の2成分拡散係数が酸素-窒素のそれを上まわり、かつ、 $\phi \leq 1$ でルイス数が1より小さいので、希薄側で不安定であることがいえる。プロパンの場合は、逆に、 $\phi > 1$ で不安定といえるが、水素ほど、ルイス数が1からずれることがないので、不安定の現れ方は、少ないことが考えられる。一方、メタンは、拡散係数も酸素に近く、ルイス数も各当量比で非常に1に近い。よって、メタン-空気火炎は、拡散・熱的效果については中立安定に近いといえる。表2の値は、すべて、点火前の容器内の熱力学的状態で計算してあるが、実際、乱れが開始するのは、伝ば中であり、温度、圧力も変化している。近似的には D_{12} と α は両者とも $T^{3/2}/P$ に比例して変化するので Le は一定と考えてもよいが、厳密には変化しうる。4・1節で示した熱力学的モデルから、未燃気体の温度が計算されるので、測定圧力を用いて各物性値の値を計算してみると、例えば、水素-空気火炎、中心点火、 $\phi = 1$ について、乱れ開始位置におけるルイス数は0.527で、初期状態とほとんど変わらず、拡散・熱的效果は変化しないと考えられる。

メタンの場合、当量比によらず規則的な乱れが伝ば

中期から終期にかけて発生したが、上述のように、拡散・熱的效果については、中立安定であることから、何らかの他の要因によるものである。Groff は、拡散・熱的效果については、安定な条件においても火炎面を横切る膨張比がある値以上になると、特徴的な多角形のセル構造が火炎面に現れることを示している。Groff の実験装置は、準球形で、球面火炎を正面から観察できる形である。本実験装置では、容器はディスク形なので、伝ば終期では、球面火炎の断面を見る形になっている。図 11(c) の特徴的な形は、正面から見れば、Groff の写真のような多角形のセルになっているものと考えられる。Groff も議論しているように、この不安定構造は、密度の不連続による流体力学的不安定性と考えられる。この不安定性については、容器の大きさが問題になるため、本実験でこれ以上の解析は困難であり、容器の大きさを変えて実験する必要がある。水素-空気、プロパン-空気の場合も拡散・熱的效果に対して安定な領域でも、発生は遅れるものの乱れは存在している。そして、そのときの ra は、メタン-空気火炎に近い値をもつ。つまり、定容容器内の火炎面の不安定性の原因については、(1) 拡散・熱的效果、(2) 流体力学的効果の二つが存在し、 $Le=1$ に近いとき、火炎伝ばにつれて(2)による乱れが出現する。 $Le=1$ では、(1)により乱れが早く発生、成長し、逆のとき抑制される。

5. 結 論

直径 100 mm, 高さ 30 mm のディスク形定容容器を

用い、水素-空気、メタン-空気、プロパン-空気の各混合気体中の火炎伝ばについて、圧力測定とシュリーレン撮影により、火炎面の不安定性を観察し、以下の結論を得た。

燃料が水素、プロパンの場合、拡散・熱的效果によりルイス数が 1 より小さいとき乱れの発生成長が促進され、1 より大きい場合抑制される。メタンの場合、ルイス数が 1 に近いため流体力学的効果による乱れが顕在化する。

最後に、本実験の遂行にあたり、熱心に協力された蔡和彦、藤澤 伸行の両君(当時、本学学部生)、論文の作成に協力された 品君(本学大学院生)に心から感謝申し上げる。

文 献

- (1) Markstein, G. H., *J. Aeronaut. Sci.*, 18(1952), 199.
- (2) Sivashinsky, G. I., *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15(1983), 179.
- (3) Groff, E. G., *Combust. Flame*, 48(1982), 51.
- (4) Gonzalez, M., ほか 2 名, *Combust. Flame*, 88(1992), 201.
- (5) 疋田・秋田, 燃焼概論(1971), 196, コロナ社.
- (6) Strehlow, R. A., *Combustion Fundamentals*, (1984), 106, McGraw-Hill.
- (7) Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, (1987), 381, Academic Press.
- (8) Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F. and Bird, R. B., *Molecular Theory of Gases and Liquids*, (1954), 514, John Wiley & Sons.