定容容器内伝ば火炎面の不安定性* (不活性気体による希釈の影響)

蔡 品^{*1}, 大八木 重治^{*2}, 吉 橋 照 夫^{*3}

Instabilities of Flame Front Propagating in a Constant-Volume Chamber (Effects of Dilution by Inert Gases)

Pin CAI, Shigeharu OHYAGI and Teruo YOSHIHASHI

The present work is a continuation of our previous study to obtain a fundamental understanding of instabilities of a flame front propagating in a constant-volume combustion chamber. In this report, attention was focused on effects of dilute gases on this phenomenon. Experiments were conducted in a disk-shaped constant-volume chamber of 100 mm diameter and 30 mm height with a window. The flames were visualized by instantaneous schlieren photography. It was found that the instabilities arise for lean hydrogen/oxygen mixtures diluted with argon as well as helium, which can be explained as thermodiffusive effects. For methane or propane/oxygen mixtures, the diluent plays an important role. Using argon as a diluent renders the flame unstable in accord with the thermodiffusive theory, while using helium renders it stable which cannot be explained by this theory. For these mixtures diluted by helium, initial disturbances might be suppressed by viscosity.

Key Words: Combustion Phenomena, Premixed Combustion, Gaseous Fuel, Flame Instabilities, Preferential Diffusion, Inert Gases

1. 結 論

予混合火炎面に自発的に生じる不安定性の原因については、拡散・熱効果、流体力学的原因、重力による影響が考えられる。従来、これら火炎面の不安定性に関する研究は、容器壁の影響が少ない大きな容器を用い、自由膨張する球形火炎⁽¹⁾や、大きな径をもつ管内を伝ばする平面火炎を対象として行われてきた。一方、内燃機関など実用的燃焼器では、火炎と壁面との干渉が必ず生じ、壁面付近の消炎や壁熱伝達に関連した多くの研究がされている。また、容器内では、対向する壁の影響で火炎が大きくひずむ「チューリップ火炎」と呼ばれる現象が起きる場合もある⁽²⁾。前報⁽³⁾で著者らは、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、シュリーレン写真により、火炎面の形状を観察し、不安定を生じる条件、不安定性の出現位置など容器内の火炎の挙動について考察し、拡散・熱効果による不安定性

の出現と対向壁面付近での不安定性の出現を示した。本報では、引き続き、酸化剤を空気から、酸素を分子量や温度伝導率の値の大きく違う Ar, または He で希釈したアルゴン疑似空気($O_2 + 3.76 \text{ Ar}$), または、ヘリウム疑似空気($O_2 + 3.76 \text{ He}$)に変え、火炎面上に現れるセル状乱れの発生に対する影響を検討する。

2. 実 験

実験装置全体は前報と同じものを用い、定容容器、配管系、圧力測定系、点火系、写真撮影装置から構成されている。図1に実験に用いた定容容器の概略を示す。容器は直径 100 mm, 幅 30 mm の燃焼室をもち、

図1 定容容器

* 原稿受付 平成6年4月15日。

*¹ 東京大学大学院 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

*² 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保225)。

*³ 埼玉大学工学部。

外周には点火プラグ、給排気孔および圧力変換器が取り付けられている。可視化用に、両側面は厚さ 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。容器は側面を鉛直にし、点火プラグを真上にして実験室内に設置される。シュリーレン写真は発光時間 2 μ s のキセノンフラッシュランプ、焦点距離 2 m の 2 枚の凹面鏡、ナイフエッジおよび 35 mm カメラを用いて撮影する点火やカメラの作動時間、圧力の測定開始時間は 3 チャンネルディレイ装置(精度 1 μ s)を介して設定する。

実験条件は表 1 に示す。容器内初期圧力は 101.3 kPa に固定し、初期温度は室温(約 298 K)である。燃料は水素、メタン、プロパンの 3 種類で、酸化剤は酸素をモル比で 3.76 倍のアルゴンまたはヘリウムで希釈したアルゴン疑似空気、ヘリウム疑似空気を用い、当量比は点火可能範囲内で変化させた。実験は各条件につき、最低 6 回行い、点火から燃焼終了までほぼ等間隔になるよう撮影時期を変化させ、1 枚ずつの瞬間写真を撮影した。

3. 結果

3.1 最大燃焼圧力と燃焼時間

容器内圧力変化を調べるにより測定した各当量比の最大燃焼圧力と燃焼時間を図 2, 3 にまとめて示す。燃焼時間は点火から圧力が最大値になる時間と定義する。どの燃料に対してもやや燃料過剰側で最大燃焼圧力がピークになり、燃焼時間が最短であることがわかる。また、燃料によらず、アルゴン疑似空気の場合、容器内の最大燃焼

表 1 実験条件(298 K, 101.3 kPa)

Igniter Position	Periphery . Center									
Oxidizer Fuel ϕ	$O_2+3.76Ar$					$O_2+3.76He$				
	Equivalence Ratio									
H_2	0.5	0.65	0.8	1.0	0.35	0.5	1.0	3.0	4.0	
	2.0	3.0	4.0	5.0						
CH_4	0.6	0.8	1.0	1.1	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	
	1.2	1.3	1.5							
C_3H_8	0.6	0.8	1.0	1.1	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	
	1.2	1.5	2.0

(a) 水素系

(b) メタン系

(c) プロパン系

図 2 最大燃焼圧力(ゲージ圧)の当量比による変化

(a) 水素系

(b) メタン系

(c) プロパン系

図 3 燃焼時間の当量比による変化

圧力が最も大きく、ヘリウム疑似空気では燃焼終了時間が早くなることがわかる。単原子気体であるアルゴンまたはヘリウムは、二原子の窒素より、モル定容比熱が小さいため、一定の燃料の発熱量に対して、温度の上昇が大きく、最大燃焼圧力が高い。また、温度の高いほうが反応速度が速く、伝ば速度も速い。ゆえに、燃焼時間は窒素より、アルゴンまたはヘリウムのほうが短い。アルゴンとヘリウムと比較すると、ヘリウムの方が温度伝導率が大きいため、熱損失が大きいので、アルゴンよりヘリウムのほうが燃焼圧力が低くなる。しかし、燃焼速度は温度伝導率の1/2乗に比例するので、温度伝導率大きいヘリウムのほうが燃焼時間が短い。

3・2 シュリーレン写真 前報⁽³⁾で酸化剤が空気である場合について述べたが、水素は希薄側で、プロパンは過剰側で拡散・熱的效果により、不安定になりやすい。メタンはレイス数が各当量比で非常に1に近いので、当量比による依存性は少なく一様に対向する壁面付近で流体力学的効果による規則的な不安定現象が現れてくることが観察された。本報では、緒言で述べたように酸化剤としてアルゴン疑似空気またはヘリウム疑似空気をを用いた場合について、瞬間シュリーレン写真を用いて、火炎面の不安定性について調べた。

写真は一条件につき時間を追って最低6枚撮影し、火炎伝ばの非定常過程をとらえている。ここでは、混合気の違いによる火炎面の状況の違いを検討するため、火炎伝ば中期から後期にかけてのほぼ同じ火炎位置での瞬間シュリーレン写真を例にとり各混合気体の当量比の違いについて比較することにする。

図4(a)～(c)に水素/アルゴン疑似空気のシュリーレン写真を示す。図4(a)は当量比0.5、図4(b)は1.0、図4(c)は4.0の写真である。燃料希薄の0.5の場合、火炎面には未燃側に凸で既燃側にカスプをもつ大規模なしわ状の乱れが発生している。これらの写真は火炎面を横から見たものであり、前から見たらどのような構造かは不明である。火炎伝ば初期段階の火炎がガラス窓に接触する前の写真から判断してセル状の構造をなしているものと考ええる。量論比ではセルは細くなり、燃料過剰側ではほとんど乱れのない火炎面が観察される。いずれの当量比においても見掛け上の火炎帯厚みは比較的厚く火炎面全体が光軸方向(紙面に垂直な方向)に湾曲しているものと思われる。希釈気体をヘリウムに変えると、図5(a)～(c)に示すように、セルの大きさがアルゴンに比べて小さく、形状も規則的でより穏やかなものであることがわかる。既燃部分に見える多数の黒い点はガラス面上に凝縮し

(a) 当量比 0.5, 点火後 9.0 ms

(b) 当量比 1.0, 点火後 3.8 ms

(c) 当量比 4.0, 点火後 8.0 ms

図 4 水素/アルゴン疑似空気火炎のシュリーレン写真

(a) 当量比 0.5, 点火後 6.5 ms

(b) 当量比 1.0, 点火後 3.2 ms

(c) 当量比 4.0, 点火後 9.0 ms

図 5 水素/ヘリウム疑似空気火炎のシュリーレン写真

(a) 当量比 0.6, 点火後 40 ms

(b) 当量比 1.0, 点火後 14 ms

(c) 当量比 1.5, 点火後 35 ms

図 6 メタン/アルゴン疑似空気火炎のシュリーレン写真

(a) 当量比 0.8, 点火後 15.5 ms

(b) 当量比 1.0, 点火後 11 ms

(c) 当量比 1.2, 点火後 13 ms

図 7 メタン/ヘリウム疑似空気火炎のシュリーレン写真

(a) 当量比 0.6, 点火後 30 ms

(b) 当量比 1.0, 点火後 12 ms

(c) 当量比 1.5, 点火後 16 ms

図 8 プロパン/アルゴン疑似空気火炎のシュリーレン写真

(a) 当量比 0.9, 点火後 13 ms

(b) 当量比 1.0, 点火後 10 ms

(c) 当量比 1.5, 点火後 14 ms

図 9 プロパン/ヘリウム疑似空気火炎のシュリーレン写真

図 10 燃料・当量比・希釈気体による不安定性発生位置の変化

た水滴と思われる。メタン/アルゴン疑似空気火炎のシュリーレン写真を図 6 (a)～(c) に示す。水素火炎に比べて全体的に見掛け上の火炎帯厚みが厚く、光軸方向の湾曲が大きい。乱れは水素と同じく希薄側で顕著であるが、縦(進行)方向に細かく(1 mm 程度)長い裂け目のような形状である。燃料過剰の場合は湾曲は大きい乱れは発生しない。前報⁽³⁾で示したメタン/空気の場合、当量比によらず縦方向に粗く(1 cm 程度)長い規則的な裂け目が生じたのに比べて裂け目の間隔(セルの大きさ)、規則性、当量比依存性において違いが見られる。一方、希釈気体がヘリウムの場合、図 7 (a)～(c) に示すように当量比によらず乱れは発生せず、光軸方向の湾曲のみ観察される。また、シュリーレン像が層をなしていることから火炎面が光軸方向のセルに分割し、いわゆるチューリップ火炎を上から見た形になっているものと考えられる。図 8 (a)～(c) はプロパン-アルゴン疑似空気火炎であるが、燃料過剰側で乱れが大きく顕著に現れる。これは、前報⁽³⁾の空気の場合と同様であるが、乱れのスケールは大きい。図 9 (a)～(c) のプロパン-ヘリウム疑似空気火炎の場合、メタンと同様に光軸方向の湾曲のみで伝ば方向への分裂は観察されない。

これらの写真は伝ば中後期のほぼ同じ火炎位置で比較したものであるが、前述のように現象は非定常であり、この写真に乱れがとらえられていなくてもさらに伝ばすると乱れが発生したり、その逆の場合もある。図 10 (a)～(c) に各混合気体の火炎上に乱れの発生する火炎位置 r_i を当量比に対してプロットした。前報⁽³⁾の空気火炎のデータも再プロットした。全般的にヘリウム疑似空気を酸化剤に用いた火炎は乱れ開始位置が他に比べて遅く、安定な火炎であること、アルゴン疑似空気と空気は燃料によって乱れやすさが異なり、水素は希薄側でアルゴン疑似空気が、プロパンは

過剰側で空気が乱れやすいことがわかる。また、基本的には酸化剤をアルゴン疑似空気、または、ヘリウム疑似空気に変えても水素は希薄側でプロパンは過剰側で速く乱れ、メタンは当量比によらずほぼ一定の場所で乱れが発生することが明らかとなった。

4. 考 察

火炎面上に発生する乱れの発生原因の一つとし、拡散・熱効果により生じる不安定が知られている⁽⁴⁾。ここで、拡散・熱効果とは、以下のような現象をいう。層流火炎面上に何らかの原因で生じたじょう乱による凸部に、未燃混合気のうち拡散係数の大きな成分が集中する。この成分が不足成分の場合、局所的に量論比に近い部分ができ、燃焼速度が高くなり、凸部はさらに成長する。逆にこの成分が過剰成分であればさらに過剰となり、凸部は減衰する。また、凸部からの熱伝導による放熱の速さが拡散のそれより速ければ、前者のようにはならない。つまり、火炎面の不安定が生じる条件としては不足成分の拡散係数が過剰成分のそれより大きくかつ未燃ガスのルイス数が 1 より小さいことである。前報⁽³⁾と同様に気体分子運動論⁽⁵⁾に基づき代表的な混合気の温度伝導率、混合気中にある最大成分に対する不足成分の二成分拡散係数およびルイス数を計算し、表 2 に示す。当量比 ϕ が 1 の場合は希薄側として不足成分を定義したがこれは、各燃料とも最大燃焼速度を示す当量比はやや燃料過濃側にあるからである。水素では希薄側で上述の条件を満たし不安定性が強くプロパンでは逆になることは、希釈気体をアルゴン、ヘリウムに変えても変わらない。一方、メタンの場合、空気では、当量比によらずほとんど 1 に近く拡散・熱効果による乱れは発生しないことを示唆しているが、アルゴン疑似空気では希薄側、ヘリウム疑似空気では過濃側が不安定領域と考えられる。シュリーレン写真

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(298 K, 101.3 kPa)

Fuel	Oxidizer	ϕ	Thermometric Conductivity α (mm ² /s)	Diffusion Coefficient D_{12} (mm ² /s)	Lewis Number $Le = \alpha / D_{12}$
H ₂	O ₂ + 3.76 N ₂	0.5	31.684	75.959	0.417
		1.0	40.211	75.959	0.529
		5.0	81.185	20.471	3.966
	O ₂ + 3.76 Ar	0.5	30.830	79.128	0.390
		1.0	39.499	79.128	0.499
		5.0	79.532	19.376	4.105
	O ₂ + 3.76 He	0.5	74.697	154.78	0.483
		1.0	80.448	154.78	0.520
		4.0	103.479	73.949	1.399
CH ₄	O ₂ + 3.76 N ₂	0.8	21.710	21.676	1.002
		1.0	21.682	21.676	1.000
		1.3	21.645	20.471	1.057
	O ₂ + 3.76 Ar	0.8	20.209	20.976	0.963
		1.0	20.137	20.976	0.960
		1.5	19.991	19.376	1.032
	O ₂ + 3.76 He	0.8	62.401	67.617	0.923
		1.0	61.054	67.617	0.903
		1.2	59.792	73.949	0.809
C ₃ H ₈	O ₂ + 3.76 N ₂	0.8	20.826	11.161	1.866
		1.0	20.588	11.161	1.845
		1.5	20.204	20.471	0.978
	O ₂ + 3.76 Ar	0.8	19.224	10.143	1.895
		1.0	18.919	10.143	1.865
		1.5	18.213	19.376	0.940
	O ₂ + 3.76 He	0.8	60.935	41.894	1.455
		1.0	59.246	41.894	1.414
		1.5	55.423	73.949	0.749

では、水素についてはアルゴン、ヘリウムともに希薄側で乱れ、メタンではアルゴン疑似空気の場合希薄側で進行方向の分裂が見られるがヘリウム疑似空気では当量比によらず光軸方向の乱れのみである。プロパンでもアルゴン疑似空気は燃料過濃側で乱れるが、ヘリ

ウム疑似空気では光軸方向の乱れのみ出現している。したがって、空気とアルゴン疑似空気の場合は、拡散・熱効果で説明可能であるが、ヘリウム疑似空気の場合は不安定が生じてよい条件でも安定である。これは、ヘリウムの場合、温度伝導率、拡散係数が他に比べて大きく、動粘性係数も大きいため、伝ば速度の速い水素を除いて、代表的なレイノルズ数が小さく、流体力学的乱れが発生し難いためと考えられる。つまり、乱れはまず流体力学的原因で発生し、伝ばにより成長するか減衰するかを拡散・熱効果が決定するものと考えられる。

5. 結 論

定容容器内伝ば火炎面の不安定性と燃料、希釈気体、当量比との関係について実験的に調べた結果以下のことが明らかになった。

(1) アルゴンを希釈気体とした場合、窒素の場合と同様に、拡散・熱効果による予測どおりに、水素、メタンとも燃料希薄側で不安定であり、プロパンは燃料過濃側で不安定であることがわかった。

(2) ヘリウムを希釈気体とした場合、水素希薄側を除いて安定であった。このことは、拡散・熱効果による乱れの成長には流体力学的な乱れの発生が先行しなければならないことを示唆している。

文 献

- (1) Groff, E. G., *Combust. Flame*, **48**(1982), 51-62.
- (2) Gonzalez, ほか 2 名, *Combust. Flame*, **88**(1992), 201-220.
- (3) 大八木・ほか 2 名, *機論*, **60**-569, B(1994), 300-307.
- (4) Herzberg, M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**(1989), 203-239.
- (5) Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F. and Bird, R. B., *Molecular Theory of Gases and Liquids*, (1954), 514, John Wiley & Sons.