伸長を受けるメタン・プロパン混合燃料予混合炎の消炎特性*

北野 三千雄^{*1}, 大須賀 貴則^{*2}Extinction Characteristics of Stretched Premixed Flames
of Methane-Propane Mixtures

Michio KITANO and Takanori OHSUKA

Concerning the stretched cylindrical premixed flames formed in a radial-flow nozzle burner, effects of fuel mixing between methane and propane were examined on the extinction characteristics, such as the velocity gradient (stretch rate) and flame diameter at the state of extinction and flame temperature variations with the velocity gradient. These fuels were used because they have been known to show different behavior to the extinction due to flame stretch. The results showed that the characteristics were not linearly related with the volume fraction of each component fuel, but inclined to be weighted with propane and that at the stoichiometric condition some mixed fuels had a stronger resistibility to flame extinction than the pure component fuel. To explain the results, theoretical analysis based on the flame sheet model was carried out for the investigation of the effects of stretch, fuel mixing, Lewis number and preferential diffusion on the flame temperature which is closely related to the extinction phenomena.

Key Words: Combustion, Extinction, Fuel Mixing, Stretched Premixed Flame, Lewis Number, Preferential Diffusion

1. 緒 言

実用燃料の多くは多成分燃料であるが、例えば二成分混合燃料を考えた場合、その燃焼特性が混合割合に対して線形的な変化を示すことはまれで、どちらかの成分に重みがかかったり、場合によっては極大値あるいは極小値をもつこともある。このような現象を巧みに利用すれば、性質の異なる燃料を混合することにより燃焼特性の改善を図ることができる。この意味において、さまざまな燃焼特性に関する燃料混合の影響とその機構を調べておくことは重要である。このような観点に立って、本研究では伸長を受ける予混合炎の消炎特性に着目した。

近年、乱流予混合炎を層流火炎子(laminar flamelet)の集合体ととらえ、火炎子の特性から乱流炎の構造・挙動を説明しようとする考えが提示され⁽¹⁾⁽²⁾、伸長あるいは収縮といったひずみを受ける火炎や、大きな曲率をもつ火炎の研究が盛んに行われている^{(3)~(8)}。ひずみを受ける火炎では火炎帯と流線とが交せず、流管壁を通しての熱や物質の出入りが生ずる

ため、熱と反応物質あるいは反応物質相互の拡散速度に差があるときには、いわゆるルイス数効果あるいは選択拡散効果により火炎特性が変化する^{(9)~(12)}。伸長炎を対象としたこれまでの実験的研究により、空気を酸化剤とした場合、拡散係数の大きなメタンとこの小さなプロパンでは、希薄側および過濃側において異なったタイプの消炎を生ずること⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、また、曲率をもつ火炎では上記の効果が拡大されること⁽¹⁵⁾が明らかになっている。

そこで本研究では、半径流ノズルバーナにより得られる円筒状の伸長火炎を用いて、消炎特性が大きく異なるメタンとプロパンを混合して混合燃料としたときの、混合割合に対する消炎限界伸長率(速度こう配)、消炎時火炎直径、火炎温度などの変化を測定し、また、火炎面モデルに基づく解析も行い、燃料混合の影響を移動速度論的立場から考察した。

2. 実験装置および方法

図1に本実験で用いたバーナの構造および拡大した測定部を示す。混合気は外周より整流円筒(焼結金属製)を通して供給され、流出部(幅 $W=10$ mm, 直径 $D=12$ mm)から流出するが、高速においても層流状態が維持されるよう流路断面はノズル形状をしている。

* 原稿受付 平成6年5月16日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} (株)本田技術研究所朝霞研究所 (〒351 朝霞市泉水3-15-1)。

図1 実験装置

混合気点火すると、中心軸方向に伸長する真円度のよい円筒状炎が形成される⁽¹⁵⁾。ノズルから流出した混合気の一部は未燃のまま排出され、下流で燃えて火炎の尾を形成し、これがバーナを加熱したり火炎を不安定化させたりするので、これを防止するため混合気流の周りから窒素を流している。混合気の流出速度を増大させ伸長率を上げてゆくとやがて消炎するが、このときの予熱帯前縁付近における半径方向速度の半径方向こう配(の絶対値) g を求め消炎伸長率に対する指標値とした。速度場の測定にはLDVを用いているが、方法等については既報⁽¹⁶⁾と同じであるので、ここでは省略する。火炎温度の測定には、軸方向に支持された線径100 μm のPtRh(20%)-PtRh(40%)の熱電対を用いた。ただし、指示温度に対する熱伝導やふく射による損失の補正は行っていない。

3. 実験結果および考察

以下ではおもに、希薄側、過濃側の代表として選んだ当量比 $\phi=0.7$ と1.3、および $\phi=1.0$ の三つの当量比について実験し検討しているが、燃料がメタンあるいはプロパンのみの場合の、これらの ϕ における混合気の熱拡散率 α 、拡散係数 D_i ($i=m, p, o$ はそれぞれメタン、プロパン、酸素を表す)、ルイス数 Le_i ($=\alpha/D_i$)を算出(いずれも25°C, 1 atmにおける値)し⁽¹⁷⁾、表1に示した。

3.1 消炎限界速度こう配 図2は混合燃料中のメタンの体積割合 V_m [%]を変えたときの当量比 ϕ と消炎限界速度こう配 g_{ext} の関係を示す。 g_{ext} は流れの伸長(正のひずみ)に対し、火炎がどこまで耐えられるかを示しており、火炎の強度を表している。図2には、Yamaoka-Tsujii⁽¹⁸⁾により測定されたメタン-空気炎およびプロパン-空気炎の燃焼速度 S_u の変化も示しているが、 S_u は混合気の総括的反応速度の平方根にほぼ比例することから、伸長を受けない元来の状態で

表1 熱拡散率、拡散係数およびルイス数

ϕ	Fuel	α	D_m (Le_m)	D_p (Le_p)	D_o (Le_o)
0.7	M	0.217	0.220 (0.985)		0.208 (1.04)
	P	0.203		0.116 (1.74)	0.201 (1.01)
1.0	M	0.217	0.220 (0.987)		0.209 (1.04)
	P	0.198		0.116 (1.70)	0.199 (0.995)
1.3	M	0.217	0.220 (0.989)		0.209 (1.04)
	P	0.194		0.116 (1.67)	0.197 (0.985)

M: Methane P: Propane α : Thermal diffusivity (cm^2/s)
 D_i : Diffusion coefficient (cm^2/s) Le_i : Lewis number

図2 消炎時速度こう配および燃焼速度の変化

の火炎強度を表しているとみなすことができる。これによると、 S_u は ϕ によらずプロパン炎のほうが多少大きく、したがって火炎強度はメタン炎よりも強いことになるが、両者の曲線形状は類似して火炎強度を最大とする ϕ の位置はともに1.05~1.10の間にある。これに対し、伸長に対する火炎強度の曲線 g_{ext} は、 S_u 曲線をメタン炎では希薄側、プロパン炎では過濃側にシフトした形になっており、希薄側では伸長を受けない場合とは逆にメタン炎のほうが強く、また、過濃側では差が拡大し著しくプロパン炎のほうが強い。混合した場合については、 $V_m=50$ についての曲線が、 $\phi=1$ 付近の一部を除き二つの成分燃料に対する曲線の間にはあるものの、プロパン炎のそれにより近いことから、混合燃料での火炎強度がプロパンに重みのかかった特性を示すことがわかる。

上述のシフト量がどの程度かをみるため、 g_{ext} を最大とする当量比 $\phi_{p,g}$ の V_m による変化を図3に示した。図3には、メタン炎およびプロパン炎の S_u を最大とする当量比 $\phi_{p,s}$ も●で示してある⁽¹⁹⁾。混合時には適当なデータが見つからなかったため、これら2点を直線で結んでいるが、2点の値はほぼ等しく、 $\phi_{p,s}$ の V_m に対する変化は少ないと考えられる。これに対し、 $\phi_{p,g}$ はプロパン炎では過濃側、メタン炎では希薄

図3 火炎強度を最大とする当量比の変化

図5 燃焼速度および断熱火炎温度の変化

図4 消炎時速度こう配の変化

側にかなり移動しており、 V_m の増大とともに過濃側から希薄側まで大きく変化する。このように、伸長を受けるときとそうでないときは火炎強度を最大とする ϕ の値に大きな差を生じる。

図4は $\phi=0.7, 1.0$, および 1.3 における V_m と g_{ext} の関係を示す。いずれの ϕ についても g_{ext} の変化は V_m に対して線形的ではない。 $\phi=0.7$ と 1.3 をみると、全体の変化量に対する $V_m=0$ 近くでの変化量は小さく、プロパン依存性の強い曲線になっている。また、 $\phi=1.0$ の場合には、メタン、プロパン単独の場合よりも g_{ext} が大きくなる V_m の領域が存在し、混合により伸長に対する火炎強度が強められていることがわかる。

前述のように S_u は伸長しない場合の火炎強度と考えられるので、 g_{ext} との比較のため、Spaldingによる混合則⁽²⁰⁾⁽²¹⁾に基づいて各 ϕ における混合燃料の S_u を計算で求め、図5に示した。メタン炎、プロパン炎の S_u には図2の測定値を採用し、混合則を適用するのに必要な S_u の火炎温度依存についてはKaskan⁽²²⁾のデータ(あるいは内挿または外挿値)を用いた。両燃料の S_u に大きな差はないが、いずれの ϕ についてもプロパン炎のほうが大きく、 S_u は V_m の増大とともに単調に減少してゆく⁽²³⁾。図5中の破線は化学平衡計算

により求めた断熱火炎温度 T_{ad} を表しているが、 S_u と T_{ad} の変化はよい対応を示している。図4を図5と比較すると、図2で述べたことと対応して、 $\phi=0.7$ では関係が逆転してプロパン炎のほうが弱くなり、 $\phi=1.3$ では右下がりの変化が拡大されている。また、 $\phi=1.0$ に関しての g_{ext} は、 S_u や T_{ad} にはみられない極大値をもっており、 $\phi=0.7$ や 1.3 とは異なった因子が消炎に働いていることを示唆している。

以上述べてきた現象は次のように説明される⁽¹³⁾⁽²⁴⁾。伸長する流れ場に安定する火炎では流線と火炎帯とが直交せず、流管壁を通しての熱や物質の出入りを生ずるため、熱と反応物質あるいは反応物質相互の拡散速度に差があるときには、その影響(いわゆるルイス数効果および選択拡散効果)を受け、伸長しない火炎とは異なった特性を示す。影響の大きさは前者はルイス数 $Le_i=a/D_i$ 、後者は $D_i/D_j (=Le_j/Le_i)$ により評価される。 $Le_i < 1$ の場合には、伸長による反応物質 i の流入速度の増大(したがって発熱速度の増大)が熱流出速度の増大を上回り、火炎温度は上昇し火炎は強化される。ただし、伸長率の増大とともに強化され続けるのではなく、反応速度の有限性のため、伸長率がある程度以上になると、増大する反応物質の流入速度に反応が追いつけなくなって不完全燃焼状態となり火炎温度は低下しはじめ、さらに伸長率を増大してゆくとついには消炎する。 $Le_i > 1$ のときにはこれとは逆で、伸長は火炎温度を低下させ火炎を弱化する。反応物質 i としては現象に支配的な混合気中の不足反応物質を考え、十分希薄あるいは過濃な混合気では、それぞれ燃料、酸素を基準とするが、量論比近くの混合気では、 D_i/D_j の大きさによっては、初期混合気中の不足反応物質が反応域での不足反応物質とはならない場合もあり、ルイス数効果に加えて選択拡散効果も考える必要がある⁽¹²⁾⁽²⁴⁾。その際、単成分燃料では反応物質は燃料 f と酸素 o だけで D_f/D_o が影響因子となるが、

ここで扱っている二成分混合燃料の場合には D_m/D_o , D_p/D_o の二つとなり、しかも、この拡散係数比がメタンでは1より大、プロパンでは1より小(表1)であり、選択拡散効果が逆に現れるため、混合時におけるその影響は単純ではなく、図4で示されたような極大値をもつ原因になっている。

このような点を念頭において表1の Le_i と対応させて考えると、 $Le_i < 1$ となる希薄メタン炎、過濃プロパン炎では伸長により火炎が強化され、 $Le_i > 1$ となる過濃メタン炎、希薄プロパン炎では逆に弱化する。これに加えて、 $\phi=1$ 付近においては、酸素より拡散係数が小さいプロパンでは、反応域の組成が希薄側に移行するため不足反応物質はプロパンとなり、これに基づくルイス数効果($Le_p > 1$)により火炎強度が弱められ、また、メタン炎では逆に過濃側に移行し、同様の効果(この場合は $Le_o > 1$)により弱められる。これらの結果、 g_{ext} を最大とする当量比 $\phi_{p,g}$ の値は、伸長や火炎曲率の影響を受けない状態で測定される S_u に対する $\phi_{p,s}$ よりも、プロパン炎では過濃側に、メタン炎では希薄側にずれる。特に、酸素に比べて燃料の拡散係数がかなり小さいプロパン炎では、その効果が強く現れる。

3・2 消炎時火炎直径 図6は、 V_m を変えたときの当量比 ϕ と消炎時火炎直径 d_{ext} の関係を示す。メタン炎とプロパン炎では $\phi=1$ をはさんで対照的な変化

図6 消炎時火炎直径の変化

を示している。すなわち、メタン炎の場合、過濃側では火炎直径が大きい状態で、また、希薄側ではかなり小さくなってから消炎するのに対し、プロパン炎ではこれとまったく逆な状態で消炎している。この現象はルイス数効果による火炎の強化あるいは弱化と関係していて、強化される場合には直径が小さくなるまで火炎は維持され、弱化の場合には大きい直径で消炎する⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。混合時の $V_m=50$ の場合をみると、曲線はプロパン炎のそれに近く(特に過濃側で顕著)、 d_{ext} に関してもプロパンの影響が強く現れている。

なお、ここでは伸長の効果を速度こう配 g で評価しているが、扱っている円筒状火炎での火炎伸長率 ϵ は火炎曲率の影響も受け、予熱帯前縁では $\epsilon = g + |u_1|/r_1$ (ただし、 r_1 , u_1 は予熱帯前縁の半径位置およびそこにおける半径方向速度)となる⁽²⁵⁾。測定によると消炎時の u_1 は ϕ が同じであれば V_m によりあまり変化しないので、仮に r_1 として図6の d_{ext} の半分を用い、これによる火炎伸長率 ϵ_{ext} で火炎強度を評価すると、 d_{ext} の小さい希薄メタン炎および過濃プロパン炎では、この大きい過濃メタン炎、希薄プロパン炎に比べ第2項の寄与が大きくなるため、 ϵ_{ext} で表した火炎強度と ϕ の関係は図2で述べた傾向をいっそう顕著なものとする。

3・3 火炎温度 図7に、それぞれの ϕ についての、速度こう配 g に対する火炎温度 T_f (ノズル部の幅方向中心から10 mm下流における中心軸上の温度とした)の変化を示す。図7中の縦線は消炎限界を表す。 $\phi=0.7$ および 1.3 の場合、メタン炎とプロパン炎では異なった傾向(g とともに上昇、または減少ないしほぼ一定)を示し、ルイス数効果による火炎の強化あるいは弱化に対応した変化が現れている。ただし、強化されるときには、消炎に至る前に前述の不完全燃焼が原因の急激な温度低下がみられる。混合した場合は、混合割合に応じて成分燃料単独の場合の中間的傾向を示すが、プロパンに重みをもった変化となっている。一方、 $\phi=1.0$ の場合にはメタン炎とプロパン炎で

図7 速度こう配による火炎温度の変化

類似の変化を示すが、 $V_m=50$ の混合燃料の T_f は、低い g では両成分燃料の中間にあるものの、 g の増加とともに T_f の高いプロパン炎に近づき、やがてこれよりも高い値をとるようになる。 $\phi=1$ 付近では選択拡散効果が大きく、反応域での組成がメタン炎では過濃側、プロパン炎では希薄側に移行するため、いずれも成分燃料単独では火炎が弱められるが、 $V_m=50$ の混合燃料ではそれらの作用がちょうど相殺される形となり、二成分とも酸素との間で過不足の少ない、あるいは過不足を生じない量論混合気反が行われるためと考えられる。

4. 火炎面モデルによる解析

ポテンシャル流れの場合($u=-gr, v=2gz$)に形成される円筒状火炎を図8に示すような火炎面モデルを用いて解析し、これに基づいて実験結果を考察する。このモデルでは消炎現象は解析できないが、図7でみられるように伸長に対する火炎強度と火炎温度とはよい対応を示すので、火炎温度の伸長による変化がわかれば、火炎強度の定性的予測は可能であると考えられる。支配方程式はすでに報告されている単一燃料の場合⁽¹²⁾を二成分燃料に拡張することで得られ、最終的には次の2式(火炎面でのエネルギーおよび成分の保存式)を解くことにより火炎温度 T_f が求められる。

図8 解析モデル

$$(T_f - T_\infty)F(X_f) = (H_m/C_p)(Y_{m,\infty} - Y_{m,r})F(X_m) + (H_p/C_p)(Y_{p,\infty} - Y_{p,r})F(X_p), \dots (1)$$

$$(Y_{o,\infty} - Y_{o,r})F(X_o) = r_{st,m}(Y_{m,\infty} - Y_{m,r})F(X_m) + r_{st,p}(Y_{p,\infty} - Y_{p,r})F(X_p) \dots (2)$$

ここに、

$$X_f = \xi_r^2, X_i = Le_i \xi_r^2, \xi_r = S/\sqrt{2ag} \dots (3)$$

$$F(X) = -\exp(-X)/XE_i(-X) \dots (4)$$

で、 T は温度、 Y は質量分率、 H は燃焼熱、 C_p は定圧比熱、 Le はルイス数、 S は火炎位置における速度(燃焼速度に相当)、 a は熱拡散率、 g は速度こう配(火炎伸長率 $=2g$)、 r_{st} は量論酸素燃料比、添字 m, p, o はそれぞれメタン、プロパン、酸素、 r は火炎面位置、 ∞ は無限上流における値を表す。また、 E_i は指数積分関数である。火炎面での条件

$$Y_{i,r}Y_{o,r} = 0 \quad (i=m, p) \dots (5)$$

から、火炎面において希薄状態($Y_{m,r}=Y_{p,r}=0$)の場合には直ちに T_f を決定できるが、過濃状態($Y_{o,r}=0$)の場合には、不足する酸素を二つの燃料成分が同時に消費するので、その消費速度の比を与えてやる必要がある。ここでは、火炎面での組成と同じ燃焼ガス組成を与える混合気を考え、この混合気の非伸長時の T_f が、化学平衡計算による断熱火炎温度 T_{ad} に等しくなるように消費比率を決定した。なお、 $H_{m,p}/C_p$ の値は、各当量比におけるメタン炎およびプロパン炎の非伸長時の T_f が T_{ad} となるように選んだ。 Le には表1と同じ方法で求めた値を使用している。

図9は V_m をパラメータとする T_f と無次元火炎位置 ξ_r との関係である。 ξ_r は伸長率の平方根に逆比例するので横座標を左にゆくほど伸長率が高くなる。 $\xi_r \rightarrow \infty$ は一次元流炎(非伸長炎)で、このときの T_f は T_{ad} に一致する。メタンまたはプロパンのみの場合、不足反応物質の $Le < 1$ の条件(希薄メタン炎、過濃プロパン炎)では、伸長率の増大とともに T_f は上昇し火炎は強化されるが、 $Le > 1$ (過濃メタン炎、希薄プロパン炎)では逆に弱められる。 $\phi=1.0$ の火炎では、選

図9 伸長率による火炎温度の変化

図 10 混合割合による火炎温度の変化

拡散効果によりメタン炎では過濃側に、プロパン炎では希薄側に移行し、これがルイス数効果と結びついて、ともに T_r は低下する。プロパンの場合、 Le の 1 からのずれが大きいいため伸長の影響が強く現れ、プロパンが不足反応物質となる $\phi=0.7$ および $\phi=1.0$ の T_r の変化は大きい。メタンや酸素が不足反応物質となる条件では、 $Le \sim 1$ であるためその変化は少ない。しかし、いずれの ϕ においても、 $V_m=50$ の曲線からわかるように、混合燃料の T_r はプロパン側に偏る傾向が現れている。図 7 の実験結果と比較すると、不完全燃焼に起因する温度低下の領域を除きおおむねよい対応を示す。

ここで扱っているのは火炎面モデルに基づく簡単化された理論であるので定量的な議論は難しいが、式 (3) の ξ_r において、メタン炎、プロパン炎に対し g , S , a としてそれぞれ図 4, 5 および表 1 の値を用い、消炎時の ξ_r を求めてみると 1.4~3 となる。そこで、 $\xi_r=2$ を消炎限界とみなし、ここにおける V_m と T_r の関係を求めた。結果を図 10 に示す。成分燃料のみの場合、不足反応物質の Le が 1 より小さいか大きいかに応じて T_r は T_{ad} (破線) よりも上昇あるいは低下するが、どの ϕ についても T_{ad} はプロパン炎のほうが高いため、伸長率の増大とともにプロパン炎とメタン炎の T_r の差は、希薄側で縮小または逆転 ($\xi_r=2$ では逆転)、過濃側で拡大する方向にある (図 9)。 $\phi=0.7$, 1.3 についての V_m - T_r 曲線の形状は図 4 で示した V_m - g_{ext} 曲線と類似しており、その変化はプロパン側で小さくメタン側で大きいといった、プロパンに重みのかかったものとなっている。 T_{ad} と V_m の関係も同様であり、このような火炎温度の V_m 依存がそのまま g_{ext} の V_m 依存に反映しているといえる。なお、この重みについての関係は、 Le_m と Le_p の値を取り替えて計算しても変わらないことから、ルイス数の 1 からのずれの大小が原因で生じたものではない。

$\phi=1.0$ については、プロパン炎、メタン炎ともに

図 11 量論混合気における未燃成分の質量分率

図 12 消炎時火炎直径の変化

T_r は T_{ad} よりも低下するが、 $V_m=90$ 付近に弱い極大をもつ曲線が得られた。これも図 4 の変化と定性的に一致するものである。図 11 はこのときの火炎背後での反応物質の質量分率 $Y_{i,r}$ の変化を示す。上流で $\phi=1.0$ の量論混合気であっても、反応物質の拡散速度の違いにより火炎面では過不足を生じ、プロパン炎では酸素が、メタン炎ではメタンが燃え残るが、 T_r が極大となる V_m 付近においては燃料、酸素ともに零で、これらが量論混合気的に過不足なく消費されていることがわかる。

ξ_r = 一定としたときの、火炎温度 T_r が最大となる

当量比 $\phi_{p,T}$ の V_m による変化を図3に破線で示した。 $\phi_{p,T}$ は、非伸長の場合 ($\xi_r = \infty$) には V_m にほとんど依存せず一定で、 S_u を最大とする当量比 $\phi_{p,S}$ に近い変化を示すが、伸長率の増大 (ξ_r の減少) とともにメタン炎では希薄側、プロパン炎では過濃側にずれてゆき、 V_m に対する $\phi_{p,T}$ の変化量はしだいに増す。

半径方向速度 $u = -gr$ から、火炎直径 d は

$$d = 2S/g \dots\dots\dots (6)$$

と表されるので、 g に実測の g_{ext} 、 S に図2および図5の S_u を用いて消炎時火炎直径 d_{ext} を算出してみた。結果を図12に示すが、図6と比較して値は同程度であり、変化の様子もよく一致している。上式より d_{ext} は S_u と g_{ext} の比として表されるから、その変化は ϕ に対する両曲線の相対的形状で決まり、図2で示されるように、 g_{ext} のとがり度が S_u のそれより鋭いメタン炎の場合には d_{ext} は極小値をもつが、 g_{ext} の変化が S_u に比較して希薄側で急、過濃側で緩やかなプロパン炎の場合には d_{ext} は単調減少となる。点の数は少ないが、中間の V_m に対する d_{ext} も、図6と同様にプロパンの重みの強い、また、過濃側で顕著な変化となっている。

以上のように、計算と実験の結果は定性的によく一致しており、火炎面モデルと化学平衡温度を結びつけた解析により求めた、伸長に対する火炎温度の応答から、混合時の火炎強度(限界伸長率)をある程度予測できることが示された。

5. 結 言

半径流ノズルバーナを用いて、伸長時の消炎特性が大きく異なるメタンとプロパンを成分とする混合燃料の円筒状伸長予混合炎をつくり、燃料混合による消炎特性(消炎時の速度こう配、火炎直径、火炎温度)への影響を調べた。その結果について、伸長しない場合の火炎強度の指標値である燃焼速度や、火炎面モデルに基づいた解析による火炎温度の変化と対応づけて考察し、以下の知見を得た。

(1) ルイス数効果、選択拡散効果により、伸長に対する火炎強度が最大となる当量比は、燃焼速度が最大となる当量比よりメタン炎では希薄側、プロパン炎では過濃側に移り、混合時のそれは希薄側から過濃側まで大きく変化する。

(2) 希薄側および過濃側における混合時の火炎温度はプロパンに重みをもち、これが消炎特性のプロパン依存性を強めている。

(3) 量論混合気とした場合、メタンおよびプロパ

ン単独の場合よりも混合したほうが火炎が強化される混合割合が存在する。これは、単独燃料では選択拡散効果により反応域での組成が過濃側(メタン炎)あるいは希薄側(プロパン炎)に移るため火炎が弱化するが、混合時にはその効果が相殺され両成分燃料の間で量論混合気の燃焼が行われるからである。

終わりに、LDV計測に関し助言をいただいた本学流体科学研究所 小林秀昭助教授、実験に協力された工学部 三上光弘技官に謝意を表する。

文 献

- (1) Libby, P. A. and Bray, K. N. C., *Combust. Flame*, **39** (1980), 33.
- (2) Peters, N., *Proc. 21st Symp. (Int.) Combust.*, (1986), 1231.
- (3) Takeno, T. and Ishizuka, S., *Combust. Flame*, **64** (1986), 83.
- (4) Law, C. K., *Proc. 22nd Symp. (Int.) Combust.*, (1988), 1381.
- (5) Asato, K., Kawamura, T. and Ban, T., *Proc. 22nd Symp. (Int.) Combust.*, (1988), 1509.
- (6) Kobayashi, H. and Kitano, M., *Handbook of Heat and Mass Transfer*, 4: Advances in Reactor Design and Combustion Science, (1990), Chapt. 19, Gulf Publishing Company.
- (7) Kobayashi, H. and Kitano, M., *Combust. Sci. Technol.*, **89** (1993), 253.
- (8) Ishizuka, S., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **19** (1993), 187.
- (9) Sivashinsky, G. L., *Acta Astronaut.*, **3** (1976), 889.
- (10) Buckmaster, J., *Proc. 17th Symp. (Int.) Combust.*, (1979), 835.
- (11) Sato, J. and Tsuji, H., *Combust. Sci. Technol.*, **33** (1983), 193.
- (12) Kobayashi, H., Kitano, M. and Otsuka, Y., *Combust. Sci. Technol.*, **57** (1988), 17.
- (13) Tsuji, H. and Yamaoka, H., *Proc. 19th Symp. (Int.) Combust.*, (1982), 1533.
- (14) Sato, J., *Proc. 19th Symp. (Int.) Combust.*, (1982), 1541.
- (15) Kobayashi, H. and Kitano, M., *Combust. Flame*, **76** (1989), 285.
- (16) 小林・ほか2名, 機論, **57-535**, B (1991), 1141.
- (17) Reid, R. C., ほか2名 (平田・ほか4名訳), 気体, 液体の物性推算ハンドブック, 第3版, (1985), 469, マグロウヒルブック.
- (18) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 1883.
- (19) Glassman, I., *Combustion*, 2nd ed., (1987), 461, Academic Press.
- (20) Spalding, D. B., *Fuel, Lond.*, **35** (1956), 347.
- (21) Yumlu, V. S., *Combust. Flame*, **12** (1968), 14.
- (22) Kaskan, W. E., *Proc. 6th Symp. (Int.) Combust.*, (1957), 134.
- (23) 新岡, 東北大学流体科学研究所報告書, **2** (1991), 67.
- (24) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 22nd Symp. (Int.) Combust.*, (1988), 1565.
- (25) Kobayashi, H. and Kitano, M., *Combust. Sci. Technol.*, **75** (1991), 227.