

# 水素予混合乱流火炎の局所燃焼特性 に関する実験的検討

中原真也・城戸裕之・平田 耕一

九州大学 大学院工学研究院

819-0395 福岡市西区元岡744

## An Experimental Study on Local Propagating Characteristics of Hydrogen Premixed Turbulent Flames

Masaya NAKAHARA, Hiroyuki KIDO and Koichi HIRATA

Kyushu University

744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

One of the dangers latent in the hydrogen society is that hydrogen has wider flammable range and smaller minimum ignition energy than hydrocarbons. Elucidating the mechanisms of turbulent combustion and establishing a model of turbulent burning velocity for hydrogen mixtures are expected to be developed for prediction and prevention of serious fire or explosion. In our previous studies, the local burning velocity of turbulent flames could be changed from the laminar burning velocity caused by the preferential diffusion effect, and play an important role in the turbulent burning velocity. The present study is performed to investigate directly the local flame properties of hydrogen premixed turbulent flames at the weak turbulence condition. Lean and rich hydrogen mixtures having nearly the same laminar burning velocity are prepared. Propane fueled mixtures are also examined for comparison. A two-dimensional sequential laser tomography technique is used to obtain the temporal statistical relationship between the flame shape and the flame displacement. In order to examine the local burning velocity, the local flame displacement velocity  $S_F$  is quantitatively obtained as the key parameters of the turbulent combustion. The obtained  $S_F$  is also discussed by the concept of the Markstein number as well as the preferential diffusion effect.

**Key words:** hydrogen premixed turbulent combustion, local flame displacement velocity, preferential diffusion effect, Markstein number, laser tomography.

### 1. 緒 言

来る水素社会では、水素の製造、貯蔵・輸送そして利用の各段階で漏洩等による火災・爆発事故の危険性が潜在化する。水素が拡散に優れることから適切な換気・排気を行えば未然に防ぐことは可能である。しかしながら、水素漏

洩が火災・爆発事故に至り易いことが予測されるのは、水素は従来型燃料である炭化水素に比べ最小着火エネルギーが小さく、また可燃範囲も広いなどの燃焼特性[1]を有することに因る。また水素が漏洩した場には一般的にはガス流動が存在し、乱流燃焼となることが容易に予測できる。したがって、乱流中を伝ばする水素火炎の燃焼特性を解明

し、乱流燃焼モデルを開発することは、水素漏洩等に伴う火災爆発事故の予測さらには予防の観点から必要不可欠である。

一方、著者[2,3]らはこれまでに、予混合乱流燃焼場では乱流輸送過程が支配的であると考えられる乱れの強い領域でも分子輸送過程に起因する選択拡散効果が重要な因子であり、従来の考え方と異なり乱流火炎の局所燃焼速度が量論混合気付近を除き層流燃焼速度から変化していることを明らかにした。したがって、乱流燃焼時の局所火炎の燃焼特性を解明しモデル化を行うことは、予混合乱流燃焼モデルの開発において重要な課題である。

本研究では、連続2次元火炎断層写真撮影法を用いて直接的に水素予混合乱流火炎を観測し局所火炎の燃焼特性を明らかにする。ここでは、層流燃焼速度を揃えた希薄および過濃人工空気混合気を使用し、燃料には水素と比較のために分子量が比較的大きなプロパンも対象とする。火炎断層写真からは、局所火炎形状や局所火炎変位速度を定量化し、局所燃焼速度特性に与える燃料の濃度や種類の影響を明らかにする。さらに、層流球状伝ば火炎を用いて伸長あるいは火炎半径が燃焼速度に及ぼす影響の度合いを表すMarkstein数[4,5]を算出し、乱流火炎の局所燃焼速度特性に与える影響を検討する。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置

燃焼実験には、高速度カメラを除き既報[6,7]と同様の燃焼器および連続2次元火炎断層写真撮影システムを使用した。使用した燃焼装置は、内径が約100mmの球形に近い定容燃焼器で、光学計測が容易なように向かい合う4面

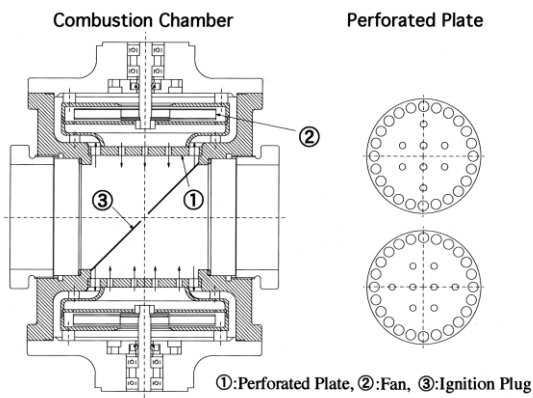


図1 定容乱流燃焼装置断面図

に直径85mmの観測窓、他の2面には直径90mmの多孔板①を有する。燃焼器の概要を図1に示す。多孔板後方の遠心ファン②を回転させることで多孔板中心付近の穴から混合気を噴出させ、燃焼室中心部にほぼ等方的な定常乱れ場を作ることが出来る。

連続火炎断層写真撮影システムは、図2に概略を示すように、光源に連続発振Nd:YAGレーザ(第二高調波532nm, 出力5W)を用い、三枚のシリンドリカルレンズにてシート光を燃焼室に照射でき、幅約64mmで厚さ0.1mm以下のシート光を作り、燃焼室に照射できる。混合気に添加された二酸化チタン(0.03~0.05 $\mu$ m)の散乱光を高速度カメラ(512 $\times$ 512画素, 8bit, 2000FPS)で撮影した。また、火炎の自発光の影響を押さえるために、バンドパスフィルター(530nm, 半値幅10nm)をレンズ前に取り付けた。なお、高速度カメラは既報[6,7]より高性能化され、1画素の大きさは実像上で0.12mmである。

実験は、各混合気を大気圧充填し、所定の乱れ強さ $u'$ の下で、燃焼室の中心で火花点火した。乱流火炎の撮影は、ファン回転数が1000および1400rpmとし乱れ強さ $u'$ が約0.35または0.49m/sで実施した。なお、ファン回転数1000rpmの場合の乱流場の特性値を表1に示す。表1中、 $L_d$ は縦方向積分尺度、 $\eta_0$ は予熱帯厚さ(= $\alpha / S_{L0}$ )、 $Da$ はダムケラー数、 $Re_l$ は $L_d$ に基づくレイノルズ数である。また連続火炎断層写真撮影は各条件に対して10回ずつ行った。

### 2.2 混合気組成

実験に用いた混合気は、表1に示す、当量比 $\phi$ が0.8と1.2で、窒素で希釈し層流燃焼速度 $S_{L0}$ をほぼ25cm/sに揃え、水素およびプロパンを燃料とした人工空気混合気である。

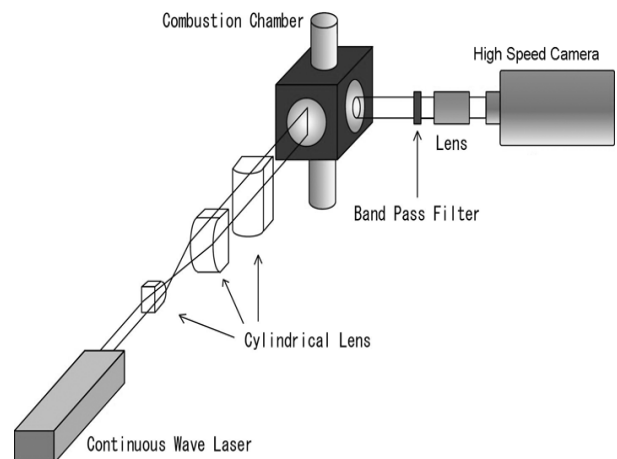


図2 二次元連続火炎断層写真撮影システム概要図

表1 混合気組成と乱れ特性値

Mixture	Molar Fraction			$\phi$	$S_{L0}$ cm/s	$a_0$ mm <sup>2</sup> /s	$\nu$ mm <sup>2</sup> /s	$D_F/D_O$	$Le$	Fan Speed 1000 rpm			
	Fuel	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>							$u'/S_{L0}$	$L_f/\eta_0$	$Da$	$Re_l$
H08-25N	H <sub>2</sub>	0.63	6.13	0.8	24.7	30.5	17.4	2.90	0.423	1.42	22.7	15.9	56.5
H12-25N	H <sub>2</sub>	0.42	5.02	1.2	25.1	32.6	17.9	2.84	1.286	1.40	21.5	15.3	55.0
P08-25N	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	6.25	25.63	0.8	24.8	19.5	14.7	0.57	1.574	1.42	35.5	25.1	66.7
P12-25N	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4.17	18.54	1.2	25.0	19.0	14.4	0.58	0.887	1.40	36.8	26.2	68.0

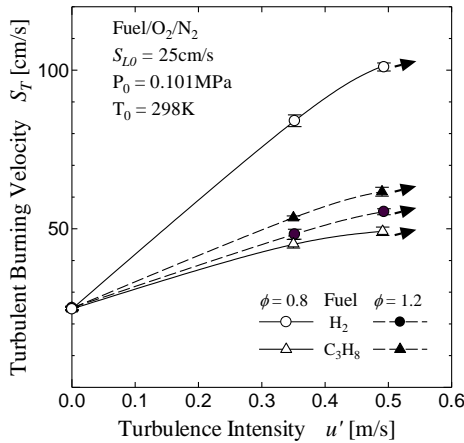


図3 乱流燃焼速度 $S_T$ と乱れ強さ $u'$ の関係

ここで、プロパンは、表1に示すように分子量が大きく拡散速度が酸素より遅く、水素と大きく異なる拡散特性を有することから選定した。表1中、 $a_0$ は熱拡散率、 $\nu$ は動粘性係数、 $D_F/D_O$ は燃料と酸素の拡散係数の比、 $Le$ は不足成分の拡散係数に基づくルイス数を表す。なお、 $S_{L0}$ および乱流燃焼速度 $S_T$ は圧力履歴から算出した[2,3]。

図3に、表1に示した混合気の乱れ強さ $u'$ にともなう乱流燃焼速度 $S_T$ の変化を示す。図3から、 $S_{L0}$ を揃えた混合気にもかかわらず、同一 $u'$ での $S_T$ は、燃料の種類および当量比 $\phi$ により変化することがわかる。水素混合気の場合、 $S_T$ は $\phi$ が小さい希薄な混合気ほど増大する傾向にある。一方、プロパン混合気では、水素の場合と逆で、 $\phi$ が大きい過濃な混合気ほど $S_T$ が増大する傾向にある。

2.3 換算局所火炎変位速度の算出法

既報[6,7]と同様の手法で、火炎形状特性として局所火炎曲率 $1/r$ および火炎伝ば特性として局所燃焼速度に相当する換算局所火炎変位速度 $S_F$ を算出する。なお、 $r$ は局所火炎曲率半径である。

得られた画像は、まず点火栓除去、エッジ処理を施した後、火炎面検出を行う。本解析では、未燃混合気側に凸な火炎曲率を正とし、着目している火炎面1と、0.5ms後の火炎面2から、局所火炎変位速度 $V_F$ を算出する。ここで、

二枚の画像の時間間隔が短いことから、火炎素面の移動方向は、火炎面1上の検出点から法線ベクトル方向に火炎が伝ばしたと仮定した。最終的に、 $S_F$ は次式により求めた。

$$S_F = (\rho_b / \rho_u) \cdot V_F \tag{1}$$

ここで、 $\rho_b$ 、 $\rho_u$ は各々既燃ガス、未燃混合気の密度である。

なお、火炎の伝ば進行とともに若干上昇する燃焼室内圧力などの影響を排除するため既報[6,7]と同様の手法を用いた。すなわち、 $S_F$ の平均値は、点火直後の火炎形成初期では大きく変化するが、その後、火炎が成長するにつれ概ね一定を呈する準定常状態となる領域が存在する。そこで、 $S_F$ の評価に際しては、十分に準定常状態となっている火炎伝ば進行度( $R_A/R_C$ )<sup>3</sup>が約0.018となる、ほぼ同一の体積燃焼割合時の火炎面のみを解析対象とした(図5参照)。ここで、 $R_A$ および $R_C$ はそれぞれ火炎断層写真から得られる既燃部面積および燃焼室容積の等価半径を表す。

また、本実験対象が基本的には球形伝ば火炎でありその対称性から、本研究では燃焼器中央より上側の火炎のみを解析対象とした。

3. 実験結果および考察

3.1 乱流火炎観測

図4に、当量比 $\phi$ 0.8と1.2の水素混合気とプロパン混合気の $u'=0.35$  m/s ( $u'/S_{L0}=1.4$ )での連続火炎断層写真の一例を示す。なお、中心付近の暗い部分が既燃ガス部でその周囲の明るい部分が未燃混合気でその両者の境界が火炎面になる。図4から概ね連続した火炎面を有するしわ状火炎であることがわかる。この傾向は、他の混合気および $u'$ が0.49 m/s ( $u'/S_{L0}=2.0$ )でも同様であった。図4(a)(b)から、 $\phi$ 0.8ではプロパン混合気に比べて水素混合気は、火炎の凹凸が大きくなる傾向にあり、未燃混合気側に凸な火炎部分の伝ば速度が既燃ガス側に凸な部分に比べて大きくなる傾向が観察できる。一方図4(c)(d)から、 $\phi$ 1.2の過濃混合気

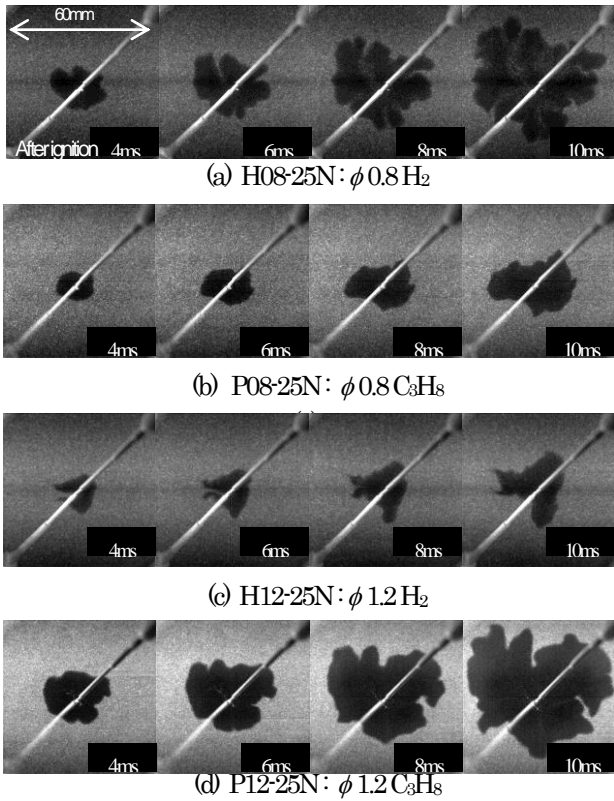


図4 連続火炎断層写真 ( $u/S_{L0}=1.4$ )

では、逆に水素混合気の方がプロパン混合気より凹凸が小さくなる傾向が観察される。

なお、図4の各条件で  $(R_A/R_C)^3$  が約0.018となる時刻は、(a)7ms、(b)11ms、(c)15ms、(d)7ms程度である。

次項で、火炎形状および局所燃焼速度特性について定量的に考察する。

### 3.2 局所燃焼速度特性

図5に、図4(a)の乱流火炎を解析した時系列に変化する火炎面の等値線を一例として示す。図5中、ベクトルを示した火炎面は、 $(R_A/R_C)^3$  が約0.018である。また、太線は正曲率の領域での火炎伝ばベクトルを、細線が負曲率を示す。図5から、本解析により未燃混合気側に凸(正曲率)かまたは既燃ガス側に凸(負曲率)なのかの火炎面形状が精度良く再現できていることがわかる。

図6に、 $u/S_{L0}=1.4$ の各予混合気乱流火炎に対して、火炎曲率  $1/r$  を予熱帯厚さ  $\eta_0$  で無次元化したものの確率密度関数(pdf)、および層流燃焼速度  $S_{L0}$  で無次元化した換算局所火炎変位速度  $S_F$  を示す。図6中の波線は、正曲率または負曲率での各値の平均値を示す。また、 $\eta_0 (=a/S_{L0})$  は、表1からわかるようにプロパンに比べて水素混合気の方が1.6倍程度大きい。なお、 $u/S_{L0}=0$ の層流火炎では、算出

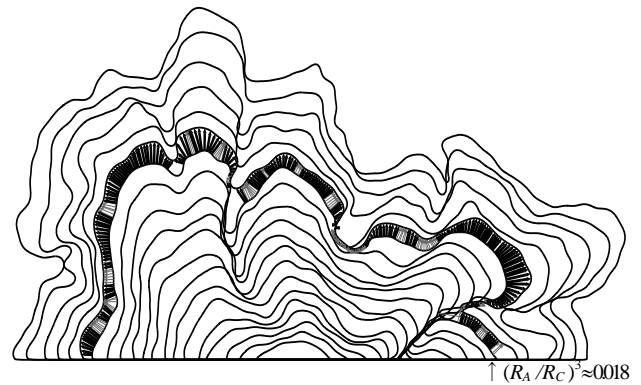


図5 時系列に変化する乱流火炎面の等値面 (撮影間隔0.5ms, H08-25N,  $u/S_{L0}=1.4$ )

された  $\eta_0/r$  は概ね0値付近に集中し、 $S_F$  も概ね  $S_{L0}$  値を示し分散は小さいことが観察されている。

図6から、比較的乱れの弱い  $u/S_{L0}=1.4$  にもかかわらず、いずれの混合気においても、層流燃焼時と異なり  $\eta_0/r$  および  $S_F$  が広い範囲に分布していることがわかる。特に、プロパン混合気に比べ水素混合気の  $S_F$  値はより広い範囲に分布している。これは、水素混合気が、プロパン混合気に比べ、火炎曲率に対して、より局所燃焼速度が大きく変化する傾向にあることを現している。さらに、水素混合気では層流燃焼速度の約5倍に達するものもあることがわかる。これは、従来の少なくとも本実験範囲のしわ状層流火炎が存在するような乱れの弱い領域では、火炎面の局所燃焼速度は層流燃焼速度であるとする考え[8]と矛盾する。

図7に  $u/S_{L0}=1.4$  での、得られた  $S_F$  の正曲率を有する火炎部分の平均値  $S_{F,mu}$  および負曲率側の平均値  $S_{F,mb}$  を  $S_{L0}$  で無次元化した値を  $\phi$  に対して示す。図7より、 $S_{F,mu}$  と  $S_{F,mb}$  を比較すると、燃料の種類や  $\phi$  によらず  $S_{F,mu}$  の方が大きいことがわかる。さらに  $S_{F,mu}$  と  $S_{F,mb}$  の差は、水素では希薄側で、プロパンでは過濃側で顕著になる傾向にある。この傾向は、3.1項で述べた火炎断層写真の観測結果と一致する。これは、従来のレイス数の概念[4]から、表1に示すように水素では希薄混合気で、プロパンでは過濃混合気で  $Le$  が1より小さく、火炎の凹凸が増幅される性質を有することが一因であると考えられる。すなわち、表1に示すように酸素の拡散係数に比べて水素は大きく、プロパンは小さいことから、選択拡散効果[2-4]により乱流燃焼場を支配する未燃混合気側に凸な火炎部分には、希薄水素混合気では不足成分である燃料(水素)が、一方過濃プロパン混合気では不足成分である酸素が相対的に多く拡散し局

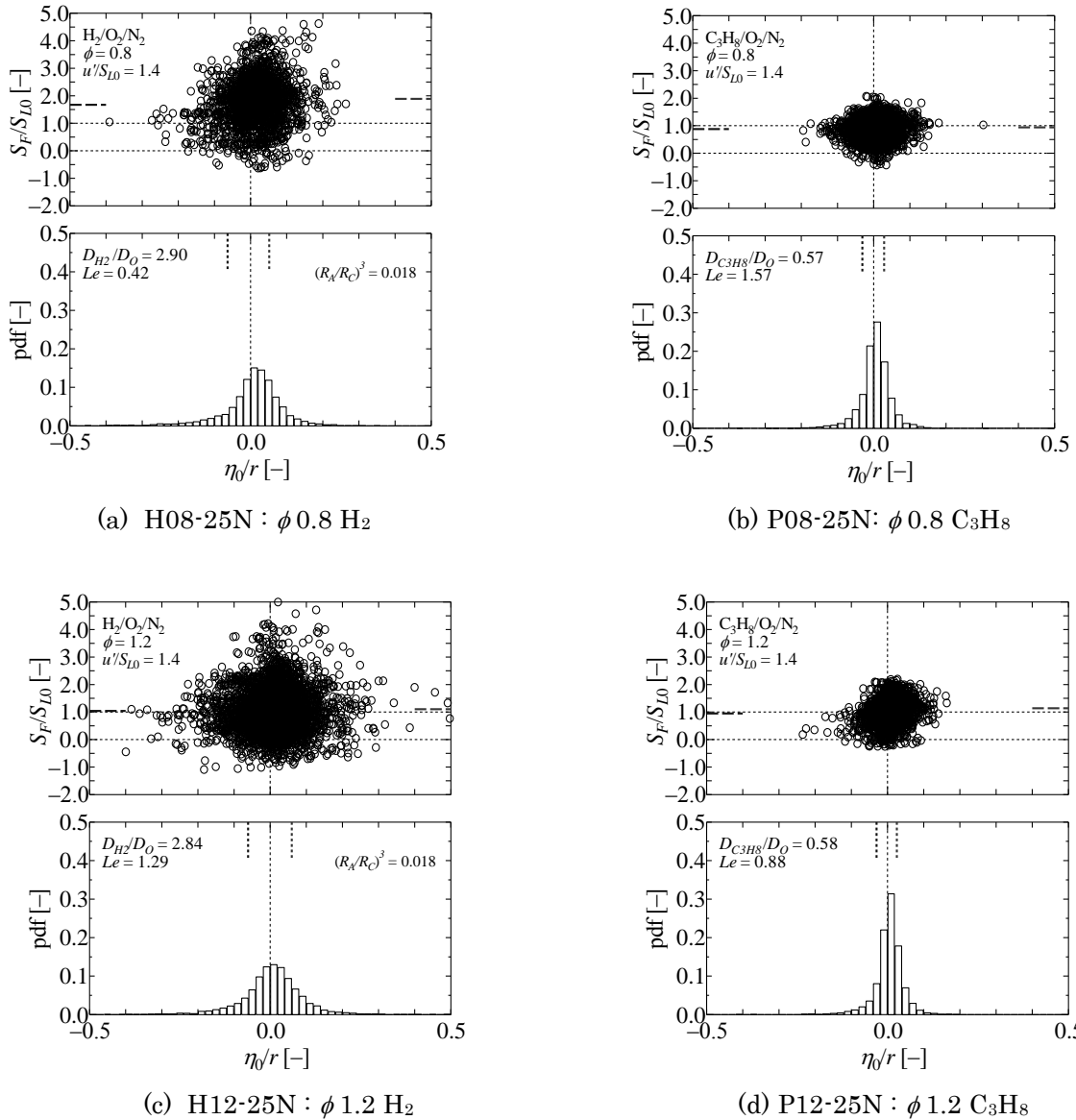


図6 予熱帯厚さ $\eta_0$ で無次元化した火炎曲率 $1/r$ の確率密度関数(pdf)および層流燃焼速度 $S_{L0}$ で無次元化した換算局所火炎変位速度 $S_F$ の関係 [( $R_A/R_C$ )<sup>3</sup>≈0.018,  $u'/S_{L0}$ =1.4]

所燃焼速度を増加させるためである。

図8に、 $S_{L0}$ で無次元化した  $S_F$ の平均値 $S_{F,m}$ と $u'/S_{L0}$ の関係を示す。なお、 $u'/S_{L0}$ は乱流燃焼特性の重要な支配因子である化学反応特性時間と乱流混合特性時間の比に相当する値である。図8から、平均局所燃焼速度に相当する $S_{F,m}$ は、水素混合気では希薄なほど、一方プロパン混合気では過濃なほど、同一 $u'/S_{L0}$ では大きくなる傾向が観察される。さらに、酸素との拡散係数の差異がプロパンより大きく、分子拡散特性に優れた水素を燃料とした混合気では、不足成分が燃料である希薄側において選択拡散効果により $S_{F,m}$ の値がプロパンに比べ大きく変化することがわかる。この結果は、基本的に図3で観察された、水素では希薄な

ほど、プロパンでは過濃なほど同一 $u'$ での $S_F$ が増加する傾向と一致する。したがって、乱流燃焼速度を決定する重要な因子は、反応物の分子拡散特性の影響すなわち選択拡散効果を受け変化する局所燃焼速度であることが明らかである。

また図8から本実験範囲では、希薄な水素混合気では顕著に現れていないものの、局所燃焼速度は乱れ強さと共に無限大に増大もしくは減少するものでないことが推測できる。すなわち、 $u'/S_{L0}$ の増大に伴い $S_{F,m}/S_{L0}$ の変化が次第に小さくなり、当量比に依存したある値に漸近する傾向が見られる。

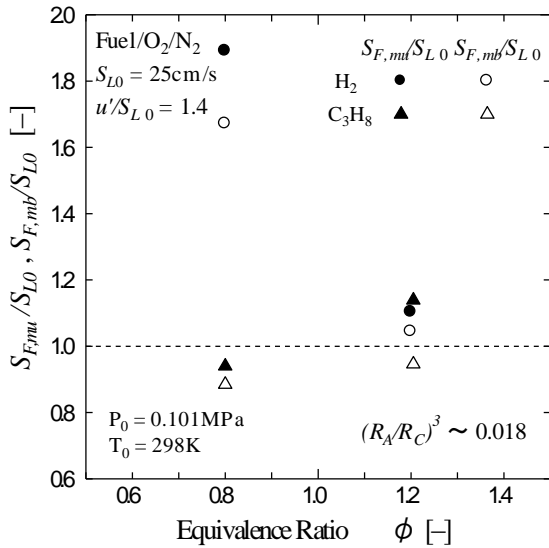


図7  $S_{F,mu}$  と  $S_{F,mb}$  に及ぼす燃料の種類および当量比  $\phi$  の影響 ( $u'/S_{L0}=1.4$ )

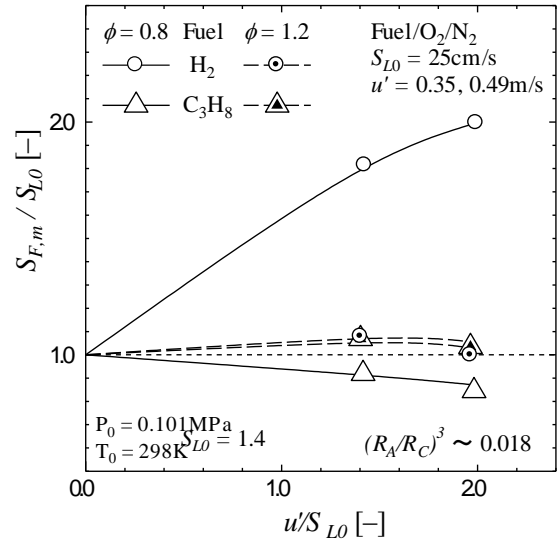


図8  $S_{F,m} / S_{L0}$  に及ぼす  $u'/S_{L0}$  の影響

### 3.3 Markstein数

層流火炎を対象とした議論であるが、火炎伸長もしくは火炎曲率が燃焼速度に与える影響が研究[4,5]され、Faethら[9]により次のような関係式が外向きに伝ばする球状層流火炎に対して提案されている。

$$S_{L\infty} / S_{L1} = 1 + MaKa \quad (2)$$

ここで、 $S_{L\infty}$ は火炎伸長が無いときの層流燃焼速度( $S_{L0}$ に相当する値)、 $S_{L1}$ は層流火炎が伸長を受けているときの燃焼速度  $[=(\rho_b/\rho_u) \cdot (dr_f/dt)]$ 、 $Ka$ はKarlovitz数  $[=K \cdot (a_0/S_L^2)]$ 、 $K$ 伸長  $[1/A \cdot dA/dt = (2/r_f) \cdot dr_f/dt]$ 、 $A$ は火炎要素表面積、 $r_f$ は層流球状伝ば火炎半径、 $Ma$ はMarkstein数である。

なお、式(2)から、同一 $Ka$ では $S_{L1}$ は、 $Ma$ が小さいほど増大し、 $Ma$ が負の値となると $S_{L\infty}$ または $S_{L0}$ の値より大きくなることからわかる。本研究では、式(2)は層流火炎を対象とした関係式ではあるが、乱流火炎面のうち未燃混合気側に凸な火炎部分の形状特性および作用する伸長が基本的には外向きに伝ばする層流球状火炎の場合と相似であることに着目し、 $Ma$ を実験的に求め、乱流燃焼時の未燃混合気側に凸な火炎部分の局所燃焼速度特性に関して考察を試みる。

図9に、推定した $Ma$ と $\phi$ の関係を示す。図9から、水素混合気では希薄なほど、プロパン混合気では過濃なほど $Ma$ は減少する傾向を示す。すなわち、定性的な傾向としては、得られた $Ma$ から、乱流火炎面のうち未燃混合気側に凸に湾曲し正伸長を受けた火炎部分では、水素では希薄、

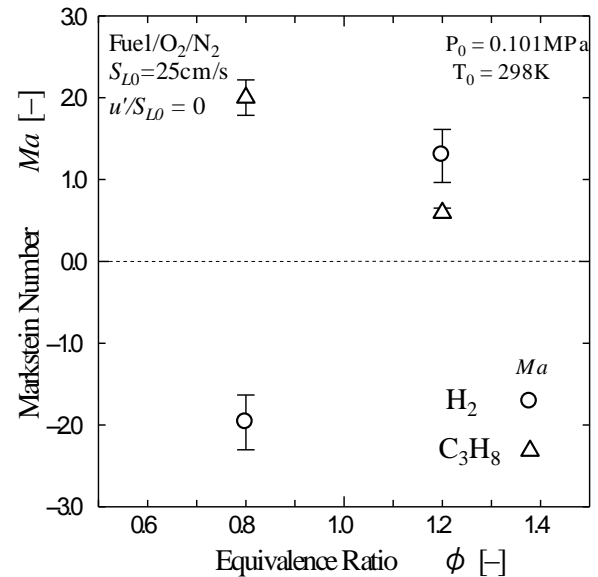


図9 球状伝ば層流火炎から推定したMarkstein数 $Ma$

プロパンでは過濃なほど燃焼速度が増加する傾向にあることが推測できる。この結果は、定性的には図7または図3の結果と一致している。したがって、定量的検討が必要ではあるが、層流火炎を対象としたMarkstein数は、乱流火炎の局所燃焼速度や乱流燃焼速度特性とある一定の相関関係がみられることがわかる。

### 4. 結論

層流燃焼速度を揃えた希薄および過濃水素およびプロパン予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性を解明するため

に、換算局所火炎変位速度 $S_F$ を定量的に検討した。得られた主な知見を次に示す。

- (1) 未燃混合気側に凸な領域の $S_F$ は既燃ガス側に凸な領域より大きくなる傾向にあり、水素では希薄なほど、プロパンでは逆に過濃なほど顕著であった。これは燃料の分子拡散特性に着目した選択拡散効果から説明できる。
- (2)  $S_F$ の平均値は、水素では希薄なほど増大し、プロパンでは逆に過濃なほど増大する傾向を示した。さらに、乱れ強さの増加により $S_F$ の平均値は増減するが、希薄水素混合気でその変化は著しかった。これらの結果は、それぞれの乱流燃焼速度特性によく一致する。
- (3) Markstein数を実験的に算出し、乱流火炎のうち未燃混合気側に凸な領域の局所燃焼速度に与える影響を検討した。その結果、定性的には局所燃焼速度および乱流燃焼速度特性とある一定の相関関係が見られた。

## 謝 辞

終わりに、本研究において九州大学大学院生・高本英昭君のご協力を頂いた。また、本研究費の一部は、平成17年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)No.15360113)によるものである。ここに記し、謝意を表す。

## 参考文献

1. Lewis, B, and von Elbe, G. ; Combustion, Flames, and Explosion of Gases, 3rd ed., Academic Press, (1987).
2. 城戸, 中原, 井上; 機論 B, Vol.62, No.600, pp.3198-3204(1996).
3. Kido, H. and Nakahara, M. ; JSME Int. J., Ser.B, Vol. 41, No.3, pp.666-673(1998).
4. Williams, F. A. ; Combustion Theory, 2nd ed., Benjamin / Cummings Publishing Co., (1985).
5. Peters, N. ; Turbulent Combustion, Cambridge University Press, p.95(2000).
6. 城戸・他3名; 自技論, Vol.32, No.1, pp.11-16 (2001).
7. Kido, H., et al. ; Pro. Combustion Institute, Vol.29, pp.1855-1861 (2002).
8. Andrews, G. E., et al. ; Combust. Flame, Vol.24, pp.285-304(1975).
9. Know, S., et al. ; Combust. Flame, Vol.90, pp.230-246(1992).