水素-酸素-希釈ガス予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的検討*

中原 真也^{*1}, 西部 祥平^{*2}, 橋本 淳^{*3}, 阿部 文明^{*1}

An Experimental Study on Local Flame Displacement Velocity of Hydrogen-Oxygen-Dilution Gas Premixed Turbulent Flames

Masaya NAKAHARA ^{*1}, Shohei NISHIBE, Jun HASHIMOTO and Fumiaki ABE^{*1} Ehime University, Department of Mechanical Engineering
Bunkyo-cho 3, Matsuyama, 790-8577 Japan

This experimental study was performed to investigate directly the local flame properties of turbulent propagating flames at the same weak turbulence condition, in order to clarify basically the influence of the addition of dilution gas to hydrogen mixtures on its local burning velocity. The mixtures having nearly the same laminar burning velocity with different dilution gas types and equivalence ratios were prepared. A two-dimensional sequential laser tomography technique was used to obtain the relationship between the flame shape and the flame displacement in a constant-volume vessel. The local flame displacement velocity S_F , curvature and stretch of turbulent flames were quantitatively measured as some of the key parameters of local flame properties on turbulent flames. Additionally, the Markstein number Ma was obtained from outwardly propagating spherical laminar flames, in order to examine the effect of positive stretch on burning velocity. It was found that the trends of the mean values of measured S_F with respect to dilution gas types and equivalence ratios corresponded well its turbulent burning velocity. The trend of the obtained Ma could explain the S_F of turbulent flames only qualitatively. The local burning velocity at the part of turbulent flames with positive stretch and curvature due to the Ma , S_{Lr} , attempted to be estimated quantitatively. As a result, a quantitative relationship between the estimated S_{Lr} and the S_F at positive stretch and curvature of turbulent flames could be observed only for mixtures with $Le > 1$ or $Ma > 0$, regardless of dilution gas types.

Key Words : Internal Combustion Engine, Premixed Combustion, Hydrogen-Oxygen Combustion, Dilution Gas, Local Burning Velocity, Markstein Number, Lewis Number, Preferential Diffusion

1. 緒 言

水素-酸素燃焼は、二酸化炭素・未燃炭化水素・窒素酸化物フリー燃焼であり、環境負荷低減を目指した究極的な燃焼技術の一つである。しかしながら、実用的には燃焼温度制御のために適切な希釈ガスが必要になる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。各種燃焼機器の性能は燃焼速度特性に支配され、さらに一般的な燃焼機器が高負荷燃焼化のために乱流燃焼場を利用していることから、水素-酸素-希釈ガス混合気の乱流燃焼速度に関する知見およびその予測モデルの構築は次世代水素燃焼機器を開発するためには必要不可欠である。

さらに、水素の利用で潜在化する水素漏洩に伴う火災爆発事故を抑制・防止するための一つの技術として、希釈ガスを利用すること⁽⁴⁾⁽⁵⁾が期待されている。これら防止技術を確立する上でも、火災等が発生した場にガス流動が存在し乱流燃焼化していることも想定されるため、希釈ガスが乱流燃焼特性に及ぼす影響を解明することは重要な課題である。

* 原稿受付 2011 年 8 月 14 日

^{*1} 正員, 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番)^{*2} 学生員, 愛媛大学大学院理工学研究科^{*3} 正員, 津山工業高等専門学校機械工学科 (〒708-8509 岡山県津山市沼 624-1)

E-mail: mnakahara@eng.ehime-u.ac.jp

一方、著者らは既報⁽⁶⁾で、層流燃焼速度を揃えた水素-酸素-希釈ガス混合気の乱流燃焼速度特性について検討した。その結果、希薄混合気では、希釈ガスの種類により、乱流燃焼速度特性に与える影響が異なることを明らかにした。そこでは、希釈ガスの分子拡散特性に起因した選択拡散効果により、乱れにより湾曲した火炎面での実質的な燃焼速度である局所燃焼速度の平均値が層流燃焼速度から変化し、乱流燃焼速度特性に大きく影響を与えることを定性的な議論により明らかにした。また、既報⁽⁷⁾では、水素と炭化水素燃料の二成分燃料混合気を対象に燃料の分子拡散特性がどのように影響を与えるかに着目し、この乱流燃焼場で重要となる局所燃焼速度を直接的な手法で詳細な検討を行った。

本研究では、希釈ガスが乱流燃焼場で重要な局所燃焼速度特性に与える影響を詳細に検討するために、層流燃焼速度を揃えた当量比が 0.5 と 0.7 の希薄混合気に加え、量論比の 1.0 の水素-酸素-希釈ガス混合気を対象に、乱流火炎の局所伝ば特性を直接観測し定量的に評価する。希釈ガスとしては、内燃機関を想定した場合に理論熱効率の向上が望めるアルゴンおよびヘリウムを、比較のために一般的な窒素も対象にする。ここでは、しわ状層流火炎が存在するような比較的乱れの弱い領域での予混合乱流伝ば火炎を対象に、局所火炎伝ば特性を二次元ではあるが連続断層写真として観測し、局所火炎燃焼特性を検討するために火炎変位速度および火炎形状を定量的に議論する。さらに、局所の火炎伸長が乱流火炎の局所燃焼速度特性に与える影響を検討するために、外向きに伝ばする球状層流火炎から求まる燃焼速度の火炎伸張に対する感度を表す Markstein 数を推定し、乱流火炎から得られた火炎変位速度との関係および乱流火炎の局所燃焼速度に与える定量的な影響を明らかにする。

2. 実験装置および方法

2・1 実験方法

燃焼実験には既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様の燃焼器および二次元連続火炎断層写真撮影システムを使用した。燃焼器は、図 1 に示す内径が約 100 mm の球形に近い定容燃焼器で、向かい合う 4 面に直径 85 mm の観測窓、他の 2 面には直径 90 mm の多孔板を有し、その後方の遠心ファンを回転させることにより燃焼室中心部に概ね等方的な定常乱れ場を発生できる。火炎断層写真撮影システムは、光源に連続発振 Nd:YAG レーザ（第二高調波 532 nm, 出力 5 W）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、混合気に添加された二酸化チタン粒子（0.03~0.05 μm ）の散乱光を高速度カメラ（512×512 画素, 8bit, 2000 FPS, 露光時間 18 μs ）で撮影できる。なお、本研究は二次元の撮影ではあるが、火炎の三次元的挙動を極力排除するため、燃焼室内に照射されるシート光は、点火栓の中心位置を通過するようにしている。また、1 画素の大きさは実像上で 0.12 mm である。

実験は、各混合気（表 1 参照）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外向きに伝ばする火炎を観測した。なお、点火エネルギーは、約 2.0 J とした。乱流火炎の撮影は、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様にファン回転数を 1000 rpm とし、すなわち u' が 0.35 m/s（ヘリウムの場合：0.47 m/s）、または u'/S_{L0} では 1.4（ヘリウムの場合：1.8）となる乱れ場で実施した。表 1 に、既報⁽⁶⁾と同様に混合気の動粘度を考慮した非燃焼場での乱流

Fig. 1 Cross-sectional view of combustion chamber

Table 1 Properties of mixtures and test condition

Mixture	ϕ	Components [mol]			S_{L0} cm/s	a_0 mm ² /s	ν mm ² /s	Le	T_p K	D_D $D_{D,N2}$	Fan Speed 1000 rpm			
		H ₂	O ₂	Dilution Gas							u'/S_{L0}	L_f/η_0	Da_l	Re_l
H05-25N	0.5	1.0	1.0	N ₂ 6.63	24.9	29.5	17.2	0.41	1221	1.00	1.41	23.6	16.7	57.1
H07-25N	0.7	1.0	0.7	N ₂ 6.14	25.1	30.4	17.4	0.42	1309	1.00	1.40	23.1	16.5	56.5
H10-25N	1.0	1.0	0.5	N ₂ 5.66	24.8	31.4	17.6	-	1402	1.00	1.42	22.1	15.5	55.9
H05-25A	0.5	1.0	1.0	Ar 9.20	25.3	29.3	15.3	0.39	1279	0.98	1.38	24.1	17.4	64.1
H07-25A	0.7	1.0	0.7	Ar 8.64	25.4	30.0	15.4	0.40	1367	0.98	1.38	23.6	17.1	63.8
H10-25A	1.0	1.0	0.5	Ar 8.00	25.1	30.9	15.5	-	1470	0.99	1.40	22.7	16.3	63.4
H05-25H	0.5	1.0	1.0	He 10.30	25.7	151.9	82.0	1.11	1197	2.94	1.81	5.0	2.8	16.8

特性値を示す。表1中、 u' は乱れ強さ(ガス流速変動の二乗平均値)、 S_{L0} は層流燃焼速度、 η_0 は予熱帯厚さ $[=a_0/S_{L0}]$ 、 L_f は縦方向積分尺度、 Da_l はダムケラー数 $[=L_f/u' \cdot S_{L0}/\eta_0]$ 、 Re_l は L_f に基づくレイノルズ数 $[=L_f u'/\nu]$ 、 a_0 は熱拡散係数および ν は動粘性係数である。また、乱流火炎の連続断面写真撮影は各混合気に対して10回ずつ行った。またMarkstein数の算出のために、静止混合気中を伝ばする層流火炎の撮影は5回ずつ実施した。

2・2 混合気

本研究では、希釈ガス⁽⁶⁾には、一般的な窒素(N₂)に加え、窒素とほぼ同等の拡散特性を有するアルゴン(Ar)および拡散速度が大きなヘリウム(He)を用いた。実験に用いた水素-酸素-希釈ガス混合気を表1に示す。各混合気は、水素-酸素混合気への希釈ガス量を調整することにより層流燃焼速度 S_{L0} を25 cm/sにほぼ揃えた当量比 ϕ が0.5, 0.7および1.0の人工的に作成した混合気である。表1に示すように、層流燃焼速度を揃えた混合気を用いることにより化学平衡計算による定圧断熱燃焼温度 T_p が概ね等しくなり、火炎面形状や火炎面近傍のガス流動に影響を与える可能性のある浮力や熱膨張の影響を平準化できる。なお、希釈ガスをヘリウムにした場合、 ϕ が0.7および1.0の混合気は、同一点火エネルギーでは作成できなかった。ここで、表1中、 Le は不足成分の拡散係数 D_d に基づくルイス数 $[=a_0/D_d]$ を表す。また、 D_D は二成分系拡散係数に基づく多成分系拡散係数⁽⁶⁾⁽⁹⁾から算出した各混合気の希釈ガスの拡散係数であり、 $D_{D,N2}$ は同一 ϕ の窒素を希釈ガスとした混合気での窒素の拡散係数を表す。なお、 S_{L0} は、既報⁽⁶⁾と同様に、点火後燃焼初期の燃焼室内圧力上昇が0.01~0.02 MPa範囲での圧力上昇率 dp/dt から算出⁽¹¹⁾した。

図2に、使用した混合気の同一ファン回転速度1000 rpm (N₂&Ar : $u'/S_{L0}=1.4$, He : $u'/S_{L0}=1.8$)での ϕ に対する乱流燃焼速度 S_T の変化を示す。図2中、既報⁽⁷⁾の窒素を希釈ガスとした S_{L0} を25cm/sに揃えた $\phi=0.8$ と1.2の水素混合気の結果も合わせて示す。図2から、窒素と同等の拡散特性を有するアルゴンはほぼ等しい S_T 特性を示す。一方、

Fig. 2 Variation of S_T with ϕ and dilution gas types at $u'/S_{L0}=1.4$ for N₂ and Ar, $u'/S_{L0}=1.8$ for He.

Fig. 3 Schematic illustration of determinations of local flame displacement velocity S_F and flame stretch K_T of turbulent flames.

窒素より拡散速度が大きなヘリウムは、相対的な乱れ強さが大きいにも関わらず S_T が著しく低下することがわかる。なお、 S_T は既報^{(6)・(10)}と同様に、 $S_T/S_{L0} \approx (dp/dt)_T/(dp/dt)_{L0}$ の関係から算出⁽¹²⁾した。ここで、添え字 T は乱流燃焼、 $L0$ は層流燃焼を表す。

2・3 局所火炎伝ば特性解析方法

本研究では、局所火炎燃焼特性として、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様の手法で、まず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 の定量化を行った。

ここでは、解析法の概要を次に示す。まず得られた連続火炎断層写真から着目している火炎面を離散点として検出し、各解析点における $1/r$ を算出する。本解析では、未燃混合気側に凸な火炎曲率を正とした。次に、図 3 に示すように、着目している火炎面 1 と、0.5 ms 後の火炎面 2 から、局所火炎伝ば速度(既燃ガスに関する局所火炎変位速度) 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 上の解析点から法線ベクトル方向に火炎が伝ばしたと仮定し、法線ベクトルと火炎面 2 が交わる点までの距離から V_F を算出した。さらに、換算局所火炎変位速度(未燃混合気に関する局所火炎変位速度) S_F は次式により求めた。

$$S_F = (\rho_b / \rho_u) \cdot V_F \quad (1)$$

ここで、 ρ_b , ρ_u は各々既燃ガス、未燃混合気の密度であり、 ρ_b は表 1 の化学平衡計算による T_p により算出した。なお、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾で議論したように、乱流火炎から得られた S_F は、本実験では等方的な定常乱れ場を使用していること等から、概ね乱流火炎の局所燃焼速度特性を評価できる値と考えられる。しかしながら、正確な局所燃焼速度の算出には火炎面近傍の流れ場を把握することが必要⁽¹³⁾であるが、本研究での乱れ場の計測は非燃焼場のみであり、 S_F には考慮していない。

さらに、火炎伝ば進行とともに上昇する燃焼室内圧力や火炎サイズの影響を取り除くため既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様の手法を用いた。すなわち、 S_F の評価に際しては、火炎進行度 $(R_A/R_C)^3$ 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 4 参照)。ここで、 R_A および R_C は各々火炎断層写真から得られる既燃部断面積および燃焼室容積の等価半径を表す。

なお、火炎断層写真の解析対象は、その対称性より燃焼室中央より上方のみとした。また、10組の乱流火炎面から得られる解析点総数は、各撮影条件で 3800 程度となる。

次に、既報⁽⁷⁾と同様の手法で、得られた 2 次元画像から火炎面面積変化率に基づく火炎伸長を推定した。火炎伸長 K は、火炎面面積 A の時間変化量として一般的には次式のように定義される⁽¹⁴⁾。

$$K = 1/A \cdot dA/dt \quad (2)$$

ここで、外向きに伝ばする球状層流火炎での火炎伸長 K_l は、式(2)を基に時系列で変化する火炎半径 r_f を用いて次式で表される⁽¹⁵⁾。

$$K_l = 2/r_f \cdot (dr_f/dt) \quad (3)$$

乱流火炎の火炎伸長 $K_T = [1/A_T \cdot dA_T/dt]$ を考えた場合、火炎構造の 3 次元性により層流火炎ほど単純ではない⁽¹⁶⁾。本研究では、表 1 に示すように比較的低 Re_l 場を対象としていること、二枚の画像の時間間隔および解析点間隔が短いことから、 K_T における乱流火炎面の要素面積の微小変化量 dA_T を、図 3 に示すように、連続する火炎面 1 と 2 の各火炎面の要素面積 A_1 と A_2 を、 S_F を求める時に使用したそれぞれ隣接する解析点の距離 l_1 と l_2 を用いて次式で得られると仮定し求めた。

$$dA_T = A_2 - A_1 = l_2^2 - l_1^2 \quad (4)$$

3. 実験結果および考察

3・1 火炎形状特性

図 4 に、ファン回転速度 1000 rpm (N_2 &Ar : $u'/S_{L0}=1.4$, He : $u'/S_{L0}=1.8$)での当量比 $\phi=0.5$ の窒素、アルゴンとヘリ

Fig. 4 Temporal evaluations of upper part of flame front contours for turbulent flames ($\phi=0.5$, $u'/S_{L0}=1.4$ for N₂ and Ar, $u'/S_{L0}=1.8$ for He, Images photographed every 0.5 ms)

ウムを希釈ガスとした場合の乱流火炎面の時系列に変化する等値面の一例をそれぞれ示す。図4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。また太赤線は正曲率形状部分での火炎伝ばベクトルを、細青線は負曲率部分であることを示す。

図4より、希釈ガスが窒素とアルゴンの場合には、概ね同等の火炎形状を有することがわかる。しかし、ヘリウムの場合、窒素等に比べて相対的に乱れ強さ u'/S_{L0} が大きいにもかかわらず、火炎面の凹凸のスケールが大きくなる傾向とした火炎形状になっていることがわかる。これは、表1に示すように、 $\phi=0.5$ では、希釈ガスがヘリウムの場合のみレイリス数 Le が1より大きく、 $Le<1$ の混合気に対して相対的に火炎面形状が安定化するためであると推測できる⁽¹⁴⁾。さらに、ヘリウムの場合には、他に比べて等値面の間隔が狭いことから、火炎の伝ば速度が他に比べて遅いと推測できる。

図5に、解析した結果の一例として、図4と同じく $\phi=0.5$ の各希釈ガスの混合気に対して、各10枚の火炎を解析した、予熱帯厚さで無次元化した火炎曲率 η_0/r の確率密度関数pdf、および層流燃焼速度で無次元化した換算局所火炎変位速度 S_F/S_{L0} を示す。なお、 η_0 は (a_0/S_{L0}) で定義されるが、表1から a_0 値がヘリウム混合気の場合に他と比べ5倍程度大きいことから、ヘリウムの場合[図5(c)]は横軸のスケールが他と変えてある。

図5から、比較的乱れの弱い $u'/S_{L0}=1.4$ (He: $u'/S_{L0}=1.8$)にもかかわらず、いずれの混合気においても、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様に層流燃焼時と異なり η_0/r および S_F/S_{L0} が広い範囲に分布していることがわかる。さらに、窒素とアルゴンの場合には、 $\phi=0.5$ においては、正曲率側、すなわち未燃混合気側に凸な形状部分の方が S_F/S_{L0} が若干大きくなる傾向に分布し、両者は概ね同様な分布を示す傾向にある。一方、ヘリウムの場合、他と異なり正曲率と負曲率側での S_F/S_{L0} の分布に大きな傾向の差異が観察できないことがわかる。これは、上述したようにレイリス数の影響が現れていると推測できる。なお、他の当量比においても、窒素とアルゴンは同等の傾向を示した。これら S_F の値が広く分布する現象は、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾でも議論したように、少なくとも図4の様なしわ状もしくは連続的な火炎が

Fig. 5 PDF of η_0/r and distribution of S_F/S_{L0} for turbulent flames ($\phi=0.5$, $u'/S_{L0}=1.4$ for N₂ and Ar, $u'/S_{L0}=1.8$ for He)

Fig. 6 Variation of S_{Fmu} and S_{Fmb} with ϕ and dilution gas types ($u'/S_{L0}=1.4$ for N_2 and Ar, $u'/S_{L0}=1.8$ for He)

Fig. 7 Variation of S_{Fm} with ϕ and dilution gas types ($u'/S_{L0}=1.4$ for N_2 and Ar, $u'/S_{L0}=1.8$ for He)

存在するような比較的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従来の多くの乱流燃焼速度モデル⁽¹⁷⁾と矛盾する。また、この $u'/S_{L0}=1.4$ 程度の乱流火炎でも S_F 値の広い分布が観測されることは、比較的弱い乱れ強度から乱流場の非定常性が局所燃焼特性に現れることを示唆している。

また図 5 中に示す Z_u/Z_b 値は、正曲率側と負曲率側の解析点の個数比を表す。図 5 から、 Le が 1 より大きなヘリウムの場合には他より Z_u/Z_b 値は小さくなるものの、 Z_u/Z_b 値は希釈ガスによらず 1 より大きく、負曲率より正曲率の解析点の個数は多いことがわかる。他の条件でも同様の傾向を示した。これは 2 次元での解析ではあるが、水素-酸素-希釈ガス混合気でも未燃混合気側に凸な部分の燃焼特性がより乱流火炎全体の燃焼特性に影響を及ぼす可能性があること⁽⁷⁾⁽⁸⁾を示している。

なお図 5 中、 S_F/S_{L0} が負の値を示すものが存在する。これは、 S_F が式(1)より伝ば速度 V_F に基づく値で、 V_F が負の値であったことに起因する。 V_F が負の値を示すものが存在することは、上述のように、等方的な定常乱れ場であっても、厳密な微小火炎要素の局所燃焼速度の算出には、火炎面近傍の流れ場の考慮が必要であることを示唆している。特に、本実験範囲では、図 5(c)からわかるように、ヘリウムを希釈ガスとした場合、 S_F/S_{L0} が負の値を示す割合が他より多く全体の解析点の 1 割近くに達する。これは、図 4 で観測されたようにヘリウムの場合には火炎伝ば速度が遅く乱れ等の外的因子の影響を受けやすいためであると推測できる。

3・2 換算局所火炎変位速度特性

図 6 に、 $u'/S_{L0}=1.4$ (He : $u'/S_{L0}=1.8$) で測定した S_F の正曲率側の平均値 S_{Fmu} および負曲率側の平均値 S_{Fmb} を S_{L0} で無次元化した値と ϕ の関係を示す。なお、既報⁽⁷⁾の窒素を希釈ガスとした S_{L0} を 25 cm/s に揃えた $\phi=0.8$ と 1.2 の結果も合わせて示す。また、 S_{Fmu} および S_{Fmb} は、対象となる解析点数に基づく単純平均であり、火炎面形状に著しく凹凸が発生したり、火炎移動距離が大きくなると、真の値より誤差が増大することが推測できる⁽¹⁸⁾。

図 6 より、 S_{Fmu} と S_{Fmb} を比較すると、窒素とアルゴンの場合には、 ϕ によらず S_{Fmu} の方が明らかに大きな値を示す。一方、 $\phi=0.5$ のみであるがヘリウムの場合には、両者に差異は見られない。さらに、窒素とアルゴンの場合には、 ϕ が 0.5 に比べ ϕ が大きな 1.0 の場合の方が、両者の差は小さくなる傾向にあることもわかる。

これは、3.1 節での火炎形状の観測結果や既報⁽⁸⁾で燃料の種類の差異に着目し議論したように、希釈ガスの差異に起因するレイス数の効果⁽¹⁴⁾によるものと推測できる。表 1 に示すように、本実験範囲では、ヘリウム混合気 ($\phi=0.5$) の Le は 1 より大きく、窒素とアルゴンの場合には、 Le は 1 より小さく、 ϕ が 1 に近づくと大きくなる傾向にある。すなわち、 $Le < 1$ の場合は拡散-熱的不安定性により、未燃混合気側に凸な火炎面部分の燃焼速度が既燃ガスに凸な部分に比べて相対的に増大し、火炎面の凹凸を発達させる傾向となる。一方、 $Le > 1$ の場合は基本的には火炎面の凹凸を安定化する方向に作用する。したがって、図 6 に示すように、 Le が大きな混合気ほど S_{Fmu} と S_{Fmb}

Fig. 8 Estimated Ma as a function of ϕ and dilution gas types

の差異が減少する傾向が観察されたと推測できる。

図 7 に、得られた S_F の火炎面全体での平均値 S_{Fm} を S_{L0} で無次元化した値と ϕ との関係を示す。なお、図 7 中に、図 6 と同様に既報⁽⁷⁾の結果を合わせて示す。図 7 から、窒素とアルゴンの場合には、同一の乱れ特性値のもとでは、 S_{Fm}/S_{L0} 値は、 ϕ によらずほぼ同等の値を示し、 ϕ が 1.0 程度に比べ希薄混合気では大きくなるものの ϕ が 0.7 と 0.5 では大きな差異がないことがわかる。一方、ヘリウムの場合には、 $\phi=0.5$ のみであるが、他の希釈ガスに比べて相対的な乱れ強度である u'/S_{L0} が大きいにもかかわらず、同一 ϕ では低い S_{Fm}/S_{L0} 値を示す。これら図 7 の S_{Fm} の結果は、図 2 で観察された乱流燃焼速度特性とよい一致を示す。したがって、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾で検討した燃料の差異のみならず、希釈ガスの異なる混合気でも、 S_F は上述のように局所燃焼速度と同値ではないが強い相関関係にある値と考えられることから、局所燃焼速度特性が乱流燃焼速度特性を決定する重要な因子であることは明らかである。

次に、この乱流火炎の局所燃焼速度特性に影響を与える因子の一つとして、各混合気が層流燃焼場で固有する燃焼速度の火炎伸長に対する感度を表す Markstein 数を推定し、乱流火炎の局所燃焼速度特性との関係について議論する。

3・3 乱流火炎の局所燃焼速度に及ぼす Markstein 数の影響

伸張や曲率を有する層流火炎面の燃焼速度がその度合いにより変化することが、多くの漸近的解析や実験研究⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾により議論されている。そして、火炎伸張と層流燃焼速度には線形的な関係があり、Faeth ら⁽¹⁵⁾⁽²¹⁾により次式が外向きに伝はする球状層流火炎に対して提案されている。

$$S_{L\infty}/S_{Li}=1+Ma \cdot Ka_i \quad (5)$$

ここで、 $S_{L\infty}$ は火炎伸張がないときの層流燃焼速度 (S_{L0} に相当する値)、 S_{Li} は伸張を受けているときの層流燃焼速度 $[=(\rho_b/\rho_u) \cdot (dr_f/dt)]$ 、 Ka_i は火炎伸長度を表す Karlovitz 数 $[=K_i \cdot (a_0/S_{Li}^2)]$ 、 K_i は式(3)の火炎伸張 $[=1/A \cdot dA/dt = (2/r_f) \cdot dr_f/dt]$ 、 A は火炎面要素面積、 r_f は球状伝ば層流火炎の平均半径、 Ma は Markstein 数である。したがって、基本的には時系列に変化する r_f を求めることにより、式(5)から Ma が推定可能である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

図 8 に、式(5)から求めた Ma と ϕ の関係を示す。図 8 から、希釈ガスがアルゴンと窒素の場合、 Ma は、本実験範囲では負の値を示し、量論比から ϕ の減少に伴い、 $\phi=0.7$ 程度までは急激に減少し、 ϕ が 0.5 程度になると若干大きくなる傾向を示すことがわかる。一方、ヘリウムの場合、 $\phi=0.5$ のみであるが、 Ma は、他の希釈ガスに比べ大きな値を示し、正の値を有することがわかる。ここで、式(5)は、同一 Ka_i では、 Ma が大きいほど燃焼速度が低下する関係を示す。この式(5)の関係から、各希釈ガスにおいて、図 8 の Ma の傾向は、図 6 や 7 の S_F 傾向と相関があるように見える。そこで、両者の関係を次に検討する。

ここで、 Ma は層流火炎を対象に得られたものであるが、その形状および伸長の作用の類似性から、少なくとも乱流火炎のうち未燃混合気側に凸な正曲率を有する火炎形状部分の局所燃焼速度と伸張との関係を評価する指標となると考えられる。そこで、図 9 に、層流火炎から得られた Ma と $u'/S_{L0}=1.4$ ($He:u'/S_{L0}=1.8$) の乱流火炎から得た正曲率部分の S_F の平均値 S_{Fmu} の関係を示す。なお図 9 には、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾の水素-メタンと水素-プロパンの

Fig. 9 Relationship among Ma , $S_{F,mu}/S_{L0}$ and $S_{Lt}/S_{L\infty}$ estimated by Ma .

Fig. 10 Relationship among Le , $S_{F,mu}/S_{L0}$ and $S_{Lt}/S_{L\infty}$ estimated by Ma .

二成分燃料混合気の結果も合わせて示す。また図 9 中、二成分燃料混合気の Φ は、燃料中の各炭素および水素分子数を基にした総合当量比⁽⁷⁾⁽⁸⁾を表す。

図 9 から、希釈ガスに起因する Ma の差異と $S_{F,mu}/S_{L0}$ の関係が、これまでに明らかにした燃料の種類の違いに起因した $Ma-S_{F,mu}/S_{L0}$ の関係⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様であることがわかる。すなわち、 Ma が負から正へと大きくなると、 $S_{F,mu}/S_{L0}$ が概ね比例的に低下する。これは、上述の式(5)が、同一 Ka_t では、 Ma が大きいほど燃焼速度が低下する関係にあることと一致する。すなわち、窒素、アルゴンやヘリウムで希釈した水素-酸素混合気でも、定性的には層流火炎から得られた Ma が乱流火炎の局所燃焼速度特性と良い相関関係にあることがわかる。

次に、上述のように局所燃焼特性と関連性を有するルイス数との関係を検討するために、 $S_{F,mu}/S_{L0}$ と Le との関係を図 10 に示す。なお、図 10 には、図 9 と同様に二成分燃料混合気の結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾も合わせて示す。

図 10 から、 $Le-S_{F,mu}/S_{L0}$ の関係にも Ma と同様に良い相関関係にあり、 Le の増大とともに $S_{F,mu}/S_{L0}$ が概ね線形的に減少することがわかる。また、図 10 から、 Le が 1.0 付近の二成分燃料混合気において、図 10 の Ma に比べて、不連続性が若干観察される。このことと、 Le は $\phi=1.0$ で不連続となることを考えあわせると、混合気を構成する成分に因らず乱流火炎の局所燃焼速度特性を整理するには、Markstein 数の方が適していると考えられる。

最後に、乱流火炎の燃焼速度特性を整理する上で重要な因子の一つである Ma が、乱流火炎の局所燃焼速度に定量的にはどれだけ影響を与えるか検討を試みる。ここでは、既報⁽⁷⁾と同様に式(5)を乱流火炎へ適用する手法により、 Ma を求めた外向きに伝ばする球状層流火炎と同じく、乱流火炎のうち正曲率かつ正伸長の火炎部分が有する Karlovitz 数を被った場合の燃焼速度の変化量 $S_{Lt}/S_{L\infty}$ を、 Ma の乱流火炎への効果量として次式で推定する。

$$S_{L\infty}/S_{Lt} = 1 + Ma \cdot Ka_t \quad (6)$$

ここで、 S_{Lt} は式(5)で得た Ma に基づく正曲率で正伸長を有する乱流火炎の局所燃焼速度の推定値であり、 Ka_t は乱流火炎の局所火炎特性を考慮した Karlovitz 数で次式から求める。

$$Ka_t = 1/n \cdot \left(\sum_{i=1}^n K_T \cdot a_0 / S_F^2 \right), \quad \text{at } 1/r > 0 \text{ \& } K_T > 0 \quad (7)$$

式(7)中、 n は正曲率で正伸長を有する火炎要素(解析点)の数、 K_T は式(4)より推定した乱流火炎の微小火炎要素の表面積変化 $[=1/A_T \cdot dA_T/dt]$ に基づく火炎伸長である。

図 9 および 10 中に、式(6)より乱流火炎 (N_2 & Ar : $u'/S_{L0}=1.4$, He : $u'/S_{L0}=1.8$) の正曲率かつ正伸長火炎部に対して推定した $S_{Lt}/S_{L\infty}$ を示す。なお、本実験では K_T 値は、 $u'/S_{L0}=1.4$ では 80~150 1/s 程度、 $u'/S_{L0}=1.8$ では約 60 1/s である。

図9と10から、既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾で明らかにした燃料の種類のみならず、希釈ガスの種類に因らず、 Ma に基づく S_{Li}/S_{Lo} は、 Ma および Le が大きいほど小さくなる傾向にあり、定性的には乱流火炎から得られた S_{Fmu}/S_{Lo} との相関関係が観察できる。しかしながら、 Ma および Le が小さいほど、 S_{Li}/S_{Lo} 値と S_{Fmu}/S_{Lo} 値との差異が増大するのは明らかである。すなわち、大きい Ma および Le を有する混合気の乱流火炎ほど、特に $Ma > 0$ および $Le > 1$ では、Markstein数の効果が、少なくとも乱流火炎面のうち正伸長を有する未燃混合気側に凸な火炎部分の燃焼速度の変化において支配的な因子であると推測できる。一方、 $Ma < 0$ および $Le < 1$ で Ma および Le が小さい乱流火炎の局所燃焼速度の変化には、他の支配因子が存在すると考えられる。その支配因子の一つとして、熱拡散より物質拡散が支配的な $Le < 1$ で両者の差異が顕著になることから、火炎面に凹凸が発生することにより作用する選択拡散効果⁽¹⁴⁾が考えられる。ここで、分子拡散特性に着目⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾すると、水素とヘリウムは分子量が他の窒素やアルゴンさらには酸化剤の酸素より小さく拡散速度が大きい。したがって、上述のように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、選択拡散効果により拡散速度が相対的に大きな水素やヘリウムが拡散する。例えば、水素-酸素-アルゴンや窒素混合気の場合、希薄の $\phi=0.5$ や 0.7 では $Le < 1$ であり物質拡散の効果が支配的となり、不足成分である水素が、この未燃混合気側に凸な火炎部分に相対的に多く拡散するため、この部分の燃焼速度が増加する。そのため図9や10のように、 $Le < 1$ では、 S_{Fmu}/S_{Lo} と S_{Li}/S_{Lo} の差異が大きくなる傾向が観察されると推測できる。なお、乱流燃焼場から得られた S_F には、式(5)や(6)で考慮した式(2)に基づく火炎表面積の変化にともなう火炎伸長に加え、層流燃焼場にはない例えば u'/λ_g のガス流動による火炎伸長も作用している。ここで、 λ_g はテイラーの微細尺度で、ファン回転速度1000 rpmでは u'/λ_g は190 1/s程度である。

以上本研究から、真の局所燃焼速度特性の評価には、火炎面近傍の流れや乱流火炎の三次元性の考慮⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾⁽²²⁾が必要であるが、もし図9のような Ma と局所燃焼速度特性と何らかの相関関係が存在すると、 Ma は実験的にも解析的にも得ることが可能なため、 Ma に基づく乱流火炎の局所燃焼速度予測モデルを構築できる可能性がある。さらに、既報⁽¹⁰⁾で局所燃焼速度に基づく乱流燃焼速度モデルを提案しているが、本研究は、水素-酸素-希釈ガス混合気のみならず多様な混合気に対応した乱流燃焼速度モデル⁽¹⁰⁾の構築に発展しうる可能性もある。

一方、希釈ガスや燃料の種類によらず、 $Ma < 0$ または $Le < 1$ の混合気のような、乱流火炎の局所燃焼速度特性を、層流火炎の伸長の燃焼速度への効果を表すMarkstein数だけでは定量的には説明できない混合気条件が存在することを明らかにできた。

4. 結 論

層流燃焼速度 S_{Lo} を25 cm/sに揃えた当量比 $\phi=0.5\sim 1.0$ の水素-酸素-希釈ガス混合気において、希釈ガスを一般的な窒素に加えて、アルゴンおよびヘリウムを対象にし、二次元火炎断層写真撮影法を用いて乱れ強さ u' が0.35 m/s (He: 0.47 m/s)での乱流火炎の換算局所火炎変位速度 S_F を定量化し検討した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 希釈ガスがヘリウムの場合は、 $\phi=0.5$ のみの検討であるが、他の希釈ガスに比べて相対的な乱れ強さが大きいにもかかわらず、他より凹凸がない火炎面形状であること、さらに未燃混合気側へ凸と凹な各火炎部分の S_F の平均値に差異がないことが観察された。この現象は、ヘリウム混合気が他の希釈ガス混合気よりルイス数が大きいことに因ると推察できた。
- (2) 乱流火炎から得られた S_F の平均値 S_{Fm} は、ヘリウムの場合($\phi=0.5$)は、同一 ϕ の窒素やアルゴンの場合に比べ著しく小さい値を示した。一方、窒素とアルゴン混合気の S_{Fm} は、同一 ϕ では概ね同等の値を示し、 ϕ が1.0に近づく急激に低下する傾向を示すことがわかった。さらに、これら S_{Fm} の傾向は、希釈ガスの種類によらず、これら混合気の乱流燃焼速度特性とよい一致を示すことが明らかになった。
- (3) 希釈ガスの種類を変化させた混合気でも、外向きに伝ばする球状層流火炎から得たMarkstein数 Ma は、乱流火炎の未燃混合気側に凸な火炎部分の S_F の平均値である S_{Fmu} と良い線形的な相関関係にあることが確認できた。また、不足成分に基づくルイス数 Le も S_{Fmu} と概ね線形的な関係にあることがわかった。
- (4) 最後に、層流火炎から得られた Ma が乱流燃焼場でどれだけ局所燃焼速度に影響を与えるか定量的に検討するため、 Ma をもとに乱流火炎の正伸長かつ正曲率を有する火炎部分の燃焼速度 S_L の推定を試みた。その結果、希釈ガスに因らず、 S_L と S_F には定性的な相関関係が観察できたものの、両者に定量的な相関関係がみられるのは $Ma > 0$ または $Le > 1$ の混合気条件であることを明らかにした。

謝 辞

終わりに、本研究において九州大学名誉教授・城戸裕之先生に貴重なご意見を頂いた。また、本研究の実験を行うにあたり、九州大学大学院工学府学生・高本英明君、愛媛大学大学院理工学研究科学生・藤田侑士君にご協力いただいた。ここに記し、謝意を表す。

文 献

- (1) WE-NET summary of annual reports (1994), <http://www.ena.or.jp/WE-NET/index.html> (参照日 2011 年 8 月 1 日).
- (2) 古谷博秀, 濱純, 高橋三郎, “ArF エキシマレーザによる水素-酸素-アルゴン混合気の着火・火炎核成長過程の実験的研究”, 日本機械学会論文集B編, Vol.61, No.590(1995), pp.3470-3476.
- (3) Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L., “Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.127(2005), pp.73-80.
- (4) Kishore, V.R., Muchahary, R., Ray, A., Ravi, M.R., “Adiabatic burning velocity of H₂-O₂ mixtures diluted with CO₂/N₂/Ar”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34(2009), pp.8378-8388.
- (5) 井上雅弘, 中原真也, “水噴霧による水素の燃焼制御法に関する研究”, 水素エネルギーシステム, Vol.34, No.3 (2009), pp.23-30.
- (6) 城戸裕之, 橋本淳, Barat D., 西垣雅司, 岡本秀樹, “乱流燃焼速度に及ぼす不活性ガスの影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.65, No.640 (1999), pp. 4138-4143.
- (7) Nakahara, M., Shirasuna, T., and Hashimoto, J., “Experimental Study on Local Flame Properties of Hydrogen added Hydrocarbon Premixed Flames”, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.4, No.1(2009), pp.190-201.
- (8) 中原真也, 橋本淳, 白砂貴盛, 月川正善, “水素添加プロパン予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的検討”, 日本機械学会論文集B編, Vol.75, No.760 (2009), pp.2550-2557.
- (9) Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N. "Transport Phenomena", (1960), John Wiley & Sons., p.554-591.
- (10) 城戸裕之, 中原真也, “選択拡散効果を考慮した乱流燃焼速度の整理”, 日本機械学会論文集B編, Vol.63, No.614 (1997), pp.3477-3483.
- (11) Lewis, B., and von Elbe, G., *Combustion, Flames, and Explosion of Gases*, 3rd ed. (1987), pp.333-361, p.389, Academic Press.
- (12) Babkin, V. S., Babushok, V. I., and Suyushev, V. A., *Dynamics of Turbulent Gas Combustion in a Closed Volume, Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol.13, No.3 (1978), p.291-295.
- (13) Furukawa, J. and Williams, F. A., Flamelet Effects on Local Flow in Turbulent Premixed Burning Flames, *Combustion Science and Technology*, Vol.170 (2003), pp. 1835-1858.
- (14) Williams, F. A., *Combustion Theory 2nd*, The Benjamin/Cummings, (1985), p.349.
- (15) Know, S., Tseng, L.-K., and Faeth, G. M., Laminar Burning Velocities and Transition to Unstable Flames in H₂/O₂/N₂ and C₃H₈/O₂/N₂ Mixtures, *Combustion and Flame*, Vol.90(1992), pp.230-246.
- (16) Tanahashi, M., Sato, M., Shimura, M., T. Miyauchi, T., “DNS and Combined Laser Diagnostics of Turbulent Combustion”, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 3, No. 3(2008), pp. 391-409.
- (17) Andrews, G.E., Bradley, D. and Lwakabamba, S.B., Turbulence and Turbulent Flame Propagation-A Critical Appraisal, *Combustion and Flam*, Vol.24 (1975), pp.285-304.
- (18) Renou, B., Boukhalfa, A., Puechiberty, D., and Trinité, M., Local Scalar Flame Properties of Freely Propagating Premixed Turbulent Flames at Various Lewis Numbers, *Combustion and Flam*, Vol.123(2000), pp.507-521.
- (19) Markstein, G.H., *Non-steady flame Propagation*, (1964), p.22, Pergamon, New York.
- (20) Peters, N., *Turbulent Combustion*, (2000), p.95, Cambridge University Press.
- (21) Know, O.C., and Faeth, G. M., Flame/Stretch Interactions of Premixed Hydrogen-Fueled Flames: Measurements and Predictions, *Combustion and Flam*, Vol.124(2001), pp.590-610.
- (22) Gashi, S., Hult, J., Jenkins, K.W., Chakrabort, N., Kaminski, C.F., Curvature and wrinkling of premixed flame kernels – comparisons of OH PLIF and DNS data, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.30 (2004), pp. 809-817.