

# 希薄水素混合気の乱流燃焼速度特性に与える 希釈ガスの影響

中原真也・城戸裕之・中島健四郎

九州大学 大学院工学研究院

812-8581福岡市東区箱崎6-10-1

## Effect of Dilution Gas on Turbulent Burning Velocities of Lean Hydrogen Mixtures

Masaya NAKAHARA, Hiroyuki KIDO and Kenshiro NAKASHIMA

Kyushu University

6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

It is important that the effect of dilution gas on the turbulent burning velocity of hydrogen mixtures is elucidated to develop modern hydrogen combustion devices. In our previous studies, the preferential diffusion effect was made clear to play an important role in the turbulent combustion characteristics, affecting the local burning velocity, where nitrogen was added as a dilution gas to several fuel/air mixtures. The present study is performed to obtain experimentally the turbulent combustion characteristics of dilution gas added lean hydrogen mixtures with special attention to the local burning velocity of turbulent flame, in order to elucidate the mechanism of turbulent combustion of those mixtures. In this study, the turbulent burning velocities of the prepared mixtures, whose laminar burning velocity were nearly the same and the equivalence ratio were varied, were experimentally investigated. Where, argon, helium and carbon dioxide in addition to nitrogen were adopted as dilution gas. It is found that carbon dioxide added mixtures show larger turbulent burning velocities than that of nitrogen added mixtures at the same equivalence ratio. On the contrary, helium added mixtures show very smaller turbulent burning velocities. Those characteristics are discussed in preferential diffusion effect, turbulent flame-front configurations and Markstein number.

**Key words:** Hydrogen Premixed Turbulent Combustion, Dilution Gas, Turbulent Burning Velocity, Preferential Diffusion Effect, Markstein Number

### 1. 緒言

水素は、二酸化炭素・未燃炭化水素フリー燃焼であると共に再生可能な燃料であることから、究極的な燃焼機器用次世代燃料である。しかしながら、水素-空気燃焼では窒素酸化物排出の問題が残る。この問題を解決する燃焼技術として純酸素燃焼が考えられる。しかしこの燃焼法は、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。特に、未燃燃料排出など観点から、希薄水素混合気に関して重要である。しかしながら、量論混合気付近を対象とした層流燃焼速度や乱流燃焼速度の定量的な整理に関する研究[4-6]は多く行われているもの

の、非理論混合気でも希釈ガスが乱流燃焼速度に与える影響に関しては十分には解明されていない。

一方、著者[7-8]らはこれまでに、燃料-空気混合気を窒素で希釈することにより層流燃焼速度を揃えた当量比の異なる水素や炭化水素人工空気混合気を用いて、乱流燃焼速度特性について検討してきた。その結果、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。さらに、この乱流燃焼場の平均局所燃焼速度を選択拡散効果を考慮することにより推定する方法を提案した。また、推定した平均局所燃焼速度を基準値とすると乱流燃焼速度特性を整理できることを示した。

したがって、より優れた水素燃焼機器を実現するためには、乱流燃焼速度特性や局所燃焼速度への希釈ガスの影響を解明しモデル化を行うことは重要な課題である。

本研究では、まず基礎的な検討して、希釈ガスの種類を従来の窒素に加え、アルゴン、ヘリウムおよび二酸化炭素と変化させた層流燃焼速度を揃えた希薄水素-酸素-希釈ガス混合気を使用し、希釈ガスの種類が乱流燃焼速度特性に与える影響について実験的に明らかにする。次に乱流燃焼速度特性を支配する局所燃焼速度特性について検討する。まず、分子選択拡散効果から定性的な検討を行い、選択拡散効果を考慮した推定法をアルゴンおよびヘリウムの場合に適用し平均局所燃焼速度を定量化する。さらに、局所燃焼速度と相関関係を有する局所火炎構造について検討するため、2次元火炎断層写真撮影法による乱流火炎を観測する。最後に、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[9-10]を推定し考察する。

2. 実験装置および方法

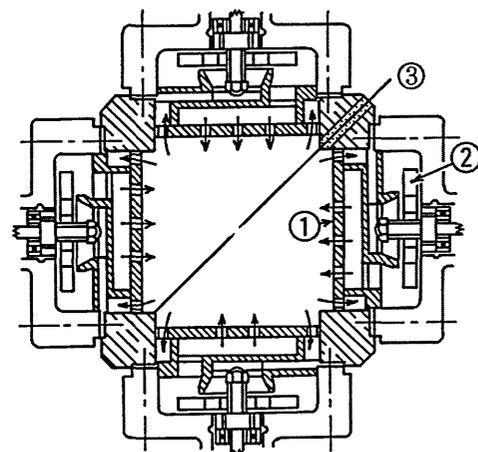
実験に用いた希薄水素-酸素-希釈ガス混合気を表1に示す。希釈ガスには、従来から検討している窒素(N<sub>2</sub>) [7,8]に加え、N<sub>2</sub>とほぼ同等の拡散特性を有するアルゴン(Ar)、拡散速度が大きなヘリウム(He)および拡散速度の小さな二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を使用し、層流燃焼速度S<sub>L0</sub>を15および25cm/sにほぼ揃えた当量比φの異なる人工的に作

表1. 混合気特性

Mixture	φ	Fuel & Dilution Gas	Molar Fraction			S <sub>L0</sub> cm/s	D <sub>F</sub> /D <sub>O</sub>	a <sub>0</sub> mm <sup>2</sup> /s	ν <sub>0</sub> mm <sup>2</sup> /s	Le
			Fuel	O <sub>2</sub>	Dilution Gas					
H02-15N	0.2	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	2.50	7.50	14.77	2.979	27.64	16.83	0.380
H05-15N	0.5	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	1.00	7.80	15.31	2.967	28.41	16.98	0.393
H07-15N	0.7	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	0.71	7.39	15.26	2.951	29.00	17.10	0.402
H09-15N	0.9	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	0.56	6.94	15.88	2.933	29.60	17.24	0.411
H02-15A	0.2	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	2.50	11.00	15.57	3.291	27.20	15.14	0.363
H05-15A	0.5	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	1.00	11.80	14.44	3.299	27.72	15.01	0.370
H07-15A	0.7	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	0.71	10.86	15.50	3.283	28.44	15.09	0.380
H09-15A	0.9	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	0.56	10.56	14.83	3.277	28.75	15.12	0.384
H02-15C	0.2	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	2.50	5.00	15.32	3.346	20.11	11.37	0.311
H05-15C	0.5	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	1.00	5.50	14.89	3.256	19.17	10.48	0.308
H07-15C	0.7	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	0.71	4.70	15.74	3.179	20.34	10.63	0.328
H09-15C	0.9	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	0.56	4.17	14.70	3.118	21.38	10.78	0.346
H02-15H	0.2	H <sub>2</sub> /He	1.00	2.50	8.80	14.80	1.612	117.85	54.66	0.962
H05-25N	0.5	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	1.00	7.10	24.69	2.946	29.03	17.12	0.402
H07-25N	0.7	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	0.71	6.43	25.38	2.917	30.02	17.33	0.416
H09-25N	0.9	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1.00	0.56	6.17	24.53	2.904	30.54	17.44	0.423
H05-25A	0.5	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	1.00	9.70	25.00	3.261	28.94	15.23	0.386
H07-25A	0.7	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	0.71	8.93	25.34	3.242	29.80	15.33	0.398
H09-25A	0.9	H <sub>2</sub> /Ar	1.00	0.56	8.72	24.86	3.236	30.16	15.36	0.403
H05-25C	0.5	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	1.00	4.50	25.39	3.195	20.74	10.89	0.331
H07-25C	0.7	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	0.71	4.25	24.90	3.144	21.21	10.84	0.342
H09-25C	0.9	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1.00	0.56	3.75	25.43	3.077	22.40	11.02	0.362
H02-25H	0.2	H <sub>2</sub> /He	1.00	2.50	7.75	25.00	1.583	113.32	51.85	0.942
H03-25H	0.3	H <sub>2</sub> /He	1.00	1.67	9.35	24.90	1.706	134.59	66.46	1.038
H04-25H	0.4	H <sub>2</sub> /He	1.00	1.25	10.10	25.11	1.767	145.62	75.87	1.085
H05-25H	0.5	H <sub>2</sub> /He	1.00	1.00	10.50	24.55	1.803	152.32	82.42	1.112

成した希薄混合気である。ここで、表中のD<sub>F</sub>/D<sub>O</sub>は燃料と酸素の拡散係数の比[9,11,12]、a<sub>0</sub>は熱拡散率、ν<sub>0</sub>は動粘性係数、Leはルイス数(=a<sub>0</sub>/D<sub>F</sub>)で、D<sub>F</sub>は不足成分の拡散係数を表す。

燃焼速度計測実験には、図1に示す内径が約120mmの球形に近い定容燃焼装置[7,8]を用いた。装置には向かい合う4面には多孔板が、他の2面には観測窓が取り付けられている。多孔板後方の遠心ファンを回転させること



①: Perforated Plate, ②: Fan, ③: Ignition Plug

図1. 定容乱流燃焼装置断面図(燃焼速度計測用)

により、燃焼室中心付近にはほぼ等方的な定常乱れ場を発生できる。

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。層流および乱流燃焼速度は既報[7,8]と同様に燃焼室内の圧力履歴から算出した[13,14]。なお、乱れ強さ $u'$ と遠心ファイン回転数および動粘度の関係はLDVを用いて計測し、各混合気において設定したファン回転数における乱れ強さを算出した。

火炎観測およびMarkstein数を算出のために既報[15,16]と同様の瞬間および連続2次元火炎断層写真撮影システムを使用した。燃焼器には、基本仕様は図1と同一の内径が約100 mm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面に直径85 mmの観測窓が設置してある。ここでは、一例として瞬間火炎断層写真の観測システムの概要を図2に示す。パルスND-YAGレーザ（第2高調波532nm, 出力300mJ/パルス, パルス幅5ns）を用い、3枚のシリンドリカルレンズ（焦点距離：40,480,1000mm）にて、幅約72mmで厚さ0.2mm以下のシート光を作り、燃焼室に照射した。散乱粒子には二酸化チタン（0.03~0.05 $\mu$ m）を用い、散乱光をCCDカメラ（1280×1000画素）で撮影した。なお、1画素の大きさは実像上で約0.11mmである。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）および熱線吸収フィルター（ケル社製:HA50）をレンズ前に取り付けられた。一方、連続火炎断層写真では1画素の大きさは実像上で0.23 mmであった。

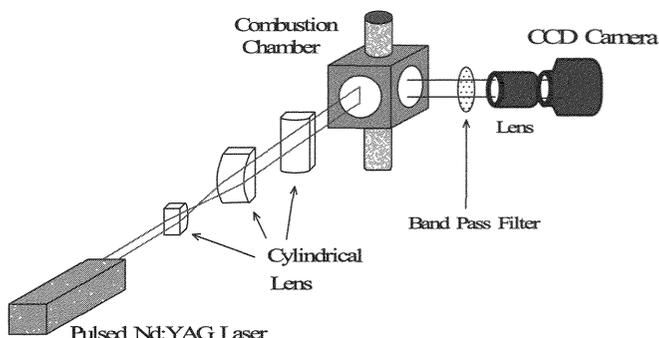


図2. 瞬間2次元火炎断層写真撮影システム概略図

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 乱流燃焼速度特性

各種希積ガスを添加し、層流燃焼速度 $S_{L0}$ を15および25cm/sに揃えた代表的な当量比 $\phi$ の希薄水素混合気の乱流燃焼速度 $S_T$ の計測結果をそれぞれ図3および4に示す。なお、消炎限界は点火しても火炎伝ばに至らない実験回数が50%以上となった条件とした。また、本報では、例えば図4で $N_2$ 、Arおよび $CO_2$ 添加混合気で $\phi$ が0.4~0.2のデータがないのは単に実験を行っていないだけである。

図3および4から、まず希積ガスの種類を変化させても、既報[7,8]と同様に $S_{L0}$ をほぼ揃えた混合気にもかかわらず、本実験範囲では基本的には $\phi$ が小さい希薄な混合気ほど同一乱れ強さ $u'$ での $S_T$ は増大し、消炎限界は拡大する傾向にあることは明らかである。しかしながら、同一 $\phi$ では希積ガスの種類によりその変化には差異が見られる。

細点線で示すArを添加した混合気は、太実線で示す同一 $\phi$ の $N_2$ 添加混合気と比べて、同一 $u'$ ではほぼ同等か若干大きな $S_T$ を示すことがわかる。

一点破線で示すHe添加混合気は、 $N_2$ 添加混合気と比べて $S_T$ がかなり小さくなっていることがわかる。したがって、希積ガスとしてHeを用いた場合には、乱流燃焼速度特性に大きな悪影響を与えていることがわかる。なお、Heを添加した混合気では、Heの高い熱拡散率のために点火直後の初期火炎における熱損失が大きくなる。そのため、本実験装置で使用している点火エネルギー(2.5J)では、He添加希薄水素混合気では、 $S_{L0}$ が15cm/sでは $\phi$ が概ね0.3以上、25cm/sでは $\phi$ が概ね0.6以上においては火炎伝ばに至る混合気を作成できなかった。

破線で示す $CO_2$ を添加した混合気では、他の希積ガスと比べて大きな $S_T$ を示している。したがって、 $CO_2$ は乱流燃焼場において、 $S_{L0}$ が同等の混合気では乱流燃焼速度特性の改善効果を有していることがわかる。

#### 3.2 選択拡散効果

これまでに、燃料-空気混合気を窒素で希釈することにより層流燃焼速度を揃えた当量比の異なる各種燃料の人工空気混合気を用いて、乱流燃焼速度特性について検討してきた[7,8]。その結果、乱流燃焼場では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ることを明らかにした。すなわち、選択拡散効果により、従来

は均一と考えられていた火炎面近傍の混合気組成は不均一となり、乱流火炎面の未燃混合気側に凸な火炎部分には相対的に拡散係数（または拡散速度）の大きな分子の濃度が増加する。したがって、乱流火炎の局所燃焼速度は火炎形状に起因して変化し、乱流燃焼速度に大きく影響を与える。さらに、この未燃混合気側に凸な火炎部分の燃焼特性は、乱流火炎の全体の燃焼特性を支配することを明らかにした。例えば、希薄水素混合気であれば、水素の拡散速度は窒素および酸素に比べて速いこと、および希薄では燃料が不足していることから、未燃混合気側に凸な火炎部分に水素が相対的に多く拡散する。そのため局所燃焼速度も増加し、火炎面全体としての平均局所燃焼速度が増加することになると推定できる。なお窒

素と酸素の拡散特性は分子量がほぼ等しいことから概ね同等である（表2参照）。

ここでは、選択拡散効果の観点から、窒素だけでなく他の希積ガスの場合についても考察する。表2には、水素 $H_2$ 、酸素 $O_2$ 、窒素 $N_2$ 、アルゴン $Ar$ 、ヘリウム $He$ および二酸化炭素 $CO_2$ の各分子特性値を示す。ここで、 $w$ は分子量、 $d$ は分子直径、 $d$ はレナード・ジョーンズポテンシャルの極小値、 $k$ はボルツマン定数を表す[12]。また、図5には、表2を基に計算した表1の各混合気の希積ガスの拡散係数 $D_M$ を窒素の $D_M$  ( $D_{M,N_2}$ )で無次元化したものを示す。 $Ar$ 添加混合気においては、図5に示すように $Ar$ 分子は $N_2$ 分子より分子量は大きいものの、単原子分子であるため、 $N_2$ と同程度の拡散特性を有する。また、 $He$

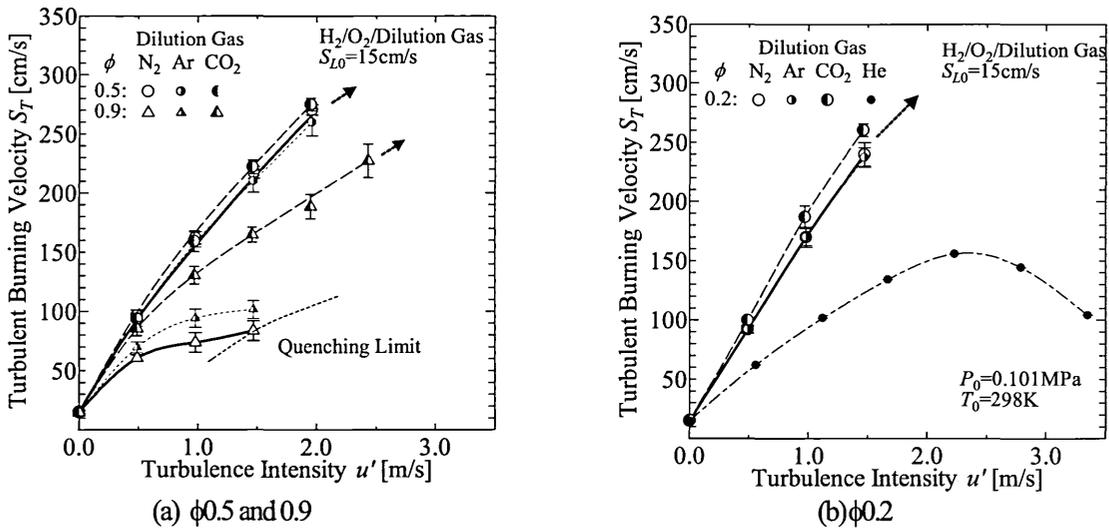


図3 乱流燃焼速度 $S_T$ と乱れ強さ $u'$ の関係( $S_{L0}=15\text{cm/s}$ )

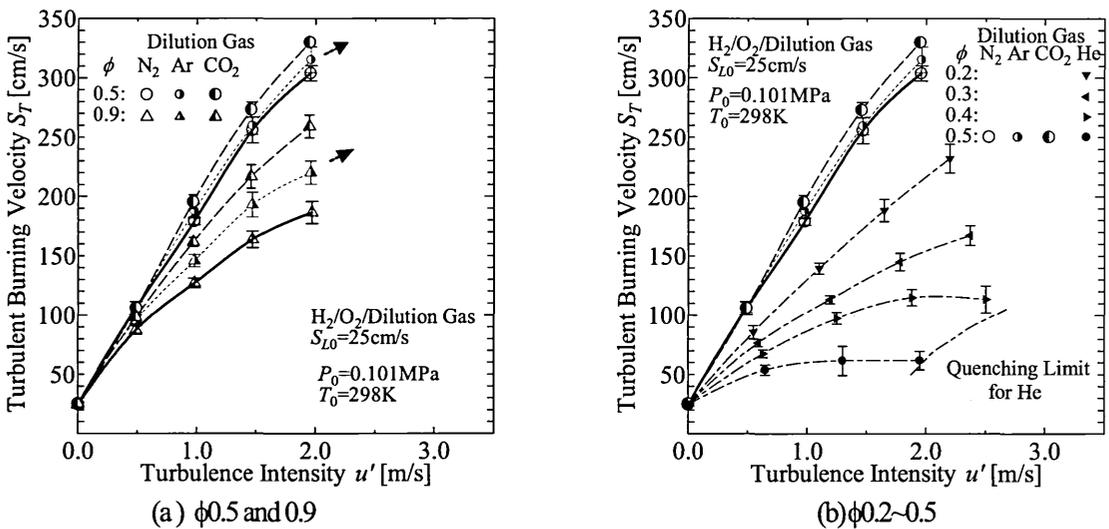


図4 乱流燃焼速度 $S_T$ と乱れ強さ $u'$ の関係( $S_{L0}=25\text{cm/s}$ )

表2. 分子特性値

Substance	w g/mol	$\sigma$ nm	$\epsilon/k$ K
H <sub>2</sub>	2.016	0.283	59.7
O <sub>2</sub>	31.999	0.347	106.7
N <sub>2</sub>	28.013	0.380	71.4
Ar	39.948	0.354	93.3
He	4.003	0.255	10.2
CO <sub>2</sub>	44.010	0.394	195.2

w: Molecular weight  
 $\sigma$ : Characteristic Lennard-Jones length  
 $\epsilon$ : Characteristic Lennard-Jones energy  
 k: Boltzmann's constant

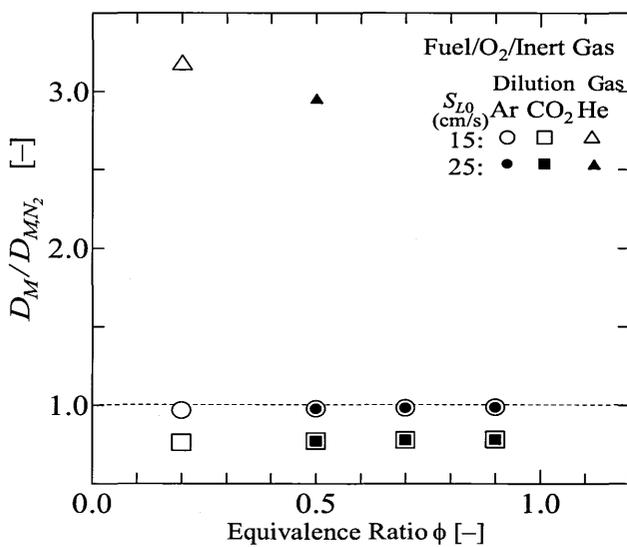


図5. 希釈ガスの分子拡散特性

( $D_M$ : 希釈ガスの分子拡散係数,  $D_{M,N_2}$ : 窒素の $D_M$ )

添加混合気においては、Heは分子量も小さく、単原子分子であることから、他の希釈ガスに比べて大きな拡散特性を有する。

一方、CO<sub>2</sub>添加混合気の場合は、他の成分に比べCO<sub>2</sub>は分子量が大きく、分子直径はH<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>分子に比べて大きいことから、N<sub>2</sub>に比べて小さな拡散特性を有する。

以上の各希釈ガスの拡散特性から、図3と4を考察するとN<sub>2</sub>と同程度の拡散特性を有するArは同程度の乱流燃焼速度特性を呈し、拡散係数が小さなCO<sub>2</sub>は乱流燃焼速度が相対的に増加し、一方、拡散係数が著しく大きなHeは乱流燃焼速度を著しく減少させることがわかる。すなわち、CO<sub>2</sub>など相対的に拡散速度の遅い希釈ガス分子は、選択拡散効果により上述の乱流燃焼場全体を支配する未燃混合気側に凸な火炎部分での濃度は相対的に低

下する。この部分の希釈ガス濃度の低下は局所燃焼速度の増加となり、乱流火炎全体としての平均の局所燃焼速度を増加させると推察できる。一方、Heなど拡散速度の速い希釈ガス分子は、選択拡散効果により逆に未燃混合気側に凸な火炎部分に多く拡散し濃度は相対的に増加し、結果的に乱流燃焼場の平均局所燃焼速度を低下させることになる。

したがって、希釈ガスの分子拡散特性に起因する選択拡散効果により、乱流燃焼速度特性を説明できることは明らかである。

### 3.3 乱流燃焼時の平均局所燃焼速度

既報[7,8]で提案している選択拡散効果[9]を考慮した乱流火炎の平均局所燃焼速度 $S_L$ の推定法を、N<sub>2</sub>に加え、ArとHeを希釈ガスとする混合気に適用し、次の仮定を用い実験的に推定した。①乱流燃焼時の火炎面積は乱れ強さのみに依存する。②乱流火炎面近傍において、N<sub>2</sub>またはAr添加混合気においては、希釈ガスとO<sub>2</sub>のモル比、He添加混合気においてはHeとH<sub>2</sub>のモル比は一定である。③選択拡散効果量は当量比に依存しない。ここで、②の仮定では、3.2項での各希釈ガスの拡散特性の議論から、Arを希釈ガスとした三成分系（水素-酸素-希釈ガス）混合気の拡散特性を考えた場合、乱流火炎面近傍において、N<sub>2</sub>添加混合気の場合と同様に、希釈ガスとO<sub>2</sub>が一つのグループとして運動していると仮定した。また、He添加水素混合気では、H<sub>2</sub>とHeは一つのグループとして運動していると仮定した。一方、他の希釈ガスと異なり、CO<sub>2</sub>添加混合気の火炎面近傍において、拡散特性の観点からはH<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>がそれぞれ独立して運動することが考えられる。この様に分子拡散特性が複雑であることから、CO<sub>2</sub>添加混合気を選択拡散効果量を推定していない。

図6に、推定した乱流燃焼時の火炎面の実質的な燃焼速度と考えられる平均局所燃焼速度と層流燃焼速度の比 $S_L/S_{L0}$ を当量比 $\phi$ に対して示す。

図6から、Ar添加混合気の $S_L/S_{L0}$ は、N<sub>2</sub>添加の値と比較すると、同等か若干大きくなっている。したがって、Ar添加混合気の乱流燃焼速度はN<sub>2</sub>添加混合気と同等か若干高い傾向を示すことが予測できる。この傾向は、図3と4の $S_L$ 計測結果の傾向と良い一致を示す。

一方、He添加水素混合気は、N<sub>2</sub>添加混合気に比べ選択拡散効果量 $S_L/S_{L0}$ の値が著しく小さいことがわかる。これも、図3と4の $S_L$ 計測結果の傾向と一致する。

以上から、選択拡散効果を考慮し推定した局所燃焼速

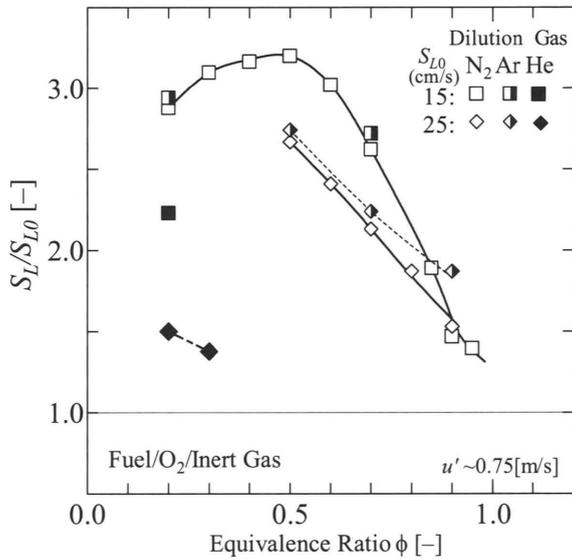


図6. 選択拡散効果を考慮して推定した乱流燃焼時の平均局所燃焼速度 $S_L$   
( $D_M$ : 希釈ガスの分子拡散係数,  $D_{M,N_2}$ : 窒素の $D_M$ )

度により、乱流燃焼速度特性を定性的に説明できることがわかる。

3.4 乱流火炎観測

図7に、瞬間2次元火炎断層写真撮影法により観測した乱流火炎の一例を示す。写真は $\phi=0.5$ ,  $S_{L0}=25\text{cm/s}$ の混合気で、 $N_2$ ,  $Ar$ および  $CO_2$ 添加混合気は $u'$ が $0.35\text{ m/s}$ 、 $He$ は $u'$ が $0.47\text{ m/s}$ である。なお、中心付近の暗い部分が既燃ガス部で、周囲の明るい部分は未燃混合気で両者の境が火炎面である。

図7から、 $u'S_{L0}$ が1.4(ただし $He$ は1.9)の乱れの条件下では、希釈ガスの差異によらず概ね連続した火炎面を有する火炎構造となっていることがわかる。しかしながら、その火炎面形状は希釈ガスに依存している。

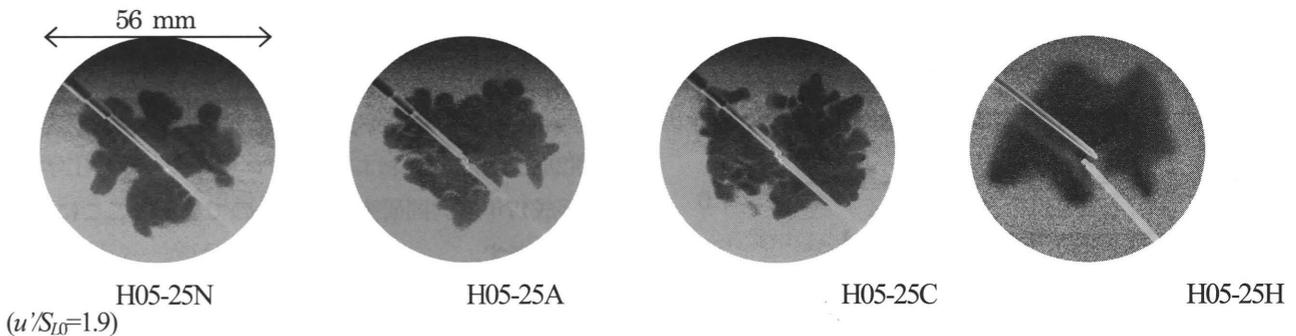


図7. 乱流火炎断層写真の一例 ( $u'/S_{L0}=1.4$ )

$N_2$ 添加混合気に比べて、 $Ar$ 添加混合気は概ね同等の形状を、 $CO_2$ 添加混合気は若干火炎面の凹凸が微細化する傾向に、逆に $He$ 添加混合気は、他に比べて $u'$ が大きいにも関わらず火炎面の凹凸が著しく緩慢になっていることがわかる。

火炎面形状の凹凸が小さくなる、すなわち火炎曲率が大きくなると、選択拡散効果などの火炎面が湾曲することにより生じる不安定性効果が増幅されると考えられる[7,8]。

すなわち、 $CO_2$ 添加乱流火炎にみられた火炎面曲率の増大は選択拡散効果をより顕在化させる可能性がある。したがって、これら希釈ガスに起因する火炎形状の差異が、乱流燃焼速度および局所燃焼速度特性に影響を与えていることが推察できる。

3.5 Markstein数

Marksteinを初めとし層流火炎を対象に、火炎伸長と燃焼速度には線形的な関係があることが議論[9,10]され、Faethら[17]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。

$$S_{Lc}/S_L = 1 + MaKa \tag{1}$$

ここで、 $S_{Lc}$ 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)、 $S_L$ は伸長を受けているときの層流燃焼速度  $[=(\rho_b/\rho_u) \cdot (dr/dt)]$ 、 $Ka$ はKarlovitz数  $[=K \cdot (\alpha/S_L^2)]$ 、 $K$ は伸長  $[1/A \delta A/\delta t = (2/r) dr/dt]$ 、 $A$ は火炎要素表面積、 $r$ は層流球状伝ば火炎半径、 $Ma$ はMarkstein数である。式(1)は層流火炎を対象とした関係式ではあるが、本研究では、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[15,17]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8に、 $S_{L0}=25\text{cm/s}$ の混合気に対して推定した $Ma$ を示す。図8から、Heと $\text{N}_2$ 添加混合気の場合、 $\phi$ の減少に伴い $Ma$ が低下する傾向を示すことから、同一の $Ka$ すなわち同様な伸長を受けた乱流火炎では未燃混合気側に凸な火炎部分の燃焼速度が $\phi$ の減少に伴い増加する傾向にあることが推定できる。さらに、 $\text{N}_2$ の場合に比較してHeでは、 $Ma$ の値が大きいかつ概ね正の値を有することから、 $S_{L1}/S_{L0}$ は小さく、すなわち $Ma$ に基づく燃焼速度は同一 $Ka$ であれば著しく小さくなることが推測できる。これら $\text{N}_2$ とHeに関する結果は、図3や4の乱流燃焼速度特性や図7の局所燃焼速度特性と一致する傾向を示す。

しかしながら、Arと $\text{CO}_2$ 添加混合気の場合には、 $\phi$ の減少に伴い $Ma$ が増加する傾向を示したり、 $\phi$ が0.5で $\text{CO}_2$ が $\text{N}_2$ より大きな $Ma$ を示すなど、Heと $\text{N}_2$ 添加混合気の場合のように乱流燃焼速度や局所燃焼速度の計測結果との良い相関関係は見られない。

したがって、さらに火炎形状や火炎表面積などに関する詳細な検討は必要であるが、本実験範囲では火炎伸長および曲率の効果のみでは、包括的に局所燃焼速度および乱流燃焼速度特性を説明できない。この結果は、3.2および3.3項の結果を考えあわせると、乱流燃焼時の局所燃焼速度や乱流燃焼速度に与える選択拡散効果の影響が支配的であることを示唆するものである。

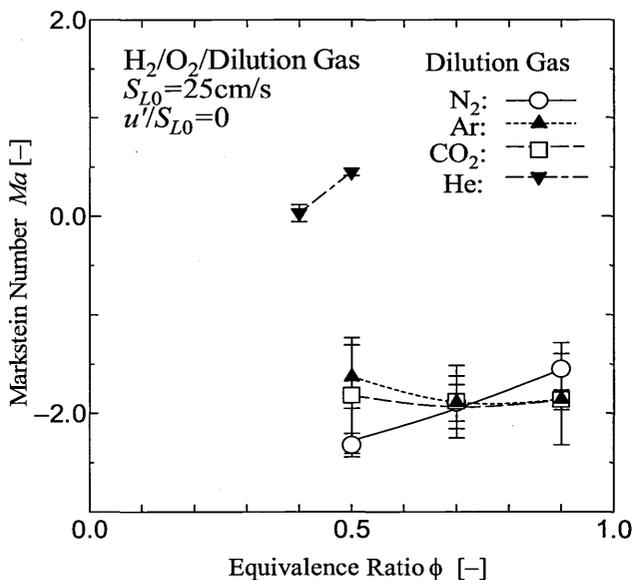


図8. 球状伝ば層流火炎から推定したマークスタイン数 $Ma$

#### 4 結論

層流燃焼速度を揃えた希薄水素-酸素-希釈ガス混合気において、希釈ガスの種類を窒素 $\text{N}_2$ 、アルゴンAr、二酸化炭素 $\text{CO}_2$ およびヘリウムHeと変化させ、乱流燃焼速度特性および局所燃焼速度特性に与える希釈ガスの影響を実験的に調べた。その結果、次のような知見が得られた。

- (1) 乱流燃焼速度特性は、同一当量比、同一乱れ強さの $\text{N}_2$ 添加混合気と比較し、 $\text{N}_2$ と同等の拡散速度を有するAr添加ではほぼ同等か若干高い値を、拡散速度が大きなHe添加では著しく低い値を、逆に拡散速度が遅い $\text{CO}_2$ 添加では高い値を示した。すなわち、本実験条件下では、拡散速度が遅い希釈ガスほど乱流燃焼速度特性を向上させる傾向にあることがわかった。
- (2) 選択拡散効果を考慮し推定した平均局所燃焼速度は、 $\text{N}_2$ 添加混合気と比較して、Ar添加は同程度か高い値を、He添加は低い値を示した。この結果は、乱流燃焼速度特性を定性的に説明できる。
- (3) 火炎断層写真を撮影し火炎形状を観察した結果、概ね同一の乱れ場でも、希釈ガスの種類が乱流火炎形状に影響を与え、 $\text{N}_2$ 添加混合気と比べて、Arは概ね同等の形状を、 $\text{CO}_2$ は若干火炎面の凹凸が微細化し、逆にHeは他に比べて火炎面の凹凸が著しく緩慢になることがわかった。
- (4) Markstein数を球状伝ば層流火炎から推定したが、本実験範囲では乱流燃焼速度や局所燃焼速度特性に対して希釈ガスに因らない定性的な関係は見いだされなかった。

#### 謝辞

終わりに、本研究において九州大学大学院生・濱根将太君、須本祐一朗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)および(財)エネルギー総合工学研究所平成17年度共同研究によるものである。ここに記し、謝意を表す。

## 参考文献

1. WE-NET summary of annual reports (1994),  
<http://www.ena.or.jp/WE-NET/index.html>
2. 古谷 他 2名; 機論 B, Vol.61, No.590, pp.3470-3476(1995).
3. Andrews, G. E., et al.; Combust. Flame, Vol.24,  
pp.285-304(1975).
4. D.D.S.LIU and R.MacFARLANCE; Combust. Flame,  
Vol.49, pp.59-71(1983).
5. Gülder, Ö. L.; Proc.23th Symp.(Int.) on Combust., Combust.  
Inst., pp.743-750(1990).
6. Kido, H., Huang, S. and Nakashima, K; JSME Int. J., Ser.2,  
Vol.34, No.4, pp.509-519(1991).
7. 城戸 他 2名; 機論 B, Vol.62, No.600, pp.3198-3204(1996).
8. Kido, H. and Nakahara, M.; JSME Int. J., Ser.B, Vol. 41,  
No.3, pp.666-673(1998).
9. Williams, F. A.; Combustion Theory, 2nd ed., Benjamin /  
Cummings Publishing Co., (1985).
10. Peters, N.; Turbulent Combustion, Cambridge University  
Press, p.95(2000).
11. Bird, R.B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N.; Transport  
Phenomena, John Wiley & Sons, pp.554-591(1960).
12. Reid, R. C., et al.; The Properties of Gases and Liquids, 3rd  
ed., McGraw-Hill, Inc., pp.678-679 (1977).
13. Lewis, B., and von Elbe, G.; Combustion, Flames, and  
Explosion of Gases, 3rd ed., Academic Press, (1987).
14. Babkin, V. S., et al.; Combustion, Explosion, and Shock  
Waves, Vol.13, No.3, pp.291-295 (1978).
15. Kido, H., et al.; Proc. of the 4rd KSME- JSME Thermal Eng.  
Conf., Vol.3, pp.3-85-3-90 (2000).
16. Kido, H., et al.; 2003 JSAE/SAE International F&L  
Meeting, SAE 2003-01-1773, (2003).
17. Know, S., et al.; Combust. Flame, Vol.90, pp.230-246 (1992).