乱流燃焼速度に及ぼす不活性ガスの影響*

城戸 裕之^{*1}, 橋本 淳^{*2}, Dilmurat BARAT^{*3}
西垣 雅司^{*4}, 岡本 秀樹^{*4}

Effect of Inert Gas on Turbulent Burning Velocities

Hiroyuki KIDO^{*5}, Jum HASHIMOTO, Dilmurat BARAT,
Masashi NISHIGAKI and Hideki OKAMOTO^{*5} Kyushu University, Dept. of Mechanical Science and Engineering,
6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Fukuoka, 812-8581, Japan

In our previous work, the preferential diffusion effect was found to play an important role in premixed turbulent combustion characteristics, where nitrogen was added as an inert gas to several fuel/oxygen mixtures. In this study, the inert gas is changed to Ar, He and CO₂, and the relationship between the turbulent burning velocity and the diffusion coefficient of each inert gas is examined experimentally. As a result, Ar and CO₂ added mixtures show slightly larger turbulent burning velocities than that of nitrogen added mixtures. On the contrary, He added mixtures show very smaller ones at the same equivalence ratio. These characteristics are discussed in connection with each diffusion coefficient of fuel, oxygen and inert gas in multi-component system.

Key Words: Internal Combustion Engine, Premixed Combustion, Turbulent Burning Velocity, Preferential Diffusion, Inert Gas

1. 序 論

予混合乱流燃焼場における混合気の乱流燃焼速度および消炎限界は、内燃機関の性能を決定する重要な因子であり、機関設計、性能予測シミュレーションなどにおける乱流燃焼速度予測モデルの確立は重要な課題である。そのため、乱流燃焼速度およびその火炎構造に関する研究は多い^{(1)~(3)}。しかしながら、それらはおもに理論混合比近辺の限られた混合気に関する議論であることが多く、近年の低公害化、省エネルギーといった問題から要求される、希薄混合気まで含めた乱流燃焼速度の統一的な検討は少ない。

著者らは既報⁽⁴⁾で、層流燃焼速度を揃え、当量比を変化させた種々の炭化水素系および水素混合気について乱流燃焼実験を行った。その結果、特に非理論混合気における乱流燃焼時、反応物の拡散特性の違いに基づく選択拡散効果が重要な役割を担っており、乱流火

炎素面における局所的な燃焼速度が層流燃焼速度から変化していることを実験的に明らかにした。さらにこの局所燃焼速度を推定し、その影響を考慮することで、種々の層流燃焼速度、当量比を有する混合気における乱流燃焼速度特性を、定性的、定量的に説明できた。

本研究では、混合気に含まれる各成分の拡散特性が、乱流燃焼速度に及ぼす影響を検討するため、不活性ガスの種類を変化させることにより、多成分系拡散係数を変化させて乱流燃焼実験を行った。実験には、燃料としてメタン、水素を用い、添加する不活性ガスとして、分子特性値の異なるアルゴン、ヘリウム、二酸化炭素を用いた。

2. 実験方法

2.1 実験装置 本研究では、図1に示す内径が約120 mmの球形に近い定容燃焼装置を用いた。装置には向かい合う4面に多孔板が、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により、燃焼室中心部にほぼ等方的な定常乱れ場を発生することができる。

燃焼実験は、各混合気を燃焼室内に大気圧充てんし、所定のファン回転数の下で燃焼室中心部において火花点火することにより行った。層流および乱流燃焼速度

* 原稿受付 1999年4月15日。

^{*1} 正員, 九州大学大学院工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)。^{*2} 学生員, 九州大学大学院。^{*3} 正員, 九州大学大学院。^{*4} 正員, 大阪ガス(株)研究開発部 (〒554-0051 大阪市此花区西島 6-19-9)。

E-mail: jun@mech.kyushu-u.ac.jp

Table 1 Properties of mixtures

Mixture	ϕ	Fuel & Inert Gas	Molar Fraction			S_{L0} cm/s	D_F/D_0	α mm ² /s	ν mm ² /s	Le
			Fuel	O ₂	Inert Gas					
M07-25N	0.7	CH ₄ /N ₂	1.00	2.86	9.86	24.98	1.053	21.078	15.182	0.888
M09-25N	0.9	CH ₄ /N ₂	1.00	2.22	9.44	25.06	1.053	21.123	15.181	0.890
M11-25N	1.1	CH ₄ /N ₂	1.00	1.82	8.00	25.04	1.052	21.157	15.198	0.938
M07-25A	0.7	CH ₄ /Ar	1.00	2.86	15.00	25.13	1.079	20.469	13.797	0.880
M09-25A	0.9	CH ₄ /Ar	1.00	2.22	14.89	25.25	1.078	20.495	13.754	0.881
M11-25A	1.1	CH ₄ /Ar	1.00	1.82	12.91	25.37	1.077	20.532	13.764	0.951
M07-25C	0.7	CH ₄ /CO ₂	1.00	2.86	5.30	24.87	1.123	13.710	10.220	0.691
M09-25C	0.9	CH ₄ /CO ₂	1.00	2.22	4.80	24.81	1.109	13.594	10.097	0.692
M07-15N	0.7	CH ₄ /N ₂	1.00	2.86	11.14	15.38	1.054	21.083	15.168	0.889
M09-15N	0.9	CH ₄ /N ₂	1.00	2.22	10.82	14.91	1.053	21.124	15.166	0.891
M11-15N	1.1	CH ₄ /N ₂	1.00	1.82	9.46	15.15	1.052	21.155	15.177	0.939
M07-15A	0.7	CH ₄ /Ar	1.00	2.86	17.71	14.52	1.079	20.454	13.746	0.879
M09-15A	0.9	CH ₄ /Ar	1.00	2.22	17.56	14.52	1.078	20.477	13.707	0.881
M11-15A	1.1	CH ₄ /Ar	1.00	1.82	15.45	14.86	1.077	20.508	13.712	0.951
H05-25N	0.5	H ₂ /N ₂	1.00	1.00	7.10	24.69	2.946	29.565	16.726	0.409
H07-25N	0.7	H ₂ /N ₂	1.00	0.71	6.43	25.38	2.917	30.649	16.939	0.425
H09-25N	0.9	H ₂ /N ₂	1.00	0.56	6.17	24.53	2.904	31.201	17.047	0.433
H05-25A	0.5	H ₂ /Ar	1.00	1.00	9.70	25.00	3.261	28.769	14.705	0.384
H07-25A	0.7	H ₂ /Ar	1.00	0.71	8.93	25.34	3.242	29.687	14.794	0.396
H09-25A	0.9	H ₂ /Ar	1.00	0.56	8.72	24.86	3.236	30.073	14.818	0.402
H05-25C	0.5	H ₂ /CO ₂	1.00	1.00	4.50	25.39	3.195	20.431	10.425	0.326
H07-25C	0.7	H ₂ /CO ₂	1.00	0.71	4.25	24.90	3.144	20.939	10.373	0.337
H09-25C	0.9	H ₂ /CO ₂	1.00	0.56	3.75	25.43	3.077	22.176	10.546	0.358
H02-25H	0.2	H ₂ /He	1.00	2.50	7.75	25.00	1.583	109.250	50.105	0.908
H03-25H	0.3	H ₂ /He	1.00	1.67	9.35	24.90	1.706	129.392	64.018	0.998
H04-25H	0.4	H ₂ /He	1.00	1.25	10.10	25.11	1.767	139.817	72.953	1.041
H05-25H	0.5	H ₂ /He	1.00	1.00	10.50	24.55	1.803	146.144	79.166	1.067
H07-15A	0.7	H ₂ /Ar	1.00	0.71	10.93	15.37	3.284	28.220	14.556	0.377
H03-35H	0.3	H ₂ /He	1.00	1.67	8.55	35.13	1.689	126.791	61.960	0.988

① Perforated Plate, ② Fan, ③ Ignition Plug

Fig. 1 Cross sectional view of the combustion chamber

は燃焼室内の圧力履歴から算出した⁽⁵⁾。ファン回転数、動粘度、乱れ強さの関係はLDVを用いて計測しており、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。

2.2 実験に使用した混合気 本研究では、燃料-酸素混合気中添加する不活性ガスとして、アルゴン、ヘリウム、二酸化炭素を用いた。実験に使用した混合気を表1に示す。各混合気は、層流燃焼速度を25 cm/sおよび15 cm/s(一部は35 cm/s)に揃え、当量比を変化させた混合気である。表1中には、比較のために使用した窒素添加混合気⁽⁴⁾も示す。本研究では、これらの解析対象混合気をグループIと呼ぶ。なお、グループIの選択拡散効果量を推定するために、グループII、グループIIIと称する補助混合気⁽⁴⁾を用いた。ここで、本研究で用いる混合気名は以下のような意味を有する。一例としてM07-25Nでは、Mは燃料がメタンであること、07は当量比0.7であること、25は層流燃焼速度25 cm/sであること、Nは不活性ガスとして窒素を用いたことを示す。燃料記号がHの場合は水

水素を、不活性ガス記号 A は Ar, C は CO_2 , H は He を表す。

ここで、表 1 中の D_F , D_0 は、それぞれ燃料、酸素の多成分系拡散係数であり、二成分系拡散係数に基づく多成分系拡散係数の経験式⁽⁶⁾⁽⁷⁾から算出した。また、 ϕ は当量比、 S_{L0} は層流燃焼速度、 α は熱拡散係数、 ν は動粘度、 Le はルイス数を表す。

3. 実験結果および考察

3.1 乱流燃焼速度特性 各種不活性ガスを添加し、層流燃焼速度を 25 cm/s に揃えたメタンおよび水素混合気における乱流燃焼速度計測結果を、図 2 および図 3 に示す。また、層流燃焼速度を 15 cm/s に揃えたメタン混合気における計測結果を図 4 に示す。図 3 中の窒素、アルゴン、二酸化炭素を添加した当量比

0.2~0.4 の水素混合気は、乱流燃焼可能であるが、本研究では燃焼速度の測定を行っていない。

図 2, 3 から、細実線で示すアルゴンを添加した混合気においては、メタン、水素いずれの混合気においても、太実線で示す同一当量比の窒素添加混合気と比べて、同一乱れ強さでは若干大きな乱流燃焼速度を示すことがわかる。また、層流燃焼速度が 15 cm/s、当量比が 1.1 のメタン混合気においては、アルゴンを添加した混合気では乱流火炎の伝ばを確認できたが、窒素を添加した混合気では火炎伝ばに至らなかった。これらのことから、不活性ガスとしてアルゴンが燃焼場に存在することにより、窒素が存在する場合に比べて乱流燃焼速度特性が若干改善されていることがわかる。

なお、図 3 中には示していないが、当量比 0.7 の窒素、アルゴン添加水素混合気においても同様の傾向を示した。

ヘリウムを添加した混合気では、ヘリウムの高い温度伝導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 (2.5 J) では、メタン-酸素にヘリウムを添加した混合気において、層流燃焼速度 S_{L0} が 25 cm/s 程度となる混合気は作成できなかった。同様にヘリウム添加水素混合気においても、当量比が 0.6 以上においては混合気を作成できなかったため、当量比が 0.5 以下の混合気に対して実験を行った。

図 3 から、同一条件となる当量比が 0.5 の混合気と比較すると、太破線で示すヘリウム添加混合気は、窒素添加混合気と比べて乱流燃焼速度がかなり小さくなっていることがわかる。したがって、不活性ガスとしてヘリウムが燃焼場に存在することにより、乱流燃焼

Fig. 2 Turbulent burning velocities (CH_4 , $S_{L0} = 25 \text{ cm/s}$)

Fig. 3 Turbulent burning velocities (H_2 , $S_{L0} = 25 \text{ cm/s}$)

Fig. 4 Turbulent burning velocities (CH_4 , $S_{L0} = 15 \text{ cm/s}$)

速度特性に大きな悪影響を与えていることがわかる。

細破線で示す二酸化炭素を添加した混合気では、メタン、水素いずれの混合気においても、窒素、アルゴンを添加した混合気比べて大きな乱流燃焼速度を示している。したがって、二酸化炭素は乱流燃焼場において、乱流燃焼速度特性の大きな改善効果を有していることがわかる。

3・2 選択拡散効果量 これらの混合気に対して、選択拡散効果量の推定を行った。選択拡散の効果量としては、火炎面における当量比の平均増減効果量 $\delta\phi$ 、およびそれに伴う平均局所燃焼速度 S_L を提案した⁽⁴⁾。

3・2・1 測定手法 選択拡散効果量は、以下の仮定の下で実験的に推定した。

(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、窒素添加、アルゴン添加混合気においては、不活性ガスと酸素のモル比、ヘリウム添加混合気においてはヘリウムと燃料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。

まず、効果量を推定する混合気をグループ I とすると、各グループ I の混合気に対し、当量比および層流燃焼速度は異なるものの、ある低い乱れ強さの領域(本研究では約 0.75 m/s 付近)において、グループ I の混合気と等しい乱流燃焼速度をもつ混合気、グループ II を実験的に特定した。これらの二組の混合気は、乱流燃焼速度が火炎面積の増加率と局所燃焼速度の積に比例すること、および仮定 1 から、この乱れ強さにおいてほぼ等しい火炎面積を有することより、等しい局所燃焼速度を有していると考えた。

次に、これらの混合気における局所的な組成の変化を以下のように推定した。表 2 には、メタン、水素、

酸素、窒素、アルゴン、ヘリウム、二酸化炭素の各分子特性値を示す。 w は分子量、 σ は分子直径、 ε 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⁽⁶⁾。

アルゴン添加混合気においては、表 2 に示すように、アルゴンは酸素より質量は大きいものの、単原子分子であるため分子特性値の差異は小さく、その結果酸素とほぼ同程度の多成分系拡散特性を示す。そのため、使用した三成分系混合気の乱流火炎面近傍においては、既報の窒素添加混合気と同様⁽⁴⁾ に、不活性ガスと酸素が一つの遅いグループとして運動し、燃料のみが単独で比較的早い拡散運動を行っており、アルゴンと酸素の局所的なモル比は変化しないと仮定した。

ヘリウム添加混合気においては、表 2 に示すように、ヘリウムは質量も軽く、単原子分子であることから分子直径も小さいため、比較的大きな拡散特性を有する。したがって、窒素添加、アルゴン添加混合気の場合と異なり、水素と不活性ガスが一つのグループとして比較的早い拡散運動を行い、酸素のみが単独で運動しており、ヘリウムと水素の局所的なモル比は変化しないと仮定した。

したがって、乱流燃焼時の湾曲火炎面における未燃混合側への突出部に対し、これら二つの分子グループのうち、早いものが優先的に拡散し、遅いものの拡散が遅れることにより、局所的な濃度差が発生していると考えた。

この条件にしたがい、グループ I およびグループ II の混合気に対して、本来の混合気組成から当量比を変化させ、層流燃焼速度を計測した一例を図 5 に示す。この例では、アルゴンと酸素のモル比を一定に保ち、

Table 2 Characteristic values of each molecules

Substance	w g/mol	σ Å	ε/k K
CH ₄	16.043	3.758	148.6
H ₂	2.016	2.827	59.7
O ₂	31.999	3.467	106.7
N ₂	28.013	3.798	71.4
Ar	39.948	3.542	93.3
He	4.003	2.551	10.2
CO ₂	44.010	3.941	195.2

w : Molecular Weight

σ : Characteristic Lennard-Jones Length

ε : Characteristic Lennard-Jones Energy

k : Boltzmann's Constant

Fig. 5 Laminar burning velocities of group III mixtures

当量比のみを変化させた混合気, グループIIIを用いて計測している。

図5を用い, 選択拡散効果量を推定した。グループI, IIの混合気は, 火炎面において当量比の変化にしたがい, おおの図5に示す層流燃焼速度特性を示す。仮定3より各グループI, IIの混合気は等しい当量比変化量を受け, さらに上述のように等しい局所燃焼速度になったと考え, 図5中の破線で示すようにして, 平均当量比増減効果量 $\delta\phi$ および平均局所燃焼速度 S_L を決定した。

3・2・2 測定結果および考察 図6に, 各混合気において推定した平均局所燃焼速度と層流燃焼速度の比, S_L/S_{L0} を当量比に対して示す。

図6から, メタン, 水素いずれの混合気においても, アルゴンを不活性ガスとして使用した場合には, S_L/S_{L0} が窒素を使用した混合気比べて若干大きくなっていることがわかる。これらは, 不活性ガスとしてアルゴンを使用した混合気における各成分の多成分系拡散係数は, 窒素を使用した混合気比べて全体的にやや小さな値を示すものの, 各分子の拡散特性における相対関係を考えた場合, 燃料と酸素の拡散特性の比は若干大きくなり, 燃料の予熱帯への集中度が大きくなっているためと考えられる。したがって, 選択拡散効果量が相対的に大きくなるアルゴン添加混合気は, 同条件において, 窒素添加混合気よりも, 若干大きな乱流燃焼速度を示していると考えられる。

一方ヘリウム添加水素混合気は, 窒素添加水素混合気比べて選択拡散効果量ははるかに小さいことがわかる。これは, ヘリウム添加混合気における各成分の多成分系拡散係数は, 窒素を添加した混合気比べて

全体的に大きな値を示すものの, 各分子の拡散特性における相対関係を考えた場合, 水素, ヘリウムという拡散特性の非常に大きな分子が複数存在することにより, 燃料と酸素の拡散特性の比が小さくなり, 選択拡散効果が抑制されているためと考えられる。

ヘリウム添加混合気は, 窒素添加混合気比べてかなり大きな動粘度, 温度伝導率を有している。したがって乱れの特性値が異なり, その結果火炎構造が変化し, 乱流燃焼速度に影響を与えている可能性がある。しかしながら, 推定した局所燃焼速度がかなり小さな値を示していることから, ヘリウム添加混合気における低い乱流燃焼速度の原因として, 選択拡散効果が支配的であることが考えられる。

二酸化炭素添加混合気においては, 表2に示すように, 二酸化炭素は質量も大きく, 三原子分子であることから, 分子直径もメタン, 水素, 酸素に比べて大きいため, 比較的小さな拡散特性を有する。したがって火炎面近傍において, 燃料, 酸素, 二酸化炭素がそれぞれ独立した三つのグループとして運動していると考えられる。このような系における局所燃焼速度の実験的な推定は難しいため, 本稿では二酸化炭素添加混合気に対する選択拡散効果量の推定は行っていない。しかしながら, 二酸化炭素添加混合気においては, 燃料と酸素の拡散特性の比が相対的に大きくなることから, 選択拡散効果が乱流燃焼特性にかなり良好な影響を与えており, 窒素添加, アルゴン添加混合気よりも大きな乱流燃焼速度をもたらしていると考えられる。

図7に, メタン-酸素混合気に対して, 窒素, アルゴン, 二酸化炭素のいずれかを添加した三成分混合気における, 燃料と酸素の拡散係数の比 D_F/D_O , および不

Fig. 6 Variation of S_L/S_{L0} with equivalence ratio

Fig. 7 Comparison of D_F/D_O and D_M/D_O of each gas

活性ガスと酸素の拡散係数の比 D_M/D_0 を示す。

燃料, 不活性ガス, 酸素の拡散係数, D_F , D_M , D_0 はいずれも多成分系有効拡散係数であり, 混合気中に含まれる各成分同士の二成分系拡散係数から算出されている。したがって, ある成分の変化はすべての拡散係数へ影響を及ぼし, 特に体積割合の大きい不活性ガスの変化による影響は大きい。また, 二成分系拡散係数に基づいていることから, ある成分の変化による各成分の多成分系拡散係数への寄与には差異がある。

ここで, 局所的に組成割合の変化を考える場合, 各成分の拡散係数の絶対値よりも, 相対関係を考慮すべきであり, ここでは各混合気中の酸素の拡散係数との比に基づいて考察する。

アルゴン添加混合気において, D_F/D_0 は窒素添加混合気に比べて大きな値を示している。一方, D_M/D_0 は若干大きいものの, ほぼ同程度の値を示している。これは, 窒素に比べてアルゴンのほうが若干拡散係数は小さいものの, アルゴン添加混合気では酸素の拡散係数の低下割合が大きくなるためである。また, 二酸化炭素添加混合気においては, 燃料の拡散係数が, 窒素添加, アルゴン添加混合気に比べて相対的にかなり大きくなっている。一方, D_M/D_0 はかなり小さくなっていることがわかる。

ここで, 乱流燃焼速度計測結果は, 二酸化炭素, アルゴン, 窒素添加混合気の順に大きな値を示している。すなわち, 希薄混合気においては, 燃料の拡散特性が大きく, また不活性ガスの拡散特性が小さな混合気ほど, 良好な乱流燃焼特性を示していることがわかる。これは上述のように, 乱流燃焼場においてこのような多成分系拡散特性に基づく選択拡散効果が, 予熱帯での局所的な組成に影響しているためと考えられる。したがって, 乱流燃焼場に存在する各分子の拡散特性を相互比較することにより, 乱流燃焼特性を定性的に予測できることがわかる。

4. 結 論

メタン-酸素, 水素-酸素に添加する不活性ガスを変化させた混合気に対し乱流燃焼実験を行い, 乱流燃焼速度特性および選択拡散効果量についての検討を行った結果, 以下の結論を得た。

(1) 不活性ガス種類が異なり, 同一当量比で, 層流燃焼速度を揃えた混合気における乱流燃焼速度は, 二酸化炭素を添加した混合気がもっとも大きな値を示した。また, ヘリウムを添加した混合気では, 乱流燃焼速度の著しい低下が見られた。

(2) 燃料-酸素混合気に添加する不活性ガスを変化した場合, 各成分の乱流燃焼場における多成分系拡散特性が変化し, その相互関係により選択拡散効果に影響を与える。

(3) 選択拡散効果量を推定した結果, アルゴン添加混合気では窒素添加混合気よりも若干大きな値を示し, ヘリウム添加混合気では小さな値を示した。これらの影響を考慮することにより, 乱流燃焼速度特性を定性的に説明できる。

文 献

- (1) Andrews, G. E., Bradley, D. and Lwakabamba, S. B., *Combust. Flame*, **24**(1975), 285-304.
- (2) Gülder, Ö. L., *Proc. 23rd Symp. (Int.) Combust.*, Combust. Inst., (1990), 743-750.
- (3) Kido, H., Huang, S. and Nakashima, K., *JSME Int. J.*, Ser. 2, **34**(1991), 509-519.
- (4) 城戸裕之・中原真也, 機論, **63**-614, B(1997), 3477-3483.
- (5) Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames, and Explosion of Gases*, 3rd ed., (1987), 389, Academic Press.
- (6) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., *Transport Phenomena*, (1960), 554-591, John Wiley & Sons.
- (7) Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., (1985), 631-637, Benjamin/Cummings Publishing Co.
- (8) Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Sherwood, T. K., *The Properties of Gases and Liquids*, 3rd ed., (1977), 678-679, McGraw-Hill, Inc.