

燃烧容器内における乱流火炎伝ば(3)

飯沼, 一男 / IINUMA, Kazuo / 伊庭, 由昌 / 福沢, 清 /
FUKUZAWA, Kiyoshi / IBA, Yoshimasa

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

13

(開始ページ / Start Page)

35

(終了ページ / End Page)

49

(発行年 / Year)

1977-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004188>

燃焼容器内における乱流火炎伝ば(第3報)

飯 沼 一 男*・伊 庭 由 昌**
福 沢 清**

Turbulent Flame Propagation in a Combustion Bomb (3rd Report)

Kazuo INUMA, Yoshimasa IBA
and Kiyoshi FUKUZAWA

Abstract

Following the previous work on turbulent flame propagation through homogeneous propane-air mixtures in a combustion bomb, dependence of the flame accelerating effect of turbulence on the mixture composition has been studied with methane-air, methane-hydrogen-air, and propane-hydrogen-air mixtures, by means of high speed schlieren motion pictures and pressure measurements.

Main conclusions obtained are as follows: (1) The effect of turbulence on flame propagation time with methane-air mixtures is more pronounced on leaner side in contrast with propane-air mixtures. (2) A considerable variation in burning time is found with extremely rich as well as lean methane-air mixtures. (3) Rich limit of flame propagation in methane-air mixtures is considerably restricted, whether turbulence is given or not. (4) Addition of hydrogen has marked effect on acceleration of flame on the lean side, both with methane-air and propane-air mixtures. (5) Dependence of turbulent burning velocity on the mixture composition has been determined and is found almost equivalent to the above-mentioned results. (6) All of these results can be understood by considering preferential diffusion of fuel and oxygen molecules in the preheat zone of flame front, and this seems to support the theory that increase of burning velocity by turbulence is mainly due to the increase of flame surface area instead of eddy diffusion.

§1. ま え が き

火花点火機関における燃焼過程のシミュレーションに不可欠と考えられる、燃焼速度に及ぼす乱れの影響の解明を目的として、密閉容器内の均質混合気に乱れを与えた場合の火炎伝ば挙動についての研究を開始し、その成果の一部はすでに第1報¹⁾ および第2報²⁾ として報告した。現在

* 機械工学科 (現在は東京大学工学部航空学科)

** 機械工学科

までに明らかにされたおもな点は、燃焼速度に対する乱れの促進効果が乱れの性質だけでなく、混合気の当量比にも依存することで、プロパン空気混合気の場合、その効果は混合気が過濃なほど著しく、またシュリーレン写真による火炎面性状の観察結果からも、過濃な混合気ほど火炎面に生ずる凹凸が細かいという傾向が定性的ながら確かめられた。

層流燃焼速度に対する乱流燃焼速度の増加の割合は、乱れ強さのほか当量比によっても相違し、乱れが弱い場合には量論比付近、希薄側、過濃側の順に大きくなるが、乱れがある程度強くなると当量比が大きいほど燃焼速度の増加割合も大きくなる傾向を示す。したがってまた、乱れが強くなると乱流燃焼速度が最大となる当量比は、火炎温度最高の当量比よりもやや過濃側に移動する。

火炎面性状および燃焼速度に対する乱れの影響が当量比によって相違するという事実は、予混合バーナ火炎において観察されるセル状火炎の生成⁹⁾との関連を示唆し、混合気に与えられた乱れによって生ずる火炎面の凹凸が、予熱帯における燃料分子と酸素分子との選択拡散のために、過濃混合気では助長され、希薄混合気では弱められることに起因するものと考えられる。しかしその推論が正しいならば、以上の効果は燃料の種類にも依存するはずで、酸素分子よりも拡散速度の大きな燃料では逆に希薄混合気ほど乱れによる燃焼速度の促進効果が大きいことになる。

本報ではその点を確認するために、前報までのプロパンのかわりにメタンを用い、さらに拡散速度がきわめて大きい水素をプロパンおよびメタンに混入した場合について、前回とほぼ同様な測定を行った結果について述べる。

§2. 実験装置と方法

前回使用した燃焼容器を用い、ほぼ同様の方法で測定を行った。図1に容器の概要を示す。直径2 mmの小孔40個を有する乱れ発生板を中央位置から上下に急速に移動させることで混合気に乱れを与え、所定の時間後に容器中央で火花点火して、火炎伝ば状況をシュリーレン高速度撮影すると同時に、容器内の圧力変化をピエゾ式ピックアップとメモリスコープで記録した。メタンおよびプロパンは99.9%、水素は99.99%のいずれも市販のシリンダガスを使用した。容器内混合気の初圧は2 kgf/cm²、初温は25~30°Cである。

水素の混入割合は全燃料中の水素の重量%で表わし、水素を加えた場合の当量比は、その混合気の完全燃焼に必要な全燃料と空気との重量比に対する値として定義した。均質な混合気を得るため、あらかじめ混合容器中で十分なかくはんを行った後、燃焼容器に充填した。

前回の装置では上下の乱れ発生板の運動が完全に対称的ではなかったので、空気シリンダ配管の流動抵抗を加減することによりほぼ対称になるまで改善した。また乱れ発生板の停止を検出して火花点火までの遅延回路の作動を開始するための受光部を、CaSからフォトリソグラフィに置きかえることにより、作動遅れをかなり短縮できた。乱れ発生板の平均移動速度も前回よりやや大きく、3.5 m/sとなった。その結果、前報の0 msにおける乱れ強さは本報での10 msにおけ

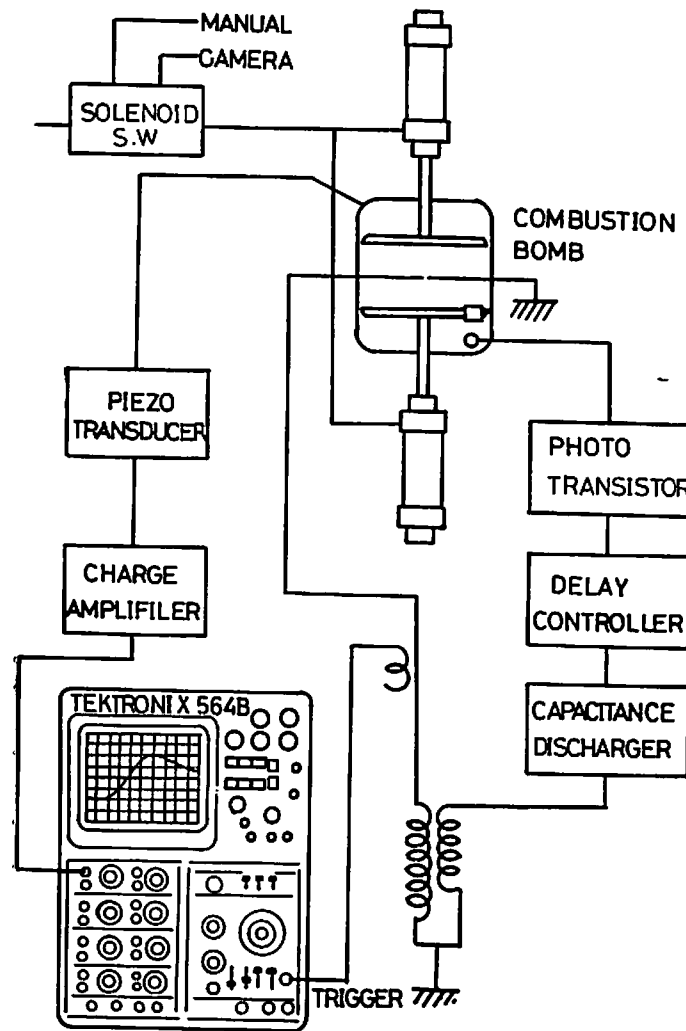


Fig 1. Schmatic diagram of the experimental apparatus.

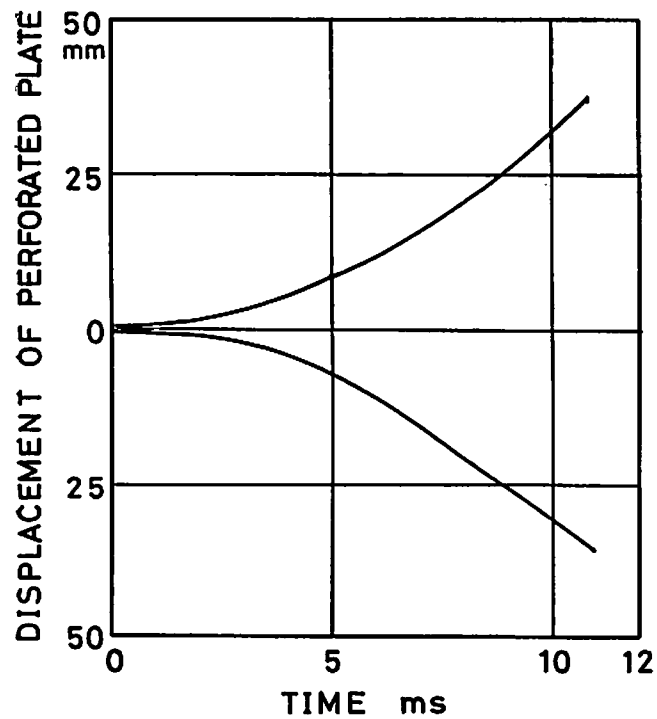


Fig 2. Displacement of perforated plates against time.

る値にほぼ対応することになる。そのほか火花回路の誤動作防止装置など、細かい点で多くの改善がなされたが、実験装置、方法とも前回と大差はない。図2に乱れ発生板の時間的変位を示す。

乱れの性質については、点火用電極付近に熱線風速計のプローブを挿入して、混合気の非燃焼時の電流波形を記録することにより、流速変動や周波数の概略を調べたが、前回と同様、十分定

Table 1. Properties of turbulence measured by a hot-wire-anemometer.

TIME INTERVAL ms	MEAN VELOCITY m/s	VELOCITY FLUCTUATION		
		FREQUENCY Hz	INTENSITY OF TURBULENCE m/s	RELATIVE INTENSITY OF TURBULENCE %
0 ~ 2	8.2	11 000 6 00	4.1 1.9	50 24
4 ~ 6	5.0	10 000 6 00	1.1 1.5	22 30
8 ~ 10	3.8	9 000 5 00	0.5 1.2	13 32
18 ~ 20	2.6	8 000 3 00	0.3 0.7	12 27
45 ~ 55	1.7	7 000 1 00	0.05 0.10	2.9 5.9
70 ~ 75	1.2	7 000 50	0.04 0.05	3.4 4.2

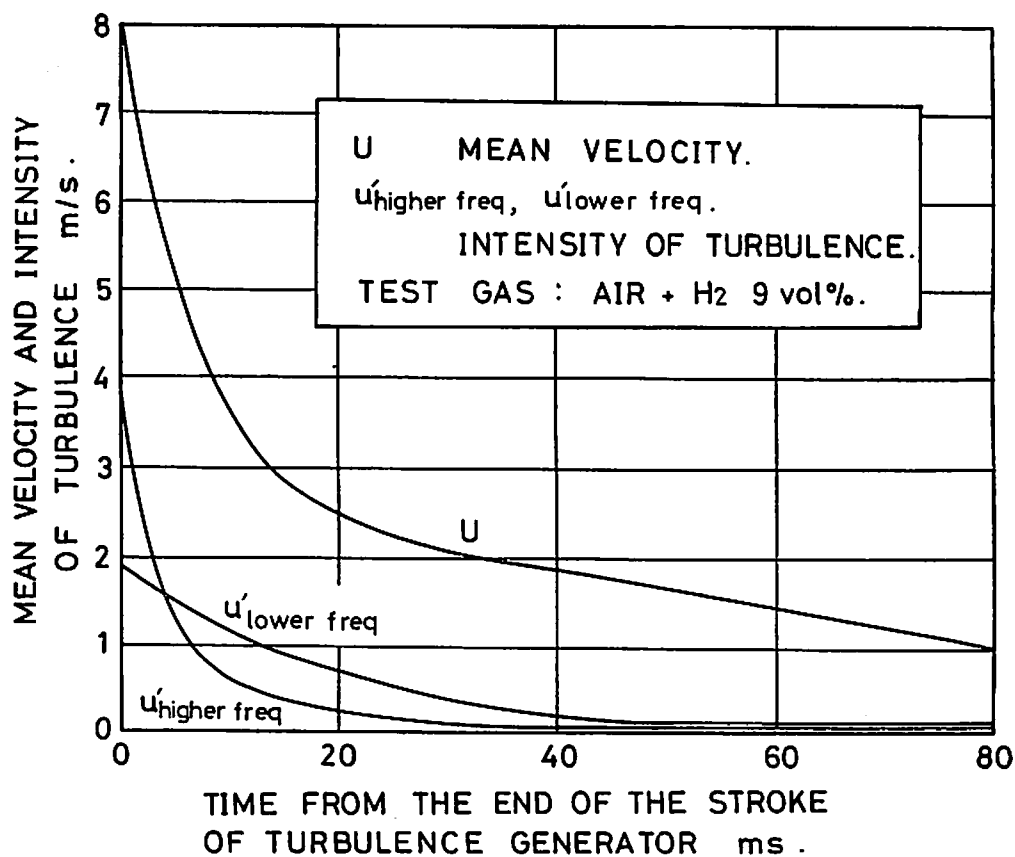


Fig 3. Decay of the mean velocity and the intensity of turbulence.

量的に明確な情報は得られていない。電流波形の記録をみると、流速変動には明らかに低周波の成分と比較的高周波の成分を含み、それぞれ乱れ発生板停止後の時間経過とともに大略表1に示すような変化がみられる。図3は平均流速 U および乱れ強さ u' の時間経過による減衰状況で、前回の実験における測定結果と数値的には多少異なるが、傾向はほぼ同様である。

§3. 結果と考察

3.1 メタン空気混合気の火炎伝ば時間

点火から最高圧力までの時間を同一条件で最低30回測定した火炎伝ば時間の平均値は当量比によって図4のように変化する。図中のパラメータとして、層流は静止混合気における値、0～55 ms は乱れ発生板停止から点火までの遅延時間を意味し、したがって点火時における混合気の乱れは、図3に示したように遅延時間が短いほど強い。図4から明らかなように、メタン空気混合気の乱れによる火炎伝ば時間の短縮は、プロパン空気混合気の場合とは反対に希薄混合気側で顕著であり、まえがきに述べた選択拡散の効果を裏書きする結果となっている。

乱れがもっとも強い場合に当量比0.6で短縮効果が小さいのは、火炎核の生長が強い乱れのために阻害されるためで、図5に示すようにこの場合は伝ば時間のばらつきも非常に大きい。同じ

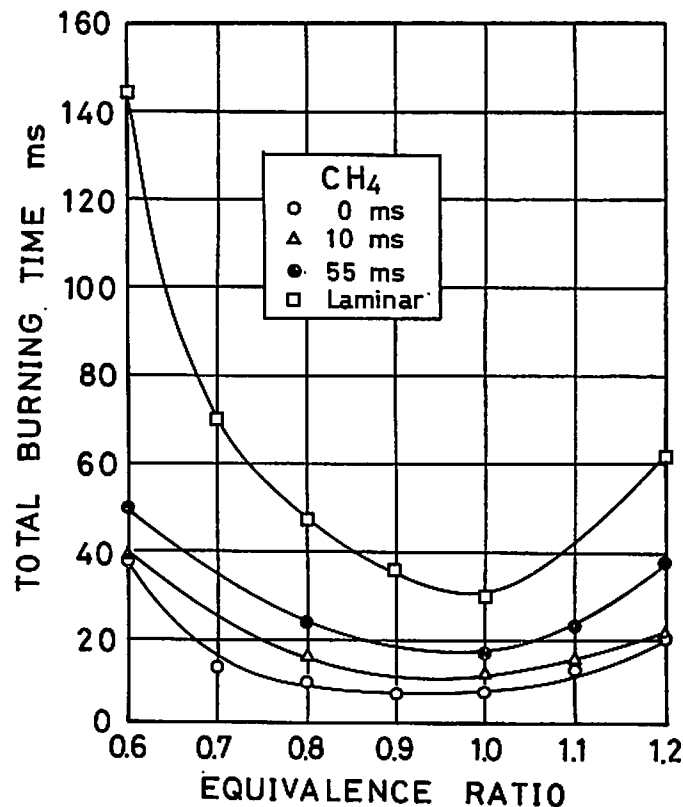


Fig 4. Total burning time of methane-air mixtures. Parameter indicates spark timing from the end of the stroke of turbulence generator.

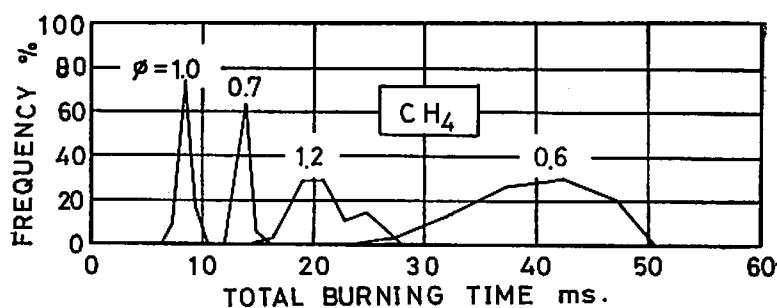


Fig 5. Frequency distribution of total burning time. (methane-air)
Parameter indicates equivalence ratio.

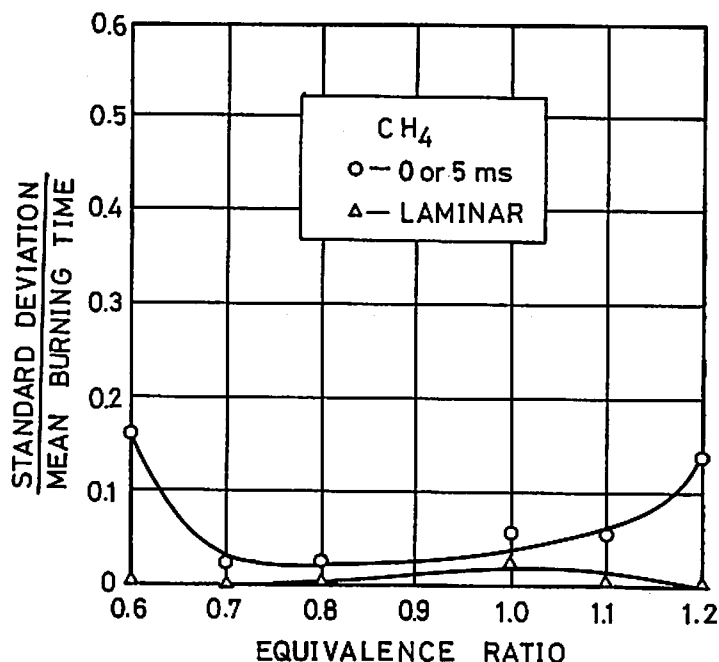


Fig 6. Change of total burning time fluctuation with equivalence ratio. (methane-air)

当量比でも乱れが弱い場合には火炎核の生長に不連続性は現われず、ばらつきも小さいが、乱れがある程度以上に強くなると急激に変動が大きくなり、平均としての伝ば時間の短縮効果も小さくなる。火炎伝ば時間の変動率の当量比による変化を図6に、また乱れの強さによる相違を図7に例示する。過濃側で変動率が大きくなっているのは、希薄側に比べて平均火炎伝ば時間が小さいためでもある。また層流火炎伝ばの場合に希薄側、過濃側とも変動率が小さいのは、平均伝ば時間がかかなり大きいことによる。

しかしプロパン空気混合気の場合と比較すると、いわゆる可燃限界当量比は希薄側でも過濃側でもやや狭いにもかかわらず、安定な火炎伝ばが可能な限界当量比は、過濃側でとくに狭くなり希薄側ではむしろプロパン空気混合気よりも多少広くなる傾向を示す。このことは静止混合気の場合にもいえるので、点火直後の曲率の大きな火炎面における選択拡散の効果と考えられる。火炎伝ば限界当量比に対する乱れの影響については、まだ詳細な測定は行っていないが前報にも述べたように火炎核の生長期間における乱れ的作用にも、選択拡散の効果がかなり重要な役割を演ずることが示唆される。

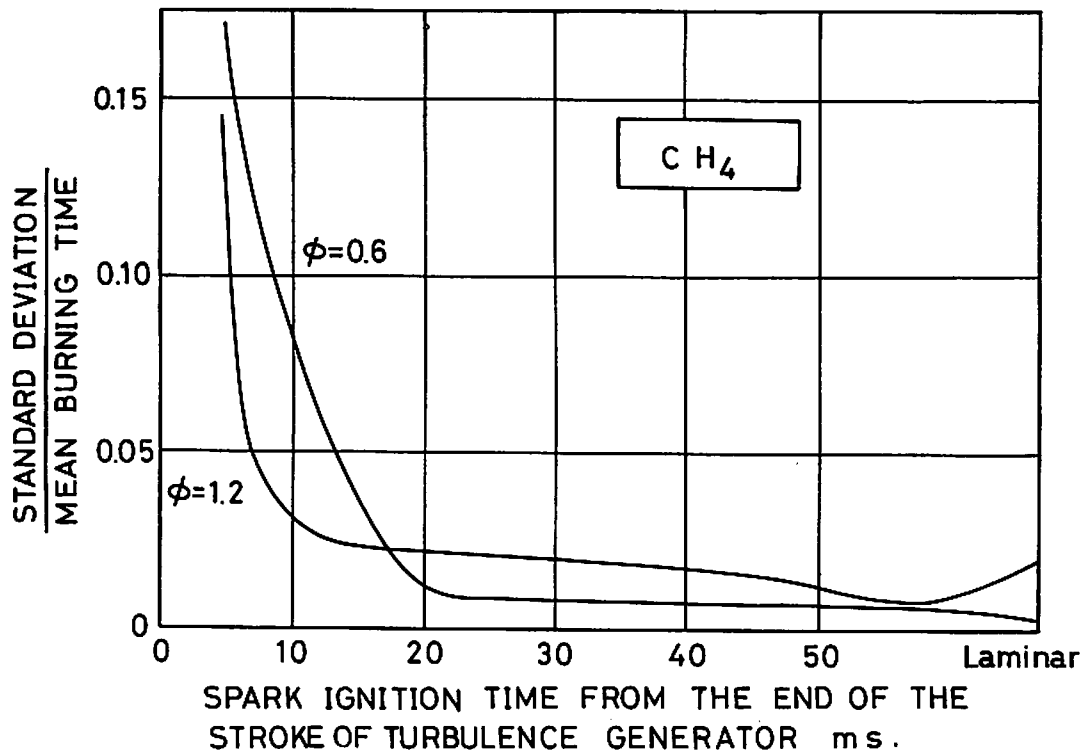


Fig 7. Relations between fluctuation of total burning time and spark ignition time from the end of the stroke of turbulence generator. (methane-air)

乱れによる火炎伝ば時間の短縮割合は、当量比および乱れの強さによって図8に示すように変化し、前報のプロパン空気混合気の場合とは当量比に対して逆の傾向にあるが、火炎伝ば限界に近い当量比の混合気では、乱れが強くなると火炎核の生長過程が全伝ば時間に影響を与える。

3.2 メタン水素空気混合気の火炎伝ば時間

メタン空気混合気中のメタンの一部を水素でおきかえた場合の、当量比による平均火炎伝ば時間の変化を図9および図10に示す。水素を混入すると希薄側における乱れによる火炎伝ばの促進がいっそう顕著となり、伝ば時間が最小となる当量比は、乱れが強いほど、また水素の割合が多いほど希薄側に移動する傾向がみられる。また過濃側では水素の混入割合の増加による層流燃焼速度の増大にほぼ対応して乱流火炎伝ば時間も短縮されるのに対して、希薄側では水素を少量混入することによる伝ば時間の短縮効果がとくに著しく、水素の割合が多くなるとその効果は小さくなる傾向にある。このことは、希薄混合気の火炎伝ば初期における乱れによる伝ば阻害効果が、水素の混入によって低減されることを意味するが。選択拡散の効果のほか、僅

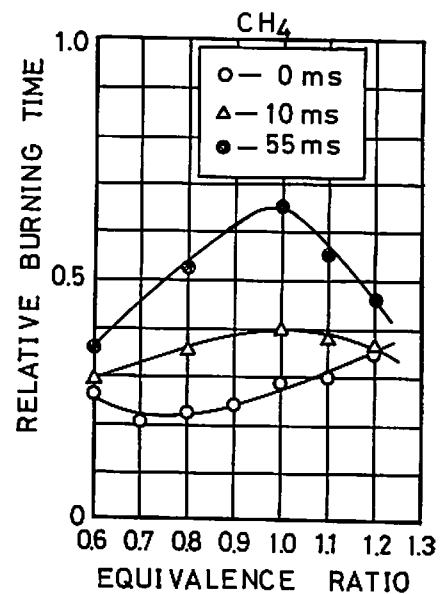


Fig 8. Change of relative burning time with equivalence ratio. (methane-air)

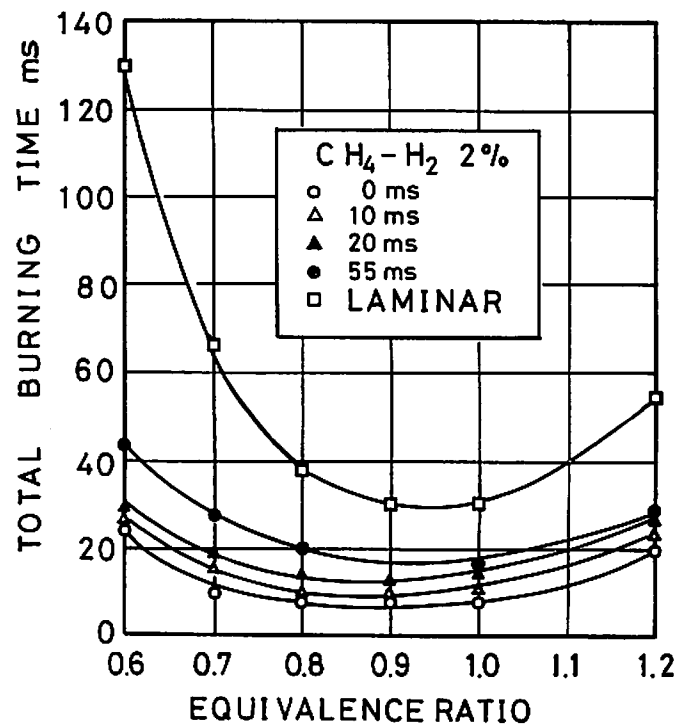


Fig 9. Total burning time of methane-hydrogen (2 wt %)-air mixtures. Parameter indicates spark timing from the end of the stroke of turbulence generator.

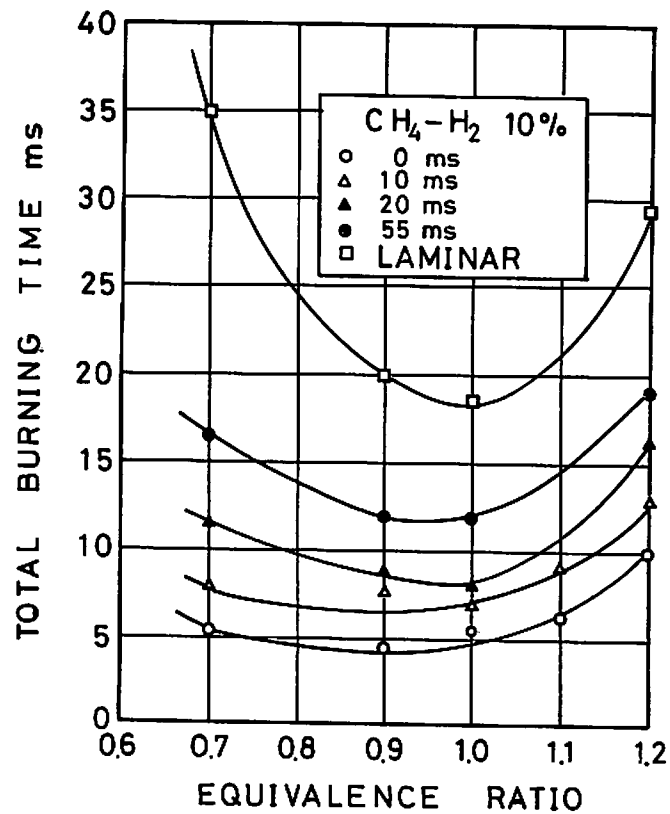


Fig 10. Total burning time of methane-hydrogen (10 wt %)-air mixtures. Parameter indicates spark timing from the end of the stroke of turbulence generator.

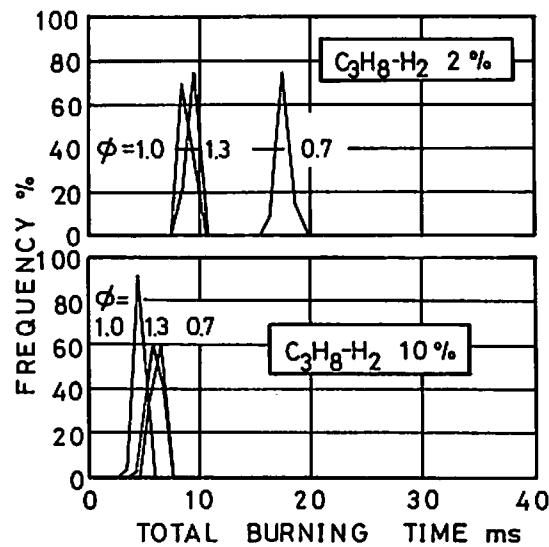


Fig 11. Frequency distribution of total burning time. (methane-hydrogen-air)
Parameter indicates equivalence ratio.

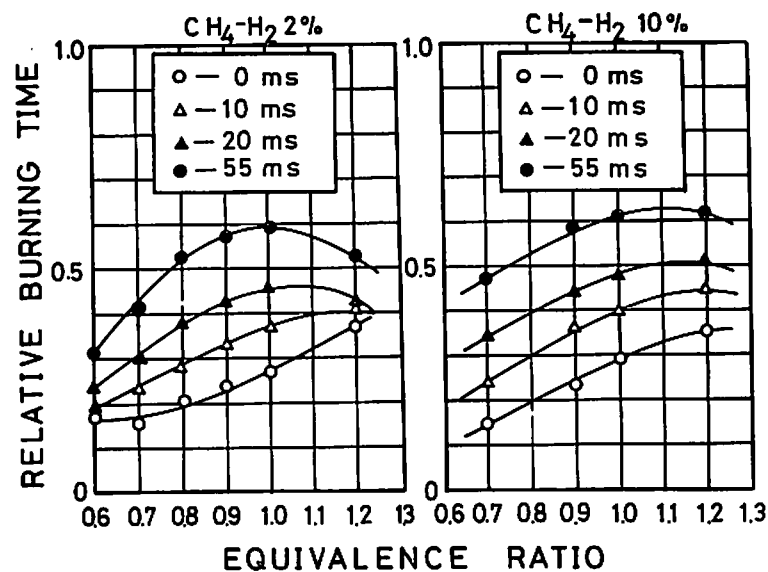


Fig 12. Change of relative burning time with equivalence ratio. (methane-hydrogen-air)
Parameter indicates spark timing from the end of the stroke of turbulence generator.

かながら火炎温度の上昇も関係するものと考えられる。火炎伝ば時間の頻度分布は図11に示すようになる。

乱れを与えた場合のメタン水素空気混合気の火炎伝ば時間と、それぞれの混合気での層流火炎伝ば時間との比を当量比に対してプロットすると図12のようになる。図8と比較してみると、過濃側では乱れによる燃焼時間の短縮割合が、水素の混入によってむしろ小さくなる傾向がみられるが、そのことも選択拡散の効果として考えれば理解できる。

3.3 プロパン水素空気混合気の火炎伝ば時間

プロパン空気混合気についてはすでに前報⁽²⁾に述べてあるが、プロパンの一部を水素でおきか

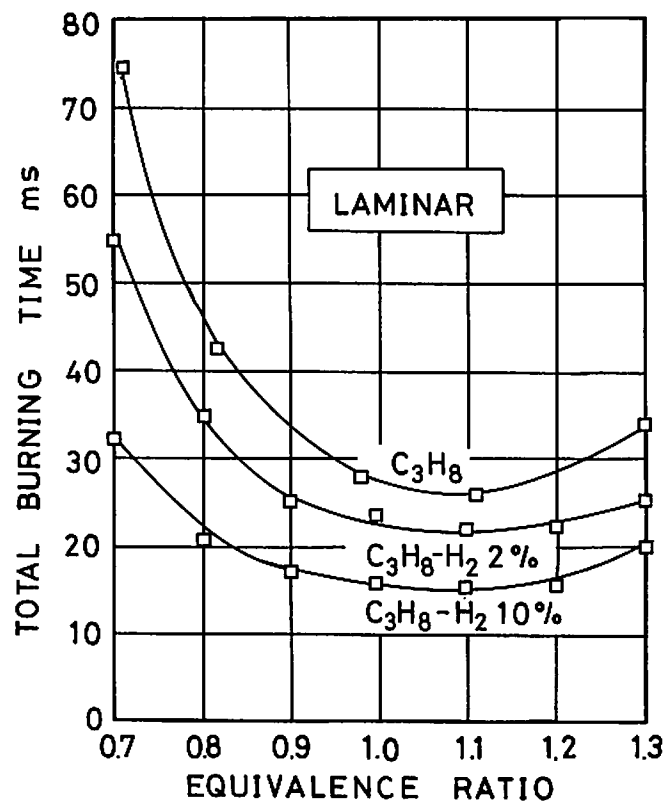


Fig 13. Total burning time of laminar flame propagation.

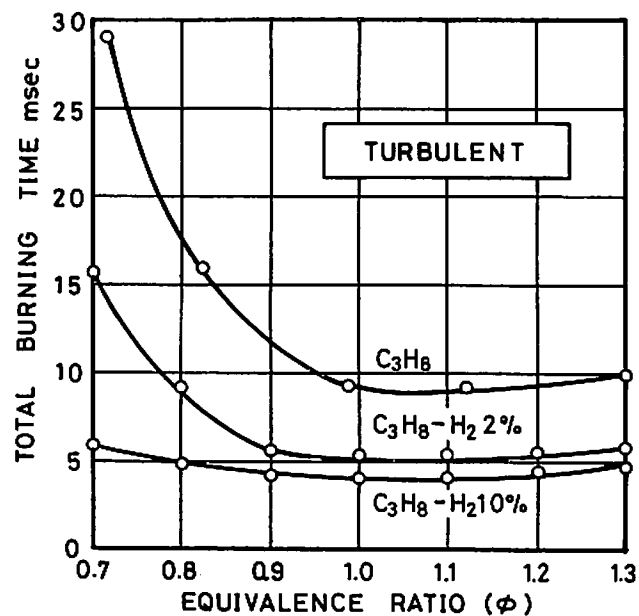


Fig 14. Total burning time of turbulent flame propagation.

Spark timing: the end of the stroke of turbulence generator.

えた場合の、当量比による層流および乱流火炎伝ば時間(0 ms の場合)の変化を、それぞれ図13および図14に示す。層流の伝ば時間は水素混入量の増加とともにかなり短縮されるのに対し、乱流の場合には少量の混入が大きな短縮効果を示し、混入量を増してもその効果はそれほど増大しない。このような傾向はメタン空気混合気の希薄側でも認められたが、プロパン空気混合気の希

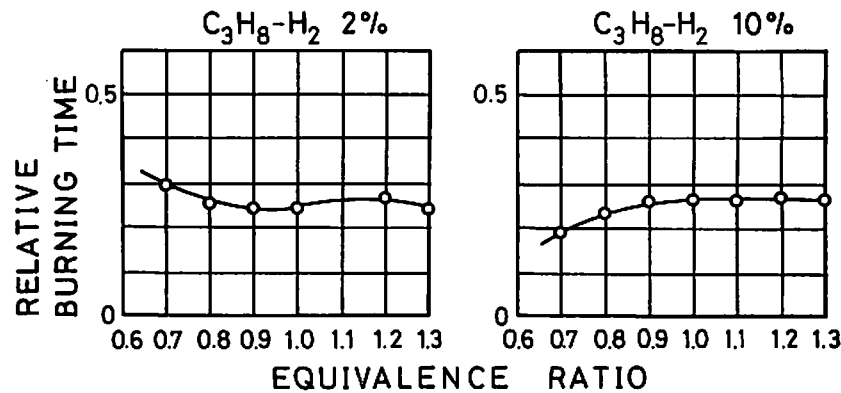


Fig 15. Change of relative burning time with equivalence ratio. (propane-hydrogen-air)

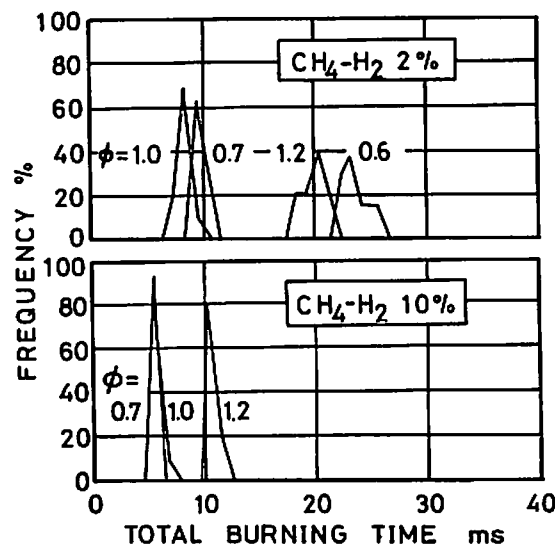


Fig 16. Frequency distribution of relative burning time. (propane-hydrogen-air)

薄側では、乱流火炎伝ば時間はむしろ水素の混入量の増加とともにかなり短縮され、水素10%（容積割合では約53%）の混合気の場合には、火炎伝ば時間は当量比によってあまり変わらないようになる。

層流火炎伝ば時間に対する乱流火炎伝ば時間の比を図15に示す。プロパン空気混合気での乱れによる伝ば時間短縮の効果は、前述のメタン空気混合気の場合とは逆に過濃側ほど大きい。水素の混入によって希薄側における短縮効果が増大し、混入量が多くなるとむしろ希薄側における短縮効果のほうが大きくなる。乱流火炎伝ば時間の頻度分布を図16に示す。ばらつきの絶対値は、極端な希薄混合気を除けば水素の混入によってあまり変わらないので、平均伝ば時間が短縮されるだけ変動率としては大きくなる。

3.4 乱流燃焼速度

火炎伝ば特性は燃焼室形状に強く依存し、本実験で使用した燃焼容器においても、火炎伝ばの後期には複雑な混合気流動を生ずることに避けられない。したがって上述の火炎伝ば時間による比較では、必ずしもあらかじめ混合気中に与えられた乱れの影響について論じたことにはならない恐れがある。そこで圧力上昇が無視できる比較的初期の火炎伝ばに注目し、火炎がガラスの面

に接触する以前の火炎半径 10 mm 付近での燃焼速度を、シュリーレン高速度撮影による火炎速度から算出した。ただし燃焼ガスの密度は、混合気の断熱火炎温度における平衡組成の計算値から求めた。前報¹⁾の結果によれば、半径 10 mm 以内では火炎伝ばの初期ほど燃焼速度は小さいが、10 mm を越えるとほとんど変わらないことが確かめられている。測定数も少なく、また乱れが強い場合には火炎面の変形も大きいので、平均値としての火炎速度の測定に問題があり、燃焼速度にもある程度の誤差は避けられないが、メタン水素およびプロパン水素空気混合気の、層流および乱流燃焼速度 (0 ms の場合) を当量比に対してプロットすると図17～図20のようになる。

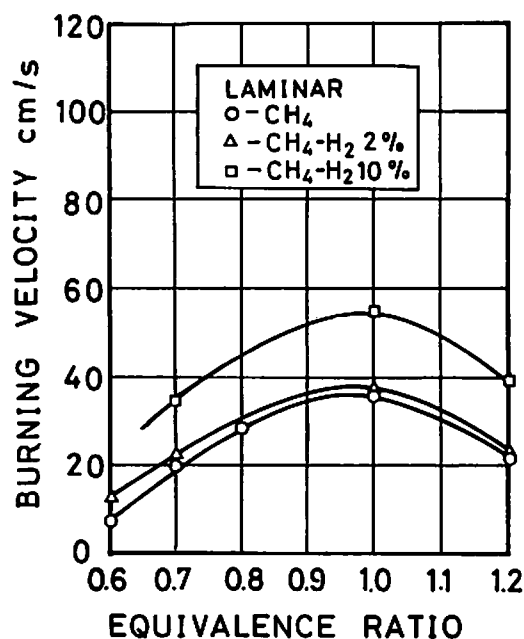


Fig 17. Change of laminar burning velocities with equivalence ratio. (methane-air)

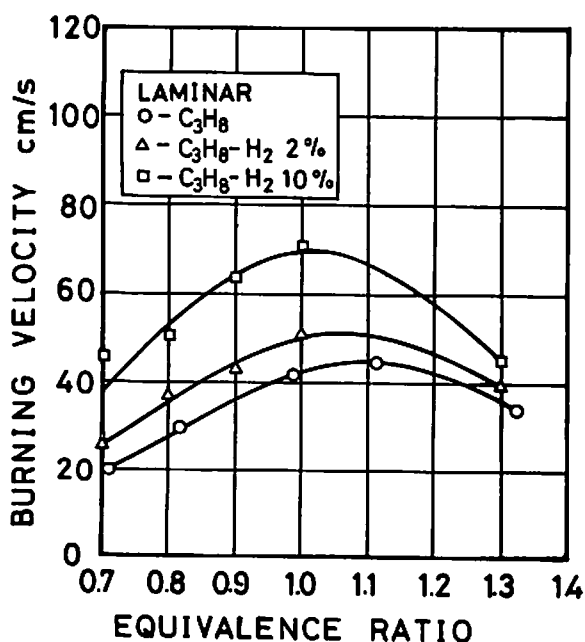


Fig 18. Change of laminar burning velocities with equivalence ratio. (propane-air)

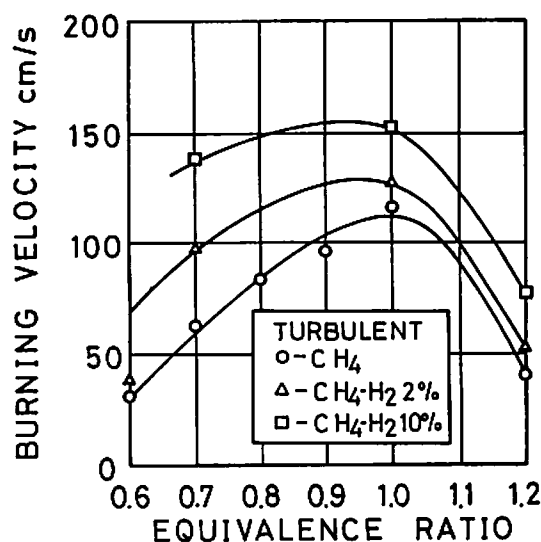


Fig 19. Turbulent burning velocities against equivalence ratio. (methane-air)
Spark timing: the end of the stroke of turbulence generator.

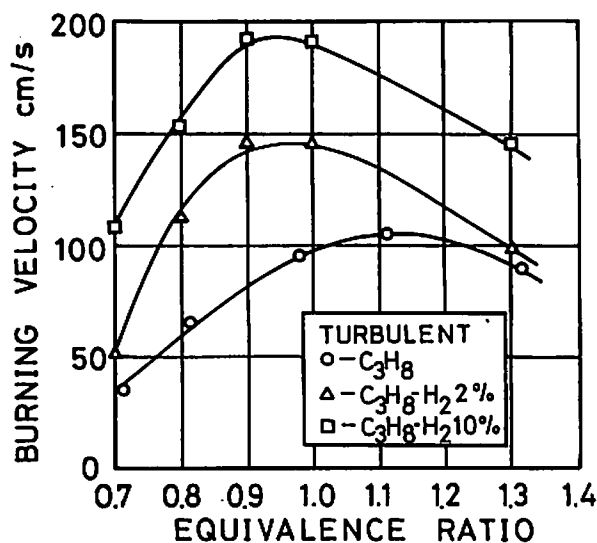


Fig 20. Turbulent burning velocities against equivalence ratio. (propane-air)
Spark timing: the end of the stroke of turbulence generator.

これらの結果は、前述の火炎伝ば時間の検討によって得られた結論にほぼ対応しており、燃焼速度に及ぼす乱れの影響が燃料の種類や当量比によって相違するという事実およびその依存性は、だいたい前述のとおりである。層流燃焼速度に対する乱流燃焼速度の比は、メタン空気混合気では希薄側で約3倍、理論比付近で3.5倍、当量比1.2の過濃側では2倍程度であるが、水素の混入により希薄側では4~4.5倍に増大し、理論比ないし過濃側では逆に多少下する。一方プロパン空気混合気では当量比1.6で4倍程度から当量0.7~0.8で2倍程度まで当量比の減少とともに低下するが、水素の混入により希薄側で2.5~3倍、理論比付近では3.5倍程度まで増大する。層流燃焼速度は水素の混入により当量比に無関係にほぼ一定の割合で増大するが、乱流燃焼速度に対する水素混入の効果は希薄混合気の場合ほど顕著である。また層流燃焼速度は水素の

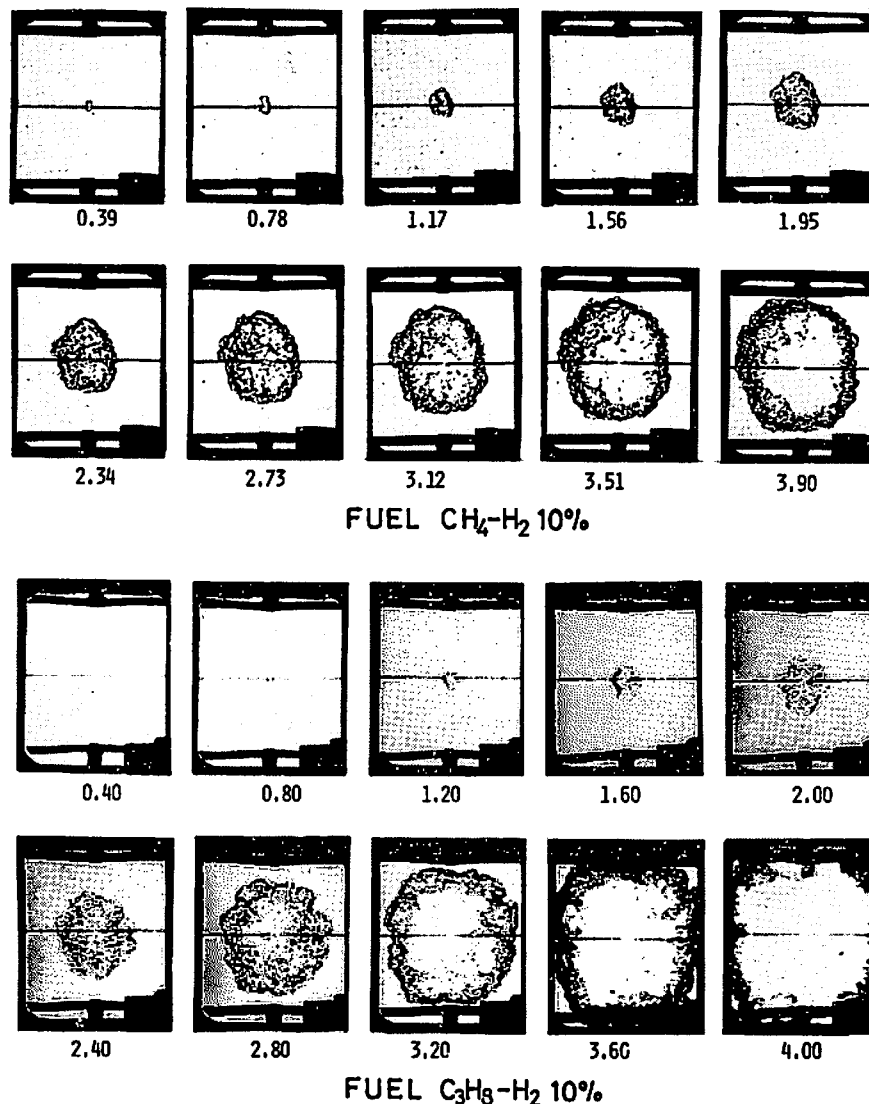


Fig 21. Schlieren photographs of flames with different fuel air mixtures.

Spark timing: the end of the stroke of turbulence generator,
equivalence ratio is 1.0

混入量の増加にはほぼ対応した変化を示すが、乱流燃焼速度は理論比ないし希薄側では少量の水素混入が大きな促進効果を示す傾向にある。

燃焼速度に対する重要な影響因子である乱れ特性については、十分な測定を行うに至らなかったもので、その影響に関しては明らかでないが、図3に示したように寸法の小さな高周波成分の乱れ強さが、乱れ発生板停止後急速に減衰するにもかかわらず、火炎伝ば時間の短縮効果が点火遅延時間によってそのような対応を示さないことは、どちらかといえば寸法の大きな低周波成分の乱れ強さが燃焼速度の促進に大きな役割を演じ、火炎面の細かい凹凸の増加による火炎面積の増大によって火炎伝ばが速められるという考えを支持するように思われる。そのことは火炎のシュリーレン写真の観察によってもある程度確かめられ、また予熱帯における選択拡散が大きな影響を与えるという推論とも矛盾しない。図21にシュリーレン写真の二三の例を示す。

§ 4. 結 び

容器内の均質混合気における乱流火炎伝ばの基本的な挙動を知るために、メタン空気、メタン水素空気、およびプロパン水素空気混合気を用いて、前報と同様にシュリーレン高速度撮影および圧力変化の測定を行い、いくつかの点を明らかにした。得られたおもな結論は次のとおりである。

(1) 乱れによる火炎伝ばの促進効果は、プロパン空気混合気では過濃側で著しく希薄側で小さいのに対して、メタン空気混合気では逆に希薄側で顕著である。

(2) メタン空気混合気の極端な希薄側および過濃側では、乱れ強さがある程度以上になると、プロパン空気の希薄混合気の場合と同様に、火炎核の生長が阻害され伝ば時間のばらつきが大きくなる。

(3) メタン空気混合気では乱れの有無にかかわらず、容器内で正常な火炎伝ばが行われる当量比の範囲は、プロパン空気混合気に比べて過濃側で非常に狭い。

(4) メタン空気およびプロパン空気混合気とも、水素を混入すると希薄側での乱れによる火炎伝ば促進効果が著しく、極端な希薄混合気における火炎核の生長過程も明らかに改善される。

(5) 火炎伝ばの比較的初期における乱流燃焼速度を算出した結果によると、燃焼速度に対する乱れの効果は上記の火炎伝ば時間に及ぼす影響によく対応しており、乱れの強さだけでなく燃料の種類や当量比にも大きく依存する。

(6) 以上の結果はいずれも、乱流火炎面における燃料分子と酸素分子との局所的な選択拡散の効果として理解でき、火炎面性状のシュリーレン写真による観察結果とともに、乱れによる燃焼速度の促進が主として火炎面の凹凸の増大に起因することを支持するように思われる。

火炎伝ばに対する混合気の乱れの影響について、従来必ずしも明確とはいえなかった基本的性質に関し、少なくとも定性的には明らかにされたと考えられるが、乱れの性質および選択拡散についての定量的な議論が今後に残された課題である。

本研究の一部は昭和50年度文部省科学研究費、および日本自動車研究所（燃焼と排気研究委員会）の研究補助金によることを付記して謝意を表する。

文 献

- 1) 飯沼, 山田: 法政大学工学部研究集報11 (1975), 23
- 2) 飯沼, 伊庭, 上野: 同上12 (1976), 7
- 3) G. H. Markstein: *J. Aero. Sci.* 18 (1951), 199