

不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼特性

日大生産工（院） ○大脇 建作
日大生産工 野村 浩司
日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

近年の省資源化や環境問題から、火花点火機関の高効率化・低エミッション化への要求は非常に高まっており、予混合気の燃焼特性解明が急務となっている。これまで予混合気の燃焼特性は、温度や圧力の他に、混合気中の乱れによって支配されていると考えられ、これらが均一濃度予混合気の燃焼特性に及ぼす影響についての研究が多く行われてきた⁽¹⁾。しかし、実際の燃焼室では、燃料と空気の混合は均一でなく空間的に高濃度部と低濃度部が複雑に分布していると考えられ、さらに、火炎伝播促進の要求から燃焼室内では強い乱れが形成されている。そのため、実際の燃焼室内では混合気濃度分布の不均一さと乱れが存在し、これらが火炎伝播の過程に影響を及ぼしている。したがって、予混合気の燃焼特性を解明するため、不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼特性を解明する必要がある。

そこで本研究では、定容燃焼容器内に不均一濃度混合気 - 乱れ場を生成し、不均一濃度混合気 - 乱れ場が燃焼特性に及ぼす影響を調べた。

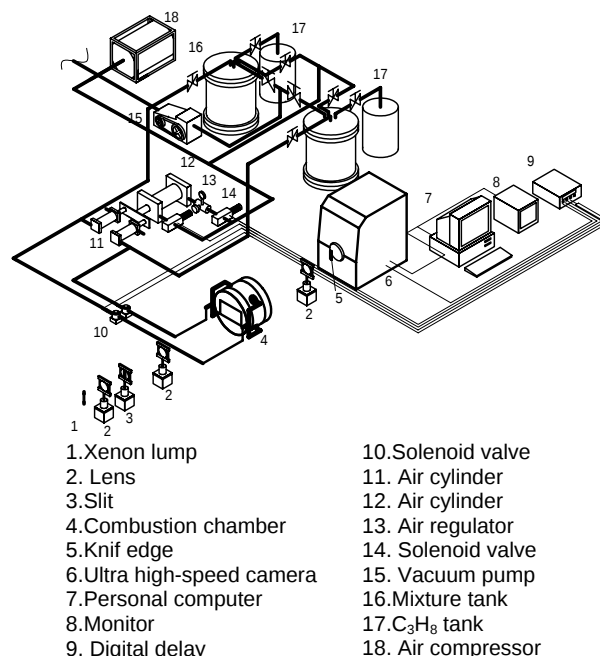


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置の概略を Fig.1 に示す。燃焼容器はステンレス鋼 (SUS303) 製で垂直断面が 54mm × 34mm の矩形状で、幅 56mm の直方体形状となっている。燃焼容器両端面には観察用の石英ガラス窓 (直径 80 mm, 厚さ 15 mm) が設置されている。また、燃焼容器円周上には中心に対向する形で、混合気噴射ノズル、電極ホルダ、および圧力センサが取り付けられている。本研究では、混合気としてプロパン - 空気混合気を用い、不均一濃度混合気 - 乱れ場の生成法として、燃焼容器内に燃焼容器内の混合気濃度と異なる濃度の混合気を噴射し混合気噴流の衝突という方法で実現した。混合気の噴射装置は、4 本のノズル、2 つの充填用エアシリンダ、押し出し用シリンダ、コンプレッサ、ソレノイドバルブから構成されている。実験では、異なる濃度の混合気を充填用エアシリンダ、および燃焼容器にそれぞれ充填する。その後、押し出し用エアシリンダに背圧 (0.5MPa) をかけ、充填用エアシリンダ内の混合気を押し出し、微量流量調節弁通過後、各流路下部に設置した乱

れ生成ノズルで増速して、燃焼容器中心部で衝突させることで、不均一濃度混合気 - 乱れ場が生成される。今回の実験では、一つの充填用エアシリンダに過濃側混合気を充填し、他方の充填用エアシリンダおよび燃焼容器に希薄側混合気を充填する方法 (Pattern1)、2 つの充填用エアシリンダに希薄側混合気を充填し、燃焼容器に過濃混合気を充填する方法 (Pattern2)、2 つの充填用エアシリンダに過濃側混合気を充填し、燃焼容器に希薄側混合気を充填する方法 (Pattern3) の 3 つのパターンで実験を行った。

混合気への点火方法としては、電流遮断式点火装置を用いた。点火時期については、電極がない状態における燃焼容器中心部での流速をレーザードップラー流速計 (LDV) を用いて測定し、乱れ強さが最大になった時期を点火時期とした。Fig.2 に流速測定で得られた流速波形、乱れ強さの時間履歴を示す。この図から、本実験装置では主流の存在しない乱れ場が生成されていることが分る。また、点火時の乱れ強さは 3.51 m/s である。

不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼特性の評価

Characteristics of Combustion for Inhomogeneous Mixture and Turbulence Fields

Kensaku OWAKI, Hiroshi NOMURA, and Yasushige UJIIE

は、燃焼容器に取り付けられた圧力センサより得られた圧力履歴から、燃焼時間を求めることで評価した。また、シュリーレン光学系を設置し、超高速カメラを用いて火炎核の成長形態を撮影し、火炎核形状からも燃焼特性の評価を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 均一濃度混合気 - 乱れ場

不均一濃度混合気 - 乱れ場での燃焼実験前に、均一濃度混合気 - 乱れ場、および均一濃度混合気 - 静止場で燃焼実験を行い、均一濃度混合場での各当量比における、乱れ場および静止場での燃焼時間を求めた。Fig.3 に乱れ場、および静止場での各当量比に対する燃焼時間を示す。ここで、静止場での燃焼実験では、2つの充填用エアシリンダの混合気を燃焼容器内に噴射した後、混合気が静止した条件で実験を行った。均一濃度混合気 - 静止場の燃焼時間についてみると、当量比 1.2 を最小とし、希薄側、過濃側に行くにつれて、燃焼時間は増大する。均一濃度混合気 - 乱れ場においても、当量比 1.2 を最小として、希薄側、過濃側に行くにつれて、燃焼時間は増大する。しかしながら、過濃側の混合気の燃焼時間は当量比 1.5 付近までほぼ等しく、燃焼時間の増加傾向が小さい。ここで、静止場の燃焼時間がほぼ等しい当量比 0.8 と当量比 1.5 の乱れ場での火炎核のシュリーレン写真 Fig.5 をみる。火炎核の写真から、当量比 0.8 の火炎核に比べ、当量比 1.5 の火炎核形状は凹凸が多く存在し、火炎核が複雑化していることが分かる。希薄側に比べ、過濃側で燃焼時間の増加傾向が小さくなったのは、火炎核が複雑になり、火炎面積が増大したためだと考えられる。

3.2 不均一濃度混合気 - 乱れ場

本実験では、希薄側の混合気の当量比を ϕ_{lean} 、過濃側の混合気の当量比を ϕ_{rich} と表し、燃焼容器内の総合的な当量比を総当量比とし ϕ_{total} で表す。また、燃焼容器内の当量比を ϕ_{cham} で表した。

3.2.1 Pattern1 の実験結果

燃焼容器内に希薄側の混合気を充填し、充填用エアシリンダに希薄側混合気と、過濃側混合気を充填し、濃度の異なる噴流で不均一濃度混合気 - 乱れ場を生成した実験では Table 1 に示すような条件で実験を行った。この条件では、希薄側混合気の体積割合が約 75%、過濃側混合気の体積割合が約 25% である。

Fig.5 に不均一濃度混合気 - 乱れ場での燃焼実験によって得られた、燃焼時間の結果を示す。図は、不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼時間を、希薄側の混合気の当量比 (ϕ_{lean}) に対する燃焼時間として示し、総当量比を副変数として用いた。また、図中には均一濃度混合気 - 乱れ場での燃

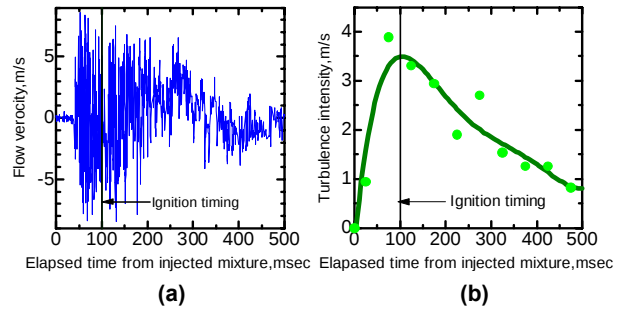


Fig.2 The flow velocity measurement result.
(a) Temporal variations of the flow-velocity.
(b) Temporal variations of the turbulence intensity.

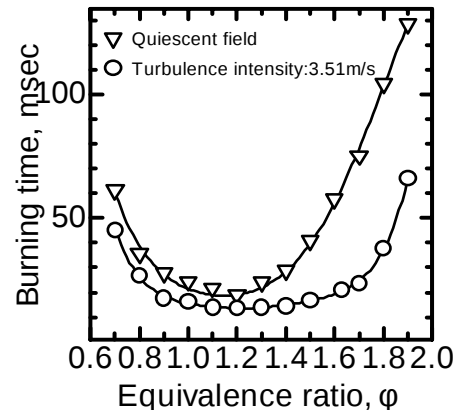


Fig.3 Effect of equivalence ratio on burning time
(Homogeneous mixture)

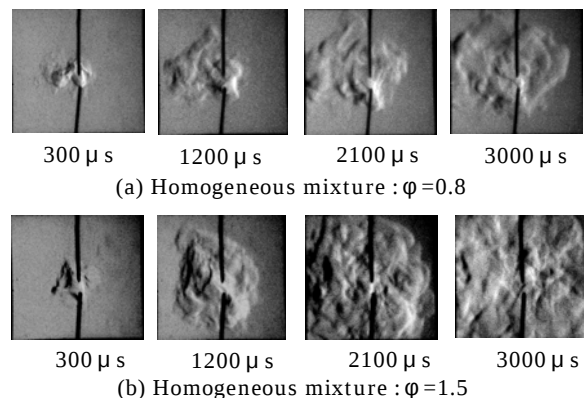


Fig.4 Schlieren photographs of flame kernels
(Homogeneous mixture)

焼実験で得られた、総当量比 0.70 ~ 1.30 までの燃焼時間を破線で示してある。図から、総当量比 1.30 以外の条件において、濃度の異なる混合気噴流を衝突させ、不均一濃度混合気 - 乱れ場を生成した時の燃焼時間は、均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼時間より長くなるという傾向があることが分かる。また、各総当量比で希薄側の混合気の当量比 (ϕ_{lean}) で燃焼時間を比較すると、総当量比によらずほぼ等しいことが分る。このことから、本実験によって生成した不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼特性は、希薄側の混合気濃度の影響が大きいと考えられる。ここで、Fig.6 の火炎核のシュリーレン写真をみる。図中

の(a),(c) は総当量比 1.14 であり, (a) は当量比 1.14 の均一濃度混合気 - 乱れ場, (c) は希薄側の混合気の当量比 ($\phi_{lean} = 0.90$), 過濃側の混合気の当量比 ($\phi_{rich} = 1.90$) を噴射し生成した不均一濃度混合気 - 乱れ場である。また, (b) は当量比 0.90 の均一濃度混合気 - 乱れ場の火炎核のシュリーレン写真である。まず, (a), (c) の写真で火炎核の成長を比較すると, (c) の不均一濃度混合気 - 乱れ場での火炎核の成長は, (a) の均一濃度混合気 - 乱れ場に比較して遅れていることが分る。次に, (c) と(b) とを比較すると, 火炎核の成長ほぼ同じであることが分る。このことから, 不均一濃度混合気 - 乱れ場の火炎核の成長からも希薄側の混合気濃度の影響が大きいと考えられる。これらの結果から, 濃度の異なる混合気の噴流を衝突させ, 不均一濃度混合気 - 乱れ場を生成したが, 燃焼特性(燃焼時間・火炎核の成長)は, 体積割合の多い混合気濃度に影響され, 濃度不均一性が燃焼特性に与える影響は小さいと考えられる。

3.2.2 Pattern2 および Pattern3 の実験結果

燃焼容器内に希薄側混合気もしくは, 過濃側混合気を充填し, エアシリンダに燃焼容器内とは異なる濃度の混合気を充填し, 不均一濃度混合気 - 乱れ場を生成した実験では, Table 2 に示すような条件で実験を行った。この条件では, 希薄側混合気の体積割合が約 50%, 過濃側混合気の体積割合が約 50% である。

Fig.7 に実験によって得られた燃焼時間を燃焼容器内当量比(ϕ_{cham})に対する燃焼時間として示し, 総当量比を副変数として用いた。また, 図中には均一濃度 - 乱れ場の実験で得られた燃焼時間の曲線を示してある。図から, 均一濃度混合気 - 乱れ場の曲線と, 不均一濃度混合気 - 乱れ場で, 燃焼容器当量比を変化させた燃焼時間の曲線がほぼ一致している。このことから, この条件で不均一濃度 - 混合気乱れ場を生成した場合の燃焼特性は, 燃焼容器内の当量比の燃焼特性が大きく影響していると考えられる。そこで, 燃焼容器内に希薄側の混合気を充填した場合と, 過濃側の混合気を充填した場合とに分けて考察する。Fig.8 に燃焼容器内に希薄側の混合気を充填した場合, Fig.9 に過濃側の混合気を充填した場合の燃焼容器内当量比に対する燃焼時間を示す。どちらの図も, 副変数として総当量比を用いている。また, 図中には均一濃度混合気 - 乱れ場で得られた燃焼時間を破線で示す。ここで, 各総当量比で均一濃度混合気 - 乱れ場と不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼時間を比較する。不均一濃度混合気 - 乱れ場の燃焼時間が燃焼容器内の混合気濃度の燃焼特性に大きく影響を受け, 燃焼容器内の当量比が均一濃度

Table 1 Injection pattern of mixture

Equivalence ratio (Mixture pattern)									
$\phi_{total}=0.80$	$\phi_{total}=0.90$		$\phi_{total}=1.00$		$\phi_{total}=1.14$		$\phi_{total}=1.30$		
ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}
0.67	1.20	0.70	1.53	0.80	1.63	0.80	2.24	1.10	1.93
0.70	1.10	0.80	1.21	0.90	1.31	0.90	1.90	1.20	1.61
0.74	1.00	0.84	1.10	0.94	1.20	1.00	1.58	1.24	1.50
0.77	0.90	0.87	1.00	0.97	1.10	1.12	1.20	1.27	1.40

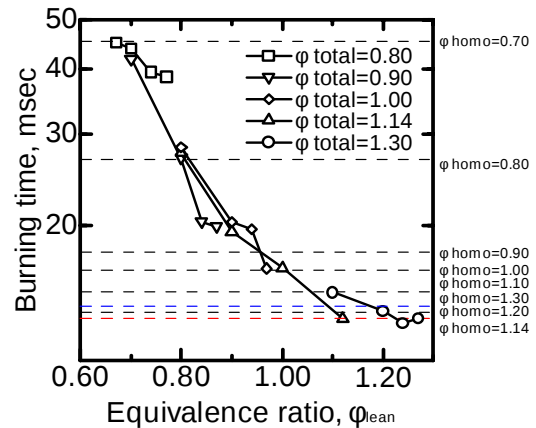


Fig.5 Effect of equivalence ratio on burning time (Inhomogeneous mixture)

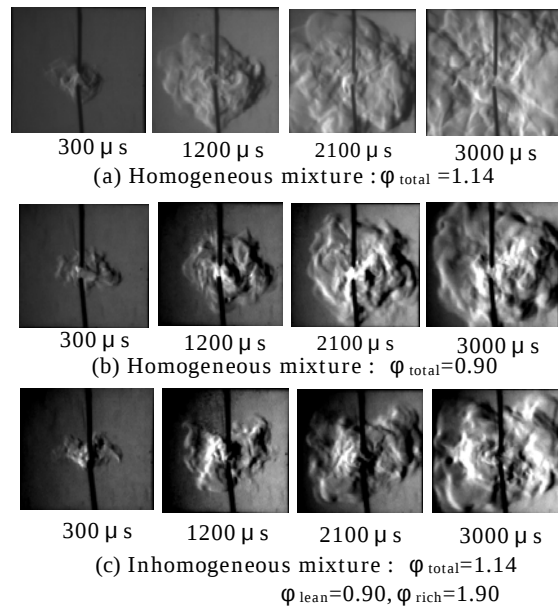


Fig.6 Schlieren photographs of flame kernels

混合気の当量比に比べ, 燃焼時間が短い条件であれば燃焼時間は短縮され, 燃焼時間が長い条件であれば長くなる傾向になる。しかしながら, 燃焼容器に希薄側混合気を充填した $\phi_{total}=1.2$ の $\phi_{cham}=\phi_{lean}=1.1$, $\phi_{rich}=1.3$ と過濃側の混合気を充填した $\phi_{total}=1.2$ の $\phi_{lean}=1.1$, $\phi_{cham}=\phi_{rich}=1.3$ の条件では均一濃度混合気 - 乱れ場に比べ, 不均一濃度混合気 - 乱れ場のほうが燃焼時間が短くなっていることが分る。この条件の, 希薄側混合気 ($\phi_{lean}=1.1$) および, 過濃側混合気 ($\phi_{rich}=1.3$) のどちらの混合気も均一濃度混合気 - 乱れ場での当量比 1.2 の燃焼時間より燃焼時間は長く, 燃焼時間の傾向としては, 均一濃

度混合気 - 乱れ場の燃焼時間より長くなる
ことが考えられる。しかし、不均一濃度混合気 - 乱
れ場を生成することで、均一濃度混合気 - 乱れ
場の燃焼時間に比べ燃焼時間は短縮される。
これは、濃度の異なる混合気の燃焼速度の差に
よるものと考えられる。燃焼速度の違いにより、
火炎成長に差ができ、火炎が複雑になる。火炎
が複雑化したことにより、火炎面と未燃混合気
との反応領域が増大し燃焼時間が短縮されたも
のだと考えられる。ここで、Fig.10 の火炎核の
シュリーレン写真をみる。どちらの写真も総当
量比 1.2 であり、(a) は当量比 1.2 の均一濃度
混合気 - 乱れ場、(b) 燃焼容器内に加納側混合
気 ($\phi_{\text{cham}} = \phi_{\text{rich}} = 1.3$) を充填し、希薄側混合気
($\phi_{\text{lean}} = 1.1$) の噴射し生成した不均一濃度混合
気 - 乱れ場である。この写真を比較すると火炎核
形状に違いが見られる。特に、点火から 2100 μ s
後の火炎核は均一濃度混合気 - 乱れ場の火炎核
に比べ、不均一濃度混合気 - 乱れ場の火炎核
形状が複雑となっていることが分る。このこと
から、混合気濃度分布の不均一さが火炎核形状
に影響を与え、燃焼特性に影響を与える条件が
存在することが分かった。

4. 結言

- 混合気としてプロパン - 空気混合気を用い、
定容燃焼容器内に、均一濃度混合気 - 乱れ場お
よび、不均一濃度混合気 - 乱れ場を生成し、点
火 - 燃焼実験を行った結果以下の知見を得た。
- 均一濃度混合気 - 乱れ場では、過濃混合気
側で乱れによる燃焼時間短縮効果が大きい。
 - 混合気濃度分布の不均一さが燃焼特性に影
響を与える条件が存在する。

Table 2 Injection pattern of mixture

Equivalence ratio (Mixture pattern)									
$\phi_{\text{total}}=0.8$		$\phi_{\text{total}}=0.9$		$\phi_{\text{total}}=1.0$		$\phi_{\text{total}}=1.1$		$\phi_{\text{total}}=1.2$	
ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}	ϕ_{lean}	ϕ_{rich}
0.7	0.9	0.8	1.0	0.9	1.1	1.0	1.2	1.1	1.3
0.6	1.0	0.7	1.1	0.8	1.2	0.9	1.3	1.0	1.4
0.5	1.1	0.6	1.2	0.7	1.3	0.8	1.4	0.9	1.5
0.4	1.2	0.5	1.3	0.6	1.4	0.7	1.5	0.8	1.6

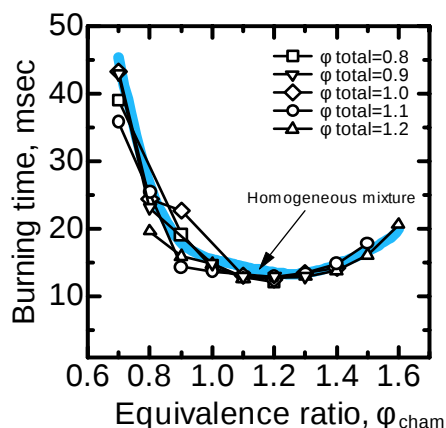


Fig.7 Effect of equivalence ratio on burning time (Inhomogeneous mixture)

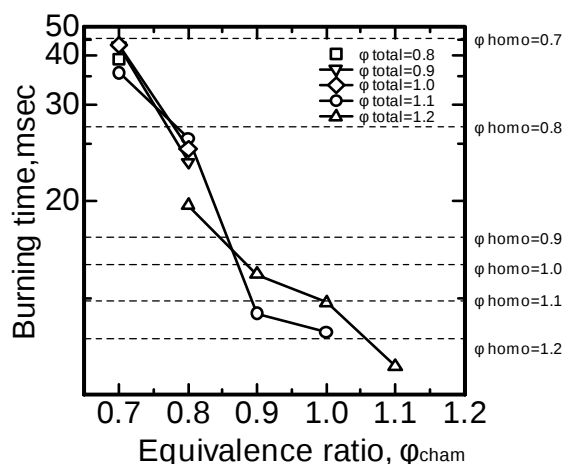


Fig.8 Effect of equivalence ratio on burning time (Inhomogeneous mixture)

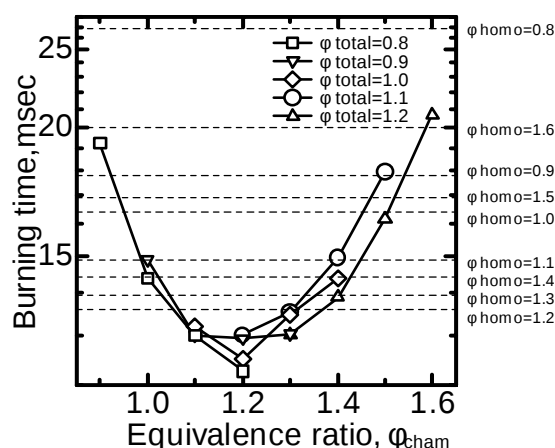


Fig.9 Effect of equivalence ratio on burning time (Inhomogeneous mixture)

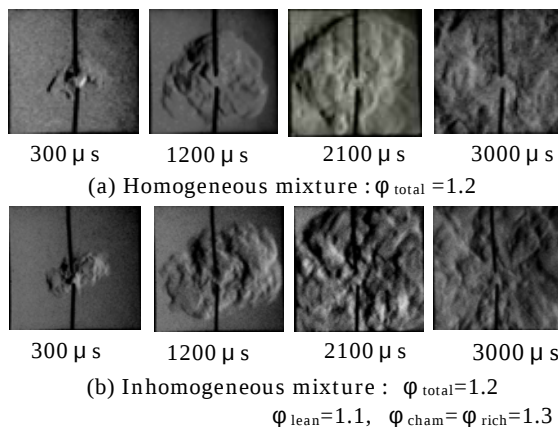


Fig.10 Schlieren photographs of flame kernels

参考文献

1. 北川・戸上ほか, 日本機械学会論文集, No.03-1325, p295-302(2004)
2. 城戸・田上ほか, 自動車技術会論文集, 28 - 1, p17-22(1997)
3. 城戸・中原ほか, 日本機械学会論文集, No.95-1935, p290-295(1996-8)