

複雑流れ現象としての燃焼の解明とその応用

氏家 康成 (機械工学科), 野村 浩司 (機械工学科)

1. 緒言

噴霧燃焼は、ディーゼル機関やガスタービンなどの燃焼器に広く用いられているが、2相流であり、相変化、拡散・混合、熱移動、化学反応などの現象を含むため、その燃焼機構は非常に複雑で、不明な点が多い。林と熊谷¹⁾は噴霧を単純化したモデルとして、凝集法により生成した均一分散・均一粒径の燃料液滴群を研究対象にし、噴霧燃焼の機構解明を行った。著者らは²⁾定圧燃焼容器を用い、同様な実験を平均液滴粒径が大きい条件および全燃料に占める液体として存在する燃料の割合が大きい条件について行い、ある燃料液滴-蒸気-空気混合気の状態では、均一燃料液滴群が存在する混合気の方が同じ当量比の予混合気よりも火炎伝播速度が速くなることを見いだした。本報では、定容燃焼容器内に均一燃料液滴群を生成し、燃焼実験を行った結果を報告する。燃焼中の圧力履歴を測定することにより、混合気中の燃料液滴が、火炎伝播促進だけでなく、実機の燃焼で重要な最高燃焼圧力の向上にも寄与するのかどうかを明らかにすることを目的とした。

2. 実験装置および方法

Fig.1に実験装置概略を示す。定容燃焼容器内に均一燃料液滴群を生成する方法として、凝集法を採用した。これは、予め燃焼容器内に充填された飽和燃料蒸気-空気混合気を過飽和状態にし、蒸気を液滴群に凝集させる方法であり、Wilsonの霧箱における霧生成原理と同じである。飽和燃料蒸気-空気混合気を過飽和状態にさせる方法として、急速減圧方式を採用した。急速減圧方式は、飽和混合気を急速減圧することにより温度降下を起こさせ、燃料蒸気分圧を低下させることで燃料蒸気の一部を凝集させる方式である。直径分布幅の小さい微小粒径液滴群の生成に適している。燃焼室は内径40 mm、高さ40 mmの円筒形である。減圧中に燃焼室壁から混合気に熱が流入するのを抑制するため、遅れ時間を考慮して減圧開始数秒前から冷却水を燃焼室外側に循環させた。

燃焼室に高圧の燃料蒸気-空気混合気を充填し、配管の一部に設けられた排気タンクに低圧の空気を充填する。燃焼室と排気タンクの間設けた減圧バルブを開くことにより、燃焼室内を急速減圧させ、液滴群を生成させた。減圧終了後、シリカコーティングを施した電熱線(長さ:約5 mm、直径:50 μm)に通電し、混合気を点火した。電熱線は燃焼室の中心に設置されている。

燃料には、蒸気圧が適当なこと、すずが発生しにくいことなどの理由から、エタノールを用いた。液滴群平均液滴直径の計測には、昨年度導入した3次元PDAを用いた。火炎の伝播挙動の観察には影写真法を用い、高速度カメラ(2000 fps)で記録した。混合気温度は、白金測温抵抗体を用いて測定した。減圧途中の混合気温度測定には、時定数の小さいR種熱電対(線径:50 μm)を用いた。圧力測定には、ダイヤフラム式ダイナミック圧力センサと半導体圧力変換器を用いた。燃焼時の燃焼室内圧力測定には前者を使用し、10 kHzでサンプリン

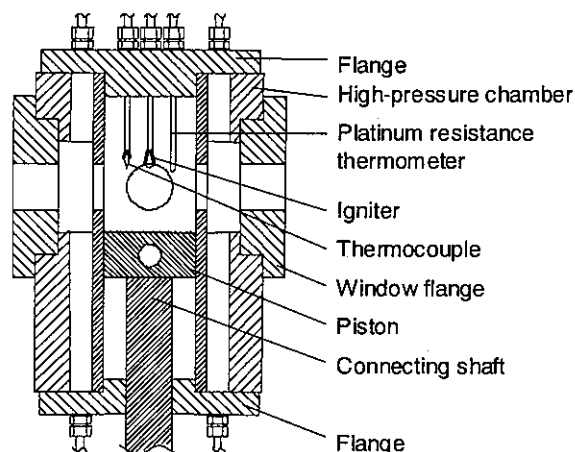


Fig. 1 Combustion chamber.

グを行った。

混合気における燃料と空気の割合は、当量比を用いて示した。液滴群として存在している燃料と蒸気として存在している燃料を合わせて計算した当量比を総当量比 ϕ_t 、液滴群として存在する燃料のみで計算した当量比を液体当量比 ϕ_l 、蒸気として存在する燃料のみで計算した当量比を気体当量比 ϕ_g とした。よって、 $\phi_t = \phi_l + \phi_g$ の関係が成立する。

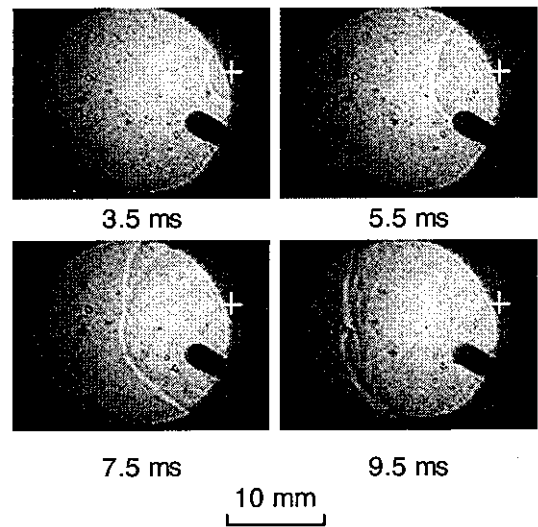
均一燃料液滴群の平均液滴直径が、火炎伝播速度、最大燃焼圧力および燃焼時間に及ぼす影響を調べるため、点火直前の混合気圧力 P_0 を 0.2 MPa、 ϕ_t を 0.9、 ϕ_l を 0.21 (0.19~0.22) で一定とし、液滴群平均液滴直径 d_m を 2.7 ~ 13 μm の範囲で変化させて、実験を行った。火炎伝播速度は、連続影写真から火炎半径の時間変化を求めて算出した。火炎半径は、点火用電熱線を中心に燃焼室軸方向を 0 deg として、-30 から 30 deg の範囲で、15 deg おきに 5 方向、火炎の半径を測定し、その平均値とした。測定した火炎直径の時間変化を多項式で近似し、その時間微分を火炎の移動速度とした。火炎伝播速度は、火炎半径が 10 mm に達した時点での火炎移動速度を代表火炎伝播速度として使用した。燃焼時間および最大燃焼圧力は、ダイナミック圧力センサによって計測される火炎伝播中の燃焼室圧力の時間変化から求めた。燃焼時間は、自立火炎が形成されてから燃焼室圧力が最大となるまでの時間と定義した。

3. 実験結果および考察

火炎の伝播挙動を Fig.2 に示す。点火用電熱線は図中の白十字で示される位置にある。時刻の原点は電熱線に通電した時刻とした。火炎は、点火誘導期間を経た後、3.5 ms において自立火炎に移行した。その後、火炎は電熱線を中心としたほぼ球形を保ちながら伝播し、7.5 ms 付近から火炎面に歪みが生じた。同一当量比の予混合気の場合、図の下段の火炎にみられるような歪みは生じないことより、混合気中に存在する燃料液滴に誘発された歪みであると考えられる。

火炎伝播速度を計測した結果を Fig.3 に示す。比較のため、図中に総当量比の等しい予混合気の火炎伝播速度を破線で示す。 d_m の増大に伴い、最大燃焼圧力は増大し、その後減少傾向にある。また、燃料液滴-蒸気-空気混合気の火炎伝播速度は予混合気の火炎伝播速度を上回っている。これらの結果は、定圧燃焼実験の結果と定性的に一致する。

火炎伝播速度の平均液滴直径依存性は、火炎前縁において燃料液滴と未燃混合気の間には生じる相対速度(スリップ速度)によって説明できると考えられる。本実験のような球状火炎伝播の場合、火炎伝播速度が一定であっても火炎前縁で未燃混合気は加速する。加速の度合いは、火炎の曲率の減少に伴い、減少する。未燃混合気が加速するとき、燃料液滴の慣性が混合気と比較して大きいため、両者の間に相対速度が生じる。Fig.4 に現象を単純化した一次元モデルの概略図を示す。このモデルを用いて混合気中の燃料液滴が火炎伝播に及ぼす影響を考察する。火炎に固定した座標における液滴の速度 V_d は



$P_0 = 0.2 \text{ MPa}$, $\phi_t = 0.9$, $\phi_l = 0.19$, $d_m = 13 \mu\text{m}$

Fig. 2 Flame propagation behavior in a homogenous fuel spray.

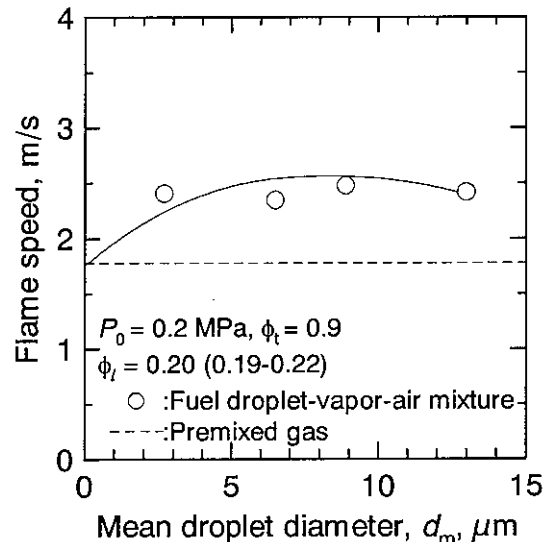


Fig. 3 Effect of mean droplet diameter on flame speed.

$$V_d' = V_f \cdot V_d \quad (1)$$

と表される。ここで、 V_f および V_d は地上に固定した座標における火炎の速度と液滴の速度である。火炎に固定した座標における未燃混合気の流れ速度 V_g' は

$$V_g' = V_f \cdot V_g \quad (2)$$

と表される。ここで、 V_g は地上に固定した座標でみた炎前縁における未燃混合気の流れ速度である。火炎に突入する燃料液滴-蒸気-空気混合気の総当量比（以下、局所総当量比 ϕ_t と記述する）は、 V_d' と V_g' を用いて次のように表すことができる。

$$\phi_t' = \phi_g + \phi_l V_d' / V_g' \quad (3)$$

ここで $\phi_l + \phi_g = \phi_t$ であるから、(3)式は次のように書き換えることができる。

$$\phi_t' = \phi_t + \phi_l (V_d' / V_g' - 1) \quad (4)$$

スリップ速度 V_s は次式で定義される。

$$V_s = V_d' - V_g' \quad (5)$$

よって、最終的に次式を得る。

$$\phi_t' = \phi_t + \phi_l V_s / V_g' \quad (6)$$

火炎前縁から突入した燃料液滴が全て予熱帯で蒸発すると仮定すれば、反応帯における混合気の当量比は ϕ_t' に等しくなる。

式(6)より、スリップ速度が増大すると ϕ_t' が増大することがわかる。燃料液滴の直径が大きくなると液滴の慣性が増し、スリップ速度は大きくなる。よって、 d_m の増大は ϕ_t' を増大させると考えられる。予混合気の燃焼実験の結果から、 ϕ_t が増大した場合、 $\phi_t = 1.1$ までは火炎伝播速度が増大し、それ以降は減少することがわかっている。以上より、初期の総当量比が0.9である本実験の場合、 d_m の増大により ϕ_t' が増大し、 $\phi_t' = 1.1$ となるまでは火炎伝播速度が増大、それ以降減少したと考えられる。

Fig.5に燃焼室内圧力 P の時間変化を示す。縦軸の燃焼室内圧力は、点火直前の燃焼室内圧力 P_0 で無次元化して示した。横軸の原点は、自立火炎が発生した時刻である。火炎伝播の前半においてはほとんど圧力上昇が認められず、後半になって急速に圧力が上昇することがわかる。予混合気より燃料液滴-蒸気-空気混合気の方が火炎伝播速度が速いため、圧力の上昇も燃料液滴-蒸気-空気混合気の方が急峻となっており、

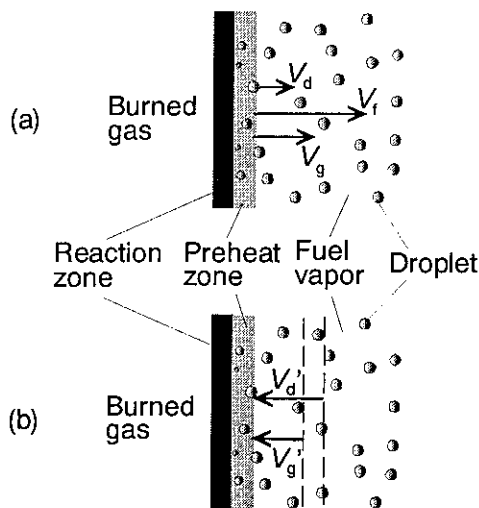


Fig. 4 Schematic of the region ahead of the flame. The coordinations are fixed on (a) the ground, and (b) the flame.

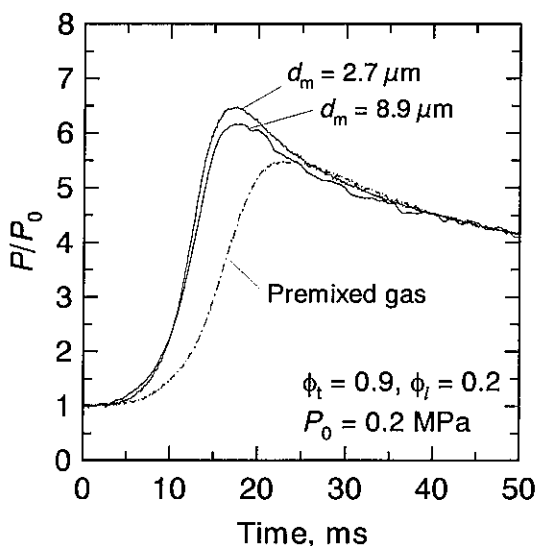


Fig. 5 Histories of pressure in the combustion chamber during flame propagation.

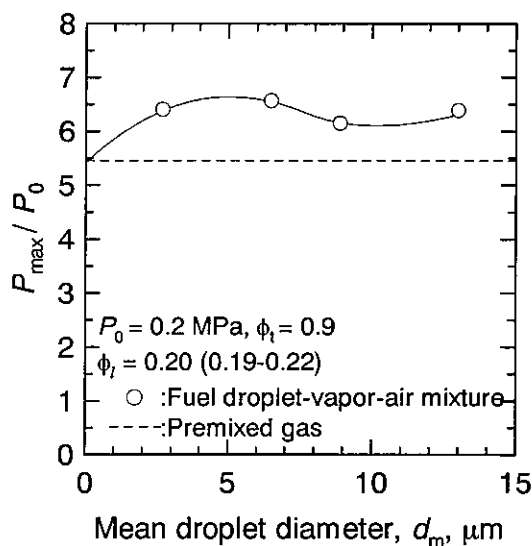


Fig. 6 Effect of mean droplet diameter on maximum burning pressure ratio.

最高到達圧力、すなわち最大燃焼圧力も高くなっている。これは、火炎伝播に要する時間が減少したために熱損失が減少し、結果として最大燃焼圧力が増大したと解釈できる。 d_m が 2.7 と 8.9 μm の燃料液滴-蒸気-空気混合気と比較すると、火炎半径 10 mm における火炎伝播速度は $d_m = 8.9 \mu\text{m}$ の場合の方が若干速いにもかかわらず、最大燃焼圧力は逆に低くなっている。火炎が急激に減速する燃焼室壁付近ではスリップ速度は負になり、局所当量比が希薄側に移行する。 d_m が大きい方がスリップ速度がより生じることを考慮すると、 d_m が 8.9 μm の場合、2.7 μm の場合よりも局所当量比の減少が大きく、火炎伝播速度がより減少すると考えられる。燃焼後期における火炎伝播速度の減少が燃焼時間の増大に繋がり、結果として熱損失が増大、最大燃焼圧力が減少したと推察される。

最高燃焼圧力を計測した結果を Fig.6 に、燃焼時間を測定した結果を Fig.7 にそれぞれ示す。比較のため、図中に総当量比の等しい予混合気最大の燃焼圧力を破線で示す。

Fig.6 の縦軸は P_0 で無次元化して示した。 d_m の増大に伴い、最大燃焼圧力は増大し、その後減少する。極小値をとった後、再び最大燃焼圧力は増大する。燃焼時間は最大燃焼圧力と増減が正反対になる。このことより、燃焼時間の減少が熱損失を減少させ、結果として最大燃焼圧力が増大するという予混合気燃焼で一般的に用いられる解釈が燃料液滴-蒸気-空気混合気の場合にも成り立つことがわかる。実験範囲の d_m において、燃料液滴-蒸気-空気混合気最大の燃焼圧力は予混合気値より大きくなった。このことより、燃料液滴の燃え残り量は、液滴群の平均液滴直径が小さい場合、あったとしても微小であると推察される。また、最大燃焼圧力が最大値を示す d_m の値は、火炎伝播速度が最大値を示す d_m より小さいことがわかった。このことは、最大燃焼圧力の d_m の依存性の考察には、火炎減速時にスリップ速度が火炎伝播速度に及ぼす影響も考慮に入れる必要があるとした前段の考察を支持している。 $d_m > 10 \mu\text{m}$ で最大燃焼圧力が増大、燃焼時間が減少しているのは、火炎伝播速度が減少傾向にある領域であるため、局所当量比が燃焼前半は過濃、後期は希薄となり、その途中で最大火炎伝播速度をとる当量比を通過することが燃焼に要する全体の時間を短縮したためと考えられる。

4. 結言

燃焼時圧力を 0.2 MPa、総当量比を 0.9、液体当量比を 0.20 で一定、平均液滴直径を 2.7 ~ 13 μm の範囲で変化させて均一燃料液滴-蒸気-空気混合気定容燃焼実験を行った。その結果、混合気中に存在する微小な液滴群が火炎伝播速度および最大燃焼圧力を共に増大させる条件が存在することが実験的に確認された。これにより、予混合気中に微小燃料液滴群を残留させることによる希薄混合気の燃焼促進法が、実機の燃焼改善にも有用であることがわかった。詳細な燃焼機構については、火炎前縁の液滴粒径と速度の同時計測を行って明らかにしていく予定である。

参考文献

- (1) S. Hayashi, and S. Kumagai, "Flame Propagation in Fuel Droplet-Vapor-Air Mixtures", The Proc. Combust. Inst., 15(1975) 445-452.
- (2) H. Nomura, M. Koyama, H. Miyamoto, Y. Ujiie, J. Sato, M. Kono, and S. Yoda, "Microgravity Experiments of Flame Propagation in Ethanol Droplet - Vapor - Air Mixture", The Proc. Combust. Inst., 28(2000) 999-1005.

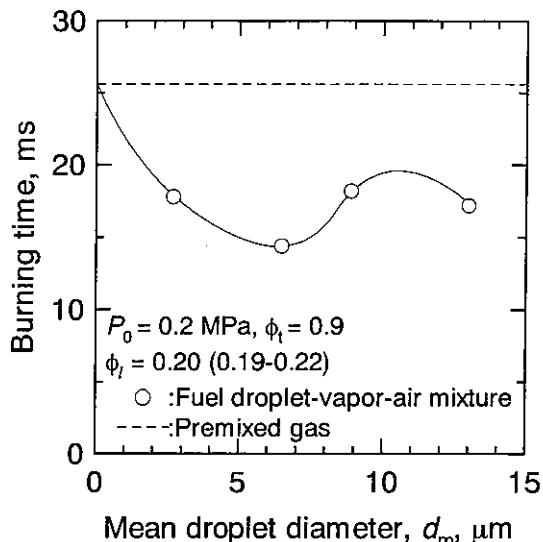


Fig. 7 Effect of mean droplet diameter on burning time.