

部分予蒸発噴霧バーナの開発と火炎観察

日大生産工(院) ○早崎 将司 日大生産工(院) 福田 智幸
(株)本田技研 川澄 郁絵 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

部分予蒸発燃料噴霧の燃焼機構を解明することは、ディーゼル機関の高出力化に制限を与えるディーゼルノックの抑制や、筒内直噴ガソリン機関の燃焼促進、予蒸発希薄予混合ガスタービンの予蒸発管における逆火防止などに有用な知見が得られると考えられる。噴霧燃焼機構は非常に複雑で、いまだ解明されていない点が多い。単一液滴、液滴列、液滴マトリックスの燃焼に関する研究など、噴霧機構を解明することを目的として種々のアプローチがなされている。しかしながら、これらの研究と噴霧燃焼を結びつける十分な知見は得られていない。これまで、予混合気中に分散する燃料液滴が燃焼に及ぼす影響を調べるため、実機の噴霧をモデル化した粒径分布幅の狭い静止均一分散噴霧を凝集法により生成し、定圧および定容環境下で燃焼させる研究を行ってきた^{1),2)}。その結果、予混合気中に分散する燃料液滴が火炎伝播速度や最大燃焼圧力などに大きく影響を及ぼしていることが明らかになった。本研究では、均一噴霧バーナを用いて伸長流れ場に平面火炎を保炎し、予混合気中に分散する燃料液滴が燃焼速度に及ぼす影響を調べてきた³⁾。燃焼速度は、同一総当量比の予混合火炎のものと比較して、希薄領域では大きくなることがわかった。本報では、レーザースート法により、平面火炎前縁の液滴挙動観察を行った結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 噴霧生成原理

予混合気中に燃料液滴を均一に分散させる方法として、凝集法を採用した。これは、燃焼容器内に充填された飽和燃料蒸気-空気混合気を急速減圧させることにより温度降下を起こさせ、燃料蒸気の一部を液滴に凝集させる方法である。この噴霧生成法の原理は、Wilson の霧箱と同じである。本研究ではこの原理を用いて、液滴直径分布が狭く、空間的均一性、時間的安定性を持つ層流である噴霧流を生成した。

2.2 実験装置構成

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験装置は均一噴霧バーナ、制御装置および計測装置から構成される。均一噴霧バーナは急速減圧容器、ピストン、ノズルおよび点火装置から構成される。急速

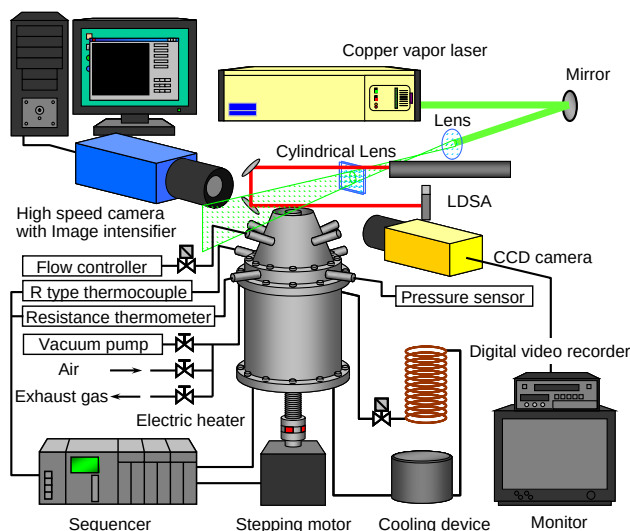


Fig.1 Experimental apparatus.

減圧容器は直径 80 mm、全長 80 mm の円筒形であり、噴霧流を流す内側ノズルおよび周囲流の流れる外側ノズルの出口直径はそれぞれ 8 mm、28 mm である。周囲流には窒素を用い、中心流と同流速で流した。窒素の流路には、整流板を設けた。点火・保炎装置には直径 600 μm 、長さ 30 mm のニクロム線を使用した。本装置は、噴霧流が点火した後は、出力を低下させ、斜め平面火炎を保炎させる役割を持つ。ノズルと点火・保炎装置の詳細を Fig. 2 に示す。ノズル出口と平行に直線状に張られたニクロム線は、その中央がノズル出口 2 mm 上方の噴霧流外縁と接するように設置した。制御装置にはシーケンサを用い、急速減圧容器内温度、電磁弁、ピストン駆動用のステッピングモータの制御を行った。定常時の急速減圧室内温度測定用の白金測温抵抗体、急速減圧中温度測定用の R 種熱電対を急速減圧容器内に設置した。急速減圧容器壁から生成された噴霧への熱流入を抑制するため、急速減圧中および後、代替フロンを用いて急速減圧容器壁の冷却を行った。計測装置は、前述の測温抵抗体および熱電対に加え、圧力計および光学計測装置からなる。急速減圧容器内の圧力は、絶対圧力計を用いて測定した。噴霧流の平均液滴直径は、レーザ光散乱方式粒度分布測定装置 (LDSA) を用いて測定した。火炎の挙動観

Development of a Partially-Prevaporized Spray Burner and Flame Observation

Masashi HAYASAKI, Tomoyuki FUKUDA, Ikue KAWASUMI,
Hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

察は、直接写真法により CCD カメラ（露光時間：1/1000 s，フレームスピード：30 fps）で行った。噴霧流中の液滴挙動の観察は、銅蒸気レーザーによるレーザーシート法によりイメージインテンシファイア内蔵高速度カメラ（露光時間：3 μ s，フレームスピード：3000 fps）を用いて行った。レーザーシートは、ノズル中心軸を含み、点火・保炎用ニクロム線に直交するように照射した。

急速減圧容器内に燃料および空気を充填，加圧した後，所定の温度まで加熱した。その後，容器に取り付けられた減圧用バルブを開くことにより容器内を急速減圧させ，均一燃料噴霧を生成した。生成した均一噴霧を，ステッピングモータによって駆動されるピストンにより，ノズル出口から押し出した。噴霧流が安定した後，点火・保炎装置により，平面火炎をノズル出口上方 2 mm の位置に保炎した。

2.3 実験条件

燃料および酸化剤にはそれぞれ，エタノール（純度 99.5%）および純空気を使用した。平均液滴直径にはザウタ平均粒径 d_m を用いた。噴霧の生成には，すべての実験において，飽和燃料蒸気-空気混合気を減圧前の混合気として使用した。総当量比 ϕ_t は，急速減圧前の混合気の温度 T_0 および圧力 P_0 により決定した。気体当量比 ϕ_g は急速減圧後の温度 T_1 および圧力 P_1 により決定した。液体当量比 ϕ_l は， $(\phi_t - \phi_g)$ と定義した。燃焼実験はすべて 0.1 MPa のもとで行った。

3. 実験結果および考察

3.1 斜めに保炎された平面火炎

Fig.3 に，噴霧流中に保炎された斜め火炎の CCD 画像および噴霧流の液滴直径分布を示す。噴霧流はレーザーシートによって照射されており，液滴は 10 回程度の多重撮影になっている。図中には，実線により内側ノズルの出口および一点差線によりノズルの中心軸を示した。(a)および (b)は，それぞれ $\phi_t = 0.9$ ， $\phi_l = 0.3$ ， $d_m = 14.3 \mu\text{m}$ および $\phi_t = 0.9$ ， $\phi_l = 0.3$ ， $d_m = 6.2 \mu\text{m}$ の噴霧流である。ノズル出口流速 v_0 は 0.77 m/s とした。ノズル中心軸に直交する平面とノズル中心軸付近で火炎がなす角度 α_f は，それぞれ 28.7° および 32.2° であった。(a)および (b)のどちらの条件においても，鉛直上向きにノズルを出た噴霧流が，火炎により画像右方向に偏向されていることがわかる。また，点火・保炎用熱線から遠ざかるに従って，火炎の傾きは徐々に緩やかになる。(a)の噴霧流に比較して，(b)の噴霧流は偏向が少ない。これは，(b)の噴霧流の平均液滴直径が大きいので，液滴の慣性が大きくて未燃混合気の流れに追従しにくいからであると考えられる。(a)では青炎と噴霧の間に液滴の存在しない範囲が確認された。また (b)では火炎

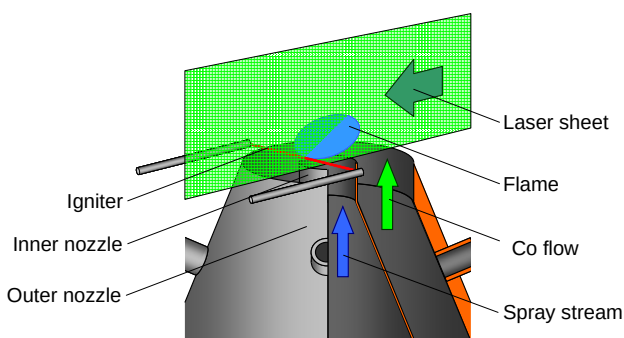


Fig.2 Nozzle and igniter.

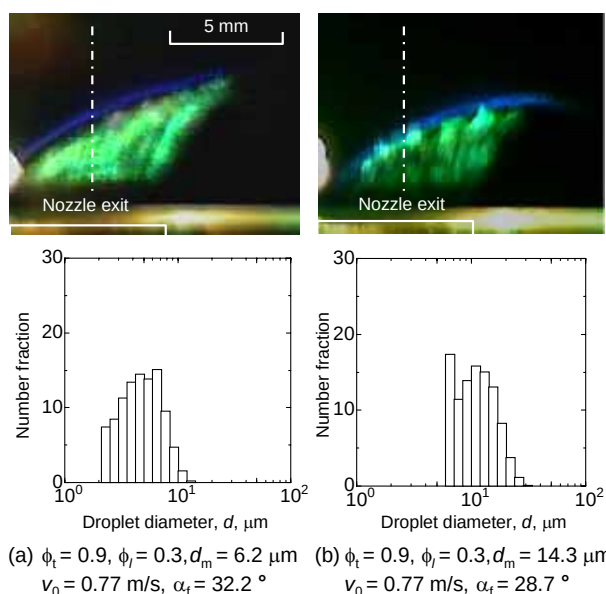


Fig.3 Laser sheet images of spray flame and droplet diameter distributions.

を突き抜ける液滴が多数観察された。液滴直径分布のグラフと合わせて考察すると， $\phi_t = 0.9$ ， $\phi_l = 0.3$ の場合， $d < 10 \mu\text{m}$ の液滴は火炎の予熱帯において蒸発が完了することがわかる。

3.2 液滴速度の PTV 計測

Fig.4 に，噴霧流中の液滴速度を PTV により測定した結果を示す。PTV 用高速度カメラの露光時間において火炎の自発光を観察することが困難であったため，CCD カメラで同位置を同時撮影した火炎画像とともに示す。白の破線はノズルの中心軸を示す。噴霧流の性状は $\phi_t = 0.9$ ， $\phi_l = 0.3$ ， $d_m = 8 \mu\text{m}$ であり，ノズル出口流速は 0.77 m/s である。このとき， $\alpha_f = 30^\circ$ であった。レーザーシート画像より，液滴は火炎の反応帯に突入する前にすべて蒸発が完了していることが確認できる。また，斜め火炎が保炎されている噴霧流中の未燃液滴は，流れと直角方向に速度成分を持っていることがわかる。

Fig.5 に、火炎前縁の液滴速度の分布を示す。グラフの横軸は y 座標、縦軸はノズル中心軸付近（ノズル中心軸から x 軸方向に ± 0.2 mm の幅のレーザーシート内）の液滴速度であり、 x 軸方向成分および y 軸方向成分を示している。ここで、 x 軸および y 軸は Fig.4 に示されている方向であり、原点は青炎前縁とノズル中心軸の交点とした。図中の各点は、0.1 s 間の 10~100 個のデータの平均値を示している。総当量比は 0.9、火炎角度は 30° で一定とし、平均液滴直径およびノズル出口流速を変化させた。Fig.5-(a) および Fig.5-(b) は $\phi_f = 0.25$ および $\phi_f = 0.2$ の結果をそれぞれ示す。 x 軸方向成分から、噴霧流中の液滴の x 軸方向速度 v_x は、火炎に近づくにしたがって増大し、 $y = -1$ mm 付近から減少することがわかる。 y 軸方向成分から、 y 軸方向速度 v_y は火炎に近づくにしたがって減少し、 $y = -1$ mm 付近から増大することがわかる。 $y = -1$ mm 付近で、液滴は火炎の予熱帯に突入したと考えられる。 x 軸方向液滴速度について $d_m = 6$ と $14 \mu\text{m}$ の場合を比較すると、 $d_m = 6 \mu\text{m}$ の場合の方がノズル出口流速が小さいにもかかわらず x 軸方向成分が大きい。これは、小さい液滴は慣性が小さいので、流れに追従して加速しやすいからと考えられ、Fig.3 の考察を裏付けている。また、蒸発の遅い $d_m = 14 \mu\text{m}$ の噴霧流の場合、予熱帯においても液滴速度が計測されていることがわかる。Fig.6 に、液滴が火炎に突入する速度の火炎垂直成分 v_{dn} とノズル中心軸からの x 軸方向距離の関係を示す。 v_{dn} は予熱帯に突入する液滴の v_x 、 v_y および α_f より、

$$v_{dn} = v_y \cos \alpha_f - v_x \sin \alpha_f \quad (1)$$

の式から求めた。 $d_m = 6 \mu\text{m}$ の場合は、 x に対して v_{dn} がほぼ一定であることがわかる。 $d_m = 14 \mu\text{m}$ の場合は、 x が増大すると v_{dn} が減少することがわかる。 $d_m = 14 \mu\text{m}$ の噴霧流では、液滴が大きな慣性を有するため、 x の小さい範囲では液滴があまり減速せずに火炎に突入するが、 x の大きい範囲ではノズルから火炎までの距離が長いため、液滴が十分に減速するからであると推察される。このことから、 x の小さい領域では火炎前縁での局所当量比が増大していることが予想される。

3.3 燃焼速度火炎角度依存性

Fig.7 に火炎角度 α_f と火炎に突入する液滴速度火炎垂直成分 v_{dn} の関係を示す。それぞれのプロットは同一条件の噴霧流を用いたので、 v_{dn} の大小から燃焼速度の大小が比較できると考えられる。 $d_m = 7 \mu\text{m}$ の噴霧流では、 α_f が増大すると燃焼速度が減少することがわかる。また $\alpha_f = 20^\circ$ の火炎と $\alpha_f = 27^\circ$ の火炎とでは燃焼速度の値がほぼ同じであることがわかる。詳細に検討を行うため、火炎に突入する液滴速度火炎垂直成分 v_{dn} とストークス数との関係を Fig.8 に示す。噴霧流中の液滴

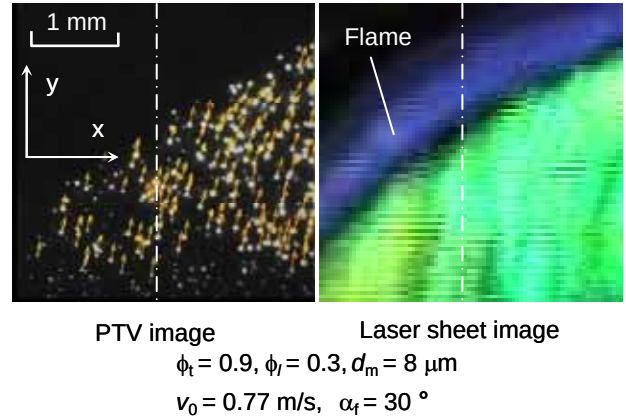


Fig.4 Result of PTV measurement and image of flame.

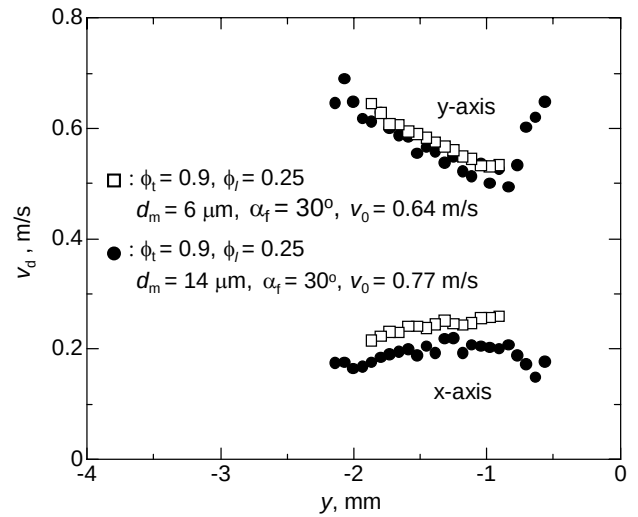


Fig.5 Droplet velocity distributions along y-axis.

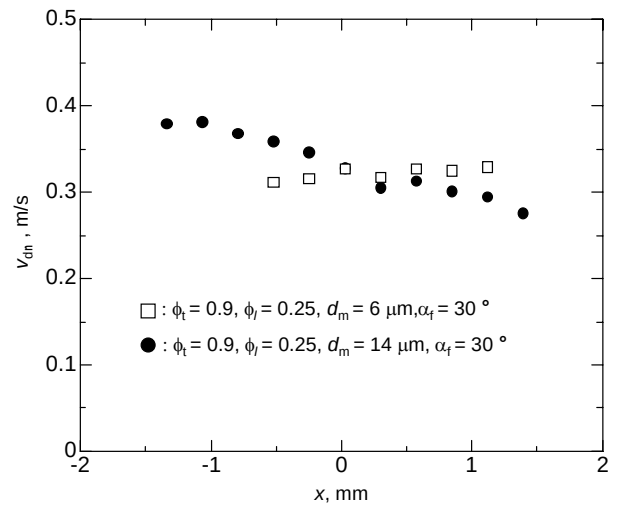


Fig.6 Droplet velocity normal to flame.

の追従性を示すストークス数 St が噴霧燃焼に影響を及ぼすことが知られている 4). ここで St は

$$St = \frac{\rho_l d^2 a}{18 \mu_g} \quad (2)$$

の式を用いた. ρ_l , d , μ_g および a はそれぞれ液滴の密度, 周囲気体の密度, 液滴直径, 周囲気体の粘性係数および伸長率を表している. 伸長率は流体の速度勾配を表すが, 周囲気体の速度を計測していないため, ここでは液滴の速度変化から求めた速度勾配を気体の速度勾配としている. よって, 実際の St の値とは異なることが予想される. Fig.7 において, 点火・保炎用熱線の熱的影響が現れていると考えられる $x < -0.5$ の範囲のデータは除外した. グラフより, $St = 0.016$ 付近までは St の増大に伴って v_{dn} が増大することがわかる. これは, スリップ速度が大きくなり, 局所総当量比の増大による燃焼速度の増大が起こったためと考えられる. また $St = 0.016$ を超える範囲では St の増大に伴って v_{dn} が減少することがわかる. これは, 火炎伸長率の増大および液滴が火炎予熱帯により入り込むことによる反応帯気体当量比の低下によって燃焼速度が減少したためだと推察される. この現象については今後詳細を調べることにする.

4. 結言

- (1) 層流の部分予蒸発燃料噴霧流中に斜めに保炎された火炎を観察した. 総当量比 0.9, 液体当量比 0.3 の場合, 直径 $10 \mu\text{m}$ 以下の液滴は火炎の予熱帯において蒸発が完了することがわかった.
- (2) PTV により, 斜め火炎が形成された噴霧流中の液滴の速度を計測した. 液滴速度は, 予熱帯前縁に近づくにしたがって, ノズル中心軸に平行な成分は減少し, 垂直な成分は増大することがわかった.
- (3) 平均液滴直径 $14 \mu\text{m}$ の噴霧流の場合, 液滴が火炎に突入する速度の火炎垂直成分は, 火炎のノズルに近い部分が大きく, ノズルから遠ざかるにしたがって減少する. 平均液滴直径 $6 \mu\text{m}$ の噴霧流の場合は, 点火・保炎用熱線の熱的影響部を除けば, ほぼ一定である.
- (4) 総当量比 0.9, 液体当量比 0.3, 平均液滴直径 $7 \mu\text{m}$ の噴霧流中に保炎された火炎においては, v_{dn} は $St = 0.016$ まで増大し, その後減少する.

謝辞

本研究は, (財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである. ここに感謝の意を表す.

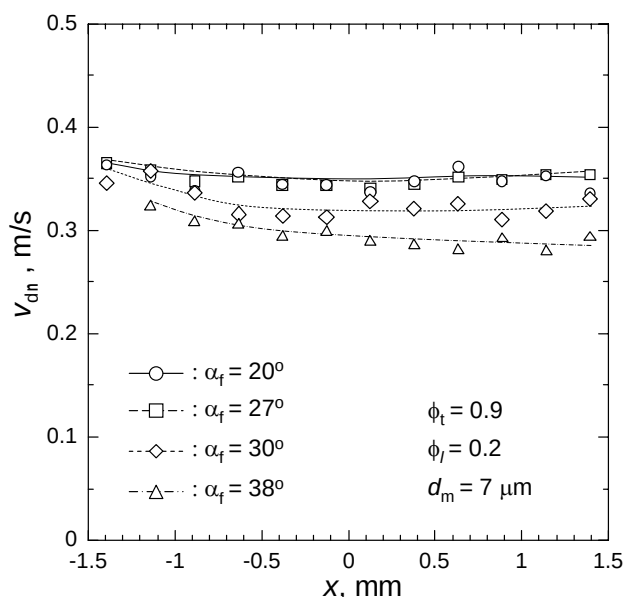


Fig.7 Distribution of droplet velocity normal to flame along the flame leading edge.

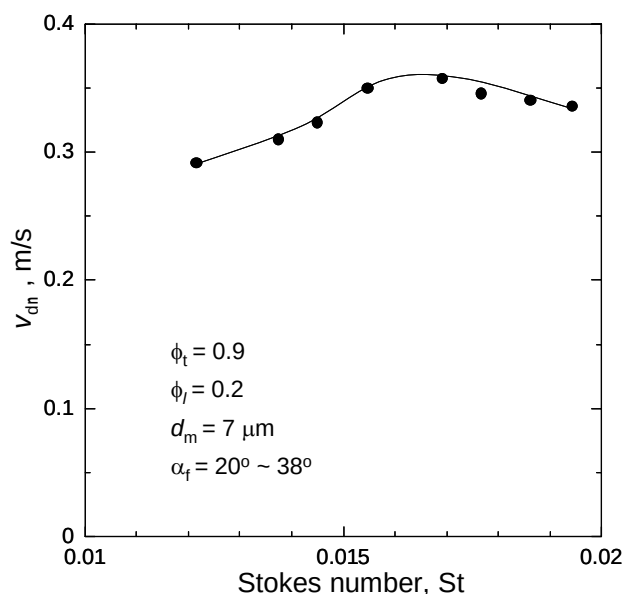


Fig.7 Relationship between Stokes number and droplet velocity normal to flame.

参考文献

- 1) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., and Ujiie, Y., The Proc. Combust. Inst, Vol. 28, (2001), 999-1005.
- 2) Nomura, H., Hamasaki, T. et al., SAE Paper #2003-01-0628, (2003).
- 3) Hayasaki, M., Kawasumi, I., Nomura, H., Ujiie, Y., International Symposium on Space Technology and Science, 2004-h-17, (2004)
- 4) Mikami, M., Miyamoto, S., and Kojima, N., Counterflow Diffusion Flame with Polydisperse Sprays, The Proc. Combust. Inst, Vol. 29, (2002), 593-599.