

均一噴霧バーナの開発とレーザ計測装置を用いた噴霧流の解析

日大生産工 氏家 康成 日大生産工 野村 浩司 日大生産工(院) 福田 智幸

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、ディーゼルエンジンのノッキング抑制や筒内直噴ガソリンエンジンの燃焼促進、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。噴霧燃焼の機構解明を目的に単一液滴、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、これらの研究と実機の部分予蒸発噴霧燃焼を直接結びつける十分な知見は得られていない⁽¹⁾。そこで、両者の隔たりを補完する均一燃料液滴 蒸気 空気混合気（以下、液滴混在予混合気）の燃焼を対象とした研究を行ってきた⁽²⁾⁽³⁾。

これまで、燃料液滴と液滴周囲の混合気との相対速度（スリップ速度）が燃焼に及ぼす影響を解明することを目的とし、平均液滴直径の小さな液滴を対象に、均一噴霧バーナを用いて火炎中の液滴の挙動観察や燃焼速度の測定を行ってきた⁽⁴⁾。その結果、液滴混在予混合気の平均液滴直径と火炎における液滴存在範囲の関係や、同一総当量比の予混合気の場合と比較して希薄液滴混在予混合気では燃焼速度が大きくなり、過濃混合気では逆に小さくなることなどがわかった。本研究では、2次元位相ドップラー流速計（PDA：Phase Doppler Anemometry）を使用して火炎中の液滴挙動を詳細に把握することを試みた。

2. 実験装置および方法

2.1 噴霧生成原理

PDAを用いて多点測定を行う場合、測定に要する時間が長くなるため、時間的に安定した混合気流が必要となる。しかしながら、以前に開発した急速減圧式均一噴霧バーナは、20 s程度の噴霧流連続生成が限界であった。新たに開発したバーナでも、予混合気中に燃料液滴を均一に分散させるために凝集法を利用した。連続的に生成される飽和燃料蒸気 空気混合気を冷却管に通して冷却し、連続的に燃料蒸気の一部を液滴に凝集させた。

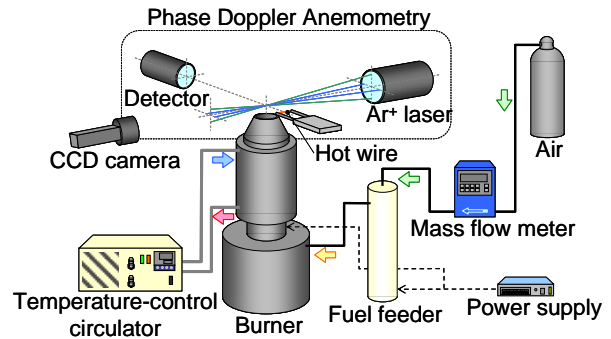


Fig.1 Experimental apparatus.

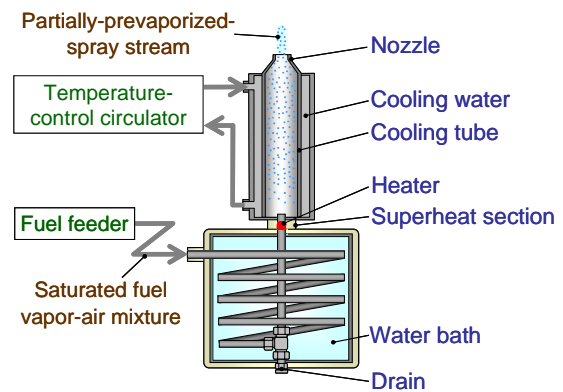


Fig.2 Partially-prevaporized-spray burner.

2.2 実験装置構成

実験装置全体の概略を Fig.1 に示す。実験装置は、主に均一噴霧バーナ、飽和燃料蒸気 空気混合気供給装置、点火・保炎装置、計測装置から構成されている。

均一噴霧バーナの概略を Fig.2 に示す。均一噴霧バーナは、主に恒温部、加熱部、冷却部およびノズルから構成されている。飽和燃料蒸気-空気混合気供給装置は、加熱した液体燃料中に沈めた多孔質体に空気を送り込むことで、連続的に飽和燃料蒸気 空気混合気を均一噴霧バーナに供給することができる。混合気を飽和状態に保つため、均一噴霧バーナの恒温部温度より 0.5 ~ 1.0 高い飽和燃料蒸気 空気混合気を供給装置から均一噴霧バーナに供給し、燃料蒸気が恒温部

Development of Uniform-Spray-Stream Burner and Analysis of Spray Stream with Laser Measuring Instrument

Yasushige UJIIE, Hiroshi NOMURA, Tomoyuki FUKUDA

チューブ内壁面で少量凝集する状態にした。混合気の総当量比が目的の値になる燃料の飽和蒸気圧を算出し、その飽和蒸気圧が得られる燃料の温度に恒温部温度を設定した。計算では、ダルトンの法則が成り立つことを仮定した。噴霧の平均液滴直径を制御するため、恒温部と冷却部の間に加熱部を設けた。加熱部は飽和燃料蒸気 空気混合気を急速加熱し、過熱蒸気の状態を実現する。循環する冷却水で金属壁を介して燃料蒸気-空気混合気を冷却し、混合気中に液滴群を生成する。冷却部の内直径は 30 mm であり、長さは 200 mm である。生成された液滴混在予混合気は、ノズルより噴出される。ノズル出口内径は 10 mm である。

点火・保炎装置は、電源と点火・保炎用熱線（直径 600 μ m のニクロム線）で構成される。本装置は、混合気流が点火した後に出力を低下させ、斜め平面火炎を混合気流中に保炎させる役割を持つ。ノズル出口と平行に直線状に張られた電熱線は、その中央がノズル出口 2 mm 上方で混合気流外縁と接するように設置した。

計測装置は、位相ドップラー 2 次元流速計 (PDA)、質量流速計測・制御装置、白金測温抵抗体である。PDA は液滴混在予混合気流の局所的液滴直径分布および液滴速度分布の同時計測に用いた。質量流速計測・制御装置は空気流量の計測、白金測温抵抗体は飽和燃料蒸気 空気混合気供給装置、恒温部、加熱部出口、およびノズル出口での混合気温度の計測に用いた。生成された液滴混在予混合気流および保炎された火炎の観察は、CCD カメラを用いて行った。混合気流の全体的観察には、混合気流の中心軸を通り、観察方向に対して垂直な方向から幅 2 mm のシート光を照射し、CCD カメラで撮影を行った。

PDA の測定体積は、波長 514.5 nm のレーザー光については $0.076 \times 0.076 \times 0.797 \text{ mm}^3$ 、波長 488 nm のレーザー光については $0.072 \times 0.072 \times 0.756 \text{ mm}^3$ であった⁽⁵⁾。

2.3 実験パラメータ

液滴混在予混合気流の特性値として、総当量比、液体当量比、ノズル出口平均流速、および平均液滴直径を選んだ。これらを独立に制御するためには恒温部温度、冷却部温度、ノズル出口流速の 3 つの混合気流制御パラメータに加え、混合気の冷却チューブ内滞在時間（冷却チューブ内直径および長さ依存する）も制御パラメータとして必要になる。冷却チューブ直径あるいは長さを変化させることは装置の構造上困難であったため、恒温部を出た飽和燃料蒸気 空気混合気を加熱部で過熱燃料蒸気 空気混合気にし、冷却チュー

ブを短くしたのと同等の効果を得る機構とした。

総当量比は恒温部出口の飽和燃料蒸気 空気混合気の温度から求めた。液体当量比は、ノズル出口での混合気流の温度から気体当量比を求め、総当量比から気体当量比を減ずることで求めた。ノズル出口平均流速は、質量流速計測・制御装置で空気質量流量を計測し、ノズル出口での燃料蒸気分圧から理想気体を仮定して混合気の体積流量を求め、流速に換算した。液滴混在予混合気流の平均液滴直径には、ザウター平均液滴直径を使用した。

今後予定されている微小重力場での実験に先立って、通常重力場で液滴混在予混合気流の特性値制御実験および燃焼実験を行った。総当量比 ϕ_t を 0.8~1.4、液体当量比 ϕ_l を 0.1~0.3、噴霧のノズル出口平均流速 v_{0a} を 0.3~2.0 m/s の範囲で変化させた。

実験試料には、揮発性が適当である理由からエタノール（純度 99.5%）と、成分が明確である純空気を用いた。

3. 実験結果および考察

予備実験として、生成された液滴混在予混合気流の平均液滴直径および直径分布をレーザ光散乱方式粒度分布測定装置 (LDSA) を用いて計測した。その結果、液滴混在予混合気流の平均液滴直径は時間的に変化しないこと、また、直径分布幅は過去に使用した急速減圧式噴霧生成装置で生成された液滴混在予混合気と同等であることが確認された。

3.1 非燃焼流れ場

CCD カメラを用いた直接写真法によりノズルから噴出された液滴混在予混合気流の観察を行った。液滴混在予混合気流の 3 例を Fig.3 に示す。ノズルから噴出する混合気流が安定した層流であり、また液滴が偏りなく分散していることを確認した。混合気流速 1.23 m/s までは、他の液滴混在予混合気流生成条件においても、同様な結果が得られた。

冷却直前の飽和燃料蒸気 空気混合気を急速加熱し、過熱燃料蒸気の状態から混合気を冷却することで凝集時間を制御し、液滴混在予混合気流の平均液滴直径を変化させる平均液滴直径制御法の検証を行った結果を Fig.4 に示す。縦軸は混合気流の平均液滴直径、横軸は混合気の過熱度である。過熱度は加熱部を出た直後の混合気温度から恒温部温度を減じた値と定義した。いずれの総当量比の場合においても、過熱度が大きくなると液滴直径が小さくなるのがわかる。また、飽和燃料蒸気 空気混合気の急速加熱は、液滴直径の時間

的な安定性，空間的均一性および液滴直径分布に影響を及ぼさなかった。

Fig.5 は，ノズル中心軸に直交する線上の液滴直径および液滴速度を PDA で測定した結果である．縦軸は液滴直径および液滴速度，横軸はノズル中心軸からの水平方向距離 x である． $x = 5 \text{ mm}$ にノズル出口内壁が位置する．計測はノズル出口から 5 mm 下流で行った．各点は $10 \sim 100$ 個のデータの平均値である．ノズル中心から約 3 mm の位置までは平均液滴直径および液滴速度が一定であり，速度境界層と液滴直径が減少する領域がほぼ一致することがわかった．このことから，燃焼実験では，ノズル中心軸から 3 mm の領域のデータを取得することとした．今後，周囲流を混合気流と同温度・同速度で流すことにより，実験領域の拡大を図る．

3.2 燃焼流れ場

点火・保炎用熱線を用いて斜め平面火炎を混合気流中に保炎させ PDA で火炎近傍の液滴直径および速度の計測を行った．斜め平面火炎のモデルおよび CCD カメラでの撮影例を Fig.6 に示す．点火・保炎線に垂直かつノズル中心軸に直交するように x 軸を設置した．点火保炎線から遠ざかる向きを正の向きとした．また，混合気流の下流方向を正の向きとし，ノズル中心軸上に y 座標を設置した．青炎前縁の位置を $y = 0 \text{ mm}$ とした．総当量比を 0.9 ，液体当量比を 0.3 ，噴霧のノズル出口平均流速を 0.44 m/s ，ノズル出口における噴霧平均液滴直径 d_{m0} を $15.8 \mu\text{m}$ にそれぞれ保ち $y = -1.1$ から 0 mm まで 0.1 mm ごとに y 軸上の液滴直径と速度を計測した．このとき，ノズル中心軸上で火炎が x 軸となす角度 θ_{f0} は 35° であった．

Fig.7 は，平均液滴直径および速度の y 軸上における変化を示している．液滴速度は，直径によって $2 \sim 5$ ， $8 \sim 11$ および $13 \sim 18 \mu\text{m}$ の 3 つの範囲に分類し，それぞれについて x 軸方向平均速度および y 軸方向平均速度を示した． v_{dx} は青炎前縁に近づくと増加し， $y = -0.8 \text{ mm}$ 付近で増大が急になり， $y = -0.3 \text{ mm}$ 付近から減少することがわかる． v_{dy} は青炎前縁に近づくと減少し， $y = -0.3 \text{ mm}$ 付近から増大している．平均液滴直径は， $y = -0.8 \text{ mm}$ まで変化せず， $y = -0.7 \text{ mm}$ 付近から緩やかに減少し，青炎近傍で急激に減少している． $y = -0.8 \text{ mm}$ 付近に予熱帯前縁が存在していると考えられる $y = -0.7 \text{ mm}$ において， $d = 8 \sim 11 \mu\text{m}$ の液滴速度が $d = 13 \sim 18 \mu\text{m}$ の液滴速度より大きくなっていることも $y = -0.7 \text{ mm}$ が予熱帯内であることを支持している．予熱帯におい

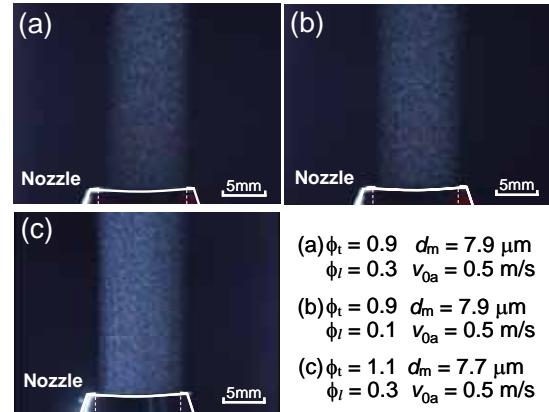


Fig.3 Direct images of spray streams.

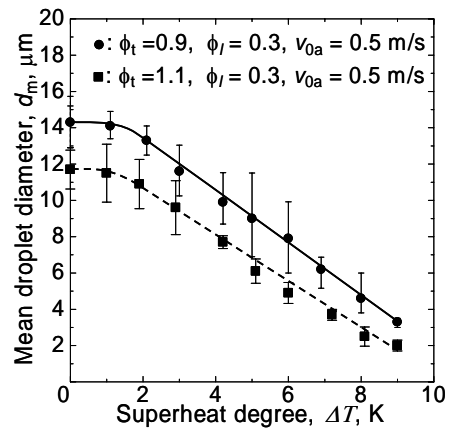


Fig.4 Relations between superheat degree and mean droplet diameter.

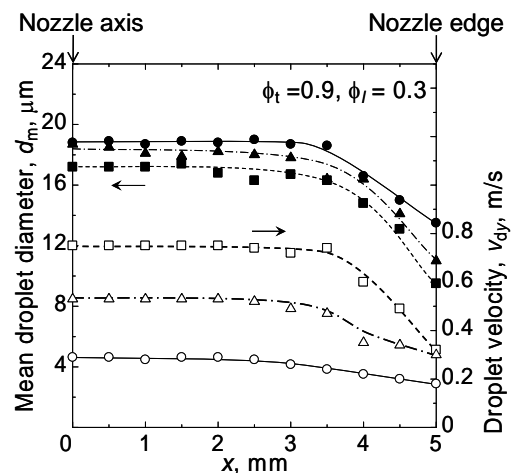


Fig.5 Droplet diameter and velocity profiles along the x -axis 5 mm above the nozzle exit.

て，直径の大きな液滴よりも小さな液滴の方が周囲の混合気に追従して加速し， x 軸方向， y 軸方向ともに速度が大きいことがわかった．

Fig.8 に， $y = -1.1$ ， -0.1 ，および 0 mm の 3 点の液

滴直径分布を示す．縦軸は累積個数分布，横軸は液滴直径である．液滴直径分布幅は，液滴が予熱帯に突入すると一度広がり，青炎近傍で急激に狭くなることがわかった． d^2 則が成り立つ場合，液滴直径の減少速度は，直径の小さな液滴の方が大きくなる．このことから，予熱帯上流の $y = -1.1$ mm において液滴直径の小さな液滴ほど予熱帯突入後の $y = -0.1$ mm までの液滴直径の減少が大きく，結果として液滴直径分布幅が液滴直径の小さい側へ広がったと考えられる．また，青炎近傍では液滴への熱流入が増大し，蒸発速度が急激に増大するため，小さい液滴が消滅して液滴直径分布幅が狭くなったと考えられる．

4. 結言

連続生成均一噴霧バーナを開発・製作し，バーナの性能試験および PDA による部分予蒸発噴霧火炎の構造観察を行った．以下に得られた知見を列挙する．

- 1) 液滴混在予混合気流の平均液滴直径は時間的に変化しないこと，また，直径分布幅は過去に使用した急速減圧式噴霧生成装置で生成された液滴混在予混合気と同等であることが確認できた．
- 2) 混合気流速が 1.23 m/s まで，混合気流は安定した層流であることが確認できた．
- 3) 燃料蒸気，空気混合気の過熱度を変化させることで，凝集時間を制御し，液滴混在予混合気流の平均液滴直径を変化させることができた．
- 4) ノズル中心軸から約 3 mm の位置までは，平均液滴直径および液滴速度が一定であることがわかった．
- 5) 予熱帯において，直径の大きな液滴よりも小さな液滴の方が周囲の混合気に追従して加速し， x 軸方向， y 軸方向ともに速度が大きいことがわかった．平均液滴直径 $15.8 \mu\text{m}$ の液滴混在予混合気流に含まれる比較的大きな液滴が，予熱帯で完全に蒸発せずに反応帯に突入する現象を PDA でとらえることができた．
- 6) 液滴の直径分布幅は，液滴が予熱帯に突入すると一度広がり，青炎近傍で急激に狭くなることがわかった．

参考文献

- (1) F.A. Williams: Oxidation and Combustion Reviews, 3, (1997), 1.
- (2) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., and Ujiie, Y., The Proc. Combust. Inst, 28, (2001), 999.
- (3) Nomura, H., Hamasaki, T., et al., SAE Paper

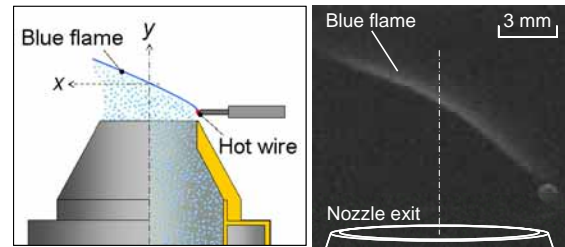


Fig.6 A tilted flat flame model and direct image.

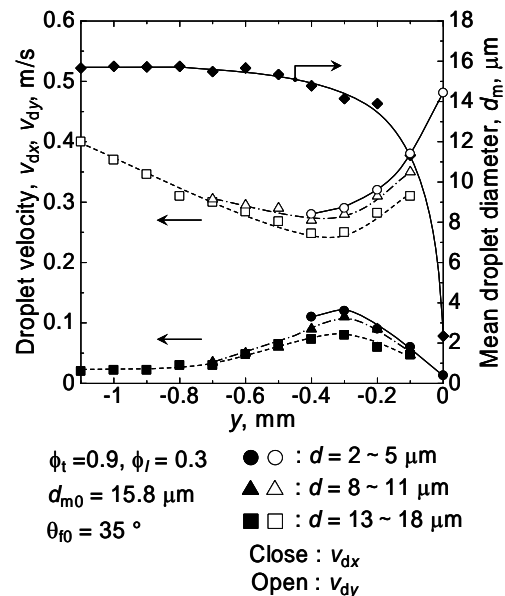


Fig.7 Droplet diameter and velocity profiles along the central axis of the nozzle exit.

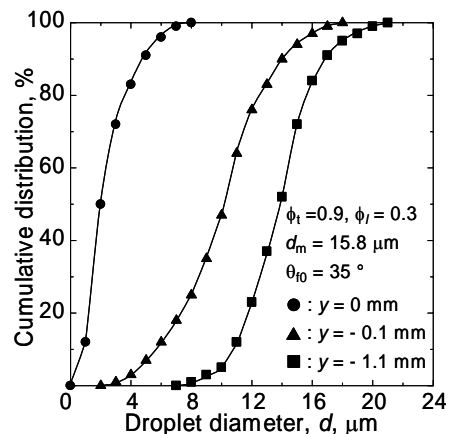


Fig.8 Droplet diameter distributions on the central axis of the nozzle exit.

#2003-01-0628(2003).

- (4) Hayasaki M., Kawasumi, I., Nomura, H., Ujiie, Y., International Symposium on Space Technology and Science, 2004-h-17, (2004).
- (5) Dantec PDA Manual, (2002), 7-6, Dantec Inc.