

# 燃料液滴混在予混合気流中の斜め平面火炎

日大生産工(院) ○小田桐 祥子 日大生産工(院) 及川 尚樹  
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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)(3)</sup>。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。また、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<sup>(4)</sup>。その結果、平均液滴直径および流れの伸長率が火炎における液滴存在範囲に及ぼす影響や、液滴混在予混合気における流れの伸長率と燃焼速度の関係が明らかになった。本研究では、2次元位相ドップラ流速計（PDA：Phase Doppler Anemometry）により火炎中の液滴挙動を詳細に把握することを試みる。

## 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、凝縮法を採用した。これは、飽和燃料蒸気-空気混合気を冷却することで燃料蒸気の一部を液滴に凝縮させる方法である。この噴霧生成法の原理は、

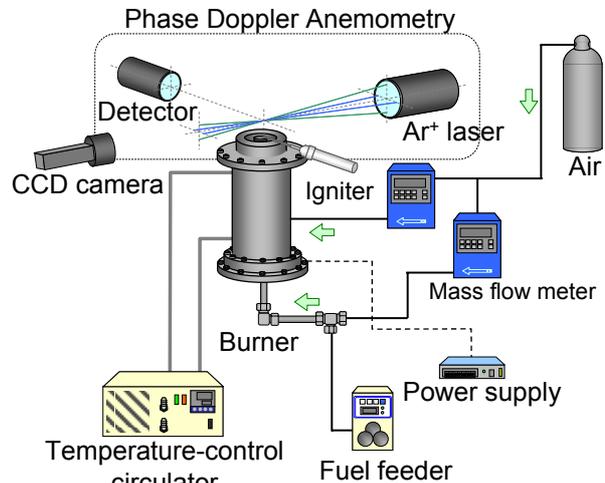


Fig.1 Experimental apparatus.

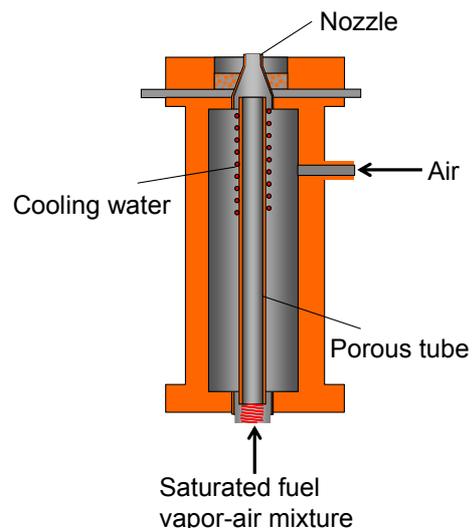


Fig.2 Partially-prevaporized-spray burner.

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の液滴混在混合気流を実現した。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本報では、以前使用していた連続均一噴霧バーナを長時間安定して液滴混在混合気流が生成できる

## Tilted Flat Flame in Fuel Vapor-Air Premixture Containing Fine Fuel Droplets

Shoko ODAGIRI, Naoki OIKAWA, Hiroshi NOMURA, Yasushige UJIIE

ように改良を行った。

## 2.2 実験装置構成

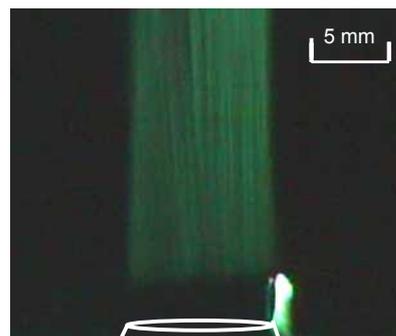
実験装置全体の概略を図 1 に示す。実験装置は、主に均一噴霧バーナ、制御装置および計測装置から構成されている。

均一噴霧バーナの概略を図 2 に示す。均一噴霧バーナは、主に蒸発部、加熱部、冷却部およびノズルから構成されている。燃料蒸気-空気混合気は、燃料ポンプより供給された燃料を蒸発部で全て蒸発させ、同じ流路を流れる純空気と混合させることで生成する。燃料ポンプから燃料を連続的に送ることで、長時間の燃料蒸気-空気混合気生成が可能である。噴霧の平均液滴直径を制御するため、蒸発部と冷却部の間に加熱部を設けた。加熱部で飽和燃料蒸気-空気混合気の加熱量を制御し、冷却管での冷却速度を変化させる。多孔質円筒より冷却空気を供給することで燃料蒸気-空気混合気を冷却し、混合気中に液滴群を生成する。冷却部の内径は 14 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。ノズルは同軸流ノズルであり、液滴混在混合気流を流す内側ノズルおよび周囲流を流す外側ノズルの出口内径はそれぞれ 8 および 20 mm である。周囲流には窒素を用いた。窒素の流路には整流器を設けた。ボタンタッチ火炎を用い、混合気流を点火し、斜め平面火炎を混合気流中に保炎させた。

計測装置は、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液滴直径および液滴速度の計測に、質量流速計測・制御装置は空気流量の計測に、白金測温抵抗体は蒸発部、加熱部出口、およびノズル出口での混合気の温度計測に用いた。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  $0.072 \times 0.072 \times 0.756 \text{ mm}^3$  である。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、直接写真法により CCD カメラ（露光時間：1/30 s、フレームスピード：30 fps）で行った。レーザーシートは、ノズル中心軸を含み、点火・保炎用タッチ噴孔を通るように照射した。噴霧流中の液滴挙動の観察は、YAG レーザ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付き高速度カメラ（露光時間：30  $\mu\text{s}$ 、フレームスピード：2000 fps）を用いて行った。

## 2.3 実験パラメータ

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。総当量比  $\phi_t$  は、燃料供



$$\phi_t = 0.9 \quad \phi_f = 0.1 \quad d_m = 9.3 \mu\text{m}$$

Fig. 3 CCD camera images of a spray stream.

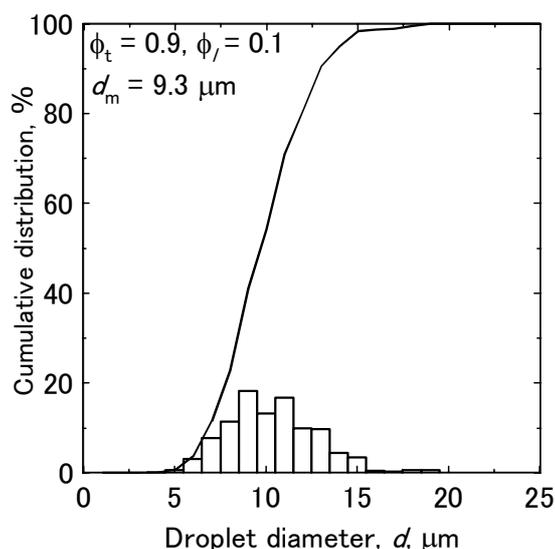


Fig.4 Typical droplet diameter distributions.

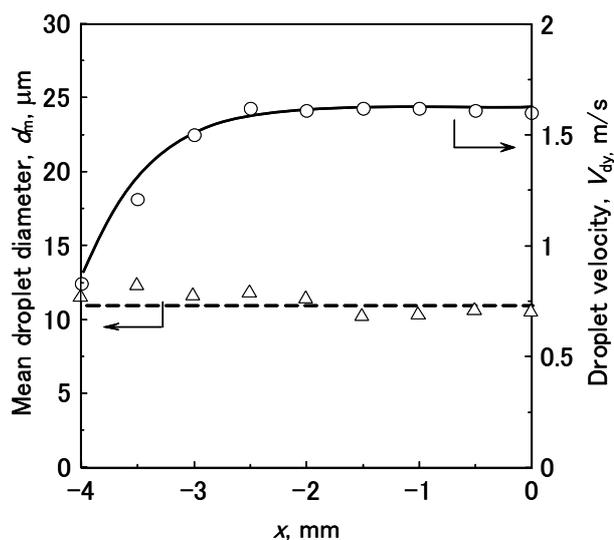


Fig.5 Droplet diameter and velocity profiles along the x-axis 5 mm above the nozzle exit.

給量と空気流量により決定した。本実験装置では、ノズル出口で液滴混在予混合気流の気相は燃焼蒸気が飽和状態になっているので、気体当量比 $\phi_g$ はノズル出口の混合気温度 $T_1$ により決定した。液体当量比 $\phi_l$ は、 $(\phi_t - \phi_g)$ と定義した。燃焼実験はすべて0.1 MPaの圧力条件で行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 液滴混在予混合気流の生成実験

図3に、液滴混在混合気流のレーザシート画像、図4にPDAを用いて計測を行った液滴混在混合気流の平均液滴直径分布を示す。条件は $\phi_t=0.9$ ,  $\phi_l=0.1$ ,  $d_m=9.6\ \mu\text{m}$ であり、図中には実線により内側ノズルの出口外形を示した。ノズルから噴出する混合気流が安定した層流であり、液滴が偏りなく分散していることが確認できた。液滴直径分布は、過去に使用した急速減圧式飽和燃料蒸気凝縮法で生成された液滴群の分布と同様であった。図5は、PDAを用いて液滴混在混合気流の液滴の直径分布および速度分布の同時計測を行った結果である。条件は $\phi_t=0.9$ ,  $\phi_l=0.1$ ,  $d_m=11\ \mu\text{m}$ , 平均流速は1.5 m/sであり、縦軸は局所平均液滴直径およびノズル軸方向液滴速度 $V_{dx}$ , 横軸はノズル中心軸からの水平方向距離 $x$ である。 $x=4\ \text{mm}$ 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。 $y$ 軸はノズル軸方向上向き正に設置した。各点は約100個のデータの平均値である。平均液滴直径はほぼ一定であり、液滴速度はノズル中心から約2.5 mmの位置までほぼ一定であることがわかった。このことから、燃焼実験では、ノズル中心軸から2.5 mmの領域のデータを取得することとした。

#### 2.2 燃焼実験

ブタントーチ火炎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を図6に示す。トーチ火炎孔を含む平面内かつノズル中心軸に直交するように $x$ 軸を設置した。トーチ火炎孔から遠ざかる向きを正の向きとした。また、混合気流の流れの向きを正とし、ノズル中心軸上に $y$ 座標を設置した。図7は生成された液滴混在混合気流にトーチ火炎を用いて斜め平面火炎を保炎させた画像である。条件は $\phi_t=1.0$ ,  $\phi_l=0.1$ ,  $d_m=16.8\ \mu\text{m}$ である。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 $\theta_{f0}$ は、 $48^\circ$ であった。レーザシート画像より、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

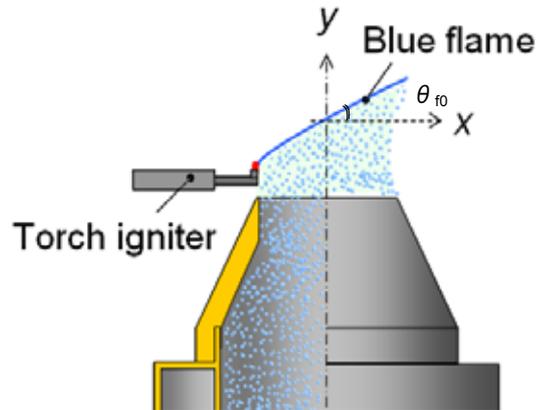


Fig.6 A tilted flat flame model.



$\phi_t=1.0$   $\phi_l=0.1$   $d_m=16.8\ \mu\text{m}$

Fig.7 CCD camera images of a spray flame.

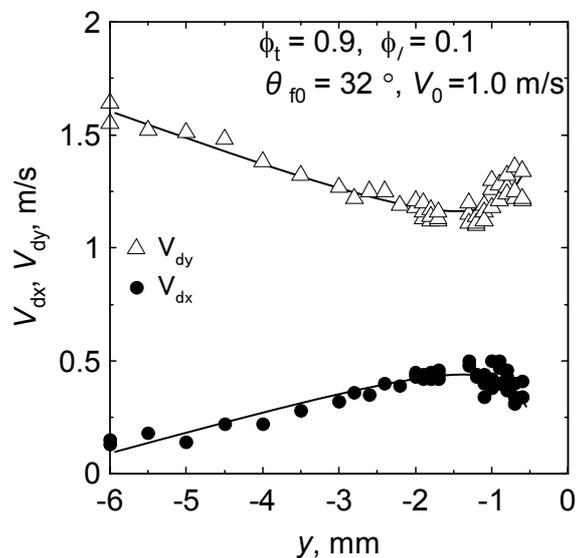


Fig.8 Droplet velocity profiles along y-axis.

た、斜め火炎が保炎されている噴霧流中の未燃液滴は、青炎前縁で半径方向に速度成分を持っていることがわかる。

総当量比を0.9、液体当量比を0.1、噴霧のノズル出口平均流速を1.0 m/s (火炎角度 $\theta_{f0}=50^\circ$ )とし、

ノズル出口における噴霧平均液滴直径  $d_{m0}$  を  $15.8 \mu\text{m}$  に保って PDA 計測を行った。ノズル中心軸上の青炎前縁の位置を  $y = 0 \text{ mm}$  とし、上流である  $-6$  から  $0 \text{ mm}$  までノズル中心軸上の液滴直径と速度を調べた。図 8 に、火炎上流の液滴速度分布を示す。グラフの横軸は  $y$  座標、縦軸はノズル中心軸付近の液滴速度  $v_d$  であり、 $x$  軸方向成分および  $y$  軸方向成分を示している。 $v_{dx}$  は火炎に近づくにしたがって直線的に増大し、 $y = -1 \text{ mm}$  付近から減少することがわかる。 $v_{dy}$  は火炎に近づくにしたがって直線的に減少し、 $y = -1 \text{ mm}$  付近から増大することがわかる。 $v_{dx}$ 、 $v_{dy}$  とも  $y = -2 \text{ mm}$  付近から変化が直線的でなくなることから、 $y = -2 \text{ mm}$  付近で、液滴は火炎の予熱帯に突入したと考えられる。

図 9 に、 $\phi_t = 0.9$  の液滴混在予混合気流について、燃焼速度の伸長率依存性を調べた結果を示す。燃焼速度の算出法は参考文献 2 に詳細を記した。伸張率算出するため、予熱帯前縁付近では PDA 計測を  $x$  軸方向にも行い、そのデータから液滴直径  $16 \mu\text{m}$  の液滴速度だけを抽出して流速を求めた。黒塗りの点は以前に PTV を用いて計測を行った結果であり、白抜きのは今回 PDA を用いた多点計測により得られた燃焼速度である。液体当量比の違いが顕著に現れなかったが、若干燃焼速度が大きな値を示した。伸張流れの影響で予混合気中の液滴のスリップ速度が増し、反応帯での局所総当量比を増大させる条件であることから、液体当量比が減少したことで燃焼速度が大きくなったと考えられる。しかしながら、 $y$  軸方向のスリップ速度 ( $=v_{dy} - v_{gy}$ ) を調べてみると、図 10 に示すように、予熱帯前縁付近のスリップ速度は正の値を示すがほぼゼロであった。スリップ速度と燃焼速度の関係については、今後詳細に調べる予定である。

#### 4. 結言

計測時間を要する多点 PDA 計測を行うため、連続生成液滴混在混合気バーナを改良し、燃焼速度および伸長率の計測を行うことができた。

#### 参考文献

- (1) 水谷幸夫, 若林卓, 微粒化, 第 6 巻, 16 号, 1997, pp. 16-28.
- (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 (2003) #2003-01-0628.
- (4) Nomura, H., Hayasaki, M., and Ujiie, Y., Effects of fine fuel droplets on a laminar flame stabilized in

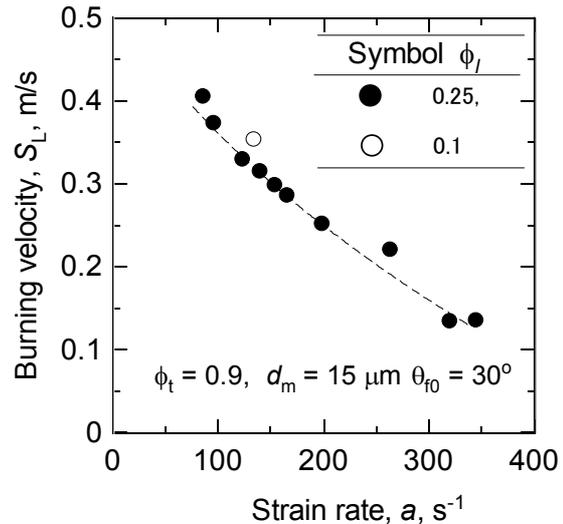


Fig. 9 Effect of Liquid equivalence ratio on the relation between burning velocity and strain rate.

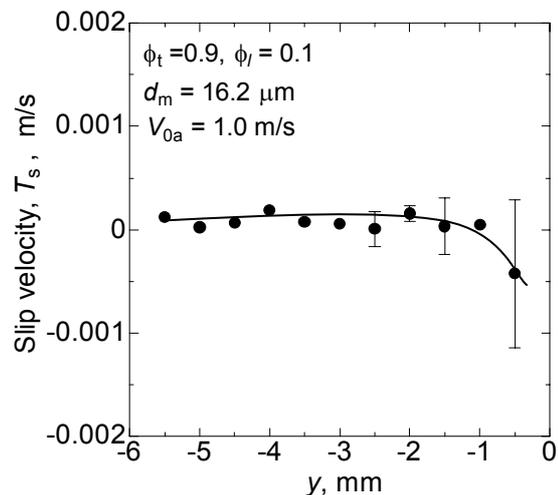


Fig. 10 Slip velocity profiles along  $y$ -axis.

a partially prevaporized spray stream, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, (2007), pp. 2265-2272.