

## 小型均一噴霧バーナの開発と対向流平面火炎に関する研究

日大生産工 (院)      ○相原 秀紀      日大生産工      野村 浩司  
日大生産工      氏家 康成

### 1. 緒言

噴霧燃焼の一形態である予蒸発燃料噴霧の燃焼機構を解明することは、ディーゼル機関のノッキング制御やガソリン機関の燃焼における残留燃料液滴の影響解明、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。予蒸発噴霧燃焼機構解明を目的に、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。よって、予混合気中に均一分散させた直径分布幅の狭い燃料液滴群の燃焼研究は、両者の隔たりを補う研究として重要であると考えられる。

林と熊谷は、燃料蒸気-空気混合気を急速膨張させることによって、粒径分布の狭い均一分散燃料液滴群を生成した<sup>1)</sup>。野村らは、同様な方法により粒径分布の狭い静止均一分散燃料液滴-蒸気-空気混合気（以下、液滴混在予混合気）を生成し、定圧および定容環境下で燃焼実験を行ってきた。その結果、予混合気中に分散する燃料液滴が火炎伝播や最大燃焼圧力などに大きな影響を及ぼしていることが明らかになり、燃料希薄液滴混在予混合気の花炎伝播速度および最大燃焼圧力は、同一当量比の燃料蒸気-空気混合気のそれと比較して、大きくなることわかった<sup>2)</sup>。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、均一噴霧バーナを用いての花炎中の液滴挙動観察や燃焼速度の測定を行ってきた。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。また、上記の研究では主に揮発性の高いエタノールにて研究がなされていたが、比較実験として揮発性の低い燃料で

ある正デカン（純度 99%）による研究が及川らによってなされた<sup>3)</sup>。

これまで、揮発性の比較的低い正デカンでは、重力の影響が少ないザウタ平均直径が数 $\mu\text{m}$ の液滴混在予混合気の生成が困難であった。また実験装置が大きかったために、正デカンによる液滴混在予混合気を用いた微小重力実験は行われてこなかった。そこで本研究は、平均直径が数 $\mu\text{m}$ の液滴混在予混合気の生成と、微小重力実験の実施を目的に、小型均一噴霧バーナの開発を行った。また開発した均一噴霧バーナを用いて、液滴混在予混合気流および対向流れ場に保炎した火炎を過去の実験結果と比較した。

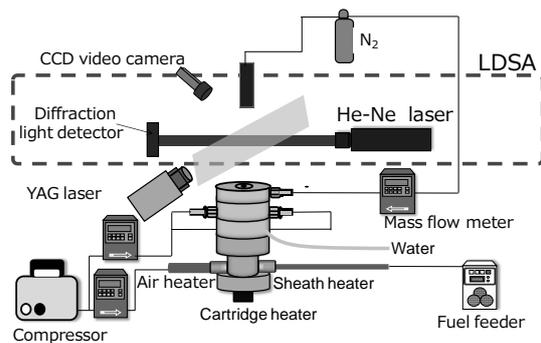


Fig.1 Experimental apparatus.

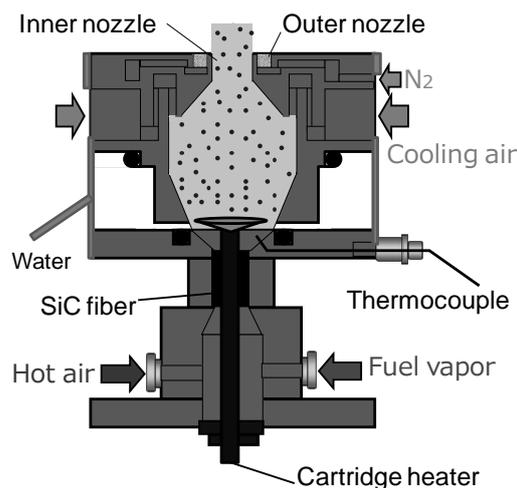


Fig.2. Developed spray burner.

Development of Small Uniform Spray Burner and Study on Flat Flame Stabilized in Counter-Flow

Hideki AIHARA, Hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

## 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、Wilson の霧箱と同じである。

### 2.2 実験装置構成

実験装置全体の概略を Fig. 1 に示す。実験装置は主に噴霧バーナ、窒素噴出管、制御装置および計測装置から構成される。噴霧バーナは、主に予混合気供給部、冷却部、テフロン中間部およびノズル部から構成される。燃料ポンプより供給された液体燃料をシースヒータにて全て蒸発させ、予混合気供給部にて高温空気と巡回させて混合させることで燃料蒸気—空気混合気を生成している。また燃料蒸気—空気混合気はカートリッジヒータにて保温することで、予混合気供給部内での凝縮を防いでいる。生成した燃料蒸気—空気混合気は、流路に詰め込まれた SiC ファイバーによって整流および混合され、カートリッジヒータ先端に取り付けられた拡散板によって、冷却部全体へ供給される。冷却部では、燃料蒸気—空気混合気流と逆向きに冷却部壁面を流れる冷却用空気により、燃料蒸気—空気混合気流の速やかな冷却と凝縮が行われる。冷却部は、内直径 18 mm、高さ 16 mm の円筒形である。冷却用空気がバーナの壁と燃料蒸気—空気混合気の間を下方に流れるので、燃料蒸気の壁での凝縮を防止し、冷却部を外部から冷却することで冷却用空気の温度を低下させている。冷却部とノズル部周囲に冷却用の水を流すことで、冷却用空気を常に一定温度に保っている。さらに燃料蒸気—空気混合気供給部と冷却部を繋げる部品に熱伝導率が低いテフロンを用いることで、加熱されている予混合気供給の熱が冷却部およびノズルに伝わることを防いでいる。燃料蒸気—空気混合気の冷却によって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、内ノズルから噴霧流、外ノズルから窒素周囲流を噴出している。内ノズル形状は、直径 14 mm から 8 mm に頂角 60° で流路を絞った後に、長さ 3.4 mm の直管に続く形状である。外ノズル形状は管路外径 12 mm、管路内径 9 mm となっており、流路には、ステンレス製メッシュ

(#1000) を詰めた整流器を設置している。周囲流は周囲空気中の酸素が予混合気流の燃焼に及ぼす影響を排除することが目的であり、流速は 0.1 m/s とした。噴霧バーナに対向する窒素噴出管には、内径 12 mm のステンレス管を用い、流路には整流器としてステンレス製メッシュ (#1000) を丸めて詰めた。

制御装置は、燃料流量制御ポンプ、窒素および空気流量制御にマスフローコントローラーを用いた。各種ヒータの制御には、スライダックおよび温度調節器を用いた。

計測装置は、レーザ光散乱方式粒度分布測定装置(LDSA)、CCD ビデオカメラおよび K 種熱電対である。LDSA は液滴混在予混合気流の液滴直径および液滴直径分布の計測に、K 種熱電対はノズル出口温度の測定に使用した。また液滴混在予混合気の観察は、YAG レーザ(中心波長: 532 nm, 出力: 0~1 W) を光源とするレーザシート法により CCD ビデオカメラ(フレームスピード: 30 fps, 露光時間: 1/30 s) で行った。

### 2.3 実験パラメータ

燃料には、揮発性が比較的低い燃料である正デカン(純度 99%)を使用した。空気には、大気をコンプレッサにより加圧した圧縮空気を使用した。平均液滴粒径にはザウタ平均粒径  $d_m$  を用いた。総当量比  $\phi_t$  は、液体燃料供給流量と総空気供給量より決定した。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料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。対向窒素流速  $V_N$  は火炎位置が光学測定に適するように調整した。液滴混在予混合気平均流速  $V_0$  は、液滴混在予混合気流量と内ノズル面積から算出した。また、全ての実験は大気圧および通常重力環境で行った。燃焼実験における点火は、ブタン火炎による強制点火で行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 噴霧バーナ寸法

過去の均一噴霧バーナ外寸法は、直径 120 mm、高さ 240 mm の円筒型であった。今回開発した噴霧バーナは、直径 50 mm、高さ 65.7 mm であるので、装置を大幅に小型できた。また燃料ポンプなどのバーナ構成装置は過去の均一噴霧バーナと同じ物を使用したので、

構成装置による大型化も抑制している。

### 3.2 噴霧生成実験

開発した噴霧バーナを用いて噴霧生成実験を行い、液滴混在予混合気流の均一性評価を行った。Fig. 3, 4 および 5 に  $\phi_t = 1.3$ ,  $\phi_l = 0.33$ ,  $v_0 = 1.42$  m/s の条件で液滴混在予混合気流を生成した一例を示す。Fig. 3 に LDSA を用いて計測した液滴直径分布を示す。横軸に液滴直径  $d$ , 縦軸に体積分率を示す。棒グラフは頻度分布, 曲線は累積分布を示す。粒径分布幅が比較的狭い噴霧が生成されていることがわかる。

Fig. 4 は、液滴直径分布の時間変化を示している。横軸は時間, 縦軸は液滴直径である。白丸は平均液滴直径, エラーバーの下端は 10% 体積直径  $d_{10\%}$ , 上端は 90% 体積直径  $d_{90\%}$  を示している。また黒丸は噴霧濃度を示している。噴霧濃度は、単位体積あたりの液滴総体積に比例した値である。液滴直径分布は時間的に安定していることがわかる。しかしながら、噴霧濃度は時間的に変動しており、液滴数密度が変動していることがわかる。これは燃料蒸気-空気予混合気の燃料蒸気濃度が不安定であることが原因と考えられる。今後改善する必要がある。

Fig. 5 に、対向流れ場における液滴混在予混合気流のレーザシート画像を示す。液滴混在予混合気流は、層流になっているが、液滴が空間的に偏っているのがわかる。これはバーナ冷却部での冷却空気と燃料蒸気-空気予混合気の混合を促進することで改善できると考えている。

開発した噴霧バーナによって生成された液滴混在予混合気流の液滴直径分布と、過去の実験装置で生成された液滴混在予混合気流の液滴直径分布を比較した。Fig. 6 に、10% 体積直径と 90% 体積直径を平均液滴直径で除した値を示す。横軸に平均液滴直径である。白塗りのプロットが開発したバーナの実験結果, 黒塗りのプロットが過去の実験装置の結果を示している。過去の実験装置と比べ、液滴粒径の小さな噴霧が生成されたことが確認できる。また、直径分布幅は過去の実験結果と比べて、ほぼ同等の分布幅を持つ噴霧が生成されていることがわかる。凝縮法で生成された液滴混在予混合気流の液滴直径分布幅が、液滴平均直径の減少に伴って広がることは、過去の実験装置の傾向に合致している。

### 3.3 燃焼実験

前節の液滴混在予混合気流生成実験にて評

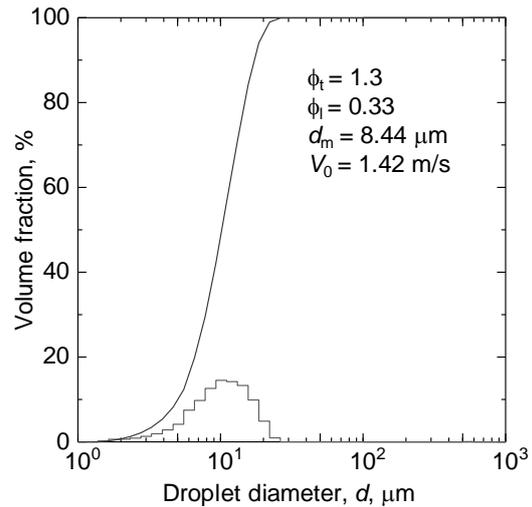


Fig.3 Droplet diameter distribution.

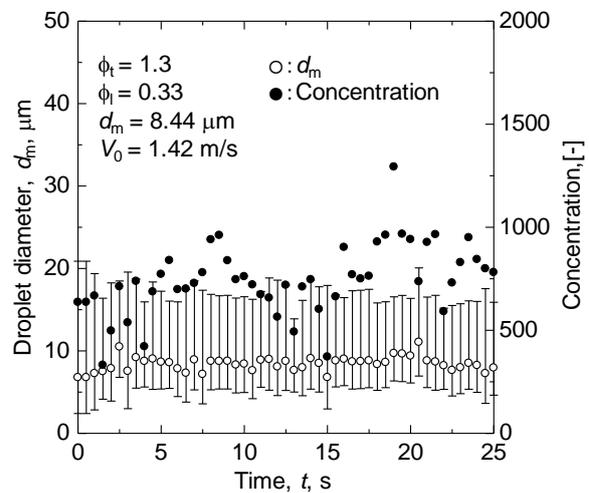
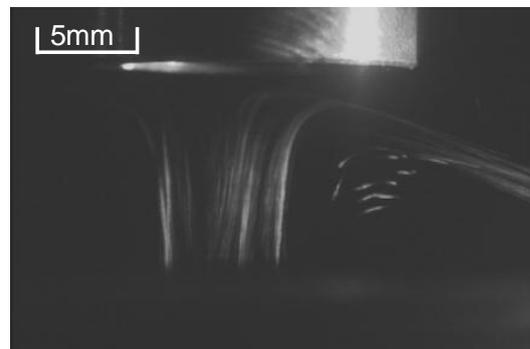


Fig.4 Temporal variation of droplet diameter distribution and concentration.



$\phi_t = 1.3$ ,  $\phi_l = 0.33$ ,  $d_m = 8.44$   $\mu\text{m}$ ,  $V_0 = 1.42$  m/s

Fig.5 Laser sheet image of a fuel vapor-air premixture flow containing fine fuel droplets.

価を行った液滴混在予混合気流を点火し、対向流れ場に保炎された液滴混在予混合火炎を観察した。結果を Fig. 7 に示す。噴霧バーナノズル出口と窒素噴出管間隔は、15 mm である。対向流れ場に形成した火炎は定常定常な平面火炎ではなく、時間的に不安定で、三次元的に変動する火炎が形成された。これは液滴混在予混合気流の液滴濃度が時間的・空間的に不安定なためだと考えられる。

過去の実験<sup>3)</sup>では、平均液滴粒径約 20  $\mu\text{m}$  の正デカン液滴混在予混合気流に定常定常な火炎を形成したとき、多くの液滴が火炎を貫通するのが観察されている。本報で開発したバーナを用いて、平均液滴粒径約 8  $\mu\text{m}$  の正デカン液滴混在予混合気流で燃焼実験を行った結果、過去の実験結果と同様、液滴が火炎を貫通する様子が観察された。しかしながら本報の液滴混在予混合火炎は、定常定常な平面火炎ではないので、噴霧の濃度むらおよび時間的不安定性により生じた火炎の消失部より液滴が飛び出した可能性も考えられる。定常定常な平面火炎が保炎できるようにバーナを改善することが、最大の課題である。

#### 4. 結言

- (1) 従来の均一噴霧バーナより大幅な小型化に成功した。
- (2) 開発した噴霧流バーナを用いて噴霧生成実験を行い、噴霧流の評価を行った結果、液滴分布幅が比較的狭く、時間によらず噴霧直径分布が安定した噴霧の生成に成功した。また過去の実験結果と比較して、平均液滴粒径が小さく、ほぼ同等の液滴直径分布幅を持つ噴霧が生成されることを確認した。
- (3) 総当量比 1.3、液体当量比 0.33、ノズル出口速度 1.42 m/s、平均液滴直径 8.44  $\mu\text{m}$ 、対向窒素流速 0.66 m/s の条件において、燃焼実験を行った。液滴が火炎を貫通する事象が観察された。

#### 参考文献

- 1) Hayashi, S. and Kumagai, S. : Flame Propagation in Fuel Droplet-Vapor-Air Mixtures, *The Proc. Combust. Inst.*, Vol. 15, (1975), pp. 445~452.
- 2) Nomura, H, Hayasaki, M., and Ujiie, Y.: *The Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, (2007), pp.

2265~2272.

- 3) 及川直樹, 野村浩司, 氏家康成: 対向流バーナを用いた燃料過濃液滴混在予混合気火炎の観察と燃焼速度測定, *日本微粒化学会誌*, Vol.18, No.62, (2009), pp. 68~74.

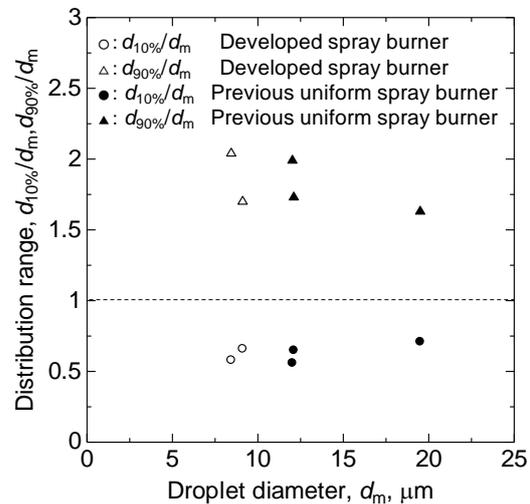
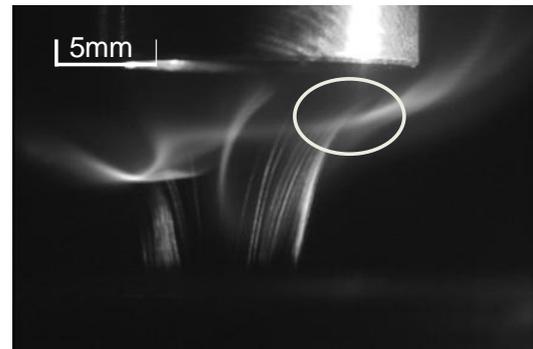


Fig.6. Droplet diameter distribution range.



$\phi_t = 1.3$ ,  $\phi_l = 0.33$ ,  $d_m = 8.44 \mu\text{m}$ ,  
 $V_0 = 1.42 \text{ m/s}$ ,  $V_N = 0.5 \text{ m/s}$

Fig.7 Flame stabilized in a fuel vapor-air premixture flow containing fine fuel droplets.