

過濃液滴混在予混合気流の伸長が燃焼速度に及ぼす影響

日大生産工（院）

○及川 尚樹

日大生産工

日大生産工

野村 浩司

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。著者らは、均一燃料液滴—蒸気—空気混合気（以下、液滴混在予混合気）の球状火炎伝播を対象とした研究を行ってきた⁽¹⁾。その結果、平均液滴直径が小さい場合、液滴混在予混合気の場合と比べて希薄液滴混在予混合気では火炎伝播速度が大きくなり、過濃液滴混在予混合気では逆に小さくなることがわかった。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^(2, 3)。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、これまで火炎と液滴の干渉を観察するために、斜め平面火炎を液滴混在予混合気中に保炎して実験を行ってきたが、過濃液滴混在予混合気流で火炎を安定して保炎させることが困難であった。そこで、対向流れ場を用いて実験ができるように装置を改良した。これまで火炎が不安定で実験が行えなかった過濃液滴混在予混合気流中に平面火炎を保炎させ、燃料液滴が液滴混在予混合気の燃焼速度に及ぼす影響を調べた。

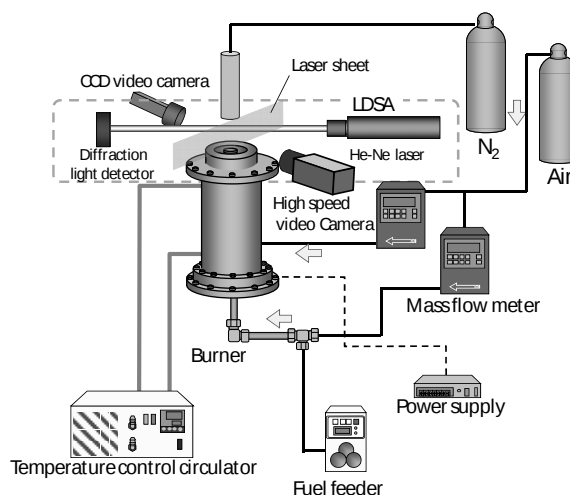


Fig.1 Experimental apparatus.

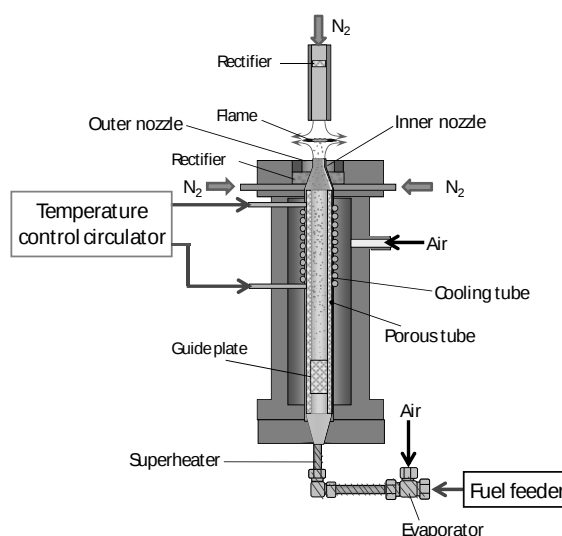


Fig.2 Partially-prevaporized-spray burner for counterflow

2. 実験装置および方法

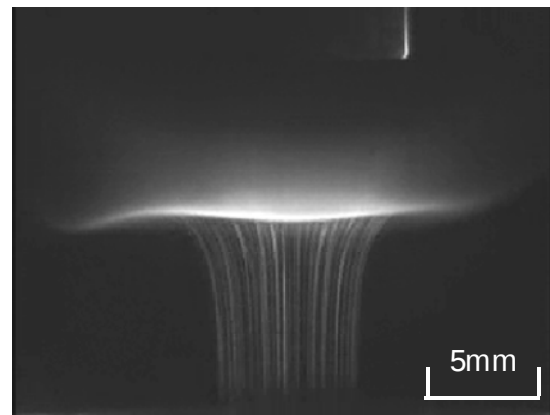
2.1 噴霧生成原理

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 の霧箱とじであり、液滴直径分布幅が狭く、空間的均一性・時間的安定性を有する層流の液滴混在混合気流を実現することが可能である。

2.2 実験装置構成

実験装置全体の概略を図 1 に示す。実験装置は主に対向流均一噴霧バーナ、制御装置および計測装置から構成される。対向流バーナの概略を図 2 に示す。対向流バーナは、均一噴霧生成部と対向流用円筒管から構成される。上部円筒管出口および均一噴霧生成部ノズル出口の内直径は 8 mm である。両出口間隔は 15 mm とした。上部円筒管からは窒素を供給した。均一噴霧生成部は、主に蒸発部、加熱部、冷却部およびノズルから構成される。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に混合させることで、長時間、安定した燃料蒸気－空気予混合気の生成が可能である。蒸発部で生成された燃料蒸気－空気予混合気の過熱度を過熱部で制御し、予混合気の冷却部滞在時間を一定とした場合の凝縮時間を変化させることで、液滴混在予混合気流の平均液滴直径を制御した。冷却部管内壁には多孔質円筒を用い、冷却された空気を多孔質円筒から供給することで燃料蒸気－空気予混合気を冷却した。冷却部の内直径は 26 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、周囲流を流す外ノズルの出口内直径は 20 mm である。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、周囲流気体には窒素を用いた。流路には整流器を設けた。周囲流速は 0.1 m/s とした。点火用電熱線により液滴混在予混合気流を手動で点火し、対向流中に平面火炎を保炎させた。計測装置は、レーザー光散乱方式粒度分布測定装置 (LDSA)、Particle Tracking Velocimetry (PTV)、CCD ビデオカメラ、質量流速計測・制御装置、白金測温抵抗体である。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、



$$\phi_t = 1.2 \quad \phi_l = 0.19 \quad d_m = 29.4 \text{ } \mu\text{m}$$

Fig.3 Laser sheet image of a spray stream.

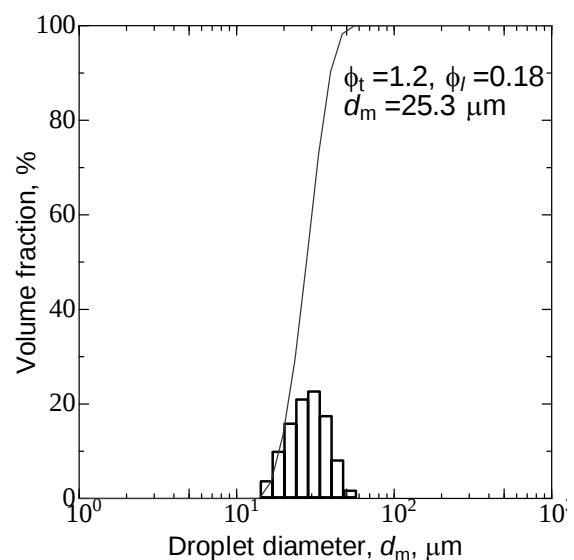


Fig.4 Droplet diameter distribution.

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。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 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。液滴混在予混合気流中の液滴挙動は、YAG レーザを光源とす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（画像寸法：252 × 188 pixels，フレームスピード：2000 fps，露光時間：30 μs）を用いて観察した。レーザーシートは、ノズル中心軸を含むように照射した。レーザーシート面における液滴速度のノズ

ル軸方向(y 軸方向)成分 v_{dy} の分布を PTV によって計測した.

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 ϕ_t は, 蒸発部と冷却部に供給した空気の総供給率と燃料供給率により決定した. 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料蒸気が飽和状態になっているので, 気体当量比 ϕ_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 ϕ_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. 総当量比は 1.2 および 1.4, 液体当量比は約 0.2 で一定とし, 均一噴霧生成部ノズル出口平均流速 v_0 は 1.0 から 1.4 m/s の範囲で変化させた.

3. 実験結果および考察

図 3 に, 対向流れ場に保炎させた平面火炎を CCD ビデオカメラで撮影した画像, 図 4 に LDSA を用いて計測した液滴直径分布を示す. 液滴混在予混合気流の条件は, $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.19$, $d_m = 29.4 \mu\text{m}$ および, $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.18$, $d_m = 25.3 \mu\text{m}$ である. ノズルから噴出する液滴混在予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. 比較的液滴直径が大きく, 直径分布幅が小さい液滴混在予混合気の生成に成功した. 希薄液滴混在予混合気流では保炎が困難であったため, 過濃液滴混在予混合気で燃焼実験を行った.

図 5 に, $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.2$, $d_m = 28.9 \mu\text{m}$ および $\phi_t = 1.4$, $\phi_l = 0.2$, $d_m = 22.3 \mu\text{m}$ の液滴混在予混合気において, ノズル中心軸付近火炎上流の v_{dy} および, 気体速度 y 軸方向成分 v_{gy} の分布を調べた結果を示す. 気体流速 v_{gy} は液滴速度データから求めた⁽²⁾. グラフの横軸は y 座標, 縦軸は液滴速度および気体速度である. ノズル中心軸上の青炎前縁の位置を $y = 0 \text{ mm}$ とし, 液滴混在予混合気流の流れ方向を y 軸の正の向きとした. 図 5 (a) と (b) において v_{dy} は火炎に近づくにしたがって単調

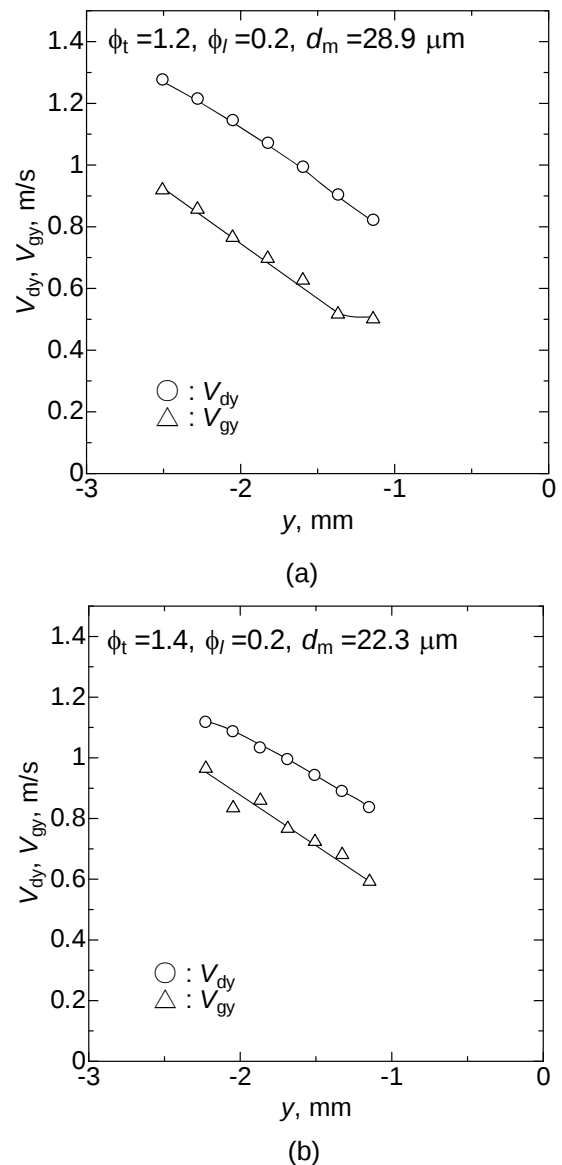


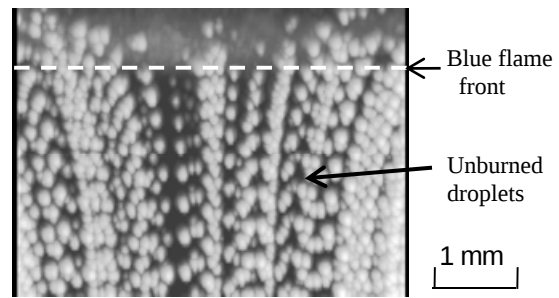
Fig.5 Droplet and gas velocity profiles along y -axis.

に減少していることがわかる. v_{gy} は火炎に近づくにしたがってほぼ直線的に減少していることがわかる. この直線の傾きの絶対値を流れの伸長率 a とした. 図 5 (a) については, $y = -1.4 \text{ mm}$ 付近で直線から外れるプロットが有ることがわかる. このことから, $y = -1.4 \text{ mm}$ 付近が火炎の予熱帯前縁であると考えられる. 図 6 に青炎に突入する液滴の画像を示す. 液滴混在予混合気流の条件は, $\phi_t = 1.2$, $\phi_l = 0.2$, $d_m = 27.5 \mu\text{m}$ である. 図 6 の画像は, 25 ms 間のレーザシート画像 50 枚を重ね合わせた画像である. 画像には青炎の前縁を

破線で示した．多くの液滴が青炎に突入している様子がわかる．図7に， $\phi_t = 1.2 \sim 1.4$ の液滴混在予混合気流について，層流燃焼速度の総当量比依存性を調べた結果を示す．燃焼速度 S_L は，予熱帯前縁での v_{gy} を上流の速度勾配で青炎前縁まで外挿した値とした⁽⁴⁾．液体当量比，平均液滴直径および流れの伸長率は，それぞれ 0.2, 22.4–29.4 μm および 300 s^{-1} である． $\phi_t = 1.2 \sim 1.4$ のプロットは，それぞれ 2～5 個のデータの平均値である．総当量比が大きい液滴混在予混合気流の方が，燃焼速度が大きいことがわかる．これは，平均液滴直径が大きいために液滴が青炎内部にまで突入しており，反応帯前縁において液滴からの燃料供給が少ないため，気体当量比が大きい液滴混在予混合気流の方が燃焼速度が大きな値を示したと考えられる． $\phi_t = 1.4$ の場合，初期の気体当量比が 1.2 であるので，さらに総当量比を増大させれば，すなわち初期の気体当量比を増大させれば，燃焼速度は減少すると予想される．反応帯前縁で蒸発を完了せずに青炎に液滴が突入していることと，火炎伸長により火炎が冷却されることから，火炎温度の低下が起こっていると考えられる．総当量比を 1.2 から減少させると，火炎を保炎することができなかったのは，この火炎温度低下が原因であると推察される．今後データ数を増やしていく予定である．

4. 結言

- (1) 対向流れに火炎を保炎できるように改良した結果，液滴混在予混合気流中に平面火炎を安定して保炎させることができ，燃焼速度および伸張率の計測を行うことができた．
- (2) 液体当量比 0.2，平均液滴直径 21.4～29.4 μm ，流れの伸長率 300 s^{-1} の液滴混在予混合気流では，液滴が蒸発を完了せずに青炎に突入し，総当量比が大きい場合，すなわち，気体当量比が大きい方が燃焼速度が大きくなることがわかった．総当量比が 1.2 を下回ると，火炎を保炎することができなかった．



$$\phi_t = 1.2, \phi_l = 0.2, d_m = 27.5 \mu\text{m}$$

Fig.6 Superposed image of laser sheet images in the front of a blue flame (duration:25 ms).

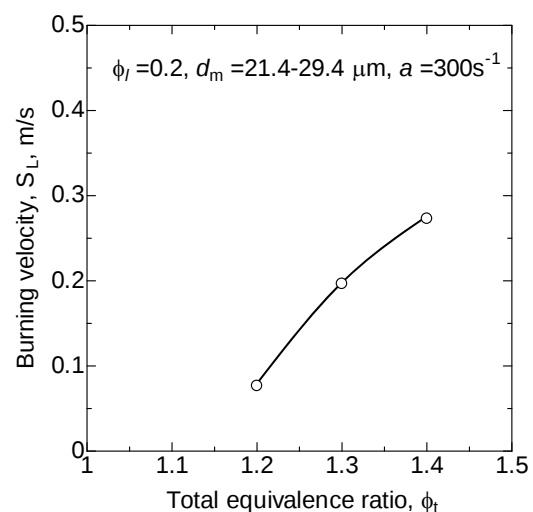


Fig.7 Burning velocity as a function of total equivalence ratio.

参考文献

1. Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., and Ujiie, Y., *The Proc. Combust. Inst.*, 28(2001), 999-1005.
2. Nomura, H., Hamasaki, T., et al., *SAE Transactions Journal of Engines*, Section 3, 112(2004) 843-850.
3. Nomura, H., Hayasaki, M., and Ujiie, Y., *The Proc. Combust. Inst.*, 31, (2007), 2265-2272.
4. B. Deshaies, P. Cambray, *Combust. Flame* 82(1990), 361-375.