

基礎実験用部分予蒸発噴霧バーナの開発と燃焼実験

氏家 康成（機械工学科） 野村 浩司（機械工学科）

1. 緒言

噴霧燃焼はディーゼル機関やガスタービン、工業炉などの燃焼器に広く使用されている。その燃焼は燃料微粒子、燃料蒸気および空気からなる極めて不均一な系で起こる現象である。噴霧燃焼の機構を解明することは、燃焼器の性能向上に寄与するばかりではなく環境破壊を引き起こす排出ガスを減少させることなどに有効である。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。その機構を解明することを目的とし、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、これらの研究と噴霧燃焼を結びつける十分な知見は得られていない。本研究では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均一分散・均一粒径噴霧を用いて実験を行った。これまで、静止均一分散・均一粒径噴霧の定圧および定容条件下での燃焼実験を行ってきた^(1,2)。その結果、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。この機構を解明することは、燃料液滴と火炎の干渉を明らかにし、液滴燃焼の研究と実燃焼器内の噴霧燃焼を関連づけるのに有用である。本研究では、定在定常火炎が実現できる均一噴霧バーナを開発し、燃焼実験を行った。非燃焼流れ場については、レーザ・シート法を用いて観察を行った。平均液滴直径の大きな噴霧は重力の影響を強く受けるため、微小重力場を用いた実験も行った。微小重力場の実現には、ダイヤモンドエアサービス社の運行するパラボリックフライトを用いた。

2. 実験装置および方法

2.1 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、予め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。

2.2 実験装置

実験には、均一な流速分布を実現するためにコアキシャル・ノズルバーナを用いた。実験装置の概略を図1に示す。実験装置は、均一噴霧バーナ、バーナ冷却装置、飽和燃料蒸気-空気混合気供給装置、計測装置およびシーケンサから構成される。図2にバーナの詳細図を示す。バーナは急速減圧容器、ピストンおよびノズルから構成されている。急速減圧容器は直径80 mm、高さ80 mmの円筒形であり、混合気温度測定用の白金測温抵抗体、急速減圧中の温度測定用にR種熱電対が設置されている。容器壁はシーケンサによってPID制御されたシースイヒータで加熱される。急速減圧中および後は、容器壁から混合気への熱流入を抑制するため、フロン134aを用いて容器を冷却をした。急速減圧容器は2重構造になっており、フロンは内壁と外壁の間に導かれる。ピストンは、急速減圧により生成された均一噴霧を押し出す。ノズルの出口直径は8 mmで、周囲流には窒素を用いた。窒素の流路には、整流板を設けた。フードは、微小重力実験を行う際に燃焼ガスを機内に出さないこと、およびバーナ出口を0.1 MPaに保つことを目的とし、バーナ出口に設置した。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。噴霧の平均液滴直径は、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。火炎の観察

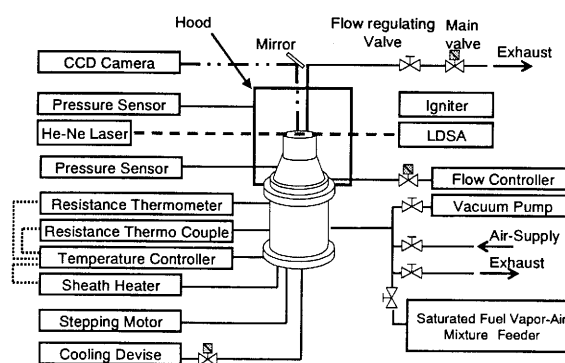


図1 実験装置概略。

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。非燃焼流れ場については、銅蒸気レーザ（波長 511 nm，パルス幅 20-30 ns）を光源に使い，レーザ・シート法により，イメージンテンシファイア (I.I.)付き高速ビデオカメラ（露光時間：1/1000 s，フレームスピード：1000 fps）で観察を行った。

2.3 実験方法

均一噴霧生成容器を所定の温度まで加熱した後，飽和燃料蒸気-空気混合気をノズル出口より充填し，加圧する。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させる。噴霧の平均液滴直径は，流量調節弁の開度によって減圧速度を調節し，変化させた。生成された均一噴霧は，ステッピングモータによって駆動されたピストンにより，ノズル出口から押し出される。点火には，ニクロム線による熱面点火を採用した。燃料には，蒸気圧が実験に相当であること，過去の研究結果の考察に得られる知見を適用することを考慮し，エタノールを使用した。酸化剤には成分が明確である純空気を用いた。

混合気における燃料と空気の割合は，当量比を用いて示した。液滴群として存在している燃料と蒸気として存在している燃料を合わせて計算した当量比を総当量比 ϕ_t ，液滴群として存在する燃料のみで計算した当量比を液体当量比 ϕ_l ，蒸気として存在する燃料のみで計算した当量比を気体当量 ϕ_g とした。実験圧力 P_1 は，全ての実験において0.1 MPaとした。平均液滴直径 d_m には，ザウタ平均液滴直径を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 噴霧性状

急速減圧による温度降下を利用した凝集法で燃料液滴を生成する場合の生成のパラメータとして，減圧前温度 T_0 ，減圧前圧力 P_0 ，減圧終了時圧力 P_1 および初期温度降下速度が挙げられる。初期温度降下速度は凝集初期の液滴核の数密度を決める重要なパラメータである。図3に， $\phi_l = 0.9$ および $\phi_l = 0.5$ の条件における，平均液滴直径と初期温度降下速度の関係を示す。初期温度降下速度は，減圧開始後0.5 s間の平均温度降下率と定義した。初期温度降下速度が大きくなると，平均液滴直径が減少することがわかる。また，平均液滴直径の初期温度降下速度の関係は2つの曲線で示されていることがわかる。一つは，初期温度降下速度が小さい領域で

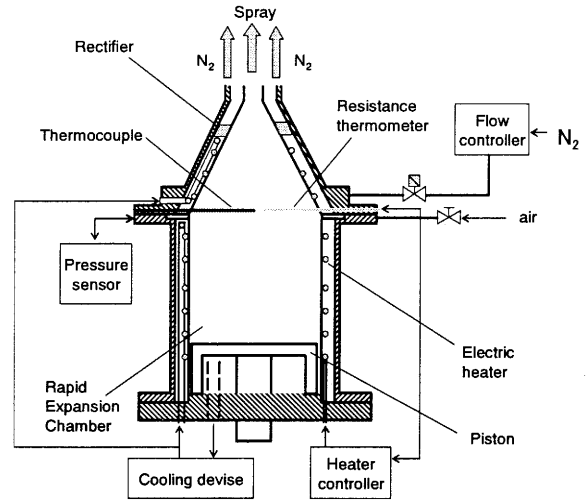


図2 均一噴霧バーナ。

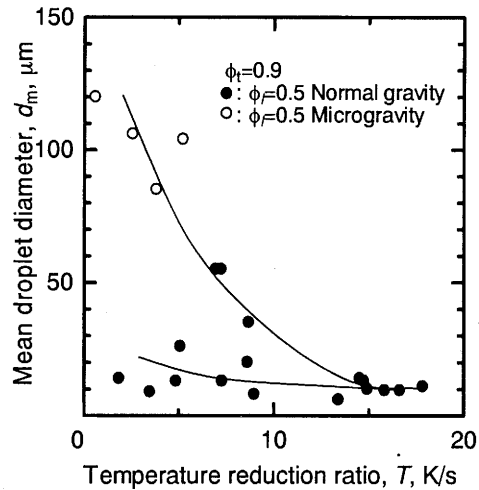


図3 平均液滴直径と初期温度降下速度の関係。

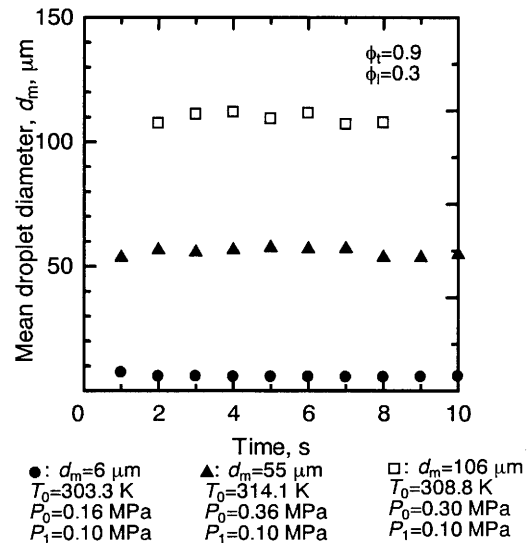


図4 平均液滴直径の時間変化。

大きな値を示し、初期温度降下速度の増大に伴って急激に減少する曲線である、もう一つは初期温度降下速度が小さい領域で小さな値を示し、初期温度降下速度の増大に伴って緩やかに減少する曲線である。両者は、初期温度降下速度が大きい領域で重なる。同様な傾向が他の液体当量比についても見られた。大きい液滴は、通常重力場での実験の場合、生成時に重力の影響を強く受けて沈降してしまう。そのため小さい液滴のみがノズル出口から押し出されたと考えられる。したがって、微小重力場を利用した噴霧生成では重力の影響を受けずに大きな液滴が押し出されたと推察される。減圧時間を変化させることにより、噴霧流の平均液滴直径を3～120 μmの範囲で変化させることができた。

3.2 噴霧の均一性

均一噴霧バーナにより生成された噴霧の例として、 $\phi_1 = 0.9$, $\phi_1 = 0.3$ の噴霧流について平均液滴直径の時間変化を図4に示す。時間軸の原点は、ピストンが始動した時刻である。丸および三角のプロットは通常重力場における実験結果、四角いプロットは微小重力場における実験結果である。減圧時間はそれぞれ1.6, 4.1および6.4 sである。液滴直径や実験環境に依らず、時間的に安定した平均液滴直径の噴霧がバーナから押し出されていることがわかる。噴霧の平均液滴直径が大きい場合、通常重力場で生成された噴霧流は、微小重力場で生成された噴霧流のより液滴数密度が低いことが、LDSAのレーザー透過光強度より確認された。このことより、通常重力場で平均液滴直径の大きい噴霧を生成した場合、ノズル出口における噴霧流の液体当量比は、急速減圧容器内の温度・圧力から計算した液体当量比と異なっていることが示唆された。

図5に、 $\phi_1 = 0.9$, $\phi_1 = 0.5$ の条件におけるピストン始動から5 s後の液滴直径分布を示す。(a)および(b)は通常重力場における実験結果であり、 d_m はそれぞれ5および20 μmである。(c)は微小重力場における実験結果であり、 d_m は106 μmである。(a)と(b)を比較すると、(b)のほうが液滴の分布幅が狭い。大きい液滴は通常重力場においては重力の影響を強く受け液滴が沈降してしまう。液滴の沈降速度が混合気を押し出す速度を上回ると、ノズル出口から液滴が出てこなくなると考えられる。よって、通常重力場で平均液滴直径の大きい噴霧を生成した場合、噴霧中の大きい液滴が欠落するため、液滴直径分布幅が狭くなったと考えられる。(b)の場合、

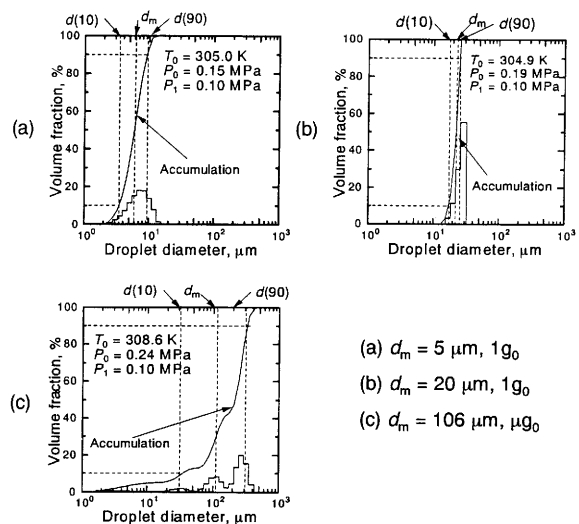


図5 噴霧の液滴直径分布の例。

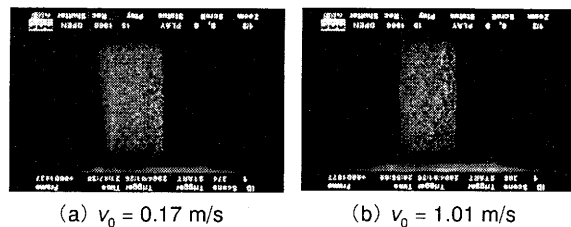


図6 噴霧流のレーザー・シート写真。

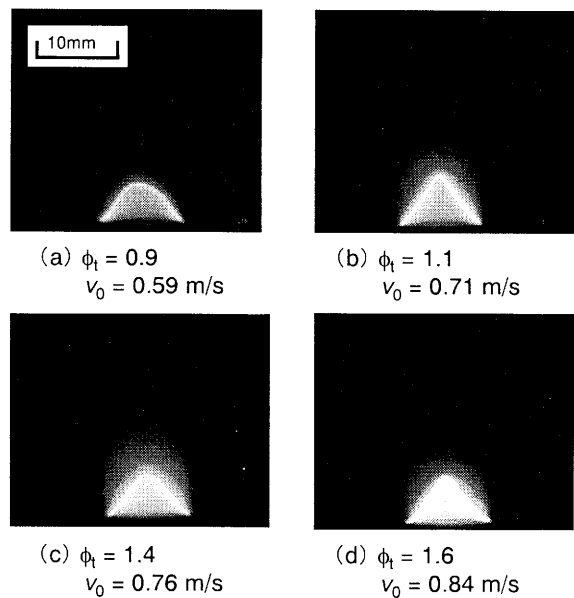


図7 火炎の直接写真。

噴霧の数密度が低かったことから、この考察は支持されると考える。(b)と(c)を比較すると、液滴分布幅は(c)の方が広いことがわかる。これは、減圧時間が航空機実験の微小重力時間を超えてしまうために行った2段階減圧の2段階目の減圧で液滴核が生成されたためと考えられる。十分に長い微小重力時

間が利用できれば、平均液滴直径の大きな噴霧であっても直径分布幅を狭くして生成できると考えられる。

噴霧流の空間的均一性の確認には、レーザ・シート法を用いた。結果の例を図6に示す。写真より、生成された噴霧流には液滴が均一に分布し、層流となっていることがわかる。ノズル出口流速 v_0 が1.01 m/sまでは、噴霧流は層流であることが確認された。

3.3 火炎の観察

均一噴霧火炎の写真を図7に示す。未燃混合気流速は、各条件において火炎基部角度がほぼ50度になるように設定した。液体当量比は0.4で、平均液滴直径は7.5 μm で固定した。総当量比が高くなるのに伴って、火炎の色が青紫から青緑に変わっていくことが観察された。一般的に、炭化水素と空気の前混合火炎において火炎の色は、空気過剰であれば紫色であり、可燃性気体の割合が増すにつれて青色が強くなり、可燃性気体が過剰になると緑色が強くなる⁽³⁾。したがって、エタノールを用いた本実験においても同様の結果が得られたと考えられる。予混合火炎が緑色になる総当量比においても、均一噴霧火炎は青緑色であったことから、均一噴霧火炎の反応帯は同一当量比の予混合火炎より希薄側に移行していることが推察される。また、全ての条件において2次火炎が確認された。これは、均一燃料噴霧中の比較的大きな液滴が予熱帯および反応帯で完全には蒸発・燃焼せず、反応帯を通過した後には蒸発・燃焼して2次火炎を形成していると考えられる。2次火炎は青紫色であった。

3.3 燃焼速度の計測

円錐定在火炎を用いて、角度法により燃焼速度を求めた。燃焼速度と当量比の関係を図8に示す。噴霧の平均液滴直径は7.5 μm 、液体当量比は0.4で固定した。白抜きのプロットが予混合火炎の燃焼速度、黒塗りのプロットが均一噴霧火炎の燃焼速度を示している。火炎基部の角度は50度で統一した。予混合気の燃焼速度は、 $\phi_1=1.1$ で最大値をとった後、減少する。噴霧火炎の燃焼速度は、希薄側は予混合気火炎の燃焼速度とほぼ等しく、 $\phi_1=1.5$ 付近で最大値を取り、その後減少する。過濃側において燃焼速度が速くなるのは、次のように考えられる。定圧容器を用いて行った過去の研究において^(1,2)、液体当量比を固定 ($\phi_1=0.2$ および0.3) して火炎伝播速度と総当量比の関係について調べた結果より、液体当量比が大きくなるのに伴って、火炎伝播速度の

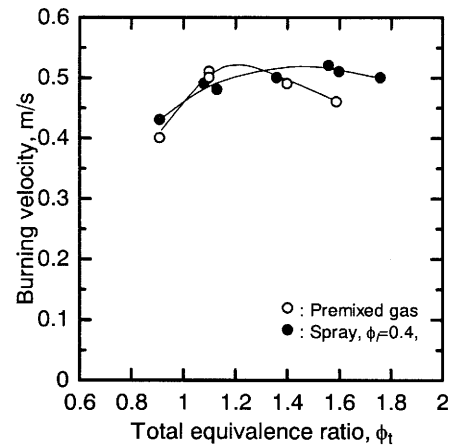


図8 角度法を用いて測定した燃焼速度。

最大値が過濃側に移動することが報告されている。本実験の液体当量比は0.4と大きく、初期の気体当量比が支配的な噴霧条件であることが、過濃側で均一噴霧火炎の燃焼速度が予混合火炎のそれを上回った要因であると考えられる。

4. 結言

- (1) 噴霧の平均液滴直径を3~120 μm の範囲で変化させることができた。
- (2) 重力により大きい液滴は沈降してしまうため、平均液滴直径の大きい均一噴霧流の生成には微小重力環境の利用が不可欠である。
- (3) 噴霧流の平均液滴直径は時間的に安定していた。
- (4) ノズル出口に保炎された円錐火炎を用いて角度法により燃焼速度を計測した結果、液体当量比が0.4、平均液滴直径が7.5 μm の均一噴霧火炎の燃焼速度は、過濃領域において同一総当量比の予混合火炎より速くなることがわかった。

5. 参考文献

- (1) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., Ujiie, Y., and Sato, J., Microgravity Experiments of Flame Propagation in Ethanol Droplet-Vapor-Air Mixtures, The Proc. Combust. Inst, Vol. 28, (2001), pp. 999-1005.
- (2) Nomura, H., Hamasaki, T. et al., Fundamental Study on Effects of Residual Fuel Droplets on Flame Propagation in SI Engines, SAE paper #2003-01-0628, (2003).
- (3) 平野敏右, 燃焼学, 第2版, 海文堂出版, 東京, (1986).