

複雑流れ現象としての燃焼の解明とその応用

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が、噴霧中の複雑な流れ、燃料液滴と空気の相対速度、液滴の偏在、液滴直径分布幅の広さなどが現象を複雑にしているため、燃焼機構には不明な点が多い。この複雑な噴霧燃焼を解明することを目的とし、噴霧燃焼の最も単純なモデルである単一液滴の燃焼に関する研究、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¹⁾。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、火炎構造を調べた。これまで、静止均一分散・均一粒径噴霧の定圧および定容環境下での燃焼に関して研究を行ってきた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、液滴燃焼の研究と噴霧燃焼を関連づけるのに有効であると考えられる。実験には、球状進行火炎よりも液滴挙動観察に適している定在定常火炎を用いた。定在定常火炎は均一噴霧バーナを用いることにより実現させた。

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、定圧および定容環境下での火炎伝播実験で実績のある凝集法を採用した。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、ウィルソンの霧箱と同じ原理である。

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。均一噴霧バーナを含む実験装置概略を、図1に示す。実験装置は、バーナ、バーナ冷却装置、計測装置およびシーケンサから構成される。バーナは、急速減圧容器、ピストン、ノズルおよびフランジから構成されている。急速減圧容器は直径80 mm、全長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。急速減圧容器壁は、シーケンサのPID制御によりシーヒータで加熱される。急速減圧中および後の、燃焼室壁から混合気への熱流入を抑制するため、燃焼室壁はフロン134aを用いて冷却をした。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である。周囲流には窒素を用い、中心流と同流速で流した。窒素の流路には、整流板を設けた。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、レーザー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。

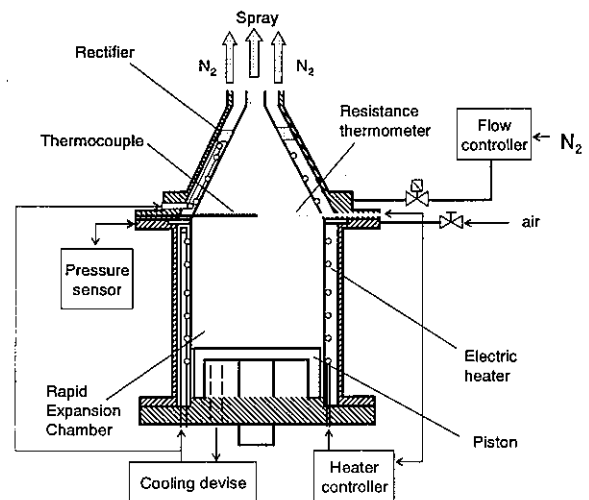


図1 均一噴霧バーナ。

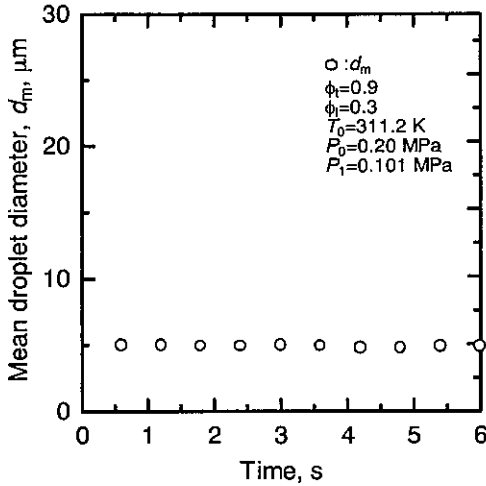


図2 平均液滴直径の時間変化 ($d_m = 5 \mu\text{m}$).

2.3. 実験方法

急速減圧容器を所定の温度まで加熱した後、燃料をノズル出口より注入し、空気に加圧する。燃料蒸気-空気混合気を飽和状態にさせた後、急速減圧容器内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た。生成された均一噴霧は、ピストンにより一定流速でノズル出口から押し出される。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。混合気圧力 P_1 は、全ての実験において 0.1 MPa とした。

3. 実験結果および考察

均一噴霧バーナの作動試験を行った。生成された均一噴霧の一例として、 $\phi_t = 0.9$, $\phi_l = 0.3$ のときの、平均液滴直径の時間変化を図2に示す。グラフ中の T_0 は混合気温度、 P_0 は減圧前の混合気圧力である。燃料噴霧の平均液滴直径 d_m は、急速減圧後、 $5 \mu\text{m}$ で安定していることがわかる。このときの減圧時間 t_R は 0.2 s であった。次に減圧時間を 1.8 s で行ったところ、 $d_m = 20 \mu\text{m}$ の燃料液滴が生成された。バーナ出口流速はどちらの場合でも、0.55 m/s とした。図3において、(a) は $d_m = 5 \mu\text{m}$ 、(b) は $d_m = 20 \mu\text{m}$ の場合の減圧開始 5 秒後の液滴直径分布を示す。 $d_m = 20 \mu\text{m}$ の方が $d_m = 5 \mu\text{m}$ のときより分布幅が狭い。これは、大きな液滴は、重力の影響を受け、生成されると同時に沈降してしまうため、押し出された噴霧には大きな液滴が含まれず、液滴の分布幅が狭いと考えられる。定圧および定容実験において生成される液滴直径分布と比較すると、 $d_m = 20 \mu\text{m}$ の場合は、本均一噴霧生成装置のほうが液滴の分布幅が狭かった。

図4は、生成された均一噴霧流にその中心軸を含む面状のレーザーシートを照射し、シート直角方向

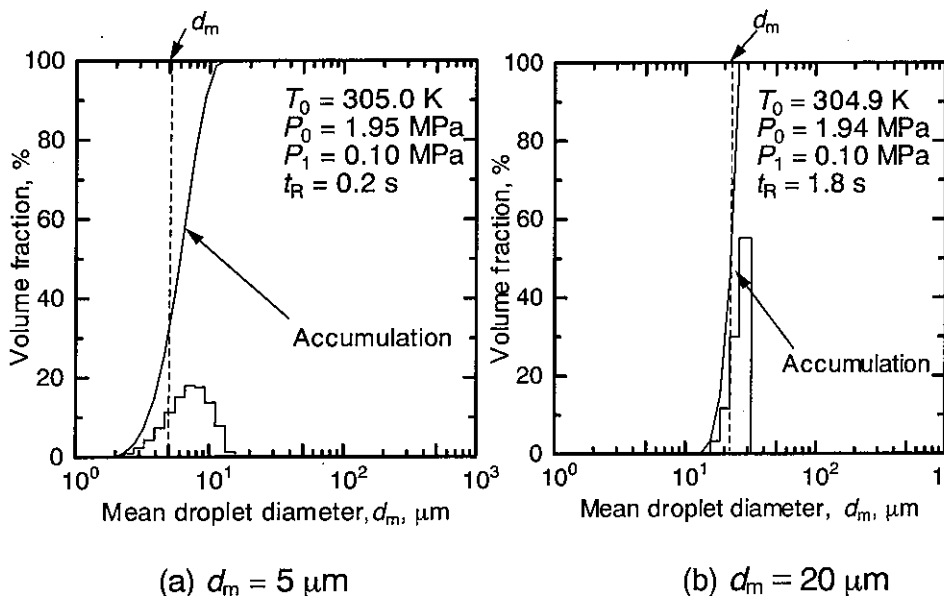


図3 液滴直径分布の例.

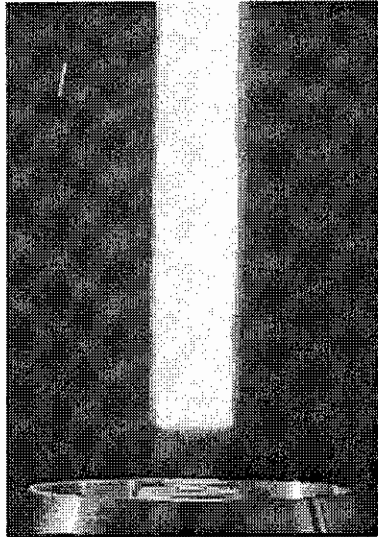


図4 噴霧流のレーザーシート画像.

から CCD カメラで直接撮影した画像である。レーザーシートはノズル出口から約10 mmの位置から上方部分に照射されている。中央の明るい部分が噴霧流であり、柱の太さがほぼ均一で、筋や明るさの偏りも観察されなかった。噴霧流が均一にノズルか

ら押し出されていることが確認された。

次に、燃焼実験を行った結果を図5に示す。上段は $\phi_t = 0.9$ 、下段は $\phi_t = 1.2$ である。噴霧の平均液滴直径が $5 \mu\text{m}$ および $20 \mu\text{m}$ の火炎直接写真を示した。比較のため、同一当量比の予混合火炎の写真も示した。 $\phi_t = 0.9$ の予混合火炎には2次火炎が見られなく、 $\phi_t = 1.2$ の予混合火炎には2次火炎がぼんやりと観察された。一方、均一燃料噴霧を含む火炎では、全ての場合において2次火炎が確認された。これは、均一燃料噴霧中の液滴が予熱帯および反応帯で完全に蒸発せず、燃え残った燃料液滴が反応帯を出た後に蒸発し、燃焼して2次火炎を形成しているからだと考えられる。

均一燃料噴霧火炎は、1次火炎は青、2次火炎は青紫であった。 $\phi_t = 0.9$ および $\phi_t = 1.2$ どちらの場合でも、写真上での2次火炎の色の濃さが、 $d_m = 5 \mu\text{m}$ よりも $d_m = 20 \mu\text{m}$ のほうがより濃い。予熱帯および反応帯での燃料液滴の蒸発の割合は、液滴が大きくなるほど小さくなる。2次火炎での燃料液滴の蒸発量は、液滴が大きいほど多くなるため、 $d_m = 20 \mu\text{m}$ のほうが2次火炎の色が濃くなったと考えられる。火

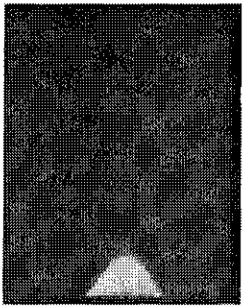
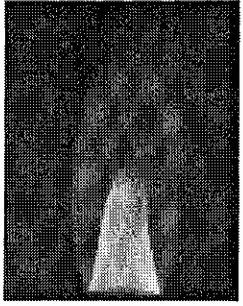
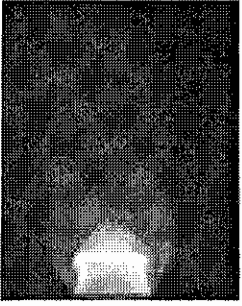
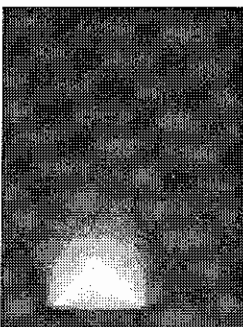
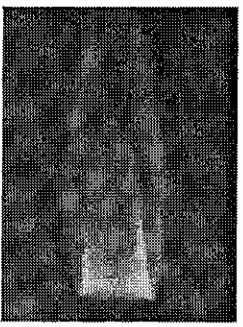
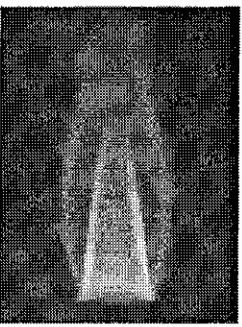
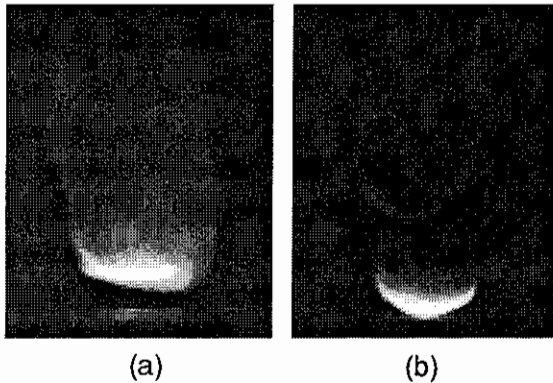
	Premixture	$d_m = 5 \mu\text{m}$ $\phi_l = 0.35$	$d_m = 20 \mu\text{m}$ $\phi_l = 0.35$
$\phi_t = 0.9$	 $v = 0.6 \text{ m/s}$	 $v = 0.56 \text{ m/s}$	 $v = 0.84 \text{ m/s}$
$\phi_t = 1.4$	 $v = 0.76 \text{ m/s}$	 $v = 0.53 \text{ m/s}$	 $v = 0.67 \text{ m/s}$

図5 火炎の直接写真.



図6 円柱状噴霧火炎.
 $(\phi_t=1.2, d_m = 20 \mu\text{m}, v = 0.67 \text{ m/s})$



(a) $\phi_t = 0.9, \phi_l = 0.35$
 (b) $\phi_t = 1.2, \phi_l = 0.35$

図7 平面火炎の直接写真.

炎の保炎は、 $\phi_t = 1.2$ の方が $\phi_t = 0.9$ より流速の幅が狭いため困難であった。火炎がノズル口に平行になった場合、燃烧速度は異常に大きく算出された。この原因については、今後詳細に調べる。

$\phi_t = 0.9, d_m = 20 \mu\text{m}$ の条件の火炎は、他の条件の火炎と異なり、円柱状の火炎となった。この形状は、 $\phi_t = 1.2$ の $d_m = 20 \mu\text{m}$ の場合でも、保炎過渡期に見られた(図6)。完全な円柱ではないが、 $\phi_t = 0.9$ のそれより高さのある1次火炎が観察された。この現象は、小さい液滴では観察されなかった。また、大きい液滴の場合の特徴として、安定した浮き上がり火炎が観察されることがあった。そのときの火炎を図7に示す。(a)は $\phi_t = 0.9$ 、(b)は $\phi_t = 1.2$ 、液体当量比および平均液滴直径は図4と同じである。1次火炎はノズル口に平行して、比較的長期間定在した。これは、ノズル出口の円柱状火炎の基部が吹き飛んだにもかかわらず、流速

が燃烧速度とつりあっていたため、火炎面が平板状になったと考えられる。2次火炎は1次火炎の上方に定在した。写真(b)では、2次火炎が1次火炎から分離し、2つ形成されている様子が観察できる。円柱状火炎および平面浮き上がり火炎が現れる原因については、今後詳細に調べる。

4. 結言

定在定常均一噴霧火炎を実現できる実験装置を新たに開発・製作し、作動試験を行った。液滴は、均一に生成することができた。燃烧実験を行ったところ、予混合火炎と。均一噴霧火炎では構造の違いが確認された。均一噴霧火炎には、希薄側でも過濃側でも2次火炎が観察された。

5. 参考文献

- 1) Williams, F. A., The Mechanism of Combustion of Droplet and Spray of Liquid Fuels, Oxidation and Combustion Reviews, 1968, Vol. 3, 1996, pp.1-45.
- 2) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., and Ujiie, Y., Sato, J., Micro gravity Experiments of Flame Propagation in Ethanol Droplet-Vapor-Air Mixtures, The Proc. Combust. Inst, Vol. 28, pp. 999-1005.