

プロジェクト3

複雑流れ現象としての燃焼の解明とその応用

氏 家 康 成, 野 村 浩 司 (機械工学科)

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、ディーゼル機関の高出力化に制限を与えるディーゼルノックの抑制や、筒内直噴ガソリン機関の燃焼促進、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。噴霧燃焼機構は非常に複雑で、いまだ解明されていない点が多い。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、噴霧機構を解明することを目的として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¹⁾。均一粒径・均一分散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²⁾は、燃料蒸気-空気混合気を急速膨張させることによって、粒径分布幅の狭い均一分散燃料液滴群を生成した。野村らは同様の方法を用いて実機の部分予蒸発燃料噴霧をモデル化した粒径分布幅の狭い静止均一分散燃料液滴-蒸気-空気混合気を生成し、定圧および定容環境下で燃焼実験を行ってきた^{3,4)}。その結果、予混合気中に分散する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。本研究では、急速膨張方式噴霧バーナを用い、伸長流れ場に平面火炎を保炎させ、予混合気中に分散する燃料液滴が燃焼速度に及ぼす影響を調べた⁵⁾。燃焼速度は、同一総当量比の予混合火炎のものと比較して、希薄領域では大きくなり、過濃領域では逆に小さくなることがわかった。また、Particle Tracking Velocimetry (PTV)により、斜め平面火炎の構造観察および火炎前縁の液滴速度計測を行い、その結果を考察した。本概要では、PTVを行った実験について記述する。

2. 実験装置および方法

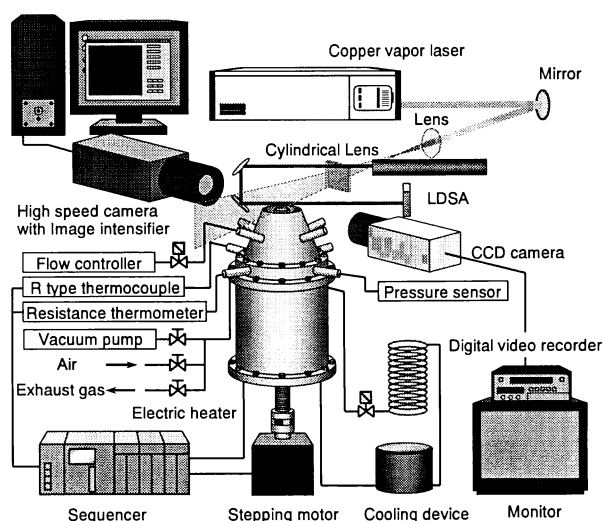


Fig.1 Experimental apparatus.

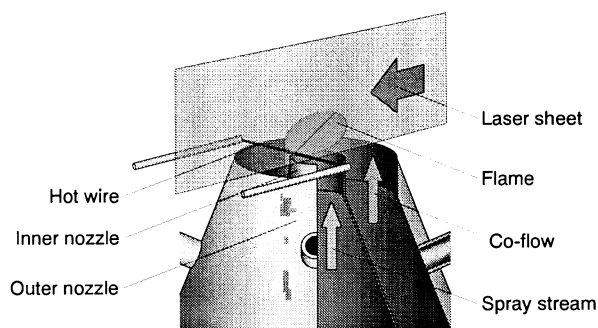


Fig.2 Nozzle and hot wire.

2.1 部分予蒸発燃料噴霧の生成原理

予混合気中に燃料液滴を均一に分散させる方法として、凝集法を用いている。これは、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。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

持つ層流の噴霧流を実現した。

2.2 実験装置構成

実験装置の概略を Fig.1 に示す。実験装置は噴霧バーナ、制御装置および計測装置から構成される。噴霧バーナは急速減圧容器、ピストン、ノズルおよび点火装置から構成される。急速減圧容器は直径 80 mm、全長 80 mm の円筒形である。ノズルは同軸流ノズルであり、噴霧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直径はそれぞれ 8 および 28 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。点火・保炎装置の電熱線には、直径 0.6 mm、長さ 30 mm のニクロム線を使用した。本装置は、噴霧流が点火した後は、出力を低下させ、斜め平面火炎を噴霧流中に保炎させる役割を持つ。ノズルと点火・保炎装置の詳細を Fig.2 に示す。ノズル出口と平行に直線状に張られた電熱線は、その中央がノズル出口 2 mm 上方の噴霧流外縁と接するように設置した。制御装置にはシーケンサを用い、急速減圧容器内温度、電磁弁、ピストン駆動用のステッピングモータの制御を行った。定常時の急速減圧室内温度測定用の白金測温抵抗体、急速減圧中温度測定用の R 種熱電対（線径 50 μm ）を急速減圧容器内に設置した。急速減圧容器壁から生成された部分予蒸発燃料噴霧への熱流入を抑制するため、急速減圧中および後、代替フロンを用いて急速減圧容器壁の冷却を行った。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。急速減圧容器内の圧力は、絶対圧力計を用いて測定した。噴霧流の平均液滴直径は、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。火炎の挙動観察は、直接写真法により CCD カメラ（露光時間：1/1000 s、フレームスピード：30 fps）で行った。噴霧流中の液滴挙動の観察は、銅蒸気レーザー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内蔵高速度ビデオカメラ（露光時間：3 μs 、フレームスピード：3000 fps）を用いて行った。レーザーシートは、ノズル中心軸を含み、点火・保炎用電熱線に直交するように照射した。燃料および空気を急速減圧容器内に充填・加圧した後、所定の温度まで加熱した。

その後、ノズル蓋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、均一部分予蒸発燃料噴霧を生成した。ノズル蓋を取り外した後、生成した均一部分予蒸発燃料噴霧を、ステッピングモータによって駆動されるピストンにより、ノズル出口から押し出した。噴霧流が安定した後、点火・保炎装置により、斜め平面火炎をノズル出口に保炎した。

2.3 実験条件

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。すべての実験において、急速減圧前の混合気として飽和燃料蒸気-空気混合気を使用した。総当量比 ϕ_t は、急速減圧前の混合気の温度 T_0 および圧力 P_0 により決定した。気体当量比 ϕ_g は急速減圧後の温度 T_1 および圧力 P_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。

3. 実験結果および考察

3.1 斜めに保炎された平面火炎

Fig.3 に、噴霧流中に保炎された斜め火炎の CCD カメラ画像および噴霧流の液滴直径分布を示す。噴霧流はレーザーシートによって照射されており、液滴は 10 回程度の多重撮影になっている。図中には、破線により内側ノズルの出

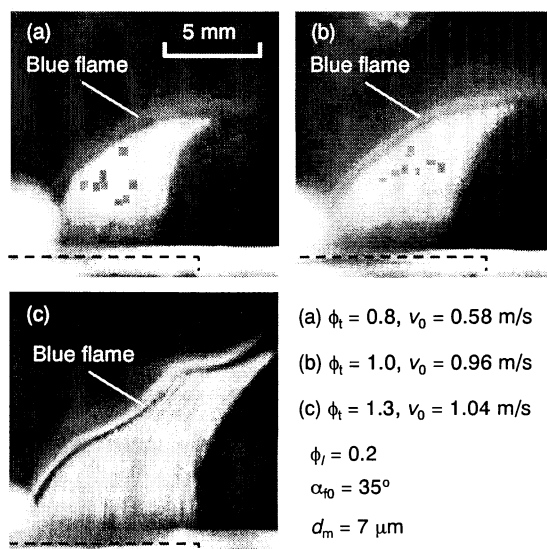
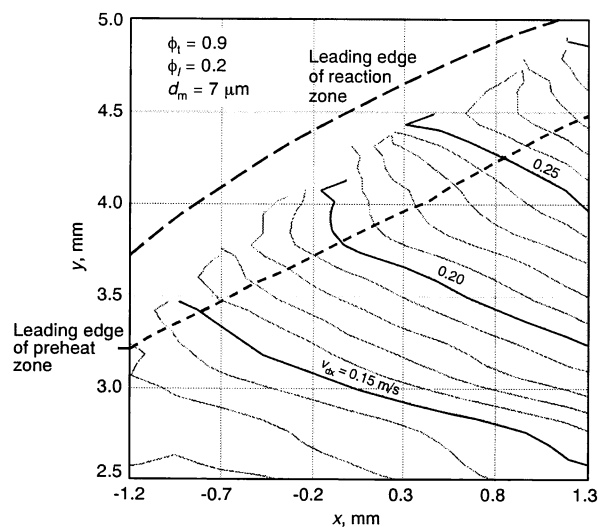


Fig.3 Flame images for different total equivalence ratios.

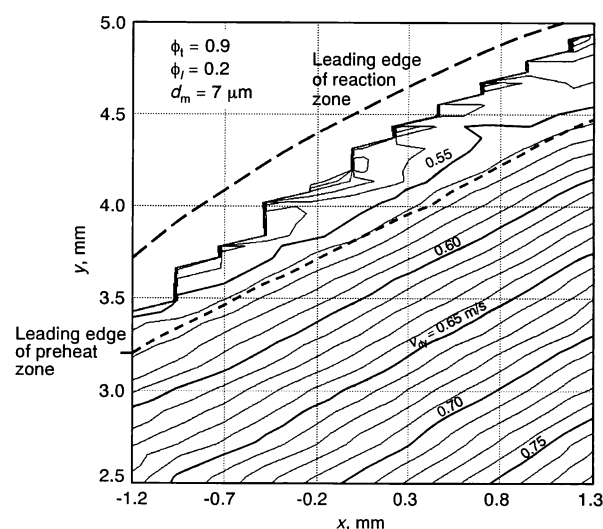
口外形を示した。すべての条件において $\phi_l = 0.2$, $d_m = 7 \mu\text{m}$ およびノズル中心軸に直交する平面とノズル中心軸付近で火炎がなす角度 α_0 は, 35° であった。Fig.3-(a), (b) および (c) は, それぞれ $\phi_l = 0.8, 1.0$ および 1.3 の噴霧火炎である。すべての条件において, 鉛直上向きにノズルを出た液滴が, 火炎により画像右方向に偏向されていることがわかる。また, 青炎と噴霧の間に液滴の存在しない領域が確認された。Fig.3-(a) と (b) の写真を比較すると, Fig.3-(b) の火炎の方が明るく, また, 噴霧流が右方向により伸びていることがわかる。これは, $\phi_l = 0.8$ の火炎と比較して $\phi_l = 1.0$ の火炎では発熱が激しく, 火炎が噴霧流を押し返す力が大きくなったためだと考えられる。また, $\phi_l = 1.3$ では火炎面が振動する様子が観察された。

3.2 液滴速度の PTV 計測

Fig.4 に, 噴霧流中の液滴速度を PTV により測定した結果を示す。Fig.4-(a) および (b) は, x - y 平面 (レーザーシート面) における液滴速度 x 軸方向成分 v_{dx} および y 軸方向成分 v_{dy} の分布をそれぞれ示している。ここで, x 軸はノズルに対して水平な成分, y 軸はノズル中心軸に対して平行な成分にとった。原点はノズルの中心とした。図中には, 等速度線, 予熱帯前縁および反応帯前縁を示した。Fig.5 において予熱帯前縁位置の定義を行う。グラフは噴霧流の気相流速の一例であり, 流速の x 軸方向成分 v_{gx} および y 軸方向成分 v_{gy} の y 軸方向変化を示している。気相流速の計測方法は 3.4 節で後述する。ある y 座標までは, それぞれの速度成分は直線的に変化していることがわかる。本研究での予熱帯前縁の位置は, v_{gy} の y 軸方向変化が直線から外れた位置, 反応帯前縁の位置は, 直接写真から求めた青炎前縁の位置とした。図に使用したデータは, 各グリッド ($0.238 \text{ mm} \times 0.059 \text{ mm}$) における 0.1 s 間の $10 \sim 100$ 個のデータの平均値である。Fig.4 において v_{dx} は, 予熱帯に近づくにしたがって増大し, v_{dy} は予熱帯に近づくにしたがって減少することがわかる。また, 予熱帯上流では, v_{dx} および v_{dy} は, y 軸方向に対してほぼ一定の傾きを有することがわかる。Fig.5 に, 火炎上流のノズル中心軸上液滴速度分布を示す。グラフの横軸は y 座標であり, 縦軸は液



(a) x -axis component



(b) y -axis component

Fig.4 Distribution of droplet velocity in x - y plane.

滴速度の x 軸方向成分および y 軸方向成分を示している。ここでは, y 座標の原点は青炎前縁とノズル中心軸の交点とした。図中の各点は, Fig.4 で設定したグリッドのなかから, ノズル中心軸を含むグリッドを抽出して, その値を示している。 $\phi_l = 0.9$, $\phi_l = 0.25$, $\alpha_0 = 30^\circ$ で一定とし, 平均液滴直径およびノズル出口流速を変化させた。 $d_m = 15 \mu\text{m}$ の場合, 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。火炎前縁で液滴速度の x 軸

方向成分が増大から減少, y 軸方向成分が減少から増大に変わるのは, 液滴が予熱帯に突入したからと考えられる. $d_m = 6 \mu\text{m}$ の場合, $y = -0.7 \text{ mm}$ 付近で x 軸方向成分が増大から減少に転じ, $y = -1 \text{ mm}$ 付近で y 軸方向成分が減少から増大に転じている. $d_m = 6 \mu\text{m}$ の場合と $d_m = 15 \mu\text{m}$ の場合の液滴速度の y 軸方向成分を比較すると, $d_m = 15 \mu\text{m}$ の場合の方が減少から増大に転じる速度変化が急であることがわかる. また, 両者について液滴速度が取得できた y 座標の範囲を比較すると, $d_m = 15 \mu\text{m}$ の場合の方が, より反応帯近傍まで速度データが得られていることがわかる. これは, $d_m = 6 \mu\text{m}$ の場合, 予熱帯に液滴が突入すると急速に液滴が蒸発・消滅するためであると考えられる. x 軸方向液滴速度について比較すると, $d_m = 6 \mu\text{m}$ の場合の方が x 軸方向成分が大きい. これは, 燃焼速度が大きいために流れが強く偏向されたことと, 小さい液滴のは慣性が小さいので, ために流れに追従して加速しやすいからと考えられる.

3.3 液滴の予熱帯突入速度の噴霧流ノズル出口流速依存性

Fig.7 に, 予熱帯に突入する液滴速度火炎垂直成分 v_{dn} に及ぼす噴霧流ノズル出口流速 v_0 の影響を示す. v_0 を増大させることにより, α_0 を増大させた. v_{dn} は予熱帯に突入する液滴の速度成分 v_{dx}, v_{dy} および座標 x における火炎角度 α_f より,

$$v_{dn} = v_{dy} \cos \alpha_f - v_{dx} \sin \alpha_f \quad (1)$$

の式を使って求めた. 噴霧流性状は同一であり, $\phi_t = 0.9$, $\phi_f = 0.2$, $d_m = 7 \mu\text{m}$ となっている. α_0 が増大すると, すなわち v_0 が増大すると, v_{dn} が減少することがわかる. また, 点火・保炎用電熱線から遠ざかるにしたがって, v_{dn} は緩やかに減少し, その減少率は α_0 が増大すると大きくなることわかる. このことより, 火炎における局所噴霧流性状が x 軸方向に一樣ではなく, 火炎角度が大きくなると一樣性が低下することがわかる.

3.4 燃焼速度

液滴速度データを用いて, 反応帯上流の気体流速 v_g を求めた. Fig.8 のような簡単な火炎のモデルを考える. 液滴は周囲気体の抗力によって

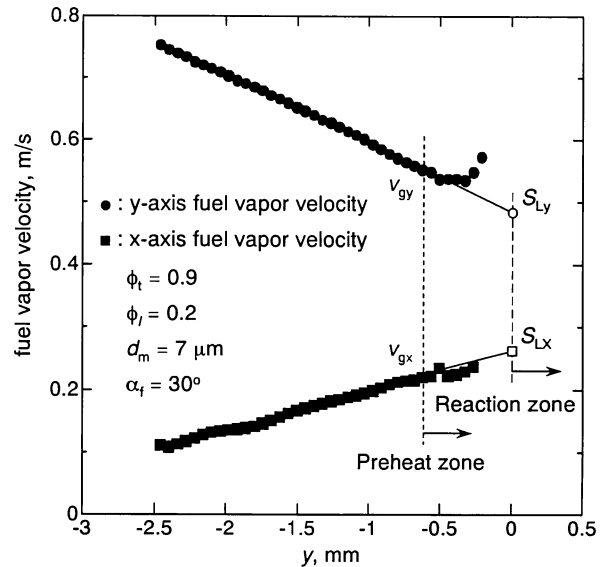


Fig.5 Droplet velocity profiles along the y-axis and definition of the burning velocity.

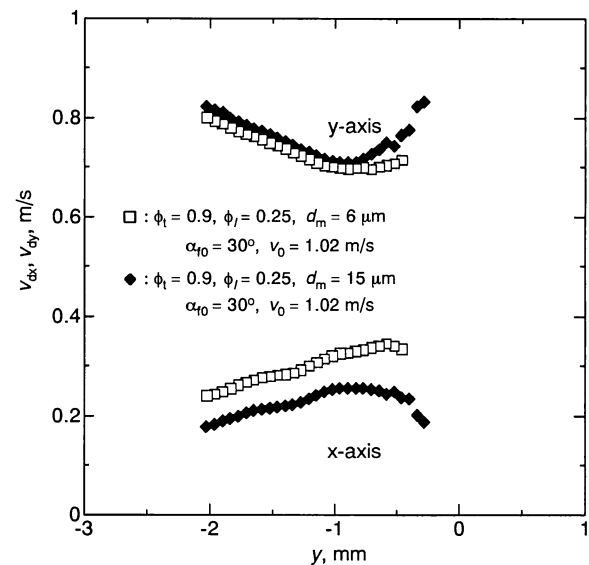


Fig.6 Droplet velocity profiles along y-axis.

y 軸方向には減速, x 軸方向には加速するので, 液滴について y 軸方向の運動方程式を立て, それを解くことによって求めた. 燃焼速度は予熱帯前縁における液滴の速度を, その位置での速度勾配によって反応帯前縁まで延長した値と一致することが報告されている⁹⁾. 本研究においてもこの方法で燃焼速度を求めた. Fig.5 において予熱帯前縁での v_{gx} および v_{gy} を上流の速度勾配で反応帯前縁まで延長した値をそれぞれ燃焼速度の x 軸方向成分 S_{Lx} および y 軸方向成分 S_{Ly} とした. 燃焼速度 S_L は, S_{Lx} と S_{Ly} から

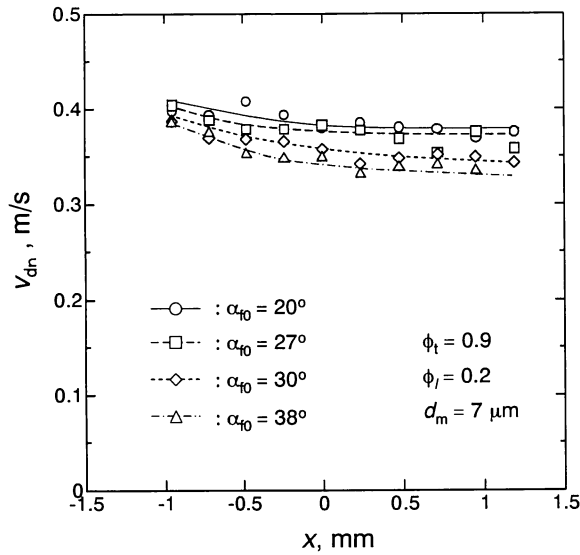


Fig.7 Distribution of the droplet velocity component normal to a flame along the leading edge of the flame.

$$S_L = S_{Ly} \cos \alpha_f - S_{Lx} \sin \alpha_f \quad (2)$$

として求めた。

3.5 燃烧速度の総当量比依存性

Fig.9 に、 $\phi_t = 0.7, 0.8, 0.9$ および 1.0 の噴霧流について、燃烧速度のストークス数依存性を調べた結果を示す。噴霧流中の液滴の気体追従性を示すストークス数 St が噴霧燃烧に影響を及ぼすことが知られている⁷⁾。ここで St は

$$St = \frac{\rho_l d^2 a_n}{18 \mu_g} \quad (3)$$

である。 ρ_l , d , μ_g および a_n はそれぞれ液滴の密度、液滴直径 (d_{10} を使用)、気体の粘性係数および火炎垂直方向伸長率を表している。液体当量比と平均液滴直径は、それぞれ 0.2 と $7 \mu m$ で一定とした。 St の増大は、液滴と気体との間に速度差が生じることによる反応帯前縁での局所総当量比増大、および式(3)の気体流速の伸長率のみが変化している本条件では、火炎伸長につながる。 $St = 0.005$ までは、どの総当量比においても燃烧速度がほとんど変化していないことがわかる。このことから $St < 0.005$ の領域では燃烧速度に及ぼす局所総当量比増大および火炎伸長の影響がほとんどないと考えられる。 $\phi_t = 0.7$ および 0.8 の火炎では、 $St > 0.005$ の領域に

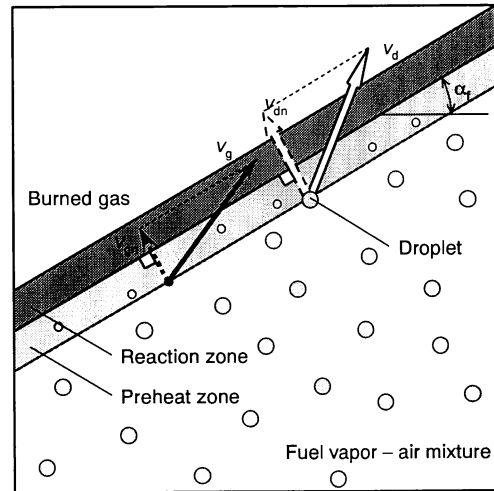


Fig.8 Flame model.

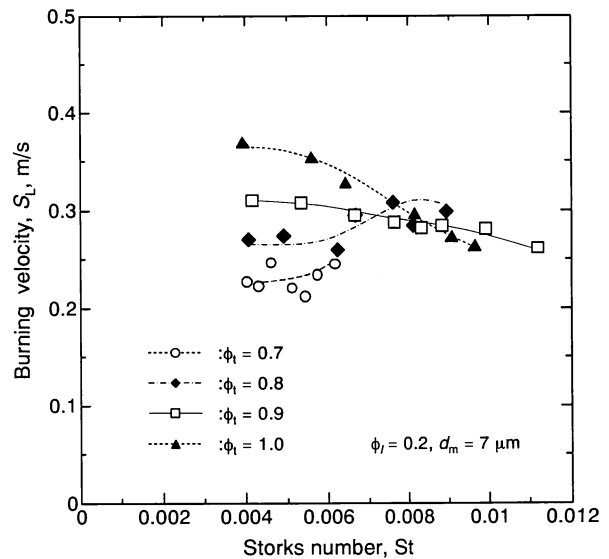


Fig.9 Relationship between Stokes number and burning velocity.

において、 St の増大に伴って燃烧速度が増大している。このことから、 $\phi_t = 0.7$ および 0.8 の火炎に対しては、火炎前縁での局所総当量比の増大がこの領域では支配的であることが示唆される。また $\phi_t = 0.8$ の火炎では、 $St = 0.008$ 付近から燃烧速度が減少する傾向にあることがわかる。この領域では、火炎伸長の影響が支配的になったことが示唆される。 $\phi_t = 0.9$ および $\phi_t = 1.0$ の火炎では、 $St > 0.005$ の領域において、 St の増大に伴って燃烧速度は減少する。これは局所総当量比が増大しても燃烧速度があまり増大しない総当量比であるため、火炎伸長が燃烧速度の低下に

及ぼす影響が支配的であると推察される。

4. 結言

燃料液滴粒径分布幅の狭い層流の噴霧流を生成し、熱線に保炎された斜め火炎を観察した。火炎前縁液滴速度の2次元分布を PTV 測定し、燃焼速度を算出した。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 総当量比 0.8 から 1.3, 液体当量比 0.2 の平均液滴直径 $7\ \mu\text{m}$ 場合、液滴は火炎の予熱帯において蒸発が完了することがわかった。
- (2) 噴霧流の総当量比が火炎形状に及ぼす影響を観察した。総当量比 1.3 の場合、保炎された火炎が振動する現象が観察された。
- (3) PTV を用いて、斜め火炎が形成された噴霧流中の液滴速度を計測した。液滴速度は、予熱帯前縁に近づくにしたがって、ノズル中心軸に平行な成分は減少し、垂直な成分は増大することがわかった。
- (4) PTV を用いて計測した液滴速度から気体流速を算出し、燃焼速度を求めた。液体当量比 0.2, 平均液滴直径 $7\ \mu\text{m}$ の噴霧流について、ストークス数が燃焼速度に及ぼす影響を調べた。ストークス数の増大に伴って、総当量比 0.7 および 0.8 の噴霧流では燃焼速度が増大し、総当量比 0.9 および 1.0 の噴霧流では減少する。

参考文献

- 1) F. A. Williams: Oxidation and Combustion Reviews, 3 (1997) 1.
- 2) S. Hayashi, S. Kumagai: The Proc. Combust. Inst., 15 (1975) 445.
- 3) Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., and Ujiie, Y: The Proc. Combust. Inst, 28, (2001), 999.
- 4) Nomura, H., Hamasaki, T., SAE Paper #2003-01-0628, (2003).
- 5) Hayasaka, M., Kawasumi, I., Nomura, H., Ujiie, Y: International Symposium on Space Technology and Science, 2004-h-17, (2004).
- 6) B. Deshaies and P. Cambray., Combustion and flame 82, (1990) 361.

- 7) Mikami, M., Miyamoto, S., and Kojima, N: Counterflow Diffusion Flame with Polydisperse Sprays, The Proc. Combust. Inst, 29, (2002), 593.