予混合噴霧火炎の巨視的燃焼挙動*

(第2報, 噴霧流中の伝ば火炎速度と油滴クラスター消失速度)

津島 将司^{*1}, 斎藤 寛泰^{*2}
赤松 史光^{*2}, 香月 正司^{*2}Macroscopic Flame Structure in a Premixed-Spray Burner
(2nd Report, Flame Propagation Speed and Droplet Cluster Disappearance Speed)Shohji TSUSHIMA^{*3}, Hiroyasu SAITOH,
Fumiteru AKAMATSU and Masashi KATSUKI^{*3} Osaka University, Dept. of Mechanical Engineering,
2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

Both flame propagation speed and droplet cluster disappearance speed in a premixed-spray burner system are experimentally investigated by image processing analysis in an effort to evaluate two-stage flame structure observed in the premixed-spray flame. It is confirmed that flame speed concerned with premixed-mode combustion in the spray flame is approximately 2.0 m/s in average while mean disappearance speed of droplet clusters, which are dominated by diffusion-controlled combustion-mode downstream of the flame, is evaluated as much as 0.45 m/s. Although both speed, which are supposed to depend on local properties of the spray itself and flow conditions surrounding droplet clusters, are scattered in experiments, it was clarified that both characteristics of premixed-mode and diffusion-mode combustion in spray flames are of much difference in nature.

Key Words: Combustion, Liquid Fuel, Laser, Spray Flame, Group Combustion, Droplet Cluster, Flame Propagation, Laser Tomography

1. 緒 言

噴霧火炎をモデル化する上で, 噴霧燃焼機構を解明することは, より精度の高い信頼性のあるモデルを構築するために必要不可欠である. また, あらたに提唱されたモデルを検証するためには, 実験結果と数値計算結果を比較し, 検討する必要がある. これらのことを踏まえ前報⁽¹⁾では, 噴霧火炎中の基礎的燃焼機構を巨視的観点から考察し, 予混合噴霧火炎中の燃焼挙動を明らかにした.

その結果, 予混合噴霧火炎中においては, 予混合燃焼的な火炎伝ば現象と拡散燃焼的な油滴クラスターの燃焼が混在していることが確認された. このような現象は, 実際の噴霧燃焼器においても存在していると考えられる.

しかし, 従来までの噴霧火炎の実験的研究においては, 噴霧火炎の燃焼速度を火炎前縁位置から一元的に導出するものがほとんどであり, 例えば Ballal と Lefebvre⁽²⁾は噴霧流中を伝ばする火炎の速度(flame speed)を微小重力状態で計測し, 水谷ら⁽³⁾は予混合噴霧火炎前縁の挙動を時間平均的に観察し, 予混合噴霧火炎の燃焼速度として導出している. Polymeropoulos と Das⁽⁴⁾も同様の実験を行

っており, 噴霧の平均粒径と燃焼速度の関係について考察を加えている. また, 中部ら⁽⁵⁾はやはり同様の予混合噴霧火炎に対し, 主流空気流中にプロパンを混入し, 気液混焼およびガス・噴霧専焼時の燃焼速度を計測し, 系統的にまとめている.

しかし, いずれの実験的研究においても, 噴霧火炎中における予混合燃焼的な伝ば火炎の速度(以下, 伝ば火炎速度と称する)と, 拡散燃焼的な油滴および油滴クラスターの消失速度をそれぞれに区別して導出したものは見当たらない. 工業的には, これら噴霧火炎中の伝ば火炎の速度および油滴クラスターの消失速度は, それぞれ燃焼炉内における火炎位置および火炎長さとして反映されるため, 区別して取り扱う必要があると考えられる.

前報で示したように, これらの燃焼機構の違いは, Williams⁽⁶⁾のモデルにおける均質燃焼(Homogeneous combustion)と不均質燃焼(Heterogeneous combustion)とに区別することができる. 近年, Greenberg⁽⁷⁾らは同様のモデルを用いてヘプタン層流噴霧火炎を対象に一次元数値解析を行ったが, 実験的知見の必要性は明らかである.

そこで本実験では, 予混合噴霧火炎中での伝ば火炎速度および油滴クラスターの消失速度を導出し, 比較することを目的に, 噴霧断面像計測を行った. その際, 位相ドップラ計測による噴霧流場の計測と併せて, 画像処理

* 原稿受付 1999年11月9日.

^{*1} 正員, 日本学術振興会特別研究員, 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1).^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科.

E-mail: tsushima@combu.mech.eng.osaka-u.ac.jp

Fig.1 Experimental apparatus

解析を施すことにより、伝ば火炎速度および油滴クラスターの消失速度を算出した。

2. 実験装置および方法

本実験では、予混合噴霧流中の伝ば火炎速度、および油滴クラスターの消失速度を導出するために、噴霧断面像の撮影を行い、さらに位相ドップラ流速計 (Phase Doppler Anemometry, PDA) を用いて噴霧流場の計測を行った。図1に本実験で使用した実験装置を示す。本実験で用いた予混合噴霧バーナおよび噴霧断面像撮影の光学系は前報⁽¹⁾と同一のものであるため、ここでは省略する。バーナポートの詳細については文献(8)を参照されたい。

実験条件も燃焼用空気断面平均流速 5.5m/s、灯油—空気質量流量比 $0.045\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$ 、霧化用空気圧力 0.4MPa と同じ条件であり、噴霧断面像の撮影範囲も有効画素数 $256 \times 128\text{pixel}$ (実空間で $140 \times 70\text{mm}$ に対応) で同一である。撮影された噴霧断面像はパーソナルコンピュータを介してデジタル記録された後、ワークステーション (富士通, S-4/IP, SUN SPARC ICP 互換機, または, Hewlett Packard, Series 735) で二値化処理等の画像処理解析が行われる。なお画像処理解析の際には, C 言語による自作プログラムを用いた。実験に際し, 噴霧断面像の撮影はレーザシート光強度の高さ方向の制約から, 鉛直方向に分割して行い, 座標軸は火炎下流方向に h 軸を, 半径方向に r 軸をとった。

PDA 光学系と信号処理器には市販の装置 (Dantec, 送光系 60X, 受光系 57X10, 信号処理器 58N10) を用い, 光源にはアルゴンイオンレーザ (NEC, GLG3200, 発振波長 514.5nm) を使用した。光電子増倍管からの出力信号は信号処理器で処理された後, パーソナルコンピュータ (IBM, PS/486DX-33MHz) で解析される。ここでドップラ信号の受光方向は光軸に対して, 70.3° に設定した⁽⁹⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 予混合噴霧火炎中の伝ば火炎の速度

3.1.1 連続噴霧流境界の抽出 前報⁽¹⁾において,

予混合噴霧火炎は, 上流部における選択的火炎伝ばに代表される予混合的火炎と, 下流部における油滴クラスターの燃焼による拡散的火炎という二重火炎構造を持つことが明らかになった。ここではまず, 予混合噴霧火炎中に形成される伝ば火炎の速度の導出について示す。

図2は $h=5 \sim 75\text{mm}$ の領域で撮影された噴霧断面像の一例である。前報⁽¹⁾で示したように, この領域では噴霧流が連続的に存在していることがうかがえる。ここで, 画像に見られる連続噴霧流の複雑な形状は, 予混合燃焼的な火炎伝ばによって形成されたと考えられる。次に, その形状を抽出するために, 図3に示されるような二値化処理の後に連続噴霧流の境界抽出を行うと, 図4を得る。二値化処理手法については文献(10)に詳述してあるが, 本実験においては撮影画像のコントラストが高く保たれるように撮影領域を限定して実験を行ったため, 噴霧境界と背景領域の境界がはっきりしており, 二値化処理に関する誤差はほとんど無視できる程度である。そして二値化処理をランダム撮影された 600 枚の噴霧断面像について行い, それらを重ね合わせると図5のような画像が得

Fig.2 Instantaneous spray images measured at $h = 5 \sim 75\text{ mm}$

Fig.3 Binarized images

Fig.4 Extracted spray boundary images

Fig.5 Overlapped image of spray boundary

Fig. 6 Measured flowfield of the premixed-spray

られる。なお重ね合わせ画像には 11×11 メディアンフィルタ処理⁽¹¹⁾を施してある。すなわち、この画像の各ピクセルの輝度値は、時間平均的に見た連続噴霧流の境界の存在頻度を表している。ここで 600 枚の画像は、時間的にまったく連続していない画像（ランダム）画像を解析対象にする必要がある。つまり、バーナポートより連続的に存在している噴霧流の境界の重ね合わせ、時間平均的に見た連続噴霧流の境界の存在頻度を求める際には、前報⁽¹⁾で示したような連続画像では、撮影時間が非常に短いために、現象の統計的平均を導出するには向かないからである。

図5の画像を用いて、予混合噴霧火炎中での伝ば火炎速度を連続噴霧流の消失速度として導出する。すなわち、画像中の連続噴霧流の平均境界位置を求め、三角法の適用を試みるが、三角法を適用する際には、噴霧流場の流れ場に関する計測が必要となる。そのため、予混合噴霧の流れ場および噴霧特性を調べるために、位相ドップラ流速計による計測を行った。

3.1.2 位相ドップラ流速計による噴霧流場の計測

図6に予混合噴霧火炎中における油滴の二次元平均速度ベクトルの計測結果を示す。一次元位相ドップラ流速計を用いた二次元速度場の導出については、参考文献(12)に詳述されているのでここでは、省略する。図6に示すように、油滴は外部空気との間のせん断による影響も比較的少なく、外周部を除いて、ほぼバーナ中心軸に平行に約 7.0 m/s で飛行していることがわかる。図7に $r=15$ mm における、油滴粒径 D と粒径ごとのバーナ軸方向速度の平均値 $V_h(D)$ の関係を示す。図中、(a) $h=25$ mm, (b) $h=75$ mm はそれぞれバーナ高さ方向の計測位置を示している。ま

Fig. 7 Size-classified axial mean and rms velocity of droplets ($r = 15$ mm)

た、図中の縦方向の線分は $V_h(D)$ の時間平均値（●印で表示）を中心に $V'_h(D)$ （軸方向速度変動の rms 値）を示している。通常、燃焼炉などの噴霧火炎中では、油滴粒径によって飛行履歴が異なるため⁽¹³⁾、粒径別速度ベクトルを導出する必要がある。その図から、本実験においては、どの位置においても粒径による速度差は小さく、油滴全体から算出した平均速度ベクトルが、流れ場全体の特性を表現していることがわかる。このことは、“予混合噴霧”の条件が実現されていることを表している。

噴霧火炎中での燃焼特性は、噴霧の粒度分布に大きく影響される。すなわち、Burgoyen と Cohen⁽¹⁴⁾や小笠原と水谷⁽¹⁵⁾は、 $10 \mu\text{m}$ 以下の油滴は、その燃焼過程、特に伝ば火炎としての挙動について、ガス燃料と同様の振る舞いを示すと考察している。図8に予混合噴霧火炎中における噴霧の粒度数密度分布⁽¹⁶⁾の軸方向変化を示す。本実験条件の下では、ザウテル平均粒径は $30 \mu\text{m}$ 程度であり、下流に行くにしたがってやや増加する傾向が確認された。このことは粒度分布形状の変化にも現れており、下流に行くにつれて、小粒径の油滴の存在確率が減少していることがわかる。これは、小粒径のものほど、蒸発および燃焼によって消滅する油滴が多いことを示唆している。

Fig. 8 Number density size distribution of the premixed-spray

Fig.9 Definition of the speed of propagating flame

3.1.3 伝ば火炎速度の導出 噴霧断面像から求めた連続噴霧流の境界位置と、位相ドップラ計測による流れ場計測結果を用いて、三角法を適用する。図9に示すように連続噴霧流の境界と予混合噴霧流場のなす角 θ は 16.5° と求められる。この時、噴霧境界位置における油滴の平均速度 U は 7.0 m/s であるため、伝ば火炎の速度 S は 2.0 m/s と求められる。ここで注意しなければならないのは、この値は噴霧火炎中における伝ば火炎速度の平均値であるということである。すなわち、図4のように噴霧境界の位置が変動していることからわかるように、噴霧火炎中での伝ば火炎速度もまた、時間的・空間的に変動している。このような噴霧火炎中の伝ば火炎速度の変

動がどのような機構で起こるのかは明らかではないが、噴霧の時間的・空間的な不均一性に関係していると考えられる。このことは、噴霧特性の変動と伝ば火炎の速度変動をあわせて議論する必要があることを示唆している。

次節では、これら予混合的な火炎伝ばを経て形成される油滴クラスターの消失速度の導出を試みる。

3.2 予混合噴霧火炎中の油滴クラスター消失速度

前節で述べたように、予混合噴霧火炎中では、連続噴霧流が火炎伝ばによって消失する一方で、残存する一部の噴霧流が油滴クラスターを形成し、下流域においてゆっくりと燃焼する。前節では、伝ば火炎速度の導出を試みたが、ここでは、下流域における油滴クラスターの消失速度を画像処理解析から求める。図10(a)に撮影領域 $h=125\sim 195\text{ mm}$ における噴霧断面連続像の一例を示す。撮影はフレームレート 9000 駒/s で行い、ここで画像は8駒おきに並べてある。いま、画像中四角で囲んだ油滴クラスターの消失速度の時間変化を求める。まず、着目している油滴クラスターの断面積 S を求めるために、撮影画像の二値化処理を行い、図10(b)を得る。そして解析対象とした油滴クラスターが次の撮影画像中でどの位置に移動したかを、画像相関法によって計算する⁽¹⁷⁾。ここで、二画像間における油滴クラスターの同定は、画像間で油滴クラスターがおおよそ2 pixel程度しか移動せず、形状変

(c) Variation of cross-sectional and disappearance speed of droplet cluster

Fig.10 Image processing procedure to obtain disappearance speed of droplet cluster

Fig.11 Probability distribution of disappearance speed

化も少ないため、比較的容易に計算される。そして油滴クラスターの断面積 S_i の変化量と、周囲長 ℓ_i から消失速度 ω_i が次式により計算される。

$$\omega_i = \frac{S_i - S_{i+1}}{\ell_i \cdot \Delta t} \quad (1)$$

ここで、 S_i と S_{i+1} は、それぞれ連続した i 番目と $i+1$ 番目の画像における油滴クラスターの断面積、 Δt は二画像間の時間差で 1/9000(s) である。図 10(c) はこのようにして求められた画像中四角で囲んだ油滴クラスターの断面積 S_i 、および消失速度 ω_i の時間変化を示したものである。撮影画像からもわかるように、この油滴クラスターは下流方向に移動しながら、周辺部より次第に消失している。ここで画像処理解析の結果、求められた油滴クラスターの消失速度は、約 0.4 m/s を中心に変動しており、この油滴クラスターの消失速度の平均値 $\bar{\omega}$ は 0.40 m/s であることがわかる。

このような画像処理解析を、噴霧断面画像中の全ての油滴クラスターに施し、油滴クラスターの消失速度の分布を求めると、図 11 のようになる。これより、油滴クラスターは平均的にみると、約 0.45 m/s の速度で消失していることがわかる。また計算された消失速度は 1.5 m/s まで広い範囲にわたっている。このことは、各油滴クラスターの特性の違い、すなわち、各油滴クラスターごとの油滴数密度、粒度分布、蒸気濃度分布、雰囲気酸素濃度、雰囲気温度等の違いに起因していると考えられる。いずれにしても、先に導出した噴霧火炎中の伝ば火炎速度との違いは明らかであり、噴霧火炎中の油滴の消失過程に関して、火炎伝ばによる消失と、油滴クラスターとしての消失を区別して考える必要があることがわかる。

3.3 予混合噴霧火炎と予混合ブンゼン火炎の相似性

このような、噴霧火炎中の伝ば火炎と油滴クラスターの燃焼を、過濃予混合ブンゼン火炎と比較して考えると

非常に興味深い。すなわち、当量比 1 以上の過濃予混合ブンゼン火炎においては、図 12(a) に示すように予混合火炎伝ばによる内炎と、拡散燃焼による外炎が存在している。一方、予混合噴霧火炎は、バーナポートより連続的に存在している噴霧流が予混合燃焼的な火炎伝ばによって分断され、油滴クラスターが形成される。そして、個々の油滴クラスターは拡散燃焼的にその外縁部から消失していく。すなわち、前項で指摘したように、時間平均的な伝ば火炎面が予混合噴霧火炎中にも存在し、その火炎面を通過した過濃な油滴クラスターが、下流域において反応し、消失していつていると考えることができる。予混合噴霧火炎中において形成されるある瞬間の伝ば火炎が、予混合ガス火炎の内炎のように空間的に連続な面としての構造を持つかどうかは明らかではないが、ここでは図 12(b) のように、予混合噴霧火炎中における時間平均的な伝ば火炎面を、過濃予混合ブンゼン火炎における予混合燃焼域（内炎）として、さらに伝ば火炎後流域の油滴クラスターの燃焼領域を予混合ブンゼン火炎中の拡散燃焼域（外炎）に対応させて考えることができる。前述のように、油滴クラスターの拡散燃焼域では、予混合ブンゼン火炎のように空間的に一様かつ連続な拡散火炎面は存在せず、空間的に散在する拡散燃焼片の集合体であり、そのまま予混合ブンゼン火炎の拡散火炎面（外炎）のようには考えられないが、予混合的、拡散的といった巨視的観点から考察すると、予混合噴霧火炎は過濃予混

Fig.12 Comparison of a premixed-spray flame to a premixed gaseous flame

合ブンゼン火炎と似通った構造を呈していることになる。

一方、予混合噴霧火炎と過濃予混合ブンゼン火炎の決定的な性質の違いも忘れてはならない。すなわち、過濃予混合ブンゼン火炎は均質であり、予混合噴霧火炎は時間的・空間的にも不均質である、ということである。予混合噴霧火炎の時間・空間的不均質性については、連続噴霧流の境界位置の変動および空間的に散在する油滴クラスターとして観察された。また本実験で用いた予混合噴霧火炎は水素の環状パイロットバーナにより保炎されており、予混合噴霧単体としての保炎性は、バーナリムによって保炎がなされる予混合ガス火炎に比べて、劣っていることから、ガス火炎のような空間的に繋がった伝ば火炎面が常に形成されているとは考えにくい。すなわち、予混合噴霧中の燃焼しやすい領域において伝ば火炎が形成されており、その一方で、燃焼しにくい部分については、局所的に消炎していることが予想される。また、本実験における予混合噴霧は当量比に換算すると約0.75であることから、気体燃焼においては外炎が形成される範囲にはない。しかし、予混合噴霧においては局所的に噴霧の濃淡が存在し、それとともなって、局所当量比も供給当量比を中心に変化している。そのため、火炎伝ば速度も局所的に変動し、一部噴霧流は油滴クラスターとして残存する。これらを明らかにするためには、時間的・空間的変動をも考慮に入れた、さらなる実験的研究が必要である。

4. 結 言

噴霧火炎中の二重火炎構造に着目し、予混合噴霧火炎中の伝ば火炎速度と油滴クラスターの消失速度を導出するために、噴霧断面像および位相ドップラ計測を行い、以下の知見を得た。

- (1) 予混合噴霧火炎中の火炎伝ば速度を、噴霧断面像から得られる噴霧流境界の平均位置および位相ドップラ計測による油滴速度から導出し、その有用性を示した。
- (2) 予混合噴霧流中の伝ば火炎速度は、時間的・空間的に変動しているが、本実験条件においては平均すると約2.0m/sであった。
- (3) 予混合噴霧火炎中の油滴クラスターの消失速度を、噴霧断面連続像の画像処理解析から計算した。その結果、本実験条件の範囲において、時間的・空間的に変化するものの、平均すると約0.45m/sであった。
- (4) 予混合噴霧火炎中において、伝ば火炎速度と油滴クラスターの消失速度は異なっており、それぞれに区別して考える必要がある。

終わりに、研究費の一部を文部省科学研究費補助金に

よったことを記し、謝意を表する。また快く計測機材を貸与された日立造船株式会社技術・開発本部技術研究所機械システム研究室 岡崎泰英氏に謝意を表する。

文 献

- (1) 津島・他3名, 機論, **66**-648B(2000), 2227.
- (2) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., 18th Symp. (Int.) on Combust., (1981), 321, The Combust. Inst.
- (3) 水谷, 西本, 機論, **38**-311(1972), 1844.
- (4) Polymeropoulos, C. E. and Das, S., Combust. Flame, **25**(1975), 247.
- (5) 中部・他2名, 機論, **53**-486B(1987), 636.
- (6) Williams, F. A., Combustion Theory Second Edition, (1985), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (7) Greenberg, J. B.・他2名, Combust. Flame, **104**(1996), 358.
- (8) 赤松・他3名, 機論, **60**-577B(1994), 3172.
- (9) Pitcher, G.・他2名, 5th Symp. (Int.) on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (1990), 14.4.
- (10) 津島, 大阪大学博士論文, (1999).
- (11) 河田, 南編著, 科学計測のための画像データ処理, (1994), CQ出版社.
- (12) 赤松・他4名, 高温学会誌, **20**-5(1994), 195.
- (13) 栗原・他2名, 機論, **61**-582B(1995), 759.
- (14) Burgoyne, J. H. and Cohen, L., Proc. Roy. Soc. Lond. A, **225**(1954), 375.
- (15) 小笠原, 水谷, 機論, **31**-226(1965), 1002.
- (16) 若林, 大阪大学博士論文, (1997).
- (17) 植村・他2名, 可視化情報, **10**-38(1990), 58.