



Title	噴霧火炎の巨視的燃焼挙動と光学計測に関する研究
Author(s)	津島, 将司
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155065
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博 士 論 文

噴霧火炎の巨視的燃焼挙動と
光学計測に関する研究

平成10年11月

津 島 将 司

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 本研究の対象.....	1
1.2 従来の研究.....	3
1.2.1 噴霧火炎構造に関する研究の分類.....	3
1.2.2 単滴および液滴列の燃焼に関する研究.....	3
1.2.3 噴霧流（予混合噴霧）および噴流型噴霧の燃焼に 関する研究.....	4
1.3 本研究の位置づけと目的.....	10
1.4 本論分の概要と構成.....	11
1.5 参考文献.....	13
第 2 章 位相ドップラ計測における火炎の影響	23
2.1 緒言.....	23
2.2 実験装置および方法.....	24
2.2.1 実験装置.....	24
2.2.2 ブンゼンバーナおよび温度計測装置.....	25
2.3 実験結果および考察.....	26
2.3.1 光路上の火炎の影響.....	26
2.3.2 レーザ出力の影響.....	30
2.3.3 火炎の大きさの影響.....	30
2.4 結言.....	31
2.5 参考文献.....	31
第 3 章 光学式受光プローブの実験的性能評価	42
3.1 緒言.....	42
3.2 Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics(MICRO)の構成	43
3.3 層流予混合ブンゼン火炎を用いた検証.....	44
3.4 乱流予混合ブンゼン火炎を用いた検証.....	45
3.5 予混合噴霧火炎を用いた検証.....	46
3.6 結言.....	47
3.7 参考文献.....	47
第 4 章 予混合噴霧火炎の巨視的火炎構造の観察	54
4.1 緒言.....	54

4.2	実験装置および方法	55
4.2.1	実験装置の概略	55
4.2.2	予混合噴霧バーナ	55
4.2.3	噴霧断面像撮影の光学系	56
4.2.4	局所発光計測の光学系	57
4.2.5	信号処理系	59
4.3	実験結果および考察	59
4.3.1	噴霧断面像の撮影	59
4.3.2	噴霧断面像と局所領域からの発光信号の 同時時系列計測	60
4.4	結言	63
4.5	参考文献	63

第5章	予混合噴霧火炎中の火炎伝ば速度と 油滴クラスター消失速度	71
5.1	緒言	71
5.2	実験装置および方法	72
5.2.1	実験装置の概略	72
5.2.2	画像処理装置	73
5.2.3	二値化処理	73
5.3	実験結果および考察	74
5.3.1	予混合噴霧火炎中の火炎伝ば速度	74
5.3.2	予混合噴霧火炎中の油滴クラスターの消失速度	76
5.4	結言	78
5.5	参考文献	78

第6章	予混合噴霧火炎の燃焼挙動に 及ぼす噴霧特性の影響	87
6.1	緒言	87
6.2	実験装置および方法	88
6.2.1	実験装置の概略	88
6.3	実験結果および考察	88
6.3.1	霧化圧力の違いによる噴霧特性と火炎形状の変化	88
6.3.2	噴霧特性の違いが火炎の伝ば速度に及ぼす影響	89
6.3.3	噴霧境界と燃焼反応領域の関係	90
6.4	結言	92

6.5	参考文献.....	93
第7章	火花点火球形噴霧火炎中の火炎伝ば挙動の観察.....	101
7.1	緒言.....	101
7.2	実験装置および方法.....	102
7.2.1	実験装置の概略.....	102
7.2.2	OH ラジカル自発光像および隣接二値点からの 発光信号検出の光学系.....	102
7.3	実験結果および考察.....	103
7.3.1	自由落下噴霧の特性.....	103
7.3.2	球形噴霧火炎の直接高速度撮影.....	104
7.3.3	OH ラジカル自発光像と局所 OH ラジカル自発光の 同時時系列計測および球形火炎の伝ば速度の導出.....	104
7.4	結言.....	106
7.5	参考文献.....	106
第8章	結論.....	111
	関連発表論文.....	115
謝 辞	118

第1章 緒論

1.1 本研究の対象

噴霧燃焼は工業的に広く用いられており、エネルギー問題の観点からも、より高効率かつクリーンな燃焼技術の開発が不可欠である。そのためには、噴霧現象を基礎から解明し、噴霧特性と燃焼機構の関係を系統的に整理することが必要であり、それが実現してはじめて噴霧火炎の本質を捉えたモデルの構築が可能となる。

現在、工業的に用いられる噴霧火炎は、各種工業炉、液体燃料ロケットエンジン、ガスタービン燃焼器に代表される定常場から、ディーゼル機関のような非定常場まで、その応用範囲は多岐にわたっている^(1, 2)。液体燃料を無数の微細な油滴に微粒化し、表面積を広げるとともに、空気との混合をよくして燃焼させる⁽³⁾、というのが噴霧燃焼の基礎的機構である。

工業炉を例にとると、図 1-1 に示すように液体燃料は、噴霧器による微粒化、周囲空気との混合、蒸発、燃焼という過程を経る。ここで、それらの素過程はそれぞれに独立した現象ではなく、互いに複雑に影響を及ぼしあう。従来の研究においては、そのような現象の複雑さを極力排除するために、素過程に含まれる現象をさらに細分化して抽出し、それぞれの基礎的現象を支配する多くの影響因子について考察が加えられてきた。

液体燃料の微粒化に関しては、液体の分裂機構に関して数多くの研究がなされ⁽⁴⁻⁹⁾、現在では噴霧器内部流れの影響なども考察されている⁽¹⁰⁻¹²⁾。また、噴霧器内部形状や霧化条件が噴霧特性に与える影響についても研究が進められており^(13, 14)、抜山・棚澤ら⁽¹⁵⁻¹⁹⁾の研究に代表される噴霧の粒径分布の定式化などに関する研究⁽²⁰⁻²⁴⁾も現在までに数多く見られる。しかし、全ての噴霧器の微粒化特性を統一的に記述する手法はいまだ確立されていない。

微粒化ののちに形成される噴霧と周囲空気との混合は、噴霧の運動や粒子の分散の問題として扱われ、古くから多くの研究が行われてきた⁽²⁵⁻²⁷⁾。近年、粒子の熱泳動効果に着目した研究⁽²⁸⁻³⁰⁾も幾つか見られるが、通常、粒子がコルモゴロ

フスケール(Kolmogorov microscale)よりも大きいときは、分子運動論中に展開されるような熱や物質の勾配による拡散よりも、乱流渦との相互干渉による粒子の分散が支配的であるとされる。Brown と Roshoko⁽³¹⁾はせん断混合層における実験的研究から、大規模組織構造(large-scale structures)によって自由せん断流(free shear flow)が特徴づけられることを指摘し、Crowe ら⁽³²⁾は粒子の流れに対する追従性を示す指標として、流れの時間的な変動に対する粒子の特性時間の比から、Stokes 数(Stokes number)を定義した。現在、その有意性は広く認められている。Kenning と Crowe⁽³³⁾は、さらに粒子の添加による流れ場中の乱れの生成および消滅を表す指標として、粒子径と乱れの積分スケール(Integral length scale)の比を用いた解析を行った。また、Eaton⁽³⁴⁾らは近年、乱流渦中の粒子には選択的に集中する(preferential concentration)作用が働くことを指摘している。これら乱流渦と粒子、および粒子間の相互干渉の問題は、実用燃焼器中においては、保炎器後流の循環流領域における大規模渦と燃料液滴との相互干渉作用および噴霧の分散挙動として顕在化され、それらは蒸発過程にも影響を与え、形成される噴霧火炎挙動に関して重要な役割を示す。

噴霧の蒸発過程については、燃料液滴からの燃料蒸気相の生成過程および周囲空気との混合による混合気の形成過程が問題とされる。さらに近年、油滴群としての振る舞いも議論の対象に取り上げられている^(35, 36)が、いまだ十分な説明はなされていない。蒸発過程は混合気の着火過程に密接に関係し、その後の燃焼過程に結びつくことから、併せて噴霧火炎構造として研究対象となることが多い。従来までに行われた研究については後章で詳述していくこととし、ここでは蒸発および燃焼を含んだ噴霧燃焼全般に関する研究解説(review)を概説するにとどめる。単一液滴や液滴列の蒸発、燃焼については Law⁽³⁷⁾や Annamalai and Ryan⁽³⁸⁾に詳しく、Sirignano⁽³⁹⁾は高温雰囲気中での油滴および油滴群の蒸発と燃焼に関して理論的な解説を行っている。また Umemura⁽⁴⁰⁾は干渉する油滴の蒸発、燃焼を漸近解法を用いて解析し、Faeth^(41, 42)、Williams⁽⁴³⁾、Chigier⁽⁴⁴⁾らはそれぞれ噴霧燃焼全般に対する解説を行っている。

本研究で対象とするのは、噴霧火炎中における液体燃料噴霧の燃焼挙動であり、先の噴霧燃焼を構成する素過程から分類すると、噴霧の蒸発および燃焼過程に着目したものである。つまり、図 1-1 に示される実用燃焼器を例にとると、本来、乱れや循環的作用によって複雑化している噴霧燃焼過程のなかから、微粒化過程や噴霧の分散過程の影響を極力排除し、蒸発過程および燃焼過程、すなわち、噴霧火炎の基礎的構造を解明せんと試みるものである。以下では、まずこの範疇に属するこれまでの研究について述べ、さらに本研究の位置づけと目的および本論分の構成を示していく。

1.2 従来の研究

1.2.1 噴霧火炎構造に関する研究の分類

噴霧火炎構造に関する研究は、大別すると 1)実験的解析, 2)理論・数値的解析, 3)計測手法の開発・適用, の三つに分けられる。これらは互いに相互補完的關係にある。すなわち, 実験にはなんらかの計測手法の適用が不可欠であり, 現象をより高時間・高空間分解能で捉え, 未知のベクトル量およびスカラー量を求めるためにより高度な計測技術の開発・適用が要求される。そして得られた実験的知見はあらたな実験仮説(model)として数値解析モデルに組み込まれる。一方, 理論・数値解析においては, 実験では観察しえない微細な現象までも解析対象とすることが可能であり, 対象とする現象のあらたな理解・解釈を促す。また計測された実験データは数値解析結果と照らし合わされるので, 実験データの信頼性を議論する上で計測法に関する知識が必要となる。その意味では, 計測法と数値解析もまた密接に関わりあっている。これらのことを踏まえ, 以下では, 従来までに行われた噴霧燃焼研究に関して述べていく。

初期の噴霧燃焼研究の成果は Lewis and von Elbe の教科書⁽⁴⁵⁾, ならびに Barnett and Hibbard の展望⁽⁴⁶⁾に集約されている。噴霧燃焼研究の原点は単滴燃焼に関する研究にあり, それから液滴列燃焼の実験的および理論的・数値解析的研究, 油滴群燃焼仮説, 均一粒径油滴群の燃焼実験とモデリング, 予混合噴霧の燃焼実験, 噴流型噴霧の燃焼実験とモデリング, 対向流噴霧火炎の実験と理論および数値解析にわたる研究, という順序で発展してきたといえる⁽⁴⁷⁾。それぞれは現在も研究が進められており, やはりお互いに相互補完的關係にある。

1.2.2 単滴および液滴列の燃焼に関する研究

単滴燃焼に関する研究はいまでも活発に進められている。Williams⁽⁴⁸⁾のまとめに従えば, 単一滴燃焼実験は液滴の保持の手法により 1)多孔質球を用いる方法, 2)懸垂液滴, 3)落下液滴に分類される。近年は, 重力場における火炎形状の変形を避けるために微小重力環境における実験も行われている⁽⁴⁹⁻⁵⁴⁾。また理論解析も数多く発表されており, 油滴内部の流動を考慮したものもある⁽⁵⁵⁾。これらいずれもが液滴の蒸発, 着火および燃焼といった諸過程にたいして最も基礎的な方向からの解明を試みるものである。現在, 広く受け入れられている油滴の蒸発・燃焼モデルに, 単一滴の蒸発・燃焼実験から得られた d^2 則(*d-square law*)モデルがある⁽⁴⁸⁾。これは油滴径 d の燃料液滴は蒸発開始後, d^2 が直線的に減少し, 消滅するというモデルであり, 次式で表される。

$$d^2 - d_0^2 = K\Delta t \quad (1.1)$$

ここで, d_0 は初期油滴直径, Δt は経過時間であり, K は油滴の状態によって, 蒸発速度定数にも燃焼速度定数にも置き換えられる。このモデルは単一滴の

燃焼実験結果とよく一致するが、現実の噴霧燃焼場における油滴間の干渉作用や、液滴周囲空間での燃料蒸気の蓄積作用などが考慮されていない。そのため、Law⁽³⁷⁾らは d^2 則は適用範囲が限られていることを指摘している。

単滴燃焼と噴霧燃焼をつなぐものとして液滴列を用いた実験も数多く行われている。それらのいずれもが、複数個の燃料液滴の干渉作用に着目した研究であり、油滴径や油滴間距離、さらに油滴の空間的配置などに関して考察が加えられている⁽⁵⁶⁻⁶⁰⁾。液滴列における蒸発・燃焼率は、単滴の場合のそれとは異なることから、単滴燃焼場での蒸発・燃焼率と比較した補正係数(correction factor)を導入した評価がしばしば用いられる⁽³⁸⁾。しかし、補正係数の値は油滴径や油滴成分、さらに油滴の空間的配置によって変化することが指摘されており、実用噴霧燃焼場においては、粒径の異なる油滴が様々な距離や配置をとりながら存在していることを考慮すると、液滴列燃焼と噴霧燃焼との間には隔たりが存在するといわざるを得ない。

1.2.3 噴霧流（予混合噴霧）および噴流型噴霧の燃焼に関する研究

上述のような単滴・液滴列燃焼では模擬できない噴霧火炎固有の構造、すなわち、噴霧の粒度分布や数密度の空間的・時間的不均一性を再現するために、噴霧流（予混合噴霧）や対向流噴霧、および噴流型噴霧が用いられる。

Burgoyne と Cohen⁽⁶¹⁾は噴霧流の平均粒径が火炎伝ば挙動におよぼす影響を調べるために、テトラリン(Tetralin, $C_{10}H_{12}$)の均一粒径油滴群を鉛直ガラス管内に落下させ、油滴群中を上方に伝ばする火炎を実験的に観察した。その結果、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の油滴群は気体燃料の予混合気と同様の燃焼形態をとり、粒径が $40\mu\text{m}$ 以上になると油滴が個々に燃焼して、不連続的な火炎伝ばが生じ、 $10\sim 40\mu\text{m}$ の油滴群では両者の混在した様相を呈することを報告している。また、小笠原と水谷ら⁽⁶²⁻⁶⁴⁾も Burgoyne らと同様の実験を、より粒径範囲を拡げて行い、理論解析結果とあわせた考察から、粒径によって着火にいたるまでの蒸発量が違うことが、火炎伝ばの連続性の違いとなって現れてくると結論づけている。しかし、いずれの実験も噴霧流中での伝ば火炎の構造に関しては、可視領域(visible bands)における直接写真(direct photograph)および影写真(shadowgraph)を用いた観察に基づいており、燃焼反応領域を特定できているかどうかについては不確定であり、より詳細な観察が必要とされる。

また、Ballal と Lefebvre⁽⁶⁵⁾も同様の実験を微小重力環境下で行い、オクタン(iso-octane, C_8H_{18})、ディーゼル油(diesel oil)、重油(heavy oil)のそれぞれについて燃焼速度式を導出している。しかし提案された実験式には、粒度分布や噴霧数密度の影響が考慮されていないなどの問題点が残されている。

噴霧火炎の燃焼速度は、多くの研究者によって計測が行われている⁽⁶⁶⁻⁷⁰⁾。水谷

ら^(66, 67)は、微粒化の完了した油滴を空気中に浮遊させて油滴と周囲空気との速度差(Slip velocity)をできるだけ抑えた二相流である予混合噴霧を燃焼研究に導入し、予混合噴霧火炎前縁の挙動を時間平均的に観察し、見かけの燃焼速度を導出している。Polymeropoulos と Das⁽⁶⁸⁾も同様に予混合噴霧を用い、噴霧の平均粒径の変化による燃焼速度の違いについて考察を加えている。その結果、燃焼速度が最大値をとる微粒化条件があることを示し、霧化の促進に伴って火炎が青色を呈し、予混合的な火炎が形成される様子を観察した。予混合噴霧は、微粒化過程が完了し、油滴と周囲空気との速度差が抑えられていることから、噴霧火炎中の基礎的燃焼挙動を観察するのに適しており、その後、中部ら⁽⁷¹⁻⁷³⁾は同様の予混合噴霧で燃料として白灯油(kerosene)とプロパン(propane, C_3H_8)を用いた気液混焼火炎での燃焼速度と火炎構造について詳細な観察を行っている。

しかし、いずれの実験的研究においても、噴霧火炎の燃焼速度は時間平均的に扱われており、その変動は考慮されていない。このことは、噴霧が時間的・空間的に不均一な構造をとることから考えると不十分であり、噴霧特性の変動と燃焼速度の変動をあわせて議論する必要がある。さらに、噴霧火炎中に予混合的な燃焼と拡散的燃焼が共存していることを考慮する必要があると思われる。ここでの予混合的な燃焼とは、噴霧中での火炎伝ば現象をさしており、予混合ガス火炎中での火炎伝ば現象と対応させて、このように表現するものである。一方、拡散的燃焼とは、ガス拡散火炎に見られるような物質および温度拡散が支配的となる燃焼形態のことであり、噴霧火炎中においては燃料蒸気および酸素の拡散現象が律則となる燃焼形態を意味している。

理論・数値解析の分野においては、Williams ら⁽⁴⁸⁾が噴霧火炎の不均一性を考慮し、噴霧流中での予混合的な火炎伝ばと個々の油滴周囲での拡散燃焼を組み入れたモデルを提案している。すなわち、図 1-2 に示すように、蒸発領域で形成された燃料蒸気は酸素と混合して予混合気となり、均質燃焼(homogeneous combustion)域で反応する。ここで均質燃焼域とは、燃焼反応が個々の油滴とは関係なく進行する領域、つまり、個々の油滴は燃料蒸気の供給源として振る舞うだけであり、蒸発後の燃料蒸気が周囲の酸素と混合して、均質な予混合気を形成し、燃焼する領域を意味している。その意味で、均質燃焼域は噴霧火炎中における予混合的な燃焼領域を表現しているといえる。ここで、液体燃料の揮発性が非常に高く、油滴径も十分に小さい場合には、蒸発および酸素との混合は反応領域に達するまでに完了するため、均質燃焼が噴霧火炎構造を支配することになる。すなわちこの場合、噴霧燃焼でありながら気体燃焼と類似の形態をとることになる。後述するが、対向流型噴霧を用いた実験的研究の多くが、このような火炎を対象としている。しかし通常、油滴の蒸発および酸素との混合は、油滴が反応領域に達するまでに完了してはいない。そのため、蒸発の完了

しなかった個々の油滴は、均質燃焼域に到達し着火後、油滴周囲に拡散炎を伴いながら個々に燃焼する。このような油滴個々が燃焼する領域は不均質燃焼 (heterogeneous combustion) 域と呼ばれている。実際の噴霧火炎中では、予混合的特性を有する均質燃焼域と拡散的特性を有する不均質燃焼域が共存しており、時間・空間的な噴霧特性の変動と関わりあいながら、その燃焼特性を変化させていると考えるのが妥当である。噴霧火炎中にこのような特性の異なる燃焼形態が共存しているとすれば、各々の燃焼過程から排出される廃棄物特性は当然異なるはずであり、その双方の燃焼特性を組み入れた噴霧燃焼モデルの構築が必要不可欠である。その点から考えると、Crowe⁽⁷⁴⁾らによって提唱され、現在、噴霧燃焼解析に広く用いられている PSI-cell モデルは、油滴の個々の挙動のみに着目しており、不十分であるといわざるをえない。

しかし、このような噴霧火炎構造の多様性（ここでは均質燃焼と不均質燃焼を内包するという意味）に関する実験的知見はきわめて少ない。これは噴霧火炎は反応性二相流であるため、長く計測が困難であるとされてきたことに起因する。さらに、実用燃焼器内での現象はあまりに複雑であり、実験的研究においては、火炎構造の議論をする以前に、どのようにすれば、実用燃焼器内での噴霧火炎構造を損なうことなく抽出し、観察対象となしえるのか、という問題が長く残されていたためである。その回答の一つが、前述のように水谷らによって導入された予混合噴霧である。しかし、予混合噴霧火炎においては火炎は定在しておらず、そのため詳細な火炎構造の観察対象とするには向かない。そこで、噴霧火炎構造の抽出および詳細な観察に適する実験対象として、対向流噴霧が、やはり水谷らによって噴霧燃焼研究に取り入れられた⁽⁷⁵⁾。しかし、当時の計測技術の未熟さから火炎構造の詳細を議論する段階には達しなかった。

その後のレーザ計測技術の急速な発展により、現在では噴霧火炎構造が明らかにされつつある。なかでも位相ドップラ法(phase-Doppler technique)⁽⁷⁶⁾により、空間中を飛行する液滴の速度および粒径に関する計測技術が確立され、噴霧断面像(laser tomography)の可視化やレーザ誘起蛍光法(laser induced fluorescence)が噴霧火炎に適用されるようになってからは^(77, 78)、対向流噴霧のみならず、噴流型噴霧火炎においても多くの実験的知見が得られている⁽⁷⁹⁻⁸⁷⁾。

対向流噴霧を用いた実験的研究として、Chen と Gomez^(68, 89)の行った一連の研究が挙げられる。Chen と Gomez は静電気力を利用して、狭分散かつ平均粒径を変化させるとことができる層流噴霧を形成し⁽⁸⁸⁾、ヘプタン(heptane, C_7H_{16})噴霧-窒素の予混合噴霧を酸素流に対向させて保持される対向流噴霧火炎について位相ドップラ計測を行い、伸長率を変化させて実験を行った。その結果、低伸長率火炎では、ヘプタン噴霧は火炎に到達する前に蒸発を完了するため火炎は薄く、青色を呈し、気体燃焼と同様の燃焼挙動を示した。一方、高伸長率火炎で

は油滴が火炎到達後も存在するため、火炎後流においてすすの発生による輝度の高い火炎が観察されたとしている⁽⁸⁹⁾。この両者の違いは、予混合的燃焼と拡散的燃焼の違いであると解釈される。

Li ら⁽⁹⁰⁻⁹³⁾は同じく対向流噴霧を用いて、非燃焼時と燃焼時のそれぞれの条件で位相ドップラ法を適用し、実験結果と数値解析結果を比較している。さらに Li と Williams⁽⁹²⁾は供給当量比 1.6~3.0 という過濃メタノール(methanol, CH₃OH)–空気の予混合噴霧流と空気流を対向させて形成した噴霧火炎中において、予混合的燃焼と拡散的燃焼が実験的に観察されたことを報告している。これを彼らは噴霧二重燃焼(spray two-stage flame)と呼んでおり、予混合燃焼は燃料供給ポート側に形成される。一方、拡散燃焼は供給当量比が過濃側で設定されていることから、対向空気流側に形成される。このような噴霧火炎の二重構造は、Continillo と Sirignano⁽⁹⁴⁾によって、以前からも数値解析結果として報告されており、彼らはオクタン(n-octane, C₈H₁₈)と常温の空気からなる予混合噴霧流と常温の空気流によって安定化される対向流噴霧火炎において、二重燃焼構造が現れることを指摘している。その後、Gutheil と Sirignano⁽⁹⁵⁾は気体燃焼研究において近年、活発に行われている反応動力学計算⁽⁹⁶⁾を組み込んだ数値解析を行い、Chen と Gomez ら⁽⁸⁸⁾の実験結果と比較し、やはり同様に噴霧火炎中での二重燃焼構造を報告している。噴霧二重燃焼構造に関しては、噴流型噴霧燃焼を用いた Stepowski ら⁽⁹⁷⁾の実験でも観察されている。

Stepowski ら⁽⁹⁷⁻⁹⁹⁾は、同軸二流体噴射弁によって形成されるメタノール(methanol, CH₃OH)噴霧燃焼の燃焼基部における保燃機構を調べ、燃焼中の OH ラジカル像をレーザ誘起蛍光法を用いて観察した。その結果、メタノールのような揮発性の高い燃料では大規模組織構造(large-scale structure)による周囲空気流の流入(entrainment)が支配因子となっていることを見出し⁽⁹⁸⁾、噴流型燃焼は内部燃焼と外部燃焼からなる二重燃焼構造を呈することを示した⁽⁹⁷⁾。

一方、Greenberg ら⁽¹⁰⁰⁻¹⁰²⁾は、均質燃焼域と不均質燃焼域を組み合わせた噴霧燃焼モデルを提案し、彼らの提唱する噴霧粒径クラス別解析手法(sectional approach)⁽¹⁰²⁾とあわせて、多分散の層流予混合噴霧中での燃焼伝ば挙動を計算している。その中で、彼らは燃料蒸気が予混合気として燃焼する均質燃焼域を非常に薄いものと仮定し、燃料液滴は周囲気温度が着火温度以上でかつ周囲に酸素が存在する場合には、瞬間的に蒸発・反応するとしてモデルを構築している。このため、計算結果は油滴の着火温度の与え方によって大きく異なることが予想される。油滴の着火過程は、粒径分布および周囲気条件などの多くの影響因子と密接に関係するため複雑であり、これまで多くの実験・解析的研究が行われている⁽¹⁰³⁻¹⁰⁶⁾。数値解析の上でしばしば用いられる油滴の着火の判定基準としては Law ら⁽¹⁰⁷⁾の提唱している着火ダムケラ数(ignition Damköhler number)モデル

がある。これは油滴の雰囲気条件から着火のおこる実効半径位置を決定するモデルである。しかしこのモデルには、液滴相互間の干渉作用などは考慮されておらず、今後改良が必要と思われる。

噴霧火炎構造を予混合的・拡散的火炎の共存として扱う上記の手法に対して、油滴群としての燃焼挙動に着目したのは Chiu ら^(35,36)である。油滴群としての振る舞いは実験・解析の両分野において常に議論の必要性を指摘されながらも長く考察が加えられていなかった。

Chiu らは“油滴群燃焼”という概念を提唱し、均一粒径の油滴からなる球形の油滴群（油滴クラスター）について解析を行い、油滴群内部での燃料蒸気の発生率と油滴群内部への酸素の拡散速度の比として定義される群燃焼数 G によって、図 1-3 に示されるような、1)単滴燃焼、2)内部群燃焼、3)外部群燃焼、4)外殻燃焼、の4つの異なる燃焼形態に分類した。ここで群燃焼数 G は次式で定義されている。

$$G = 1.5Le(1+0.276Sc^{1/3}Re^{1/2})n_T^{2/3}(d/L) \quad (1.2)$$

ここで、 $Le (=Sc/Pr)$ はルイス数で Pr は空気のプラントル数、 Sc は燃料蒸気-空気系のシュミット数、 Re は油滴直径とスリップ速度を用いたレイノズル数、 n_T は油滴群に含まれる油滴総数、 d は単一滴直径、 L は平均油滴間距離である。

このような油滴の群燃焼挙動に関しては、Rangel と Continillo⁽¹⁰⁸⁾や、Bellan と Harstad^(109,110)が、乱流渦と油滴との相互作用を理論的に取り扱い、油滴クラスターの形成と群燃焼挙動との関係を論じようと試みている。また実験的研究としては、Driscoll と Pelaccio⁽¹¹¹⁾が噴流型火炎を形成し、火炎上流部では群燃焼がおこっていることを報告している。また Allen と Hanson⁽¹¹²⁾はヘプタン(n-heptane, C_7H_{16})噴霧火炎中の OH および CH ラジカル分布を平面レーザー誘起蛍光法(PLIF)を用いて可視化し、火炎前縁部において、油滴群を取り囲むように燃焼反応領域が存在し、群燃焼の形態をとっていることを示した。Stepowski ら⁽⁹⁷⁾も同様に PLIF 法によりメタノール噴霧火炎中の OH ラジカル分布を計測し、火炎上流部においては単滴燃焼が確認されなかったとしている。

Chen と Gomez^(113, 114)は先に述べた静電噴霧を用いて同軸噴流型のヘプタン層流噴霧火炎を形成し、通常重力場と微小重力場で実験を行っている。その結果、噴流上流部に蒸発領域が現れ、その下流部に燃焼領域が存在し、単滴燃焼はおこっていないことを報告している。

一方、赤松ら^(115,116)は予混合噴霧火炎中での油滴群燃焼挙動を、光学的計測手法を用いて詳細に観察し、油滴群燃焼数をはじめ実験的に導出することに成功した。その中で、群燃焼理論との比較、検討を行い、予混合噴霧火炎中では、内部群燃焼から外部群燃焼における領域にあることを示した。この赤松らの実験結果を受けて、Chiu ら⁽¹¹⁷⁾は油滴群燃焼の分類に改良を施し、ある特異な条件

においては、油滴群の内部で予混合的な火炎が形成され、外部で拡散的な火炎が保持されることを示した。しかし一連の Chiu らの解析においては、均一粒径油滴群を仮定しており、油滴群を高温雰囲気中に瞬間的にさらすとして初期条件を設定するなど、改良すべき点も指摘されている⁽¹¹⁸⁾。また、彼らの油滴群燃焼理論においても、油滴群中の油滴の蒸発率に関しては、先の Williams らの解析で見られるような単滴蒸発モデルを出発点としており、油滴間相互作用を考慮したモデルの必要性は明らかである。

しかし、Chiu らの提唱した群燃焼数は、油滴群の噴霧特性をある代表値を用いて記述し、燃焼挙動と関係づけたという点で画期的である。同様の実験的研究として Yule と Bolado⁽¹¹⁹⁾のものがある。彼らは同軸噴流型の重油噴霧火炎の燃焼形態を、直接に噴霧特性と関連づけるのではなく、蒸発特性スケールと周囲空気流入による混合気形成スケールの比から分類した。彼らの分類では、噴流型噴霧火炎は気体噴流拡散火炎と同様の構造をとることを前提としており、これら互いの火炎構造の相似性については、Onuma と Ogasawara⁽¹²⁰⁾によって実験的に示されている。Onuma と Ogasawara は灯油を燃料として形成される噴流型噴霧火炎が、燃料を灯油からプロパンに切り替えて形成される気体噴流火炎とほとんど同一の構造を持つことを実験的に明らかにした。噴霧火炎と気体噴流火炎の相似性に関しては様々な指摘があり⁽¹²¹⁾、時間平均的観察からではなく、時間的・空間的な不均一性を有する噴霧火炎の局所構造を考慮した更なる実験的知見が要求される。

その後、Jiang と Chiu⁽¹²²⁾は噴霧中の局所の燃焼特性を群燃焼数で代表させることで計算負荷を軽減させ、実用燃焼器内での油滴群燃焼挙動に関して数値解析を行っている。実用燃焼器内での火炎挙動は McDonell と Samuelsen⁽¹²³⁻¹²⁵⁾、Hardalupas ら⁽¹²⁶⁾や池田ら⁽¹²⁷⁻¹²⁹⁾によって示されたように非常に複雑であり、今後、Chiu らの提唱する群燃焼数のような、噴霧特性と燃焼挙動を関係づける代表値の実験的導出と裏付けが必要となる。

以上、述べてきたように、噴霧火炎構造に関する研究は数多く行われてきたが、特に実験的研究においては、噴霧火炎中の現象を時間平均的に捉えるものがほとんどである。そのため、噴霧火炎特有の性質である時間的・空間的不均一性が燃焼挙動にどのように影響を与えるのか、噴霧火炎中において予混合的燃焼火炎と拡散的燃焼火炎がどのように関わり合っているのか、また、噴霧火炎中での油滴群の燃焼挙動はどのようなものなのか、など疑問点は多く残されている。これらの問題を解明するためには、噴霧火炎中の燃焼現象を時間連続的に捉える必要がある。また、より多くの情報を得るためには、高度に統合された同時時系列計測システムを構築し、しかるべき実験対象に適用しなければならない。そこで本研究では、火炎発光計測、噴霧断面像計測や位相ドップラ法などの光

学的計測手法を統合し、実験対象としては噴霧火炎特有の火炎構造や火炎伝ば挙動を追求できる可能性を持った予混合噴霧火炎を用いた。さらに噴霧流中の火炎伝ば速度の統計的計測を目的に、自由落下噴霧流中での火花点火球形火炎についても実験を行った。以下では従来の研究をふまえた本研究の位置づけおよび目的を、本研究で用いた計測手法とあわせて示す。

1.3 本研究の位置づけと目的

上述のように、噴霧火炎構造に関する研究は数多く行われてきたが、噴霧火炎中において予混合的燃焼挙動と拡散的燃焼挙動がどのように関わり合っているのか、および油滴群としての燃焼挙動を実験的に観察した例は少ない。従来は噴霧火炎構造を時間的・空間的に平均化した議論が繰り広げられてきたが、噴霧火炎は時間的にも空間的にも不均一な構造を持っており、しかも単滴燃焼の集合体ではなく、油滴群として燃焼していると考えられる。そのため、燃焼効率、燃焼排出物の正確な予測という観点からも、噴霧の不均一性を考慮に入れた噴霧燃焼モデルが必要なことはいうまでもない。それには、噴霧火炎構造を時間連続的かつ空間的に捉えるような計測手法を用いた噴霧火炎の実験的観察が不可欠である。そこで、本研究では、前述した噴霧火炎中の予混合的および拡散的燃焼挙動を巨視的視点から観察し、油滴の集合体、すなわち油滴群としての燃焼挙動を時間連続的に捉え、時間的変動を含めた実験的知見を得ることを目的とする。

空間的に不均一で、しかも時間的変動を伴う噴霧火炎構造を観察するためには、しかるべき実験対象を用いる必要がある。噴流型噴霧火炎や実用燃焼器で用いられる噴霧バーナは、循環流を伴うなど流れ場が複雑であり、噴霧火炎中の基礎的燃焼挙動の観察には向かない。また、Li と Williams ら⁽⁹¹⁻⁹³⁾に代表される対向流型噴霧火炎においては、火炎を安定化させるためにあらかじめ気体燃料が添加されたり、メタノールなどの高揮発性の液体燃料を用いるなどしているため、油滴は火炎面到達前にすでに蒸発している。そのため、実質的には燃料蒸気と空気からなる均質（気体）燃焼を行っており、噴霧火炎特有の均質燃焼と不均質燃焼の共存を模擬しているとはいえない。近年、若林⁽¹³⁰⁾は、灯油を燃料に用いた比較的安定な対向流型噴霧火炎の形成に成功し、今後、噴霧火炎構造の詳細な観察が期待されるが、実験条件選定の難しさなどの問題は残されている。そこで本研究では、水谷ら⁽⁶⁾によって噴霧燃焼研究に導入された、噴霧火炎特有の火炎構造や火炎伝ば挙動を追求できる可能性を持った予混合噴霧火炎を用いた。

本研究室では、以前より予混合噴霧を用いた実験的研究を行っており、中部

ら⁽⁷¹⁻⁷³⁾は予混合噴霧流をパイロット火炎で保炎して得られる逆円すい型の噴霧火炎に対して、火炎構造の観察や燃焼速度の測定を行い、シューリーレン撮影と画像処理の組み合わせや、OH ラジカル発光像などを用いて燃焼速度を厳密に定義した。また、噴霧火炎中に接触式の視野制限プローブ⁽⁷²⁾を挿入し、火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号、CH ラジカル発光バンドの火炎発光信号と油滴からの速度信号の同時時系列計測を行った。さらに、それらの信号に統計解析と周波数解析⁽¹³¹⁾を施すことによって、時間平均的ではあるが不均一に分布する油滴の複雑な群燃焼挙動を観察することに成功した。

次いで赤松ら^(115,116)は、逆円すい火炎に代えて、予混合噴霧を環状の水素拡散パイロットバーナで保持し燃焼性を向上させた上で、火炎発光信号と位相ドップラ法を用いた油滴粒径と速度の同時時系列計測を行い、個々の油滴群の群燃焼数を実験的に導出し、実際の油滴群の燃焼挙動とあわせて考察を加えた。

しかし、いずれの実験においても当時の計測技術の未成熟から、予混合噴霧火炎中の油滴および油滴群の空間的な分布および消失過程を時間連続的に捉えて観察することはできなかった。そのため、火炎中の局所領域からの発光信号や、油滴速度および粒径を時間平均的に観察し、統計解析や周波数解析結果から噴霧火炎構造を推察するにとどまっていた。そこで本研究では、高速度 CCD カメラとアルゴンイオンレーザ(Ar-ion laser)を用いて、予混合噴霧火炎中の噴霧断面像を時間連続的に観察した。また、同時に火炎中の局所領域からの火炎発光信号を検出するために、従来の接触式の視野制限プローブを用いた受光系ではなく、光学的に視野を制限した受光プローブ（以下、光学式受光プローブと称す）を開発し、噴霧断面像との同時時系列計測を行った。さらに、噴霧特性の計測には位相ドップラ法を適用したが、それにもなつて火炎中での位相ドップラ計測の火炎の存在による計測誤差に関しても考察を加えた。このように、光学的計測技術を統合して適用することで、時間平均化することなく燃焼挙動を観察し、噴霧火炎の空間的構造についても考察が可能となった。

さらに本研究では、噴霧流中での火炎伝ば速度の統計的計測を目的に、自由落下噴霧流中での火花点火球形火炎⁽¹³²⁾の成長過程を観察し、2台の光学的受光プローブを用いて火炎伝ば速度の計測を行った。また噴霧火炎中の伝ば火炎の速度と油滴クラスタの消失速度に関して考察を加え、それらを統計的に導出する意義を示した。

1.4 本論文の概要と構成

本論文は、全 8 章から構成されている。その内容は、緒論（第 1 章）と結論（第 8 章）のほかに、噴霧火炎中での光学的計測技術の開発と誤差評価（第 2，3 章）、そして予混合噴霧火炎を用いた実験（第 4～6 章）と火花点火球形火

炎を用いた実験（第7章）に大別される。以下に各章の内容を示す。

第1章では、噴霧燃焼に関連する現在までの研究をまとめ、特に、その基礎的火炎構造に関する知見に注目した。そして、本研究の目的と位置づけを明確にした。

第2章では、近年、噴霧および噴霧燃焼研究に必要な不可欠となった位相ドップラ法を火炎中で適用した場合の計測誤差について実験的に評価を行った。特に光学系光路上の火炎の影響について考察を加えた。その際、粒径既知のポリスチレン粒子を測定対象に用い、光路上にブンゼン型火炎を設置して、計測値に与える影響を調べた。

その結果、光路上に存在する火炎は、光路上の空間的な屈折率の変化を起こし、速度計測結果には影響を与えない一方で、粒径計測の際には誤差要因となることを見出した。すなわち、火炎の存在は平均粒径の計測値には大きな影響を与えないが、計測値にばらつきを発生する要因となり、計測データレートを低下させることを示した。

第3章では、本研究室であらたに開発した光学式受光プローブである Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics(MICRO)について、実験的に性能評価を行った。まず始めに、層流予混合ブンゼン火炎を対象に実験を行い、次いで、乱流予混合火炎に適用し、静電探針からのイオン電流信号との比較を行った。さらに、予混合噴霧火炎に適用した際に得られた火炎発光信号と、本研究室でこれまで用いてきた、局所発光検出用の接触式の視野制限受光プローブから得られた実験結果との比較、検討を行い、あらたに開発した MICRO プローブを用いた光学系によって、本実験で対象とする予混合噴霧火炎中の局所領域からの発光信号を検出することが可能であることを示した。

第4章では、予混合噴霧火炎中の巨視的な燃焼挙動について考察を加えるために、高速度カメラとアルゴンイオンレーザを用いて噴霧断面像の可視化を行い、同時に MICRO プローブを使って火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号と CH バントの発光信号、および油滴からの Mie 散乱光信号の時系列計測を行った。その結果、火炎中での噴霧の消失過程を時間連続的に捉えることが可能となり、予混合噴霧火炎中においては、バーナポートから連続的に存在する予混合噴霧流が選択的な火炎伝ば現象によって分断され、その後形成される油滴群が拡散的に燃焼し、消失していく様子が明らかになった。

第5章では、予混合噴霧火炎中の噴霧の消失過程、特に消失速度に注目した。まず、噴霧断面像に統計処理を施すことによって、予混合噴霧火炎中での伝ば火炎の速度を導出した。その際、バーナポートから連続的に存在する噴霧流の境界画像の重ね合わせ処理を行い、位相ドップラ計測による流れ場の計測結果とあわせて伝ば火炎の速度を計測する手法を提案した。次いで、予混合噴霧火

炎下流において形成される個々の油滴群の消失速度を画像処理解析によって導出した。その結果、伝ば火炎速度と個々の油滴群の消失速度は大きく異なっており、噴霧火炎中における液体燃焼噴霧の消失に関しては、伝ば火炎速度と、個々の油滴および油滴群の消失速度を別々に考慮する必要があることが明らかになった。

第6章では、噴霧特性が燃焼挙動に与える影響について調べるために、予混合噴霧流の噴霧特性を変化させ、位相ドップラ計測、火炎発光計測および噴霧断面像の計測を行った。その結果、噴霧特性は火炎長に大きく影響を与える一方で、噴霧流中での火炎伝ば速度にはあまり影響を与えないことが明らかになった。また、予混合噴霧火炎中の火炎構造を一次元的に取り扱うために、噴霧境界像と火炎発光信号を用いた解析を施した結果、火炎伝ばのおこる際には、噴霧流内部においても燃焼反応領域が見られ、噴霧境界付近で最も燃焼反応が活発であることが示された。

第7章では、噴霧火炎特有の不均一性を考慮に入れながら火炎伝ば速度を統計的に計測するために、実験条件の変更が容易でかつ繰り返し計測を行うことができる火花点火球形火炎を実験対象に、2台のMICROプローブを用いて火炎伝ば速度の計測を行った。すなわち、2台のMICROプローブを空間中の異なる局所領域からの火炎発光信号を検出するように設置し、球形火炎がそれぞれの測定体積に達する到達時間差から火炎伝ば速度を導出した。その結果、2台のMICROプローブを用いた計測手法は、火炎伝ば速度の導出に適しており、噴霧特性の不均一性と火炎伝ば速度の変化をあわせて考察する必要があることを示した。

第8章は本論文の総括である。

1.5 参考文献

- (1) Faeth, G. M., "Current Status of Droplet and Liquid Combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.3, (1977), pp.191-224.
- (2) 吉田邦夫監修, 油燃焼の理論と実際, (1992), 省エネルギーセンター刊.
- (3) 水谷幸夫, 燃焼工学第2版, (1989), 森北出版.
- (4) Taylor, G. I., "The Formation of Emulsions in Definable Fields of Flow", Proc. Roy. Soc. London, A, Vol.146, (1934), pp.501-523.
- (5) Tomokita, S., "Breaking up of a Drop of Viscous Liquid Immersed in Another Viscous Fluids which Extending at a Uniform Rate", Proc. Roy. Soc. London, A, Vol.153, (1936), pp.302-318.
- (6) Hinze, J. O., "Fundamental of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes", AIChE J., Vol.1, No.3, (1955), pp.289-295.
- (7) Reitz, R. D. and Bracco, F. V., "Mechanism of Atomization of a Liquid Jet", Physics of Fluids, Vol.25, No.10, (1982), pp.1730-1742.

- (8) Chiger, N. A., "The Physics of Atomization", ICLASS-91, (1991), pp.1-15.
- (9) Chiger, N. A., and Reitz, R. D., "Regimes of Jet Breakup and Breakup Mechanics", Recent Advances in Spray Combustion edited by Kuo, K. K., (1996), pp.109-135. AIAA.
- (10) Chin, J. S. and Lefebvre, A. H., "Flow Pattern in Internal-Mixing Twin-Fluid Atomizers", Atomization and Sprays, Vol.3, (1993), pp.463-475.
- (11) 許敏, 新井雅隆, 廣安博之, "ディーゼル噴射弁の水流 模型による流れの観察", 日本機械学会論文集, 53B-491, (1987), pp.2214-2218.
- (12) Kim, J. H., Nishida, K. and Hiroyasu, H., "Characteristics of the Internal Flow in a Diesel Injection Nozzle", Proc. ICLASS-97, (1997), pp.175-182.
- (13) Kuferath, A. and Leuckel, W., "Experimental Investigation of Flow Conditions Inside an Air-Assisted Internal-Mixing Nozzle and their Correlation with Spray Data", Proc. ICLASS-97, (1997), pp.262-269.
- (14) Mullinger, P. J. and Chigier, N. A., "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin-Fluid Atomizers", J. Inst. Fuel, Vol.47, (1974), pp.252-261.
- (15) 抜山四郎, 棚澤泰, "空気による液体微粒化の実験 (第1報)", 日本機械学会論文集, 4-14, (1938), pp.86-93.
- (16) 抜山四郎, 棚澤泰, "空気による液体微粒化の実験 (第2報)", 日本機械学会論文集, 4-15, (1938), pp.138-143.
- (17) 抜山四郎, 棚澤泰, "液体微粒化の実験(第3報, 噴霧流内の粒の大きさの分布に就て)", 日本機械学会論文集, 5-18, (1939), pp.131-135.
- (18) 抜山四郎, 棚澤泰, "液体微粒化の実験(第4報, 液体の諸性質が噴霧粒径に及ぼす影響)", 日本機械学会論文集, 5-18, (1939), pp.68-75.
- (19) 抜山四郎, 棚澤泰, "液体微粒化の実験(第5報)", 日本機械学会論文集, 6-22, (1940), pp.7-14.
- (20) Wigg, L.D., "Drop Size Prediction for Twin-Fluid Atomizer", J. Inst. Fuel, Vol.37, (1964), pp.500-505.
- (21) Rizkalla, A. A. and Lefebvre, A. H., "Influence of Liquid Properties on Air Blast Atomizer Spray Characteristics", Trans. ASME J. Eng. Power., Vol.97, (1975), pp.173-179.
- (22) Rizkalla, A. A. and Lefebvre, A. H., "The Influence of Air and Liquid Properties on Airblast Atomization", Trans. ASME J. Fluids Eng., Vol.97, (1975), pp.316-320.
- (23) Semião, V., Andrade, P. and Carvalho, M. G., "Spray Characterization: Numerical Prediction of Sauter Mean Diameter and Droplet Size Distribution", Fuel, Vol.75, No.15, (1996), pp.1707-1714.
- (24) Cousin, J., Yoon, S. J. and Dumouchel, C., "Coupling of Classical Linear Theory and Maximum Entropy Formalism for Prediction of Drop Size Distribution in Sprays: Application to Pressure-Swirl Atomizers", Atomization and Sprays, Vol.6, (1996), pp.601-622.
- (25) Chung, J. N. and Troutt, T. R., "Simulation of Particle Dispersion in an Axisymmetric Jet", J. Fluid Mech., Vol.186, No.4, (1988), pp.199-222.
- (26) Yule, A. J., "Large-Scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet", J. Fluid Mech., Vol.89 part 3, (1978), pp.413-432.

- (27) 段智久, “ディーゼル燃料噴霧の乱流構造と形成機構”, 同志社大学博士論文, (1996).
- (28) Gomez, A. and Rosner, D., “Thermophoretic Effects on Particles in Counterflow Laminar Diffusion Flames”, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.89, (1993), pp.335-362.
- (29) Sung, C. J., Kistler, M., Nishioka, M. and Law, C. K., “Further Studies on Effects of Thermophoresis on Seeding Particles in LDV measurements of Strained Flames”, *Combust. Flame*, Vol.105, (1996), pp.189-201.
- (30) 戸田顕, 大西久孝, 土橋律, 平野敏右, 櫻谷隆, “燃焼場近傍における粒子の挙動に関する研究 (第3報)”, 第35回燃焼シンポジウム講演論文集, (1997), pp.67-69.
- (31) Brown, G. L. and Roshko, A. J., “On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers”, *J. Fluid Mech.*, Vol.64 part 4, (1974), pp.775-816.
- (32) Crowe, C. T., Chung, J. N. and Troutt, T. R., “Particle Mixing in Free Shear Flows”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.14, (1988), pp.171-194.
- (33) Kenning, V. M. and Crowe, C. T., “On the Effect of Particles on Carrier Phase Turbulence in Gas-Particle Flows”, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.23, No.2, (1997), pp.403-408.
- (34) Eaton, J. K. and Fessler, J. R., “Preferential Concentration on Particles by Turbulence”, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.20, Suppl., (1994), pp.169-209.
- (35) Chiu, H. H. and Liu, T. M., “Group Combustion of Liquid Droplets”, *Combust. Sci. Tech.*, Vol.17, (1977), pp.127-142.
- (36) Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., “Internal Group Combustion of Liquid Droplets”, *Nineteenth Symp. (Int.) on Combust.*, (1982), pp.971-980, The Combustion Institute.
- (37) Law, C. K., “Recent Advances in Droplet Vaporization and Combustion”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.8, (1982), pp.171-201.
- (38) Annamalai, K. and Ryan, W., “Interactive Processes in Gasification and Combustion. Part I: Liquid Drop Arrays and Clouds”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.18, (1992), pp.221-295.
- (39) Sirignano, W. A., “Fuel Droplet Vaporization and Spray Combustion Theory”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.9, (1983), pp.291-322.
- (40) Umemura, A., “Interactive Droplet Vaporization and Combustion: Approach from Asymptotics”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.20, (1994), pp.325-372.
- (41) Faeth, G. M., “Mixing, Transport and Combustion in Sprays”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.13, (1987), pp.293-345.
- (42) Faeth, G. M., “Spray Combustion Phenomena”, *Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust.*, (1996), pp.1593-1612, The Combustion Institute.
- (43) Williams, A., “Fundamentals of Oil Combustion”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.2, (1976), pp.167-179.
- (44) Chigier, N. A., “The Atomization and Burning of Liquid Fuel Sprays”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.2, (1976), pp.97-114.
- (45) Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, (1951), Academic Press.
- (46) Barnett, H. C. and Hibbard, R. R., *NACA Rep.*, No.1300, (1957).
- (47) 水谷幸夫, 若林卓, “噴霧燃焼”, *微粒化*, Vol.6, No.16, (1997), pp.151-163.

- (48) Williams, F. A., "Combustion Theory Second Edition", (1985), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (49) Hayashi, S. and Kumagai, S., "Limiting Factor of Flame Propagation in Low-volatility Fuel Clouds", Eighteenth Symp. (Int.) on Combust., (1981), pp.361-367, The Combustion Institute.
- (50) Dietrich, D. L., Haggard Jr, J. B., Dryer, F. L., Nayagam, V., Shaw, B. D. and Williams, F. A., "Droplet Combustion Experiments in Spacelab", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., (1996), pp.1201-1207, The Combustion Institute.
- (51) Nomura, H., Ujiie, Y., Rath, H. J., Sato, J. and Kono, M., "Experimental Study on High-Pressure Droplet Evaporation Using Microgravity Conditions", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., (1996), pp.1267-1273, The Combustion Institute.
- (52) 佐藤公美, 瀬川大資, 角田敏一, 久保山隆志, "航空機を利用した微小重力下超臨界雰囲気中における燃料液滴燃焼現象の解明", 第 35 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1997), pp.111-113.
- (53) Sato, J., Tsue, M., Niwa, M. and Kono, M., "Effects of Natural Convection on High-Pressure Droplet Combustion", Combust. Flame, Vol.82, (1990), pp.142-150.
- (54) Tsue, M., Segawa, D., Kadota, T. and Yamasaki, H., "Observation of Sooting Behaviors in an Emulsion Droplet Flame by Planar Laser Light Scattering in Microgravity", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., (1996), pp.1251-1258, The Combustion Institute.
- (55) Mikami, M., Niwa, M., Kato, H., Sato, J. and Kono, M., "Clarification of the Flame Structure of Droplet Burning Based on Temperature Measurement in Microgravity", Twenty-Fifth Symp. (Int.) on Combust., (1994), pp.439-446, The Combustion Institute.
- (56) Jiang, T. L., Chen, W. S., Tsai, M. J. and Chiu, H. H., "A Numerical Investigation of Multiple Flame Configurations in Convective Droplet Gasification", Combust. Flame, Vol.103, (1995), pp.221-238.
- (57) Brzustowski, T. A., Twardus, E. M., Wojcicki, S. and Sobiesiak, A., "Interaction of Two Burning Fuel Droplets of Arbitrary Size", AIAA, Vol.17, No.11, (1979), pp.1234-1242.
- (58) Labowsky, M., "Calculation of the Burning Rates of Interacting Fuel Droplets", Combust. Sci. Tech., Vol.22, (1980), pp.217-226.
- (59) Goto, M., Ju, J., Niioka, T., "Numerical Analysis of Ignition of Fuel Droplet Array in Hot Stagnant Air", Twenty-seventh Symp. (Int.) on Combust., (1998), The Combustion Institute. (Printing)
- (60) 加藤伸一郎, 小林秀昭, 新岡嵩, "微速空気流中における燃料液滴列の燃え拡がり速度", 第 35 回燃焼シンポジウム, (1997), pp.624-626.
- (61) Burgoyne, J. H. and Cohen, L., "The Effect of Drop Size on Flame Propagation in Liquid Aerosols", Proc. Roy. Soc. Lond., A, Vol.225, (1954), pp.375-392.
- (62) 小笠原光信, 水谷幸夫, "液体燃料粒子群中での層流火炎伝ばに関する研究 (第 1 報, 実験と火炎伝ば機構の考察)", 日本機械学会論文集, 31-226, (1965), pp.1002-1007.
- (63) 小笠原光信, 水谷幸夫, "液体燃料粒子群中での層流火炎伝ばに関する研究 (第 2 報, 理論解析)", 日本機械学会論文集, 31-226, (1965), pp.1008-1018.
- (64) 小笠原光信, 水谷幸夫, "液体燃料粒子群中での層流火炎伝ばに関する研究 (第 3 報, 理論の適用例と諸因子の影響)", 日本機械学会論文集, 31-226, (1965), pp.1019-10071025

- (65) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., "Flame Propagation in Heterogenous Mixtures of Fuel Droplets, Fuel Vapor and Air", Eighteenth Symp. (Int.) on Combust., (1981), pp.321-328.
- (66) 水谷幸夫, 西本武雄, "乱れのある噴霧流の火炎速度", 日本機械学会論文集, **38-311**, (1972), pp.1844-1854.
- (67) 水谷幸夫, "乱れのある噴霧流の火炎速度", 日本機械学会論文集, **38-315**, (1972), pp.2935-2944.
- (68) Polymeropoulos, C. E. and Das, S., "The Effect of Droplet Size on the Burning Velocity of Kerosene-Air Sprays", Combust. Flame, Vol.25, (1975), pp.247-257.
- (69) Myers, G. D. and Lefebvre, A. H., "Flame Propagation in Heterogeneous Mixtures of Fuel Drops and Air", Combust. Flame, Vol.66, (1986), pp.193-210.
- (70) Richards, G. A. and Lefebvre, A. H., "Turbulent Flame Speeds Hydrocarbon Fuel Droplets in Air", Combust. Flame, (1989), Vol.78, pp.299-307.
- (71) 中部主敬, 水谷幸夫, 谷村聡, "予混合噴霧火炎の燃焼速度と気液混焼特性", 日本機械学会論文集, **53-486B**, (1987), pp.636-641.
- (72) 中部主敬, 水谷幸夫, 平尾知之, "火炎発光と油滴ミ-散乱による噴霧火炎と気液混焼火炎の構造観察", 日本機械学会論文集, **55-516B**, (1989), pp.2517-2525.
- (73) 中部主敬, 水谷幸夫, 藤岡博之, 赤松史光, "分光可視化画像処理による噴霧火炎の構造観察", 日本機械学会論文集, **58-546B**, (1992), pp.635-641.
- (74) Crowe, C. T., Sharma, M. P. and Stock, D. E., "The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows", Trans. ASME, Ser.I, 99-2, (1977), pp.325-332.
- (75) 水谷幸夫, "対向流噴霧火炎を用いた噴霧の燃焼機構と大気汚染物質生成機構に関する研究", 昭和59年度科学研究費補助金(一般研究 B57460098)研究成果報告書, (1985).
- (76) Bachalo, W. D. and Houser, M. J., "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions", Opt. Eng., Vol.23, No.5, (1984), pp.583-590.
- (77) Chigier, N., "Optical Imaging of Sprays", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.17, (1991), pp.211-262.
- (78) Hanson, R. K., "Combustion Diagnostics: Planar Imaging Techniques", Twenty-First Symp. (Int.) on Combust., (1986), pp.1677-1691, The Combustion Institute.
- (79) Chen, Z. H., Lin, T. H. and Sohrab, S. H., "Combustion of Liquid Fuel Sprays in Stagnation-Point Flow", Combust. Sci. and Tech., Vol.60, (1988), pp.63-77.
- (80) Gao, L. P., D'Angelo, Y., Silverman, I. Gomez, A. and Smooke, M. D., "Quantitative Comparison of Detailed Numerical Computations and Experiments in Counterflow Spray Diffusion Flames", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., (1996), pp.1739-1746, The Combustion Institute.
- (81) Darabiha, N., Lacas, F., Rolon, J. C. and Candel, S., "Laminar Counterflow Spray Diffusion Flames: A Comparison Between Experimental Results and Complex Chemistry Calculations", Combust. Flame, Vol.95, (1993), pp.261-275.
- (82) Lacas, F., Darabiha, N., Versavel, P., Rolon, J. C. and Candel, S., "Influence of Droplet Number Density on the Structure of Strained Laminar Spray Flames", Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust., (1992), pp.1523-1529.
- (83) Mao, C. -P., Wang, G. and Chigier, N., "An Experimental Study of Air-Assist Atomizer Spray

- Flames”, Twenty-First Symp. (Int.) on Combust., (1986), pp.665-673.
- (84) Presser, C., Gupta, A. K., Avedisian, C. T. and Semerjian, H. G., “Fuel Property Effects on the Structure of Spray Flames”, Twenty-Third Symp. (Int.) on Combust., (1990), pp.1361-1367, The Combustion Institute.
- (85) Gupta, A. K. and Avedisian, C. T., “Role of Combustion on Droplet Transport in Pressure-Atomized Spray Flames”, *J. Propulsion and Power*, Vol.12, No.3, (1996), pp.543-553.
- (86) Edwards, C. F. and Rudoff, R. C., “Structure of a Swirl-Stabilized Spray Flame by Imaging, Laser Doppler Velocimetry, and Phase Doppler Anemometry”, Twenty-Third Symp. (Int.) on Combust., (1990), pp.1353-1359, The Combustion Institute.
- (87) Goix, P. J., Edward, C. F., Cessou, A., Dunskey, C. M. and Stepowski, D., “Structure of a Methanol/Air Coaxial Reacting Spray Near the Stabilization Region”, *Combust. Flame*, Vol.98, (1994), pp.205-219.
- (88) Chen, G. and Gomez, A., “Counterflow Diffusion Flames of Quasi-Monodisperse Electrostatic Sprays”, Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust., (1992), pp.1531-1539, The Combustion Institute.
- (89) Gomez, A. and Chen, G., “Charged-Induced Secondary Atomization in Diffusion Flames of Electrostatic Sprays”, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.96, (1994), pp.47-59.
- (90) Li, S. C., Libby, P. A. and Willimas, F. A., “Experimental and Theoretical Studies of Counterflow Diffusiion Flames”, Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust., (1992), pp.1503-1512, The Combustion Institute.
- (91) Li, S. C., Libby, P. A. and Williams, F. A., “Spray Structure in Counterflowing Streams with and without a Flame”, *Combust, Flame*, Vol.94, (1993), pp.161-177.
- (92) Li, S. C. and Williams, F. A., “Experimetal and Numerical Studies of Two-Stage Methanol Flames”, Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., (1996), pp.1017-1024, The Combustion Institute.
- (93) Li, S. C., “Spray Stagnation Flames”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.23, (1997), pp.303-347.
- (94) Continillo, G. and Sirignano, W. A., “Counterflow Spray Combustion Modeling”, *Combust. Flame*, Vol.81, (1990), pp.325-340.
- (95) Gutheil, E. and Sirignano, W. A., “Counterflow Spray Combustioin Modeling with Detailed Transport and Detailed Chemistry”, *Combust. Flame*, Vol.113, (1998), pp.92-105.
- (96) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., Sandia Report SAND 87-8215, (1987).
- (97) Cessou, A. and Stepowski, D., “Planar Laser Induced Fluorescence Measurement of [OH] in the Stabilization Stage of a Spray Jet Flame”, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.118, (1996), pp.361-381.
- (98) Stepowski, D., Cessou. A. and Goix, P., “Flame Stabilization and OH Fluorescence Mapping of the Combustioin Structures in the Near Fields of a Spray Jet”, *Combust. Flame*, Vol.99, (1994), pp.516-522.
- (99) Bazile, R. and Stepowski, D., “Measurements of the Vaporization Dynamics in the Development Zone of a Burning Spray by Planar Laser Induced Fluorescence and Raman Scattering”, *Exp. in Fluids*, Vol.16, (1994), pp.171-180.
- (100) Greenberg, J. B., Silverman, I. and Tambour, Y., “A New Heterogeneous Buring Velocity Formula for the Propagation of a Laminar Flame Front Through a polydisperse Spray of Droplets”, *Combust.*

Flame, Vol.104, (1996), pp.358-368.

- (101) Silverman, I., Greenberg, J. B. and Tambour, Y., "Stoichiometry and Polydisperse Effects in Premixed Spray Flames", *Combust. Flame*, Vol.93, (1993), pp.97-118.
- (102) Greenberg, J. B., Silverman, I. and Tambour, Y., "On the Origins of Spray Sectional Conservation Equations", *Combust. Flame*, Vol.93, (1993), pp.90-96.
- (103) Aggarwal, S. K. and Sirignano, W. A., "Ignition of Fuel Sprays: Deterministic Calculations for Idealized Droplet Arrays", *Twentieth Symp. (Int.) on Combust.*, (1984), pp.1773-1780, The Combustion Institute.
- (104) Aggarwal, S. K. and Sirignano, W. A., "Ignition of Polydisperse Sprays: Importance of D_{20} ", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.46, (1986), pp.289-300.
- (105) Gutheil, E., "Numerical Investigation of the Ignition of Dilute Fuel Sprays Including Detailed Chemistry", *Combust. Flame*, Vol.93, (1993), pp.239-254.
- (106) 角田敏一, 廣安博之, 大矢秀夫, "高温高压の気体中における燃料液滴の着火おくれに関する研究", *日本機械学会論文集*, **41**-348, (1975), pp.2475-2485.
- (107) Law, C. K. and Chung, S. H., "An Ignition Criterion for Droplets in Sprays", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.22, (1980), pp.17-26.
- (108) Rangel, R. H. and Continillo, G., "Theory of Vaporization and Ignition of a Droplet Cloud in the Field of a Vortex", *Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust.*, (1992), pp.1493-1501, The Combustion Institute.
- (109) Bellan, J. and Harstad, K., "Steady Injection of Identical Clusters of Evaporating Drops embedded in Jet Vortices", *Atomization and Sprays*, Vol.5, (1995), pp.1-16.
- (110) Bellan, J. and Harstad, K., "Evaporation, Ignition, and Combustion of Nondilute Clusters of Drops", *Combust. Flame*, Vol.79, (1990), pp.272-286.
- (111) Driscoll, J. F. and Pelaccio, D. G., "Turbulent Eddy Diffusivity and Mean Eddy Lifetimes Measured in Spray Combustion", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.21, (1980), pp.205-212.
- (112) Allen, M. G. and Hanson, R. K., "Optical Imaging of Species Concentration Fields in Spray Flames", *Twenty-First Symp. (Int.) on Combust.*, (1986), pp.1755-1762, The Combustion Institute.
- (113) Chen, G. and Gomez, A., "Co-Flow Laminar Diffusion Flames of Monodisperse Sprays: Structure, Evaporation and Microgravity Effects", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.115, (1996), pp.177-201.
- (114) Chen, G. and Gomez, A., "Dilute Laminar Spray Diffusion Flames near the Transition from Group Combustion to Individual Droplet Burning", *Combust. Flame*, Vol.110, (1997), pp.392-404.
- (115) 赤松史光, 中部主敬, 水谷幸夫, 香月正司, "予混合噴霧流中で燃焼する油滴群の光学的計測", *日本機械学会論文集*, **60**-577B, (1994), pp.3172-3178.
- (116) 赤松史光, 水谷幸夫, 香月正司, 津島将司, 趙庸大, "予混合噴霧流の油滴群燃焼挙動と群燃焼数", *日本機械学会論文集*, **62**-596B, (1996), pp.1622-1628.
- (117) Chiu, H. H. and Lin, C. L., "Anomalous Group Combustion of Premixed Clusters", *Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust.*, (1996), pp.1653-1661, The Combustion Institute.
- (118) Chigier, N., "Group Combustion Models and Laser Diagnostic Methods in Sprays", *Combust. Flame*, Vol.51, (1983), pp.127-139.

- (119) Yule, A. J. and Bolado, R., "Fuel Spray Burning Regime and Initial Conditions", *Combust. Flame*, Vol.55, (1984), pp.1-12.
- (120) Onuma, Y. and Ogasawara, M., "Studies on the Structure of a Spray Combustion Flame", Fifteenth Symp. (Int.) on Combust., (1975), pp.453-465, The Combustion Institute.
- (121) 上野正康, 菊田和重, 近久武美, 菱沼孝夫, "非定常な気体および液体噴霧燃焼における火炎構造の相似性", 第35回燃焼シンポジウム講演論文集, (1997), pp.265-267.
- (122) Jiang, T. L. and Chiu, H. H., "Spray Group Combustion in a Cylindrical Nonpremixed Combustor", *Atomization and Sprays*, Vol.3, (1993), pp.203-221.
- (123) McDonell, V. G., Wood, C. P. and Samuelsen, G. S., "A Comparison of Spatially-Resolved Drop Size and Drop Velocity Measurements in an Isothermal Chamber and A Swirl-Stabilized Combustor", Twenty-First Symp. (Int.) on Combust, (1986), pp.685-694, The Combustion Institute.
- (124) McDonell, V. G. and Samuelsen, G. S., "Effect of Fuel Injection Mode on Fuel Vapor in Reacting and Non-Reacting Methanol Sprays", Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combust., (1992), pp.1557-1564, The Combustion Institute.
- (125) McDonell, V. G., Adachi, M. and Samuelsen, G. S., "Structure of Reacting and Nonreacting, Nonswirling, Air-Assisted Sprays, Part I: Gas-Phase Properties", *Atomization and Sprays*, Vol.3, (1993), pp.389-410.
- (126) Hardalupas, Y., Taylor, A. M. K. P. and Whitelaw, J. H., "Velocity and Size Characteristics of Liquid-Fuelled Flames Stabilized by a Swirl Burner", *Proc. Roy. Soc. London, A*, Vol.428, (1990), pp.129-155.
- (127) 池田裕二, 河原伸幸, 中島健, "噴霧燃焼炉内の流れ場のガス成分とフラックス測定", 日本機械学会論文集, **61**-581B, (1995), pp.332-338.
- (128) 池田裕二, 河原伸幸, 中島健, "ガンタイプバーナ近傍における保炎機構 (乱れとガス濃度変動)", 日本機械学会論文集, **62**-596B, (1996), pp.1599-1607.
- (129) 河原伸幸, "噴霧燃焼における噴霧挙動と乱れ構造に関する研究", 神戸大学博士論文, (1997).
- (130) 若林卓, "対向流噴霧火炎の形成, 計測ならびに構造に関する研究", 大阪大学博士論文, (1997).
- (131) 日野幹雄, *スペクトル解析*, (1993), 朝倉書店.
- (132) 赤松史光, 中部主敬, 水谷幸夫, 香月正司, 田端敏克, "油滴群中を伝ばする火花点火球形火炎の構造観察 (第2報)", 日本機械学会論文集, **61**-582B, (1995), pp.752-758.

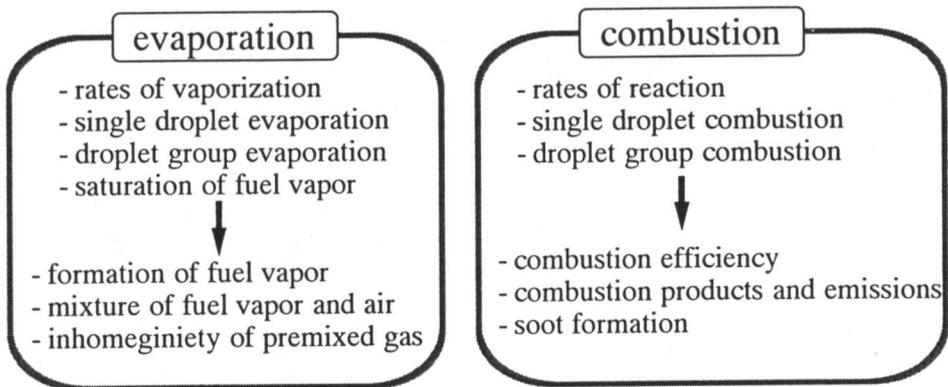
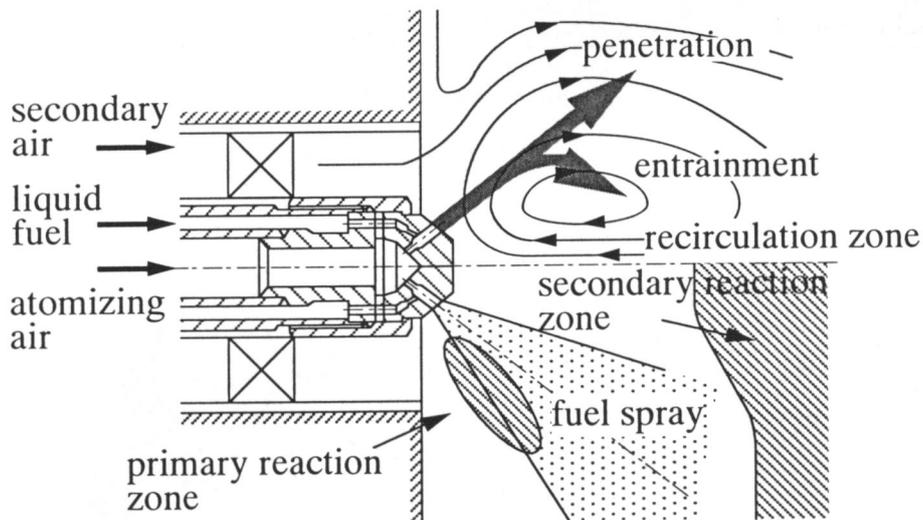
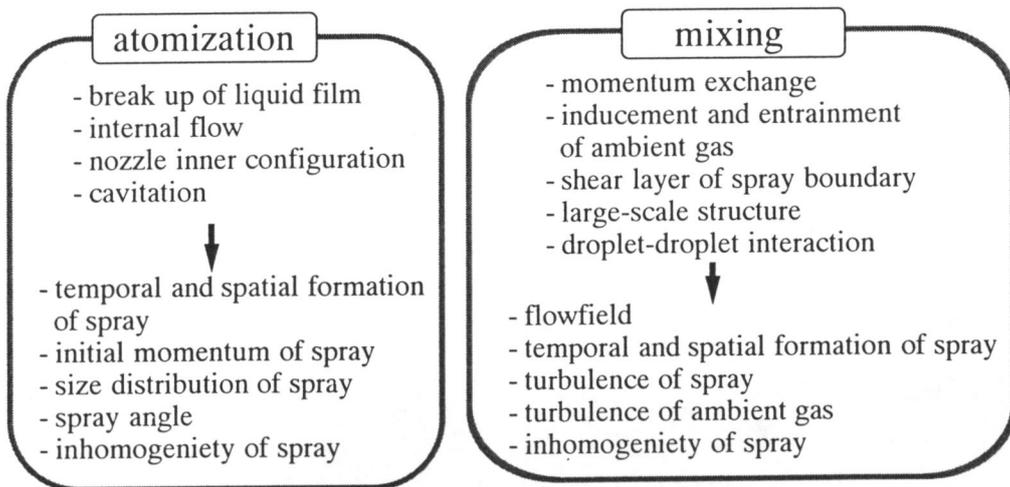


図 1-1 噴霧燃焼器の模式図

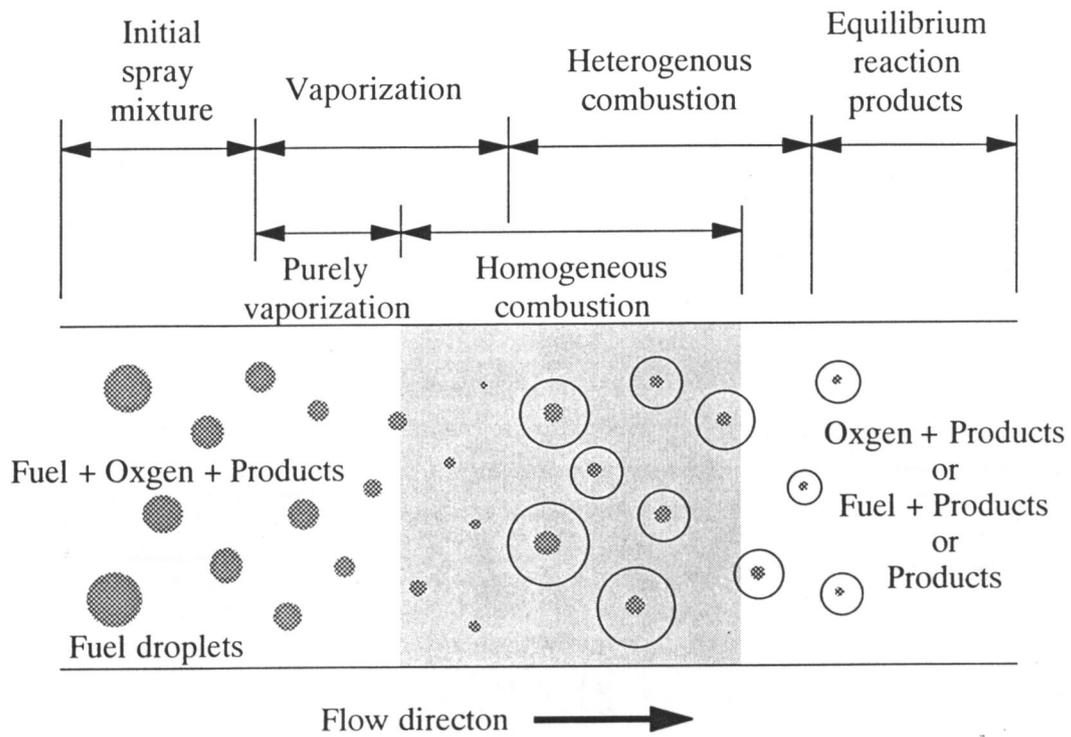


図 1-2 噴霧火炎伝ばの模式図⁽⁴⁸⁾

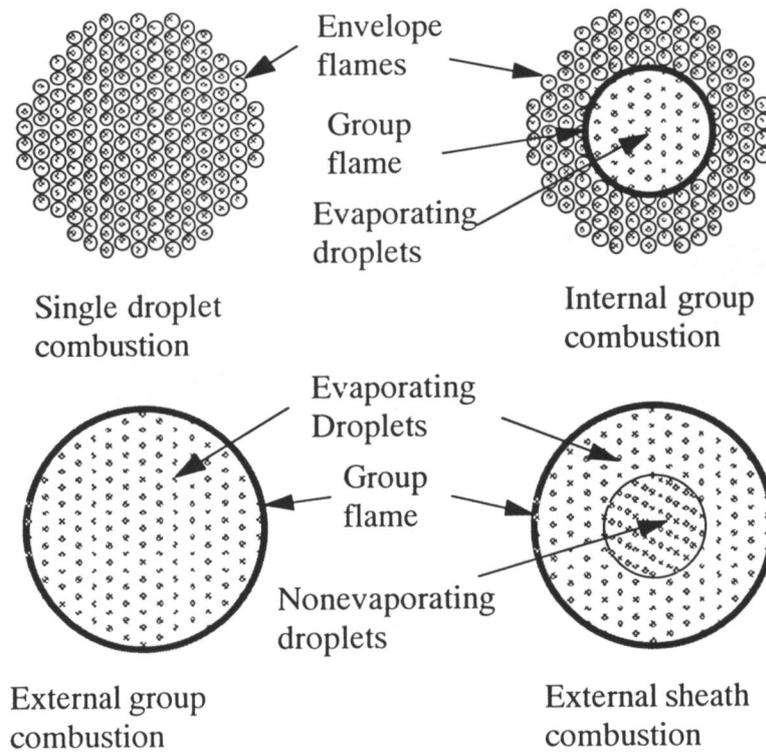


図 1-3 油滴群燃焼の 4 形態⁽³⁶⁾

第2章 位相ドップラ計測における 火炎の影響

2.1 緒言

噴霧燃焼は非常に複雑な現象であるが、近年の計測技術および信号処理技術の急速な発達により、現象解明が進んでいる。その中でも、レーザーを利用した計測技術の進歩は著しく、レーザー誘起蛍光法⁽¹⁾ (LIF)、レーザドップラ流速計⁽²⁾ (LDV)、フェーズドップラ流速計⁽³⁾ (PDA) といった新たな計測手法が確立されてきている。レーザ計測の利点は非接触であり高時間分解能・高空間分解能が得られることにあるが、反面、光学系のセッティングが難しく、光学に関する専門知識が必要となる。また、計測結果の定量性や誤差評価に関して課題が残されている。

レーザを利用した噴霧粒径の計測法が近年、開発・適用されているが⁽⁴⁾, PDAはLDVの基本原理にもとづいており、測定体積を通過した粒子の速度だけでなく、散乱粒子からのドップラ信号の位相差を用いて粒径も同時に計測することができる。液滴径を計測する際に、従来の二相流の研究において用いられていた浸せき法、こん跡法、直接受け止め法などは、いずれも観察によって粒径を計測するため、簡便な方法ではなかった⁽⁵⁾。また、計測可能最小粒径にも限界がありを、時系列データを得ることはほとんど不可能に近かった。しかし、フェーズドップラ流速計 (Phase Doppler Anemometry, PDA) により、液滴の速度と粒径を同時に計測することが可能になり、近年、噴霧流および噴霧燃焼場における適用例が数多く報告されるようになり⁽⁶⁻⁹⁾, 現象解明の有効な手段として受け止められている。しかし、PDAもLDVの発達過程に見られたように、解決・検証すべき課題が残されている。それらを幾つか挙げてみると、計測原理による計測値の信頼性、例えば測定体積内の液滴の通過位置の差異により生じる誤差⁽¹⁰⁻¹¹⁾, 測定体積を分割するスリットの影響⁽¹²⁾, 光学系の設置および計測時のパラメータの設定により生じる誤差⁽¹³⁾, 信号処理および補正方法⁽¹⁴⁾, 液相質量流束計

測定の精度^(15, 16)、燃焼場に適用する際の問題点^(17, 18)などがある。それぞれに重要な課題であるが、特に、燃焼場における PDA 計測の適用を考えた場合、光路上の火炎の存在による空間の屈折率の変化、液滴自体の温度変化により生ずる液滴内部の屈折率の変化、測定体積内における液滴の蒸発による粒径の変化と、それに伴う蒸発ガスの影響などが考えられる。そのため、今後、燃焼場で PDA 計測を用いる上で、その精度の考察は必要不可欠である。しかし、未だ燃焼場における PDA 計測の精度に関する考察は十分になされていない。

そこで、本研究では燃焼場に PDA 計測を適用する際の誤差の系統的な評価を目的に、特に非燃焼場と燃焼場での計測の際の決定的な違いである光路上の火炎の存在が計測に及ぼす影響について、粒径既知のポリスチレン粒子を用いた実験を行い、光路上の火炎形態や火炎位置に関して誤差評価を行った。

2.2 実験装置および方法

2.2.1 実験装置

図 2-1 は実験装置の構成である。今回、測定対象としたポリスチレン粒子（積水化成工業、エスレンビーズ）は、事前に光学顕微鏡により粒径を検定してある。ポリスチレン粒子は、モータを一定の速度で回転させることにより PDA 測定体積内を一定速度で通過し、計測が行われる。モータは市販品（MABUCHI, RF-500TB）を用い、定電圧電源（菊水電子, MODEL PAB 32-2）によって駆動される。

PDA 光学系の受光系および信号処理系には市販の装置（DANTEC, 57X10 および 58N10）を用い、光源にはアルゴンイオンレーザー（Spectra Physics, Stable2017, 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。受光方向は光軸に対して前方から 63° であり、屈折率 1.59 のポリスチレン粒子を計測する際には、この方向でレーザー光の 1 次屈折率が支配的になり、反射光の割合が最小となる⁽¹⁹⁾。

ところで、PDA 計測法は多くのパラメータを含んだ計測法であり、検討すべき項目を書き出してみると、システム設計時の検討項目としては、測定体積の大きさとフリンジ間隔、計測速度範囲、計測粒径範囲などがある。また、計測時にはレーザーパワー、受光開口窓の幅、スフェリカル、アクセプト率、データレート、光電子増倍管の印加電圧などが挙げられる。通常、計測時にこれらの設定値を最適化することは難しく⁽¹³⁾、計測中の実験者の判断によって計測値に含まれる誤差も変化する。しかし、本実験においては、計測対象粒子の粒径が事前に分かっていること、およびその速度も予測可能であることから、それに見合うよう光学系のセッティングの最適化を行い、その誤差が最小になる

よう努めた．実際には，計測の際に PDA 信号処理器からのドップラ信号をオシロスコープによりモニタしながら，測定条件が最適となるように受光系の3つの光電子増倍管の印加電圧と増幅率，およびポリスチレン粒子軌道をマイクロトラバーサ（シグマ光機製， Σ 707C-(1)，最小読みとり目盛り $10\mu\text{m}$ ）で調整した．表 2-1 に計測に用いた PDA 光学系の仕様を示す．

本実験では，光路上の火炎の存在が PDA 計測に及ぼす影響を調べるために，図 2-2 に示すように，PDA の送光系あるいは受光系と測定体積の間にブンゼンバーナを設置し，送光系とブンゼンバーナの距離 L_t ，受光系とブンゼンバーナの距離 L_r ，光軸からバーナポート出口までの距離 H を変化させた．

2.2.2 ブンゼンバーナおよび温度計測装置

ブンゼンバーナはノズル外径 16mm ，内径 13mm の真ちゅう製円管であり，バーナ内部には混合気の流れが安定するようにスチールウールと金網（40mesh）を入れてある．ここで，供試燃料にはプロパンを使用した．本実験で使用した火炎は，当量比 1.46，ノズル出口における断面平均流速 0.5m/s の部分予混合火炎 ($\text{Re}=436$) と，断面平均流速 0.03m/s の拡散火炎 ($\text{Re}=95$) であり，それぞれ青炎と輝炎に対応する．本実験で用いた PDA 光源の波長は 514.5nm であり，輝炎の場合には，すすからの連続スペクトルがレーザー光に重畳し，ドップラ信号のノイズ成分を増加させることが考えられる．本実験ではその影響を考察する目的で，上記二つの火炎形態を用いた．

ブンゼンバーナの平均温度および温度変動の計測には，アナログ式熱慣性補償回路付き裸熱電対に表面反応防止用 SiO_2 コーティングを施したものを使用した．図 2-3 に温度プローブの構造を示す．電気溶接によって感温部にビードができないように作られた素線径 $25\mu\text{m}$ の Pt/Pt-13%Rh 熱電対を同材質の線径 $500\mu\text{m}$ の支柱に水素溶接したものを使用した．温度変動を熱電対で計測する場合，熱慣性による応答遅れを補償する必要がある⁽²⁰⁾．そこで，本実験では，本来，流速や温度によって影響を受ける熱電対の応答特性を一次遅れと仮定し，一次進み特性を有する電気回路で補償を行い，その際，補償時定数は一定とし，本実験では補償時定数は 10ms で計測を行った⁽²⁰⁾．

図 2-4 に温度の測定系を示す．熱電対の出力は，オペアンプを使用した反転増幅器で 50 倍に増幅され，補償器により 2 倍に増幅するとともに熱電対の一次遅れが電氣的に補償される．そして，その出力はローパスフィルタ（NF ELECTRONIC，FV-665）で 5kHz 以上の高周波成分を取り除いた後，A/D コンバータ（ELMEC，Model EC-2392B）によってデジタル化され，パーソナルコンピュータ（NEC，PC9801-VX）に取り込まれ記録される．A/D コンバータの離散時間は $50\mu\text{s}$ （サンプリングレート 20kHz ）であり，90,000 個のデータを記録でき

ることから、一度に 4.5s 間の計測が可能である。また、サンプリング定理⁽²¹⁾から 10kHz までの変動の計測が可能であるが、本実験では 5kHz 以上の高周波ノイズを取り除いており、さらに熱電対の応答特性を考慮すると 1kHz までの温度変動の計測は可能と考えられる。

図 2-5 に実験に用いた青炎、輝炎のそれぞれの火炎の平均温度 T および温度変動の rms 値 T' の分布を示す。両火炎ともバーナ下流になると平均温度は低下するが、温度変動の rms 値は増加する傾向があることが分かる。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 光路上の火炎の影響

火炎位置および火炎形態の影響 図 2-6(a), (b), (c) はそれぞれ、光路上に火炎がない場合、送光系の前に青炎（部分予混合火炎）をおいた場合 ($L_f = 150\text{mm}$, $H = 50\text{mm}$)、同じ位置に輝炎（拡散火炎）を置いた場合の、速度および粒径の時系列データの一例である。測定対象としたポリスチレン粒子の直径は $153\mu\text{m}$ である。また、図 2-7 は(a), (b), (c) それぞれの条件での速度、粒径計測値の PDF であり、図中に平均値と rms 値が記入されている。

図 2-6(a) と (b), (c) を比較すると、速度計測においては計測値は火炎の影響をほとんど受けないことが分かる。しかし、時折火炎の存在により棄却されるデータがあり、計測値を時系列データとして扱う際には注意が必要である。

一方、粒径計測について見ると、火炎が光路上にない場合、計測値にばらつきはほとんど見られず（図 2-6(a)）、計測が良好に行われている。図 2-7(a) に示すように、次式で定義する粒径計測値の標準偏差 D' は $0.21\mu\text{m}$ となっている。

$$D' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i - D_{10})^2 / N} \quad (2.1)$$

ここで N は総サンプル数、 D_i は i 番目の粒径計測値、 D_{10} は計測された平均粒径である。それに対して図 2-6(b), (c) の火炎がある場合には計測値にばらつきが見られ、光路上の火炎の存在が粒径計測に影響を及ぼしている。ここで、興味深いことは、光路上の火炎の影響によって計測値は小粒径側もしくは大粒径側の一方に偏るのではなく、非燃焼時の測定値を中心にしてばらつきが現れるということである。図 2-7(b), (c) に示すように、青炎に対して生じるばらつき D' の値は、 $D' = 1.31\mu\text{m}$ 、また輝炎に対しては $D' = 1.14\mu\text{m}$ となり大きさに大差は見られない。すなわち、火炎発光が入射レーザ光の波長に重畳するか否かの影響はほとんど現れていない。

ここで、PDA 光路上の屈折率の変化がどのように計測に影響を与えるかを調べるために、受光系の手前に厚さ 5mm のアクリル版を挿入して実験を行った。図 2-8 にアクリルを挿入した場合の速度および粒径の時系列計測結果を示す。実

験では、計測開始より約 35 秒後に受光系手前にアクリル板を挿入した。図 2-8 より、アクリル板挿入後、速度計測値には変化は見られないが、粒径計測値は小粒径側にシフトしていることがわかる。また、図 2-6に見られたような計測値のばらつきは見られず、アクリル板挿入後も一定の計測値を示している。これは、アクリル板の挿入による PDA 光路上の屈折率の変化は静的なものであり、火炎のように時間的に屈折率の空間分布が変化しないためであると考えられる。このことから、火炎の存在による空間の温度分布の変動、すなわち屈折率の変動が、図 2-6に見られた計測値のばらつきの原因であるといえる。

次に、光路上に置かれた火炎の位置が計測値に及ぼす影響を調べるために、光路上のブンゼンバーナの位置を変化させて計測を行った。図 2-9 は火炎の位置と計測された平均粒径 D_{10} の関係をプロットしたもので、ブンゼンバーナをそれぞれ送光系の手前、あるいは受光系の手前に設置した場合の計測結果である。また、図 2-10 は同じく火炎の位置と D' の関係をプロットしたもので、いずれも PDA 光学系の光軸にかかる火炎部分の平均温度と変動の大きさが等しくなるよう $H=50\text{mm}$ に固定した。これらの結果を見ると、光路上の火炎の存在は、火炎形態（青炎または輝炎）や、設置位置に関わらず、計測される平均粒径値にはほとんど影響を与えないことが分かる。また、いずれの条件においても、平均粒径は $153\ \mu\text{m} \pm 3\ \mu\text{m}$ の間にあり、平均粒径に関しては、火炎が光路上のいかなる位置に存在しても計測精度は十分と言える。

一方、測定値のばらつきは火炎の設置位置によって大きく異なる。すなわち、送光系、受光系のどちら側に火炎を置いて、光学系と火炎の距離が近いほど、 D' の値は大きくなる傾向が見られる。

送光系、受光系それぞれの前に置かれた火炎の影響は、まったく性質の異なるものと考えられるので、それぞれの場合について区別して誤差要因を考える。

まず、送光系の光路上に火炎が存在する場合、火炎による空間の屈折率の微小な変化が、測定体積を形成する 2 本のレーザー光を微妙に屈折させ、測定体積の位置や大きさ、測定体積内でのレーザー強度分布が変化し、計測値にばらつきが表れるものと考えられる。そのため、送光系に火炎が近いほど 2 本のレーザー光の屈折による測定体積のずれが大きくなり、 D' も大きくなるといえる。

一方、受光系の光路上に火炎がある場合、ポリスチレン粒子からの散乱光信号が火炎の存在する領域で微妙に屈折し、信号の質を低下させる（目視ではあるがオシロスコープをモニタすることにより確認される）とともに、位相を変化させる。また、本実験で用いた受光光学系は、図 2-11 に示すように受光開口窓が U1, U2, U3 の領域に分割され、それぞれに対して光電子増倍管が割り当てられている⁽²²⁾。このため、受光系に火炎が近いほど開口窓が屈折率の不均一な空間を多く見こむことになる。このとき、領域 U1, U2, U3 を通してそれぞれの

光電子増倍管に達するドップラ光はさまざまに屈折し、位相が変化することが誤差を生じる要因と考えられる。

火炎平均温度と温度変動の影響 これまでの実験では、光軸からバーナポート出口までの距離 $H=50\text{mm}$ 一定としていたが、この H を変化させて計測を行った。ここでは、 H を変化させることにより、光軸にかかる火炎部分の平均温度および温度変動の rms 値を変化させ、その影響を比較することを意図している。図 2-12 は火炎の位置と平均粒径 D_{10} の計測値の関係を示したものであり、ブンゼン火炎を送光系と測定体積の間、あるいは受光系と測定体積の間に置いたときの計測結果である。図 2-13 は同じく火炎の位置と測定された粒径の rms 値 D' の関係をプロットしたものである。ここで、測定対象は直径 $153\ \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子であり、用いた火炎は前述の青炎である。

図 2-12 を見ると、ここでも平均粒径の計測値は $153\ \mu\text{m} \pm 3\ \mu\text{m}$ の間にあり、 H の値に依存しないことが分かる。一方、 D' については、 H の増加とともに大きくなり、特に受光系の前に火炎が存在する場合にその傾向が顕著であり、計測値のばらつきが大きくなる（図 2-13）。図 2-5 によると、 H が増加するにつれ、光軸にかかる火炎部分の温度は低下し、温度変動は大きくなるので、火炎の温度変動、すなわち密度変動を介しての屈折率の変動が、計測誤差発生の重要な影響因子であることが推測できる。

光路上の火炎によって生じる計測誤差は、測定体積の位置・大きさの変化、および送光レーザー光の交叉角の変化、ドップラ光の屈折による位相のずれ、受光系の視野の揺れなどによるものである。これらはすべて送光系からの射出レーザー光および粒子からのドップラ光が屈折の影響を受けることに帰着できると考えられる。よって、計測された温度変動（図 2-5）と発生した計測値のばらつきとの関係を調べる。

図 2-14 に示すように、測定体積中心に原点をとり、そこからレーザー光に沿って光源方向に距離を表す変数 η をとると、図 2-5 から上下 2 本の入射光に沿う温度変動の rms 値の分布 T'_u 、 T'_l が得られる。ここで下付添字 u 、 l はそれぞれ送光系レーザー光の上側と下側を示す。光路上の屈折率の変動は、測定体積からの距離が遠くで生じるほど、測定体積位置のずれとして影響が大きくあわられるので、送光系に対する温度変動、すなわち屈折率変動の影響は次式で定義される F_t に比例する。

$$F_t = \int_0^{f_t} \eta T'_u d\eta + \int_0^{f_t} \eta T'_l d\eta \quad (2.2)$$

ここで、 f_t とは送光系フロントレンズの焦点距離である。

前述の青炎を仮定し、それぞれの H と L_t についてこの値を求めると、 H 、 L_t と F_t 値の関係は図 2-15 に示すようになる。すなわち、 F_t 値は H の増加および L_t

の減少とともに増加する傾向があり、この傾向は前述の D' 値の傾向とよく一致している。

受光系に対する火炎の影響は、送光系に対する場合と同様に、受光系の焦点位置と測定体積位置のずれのほか、屈折率変化による位相のずれが考えられる。前者については上述の議論が適用できるが、後者については図 2-16 に示すように、受光空間 V 内の屈折率変動が影響を及ぼすと考え、その大きさは温度変動の rms 値 T' の空間分布を用いて定義される F_r 値に比例すると考えられる。

$$F_r = \int_V T' dV \quad (2.3)$$

H 、 L_r と F_r 値の関係を示す図 2-17 を見ると、 F_r 値は H の増加および L_r の減少とともに増加し、前述の D' 値と同様の傾向を示すことが分かる。

PDA 光学系に沿う空間の温度変動の rms 値を用いて導出された F_r 値および F_t 値が D' 値と同様の傾向を示すことから、温度変動、すなわち光路上の屈折率変動が計測誤差発生の主因であるとの推測が裏付けられたことになる。しかし一般の PDA 計測において光路上の温度変動を知ることはほとんど不可能であるので、計測時に測定可能な火炎の揺れによって生じる測定体積位置のずれを実測し、計測誤差との対応を評価することを試みる。

図 2-18 は屈折によるレーザー光の移動量の計測と、ポリスチレン粒子の PDA 計測の同時測定のための実験装置の概略図である。PDA 光学系およびポリスチレン粒子回転部は前述のものと同じである。ここでは、光路上の火炎によるレーザー光の揺れを評価するために、PDA 送光系から射出される 2 本のレーザー光をレーザートラップによって受け止め、レーザートラップ上の二つのレーザー光の軌跡を CCD カメラによって撮影した。レーザーの光路にかかる火炎部分の屈折率の変動が大きいほど、レーザー光の軌跡は大きく移動すると考えられる。実験はブンゼンバーナを設置しない場合、ブンゼンバーナを $L_t=150\text{mm}$ 一定とし、 $H=50, 75, 125\text{mm}$ に設置した場合について行った、用いた火炎は前述の青炎である。なお、CCD カメラによる撮影は 10 秒間行い、データ処理画面数は 300 枚とした (frame rate 30 駒/s)。

図 2-19 は計測されたレーザートラップ上のレーザー光の軌跡である。光路上に火炎が存在する場合の方がレーザー光の揺れが大きく、 H の増加と共にその揺れ量は大きくなっていることが分かる。ここで揺れ量を定量的に評価するために、図 2-20 に示すように、火炎を設置しない場合のレーザー光位置からの移動量 Δ_u と Δ_l の rms 値 Δ'_u と Δ'_l を求め、次式により揺れ量 Δ' を定義する。

$$\Delta' = \Delta'_u/L_p + \Delta'_l/L_p \quad (2.4)$$

ここで、 L_p は PDA 測定体積からレーザートラップまでの距離であり、下付き添字 u と l は、それぞれ送光系の上側レーザー光と下側のレーザー光を意味している。

図 2-21 に示すように、測定点のずれ Δ' と計測される粒径のばらつき D' 値の傾

向はよく一致することが分かる。D'値の絶対値は、個々のPDA光学系の設計パラメータの差異や計測設定値などの条件に依存して変化するため、計測誤差の一般的な補正関数を Δ' を用いて定義することはむずかしいが、計測時に送光系のレーザ光の揺れ量を測定することにより、火炎の影響による計測誤差の大きさを定性的に評価できることが示されたと考える。

2.3.2 レーザ出力の影響

火炎の存在がドップラ信号のS/N比を低下させる例として、図2-22にレーザ出力を変化させた場合の、計測サンプル数、データのバリデーションレート、D'値の変化を示す。火炎は受光系から距離 $L_r=125\text{mm}$ 、 $H=175\text{mm}$ の位置に設置されており、レーザ出力はレーザ交叉部において15、20、25 mWになるように変化させた。ここで、測定対象としたのは直径 $153\ \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子である。

これらの結果より、レーザーパワーの低い場合、火炎が光路上に存在することにより、信号のS/N比が低下し、有効なデータ数が減少することが分かる(図2-22(a), (b))。また、レーザ出力を上げると、棄却されるデータの数は減少するものの、測定されたデータから得られるD'値は、レーザ出力の大小には依存せず、むしろ火炎の存在の有無の影響が著しい(図2-22(c))。

2.3.3 火炎の大きさの影響

実際の噴霧火炎においては、火炎はPDA光路上にわたって広い範囲に存在している。そこで、そのような火炎を模擬するためにブンゼンバーナをさらにもう一つ加え、計2個のブンゼンバーナを光路上に設置して実験を行った。測定対象は直径 $78\ \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子である。図2-23および図2-24はそれぞれ送光系および受光系光路上に、(a)火炎を設置しない場合、(b)ブンゼンバーナ1を $L=200\ \text{mm}$ 、 $H=50\text{mm}$ に設置した場合、(c)ブンゼンバーナ2を $L=150\ \text{mm}$ 、 $H=50\text{mm}$ に設置した場合、(d)ブンゼンバーナ1および2を同時に設置した場合に計測された粒径の確率分布を示している。送光系、受光系いずれの側についても、2個のブンゼンバーナを同時に配置した場合、計測値のばらつきが大きくなっており、粒径計測値の分布は、バーナを一つずつ設置した場合の影響を重ね合わせたような結果となっている。先に定義した F_s 値および F_r 値を適用しても同様の傾向が得られることから、光路上の広い範囲にわたって温度変動、ひいては屈折率変動が存在するほど、計測誤差が増加する原因となると言える。一方、図2-25および図2-26に示される速度計測結果からは、粒径計測時にみられたような計測値の変動はみられず、一定の値を保っている。このことは計測原理から考えても明らかである。速度計測においては、粒子が測定体積を通過する際に発するドップラ光の周波数の値のみから速度を算出する。そのため、

光路上に屈折率の変化する領域があっても、周波数成分の変化はその領域内にとどまり、結局、受光されるときには周波数の値は元に戻っている。したがって速度計測値には影響が現れない。しかし、粒径計測の際にはドップラ信号の位相のずれから粒径を算出しており、ドップラ光が通過した空間の屈折率の変化は、光学的距離の変化として反映され、計測値に影響を与えることになる。

2.4 結言

PDA 計測において光路上の火炎の存在が計測に及ぼす影響について、既知の粒径を持つポリスチレン粒子を用いて計測値の定量的な評価を試み、誤差要因を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 速度計測においては、光路上の火炎の存在は計測値に影響を与えないが、データレートが低下する傾向がある。
- (2) 粒径計測においては、光路上の火炎の存在は計測される粒径平均値にはほとんど影響を与えない。しかし、計測値にばらつきが現れ、火炎が送光系および受光系に近づくほどばらつきは大きくなり、特に受光系の前に火炎が存在するときに計測精度が低下する。
- (3) 粒径計測においては火炎の揺れ、すなわち屈折率の変化が重要な影響因子であり、計測値に大きな影響を及ぼす。
- (4) 光路上の火炎の存在によって、ドップラ信号の S/N 比が低下するために、高レーザー出力が必要となる。
- (5) PDA 計測における光路上の火炎の影響による計測誤差を評価する指標として、レーザー光の揺れ量を取り上げ、その可能性を示した。

2.5 参考文献

- (1) Laurendeau, N. M., "Temperature Measurement by Light-Scattering Methods", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.14, (1988), pp.147-170.
- (2) Drust, F., Melling, A. and Whitelaw, J. H., Principle and Practice of Laser Doppler-Anemometry, (1976), Academic Press.
- (3) Bachalo, W. D. and Houser, M. J., "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions", Opt. Eng., Vol.23, No.5, (1984), pp.583-590.
- (4) Black, D. L., McQuay, M. Q. and Bonin, M. P., "Laser-Based Techniques for Particle-size Measurement: A Review of Sizing Methods and their Industrial Applications", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.22, (1996), pp.267-306.
- (5) 抜山四郎, 棚澤泰, "空気による液体微粒化の実験 (第 1 報)", 日本機械学会論文集, 4-14, (1938), pp.86-93.
- (6) McDonnell, V. G. and Samuelsen, G. S., "Application of Laser Interferometry to the Study of Droplet/Gas Phase Interaction and Behavior in Liquid Spray Combustion System", Combust. Sci.

- and Tech., Vol.74, (1990), pp.343-359.
- (7) 栗原昇, 池田裕二, 中島健, “エアアシストインセクタにより形成された噴霧の分散過程”, 日本機械学会論文集、61-582B, (1995), pp.759-765.
 - (8) Domnick, J., Lindenthal, A., Tropea, C. and Xu, T. -H., “Application of Phase Doppler Anemometry in Paint Sprays”, *Atomization and Spray*, Vol.4, (1994), pp.437-450.
 - (9) Li, S. C., Libby, P. A. and Williams, F. A., “Turbulent Sprays in Stagnation Flows”, *Atomization and Sprays*, Vol.5, (1995), pp.287-304.
 - (10) Gouesbet, G. and Gréhan, G., “Gaussian Beam Errors in Phase Doppler Anemometry and their Elimination”, *Fifth Symp. (Int.) on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, 11.6, (1990), pp.243-259.
 - (11) Hardalupas, Y. and Taylor, A. M. K. P., “Phase Validation Criteria of Size Measurement for the Phase Doppler Technique”, *Exp. in Fluids*, Vol.17, (1994), pp.253-258.
 - (12) Durst, F., Tropea, C. and Xu, T. -H., “The Slit Effect in Phase Doppler Anemometry”, *2nd Conf. (Int.) on Fluid Dynamic Measurement and its Applications*, (1994), pp.38-43.
 - (13) Ikeda, Y., Sekihara, F. and Nakajima, T., “Set-up Parameter Optimization of Phase Doppler Technique for Spray Measurement”, *7th. Conf. (Int.) on Liquid Atomization and Spray Systems*, (1997), pp.983-990.
 - (14) Saffman, M., “Automatic Calibration of LDA Measurement Volume Size”, *Applied Optics*, Vol.26, No.13, (1987), pp.2592-2597.
 - (15) Qiu, H. -H. and Sommerfeld, M., “A Reliable Method for Determining the Measurement Volume Size and Particle Mass Fluxes using Phase-Doppler Anemometry”, *Exp. in Fluids*, Vol.13, (1992), pp.393-404.
 - (16) Qiu, H. -H. and Sommerfeld, M., “Particle Concentration Measurements by Phase-Doppler Anemometry in Complex Dispersed Two-Phase Flows”, *Exp. in Fluids*, Vol.18, (1995), pp.187-198.
 - (17) Ikeda, Y., Hirohata, T. and Nakajima, T., “Measurement Uncertainties of Phase Doppler Technique due to Effect of Slit Location, Control Volume Size Effects”, *Developments in Laser Techniques and Fluid Mechanics*, (1997), pp.165-179, Springer-Verlag.
 - (18) Martin, J. K., “Transient Diesel Sprays: Application of the Phase/Doppler Particle Analyzer for the Measurement of Liquid Droplet Characteristics”, *燃焼研究*, Vol.91, (1992), pp.1-12.
 - (19) Pitcher, G., Wigley, G. and Saffman, M., “Sensitivity of Droplet Measurements by Phase Doppler Anemometry to Refractive Index Changes in Combustion Fuel Sprays”, *Fifth Symp. (Int.) on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 14.4, (1990).
 - (20) 水谷幸夫, 松本弥寸嗣, 香月正司, “熱電対による火炎温度とその変動の測定”, 日本機械学会論文集, 51-468B, (1985), pp.2656-2663.
 - (21) 南茂夫, 河田聡編著, 科学計測のための波形データ処理, (1986), CQ 出版社.
 - (22) DANTEC, PDA User's manual, p20.

表 2-1 PDA 光学系の仕様

<i>Transmitting optics:</i>	
Wavelength of laser beam	514.5 nm
Initial diameter of laser beam	1.34 mm
Focal length of front lens	500 mm
Beam separation	51.5 mm
Spot diameter	244.8 μm
Fringe spacing	5.0 μm
Fringe number	49
<i>Receiving optics:</i>	
Off axis angle	63 degree
Focal length of receiving optics	310 mm
Width of spatial filter	100 μm
Range: Maximum diameter	254.0 μm
Maximum velocity	1.5 m/s
Minimum velocity	-0.5 m/s
Bandwidth of signal processor	0.4 MHz
Frequency shift	40 MHz
Sampling time	100 s

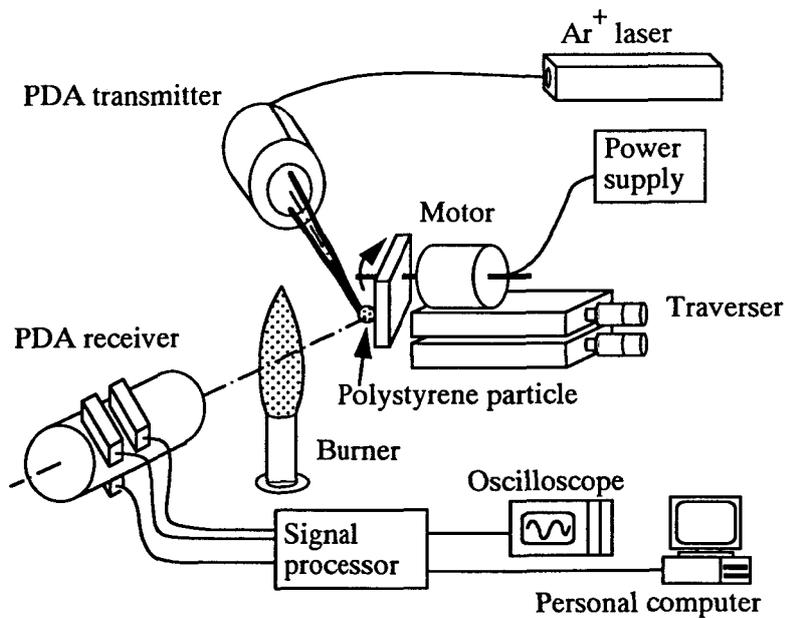


図 2-1 実験装置の概略

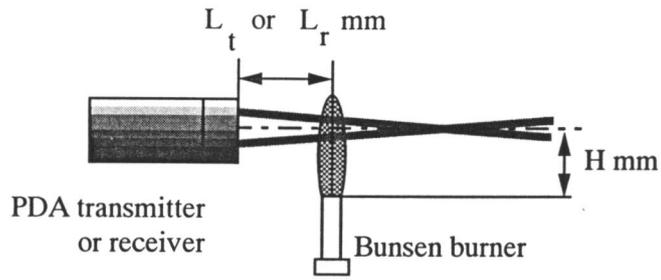


図 2-2 バーナ移動方向

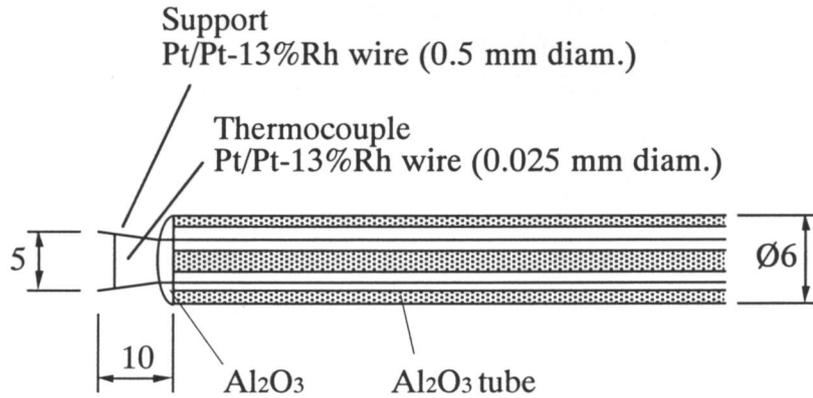


図 2-3 熱電対先端の構造

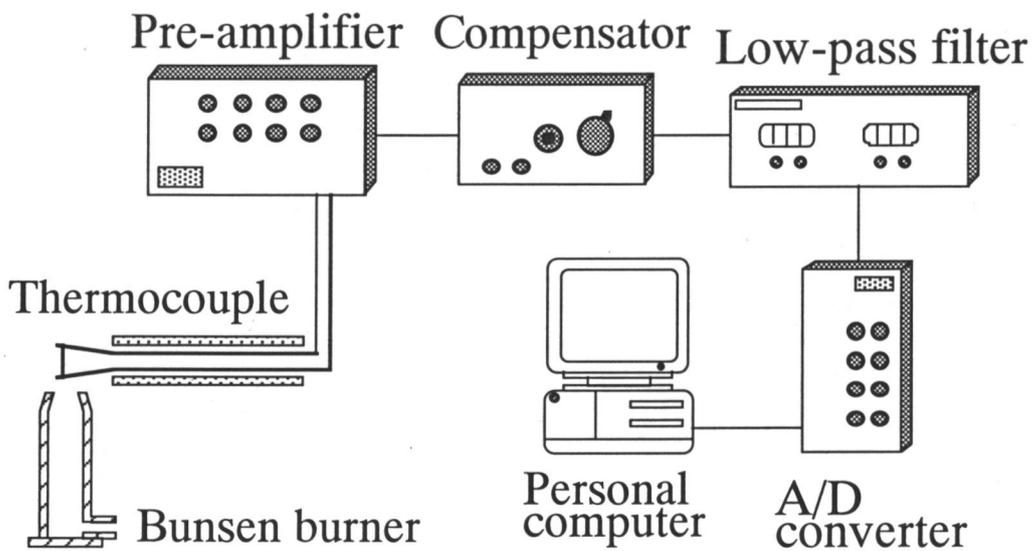
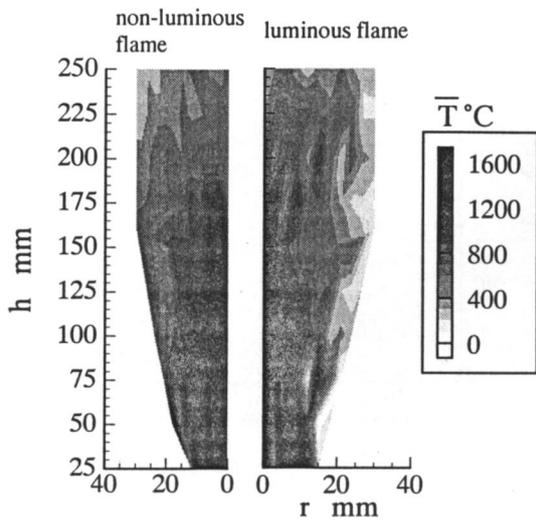
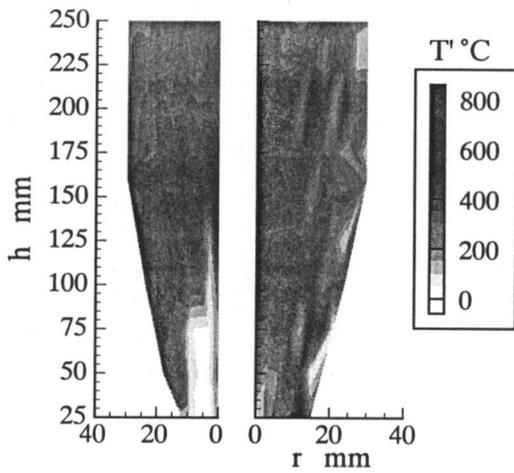


図 2-4 温度測定系

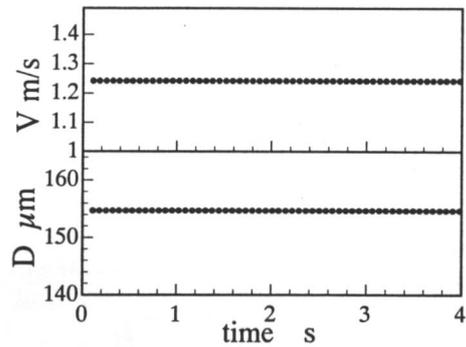


(a) 平均温度分布

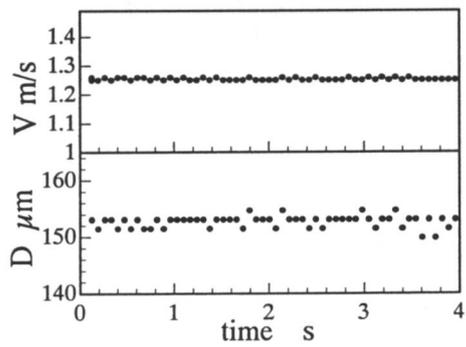


(b) 温度変動分布

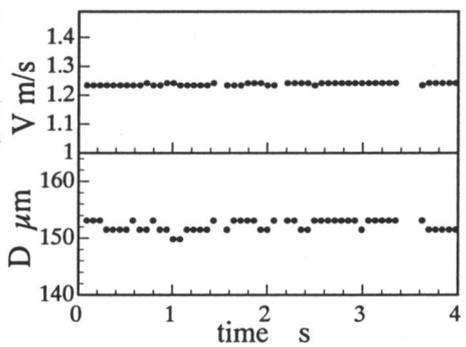
図 2-5 ブンゼン火炎温度分布



(a) without flame



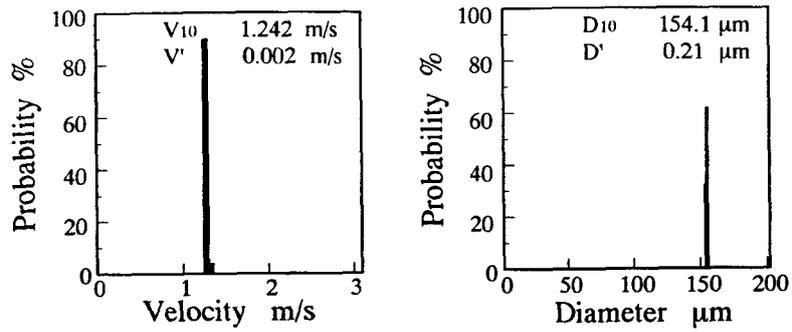
(b) with non-luminous flame



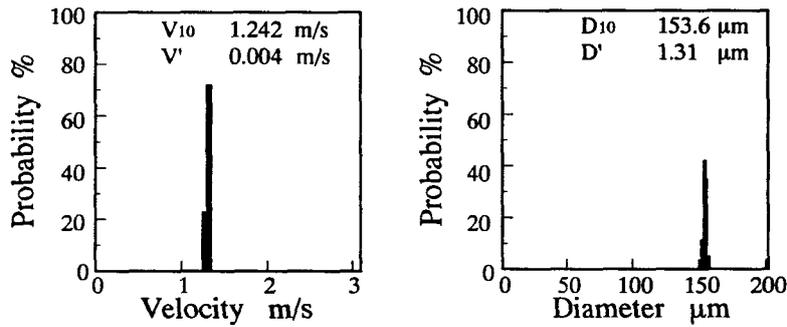
(c) with luminous flame

図 2-6 粒子速度および粒径の時系列データ

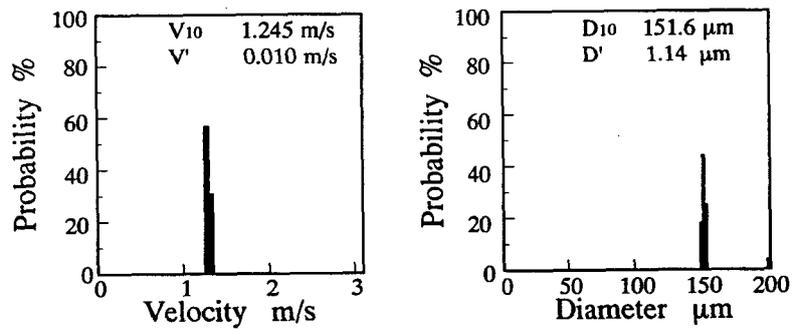
($L_f=150\text{mm}$, $H=50\text{mm}$)



(a) without flame



(b) with non-luminous flame



(c) with luminous flame

図 2-7 速度および粒径計測結果 ($L_f=150\text{mm}$, $H=50\text{mm}$)

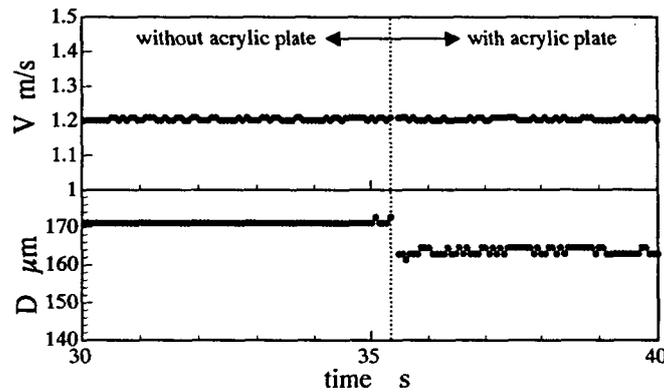
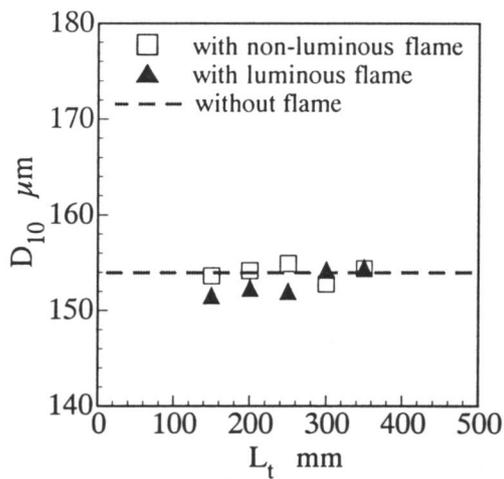
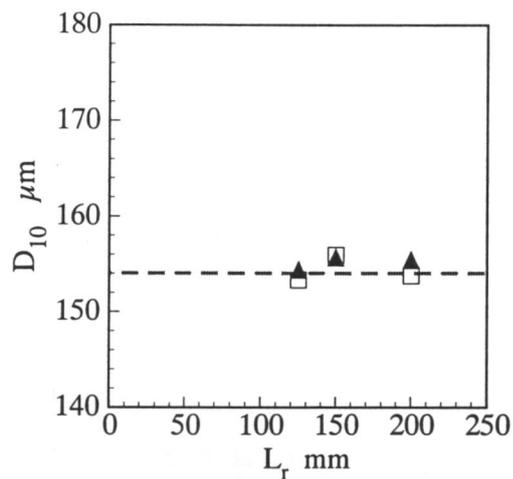


図 2-8 アクリル板挿入時の時系列計測結果

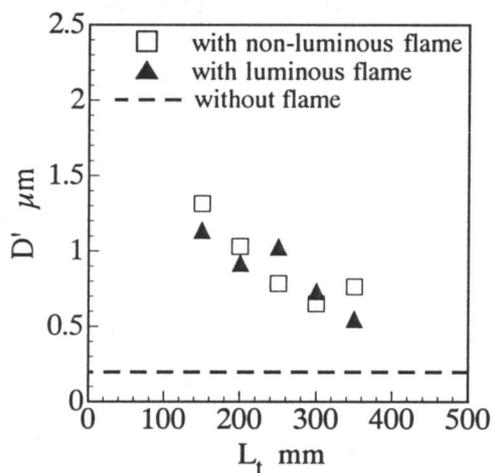


(a) Transmitter-side

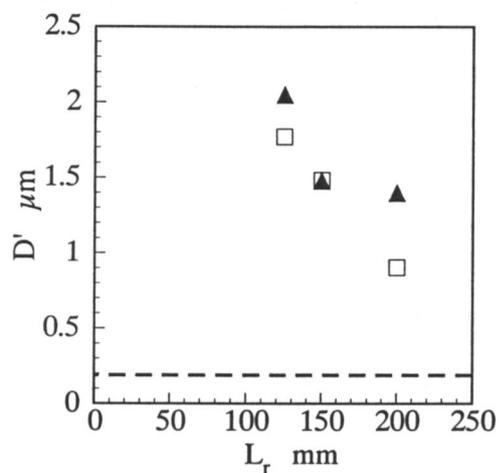


(b) Receiver-side

図 2-9 平均粒径計測結果におよぼす火炎位置の影響 ($H=50\text{mm}$)

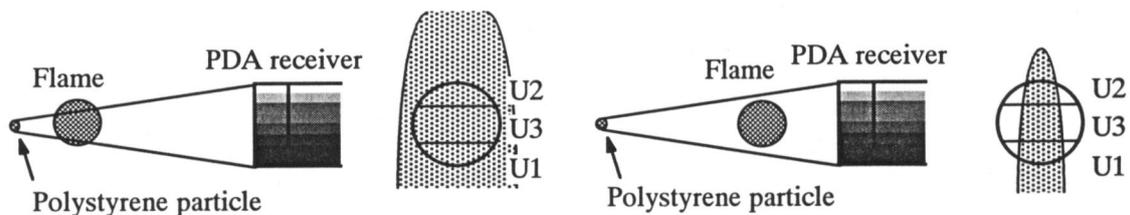


(a) Transmitter-side



(b) Receiver-side

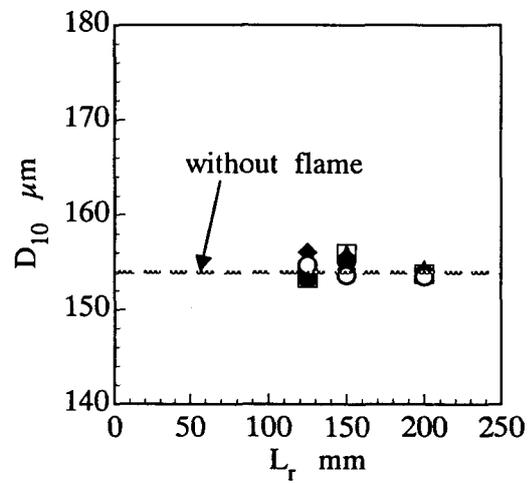
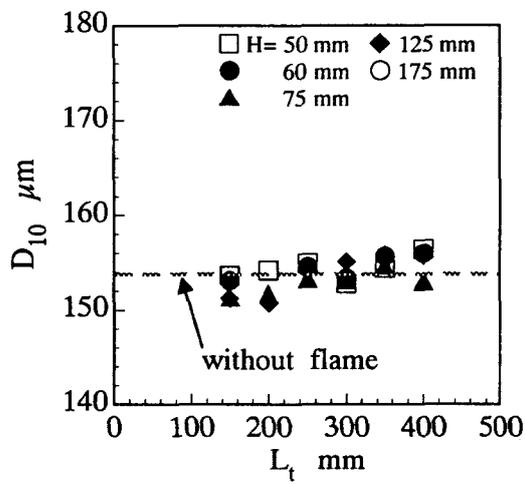
図 2-10 粒径計測値のばらつきと火炎位置の関係 ($H=50\text{mm}$)



(a) 火炎と受光系が遠い場合

(b) 火炎と受光系が近い場合

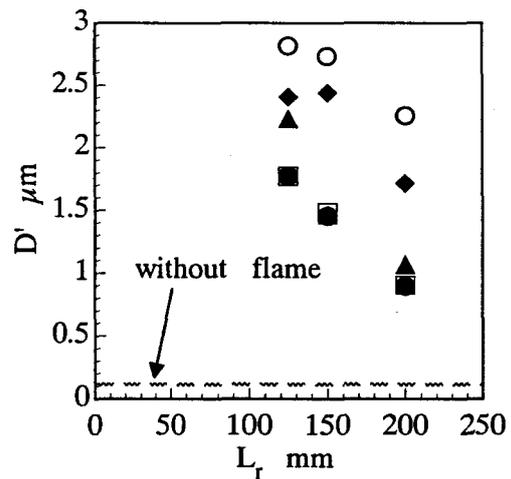
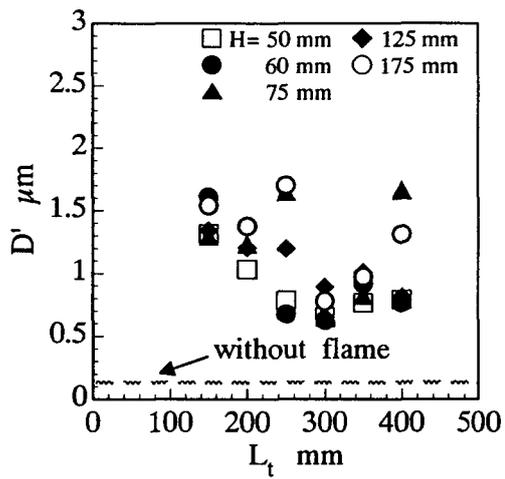
図 2-11 PDA 受光系の視野および開口窓と火炎位置の関係



(a) Transmitter-side

(b) Receiver-side

図 2-12 平均粒径計測結果と火炎位置の関係



(a) Transmitter-side

(b) Receiver-side

図 2-13 粒径計測値のばらつきと火炎位置の関係

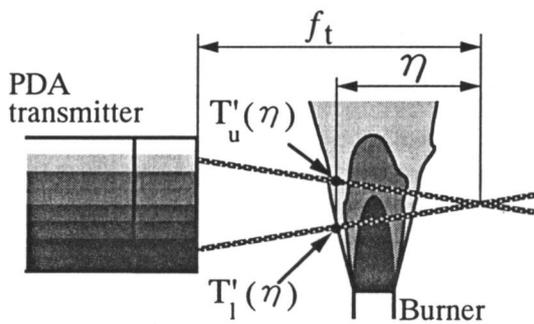


図 2-14 PDA 送光系と各変数の空間的關係

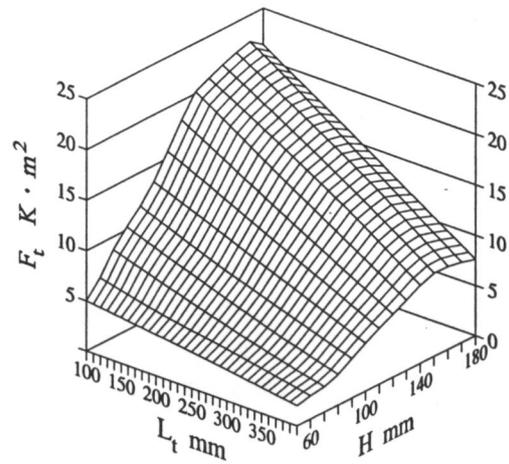


図 2-15 F_t 値の分布

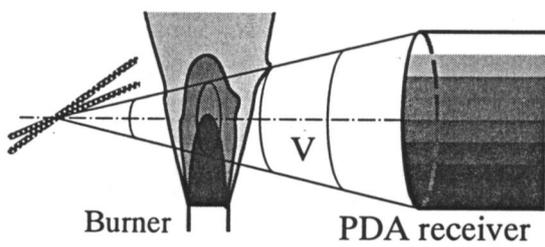


図 2-16 PDA 受光系視野の空間配置

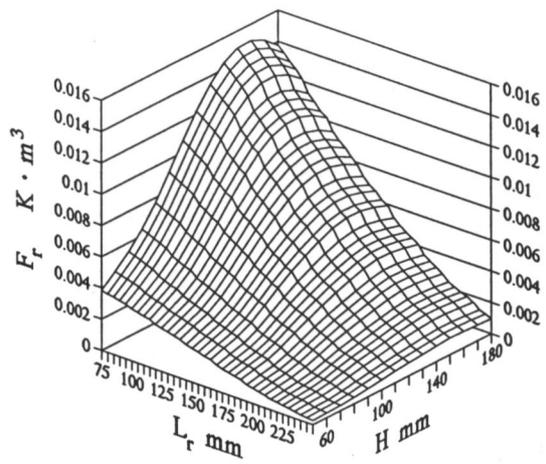


図 2-17 F_r 値の分布

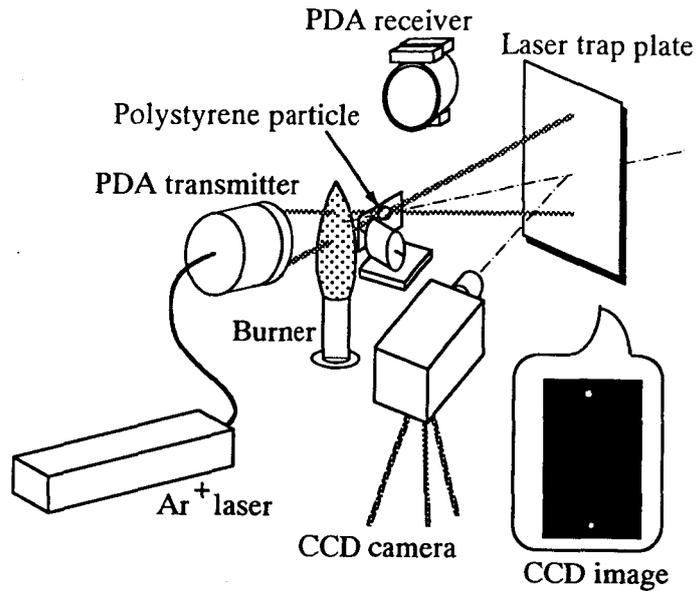
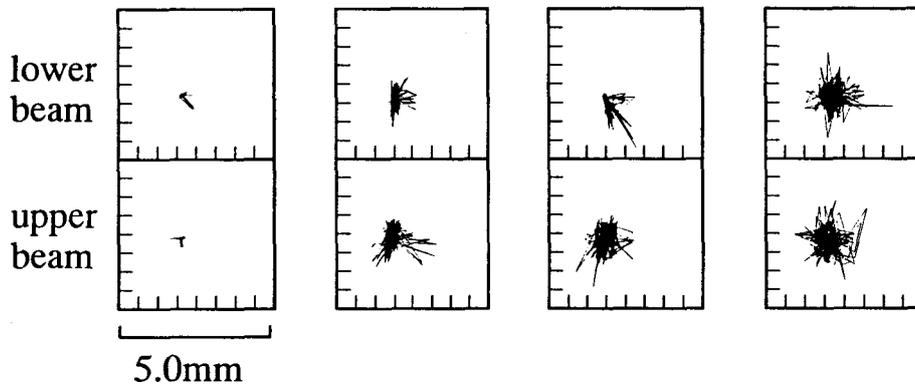


図 2-18 レーザ揺れ量計測のための実験装置



(a) Without flame (b) $H=50\text{mm}$ (c) $H=75\text{mm}$ (d) $H=125\text{mm}$

図 2-19 入射レーザー光のレーザートラップ上における軌跡 ($L_t=150\text{mm}$)

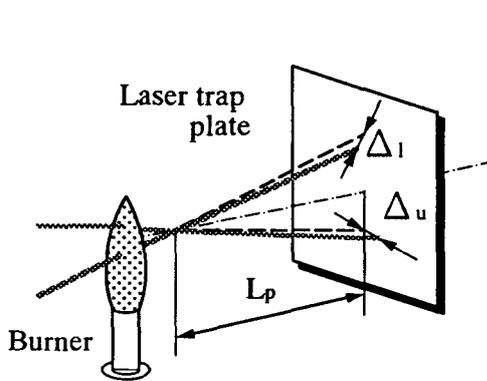


図 2-20 レーザ揺れ量の定義

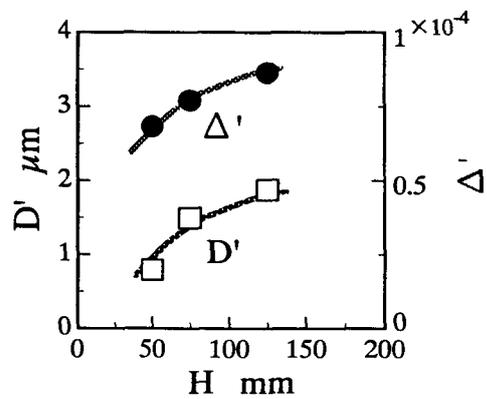
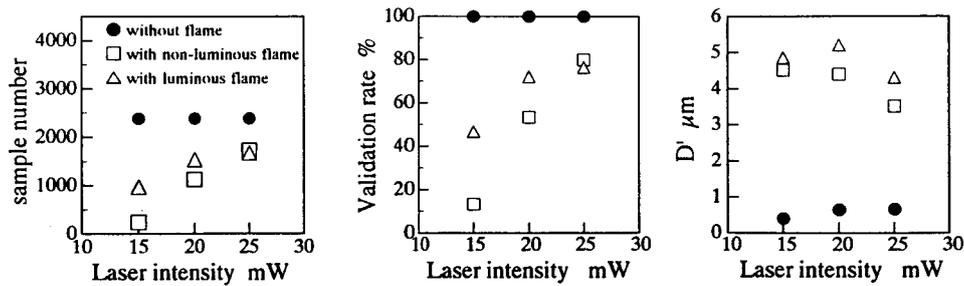
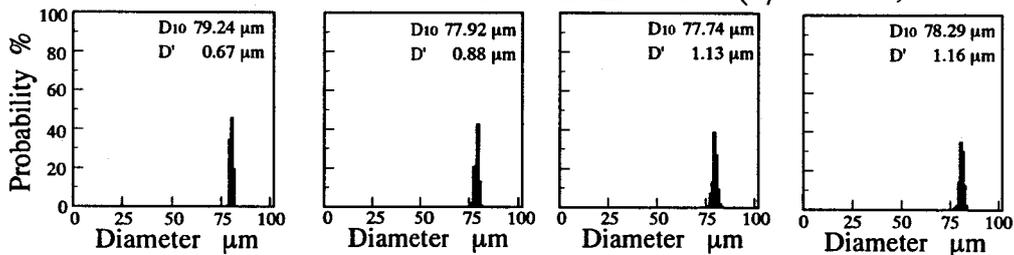


図 2-21 粒径計測値のばらつきと入射レーザー光の揺れ量の関係 ($L_t=150\text{mm}$)



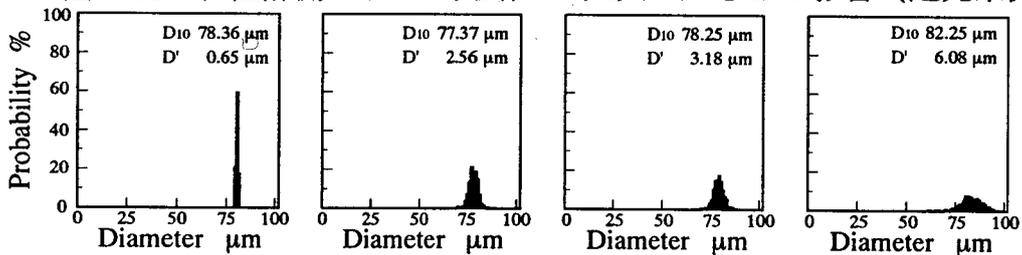
(a) サンプル数 (b) validation rate (c) 粒径計測値のばらつき

図 2-22 レーザ出力と計測誤差の関係 ($L=125\text{mm}$, $H=175\text{mm}$)



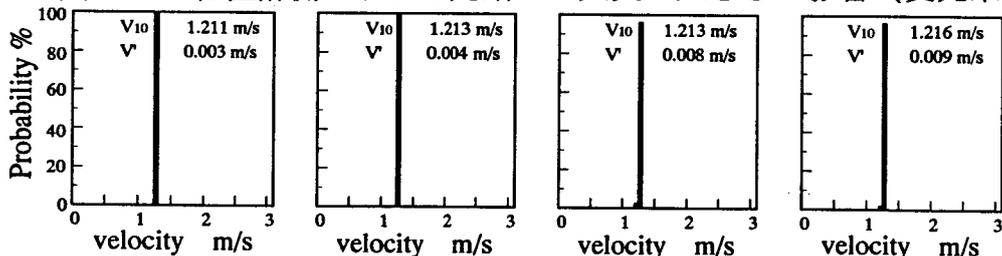
(a) Without flame (b) With burner 1 (c) With burner 2 (d) With burner 1 and 2

図 2-23 粒径計測における光路上の火炎の大きさの影響 (送光系側)



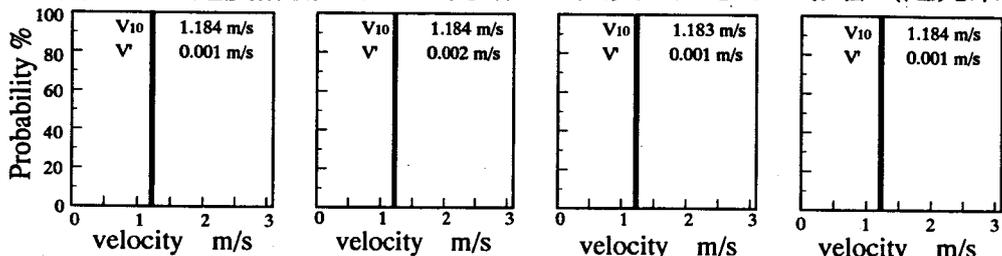
(a) Without flame (b) With burner 1 (c) With burner 2 (d) With burner 1 and 2

図 2-24 粒径計測における光路上の火炎の大きさの影響 (受光系側)



(a) Without flame (b) With burner 1 (c) With burner 2 (d) With burner 1 and 2

図 2-25 速度計測における光路上の火炎の大きさの影響 (送光系側)



(a) Without flame (b) With burner 1 (c) With burner 2 (d) With burner 1 and 2

図 2-26 速度計測における光路上の火炎の大きさの影響 (受光系側)

第3章 光学式受光プローブの 実験的性能評価

3.1 緒言

噴霧火炎は反応性二相流であり，長く計測が困難であるとされてきた．その大きな理由は，油滴の付着により熱電対や静電探針などの接触式プローブの使用が難しく，また得られる計測値の信頼性が低いことに起因している．

中部や赤松ら^(1, 2)は，予混合噴霧火炎の微細構造を調べるために，火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光，CH バンドの発光信号，油滴ミエ散乱光信号を，物理的な視野制限プローブを用いて計測した．しかし，視野制限プローブなどの接触式プローブは，燃焼場を乱す恐れがある．また噴霧断面像計測などの他のレーザ計測技術と同時に用いるのは難しいなどの問題も挙げられる．そこで非接触計測の可能な光学的に視野を制限した受光プローブ（以下では光学式受光プローブと称する）が必要となる．

火炎中の局所領域からの発光計測は，レーザ誘起蛍光(Laser Induced Fluorescence) 法⁽³⁾やレーザ断層像(Laser tomography)法⁽⁴⁾，位相ドップラ法(Phase Doppler Anemometry)⁽⁵⁾，などのプローブ光を対象場に入射する計測法とは異なり，受動的に信号を検出することから，受光光学系による計測領域の絞り込みが重要となる．火炎発光計測においては，従来よりガラスレンズとピンホールを用いた単レンズ光学系⁽⁶⁾が広く用いられているが，単レンズ光学系では，計測波長によって焦点位置が変わる色収差(chromatic aberration)の問題や，レンズの内側と外側を通過した光によって焦点位置が変わる球面収差(spherical aberration)の問題があり⁽⁷⁾，局所領域からの多波長にわたる発光の検出という点で問題が残る．

そこで，若林ら⁽⁸⁾は凹面鏡と凸面鏡を組み合わせ，光ファイバにより集光するカセグレン型受光系 (Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics, MICRO) を開発し，光線追跡法を用いた性能評価を行った．カセグレン光学系については，kaurenenn ら⁽⁹⁾やNyegen と Paul⁽¹⁰⁾によって多波長の画像の同時計測に適用された

例が報告されている。MICROは局所領域からの発光計測のための受光光学系として設計されており、若林らの解析の結果、あらたに開発したMICROは、

- 1) 色収差がないため各波長の焦点位置が等しい
- 2) 凹面鏡と凸面鏡を最適設計することにより球面収差をほぼ解消することができる
- 3) 光ファイバを用いているため容易に測定体積を可視化できる
- 4) 集光率分布特性に優れる

などの利点を有することが示された。しかし、若林らの行った性能評価法は光線追跡法を用いたシミュレーションであり、実験的に局所領域からの発光計測が可能であるかどうかを調べる必要がある。

そこで、本実験ではあらたに開発したMICROの実験的性能評価を行うことを目的に、まず最初に層流予混合ブンゼン火炎を対象とした実験を行い、次いで、乱流予混合火炎に適用し、MICROで受光されたOHラジカル自発光と静電探針によるイオン電流信号との比較を行った。さらに、MICROを予混合噴霧火炎に適用し、以前に用いられていた接触式の視野制限プローブで得られた火炎発光信号との比較を行った。

3.2 Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics(MICRO)の構成

図3-1、図3-2に実験に用いたMICROの概観の写真および構成を示す。MICROの光学配置については文献⁽¹⁾に詳述されている。図3-1に示されるように、MICROは凹面鏡および凸面鏡と光ファイバから構成されており、従来の単レンズ系光学系で問題とされる色収差の問題を解消し、球面収差についても極力抑えるよう最適化設計が施されている。なお、本実験で用いたMICROの凸面鏡から焦点位置までの距離は300mmであり、実質上、この距離がMICROの作動距離(working distance)に相当する。

測定領域からの発光は凹面鏡と凸面鏡により反射され、コア径200 μ mの光ファイバケーブル(三菱電線, ST-U200D-SY, NA=0.2)によって集光された後、図3-3に示す波長分離・検出部へと導かれる。ここで、光ファイバケーブルには火炎発光の波長範囲を考慮して、紫外および可視域透過型のものを用いた。波長分離部では、ファイバ端面から射出された光がコリメーティングレンズ(三菱電線, D-95HL-S・F, f=10mm)によって平行光にされ、2枚のダイクロイックミラーにより波長分離される。

このように光ファイバを利用することの利点としては、

- 1) 受光光学系と波長分離・検出部を分割することで、実験装置周りの省スペース化が図られ、光学系の設置および調整などの利便性が向上する。
- 2) 波長分離・検出部側の光ファイバをHe-Neレーザなどの可視光源と接続し、

ファイバ端面に光を入射してやることで、MICRO 前方に形成される測定体積を容易に可視化することができる。

などが挙げられる。特に、2) については、形成される測定体積は波長によらないために、OH ラジカルなどの紫外域や、現在、半導体レーザを用いた計測が注目されている CO₂ などの赤外域といった幅広い発光信号を検出する際の、光学系の微調整に威力を発揮する。

波長分離・検出部での検出波長は、実験の目的によって変更可能である。ここでは、層流および乱流予混合ブンゼン火炎を対象とした実験においては OH ラジカル自発光のみを検出し、予混合噴霧火炎を対象とした実験においては、OH ラジカル自発光、CH バンドの発光そして油滴からのミー散乱光を同時に検出した。各発光信号の物理的意味については、第 4 章で詳述している。各波長の分離にはダイクロイックミラー DM₁ と DM₂ および光干渉フィルター F (中心波長、半値幅は OH バンド発光用が 308.5nm と 18nm, CH バンド発光用が 430.5nm と 1.0nm, ミー散乱光用が 514.5nm と 1.0nm で、各々添字 OH, CH, MS で表示) を用い、分離後の各発光は光電子増倍管 PM (浜松ホトニクス, R106UH) によって検出される。光電子増倍管からの出力信号は I/V 変換器 (NF Electronics Instruments, Model LI-76) により電圧信号に変換され、自作の V/V アンプで増幅される。そしてローパスフィルター (NF ELECTRONIC, FV-665) で高周波ノイズを除去された後、A/D コンバータ (Elmec, EC-2390) により 12bit のデジタル記憶され、パーソナルコンピュータ (NEC, PC9801-VX) に取り込まれる。

3.3 層流予混合ブンゼン火炎を用いた検証

MICRO の性能評価を行う際に、まず層流予混合ブンゼン火炎を用いた実験を行った。実験には内径 13mm, 外径 16mm のブンゼンバーナを使用し、燃料にはプロパンを用いた。実験条件は、当量比 1.2, ノズル出口における断面平均流速 1.5m/s (Re=1300) に設定し、層流予混合火炎を形成した。実験は、MICRO の測定体積中心をバーナポートから上方 10mm の位置に設置し、ブンゼンバーナを MICRO に向かって、前後、左右にトラバースすることによってブンゼン火炎内の OH ラジカル自発光を計測し、通常問題とされる光軸に沿った領域からの発光の影響などを調べ、MICRO の空間分解能について検証を行った。

図 3-4, 図 3-5 にブンゼン火炎を MICRO に対して、左右および前後にトラバースして得られるブンゼン火炎内 OH ラジカル自発光強度の半径方向分布を示す。実験に用いた層流予混合ブンゼン火炎の反応領域は、目視によるとバーナ中心から半径方向に 5mm の位置にあったことから、特に図 3-4 の場合、すなわち、バーナを左右にトラバースした場合には反応領域のピークがよく検出されていることがわかる。しかし、反応がおこっていないはずの中心軸付近におい

でも OH ラジカル自発光信号は検出されている。このことは、図 3-5 の場合、つまり、バーナを前後方向にトラバースした場合においてより顕著に現れている。図 3-5 よりバーナを前後にトラバースした場合には、MICRO の実効測定体積が火炎内に位置しないときにも発光信号が検出されていることがわかる。ここで検出されているのは、明らかに MICRO の実効測定体積外からの発光信号である。

図 3-6 に若林らによって行われた光線追跡法による MICRO の集光率分布特性の解析結果を示す。若林らは光線追跡法による解析において、MICRO の実効測定体積は集光率のピーク値から $1/e^2$ となる領域で定義しており、MICRO 光学系の光軸(z軸)方向に 1.6mm、半径(r軸)方向に 200 μ m が実効測定体積であるとしている。しかし、本実験結果は、たとえ集光率分布に優れた光学系を用いたとしても、背景光として実効測定体積外からの発光信号を検知してしまう可能性があることを示している。

3.4 乱流予混合ブンゼン火炎を用いた検証

前節で述べたように、層流火炎を対象とした場合、集光率分布特性に優れた MICRO 光学系の利点が見られなかった。ここでは、乱流予混合ブンゼン火炎を用いて、MICRO による局所領域からの発光信号検出の可能性について調べる。

実験には内径 11.4mm のブンゼンバーナを用いた。MICRO の測定体積中心と静電探針(イオンプローブ)の先端位置はほぼ一致させるように設置し、火炎中の同じ領域からの OH ラジカル自発光とイオン電流をモニターできるように配慮した。図 3-7 は実験に用いた乱流予混合ブンゼン火炎の直接写真であり、図中、+印は MICRO およびイオンプローブの測定点である。測定点はバーナ中心軸上でバーナポート出口より上方 50mm の位置にあり、乱流予混合火炎の内炎の先端部に相当する。

実験に用いたイオンプローブ先端部の構造を図 3-8 に、イオン電流測定系を図 3-9 に示す。イオンプローブには水冷を施し、探針の素線は高温の火炎中において耐酸性と導電度の良い線径 0.1mm、感応部長さ 1.0mm の Pt-13%Rh 合金を用いた。測定系ではアースをバーナとし、静電探針の感応部は負の一定電圧(-18V)により陽イオンを捕獲し、検出されたイオン電流は I/V 変換器(NF Electronics Instruments, Model LI-76)により電圧信号に変換された後、V/V アンプで増幅され、A/D コンバータ(Elmec, EC-2390)により 12bit のデジタルデータに変換され、パーソナルコンピュータ(NEC, PC9801-VX)で記録される。

図 3-10 にイオン電流信号と MICRO によって検出された OH ラジカル自発光信号の同時時系列計測結果を示す。ここで、MICRO により検出された OH ラジカル自発光信号は、高周波成分のノイズ除去のためにカットオフ周波数 5kHz で設

定されたローパスフィルタを通過させてある。この結果より、MICROによるOHラジカル自発光信号がイオン電流信号とよく一致していることがわかる。イオン電流信号は火炎中の陽イオンを検出しており、OHラジカルと完全には一致しないが、火炎中の局所領域における燃焼反応の存在を示している。イオン電流信号がMICROによるOHラジカル自発光信号とよく一致していることから、MICROを用いた局所反応領域の検出が可能であることがわかる。このことは前節での層流火炎を用いた実験で得られた結果に反するが、以下のように解釈される。

まず、層流火炎と乱流火炎の相違は、燃焼反応領域が空間的に変動しているか否かにある。乱流火炎中では、実効測定体積外の燃焼反応領域からのOHラジカル自発光は、層流火炎を用いた検証実験で見られたように検出され、背景光として重畳してくるが、火炎面が変動しているために、火炎面がMICROの実効測定体積内を通り過ぎると、急激なピークとしてOHラジカル自発光信号が検出される。そのため検出される発光信号は、実効測定体積内からの発光が支配的となり、局所領域からの発光計測が可能となる。すなわち、燃焼反応領域が空間的に変動して存在している場合ほど、MICROの持つ集光率特性の優位性が現れてくるといえる。ここで、集光率特性は凹面鏡と凸面鏡の選定によって変化させることが可能であることを考えると、MICROを用いて局所領域からの発光計測を試みる際には、計測場にあわせた光学系の設計が必要であり、対象とする場において局所領域からの発光計測が可能かどうかを事前の予備実験により確認する必要がある。そこで次節では、予混合噴霧火炎にMICROを適用した場合に検出される発光信号と、以前に用いられていた接触式の視野制限プローブを用いた光学系によって検出された発光信号を比較することで、MICROを用いて噴霧火炎中における局所発光計測が可能であるかどうかを検証する。

3.5 予混合噴霧火炎を用いた検証

図3-11にMICROによって検出された予混合噴霧火炎中のOHラジカル自発光信号、CHバンドの発光信号、油滴ミ-散乱光信号の時系列計測結果を示す。ここで、MICROは測定体積中心がバーナポート中心軸から半径方向に15mm、バーナポート出口から上方50mmの位置にくるように設置されている。一方、図3-12に以前の実験における視野制限プローブを用いた受光光学系を示す。ここで、視野制限プローブは検出される火炎発光が、光路上の積分値にならないように挿入されており、検出領域は直径2mm、長さ4mmのつづみ上に制限されている。検出領域内からの発光信号は石英レンズLで集光され、ダイクロイックミラーDM₁とDM₂によって波長選択された後、ピンホールPに結像される。そして、光干渉フィルタF（中心波長、半値幅はOHバンド発光用が308.5nmと

18nm, CH バンド発光用が 430.5nm と 1.0nm, ミー散乱光用が 514.5nm と 1.0nm で, 各々添字 OH, CH, MS で表示) を通して背景光を除去され, 光電子増倍管 PM で検出される. 図 3-13 は, 視野制限プローブを用いた場合の, 同じ測定位置 (中心軸から半径方向に 15mm, バーナポート出口から上方 50 mm) における各発光信号の時系列計測結果である. 図 3-11 と図 3-13 を比較すると, 両光学系で得られた発光信号は同程度の分解能を示しており, また信号波形も非常に類似していることがわかる. 視野制限プローブを用いた過去の実験においては, 単レンズ光学系で集光していたために, 色収差などの問題を含んでおり, 両者の単純な比較はできない. しかし, ここで用いた波長分離部と検出部は, 視野制限プローブおよび MICRO を用いたいずれの場合においても全く同じ構成であることを考えると, MICRO は視野制限プローブを用いた以前の光学系と同等の空間分解能を有し, 予混合噴霧火炎中の局所領域からの発光信号の非接触での検出が可能であると考えられる.

3.6 結言

あらたに開発した光学式の受光プローブである Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics(MICRO)を層流予混合ブンゼン火炎, 乱流予混合ブンゼン火炎, 予混合噴霧火炎のそれぞれに適用し, 実験的に性能評価を行った. その結果, 以下の知見を得た.

- (1) MICRO の持つ空間的な集光率特性の優位性は, 乱流場などの発光領域が空間的に不均一に分布している場において現れる.
- (2) 乱流予混合ブンゼン火炎において, イオン電流信号と MICRO による OH ラジカル自発光信号はよく一致した.
- (3) 予混合噴霧火炎に MICRO を適用した場合, 以前に得られた視野制限プローブによる発光信号計測結果と同様の傾向を示したことから, MICRO による予混合噴霧火炎中の局所領域からの発光信号の計測が可能であることが示された.

3.7 参考文献

- (1) 中部主敬, 水谷幸夫, 平尾知之, “火炎発光と油滴ミー散乱による噴霧火炎と気液混焼火炎の構造観察”, 日本機械学会論文集, 55-516B, (1989), pp.2517-2525.
- (2) 赤松史光, 中部主敬, 水谷幸夫, 香月正司, “予混合噴霧流中で燃焼する油滴群の光学的計測”, 日本機械学会論文集, 60-577B, (1994), pp.3172-3178.
- (3) Dyer, M. J. and Crosley, D. R., “Two-Dimensional Imaging of OH Laser-Induced Fluorescence in a Flame”, Optics Letters, Vol.7, No.8, (1982), pp.382-384.
- (4) Boyer, L., “Laser Tomographic Method for Flame Front Movement Studies”, Combust. Flame, Vol.39, (1980), pp.321-323.

- (5) Bachalo, W. D. and Houser, M. J., "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions", *Opt. Eng.*, Vol.23, No.5, (1984), pp.583-590.
- (6) 伊藤宏一, 本望行雄, 宋戴翼, 五味努, "ラジカルの発光強度による瞬間燃空比の計測", *日本機械学会論文集*, 52-481B, (1986), pp.3362-3371.
- (7) 岸川利郎, *光学入門*, (1987), オプトロニクス社.
- (8) 若林卓, 赤松史光, 香月正司, 水谷幸夫, 池田裕二, 河原伸幸, 中島健, "多波長高空間分解能集光プローブの開発 (第1報, 光線追跡法による空間分解能の評価)", *日本機械学会論文集*, 64-619B, (1998), pp.925-930.
- (9) Kauranen, P., Andersson-Engels, S. and Svanberg, S., "Spatial Mapping of Flame Radical Emission Using a Spectroscopic Multi-Colour Imaging System", *Appl. Phys. B53*, (1991), pp.260-264.
- (10) Nguyen, Q.-V. and Paul, P. H., "The Time Evolution of a Vortex-Flame Interaction Observed Via Planar Imaging of CH and OH", *Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust.*, (1996), pp.357-364, The Combustion Institute.
- (11) 若林卓, "対向流噴霧火炎の形成, 計測ならびに構造に関する研究", *大阪大学博士論文*, (1997).

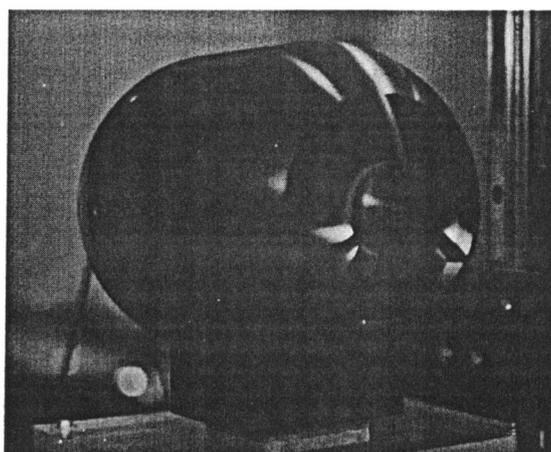


図 3-1 MICRO の外観写真

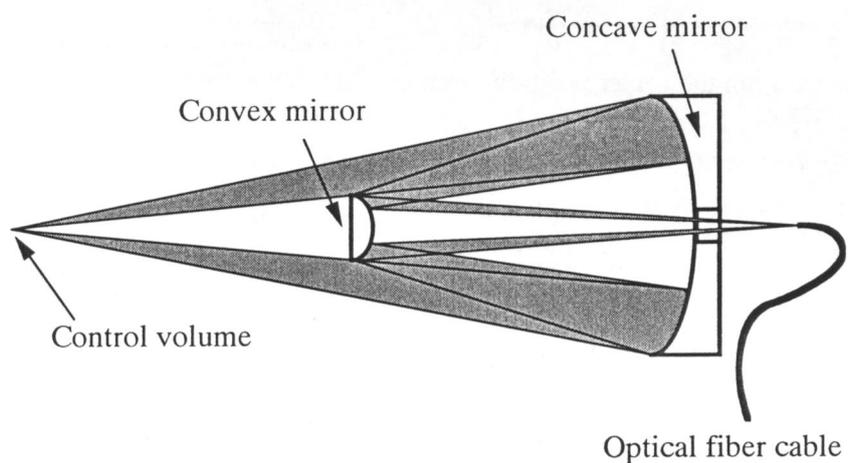


図 3-2 MICRO の構成

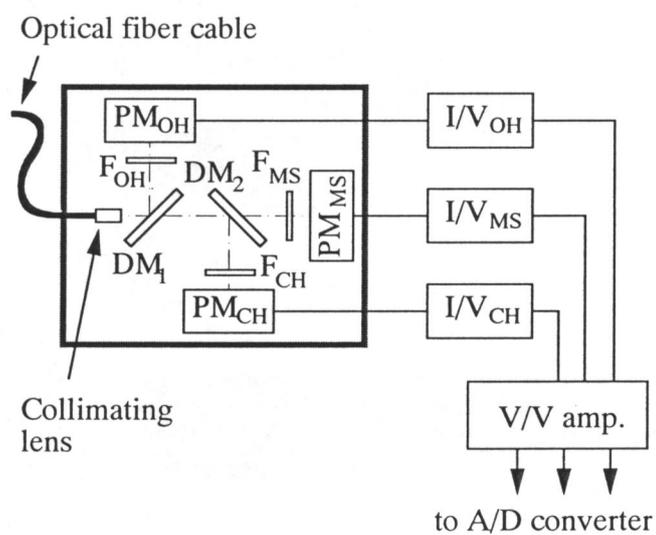


図 3-3 波長分離・検出部の構成

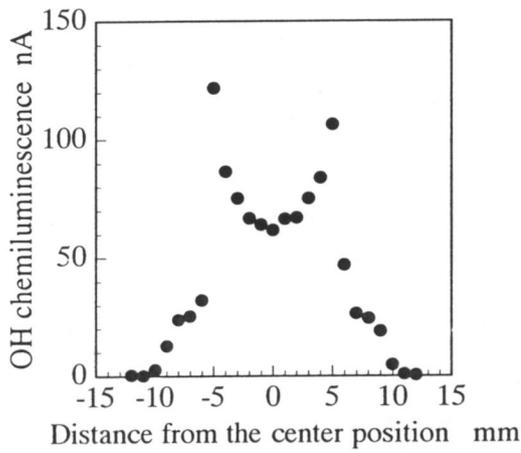


図 3-4 層流予混合ベンゼン火炎中の OH 発光強度分布 (MICRO を火炎に対して左右に移動)

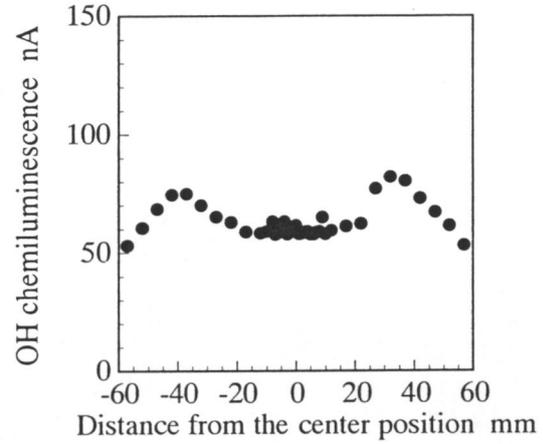


図 3-5 層流予混合ベンゼン火炎中の OH 発光強度分布 (MICRO を火炎に対して前後に移動)

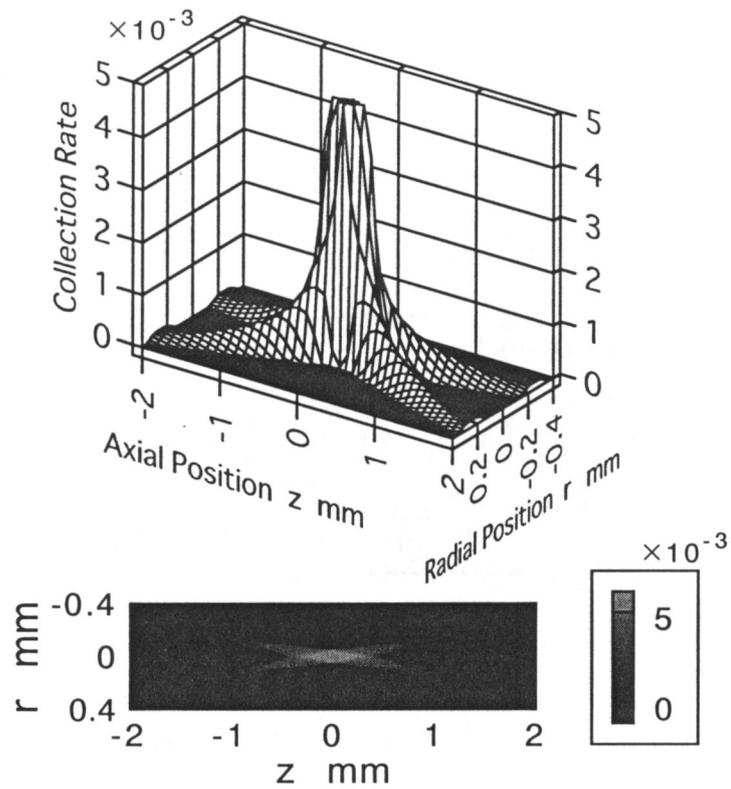


図 3-6 光線追跡法から計算される MICRO の集光率分布 (若林ら⁽⁸⁾より引用)

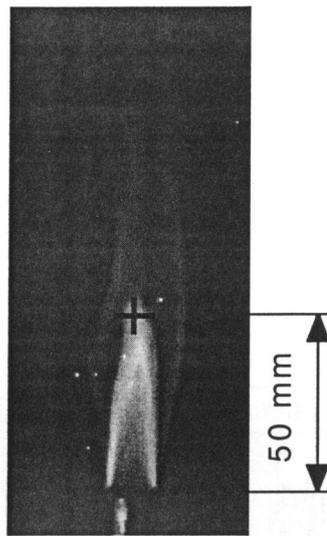


図 3-7 乱流予混合ブンゼン火炎の直接写真と MICRO および静電探針の測定点

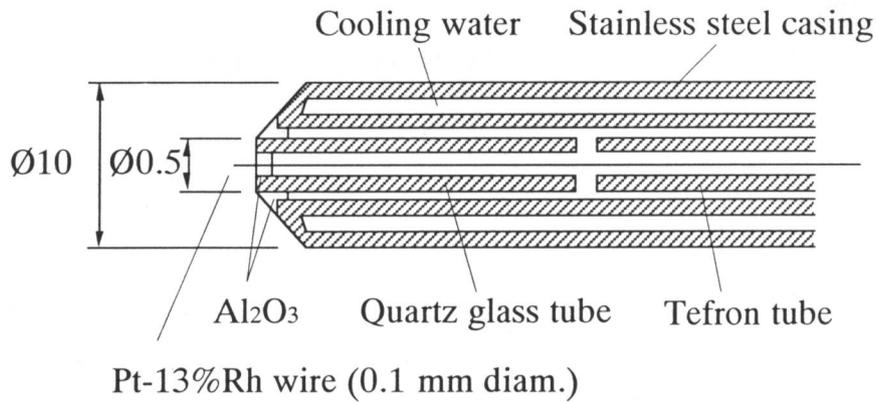


図 3-8 静電探針先端の構造

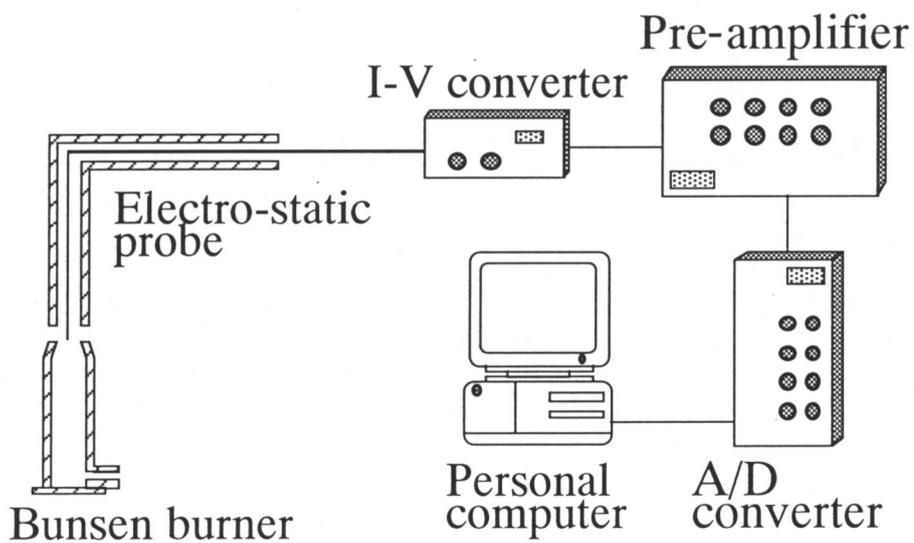


図 3-9 イオン電流測定系

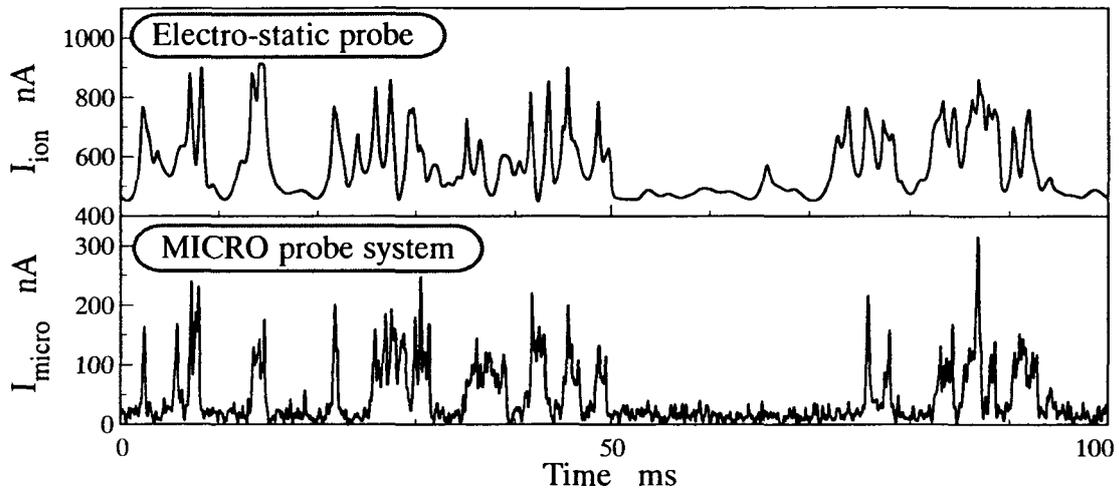


図 3-10 イオン電流信号と MICRO による OH ラジカル自発光信号の同時時系列計測結果

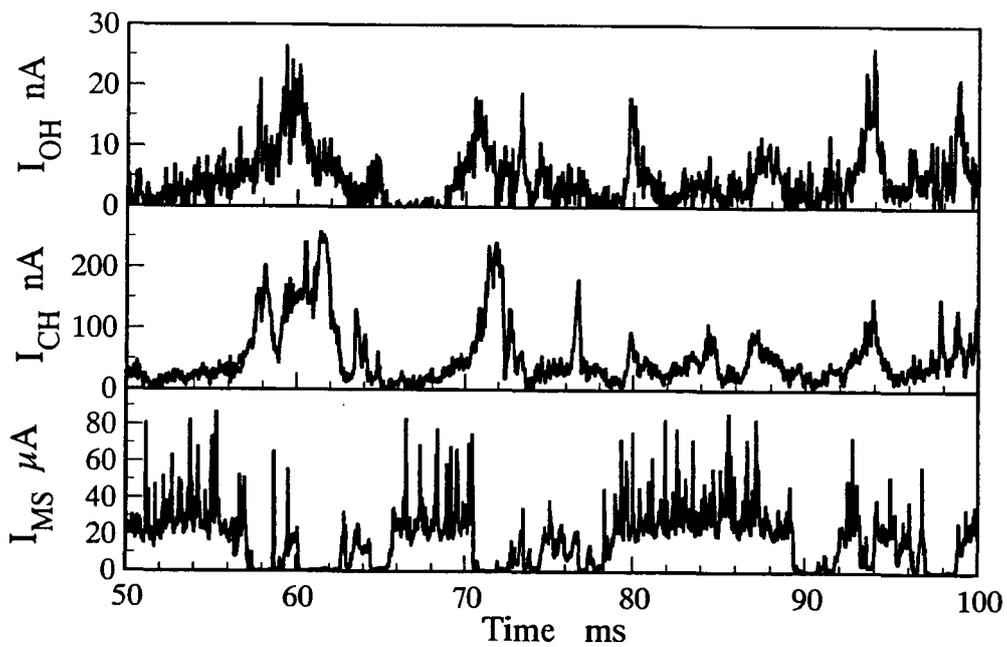


図 3-11 MICRO によって検出された予混合噴霧火炎からの発光信号 (測定位置 $h=50\text{mm}$, $r=15\text{mm}$)

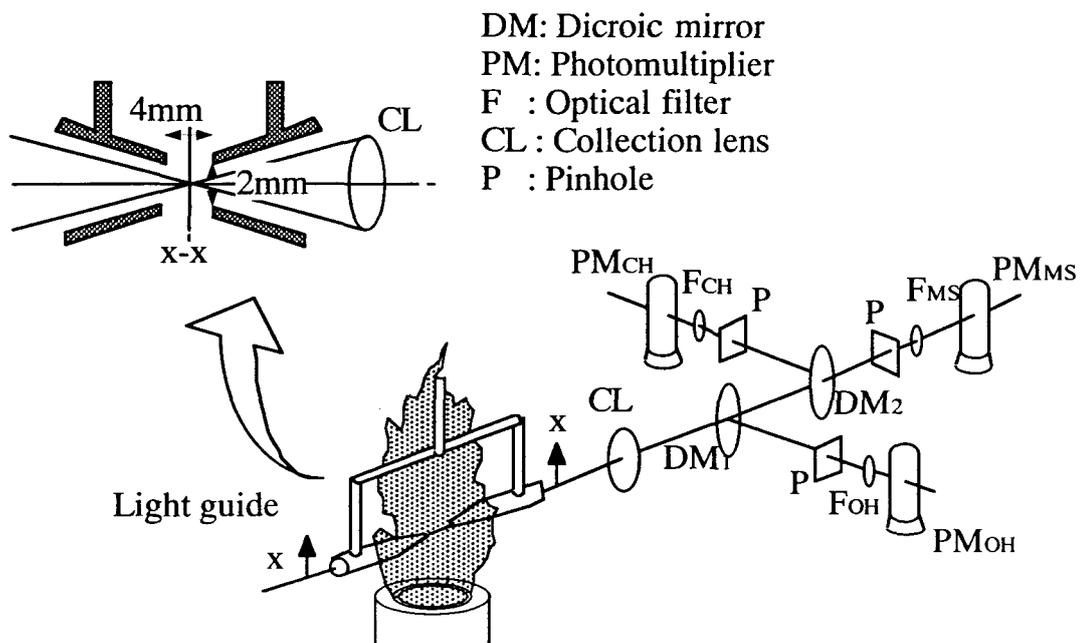


図 3-12 視野制限プローブを用いた受光光学系

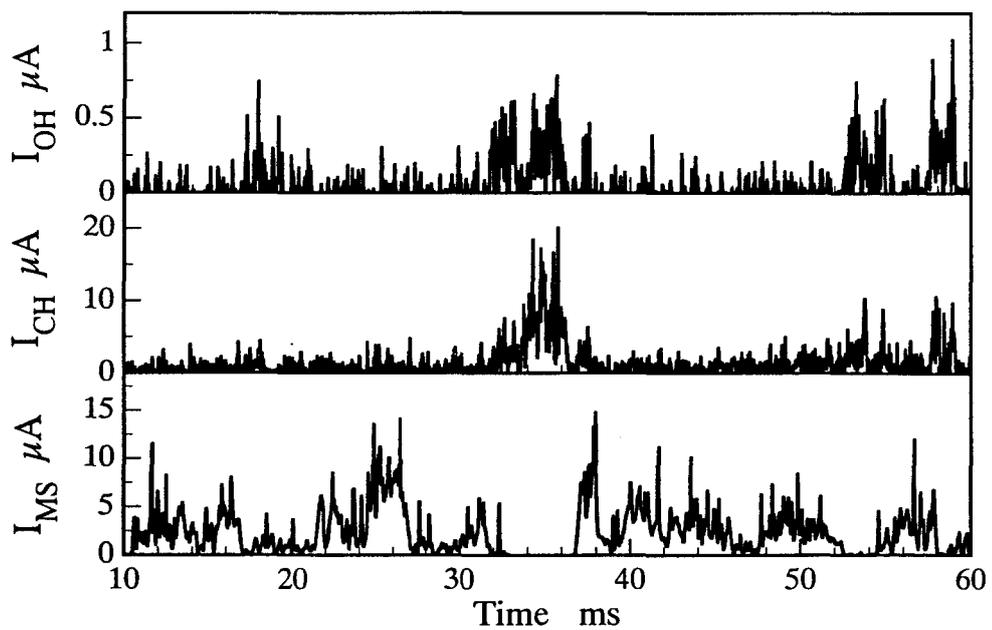


図 3-13 視野制限プローブによって検出された予混合噴霧火炎からの発光信号 (測定位置 $h=50\text{mm}$, $r=15\text{mm}$)

第4章 予混合噴霧火炎の巨視的 火炎構造の観察

4.1 緒言

第1章において噴霧火炎構造に関する従来までの研究を概説したが、噴霧火炎は予混合火炎的特性と拡散火炎的特性を併せ持っているといえる⁽¹⁾。すなわち、噴霧流中での火炎伝ば現象は予混合的特性のあらわれであり、個々の液滴の周囲に形成される火炎は拡散的特性を帯びている。さらに、噴霧火炎中での油滴群（油滴クラスター）としての燃焼挙動が Chiu ら^(2,3)によって解析されており、個々の油滴の燃焼ではなく、多数の油滴の集合体としての燃焼挙動の観察が必要とされている。実用燃焼器においては、このような噴霧火炎の燃焼機構の複雑さに加えて、流れ場の影響も重なり、火炎構造は一層複雑化している。そのため、基礎的燃焼機構の観察には、流れ場を単純化した予混合噴霧や対向流型噴霧によって形成される噴霧火炎を実験対象として取り上げられることが多い。いずれも、水谷^(4,5)によって噴霧燃焼研究に導入されたものであるが、対向流型噴霧火炎は、純粋に液体燃料のみを供給して火炎を保持することが困難であり、安定性にいまだ課題が残されている⁽⁶⁾。そこで安定性に優れる予混合噴霧流を用いた実験が従来まで行われてきた。

中部ら⁽⁷⁾は予混合噴霧流をパイロット火炎で保炎して得られる逆円すい型の噴霧火炎に対して、火炎構造の観察を行い、燃焼速度を実験的に導出した。予混合噴霧流は、二流体噴射弁により微粒化された噴霧を空気に乗せて搬送して形成されており、油滴と霧囲気空気の速度差が極力抑えられ、噴霧火炎構造や火炎伝ば挙動の観察に適している。その中で、OH ラジカル発光像の計測や、接触式の視野制限プローブを用いた火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴の速度信号の同時時系列計測を行った。さらに得られた各信号に統計解析と周波数解析を施すことによって、時間平均的ではあるが噴霧火炎中の油滴群燃焼挙動の観察に成功した。

次いで赤松ら⁸⁾は、逆円すい型の噴霧火炎に代えて、予混合噴霧を環状の水素拡散パイロット火炎で保炎し、燃焼性を向上させた上で、火炎発光信号と油滴からのミー散乱光信号に加え、位相ドップラ流速計による油滴粒径および速度の同時時系列計測を行い、個々の油滴群の群燃焼数を実験的に導出することに成功し、燃焼挙動とあわせて考察を加えた。

しかし、いずれの実験においても当時の計測技術の未発達から、予混合噴霧火炎中の油滴および油滴群の消失過程を時間連続的に捉え、空間的に把握することができなかった。そのため、火炎中の局所領域からの発光信号や、油滴速度および粒径をオイラー的計測手法により観察し、統計解析や周波数解析結果から噴霧火炎構造を推察するにとどまっていた。そこで本実験では、赤松らの用いた予混合噴霧バーナに対し、まず高速度 CCD カメラとアルゴンイオンレーザ(Ar-ion laser)を適用し、予混合噴霧火炎中の噴霧断面像を時間連続的に観察した。またその後、噴霧断面画像中の燃焼反応領域を特定するために、火炎中の局所領域からの火炎発光信号の検出を試みた。その際、従来の接触式の視野制限プローブではなく、第3章で示した光学式の受光プローブ MICRO(Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics)を適用して、噴霧断面像との同時時系列計測を行い、予混合噴霧火炎中の油滴群の形成および消失過程を観察するとともに、予混合噴霧火炎の巨視的燃焼挙動に関して考察を加えた。

4.2 実験装置および方法

4.2.1 実験装置の概略

本実験では、噴霧火炎中の油滴群の形成および消失過程と噴霧火炎の巨視的燃焼挙動解明のために、まず噴霧断面連続像の撮影を行った。さらに噴霧断面画像中の燃焼領域の特定のために、あらたに噴霧断面像と火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴ミー散乱光信号の同時時系列計測光学系を構築し、予混合噴霧火炎に適用した。図 4-1 に本実験で使用した実験装置を示す。以下では、本実験で用いた予混合噴霧バーナの構造を示した後に、それぞれの光学系について詳述していくこととする。

4.2.2 予混合噴霧バーナ

前述のように、実際の噴霧火炎中での現象を実験室レベルで理想化して、抽出するには、ある程度の油滴が存在していることが望ましい。さらに研究対象を噴霧火炎中の基礎的な燃焼挙動とするなら、工業用燃焼炉などでみられる循環や渦の存在は流れ場を複雑化するため、それらを極力排除した、より単純化した流れ場が必要となる。予混合噴霧は、微粒化の完了した油滴を空気流に浮遊させ、油滴と気相の速度差（スリップ速度，Slip velocity）を極力抑えた二相流

である。本研究で用いた予混合噴霧バーナも、図 4-2 に示すように同様の構造を有している。本実験で使用した液体燃料は市販の白灯油であり、燃料ポンプにより燃料タンクからバーナポート上流 440mm に設置された二流体噴射弁（スプレーイングシステム、セットアップ番号 2A）に送られる。二流体噴射弁において液体燃料は圧縮機から供給される霧化用空気で微粒化され、油滴濃度のほぼ一様な噴霧円すいの中央部だけがバーナポートに送られ、噴霧周辺部はドレインとして排出される構造になっている。燃焼用空気は送風機から、脈動抑制容器を通った後、計量オリフィスを通してバーナ底部から供給される。燃焼用空気は二流体噴射弁直上の絞りを通り、燃料噴霧と混合され、予混合噴霧流としてバーナポートから上向きに噴出される。なお、絞りとその上の仕切り円筒は、脈動防止のために挿入されている。また、パイロット火炎用の水素は、計量オリフィスを通った後、環状のパイロットバーナポートから噴出される。その他に、本実験では用いていないが、燃焼用空气にプロパンを予混合することによって、プロパン-灯油混焼火炎実験も行うことができる。さらに、逆火時の対策として、炭酸ガスを燃料噴射室の下部より噴出できる構造になっている。

図 4-3(a)は火炎の直接写真（露光時間 1/15 秒）、ならびにバーナポート部の詳細であり、図 4-3(b)は火炎の短時間露光写真（露光時間 1/1000 秒）である。この火炎像から、噴霧火炎中には瞬間的に非常に不均一な火炎塊が存在し、時間的・空間的に不均一な構造を持っている様子がうかがえる。バーナポート内径は 52.7mm のステンレス製で、周囲に幅 1mm の環状の水素拡散パイロットバーナを有している。その外周には内径 58.7mm、外径 80.9mm の環状の流路に主流と同軸・同速の空気を流して火炎を安定させるとともに、噴霧流線の拡がりを抑える構造になっている。

実験条件は、燃焼用空気の断面平均流速 5.5m/s、灯油-空気質量流量比 $0.045\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$ （当量比に換算すると約 0.75）、霧化用空気圧力 0.4MPa とした。ここでは、図 4-3 に示すように、バーナポート中心を原点とし、火炎下流方向に h 軸を、半径方向に r 軸をとった。

4.2.3 噴霧断面像撮影の光学系

燃焼研究においてミー散乱によるレーザ断層像撮影法（レーザトモグラフィ）を最初に適用したのは、Boyer ら⁽⁹⁾である。彼らは予混合気中に添加されたシード粒子（油滴）が火炎面において消失することを利用して、乱流予混合火炎中の火炎面の挙動を一次元的に観察した。今日では、CCD カメラなどの撮影機器の発達にともない、二次元像の撮影が、数 ns の高時間分解能と、数 μm の高空間分解能で可能となっている⁽¹⁰⁾。

噴霧火炎中においては、多量の燃料液滴が存在するため、燃料液滴そのもの

がシード粒子となり、レーザーシートによって油滴を照射し、油滴からのミー散乱光を撮影することで、火炎中の噴霧断面像が容易に可視化できる。その際、注意しなければならないのは、噴霧はサブミクロンオーダーから数百ミクロンオーダーまでの粒度分布を持っており、入射レーザー光強度が同じでも、粒径によってミー散乱光強度が大きく変わることである。粒子からのミー散乱光強度は粒子直径の二乗、つまり、粒子の表面積に比例するため、より小さな油滴を画像上で検知するには、より高出力のレーザーが必要となることはいうまでもない。そのため、レーザーシートの光源としては、通常、Nd-YAG (Neodymium Yttrium, Aluminum, Garnet) レーザの第二高調波 (2nd harmonic, 532 nm) がよく用いられる。しかし、通常の Nd-YAG レーザはパルスレーザー (Pulse Laser) であることから、現象を時間連続的に観察することはできない。そこで低出力ではあるが、アルゴンイオンレーザー (Argon-ion Laser) などの連続発振レーザー (Continuous Wave Laser) と高速度カメラなどを用いて時間連続的な測定が行われる⁽¹¹⁾。最近では、パルスレーザーの高出力と連続発振レーザーの長所を併せ持った銅蒸気レーザー (Copper-vapor Laser) などを用いる例も報告されているが⁽¹²⁾、本実験では、アルゴンイオンレーザー (Spectra-Physics, Stable 2017, 発振波長 514.5nm, 実効出力 4W) を使用した。

図 4-1 に示すように、アルゴンイオンレーザーより射出されたレーザー光は、数枚の反射ミラーを介した後、平凹レンズ、平凸レンズ、シリンドリカルレンズにより厚さ約 0.3mm シート光となり、バーナポート上の垂直断面または水平断面を照射する。照射された油滴からのミー散乱光像は光干渉フィルタ (日本光学, 中心波長 514.5nm, 半値幅 1.8nm) を通して背景光を除去された後に、高速度 CCD カメラ (Kodak, Ektapro HS Model 4540) により、9000 駒/s で連続 2048 駒撮影される (実時間で 227ms に対応)。本実験では垂直断面像撮影の際には、レーザーシート高さ方向のレーザー強度の制約から、測定を h 軸方向に分割して行った。撮影は h 軸方向に 70mm の範囲について行い、得られた画像データは有効画素数 256×128 pixel (実空間で 140×70mm に対応) で 256 階調に変換され、デジタル記録される。

4.2.4 局所発光計測の光学系

まずはじめに、本実験で計測する OH ラジカルや CH ラジカルなどの活性化学種から放出される化学発光 (Chemiluminescence) の物理的解釈について述べる。

火炎中の化学発光とは、原・分子種が燃焼反応による余剰エネルギーによって励起され、基底状態に遷移する際に放出する発光であり、各化学種によって放出する波長が異なることから、反応領域の判定や、火炎構造の観察に広く用いられている。中でも、炭化水素系燃料の火炎では、OH, CH, C₂ ラジカルによ

る発光が顕著で、いずれも明瞭な帯構造(band structure)を持つことから、計測の対象となることが多い。Dyer と Crosley ら⁽¹³⁾によると、OH ラジカルは寿命時間が長いために、燃焼ガス中に広く分布するが、OH ラジカル自発光は、



なる反応で生じた励起状態の OH ラジカル OH* (*は励起状態を表す) が、



のように $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 遷移して基底状態に落ちる際に発する (0,0), (1,0), (1,1) バンドの発光が主であり、それぞれ 306.4nm, 281.1nm, 312.2nm の波長に対応している。ここで、 h はプランク定数、 ν は発光の周波数である。その強度は OH ラジカル自身の濃度ではなく、反応律速因子である CH ラジカル濃度と対応して、燃焼反応領域を中心に出現する。

また、CH 自発光は、



なる反応⁽¹⁴⁾ で生じた励起状態の CH ラジカル CH*が、



のように $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ 遷移して基底状態に落ちる際に発する、431.5nm をバンドヘッドとする (0,0) バンドの発光が顕著である。その強度は反応(4)の律速因子である C_2 ラジカル濃度と対応しており、おもに炭化水素の初期反応領域で観察される。

一方、 C_2 自発光は、 C_2 ラジカルが $A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u$ 遷移する際に発する 516.52nm をバンドヘッドとする(0,0)バンド (Swan バンド⁽¹⁵⁾) の発光が顕著である。

これらのラジカル発光信号は燃焼反応と結びついているので、火災の診断上、非常に有効な手がかりとなる。しかし、この場合注意しなければならないことは、得られる発光信号は、直接ラジカルの濃度を示しているのではないということである。ラジカルの発光強度は励起状態の化学種の濃度と、これが遷移する確率に依存する。さらに高温火災中では熱的励起により OH 自発光が発生するため OH 自発光領域と反応領域が完全には対応しない。また噴霧火災などの輝炎においては、火災中のすすからの固体発光が重畳していることも考慮しなければならない。

本実験では、噴霧火災中の OH バンド波長域と CH バンド波長域のそれぞれの狭帯域波長光を測定対象としたが、噴霧火災などの輝炎を呈する火炎を対象とする場合には、CH ラジカルから放出される自発光は、すすからの連続スペクトルに埋もれた形で現れる。一方、紫外域では連続スペクトルの成分が弱く、輝炎であっても OH バンド波長域を含む狭帯域波長光を測定することによって、OH ラジカル自発光を検出することができる。そのため、ここでは、OH バンド波長域で検出された発光は OH ラジカル自発光と考え、CH バンド波長域で検出

された発光については、ラジカル発光と輝炎発光の混在したものを検出しているとして考えるのが妥当^(8,16)であり、以下では CH バンド発光と表記する。

本実験では図 4-1 に示すように、噴霧火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光、CH バンド発光および油滴からのミー散乱光は、レーザシート照射方向から前方 45° の方向に設した局所発光計測用受光プローブ MICRO(Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics)によって集光される。集光された発光は光ファイバを通して波長分離・検出部へと送られる。MICRO 光学系および波長分離部の構成については、第 3 章で示したものと同一のものを使用しており、すでに前章 (3.2 節参照) にて詳述しているため、ここでは省略する。

4.2.5 信号処理系

図 4-4 に信号処理系のブロック線図を示す。噴霧断面像と各種発光信号の同時時系列計測の際には、A/D コンバータにより、OH ラジカル自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴ミー散乱光信号と高速度 CCD カメラからのシャッター信号の計 4 信号を計測した。A/D コンバータの計測条件としては、サンプリングタイムを 20 μ s に設定し、1 チャンネル当たり 45,000 個のデータが記録されるため、0.9 秒間の計測が可能である。なお OH ラジカル自発光信号、CH バンド発光信号については高周波ノイズ除去のためにローパスフィルタを通し、その際、カットオフ周波数は 20kHz に設定した。また、高速度 CCD カメラと A/D コンバータの同期にはパルスディレイ・ジェネレータ PDG (Stanford Research Systems, WC Model DG535) を用い、PDG から TTL 信号を高速度 CCD カメラおよび A/D コンバータのそれぞれの外部トリガ入力端子に入れて計測を開始した。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 噴霧断面像の撮影

図 4-5 および図 4-6 は噴霧断面像の一例であり、それぞれレーザシートを垂直方向および水平方向に照射して得られたものである。非燃焼時と燃焼時の噴霧断面像を併せて示しており、垂直断面撮影時には、レーザシート強度の制約から、ここでは $h=5\sim 75\text{mm}$, $h=65\sim 135\text{mm}$, $h=5\sim 75\text{mm}$ の 3 領域に分割してある。そのため、図 4-5, 図 4-6 とともに、それぞれの画像は同時刻のものではない。図 4-5 から非燃焼時には明確な境界をもった油滴クラスターは存在しておらず、“予混合噴霧”の条件が実現されていることがわかる。一方、燃焼時については、バーナポート近傍においては連続的に存在していた噴霧流が下流に行くにつれて分断され、油滴クラスターが形成されていく様子が見えてくる。このことは図 4-6 の水平断面像からも示されており、バーナ上流部では連続的に噴霧流が存在しているのに対し、バーナ下流部においては、油滴クラスターが空間的に

散在していることがわかる。

油滴クラスターの形成過程についてさらに詳しく考察を加えるために、図 4-7 に撮影領域 $h=5\sim 75\text{mm}$ における噴霧断面連続画像の典型的な例を示す。画像は 8 駒（画像間 0.89ms に対応）おきに示している。バーナポート近傍では連続的に存在する噴霧流がバーナポート周囲のパイロット火炎によって噴霧流周辺部からわずかに消失していき、下流に行くにしたがって、噴霧流が先細りしていく様子が観察される。しかし、図 4-7 と同一撮影領域においても、異なる時刻においては図 4-8 に示すような現象も見られる。すなわち、図 4-7 とは異なり、図中に矢印で示した位置から、連続噴霧流が半径方向に大きく浸食されていることがわかる。このような現象は時折見られるが、噴霧断面像だけからでは、ここで見られたような急激な噴霧の消失が火炎伝ばに起因するのか、噴霧流の乱れによる油滴の空間的な移動によるものなのかを判別することはできない。

図 4-9 は撮影領域 $h=65\sim 135\text{mm}$ における噴霧断面連続像の一例である。バーナポート近傍において連続的に存在していた噴霧流は、この領域において図中矢印で示されるように分断され、複雑な形状の油滴クラスターが形成されている。さらに図 4-10 に示された下流領域 $h=125\sim 195\text{mm}$ における連続断面像を見ると、この領域に至るまでに、大部分の油滴は消失している。しかし、残存している油滴クラスターは、前述の領域 $h=5\sim 75\text{mm}$ に見られたような急激な形状の変化もなく、油滴クラスター周囲から次第に消失し、下流に流されていく様子が観察される。これは、油滴クラスター自身が燃料蒸気の供給源となり外部から拡散燃焼的に消失していくためと考えられるが、やはり、油滴断面画像の観察からは厳密な判断ができない。そこで次項では、これら噴霧断面計測だけでは明らかにできない点を考察するために、噴霧断面像と局所からの発光計測を同時に行い、その解明を試みる。

4.3.2 噴霧断面像と局所領域からの発光信号の同時時系列計測

画像上の MICRO の測定体積中心位置の決定 前項では、予混合噴霧火炎中で、燃焼時に油滴クラスターが形成されており、その形成過程において、バーナポートから連続的に存在している噴霧流の一部が急激に消失していく様子が観察された。また、バーナ下流部においては、連続的な噴霧流はもはや存在せず、油滴クラスターがその外縁部から次第に消失していくことが確認された。しかし、いずれも噴霧断面像からは燃焼反応領域が特定できないために、噴霧流の急激な消失が何に起因しているのか、また、油滴クラスターの緩慢な消失は燃焼反応によるものなのか、といったことまでは考察できなかった。そこで、噴霧断面像と火炎中の局所領域からの発光信号の同時時系列計測を行うことによって、それらの機構の解明を試みる。

まず、噴霧断面画像中の MICRO の計測位置の決定方法について述べる。実際に光学系の設定を行う際には、MICRO の波長分離部側の光ファイバ端面から He-Ne レーザを照射し、MICRO の焦点位置の可視化を行い、レーザシート内における MICRO の測定位置を確定した。しかし、上記方法は目視によっているため、画像中の数ピクセルの範囲までは MICRO の測定位置を確定することは可能であるが、どのピクセルかまでを特定することはできない。そこで、MICRO によって計測された油滴ミ-散乱光信号と、噴霧断面像中の各ピクセルの輝度値を比較することによって、噴霧断面画像中の MICRO の測定位置を特定した。

図 4-11 は MICRO によって計測された油滴ミ-散乱光信号と、噴霧断面連続像中のピクセル(130, 64)の輝度値を時系列データに再構成したものである。図中、参考のために、撮影された噴霧断面像を併せて示してある。ここで、両信号の相互相関係数は 0.789 であった。このような処理を、画像中の各ピクセルについて行い、MICRO により得られた信号と最も相関の高いピクセル位置を確定する。図 4-12 は MICRO からの油滴ミ-散乱光信号と、噴霧断面連続像から再構成された各ピクセルの輝度信号の相互相関係数を、画像上の各ピクセル位置に対応させて表示したものである。これより、ピクセル(130, 64)において、相互相関係数が最大となることから、噴霧断面像中の MICRO の測定体積中心はピクセル(130, 64)にあると決定される。

油滴クラスターの形成および消失過程 図 4-13 にバーナポート近傍の $h=15\text{mm}\sim 85\text{mm}$ における噴霧断面連続像と、 $h=50\text{mm}$, $r=15\text{mm}$ の位置（画像中 +印で表示）で検出された OH ラジカル自発光信号 I_{OH} , CH バンドの発光信号 I_{CH} , および油滴ミ-散乱光信号 I_{MS} の同時時系列計測結果を示す。 $t=57\text{ms}$ 前後（図中 A1~A5 の時間帯）において、画像からは図中白矢印で示すように、連続噴霧流が半径方向に急激に消失していく様子が観察される。この時、OH 信号、CH 信号はともに大きく立ち上がっており、図中 +印の領域において燃焼反応が起こっていることがうかがえる。このことより、噴霧流の消失は燃焼反応によるものであり、その燃焼反応領域が速い速度で噴霧流中を特定の方向に移動すること（これを選択的な火炎伝ばと呼ぶ）で、噴霧流が分断されていることがわかる。さらに注目すべきは、A2~A3 の時間帯において、ミ-散乱光信号と火炎発光信号が同時に立ち上がっていることである。このことは、噴霧境界内部にまで燃焼反応領域が存在していることを意味しており、興味深い。

次に、 $t=64\text{ms}$ 前後（図中 B1~B5 の時間帯）における、噴霧断面像を観察すると、 $t=62.7\text{ms}$ (B1 に対応) において、図中矢印で示した位置から、火炎伝ばが始まろうとしている。その後、火炎は図中矢印で示すように、左斜め上方に向かって伝ばしていくのがわかる。つまり、この位置より上流側にあった噴霧

流は何らかの理由で、火炎伝ばを妨げたと考えられる。このことは、図中の B4～B5 で示されたミー散乱光信号の立ち上がっている時間帯では、火炎発光信号の立ち上がりが見られないことにより確認できる。

以上の結果から、火炎は噴霧流中の燃焼しやすい領域を選択的に伝ばしていくと考えられ、さらに火炎伝ばの起こる際には、噴霧境界内部にまで燃焼反応領域が存在していると推察される。しかし、どのような条件において火炎伝ばがおり、どのような条件で火炎伝ばが妨げられるのかについては、未だ明らかにされておらず、今後より詳細な観察が要求される。

次に、連続噴霧流の分断によって形成された、油滴クラスタの消失過程について考察を加える。図 4-14 は火炎の下流域 $h=115\sim 185\text{mm}$ における噴霧断面連続像と、 $h=150\text{mm}$ 、 $r=15\text{mm}$ の位置（画像中に +印で表示）で検出された各種発光信号の同時時系列計測結果である。噴霧断面像から、この領域においては燃焼液滴の大部分がすでに消失していることがわかる。バーナ下流域で観察される油滴クラスタは、上流域での燃焼反応領域を通過した後、なおも残存しているものであり、何らかの燃焼しにくい特性を持っていると考えられる。そのような油滴クラスタは図中矢印で示したもののよう、その外縁部より次第に消失していく様子が観察される。この時の火炎発光信号を見ると、油滴クラスタのすぐ外側で燃焼反応が確認された（時間帯 C4～C5）。このことから、油滴クラスタの外縁部を覆うように燃焼反応領域が存在しており、クラスタの消失が、クラスタ自身が燃料蒸気の供給源となった拡散燃焼によるものであることがうかがえる。

また下流域で、一部の油滴クラスタはその消失の過程において、図 4-15 に示されるように、次第に輝炎を呈するように変化しながら消失していく様子が確認された。通常、画像から油滴クラスタと輝炎塊を判別することは容易ではないが、ここでは油滴クラスタはレーザシートの照射によって可視化されているため、その境界がはっきりとしており、輝炎塊はその境界がぼんやりとしている。このことから、図 4-15 において観察される油滴クラスタは、その消失過程で次第に輝炎塊となっていくことがわかる。そして、その機構は以下のように推察される。すなわち、バーナポートより連続的に供給される噴霧流は時間的・空間的に不均一であるために、一部分は燃焼しにくい特性（ここでは、過濃であると予想される）を持っている。そのため、噴霧流の一部は上流域での燃焼反応による消失をまぬがれ、油滴クラスタとして残存する。そして、下流域において、その外縁部からゆっくりと消失していくが、その際、周囲雰囲気が高温度であるために、すすを形成し、輝炎塊が発生する。噴霧火炎中でのすすの形成過程は燃焼排気物質低減の観点から重要であり、今後、油滴クラスタの燃焼過程を考察する上で考慮されるべき問題であると思われる。

4.4 結言

予混合噴霧火炎の燃焼挙動を巨視的観点から考察するために、噴霧断面連続像および火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴ミ-散乱光信号の同時時系列計測を行い、以下の知見を得た。

- (1) あらたに構築した噴霧断面像と火炎中の局所領域からの発光信号の同時時系列計測システムは、噴霧火炎構造解明に関して有用である。
- (2) 非燃焼時には油滴クラスターは形成されておらず、その一方で、燃焼時にはバーナポート近傍において連続的に存在している噴霧流が、予混合燃焼的な選択的伝ば現象によって分断され、油滴クラスターが形成される。
- (3) バーナ下流域において、油滴クラスターはその外縁部より次第に消失していき、その際、油滴クラスター自身が燃料蒸気の供給源となり拡散燃焼的に振る舞う。
- (4) 一部の油滴クラスターについては、バーナ下流域で次第に輝炎塊になる様子が観察された。

4.5 参考文献

- (1) Williams, F. A., *Combustion Theory Second Edition*, (1985), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (2) Chiu, H. H. and Liu, T. M., "Group Combustion of Liquid Droplets", *Combust. Sci. Tech.*, Vol.17, (1977), pp.127-142.
- (3) Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., "Internal Group Combustion of Liquid Droplets", *Nineteenth Symp. (Int.) on Combust.*, (1982), pp.971-980, The Combustion Institute.
- (4) 水谷幸夫, 西本武雄, "乱れのある噴霧流の火炎速度", *日本機械学会論文集*, 38-311, (1972), pp.1844-1854.
- (5) 水谷幸夫, "対向流噴霧火炎を用いた噴霧の燃焼機構と大気汚染物質生成機構に関する研究", 昭和 59 年度科学研究費補助金 (一般研究 B57460098) 研究成果報告書, (1985).
- (6) 若林卓, "対向流噴霧火炎の形成, 計測ならびに構造に関する研究", 大阪大学博士論文, (1997).
- (7) 中部主敬, "液体燃料噴霧の燃焼特性と火炎構造に関する研究", 大阪大学博士論文, (1990).
- (8) 赤松史光, "液体燃料噴霧の油滴群燃焼挙動に関する研究", 大阪大学博士論文, (1995).
- (9) Boyer, L., "Laser Tomographic Method for Flame Front Movement Studies", *Combust. Flame*, Vol.39, (1980), pp.321-323.
- (10) Fath, A., Much, K. U. and Leipertz, A., "Spray Break-up Process of Diesel Fuel Investigated Close to the Nozzle", *7th Conf. (Int.) on Liquid Atomization and Spray Systems*, Vol.1, (1997), pp.513-520.
- (11) Fuchihata, M, Katsuki, M. and Mizutani, Y., "Observation of Turbulent Premixed Flames by Simultaneous Monitoring with Laser Tomography and Ionization Probe", *The 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conf.*, Vol.2, (1996), pp.291-296.

- (12) Su, T. F., Kozma, J. M., Warrick, C. B. and Farrel P. V., "Effects of Fuel Viscosity and Ambient Temperature on Spray Characteristics from Multi-Hole Nozzle Injectors", 7th Conf. (Int.) on Liquid Atomization and Spray Systems, Vol.1, (1997), pp.183-190.
- (13) Dyer, M. J. and Crosley, D. R., "Two-Dimensional Imaging of OH Laser-Induced Fluorescence in a Flame", Optics Letters, Vol.7, No.8, (1982), pp.382-384.
- (14) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., Flames; Their Structure, Radiation and Temperature 3rd Edition, (1970), p.227, Chapman and Hall.
- (15) Gaydon, A. G., The Spectroscopy of Flames, (1957), p.114, Chapman and Hall.
- (16) 水谷幸夫, 燃烧工学第2版, (1989), 森北出版.

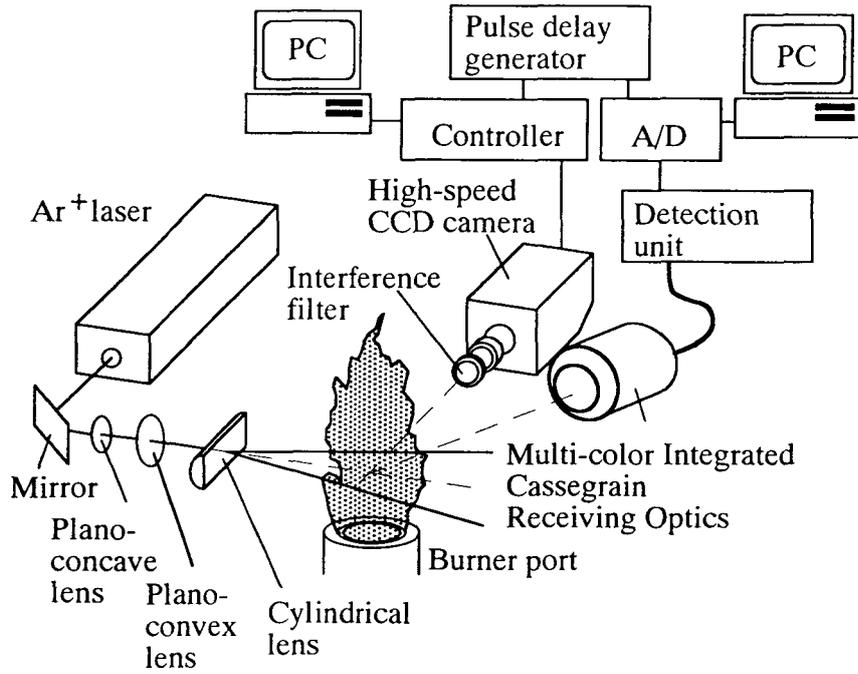


図 4-1 実験装置の概略

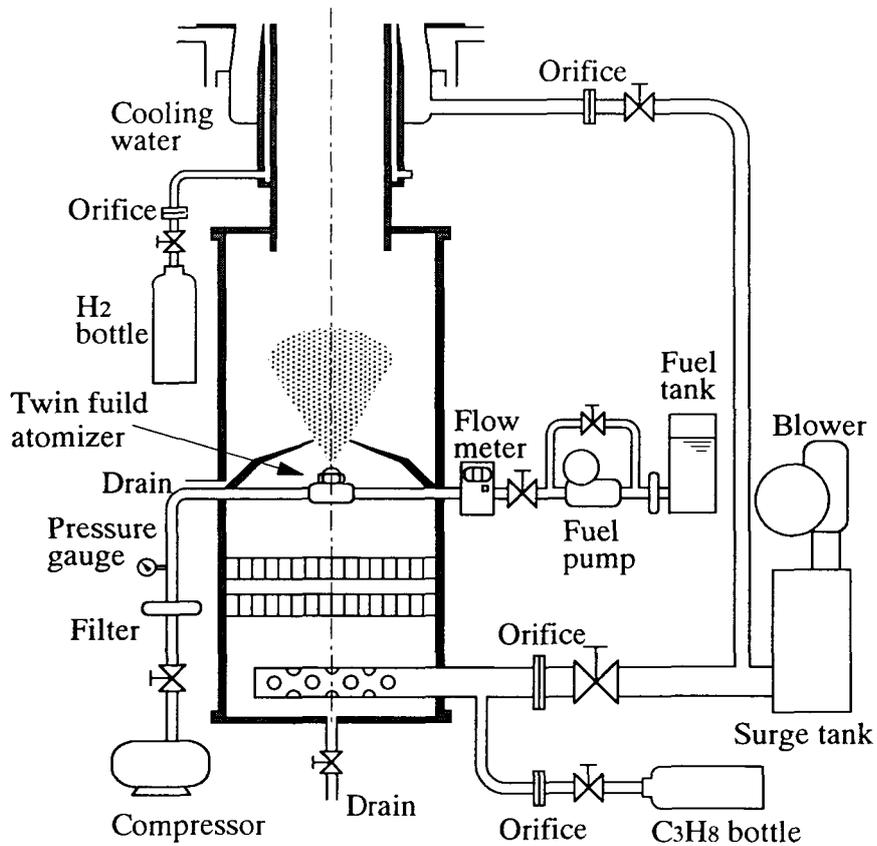
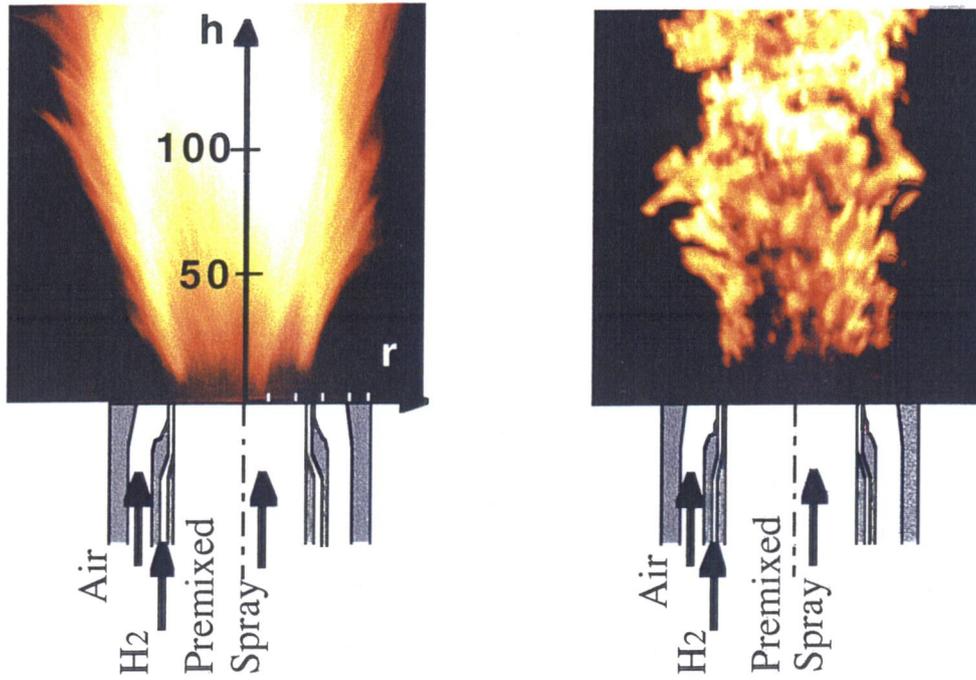


図 4-2 予混合噴霧バーナの構造



(a) 直接写真(露光時間 1/15 秒) (b) 短時間露光写真(露光時間 1/1000 秒)

図 4-3 予混合噴霧バーナポート部の詳細と火炎写真

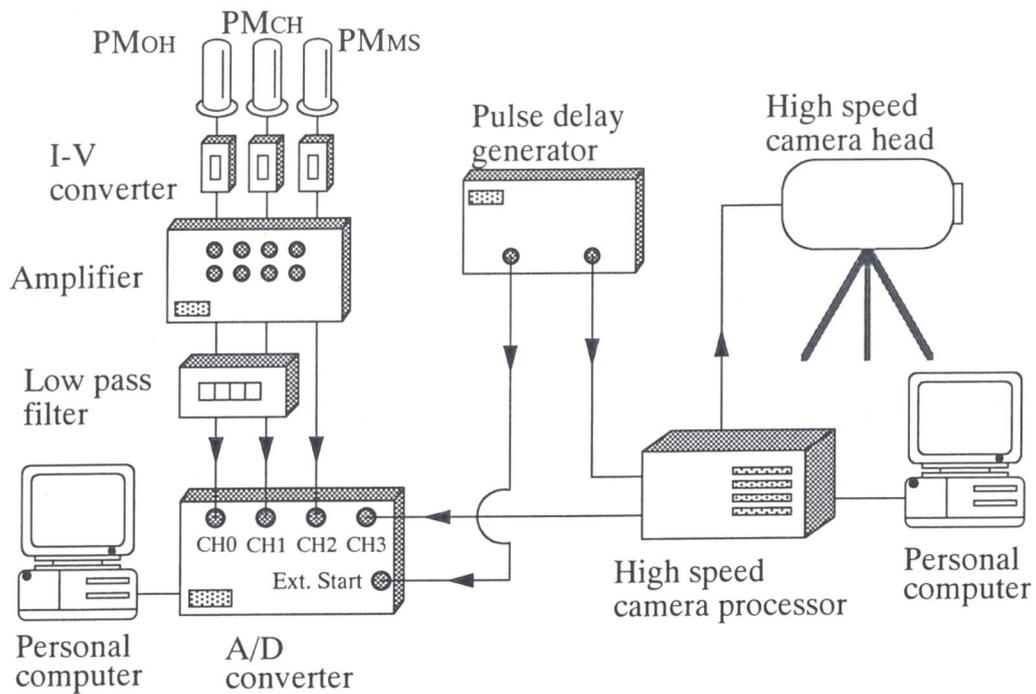
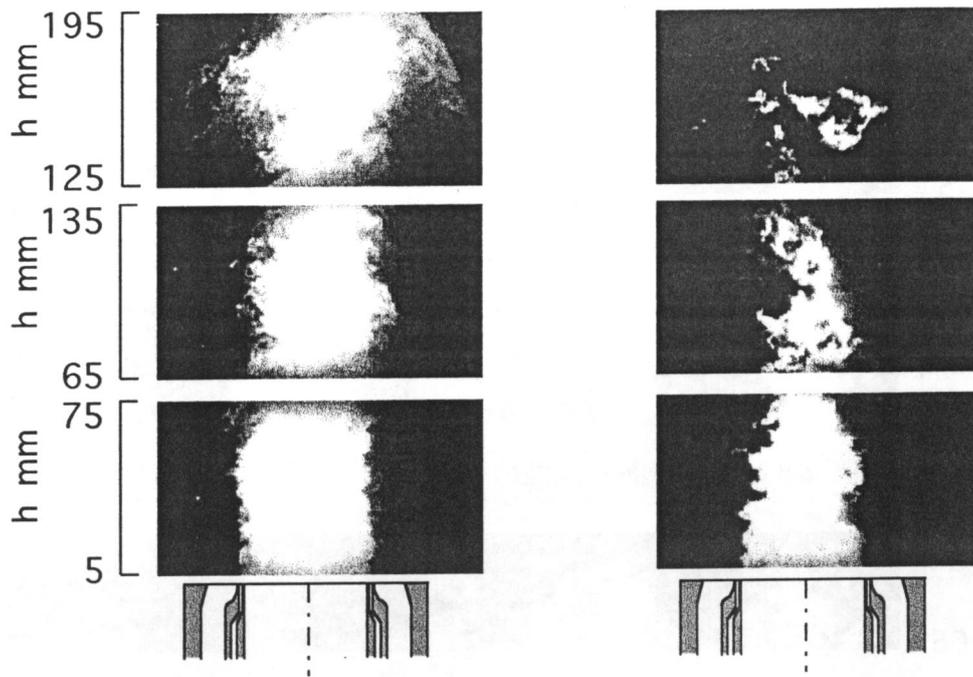


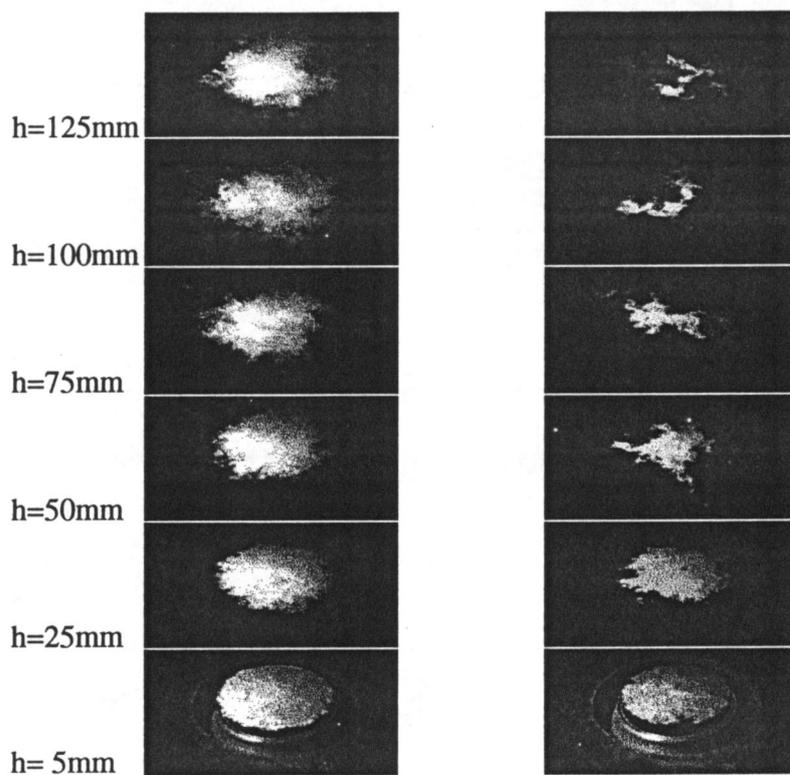
図 4-4 信号処理系のブロック線図



(a) Non-combusting case

(b) Combusting case

図 4-5 噴霧断面像 (レーザーシートを垂直に照射)



(a) Non-combusting case

(b) Combusting case

図 4-6 噴霧断面像 (レーザーシートを水平に照射)

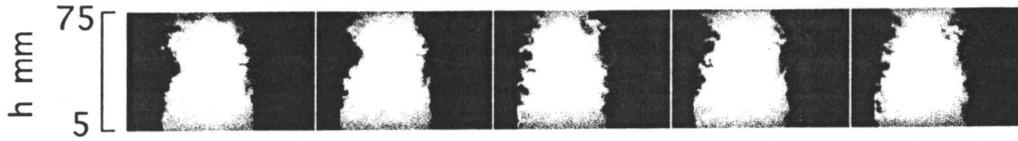
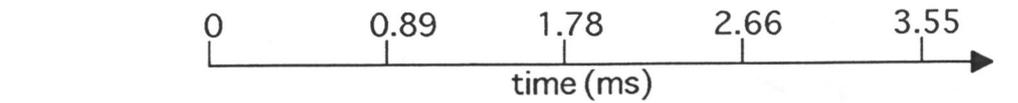


図 4-7 噴霧断面連続像の一例 (撮影領域 $h=5\sim 75$ mm)



図 4-8 噴霧断面連続像の一例 (撮影領域 $h=5\sim 75$ mm)

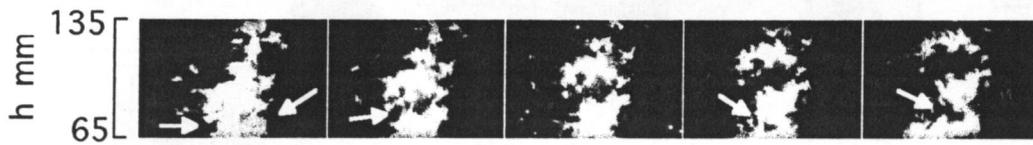
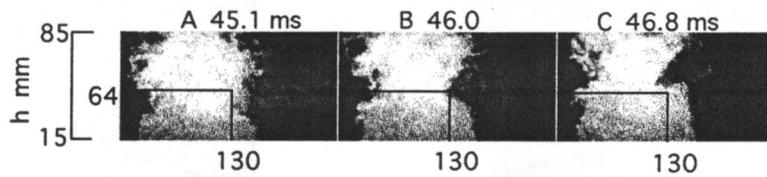


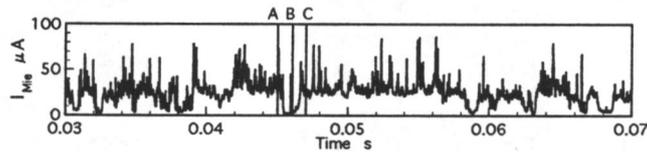
図 4-9 噴霧断面連続像の一例 (撮影領域 $h=65\sim 135$ mm)



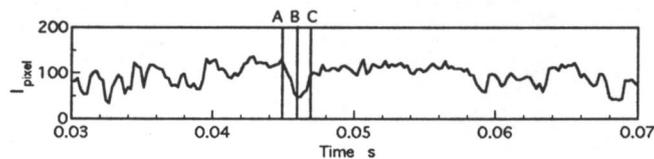
図 4-10 噴霧断面連続像の一例 (撮影領域 $h=125\sim 195$ mm)



(a) 噴霧断面連続像



(b) MICRO によって検出された油滴ミ一散乱光信号



(c) 噴霧連続像から再構成されたピクセル(130,64)における輝度値の時系列表示

図 4-11 MICRO による油滴ミ一散乱光信号と画像の輝度値の比較

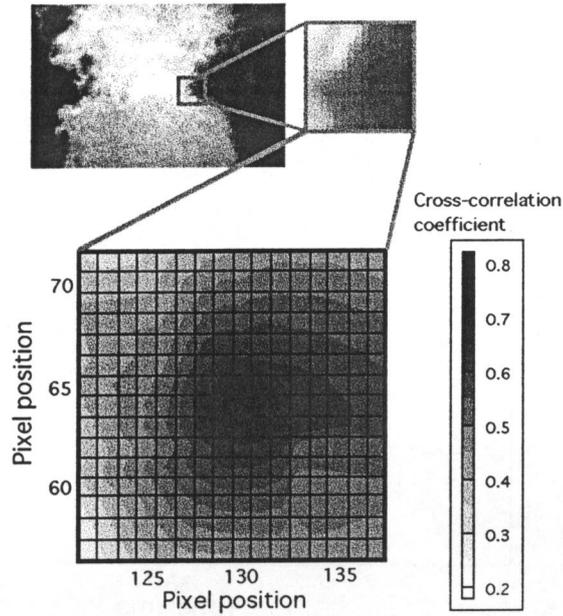


図 4-12 油滴ミエ散乱光信号と噴霧断面連続像の輝度値から算出した相互相関係数の分布

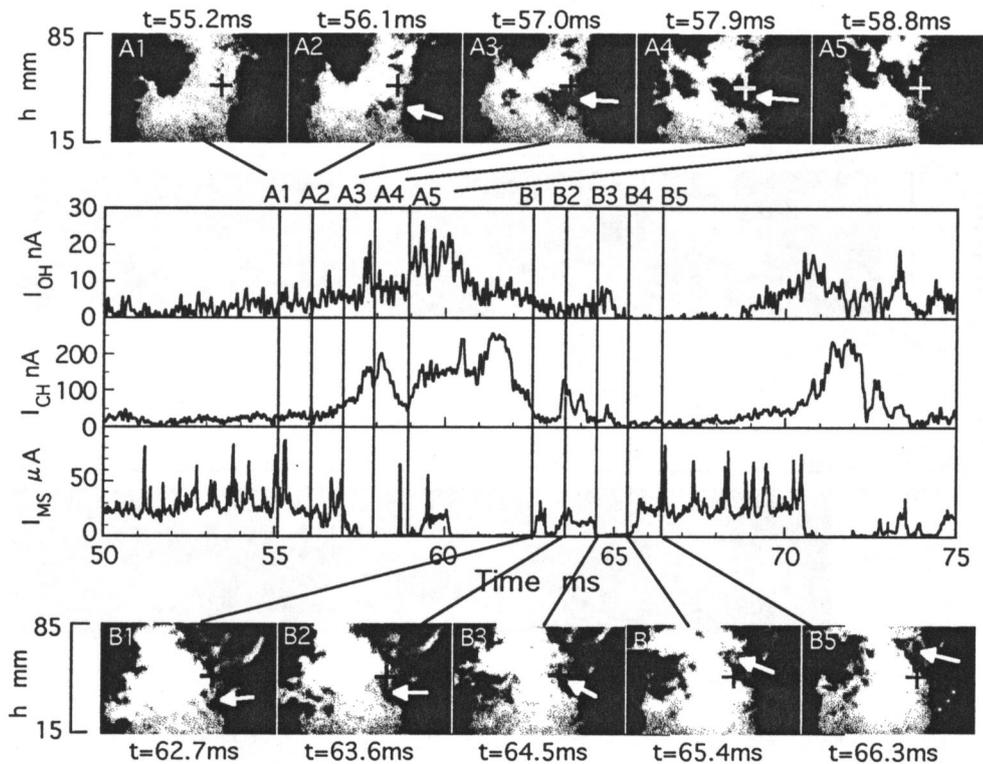


図 4-13 噴霧断面像と局所発光信号の同時時系列計測結果
(撮影領域 $h=15\sim 85\text{mm}$, MICRO 測定位置 $h=50\text{mm}$, $r=15\text{mm}$)

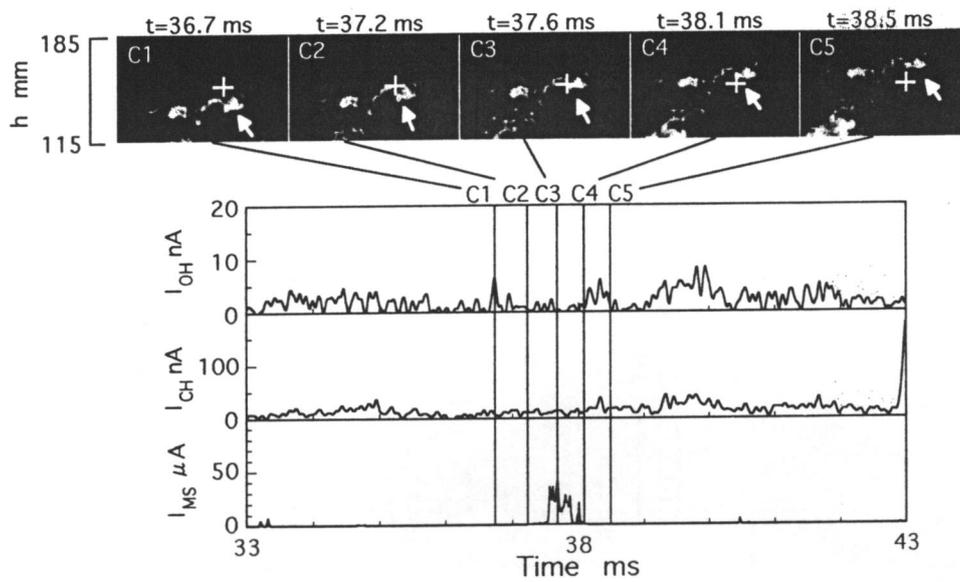


図 4-14 噴霧断面像と局所発光信号の同時時系列計測結果
 (撮影領域 $h=115\sim 185\text{mm}$, MICRO 測定位置 $h=150\text{mm}$, $r=115\text{mm}$)

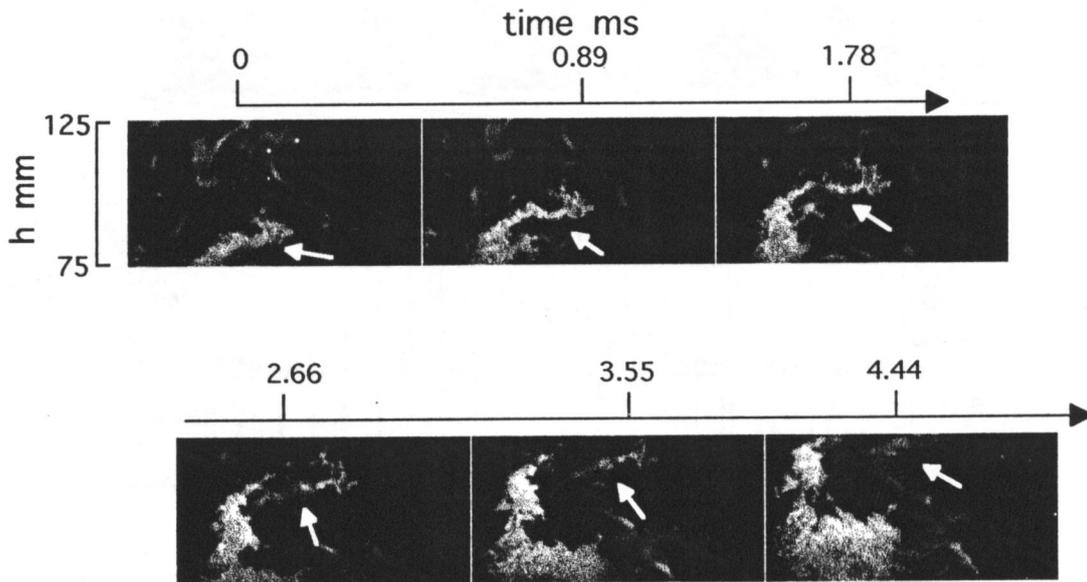


図 4-15 油滴クラスターからすすへの変化過程
 (撮影領域 $h=75\sim 125\text{mm}$)

第5章 予混合噴霧火炎中の火炎伝ば速度と油滴クラスター消失速度

5.1 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、実験結果と数値解析結果を比較し、検討する必要がある。これらのことを踏まえ、第4章では、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。本章では、理論および数値計算結果との比較を前提に、予混合噴霧中の伝ば火炎の速度（以後、伝ば火炎速度と記述する）および油滴クラスターの消失速度の導出を試みる。ここで「伝ば火炎速度」とは、第4章で観察されたような予混合噴霧流が火炎伝ばによって消失する際の燃焼速度のことであり、従来より用いられる「火炎伝ば速度」との混同を避けるために、本論文で用いた呼称である。

火炎伝ばの速度は、観察者の座標系の取り方によって、燃焼速度や火炎伝ば速度などと表現されている。本来、火炎伝ば速度とは静止観察者から見た見かけの伝ば速度であるとされている⁽¹⁾が、現在は必ずしもそのような使われ方をするとともに限らず、燃焼速度と混同されているところがある。そのため、「火炎伝ば速度」を伝ば火炎による燃焼速度と捉え、静止座標から見た火炎伝ば速度を、「見かけの火炎伝ば速度」などと称して、区別することもある。しかし、これらの表記については研究者によって異なっているところもあるため、本論文では、表記上の混乱を避けるために、予混合噴霧流が火炎伝ばによって消失する際の燃焼速度を「伝ば火炎速度」と称し、以下で用いることにする。

第1章でも述べたように、噴霧火炎の燃焼速度および火炎伝ば速度に関しては古くから数多くの研究が行われている。Lefebvreら⁽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、Mizutani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(flame velocity)を導出している。Polymeropoulos と Das ら⁽⁴⁾も同様の実験を行い、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、気液混焼状態での燃焼速度を計測し、系統的にまとめている。その中で、燃焼速度を導出する際の火炎面の決定方法についても詳しく考察を加えており、直接写真、長時間露光シュリーレン写真、画像平均化シュリーレン写真そして OH ラジカル自発光断面像を比較している。その結果、OH ラジカル自発光断面像を火炎の代表面とするのが妥当であると述べている。

しかし、いずれの実験的研究においても当時の計測技術の未発達から、計測が時間平均的であり、また計測対象とした噴霧特性の計測精度についても不十分であるといわざるを得ない。また、前章で示したように、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および油滴クラスターの燃焼が混在している。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。これら両者の燃焼機構の違いは、すなわち、第 1 章で示した Williams⁽⁶⁾のモデルにおける均質燃焼と不均質燃焼としての違いである。それゆえ、これまでのように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のではなく、予混合燃焼的な噴霧流中での伝ば火炎の速度と、拡散燃焼的な油滴および油滴クラスターの消失速度のそれぞれに区別して取り扱う必要があると考えられる。

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。

5.2 実験装置および方法

5.2.1 実験装置の概略

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、さらに市販の一次元位相ドップラ流速計を用いて噴霧流場の計測を行った。図 5-1 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章と同一のものであるため、ここでは省略する。また実験条件も燃焼用空気の断面平均流速 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。なお前章と同様に、レーザシー

ト光強度の高さ方向の制約から、撮影は鉛直方向に分割して行った。座標軸に関しても前章同様に、火炎下流方向に h 軸を、半径方向に r 軸をとった。

5.2.2 画像処理装置

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 言語による自作のプログラムを用いた。

5.2.3 二値化処理

本実験では、噴霧断面像の境界や個々の油滴クラスターを抽出するために、撮影された噴霧断面画像に対し、二値化処理(画像データのための処理解析)を施し、画像処理解析を行っている。ここで、より妥当性のある二値化処理を施すことは、画像処理解析結果の精度および信頼性を高めるものとなるため重要である。通常、ある解析対象画像に二値化処理を施す場合、二値化のしきい値は以下の方法で決定される。

今、解析対象画像としてコントラストが高く、画像内で照射光の輝度むらなどのない理想的な画像、すなわち、図 5-2(a)のような画像を考える。このとき、図 5-2(a)の画像の輝度のヒストグラムは図 5-2(b)のように双峰状になり、入射レーザーシート内の油滴からの散乱光は、ヒストグラムの右側の峰に対応している。そのため、噴霧断面画像中の噴霧の存在領域を決定する二値化のしきい値には、双峰の間の谷の位置に対応する輝度値をとればよいことがわかる⁽⁷⁾。しかし本実験では、予混合噴霧火炎中の噴霧挙動を巨視的に観察することを目的に、撮影範囲をレーザーシートの高さ方向に 70mm 程度とっているため、撮影画像中のレーザーシート強度分布は一様ではない。そこで、レーザーシートの強度分布を考慮した合理的な二値化処理のしきい値を決定する必要がある。

アルゴンイオンレーザーから射出されたレーザー光は、図 5-1 に示されるように数枚の反射ミラーおよび一連のレンズ系を介して、レーザーシート光にされる。その際、レーザー光強度はガウス分布形状を有しているために、レーザーシート中心部の強度がレーザーシート端部に比べて強くなる。そこで本実験では、以下の方法によりレーザーシート高さ方向に沿って二値化処理のしきい値を決定した。

まず、図 5-3 に示すような 600 枚の互いに時間的に連続していない画像（これをランダム画像と呼ぶこととする）を解析対象とする。ここで第 4 章で撮影したような連続画像を解析対象として用いると、 $600 \text{ frame} \times 1/9000 \text{ s/frame} = \text{約 } 67 \text{ms}$ となり、非常に短時間の現象から二値化のしきい値を決定することになる。そのため、撮影された短時間の現象に依存したしきい値となる恐れがある。ここ

ではそのような不確定性を排除するために、ランダム画像を解析対象とした。そして、これら 600 枚のランダム画像群の各行ごとに輝度値のヒストグラムを求める。図 5-4(a), (b)は、このようにして得られた画像中の下から数えて第 3 行目と第 64 行目のピクセルの輝度値のヒストグラムである。ここでヒストグラムの縦軸は出現頻度の最大値で正規化してある。これより、レーザシート中央部に対応する第 128 行目においてはピクセルの輝度値が全体的に大きく、一方のレーザシート端部に相当する第 3 行目においては、油滴からの Mie 散乱光強度が低いために、撮影される画像中の輝度値も小さくなっており、ヒストグラムも輝度値の低い側に偏った分布となっている。しかし、いずれの場合においてもヒストグラム中の双峰状の部分の中間、つまり谷の部分をとって二値化処理のしきい値とすればよいことがわかる。このような輝度のヒストグラムを各行ごとにまとめ、画像化したものが図 5-5(a)である。図 5-5(b)は、参考までに 3 次元表示したものである。図 5-5(a)の横軸は先のヒストグラム同様にピクセルの輝度値を表しており、0 から 255 である。また、縦軸は撮影された画像中の各行に対応している。図 5-5 中の画像の濃淡は先のヒストグラム中の縦軸、つまり、出現確率を表している。これより、レーザシート中心部では最もレーザ強度が強く、端部に向かうにつれて、次第にレーザ強度が弱くなっていることがわかる。そして各行ごとのヒストグラムの谷を結んでいくと、図中の白線のようにガウス分布形上となる。本実験においては、この白線上の値から、各行ごとに二値化処理の際のしきい値を決定した。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 予混合噴霧火炎中の火炎伝ば速度

連続噴霧流境界の抽出 まず、噴霧断面像を用いた伝ば火炎速度の導出について示す。図 5-6 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。前章で示したように、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 5-7 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 5-8 を得る。同様の処理を 600 枚のランダム撮影された噴霧断面像について行い、それらを重ね合わせたものを図 5-9 に示す。なお重ね合わせ画像にはメディアンフィルタ処理⁷⁾を施してある。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。すなわち、バーナポートより連続的に存在している噴霧流の境界を重ね合わせ、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、前章で

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。

次に、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。そこで、図 5-9 から連続噴霧流の平均境界位置を求め、三角法を適用を試みるが、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。そのため本実験では、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を用いた。

位相ドップラ流速計による噴霧流場の計測 図 5-10 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⁹⁾に詳述されているので、ここでは省略する。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⁹⁾、粒径別の速度ベクトルが導出される。しかし本実験では、図 5-10 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 8.0m/s で飛行していることがわかる。図 5-11 に、 $r=15\text{mm}$ 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) $h=25\text{mm}$, (b) $h=75\text{mm}$, (c) $h=125\text{mm}$, 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。この図から、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 Cohen¹⁰⁾や小笠原と水谷¹¹⁾は、 $10\mu\text{m}$ 以下の油滴はガス燃料としての振る舞いを示すと考察している。図 5-12 に予混合噴霧火炎中における噴霧の粒度数密度分布¹²⁾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。

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 5-13 に示すように連続噴霧流の境界と予混合噴霧場のなす角 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 7.0m/s であるため、伝ば火

炎の速度 S は 2.0m/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 5-8 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・空間的な不均一性と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、今後はあわせて議論する必要があることを示唆している。

さらに、噴霧流の一部はここで導出した平均的な火炎面位置を通過していき、その下流域においても残存し、油滴クラスターを形成する。そのため、次項では、残存する油滴クラスターについてもその消失速度の導出を試みる。

5.3.2 予混合噴霧火炎中の油滴クラスターの消失速度

前章で述べたように、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。前項では、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 5-14(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。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 5-14(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⁽¹³⁾。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。

$$\omega_i = \frac{S_i - S_{i+1}}{l_i \cdot \Delta t} \quad (5.1)$$

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 $1/9000(\text{s})$ である。図 5-14(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 0.4m/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 0.40m/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 5-15 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 0.45m/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 1.5m/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。

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 5-16(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的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 5-16(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を存在せず、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）とは考えられないが、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ブンゼン予混合火炎と似通った構造を呈していることになる。

このような予混合噴霧火炎中の予混合的燃焼域および拡散的燃焼域の共存は、赤松⁶⁾による火炎発光計測結果からも示されている。すなわち、赤松は予混合噴霧火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号と CH バンドの発光信号の対応関係（同期）に注目し、火炎上流部では両信号の対応がよくとれている（同期している）ことから、青炎燃焼であるとし、下流部では対応がよくとれてい

ない（同期していない）ことから、輝炎を伴う燃焼が支配的であることを示している。

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、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、その保炎性におい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、それにともなって、局所当量比も供給当量比を中心に变化している。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。このように考えると、極言すれば噴霧火炎はガス火炎に蒸発という過程を加味し、さらに時間的・空間的不均質性を加えたもの、ともいえる。古くは Onuma と Ogasawara⁽¹⁴⁾が気体噴流拡散火炎と噴流型噴霧火炎の相似性を指摘しているが、今後、この方面に関する理論的・実験的研究が期待される。

5.4 結言

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。

5.5 参考文献

- (1) 水谷幸夫, 燃烧工学第2版, (1989), 森北出版.
- (2) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., "Flame Propagation in Heterogenous Mixtures of Fuel Droplets, Fuel Vapor and Air", Eighteenth Symp. (Int.) on Combust., (1981), pp.321-328.
- (3) 水谷幸夫, 西本武雄, "乱れのある噴霧流の火炎速度", 日本機械学会論文集, **38**-311, (1972), pp.1844-1854.
- (4) Polymeropoulos, C. E. and Das, S., "The Effect of Droplet Size on the Burning Velocity of Kerosene-Air Sprays", Combust. Flame, Vol.25, (1975), pp.247-257.
- (5) 中部主敬, 水谷幸夫, 谷村聡, "予混合噴霧火炎の燃烧速度と気液混焼特性", 日本機械学会論文集, **53**-486B, (1987), pp.636-641.
- (6) Williams, F. A., *Combustion Theory Second Edition*, (1985), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (7) 河田聡, 南茂夫編著, 科学計測のための画像データ処理, (1994), CQ 出版社.
- (8) 赤松史光, "液体燃料噴霧の油滴群燃烧挙動に関する研究", 大阪大学博士論文, (1995).
- (9) 栗原昇, 池田裕二, 中島健, "エアアシストインゼクタにより形成された噴霧の分散過程", 日本機械学会論文集, **61**-582B, (1995), pp.759-765.
- (10) Burgoyne, J. H. and Cohen, L., "The Effect of Drop Size on Flame Propagation in Liquid Aerosols", Proc. Roy. Soc. Lond., A, Vol.225, (1954), pp.375-392.
- (11) 小笠原光信, 水谷幸夫, "液体燃料粒子群中での層流火炎伝ばに関する研究 (第1報, 実験と火炎伝ば機構の考察)", 日本機械学会論文集, **31**-226, (1965), pp.1002-1007.
- (12) 若林卓, "対向流噴霧火炎の形成, 計測ならびに構造に関する研究", 大阪大学博士論文, (1997).
- (13) 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄, "2 値化相関法", 可視化情報, Vol.10, No.38, (1990), pp.58-64.
- (14) Onuma, Y. and Ogasawara, M., "Studies on the Structure of a Spray Combustion Flame", Fifteenth Symp. (Int.) on Combust., (1975), pp.453-465, The Combustion Institute.

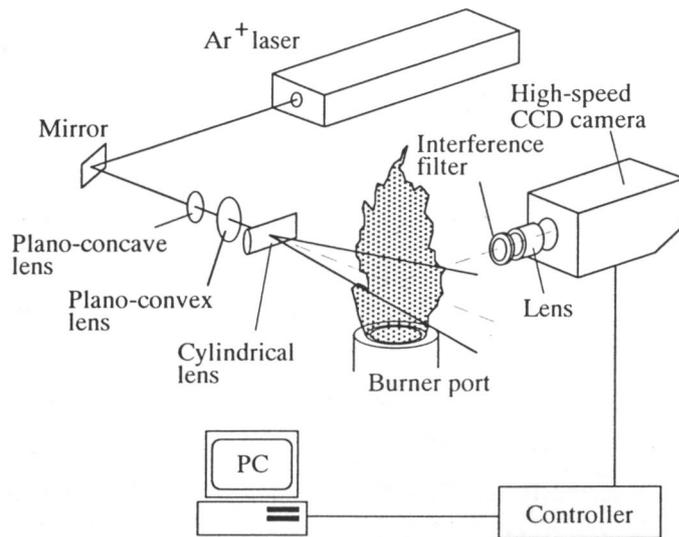
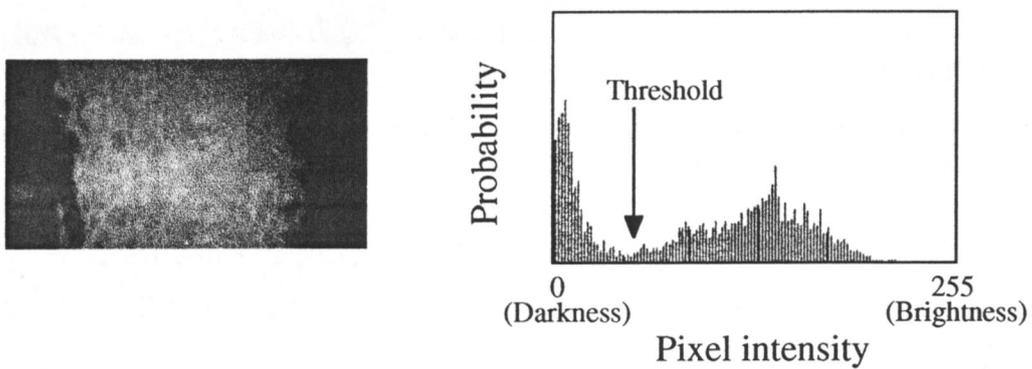


図 5-1 実験装置の概略



(a) 画像例 (合成画像)

(b) 輝度のヒストグラム

図 5-2 輝度むらのない画像と輝度値の出現頻度分布

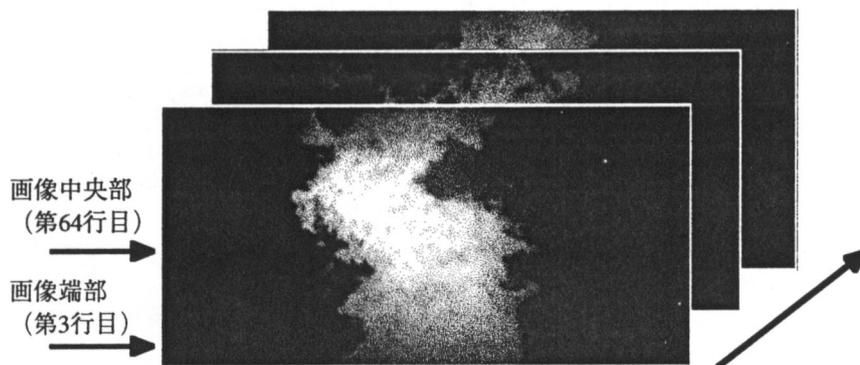
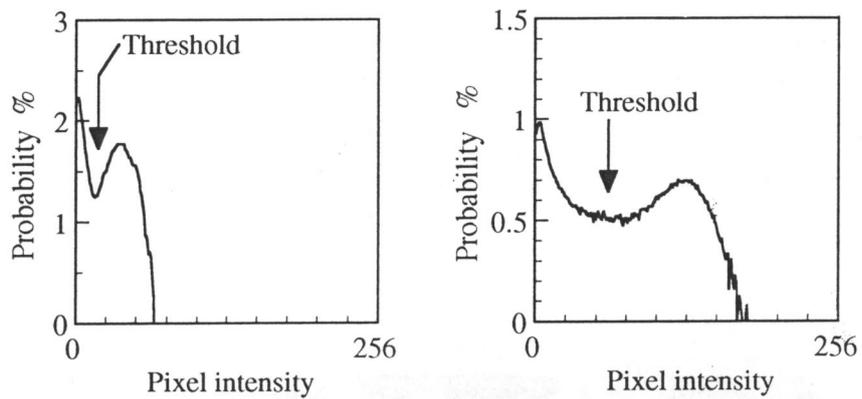
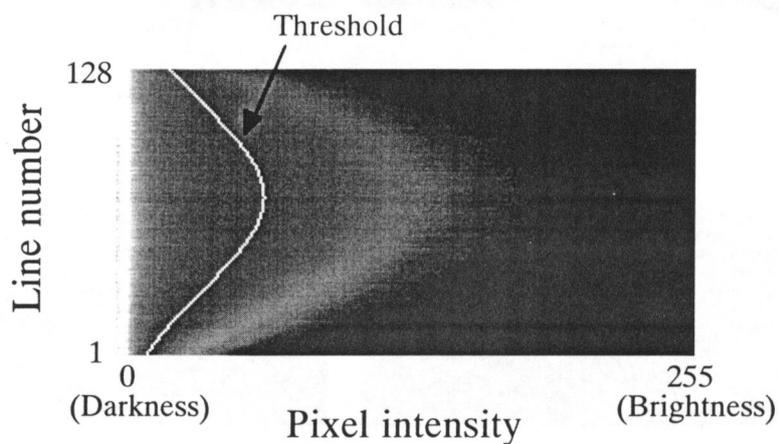


図 5-3 噴霧断面の画像例

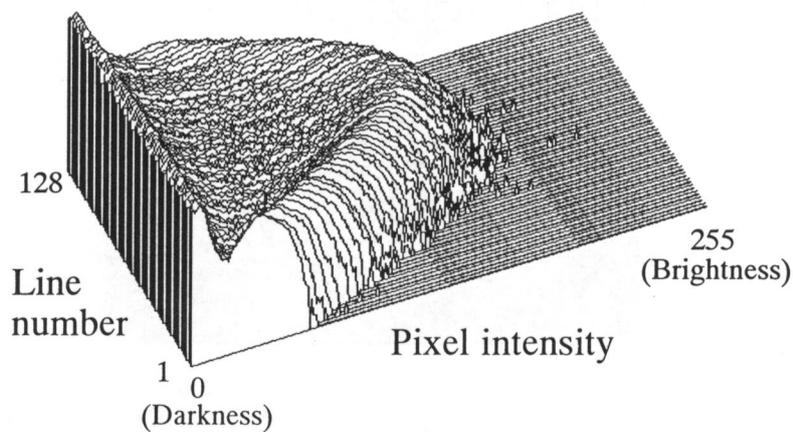


(a) 画像端部 (第 3 行目) (b) 画像中央部 (第 64 行目)

図 5-4 撮影画像内の高さ方向の違いによる輝度頻度分布の違い
(ランダム画像 600 枚を累積して算出)

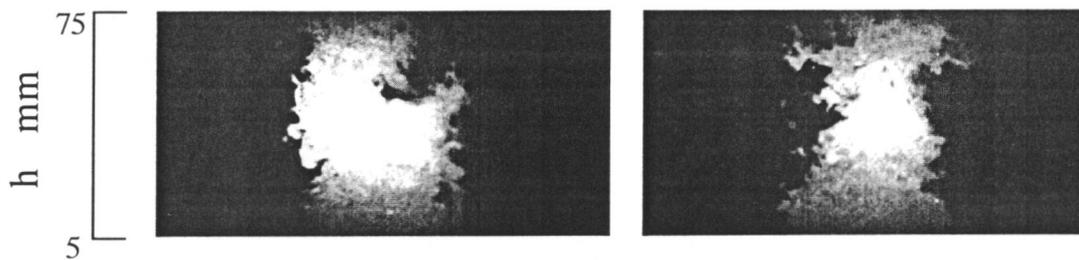


(a) 2次元表示



(b) 3次元表示

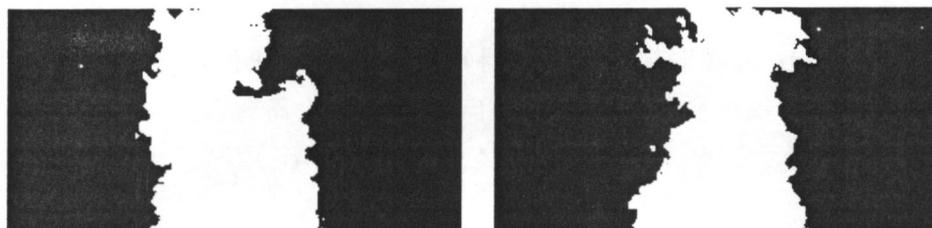
図 5-5 画像内各行の輝度値の出現頻度分布 (ランダム画像 600 枚より算出)



(a) 画像例 1

(b) 画像例 2

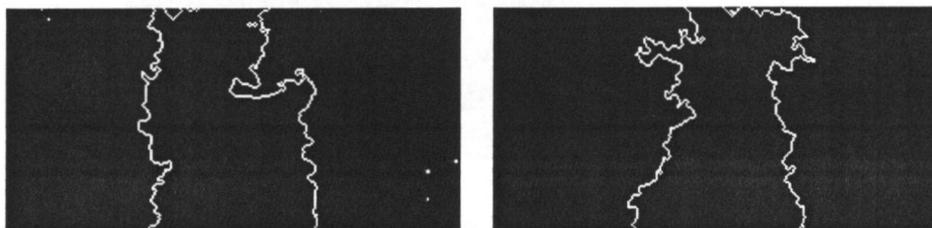
図 5-6 噴霧断面像の例 (撮影領域 $h=5\sim 75\text{mm}$)



(a) 画像例 1

(b) 画像例 2

図 5-7 二値化処理後の画像



(a) 画像例 1

(b) 画像例 2

図 5-8 境界抽出後の画像

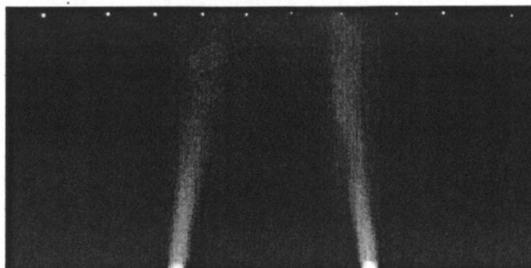


図 5-9 境界画像の重ね合わせ画像 (撮影領域 $h=5\sim 75\text{mm}$)

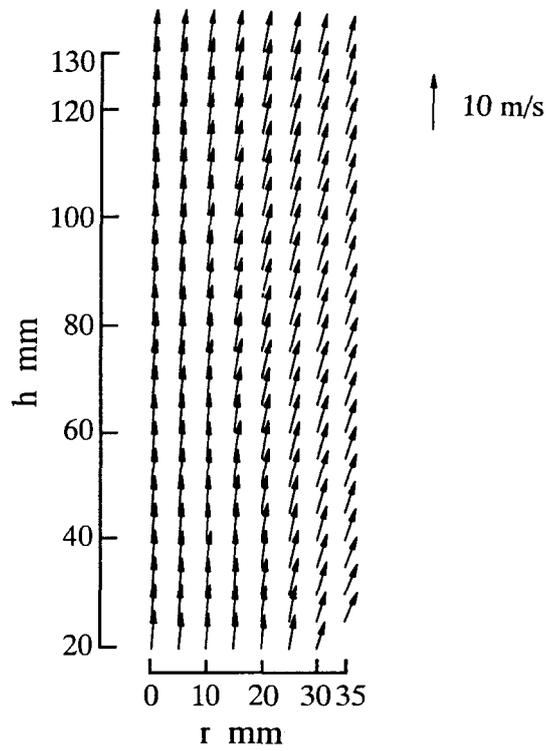
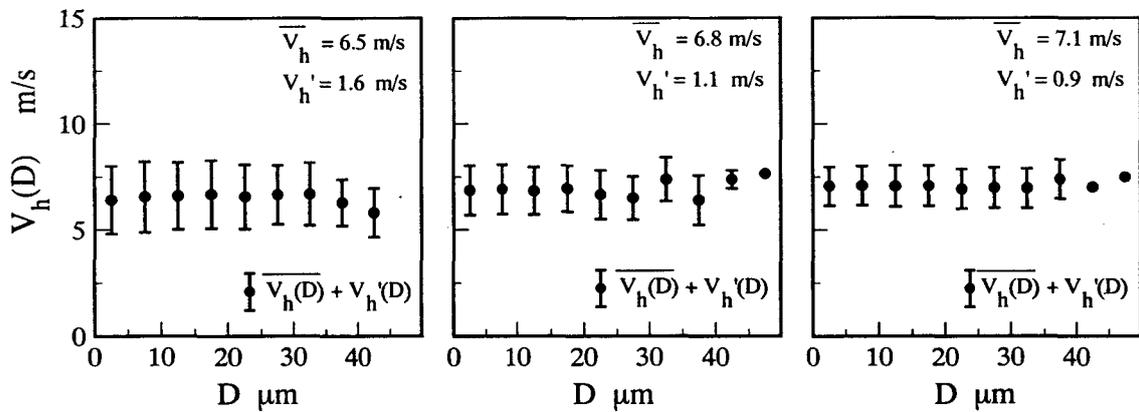


図 5-10 予混合噴霧火炎中の油滴の 2 次元流れ場



(a) $h=25$ mm

(b) $h=75$ mm

(c) $h=125$ mm

図 5-11 粒径別の油滴軸方向速度と速度変動の rms 値 ($r=15$ mm)

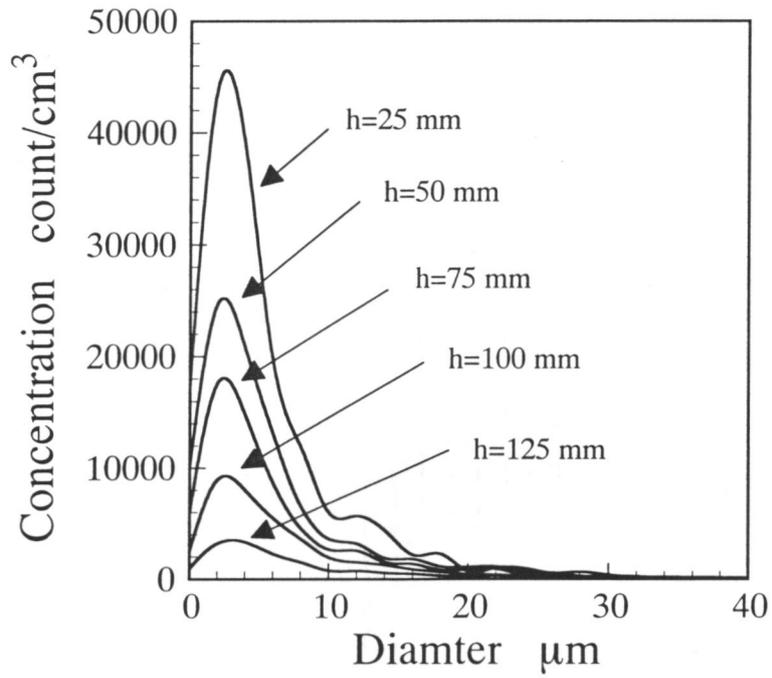


図 5-12 噴霧の粒度数密度分布 ($r=15$ mm)

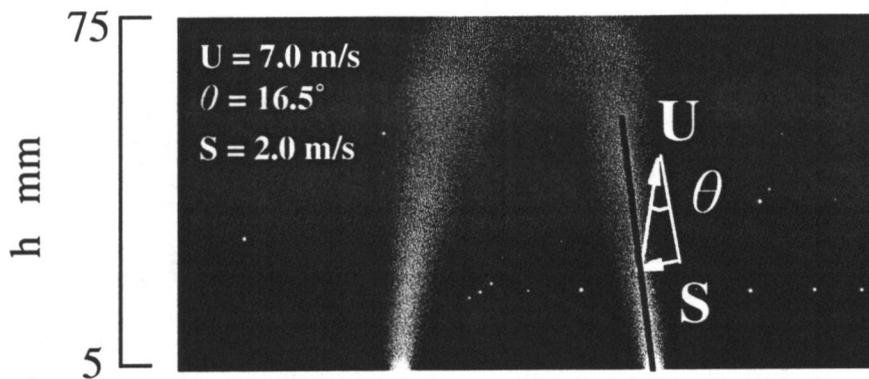
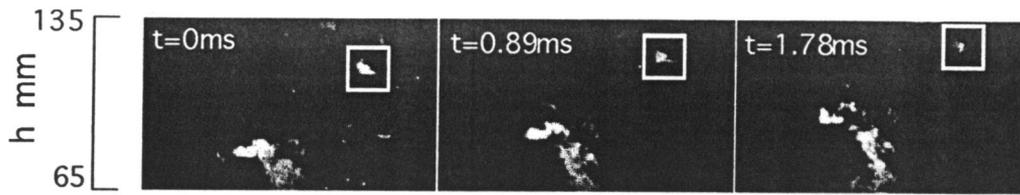


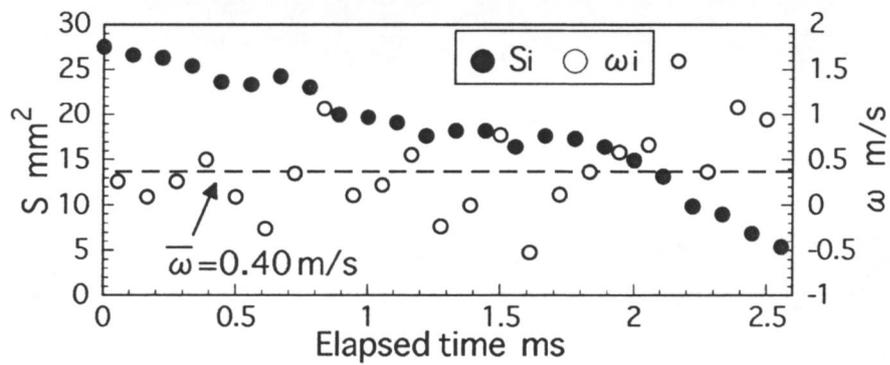
図 5-13 伝ば火炎速度の導出



(a) 噴霧断面像



(b) 二値化处理画像



(c) 油滴クラスター断面積および消失速度の時系列変化

図 5-14 油滴クラスター消失速度の導出過程

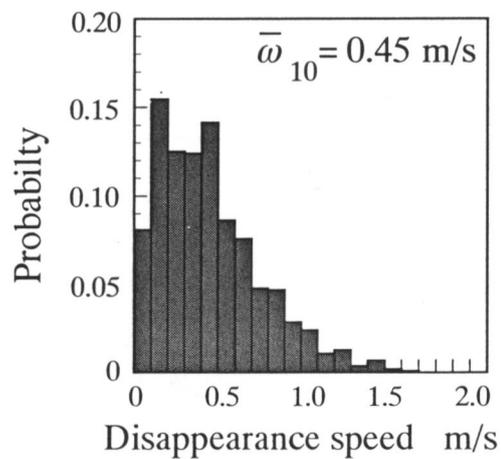
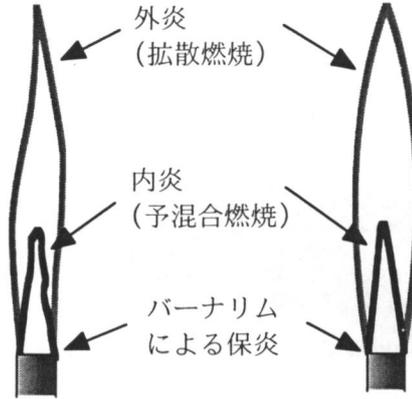


図 5-15 油滴クラスター消失速度の確率分布



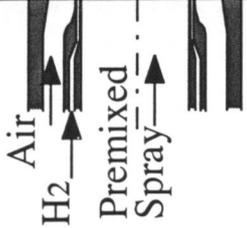
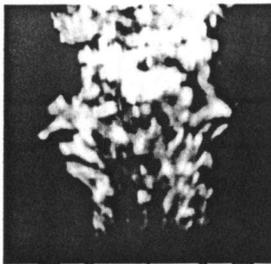
直接写真
(露光時間 1/60秒)



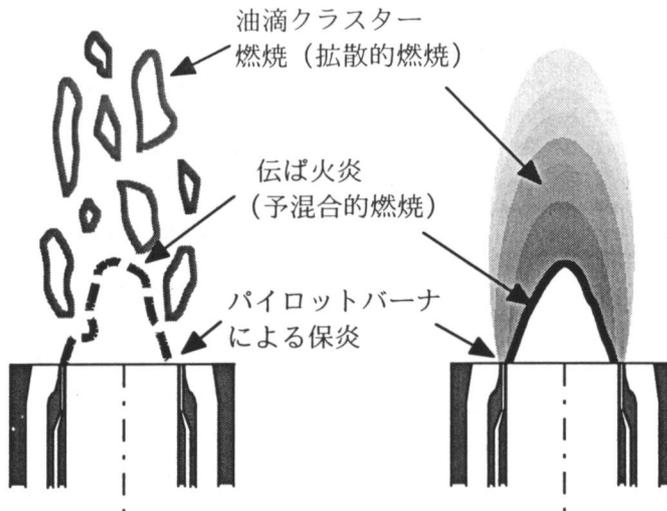
瞬間的模式図

時間平均的模式図

(a) 予混合ガス火炎



直接写真
(露光時間 1/1000秒)



瞬間的模式図

時間平均的模式図

(b) 予混合噴霧火炎

図 5-16 予混合ガス火炎と予混合噴霧火炎の燃焼形態の比較

第6章 予混合噴霧火炎の燃焼挙動に及ぼす噴霧特性の影響

6.1 緒言

噴霧燃焼器は工業上広く用いられており、その燃焼特性は噴霧器から噴射される液体燃料噴霧の特性に大きく依存している⁽¹⁾。例えば、二流体噴射弁においては、噴霧器形状はもちろんであるが、噴射弁へ供給される液体燃料および霧化用圧縮空気圧力の流量と圧力によっても噴霧特性が変化するため⁽²⁾、噴霧器の運転条件が燃焼器全体の効率にも関わってくる。そのため、噴霧特性と燃焼挙動の関係を明らかにし、噴霧燃焼の基礎的知見を得ることは、より高性能な噴霧燃焼器開発の観点からも必要不可欠である。

前章までにおいては、ある一つの実験条件における予混合噴霧火炎の燃焼挙動について考察を加えてきた。すなわち、レーザシートと高速度カメラおよび火炎発光用プローブを用いた噴霧断面像と局所火炎発光の同時時系列計測を行った。その結果、予混合噴霧火炎中において、予混合燃焼的な選択的火炎伝ば現象が油滴クラスター形成の要因となっており、その後、形成された油滴クラスターが拡散的に燃焼していく様子が観察された。

さらに前章では、予混合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の導出を試みた。しかし、数値解析結果との比較ということを考えると、予混合噴霧火炎下流域で観察された油滴クラスターについては、油滴数密度、平均粒径などの個々の油滴クラスターの特性および燃料蒸気濃度、雰囲気酸素濃度などを計測することが困難であるために、導出される油滴クラスター消失速度を計算値と比較することは難しい。一方、上流部で観測された伝ば火炎の速度については、バーナポートより供給される予混合噴霧の特性の算出が可能であり、さらに実験条件を調節することによって、噴霧特性を変化することができるなどの理由から、数値解析結果との比較が期待できる。

そこで本章では、まず噴霧特性の違いが燃焼挙動に及ぼす影響を調べるため

に、予混合噴霧バーナ上流部に設置された二流体噴射弁に供給する霧化用圧縮空気の圧力を調節し、液体燃料の噴霧特性を変化させ、燃焼特性に与える影響について考察を加えた。その際、すべての実験条件において、予混合噴霧の灯油－空気質量流量比を一定に保った。続いて、それぞれの実験条件における予混合噴霧火炎中の伝ば火炎速度を導出し、噴霧特性の違いによる比較を行った。さらに、噴霧断面像と局所火炎発光の同時計測結果を解析することにより、噴霧境界と燃焼反応領域の空間的關係について考察を加えた。

6.2 実験装置および方法

6.2.1 実験装置の概略

本実験で用いた予混合噴霧バーナと噴霧断面像撮影ならびに局所火炎発光計測に用いた光学系は前章までのものと同じ（図 4-1 等を参照のこと）であるので、ここではその詳細については省略する。実験は二流体噴射弁に供給する霧化用空気圧力 P を 0.4MPa から 0.1MPa まで 0.1MPa おきに変化させて行った。その際、燃焼用空気の断面平均流速は 5.5m/s 一定とし、灯油－空気質量流量比が $0.045\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$ （当量比は約 0.75 に相当）一定になるように調節した。

噴霧火炎中の油滴粒径および速度の計測には前章同様に一次元フェーズドトップラ流速計(PDA)を用い、噴霧断面像は撮影範囲を有効画素数 256×256 pixel（実空間で $90 \times 90\text{mm}$ に対応）として実験を行った。座標軸に関しても前章同様に、火炎下流方向に h 軸を、半径方向に r 軸をとった。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 霧化圧力の違いによる噴霧特性と火炎形状の変化

図 6-1 は予混合噴霧火炎の直接写真（露光時間 1/15 秒）であり、霧化用圧縮空気圧力が小さくなるにつれて火炎長が伸びている様子が観察される。特に、 $P=0.1\text{MPa}$ において、その傾向が顕著であり、霧化圧力の変化に伴う予混合噴霧特性の違いが燃焼挙動に影響を与えていることがわかる。そこで、それぞれの条件における噴霧特性を調べるために、PDA により油滴粒径および速度計測を行った。図 6-2 にバーナポートから(a) $h=50\text{mm}$ と(b) $h=100\text{mm}$ のそれぞれの断面における油滴の軸方向平均速度分布を示す。油滴の軸方向速度は霧化用空気圧力の減少とともにバーナ中心部においてわずかながら増加してしている。 $h=50\text{mm}$, $r=0\text{mm}$ での油滴軸方向平均速度を比較すると、 $P=0.4\text{MPa}$ の場合 6.9 m/s であり、 $P=0.1\text{MPa}$ の場合には 7.8 m/s であった。すなわち、約 13%程度増速していることになるが、火炎長の変化は約 2 倍程度であり、軸方向速度の増加が火炎長の増大を招いたとは考えにくい。そこで、同一断面でのザウテル平均粒径(SMD)の半径方向分布を図 6-3 に示す。それぞれの条件を比較すると、霧化

圧力が大きくなるに従い、平均粒径が小さくなる傾向が見て取れる。霧化圧力の増加に伴って、微粒化が促進された結果である。図 6-1 の火炎写真より、 $P=0.4\text{MPa}$ から $P=0.2\text{MPa}$ においては火炎長がほとんど同じであったことから、これらの条件においては霧化圧力の変化による影響が現れていないといえる。このことは PDA 計測結果からも示されている。すなわち、 $P=0.4\text{MPa}$ から $P=0.2\text{MPa}$ に霧化圧力を変化させても、平均粒径や流れ場などの噴霧特性にはほとんど影響が現れていない。しかし、霧化圧力を $P=0.2\text{MPa}$ から $P=0.1\text{MPa}$ に減少させると、 $h=100\text{mm}$ 、 $r=15\text{mm}$ において $P=0.3\text{MPa}$ で $22\mu\text{m}$ であった SMD が、それぞれ $25\mu\text{m}$ から $36\mu\text{m}$ へと増加しており、この時、火炎長も大きく伸びている。平均粒径の増大が、油滴の蒸発および燃焼時間の増加を招いた結果であると思われる。

6.3.2 噴霧特性の違いが火炎の伝ば速度に及ぼす影響

次に、噴霧特性が火炎の伝ば速度に与える影響について考察を加える。図 6-4 は霧化用空気圧力 $P=0.4\text{MPa}$ における噴霧断面像の一例である。前章と同様の手法を用いて、図 6-5 に示されるような予混合噴霧流の境界抽出を行い、600 枚の境界画像の重ね合わせ処理を施すと、図 6-6 に示されるような画像を得る。これら一連の画像処理解析の後に、三角法を適用し、それぞれの実験条件における伝ば火炎速度を導出すると図 6-7 のようになる。これより、導出された伝ば火炎速度は霧化用空気圧力の変化にほとんど影響されずに約 2.0m/s であることがわかる。Mizutani ら⁽³⁾は、噴霧火炎において油滴粒径および気液混焼割合によって燃焼速度が変化し、最大となる条件が存在することを示したが、ここでの実験条件の範囲内においては、噴霧の平均粒径の変化による火炎の伝ば速度の違いは現れなかった。これは、霧化圧力の減少によって比較的粒径の大きな油滴の割合が増加するが、火炎伝ばの際に支配的な役割を考えると考えられる小さな油滴は未だ十分に存在し、そのため、火炎の伝ば速度にほとんど影響があらわれなかったのだと推察される。噴霧火炎は液体燃料の蒸発により気液混焼火炎の性質を有し、気液を含めた局所の当量比および噴霧の粒径分布などを考慮に入れて火炎の伝ば速度を評価する必要がある。今後より広範囲な実験条件での噴霧流中の火炎の伝ば速度の計測が必要であることはいうまでもない。

しかし、ここでの実験結果を前章での考察と同様に、予混合ガス火炎と比較すると非常に興味深いことがわかる。本実験においては、霧化用空気圧力の減少とともに、火炎長は増大する一方で、伝ば火炎の速度はどの条件においてもほぼ一定に保たれることが示された。これを模式的に表したものが図 6-8 である。ここで、伝ば火炎の速度はほぼ一定であることから、予混合ガス火炎の内炎に相当する予混合噴霧火炎中の時間平均的な伝ば火炎面の位置は、どの条件にお

いてもほとんど変化がないと考えることができる。その一方で、火炎長が霧化圧力の減少とともに増大するということは、油滴クラスターの拡散燃焼領域が空間的に伸びたことを意味している。

これらのことを予混合ガス火炎に置き換えて考えると、霧化用圧縮空気圧力を減少させることは、予混合気の供給当量比を過濃側に増大させたときの効果と一致する。PDA 計測結果より、霧化用圧縮空気圧力の減少は、予混合噴霧の平均粒径の増大を招くことが示されたが、今、予混合噴霧に関して供給の当量比ではなく、平均粒径や数密度などの噴霧特性を考慮した実効当量比なるものを想定すると、平均粒径の増大は実効当量比の増大に相当する。そのため、霧化圧力の減少によって火炎長が伸びる。またその一方で、霧化圧力の減少は伝ば火炎の速度にはほとんど影響を与えなかった。このことは、予混合噴霧中での火炎伝ばが比較的小粒径の油滴に支配されると考えると説明が可能である。すなわち、霧化圧力の減少によっても、依然、予混合噴霧内には十分な量の小さな油滴が存在しており、火炎伝ばの際の実効当量比にはほとんど変化がないため、結果として、伝ば火炎の速度にはほとんど影響があらわれなかったと考えることができる。

6.3.3 噴霧境界と燃焼反応領域の関係

これまで、噴霧境界位置から伝ば火炎の速度を導出してきたが、ここでは、噴霧境界と燃焼反応領域の空間的關係について考察を試みる。図 6-9(a)は噴霧断面像と局所発光信号の同時時系列計測結果の一例である。噴霧断面画像中の＋印は MICRO の計測点を示している。以下では、噴霧境界と燃焼反応領域の空間的關係を一次元的に解析する手法⁽⁴⁾を示す。まず、MICRO 測定点と噴霧境界の距離 L を画像から算出する。その際、撮影された噴霧断面画像には事前に二値化処理および境界抽出処理が施されている。今、解析対象画像として図中の画像 A を取り上げると、 $L=1.68\text{mm}$ と求まる。このとき、MICRO 測定点が噴霧境界より内側に位置している場合には、便宜的に L に正符号を課し、図中の画像 B のように MICRO 測定点が噴霧境界より外側に存在している場合には、負記号を課すことにすると、画像 B においては噴霧境界からの MICRO の測定点までの距離は $L=-7.75\text{mm}$ となる。そして、解析対象画像が撮影されたときの OH ラジカル自発光信号強度 I_{OH} 、CH バンド発光信号強度 I_{CH} および油滴ミーン散乱光信号強度 I_{MS} を局所発光計測結果から求める。画像 A の場合には $I_{\text{OH}}=52.7\text{nA}$ 、 $I_{\text{CH}}=32.3\text{nA}$ 、 $I_{\text{MS}}=16.1\mu\text{A}$ であり、画像 B の場合には $I_{\text{OH}}=324.6\text{nA}$ 、 $I_{\text{CH}}=123.6\text{nA}$ 、 $I_{\text{MS}}=2.83\mu\text{A}$ と求まり、それぞれを MICRO 測定点と噴霧境界の距離 L に対してプロットすると図 6-9(b)を得る。このような一連の解析を撮影画像 600 枚について行い、噴霧境界と各発光強度の関係を求めたものが図 6-10 である。図 6-10 を見

ると、画像より判別される噴霧境界（ $L=0\text{mm}$ に相当）付近で油滴ミ一散乱光強度が急激に減少しており、画像から認識される噴霧境界よりもなお外側に、わずかながら油滴の存在を示すミ一散乱光信号が存在することが確認される。これより噴霧断面画像の二値化処理後に求められる噴霧境界は、噴霧の消失の最大勾配の位置を表していると考えられる。つまり噴霧の蒸発が最も活発な位置に相当する。また図 6-10 より油滴 Mie 散乱光信号が検出されなくなる位置において OH ラジカル自発光信号および CH バンドの発光信号がともに最大となることから、噴霧流の外縁部に燃焼反応領域が最も活発な領域があることが確認される。また噴霧境界内側においても燃焼反応領域が見うけられ、第 4 章で示したように灯油などの低揮発性燃料噴霧中を火炎が伝ばしていく際には、噴霧領域と燃焼反応領域が共存している領域があることを示している。このような構造は霧化圧力の変化によってもあまり影響されず、それぞれの実験条件において伝ば火炎の速度がほぼ等しかったことから、形成される伝ば火炎の構造にはほとんど違いがないと考えられる。

以上の結果から、伝ば火炎の構造を模式的に表すと図 6-11 のようになる。すなわち、燃焼反応領域は噴霧内部においても存在し、噴霧外縁部において最も活発であるといえる。しかし、ここでの議論は噴霧流中に形成される伝ば火炎の巨視的構造にとどまっており、火炎伝ばの微視的なメカニズムについては更なる実験的観察が必要であることは言うまでもない。

本実験では噴霧火炎の巨視的構造について考察を加えてきたが、ここでは微視的観点から、一般的に指摘されている噴霧流中の火炎伝ばのメカニズムとして次の二通りのものを提示しておく。すなわち、噴霧流中に伝ば火炎が火炎面として存在していると考えられるものと、空間的に散在する個々の燃焼油滴の集合体としての火炎が存在するものとする⁽⁵⁾。それぞれを模式的に表すと図 6-12(a)および図 6-12(b)のようになる。

図 6-12(a)に示すように伝ば火炎が火炎面として存在していると考えられる場合、伝ば火炎は噴霧流中に形成されている可燃予混合気中を伝ばしていくと考えられる。すなわち、伝ば火炎は予混合燃焼的特性を持つ。その際、重要となるのが可燃混合気の形成過程である。この場合、燃焼反応領域からの熱伝導および輻射伝熱によって燃料液滴の蒸発が促進され、燃料蒸気が生成された後に、周囲雰囲気酸素と混合され、可燃混合気が形成される。すなわち、燃焼反応領域として反応帯および予熱帯からなる火炎帯が存在し、さらにその手前に予蒸発領域が存在することになる。小笠原と水谷ら⁽⁵⁾が指摘したように、粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の油滴はガス燃料と同様に振る舞うとすると、予蒸発域は非常に薄く、予熱帯域の一部として考えれば説明がつく。

また、噴霧は粒径分布を持つことから、比較的大きな油滴も存在する。この

場合、火炎が伝ばし通過する過程において、蒸発しきらなかった燃料液滴は伝ば火炎が通過する際に燃焼し、伝ば火炎下流において単滴または油滴クラスターとして拡散燃焼する。その際、拡散火炎は輝炎を伴うため、輻射の効果により上流部の噴霧流の蒸発を促進することになる。いずれにしても、予蒸発域、予熱帯域、反応帯域のそれぞれの厚さについては、液体燃料の性状、噴霧特性等によっており、様々であると予想されるが、図 6-12(a)の伝ば火炎モデルの特徴は、火炎が空間的に連続的に面構造をなして存在していることである。

一方、空間的に散在する個々の燃焼油滴の集合体としての火炎が存在すると考えるものが図 6-12(b)である。図 6-12(b)においては、いわゆる予蒸発域と予熱帯域で燃料液滴の蒸発および予熱が完了し、個々に散在する燃料液滴の空間的位置関係によって、個々の油滴や油滴群を包み込むような全周炎が形成されると考えられる。この場合、伝ば火炎といえども、拡散燃焼的な性質を帯びてくる。また伝ば火炎が空間的に常に火炎面として存在しているとは限らず、空間的に不均一な燃料蒸気塊が反応領域において燃焼すると考えられる。

双方のモデルは、予混合気の形成および伝ば火炎としての燃焼過程に関して全く異なっており、前者は全く予混合ガス火炎の火炎伝ばメカニズムと同様であるが、後者は空間中に分散して燃料成分が存在する噴霧火炎特有の現象であると考えることができる。メタノールなどの高揮発性燃料を用いた Li⁽⁶⁾らや Gomez⁽⁷⁾らの対向流噴霧火炎の実験においては、噴霧は燃焼反応領域に到達する前に蒸発を完了しており、予混合ガス火炎中に見られるのと同様の伝ば火炎が形成されていると考えられるが、このようなメカニズムが灯油などの低揮発性燃料噴霧の場合にも当てはまるのかどうかについては未だ明らかではない。また、実際には噴霧火炎中には粒径分布が存在し、液体燃料の成分によって揮発性も大きく変わることから、火炎伝ばのメカニズムとしては両者が共存して存在し、伝ば火炎が形成されているとも考えられる。いずれにしても、今後は伝ば火炎の微視的構造観察が必要であり、レーザ誘起蛍光法などを用いた噴霧中の形成される伝ば火炎の微視的な燃焼反応領域の可視化などが求められる。

6.4 結言

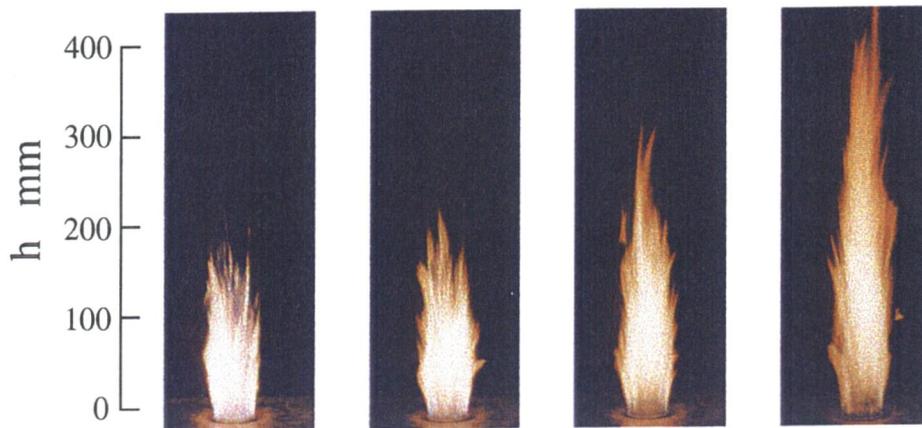
噴霧特性の違いが予混合噴霧火炎の燃焼挙動に及ぼす影響を調べるために、予混合噴霧バーナの二流体噴射弁に供給する霧化用空気圧力を調節して予混合噴霧特性を変化させ、形成された予混合噴霧火炎に噴霧断面像計測、局所発光計測ならびに位相ドップラ計測を適用し、以下の知見を得た。

- (1) 霧化圧力を減少させると予混合噴霧の平均粒径が増大し、火炎長が伸びる。
- (2) 本実験条件範囲内においては、霧化圧力の変化は噴霧流中の伝ば火炎の速度にはほとんど影響を与えない。

- (3) 噴霧流中の伝ば火炎の巨視的構造として、噴霧領域と燃焼反応領域が共存する領域があることが確認された。
- (4) 予混合噴霧火炎中の伝ば火炎においては、噴霧流外縁部に最も燃焼反応が活発な領域が存在している。

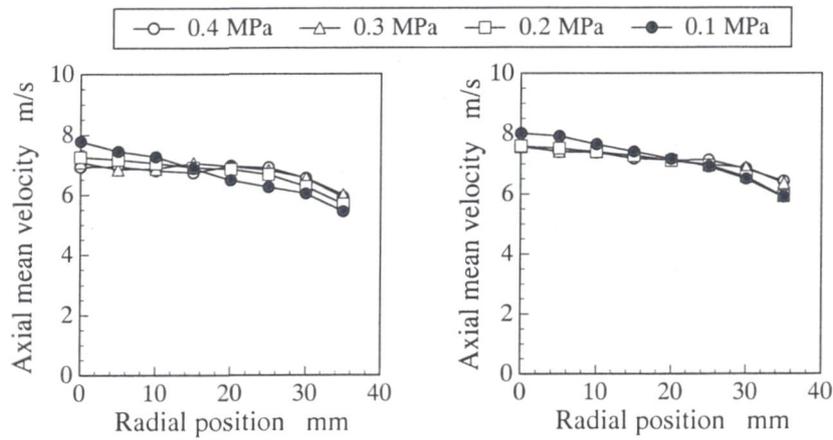
6.5 参考文献

- (1) 吉田邦夫監修, 油燃焼の理論と実際, (1992), 省エネルギーセンター刊.
- (2) Mullinger, P. J. and Chigier, N. A., "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin-Fluid Atomizers", J. Inst. Fuel, Vol.47, (1974), pp.252-261.
- (3) Mizutani, Y. and Nakajima, A., Combust. Flame, Vol.21, (1973), pp.343-357.
- (4) Fuchihata, M., Masashi, M. and Mizutani, Y., "Observation of Turbulent Premixed Flames by Simultaneous Monitoring with Laser Tomography and Ionization Probe", Proc. the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, 1996, II-291.
- (5) 小笠原光信, 水谷幸夫, "液体燃料粒子群中での層流火炎伝ばに関する研究 (第1報, 実験と火炎伝ば機構の考察)", 日本機械学会論文集, 31-226, (1965), pp.1002-1007.
- (6) Li, S. C. and Williams, F. A., "Experimental and Numerical Studies of Two-Stage Methanol Flames", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., (1996), pp.1017-1024, The Combustion Institute.
- (7) Gomez, A. and Chen, G., "Charged-Induced Secondary Atomization in Diffusion Flames of Electrostatic Sprays", Combust. Sci. and Tech., Vol.96, (1994), pp.47-59.



(a) P=0.4 MPa (b) P=0.3 MPa (c) P=0.2 MPa (d) P=0.1 MPa

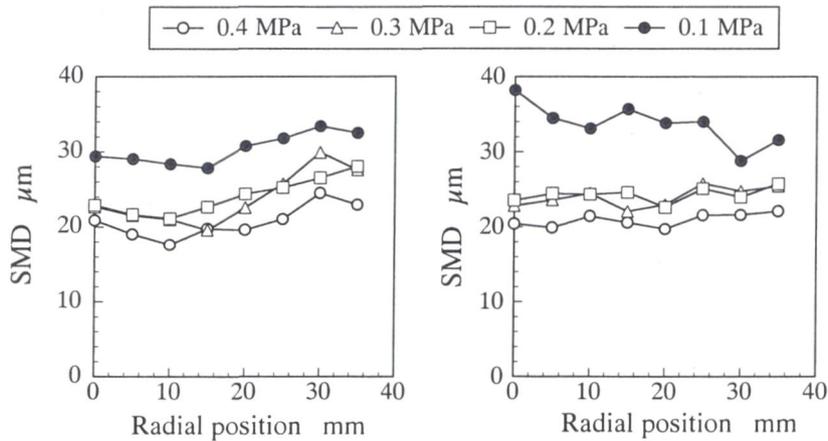
図 6-1 火炎の直接写真 (露光時間 1/15 秒)



(a) h=50 mm

(b) h=100 mm

図 6-2 油滴軸方向平均速度の半径方向分布



(a) h=50 mm

(b) h=100 mm

図 6-3 ザウテル平均粒径の半径方向分布

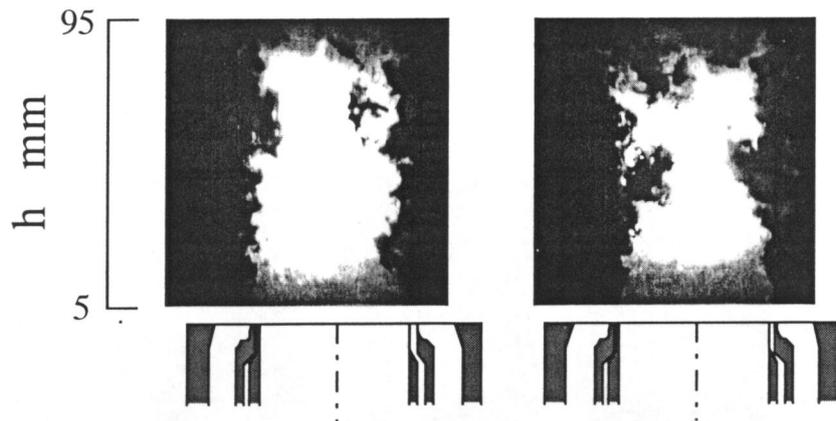


図 6-4 噴霧断面像の例 (P=0.4 MPa)

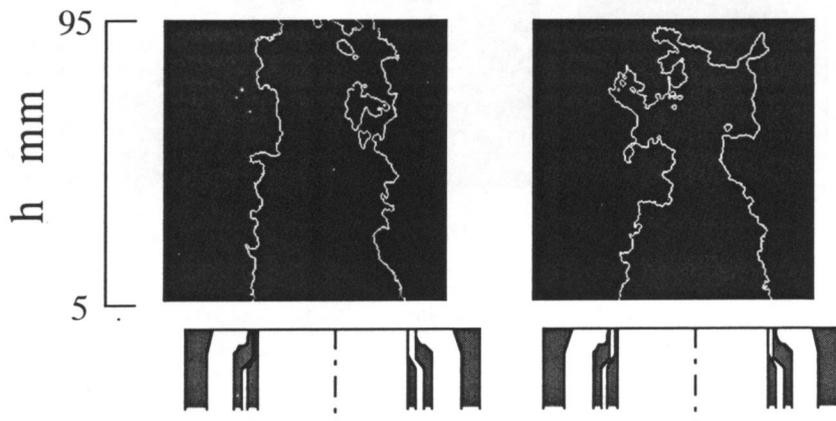


図 6-5 噴霧境界抽出画像 (P=0.4 MPa)

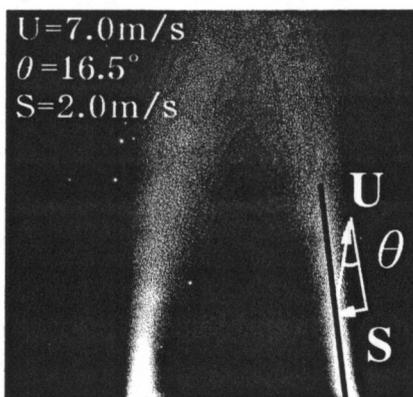


図 6-6 噴霧境界重ね合わせ画像と
伝ば火炎速度の導出 (P=0.4 MPa)

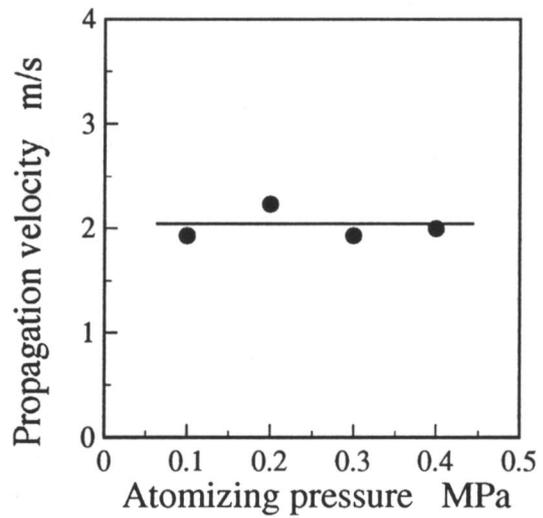


図 6-7 霧化用空気圧力の伝ば火炎
速度への影響

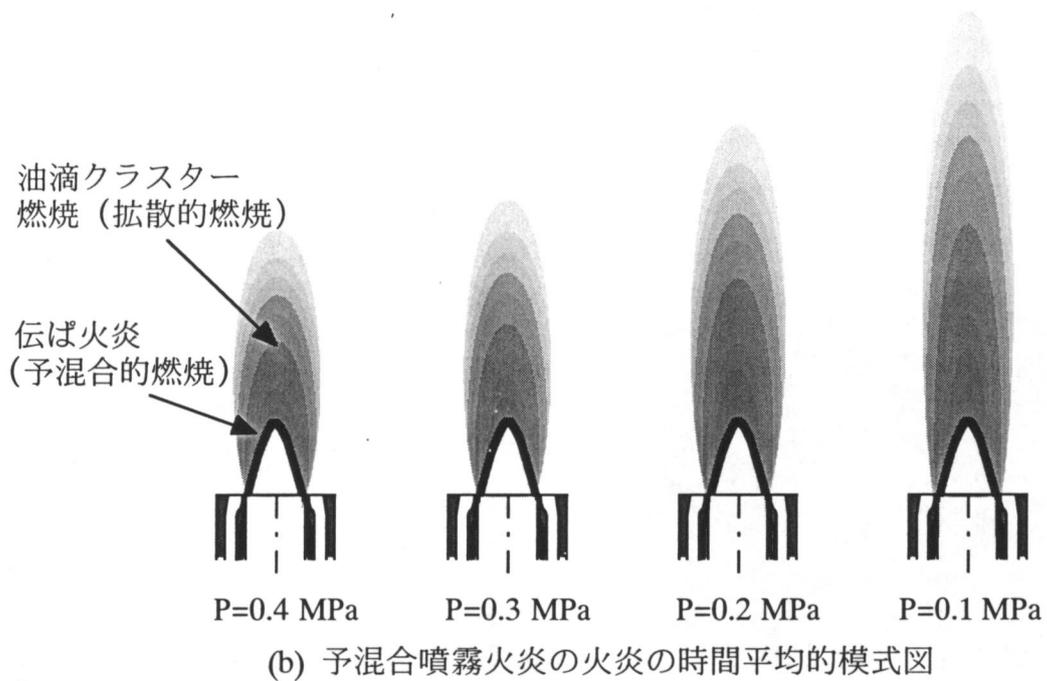
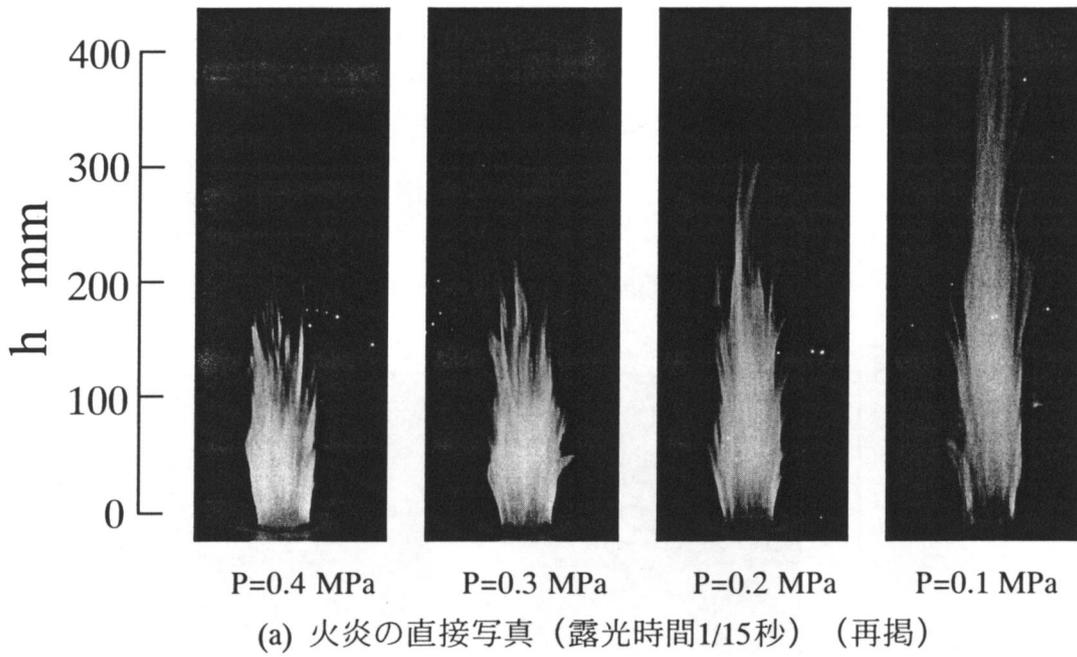
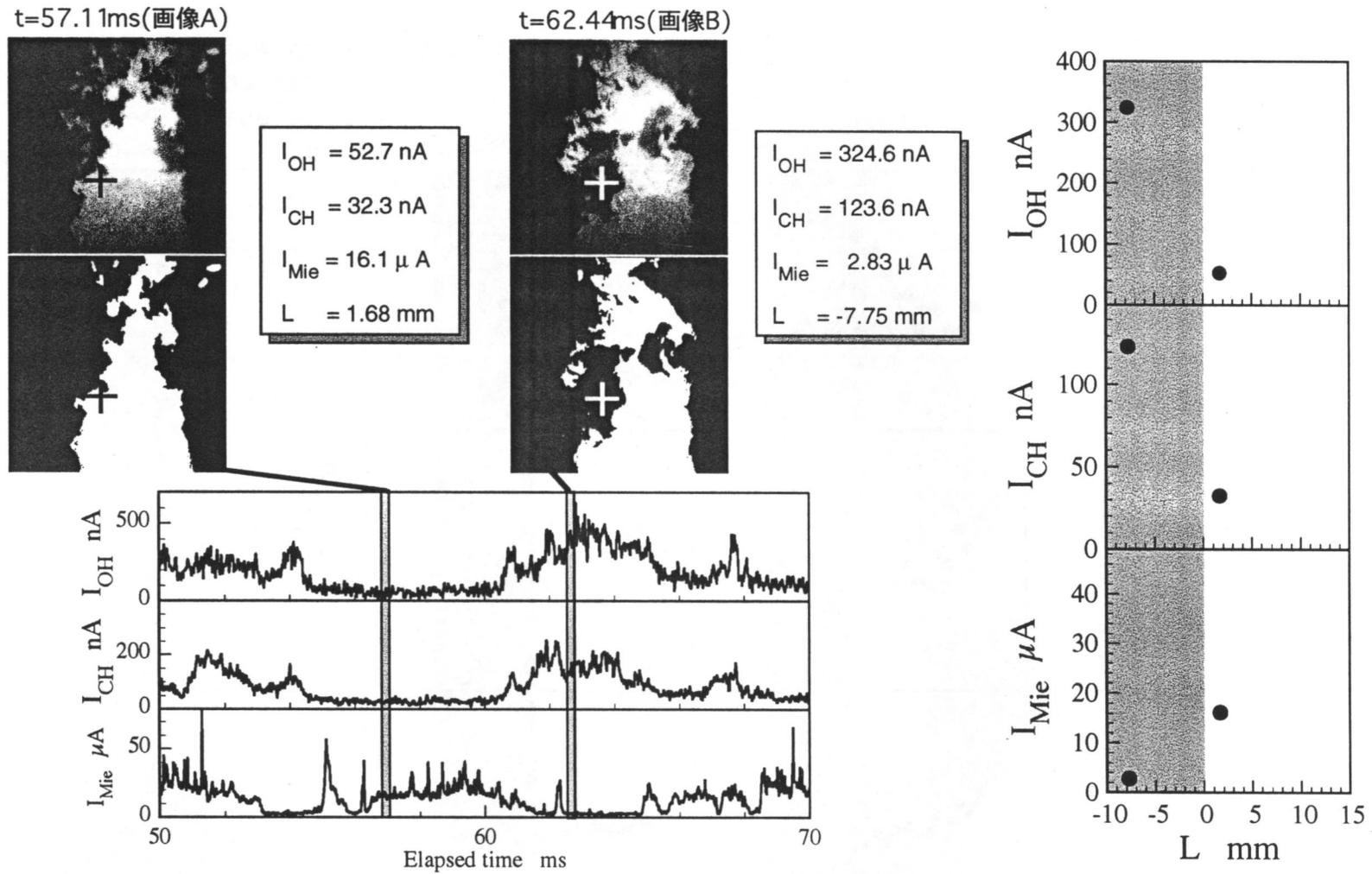


図 6-8 霧化圧力の違いによる予混合噴霧火炎の巨視的構造の変化



(a) 同時時系列計測結果および解析対象画像における各種信号強度の算出例 (b) 発光信号強度と噴霧境界位置の解析例

図6-9 噴霧断面像と局所発光信号の同時時系列計測と一次元的解析手法の適用例

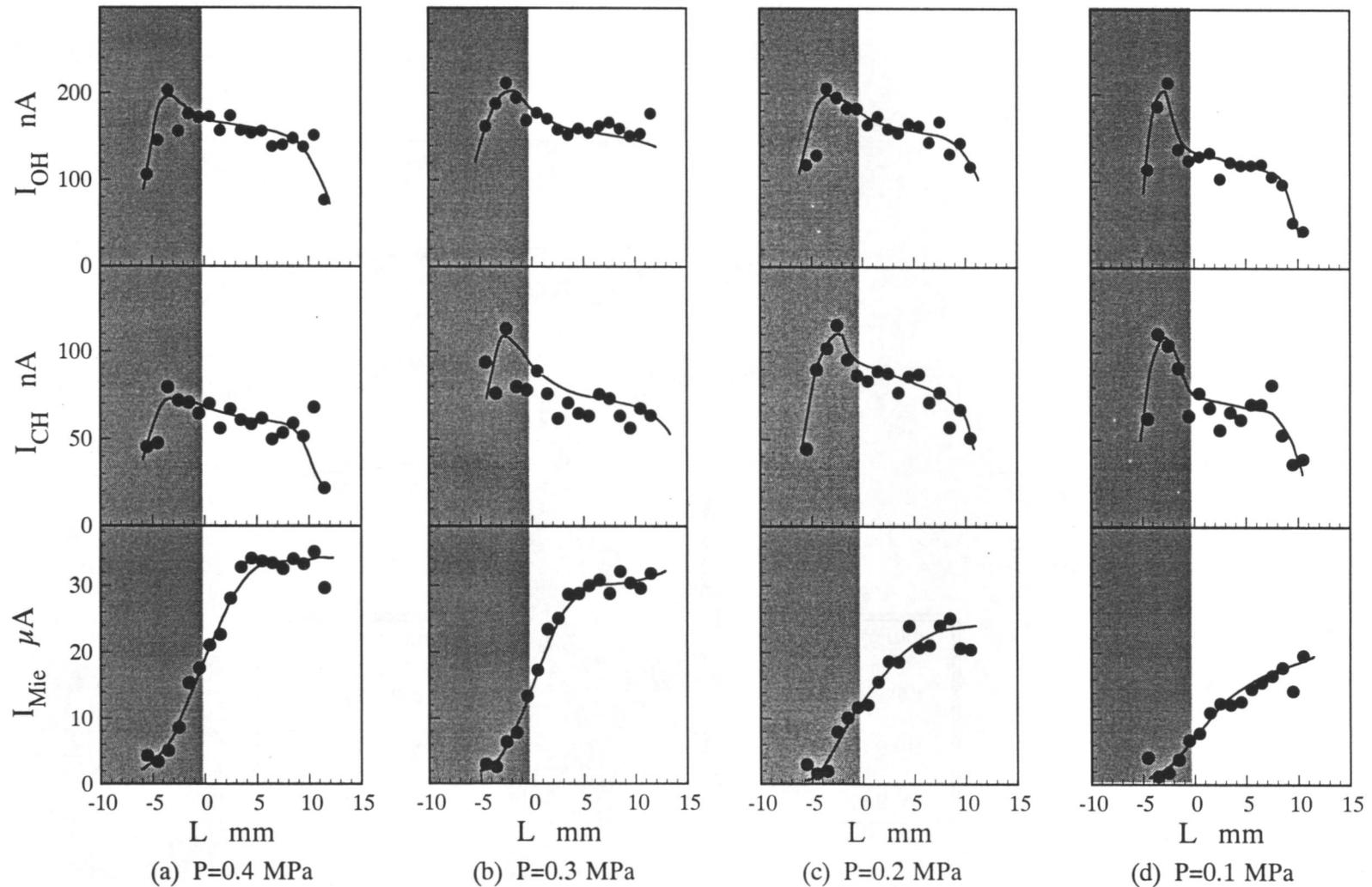


図6-10 噴霧境界位置と各発光信号強度の相関 (MICRO計測位置 $h=35$ mm, $r=15$ mm: 解析対象画像640枚)

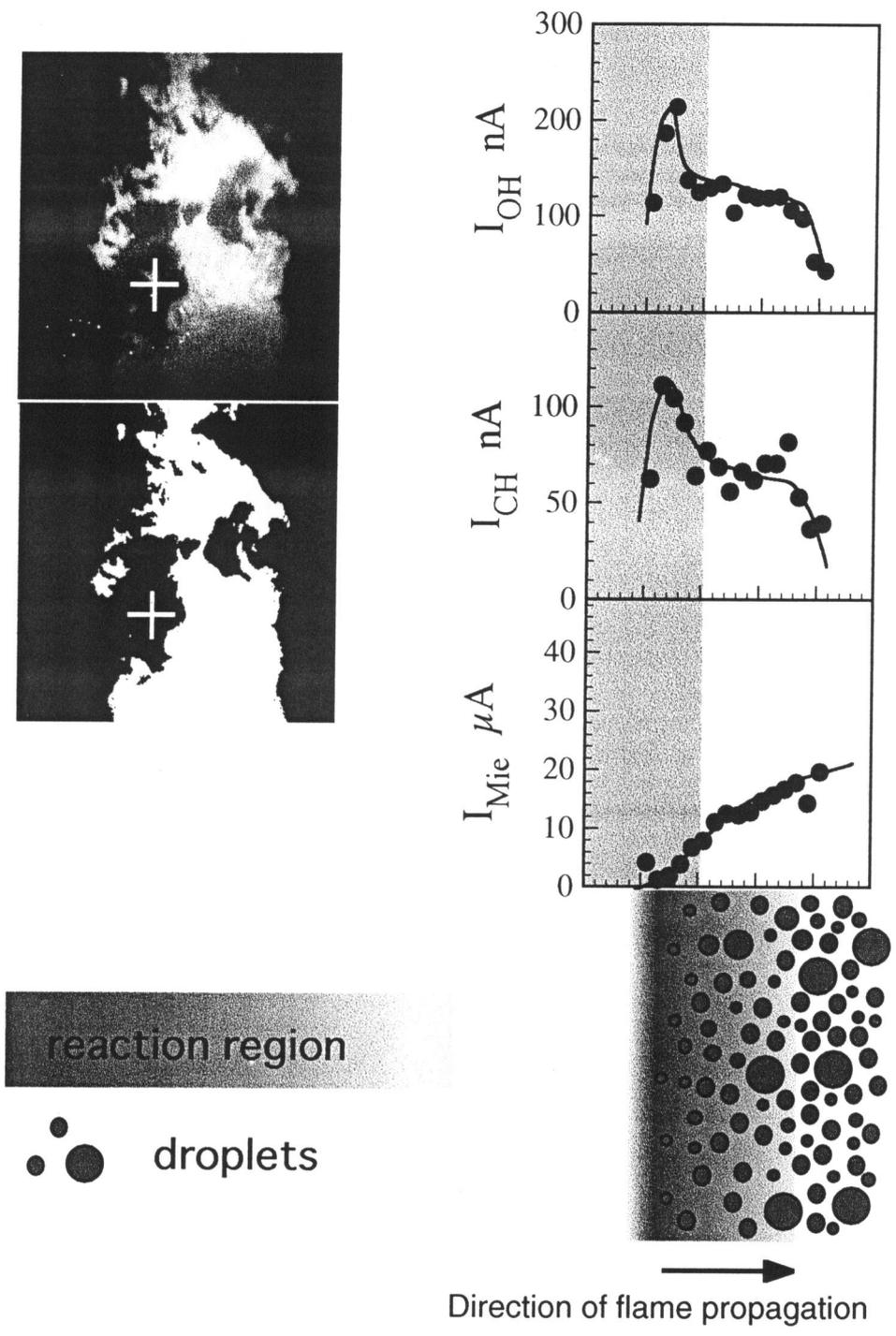
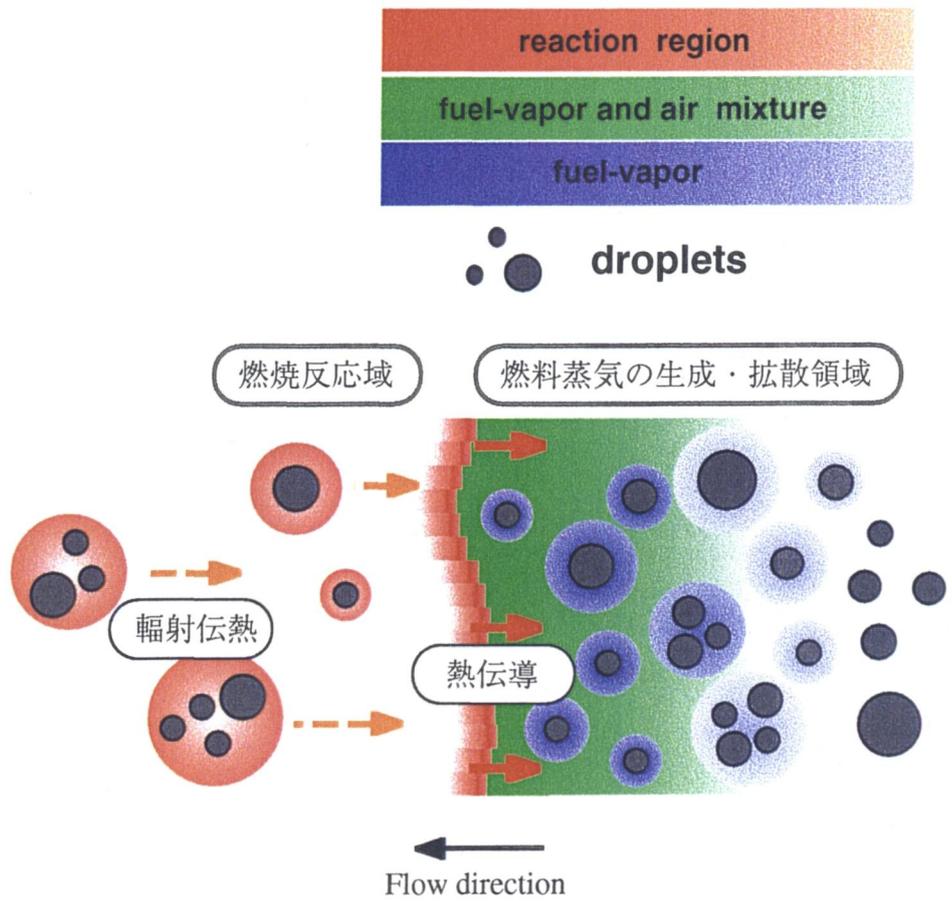
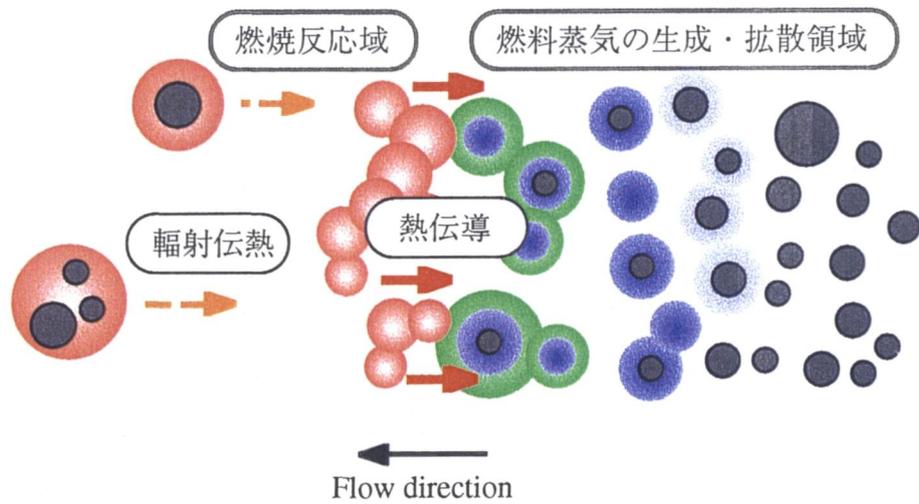


図 6-11 噴霧境界位置と発光信号強度の相関解析結果から導出される噴霧流中を伝ばする火炎の巨視的構造の模式図



(a) 火炎面としての伝ば火炎構造



(b) 空間的に散在する個々の燃焼油滴の集合体としての伝ば火炎構造

図 6-12 伝ば火炎の微視的構造の模式図

第7章 火花点火球形噴霧火炎中の 火炎伝ば挙動の観察

7.1 緒言

噴霧火炎中の燃焼挙動は、予混合的な火炎伝ば現象と拡散的な燃焼の二つに大別される⁽¹⁾。前章までにおいて、予混合噴霧火炎中における巨視的燃焼挙動の観察を行い、噴霧流中での選択的な火炎伝ば現象が、油滴群形成の一要因となっていることを示した。このような火炎伝ば現象は噴霧火炎構造を知る上で重要である。しかし、前章までで用いた予混合噴霧火炎中では、火炎伝ば現象は、予混合噴霧流中の燃焼しやすい領域において起こっているため時間的・空間的にランダムであり、形成される伝ば火炎構造の観察は容易ではない。また、伝ば火炎速度の計測を考えると、噴霧の不均一性を考慮に入れることが可能で、かつ実験条件の設定・変更が容易な噴霧火炎が実験対象として適しており、予混合噴霧火炎はこの点に関して十分とはいえない。

Li ら⁽²⁾や Gomez ら⁽³⁾は噴霧火炎中での伝ば火炎の詳細な構造観察の手段として、対向流噴霧火炎を利用した一連の研究を行っている。しかし、彼らの実験においては使用している液体燃料の揮発性が高く、そのため火炎構造は予混合ガス火炎と類似したものになっており、実験結果がそのまま灯油等の低揮発性燃料を用いた噴霧火炎にも適用できるかは定かではない。また、噴霧火炎中の伝ば火炎の特性を損なうことなく抽出したものとして、若林⁽⁴⁾の二次元対向流噴霧火炎が挙げられるが、実験条件の選定が難しいなどの問題が残されている。

赤松ら⁽⁵⁾は、超音波噴霧器から自由落下しながら周囲空気と緩慢に混合する燃料噴霧を一点で火花点火し、火炎核から成長する球形噴霧火炎の観察を行い、噴霧流中の伝ば火炎構造について詳細な考察を行った。その結果、油滴間に存在する燃焼しやすい燃料蒸気成分や微小油滴領域中を不輝炎が選択的に伝ばし、

その背後で、油滴クラスターが拡散燃焼片となってランダムに出現すること示した。赤松らの用いた火花点火球形火炎は、実験条件の変更が比較的容易であり、火炎伝ば機構の観察にも有効な手段である。そこで、本章でも赤松らと同様に自由落下噴霧中で火花点火により球形火炎を形成し、時間連続的に火炎伝ば挙動を観察した。その際、イメージンテンシファイアおよび高速度 CCD カメラを用いて火炎発光像の高速度撮影を行った。さらに燃料供給量を変化させ、それぞれの条件において、2 台の MICRO プロブを用いた火炎伝ば速度の計測を試み、さらにその結果を統計的に処理した。

7.2 実験装置および方法

7.2.1 実験装置の概略

本実験で用いた実験装置および光学系の概略を図 7-1 に示す。外乱の影響を防ぐために直立したアクリル製ダクト (280mm×280mm×1325mm, 上下端開放) の上端中央にフェライト製振動子を持つ超音波噴霧器が設置されている。超音波振動子への駆動入力は、CR 発振器 (KIKUSUI electronics, Model 417A) による約 18.5kHz の正弦波を、自作のパワーアンプで約 10W に増幅してワットメータ (TOA, HF POWER METER Model OP-1R) を通して行う。

液体燃料 (白灯油) は、微量注入ポンプ (古江サイエンス, JPV-W) によって噴霧器に供給される。噴霧器のホーン先端部で微粒化された燃料噴霧は、自由落下しながら緩慢に周囲空気と混合し、噴霧器ホーン先端から 400mm 下方に設置された電極間隙 4mm の電気火花 (放電時間 20ms) によって点火される。点火のトリガにはパルスディレイ・ジェネレータ (Stanford Research Systems, WC Model DG535) を用い、放電開始時刻を基点にして各種計測器の同期をとった。なお、点火後浮力により上方へ燃え上がった火炎は、ダクト上端より CO₂ を噴射し消火する構造となっている。なお点火実験は、供給燃料流量が 4.4, 6.3, 11.0 cm³/min のそれぞれの条件において、約 120 回ずつ繰り返し行い、各条件での火炎伝ば速度の比較を試みた。

7.2.2 OH ラジカル自発光像および隣接二地点からの発光信号検出の光学系

点火後形成される球形火炎からの OH ラジカル自発光連続像は光干渉フィルタ (中心波長 308.5nm, 半値幅 18nm) を通して背景光を除去された後、イメージブースターユニット (浜松ホトニクス, C4412) 付きイメージンテンシファイア (浜松ホトニクス, C4273) によって増幅され、リレーレンズを介して高速度 CCD カメラ (Kodak, Ektapro HS Model 4540) により取り込み速度 4500 駒/秒で撮影される。高速度カメラは実験装置設置の制約上、電極間隙正面から 18°

傾けた位置に設置されている。得られた画像データは有効画素数 256×256 pixel (実空間で $95\text{mm} \times 95\text{mm}$ に相当) で 256 階調に輝度変換され、デジタル記録される。

火炎中の隣接する二点からの OH ラジカル自発光は、電極間隙を挟んで正対し設置された MICRO A ならびに MICRO B によってそれぞれ集光され、光ファイバを通して、発光検出部へと導かれる。MICRO プロブの構成は第 3 章で詳述しているため、ここでは省略する。本実験で用いた発光検出部の構成を図 7-2 に示す。MICRO A, MICRO B, それぞれによって集光された火炎発光は、光ファイバから射出され、コリメートレンズによって平行光にされる。その後、光干渉フィルタ F (日本真空光学, 中心波長 308.5nm , 半値幅 18nm) で背景光を除去され、光電子増倍管 PM (浜松ホトニクス, R106UH) で検出される。光電子増倍管からの出力電流は I/V 変換器 (NF Electronics, Model LI-76) により電圧に変換され、自作の V/V アンプで増幅される。そしてローパスフィルタ (NF Electronics, FV-665) で高周波ノイズを除去された後、A/D コンバータ (Elmec, EC-2390) に離散時間 $10\mu\text{s}$ で 12bit のデジタル記録され、パーソナルコンピュータ (NEC, PC9801-VX) に取り込まれる。

図 7-3 に 2 台の MICRO プロブのそれぞれの焦点位置の可視化画像を示す。図中、電極間隙上方に見える明るい点が、それぞれに可視化された MICRO の焦点である。焦点位置の可視化は、MICRO に取り付けられた光ファイバケーブルの端面より He-Ne レーザ (Melles Griot, Model 05LPL479, 出力 4.5mW) を入射して行うことができる。色収差のない MICRO プロブにおいては焦点位置はすべての波長範囲において同一であり、本実験のように紫外光検出の際の光学系の調整においても、可視光を利用することができ、光学系の調整が容易になる。

2 台の MICRO プロブのそれぞれの焦点位置と電極間隙の空間的配置は図 7-4 に示すとおりである。MICRO A は電極間隙中央の直上 4mm , MICRO B はさらにその 6mm 上方に焦点位置がくるように設置されている。

7.3 実験結果および考察

7.3.1 自由落下噴霧の特性

噴霧特性は火炎伝ば速度と密接に関係しているものと考えられる。そこで、本実験では、点火実験を行う前に、位相ドップラ流速計を用いて自由落下噴霧流中の油滴の粒径および落下速度の計測を行った。図 7-5 はそれぞれの燃料供給条件における自由落下噴霧流の粒度分布である。ここで、サンプル数は 15,000 個の油滴とし、位相ドップラ流速計の測定位置は、2 台の MICRO プロブの焦点位置の midpoint, すなわち、火花電極間隙から 7mm 上方に設置した。図中には、各条件におけるザウテル平均粒径 D_{32} , 油滴の平均軸方向速度 \bar{U} およびその RMS

値 U' をあわせて示している。ここで、軸方向速度とは鉛直下向きを正方向とした油滴の落下速度のことである。図より、噴射燃料流量の増加に伴い、ザウテル平均粒径が増加してことがわかる。粒度分布から判断すると、燃料供給量を増加させても、粒度分布のピークの位置は変化せず、その一方で大粒径の油滴の存在確率が增大していることが見て取れる。また、燃料流量の増加とともに、油滴の軸方向速度およびその RMS 値もそれぞれ増加していることがわかる。

図 7-6 に油滴直径と軸方向速度の相関を示す。これより、油滴粒径が大きいほど軸方向速度が増加する傾向があらわれている。これは油滴粒径によって終端速度が異なるためであり、そのため燃料流量の増大とともに軸方向速度の RMS 値も増加した値となったものと考えられる。

7.3.2 球形噴霧火炎の直接高速度撮影

図 7-7 に火花点火後の球形噴霧火炎の直接撮影結果を示す。点火後から約 100ms の間、火炎は球形を保って成長し、その後、浮力の影響によって火炎形状は大きく歪んでくる。そのため本実験では、火花点火後に火炎が球形を保って伝ばしていく初期の球形噴霧火炎を実験対象とし、伝ば挙動の観察を行った。図 7-7 から判断すると、空間中にランダムに塊状を成して燃焼反応領域が形成されているように見える。しかし、ここで撮影しているのは火炎の直接撮影像であり、噴霧火炎中の輝炎領域のみである。

以前の実験において赤松ら⁹⁾は不輝炎の挙動および不輝炎領域や輝炎領域と油滴クラスターの位置関係を明確にするために、OH 発光像と C_2 バンド発光像ならびに油滴ミ一散乱光像の瞬時同時撮影を行い、油滴間に存在する燃焼しやすい燃料蒸気成分や微小油滴領域中を不輝炎が選択的に伝ばし、その背後で、油滴クラスターが拡散燃焼片となってランダムに出現すること示した。しかし、いずれも瞬時画像の同時計測であったことから、伝ば火炎の成長過程を時間連続的に観察することはできなかった。そのため本実験では、噴霧流中の伝ば火炎における燃焼反応領域の成長過程について考察を加えるために、OH 発光像および局所領域からの OH ラジカル自発光信号の同時時系列計測を行った。

7.3.3 OH ラジカル自発光像と局所 OH ラジカル自発光の同時時系列計測および球形火炎の伝ば速度の導出

図 7-8 に燃料流量 $4.4\text{cm}^3/\text{min}$ における OH ラジカル自発光連続像と、2 台の MICRO によって検出された OH ラジカル自発光信号 I_{OH} の同時時系列計測結果を示す。画像中、+印はそれぞれ 2 台の MICRO の測定位置を表しており（上：MICRO B, 下：MICRO A）、点火前の画像 A 中には点火電極間隙もあわせて示してある。撮影された OH ラジカル自発光の連続像から、 $t=3.3\text{ms}$ （画像 B）に

において電極間隙間の放電が確認される。そして放電後、着火が起こり、球形火炎が形成されて徐々に成長していく。この時 D~H の画像中で、輝度の暗い部分は不輝炎、明るい部分は輝炎であると思われる。点火後、輝度の暗い領域が、輝度の明るい領域に先立って空間的に広がっていく様子が観察される。すなわち、不輝炎伝ば後、その後縁部において不連続かつランダムに輝炎領域が形成されていっていることがわかる。ここで不輝炎の伝ばも空間的に一様ではなく、選択的であることが見て取れる。また、画像中ランダムに見られる高輝度の斑点状の輝炎塊は、単一油滴または油滴クラスター周囲に形成される拡散火炎であると考えられる。

次に、球形火炎の伝ば速度を導出するために、隣接する 2 点からの OH ラジカル自発光信号を観察すると、 $t = 10.4 \text{ ms}$ (画像 C に対応) において OH ラジカル自発光信号の立ち上がりが確認される。この時、同時に撮影された画像 C においては、球形火炎が MICRO A の測定位置を通過しようとしており、画像と局所発光計測がよく対応していることがわかる。さらに $t = 47.7 \text{ ms}$ (画像 G に対応) において MICRO B による OH ラジカル自発光信号は立ち上がりはじめ、この時、MICRO B の測定位置を火炎が通過していく様子が画像からも確認される。これより、自由落下噴霧中を火炎が伝ばする際の、MICRO A と MICRO B のそれぞれの OH ラジカル自発光の検出時間差を求めると $\Delta t = 37.3 \text{ ms}$ となる。いま、MICRO A と MICRO B の測定位置の間隔 L は 6.0 mm であるから、見かけの火炎伝ば速度 V は次式、

$$V = L/\Delta t \quad (7.1)$$

より 0.16 m/s と求まる。

本実験では、噴霧燃焼は二相流であり、時間的・空間的に不均一であることを考慮して同様の点火実験を各実験条件ごとに約 120 回ずつ行い、火炎伝ば速度の統計的導出を試みた。図 7-9 に点火実験によって求められた見かけの火炎伝ば速度 V の確率分布を示す。図より、いずれの実験条件においても見かけの火炎伝ば速度の平均値は約 0.29 m/s であることがわかる。この値は、前章で得られた予混合噴霧火炎中の伝ば火炎の速度 (約 2.0 m/s) に比べて非常に小さい。予混合噴霧流は自由落下噴霧流に比べて乱れが大きく、そのため、火炎伝ば速度も増加したと考えられる。

また本実験では、燃料噴射量によらず火炎伝ば速度はほぼ等しい値をとっている。先の PDA 計測結果では、燃料供給量を増加させても、火炎伝ばの際に重要な役割を果たすとされる $10 \mu\text{m}$ 以下の小粒径の油滴はほとんど増加していなかった。そのため、ここでも燃料流量を増加させても、火炎伝ば速度にほとんど影響があらわれなかったものと考えられる。すなわち、いくら大粒径の油滴が増加しても、火炎伝ば速度には影響を与えないものと推察される。また、火

炎伝ば速度の平均値はほとんど一定であるが、その一方で同じ実験条件であっても、各点火実験ごとに火炎伝ば速度は大きくばらついている。このことは、噴霧火炎が時間的・空間的に不均一な構造をとることを示唆しており、空間中の局所領域を占める噴霧の特性によって火炎伝ば速度が変わり、選択的な火炎伝ばが起きうるということを示している。

最後に、ここで導出した火炎伝ば速度は、見かけの火炎伝ば速度であり、厳密には噴霧流の落下速度や火炎伝ばによって生じる熱膨張の効果を考慮する必要がある。赤松ら⁽⁵⁾の実験においては、油滴の平均速度は火炎到達前と火炎通過後でほとんど変化があらわれていない。一方、対向流噴霧火炎を用いた実験⁽⁴⁾では、火炎前縁に近づくと油滴が減速することが報告されており、今後、真の火炎伝ば速度の導出には、MICROプローブを用いた見かけの火炎伝ば速度と位相ドップラ流速計による噴霧流の落下速度の同時計測が必要であると思われる。

7.4 結言

噴霧流中を伝ばする火炎を観察し、伝ば火炎の速度を統計的に導出するために、超音波噴霧器から自由落下して周囲空気と緩慢に混同する燃料噴霧を一点で火花点火して球形噴霧火炎を形成し、OHラジカル自発光像および局所OHラジカル自発光の同時時系列計測を行い、以下の知見を得た。

- (1) 不輝炎到達後、その後縁において輝炎領域がランダムに形成されていく様子が時間連続的に捉えられた。
- (2) 火炎中の隣接する2地点からのOHラジカル自発光信を2台のMICROプローブを用いて検出し、火炎伝ば速度の導出を試みた。
- (3) 本実験の範囲内において、燃料流量の増加は平均火炎伝ば速度にはほとんど影響を与えないが、伝ば速度がばらつきは大きくなる。

7.5 参考文献

- (1) Williams, F. A., *Combustion Theory Second Edition*, (1985), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- (2) Li, S. C. and Williams, F. A., "Experimental and Numerical Studies of Two-Stage Methanol Flames", *Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust.*, (1996), pp.1017-1024, The Combustion Institute.
- (3) Gomez, A. and Chen, G., "Charged-Induced Secondary Atomization in Diffusion Flames of Electrostatic Sprays", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.96, (1994), pp.47-59.
- (4) 若林卓, "対向流噴霧火炎の形成, 計測ならびに構造に関する研究", 大阪大学博士論文, (1997).
- (5) 赤松史光, 中部主敬, 水谷幸夫, 香月正司, 田端敏克, "油滴群中を伝ばする火花点火球形火炎の構造観察(第2報)", *日本機械学会論文集*, 61B-582, (1995), pp.752-758.

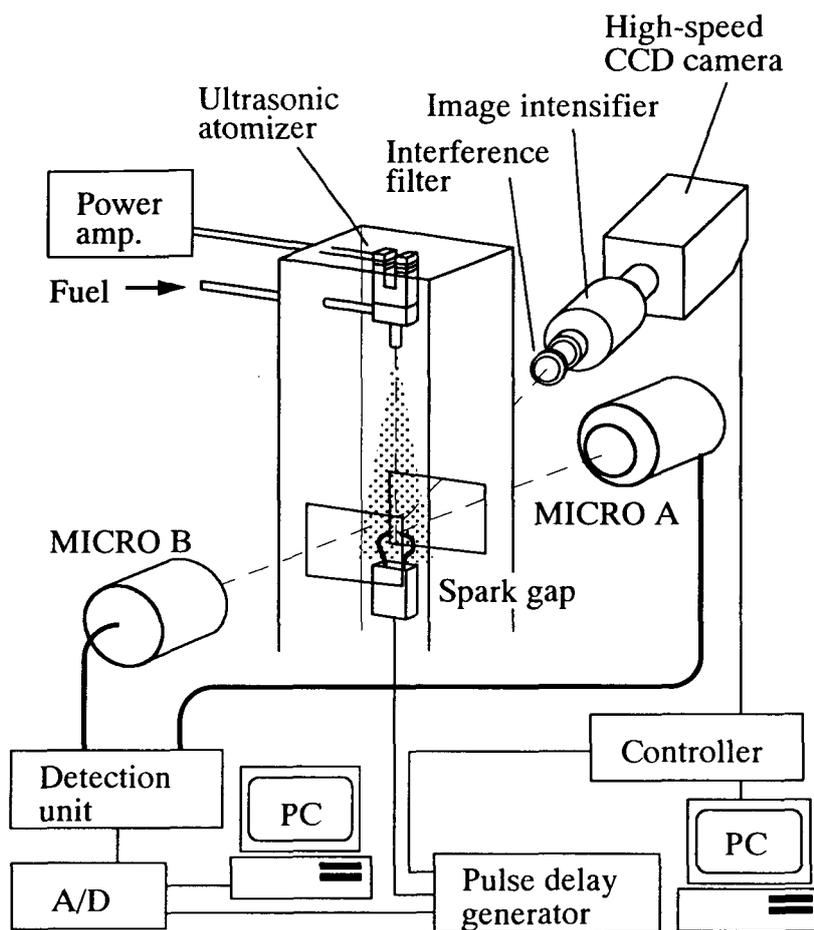


図 7-1 実験装置の概略

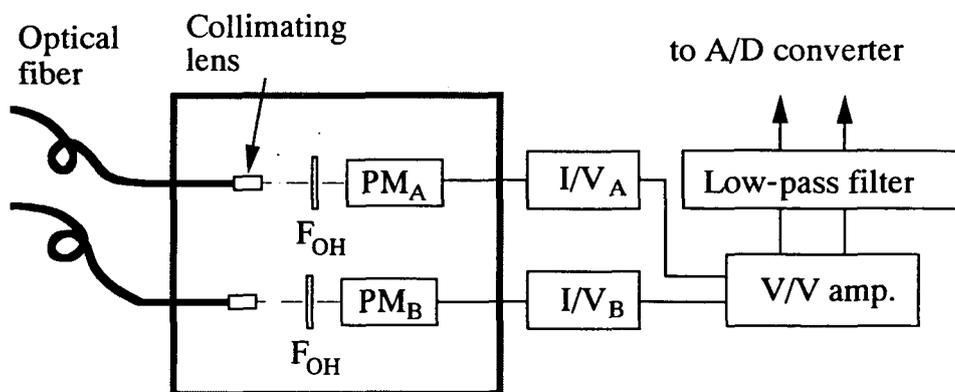


図 7-2 発光検出部の構成

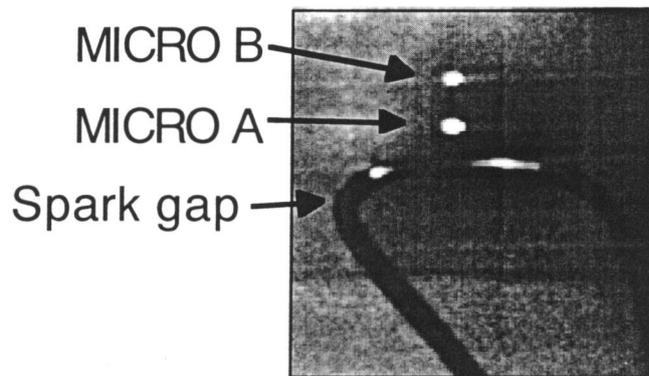


図 7-3 MICRO プロブの焦点位置の可視化画像

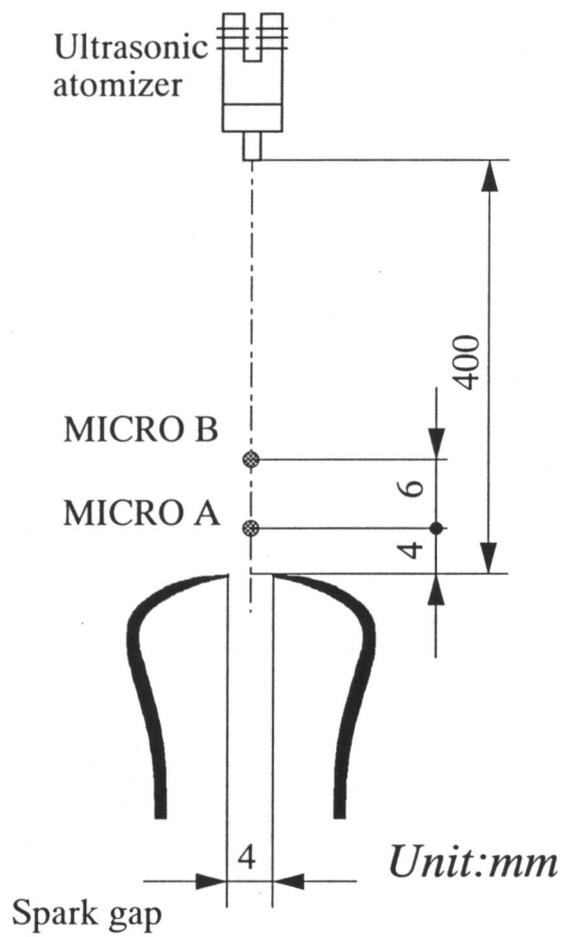


図 7-4 MICRO プロブの焦点位置と火花電極間隙の配置

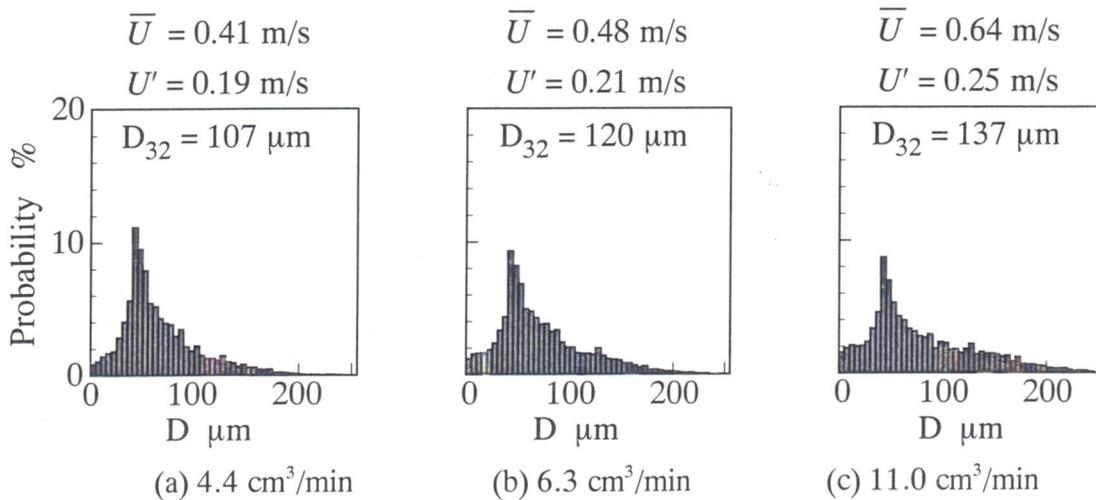


図 7-5 自由落下噴霧の粒度分布

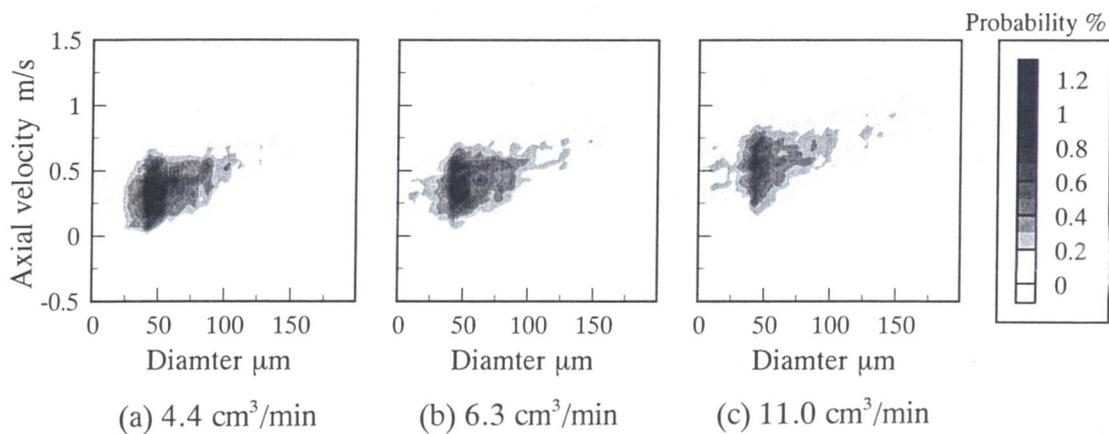


図 7-6 油滴直径と軸方向速度の相関

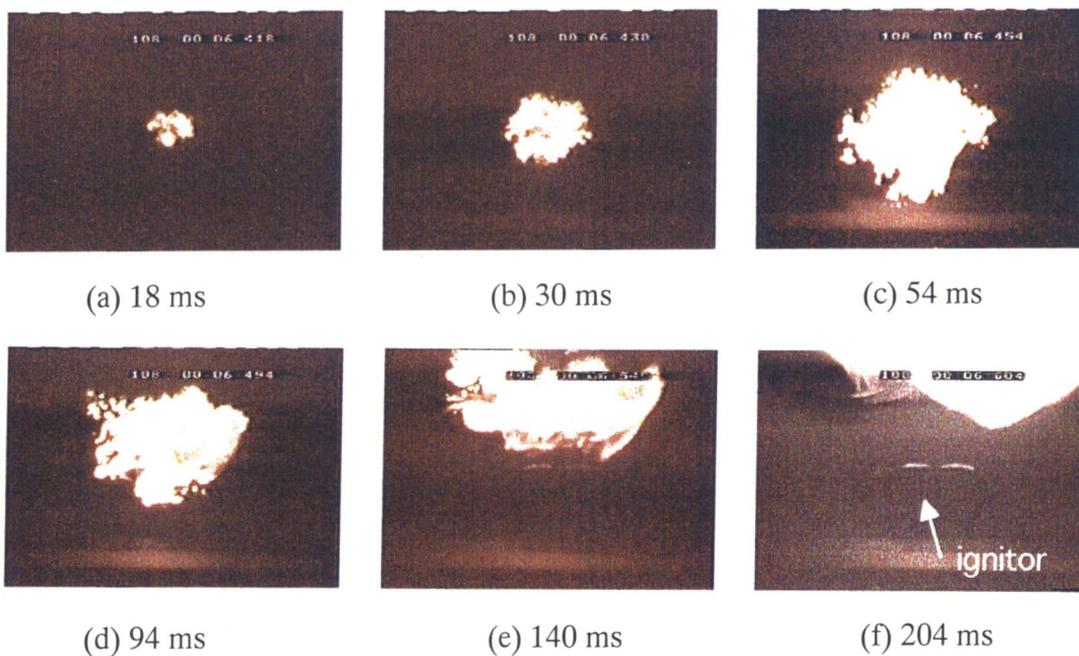


図 7-7 火花点火球形火炎の高速度撮影結果

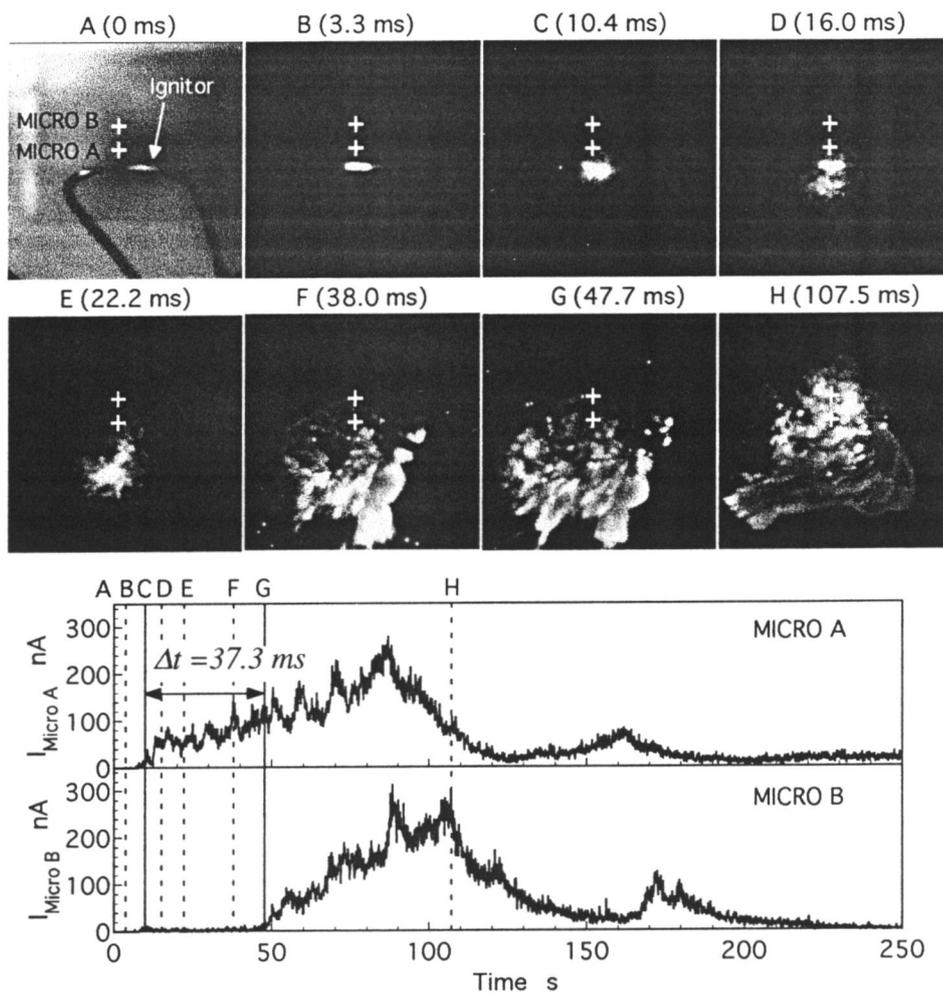


図 7-8 OH ラジカル自発光像と局所 OH ラジカル自発光の同時計測結果

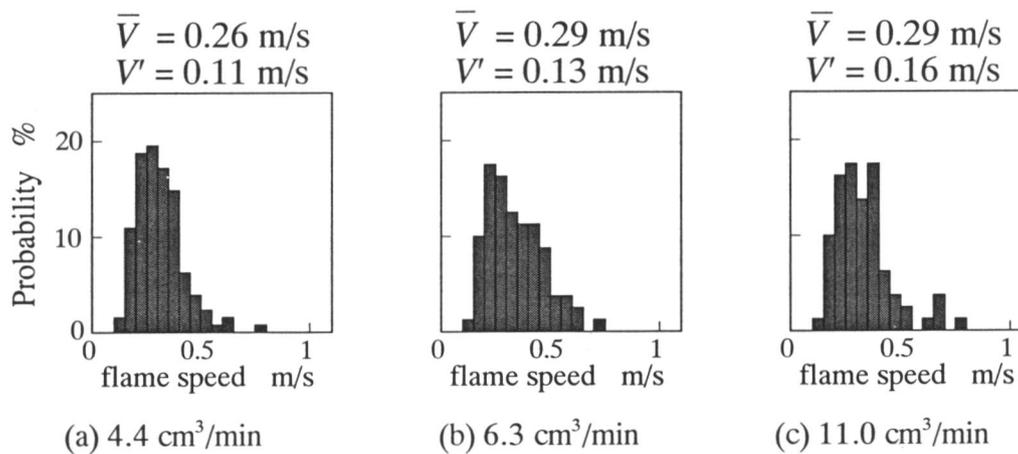


図 7-9 火炎伝ば速度の確率分布

第8章 結論

噴霧燃焼は工業的に広く利用されているにもかかわらず、燃焼器の設計・開発、運転条件の選定など、実務的な作業に関しては未だ経験に頼る部分が多いのが実状である。しかし近年、地球環境問題の観点から、より高効率かつ低有害排出物を実現する燃焼器の開発が求められており、現状のままの経験則に依存した設計・開発手法では非効率的であり、今後より厳しくなると予想される有害物質の排出規制を克服することは容易ではない。そのため、より信頼性のあるシミュレーションコードの開発が必要不可欠であり、それには実験的知見の蓄積が必要なことはいうまでもない。しかし、気液二相流としての性質を有する噴霧火炎は計測が困難であり、噴霧火炎構造に関する実験的知見は、ガス火炎と比較しても著しく不足している。現在、噴霧燃焼モデルとしては PSI-Cell モデルなどの単滴燃焼を基礎とした非常に簡略化されたモデルが広く用いられているが、通常、燃焼器中に形成される火炎は、無数の液滴とその蒸発によって形成される気液二相流としての混合気の反応の結果であり、噴霧としての燃焼挙動は、単滴のそれとは大きく異なっていると考えられる。そのため、噴霧としての燃焼挙動を理解することが最も重要であり、実際の火炎構造を反映した噴霧燃焼モデル構築への最短距離であるといえる。

そこで、本論文ではまず噴霧火炎の燃焼挙動を観察するための光学的計測システムの開発を行った。最初に、噴霧計測に広く適用されている位相ドップラ計測法を燃焼場に適用した際に生じる誤差について考察を加え、次いで、局所発光計測に用いるために新たに開発した Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics(MICRO)の実験的性能評価を行った。

そして従来の時間平均的な観察ではなく、噴霧火炎の燃焼挙動について時間的・空間的変動をも考慮に入れた計測を行うために、位相ドップラ法、局所発光計測に加え、レーザによる噴霧断面の可視化像の時系列計測を可能とする光

学系を構築し，予混合噴霧火炎に適用した．予混合噴霧火炎は微粒化の完了した灯油燃料噴霧を空気流によって輸送し，形成される予混合噴霧流をパイロット火炎によって保炎する構造となっており，油滴と周囲空気のスリップ速度が極力抑えられた単純な流れ場を形成することができる．そのため噴霧火炎中の燃烧挙動および火炎伝ば現象の観察に適している．この火炎に同時光学計測システムを適用した結果，予混合噴霧火炎中においては，選択的な火炎伝ば現象によって予混合噴霧流が分断され，一部残存した噴霧流が下流部において油滴クラスターとして燃烧していく様子が観察された．さらに，伝ば火炎の速度と油滴クラスターの消失速度を画像処理解析から導出した．その結果，噴霧火炎は瞬間的・局所的に不均一な構造をとっているため，伝ば火炎速度と油滴クラスターの消失速度はともに大きなばらつきを見せるものの，統計的には伝ば火炎速度は油滴クラスター消失速度よりも大きな値をとることを示した．また，予混合噴霧火炎は予混合火炎的特性と拡散火炎的特性の双方を併せ持っていることを明らかにした．

つづいて，噴霧特性が燃烧挙動に及ぼす影響について調べた．その中で，予混合噴霧の平均粒径の増加は，火炎長を伸ばす方向に作用する一方で，予混合噴霧火炎中の伝ば火炎速度にはほとんど影響を与えないことを示した．さらに，局所火炎発光計測結果と噴霧断面像を一次元的に解析することにより，噴霧流内部においても燃烧反応領域が存在することを明らかにした．

また，予混合噴霧火炎に代わって自由落下噴霧流を空間中の一点で火花点火して得られる球形火炎についても観察を行い，実験条件の違いによる火炎伝ば速度を比較した．その際，火炎伝ば速度の導出には，空間中の異なる局所領域からのOHラジカル自発光信号を2台のMICROプローブを用いて検出することにより行い，得られた結果に対して統計的処理を試みた．

以下に，得られた知見を章別にまとめて記す．

第2章では，噴霧燃焼場に位相ドップラ計測法を適用する際に生じる誤差評価を行うことを目的に，位相ドップラ計測において光路上の火炎の存在が計測に及ぼす影響について，既知の粒径を持つポリスチレン粒子を用いた計測から定量的な評価を試み，誤差要因を検討した．その結果，以下のことが明らかになった．

- (1) 速度計測においては，光路上の火炎の存在は計測値に影響を与えないが，データレートが低下する傾向がある．
- (2) 粒径計測においては，光路上の火炎の存在は計測される粒径平均値にはほと

んど影響を与えない。しかし、計測値にばらつきが現れ、火炎が送光系および受光系に近づくほどばらつきは大きくなり、特に受光系の前に火炎が存在するときに計測精度が低下する。

- (3) 粒径計測においては火炎の揺れ、すなわち屈折率の空間的な変化が重要な影響因子であり、計測値に大きな影響を及ぼす。
- (4) 光路上の火炎の存在によって、ドップラ信号の S/N 比が低下するために、高レーザ出力が必要となる。
- (5) PDA 計測における光路上の火炎の影響による計測誤差を評価する指標として、レーザ光の揺れ量を取り上げ、その可能性を示した。

第 3 章では、局所発光計測用に新たに開発された光学式受光プローブである MICRO 光学系の実験的性能評価を行うことを目的に、MICRO プローブを層流予混合ブンゼン火炎、乱流予混合ブンゼン火炎、予混合噴霧火炎のそれぞれに適用した。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) MICRO の持つ空間的な集光率特性の優位性は、乱流場などの発光領域が空間的に不均一に分布している場において現れる。
- (2) 乱流予混合ブンゼン火炎において、イオン電流信号と MICRO による OH ラジカル自発光信号は良く一致した。
- (3) 予混合噴霧火炎に MICRO を適用した場合、以前に得られた視野制限プローブによる発光信号計測結果と同様の傾向を示したことから、MICRO による予混合噴霧火炎中の局所領域からの発光信号の計測が可能であることが示された。

第 4 章では、噴霧火炎中の燃焼挙動を巨視的観点から考察するために、噴霧断面連続像および火炎中の局所領域からの OH ラジカル自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴ミ-散乱光信号の同時時系列計測システムを比較的単純な流れ場を有する予混合噴霧火炎に適用した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) あらたに構築した噴霧断面像と火炎中の局所領域からの発光信号の同時時系列計測システムは、噴霧火炎構造解明に関して有用である。
- (2) 非燃焼時には油滴クラスターは形成されておらず、その一方で、燃焼時にはバーナポート近傍において連続的に存在している噴霧流が、予混合燃焼的な選択的伝ば現象によって分断され、油滴クラスターが形成される。
- (3) バーナ下流域において、油滴クラスターはその外縁部より次第に消失していき、その際、油滴クラスター自身が燃料蒸気の供給源となり拡散燃焼的に振る舞う。
- (4) 一部の油滴クラスターについては、バーナ下流域で次第に輝炎塊になる様子が観察された。

第5章では、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、以下のことを示した。

- (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。

第6章では、噴霧特性の違いが予混合噴霧火炎の燃焼挙動に及ぼす影響を調べるために、予混合噴霧バーナの二流体噴射弁に供給する霧化用空気圧力を調節して予混合噴霧特性を変化させ、形成された予混合噴霧火炎に噴霧断面像計測、局所発光計測ならびに位相ドップラ計測を適用した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 霧化圧力を減少させると予混合噴霧の平均粒径が増大し、火炎長が伸びる。
- (2) 本実験条件範囲内においては、霧化圧力の変化は噴霧流中の伝ば火炎の速度にはほとんど影響を与えない。
- (3) 噴霧流中の伝ば火炎の巨視的構造として、噴霧領域と燃焼反応領域が共存する領域があることが確認された。
- (4) 予混合噴霧火炎中の伝ば火炎においては、噴霧流外縁部に最も燃焼反応が活発な領域が存在している。

第7章では、噴霧流中を伝ばする火炎を観察し、伝ば火炎の速度を統計的に導出するために、超音波噴霧器から自由落下して周囲空気と緩慢に混同する燃料噴霧を一点で火花点火して球形噴霧火炎を形成し、OHラジカル自発光像および局所OHラジカル自発光の同時時系列計測を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 不輝炎到達後、その後縁において輝炎領域がランダムに形成されていく様子が時間連続的に捉えられた。
- (2) 火炎中の隣接する2地点からのOHラジカル自発光信を2台のMICROプローブを用いて検出し、火炎伝ば速度の導出を試みた。
- (3) 本実験の範囲内において、燃料流量の増加は平均火炎伝ば速度にはほとんど影響を与えないが、伝ば速度がばらつきは大きくなる。

関連発表論文

公刊論文

- (1) Tsushima, S., Saitoh, H., Akamatsu, F. and Katsuki, M., "Observation of Combustion Characteristics of Droplet Clusters in a Premixed-Spray Flame by Simultaneous Monitoring of Planar Spray Images and Local Chemiluminescence", Twenty-seventh Symp. (Int.) on Combust., (1998), The Combustion Institute, (in printing).
- (2) Tsushima, S., Akamatsu, F. and Katsuki, M., "Application of New Light Collecting Probe with High Spatial Resolution to Spark-Ignited Spherical Flames", 9th Symp. (Int.) on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics", (1998), pp.35.3.1-35.3.7.
- (3) 津島将司, "レーザシート法による噴霧火炎の群挙動の可視化と火炎内ラジカル自発光の点計測", 高温学会誌, Vol.24, No.3, (1998), pp.111-115.
- (4) Tsushima, S., Saitoh, H., Akamatsu, F. and Katsuki, M., "Application of Simultaneous Measurement of Laser Tomography and Flame Luminescence to a Premixed-Spray Flame", 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, (1998), AIAA 98-0721.
- (5) Tsushima, S., Akamatsu, F., Katsuki, M., Mizutani, Y. and Cho, Y.-D., "Accuracy of Phase-Doppler Anemometry in the Presence of Flames", Part. Part. Syst. Charact., Vol.14, (1997), pp.225-232.
- (6) Tsushima, S., Akamatsu, F., Katsuki, M. and Yamamoto, S., "Observation of Droplet Cluster Behaviors in a Premixed-Spray Flame by Laser Tomography", The 7th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS97), (1997), pp.1082-1089.
- (7) 津島将司, 赤松史光, 香月正司, 水谷幸夫, 趙庸大, "位相ドップラ計測における火炎の影響", 日本機械学会論文集, 63-607B, (1997), pp.1041-1048.
- (8) Tsushima, S., Akamatsu, F., Katsuki, M., Mizutani, Y. and Cho, Y.-D., "The Influence of Flame on Phase Doppler Anemometry", 8th Symp. (Int.) on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics", (1996), pp.2.4.1-2.4.8.

講演論文

- (1) 津島将司, 赤松史光, 香月正司, “予混合噴霧火炎の燃焼特性に及ぼす霧化圧力の影響”, 日本機械学会第 73 期関西支部定時講演論文集, No.984-1, (1998.3), pp.13.15-13.16.
- (2) 津島将司, 赤松史光, 香月正司, “自由落下噴霧の火花点火球形火炎の構造観察 (第 5 報)”, 第 35 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1997), pp.365-367.
- (3) 津島将司, 香月正司, 赤松史光, 斎藤寛泰, “予混合噴霧火炎中での油滴群燃焼挙動の把握”, 日本機械学会第 72 期関西支部定時講演論文集, No.974-1, (1997.3), pp.13.45-13.46.
- (4) 津島将司, 香月正司, 赤松史光, 山本征治, “予混合噴霧火炎中における油滴群燃焼挙動の観察”, 第 34 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1996), pp.567-569.
- (5) 津島将司, 水谷幸夫, 香月正司, 赤松史光, 趙庸大, 山本征治, “PDA 計測における火炎の影響 (第二報)”, 日本機械学会第 71 期関西支部定時講演論文集, No.964-1, (1996.3), pp.565-566.
- (6) 津島将司, 水谷幸夫, 香月正司, 赤松史光, 趙庸大, “PDA 計測における火炎の影響”, 第 33 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1995), pp.457-459.

謝 辞

本研究は大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻エネルギー工学領域燃焼工学講座において行われたものである。本研究の一部は、平成10年度文部省科学研究費補助金[基盤研究(A)]のもとに行われた。また平成10年度より日本学術振興会特別研究員として補助金の交付を受けた。ここにあわせて記すとともに、感謝の意を表する。

本講座で研究を行う機縁をあたえられ、終始適切なご指導と有益なご助言を賜り、本論文執筆に際しても綿密なご校閲をいただいた本講座教授 香月正司先生に対して、謹んで感謝の意を表します。本講座に所属し、日々の研究生活を先生の身近で過ごせたことで、多くのことを学ぶ機会に恵まれ、大きな糧となりました。

本論文をまとめるにあたって、お忙しい中の貴重な時間を賜り、ご校閲とご指導いただいた本学工学研究科教授 高城敏美 先生、教授 片岡 勲 先生に対して深く謝意を表します。特に、高城敏美 先生には折りにふれてお声をかけていただき、さまざまなご助言をいただきました。

学部学生として本講座に所属していた当時から、多くのご迷惑をおかけしたにもかかわらず、終始御懇篤なるご指導、ご鞭撻を賜った当時本講座教授 水谷幸夫 先生（現大阪大学名誉教授）に対して謹んで感謝の意を表します。一学部学生として先生の講義を聴講する機会に恵まれたことが、燃焼学に興味を持つ第一歩となりました。

本研究を遂行するにあたり、共同研究者として直接ご指導いただいた本講座助手 赤松史光 先生に心から感謝いたします。多大の情熱をもって誠実に研究と向き合い、惜しみなく努力する姿勢から多くのことを教えていただきました。また、生意気な私に対して公私にわたり繰り返しご助言を賜ったことは、研究活動のみならず学生生活を進める上で大きな力となりました。

学部学生当時から大学間の垣根を越えて数多くのご助言を賜り、公私にわたるご指導をいただいた神戸大学機器分析センター助教授 池田裕二 先生に深謝いたします。先生には国際会議などを通じて多くの世界的な研究者と出会う貴重な機会をいただきました。その一つ一つの出会いが研究を進める上で大きな糧となりました。

本研究に際し、快く計測機材を貸与いただいた日立造船株式会社 岡崎泰英氏に謹んで感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたっては、本講座助手 芝原正彦 先生、本講座に在籍された三菱重工業株式会社 萬代重美、日立造船株式会社 安田俊彦、客員研究員 趙庸大 先生（韓国蓮庵工業専門大学）の各氏から数多くの有益なご助言と

ご指導を賜りました。また当時本講座大学院博士課程の若林 卓，湊端 学，大学院修士課程の田端敏克 の諸氏には数々の有益なご助言とご支援をいただき，特に計測機器および計算機の使用方法から実験結果の解析手法にいたるまで幅広く教えていただきました。さらに，当時の工学部4年次学生 山本征治，斎藤寛泰，高田鎮寛 の各氏には，深夜にわたる実験・解析に惜しみない努力と熱心な協力をいただき，多大なご尽力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

本講座に在籍して五年の歳月が過ぎようとしています。その間，研究室の内外を問わず，ここには書ききれないほどの多くの方々からご指導，ご教授をいただきました。さらにこれまでの人生において，公私にわたる友人，先輩，後輩との関わりの中から受けた刺激は無形であるが故に，私にとって非常に貴重なものでありました。この場を借りて，その全ての方々に謹んで感謝の意を表します。

最後に，独りよがりな私を長い間，暖かく信頼して見守ってくれた両親，祖父母，そして，私の日々の格闘を最も身近なところから支え，絶えず励まし，自らもともに悩んでくれた最愛の妻 みどり に心から感謝します。