



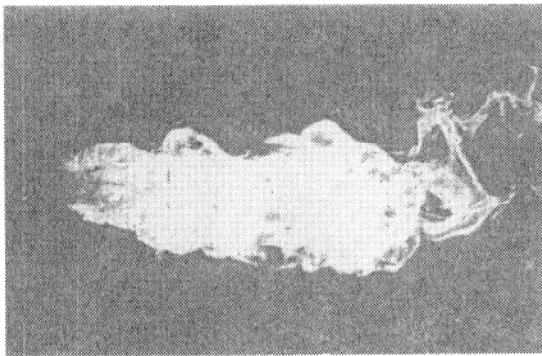
研究ノート

定常噴霧火炎の構造

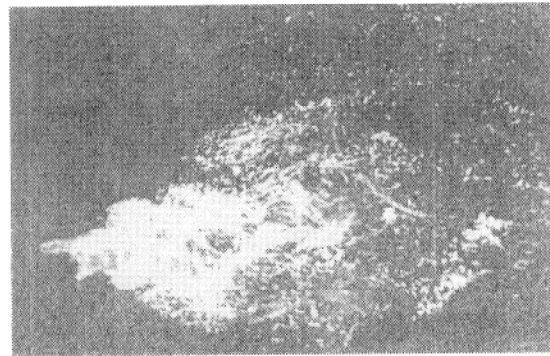
水谷幸夫*

Structure of Steady Spray Flames

Key Words : Combustion, Spray, Flame Structure, Signal Processing, Image Processing



(a) No.2 燃料油の火炎



(b) No.6 燃料油の火炎

図1 同一条件で噴射された No.2 燃料油と No.6 燃料油の火炎¹⁾

1. はじめに

燃料噴霧の燃焼にはディーゼルエンジンのように非定常な燃焼と、ガスタービンやボイラのように定常な燃焼とがある。一見、前者の方が複雑に見えるかもしれないが、ディーゼル噴霧は発火前に蒸発を完了してしまうケースが多く、その場合には煤や NO_x の発生に関連して、発火までに噴霧領域にどれだけの空気が誘引されるかだけが問題となることが多い。それに対して、定常噴霧の燃焼においては、燃料の性状や噴射・燃焼条件が多岐にわたることもあって、

見かけよりはかにバラエティに富んだ複雑な火炎構造を持ち、その構造が煤や NO_x の発生、火炎の熱放射特性等に影響するので、最近、盛んに研究されるようになってきた。

定常噴霧の燃焼においては、火炎は誘引・混合の特性時間と油滴蒸発の特性時間との大小関係によって、

- (1) 燃料蒸気の気相乱流拡散火炎
- (2) 単一油滴もしくは小さな油滴塊の二相拡散火炎片の集合体
- (3) 両者の中間形態である遷移火炎

のいずれかの形態をとる。もちろん、純粹に(1)もしくは(2)の形態をとることはほとんどなく、通常は(1)に近い遷移火炎や、(2)に近い遷移火炎が観察される。その違いをよく表した写真が Breña de la Rosa¹⁾によって発表されているので、図1に示しておく。これは軽質の No. 2 燃料油と重質の No. 6 燃料油を同一条件で微粒化して作られた火炎であるが、前者がガ

*Yukio MIZUTANI
1935年1月23日生
大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了
現在、大阪大学工学部機械工学科燃焼工学講座、教授、工学博士、燃焼工学
TEL 06-877-5111
ext. 4216



ス火炎に近いことは、写真からお分かりいただけます。

大阪大学工学部機械工学科の燃焼工学講座と産業機械工学科の輸送現象学講座は噴霧燃焼の分野で国内外の研究をリードしてきたが、1975年当時、輸送現象学講座に在籍した小沼と小笠原²⁾は同じ噴霧器で灯油とプロパンを噴射し、噴霧火炎とガス拡散火炎がほとんど同じ構造を持つことをつきとめた。この研究は噴霧火炎の数値シミュレーションに好都合な材料を提供したために、世界的にもてはやされた。

ところで、液体燃料は予熱空気流もしくは高温循環ガス流中に噴射して、火炎を安定させることが多い。この場合、噴霧内に誘引された高温ガスと接触して油滴の一部が蒸発し、噴霧境界の外側に蒸気の火炎が形成される。著者ら³⁾は蒸気火炎の形成が火炎安定機構のキーであるとの見通しのもとに、流れの可視化やプローブによる測定法を動員して火炎上流部の構造を調べ、欧米の専門書等に再々、引用された。

いま一つ、よく利用される噴霧火炎の安定化方法は、噴霧や燃焼用空气に旋回を掛ける方法である。最近、シュリーレン法、直接写真、レーザ影写真等の光学的方法を巧妙に組み合わせ、さらにフェーズドップラー法、ミー散乱法、広帯域赤外線減衰・散乱法、分離蛍光剤気液可視化法 (EXCIPLEX 法) 等の新しい光学的方法を導入して、旋回噴霧火炎の構造を詳細に調べ、数値シミュレーション技術の開発のためのデータベースにしようという動きがある⁴⁾。

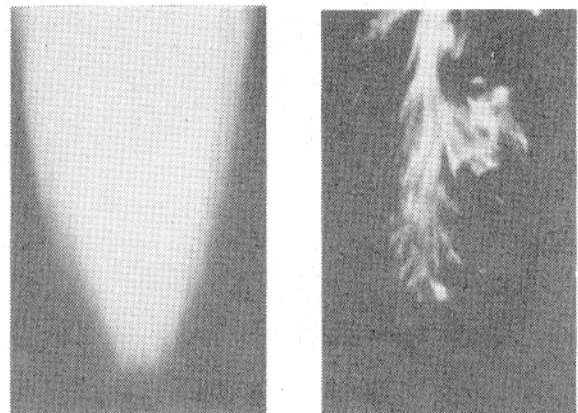
最近では、気相乱流拡散火炎から二相拡散火炎片の集合体までのいろいろな段階にある遷移火炎の構造に関する考察から、噴霧を油滴の集合体 (油滴塊) と見なし、油滴の蒸発速度と油滴塊内部への酸素の拡散速度との競合で噴霧火炎の形態が決定されるという「油滴群燃焼」の概念が生まれた⁵⁾。

著者らは、噴霧が渦などの影響を受けて濃度むらを作り易いことに着目し、噴霧火炎の構造はこの濃度むらと密接な関係を持つこと、さらに NO_x やすす、粒状物質といった有害物質の生成もこのむらに関係するという説を提唱した。そして、油滴群燃焼の概念も、噴霧全体ではな

く、むらに起因するそれぞれの高濃度領域に適うべきであると主張した。この主張を裏付けるために、光学的手段で火炎の詳細な構造を調べることにより、気相拡散火炎と二相拡散火炎片の共存状態を実証して、国内外で大きな反響を得たので、以下にその概要を説明する。

2. 遷移噴霧火炎の構造

パイロット火炎によって保炎された予混合噴霧 (空气中に油滴を浮遊させた平衡二相流) の火炎を肉眼で眺めると、1/15s と比較的長い露



(a) 露出時間 1/50s

(b) 5000 駒/s

図2 露出時間による火炎像の変化

出時間を掛けた図2(a)の写真のように、青炎を伴った滑らかな火炎面が観察される。ところが、同じ火炎を5,000駒/sで高速度撮影すると、図2(b)の写真のように、連続した火炎面を持たない、複雑な形をした輝炎塊群が観察される。これから、噴霧火炎は非常に複雑な構造を持っており、油滴の濃度むらに対応した、いくつかのグループに別れて群燃焼をしているように見受けられる。しかも、図2(a)で輝炎外縁に青炎が見られることから、輝炎塊と輝炎塊の間には青炎が存在すると考えられる。前述のように、噴霧には濃淡のむらが生じ易いが、比較的油滴の希薄な領域に燃料蒸気が発生すると、青炎が速い速度で伝ばし、取り残された油滴密集領域は輝炎を伴って拡散燃焼をする。

このような噴霧火炎の微細構造を明らかにするために、図2(a)の火炎の前縁 (倒立輝炎円

錐の斜辺中央部)とその真上10mmの2点で、OH及びCHラジカル発光バンドの火炎発光信号、レーザードップラー流速計(LDA)による油滴のミー散乱信号と飛行速度信号の同時観測を行った⁶⁾。その際、気相乱流拡散火炎から二相拡散火炎片集合体までの種々の遷移火炎をシミュレートするために、燃料蒸気の代わりに、燃焼用空気にプロパンを種々の割合で混合した。

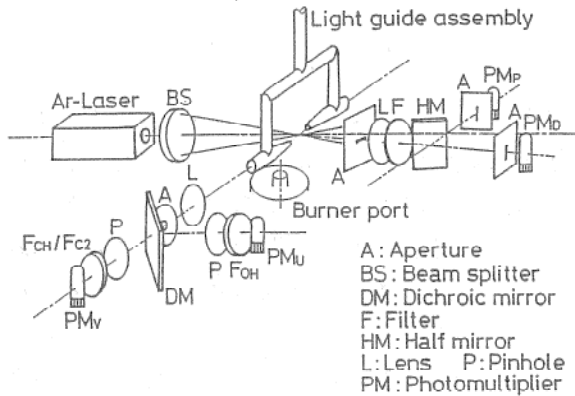


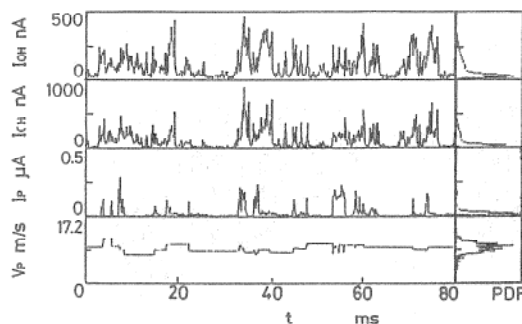
図3 光学系の構成⁶⁾

図3に示す光学系を用いて、一点からの火炎発光信号、ミー散乱信号、速度信号を同時に記録した。図中、PM_DとPM_PはLDAのドップラー信号とミー散乱信号を検出するためのフォトマルで、水平方向に5°オフセットさせて、ミー散乱信号の測定体積を制限している。PM_UとPM_VはOHとCHバンドの火炎発光信号を検出するフォトマルで、検出体積は視野制限プローブによって、直径2mm、奥行き4mmに制限されている。

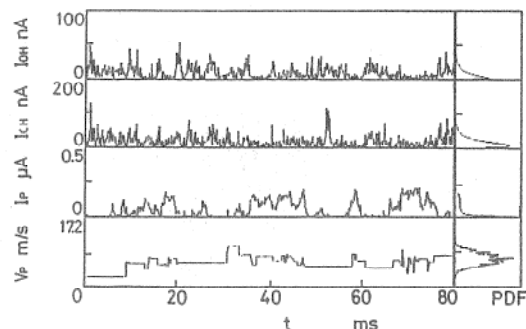
図4は火炎前縁位置で得られた信号波形である。(a)は気液混焼の場合で、全燃料に占める液体燃料(灯油)の質量割合が23%、(b)は噴霧専焼の場合である。信号は、上から順にOHとCHバンド発光の強度 I_{OH} と I_{CH} 、ミー散乱強度 I_P 、油滴速度 V_P である。気液混焼の(a)においては I_{OH} と I_{CH} がほぼ同期している。CHバンドの発光にはすすの固体発光も重畳しているが、当量比一定の青炎ではCHとOHラジカルの発光強度比もほぼ一定で、すす発光を伴う輝炎ではOHバンドとCHバンドの発光の間の相関が低下する。したがって I_{OH} と I_{CH} がほぼ同期しているということは、厚みの薄い青炎がすす発光を伴う輝炎より優勢であることを意味している。また I_{OH} と I_{CH} は I_P ともほぼ同期しており、青炎が油滴の存在する部分を選択的に伝ばすることを示している。

一方、噴霧専焼の(b)においては、すべての信号の同期状態が悪化しており、輝炎の出現頻度が増したことが分かる。また、 I_{OH} と I_P がほぼ逆位相となっており、火炎が油滴塊の外に押し出されたことをうかがわせる。

さらに詳細な解析は I_{OH} と I_{CH} 並びに I_{OH} と I_P の相関、それもフーリエ周波数 f の関数として計算される相関係数、すなわちコヒーレンス $C_{OH, CH}$ 、 $C_{OH, P}$ ならびに位相差、すなわちフェーズ $P_{OH, CH}$ 、 $P_{OH, P}$ を用いれば可能となる。というのは、油滴平均速度を f で割ると空間スケールとなり、スケールの関数としての相互相関係数と、そのスケールに相対的な現象のずれが判明するからである。詳細は省略するが、このよ



(a) 気液混焼(灯油23%)



(b) 噴霧専焼

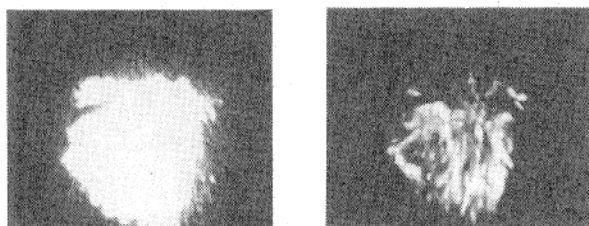
図4 火炎面における火炎発光信号、ミー散乱信号、油滴速度信号の対比⁶⁾

うな信号解析によって、噴霧は油滴の濃度むらに応じたいくつかの油滴塊に別れて群燃焼を行うものの、その群火炎の中に、さらに小さなスケールの輝炎もしくは拡散火炎片が含まれる複雑な火炎構造をとることが分かってきた。

3. 噴霧火炎の伝ば

図2によると、噴霧火炎は複雑な形をした輝炎が不連続、かつランダムに伝ばしているように見える。そしてこのような火炎伝ばをリレータイプの火炎伝ばと呼ぶ研究者もある。しかし、油滴塊の間に青炎が存在するという上述の実験結果から見て、本当に不連続、かつランダムな火炎伝ばが起こっているかどうか疑問が残る。

その点を確認するために、静かに自由落下する噴霧を一点で火花点火して、形成される火炎球をOH発光バンドから近赤外まで高感度で記録できるCCDカメラで撮影し、画像処理によって一つの画像を青炎像と輝炎像に分離したところ、図5が得られた⁷⁾。青炎は輝炎より大きく、



(a) 青炎像

(b) 輝炎像

図5 火花点火火炎球の青炎像と輝炎像⁷⁾

青炎の伝ばした後の高温領域で油滴塊がランダムに着火している様子が想像される。そしてそのことは、火炎球下端部でOHバンドとCHバンドの発光を、同時かつ連続的にモニターすることにより確かめられた。また青炎背後の領域

を5,000 駒/sで高速度撮影し、二値化処理により輝炎の挙動を可視化したところ、図6に示すように、いわゆるリレータイプのランダムかつ不連続な輝炎領域の拡大が観察された。

これから、たとえ輝炎がランダムかつ不連続に伝ばしているように見えても、実際には可視化されない青炎が先行した後の高温領域で、油滴塊がランダムに着火して、輝炎領域が拡大しているに過ぎないことが分かった。

4. 結 び

以上述べてきたように、燃焼現象の研究は微細化・詳細化する傾向にあり、それによって火炎の伝ばや安定化、有害物質の生成、火炎ふく射といった現象を正しく理解する努力が払われている。また、燃焼計測は最新の光学的測定技術のテストフィールドともなっており、し烈な研究競争が繰り広げられている。隔年に開催される国際燃焼シンポジウムは、論文の採択率がわずか1/3という研究者の修羅場で、それでも出席者は1,500名を越える盛況である。本文が一昔前とは様変わりした燃焼研究の動向を理解していただく一助にでもなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) A. Breña de la Rosa et al., 21st Symp. (Int.) on Combust. (1988), pp.557-566.
- 2) Y. Onuma and M. Ogasawara, 15th Symp. (Int.) on Combust. (1975), pp. 453-465.
- 3) Y. Mizutani et al., 16th Symp. (Int.) on Combust. (1977), pp. 631-638.
- 4) C. F. Edwards and R. C. Rudoff, 23rd

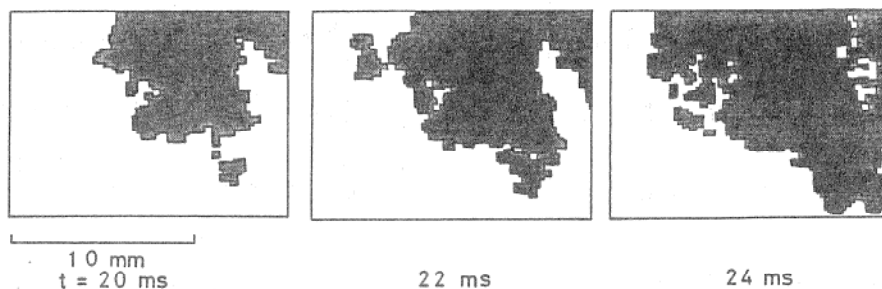


図6 火炎球下部における輝炎の挙動⁷⁾

- Symp. (Int.) on Combust. (1990), pp. 1353-1359.
- 5) H. H. Chiu et al., 19th Symp. (Int.) on Combust. (1982), pp. 971-980.
- 6) K. Nakabe et al., Combust. Flame 84-1/2 (1991), 3-14.
- 7) K. Nakabe et al., Proc. 5th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems [NIST Special Publ. 8131] (1991), pp. 539-546.

