噴霧燃焼の光学計測*

赤松 史光**

Optical Measurement of Spray Combustion

Fumiteru AKAMATSU

1. はじめに

エネルギー資源、とりわけ化石燃料の枯渇が叫ばれる中、今もって我々の生活は石油をはじめとする化石燃料の燃焼に大きく依存しており、世界の一次エネルギーの約 85% が化石燃料の燃焼によって生み出されている。一方、化石燃料の燃焼が地球規模での環境破壊を引き起こす要因となっていることも紛れもない事実であり、より高度な燃焼制御にもとづいたクリーンかつ高効率な燃焼技術の出現が早急に望まれる。

液体燃料の燃焼形態としては、高負荷燃焼が可能で制御の応答性が良いという理由から、工業的には噴霧燃焼が多用されており、その用途は、ロケット、航空機、船舶、自動車等の各種エンジンおよび加熱炉など多岐にわたっている。しかし噴霧燃焼は、燃料の微粒化、油滴の気相への分散、蒸発、燃焼といった素過程が同時に相互作用を及ぼしあいながら進行する反応性二相乱流であり、その燃焼制御技術の多くは、試行錯誤的な経験工学に基づくものである。

今、1 ml の液体燃料が粒径 20 μ m の油滴に微粒化されたとすると、約 2.4 億個もの油滴が出現することになり、実際の噴霧火炎中には天文学的な数の油滴が存在していることになる。しかも、微粒化によって生成される油滴は本質的に粒径分布を有しており、この油滴粒径の違いが現象をさらに複雑化している原因となっている。

計測の面から考えると、噴霧火炎内の現象や構造をよく理解するには、分散相である液滴と気相の両方を観測する必要がある。しかし、サンプリングプローブを用いた計測手法では、それぞれの相の情報を分離することがむずかしい上に、時間分解能・空間分解能が低く、複雑な火炎構造の変化に対応できる計測が不可能である。また、現在、気体燃料の火炎（ガス火炎）に対して用いられている種々のレーザ計測法の中にも、油滴の存在によって噴霧火炎に対しては容易には適用できないものが多い。したがって、ガス火炎と比べると、噴霧火炎に関して計測可能な物理量の数がどうしても制限されてしまうため、実験的知見が未

だ十分に得られていないというのが実情である。

また、実際の噴霧火炎中では、液滴は個々の単滴としてではなく、互いに干渉しあいながら蒸発・燃焼している。そのような考えのもとで、Chiu ら¹⁾は何千、何万という数の油滴の集まりを群（クラスター）として扱い、その燃焼挙動を理論的に解析し、油滴の粒径および数密度によって、油滴群の燃焼挙動が異なることを予測した。しかし、この分野における実験的研究は少なく、近年の急速なレーザ計測技術の発達を待って、ようやく多くの実験的知見が明らかとなった。

本稿では、近年、噴霧燃焼計測に不可欠となったレーザシートによる噴霧断面像の可視化法と、火炎中の局所領域からのラジカル発光計測について述べるとともに、著者らが開発した噴霧断面像と局所ラジカル発光の同時時系列計測システムを紹介する。また、実際に噴霧火炎に適用した場合の結果を示し、噴霧火炎中での油滴群の燃焼挙動についての考察を行う。

2. 油滴群燃焼理論

実際の噴霧火炎中では、液滴は個々の単滴としてではなく、互いに干渉しあいながら蒸発・燃焼している。そのような考えのもとで、Chiu ら¹⁾は何千、何万という数の油滴の集まりを群（クラスター）として扱い、その燃焼挙動を理論的に解析し、油滴の粒径および数密度によって、油滴群の燃焼挙動が異なることを予測した。当初 Chiu ら¹⁾は、等間隔で配置された直径 d の均一粒径油滴からなる直径 D_c の球形油滴群において、油滴群に含まれる油滴の総蒸発率と拡散による油滴群内外のガス成分交換率の比と定義される群燃焼数 G を用いて、油滴の群燃焼形態を分類している。

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

ここで、 Le はルイス数、 Sc はシュミット数、 Re は油滴粒径とスリップ速度を用いた油滴レイノルズ数、 n_T は油滴群内部に含まれる油滴総数、 d は均一滴油滴直径、 L は平均油滴間距離である。

この群燃焼数 G によって分類される 4 つの燃焼モードを Fig. 1 に示す。

(a) $G < 10^{-2}$ 「単滴燃焼」

個々の油滴は、十分な酸素濃度の雰囲気中で、全周炎

* 原稿受付 2015 年 1 月 15 日

** 大阪大学大学院 工学研究科

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1、

E-mail: akamatsu@mech.eng.osaka-u.ac.jp)

Fig. 1 Various modes of droplet group combustion.

に包まれて燃焼する。

(b) $10^{-2} < G < 1$ 「内部群燃焼」

油滴群中心部で酸素が不足し、群火炎が形成されるが、その周囲には単滴燃焼が存在する。

(c) $1 < G < 10^2$ 「外部群燃焼」

油滴群内部への酸素の供給が大きく不足し、油滴群外部に群火炎が形成される。

(d) $10^2 < G$ 「外殻燃焼」

油滴群中心部では油滴の蒸発がまったく起こっておらず、その周囲に油滴の蒸発領域と火炎領域が存在する。

また、無次元油滴間距離 S を、

$$S = (L/10d)/(1 + 0.276Sc^{1/3}Re^{1/2}) \quad (2)$$

と定義すると、群燃焼数 G は、 S と油滴群内の油滴総数 n_T を用いて次のように表せる。

$$G = 0.15Le \cdot n_T^{2/3}/S \quad (3)$$

ここでレイ数 $Le = 1$ とすれば、Fig. 2 に示すように、 $S-n_T$ 平面に等 G 線と各群燃焼形態の現れる領域を示すことができる。

噴霧燃焼を油滴群の燃焼として取り扱い、初めてその挙動を理論解析した「油滴群燃焼理論」ではあるが、モデルの構築過程で、次のような仮定が置かれていることに注意しなければならない。1) 油滴群は球形であり静止雰囲気中に存在する。2) 油滴群は均一粒径の油滴からなる。3) 群火炎は非常に薄いシート状に形成される。すなわち、いずれの仮定も実現象とは大きく異なっており、本理論の妥当性の評価には、実験的裏付けが不可欠であった。この分野における実験的研究は少なく、近年

Fig. 2 Various regimes of droplet group combustion.

の急速なレーザ計測技術の発達を待って、ようやく多くの実験的知見が明らかとなった。

本章では、著者らが開発した噴霧断面像と局所ラジカル発光の同時時系列計測システムを用いた噴霧火炎中での油滴群の燃焼挙動の観察結果を概説する。

3. 予混合噴霧火炎バーナ

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、工業用バーナなどで見られる噴射ノズル近傍での微粒化過程の影響や保炎器後流に形成される循環流や大規模渦を極力排除した、より単純化され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を極力抑えた二相流であり、水谷ら²⁾によって燃焼研究に導入され、中部ら^{3,4)}によって噴霧火炎の詳細構造に関する研究が行われた。

Fig. 3 (a) に、実験に用いた予混合噴霧火炎バーナ^{5,6)}と火炎の直接写真（露光時間 1/15s）を示す。この写真に捉えられている火炎像は、目視による火炎の外観に対応している。バーナポートは内径 52.7mm で、周囲に幅 1.0mm の環状の水素拡散パイロットバーナを有している。バーナポート上流 440mm に設置された二流体噴射弁により微粒化された液体燃料（白灯油）は燃焼用空気と混合され、予混合噴霧としてバーナポートから上方に噴出する。実験条件は、燃焼用空気の断面平均流速 5.5m/s ($Re=19400$)、灯油 - 空気質量流量比 0.045kg/kg（供給当量比 0.75）とした。計測の際の座標系としては、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. 火炎中の噴霧における油滴群燃焼挙動

Fig. 3 (b) に火炎の短時間露光（1/1000s）の直接写真^{5,6)}を示す。目視では、前述の Fig. 3 (a) のようになめらかな形状をもつように見える噴霧火炎も、瞬間的には多数の不均質な火炎塊から構成されていることが確認できる。実はこれこそが噴霧火炎中の油滴群燃焼¹⁾の存在を端的に示している。

Fig. 4 は、予混合噴霧中にレーザシート光を照射し、噴霧断面を可視化したものであり、(a) が非燃焼時、(b)

Fig. 3 Premixed-spray burner and the flame.

Fig. 4 Unburned spray images.

が燃焼時のものである。非燃焼時には連続して存在していた噴霧流が部分的に消失して、燃え残った噴霧領域が、油滴群（クラスター）として存在していることが分る^{5,6)}。

したがって、このように時空間的に非常に不均一な構造をとる火炎中の噴霧の燃焼過程を議論する場合には、位相ドップラー流速計（Phase Doppler Anemometer：PDA）等の単独計測により、一点における油滴と速度を計測し、その時間平均的な統計量を得るだけでは不十分であり、油滴クラスターの存在や燃焼反応の有無といった複数の情報を、同時かつ時系列で連続的に計測することが必要不可欠であることが理解していただけよう。

噴霧火炎中での油滴クラスターの形成過程を詳細に観察するために、噴霧断面像と火炎中の局所領域からのOHおよびCHラジカル自発光の同時時系列計測光学系を構築し、前述の予混合噴霧火炎に適用した⁷⁾。Fig. 5に計測システムを示す。以下では、それぞれの光学系について詳述していくこととする。

4.1 噴霧断面像撮影用光学系

火炎中の噴霧断面像撮影の光源には、アルゴンイオンレーザー（Spectra-Physics, Stable 2017, 発振波長514.5nm, 出力2 W）を用いた。レーザー光は、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、バーナの中心軸を含む垂直断面を照射する。照射された油滴からのMie散乱光像は光干渉フィルタ（日本真空光学製, 中心波長514.5nm, 半値幅1.0nm）により背景光を除去された後に、高速度カメラ（Kodak, Ektapro HS Model 4540）により、9000 駒/s で連続 2048 枚撮影される（撮影時間 228ms

Fig. 5 Measurement system.

に対応)。得られた画像データは、有効画素数 128×256 pixel（実空間で 70×140 mm に対応）で 256 階調に変換されデジタル記録される。

4.2 局所ラジカル自発光計測用光学系

火炎からの自発光信号の計測には、従来、市販のガラスレンズを数枚用いた単純な光学系が用いられており、波長による焦点位置の違い（色収差, Chromatic Aberration）や、レンズの内側と外側を通過する光線の集光位置の違い（球面収差, Spherical Aberration）のために空間分解能が低いなどの短所があった。

筆者らは局所領域からの多波長の火炎発光受光用に、カセグレン光学系を用いることで色収差の問題を解消し、凹面鏡と凸面鏡の組み合わせを最適化することで球面収差を最小化し計測の空間分解を向上させ Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics (MICRO)を開発した⁸⁾。

Fig. 6に MICRO の構成を示す。測定体積からの発光は凹面鏡および凸面鏡により反射され、光ファイバーの端面に集光される。光線追跡法を用いて測定体積の大きさを評価した結果、Fig. 7に示すように光軸方向に約 1.6mm, 最小ウエスト径が約 0.2mm であり、従来のレンズ光学系よりも集光率分布に優れていることが確認された⁸⁾。

燃焼反応領域と油滴の存在領域の関係について考察を加えるために、火炎中のOHおよびCHバンドの発光信号にあわせて、油滴からのMie散乱光信号を同時に計測した。

MICROによって集光された多色混合光は、光ファイバーを介して高速波長分離器に送られ、ダイクロイックミラーによって波長選択された後に、OH発光用フィルタ（中心波長306.6nm, 半値幅9.3nm）、CHバンド発光用フィルタ（中心波長431.1nm, 半値幅3.0nm）、

Fig. 6 Configuration of MICRO.

Fig. 7 Spatial distribution of collection rate of MICRO.

Mie 散乱光用フィルタ（中心波長 514.5nm, 半値幅 1.0nm）により各波長に分離され、それぞれの光電子増倍管（PM）によって検出される。光電子増倍管からの出力電流は I/V 変換器により電圧に変換され、V/V アンプで増幅された後、A/D コンバータにより、サンプリング周波数 100kHz, 12bit でデジタル記憶される。高速度カメラと 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（Stanford Research Systems 製, WC Model DG535）を用いた。

4.3 実験結果および考察

Fig. 8 にバーナポート近傍の $h=15\sim85\text{mm}$ における噴霧断面連続像と、 $h=50\text{mm}$, $r=15\text{mm}$ の位置（画像中に + 印で表示）で検出された OH ラジカル自発光信号 I_{OH} , CH バンドの火炎発光信号 I_{CH} , および油滴からの Mie 散乱光信号 I_{MS} の同時時系列測定結果を示す。

前述の Fig. 4 に示した、以前に行った噴霧断面連続像のみの観察⁵⁾から、バーナポート近傍において、未燃噴霧流が非常に早い速度で部分的に消失する現象が確認された。その一方で、非燃焼時には同様の現象が確認されなかったことから、未燃噴霧流の消失が燃焼反応によるものであることが推察されたが、噴霧断面像は単に油滴の存在の有無を示しているにすぎず、噴霧断面像中の燃焼反応領域について考察を加えることは出来なかった。しかし本計測システムでは、噴霧断面像と火炎からの発光信号を同時に計測することで、噴霧流の消失原因について、噴霧の存在領域と燃焼反応領域の関係にまで踏み込んだ考察が可能となった。

Fig. 8 を見ると、 $t=57\text{ms}$ 前後（図中 A1~A5 の時間帯）において、図中の白矢印で示すように、連続噴霧流が半径方向に急速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早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んでいる）で、噴霧流が分断されていることが分る。さらに、図中

Fig. 8 Simultaneously monitored time-series data.

A2~A3 の時間帯において、Mie 散乱光信号と火炎発光信号が同時に立ち上がっている。このことは、噴霧境界の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いる。

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ことが分る。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、火炎の伝ばを妨げたと考えられる。このことは、図中の B4~B5 で示される Mie 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は見られないことから確認できる。

5. 火炎中の個々の油滴クラスターの群燃焼数

本章では、前章で詳述した連続噴霧流の分断によって形成された油滴クラスターの燃焼過程について考察を加える。

Fig. 9 は計測システム⁹⁾の概要である。Fig. 5 の計測システムに、位相ドップラー流速計(PDA)が追加されており、高速度カメラによる噴霧断面像と、火炎中の 1 点における、OH ラジカル自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴からの Mie 散乱光信号と PDA による油滴粒径と速度の計 1 画像と 5 つの局所信号の同時時系列計測が可能となっている。

5.1 噴霧断面像撮影用光学系

PDA 送光系の光源にアルゴンイオンレーザの 514.5nm の波長を用いるため、レーザシート光用にはアルゴンイオンレーザ (Spectra Physics 製, BeamLock 2080, 出力 10W) の 488nm の波長を用いた。シート光により照射された油滴からの Mie 散乱光像は、光干渉フィルタ、イメージンテンシファイア (I.I.) (浜松フォトニクス製, C6653MOD) を通して、レーザシートに垂直方向に設置された高速度カメラ (Kodak 製, Ektapro HS Model 4540) により、13500 駒/s で連続 4096 枚 (撮影時間 303ms に対応) 撮影される。得られた画像データは、有効画素数 $128 \times 128\text{pixel}$ (実空間で $30 \times 30\text{mm}$ に対応) で 256 階調に変換されデジタル記録される。

5.2 測定方法および測定領域

画像撮影領域の中心に位置する 1 点において、前述の高空間分解能を有する集光光学系 MICRO⁷⁾ による油滴 Mie

Fig. 9 Simultaneous measurement system.

散乱光信号, OH ラジカル自発光信号, CH バンドの発光信号と, PDA による油滴粒径, 速度の5つの局所信号を同時計測した. 画像撮影装置, PDA システム, 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 (Stanford Research Systems 製, WC Model DG535) を用いた.

計測の際には, 画像中心の h 座標を代表高さ h_r とした. 画像撮影領域は, 油滴群が頻繁に観察される $r = -15 \sim 15 \text{ mm}$, $h_r = 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 \text{ mm}$ の7領域とした.

5.3 個々の液滴群の群燃焼数の算出方法

実験データから個々の油滴群の群燃焼数を算出するために, 前述の Chiu ら¹⁾に理論解析における均一油滴直径 d を油滴群内部に含まれる油滴の算術平均粒径 d_{10} で置き換え, 油滴群直径 D_c としては, 画像処理により油滴群の断面積 S を算出し, それと等しい断面積をもつ等価球の直径 l_c を用いた.

$$l_c = \sqrt{4S/\pi} \quad (4)$$

予混合噴霧を用いているため油滴と気相とのスリップ速度には非常に小さいため油滴レイノルズ数 $Re = 0$ とし, ルイス数 $Le = 1$ とおくと, 前述の式(3)より, 火炎中の個々の油滴群の群燃焼数 G_c は,

$$G_c = 1.5n_T^{2/3} \cdot d_{10}/L \quad (5)$$

となる. ここで, 平均油滴間距離 L は PDA の時系列データを用いて次式により算出した.

$$L = \sum_{i=1}^{N_c} (t_{i+1} - t_i) \cdot V_i / (N_c - 1) \quad (6)$$

ただし, N_c は個々の油滴群内で計測された PDA データ個数, t_i は i 番目の油滴のアライバルタイム, V_i は i 番目の油滴速度である. また, 油滴群内の油滴総数 n_T は, 直径 l_c の球形油滴群の内部に油滴が等間隔 L で充填されているとし, 次式により求めた.

$$n_T = (\pi/6 \cdot l_c^3) / L^3 \quad (7)$$

5.4 個々の油滴群の群燃焼数の計測

以上の手順により, 画像撮影により確認された火炎中の個々の油滴群の群燃焼数 G_c を算出し, 前述の Fig. 2 の S - n_T 平面にプロットしたものを Fig. 10 に示す. 個々の油滴群の群燃焼数 G_c は Chiu らの理論解析で予測された範囲に収まっていることが分る. 単滴燃焼のものは油滴総数が 10 個以下のものに限定されており, 支配的となっている群燃焼形態は, 内部群燃焼と外部群燃焼である.

Fig. 10 G number of individual droplet clusters.

次に, 個々の油滴群に注目し, 求めた G_c を Chiu らの理論による群燃焼形態の分類に当てはめた場合, 実際に観察される群燃焼状態と一致するかを検証した. Fig. 11 に, $h_r = 110 \text{ mm}$ における OH ラジカル自発光信号, CH バンドの発光信号, 油滴 Mie 散乱光信号, 油滴粒径と速度, および噴霧断面画像の同時時系列データを示す. MICRO により得られた発光信号は, 最大値で正規化している. 画像中の+印で示した点が画像中心, すなわち MICRO と PDA の計測点である. 噴霧断面像との同時計測を行った結果, どのような形状の油滴群が計測点をどのように通過したのかが確認できる. 噴霧断面の連続画像と MICRO による Mie 散乱光信号との対応がよく取れている.

(a) の油滴群は, $G_c = 1.28$ であり, Chiu らの分類によれば, 群燃焼形態は外部群燃焼に相当する. MICRO の時系列データを見ると, 全体的には, 油滴群に対応する油滴 Mie 散乱光信号の持続期間の前後に OH ラジカル自発光, CH バンドの火炎発光信号が強く, 油滴群内部では火炎発光信号は微弱であることから, 油滴群を取り囲むように燃焼反応領域が存在し, その内部では燃焼反応がほとんど起こっていないといえるので, この油滴群全体の燃焼形態は, 外部群燃焼と判断できる. よって, この油滴群の実際の燃焼形態は, 求めた G_c を Chiu らの分類にあてはめた場合と合致しているといえる. しかし, この油滴群の下端へいくにつれ, 油滴 Mie 散乱光信号は弱くなっており, 逆に火炎発光信号は強くなる傾向にある. このように, 油滴群全体では, その燃焼状態が Chiu らの群燃焼形態の分類と合致しているといえども, 局所的には, 油滴群内の噴霧特性, あるいはその他の条件, 例えば, 雰囲気温度, 燃料蒸気濃度, 酸素濃度等の不均一さにより, 同一の油滴群内部においても燃焼形態が異なることが分る.

次に, (b) の油滴群に注目すると, $G_c = 0.422$ であり,

Fig. 11 Simultaneously monitored time-series data and images.

Chiu らの分類によれば、その群燃焼形態は内部群燃焼に相当する。MICRO の時系列データより、油滴群内部で火炎発光信号が検出されているものの、その中心部付近では火炎発光信号強度は弱くなっており、内部群燃焼に近い燃焼状態であると考えられ、この油滴群の群燃焼形態は、Chiu らの分類と一致している。

(c)の油滴群は $G_C=0.0677$ であり、Chiu らの理論解析によれば、その群燃焼形態は内部群燃焼に相当する。発光信号の時系列データをみると、火炎発光信号は Mie 散乱光信号と似た波形を示している。つまり、油滴群全体で燃焼反応が起こっており、単滴燃焼の群燃焼状態であると考えられる。 $G_C=0.0677$ なので、その群燃焼形態は、単滴燃焼に近い内部群燃焼であると考えられるが、Chiu らの分類とは一致しない結果となった。

Chiu らの群燃焼形態の分類と実際に観察される群燃焼形態がどの程度一致するかを、観察されたすべての油滴群について定量的に確認するために、それぞれの油滴群について、油滴群が MICRO の測定点を通過する時間内に OH ラジカル自発光が検出される時間割合 R_{OH} と G_C の関係を調べた結果を Fig.12 に示す。図中の曲線は、Chiu らの理論解析による分類にしたがう場合に予想される結果である。これらの図から分るように、 G_C と R_{OH} には強い相関はなく、 G_C が対応する4つの群燃焼形態と一致しない油滴群が多数観察されることが確認された。

このような Chiu らの群燃焼形態の分類と実際に観察される群燃焼形態の不一致の原因としては、理論解析の際に用いられている様々な仮定が、本実験で対象とした乱流予混合噴霧火炎中で観察される油滴群には当てはまらないことも挙げられるが、Chiu はこの実験事実をうけて、従来の群燃焼数 G を幾何学的群燃焼数 (geometrical group combustion number) G_c とし、実際の油滴群の群燃焼形態は、次式の新しい群燃焼数、

$$G = C_v G_c \quad (8)$$

により決まるとした¹⁰⁾。ここで、 C_v は蒸発修正係数 (Gasification correction factor) で、気流中の相互干渉する油滴群の蒸発率と静止した単独の油滴群の蒸発率の比である。このことは、最新の計測技術を用いた同時時系列データによる詳細な実験結果を提示したことで、20 余年の時を越えて理論と実験の距離が縮小し、実験的知見と理論的考察が有効に結びついた結果であり、大変意義深い。

Fig.12 Relations between G_C and R_{OH}

また、このような火炎の瞬間構造こそが、窒素酸化物 (NO_x) やすす等の有害物質の排出特性に直接的に関与しており、火炎の詳細燃焼機構を知ることは、高効率・クリーン燃焼を実現するためには必要不可欠である。

6. まとめ

本稿では、レーザシート法による噴霧断面像の可視化と火炎内局所ラジカル発光の同時時系列計測システムを紹介し、実際の噴霧火炎に適用した場合の計測結果を示した。

従来の、レーザシート法、PDA 計測、火炎発光計測等を単独で用いる方法ではなく、それらを統合して同時時系列計測システムを構築することで、より詳細な燃焼現象の観察が可能となり、噴霧火炎中における選択的な火炎伝ば現象によって噴霧流が分断されて油滴クラスターが形成され群燃焼することが明らかとなった。

このような複数の計測機器を統合して燃焼診断に用いる例¹¹⁾がここ数年で増加しており、今後、燃焼研究の分野に新たな知見をもたらすことが期待される。その一方で、大量の計測データの中に潜む現象の本質を見失うことがないように、研究者には今後、計測法、解析手法等のより広範な知識が求められるであろう。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、筆者が学生時代より直接ご指導戴きました、大阪大学名誉教授 水谷幸夫先生、大阪大学名誉教授 香月正司先生、京都大学教授 中部主敬先生に深謝致します。また、当時の大学院博士課程学生 津島将司氏 (現：大阪大学 教授)、齊藤寛泰氏 (現：芝浦工業大学 准教授)、若林 卓氏 ((現：KRI) をはじめとする大阪大学燃焼工学研究室の学生の皆様に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) H. H. Chiu, H. Y. Kim and E. J. Croke, Proc. of the Combustion Institute, 19 (1982), 971.
- 2) 水谷, 西本, 機論, 38-311 (1972) 1844.
- 3) 中部, 水谷, 谷村, 機論, 53B-486 (1987), 636.
- 4) 中部, 水谷, 平尾, 機論, 55B-516 (1989), 2517.
- 5) F. Akamatsu, Y. Mizutani, M. Katsuki, S. Tsushima, Y.-D. Cho, K. Nakabe, Atomization and Sprays, 7-2 (1997), 199.
- 6) F. Akamatsu, Y. Mizutani, M. Katsuki, S. Tsushima, Y.-D. Cho, Proc. of the Combustion Institute, 26 (1996), 1723.
- 7) S. Tsushima, H. Saitoh, F. Akamatsu, M. Katsuki, Proc. of the Combustion Institute, 27 (1998), 1967.
- 8) F. Akamatsu, T. Wakabayashi, S. Tsushima, M. Katsuki, Y. Mizutani, Y. Ikeda, N. Kawahara, T. Nakajima, Measurement Science and Technology, 10 (1999), 1240.
- 9) 赤松, 石田, 斎藤, 香月, 第 40 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2002), 491.
- 10) H. H. Chiu, Proc. of the Combustion Institute, 28 (2000), 1095.
- 11) 城地, 中, 志村, 店橋, 宮内, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), 516.