

噴霧燃焼の光学計測と数値シミュレーション



研究ノート

赤松 史光*

Optical Measurement and Numerical Simulation of Spray Combustion

Key Words : Combustion, Spray Combustion, Optical Measurement, Numerical Simulation

1. はじめに

近年、省エネルギーと環境保護の観点から、燃焼機器の効率化・クリーン化が急務となっている。日本の1次エネルギーの約50%が液体燃料の燃焼によって生み出されており、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、工業的には液体燃料を数十 μm 程度の霧状に微粒化して燃焼させる噴霧燃焼が多用されている。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。

しかしながら、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、幅広い時間・空間スケールにわたる極度の非線形現象であるため、その詳細燃焼機構については未解明の点が多いのが現状である。

本稿では、乱流、相変化、化学反応を含む反応性二相乱流現象である噴霧燃焼の詳細構造を観察し、現象をモデル化して数値シミュレーションを行なうために、現在、当研究室で取り組んでいる研究内容について概説する。



* Fumiteru AKAMATSU
1966年9月生
1991年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了
現在、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻燃焼工学研究、助教授、博士(工学)、燃焼工学
TEL 06-6879-7253
FAX 06-6879-7247
E-mail : akamatsu@mech.eng.osaka-u.ac.jp

2. 噴霧燃焼の詳細構造の観察と数値シミュレーション

筆者らは、従来の時間平均的統計量の測定に代わり、高時間・高空間分解能かつ高精度な変動量の時系列データの多チャンネル同時測定により、Chiuらの油滴群燃焼仮説¹⁾を定量的に検証することに成功した²⁻⁵⁾。その結果、流れ場中の乱れや油滴間相互干渉の影響が噴霧火炎の燃焼特性を支配し、噴霧の不均質性が群としての挙動を作りだすこと、さらにこの群挙動の時空間的变化が、噴霧の燃焼機構と深く結びついていることが明らかとなった。しかし、実験により噴霧火炎中の全ての物理量を計測することは不可能に近いので、さらなる噴霧燃焼機構の解明を目指すには、実験的研究と数値解析的研究の密接な連携が必要である。

2.1 噴霧燃焼の詳細構造の観察

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、油滴の粒径および空間数密度によって、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_r 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 G によって分類される4つの燃焼モードを図1に示す.

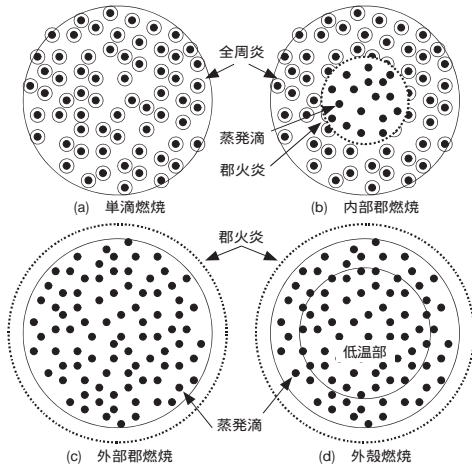


Fig.1 Various modes of droplet group combustion

(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.

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. この分野における過去の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になりつつある.

本節では, 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.

図2(a)に, 実験に用いた予混合噴霧火炎バーナ²⁾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.

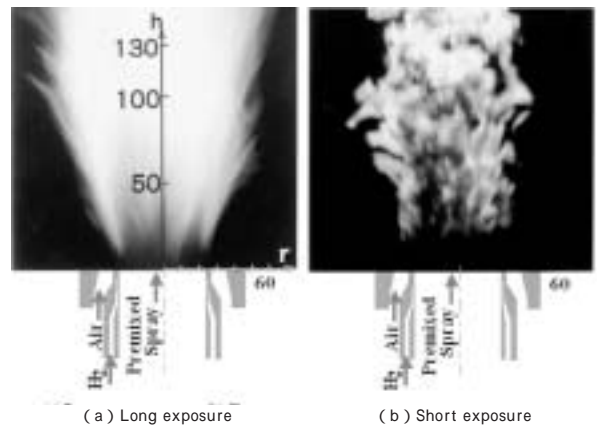
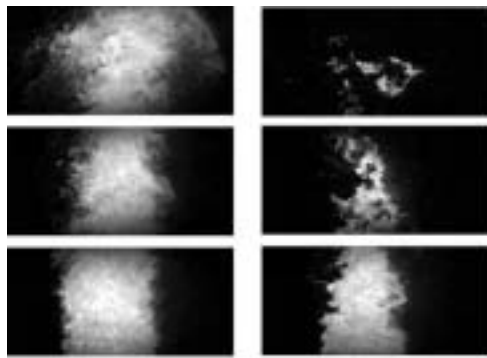


Fig.2 Premixed-spray burner and the flame

図2(b)に, 火炎の短時間露光(1/1000s)の直接写真²⁾を示す. 目視では, 前述の図2(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.

図3は, 予混合噴霧中にレーザシート光を照射して噴霧断面の瞬間像を露光時間1/1000sで可視化したものであり, (a)が非燃焼時, (b)が燃焼時のものである²⁾. 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かる. 長時間露光の時間平均的な噴霧画像では, このような油滴群の存在を捕らえることはできない. したが



(a) Non-combusting (b) Combusting

Fig.3 Unburned spray images

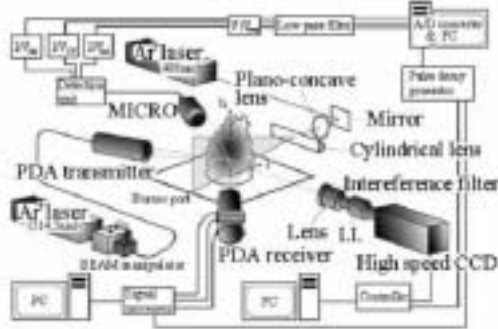


Fig.4 Simultaneous measurement system

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、単独計測によって火炎中の一点における物理量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、その内部の噴霧特性、燃焼反応の有無といった複数の情報を、同時かつ時系列で計測することが必要不可欠である。

油滴クラスターの燃焼過程について考察を加えるための同時時系列計測システム⁵⁾を図4に示す。本システムでは、高速度カメラによる噴霧断面像と、高空間分解能を有する集光光学系 Multi-Color Integrated Cassegrain Receiving Optics (MICRO)⁶⁾を用いた火炎中の1点における燃焼反応の有無を示すOH自発光信号とCHバンドの発光信号、油滴からのMie散乱光信号と、位相ドップラー流速計(Phase Doppler Particle Analyzer: PDDA)⁷⁾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。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、イメージインテンシファイア(I.I.)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により、13500駒/sで連続4096枚(撮影時間

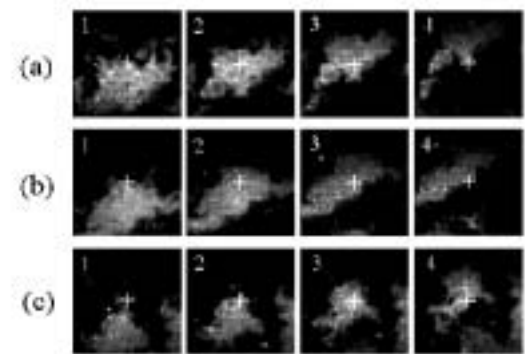
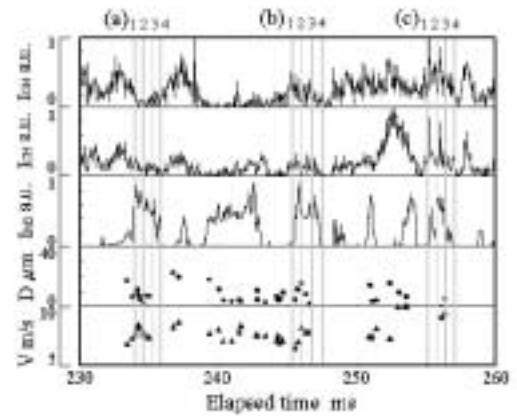


Fig.5 Simultaneously monitored time-series data

303msに対応)撮影される。得られた画像データは、有効画素数128×128pixel(実空間で30×30mm)で256階調に変換されデジタル記録される。計測の際には、MICROとPDPAによる計測点である画像中心のh座標を代表高さ h_r とした。画像撮影領域は、油滴群が頻りに観察される $r = -15 \sim 15\text{mm}$ 、 $h_r = 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160\text{mm}$ の7領域とした。

結果の一例として図5に、 $h_r = 110\text{mm}$ におけるOH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の一例を示す。画像中の+印で示した点が画像中心、すなわちMICROとPDPAの計測点である。(a)の油滴群に注目して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ことが分かる。また、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

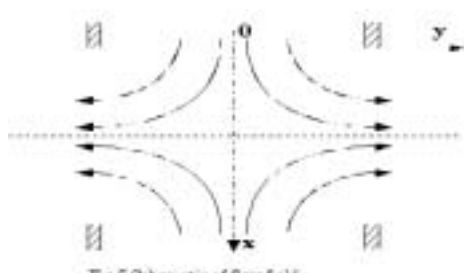


Fig.6 Schematic of flow field

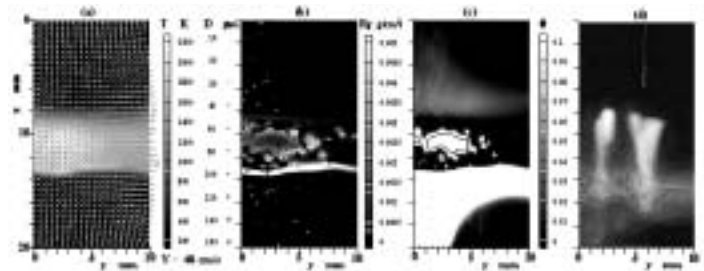


Fig.7 Numerical results) and the corresponding flame photograph (t=30ms)

号は強くなる傾向にある。このように、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大きく異なることが分かる。

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。

2.2 噴霧燃焼の数値シミュレーション

実用燃焼器を対象とした数値解析に広く用いられている汎用の噴霧燃焼の数値シミュレーションコードでは、気相の解析に必要な乱流モデルおよび乱流燃焼モデルに加え、分散相である噴霧の解析のための噴霧モデルが組み込まれていることが多い。このような状況では、噴霧モデルの妥当性の議論以前に、使用した乱流モデルの二相燃焼場への適用性の是非や、乱流燃焼反応モデルの不確定性など、検討すべき要因があまりにも多いことが問題である。

また、わずか1 mlの液体燃料が粒径 $20 \mu\text{m}$ の油滴に微粒化されると、約2.4億個もの油滴が形成され、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。したがって、汎用の噴霧燃焼の数値シミュレーションコードでは、計算負荷を軽減させる目的で、火炎中の無数の油滴をすべて追跡する代わりに、多数の油滴 n 個を含んだ仮想的な油滴パーセルを追跡し、単滴の蒸発量を単純に n 倍して、蒸発量を見積もることが多い。しかし、このパーセル近似モデルでは、油滴の密集効果、すなわち、油滴群燃焼⁹⁾を全く考慮することはできない。したがって、その適用範囲、すなわち、1パーセルあたりに含ま

れる油滴個数をよく吟味して用いることが必要であると考えられるが、実際には、計算負荷にあわせて適当に1パーセル内の油滴数が決定されているのが現状である。

一方、基礎的研究として、層流対向流場に形成された噴霧火炎の構造に関する研究が数多く発表されている^{8,9)}。対向流場では、実験においては、時空間的に安定化された燃焼反応帯の詳細構造の観察が可能である。また、数値計算においては、相似変換⁹⁾を行なうことにより、流れ場を一次元に簡略化して扱うことができるため、計算負荷の高い詳細反応モデルを組み、窒素酸化物(NO_x)等の微量物質の生成量の計算が可能となる。ただし、対向流場における噴霧火炎では、燃料液滴と気相との間にスリップが生じるために、高揮発性液体燃料の単分散微小粒径噴霧が火炎帯突入前に、ほぼすべて蒸発を完了する特殊な場合を除いては、厳密には相似変換を適用することはできない。したがって、相似変換を用いた場合には、火炎中に多数の油滴が存在し、不均質な気液混相燃焼場を呈する実際の噴霧火炎の数値計算は不可能である。

本節では、以上に述べた問題点を踏まえ、層流の二次元対向流場に形成された多分散噴霧火炎を対象として、噴霧に関するモデル以外はできる限りモデルを使用しない非定常数値計算¹⁰⁾について概説する。また、同噴霧火炎を対象とした実験結果¹¹⁾と比較することにより、本数値解析コードの妥当性の検証を行なうとともに、実験結果と数値解析結果を補完的に用いて、気体燃料の平面火炎により規定された高温場に液体燃料噴霧が突入する際に、油滴群の存在によって生じる物理量の不均一性に起因する火炎構造の変化、ならびに油滴群の燃焼機構に関する考察を行った結果を概説する。

数値解析においては、気相は、質量保存式、運動

量保存式，エネルギー保存式，化学種保存式を直接解くことでオイラー的に求め，油滴については，パーセル近似を用いることなく火炎中のすべての油滴をラグランジュ的に追跡する非定常計算を行った．相間干渉モデルとしてはPSI-Cellモデル¹²⁾を使用した．蒸発に関しては，油滴が燃焼反応帯へ入る以前の子蒸発を考慮できるように，飽和温度以下での油滴の蒸発を考慮した¹³⁾．また，物性値の温度依存性を正確に考慮するために，CHEMKINデータベース^{14,15)}を用いた．液相n-デカンの物性値は，温度依存性を考慮して，文献¹⁶⁾から得た．

対象とした流れ場の模式図を図6に示す．バーナポート間隔は20mmとした．非定常数値計算では，その初期条件が明確に規定されなければ，計算結果に物理的な意味はないので，定在する気体燃料の平面火炎を初期値とした．具体的には，上側ポートからは常温常圧の空気が，下側ポートからは空気とn-デカン蒸気の子混合気（当量比0.6）が速度40cm/sで流入し，対向流場（伸張率40s⁻¹）にガス火炎が形成される．その後ある時刻t=0msを起点に，上側ポートからn-デカン（C₁₀H₂₂）噴霧が燃料-空気質量流量比0.014kg_{fuel}/kg_{air}（供給当量比0.237に相当），初期速度40cm/s（空気と同速）で供給される．

用いた数値計算手法は有限体積法に基づいており，圧力場の解法にはSIMPLEアルゴリズムを用いた．考慮した支配方程式は，

- 1) 質量保存式
- 2) x方向運動量保存式
- 3) y方向運動量保存式
- 4) エネルギー保存式
- 5) 化学種保存式 (O₂, N₂, CO₂, H₂O, C₁₀H₂₂)

で，生成項に油滴と気相との相間相互干渉項を考慮した．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = S_{\rho} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u u - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u v - \mu \frac{\partial u}{\partial y}) \\ = - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu (\frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} \mu (\frac{\partial v}{\partial x}) + \rho g_x + S_{\rho u} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v v - \mu \frac{\partial v}{\partial y}) \\ = - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu (\frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} \mu (\frac{\partial v}{\partial y}) + S_{\rho v} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u h - \mu \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v h - \mu \frac{\partial h}{\partial y}) = S_{\rho h} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u Y_k - \mu \frac{\partial Y_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v Y_k - \mu \frac{\partial Y_k}{\partial y}) \\ = S_{\rho Y_k} + S_{\rho Y_k} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで， ρ は気相の密度， u は気相の x 方向速度， v は気相の y 方向速度， μ は混合気の粘性係数， P は気相の圧力， g は重力加速度， h は気相の比エンタルピ， α は熱拡散率 Y_k は k 成分化学種の質量分率， D_k は k 成分化学種の混合気に対する物質拡散係数， $S_{\rho Y_k}$ は k 成分化学種の燃焼反応による生成項， S_{ρ} は油滴との相互干渉項を示している．ただし，気相の密度 ρ は理想気体の状態方程式から求める．

噴霧モデルは，気相の解析の際に用いられる計算格子点を囲むコントロールボリュームにおいて，油滴と気相との熱，物質および運動量の交換が行われるCroweらのPSI-Cellモデル¹²⁾に基づいており，1タイムステップ間の油滴と気相との相互干渉項は油滴の移動後の位置で考慮した．

油滴の衝突，分裂は無いとし，気相中の油滴の運動方程式は以下のように表した．

$$m_l \frac{dV_l}{dt} = F + m_l g \quad (7)$$

$F = (F_x, F_y)$ は油滴が気相から受ける力であり，以下のように表される．

$$F = \frac{1}{8} \pi d_l^3 \rho (V - V_l) |V - V_l| C_D \quad (8)$$

ただし， d_l は油滴直径， ρ は混合気の密度， $m_l = (\pi/6) \cdot d_l^3 \rho_l$ は油滴の質量， ρ_l は油滴の密度， $V = (u, v)$ は気相速度ベクトル， $V_l = (u_l, v_l)$ は油滴速度ベクトル， $g = (g, 0)$ は重力加速度ベクトルである．油滴の抵抗係数 C_D については，油滴直径とスリップ速度を用いたレイノルズ数 Re_d を用い，以下のように表した¹⁷⁾．

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{Re_d^{1/2}}{6} \right) \quad (9)$$

$$Re_d = \frac{\rho |V - V_l| d_l}{\mu} \quad (10)$$

油滴の蒸発モデルとして，常温の場合であっても油滴の蒸発量を見積もれるよう，AbramzonとSirignanoのモデル¹³⁾を用いた．気相と油滴の相対運動に起因する対流が物質と熱の移動に及ぼす影響を考慮した場合，油滴の蒸発率 \dot{m}_l と気相から油滴へ熱移動量 Q_l は以下のように表せる．

$$\dot{m}_l = \pi \cdot d_l \rho_l D_l Sh^* \ln(1 + B_l) \quad (11)$$

$$Q_i = \dot{m} \left[\frac{c_{pF}(T - T_i)}{B_T} - L(T_i) \right] \quad (12)$$

ここで、 ρ_f と D_f は油滴表面付近の燃料蒸気と周囲気体の混合層内（以下、油滴混合層と略記）の混合気の密度と拡散係数、 c_{pF} は油滴混合層内の燃料蒸気の定圧比熱、 $L(T_i)$ は油滴温度 T_i での蒸発潜熱、 Sh^* は油滴混合層に対して修正されたシャーウッド数、 B_{M} はSpaldingの物質トランスファード数であり次式のように示される。

$$B_M = \frac{Y_{F_s} - Y_{F_e}}{1 - Y_{F_s}} \quad (13)$$

ここで、 Y_{F_s} は油滴周囲の気相中の燃料蒸気の質量分率、 Y_{F_e} は油滴表面の燃料蒸気の質量分率であり、油滴温度での T_i 飽和状態における燃料蒸気の質量分率として、Clapeyron-Clausius式より求める。また、 B_T はSpaldingの熱トランスファード数であり、以下の関係式から求める。

$$B_T = (1 + B_M)^2 - 1 \quad (14)$$

$$\theta = \frac{c_{pF} Sh^*}{c_{pF} Nu^* L_e} \quad (15)$$

c_{pF} は油滴混合層内の燃料蒸気の定圧比熱、 c_{pF} と L_e は油滴混合層内の混合気の定圧比熱とルイス数である。また、 Sh^* と Nu^* は油滴混合層に対して修正されたシャーウッド数とヌッセルト数であり、以下のように表せる⁹⁾。

$$Sh^* = 2 + \frac{(1 + Re \cdot Sc)^{1/3} [\max(1, Re)]^{1/4} - 1}{F(B_M)} \quad (16)$$

$$Nu^* = 2 + \frac{(1 + Re \cdot Pr)^{1/3} [\max(1, Re)]^{1/4} - 1}{F(B_T)} \quad (17)$$

$$F(B) = (1 + B)^{-1} \frac{\ln(1 + B)}{B} \quad (18)$$

式(11)、(12)、(15)中の油滴混合層内の物性値を算出するために必要な、油滴混合層内の代表温度および燃料蒸気の質量分率は、1/3ルール¹⁰⁾に基づいて、以下のように表した。

$$T_f = T_i + A(T - T_i) \quad (19)$$

$$Y_{F_f} = Y_{F_s} + A(Y_{F_e} - Y_{F_s}) \quad (20)$$

ただし、 T_f は油滴混合層内の混合気温度、 T_i は油滴の温度、 A は重み係数 ($=1/3$)、 T は気相温度、 Y_{F_f} は油滴混合層内の燃料蒸気の質量分率、 Y_{F_s} は油滴表面の燃料蒸気の質量分率、 Y_{F_e} は油滴周囲の気相中の燃料蒸気の質量分率である。

油滴の粒径変化を記述する方程式は、次のように表した。

$$\frac{d\dot{m}_i}{dt} = \frac{2\dot{m}_i}{m_i^2 \rho_i} \quad (21)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_i}{(1/6)\dot{m}_i^2 \rho_i c_{p_i}} \quad (22)$$

ここで、 c_{p_i} は油滴の定圧比熱である。

油滴の存在が気相に与える影響を表す S_i は、各気相コントロールボリュームに存在する油滴個数を N とすれば、以下のように記述できる。気相の質量保存式への干渉項は、

$$S_{i,m} = -\sum \frac{\dot{m}_i}{V \Delta t} \quad (23)$$

気相の運動量保存式への干渉項は、

$$S_{i,u} = -\sum \frac{F_i}{V \Delta t} \quad (24)$$

$$S_{i,v} = -\sum \frac{F_i}{V \Delta t} \quad (25)$$

気相のエネルギー保存式への干渉項は、

$$S_{i,e} = \frac{\sum [-Q_i - \dot{m}_i (c_{p_i}(T - T_i) + L(T_i))]}{V \Delta t} \quad (26)$$

気相の化学種保存式への干渉項は、燃料蒸気成分に対してのみ考慮して、

$$S_{i,j} = \sum \frac{\dot{m}_i}{V \Delta t} \quad (27)$$

と表すことができる。ここで、 F は気相コントロールボリュームの体積、 c_{p_i} は燃料蒸気の定圧比熱である。

燃焼反応モデルにはn-デカンの一段総括反応¹⁹⁾を用いた。燃料の単位時間・単位体積あたりの反応量を R_k とすると、化学種保存式の燃焼反応による生成項は次式で示される。

$$S_{i,k} = -\frac{n_k}{n_f} \frac{W_k}{W_f} R_k \quad (28)$$

ここで、 n_k は k 成分化学種の生成側を正とする一段総括反応式の量論係数、 W_k は k 成分化学種の分子量である。

結果の一例として、図7に噴霧噴射開始からの経過時間 $t=30\text{ms}$ の計算結果 (a) ~ (c)、およびそれに対応する火炎写真¹¹⁾ (d) を示す。図中(a),(b),(c)にはそれぞれ、気相温度 T 、燃焼反応率 R_f 、気相当量比 ϕ がグレイスケールで示されている。また、図中(a)には灰色矢印で示された気相の速度ベクトル V 、(b)には油滴の位置と粒径 d_i の情報、(c)には気相当量比 $\phi = 1$ の等値線を示す黒線が重ねて表示されている。

高温領域中に極めて当量比の高い部分が存在し、その領域で共通の群火炎を有する油滴群が形成されており、火炎写真では非常に明るい輝炎が観察され

る。沸点が447.3Kの液体燃料 (n-デカン) が、高温領域中で未燃のまま油滴群を形成するのは、燃料蒸気が過濃状態となり酸素不足のために燃焼反応が進行しないため、未燃液滴の周囲に燃料の飽和蒸気が存在するために、液滴の蒸発が遅れるためである。

また、未燃噴霧流側に厚みの非常に薄く、弱い連続した反応領域が見られ、火炎写真ではその領域に青炎が観察される。この青炎領域での当量比は0.05程度であり (図(c)参照)、背後にある輝炎からの伝熱により油滴の予蒸発が進行していることが分かる。当量比0.05は常温では可燃範囲にないが、輝炎からの伝熱により保持されて、希薄な予蒸発蒸気の混合気が予混合的に燃焼していると考えられる。従って、噴霧中を伝ばする火炎の先端にみられる青炎の燃焼は、予蒸発蒸気の希薄予混合火炎であることが理解できる。

このように、厳密な数値解析を行なうことによって、実験で観察される現象の理解が深まることが重要であると考えられる。

3. おわりに

本稿では、複数の信号と画像の同時時系列計測と、モデルを噴霧モデルに限定した非定常数値シミュレーションによる噴霧火炎の詳細構造に関する考察結果について紹介した。噴霧火炎の詳細構造も、レーザ応用計測と詳細数値計算の成熟により、明らかになりつつある。

研究者にとってより重要なのは、このような高度な計測システムや詳細数値計算を用いて得られた大量のデータの中に潜む現象の本質を捉えることであり、そのためには、計測法や数値解析手法の原理に関する広範な知識が求められるばかりではなく、どのような物理量をいかなる理由で知りたいのかといった、はっきりとしたビジョンを持って研究を進めていくことが今後益々重要となるであろう。

実用燃焼器の数値シミュレーションに加え、乱流燃焼の直接数値解析(DNS)²⁰⁾をはじめとする現象解明のための大規模数値計算も、コンピュータの高速化にともない、急速な進歩を遂げている。実用噴霧燃焼に対する数値シミュレーションの精度をより向上させていくためには、噴霧燃焼現象解明のためのモデルフリーの直接数値解析と、レーザ応用計測を用いた詳細な実験観察に基づいて、実際の物理現象

を反映した噴霧燃焼モデルを構築することが必要不可欠であろう。

参考文献

- 1) H.H. Chiu, et al., Proc. Combustion Institute., 19(1982), 971.
- 2) F. Akamatsu, et al., Atomization and Sprays, 7-2(1997), 199.
- 3) F. Akamatsu, et al., Proc. Combust. Inst., 26(1996), 1723.
- 4) 赤松ら, 機論, 62-596B (1996), 1622-1628.
- 5) 赤松ら, 第40回燃焼ソポジウム講演論文集, (2002), 491.
- 6) F. Akamatsu, et al., Meas. Sci. Technol., 10(1999), 1240.
- 7) W.D. Bachalo, Int. J. Multiphase Flow, 20(1994), 261.
- 8) J.B. Greenberg, et al., Combust. Sci. & Technol., 50(1986), 255.
- 9) G. Continillo, and W.A. Sirignano, Combust. Flame, 81(1990), 325.
- 10) F. Akamatsu, et al., Proc. of the 8th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-2000), (2000), 25.
- 11) 高田, 赤松, 香月, 機講論, No.004-1, (2000), 5-37.
- 12) C.T. Crowe, et al., Trans. ASME, J. of Fluids Eng., 99(1977), 325.
- 13) B. Abramzon, and W.A. Sirignano, Int. J. Heat and Mass Transfer, 32(1989), 1605.
- 14) R.J. Kee, et al., SANDIA Report, SAND87-8215B (1987).
- 15) R.J. Kee, et al., SANDIA Report, SAND86-8246 (1986).
- 16) B. Abramzon, and W.A. Sirignano, ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf. (1987), Vol. 1, 11.
- 17) A. Putnam, American Rocket Society. J., 31(1961), 1467.
- 18) G.L. Hubbard, et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 18(1975), 1003.
- 19) C.K. Westbrook, and F. L. Dryer, Prog. Ener. Combust. Sci., 10(1984), 1.
- 20) M. Tanahashi, et al., Proc. Combust. Inst., 29(2002), 2041.