レーザ計測による混相燃焼火炎内分散粒子の挙動把握手法

Laser Diagnostics of the Dispersed Particle Behaviors in Multiphase Combustion Flame

黒瀬 良一^a, 赤松 史光^b, 牧野 尚夫^c

Ryoichi Kurose, Fumiteru Akamatsu, Hisao Makino

Keywords : Dispersed particle, Multiphase combustion flame, Laser measurement

1. はじめに

固体や液体の燃料を数十から数 μm 程度に粉碎もしくは微粒化し、気相中で燃焼させる混相燃焼は、微粉炭燃焼やガスタービンエンジンなどのエネルギー変換装置や、ロケットエンジンなどの推進装置をはじめ、多くの工業装置内で見られる。しかし、混相燃焼

場では、固体や液体からなる燃料粒子群の気相への分散、揮発（蒸発）、燃焼が同時に起こるため、燃焼過程が極めて複雑となり、その詳細なメカニズムは十分に解明されていない。

このような混相燃焼の詳細メカニズムを明らかにするために、著者らはこれまで、実験室規模でコンパクトな微粉炭燃焼火炎や噴霧火炎に光学計測法を適用することにより、同火炎内における燃料粒子の挙動や火炎の微細構造の解明を試みてきた（例えば文献¹⁻⁶⁾）。本解明において、火炎内燃料粒子は、揮発（固体）や蒸発（液体）を伴いながら移動するため、その移動速度と粒径変化（質量変化）を評価することが最も重要である。これらの特性量を測定する方法として、近年、非接触で極めて高い時間・空間分解能をもつレーザ計測法が注目されている。粒子の移動速度については、レーザドップラ流速計（Laser Doppler Velocimetry, LDV）を用いた測定が可能であり、既に多くの計測例が報告されている。しかし、LDVでは、粒径分布を持つ燃料粒子のオーバオール（全）の速度のみが測定されるため、燃焼に伴う粒径の変化や粒径ごとの粒子速度など、詳細な検討を行うことができない。そのため、現在、粒子の速度と粒径を同時に測定する方法として、フェイズドップラ粒子分析計（Phase Doppler Particle Analyzer, PDPA）が良く用いられているが、その適用は噴霧液滴などの球形粒子に限られるため、微粉炭のような不定形粒子への適用は不可能である。これに対して、近年、微粉炭粒子のような不定形粒子に対する速度、粒子形状、および粒径の同時測定が可能な方法として、シャドウドップラ流速計（Shadow Doppler Particle Analyzer, SDPA）が開発されており、注目されている。

2003年11月25日受付

a (財) 電力中央研究所 横須賀研究所エネルギー化学部

(〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1) TEL 046-856-2121

b 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) TEL 06-6879-7253

c (財) 電力中央研究所 C S 推進本部

(〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1) TEL 03-3201-6601

< 著者紹介 >

黒瀬良一

平成10年3月九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了、同年4月(財)電力中央研究所入所、主任研究員、平成13年4月から群馬大学大学院工学研究科客員助教授併任、工学博士

専門：乱流燃焼、微粉炭燃焼、混相流

赤松史光

平成3年3月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、同年4月同大学工学部助手、平成9年10月より一年間カルフォルニア大学アーバイン校客員研究員（文部省在外研究員）、平成12年12月大阪大学大学院工学研究科講師、平成15年4月同工学研究科助教授、平成15年4月から独立行政法人産業技術総合研究所招聘研究員（併任）、工学博士

専門：噴霧燃焼、レーザ応用計測

牧野尚夫

昭和54年3月京都大学大学院工学研究科修士課程修了、同年4月(財)電力中央研究所入所、平成14年7月から同所C S推進本部（部長）、平成13年4月から群馬大学大学院工学研究科客員教授併任、工学博士

専門：微粉炭の高度燃焼技術、集塵技術、粉体計測

本稿では、PDPA と SDPA の計測原理、およびこれらの手法を混相燃焼火炎に適用した計測結果について概説し、今後の展望を述べる。

2. フェイズドップラ粒子分析計 (PDPA) の噴霧火炎への適用

2.1 計測原理の概略

1964年に Yeh and Cummins⁷⁾ によってその測定原理が発表されたレーザドップラ流速計 (LDV) は、1970年代に急速な進歩を遂げ、実用化の段階に達した⁸⁾。さらに、最近の電子回路や信号処理技術のめざましい進歩により、高精度の時系列データの収集が可能となり、多彩なソフトウェアの開発や光ファイバー型光学系の開発と相まって、第二世代 LDV の到来を迎えたと言われている⁹⁾。また、LDV の原理を応用して微小粒子の速度と粒径を同時測定できるフェイズドップラ粒子分析計 (PDPA)¹⁰⁾ も、様々な噴霧計測に用いられてきている¹¹⁾。

LDV による流速測定と同時に、粒径の測定が行える計測法が PDPA である。流速測定の原理は LDV と同一であるので、ここでは粒径測定の原理についてのみ記述する。

Durst and Zare¹⁰⁾ は LDV 測定における散乱光の研究で、散乱光のフリンジの間隔が測定粒子の直径に比例すること、受光位置を移動させても散乱光のドップラ周波数は変化せず、位相だけが変化することを見いだした。これが PDPA の始まりである。PDPA の送光系の測定体積 (LDV に使用されるものと同様) における散乱光の状態を図 1 に示す。

ここでは、散乱粒子は周囲の媒質に対する比屈折率 n の透明な球形粒子であるとする。また、測定体積内のフリンジ間隔 δ_f は次式により表される。

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

ここで、 λ は入射レーザ光の波長、 θ は 2 本の入射ビームの交差角である。粒子径 d_p が入射光の波長 λ

図1 PDPA 計測における粒径測定の原理

に対して十分大きい場合は、測定体積を通過する粒子は凸レンズの役割を果たし、その焦点距離 f_p は次式で与えられる。

$$f_p = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{d_p}{4} \quad (2)$$

この効果により、粒子が測定体積を通過すると、距離 R ($R \gg f_p$) 離れた位置では、測定体積内のフリンジ間隔 δ_f は拡大投影されて S_{refr} となる。ただし、像の拡大率はレンズの焦点距離 f_p によって決まるので、 S_{refr} と f_p の間には以下の関係が成り立つ。

$$S_{\text{refr}} \approx (R - f_p) \frac{\delta_f}{f_p} \approx R \frac{\delta_f}{f_p} \quad (3)$$

式 (2) と (3) から S_{refr} を求めることにより、粒径測定が可能となる¹²⁾。

S_{refr} を計測するためには、図 1 に示すように一定の距離 S' だけ隔てて受光素子を設置し、それぞれから検出される散乱光の位相差 Φ を測定すればよい。すなわち、検出されるドップラ信号の周波数 f_d はどの位置で観察しても一定であるため、検出器の間隔 S' 、拡大投影されたフリンジ間隔 S_{refr} 、ならびに位相差 Φ の関係は、式 (1) を使用して、

$$\begin{aligned} \Phi &= 2\pi \frac{S'}{S_{\text{refr}}} = 2\pi S' \frac{n}{n-1} \frac{d_p}{4} \frac{1}{R \delta_f} \\ &= 2\pi S' \frac{n}{n-1} \frac{d_p}{4} \frac{2 \sin(\theta/2)}{R \lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。上式から、粒径 d_p と位相差 Φ は比例関係にあることが分かる。

2.2 実験装置および方法

図 2 に、実験に用いた予混合噴霧火炎¹³⁾ の直接写真 (露光時間 1/15s) とバーナポート部の詳細を示す。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 1mm の環状の水素拡散パイロットバーナを有している。その外周には同軸・同速の空気を流して火炎を安定化させるとともに、噴霧流線の広がりを抑える構造になっている。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。その際に、前述した、ポート周囲に環状に配置されたパイロットバーナにより保炎され、噴霧火炎が形成される。本研究では、燃焼用空気

図2 予混合噴霧火炎バーナ

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 に相当), 二流体噴射弁の霧化用空気圧力 0.4MPa で実験を行った。計測の際の座標系としては, 図中に示すように, 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。

図3に, PDPAの光学系を示す。PDPAの受光系および信号処理器には市販の装置 (DANTEC 社製, 57X10 および 58N10) を用いた。また, 送光系の光源には, 波長 514.5nm のアルゴンイオンレーザ (Spectra Physics 社製, Stable2017) を使用した。レーザ光は光ファイバにより送光系に導かれた後に送光系内で二分割され, 逆流の計測を可能とするために, そのうちの一方がブラッグセルにより 40MHz の周波数変調を受ける。送光系から射出される2本の

図3 PDPA 光学系

表1 PDPA の仕様

Transmitting optics	
Wavelength of laser beam (nm)	514.5
Focal length (mm)	310
Spot diameter (μm)	145
Fringe spacing (μm)	5.0
Fringe number	29
Receiving optics	
Focal length (mm)	310
Width of spatial filter (μm)	100
Range of size and velocity measurement	
Maximum diameter (μm)	96.5
Maximum velocity (m/s)	15.0
Minimum velocity (m/s)	-5.0
Bandwidth of signal processor (MHz)	4.0
Frequency shift (MHz)	40

レーザ光は, 焦点位置で交差して測定体積を形成する。測定体積を通過する油滴からのドップラ光は, 光軸に対して 70.3° の方向に配置された受光系により検知され, 信号処理器で処理された後, パーソナルコンピュータに記録される。この受光角は, 常温で屈折率が 1.42 の白灯油の油滴に対して, レーザ光の反射光成分が落ち込み, 1 次屈折光が支配的になる角度である¹⁴⁾。本実験で用いた PDPA の仕様を表1に示す。

2. 3 計測結果

(a) PDPA による計測

図4に, PDPAを用いて計測された, $r=15\text{mm}$ での油滴粒径 D ごとのバーナ軸方向速度の平均値 $\overline{V_h(D)}$ を示す。(a) は $h=70\text{mm}$, (b) は $h=100\text{mm}$, (c) は $h=130\text{mm}$ での結果であり, (a) $\rightarrow$ (b) $\rightarrow$ (c) の順に火炎の下流方向 (火炎上方) へと進む。また, 図中の縦方向の線分は $\overline{V_h(D)}$ の時間平均値 $\overline{V_h(D)}$ (●印で表示) を中心に $\pm V'_h(D)$ (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, 噴霧全

図4 粒径別の油滴軸方向平均速度と速度変動の rms 値 ($r=15\text{mm}$)

図5 油滴の粒径分布 ($r=15\text{mm}$)

体としての軸方向速度変動のrms値 V'_h も $1.0\sim 1.2\text{ m/s}$ と比較的小さいことが分かる。

図5は、図4と同じ位置における油滴の粒径分布で、図中にはザウテル平均粒径 D_{32} と空間油滴数密度 N_p が記入されている。(a), (b), (c) のいずれの場合も D_{32} は $30\mu\text{m}$ 程度であり、 $5\mu\text{m}$ 以下の微小油滴を除いては、粒度分布の形状もほとんど変化が見られない。ただ、油滴数密度は激減しており、蒸発・燃焼により消滅する油滴の多いことが分かる。

図6に、火炎中の気相の速度と、粒径ごとの油滴の気相との相対速度（スリップ速度）を示す。その際に、 $10\mu\text{m}$ 以下油滴は気相に追従するとして、その速度をもって気相の速度とした。この結果から、バーナ中心軸付近では、油滴のスリップ速度は非常に小さいものの、バーナ外周部においては、大粒径油滴が下向き内側方向へのスリップ速度を持っていることが分かる。これは、慣性力の大きな油滴が、気相の燃焼による熱膨脹による上向き外側への加速に追従できないためである。

(b) PDPA と他の計測法との同時時系列計測

次に、噴霧火炎の瞬時構造に着目し、PDPA と他

図6 火炎中の気相速度と粒径ごとの油滴スリップ速度

図7 火炎の短時間露光写真

の計測法との同時時系列計測を試みた例について述べる。

図7に、火炎の短時間露光 ($1/1000\text{s}$) の直接写真¹³⁾を示す。目視では、前述の図2のようになめらかな形状をもつように見える火炎も、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¹⁵⁾の存在を端的に示している。

図8は、予混合噴霧中にレーザシート光を照射して噴霧断面を可視化したもの¹⁶⁾であり、(a)が非燃焼時、(b)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

(a) 非燃焼時

(b) 燃焼時

図8 レーザシート法による噴霧断面象

図9 同時時系列計測システム

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。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災中の噴霧の燃焼過程を議論する場合には、PDPA等の単独計測により、一点における油滴と速度を計測して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、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。

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、考察を加えるための同時時系列計測システム¹⁷⁾の概要を図9に示す。本計測システムでは、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)^{18, 19)}を用いた火炎中の1点におけるOH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、PDPA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。PDPA送光系の光源にアルゴンイオンレーザの514.5nmの波長を用いたので、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) 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 Model4540) 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 × 128 pixel (実空間で 30 × 30mm に対応) 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_c とし

図 10 同時時系列データの一例

た。画像撮影領域は、油滴群が頻繁に観察される $r = -15 \sim 15 \text{ mm}$, $h_i = 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 \text{ mm}$ の 7 領域とした。

図 10 に、 $n_r = 110\text{mm}$ における OH 自発光信号、CH バンドの発光信号、油滴ミエ散乱光信号、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ミエ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、油滴ミエ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かる。

図 11 SDPA 光学系

3. シャドウドップラ粒子分析計 (SDPA) の微粉炭火炎への適用

3.1 計測原理の概略

SDPA は、粒子の速度を測定する前方散乱型 LDV の送光系と、測定体積を通過する粒子によって生ずるレーザ光のシャドウから粒子形状を求めるための光学系から構成される^{20, 21)}。図 11 に、SDPA の光学系の構成を示す。本図において、受光レンズ、対物レンズならびにフォトダイオードアレイを除いたものが LDV の送光系に相当する。Ar⁺ レーザ光 (488.0nm, 約 400mW) が、ビームスプリッタにより 2 本に分離されて、レンズ 1 (焦点距離約 500mm) により測定体積に導入される。測定体積の大きさは、およそ直径 0.12mm および長さ 2.5mm であり、フリッジ間隔は 5.0 μ m である。測定体積を通過する粒子によって散乱されたレーザ光は、レンズ 2 (焦点距離約 500mm) によって集光されると共に、光ファイバを介してコンピュータに送られ、そのドップラ信号から粒子速度が求められる。

一方、粒子の 2 次元形状は、測定体積を通過する粒子によって形成されるレーザ光のシャドウが、受光レンズならびに対物レンズにより 64 個の素子を持つフォトダイオードアレイ上に投影され、その投影像の時系列データとドップラ信号から求められる粒子速度を用いて得られる。図 12 に、粒子形状の計測結果の例

図 12 SDPA により測定された粒子形状の一例

図 13 微粉炭燃焼バーナ装置の概略

を示す。粒径は、粒子の 2 次元形状を表すピクセルの数とピクセル 1 個あたりの面積の積から求めた粒子の投影面積 A から計算される投影面積円相当径として計算される。また、円形度 ϕ ($0 < \phi < 1$) は、粒子形状が真円の場合には 1 となり、針状の場合には 0 となる指数であり、以下の式で定義される。

$$\phi = \sqrt{4\pi A / C} \quad (5)$$

ここで、 C は投影された粒子の周囲長である。

3.2 実験装置および方法

図 13, 14 に微粉炭燃焼バーナ装置の概略、および微粉炭火炎の直接写真 (露光時間 1/8000s) を示す。本研究では、微粉炭供給量が 8.9g/min の火炎を対象に計測を行った。コンプレッサから供給される微粉炭搬送用の空気は、除湿および除じんされ、マスフローコントローラで流量を制御された後、エジェクタに導か

図 14 微粉炭火炎の撮影写真

表2 石炭性状

High heating value ^{*1}	29.1MJ/kg
Low heating value ^{*1}	28.1MJ/kg
Proximate analysis	(wt %)
Moisture ^{*2}	2.60
Ash ^{*1}	15.20
Volatile matter ^{*1}	26.90
Fixed carbon ^{*1}	57.90
Ultimate analysis	(wt %)
Carbon ^{*1}	71.90
Hydrogen ^{*1}	4.40
Nitrogen ^{*1}	1.50
Oxygen ^{*1}	6.53
Total sulfur ^{*1}	0.44
Combustible sulfur ^{*1}	0.39

^{*1} : Dry basis, ^{*2} : As received

れる。エジェクタでは、スクリーフィーダ（日清エンジニアリング Fcμ-030F）によって定量供給される微粉炭が搬送用空気に吸引・混合され、バーナ部へ導かれた後、内径 $D=6\text{mm}$ の円管から鉛直上向きに放出される。本実験においては、微粉炭の供給量が少なく、微粉炭のみで安定した火炎を形成することが困難であったため、微粉炭を供給する円管の外側に設けた幅 0.5mm のスリットからメタンを供給し、着火源とした。燃焼後の排ガスは、水冷熱交換器で冷却およびバグフィルタによる除じん後、ファンによって大気中に放出される。使用した石炭は、現在最も一般的に用いられている豪州炭（ニューランズ炭）であり、実発電所と同様の条件で粉碎したものを用いた。石炭性状を表2に示す。

計測は、所定量の空気およびメタンを供給してメタン火炎を安定させた後、微粉炭を供給して開始した。微粉炭、空気およびメタンの供給量を表3に示す。メタンの投入熱量は、微粉炭の投入熱量のおおよそ5分の1である。なお比較のため、SDPAによる計測は微粉炭を供給しながらも火炎を形成させない非燃焼場（メタンに代えて空気を供給）に対しても実施した。また、粒子速度に関してはLDVによる計測も行った。

表3 微粉炭、空気およびメタンの供給量

Pulverized coal feed rate	$1.49 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$
Thermal input of coal [*]	4.19kW
Air flow rate	$1.80 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
CH ₄ flow rate	$2.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Thermal input of CH ₄ [*]	0.83kW

^{*} Based on low heating value

図15 平均粒子速度および平均気流流速の z 軸上分布

3.3 計測結果

(a) 粒子速度および気流流速分布

図15、16に、LDVならびにSDPAによって測定した、非燃焼時および燃焼時における微粉炭粒子速度の平均値 U および速度変動強度 (rms 値) u' の z 軸上分布をそれぞれ示す。また両図には、微粉炭を供給しない非燃焼時の気流の U および u' についてのLDVによる測定結果も示す（シーディング粒子として、質量中位径が約 $2\mu\text{m}$ のアルミナ粒子（（社）日本粉体工業技術協会、白色溶融アルミナ No. 1）を使用）。SDPA計測では z/D が10未満の領域において、粒子濃度が極めて高いことなどの理由により十分なデータレートが得られなかったため、この領域のデータをプロットから除外している。なお、以下、距離についてはバーナ内径 D によって無次元化したものを、粒子速度および気流流速についてはLDVを用いて計測した非燃焼時の $z/D=0$ および $r/D=0$ における平均気流流速 U_0 を用いて無次元化したものを用いた。

これらの図から、SDPAの測定値はLDVの測定値

図16 粒子速度および気流流速の変動強度の z 軸上分布

と良く一致しており、非燃焼時および燃焼時いずれの場合にも、 $z/D \geq 10$ の領域において、SDPA による粒子速度の計測がLDVと同程度の測定精度を有することが分かる。

図15に示されるように、非燃焼時の気流および粒子の U は、 z/D の増大に応じて同様に低下する傾向を示すが、 z/D が4を越える領域において、粒子の U は気流の U より若干大きな値を示す。これは、粒子はその慣性力により、気流に比べて速度の低下が遅れるためであると考えられる。また、燃焼時の粒子の U は、非燃焼時に比べ z/D の増大による低下傾向が非常に小さい。これは、燃焼反応に伴う温度上昇によって気体が膨張し、気流流速が増加したためであると考えられる。

一方、図16に示されるように、非燃焼時の気流の u' は z/D が7以下の領域ではバーナ端からの距離が増加するにつれて大きくなり、一旦ピークを示した後、減少する。LDVで計測された非燃焼時の粒子の u' もこれと同様の变化傾向を示すが、ピーク位置が気流より下流に現れることや、 z/D が10を越える領域において減少傾向が緩やかになるなど、気流の u' とは差異が見られる。これらは、粒子の U の結果と同様に、粒子はその慣性力のため、気流よりも速度の追従が遅くなることが原因であると考えられる。また、燃焼時の粒子の u' は、非燃焼時に比べ小さくなると共に、その分布傾向も非燃焼のものとは異なる。すなわち、燃焼時の粒子の u' は、 z/D が8以下の領域においてはほぼ一定の値を示しているが、それを越えたと低下し、 z/D が17程度で極小値を示した後上昇する。燃焼時には、温度が上昇して気体の密度が低下することにより動粘性係数が上昇するため、気流の乱れが抑制されることが知られている。燃焼時の粒子の u' も、この気流の乱れの抑制の影響などを受けて、非燃焼時に比べて低下したものと考えられる。 z/D が17以降の領域においては、火炎の終端部に近く、火炎の温度が急激に低下するため、燃焼時の粒子の u' が z/D の増加に伴い上昇する。なお、目視による火炎の長さは約 $25D$ であり、火炎の終端部においては、燃焼時の粒子の u' が非燃焼時の値と一致する。

(b) 粒径および粒子形状の変化

SDPAによって測定された粒径からその個数平均値および変動値(rms値)を計算し、 z 軸上バーナからの距離に対してプロットしたものを図17に示す。図から、非燃焼時には粒径の平均値およびrms値とも

図17 平均粒径およびそのrms値の z 軸上分布

z/D に対する大きな変化は見られないが、燃焼時には粒径の平均値および粒径分布の広がりを表すrms値とも、 z/D の増加に伴い大きくなることが分かる。これは、Lee et al.²²⁾が、落下型電気炉を用いて燃焼中の石炭粒子をサンプリングし、粒径分布を計測した結果と同様であり、粒子の膨潤によるものと考えられる。

図18に、 $z/D=10, 15, 20$ の各位置における非燃焼時および燃焼時に取得した粒子形状について円形度の計算を行ったものを示す。この図では、粒径を $5\mu\text{m}$ ごとに区分し、それぞれの領域における個数平均粒径と円形度の平均値をプロットした。エラーバー

図18 平均粒径と粒子の円形度の関係

図19 平均粒径と粒子速度および変動強度の関係（非燃焼時）

図20 平均粒径と粒子速度および変動強度の関係（燃焼時）

は、測定結果のばらつきを標準偏差（rms）によって示したものである。非燃焼時の円形度が z/D や粒径によらずほぼ一定であるのに対して、燃焼時の円形度は特に粒径が $60\mu\text{m}$ 以下の粒子のものが非燃焼時に比べて低下し、その傾向は z/D の増大に伴い顕著になることが分かる。Lee et al.²²⁾ は、粒径と同時に円形度の計測も実施し、燃焼時には円形度が増加するという本研究とは異なる結論を得ている。燃焼時に円形度が減少する理由としては、粒子の膨潤や揮発分の放出により粒子にクラック等が生じることが考えられる。また一方、円形度が増加する理由としては、燃焼の進行に伴う粒子温度の上昇により粒子が球状化することが考えられる。

(c) 粒子速度と粒径の関係

粒子速度と粒径の関係を明らかにするため、粒子を粒径 $5\mu\text{m}$ ごとに区分し、各粒径領域における個数平均粒径と U および u' との関係を検討した。図19および図20に、非燃焼時ならびに燃焼時の $z/D=10, 15, 20$ の各位置における結果をそれぞれ示す。なお、図19にはLDVによって測定された気流の U と u' の測定結果も示した。

非燃焼時には粒子の U は粒径の増大に伴い増加する傾向を示し、その差異は z/D の増加に従い顕著になる。これに対して、燃焼時における粒子の U は、粒径に対して大きな変化をしない。また、粒子の u' については、非燃焼時および燃焼時いずれの場合においても、粒径の違いによる変化は見られない。非燃焼時において、粒子の U が粒径の増大に伴い大きくなる原因については、慣性力の小さい小粒径粒子の U は気流に追従して z/D の増加により低下するが、大粒径粒子は慣性力が強いいため、 z/D の増加に応じた速度の低下が遅くなるためであると考えられる。

4. おわりに

本稿では、混相燃焼火炎内の燃焼粒子挙動に着目し、噴霧火炎内の球形油滴の速度と粒径、および微粉炭火炎内の非球形粒子の速度と形状を計測するための手法として、フェイズドップラ粒子分析計（Phase Doppler Particle Analyzer, PDPA）およびシャドウドップラ流速計（Shadow Doppler Particle Analyzer, SDPA）をそれらの研究例と共に紹介した。また、PDPAに関しては、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との同時時系列計測システムを用いた、より高度な計測例についても概説した。近年では、このように様々な計測法を統合した同時時系列計測システムを構築することにより、詳細な観察が可能となってきた。しかし、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る。そのためには、計測法や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ますます重要となると考えられる。

〔謝辞〕本報は、これまで（財）電力中央研究所および大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻燃焼工学講座において得られた研究成果の一部をまとめたものである。本文をまとめるにあたり、共同研究者である、（財）電力中央研究所 辻 博文氏、大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻燃焼工学講座 香月正司教授、黄 承敏氏には貴重なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 辻 博文, 黒瀬良一, 牧野尚夫: “シャドウドブプラ流速計を用いた微粉炭火炎内の粒子速度と粒子形状・粒径の同時計測”, 日本機械学会論文集 (B編), **68**, 596-602 (2002)
- 2) Kurose, R. and H. Makino: “Large Eddy Simulation of a Solid-fuel Jet Flame”, *Combustion and Flame*, **135**, 1-16 (2003)
- 3) 黄 承敏, 黒瀬良一, 辻 博文, 赤松史光, 牧野尚夫, 香月正司: “乱流微粉炭燃焼火炎の微細構造の観察 (第2報)”, 第41回燃焼シンポジウム講演論文集, 掲載予定
- 4) 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 (B編), **60**, 3172-3178 (1994)
- 5) 津島将司, 斎藤寛泰, 赤松史光, 香月正司: “予混合噴霧火炎の巨視的燃焼挙動 (第1報 油滴クラスター形成・消失過程と二重火炎構造)”, 日本機械学会論文集 (B編), **66**, 307-314 (2000)
- 6) 赤松史光, 石田 礼, 斎藤寛泰, 香月正司: “予混合噴霧流の群燃焼挙動”, 第11回微粒化シンポジウム講演論文集, pp. 235-240 (2002)
- 7) Yeh, Y. and H. Z. Cummins: “Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne Laser Spectrometer”, *Applied Physics Letters*, **4**, 176-178 (1964)
- 8) Durst, F., A. Melling and J. H. Whitelaw: “Principle and Practice of Laser-Doppler Anemometry”, Academic Press (1976)
- 9) 前田: “フェーズ・ドブプラ法による粒径測定あれこれ”, 燃焼研究, **91**, 13-23 (1992)
- 10) Durst, F. and M. Zare: “Laser Doppler Measurements in Two-phase Flow”, Proc. of the LDA Symposium, Copenhagen, pp. 403-429 (1975)
- 11) Bachalo, W. D.: “Experimental Methods in Multiphase Flows”, *Int. J. Multiphase Flow*, **20**, 261-295 (1994)
- 12) Ibrahim, K. M., G. D. Werthiner and W. D. Bachalo: “Signal Processing Considerations for Laser Doppler and Phase Doppler Applications”, Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, p. 291 (1990)
- 13) 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 (B編), **62**, 1622-1628 (1996)
- 14) Pitcher, G., G. Wigley and M. Saffman: “Sensitivity of Dropsizes Measurement by Phase Doppler Anemometry to Refractive Index Changes in Combusting Fuel Spray”, Proc. of 5th Int. Symp. Laser Anemometry Fluid Mech., Paper No. 14.4 (1990)
- 15) Chiu, H. H., H. Y. Kim and E. J. Croke: “Internal Group Combustion of Liquid Droplets”, *Proc. of The Combust Inst.*, **19**, 971-980 (1982)
- 16) 津島将司, 斎藤寛泰, 赤松史光, 香月正司: “予混合噴霧火炎の巨視的燃焼挙動 (第2報 噴霧流中の伝ば火炎速度と油滴クラスター消失速度)”, 日本機械学会論文集 (B編), **66**, 2734-2739 (2000)
- 17) 赤松史光, 石田 礼, 斎藤寛泰, 香月正司: “予混合噴霧流の油滴群燃焼挙動”, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 491-492 (2002)
- 18) 若林 卓, 赤松史光, 香月正司, 水谷幸夫, 池田裕二: “多波長高空間分解能集光プローブの開発”, 河原伸幸, 中島 健, 日本機械学会論文集 (B編), **64**, 277-282 (1998)
- 19) Akamatsu, F., T. Wakabayashi, S. Tsushima, M. Katsuki, Y. Mizutani, Y. Ikeda, N. Kawahara and T. Nakajima: “Development of Light-collecting Probe with High Spatial Resolution Applicable to Randomly Fluctuating Combustion Fields”, *Measurement Science and Technology*, **10**, 1240-1246 (1999)
- 20) Hardalupas, Y., K. Hishida, M. Maeda, H. Morikita, A. M. K. P. Taylor and J. H. Whitelaw: “Shadow Doppler Technique for Sizing Particles of Arbitrary Shape”, *Applied Optics*, **33**, 8417-8426 (1994)
- 21) Maeda, M., H. Morikita, I. Prassas, A. M. K. P. Taylor and J. H. Whitelaw: “Shadow Doppler Velocimetry for Simultaneous Size and Velocity Measurements of Irregular Particles in Confined Reacting Flows”, *Part. Part. Syst. Character.*, **14**, 79-87 (1997)
- 22) Lee, C. W., A. W. Scaroni and R. G. Jenkins: “Effect of Pressure on the Devolatilization and Swelling Behavior of a Softening Coal during Rapid Heating”, *Fuel*, **70**, 957-965 (1991)