シャドウドッ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*辻 博文^{*1}, 黒瀬 良一^{*1}, 牧野 尚夫^{*2}Simultaneous Measurement of Particle Velocity, Particle Shape and
Particle Size in Pulverized Coal Flame by Shadow Doppler VelocimetryHirofumi TSUJI, Ryoichi KUROSE^{*3} and Hisao MAKINO^{*3}Chemical Energy Engineering Department, Yokosuka Research Laboratory, Central Research Institute of
Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 240-0196 Japan

The velocity and size of coal particles in a laboratory-scale pulverized coal combustion flame were simultaneously measured by Shadow Doppler Velocimetry (SDV) which has the advantage over other Laser-based sizing methods for arbitrary shaped particles. The Laser Doppler Velocimetry (LDV) was also used to measure the airflow velocity and particle velocity. The results show that mean velocity of large particles is larger than mean airflow velocity due to the inertia force of particles in the case of noncombustion condition. The particle rms velocity in the combustion condition is smaller than that in the noncombustion condition. The particle size in the combustion condition gradually increases with an increase of the distance from the burner. The circularity of the particles in the combustion condition is slightly lower than that of particles in the noncombustion condition. The mean velocity and rms particle velocity don't change with the particle size in the case of combustion condition.

Key Words: Solid Fuel, Combustion, Laser, Pulverized Coal, Shadow Doppler Velocimetry, Particle Velocity, Particle Shape, Particle Size

1. 結 論

電気事業においては、火力発電用燃料として、埋蔵量が豊富で供給安定性が高いとの理由から石炭の利用拡大を積極的に推進している。しかし、その利用にあたっては、環境汚染物質の排出量の抑制や資源の有効活用のため、低 NO_x 燃焼技術の開発や高効率燃焼技術の開発など、燃焼技術のより一層の高度化が求められている。

現在最も一般的に用いられている石炭の利用技術は、石炭を平均粒径 40 μm 程度に粉碎するとともに空気搬送し、バーナで燃焼させる微粉炭燃焼方式である。この微粉炭燃焼では、微粉炭粒子が乱流場において空気と混合・燃焼する過程が NO_x の排出量や燃焼効率に大きく影響するため、高温の乱流場における微粉炭粒子の速度や粒径変化などの挙動を正確に把握することが極めて重要となる。

このような乱流中の粒子の挙動を測定する方法とし

て、近年、非接触で極めて高い空間・時間分解能をもつレーザ計測法が注目されている。粒子の速度についてはすでに、レーザドップラ流速計(LDV)を用いた測定例がいくつか報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし LDV では、粒径分布を持つ微粉炭粒子のオーバオール速度のみが測定されるため、燃焼に伴う粒子形状・粒径の変化や粒径による粒子速度の差異など、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、フェイズドップラ流速計(PDV)がよく用いられているが⁽³⁾⁽⁴⁾、PDV は、測定原理上、計測対象が液滴などの球形粒子に限られ、微粉炭のような不定形の粒子への適用は不可能である。

このような背景のなか、微粉炭粒子のような不定形粒子の速度を測定すると同時に、粒子形状および粒径の測定が可能な方法として、Maeda ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾ は、LDV のシステムを拡張したシャドウドップラ流速計(SDV)を開発した。しかしながら、SDV を実際の微粉炭燃焼場に対して適用した例⁽⁷⁾は少なく、微粉炭燃焼場における微粉炭粒子の挙動はまだ十分に解明されていないのが現状である。

そこで本報では、実験室規模の微粉炭の燃焼場および非燃焼場を対象に、SDV 計測および LDV 計測を行

* 原稿受付 2001 年 11 月 24 日。

^{*1} 正員、(財)電力中央研究所(〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1)。^{*2} (財)電力中央研究所。

E-mail: tsuji@criepi.denken.or.jp

った。これらより、両計測法の粒子速度を比較するとともに、SDVにより、燃焼に伴う粒子形状・粒径の変化、さらに粒子速度と粒径の関係を考察した。

2. おもな記号

- A : 粒子の投影面積 (μm^2)
 C : 投影された粒子の周囲長 μm
 D : バーナ内径 ($=0.006\text{ m}$) m
 D_p : 粒子の投影面積円相当径 μm
 r : 半径方向座標 m
 u : z 方向の気流流速および粒子速度 m/s
 U : u の平均値 m/s
 U_0 : $z/D=0$ および $r/D=0$ における非燃焼時の z 方向の平均気流流速 m/s
 u' : u の rms 値 m/s
 x, y : 粒子画像上の座標 m
 z : 流れ方向座標 m
 ϕ : 粒子の円形度 -

3. 実験装置および実験方法

3.1 シャドウドップラ流速計(SDV) SDVは、粒子の速度を測定する前方散乱型LDVの光学系と、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。図1に、SDV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の光学系に相当す

Fig. 1 Optical arrangement of Shadow Doppler Velocimetry

Fig. 2 Particle shape measured by SDV

る。SDVを用いた粒子速度と粒径の同時測定法の原理については、Maedaらの文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾に詳述されており、本論文ではその概略を説明する。Ar⁺レーザ光(488.0 nm, 約400 mW)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500 mm)により測定体積に導入される。測定体積の大きさは、おおよそ直径0.12 mmおよび長さ2.5 mmであり、フリンジ間隔は5.00 μm 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500 mm)によって集光されるとともに、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、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個の素子をもつフォトダイオードアレイ上に投影される。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粒子の二次元形状が得られる。図2に、粒子形状の計測結果の例を示す。本画像より、粒径ならびに粒子形状の評価を行う上で最も重要な指標の一つである円形度⁽⁸⁾を求めた。

粒径は、粒子の二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。

$$\phi = \sqrt{4\pi A}/C \quad \dots\dots\dots (1)$$

周囲長 C は、後述する方法により、粒子のエッジ部分のピクセルを選択し、その個数と単一ピクセルの一片の長さの積とした。この方法で円形度を求める場合には、粒子1個あたりのピクセルの数が少ない場合に、 C の誤差が大きくなり、 ϕ の精度に影響を及ぼすことが予想された。そのため、まず以下に示す簡単な理論検討を行い、粒子1個のピクセルの数が ϕ に与える影響を検討した。

図3は、その検討方法の概念を示したものである。最初に同図(a)のように、 x - y 平面上にメッシュを作成してピクセルを生成させる。なお、ピクセルの位置は、 x 方向については $i(1, 2, 3, \dots)$ により、 y 方向については $j(1, 2, 3, \dots)$ によって表す。今、 x - y 平面上の任意の位置にあるピクセルの重心を中心とする真円を描画する。次に、真円の中心から各ピクセルの重心までの距離と真円の半径との大小関係を考慮して計算対象の粒子画像を表すピクセルとして選択する。図

Fig. 3 Method of evaluating the effect of number of pixels on measurement accuracy of circularity of a particle

3(a)において、粒子画像を表すピクセルは黒で、それ以外のピクセルは白で示す。粒子の面積 A は、図 3(a)に示される黒色ピクセルの数をカウントすることにより求める。

周囲長 C を求めるための、エッジ部分のピクセル数のカウントは、以下の方法に従った。まず、 j が同一の x 方向のピクセル列について、白から黒あるいは黒から白の境界にあたるピクセルを選択する。この操作をすべての j について行い、選択されたピクセルの数をカウントする。図 3(b)には、図 3(a)の粒子画像に対してこの操作を行い、選択されたピクセルをハッチングで示した。これと同様に、図 3(c)に示すように、 i が同一の y 方向ピクセル列についても境界のピクセルを選択し、その個数をカウントする。これらのピクセルの個数から、図 3(d)に示される、 x および y 方向における境界ピクセルの選択の操作で重複して描出されたものの個数を除き、エッジ部分のピクセル数とした。

この方法による円形度の計算を、真円の直径を変化させて、すなわち粒子 1 個当たりのピクセル数を変えて行い、 ϕ を粒子 1 個当たりのピクセル数に対してプロットしたものが図 4 である。本図から、粒子 1 個当たりのピクセル数が少ない場合には、円形度の測定結果にばらつきが見られているが、ピクセル数がおおよ

Fig. 4 Effect of number of pixels on measurement accuracy of circularity of a particle

Fig. 5 Sectional view of a burner

そ 100 を越えると円形度のばらつきは小さくなることがわかる。

しかし図 4 は、粒子 1 個当たりのピクセル数が増加するに従い、円形度が理論値である 1 ではなく、0.92 程度に漸近することを示す。これは、上述した方法においては、周囲長 C が実際のものよりもやや長めに算出されるためである。

このように本法では、実際の円形度よりもやや低い値が得られるという今後の検討課題を有しているものの、円形度の計算が容易に行えること、およびピクセル数 100 以上の粒子については、十分な相対比較が可能であることなどを考慮し、ピクセル数が約 100 以上の粒子について本法による円形度の計算を実施した。

なお本計測においては、LDV 計測および SDV 計測いずれの場合にも、シフト周波数は 2 MHz とした。SDV 計測におけるデータ取得のトリガ信号としては、粒子のシャドウ信号を使用した。また、LDV により粒子速度を測定する際には、レーザ光のシャドウの受

光を停止して計測を行った。

3.2 微粉炭燃焼装置 図5に、バーナの断面図を示す。本研究では、微粉炭供給量が8.9 g/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、エジェクタに導かれる。エジェクタでは、スクリーフィード(日清エンジニアリング FCM-030 F)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 $D=6$ 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 0.5 mm 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

で粉砕し、分級したものをを用いた。石炭性状を表1に示す。

3.3 実験方法 実験は、次の手順で行った。まず、所定量の空気およびメタンを供給して、メタンの火炎を形成した。メタンの火炎が安定した後に微粉炭を供給し、計測を開始した。微粉炭、空気およびメタンの供給量は、表2に示す値に設定した。メタンの熱投入量は、微粉炭の熱投入量のおおよそ5分の1である。

燃焼場における計測の比較対象として、微粉炭の供給は行わず火炎を形成させない非燃焼場においてもSDVならびにLDVによる計測を実施した。ただし、この場合には、メタンに代えて同一体積流量の空気を供給した。実験は、 z 軸上でバーナからの距離を変えて行った。各点で取得したデータ数は、SDV計測の場合には数千であり、LDV計測の場合には10万であった。

さらに非燃焼時においては、微粉炭の代わりに質量

Table 1 Coal properties

High heating value ^{*1}	29.1 MJ/kg
Low heating value ^{*1}	28.1 MJ/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

Table 2 Experimental conditions

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

*Based on low heating value

Fig. 6 Mean particle velocity and mean airflow velocity measured by LDV and SDV

Fig. 7 Rms particle velocity and rms airflow velocity measured by LDV and SDV

中位径が約 $2\text{ }\mu\text{m}$ 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〕を供給し, LDV を用いた気流流速の計測も実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 粒子速度および気流流速の測定結果 図6および図7に, LDV ならびに SDV 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 rms 値 u' の z 軸上分布をそれぞれ示す。また両図には, 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。SDV 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た。なお, これらの図を含め以降においては, 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, SDV の測定値は, LDV の測定値とよく一致しており, 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, SDV 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わかる。

図6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, 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。

非燃焼時の気流の u' は, 図7に示されるように, 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, いったんピークを示した後, 減少する。LDV で計測し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, 気流よりも速度の低下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ともに,

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, それを越えると低下し, 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。

4.2 燃焼に伴う粒径および粒子形状の変化

SDV によって測定した粒径から, その個数平均値および rms 値を計算した。それらの z 軸上分布を図8に示す。本図に示されるように, 非燃焼時には, 粒径の平均値および rms 値とも z/D に対する大きな変化は見られない。これに対して燃焼時には, 粒径の平均値, および粒径分布の広がりを表す rms 値とも, 粒径が z/D の増加に伴い大きくなる。これは, Lee ら⁽⁹⁾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。

次に, $z/D=10, 15, 20$ 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。図9は, 粒径を $5\text{ }\mu\text{m}$ 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ものである。エラーバーは, 測定結果のばらつきを標準偏差(rms 値)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

Fig. 8 Change of mean and rms particle size on z axis

Fig. 9 Circularity of particles for each 5 μm particle size class

が $60\text{ }\mu\text{m}$ 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わかる。前出の Lee ら⁽⁹⁾ 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減少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。これらの検討は、石炭性状および燃焼条件を変化させた計測とともに円形度の算出方法についての詳細な評価を必要とするため、現時点では困難であるが、今後の早急な検討が不可欠であると考えられる。

4.3 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 $5\text{ }\mu\text{m}$ 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 10 および図 11 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 10 には LDV によって測定した気流の 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

Fig. 10 Mean and rms particle velocity for each 5 μm particle size class in the case of noncombustion condition

Fig. 11 Mean and rms particle velocity for each 5 μm particle size class in the case of combustion condition

する傾向を示し、その変化傾向は 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 の増加に対する速度の低下が遅くなるためであると考えられる。

5. 結 論

本研究では、実験室規模の微粉炭の燃焼場および非燃焼場を対象に、LDV による粒子速度の計測ならびに、SDV による粒子速度と粒子形状・粒径の同時計測を行った。得られた主な知見は、以下の通りである。

(1) SDV によって測定した粒子速度は、LDV の結果とほぼ一致し、SDV により LDV と同様の測定精度で粒子速度の計測ができることが明らかになった。

(2) 非燃焼時の粒子速度は、粒子の慣性力により、気流とは若干の異なる値を示すものの、その変化傾向は気流と同様である。燃焼時には急激な温度の上昇による気体の膨張により、粒子速度の平均値は非燃焼時に比べ増加する。粒子速度の rms 値は、非燃焼時に比べ低下する。

(3) 微粉炭粒子の粒径は、バーナ端からの距離の増加に伴って、非燃焼時には変化しない。これに対し、燃焼時には粒子が膨潤する影響を受けて、平均径およ

び分布の広がりとも大きくなる。

(4) 燃焼時の円形度は、非燃焼時に比べ低下し、その傾向は z/D の増加に対して、顕著になる。

(5) 非燃焼時の粒子速度は、粒子の慣性力によりその平均値は粒径によって増加するが、rms 値はほとんど変化しない。また燃焼時においては、粒子速度の平均値および rms 値とも粒径に対して変化しない。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、豊橋技術科学大学学部生(当時)中村友繁氏のご協力を得た。ここに付記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) Schnell, U. and Ber. Bunsenges, *Phys. Chem.*, **97** (1993), 1582-1589.
- (2) Jensen, P. A., Ereaud, P. R., Clausen, S. and Rathmann, O., *J. Inst. Energy*, **67** (1994), 37-46.
- (3) レーザ計測ハンドブック編集委員会, レーザ計測ハンドブック, 丸善 (1993), 159-181.
- (4) Black, D. L., McQuay, M. Q. and Bonin, M. P., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **22** (1996), 267-306.
- (5) Hardalupas, Y., Hishida, K., Maeda, M., Morikita, H., Taylor, A. M. K. P. and Whitelaw, J. H., *Appl. Opt.*, **33** (1994), 8417-8426.
- (6) Maeda, M., Morikita, H., Prassas, I., Taylor, A. M. K. P. and Whitelaw, J. H., *HTD-Vol. 321/FED-Vol. 233*, (1995), 351-360.
- (7) Maeda, M., Morikita, H., Prassas, I., Taylor, A. M. K. P. and Whitelaw, J. H., *Part. Part. Syst. Charact.*, **14** (1997), 79-87.
- (8) 粉体工学会編, 粉体工学便覧-第2編-, 日刊工業新聞社 (1998), 36-37.
- (9) Lee, C. W., Scaroni, A. W. and Jenkins, R. G., *Fuel*, **70** (1991), 957-965.