光学計測による乱流微粉炭燃焼火炎の詳細構造の観察*

(第2報、燃焼反応領域と微粉炭粒子存在領域の瞬時二次元同時計測)

黄 承 敏^{*1}, 黒 瀬 良 一^{*1}, 赤 松 史 光^{*2}
辻 博 文^{*1}, 牧 野 尚 夫^{*1}, 香 月 正 司^{*2}

Observation of the Detailed Structure of Turbulent Pulverized Coal Flame by Optical Measurement

(2nd Report, Instantaneous 2D-Measurement of the Combustion Reaction Zone and the Pulverized Coal Particles)

Seung-min HWANG^{*3}, Ryoichi KUROSE, Fumiteru AKAMATSU,
Hirofumi TSUJI, Hisao MAKINO and Masashi KATSUKI

^{*3} Energy Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI),
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 240-0196 Japan

In this work, we targeted combustion reaction zone of the primary air in the actual pulverized coal burners, and the burner was fabricated as open type in order to apply various optical measurement techniques. In the second report, simultaneous measurement of OH-PLIF and Mie-scattering image of pulverized coal particles was performed, and the spatial relation between combustion reaction zone and pulverized coal particle zone was examined. It was found that, in the upstream region, combustion reaction occurs only in the periphery of the clusters where high-temperature burnt gas of the methane pilot flame is entrained and oxygen supply is sufficient, and that, in the downstream region, however, combustion reaction can be seen also inside of clusters of pulverized coal particles. This is because, in the downstream region, the devolatilization process of the coal particles proceeds accompanied by temperature rise of the particles and mixing process between the volatile matter and circumference air is prompted. From these results, it can be said that the present diagnostics techniques are quite effective for evaluating the pulverized coal flames.

Key Words: Pulverized Coal Combustion, Simultaneous Measurement, OH-PLIF, Mie Scattering, Devolatilization

1. 結 論

石炭は他の化石燃料に比べて埋蔵量が豊富で、産地の偏在がなく供給安定性も高いため、最も重要なエネルギー源の一つであり、その利用技術としては、石炭を平均粒径 40 μm 程度の微粒子に粉砕するとともに、空気搬送してバーナで燃焼させる微粉炭燃焼方式が最も一般的に採用されている^{(1)~(3)}。

著者らは、前報において⁽⁴⁾、光学系の調整が容易に行えることや燃焼装置の操作が簡便にできることなどを考慮し、実験室規模のコンパクトかつ安定した乱流微粉炭火炎を形成可能な小型モデルバーナを作製し、同微粉炭バーナに、シャドウドップラ流速計(SDPA)、2色温度計、および局所火炎発光集光光学系

(MICRO)を適用することによって、乱流微粉炭火炎内の微粉炭粒子挙動や火炎構造について時間平均的な評価を行った。

本報では、平面レーザ誘起蛍光(Planar Laser-Induced Fluorescence: PLIF)^{(5)~(9)}を上記の小型モデル微粉炭バーナに適用し、OHラジカルの瞬時二次元分布の計測を行うとともに、レーザシート法により微粉炭粒子の断面画像との同時計測を行い、燃焼反応領域と微粉炭粒子存在領域との位置関係を明らかにすることにより、乱流微粉炭火炎の詳細構造についての考察を行った結果について報告する。さらに、火炎構造について、その瞬間構造を詳細に考察するために、火炎中心軸上におけるOH-LIF画像の強度分布と微粉炭粒子断面像の強度分布に対して統計解析を実施した。

2. 実験装置および方法

2・1 微粉炭燃焼装置

用いた微粉炭燃焼装置は、第1報と同一である。バーナは、種々の光学的計測を

* 原稿受付 2004年11月12日。

^{*1} 正員, (財)電力中央研究所エネルギー技術研究所(〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1)。

^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。

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

Fig.1 Configuration of pulverized coal burner and supply system

たやすくするために、大気開放式とした。本研究で用いた乱流微粉炭燃焼バーナの供給系を含めた全体の構成を図1に示す。バーナは内径6 mmの主流円管とその周囲の環状スリット流路(幅0.5 mm)を有する二重管構造となっている。燃焼用主流空気は、コンプレッサから供給され、マスフローコントローラで流量を制御された後、微粉炭用インジェクタに導かれる。インジェクタでは、スクリーフフィーダによって定量供給される微粉炭が空気に吸引・混合され、バーナ部へ導かれた後、主流円管から微粉炭粒子・空気の固気二相流が鉛直上向きに噴出される。

本研究においては、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、微粉炭を供給する主流円管の外側に設けた幅0.5 mmの環状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、排気ファンによって大気中に放出される。

使用した石炭はニューランズ炭(豪州炭)であり、実発電所で用いられているものと同一の粒径分布を有する。石炭性状を表1に示す。

2・2 実験方法および条件 実験に際しては、最初に、主流管に空気のみを、周囲の環状スリットにメタンを供給して、ガス火炎を形成し、メタンのパイロット火炎が安定した後に微粉炭の供給を開始し、微粉炭供給量を所定の8.92 g/min(供給当量比 $\phi=6.09$)となった後に、計測を行った。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。本実験で対象としている火炎では、燃料投入量に対する理論空気量(9.49 kg/kg)と石炭搬送用空気量から供給当量比を求めると6.09と非常に高い値となっている。し

Table 1 Properties of coal

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}	1.5
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
Air flow rate	1.80×10^{-4} m ³ /s
CH ₄ flow rate	2.33×10^{-5} m ³ /s
Thermal input of coal [*]	4.19 kW
Thermal input of CH ₄ [*]	0.83 kW
Bulk equivalence ratio	6.09
Reynolds number	2544

^{*} Based on low heating value

かしながら、本火炎は大気開放火炎であり、燃料である石炭およびメタンと石炭搬送用空気との燃焼だけでなく、周囲空気の誘引による燃焼も生じているため、上述の石炭搬送用空気量に基づいた空気比は重要でなく、石炭搬送用空気量を決定する際には、微粉炭が搬送用空気配管内に沈降しない程度の流速を持ち、かつ微粉炭と空気の供給量の比が、実微粉炭バーナの一次空気管内と同程度になるようにした。また、環状スリット流路から保炎用に供給しているメタンの供給量は、安定な微粉炭火炎が形成できる最低量とした。計測の際は、バーナ出口断面の中心を原点とし、火炎下流方向に z 軸を、半径方向に r 軸をとった。

2・3 測定光学系の概要 本実験では、平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)を乱流微粉炭燃焼場に適用して、OHラジカルの瞬時二次元計測を行い、揮発分の燃焼形態を詳細に検討するとともに、同時にレーザシート法により微粉炭粒子の断面像の計測を行い、燃焼反応領域と微粉炭粒子存在領域との位置関係について考察を試みた。図2に、本実験で用いた測定光学系の詳細を示す。

レーザシート光の光源としては、Nd:YAGパルス

Fig. 4 Mie scattering images of pulverized coal particles

3・2 OH-LIF 画像と微粉炭粒子断面像の同時撮影
多環芳香族炭化水素 (PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) は、主に炭化水素燃料や石油や石炭などの化石燃料の不完全燃焼や還元雰囲気下での熱分解により発生する。また、この PAH はさまざまな分子構造をもつため、広い波長範囲で吸収帯および発光帯をもち、また、火炎中に多量に存在するために、LIF 法を燃焼場に適用する場合には、PAH が励起されることを考慮に入れる必要がある⁽¹²⁾。したがって、予備実験として、入射光の波長を徐々に変化させながら蛍

Fig. 5 Difference of LIF image by changing the wavelength of laser irradiation

光画像の計測を行い、PAH の励起の影響について検討を行った。図 5 は、本実験で用いた OH-LIF 強度の励起波長である 285.586 nm で撮影した蛍光画像と、励起波長から少し外れた励起波長である 285.600 nm での蛍光画像を示したものである。撮像領域は 30×30 mm であり、半径方向位置 $r = -15 \sim 15$ mm、高さ方向位置 $z = 45 \sim 75$ mm である。この結果から、本実験で用いた励起波長である 285.586 nm では、PAH の励起による蛍光の影響は、ほぼないと考えられる。

次に、OH-LIF 画像と微粉炭粒子断面像の同時測定を行い、燃焼反応領域と微粉炭粒子存在領域との位置関係を調べた結果を図 6 に示す。得られた両画像は、1 パルスのレーザにより可視化されたものである。また、両画像の中心横断面 ($z = 30$ mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm) の輝度分布を図 7 に示す。

微粉炭断面像と OH-LIF 画像を比較してみると、火炎の上流部では、微粉炭粒子の存在領域の周辺部において、OH-LIF 強度が高く、下流部に行くにつれて、微粉炭粒子が存在している領域で OH-LIF 強度が高くなっていることがわかる。この結果から、バーナポート近傍の上流域においては、メタン火炎による燃焼反応領域が噴流の組織構造によって巻き込まれ、酸素の供給がよい微粉炭粒子の数密度が高い領域の周辺部のみで燃焼反応が起っており、火炎の下流に行くに

Fig. 6 Simultaneous images of Mie scattering of pulverized coal particles and OH-PLIF

従い、微粉炭粒子の温度が上昇し、揮発分の放出が進行するとともに、周囲空気との混合が促進され、微粉炭粒子の存在領域においても燃焼反応が見られるようになることがわかる。

これは、Chiu ら⁽¹³⁾が提唱した液体燃料の噴霧燃焼における群燃焼(Group combustion)に当てはめると、火炎上流部では外部群燃焼に相当する燃焼形態、火炎の下流部では内部群燃焼に相当する燃焼形態となると考えられる。

3.3 統計解析による燃焼形態の検討 画像の定

Fig. 7 Distribution of brightness intensity of Mie scattering image of pulverized coal particles and OH-PLIF on the central horizontal line

性的な観察のみでは、微粉炭燃焼の定量的な評価はできないために、図6に示したOH-LIF画像と微粉炭粒子断面像の同時測定結果における両画像の中心軸上の輝度分布(図8参照)に対して、統計解析を行った。解析においてFFT処理の際に用いた総データ数は、256(2⁸)個であり、基本波数は50 L/mに相当する。また、解析を行った領域の総データ数を256個としたため、画像中での高さ方向の長さに換算すると20 mmとなる。

画像信号 $f_i(t)$ の複素スペクトルを $F_i(f)$ とすると、パワースペクトル $W_i(f)$ 、クロススペクトル $X_{ij}(f)$ は次式によって求められる。

$$W_i(f) = F_i(f) \cdot \overline{F_i(f)} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$X_{ij}(f) = F_i(f) \cdot \overline{F_j(f)} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $\overline{F_i(f)}$ は $F_i(f)$ の共役複素スペクトルであ

Fig. 8 Distribution of brightness intensity of Mie scattering image of pulverized coal particles and OH-PLIF on the central axis

Fig. 9 Auto-correlation coefficient of Mie scattering intensity of pulverized coal particles

る。なお、添字 i, j は、ミー散乱光と OH-LIF の強度値に置き換わる。自己相関、相互相関はそれぞれ、パワースペクトル、クロススペクトルの逆フーリエ変換として求められる。

図9にミー散乱光強度分布の自己相関係数 $R_{Ms}(\tau)$ を示す。ここで、横軸 τ はずれ距離である。自己相関係数のすそ野の広がり(ゼロクロス値の幅)は、微粉炭粒子の濃度むら(粒子群)のスケールに関係すると考えられる。自己相関係数の形状の変化を見ると、下流に行くにつれて形状が先鋭的になっている。例えば、上流の $z=15\sim45$ mm から下流の $z=165\sim195$ mm にかけて、ゼロクロス値の幅であるずれ距離はおよそ 9.68 mm から 5.94 mm としだいに狭くなっていることから、微粉炭粒子の燃焼が進行するに従い、粒子群のスケールが減少していることがわかる。

図10にミー散乱光と OH-LIF の強度の相互相関係数 $S_{MSOH}(\tau)$ を示す。ここで、横軸 τ はミー散乱光に対する OH-LIF のずれ距離である。火炎の上流域での S_{MSOH} 形状($\tau=0$ mm は深くくぼみをもつが、微粉炭粒子の揮発と燃焼が進むにつれて正のピークに変わっている。これらのことから、燃焼が進行するにつれ、微粉炭粒子群の周囲に存在していた燃焼反応領域が、微粉炭粒子群内部にも見られるようになることが確認できる。

近年、燃焼の数値シミュレーションも Large Eddy Simulation (LES) をベースにしたものに移行している。LES においては、その精度検証のために、火炎の時間平均構造のみばかりでなく、火炎の瞬間構造に関するデータが必要不可欠となる。本研究で得られた計測結果は、微粉炭燃焼の詳細構造の解明のためのみばかりでなく、微粉炭燃焼の数値シミュレーションの精度評価のためのデータベースとしても非常に有効であると考えられる。

Fig. 10 Cross-correlation coefficient between Mie scattering intensity of pulverized coal particles and OH-LIF intensity

4. 結 論

平面レーザ誘起蛍光(Planar Laser-Induced Fluorescence; PUIF)をモデル微粉炭バーナに適用し, OH ラジカルの瞬時二次元計測を行うとともに, レーザシート法により微粉炭粒子の断面像との同時計測を行い, 燃焼反応領域と微粉炭粒子存在領域との位置関係について考察を行った。さらに, 火炎の瞬間構造を詳細に考察するために, OH-LIF 画像の強度分布と微粉炭粒子断面像の強度分布を用いて統計解析を実施した結果, 以下の知見を得た。

(1) 本手法により, 燃焼反応場を乱すことなく乱流微粉炭火炎内における燃焼反応領域と微粉炭粒子存在領域との位置関係を調べることができる。

(2) バーナポート近傍の上流域においては, メタンの燃焼反応領域が噴流の組織構造によって巻き込まれ, 微粉炭粒子の数密度が高い領域の周辺部の酸素の供給がよい部分でのみ燃焼反応が起こる。しかし, 火炎の下流に行くに従い, 微粉炭粒子の温度が上昇し, 揮発分の放出が進行するとともに周囲空気との混合が促進され, 微粉炭粒子の存在領域においても燃焼反応が見られるようになる。

(3) 本研究で得られた火炎の瞬間構造に関する測定データは, 微粉炭燃焼の詳細な構造の解明のためのみばかりでなく, LES をベースとした微粉炭燃焼の数値シミュレーションの精度評価のためのデータベースとしても非常に有効であると考えられる。

本研究を実施するにあたり, 三菱重工業出口祥啓氏, 電力中央研究所白井裕三, 池田道隆両氏から貴重なご助言とご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 辻博文・黒瀬良一・牧野尚夫, 機論, 68-666, B (2002), 569-602.
- (2) Hwang, S. M., Kurose, R., Oomagari, K., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H. and Katsuki, M., *Proceeding of the 4th Asia-Pacific Conference on Combustion, ASPACC 2003*, (2003), 414-417.
- (3) Hwang, S. M., Kurose, R., Oomagari, K., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H. and Katsuki, M., *Proceeding of the International Conference on Power Engineering-03 (ICOPE-03)*, 2 (2003), 393-398.
- (4) 黄承敏・黒瀬良一・赤松史光・辻博文・牧野尚夫・香月正司, 光学計測による乱流微粉炭燃焼火炎の詳細構造の観察 (第1報, 微粉炭粒子の挙動と火炎構造の時間平均的な計測), 機論, 71-710, B (2005), 2560-2567.
- (5) 出口祥啓・野田松平・村田正義・曾田正治・稲田満, 三菱重工技報, 32-3, (1995).
- (6) Deguchi, Y. and Iwasaki, S., *Proceeding of the 1st Asia-Pacific Conference on Combustion*, (1997), 22-25.
- (7) 出口祥啓, 燃焼研究, 114, (1998), 1-10.
- (8) 武野計二・出口祥啓・徳田君代, 燃焼の科学と技術, 5 (1998), 169-184.
- (9) 辻博文・宮崎哲夫, 電力中央研究所報告書 W 97007, (1998).
- (10) 日野幹夫, スペクトル解析, (1993), 朝倉書店.
- (11) 赤松史光, 大阪大学博士論文, (1995).
- (12) 出口祥啓, 豊橋技術科学大学博士論文, (1990).
- (13) Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., *Proc. Combust Inst*, 19 (1982), 971-980.