TDP モデルを用いた微粉炭燃焼場の数値解析*

(第2報, 100 kg-coal/h 低 NO_x スワールバーナへの適用)

橋本 望^{*1}, 黄 承 敏^{*2}, 黒瀬 良一^{*3}
辻 博文^{*1}, 白井 裕三^{*4}

A Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion Field Using a Tabulated-Devolatilization-Process Model (TDP Model)

(2nd Report, Application to a 100 kg-coal/h Low NO_x Swirl Burner)

Nozomu HASHIMOTO^{*5}, Seung-Min HWANG, Ryoichi KUROSE,
Hirofumi TSUJI and Hiromi SHIRAI

^{*5} Central Research Institute of Electric Power Industry,
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 240-0196 Japan

A numerical simulation of a pulverized coal combustion field formed by an industrial low-NO_x burner in a 100 kg-coal/h test furnace is performed employing a tabulated-devolatilization-process model (TDP model), and its validity for a strong swirling flow field is investigated in detail. The predicted characteristics of the pulverized coal combustion field obtained from the simulation employing the TDP model are compared with those employing the conventional devolatilization model and the experiments. The results show that drastic differences appear between the gas flow pattern and coal particle behavior in the furnace for the TDP model and those for the conventional model. In particular, the recirculation flow behavior is strongly affected by the difference in the coal devolatilization model because of the difference in the volatile matter evolution rate. The comparisons with the experiments show that the TDP model is superior to the conventional model for predicting the pulverized coal combustion field in a swirling flow with recirculation.

Key Words: Pulverized Coal Combustion, Numerical Simulation, Devolatilization, Particle Heating Rate, Solid Combustion, Multi-Phase Flow, Turbulent Combustion, Solid Fuel

1. 結 言

近年, 汎用熱流体解析ソフトウェアによる数値シミュレーション技術の発展は目覚しく, 様々な工業分野において, プロセスや機器の設計や現象解明への利用が進みつつある. 微粉炭火力の分野においても, 数値シミュレーションによる実験炉や実炉を対象とした解析が行われている⁽¹⁾⁽¹¹⁾. しかし, 微粉炭燃焼の数値シミュレーションで用いられてきた各種モデルについては, 計算負荷を低減するため, 大幅に簡素化されたモデルが使用されているのが実状である⁽¹⁾⁽¹¹⁾. そのため, 火炉内のおおまかな傾向は一致するものの, バーナ近傍における火炎形状が実験で観察されるものと大きく

異なるといったことが生じる. この相違は, 数値シミュレーションによって, バーナの操作条件や炭種等の影響評価を行う上で, また, バーナ近傍におけるスラッシングや硫化腐食等の現象を予測する上で大きな問題になると考えられる. そのため, バーナ近傍における火炎形状再現性の高精度化が求められている. このようなバーナ近傍の火炎形状の再現性を高精度化するためには, 微粉炭粒子中水分の蒸発モデル, 揮発分放出モデル, 揮発分燃焼モデル, チャー(固定炭素)燃焼モデル, および乱流モデル等を高度化する必要がある. これらの中でも, 揮発分放出モデルはバーナ近傍でのガス膨張効果に大きく影響を与えるため, 特に重要であると考えられる.

そこで, 著者らは, 個々の粒子の昇温速度に応じた揮発分の放出量・速度を考慮できる新しい揮発分放出モデル, Tabulated-Devolatilization-Process model (TDP モデル) を開発し, 微粉炭燃焼場を対象として数値シ

* 原稿受付 2009年11月13日.

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

^{*2} Hoseo University(1463-10 Seocho 3-dong, Seocho-gu, Seoul, 137-867, Korea).

^{*3} 正員, 京都大学工学部(〒606-8501 京都市左京区吉田本町).

^{*4} (財)電力中央研究所.

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

ミュレーションを行い、モデルの有効性を検討した。第1報⁽¹²⁾では、小型微粉炭ジェットバーナ（微粉炭供給量約 0.5 kg/h）の旋回の無い比較的単純な流れ場における微粉炭燃焼場を対象とした数値シミュレーションを行い、TDP モデルの有効性を明らかにした。しかし、大型の微粉炭燃焼ボイラなどでは、旋回流による保炎機構を用いたスワールバーナが使われており、非常に複雑な流れ場において微粉炭の燃焼反応が進行する。そのため、TDP モデルの大型の微粉炭燃焼ボイラへの有用性を確認するためには、旋回流による保炎機構を用いたスワールバーナによって形成される微粉炭燃焼場を対象とした TDP モデルの精度検証が必要である。そこで、本第2報では、旋回流による保炎機構を用いたスワールバーナを具備する石炭燃焼試験炉（微粉炭供給量約 100 kg/h）内の微粉炭燃焼場を対象として、TDP モデルを用いた微粉炭燃焼数値シミュレーションの精度検証を行った。TDP モデルおよび従来モデルを用いたシミュレーション結果と、Laser Doppler Velocimeter (LDV) を用いたシステムにより計測した炉内の粒子速度分布との比較を行った。

2. 記 号

A_v	: (2)式の頻度因子 [1/s]
$D_{p,i}$	: 初期粒子直径 [μm]
E_v	: (2)式の活性化エネルギー [J/mol]
m_p	: 微粉炭粒子の質量 [kg]
M_{vola}	: 粒子中の揮発分の割合 [kg/kg-coal]
M_{vola}^*	: 石炭中揮発分の工業分析値 [kg/kg-coal]
Q	: Q ファクタ
R	: 気体定数 [J/(mol K)]
T_p	: 粒子温度 [K]
V	: 微粉炭粒子から放出された揮発分質量 [kg]

3. Tabulated-Devolatilization-Process (TDP)モデル

微粉炭燃焼場の数値シミュレーションでは、以下のアレニウス型の式⁽¹³⁾によって時々刻々の揮発分放出速度を求める手法が広く用いられている。

$$\frac{dV}{dt} = K_v (M_{vola} m_p - V) \quad (1)$$

$$K_v = A_v \exp\left(-\frac{E_v}{RT_p}\right) \quad (2)$$

従来モデルでは、上式の M_{vola} , A_v および E_v はそれぞれ単一の値しか選ぶことができない。また、従来モデルにおいて、 M_{vola} は Q を使用して以下の式で与えられる。

$$M_{vola} = Q M_{vola}^* \quad (3)$$

上式の Q は、通常 1.2~1.5 程度の固定値として扱われる。

一方、TDP モデルでは、事前に粒子の温度履歴と M_{vola} , A_v および E_v の値が登録されたデータベースを作成しておき、個々の微粉炭粒子の昇温速度に応じた M_{vola} , A_v および E_v の値を設定する。

TDP モデルおよび従来モデルの計算フローを図1に示す。TDP モデルでは、事前に粒子の温度履歴と M_{vola} , A_v および E_v の値が登録されたデータベースを作成しておく。このデータベースの作成には、Drop tube furnace (DTF) や Wire grid (WG) などを用いた実験結果を使う方法や、熱分解シミュレーションソフトの計算結果を使う方法などが考えられる。本研究では、FLASHCHAIN モデル⁽¹⁴⁾を用いた熱分解シミュレーションソフト PC Coal Lab⁽¹⁵⁾によりデータベースを作成した。PC Coal Lab は DTF もしくは WG を用いた実験をシミュレーションできるソフトであり、粒子昇温速度が 1×10^3 K/s よりも大きい条件では DTF ケースで、 1×10^3 K/s 以下の条件では WG ケースでシミュレーションを実施した。DTF ケースの場合は壁面温度および石炭粒子径、WG ケースの場合は直接昇温速度を変化させることにより、粒子昇温速度を様々に変化させてデータベースを作成した。TDP モデルでは個々の粒子の昇温速度に応じて M_{vola} , A_v および E_v の値を決定する。しかし、粒子の昇温速度は計算結果から得られるものであり、事前には得られない情報である。そのため、以下のような手順で計算を行う。

① まず初期条件として全ての粒子に適当な M_{vola} , A_v および E_v の値を与える。

② 設定された M_{vola} , A_v および E_v の値を使用して1イタレーション（数値計算の解が収束するまで行う繰り返し計算のうちの1回分）の計算を行う。

③ ②の結果から個々の粒子の温度履歴を調べ、揮発分放出データベースに登録されている温度履歴と照合する。

Fig. 1 Calculation flowcharts for the conventional model and the TDP model

④ 計算結果と一番近い温度履歴に対応する M_{vola} , A_v および E_v の値を次のイタレーションの計算に使用する。

②～④を、計算結果が収束するまで繰り返して行う。

粒子温度履歴の照合作業の概念図を図2に示す。破線は揮発分放出データベースに登録されている温度履歴を、実線は前回のイタレーションの結果から得られた粒子の温度履歴を、それぞれ示している。揮発分放出データベースに登録されている温度履歴の内、前回イタレーションの結果から得られた粒子の温度履歴に最も近いものを検索し、その温度履歴に対応する M_{vola} , A_v および E_v の値を次回イタレーションの計算で使用する。

従来モデルにおける Q , A_v および E_v の値はそれぞれ、1.2, 2021 1/s, 3.11×10^4 J/mol⁽¹⁶⁾を使用した。

揮発分放出に関わる部分以外のモデルについては、著者らが過去に行った微粉炭燃焼数値シミュレーション⁽¹⁾と同じモデルを使用して計算を実施した。モデル詳細については、文献⁽¹⁾を参照されたい。

4. 計算対象および計算条件

本研究で計算対象としたのは、当所が所有する、100 kg-coal/h の単一バーナを具備する石炭燃焼試験炉内の微粉炭燃焼場である。バーナには超低 NO_x バーナである CI- α バーナ⁽²⁾⁽⁵⁾⁽¹⁷⁾を採用した。石炭燃焼試験炉の概略を図3に示す。石炭燃焼試験炉は長さ 8 m, 内径 0.85

m の横置円筒型であり、排ガス性状と燃焼特性が発電用の大型の微粉炭燃焼ボイラと相似になるように設計されている。燃焼用空気は、バーナと二段燃焼用空気注入ポートから炉内へと供給される。二段燃焼用空気注入ポートは、バーナからの軸方向距離 $z = 3.0$ m の位置に設置されている。CI- α バーナは三重管構造を有しており、燃焼用空気は、一、二、三次空気に分割されてからバーナに供給される。微粉炭は、一次空気口から一次空気と共に旋回のない状態で炉内へ搬送される。二、三次空気は一次空気管の外周部から注入され、バーナ内に設置された各 16 枚の旋回翼により旋回を与えられる。なお、これら燃焼試験装置の詳細については別報⁽¹⁷⁾を参照されたい。実験で使用した石炭はニューランズ炭(豪州炭)であり、中位径(質量基準) 40 μ m 程度に粉碎したものをを用いた。使用したニューランズ炭の性状を表1に示す。

図4に数値シミュレーションに使用した計算領域を

Fig. 2 Schematic diagram of extraction process (step ③ in Fig. 1)

示す。バーナ先端部を基準 ($Z=0$) として炉内の形状を可能な限り忠実に再現した。計算負荷を小さくするため、炉の中心軸を通る YZ 平面で縦に半分にカットした形のハーフモデルとし、断面には周期境界条件を設定した。全体の流体セル数は約 140,000 個で、複雑な形状となるバーナ部のメッシュを特に細かく作成した。

本計算の燃焼条件は、実験⁽¹⁸⁾と同じになるように設定した。バーナ一次空気の温度および供給量を 353 K および $165 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (流速は一次空気管出口で 16.0 m/s) とした。二次、三次、および二段燃焼用空気の供給温

度を 623 K、供給量をそれぞれ、64, 387, $264 \text{ Nm}^3/\text{h}$ とした。微粉炭粒子の初期温度および供給速度を一次空気のそれらと同じ値 (353 K および 16.0 m/s) に設定した。各燃焼空気は流速が高く、乱流条件で供給される。燃焼炉側面の境界には、外気の温度を 308 K と仮定した場合の熱抵抗 ($= 0.04 \text{ [(m}^2 \text{ s K)/J]}$) 条件を課した。供給する微粉炭は、5, 20, 40, 60, 80, および $100 \mu\text{m}$ の粒径をもつ粒子から構成されると仮定した。各粒径をもつ粒子の重量分率、および実際の計算に用いた代表粒子の数を表 2 に示す。合計で 4,800 個の代表粒子を投入して計算を行った。

Fig. 3 Pulverized coal combustion test furnace

Fig. 4 Computational domain

Table 1 Fuel properties

Coal	Newlands
Proximate analysis [wt%]	
Moisture ^{*1}	(3.4)
Volatile matter ^{*2}	29.19
Fixed carbon ^{*2}	54.76
Ash ^{*2}	16.05
Fuel ratio [-]	1.88
Ultimate analysis ^{*2} [wt%]	
C	71.70
H	4.33
N	1.43
O	6.30
Combustible sulfur	0.19
Lower heating value ^{*2} [MJ/kg]	28.13

*1: As received basis *2: Dry basis

5. 粒子速度計測

本研究では、TDP モデルの微粉炭燃焼炉内の計算精度を検証するため、石炭燃焼炉内の粒子速度計測を行った。図5に本研究で用いた粒子速度計測システムの概要を示す。光源は、マルチラインの Ar^+ イオンレーザ (NEC 社製, GLG3282) を用いた。軸方向平均粒子速度の炉内分布を得るため、炉軸方向 $Z = 0.26, 0.61, 0.99$ および 1.39 m の位置に設けられた観測窓を利用し、炉の X 方向にトラバースして計測を行った。トラバースが容易に行えるよう、後方散乱型 LDV プローブを用いた。火炎からの光学機器への熱の影響を極力排除するため、当所で開発した冷却プローブを用いて計測を行った。粒子速度計測の詳細については、別報⁽¹⁸⁾を参照されたい。

6. 結果および考察

6・1 粒子挙動 図6に、バーナからの軸方向距離 $Z = 0.26, 0.61, 0.99$ および 1.39 m における軸方向

Table 2 Initial diameter, mass fraction and number of representative coal particles

$D_{pi} [\mu\text{m}]$	$MF_p [-]$	$N_p [-]$
5	6.76	320
20	26.81	1,280
40	24.00	1,120
60	16.25	800
80	12.20	640
100	13.98	640

平均粒子速度 U_z の分布を示す。図中の点線は $U_z = 0 \text{ m/s}$ を示す。従来モデルにおいてプロットが無い部分は、代表粒子がほとんど存在しない部分を示す。LDV を用いた粒子速度計測結果と、従来モデルおよび TDP モデルを用いたシミュレーション結果を比較すると、TDP モデルの方が実験値と良く一致していることが分かる。特に、実験において炉中心軸付近の U_z が正の値となる傾向が、従来モデルでは再現されていないのに対し、TDP モデルでは良く再現されている。まず、 $Z = 0.26 \text{ m}$ のグラフに注目すると、炉中心軸上では実験値が正の値であるのに対し、従来モデルでは負の値である。また、 $X \geq 0.12 \text{ m}$ の範囲では、従来モデルでは代表粒子が全く存在しない。これに対し、TDP モデルでは、 $0.05 \text{ m} \leq X \leq 0.12 \text{ m}$ の範囲で実験との差異が大きいものの、 $X \geq 0.12 \text{ m}$ の範囲で実験値と非常に良く一致し、炉中心軸上では U_z が正の値となる傾向が再現されている。次に、 $Z = 0.61 \text{ m}$ のグラフに注目すると、 $0.27 \text{ m} \geq X \geq 0.15 \text{ m}$ の範囲では従来モデルと TDP モデルの差異がほとんど見られず、どちらのモデルも実験値とは異なり、 U_z が負の値となっている。しかし、 $Z \leq 0.12 \text{ m}$ の範囲では、従来モデルの U_z が負の値のままであるのに対し、TDP モデルでは実験と同様に U_z が正の値となっていることがわかる。 $Z = 0.99$ および 1.39 m のグラフに注目すると、 $X \leq 0.2 \text{ m}$ の範囲において、従来モデルと実験の U_z の差異が大きい。一方、TDP モデルでは、全域にわた

Fig. 5 Schematic diagram of particle velocity measurement system

Fig. 6 Radial distributions of mean axial particle velocities

って、実験と良く一致していることがわかる。このように、従来モデルと TDP モデルの U_z の分布が大きく異なるのは、流れ場の違いに起因する。なお、周方向の粒子速度に関しては、両モデル間で特筆すべき違いが見られなかったため、本論文では省略する。

図7に、両モデルにおけるガス流速ベクトル分布図を示す。従来モデルと TDP モデルでは、ガス流速ベクトルの分布が大きく異なることが分かる。従来モデルでは炉中心軸上のガスがバーナに向かう方向に流れている領域が広く見られ、大きな再循環流がみられる。一方、TDP モデルでは中心軸上のガスはどの位置においても炉出口に向かう方向に流れている。TDP モデルでは、バーナに向かう方向の流れが炉中心軸上を一次空気管から貫通する流れを取り囲むように、炉中心軸から少し離れた位置で見られる。このように、両モデルの炉中心軸上の流れが大きく異なるため、図6の U_z 分布も大きく異なると考えられる。

図8および図9に、両モデルによって計算された炉中心断面における粒子の体積分率および粒子の軌跡を示す。図9の粒子の色は粒子温度を示す。従来モデルでは、バーナから出た1次空気の流れおよび微粉炭粒子が図7で見られた大きな再循環流によるバーナに向

かうガスの流れとぶつかり合い、炉の外側へはじき出されるため、図8で見られるように、バーナから少し離れた下流側では炉中心軸付近に粒子がほとんど存在しない。下流側では炉壁面近傍が最も粒子密度が高くなっていることが分かる。一方、TDP モデルでは、一

Fig. 7 Gas velocity vectors on the cross section at the center of the furnace

Fig. 8 Distributions of particle volume fraction on the cross-section at the center of the furnace

次空気管からの流れが炉出口に向かって貫通しているため、粒子の多くはその流れに乗り、炉中心軸上の粒子密度が高くなっていることが分かる。この傾向は、後述する実験時における火炎の写真の傾向とも一致する。

図10に、実験時の火炎の写真を示す。写真は $Z=0.61$ mの位置に設置された観察窓から、バーナ出口の方へ向かって撮影したものである。実験ではバーナから炉出口方向に向かって輝炎が柱状に真っ直ぐ伸びていることが分かる。実験時の写真で観察される輝炎は、火炎中のすすおよび微粉炭粒子が高温になり、可視光の波長域でのふく射強度が十分に強くなっている部分であると考えられる。炉内に供給される微粉炭粒子の質量基準中位径は約 $40\text{ }\mu\text{m}$ であるが、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 程度の微小な粒子が6.8%程度含まれており、そのような微小な微粉炭粒子は十分な流れ場への追従性を持っていると考えられる。すすは微粉炭粒子から放出された揮発分から生成され、その粒子径は十分に小さく、十分な流れ場への追従性を有すると考えられる。つまり、微粉炭とすすは両方ともガスの流れに追従しやすく、乱流拡散するものと考えられる。そのため、すすがある場所には微小な微粉炭粒子も混在していると考えられる。すなわち、輝炎が存在する場所には、十分な体積分率の高温の微粉炭粒子が存在すると考えられる。従って、実験で観察される輝炎は、数値シミュレーションにおいては、図9中において高温の微粉炭粒子が見られる部分に相当すると考えられる。図8および図9から判

(a) Conventional model

(b) TDP model

Fig. 9 Coal particle trajectories with particle temperature

Fig. 10 Flame photograph obtained during the experiment

断した場合、従来モデルを用いたシミュレーション結果では、炉壁面近くに高温の微粉炭粒子が存在するため、実験で観察される火炎の傾向を模擬できていないことが分かる。一方、TDPモデルを用いたシミュレ

Fig. 11 Distributions of volatile matter evolution rate on the cross section at the center of the furnace

Fig. 12 Probability of selection of each temperature history in the devolatilization database during the extraction process (Fig. 2)

ション結果では、高温の微粉炭粒子がバーナ出口から直下流の炉中心軸付近に柱状に存在し、実験で観察される火炎の傾向が良く捕らえられていることが分かる。以上のように、従来モデルのシミュレーション結果とTDPモデルのシミュレーション結果でガス流速および粒子速度分布が大きく異なるのは、微粉炭粒子からの揮発分放出量および放出速度が異なることに起因する。

6・2 揮発分放出特性 本論文では、個々の固体粒子が揮発分を放出する速度を「粒子からの揮発分放出速度[kg/s]」、多数ある微粉炭粒子から任意の場所の気相に揮発分が放出される速度を「気相への揮発分放出速度[kg/m³/s]」と定義する。図11に、気相への揮発分放出速度の分布を示す。気相への揮発分放出速度のピーク値は、TDPモデルでは従来モデルの2倍程度と

Fig. 13 An example of particle temperature and mass histories in the devolatilization database

なっていることが分かる。これは、本研究で対象とした石炭燃焼炉内における微粉炭粒子の昇温速度が高いためであると考えられる。

図12に、揮発分データベース中の各粒子昇温履歴が、粒子温度履歴照合時(図1③および図2)に選択された回数の分布を示す。横軸は、図13で例示されるように、各粒子温度履歴中の揮発分の放出が活発に行われる部分(図13の例では時刻0~0.07秒の部分)を最小二乗法で直線近似した昇温速度である。各昇温速度が選択された回数割合については、数値計算結果が収束した後、1,000回分のイタレーションの平均値を求めた。図12から、ほとんどの粒子は $10^4 \sim 10^6$ K/s程度の高い速度で昇温していることが分かる。TDPモデルでは、昇温速度が高い場合、粒子からの揮発分放出速度および放出量が、昇温速度が低い場合に比べて大きくなる。そのため、第1報⁽¹²⁾と同様に、バーナ出口近傍におけるTDPモデルの粒子からの揮発分放出速度および放出量が従来モデルよりも大きく、図11における気相への揮発分放出速度のピーク値が大きいものと考えられる。微粉炭粒子から揮発分が多く放出されることは、その燃焼ガスによる膨張効果が大きくなることを意味する。図7で見られたTDPモデルと従来モデルの流れ場の違いは、TDPモデルの方が微粉炭粒子から揮発分が多くかつ速く放出され、その燃焼ガスの膨張効果が大きいことに起因していると考えられる。すなわち、TDPモデルを使用した場合は、1次空気管から投入された微粉炭粒子から放出される揮発分の燃焼による膨張効果が大きく、バーナから炉出口に向かう流れが強いため、従来モデルでは見られた大きな再循環流による炉中心軸上をバーナ側へ向かう流れが、TDPモデルの場合は見られないものと考えられる。

また、図12から、初期粒径が小さいほど、粒子昇温速度の高い温度履歴が選択されていることが分かる。

これは、粒子径が小さいほど粒子の熱容量が小さく、温度が上がりやすいためである。初期粒径 $80 \sim 100 \mu\text{m}$ の大きな粒子は $3 \sim 4 \times 10^4 \text{ K/s}$ 程度の昇温速度が多いのに対し、初期粒径 5 mm の小さな粒子は $1 \sim 2 \times 10^5 \text{ K/s}$ 程度の昇温速度が多く、一部の粒子では $1 \times 10^6 \text{ K/s}$ に達していることが分かる。TDP モデルでは、昇温速度が高いほど、微粉炭粒子からの揮発分の放出量および放出速度が大きいため、本研究で対象とした微粉炭燃焼場では、初期粒径が小さいほど揮発分の放出量および放出速度が高くなる。従来モデルでは、このような、初期粒径に依存した揮発分放出量および放出速度を設定することはできない。

6・3 ガス温度・ O_2 モル分率分布 図14にシミュレーションで得られたガス温度分布と実験時の熱電対温度指示値分布を示す。実験時の壁面温度や微粉炭粒子およびすすからのふく射入熱量を見積もることが困難であるため、熱電対指示値のふく射補正は行っていない。従来モデルを用いたシミュレーション結果では、最高温度を示す領域が壁面近くに形成されているのに対し、TDP モデルを用いたシミュレーション結果では、最高温度を示す領域が炉中心軸付近に形成されている。Z 方向のピーク位置は多少異なるものの、実験時の熱電対温度指示値のピークも炉中心軸付近に見られることから、TDP モデルの方が従来モデルよりも実験結果の傾向をより良く再現していることが分かる。

図15に O_2 モル分率の比較を示す。Z = 1.5 ~ 3.0 m の範囲において、従来モデルを用いたシミュレーション結果では O_2 モル分率の半径方向の勾配が小さく、ど

の半径方向位置においても O_2 モル分率が低い値になっているのに対し、TDP モデルを用いたシミュレーション結果では、炉中心軸付近では O_2 モル分率がほぼ0に近く、炉壁面に向かうに従って O_2 モル分率が増加するという実験結果の傾向を良く再現していることが分かる。

以上の検討結果から、微粉炭粒子からの揮発分放出モデルとして TDP モデルを用いることにより、微粉炭燃焼炉内の火炎および粒子挙動の再現性が向上することが明らかとなった。

一方、図6において、Z = 0.99 および 1.39 m の位置では、実験結果と TDP モデルのシミュレーション結果が良く一致しているのに対し、バーナに近い Z = 0.26 および Z = 0.61 m の位置では、両者の差異が大きい。これは、本研究で採用している RNG k- ϵ モデルを用いた RANS 法の乱流モデリング精度が低いことが主な原因であると考えられる。渡邊らが行った石炭燃焼炉内のコールドフローを対象としたシミュレーションに関する研究⁽¹⁹⁾では、RANS 法を用いたシミュレーションの場合、乱流のミキシング効果が過小に評価され、正方向の軸方向速度も負方向の軸方向速度も過大に現れることが報告されている。図6の Z = 0.26 m の位置におけるグラフについて、X = 0.3 m の位置から炉中心軸に向かう方向に見ていくと、実験と TDP モデルを用いたシミュレーションの両方において、 U_z の値は徐々に増加し、X = 0.1 m 付近の位置で極大値を取った後に減少し、X = 0.075 m 付近の位置で極小値を取った後に炉中心軸上に向かって再び増加するという傾向は一致す

Fig. 14 Distributions of the predicted gas temperature and the value indicated by the thermocouple in the experiment on the cross section at the center of the furnace

Fig. 15 Distributions of the predicted O_2 mole fraction and that measured in the experiment on the cross section at the center of the furnace

る。しかし、 $X=0.1$ m 付近の極大値および $X=0.075$ m 付近の極小値はどちらもシミュレーションの方が過大に現れていることが分かる。これは、前述のように、RANS 法で乱流のミキシング効果が過小評価されているためであると考えられる。

7. 結 言

本研究では、著者らが考案した揮発分放出モデル (TDP モデル) を採用した微粉炭燃焼数値シミュレーションを、大型の微粉炭燃焼ボイラと同様のスワールバーナによって形成される試験炉内の微粉炭燃焼場に適用することにより、その適用性を検証した。本研究により得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 燃焼炉内における微粉炭粒子の昇温速度は、初期粒径が小さいほど高い傾向を示す。TDP モデルは、このような初期粒子径毎の昇温速度に応じた揮発分放出量および放出速度を考慮可能なモデルであり、考慮不可能な従来モデルに比べて、特に初期粒径に広い分布をもつ微粉炭粒子を取り扱う微粉炭燃焼場の数値計算において有効である。

(2) TDP モデルを用いることにより、微粉炭燃焼炉内の火炎および粒子挙動の再現性は、従来モデルを用いた場合よりも向上する。また、燃焼炉内の粒子速度は、バーナから比較的離れた位置においては、実験で計測された粒子速度と定量的に一致する。

(3) TDP モデルと従来モデルでは、バーナ近傍における炉中心軸上の流れが大きく異なる。特に、その相違は、バーナ出口付近に形成され、火炎の着火や保炎に重要な役割を果たす再循環流の特性に顕著である。これは、バーナ出口近傍において、TDP モデルの方が従来モデルよりも粒子から揮発分が多くかつ速く放出され、その燃焼ガスの膨張効果が大きいためであると考えられる。

文 献

- (1) Hashimoto, N., Kurose, R., Tsuji, H., Shirai, H., A numerical analysis of pulverized coal combustion in a multi-burner furnace, *Energy & Fuels*, Vol. 21 (2007), pp. 1950-1958.
- (2) Kurose, R., Makino, H., Suzuki, A., Numerical analysis of pulverized coal combustion characteristics using advanced low-NOx burner, *Fuel*, Vol. 83 (2007), pp. 693-703.
- (3) Kurose, R., Ikeda, M., Makino, H., Combustion characteristics of high ash coal in a pulverized coal combustion, *Fuel*, Vol.80 (2001),pp. 1447-1455.
- (4) Kurose, R., Tsuji, H., Makino, H., Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion characteristics. *Fuel*, Vol.80 (2001), pp.1457-1465.
- (5) Kurose, R., Ikeda, M., Makino, H., Kimoto, M., Miyazaki, T., Pulverized coal combustion characteristic high fuel ratio coals, *Fuel*, Vol.83 (2004),pp. 1177-1785.
- (6) Zhou, L. X., Li, L., Li, R. X., Zhang, J., Simulation of 3-D gas-particle flows and coal combustion in a tangentially fired furnace using a two-fluid-trajectory model, *Powder Technology*, Vol. 125 (2002), pp. 226-233.
- (7) Backreedy, R. I., Jones, J. M., Ma, L., Pourkashanian, M., Williams, A., Arenillas, A., Arias, B., Pis, J. J., Rubiera, F., Prediction of unburned carbon and NOx in a tangentially fired power station using single coals and blends, *Fuel*, Vol. 84 (2005), pp. 2196-2203.
- (8) Bosoga, A., Panoiu, N., Mihaescu, L., Backreedy, R. I., Ma, L., Pourkashanian, M., Williams, A., The combustion of pulverized low grade lignite, *Fuel*, Vol. 85 (2006), pp. 1591-1598.
- (9) Pallares, J., Arauzo, I., Diez, L. I., Numerical prediction of unburned carbon levels in large pulverized coal utility boilers. *Fuel*, Vol. 84 (2005), pp. 2364-2371.
- (10) Backreedy, R. I., Jones, J. M., Pourkashanian, M., Williams, A., Burn-out of pulverized coal and biomass chars, *Fuel*, Vol. 82 (2003), pp. 2097-2105.
- (11) Xu, M., Azevedo, J. L. T., Carvalho, M. G., Modeling of a front wall fired utility boiler for different operating conditions, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 190 (2001), pp. 3581-3590.
- (12) Hashimoto, N., Kurose, R., Shirai, H., A numerical simulation of pulverized coal combustion field using a tabulated-devolatilization-process model (TDP model). (Part 1: Application to a small jet burner), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 76 (2010), pp. 1386-1395.
- (13) Badzioch, S., Hawksley, P.G.W., Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 9 (1970), pp. 521-530.
- (14) Niksa, S., and Kerstein, A. R., FLASHCHAIN theory for rapid coal devolatilization kinetics. 1. Formulation, *Energy & fuels*, Vol. 5 (1991), pp. 647-665.
- (15) PC Coal Lab Version 3.2 User Gide and Tutorial, Niksa Energy Associates, 2004.
- (16) Tominaga, H., Harada, M., Ando T. and Suzuki, Y., The development of pulverized coal combustion simulator (in Japanese), *J. NIRE*, Vol. 6 (1997), pp. 333-343.
- (17) Ikeda, M., Kozai, Y., Makino, H., Emission characteristics of NOx and unburned carbon in fly ash of sub-bituminous coal combustion, *JSME International Journal, Ser. B*, Vol. 45 (2002), pp. 506-511.
- (18) Hashimoto, N., Hwang, S. -M., Tsuji, H., Tanno, K., Shirai, H., Clarification of particle behaviors in a pulverized coal combustion furnace - Development of the particle velocity measurement system using LDV and clarification of influence of combustion reaction on particle behaviors - (in Japanese), CRIEPI report, M08004, 2008.
- (19) Watanabe, H., Kurose, R., Komori, S., Large-eddy simulation of swirling flows in a pulverized coal combustion furnace with a complex burner, *J. Environment Eng.* Vol. 4 (2009), pp. 1-11.