石炭燃焼モデルの実機ボイラでの検証*

山本 研二^{*1}, 谷口 正行^{*1}, 小林 啓信^{*1}
坂田 太郎^{*2}, 工藤 一彦^{*3}Validation of Coal Combustion Model by Using Experimental Data of
Utility BoilersKenji YAMAMOTO^{*4}, Masayuki TANIGUCHI, Hironobu KOBAYASHI,
Taro SAKATA and Kazuhiko KUDO^{**} Hitachi, Ltd., Power & Industrial Systems R & D Laboratory,
832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-0034 Japan

Applicability of a coal combustion model was validated by using experimental data of utility boilers. The coal combustion model had gasification and NO_x reaction submodels and it was developed by using a small drop-tube-furnace (coal feed rate 0.6 kg/h). A turbulence combustion simulation program was developed by introducing the coal combustion model. The simulation program was validated by comparing with twenty three experimental results that contained different plant, load and coal data. The temperature difference between simulated and experimental results was less than 30 degrees C at the exit of the furnace. The characteristic of coal burnout that was decreased with increasing load was predicted. The NO_x concentration difference between simulated and experimental results was less than 15 percent. The coal combustion model was applicable to the utility boilers as same as the drop-tube-furnace.

Key Words: Coal Combustion, Gasification, Numerical Simulation, Pulverized Coal, Utility Boiler, NO_x, Furnace Exit Gas Temperature, Burnout, Furnace

1. 緒 言

微粉炭だきボイラでは、排出 NO_x 濃度の低減が要求されている。さらに、ボイラの NO_x を低減するためには、NO_x 濃度に重度な影響を及ぼす還元雰囲気での燃焼メカニズムについて調べる必要がある。また、燃焼過程を適切にモデル化して、NO_x 濃度やこれに重要な影響を及ぼすガス温度、燃焼率を予測する解析プログラムを開発する必要がある。

従来の微粉炭燃焼解析プログラムでは、燃焼炉内の CO₂, O₂ などの主要なガス濃度分布でさえ予測できるものが少なかった⁽¹⁾⁽²⁾。特に、還元雰囲気での CO, HCN や出口 NO_x 濃度を予測できるプログラムはなかった。還元雰囲気でのおもな固気反応はチャーと CO₂, H₂O の反応であるガス化反応であり、この反応速度は窒素雰囲気中で測定されていた⁽³⁾。この方法で測定した反応速度を用いてもガス組成の予測精度向上に

寄与しなかったため、この反応を省略することが多かった。

山本らは、石炭供給量 0.6 kg/h の層流、予混合燃焼炉で測定した燃焼率の結果から、精度の高いガス化反応モデルを開発した⁽⁴⁾。このモデルは、空気比が 0.4 から 1.5 の範囲で燃焼率を 3% 以下の誤差で予測した。この研究で、酸素が共存する燃焼場で測定したガス化反応速度は、従来の窒素雰囲気中で測定したものよりも高いことがわかった。さらに、実機ボイラの運用条件である空気比 0.8 では、約 10% の石炭がガス化反応するので、実機の解析においてガス化反応は無視できないことがわかった。

また、Taniguchi らは同じ燃焼炉を使用した燃焼試験から得た NO_x 濃度を基に、NO_x 反応モデルを開発した⁽⁵⁾。NO_x 濃度に重要な影響を及ぼす反応は、チャー燃焼域でガス化反応により発生する CH ラジカルによる NO_x の還元反応であることがわかった。Yamamoto らは、これらのガス化と NO_x 反応モデルを乱流燃焼解析プログラムに組み込み、石炭供給量 25 kg/h の小形実験炉で得た測定データと比較することでプログラムの精度を検証した⁽⁶⁾。これにより、このプログラムで主要なガス濃度だけではなく、還元雰囲気中で発生する CO や HCN の濃度も予測可能であるこ

* 原稿受付 2002 年 6 月 10 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所 電力・電機開発研究所(☎ 312-8507 ひたちなか市堀口 832 の 2(素形材本部内))。^{*2} バブコック日立(株)呉事業所(☎ 737-8508 呉市宝町 6-9)。^{*3} 正員、北海道大学大学院工学研究科(☎ 060-8628 札幌市北区 13 条西 8)。

E-mail: kenji-c_yamamoto@pis.hitachi.co.jp

とがわかった。しかし、これらのガス化と NO_x 反応モデルは、電気炉と小形燃焼炉だけで検証されており、微粉炭だきボイラ実機への適用性については調べていない。また、 NO_x や石炭の反応速度の計算には、ガス温度が重要であるが、このモデルのガス温度の予測精度についても調べられていない。

本研究の目的は、山本らが電気炉で開発した燃焼モデルを微粉炭だきボイラの実機の数値解析に適用し、大規模な燃焼装置における NO_x 濃度、ガス温度、燃焼率の予測精度を確認することにある。

2. おもな記号

A_c : 頻度因子	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
C : 固体濃度	kg/kg
D : 拡散速度係数	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
E_c : 活性化エネルギー	J/mol
h : 比エンタルピー	J/kg
k : 乱流エネルギー	m^2/s^2
k_s : 表面反応速度定数	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
k_d : 拡散速度定数	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
M : 分子量	
M_c : 炭素の分子量	
m_p : 1 粒子の質量	kg
n : 粒子の個数密度	m^{-3}
P_j : ガスの分圧	Pa
R : 一般ガス定数 ($=8.31$)	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$
R_j : ガスの反応速度	$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
S_{ext} : 微粉炭粒子の表面積	m^2
S_{char} : 微粉炭粒子の反応速度	$\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{s})$
T : 温度	K
u, v, w : ガス流速	m/s
W_c : 未燃チャーの質量割合	kg/kg
W_a : 灰分の質量割合	kg/kg
Y_j : ガスの質量分率	kg/kg
ρ : ガス密度	kg/m^3
ϵ : 乱流散逸率	m^2/s^3
ϕ : 保存変数	
Γ : 有効粘性係数	kg/ms
μ : 粘性係数	kg/ms
添 字	
j : ガス組成	
m : 境界層	
p : 粒子	
t : 乱流状態	
0 : 原炭の値	
$*$: 原炭の値	

- : 平衡値

3. 数値計算モデル

3.1 支配方程式 本研究では、微粉炭だきボイラの火炉内を三次元直交メッシュに分割し、流動・燃焼・伝熱の方程式を解いた。計算に用いた編微分方程式を式(1)～(3)に示す。 ϕ は保存変数、 Γ_ϕ は有効粘性係数、 S_ϕ は生成項である。運動量と圧力の計算には SIMPLE 法⁽⁷⁾ を用いた。計算したガス組成 Y_j は、 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 H_2 、 CH_4 、 NO 、 XN である。 XN はアンモニアとシアン合計濃度で、おもに還元雰囲気中で生じる N 化合物である。乱流の計算には k - ϵ 乱流モデルを用いた。3.3 節で説明するが、 C_{char} 、 C_{ash} 、 C_{vol} は微粉炭中のチャー、灰、ボラタイルの固体濃度であり、ガスと同様にオイラー座標系で計算した⁽⁶⁾。

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \phi + \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi = \{1, u, v, w, h, Y_j, k, \epsilon, C_{\text{char}}, C_{\text{ash}}, C_{\text{vol}}\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Gamma_\phi = \frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\phi} \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 ガス燃焼モデル ガス燃焼の計算モデルで重要な点は二つある。

(1) 反応時間が十分に長ければ、ガス濃度は平衡濃度に漸近すること

(2) 全体の反応速度は、ガスの反応速度と乱流混合速度により決まること

1 番めについては、還元雰囲気でのガス組成の決定に重要であるが、考慮されている例⁽⁸⁾ は少ない。本計算では、ガスの反応速度は非常に高いと考え⁽⁶⁾、全体の反応速度は乱流混合速度により決まると仮定した。乱流反応速度は Magnussen の渦消散モデル⁽⁹⁾ により計算した。ガス濃度が平衡濃度に漸近していく反応速度を式(4)で計算した。ここで、 τ_t は渦消散モデルで求めた反応の時定数である。

$$R_j = \rho(Y_j - \bar{Y}_j)/\tau_t \quad \dots\dots\dots (4)$$

3.3 石炭燃焼モデル 微粉炭燃焼において石炭粒子の計算にはラグランジェ法が一般的に用いられている⁽¹⁰⁾ が、ラグランジェ法を火炉の燃焼計算に適用する際には、サンプル粒子の個数を多くしないと解が収束しない問題があることがわかった。そこで、本研究では簡略化したオイラーの方法で計算した。石炭をチャー、ボラタイル、灰の 3 成分と考え、これらの濃度の輸送方程式を計算した⁽⁶⁾。

熱分解のモデルには、Kobayashi らによる 2 反応競

合モデル⁽¹¹⁾を用いた。反応速度はレーザを用いた急速熱分解実験から求めた⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

チャーの固気反応速度を山本らのモデル⁽⁴⁾により計算する。このモデルは、壁面温度 900~1400°C、空気比 0.4~1.5 の条件で燃焼率を誤差 3% 以内で予測した。以下に、このモデルを簡単に説明する。チャーは O_2 , CO_2 , H_2O と反応する[式(5)~(7)]。式(5)の反応を酸化反応、式(6), (7)をガス化反応と呼ぶ。反応速度は表面反応速度 k_{sj} と拡散速度 k_{dj} に依存する[式(8)~(10)]。この表面反応速度は細孔内拡散速度と固体表面での真の反応速度を合せた速度を意味する。

反応に有効な石炭の表面積 S_{ext} は式(11)で計算する。 W_c と W_a は、原炭の重量に対するチャーと灰の質量割合である。石炭の初期粒径は原炭の体面積平均径で与えた。粒子径は、熱分解過程では一定で、チャーの燃焼とともに減少すると仮定した。輸送方程式(1)から得られるチャーと灰の質量濃度から表面積を計算する[式(12)]。粒子の個数密度 n は燃焼過程で変化しないと仮定し、式(13), (14)で計算する。

$$S_{char} = \sum_j \frac{P_j S_{ext} n}{\frac{1}{k_{dj}} + \frac{1}{k_{sj}}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$j = O_2, CO_2, H_2O$$

$$k_{sj} = A c_j \exp\left(-\frac{E_{Cj}}{RT_p}\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$k_{dj} = \frac{2M_c D_j}{d_p R T_m} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$S_{ext} = S_{ext}^* \left(\frac{W_c + W_a}{W_{c0} + W_{a0}} \right)^{-1/3} \frac{W_c}{W_{c0}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$= S_{ext}^* \left(\frac{C_{char} + C_{ash}}{C_{char0} + C_{ash0}} \right)^{-1/3} \frac{C_{char}}{C_{char0}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$C_{char0} = C_{ash} W_{c0} / W_{a0} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$n = \rho(C_{char0} + C_{ash}) / m_{p0} \quad \dots\dots\dots (14)$$

3.4 NO_x 反応モデル NO_x 反応モデルは Taniguchi らのモデル⁽⁵⁾を使用した。このモデルで使用した反応経路の概要を図1に示す。図1(a)はN化合物の反応経路を示す。ボラタイル中のN分の反応を Fenimore モデル⁽¹⁴⁾により計算した。加えて、CH ラジカルによる NO_x の還元モデル⁽¹⁵⁾と拡大 Zeldovich 機構⁽¹⁶⁾によるサーマル NO_x モデルを組み込んだ。このモデルは、電気炉において、 NO_x 濃度を $\pm 17\%$ 以下の誤差で予測した。

低 NO_x 燃焼状態における N 化合物の反応経路につ

(a) Nitrogen species

(b) CHI

Fig. 1 Reaction scheme

いて説明する。初めに、熱分解反応によりボラタイル中のN分から経路R1によりXNを生成する。XNはアンモニアとシアン等のN化合物の総称である。XNの酸化反応速度R2は高いので、酸化域でXNはすぐに NO_x に変化する。そのため、XNよりも NO_x のほうがバーナ入口に近い場所で検出される⁽¹⁷⁾。次に、熱分解反応もしくはチャーの固気反応により酸素濃度の低い還元雰囲気形成される。近年、揮発分の少ない石炭であっても低 NO_x 燃焼が可能になっており⁽¹⁸⁾、チャーの固気反応が重要な反応であると考えられる。還元雰囲気でのN化合物のおもな反応は NO_x の還元反応(経路R3, R6)である。使用したモデルの特徴は、R6の反応で重要な炭化水素ラジカルが熱分解過程だけではなく、チャーの酸化、ガス化反応によっても発生すると仮定したところである。図1(b)に炭化水素ラジカルの反応経路を示す。一般に、炭化水素ラジカルは揮発分の熱分解過程で発生すると仮定される⁽¹⁹⁾。しかし、火炎で採取したチャーの中には炭素8モルに対して、約1モルの水素が含まれる⁽⁵⁾。本モデルでは、酸化とガス化反応により、チャーに含まれる水素の一部が炭化水素ラジカルとして放出されると仮定した。このR6の反応経路は、特に、揮発分の少ない石炭で重要である。R6を無視した場合、XN濃度が低くなり、還元雰囲気での NO_x 還元反応(R3)を過小評価する。最後に、完全燃焼域では空気を混合させるので残っているXNはR2により NO_x へ転換する。また、完全燃焼域でチャーが燃焼した場合は、R4により一部 NO_x に変化する。また、同時にチャーによる NO_x 還元反応(R5)も生じるため、 NO_x 濃度が減少する場合もある。

3.5 ふく射計算モデル ふく射によるエネルギー

一の輸送計算には光線追跡法の一つであるDT(Discrete Transfer)法⁽²⁰⁾を用いた。オリジナルのDT法はエネルギーを保存しないので、エネルギーを保存する方法⁽²¹⁾を用いた。壁面の要素に入る光線の本数は36本とした。DT法は、実用的な計算負荷で精度の高い計算ができる。

吸収係数は、ガス分子(CO₂, H₂O)や固体粒子(チャーやフライアッシュ等)の濃度により決まると仮定した。ガスの吸収係数は、光学データベースの一つであるWSGG(Weighted Sum of Gray Gasses)⁽²²⁾により計算した。また、固体粒子によるふく射特性はミー散乱理論⁽²³⁾により計算した。これより微粉炭の燃焼過程における粒子径変化による吸収係数変化を考慮する

ことができる。

4. 微粉炭だきボイラの運用条件

NO_x濃度やガス温度は、ボイラの規模・負荷や使用する石炭種により変化する。解析プログラムは、これら条件の性能への感度も予測できなければならない。そこで、本研究では、表1~3に示すさまざまなボイラの運用条件で得られた実測値と比較することで解析プログラムを検証した。検証に使用したボイラは3種類で、最大出力は500~1000 MWである。これらのボイラの基本構造を図2に示す。ボイラ火炉には石炭と空気を投入するバーナと、完全燃焼用空気を投入するOAP(オーバエアポート)が設置されている。設置されているバーナは、火炎内脱硝法によりNO_xを低減するHT-NR2バーナ⁽²⁴⁾である。また、火炉天井にはつり下げ形の過熱器が設置されている。

検証に用いた実測値は、ボイラ負荷35~100%における定常状態で得られたものである。また、負荷が高いほど石炭供給量は多い。

使用した石炭の性状を表3に示す。石炭の燃焼性を示す燃料比(=固定炭素/揮発分)は1.2から2.4であり、日本国内で使われる石炭の範囲とおおよそ一致する。燃料比が高い石炭は、NO_xを低減するために必要な還元領域を広く形成できないので、排出NO_x濃度が高くなる。また、石炭中にN分が多いと、N分の酸化により生成するフューエルNO_xが多くなるので、排出NO_x濃度が高くなる。

Table 1 Operating conditions of boilers

Case Number	Boiler	Coal	Load(%)	Coal Feed Rate(kg/s)
1	B1	C1	35	35.9
2	B1	C1	60	56.7
3	B1	C1	100	90.8
4	B2	C1	35	30.6
5	B2	C1	50	43.7
6	B2	C1	75	65.6
7	B2	C1	100	87.5
8	B1	C5	35	32.3
9	B1	C5	50	47.5
10	B1	C5	75	69.4
11	B1	C5	100	92.2
12	B3	C4	35	19.2
13	B3	C4	50	26.3
14	B3	C4	75	38.6
15	B3	C4	100	50.3
16	B2	C2	35	36.3
17	B2	C2	50	49.0
18	B2	C2	75	71.6
19	B2	C2	100	93.7
20	B2	C3	35	29.0
21	B2	C3	50	39.0
22	B2	C3	75	57.2
23	B2	C3	100	75.3

Table 2 Boiler configurations

Boiler Name	Maximum Electric Output(MW)	Number of Burners
B1	1000	56
B2	1000	42
B3	500	24

Table 3 Coal analysis

Coal Name	FR (-)	Water (wt%)	Ash (wt%)	N (wt%)	Heating Ratio (MJ/kg)
C1	1.22	10.2	9.3	1.19	25.87
C2	1.20	13.4	12.3	1.03	24.16
C3	1.96	5.9	10.2	1.53	30.06
C4	1.98	19.4	7.2	1.54	23.79
C5	2.45	9.2	14.6	1.36	25.33

FR(Fuel Ratio) = Fixed Carbon / Volatile Matter

Fig. 2 Structure of test boiler

5. 解析結果と検証

以下では、第1にガス温度の検証結果を、次に NO_x 濃度と燃焼率の検証結果を報告する。ガス温度は石炭や NO_x の反応速度の計算に重要である。しかし、微粉炭だきボイラの実機においてガス温度を直接測定することは以下の理由で難しい。(1)燃焼装置が大きいために中央までプローブを挿入することが困難。(2)ガス温度が 1000°C 以上と高温であるために、溶融灰が計測装置に付着して連続測定が困難。(3)炉内の燃焼状態は非定常的であり、時間平均値を得るためには長いサンプリング時間が必要。そこで本研究では、最も精度よく測定できる火炉出口ガス温度について計算と実測の値を比較した。火炉出口ガス温度は、図2に示す火炉出口断面におけるガス温度の平均値である。

このガス温度は、節炭器出口ガス温度から間接的に測定することで正確に求めることができる。ガスの流量と組成は、運用条件から求める。節炭器出口のガス温度は 400°C 程度であり、測定することが容易である。節炭器出口の比エンタルピーは、測定したガス温度とガスの組成から計算する。また、火炉出口から節炭器出口までの間に設置されている熱交換器の伝熱量は、熱交換器の入口と出口の蒸気温度の測定値から計算できる。節炭器出口の比エンタルピーと熱交換器の伝熱量から火炉出口の比エンタルピーを計算する。最後に火炉出口の比エンタルピーとガス組成から、火炉出口ガス温度を計算する。本方式の計測誤差は $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度である。また、本方法ならば火炉出口断面のガス温度の平均値を求めることができる。

図3に計算と実測の火炉出口ガス温度の比較結果を示す。比較に使用した条件は、ケース番号1から19である。すべての条件において、火炉出口ガス温度の計算と実測の差は $\pm 30^\circ\text{C}$ 以下であった。また、火炉の

Fig. 3 Validation of furnace exit gas temperature

熱吸収量はボイラの入熱と火炉出口ガス温度から決まる。火炉出口ガス温度の誤差を火炉熱吸収量の誤差に変換すると、約 $\pm 5\%$ になる。燃焼速度が異なれば発熱位置が変化するので、熱吸収量も変わる。すなわち、熱吸収量を予測できるということは、燃焼モデルが適切であることを示している。

ケース番号11における、バーナを含む断面でのガス温度分布の計算結果を図4に示す。ガス温度は、バーナを設置している高さで高く、火炉出口に近づくにつれて低下する。ガス温度が低下する理由は、ガスの保有する熱が火炉を形成する水冷壁に吸収されるためである。バーナを設置している高さにおいて、火炉中央部のガス温度が低い。これは、ここで生じているガ

Fig. 4 Temperature distribution (Case 11)

Fig. 5 Distribution of gas concentration (Case 11)

Fig. 6 Validation of NO_x concentrations

ス化反応が吸熱反応であるためである。

次に CO と NO_x 濃度分布について調べた。ケース番号 11 における CO の濃度分布の計算結果を図 5(a) に示す。CO 濃度は、バーナ近傍で高くなり、OAP 設置高さよりも少し下方の火炉中央部で最大となる。低 NO_x バーナの原理は、石炭をバーナ近傍で着火させることで高温の還元領域を拡大し、NO_x の還元反応を促進することである⁽²⁵⁾。今回の計算でもバーナ近傍で石炭が着火したために、ここの CO 濃度が高くなった。また、OAP 位置までは酸素不足領域なので、ガス化反応により CO 濃度が上昇した。その後、OAP の空気との混合によりほぼ零になった。計算で得られたバーナ近くで CO 濃度が上昇し、追加空気との混合によりほぼ零になる傾向は、実験結果⁽²⁶⁾と一致した。

同じ断面における 0%O₂ 換算の NO_x 濃度分布を図 5(b) に示す。NO_x 濃度はバーナ近傍で一度上昇した。熱分解反応によりボラタイル中の N 分が気相側に放出され(反応経路 R 1)、これが R 2 により酸化されたためである。その下流には CO 濃度の高い還元領域が形成されており、ここで生じる NO_x 還元反応(R 5, R 6)により NO_x 濃度が低下した。OAP 空気が混合すると酸素濃度が高い場所が生じるので、反応経路 R 4, R 2, R 9 により NO_x 濃度が高くなった。NO_x 濃度は、OAP から火炉出口に向かって低下する。これは、チャーによる NO_x 還元反応のためである(R 5)。これらの NO_x 濃度の傾向は、実験データ⁽²⁶⁾と一致している。

Fig. 7 Validation of burnout

次に、ケース番号 8～11, 17～23 の条件において計算と実測の火炉出口 NO_x 濃度を比較した(図 6)。計算の NO_x 濃度は計算領域の出口の平均値であり、実測は ECO 出口で測定したものである。火炉出口より下流では、NO_x に関する反応は生じないと仮定した。すべての条件において、実測と計算の NO_x 濃度は誤差 ±15% 以下で一致した。小形燃焼炉で検証した場合と同程度の誤差であり、本 NO_x 反応モデルは実機の解析に適用できることがわかった。実機では、C 2 → C 3 → C 5 と燃料比の高い石炭ほど NO_x 濃度が高い。燃料比の高い石炭の燃焼性はよくないので還元領域が小さくなる。計算も同様の特性であり、燃焼比の NO_x に対する影響を再現した。また、実機の NO_x 濃度は負荷の上昇とともに高くなる傾向にある。負荷が高いと石炭供給量が増加する。このため、還元領域での滞留時間が短くなり NO_x の還元量が低下した。計算でもボイラ B 1, 石炭 C 5 における 50% 負荷を除いて実機の傾向を再現し、還元領域における NO_x 反応モデルが適切であることがわかった。実機と解析の傾向が一致していない条件は、燃えにくい石炭を使用し、ガス温度も低い条件である。このような条件で生じる火炎の不安定性による NO_x 濃度の上昇を、解析では精度よく解けていないと考えられる。また、チャーと NO_x 反応モデルは、燃焼温度が 1 673 K までの実験値を基に開発された。今回の計算は最大温度が 2 000 K 以上であり、高温においても本モデルを適用できることがわかった。

ケース番号 8～11 において火炉出口の燃焼率の解析精度を調べた結果を図 7 に示す。実測と解析とともに、負荷の上昇とともに燃焼率が低下した。これは、石炭供給量の増加とともに、炉内での燃焼時間が短くなったことによる。また、燃焼率の誤差は最大 0.3% であ

り、小形燃焼炉で検証したときの3%より小さくなった。これらの結果から、チャーの燃焼モデルを実機に適用可能であることがわかった。

6. 結 論

小形燃焼炉で開発したガス化、 NO_x 反応モデルを数値解析プログラムに組み込み、実機ボイラを対象に、ボイラ形状、ボイラ負荷、石炭種の異なる23ケースの条件を評価し、実機による実験結果と比較した。この結果、実機ボイラであっても NO_x 濃度、ガス温度、燃焼率を予測できることがわかった。

(1) 解析の火炉出口 NO_x 濃度は、実測値と比較して $\pm 15\%$ 以下の誤差で一致した。燃料比の高い石炭ほど火炉出口 NO_x 濃度が高くなる傾向は実測値と一致した。負荷の高い条件で火炉出口 NO_x 濃度が高くなる傾向は実測値と一致した。実機ボイラであっても、小形燃焼炉と同等の精度で NO_x 濃度を予測できた。

(2) 解析の火炉出口ガス温度は、ECO 出口ガス温度と熱交換器の伝熱量等から求めた実測値と比較して $\pm 30^\circ\text{C}$ 以下で一致した。これは、火炉の熱吸収の誤差に換算すると $\pm 5\%$ である。

(3) 火炉出口の燃焼率が負荷の上昇とともに低下する傾向は実測値と一致した。燃焼率は、誤差0.3%以下で一致した。実機ボイラであっても、小形燃焼炉と同等の精度で燃焼率を予測した。

(4) ボイラ実機条件で、バーナ近傍で一度 NO_x 濃度が上昇し、高温の還元域で NO_x 濃度が低下し、OAP 空気と混合すると再度 NO_x 濃度が上昇する低 NO_x 燃焼の傾向を再現した。

文 献

- (1) Anagnostopoulos, J. S., ほか2名, *Combust. Flame*, **92**

- (1993), 209-221.
 (2) Truelove, J. S. and Williams, R. G., *Proc. 22nd Symp. (Int.) Combust.*, (1988), 155-164.
 (3) Smoot, L. D., *Fundamentals of Coal Combustion*, (1993), 661, Elsevier Science Publishers B. V.
 (4) 山本研二・ほか3名, *機論*, **65**-637, B (1999), 260-266.
 (5) Taniguchi, M., ほか3名, *Fuel*, **81** (2001), 363-371.
 (6) Yamamoto, K., ほか2名, *Proc. 3rd Int. Symp. Adv. Energy Convers. Syst. Relat. Tec.*, 1-B-5 (2001).
 (7) S. V. パタンカー原著, 熱移動と流れの数値解析, (1985), 116, 森北出版.
 (8) Smith, P. J. and Fletcher, T. H., *Combust. Sci. Tech.*, **58** (1988), 59-76.
 (9) Magnussen, B. F., ほか3名, *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1976), 1657-1663.
 (10) Lockwood, F. C., ほか2名, *Combust. Flame*, **38** (1980), 1-15.
 (11) Kobayashi, H., ほか2名, *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1976), 411-425.
 (12) Taniguchi, M., ほか6名, *J. Energy Res. Tech.*, **123** (2001), 32-38.
 (13) 岡崎洋文・ほか5名, *機論*, **62**-598, B (1996), 374-379.
 (14) Fenimore, C. P., *Proc. 17th Symp. (Int.) Combust.* (1979), 661-670.
 (15) Bose, A. C. and Wendt, J. O. L., *Proc. 22th Symp. (Int.) Combust.*, (1988), 1127-1134.
 (16) Miller, J. A. and Bowman, C. T., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15** (1989), 287-338.
 (17) Abbas, T., ほか, *Combust. Flame*, **93** (1993), 316-326.
 (18) Kiyama, K., ほか4名, *Proc. Int. Conf. Power Eng.*, **97**, 2, Tokyo, (1997), 477-481.
 (19) Williams, A., ほか, *Fuel*, **93** (1994), 1006-1019.
 (20) Lockwood, F. C. and Shah, N. G., *Proc. 18th Symp. (Int.) Combust.*, (1981), 1405-1414.
 (21) Coelho, P. J. and Carvalho, M. G., *Tran. ASME*, **119** (1997), 118-128.
 (22) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedmam, J. N., *J. Heat Transf.*, **104**-4 (1982), 602-610.
 (23) Kim, C. and Lior, N., *Fuel*, **74**-12 (1995), 1891-1902.
 (24) 石田忠・ほか3名, 日立評論, **74**-11 (1992), 37-42.
 (25) Azuhata, S., ほか5名, *Proc. 21st Symp. (Int.) Combust.* (1986), 1199-1206.
 (26) 植戸清・ほか3名, *機論*, **55**-517, B (1989), 2787-2794.