ボイラにおける微粉炭の炉内流動及び燃焼のシミュレーション*

Numerical Simulation of Combusting Flows in Coal-Fired Boiler Furnace

廣 川 雅 俊**
HIROKAWA Masatoshi

Abstract It is important to determine unburnt carbon content and temperature distribution for design and operation of coal fired boiler. A numerical simulation of combustion flows in a coal-fired boiler furnace has been done using Reynolds equations, including solid gas two-phase flow. Gas flow patterns, coal behavior and diameter variation, and distributions of the heat release rate, temperature, and oxygen concentration have been obtained as numerical simulation results. Moreover, it has been made clear that coal trajectory and its diameter effect the heat release rate and unburnt carbon content.

Keywords: Coal-fired boiler furnace, Unburnt carbon content,
Temperature distribution, Coal trajectory, Numerical simulation

1. はじめに

微粉炭焚きボイラでは、火炉壁に取り付けられたバーナ部から火炉内に直径20～200ミクロン程度の微粉炭が燃焼空気とともに投入され、燃焼しつつガスにより搬送され、その後灰（一部未燃分を含む）になって煙道にはいる。微粉炭燃焼における炉内の発熱量分布やガス温度分布の把握、未燃分の減少やアッシュエロージョン対策等の問題はボイラを設計、運転する上できわめて重要である。以上の問題に対処するためには微粉炭や灰の挙動を明らかにすることが必要であり、これは固気二相流の問題に帰着する。

最近、熱流動解析技術の進展に伴い、炉内のガスの流れ、温度分布および混合拡散状況がかなりの精度で解析できるようになってきた¹⁾。われわれは、これを固体の運動方程式等と組み合わせた固気二相流解析コードを用いて微粉炭の飛跡や灰の濃度分布等を、また燃焼反応式と組み合わせることにより微粉炭の燃焼過程をシミュレートすることを試みている。固気二相流としてはまだかなり単純な取り扱いの段階ではあるが、従来の一次的な取り扱いでは得られなかったいくつかの知見が得られつつある。

ここでは微粉炭焚きボイラを対象とした上述のシミュレーションの方法とその解析例について紹介する。

* 1989.5.16 受付

** 川崎重工業株式会社技術研究所
〒673 明石市川崎町1番1号 電話(078)921-1634

2. 固気二相流の運動方程式

速度 $U_g (u_g, v_g, w_g)$ の気流中に質量 m の粒子が速度 $U_s (u_s, v_s, w_s)$ で飛散しているときの粒子の x 方向の運動方程式は、粒子を球と仮定すると、次式で表される。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\pi D^2}{8} \rho_g c_d (u_g - u_s) |U_g - U_s| + m g_x \quad (2.1)$$

$$m = \frac{\pi D^3 \rho_s}{6} \quad (2.2)$$

ここで、 c_d は粒子の抵抗係数、 D は粒子を球とした場合の直径、 g_x は x 方向の体積力（例えば重力の加速度等）、 m は粒子の質量、 U_g 、 U_s はガスと粒子の速度ベクトル、 (u_g, v_g, w_g) 、 (u_s, v_s, w_s) はガスと粒子の x 、 y 、 z 方向の速度成分、 ρ_g 、 ρ_s はガスと粒子の密度である。

また、 $|U_g - U_s|$ はガスと粒子の相対速度を表し、粒子の抵抗係数 c_d としては次式を用いる。

$$|U_g - U_s| = \sqrt{(u_g - u_s)^2 + (v_g - v_s)^2 + (w_g - w_s)^2} \quad (2.3)$$

$$c_d = \left. \begin{array}{l} 24.0 / R_e \quad (R_e \leq 1.0) \\ 18.5 / R_e^{0.6} \quad (1.0 < R_e \leq 900.0) \\ 0.44 \quad (900.0 < R_e) \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

R_e はレイノルズ数で

$$R_e = |U_g - U_s| \cdot D / \nu_g$$

ここで、 ν_g はガスの動粘性係数を表す。

粒子の速度ベクトル U_s は

$$(u_s, v_s, w_s) = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right) \quad (2.5)$$

粒子に関する初期条件は

$$t = 0 \text{ で } u_s = dx/dt = u_{s0}, \quad x = x_{s0} \quad (2.6)$$

以上が x 方向の運動方程式であるが、 y 、 z 方向についても同様に記述できる。

なお、ガスの速度ベクトル U_g は 3 次元熱流動解析コードから計算できる。

次に、粒子が炉壁と衝突した場合の取り扱いについては、炉壁を平板、粒子を球形として、辻の教科書²⁾ (p49, 表 4.2) に記載されている、衝突前後の速度関係の次式を使用する。

気流中の粉体の飛跡は式 (2.1) の運動方程式により、また燃焼ガス側は $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた混合拡散解析機能のある 3 次元熱流動解析コードにより解析を行う。

3. 微粉炭の燃焼反応式

微粉炭の燃焼過程については、加藤ら^{3), 4)} および蔵田ら⁵⁾ により一次元モデルを用いた理論的、実験的な検討がなされており、灰中未燃分に及ぼす石炭の性状や燃焼条件の影響が詳細に論じられている。ここでは微粉炭の燃焼過程を多次元熱流動解析、混合拡散解析および固気二相流

の解析と組み合わせて燃焼過程を三次元的にシミュレートする方法を紹介するが、微粉炭の燃焼基礎式と微粉炭粒度分布については加藤らが用いた方法に従う。以下にその方法について紹介する。

3.1 燃焼基礎式

微粉炭には揮発分、固定炭素（チャー）と灰分が含まれており、その燃焼は揮発分の蒸発燃焼とチャーの表面燃焼に分けられるが、ここではチャーの燃焼過程についてシミュレートし、揮発分は等価的にチャーの燃焼に含まれるものとする。

まずチャーの総括燃焼速度は、粒子表面での酸素の拡散速度と表面での化学反応速度で決まるとすると次の関係が成り立つ。

$$d m / d t = -\pi D^2 K_T \quad (3.1)$$

$$K_T = 1 / (1 / K_{MT} + 1 / K_{CHEM}) \quad (3.2)$$

ただし、微粉炭1個あたりの質量と微粉炭粒径変化（ $d m$ と $d D$ ）の関係は式(2.2)より $d m = \pi D^2 \rho_s d D / 2$ で表わされる。またここで K_T は粒子の単位表面積当りの総括反応速度、 K_{MT} は拡散律速（化学反応速度無限大）時の反応速度、 K_{CHEM} は表面反応律速（拡散速度無限大）時の反応速度を表す。

拡散律速時の反応速度 K_{MT} はMulcahyらの式を用いる。

$$K_{MT} = -\frac{48}{32} \cdot \frac{D_0 \rho_0}{D} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.75} \cdot \frac{\ln(1 - \gamma \cdot f_m)}{\gamma} \quad (3.3)$$

ここで D_0 は標準状態の酸素の拡散係数、 ρ_0 は標準状態のガス密度、 T は絶対温度、 f_m は酸素の質量分率、 γ は拡散係数と燃焼反応の量論係数によって決まる値で、 $C \rightarrow CO$ の反応では $\gamma = 1$ となる。

次に表面反応律速時の反応速度 K_{CHEM} としては加藤らによる次式を用いる。

$$K_{CHEM} = K'_{CHEM} \times \{1 + (2 / F R)^{1.5} \times 2\} / 3 \quad (3.4)$$

$$K'_{CHEM} = 8710 \cdot \exp(-17980 / T) \times P_{O_2}, \quad (T \leq 1500K) \quad (3.5)$$

$$K'_{CHEM} = (8.35 \times 10^{-4} \cdot T^{-0.525}) \times P_{O_2}, \quad (T > 1500K)$$

ここで $F R$ は微粉炭の燃料比、 P_{O_2} は酸素の分圧、 T はガスの絶対温度を表す。

3.2 微粉炭粒度分布

微粉炭の初期粒度分布は、Rosin-Rammlerの分布に従うものとする、粒子の残留積分重量割合 R は

$$R = \exp(-X^n) \quad (3.6)$$

で表わされる。ここで X は無次元粒径（＝粒径／重量平均粒径）、 n は分布指数である。したがって粒径ごとの粒子数頻度分布は次式で表される。

$$dN/dX = \exp(-X^n) \cdot n \cdot X^{n-1} \quad (3.7)$$

4. 微粉炭燃焼解析

微粉炭燃焼解析の計算手順をTable 1に示す。

Table 1 Flow chart of computational method

- ① まずボイラの形状、幾何学的条件、ガスの流量、物性値等を入力として、炉内の発熱量分布を仮定して熱流動解析コードにより炉内のガス速度分布と温度分布を計算する。
- ② 微粉炭の流量、平均粒径等を入力し、またバーナをいくつかのサブメッシュに細分割する。次にバーナのサブメッシュから流出する各微粉炭粒径に対する粒子の個数を計算する。微粉炭の粒径分布は Rosin-Rammler の式(3.6), (3.7)に従う。本計算では微粉炭のバーナ部を9分割し、更に各部分から10種類の粒径の微粉炭を上述の分布に従って流出させる。
- ③ 熱流動解析で求めた流れ場と温度場の中に各微粉炭粒子を流出させ、固気二相流解析により ΔT 時間後の粒子の位置を計算する。
- ④ 燃焼反応方程式を用いて ΔT 時間中の各メッシュの微粉炭の粒径減少量、発熱量、酸素消費量を計算する。(酸素濃度の初期値は適当に仮定する。)
- ⑤ 以上の計算を炭素量がゼロになるか、粒子が流出口に達するまで続ける。
- ⑥ 更に対象とする全ての粒径と全ての投入口について以上の計算を行い、発熱量と酸素消費量を各メッシュ毎に積算し、メッシュごとの発熱量と酸素消費量の分布を求める。
- ⑦ 以上の発熱量と酸素消費量の分布の下で熱流動解析と混合拡散解析を行ない、ガス温度と酸素濃度の分布を求め、さらに固気二相流解析、燃焼反応解析、熱流動解析および混合拡散解析を、ガス温度と酸素濃度が収束するまで繰り返す。
- ⑧ 出力として、ガスの速度、温度、発熱量、酸素濃度、微粉炭(灰)の濃度のメッシュ毎の分布および微粉炭の飛跡、未燃量等が計算される。

Fig.1 Grid arrangement

Fig.2 Gas flow pattern

Table 2 Boiler specification and characteristics of coal

ボ イ ラ 要 目	出力	1 5 6 MW
	蒸発量	4 9 0 T / H
	バーナ配置	フロント燃焼
	バーナ配列	4 段 4 列
	T S 配列	2 段 4 列
	空気比	1 . 2
	T S C	2 5 %
石 炭 性 状	低位発熱量	5 8 1 6 Kcal/kg
	燃料比	2 . 0
	灰分	1 0 %
	初期粒径	2 0 0 メッシュ
		7 5 % パス 8 5 % パス

Fig.3 Trajectory of coal

5. 微粉炭ボイラでの解析例

上述の方法を用いてボイラにおける微粉炭の炉内流動と燃焼解析を実施した例を以下に示す。対象としたボイラの要目と微粉炭の性状をTable 2に、またボイラのメッシュ分割をFig.1に示す。解析はボイラ炉幅方向の中央部を対称面として、その半分について実施した。

Fig.2に炉幅方向中央部における炉内の燃焼ガスのフローパターンを、Fig.3に微粉炭の飛跡の一例を粒径250ミクロンと65ミクロンについて、ガスの流線（マーカー飛跡）と対比して示す。Fig.3にみられるように、65ミクロンの粒子はほぼガスの流線に乗って飛散しているが、250ミクロンの粒子の飛跡はガスの流線よりも炉の奥の方向に（図では右方向、炉の奥行き5分の1程度）ずれていることがわかる。微粉炭粒子の飛跡は、炉内に発熱量やガス温度分布、および微粉炭の未燃量にも影響することが考えられるが、Fig.3の結果は粒径の大きい微粉炭については、灰の濃度や燃焼過程等を3次的に解析する場合、ガスと粒子の相対速度が無視できなくなることを示している。

Fig.4に最上段と最下段のバーナから流出した、微粉炭粒子の粒径の火炉の高さ方向の変化を、初期粒径をパラメータとして示す。横軸の0は最下段バーナの位置を、1は火炉出口を示す。最上段からの粒子は、100ミクロン径以下のものについては火炉の高さ方向に比較的スムーズに変化し、火炉出口までに燃焼が完了している。200ミクロン径のものは火炉出口でも燃え尽きず、未燃の状態で流出する。一方最下段バーナから出た粒子については、高さ方向に複雑な挙動を示している。70ミクロン径のものは、はじめ下方に落ちた後、流れに乗って炉内を上昇し、燃え尽きる。100ミクロン径の粒子は下方に落下し、ホッパーに落ちる。

Fig. 5はTSポート以降の火炉高さ方向の未燃分の変化を、初期粒径をパラメータとして示したものである。初期粒径は、200メッシュ、75%パスと85%パス(平均粒径は約56ミクロンと43ミクロン)である。縦軸はTSポートでの未燃分を1として示した。火炉出口での未燃分はTS

ポートでの値の、75%パスで約1/3、85%パスで約1/5になっている。粒径の違いが未燃分に大きく影響することがわかる。

Fig.4 Variation of coal diameter along the furnace height

Fig.5 Variation of unburnt carbon along the furnace height

Fig.6に炉幅方向中央断面における発熱量の分布を、Fig.7にガスの温度分布を示す。発熱量の高いところはバーナ下部では火炉の奥にあるのに対し、上部に行くにしたがって火炉中央部に移行する。一方、Fig.3の例からもわかるように、バーナから出た微粉炭はほぼ水平に火炉の奥行き方向に流れた後、炉の中央部に向かって上昇する。Fig.6にみられる発熱量の分布はこの微粉炭の飛跡からも説明できる。なお大部分の微粉炭はバーナ部で燃焼するため、TSポート以降の発熱量は低くなっている。

Fig.7に示すガスの温度分布もこの発熱量分布に対応して、バーナ上部では火炉奥行き方向の中央部以降で温度が高くなっている。以上にみられるバーナ部での火炉奥行き方向の温度勾配は、均一発熱を想定したものよりも大きい。なお、TSポート以降の温度勾配は大きくないが、バーナ部で燃え残った微粉炭による発熱が少しあるため、ガス温度も若干上昇する。

Fig.8に炉幅方向中央断面における酸素濃度の分布を示す。バーナ部では発熱量の大きい火炉の奥行き方向の中央部以降で酸素濃度が低くなる。TSポートで補給された酸素は未燃分の燃焼に費やされ、火炉出口では再び酸素濃度が低くなる。

なお以上の結果は、実缶計測値と比較すると灰中未燃分については10%以内で、ガス温度は火炉出口で50℃の範囲で一致している。

6. おわりに

ここでは固気二相流のシミュレーションという観点から微粉炭焚きボイラにおける微粉炭の挙動と、それに関連させた燃焼過程のシミュレーションについて、その方法と解析例を紹介した。はじめに述べたように、固気二相流の取り扱いとしてはまだ初歩的なものであるが、この

Fig.6 Distribution of heat release rate
(kcal/m³s)

Fig.7 Distribution of gas temperature
(°C)

Fig.8 Distribution of oxygen concentration
(%)

観点をいれることにより、多くの新たな知見が得られつつある。他方、ここで紹介したシミュレーションについてもいくつかの問題点がある。以下では固気二相流に関する問題点を挙げて結びとする。

- ① 球形以外の粒子についての取り扱い（微粉炭粒子の形状、その形状に対応した抵抗係数の把握）
- ② 微粉炭粒子の回転を考慮したシミュレーション。
- ③ 微粉炭粒子が炉壁と衝突した場合の取り扱い。特に粒子に粘着力がある場合の取り扱い。
- ④ 本稿では取り扱っていないが、ボイラの大流伝熱部管群に粒子が衝突した場合の取り扱い、および粒子の衝突と管の摩耗の関係（アッシュエロージョン）、等。

参考文献

- (1) 白羽陸宏、他：川崎技報，85号，1-6 (1984)。
- (2) 辻 裕：「空気輸送の基礎」第一版，養賢堂，東京(1984)。
- (3) 加藤幸三、他：機械学会論文集(B編)，49巻，437号，233-433(1983)。
- (4) 加藤幸三、他：機械学会論文集(B編)，49巻，437号，244-254(1983)。
- (5) 蔵田親利、藤井健一、原田英一：機械学会論文集(B編)，52巻，474号，975-984(1986)。