

## ボイラ火炉内3次元流動・伝熱・燃焼シミュレーション

遠藤 喜彦 エネルギー・プラント事業本部ボイラ事業部燃焼技術部  
 宮前 茂広 エネルギー・プラント事業本部ボイラ事業部燃焼技術部専門課長  
 安藤 安則 技術本部技術研究所流体・燃焼研究部専門課長工学博士

Numerical Analysis of Three-Dimensional Flow Fields with Combustion and Heat Transfer  
 in Pulverized Coal Firing Boilers

Yoshihiko Endo  
 Shigehiro Miyamae  
 Yasunori Ando

Supercomputers with large memories and high computational speeds have allowed CFD (Computational Fluid Dynamics) to become important in many engineering fields. CFD has been applied to numerical analysis of the pulverized coal firing boiler. For numerical simulation of pulverized coal firing, the important items are: 1. estimating staged combustion; 2. considering coal properties including optical properties of coal particles; 3. estimating chemical species; 4. handling particle motion including particle dispersion. A three-dimensional numerical simulation code, including these items, has been developed by IHI. The details of the analytical models and application to a 1 000 MW pulverized coal firing boiler furnace are described here.

## 1. 緒 言

石炭火力発電は原子力発電とともに、今後の電源開発の柱として大きく期待されている。石炭火力発電用ボイラでは、Australiaをはじめとする諸外国からの多種類の石炭が使用されている。石炭は重油、ガスと異なり、産炭地ごとの性状の相違が大きく、それが燃焼特性、取熱特性、環境特性やボイラの運用性に影響を与える<sup>(1)</sup>。ボイラ火炉の計画では、使用する石炭性状にもとづき、これらの特性を満足させるように設計を行なう。しかしながら、炭種ごとの火炉取熱特性や環境特性の変化は、各種の設計パラメータや運転操作パラメータが複雑に、かつ相互に影響しているため、その予測が難しい。とくに今後、石炭火力発電用燃料として導入が予測される亜瀝青炭や原料炭などについては、実缶での燃焼実績が乏しく、その予測精度を高めるには従来の知見を補うあらたな設計支援ツールが必要となる。また、より一層の低NO<sub>x</sub>化、低未燃分化などの要求に対して、火炉サイズ、バーナ配置、2段燃焼用空気ポートの配置などの設計パラメータの変更に対するボイラ性能の影響を適確に評価することが肝要となる。さらに最近の地球規模のCO<sub>2</sub>問題に対応するためには、省エネルギー化、代替エネルギー技術開発とともに、既存の発電システムの高効率化が不可欠である。超々臨界圧や蒸気温度の高温化には、各伝熱部の設計において従来以上の信頼性が求められる。

数値シミュレーション技術は、計算機容量の増大や計算速度の向上によっていちじるしく進歩し、とくに熱流体解

析(CFD)技術は、設計技術支援として多くの工業分野に適用されている。当社では独自に3次元熱流体解析コード(VEGA-3)を開発<sup>(2)</sup>し、それをボイラ火炉内流動・伝熱・燃焼解析に適用してきている<sup>(3)</sup>。本解析コードでは、使用する石炭の特性値(組成、粒子の光学特性や粒子サイズなど)や運転操作パラメータ(ボイラ負荷、2段燃焼率など)を入力することで、ボイラ火炉内の流動、微粉炭粒子挙動、火炉取熱分布や炉内ガス組成(O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>など)が把握でき、設計支援ツールとして利用されてきている。

本稿では3次元数値解析コードの詳細とその解析例について述べる。

## 2. 記 号

本稿に使用した記号はそれぞれつぎのものを意味している。

$A_p$	: 粒子の投影面積 (m <sup>2</sup> )
$C_D$	: 粒子の抵抗係数 (—)
$g$	: 重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )
$I$	: 放射強度 (W/m <sup>2</sup> ・str.)
$K_C$	: チャー表面での化学反応速度 (m/s)
$K_d$	: 酸素のチャー表面への拡散速度 (m/s)
$k$	: 乱流エネルギー (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$m_c$	: チャーの質量 (kg)
$m_i$	: ガス成分 <i>i</i> に対する質量分率 (—)
$R$	: ガス定数 (cal/mol・K)
$S_p$	: チャーの外表面積 (m <sup>2</sup> )
$U'$	: 流速の時間平均値に対する変動速変度 (m/s)

- V : 放出揮発分 (%)
- V<sub>CNS</sub> : 炭素, 窒素, 硫黄の放出割合 (—)
- V<sub>O</sub> : 揮発分最大放出率 (%)
- VM<sub>P</sub> : 工業分析値の揮発分割合 (%)
- u<sub>i</sub> : i 方向の流速成分 (i = x, y, z) (m/s)
- x, y, z : デカルト座標 (m)
- Y<sub>O<sub>2</sub></sub> : 酸素の質量分率 (—)
- Γ<sub>φ</sub> : φ に対する有効拡散係数 (kg/m · s)
- β : 量論係数 (—)
- ε : 乱れの散逸率 (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)
- μ, η, ξ : x, y, z 方向の余弦
- ρ : ガス密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- ρ<sub>p</sub> : 粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- φ : 解くべき変数
- [X] : X に対するモル分率 (—)

3. 基礎方程式

3.1 気相の支配方程式

流れ場を 3 次元定常粘性流れ場とし, 標準の k-ε 乱流モデル<sup>(4)</sup>を用いると, デカルト座標系での流れ場の支配方程式はつぎの標準方程式にまとめられる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_1 \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_2 \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_3 \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi + S_{\phi p} \dots\dots\dots (1)$$

第 1 表に, 解くべき変数, 各変数の有効拡散係数, 各変数に関する対流項, 拡散項以外のソース項および粒子からのソース項をまとめて示した。ここで, S<sub>h</sub> は後述する放射伝熱モデルからのソース項である。また, m<sub>ovm</sub>, m<sub>chr</sub>, m<sub>uvm</sub>, m<sub>co</sub> は微粉炭燃焼解析で特有な変数であり, m<sub>ovm</sub> は揮発分とチャーからの生成ガスの質量分率, m<sub>chr</sub> はチャーからの生成ガスの質量分率, m<sub>uvm</sub> は未燃揮発分の質量分率, m<sub>co</sub> は CO の質量分率である。したがって, 本解析で解くべき変数は後述の放射強度を含め合計 12 個となる。本解析コードでは, 2 方程式乱流モデル (k-ε 乱流モデル) を採用した。第 1 表での乱流定数はそれぞれ

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_D = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

とした。また, Prandtl 数, Schmidt 数は以下のとおりである。

$$\sigma_h = 0.9 \quad \sigma_{ovm} = 0.9 \quad \sigma_{chr} = 0.9$$

$$\sigma_{uvm} = 0.9 \quad \sigma_{cco} = 0.9 \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 ガス反応モデル

本解析では, 微粉炭またはチャーからの揮発分や CO などの生成ガスの燃焼速度を Spalding ら<sup>(5)</sup>の Eddy Break Up モデルを用いて評価した。第 1 表の R<sub>fu</sub>, R<sub>co</sub> はつぎのよう

第 1 表 φ と Γ<sub>φ</sub>, S<sub>φ</sub>, S<sub>φp</sub> のまとめ  
Table 1 Summary of φ, Γ<sub>φ</sub>, S<sub>φ</sub> and S<sub>φp</sub>

φ	Γ <sub>φ</sub>	S <sub>φ</sub>	S <sub>φp</sub>
1	0	0	$-\frac{\partial m_p}{\partial t}$
u	μ <sub>eff</sub>	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x})$	$-\frac{\partial m_p \mu_p}{\partial t}$
v	μ <sub>eff</sub>	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y})$	$-\frac{\partial m_p v_p}{\partial t}$
w	μ <sub>eff</sub>	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$	$-\frac{\partial m_p w_p}{\partial t}$
k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	G <sub>k</sub> - ρ · ε	0
ε	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{G_k C_1 \epsilon}{k} - \frac{C_2 \rho \epsilon^2}{k}$	0
h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	S <sub>h</sub>	$-\frac{\partial m_p h_p}{\partial t}$
m <sub>ovm</sub>	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{ovm}}$	0	$-\frac{\partial m_p}{\partial t}$
m <sub>chr</sub>	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{chr}}$	0	$-\frac{\partial m_{chr}}{\partial t}$
m <sub>uvm</sub>	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{uvm}}$	R <sub>fu</sub>	$-\frac{\partial m_{ovm}}{\partial t}$
m <sub>co</sub>	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{cco}}$	R <sub>co</sub>	$-\frac{\partial m_{chr}}{\partial t} \frac{K_{co}}{1+K_{co}}$

に評価した。

$$R_i = - [the \text{ smaller of } (R_{i,CK}, |R_{i,EBU}|)] \dots\dots\dots (4)$$

ここで, i は未燃揮発分あるいは CO, R<sub>i,EBU</sub> は Eddy Break Up モデルで評価される反応速度, R<sub>i,CK</sub> は後述する化学反応速度である。R<sub>i,EBU</sub> は次式で示される。

$$R_{i,EBU} = - C_R \rho G_i^{1/2} \epsilon / k \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで, C<sub>R</sub> は定数 (=1.5), G<sub>i</sub> は局所的な未燃揮発分, CO の濃度変動で, 次式で与えた。

$$G_i^{1/2} = C_g l \left[ \left( \frac{\partial m_i}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial m_i}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial m_i}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

C<sub>g</sub> は定数 (=6.0), l は乱れの混合長さである。

3.3 放射伝熱モデル

ボイラ火炉内の数値解析では, 火炉壁の収熱特性を評価することが主要な目的の一つとなる。放射伝熱モデルには, DO (Discrete Ordinate) Method<sup>(6)</sup>を採用した。モデルでは, 放射性ガス (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) と粒子の共存した条件で解析でき, 粒子の光学特性の放射伝熱に与える影響についても評価できる。DO Method では, 放射伝熱場の計算は流れ場などの計算に用いる計算格子より粗い計算格子で行なえることから, 計算時間を短縮することができる。

3.3.1 放射伝熱方程式

放射性気体中を通過する放射強度の変化を示す放射伝熱方程式は, 一般に次式で表わされる。

$$\frac{dI(r, \Omega)}{dr} = \frac{k_s}{4\pi} \int I(r, \Omega') \cdot P(\Omega, \Omega') \cdot d\Omega' + k_a \cdot I_b(T) - k_e \cdot I(r, \Omega) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, k<sub>s</sub>, k<sub>e</sub>, k<sub>a</sub> はそれぞれ散乱係数, 減衰係数, 吸収

第 2 表 3 方向に対する  $\mu, \eta, \zeta$  の値  
Table 2 Directional cosines of 3 directions in one quadrant

m	$\mu$	$\eta$	$\zeta$
1	0.2959	0.2959	0.9082
2	0.2959	0.9082	0.2959
3	0.9082	0.2959	0.2959

係数であり、粒子の空間密度、粒子有効面積などから決定される。 $P(\Omega, \Omega')$  は  $\Omega$  方向からの放射が  $\Omega'$  方向にどの程度散乱するかを規定する関数である。任意の点における放射エネルギー流束は 3 次元の直交座標系で表現すると次式となる。

$$\mu(dI/dx) + \eta(dI/dy) + \zeta(dI/dz) = k_s \cdot I_s + k_a \cdot I_b - k_e I(\Omega) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$\mu, \eta, \zeta$  は  $\Omega$  方向に対する余弦であり、第 2 表に示した。 $I_b, I_s$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$I_b = \sigma T^4 / \pi \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$I_s = (1/4\pi) \int I(\Omega') \cdot P(\Omega, \Omega') d\Omega \quad \dots\dots\dots (10)$$

DO Method では (8) 式を立体角  $4\pi$  内で  $N$  箇の方向について解く。本解析コードでは、 $N = 24$  とした。エネルギー方程式へのソース項は次式となる。

$$S_h = 4\pi k_s I_b - k_a \int I d\Omega \quad \dots\dots\dots (11)$$

3.3.2 ボイラ火炉内の放射特性

一般にボイラ火炉内における放射伝熱は、燃焼ガス中に含まれる放射性ガスである  $CO_2, H_2O$  とともに、とくに石炭焚ボイラでは微粉炭粒子および灰粒子の放射特性を考慮する必要がある。ガスの放射特性は一般の Hottel Chart として知られているように、 $CO_2, H_2O$  の放射率が提案されている。Hottel Chart をもとにそれらを一般化したモデルが多種あるが、本解析コードでは、 $CO_2, H_2O$  の分圧、ガス温度に対して吸収係数を精度良く評価できる 3 gray gas model<sup>(7)</sup> を用いた。3 gray gas model では、 $CO_2, H_2O$  のバンドスペクトルを吸収係数の異なる三つの灰色吸収バンドに置き換え、実ガスの吸収曲線を評価する。このモデルでの  $CO_2, H_2O$  共存ガスの放射率は次式で与えられる。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^3 a_i(T) \{1 - \exp(k_i(P_{CO_2} + P_W)L)\}$$

$$a_i = b_{i,0} + b_{i,1}T + b_{i,2}T^2 + b_{i,3}T^3 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $a_i$  は重み関数でガス温度の関数として与える。 $k_i$  は吸収係数で  $b_{i,0-3}$  とともに  $CO_2$  分圧  $P_{CO_2}$ 、 $H_2O$  分圧  $P_W$  に対して与える。

粒子が共存する場合の放射エネルギーの吸収、散乱は、①粒子の光学特性（複素屈折率）、②粒子温度、③粒子サイズ、④粒子の空間密度の影響を受ける。微粉炭燃焼にお

ける粒子の光学特性（複素屈折率  $n-in'$ ）は、使用する石炭や燃焼過程での灰中未燃分によって異なる。 $n$  (refractive index) の値は一般に炭化度が進むにつれて炭素含有量が増加するため大きくなり、瀝青炭で 1.85 のオーダーである（炭素粒子で 2.20）<sup>(8)</sup>。フライアッシュでは、 $n=1.3 \sim 1.7$ <sup>(9)</sup> である。 $n'$  (absorption index) も  $n$  と同様の傾向を示すが、瀝青炭のなかでも性状により大きく変化し 0.04~0.22<sup>(8)</sup> 程度となる。フライアッシュでは、 $n'$  の値は未燃分含有量に依存し、0.005 ~ 1.5 である。

3.4 粒子の運動解析

石炭焚きボイラでは、石炭は平均粒径  $40 \mu m$  程度の微粉炭として使用される。本解析コードでは、PSIC (Particle Source in Cell) 法を用い Lagrangian 的に粒子の挙動を評価した。粒子の運動、燃焼にともなう粒子の質量、運動量、エンタルピーの変化は、ガス側のソース項 ( $S_{\phi p}$ ) とし評価する。微粉炭燃焼解析の場合、この粒子からガス相へのソース項は第 1 表に示した。

一般に流体中の粒子の運動方程式は、外力として重力のみを考慮すると次式となる。

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D A_p \rho \{ \vec{U}_g - (\vec{U}_p + \vec{U}_{pdiff}) \} \times [ \vec{U}_g - (\vec{U}_p + \vec{U}_{pdiff}) ] + m_p g \quad \dots\dots\dots (13)$$

本解析コードでは、流れの乱れによる粒子の移動についても考慮している。流れの乱れによる粒子の移動速度は、流れの乱れ速度に対しつぎのように表される。

$$U_{pdiff} = \xi \sqrt{U'^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$U'^2 = \frac{2}{3} k \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $\xi$  は平均値 0、標準偏差 1 の正規分布乱数で与えた。(13) 式を計算セル内で  $\Delta t$  について時間積分することにより、粒子の速度、位置を求める。時間積分には Runge-Kutta-Gill 法を用いた。

3.5 境界条件

第 3 表に各変数に対するバーナ部、壁面、対称面、出口での境界条件を示した。壁面に関しては、流速成分に対し

第 3 表 境界条件  
Table 3 Boundary conditions

$\phi$	バーナ	壁面	対称面	出口
$u_i$	$u_{in}$	0 (すべりなし)	$\frac{\partial u_i}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial u_i}{\partial x} = 0$
$k$	$0.0003 \times u_{in}$	W.F.	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$
$\varepsilon$	$k_{in}^{3/2} / 0.003D$	W.F.	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$
$h$	$h_{in}$	$h_{wall}$	$\frac{\partial h}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial h}{\partial x} = 0$
$\frac{m_{Ovm}}{m_{Ovm}} \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O}} \frac{m_{Ash}}{m_{Ash}}$	0	$\frac{\partial m_i}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial m_i}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial m_i}{\partial x} = 0$

(注) W.F.: 壁関数,  $n$ : 壁と垂直方向,  $D$ : スロート径

すべりなし、乱流特性量に対し一般的な壁関数、エンタルピに対し壁温から計算されるエンタルピで与えた。

各バーナ出口での燃焼用空気のスワールのモデル化を第 1 図に示した。図中で円はバーナスロートを示しており、内部の 4 点から微粉炭とともに燃焼用空気が炉内に流入するものとした。軸方向速度成分  $U_B$  は一定とし、流入角度  $\theta$ 、スワール数を各バーナについて与えることで、流量、角運動量が実現されるように代表接線速度成分 ( $W_S$ ) と噴流の拡がりモデル化速度成分 ( $V, W$ ) を計算した。微粉炭も各バーナについて円内の 4 点から流入するものとし、その粒径分布と各粒径の重量割合を与える。粒子の初速度は空気流速と同じとした。

4. 微粉炭の燃焼モデル

本解析コードを石炭焚きボイラ火炉内の数値シミュレーションに適用するにあたり、

1. 微粉炭の粒径分布
  2. 石炭性状
  3. 揮発分の放出とその燃焼過程
  4. チャーの酸化過程
- についてモデル化を行なった。

4.1 微粉炭の粒径分布

微粉炭の粒径分布は、Rosin-Rammler の分布関数などで表すことができるが、本解析コードでは粒径分布と各粒子径の質量割合を各バーナについて与える。

4.2 揮発分の放出とその燃焼過程

火炉に投入された微粉炭は急速に加熱され、揮発分を放出する。その揮発分の放出量は、JIS の工業分析で規定される揮発分量とは異なり、微粉炭の粒子温度などに依存する。われわれは、性状の異なる 5 種類の石炭を用いて乾留実験を行ない、熱分解過程での揮発分放出量を計測し、つぎの実験式を得た<sup>(1)</sup>。

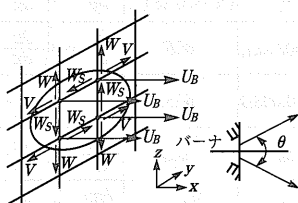
$$V_0 = Q \cdot VM_p$$

$$Q = 3.4 \exp(-2870/RT_p) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、揮発化係数  $Q$  は工業分析による揮発分量  $VM_p$  に対する粒子温度  $T_p$  での放出揮発分の比を示し、1400°C で 1.4 となる。

揮発分の放出速度は、次式<sup>(10)</sup>で与えた。

$$\frac{dV}{dt} = k_1 (V_0 - V)$$



第 1 図 バーナ出口でのスワールのモデル化  
Fig. 1 Modeling of burner swirl

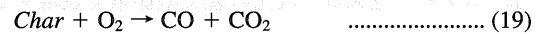
$$k_1 = 2.08 \times 10^4 \exp(-22000/RT_p) \quad \dots\dots\dots (17)$$

また、気相に放出された揮発分は一段反応で  $CO_2, H_2O$  が生成するものとした。その燃焼速度を次式で与えた。

$$R_{fu,CK} = -10^{10} \rho^2 T^{1/2} m_{uvm} m_{O_2} \exp(-2054/RT) \quad \dots\dots\dots (18)$$

4.3 チャーの酸化過程

チャーの酸化反応は、バーナ付近での  $CO$  生成過程を評価する目的で、つぎのような反応をモデル化した。



チャー粒子はその酸化過程で、粒径一定とし粒子密度が変化するものとし、チャーの質量変化を次式で与えた。

$$\frac{dm_c}{dt} = -K_{eff} \cdot S_p \cdot \rho_p \cdot \beta \cdot Y_{O_2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで総括反応速度定数  $K_{eff}$  は、チャー表面への  $O_2$  の拡散とチャー表面での化学反応を考慮して、次式で評価した。

$$\frac{1}{K_{eff}} = \frac{1}{K_C} + \frac{1}{K_d} \quad \dots\dots\dots (22)$$

また、チャーからの  $CO$  の生成割合は、C.Y.Wen ら<sup>(11)</sup>の実験式を採用した。

$$\frac{[CO]}{[CO_2]} = 10^{3.4} \exp(-12400/RT_p) \quad \dots\dots (23)$$

生成した  $CO$  の  $CO_2$  への酸化反応速度は、 $CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$  の反応と火炎中の  $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$  の反応が主體的であるとし、 $H_2O$  の平衡状態を考慮し次式で与えた。

$$\frac{d[CO]}{dt} = -k_2 [CO][O_2]^{1/2} [H_2O]^{1/2}$$

$$k_2 = 1.3 \times 10^{14} \exp(-3000/RT) \quad \dots\dots\dots (24)$$

4.4 石炭性状の数値解析への応用

石炭性状はその産炭地により大きく異なる。微粉炭燃焼において、石炭性状が燃焼に与える影響を予測、評価することは重要である。一般に石炭性状は、工業分析、元素分析で与えられるが、本解析コードでもこれら分析値にもとづき、石炭性状の影響を評価できるモデルを構築した。

揮発分およびチャーの組成を元素分析値から第 4 表に示したように評価した。ここで、石炭中の酸素、水素は揮発過程ですべて放出し、炭素、窒素、硫黄は一定の比率で放出するものと仮定した。炭素、窒素、硫黄の放出比率は揮発分放出率から次式で与えた。

$$V_{CNS} = \frac{V_0 - H - O}{C + N + S} \quad \dots\dots\dots (25)$$

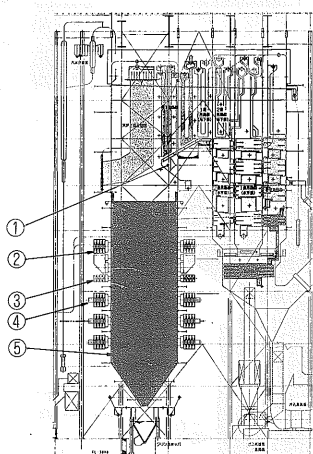
発熱量は、揮発分、チャーを構成する組成より算出した。

第4表 石炭性状の評価

Table 4 Properties of volatile matter and char

種別	揮発分	チャー	
項目			
成分 (%dry)	C	$C \cdot VCNS$	$C \cdot (1-VCNS)$
	H	H	-
	O	O	-
	N	$N \cdot VCNS$	$N \cdot (1-VCNS)$
	S	$S \cdot VCNS$	$S \cdot (1-VCNS)$
発熱量 (kcal/kg)	$8100 \times C \cdot VCNS$ $+34000 (H-O/8)$ $+2200 \times S \cdot VCNS$	$8100 \times C + 2200 \times S$ $\times (1-VCNS)$	

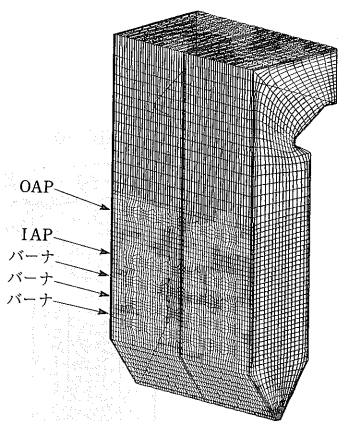
(注) C:炭素 H:水素 O:酸素 N:窒素 S:硫黄



(注) ①:ノーズ ③:IAP  
②:OAP ④:バーナ  
⑤:火炉

第2図 1000MW 微粉炭焼きボイラ

Fig. 2 1000MW pulverized coal firing boiler



第3図 ボイラ火炉の計算格子

Fig. 3 Computational grid for the boiler furnace

## 5. 石炭焼きボイラ火炉内の熱流動・燃焼・伝熱解析

第2図に示した1000MW石炭焼きボイラを対象に、本解析コードを適用した。火炉は、高さ68m、炉幅32mで

第5表 基準解析条件

Table 5 Operating condition

給炭量 (t/h)	331.5
粒子サイズ (μm)	10, 20, 50, 100 (各25wt%)
全空気量 (t/h)	4025.2
空気温度 (K)	613
2段燃焼率 (%)	IAP: 8.4, OAP+SAP: 21
壁温 (K)	973
壁の吸収係数	0.8

第6表 石炭性状

Table 6 Coal properties

(a) 工業分析値 (恒湿ベース) (b) 元素分析値 (無水ベース)

固有水分 (%)	2.5	炭素 (%)	66.2
固定炭素 (%)	50.5	水素 (%)	3.9
揮発分 (%)	27.0	酸素 (%)	6.7
灰分 (%)	20.0	窒素 (%)	1.7
		硫黄 (%)	1.0
		灰 (%)	20.5

(注) 発熱量: 26 MJ/kg

第7表 計算条件

Table 7 Conditions of case study

種別	case I	case II	case III
項目			
ボイラ負荷 (MW)	1000	1000	1000
スワール数	0.5	0.3	0.3
ガスミキシング率 (%)	0	0	10

あり、バーナは3段対向で48バーナ、OAP (オーバーエアポート), IAP (インターステージエアポート) がそれぞれ16個、SAP (サイドエアポート) がOAP段の両端に4個設置されている。

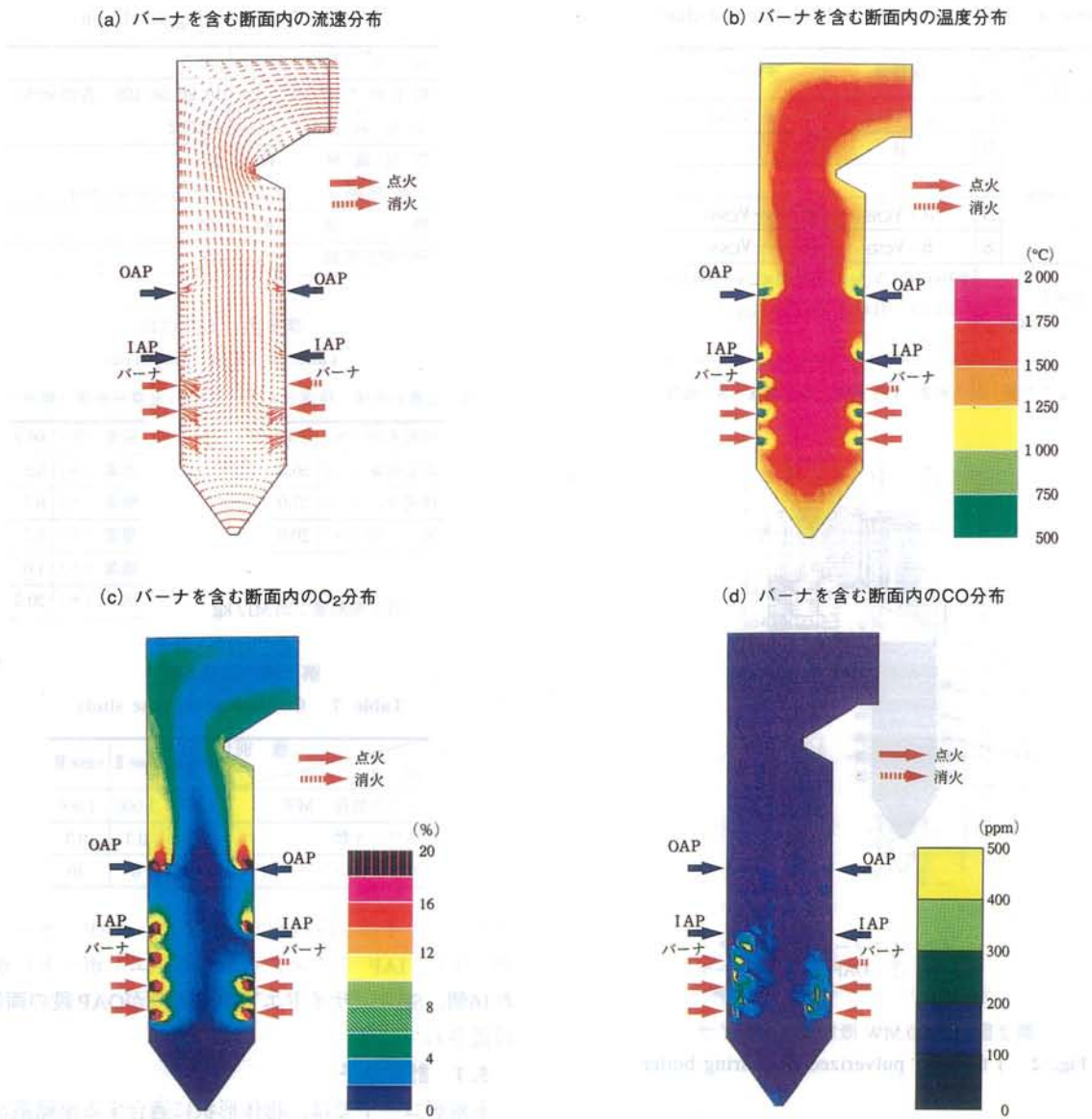
### 5.1 計算格子

本解析コードでは、物体形状に適合する座標系が使用できる。第3図に本解析に用いた計算格子を示した。火炉幅方向の対称性を考慮し、解析対象は火炉の半分とした。計算格子点数は43520 ( $x \times y \times z = 20 \times 34 \times 64$ ) 点で与え、現象が大きく変化するバーナからOAPまでの領域の格子分割を細かく設定した。

### 5.2 計算条件

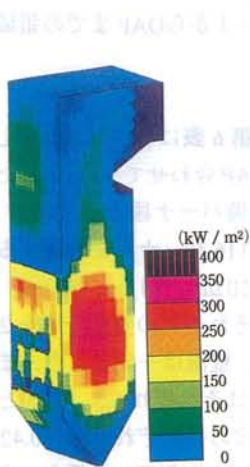
第5表に解析条件を、第6表に石炭性状を示した。2段燃焼率は、OAP, IAP, SAP合わせて30%とした。バーナは、缶後上段バーナを予備バーナ段とし、缶前3段 (24バーナ)、缶後中、下段 (16バーナ) を使用する条件とした。微粉炭粒子サイズは10μm, 20μm, 50μm, 100μmの四つの粒子径で代表し、それぞれの質量分率を25wt%で与えた。今回の解析では、壁温は一定とした。また、粒子の複素屈折率( $n, n'$ )の値はそれぞれ1.5, 0.05とし、粒子の吸収係数と散乱係数を求めそれぞれ0.84, 0.42を得た。

本解析では、三つのケーススタディを行なった。第7表にその計算条件を示した。ケースIは基準条件とし、ケースIIはバーナスワール数 (旋回強度) の変化の影響、ケー



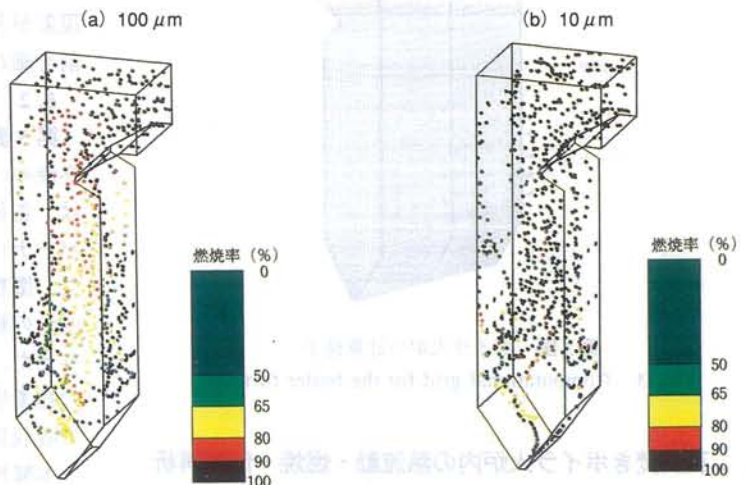
第 4 図 火炉内の流速, 温度, O<sub>2</sub>, CO 分布

Fig. 4 Distribution of flow, temperature, O<sub>2</sub> and CO in the furnace



第 5 図 火炉壁収熱率分布

Fig. 5 Predicted radiative heat flux on the furnace wall



第 6 図 燃焼過程における微粉炭粒子の軌跡

Fig. 6 Particle trajectories of pulverized coal in the combustion process

スⅢは排ガス混合の影響を評価した。

5.3 ボイラ火炉内の熱流動と微粉炭燃焼

第4図にケースⅠについてバーナを含む縦断面の流れおよび炉内ガス温度、O<sub>2</sub>濃度、CO濃度の分布を示した。下段、中段バーナの領域での燃焼ガスのフローパターンは、ほぼ対称になっており、缶後上段バーナを消火した状態でも、火炉奥行き方向に対し偏りが生じてない。この領域での炉内ガス温度は、約1700℃でほぼ均一となっている。またO<sub>2</sub>は、バーナ出口で急速に消費され、2段燃焼特有の低濃度になる。COは局所的に500ppm程度生成されるが、ただちに酸化され低濃度のCOレベルになる。

OAPからの空気噴流は、燃焼ガスと混合されO<sub>2</sub>が消費されている。また、火炉出口において様な速度分布が得られ、ノーズの形状が適切であることが確認できた。

第5図に火炉壁の収熱率分布をケースⅠについて示した。バーナゾーン側壁で最大400kW/m<sup>2</sup>の収熱率を示し、実機での計測結果と良く一致した。粒径10μm、100μmの粒子軌跡とその微粉炭の燃焼率の変化をケースⅠについて第6図に示した。10μmの微粉炭はすみやかに燃焼が完結するが、100μmの微粉炭は燃焼完結に時間を要する。火炉出口での灰中未燃分は、0.5%程度であり、その大部分が大粒径の微粉炭粒子の燃え切りの影響を受けていることが確認できた。

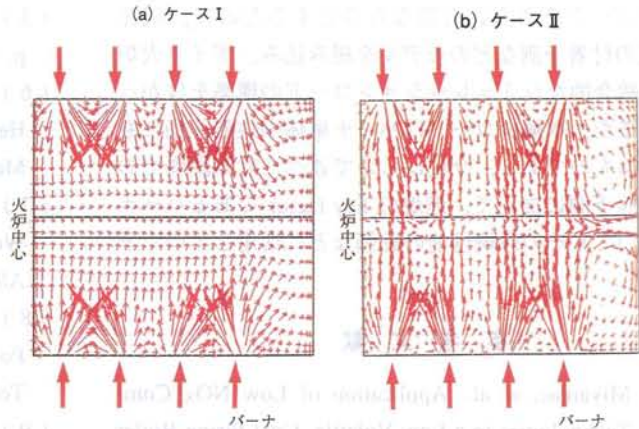
5.4 ボイラ火炉計画への応用

第7図、第8図にケースⅠ、ケースⅡについてバーナを含む横断面での流速分布と火炉内温度分布を示した。バーナ出口でのスワール数が火炉内の流動状態に大きな影響を及ぼす。両ケースとも火炉奥行き方向に対しほぼ対称な流動を示すが、旋回力が弱いケースⅡでは、バーナ軸方向の噴流の運動量の増加により、火炉側壁付近にケースⅠで見られない循環流が形成される。また、スワール数は燃焼温度にも影響を与え、ケースⅡではケースⅠに比べて火炉中央部に温度の高い領域が形成される。

第9図にケースⅡ、ケースⅢの火炉高さ方向について平均収熱率分布の比較を示した。両ケースとも上段バーナレベルで平均収熱率が高くなるが、ケースⅢでは排ガス混合にともなう火炎温度の低下によりバーナゾーンでの収熱率が低くなる。また、全収熱率を比較するとケースⅡに対してケースⅢでは約12%程度低くなる結果を示した。

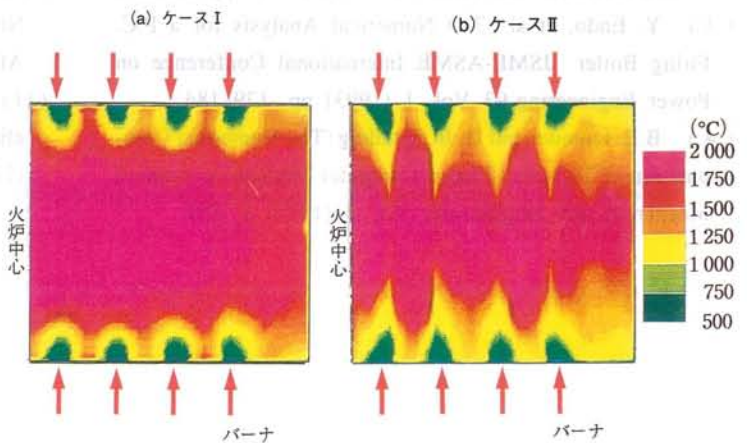
6. 結 言

ボイラの計画について、これまで以上の精密な検討が要求されており、設計支援ツールの一つとして数値解析コードを開発した。本解析コードは、石炭性状や運転操作パラメータのボイラに与える影響を精度良く評価でき、火炉計画の検討などに使用されている。



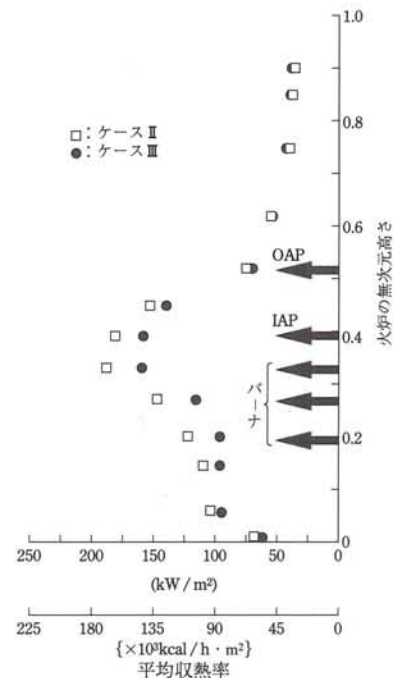
第7図 下段バーナ面における流速分布

Fig. 7 Flow pattern in the horizontal plane of the lowest burner row



第8図 下段バーナ面における温度分布

Fig. 8 Temperature distribution in the horizontal plane of the lowest burner row



第9図 火炉高さ方向の平均収熱率分布

Fig. 9 Mean radiative heat flux against furnace height

本解析コードをさらに有効なものとするために、現在  $\text{NO}_x$  や灰の付着予測などのモデルを組み込み、ボイラ火炉に対する総合的なシミュレーションコードの構築をはかっている。また、本解析コードはバーナ単体の性能評価にも適用できるものであり、今後はここで述べた計画段階での火炉の性能予測に加えて、燃焼の key factor であるバーナ単体についてもその燃焼性能の評価などに活用していく予定である。

### 参 考 文 献

- (1) S. Miyamae, et al.: Application of Low  $\text{NO}_x$  Combustion Technologies to a Low Volatile Coal Firing Boiler Joint Symp. on Stationary  $\text{NO}_x$  Control (1989)
- (2) 河合理文 ほか 4 名: ボイラ火炉内の燃焼流動解析 石川島播磨技報 第31巻第4号 1991年7月 pp.242-246
- (3) Y. Endo, et al.: 3-D Numerical Analysis for a P.C. Firing Boiler JSME-ASME International Conference on Power Engineering-93 Vol. 1 (1993) pp. 179-184
- (4) B.E. Launder and D. B. Spalding: The Numerical Computation of Turbulent Flows Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol. 3 (1974) p. 269
- (5) D.B Spalding Int. 16th Symp. on Combustion (1977) p. 1 657
- (6) W.A. Fiveland: Discrete Ordinate Method for Radiative Heat Transfer in Isotropically and Anisotropically Scattering Media ASME HTD Vol. 49 (1985) pp. 1-31
- (7) T.F. Smith et al.: Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model Transactions of the ASME Vol. 104 (1982. 11) pp. 602
- (8) R. Viskant et al.: On the Radiative Properties of Polydispersions: A Simplified Approach Combust. Sci. and Tech. Vol. 44 (1985) pp. 143-159
- (9) T.F. Wall, R.P. Gupta, et al.: Fly Ash Characteristics and Radiative Heat Transfer in Pulverized-Coal-Fired Furnace Combust. Sci. and Tech. Vol. 26 (1981) pp. 107-121
- (10) J.W. Mitchell and J.M. Tarbell: A Kinetic Model of Nitric Oxide Formation During Pulverized Coal Combustion AIChE Journal Vol. 28 No. 2 (1982) pp. 302-311
- (11) C.Y.Wen, et al.: Entrainment Coal Gasification Modeling Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. Vol. 18 No. 4 (1979) pp. 684-695