

微粉炭バーナの設計・開発支援ツールの開発

遠藤 喜彦 エネルギー・プラント事業本部電力事業部燃焼技術部
 宮前 茂広 エネルギー・プラント事業本部電力事業部燃焼技術部 専門課長
 高野 伸一 エネルギー・プラント事業本部電力事業部燃焼技術部
 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

The Supporting Tool for Design and Development of Pulverized Coal Burners

Yoshihiko Endo, Shigehiro Miyamae,
 Shin-ichi Takano, Yasunori Ando

Supercomputers and EWSs (engineering work station) with a large memory and high computational speed have made numerical simulation techniques useful in many engineering field. IHI has developed a 3-dimensional simulation tool to support the design and development of pulverized coal burners for boilers. This tool facilitates analysis of the flow field in combustion, heat transfer, and NO_x formation of pulverized coal firing near the burner. This paper outlines the analytical method application to the IHI-FD burner.

1. 緒言

近年のコンピュータの発達には目覚ましいものがあり、スーパーコンピュータなどハード面の進歩は著しい。また高性能なEWS (Engineering Work Station)が比較的 low cost で購入できるようになり、数値シミュレーション技術がさまざまな分野で利用されている。当社においても CFD (Computational Fluid Dynamics) コードを自社開発し、船舶、航空機など広い分野にわたり利用している^{(1),(2),(3)}。

最近、一段ときびしくなった NO_x 低減や灰中未燃分低減に対するニーズにマッチするためには、従来実施していた試験炉での燃焼試験だけでは不十分であり、炉内での燃焼現象を十分に解明、理解していく必要がある。とくに微粉炭ボイラにおいては、使用炭種により性状が大きく異なるため、それが燃焼性能、収熱特性、環境性能やボイラの運用性に影響を及ぼす。したがって、あらかじめ石炭性状がボイラやバーナの性能に及ぼす影響を予測、把握しておくことが必要となり、そのため、当社では微粉炭ボイラ火炉内⁽⁴⁾に対する 3次元流動、伝熱、燃焼シミュレーションコードを開発している⁽⁴⁾。本シミュレーションコードの特長として、まず微粉炭燃焼のモデルに、当社での微粉炭燃焼に関する基礎研究から構築したモデルを用いていることが挙げられる。本モデルは石炭性状の相違を考慮しておりバーナ近傍やボイラ火炉内の燃焼、伝熱、NO_x 生成・分解挙動に及ぼす影響を予測、評価できるものである。また、バーナ近傍やボイラ火炉内の現象は、流動、伝熱、燃焼、粒子の挙動が相互に作用しあつた非常に複雑なものであるが、これらの現象を一括して解析することも特長の一つである。そして上述のようにコードはすべて自社開発であ

り、コードの改良が容易で適用範囲も広い。

この 3次元流動、伝熱、燃焼シミュレーションコードを効果的に微粉炭バーナの設計・開発に適用することを目的に、微粉炭バーナの設計・開発支援ツールを開発した。本稿では支援ツールの解析手法と解析例を紹介する。

2. 数値解析手法

バーナ近傍の現象は非常に複雑であるが、本支援ツールは、これらの現象にあつた数値モデルを用い、それぞれの現象の相互作用を考慮しながら解析を行なっている。本稿では、数値モデルの概要を紹介する。

2.1 気相の支援方程式

バーナ近傍のように、強旋回流を伴う流れ場に対する燃焼シミュレーションでは、伝熱、燃焼、粒子挙動も含めて 3次元的に解析を行なう必要があり、計算格子点数も多くなるため、計算時間や解析の目的に応じて乱流モデルを決定しなければならない。本支援ツールでは、一般に広く用いられている $k-\epsilon$ 乱流モデルと強旋回流の解析に適しているといわれている ASM (Algebraic Stress Model) を組み込んでいる。流れ場を 3次元定常非圧縮性流れとし、乱流モデルに ASM を用いると円筒座標系での流れ場の支援方程式は、次式にまとめられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w \phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + S_{\phi} + S_{\phi p} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ は解くべき変数、 Γ_ϕ は各変数の有効拡散係数、 S_ϕ 、 $S_{\phi p}$ はそれぞれ各変数に対するソース項および粒子からのソース項であり、第1表に示した。

(1)式、第1表に使用した記号は、それぞれつぎのことを意味する。

- x, r, θ : 円筒座標系 (m, m, °)
- u, v, w : x, r, θ 方向の時間平均流速成分 (m/s)
- ρ : 流体の密度 (kg/m³)
- p : 圧力 (Pa)
- k : 乱流運動エネルギー (m²/s²)
- ϵ : k の散逸率 (m²/s³)
- μ : 流体の粘性係数 (kg/(m·s))
- $\overline{u_i u_j}$: Reynolds 応力のテンソル成分 (m²/s²)
- h : 総エンタルピー (J)
- R_x, R_r, R_θ : x, r, θ 方向の合成放射エネルギーフラックス (J/m²·s)
- m_{ovm} : 微粉炭からの生成ガス質量分率
- m_{chr} : チャーからの生成ガス質量分率
- m_{uvm} : 未燃揮発分の質量分率
- m_{co} : チャーから生成したCOの質量分率
- m_p : 粒子質量 (kg)
- u_p, v_p, w_p : x, r, θ 方向の粒子速度成分 (m/s)
- h_p : 粒子からのエンタルピー (J)
- t : 時間 (s)

ここで乱流燃焼モデルには、EBU(Eddy Break Up)モデルを、放射伝熱解析には6-Fluxモデルをそれぞれ用いた。また境界条件は第2表に示したとおりである。

2.2 粒子の運動方程式

粒子挙動はPSIC(Particle Source in Cell)法により評価しており、円筒座標系で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、各方向に対してそれぞれ次式で表せる。

$$\frac{du_p}{dt} = -F(u_p - u) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = -\frac{w_p^2}{r} - F(v_p - v) - g \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = -\frac{v_p w_p}{r} - F(w_p - w) - g \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$F = -\frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} C_d \frac{R_{ep}}{24} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C_d は抵抗係数、 D_p は粒子径、 ρ_p は粒子密度、 R_{ep} は粒子 Reynolds数である。

本支援ツールでは、流れの乱れによる粒子の移動も考慮しており、詳細は既報⁽⁴⁾を参照されたい。また、粒子の運動ならびに燃焼にともなう粒子の質量、運動量およびエンタルピーの変化は、ガス側のソース項($S_{\phi p}$)として評価し、そのソース項を第1表にまとめた。

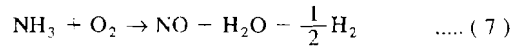
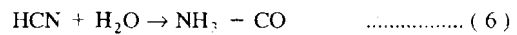
2.3 微粉炭燃焼のモデル化

微粉炭燃焼のモデルの構築にあたり以下の項目についてモデル化を行なった。

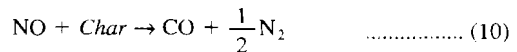
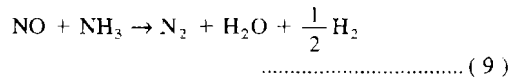
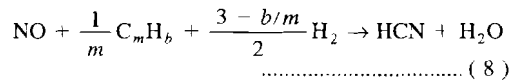
- (1) 微粉炭の粒径分布
- (2) 石炭性状の相違が燃焼に与える影響
- (3) 揮発分の放出とその燃焼過程
- (4) チャーの酸化過程
- (5) 微粉炭、チャーの放射物性
- (6) NO_x生成、分解過程

ここでは、NO_x生成・分解モデルについて概略紹介するが、燃焼にともない発生するNO_xの大部分はNOのため、以降の解析はNOのみについて考察する。なお、上記(1)から(5)のモデルについては既報⁽⁴⁾を参照されたい。

発揮過程で放出される窒素(N)分は、すべてHCNとし、その放出量は当社で構築した実験式で評価⁽⁵⁾した。放出されたHCNはつぎの過程でNOを生成する⁽⁶⁾。



生成したNOはつぎの過程で分解する。



発揮過程でチャー中に残存したN分は、チャーの酸化過程でNOとして放出される。また、サーマルNOについても考慮している。

3. 支援ツールの機能

数値シミュレーション技術を設計、開発の段階で効率的に活用するためには、利用者が数値シミュレーションおよびハードウェアの専門的な技術をもっていなくても容易に利用できるものとする必要がある。とくにバーナのように形状が3次元で複雑な場合、計算格子の生成、境界条件および解析条件の設定には多大な労力を要する。また、解析結果は膨大な数の数値群となるが、これらの数値群から必要なデータを効率的に取り出すことも必要である。

したがって、支援ツール構築にあたり、第3表に示した機能を持たせ、解析の前処理、後処理を簡略化した。以下に各機能の内容を解析例にしたがって説明する。解析対象としたバーナは、IHI-DFバーナでその構造および予測されるフローパターンを第1図に示す。

第1表 $\phi, \Gamma_\phi, S_\phi, S_{\phi p}$ のまとめ
Table 1 Summary of $\phi, \Gamma_\phi, S_\phi, S_{\phi p}$

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ	$S_{\phi p}$
l	0	0	$-\frac{\partial m_p}{\partial t}$
u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{r\partial\theta}(\mu \frac{\partial w}{\partial x})$ $-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}\bar{u}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\bar{r}\bar{u}\bar{v}) - \frac{\partial}{r\partial\theta}(\rho \bar{u}\bar{w})$	$-\frac{\partial m_p \mu_p}{\partial t}$
v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{r\partial\theta}[\mu(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r})] + \frac{\rho w^2}{r}$ $-\frac{2\mu}{r}(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial\theta} + \frac{v}{r}) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}\bar{v}) - \frac{\partial}{r\partial r}(r\bar{r}\bar{v}\bar{v}) - \frac{\partial}{r\partial\theta}(\rho \bar{v}\bar{w}) + \frac{\rho}{r} \bar{w}\bar{w}$	$-\frac{\partial m_p w_p}{\partial t}$
w	μ	$-\frac{\partial p}{r\partial\theta} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{r\partial\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\{r\mu(\frac{\partial v}{r\partial\theta} - \frac{w}{r})\} + \frac{\partial}{r\partial\theta}[\mu(\frac{\partial w}{r\partial\theta} - \frac{2v}{r})]$ $+ \frac{\mu}{r}(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{r\partial\theta} - \frac{w}{r}) - \frac{\rho w w}{r} - \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}\bar{w}) - \frac{\partial}{r\partial r}(r\bar{r}\bar{v}\bar{w}) - \frac{\partial}{r\partial\theta}(\rho \bar{w}\bar{w}) - \frac{\rho}{r} \bar{v}\bar{w}$	$-\frac{\partial m_p w_p}{\partial t}$
k	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon}$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon}$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon}$	$C_s \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho \frac{k}{\epsilon} (\bar{u}\bar{v} \frac{\partial(rk)}{r\partial r} + \bar{u}\bar{w} \frac{\partial k}{r\partial\theta}) \} + C_s \frac{\partial}{r\partial r} \{ \rho \frac{rk}{\epsilon} (\bar{u}\bar{v} \frac{\partial k}{\partial x} + \bar{v}\bar{w} \frac{\partial k}{r\partial\theta}) \}$ $+ C_s \frac{\partial}{r\partial\theta} \{ \rho \frac{k}{\epsilon} (\bar{u}\bar{w} \frac{\partial k}{\partial x} - \bar{v}\bar{w} \frac{\partial(rk)}{r\partial r}) \} + \rho p_k - \rho_t$	0
ϵ	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon}$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon}$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon}$	$\frac{\partial}{\partial x} \{ \rho \frac{k}{\epsilon} (\bar{u}\bar{v} \frac{\partial(r\epsilon)}{r\partial r} - \bar{u}\bar{w} \frac{\partial \epsilon}{r\partial\theta}) \} - \frac{\partial}{r\partial r} \{ \rho \frac{rk}{\epsilon} (\bar{u}\bar{v} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} - \bar{v}\bar{w} \frac{\partial \epsilon}{r\partial\theta}) \}$ $+ \frac{\partial}{r\partial\theta} \{ \rho \frac{k}{\epsilon} (\bar{u}\bar{w} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \bar{v}\bar{w} \frac{\partial(r\epsilon)}{r\partial r}) \} + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} p_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$	0
h	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon} / \sigma_h$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon} / \sigma_h$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon} / \sigma_h$	$2\alpha_s (R_s + R_r + R_\theta - 3E)$	$\frac{\partial m_p h_p}{\partial t}$
m_{ovm}	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon} / \sigma_{ovm}$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon} / \sigma_{ovm}$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon} / \sigma_{ovm}$	0	$-\frac{\partial m_p}{\partial t}$
m_{chr}	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon} / \sigma_{chr}$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon} / \sigma_{chr}$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon} / \sigma_{chr}$	0	$\frac{\partial m_p c_h}{\partial t}$
m_{uvm}	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon} / \sigma_{uvm}$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon} / \sigma_{uvm}$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon} / \sigma_{uvm}$	R_{uvm}	$-\frac{\partial m_{pvm}}{\partial t}$
m_{co}	$\Gamma_{\phi, x} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{u}\bar{u}}{\epsilon} / \sigma_{co}$ $\Gamma_{\phi, r} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{v}\bar{v}}{\epsilon} / \sigma_{co}$ $\Gamma_{\phi, \theta} = \rho \frac{k}{\epsilon} \frac{\bar{w}\bar{w}}{\epsilon} / \sigma_{co}$	R_{co}	$-\frac{\partial m_{pco}}{\partial t}$

第2表 境界条件

Table 2 Boundary conditions

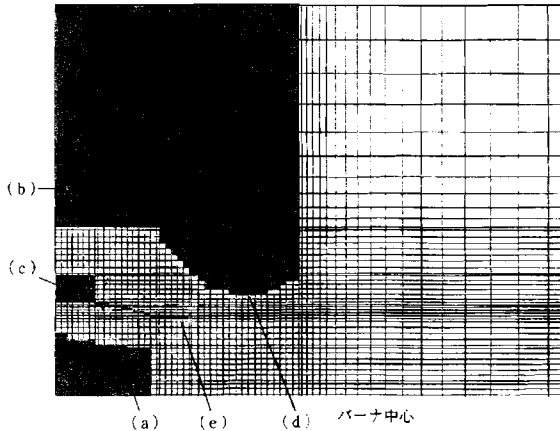
ϕ	壁面	中心	出口	対象面	
u	0	$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$		$\phi_{k+1} = \phi_{k-n+1}$	
v					$u = 0$
w					$w = 0$
k	W.F.	$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$	$\phi_{k+1} = \phi_{k-n+1}$	
ε	W.F.		$\phi_{k+2} = \phi_{k-n+2}$		
h	h_{wall}				
m_j	$\frac{\partial m_j}{\partial n}$				

(注) W.F.: 壁関数, n : 壁と垂直方向
 $j = ov, u, v, w, chr, CO$

第3表 支援ツールの機能一覧

Table 3 Functions of the tool

機能	内容
自動格子生成 (対話形式)	・22項目の設計諸元の入力で 3次元格子の自動生成
条件の 対話形式入力	・境界条件: 変更の必要なし ・解析条件: バーナ運用条件の入力のみ
後処理機能	・設計・開発支援パラメータの出力 ・グラフィック処理



第2図 計算格子 (スロット部拡大)
 (注) (a) 微粉炭ノズル (d) スロット
 (b) アウターベーン (e) フローディバイダ
 (c) インナーベーン

Fig. 2 Computational grid

を示す (スロット部拡大). ここで格子点数は 33 600点
 $(x \times r \times \theta = 80 \times 60 \times 7)$ である.

3.2 解析条件の設定

本支援ツールでは, 解析条件も対話形式の入力とした.
 利用者は, バーナの運転条件に対応した下記に示す項目に
 ついて入力するだけで解析を実行できる.

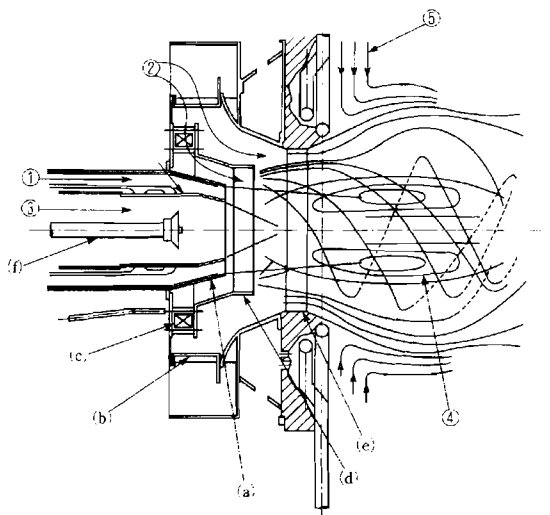
- (1) 石炭性状 (工業分析値, 元素分析値)
- (2) 微粉炭量
- (3) 1次空気量と微粉炭量の重量比 (air/coal)
- (4) 2段燃焼率
- (5) 排ガス O_2
- (6) 燃焼用空気温度
- (7) 微粉炭の粒径分布

3.3 データの後処理

解析結果は膨大な数値群として出力され, 数値群はグラ
 フィックソフト用のデータに自動的に変換され, ファイル
 に格納される. 一方, 対象としたバーナは第1図に示した
 ように, 主にアウターベーンにより燃焼用の空気に強い旋
 回を与え, 内部循環領域 (高温の燃焼ガスが後流から逆流
 してくる領域) を形成し, 火炎の安定性を確保している.
 そのため, バーナ近傍の旋回強度やバーナ出口部の流速分
 布などはバーナ近傍の火炎の状態を評価する上での指標と
 なる. そこで本支援ツールでは, これらの数値群を, 一般
 的な流線やガス成分の濃度分布に加えて, バーナの設計・
 開発を支援するデータ (スワール数, バーナ出口での流速
 分布, 内部循環領域の状態など) に加工し, 出力するもの
 とした. ここでスワール数 (S) は, 角運動量の軸方向フ
 ラックス G_θ と軸方向運動量の軸方向フラックス G_x を用い
 次式で定義される⁽⁷⁾.

$$S = \frac{G_\theta}{D_T / 2 G_x} = \frac{\int_0^{D_T/2} \rho u w r^2 dr}{D_T / 2 \int_0^{D_T/2} \rho u^2 r dr} \quad (11)$$

ここで, D_T はスロット径である.



(注) ①: 1次空気+微粉炭 (a) 微粉炭ノズル
 ②: 2次空気 (b) アウターベーン
 ③: 3次空気 (c) インナーベーン
 ④: 内部循環流 (d) フローディバイダ
 ⑤: 外部循環流 (e) スロット
 (f) 油ガン

第1図 IHI-DFバーナ

Fig. 1 IHI-DF burner

3.1 自動格子生成

数値シミュレーションにおける計算格子の作成は, 解
 の精度, 計算の収束性の点から非常に重要であり, また
 格子点数および格子間隔を適切なものにする必要がある.
 本支援ツールでは利用者がバーナの設計諸元のみを入力
 することで自動的に3次元の計算格子を作ることができる.
 入力は対話形式であり, 既存のデータファイルを流
 用することもできるため, きわめて短時間でこなせる.
 第2図は本支援ツールを用いて作成した計算格子の一例

4. 解析結果

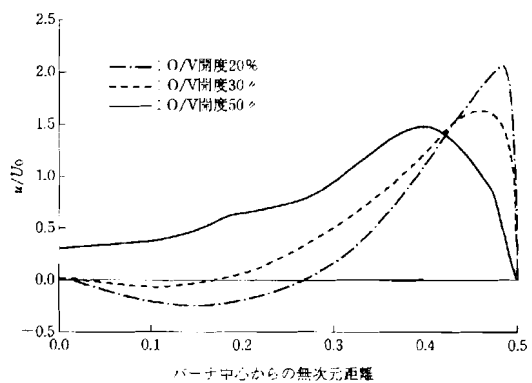
4.1 フローパターン解析

前述のようにアウターベーンは内部循環領域の形成に大きく寄与するためボイラの運転時には、アウターベーンの開度（燃焼用空気の旋回強度）を調整し、火炎の燃焼状態を最適にする。したがって、アウターベーンの開度とフローパターンや燃焼状態をあらかじめ把握することはバーナ計画や運転時において重要である。そこで、アウターベーンの開度に対するバーナ近傍でのフローパターンの変化を本支援ツールを用い解析した。ここでベーン開度は、全閉を0%、全開を100%として示してあり、開度が小さくなるほど燃焼用の空気の旋回力が強くなる。なお、本解析はバーナ近傍のフローパターンの変化を確認することを目的としており、このため燃焼解析は行っていない。

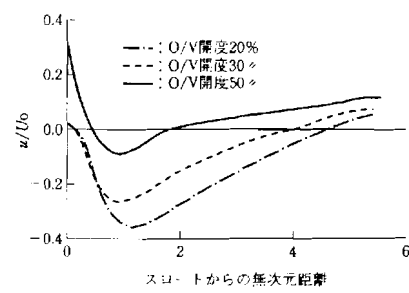
第3図にアウターベーンの開度20, 30, 50%に対するバーナの中心を含む断面でのフローパターンを示す。アウターベーンの開度によりフローパターンが大きく変化しており、開度が小さいとき、すなわち旋回強度が大きいときには、流れはバーナ出口で大きく広がり、バーナ近傍に大きな内部循環領域が形成される（図中の実線が内部循環領域の境界を示す）。逆に、開度が大きくなると、旋回方向の運動量に対し流れ方向の運動量が相対的に大きくなり、流れは広がらず内部循環流も小さくなる。

第4図にスロート部での軸方向流速成分(u)の半径方向の分布を示す。横軸は、バーナ中心からの半径方向の距離をスロート径で無次元化した値で示し、縦軸はスロート部の平均流速(U_0)で無次元化した値で示してある。第4図において、アウターベーンの開度が30%時より20%時の方が旋回強度が強くなり、 u/U_0 の負の領域が大きくなっていることが確認できる。これはバーナ近傍に形成される内部循環領域が大きくなることを示しており、これにより微粉炭の着火が、開度20%の方が安定する傾向にあることを示している。逆に、アウターベーン開度50%時には、スロート断面内に u/U_0 が負の領域が見られない。これより、解析対象としたバーナでアウターベーン開度を50%と比較的開けた状態で運転すると、微粉炭の着火が遅れ、火炎がバーナ先端から離れる可能性が予測できる。

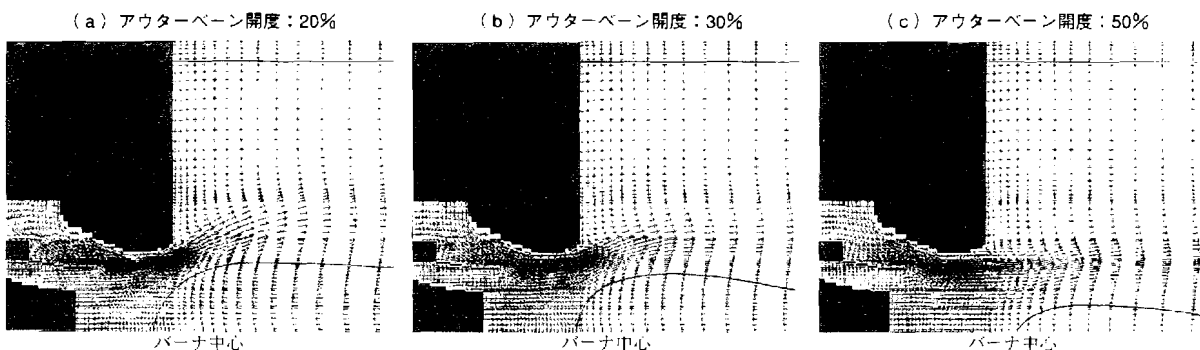
第5図は、バーナ中心軸上の軸方向の流速成分の分布を示したものである。横軸は軸方向の距離をスロート径で無次元化した値で示し、縦軸は第4図と同様にスロート部の平均流速で無次元化した値で示している。第5図において、 u/U_0 が負のところが内部循環領域であり、アウターベーンの開度によりその位置、大きさが異なることが確認できる。すなわちアウターベーンの開度が大きくなるにしたがい、内部循環領域の形成される位置が後流側になり、しかもその範囲が小さくなった。第3図から第5図のフローパターンの相違は、燃焼用空気に与えられる旋回強度の違いにあることから第6図に解析対象としたバーナのアウターベーンの開度に対するスワール数を示した。本図において、アウターベーンの開度が大きくなるにしたがい



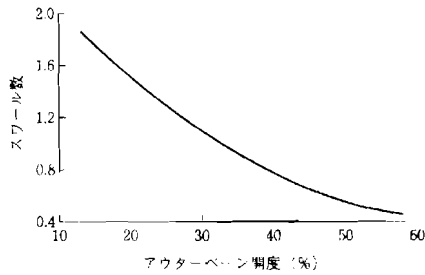
第4図 スロート部での軸方向の流速分布
Fig. 4 Distribution of velocity component u at throat exit



第5図 バーナ中心軸上の軸方向の流速分布
Fig. 5 Distribution of velocity component u on burner center line



第3図 バーナー近傍のフローパターン
Fig. 3 Flow patterns near the burner

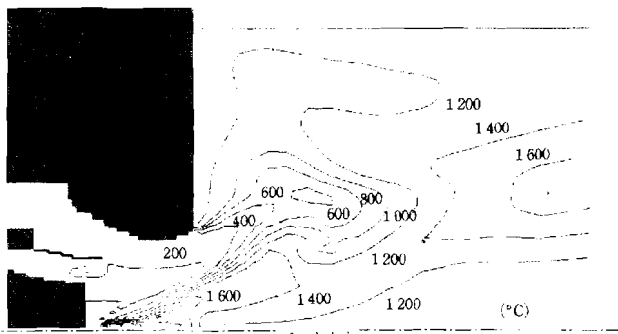


第6図 アウターベーンの開度に対するスワール数の変化
Fig. 6 Swirl number against the opening of the outer vane

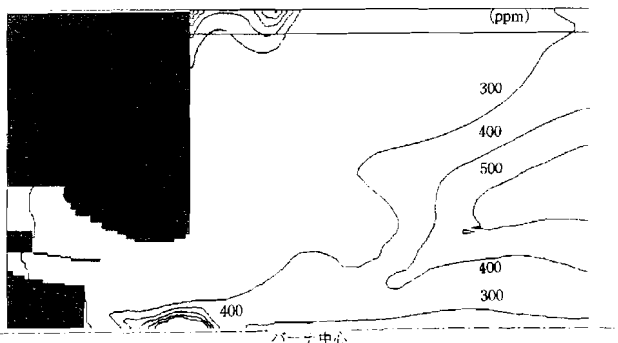
第4表 微粉炭の質量割合
Table 4 Particle size and mass ratio

粒径 (μm)	質量割合 (wt%)
5	20
25	30
60	30
110	15
200	5

(a) 燃焼ガス温度



(b) NO分布



第7図 燃焼解析結果の一例 (スロート部拡大)
Fig. 7 Distributions of temperature and NO

て、スワール数が小さくなり、通常運用開度である40から45%ではスワール数は0.8から0.7となることがわかる。

4.2 燃焼解析

つぎに上記のバーナに対し、微粉炭燃焼を含めた解析例を示す。解析条件は、ボイラの定格負荷、2段燃焼率30%、排ガスO₂濃度3.0%に相当するものとしている。本解析では、微粉炭の粒径分布は五つの代表粒子径で与え、それぞれの質量割合を第4表に示した。

第7図に解析結果の一例として、バーナの中心断面内の燃焼ガスの温度分析、NOの分布を示す。第7図-(a)よりバーナ近傍に高温の内部循環流が形成されており、燃焼が良好であることが確認できる。また、第7図-(b)よりNOの生成、分解挙動も把握することができる。これらの解析結果は、バーナの性能を評価する上で有効な情報となり、バーナの設計段階での性能評価のみならずバーナの開発時においても、バーナ近傍での現象の把握に非常に役立つ。

5. 結 言

数値シミュレーション技術を用い、バーナの最適設計や効率的な開発を可能とすることを目的としたバーナ設計・開発支援ツールの開発を行っており、微粉炭バーナに対する支援ツールを開発した。本支援ツールは、設計者が数値シミュレーションの技術をもっていなくても容易にバーナ近傍の流動、伝熱、燃焼の挙動を解析でき、バーナ性能を事前に評価できるものである。また、バーナの開発段階に本支援ツールを活用することで、燃焼試験に代わり、設計諸元のバーナ性能に及ぼす影響を評価することができる。

今後、本支援ツールを活用し、微粉炭バーナの高度でかつ迅速な開発や信頼性の高い設計に役立てたい。また微粉炭バーナだけでなく油バーナに対しても適用していく予定である。

参 考 文 献

- (1) 河合理文, 遠藤喜彦, 松本貴子, 坪井玲子, 佐々木英治, 類家 誠, 安藤安則: エネルギー・環境関連機器開発へのCFDの応用 石川島播磨技報 第35巻第1号 1995年1月 pp. 5-10
- (2) 増子 章, 伊藤章雄, 澤田信一, 渡邊 修, 蒲谷達雄: 船舶海洋・水理分野での流体数値シミュレーション 石川島播磨技報 第35巻第1号 1995年1月 pp. 11-14
- (3) 山根善行, 澤口 誠, 松本貴子, 安藤安則, 麻生茂, 福田正大: 超音速空力混合現象の研究 石川島播磨技報 第35巻第1号 1995年1月 pp. 28-32
- (4) 遠藤喜彦, 宮前茂広, 安藤安則: ボイラ炉内3次元流動・伝熱・燃焼シミュレーション 石川島播磨技報 第34巻第2号 1994年3月 pp. 93-100
- (5) T. Kiga, S. Miyamae & K. Suzuki: Application of Low NO_x Combustion Technologies to a Low Volatile Coal Firing Boiler Joint Symp. on Stationary NO_x Control (1989)
- (6) 遠藤喜彦, 宮前茂広, 田中 雅, 成川公史, 小倉義己: 一次元微粉炭燃焼シミュレーションによるNO_x生成分解挙動と未燃分排出特性の予測 化学工学会第27回秋季大会研究発表講演要旨集 第2冊 p. 99
- (7) F. C. Lockwood & T. Mahmud: On the Prediction of Pulverized Coal Flame Stability Combust. Sci. and Tech. Vol. 66 pp. 319-328