

数値シミュレーションによる廃熱ボイラの気流混合最適化

菊川裕規¹，中尾里志²，吉田尚平²，亀谷敏博³

¹機械工学科，²機械工学科平成16年度卒業生，³日鉱金属株式会社

The exhaust-heat recovery boiler of a copper refining plant has the role of which oxidizes the sulfide contained gas by blowing air from the exhaust gas discharged in self-melting furnace. When observing an internal phenomenon about the high temperature and large scale phenomenon, the real scale experiment is difficult. Then, in order to solve the problem, the numerical simulation was used. In this research, the numerical simulation of the flow blowing with the exhaust gas in a boiler is carried out. The main purpose of this research is to search the optimal condition for the air entry rate making an optimizing mixed state by visualizing those gases. As a result of calculating by a numerical simulation, it turned out that the circulation style is deeply related to the air current mixture in a boiler. If the big circulation style in a boiler is obtained, it will be thought that air current mixture of an exhaust gas and air is promoted.

Key Words: Computational Fluid Dynamics , Heat Recovery Boiler , Navier-Stokes equation

1. はじめに

銅精錬工場の廃熱回収ボイラは，次の 2 つの目的から使用される．

- (1) 壁面裏に設置された配管内を流れる水を輻射熱で加熱し，水蒸気でタービンを動かす．
- (2) 廃熱回収ボイラ手前の自溶炉から排出される硫化物を酸化させフィルタで回収して除去する．

銅精錬過程の自溶炉内では



の反応が起こっており，左辺第 1 項は銅精鉱，右辺第 1 項はマット（銅品位 65% の銅），右辺第 2 項はスラグ（酸化鉄と珪酸の化合物）を表す．廃熱回収ボイラでは，自溶炉から排出されるこの排ガスから熱を回収すると共に，マット（硫化物）を，空気を吹き込むことで酸化させる役目がある．

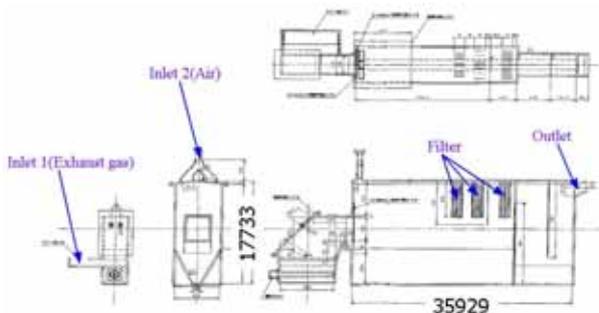


Fig.1 Schematics of Heat Recovery Boiler

本研究ではボイラ内における排ガスと吹き込み空気の流れを数値シミュレーションし，それらの気流混合を可視化することで，理想的な混合状態を作りだすための流入速度の最適条件を求める事を目的とする．

解析対象である廃熱回収ボイラの概要を Fig.1 に示す．この廃熱ボイラは長さが約 36m,高さが約 18m という大きさである．

2. 解析手法

廃熱回収ボイラのように，実物が大きく内部が高温となるような物について内部の現象を観察する場合，実物での実験による現象の観察は難しい．取り扱いを容易にするため，寸法が原型と相似な模型を用いた実験がしばしば利用される．しかし，模型実験では模型作製の手間がかかる他，相似則の緩和によりいくつかの現象に誤差が生じる可能性がある．また，高温状態における熱の浮力の再現や混合状態の可視化を模型実験で行うことは難しい．

そこで，模型実験の問題点を解決するため，コンピュータを使い実物と同寸法の 3 次元モデルを作成し，境界条件や保存則式を考慮させた上で数値シミュレーションを行う．これにより，模型作製のコスト削減を図り，モデル形状の変更や解析条件を変化させた時のデータを得ることが容易となり，時間短縮も可能である．

数値シミュレーションを行うために用いるのが，計算流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) である．CFD では，流体の運動を表現するいくつかの重要な方程式として，ナビエ・ストークス

クスの方程式(運動量保存式)や連続の式(質量保存式)等の支配方程式を離散化し、コンピュータを使って高速に演算して流れ場や温度場等を数値的に解析する手法である。今回は、ADAPTIVE RESEARCH社の流体解析ソフト CFD2000 を用いた。

3. 支配方程式及び離散化法

3-1 ナビエ・ストークスの運動方程式

流れ場全体の様子を詳しく調べるためには流体粒子の運動を詳しく調べなければならず、流体粒子の持つ物理量(3つの速度成分 u, v, w , 密度 ρ , 圧力 p 及び温度 t)を求めることにより流れの様子を調べる事ができる。

これらの物理量は、流体の運動を支配する3つの法則(質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則)と状態方程式から求められる。ここで取り扱う流体が音速より遅い場合は圧縮性の影響は省略され、流れは非圧縮性流れとして取り扱うことができる。また温度一定の非圧縮性流体では密度 ρ は一定であり、粘性係数 μ も一定としてよいため状態方程式やエネルギー保存則とは無関係に調べる事ができる。従って、非圧縮性・等エントロピーの流れは流体粒子の持つ3つの速度成分と圧力から決定され、質量保存則・運動量保存則より求められる。

粘性流体が流動する場合、流体粒子の伸縮・せん断変形などにより流体中に内部応力が発生する。ここで Fig.2 のように各辺の長さが dx, dy, dz , の微小六面体を考える。

この微小六面体に作用する外力は流体に均等に作用する体積力であり、内部応力は流体粒子の単位面積あたりに作用する表面力と等しくなる。また表面力は各面に垂直な応力と面に平行な2つのせん断応力に分けられる。微小六面体に働く表面力の x, y, z , 方向成分は、

$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$$

の9つである。

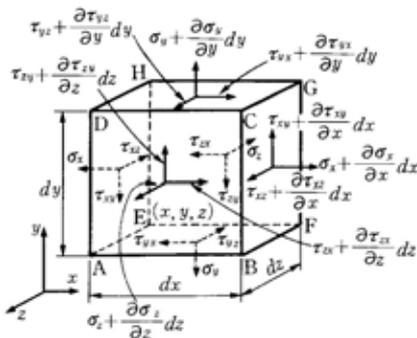


Fig.2 Inside Power Distribution

各面に作用する力を3方向成分について整理すると、 x 方向については

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) dx dy dz$$

y, z 方向についても同様に

$$\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right) dx dy dz$$

$$\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\right) dx dy dz$$

と表される。ここで単位質量に作用する体積力の x, y, z , 方向の成分をそれぞれ X, Y, Z とし、ニュートンの第2法則(運動方程式)を流体粒子に適用すると

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho X + \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho Y + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho Z + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\right)$$

と表される。せん断応力 については

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \frac{d\beta}{dt} = \mu \gamma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

の式が成立する。ここで d はそれぞれ、せん断歪・せん断歪速度を表す。また引張り応力 については

$$\sigma_x = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v}$$

$$\sigma_y = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v}$$

$$\sigma_z = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v}$$

の式が成立する。従って x, y, z 方向の運動方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + f \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + f \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + f \end{aligned}$$

となる。これらを一つの式にまとめると

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}\right) = -\nabla p + \mu \left(\nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u})\right) + \mathbf{f}$$

の形で表される。

・ $u \cdot p \cdot \mu$ はそれぞれ、ある位置と時刻における流体の密度・速度・圧力・粘性率である。方程式は運動量保存則に基づいており、左辺は運動量の時間的・空間的变化を表し、右辺は圧力および粘性による運動量輸送を表している。流体を非圧縮性流体と見なすと、 $\nabla \cdot u = 0$ より

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u + f$$

これを微分形式で表すと、

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i$$

となる。これは粘性流体の運動に対して一般的に成立する方程式で、この方程式はナビエ・ストークス方程式である。

左辺第1項は速度の時間変化を表す非定常項、第2項は各位置での流速分布を表す移流項である。この移流項が非線形性を持っている。右辺第1項は圧力の変化を表す圧力項、第2項は運動及び圧力エネルギーが拡散される変化率を表し、数値計算において分布を平滑化させ安定させる効果を持つ拡散項、第3項は重力等の外力項である。移流と粘性の強さの比率はレイノルズ数と呼ばれる無次元数であり、レイノルズ数がある閾値を越えると微小なかく乱が移流項の非線形性により拡大していくことで流れ場は非定常な乱流となる。

流体のシミュレーションは、この方程式を数値的に解く(離散化する)ことで流体の挙動を予測する。

3-2 エネルギー方程式

固定された微小体積内の流体に熱力学第一法則を適用すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\kappa}{C_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \Phi + Q + S_{H,p}$$

ここに H は局所的な密度で平均化された静的な流体のエンタルピーを表し、 κ は熱伝導率、 C_p は質量で平均化した定圧比熱、 $S_{H,p}$ はエンタルピー生成・吸収項を表す。 Φ はストークスの分子散逸関数で

$$\Phi = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

で表される。

今回解析に用いた流体解析ソフト CFD2000 では、ナビエ・ストークス方程式、及び連続の式、エネルギー方程式等の支配方程式を、有限体積法を用いて離散化する事で解析を行う。

3-3 離散化手法

有限体積法とは、解析領域を多数のセルに分割し、個々のセルにおいて支配方程式を積分して全領域において保存則を満たす離散化式を導く手法である。

この代数方程式に一般的かつ効率的な数値解法を適用して解を求める。

今回解析を行ったボイラを直交座標系で簡略化して作成したモデルを Fig.3 に示す。Fig.3 における Inlet は流入口、Outlet は流出口である。

4. 解析及び結果

流入口 1 からは排ガスの主成分である二酸化硫黄を流入し、流入口 2 からは空気を流入した。廃熱回収ボイラには、排ガスに含まれる硫化物を酸化させる目的があるので、ボイラ内でいかに効率良く 2 つの気流を混合するかが問題である。そこで、2 つの流入口の流速を変化させボイラ内のガス濃度分布を求める事で、最適な流入条件を推測した。

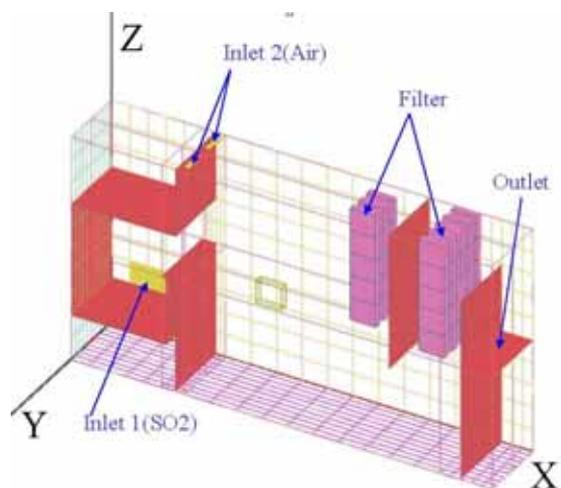


Fig.3 Simplified Model for analysis

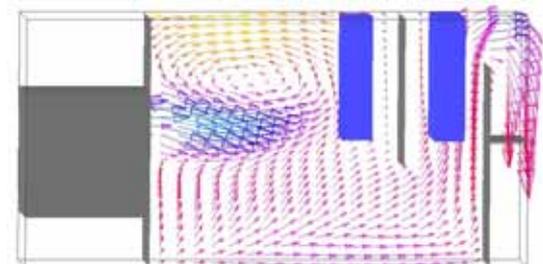


Fig.4 Velocity Vector for Result A (XZ-plane)
(Inlet 1:4.4m/s, Inlet 2:7.5m/s)

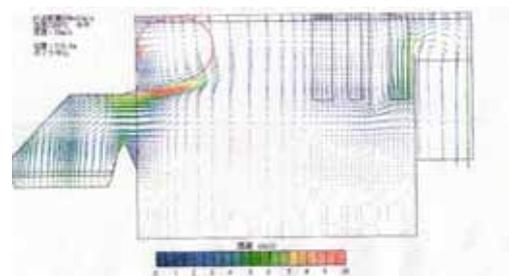


Fig.5 Velocity Vector (XZ-Plane)

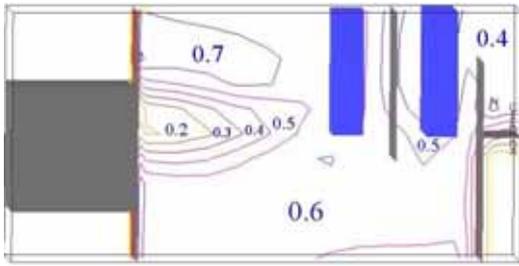


Fig.6 Distribution of Air Density for Result A (XZ-plane)



Fig.7 Distribution of Air Density for Result A (XY-plane)

4 - 1 Result A

まず、作成したモデルの精度を検証するため、銅精錬工場技術開発センターが行った解析と比較した。各流入口の流入条件を同じとし、流入口 1 の流速を 4.4m/s、流入口 2 の流速を 7.5m/s とした時の解析結果を Result A とする。得られた流速ベクトルを Fig.4 に示す。銅精錬工場技術開発センターの解析結果を Fig.5 に示す。

その結果、技術開発センターの解析結果と同様に、ボイラ上部に循環流が現れ、各断面での流速分布も同様の結果が得られた。従って、今回作成した簡略モデルの解析精度は十分であると考えられる。得られた空気濃度分布を Fig.6 及び Fig.7 に示す。

Fig.6 及び Fig.7 における数字は、ボイラ内の混合ガス成分中の空気の割合を示す。Fig.6 からボイラ上部に 0.7(混合ガス成分中の空気の割合が 70%)という領域が広がっている事が見受けられる。更に、全体的に 0.6 という領域が広い事から、この条件では気流混合が行われていないと言える。また、Fig.7 から 0.2 ~ 0.6 という領域が複雑に存在している事からも、この条件では気流混合が行われていないと言える。

4 - 2 Result B

次に、流入口 1 の流速は 4.4m/s のまま変化させず、流入口 2 の流速を 2 倍の 15.0m/s に変化させた時の解析結果を Result B とする。得られた流速ベクトルを Fig.8 に示す。Fig.8 より、循環流の位置が Fig.4 よりも下の方へ移動している事が見受けられる。空気濃度分布を Fig.9 及び Fig.10 に示す。Fig.9 から、0.5 という領域がボイラ内の大部分を占めている事が見受けられる。また、Fig.10 から 0.2 ~ 0.6 という領域が入り組んで存在している事が分かる。

以上の結果より、Result A よりも Result B の方が気流混合に関しては良い条件であると言える。

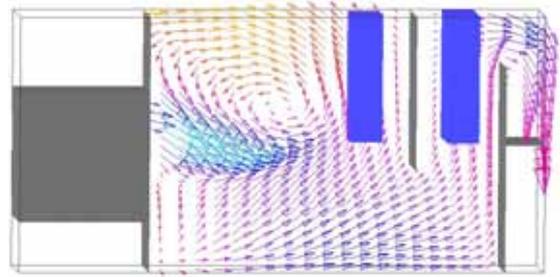


Fig.8 Velocity Vector for Result B (XZ-plane) (Inlet 1:4.4m/s, Inlet 2:15.0m/s)

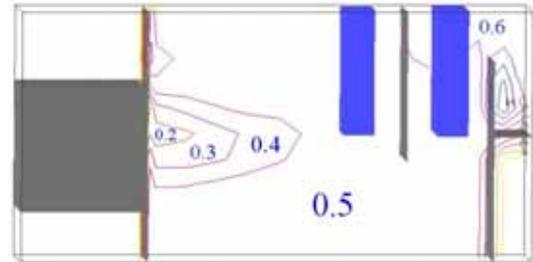


Fig.9 Distribution of Air Density for Result B (XZ-plane)

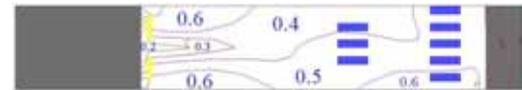


Fig.10 Distribution of Air Density for Result B (XY-plane)

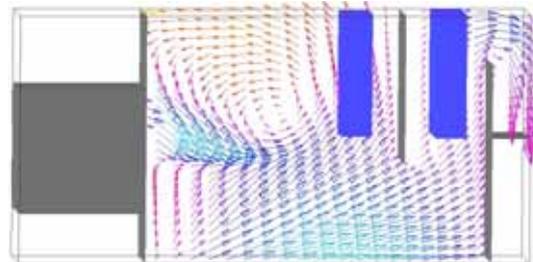


Fig.11 Velocity Vector for Result C (XZ-plane) (Inlet 1:4.4m/s, Inlet 2:22.5m/s)

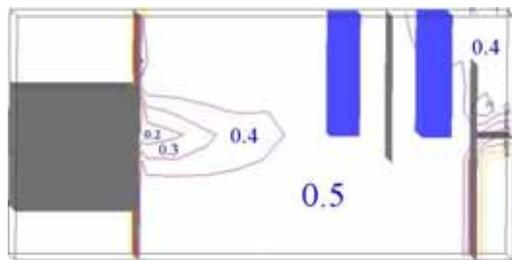


Fig.12 Distribution of Air Density for Result C (XZ-plane)

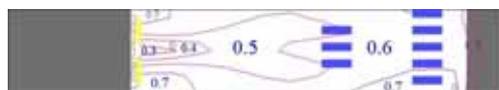


Fig.13 Distribution of Air Density for Result C (XY-plane)

4 - 3 Result C

次に, 流入口 1 の流速は 4.4m/s のまま変化させず, 流入口 2 の流速を 3 倍の 22.5m/s に変化させた時の解析結果を Result C とする. 得られた流速ベクトルを Fig.11 に示す. Fig.11 より, 循環流の位置が Fig.8 よりも下の方へ移動している事が見受けられる. 空気濃度分布を Fig.12 及び Fig.13 に示す. Fig.12 から, 0.5 という領域がボイラ内の大部分を占めている事が分かる. Fig.13 から 0.3~0.7 という領域が存在しているが大部分は 0.6 という領域である事が分かる. また, Fig.12 及び Fig.13 から, Fig.6 及び Fig.7 に比べて全体的に濃度が均一になっている事が分かる. 以上の結果から, Result C の方が Result A よりも気流混合に関しては良い条件であると言える.

4 - 4 Result D

次に, 流入口 1 の流速は 4.4m/s のまま変化させず, 流入口 2 の流速を 4 倍の 30.0m/s に変化させた時の解析結果を Result D とする. 得られた流速ベクトルを Fig.13 に示す. Fig.14 より, 循環流の位置が Fig.11 よりも上の方へ移動している事が見受けられる. 空気濃度分布を Fig.15 及び Fig.16 に示す. Fig.15 から, 0.5 という領域がボイラ内の大部分を占めている事が分かる. Fig.16 から, 0.3~0.6 という領域が存在しているが, 0.5 という領域が大部分を占めている事が分かる. また, Fig.6 及び Fig.7 に比べて全体的に濃度が均一になっている事が分かる. 以上の結果から, Result D の方が Result A よりも気流混合に関しては良い条件であると言える.

4 - 5 Result E

次に, 流入口 1 の流速を 2 倍の 8.8m/s に変化させ, 流入口 2 の流速を 7.5m/s のまま変化させなかった時の解析結果を Result E とする. 得られた流速ベクトルを Fig.17 に示す. Result A~D では循環流がボイラ内に 1 つ存在していたが, Result E では Fig.17 よりボイラ上部に 1 つ, ボイラ内下部に 1 つ見受けられる. 空気濃度分布を Fig.18 及び Fig.19 に示す. Fig.18 から, ボイラ内の大部分を 0.4 という領域が占めている事が分かる. Fig.19 から, 0.1~0.3 という領域が存在している事が分かる. また, Fig.18 及び Fig.19 から, Fig.5 及び Fig.6 に比べて全体的に濃度が均一になっていない事が分かる. 以上の結果より, Result E は Result A よりも気流混合に関しては悪い条件であると言える.

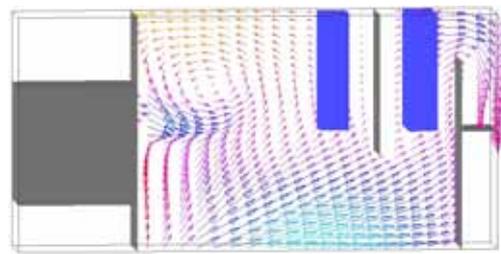


Fig.14 Velocity Vector for Result D (XZ-plane)
(Inlet 1:4.4m/s, Inlet 2:30.0m/s)

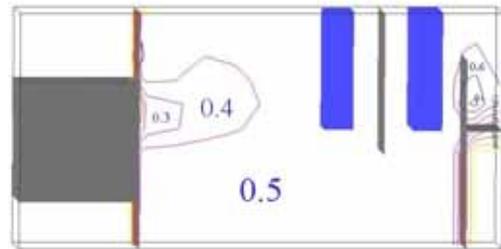


Fig.15 Distribution of Air Density for Result D
(XZ-plane)

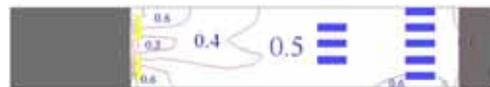


Fig.16 Distribution of Air Density for Result D
(XY-plane)

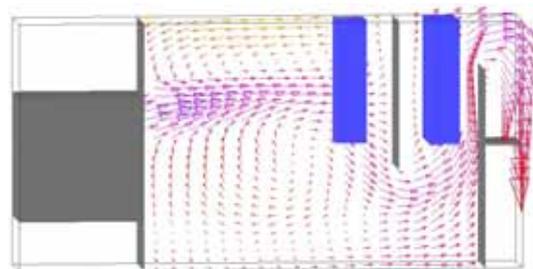


Fig.17 Velocity Vector for Result E (XZ-plane)
(Inlet 1:8.8m/s, Inlet 2:7.5m/s)

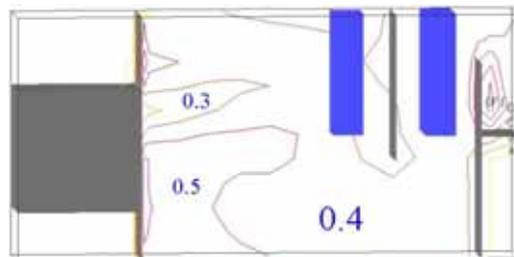


Fig.18 Distribution of Air Density for Result E
(XZ-plane)



Fig.19 Distribution of Air Density for Result E
(XY-plane)

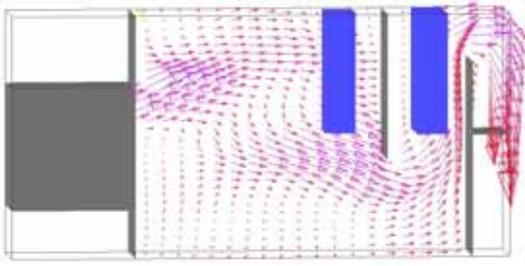


Fig.20 Velocity Vector for Result F (XZ-plane)
(Inlet 1:13.2m/s, Inlet 2:7.5m/s)

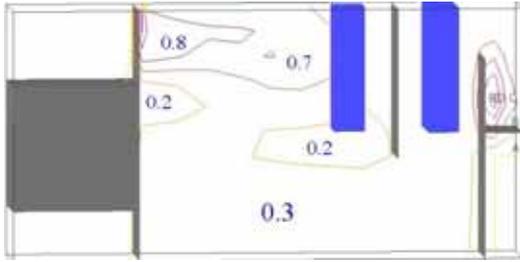


Fig.21 Distribution of Air Density for Result F
(XZ-plane)



Fig.22 Distribution of Air Density for Result F
(XY-plane)

4 - 6 Result F

次に、流入口1の流速を3倍の13.2m/sに変化させ、流入口2の流速を7.5m/sのまま変化させなかった時の解析結果をResult Fとする。得られた流速ベクトルをFig.20に示す。Fig.20より、Result A~Eで見受けられた循環流が無くなり、ボイラ内の流れが大きく変わっている事が分かる。空気濃度分布をFig.21及びFig.22に示す。Fig.21から、ボイラ内上部に0.7,0.8という領域が存在しており、ボイラ内の大部分は0.3という領域が占めている事が分かる。Fig.22から、0.1~0.2という領域がボイラ内の大部分を占めている事が分かる。また、Fig.21及びFig.22より、Fig.5及びFig.6に比べて全体的に濃度が均一になっていない事が分かる。この結果から、Result FはResult Aよりも気流混合に関しては悪い条件であると言える。

5 . 結論

今回の解析結果では、流入口2の流速を上げるほど、循環流の位置が下の方へ移動する傾向が見られた。また、混合ガス濃度分布に関しては、Result Aではボイラ内上部に空気濃度の高い混合ガスの領域があり、全体的にも若干空気濃度が高いのに対して、流入口2の流速を増加させた場合のResult Cでは、ボイラ内上部の空気濃度の高い混合ガス領域が無くなり、全体的にも排ガスと空気の混合が均一の領域が広がっている事から、ボイラ内の気流混合が促進されたと考えられる。

逆に、流入口1の流速を上げると循環流が無くなり、ボイラ内の気流が大きく変わった。また、混合ガス濃度分布に関しても、気流混合が行われておらず、全体的に排ガス濃度が高くなっている。

以上の結果から、循環流がボイラ内の気流混合に深く関係しており、ボイラ内に広い循環流が得られれば、排ガスと空気の気流混合が促進されると考えられる。また、今回の解析では、流入口2の流速を流入口1の流速の3倍に設定した場合が最も望ましい気流混合が得られた。

謝辞

本研究は日鉱金属株式会社佐賀関精錬所との共同研究として行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 棚橋隆彦, はじめてのCFD-移流拡散方程式-, コロナ社, (1996年)
- (2) 内田茂男, 流体力学序説 基礎理論から応用まで, 森北出版株式会社, (1990年)
- (3) 大槻義彦, div, grad, rot, ..., 共立出版株式会社, (1993年)
- (4) ランダウ=リフシッツ, 流体力学 1, 東京図書株式会社, (1970年)

(2005.9.30 受付)