

# 連続铸造機内流動及び介在物挙動解析シミュレータ の構築と応用

## Development and Application of Simulator for Analysis of Liquid Steel Flow in Continuous Casting Machine and Inclusions Behavior

沢田 郁夫<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 岡沢 健介<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 竹内 栄一<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 重松 清<sup>\*<sup>(3)</sup></sup>  
*Ikuo SAWADA Kensuke OKAZAWA Eiichi TAKEUCHI Kiyoshi SHIGEMATSU*  
 田中 宏幸<sup>\*<sup>(4)</sup></sup>  
*Hiroyuki TANAKA*

### 抄 録

連続铸造工程における機内溶鋼流動、溶鋼中介在物挙動及び铸片中介在物の集積挙動を解析する目的で、LES乱流モデルと三次元曲線座標系での有限差分法を用いて数値シミュレータを開発した。このシミュレータによる流動の計算精度を確認するために、水模型及び水銀模型実験での実測結果と対比し、時間平均流速のみならず乱流変動挙動についても大略良好な精度を確認した。また、このシミュレータを用いて種々の連続操業（機形状の影響、電磁ブレーキ・電磁攪拌印加の影響）における铸片内介在物挙動を解析し、主な支配機構について考察した。

### Abstract

With a view to analyzing the flow of liquid steel in continuous casting machine, the behavior of inclusions in the liquid steel, and the cumulative tendency of inclusions in cast slabs, a numerical simulator has been developed by means of the LES turbulence model and the finite difference method in three-dimensional curvilinear coordinates system. To confirm the accuracy in calculating the flow by the simulator, results thus computed were drawn into comparison with the actual results of observation both in water model test and mercury model test, and it was confirmed that almost good accuracy was obtained with regard to not only the time-averaged velocity but the behavior of the turbulent flow. Using the simulator, analyzed was the behavior of inclusions in the cast slabs in various conditions of continuous casting operation such as the effects of continuous casting machine's profile, the effects of electromagnetic brake and electromagnetic stirrer applied, and main governing mechanisms for the behavior were considered.

## 1. 緒 言

鉄の連続铸造（以下、連続と略す）プロセスにおける機内溶鋼流動は、製品铸片にみられる内部欠陥（非金属介在物、Arガス気泡等に起因する）や表層・表面欠陥（パウダー、Arガス気泡、表層系介在物や初期凝固の不均一化による縦割れ等に起因する）を左右する重要な因子である。一般に内部欠陥は铸型短辺に衝突した後の下降流に、また表面欠陥は、铸型メニスカス近傍や浸漬ノズル凝固シェル長辺間の流動状況に影響される。従って、これらの流動状況を抑制するためには浸漬ノズル形状の幾何形状を変更したり、電磁攪拌（移動磁界印加）や電磁ブレーキ（直流磁界印加）を作用させる試みがなされている。

一方、計算機の進歩に伴って、数値流体計算による連続機内溶鋼

流動の解析も頻繁に行われるようになってきているが、定量的な精度が十分な解析例は少ない。電磁場（直流磁界、交流磁界）印加や機の湾曲形状、凝固シェル形状を考慮した上での溶鋼流動・介在物挙動モデルについては、十分に検討されていないのが現状である。

本報告では、実操業での溶鋼流動、溶鋼中介在物の濃度分布及び铸片内介在物の濃度分布を定量的に予測できる数学モデル、数値シミュレータの構築とその応用について述べる。溶鋼流動の計算には乱流モデルの選択が重要となる。本研究では、乱流の非定常計算手法として近年多用されるようになってきた Large Eddy Simulation（以下、LES<sup>1)</sup>と称する）を採用し、また、機の湾曲形状を考慮するために、三次元曲線座標系<sup>2)</sup>での差分法に基づく数値計算プログラムを自主開発して計算した。このプログラムを用い、実機連続機での諸現象の解析を行った結果について以下に述べる。

\*<sup>(1)</sup> 技術開発本部 先端技術研究所 未来領域研究部 主任研究員

\*<sup>(2)</sup> 技術開発本部 プロセス技術研究所 製鋼プロセス研究部

主幹研究員

\*<sup>(3)</sup> 大分製鐵所 設備部

\*<sup>(4)</sup> 八幡製鐵所 製鋼部 掛長

## 2. 数学モデルと数値シミュレータ

### 2.1 基礎式

以下に基礎式を示す。流動の計算には、質量保存式及び運動量保存式を、溶鋼中介在物濃度の計算には、介在物粒子の終末速度を考慮した対流-拡散型の収支式を用いた。また、電磁力(ローレンツ力)の計算では、電磁ブレーキ、電磁攪拌の各々で後述の異なる手法を使い分けた。

【質量保存式、LESに基づく運動量保存式及び介在物濃度の収支式】

$$\partial U_i / \partial t + \partial E_i / \partial \xi + \partial F_i / \partial \eta + \partial G_i / \partial \zeta = g + F \quad \dots\dots(1)$$

$$U_i = J U \quad \dots\dots(2)$$

$$E_i = J (E \xi_x + F \xi_y + G \xi_z) \quad \dots\dots(3)$$

$$F_i = J (E \eta_x + F \eta_y + G \eta_z) \quad \dots\dots(4)$$

$$G_i = J (E \zeta_x + F \zeta_y + G \zeta_z) \quad \dots\dots(5)$$

$$U = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho C) \quad \dots\dots(6)$$

$$E = (\rho u, \rho u^2 + p + \tau_{xx}, \rho uv + \tau_{xy}, \rho uw + \tau_{xz}, \rho uC + T_x) \quad \dots\dots(7)$$

$$F = (\rho v, \rho uv + \tau_{xy}, \rho v^2 + p + \tau_{yy}, \rho vw + \tau_{yz}, \rho vC + T_y) \quad \dots\dots(8)$$

$$G = (\rho w, \rho uw + \tau_{xz}, \rho vw + \tau_{yz}, \rho w^2 + p + \tau_{zz}, \rho [w + w_g] C + T_z) \quad \dots\dots(9)$$

$$J = \partial(x, y, z) / \partial(\xi, \eta, \zeta) \quad \dots\dots(10)$$

t : 時間

x, y, z : デカルト座標成分

$\xi, \eta, \zeta$  : 曲線座標成分

$\rho$  : 密度

U : 流速ベクトル (u, v, w)

$\tau$  : 分子粘性に基づく応力テンソルとサブグリッドスケール渦による応力テンソルの和。サブグリッドスケールモデルとしては単純 Smagorinsky モデルを用いた。

P : 圧力

g : 重力加速度

F : ローレンツ力

$w_g$  : 介在物粒子の終末浮上速度ベクトル

T : 分子拡散に基づく拡散フラックスとサブグリッドスケール渦による拡散フラックスの和

【電磁場の式 (電磁ブレーキの場合)】

$$B = \mu (1/4\pi) (I \, dl \times r / r^3) \quad \dots\dots(11)$$

$$\text{div}(\text{grad} \phi) = \text{div}(U \times B) \quad \dots\dots(12)$$

$$J = \sigma (-\text{grad} \phi + U \times B) \quad \dots\dots(13)$$

$$F = J \times B \quad \dots\dots(14)$$

$\mu$  : 透磁率

J : 渦電流密度ベクトル

$\phi$  : 電位のスカラーポテンシャル

B : 磁束密度ベクトル

【電磁場の式 (電磁攪拌の場合)】

ベクトルポテンシャルA-スカラーポテンシャル  $\phi$  に基づく基礎式を用い、その解法には有限要素法に基づく自社開発ソフト FLEDY<sup>3)</sup>を使用した。

### 2.2 離散化及び解法アルゴリズム

上記(1)~(13)式の離散化には完全保存形式の有限差分法を用い、格子と変数配置にはスタガード系を用いた。(1)式の左辺第二、三、四項の差分精度は基本的に二次精度とした。また、流れと圧力の連成解法には準陰解法の Fractional Step 法<sup>4)</sup>又は HSMAC 法<sup>4)</sup>を用

いた。以上の数値解法には自社開発ソフト FLODIA<sup>5)</sup>を使用した。

## 3. 解析対象

### 3.1 計算精度確認のための模型実験

#### 1) 水模型実験装置

機サイズ : 200×1250 [mm]

鋳造速度 : 1.6 [m/min] 相当

浸漬ノズル : 吐出口 70×80[mm], 吐出角度 下向き15[°]

流速測定方法 : 電磁流速計で時間平均速度を測定

#### 2) 水銀模型実験装置

機サイズ : 100×600 [mm]

鋳造速度 : 0.39 [m/min] 相当

浸漬ノズル : 吐出口 28 [φmm], 吐出角度 下向き15[°]

流速測定方法 : Vives センサー<sup>6)</sup>にて流速の時間変動及び乱流エネルギースペクトルを測定

### 3.2 実機連続機における適用

新日本製鐵内の様々な連続機における流動、介在物挙動解析に適用したが、各々の詳細な装置緒元、操業条件については省略する。

## 4. 解析結果と考察

### 4.1 模型実験 (水模型、水銀模型) による流体計算精度の確認

水模型実験に対応する流動計算を LES を用いて行い、60s 間にわたる時間平均操作を施した。図1にその結果を示す。また、水模型実験にて得られた時間平均速度ベクトルを図2に示す。また、メニスカス近傍流速の計算値と実験値を対比したのが図3である。図3

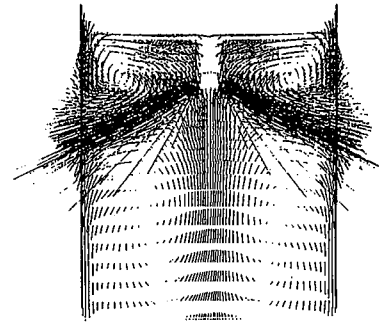


図1 水モデル内時間平均流速の計算結果

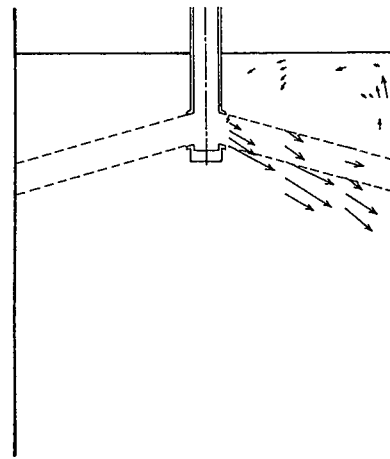


図2 水モデル内時間平均流速の実験結果

より LES による時間平均速度の計算精度が良好である。この結果は別報<sup>7)</sup>に示すように  $k-e$  乱流モデルでの計算結果よりも良好であった。

次に、乱流変動挙動の計算結果について述べる。図4は LES により計算されたメニスカス近傍流速(幅方向成分)の時間変動を示す。図5には水銀模型にて実測されたメニスカス近傍流速(幅方向成分)の時間変動を示す。両者間には類似な構造の変動が観察される。図6は計算及び水銀模型実験にて実測されたメニスカス近傍流速の乱流エネルギースペクトルの比較を示す。0.01から数 Hz の広い周波数領域にわたり強い乱流成分を持つこと、数 Hz 以上で急激にエネルギーが減衰すること等、定性的に共通な結果が得られた。

この乱流変動の解析手法を用いて検討した結果、機内上部に存在する乱流の生成は、主に浸漬ノズル吐出口近傍における流れの不安

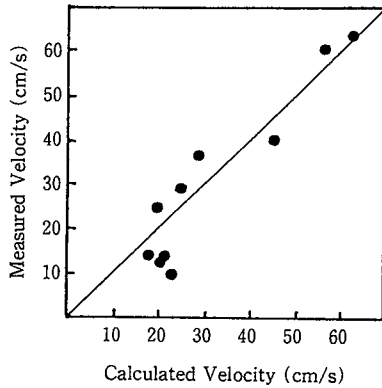


図3 水モデル内時間平均流速の計算値と実験値との対比

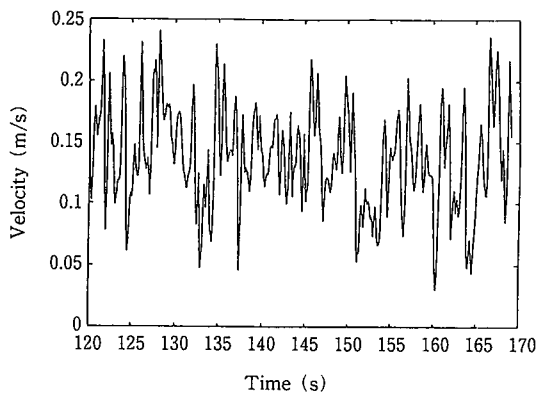


図4 LESによるメニスカス近傍流速の経時変化の計算結果

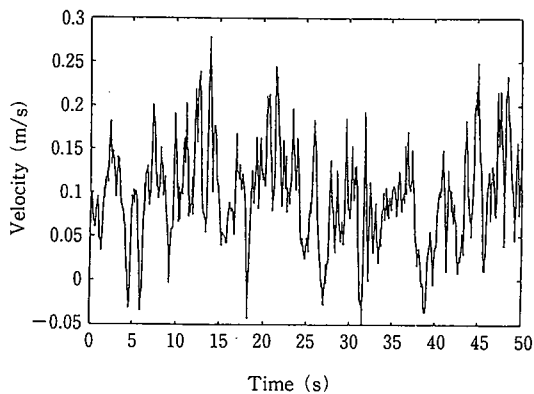


図5 水銀モデル内メニスカス近傍流速の経時変化の実測結果

定性に起因することが分かった。

4.2 機形状を考慮した溶鋼流動と介在物内部集積挙動の数値解析  
湾曲型や垂直曲げ型等のように、湾曲する機形状や発達する凝固シェル形状の影響を考慮する目的で、三次元一般化座標変換を用いて溶鋼流動と介在物挙動の解析を行った。

鋳片サイズは289×1830mm、鋳造速度は1.3m/min、機形状は垂直曲げ型(垂直部は2.5m)及び湾曲型(10.5mR)である。

図7には垂直曲げ型及び湾曲型での機内溶鋼流動の計算結果を示す。湾曲型の場合には、湾曲する流路が溶鋼下降流に対して抵抗となり下降流がやや浅くなっている。このことは一見介在物の鋳片への内部集積現象に対して湾曲型のほうが有利のように思えるが、実際には下記のように機の湾曲形状の影響のほうが大きい。

図8には、粒径280 $\mu$ mの介在物が鋳片のどの位置に捕捉されるかを計算した結果を示す。また、図9には、浮上パラメータ(= [介在物終末浮上速度] / [鋳造速度])が図8とほぼ同一の操作条件における実鋳片内介在物の厚み方向分布の観察結果を示すが、両者の傾向は大局的に一致する。

湾曲型では鋳片下面表層から30mm付近で強い介在物内部集積現象が見られる。このピーク位置は機の湾曲度が大きくなり始める凝

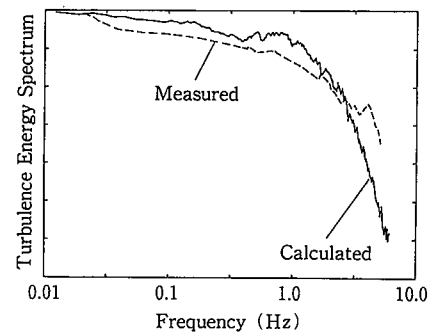


図6 メニスカス近傍での乱流エネルギースペクトルの計算と実験との対比

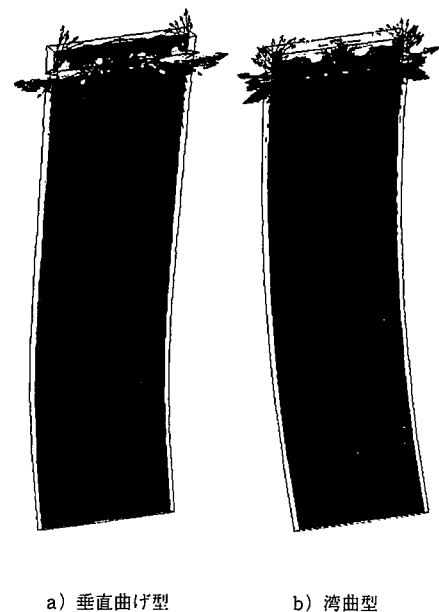


図7 機内溶鋼流速の計算結果(厚み1/2断面)

固位置に対応し、またピーク値は垂直曲げ型よりも大きい。このことは介在物の鋳片への内部集積現象に関して、上述の溶鋼流動の影響よりも機の湾曲形状の影響のほうが大きいことを示している。つまり、メニスカスより深い位置における介在物の凝固シェルへの捕捉速度は、介在物の終末浮上速度ベクトル（重力と反対方向）と固液界面での法線ベクトルとの内積に依存する。従って固液界面が水平に近くなるほど、捕捉されやすくなることを意味している。実際、垂直曲げ型の場合、2.5mの垂直部では介在物捕捉量が極めて少ない。

4.3 スラブ連鋳機内での電磁ブレーキの影響

鋳片への介在物の内部集積挙動に関して、上述のように鋳造条件が同一である場合には機の湾曲形状の影響が最も顕著であるが、機形状が同一の場合には溶鋼流動の影響が現れる。特に、図10のように、鋳型下部に形成される溶鋼循環流の下降流速が、介在物終末浮上速度より小さい場合には、介在物は鋳型深部には到達しない。しかし、下降流速が介在物終末速度より大きい場合には、介在物は鋳型深部に到達し、内部集積帯に、より多く捕捉されることになる。最近、溶鋼の下降流を制御するための一方法として、電磁ブレーキ（直流磁界）印加法が試みられている。

図11にはメニスカスより1.1m深い位置に、均一な水平磁界を形成する電磁ブレーキを作用させた場合の、溶鋼流動の計算結果を示す。図10の未印加の場合と比較して、磁界直下で溶鋼下降流速が低減し循環流がなくなる様子が見られる。

4.4 スラブ連鋳機内での電磁攪拌挙動の影響

鋳片表層への介在物捕捉挙動に関しては、捕捉位置がメニスカス近傍であり、固液界面がほぼ垂直であることから、上述のように介在物の浮上による捕捉現象に支配されない。また、溶鋼流速が大きいほど介在物は捕捉されにくく、介在物捕捉粒径が小さくなること

が報告<sup>9)</sup>されている（図12参照）。この現象は介在物のシェルウオッシングと解釈されているが、このシェルウオッシングを促進するために、移動磁界による電磁攪拌を作用させて、溶鋼流速を加速させる操作が行われている。

図13, 14には、浸漬ノズル形状を円形とし電磁攪拌有無時の機内溶鋼流動を計算した結果を示す。電磁攪拌の効果はメニスカス近傍よりもコアセンター付近で顕著となり、未印加の場合と比較して固液界面近傍の溶鋼流速が増大することが分かる。このことは、上記

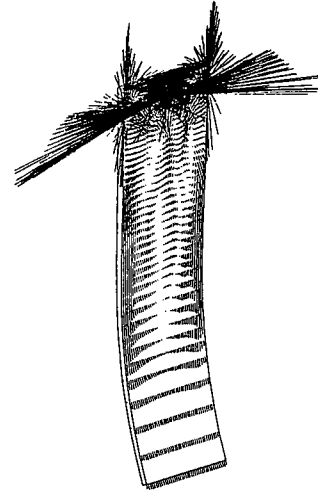


図10 電磁ブレーキ未印加時溶鋼流動の計算結果

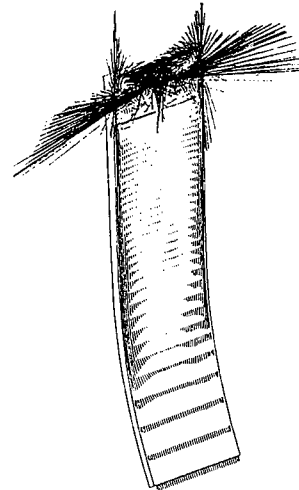


図11 電磁ブレーキ印加時溶鋼流動の計算結果

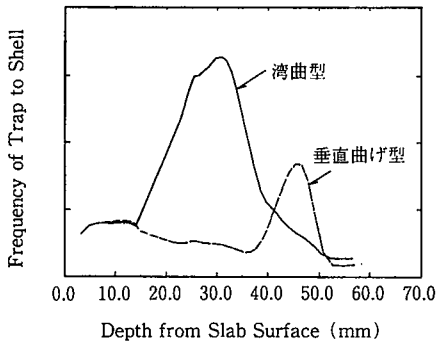


図8 計算された鋳片厚み方向介在物分布

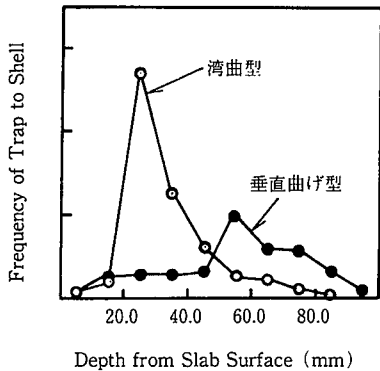


図9 実鋳片で観察された鋳片厚み方向介在物分布

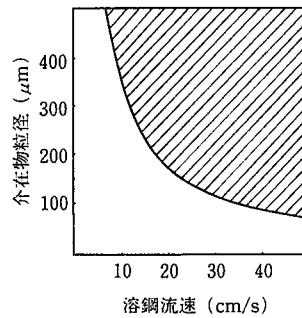


図12 介在物シェルウオッシングに対する溶鋼流速と粒径の影響 (図中ハッチング領域はシェルウオッシングされる)

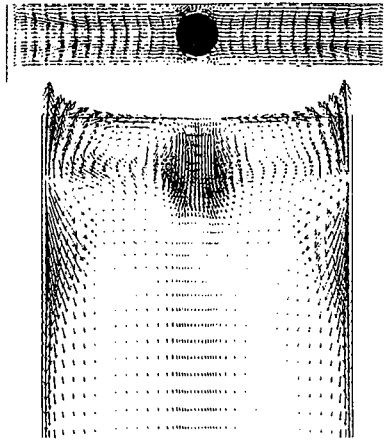


図13 電磁攪拌未印加時溶鋼流動の計算結果

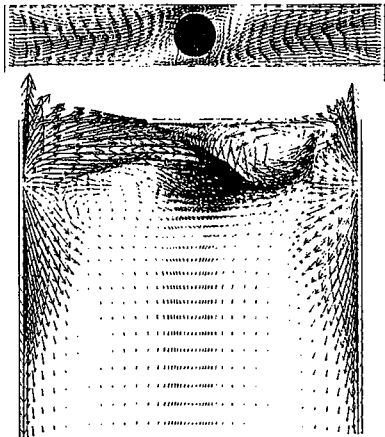


図14 電磁攪拌印加時溶鋼流動の計算結果

報告<sup>8)</sup>を併せて考えれば、電磁攪拌印加時に大きな粒径の介在物が激減する事実と対応している。

## 5. 結言

LES乱流モデルと三次元曲線座標系での有限差分法を用いて、連続機内溶鋼流動、溶鋼中介在物挙動及び铸片中介在物の集積挙動を計算する数値シミュレータを開発した。

このシミュレータの計算精度を確認する目的で、水模型及び水銀模型実験での実験結果を対比し、時間平均流速のみならず乱流変動挙動に関しても、大略良好な精度を確認した。また、このシミュレータを用いて、種々の連続機における铸片内介在物捕捉挙動を解析し、支配機構を推察することができた。

## 参考文献

- 1) Deardorff, J.W. : J. Fluid Mech. 41, (1970)
- 2) 例えば, Anderson, D.A., Tannehill, J.C., Pletcher, R.H. : Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. 1984, McGraw-Hill
- 3) Ueyama, T., Shinkura, K., Ueda, R. : IEEE Trans. Magn. 25, p.4153k (1989)
- 4) 例えば, 棚橋隆彦 : 機械の研究. 39, p.1249 (1987)
- 5) 例えば, Sawada, I., Tanaka, H., Tanaka, M. : BRS Bulletin. p.14 (1994)
- 6) Vives, C.H., Ricou, R. : Met. Trans. 168, p.377 (1985)
- 7) 沢田郁夫, 岸田豊, 岡沢健介, 田中宏幸 : 鉄と鋼. 79, p.30 (1993)
- 8) 沢田郁夫, 岡沢健介 : 材料とプロセス. 8(1), p.344 (1995)