

# 電磁気センサにおける電磁流体解析手法の研究

藤野 慎平\*・佐藤 正次\*<sup>2</sup>・谷口 尚司\*・藤 健彦\*<sup>3</sup>・藤崎 敬介\*<sup>\*,3</sup>

Magnetohydrodynamic Calculation Method for Electromagnetic Sensor

Shinpei FUJINO, Shoji SATOU, Shoji TANIGUCHI, Takehiko TOH and Keisuke FUJISAKI

**Synopsis** : A new type of magnetohydrodynamic calculation method is proposed to evaluate the electromagnetic sensing process, in which fluid dynamics makes much influence on the electromagnetic field. First, multi-phase flow of molten steel and slag are momentarily performed in fluid calculation in the proposed method. Second, conditions of multi-phase flow are momentarily performed in electromagnetic calculation. Last, secondary voltages are momentarily calculated. It is able to observe internal state of multi-phase flow of molten steel and slag by fluid calculation. It was able to understand the relation between slag detection process and sensor output by magnetohydrodynamic calculation.

**Key words**: electromagnetic sensor; magnetohydrodynamic calculation; multi-phase flow; slag detection process.

## 1. はじめに

電磁気センサは非接触で検出ができ、堅牢であるため、鉄鋼プロセスといった高温環境に耐えうるプロセスセンサとして、実際のオンライン操業に幅広く使用されている<sup>1,2)</sup>。電磁気センサは製造プロセスの状態を的確に把握するのに用いられ、その出力情報はプロセスの生産性や製品の品質を決定するのに用いられる。そのためプロセス状態と電磁気センサ出力とを把握して、センサの設計・開発を行うことは、更なる高生産性、高品質およびその結果によるエネルギー効率向上のために重要なことである。

しかし実プロセスの内部状態をオンラインで可視化することは難しく、電磁気センサのセンサ出力とプロセス内部の状態とを十分に把握しないまま使用されているのが現状といえる。よって、電磁気センサ出力の情報をもとに何らかの操業アクションをとった場合には、しばしばその操業アクションは誤動作や遅れを生じることになる。特に鉄鋼プロセスで多い流動現象の把握については、乱流、非定常流動のために、プロセス状態は各操業時において時々刻々と変化している。このため、時々刻々変化するプロセスの内部状態を把握した上で、センサ出力を知ることが重要なことといえる。

電磁気センサは渦電流現象を利用するため、熔融金属を用いた評価実験手法が考えられるが、熔融金属は不透明であり、直接観測することが困難なため、内部状態を十分に把握することは難しい。そこで、内部状態とセンサ出力との相互関係を把握する手法として、電磁場と流体場を連成

した数値解析が有効であるといえる。従来の電磁流体解析は、発生した電磁力により流動が変動するのに対し、今回の電磁気センサでは、電磁場作用による流動変動が極めて少ないために、電磁気センサに適した電磁流体解析技術を考える必要がある。本文では、電磁気センサに適した新しい電磁流体解析技術を考察し、それをスラグ検知プロセスに適用したので、以下に報告する。

## 2. 電磁気センサとしてのスラグ検知センサ

### 2.1 スラグ検知プロセス

ここでは電磁気センサとしてスラグ検知センサを一例として考えることにする<sup>3,4)</sup>。連続鑄造プロセスにおいて、溶鋼は取鍋からタンディッシュを経て鑄型に注がれ、鑄片となる。Fig. 1に取鍋を示すように、取鍋内の溶鋼残量が少なくなると、取鍋上部のスラグが溶鋼と共にタンディッシュへ流出し、そのままスラグ系の非金属介在物、あるいは鋼中のアルミニウム反応酸化により、アルミナ系の非金属介在物を生成する。非金属介在物は製品の延性、韌性、加工性、切削性、疲労性および耐食性などの性質に悪影響を及ぼす要因となるため、スラグがタンディッシュに流出する前にスラグを検知して溶鋼を止める必要がある。この場合、スラグ検知が早いと溶鋼の歩留まりが悪くなり、遅いとスラグがタンディッシュに流出し、鋼の品質が悪くなる。このスラグの流出の時期を適切に検知するために、電磁気センサとしてのスラグ検知センサが使用されている。

平成17年9月9日受付 平成17年11月16日受理 (Received on Sep. 9, 2005; Accepted on Nov. 16, 2005)

\* 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-602 Aza-Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai 980-8579)

\* 2 (株) N・TEC 大分 (N・TEC Oita Corporation)

\* 3 新日本製鐵 (株) 環境・プロセス研究開発センター (Environment and Process Technology Center, Nippon Steel Corporation)

## 2.2 電磁気センサの原理

電磁気センサは溶鋼とスラグの導電率の違いを利用して、溶鋼中のスラグを磁場分布の変化で検知するものである。スラグ検知センサの構造をFig. 2に示す。センサは一次コイルと二次コイルから構成されており、一次コイルに高周波電流（1kHz程度）を流すと、発生する磁束が二次コイルと鎖交し、磁束の時間変化を電圧として検出する。この周波数帯では、溶鋼は導電体とみなすことができるが、スラグは非導電体とみなされる。溶鋼内部には、磁束の時間変化により渦電流が発生し、溶鋼中にスラグが混入すれば、導電率分布が変わるので渦電流が変化する。渦電流が生じると、それによる誘導磁場が発生するので、二次コイルと鎖交する磁束に変化が生じる。つまり、スラグの有無で導電率分布に変化が生じ、そこでの渦電流の発生に変化

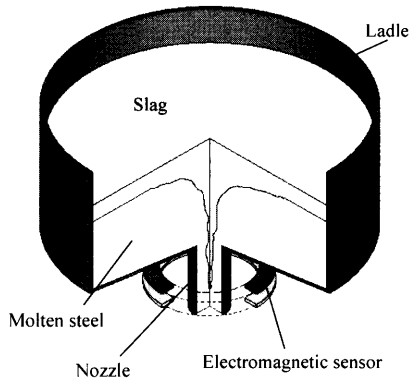


Fig. 1. Slag detection sensor is put in nozzle under ladle.

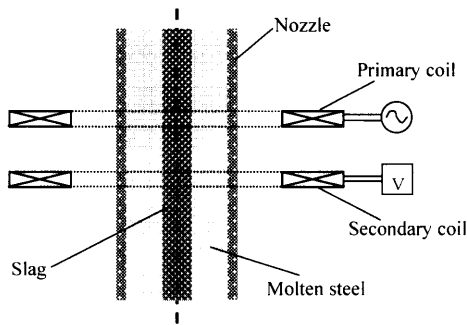


Fig. 2. Slag detection sensor is composed of primary coil and secondary coil.

が生じ、誘導磁場も変化し、二次電圧も変化する。この二次電圧の変化でスラグの存在を検出している。

## 3. 電磁気センサにおける電磁流体解析手法

スラグ検知プロセスは電磁場と流体場とが同時に存在するので、両者を連成した解析手法が必要である。

従来の電磁流体解析では、電磁攪拌など電磁力が流体に作用する場合の解析手法が今まで用いられてきた。そこでは、溶鋼といった導電性熔融金属に、体積力としての電磁力を作用させて、流動の変化をおこすものであるため、電磁場現象から得られる電磁力は、流体における方程式の外力項として作用しているものである<sup>5)</sup>。電磁場の作用により流動が変化し、流動の変化により、磁場分布の変化や導電体分布の変化が起こり、それらを適切にモデル化することが、そこでの主な数値解析上の技術課題であった。

これに対し、スラグ検知センサといった電磁気センサの場合は、電磁力による流動変動への影響は極めて小さく、むしろ、流動状態が電磁気現象に与える方が大きい現象である。このため、スラグ検知センサに適した新しい電磁流体解析手法を考える必要がある。Fig. 3に電磁気センサにおける電磁流体解析モデルを提示する。

電磁流体解析は、まず、導電体流体（溶鋼）と非導電体流体（スラグ）との混相流体の動的計算を行う。次に時々刻々の流動形状に対し電磁場計算を行い、時々刻々の二次電圧を算出する。時々刻々の二次電圧を時系列に表示することで、スラグ流出挙動とセンサ二次電圧出力との動的挙動を把握することができる。

### 3.1 流体計算

電磁気センサにおける電磁流体解析では、電磁気による流動の影響が無視できるので、流動現象は電磁場とは独立して数値解析することができる。但し、流体解析では、時々刻々と推移する導電体と非導電体との分布が問題となるので、混相流体解析を行う必要がある。ここで用いる流体計算の基本式は質量保存式および運動量保存式であり、これらを基に有限体積法を用いて解析した。

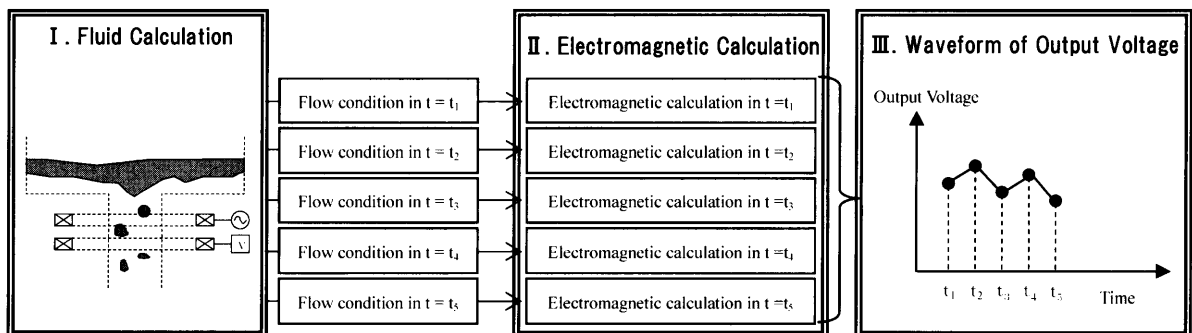


Fig. 3. Magnetohydrodynamic calculation model for electromagnetic sensor.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は流速、 $\rho$ は密度、 $\eta$ は粘性係数、 $\mathbf{g}$ は重力加速度を表す。

混相流モデルとしては、Volume of Fluid (VOF)法<sup>6,7)</sup>を使用する。VOF法では、あるコントロールボリュームにおける各相の体積割合を体積分率 $F_i$  ( $i=1$ :空気,  $i=2$ :溶鋼,  $i=3$ :スラグ)として導入し、全てのコントロールボリュームに対し、

$$\sum F_i = 1 \dots\dots\dots (3)$$

が成立すると同時に、次式で表す体積分率方程式を解くことにより実行される。

$$\frac{\partial F_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F_i = 0 \dots\dots\dots (4)$$

輸送方程式によって示される密度、粘性係数は、各コントロールボリュームにおいて構成要素となる相の状態によって決定され、以下のようになる<sup>8)</sup>。

$$\rho = \sum F_i \rho_i \dots\dots\dots (5)$$

$$\eta = \sum F_i \eta_i \dots\dots\dots (6)$$

運動量保存式は上記の $\rho$ と $\eta$ を介して全ての相の体積分率に従属している。

また、乱流モデルには標準 $k$ - $\epsilon$ モデルを採用し、円筒二次元場で解析した。混相流解析の後に、時々刻々推移する溶鋼の導電率の空間分布が溶鋼の体積分率 $F_2$ を用いて表現される。

### 3.2 電磁場計算

本解析では、流動変動に対して電磁場における交流周波数の変化は十分に早いと考えることができるので、時々刻々の流動状態は、電磁場からみれば準定常状態とみなすことができる。このため、ある時刻の導電体分布 ( $F_2$ 分布)における電磁場解析は $j\omega$ 法 ( $\omega=2\pi f$ ,  $f$ は交流の周波数)による準定常解析で行うことができる。具体的には、電磁場計算では次式で表される渦電流磁場における $A$ - $\phi$ 法<sup>9)</sup>を用いた。

$$\nabla \times ([v] \cdot \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $[v]=[μ]^{-1}$ は磁気抵抗率、 $[μ]$ は透磁率、 $\mathbf{A}$ は磁気ベクトルポテンシャル、 $\mathbf{J}_0$ は強制電流、 $\sigma$ は導電率、 $\phi$ は電気スカラーポテンシャルである。ここで、ある要素 $F_2$ の導電率は溶鋼のコントロールボリュームを用いて次式で定義されるものとする。

$$\sigma = \sigma_0 F_2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\sigma_0$ は溶鋼の導電率である。空間的には有限要素法<sup>10)</sup>により離散化し、時間変動については、 $j\omega$ 法を用いた。ここでは、円筒二次元場で計算を行い、二次電圧は以下の式より算出した。

$$\dot{E} = -j\omega N_s \int_{\text{Secondary coil}} \dot{B}_n dS \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $N_s$ は二次コイルのターン数、 $\dot{B}_n$ は二次コイルに鎖交する磁束密度である。また、スラグがノズルに混入した際の二次電圧変化は、以下のごとく変化分を正規化した値 $X$ で評価する。

$$X = \frac{E - E_{R=0}}{E_{R=R0} - E_{R=0}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $E$ は時刻 $t$ 、あるいはスラグ半径 $R$ のときの二次電圧、 $E_{R=0}$ はノズル内に全くスラグが存在しないときの二次電圧 (初期二次電圧)、 $E_{R=R0}$ はノズル内が全てスラグのときの二次電圧である。 $R0$ はノズルの半径であり、今回は $R0=40$ mmである。

## 4. 解析結果

### 4.1 解析モデル

流体計算モデルをFig. 4に、電磁場計算モデルをFig. 5にそれぞれ示す。流体計算では、スラグと溶鋼とに分離した取鍋の真中に流出ノズルがついているプロセスを計算領域とした。境界条件として、取鍋上部は入口速度境界、取鍋下部は出口圧力境界、取鍋壁は壁境界、取鍋の中心には軸境界をそれぞれ使用した。

電磁場計算では、電磁場が十分作用し、溶鋼とスラグが排出されるノズル部分を計算領域とした。計算領域の端では磁場が十分に減衰していると仮定して、境界条件として固定境界を使用した。

流体解析時間は6.5秒行った。電磁場解析 (センサ出力

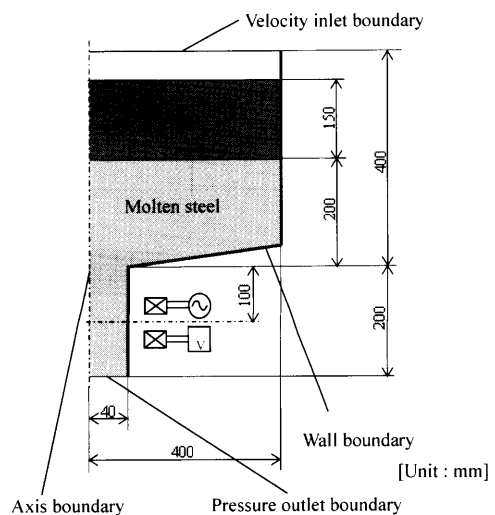


Fig. 4. Calculation model for fluid dynamics.

のサンプリング時間)は流体時間の0.02秒毎に行い、計325回の電磁場計算を行った。数値計算に用いた物性値はTable 1に示す。

4.2 解析結果

流体計算により得られた時々刻々の溶鋼とスラグとの混相流体の流動状態、電磁場計算により得られた時々刻々の磁力線図(実部)、時々刻々の変化指標 $X$ の計算結果をFig. 6にそれぞれ時系列に示す。溶鋼とスラグとの混相流体の流動状態図より、時刻 $t=0.74$ s時において、取鍋上部のス

ラグがノズルに混入し始め、 $t=4.5$ s時においては大量のスラグがノズルに混入し、ノズルの大半をスラグが占めている。しかし、 $t=4.5, 6.0$ s時においては、取鍋下部に少量の溶鋼が残留している。このように流体計算により、通常観測できない混相流体の流動状態を可視化することができる。また $t=0.74$ s時においては、スラグ相からスラグがちぎれてノズルに混入する様子がみられた。しかしながら、ここでは円筒二次元解析であるために、スラグはノズルの中心より流出しているが、三次元解析<sup>11)</sup>では、偏流がおこっている。その挙動をも含めた物性解析が今後の課題といえる。

次に各時刻における磁力線図を考察する。 $t=0$ sから

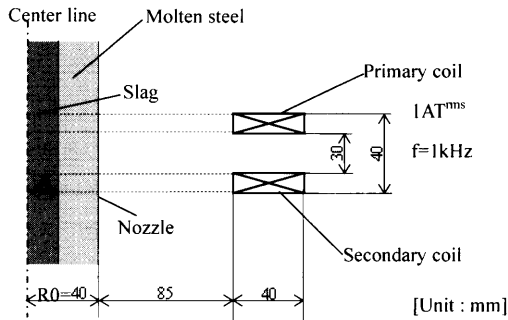


Fig. 5. Calculation model for electromagnetic field.

Table 1. Material property.

|                              | Air                  | Molten Steel         | Slag                 |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Density [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.225                | 7000                 | 3000                 |
| Viscosity [Pa·s]             | $1.8 \times 10^{-5}$ | $4.4 \times 10^{-3}$ | $4.4 \times 10^{-2}$ |
| Electric conductivity [S/m]  | 0                    | $7.69 \times 10^5$   | 0                    |
| Surface tension [N/m]        | Air                  | 1.65                 | $4.4 \times 10^{-1}$ |
|                              | Molten steel         | 1.65                 | —                    |
|                              | Slag                 | $4.4 \times 10^{-1}$ | —                    |

| Time $t$ [s] | Flow condition | Magnetic field lines (real part) | Variation index $X$ |
|--------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| 0.0          |                |                                  | 0.000               |
| 0.74         |                |                                  | 0.000               |
| 1.6          |                |                                  | 0.000               |
| 3.0          |                |                                  | 0.001               |
| 4.5          |                |                                  | 0.135               |
| 6.0          |                |                                  | 0.467               |

Fig. 6. Time-series calculation results of flow condition and magnetic field lines (real part) and variation index  $X$ .

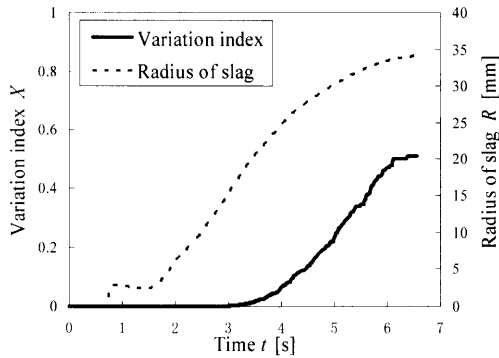


Fig. 7. Dynamic behavior of variation index  $X$  of secondary voltage and radius of slag  $R$ .

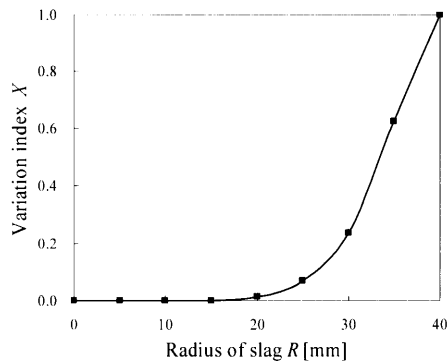


Fig. 8. Characteristic of variation index  $X$  when radius of slag  $R$  is increased.

$t=3.0$  s時までは磁力線図には変化がみられないが、 $t=4.5$  s時にはノズル中心のスラグの存在のため、磁力線図の変化がみられる。Fig. 7に変化指標 $X$ とFig. 5で定義するスラグ半径 $R$ の計算結果を示すが、 $t=4$  s時あたりから変化指標 $X$ に変化が生じてスラグを検出し始めていることがわかる。

スラグ半径 $R$ を0より少しずつ増加したときの変化指標 $X$ の特性をFig. 8に示す。本センサでは $R=0$ から $R=20$  mmまではほとんどスラグの存在を検知しないことがわかる。これは、今回の電磁流体計算結果では、 $t=3.0$  s時までに対応し、その時刻まで変化指標 $X$ に変化がないのは、スラグがノズルの中心を通過しているためだといえる。Fig. 7より、スラグ半径 $R$ が30 mm以上になると、変化指標 $X$ に変化が生じており、Fig. 6の時系列結果をみると $t=4.0$  s時あたり

の変化指標 $X$ が変化していることがわかる。

以上のように、今回の計算ではスラグ流出の初期にはスラグがノズル中心を流れているため、スラグをセンサで検知できず、スラグが流出し始めてから3秒ほどして、初めてスラグを検知していることがわかる。

## 5. 結言

本報告では、スラグの検知に使用される電磁気センサに適した新しい電磁流体計算手法を提案した。そこでは、流動の変動に比べて電磁場の交流変動は十分に早いと仮定することで、電磁場による流動の影響は無視することができ、時々刻々の流動状態における二次電圧を算出した。この電磁流体計算手法より、時々刻々推移するスラグのノズル内混入状態（プロセス状態）とスラグ検知センサの二次電圧（センサ出力）との関係を、プロセス内可視化を含めて表現し、把握することができた。例えば、今回の解析条件では、スラグが流出して、検知されるまで、3秒程度の時間の遅れが生じていることになる。実際のスラグ流動は三次元流動のため、偏流している可能性があるため、今後は三次元解析を行う必要がある。

## 文 献

- 1) S.Ando: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 2.
- 2) K.Fujisaki: *IEEE Trans. Mag.*, **39** (2003), 2190.
- 3) K.Sekino, A.Satoh and T.Sakane: *Rev. Metall. Cah. Inf. Tech.*, (1992), 353.
- 4) P.H.Dauby, D.F.Havel, P.A.Medve, H.D.Baker, A.J.Rumler and C.E.Tomazin: *Proceedings of AIME*, (1990), 33.
- 5) K.Fujisaki, T.Ueyama and K.Okazawa: *IEEE Trans. Mag.*, **33** (1997), 1642.
- 6) 高橋敏美, 南部健一, 松本洋一郎, 神山新一: 燃焼・希薄流・混相流・電磁流体の解析, 東京大学出版会, 東京, (1995), 81.
- 7) C.W.Hirt and B.D.Nichols: *J. Comput. Phys.*, **39** (1981), 201.
- 8) FLUENT 6.0 User's Guide, Fluent Inc., (2001).
- 9) T.Ueyama, K.Shinkura and R.Ueda: *IEEE Trans. Mag.*, **25** (1989), 4153.
- 10) 中田高義, 高橋則雄: 電気工学の有限要素法第2版, 森北出版, 東京, (1986), 5.
- 11) S.Pirker: *Proceedings of CFD, Fourth International on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries, Norway, No. 22*, (2005).