

# 電磁場解析技術の現状と鋳型内流動制御への応用

## Electromagnetic Field Analysis and Its Application to Flow Control in Casting Mold

梅津 健司<sup>\*(1)</sup> 藤崎 敬介<sup>\*(2)</sup> 和嶋 潔<sup>\*(3)</sup> 西 俊二<sup>\*(4)</sup>  
*Kenji UMETSU Keisuke FUJISAKI Kiyoshi WAJIMA Shunji NISHI*

澤田 健三<sup>\*(2)</sup> 植山 高次<sup>\*(5)</sup>  
*Kenzo SAWADA Takatsugu UEYAMA*

### 抄 録

有限要素法を用いた三次元汎用電磁場解析ソフトウェア FLEDY は、製鉄プロセスにおける電磁エネルギー応用装置の設計、開発に適用されてきた。本論文では、電磁場解析の基礎方程式や各種機能及び高速化手法について解説する。また、製鉄プロセスへの応用として、鋳型内流動制御への適用例について述べた。

### Abstract

The three-dimensional general purpose software, FLEDY, for electromagnetic field analysis with using the finite element method, has been applied to designing and developing electromagnetic energy-utilized apparatuses in steelmaking processes. In this paper, basic equations for the electromagnetic field analysis, its various functions, and fast-calculating methods are explained. An example applied to a molten steel flow control in a casting mold in the steelmaking process is also presented.

## 1. 緒 言

著者らの一部はすでに本誌において、有限要素法を用いた三次元汎用電磁場解析ソフトウェア FLEDY について解説した<sup>1)</sup>。FLEDY は製鉄プロセスにおける電磁エネルギー応用装置の開発支援を目的として開発され、装置の設計・開発に利用され、機能向上をはかってきた。また、1989年より新日本製鐵のエレクトロニクス・情報通信事業部より販売を開始し、多くの社内外へのユーザーへ提供してきた。

本論文では、まず、電磁場解析の基礎方程式について触れ、現時点での機能及び高速化のための手法を解説する。高速化については特に進展著しく、ICCG 法及び辺要素法の新手法について詳しく述べる。更に、並列処理による連立一次方程式の高速化についても詳説する。また、製鉄プロセスへの応用として、鋳型内流動制御への適用例について述べる。この例では電磁流体解析の実用的な手法が用いられている。

## 2. 電磁場解析の基礎方程式<sup>1,2)</sup>

電磁場解析ソフトウェア FLEDY は二つのプログラムより構成されている。静磁場・渦電流場問題を解くプログラムと、静電場・温度場を対象とするプログラムである。ここでは、両者の基本部について述べる。

### 2.1 渦電流場の基礎方程式

電磁場の基礎方程式は以下の四つの Maxwell 方程式である。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \dots\dots(1), \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \dots\dots(2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \dots\dots(3), \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\rho$ ,  $\mathbf{J}$  は電場の強さ、磁束密度、電束密度、磁場の強さ、電荷密度、電流密度である。上式のベクトルの間には構成方程式と呼ばれる以下の関係式が成立する。

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad \dots\dots(5)$$

$\epsilon$ ,  $\mu$  は誘電率、透磁率といわれ、一般的にはテンソル量である。さて、通常はこれらの方程式はベクトル・ポテンシャル  $\mathbf{A}$ , スカラー・ポテンシャル  $\phi$  と呼ばれる量を用いて書き換える。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad \dots\dots(6)$$

この変換方法は任意の電磁場に関する物理量を導出できる汎用性の高い、最も標準的な変換法で、 $\mathbf{A}$ - $\phi$  法と呼ばれる。ベクトル・ポテンシャルはその実在性が確認されていることもあって<sup>3)</sup>、最近のプログラムのほとんどはこの手法を採っている。

渦電流場では式 (1) の第 2 項の変位電流項を無視し、式 (5), (6) と Joule の法則を用いてえられる以下の式を基礎方程式としている。

$$\nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_o + \mathbf{J}_e \quad \dots\dots(7)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{J}_o + \mathbf{J}_e) = 0 \quad \dots\dots(8)$$

<sup>\*(1)</sup> 技術開発本部 設備技術センター システム制御技術部 掛長  
<sup>\*(2)</sup> 技術開発本部 プロセス技術研究所 計測制御研究部 主任研究員  
<sup>\*(3)</sup> 技術開発本部 プロセス技術研究所 計測制御研究部 研究員

<sup>\*(4)</sup> エレクトロニクス・情報通信事業部 産業システム開発部 部長代理  
<sup>\*(5)</sup> 技術開発本部 プロセス技術研究所 計測制御研究部 部長

$$\mathbf{J}_e = \sigma \cdot \mathbf{E} = -\sigma \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 $\mathbf{J}_0$ 、 $\mathbf{J}_e$ は励磁電流密度、渦電流密度である。静磁場問題を解く場合は上記の式(7)のみを採用し、かつ $\mathbf{J}_e$ を0とおけばよい。式(9)は時間微分項を含んでいるので、時間に対しても離散化を施さなければならない。渦電流場は準定常な、すなわち、正弦波交流の問題の場合は微分演算子を複素数 $j\omega$  ( $j$ :虚数単位、 $\omega$ :角周波数)で置き換える $j\omega$ 法を用いることができる(時間変動は位相によって表現される)。過渡問題に対しては次式の後退差分法で離散化されている。

$$\frac{\partial \mathbf{A}_{i+1}}{\partial t} = \frac{\mathbf{A}_{i+1} - \mathbf{A}_i}{\Delta t} \quad (\Delta t: \text{時間刻み})$$

こうして得られた基礎方程式に Galerkin 法を適用し、有限要素法を用いて離散化する。展開した連立一次方程式は次式のようにまとめられる。 $[\ ]$  はマトリクス、 $\{ \}$  はベクトルを表す。

$$[\mathbf{K}(\mu, \sigma, \omega)]\{\mathbf{A}\} = \{\mathbf{F}(\mathbf{J}_0)\} \quad (\text{準定常})$$

$$[\mathbf{K}(\mu, \sigma)]\{\mathbf{A}_{i+\Delta t}\} = [\mathbf{M}(\Delta t, \sigma)]\{\mathbf{A}_i\} + \{\mathbf{F}_{i+\Delta t}(\mathbf{J}_0)\} \quad (\text{過渡})$$

離散化手続き及び式の詳細な内容は文献2)に記述されている。基礎方程式を除けば、次の電場解析も離散化手続きは同じである。

## 2.2 電場の基礎方程式

静電場や定常電流場を解く場合は、Poisson あるいは Laplace 方程式が基礎方程式となる。プログラムは次の拡散方程式を基本式としているので、前記の二つの場に加え、温度場も解くことができる。

$$\nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla \phi) + Q = C \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 $\phi$  は電位又は温度であり、 $\kappa$  は誘電率・導電率又は熱伝導率、 $C$  は静電容量又は熱容量、 $Q$  は電荷密度・電流湧き出し密度又は発熱密度である。時間微分の展開には Crank-Nicolson 法が採用されている<sup>4)</sup>。いま、式(10)に Galerkin 法を適用し、有限要素法で展開した連立一次方程式を次式で表現する。

$$[\mathbf{K}(\kappa)]\{\phi\} + [\mathbf{C}] \frac{\partial \phi}{\partial t} = \{Q\}$$

すると、Crank-Nicolson の展開式は

$$\begin{aligned} & \left( \frac{[\mathbf{C}]}{\Delta t} + \frac{1+\beta}{2} [\mathbf{K}] \right) \{\phi\}_{i+\Delta t} \\ & = \left( \frac{[\mathbf{C}]}{\Delta t} - \frac{1-\beta}{2} [\mathbf{K}] \right) \{\phi\}_i \\ & - \frac{1}{2} \{ (1+\beta) \{Q\}_{i+\Delta t} + (1-\beta) \{Q\}_i \} \end{aligned}$$

となる。 $\beta$  は  $-1 \leq \beta \leq 1$  の値をとるパラメーターである。

## 3. FLEDY の各種解析機能

前述の基礎方程式によって、種々の電磁場の解析が可能であるが、具体的に問題を解く上で必要あるいは有効な機能がいくつかある。以下にそれらの解析機能について紹介する。なお、ここで述べる機能のほかに Maxwell 応力、速度項、永久磁石、材料異方性、磁気エネルギー計算など、多くの解析機能がある。

### 3.1 非線形解析機能

現実の磁性体は磁場の強さが大きくなると、一般に透磁率が低下し、いわゆる磁気飽和が起こる。そのため、非線形解析を行わなければ解は得られない。非線形解析の手法にもいくつかあるが、FLEDY は、式(7)の透磁率 $\mu$ を反復修正して解く単純反復法と、Maxwell 方程式をもとにポテンシャルの修正量を見積もる Newton-Raphson

法<sup>9)</sup>の二つの方法を備えている。両者とも磁化特性曲線を参照して修正を行い、収束の判定に透磁率、磁束密度、ベクトル・ポテンシャルのどれかを参照することができる。Newton-Raphson 法は磁化曲線の接線を利用して追従する方法で、構造解析などで広く利用されている。しかしながら、電磁場解析においては収束性は高くなく、緩和係数などの導入も試みられたが<sup>9)</sup>、大きな改善は得られていない<sup>7)</sup>。

また、前回の報告<sup>1)</sup>では、準定常非線形解析の新手法(等価正弦波法)について触れた。その後、この方法は磁場の強さ $\mathbf{H}$ と磁束密度 $\mathbf{B}$ が回転するような問題では不十分であることが判明し、回転磁場についても適用できるよう拡張した<sup>8)</sup>。この拡張版でも $\mathbf{H}$ と $\mathbf{B}$ の方向の一致及び等方性は仮定されている。拡張による計算時間の増加はほとんどなく、約20倍以上の高速化が達成されている。

### 3.2 電圧源解析機能(回路方程式)<sup>9)</sup>

基礎方程式(7)、(8)は励磁電流密度 $\mathbf{J}_0$ が既知であることが前提になっている。しかしながら、実際の電気機器は電圧値を参照することがほとんどであり、電圧値が入る基礎方程式の構成が必要である。

単相交流が図1に表される直列回路を流れている場合を考える。導体部の表皮効果を無視して、回路の線電流が $I_0$ であるとする。この線電流が断面積 $S_c$ 、巻数 $n_c$ のコイルを流れるとすると、

$$n_c I_0 = S_c |\mathbf{J}_0| \quad \dots\dots(11)$$

が成立する。また、直列回路の回路方程式は

$$(Z_0 + R) I_0 + j\omega \psi = V_0 \quad \dots\dots(12)$$

で与えられる。ここで、 $\psi$  はコイルに鎖交する磁束であり、ベクトル・ポテンシャルを用いて次式で表現される。

$$\psi = \frac{n_c}{S_c} \iint (\int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}) dS \quad \dots\dots(13)$$

面積分はコイル断面について、線積分はコイルに沿って行う。式(9)、(11)、(13)を用いて式(7)、(12)を変形し、式(8)との連立方程式を解くことによって、有限要素領域と回路の結合系を扱うことができる。

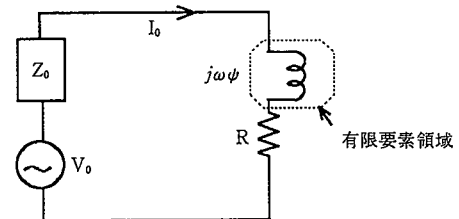


図1 電圧源に接続された直列回路

### 3.3 節要素<sup>10)</sup>

磁気ヘッドの空隙やMRIの薄い磁気シールド材のように、解析領域内に領域の寸法に比して極端に薄い物体がある問題では、寸法比の相違が連立一次方程式に数値的特異性を持ち込み、非物理的解が得られる。正しい解を得ようと細分割すれば計算時間が膨大になる。

節要素は、近接した変数を連立方程式の未知変数とせず、変数間の差を未知変数(これを相対ポテンシャルと呼ぶ)として連立方程式を構成し、精度と計算時間短縮の両立を実現する方法である。

いま、節点 $i+1$ と $i$ が近接している場合、ある電磁的量子 $\mathbf{A}$ について

$$A_{i+1} = A_i + \Delta_i \quad (\Delta_i: \text{相対ポテンシャル})$$

と変換する。この $\Delta_i$ を $A_{i+1}$ の代わりに未知変数として連立方程式を構成し直すと、特異性を根本的に除去することができる。

節要素の適用例を以下にあげる。図2は磁気シールドの簡易な装置の1/8領域モデルである。本手法の妥当性の検証のため、併せて実

験も行った。解析結果と実験結果から磁束密度の x 方向成分について等高線図で表したのが図3である。六つの図のうち、左側三つが実験結果、右側の三つは解析結果である。(a)図は遮蔽板がない場合で、二つの図から箔要素では体積比の影響が出ないことが分かる。また、(b)、(c)図から、遮蔽板が存在する場合でも、妥当な解が得られているのが分かる。特に、高透磁率のアモルファスにおいても解の精度は高い。なお、板を H12として、従来の方法で計算したところ、最大磁束が4倍以上となり、空气中に異常に大きなベクトルが現れた。

3.4 浮き節点法<sup>11)</sup>

浮き節点とは外郭境界を除いて各有限要素の構成節点のうち、他のいかなる要素の構成節点とも重複しない節点である。いま、二つの節点 i と j を考え、その直線上に別の節点 p があるとき、点 p を浮き節点と定義する。節点 p での物理量  $A_p$  は他の2節点との距離の比率

を各々  $\alpha$ 、 $1-\alpha$  として次の線形補間式で近似される。

$$A_p = \alpha A_i + (1-\alpha) A_j$$

浮き節点は相対的で、i、j を p と他の節点から補間してもよい。

浮き節点法は以下の二つの利点を持つ。

- (1)不整合分割が可能のため、部分的に分割の粗密をつけることで、要素数を節約できる(図4<sup>11)</sup>)。
- (2)不整合の要素間接合を許すため、メッシュ作成や物体の相対移動が容易に扱える。

(2)の解析例を図5、6に挙げる。図5は周期的に電流を配置した回転体のモデル図であり、その結果が図6である。図6ではベクトルポテンシャルの等高線を表示している。二つの領域の接合部で不整合の節点が多くあるにも関わらず、等高線が滑らかにつながっているのがわかる。

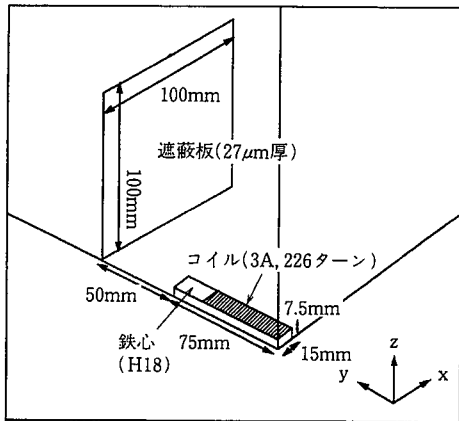


図2 磁気シールド1/8モデル図(静磁場)

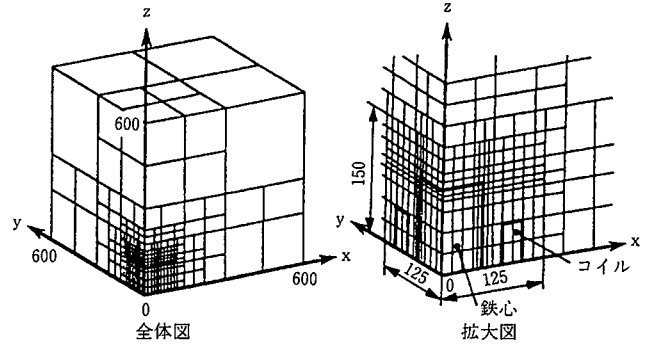


図4 浮き節点を含む分割図

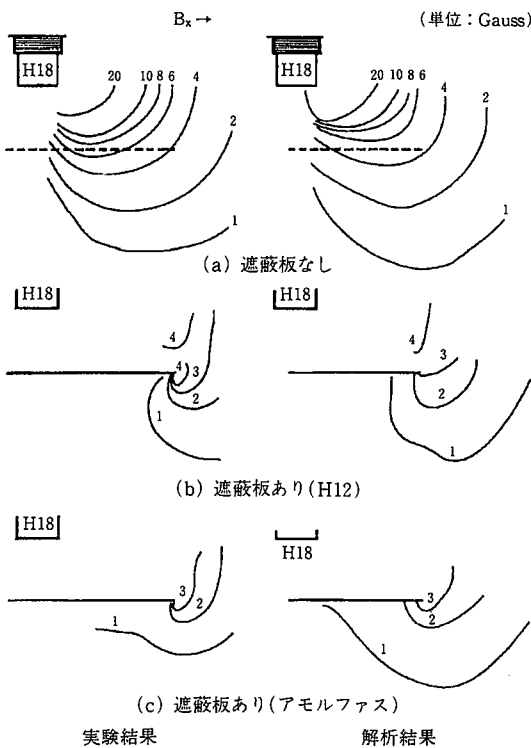


図3 実験結果と解析結果の比較

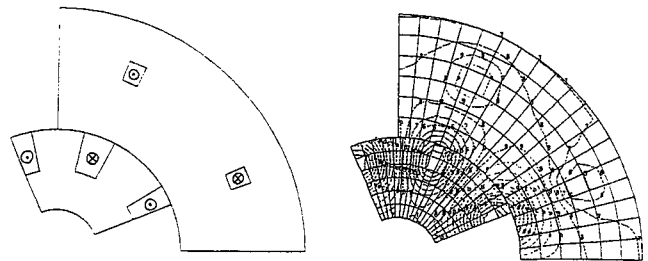


図5 回転体の1/4モデル図

図6 ポテンシャル等高線図

3.5 連成解析機能<sup>11)</sup>

実際の電磁気を応用した装置では、電磁気現象のみならず、熱現象や力学的運動を伴う。したがって、現実性の高い解析を必要とする場合、あるいは、最終的に欲する量が電磁的でない場合は他の解析と連成して解く必要がある。FLEDYはこのような電磁気現象と熱・流体といった他の要素的な現象とが結合した問題を扱えるようになっており、大きな特徴の一つとなっている。

3.5.1 温度場との連成解析

通電加熱や誘導加熱の問題では温度場と連成する必要がある。FLEDYではデータの交換を通して現実性の高い解析が可能である。手順は以下のようになる。

- 1)  $j\omega$  法で誘導電流による発熱量を求める。
- 2) 発熱量をもとにある時間ステップ分温度を計算する。
- 3) 温度から物性値(透磁率、導電率)を更新する。

この三つのステップを解析終了時刻まで繰り返す。

直流通電加熱の場合は1)の発熱量を電場解析プログラムで求めれ

ばよい。通常は、電磁場の時間変化の方が温度のそれより大きいいため、電磁場解析は準定常で十分であり、計算時間も少なくすむ。また、温度の変化に併せて、材料の電磁気特性の変化を考慮できるので、精確に現象を再現することができる。なお、メッシュは両プログラムともに同一のものを使うことができる。

### 3.5.2 流体との連成解析

電磁攪拌のような電磁流体の問題では流体と連成する必要がある。FLEDY では導体にはたらくローレンツ力を計算することができる。したがって、以下の手順で電磁力による流体の挙動をある程度、再現することができる。

- 1) FLEDY の  $j\omega$  法でローレンツ力の時間平均を求める。
- 2) ローレンツ力を他の流体解析プログラムに渡し、Navier-Stokes 方程式の体積力項に代入して流速計算を行なう。

温度場との連成解析のように相互計算は行わない。流体の挙動の時間的スケールが電磁場のそれよりずっと大きい場合は、この方法でも十分な解が得られる。ただし、電磁力と流速の分布領域は一般的に一致しないので、メッシュはその相違に注意して作成する必要がある。この方法によって実際に解析した例を5章に詳述する。

## 4. 高速化手法

計算能力は容量と速度によって決まり、少ない容量・計算手順で解が得られることが望ましい。実現方法として、アルゴリズム自身の高速化とハードに依存した高速化の2種類がある。前者は反復解法、後者は並列処理が代表である。ここでは両者について詳述する。

### 4.1 ICCG 法<sup>12)</sup>

連立一次方程式の解法には、大きく分けて直接法と反復法の二つがある。FLEDY は両解法とも備えており、直接法については代表的な変形 Cholesky 法を、反復法については ICCG 法 (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method) が採用されている。大きな連立一次方程式をなす収束性の高い問題では、ICCG 法は変形 Cholesky 法に比較して格段に計算時間が短い。計算例を表 1 に挙げる。ICCG 法にすることで7倍の高速化が達成されている。ICCG 法のアルゴリズムについては4.3を参照されたい。

高速性だけでなく、収束性からも ICCG 法は有益性がある。ICCG 法が大きな反復回数で収束しない場合、ほとんどがもともと性質の悪い問題か、条件が不適切であることが多い。したがって、問題の性質の判断を ICCG 法の収束性によってある程度知ることができる。

表 1 ICCG 法及び辺要素法の計算時間への影響

	節点要素+変形コレスキー	節点要素+ICCG	辺要素+ICCG
反復回数	—	438	220
計算時間	859分	123分	40分

電気学会検証用穴あきモデル(要素数: 5445, 総節点数: 6368)  
ICCG 収束判定因子:  $5.0 \times 10^{-5}$  計算機: 米国サンマイクロシステムズ社製 SPARC station2

### 4.2 辺要素法<sup>13)</sup>

電磁場解析技術は構造解析技術を土台として発展してきた経緯上、その骨格は構造解析技術と同じであるといつてよい。ところが1980年代後半からベクトル量が基本となる電磁場を扱うのに適した新しい要素法“辺要素法”が開発され、多くの研究がなされている。

辺要素法は変数の割当て方に特徴があり、節点要素では節点毎に物理量が配分され、ベクトル量は節点上の三つの変数で構成されるのに対して、辺要素では、ベクトル量は要素辺のベクトルの合成で表現される。辺には一つの変数を割り当てられ、ベクトルの向きは

辺の方向で表される(図7参照)。辺要素が脚光を浴びている理由は三つある。通常の要素法と違い、ベクトル補間関数を用いて直接ベクトル量を表現できること。電磁波問題において節点要素に比べて非常に精度が高いこと。そして、高速化が可能なことである。ただし、辺要素法単独では、高速化は必ずしも実現できない。

高速化については、直接法を用いる限り、辺要素法、節点要素法ともにマトリクスのバンド幅の広がりにはほぼ同じで、特に高速になる要因はない。しかし、ICCG 法などの反復法を使えば、マトリクス内の非零要素のみでよく、その数は節点要素に比較して通常2、3分の1程度になる。加えて、節点要素より反復回数が数分の1ですむことが多いため、結果的に高い高速性が得られる。辺要素法を FLEDY に組み込んで高速化を分析した一例を表 1 に挙げる。この例では、辺要素を用いることで、3倍以上の高速化を達成し、ICCG 法との組み合わせによって標準的な手法の実に21倍以上の高速化を達成している。

### 4.3 並列処理による高速化<sup>14)</sup>

FLEDY に用いた並列化手法は全連立一次方程式を複数の演算器に割り当てて解く方法で、ハードウェアにはインモス社製のローカルメモリ付き並列処理用プロセッサ“Transputer”を使用し、アーキテクチャは分散メモリ型 MIMD (Multiple Instruction Multiple Data) を採用した。このアーキテクチャは演算器個数に制約がなく、将来、主流の並列処理アーキテクチャと考えられている。

並列化は変形 Cholesky 法、ICCG 法の両法について行った。ここでは利用度が増している ICCG 法についての並列化をとりあげる。連立一次方程式  $Ax = b$  に対する ICCG 法のアルゴリズムは以下のようになる。

(不完全 Cholesky 分解・初期値設定)

$$K = (U^T D U)^{-1} \quad x_0 = Kb \quad r_0 = b - Ax_0 \quad p_0 = Kr_0$$

(反復計算: 反復 k 回目)

$$\begin{aligned} & \text{WHILE } \|r_k\| > \varepsilon \parallel b \parallel \\ & \alpha_k = (r_k, Kr_k) / (p_k, Ap_k) \\ & x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \\ & r_{k+1} = r_k - \alpha_k Ap_k \\ & \beta_k = (r_{k+1}, Kr_{k+1}) / (r_k, Kr_k) \\ & p_{k+1} = Kr_{k+1} + \beta_k p_k \\ & k = k + 1 \end{aligned}$$

$U^T, D, U$  は全体係数マトリクス  $A$  を不完全 Cholesky 分解して得られる下三角, 対角, 上三角の行列である。 $\varepsilon$  は収束判定因子である。

並列化は不完全 Cholesky 分解と反復毎の後退代入の部分で難しく、これらの並列化の程度が計算速度を決定する。並列化を容易にするため、図 8 に示すようにバンドマトリクスに対して、ブロック内部の非零要素にのみ不完全 Cholesky 分解を施す。ブロックの一辺の大きさは各プロセッサ1個が担当する行数に等しく、不完全 Cholesky 分解においてはブロック間の通信を排除、反復毎の後退代入では通信の軽減をはかっている。しかし、演算器の数が増えるほど不完全 Cholesky 分解の行われる範囲は小さくなり、反復回数は増加する。今のところ、高い並列性と高い収束性の両立する反復法は見つかっていない。本手法による計算時間は表 2 のようになる。反復回数の増加のために全体の処理時間の短縮を妨げているのがわかる。並列処理は変形 Cholesky 法の方が効果は高いが、モデルの大きさ、計算機容量、全演算時間などを考慮して、解法を選択する必要がある。

## 5. 鋳型内流動制御への応用<sup>15)</sup>

### 5.1 鋳型内流動制御と電磁攪拌装置

製鉄プロセスにおける品質の制御が可能となることは生産上、決定的な意義を持つ。実際に品質を大きく決める工程は鋳造工程である。転炉等にて精錬された溶鋼を鋳造機で一度、凝固させると、後の工程では、その表面性状を大きく変更したり、侵入した介在物を除去することができないからである。鋼材の表面性状向上及び介在物除去のために、溶鋼の凝固領域に攪拌作用を付与させる方法が鋳型内電磁攪拌装置によって実現されている。

電磁攪拌装置では、電磁コイルによる電磁力によって、溶鋼での流動が生じるために、まず、電磁場解析による電磁現象を把握し、その後に、流体解析による流体特性を明らかにする必要がある。また、攪拌対象物が流体であるため、電磁力の大きさとともにその分布も重要となる。通常、電磁攪拌装置はリニア誘導機の一次コイルに相当し、溶鋼がリニア誘導機の二次側に相当する。コイルから発生する移動磁場が溶鋼と鎖交し、誘導電流が生成される。移動磁場と誘導電流から溶鋼内に分布したローレンツ力が発生し、溶鋼が攪拌される仕組みになっている。

鋳型内電磁攪拌装置の1例を図9に示す。モールドは溶鋼を凝固させるため、熱を効率よく奪うよう、伝熱性の高い銅板が使用されている。更に、その強度を保つために、銅板の外側にステンレス鋼板

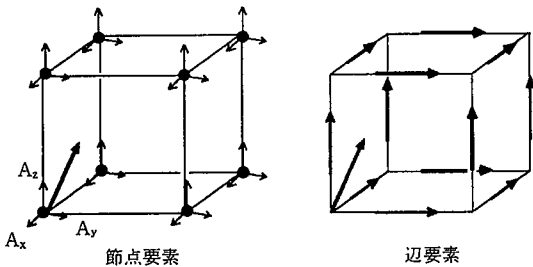


図7 節点要素と辺要素

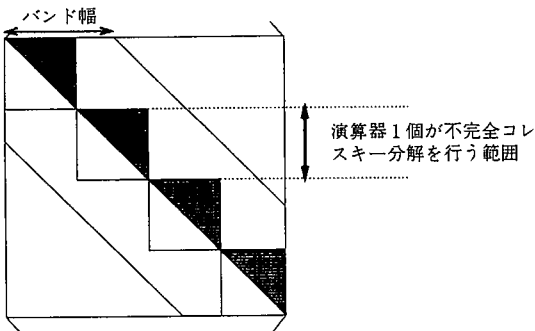


図8 不完全Cholesky分解の並列化

表2 計算時間(ICCG法, 対角項を1.2倍, 単位: 秒)

CPU数	処理時間	データ転送	前処理	反復回数
1	1858	21	134	92
2	1291	22	54	146
4	805	22	20	202
8	481	22	8	247
16	284	26	3	265

マトリクス次元: 2224 帯幅: 392 非零要素数: 78528  
CPU: Transputer (米国サンマイクロシステムズ社製 SPARC station/370)

が使用されている。このため、コイルはこの銅-ステンレス鋼板の外側に配備される。また、コイルと溶鋼との間隔が大きいため、極間も大きく取る必要がある。しかし、極間が大きいと、漏れ磁場が増える。漏れた磁場の抑制とモールド周りの省スペースを実現するため、コイルは鉄芯に密着して胴巻きに巻かれている。コイルはモールドの二つの長辺に並行に配置される。

### 5.2 電磁流体解析の手法

解析はFLEDYで求めたローレンツ力を新日本製鐵内で開発された流体解析ソフトウェアへ外力として渡し、流速計算を行った。ここでは、リニアモータ移動磁場の同期速度が、溶鋼の流速より非常に速いものとして、流体場から電磁場への影響はないものとした。

電磁場解析は電磁場の集中する湯面近傍を、流体解析は溶鋼が充填している長いモールド内をモデル化した。コイルには3相交流が空間周期的に印加され、移動磁場を形成する(移動方向は上からみて反時計回り)。

コイルは、リニア構造のため、電流に3相不平衡成分が発生し得るが、動作周波数が数Hzと極低周波のため、不平衡の影響がインダクタンス成分よりも、一次側の直流抵抗成分が支配的となり、実際の電流は平衡状態となる。そこで、3相平衡な電流源にて解析した。また、鉄芯は磁気飽和がないものとして、比透磁率を一定とした。

電磁場解析によって得られた湯面近傍のローレンツ力分布を上方より眺めたのが図10である。これより得られた流速分布が図11である。ローレンツ力分布は、回転攪拌においては、節が必ず発生するが、流速分布への影響は比較的小さいことがわかった。

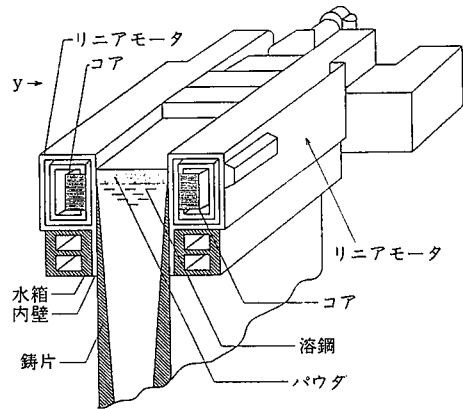


図9 鋳型内電磁攪拌装置の概略図

## 6. 結 言

3次元汎用電磁場解析ソフトウェアFLEDYの現状の解析機能とその応用例について述べた。種々の機能は具体的な電気機器や製鉄プロセスへの電磁エネルギー応用装置への開発支援を通して追加されてきたものである。応用として、鋳型内溶鋼の電磁攪拌への適用例を通じてその有用性を示した。この例からもわかるように、計算機環境の向上とアルゴリズムの改善の相乗効果によって、数値解析による実際の問題へのアプローチが現実性の高いものとなってきており、今後、多くの実プロセスへの応用が進展すると思われる。

なお、FLEDYの開発や解析では、(株)八幡コンピュータセンターの中司琢磨氏、園田慎二氏、(株)日鐵エレクトックスの清水哲也氏、新日鉄情報通信システム(株)の水谷康宏氏、(株)共栄エレクトロニクス(株)の森島史氏にご協力頂きました。ここに謝意を表します。



$3.02 \times 10^8 \text{ N/m}^3$

図10 湯面近傍のローレンツ力分布

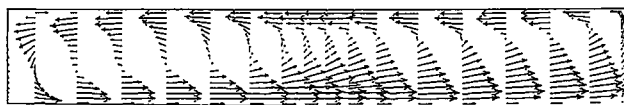


図11 湯面近傍の流速分布

### 参考文献

- 1) 植山, 梅津: 新日鉄技報. (341), 23 (1991)
- 2) Ueyama, T., Shinkura, K., Ueda, R.: IEEE Trans. on Magnetics, MAG-25, No.5, 4153-4155 (1989)
- 3) Tonomura, A.: Reviews of Modern Physics. Vol.59, p.639 (1987)
- 4) 日本機械学会編: 熱と流れのコンピュータアナリシス. コロナ社, 178 (1986)
- 5) 中田, 高橋: 電気工学の有限要素法第2版. 森北出版, 200 (1982)
- 6) Fujiwara, K., Nakata, T., Okamoto, N., Muramatsu, K.: IEEE Trans. on Magnetics, MAG - 29, No.2, 1962-1965 (1993)
- 7) 藤原, 中田, 荻野, 近藤: 非線形磁界解析における種々の単純反復法. 平成7年電気学会全国大会896
- 8) 定木, 梅津, 和嶋, 植山: 電気学会静止器・回転機合同研究会資料. SA-94-10, RM-94-74 (1994)
- 9) 植山, 西, 西坂, 和嶋, 梅津: 電気学会静止器・回転機合同研究会資料. SA-91-28, RM-91-91 (1991)
- 10) Ueyama, T., Umetsu, K., Hirano, Y.: IEEE Trans. on Magnetics, MAG-26, No.5, p.2202 (1990)
- 11) 村松, 中田, 高橋, 藤原: 電気学会回転機・静止器合同研究会資料. SA-91-36, RM-91-99 (1991)
- 12) 村田, 名取, 唐木: 大型数値シミュレーション. 岩波, 1990, 102
- 13) 藤原: 第2回電磁界数理解析に関するセミナー講演論文集, “辺要素を用いた三次元磁界解析”. (1991)
- 14) 植山, 金子, 梅津: 第3回電磁界数理解析に関するセミナー講演論文集 “並列処理技術”. (1992)
- 15) 藤崎, 梅津, 澤田, 植山, 岡澤, 藤, 竹内: 電気学会リニアドライブ研究会資料. LD-94-24, 57-66 (1994)