

## 電磁場技術の鉄鋼プロセスへの応用

## Application of Electromagnetic Field Technique to Steelmaking Process

藤 崎 敬 介<sup>(1)</sup>  
Keisuke  
FUJISAKI

和 嶋 潔<sup>(2)</sup>  
Kiyoshi WAJIMA

澤 田 健 三<sup>(3)</sup>  
Kenzou SAWADA

植 山 高 次<sup>(4)</sup>  
Takatsugu  
UEYAMA

## 抄 録

新日本製鐵で開発した汎用電磁場解析ソフトウェアFLEDYを基盤とした数値解析技術を駆使して、電磁場技術の製鉄プロセスへの応用の展開を行っている。まず、溶鋼応用の基盤となる電磁流体解析の技術開発として、連成部分におけるモデル開発を行い、電磁攪拌、電磁ブレーキ、自由表面形状等の課題ごとのモデルを開発した。次に、溶鋼の応用として、スラブ及びビレット連続 casting 機の電磁攪拌技術の開発、電磁ブレーキ技術の開発並びに、自由表面形状を考慮したビレット電磁攪拌の開発を行い、その電磁流動特性を明らかにしたことを述べた。更に、薄板への応用として、連続圧延機ランアウトテーブルの直流電磁力応用開発、薄板の中心位置決め装置の開発を効率よく行ったことについて述べた。最後に、電磁場技術のセンサ応用として、ビレット磁粉探傷装置の磁化器の最適設計を行った。これらの技術のいくつかは、品質向上及びコスト切り下げの重要な技術として、既に現場適用され、実用化されている。

## Abstract

Application of an electromagnetic field technique to the steelmaking process has been developed by Nippon Steel, making the most use of the numerical analysis technology based on the general purpose electromagnetic field solver "FLEDY" developed by Nippon Steel. In this paper, described are, as first, the development of models in the compound part as the technique for the electrohydrodynamic analysis to be the basis of applying the electromagnetic technique to the molten steel, and the development of models for respective application to such as electromagnetic stirring, electromagnetic braking, free surface problems and so. Then, as an application of the electromagnetic field technique to the molten steel, explained are these developments of the electromagnetic stirring technique introduced into the slab or billet continuous caster, the electromagnetic braking technique, and the electromagnetic stirrer in the billet continuous caster taking account of the free surface problems, and electrohydrodynamic characteristics of these techniques are clarified. Further, as its application to steel sheets, described are the application of the direct current electromagnet force to the run-out table of hot strip mill and the development of the center positioning devices for steel sheets, which are effectively functioning. Lastly, as an application of the electromagnetic field technique to sensors, an optimized designing of electromagnet devices for the magnetic powder flow detector for billets is described. Some of these techniques have been already utilised in the actual on-site facilities to realize the improvement of steel product quality and the reduction in manufacturing costs.

## 1. 緒 言

最近の国内外の大きな環境の変化に伴い、鉄鋼プロセスの開発も更なる品質向上とコスト切り下げが要求され、そのための新しいシーズ技術として、電磁場利用技術がこれまでになく脚光を浴びている。そのために我々は、実験に変わる重要な研究開発ツールである数値解析を駆使した開発を行っており、汎用電磁場解析ソフトウェアFLEDYを中心として取組んでいる。

本文では、まず、溶鋼への応用として、その基盤となる電磁流体

解析の連成部分におけるモデル開発を行い、電磁攪拌、電磁ブレーキ、自由表面形状等の課題ごとのモデルを開発したことを述べる。次に、溶鋼の応用として、スラブ及びビレット連続 casting (以下、連続 casting 機) の電磁攪拌技術の開発、電磁ブレーキ技術の開発並びに、自由表面形状を考慮したビレット電磁攪拌の開発を行い、その電磁流動特性を明らかにしたことについて述べる。更に、薄板への応用として、連続圧延機ランアウトテーブルの直流電磁力応用開発、薄板の中心位置決め装置の開発を効率よく行ったことについて

<sup>(1)</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 工博  
<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  
研究員

<sup>(3)</sup> (株)日鉄技術情報センター 主任部員

<sup>(4)</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 工博

述べる。最後に、電磁場技術のセンサ応用として、ピレット磁粉探傷装置の磁化器の最適設計を行った<sup>1,3)</sup>。

## 2. 電磁流体数値解析

電磁流体解析技術は、溶鋼等の熔融金属に電磁場を適用しようとするときに使用される。しかしながら、マックスウェルの四つの式及びその関連式を基にした電磁場解析とナビエ-ストークスの式及びエネルギー保存式、運動量保存式等を基にした流体解析とを連成解析することは、多大に計算時間がかかり、目的に応じた何らかのモデル化を行って解析すべきだと考えている。

例えば、図1(a)に通常想定される電磁流体解析の一例を示しているが、そこでは、次のような手順を行って解析することになる。まずある熔融金属の形状において、電磁場解析で電磁力分布を求め、次にその電磁力分布を流体解析の外力項として流体解析を行い、今度はそこで求めた流速分布及び自由表面形状を電磁場解析の速度起電力及び境界条件として電磁場解析を行い、云々、といった繰り返し計算をある収束範囲に収まるまで解析する。この手法は、単独計算だけでも多大に計算時間がかかることを勘案すれば、実用上かなり困難なものといえる。

従って、電磁流体の応用課題に応じて、その特性に合わせたモデル化を行い、実用的な数値解析技術を開発すべきであると考えられる。

まず、電磁攪拌装置(EMS: Electromagnetic Stirring)の場合は、溶鋼の速度(約0.5m/s以下)に比してEMSの磁場の同期速度が4~6m/sと小さいために、電磁場における速度起電力の影響はほとんど無視される。また、スラブ連铸機の場合は、湯面が比較的平坦なので、流体解析による速度及び表面形状の電磁場への影響は無視される。従って、この時の電磁流体解析方法は図1(b)のようになる。

次に、電磁ブレーキの場合は、直流印加磁場と、溶鋼の速度から生じる渦電流による誘導磁場との比である磁気レイノルズ係数が0.1以下と小さいために、電磁場は、与えられた磁場内ではポアソン式

になる。そのポアソン式を流体解析内に取り組み、与えるべき磁場分布を電磁場解析で行うものとするれば、電磁流体解析は図1(c)のようになる。

最後に、電磁力によって自由表面形状が変化する場合<sup>4)</sup>のモデル化として、Rの射影法<sup>5)</sup>を考案した。これは、電磁力によって流体の自由表面が変形した場合、ある基準からの距離(R)をベースに電磁力を射影するもので、磁気浮上車両の多剛体ダイナミクスモデル<sup>6)</sup>を基礎に考案されたものである。この場合、電磁流体解析手法としては図1(d)のようになり、大変形した場合のみ電磁場を再計算するシステムになる。

以上のように、現在開発している電磁流体解析技術は、電磁場解析モデルを一部流体解析内に取り込むことで、電磁場解析そのものをも同時に解析できるようになっており、これにより、電磁コイル特性に着目したプロセス開発ができるようになっている。

## 3. 連铸機への応用

### 3.1 スラブ铸型での電磁攪拌技術

スラブ铸型での電磁攪拌装置(EMS)は、表面品質向上のために新日本製鐵社内各所で実用化されている。ここでは、数値解析でその基本特性をみる<sup>7,8)</sup>。

図2は、連铸機モールド内に内蔵されたEMSの鳥瞰図である。溶鋼は銅板モールドで冷却され徐々に固体となる。モールドの外にEMSコイルが配置されている。図3は、引抜き方向(z)から見たEMSコイルであるが、溶鋼とコイルとの間に銅板があるため、磁気シールド効果によって動作周波数は数Hz程度と極めて低い。コイルは、モールド内に低容積で収まるように、コイルワインディング式に巻かれた構造である。

まず、電磁場解析の妥当性をみるために、測定値と解析値との比

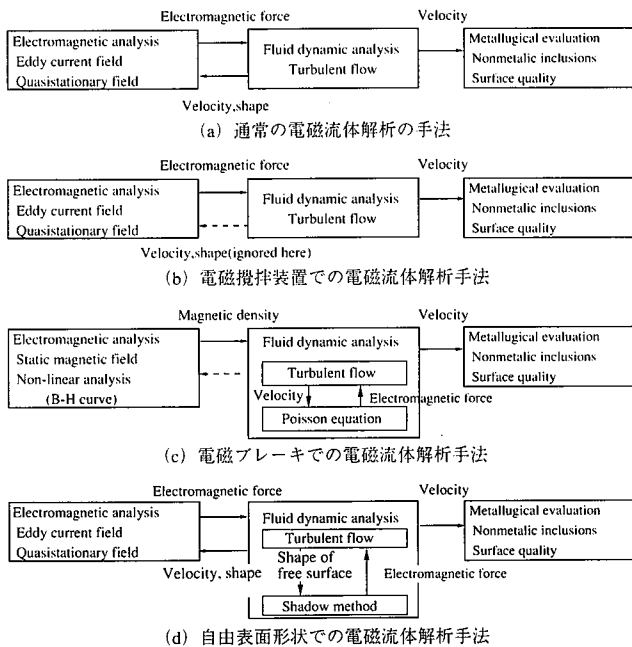


図1 目的に応じた電磁流体解析技術

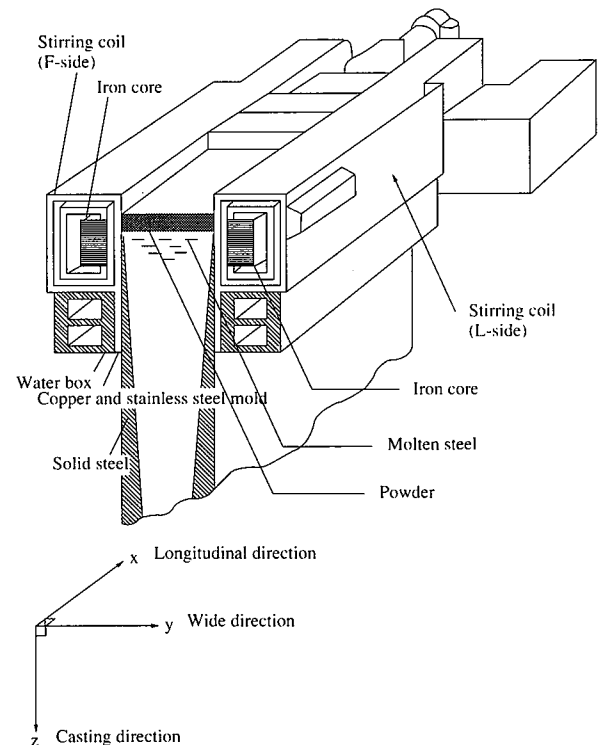


図2 モールド内電磁攪拌装置の鳥瞰図

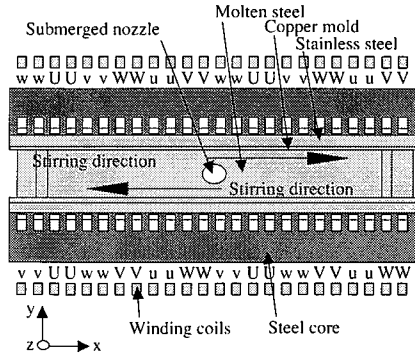
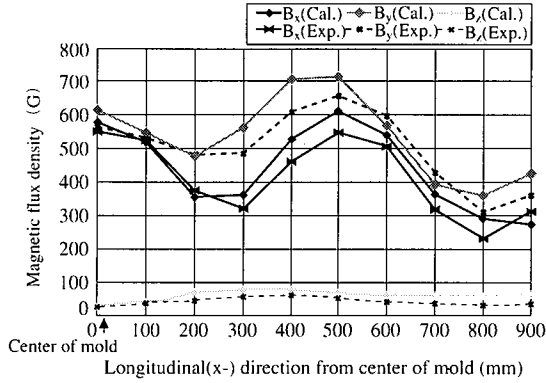
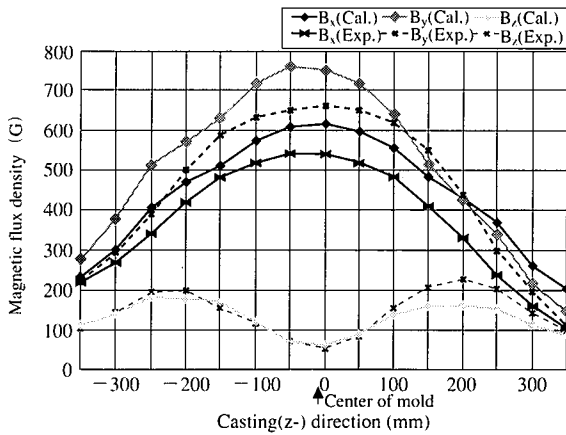


図3 スラブ式電磁攪拌装置



(a) モールド幅方向(x)分布

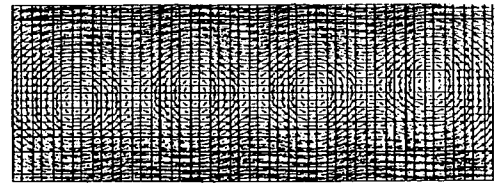


(b) 引抜き方向(z)分布

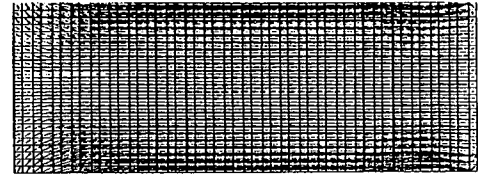
図4 三次元磁束密度分布の実験値と解析値との比較

較を行ってみる。図4がその結果である。幅方向分布及び引抜き方向分布ともに、三次元の磁束密度分布の解析値が測定値とよく一致していることが分かる。

次に、電磁力分布を図5に示す。現行使用されている回転攪拌モード(同図(a))では、極数に応じた渦がモールド内に生じている。これは、F面のコイルとL面のコイルの磁場の相互作用によるものであり、水平攪拌モード(同図(b))では生じていない。この電磁力の渦の影響を流体解析で評価してみた。図6に示すように、流速分布はほぼきれいな回転攪拌流となっており、電磁力でみられた渦分布の影響は、流体の慣性及び連続性のため無視されている。



(a) 回転攪拌モード



(b) 平行攪拌モード

図5 攪拌モードによる電磁力分布

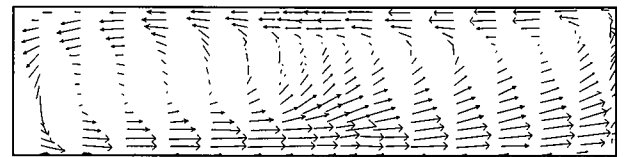


図6 流速分布(回転攪拌, 2 Hz, 4 極)

### 3.2 ビレット連铸機

次にビレット連铸機での電磁攪拌特性をみる。通常はビレットモールド一つづつに電磁攪拌装置が配置されるが、設備集約等により、スラブ連铸機をビレット連铸機にも流用する場合には、図7に示すように一つのEMSコイルで、3個のビレットモールドを攪拌させることになる。この場合、3個のモールドに均一な電磁力が付与されるようにEMSコイルを適切に配置しなければならない。ここでは、F/L面のコイルの相対的位相差の最適値をみる<sup>9)</sup>。

図7の電気結線を基準にして、相対的位相特性を図8に示す。ここで、電磁トルクTは下記の式で与えられる。

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{f_i V_i r_i}{z_i} \text{ (Nm/m)}$$

ここで、 $f_i$ : #要素の電磁気力(N/m<sup>3</sup>)、 $V_i$ : #要素の体積(m<sup>3</sup>)、 $r_i$ : モールド中心から#要素までの距離(m)、 $z_i$ : #要素のz方向の厚み(m) 図8をみると、相対位相が変わるにつれ正弦波状にきれいに变化していることが分かる。3個のモールドがすべて等しくなる位相は存

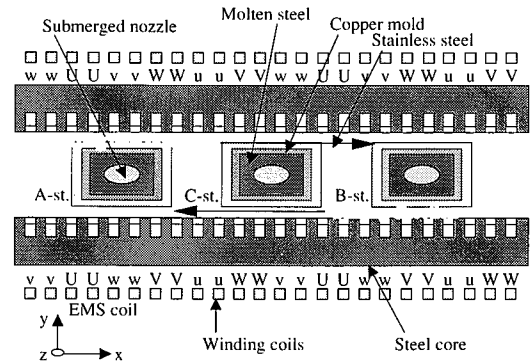


図7 電磁攪拌装置のビレット連铸機への流用

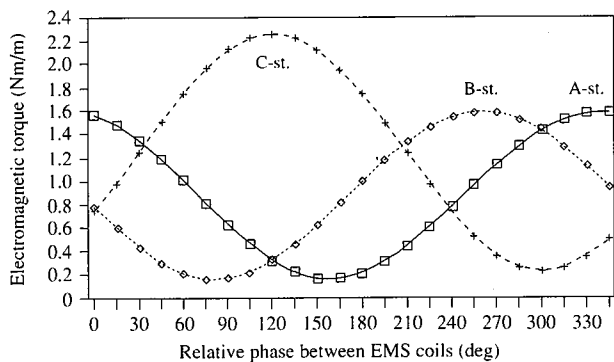


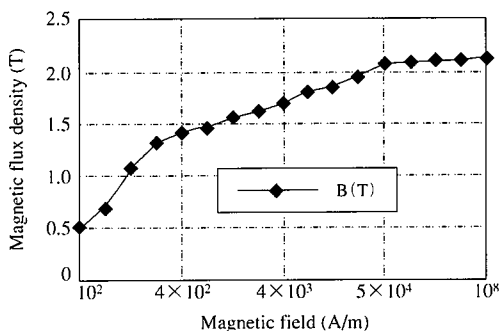
図8 ビレット電磁攪拌装置での位相特性

在しないが、0度または240度では比較的良好一致を見ている。

### 3.3 電磁ブレーキ技術

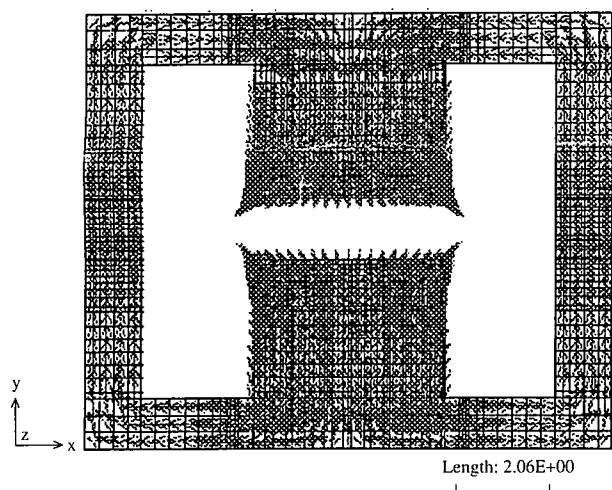
電磁ブレーキにより流動制御することはよく知られており、多くの電磁流体解析が行われている。ここでは、鉄芯の磁気飽和について述べる。

電磁ブレーキでは、モールド近辺の狭隘な空間にできるだけ大きな磁束密度を確保する必要があるために、電磁コイルの鉄芯は磁気飽和した領域で使用することになる。図9(a)のB-H曲線における鉄芯の磁束密度分布を同(b)に示す。鉄芯の歯部及びその付け根部分で磁気飽和が生じていることが分かる。



(a) B-H曲線

LMF core



(b) 電磁コイルの磁束密度分布

図9 電磁ブレーキ特性

### 3.4 自由表面問題

ビレット連铸機にEMSを印加すると、洗濯機のように、湯面の形状が盛り上がり、品質に悪影響を与えることが分かっている。その特性をRの射影法を用いて湯面形状を評価した。図10に解析結果を示すが、洗濯機のように、湯面が盛り上がっていることが分かる。

### 3.5 リニアモータノズルの開発<sup>10)</sup>

EMSはリニアモータ(誘導式)の一種であり、それをノズルに適用し、流量制御に用いたので以下に報告する。

図11は、リニアモータをノズルに適用した例であり、リニアモータの進行磁界の方向をノズル上方に付与すれば、ノズル流量のブレーキとして作用し、また進行磁界の方向を下方に付与すれば、流量の加速増加に寄与できる。リニアモータの電源をインバータ式にすれば、電圧または周波数を可変にすることで電磁力の大きさを変えることができ、ノズル流量の調整制御装置に使用可能である。

この特性を実験で確かめた結果の一例を図12に示す。ここでは垂直ノズルを使用している。両側式リニア誘導機(DLIM)電流60Aでは、水平ノズルまたは固体の二次導体であれば、完全に静止または逆向きに移動となる状態である。しかし垂直ノズルであり、かつ二次導体が液体であるため、ノズル端部での電磁力が作用しないところから漏れ初め、液体金属を完全に静止することはできなかった。水平ノズルでは完全に静止でき、弁としての作用が期待できる。

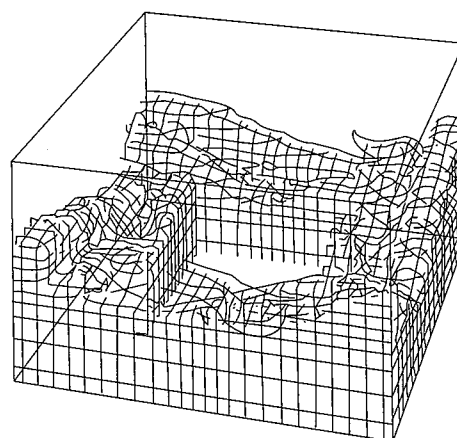


図10 電磁攪拌による自由表面形状

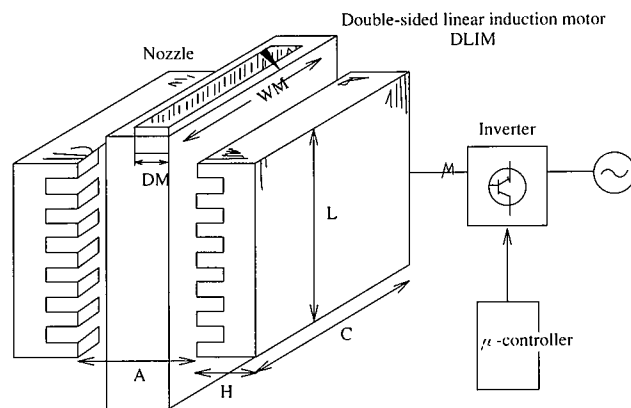


図11 リニアモータノズルの外形

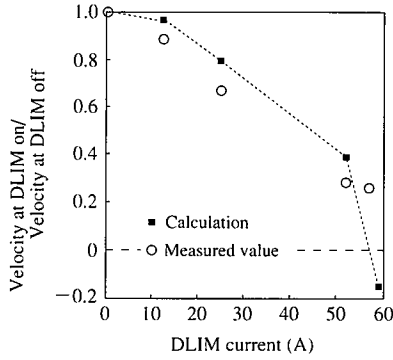


図12 垂直ノズルでの流動特性結果

#### 4. 薄板への応用

##### 4.1 電磁カランアウトテーブルの開発<sup>11)</sup>

薄板の電磁力応用として、まず、連続圧延におけるランアウトテーブルの薄板におけるフライング防止のために電磁コイルを応用した電磁カランアウトテーブルを説明する。

図13に、既設のロールに電磁コイルを周回させた電磁カランアウトテーブルの概形図を示す。電磁コイルに直流電流を付与することで鉄芯であるロールが電磁石の鉄芯と兼用し、フライングする薄板を電磁石の力でフライング防止し、スレディング速度の向上を狙ったものである。

薄板の磁気飽和をも考慮した電磁界数値解析結果によると、ロールと薄板の接点は、空隙長が最も短いために、その20mm程度の幅に電磁力のほとんどが集中していることが分かる(図14参照)。このため、薄板がロールに付着すれば、薄板とロールの吸着力が増し、摩擦が減るために、ロールの駆動力が薄板に直接伝達され、薄板の速度向上、つまりスレディング速度向上が期待される。

一方、電磁コイルの発生する磁束が回転するロールと直角に横切る部分があるために、速度起電力がロール幅方向(x)に発生し、ロールがアースに設置していれば、渦電流がロールに流れることになる。このため、渦電流を駆動するエネルギーは、ロールを駆動するモータから供給させることになるので、渦電流が流れるとモータの電流が増加することになる。この特性をオフライン実験によって詳細に評価したところ、モータの電流は電磁カランアウトテーブル

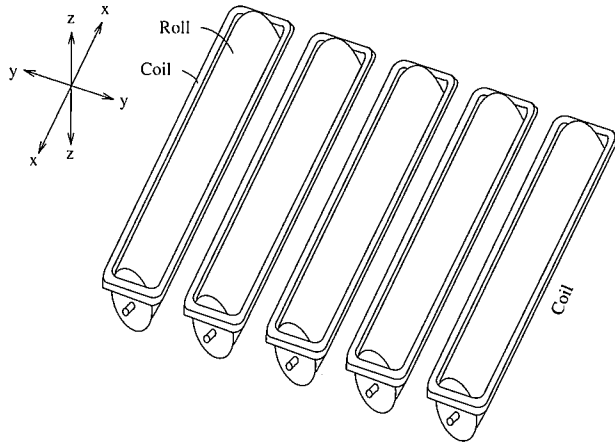


図13 電磁カランアウトテーブルの概形図

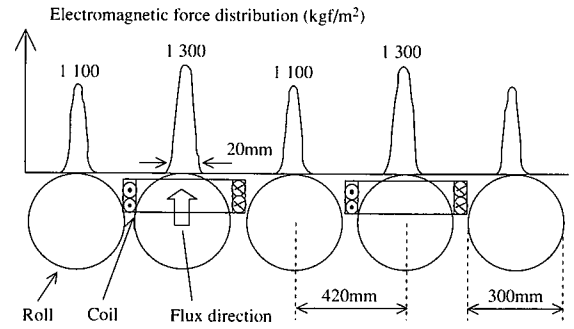


図14 電磁カランアウトテーブルの電磁力特性

によって増加するものの、実用上問題ないことが分かった。

##### 4.2 中心制御技術の開発<sup>12)</sup>

次に、電磁場技術の薄板応用として、電磁石の薄板の中心制御の応用開発について述べる。

図15は、0.5mm厚みの薄板の両面に対抗するように2個の電磁石を配置し、それぞれの電圧の大きさを変えることで、薄板の中心制御を実現しようと狙ったものである。つまり、例えば薄板が上方に移動した場合、上方の電磁石の電圧を小さくし、下方の電磁石の電圧を大きくすれば、薄板は下方に電磁力が作用するので、中心に向かうことができる、といった具合に制御するのである。

この場合、2個の電磁石の電流の向きには2種類の任意性があり、図16のごとく、同極配置、異極配置と呼んでいる。問題は、どちらの方が電磁力特性が優れているかである。これを数値解析で評価した結果も図17に示す。薄板の磁気飽和によって、電磁力は電流にはほぼ比例した特性を示しているが、極の配置としては、異極配置のほうが大きな電磁力が発生することが分かる。

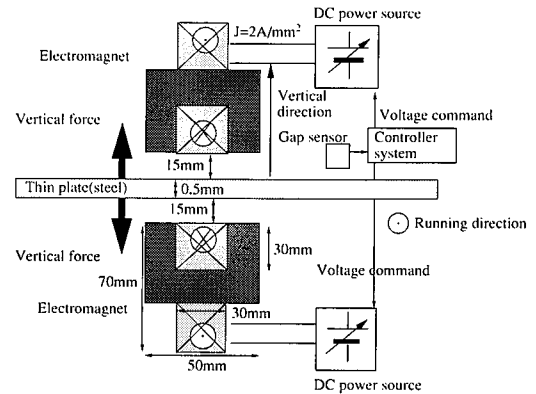


図15 電磁石による薄板の制振装置

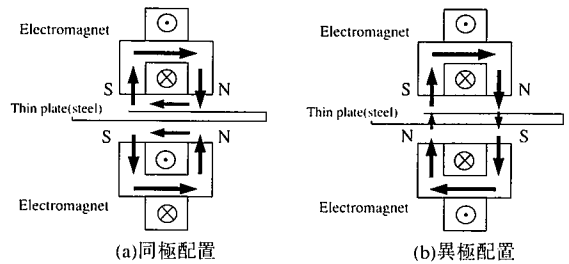


図16 極配置による磁束経路

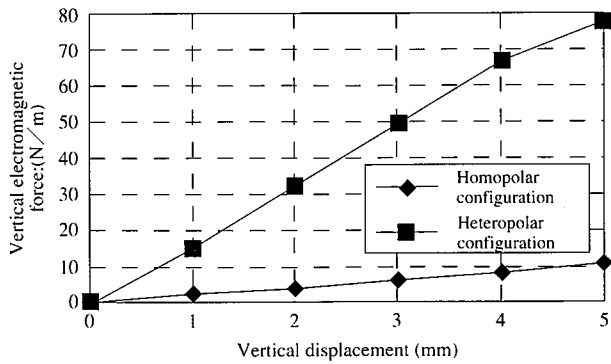


図17 極配置による電磁力特性

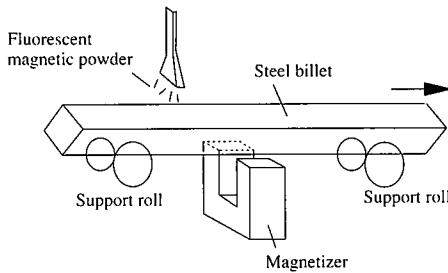


図18 磁粉探傷装置の構成図

## 5. 電磁気センサへの応用

電磁場技術は、今まで述べた電磁力を中心とした応用の外に、電磁気センサへの応用にも開発が進んでいる。ここでは、その一例として、磁粉探傷装置の磁化コイルの最適設計開発を行ったので以下に述べる<sup>13)</sup>。

磁粉探傷装置は、図18に示すように、鋼材の表面に磁粉(微細な鉄粉と溶媒としてのアルコールとからなる)を塗布し、その後磁化装置で励磁すると、表面にある傷部分では他と異なった磁粉模様がでるため、それを人間等が検知して鋼材の表面傷を検出する装置である。そこでは、励磁装置である磁化器によって、鋼材の面と平行成分のみを発生することが重要である。つまり、鋼材面に垂直な磁化成分があると、傷と同様の磁粉分布を示して誤検出となるために、平行成分をできるだけ大きくする磁化器の設計が大切である。

図19に、この解析によって得られた磁束密度の水平成分と垂直成分

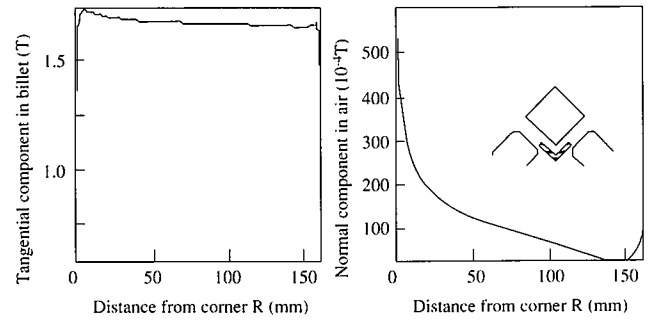


図19 磁粉探傷装置の磁化器の磁束密度分布

分を示す。コイル形状を変更し、更に磁気シールド材を配置することで、従来の磁化器より数段優れた磁化器を設計することができた。

## 6. 結 言

以上のごとく、電磁場の製鉄プロセス応用は着実に進んでおり、電磁力応用だけでなく、電磁気センサ開発まで幅広く行われている。これらの技術のいくつかは、品質向上及びコスト切り下げの重要な技術として既に現場適用され、実用化されている。今後は益々の技術向上を図っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 植山, 梅津: 新日鉄技報, (341), 23(1991)
- 2) 梅津, 藤崎, 和嶋, 西, 澤田, 藤崎, 植山: 新日鉄技報, (357), 11-16(1995)
- 3) Ueyama, T., Shinkura, K., Ueda, R.: IEEE Trans. Magn. 25, (5), 4153-4155 (1989)
- 4) Hirt, C.W., Nichols, B.D.: J. Comp. Phys. 39, 201 (1981)
- 5) 藤崎: 自由表面による非定常流電磁流体解析, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-95-46, 1995
- 6) 藤崎, 正田: 電磁吸引制御式磁気浮上車両の走行シミュレーション, シミュレーション, 3(2), 88-96(1984)
- 7) Fujisaki, K., Ueyama, T., Okazawa, K.: IEEE Trans. Magn. 33(2), 1642-1645(1967)
- 8) Bozorth, M.R.: Ferromagnetism, D. Van. Nostrand Company, Inc. 1951
- 9) Fujisaki, K., Ueyama, T., Takahashi, K., Satoh, S.: Phase Characteristics of Electromagnetic Stirring, IEEE INTERMAG'97, BR-18, 1997
- 10) Fujisaki, K., Nakagawa, J., Misumi, H.: IEEE Trans. Magn. 30, (6), 4764-4766, (1994)
- 11) 藤崎, 植山, 田中, 入部: 日本 AEM 学会誌, 1(3), 34-40(1993)
- 12) Fujisaki, K., Ueyama, T., Wajima, K.: IEEE Trans. Magn. 32(5), 5058-5060 (1996)
- 13) Wajima, K., Umetsu, K., Naitoh, S., Ueyama, T., Sonoda, S.: IEEE Trans. Magn. 32(5), 4311-4313 (1996)