



製鋼プロセスにおける電磁流体力学の応用

藤 健彦*

Application of Magnetohydrodynamics to Steelmaking Process

Takehiko TOH

Synopsis : Recent applications of Magnetohydrodynamics to the steelmaking process are reviewed. Many applications have been developed in the field of steelmaking because of the demand to employ clean and efficient remote actions for various states of the liquid and solid steels by using various functions such as heating, stirring, braking and shaping. Not only the endeavor of the technological development but of the theoretical investigations play important roles. Plenty of R&D has been tried, and some of the technologies are already established and some are still in the very fundamental stage or interrupted because of their difficulties. In this review, some of the latter cases are also picked up, because the recent or future progress in the surrounding technologies or the change in the demand might lead to the retrial of the development.

Key words: steelmaking; continuous casting; electromagnetism; simulation.

1. 緒言

電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics 以下 MHD) は、地球・宇宙物理、原子力などの分野における研究を契機に発展してきた。鉄鋼業では、古くから電気エネルギーを溶解・精錬・凝固の過程で活用しており、製鋼の工程では、連続鋳造の導入早々に、ストランド内電磁攪拌や、ASEA-SKF 炉のような小規模の溶鋼の攪拌への適用など単独の技術として進展が見られた。我が国では、製鋼工程への体系的な電磁気的应用技術の検討は、鉄鋼協会の特定基礎研究会である電磁気冶金の基礎研究部会の設立に始まる¹⁾。研究会や大学及び各企業における研究開発、実機適用の検討においては、電磁気特に電磁流体現象の理解や、制御機能の支配パラメータの把握と定量化、周辺技術の積極的な取り込みが重要であった。

電磁気の利用技術でポピュラーなものは、アークもしくは誘導を利用した加熱・溶解・攪拌であり、多くの工程で応用技術が展開されている。しかし、他の機能の多くを積極的に活用しているのは連続鋳造工程である。これは、プロセスサイズと制御機器のサイズの一致、同一の作用をもたらす他の技術とのコスト的優位性、さらには周辺技術の成熟度に依存している。さらに、連続鋳造工程が溶鋼から鋳片までの高温の電気伝導性流体及び固体を扱い、基本的な品質を造り込む工程として、クリーンな遠隔作用を要求していることによる。

本稿においては、最近の電磁流体力学の製鋼工程への応用についての研究開発動向を概括し、また課題と今後望まれる研究開発について述べたい。

2. MHD 機能と基礎理論

2.1 機能概要と分類

いわゆる電磁気冶金の分野では、系統的な研究開発がはじまった際に、電磁場の種類と作用の分類を経て、応用分野が整理されている¹⁾。

Table 1 は、電磁場の応用技術の分類である。直流電磁場と交流電磁場の利用技術に大別される。製鋼工程においては、現在両方が使用されており、直流電磁場の典型的な利用例は、鋳型内電磁ブレーキ及びタンディッシュプラズマ加熱である。また、研究開発レベルでは、タンディッシュあるいはノズルへの制動作用の適用例がある。直流電磁場は、予め付与された流動と相互作用して制動力その結果として分離力を発生する比較的単純な作用と思われるが、応用の過程で複雑な現象が見出され、その理解と制御への多くの取り組みがなされてきている。また、近年冷凍機式超電導磁石の技術の著しい発展に支えられて多くの基礎的研究が活発になされていると同時に²⁾、高スループット用鋳型内電磁ブレーキとしての製鋼工程への利用の試みがある³⁾。他、強磁場環境の磁化力利用による数多くの新しい作用の開拓が行われ⁴⁾、将来の製鋼工程への応用への発展が期待されている。

直流電磁場と比較して、交流電磁場は強度に加えて相数、周波数及び波形が変えられるために種々の作用を示す。この作用は、直流電磁場の機能である加熱及び制動に加えて、攪拌・振動、浮揚・成形、分離の機能として表現されている。パワーエレクトロニクスの進展に支えられて、大容量、高応答の環境が容易に得られるようになったことから、よ

Table 1 Categories and application example of electromagnetic field for steelmaking.

(AC:Alternative Current, DC:Direct Current)

Principle	Function	Field	Applications for Steelmaking
Lorentz Force	Shape Control	AC	Electromagnetic Casting, Cold Crucible
	Flow Promotion	AC	Electromagnetic Stirring, Electromagnetic Pump, Secondary Refining
	Flow Suppression	AC/D	Wave Suppression, Electromagnetic Brake
	Levitation	AC	Electromagnetic Casting, Cold Crucible, Conventional Levitation, Edge Containment
	Solidification Structure Control	AC	Electromagnetic Stirring, Pulsative Current Imposition
	Separation	AC/D	Inclusion Removal
Joule Heating	Heating	AC	Induction Heater in Tundish or Iron Reserver, Plasma Heater
		DC	Plasma Heater
Lenz's Law	Detection	AC	Level Sensor, Velocimetry, Slag Flowout Detection
Magnetization Force	Mixing Control	DC	Particle Separator, Continuous Steelmaking
	Precipitation Control	DC	Tramp Element Control

り大規模かつ複雑な制御，利用へと進展してきている。製鋼工程では，溶解炉を除いても，連続铸造，タンディッシュなど多くの作用が利用されている。多くの研究開発を経て，その現象解明と定量化を起点として，新たなプロセスへと進展している。また，周辺機器応用としては，センサーが多数ある。

さらに，マイクロ波も，GHz 領域の交流電磁場としての見直しが行われており，取鍋などの耐火物乾燥への応用のような分子振動の利用として実用化⁵⁾されている (Fig. 1) が，次の段階として界面現象を積極的に利用する試みも始められている。

2.2 基礎理論と解析法の進展

製鋼工程では前記の目的で，種々の装置が使用されている。この電磁装置によって溶鋼に働く電磁力は，印加された電場，磁場あるいは溶鋼内の誘導電流，もともと存在する流動などの相互作用で発生する。

製鋼工程で利用される電磁プロセッシングは，下記の5つの式によって理解することができる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \dots\dots\dots (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \dots\dots\dots (4)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \dots\dots\dots (5)$$

ここで， \mathbf{B} , \mathbf{E} , \mathbf{F} , \mathbf{H} , \mathbf{J} はそれぞれ，磁束密度，電場，ローレンツ力，磁場，電流密度のベクトルであり，また， μ , σ , \mathbf{v} , t はそれぞれ，透磁率，電気伝導度，流速ベクトル，時間である。

(1)~(5) 式は，それぞれ，ファラデーの電磁誘導の法則，アンペールの法則，ガウスの法則，オームの法則及びフレミングの左手の法則である。(1)~(4) 式から，次式が得られる。

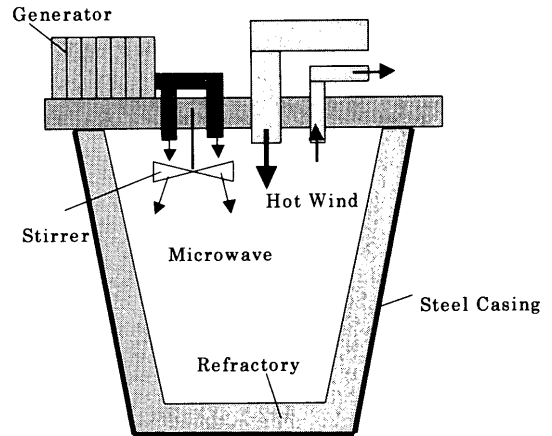


Fig. 1. Refractory drying by use of microwave Technology⁵⁾.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} \dots\dots\dots (6)$$

この磁場の拡散方程式は移動現象における拡散方程式と一致する。 $1/\mu\sigma$ [m²/s] は拡散係数と同じ次元を有しており，磁気拡散係数とよばれている。系を代表する長さを L ，代表磁場を B_0 ，代表速度を v_0 として無次元化を行うと，磁気レイノルズ数 $Re_m = \mu\sigma v_0 L$ とよばれる無次元数が得られる。 Re_m は磁場に対する流れの効果を表す無次元数である。 Re_m が1より十分小さい場合は，磁場は流れによって変化しない。この場合，導体内の電磁場は流れを考慮せず求めることができるので，計算が単純になる。

Re_m が1程度あるいはそれより大きい場合は，磁場と流れは互いに影響し合う。このような場合の磁場と流れ場を求めるためには，(6) 式と流れの式である連続の式とナビエ・ストークスの式を連立させて解く必要がある。

一般に，電磁ブレーキなど，直流電磁場の問題に対しては流れと磁場の相互作用が不可欠なので，電磁場解析と流体解析は完全に連成して解析される。この場合，(6) 式は差分法によりそのまま流体のソルバーで解かれるか，スカラーポテンシャルを設定してポアソン方程式として解かれ

ている。一方、交流電磁場の場合は、磁気レイノルズ数が小さいことを利用し簡易的に、電磁場を有限要素法、境界要素法、積分方程式法等で予め解析し、(5)式で求めたローレンツ力、あるいはジュール熱を外部体積力、体積入熱としてナビエストークス式、エネルギー方程式に入れる方法などがとられているが、電磁攪拌など流れの項の影響が比較的大きい場合にも連成して解かれる場合がある。最近では、計算機能力や解析手法の進展に伴い、両者を差分法・有限体積法あるいは有限要素法で直接連成して解くようになってきている。差分法系の解析手法も非構造メッシュに移行しつつあり、有限要素法との差がなくなっている。連成計算のニーズが高まる中、こうした手法間の格差がなくなり、障壁が取り除かれることで、現象の理解や制御手段の新たな検討、適正化が行われ発展が期待される。

3. 工程別応用、最近の応用技術

製鋼工程で電気エネルギーを使用しているプロセスはアーク炉を始めとして多数の技術があるが、ここでは、上工程から順次電磁流体力学の応用分野として研究が多く行われている応用技術、あるいは興味深い作用をもつもの、さらに今後の発展の萌芽が見られるものを適宜抽出してみたい。

3.1 精錬工程での応用

高炉からの銑鉄を蓄積する装置に混銑炉がある。これに誘導加熱装置を付加し、スクラップを効果的に消費できるようにしたプロセスが誘導加熱装置付貯銑炉 (IRB) である⁶⁾。この炉では、Fig. 2 に示すように、古くから開発されているチャンネルファーネス技術が用いられている。チャンネルファーネスについては、基礎実験として水銀を用いた MHD 場の測定⁷⁾、モデル化による解析が多数ある。

例えば Fig. 3 に示すように、前述のチャンネル炉内の MHD 方程式を全て差分法で解く解析が挙げられる⁸⁾。効果的な伝熱場を作ることと耐火物溶損を少なくする構造検討など最近でも盛んに検討されている技術である。

1次コイルが発生する交流電磁場を2次コイルで検出し、中間に存在する電気伝導体の存在量あるいは位置の変化によりインピーダンスが変化する作用を利用する技術は、連続鑄造の湯面レベル検知をはじめとして、転炉、取鍋のスラグ流出検知技術として実用化されている。しかし一方で、スラグ流出量を極小に留めたいニーズから電磁場による制御方法の検討もなされてきており、直流磁場を印加する方法、移動磁場を印加する方法などが挙げられる。いずれの方法も、鉄皮、厚い耐火物層の外から工業的に採算がとれる方法で電磁場を印加できるようになれば有効なプロセスとなりうるものである。

この例に挙げられるように、精錬工程への電磁力適用については多くの期待があるものの、熱源としての利用を越えて、攪拌などの機能を利用しようとした場合には、①装

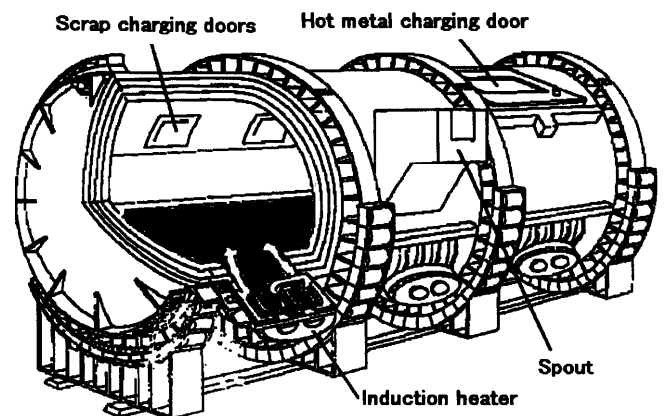


Fig. 2. Iron reserver with induction heating.⁶⁾

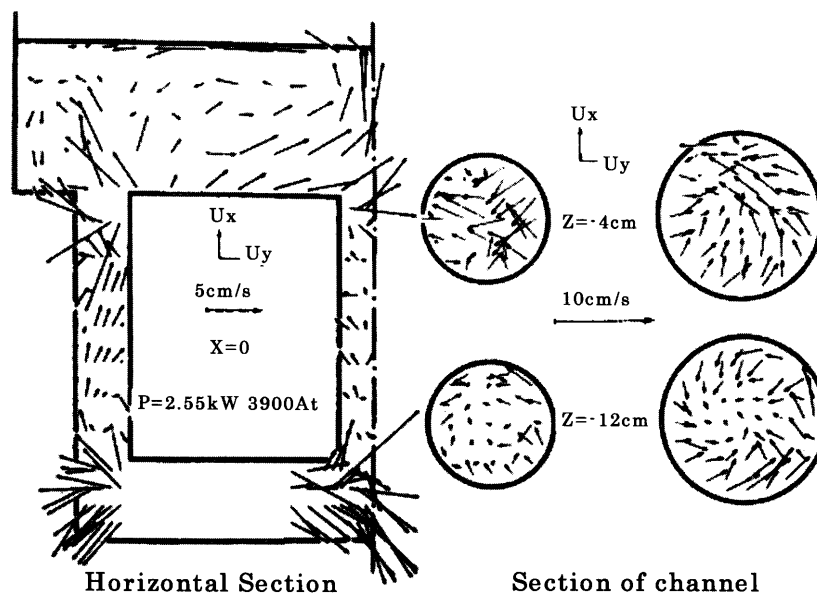


Fig. 3. Measured velocity field in mercury model of channel furnace.⁷⁾

置の投資対効果、②ガス攪拌に対する優位性が問題となる。前述のように精錬容器全体に電磁場を作用させるのではなく、流出口等局所的に適用する方法は比較的小型の装置で大きな効果が狙えるものである。例えば、2次精錬の例であるRH脱ガス装置に電磁力を適用するアイデアは古くからあるが、最近浸漬管外周にリニアモーターを配して溶鋼に旋回運動を与えて遠心力によりガス挙動を制御し、精錬効率を高めるアイデアを数値解析検討した例がある⁹⁾。このような、局所的な利用技術の発展は今後期待されるところである。

資源化の難度が高い2次精錬スラグの処理に、電磁力を利用する検討がいくつか行われている。その1つは、スラグ中に精錬時の強攪拌で発生し残留している粒鉄を電磁場により分離促進しようとする検討である。直流磁場印加による異相の混合分離制御のアイデアが基礎実験により検討されている¹⁰⁾。

3.2 タンディッシュにおける電磁力利用

連続铸造におけるタンディッシュ内の溶鋼温度平準化を狙った加熱技術は、前記のチャンネルファーネス方式が実用化されている (Fig. 4)¹¹⁾。このプロセスについては、加

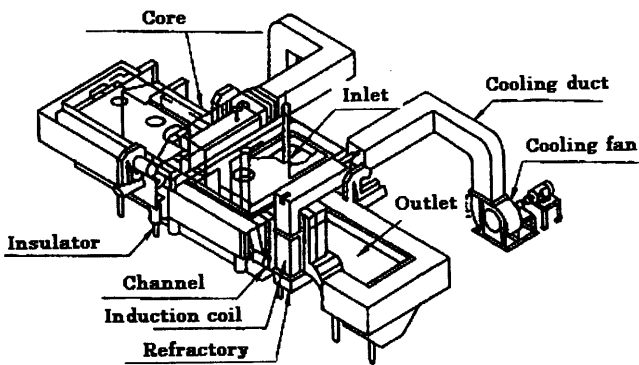


Fig. 4. Tundish with induction heater.¹¹⁾

熱機能のほかに、誘導電流束が同方向電流であるがゆえに発生する電磁ピンチ力とその反作用による介在物の分離、耐火物壁への付着、熱対流の積極利用による溶鋼清浄化の観点から多くの研究がなされてきた^{12,13)}。総合的な電磁流動解析が行われており、熱対流が有効に作用することが明らかにされている。清浄化については、他に、移動磁場、固定交流磁場、静磁場とチャンネル形状と配置を組み合わせ工夫したプロセスがいくつか提案されている。(Fig. 5)¹²⁾ 工業的に、清浄化と詰まりの相反する問題、除去速度と生産性の問題が解決されればこれも実用化されるプロセスである。加熱技術については、大容量化が容易である利点を生かして、プラズマ加熱法が多く用いられるようになってきている。(Fig. 6)¹⁵⁾ 熱プラズマ技術については、大出力トーチ技術の確立が技術発展の引き金になっているが、トーチの寿命延長などを狙いとして、大出力の領域での現象定量化、ノズル設計など今後発展余地がある。数値解析の取り組みは進み、Fig. 7のように2次元モデルでの解析などの例がある¹⁶⁾が、今後もトーチ設計につながる

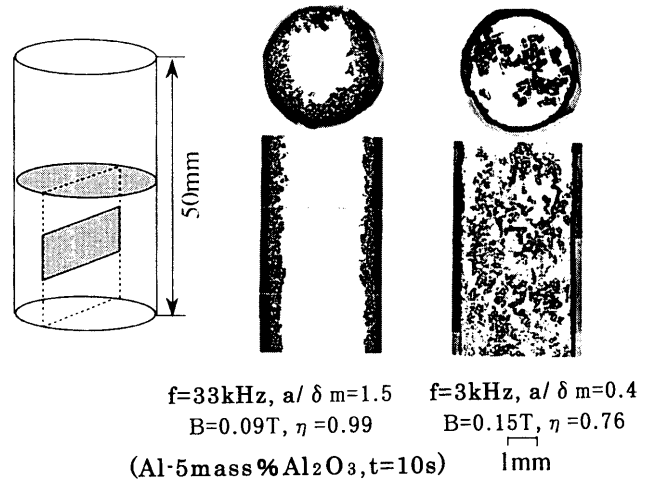


Fig. 5. Cleanliness improvement with induction channel.¹²⁾

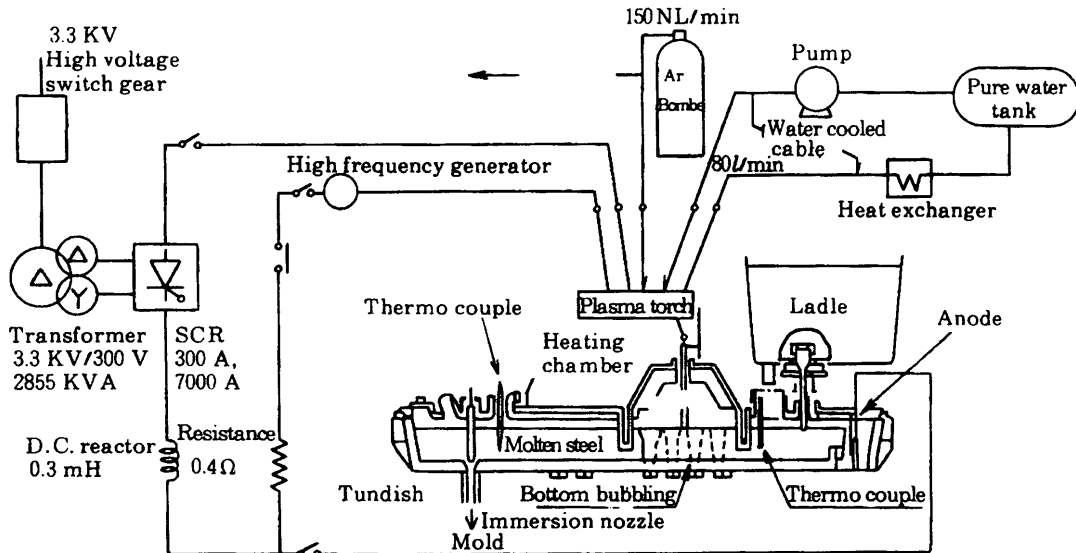


Fig. 6. Tundish with plasma heating.¹⁵⁾

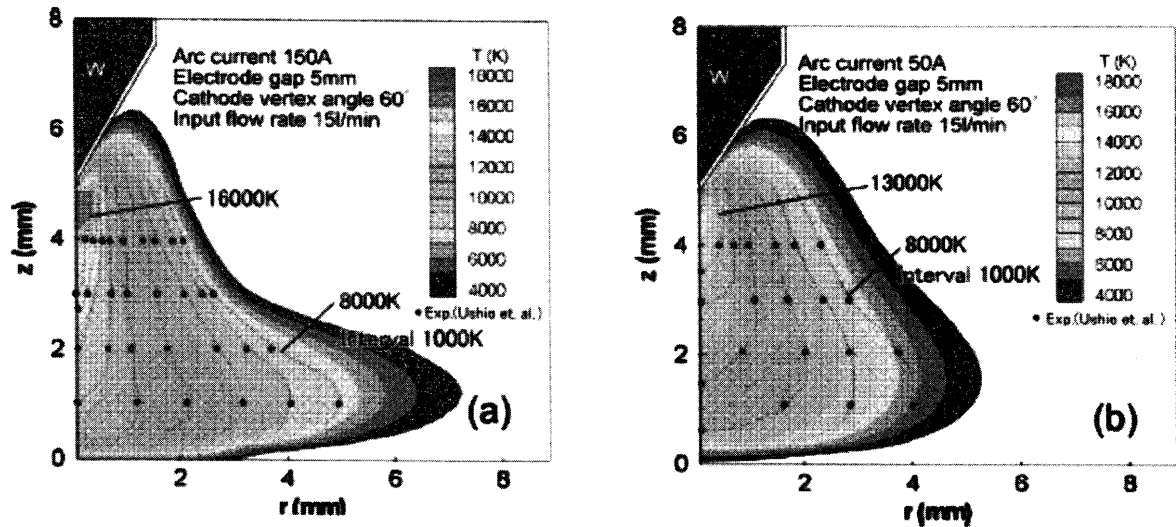


Fig. 7. Axisymmetric numerical simulation of DC plasma.¹⁶⁾

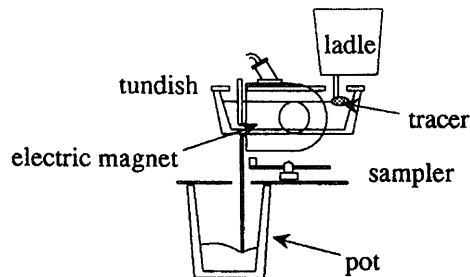
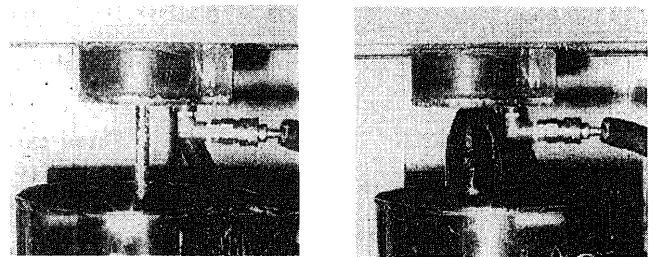


Fig. 8. Flow control in tundish with electromagnetic brake.¹⁸⁾



a) Without Stirring

b) With Stirring

Fig. 9. Nozzle flow control with electromagnetic stirring.¹⁹⁾

精度あるフルモデル化が重要となる。

一方、タンディッシュ内の流動制御については、非金属介在物の浮上分離による溶鋼清浄化効果の向上が重要である。流動制御の視点は、ひとつは鑄造スタート時や取鍋交換部のタンディッシュ入側と出側を短絡して流れる流動の抑制、もうひとつは実用化されている旋回流の遠心力の反作用を利用する例のような積極的な制御¹⁷⁾である。前者は Fig. 8 に示すように従来の堰に代わり電磁ブレーキが試用された¹⁸⁾。本技術の効率には、境界条件の影響がでる。絶縁壁においては誘導電流の保存を成り立たせる関係上電流が溶融金属内を迂回し、このために壁面では逆に加速流れが発生する。連続鑄造のように凝固シェルという導電壁が存在しない耐火物で囲まれた空間へのブレーキ適用については、これを踏まえた検討が必要である。タンディッシュは、大型化の道を行ってきており、制御技術の開発により小型でも高い清浄度制御が可能な技術の構築など、新たな展開が望まれる。

電磁力を適用しやすい小空間を使うものとして、ノズルへの電磁力適用については多くの試みがある。移動磁場を利用して流動制御を行う研究は、矩形断面形状で溶融金属の流通方向に電磁力を与えて制御するもの、Fig. 9 のように旋回を与えて静圧の変化を利用して流量制御するも

の¹⁹⁾、電磁ブレーキを与えてノズル内流動の平準化を狙ったもの²⁰⁾などがある (Fig.10)。このうち、旋回タイプのもものは、耐火物内に設置した旋回羽根を利用して注入流の平準化などの効果を得ているノズル²¹⁾と同様に先々装置技術が確立されれば有用な技術となることが期待される。また、Fig.11 に示す流動制御性が高い、回転ねじれ磁場による溶融金属搬送ポンプも実験的解析的に検討が進められ、試作されている²²⁾。

3.3 鑄型内及びストランド内への応用

鑄型内流動制御への応用は、電磁場の製鋼工程への応用技術では最も精力的に進められてきたものである。詳細は本稿と並行して執筆されている鑄型内流動制御に関するレビューに委ねるとして、ここでは、流動制御以外の作用をもつ応用技術、電磁流体现象として興味深くあるいはプロセス上のキーポイントとなる現象の研究について言及したい。応用技術については、ひとつは、いわゆる浮揚・成形機能の応用、もうひとつは振動機能の応用である。

鑄型内への電磁力適用では、Getselevが発明したアルミニウムでは実用化されている鑄型なし電磁鑄造レベテーションキャストイングがある。また、完全な鑄型なしではなく僅かなサポートを併用して印加電磁場の周波数を低減し攪拌機能を強化した Vivès らの技術がある²³⁾。この技術の鉄

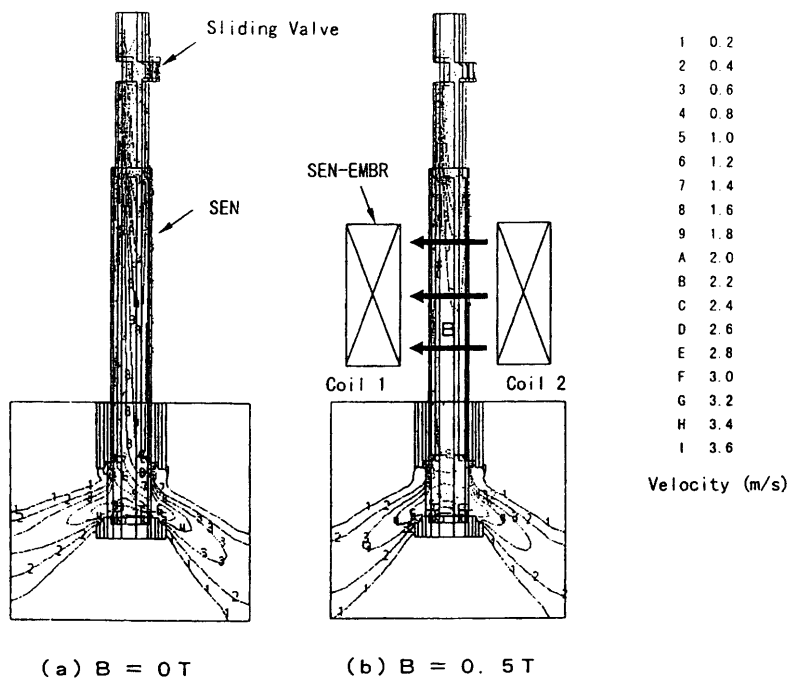


Fig. 10. Biased flow control in submerged entry nozzle with electromagnetic brake.²⁰⁾

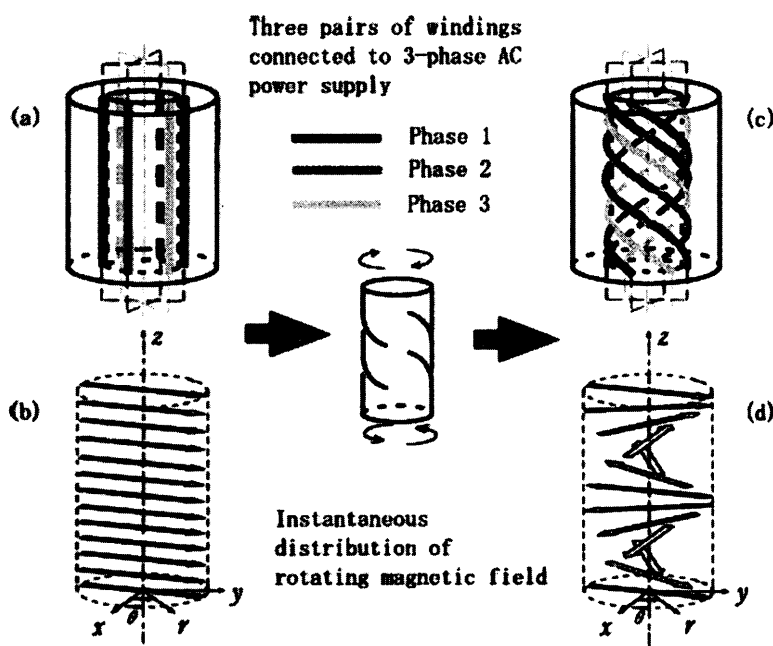


Fig. 11. Electromagnetic pump of liquid metal.²²⁾

鋼応用は、比重、電気伝導度、生産性の観点でアルミニウムと鉄の比較を行った結果、日本ではフラックス潤滑との併用技術として開発が進んできている。鋼の電磁鋳造はメニスカス部にソレノイドを設置し、これによってピンチ力を作用させてパウダー流入ギャップを拡大、消費量を増大して²⁴⁾、潤滑を改善するものである。オシレーションマークの消失など凝固均一化により鋳片表層直下の清浄度も大きく向上する。現在、パルス状に電磁力を印加する方法が開発され²⁵⁾、ピレットだけでなく、スラブの電磁鋳造が可能になってきている。成形機能の応用としては、電磁鋳造

法のほかに、双ロール法の電磁サイド堰の研究がある²⁶⁾。電流と磁場の併用方式から多数の方式が提案されてきたが、最近3次元解析の試みがある (Fig.12)²⁷⁾。電磁成形の場合には、成形し、静圧に見合う電磁力を付与することにより溶湯をサポートするが、電磁力の回転成分により発生する流動による不安定性の処置が課題である。周波数アップによる流動抑制と擾乱ダンピングがひとつの方法である。

振動機能は、鋳片の凝固組織を微細化する技術として研究されており、電磁攪拌による等軸晶化技術の確立以降、

パルス電流印加法²⁸⁾, ヘリウムフリー超電導磁場と交流電流の重畳印加法などの研究が進められている(Fig.13)²⁹⁾。

流動制御や形状制御の連続鋳造への適用は、品質制御を狙いとしており、磁場中の非金属介在物や気泡の挙動解明は欠かせない。単一粒子の挙動については解明が進んできたが、連続鋳造鋳型内のようにポイド率が高いところでの電磁流体挙動の把握や、複雑な凝固界面での粒子挙動などまだ多くの研究課題がある。最近では、液体金属中粒子間の電磁相互作用力と粒子周囲の電磁流動シミュレーション³⁰⁾や(Fig.14), 磁場中を浮上する気泡の挙動解析³¹⁾などが行われている。

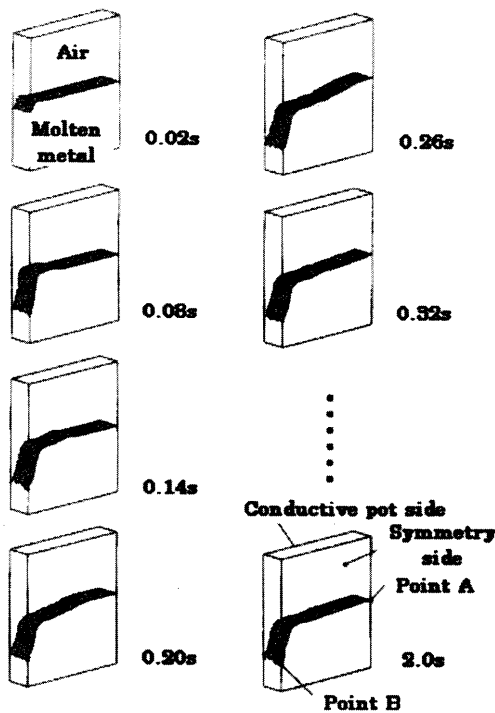


Fig. 12. Electromagnetic side dam for twin roll caster.²⁷⁾

バルク流動の把握については、水・水銀実験による評価と Large Eddy Simulation (LES) を中心とする乱流解析により定常さらには非定常電磁流体现象の理解が進んでいる。また、品質に対応する介在物や気泡挙動については軌跡計算に始まり、2流体モデルを使った解析が詳細な実験と併せて進められた³²⁾ (Fig.15³³⁾)。ノズルから流出する気泡径分布等解析全体に影響する境界条件の調査も進みつつある³⁴⁾。また、凝固シェルへの捕捉現象については、3次元でミリ秒単位の短時間でおこる直接観察が困難な現象であるが、種々の作用力の影響について詳細検討と支配力(現象)の抽出が行われてきている³⁵⁾。またバルク内と境界での挙動をあわせた解析により、鋳片品質との対応を見ていく試みも行われている。凝固フロントの数ミクロン~数100ミクロン単位の現象と鋳型内のプールに代表されるメートル単位を同時に扱う必要があると共に、定常だけでなく非定常現象も重要であることから、ますます能力が向上しつつある数値解析に期待が寄せられるところである。

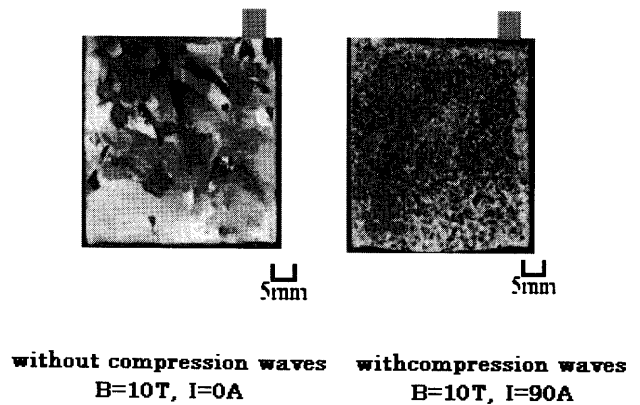


Fig. 13. Solidification structure control with superconducting magnet.²⁹⁾

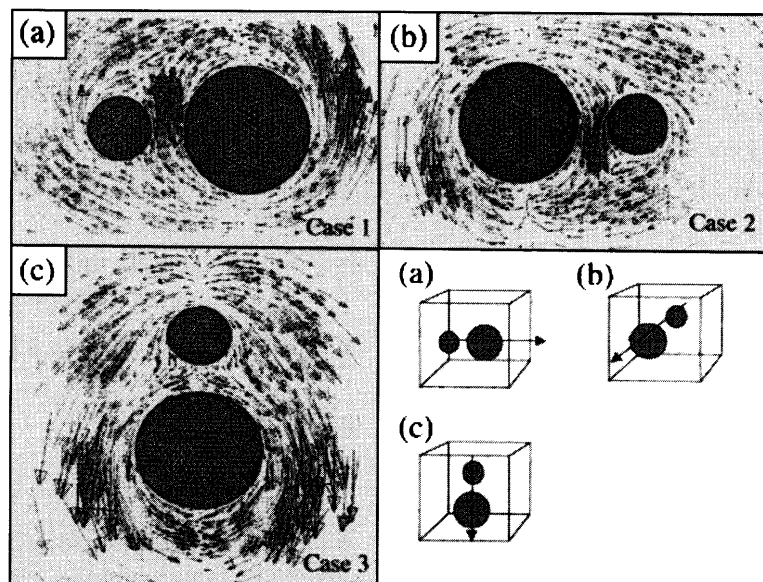


Fig. 14. Interaction between two particles under electric field.³⁰⁾

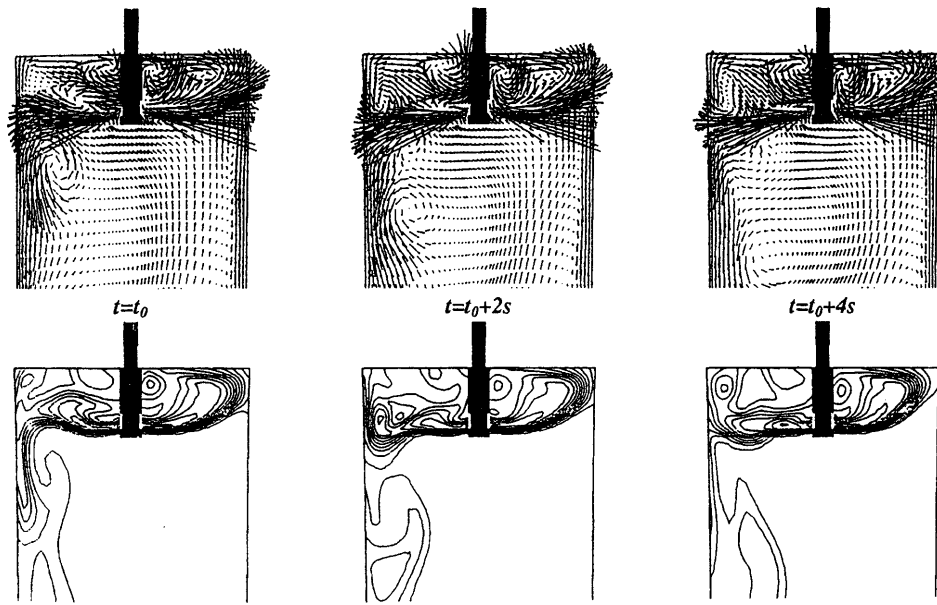


Fig. 15. Two fluid model analysis of continuous casting strand.³³⁾

3.4 プロセス評価, 品質検知への応用

電磁気的作用を利用したセンシング技術については、遠隔作用の特徴を生かして、湯面レベル計、スラグ流出検知等々多数の技術が使用されている。ここでは電磁流体力学的作用を用いているものに限って述べてみたい。

流速センサーは、製鋼工程における電磁流体力学の研究においては、重要な位置を締め、水銀実験が初期には多用され、その際にはホットフィルムを用いた測定に加え、永久磁石が作る直流磁場と流れが干渉し作る電場を測定する浸漬型のセンサーが多く使用された。このセンサーは、低融点金属までは使用可能であり、多くの流速分布測定結果が報告されている。これに対し、高温溶鋼では、サーメットを用いたロッド式センサー、カルマン渦を用いた改良などがなされたが、現象に影響を極力与えず、長時間連続モニタリングが可能な非接触測定へのニーズは高い。直流磁場を用いて鋳型内2点間の信号の位相変化とセンサー間距離からセンサー方向の速度成分を測定するセンサーが開発され、その後、交流磁場と流れの干渉により発生する磁場を検知し、流速を測定するセンサーが開発されてきている³⁶⁾。

もうひとつの応用例は、いわゆる電磁気冶金の分野で研究が盛んに行われてきたコールドクルーシブルを利用するものである。コールドクルーシブルはチタン合金や多結晶シリコンの溶解、鋳造法として実用に供されているが³⁷⁾、製鋼工程では前記電磁鋳造用鋳型に利用された報告の他に、品質評価法に応用した例がある。迅速に溶鋼の清浄度を検知するために、サンプルとして代表性を持つ容量があり、耐火物による汚染がない水冷銅容器を用いて、電磁斥力により溶鋼表面に介在物を集積させて、この部位の介在物組成を蛍光X線法などで測定する³⁸⁾。

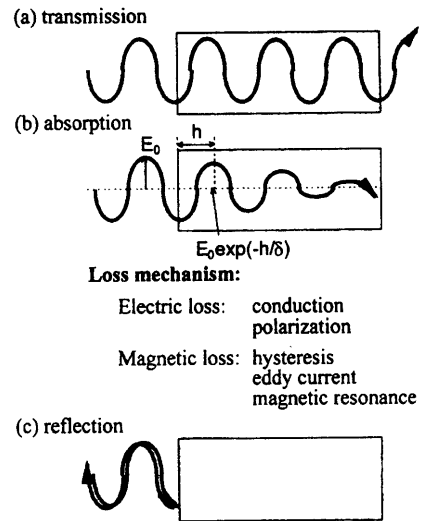


Fig. 16. Functions of microwave.³⁹⁾

3.5 マイクロ波応用

萌芽的研究分野として、マイクロ波に注目し、分子の強制振動による高速焼結、拡散促進、反応促進などの非熱効果の原理と応用を目指すところみがなされている³⁹⁾(Fig.16)。周波数が高い領域で現在のところ出力が100kWレベルに留まるので、小規模のプロセスへの適用以外には、界面現象を制御するような応用が期待される。

4. 結言

製鋼工程においては、ニーズとシーズの間の連携から、電磁流体力学の多くの応用技術が生まれてきている。体系的な適用技術の研究開発は、連続鋳造の分野を中心に発展してきた。これは連続プロセスでは、多量の鋼に関する処

理が、比較的コンパクトな装置で可能となるためであり、また連続プロセスであるが故に実用化された。大容量の電気エネルギーの利用も、パワーエレクトロニクスの進展により盛んになっており、今後さらに大空間での強磁場や、超高周波であるマイクロ波も体系的な取り組みを経て利用が進むと思われる。また、材料やプロセスメタラジと融合した研究が増えるものと想定される。エレクトロニクス技術の進展と相俟って、センシング、制御を支える基礎研究や解析技術の進歩にも併せて期待したい。

文 献

- 1) 浅井滋生：第129・130回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1989)，4.
- 2) M.Garnier: 3rd Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, ISIJ, Tokyo, (2000), 3.
- 3) T.Mochida, Y.Kishimoto, T.Yamada and S.Takeuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 393.
- 4) S.Asai: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 52.
- 5) K.Fujisaki and H.Taira: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 78.
- 6) Y.Takasaki, Y.Mimura, R.Sakomura, N.Hirashima, Y.Okada, K.Seki, T.Harada and H.Honguu: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 48.
- 7) C.Vivès and R.Ricou: Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo, (1990), 307.
- 8) I.Sawada and Y.Fautrelle: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 40.
- 9) B.Li and F.Tsukihashi: Proc. 4th Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, Lyon, (2003), 333.
- 10) T.Kozuka and M.Kawahara: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 46.
- 11) 日本鉄鋼協会共同研究会，第107回製鋼部会，鋼107-自(1992)新日鉄・室蘭(私信).
- 12) F.Yamao, K.Sassa, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 30.
- 13) S.Taniguchi and J.K.Brimacombe: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 24.
- 14) T.Kozuka and M.Kawahara: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 892.
- 15) T.Kuwabara, K.Umezawa, T.Nuibe and M.Fukuyama: Proc. 8th ISPC, (1987), 2247.
- 16) H.Nishiyama, T.Sato and K.Takamura: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 950.
- 17) Y.Miki, H.Shibata, N.Bessho, Y.Kishimoto, K.Sorimachi and T.Hirota: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 239.
- 18) A.Idogawa, S.Takeuchi and N.Bessho: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 211.
- 19) K.Ayata and T.Fujimoto: Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo, (1990), 347.
- 20) 森下雅史，田井啓文，綾田研三：電磁ノーベル・プロセッシング研究会報告書，日本鉄鋼協会，東京，(1999)，137.
- 21) S.Yokoya, S.Takagi, Y.Yasugahira, M.Iguchi and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 183.
- 22) T.Ando, K.Ueno, S.Taniguchi and T.Takagi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 849.
- 23) C.Vives: Symp. on Liquid Metal Magnetohydrodynamics, Kluwer Acad. Publ., Riga, (1998), 355.
- 24) T.Toh, E.Takeuchi, M.Hojo, H.Kawai and S.Matsumura: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1112.
- 25) M.Tani, J.Tanaka, E.Takeuchi, K.Fujisaki, N.Yamasaki and K.Isobe: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 815.
- 26) K.E.Blazek, W.F.Praeg, J.G.Rachford, Y.H.Wang and M.Mori: *Iron Steelmaker*, **25** (1998), 39.
- 27) K.Morita, M.Yoshida, C.Kuwada, S.Kanamori, H.Nakajima and T.Tanahashi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 899.
- 28) M.Nakada, K.Miri, M.Komatsu and Y.Kawai: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 1349.
- 29) K.Iwai, S.Asai, S.Kojima, K.Takada and T.Takagi: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 829.
- 30) T.Ogasawara, N.Yoshikawa, S.Taniguchi and S.Asai: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 862.
- 31) I.Furuhashi, K.Iwai and S.Asai: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 998.
- 32) N.Kubo, T.Ishii, J.Kubota and N.Aramaki: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 1251.
- 33) H.A.Wouters, R.P.J.Duursma, A.A.Kamperman and W.F.M.Damen: Proc. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, ISIJ, Tokyo, (2000), 182.
- 34) T.Toh, H.Hasegawa and H.Harada: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1245.
- 35) I.Sawada and K.Okazawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 344.
- 36) K.Ohta, K.Murakami and K.Fujimoto: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 64.
- 37) M.Garnier: Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo, (1990), 226.
- 38) H.Kondo, T.Toh, R.Uemori, T.Suzuki, K.Chiba, H.Yamamura, M.Wakoh and E.Takeuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 120.
- 39) H.Takizawa: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 74.