入門講座

電磁力利用の材料プロセッシングと環境技術-3

連続鋳造への電磁力の利用

Application of Electromagnetic Force to Continuous Casting of Steel

藤　健彦
Takehiko Toh
新日本製鐵（株）　環境・プロセス研究開発センター
製鋼研究開発部　主幹研究員

1 緒言

鉄鋼業では、電磁誘導もしくはアークを利用した加熱を始めとして、多くの工程で電気エネルギーを利用している。製鋼から連続鋳造までの工程は、液相から固相まで広い温度範囲・状態で鋼を扱うことが必要であり、特に連続鋳造工程では高温環境下で種々の遠隔作用を必要とすることから、電磁気が有する種々の機能を多く活用している。電磁力を多用する理由は、基本的な品質造り込みのためにクリーンな遠隔作用が必要であることに加えて、連続鋳造用鋳型寸法が1mのオーダーであり誘導コイルや電源などの装置の製作可能な寸法であること、もともと鋳型など水冷された環境があり熱的な不安要素が少ないこと、同一の作用をもたらす他の技術と比較して効果及びコスト上優位である等による。

本稿では、連続鋳造工程の中で鋳型及びストランド内で使用される電磁力の原理・作用を入門講座の第1回の内容を踏まえて説明し、その応用技術について、核となる現象とその制御方法、効果を述べたい。

2 電磁力の機能と応用

2.1 機能概要と分類

体系的に考える上では、直流・交流で大別するか、加熱・攪拌・制動・成型等々の機能から分類することができるが、複合的な利用あるいは作用となっている場合が多く見られる[1)]。Table 1は、連続鋳造工程における応用技術の分類である。本稿では、直流電磁場の応用として制動機能の応用技術を解説する。また、交流電磁場の応用としては、攪拌機能、成型機能の応用技術について解説する。なお、応用技術の発展の系譜として、Fig.1に、連続鋳造工程において導入あるいは開発された代表的な技術を示す。連続鋳造法は、造塊法に代わる方法として台頭後、高生産性を目指して、高速化・多連化さらに高級化・高清浄化が指向されてきた。このため、数多くの流動制御に関するR＆Dが実施された。電磁力の機能の多様性を生かして、同一目的であっても、種々の手段が選択・適用されてきた。機能や効果・長所短所の比較検討によりいくつかの技術は淘汰集約されてきているものの、流動制御手段として多様な技術となっているのが現状である。品

Table 1　Category and applications of electromagnetic field for continuous casting

(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
	Flow Supression	AC/DC	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/DC	Inclusion Removal
Joule Heating	Heating	AC	Induction Heater in Tundish, Plasma Heater
		DC	Plasma Heater
Lenz's Law	Detection	AC	Level Sensor, Velocimetry, Slag Flowout Detection
Magnetization Force	Mixing Control	DC	Particle Separator
	Precipitation Control	DC	Tramp Element Control

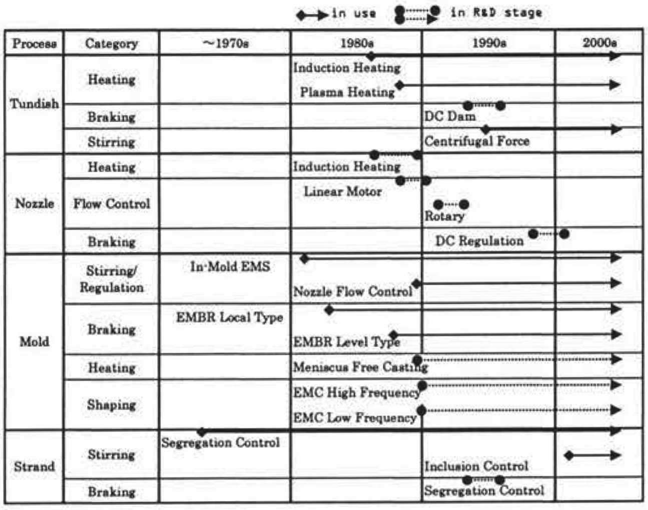

Fig.1　Applied MHD technologies to continuous casting process

種構成、前後工程含めた生産体制など使用される環境にも依存しており、工業技術であるから当然解は一つでなく、効果を発揮している技術は生き残り、電磁力以外の技術も併用されつつ最適化が継続されている。

2.2 直流電磁場による電磁制動技術

連続鋳造鋳型内流動の制御を狙いとして、電磁ブレーキが導入されたのは1980年代初頭に遡る。鋼の連続鋳造では、流動・熱の観点から2つの吐出口を有する浸漬ノズルが常用されているが、この吐出流を制動するために電磁ブレーキが開発された。歴史的には、Fig.2に示すように、後に第1世代と呼ばれた2極の局所磁場が最初用いられ、いくつかの変形が試された後、制動効率を向上させる狙いから、第2世代と呼ばれる均一磁場に移行してきた。第2世代の均一磁場は制御思想の違いからいくつかのバリエーションを生み、今日に至っている[2)]。

電磁ブレーキの原理は以下に述べる通りである。すなわち、吐出流に直流磁場を作用させるとフレミングの右手の法則により、誘導電流が発生する。さらに発生した誘導電流と直流磁場により、フレミングの左手の法則により、電磁力（ローレンツ力）が吐出流に逆らうように流れを制動する働きを生む。磁場強度としては常電導でも1テスラ（T）に近い例が報告されているが、一般には鋳型中心で最大値が0.3T程度である。電磁ブレーキは、原理的には単純な作用であるが、吐出流が速度分布を持つこと、連続鋳造機の広い範囲を均一な磁石で覆うことは不可能であることから直流磁場が一様でなく分布を持つこと、この2点から鋳型の溶鋼プール内には実際には複雑な流体挙動が生まれる[3)]。溶融金属は電気の良導体であるから、吐出流と直流磁場により発生した誘導電流は保存されるように回路を作る必要がある。鋳型壁と凝固シェルは、一般には電気伝導度のオーダーが落ちる溶融あるいは凝固したフラックスで隔絶されていることから絶縁の条件に近くなると考えられる。また、ノズルはアルミナグラファイトで電気は流すが溶鋼に比較すると絶縁に近い。以上のことから鋳型内で発生する電流はほぼ凝固シェルで取り囲まれた溶鋼プール内で閉じたものとなる。このことから、流動制御上は非常に重要な2つの現象が現れる。その1つは、鋳型短辺付近で発生する制動低下の現象である。これは、電流の保存のために、電流ループができるため、同方向の磁場に対し反対向きの電流が発生し流れを制動している部分の近くに加速する部分が発生する現象である。もう1つは、吐出流の周囲に現れる逆向き流れである。これも、強い流れの吐出流の周りに逆向きの電磁力が作用する結果発生する現象である。流れが、溶鋼中の非金属介在物や気泡を輸送すること、また、フラックスの巻き込みを支配することから、前者は、電磁ブレーキの重要な狙いである連続鋳造鋳片の内部品質向上に影響し、後者は鋳片表層品質に関連する湯面近傍の流動特に鋳型中央での流体挙動に大きく影響する。鋳型短辺で発生する加速流れは、タンディッシュやその他の絶縁壁で囲まれた領域で制動効果を得ようとする電磁ブレーキ技術者を悩ませたが、鋳型内では幸いに加速力としての電磁力を受けても流動しない凝固シェルの存在が、この現象を緩和してくれることから悪影響は抑えられている。以上の議論を、数値解析を用いて示したものが、Fig.3である[3)]。前記の逆流れは、0.5T時の吐出流上方の逆向きベクトルに現れており、また短辺付近の制動効率低下は、短辺付近の下降流の磁場による低下が他の部位に比べ弱いことから見てとれる。

なお、数値解析では一般に下記のナビエ・ストークス式(2)を連続の式(1)と共に適切な境界条件で解いて流動を算出するが、(2)式の外力項に制御の種類に応じた支配力を定

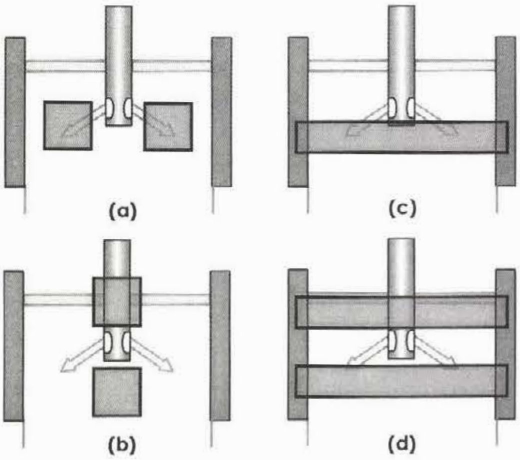

Fig.2 Category of electromagnetic braking technologies
(a) Horizontal local field, (b) Vertical local field, (c) Single level field, (d) Double level field

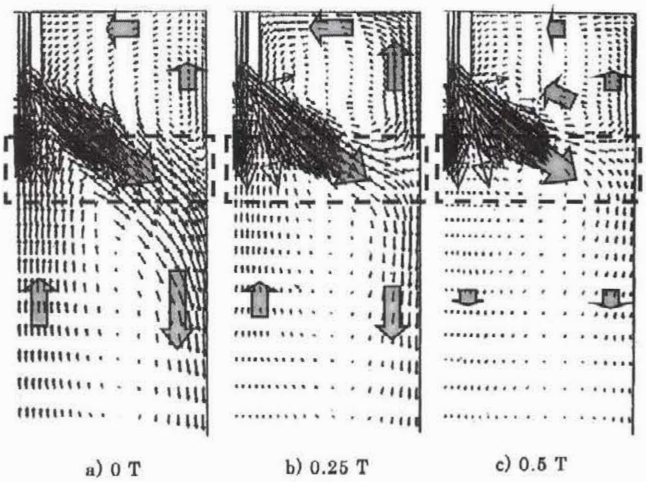

Fig.3 Flow field under level magnetic field
(a) 0T, (b) 0.25T, (c) 0.5T

量化する電磁力項を代入し求める。電磁ブレーキの場合には、磁場と流れの干渉により誘導電流が発生し、その電流と磁場が干渉することにより電磁力が発生するので、必然的に電磁場解析と流体解析の連成が必要である。電磁場は、電位に相当するスカラーポテンシャルを設定してポアソン方程式を解く方法や、誘導磁場方程式を解いて磁束密度分布を求める方法などがあるが、電磁場、流動場共に差分法など一般に電磁場解析で用いられる有限要素法を用いずに解かれることが多い。

$$\nabla \cdot u = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_f \nabla u) + \rho g + f \quad \cdots\cdots (2)$$

スカラーポテンシャルを利用する方法では、ポアソン方程式 (3) を解き、(4) 式により電流を算出し、電流と磁場の外積により電磁力を算出し、(1), (2) 式との連成下での繰り返し計算を行う。

$$\nabla \cdot (\nabla \phi) = \nabla \cdot (u \times B) \quad \cdots\cdots (3)$$

$$j = -\sigma \nabla \phi \quad \cdots\cdots (4)$$

ここで、u：流速ベクトル、ρ：密度、t：時間、p：圧力、μ_f：粘性係数、g：重力加速度ベクトル、f：外力（体積力）、ϕ：スカラーポテンシャル、B：磁束密度ベクトル、j：誘導電流ベクトル、σ：電気伝導度である。

電磁ブレーキの制御条件については、狙いとする鋳型内の流動条件によるので複雑ではあるが、第一義的には、電磁力と慣性力の比であり、以下に定義される無次元数であるインタラクションパラメータ（スチュアート数）で整理できる。電磁力は、電気伝導度をσ、磁束密度をB、流速をu、代表長さをLとした時、$\sigma B^2 u$で現され、慣性力は密度をρとすると$\sigma u^2/L$で現されるので、その比は、$\sigma B^2 L/\rho u$となり、これがインタラクションパラメータである。同一の寸法であればスループットを上げると、その平方根に比例して磁束密度を上げていくのがマクロ的には相似な条件となる。Fig.4に示すように、鋳片の介在物品質を調査してみると、磁場を適度にかける場合に介在物品質が最良となる傾向が見られ、種々の寸法や速度、磁場条件をまとめて整理できるのは、電磁ブレーキを用いた流動制御さらには介在物品質を支配する現象が複雑でありながら、電磁制御の基本パラメータに支配されていることを示しており興味深い[3]。

第2世代電磁ブレーキの一つとして、高スループット化をターゲットに吐出口を挟むように2段の均一電磁ブレーキを用いる技術がある[4]。吐出流が増すと、湯面の流速が上がり

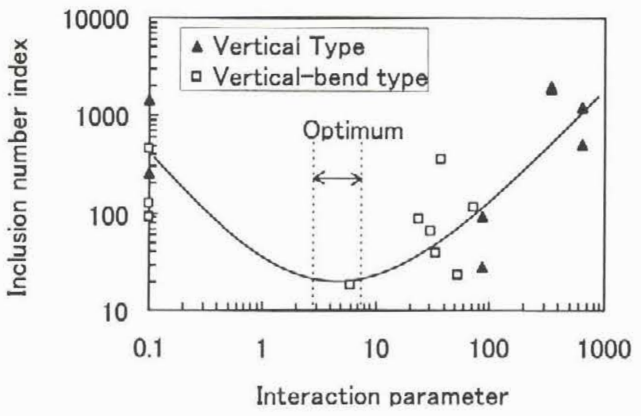

Fig.4　Change in cast cleanliness with interaction parameter

フラックス巻き込みも起こるので、湯面近傍にも均一電磁ブレーキを印加する。この技術も、さらに吐出流からの下降流の制動と、メニスカス流速の制御を同時に行うために上段の磁束密度が独立に制御できるよう工夫を加えられている。なお、電磁ブレーキは一般に常電導の電磁石が使用され、鉄心が利用される。従って、効率良く鋳型内に磁場を発生する上では磁気飽和現象に留意すると共に、鉄心の形状を工夫する必要がある。この2段のブレーキでは上部と下部のブレーキの極を鋳型厚み方向に対し逆にし、両長辺内の上下のコイルを鉄心で結ぶ磁気回路を利用している。

直流磁場は、乱流の渦に直接影響を及ぼすものであるから、乱流の度合いを示す無次元数であるレイノルズ数が数十万にも達する連続鋳造工程においても、乱流構造そのものへの影響が本来は無視できない。工業的に良く用いられ、今ではポピュラーとなった数値解析における乱流モデルである$k-\varepsilon$やLarge Eddy Simulation (LES) モデルも通常は等方性を仮定しており、水銀などを用いたモデル実験による流速測定結果や実際の連続鋳造機で観察される現象がある程度表現できていることから乱流モデルとして常用されるものの、電磁ブレーキが多くの場合に鋳型厚み方向の磁場を印加すること、磁場はその方向に直交する流動に対してのみ電磁力を発生することから異方性を示すべきものである。乱流は大きな渦が小さな渦に変化し最終的にエネルギーとして消失するエネルギーカスケードを示すが、磁場中では小さな渦が大きな渦に変化する逆の現象も起こり得るし、3次元乱流は2次元乱流になって生き残るという研究もある[5]。今後も研究されていくであろう興味ある領域である。

電磁ブレーキは、溶鋼プールのバルク内の非金属介在物や気泡挙動を制御する有効な手段であるが、流動の制動の副次効果として、溶質成分の混合抑制効果を発現する。この効果は、生産性を向上させる連々鋳技術において、マシンに負荷がかかる仕切り板装入などを伴うことなく生産性を落とす度合いを減らすことを狙いとして、異鋼種を連続的に鋳造する

際に成分が不均一な継目の長さを極小化する技術として実用化されている。

2.3　交流電磁場による制御技術

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。以下、攪拌及び浮揚・成型機能の応用技術の例を解説する。

交流磁場については、最も重要な無次元数はシールドパラメータである。これは、誘導磁場方程式の非定常項と拡散項の比で定義され、電磁場の角周波数をωとすると非定常項がωB、透磁率をμとすると拡散項が$B/(\sigma\mu L^2)$で現されることから、$R_\omega=\sigma\mu\omega L^2$で現され、磁場の導体中への浸透度合いを示す数であり、この数値が大きいほど磁場の導体中への浸透度合いは小さくなる。なお、交流磁場の電磁流体解析では、一般的には流動の存在による磁場の変化が小さい取り扱い、即ち磁気レイノルズ数が小さい場合が多く、有限要素法などによって算出された外力を直接ナビエ・ストークス式に代入して連成することなく流動場が算出されることが多い。

2.3.1　攪拌機能の利用技術

ノズルからの注入流など強制的な流動が無くても、交流電磁場下では電磁コイルから与えられる磁場と導体である溶鋼中にレンツの法則により発生する誘導電流の相互作用により生成する電磁力により流動が生成する。従って相数にかかわりなく溶鋼中には流動が誘起されることになるが、種々のパラメータの中で最も効率よく攪拌機能を発生するものとして移動磁界がある。磁場が移動すると導体中の固定した座標では磁場が変化したことになり、その変化を打ち消すようにレンツの法則により誘導電流が発生する。さらに発生した電流と印加している磁場の干渉により電磁力が発生することになる。連続鋳造の攪拌ではこの移動する磁場を作る方法として電流の位相の変化を利用しており、主として、ブルーム・ビレットでは2相乃至は3相の回転磁界、スラブでは3相リニアモーターが使用される。スラブにおけるノズル注入流の制御を含む広義の電磁攪拌の類型をFig.5にまとめて示した。

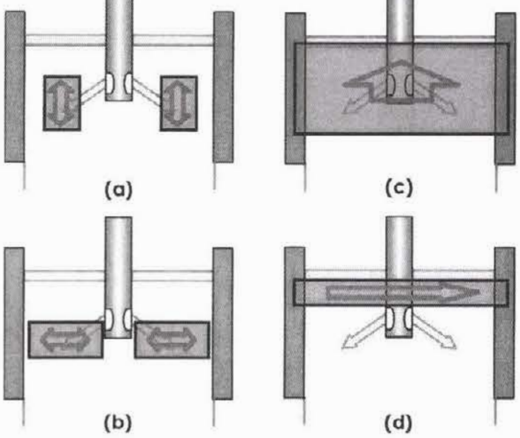

Fig.5　Category of electromagnetic stirring technologies
(a) Vertical SEN flow control, (b) Horizontal SEN flow control, (c) Vertical stirring, (d) Horizontal stirring

効率的に攪拌力を与える上で、電磁気的な検討が行われてきた。使用される周波数については次の特徴がある。すなわち、移動磁場を構成する交流磁場は、導体内で指数関数的に減少する。誘導電流あるいは磁場が自然対数の底即ち1/eに減少する深さをスキンデプスと呼び、$\sqrt{(2/\mu\sigma\omega)}$により定義されるが、導体の電気伝導度、周波数が高いほどこの値は小さくなる。入門講座の初回で述べられているように、溶鋼では、スキンデプスは1Hzで0.59 mとなり、周波数が100倍になる毎にスキンデプスは1/10になっていき、10 kHzで5.9 mmになる。鋳型には、銅板が使用され、銅の電気伝導度は溶鋼の10倍近くであることからさらにシールド効果は大きくなる。電磁攪拌では、ストランド内では厚い凝固シェルを介して、また、鋳型内では銅板とステンレスのバックプレートを介して溶融部分に電磁力を作用させる必要があることから数Hzから数10Hzの比較的低い、断面寸法と表皮深さの関係から決まる最適周波数で使用される。リニアモーターを例に取れば、鉄心、相等多くのパラメータを抱え、その最適化は複雑なものであるが、推力の他に、鉄心寸法、周波数、極数が重要である。

作用としては、連続鋳造の電磁攪拌は、歴史的には鋳片中心の凝固組織の等軸晶化を目的として導入され、ビレットやブルームなどの小断面鋳型内での電磁攪拌は凝固組織微細化すなわちポロシティーや偏析低減に寄与するが、また、鋳片表層欠陥防止の面から重要な役割を果たしている。すなわち、表層に関しては、メニスカス温度の均一化に加え、表層介在物および気泡の低減に効果がある。内部に関しては、鋳型内での攪拌により溶鋼スーパーヒートを低下させ、等軸晶生成を促進している。小断面鋳型での電磁攪拌では回転磁界型が用いられている。鋳型構造が単純で鋳型銅板及びバックプレートの厚みが薄いため、周波数は50～100Hzと高めになる。一方、小断面であるため、過剰な攪拌はメニスカスを乱し、パウダー鋳造の場合はその巻き込みを助長することになる。この抑制のための方策として、シールド技術を用いてメニスカス部の電磁力を落とす方法、電磁ブレーキをかける方法、反対方向の旋回攪拌を行う上下2段の電磁攪拌コイルを使用する方法などが実施されている。スラブ連鋳機においては鋳型が厚く、スキンデプスを深くとるため周波数は数Hzに設定される。目的は鋳片表層気泡、および介在物の低減である。

17

メニスカス位置に設置されたリニアモーターにより水平方向に溶鋼が旋回駆動される例では、流速は最大で0.5 m／秒程度である。旋回流動によりメニスカスの温度が均一化され、凝固も均一化される。また、溶鋼駆動によって増加する凝固界面近傍の流速勾配も凝固シェルにより捕捉される気泡・介在物の数、サイズ分布の改善に寄与している[6]。この流動は凝固前面に形成される溶質濃度分布にも影響を与える。鋳型内電磁攪拌技術は、リムド鋼の連鋳化を狙いとして開発されたが、現在ではこれを利用してCO気泡の生成を抑制し、弱脱酸鋼の連鋳化が可能となっている[7]。

一方、リニアモーターを浸漬ノズル吐出口位置に設置し、ノズルからの吐出流を加速、減速して、鋳型内溶鋼流動を制御する技術がある。これによりメニスカスへの熱供給による鋳片表皮下組織におけるフックの生成、およびパウダー巻き込みを防止できる[8]。

2.3.2 成型機能の利用技術

固定交流磁場について以下概説する。Fig.6に示すように、導体を周回するようにコイルを配置し、交流電流を流すことにより、導体にはレンツの法則によりコイルと逆向きの誘導電流が発生する。この誘導電流によりジュール熱が発生すると同時に、フレミングの左手の法則により導体には内向きでピンチ力と呼ばれる電磁力が発生する。導体への電磁場の浸透度は、スキンデプスと称されるパラメータで代表される。導体の電気伝導度、周波数が高いほどこの値は小さくなり、電磁力は導体表層に集中する。同時に電磁力が空間分布を持つことから導体が液体の場合には導体内に流動が発生するが、スキンデプスが小さくなるにつれて回転成分が次第に小さくなり、導体を成型する機能が上がる。成型とは、電磁気圧として溶融金属を壁から離したり浮揚させたり、波動を抑制したりする機能を指す。鉄鋼分野での応用が考えられる以前に考えられた技術として、鋳型無し電磁鋳造がある。これはレビテーションキャスティング[9]と称されるものでアルミニウムや銅の分野では実用化されている。また、電磁気応用研究として盛んに検討され非鉄分野では実用化された技術に、コールドクルーシブル技術があるが、これは浮揚機能とジュール加熱を応用した技術である。本項においてはこの2つの技術の鉄鋼応用について詳しく解説する。なお、波動抑制機能は連続鋳造では直接利用されているというよりは、後述の高周波式電磁鋳造などで半ば自動的に利用されている。

電磁鋳造は、鋳型無しで鋳造できることから画期的な技術であるが、比重が小さい上に電気伝導度・熱伝導度が高く、鋳造速度がもともと遅いアルミニウムの技術を、そのまま鉄に適用することができないことから、鉄鋼分野では通常の連続鋳造の潤滑と鋳片表面性状を改善する技術として展開された。鋼の連続鋳造鋳型は、水冷銅板とそれを機械的に補強するステンレスのバックプレートで構成される。この鋳型の外側に電磁コイルを配置すると、鋳型自身が導体であることから、鋳型内部の溶鋼に効率よく電磁力を作用させるには鋳型構造に工夫を要する。鋳型構造の考え方は、Fig.7に示すように、2つの方向で検討された。すなわち、コールドクルーシブルと同様、鋳型を小さく分割し各セグメントを周回する誘導電流の発生を促した上で、数10 kHz以上の高周波電磁場を用いる方法[10]と、鋳型の分割を極力少なくし、電磁場の周波数を数10～数100Hzにおさえて電磁場の浸透性を確保する方法である。前者は電磁力の回転成分を小さくする方向である高周波ゆえに安定成型性を生むが、セグメント化することを起因として鋳型強度に劣る。後者は鋳型強度には優れるが安定成型性が劣る。各々周辺技術の改善が行なわれ、欠点を補う形で発展したが、前者は比較的小断面、後者は大断面の連続鋳造応用に向くとされる。低周波式の課題である安定成型については、数10～数100Hzの正弦波を搬送波として、数～10Hz程度の信号波を用いるパルス電磁鋳造技術が開発され、パラメータの変更に伴い同時に変化する成型機能と攪拌機能を独立化し、形状制御の安定性と適正流動を得る方法が指向されている[11,12]。

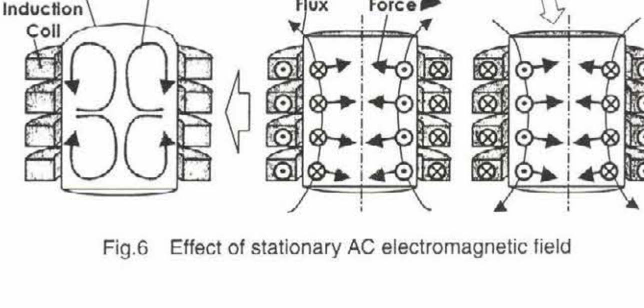

Fig.6 Effect of stationary AC electromagnetic field

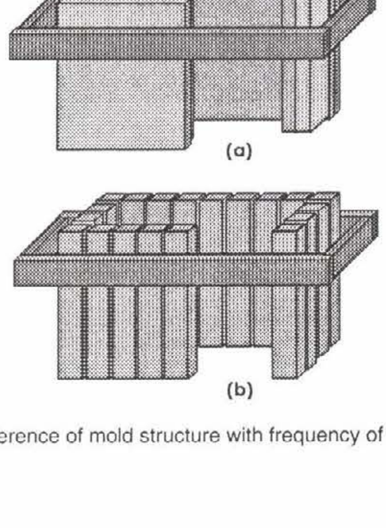

Fig.7 Difference of mold structure with frequency of imposed field

コールドクルーシブル技術は、成型・浮揚機能により水冷銅坩堝内で内部の金属と坩堝壁の接触を極力断ち、ジュール加熱により耐火物などを用いることなく金属を溶融処理するものである。溶解の際に水冷坩堝の名の通り耐火物を使用しないことから、チタン等の活性金属、タングステンカーバイド等高融点金属の溶融処理技術、あるいは放射性廃棄物の処理技術として発展している[13]。鉄鋼業においても耐火物を使用しないことから活性フラックスの適用性が高まる[14]などこの技術の本来の特性を生かす研究も行われているが、鉄鋼の精錬プロセスとして要求される数m直径の装置の製作が困難であることと経済効果の観点から実プロセス規模での適用例はない。連続鋳造においては、サイズ的に製作できることから、小断面ビレット鋳造用の高周波式電磁鋳造鋳型としての適用がある。より小サイズでは、コールドクルーシブルの機能を活用して、介在物の品質評価手法[15]、あるいは溶融領域近傍での材料力学特性評価手法[16]として適用されている事例がある。

2.4 電磁場の介在物・気泡挙動に及ぼす影響

流動制御の連続鋳造への適用は、品質制御を狙いとしており、凝固の制御に加えて介在物・気泡の捕捉抑制が重要な課題である。これには、磁場中の非金属介在物や気泡の挙動解明は欠かせない (Fig.8)。単一粒子として考えた場合、介在物・気泡挙動は粒子に固定した座標における運動方程式により把握できる。運動方程式は例えば下式のように示される。左辺は慣性項、右辺第一項が抗力項、第二項が浮力の項、第三項が仮想質量の項、第4項が圧力勾配による項であり、この他後述の種々の作用力が加えられる。

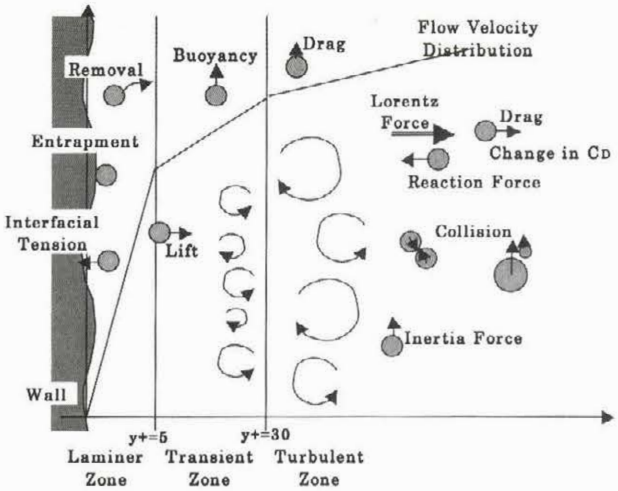

Fig.8 Forces acting on particles and bubbles under electromagnetic field

$$\frac{du_P}{dt}=F_D(u-u_P)+\left(1-\frac{\rho}{\rho_P}\right)g+\frac{\rho}{2\rho_P}\frac{d}{dt}(u-u_P)+\frac{\rho}{\rho_P}u_P\frac{\partial u}{\partial x} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

$$F_D=\frac{18\mu_f}{\rho_P D_P{}^2}\frac{C_D\mathrm{Re}}{24} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

$$\mathrm{Re}=\rho D_P|u-u_P|/\mu_f \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

ここで、u_P：粒子速度ベクトル、u：流速ベクトル、t：時間、ρ：流体の密度、ρ_P：粒子の密度、g：重力加速度ベクトル、D_P：粒子径、x：座標、μ_f：流体の粘性係数、C_D：抵抗係数である。

作用力は、上記の慣性力、抗力、浮力、仮想質量、さらには揚力、マグナス力等々[17,18]に加え、電磁反力[19,20]が加わる。電磁反力以外にも、例えば抵抗係数は磁場の関数となり、0.3Tの磁場下では数10％の抵抗係数の増加が予想される。層流条件での単一粒子の抵抗への磁場の影響など解析的に扱える挙動については解析的に解かれていたり、また変形する気泡の磁場中の挙動を数値解析したり強磁場と導電性の透明流体を用いて観察評価するなどの基礎研究あるいは流体解析に加えて粒子挙動の数値シミュレーションが進められてきている。また、ノズルから吹き込まれるアルゴン気泡は単一気泡というよりは気泡群となっていることから、前記のような粒子に固定した座標で見るラグランジュ的な見方での解析の他に、混相として空間に固定した座標で溶鋼とともにオイラー的な見方で扱う解析も応用されてきている[21]。アルミナなどの介在物の凝集現象についても、一般にポピュレーションバランス式を解く方法で解析されているが、電磁力の影響は例えば電磁ブレーキ印加により流速分布が変化することに加えて、(8) 式に示す粒子同士の衝突頻度式の乱流エネルギー消散 ε が減少することにより乱流凝集が減少するような形で取り込まれている。なお、(8) 式は、括弧内の第一項が差動凝集、第二項が乱流凝集を現す。

$$N_{ij}=2(2\pi)^{1/2}R^2\left[\left\{\frac{(\rho_P-\rho)D_{Pi}{}^2}{18\mu_f}-\frac{(\rho_P-\rho)D_{Pj}{}^2}{18\mu_f}\right\}^2-\frac{1}{9}R^2\frac{\varepsilon\rho}{\mu_f}\right]^{1/2}n_i n_j \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

ここで、N_{ij}：単位時間単位体積あたりの粒子の衝突頻度、R：直径D_{Pi}、D_{Pj}の粒子が衝突合体してできる粒子の等価径、n_i、n_j：直径D_{Pi}、D_{Pj}の粒子の流体単位体積あたりの個数、ε：乱流エネルギー消散をそれぞれ現す。

これまでの研究開発により、実機において品質制御効果を発揮している種々の電磁力応用技術の制御メカニズムも概ね解明されてきているが、例えば、連続鋳造鋳型内のようにノズルから吹き込んだアルゴンが数%から数10%といった高いボイド率のところでは導電性流体である溶鋼中の電流の流れ方に影響を及ぼすはずであり、そのような状況下での電磁流体挙動の把握や、電磁力作用下での乱流中の粒子挙動の把握、デンドライト凝固のような複雑な凝固界面での粒子挙動を議論するようなより現実的な状況下での研究などまだ多くの研究課題がある。種々の取り組みが継続されている。

3 結言

プロセスが単純であることは望ましい方向であるが、連続鋳造工程は高温かつ乱流の領域にあり、多くの制御機能を要求することが多い。電磁力の流動及び形状制御機能に加えて伝熱、介在物、溶質挙動の制御を求めることはこれまで述べた通りである。このことから、ひとつの方向として、制御装置のハイブリッド化がある。シリコン単結晶引き上げ法であるチョクラルスキー法への電磁力適用が多種類の磁場を併用しつつあるのと同様に、品質と生産性の同時向上が追求されている。しかし、重畳された電磁場は直接的にも間接的にも相互作用を起こすので、適用にあたっては、単純な重ね合わせではなく現象の深い理解と多くの試行が要求される。ハイブリッド化の例として、低周波電磁場による電磁鋳造法において、形状制御性の改善のために直流磁場を重畳する試み[22]や、固定交流磁場と移動磁場を重畳し、両者の効用を享受する技術の研究[23]などがある。超電導に始まる強磁場、大容量、超高周波、高応答、多様な波形等々、従来困難とされていたものもパワーエレクトロニクス等の技術の進展により可能となってきており、今後さらに周辺環境が整っていくことから、電磁力利用技術のさらなる発展が予想される。

参考文献

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) 綾田研三：第129・130回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1989)，103.
3) H.Yamamura, T.Toh, H.Harada, E.Takeuchi and T.Ishii：ISIJ Int., 41 (2001), 1229.
4) S.Idogawa, K.Tozawa, S.Takeuchi, K.Sorimachi, M.Sugisawa and J.Hasunuma：CAMP-ISIJ, 9 (1996), 618.
5) R.Moreau：Proc. 4th Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (2003), 1.
6) J.Fukuda, Y.Ohtani, A.Kiyose and K.Tsutsumi：Proc. 3rd European Conf. on Continuous Casting, UNESID, Spain, (1998), 437.
7) E.Takeuchi, H.Fujii, T.Ohashi, H.Tanno, S.Takao and I.Furugak：Tetsu-to-Hagané, 69 (1983), 85.
8) J.Kubota, N.Kubo, M.Suzuki, T.Ishii, R.Nishimachi and N.Aramaki：Tetsu-to-Hagané, 86 (2000), 271.
9) 小島陽，古井光明：電磁力を利用した材料プロセッシングの新展開，平成11年6月，日本鉄鋼協会，(1999)，87.
10) H.Nakata, M.Kokita and K.Ebina：Tetsu-to-Hagané, 80 (1994), 711.
11) T.Toh, E.Takeuchi, M.Hojo, H.Kawai and S.Matsumura：ISIJ Int., 37 (1997), 1112.
12) M.Tani, H.Harada, T.Toh, N.Yamasaki, K.Fujisaki, E.Anzai, E.Takeuchi, T.Matsumiya and K.Miyazawa：Proc. 4th European Continuous Casting Conference, 1 (2002), 39.
13) M.Garnier：Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Nagoya, (1990), 226.
14) Y.Kobayashi, K.Sakuraya, T.Watanabe, S.Iwasaki and A.Fukuzawa：Proc. 3 rd Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (2000), 364.
15) H.Kondo, T.Toh, R.Uemori, T.Suzuki, K.Chiba, H.Yamamura, M.Wakoh and E.Takeuchi：Tetsu-to-Hagané, 89 (2003), 120.
16) Y.Itoh, T.Katoh and A.Yamanaka：CAMP-ISIJ, 14 (2001), 892.
17) S.Taniguchi and J.Kikuchi：CAMP-ISIJ, A211 (1987), 29.
18) I.Sawada and K.Okazawa：CAMP-ISIJ, 8 (1995), 344.
19) 竹内栄一：第129・130回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1989)，127.
20) S.Taniguchi and A.Kikuchi：Proc. 3 rd Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (2000), 315.
21) N.Kubo, T.Ishii, J.Kubota and N.Aramaki：ISIJ Int., 42 (2002), 1251.
22) J.M.Galpin, P.Gardin, J.Y.Lamant, M.Tani, H.Harada and T.Toh：Proc. 4th European Continuous Casting Conference, 1 (2002), 47.
23) 谷口尚司，上野和之，舞嶽孝二，大久保光浩，安藤努：材料プロセスへの電磁力の高度利用，日本鉄鋼協会，(2003)，171.

記号

B：代表磁束密度 [T]

C_D：抵抗係数 [−]

D_P、D_{Pi}、D_{Pj}：粒子径 [m]

f：電磁力 [N/m^3]

g：重力加速度 [m/s^2]

j：誘導電流 [A/m^2]

L：代表長さ [m]

N_{ij}：粒子同士の衝突頻度 [$-/m^3s$]

n_i、n_j：粒子の単位体積あたりの存在個数 [$-/m^3$]

p：圧力 [Pa]

R：衝突後生成する粒子の等価径 [m]

Re：レイノルズ数 [−]

R_ω：シールドパラメータ [−]

t：時間 [s]

u：流速 [m/s]

μ_P：粒子速度 [m/s]

x：座標 [m]

δ：磁気表皮深さ [m]

ε：乱流エネルギー消散 [m^2/s^3]

μ：透磁率 [H/m]

μ_f：流体の粘性係数 [Pa・s]

ρ：流体の密度 [kg/m^3]

ρ_P：粒子の密度 [kg/m^3]

σ：電気伝導度 [S/m]

ϕ：スカラーポテンシャル [V]

ω：各周波数 [−/s]

(2004年9月22日受付)

21