



電磁流体力学の冶金プロセスへの応用

© 1985 ISIJ

Metallurgical Applications of MHD

Dr. Marcel GARNIER

1. 結 言

電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics: MHD) に関連する現象が冶金の分野で認められるようになったのは今世紀のはじめで実に早い時点であつたが、MHD を使つて冶金の問題を解決したという訳ではなかつた。最初は、単にメタルに通電し、ジュール熱によつてメタルを溶解するとか、アルミ精錬に見るように、電解を目的とするものであつた。こういった応用のすべてに MHD 現象がみられたのであるが、その主な効果は熔融金属中に流れを誘発することであり、MHD 現象としては 2 次的かつ一般的なものとして認識されていたにすぎなかつた。

誘導炉においては、電磁攪拌が浴の温度を均一化するという点に関して積極的な役割を果たしたのであるが、耐火物を機械的に浸食して熔融金属を汚染するという点においては否定的な役割しか果たさなかつた。今日、誘導炉は熱効率の最適化を図るように設計されてはいるが、品質を考慮してメタルの状態がよりよいものとなるようには設計されていない。同じことは溶解炉にも見られ、そこでは長年にわたり、メタルの溶解に必要な熱移動は自然対流のみに依存してきた。しかしながら、ごく最近になつてはじめて合理的な取り組みがなされはじめた。すなわち、炉の形状を変えて、電磁気力の回転成分を誘発し、メタルを攪拌して熱移動を促すことによつて溶解時間の短縮が企てられた。アルミニウムの電解セルでは、使われるエネルギーの内、大きな割合 (~30%) が陽極とメタル間に存在する熔融塩浴での抵抗損失に消費されている。そこで、セルの水平方向の寸法を拡大して、熔融塩浴の厚みを減少させることによりプロセスの効率を高めることができる。セルの寸法と熔融塩浴の厚みは液体の運動によつて規定される。しかし、流体運動は十分解明されていないし、制御もされていない。この場合、MHD による流体の運動は 2 次的なものではあるが、否定的な効果を生じ、本装置を発展させる上で障害となつている。

最近の研究では、電磁気的な効果の現象論的解析とセルの総括的かつ局所的なモデル化によつて、熔融アルミニウムの炉の形状や電極の位置の影響についてはかなり明確になり^{1)~3)}、装置設計の方法が確立されてきている。

古典的技術から例をとるならば、ESR と VAR の再溶解プロセスを例にあげることができる。そこでは長年にわたり MHD の観点からは誤つた制御がなされてきた。ESR における攪拌のように、それが好ましい時はもとより、電流の短絡の原因となる VAR の自由表面運動のように、それが好ましくない時にも止むを得ず MHD 効果を容認してきた。しかし、ここ数年の間に、電磁攪拌についての知識と理解が進み^{4)~6)}、両技術とも著しい進歩をとげることとなつた。例えば、VAR の鑄型の回りに攪拌のための誘導装置を取り付けるといつたような装置の改良によつて、自由表面の更新を促し、製品の品質を改善することができた。

MHD の応用として、連鑄と取鍋精錬における電磁攪拌は興味深く、かつ特色あるものとなつており、冶金学的に詳しく解析がなされ、大きな発展を遂げた。本稿では、MHD 現象がどのようにして冶金の分野に重要な改善をもたらしたかを示すために、後ほど電磁攪拌について詳しく触れることにするが、ここではまず、MHD に見られる種々の機構を明らかにするための実験的、物理的、数学的な方法を紹介する。将来解決されるべき科学上の問題については、電磁攪拌という特殊な応用を他の一般的な応用に結び付けて述べるとともに、ごく最近の応用例のいくつかを示す。これまで述べてきたものは、MHD 現象が十分理解される前に、すでにその技術が存在していたのであるが、最近の応用例では MHD の物理的な機構を発掘することが装置の基本概念となつている⁷⁾⁸⁾。

2. MHD の冶金分野への応用の成功例： 電磁攪拌

2.1 技 術

すでに 1917 年に結晶構造を変えることを目的とし

昭和 60 年 7 月 16 日受付 (Received July 16, 1985) (依頼解説)

* CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), Director of the G. I. S. (Groupement d'Intérêt Scientifique) MADYLAM (Magnétodynamique des Liquides Applications à la Métallurgie), B. P. 68 38402 Saint-Martin d'Heres, France

翻訳：浅井滋生 (名古屋大学工学部 工博, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

て、凝固中の溶湯が電磁攪拌されていたということは興味深い。その後、誘導攪拌の技術は広くビレット、ブルーム、スラブ連铸および取鍋精錬において用いられてきた。冶金的な効果に促され、過去 10 年間に世界の研究は大きな進歩を遂げた。ごく最近の技術の状況については、BIRAT と CHONE⁹⁾によつて 1982 年にレビューされている。

今日、世界の数多くの連铸機に誘導型の攪拌機が装備されていることが示すように、電磁誘導による攪拌は MHD の冶金プロセスへの応用の最適例と言える。連铸においては二つのタイプの攪拌機が開発されてきた。その一つは、ビレットやブルームに、他はスラブに用いられており、それらはモールド内や 2 次冷却帯の铸型直下に取り付けられている。誘導装置の種類としては、一つは、回転や移動する磁界を発生させる円筒型のもの、他は、ビレットやブルームではストランド軸に平行に、スラブではボードサイドに沿つて水平方向に移動磁界を発生させるリニヤー型のものがある。また、铸型の回りに取り付けた誘導装置によつて、回転と移動を組み合わせた磁界を作り、螺旋状の攪拌も行われてきた。以上述べた誘導装置では、銅铸型や凝固層による磁気遮蔽効果を回避するため、低周波 (1~20 Hz) の交流が用いられる。別のタイプの独創的な攪拌機も開発されている。例えば、サマリウム・コバルトの磁石を用いる磁気攪拌¹⁰⁾、銅铸型に高電流を通じ、一卷きコイルとして用いるもの¹¹⁾、永久磁石による磁場とプラズマを介して熔融金属中に印加された電流を組み合わせる伝導攪拌 (静磁場通電方式)¹²⁾がある。これらの攪拌機の詳しい記述は多くの文献^{13)~18)}にみられるが、スラブ用の電磁攪拌技術のいくつかの例を Fig. 1 に示す。

取鍋精錬の誘導攪拌の開発は 25 年ほど前より始まり今日まで続いている。使用される技術は連铸と同じで¹⁹⁾、垂直方向の循環流を伴う回転運動を誘導する円筒型コイルと、上向き、下向き、あるいは上下方向に移動磁界を発生させ、一つあるいは数個の渦からなる垂直流に水平方向の循環流を付随させる垂直型コイルとがある²⁰⁾。い

くつかの誘導攪拌機とその流れのパターンの模式図を Fig. 2 に示す。

2.2 電磁攪拌の冶金的効果

過去 5 年間に渡つて、連铸と取鍋精錬の電磁攪拌の効果については数多くの議論がなされてきた²¹⁾²²⁾。連铸に見る主要な効果は次のようである。

—オープン铸込みの場合、铸型内を回転攪拌することによつて、スラグの巻込みが押さえられ、外表面の性状の改善がなされ、ピンホールの数が激減する (Fig. 3)。

—铸型内に上向きの流れを作り、介在物を自由表面でスラグ中に捕捉することにより内部の品質改善がなされ

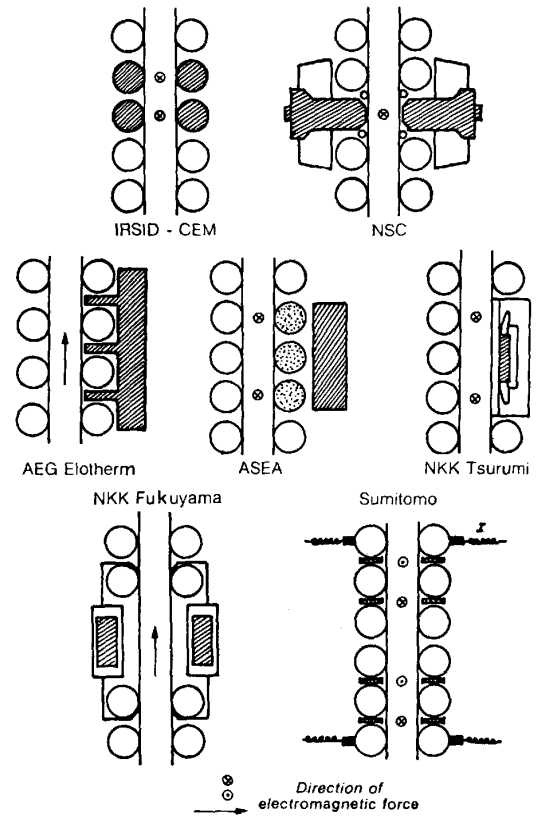


Fig. 1. Electromagnetic stirring technologies for slabs. (from IRSID)

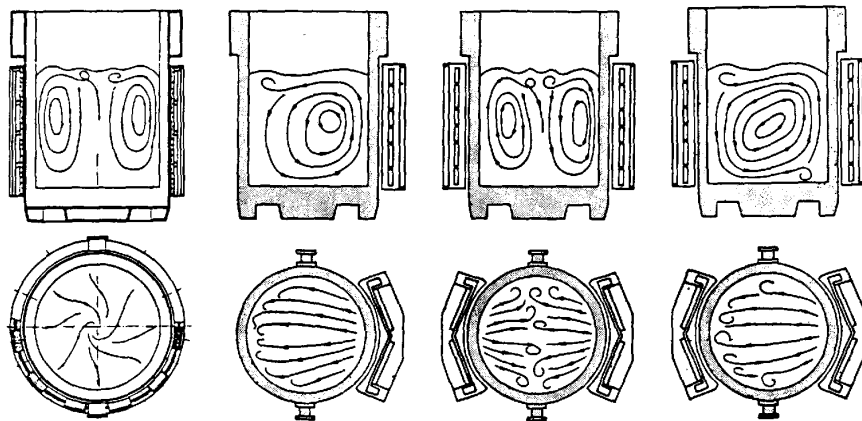
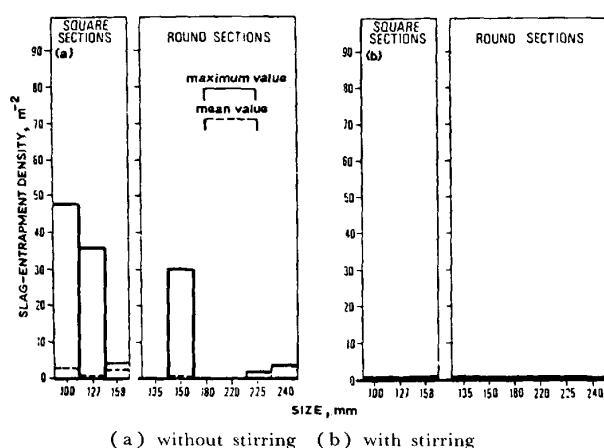


Fig. 2. Stirring pattern in a ladle. (from ASEA)



(a) without stirring (b) with stirring
Fig. 3. Improvement in surface quality obtained with in-mould rotary stirring. (from IRSID)

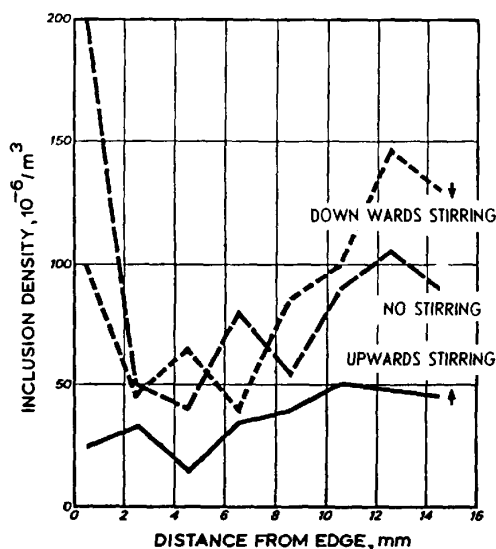


Fig. 4. Improvement in subsurface quality with in-mould linear stirring. (from IRSID-Allevar)

る (Fig. 4).

一 鋳型内およびモールド下の攪拌は内質の改善をもたらす。すなわち、電磁攪拌はブリッジの形成を抑制し、凝固前面を平滑にする。また、2次冷却帯では対流によつて熱輸送が促進される結果、過熱と潜熱の除去時間が短縮し、凝固前面で破断されたデンドライトの再溶解によつて温度が均一化する。その結果、等軸晶帯の生成が促され、軸方向に沿つて非金属介在物が均一に分布することとなる。しかしながら、スラブ型連鋳機で、水平方向に攪拌する線形誘導装置では、湯の速度が速く、しかもスラブ短辺面近傍の流線の曲率半径が小さくなる結果、「ホワイトバンド」(負偏析)が形成される。この欠点を回避するには交番攪拌が非常に有効である²³⁾。

もう一つの電磁攪拌の効用は取鍋精錬における化学反応の促進と溶湯の均一化である²⁴⁾。

一 界面近くで溶融金属の流速が大きくなると、反応成分が界面に輸送される時間が短縮され、不均一反応、例

えば、スラグ-金属間の反応速度が大きくなる。その場合、律速段階は化学反応となる。

一 反応成分や合金が添加されるような場合には、浴内の乱流が金属の均一化を促進する。

一 介在物、例えば、脱酸によつて生成するアルミナ粒子の離脱時間は誘導攪拌によつて短縮できる。

電磁攪拌されている浴内での介在物除去の速度論的機構は非常に複雑である。すなわち、浴中の磁場は介在物の形状と電気伝導度によつて異なつた働きをし²⁵⁾、その上、フローパターンや乱流の特性が介在物の成長を促し、介在物の除去につながつたり、逆に分散を促し、浴中での非金属介在物の均一分布に導き著しい逆作用をなすかもしれない。更に、攪拌に伴う流速が適当であれば、介在物は離脱可能域(例えば、自由表面やスラグ-金属界面)から離脱することになるが、速度が速くなりすぎると介在物は界面で捕捉される機会を逸することになる。

連鋳におけるホワイトバンドの形成も含めて、“優れた”電磁攪拌機が具備すべき条件を定めることは難しい。すなわち、何が“優れた”攪拌機を構成するのか、あるいは、製品の形状(ビレット、ブルーム、スラブ)や取鍋、合金組成が決まつた場合に、所要の結果を得るためには、何が“正しい”攪拌条件であるかを定めることは困難である。連鋳に関しては、BIRATが、冶金的目標と連鋳の機種を設定した上で、攪拌システムを設計する有用な指針を与えている。しかしながら、特殊なリニャー型や螺旋型の攪拌あるいは伝導型(静磁場通電)や新しいタイプの攪拌機についてはまだ十分な実績がないため、2, 3の問題が残つている。最近では、物理的な方法と数学的モデルによつて興味深い結果が得られているが、攪拌システムの設計に当たってはまだまだ多くの研究が必要である。

3. MHD 現象の物理的解析方法と数学的モデル

3.1 物理的手法

連鋳の電磁攪拌の開発でなされた進歩のほとんどは、その起点を物理的手法に負つている。電磁攪拌で作られた材料を冶金学的に調べたり、攪拌装置や溶融金属の特性に関連する研究では、IRSIDが重要な役割を果たしてきた。

連鋳プール内に誘導されるフローパターンは攪拌についての基本的情報を与える。溶融金属は高温かつ不透明であり、実験で直接流速を求めることは難しい。したがつて、凝固したインゴットから冶金学的にフローパターンを求めることになる。断面のサルファプリントはこのよい例であり、またホワイトバンドは流れ関数と流速について情報を与えてくれる (Fig. 5)²⁶⁾。

この方法は、攪拌装置の機能の改善にとつてのみ有効

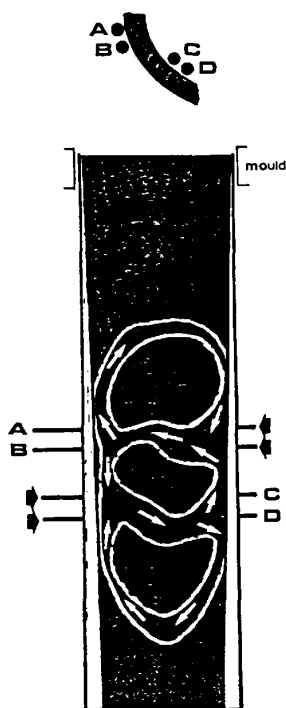


Fig. 5. Butterfly flow pattern obtained with IRSID-CEM stirring rolls.

であり、原理上からは最適な操作条件を導き出してくれるものではない。すなわち、ホワイトバンドは取り除かれるべきものであり、それが除去されればこの方法は使えなくなり、より正確な方法が必要となるからである。また、高橋ら²⁷⁾の研究も非常に有効なもので、そこではデンドライトの傾きから速度が求められている。しかしながら、欠陥の存在を前提としており、前の方法と同様の限界がある[†]。

放射性トレーサーを用いる他の方法もあるが、連铸機に適用するのは難しい²⁸⁾。水銀のような電気伝導性の液体を攪拌機の内部に置いて流速を測定することはできるが、この場合には凝固現象は考慮されないこととなる。一方、低融点の金属を用いる場合には凝固現象は加味されるものの、そこで流速を測る技術は現存していない。

スラブの水平移動磁界攪拌については、水モデル実験で比較的よいフローパターンが再現できる²⁹⁾³⁰⁾。電磁攪拌では電磁気力が誘導される領域は狭い範囲に限定されるため、攪拌装置から少し離れると液体はもとの駆動源とは無関係に運動する。そこで、水モデル実験では電磁気力に代わりプロペラによつて液体を駆動させる。Fig. 6には水モデルで得られた交番攪拌の場合のフローパターンを示す。

以上述べた手法は流速についてはそのオーダーを与える程度で、フローパターン以外には情報を提供してくれない。しかし、その情報から速度場と同じく重要な温度

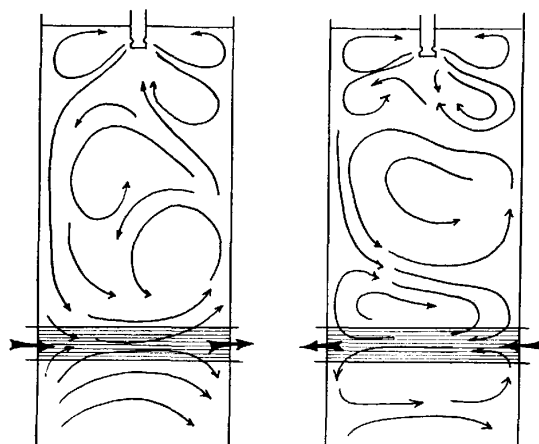


Fig. 6. Experimental flow patterns with alternate stirring.

場を推算することができる。数は少ないが、モールド内溶湯の測定がなされている³¹⁾³²⁾。しかし、数学的モデル以外の方法では、温度場を求めることは難しい。

取鍋攪拌では、問題はさらに難しくなり、上述の手法はほとんど適用できない。

3.2 数学的モデル

MHD現象が温度や冶金的問題と結びつく場合、その機構は複雑になる。このような場合に十分な情報を提供できる数学的モデルは存在しない。しかし、攪拌下の金属の運動と伝熱と凝固について興味深い研究がなされている。

流体運動のモデル化に当たっては、通常、乱流現象を考慮するために分子粘性係数より数オーダー大きい乱流粘性係数を用いたり、プラントルの混合長距離理論やK-εモデルを採用している。しかし、これらのモデルはすべて近似的な結果しか与えず、十分な実験データが得られていないという点に問題がある。

これまでなされてきた数学的モデルについて、三つの典型的な例を示す。VAN DEN HOVE³³⁾は、ビレットの铸型下の攪拌を対象にして、磁場と流体運動について、優れたモデル化を行つている。しかし熱と凝固の問題は取り扱っていない。LESOULT³⁴⁾はスラブ铸造における凝固のモデル化を行つている。そこではフローパターンの計算はなされていないが、水モデル実験に基づいて図解的にまとめられている。MEYERとDURAND³⁵⁾はMHD現象と凝固現象を組み合わせたモデル化を行つている。この研究の独創的な点は、簡単な装置でAl-Cu合金を用いた実験を行い、数学的モデルと結び付けているところである。詳しい説明は後ほど本稿でなされる。

LESOULTは、電磁攪拌による循環流によつて浸食される等軸晶の成長に関して、モデルを提出している。流れのパターンを除けば、系に含まれる変数は単位時間、単位面積当たり浸食を受ける結晶の数とその半径である。そして、熱と溶質の移動は拡散系として取り扱われる。

† 本文章は原文に沿ったものであるが、一部著者に誤解があるものと思われる(訳者)。

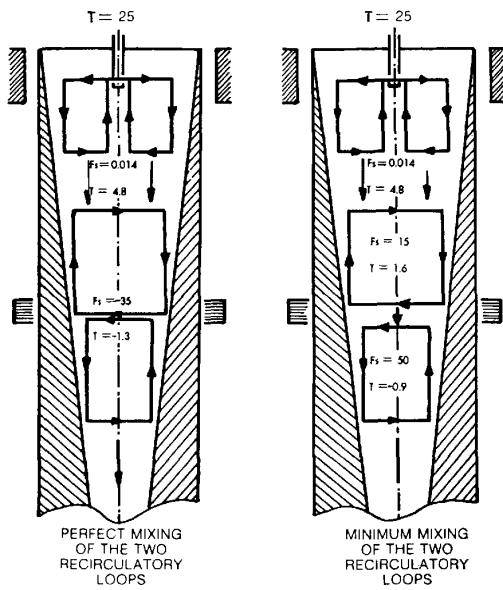


Fig. 7. Maps of superheat $T(^{\circ}K)$, and solid fraction $F_s(\%)$ in liquid pool in instance of stirring with IRSID-CEM rolls.

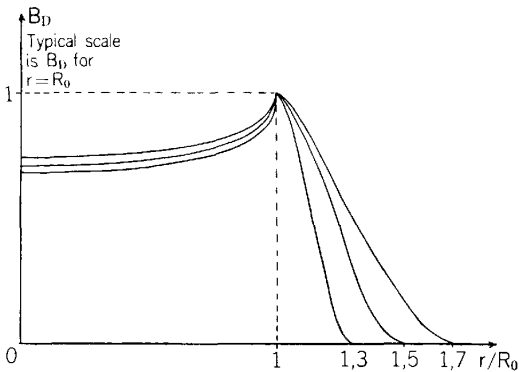


Fig. 8. Magnetic field distribution (azimuthal component with respect to the radius of the inductor).

Fig. 7 は上方と下方の流れの間の物質移動の違いによつて生ずる過熱度と固相分率を計算したものである。

VAN DEN HOVE は攪拌装置によつて作られる磁場の計算モデルと攪拌機の定義に注意を払い、メタル外部のスカラーポテンシャルと内部の磁場を混合法 (mixed technique) を用いて有限要素法で計算している。このモデルは攪拌装置のコーナー部をモデル化するのに適しており、誘導器の上下端部で磁場の増大に伴つて現れる端効果が詳細に表されている (Fig. 8)。攪拌装置の中心からの距離をパラメーターにして、方位角方向の速度分布を Fig. 9(a) に示す^{†2}。また、サイズが有限である誘導器で、磁場の強さを変えた場合の角速度の計算結果を Fig. 9(b) に示す。

熱と結晶の輸送に大きな影響を及ぼす循環流が垂直面内に現れる。この循環流が生ずる理由は二つある。一つ

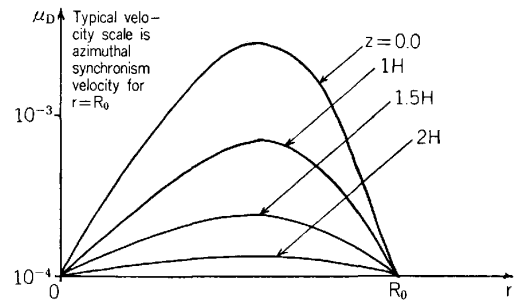


Fig. 9-a. Azimuthal velocity profiles with respect to the distance z from the stirrer center (H denotes the height of the inductor, R_0 the radius of liquid metal column).

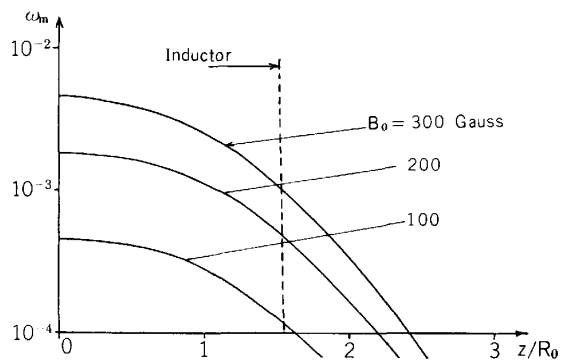


Fig. 9-b. Mean angular velocity profile (referred to synchronism velocity)

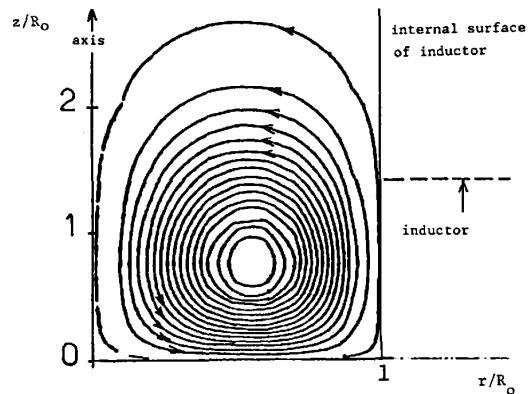


Fig. 10. Vertically recirculating flow pattern.

は端効果によつて電磁気力に回転成分が生ずるためであり、他は、液体金属を圧縮する方向に働く電磁気力の成分が軸方向に減衰するためである。その結果、スタラーの外側に対して内側での液体圧が高くなり、軸方向に流れが生ずる。流れの計算結果が Fig. 10 に示されている。引抜速度変化に伴う磁場対流の様子が Fig. 11 に示されている。流体の運動から見ると磁場の影響域は攪拌装置の幅の 2 倍^{†3} 程度であることがわかる。

Fig. 12-a に示す MEYER と DURNALD が用いた実験装置は長方形の鋳塊用鋳型 (高さ 400 mm, 長さ 200

^{†3} 原文では 4 倍とあるが、Fig. 10, 11 から 2 倍と判断される (訳者)。

^{†2} 本文章、訳者挿入。

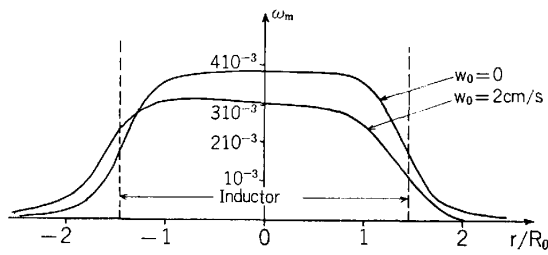


Fig. 11. Mean angular velocity distribution with respect to withdrawal speed W_0 .

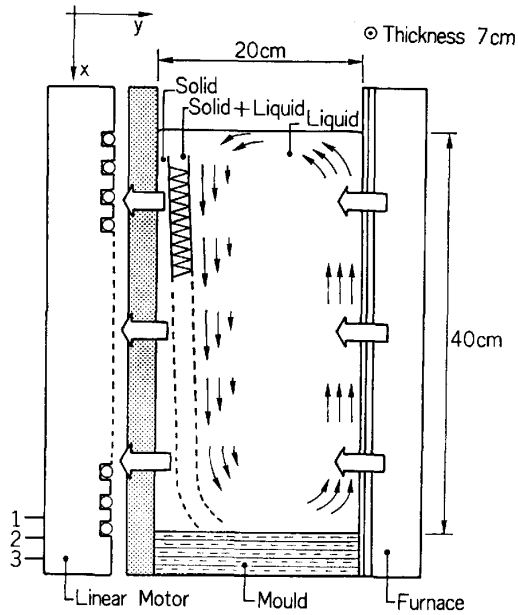


Fig. 12-a. Experimental device.

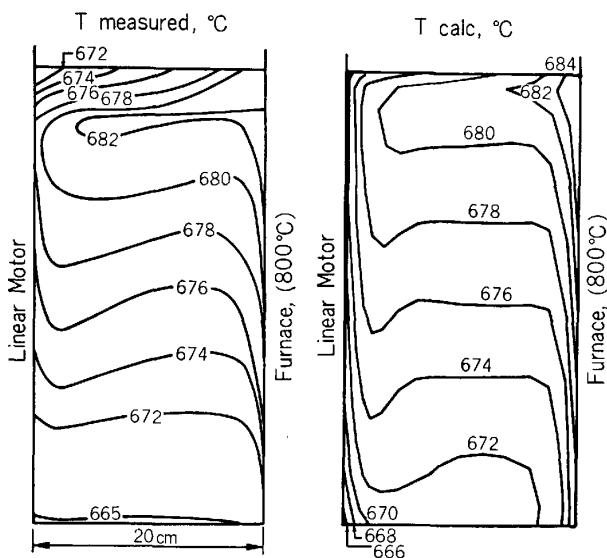


Fig. 12-b. Measured and computed temperature $T(^{\circ}\text{C})$ in permanent state: natural convection.

mm, 厚さ 70 mm) で, 誘導装置に向かい合った壁に加熱源の炉が取り付けられている. 溶融 Al-2%Cu 合金が密度差 (自然対流) と垂直方向に誘導される移動磁界 (強制対流) によって駆動されている. 流速は定常状態

下で測定された. モデルは自然対流と電磁攪拌の両者を考慮して, 伝熱と流れを計算している. モデル化に当たっては, 電磁気力の分布は 2 次元とし, 誘導装置と鋳型は垂直方向に無限に長いものと仮定されている. クレーター部は温度によつて, 液相域 ($T > T_l$ (液相線温度)), 固・液共存域 ($T_l > T > T_s$ (固相線温度)), 固相域 ($T < T_s$) の三つの領域に分割されている. 物性値は密度が温度とともに線形的に変化することを除いては, 固相と液相でそれぞれ一定とし, 共存層では固相分率によつて連続的に変化するものとした.

温度場と速度場の計算では, 乱流による効果が考慮されている. すなわち, 分子粘性係数と分子拡散係数が乱流の粘性係数と拡散係数に置き換えられる. 乱流粘性係数の計算には混合長モデルが用いられ, 乱流の熱拡散率は乱流の動粘性係数に等しいとされている.

定常状態で測定された温度と計算によつて得られた温度が, 自然対流と強制対流のそれぞれの場合について, Fig. 12-b と Fig. 12-c に示されている. 両者にはよい一致が見られる.

時間の経過に伴つて変化する温度と凝固領域の様子は熱伝導のみが働く場合, 自然対流を考慮する場合, 電磁攪拌が行われる場合のそれぞれについて計算され比較された. Fig. 12-d は注湯後 180 s の状態で, 等温線で区切られた斜線部が固相域を示す. 攪拌がある場合には, チル面に沿つてはじまる凝固の開始時刻は遅れ, 顕熱が潜熱より先に除かれることがわかる. この場合, 液体は 5K の過熱度に保持されているため, 柱状晶組織となることが予測される. Fig. 12-e は注湯後 270 s 経過したもので, 攪拌下では液体の温度はほぼ均一の液相線温度に等しくなっている. この状態は等軸晶凝固に好ましいものである.

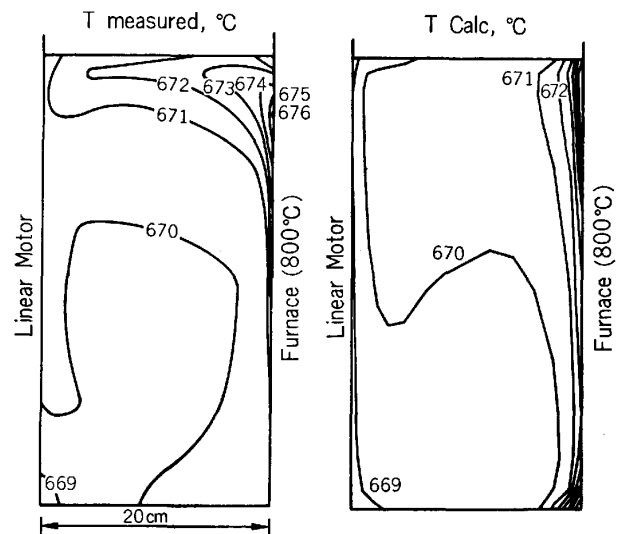
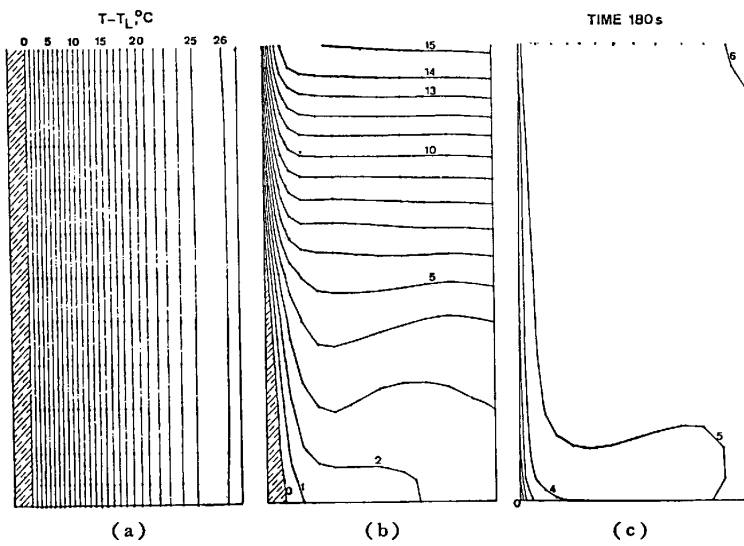
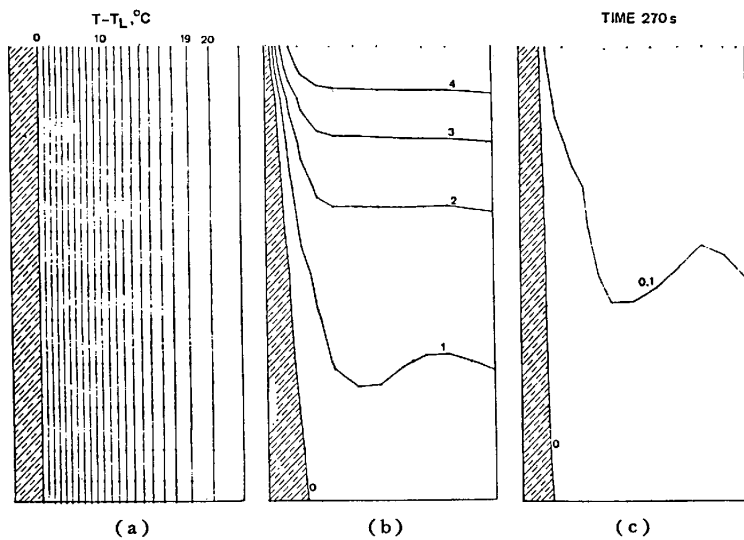


Fig. 12-c. Measured and computed temperature $T(^{\circ}\text{C})$ in permanent state: forced fluid flow.



(a) Pure heat conduction (b) Natural convection
(c) Forced convection
Fig. 12-d. Temperature field 180 s after pouring.



(a) Pure heat conduction (b) Natural convection
(c) Forced convection
Fig. 12-e. Temperature field 270 s after pouring.

4. MHD の冶金プロセスへの応用に関連する科学的諸問題

これまで述べてきた例から、MHD の冶金プロセスへの適用を成功させるには、MHD 現象の解析とその理解を深めることが重要であることがわかる。そのために研究すべき数多くの科学的問題がある。

(1) 電磁場のモデル化

誘導装置とそれによつて作られる磁場に関連する問題を解かなければならない。

周波数があまり高くない場合 (50 Hz までの商用周波数) には、誘導装置のモデル化に有効な手法がある。しかし、周波数が高くなるといくつかの問題が生じてくる。一つのコイル内で、その導体部の間に、また、コイルと周囲の磁気的環境の間に強い相互作用が働くことになる。この場合、電流密度分布は導体断面内で、もはや均一ではなくなり、表皮効果を均一なものと考えられなくなる。電流密度は未知変数となり、古典的手法は使えなくなる。最近の研究は、均一電流密度分布の仮

定が正しくないことを示している³⁶⁾。例えば多重コイルの場合、電流は直感的に想像されるものとは逆に、局在して流れる。そのため、見積もりがたいマイナス効果が磁場とコイル抵抗間に現れる。

磁場を精度よく計算する手法の開発が必要である。実際には MHD の計算において必要となるのは磁場ではなく、ローレンツ力の回転成分であり、磁場からそれを求める各ステップで、計算精度が失われるということを忘れてはならない。通常的手法では、運動方程式を解く前に少なくとも 3 回の微分操作が必要となる。第一番目は、ベクトルポテンシャルから磁場を導く時、第二番目は、電流密度とローレンツ力を計算する時、そして第三番目は、ローレンツ力の回転 (ベクトル演算のカールの計算) を取る時である。速度場の計算精度はこれらの微分の精度に依存しているため、最近の研究においてはこの点に特別な注意が払われている³⁷⁾³⁸⁾。実際の形状のもとで磁場を計算するには端効果も考慮せねばならず、三次元的取扱いが必要となる。

(2) 速度場の計算

電磁気力が得られると、液体金属の平均速度は有限差分や有限要素法といった古典的計算法によつて求めることができる。しかし、ローレンツ力によつて誘発される攪拌は常に乱流となり、これまでのモデルでは、MHD乱流を正しく表すことができないということがわかっている。この場合の乱流は多くの理由から特殊なものとなる。そのため、修正だけということはありません、特殊なモデルを展開する経験が必要となる。ジュール効果によつて、磁場が非等方的に誘導され、乱流特性は著しく変化する。このような非等方性乱流は直流の均一磁場のものとはよく知られているものである³⁹⁾。交流磁場の場合にはさらに複雑で捕え難いものとなり、単純な外挿は危険となろう。交流磁場によつて誘起されるローレンツ力は次の二つの理由から特殊な、これまで経験しなかつた新しいものとなる。まず第一に、ローレンツ力は流体中に均一に分布せず表層部に局在する。そこは流体力学的境界層と同じ領域であるため、境界層は大きく変形する。第2に、電磁気力は一定ではなく脈動成分を持つ。平均流速を計算する際、脈動成分を無視すれば、乱流モデルでこれを考慮しなければならない。なぜなら、脈動成分はある大きさを持つており、乱流スペクトルに特定のパワーを注入するかもしれないからである。さらに、多くの冶金プロセスで流れは循環しており、流体要素は表層部で周期的な磁場と脈動を経験することになる。この周期は乱流の典型的な時間スケールと一致するため、乱流の起源に影響を及ぼす。交流磁界下で見られるこの新しいMHD乱流について理論的かつ実験的研究を進めることは急務である。それは平均的速度場に影響するばかりでなく、輸送現象にも関連する。

(3) 熱的效果

多くの研究において、電磁気力によつて誘導される速度場を求める際、液体金属は等温であると仮定されている。この近似は誘導炉のような系では正しいが、例えば、相変化を伴う場合には、計算結果に重大な問題を生じせしめる。たとえ温度勾配が浮力効果に対して重要でないとしても、物性値の変化は考慮されなければならない。例えば、メタル層のある位置でキューリー一点に達することが起これば、当然、透磁率の変化を考慮せねばならない。また、凝固前面の境界層内や固液共存層内の流体運動については、有効粘性係数の変化を考慮せねばならない。電磁流体力学に熱的現象を組み合わせた数値モデルの展開も試みられてはいるが⁴⁰⁾、この分野については研究の緒についたところである。

(4) 輸送現象

液体金属の乱流特性と輸送機構(運動量輸送、熱輸送、物質輸送)の関連を明らかにするために基礎研究が必要となる。工業への応用の観点からは、種々の重要な問題に答えるという点で意味深い。例えば、いかなる乱流が粒子の合体を促進し介在物の除去速度を高めるの

か、逆に、いかなる乱流が粒子を分散させて浴の汚染に結び付くのか。同じような問題が界面近傍の輸送についても見られる。例えば、スラグ-メタル界面近傍で誘発される乱流は輸送現象に大きな影響を持つもので、異相間反応速度を加速するための最適条件が見出されなければならない。界面の不安定性はマランゴニー効果に見られるばかりでなく、乱流強度と局所の物質移動速度とを結び付ける。また、界面での物質移動は界面張力を変化させ、スラグのエマルジョン化を促す。壁の近傍では、粒子の捕捉や逆に捕捉された粒子が洗い流されるので、乱流特性の制御が重要となる。さらに、凝固組織を制御するには凝固前面における熱と物質の移動に及ぼす乱流の効果を詳細に解析する必要がある。

これらの研究が興味深く、かつ複雑化している原因は、MHD現象が化学、物理化学、熱力学および冶金学に関係しているためであり、科学者や専門家の間で連繫を密にしなければ、これらの問題を解決することはできないであろう。

5. 冶金プロセスへのMHDの新しい適用

電磁気的な効果なくしては操作が難しいか、あるいは不可能な冶金操作にMHDを新たに適用することができる。

(1) 連続鋳造による空心材製造の電磁装置

今日、空心塊やチューブを作る精密鋳造は冶金分野に広く行き渡っている訳ではない。本技術が経済的に成り立つためには数多くの問題を解決せねばならない。外表面と内表面の性状の優れた製品を作ることが基本であり、環状の形状を得ることも難しい。鋳造中にスラグ滴のような非金属介在物が初期凝固殻に捕捉されると内外面の著しい欠陥となる。機械加工の前にこの欠陥を表層より取り除くには、極めて高価で複雑な工程を通さねばならない。

アルミニウムの連鋳では、この問題に当たつて電磁気的な解決が図られた。環状の熔融金属の内外面に誘導装置と遮蔽板を設け、自由表面の形状を重力に抗して安定に保つようにする(Fig. 13)。このプロセスはGETSELEV⁴¹⁾によつて確立されたものである。熔融金属の深さは数センチメートルを越えないようにしなければならないので、本技術はアルミニウムなど非常に軽くて熱伝導率の高い金属に限定される。他の金属に適用する場合、例えば鋼では鋳込み速度を非常に小さく取らねばならず、メリットがないかもしれない。

(2) 熔融金属の磁気成形: アモルファス金属のための特殊な適用

高周波磁場を用いて液体金属の自由表面を特定な形状に成形できることを実験によつて示した。原理は、非常に薄い表層内に不均一な磁気圧力を誘導し、表面張力、重力、慣性力と釣合せ、はじめの形状とは異なる平衡形

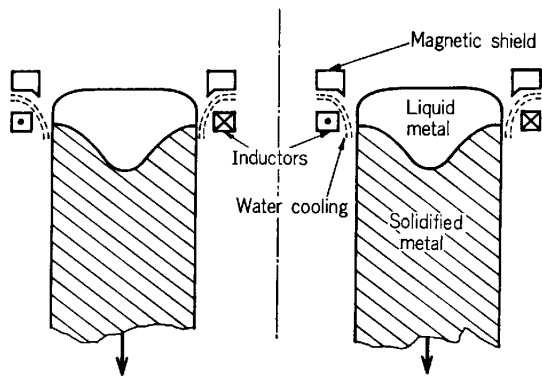


Fig. 13. Electromagnetic device for continuous casting of aluminum.

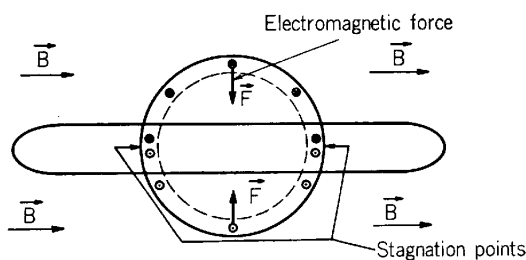


Fig. 14. Magnetic shaping of a ribbon.

状に変形させるものである。冶金プロセスへの適用としては、壁なしで液体金属ジェットを拘束したり、誘導すること、浮遊させること、磁気的な成形による連铸が考えられる⁴²⁾。

磁気圧力を用いた形状制御の好例として、垂直方向に落下する円形の金属ジェットに磁場を印加して、極薄のリボン状断面にするプロセスを挙げることができる。温度勾配を付けずに急冷し急速凝固によって得られるアモルファス金属の作成にこの極薄の熔融金属リボンを用いることができる。急冷凝固法には「平面流れの铸造」と「熔融紡糸法」の二つの主要技術がある⁴³⁾⁴⁴⁾。はじめのものは7インチ幅のアモルファスを作るまでになっており、技術的な成功を治めた。第二番目のものは液体金属ジェットの不安定性を減衰させることが難しく、よい結果が得られていない。交流磁界は円形断面のジェットを薄帯化し、凝固するまでそれを安定に保つことができる。

直径1cmの円形のジェットを水平磁界中に置き、磁界の周波数は表皮が十分薄くなるよう400Hzとした。ジェットのまわりに誘導される中心方向の電磁気力は不均一 (Fig. 14) となり、磁場と誘導電流から電磁気力が零となる二つの停留点が現れる。一方、停留点を結ぶ線に垂直な方向の電磁気力は最大となる。この力と表面張力の収支に基づいて液体金属を磁界方向に引き延ばし、望ましいリボン形状とする。水銀や熔融せずを用いた実験室規模の試験では1mmより薄いリボンが容易に得られた。

興味深いことに、液体ジェットは軸方向の速度を持つために、リボンの最大幅は二つのコイルの位置に現れるのではなく、それより下に現れる。工業的観点からは、広幅のリボンを作るために二つ、あるいはそれ以上の数の成形液体薄帯を合体させることができる。しかしながら、合体に伴う不安定性から、できたリボンには端に平行に周期的リップルが生ずる。このリップルの波長は最初のリボン幅となる。このような乱れは磁場が存在していないところで現れ、表面張力によって増幅されるものであり、減衰させることは難しい。そこで、リップルを平滑にしてリボンを安定化させる第2の誘導装置が必要となる。

MHDは、古典的な方法では解決が難しい問題に答えを与えることができるもので、在来技術の改良ではなく新しい技術を生み出す創造的なものといえる。交流磁界はリボンに優れた安定性をもたらすと同時に、無接触であるため、不活性ガス雰囲気のもとで作業を進めれば金属を汚染しない。

(3) 電磁レビテーションの溶接への応用

冶金工業や機械の組み立てにおいては、重力に逆らって溶接作業を進めなければならないことがしばしばあり、作業を困難なものにしている。熔融金属が凝固してしまいうまで、しかるべき位置に熔融金属を保持することは作業者の腕にのみ頼ってきた。液体金属中に適当な電磁気力を誘発させ、誘導装置をうまく設計することによって望みの安定水平形状を生み出すことができる。

液体金属を浮遊させる装置は多いが、平滑な自由表面を作ることはできない。ここに紹介する装置は熔融金属の軸に平行ないくつかの水平伝導器からできていて、互いに逆方向に流れる交流電流を流すものである。この装置には利点と欠点がある。すなわち、レビテーション金属の安定性に不可欠な復元力を与えるが、対称軸の上に磁界の停留点を作る。停留点には電磁気力が働かないので、熔融金属が母材から遊離する。この欠点を克服するために、本装置では二つの対になった伝導器 (Fig. 15) を使用する。それにはおのおのの伝導器間の相互作用のない状態で、それらの重ね合せが必要となる。そのための方法として二つの提案がある。一つは、同一の周波数で $\pi/2$ だけ位相のずれた電流を用いることであり、他

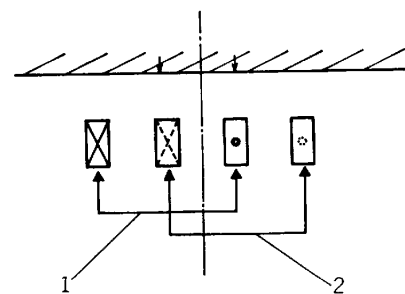


Fig. 15. Inductor cross section: two couples of rectangular conductors (1 and 2) are used.

の一つは、二つの異なる周波数の電流を用いることである。その周波数は自由表面上の磁場の停留点から溶融金属が落下しないように選ばなければならない。表皮厚さ、磁場の強度、周波数、から求まる四つの相互インダクタンスの値は1と比較して小さいものでなければならない。この場合、伝導器間の距離と伝導器とメタル表面の距離の比を適当に選べば、溶融金属にほぼ均一な磁気圧力を与えることができる。

装置の運転を容易にして、効率を高めるために二つの技法が取られている。一つは誘導器の active part, コンデンサー, front loop からなる特殊回路を用いるものであり、コンデンサーの容量と front loop の自己インダクタンスの値をうまく設定することによつて、フィードバックが付いた一つの通常の誘導器で、二つの異なる周波数を得ることができる (Fig. 16)。コイル内の導体部間の相互インダクタンスの解析から、強力でかつ好ましくない電流が導体部の断面内で不均一に生ずることがわかつた⁴⁵⁾⁴⁶⁾。他は、この効果を打ち消し、電流が溶融金属のできるだけ近傍を流れるよう、長方形断面を二つの部分に分割するものである (Fig. 17)。水冷された長方形の伝導器の上面は銅製で、他の三つの面は電気伝導率の低いステンレスでできている。全断面が銅でできている場合に比較して磁界の強さは2倍となる。

(4) 液体金属から介在物を除去する電磁装置

スラグや介在物除去を電磁気的に行うための原理を次に示す。溶融金属に直流電流と直流磁束を互いに直交するように印加する。電磁気力の方向が壁に垂直となるようにすることによつて、圧力勾配の分布が非回転の電磁

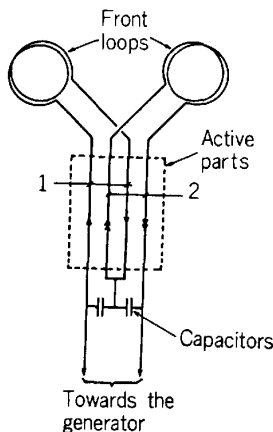


Fig. 16. Complete electric circuit.

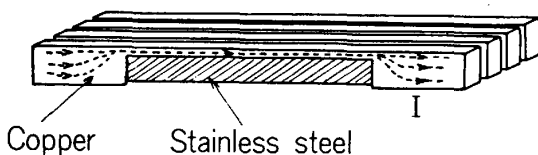


Fig. 17. Technological solution used to force electric current to flow in the upper part of the inductor.

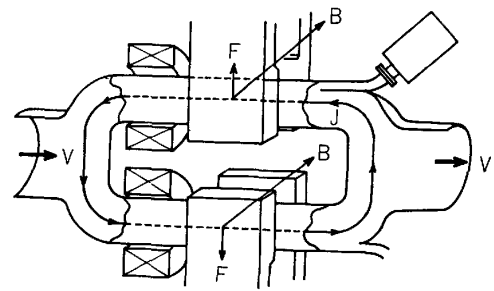


Fig. 18. Possible configuration for an electromagnetic separation device.

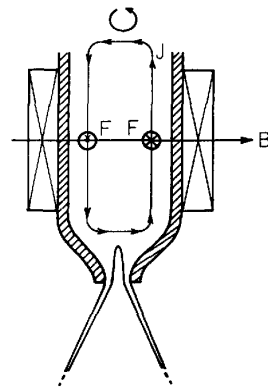


Fig. 19. Schematic view of electromagnetic pulverisation device.

気力と釣り合い、流れが誘導されない。圧力勾配中に存在する絶縁性の粒子は電磁気力を受けないため、電磁気力とは反対方向の壁側に動かされ、捕捉される。一種の電磁気的デカンテーションがなされる訳である。デカンテーションの時間は重力しか働かない場合に比較してはるかに短いものとなる。それには二つの理由がある。すなわち、重力より大きな電磁気力を作り出すことは容易であり、しかも重力による分離は密度差に基づくものであるが、本法は電気伝導度の差を利用している。重い物質と軽い物質の密度比は高々 10 程度であるが、良導体と不良導体の電気伝導度の比は 10 の数割に達する⁴⁷⁾。

小さい酸化物 (0.01 mm 径まで) を、この方法によつて溶融金属から分離させることが可能である。電磁気力による介在物分離装置の一つを Fig. 18 に示す。

(5) 溶融金属噴霧化の電磁装置

Fig. 19 には交流磁界を使つて溶融金属から直接金属の粉末を作る装置の模式図を示す⁴⁸⁾。溶融金属は耐火物でできた円形垂直容器に注がれる。容器の周りに取り付けられたコイルが回転磁界を発生する。回転磁界は、金属の物性値、ダクト内金属の流速、得られる粒子の径によつて決まる。電磁気力が印加されると、溶融金属は容器内で回転運動をはじめ、遠心力によつて圧力勾配が生じ、容器の中心を対称軸にして容器の内側にへこむような自由表面が形成される。容器を出る溶融金属は非常に薄い円錐状の膜となり、表面張力がこの膜を不安定にして、小さな粒滴に分散させる。粒子の形状は表面張力に

よつて決められる。さらに、熔融金属の供給速度と回転磁界の強さを制御することによつて膜の厚みを調節し、粒子が球形となるように凝固させ、その径を決めることができる。この特殊な方法を用いれば、粒子径分布の非常に狭い粒子群を得ることができる。

6. 結 言

省エネルギーを重視する経済状況のもとで、今日、冶金、特に鉄鋼業は極めて重要な課題に直面している。現存の冶金技術を改善したり、革新的技術を生み出すという点において MHD は重要な寄与をもたらすことができる。冶金の分野において交流磁場が適用できる場所は多い。これまで、MHD があれば問題が解決できるかもしれないと考えられてきた分野において、最近、MHD が問題解決の鍵となることが認識されるようになってきた。

そのような観点から、連鑄の電磁攪拌の成功は最適例といえる。これは治金的に多くのメリットがあつたという点であり、高級鋼の連鑄化へと、連鑄の用途の拡大に大きく貢献するところとなつた。

私は BIRAT 氏による「数年以内にすべての主要鋼種が連鑄化される際に、電磁攪拌は必須の技術となる。」という言葉に同意する。しかしながら、この言葉は MHD の進歩が現状の知識をさらに精密化されたものにする時のみ、現実のものとなるのである。このことは、一方においては、理論家と科学者と現場の製鋼技術者の密接な連絡が必要であることを意味し、他方においては MHD の専門家と化学者、物理化学者と冶金の専門家のより密接な関係が必要であることを意味している。大学内の協力と大学と工場間の協力が問題を解決し、近代工業に革新をもたらす唯一の策である。本稿が協力と遂行の姿勢を促し、その触媒作用となれば幸いである。

文 献

- 1) A. R. JOHNSON: *Light Metals*, 1 (1978), p. 45
- 2) E. D. TARAPORE: *Proc. AIME Conference*, Vol. 1 (1971), p. 541
- 3) R. MOREAU and J. EVANS: to be published in *J. of the Electrochemical Society*
- 4) J. SZEKELY and K. NAKANISHI: *Metall. Trans.*, 6B (1975), p. 245
- 5) A. SNEYD: *J. Fl. Mech.*, 92 (1979), p. 35
- 6) Y. FAUTRELLE: *J. Fl. Mech.*, 102 (1981), p. 405
- 7) A. ALEMANY, J. BARBET, Y. FAUTRELLE and R. MOREAU: 1977-French Patent n° 77.17.296
- 8) M. BARNIER and R. MOREAU: 1977-French Patent n° 77.21.121
- 9) J. P. BIRAT and J. CHONE: *Ironmaking Steelmaking*, 10 (1983), p. 269
- 10) D. USHIJIMA, A. YOSHIDA, M. MIZUTANI and H. OKAJIMA: *Conf. on South-East Asia Iron and Steel Institute*, Manilla (1981), Paper 29
- 11) D. A. MELFORD, K. R. WITTINGTON, G. D. FUNNEL and G. R. ARMSTRONG: 4th International Iron and Steel Congress, London (1982)
- 12) T. SHIRAIWA, Y. SUGITANI, M. MIZUTANI, S. KOBAYASHI, S. ISHIMURA and H. TOMONO: *Sumitomo Search* (1979), p. 97
- 13) K. AYATA, T. MORI, K. NARITA and T. OHNISHI: *Rev. Metall. Ca. Inf. Tech.*, 79 (1982), p. 371
- 14) T. INOUE and H. TANAKA: *Nippon Steel Tech. Report* (1979) 13, p. 1
- 15) S. MIYOSHI: "Continuous casting" (1977), p. 286 [The Metal Society, London]
- 16) J. LIPTON, C. A. DACKER and S. KOLLBERG: *Iron Steel Eng.*, 57 (1980), p. 66
- 17) AEG-ELOTTERM: *Adversising pamphlet* (1979)
- 18) M. NAKATANI, T. ADACHI, S. KIMIYA and K. KIMURA: "Clean Steel" (1983), p. 416 [The Metals Society London]
- 19) Y. SUNDBERG: *ASEA Journal*, 44 (1971), p. 71
- 20) Y. SUNDBERG: *Proc. IUTAM Symposium on "Metallurgical applications of MHD"* (1982)
- 21) J. RUER, J. P. BIRAT and R. ALBERNY: *Report EUR 707 FR, Luxembourg* (1983)
- 22) R. VENTAVOLI, R. ALBERNY and J. P. BIRAT: *Report EUR 6136, II FR, Luxembourg* (1978)
- 23) H. S. MARR: *Proc. IUTAM Symposium, Cambridge U. K.* (1982)
- 24) Mizushima Steel Works, Kawasaki Steel Corporation: *Internal Report* (1971)
- 25) P. MARTY: *Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble* (1982)
- 26) J. P. BIRAT, P. NEU, J. C. DHUYVETTER and M. JEANNEAU: *Proc. 69th Steel making Conf., Pittsburgh* (1982)
- 27) T. TAKAHASHI and I. HAGIWARA: *Trans. ISIJ*, 16 (1976), p. 283
- 28) R. WIDDOWSON and H. S. MARR: *Sheffield Int. Cong. on Solidification and Casting Metals Soc. Book* (1979), p. 547
- 29) Y. SUNDBERG: *ASEA Review* (1971), p. 107
- 30) J. SZEKELY and R. T. YADOWA: *Metall. Trans.*, 3 (1972), p. 2673
- 31) C. OFFMAN: *Scandinavian J. Metallurgy*, 10 (1981), p. 25
- 32) P. NEU and J. C. GENNESON: *IRSID Report n. ACI 82/321* (1982)
- 33) P. VAN DEN HOVE: *Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble* (1982)
- 34) G. LESOULT and P. NEU: *Proc. IUTAM Symposium, Cambridge U. K.* (1982)
- 35) J. L. MEYER: *Thèse de Docteur-Ingénieur-Université de Grenoble* (1983)
- 36) D. DELAGE and R. ERNST: to be published in *Revue Générale de l'Electricité*
- 37) J. D. LAVERS: *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, IA-19 (1983), p. 633
- 38) J. D. LAVERS and P. P. BIRINGER: *Proc. of IUTAM Symposium, Cambridge U. K.* (1982)
- 39) J. SOMMERIA and R. MOREAU: *J. Fluid Mech.*, 118 (1982), p. 507
- 40) R. MASSE: *Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble* (1983)

-
- 41) Z. N. GETSELEV and G. I. MARTY NOV: Magnit. Hidrodi 1975 (1975), p. 106
- 42) M. GARNIER: Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Grenoble (1982)
- 43) H. K. KIEBERMANN: General Electric Corporate Research and Development
- 44) T. R. ANTHONY and H. E. CLINE: General Electric Corporate Research and Development
- 45) J. M. BIASSE and M. GARNIER: French patent n° 80-052-52 (1980)
- 46) J. M. BIASSE, R. ERNST and M. GARNIER: I. E. E. Trans. en Ind. Appl., 1A-19 (1983), p. 640
- 47) A. ALEMANY, J. P. ARGOUS, J. BARBET, M. IVANES, R. MOREAU and S. POINSOT: French patent n° 80-400-443-0 (1980)
- 48) A. ALEMANY, J. BARBET, Y. FAUTRELLE and R. MOREAU: French patent n° 77-17-296 (1977)
-