

電磁鑄造法の現状と将来



吉田 政博*

Electromagnetic Casting Up to Date and Future

Masahiro YOSHIDA

1. 緒 言

鋼の連続鑄造は、1950年のMannesmann式連鑄機に始まるとされているが¹⁾、アルミニウムの連続鑄造は、1935年のAlcoa, VLM (Vereinigte Leichtmetallwerke GmbH)のDC (Direct Chill) 鑄造にその始まりを見ることができる²⁾。以来50年、アルミニウム連鑄技術は著しい発展を遂げ、1960年代にはHot-Top鑄造法および本稿の主題である電磁鑄造法 (Electromagnetic Casting, 以後略してEMC) が開発され、また現在鉄鋼分野で開発が進められている水平鑄造法、溶湯圧延法も、ほぼこの時期に実用化の研究が行われている。1970年代以降、これらの鑄造プロセスは完成された技術として非鉄分野では工業ベースで順調に稼働している。

アルミニウム分野で、このように多くの鑄造プロセスの開発研究が行われ、その工業化が早かつたのは低融点で溶湯が扱いやすく、熱伝導性が良好なことから、比較的簡単な鑄型構造、冷却システムで鑄造が可能であつたためと考えられる。しかし、最近の鉄鋼関連技術の進歩、優れた耐火材料の開発は、非鉄と同様なプロセスの実現を可能としており、省エネ・省力の時代の流れとも合致して、非鉄で実用化された各種鑄造プロセスの鉄鋼分野での実用化の研究が盛んになつている。水平鑄造法は既に実用化の域に達しており³⁾、ハズレー法 (双ベルト法)、ハンター法および3C法 (Continuous Casting between Cylinders) (いずれも双ロール法) などの薄板連鑄、急冷連鑄の研究も実用化目前の状態にまできている⁴⁾。

各種鑄造プロセスの中でまだ鉄鋼では適用されていない鑄造法がある。ソ連で開発されたEMCがそれで、鑄型を使わない鑄造法として発表当時反響を呼んだプロセスである⁵⁾。鑄型の代わりに電磁気力を用いて溶湯柱を保持する方法は、無接触の自由表面で凝固が進行し、従来の鑄造の概念を一新するものである。最近、MHD (Magnetohydrodynamics) の冶金プロセスへの応用という面から、このEMCは鉄鋼の電磁攪拌などと共に成功例としてよく引用される⁶⁾⁷⁾。EMCは現在、非鉄分野で

のみ実用化されている技術であるが、連鑄の歴史を振り返ると非鉄の鑄造プロセスが鉄鋼分野へ波及する場合も多く、将来EMCが鋼の連鑄に適用される可能性もある。

本稿ではアルミニウムにおけるEMCの現状を紹介するとともに、EMCの原理、特徴および、今後のEMC技術の動向と鋼の連鑄への応用の可能性について述べる。

2. EMCの歴史と現状

2.1 EMCの歴史

EMCは1960年代の中央にGetselev⁸⁾によつて開発された。EMCによる最初の鑄塊は1966年に得られており、1969年には直径200~500mmのピレットが工業ベースで造塊されている⁹⁾。その後スラブにも適用され、300×1250~1550mm²の断面形状のものが実用化され、チェコスロバキア、ハンガリー、東独などの東欧諸国に波及した¹⁰⁾。西欧諸国では、米国のKaiserが1973年にライセンスを導入¹¹⁾、同年Alusuisseも技術導入¹²⁾したほか、Alcoa, Reynolds, Pechineyなどの大手アルミメーカーはいずれもこの時期に技術導入をしている。日本でも1972年10月に当時の三菱化成が導入している¹³⁾。

ソ連から導入したEMC技術は、スラブの場合、一連装技術が基本であつたようで¹⁴⁾、西欧諸国が要求する多連装あるいは大断面スラブの連鑄技術にはほど遠く、導入後も各社で技術開発が必要であつた。Alusuisseは1978年、米国の子会社Conalcoに初めて実用プラントを設置し、スラブサイズ500×1300mm²の4連装設備を稼働させた¹²⁾。Kaiserは1981年に500×1300mm²の5連装設備を完成させている¹¹⁾。現在、EMC技術を導入した中で、工業ベースに乗るまでに実用化したのはKaiserとAlusuisseの2社のみであり、いずれも基本技術導入後数年を要している。EMCの実用化にはコンピューターコントロールによる鑄造の自動化が不可欠であつたとされている¹⁵⁾¹⁶⁾。

AlusuisseのEMC技術は子会社Conalcoのほか、

昭和61年7月15日受付 (Received July 15, 1986) (依頼解説)

* 住友軽金属工業(株)技術研究所プロセス研究部 (Process Technology Department, Technical Research Laboratories, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., 3-1-12 Chitose Minato-ku Nagoya 455)

Alcoa, Reynolds にも供与されており, 1985 年時点で年間 45 万 t が Alusuisse EMC 技術で製造されている¹⁷⁾. 現在, 欧米, 特に米国の主要アルミメーカーは, 設備更新期に合わせて従来の DC 鋳造法から EMC への転換を計っており, 今や EMC は技術的完成度の高い鋳造法になったといえよう.

2.2 DC 鋳造法と EMC

代表的なアルミニウム連鋳法を比較したものを図 1 に示す. 図 1 (a) は従来の DC 鋳造法であり, 凝固は鋳型部一次冷却 (S_1) と直接水冷部二次冷却 (S_2) の二段階で進行する. アルミニウム鋳塊の表面欠陥 (ひきつき, 発汗等) はほとんど鋳型内凝固殻の部分で生じる¹⁸⁾. すなわち, インゴット表面からの抜熱量は鋳型部で形成されるエアギャップのためにメニスカス下数センチの領域で急激に減少し, 再溶出・逆偏析を生じて表面欠陥となる. 従って, 表面欠陥を防止するには凝固殻 S_1 の形成を極力抑えねばならず, 低湯面鋳造や図 1 (b), (c) に示す Hot-Top 鋳造法が考案された. 図 1 (b) は鋳型内の一次冷却部分を断熱性セラミックファイバーシートで被覆するもので, 主にスラブ用の Hot-Top 連鋳法として採用されている¹⁹⁾²⁰⁾. 図 1 (c) は鋳型上部を断熱材で置き換えたもので, 油潤滑を併用することにより良好な表面品質の鋳塊が得られている. この方法はピレット用 DC 連鋳法の主流になりつつある²¹⁾²²⁾.

図 1 (b), (c) の Hot-Top 連鋳法は二次冷却が主体の凝固になっているが, 鋳型冷却による凝固殻もわずかなではあるが存在しており, 表面欠陥は皆無ではない. 表面欠陥を無くすには, 究極的には鋳型を用いないことであり, 図 1 (d) の EMC はこれを実現した鋳造法である. 鋳型の代わりに電磁力によって溶湯部分を空間内に保持する. 凝固は二次冷却のみにより進行し, 他の連鋳法より鋳塊表層部の冷却速度が増大するため, 表面改

善のほか組織改善の効果もある.

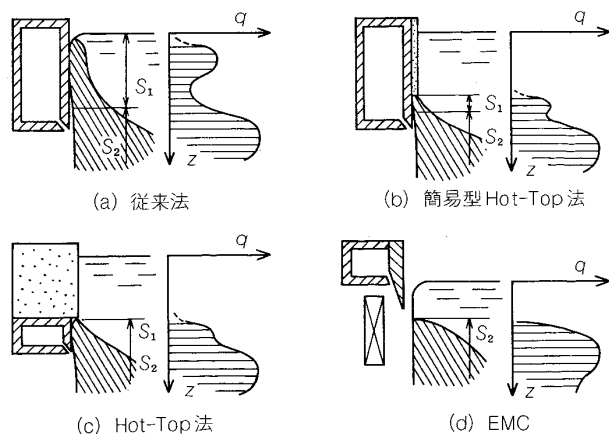
3. EMC の原理と理論解析

3.1 EMC の原理

電気の良い導体を交流磁場の中に置くと, 導体には渦電流が誘起される. 誘導加熱, 誘導溶解は渦電流によるジュール熱を利用するものであるが, EMC は渦電流と交流磁場との相互作用に基づく電磁気力 (ローレンツ力) を利用するものである.

図 2 に EMC の原理図を示す. コイルに高周波電流 J_0 を流すと, 交流磁場 H が発生すると同時に鋳塊表層にはコイル電流とは逆位相の渦電流 J (その深さは周波数 f , 鋳塊の電気伝導度 σ に依存する) が流れる. この渦電流は磁場との相互作用によってフレミングの左手則に基づく電磁気力 F (この場合鋳塊中心方向) が働き, 溶湯柱を側面から保持する. この時, 鋳塊に冷却水を当て, 引抜き量と注湯量をバランスさせれば, 連鋳操作が可能になる. しかし, このままでは交流磁場内の溶湯柱は山型に盛り上がり, 形状が不安定である. 所定の安定した断面形状を得るには図 2 (b) に示すように, 溶湯柱側面を垂直に保持してやる必要があり, そのために磁場遮蔽スクリーンが設けられている. これは磁場を上方ほど減衰させて溶湯静圧 (直線的に変化) とほぼ等しくなるよう電磁気力分布を作るものである. また, 溶湯内の過度の流動を抑えて, 形状を安定化する働きもある.

保持すべき溶湯静圧は湯面レベルおよび固液界面位置によって変化するため, 湯面コントロールと冷却コントロールが重要となる. 特に, スラブの場合は平面部 (長辺部, 短辺部) とコーナー部では冷却強度が異なり, 鋳塊周囲の固液界面位置を均一化するための工夫が必要となる.



q: インゴット表面からの抜熱量 z: メニスカスからの距離
S₁: 鋳型冷却による凝固殻 S₂: 直接水冷による凝固殻

図 1 アルミニウム連続鋳造法の比較

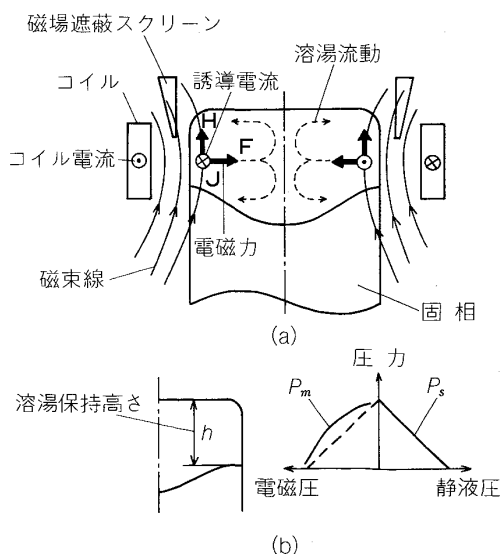


図 2 EMC の原理図

3.2 磁場解析

EMC の理論的解析には、電磁場が電磁気力による溶湯流動場と相互に影響を及ぼし合うため、電磁流体力学的取り扱いが必要となる⁶⁾。すなわち流動場の支配方程式である Navier-Stokes 式と、電磁場の支配方程式である Maxwell 式を連立して解かねばならない。しかし、実際の解析では流動場を無視して、まず電磁場のみを解析し、得られた電磁気力分布から流動場を推定する場合が多い。

Maxwell の基礎式は (1)～(4) 式で表される。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

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

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

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は電場、 $\mathbf{H}$ は磁場、 $\mathbf{J}$ は電流密度、 μ_0 は透磁率、 t は時間、 σ は電気伝導度である。

(1)～(4) 式を所定の境界条件下で解けば、電流密度 $\mathbf{J}$ 、磁場強さ $\mathbf{H}$ が求まり、電磁気力 (体積力) $\mathbf{F}$ は、(5) 式から計算することができる。

$$\mathbf{F} = \mu_0 \mathbf{J} \times \mathbf{H} \quad (5)$$

誘導溶解炉、アルミニウム電解精錬、レビテーションメルティングについては磁場解析および電磁場内の流動解析が SZEKELY ら²³⁾、EVANS ら²⁴⁾、LAVERS ら²⁵⁾ によつて行われているが、EMC の解析も基本的には同じものとなる。EMC に関連した解析例には図 3 に示すモ

デルがある。

(1) 一次元および二次元モデルの解析解

図 3 (a) は無限長ソレノイドを仮定した平行磁場内に置かれた導体の一次元モデルであり、SIMPSON²⁶⁾ により解析されている。

ピレット表面に交流磁場 H_0 があると、半径 r の位置での時間平均の磁場強さ H 、電流密度 J 、電磁気力 (体積力) F は、それぞれ (6), (7), (8) 式で表される。

$$H = H_0 \frac{\text{ber}(\alpha R) + j \cdot \text{bei}(\alpha R)}{\text{ber}(\alpha) + j \cdot \text{bei}(\alpha)} \quad (6)$$

$$J = -J \frac{2}{\delta} H_0 \frac{\text{ber}'(\alpha R) + j \cdot \text{bei}'(\alpha R)}{\text{ber}(\alpha) + j \cdot \text{bei}(\alpha)} \quad (7)$$

$$F = \frac{\mu_0 H_0^2}{a} \left\{ \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\text{ber}(\alpha R) \cdot \text{ber}'(\alpha R) + \text{bei}(\alpha R) \cdot \text{bei}'(\alpha R)}{\text{ber}^2(\alpha) + \text{bei}^2(\alpha)} \right. \quad (8)$$

ここで、 $R=r/a$ 、 $\alpha=\sqrt{2}a/\delta$ であり、 δ は (9) 式で示される電流浸透深さである。ただし、 $\text{ber}(x)$ 、 $\text{bei}(x)$ は Kelvin 関数であり $\text{ber}'(x)$ 、 $\text{bei}'(x)$ はその微分を表す。

$$\delta = \sqrt{2/\mu_0 \omega \sigma} \quad (9)$$

ここで ω は角周波数である。

(8) 式で最大の体積力はピレット表面 ($R=1$) で生じ、(10) 式で与えられる。

$$F_0 = \frac{\mu_0 H_0^2}{a} \phi \quad (10)$$

ここで、 ϕ は (11) 式で表され、ピレット径、電気伝導度、周波数などの装置変数の関数である。

$$\phi = \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\text{ber}(\alpha) \cdot \text{ber}'(\alpha) + \text{bei}(\alpha) \cdot \text{bei}'(\alpha)}{\text{ber}^2(\alpha) + \text{bei}^2(\alpha)} \quad (11)$$

体積力が求まるとピレット内に働く電磁圧分布を求めることができる。ピレット表面と半径 R の電磁圧差 P は (12) 式で与えられ、その最大値 P_0 は中心 ($R=0$) に位置し、(13) 式となる。

$$P = \frac{\mu_0 H_0^2}{4} \cdot \left\{ 1 - \frac{\text{ber}^2(\alpha R) + \text{bei}^2(\alpha R)}{\text{ber}^2(\alpha) + \text{bei}^2(\alpha)} \right\} \quad (12)$$

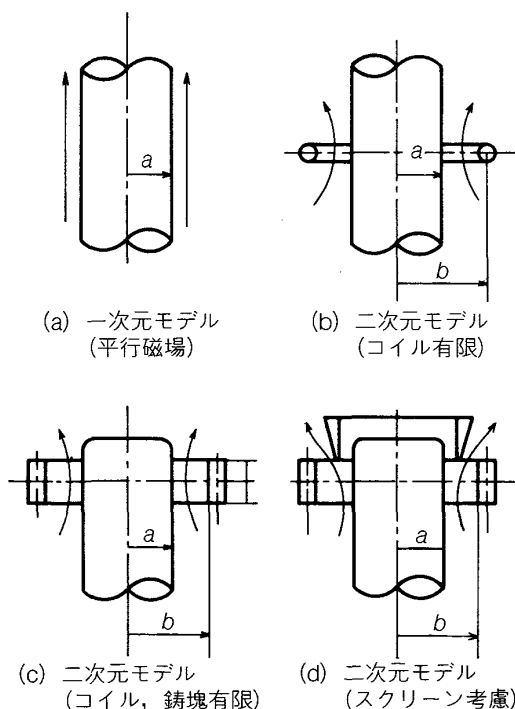
$$P_0 = \frac{\mu_0 H_0^2}{4} \phi \quad (13)$$

ここで、 ϕ は ϕ と同様に α によつて変化する関数であり、(14) 式で表される。

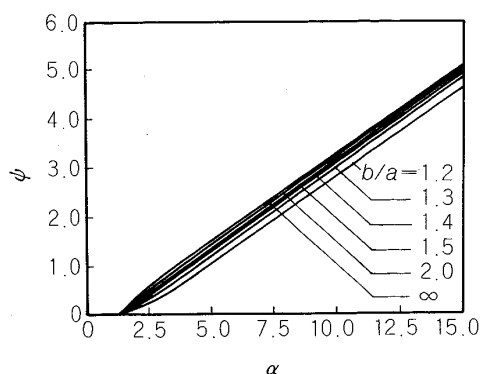
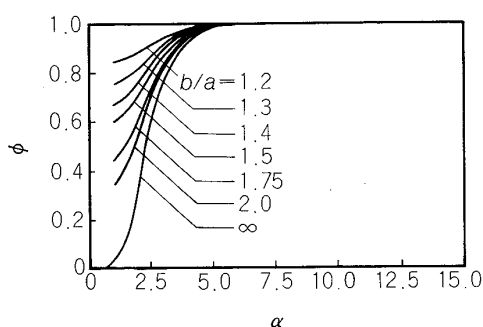
$$\phi = 1 - \frac{1}{\text{ber}^2(\alpha) + \text{bei}^2(\alpha)} \quad (14)$$

LAVERS ら²⁷⁾ は図 3 (b) の 1 ターンコイルによる二次元解析モデルで、一次元解析と同様な整理の仕方では体積力、電磁圧を (15), (16) 式のように求めている。

$$F = \frac{\mu_0 H_z^2(a, z)}{a} \phi(a, z) \quad (15)$$



a: インゴット径 b: コイル径
図3 EMCの磁場解析モデル

(a) 関数 $\phi(\alpha, 0)$ (b) 関数 $\phi(\alpha, 0)$ 図4 有限コイルの EMC 二次元モデルにおける関数 $\phi(\alpha, 0)$, $\phi(\alpha, 0)$ ²⁷⁾

$$P_0 = \frac{\mu_0 H_z^2(a, z)}{4} \phi(a, z) \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $\phi(a, z)$, $\phi(a, z)$ は (11), (14) 式を二次元に拡張したものである。コイル中央 ($z=0$) での $\phi(a, 0)$, $\phi(a, 0)$ を b/a をパラメータとして計算した結果を図 4 (a), (b) に示す。一次元の解は $b/a = \infty$ の場合に相当しており、 b/a が 2 以上では、 ϕ は一次元の解とほとんど一致していることがわかる。また、 ϕ は α が 7 以上の時、 b/a が変化しても ϕ はほとんど変化せず、電磁圧の最大値は $P_0 = \mu_0 H_0^2/4$ となる。

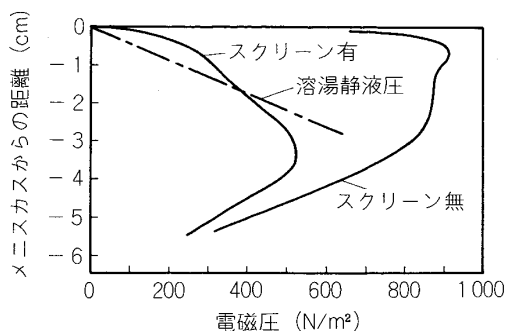
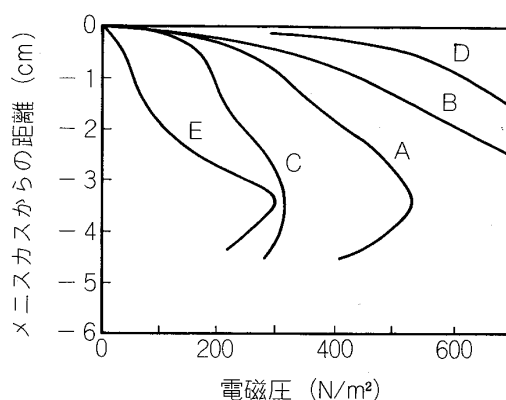
GETSELEV ら²⁸⁾²⁹⁾ は図 3 (b) に示す二次元解析のほか、ホロービレットの磁場解析も行っている。また、EMC に関連した流動解析の報告例もある³⁰⁾。

(2) 数値計算

解析的手法は電気パラメータや鋳塊寸法が磁場強さ、体積力に及ぼす影響を明確にするが、図 3 (d) に示す磁場遮断スクリーンの効果を考慮することは難しい。スクリーンの有無、スクリーンやコイルの形状および、それらの相対的位置関係などが磁場分布、体積力分布に及ぼす影響を知るには数値計算が必要となる。

EMC の数値解析例は少なく、LAVERS³¹⁾ が報告しているのみである。

図 5 は直径 200 mm のビレット EMC において、スクリーンの有無が電磁圧分布に及ぼす影響を示すものであ

図5 磁場遮断スクリーン有無による鋳塊表面の電磁圧分布数値計算例³¹⁾

A : $f=3\,000\text{ Hz}$, $d=24\text{ cm}$, B : $f=3\,000\text{ Hz}$, $d=22.5\text{ cm}$,
C : $f=3\,000\text{ Hz}$, $d=26\text{ cm}$, D : $f=1\,000\text{ Hz}$, $d=24\text{ cm}$,
E : $f=10\,000\text{ Hz}$, $d=24\text{ cm}$

図6 電磁圧分布に及ぼす周波数 f , コイル内径 d の影響³¹⁾

る。スクリーンが無い場合、メニスカス近傍で最大電磁圧となつているのに対して、スクリーンを挿入するとメニスカス部の電磁圧が急激に減少し、最大電磁圧は下方部分に移行する。適正なスクリーン位置であれば、図中の直線で示される溶湯静液圧とほぼバランスする圧力分布となる。

図 6 は図 5 と同じ状況下で、コイル内径および周波数が電磁圧分布に及ぼす影響を調べたものである。コイル内径、すなわちコイルと鋳塊間の距離は電磁圧分布に大きく影響することがわかる。周波数は電流浸透深さに関係し、高周波ほど磁場遮断効果が增大する。周波数に合った適切なスクリーン材質 (電気伝導度) を選択する必要がある。

有限要素法による EMC 解析例を図 7 に示す。図 7 (a), (b) はスクリーン有無による磁束線分布の計算結果を示している。

数値解の結果は電気パラメータ、装置構造の変化が系に及ぼす影響を適切に表しており、装置設計に有用な指針を与える。しかし、溶湯流動が考慮されておらず、厳密な解析という点ではまだ問題を残している。電磁場

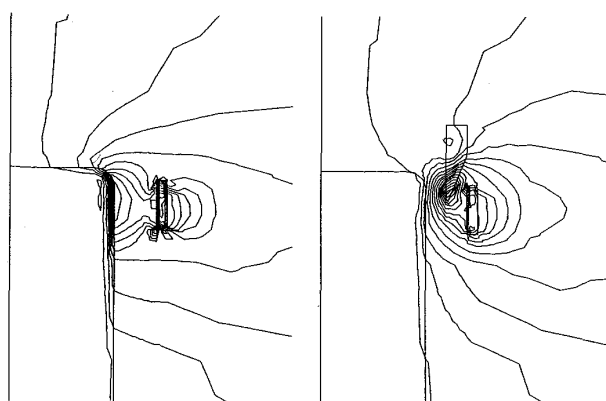


図7 有限要素法による磁場解析例 (磁束線分布, 位相 $wt=0$ 時)

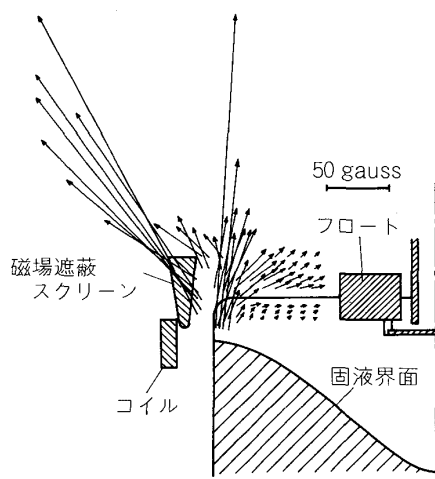


図8 $\phi 345$ mm ビレット EMC における磁束密度の実測例³²⁾ (周波数 3 000 Hz, 電流 4 950 A)

と流動場を組合わせたモデルの開発が今後の課題といえる。

VIVES ら³²⁾ は溶湯中での磁場, 電流密度, 流速測定センサーを開発し, 実際の EMC におけるこれらの実測値を報告している。図8は 2 000 Hz, 4 950 A の電気条件下において, 直径 345 mm のビレット EMC を行つた場合の磁束密度分布を示している。溶湯柱側面で 250 gauss (実効値) の磁束密度実測値を得ている。

アルミニウムの EMC では, 強固な酸化皮膜の存在も溶湯保持に有効に作用しているといわれており³³⁾, 計算上から得られる磁場強度よりも低い値で無接触鑄造が可能と推察される。

4. EMC の装置と操作条件

図9にソ連³⁴⁾, Kaiser³⁵⁾, Alusuisse³⁶⁾が採用している代表的な EMC 鑄型の例を示す。EMC 鑄型の基本的構成は同じであり, ステンレス製スクリーン, 銅製の1

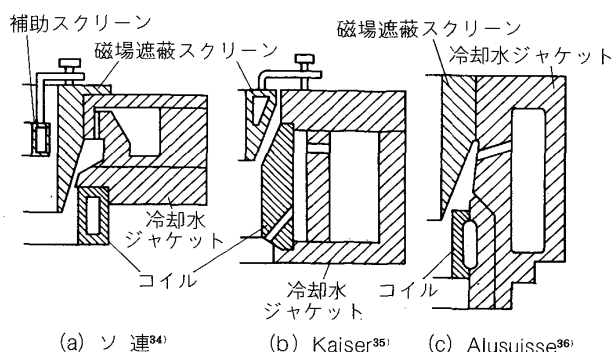


図9 代表的 EMC 鑄型の構造比較

ターンコイル, 非導電性材 (通常, 有機樹脂) の冷却水ジャケットから成る。初期のソ連タイプのコイルは水冷銅パイプを用いていたが, Kaiser, Alusuisse 式は水冷銅板を用いており, 装置がコンパクト化している。特に, Kaiser 式では冷却水ジャケットの内壁をコイルとして兼用しており, 外観上は従来の DC 鑄型と変わらない構造となっている。

スクリーンの位置は EMC を実施する場合の重要なポイントであり, 図9 (a), (b) では高さを変えられる微調整機構を有している。Alusuisse 式では適正位置にスクリーンを固定している。なお, スクリーンは誘導加熱されるため冷却が必須である。

スクリーンは必要不可欠なものとされているが, コイル形状, 形態によつてはスクリーンを無くすることができる。すなわち, テーパー (上開き) 付きコイルの採用や, コイル上端部の電流密度を減少させることにより, スクリーンを有する時と同様な効果を得ることが可能とされている³⁷⁾。

EMC の代表的操作条件を表1に示す。周波数はアルミニウムの場合, 2 000~3 000 Hz である。スクリーンの材質は, この周波数帯ではステンレスが多く用いられるが, さらに低い周波数ではアルミニウムあるいは銅も使用可能である。溶湯保持高さは 30~60 mm の範囲で, これを保持するのに必要なコイル電流は 3 500~5 000 A 程度である。実質的に必要な電力は 35~50 kW と比較的小さく, アルミニウム 1 t 当たりの電力量は 10~30 kWh/t 程度とされている¹¹⁾。

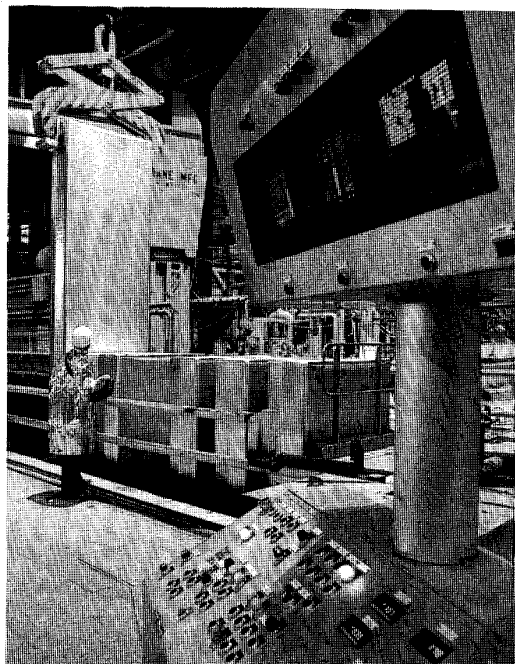
EMC 連鑄操作は従来法と大差はない。EMC 鑄型内に底台をセット後, コイルに電流を流し, 注湯を開始する。湯面レベルが所定位置に達したら底台を降下させる。EMC では, この鑄造初期の形状安定化が最も重要であり, 以後の鑄造の良否に影響する。

固液界面の位置は磁場強さが最大の位置, すなわちコイル高さの中央付近に一致させるのが良く, そのための冷却条件, 鑄造条件のコントロールが重要となる。

実用 EMC プラントの例を写真1に示す。これは Alcoa のスラブ用のプラントで, Alusuisse 技術による

表 1 代表的な EMC 操作条件

铸塊サイズ	コイル電流 (A)	コイル電圧 (V)	周 波 数 (Hz)	電 力 (kW)	保持ヘッド (mm)
300×1100	5000	55	2000	40~50	55
φ340	4970	29	2000	35	29
482×1143	—	40~50	2400~3000	—	38
φ345	3400~3800	—	2500	—	—

写真1 実用 EMC プラントの例 (Alcoa)³⁸⁾ (Alusuisse 技術による)

ものである³⁸⁾。多連装の場合、コイル間の磁場の干渉問題が心配されるが、スラブ間隔は従来法と同程度となっており、EMC 铸型のスペース的制約はないようである。なお、最近の EMC プラントは大型化が進み、Kaiser では 720 mm 厚みの超大型スラブを EMC で铸造している³⁹⁾。

5. EMC の応用

5.1 銅および鉄鋼分野での EMC

アルミニウム以外での EMC の適用としては、Olin による銅スラブ EMC の実施例がある。Olin は 1978 年にソ連から基本ライセンスを導入し、1982 年には商用サイズの銅合金スラブの EMC に成功している⁴⁰⁾。写真 2 に C638 銅合金 EMC スラブを示す。密度がアルミニウムの 3 倍以上の銅でも無接触铸造が実現されており、適正な操作条件、铸型構造によつては高密度金属への EMC 適用も十分可能なことを示唆している。

アルミニウム、銅、鋼に EMC を適用する場合に参考となるパラメーターを表 2 に示す。括弧内の数字はアルミニウムを 1 とした時の比を示している。密度がアルミニウムの約 3 倍である銅、鋼は、同じ保持高さの場合、

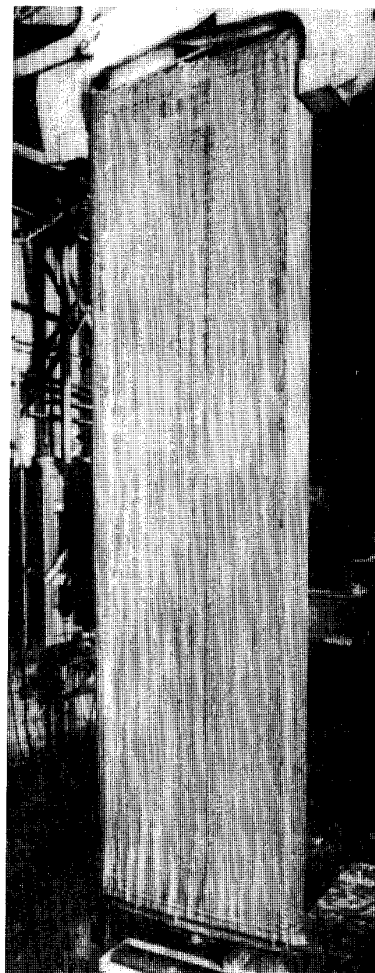
写真2 銅合金スラブにおける EMC (Olin)⁴⁰⁾

表 2 アルミニウム、銅、鋼における EMC の比較

項 目	アルミニウム	銅	鋼
ρ (g/cm ³)	2.4 (1)	7.8 (3.3)	6.9 (2.9)
ρ_s ($\mu\Omega$ cm)	25 (1)	20 (0.8)	150 (6)
δ (mm)	$f=1\text{ kHz}$ 3 10	8.0 (1.7) 4.6 (1) 2.5 (0.5)	7.1 (1.5) 4.1 (0.9) 2.2 (0.5)
P (gf/cm ²)	$h=5\text{ cm}$ 12 10 20	39 (3.3) 78 (6.5) 156 (13)	34.5 (2.9) 69 (5.8) 138 (11.5)
B (gauss)	$h=5\text{ cm}$ 540 10 20	980 (1.8) 1390 (2.5) 1960 (3.6)	920 (1.7) 1300 (2.4) 1840 (3.4)

ρ : 密度, ρ_s : 比抵抗, δ : 電流浸透深さ, P : 静液圧(電磁圧),
 B : 磁束密度, f : 周波数, h : 溶湯保持高さ
 () 内の数値はアルミニウムを基準(=1)とした場合の比

約3倍の電磁圧が必要となる。しかし、鑄型が長い銅の場合、保持高さはその分だけ長くなり、実際に無接触鑄造を実現するにはアルミニウムの数倍以上の電磁圧が必要となろう。

周波数は、アルミニウムの EMC における電流浸透深さが 4.6 mm となる 3 kHz を基準とすれば、銅ではほぼ同じ周波数帯が使用できる。銅は比抵抗が大きいためより高い周波数を用いる必要がある。

必要磁場強さは (13), (16) 式からわかるように電磁圧の平方根に比例する。アルミニウムを 5 cm 保持するのに必要な磁束密度は 540 gauss (実効値) であるが、銅を 5 cm 保持するには 920 gauss, 20 cm 保持するには 1840 gauss であり、アルミニウムの 3~4 倍の磁束密度となる。銅の場合も銅と同様な値となる。

このように電気的面からいえば、鉄鋼でも EMC は十分実現可能である。しかしながら、熱伝導特性、高い融点に起因する鑄造方法、冷却方法の違いなどがより問題になると考える。さらに、銅の鑄造速度はアルミニウムの 10 倍以上であり、湯面レベルの変動抑制、固液界面位置の均一化が図れるかが重要な課題となろう。現時点では、鉄鋼の高い生産性を維持する EMC プロセスの開発はかなり難しいと考えられる。ただ、鑄造速度を落として生産性を犠牲にしても経済的に成り立つ特殊材料があれば、EMC 化のメリットはあり得よう。

5.2 EMC の応用

アルミニウムの EMC のように完全無接触を前提とすれば上述のような議論になるが、従来法に EMC を付加的に応用するとすれば状況は異なる。たとえば、鑄型内凝固殻と鑄型壁との接触圧を電磁氣的に低減させ (電磁加圧)、鑄型オシレーション、パウダー等の負荷を軽減できれば、鑄肌改善、表面割れ対策に役立つ可能性がある。既に、このような発想で、アルミニウムの Hot-Top 連鑄では鑄型部を気体 (主に空気) で加圧し、著しい鑄肌改善効果を得ている⁴¹⁾⁴²⁾。また、電磁力を局部的 (コーナー部、短辺部) に作用させることも可能であろう。

水平連鑄に EMC を適用することも原理的には不可能ではない。溶湯静圧は堅型連鑄に比較して小さく、設備

的にもコンパクト化が期待できる。ただ、上下での静圧差、形状制御の点で電磁力の与え方が難しくなる。

浅井ら⁴³⁾は静磁場通電方式による水平 EMC を報告しており、まだ小径のビレット ($\phi 10$ mm 以下) の段階であるが、薄板への適用も考えられ注目される。

EMC を引き上げ式連鑄に適用した例として GE の GELEC (GE Levitation Casting) プロセスがある⁴⁴⁾⁴⁵⁾。図 10 は GELEC プロセスを模式的に示したものである。三相交流による移動磁場を用いて、直径 22 mm の銅、アルミニウム棒の鑄造例を示している。鑄塊と鑄型の間隙はわずかであり (0.1 mm 以下)、溶湯保持高さは 150 mm としている。

この他、堅型でストリップを製造する EMC プロセスも提案されている⁴⁶⁾。電磁気力を鑄造用鑄型に適用して、金属溶湯流を制御する方法は新しい冶金プロセスとして、今後、研究開発が盛んになるものと思われる。

6. 結 言

アルミニウムにおける EMC は 20 年以上前に開発された技術であるが、近年、技術的面および経済的面から従来法に取って代わり得るプロセスとして評価され、工業ベースで順調に稼働している。この EMC は銅分野への適用が試みられており、いずれは鉄鋼の分野にも適用される可能性がある。しかし現段階では、技術的問題、生産性・経済性等、検討すべき課題が多く、アルミニウムのように既存のプロセスに直ちに置き代わるとは考えにくい。しかし、電磁攪拌技術がそうであつたように、現状の連鑄材品質改善の一つとして電磁気力を利用する、あるいは鑄型の制約を軽減するために EMC 的技術を応用することは十分考えられる。また、水平連鑄、薄板連鑄、急冷凝固法など、堅型連鑄の代替省エネプロセス検討の中で EMC が利用されることもあり得よう。

近年、高保持力永久磁石、超伝導磁石の開発により強力な直流磁場も容易に得られるようになった。交流磁場のみならず、直流磁場を組み合わせた MHD 技術の応用研究が進み、プラズマ流を電磁気力で封じ込めようとする次世代には、冶金プロセスは一変している可能性がある。日本鉄鋼協会では既に、電磁気冶金の基礎研究部会

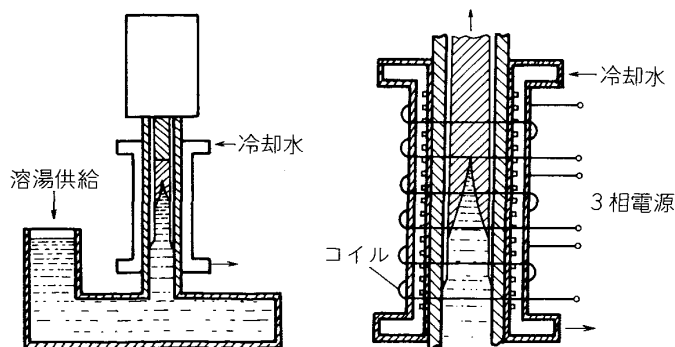


図10 引き上げ式 EMC (GELEC プロセス)⁴⁶⁾

が発足し、MHD の冶金応用に関する基礎研究に着手したと聞いている。今後の発展に期待したい。

最後に、鋼の連铸に携わったこともなく、電磁気冶金にも浅学な身でありながら、本稿の執筆をお引き受けすることとなったが、本稿によつて少しでも多くの方々に電磁気冶金、EMC 技術に興味を持っていただけたなら幸いである。

文 献

- 1) 郡司好喜: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 934
- 2) Hall-He'roult Centennial First Century of Aluminum Process Technology 1886-1986 (1986), p. 71 [TMS-AIME]
- 3) 野崎 努, 糸山誓司: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 784
- 4) 鉄と鋼, 71 (1985), A197~A253
- 5) T. R. PRITCHETT: Light Metal Age (1973) 12, p. 21
- 6) 浅井滋生: 日本金属学会会報, 22 (1983), p. 1029
- 7) M. GARNIER: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1846
- 8) 特許第 30720 号
- 9) F. I. KVANOV, Z. N. GETSELEV, G. V. CHEREPOK and V. I. YAKOVLEV: Tsvethn. Met. (1974) 4, p. 50
- 10) J. CSERNEY-BALINT: e'vfolyam, 20 (1983), p. 373
- 11) T. R. PRITCHETT: Light Metal Age (1981) 10, p. 12
- 12) H. M. DILLON, G. B. LECONTE and D. W. WORLLEDGE: Light Metal Age (1979) 6, p. 19
- 13) 三田村康二, 杉崎英雄, 青山 堯, 白根沢道明: 第 49 回 軽金属学会秋期大会概要集 (1975), p. 19
- 14) K. BUXMANN, W. HALLER and J. BOSSHARD: Tsvethn. Met. (1980), p. 73
- 15) D. G. GOODRICH, J. L. DASSEL and R. M. SHOGREN: Light Metals (1982), p. 781 [TMS-AIME]
- 16) R. SAUTEBIN and W. HALLER: Light Metals (1985), p. 1301 [TMS-AIME]
- 17) J. C. WEBER and R. SAUTEBIN: Light Metals (1986), p. 869 [TMS-AIME]
- 18) K. BAXMANN: Light Metals (1978), p. 313 [TMS-AIME]
- 19) W. J. BERGMANN: Aluminium, 51 (1975), p. 336
- 20) US Patent 4558730
- 21) W. J. BERGMANN: Metall. Trans., 1 (1970), p. 3361
- 22) 軽金属学会研究委員会, 研究部会報告書 (1981) 6, p. 7
- 23) J. SZEKELY and K. NAKANISHI: Metall. Trans., 6B (1975), p. 245
- 24) S. D. LYMPANY, J. W. EVANS and R. MOREAU: Proc. of IUTAM Symposium, Cambridge, UK (1982), p. 15
- 25) J. D. LAVERS and P. P. BIRINGER: 同上, p. 62
- 26) P. G. SIMPSON: Induction Heating Coil and System Design (1960) [McGraw-Hill]
- 27) J. D. LAVERS: IEEE. Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meet. 15th (1980), p. 949
- 28) Z. N. GETSELEV and G. N. MARTYNOV: Magnit. Gidrodi. (1968) 1, p. 150
- 29) Z. N. GETSELEV and G. N. MARTYNOV: Magnit. Gidrodi. (1976) 1, p. 121
- 30) Z. N. GETSELEV and G. N. MARTYNOV: Magnit. Gidrodi. (1975) 2, p. 106
- 31) J. D. LAVERS: IEEE. Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meet. 17th (1982), p. 954
- 32) C. VIVES and R. RICOU: Proc. of IUTAM Symposium, Cambridge, UK (1982), p. 24
- 33) V. I. DOBATKIN and G. A. BALAKHONTSEV: Splavy Tsvethykh Metallov (1972), p. 42
- 34) US Patent 3605865
- 35) US Patent 4004631
- 36) 特開昭 60-203342
- 37) US Patent 3985179
- 38) Alcoa Annual Report (1983), p. 8
- 39) F. L. CHURCH: Modern Metals (1986) 5, p. 63
- 40) D. E. TYLER: Proc. of Copper'83, London, 3 (1983), p. 22-1
- 41) S. YANAGIMOTO and R. MITAMURA: Light Metal Age (1984) 6, p. 12
- 42) J. D. FAUNCE, F. E. WAGSTAFF and H. SHAW: Light Metals (1984), p. 1145 [TMS-AIME]
- 43) 浅井滋生, 小塚敏之: 鉄と鋼, 71 (1985), S 1640
- 44) Y. V. MURTY and J. P. FAUNCE: J. Met., 36 (1984) 12, p. 48
- 45) 特公昭 61-16215
- 46) 特開昭 57-85649