



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-6

連続鋳造プロセスにおける電磁力適用技術の発展

Development of Applied Electromagnetic Technologies in Continuous Casting Process

竹内栄一
Eiichi Takeuchi

新日本製鐵(株) 技術開発本部
広畑技術研究部 部長

1 はじめに

世界に誇る高生産性と高品質を併せ持つ日本の連続鋳造プロセス。これを支える我が国独自のキーテクノロジーの一つが電磁力利用技術である。

連鋳プロセスへの電磁力適用の歴史は、鋳片内質改善を目的としたストランドプールでの電磁攪拌(移動磁界)技術に始まった。等軸晶率増加を可能にしたこの技術は、中心偏析、ポロシティ、さらにはリジング対策に大きな効果を発揮し、黎明期における連鋳化比率向上に大きな役割を果たした。その後、電磁力の利用は鋳型内電磁攪拌や鋳型内電磁ブレーキの開発と実用化、これら技術の高度利用、そして電磁鋳造技術(EMC)の開発など、大きな発展を遂げることになる。

本稿では、その発展を支えた連鋳プロセスメタラジーに関する多くの知見、電磁場・流体解析技術、およびコイル・電源などの装置技術の進歩について概説すると共に、代表的な電磁力利用技術の特徴について紹介する。

2 電磁力利用技術発展を支えた技術背景

電磁力利用技術のコアとなる電磁流体力学(MHD)は原子力、核融合、プラズマ工学などの先端分野において、主として欧米を中心に発達した学問体系である。これを冶金プロセスへ適用する試みは1970年代から垣間見られるが、体系的な技術整理がなされたのは80年初頭である¹⁾。しかし、この分野で既に先行していた欧米ではなく、我が国において、しかも連続鋳造という分野において、電磁力の適用が大きく進んだ背景には以下の要因があったと言える。

①鉄鋼産業における生産性、品質競争力からの大きなニーズ

この数十年、鉄鋼製品の品質要求の高度化、またグローバルな製造コスト競争力の強化、さらには環境・省エネルギーの視点からのプロセス簡略化のニーズが高まった。例えば、我

が国の鉄鋼需要を牽引してきた造船、自動車用鋼板において、高纯净度鋼、無欠陥鋳片の高度な製造技術確立が進められると共に、高速鋳造技術の確立、連続鋳造一熱間圧延の直行化、異鋼種連々鋳技術などの高効率化が追求された。

80年初めに60%程度であった連鋳化比率が僅か10年の間に、急速に上昇すると共に、100%近くになった状態においてもそのポテンシャルを十分に発揮し尽くす段階で電磁力利用技術が必要とされたのである(図1)。

一例として、図2に鋳片表層部に発生する欠陥を模式的に示したが²⁾、圧延後に製品表面疵となるこれら欠陥の無い鋳片を製造することは、自動車用鋼板をはじめとする高品位薄板鋼板の提供に当たって極めて重要な課題であった。後述する電磁力利用技術の大半はこの課題解決を目指して開発された。

②凝固基礎メタラジーや連鋳プロセスメタラジーに関する知見の蓄積

例えば高速鋳造技術に関して、鋳型内潤滑、冷却、流動と

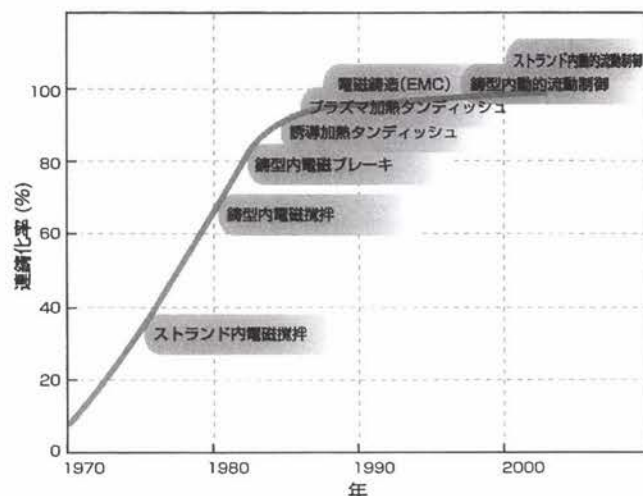


図1 連続鋳造比率の増加と電磁力適用技術の変遷

いう切り口でこれまでの報告例を振り返ってみるとおおよそ次のようになる。鋳型内潤滑に必要なモールドフラックス消費量はフラックス物性や鋳型振動モード³⁾の影響を受ける。鋳型内冷却も鋳片表面の縦割れ防止にとって重要であり、縦割れの発生しやすい鋼種の鋳造においては鋳造速度の増加と共に上昇する鋳型熱流束を一定値以下に抑える必要がある⁴⁾。熱流束を制御するにはフラックスの熱伝導や輻射(結晶析出利用)⁵⁾、固相フラックスフィルムと鋳型表面の接触熱抵抗制御⁶⁾などが有効である。また、幅方向に均一な厚みのシェルの形成が高速鋳造に有利である⁷⁾。鋳型内流動の点から見ると、浸漬ノズルから吐出される溶鋼の偏流は凝固シェルの再溶解、すなわちブレイクアウトに繋がる危険性があるばかりでなく、鋳片品質に悪影響を及ぼす。

次に、高品質鋳片製造に関するレビューを紐解くと、高纯净度鋼の溶製、保持を前提に、溶鋼中の介在物⁸⁾、気泡⁹⁾や巻き込まれたモールドフラックス¹⁰⁾の連鋳鋳型内プール内さらにはストランドプール内への侵入防止、そして流動による凝固シェル前面での捕捉防止^{11,12)}が重要であることが知られている。

プロセスの基盤研究としては、オシレーションマークの生成機構¹³⁾、モールドフラックスの流入機構¹⁴⁾、縦割れの発生機構^{15,16)}などがある。また、凝固基礎の分野においても、等軸晶の生成機構¹⁷⁾、介在物の生成¹⁸⁾と凝集¹⁹⁾、モールドフラックスの基礎物性²⁰⁾や溶融・結晶析出過程²¹⁾などについても豊富な知見の累積がある。

これらは、プロセスの能力向上や課題解決に向けて得られた成果であると共に、要素現象の解釈を深める上での知見でもあるが、非接触制御が可能な種々の機能の電磁力適用と結びつくことによって、新しいシーズ技術につながっていった。

③電磁力、および流体解析の高度シミュレーション技術の台頭と発展

連続鋳造プロセス、特にタンディッシュや鋳型内の溶鋼流動は一般に乱流状態にある。70年後半から80年代初めにかけての $k-\epsilon$ モデルをベースとした汎用プログラムの台頭はこの分野の解析に大きな進歩をもたらす第一歩となった。80年代半ばになると移動磁界による電磁攪拌や、直流磁界

による電磁ブレーキの実用化がスタートしたが、操作条件の最適化のために、乱流モデルの適用が検討され始めた。初期は体積力の項に、その位置における磁場と流れ場のベクトル積であるローレンツ力を代入、系全体の流れ場を予測するレベルからスタートしたが、実験的な評価予測法が無い状況においてはプロセス設計を行うための新しい手法となった。加えて、特に電磁ブレーキの効果を予測する上で誘導電流の回路や電気的境界条件に対する厳密な取り扱いが重要である事が議論された²²⁾。

80年代半ばを過ぎると電磁場解析の汎用プログラムが登場すると共に、電磁力利用技術においても、装置設計の面から、特にコイル形状、鋳型など周辺機器の影響の予測ができるようになった。一般に連続鋳造プロセスの系では磁気レイノルズ数が1より十分小さく、つまり誘導電流によって発生する二次磁場が印加したされた1次磁場の大きさに影響を及ぼさないという前提の下に、まず磁場分布を電磁場計算により求めておき、得られた電磁場を流体に与え、流れ場を計算するという手法が主流である。図3に示すように、移動磁界では、時間、空間的に変動する磁場の影響が考慮できるようになり、流れ場の予測精度がより高まった^{23,24)}。

90年代になると乱流の時間変化の予測のためLES (Large Eddy Simulation) 法の適用が試みられるようになり、また自由表面の記述のためにMAC (Marker and Cell) 法の適用も進められた。流れによる自由表面形状の動的シミュレーションが行われ、その精度も確認されている²⁵⁾。

さらに最近では電磁力を印加した際の流れと、その熱流動の影響を受ける凝固シェル厚みの計算、さらに溶鋼中の介在物や気泡分布の変化も連成して予測する混相流の解法が進みつつある²⁶⁾。

一方、電磁流動現象の実験によるシミュレーションにおいては、低融点合金を用いた鋳型内電磁攪拌の流れ予測が80年初めに報告されている。これは鋳型上部の流れを模擬するため、Pb-Sn-Sb合金を溶融保持したプールのメニスカス部

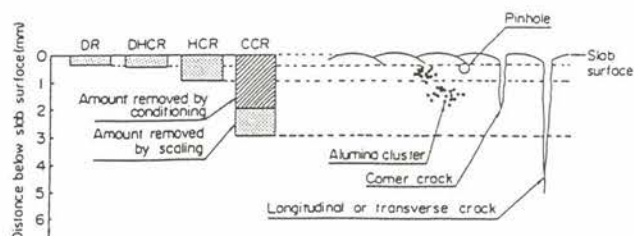


図2 生産性を疎外する鋳片表層部の各種欠陥

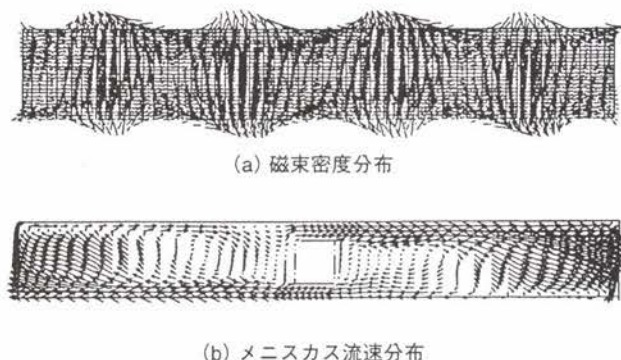


図3 リニアモータによって印加される磁場とメニスカス流動

にリニアモータを設置したものである²⁷⁾。一方、電磁ブレーキのシミュレーションとなると、ノズルからの吐出流を作る必要があり、図4に示すようなHgが循環する実験装置が開発され、電磁センサーを用いた流速測定が行われた²⁸⁾。

④電磁コイル/電源パワーエレクトロニクスの進歩

高温の溶鋼の流れを制御する上で、電磁コイルの冷却技術およびコンパクト設計は、実用上きわめて重要な技術となっている。溶鋼の温度は、約1500～1600℃と高温であるのに対して、溶鋼に電磁場を作用させる電磁コイルの温度は、電気絶縁物の特性上通常200℃以下にしなければならず、電磁コイルは操業および他の周辺設備との取り合い上、限られた空間内に設置しなければいけないからである。そのため、例えばスラブ鋳型内電磁攪拌の電磁コイルにおいては、通常の回転モータに用いられている技術とは異なるものが使用されている。ここでは電磁コイルは、その自己発熱の抜熱性を上げるため、循環している水中に浸水された状態で使用されている。電磁コイルにとって水は、多少の導電性をもつために、絶縁劣化の原因とされてきたが、溶鋼からの断熱も含めて浸水式が用いられている。また、電磁コイルと溶鋼との距離が100 mm程度と大きいために、電磁コイルの極数を2～4極と少なくし、ポールピッチを大きくする設計が用いられている。さらに、省スペースの制約上コイルエンド形状を小さくするために、銅コイルの巻き方は、積層した電磁鋼板に直接巻きつける胴巻きが用いられている。電磁コイルと溶鋼の間には、溶鋼の抜熱のため銅板が設置されており、電磁攪拌の動作周波数は1～10Hz程度と極めて低周波になっている。このため、胴巻きによる漏れ磁束の影響は軽微なものに収まっている。

溶鋼と電磁コイルとの間にある銅板は、溶鋼を抜熱させる目的からは熱伝導のよい純銅を用いるべきであるが、純銅の電気伝導度は高く、電磁コイルから発生する磁場のシールド性も良い。この冷却性と磁場浸透性を両立させるために、熱伝導と電気伝導との兼ね合い、さらには支持機能としての機

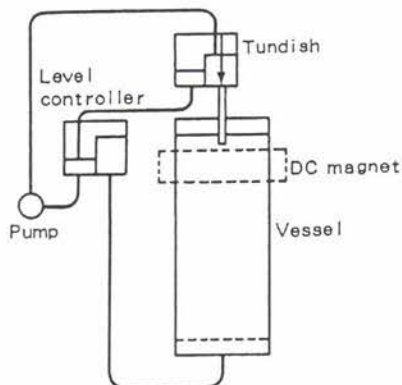


図4 鋳型内流動制御をシミュレートするための水銀モデル実験装置

械強度を保つために、析出型銅板が用いられている。

電磁攪拌の動作周波数が低いために、当初電源としては、強制整流回路を含むサイリスタ半導体素子によるサイクロコンバータ方式が用いられていた。商用周波数からの直接変換による周波数変換方式であった。近年になり、自己消弧型の電力用トランジスタの大容量化が進むにつれ、インバータ方式が用いられ、高応答かつ省スペースな電源が実現した。さらに、パワーエレクトロニクスの進歩により、高応答・大容量なIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子が開発されると、更に高周波・高応答な電源が実現した(図5)²⁹⁾。その結果、例えばEMC技術においては、メニスカス流動の不安定性抑制に必須な高周波動作・短パルスモードの電源が実用レベルの大容量領域において実現してきており、実機試験および実用化に大きく貢献している。

将来の技術として注目されている超伝導磁石は現在の所、連続鋳型内の強力な電磁ブレーキとしての適用が検討されている(図6)³⁰⁾。水銀を使ったシミュレーション実験の結果、1.5Tの磁界下で実験を行い、倍速での鋳造速度で従来並の

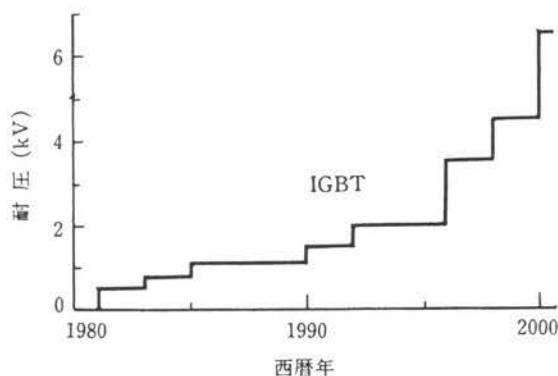


図5 IGBTの高耐圧化の進歩

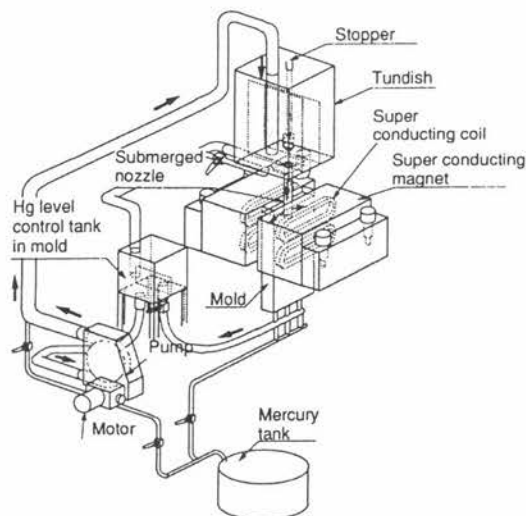


図6 超伝導磁石を装備した水銀鋳型内流動モデル実験装置

鋳型内下降流速を実現している。ここでは冷凍機付きのコイルが用いられている。

3 連続鋳造プロセスにおける電磁力適用技術

3.1 鋳型内電磁攪拌技術

スラブ連鋳機の鋳型内電磁攪拌装置ではリニアモータが用いられる (図7)。前述のようにコイルは絶縁処理して水中に浸漬、冷却されるため大電流の引加、すなわち強攪拌が可能になっている。また厚い冷却銅板など鋳型構造の点から周波数は10Hz以下に設定される^{31,32)}。

図8に示すように、メニスカス位置に設置されたリニアモータにより溶鋼は水平方向に旋回駆動される。流速の規模は0.5 m /秒程度である。この旋回流動によってモールドフラックスを含むメニスカス部位の温度は均一化されると共に、メニスカスで形成される最初期の凝固シェル、すなわちフックは衰退する³³⁾。フックの外側はフラックスと接触、反応しながら凝固するため、鋳片内部に取り込まれると不純物を提供するサイトとなり、フックの内側も介在物やAr気泡の捕捉サイトとなるため、フックの成長抑制は表層清浄度向上

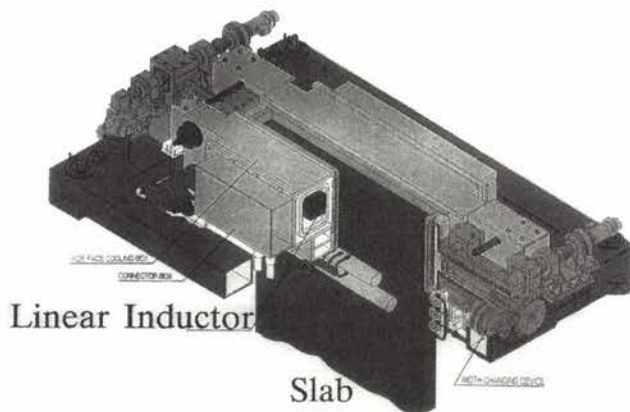


図7 スラブ用鋳型内電磁攪拌装置の外観

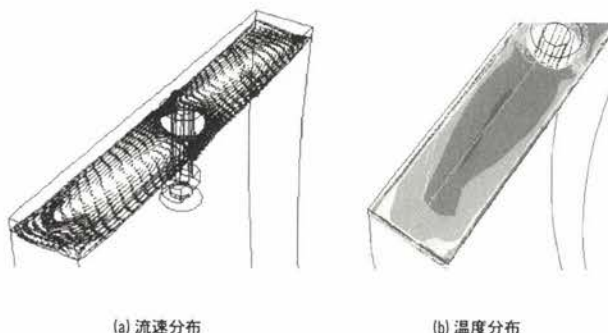


図8 鋳型内電磁攪拌によって形成されるメニスカス水平旋回流

の点から好ましい。また、流れ場、温度場が均一化するため凝固シェル厚も周方向に均一化するが、これは亜包晶系組成の鋼で発生しがちな縦割れ防止に顕著な効果がある³⁴⁾。このシェル厚均一化にはフラックスの温度、粘度の均一化、すなわち鋳型/シェル間へのフラックス流入量の均一化も貢献している。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 (図9)³⁵⁾。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。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になっている³¹⁾。

3.2 鋳型内電磁ブレーキ技術

鋳型内電磁ブレーキ技術は、直流磁界を溶鋼流れに直接作用させることによって流れを制動する技術である。直流磁界を使用するため鋳型銅板による磁束減衰の問題はなく、設備的制約は鋳型内電磁攪拌に比べ少ない。高速鋳造時に問題となるメニスカスの乱れやストランドプール深部へのノズル吐出流の侵入を防止する目的として開発が始まったが、初期の鋳型内電磁ブレーキはノズル吐出孔付近に局所的に配置されたものであった³⁶⁾。流動を鋳型内に分散させることはできたものの、制御性の点で課題を残した。直流磁界と流動によって発生する誘導電流パスの分布が、制動効率や安定性の点で重要であるという考えの下に開発された、幅方向に均一な磁場を有するタイプの鋳型内電磁ブレーキ (図10) は、安定的に下降流を制動するだけでなく、磁束密度やノズル吐出流速の調整によってメニスカスへの上昇流をも制御することができるものである³⁷⁾。これによって鋳片内部の介在物の減少、メニスカスの沈静化と温度上昇などの効果が報告されている³⁸⁾。この技術は鋳型内の混合抑制を可能とし、異鋼種連々鋳の継ぎ目における濃度遷移領域の短縮効果が報告されている (図11)³⁹⁾。混合抑制機能を使って、表層と内層が

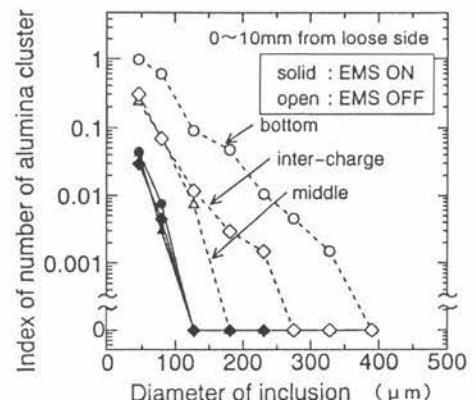


図9 鋳型内電磁攪拌による介在物の数、サイズ分布の向上

異なる鋼種からなるクラッド鋳片の製造技術も開発されている⁴⁰⁾。

一方、更なる高スループット鋳造の鋳片品質向上を目的とし、ノズル吐出孔を挟む上下位置に2段の直流磁界を設置した鋳型内電磁ブレーキ技術が登場した(図12)⁴¹⁾。この技術は浸漬ノズルの吐出孔形状のみでは困難な、メニスカス部の流動と鋳型深部の流動の同時制動を可能として、表面品質、および内部品質の向上が確認されている。メニスカスと鋳型下部での印加磁束密度が同等であるためメニスカスでの流れが過度に制動される課題があり、現在上部と下部の磁束密度

を独立に制御する方式へと発展している⁴²⁾。

3.3 動的流動制御技術

(1) 鋳型内動的流動制御技術

メニスカスでの流れが過剰な場合、フラックス巻き込みを生じ、逆に流れが弱く熱供給が不足する場合、フックの過剰成長により気泡・介在物が捕捉され欠陥に繋がる。浸漬ノズルの吐出孔位置にリニアモータを設置し、吐出流に対して順方向、あるいは逆方向に電磁推力を作用させ、メニスカスの流速を動的に制御する技術が開発された(図13)⁴³⁾。前出の鋳型内電磁攪拌と同様、鋳型銅板による磁気遮蔽効果をさけるため印可する磁場周波数は数Hzである。減速モードの場合、磁束密度の上昇と共にメニスカス流速は減衰しモールドフラックス起因などの品質欠陥が減少すること、また湯面変動が減少して拘束性ブレイクアウトなどの操業トラブルが減少することが報告されている。

(2) スtrand内動的流動制御技術

メニスカス下3.9 m位置のstrandに設置されたりニアモータにより、プール交番攪拌に鋳片両短辺に添って形成される上昇流を利用し、ノズル吐出流の下方への侵入を動的に抑制して、吐出流と共にプール内に持ち込まれる介在物や気泡のプール深部(鋳片内部)への侵入を阻止する技術が工業

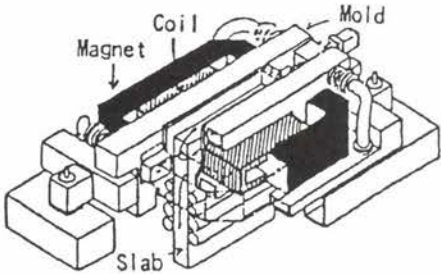


図10 均一磁場印加が可能な鋳型内電磁ブレーキ装置

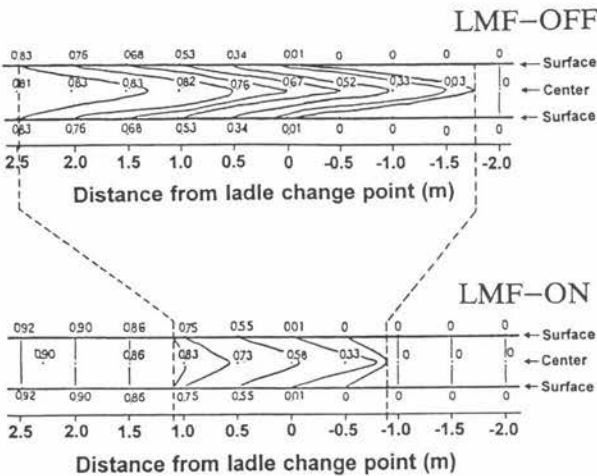


図11 均一電磁ブレーキ LMF (Level Magnetic Field) による異鋼種連々鋳継ぎ目での濃度遷移領域の低減(濃度は前鍋成分を1、後鍋成分を0として規格化した)

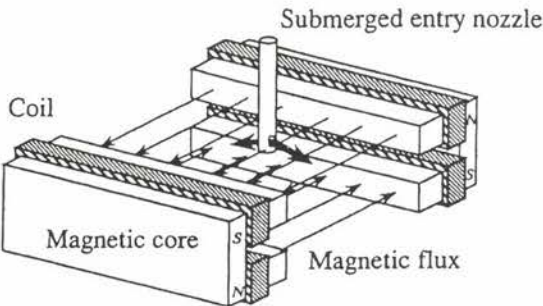
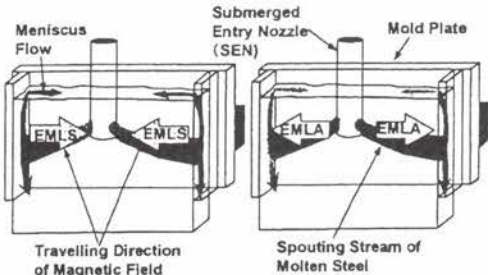
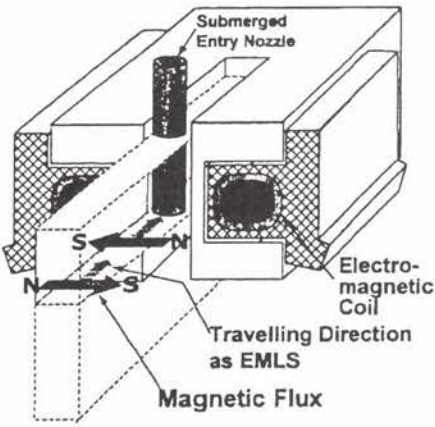


図12 上下2段の静磁場を印加可能な鋳型内電磁ブレーキ



(a) 概念図



(b) 設備概要

図13 鋳型内動的流動制御技術の概念図

化されている(図14)^{44,45)}。直流磁界を用いた電磁ブレーキ技術と対比し、動的な抑制による介在物捕捉チャンスの大幅減少が特徴とされている。なお、ストランドで使用される電磁場周波数は電磁攪拌装置の設置位置、すなわち凝固シェル厚などにより異なるが10～20Hzが一般的である。

3.4 タンディッシュ内溶鋼加熱と流動制御

高 cleanliness 鋼の溶製と鋳造の中間に位置するタンディッシュには単に溶鋼の分配機能のみならず、温度と清浄度を適性に維持する機能が要求される。鋳片中心部のポロシティや偏析欠陥の防止、また凝固組織微細化には低温鋳造が好ましいが、所定の長さに亘って安定に操業するにはタンディッシュでの溶鋼温度制御が必要である。図15、16はそれぞれ工業化されているプラズマ加熱タンディッシュ⁴⁶⁾、誘導加熱タンディッシュ⁴⁷⁾の一例である。前者では1 MW級の直流ア

ークプラズマトーチを、後者では、注入された溶鋼が通過する堰の孔に沿って誘導電流を形成させるように電磁コイルが配置されている。これらの装置によって、レードル交換時の温度低下を最大で25℃程度補償している。また図17に誘導加熱タンディッシュにおける清浄度の変化を示したが清浄度が向上している。これは、堰孔部において誘導加熱と同時に発生するローレンツ力が介在物に作用、斥力によって孔壁に付着除去されると共に、プール内攪拌を促進して浮上除去に寄与していると説明されている。

この攪拌機能を更に発展させたものに遠心分離タンディッシュがある⁴⁸⁾(図18)。注入部にリニアモータを配し、平均で1 m/sの回転流速を与えることによって、レードルから注入される溶鋼の流動パターンを変え、特にレードル交換部での大型介在物の除去を促進している。

3.5 新しい電磁力利用技術

(1) 電磁初期凝固制御技術

連続鋳造の鋳型内潤滑は、振動鋳型と下方に移動するシェルの相互作用がもたらす鋳型-凝固シェル間へのフラックス流入が支配している。脈動するフラックス流入は最先端凝固部を変形させ、いわゆるオッシレーションマークを形成する。

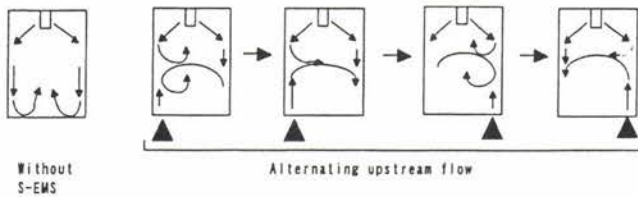


図14 ストランド内動的流動制御技術の概念図

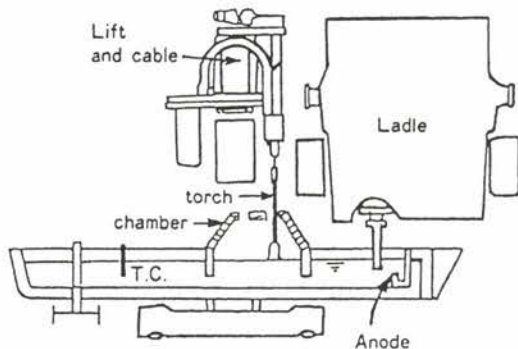


図15 プラズマ加熱タンディッシュの設備概観

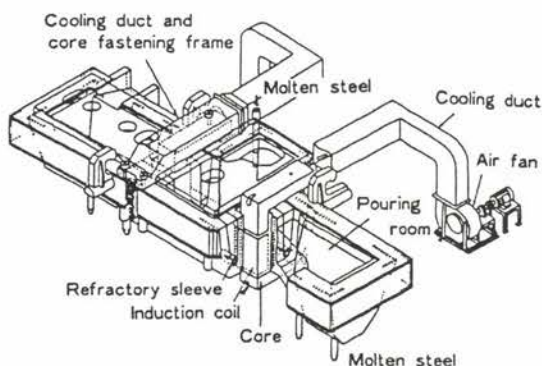


図16 誘導加熱タンディッシュの設備概観

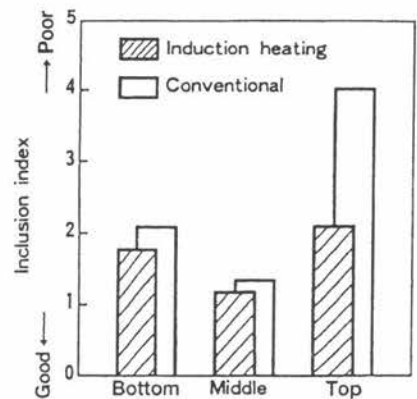


図17 電磁誘導加熱タンディッシュによる鋳片内清浄度の向上

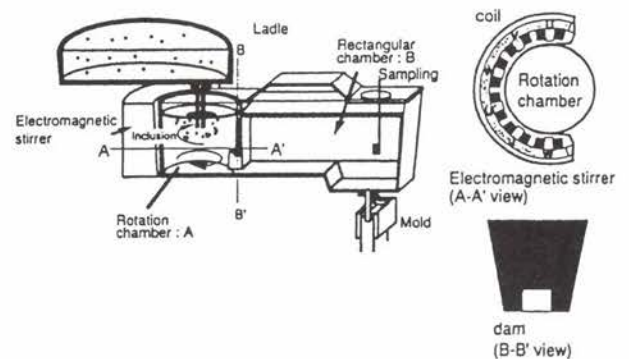


図18 遠心分離タンディッシュ設備概観

このマークが深い場合、気泡・介在物の捕捉サイトや割れの起点となるため品質上好ましくない。また、高速化に伴う潤滑性改善においても従来手法では限界があり、初期凝固の新しい制御技術が求められている。鋼の電磁鋳造は図19に示すようにメナスカス部位にソレノイド状の磁気コイルを設置し、これによってピンチ力を作動させてフラックス流入ギャップを拡大、消費量を増大して潤滑を向上するものである⁴⁹⁾。さらにオシレーションマークの消失(図20)により鋳片表層直下の清浄度も大きく改善される⁴⁹⁾。現在、パルス状に電磁力を印加する方法が開発され、ピレットだけでなく⁵⁰⁾、スラブ⁵¹⁾への適用も試行されている(図21)。

(2) 品質予測技術

鋼の清浄度が極めて高くなった現在、製鋼起因の品質欠陥は、何らかの非定常的に発生する異常要因が関与しているのが殆どである。鋳造中の溶鋼や鋳片の品質を迅速に知ることによって、製造中の鋳片の品質を制御したり、欠陥部を選択的に排除することが、清浄度の平均値を向上させるのに比べ効率的である。1) 現在の連続鋳造プロセスにおいては、先に述べたように種々の電磁力アクチュエーターが配備されて

いること、2) 計算機能力の飛躍的な能力向上に伴い数値シミュレーションの計算精度や速度が大幅に進歩したこと、さらに3) 迅速で高精度の清浄度測定技術を組み合わせることによって、製鋼品質の予測制御技術が可能になっている⁵²⁾。

図22はこの技術のシステム構成を示している。レードルスラグの溶鋼中への混濁とタンディッシュ内、鋳型内、ストランド内の挙動を数値予測し、鋳型内電磁攪拌、ブレーキによってこれを制御する。また、図23は迅速に溶鋼の清浄度を検知するために新たに開発された、コールドクルーシブルを利用した方法で、電磁斥力によって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線法で測定したり、あるいはこのようにして処理したサンプルの表層のみを電解スライム法により介在物を短時間で抽出するものである。こ

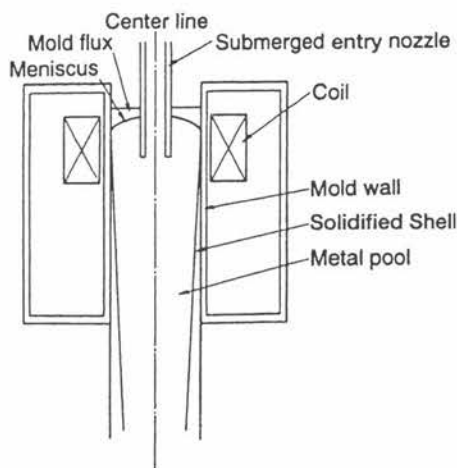


図19 電磁鋳造用鋳型の装置概要

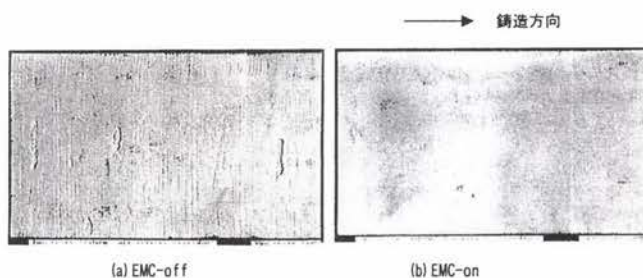


図21 電磁鋳造したスラブ表面性状の変化

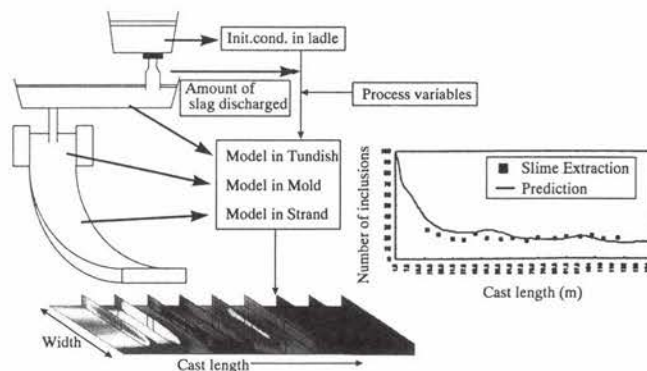


図22 連続鋳造プロセスの鋳片品質予測制御システム

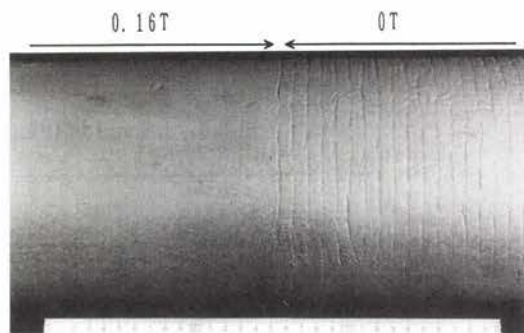


図20 電磁鋳造したブルーム表面性状の変化

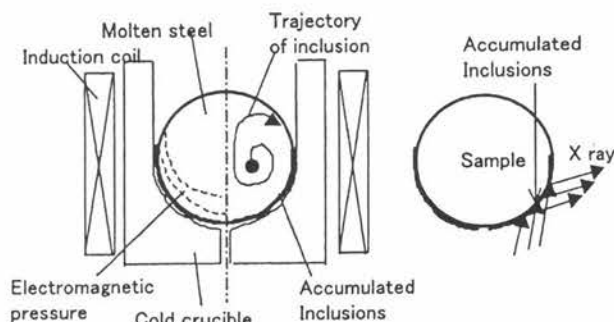


図23 コールドクルーシブルを利用した鋼中清浄度の迅速分析法

の技術によって計算結果は逐次補正されて、その予測精度を維持できる。

4 おわりに

本稿では、我国において連鑄プロセスでの電磁力適用が大きく発展した経緯を概説した。

溶融状態にある鋼が凝固、成形する中で高い品質と生産性が要求される連続鑄造プロセスにおいては、非接触で制御性の高い電磁力の利用は極めて有用である。連鑄プロセスメタラジーに関して蓄積された多くの知見、電磁場・流れ場に関する高度な解析技術、電磁場印加のためのコンパクトで高性能な装置技術が、電磁力利用技術の進歩を促した。

紹介した移動磁界や直流磁界を利用した流動制御技術は、現在我国の連鑄プロセス技術の圧倒的優位性を支えるキーテクノロジーとなっている。また、交流磁界による初期凝固技術も他国に先駆けて実用化が始まりつつある。装置もアクチュエータのみならず、種々のセンサーの開発が進みつつあり、高精度シミュレーションの高速化と相まって、よりインテリジェントなプロセスへと進化するものと期待される。

最後に、この分野の研究開発は鉄鋼各社それぞれの活発な活動もさることながら、「電磁気冶金部会」「材料電磁プロセシング部会」「高度電磁力利用マテリアルプロセシング研究会」など一連の研究会活動、および国家プロジェクト「電磁力利用によるエネルギー使用合理化金属製造プロセス開発」における産学協同の活動が極めて重要な役割を果たしたことを追記する^{53~56)}。

参考文献

- 1) H. K. Moffatt and M. R. E. Proctor : Metallurgical Application of Magnetohydrodynamics, Proceedings of a Symposium of the IUTAM, Cambridge, (1984) [The Metallurgical Society].
- 2) Z. Yamamoto : Steel Times, April (1989), 180.
- 3) 金沢敬, 川本正幸, 川本正幸, 村上敏彦, 中島敬治, 中井健 : CAMP-ISIJ, 4 (1991), 1285.
- 4) 平城正, 金沢敬, 中島敬治, 村上敏彦, 中井健, 白井善久 : CAMP-ISIJ, 4 (1991), 1284.
- 5) K. Watanabe, M. Suzuki, K. Murakami, H. Kondo and T. Shiomi : Steelmaking Conference Proceedings, ISS, Warrendale, (1996), 265.
- 6) 柴田浩幸, 鈴木幹雄, 江見俊彦 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 165.
- 7) 荻林成章, 溝口利明 : CAMP-ISIJ, 7 (1994), 1154.
- 8) 城田良康, 谷口尚司, 高谷幸司 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 43.
- 9) 石井邦宜, 今野直樹, 岡崎照夫, 上原彰夫, 竹内栄一, 原田寛, 菊池俊夫, 渡辺久仁雄 : CAMP-ISIJ, 9 (1996), 206.
- 10) 山崎強, 長谷川一, 藤健彦, 井本健夫 : CAMP-ISIJ, 10 (1997), 236.
- 11) 岡沢健介, 清瀬明人, 沢田郁夫, 原田寛, 藤健彦, 竹内栄一 : 鉄と鋼, 82 (1996), 749.
- 12) 柴田浩幸, 尹弘斌, 鈴木幹雄, 江見俊彦 : CAMP-ISIJ, 10 (1997), 128.
- 13) E. Takeuchi and J. K. Brimacombe : Met. Trans. B, 15B (1984), 493.
- 14) 長野裕, 竹内栄一 : CAMP-ISIJ, 1 (1988), 146.
- 15) S. N. Singh and K. E. Blazek : J. Metals, 26 (1974), 17.
- 16) 鈴木幹雄, 柴田浩幸, 江見俊彦 : CAMP-ISIJ, 11 (1998), 36.
- 17) 小関敏彦, 井上裕滋 : 日本金属学会誌, 65 (2001), 644.
- 18) 松本洋 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 35.
- 19) 江見俊彦, 尹弘斌, 柴田浩幸 : CAMP-ISIJ, 10 (1997), 93.
- 20) 飯田孝道, 田中敏宏, 石本佳裕, 酒井英典, 栗原靖享 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 1014.
- 21) 柏谷悦章, 石井邦宜, A. W. Cramb : CAMP-ISIJ, 11 (1998), 793.
- 22) 米山泰章, 竹内栄一, 松沢敬一郎, 沢田郁夫, 服部義孝, 岸田豊 : 製鉄研究, 335 (1989), 26.
- 23) 藤崎敬介, 澤田健三, 植山高次, 岡沢健介, 福田淳, 中島潤二 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 217.
- 24) 岡沢健介, 藤健彦, 竹内栄一, 梅津健司, 藤崎敬介, 福田淳, 大谷康彦, 中島潤二 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 218.
- 25) K. Fujisaki : Proceedings of EPM2000, ISIJ, Tokyo, (2000), 428.
- 26) 久保典子, 石井俊夫, 久保田淳, 鈴木真, 中田正之 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 217.
- 27) M. Yamahiro, I. Furugaki, T. Ohashi, T. Hiraoka, H. Fujii and E. Takeuchi : Steelmaking Conference Proceedings, ISS, Warrendale, (1983), 111.
- 28) H. Harada, T. Toh, T. Ishii, K. Kaneko and E. Takeuchi : ISIJ International, 41 (2001), 1236.
- 29) 赤木泰文 : J. IEE Japan, 121 (2001), 46.
- 30) S. Nara, Y. Kishimoto, N. Bessho and K. Sorimachi : Proceedings of EPM2000, ISIJ, Tokyo, (2000), 193.

- 31) 竹内栄一, 藤井博務, 大橋徹郎, 丹野仁, 高尾滋良, 古垣一成, 喜多村治雄: 鉄と鋼, 69 (1983), 1615.
- 32) 福田淳, 川瀬敏昭, 大谷康彦, 岩田直, 堤一彦, 奥村治彦, 渡辺久仁雄: CAMP-ISIJ, 7 (1994), 1193.
- 33) T. Toh, H. Harada, T. Sawai, S. Shima and E. Takeuchi: Proceedings of 4th Japan France Seminar, (2004), 47.
- 34) 大谷康彦, 川瀬敏昭, 福田淳, 中島潤二, 中村浩一, 山崎強: CAMP-ISIJ, 8 (1995), 348.
- 35) 清瀬明人, 宮沢憲一, 福田淳, 大谷康彦, 中島潤二: CAMP-ISIJ, 7 (1994), 1195.
- 36) J. Nagai, K. Suzuki, S. Kojima and M. Saito: Steelmaking Conference Proceedings, ISS, Warrendale, 71 (1988), 125.
- 37) H. Harada, T. Toh, T. Ishii, K. Kaneko and E. Takeuchi: ISIJ Int., 41 (2001), 1236.
- 38) 石井孝宣, 今野直樹, 岡崎照夫, 上原彰夫, 竹内栄一, 原田寛, 菊池俊夫, 渡辺久仁雄: CAMP-ISIJ, 9 (1996), 206.
- 39) 原田寛, 竹内栄一, 瀬々昌文, 石井孝宣: 鉄と鋼, 86 (2000), 278.
- 40) E. Takeuchi, M. Zeze, H. Tanaka, H. Harada and S. Mizoguchi: Ironmaking and Steelmaking, 24(1997), 257.
- 41) 井戸川聡, 戸澤宏一, 竹内秀次, 反町健一, 杉澤元達, 蓮沼純一: CAMP-ISIJ, 9 (1996), 618.
- 42) 奥村健一, 山崎久夫, 奥田治志, 高田正昭, 油原晋: CAMP-ISIJ, 12 (1999), 831.
- 43) 久保田淳, 久保典子, 鈴木真, 石井俊夫, 西町龍三, 荒牧則親: 鉄と鋼, 86 (2000), 271.
- 44) 磯野貴宏, 大貫一雄, 藤健彦, 白井登喜也, 若木明德: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 167.
- 45) 若木明德, 白井登喜也, 磯野貴宏, 大貫一雄, 藤健彦: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 168.
- 46) K. Matsumoto, Y. Hoshijima, K. Ishikura, K. Umezawa, Y. Nuri and Y. Ohori: Proc. 6th IISC, ISIJ, Tokyo, (1990), 222.
- 47) I. Suzuki, S. Noguchi, Y. Kashiwabara, T. Horie and M. Saito: Steelmaking Conference Proc., ISS, Warrendale, 71 (1988), 125.
- 48) 三木祐司, 柴田浩光, 別所永康, 岸本廉夫, 反町健一, 廣田哲仁: 鉄と鋼, 86 (2000), 239.
- 49) T. Toh, E. Takeuchi, M. Hojo, H. Kawai and S. Matsumura: ISIJ Int., 37 (1997), 1112.
- 50) 谷雅弘, 田中純, 竹内栄一, 藤崎敬介, 山崎伯公, 磯部浩一: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 815.
- 51) 谷雅弘, 原田寛, 藤健彦, 松宮徹, 宮沢憲一, 山崎伯公: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 163.
- 52) 藤健彦, 井本健夫, 今野雄介, 近藤裕之, 山村英明, 若生昌光, 竹内栄一, 伊藤彰: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 13.
- 53) 電磁気冶金の基礎研究部会報告書, 日本鉄鋼協会 特定基礎研究会 電磁気冶金の基礎研究部会編, (1990)
- 54) 電磁気力による新しいプロセッシングの可能性を求めて, 日本鉄鋼協会 特基研究会 材料電磁プロセッシング部会編, (1993)
- 55) 電磁力を利用した材料電磁プロセッシングの新展開, 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会 電磁ノーベル・プロセッシング研究会編, (1999)
- 56) 材料プロセスへの電磁力の高度利用, 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会 高度電磁力利用マテリアル・プロセッシング研究会編, (2003)

(2004年11月10日受付)