

鋳型内電磁攪拌による鋳片表面品質向上

Improvement of Slab Surface Quality with In-mold Electromagnetic Stirring

中 島 潤 二^{*(1)}

Junji NAKASHIMA

大 谷 康 彦^{*(5)}

Yasuhiko OHTANI

福 田 淳^{*(2)}

Jun FUKUDA

土 岐 正 弘^{*(5)}

Masahiro DOKI

清 瀬 明 人^{*(3)}

Akihito KIYOSE

川 瀬 敏 昭^{*(4)}

Toshiaki KAWASE

抄 録

薄板材、厚板材に求められる品質レベルは、需要家の無欠陥化、高機能化の要望の高まりにより、近年特にその厳格化を増している。これらの要望に対処するために、溶鋼の徹底した清浄化、品質劣位部鋳片の重手入れ化など種々の対策が採られてきた。一方でこれらの対策は一級品歩留まりの低下、工程全体の生産性低下を招いてきた。そこで、一般材においては鋳片表面品位の安定化が必須であり、連続鋳造工程全体として鋼交換部位等の非定常部位の品質劣位部を減らすことが重要である。このような視点に立ち、君津製鉄所では新日本製鐵で実機化した鋳型内電磁攪拌技術を基に新しい鋳型内電磁攪拌技術を確立した。これは、元来不安定なノズル吐出流とは独立した鋳型内の溶鋼流動制御を実施することにより、鋳片表層品質を向上させるものである。新しい鋳型内電磁攪拌技術の考え方を示すと共に、鋳片表面清浄性向上、初期凝固安定化のメカニズムを理論的に明らかにするとともに、その品質改善効果に関して報告した。

Abstract

The demands for surface quality assurance of sheets and plates have been increased in recent years, reflecting the users' requirement for higher grade steel. To meet these requirements, a number of countermeasures, such as pursuing extremely clean molten steels and conditioning low-grade portion have been taken. These approaches, however, lead to a loss of profitability as consequences of the decrease in productivity and the steel yield of prime-quality products. Therefore we have to stabilize even the surface quality of commercial grade steel. In the continuous casting process, it is important to reduce the off-quality portion due to ladle changing or variation in process parameters. Based on these viewpoints, Kimitsu Works in Nippon Steel Corporation has been active in controlling slab surface quality by use of molten metal flow control, without by use of the nozzle stream, and consequently a new in-mold electromagnetic stirrer (hereinafter abbreviated to "EMS") was installed. This study reports the features and design concept of the new EMS, the resulting effects on slab quality, and theoretical consideration on effects of initial solidification and cleanliness of slab.

1. 緒 言

スラブの表層に要求される品質レベルは需要家の検査工程省略化のための無欠陥コイル指向や加工特性向上の要求を受け、近年特にその厳格さを増している。これら高品位かつ高機能材の製造に対処するために、溶鋼の徹底的な清浄化、鋳片の重手入れ化など、数々の対策が採られてきた。一方でこれらの対策は一級品歩留まりの低下、物流の煩雑化等による工程全体の生産性低下、品質対策費の増加などを招き、収益を圧迫する要因の一つとなっている。従って、一般材においては鋳片表面品質の安定化が必須であり、下工程への直行、直結化が求められている。連続鋳造工程においては顧客の要望に迅速に対応できる市場対応型の製造方針を堅持しつつ、いかに短納期化と製造コストの低減を両立させていくかということが重要

である。

このような視点に立ち、君津製鉄所では新日本製鐵で実機化した鋳型内電磁攪拌技術¹⁻⁴⁾を基に、流動を利用した鋳片表面清浄性及び初期凝固制御技術の開発に取り組み、新しい鋳型内電磁攪拌技術を確立した⁵⁻⁹⁾。これは、鋳型内の溶鋼流動制御のために、元来不安定性を抱えるノズル吐出流を利用するのではなく、それとは独立した制御系を持つことを主眼とした。つまり、凝固界面に沿う、ノズル吐出流とは独立した流れを付与することにより、鋳片表層清浄性の確保及び初期凝固の安定化を達成した。

本報では、鋳片表層清浄性向上、初期凝固安定化のメカニズムを理論的に明らかにすると共に、その品質改善効果に関して報告する⁶⁻⁹⁾。

*⁽¹⁾ 君津技術研究部(製鋼) 主任研究員

千葉県君津市君津1 ☎299-1141 ☎0439-50-2543

*⁽²⁾ 本社 技術総括部 生産設備企画グループ マネジャー

*⁽³⁾ 鉄鋼研究所 製鋼研究部 主任研究員

*⁽⁴⁾ 君津製鉄所 製鋼部 製鋼技術グループ マネジャー

*⁽⁵⁾ 君津製鉄所 設備部 プロセス開発グループ マネジャー

1.1 鋳片表層品質向上に対する考え方

まず、これまでの新日本製鐵における、スラブの表層品質向上に対する取り組みの推移について述べる。1980年に薄板材の表面品質向上を目的として、広畑製鐵所に新日本製鐵の第1号機となる鋳型内電磁攪拌装置を設置し^{1,2)}、その後1982年に大分製鐵所に第2号機を設置した^{3,4)}。これらの連続鋳造機では鋳造速度は比較的低速な条件であった。その後、1990年代初頭にかけては連続鋳造機に高い生産性が求められるだけでなく、客先の要求品質水準の厳格化に伴い、表面品質の向上が求められていった。鋳片表皮下に捕捉集積される気泡、非金属介在物は浸漬ノズルからの吐出流により凝固シェル前面を洗浄する事で低減されることは経験的に分かっており¹⁰⁾、鋳片表層の清浄性向上のために高生産化、高速鋳造化が図られた^{11,12)}。

また、一方では内部欠陥低減を目的として、局所型の電磁ブレーキを適用することも試みられた^{11,12)}。しかしながら、これらの技術の前提は浸漬ノズルの吐出流を利用することであり、ノズルが溶損もしくは非金属介在物がノズル内に堆積するノズル詰まりが生ずることにより、ノズルの形状が鋳造初期の状態から変化するために、長時間の多連続鋳造の場合に安定して機能を発揮することは実質上困難であった¹¹⁻¹⁴⁾。ノズル吐出流を制御する手段として多くの試みが報告されている^{6,7)}が、ノズル吐出流の安定化が表面品質向上のための重要な要因であると考えられた。

1990年代半ばになると、生産量の伸びは鈍化し単に高生産性を求めるだけでなく、品質工程能力向上による品質のばらつき低減、歩留まり向上が求められた。そこで、(1)鋳造幅方向の均一性、(2)鋳造長さ方向の均一性、(3)操業ばらつきに対する裕度拡大の観点から、従来行われてきた本来不安定性を抱えるノズル吐出流を利用するのではなく、凝固界面にノズル吐出流とは独立した流れを付与することにより、鋳片表層清浄性の確保及び初期凝固の安定化を図ることが重要であると考え、新しい鋳型内電磁攪拌技術の適用にいたった。

1.2 鋳型内電磁攪拌装置の概要

図1に鋳型内電磁攪拌装置(以下EMSと称す)の概要を示す。実操業での適正運転条件を決定するために、低融点合金を用いた実機大モデル実験を実施し⁵⁾適正化した。図2に鋳型内電磁攪拌装置の鉄芯位置を決定するための実験結果の例を示す。ノズル吐出孔位置に磁場を印加した(a)の場合は吐出流との干渉により大きな下降流が生ずること、湯面位置に設置した(b)の場合には電磁力の損失が大きく流速が小さいことが分かる。このような知見に基づいて実操業での

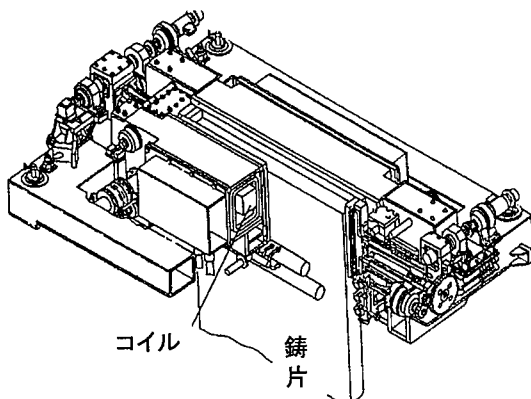


図1 鋳型内電磁攪拌装置(in-mold EMS)の模式図

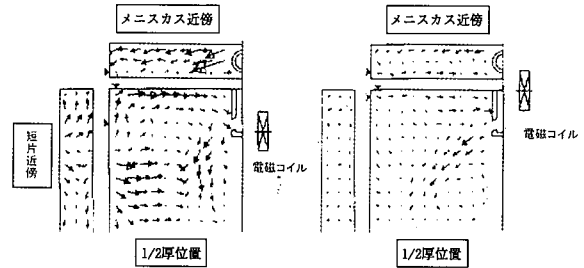


図2 低融点合金を用いた実機大試験結果

適正な鉄芯位置を決定した。

2. 実験方法

鋳型内電磁攪拌による初期凝固及び鋳片表層清浄性に及ぼす改善効果を明らかにするために実機試験を実施した。鋳造条件を表1にまとめて示す。

2.1 鋳型内の初期凝固に対する影響調査¹⁵⁾

鋳型内電磁攪拌適用による、鋳型内溶鋼流動状況の変化を明らかにするために、岡野の式¹⁶⁾を用いてデンドライト傾角を測定し、溶鋼流速を算出するとともに、歪みセンサーを用いて鋳型内の溶鋼流速の変化を直接評価した¹⁶⁾。また、鋳型内の溶鋼流動変化に伴う溶鋼温度の変化を明らかにするために、熱電対により鋳型内溶鋼の温度分布を測定し⁹⁾、初期凝固シェル形状がどう変化したかを硫黄添加試験により評価した。

2.1.1 デンドライトによる鋳型内溶鋼流動測定

デンドライト傾角測定にあたっては、図3に示すように鋳片の鋳造方向直角断面より試片を切り出し、酸により腐食した後、倍率5倍で凝固組織を撮影し測定に供した。測定した1次デンドライトアームの鋳片表面での法線に対する角度が、鋼種によらず高炭素鋼で求めた岡野等の式¹⁶⁾((1)式)に適用できると仮定して溶鋼流速を求めた。

$$\ln V = (\theta + 9.73 \times \ln f + 33.7) / (1.45 \times \ln f + 12.5)$$

但し $V < 50 \text{ cm}$

(1)

ここで θ :デンドライト傾角(度)

f :凝固速度(cm/s)

V :溶鋼流速(cm/s)

表1 実機試験での操業条件

鋼種	低炭素アルミキルド鋼: C=0.05%
	中炭素アルミキルド鋼: C=0.08~0.015%
鋳造幅	1 200~2 250mm

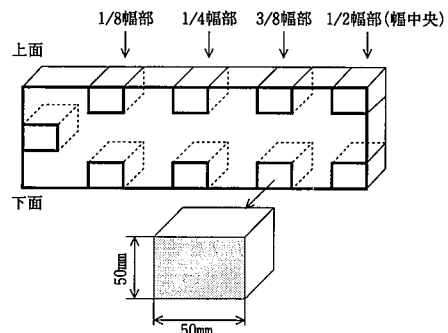


図3 デンドライト傾角測定に用いた鋳片試料採取位置

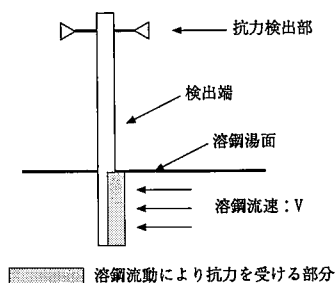


図4 流速センサーの模式図

2.1.2 溶鋼流速センサーによる鋳型内溶鋼流動測定

鋳型内溶鋼の流動状況を直接評価する目的で、図4に示す溶鋼流速測定センサーを用いた。本流速センサーは歪みゲージを張り付けた耐火物を浸漬し、溶鋼から受ける荷重のみを測定する。溶鋼流速と方向とを検知可能なセンサーである。

2.1.3 鋳型内溶鋼温度測定⁹⁾

EMS適用有無による鋳型内溶鋼温度変化を調査するために、図5に示すように、鋳造幅方向及び厚み方向に格子状に設けた合計9点にて温度測定を行い、評価した。測定に当たっては図5に示すように熱電対を3本同時に浸漬させ、EMSをOnからOffへ、また、OffからOnへと切り替えながら測定した。

2.1.4 初期凝固シェル調査

鋳造幅240mm一定で、一定速度(EMS有り、 $V=1.02\text{m/min}$ ；EMS無し、 $V=1.03\text{m/min}$)で鋳造している場合に、図6に示すように鋳型内溶鋼に硫黄試薬を一定量添加した。鋳造後、図7に示すような位置で鋳片を切断し、サルファプリントにより初期凝固シェル形状を評価した。

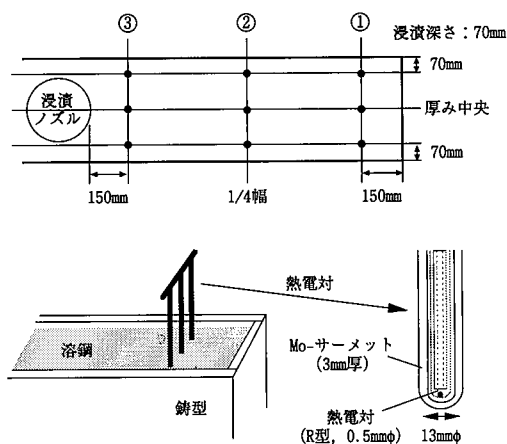


図5 鋳型内温度分布測定方法

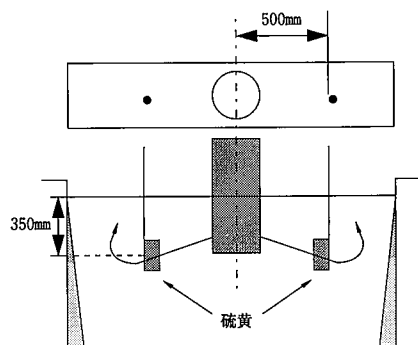


図6 鋳型内への硫黄添加試験の模式図

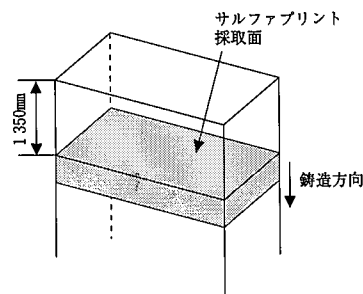


図7 初期凝固シェル厚測定のための鋳片試料採取位置

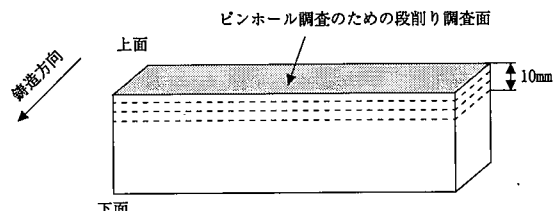


図8 段削り調査のための試料採取位置

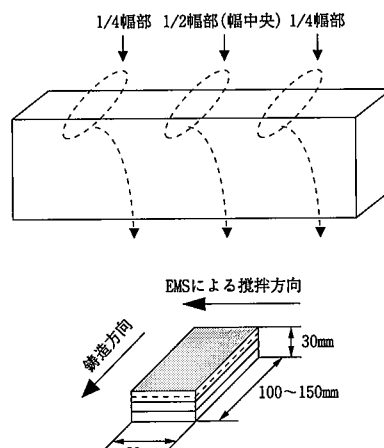


図9 スライム試料採取位置

2.2 鋳片表層清浄性への影響調査

EMS適用による鋳片表層清浄性への影響を調査することを目的に鋳片の段削り調査を行い、表層の気泡分布を調査すると共に、スライム法(電解抽出による非金属介在物評価方法)により鋳片表層の非金属介在物量を評価した。

2.2.1 鋳片段削りによる気泡分布調査

鋳片表層の気泡の幅方向、深さ方向の分布状況を評価するために、図8に示すように鋳片全幅の鋳片試料を採取し、鋳片厚み方向に段削りを実施することにより200 μm 以上の気泡個数を評価した。

2.2.2 スライム法による鋳片表面清浄性調査

鋳片表層の非金属介在物の捕捉状況に関しては、スライム法を用いて38 μm 以上の非金属介在物を評価した。図9に示すように鋳片幅方向に3か所、厚み方向に10mm間隔で試料を採取し評価した。抽出した非金属介在物は形態別にアルミナクラスターと球状非金属介在物とに分離し、各々粒径毎に分級し、個数密度を測定した。

3. 実験結果

3.1 鋳型内溶鋼流動測定結果

図10に岡野の式¹⁶⁾により求めたデンドライト傾角と溶鋼流速センサーで測定した溶鋼流速との関係を示す。両者は比較的良く一致し

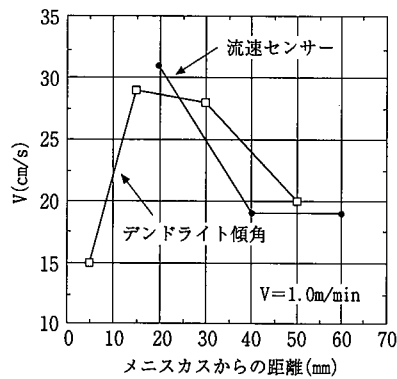


図10 デンドライト傾角から求めた溶鋼流速と流速センサーの測定値との比較

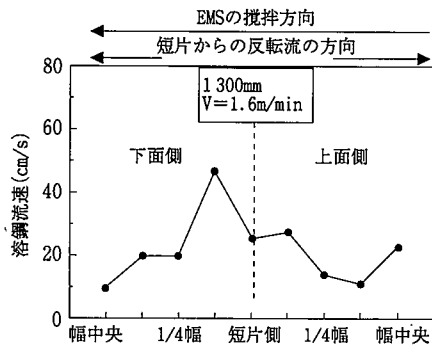


図11 デンドライト傾角から求めた鋳型内溶鋼流速分布

ている。この結果に基づき以後デンドライト傾角を測定し岡野の式¹⁶⁾により求めた溶鋼流速を算出した。図11に示すように、EMSによる攪拌流れとメニスカス反転流とが干渉する位置では、時間的に流れの方向が逆転する場合があるものの、時間平均で評価すれば安定した旋回流速が得られていることが分かった。図11よりデンドライト傾角測定結果により評価した溶鋼流速では、鋳造幅方向で平均して20cm/s程度の流速が安定して得られていることが分かる。

3.2 鋳型内溶鋼温度測定結果

図12に鋳型内の異なる9点での温度変化をまとめて示す。EMSを適用することにより、溶鋼温度は各測定点で1～2℃程度変化する。しかしながら、温度変化は測定個所によって異なり、面全体で見るとEMS適用によりばらつきが低減し、均一化していることが分かった。

3.3 初期凝固シェル厚調査結果

図13にサルファプリントにより測定した鋳造幅方向の凝固シェル厚みの測定結果を示す。図より明らかなように、EMS適用により凝固遅れの発生が低減され、凝固シェルの厚みのばらつきが小さくなり、均一性が向上する結果となっている。

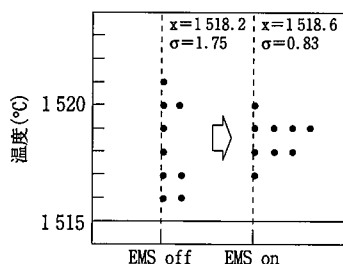


図12 EMS印加有無による溶鋼温度のばらつきの変化

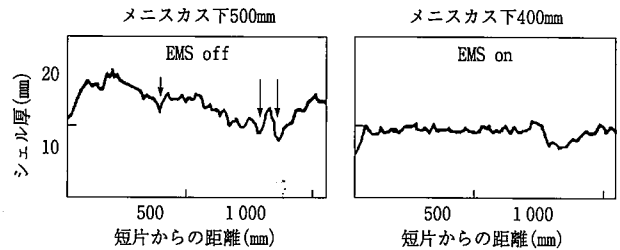


図13 サルファプリントによる初期凝固シェル厚の測定結果

3.4 鋳片表層気泡分布調査結果

図14に鋳片全幅の気泡の個数密度を鋳片深さ方向に調査した結果を示す。EMS適用により、鋳片表層直下に偏在していた気泡が安定して低減されている。なお、鋳片幅方向には気泡の偏在は見られなかった。

3.5 鋳片表層非金属介在物調査結果

図15に表層～10mmの清浄性の推移を鋳造開始から鋳造長さ方向に示す。鋳片の最ボトム(鋳造開始)部の表面清浄性は鋳造長さ約0.4mの位置で顕著に改善されている。また、鋳片表層の清浄性を最ボトム部、同鋼種継ぎ目部(鋼交換部位)、定常部と比較して図16

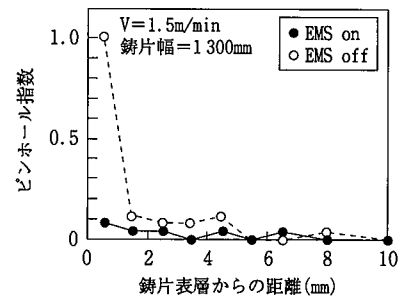


図14 鋳片表層のピンホールの分布に及ぼすEMSの効果

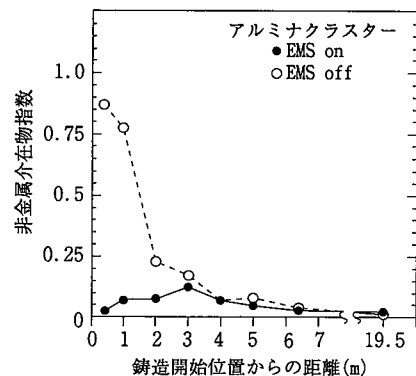


図15 鋳造長さ方向で見た非金属介在物分布に及ぼすEMSの効果

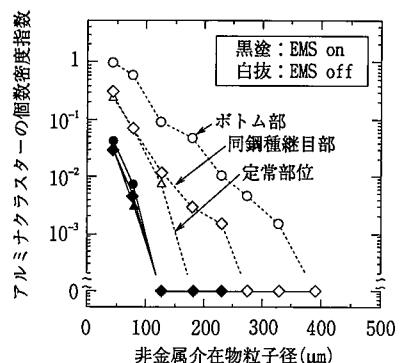


図16 アルミナクラスターの粒径分布に及ぼすEMSの効果

に示した。EMS適用により最ボトム部であっても表層～10mmの清浄性は顕著に改善され、比較材では最大400 μm の非金属介在物が観察されたのに対し、EMS適用材では106 μm 以上の非金属介在物は観察されなかった。以上の結果より、鋳型内電磁攪拌の適用により鋳片表層の清浄性が連続連続鋳造鋳片の全長にわたって、定常部位の鋳片並に改善されることが分かる。

4. 考察

4.1 初期凝固均一化に及ぼす溶鋼流動の影響

前述の図11に示したようにEMSの適用により凝固界面前面の溶鋼流速は幅方向にも、時間的にも均一化された旋回流が形成されていることが分かる。そのことが図12に示したように鋳型内溶鋼の温度分布のばらつきを小さくし、連続鋳造パウダーの流入を安定化させたものと考えられる。その結果、図17に示すように鋳型内の抜熱も均一化され、図13に示したように初期凝固シェル厚みのばらつきも低減されたものと考えられる。なお、初期凝固シェルの均一性に及ぼす溶鋼流動の影響に関しては、山村等¹⁷⁾により実験的にも検証されている。

次に、シェル均一化の効果を凝固核発生頻度の観点から評価することを試みた¹⁸⁾。EMSが鋳片縦割れ防止に有効であったことから、調査対象材として厚板向けの中炭素鋼を選択し、ピクリン酸エッチにより表層から0.2mm位置の凝固組織を顕出した。図18に示すように、25倍の顕微鏡写真より、デンドライトアームが同じ方向を向いている物を同一の核から成長したものとしてグルーピングした。単位面積当たりのグルーブ数を核発生頻度と定義し、EMS有無で比較した。以上の測定により求めた核発生頻度はEMS有りで5.06個/ mm^2 、EMS無しで1.94個/ mm^2 であり、EMS印加により核発生が促進されている。このことから、EMSの印加により鋳型内における核生成が促進され、初期凝固シェル均一化に寄与していることが分かった。

4.2 表層清浄性に及ぼす溶鋼流動の影響

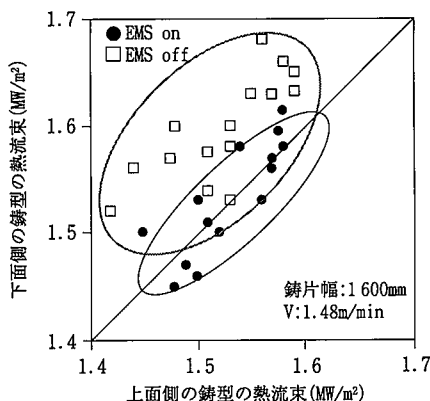


図17 鋳型の熱流束に及ぼすEMSの効果

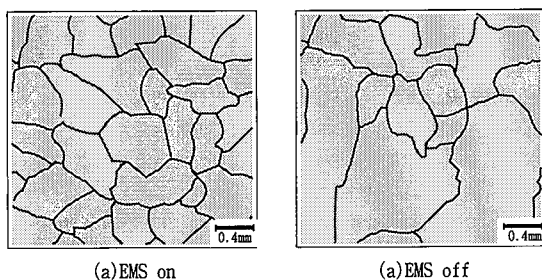


図18 鋳片表層0.2mm位置での凝固組織

従来より鋳片表面清浄性に及ぼす溶鋼流動の影響に関しては凝固シェルと溶鋼との界面の洗浄効果が報告されている^{1,2)}。しかしながら、鋳片表層部の非金属介在物挙動に対する溶鋼流速の影響は必ずしも明確ではなかったため、鋳片表層5～10mmのアルミナクラスターの個数と捕捉された非金属介在物の最大粒子径を上述の岡野の式¹⁶⁾を用いて求めた溶鋼流速で整理して図19、20に示した。溶鋼流速の増大に伴い、鋳片表面に捕捉されるアルミナクラスターの個数は減少し、かつ最大粒子径は小さくなる。図16に示したようにEMSを適用する場合の鋳片表層の清浄性に関しては、鋳型内に注入される溶鋼の清浄性の影響より鋳型内の凝固界面流速の影響をより強く受けている。以上の結果より、EMSを用いて浸漬ノズル吐出流に依存しない、安定的な溶鋼流動を凝固界面に付与することにより、鋳片表層の清浄性を安定的に確保することが可能であることが分かった。

次に、沢田等が提唱した凝固シェル近傍の非金属介在物の力学的運動挙動を解析するための数式モデル¹⁹⁾を用いて、凝固シェルに捕捉される非金属介在物粒子径に及ぼす溶鋼流速の影響を検討してみる。図21にモデルの考え方を示す。ここで鋼中の非金属介在物は二つの力を受ける。一つは界面張力勾配に起因して凝固シェルに捕捉される方向の力、もう一つは境界層の圧力勾配に起因した洗浄効果による凝固シェルから排出される方向の力である。凝固界面前面での溶鋼流速の増加に伴い、速度境界層における速度勾配と圧力勾配は大きくなるので洗浄効果による凝固シェルから排出される力が増加する。この時の洗浄効果は非金属介在物粒子径が大きいほど大きくなる。

一方、界面張力勾配も凝固界面前面での溶鋼流速の増大に伴い増加するが、濃度境界層が速度境界層に比べて小さいことから、溶鋼中の溶質の濃度勾配によって生ずる界面張力勾配によって発生する非金属介在物が捕捉される方向の力は、洗浄効果により非金属介在

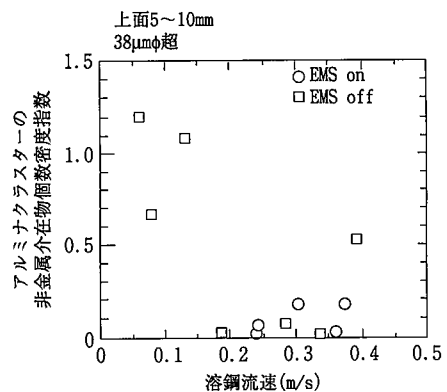


図19 アルミナクラスターの非金属介在物個数密度指数に及ぼす溶鋼流速の影響

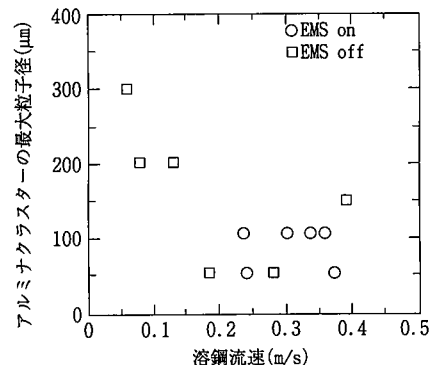


図20 アルミナクラスターの最大粒子径に及ぼす溶鋼流速の影響

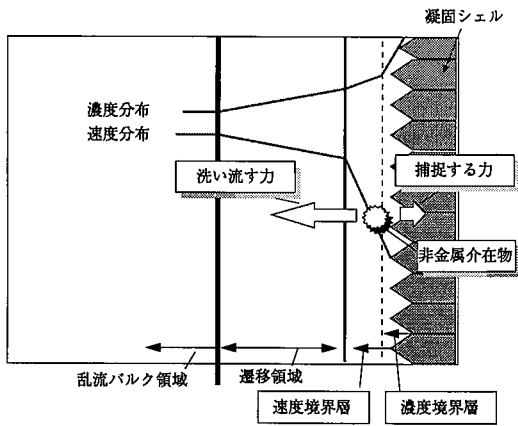


図21 凝固シェル近傍の非金属介在物粒子に作用する力の模式図

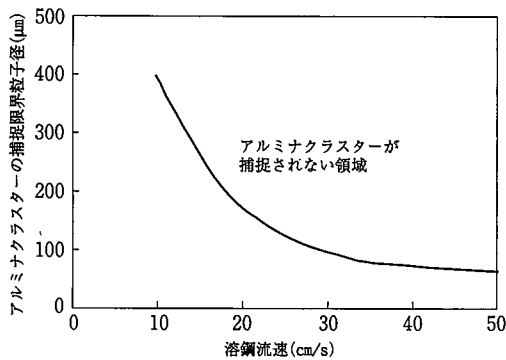


図22 溶鋼の流速と捕捉される非金属介在物の最大粒子径

物が凝固シェルから排出される方向の力に比べて小さい。その結果、図22に示すモデルを用いた計算結果¹⁹⁾が示すようにEMS適用による凝固界面前面流速の増大に伴い、凝固シェルに捕捉される非金属介在物粒子径が小さくなるものと考えられる。

5. EMS適用による製品品質改善効果

図23、24にEMS適用による薄板材の表面疵発生率低減効果及び中炭素材の縦割れ発生率低減効果を示す。EMS適用によりいずれも大きな改善効果が見られる。EMS適用後、鋳型内の熱電対情報を使用した、拘束性ブレークアウトアラーム（铸造異常警報）の発生頻度は激減し⁶⁾、操業の安定化も図られた。その結果図25に示すように厚

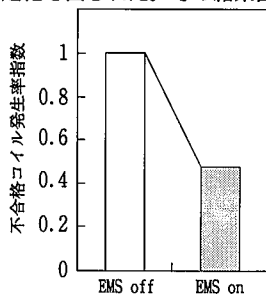


図23 EMS適用による低炭素鋼の表面欠陥減少

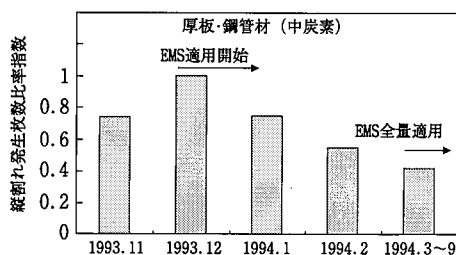


図24 EMS適用による鋳片縦割れの減少効果

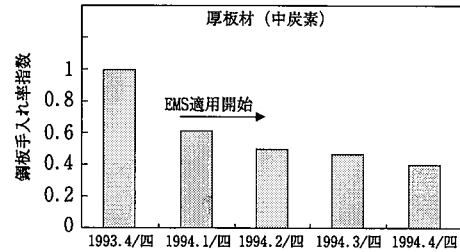


図25 EMS適用による厚鋼板手入れ率の減少効果

鋼板手入れ率の大幅な改善が達成された。

6. 結言

鋳片表層の品質向上を目的に、鋳型内電磁攪拌技術を用いて鋳型内溶鋼流動の適正化を行うとともにその効果を理論的に明らかにした。鋳型内の溶鋼流動の直接的な制御手段として、本来不安定性を抱えるノズル吐出流を利用するのではなく、凝固界面にリニアモーター方式の電磁攪拌技術を適用することにより、鋳片表層清浄性の確保及び初期凝固の安定化を実現することが可能となった。その結果、製品品質向上及び安定化に寄与するだけでなく、操業の安定化も達成された。

本鋳型内電磁攪拌技術は1994年4月より君津製鐵所No.2連続鋳造機、1996年8月より君津製鐵所No.3連続鋳造機に本格的に適用を開始し、以降良好な結果を得ている。また、本技術の有効性は他社においても確認され鋳片品質の安定化に寄与している²⁰⁾。

参考文献

- 1) 竹内栄一、藤井博務、大橋徹朗、木村一茂、高島 靖、山広実留：鉄と鋼、66、S797 (1980)
- 2) 竹内栄一、藤井博務、大橋徹朗、木村一茂、平岡照祥、山広実留：鉄と鋼、67、S833 (1981)
- 3) 白井登喜也、益守照道、仲 億、常岡聡、三隅秀幸：鉄と鋼、72、S1014(1986)
- 4) 湯山英俊、鈴木真、三隅秀幸、山村英明、射手由雄：CAMP-ISIJ、1、1220(1988)
- 5) 福田淳、川瀬敏昭、土岐正弘、堤一彦、渡辺久雄、淵上裕：CAMP-ISIJ、7、10(1994)
- 6) 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、1193(1994)
- 7) 大谷康彦、福田淳、岩田直、石渡信之、船戸和夫：CAMP-ISIJ、7、1194(1994)
- 8) 清瀬明人、宮沢憲一、福田淳、大谷康彦、中島潤二：CAMP-ISIJ、7、1195(1994)
- 9) 大谷康彦、川瀬敏昭、福田淳、中島潤二、中村皓一、山崎強：CAMP-ISIJ、8、348 (1995)
- 10) 奥村治彦：我が国における鋼の連続鋳造技術史、初版、東京、日本鉄鋼協会、p.536
- 11) 石井孝宣、田中誠、三澤健治、上原彰夫、木村秀明、堤直人：CAMP-ISIJ、2、302 (1989)
- 12) 堤直人、江阪久雄、水上義正、田中誠、上原彰夫、木村秀明：CAMP-ISIJ、2、303 (1989)
- 13) 久保田淳、沖本一生、白山章、政岡俊雄、手嶋俊夫：CAMP-ISIJ、3、256(1990)
- 14) 奥田治志、黒瀬芳和、反町健一、児玉正範、今井卓雄、村田賢治：鉄と鋼、72、S196 (1986)
- 15) 田中重典、大谷康彦、福田淳、川瀬敏昭、中島潤二、清瀬明人：TECHCO-29、IISI、1997
- 16) 岡野忍、西村隆、大井浩、千野達吉：鉄と鋼、61(14)、2982(1975)
- 17) 山村英明、水上義正：CAMP-ISIJ、7、1146(1994)
- 18) 大谷康彦、福田淳、中島潤二、江阪久雄、佐藤和久：CAMP-ISIJ、9、764(1996)
- 19) 沢田郁男、岡沢健介：CAMP-ISIJ、8、344(1995)
- 20) 森下雅史、森秀夫、鈴木陵平、三宅和郎、中岡威博、細川佳之：CAMP-ISIJ、14、6 (2001)