

# 鋳型内電磁攪拌による非定常部鋳片清浄性向上

中島 潤二\*・福田 淳\*<sup>2</sup>・清瀬 明人\*・川瀬 敏昭\*  
大谷 康彦\*<sup>2</sup>・土岐 正弘\*<sup>2</sup>・藤崎 敬介\*

Improvement of Transition Part of Slab Surface Cleanliness with In-mold Electromagnetic Stirring

Junji NAKASHIMA, Jun FUKUDA, Akihito KIYOSE, Toshiaki KAWASE, Yasuhiko OHTANI, Masahiro DOKI and Keisuke FUJISAKI

**Synopsis :** To react to user's quality demands and the needs for saving the production cost to realize the high quality slab, the transition part of slab surface cleanliness has been improved with electromagnetic stirring (EMS). In the present study, experimental investigation and 3-D fluid dynamic calculation have been carried out for analysis of the influence of velocity on the slab surface cleanliness. The following results are obtained.

(1) A steady level of surface cleanliness is possible to be maintained by providing an average velocity of about 0.2 to 0.4 m/s along the solidification front, irrespective of the cleanliness of the molten steel.

(2) According to 3-D magnetohydrodynamics calculation, electromagnetic stirring technique is useful for improvement of transition part of slab surface cleanliness, especially bottom end part of continuously cast slab.

**Key words:** electromagnetic stirring; nonmetallic inclusions; continuously cast slabs; cleanliness; ladle exchange; magnetohydrodynamics.

## 1. 緒言

自動車用外板に代表される、冷延、表面処理用薄板材では、顧客の要求品質の厳格化に伴い、表面欠陥が発生しない、特に表面清浄性に優れた鋳片を下工程の操業予定に同期して大量に製造することが求められている。鋼中の非金属介在物は製鋼起因の品質欠陥を発生させる大きな要因の一つであり、鋼中に残存することにより直接的に製品欠陥の原因になる場合と、ノズル詰まり等による偏流発生やパウダー巻き込み等の操業異常を引き起こすことにより間接的に疵発生の原因となる場合とがある。

また、粗大な気泡が鋳片表層に存在するとそれ自身で疵になり得るだけでなく、アルミナクラスターを捕捉して共存する場合が多く、品質欠陥を発生させる要因の一つである。従って、外観品質が特に厳格な材料では、溶鋼の徹底的な清浄化を図るために、数々の品質対策が施されてきた。しかしながら、これらの対策は一般的には精錬時間の長時間化、増工程による物流の煩雑化につながる場合が多く、単に、熱ロスを増大させるだけでなく、製鋼工程全体としての生産性低下を招くこととなっていた。一方、連続鋳造設備にて連々鋳を実施する場合でのタンディッシュ内の溶鋼清浄性に関して種々の研究がなされており、鋳造を開始するキャストスタート部位、鍋交換を実施する取鍋交換部

位の清浄性がタンディッシュでの空気酸化、スラッグの巻き込み等のために劣位となることが報告されている<sup>1-5)</sup>。品質厳格材の場合には、一般的にはこれらの、清浄性が劣位と考えられる鋳片部位を厳格材に充当しない、あるいは鋳片表面を溶削する、冷片にして表面研削をするといった、いわゆる重手入れを行って使用する対策等が取られている。従って、これら非定常部位の鋳片表面近傍の清浄性を向上させることが可能になれば、単に歩留まりが向上するだけでなく、手入れ工程省略による直送化により、鋳片温度低下による熱ロス防止、製鋼工程の物流整流化が可能となり、生産性を著しく向上させることが可能となる。本報では、清浄性が劣位であると言われている、非定常部位の鋳片表面清浄性向上を目的に実用化された鋳型内電磁攪拌技術<sup>6-9)</sup>に基づき導入した鋳型内電磁攪拌装置<sup>10,11)</sup>を用い、鋳型内溶鋼流動を適正化した場合の鋳片表面の気泡、非金属介在物による清浄性改善効果を評価した結果<sup>12,13)</sup>と清浄性改善に及ぼす溶鋼流速の影響とを検討した結果について述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 鋳型内電磁攪拌装置の概要

試験に用いた鋳型内電磁攪拌装置（以下EMS; Electro-

平成18年10月11日受付 平成18年11月14日受理 (Received on Oct. 11, 2006; Accepted on Nov. 14, 2006)

\* 新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター (EPC, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511) 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

\*2 新日本製鐵(株) 君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

\*3 新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター (EPC, Nippon Steel Corp.)

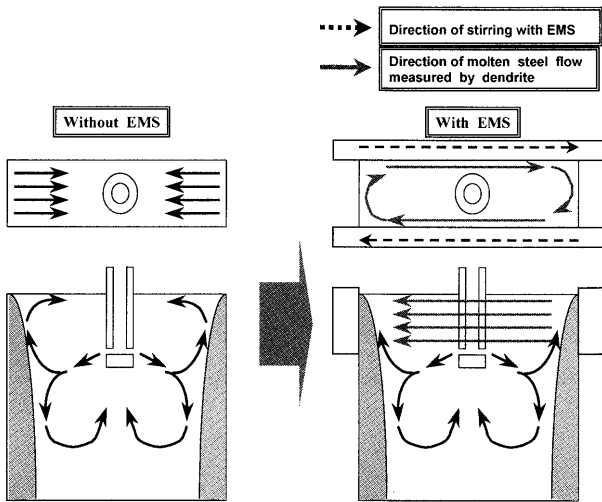


Fig. 1. Schematic drawing of flow pattern in mold with EMS.

Table 1. Casting conditions.

Steel grade	Low carbon aluminum killed steel ; [C]=~0.004%
Casting speed	0.30~1.5m/min
Slab width	1.3m

Magnetic Stirring と称する)<sup>11)</sup>は4極のリニアモーター型であり、鋳型内に電磁攪拌を適用した場合と適用しない場合の溶鋼流動状況の考え方を Fig. 1 に示す。EMS を適用しない場合の鋳型表面近傍の溶鋼流動は、浸漬ノズルからの溶鋼吐出流が短辺に衝突して上昇し、短辺から浸漬ノズルに向かって流れる流れとなっており、浸漬ノズルからの溶鋼吐出流量に応じて変化してしまう。一方、EMS を適用する場合には、鋳型に沿って設置されたリニアモーターにより付与された電磁力により、鋳型内の溶鋼は浸漬ノズルからの溶鋼吐出流の影響が小さくなり、一定方向の旋回流を形成する。

## 2.2 鋳造条件

EMS の適用の効果を確認するために、Ti 添加の極低碳素鋼（転炉にて溶製した未脱酸鋼を RH 真空脱ガス処理設備にて脱炭、脱酸処理を実施）を用いて同一チャージでのストランド間で EMS 適用有り、無しの場合で鋳造して鋳片試料を採取し比較に供した。ストランド間の条件は鋳造幅、鋳造速度をほぼ等しくした。主な鋳造条件を Table 1 に示す。

## 2.3 清浄性調査方法

### 2.3.1 鋳片表層の気泡分布調査

鋳片表層の気泡の分布状況を評価するために、Fig. 2 に示すように鋳片幅 1300 mm の全幅の鋳片試料を採取し、鋳片厚み方向に段削りを行い、直径 200 μm 以上の気泡の個数を計数し評価した。

### 2.3.2 鋳片表層の清浄性調査方法および位置

鋳片清浄性の評価方法としては、Fig. 3 に模式図で示したスライム法（電解抽出による非金属介在物評価方法）を

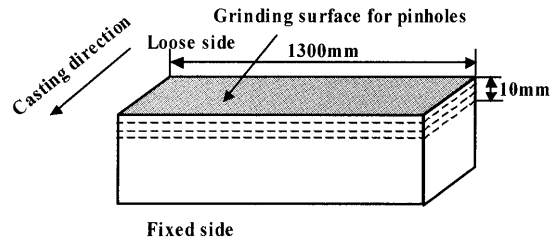


Fig. 2. Sampling position for sequential grinding test.

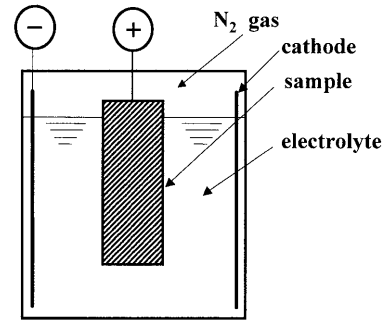


Fig. 3. Schematic drawing of the slime method.

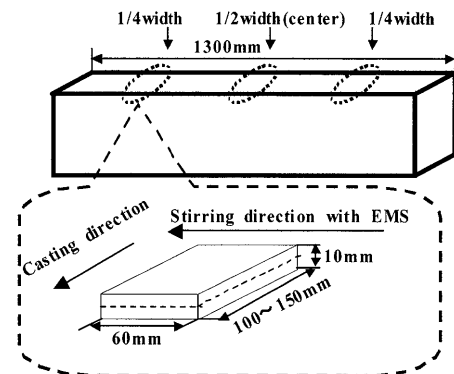


Fig. 4. Sampling position for the slime.

用いた。鋳片試料は Fig. 4 に示すように、1300 mm 幅の鋳片の 1/4 幅部、1/2 幅部の位置で、鋳片上面表層より 10 mm 位置まで 5 mm 厚の試料を切り出し、調査に供した。スライム法では塩化第一鉄水溶液中で介在物を電解抽出し、残渣の中から 38 μm 以上の大きさの介在物を分取した。抽出した介在物は形態によりアルミナクラスターと球状介在物とに分類し、各々粒子径毎に分級し、個数密度を調査した。

非常常部鋳片清浄性におよぼす溶鋼流速の影響を評価するために、キャストスタート部位 ( $V_c=0.35$  m/min から  $V_c=1.0$  m/min まで増速) より鋳造長さ方向に調査のための鋳片を採取するとともに、同鋼種連々鋳でのチャージとチャージの継ぎ目部位、取鍋交換部位近傍の継ぎ目部鋳片も採取し、調査に供した。また、比較のために定常部鋳片も採取した。

## 2.4 溶鋼流速調査方法

鋳片表面清浄性に及ぼす溶鋼流速の影響を評価するため

に、デンドライト傾角を測定し、(1)式に示す、岡野の式<sup>13)</sup>を用いて溶鋼流速を算出した。デンドライト傾角測定にあたっては、調査する位置より試片を切り出し、表面を研磨した後、ピクリン酸により腐食した後、倍率5倍で凝固組織を撮影し、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を測定した。溶鋼流速は、高炭素鋼で求めた(1)式に示す、岡野の式<sup>13)</sup>が適用できると仮定して算出した。

$$\ln V = (\theta + 9.73 \times \ln f + 33.7) / (1.45 \times \ln f + 12.5) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\theta$ ；デンドライト傾角[degree]、 $f$ ；凝固速度[cm/s]、 $V$ ；溶鋼流速[cm/s]である。

### 3. 調査結果

#### 3.1 鋳片表層の気泡分布調査結果

Fig. 5に鋳片全幅での直径200 $\mu$ m超の気泡の個数密度分布を鋳片表層から深さ方向に調査した結果を示す。EMSを適用しない場合の最表層のピンホール個数密度を1として規格化した。EMSを適用しない場合には、鋳片表層直下に偏在している気泡が、EMSを適用することにより、安定して低減されている。なお、観察された気泡が鋳片幅方向に偏在することは無かった。

#### 3.2 鋳片表層の清浄性調査結果<sup>14)</sup>

Fig. 6に鋳片表層から10mmまでの範囲のアルミナクラスター量の推移を、鋳造開始から鋳造長さ方向にEMS有り無しで比較して示す。Fig. 6より明らかなように、鋳造開始直後のキャストスタート部(最ボトム)の鋳片表面清浄性は悪く、介在物量が多いが、EMSを適用することにより清浄性は顕著に改善され、定常部鋳片にいたるまで安定した改善効果が見られる。

また、鋳片表層10mmのアルミナクラスター量で評価した清浄性を最ボトム部、同鋼種継ぎ目部(取鍋交換部位)、定常部位で比較してFig. 7に示す。清浄性が劣位である最ボトム部ではEMS無しの場合には各粒子径にて、アルミナクラスターの個数密度が大であり、最大400 $\mu$ m程度の粗大なアルミナクラスターが観察されたのに対し、EMSを適用した場合には106 $\mu$ mを超える大きさのアルミナクラスターは観察されず清浄性が顕著に改善されている。同鋼種継ぎ目部、清浄性が良好な定常部でもEMS適用によるアルミナクラスターの低減効果が見られた。以上の結果より、EMSを連々鋳時に適用することにより、鋳片表層10mmの領域では、鋳片の全長にわたって定常部位の鋳片並の清浄性が得られていることが分かった。

#### 3.3 鋳片表層の清浄性におよぼす溶鋼流速の影響

従来より、鋳片表面清浄性におよぼす溶鋼流動の影響に関しては、凝固シェル前面に溶鋼流動を付与することにより洗浄効果によって清浄性が改善されることが報告されて

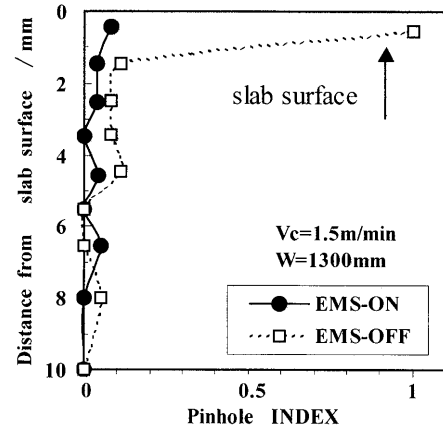


Fig. 5. Effect of EMS on the pinhole distribution in the depth direction.

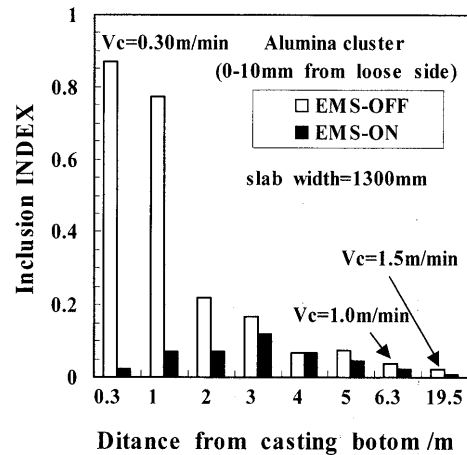


Fig. 6. Effect of EMS on the inclusions distribution in casting direction.

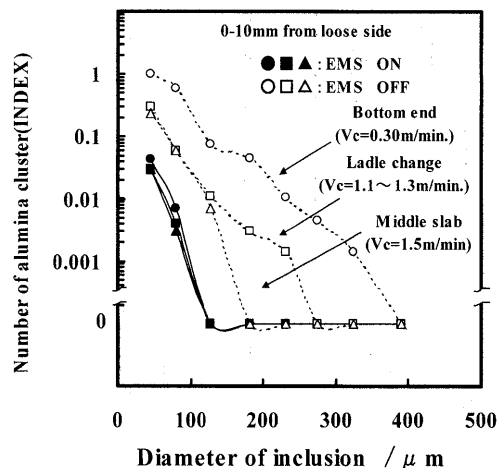


Fig. 7. Effect of EMS on the inclusions distribution in casting direction.

いる<sup>9)</sup>。しかしながら、鋳片表層の介在物と溶鋼流速との関係は必ずしも定量的には評価されていなかった。従って、鋳片表層の清浄性を確保するためには、鋳片表層の介在物挙動に及ぼす溶鋼流動の影響を明らかにすることが重要である。鋳片表層5~10mmの範囲に捕捉されたアルミナク

ラスターの個数とアルミナクラスターの最大粒子径におよぼす溶鋼流速の影響をFig. 8, Fig. 9に示す<sup>14,15)</sup>。ここで、溶鋼流速の範囲を広く取るために定常部鋳片とキャストスタートを含む非定常部鋳片の調査結果を用いた、また溶鋼流速は鋳片長辺に沿った流れが支配的であるため、鋳造方向に垂直な鋳片切断面(C断面)での鋳片の一次デンドライトアーム間隔の傾角を測定し、(1)式に示す岡野の式<sup>13)</sup>を用いて算出した。Fig. 8, Fig. 9の結果より溶鋼流速の増大とともに鋳片表層に捕捉されるアルミナクラスター個数は減少し、その最大粒子径も小さくなる<sup>14,15)</sup>。EMSを適用し溶鋼流速を0.2~0.4m/sに制御すると、アルミナクラスターの個数密度が著しく低下し、106 $\mu\text{m}$ を超える大型のアルミナクラスターも観察されなくなることが分かる。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、鋳型内の凝固界面前面流速の影響をより強く受けている。以上の結果より、EMSを用いることにより、浸漬ノズルの吐出流に起因する鋳型内溶鋼流動に依存しない、安定的な溶鋼流動を鋳型内の凝固界面前面に付与することにより、鋳片表層の清浄性を安定的にかつ、良好に維持することが可能であることが分かった。

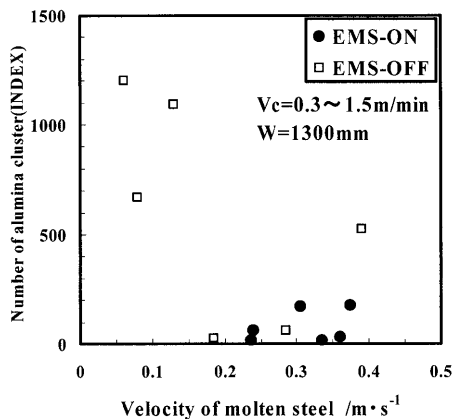


Fig. 8. Influence of velocity of molten steel on the amount of inclusions.

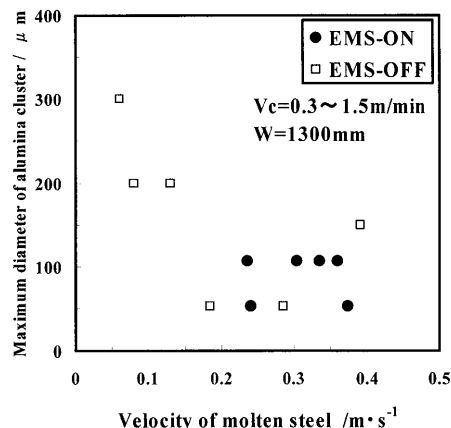


Fig. 9. Influence of velocity on the maximum diameter of inclusions.

## 4. 考察

### 4.1 溶鋼流速と介在物捕捉挙動の理論的検討

EMS適用時の鋳片表面清浄性調査により、凝固界面前面に安定的に溶鋼流動を付与することにより、鋳片表層の清浄性を安定的に良好にすることが可能なことが分かった<sup>14,15)</sup>。一方、流動下での凝固界面前面での粒子の挙動に関しては、水モデルによる粒子の捕捉実験に基づいた理論的な検討<sup>16,17)</sup>がなされており、介在物粒子におよぼす1)慣性力、2)抵抗力、3)速度勾配による揚力(Saffman力)、4)乱流拡散による移動が考慮され、溶鋼流速と捕捉される限界介在物粒子径との関係がFig.10に示すように求められている<sup>17)</sup>。凝固界面への介在物の捕捉防止の要因として、主として、介在物が凝固界面に平行な流れから力を受けるため、凝固界面付近に介在物粒子が移動してきた際に失速して捕捉されることを防止する効果であるとしている。EMSの適用により、凝固界面に流速を付与することができるので、介在物粒子が凝固界面に捕捉されるのを防止していると言える。

### 4.2 電磁流動解析による凝固界面前面流速に及ぼすEMSの効果<sup>18)</sup>

清浄性が劣位であると言われている非定常部鋳片の実態調査により、鋳片表面清浄性に及ぼす、鋳型内溶鋼流速の効果が明らかになった。Fig. 8, Fig. 9の結果より凝固界面前面流速が0.2m/s以上であれば、106 $\mu\text{m}$ を超える粗大なアルミナクラスターの捕捉は見られず、捕捉される介在物量も小さくなることが分かった。そこで、非定常部鋳片部位の表面清浄性に及ぼすEMS適用による溶鋼流動付与の効果を電磁流動解析<sup>18)</sup>を用いて評価した。Fig. 7に示すEMS適用時の鋳片表層10mmにおいては、清浄性が劣位である最ボトム部であっても、定常部並みの表面清浄性になっていることから、最ボトム部の凝固界面前面の溶鋼流動状況は定常部に比べても介在物捕捉に対してより有利な条件になっていることが考えられる。

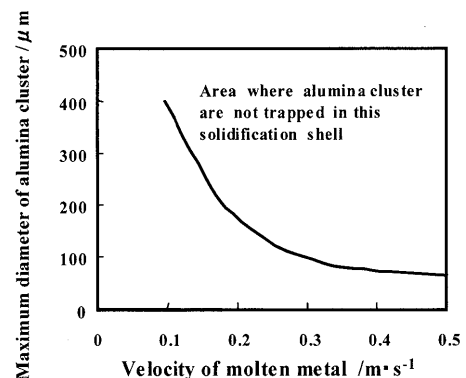


Fig. 10. Predicted relation between velocity of molten steel and maximum diameter of entrapped inclusion diameter of inclusions.<sup>17)</sup>

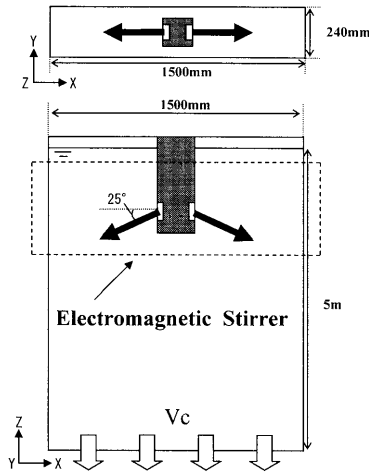


Fig. 11. Schematic drawing of simulation area.

4.2.1 計算条件<sup>18)</sup>

計算に当たっては、連続鋳造設備の鋳型内の溶鋼流動状況をシミュレートするために、計算領域としてFig.11に示すような幅 (X方向) 1.50 m、厚さ (Y方向) 0.24 m、高さ (Z方向) 5.0mの領域を考え、X、Y、Z各方向を54×22×58のメッシュに分割した。実鋳片の清浄性調査を実施したのは2.50mの垂直部を有する垂直曲げ連続鋳造設備であるが、評価の範囲が鋳型内の湯面から1.0mの範囲なので、簡略化のために計算領域は深さ5.0mの直方体とみなした。代表的な非定常部位として、キャストスタート部と取鍋交換部とを考慮し、定常部位との比較を行うために、非定常部位の鋳造速度として  $V_c=0.5\text{ m/min}$  を、定常部位の鋳造速度として  $V_c=1.6\text{ m/min}$  を代表例として計算した。ここで、 $V_c$ ：鋳造速度 [m/min]である。

計算に当たってはまず電磁界解析ソフトであるFLEDYを用い、鋳型内の磁束密度分布および渦電流分布よりローレンツ力を求めた<sup>18)</sup>。計算で得られたローレンツ力を流動解析の外力項として入力し、各々の鋳造速度にて計算を実施した。流動解析手法としてLES (Large Eddy Simulation)を用いた。

計算にあたっては、(2)式による $\vec{A}$ - $\psi$ 法、有限要素法による渦電流電磁場解析を用いて、鋳型内の磁束密度分布および渦電流分布より電磁力 $\vec{F}_{em}$ を(3)式より求めた。

$$\nabla \times ([\mu]^{-1} \nabla \times \vec{A}) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \psi \right) = \vec{J}_0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\vec{A}$ ：ベクトルポテンシャル [Wb/m]、 $\psi$ ：スカラーポテンシャル [V]、 $\vec{J}_0$ ：電流密度 [A/m<sup>2</sup>]、 $\sigma$ ：電気伝導度 [S/m]、 $[\mu]^{-1}$ ：透磁率テンソルの逆行列 [m/H]である。

$$\vec{F}_{em} = \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \psi \right) \times (\nabla \times \vec{A}) \dots \dots \dots (3)$$

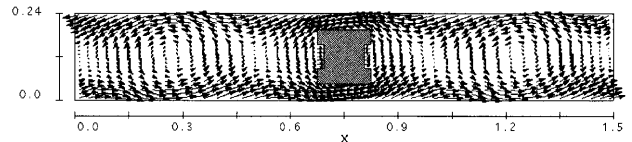


Fig. 12. Electromagnetic force distribution in mold.

Table 2. Material conditions used here.

Viscosity	0.006	[Pa·S]
Density	7200	[kg/m <sup>3</sup> ]
Surface tension	1.72	[Nm/m]
Calculation time	120	[s]

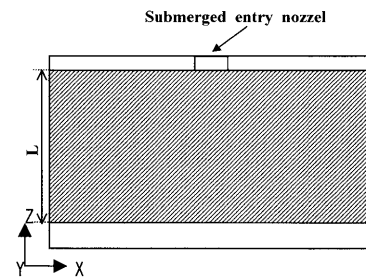


Fig. 13. Schematic drawing of the  $S_0$ .

Fig.12にコア高さ中心位置での水平方向の電磁力ベクトルの計算結果を示す。

次に、計算で得られた電磁力を(4)式に示すごとく流動解析の外力項として入力し、各々の鋳造速度における計算を実施した。

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \mu \nabla^2 \vec{u} - \nabla P + \rho \vec{g} + \vec{F}_{em} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\vec{u}$ ：流速ベクトル [m/s]、 $\rho$ ：溶鋼の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\mu$ ：粘性係数 [kg/(m·s)]、 $P$ ：圧力 [N/m<sup>2</sup>]、 $\vec{g}$ ：重力ベクトル [m/s<sup>2</sup>]、 $D/Dt$ ：全微分である。

計算に用いた溶鋼の物性値をTable 2に示す。

凝固界面に相当する壁部での流速分布を評価するために、鋳型内の溶鋼メニスカスから0.3mまでの場合とメニスカス下1.0mまでの、Fig.13に示す壁面に沿った、斜線部分範囲の流速毎の強度割合を(5)式によって算出した。

$$\alpha = \frac{S_{v_0}}{S_0} \dots \dots \dots (5)$$

算出箇所は①壁面近傍と②厚み中心位置の二箇所である。ただし

$$S_{v_0} = \sum S_i (|v| \geq v_0) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $S_0$ はメニスカスからメニスカス下Lまでの面積、 $v_0$ は流速のしきい値、 $S_{v_0}$ は斜線部において $v_0$ よりも大きな流速を持つセルの面積の和、 $S_i$ は $v_0$ よりも大きな流速値を持つセルの面積である。

4・2・2 計算結果

Fig.14, Fig.15にEMS適用の有り無しの条件での厚み中心位置での流速分布の状況を、非定常部を想定した  $V_c=0.5\text{ m/min}$  と定常部を想定した  $V_c=1.60\text{ m/min}$  の場合とで比較して示す。 $V_c=1.60\text{ m/min}$  の場合にはEMS適用有無によるメナスカス近傍の流動に顕著な差異は見られないが、 $V_c=0.5\text{ m/min}$  の場合では、EMSを適用しない場合には、メナスカス近傍の溶鋼流速が、顕著に小さくなるのに対しEMSを適用した場合には、メナスカス近傍の溶鋼流速が十分に確保されていることが分かる。

次に、(5)式で定義した $\alpha$ で铸型内の溶鋼流動状況をEMS有り無しで比較して、Fig.16, Fig.17に示した。厚み

中心位置の計算結果を(a) centerに壁近傍の計算結果を(b) wallに示す。Fig.16より明らかなように、 $\alpha$ の値は定常部を想定した  $V_c=1.6\text{ m/min}$  の場合には、厚み中央部においても、壁面近傍においても、EMS適用により $\alpha$ が大きくなる傾向は見られ、特に、壁面近傍ではEMS適用により溶鋼流速は顕著に大きくなり、 $v_0=0.2\text{ m/s}$  を超える $\alpha$ の値が大となる。

Fig.17に示す、キャストスタート部位を想定した  $V_c=0.5\text{ m/min}$  の場合でも、定常部と同様にEMS適用により $\alpha$ が大きくなる傾向は見られ、EMS適用が無い場合の溶鋼流速が小さいこともあり、EMS適用による $\alpha$ の改善効果は幅中央部、壁近傍のいずれの場合にも、定常部と比

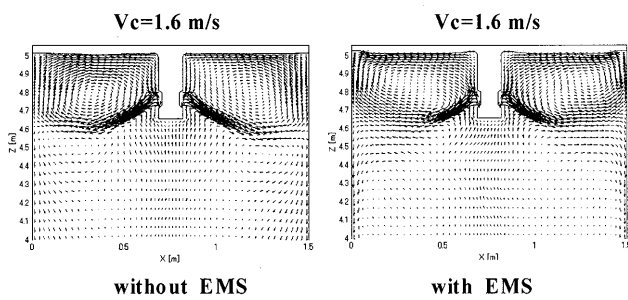


Fig. 14. Effect of EMS on velocity distribution in mold.

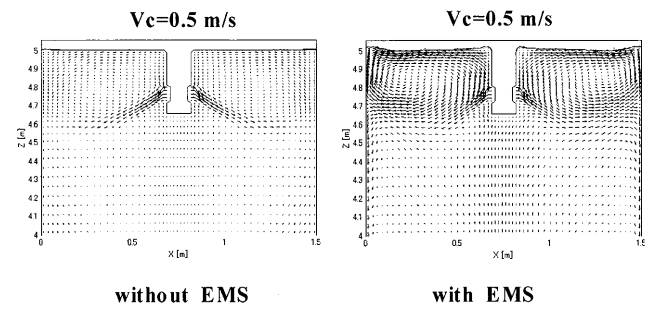


Fig. 15. Effect of EMS on velocity distribution in mold.

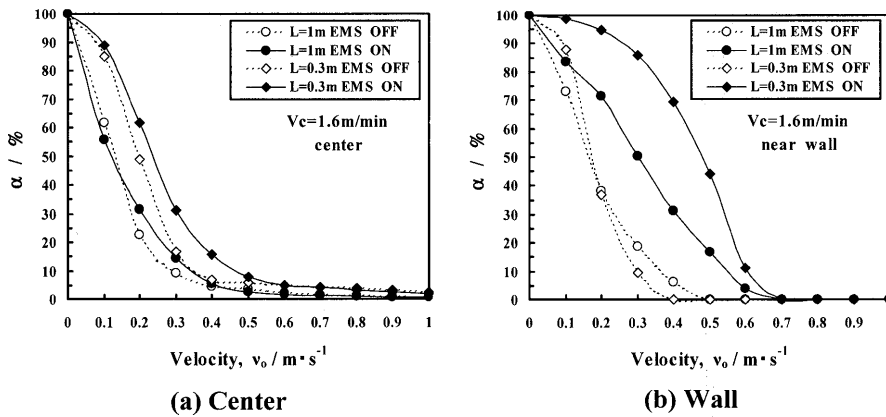


Fig. 16. Effect of EMS on  $\alpha$  distribution in mold.

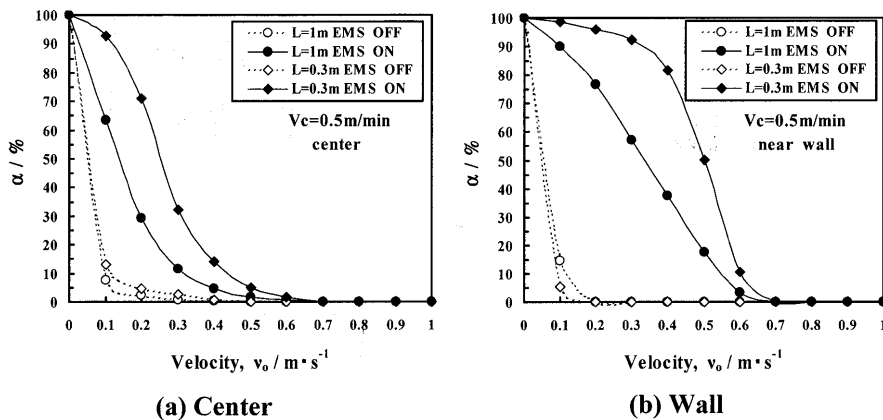


Fig. 17. Effect of EMS on  $\alpha$  distribution in mold.

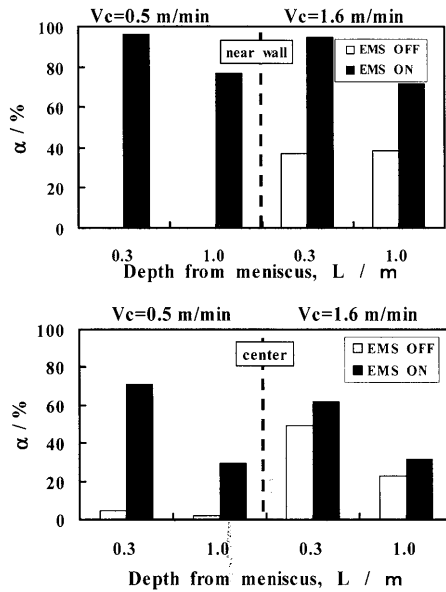


Fig. 18. Effect of EMS on velocity distribution in mold.

較して顕著である。

次に、EMS適用の効果をメニスカスからの距離Lで比較した結果をFig.18に示す。壁面近傍のαの分布は、定常部であっても、非定常部であっても、メニスカス近傍0.3mの範囲であれば、αの値は90%を超え、1.0mまでの範囲で見ても70%を超えている。各々条件ごとに比較してみると、EMSを適用した場合には、メニスカスから1.0mまでの範囲でのαの値が非定常部に相当するVc=0.5 m/minであっても、定常部に相当するVc=1.6 m/minであっても、高値に維持されている。これに対し、EMSを適用しない場合には、特に非定常部に相当する、鋳造速度が小さい場合にαの値が顕著に低下する。従って、キャストスタート、取鍋交換等の非定常部位において、取鍋から注入される溶鋼がタンディッシュ内での空気酸化、取鍋スラグの巻き込み、タンディッシュスラグの巻き込み等に起因する再酸化により、清浄性が悪化して連鋳鋳型内に注入された場合には、粗大なアルミナクラスターが鋳型内で浮上し、凝固界面前面近傍に存在した場合でも、EMSを適用した場合であれば、凝固シェルに捕捉されず溶鋼中にとどまり、浮上した後、連鋳パウダーに吸収される可能性が大きくなると言える。これに対し、EMSを適用しない場合には、そのまま、凝固シェルに捕捉され、鋳片表面清浄性を悪化させ原因になるものと考えられる。

以上の結果から明らかなように、EMSを適用しない場合には、鋳型内の溶鋼流動状況は鋳造速度、浸漬ノズルからの溶鋼吐出流によって大きく影響されるのに対し、EMSを適用することにより、鋳造速度に影響されず鋳型内の溶鋼流動状況を安定した状態に制御できるようになる。また、鋳造速度が一般的に小さい、非定常部では、Fig.19に示すように、メニスカスから一定距離の部位の

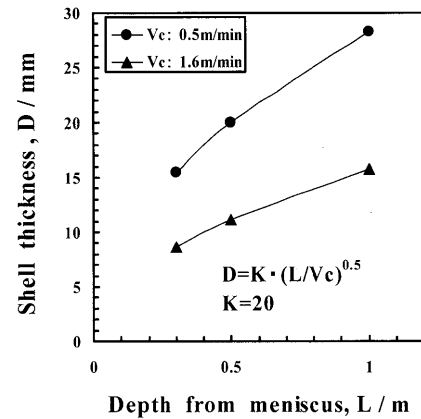


Fig. 19. Effect of EMS on shell thickness in mold.

シェル厚みは定常部位に比べて大きくなる。従って、鋳片表面からより深い位置まで、EMS適用の効果が作用することが期待される。そのため、最ボトム部のように溶鋼清浄性が劣位な部位であっても、鋳片表面清浄性は定常部並の清浄性が確保できるものと考えられる。

## 5. 結言

本研究では、清浄性が劣位であると言われている、非定常部位の鋳片表面清浄性向上を目的に、鋳型内電磁攪拌技術を適用することにより、鋳型内溶鋼流動を適正化した場合の鋳片表面の清浄性改善効果を評価するとともに、清浄性改善に及ぼす溶鋼流速の影響とを実鋳片の清浄性調査に加え、電磁流動解析により検討した。その結果以下の結論を得た。

(1) 連続鋳造設備の鋳型内に電磁攪拌を適用することにより、鋳片表面清浄性は顕著に改善され、キャストスタート部位および同鋼種継ぎ目部であっても定常部並みの表面清浄性となることが分かった。

(2) 鋳片表面に捕捉される介在物（アルミナクラスター）個数および最大粒子径は、溶鋼流速の増大とともに減少する傾向を示し、0.2 m/s以上の溶鋼流速を凝固界面前面に付与すれば、106 μm超の粗大な介在物は捕捉が防止され、個数密度も低下することが分かった。

(3) 電磁流動解析を用いて、定常部と非定常部に相当する条件での凝固界面前面の溶鋼流速を評価した結果、鋳型内電磁攪拌を適用することにより、適用しない場合には、鋳造速度の低下に伴い、凝固界面前面流速が大きく低下するのに対し、電磁攪拌を適用することにより、凝固界面前面の流速が0.2 m/sを超える範囲が鋳造速度によらず（鋳造部位によらず）広い範囲で確保できることが分かった。

(4) 鋳型内電磁攪拌技術の適用による、鋳片表面清浄性向上効果を、凝固界面前面流速が一定の値以上に確保できている面積の割合を表すαを指標として整理した結果、鋳型内電磁攪拌適用による鋳片表面清浄性改善効果を説明

することができることがわかった。

本研究における電磁流動解析実施にあたり、日鐵プラント設計(株)の山田貴啓氏の多大なる支援をいただいた。ここに深甚なる謝意を表す。

### 文 献

- 1) H.Tanaka, A.Imamura, I.Kitagawa and Y.Nishihara: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1391.
- 2) Y.Arai, M.Mori and H.Yamamura: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1321.
- 3) Y.Higuchi, Y.Tago, S.Fukagawa, T.Kanai and A.Mutoh: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 375.
- 4) K.Sasai and Y.Mizukami: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 40.
- 5) K.Sasai: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 820.
- 6) E.Takeuchi, H.Fujii, T.Ohhasi, K.Kimura, Y.Takashima and M.Yamahiro: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), S797.
- 7) E.Takeuchi, H.Fujii, T.Ohhasi, K.Kimura, T.Hiraoka and M.Yamahiro: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), S833.
- 8) T.Shirai, T.Masumori, O.Naka, S.Tuneoka and H.Misumi: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), S1014.
- 9) H.Yuyama, M.Suzuki, H.Misumi, H.Yamamura and Y.Ide: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 1220.
- 10) J.Fukuda, T.Kawase, M.Doki, K.Tsutsumi, H.Watanabe and H.Huchigami: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 10.
- 11) J.Fukuda, T.Kawase, Y.Ohtani, N.Iwata, K.Tsutsumi, H.Okumura and K.Watanabe: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1193.
- 12) Y.Ohtani, J.Fukuda, N.Iwata, N.Ishiwata and K.Funato: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1194.
- 13) S.Okano, T.Nishimura, H.Ohi and T.Chino: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 2982.
- 14) A.Kiyose, K.Miyazawa, J.Fukuda, Y.Ohtani and J.Nakashima: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1195.
- 15) J.Fukuda, Y.Ohtani, A.Kiyose, T.Kawase and K.Tsutsumi: Proc. 3rd European. Conf. on Continuous Casting, IISI, Madrid, (1998), 437.
- 16) K.Okazawa, I.Sawada, T.Toh and E.Takeuchi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 343.
- 17) I.Sawada and K.Okazawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 344.
- 18) K.Fujisaki: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **37** (2001), 1098.