

移動磁場によるスラブ連铸機の铸型内溶鋼流動制御

久保田 淳*・久保 典子*・鈴木 真*²・石井 俊夫*・西町 龍三*²・荒牧 則親*²

Steel Flow Control with Travelling Magnetic Field for Slab Continuous Caster Mold

Jun KUBOTA, Noriko KUBO, Makoto SUZUKI, Toshio ISHII, Ryuzo NISHIMACHI and Norichika ARAMAKI

Synopsis : A flow control of molten steel in a continuous slab caster mold has been carried out with travelling magnetic field. The aim of flow control is prevention against mold powder entrapment into molten steel. The travelling magnetic field was imposed to spouting stream from a submerged entry nozzle with the linear-motor-type actuator. This actuator has two travelling modes of magnetic field. One is for braking the velocity of spouting stream (EMLS: Electromagnetic Level Stabilizer), and another is for acceleration (EMLA: Electromagnetic Level Accelerator). With these braking and accelerating performance, control of steel flow velocity just below meniscus was carried out. By velocity measurement below molten steel surface at a commercial caster mold, performance of EMLS and EMLA was investigated. Especially for EMLS performance, change in meniscus velocity profile along mold width direction was examined. When increasing the intensity of EMLS, at first the meniscus velocity around a submerged entry nozzle was reduced and then the meniscus velocity around the mid of half width of a mold, hereafter the velocity around narrow face of a mold was reduced. Moreover formularization of the braking performance of meniscus velocity by EMLS was carried out. In this formula the braking performance was divided into two factors. By using the EMLS and EMLA with a computer control system, the surface defect frequency on cold rolled coil was reduced drastically.

Key words : continuous casting; slab; mold; steel flow; meniscus; travelling magnetic field; powder; entrapment; inclusion; surface; defect; velocity.

1. 緒言

連続铸造工程は液相から固相への相変換工程である。この時点で製品としての鋼の素性が造り込まれ、特に鋼の清浄度は決定的なものとなる。一方、生産の効率化を図るために連铸工程の高速化がなされており、連続铸造機铸型内の溶鋼の運動エネルギー密度は高まるばかりである。これは铸型内での凝固シェル不均一成長や、非金属介在物の溶鋼中への巻込みを助長するものである。このような環境下で、ブレークアウトなどの作業事故を防止して連铸機の操業安定化を図り、また品質欠陥を少なくして製品の品質や歩留を向上させるために、铸型内の溶鋼流動制御は重要な技術である。

铸型内の溶鋼流動制御技術は、第一に铸型内の溶鋼流動の状態を推定または検知する技術^{1,2)}、第二にその溶鋼流動の状態が適切なものとなるように制御する技術に分けられる。この第二の技術として、連铸機の基本的な操業パラメーターである铸造速度、浸漬ノズルの形状や浸漬深さ^{3,4)}、あるいはArガスの吹込み量などを調節する方法がある。しかし、いずれのパラメーターもそれを変更することにより、溶鋼流動以外の他の操業状態にも影響を及ぼすおそれがあり⁵⁾、その操作範囲に限界がある場合が多い。この点において、铸型内の溶鋼に対し、新たに電磁力を印加する方法は、このような制約を受けることなく自在に溶

鋼流動を制御できる可能性がある。

本報では、スラブ連铸機を対象とした、移動磁場式の磁場発生装置による铸型内溶鋼流動の制御効果について、主に実機での調査結果をもとにして述べる。

2. 铸型内溶鋼流動制御の目的

本報では、連铸工程における非金属鋼中介在物の発生原因であるモールドパウダーの溶鋼中への巻込みと、凝固シェルへの捕捉を防止することを主な目的とした。

铸型内溶鋼の流速が大きくなると、モールドパウダーの巻込みが生じる。この現象については多数の報告があり⁶⁻⁹⁾、メニスカスの溶鋼流でモールドパウダーの溶融層が削り込まれたり、メニスカスに生じる縦渦で巻込まれることがモデル実験で知られている。また、巻込みが生じ始める臨界値は、メニスカス溶鋼流速で0.13~0.20 m/secと報告されている⁶⁻⁹⁾。

巻込まれたモールドパウダー液滴は、製品表面の線状疵として露見する。筆者らはエネルギー分散型X線分析でモールドパウダーと同定された線状疵の、製品厚み方向断面を鏡検して、製品表面から介在物までの距離を求め、これをスラブ表面からモールドパウダー液滴までの距離に換算した¹⁰⁾。铸造速度が増すにつれてモールドパウダー液滴の付着位置は、スラブのより内部にまで至っていることが

平成11年6月28日受付 平成11年8月25日受理 (Received on June 28, 1999; Accepted on Aug. 25, 1999)

* NKK 総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama 721-8510)

*2 NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corp.)

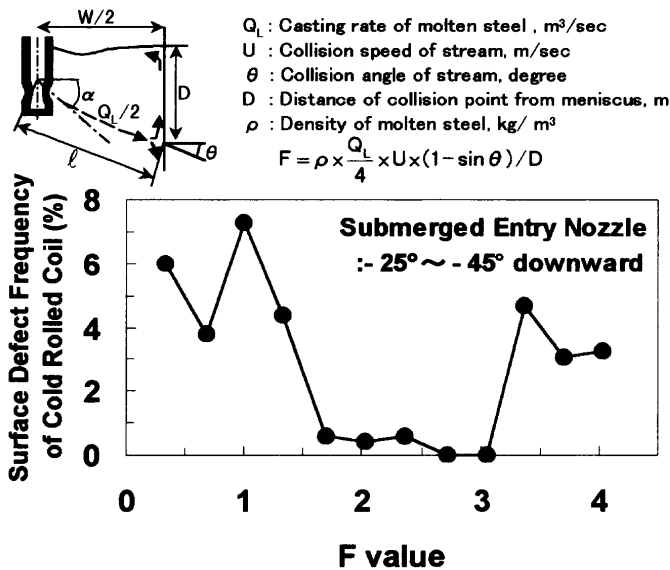


Fig. 1. Relationship between 'F value' and surface defect frequency on cold rolled coil¹⁾.

わかった。これは、巻込まれたモールドパウダー液滴が鋳型内の溶鋼流によってストランド下方へ輸送されるためと考えられる。

一方、鋳型内溶鋼の流速が小さい場合にも、モールドパウダー起因の製品表面欠陥が生じる場合がある。これは特に極低炭素鋼で顕著である。表面欠陥はスラブのコーナー近傍に相当する位置に多く発生している。このスラブコーナー部の鋳造方向に沿った断面を検鏡すると、凝固シェル先端部がメナスカスに沿ってフック状に成長した部分に介在物が捕捉されている様子が観察された¹⁾。この凝固シェル先端のフックの成長は、メナスカス部への熱の供給不足によって助長されていると考えられる¹²⁾。

上述のようにモールドパウダーの溶鋼への巻き込みによる製品表面疵の発生は、メナスカス部の溶鋼流速が過大な場合、過小な場合の両方で生じている。Fig. 1はTeshimaらが、短辺近傍におけるメナスカス直下の溶鋼運動量の指標(以下、F値¹⁾と呼ぶ)と、冷間圧延後の製品コイルの表面欠陥発生率との関係を調査した結果である²⁾。F値の大きさはメナスカス流速の大きさと読み替えられる²⁾ので、メナスカス溶鋼流速を適正な範囲に制御することによって製品表面疵の発生を防止できる²⁾といえる。

3. 移動磁場式の鋳型内溶鋼流動制御装置

3.1 基本概念

本報の移動磁場の発生装置は、浸漬ノズルからの溶鋼吐出流に直接磁場を作用させることを狙ったものである。Fig. 2はその概念図であり、磁場の移動モードにより、吐出流に対して2種類の作用を行えるようにした。第1のモードは吐出流と対向する向きに磁場を移動させ、吐出流

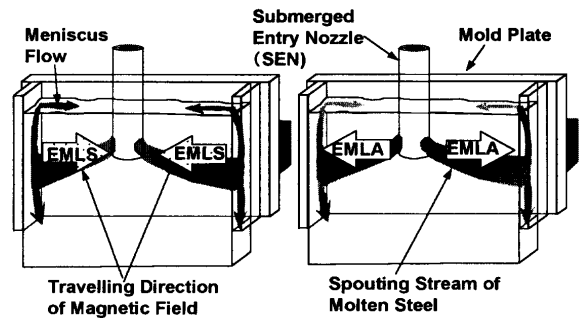


Fig. 2. Driving force imposed upon molten steel by EMLS, EMLA.

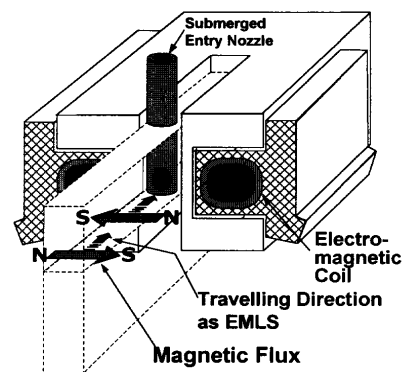


Fig. 3. Schematic illustration of installation of the magnetic field generator for EMLS, EMLA.

Table 1. Specifications of the generator of travelling magnetic field.

Magnetic Field Mode	Linear Travelling
Capacity	2000kVA-AC/Strand
Voltage	430 V/Max.
Current	2700A/Max
Frequency	0-2.6 Hz

の減速を行う。以下、この磁場移動モードをEMLS (Electromagnetic Level Stabilizer)と呼ぶ。第2のモードは吐出流を牽引する向きに磁場を移動させ、吐出流の加速を行う。以下、この磁場移動モードをEMLA (Electromagnetic Level Accelerator)と呼ぶ。

このような移動磁場を発生させるために、鋳型の前後長辺面に沿ってリニアモータータイプの磁場発生装置を配置した。Fig. 3はその概略図である。前後の磁場発生装置のコイルの磁場で合成される磁束は、図に示すように鋳型を厚み方向に貫く。そしてこの磁束はEMLSの場合には鋳型の短辺から浸漬ノズルへ向う方向に、またEMLAの場合にはその反対の向きに移動する。

3.2 実機での磁場発生装置の仕様

Table 1は実機に設置した移動磁場式の磁場発生装置の仕様である。なお磁束密度の定格値は、空気中で測定した空間・時間最大値で、磁場発生装置への投入電力の電流周波数が0.5 Hzの場合である。磁束密度の強さは投入電流の調節によって行う。また、Fig. 4に鋳型内の幅・厚み・高さ

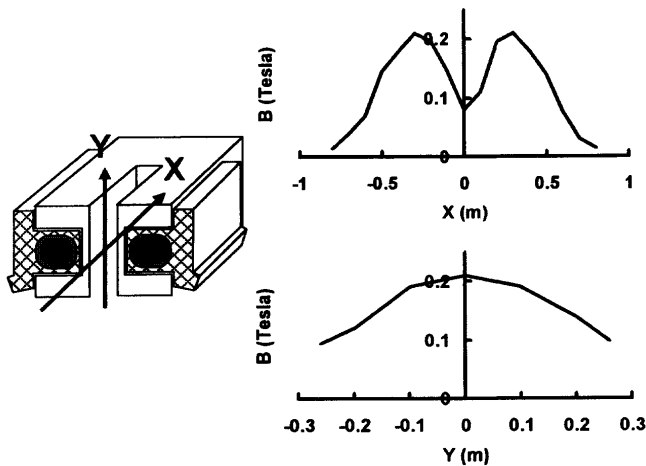


Fig. 4. Magnetic field profile of the generator of travelling magnetic field.

方向の中点を距離原点にとって、幅方向軸、高さ方向軸に沿った、定格状態における磁束密度分布を示した。鋳型の高さ方向では原点付近で、また、幅方向では原点から約0.35 m離れた位置で磁束密度は最大値となるようにした。

4. 鋳型内溶鋼流動の制御効果

4.1 メニスカスレベル変動への効果

まず、メニスカスレベル変動の制御効果について調査した。調査では実機の鋳型内の短辺・長辺面から、それぞれ0.058 m離れた交点のメニスカス位置を渦流式距離計で測定した。この測定点は吐出流が鋳型短辺へ衝突後に短辺に沿って上昇し、湯面に到達する位置である。Fig. 5の(a)はEMLSを印加した場合の一例であり、印加しない場合と比べてメニスカスレベル変動量は約1/3に減少した。またメニスカス平均レベルも降下している。これは短辺近傍の湯面変動量がその位置での溶鋼流速に比例すること²⁾を考慮すると、EMLSの印加により吐出流が減速され、前述の測定点付近に到達する流れが減衰したためと考えられる。一方Fig. 5の(b)はEMLAを印加した場合であり、吐出流が加速されるためレベル変動は増加した。

4.2 メニスカス溶鋼流速の制御効果

4.2.1 メニスカス溶鋼流速の測定方法

メニスカス溶鋼流速の測定は2種類の方法で行った。Fig. 6の(a)に示す第1の測定法では、直径0.02 m、長さ0.47 mの棒の一方を溶鋼中に浸漬し、他方を自由に回転できる支点とした。この時、棒が溶鋼から受ける抗力と、棒の自重とが釣り合っ決定する棒の傾角を測定し、溶鋼流速に換算した。以下、この方法を「傾角測定法」と呼ぶ。Fig. 6の(b)に示す第2の測定法では、棒の途中にロードセルを取り付けて、棒が溶鋼流から受ける抗力を直接測定した。以下この方法を「抗力測定法」と呼ぶ。なお、棒の材質はいずれの測定法もMo-ZrO₂サーメット¹³⁾である。ま

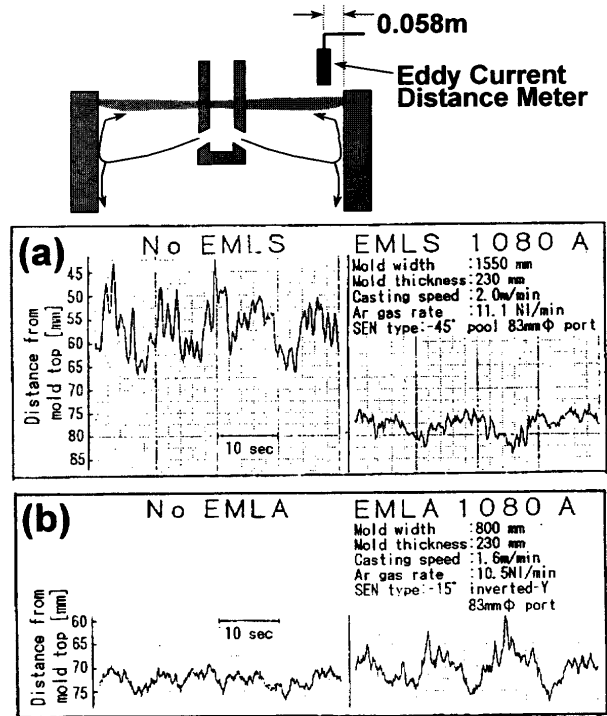


Fig. 5. Change of meniscus level fluctuation of meniscus near narrow face side of mold by EMLS, EMLA.

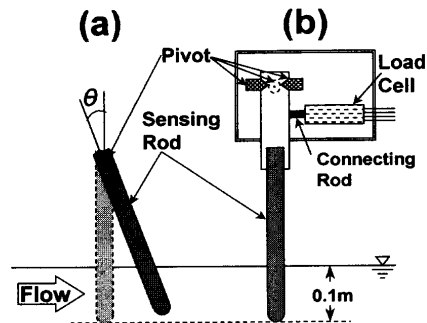


Fig. 6. Schematic illustration of devices for meniscus flow tachimetry.

た棒の浸漬深さは0.1 mとした。

4.2.2 メニスカス溶鋼流速の測定結果

EMLSを印加した場合のメニスカス溶鋼流速の時系列変化を、抗力測定法で測定した結果をFig. 7に示す。EMLSの印加によって抗力は減衰し、約45 s後には安定した。また、EMLSの印加と共に抗力の振動幅も小さくなった。この抗力の振動のエネルギースペクトルは、振動周波数の約 $-5/3$ 乗に比例しており¹⁴⁾、乱流渦による振動¹⁵⁾と考えられる。このことからEMLSによってメニスカス部の乱流エネルギーが減衰していることがわかる。

次に種々の電流値でEMLS, EMLAを印加した場合の、傾角測定法で測定したメニスカス溶鋼流速をFig. 8に示す。測定は短辺から浸漬ノズルへ向って0.2 m離れた、鋳型厚み方向の中央位置で行った。グラフの縦軸はメニスカス流速の大きさで、流れはすべて短辺から浸漬ノズルへ向う方向(以下、順方向と呼ぶ)である。横軸は中央が

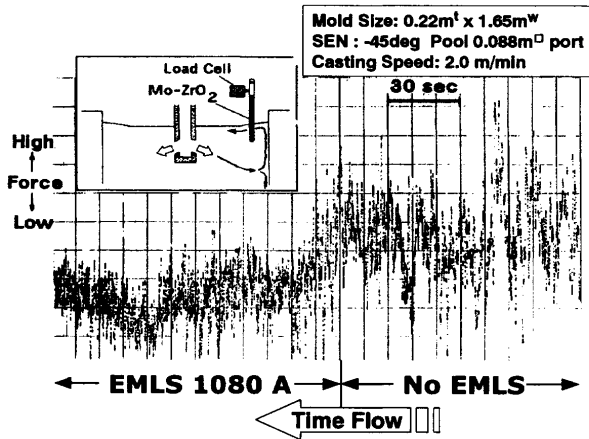


Fig. 7. Time series change of meniscus flow velocity by EMLS.

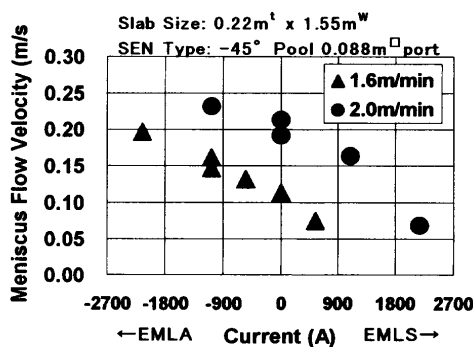


Fig. 8. Change of time-averaged velocity of meniscus flow near narrow face side of mold by EMLS and EMLA with various intensity.

EMLS, EMLA共に印加していない状態で、中央から左側がEMLS、右側がEMLAの印加電流である。EMLSの場合には印加電流の調節により、メニスカス流速を0.1 m/sec以下までの任意の大きさに、連続的に調節できることがわかる。またEMLAの場合にはメニスカス流速は加速されており、特に casting速度が低く吐出流速の小さい時にその効果が大きいことがわかる。

さらに測定位置を変えて、短辺と浸漬ノズルの間の中点位置（以下、「1/4幅位置」と呼ぶ）で測定した、EMLS印加時のメニスカス溶鋼流速をFig. 9に示す。Fig. 9の縦軸の流速の正符号は短辺から浸漬ノズルへ向う流れ、負符号はその逆方向の流れである。Fig. 8の短辺近傍で測定した場合と異なり、EMLS印加電流を増すとメニスカス溶鋼流は大きさが0 m/sまで減少した。その後も印加電流を増すと流れの向きが反転し（以下、この向きを逆方向と呼ぶ）、逆方向の流速の大きさは増した。そこで、数値電磁流体シミュレーションにより¹⁶⁾、EMLSの印加電流を変化させた時の、メニスカス溶鋼流速の鋳型の幅方向に沿ったプロファイルを求めた。Fig.10にその結果を示す。0.07 TのEMLSの印加により、浸漬ノズルから1/4幅位置付近の間で流速が大きく減衰し、一部は逆方向の流れとなっている。さらにEMLSを0.11 Tとすると、全域にわたって逆方向の

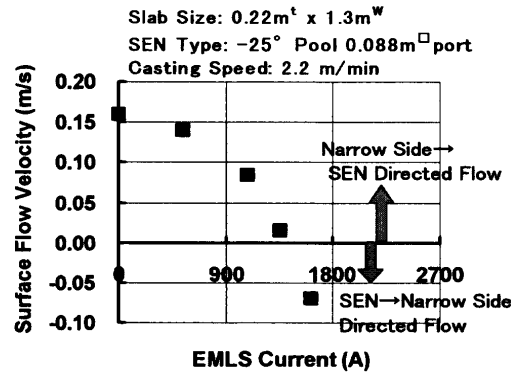


Fig. 9. Change of time-averaged velocity of meniscus flow at the 1/4 width point by EMLS and EMLA with various intensity.

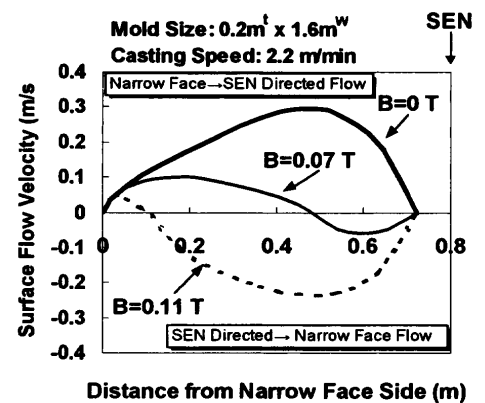


Fig. 10. Calculated profile of meniscus flow velocity along mold width direction with different intensity of EMLS.

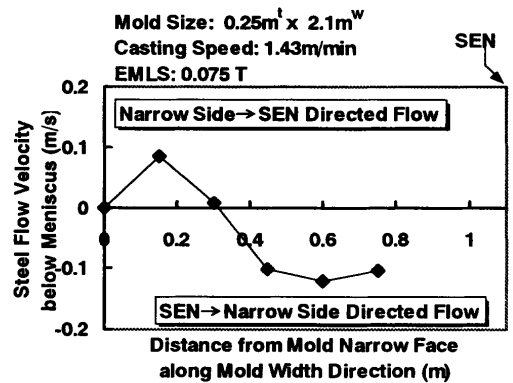


Fig. 11. Measured profile of meniscus flow velocity.

流れとなっている。Fig.11は0.075 TのEMLS印加時に、実機でメニスカス溶鋼流速を測定した結果であるが、シミュレーションで0.07 Tおよび0.11 Tの磁場を印加した場合との中間のプロファイルとなっている。このようにEMLSを印加すると、メニスカス流速の短辺から浸漬ノズルへ向う成分の減衰が、浸漬ノズル付近から生じていくことがわかった。これはEMLSの移動磁場で駆動された鋳型内の溶鋼が浸漬ノズル付近で合流し、上方に向って流れメニスカスに達した後、逆方向に流れるためと考えられる。

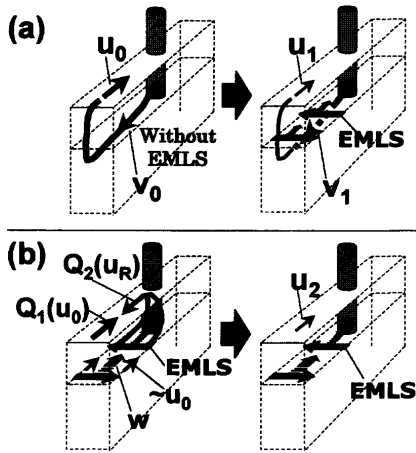


Fig. 12. Schematic illustration of the mechanism of meniscus flow braking by EMLS.

4.2.3 メニスカス溶鋼流の減速効果の定式化

つぎにEMLSによるメニスカス溶鋼流の減速効果の定式化を試みた。前述の実機流速測定の知見から、EMLSによるメニスカス溶鋼流の減速は、2つの減速効果の重積と考えられる。第1の減速効果はFig.12(a)のように磁場が吐出流に直接作用して減速力を生じ、メニスカス溶鋼流速を減速する効果であると考えた。一方、Fig.12(b)のようにEMLSは移動磁場であるため、吐出流の制動のみならず吐出流以外の铸型内溶鋼も駆動する。したがって第2の減速効果は、駆動された铸型内の溶鋼が逆方向のメニスカス流れを励起し、その流れともとの順方向のメニスカス流れが干渉して減速する効果であると考えた。

一般に密度 ρ で導電率 σ の導電体に、相対速度 u で磁束密度 B の磁場を印加した時にはたらく電磁力の大きさ F は単位体積あたり、

$$F = \sigma \cdot u \cdot B^2 \quad (1)$$

である。この電磁力を時間 Δt の間印加した時の、速度変化量の絶対値 Δu は、

$$\Delta u = (\sigma \cdot u \cdot B^2 / \rho) \cdot \Delta t \quad (2)$$

である。

そこで、まず上述した第1の減速効果について、Fig.12(a)に示すようにEMLSを印加しない状態のメニスカス流速を u_0 、吐出流速を v_0 とし、EMLS印加後の流速を u_1 、吐出流速を v_1 とする。またEMLSの磁場の移動速度を w とすると、吐出流からみた磁場の相対速度は $(v_0 + w)$ となる。この時EMLSによるメニスカス溶鋼流の速度変化率 r_1 は、

$$\begin{aligned} r_1 &= |u_1 - u_0| / u_0 \\ &\propto |v_1 - v_0| / v_0 = \Delta v / v_0 \\ &= (\sigma / \rho) \cdot (v_0 + w) / v_0 \cdot B^2 \cdot \Delta t \quad (3) \end{aligned}$$

ここで v_0 と w は同程度の大きさなので $(v_0 + w) / v_0$ の項を定数

とみなして省略し、さらに $\alpha = (\sigma / \rho)$ とおき、 Δt を吐出流の流速 v_0 と铸型幅 L の比で代表させると、

$$r_1 \propto \alpha \cdot (L / v_0) \cdot B^2 \quad (4)$$

となる。

つぎに第2の減速効果を考える。Fig.12(b)のようにもとの順方向のメニスカス流れを Q_1 、また吐出流以外の铸型内溶鋼（流速は u_0 程度とする）が、EMLSの移動磁場によって駆動されて生じる逆方向のメニスカス流れを Q_2 とし、その流速を u_R とする。この時の速度変化率 r_R は、铸型幅方向の磁場有効長さを L_e とすると、(4)式の導出にならない、次式で表される。

$$\begin{aligned} r_R &= |u_R - u_0| / u_0 = \Delta u / u_0 \\ &\propto \alpha \cdot (L_e / w) \cdot B^2 \quad (5) \end{aligned}$$

一方、 Q_1 と Q_2 の合成による u_0 から u_2 への速度変化量 Δu_2 は Q_1 、 Q_2 衝突時の力積に比例する。ここで、 Q_1 、 Q_2 の衝突時間は相対速度 $(u_0 + u_R)$ に反比例し、力は Q_1 、 Q_2 の間に $(u_0 + u_R)^2$ に比例してはたらく抗力とすると、力積は $(u_0 + u_R)$ に比例する。したがって、 u_0 が一定の場合、 Δu_2 は u_R に比例する。結局、第2の減速効果による速度変化率 r_2 は、

$$\begin{aligned} r_2 &= \Delta u_2 / u_0 \\ &\propto u_R / u_0 \\ &\propto r_R \\ &\propto \alpha \cdot (L_e / w) \cdot B^2 \quad (6) \end{aligned}$$

したがって、EMLSによる総括速度減速率 R は、EMLSの印加によって第1、第2の減速効果が同時に発現することを考慮すると、EMLS印加後のメニスカス流速を u_e として次式で表される。

$$\begin{aligned} R &= 1 - (u_0 - u_e) / u_0 \\ &= 1 - r_1 \cdot r_2 \\ &= 1 - \alpha^2 \cdot (L \cdot L_e) / (v_0 \cdot w) \cdot B^4 \quad (7) \end{aligned}$$

また B^4 項の係数のうち、連铸機設備と磁場発生装置に固有の係数 $(\alpha^2 \cdot L \cdot L_e) / w$ を β とおくと、

$$R = 1 - \beta \cdot B^4 / v_0 \quad (8)$$

となる。そこで、Fig. 9の実機測定結果について、横軸を B^2 / v_0 、または B^4 / v_0 にとって R をプロットしたグラフをFig.13(a), (b)に示す。なお、 v の値は実機の1/3スケール、フルード数近似の水モデルで計測した値を使用した。Fig.13(a)の B^2 / v_0 を横軸としたグラフは(4)式で導かれる r_1 の減速効果のみを想定した場合であるが、比例関係にはない。またこのグラフの横軸を B^2 / v_0 から B^2 / w と置き換えても同様に比例関係にはないことは容易に推定される。したがって、EMLSによるメニスカス流速の減速効果は、前述

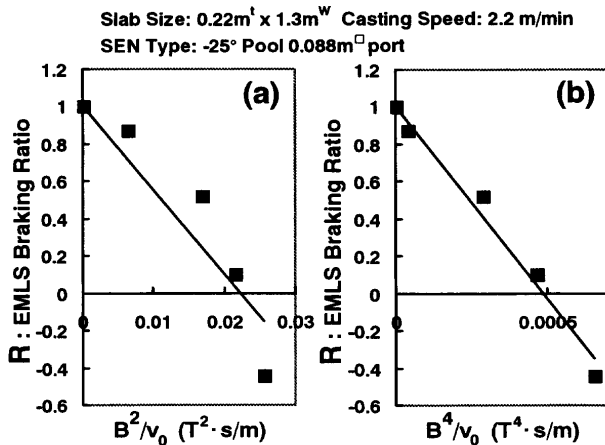


Fig. 13. Relationships between EMLS braking ratio and two parameters for analysis of EMLS effect.

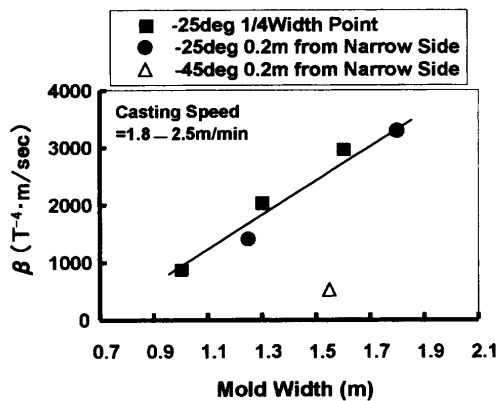


Fig. 14. Relationship between mold width and coefficient of EMLS's braking effect, β .

の第一の減速効果、第二の減速効果のいずれかが支配的であることはなく、また両者の減速効果の和としても表されないと考えられる。一方、(8)式に従い、Fig.13(b)のように B^4/v_0 を横軸とした場合、 R のプロットは良く直線になっている。これにより、EMLSによるメニスカス流速の減速効果は、前述の第一の減速効果、第二の減速効果の積として表されると考えられる。このように、実機測定結果からもEMLSのメニスカス減速効果は、第一、第二の減速効果の積として、印加磁場の磁束密度の4乗に比例することがわかった。

つぎに異なる鋳型幅、浸漬ノズル吐出角度での実機測定結果から、EMLS減速効果係数 β を求めた結果をFig.14に示す。まず吐出角度が下向き25°での β に注目すると、 β は鋳型幅に比例していることがわかる。これは磁場発生装置と溶鋼が対向する鋳型幅方向の長さが、鋳型幅の増加と共に増加し、前述の r_1, r_2 の寄与が共に増加するためと考えられる。なお、この比例関係を利用して、鋳型幅をはじめとする鋳造条件を決めた時の β を知ることができる。つぎに、吐出角度が45°での β は、等しい鋳型幅での吐出角度25°の β と比較して小さい。これは、吐出角度が下向きに大きい場合、吐出流がストランド下方に向かって進むこと

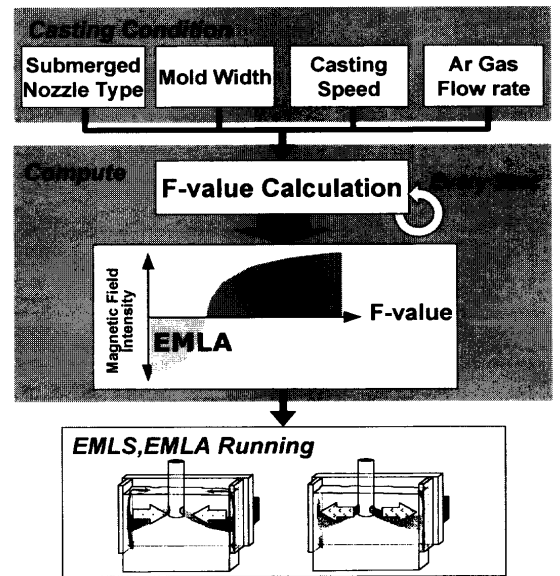


Fig. 15. Schematic diagram of computer control of EMLS, EMLA.

により、EMLSの磁場が吐出流に直接作用する時間が短く、 r_1 の寄与が小さくなるためと考えられる。

5. EMLS, EMLAの自動制御システム

鋳造開始・終了時や鍋交換時の鋳造速度変化、鋳造中の鋳型幅変更など、鋳造条件は刻々と変化する。そこで適切な鋳型内溶鋼流動制御を行うために、EMLS, EMLAの自動制御システムを構築した。このシステムはオープン制御システムである。その制御フローをFig.15に示す。最初に鋳型幅、鋳造速度、Arガス吹込み量、浸漬ノズル形状から、第2章で述べたF値を計算する。つぎにこのF値から推定されるメニスカス流速を適正範囲に制御するために、必要なEMLSまたはEMLAの電流値を運転テーブルから決定する。運転テーブルは前章の(7)式をもとにあらかじめ作成される。続いて、この電流値を磁場発生装置に電流設定値として指示する。以上のフローを鋳造中、定周期で繰返して鋳造条件の変化を検出し、EMLS, EMLAの運転条件の自動設定を行う。

6. 実機での効果

実機でのEMLS, EMLA適用前後での冷延コイルのモールドパウダー起因の表面欠陥発生率を調査した結果をFig.16に示す。EMLS, EMLAの磁束密度は2章で述べたように、メニスカス流速が適正範囲に入るよう設定した。EMLS, EMLAを手動運転することにより、表面欠陥発生率は1/3に減少し、EMLS, EMLAの自動制御によりさらに半減した。また拘束性ブレイクアウトの発生率も0件/年となった。これはEMLSの印加により過大な湯面変動が抑制

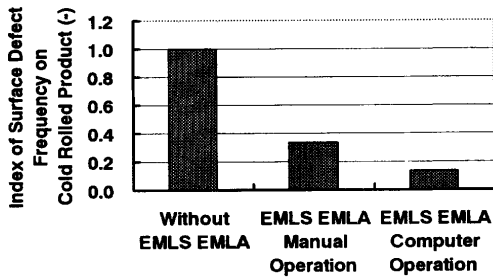


Fig. 16. Effect of EMLS, EMLA on surface defects on product.

されるため、凝固シェルの浸炭や、モールドパウダーによる鋳型・シェル間潤滑の、時間・空間的ゆらぎが抑制されたためと考えられる。

7. 結言

スラブ連続機の高速度鋳造時の、溶鋼中へのモールドパウダーの巻込みを防止するために、移動磁場式の磁場発生装置による鋳型内溶鋼流動制御を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 浸漬ノズルの吐出流に移動磁場を印加することにより、メニスカス溶鋼流速を任意の大きさにかつ連続的に加減速制御することが可能である。

(2) 吐出流に減速力(EMLS)を印加した場合、鋳型幅方向に沿ったメニスカス溶鋼流速は、磁束密度の増加とともに順次減速し、流速が0 m/sになった後は反対の向きの流速が増加する。

(3) 吐出流にEMLSを印加した場合のメニスカス溶鋼流速の減速効果は、磁束密度の4乗に比例するものとして定式化できた。これは、磁場が吐出流に作用して生じる減速力の効果と、移動磁場が鋳型内の溶鋼を駆動し、本来の

メニスカス溶鋼流と対向するメニスカス流れを誘起する効果の重積として理解できる。

(4) 従来の鋳型内溶鋼流動の推定指数と、本報で得られた磁場発生装置の効果算出式をもとに、連続の操業条件変化を考慮した制御システムを構築し、実機でEMLS, EMLAの自動運転を行った。その結果、薄板材製品のモールドパウダー起因の表面欠陥を大幅に低減することができた。

文 献

- 1) T.Teshima, T.Kitagawa, H.Funanokawa, K.Okimoto, Y.Nimura and T.Kondo: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), S1012.
- 2) T.Teshima, J.Kubota, M.Suzuki, K.Ozawa, T.Masaoka and S.Miyahara: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 576.
- 3) T.Saito, H.Yamazaki, T.Nozaiki, S.Hiwasa and M.Oguti: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 299.
- 4) J.Kubota, K.Ozawa, S.Kuwano, Y.Yamaoka and M.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1245.
- 5) T.Ishii, R.Nishimachi, Y.Nimura, E.Ihda and M.Takai: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 864.
- 6) N.Kasai, T.Nakai, T.Osamichi, H.Nakajima and T.Sakashita: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 1261.
- 7) J.Kubota, S.Kuriyama and T.Teshima: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 301.
- 8) T.Yamazaki, H.Hasagawa, T.Toh and T.Imoto: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 236.
- 9) K.Tozawa, S.Idogawa, S.Nakado and K.Sorimachi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 604.
- 10) J.Kubota, K.Okimoto, A.Shirayama and H.Murakami: Proc. 74th Steelmaking Conf., ISS, Warrendale, (1991), 233.
- 11) J.Kubota, H.Wakasa, Y.Furuno, T.Masaoka, Y.Yamaoka and M.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 253.
- 12) E.Takeuchi and J.K..Brimacombe: *Seitetsu Kenkyu*, **324** (1987), 59.
- 13) J.Nagai, K.Suzuki, S.Kojima and S.Kollberg: *Iron Steel Eng.*, **61** (1984), 41.
- 14) J.Kubota, N.Kubo, M.Suzuki, T.Ishii, Y.Yamaoka and M.Yamagishi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 235.
- 15) 巽友正著: 乱流現象の科学, 東京大学出版会, 東京, (1986), 179.
- 16) T.Ishii, S.S.Sazhin and M.Makhlouf: *Ironmaking Steelmaking*, **23** (1996), 267.