
静磁場全幅二段印加による連続 casting 鋳型内溶鋼流動制御

Control of Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold by Two Static Magnetic Fields
Covering Whole Width

井戸川 聡(Akira Idogawa) 北野 嘉久(Yoshihisa Kitano) 戸澤 宏一(Hirokazu Tozawa)

要旨：

高速 casting 時における製品品質向上を目的として、連 casting 鋳型内の溶鋼流動を最適に制御する FC モールド(Flow Control Mold)が開発された。本装置は、メニスカス部と鋳型下部の上下二段に、鋳型全幅に静磁場を印加して溶鋼流動を制御する。水銀モデル実験による原理実証後、実機実験及び数値解析により、その効果が確認された。FC モールドは、メニスカス部の静磁場で溶鋼表面流速を抑制し、鋳型下部の静磁場で下降流速を減少させ、製品の表面ならびに内部品質の向上を可能にする。川崎製鉄では千葉製鉄第 3 連続 casting 機および、水島製鉄所第 4 連続 casting 機に導入され、高品質高生産性 casting に貢献している。

Synopsis：

A new device, FC mold (Flow Control Mold), was developed to improve the quality of final products, cast at a high speed. It has two pairs of poles that generate static magnetic fields. In order to optimize steel flow in a continuous casting mold, one of the fields imposed is at the meniscus and the other is below the submerged entry nozzle (SEN). Both of the fields cover the entire width of the mold. The principle and effects of this device were confirmed through mercury model experiment, industrial application to the No.3 caster at Chiba Works and numerical simulations. The industrial application demonstrated good effects on the surface and internal qualities of the products. Kawasaki Steel has already introduced the FC molds for industrial production at the No.4 caster in Mizushima as well as the No.3 caster in Chiba. They are contributing to high productivity and high product quality.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

静磁場全幅二段印加による連続 casting 鋳型内溶鋼流動制御*

川崎製鉄技報
28 (1996) 1, 46-51

Control of Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold by Two Static Magnetic Fields Covering Whole Width



井戸川 聡

Akira Idogawa
技術研究所 鉄鋼プロセス研究部製鋼研究室 主任研究員(部長)



北野 嘉久

Yoshihisa Kitano
千葉製鉄所 製鋼部製鋼技術室 主査(課長)



戸澤 宏一

Hirokazu Tozawa
技術研究所 鉄鋼プロセス研究部水島鉄鋼研究室 主任研究員(課長補)

要旨

高速 casting 時における製品品質向上を目的として、連続 casting 鋳型内の溶鋼流動を最適に制御する FC モールド (Flow Control mold) が開発された。本装置は、メニスカス部と鋳型下部の上下二段に、鋳型全幅に静磁場を印加して溶鋼流動を制御する。水銀モデル実験による原理実証後、実機実験及び数値解析により、その効果が確認された。FC モールドは、メニスカス部の静磁場で溶鋼表面流速を抑制し、鋳型下部の静磁場で下降流速を減少させ、製品の表面ならびに内部品質の向上を可能にする。川崎製鉄では千葉製鉄所第3連続 casting 機および、水島製鉄所第4連続 casting 機に導入され、高品質高生産性 casting に貢献している。

Synopsis:

A new device, FC mold (Flow Control mold), was developed to improve the quality of final products, cast at a high speed. It has two pairs of poles that generate static magnetic fields. In order to optimize steel flow in a continuous casting mold, one of the fields imposed is at the meniscus and the other is below the submerged entry nozzle (SEN). Both of the fields cover the entire width of the mold. The principle and effects of this device were confirmed through mercury model experiment, industrial application to the No. 3 caster at Chiba Works and numerical simulations. The industrial application demonstrated good effects on the surface and internal qualities of the products. Kawasaki Steel has already introduced the FC molds for industrial production at the No. 4 caster in Mizushima as well as the No. 3 caster in Chiba. They are contributing to high productivity and high product quality.

1 緒 言

連続 casting 操業に対し、高生産性と高品質性とを両立させる要求が高まってきている。高生産性を確保するためには casting 速度の増加が前提となるが、高速 casting 時にはパウダー巻き込み現象が増加し、鋳片品質の劣化を招く問題がある。そのため、高速、高スループット casting 時の鋳片品質をいかに向上させるかが重要な課題である。

鋳片品質を決定する重要な因子の一つに、連続 casting 機鋳型内の流動がある。鋳型内部での流動は、鋳型内に持ち込まれた外来性介在物や脱酸生成物、気泡の浮上分離を支配している。一方、パウダー巻き込み現象や介在物のパウダー層への吸収を支配しているのは、溶鋼-パウダー界面における流動である。したがって、鋳片品質の向上には、これら両者の鋳型内流動制御が課題となる。

鋳型内溶鋼流動の制御技術としては、(1)浸漬ノズル形状¹⁾、(2)溶鋼湯面制御²⁾、(3)移動磁界利用³⁾などが挙げられる。また、当社は静磁場による鋳型内溶鋼流動制御技術 (EMBR) を開発し⁴⁾、その有効性を確認した⁵⁾。

しかしながら、従来型 EMBR は、湾曲型 casting 機を基に開発されたため、相対的に高スループット casting が可能な垂直型 casting 機にそのままの形で適用するには問題があった。そこで、今回、高スループット casting 時に対応する新しい電磁流動制御技術の開発を行った⁶⁻⁹⁾。

2 水銀モデル実験

2.1 実験装置と実験方法

まず、マクロな流動を調べるため、水銀モデル実験による流速測定を行った。実験装置の概要を Fig. 1 に示す。装置には水銀ポンプを取り付け、水銀を還流させながら測定を行った。

模型鋳型は塩化ビニール製で、その大きさは実機 (千葉製鉄所第3連続 casting 機) の 1/10 であり、厚み 26 mm、幅 120 mm、 casting 方向の長さ約 500 mm である。ノズルは吐出口径 6 mmφ で、下向き約 30 の 2 孔ノズルを約 30 mm 浸漬させた。

水銀流速の測定には小型の電磁流速計^{10,11)}を作成し、水銀浴中に浸漬させ流速の鉛直方向成分を測定した。

* 平成 8 年 3 月 11 日原稿受付

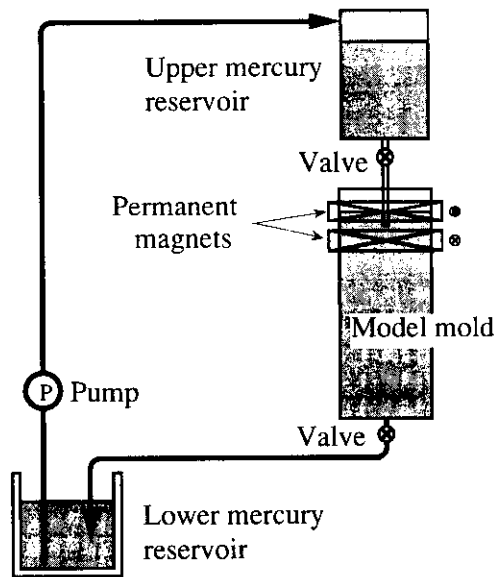


Fig. 1 Experimental apparatus for the mercury model

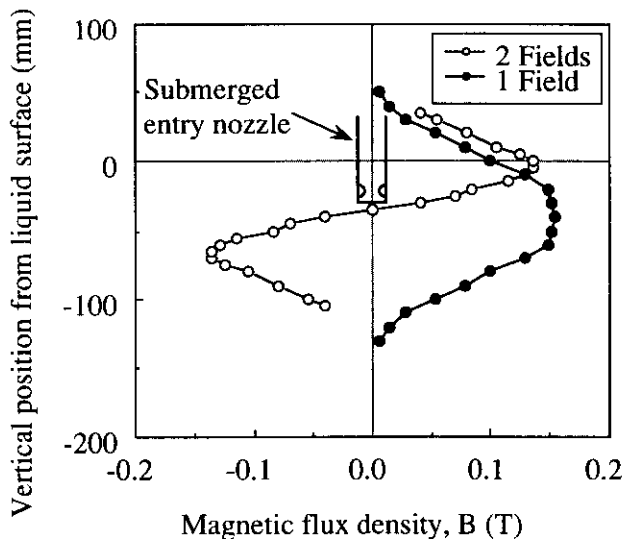


Fig. 2 Distributions of magnetic flux density used for mercury model experiments

2.2 実験条件

流量の設定は、Froude 数 ($= \frac{V^2}{gL}$, 但し、 V : 代表的な流速,

L : 代表的な長さ, g : 重力加速度) 一致条件で行い、実機 4.5 t/min 相当となる 34 ml/s とした。

印加磁場の分布は、永久磁石を組み合わせることにより、Fig. 2 に示すような一段印加型と二段印加型の二種類について実験を行った。

流速測定は、鋳型厚み中央部で行い、メニスカスから 50 mm, 150 mm, 250 mm の深さで測定した。

2.3 実験結果

流速測定結果を Fig. 3 に示す。磁場を印加しない場合、 $z=50$ mm において、鋳型中央より 40 mm の所に鋭いピークが見られる。これは、ノズルからの吐出流を捕えたものである。磁場を印加することによってこの吐出流が弱くなっている。一方、鋳型中央部ではいずれの場合にも上昇流が見られるが、一段印加型ではその流速が

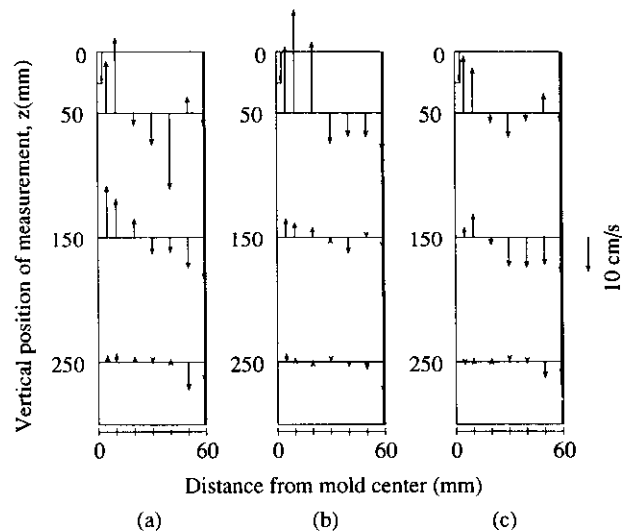


Fig. 3 Profiles of downward flow velocity in the mercury measured by Vivès probe: (a) without magnetic field, (b) with 1 pair of magnetic poles and (c) with 2 pairs of magnetic poles

大きくなっている。

$z=150$ mm においては、磁場を印加しない場合、短辺側で下降流、鋳型中央部側で上昇流が観測されるが、磁場印加によって流れが均一化される傾向を示している。

$z=250$ mm においては、磁場を印加しない場合には、短辺部に強い下降流が残っているが、磁場を印加することによって、それが低減されている。磁場を印加しない場合に比べ、二段印加型の場合には、下降流速が約 $1/2$ となった。

3 実機実験

3.1 設備概要

高スループット鋳造に対応する新しい電磁流動制御技術としては、鋳型内の溶鋼表面流速と鋳型下部における下降流速をともに抑止する効果が要求される。そうした観点と水銀モデル実験の結果から、二段全幅印加型を採用し、千葉製鉄所第 3 連鋳機において実機実験を行った。これを FC モールド (Flow Control mold) と称する。Fig. 4 に、FC モールドの模式図を示す。従来型 EMBR では、ノズルからの吐出流に制動をかけ、流れを分散させることが目的であった。それに対し、FC モールドでは、制動効果を十分に発揮させるため、鋳型全幅に静磁場を印加し、メニスカス部溶鋼流速の低減およ

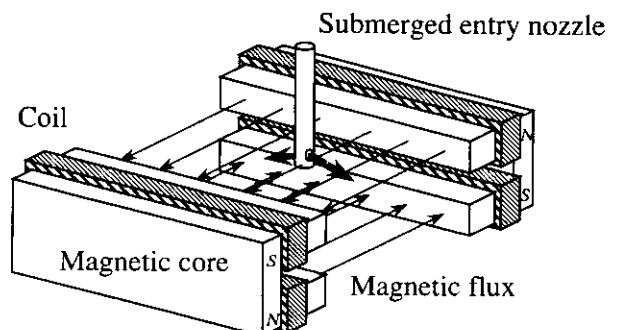


Fig. 4 Schematic illustration of the FC mold

Table 1 The specifications of the FC mold applied to the No. 3 caster at Chiba Works

Width of magnet yoke	(mm)	1 500
Distance from yoke to yoke	(mm)	450
Maximum voltage	(V)	250
Maximum current	(A)	1 200
Maximum magnetic flux density	(T)	0.28

び安定化と鋳型下部における局所下降流速の低減を目的として上下二段に印加することとを特徴としている。製作した実験設備の仕様を Table 1 に示す。本設備は、最大コイル電流 1 200 A において、最大磁束密度 0.28 T の静磁場を発生する。

実験では、4 孔下向き 15° の浸漬ノズルを浸漬深さ（メニスカス～上孔上端の距離）180 mm～230 mm で使用し、鋳造速度は 1.0 m/min から 2.0 m/min の範囲で、幅 1 000 mm から 1 400 mm、厚み 260 mm の鋳片を鋳造した。対象とした鋼種は低炭素鋼および極低炭素鋼である。

3.2 FC モールドの操業結果

FC モールドの上部磁極によるメニスカス部溶鋼流速の低減と安定化効果を調査するために、溶鋼表面流速の測定を行った。鋳造条件は、鋳片幅 1 200 mm、鋳造速度 1.6 m/min であり、鋳造鋼種は低炭素鋼である。流速の測定方法は、鋳型内溶鋼中に耐火物製の角柱 (25 mm×20 mm) を 130 mm 浸漬させ、歪ゲージ計で溶鋼動圧を測定した。Fig. 5(a) は、磁束密度 0 T と 0.28 T の時の歪ゲージ計出力をそのまま示したものである。これを見ると、磁場印加によって出力の平均値が約 2/3 に減少している。更に特徴的なことは、出力の変動値が磁場印加により約 1/3 に減少していることである。横軸に最大磁束密度、縦軸に歪ゲージ計の出力を流速に換算し 0 T の流速を 1 とした時の値をとって、Fig. 5(b) に示した。0.28 T の磁束密度を印加することにより、平均流速は 78% に、変動は 43% に減少した。

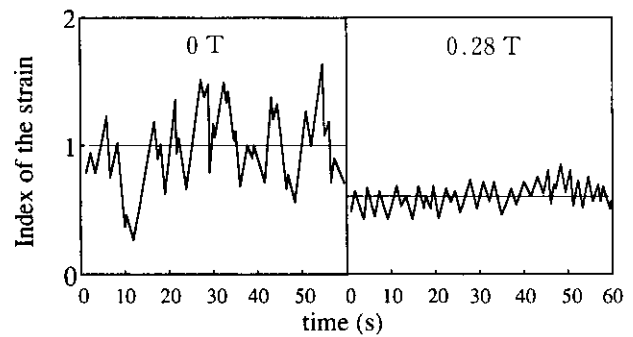
また、短辺部での湯面盛り上がり高さの測定によっても溶鋼表面流速に対し、全く同様の結果が得られた^{9,10)}。

次に、磁場印加によるメニスカス部溶鋼温度の変化を調査するため、熱電対を鋳型内溶鋼表面下 30 mm に浸漬させて测温を行った。鋳造条件は、表面流速測定時と同様である。測定結果を Fig. 6 に示す。図中の○は浸漬ノズル近傍の温度変化、●は短辺から約 100 mm における温度変化を示している。浸漬ノズル近傍においても短辺近傍においてもメニスカス部の溶鋼温度は 3～5℃ 上昇している。この効果は、FC モールドの下部磁極による制動効果によるものと考えられる。すなわち、浸漬ノズルから注入された溶鋼は下部磁極によって制動され、鋳型深部への侵入を抑えられるために高温溶鋼がメニスカス近傍に滞留するようになるからである。

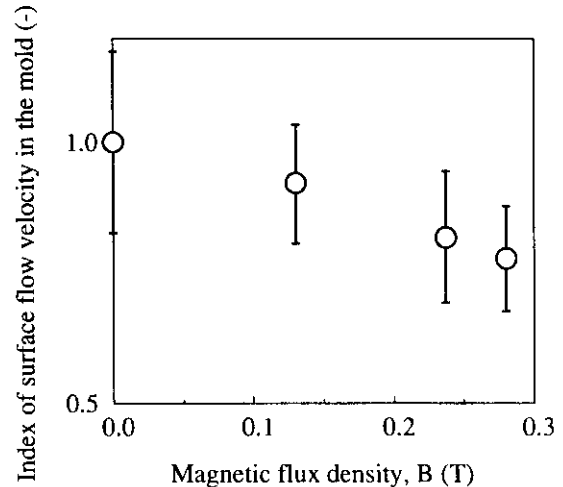
以上のように、FC モールドの上部磁極による溶鋼表面流速の低減効果と下部磁極による溶鋼侵入深さの低減効果が直接及び間接的に実証された。また、上部磁極は溶鋼表面流速の変動の抑止において顕著な効果を示すことが本実験により新たに明らかとなった。

3.3 FC モールドの鋳片品質に対する効果

前節で鋳造した鋳片表面のオシレーションマークの間隔（ピッチ）を測定した結果を Fig. 7 に示す。鋳片の短辺中央部から幅 10 mm、長さ 150 mm のサンプルを切り出し、差動トランスを用いて測定し



(a)



(b)

Fig. 5 The effect of the FC mold on the molten steel flow below the meniscus: (a) force exerted by the fluid on the ceramic body with a strain gauge, (b) calibrated velocity as a function of magnetic flux density

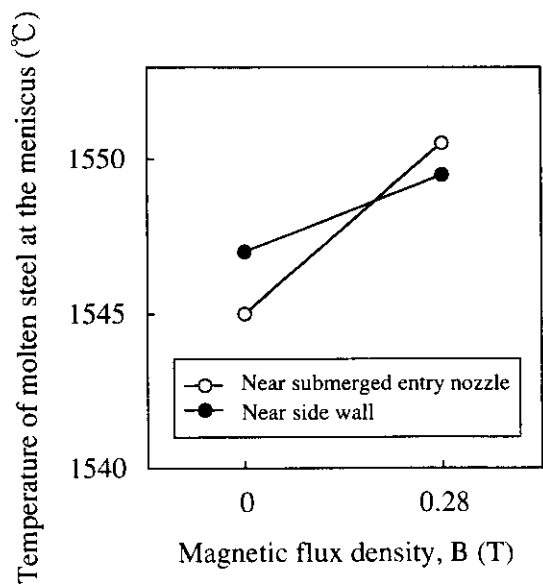


Fig. 6 The effect of the FC mold on the temperature of the molten steel at the meniscus in the mold

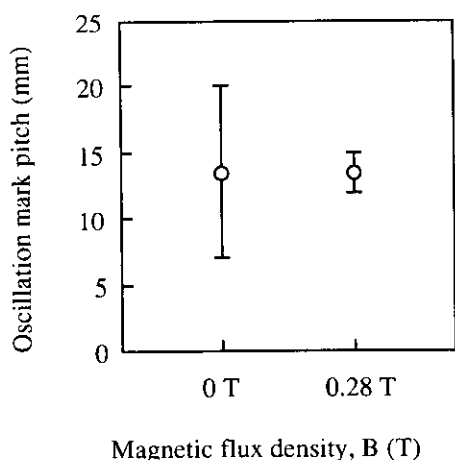


Fig. 7 The effect of the FC mold on the pitch of oscillation mark

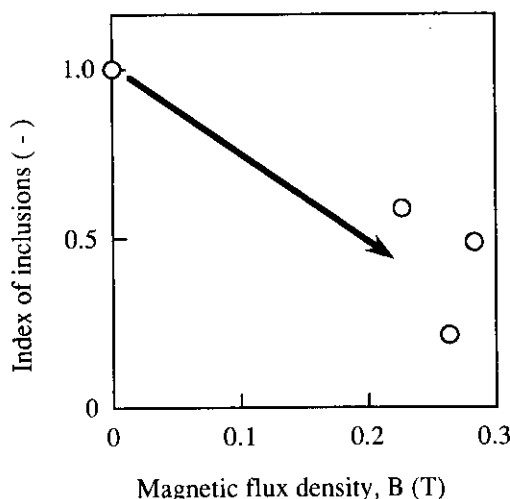


Fig. 8 Index of non-metallic inclusions extracted by slime method as a function of magnetic flux density of the FC mold

た。オシレーションマークのピッチの平均値は、鋳造速度と鋳型振動数によって決まる計算値と同じであるが、そのばらつきはFCモールドを使用した場合に極めて小さくなることからわかる。これは、FCモールドの上部磁極によって湯面レベル変動が減少し、オシレーションマークのピッチがきれいに揃うためと考えられる。

同じ鋳片のスライム抽出法による介在物量測定結果を Fig. 8 に示す。縦軸は鋳片の単位体積中介在物量指数、横軸は印加磁束密度を表す。静磁場印加によって介在物量は約 50% に減少した。介在物の最大侵入深さ H_p と鋳片中の介在物集積帯位置 T_{max} との間には、次の関係式が求められている¹²⁾。

$$H_p = \frac{4 \xi (\alpha^2 L \xi^3 - \alpha L \xi - R/2)}{3 \alpha \xi^2 - 1} + \alpha L \xi^2 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{V_c L}{k^2}, \quad \xi = \frac{T_{max}}{L} \quad (2)$$

ここに、 V_c は鋳造速度 (m/min)、 L は連鋳機の垂直部長さ (m)、 R は連鋳機の湾曲部曲げ半径 (m)、 k は凝固係数 (m/min^{1/2}) を示す。

鋳片 C 断面のサルファープリントで調査した結果、FC モールドの印加により T_{max} は 43 mm から 37 mm に減少した。この値を上式に

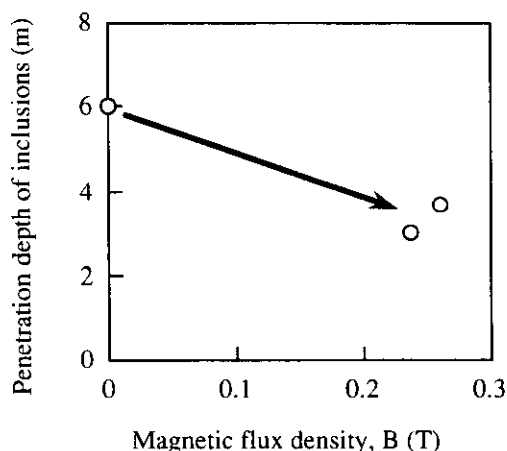


Fig. 9 The effect of the FC mold on the penetration depth of non-metallic inclusions

代入した結果を Fig. 9 に示す。静磁場を印加することによって介在物の侵入深さが約 $2/3 \sim 1/2$ に低減されている。前述の介在物量低減とこの侵入深さ低減は、FC モールドの下部磁極による溶鋼下降流の制動効果を直接的に示すものである。

3.4 FC モールドの製品品質に対する効果

本節では、鋳造鋳片を熱間圧延後、更に冷間圧延して製品にした時の品質結果について示す。

Fig. 10 は、自動車用極低炭素鋼板について検査ラインで目視検査により検出した表面欠陥の発生個数を、横軸に鋳造速度をとって示した図である。FC モールドを使用しない場合は、鋳造速度が 1.7 m/min を超えると表面欠陥の発生率が急上昇し、鋳造速度 1.5 m/min 以下の時に比較して、5 倍以上となる。一方、FC モールドを使用した場合には、鋳造速度に依らず表面欠陥発生率は $1/2$ 以下である。これら表面欠陥部の X 線分析からは、モールドパウダー成分が検出された。この結果は、FC モールドの上部磁極による表面流速の低減と湯面レベル変動の減少によるものであると考えられる。また、高速鋳造においても製品品質を悪化させることがないことを示しており、製品の表面品質の観点から本技術は高品質・高生産性の目的に適ったプロセスであると言える。

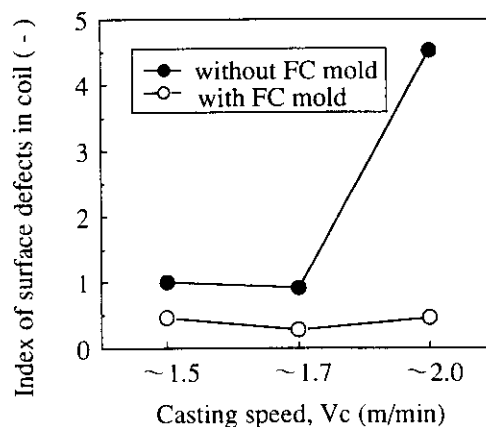


Fig. 10 The effect of the FC mold on the surface quality of the cold rolled coils of steel

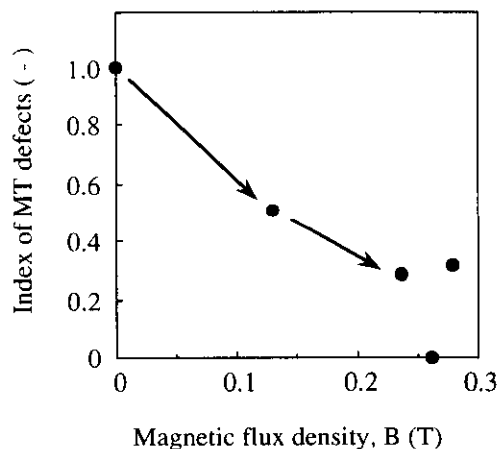


Fig. 11 Index of MT defects in the cold-rolled steel sheets with and without the application of the FC mold

次に、罐用ブリキ鋼板の磁粉探傷試験による内部品質の評価結果を Fig. 11 に示す。印加磁束密度の増加とともに、磁粉探傷 (MT) 欠陥指数は減少しており、0.28 T の印加時には $1/2$ 以下に減少している。この図は、Fig. 8 のスライム抽出法による鋳片中非金属介在物量とよく対応しており、FC モールドの下部磁極による溶鋼侵入深さの低減効果を示すものと考えられる。

4 流動解析と考察

4.1 解析方法

実機実験の結果を考察するために数値計算による流動解析を行った。計算条件を Table 2 に示す。離散化法として有限体積法を用い、乱流モデルとして二方程式モデル ($k-\epsilon$ モデル) を用いて計算した。浸漬ノズルは実機で用いている 4 孔下向き 15° とし、浸漬深さ (メニスカスから上部吐出孔上端まで) を 180 mm とした。境界条件としての流入条件は浸漬ノズル上部からノズル内に均一に流入させ、計算領域の最下端部で均一に流出させた。その他の境界条件は対称面、

Table 2 Conditions of numerical calculations

Mold size	(mm)	130 (1/2 t) $\times$ 600 (1/2 w) $\times$ 3 790 (h)
Submerged entry nozzle		With 4 ports inclined at 15° downward
Flow rate	(t/min)	4 ($V_c = 1.6$ m/min)

浴面及び最下端部でスリップ壁とし、他の境界面は固定壁とした。計算に用いた磁束密度分布は、Fig. 2 に示した一段印加型、二段印加型 (FC モールド) の 2 種類である。溶鋼流動による磁束密度分布への影響は微小なため無視し、更に、与える磁束密度成分は鋳型厚み方向 (x 方向) 成分のみとした。最大磁束密度は 0.28 T に固定した。電位ポテンシャルの計算の境界条件は、固定壁の外側に溶鋼と同じ電気伝導度を持つ凝固殻 (鉛直方向に 10 mm/m の厚みで成長すると仮定) を想定した¹³⁾。

4.2 計算結果

鋳片厚み中央断面における流動パターンを Fig. 12 に示す。(a) は磁場を印加しない場合、(b) は一段印加型の場合、(c) は二段印加型の場合を示した。磁場を印加した場合 (b)、(c) には、鋳型下部の流動が抑制されていることがわかる。表面近傍の流動状態を比較すると、一段印加型の場合 (b) は、磁場を印加しない場合 (a) に比べて表面近傍の流速が強くなっている。一方、二段印加型の場合 (c) には、表面近傍の流速が低減されている。この結果は、2 章で述べた水銀モデル実験の結果と定性的に一致している。一段印加型の場合には、表面近傍の流動を抑える効果が少ないため、鋳型下部の流動を抑えた分、表面の流動が強くなるものと考えられる。それに対し、二段印加型の場合には、下部磁極によって鋳型下部の流動を抑えても、上部磁極がその反動を抑えることが可能である。

4.3 実機実験との比較

二段印加型 (FC モールド) の計算結果について、3 章で述べた実機実験結果と比較して述べる。

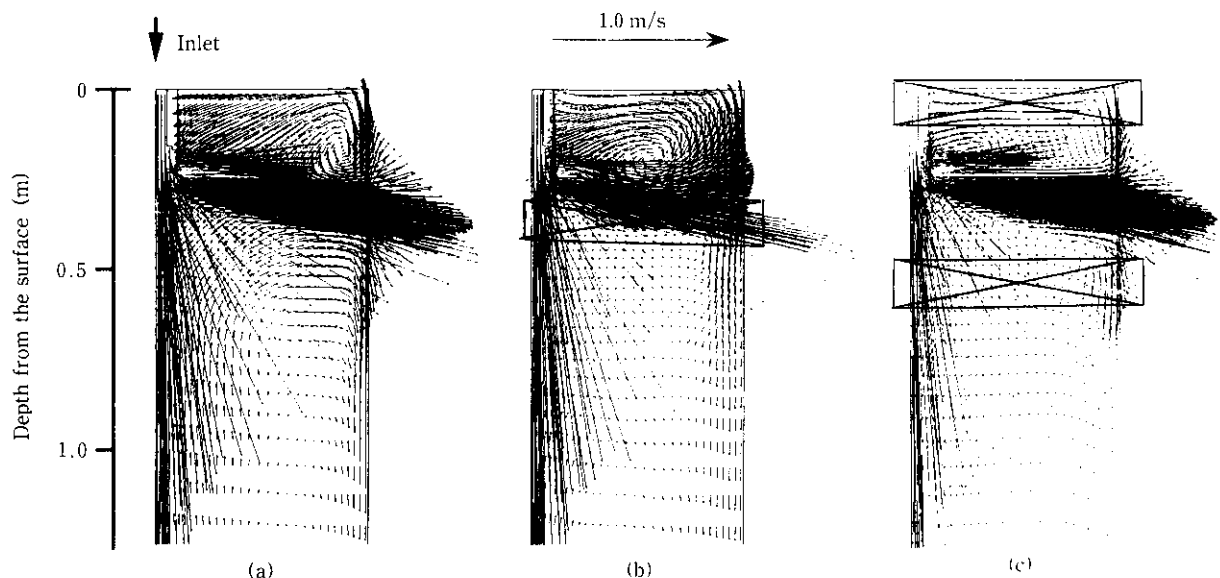


Fig. 12 Calculated velocity patterns of liquid flow in the centerline section of a mold: (a) without magnetic field, (b) with 1 pair of magnetic poles, (c) with 2 pairs of magnetic poles (FC mold)

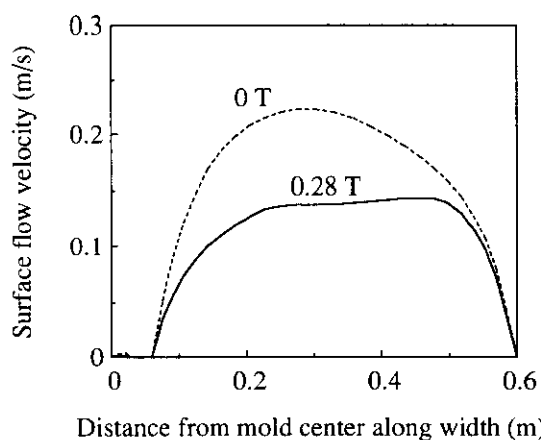


Fig. 13 Distribution of horizontal surface flow velocity at a depth of 40 mm in the center of mold thickness (calculated)

Fig. 13は表面下40 mm (第2メッシュ目)における水平方向流速の幅方向分布の計算結果を示した図であり、破線が磁場を印加しない場合、実線が0.28 Tの磁場を印加した場合の結果である。0 Tの時最大表面流速は0.23 m/sであるが、0.28 Tでは0.15 m/sとなっており、流速の減衰率は約65%である。この値はFig. 5の流速測定結果と若干差はあるものの、測定精度から考えると良好な一致と言える。

次に介在物の侵入深さについて、数値計算の結果を基に半定量的な考察を試みる。Fig. 14は表面下1 mにおける下降流速分布の計算結果を示した図である。0.28 Tの磁場印加によって最大下降流速は0.15 m/sから0.10 m/sに低減している。いずれの場合も最大値は短辺近傍で現われている。ここで、短辺下降流を2次元壁面噴流と考える。浸漬ノズルからの吐出流は3次元自由噴流であるが、短辺衝突前に噴流は十分拡がっており、長辺間に挟まれて、それ以上拡がることができないと考えられるからである。2次元壁面噴流の最大流速は噴流の初期速度に比例し、距離の1/2乗に反比例する¹⁴⁾。鋳型内の下降流によって鋳型深部に運ばれた介在物の挙動について考えると、上記のように下降流速は鋳型深部では、その深さの1/2乗に反比例して減衰しているため、ある位置では、下降流速と介在物の浮上速度とが一致し、それ以上深部へは侵入できない。その深さが介在物の最大侵入深さと解釈できる。よって、介在物の最大侵入

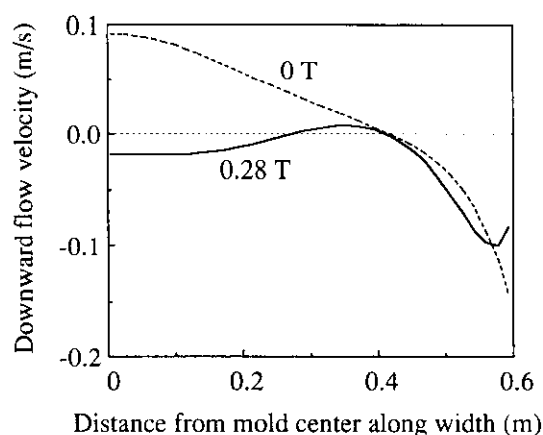


Fig. 14 Distribution of downward flow velocity at a depth of 1 m in the center of mold thickness (calculated)

入深さは短辺下降流が大きいほど深くなり、その初期速度の自乗に比例する。仮に初期速度として表面下1 mの下降流速をとれば、Fig. 14の数値計算による下降流速の結果から、侵入深さの比は2.25:1となる。この結果は、Fig. 9の結果(約1.7:1)とおおむね一致する。

5 結 言

高スループット鋳造に対応する新しい鋳型内電磁流動制御技術の開発にあたり、鋳型内流動の水銀モデル実験を行った。その結果、メニスカス部表面流速の低減と短辺近傍下降流の抑止に対して、磁極を一組だけ有する一段全幅印加型よりも、鋳型メニスカス部及び浸漬ノズル吐出孔下部に磁極を有する二段全幅印加型の方が効果が大きいことがわかった。この結果を基に、当社千葉製鉄所第3連続鋳造機において二段全幅印加型電磁制動(FCモールド)の実機検証実験を行い、上部磁極による溶鋼表面流動の抑制効果と下部磁極による鋳型下部流動の抑制効果を確認した。それらの効果について、数値計算による流動解析を用いて考察した。

現在、当社では千葉製鉄所第3連続鋳造機並びに水島製鉄所第4連続鋳造機にFCモールドの実用機を設置しており、高品質・高生産性を目的するために不可欠なプロセスとなっている。

参 考 文 献

- 1) 鷲尾 勝, 浜上和久, 小倉 滋, 朝穂隆一, 越川隆雄, 桜谷敏和: 鉄と鋼, 73(1987), S203
- 2) 浅野一哉, 加地孝行, 新井和夫, 鍋島祐樹, 森脇三郎, 田中修二: 材料とプロセス, 4(1991), 332
- 3) 久保田淳, 沖本一生, 岡 良徳, 政岡俊雄, 鈴木幹雄: 材料とプロセス, 3(1990), 1098
- 4) J. Nagai, K. Suzuki, S. Kojima, and S. Kollberg: Iron Steel Engineer, 61(1984), 41
- 5) 石塚晴彦, 山田純夫, 大西正之, 柿原節雄, 戸澤宏一, 北岡英就: 材料とプロセス, 2(1989), 298
- 6) 井戸川聡, 戸澤宏一, 竹内秀次, 反町健一, 櫻谷敏和, 杉澤元達, 森脇三郎: 材料とプロセス, 5(1992), p. 36
- 7) 井戸川聡, 戸澤宏一, 竹内秀次, 反町健一, 杉澤元達, 森脇三郎: 材料とプロセス, 5(1992), 995
- 8) 杉澤元達, 森脇三郎, 桜井美弦, 富山淑郎, 井戸川聡, 竹内秀次: 材料とプロセス, 4(1991), 1281
- 9) 飯塚和広, 杉澤元達, 森脇三郎, 朝穂隆一, 井戸川聡: 材料とプロセス, 5(1992), 996
- 10) R. Ricou and C. Vivès: Int. J. Heat Mass Transfer, 25(1982), 1579
- 11) 井戸川聡, 竹内秀次, 反町健一, 桜谷敏和: 材料とプロセス, 4(1991), 21
- 12) 井田 治, 垣生泰弘, 江見俊彦, 浜上和久, 上田典弘: 鉄と鋼, 66(1980), S142
- 13) A. Sterl: J. Fluid Mech, 216(1990), 161
- 14) N. Rajaratnam(野村安正訳): 「噴流」, (1976), 210, [森北出版]