

鑄型内溶鋼流動制御によるスラブ欠陥低減技術

Molten Steel Flow Control Technology for Decreasing Slab Defects

古米 孝平 FURUMAI Kohei JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部 主任研究員 (副課長)
三木 祐司 MIKI Yuji JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)

要旨

JFE スチールでは、連続鑄造機にて上下2段の静磁場を有する Flow Control mold (FC モールド) により、高スループット条件下における、鑄型内の凝固シェルに捕捉される欠陥を低減し、スラブ品質向上を図っている。本報では、FC モールド内での溶鋼運動量およびスラブ中の欠陥分布を調査し、電磁ブレーキの欠陥分布および鑄型内の幅方向で溶鋼流速が非対称な状態である偏流への効果を評価し、以下の知見を得た。

- (1) 鑄型内の電磁ブレーキによる溶鋼運動量低減効果は、実測と数値計算値でよく一致した。また、電磁ブレーキによる運動量低減効果は、異なるスループット、磁束密度条件においても外力項と慣性力項の比である Stuart 数で整理可能であり、Stuart 数が 3.5 以上になるように電磁ブレーキ力を印加することにより、溶鋼運動量を 50% 以上低減可能であった。
- (2) 鑄型内の凝固シェルに捕捉される欠陥分布は、スループットと電磁ブレーキの磁束密度に大きく依存した。
- (3) 鑄型内の凝固シェルに捕捉される欠陥は、数値計算により予測でき、高生産化でのスラブ高品質化するための適正な電磁ブレーキ力や鑄造条件を見出すことが可能である。

Abstract:

In order to suppress the defects entrapped on the solidified shell in the continuous casting mold under high molten steel throughput conditions, momentum of the molten steel in a mold with two static magnetic fields in the Flow Control Mold (FC mold) was investigated to evaluate the effects of the electromagnetic brake on the distribution of defects and an unbalanced flow behavior. The main results are summarized as follows:

- (1) The measured value of the effect of the electromagnetic brake on decreasing molten steel momentum was consistent with the calculated value. Molten steel momentum could be reduced by more than 50% when the Stuart number was more than 3.5.
- (2) The position of entrapped defects in the solidified shell in the mold was influenced by the throughput and the magnetic flux density of the electromagnetic brake.
- (3) Entrapped defects can be predicted by the numerical simulation, which is useful for optimizing the magnetic flux density and casting conditions.

1. はじめに

連続鑄造時に凝固シェルに捕捉され、スラブ内に残存した気泡や介在物は、熱間もしくは冷間圧延時の疵発生の原因になる場合がある。近年、高生産性と高品質化の両立が要求されており、高速、高スループット鑄造時の鑄片品質を向上させることが課題となっているが、連続鑄造での高速、高スループット鑄造時には、一般的にスラブ品質が悪化する。その原因は、鑄造速度が大きいため、鑄型内の介在物浮上効果が小さく、鑄型下方へ介在物の潜り込みが生じやすいこと¹⁾や、浸漬ノズルからの吐出流速が大きくなるため、メニスカス部の湯面変動量増大によるモールドフラックス巻

き込みが起ること²⁾等が挙げられる。これらに対し、鑄型内で電磁ブレーキを印加することで、浸漬ノズルから吐出する溶鋼流速を低減し、鑄型下方への介在物の潜り込みやメニスカス部での湯面変動増大の抑制が可能である³⁾。また、二孔型の浸漬ノズルを用いた場合、浸漬ノズル内部やスライディングゲート周りに、アルミナ等の介在物が付着する等の原因により、ノズルからの吐出流速が各孔で不均等になり、鑄型内の溶鋼流動が、スライディングゲートの開閉方向(鑄型幅方向あるいは厚み方向)で偏りを生じ、特に高スループット下において、偏流の程度が大きくなることが知られている⁴⁻⁷⁾。二孔型の浸漬ノズル吐出孔からの鑄型幅方向への溶鋼吐出流は鑄型短辺面凝固シェルに衝突後、分岐して上昇流および下降流となるが、鑄型幅方向で偏流が生じた場合、鑄型短辺面衝突部からの反転上昇流速が大きい領域で

2016 年 2 月 18 日受付

は、鋳型短辺近傍のメニスカス部に激しい湯面波動が発生し、メニスカス部の湯面変動の増加によるモールドフラックス巻き込み⁸⁾が起こる。また、鋳型短辺面衝突部での鋳型下方への下降流に乗った介在物は、鋳型下方へ潜り込み、鋳片内部の凝固シェルに捕捉され、欠陥となる⁹⁾。操業面においても鋳型内の溶鋼偏流が大きい場合、吐出流速の大きい側での鋳型短辺面衝突部での凝固シェルの再溶解によりブレイクアウトを引き起こすことも考えられる¹⁰⁾。これらより、鋳型内での、溶鋼運動量低減および偏流抑制は、高生産性と高品質化を満す上で重要な技術課題である。これまでに、浸漬ノズル形状、鋳型内での電磁攪拌や浸漬ノズル部への電磁ブレーキによる鋳型内の溶鋼運動量低減および偏流抑制の検討が行われている¹¹⁻¹³⁾。しかしながら、鋳型内の溶鋼運動量低減に対する電磁ブレーキの効果、鋳型内での偏流の程度と実際の鋳片内での欠陥捕捉分布との相関および偏流に対する電磁流動制御の影響等の詳細は分かっていない。本報では、鋳型内上部および下部の二段に電磁ブレーキを有するスラブ連続鋳機で鋳造した鋳片内の溶鋼運動量および欠陥分布を測定し、電磁ブレーキの溶鋼運動量および偏流低減効果、鋳型内での偏流状況と鋳型内での欠陥捕捉位置の相関を評価したので報告する。

2. 実験方法

本試験は、鋳型内の上部および下部のコイルにより鋳型内に電磁ブレーキを印加することが可能なFCモールドが設置された連続鋳造機³⁾で鋳造を実施した。鋳造速度、鋳型幅、鋳型厚み、FCモールドの磁束密度、溶鋼成分は表1の条件で試験を行った¹⁴⁾。鋳型内での電磁ブレーキによる溶鋼運動量低減効果を評価するために、鋳片表層と垂直な方向に対する1次デンドライトの傾き（デンドライト傾角）を測定し、(1)式¹⁵⁾を用いて溶鋼流速の算出を行った。凝固定数(2.58 × 10⁻³ m/s^{1/2})は、実鋳造時に鋳型内に鉄-硫黄合金を添加し、鋳造後の鋳片内のS濃度分布により求められた凝固シェ

表1 溶鋼成分および鋳造条件¹⁴⁾

Table 1 Chemical composition of molten steel and casting conditions¹⁴⁾

Slab width [mm]	1600-1700			
Slab thickness [mm]	260			
Casting speed [m/min]	1.2-1.7			
Throughput [t/min]	3.7-5.3			
Index of magnetic flux density (T)	0.04-0.30			
C	Si	Mn	P	Al
0.0015-0.0018	0.01-0.02	0.15-0.16	0.015-0.020	0.025-0.031

[mass%]

ル厚により(2)式を用いて算出し、(1)式中の凝固速度は(3)式に示す凝固シェル厚の時間変化から求めた。溶鋼流速の調査は、鋳型内での鋳型短辺衝突後の上昇流速を測定するために、鋳片短辺側からサンプルを切り出し、研磨およびピクリン酸腐食後に、顕微鏡を用いて1mm間隔毎にデンドライト傾角を測定した。

$$D = K\sqrt{t} = K\sqrt{Z/V_c} \dots \dots \dots (1)$$

$$V = \frac{dD}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

$$\theta = \left(\frac{0.35 \cdot C_0^2}{C_0^2 + 0.0005} + 0.65 \right) \cdot 11.5 \cdot V_F^{-0.177} \cdot \log \left(\frac{5.38 \cdot 10^{-1} \cdot V_F^{2.08}}{V} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、D: 凝固シェル厚 [m], K: 凝固定数 [m/s^{1/2}], t: 時間 [s], Z: メニスカスからの距離 [m], V_c: 鋳造速度 [m/s], θ: デンドライト傾角 [degree], C₀: 炭素濃度 [mass%], V_F: 溶鋼流速 [m/s], V: 凝固速度 [m/s]

また鋳型内の偏流が欠陥分布に及ぼす影響評価は、超音波探傷法により鋳片内の欠陥分布測定を行った。

3. 数値計算方法

鋳型内溶鋼流速への電磁ブレーキの効果を考察するために数値計算を行った¹⁶⁾。数値計算は、汎用の流体解析プログラムFluentを用い¹⁷⁾、乱流モデルには標準k-εモデル¹⁸⁾を使用した。Fluentに含まれる、質量保存式、運動量保存式(Navier-Stokes方程式)、エネルギー保存則、エンタルピーを(4)~(7)式に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{v}) \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \dots \dots \dots (6)$$

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT + \frac{\partial f_L}{\partial t} \Delta H \dots \dots \dots (7)$$

ここで、v: 速度[m/s], ρ: 溶鋼密度[kg/m³], p: 圧力[Pa], μ: 溶鋼粘性係数 [0.0057 Pa · s]¹⁹⁾, H: エンタルピー [J], k: 熱伝導率 [34 W · m/K]²⁰⁾, T: 温度 [K], S: ソース項, h_{ref}: 参照エンタルピー [J], C_p: 定圧比熱 [753 J · K/kg]²¹⁾, T_{ref}: 参照温度 [K], f_L: 液相率

電磁ブレーキ力の効果評価は、静磁場の外部磁場Bを設定し、(8)~(9)式を用いて計算を実施した。

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} + \vec{B}) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{v} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 J : 電流密度 [A/m²], E : 電場 [V/m], B : 磁束密度 [T], σ : 電気伝導度 [7.14×10⁶ S/m]²²⁾, μ : 透磁率 [1.26×10⁻⁶ H/m]²³⁾

4. 実験結果および考察

4.1 溶鋼運動量に対する電磁ブレーキの効果

図1に鋳型内の溶鋼運動量に対する、電磁ブレーキの磁束密度の影響を示す¹⁴⁾。

ここで図中縦軸は、デンドライト傾角から算出した実測運動量もしくは数値計算から求めた運動量を、(10)~(14)式で表される今村ら²⁴⁾によって提案された、磁場の影響のない場合の運動量で除したものとしている。

$$V_d = \gamma \sqrt{(1-\zeta_4)(1-\zeta_3)} \cdot \sqrt{2g[c^2(h_{TD}+l_1)+l_2+l_3]} \quad \dots\dots (10)$$

$$c = 0.364 q^{0.65} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\zeta_3 = 1.1 \left(1 - \frac{a}{B'}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\zeta_4 = 1.16 - 0.015 \phi \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\rho V_e = \rho V_d \left(\frac{X}{6.3d}\right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 V_d : 浸漬ノズルからの吐出流速 [m/s], γ : 浸漬ノズル吐出部最大流速と平均流速の比, g : 重力加速度

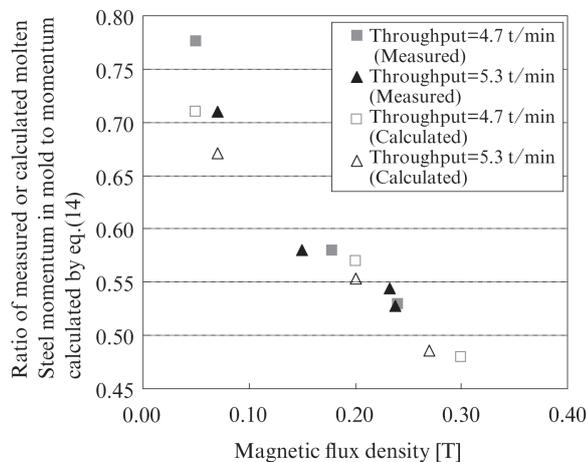


図1 磁束密度と(14)式に対する実測および数値計算での溶鋼運動量の比との関係¹⁴⁾

Fig. 1 Relationship between magnetic flux density and ratio of measured or calculated molten steel momentum in mold to momentum calculated by eq.(14)¹⁴⁾

[m/s²], h_{TD} : タンディッシュ浴深さ [m], l_1 : 上ノズル長 [m], l_2 : 下ノズル長 [m], l_3 : 下ノズル~浸漬ノズル内湯面間距離 [m], c : 浸漬ノズル内自由落下流における流出係数, q : スループット [t/min], a : 浸漬ノズル内の落下流の断面積 [m²], B' : 浸漬ノズル内断面積 [m²], ϕ : 浸漬ノズルの吐出角度 [degree], V_e : 鋳型短辺面衝突流速 [m/s], X : 浸漬ノズル吐出口~鋳型壁面までの水平距離 [m], d : 浸漬ノズル吐出口径 [m]

磁束密度が小さいと、実測での運動量と磁場影響のない(14)式を用いた運動量が近い値であるのに対し、磁束密度を大きくし、電磁ブレーキを大きく作用させると実測運動量が小さくなり、電磁ブレーキを印加しない場合に比べ最大で運動量を約半減できることが確認できた。また、(14)式で与えられる運動量に対する数値計算で求めた運動量との比を見てみると、スループット 4.7 および 5.3 t/min の両場合において、磁束密度が小さい条件でばらつきがあるが、(14)式と実測値の比によく一致することが分かった。また、磁場の影響を与える指標である、Stuart 数 N は (15) 式のように外力項と慣性力項の比で与えられる²³⁾。

$$N = \frac{|\sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}|}{|\rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}|} = \frac{B^2 \sigma L}{\rho v} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 L : 代表長さ [m]

図2に Stuart 数 N と (14) 式で与えられる運動量に対する実測値もしくは数値計算での運動量との比の関係を示す¹⁴⁾。Stuart 数 N と (14) 式で与えられる運動量に対する実測値もしくは数値計算での運動量との比に相関があり、Stuart 数 N が大きいほど鋳型内での電磁ブレーキによる運動量低減効果が大きいことが分かる。今回の結果より、異なるスループット、磁束密度条件においても Stuart 数 N が約 3.5 以上になる磁束密度を印加すれば電磁ブレーキが無い

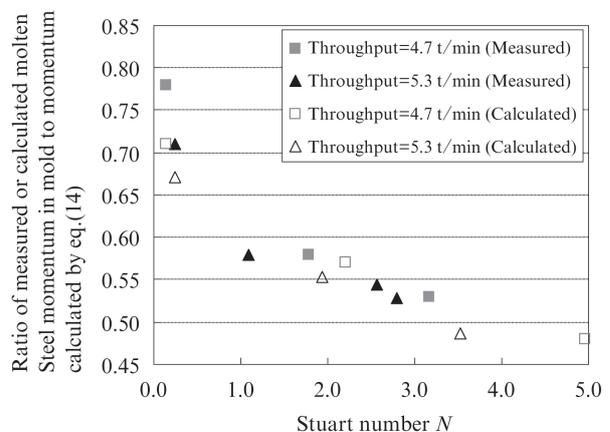


図2 スチュワート数 N と(14)式に対する実測および数値計算での溶鋼運動量の比との関係¹⁴⁾

Fig. 2 Relationship between Stuart number N and ratio of measured or calculated molten steel momentum in mold to momentum calculated by eq.(14)¹⁴⁾

場合に比べ鋳型内の溶鋼運動量を、約 50% 低減できると考えられる。

4.2 鋳型内での偏流

超音波探傷法により鋳片内の欠陥分布を測定した結果から、鋳片表面から欠陥部までの欠陥深さを、鋳型内での欠陥捕捉位置（メニスカスからの距離）に置き換えて、プロットしたものを、**図 3** に示す¹⁴⁾。

鋳型内での鋳造方向位置は、鋳片内の欠陥深さ位置から (16) 式を用い、メニスカスからの距離に換算した。

$$Z = V_c \left(\frac{D}{K} \right)^2 \dots\dots\dots (16)$$

鋳型内での電磁ブレーキの磁束密度を一定にした時の、スループット 4.2 t/min および 4.6 t/min の場合で比較すると、鋳型内での欠陥捕捉位置分布が大きく異なっており、スループット 4.6 t/min の場合、鋳型内で欠陥捕捉の分布が幅方向で偏っている。これらのスループットの違いにより欠陥捕捉位置が大きく異なっていることから、鋳型内の流動状況も異なっていることが考えられる。今回、幅方向の偏流を評価するために、鋳型内幅方向を 2 分割（鋳型内左および右）し、欠陥分布および溶鋼流動評価を行った。鋳型内の凝固シェルに捕捉される、幅方向の欠陥の偏在度合いを定量的に評価するため、(17) および (18) 式で示す、鋳型幅方向左右で捕捉された欠陥の個数密度差を欠陥偏在度と定義した。

$$A = \frac{|N_R - N_L|}{N_A} \cdot 100 \dots\dots\dots (17)$$

$$N_A = N_R + N_L \dots\dots\dots (18)$$

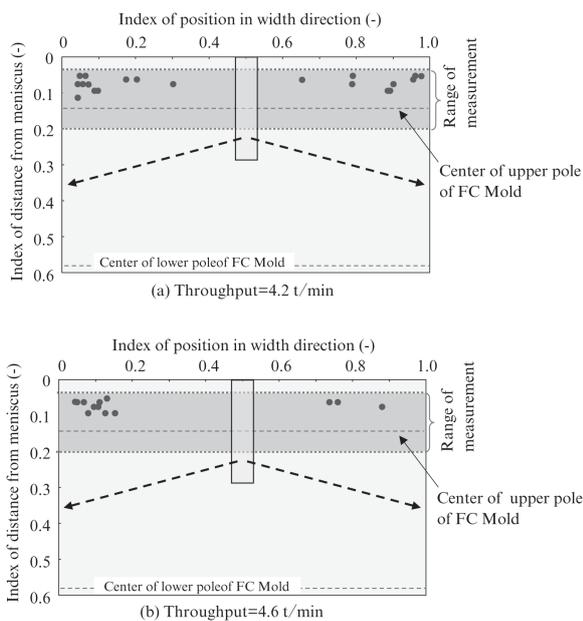
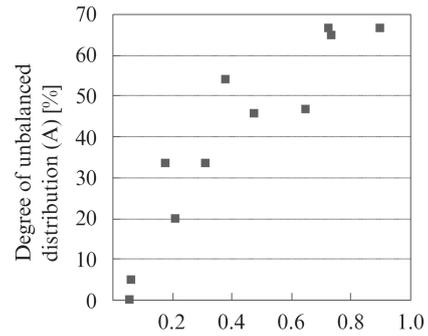


図 3 スラブ内の欠陥分布¹⁴⁾

Fig. 3 Position of surface defects in investigation of cast slab¹⁴⁾



Difference of molten steel momentum of rising flow at left and right mold narrow sides [x 10³ kg/m²/s]

図 4 鋳型内左右の溶鋼上昇運動量の差と欠陥偏在度との関係¹⁴⁾

Fig. 4 Relationship between difference of momentum of rising flow at left and right mold narrow sides and degree of unbalanced distribution of defects¹⁴⁾

ここで、A: 欠陥偏在度 [%], N_A : 全欠陥個数密度 [個/m³], N_R : 鋳型内右側で捕捉された欠陥個数密度 [個/m³], N_L : 鋳型内左側で捕捉された欠陥個数密度 [個/m³]

欠陥個数は超音波探傷法での測定結果を用いた。**図 4** に鋳型内左右の溶鋼運動量差と欠陥偏在度（メニスカスから 200 mm 以内）の関係を示す¹⁴⁾。鋳型内での溶鋼運動量差が大きい程、欠陥偏在度も大きく鋳型内の欠陥分布は、溶鋼運動量に大きく影響されることが確認できた。これらの、鋳型内の欠陥偏在度を抑制するには、鋳型内の溶鋼運動量を低減することが重要であり、Stuart 数 N で整理可能なスループットに応じた適切な電磁ブレーキ力を印加し、溶鋼運動量を低減することが有効であると考えられる。

5. 連続鋳造プロセスでの数値計算例

本章では、連続鋳造プロセスでの鋳造条件の最適化等の検討に用いている数値計算例を示す。**図 5**¹⁶⁾ に、厚み中央および凝固界面（固相率 $f_s=0.2$ ）における 0.5 mm 径の捕捉された気泡分布計算値を示す。上段は厚み中央の気泡分布

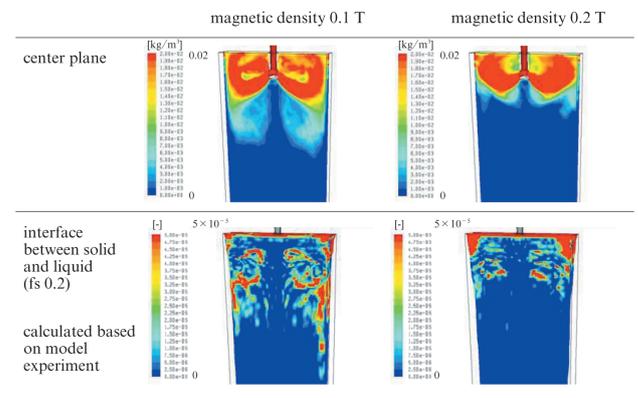


図 5 数値計算による凝固シェルに捕捉される気泡¹⁶⁾

Fig. 5 Calculated results of entrapped bubble concentration¹⁶⁾

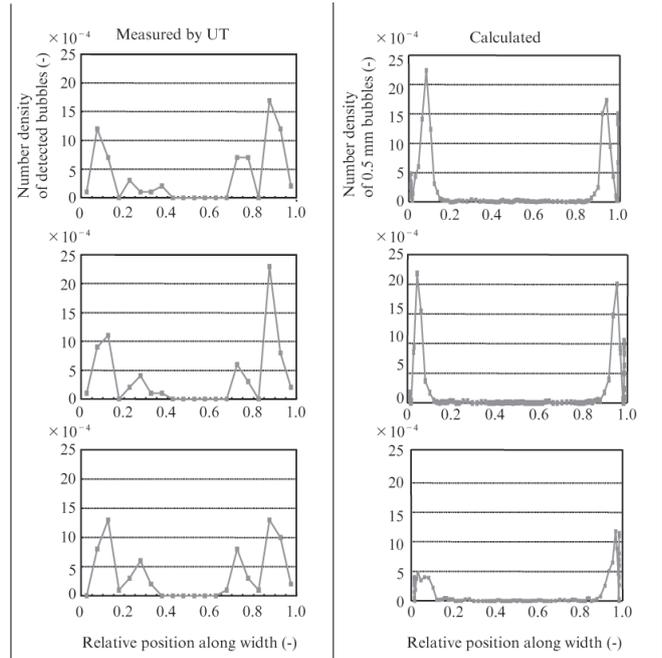
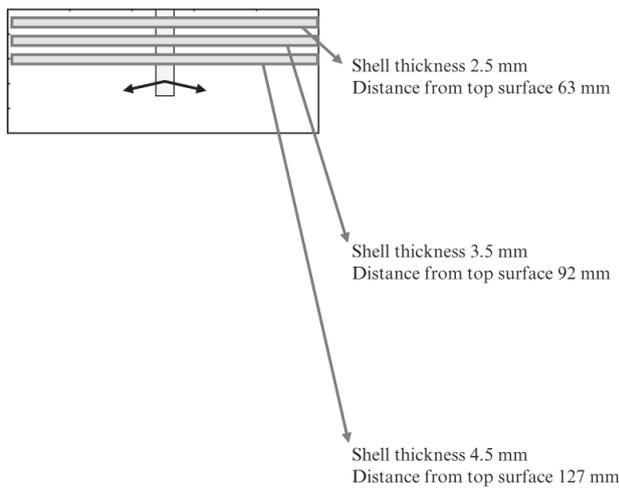


図6 数値計算および実測による気泡密度の比較¹⁶⁾

Fig. 6 Comparison between calculated and measured bubble concentration¹⁶⁾

で、下段は凝固界面における気泡捕捉率を示す。ここで、計算値の捕捉率は、吹込んだ気泡の濃度で規格化した。

左列は、FC モールドの磁束密度が 0.1 T 時、右列が 0.2 T 時であるが、FC モールドによる磁束密度強度が大きいとき（磁場強度 0.2 T）に、ノズル噴流に混入している気泡の浮上が促進しているが、これは、ノズル吐出孔からの溶鋼流速と気泡の浮力によって決定されるノズル噴流が電磁ブレーキによって制動されて、結果、気泡浮力による上昇流が促進されてノズル噴流が上方に歪曲されるためであると考えられる。図 6¹⁶⁾ に、幅方向の気泡・介在物分布を、左列に実測値、右列にモデル実験に基づく計算値を示す。

上段から、スラブ表面から 2.5 mm（溶鋼上面から推定 63 mm）、3.5 mm（同じく 92 mm）、4.5 mm（同じく 127 mm）相当の結果となっている。ここで、図 5 と同じく、計算値の捕捉率は吹込んだ気泡の個数で規格化した。実測値およびモデル実験に基づく計算値では、鋳型短辺付近に気泡分布が多く、かつ、スラブ表面から深くなるほど気泡・介在物密度は低減しており、傾向がよく一致していることが確認できた。

6. おわりに

本稿では、電磁ブレーキによる、鋳型内での溶鋼運動量低減効果および溶鋼偏流抑制効果を評価し、以下の知見が得られた。

(1) 鋳型内の電磁ブレーキによる溶鋼運動量低減効果は、実測値と数値計算値でよく一致した。また、電磁ブレー

キによる運動量低減効果は、異なるスループット、磁束密度条件においても外力項と慣性力項の比である Stuart 数 N で整理可能であり、Stuart 数 N が 3.5 以上になるように電磁ブレーキ力を印加することにより、溶鋼運動量を 50% 以上低減可能であった。

- (2) 鋳型内の凝固シェルに捕捉される欠陥分布は、スループットと電磁ブレーキの磁束密度に大きく依存し、鋳型内の欠陥偏在度は、鋳型内の運動量差と相関があることが分かった。また、モールドフラックスの巻き込みに影響するメニスカス部の湯面変動量も溶鋼運動量と同様に、異なるスループット、磁束密度条件においても Stuart 数 N で整理可能である。
- (3) 鋳型内の凝固シェルに捕捉される欠陥は、数値計算により予測でき、高生産化でのスラブ高品質化するための適正な電磁ブレーキ力や鋳造条件を見出すことが可能である。

参考文献

- Miyamura, K.; Kaneko, N.; Kanamaru, K.; Tetsu-to-Hagané. 1979, vol. 65, No. 229.
- Kosaka, S.; Yokoya, S.; Iwata, K.; Tsukaguchi, Y.; Yoshihara, M.; Hayashi, H. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 949.
- Idogawa, A.; Kitano, Y.; Tozawa, H. Kawasaki Steel Giho. 1996, vol. 28, p. 46
- Kubo, N.; Kubota, J.; Ishii, T. ISIJ Int. 2001, vol. 41, p. 1221.
- Gupta, D.; Chakraborty, S.; Lahiri, A. K. ISIJ Int. 1997, vol. 37, p. 654.
- Wang, Y. H. Steelmaking Conf. Proc. 1990, vol. 73, p. 473.
- Sasai, K.; Yamamura, H.; Tsutsumi, N.; Mizukami, Y.; Esaka, H. CAMP-ISIJ. 1992, vol. 5, p. 223.
- Teshima, T.; Kubota, J.; Suzuki, M.; Ozawa, O.; Masaoka, T.; Miyahara, S. Tetsu-to-Hagané. 1992, vol. 79, p. 576.

- 9) Tanaka, H.; Imamura, A.; Nishihara, R. *Tetsu-to-Hagané*. 1992, vol. 78, p. 1464.
- 10) Nakai, D.; Yamamoto, Y.; Miyake, T.; Nakata, H. *Proceedings of the 4th International Congress on Science Technology of Steelmaking, Gifu, Japan*. 2008, p. 97.
- 11) Tsukaguchi, Y.; Hayashi, H.; Kurimoto, H.; Yokoya, S.; Marukawa, K.; Tanaka, T. *Tetsu-to-Hagané*. 2009, vol. 95, p. 33.
- 12) Morishita, M.; Tai, Y.; Ayata, K.; Katsuta, J. *CAMP-ISIJ*. 1997, vol. 10, p. 832.
- 13) Morishita, M.; Terauchi, M.; Nakao, M.; Koga, Y.; Nakaoka, T. *CAMP-ISIJ*. 2007, vol. 20, p. 867.
- 14) Furumai, K.; Matsui, Y.; Murai, T.; Miki, Y. *Tetsu-to-Hagané*. 2014, vol. 100, p. 563.
- 15) Esaka, H.; Suter, F.; Ogiyayashi, S. *ISIJ Int*. 1996, vol. 36, p. 1264.
- 16) Miki, Y.; Ohno, H.; Kishimoto, Y.; Tanaka, S. *Tetsu-to-Hagané*. 2011, vol. 97, p. 423.
- 17) *Fluent 6.3 Manual*. ANSYS Inc. 10 Cavendish Court, Lebanon, NH, U. S. A. 2007.
- 18) Launder, B. E.; Spalding, D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England. 1972.
- 19) Nakanishi, K.; Saito, T.; Shiraiishi, Y. *Jpn. Inst. Met*. 1967, vol. 31, p. 881.
- 20) Touloukian, Y. S. *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials*. Macmillan Co., New York. 1967, vol. 1.
- 21) Elliott, J. F.; Gleiser, M. *Thermochemistry for Steelmaking*. AIME. 1963.
- 22) Hirayama, K.; Kuwano, R.; Ono, Y.; Yagi, S. *Tetsu-to-Hagané*. 1970, vol. 56, no. S91.
- 23) Iwai, K. *Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan*. 2004, vol. 9, p. 705.
- 24) Imamura, A.; Kusano, A.; Moritama, N. *Tetsu-to-Hagané*. 1992, vol. 78, p. 439.



古米 孝平



三木 祐司