

# スラブ幅方向に静磁場を印加した連続铸造機内の 溶鋼流動挙動に関する基礎検討

森下 雅史\*・小北 雅彦\*・中岡 威博\*<sup>2</sup>・三宅 俊也\*<sup>2</sup>

Basic Study on Flow Behavior of Molten Steel in a Continuous Casting Machine  
in the Presence of Static Magnetic Field Parallel to the Slab Width Direction

Masafumi MORISHITA, Masahiko KOGITA, Takehiro NAKAOKA and Toshiya MIYAKE

**Synopsis :** An electromagnetic brake (EMBR) has been developed in order to reduce non-metallic inclusions in slab by means of reducing downward molten steel flow in a continuous casting machine. However, it was reported that the conventional EMBR, which imposes static magnetic field parallel to slab thickness direction, had a problem that the non-metallic inclusions in the vicinity of width edges were not effectively reduced, especially when the slab width was small. The reason is considered that the electromagnetic force is not strong enough to prevent the downward flow from carrying the inclusions deep into the strand in the vicinity of the width edges, though the downward flow velocity is highest in the region. The force in the region is weak because electric current parallel to the slab width direction is small.

In this study, a new EMBR, which imposes static magnetic field parallel to slab width direction, has been proposed as a countermeasure for the reported problem. By computer simulations and model experiments using liquid gallium, it was demonstrated that the new EMBR suppressed the downward flow more effectively than the conventional. The region where the downward velocity was high was extinguished. By using the new EMBR, upward electromagnetic force induced by the magnetic field parallel to slab width direction and the electric current parallel to slab thickness direction brakes the downward flow effectively in the vicinity of the width edges.

**Key words :** continuous casting; surface defect; electromagnetic brake; non-metallic inclusion; computer simulation; model experiment; static magnetic field.

## 1. 緒言

連続铸造により製造したスラブ鋳片にアルミナクラスタ等<sup>1</sup>の介在物が存在すると、この介在物に起因して圧延後の鋼板製品に表面疵が発生することがある。鋳片の介在物を低減するためには、介在物の少ない清浄鋼を溶製するとともに、凝固時に溶鋼中の介在物が鋳片に捕捉されないようにすることが重要である。

このため、電磁力を利用して連続铸造機内の溶鋼流動を制御し、鋳片への介在物の捕捉を防止する技術が開発されてきた。鋳型内電磁攪拌<sup>1)</sup>(以下M-EMSと記す)や、電磁ブレーキ<sup>2-4)</sup>(以下EMBRと記す)がその成果である。

この内、M-EMSは溶鋼を積極的に攪拌することで、主に鋳片表層部の介在物低減を図る技術である。付録に示すように、一般の薄鋼板では、鋳片表面から20mm以内の表層部に存在する介在物が製品表面疵の主原因になっていると考えられる。M-EMSは、鋳片表層部が凝固する鋳型内において凝固界面を洗い流すことにより、製品表面疵に有害な鋳片表層部の介在物を効率よく低減する手段として利用

されている。

一方、EMBRは溶鋼流動を抑制することで、主に鋳片内部の介在物低減を図る技術である。

鋳型内に注入された溶鋼の流れが連続铸造機内に深く潜り込むと、溶鋼中に存在する介在物もこの流れに乗って機内深くに潜り込む。この結果、介在物は浮上しきれず、鋳片内部に捕捉されることとなる。厚み0.3mm程度まで圧下される特殊な鋼板製品においては、鋳片表面から20mm以上深い鋳片内部領域に存在する介在物も製品品質に有害となる。EMBRによって溶鋼下降流を抑制すると、介在物の浮上分離が促進されるので、鋳片内部の介在物が低減することが報告されている<sup>2)</sup>。また、高速铸造時において問題となる鋳型フラックスの巻き込みを防止する効果を有することも報告されており<sup>3)</sup>、連続铸造の生産能力向上手段としても期待されている。

しかしながら、従来のEMBRは、鋳片幅両端部において下降流を抑制する効果が弱く、特に鋳片幅が狭い場合には鋳片内部の介在物を十分に低減できないという問題を有することが報告されている<sup>6)</sup>。

平成12年11月17日受付 平成13年1月9日受理 (Received on Nov. 17, 2000; Accepted on Jan. 9, 2001)

\* (株) 神戸製鋼所加古川製鉄所技術研究センター (Research & Development Laboratories, Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675-0023)

\* 2 (株) 神戸製鋼所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

本研究では、この問題を克服し、スラブ全幅で安定した介在物低減効果を得るための新型EMBRを提案し、溶鋼流動に関する基礎的な検討を行った結果を報告する。従来型EMBRが溶鋼にスラブ厚み方向の静磁場を作用させるのに対し、新型EMBRはスラブ幅方向の静磁場を作用させる点に特徴がある。従来型と新型のEMBRについて数値計算と液体ガリウムを用いたモデル実験とを実施し、EMBRの静止磁場方向が下降流抑制効果に及ぼす影響を調査した。

## 2. 方法

### 2.1 数値計算方法

スラブ厚み方向の磁場を作用させる従来型EMBRと、スラブ幅方向の磁場を作用させる新型EMBRの流動抑制効果について検討すると共に、その計算精度を検証する目的で、以下の計算を実施した。

- (1) 各種EMBR使用時の溶鋼流動に関する計算 (実機サイズ)
- (2) 液体ガリウムを用いた流動解析精度検証用モデル実験に関する計算 (1/6サイズ)

実機サイズの計算では、Fig. 1 に示すように厚み方向の磁場をスラブ全幅に作用させるRuler型のEMBRについて、磁極位置や鋳型幅が下降流抑制効果に及ぼす影響を検討した。

また、モデル実験では、(a) EMBR無し、(b) 従来のFC型EMBR、(c) 新型EMBRの3条件で流速分布を検討した。FC型EMBRは、上方にパウダー巻き込み防止用、下方に下降流抑制用と、厚み方向の磁場を上下2段に作用させる方式である。

静磁場下における熔融金属の流動計算には、静磁場分布を仮定し、電磁流体力学 (MHD) 近似下で流動と渦電流とを連成計算する手法を用いた。基礎式<sup>7)</sup>を以下に示す。(非圧縮性流体の連続の式)

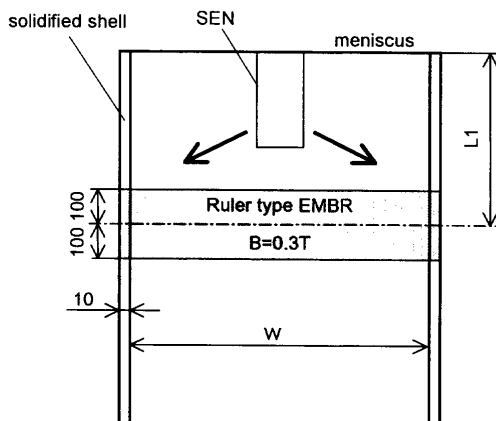


Fig. 1. Calculation model for the conventional EMBR. (Ruler type, thickness direction field)

$$\nabla \cdot U = 0 \dots \dots \dots (1)$$

(Navier-Stokesの運動方程式)

$$\rho \{ \partial U / \partial t + (U \cdot \nabla) U \} = -\nabla P + \rho \nu \nabla^2 U + \rho g + J \times B \dots \dots \dots (2)$$

(MHD近似下のマクスウェルの式)

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \dots \dots \dots (3)$$

$$\nabla \times B = \mu J \dots \dots \dots (4)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots \dots \dots (6)$$

(導電体の運動を考慮したオームの式)

$$J = \sigma (E + U \times B) \dots \dots \dots (7)$$

乱流モデルには標準のk-εモデルを採用し、凝固、自由表面の変形、浸漬ノズル閉塞防止用に吹き込むガス相の影響は無視できるものとした。

吐出流の減衰を評価するために湯面から鋳造方向に5mまでを解析領域とした。解析領域の下端は鋳造速度で均一に流出する境界条件を採用し、浸漬ノズル内には流出流量と等しい流量を均一に流入させた。また、溶鋼と凝固殻との界面は鋳造速度で下降する固体壁、湯面はスリップ壁、浸漬ノズル内外壁は固定壁条件とした。また、溶鋼の外周に厚み10mmの凝固殻を配置し、凝固殻中に流れる電流を考慮した。

### 2.2 モデル実験方法

新型EMBRによる溶鋼下降流抑制効果を実験的に検討するとともに、数値計算精度を検証する目的で、モデル実験を行った。Fig. 2にモデル実験装置の概略図を示す。計算と同様、(a) EMBR無し、(b) 従来のFC型EMBR、(c) 新

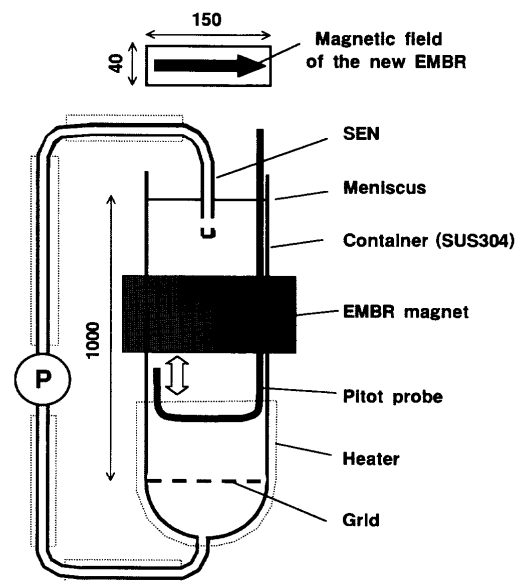


Fig. 2. Apparatus for the gallium model experiments.

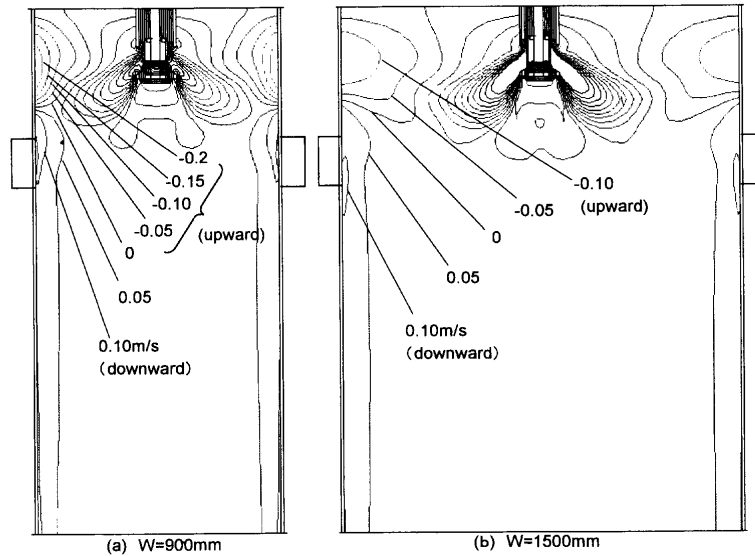


Fig. 3. Calculated distributions of downward velocity at the thickness center for the conventional EMBR (Ruler type). ( $L1=500$  mm,  $V_c=1.8$  m/min,  $B=0.3$  T)

Table 1. Experimental conditions.

	Model	Actual	Ratio
Slab thickness	0.04 m	0.24 m	0.17
Slab width (L)	0.15 m	0.9 m	0.17
Casing velocity (U)	0.055 m/s	0.028 m/s	1.98
Density ( $\rho$ )	6100 kg/m <sup>3</sup>	7000 kg/m <sup>3</sup>	0.87
Viscosity ( $\mu$ )	0.0016 Pa·s	0.0056 Pa·s	0.29
Electric Conductivity ( $\sigma$ )	3.9 MS/m	0.7 MS/m	5.57
Magnetic Flux density (B)	0.20 T	0.147 T	1.36
$Re = L U \rho / \mu$	$3.14 \times 10^4$	$3.14 \times 10^4$	1.00
$Ha = B L (\sigma / \mu)^{0.5}$	$1.48 \times 10^3$	$1.48 \times 10^3$	1.00
$N = \sigma L B^2 / \rho / U$	69.5	69.5	1.00

型EMBRの3条件でモデル実験を行った。

モデル実験では溶鋼の代わりに液体ガリウムを用いた。ガリウムは融点が約29°Cと低く、取り扱いが容易であり、また電気伝導率が大きいこと同様に磁束密度でも強力な電磁力が得られる特徴を有する。900 mm幅の実機スラブ連続鋳造に相当する1/6サイズのモデル実験とした。浸漬ノズルは注入流をスラブ幅方向に下向き35度で噴出するノズルを使用した。モデル底部において均一に流出する条件を実現するため、湯面から1 mの深さに金網を配置した。

MHD現象を扱うEMBRの実験においては、慣性力/粘性力を表すRe数、(電磁力/粘性力)<sup>0.5</sup>を表すHa数、電磁力/慣性力を表すN数の3つの無次元数が重要である。実験と実機でこれらの無次元数が同一となるように、Table 1に示す条件でモデル実験を実施した。ただし、FC型EMBRについては0.3 T、新型EMBRについては最大0.2 Tの静磁場を作用させた。流速の測定にはピトー管を用い、先端の全圧管を上方に向けて下向き流速を測定した。測定のサンプリング間隔は50 msとし、1回の測定について、サンプリング数1024、約50秒間の測定を行い、平均値を採用した。ピトー管内部には圧力媒体として水(H<sub>2</sub>O)を充填した。

### 3. 結果

#### 3.1 従来 (Ruler) 型 EMBR に関する計算結果

従来のRuler型EMBRに関する溶鋼下向流速の計算結果をFig. 3に示す。EMBRの磁極中心とメニスカスとの距離( $L1$ )を500 mmとし、900 mmと1500 mmの2水準の鋳型幅( $W$ )について、スラブ厚み中央断面における結果を示している。

いずれのスラブ幅においてもEMBRの磁極より下方において、スラブ幅中央部では下降流速が平均下降流速(0.03 m/s)にほぼ等しい速度に抑制されている。しかしながら、スラブ幅両端部では下降流速が平均下降流速より速い。

次に、磁極位置( $L1$ )を変化させた時の下降流速の計算結果をFig. 4に示す。スラブ厚み中心で、メニスカスからの深さ1500 mm、スラブ幅端部から20 mmの位置における値をプロットしている。縦軸は、EMBR適用時の下降流速 $V$ をEMBR非適用時の下降流速 $V_{B=0}$ によって規格化した値 $V/V_{B=0}$ であり、この値が小さいほどEMBRによる下降流抑制効果が強いことを表している。

広幅条件( $W=1500$  mm)では、磁極位置がメニスカス直下に相当するケース( $L1=0.1$  m)では、下降流速が若干増加しているが、その他のケースでは、 $V/V_{B=0}$ の値が0.3~0.4となっており、比較的大きな下降流抑制効果が得られている。

一方、狭幅条件( $W=900$  mm)では、 $V/V_{B=0}$ の値が0.5~0.7となっており、広幅条件と比べるとEMBRによる下降流抑制効果が弱い。また、いずれの幅においても $V/V_{B=0}$ の値が最小となる磁極位置が存在し、それより下方では磁極位置を下げるほど下降流抑制効果が弱くなっている。

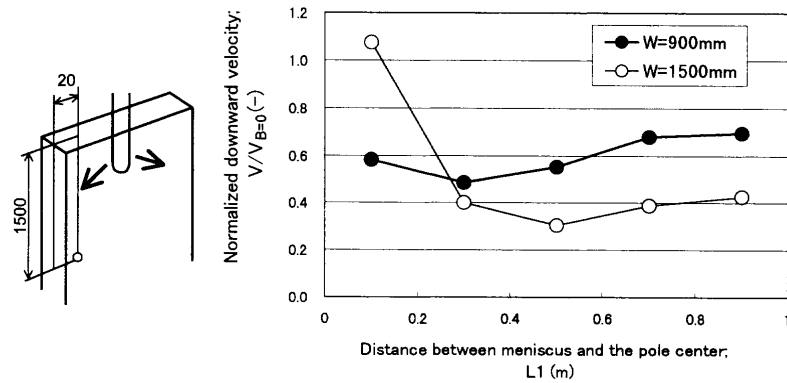


Fig. 4. Effect of slab size and field position of the Ruler type EMBR on the calculated downward velocity. ( $V_c=1.8$  m/min,  $B=0.3$  T, 20 mm from the narrow face, 1500 mm below meniscus, thickness center)

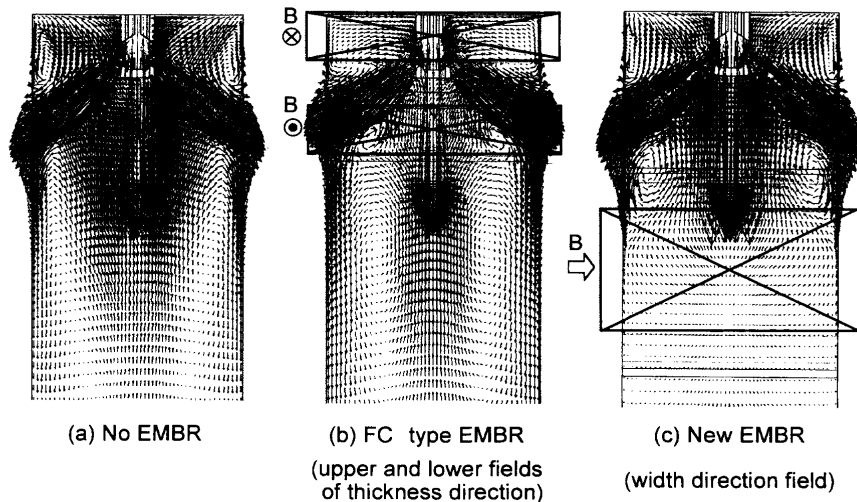


Fig. 5. Calculated velocity distributions for gallium model experiments.

### 3.2 モデル実験に関する計算結果

モデル実験についての流動計算結果を Fig. 5 に示す。厚み中央断面における流速分布を示すベクトル図である。(a) EMBR 無しに比べると、(b) FC型EMBRは磁極位置付近では流速が小さいが、磁極位置より下方ではむしろ流速が増加している。一方、(c) 新型EMBRでは磁極位置および磁極より下方の全領域において下降流速が低減しており、新型EMBRによる下降流抑制効果が大きいことを示している。

### 3.3 モデル実験に関する流速測定結果

モデル実験での下降流速の測定結果を計算結果と比較したグラフを Fig. 6 に示す。横軸はメニスカスからの距離であり、縦軸は厚み中央断面内で幅端面から5 mmの位置での下降流速である。計算結果と測定結果を比べると、全般的に測定結果の方が下降流速が大きく、両者は必ずしも一致していない。しかしながら、モデル中でメニスカスからの距離が120 mm以上深い領域について、(b) FC型EMBR、(a) EMBR無し、(c) 新型EMBRという順で下降流速が小さくなる点で、実験結果と計算結果とは定性的に良く一致している。新型EMBRを用いた場合には、モデル中でメニ

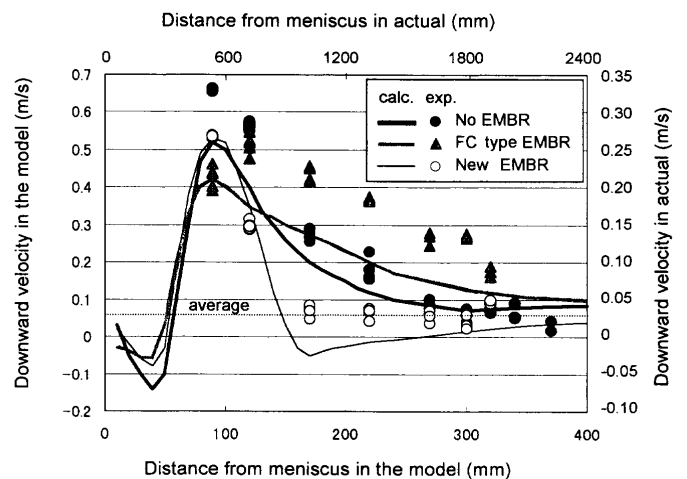


Fig. 6. Calculated and measured distributions of the downward velocity along the narrow face. (5 mm from the narrow face)

スカスからの距離が170 mm以上深い領域で平均下降流速(0.055 m/s)に近い下降流速測定結果が得られており、新型EMBRの下降流抑制効果が大きいことを実験的にも確認することができた。

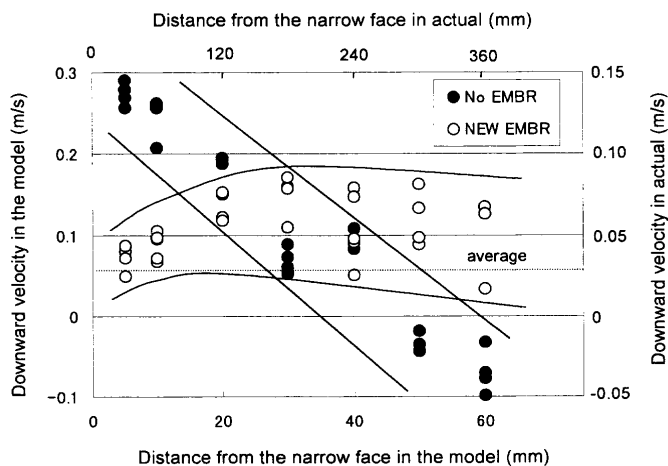


Fig. 7. Measured distributions of downward velocity. (170 mm below meniscus)

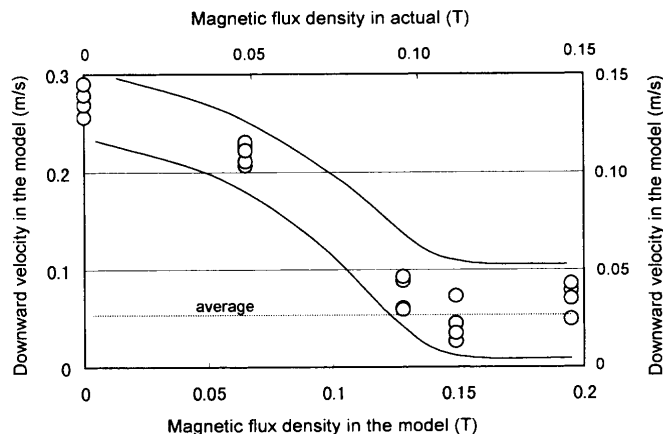


Fig. 8. Effect of magnetic flux density of the width direction field on the measured downward velocity. (5 mm from the narrow face, 170 mm from the meniscus)

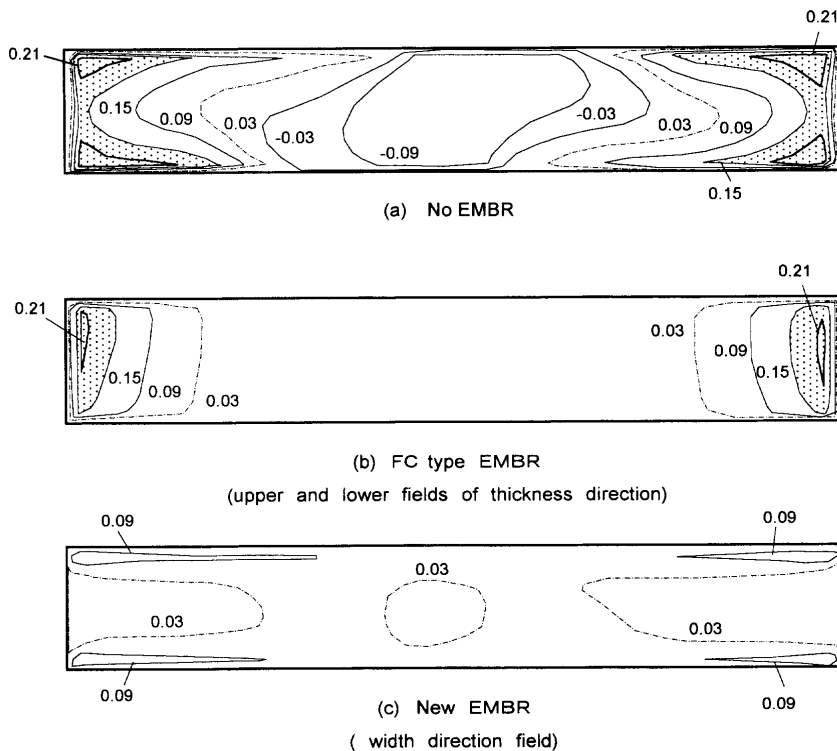


Fig. 9. Calculated downward velocity distributions at 1.5m below meniscus. ( $W=1500$  mm,  $V_c=1.8$  m/min)

また、モデル中でメニスカスからの距離が170 mmとなる深さにおける厚み中央位置での下降流速の幅方向分布測定結果をFig. 7に示す。EMBR無しの場合では、スラブ幅の端部では下降流、中央部では上昇流と、流速が幅方向に変化しているのに対し、新型EMBRでは幅端部から幅中央まで、下降流速がほぼ均一となっている。これにより、新型EMBRはスラブの幅の両端部だけでなく、幅全体にわたって下降流速を抑制できることが実験的に確認できた。

また、Fig. 8に新型EMBRについて、磁束密度と下降流速との関係性を測定した結果を示す。下降流速はメニスカスから170 mm、スラブ幅端面から5 mmの鋳型厚み中央位置

で測定した値である。モデルでの磁束密度が約0.15 Tまでは磁束密度の増加に伴って下降流速が低下するが、それ以上の磁束密度では下降流速がほぼ一定となっている。このモデル実験に相当する実機鋳造条件での必要磁束密度を相似則に基づいて換算すると、約0.11 Tとなる。

### 3.4 実機広幅条件の計算結果

以上により、実機で $W=900$  mmの狭幅鋳造条件において、新型EMBRの下降流抑制効果が大きいことを計算とモデル実験の両面から確認することができた。次に、 $W=1500$  mmの実機広幅条件に関する下降流速計算結果をFig. 9に示す。図は、鋳造速度が1.8 m/minの時、メニスカスから1500 mmの深さの水平断面内における下降流速のコ

ンター図であり、(a) EMBR無し、(b) FC型EMBR、(c) 新型EMBRの3条件の結果を示している。(a) EMBR無しの時は、下降流速が0.15 m/s以上速い領域が幅両端部近傍に広がっている。(b) FC型EMBRを使用すると、この下降流速の速い領域は低減するが、完全には消失していない。一方、(c) 新型EMBRを使用すると、下降流速の速い領域が完全に消失している。この計算結果は、広幅条件においても、新型EMBRの下降流抑制効果が大きいことを示している。

#### 4. 考察

##### 4.1 従来型EMBRの下降流抑制効果

以上の結果より、従来型EMBRの下降流抑制効果に関する問題点は以下のようにまとめることができる。

- ・幅両端部で下降流抑制効果が低い。
- ・幅が狭いと下降流抑制効果が低下する。
- ・下降流速が最小となる磁極位置が存在し、それより下方では磁極位置を下げるほど下降流抑制効果が低下する。

##### 4.1.1 幅両端部における下降流抑制効果の低下

まず、幅両端部において下降流速抑制効果が低下する原因について考察する。EMBRによって流動を抑制するためには、流れと平行で逆向きの電磁力が必要となる。電磁力  $F$  は、

$$F = J \times B \dots \dots \dots (8)$$

と与えられるので、流れと平行な電磁力を得るためには流れに垂直な磁束密度  $B$  と、流れと磁場の両方に垂直な電流密度  $J$  とが必要となる。従って、スラブ厚み方向の静磁場により下降流速を抑制するためには、スラブ幅方向の電流が必要となる。しかしながら、もともと下降流速が最も速いスラブ幅両端部においては、スラブの端に遮られ、幅方向の電流が流れにくい。このため、幅両端部において下降流速抑制効果が弱くなり、介在物が深く潜り込む問題が生じると考えられる。

##### 4.1.2 スラブ幅と磁極位置の影響

次に、幅が狭い場合や磁極を下方に設置した場合に下降流抑制効果が小さくなる理由について考察する。これらの結果も、幅両端部で下降流抑制効果が低下することにより説明することができる。すなわち Fig.10 の右半分に示すように、スラブ幅が広い場合には、静磁場が吐出噴流に直接作用する。吐出噴流部では電流を遮る壁が存在しないので流速抑制効果が大きい。しかしながら、Fig. 4 の左半分に示すように、幅が狭くかつ磁極位置が低い場合には、静磁場が吐出噴流に直接作用せず、吐出噴流が幅両端部に衝突した後の下降流に対してのみ作用する。このような場合には下降流抑制に必要なスラブ幅方向の電流が十分に流れないため、下降流速抑制効果が小さい。EMBRの磁極を上下

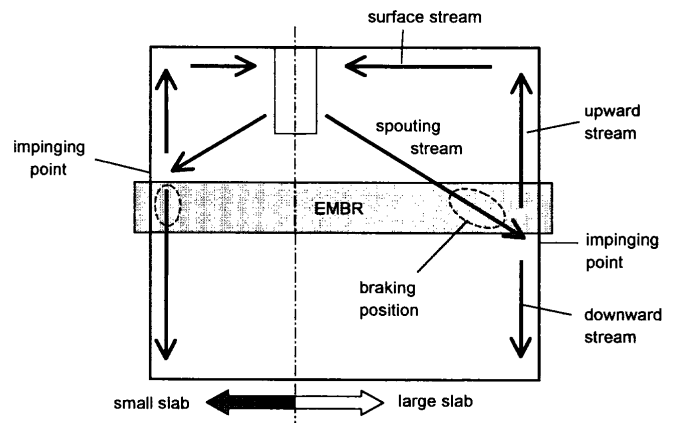


Fig. 10. Effect of the slab size on the braking position of the conventional EMBR (Ruler type).

2段に設置するFC型EMBRの場合<sup>3)</sup>や、上方の表層介在物洗浄用M-EMSと下方の下降流速抑制用EMBRとを組合わせて設置する場合<sup>5)</sup>には、下降流抑制用のEMBRの磁極を下方に設置せざるを得ない状況にある。このような場合には、特に幅の狭い casting で、EMBRによる内部介在物低減効果が小さくなると考えられる。また、幅が狭く磁極位置が上方にある場合には、静磁場が吐出噴流に直接作用するので、磁極が下方に位置する場合よりは抑制効果が大きい。しかしながら、静磁場が作用する領域が狭いため、広幅の場合より下降流速抑制効果が小さくなると考えられる。

##### 4.2 静磁場方向と潜り込み抑制効果

最後に、従来型EMBRに比べ、新型EMBRの潜り込み抑制効果が大きい結果が得られた理由について考察する。既に述べたように、従来型EMBRがスラブ厚み方向の静磁場を作用させるのに対し、新型EMBRはスラブ幅方向の静磁場を作用させる点に特徴がある。

導電性流体である溶鋼が磁力線を横切る際に発生する電磁力によって流動を抑制する基本原理は、従来型も新型も同一である。また、Fig.11に模式的に示すように、磁場方向に垂直な方向のスラブ端部には、磁場に垂直な電流が流れにくく、電磁力が働きにくい領域が発生するという事情も、従来型と新型のEMBRに共通である。すなわち、(a) 従来型EMBRではスラブ厚み方向の静磁場を作用させるのでスラブ幅両端部に電磁力の弱い領域が発生する。一方、(b) 新型EMBRではスラブ幅方向の静磁場を作用させるためスラブ厚み両端部に電磁力の弱い領域が発生する。この結果、新型EMBRでは、幅方向両端部の速い下降流速を効果的に抑制できる反面、厚み両端の広面に沿った領域で下降流速が速くなることが懸念される。しかしながら、スラブの連続 casting においては、幅が厚みより数~10倍程度大きい。このため、幅方向の流速分布は下流に大きな流れの渦を形成し、減衰に長い距離を必要とする。一方、厚み方向の流速分布が下流に形成する渦の大きさは小さく、短

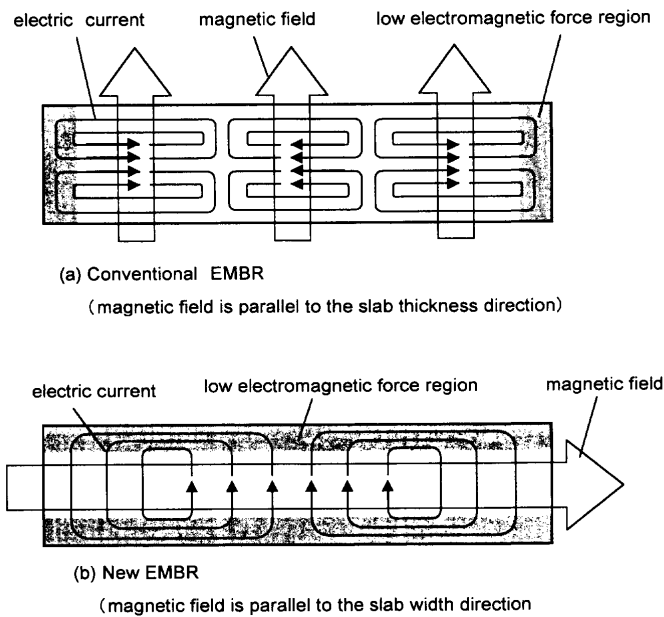


Fig. 11. Relationship between the direction of the magnetic field and the low electromagnetic force region.

い距離で速やかに減衰する。この結果として、流速分布の減衰に必要な距離は磁場方向により異なり、新型EMBRの方が速やかに下降流速が均一化されるものと考えられる。

## 5. 結言

数値計算と液体ガリウムモデル実験とにより、EMBRによる下降流抑制効果を検討した結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 鋳型厚み方向の静磁場を作用させる従来型EMBRでは、スラブ幅両端部に沿う速い下降流を完全に抑制することができない。

(2) スラブ幅が小さい場合には、従来型EMBRによる下降流抑制効果が低下する。

(3) 従来型EMBRでは、下降流速が最小となる磁極位置が存在し、それより下方では磁極位置を下げるほどEMBRによる下降流抑制効果が低下する。

(4) 上記(1)~(3)の原因は、従来型EMBRではスラブ幅両端部において幅方向の電流が流れにくく、上向きの電磁力が弱まることにより説明できる。

(5) スラブ幅方向の静磁場を作用させる新型EMBRは、スラブ厚み方向の静磁場を作用させる従来型EMBRに比べ、下降流抑制効果が大きく、スラブ水平断面内全域にわたって下降流速を均一化することができる。

(6) 新型EMBRの下降流抑制効果が従来型より大きい原因は、幅両端部に沿う下降流よりも、厚み両端部に沿う下降流の方が速やかに減衰するためと考えられる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の提案公募型事業の一貫として進められたことを

記し、謝意を表します。研究の遂行にあたり、共同研究者である名古屋大学の浅井教授、岩井助教授より、数々の有意義なご教授、ご助言を賜りました。ここに厚く感謝いたします。

## 記号

- $U$ : 流速 (m/s)
- $P$ : 圧力 (Pa)
- $t$ : 時間 (s)
- $J$ : 電流密度 ( $A/m^2$ )
- $B$ : 磁束密度 (T)
- $E$ : 電場 (V/m)
- $\nu$ : 流体の動粘性係数 ( $m^2/s$ )
- $\rho$ : 流体の密度 ( $kg/m^3$ )
- $\sigma$ : 流体の電気伝導率 (S/m)
- $\mu$ : 真空中の透磁率 (H/m)
- $W$ : スラブ幅 (m)
- $L_1$ : 磁極中心とメニスカスとの距離 (m)
- $V$ : EMBR適用時の下降流速 (m/s)
- $V_{B=0}$ : EMBR非適用時の下降流速 (m/s)
- $L$ : スラブ厚 (m)
- $V_c$ : 鋳造速度 = 平均下降流速 (m/s)
- Re: Reynolds数 (-)
- Ha: Hartmann数 (-)
- $N$ : Stuart数 (-)
- $A$ : 鋼板表面と介在物中心との距離 (mm)
- $D$ : 鋼板中での介在物厚み (mm)
- $T$ : 鋼板厚み (mm)
- $A_0$ : スラブ段階での介在物深さ (mm)
- $D_0$ : スラブ段階での介在物厚み (mm)
- $T_0$ : スラブ厚み (mm)

## 文献

- 1) H.Yuyama, M.Suzuki, H.Misumi, H.Yamamura and Y.Ite: *CAMP-ISIJ*, 1 (1988), 1220.
- 2) H.Tozawa, S.Takeuchi, T.Sakuraya and T.Fujii: *Symp. on Magneto-hydrodynamics on Process Metallurgy*, ed. by J.Szekely *et al.*, TMS, Warrendale, (1991), 215.
- 3) K.Kariya, Y.Kitano, M.Kuga, A.Idogawa and K.Sorimachi: *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol. 77, ISS, Warrendale, (1994), 53.
- 4) M.Zeze, H.Harada, E.Takeuchi and T.Ishii: *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol. 76, ISS, Warrendale, (1993), 267.
- 5) Japan Patent No. 2610741, (1997).
- 6) D.W.van der Plas, C.Platvoet, B.Debiesme, J.-P.Radot and J.-M.Galpin: *Proc. 2nd European Conf. on Continuous Casting*, VDEh, Dusseldorf, (1994), 109.
- 7) W.F.Huges and F.J.Young: *The Electromagnetodynamics of Fluids*, John Wiley & Sons, New York, (1966), 148.
- 8) K.Tanizawa, F.Yamaguchi, K.Inaoka and K.Tanaka: *Proc. 1st European Conf. on Continuous Casting*, AIM, Milano, (1991), 1479.

## 付録

### 鋼板表面疵の原因となる非金属介在物の鋳片段階での深さに関する検討

鋳片段階でどの深さに存在する非金属介在物が鋼板表面疵の原因となるかという問題に関しては谷沢らの報告<sup>8)</sup>がある。最終厚みが0.8mmの鋼板では、鋳片表面から深さ約27mmまでの領域に存在する介在物が製品表面疵の原因になるという実験結果が示されている。しかしながら、介在物の種類やサイズによる影響は必ずしも明確になっていない。ここでは、圧延時に変形しにくい非延性介在物と、砕けやすいアルミナクラスターの2種類の介在物について、Fig. A1に示す簡易モデルにより検討する。圧延時の鋼材の質量保存から、鋼板厚み $T$ と鋼板表面から介在物中心までの距離 $A$

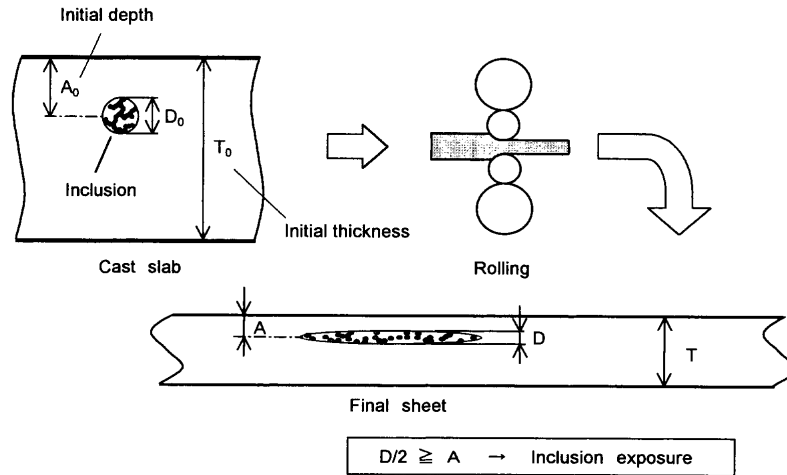


Fig. A1. Modeling of the inclusion exposure on the sheet.

との間には次式の関係が成立する。

$$T/T_0 = A/A_0 \dots\dots\dots (A-1)$$

しかしながら、介在物の厚み  $D$  は鋼材の厚みと同じ比率では低減しない。非延性介在物に関しては、

$$D = D_0 \dots\dots\dots (A-2)$$

と仮定する。また、アルミナクラスターに関しては、圧延時にクラスター全体は砕けて厚みが低減するが、クラスターを構成する直径数  $\mu\text{m}$  の個々の粒子は変形しないことから、介在物の厚み  $D$  が個々の粒子径の数倍に相当する  $20\sim 100\ \mu\text{m}$  まで低減した後はそれ以上厚みが低減しないものと仮定し、

$$D = 0.02\sim 0.1\ \text{mm} \dots\dots\dots (A-3)$$

とする。また、介在物が鋼板表面に露出して表面疵となる臨界条件は下記のように仮定する。

$$A \leq D/2 \dots\dots\dots (A-4)$$

以上により、鋼板表面に露出する介在物のスラブ中での臨界深さは次のように算出される。  
(非延性介在物)

$$A_0 \leq D_0 \cdot T_0 / 2T \dots\dots\dots (A-5)$$

(アルミナクラスター)

$$A_0 \leq 0.01 \cdot T_0 / T \sim 0.05 \cdot T_0 / T \dots\dots\dots (A-6)$$

鋼板初期厚み (=スラブ厚み)  $T_0$  を  $230\ \text{mm}$  とした場合の計算結果を Fig. A2 に示す。この図に基づいて鑄片表面から深さ  $20\sim 80\ \text{mm}$

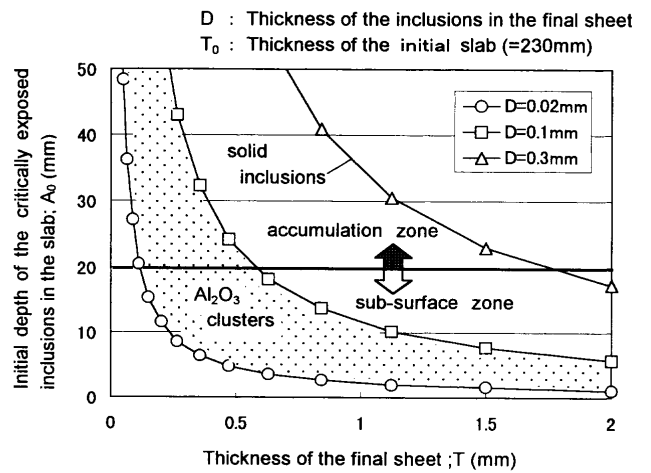


Fig. A2. Calculated depth of the non-metallic inclusions, which causes surface defects on the sheet products, in the slab.

の集積帯に存在する直径  $300\ \mu\text{m}$  程度の介在物について考える。最終厚みが  $0.8\ \text{mm}$  程度の一般の薄鋼板では非延性介在物のみが鋼板表面に露出して疵の原因となり、アルミナクラスターは露出しない。一方、最終厚みが  $0.3\ \text{mm}$  以下となる鋼板では集積帯に存在するアルミナクラスターも露出して鋼板表面疵の原因となるため、鑄片内部の介在物低減が特に重要となる。