

超電導磁石を用いた鋳型内溶鋼流動制御

持田 哲男*・岸本 康夫*・山田 敏雄*・飯島 寛昌*
奈良 正功*・竹内 秀次*

Flow Control of Molten Steel in Mold with Superconducting Magnets

Tetsuo MOCHIDA, Yasuo KISHIMOTO, Toshio YAMADA, Hiroaki IJIMA,
Seiko NARA and Shuji TAKEUCHI

Synopsis : In order to improve the cleanliness of steel slabs cast at high speeds, the application of an intense static magnetic field in the continuous caster mold using superconducting magnets was examined for the first time in the world.

Pilot scale experiments using a 5 ton steel melt were carried out. The maximum magnetic field intensity was 1.0 T. To clarify the possibility of high speed casting with a superconducting magnetic brake, casts were made at a maximum speed of 3.0 m/min. Surface and internal inclusions were remarkably reduced by application of the magnetic field. The results showed that the slab quality at a casting speed of 3.0 m/min with a static magnetic field of 1.0 T is better than that in conventional casting at 1.2 m/min without magnetic field control. Thus, these experiments confirmed the possibility of high speed casting of steel using superconducting magnets.

A numerical analysis clarified the effect of the intensity of the magnetic field on the downward velocity of the molten steel in the mold. The calculated results were in good agreement with experimental data. The reduction in internal inclusions by the application of a strong magnetic field can be convincingly explained by the reduction in the downward velocity obtained in this simulation.

Key words : continuous casting; superconducting magnet; electromagnetic brake; static magnetic field; inclusion; defect; mold; computational simulation.

1. 緒言

連続鋳造プロセスにおいて、生産性向上を図るために鋳造速度（スループット）の高速化がなされている。鋳造速度を増大させると連続鋳造鋳型内の溶鋼流動が激しくなり、溶鋼湯面でのパウダー巻き込みや湯面の乱れによる鋳片表面の欠陥が増加するとともに、鋼中の非金属介在物・気泡が鋳型内深く侵入して鋳片内部の欠陥も増加する。これらの欠陥を防止して製品の品質や歩留まりを向上させるために、鋳型内の溶鋼流動制御技術はますます重要となっている。

鋳型内溶鋼流動制御技術では静磁場^{1,2)}や移動磁場³⁾などのさまざまな電磁気力利用技術が実用化されている。例えば井戸川らは、均一な静磁場を幅方向全域で鋳込み方向に対して上下2段に印加する電磁ブレーキ(Flow Control Mold)を開発し¹⁾、実機の工程生産に適用している。

スループットをさらに増大するためには磁場強度を高める必要がある。しかしながら、鉄心に水冷銅線を巻回した通常の常電導磁石では鉄芯により磁場が飽和するために、得られる鋳型内での最大磁場強度はせいぜい0.3~0.4 T程度であり、鋳片の品質を維持しつつ鋳造速度（スループット）を現状から格段に増大させることは困難と推定される。そこで、著者らは従来の常電導磁石では得られない強磁場

を得るために、これまで鉄鋼製造プロセスでは利用例のない超電導磁石を鋳型内溶鋼流動制御へ適用する技術開発を行った。まず大型水銀モデルを用いた原理確認実験を行い、超電導磁石を用いた1 T以上の強静磁場による高スループット下での流動制動効果を確認した⁴⁾。

本論文では、5 ton規模の試験連鋳機を用いた実溶鋼の鋳造実験を行い鋳型内への強磁場印加の冶金的效果について調査した結果について述べる。また、超電導磁石による強磁場印加においてとくに見出された鋳片内部清浄度と磁場印加による流動制動効果の関係について考察した。

2. 実験方法

Fig. 1に試験連鋳機の概要を示す。鋳型の断面サイズは厚み110 mm×幅400 mm、機長11.4 m、垂直部長さ1.5 m、7点曲げ7点矯正の垂直曲げ型連鋳機である。鋳型には超電導磁石が設置され、メニスカス部および浸漬ノズル吐出孔近傍の上下2段（上下の磁極間の距離は340 mm）に全幅にわたって静磁場を印加する。

Fig. 2には超電導磁石の概要を示す。超電導磁石はNbTi超電導線からなる空芯のレーストラック形状コイルとそれを収納するクライオスタット（低温容器）から構成される。液体Heを使用せずに極低温（超電導臨界温度5.5 K以下）

に冷却するため、冷凍機を背面に有し、直接超電導コイルを伝導冷却する構造となっている。鑄型内の厚み・幅中央部における高さ（鑄造）方向の磁束密度分布をFig.3に示す。磁束密度の強さは定格100%の電流印加時において最大1Tが上下磁極中心で発生し、従来の電磁ブレーキに比べ3倍程度の高磁束密度が得られる。

Table 1に鑄造実験条件を示す。[%C]=0.05のアルミキルド鋼を1.2 m/min, 3.0 m/minの2水準の鑄造速度で、0T（磁場印加無し）、0.3T, 1Tの3水準の磁場強度で鑄造した。浸漬ノズルの吐出角度は、1.2 m/min時で下向き20°とした。3.0 m/minの高速鑄造時には、本連鑄機では鑄込み幅が400 mmと狭いため、電磁流動制御を行わない場合（比較実験時）に短辺再溶解性のブレイクアウトが懸念されたため、吐出角度は下向き60°とした。

一部の実験では、鑄造中の鑄型内（1/4幅、厚み中央部）に熱電対を浸漬して鑄型内溶鋼温度を測定し、磁場印加の影響を調査した。

得られた鑄片の定常部を調査し、強磁場印加の鑄片表面および内部品質に及ぼす影響を調査した。表層部の爪状組織は長辺中央と1/4幅、および短片面厚み中央部の計8箇

所でそれぞれ鑄造長250 mm（全被検長さ2000 mm）の爪深さを測定した。

鑄片内の介在物については、以下に述べる複数の手法で調査した。まず鑄片の横断面全面を研磨後、混酸（水：過酸化水素水：塩酸）に浸すことで鑄片内のアルミナクラスター位置を観察する方法（以降、アルミナエッチング法と呼ぶ）により、直径100 μm以上の大型アルミナクラスター個数の鑄片厚み方向分布（5 mmピッチに分割）を測定した。

次に鑄片の幅中央、1/4幅、および1/8幅の各位置におい

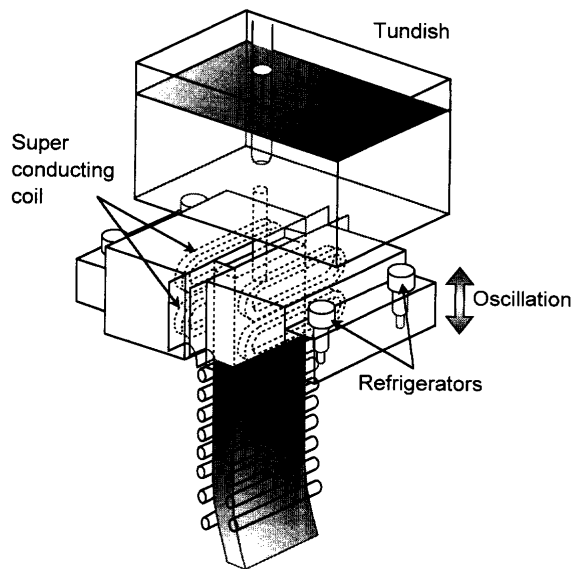


Fig. 1. Schematic illustration of pilot scale continuous caster with superconducting magnets.

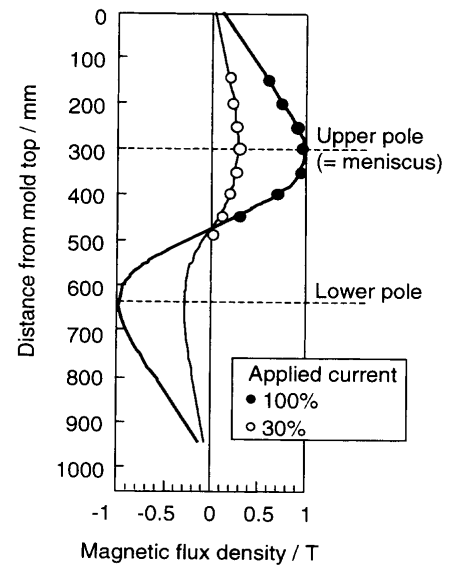


Fig. 3. Distribution of magnetic flux density at thickness center of mold in casting direction.

Table 1. Experimental conditions.

Steel grade	C/0.05% Al-killed steel	
Mold size	thickness : 110mm width : 400mm	
Magnetic field, B	0, 0.3, 1.0 T	
Casting speed, Vc	1.2m/min	3.0 m/min
Mold Oscillation	7.8 mm	7.8 mm
	92.3 cpm	172 cpm
MD flux Break point	1140 °C	1030 °C
Viscosity	2.0 poise	0.7 poise
CaO/SiO2	1.0	1.0
SEN (2 ports type)	20° downward	60° downward

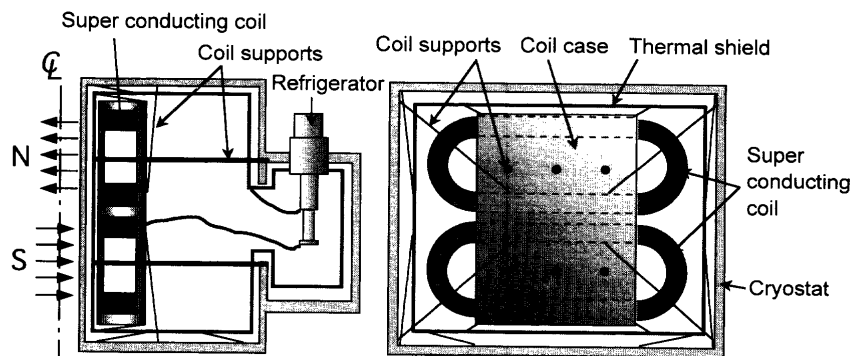


Fig. 2. Schematic illustration of superconducting magnet apparatus.

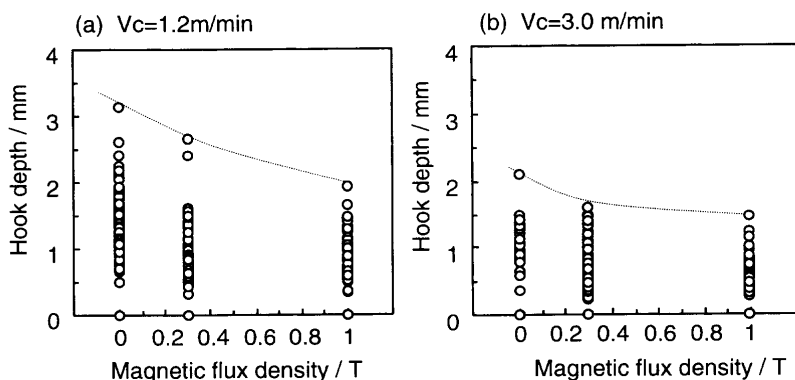


Fig. 4. Effect of magnetic flux density on hook depth at casting speeds of (a) 1.2 m/min and (b) 3.0 m/min.

て、鋳片内R面（自由側）表層から深さ30mmまでのブロックを切り出し、合計約7kgのサンプルより、スライム抽出法⁵⁾で各実験条件ごとの介在物量を定量分析した。ただし表層スケールを除去するために表面1mmを研削で除去した。抽出された介在物はフィルターで分級し、大きき別にその重量を求めた。さらに幅中央部、内R表面から25mm深さ位置での介在物粒径分布を光学顕微鏡にて測定した。測定は3 μ m以上の介在物を対象とし、倍率400倍、300mm²での視野で実施した。

3. 実験結果

3.1 鋳片表面性状への影響

鋳片表層オシレーションマーク部の爪状組織(hook)は、溶鋼内で浮上する介在物、気泡、巻き込まれたモールドパウダーの捕捉サイトと考えられており、その深さの低減により製品表面欠陥が抑制されることが期待される⁶⁾。Fig. 4に、長辺面の幅中央、1/4幅位置におけるL断面組織観察から測定した爪深さと磁場強度の関係を示す。鋳造速度によらず、磁場強度の増大とともに深い爪の発生程度が低減する傾向が認められる。

Fig. 5に、鋳造速度3.0m/minにおける磁場印加有無による鋳型内溶鋼表面温度の変化を示す。磁場印加により溶鋼温度が上昇した。これは、浸漬ノズル吐出孔からの溶鋼噴流が下極磁場により制動され、磁場無印加時に比較して鋳型内の溶鋼表層部へ熱供給が促進されたためと推定される。以上の結果から、強磁場印加によって爪深さが低減された理由は、メニスカス部への磁場印加により突発的な湯面の波立ちが抑制されたこと、およびメニスカス部温度が上昇し爪状組織の発達が抑止された2つの効果によるものと推定される。

3.2 鋳片内部品質への影響

鋳片の内部、とくに1/4厚み付近に多く集積する内部介在物は、たとえば製品鋼板が深絞り加工などの強加工を受ける場合、割れや穴あきの起点となるため、低減が望まれる⁷⁾。鋳造速度を増大すると浸漬ノズルからの吐出流速が

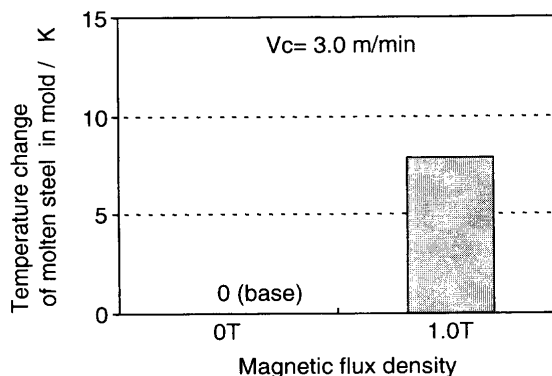


Fig. 5. Effect of magnetic flux density on temperature change of molten steel at meniscus in mold.

大きくなるため、溶鋼中の介在物が鋳型内に深く侵入し、凝固過程の凝固シェルに捕捉され、内部介在物が増加する。

アルミナエッチング法によるアルミナクラスターの鋳片厚み方向の分布をFig. 6に示す。本試験連鋳機は垂直曲げ型ではあるものの、垂直部が1.5mと短いため、内R面側（自由側）の1/4厚み付近に介在物の集積ピークが認められる。

また、鋳造速度の増加とともにアルミナクラスター個数は増加するが、磁場強度の増大とともにアルミナクラスター個数は減少し、1T印加では大幅な低減効果が認められる。

製品鋼板への影響が最も大きいと考えられる内R面表層から1/4厚集積帯（表層から30mm）までの被検面内アルミナクラスター総個数を求め、磁場強度および鋳造速度との関係をFig.7に示した。鋳造速度を3.0m/minに増大させても、1Tの強磁場印加により内部介在物量は顕著に低減し、1.2m/minの低速鋳造時における磁場無印加の場合と同等以上の内部品質が確保されている。

次に、スライム抽出法により求めた表層から1/4集積帯までの介在物量を粒径ごとに整理した結果をFig. 8に示す。1Tの強磁場印加により内部介在物量は約半減し、大きな介在物ほど減少率が大きい。

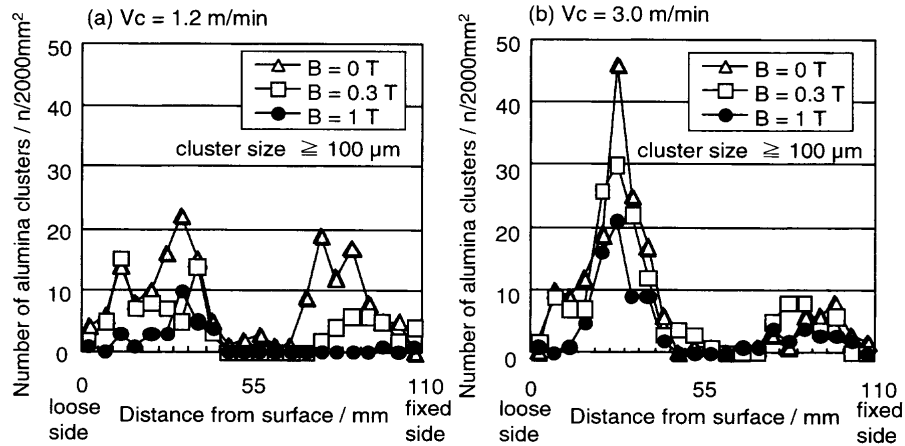


Fig. 6. Distribution of alumina clusters ($\geq 100 \mu\text{m}$) in slab thickness direction.

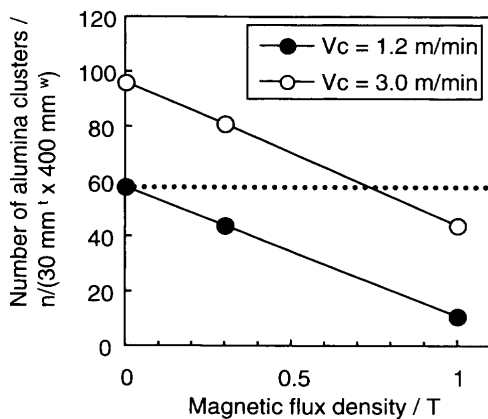


Fig. 7. Relationship between magnetic flux density and number of alumina clusters ($\geq 100 \mu\text{m}$) in slabs from surface to 1/4 thickness.

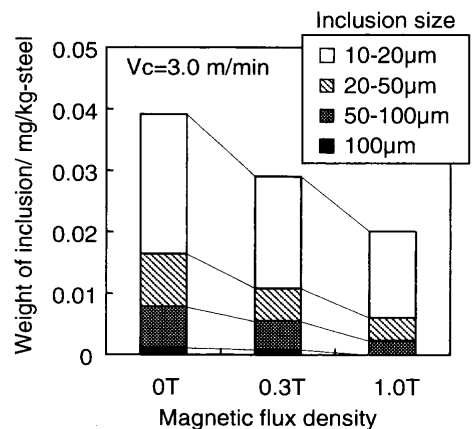


Fig. 8. Weight of inclusions in slab from surface to 1/4 thickness measured by SLIME method.

Table 2. Numerical conditions.

Mesh number		78 x 30 x 101	
Nozzle angle		60 degree at 3.0 m/min 20 degree at 1.2 m/min	
Molten steel		Density	7000 kg/m ³
		Viscosity	0.006 kg/m/s
		Electric conductivity	7.14 x 10 ⁵ S/m
Boundary conditions	Fluid dynamics analysis	Meniscus	fixed surface / free slip
		Wall / Immersion nozzle	wall function
	Magnetic analysis	Meniscus / Immersion nozzle	insulated
		Wall	conductive
		Electric conductivity of wall	7.14 x 10 ⁵ S/m

以上述べたように、アルミナエッチング法と介在物スライム抽出法において強磁場印加による鋳片内部の清浄化効果が認められた。

4. 考察

4.1 電磁流体解析による溶鋼流動の把握

超電導磁石を用いた強磁場印加による鋳型およびストランド内の溶鋼流動の変化を把握するため、三次元の流体数

値解析を行った。解析には汎用流体解析コード FLUENT Ver. 4.5 を使い、電磁気力の考慮には MHD 解析用サブルーチン⁸⁾を用いた。試験連鋳機の鋳型内メニスカスから鋳造方向に4mまでの領域を解析対象とし、下端では鋳造速度で均一に流出する境界条件とした。乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを採用した。メッシュ数は幅方向78×厚み方向30×高さ方向101の計236,340である。また、自由表面の影響は考慮しておらず、メニスカスは固定すべり壁とした。電氣的境界条件では凝固シェルの存在を考慮して壁（長辺面お

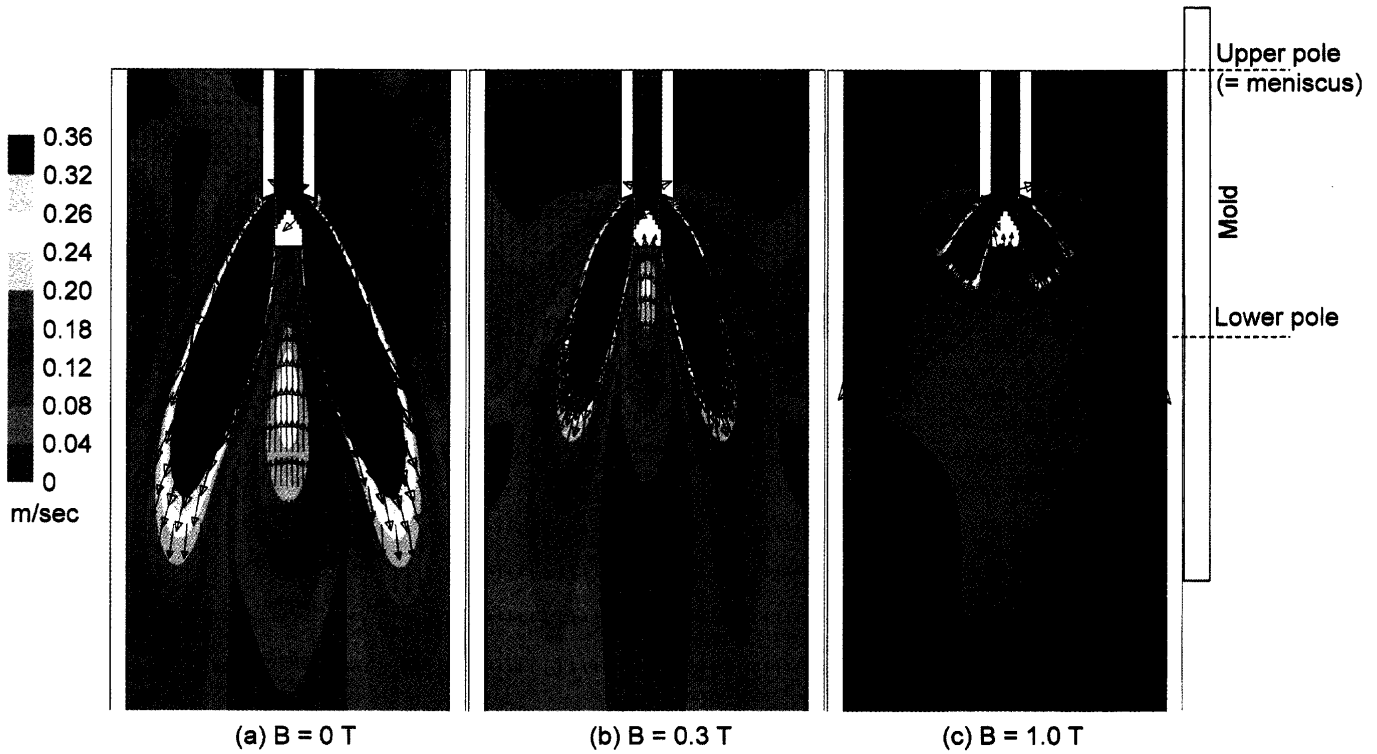


Fig. 9. Calculated molten steel flow pattern at center of mold thickness with casting speed of 3.0 m/min.

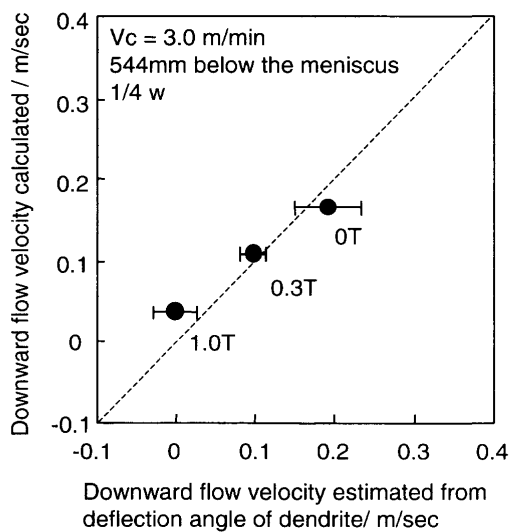


Fig. 10. Comparison of observed and calculated downward flow velocity.

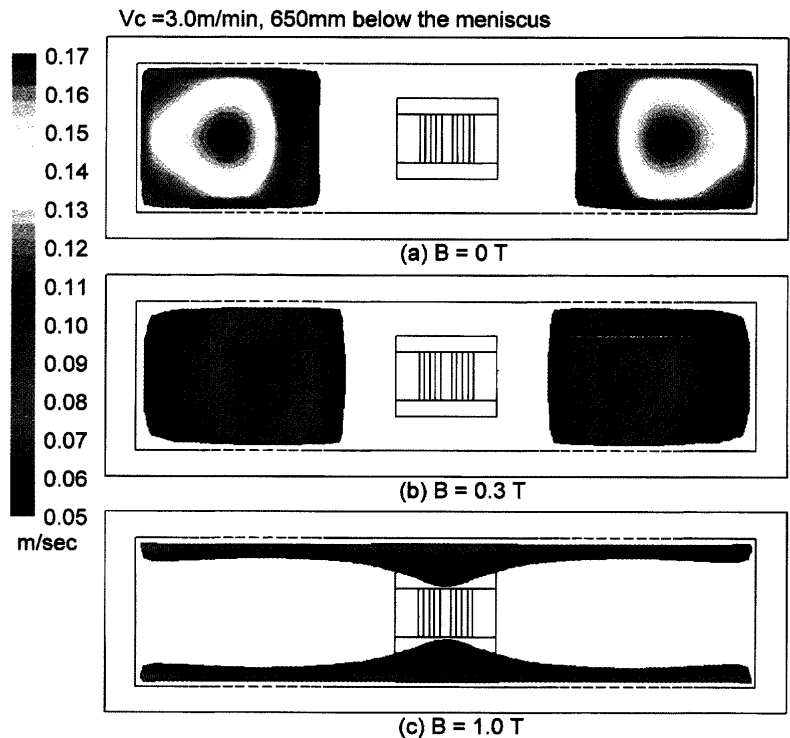


Fig. 11. Calculated downward flow distribution at mold exit with casting speed of 3.0 m/min.

よび短辺面)を導電壁とした。メニスカスおよび浸漬ノズルは絶縁とした。数値解析の条件をTable 2に示した。

Fig. 9に、鋳造速度3.0m/minにおける鋳型厚み中央部流速分布の数値解析結果を示す。磁場無印加の場合、浸漬ノ

ズルからの強い吐出流は短辺面に衝突し、一部が反転上昇して鋳型上方で循環流を形成するとともに、鋳型下方では短辺面に沿った強い下降流が形成されている(Fig. 9(a))。磁場印加強度の増大にともない吐出流は減衰し、とくに

1T印加の場合には吐出孔近傍を除いておおむねプラグフロー化していることがわかる (Fig. 9(c))。

本流動解析手法の精度を検証するため、鋳片のL断面の組織観察による一次デンドライト傾角測定から求めた下降流速推定値⁹⁾と数値解析により求めた下降流速をFig.10に比較した。測定位置は鋳型1/4幅、メニスカス下544mmである。鋳型下方の下降流速に関して、両者はよく一致していることがわかる。したがって、本流動解析手法により、鋳片内部介在物挙動に関与すると思われる鋳型内のマクロ流動は評価可能と判断される。

以降では流動解析結果に基づき、強磁場印加による内部介在物清浄化効果の機構を検討した。

4.2 強磁場印加による清浄度改善機構

鋳片内部における介在物捕捉現象と関係が深いと考えられる鋳型・ストランド内での下降流速の磁場印加による変化を見るために、磁場印加領域を通過した直後の鋳型下端 (メニスカス下650mm) 位置における鋳片水平断面内の下降流速分布 (鋳造速度3.0m/minの場合) をFig.11に示した。なお、鋳造速度3.0m/min (0.05m/sec)よりも大きい下降流速域のみ表示した。

磁場無しの場合、吐出噴流の影響による強い下降流が認められる (Fig.11(a))が、磁場印加強度の増大にともない下降流速は低減し、1T印加時には下降流は鋳造速度 (0.05m/sec)と同等まで低下しており、浸漬ノズルからの吐出流の痕跡が認められない (Fig.11(c))。

鋳型下端における下降流速の代表指標として1/4幅位置から短辺までの領域の平均下降流速を求め、磁場印加強度との関係をFig.12に整理した。鋳造速度3.0m/minおよび1.2m/minのいずれの場合も、磁場印加強度の増大にともない平均下降流速は単調に低減していることがわかる。

鋳型下端での平均下降流速と、Fig. 7で示した鋳片表層から1/4厚集積帯までの100μm以上のアルミナクラスター総個数との関係を、Fig.13に整理した。アルミナクラス

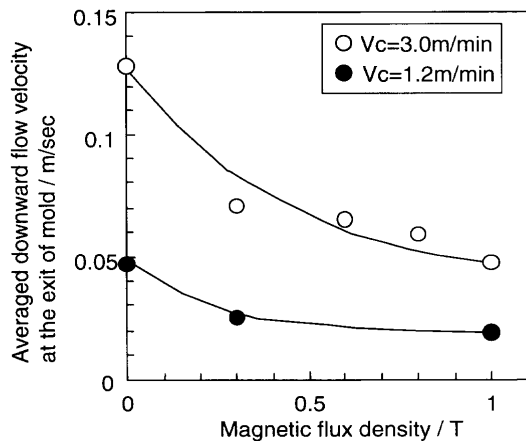


Fig. 12. Relationship between magnetic flux density and average calculated downward flow velocity at mold exit.

ター個数は鋳造速度によらず平均下降流速により統一的な相関をもつことがわかる。したがって強磁場印加による介在物低減効果は、下降流速の減少による大型介在物の浮上分離効果によるものと理解できる。

Fig.14に、光学顕微鏡にて測定した内R表面から25mm深さ位置での介在物粒径分布調査結果を示した。図は粒径ごとの介在物の累積個数を示しており、強磁場印加により約20μm以上の介在物が低減している。3m/minの鋳造条件下で浮上できる粒子径は、単純な静止流体中の終末速度で考えると200μm以上であり、強磁場印加により20μm以上の介在物が低減した結果は単純な鋳型内の流速低減効果だけでは説明できないと言える。

本研究で対象とするアルミキルド鋼において問題となる大型介在物は数μmのアルミナ単体が凝集・合体して形成されるものであり、介在物の乱流凝集・合体が重要な影響を与えている¹⁰⁾。超電導電磁ブレーキの適用は、溶鋼中の乱流強度を大きく変化させるので結果的に介在物の凝集・合体にも影響を与える可能性がある。

そこで、前述した数値流体解析結果を用いて磁場印加時のKolmogoroffの最小渦径の変化を推定した。Kolmogoroffの最小渦径、λは乱流エネルギー消散速度εと(1)式の関係がある¹¹⁾。

$$\lambda = (v^3/\epsilon)^{1/4} \dots \dots \dots (1)$$

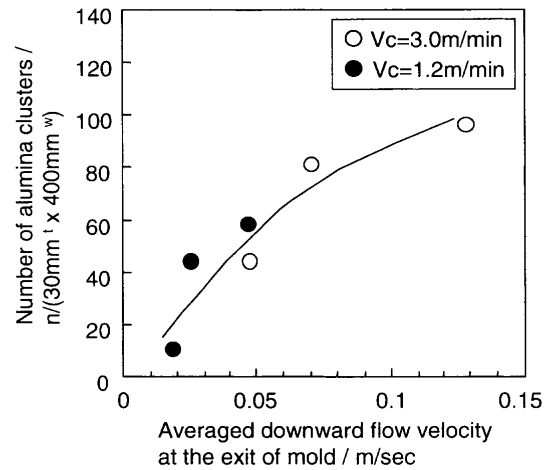


Fig. 13. Relationship between average downward flow velocity at mold exit and number of alumina clusters in cast slab.

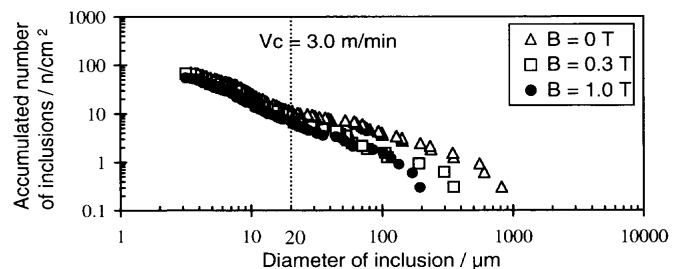


Fig. 14. Distribution of inclusion size at position 25 mm below slab surface.

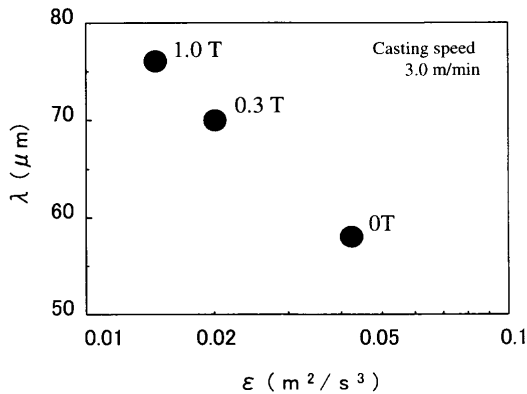


Fig. 15. Relation between average energy dissipation rate in mold, ϵ , and Kolmogoroff's eddy length scale in mold, λ .

ここで ν は流体の動粘度である。

数値解析より 3.0 m/min 鋳造時の鋳型内の平均エネルギー消散速度, ϵ を求め, (1) 式より λ を求めた。結果を Fig.15 に示す。1 T の磁場印加により最小渦径, λ は 30% 増加する。渦内部の流れ場は粘性支配となり, 最小渦径より小さい径の介在物粒子では乱流凝集・合体が生じなくなる¹²⁾。したがって, 従来説明されていた静磁場による下降流速低減効果^{1,2)}に加えて, 強磁場印加により鋳型内の乱流強度が低下し λ が増加することで, 介在物の凝集・大型化が抑制された可能性がある。

なお, 磁場印加が影響を与える介在物径 (20 μm) と, Fig.15 に示した Kolmogoroff 最小渦径の見積もり (60~80 μm) に差があるが, 系内の乱流強度の偏在を考慮すると実際の鋳型内の Kolmogoroff 最小渦径はこれよりも小さい可能性がある。また本解析では等方性乱流を仮定した k - ϵ モデルによる数値解析の結果を用いたが, さらに詳細な検討には電磁ブレーキ適用時の鋳型内乱流エネルギーの正確な見積もりが必要である。

また, 乱流下における介在物の浮上挙動が静止流体と異なることが嶋崎と谷口ら¹³⁾によって指摘されている。強磁場印加による溶鋼の乱流強度低減効果が, 介在物の凝集・合体挙動に加えて介在物の浮上速度にも影響を与えている可能性があるが, この点についても今後さらに検討する必要がある。

5. 結言

5 ton 規模の試験連鋳機を用いて超電導磁石による最大 1 T の強磁場印加下での高速鋳造実験 (3.0 m/min) を行い, 強磁場による鋳片清浄化効果を検討した。得られた結果は以下に要約される。

(1) 強磁場印加により, 鋳片の深い爪の発生程度が低減する。これは, 上極磁場による溶鋼表面の波立ち抑制と下極磁場によるメニスカスへの熱供給促進効果によるものと推定される。

(2) 1 T の磁場を印加することにより, 高速鋳造時 (3.0 m/min) においても低速鋳造時 (1.2 m/min) と同等以上の鋳片品質が得られる可能性が示された。

(3) 電磁流体数値解析による鋳型下端の下降流速推定値で, 鋳片清浄度が統一的に整理できた。

(4) 強磁場印加による鋳片の清浄度改善効果はおおむね下降流速低減による介在物侵入防止効果と理解されたが, 強磁場印加による乱流エネルギーの減少が大型介在物凝集・合体および浮上挙動に影響を与えている可能性がある。

なお, 本研究は (財) 金属系材料研究開発センター (JRCM) が経済産業省 (旧通商産業省) の補助金を受けて実施したエネルギー使用合理化金属製造プロセス開発「電磁気力プロジェクト」の一貫として行われたことを記し, 謝意を表します。また本研究を遂行するにあたり有益な議論に参画いただいた新日本製鐵 (株) 宮沢憲一博士, (株) 神戸製鋼所綾田研三博士, 川崎製鐵 (株) 別所永康博士, 戸澤宏一氏以下電磁プロジェクト企画技術委員会メンバーの方々に深く謝意を記します。また本論文作成において有益な助言をいただきました名古屋大学浅井滋生教授, および東北大学谷口尚司教授にも深く謝意を記します。

文 献

- 1) S.Idogawa, H.Tozawa and Y.Kitano: *Kawasaki Steel Giho*, **28** (1996), 46.
- 2) M.Zeze, H.Harada, E.Takeuchi and T.Ishii: *Iron Steelmaker*, **20** (1993), 53.
- 3) E.Takeuchi, T.Toh, H.Harada, M.Zeze, H.Tanaka, M.Hojo, T.Ishi and K.Shigematsu: *Shinnittetsu Giho*, **351** (1993), 27.
- 4) S.Nara, Y.Kishimoto, N.Bessho and K.Sorimachi: Proc. of 3rd Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2000), ISIJ, Tokyo, (2000), 193.
- 5) Y.Yoshida and K.Funahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 2489.
- 6) H.Yasunaka, R.Yamanaka, T.Inoue and T.Saito: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 529.
- 7) 川和高穂: 第 40・41 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1976), 190.
- 8) J.Cao: MHD modeling with FLUENT, Fluent Europe, London, (1997), 1.
- 9) S.Okano, T.Nishimura, H.Ooi and T.Chino: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 2982.
- 10) S.Taniguchi and J.Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 527.
- 11) J.O.Hinze: *Turbulence*, McGrawHill, New York, (1959), 223.
- 12) 浅井滋生: 第 100・101 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1984), 94.
- 13) S.Shimazaki and S.Taniguchi: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 778.