

論 文

UDC 621.746.047 : 669.14-412-147 : 620.184.4 : 620.192.45 : 669.14-413

連鑄鑄片の大型介在物と柱状晶成長方向との関係*

岡野 忍**・西村 隆**・大井 浩***・千野達吉****

Relation between Large Inclusions and Growth Directions of Columnar Dendrites in Continuously Cast Slabs

Shinobu OKANO, Takashi NISHIMURA, Hiroshi OOI, and Tatsukichi CHINO

Synopsis:

It is well known that the columnar dendrite grows in a direction opposing the liquid flow. Therefore, in order to make clear the fluid flow within liquid pool, the solidification structures of steel slabs cast continuously by the curved mould bending type machine were investigated. At the same time, the amount of large inclusions trapped within the upper part of slab was measured by the method of X-ray radiography. The following results were obtained;

(1) The deflection angle of columnar dendrite, depending on the solidification rate and the flow velocity along the solidified shell, is large at the edge of slab, but smaller near to the center of slab.

(2) The amount of large inclusions in the accumulated zone of slab increases in proportion to its deflection angle of columnar dendrite.

(3) In case of the asymmetrical flow from nozzle pores, the distribution of large inclusions in the direction of slab width becomes asymmetrical, and the amount of large inclusions extremely increases at the edge of strong flow side.

1. 緒 言

一般に連続鑄造されたスラブでは、断面が小さいために、溶鋼中の非金属介在物が造塊材よりもトラップされやすい傾向にある。とくに円弧型連鑄機で鑄込まれたスラブでは円弧内面側の板厚 1/4 付近に大型介在物が集積しやすい¹⁾²⁾。この部分における介在物量を減少させるためには、鑄込まれる溶鋼中の介在物量を減少させることはもちろんであるが、その外に鑄型内での介在物の浮上を促進させることも必要である。鑄型内での介在物の浮上は鑄込み時の溶鋼の流動が大きく影響し、これには鑄片の断面寸法、鑄込み速度ならびに浸漬ノズルの形状などが関係していることが水モデル実験によつて明らかにされている³⁾⁴⁾。

円弧内面側に集積する大型介在物の量は鑄込み時の溶鋼流によつて運ばれる介在物の位置、すなわち介在物の

浸入深さによつて決まる⁵⁾⁶⁾。しかしながら実際の鑄片での鑄込み時の溶鋼流動についてあまり調査されていない。

熊井ら⁷⁾は凝固シェルに沿つての溶鋼流を平板上の二次元定常流と考えたモデルにより、流動境界厚と凝固速度、溶鋼流速との関係式を導き、凝固後の鑄片における溶質分布から求めた拡散境界厚と流動境界厚との関係から広幅連鑄スラブ鑄込み時の溶鋼流速を推定している。彼らは鑄込み時の溶鋼流を二次元流として取りあつてはいるが実際の流れは三次元流であり、とくに広幅連鑄スラブの場合には鑄片幅方向への流れを無視することはできない。またこの方法では鑄片内の基準位置での流速を何らかの方法（たとえば水モデル実験など）で推定しなければ、他の位置での流速を計算することができないし、拡散境界厚を求めるためには鑄片厚み方向の溶質分布を詳細に調査しなければならない。なおこの方法では

* 昭和 49 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 50 年 3 月 27 日受付 (Received March 27, 1975)

** 川崎製鉄(株)技術研究所水島研究室 (Mizushima Laboratory, Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1-1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

*** 川崎製鉄(株)技術研究所水島研究室 工博 (Mizushima Laboratory, Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

**** 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

流れの方向についての知見はまったく得られない。

一般に凝固が進行しているとき液体側に流動があると柱状晶が流れの上流側に向かつて成長することが知られている^{8)~10)}。この性質に着目すれば連鑄鑄片の凝固組織を調査することにより鑄込み時の溶鋼流動を推定できる可能性がある。そこで種々の条件で鑄込まれた広幅連鑄スラブの凝固組織を調査し、鑄込み時の流動を評価した。同時に、鑄片内に捕捉された大型介在物の量および分布について調査し、鑄込み時の溶鋼流動と大型介在物の関係を明らかにした。

2. 調査方法

鑄片は水島製鉄所の広幅スラブ用連鑄機で鑄込まれたもので、鋼種はすべて厚板向け 50 キロ級鋼である。鑄込み条件の概要は Table 1 に示したとおりである。

凝固組織の調査はおもに鑄片の縦断面で行ない、サンプルは鑄片長辺側では円弧内外面について幅方向 5~13 か所、短辺側では 1~3 か所から採取した。このサンプルをエメリー紙 #400 まで研磨後ステッド氏液でエッチし、5 倍の写真を撮影後凝固組織を観察した。

大型介在物の量は X 線透過写真法によつて測定した。サンプルは Fig. 1 に示したように大型介在物が集積しやすい円弧内面側の横断面から厚み 5 mm の板状のもの

Table 1. Dimensions of casting machine and casting conditions.

Machine type	Curved mould bending	
Casting radius	12.5m	
Mould length	700 mm	
Slab size	Width	1 890 mm
	Thickness	260 mm
Casting speed	0.6 m/min	
Ladle analysis (%)	C	Si
	0.16~0.18	0.32~0.38
	Mn	Sol. Al
	1.25~1.45	0.022~0.040

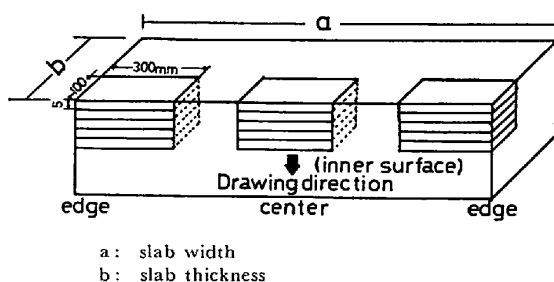


Fig. 1. Sampling method for determination of large inclusions by radiography.

を各位置 5 枚ずつ採取した。この方法によつて測定される介在物の大きさは直径 400μ 以上のものであり、それぞれの介在物については鑄片表面からの位置の測定も行なつた。大型介在物の種類はアルミナクラスターないしは $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系の地に Al_2O_3 が析出した混在型のものが主体であつた。

3. 調査結果

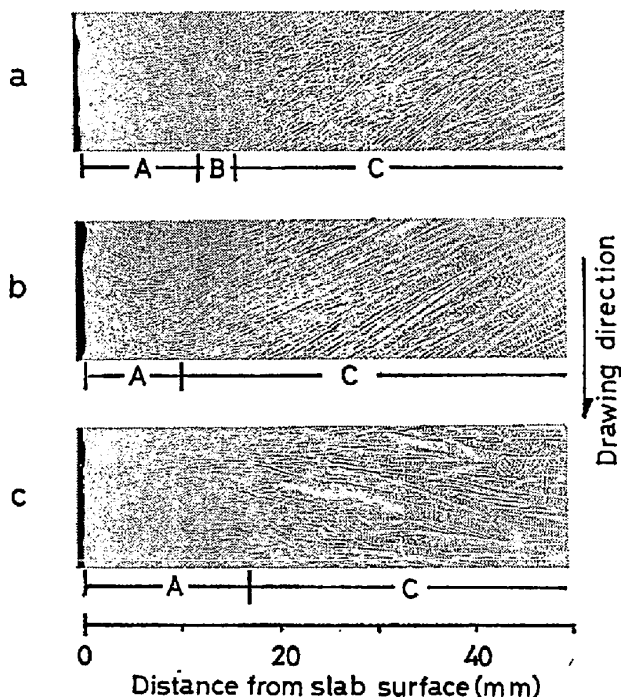
3.1 凝固組織

3.1.1 鑄片縦断面

鑄片縦断面で観察したときの凝固組織の代表例を Photo. 1 に示した。

鑄片短辺側中央部では鑄片表面から 10 mm 位まではデンドライトが種々の方向に向かつて成長しているが(領域 A)，これに続く部分は凝固組織が微細になつており(領域 B)，より内部側では柱状晶は流れの上流側に向つてほぼ一定方向に成長している(領域 C)。なお使用するノズルの種類によつては領域 A と B の間に柱状晶が下向きに成長している領域 C' が存在することもある。

鑄片長辺側では、端部近くの凝固組織は短辺側中央部



(a); Center of narrow face, (b); Edge of wide face, (c); Center of wide face
A; Dendrites grow various directions. B; Solidification structure is fine. C; Dendrites grow one direction.

Photo. 1. Solidification structures at the longitudinal section of continuously casted slab.

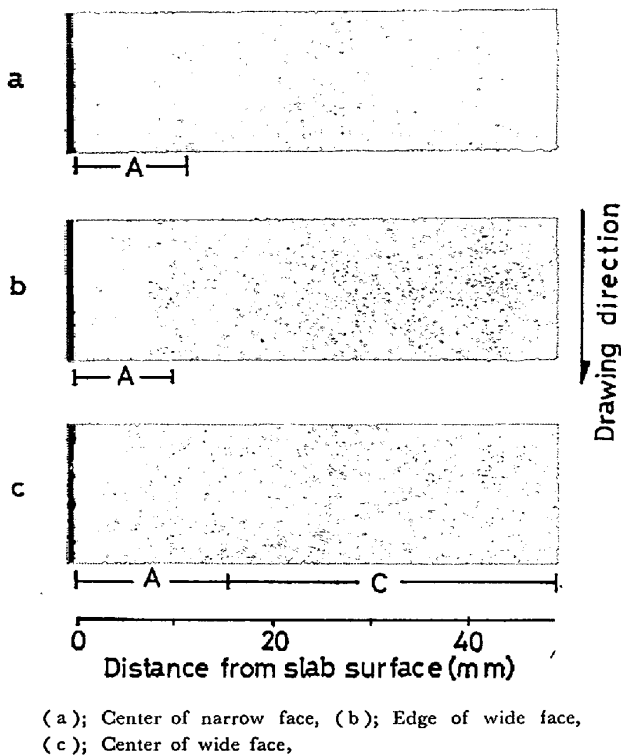


Photo. 2. Solidification structures at cross section of continuously casted slab.

と類似のものであるが、領域 B は存在しないことが多い。長辺側中央部では領域 A の範囲が広くなり、しかも領域 C における柱状晶は鑄片表面に対して垂直ないしは下向きに成長している場合が多い。

3.1.2 鑄片横断面

鑄片横断面の凝固組織を Photo. 2 に示した。

鑄片短辺側中央部では鑄片表面から数 mm の範囲が領域 A になっていることがわかるが、それより内部側では柱状晶がどの方向に向かって成長しているのかは判別できない。

鑄片長辺側についても、端部近くでは短辺側と同様領域 A 以外の部分における凝固組織は不明瞭である。しかしながら長辺側中央部では領域 A に続いて領域 C の部分が観察され、この領域の柱状晶は鑄片表面に対してほぼ垂直に成長している。

このように鑄片縦断面での柱状晶成長方向と鑄片表面との傾きが大きい位置では鑄片横断面の柱状晶成長方向の測定は不可能であり、また鑄込み時の大型介在物の浸入深さは上下方向の流れが支配的であろうと考えられることから、以下に述べる凝固組織の調査結果はすべて鑄片縦断面のものだけとした。

3.2 柱状晶の偏向角度

領域 C における柱状晶の成長方向は鑄込み条件およ

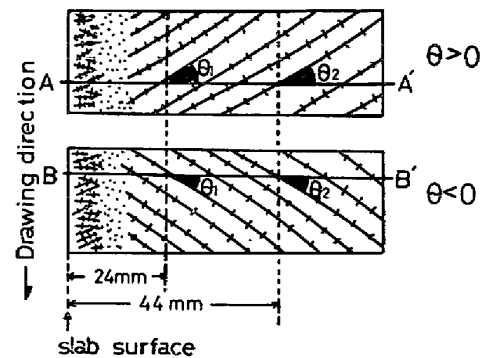


Fig. 2. Definition of deflection angles of columnar dendrites.
A-A' and B-B' are perpendicular to slab surface.

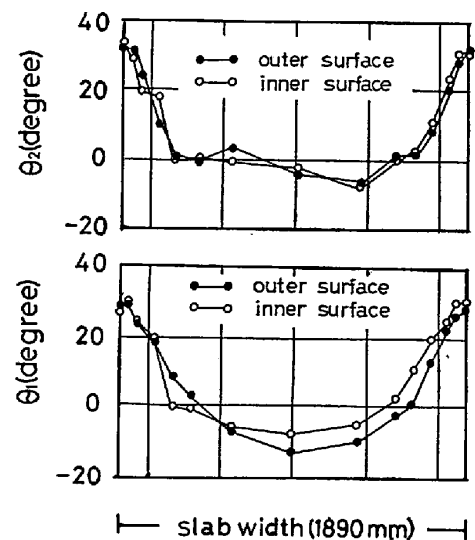


Fig. 3. Changes of deflection angles in continuous cast slab using ordinary bifurcated nozzle.

び鑄片幅方向の位置によつて変化する。そこで柱状晶の成長方向を定量的に表わすためのパラメーターとして柱状晶偏向角度 θ を以下のように定義した。

Fig. 2 において柱状晶の成長方向と鑄片表面からの垂線とのなす角度を θ とし、鑄片表面から 24 mm の位置におけるものを θ_1 、44 mm の位置におけるものを θ_2 とし、柱状晶が上向きに成長している場合（湯面側に向かって成長している場合）を正とし、下向きに成長している場合を負とした。すなわち $\theta > 0$ の場合には溶鋼は下向きに流れており、 $\theta < 0$ の場合には下から上に向かっての溶鋼流があることを意味している。実際の θ_1 、 θ_2 の測定は鑄片表面からそれぞれ 20~28 mm、40~48 mm の範囲にあるものについて行ない、10 本程度の柱状晶の平均値をもつて各鑄片での偏向角度とした。

3.2.1 正常鑄込み時の偏向角度

通常用いられている逆 Y 型ノズルで鑄込んだ鑄片の幅方向の θ の測定結果を Fig. 3 に示した。幅方向端部での θ は 30 度程度の値を示し、この部分では下向きの強い流れがあることがわかる。しかしながら端部から遠ざかるにつれて θ の値は急速に減少し、端部から 300~400 mm 離れた位置では 0 度、それより中央側では負の値となっており流れは下から上に向かっている。 θ_1 と θ_2 では後者の方がいくぶん小さい値となっているが、円弧の内外面ではあまり差がない。

箱型ノズルを用いて鑄込んだ場合の θ を Fig. 4 に示した。鑄片幅方向での θ の分布は逆 Y 型ノズルの場合と同じであるが、鑄片端部の θ は箱型ノズルの方がいくぶん小さく、また θ が負となる位置は鑄片端部から 600~700 mm と逆 Y 型ノズルの場合より鑄片幅中央部寄りになっている。

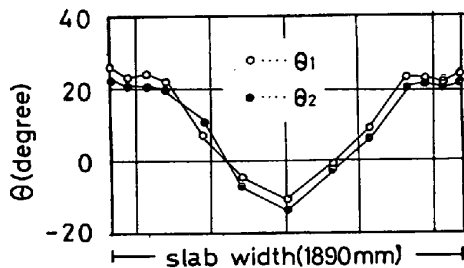


Fig. 4. Changes of deflection angles in continuous cast slab using box type nozzle.

3.2.2 異常鑄込み時の偏向角度

通常の鑄片では Fig. 3 および Fig. 4 に示したように鑄片幅方向の θ は左右対称になっているが、 θ が鑄片幅方向で非対称になっている場合がある。その例を、Fig. 5 に示した。鑄片右側端部での θ_1 は 30 度近くの値を示しているのに対し鑄片左側端部では 10 度程度であり、 θ_1 が負の値となっている範囲も鑄片左側に寄っている。このような θ の分布を示す場合を偏流が生じていると呼んでいるが、このときには θ_1 と θ_2 の値が同一位置で大きく異なることが多い。

逆 Y 型ノズルの場合ストランドに対する出口穴の穴角度が左右でアンバランスの時に偏流が生じるといわれているが¹¹⁾、その外にノズルの溶損、ノズル内面へのアルミナの付着などによっても生じ、またノズルの形状によつては偏流が非常に生じやすいものもある。

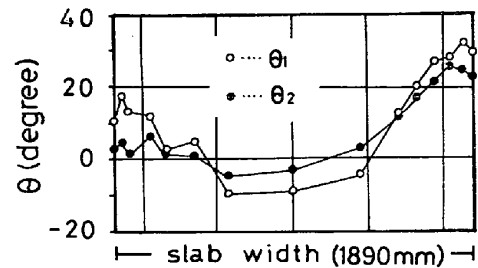


Fig. 5. Changes of deflection angles in case of asymmetrical flow from nozzle pores.

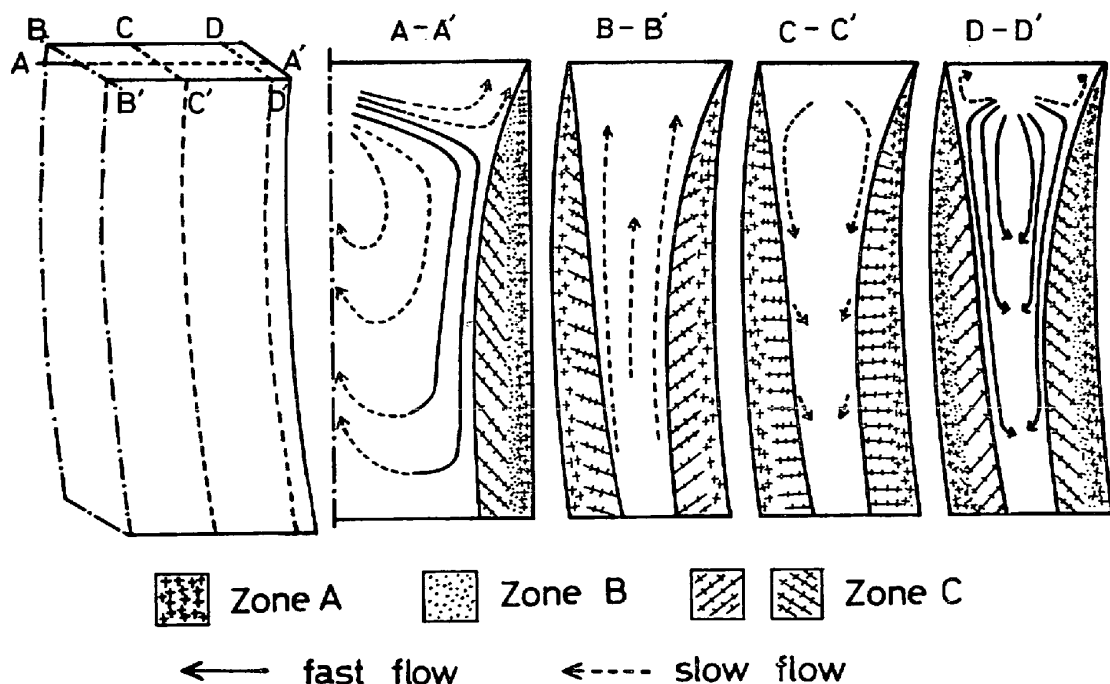


Fig. 6. Schematic representation of flow pattern in continuous cast slab.

3.3 鋳込み時の溶鋼流動

鋳片の凝固組織の観察結果をもとに鋳込み時の溶鋼の流れを推定し Fig. 6 に示した。

長辺側断面 A-A' についてみると、浸漬ノズルから出た流れは短辺側凝固シェルに衝突したのちシェルに沿った下向きの流れと上向きの流れに分岐し、衝突部のデンドライトは強い流れのため破碎され凝固組織が微細になる。凝固シェルに沿った下向きの強い流れはその一部が幅方向中央部へ分岐し、湯面から遠ざかるにつれて流速が減少し、それにつれて柱状晶の偏向角度も変化する。また短辺側衝突後の上向きの流速が大きい場合には柱状晶が下向きに成長する領域があらわれる。

短辺側断面では、鋳片幅方向位置によつて流れが異なる。端部に近い D-D' では凝固シェルに沿った強い流れは円弧の内外面ともに湯面からかなり離れた位置にまで達する。幅方向 1/4 付近の C-C' では下向きの流れも弱くなり、幅方向中央部の B-B' では上向きの弱い流れだけになっている。

浸漬ノズルの種類、鋳片の断面寸法および鋳込み速度が異なれば溶鋼流速は変化するが、1本の浸漬ノズルから溶鋼流を左右に分岐させる種類の浸漬ノズルを用いて鋳込む場合の流れのパターンは Fig. 6 に示したものとあまり変わらないであろう。

3.4 大型介在物と偏向角度の関係

3.4.1 鋳片幅方向の介在物量と偏向角度

正常鋳込みが行なわれた鋳片と偏流が生じた鋳片につ

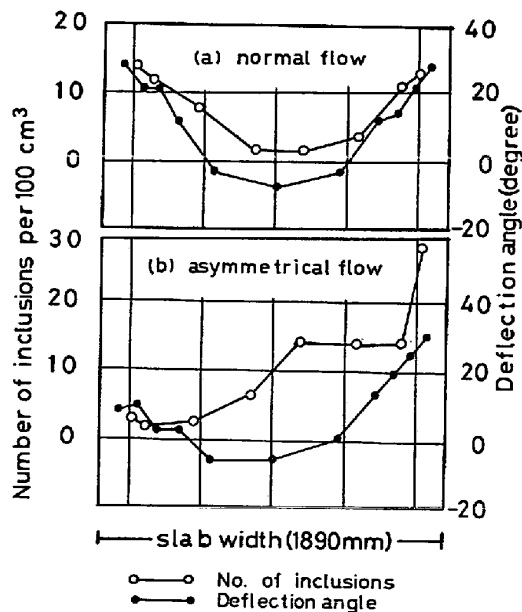


Fig. 7. Changes of large inclusions and deflection angles in the direction of slab width.

いての鋳片幅方向の大型介在物の分布を Fig. 7 に示した。

正常鋳込みの場合における大型介在物の量は鋳片端部寄りが多く、端部から離れるにつれて減少し、幅方向中央部では最も数が少ない。また鋳片幅方向の介在物量の分布は鋳片の左右で対称となっており、 θ の幅方向の分布と一致している。

偏流が生じた場合には鋳片幅方向の介在物量の分布も非対称となり、 θ が大きい側では介在物量が多く、 θ が小さい側では介在物量も少ない。介在物量が最も少なくなる位置は幅方向の中央部ではなく、 θ の値が小さい方の端部側に移る。このように柱状晶偏向角度と介在物の分布傾向に差が生じるのは、鋳片端部から幅中央部に向かう横方向の流れが θ の大きい側で早く θ の小さい側では遅いため、端部の下向きの流れによつて深くまで浸入した介在物の一部が横方向の流れにより幅中央部まで運ばれてくるためである。また偏流が生じた場合には、流れの強い側の大型介在物量は通常鋳込みのものの 2~3 倍位まで増加する例が多い。

3.4.2 鋳片端部側の大型介在物量と偏向角度

Fig. 8 に種々の条件下で鋳込まれた鋳片の端部における大型介在物量とその位置における柱状晶偏向角度との関係を示した。 θ_1 の値が 30 度付近では大型介在物量は 50 個/100 cm³ もあるのに対し、25 度では約 10 個/100 cm³、20 度では約 5 個/100 cm³ に減少しており大型介在物の量が θ_1 と密接な関係にあることがわかる。このように大型介在物量が柱状晶の偏向角度と関係しているのは、後述するように柱状晶の偏向角度が溶鋼流速に関係があり、偏向角度が大きいほど鋳込み時の溶鋼流速が大きくそのために介在物の浸入深さも深くなるからである。

3.5 介在物浸入深さと大型介在物量の関係

鋳片厚み方向の介在物分布についてはすでに数多くの

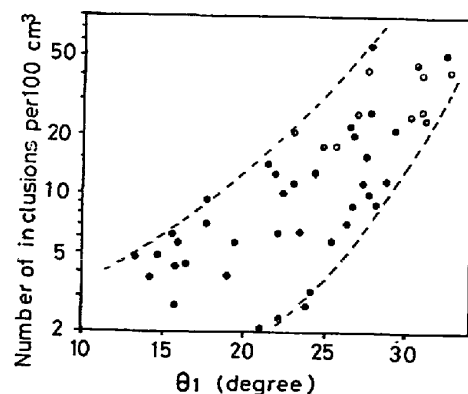


Fig. 8. Relation between deflection angle and large inclusion at edge of slab.

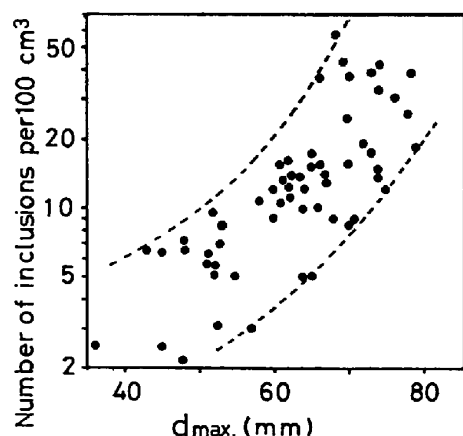


Fig. 9. Relation between $d_{\max}$ and number of large inclusions at edge of slab.
 $d_{\max}$: Distance from slab surface to the end point of accumulated zone of large inclusions.

報告があり⁶⁾¹²⁾, 円弧内側面からある範囲は大型介在物はほとんど無く, これより内部に入ると増加しはじめるがある距離以上離れると大型介在物は再び無くなることから知られている。

今回調査した鑄片では大型介在物が集積しはじめる位置はどの鑄片でも表面から約 25 mm 程度であったが, 集積が終る位置は鑄片によつて異なっていた。円弧内側表面から, 大型介在物の集積が終る位置までの距離を $d_{\max}$ とし, これと鑄片端部に集積した大型介在物量との関係を Fig. 9 に示した。 $d_{\max}$ の値が大きくなるにつれて大型介在物量は指数関数的に増加していることがわかる。

大型介在物は凝固厚が $d_{\max}$ になる位置までは浸入していることから, 鑄込速度および凝固速度が同一の鑄片では $d_{\max}$ は介在物の浸入深さを示していると考えられる。すなわち Fig. 9 は大型介在物の浸入深さが深くなるほど鑄片に捕捉される介在物量が増加することを示していると解釈することができる。

4. 考 察

4.1 柱状晶偏向角度と流速の関係

円弧型連铸機で鑄込まれた鑄片の円弧内面側板厚 1/4 付近に集積する大型介在物の量は鑄片の柱状晶偏向角度 θ と密接な関係にあることが明らかにされたが, このことは θ が鑄込み時の鑄片内溶鋼流速と関係していることを暗示している。

Miksch¹³⁾ は過冷却した水の凝固実験において, 氷のデンドライトの偏向角度は同一過冷却の下では水の流速

が大きいほど大きく, 同一流速の下では水の過冷却度が小さいほど大きくなると報告している。氷のデンドライトの成長速度は水の過冷却度の 2 乗に比例することから考えれば¹⁴⁾, 氷の場合のデンドライトの偏向角度は水の流速と氷の凝固速度の影響を受けていると考えられる。

最近高橋¹⁵⁾ は 0.5~0.65% C 鋼を 0.03~0.3 cm/sec の速度で凝固させた実験を行ない, 鋼の場合における柱状晶の偏向角度は氷の場合と同じく流速と凝固速度との影響を受けていることを明らかにした。そこでこのデータをを用いて, 鋼の場合における柱状晶偏向角度と溶鋼流速および凝固速度との関係を求めてみた。

高橋は溶鋼流速が一定の場合, 柱状晶偏向角度と凝固速度との関係を (1) 式で整理している。

$$\theta = a \ln f + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで θ : 柱状晶偏向角度 (度)

f : 凝固速度 (cm/sec)

a, b : 定数

そこで著者らは溶鋼流速 v が 2~100 cm/sec のものについて定数 a, b の値を計算し, 溶鋼流速との関係を調べた。その結果 $v \geq 50$ cm/sec, $v < 50$ cm/sec の 2 つの範囲に分ければ, これらの定数 a, b はいずれも $\ln v$ とほぼ正比例の関係にあることがわかり, θ と f から v を求める近似式として次の (2), (3) 式が得られた。

$$\ln v = \frac{\theta + 9.73 \ln f + 33.7}{1.45 \ln f + 12.5}, \quad v < 50 \quad \dots\dots (2)$$

$$\ln v = \frac{\theta + 4.83 \ln f + 7.2}{0.1 \ln f + 5.4}, \quad v \geq 50 \quad \dots\dots (3)$$

この式より, 溶鋼流速は凝固速度が同じであれば柱状晶偏向角度が大きくなるにつれて指数関数的に増大すること, 柱状晶偏向角度が同じであれば凝固速度が大なるほど溶鋼流速も大きくなることからわかる。

4.2 鑄込み時の溶鋼流速

今回調査した鑄片の鑄込み速度はほぼ 0.6 m/min であり, これらの鑄片の鑄型内および二次冷却帯の凝固厚はそれぞれ (4), (5) 式で示される。

$$d = 18.4 \sqrt{l/v_c} - 1.5, \quad l \leq 0.6 \text{ m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$d = 26.4 \sqrt{l/v_c} - 7.7, \quad l > 0.6 \text{ m} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで d : 凝固シェル厚 (mm)

l : 湯面からの距離 (m)

v_c : 鑄込み速度 (m/min)

(4), (5) 式より鑄片表面から 24 mm, 44 mm の位置での凝固速度を計算し (2), (3) 式を用いて θ_1 および θ_2 と溶鋼流速との関係を求め Fig. 10 に示した。 θ_1 の値が 30, 20, 10 度のときの v はそれぞれ 40, 9, 2 cm/sec となり θ_1 が小さくなると v は急激に減少する。

θ_1 と θ_2 の角度が同じ場合には θ_2 の位置では凝固速度が遅いぶんだけ溶鋼流速も小さくなり、 θ_1 の位置での約 1/2 程度になる。

前述の Fig. 3 および Fig. 4 に示した鑄片について θ_1 の位置における溶鋼流速の鑄片幅方向分布を計算し Fig. 11 に示した。鑄片端部の溶鋼流速は逆 Y 型ノズルの場合約 50 cm/sec、箱型ノズルで約 20 cm/sec であり箱型ノズルの方が溶鋼流減速の効果が大きい。鑄片幅方向中央部での上向きの流速はどちらも約 2 cm/sec でありノズルによる差は少ない。

熊井ら⁷⁾ は連鑄鑄片鑄込み時の凝固シェルに沿った溶鋼流速は (6) 式で推定できるとしている。

$$v_x = \frac{12.6 r v_0}{L_0 + x} \cdot \frac{1 + \sin \alpha}{2} \cdot \frac{L_0 + x}{2r} < 36.5 \quad (6)$$

ここで r : ノズル出口の半径 (cm)

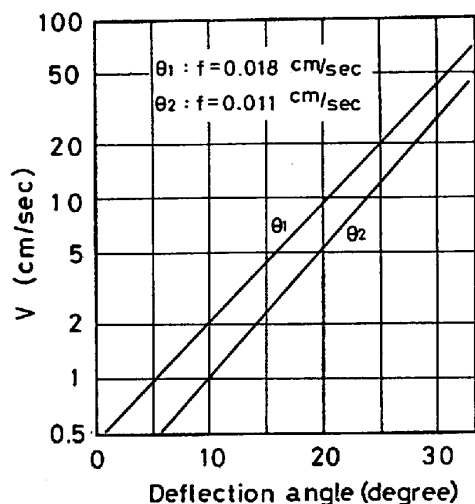
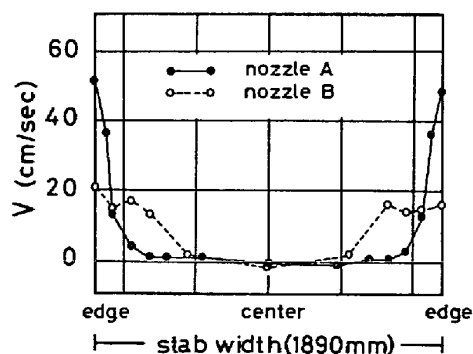


Fig. 10. Relation between flow velocity, V , and deflection angle in continuous slab.



Nozzle A : ordinary bifurcated nozzle.
Nozzle B : box type nozzle.

Fig. 11. Changes of flow velocity in the direction of slab width.

v_0 : ノズル出口での溶鋼流速 (cm/sec)

L_0 : ノズル出口から短辺の注入流衝突位置までの距離 (cm)

x : 注入流衝突点から凝固シェルに沿って測った長さ (cm)

v_x : x の位置における流速 (cm/sec)

(6) 式を用いて計算した湯面下 0.86m の位置 (θ_1 測定位置に相当) における溶鋼流速 v_x と θ_1 の値から (2) または (3) 式を用いて計算した溶鋼流速 v_{θ_1} との関係を Fig. 12 に示した。 v_{θ_1} と v_x とは比例関係にあり v_{θ_1} は v_x の約 2 倍程度の値になっていることがわかる。(6) 式で計算した値は水モデルで実測した流速よりいくぶん小さくなる傾向がある⁷⁾ ことから考えれば v_{θ_1} の値は真の溶鋼流速にかなり近い値を示しているものと推察される。

4.3 介在物の浸入深さ

鑄込み時の介在物の浸入深さは前述の $d_{\max}$ の値から推定することができるが、ここでは鑄込み時の溶鋼流速から推定してみる。

鑄込み時の介在物は鑄込み速度と溶鋼流速の和の垂直成分が介在物の浮力による浮上速度に等しくなる位置まで浸入すると考えれば、介在物の浸入深さは (7) 式で計算できる。

$$(v_l + v_c) \cos\left(\frac{l_p}{R}\right) = v_i \quad (7)$$

ここで v_l : 湯面から l_p の位置における溶鋼流速 (cm/sec)

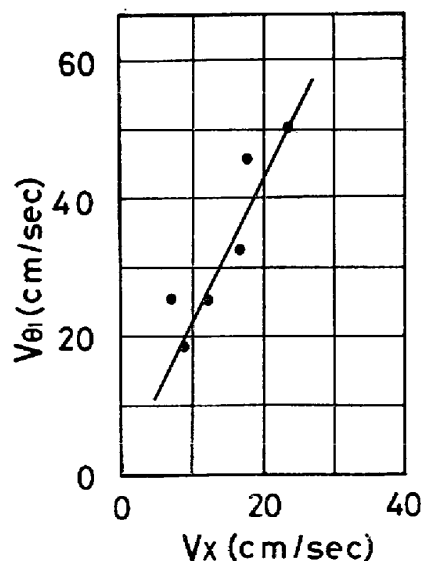
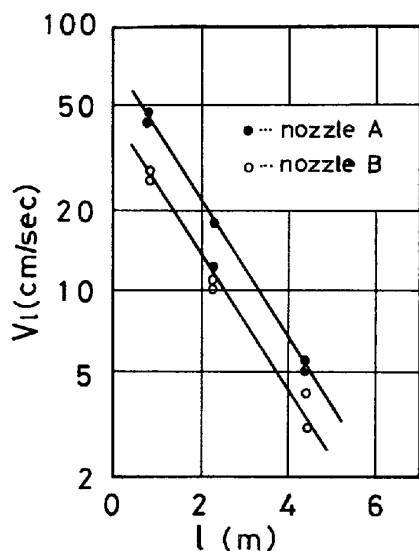


Fig. 12. Comparison of flow velocity from deflection angle, V_{θ_1} , and eq. (6), V_x , at 0.86 m below meniscus.



Nozzle A : ordinary bifurcated nozzle.
Nozzle B : box type nozzle.

Fig. 13. Distribution of flow velocity at edge of slab.

V_l ; Flow velocity of molten steel
 l ; Distance from meniscus

v_c : 鑄込み速度 (cm/sec)

l_p : 介在物の浸入深さ (m)

R : 連鑄機の円弧の半径 (m)

v_i : 介在物の浮上速度 (cm/sec)

(7) 式を用いて介在物の浸入深さ l_p を求める場合、湯面からの距離によつて v_l がどのように変化するかを知る必要がある。そこでいくつかの鑄片について、 θ_1 および θ_2 以外に鑄片表面から 64 mm の位置における柱状晶偏向角度を調査した。これらから (2)~(5) 式を用いて溶鋼流速を求めた。その結果を Fig. 13 に示した。湯面下 0.86 m の位置における溶鋼流速が 30 および 50 cm/sec のいずれの場合においても $\ln v_l$ と l とは比例関係にあることがわかる。またこのときの勾配もほぼ同じであるから v_l の値は (8) 式で推定することにした。

$$v_l = 1.67 v_{\theta_1} \exp(-0.60/l) \dots \dots \dots (8)$$

ここで v_{θ_1} : θ_1 測定位置における流速 (cm/sec)

l : 湯面からの距離 (m)

v_c を 1.0 cm/sec, R を 12.5 m としたときの介在物の浸入深さと θ_1 との関係を Fig. 14 に示した。このときの介在物の浮上速度は溶鋼の比重を 7.1 g/cm³, 介在物の比重を 4.0 g/cm³, 溶鋼の粘性を 0.05 poise とし計算した¹⁶⁾。直径 400 μ の介在物についてみると、 θ_1 が 30 度および 25 度のときの介在物浸入深さはそれぞれ 6.3 m, 5.2 m となる。この値を鑄片表面からの距離

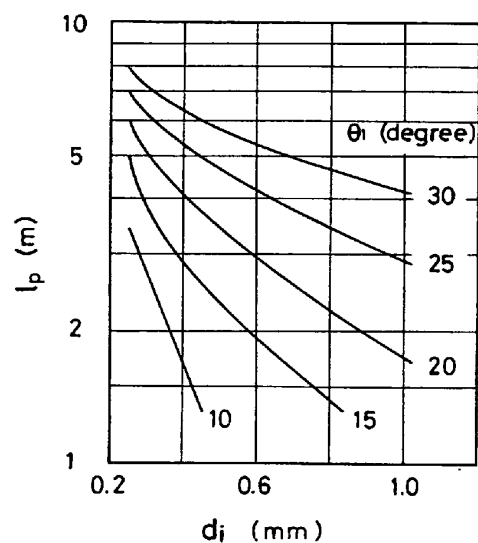


Fig. 14. Penetration depth of inclusions.

l_p ; Penetration depth

d_i ; Diameter of inclusion

θ_1 ; Deflection angle at 24 mm from slab surface

に換算すればそれぞれ 78 mm, 70 mm となり Fig. 9 に示した d_{max} の値とほぼ一致している。 θ_1 が 15 度以下では介在物浸入深さは 3.5 m 以下となり、 θ_1 が小さくなると鑄片端部の大型介在物量が減少するのは介在物の浸入深さが浅くなるためであることがわかる。

5. 結 言

凝固した連鑄鑄片の柱状晶偏向角度を測定することにより鑄込み時の溶鋼流動を推定し、つぎのことが明らかになった。

- 1) 連鑄スラブの鑄片端部では柱状晶偏向角度 θ が大きく、下向きの強い流れになつてゐるが、端部から遠ざかるにつれて θ は小さくなり、幅方向中央部では θ は負となり上向きの弱い流れがある。
- 2) 正常な鑄込み時には鑄片幅方向の θ は左右対称であるが、 θ が鑄片幅方向で左右非対称となる場合が少なくない。
- 3) 溶鋼流速 v (cm/sec) は柱状晶偏向角度 θ (度)、凝固速度 f (cm/sec) と次式の関係がある。

$$\ln v = \frac{\theta + 9.73 \ln f + 33.7}{1.45 \ln f + 12.5},$$

ただし $v < 50$ cm/sec

$$\ln v = \frac{\theta + 4.83 \ln f + 7.2}{0.1 \ln f + 5.4},$$

ただし $v \geq 50$ cm/sec

また、円弧型連鑄機の円弧内面側板厚 1/4 付近に集積

する大型介在物についてはつぎのことが明らかになった。

- 4) 正常鑄込みの場合には、大型介在物は鑄片端部に多く、幅方向中央部では最も少なくなり、鑄片幅方向での介在物分布は θ の分布と一致していた。
- 5) 鑄片幅方向で θ の値が左右非対称になっていた鑄片では θ の小さい側では、大型介在物量も少ないが、 θ の大きな側では正常鑄込み時の2～3倍の介在物量が認められた。
- 6) 鑄片端部の大型介在物量はその位置における θ の値に正比例していた。
- 7) 連鑄鑄片内の大型介在物量および鑄片幅方向の介在物分布は θ と密接に関係しているが、これは θ が溶鋼流速の関数であるため、 θ の値が変化することにより鑄込み時の介在物浸入深さが変化するためであると考えられた。

文 献

- 1) F. W. IRWIN and R. J. MILBOURNE: J. Metals, (1970) Sep, p. 30
- 2) 広本, 松永, 大橋, 大野: 鉄と鋼, 57(1971) 11, S 453
- 3) 広本, 大橋, 松永, 野中, 芝本, 深町: 鉄と鋼, 58 (1972) 4, S 75
- 4) 荒木, 青木: 鉄と鋼, 58 (1972) 11, S 403
- 5) H. VOM ENDE and G. GOGT: JISI, (1972) Dec. p. 889
- 6) 垣生, 吉井, 北岡, 飯田, 今井, 上田: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 962
- 7) 熊井, 浅野, 大橋, 野村, 藤井: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 894
- 8) W. ROTH and M. SCHIPPEN: Z. Mettalk., 47 (1956), p. 78
- 9) M. C. FLEMINGS, et al.: Trans. AFS, 64(1956), p. 636
- 10) 阿部, 戸叶: 日本金属学会誌, 35 (1971) 10, p. 947
- 11) 川上, 石黒, 菅原, 三好: 鉄と鋼, 59 (1973) 11, S 387
- 12) 熊井, 広本, 松永, 大橋, 大野: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 926
- 13) E. S. MIKSCH: Trans. AIME, 245 (1969), p. 2069
- 14) C. S. LINDENMYER, et al.: Phys., 27 (1957), p. 882
- 15) 高橋: 学振 19 委, 9725, 凝固-160, (1974, 5)
- 16) 浅野, 中野: 鉄と鋼, 57 (1971) 13, p. 1943