

## (討 8) 円弧型連鑄機製広幅スラブ内の介在物分布と溶鋼流動

川崎製鉄 技術研究所 ○垣生泰弘 北岡英就 吉井裕  
江島彬夫

千葉製鉄所 関 明 白石昌司

1. 緒言 円弧型連鑄機には数多くの利点がある反面、円弧の内側（以下上面側）に介在物が集積し易い欠点があり、その程度がはなはだしい場合には製品で超音波探傷欠陥やラミネーションなどが発生する。介在物の上面側への集積は、とくに広幅スラブでは幅方向においてその程度が異なり通常の2孔型浸漬ノズルで鑄造する場合には、スラブの短辺近傍ないしは $\frac{1}{4}$ 幅部にかけてピークを示す<sup>1,2)</sup>。このような介在物の偏在は連鑄時の未凝固部（以下クレータ）内における溶鋼流動に強く影響されると考えられるが両者を関連づけて調査した例は少ない<sup>2-4)</sup>。著者らはクレータ内の溶鋼流動が大きく異なる2種類の浸漬ノズルで鑄造した広幅スラブ内の介在物分布を調査し、介在物集積帯は鑄込流のクレータ内侵入が浅いほど、その終点が表面側へ移動して狭くなり、かつ集積量が少なくなること、幅方向の偏在は溶鋼のフローパターンに関係すること、など介在物分布が溶鋼流動と密接な関係を有することを報告した。今回はさらに溶鋼流動の異なる条件を2種類新たに加えて、広幅スラブ内の介在物分布と溶鋼流動の関係を詳細に検討し、介在物集積軽減のための最適流動条件を考察した。

## 2. 水模型実験

まず水模型実験により鑄込時におけるプール内のフローパターンおよび大型介在物に見立てた粒子の分布状況を調査した。

2.1. 方法： 装置は千葉製鉄所半径10m円弧型連鑄機の260×1700mm鑄型の $\frac{1}{4}$ 模型、粒子は約2mm $\phi$ のポリプロピレン（溶鋼中の約450 $\mu$ のシリケート系介在物に相当）を使用し、Froude数相似のもとで実験した。供試の浸漬ノズル形状をFig.1に示す。

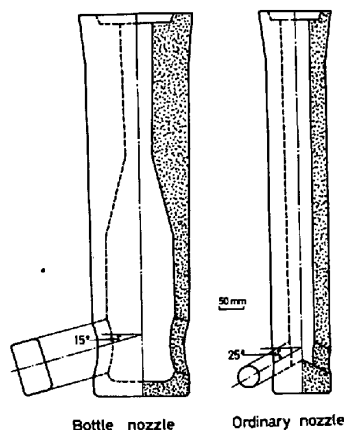


Fig. 1 Profile of submerged nozzles tested.

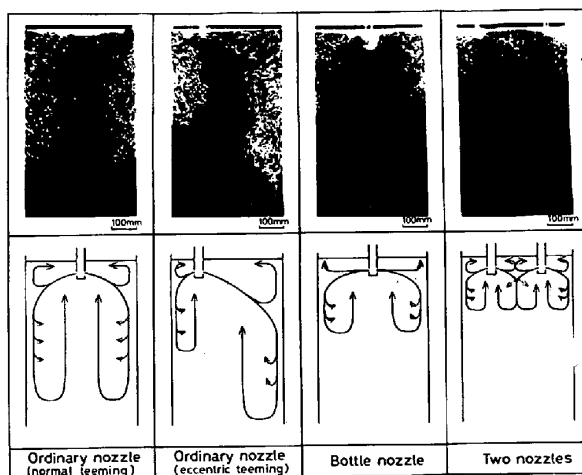


Fig. 2 Flow pattern of resin particles in water pool.

注入条件は逆Y型およびボトル型ノズルによる正常注入のほか、逆Y型ノズルの偏心注入（中心から350mm偏心）と2本ノズル注入（中心から左右へ各350mmの位置）を加えて、計4通りとした。フローパターンは粒子をトレーサーとして観察し、粒子分布は一定量の粒子をノズルからの噴流に巻込ませながら、スラブ長辺側より写真撮影して、スラブの幅および長さ方向における密度分布を調べた。

2.2. 結果： 各注入条件下でのフローパターンをFig.2に示す。逆Y型とボトル型ノズルの正常注入はほぼ同じパターンであるが、ボトル型の場合、ノズルからの噴流速度が逆Y型の約 $\frac{1}{3}$ （実測値）と小さいために短辺衝突後に形成される上下二つの分岐流はいずれも弱く、したがって下向きの分岐流により形成される循環流の下端は逆Y型の約 $\frac{1}{2}$ と浅い。偏心注入の場合は循環流の下端が左右で異なり、正常注入の場合に比して、ノズル側は浅く、反ノズル側ではプール深部まで及ぶ。一方、2本ノズル注入は、両ノズルからの噴流が衝突するスラブ中央部ではやや複雑な流れとなる以外は、1本ノズル注入を二つ合わせたほぼ同じパターンである。循環流の下端はボトル型と同程度で浅い。

Fig.3に示すプール内の粒子分布状況より、1) 粒子密度は、全般に、逆Y型・偏心注入 > 同・正常

注入>ボトル型ノズル注入>2本ノズル注入、の順で、これは粒子のプール内侵入深さの順位と一致し、粒子の浮上分離は侵入が深くなるほど悪くなる。2) 幅方向の偏在は、偏心注入の場合とくに顕著で、反ノズル側では正常注入より大きく、ノズル側では小さい。また逆Y型およびボトル型ノズルでは各々 1/4 幅部および短辺部で最も多く、幅中央部では少なく、その差が大きい。

これらに対し、2本ノズル注入の場合、幅方向における差が小さい。これはノズルからの噴流が短辺側ばかりでなく幅中央側にも吐出されていることによる。

なお、とくに注目されるのは、Fig.4に示すように、プール内深部において粒子はストークス則による浮上とフローパターンの関係で上面側に沿って偏流することである。これは介在物の上面側への集積と関連する重要な現象と思われる。

3. 実機鑄造実験

3.1. 方法:

千葉製鉄所半径10m円弧型スラブ連鑄機において、厚板向40キロ級鋼で260×1700mmスラブを、水模型実験と同じ4通りの条件(ノズル材質はすべて熔融石英)下で鑄造した。各ヒートの条件をTable.1のように揃え、いずれも鑄込中期のスラブを対象とした。スラブ内の介在物分布は、スラブの短辺部、1/4幅部および幅中央部において、上面側表面から厚み方向に連続して、20厚×200巾×100長mm(約3kg)の板状試片を切出し、スライム法で50μ以上の大型介在物を抽出して調べた。抽出介在物はほとんどがガラス質の球状介在物である。一方、クレータ-内容鋼流動に関しては、介在物調査と同位置において、柱状デンドライトの成長方向からの流れの方向、炭素濃度分布から流速をそれぞれ推定した。流速は高橋らの式： $C_s = C_L \{ 1 - 5.6 \times 10^{-3} (1 - k_o) U \}$ 、( $C_s, C_L$ =各々固相および液相中濃度、 $k_o$ =分配係数、 $U$ =流速)において、 $C_L$ =スラブ表面濃度、 $k_o = 0.20$ として算出した。

3.2. 結果と考察

3.2.1. タンディッシュ 内容鋼中の介在物: 注入法の比較に際しては、注入前の溶鋼中介在物が同じでなければならないが、Fig.5に示すように、ヒート間の差は少なく、ほぼ同一条件とみなせる。

3.2.2. スラブ内介在物分布: 各ヒートのスラブ内における50μ以上の大型介在物分布をFig.6に示す。これより次のことがいえる。1) 介在物集積量は、水模型での粒子密度の場合と同じく、逆Y

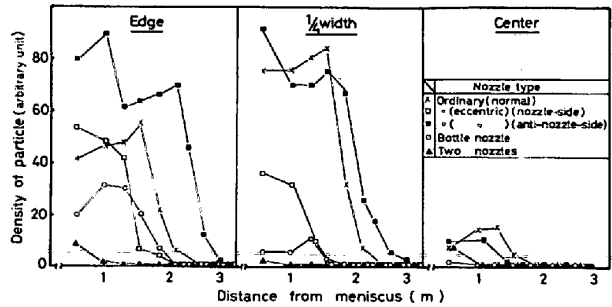


Fig. 3 Effect of nozzle shape on distribution of resin particles in water pool.

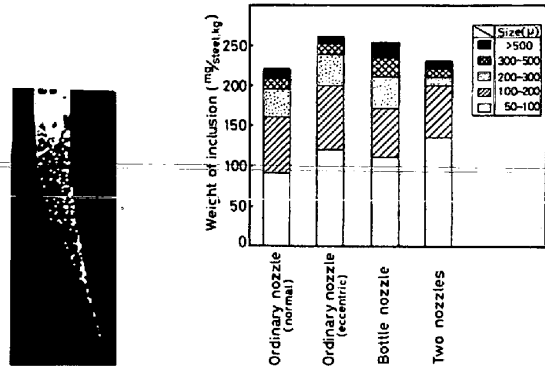


Fig. 4 Distribution of resin particles on the narrow face projection

Fig. 5 Content and size distribution of extracted large inclusions (≥50μ dia.) in molten steel in tundish.

Table. 1 Casting conditions of slabs tested.

Steel grade	Slab size (mm)	Temp. in tundish (°C)	Casting speed (%/min)	Specific cooling water (l/kg)	Chemical compositions (%)					
					C	Si	Mn	S	Alsol	Ototal
Plate steel (40 <sup>1</sup> / <sub>mm</sub> )	260x1700	1540	0.61	1.16	0.14	0.20	0.66	0.012	0.001	0.037
		1545	0.63	1.20	0.18	0.21	0.76	0.015	0.002	0.048

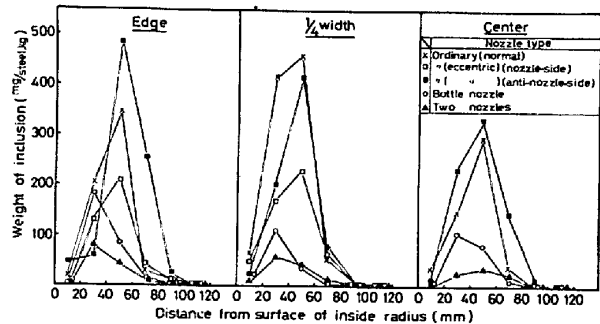


Fig. 6 Effect of nozzle shape on distribution of extracted large inclusions (≥50μ dia.) in test slabs.

型・偏心注入>同・正常注入>ボトル型ノズル注入>2本ノズル注入の順位を示した。2) 集積の少ないボトル型および2本ノズル注入は、集積の多い逆Y型ノズルの正常および偏心注入に比して、集積のピークおよび終点が表面寄りにあり、介在物のクレター内侵入が浅いことが推定される。3) 幅方向の偏在は水模型の粒子分布とほぼ同じ傾向を示し、2本ノズル注入の場合にくに少ない。

3.2.3. 凝固前面の溶鋼流動: Fig.7に各スラブの連铸時の凝固前面の溶鋼流の方向(↓下向き, ↑上向き)と速度を示す。逆Y型・正常注入時の流速は短辺中央部におけるノズルからの噴流の衝突位置で最大(約30 cm/sec)であり、その前後では漸次小さくなるが、10 cm/secをこえる領域がかなり存在する。短辺近傍では、流速が若干小さいだけで、短辺中央部と同様の速度分布を示す。1/4幅および幅中央部では、最大が約10 cm/secで5 cm/sec以下が大部分であり、全般に小さい。偏心注入では、流速は正常注入に比して、ノズル側では大きく、反ノズル側では小さいが、各位置の速度分布はノズル位置の差による幾何学的ずれはあるものの、正常注入と類似している。一方、ボトル型および2本ノズル注入の最大流速(約10 cm/sec)は逆Y型の約1/3に過ぎず、3~5 cm/sec以下のところが多く、全般に小さい。

なお、流れの方向は水模型より類推される結果と大略一致している。次に、短辺中央部において、下降流速がほぼゼロになる位置(Fig.7の矢印)および柱状デンドライトの成長方向が乱れ始める位置が鑄込流のクレター内侵入深さに相当するとして算出した値をTable.2にまとめて示す。

3.2.4 介在物分布と溶鋼流動: Fig.3, 6および7を対比すれば、スラブ内介在物分布は水模型における粒子密度分布とよく似ているが、スラブの表面から約10~30 mmの流速の大きい領域では、粒子密度が大きいにもかかわらず、介在物は少なく、粒子密度が比較的大きくかつ流速がピーク値よりやや中心寄りの、比較的小さい領域に介在物が顕著に集積していることがわかる。

今、凝固時における凝固層内への介在物捕捉量(Q)を次式であらわす。

$$Q = P \cdot N \dots\dots (1)$$

ここに、P = 介在物の凝固層への捕捉確率, N = 凝固層前面の溶鋼中介在物濃度

Nとして水模型で求めた粒子密度(ただし、粒子のスラブ厚み方向の分布状況を考慮して、凝固厚が

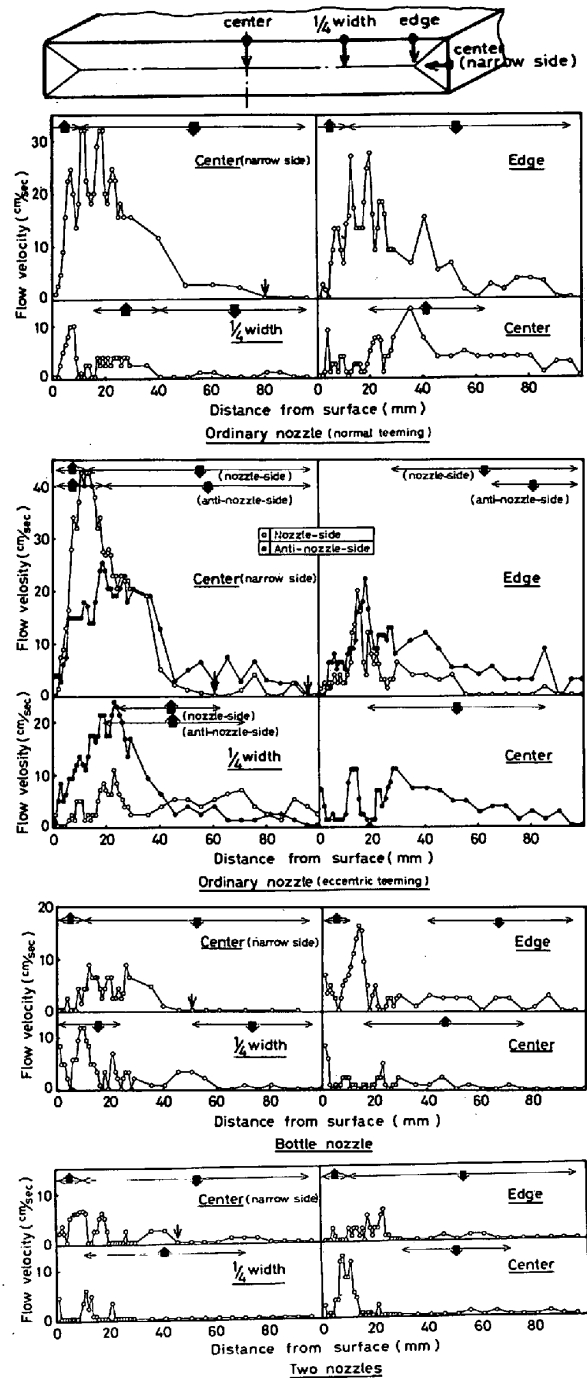


Fig.7 Flow velocity estimated from solute distribution in slabs cast by various nozzles.

Table.2 Comparison of penetration depth of casting stream in crater with various nozzles.

Type	Ordinary nozzle			Bottle nozzle	Two nozzles
	normal teeming	eccentric teeming	nozzle-side anti-nozzle-side		
Estimated by Solute distribution	5.4m	3.2m	7.2m	2.5m	2.1m
Cast structure	5.4m	3.8m	5.3m	2.9m	3.2m

40 mm以下の領域においては、測定値の  $\frac{1}{10}$  ほど) Pとして凝固前面の溶鋼流速 (V) の関数として、介在物調査相当位置毎に、それらの平均値を算出し、模型の粒子と同価の介在物に近い300~600 $\mu$ の介在物量との関係を求めた結果、Fig8に示すように、

$$Q \propto N \sqrt{V} \dots\dots (2)$$

なる関係が得られた。すなわち、溶鋼流とともにクレータ-深部に持込まれる介在物の量は浸漬ノズルからの溶鋼吐出速度ならびに角度、偏心などに依存するとともに溶鋼主流に隣接する領域で凝固前面の溶鋼流速の平方根に逆比例して凝固層へ捕促される。

次に、介在物集積量(幅方向3ヶ所の平均介在物集積量)を鋳込流のクレータ-内侵入深さで整理するとFig9のようになり、集積量は侵入が深くなるほど多くなるのが明らかである。Fig10は、水模型で推定される粒子侵入深さとこれと同価なスラブ内介在物の集積量の関係を示す。これより侵入深さを約1m以下にすれば集積はほとんど消失し、約1.5m以下にすれば、集積はごく軽度となることがわかる。

3.2.5 介在物集積軽減のための最適流動条件; 上述の結果から次のように整理できる。1) 鋳込流のクレータ-内侵入を浅くして、介在物の侵入をできるだけ浅くする。2) ノズルからの噴流をスラブ幅方向に均等に分散させ、介在物濃度の均一化をはかる。

1) については、Fig10に示す結果ならびにFig11に示す鋳込主要因と粒子侵入深さの関係より介在物集積をなくすための条件は(3)式で示される。

$$\left(\frac{V_0}{V_s - V_c}\right) \cdot \left(\frac{1 + \sin \theta}{2}\right) \cdot \left(\frac{W}{900}\right)^3 < 7.23 \sim 17.4 \dots\dots (3)$$

ここに、 $V_0$  = ノズル出口流速,  $V_s$  = 介在物浮上速度,  $V_c$  = 鋳込速度,  $\theta$  = ノズル出口の下向角度,  $W$  = スラブ幅 (mm)

条件2)は例えば複数ノズルの使用により達成されるが、その最適条件を定量的に示すことは現在ではできない。

4. 結言 円弧型連鋳機製厚板向40キロ級広幅スラブを対象に、未凝固部内の溶鋼流動が大きく異なる4通りの鋳込条件で鋳造して、介在物分布と溶鋼流動との関連を検討した結果、両者間の関係を明らかにすることができ、介在物集積軽減のための溶鋼流動制御の指針が得られた。

(参考文献) 1) 新日鉄広畑: 第49回製鋼部会資料, 鋼49-22 (S.46.7) 2) 川鉄技研千葉: 第57回製鋼部会資料, 鋼57-12 (S49.3) 3) 川上他: 鉄と鋼, 59(1973)S387, 4) 大井他: 学振資料, 19委9723(S49.5), 5) 高橋他: 鉄と鋼, 59(1973)S49, 6) Chipman, et al: Elect. Fur. Steelmaking 2(1963) p99.

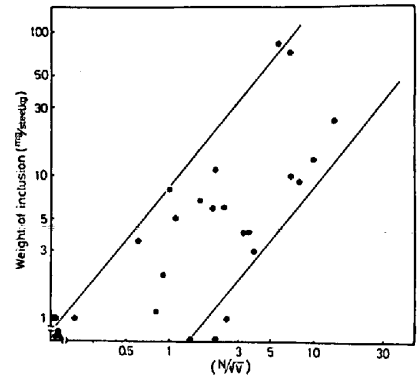


Fig 8 Relation between extracted large inclusions content ( $\geq 300\mu$ .dia.) and  $1/\sqrt{V}$  in accumulated zone of slabs.

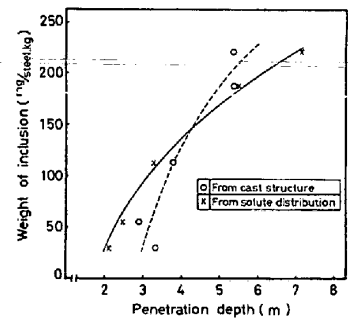


Fig 9 Relation between extracted large inclusions content ( $\geq 50\mu$ .dia.) in accumulated zone of slabs and penetration depth of casting stream in crater.

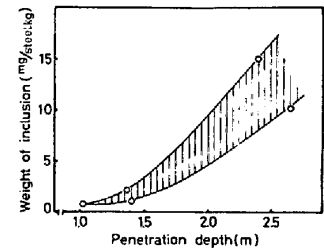


Fig 10 Relation between extracted large inclusions content ( $\geq 300\mu$ .dia.) in accumulated zone of slabs and penetration depth estimated by water model.

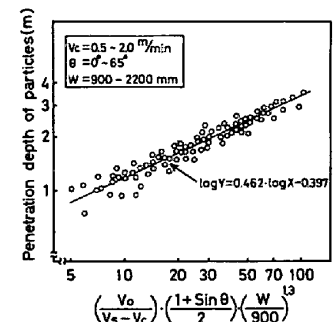


Fig 11 Estimation of penetration depth of particles in crater with various casting condition.