

討 9

厚板向スラブの高速鋳造とその品質について

川崎製鉄(株)水島製鉄所 ○児玉正範 小島信司 中井一吉

千葉製鉄所 反町健一 今井卓雄

技術研究所 工博 垣生泰弘 理博 野崎努

1 緒 言 水島製鉄所第5連鋳機および千葉製鉄所第2連鋳機は、高速鋳造時の内部割れ防止策として、ロールピッチ縮少のための分割小径ロールおよび多点曲げ矯正を採用している。両連鋳機において厚板向スラブを $1.2 \sim 1.8 \text{ m/min}$ の速度で鋳造する実験を行い、多くの知見が得られたのでその概要を報告する。

2 設備概要 表1に両連鋳機の設備仕様を示す。

水島第5連鋳機はメニスカス下 $12 \sim 26 \text{ m}$ の範囲に分割ロールを採用した2点曲げ矯正方式のDemag型全彎曲連鋳機、千葉第2連鋳機は有効垂直長さ 3.8 m を有するVöest型垂直曲げ連鋳機である。

3 実験内容 深絞り用Alキルド鋼に代表される低炭素鋼は、高温における許容伸びが大きいため、凝

固先端が矯正点を超えても内部割れ発生の懸念は少ない⁽¹⁾。今回は対象鋼種を内部割れ感受性の大きい厚板材とし、表2に示す条件で実験を行った。なお、鋳造前にはロール間隔測定装置によってロールアラインメントが管理基準内であることを確認した。

4 実験結果および考察

4-1 内部割れにおよぼす操作条件の影響 水島第5連鋳機において機内凝固実験を行い、内部割れ発生状況を調査した結果、内部割れはメニスカス下 7 m 近傍で発生しはじめ、この位置は後述の弾塑性計算から求めたバルジングによる内部歪の極大点と一致することがわかった。これは内部割れの主因は、バルジングであることを示唆するものであり、以後高速鋳造にはバルジング歪の低減に主眼をおいた高比水量の鋳造方案とした。図1に内部割れにおよぼす比水量と鋳造速度の影響を、図2に内部割れにおよぼす $\underline{s}$ および $(\underline{P} + \underline{S})$ の影響を示す。内部割れ防止のためには、鋳造速度の上昇に応じて比水量の増加が必要であり、内部割れ感受性におよぼす $\underline{s}$ および $(\underline{P} + \underline{S})$ の影響の大きいことが明らかとなった。写真1に鋳造速度 1.8 m/min においてモールド内に 5 kg/t の硬鋼線を添加したスラブのL断面Sプリントを示す。硬鋼線添加スラブは等軸晶率55%であり、内部割れも認められないのに対し、非添加スラブでは柱状晶部に軽微な割れが存在する。これは鋳造組織により内部割

表1. 連鋳機設備仕様

項 目	水島第5連鋳機	千葉第2連鋳機
型 式	Demag	Vöest
タンパッシュ容量(t)	25	25
モールド長さ(mm)	700	900
彎曲半径(m)	120, 1922 (2点曲げ矯正)	100 (垂直逐次曲げ矯正)
分割ロール使用範囲	メニスカス下 $12 \sim 26 \text{ m}$ (2分割)	メニスカス下 $1 \sim 27 \text{ m}$ (4~5分割)
機 長(m)	32	27

表2. 鋳造条件

条件 連鋳機	溶鋼成分(%)						スラブサイズ (mm)	鋳造速度 (m/min)	比水量 (l/kg)
	C	Si	Mn	P	S	Al			
水島第5連鋳	0.12	0.15	0.60	<0.030	<0.020	0.005	220×1215	12~18	1.5~2.8
千葉第2連鋳	0.19	0.25	1.20			0.030	200×1570	12~15	1.4~1.8

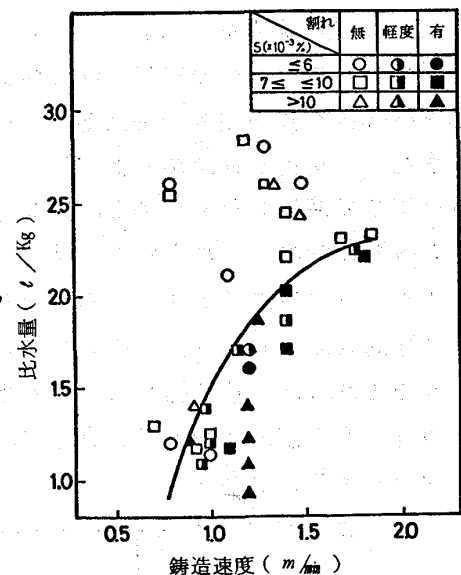
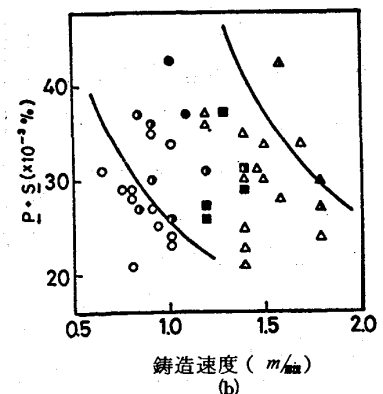
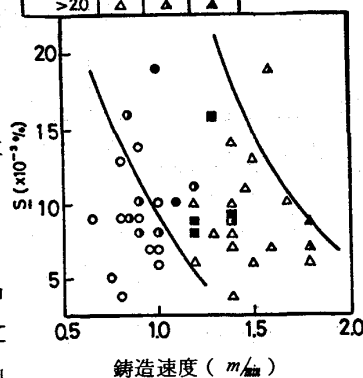


図1. 内部割れにおよぼす比水量、鋳造速度の影響

比水量 (l/kg)	割れ	無	軽度	有
≤ 1.5	○	○	○	●
$1.5 < \leq 2.0$	□	□	□	■
> 2.0	△	△	△	▲

図2. 内部割れにおよぼす $\underline{s}$, $\underline{P} + \underline{S}$ の影響

れ感受性に差のあることを示すものである。

4-2 弾塑性梁による内部歪の計算

実操業から得られた知見

を1ロールピッチ間の弾塑性梁による計算を行って確認した。図3に水島第5連鋳機におけるバルジングによる内部歪，ミスアラインメントによる内部歪の計算例を示す。機内の特定位置に内部歪の極大点が存在し，機内凝固実験の結果と良い一致を示す。また，千葉第2連鋳機の場合も，メニスカス下16.4mの内部歪極大点において内部割れが発生しやすい操業経験とよく対応した。図4に同一比水量時の鋳造速度と内部歪との関係を示すが，比水量の内部歪におよぼす影響の大きいことが確認できた。

4-3 内部割れ発生機構の検討

内部割れ発生機構の検討にあたっては割れ発生位置の推定が必要である。千葉第2連鋳機において鋳造速度

1.2m/minで鋳造し，メニスカス下16.4mの位置で故意に内部割れを生じさせた例を図5に模式的に示す。同一位置で鋳片に打ち込んだ複合紙（内部が純Ni，本体がSCM4鋼）の溶解状況の観察から，固液共存相内から発生した内部割れは固相線の表面寄り5mmに達していることを確認した。また，水島第5連鋳機および第6連鋳機において故意にロール間隔を広げて鋳造した場合にも，図5と同様の形態をとる内部割れが観察された。これらの内部割れ長さは図6に示すように凝固時間の平方根にほぼ比例する。この事実は，内部割れが固液共存相内の特定固相率位置から固相中の特定域の間で発生することを意味するものであり，固液共存相の広さが凝固時間の平方根に比例するとの報告⁽⁴⁾，および固相線と想定脆化温度間距離が凝固時間の平方根

にほぼ比例するとの伝熱計算結果によって支持される。

バルジングおよびミスアラインメントによる内部歪を弾塑性計算によりもとめ，その値に(1)式でもとめた矯正による内部歪 $\epsilon_{U \cdot B}$ を単純に加算した値を全内部歪とし，パラメーターとして凝固時間の平方根($t^{1/2}$)をと

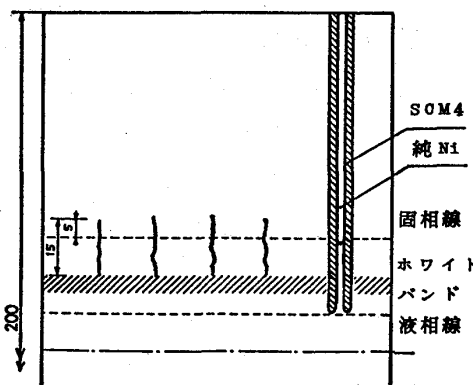


図5 千葉第2連鋳機における内部割れ模式図

り，内部割れ発生との関連を調べたものを図7に示す。

$$\epsilon_{U \cdot B} = (D/2 - S) (1/R_1 - 1/R_2) \quad (1)$$

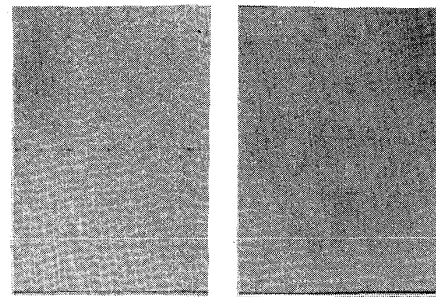


写真1 鋳造速度1.8m/minのL断面Sプリント

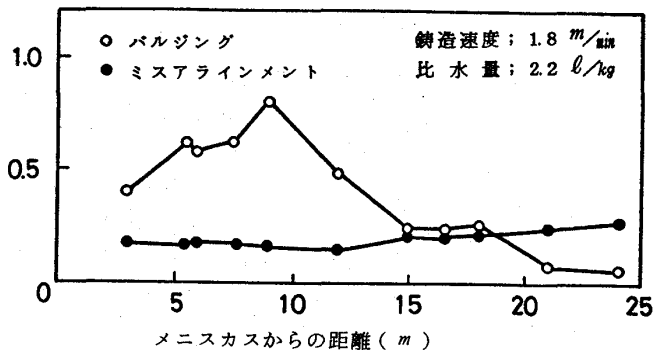


図3 水島第5連鋳機における内部歪の計算例

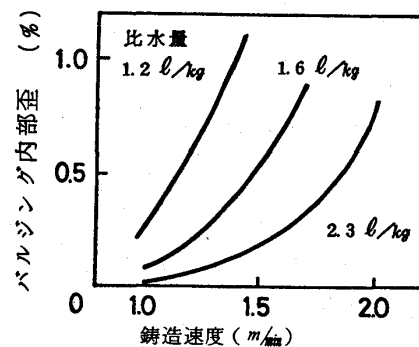


図4 水島第5連鋳機メニスカス下12mの位置における鋳造速度と内部歪の関係

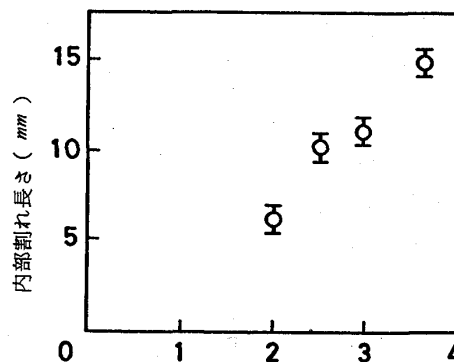


図6 凝固時間と内部割れ長さの関係

D; スラブ厚 (mm) S; シェル厚 (mm)

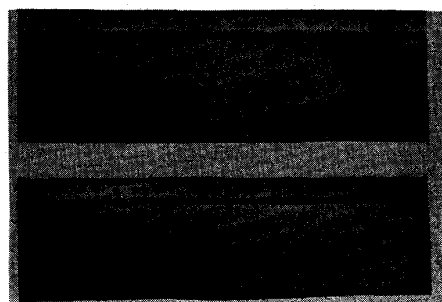
 R_1, R_2 彎曲半径 (mm)

$t^{1/2}$ の増大 (凝固速度の低下) にともない内部割れ発生に対する許容歪が低下する傾向が明らかである。この現象は下記の2つの理由によるものと考えられる。1つは、同一鑄片の凝固速度の異なる位置のマイクロ凝固組織を比較した表3から明らかなように、凝固速度の遅い場合には樹間々隔が大きくなり、かつMnSなどの低融点化合物が粗大化し割れ感受性を増大させるためと考えられる。他の一つは、鑄片はロール間を通過する際に引張り-圧縮の繰り返し応力を受けるが、クリープを考慮するとこの間に歪は引張り歪として蓄積されるため⁽⁵⁾と考えられる。図8に示すように、点Aが割れ危険域を通過して点Bに至るまでにうける蓄積歪の大小により割れが発生すると考えると、凝固速度が遅い場合には1ロールピッチ間の全内部歪は小さくても、

AからBに至るまでの時間が長いために蓄積歪は大きくなり割れ発生に至ると考えられる。この場合でも内部割れ防止の有効手段はロールピッチ間の全内部歪の低減である。図7に比水量2.3 l/kg 、鑄造速度1.8 m/min で、ロールピッチ450 mm 、彎曲半径12 m の連鑄機における1点曲げ矯正時の想定歪を示すが許容歪を超えている。これは分割ロールによる小ロールピッチ、多点曲げ矯正の優位性を示唆するものである。

4-4 中心偏析 C断面Sプリントから求めた中心偏析評点と鑄造速度の関係を図9に示すが、鑄造速度が上昇しても中心偏析評点は悪化しない。これは高比水量によるパルジングの減少、凝固先端がミスアラインメントの少ない分割ロール内に位置することにより、凝固末期の溶鋼流動が抑制され

たためと考えられる。さらにモールド内硬鋼線添加による等軸晶率の増加によって中心偏析は大幅に改善される⁽³⁾。写真2に鑄造速度1.8 m/min で鑄造し5 kg/t の硬鋼線添加を行った場合のマクロ組織を非添加材と比較して示す。



(上) 添加材, (下) 非添加材
写真2 硬鋼線添加による中心偏析の改善

4-5 大型非金属介在物 鑄造速度が大きくなるとクレーター内での介在物浮上が困難となるので鑄片内の介在物の増大が懸念される。図10に水島第5連鑄機、千葉第2連鑄機

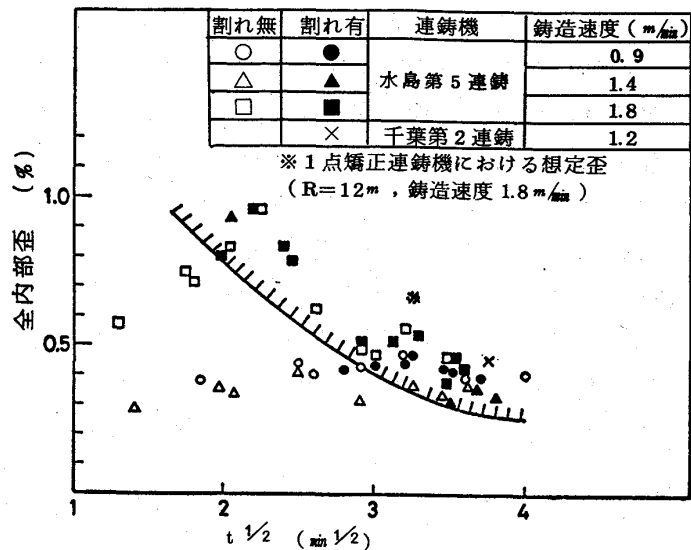


図7. 凝固時間と内部割れ許容歪の関係

表3. 同一鑄片内マイクロ組織の比較

表面からの距離 (mm)	アーム間隔 (μ)		MnS平均径 (μ)	樹間偏析 (P/R_0)
	1次	2次		
52	1200	222	3.45	3.00
92	1750	328	6.02	6.08

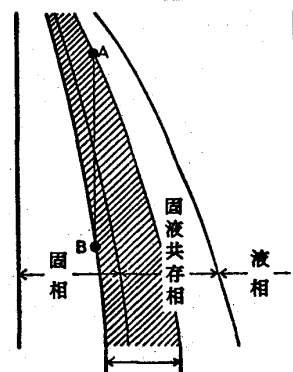


図8. 割れ発生危険域の模式図

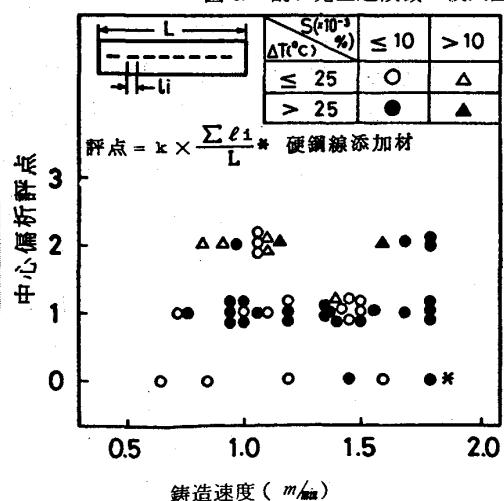


図9. 鑄造速度と中心偏析評点の関係

における鑄造速度とX線透過法により求めた直径約250 μ 以上の介在物個数との関係を示す。全彎曲連鑄機である水島第5連鑄機においては鑄造速度の上昇とともに介在物個数は増加するのに対し、垂直曲げ連鑄機である千葉第2連鑄機では1.4 m/minの速度までの増加は少い。

介在物侵入深さ H_p は(2)式の実験式で示される。

$$\log H_p = 0.462 \log \left\{ \frac{V_o}{V_s - V_o} \right\} \left\{ \frac{1 + \sin \theta}{2} \right\} \left\{ \frac{W}{900} \right\}^{1.3-0.397} \quad (2)$$

V_o ; 浸漬ノズル出口における溶鋼流速 (m/min)

V_s ; 介在物の浮上速度 (m/min) θ ; 吐出角度 ($^\circ$)

V_o ; 鑄造速度 (m/min)

W ; スラブ幅 (mm)

H_p を用いてメニスカスからXの距離のクレター内介在物

分布関数 $N(x)$, さらにその位置において鑄片上面側に捕捉される介在物密度 $n(x)$ を求めた。 $n(x)$ を介在物が捕捉されない距離 ξ から最大侵入深さ H_p まで積分することによって介在物の総量 n_{total} が導かれる。

$$n_{total} = \frac{3\beta V_s}{\alpha V_o^{1/2}} \left[\frac{H_p}{R} (0.0508 H_p^{5/2} - 0.4 \xi^{5/2}) - \frac{\alpha}{6 V_o^{1/2}} (H_p - \xi)^3 \right] \quad (3)$$

ここに $\beta = \frac{\alpha}{2(V_s - V_o)} \quad (4)$, $\xi = \left(\frac{\alpha R}{2 V_o^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (5)$

α ; 定数

β ; 凝固係数 (m $\cdot$ min $^{-1/2}$)

V_o ; 溶鋼流速 (m/min)

R ; 彎曲半径 (m)

計算結果を図10に示すが、実測の介在物個数と大略よい一致を示す。

4-6 表面状況

図11に示すように鑄造速度が上昇すると表面縦割れは増加する傾向を示す。しかし、 $C > 0.14\%$ の範囲ではこの傾向は顕著ではなく、非晶質材料を用いた適正な粘度、熔融特性を示す顆粒パウダーの使用に負うところが大きいと考えられる。一方、 $C \leq 0.14\%$ においては鑄造速度の上昇ともなり表面縦割れの増加は著しく、特に1.6 m/minを超えると大きな縦割れを伴いやすい。これは包晶反応時の凝固収縮による凝固不均一によると考えられ、今後改善を要する課題である。気泡欠陥、ノロかみ、表面微少割れについては鑄造速度の上昇によって悪化する傾向は認められなかった。また、表皮下介在物は鑄造速度の上昇とともに減少する。

5 結 言 厚板向スラブを1.2~1.8 m/minの速度で鑄造し、下記の結論を得た。

- 1) 内部割れ防止について、設備面では小径分割ロール採用によるロールピッチの縮小および多点曲げ矯正が極めて有効であり、操業面では高比水量鑄造が有効である。
- 2) 内部割れは P , S , とくに S の影響が大きく、また柱状晶の等軸晶化により発生が抑制される。
- 3) 内部割れ発生に対する許容歪は鑄片の凝固速度により異なり、凝固速度が遅いほど小さい。
- 4) 高速鑄造においても凝固先端を小ロールピッチで支持し、かつ高比水量鑄造により中心偏析は悪化しない。また中心偏析の解消にはモールド内硬鋼線添加が有効である。
- 5) 鑄片に捕捉される大型非金属介在物は、鑄造速度の上昇により全彎曲連鑄機では増加するが、垂直曲げ連鑄機ではその増加量は極めて僅かである。
- 6) 鑄造速度を上昇した場合、表面縦割れは $C > 0.14\%$ では適正なモールドパウダーの選定により低水準に保たれるが、 $C \leq 0.14\%$ では悪化の傾向が著しく、この点の改善が今後の課題である。

参考文献 (1) K. Saito, et al. 3rd Concast Convention (1972) (4) 根本ら; 鉄と鋼 58 (1972), S116

(2) 川鉄水島; 第69回製鋼部会 重-3 (1978) (5) O. M. Pühringer; Stahl u. Eisen

(3) 上田ら; 鉄と鋼 63 (1977), S124

96 (1976), 279

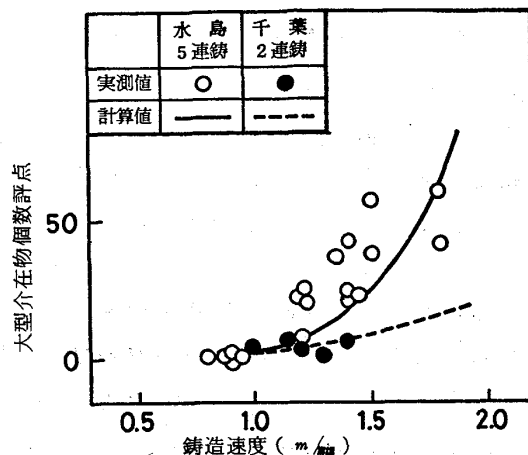


図10. 鑄造速度と大型非金属介在物個数評点の関係

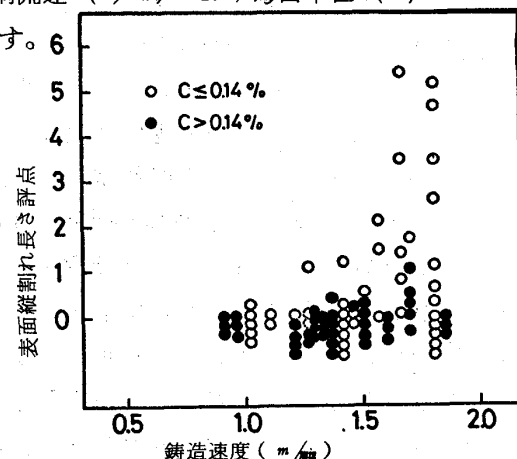


図11. 鑄造速度と表面縦割れ評点の関係