

連铸鑄片の中心割れの発生機構

草野 昭彦*・三隅 秀幸*²・千葉 仁*³・原田 慎三*⁴

The Formation Mechanism of Center-line Cracking on the Continuous Cast Slab

Akihiko KUSANO, Hideyuki MISUMI, Hitoshi CHIBA and Shinzo HARADA

Synopsis : Continuously cast slab may contain linear cracks in the middle of the slab thickness. This crack is called the center-line cracking. In many cases, the cavity cannot be closed through the rolling process and presents itself as a defect.

In this paper, the formation mechanism of center-line cracking has been discussed on the bases on investigation of center-line cracking and analysis of relevant operating conditions.

The results are summarized as follows,

- (1) Center-line cracking is a shrinkage cavity created through the solidification of molten steel closed off in the vicinity of final stage of liquid core.
- (2) The enclosed liquid thickness calculated from the cavity data is about 6mm.
- (3) The defect intervals of slabs coincide with the circumference of the roll in the neighborhood of the unbending point.
- (4) Center-line cracking is apt to occur when the slab is cast in the crack-sensitive range.

Key words : center-line crack ; continuous casting ; ultrasonic test ; shrinkage cavity ; solidification ; casting speed.

1. 緒言

連铸鑄片に発生する中心割れは圧延工程で圧着せず製品において二枚板あるいは超音波探傷(以下USTと呼ぶ)欠陥として残留し不良品発生の原因となる。そのため、中心割れの発生機構を明らかにし、その防止対策をとることが重要である。しかし今日まで中心割れの研究報告はきわめて少ない。大分製鐵所にて連铸能力向上の一環として高速铸造を志向した時に、中心割れの発生率が増加したが、それ以降、著者らは中心割れについて調査研究をすすめてきた^{1,2)}。本報告は、中心割れの発生を現象面から整理し、走査型電子顕微鏡観察により、割れ破面の実態を明らかにし、その結果より中心割れの発生機構を考察したので報告する。

2. 中心割れの実態

2・1 鑄片断面に観察される中心割れの形態

連铸鑄片の横断面の中央に線状に現れる割れを中心割れと呼んでいる。中心割れは、Fig. 1に示すように鑄片巾方向の中央部に発生するAタイプと端部に発生するBタイプに分類される。AおよびBタイプの発生率は鋼種、鑄片巾、連铸機および操業条件によって若干変るが、Aタイプの発生率は

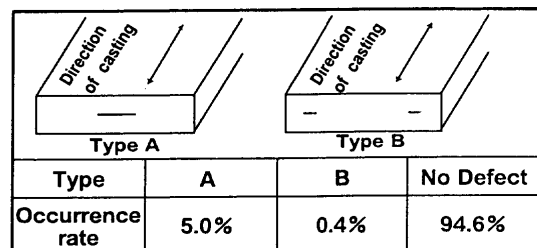


Fig. 1. Occurrence rates of center-line cracking.

Bタイプに比べ約10~15倍であり圧倒的に多い。それ故中心割れの発生機構を究明する第一ステップとして、Aタイプの中心割れに着目して調査することにした。

2・2 鑄片USTと中心割れとの対応

2・2・1 USTの方法

鑄片断面に現れる目視可能な中心割れだけでは、その実態を正確に把握することは困難である。そこで、鑄片のUSTを実施し、中心割れの二次元的発生状況を把握した。中心割れ発生位置は、巾方向中央部が圧倒的に多いので、探傷範囲は鑄片巾中央600mmとし、その間を縦横200mmピッチの交点探傷を行うこととした。交点探傷の結果、欠陥があった時はその周辺をスライドさせながら探傷を行い、欠陥の大きさを求めた。なお、使用したUST条件をTable 1に示

平成9年6月17日受付 平成9年9月10日受理 (Received on June 17, 1997; Accepted on Sep. 10, 1997)

* 新日本製鐵(株)チタン部 (Titanium Division, Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku Tokyo 100)

* 2 新日本製鐵(株)大分技術研究部 (Oita R&D Lab., Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鐵(株)大分技術研究部 (現: 県北測量(株)) (Oita R&D Lab., Nippon Steel Corp., now Kenhoku Sokuryo Co. Ltd.)

* 4 元新日本製鐵(株) (Formerly Nippon Steel Corp.)

す。

2.2.2 中心割れとUSTとの対応

中心割れとUSTとの対応を知るため、UST欠陥の程度とその欠陥部をガス切断した時の切断面の割れ発生率を調査した。その結果をTable 2に示す。欠陥エコーの高さを F_1 、バックエコーの高さを B_1 とすると、 $F_1/B_1 > 100\%$ 、あるいは F_1 エコーのみの重欠陥が、切断面に中心割れとして認められる確率が圧倒的に高い。このことから中心割れの実態を把握する方法としてUSTが1つの有力な手段であり、しかもUSTで重欠陥を検出・分離すればよいことが判った。従って今後はUSTの結果により中心割れを論考することにした。

2.3 鋳片USTに見られる中心割れの形態

鋳片UST欠陥はFig. 2に示すような3つの形態に分類できる。すなわち端部にのみ発生した端部欠陥(ガス切断面より奥行き30mm程度の割れ、Type-I)、鋳片内に欠陥が散

Table 1. Conditions of UST.

Instrument	USM-2
Probe	B2SN(equivalent of 2B25N under JIS)
Transducer	Water
Sensitivity	B_1 100%+6db

Table 2. Probability of detected center-line cracking showing up in torch-cut sections.

Defect level	only F_1 $F_1 / B_1 \geq 100$	$F_1 / B_1 < 100$
Probability of appearance	92 %	0 %

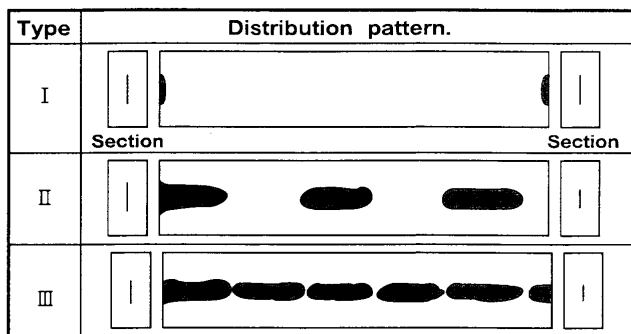


Fig. 2. Distribution patterns of center-line cracking.

在した島状欠陥(Type-II)と連続型欠陥(Type-III)に分類される。端部欠陥はその状態よりガス切断時の熱影響が主因と考えられ、また成品への影響度合が小さいので今回は調査の対象外とした。

142枚の鋳片に対し、中心割れの形態を調査した結果は、Type-IIが89%、Type-IIIが11%であり、欠陥の大部分はType-IIの島状欠陥である。

2.4 UST欠陥の周期性

USTを実施した鋳片(鋳造終了端より20m以内の鋳片を除く)のうち、島状欠陥の発生した鋳片を対象に欠陥発生間隔を連鋳機別に測定し、その結果をFig. 3に示す。図から明らかなように、欠陥の発生間隔にはピークがあり、1、2号機では1.5m、3、4号連鋳機においては約1.4mの発生間隔にピークが存在する。それ故、中心割れには連鋳機固有の周期が存在する。一方、連続型欠陥は通常の200mm交点探傷では欠陥周期は検出できない。そこで連続型欠陥部の表面を機械研磨し、20mm交点精密探傷を実施した。1号機の鋳片の測定結果の一例をFig. 4に示す。この図から、連続型欠陥においても約1.5mの欠陥周期が存在する。これらの結果より島状欠陥・連続型欠陥とも連鋳機固有の欠陥周期を有している。

2.5 中心割れの破面

2.5.1 サンプル採取方法

中心割れの実態を把握するため、割れの破面を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。UST欠陥の存在する鋳

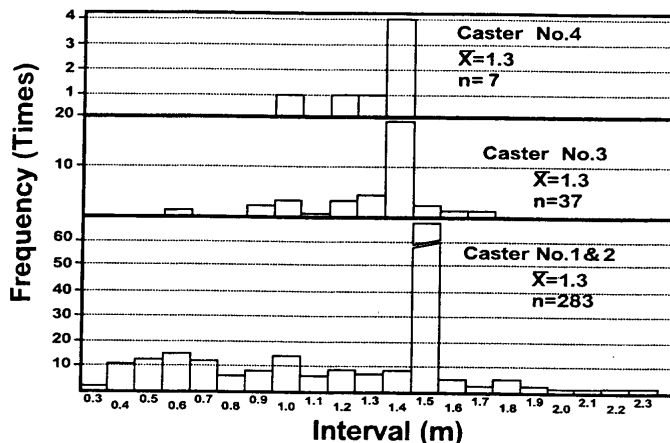


Fig. 3. Center-line cracking intervals.

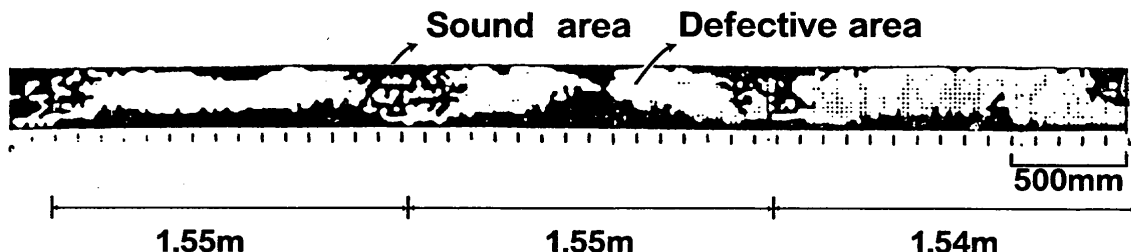


Fig. 4. Type III defect under precision UST.

片から、ガス切断の影響がないように欠陥部を内在させて切り出し、鋸断によって中心割れ部を切断した後、液体窒素で冷却したサンプルを落重試験機で中心割れ面を表面に出るよう破断させ、走査型電子顕微鏡試料に供した。破断部はUST欠陥の存在した部分、健全部およびその境界部に分けて観察した。試料は中心割れ部が等軸晶のものと同軸晶のものを選んだ。

2.5.2 観察結果

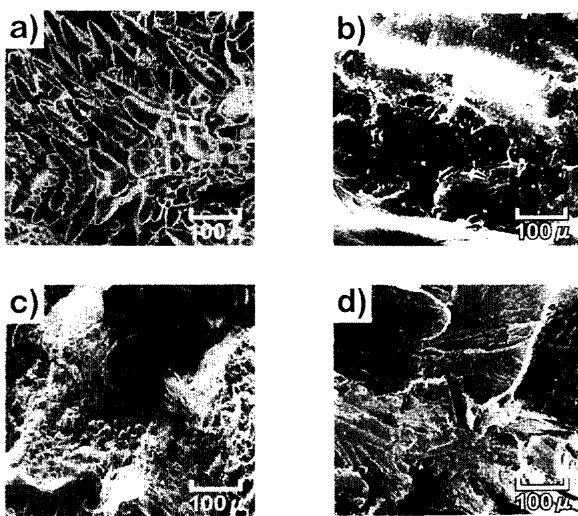
SEM観察の結果、中心割れの破面形状は、以下の4種に分類できる。

- (1)凝固界面であるデンドライト
- (2)凝固界面であると考えられる滑らかな凹凸面
- (3)デンプルをとまなう延性破面
- (4)擬似劈開面

Table 3に上記界面積の比率を示すとともに、その代表的写真をFig. 5に示した。これらの結果から中心割れの内部界面は大部分が凝固界面であり所々に直径2～3mmの柱で空隙がブリッジングされている。これらのブリッジの内比較

Table 3. Percentages of different fracture conditions.

Type	Location Face	Center	Boundary
		Type-II	
	Solidification	90 ~ 100 %	7 ~ 32 %
	Quasi-Cleavage	0 ~ 8 %	62 ~ 93 %
	Ductile fracture	0 ~ 2 %	0 ~ 6 %
Type-III			
	Solidification	70 ~ 100 %	55 ~ 74 %
	Quasi-Cleavage	0 ~ 24 %	23 ~ 55 %
	Ductile fracture	0 ~ 6 %	3 ~ 10 %



a) Typical solidification face with dendrites.
b) Smooth solidification face.
c) Ductile fracture found on the inner surface.
d) Quasi-cleavage.

Fig. 5. Photographs of fracture structure.

的高温時の熱収縮により破断したものはデンプルをとまなう延性破面を呈し、未破断部はサンプリング時に破断して擬似劈開面を呈したものである。またUST欠陥以外の健全部はサンプル採取のために低温で破壊した時に生じた擬似劈開面である。中心割れは中心偏析部まで柱状晶のものも等軸晶のものも組織には関係なく発生しており、等軸晶のもの破面には滑らかな凝固面が多く見られるが、デンドライトの場合もあり必ずしも一定でない。以上の結果から、中心割れはストランド内の未凝固溶鋼が凝固する過程である間隔をもって封じ込められた結果、凝固収縮により中心部に発生した空隙であると考えられる。

3. 中心割れの発生と操業条件

3.1 平均铸造速度および铸造速度変動との関係

前章迄の調査結果を基に連铸の操業条件と中心割れの関係を調査した。なお、以下に述べる「鋳片UST欠陥占積率」と「平均铸造速度」は次のように定義にした。

鋳片UST欠陥占積率(%) = (欠陥部の交点数/探傷域内の全交点数) × 100

平均铸造速度(Va) = 鋳片がメニスカスから矯正点を通過するまでの平均速度。

铸造速度変動(ΔV) = 鋳片の最高または最低铸造速度と平均铸造速度の差。

1～3号機で铸造した鋳片のUST欠陥占積率とVaおよびΔVとの関係をFig. 6に示した。図から明らかなように0.8～0.9m/min付近にピークを持った分布をしており、ピーク位置はΔVによって若干のズレがある。つまり、0.10m/min以下のΔVの分布(●印)は0.78m/min付近にピークを持ち、0.31m/min以上の速度変動の場合(○印)は0.93m/min付近にピークを持っている。このように中心割れの発生率とVaおよびΔVの間には密接な関係がある。これは鋳片の未凝固溶鋼先端の連铸機内での位置が関係していることを意味している。

3.2 溶鋼過熱度および二次冷却水量との関係

凝固先端の挙動に影響する主要因として、铸造溶鋼過熱

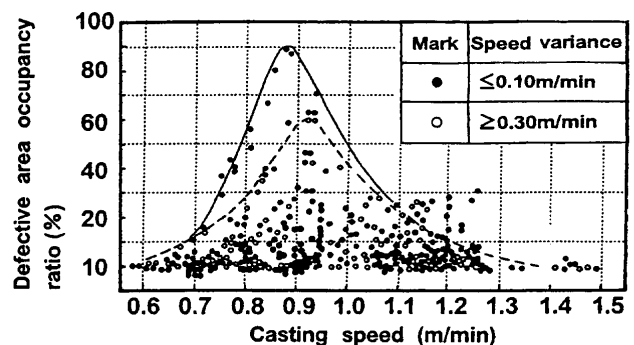


Fig. 6. Relation between the defective area occupancy ratio and casting speed.

度(ΔT)および二次冷却水量がある。 ΔT は凝固温度とタンデッシュ内溶鋼温度の差である。中心割れ発生率への影響は通常操業温度範囲($10^\circ\text{C} < \Delta T < 40^\circ\text{C}$)では関係が認められなかった。 ΔT により铸造速度を決めているためUST発生率を見る限り ΔT の影響は表れず、铸造速度の影響の内に含まれたものと考えられる。

また、二次冷却水量とその水量配分は中心割れに大きく関係することが予想されたが、冷却水量比1.4と0.8l/Kg-steelの比較においては中心割れ発生率に有意差はなかった。これは铸造温度の場合と同じく铸造速度の影響として表れるためと考えられる。

4. 中心割れ発生機構に関する考察

4.1 封じ込め発生時の溶鋼厚さの推定

4.1.1 中心割れの体積の測定

鑄片USTで検出された中心割れの部分を、鑄造方向に平行に試料を採取・研磨し、SEMによる画像解析により割れの面積を測定した。島状欠陥については周りにポロシテイを随伴しているものが多いので、UST欠陥の前後約200mmを含めて測定した。測定結果よりUST欠陥長さに相当する部分の平均中心割れ厚さを計算した。その結果をTable 4に示す。

4.1.2 封じ込め発生時の溶鋼厚さの推定

中心割れの欠陥周期は溶鋼封じ込めの単位長さと考えられるので、中心割れの厚さを測定すれば、封じ込め発生時の溶鋼厚さが計算できる。すなわち封じ込め溶鋼をFig. 7のような模型で考えると封じ込め溶鋼厚さ d_c (流動限界固相率以上の温度域で定義される溶鋼厚み)は(1)となる。

$$d_c = 2 d_1 \cdot \ell \cdot \omega / \alpha \cdot \ell_c \cdot \omega_c \dots\dots\dots (1)$$

d_c : 封じ込め溶鋼厚さ (mm)
 d_1 : 中心割れ平均厚さ (mm)

Table 4. Measured dimensions of center-line cracking and calculated dimensions of liquid pool.

Type	Center-line crack			Enclosed liquid pool		
	Width	Length	Thickness	Width	Length	Thickness
II	201mm	1173mm	260 μm	1300mm	1500mm	2.5(3.8)mm
III	300	1500	72	300	1500	5.8

* () was obtained on the assumption that porosity equivalent in volume to 50% of the cavity was generally scattered.

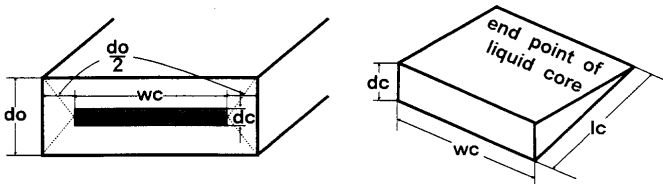


Fig. 7. Model of enclosed molten steel pool.

- ℓ : 中心割れの平均欠陥長さ (mm)
- ℓ_c : 中心割れの欠陥周期 (mm)
- α : 凝固収縮率
- ω : 中心割れの平均巾 (mm)
- ω_c : 封じ込め溶鋼巾 (mm)

ここで ℓ , ℓ_c , ω は該当鋼片のUST結果、 d_1 はSEMによる測定結果を用い、 $\omega_c = (\text{鋼片巾} - \text{鋼片厚})$ と考えると d_c が計算出来る。なお、凝固収縮率は固体・液体の密度を $\rho_s = 7.20\text{g/cm}^3$, $\rho_l = 7.02\text{g/cm}^3$ として³⁾計算した。その結果をTable 4に示す。封じ込め溶鋼厚さは島状欠陥では約3~4mm、連続型欠陥では約6mmである。またUST欠陥周期1ピッチに相当する溶鋼厚さ(凝固先端位置より1.5m離れた位置の溶鋼厚さ)を計算すると、铸造速度1.0m/minの場合に約9.2mmである。以上の結果より、封じ込め溶鋼厚さは10mm以下のオーダーであると考えられる。

本論文では封じ込め溶鋼厚さとして欠陥の形状の点から測定誤差が小さいと考えられる連続欠陥の実測値から求めた厚さ6mmを以下の考察に使用した。

4.2 中心割れの発生機構

4.2.1 凝固先端形状のモデル

連鑄における凝固先端近傍の固液界面はある一定周期の波状を呈すると仮定し、その模式図をFig. 8に示した。波の周期(T)には種々の鑄造条件、注水スプレー配置、ロール円周等が影響し、実際にはそれらの合成波、 $\sum a_i \sin 2\pi x / T_i$ (a_i : 振幅 T_i : 空間周期[m], x : 鑄造方向の距離[m])が形成されていると考えられる。Fig. 8で凝固先端のなす角度 2θ に対して、合成波の振幅 a が充分大きく、凝固先端より上流側で、円弧上側と下側の固相面が合致する場合に、溶鋼の封じ込めが発生すると考えられる。すなわち、

$$f(2\theta, \sum a_i \sin \alpha_i t) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

なる一般式に対してその解が存在する条件が溶鋼封じ込めの条件である。今単純に凝固末期の加速凝固を無視して、 θ を推定すると

$$\theta = \tan^{-1}(k^2 / (d_0 V)) \dots\dots\dots (3)$$

$2 d_0$: 鑄片厚さ (mm)

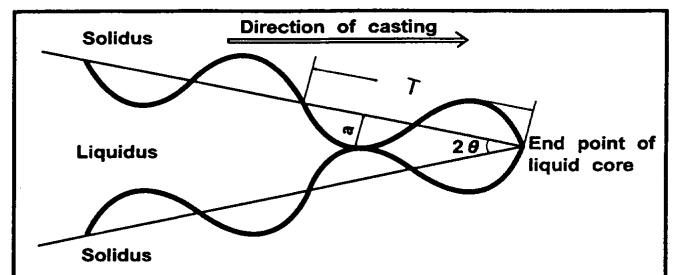


Fig. 8. Model of solidus-liquidus interface at final solidification point.

- V : 鑄造速度(m/min)
- k : 凝固定数(mm/min^{1/2})

である。(3)式において $k=27.5\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ⁴⁾, $2d_0=252\text{mm}$ とすると, $V=0.8\text{m}/\text{min}$ に対し, $2\theta=0.43^\circ$, また $V=1.5\text{m}/\text{min}$ に対し $2\theta=0.23^\circ$ と非常に小さい値となる。このように凝固先端近傍での溶鋼厚さの鑄造方向に対する角度は極めて小さく固液界面に周期の合成波が存在するならば, 容易に上・下面の凝固先端がくっつき, ブリッジを形成することが予想される。

4.2.2 中心割れの周期と連鑄設備との関係

中心割れが明瞭な周期をもつことから, その発生機構には連鑄機固有の設備上の周期が関与していると考えられる。Table 5に設備上の周期をまとめた。中心割れ周期(1・2連鑄機=1.5m, 3・4連鑄機=1.4m)に合致する設備上の周期は, 矯正点を含む円弧部から水平部に至る各ロールの円周である。この事実からロール円周に係る機械的なもの, 例えばロールの偏心運動, 偏摩耗等のロール不整が大きく影響していると考えられる。

4.2.3 封じ込め発生位置の推定

連鑄鑄片の凝固厚(d)は次の(4)式で計算される。

$$d=k(L/V)^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

L: メニスカスからの距離(m)

(4)式に $k=27.5$, $d=252/2=126\text{mm}$ を代入し矯正点(L=16.7m)で凝固が完了する鑄造速度を求めると0.80m/minとなる。一方矯正点で未凝固厚6mmとなる鑄造速度は0.85m/minとなる。この2つの計算値を基にして中心割れの発生位置を考察する。

中心割れが発生しやすい鑄造速度と速度変動の関係を考えると鑄造速度が0.87m/minおよび0.93m/minの時に占積率最大となる速度変動量は, それぞれ, $-0.1\text{m}/\text{min}$, $-0.3\text{m}/\text{min}$ であった。いずれの場合も, 矯正点より下流にあった未凝固溶鋼先端が速度変動により, 矯正点の上流に移動したことになる。即ち矯正点を未凝固厚み6mm以下で鑄片が通過する条件に相当する。さらにロール円周と中心割れ周期の関係を考えあわせると, 矯正点付近のロールで封じ込めが発生していると考えられる。これは矯正点には曲げ戻

Table 5. Specifications of rolls of each caster.

Caster	No. 1, No. 2		No. 3		No. 4		
	C(mm)	R.P(mm)	C(mm)	R.P(mm)	C(mm)	R.P(mm)	
Curved section rolls	503 ~ 1508	191 ~ 530	424 ~ 1290	173 ~ 460	565 ~ 1210	218 ~ 434	
Horizontal section rolls	I	1571	635	1382	530	1319	471
	II	1571	685	1382	580	1351	485
	III	—	—	1382	640-690	1288	420

C:Circumference, R.P:Roll Pitch

し矯正応力が加わるうえに, 鑄造速度が1.0~1.2m/min程度の場合, 凝固先端バルジング量が最大になり⁵⁾, その矯正応力が加わること等の過酷な条件が重なることにより, ロール不整やロール摩耗等が発生しやすくなる。このようにして生じた矯正点部のロール不整が中心割れの原因となっていると考えられる。

4.3 中心割れ発生危険鑄造速度領域の存在

4.3.1 危険鑄造速度領域の考え方

中心割れは溶鋼厚さが約6mm以下の凝固先端近傍において封じ込められた溶鋼が凝固する際に生じる収縮孔であると考えられる。それ故矯正点において溶鋼厚さが6~0mmとなる鑄造速度および速度変動の範囲を求めればそれが中心割れの発生確率の高い操業条件すなわち危険鑄造速度領域であると考えられる。溶鋼厚さが0mmおよび6mmとなる鑄造速度を $V_{d=0}, V_{d=6}$ とすると

$$V_{d=0} \leq V + \Delta V \leq V_{d=6} \dots\dots\dots(5)$$

が危険鑄造速度領域となる。つまり, 鑄造速度変動がある場合の危険鑄造速度領域は, 定速鑄造時の場合よりも領域が拡大することになる。(5)式を変形すると

$$\text{加速時: } V_{d=0} - \Delta V < V < V_{d=6} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{減速時: } V_{d=0} < V < V_{d=6} + (-\Delta V) \dots\dots\dots(7)$$

で表される。この(6)(7)式をあわせた鑄造速度範囲が, 中心割れ発生危険鑄造速度領域に相当する。

4.3.2 矯正点における危険鑄造速度領域

矯正点における危険鑄造速度領域は(4)(6)(7)式に対し, $L=16.7$, $k=27.5$, $d_0=126$ を代入することにより求めることが出来る。1号連鑄機に対して計算した結果をFig. 9に示した。また, 同図には通常操業における中心割れの発生実績も示した。

中心割れが発生した鑄片の大部分は危険鑄造速度領域の内部もしくはその近傍に分散していて, 中心割れはこの危険鑄造速度領域内で発生確率が高いことを示している。従って中心割れは矯正点近傍で発生したものがきわめて多いことを実証している。

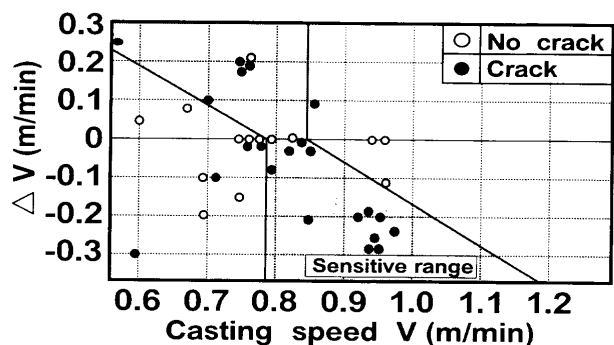


Fig. 9. Crack-sensitive range for No.1 CCM UBP roll.

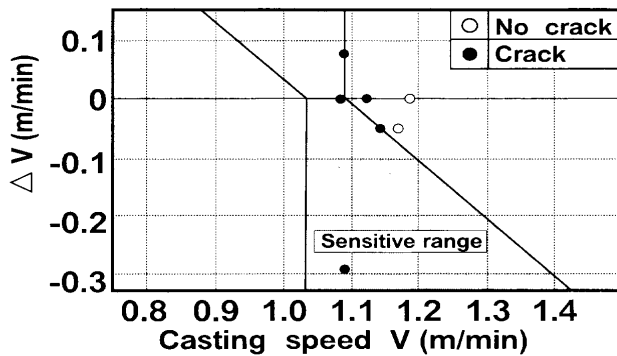


Fig. 10. Crack-sensitive range for No.1 CCM #50 roll (Eccentric roll test).

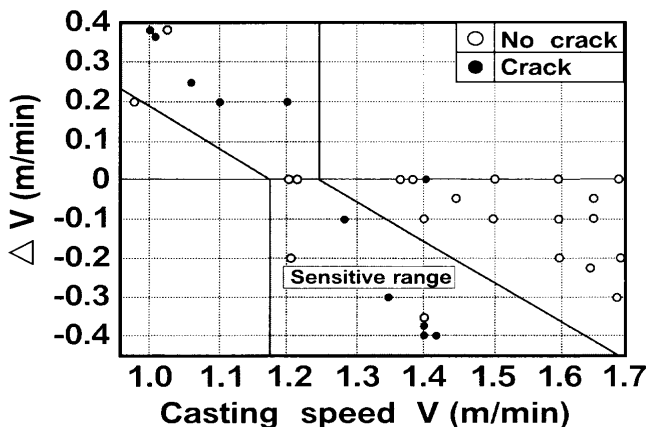


Fig. 11. Crack-sensitive range for No.4 CCM #60 roll (Bulging type test).

4・4 人工的なロール不整による発生機構の確証

連鋳機内に種々の人工的なロール不整を故意につくり、中心割れの発生機構を確証することを試みた。

4・4・1 偏心ロール型の不整

1号機の#50ロール(L=21.2m)に偏心ロール(偏心量=4mm)を設置し、鋳造速度=1.1~1.2m/minで鋳造し、中心割れの発生状況を調査した。その結果をFig.10に示す。またFig.10には#50ロールに相当する危険鋳造速度領域も示し、鋳造結果と対比させた。計算で求めた危険鋳造速度領域に対し、1鋳片のみが推定結果と異なったが、鋳造速度変動がきわめて小さい場合においても中心割れが発生した。偏心ロールは中心割れが最も発生しやすいロール不整であることがわかる。

4・4・2 バルジング型の不整

4号機の#60ロール(L=24.4m)のロール間隔を上下面(L,F面)それぞれ1.2mmずつ大きくし、鋳片に2.4mmのバルジングが発生するようにロール不整をつくった。1.0~1.7m/minの鋳造速度で鋳造した結果をFig.11に示す。またFig.11には#60ロールに相当する危険鋳造速度領域も示した。中心割れが発生した大部分の鋳片がこの危険鋳造速度領域内で鋳造された鋳片であり、前述した中心割れの発生機構および危険鋳造速度領域の考え方が正しいことが判る。

5. 連鋳操作における中心割れ減少対策

連鋳技術の進歩とともに連鋳機の改善がなされ、現在では連鋳機の剛性も増し、小径ロール、小ロールピッチに代表される高速鋳造用連鋳機が稼働する時代となった。

そのため稼働当初から中心割れが発生するというトラブルは極めて少なくなってきた。しかし、現在の優れた連鋳機においても、機械特に連鋳ロールの老朽化とともに中心割れが発生し、連鋳技術者を悩ませることが多い。

中心割れの減少対策は、前述した中心割れの発生機構から、危険鋳造速度領域を避けて操作することである。即ち、未凝固溶鋼の先端が矯正点を越えた高速鋳造を志向する場合には、

(1) 鋳造速度変動を考慮したうえで矯正点での未凝固厚が6mm以上になるように鋳造速度を設定する。

(2) ロール不整が発見された時は、そのロールを対象に危険鋳造速度領域を計算し、それを避けて操作を行う。

(3) 直線部のロールアライメント管理を徹底して行う。の3点が重要なポイントとなる。

以上の3点に留意して操作を実施した結果、大分製鐵所において中心割れは大巾に減少した。それ故この中心割れに対する危険鋳造速度領域の考え方は高速鋳造を支える操業技術の大きな一つの柱となっている。

6. 結言

金相学的手法を主体とした中心割れの実態調査および操業実態の解析を基礎にして、湾曲型連鋳機に発生する中心割れの発生機構を考察し、以下の結論を得た。

(1) 中心割れは凝固先端近傍で封じ込められた溶鋼が、凝固する際に生じた収縮孔であり、凝固収縮率をもとに封じ込め時の溶鋼厚さを計算すると約6mmである。

(2) 中心割れの発生周期は矯正点から水平のロール円周に合致し、凝固先端近傍のロール偏心等の不整が影響していると考えられる。

(3) 溶鋼厚が0~6mmになる鋳造速度を矯正点あるいは不整ロールに対する「危険鋳造速度領域」と定めることが出来る。

文 献

- 1) 原田慎三, 草野昭彦, 千葉 仁, 三隅幸幸, 羽田 淳: 鉄と鋼, 63 (1977), S142.
- 2) 原田慎三, 草野昭彦, 千葉 仁, 三隅幸幸, 羽田 淳: 鉄と鋼, 63 (1977), S143.
- 3) 溶鉄溶滓の物性値便覧, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1971), 8.
- 4) 川和高徳, 佐藤秀樹, 宮原 忍, 小谷野敬之, 根本秀太郎: 鉄と鋼, 60 (1974), 206.
- 5) 井上俊朗, 田中英記: 製鉄研究, 204 (1978), 9.