

連鑄鑄片の表面割れの連鑄機内での発生位置の推定

草野 昭彦*・三隅 秀幸*²・原田 慎三*³

Estimation of the Formed Position of the Surface Cracks on the Slab in the Continuous Caster

Akihiko KUSANO, Hideyuki MISUMI and Sinzō HARADA

Synopsis : When surface cracks on continuously cast slab were observed by a microscope, internal oxidation layers were sometimes present along the cracks. Attention was paid to these layers which are called subscales for the estimation of the formed position of the surface cracks in the continuous caster.

First, the subscale was formed on the test sample in the laboratory under the cooling condition of the continuously cast slab. Second, some kinds of cracks on the continuously cast slabs were collected, observed by a microscope and compared with the subscale of the former samples.

The results are summarized as follows.

- (1) The thickness of the subscale for the formed position in the continuous caster was calculated by the combination of the internal oxidation theories and the cooling curve of the slab.
- (2) The formed position of five kinds of cracks were considered as follows.
 - (i) The small longitudinal crack was formed in the mold and enlarged in secondary cooling zone.
 - (ii) The horizontal crack had the initiation point of crack existing in the secondary cooling zone and was enlarged at the unbending point.
 - (iii) The star crack and C-crack were formed in the mold or just under the mold.
 - (iv) The edge crack was formed at the unbending point.

Key words : continuous casting ; oxidation ; carbon steel ; surface crack ; subscale.

1. 緒言

近年、省エネルギーの1つの手段として熱片直送が盛んとなってきた¹⁻⁴⁾。この熱片直送を可能とするためには、手入れ不要の高温の鑄片を製造しなければならず、そのために表面疵を防止する技術が重要となっている。鑄片表面の欠陥には横割れや縦割れ、ヒビ割れ等の割れと表層介在物(ノロカミ等)や気泡性欠陥がある。これらの表面欠陥の内、割れを減少するためには連鑄機内での発生位置を推定し、その発生機構を明確にして、的確な防止対策を採用しなければならない。

ここでは連鑄機内での割れの発生位置を推定する1つの方法として、割れの近傍に存在する酸化物の析出層(以下「サブスケール」と称す)に着目した。

実験室にて実機の連鑄機と同一の冷却条件にて冷却したサンプルから、そのサブスケールの厚みおよび析出粒子の大きさをあらかじめ測定しておけば、連鑄鑄片に発生した割れを採取してそれと対比することにより、連鑄機内での割れの発生位置が容易に推定出来る。

本報では、既報⁵⁾のサブスケールの生成機構を基に連鑄鑄片の割れサンプルを調査することにより、連鑄機内での割れの発生位置を推定したので報告する。

2. 実験方法および調査方法

2・1 連鑄機シミュレーション試験方法

実機の連鑄機の冷却条件と同一条件にて冷却された鑄片のサブスケール厚および析出粒子の大きさをあらかじめ測定するためサブスケールを実験室的に生成させた。

2・1・1 試験装置およびサンプル

試験装置およびサンプルは既報⁵⁾と全く同じものを使用した。即ち、試験装置はFig. 1に示す雰囲気調整が出来る横型電気抵抗炉を使用した。またサンプルはTable 1に示す成分の一般の炭素鋼であり、引張り試験機を利用してサンプル内に割れを生成させたものである。

2・1・2 試験条件

Table 2に試験条件を示す。ビューレットより水を30ml/minの速度で滴下し、水蒸気雰囲気とした。

平成7年7月19日受付 平成7年9月25日受理 (Received on July 19, 1995; Accepted on Sep. 25, 1995)

* 新日本製鐵(株)チタン部(Titanium Div., Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku Tokyo 100-71)

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

* 3 産業振興(株)(元:新日本製鐵(株)大分技術研究部)(The Sangyo Shinko Co., Ltd., formerly Oita R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

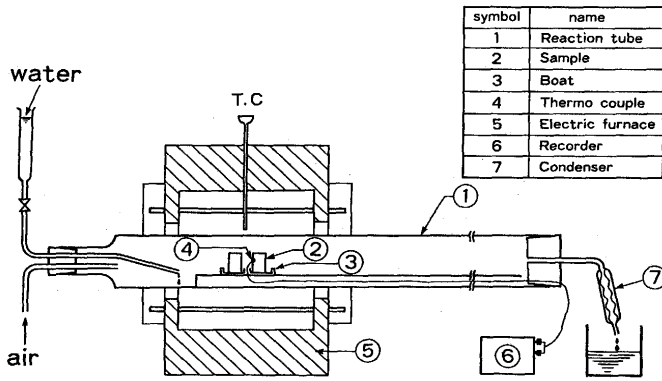


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Chemical composition of samples.

(mass %)			
C	Si	Mn	Al
0.149	0.159	0.49	0.017

Table 2. Experimental conditions.

Flow rate of mixed gas	Water=30(ml/min) Air= 0(ml/min)				
Temperature and Time	Run No.	1	2	3	4
	Temp. at start point (°C)	1250	1000	900	850
	Cooling times(min)	39	36	32	25

また鑄片の温度履歴をFig. 2に示す。この温度履歴は実機での連鑄鑄片内の温度分布を伝熱計算により算出したものであり、厚さ250mmの鑄片を鑄造速度1.0m/minで鑄造した場合の表層下7.5mm点に相当するものである。この温度履歴を得るため、反応管内の温度差を利用し、ボートを動かすことにより、Fig. 2の温度曲線に添ってサンプルを移動させ冷却した。最後に、炉からサンプルを取り出し、反応管出口部にてアルゴンガスを吹付け、冷却した。

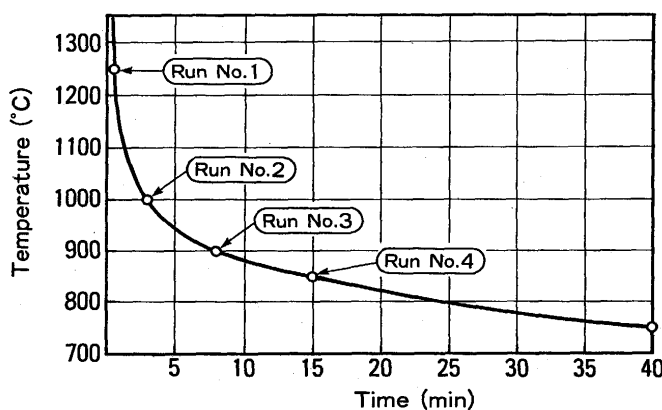


Fig. 2. Cooling curve of samples.

2.1.3 調査項目および測定方法

試験サンプルの割れ近傍に存在するサブスケールの厚みおよび析出物の大きさを顕微鏡にて既報⁵⁾と同じ方法で調査し測定した。

2.2 連鑄鑄片の割れの調査方法

連鑄鑄片に現れる実在の割れを種々採取し、これらの割れ近傍のサブスケールを顕微鏡にて観察した。

2.2.1 鑄片の製造履歴

新日本製鐵(株)大分製鐵所の1~2号連鑄機により鑄造された鑄片から疵サンプルを採取した。連鑄機の設備仕様およびその鑄造概要をTable 3に示す。鑄片の成分はTable 1とほぼ同一の炭素鋼であり、鑄造速度が1.0~1.1m/minで鑄造した250mm厚の鑄片である。

2.2.2 調査方法と調査項目

(1) サンプルの種類

縦割れ、横割れ等5種類の割れを採取した。これらの割れの種類とサンプル数をTable 4に示す。尚、Fig. 3に割れの名称とその形態を明確にするため模式図を示した。

(2) 調査方法および調査項目

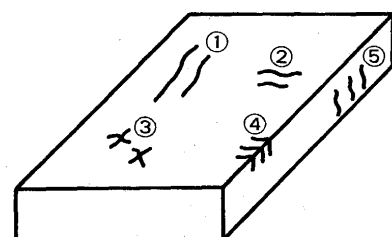
割れ部を鑄片表面に対し、垂直に切断し顕微鏡にてサブスケールを観察した。調査項目は、割れの深さおよびサブスケールの厚みと析出粒子の径およびその形態(既報⁵⁾参照)であり、シミュレーション試験と同様の方法で測定した。

Table 3. The specifications of continuous casters in Oita Works.

(1) Machine type	Bending type
(2) Radius of curvature (m)	10.5
(3) Machine length (m)	28.2
(4) Mold length (mm)	900
(5) Secondary cooling zone (m)	0.9 ~ 28.2
(6) Distance from meniscus to unbending point (m)	16.7
(7) Thickness of slab (mm)	250
(8) Casting speed (m/min)	1.0 ~ 1.1

Table 4. Number of samples for cracks.

Name of crack	Longitudinal crack	Horizontal crack	Star crack	Edge crack	C-crack
Number of samples	15	6	12	4	2



① Longitudinal crack ② Horizontal crack
③ Star crack ④ Edge crack ⑤ C-crack

Fig. 3. Schematic cracks on continuously cast slabs.

特に疵の開口巾が $3\mu\text{m}$ 以下の割れの先端部を中心に観察した。その理由は、開口巾が $3\mu\text{m}$ 以下になる割れの先端部では生成したサブスケール厚に比較し、酸化によりスケールになった地鉄の厚みがきわめて小さく正確なサブスケール厚が測定出来るからである⁵⁾。

3. 試験結果および調査結果と考察

3.1 連铸機シミュレーション試験結果

各試験条件におけるサブスケールの顕微鏡写真をFig. 4に示す。また顕微鏡観察の結果として得られたサブスケールの厚みおよびその内の析出物の大きさおよび形態をTable 5に示す。サブスケール厚は冷却開始温度が高く、炉内時間が長いもの程大きい。特にRun No. 1 (モールド直下で割れが発生したと推定)のサブスケール厚は約 $25\mu\text{m}$ であるのに対し、No. 4 (アンベンディングポイントで割れが発生したと推定)のそれは約 $5\mu\text{m}$ と大きな差を生じている。一方、析出物の大きさとその形態はRun No. 1を除いて冷却スタート付近の温度とほぼ対応している。Run No. 1は $1250\sim 1100^\circ\text{C}$ 付近での冷却速度が大きいため粒子が成長するに十分な時間がなかったためと考えられる。

3.2 サブスケール厚の実測値と計算値との対応

3.2.1 サブスケール厚の計算方法

鋳片の割れ近傍に生成するサブスケール厚(ξ_s)は、C. Wagnerの内部酸化理論より導かれたサブスケール厚に関する式⁶⁾と三吉らにより導かれたスケールの生成厚に関する式⁸⁾を組み合わせることにより、一定温度の条件下においては既報で示したように(1)式から計算出来る⁵⁾。

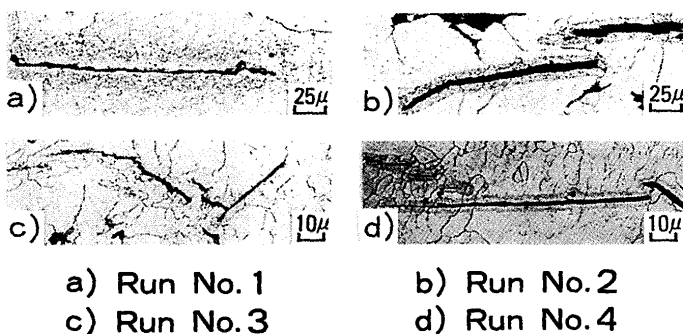


Fig. 4. Photographs of subscale of the simulated test sample.

Table 5. Results of the observation of subscale for simulated test samples.

Run No.	Thickness (μm)	Type	Dia. of particle (μm)
1	24.6	D	0.22
2	10.0	C	0.15
3	6.3	B	0.17
4	5.2	A	0

$$\xi_s = \left(\frac{2N_o D_o t}{\nu N_B} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ξ_s : サブスケール厚 (mm)

N_o : メタルスケール界面での酸素濃度 (mass%)

N_B : 析出物を生成するB成分の鉄中の濃度 (mass%)

D_o : 鉄中の酸素の拡散定数 (mm^2/s)

ν : B成分の酸化物の形態を BO_ν とする

t : 時間 (s)

しかし連铸機を通過する鋳片の温度は時間(t)の関数であり、それに伴って N_o , D_o もtの関数となるので ξ_s はtの関数となる。それ故に連铸鋳片のサブスケール厚は(1)式では単純に計算出来ない。そのため ξ_s をtで微分し、各時間における微分係数を求め、その値を積分することにより連铸鋳片におけるサブスケール厚(ξ_M)を計算した。まず(1)式において時間(温度)の関数になっている項は N_o と D_o であるのでそれを考慮して(2)式を導いた。

$$\frac{d\xi_s}{dt} = \left(\frac{1}{2\nu N_B N_o D_o} \right)^{1/2} \times \left\{ D_o \cdot t \cdot \frac{dN_o}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} + N_o \cdot t \cdot \frac{dD_o}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} + N_o D_o \right\} \dots \dots \dots (2)$$

この(2)式を $t=t_1 \sim t_2$ の間で積分した(3)式は、連铸機において鋳片がメニスカス通過後 t_1 秒後に割れが生じ(t_2-t_1)秒間連铸機内を通過しスラブクーラーで冷却されるまでに生じたサブスケール厚(ξ_M)となる。

$$\xi_M = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\xi_s}{dt} \right) dt \dots \dots \dots (3)$$

3.2.2 サブスケール厚の計算値と実測値との対応

(3)式により ξ_M を計算した。ここでは下記の鋼中における物理定数を使って算出した。

$$\begin{aligned} D_o &= 2.14 \exp(-17.5 \times 10^3/RT)^{9)} && (\gamma\text{-Fe}) \\ D_o &= 0.24 \exp(-10.1 \times 10^3/RT)^{9)} && (\alpha\text{-Fe}) \\ N_B &= N_{Si} = 0.20\% && (\text{サンプル分析値}) \\ \nu &= 2^{5)} && (\text{SiO}_2 \text{と想定}) \\ N_o &= 0.0002 \sim 0.0017\%^{9)} && (\text{Fe-O系状態図}) \\ T &= f(t) && (\text{Fig. 2}) \end{aligned}$$

また dN_o/dT および dT/dt は図より所定の時間における接線の傾きを求めた。

$800\sim 1150^\circ\text{C}$ の各温度水準に対し $d\xi_s/dt$ と時間との関係を計算し、その結果をFig. 5に示す。 $d\xi_s/dt$ は温度の低下および時間と共に小さくなる。Fig. 5と(3)式より ξ_M を計算した。計算例として条件1(メニスカス通過後1分後に割れが生じ40分後に連铸機外に出た場合)の鋳片のサブスケール厚(ξ_{M1})を示すと

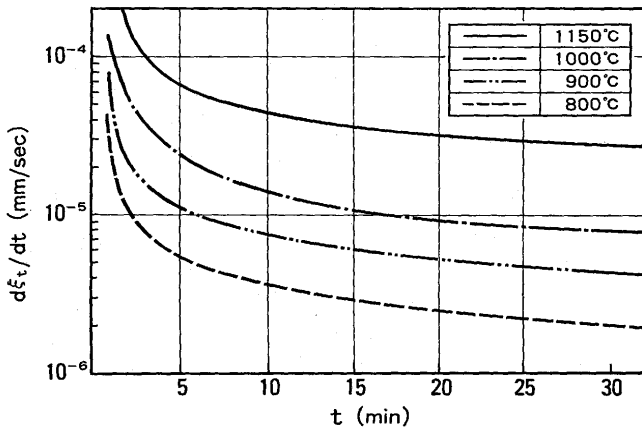


Fig. 5. Calculated value of $d\xi_t/dt$.

$$\begin{aligned} \xi_{M1} &= \int_0^{60} \left(\frac{d\xi_t}{dt} \right)_{1423} dt + \int_{60}^{120} \left(\frac{d\xi_t}{dt} \right)_{1323} dt \\ &+ \int_{120}^{420} \left(\frac{d\xi_t}{dt} \right)_{1223} dt + \int_{420}^{840} \left(\frac{d\xi_t}{dt} \right)_{1123} dt \\ &+ \int_{840}^{2340} \left(\frac{d\xi_t}{dt} \right)_{1023} dt \\ &= 27.1(\mu) \end{aligned}$$

となる。尚、上式において $(d\xi_t/dt)_T$ は温度 T における ξ_t の t に対する微分係数を表している。

同様の方法で各条件におけるサブスケール厚を計算した。この計算値とシミュレーション試験で測定された実測値との対応を Fig. 6 に示した。計算値と実測値はほぼ一致し、連铸機内で生じた割れのサブスケール厚は (3) 式により計算で求められることがわかった。

3.2.3 連铸機内の割れ発生位置とサブスケール厚の関係

铸片表層下 2.5, 7.5mm の位置に対し、铸片の冷却曲線を用いて (3) 式から ξ_M を計算した。その結果を Fig. 7 に示す。また連铸機内の特定点に対する ξ_M の値を Table 6 に示す。铸片表層部に近い程、铸片の温度が低い為、同一場所で割れが発生しても ξ_M は小さい。それ故、割れサンプルのサブスケール厚を測定し、Fig. 7 および Table 6 の ξ_M の値と対比

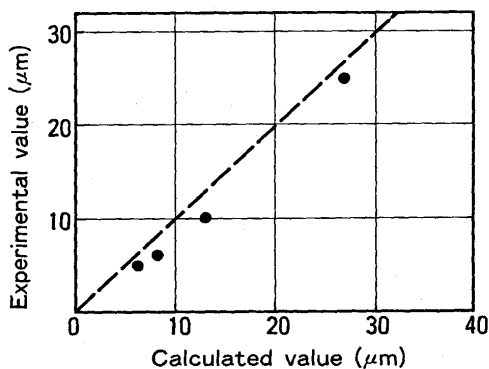


Fig. 6. Relationship between the calculated and experimental value on the thickness of sub-scale.

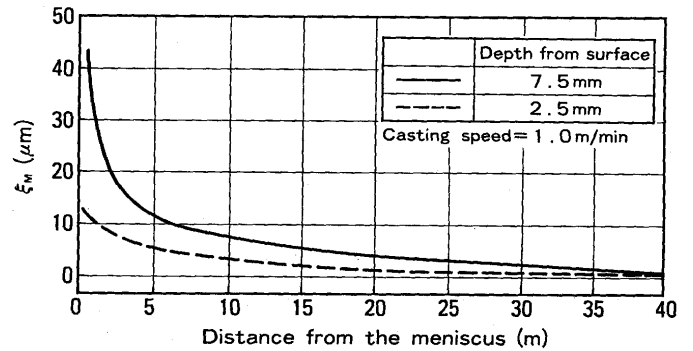


Fig. 7. Relationship between ξ_M and the distance from the meniscus.

Table 6. The value of ξ_M at the specific location on the continuous caster.

Depth from surface (mm)	Mold zone (0~0.9m)	Under the mold zone (0.9~1.2m)	Secondary cooling zone 1 (1.2~16.7m)	Unbending point (16.7m)
2.5	$\geq 10\mu\text{m}$	8~10 μm	3~8 μm	3
7.5	≥ 25	18~20	5~18	5

することにより、連铸機内での割れの発生位置が推定出来る。

3.3 割れの連铸機内での発生位置の推定

実在の連铸铸片に発生する種々の割れを採取し、サブスケールを顕微鏡で観察し、サブスケール厚の計算値ならびに実験室であらかじめ作成したサンプルと対比することにより、割れの連铸機内での発生位置を推定した。

3.3.1 縦割れ

サンプリングした縦割れは外観より次の2種類に分けられる。1つは铸片に通見られる長さ約100mm以上の大きな縦割れであり、もう1つは铸片をグラインダー研磨することにより見つけられる10mm以下の小さな縦割れである。前者の割れ深さが数mm~5mm程度であるのに対し、後者は1mm以下の浅いものである。この2つを分類して縦割れを観察した。大きな縦割れの代表写真は Fig. 8 であり、小さな縦割れは Fig. 9 である。またその観察結果を他の割れとともに Table 7 に示す。サブスケール厚は割れの大小にかかわらずほぼ5~10 μm である。割れ深さが1mm程度であれば5~10 μm のサブスケール厚でも Fig. 7 に示すようにモールドで発生したものと考えられるのに対し、割れの長さが100mm以上の大きな縦割れは深さが2.3~6.0mmでありモールド直下から二次冷却帯において発生したと考えられる。しかも割れ断面のサブスケールを観察すると、前者 (Fig. 9) がほぼ均一にサブスケールが発達しているのに対し、後者 (Fig. 8) は同一断面でもサブスケールが均一に発生していない。これらのことから大きな縦割れはモールド内で出来た小さな浅い縦割れが二次冷却帯により拡大したものか、または二次冷却帯で新たに生成したものと考えられる。

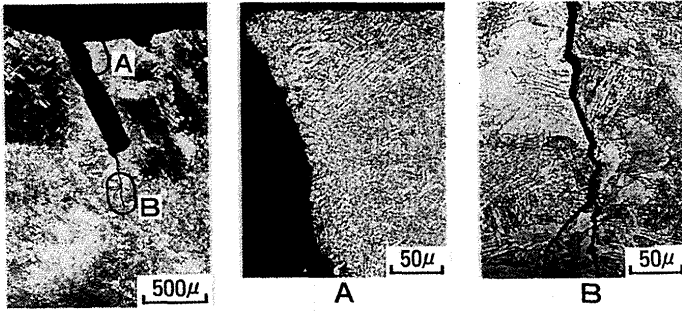


Fig. 8. Photographs of subscale for large longitudinal crack.

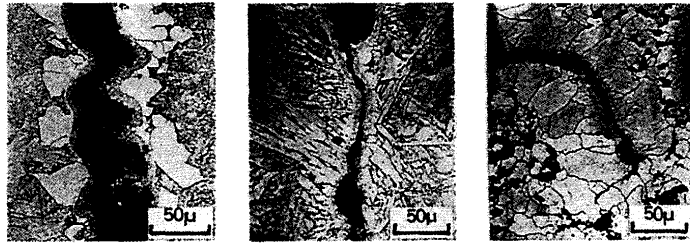


Fig. 9. Photographs of subscale for small longitudinal crack.

Table 7. Observation results for the surface cracks.

	Crack		Subscale
	Length(mm)	Depth(mm)	Thickness (μm)
Longitudinal crack(small)	5~10	0.5~1.0	5~10
Longitudinal crack(large)	100~300	2.3~6.0	5~10
Horizontal crack	13~130	2~5	5~10
Star crack	4~7	3~10	10~20
Edge crack	2~30	7~15	0
C-crack	20~50	2~5	10~65

3.3.2 横割れ

Fig.10に横割れの断面写真を示す。横割れは深さが2~5mm程度のものである。サブスケール厚は5~10μmであるが割れにクニクがあるものがあり、その先端にはサブスケールが存在しない。Fig.7をもとに考えるとクニクがある点までは比較的高温で発生したものであり、その後何らかの応力をうけ、疵が拡大したものと考えられる。それ故に横割れは発生源がアンベンディングポイント(以下UBPと略す)以前の二次冷却帯にあり、矯正応力がかかるUBP部で疵が大きく拡大するものと考えられる。

3.3.3 ヒビ割れ

Fig.11にヒビ割れの断面写真を示す。割れの深さも3~10mmと深く、サブスケール厚みも10μm以上と厚い。そのためモールド内もしくはモールド直下で発生したものと考えられる。

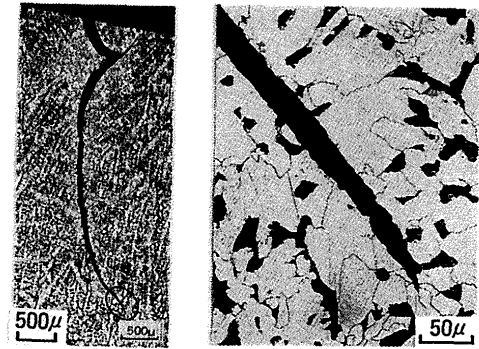


Fig. 10. Photographs of subscale for horizontal crack.

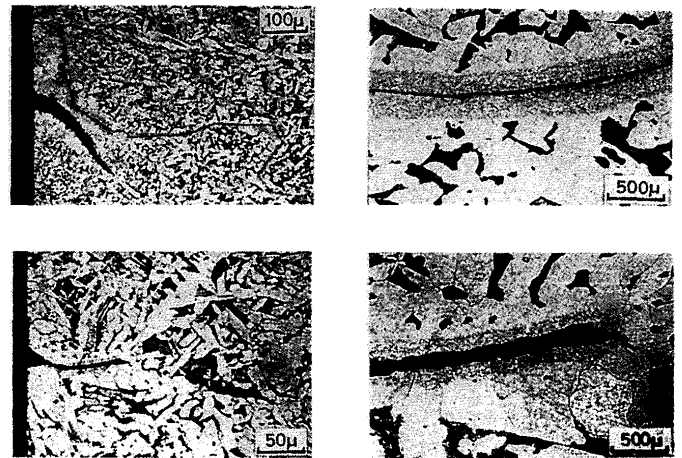


Fig. 11. Photographs of subscale for star crack.

またヒビ割れを「Cuプリント」¹⁰⁾で確認した。その結果「ヒビ割れ」については7サンプル中5サンプルにCuが検出された。これらの事実よりヒビ割れはモールド内もしくはその直下で発生したものと考えられる。

3.3.4 エッジ割れ

鋳片のエッジに発生する割れを「エッジ割れ」と呼んでいる。エッジ割れの断面写真をFig.12に示す。エッジ割れは深く、サブスケールが発達していない。そのため低温部で発生したものと推定され、発生位置としては矯正応力がかかるUBP部と考えられる。

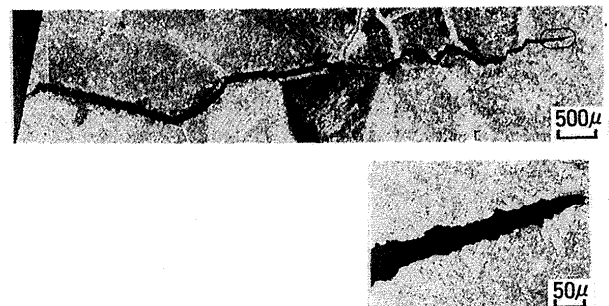


Fig. 12. Photographs of subscale for edge crack.

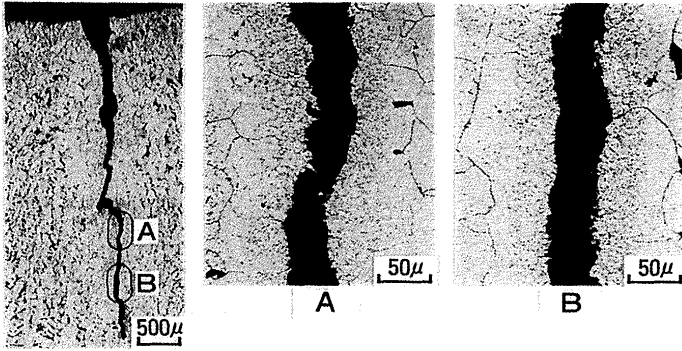


Fig. 13. Photographs of subscale for C-crack.

3・3・5 C-割れ

スラブの側面に発生する割れを「C-割れ」と呼んでいる。C-割れの断面写真をFig.13に示す。C-割れはサブスケール厚が10~65 μm ときわめて大きく、高温域で発生した典型的な形態を示している。発生位置としてはモールド内もしくはモールド直下と考えられる。

4. 結言

連铸铸片に発生する割れの連铸機内での発生位置を割れ近傍に発生するサブスケールの観察から考察し、次の結果を得た。

(1) 内部酸化理論と連铸铸片の温度履歴を組合せることにより、割れの発生位置に相当した铸片のサブスケール厚

が計算で求められる。

(2) サブスケールの厚み、析出物の大きさおよび形態を測定することにより、割れの発生位置を推定することが出来る。

(3) 5種類の割れサンプルを調査することにより発生位置を推定した。

(i) 縦割れはモールド内で発生し、二次冷却帯で拡大され、大きくなるものが多い。

(ii) 横割れは発生源がUBP以前の二次冷却帯にあり、UBP部で疵が拡大する。

(iii) ヒビ割れおよびC-割れはモールド内もしくはモールド直下で発生する。

(iv) エッジ割れはUBP部で発生する。

文 献

- 1) 森玉直徳, 沖森麻佑己, 池崎英二, 磯上勝行: 鉄と鋼, 74(1988), 1227.
- 2) 内堀秀男, 谷口 勲, 手嶋俊雄, 沖本一生, 正岡俊夫: 鉄と鋼, 74(1988), 1235.
- 3) 吉田克磨, 木村智彦, 渡部忠男, 三島健二, 小原元良: 鉄と鋼, 74(1988), 1240.
- 4) 野口 計, 品川裕明, 俵 正憲, 山上哲也: 鉄と鋼, 74(1988), 1248.
- 5) 草野昭彦, 三隅秀幸, 原田慎三: 鉄と鋼, 81(1995), 52.
- 6) C.Wagner: Z.Electrochem., 63 (1959), 772.
- 7) C.Wagner: Z.Metallkunde., 52 (1961), 545.
- 8) 三吉康彦: 社内報告, (1975), 私信.
- 9) J.H.Swisher and E.T.Turkdogan: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), 426.
- 10) 武井格道, 二村英治, 山崎精一: 鉄と鋼, 51(1965), 217.