

討10 連铸スラブの縦割れの形成におよぼす鑄型内緩冷却の影響

川崎製鉄 技研 木下勝雄、北岡英就、戸村寿孝、江見俊彦
千葉 越川隆雄、反町健一、草野清正

1. 緒言

連铸スラブの縦割れは、Cが0.12%程度の組成の鋼を高速铸造すると多発し、鑄型内凝固時に形成されると考えられる。縦割れの形成機構と低減方法を明らかにするため、スラブ鑄片に発生した縦割れの形態を調べた。次にC=0~1%の鋼を浮揚溶解装置で溶解し、銅製およびステンレス製の割鑄型に鑄込み(キャストピンテャー試験)、ピンに発生した割れの形態、割れの発生とC濃度、冷却速度の関係を明らかにした。以上の結果に基づき、通常の鑄型に比較しスラブ幅中央部での冷却を緩和した鑄型を製作し、実機鑄造に適用し縦割れの低減を計った。

2. 実験方法

2. 1. 縦割れの形態調査

Cが0.12%程度の40キロ級厚板向スラブの割れ発生部からサンプルを切出し、Kalling氏液で腐食し、割れ近傍の断面組織を観察し、デンドライトの2次アーム間隔、割れ先端附近の偏析を調べた。

2. 2. キャストピンテャー試験²⁾

表1に示す組成のスラブから、約7gの試料を切出し、浮揚溶解装置でHe雰囲気下で溶解した後、直ちに試料を図1に示したピン形状の銅製割鑄型(Mold A)に鑄造し、凝固ピンに発生した割れ長さを測定した。割れ発生位置での試験片の全周長に対する割れ周長の比を割れ指数とした。割れ指数におよぼす冷却速度の影響を銅鑄型と寸法の等しいsus304鑄型で調べた。また、割れ指数におよぼす凝固収縮変位量の影響を、銅鑄型の高さを変えて調査した(図-1 Mold A, B, C)。ピンに発生した割れの形態を調べるとともに、割れの発生・伝播時期を知るため、ピンの凝固途中のAcoustic Emission(以下AEと略す)の測定と測温を行った。

2. 3. スラブ幅中央部緩冷却鑄型を用いた鑄造実験

通常連铸鑄型の測温結果からメニスカス直下の幅中央部が強冷されていることがわかったので、図2上に示す通常鑄型(Mold U)の水冷スリット配列を図2下に示すように変えた試験鑄型(Mold T)を試作した。鑄型の試作に際し、鑄型内熱流束、 q は(1)~(3)式によりスリット内冷却水線速度、 U_w から求めた。

$$q = h(T_s - T_w) \dots\dots(1)$$

$$\frac{1}{h} = \frac{P}{2(d+w)} \cdot \frac{1}{hw} + c \dots\dots(2)$$

$$hw = K \cdot U_w^{0.8} \left(\frac{d+w}{2d_w}\right)^{0.2} \dots\dots(3)$$

ここで、 h : 総括熱伝達係数、 T_s 、 T_w : 溶鋼、冷却水温度
 C = 凝固殻、スラグ膜、銅板等の伝熱から決る定数、 hw : スリットの冷却水熱伝達係数、 d 、 w 、 P : スリットの幅、深さ、間隔、 K : 定数

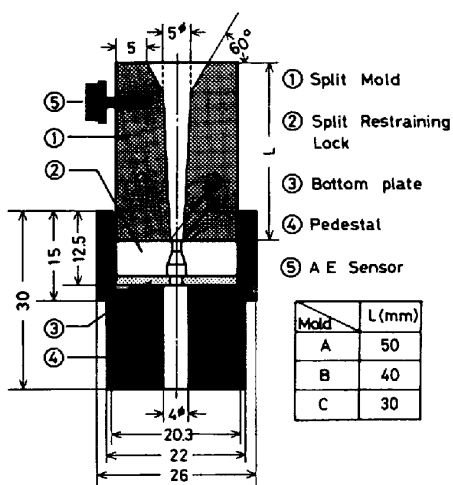


図1 キャストピンテャー試験鑄型

表1 供試材の化学組成

No.	Pure iron					
	C	Si	Mn	P	S	Al
1	0.05	---	0.33	0.016	0.009	0.110
2	0.08	0.20	0.71	0.020	0.015	0.006
3	0.10	0.20	0.72	0.020	0.002	0.006
4	0.11	0.22	0.99	0.019	0.005	0.041
5	0.13	0.16	0.68	0.024	0.016	0.020
6	0.13	0.21	0.62	0.021	0.011	0.003
7	0.14	0.19	0.65	0.031	0.019	0.028
8	0.15	0.19	0.59	0.018	0.015	0.035
9	0.17	0.18	0.83	0.021	0.012	0.001
10	0.19	0.21	0.68	0.027	0.014	0.003
11	0.20	0.19	0.73	0.020	0.015	0.002
12	0.25	0.23	1.05	0.020	0.005	0.003
13	0.30	0.23	1.06	0.020	0.012	0.004
14	0.40	0.26	1.37	0.019	0.008	---
15	0.50	0.25	0.69	0.019	0.008	0.025
16	0.65	0.27	0.92	0.017	0.008	---
17	0.89	0.27	0.46	0.014	0.008	---

U w は冷却水ヘッダー内水圧を一定としてスリット寸法ごとに圧損を考慮して求めた。一方、鋳型内熱流束は図2 Mold T の各位置に熱電対を埋設して求めた。

垂直逐次曲げ連鋳機に試験鋳型を使用し、Cが0.12%程度および0.17%程度の40キロ級厚板溶鋼をパウダー、鋳造速度を変えて鋳造した。実験チャージの定常鋳込部で10分間鋳型内測温を行い、各測定点の平均熱流束を求め、測温時期に相当する位置からスラブを採取し、約2mm厚の表面溶削を行った後、カラーチェックにより縦割れ発生長さを調べた。

3. 実験結果と考察

3. 1. 縦割れの発生形態

スラブ表面に凹みを伴う縦割れの断面マイクロ組織の1例を写真1に示す。割れ先端から内部に向けデンドライト主軸に沿って偏析が認められる。²⁾この偏析は凝固の過程でデンドライト主軸間が開口し溶質濃化溶鋼を吸引したものと考えられ、調査した縦割れ試料のすべてに認められる。縦割れはこの偏析を連ねておきているから縦割れを防止するためには偏析を防止することが重要である。偏析はいずれもスラブ表面から6mm以下の範囲に存在する。凹みを伴う割れ周囲のデンドライト2次アーム間隔は、図3に示すように、幅方向に変化し、割れを中心とした凹み部で増加する。この傾向は表面から6~9mmの深さで顕著であることから、凹みは、割れと同じくシェル厚が6mm以下の時期に形成されたと推察される。

以上から、縦割れやその誘因となる偏析は、凝固シェル厚が6mm以下、発生位置に換算するとメニスカス下約100mm以内の位置において発生することがわかった。縦割れを防ぐにはフラックスの均一流入を計り、かつメニスカス直下での冷却を制御する必要がある。

3. 2. C鋼の凝固の割れ発生におよぼす冷却速度の影響

キャストピンに発生した割れ破面はデンドライト状でピン表面の割れに凹みを伴う場合が多い。ピンの凝固過程の測温およびA E測定結果から、この割れも凝固完了前に発生したものである。すなわち、キャストピンの割れはスラブの縦割れと形態が良く似ている。

銅鋳型とSUS鋳型(いずれもMold A)について得られた割れ指数とC濃度の関係を図4に示す。銅鋳型について、割れ指数(白丸印)はC濃度とともに増加しC = 0.12~0.15%で極大値を示す。一方、SUS鋳型を用いると、割れ指数(黒丸印)は著しく減少しC濃度とともに単調に増加し、C = 0.12~0.15%におけるピークは消滅する。これはC = 0.12~0.15%の割れは冷却速度を小さくすることにより低減できることを示している。割れの発生におよぼす冷却速度の影響を検討するため、銅およびSUS鋳型について割れ発生時

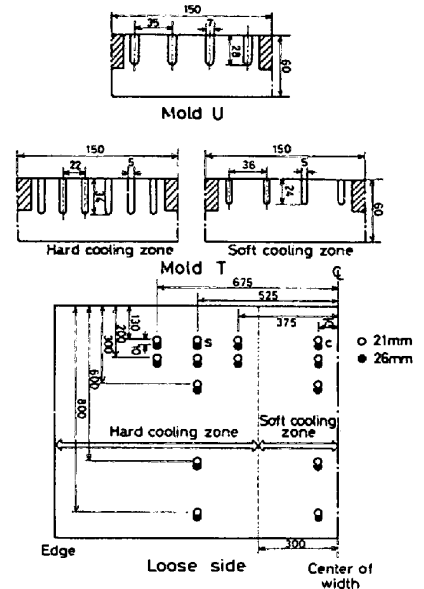


図2 通常および試験鋳型のスリット配列

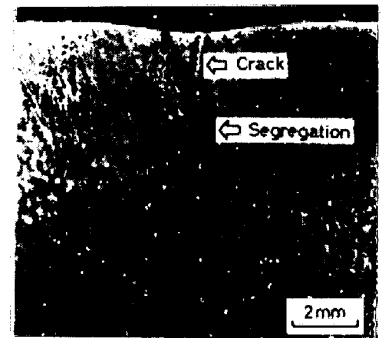


写真1 縦割れの断面マイクロ組織

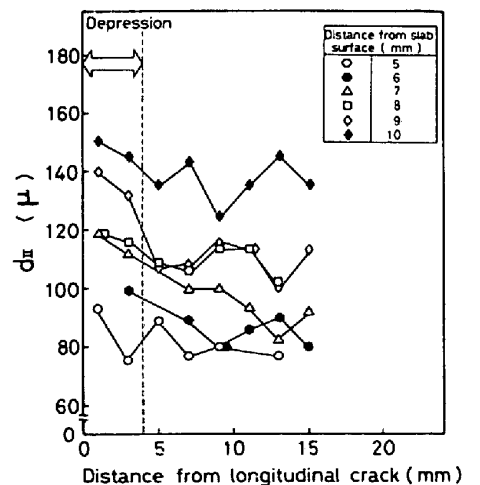


図3 割れ周囲のデンドライト2次アーム間隔

のピン内の温度分布から弾性計算によりピン内の応力分布を求めた(図5)。ピン表面に発生する引張応力 σ_z をヤング率の温度依存性³⁾を考慮して抗張力 $\sigma_{T.S}$ ⁴⁾と比較すると、 $\sigma_z/\sigma_{T.S}$ はSUS鋳型の方が銅鋳型より小さく、SUS鋳型で割れが軽減することがわかった。

図6に高さの異なる銅鋳型について得られた割れ指数とC濃度の関係を示す。C=0.12~0.15%の範囲で最大となる割れ指数(Mold A, 50mm)は、ピンの高さが小さくなるにつれ減少し(Mold B, 40mm)、さらに小さくなると割れ指数のピークは不明瞭になる(Mold C, 30mm)。すなわち、冷却速度が同じなら、収縮変位を小さくしても割れは減少する。

以上、Cが0.12%程度の鋼の連鋳時に鋳型熱流束を下げるか、同一鋳型熱流束なら収縮変位を小さくして縦割れを減少できると考えられる。事実、狭幅スラブの低速鋳造(鋳型熱流束小)時にはこの種の鋼に縦割れは出にくい。

3. 3. スラブ幅中央部弱冷時の鋳型内 抜熱特性と縦割れ

3. 1. の結果から縦割れはメニスカス下100mm以内の位置で発生することがわかったので、メニスカス下60mm

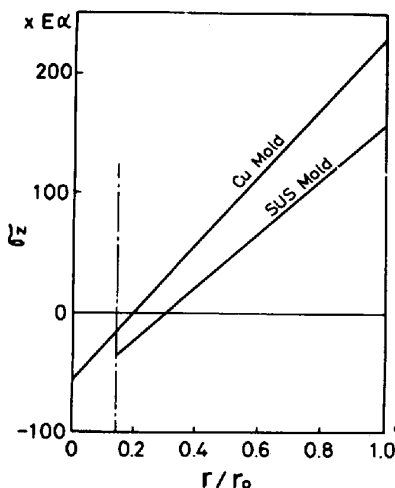


図5 キャストピン内の応力分布

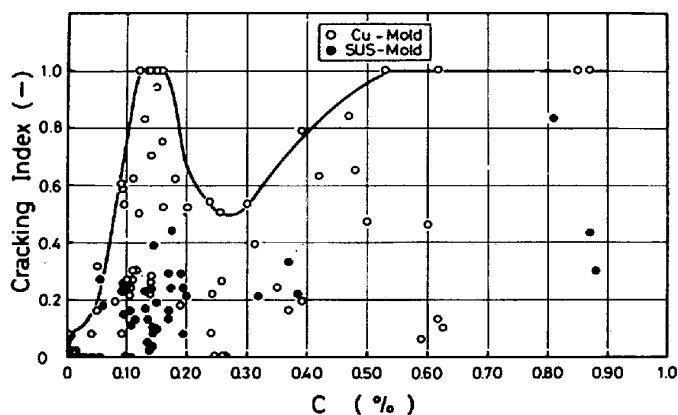


図4. 割れ指数とC濃度の関係

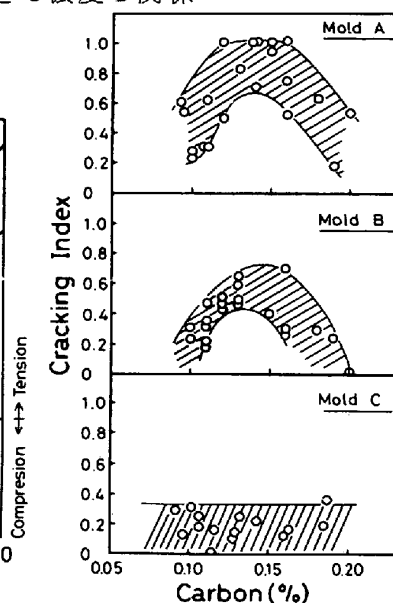


図6 割れ指数と鋳型高さの関係

図7(銅板上端から130mm)の幅中央C点(図2)および短辺寄りのS点における熱流束 q_c および q_s について検討した。Cが0.17%程度の40キロ級厚板溶鋼についての q_c と q_s の関係を図7に示す。鋳造速度が1.1~1.3%/minおよびタンディッシュ内溶鋼過熱度が12~38℃と変わった以外は同一鋳造条件のチャージを同一記号で示した。通常鋳型の熱流束は $q_s=q_c$ の直線より右方に偏倚し、幅中央部が端部より強冷されている。 q_c と q_s はスラブ幅が同じなら同一直線上にある。これに対し、試験鋳型では端部より幅中央部が弱冷されており、試験鋳型の目的とする鋳型幅中央部の熱流束低減が達成できた。試験鋳型では、 q_c 、 q_s ともスラブ幅が小さくなるほど著しく増加する。 q_s の増加は、浸漬ノズル(逆Y15°)からの溶鋼吐出流が短辺ではねかえった分岐上昇流が強くなったためと解釈される。

試験鋳型の冷却をさらに緩和するため、冷却水量を変えて熱流束を比較した(図8)。水量を減少すると q_s はあまり変化

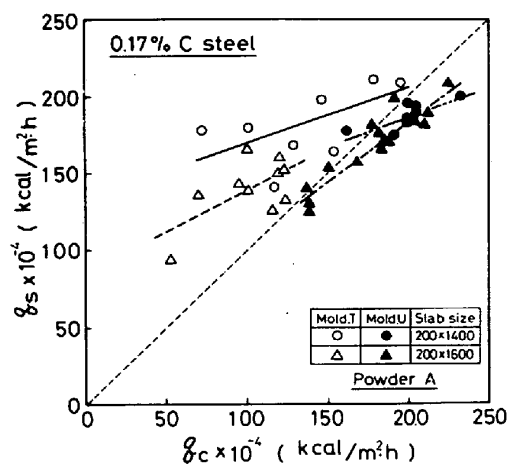


図7. 試験鋳型と通常鋳型の熱流束の比較

せず q_c が増加した。 q_c の増加は緩冷部での水量低下により沸騰伝熱が発生したためと考えられる。

Cが0.12%程度の40キロ級厚板溶鋼についても、試験鑄型で、図9に示す q_c と q_s の関係が得られる。この場合、パウダーが異なるが、図8に示したようにパウダーによる影響は小さい。Cが0.12%程度の鋼と0.17%程度の鋼では抜熱特性に差はない。

試験鑄型で鑄造したCが0.12%程度および0.17%程度の40キロ級厚板用スラブの縦割れ指数と q_c の関係を図10に示す。割れは、 q_c が増加し臨界値に達すると発生し、以後 q_c と臨界値との差に比例して増加する。割れが発生する臨界値はCが0.17%程度の鋼より、0.12%程度の鋼の方が小さく、同一鋼種ではスラブ幅が広いほど小さい。スラブ幅が大きくなると前節で示したように収縮変位が増加し割れが増加すると解釈できる。

以上の結果から、Cが0.12%程度の鋼の縦割れを低減するためには、フラックスの最適化に加えて、鑄型内メニスカス直下幅中央附近での熱流束を、スラブ幅ごとに決まる臨界値以下にすると有効である。

4. 結 言

Cを0.12%程度含有する組成の鋼の縦割れを低減するため、割れの形態を調べ、縦割れないしはその誘因となる偏析は鑄型内メニスカス下100mm以内で発生することを明らかにした。次いで、キャストピンチャー試験によりこの組成の鋼の割れを低減するためには鑄型内熱流束を低減することが有効であることを示した。そこで、鑄型の冷却水配列を変更し、スラブ幅中央部を弱冷した鑄型を試作した。試験鑄型を用いこの組成の鋼を鑄造した結果、メニスカス直下幅中央附近の熱流束が低下し、熱流束の低下に伴い縦割れも低減することがわかった。

- 文献 1) F.C.Hull : Weld. Res. Suppl. (1959) 176S
 2) 鈴木康夫：凝固現象協議会提出資料 昭55年9月、19委-10283
 3) 木下勝雄他：鉄と鋼 65(1979)14、P.2022
 4) 北岡英就他：川鉄技報 3(1980)12、P93

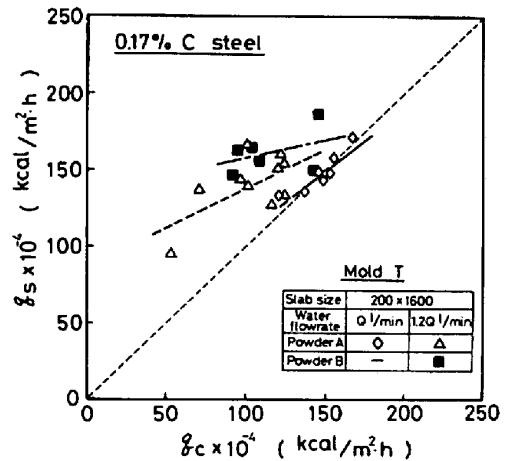


図8 冷却水量とパウダーの熱流束への影響

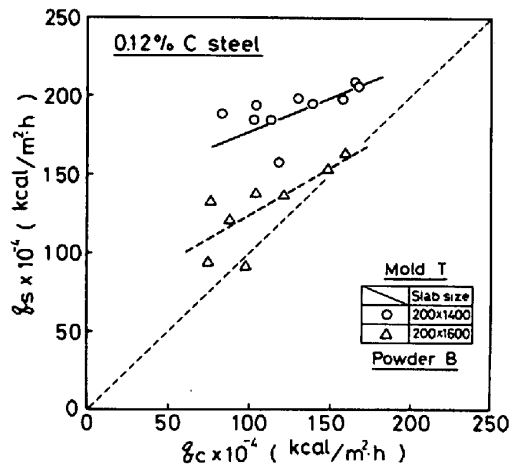


図9 試験鑄型の熱流束

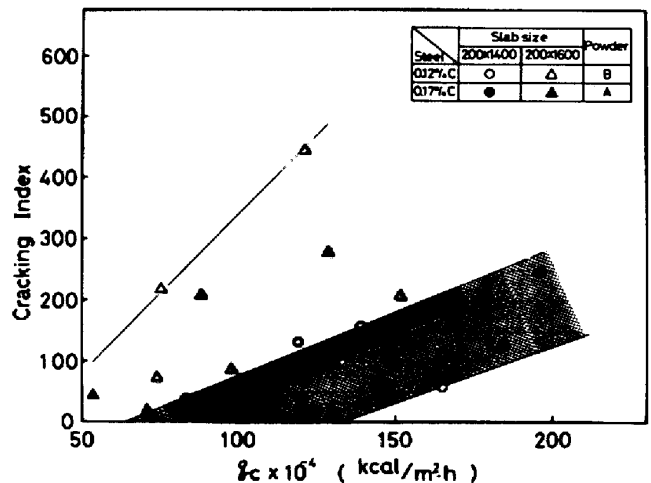


図10 割れ指数と熱流束の関係 (ハッチングは○印と△印を区別)