

(討5) 連鑄スラブの表面欠陥防止のための2次冷却パターンについて

川鉄 技研 水島研究室 野崎 努 松野 淳一
 村田 賢治 大井 浩
 川鉄 水島 製鋼部 児玉 正範 斎藤 達

1. 緒言

連鑄スラブの主要な表面欠陥の一つにコーナー横われがある。この種の欠陥は Al が0.02%以上の鋼種に多く、われ深さが5~10mmと深く手入に工数を要する。この横われは主として湾曲型連鑄機において凝固完了後ロールによる矯正時点に、引張りを受けるスラブ上面に発生する。この欠陥は矯正温度を高温あるいは低温にすることによって軽減されるが、水島製鉄所の第2連鑄機においては曲率半径が12.5mと大きいために矯正点までに表面温度が低下し高温矯正が困難であったので低温矯正について検討を行なった。

連鑄の2次冷却法についてはまだ確立した理論がないため、著者らは伝熱計算より連鑄スラブの表面温度を各ゾーンについて求め、この温度曲線の形状を合理的に修正することにより上記の横われや縦われを減少させることができたので報告する。

2. 表面温度の計算方法

スラブの表面温度は著者らがさきに考案した計算方法¹⁾を用いた。計算は1次元の凝固モデルすなわち短辺からの抜熱を無視して行ない、非定常熱伝導の式を差分法で解いた。伝熱の機構を鑄型内と2次冷却帯の二つにわけて考えると、2次冷却帯では表面温度 θ_s 、冷却水温度 θ_w と抜熱量 q_x の間には(1)式が成立する。

$$q_x = h_{xs} (\theta_s - \theta_w) \quad \text{----- (1)}$$

ここに h_{xs} は伝熱係数であり、次の実験式を用いた²⁾。

$$h_{xs} = 2.25 \times 10^4 W^{0.55} (1 - 7.5 \times 10^{-3} \theta_w) / \alpha \quad \text{----- (2)}$$

W は冷却水量($l/cm^2 \cdot min$)であり、 α は補正係数である。

3. 従来の冷却パターンによる表面温度

まず従来の冷却水量による表面温度の伝熱計算を行ない、モールド下端から矯正点までの表面温度を表1、図1に示した。モールド下端から2ゾーンまでの平均冷却速度は $150^\circ C/m$ であり、抜熱量はモールド近傍では約 $500,000 kcal/m^2 \cdot hr$ であり、下方に向かうほど抜熱量は減少し、冷却速度

表1. 従来型と平滑型の冷却水量, 計算温度

ゾーン	パターン	従来型				平滑型			
		冷却水 量 (l/min)	表面温 度 ($^\circ C$)	冷却 速度 ($^\circ C/m$)	平均冷 却速度	冷却水 量	表面温 度	冷却 速度	平均冷 却速度
Mold	0.63	2500	1250			2000			
1	1.47	207	1030	190	150	135	1110	125	83
2	2.31	227	920	101		118	1045	65	
3	3.81	207	930	-45		190	970	50	
4	5.31	143	930	0	3	190	905	43	18
5	8.31	301	840	30		320	840	22	
6	11.31	137	900	-20		290	800	17	
7	15.81	133	900	-3		320	770	6	

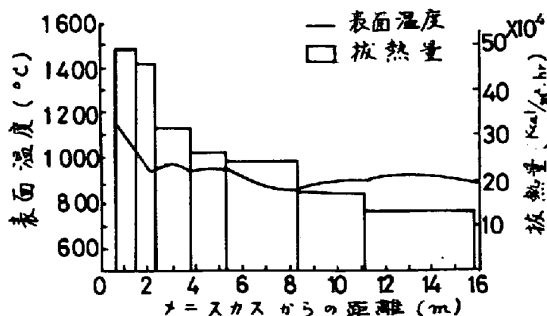


図1. 従来型の表面温度変化と抜熱量

化も一定していない。1, 2ゾーンの抜熱量に比較して3ゾーン以降の抜熱量は $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ 低いため、3ゾーンからは復熱と冷却を繰返し、6ゾーンで再び復熱し矯正前では表面中央温度が900℃と高目である。ゾーンごとの冷却速度で比較すると、連铸頭部冷却が $100^\circ\text{C}/\text{m}$ 以上なのに反し、下部では $-20 \sim +30^\circ\text{C}/\text{m}$ と復熱と冷却を繰返している。

4. コーナー横われ発生機構

コーナー横われはALが0.02%以上の鋼種に現われやすいことと、検鏡結果からALN起因のわれと推測された。冷却パターンによる欠陥発生の大筋を把握するため、操業要因の影響について50キログラムの2/6ヒートを対象に回帰分析を行なった結果、頭部冷却の強化および下部冷却の徐冷はコーナー横われの発生に不利であることが判明した。そこで、これらを考慮したALNの生成量におよぼす冷却パターンの影響を求める実験を行なった。

4. 1. ALNの析出実験と結果

冷却速度の変化によりALNは析出のCCT曲線や平衡実験から析出量に差が生じることが予想されるので、前述の伝熱計算による冷却曲線に沿った熱サイクルを与えた。実験は種々の冷却パターンを考慮して行なったが、代表的な例を図2, 3に示す。すなわち表面欠陥が発生しやすい冷却パターンに類似した型(I型)、3節で述べた従来型より頭部冷却を弱冷にした冷却曲線(II型)と、さらにALNの生成が容易とされる冷却と復熱を繰返す方法をI, II型に加味したIa, IIa型の4パターンである。実験に際しては1200℃で10分間以上の溶体化処理を行なった後で冷却過程を実施した。1200℃から700℃までの冷却時間は実機操業に対応させメニスカスから矯正点までの時間に合わせ25分とした。

実験を行なった4種の冷却パターン別による N_{total} と N_{ALN} の分析結果を表2に示す。図中の点線で示した単純冷却ではI, II型ともALNの析出は起こらず、冷却と復熱を3分間隔で単純冷却曲線の $\pm 50^\circ\text{C}$ を上下させたIa型では実機と同程度のALNが析出している。ただし、Ia型と同様の冷却と復熱を繰返してもALNの析出容易温度領域の下限温度、すなわち700℃以下からの復熱を行なわずに熱サイクルを繰返したIIa型では N_{ALN} が9ppmしかなく、したがって頭部冷却速度が $100^\circ\text{C}/\text{m}$ 以下の弱冷型の方がALNの析出に対し有利であることが明らかとなった。また従来法で表面欠陥が多発したことはALNの析出と密接な関係があることが示唆された。

表2. 熱サイクル実験によるALN量(ppm)

冷却パターン	N_{total}	N_{ALN}	$\frac{N_{\text{ALN}}}{N_{\text{total}}} \times 100$
I 型 単純冷却	55	8	14.5
Ia 型 冷却-復熱	58	33	56.9
II 型 単純冷却	56	5	8.9
IIa 型 冷却-復熱	56	9	16.1

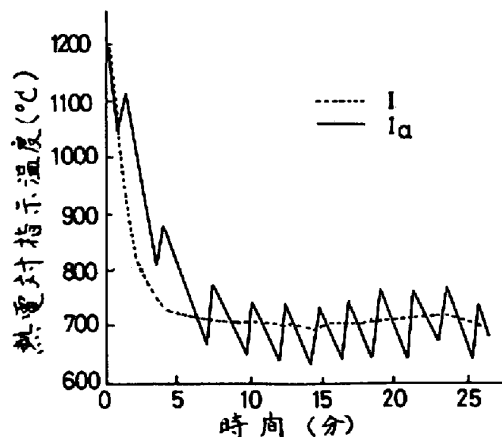


図2. 従来型冷却の熱サイクル

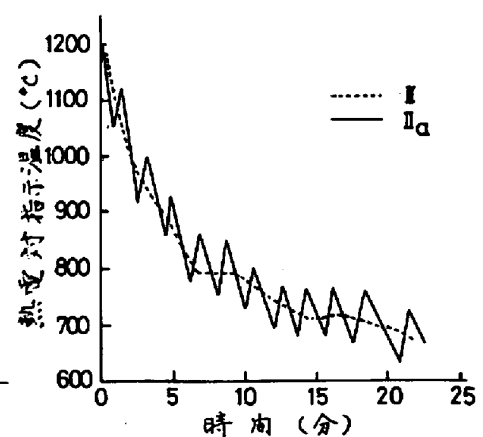
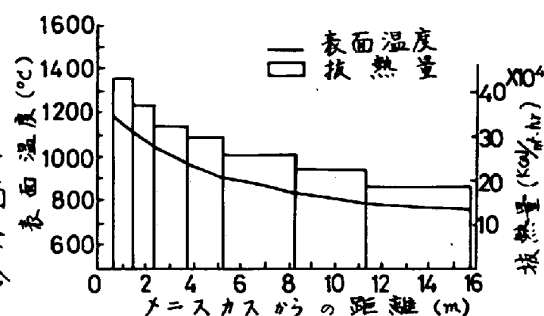


図3. 頭部弱冷型の熱サイクル

5. 表面欠陥防止のための2次冷却パターン

モールドおよびモールド直下の2次冷却を強化すればシェルの厚みの不均一をおこしやすく、また粒界を脆弱にするARNを生成する傾向にあり、このような場合には熱応力のためにはわれ発生がおこりやすい。図1にみられたように従来の表面温度曲線はゾーンごとに復熱が著しく、凝固シェルの均質な成長に好ましくないと考え、温度変化のできるだけ小さい冷却パターンを作製した。



すなわち、従来冷却法による冷却速度の解析結果をもとに 図4. 平滑型冷却パターンによる表面温度、抜熱量と表面温度を 1) 頭部冷却ゾーンの冷却速度を $100^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下に抑え、抜熱量は $70,000 \text{ Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 減らす。 2) 下部冷却ゾーンでは冷却速度を $10\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{m}$ にし、抜熱量は $30,000\sim 50,000 \text{ Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 増加する。 のように修正した。次に、表面温度はゾーンごとでの復熱を起こさず漸次冷却するように設定し、抜熱量と表面温度の関係から (1) 式を用いてスプレゾーンにおける伝熱係数を求め、さらに (2) 式の関係から冷却水量を決定した。得られた冷却水量を表1に示し、この冷却水量をもとにして再計算した表面温度曲線と抜熱量を図4に示す。またゾーンごとの冷却速度も従来冷却パターンと比較して表1に示す。この計算による新規の冷却パターンを以後平滑型と呼ぶことにする。

以上の計算により求めた冷却法と従来の冷却パターンを比較すると、

- 0.63 から 4 m 間では従来型の方が強冷で表面温度が平滑型よりも最大 100°C 高い。
- 4 から 15.8 m 間では前項 a. とは逆転し、平滑型は冷却速度が平均 $18^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と強化されている。
- 矯正点直前のスラブ表面中央部での温度は従来型 900°C 、平滑型は 770°C と大きく異なっており後者の方が結晶粒界脆弱温度領域に対し有利である。
- 平滑型は従来型に比較してゾーンの継目での復熱が全く抑えられた冷却パターンである。

6. 平滑型冷却パターン採用による表面欠陥の減少

平滑型冷却パターンの実験を16ヒート行ない、代表スラブ2枚に出現したコーナー横われ個数の平均と、同時期の従来型冷却パターンによる17ヒートの欠陥発生率を表3に比較する。平滑型冷却パターンの採用によりコーナー横われの発生を完全に防止できた。

さらに縦われはパウダーの選別やモールド内冷却が適正でない場合に、凝固シェル厚みが不均一となって応力の集中を受け発生する。

。またシェルの強度を低下させる成分としては S, Al があり、Al が

0.01% 以上でわれ発生は急増する

3) 本実験の平滑型冷却パターンを

40 キロ級鋼24 ヒートおよび50

キロ級鋼20ヒートについて実施した結果を図5に示した。両鋼種とも縦われ指数が大幅に減少した。

。平滑型冷却パターンによれば凝固シェルの厚みの変動が少なく、しかも AlN の析出が少ないために横われのみでなく縦われも減少させる効果があることが確認された。

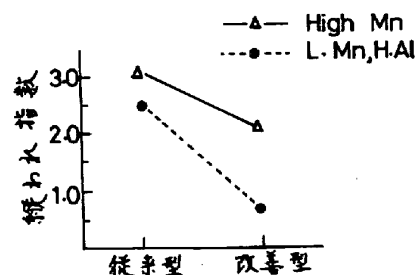


図5. 冷却パターンの縦われにおよぼす影響

表3. 冷却パターン変更によるわれ発生率の比較

パターン	スラブサイズ	ヒート数	コーナー横われ回数	実測コーナー温度
従来型	220×1575	17	87.8	800 $^{\circ}\text{C}$
平滑型	220×1575	16	0	730

7. 連鑄における頭部冷却の影響

AlN 起因のコーナー横われは矯正点での表面温度を結晶粒界脆弱温度域を避ければ発生が少ないことが報告されている⁴⁾。しかしながら今まで述べて来たように頭部の冷却速度、表面温度が主に AlN の生成と関連し、この部分での冷却をコントロールすることによって表面欠陥の発生をかなり減少させ得ることが予想されるので、矯正温度と冷却パターンのいずれが表面欠陥に対し支配的かを以下の実験により確認した。また、平滑型冷却パターンが表面欠陥防止に顕著な効果を上げる要素を明らかにするために、3つの冷却パターンを作製した。すなわち 1) 頭部強冷かつ下部も強冷

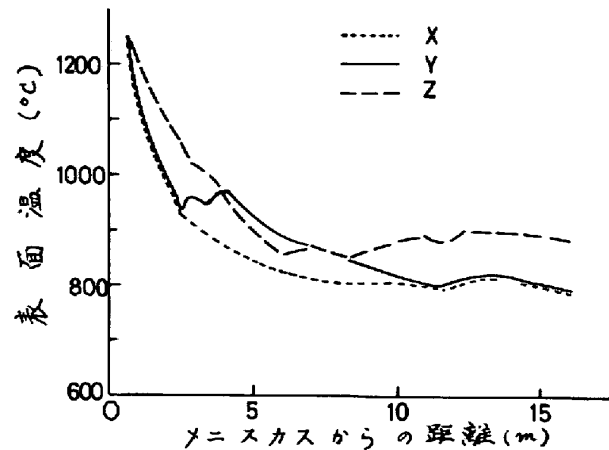


図6. X, Y, Z 法の計算表面温度

する型(X法) ロモールドから8mまでは従来型冷却としそれ以降は下部強冷を行なう方法(Y法) ハ) Y法とは逆に頭部を弱冷にし下部では従来型を行なう方法(Z法)であり実験において4ヒートの繰返し実験を行ない表面欠陥の発生状況を表4に示す。図6には各方法の計算による鋳片幅中央部の表面温度を示す。

表4. X, Y, Z 冷却パターンの実験結果

パターン	スラブ中央部の平均欠陥数	コーナー部		中央部		表面温度℃	
		NAIN (ppm)	NAIN/Ntotal (%)	NAIN	NAIN/Ntotal	コーナー	中央
X	38	45	72.7	36	62.1	700	870
Y	50	43	73.6	32	58.2	700	875
Z	0	29	54.5	5	9.6	740	950

。実験結果より矯正点温度のみを重視したX, Y法ではコーナー横われの発生があり、矯正温度よりは2次冷却帯での冷却パターンに注目したZ法はコーナー横われの発生がないことから、頭部での強冷は冷却と復熱を繰返し起こさせかつ700℃以下からの復熱となる可能性が強い⁵⁾。さらに3つの冷却法によるAlN量についてみると、 N_{AIN}/N_{total} 比でX, Y法が73%の値を示すのに反し、Z法では54%であり頭部弱冷パターンは約20% AlNの析出が少ない。中央部ではこの差は一層顕著となっている。

したがって、以上の結果より頭部冷却を考慮する冷却パターンの重要性が認識された。

8. ま と め

連铸スラブの表面欠陥の発生防止を目的として、2次冷却パターンおよび析出物の影響について検討した。

- コーナー横われはAlNによる750~900℃の脆弱域における粒界われであり、冷却-復熱を繰返しとくに700℃以下からの復熱過程によりAlNの析出が顕著となる。
- 冷却パターンと矯正温度の役割について実験した結果、矯正温度よりはむしろ連铸機頭部での冷却速度を83℃/m以下にして、AlNの析出を抑制することによってコーナー横われを減少させ得ることがわかった。また平滑型の採用により縦われも顕著に減少する傾向が明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 松野, 中村, 大井: 鉄と鋼, 60, (1974), 1023
- 2) 島田, 三塚: 鉄と鋼, 52, (1966), 1643
- 3) 大和製鋼: 製鋼部会42-29
- 4) 安斎, 山下, 宮下, 阪本, 菅, 角南: 鉄と鋼, 60, (1974), 973, 同誌 60, (1974), S37
- 5) 石黒, 市原: 鉄と鋼, 60, (1974), S464