

リムド鋼の地疵に関する一考察

森棟 隆弘・近藤 正男・池田 正夫・島崎 利治

A Study On The Sand Seams Of Limmed Steel Ingot.

Takahiro MORIMUNE・Masao KONDO・Masao IKEDA
Toshiji SHIMAZAKI

Change of the content of nonmetallic inclusion and sand seam in limmed steel ingot has been tested. Also the reason of crack formation from nonmetallic inclusion in steel, was measured numerically from the standpoint of strengths of materials.

I 緒 言

鉄鋼基礎共同研究部会より、地キズに関する研究の依頼を受け、富士製鉄株式会社室蘭製鉄所より地キズ試験用サンプルを受け取りその試料の内、下記のごとき表示記号のスラブ鋼片について、JISを用い、鋼の地キズと清浄度を調べた。次に地キズに関する基礎研究として、膨脹係数、ヤング率から、介在物と鋼が冷却中に起こす tension と compression について計算し、地キズ原因の一つの考察とした。

II 試料および試験方法

II-1) 地キズ試験片表示記号および試験片個数

F-2-(A~E) m S ₂	5個	} 合計 15個
F-4-(A~E) m S ₂	5個	
F-6-(A~E) m S ₂	5個	

II-2) 地キズ試験片溶製ならびに造塊記録

試験に供した試験片の溶製および造塊方法を表-1に示す。

II-3) 地キズおよび非金属介在物測定試験採取位置

送付されてきたスラブ試片は図-1のごとくリム、コア境界位置での圧延方向の各位置における地キズおよび非金属介在物測定塊としたものであり、各塊の圧延方向を確認するために、強酸腐蝕によってファイバーを現出し、JIS法に基いて地キズ試験片は加工方向が同じになる様に丸棒に鍛造後、段削り地キズ試片を得た。さらに

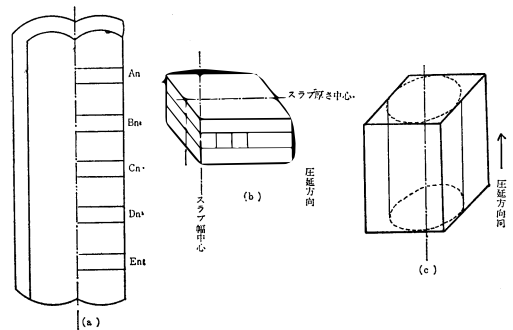


図-1 地キズおよび非金属介在物測定試片の採取方法

非金属介在物測定試片は圧延方向に平行にその中心線を通して切断して採取した。

III 地キズ試験結果および考察

本試験では JIS. G 0556 に規定する方法に基づいて測定した結果を表-2に示す。

・地キズの溶製条件との関係

地キズとスラブ溶製条件との関係は複合された結果であり、個々の条件との相関関係であるとは断定され難いが、スラブ全体を見た場合総地キズ長さで比較するとスラブ F-4 では 93.45, F-2 では 166.8, F-6 では 185.4 mm の順に多くなっている。即ち鑄込温度を一定としたとき地キズの発生は注入時間が長い程、注入速度の小さい程、蓋置時間の短かいもの程多くなっている。

しかし注入操作を緩慢にすることで発生量が大きくなる
とは考えられず、蓋置時間および蓋置までの時間とそ
の間のリミングアクションの強度により影響されるものと
考える。更にスラブ高さ位置別に見ると図-2に示すご

表-1 試験片の溶製および造塊条件

鋼塊番号			F-2	F-4	F-6
項 目					
装 入 物	主原料	溶 鉄 (kg)	102,800	左に同じ	左に同じ
		鋼 屑 (〃)	19,800	〃	〃
		合 計 (〃)	122,600	〃	〃
	副原料	焼 石 灰 (kg)	5,800	〃	〃
		スケール (〃)	3,000	〃	〃
ホタル石 (〃)		3,000	〃	〃	
溶 鉄 率 (%)			78.2	〃	〃
吹 錬 時 間 (min)			21.0	〃	〃
出 鋼 時 間 (〃)			1.9	〃	〃
吹 止 温 度 (°C)			1,590	〃	〃
出 鋼 温 度 (°C)			1,585	〃	〃
取鍋内添加剤					
FSi (kg/t)			5.40	〃	〃
Al (g/t)			62	〃	〃
コークス (kg/t)			—		
出 鋼 量 (kg)			113,200	〃	〃
鑄 型 形 状 (mm)			上部 720×953 底部 78×1004 高さ 2300		
チャージ中の鋼塊					
注 入 順 位			2	6	4
注 入 温 度 (°C)			—	—	—
注 入 時 間 (min)			1'.47	1'.37	4'.01
鑄型内 Al 添加量 (g/t)			76	38	0
リミングアクション			中	中	弱～中
スカム発生量(面積で表示) mm×mm			同程度で普通よりやや少ない		
蓋 置 時 間 (min)			32.15	34.24	21
鋼 塊 単 重 (kg)			10,500	左に同じ	左に同じ
注 入 速 度 (mm/min)			1,175	1,300	522
取鍋内化学分析値			C : 0.121 Mn : 0.41 Si : 0.006 P : 0.010 S : 0.018 O : 0.032		

とく铸型内で Al 添加を行なったスラブ F-4, F-2 で
は上部、底部より中央部での地キズ発生量が多い。ス
ラブ F-2 ではその傾向が一層大きい。これに反して Al
添加を行なわず、かつ注入速度が遅く、リミングアクシ
ョンが弱い F-6 では上部、下部での地キズ発生が多く
中央部では少ない。これはリミングアクションが弱いた
め下部で凝集成長した大型介在物に起因するものと考え
る。铸型内 Al 添加の増減による影響は底部での地キズ

表-2 地キズ試験結果
(地キズの長さおよび数)

試片表示番号		地キズの長さおよび数
F-2	A	(0.5×44.3)
	B	(0.5×73.0)
	C	(0.5×36.7+1×12.1)
	D	(0.5×114.5+1×6.7)
	E	(0.5×16.8+1×3.7)
F-4	A	(0.5×13.5)
	B	(0.5×20.2)
	C	(0.5×56.9)
	D	(0.5×40.4+1×6.7)
	E	(0.5×42.5)
F-6	A	(0.5×39.8+1×19.9+2×13.3)
	B	(0.5×77.9)
	C	(0.5×42.5)
	D	(0.5×36.7)
	E	(0.5×80.8)

(注) 20mm 以上の地キズは全く見られず被鏡面を10
倍の低倍率顕微鏡を用いて拡大検査を行なった
ものである。従って地キズ番号で 0.5 mm 程度
の地キズを正確に測定することが出来たが、肉
眼検査では見落されることがあると思うので此
の結果は規格の方法より厳しい値が出ていると
考えて良い。

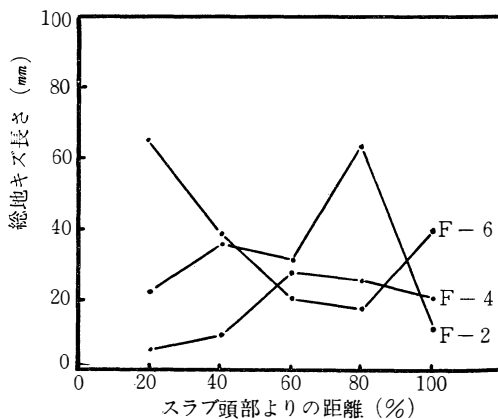


図-2 総地キズ長さ

発生が添加量と共に減少しており、また中央部では増加することが確かめられた。

IV 非金属介在物試験結果および考察

JIS, G 0555 ; 鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法により清浄度の測定試験をした結果を図-3に示す。

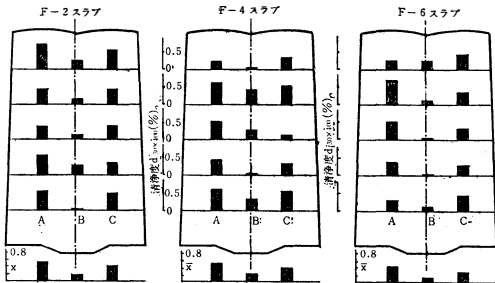


図-3 リム鋼中の非金属介在物量と分布状態

溶製条件と本実験に供したリム・コア層の試料のスラブ上下の各位置における介在物との関係を調べたが、スキン層に見られるような関係は認められず、特に鋳型内アルミニウム添加量とB系介在物量との関係は全く認められない。

本試料は全体的には硫化物系介在物が最も多く、次いで粒状酸化物系介在物が多く、アルミナ等の介在物は多少認められる程度であった。

V 介在物と鋼との間の応力計算

V-1) 計算式の求め方

鋼の冷却のときに起こる非金属介在物との間の tension および compression を求めるために、 x 軸, y 軸, z 軸の主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 主歪をそれぞれ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ とすると、歪と応力との間の基礎方程式は

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_1 - \frac{1}{m} (\sigma_2 + \sigma_3) \right\} \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_2 - \frac{1}{m} (\sigma_3 + \sigma_1) \right\} \quad (2)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_3 - \frac{1}{m} (\sigma_1 + \sigma_2) \right\} \quad (3)$$

但し, E ; ヤング率, $\frac{1}{m}$; ポアソン比

(1)+(2)+(3)

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \frac{m-2}{mE} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_V \text{ とおけば (体積歪)}$$

$$\epsilon_V = \frac{m-2}{mE} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

次に K を体積弾性係数とすれば、圧力をかけたときの変形の式から

$$\epsilon_V = P/K$$

が得られる。従って

$$P = K\epsilon_V = 3EK \quad (4)$$

これは ϵ が小さいから近似的に $\epsilon_V = 3\epsilon$ とおけるためである。

$$K = mE/3(m-2)$$

鋼の場合, $m = \frac{10}{3}$ とすれば, $K = 0.833E$, この関係を (4) 式に代入すると

$$P = 3\epsilon \times 0.833E$$

全体の圧力 P は

$$P = 3 \times 0.833\epsilon E \times (\text{全弾性温度区間}) \\ = \sum \{ (3 \times 0.833\epsilon_F \cdot E_F) \times (\text{温度区間}) \} \quad (5)$$

故に、鋼および非金属介在物を応力の平衡状態にある可塑状態の下限温度から、ある温度区間冷却したときには

鋼における応力

$$P_F = \sum \{ 3 \times 0.833 E_F (\epsilon_F - \epsilon_R) \times (\text{温度区間}) \} \quad (6)$$

介在物における応力

$$P_R = \sum \{ 3 \times 0.833 (-E_R) (\epsilon_F - \epsilon_R) \\ \times (\text{温度区間}) \} \quad (6')$$

ここで, E_R, ϵ_R はそれぞれ介在物のヤング率, 熱膨脹係数,

E_F, ϵ_F はそれぞれ鋼のヤング率, 熱膨脹係数

(注) 以上において応力 + は tension, - は compression を示す。

V-2) 鋼の冷却時に Al_2O_3 により生じた応力の計算

表-4 鋼および Al_2O_3 のヤング率と熱膨脹係数

温度区間 (°C)	鋼の熱膨脹 係数 ¹⁾ ($\times 10^{-6}$)	鋼のヤング 率 ²⁾³⁾ ($\times 10^6 \text{ psi}$)	Al_2O_3 の熱 膨脹係数 ⁴⁾ ($\times 10^{-6}$)	Al_2O_3 のヤ ング率 ⁵⁾ ($\times 10^6 \text{ psi}$)
20~100	12.3	29.86	8.5	55.5
100~200	13.3	29.00	8.5	55.0
200~300	14.5	27.87	8.5	54.9
300~400	15.5	26.73	8.5	54.0
400~500	16.2	25.59	8.5	52.5

表-5 鋼の冷却時に Al_2O_3 によって生じた応力

温 度 (°C)	Al_2O_3 により冷却時に鋼に生じ た応力 (kg/mm ²)
20 ~ 100	15.95
100 ~ 200	24.45
200 ~ 300	29.38
300 ~ 400	32.87
400 ~ 500	34.62
常温における応力	137.28

Al_2O_3 によって生じた応力は鋼の抗張力をはるかに超えている。この事は冷却の際にある温度域で局部的に亀裂を生ずる事を意味している。

V-3) 鋼の冷却時に MgO により生じた応力の計算

表一五 MgO のヤング率と熱膨脹係数および冷却応力

温度区間 ($^{\circ}\text{C}$)	MgO の熱膨 脹係数 ⁶⁾ ($\times 10^{-6}$)	MgO のヤン グ率 ⁷⁾ ($\times 10^6 \text{psi}$)	MgO により 冷却時に鋼に 生じた応力 (kg/mm^2)
20 ~ 100	13.5	30.5	-5.04
100 ~ 200	13.5	30.5	-1.02
200 ~ 300	13.5	30.5	4.90
300 ~ 400	13.5	30.0	9.39
400 ~ 500	13.5	30.0	12.14
常温における 応力			20.37

MgO の場合も Al_2O_3 の場合と同様介在物側の方が冷却応力が大であるけれども、その値は小さく、あまり影響を及ぼさない。

V-4) 鋼の冷却時に SiO_2 に生じた冷却応力の計算

表一六 SiO_2 のヤング率と熱膨脹係数および SiO_2 に生じた冷却応力

温度区間 ($^{\circ}\text{C}$)	SiO_2 の熱膨 脹係数 ⁸⁾ ($\times 10^{-6}$)	SiO_2 のヤン グ率 ^{9),10)} ($\times 10^6 \text{psi}$)	SiO_2 に生 じた冷却応力 (kg/mm^2)
20 ~ 100	32.6	11.59	20.05
100 ~ 200	32.6	11.20	24.21
200 ~ 300	32.6	10.90	21.01
300 ~ 400	32.6	10.50	19.12
400 ~ 500	32.6	10.20	17.60
			101.99

SiO_2 の場合は介在物側に tension が働き、常温に至るまで SiO_2 内に亀裂が生ずるか、または鋼と SiO_2 の境界に亀裂を生ずる事を示している。

以上の研究は主として物理定数表、ハンドブック等から Al_2O_3 , MgO , SiO_2 の諸数値を求めて計算したものであり、目下実際試料で実験中である。

VI 結 言

鉄鋼基礎共同研究会の非金属介在物部会より、富士製鉄株式会社室蘭製鉄所の地キズ用試料についての研究を

依頼され、地キズ検査を行ない、地キズの成因について少しく数的計算して、次の様な結言を得た。

1. 地キズはアルミニウムの添加量、注入速度の影響介在物浮上時間の延長などで、介在物よりの地キズは多くは減少しているが、試料がリム・コア部なので気泡の未圧着部分もあり、判定し難いところもある。

2. 介在物として、硫化物系のものが多く、次いで粒状酸化物・アルミナの順に少なくなる。

3. 鋼と非金属介在物の冷却時に生じる応力を求める計算式を求めた。

4. その式から求めると、鋼の 500°C から常温までの冷却に伴う応力は Al_2O_3 の場合は、 $137.28 \text{ kg}/\text{mm}^2$ で鋼の抗張力をはるかに超えた tension が働き、地キズ生成の一因と考え得る。

5. MgO の場合は鋼側に $20.37 \text{ kg}/\text{mm}^2$ の tension が働くが、その値が少ないので地キズ生成の直接原因とはなり得ない。

6. SiO_2 の場合は $101.99 \text{ kg}/\text{mm}^2$ の応力が介在物側に tension に働き、常温に至るまでに SiO_2 内に亀裂が生じるか、または鋼と SiO_2 の境界に亀裂を生ずる事を示している。

謝辞

本研究を行なうに当っては鉄鋼協会より色々お世話になったことについて厚く御礼申し上げたい。なお研究に協力された堀弘隆学士、余川昭吉学士の労を謝する。

鉄鋼基礎共同研究会非金属介在物部会資料、昭和43年2月

日本鉄鋼協会北陸支部 } 講演会概要集、昭和
日本金属学会北信越支部 } 45年2月5日

引 用 文 献

- (1) Metal Handbook vol. I. 1206 p
- (2) University Physics 250 p
- (3) 金属便覧 (旧版 218 p)
- (4) Metal Handbook 28 p
- (5) キャンペル; 高温工学. 48 p
- (6) Metal Handbook 28 p
- (7) 高温工学 48 p
- (8) Metal Handbook, 28 p
- (9) Meller; Handbook of Inorganic & Theoretical chemistry (Si 部門) 251 p
- (10) Sosman; The Properties of Silica 436 p