

極軟リムド鋼板の加工性と非金属介在物との関連性について*

(極軟リムド鋼の非金属介在物の研究—I)

森永孝三**・北川一智**・佐藤 進***・林 高朗****・広谷 宏**

On the Correlation between Formability and Nonmetallic Inclusions in Low Carbon Rimmed Steel Sheet.

(Study of nonmetallic inclusions in low carbon rimmed steel—I)

Kōzō MORINAGA, Kazutomo KITAGAWA,

Susumu SATŌ, Takaaki HAYASHI and Hiroshi HIROTANI

Synopsis:

A study was carried out to know the correlation between formability and non-metallic inclusion in low-carbon rimmed steel sheets.

The specimens were made from 6.5 to 15t ingot, basic open hearth furnace steel.

Formability of the sheet was measured by Erichsen and torsion tests.

The results obtained are as follows:

- (1) Stretchability of 0.8mm cold rolled annealed steel is reduced by large sulphide (MnS) and scum (over about 100 μ long).
- (2) Plenty of the above mentioned large sulphide (MnS) is precipitated as the content of sulphur reaches 0.035 to 0.040% in sheet. In that case, coarse lamination of hot milled steel is liable to occur.
- (3) The lengths of inclusions measured along the rolling direction of a ore are mostly below about 25 μ , in hot milled sheets. Moreover, authors confirm by diffraction of electron-beam that there are MnS, MnS·(Mn,Fe)O, α -Al₂O₃ (Corundum), α -SiO₂ (Cristobalite), Al₂O₃·SiO₂ (Kyanite), FeO·Al₂O₃-MnO·Al₂O₃ (Spinel), 3FeO·Al₂O₃·3SiO₂-3MnO·Al₂O₃·3SiO₂ (Garnet), 2FeO·SiO₂-2MnO·SiO₂(Olivine) in hot milled sheet. (Received 18 Mar. 1963)

I. 緒 言

室蘭製鉄所の総出鋼量の約 80% はリムド鋼で、このうちの約 73% は熱延鋼板である。このリムド熱延鋼板は需要先でさらに薄板に加工され、大半は磨薄板として用いられている。このような成品を製造している当所として、絞り加工性の良い極軟リムド鋼板を製造することが一つの大きな目標になっている。このような鋼板を製造するには鋼塊性状、熱延、冷延、および焼鈍条件について十分検討する必要がある。

今回はこのうち鋼塊性状、特に非金属介在物について注目し、極軟リムド鋼板の加工性におよぼす介在物の影響をまづ把握し、次いで材質に対して悪影響をおよぼす介在物を除去するための精錬、造塊方法を確立することに努めた。本研究の内容を大別すると次の 3 項目になる。

- (1) リムド鋼板の介在物と加工性との関連性

- (2) リムド鋼塊中介在物の分布状況および組成の決定 (スラム法による)

- (3) リムド鋼塊の濃厚偏析部の介在物について
本報はこのうちの第 1 項で、鋼板の加工性を劣化させる介在物の種類および形状と鋼板内の分布状況について重点的に検討を行なったものである。これらの検討結果について以下報告する。

II. 供試料と試験項目

供試料の熱延鋼板、冷延鋼板は次の条件で製造したものである。すなわち、塩基性平炉鋼で取鍋分析値は 0.06~0.09% C, 0.28~0.36% Mn, 0.01% Si, 0.009~

* 昭和36年10月、昭和36年6月(支部)本会講演大会にて発表 昭和38年3月18日受付

** 富士製鉄株式会社室蘭製鉄所研究所

*** 富士製鉄株式会社室蘭製鉄所研究所, 工博

**** 富士製鉄株式会社室蘭製鉄所研究所, 理博

0.016% P, 0.016~0.028% S, 鋼塊単重は 6~15 t であつて, 熱延鋼板の仕上げ面温度は 830°C, 捲取温度 550°C, 厚さ 3.2mm, 幅 3~4 ft である. 冷延鋼板は上記熱延鋼板を試験用小型四重圧延機で冷延率 70% で冷延し, 675°C × 3h バッチ焼鈍したものである. また各試験片は鋼塊位置になおして, 頭部から底部まで必要に応じて 5~20% 間隔で採取し, 幅方向中央部 150mm を使用した.

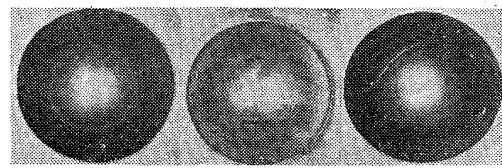
次に試験項目について述べる. 冷延鋼板は一般に高度の張出し加工および深絞り加工に耐え得る鋼板を要求され, 前者に対してはエリクセン試験, 後者に対してはコニカルカップ試験などが行なわれている. 前者で介在物の影響を検討するということは試片表面の破断現象と介在物との関連性を検討することになり, 後者ではフランジ変形能におよぼす介在物の影響を検討することになる. 今回はまづ検討の行ない易いエリクセン試験を採用した. 一方, 熱延鋼板では介在物の存在によつてラミネーションとなる可能性があるため, その検討としては圧延方向に直角に試片をとり, 振り破面の観察を試みた. なお, 鋼板内の介在物の分布状況は光学顕微鏡で観察し, 各介在物の組成決定は抽出方法も種々検討した後, 電子回折によつて行なつた.

III. 試験結果

1. 鋼板の加工性におよぼす介在物の影響

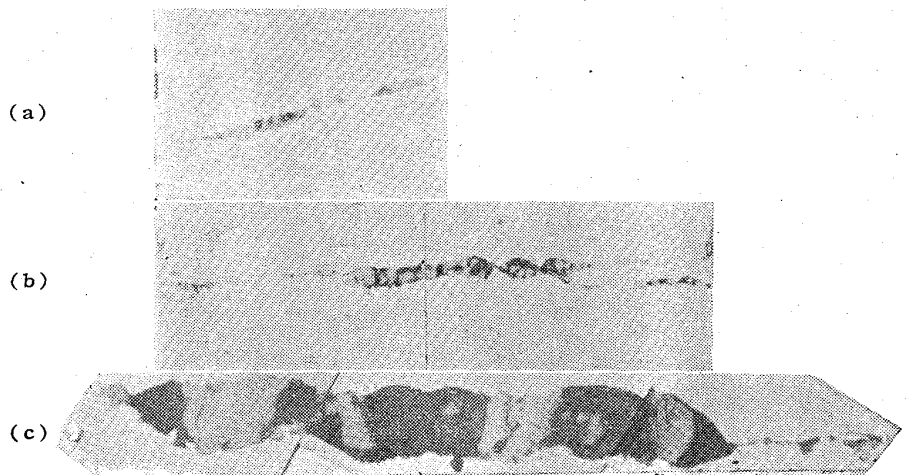
(1) 冷延鋼板の張出し加工性

一般に鋼板の張出し加工性の良否は項目 II で述べたようにエリクセン試験値によつて判定している. 今回のエリクセン試験では, しわ (Photo. 1(a) 参照) 発生前の亀裂の発生 (供試料の持つ本質的な展延性の限界を示すと考えられる) について特に注目し, しわが発生しても亀裂を生じない場合はしわの発生した際にポンチの移動を停止し, それをエリクセン値とした. このような方法でエリクセン試験を行ない, 試験片の表面状況を次の 3通りに類別した. すなわち, (a) 試験片の表面に亀裂が生ずることなくしわが発生する場合, (b) しわの発生時にしわ発生相当部分に亀裂が圧延方向に発生する場合, (c) しわが発生する前にしわ発生相当部分以外の個所に亀裂が発生する場合, それらの表面状況例を Photo. 1



(a) Wrinkle
(b) Crack along rolling direction
(c) Random cracking before wrinkling

Photo. 1. Classification of surface conditions after Erichsen test.



(a) Small sulphide (b) Large sulphide (c) Large scum
Photo. 2. Microstructure of the non-metallic inclusion.

×400 (3/5)

(a), (b), (c) に示す. 上に述べた 3 者を鋼板の張出し加工性の良否の点で順位をつけると (a), (b), (c) の順に悪くなると考えられる. さらにエリクセン試験後のしわ発生部, 亀裂発生部を圧延方向に切削研磨し, 顕微鏡観察を行ない, 次のような結果を得た.

(a) 試験片の表面に亀裂が生ずることなくしわ発生する場合 (Photo. 1(a)) には Photo. 2(a) に示したように一般には厚さ 10 μ 程度, 長さ 50 μ 程度以下の介在物が分布している. なお, 一部には厚さ 20 μ 程度の比較的厚いものが認められる場合がある.

(b) しわの発生時にしわ発生相当部分に亀裂が圧延方向に発生する場合 (Photo. 1(b)) にはその亀裂相当部分の鋼板中央部に Photo. 2(b) に示したような厚さ 10 μ ~40 μ , 長さ 100 μ 程度以上の介在物が存在している. (その組成は WHITELY 試験¹⁾で硫化物と判定)

(c) しわが発生する前にしわ発生相当部分以外に亀裂が発生する場合 (Photo. 1(c)) には Photo. 2(c) に示したような異常に大きなスカムが存在している.

以上の試験結果から冷延鋼板の張出し加工で異常亀裂 (Photo. 1(b), (c)) が発生した個所には長さ 100 μ 程度以上の大型硫化物およびスカム状介在物が存在していることが明らかになつた.

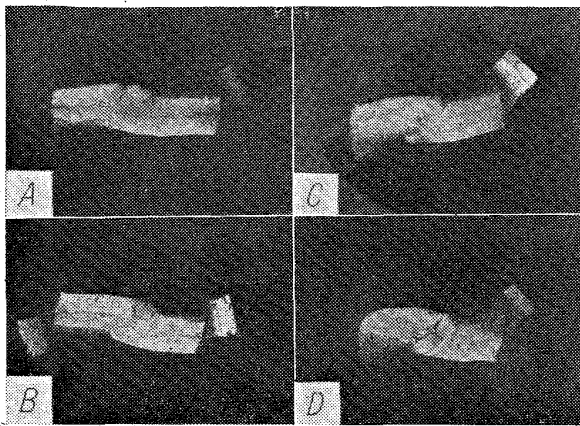


Photo. 3. Classification of the fracture after torsion test.

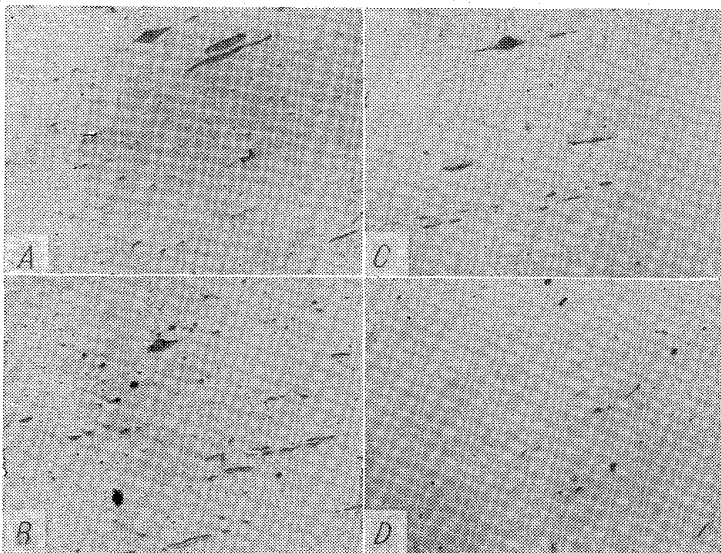


Photo. 4. Non-metallic inclusions in specimens, shown in Photo. 3. $\times 200$ (3/5)

(2) 熱延鋼板の振り試験

従来熱延鋼板のラミネーションの検出方法として、現場では試片を圧延方向に直角にとつて振り、C方向面を観察している。このことから、試片をC方向にとつて振り加工試験を行ない、破断面(L方向)を観察した場合、その個所にMatrixと変形能の異なる介在物が群落すれば、その個所には断層線が生じることが推測できる。このような観点から、熱延鋼板の振り試験を行なつて各破断面を観察し、次の結果を得た。すなわち、振り破断面形状を肉眼で観察するとPhoto. 3に示すような4種類に分別することができる。

ここで(A)は板厚中央部に亀裂が集中し、1本の太い断層線が走っている場合であり、(B)は(A)の程度の軽いもので破面の段が小さい場合である。(C)は(A)、(B)と様相は異なり、小さい亀裂が断面の数個所に認め

られ、(D)はその極く軽微なものである。次に各々の破断面の介在物の形状および分布例をPhoto. 4に示す。すなわち、(A)破面には比較的大型の硫化物(長さ 100μ 程度)が多量に存在し、(B)破面には点滴状の硫化物の存在が目立つ。一方(C)、(D)破面には大型硫化物はもちろん点滴状硫化物もほとんど認められず、主として酸化物(MnOが主成分)をともなつた 25μ 程度以下の小さな硫化物および球状酸化物が散在している。

以上振り破断面形状と介在物の形状、分布との関係について述べたが、成品のラミネーションの原因として、大型硫化物が重要な役割をしているものと思われる。

2. 鋼板中の介在物の分布状況および組成

前節で冷延鋼板の張出し加工性に対しては大型硫化物、熱延鋼板の振り加工性に対しては大型硫化物および点滴状硫化物が悪影響をおよぼすことが明らかになった。そこで上記のように問題になる介在物を主として鋼板内で介在物はどのような大きさのものが、どのように分布しているかを調査するとともにその組成の確認を行なつた。

(1) 熱延鋼板の介在物の分布状況

取鍋S量 0.016% と 0.020% の溶鋼を同一鑄型(鋼塊単重 $15t$)に注入し、 $3.2mm$ 厚みの熱延鋼板に圧延した場合の介在物の大きさ別の分布状況を鋼塊位置別に調査し、Table 1に示す結果を得た。なお、各試料とも鋼板の幅の中心でL方向に 60 視野観察したものである。この結果によると鋼塊内全般に長さ 25μ 、厚さ 7.5μ 以下の介在物が大部分で、この傾向は頭部から底部まで変りがない。介在物量は鋼塊頭部濃厚偏析部(頭部より $15\sim 20\%$)に多く、取鍋S 0.020% の方がその傾向はいちじるしい。また取鍋S量 0.020% の場合は 0.016% の場合に比較して長さ 25μ 以上の介在物の分布が多くなり、特に鋼塊濃厚偏析部には長さ $50\sim 100\mu$ 程度の加工上問題になると思われる大きな硫化物が存在している。

(2) 熱延鋼板における介在物の組成

これまでリムド鋼板の加工性に対して大型硫化物が悪影響を与えると述べてきたが、その介在物の組成は腐食法およびマイクロピッカース硬度の測定による定性結果である。そこで詳細に組成を調査するために、電子線回折により鋼板内の介在物を検討した。電子線回折を行なう場合まづ問題になるのは介在物の抽出方法である。

今回は次の4方法について検討を行なつた。

(a) Pseudo-Replica 法, (b) Extraction-Replica

法, (c) 反射回折法, (d) Micro-Vicker's 試験機で介在物を破壊して取出す方法。

抽出方法としてはジャックハンマーを使用するのが最良の方法であるとされているが, 既述の方法によつても適切な操作を行えば介在物を容易に抽出することが可能である。すなわち, 硫化物系介在物には Pseudo-Replica 法および Extraction-Replica 法, 特に後者の方法が有効であり, 反射回折法は上記二方法で抽出できず, かつ, 酸にほとんど不溶解な介在物 (たとえば Corundum) に対して適用できる。また Micro-Vicker's 試験機を用いる方法は, 介在物がダイヤモンドによつて圧碎されるような場合に有効である。

先の鋼板の加工性を劣化させた大型硫化物は Pseudo-Replica 法および Extraction-Replica 法で抽出し, 電子線回折を行ない MnS と判定した。なお, 極軟リムド熱延鋼板中の介在物としては上述の MnS の外に MnS·(Mn, Fe)O, Spinel 固溶体 (FeO·Al₂O₃-MnO·Al₂O₃), Garnet 固溶体 (3FeO·Al₂O₃·3SiO₂-3MnO·Al₂O₃·3SiO₂), Olivine 固溶体 (2FeO·SiO₂-2MnO·SiO₂), Corundum (α-Al₂O₃), Cristobalite (α-SiO₂), Kyanite (Al₂O₃·SiO₂) などが存在していることを確認した。

IV. 考 察

Ⅲにおいて冷延鋼板の張出し加工性および熱延鋼板の捩り破面におよぼす介在物の影響, ならびに鋼板中介在物の分布, 組成についての検討結果を述べた。本項目では今回の検討結果で加工性に対して大型硫化物 (MnS) がいちじるしく悪影響をおよぼすことが明らかになったのでこの原因と, この系の介在物の分布を鋼塊性状と関連させて考察する。

まづエリクセン試験後の表面状況であるが, その状況は Photo. 1 に示すように3種類ある。Photo. 1(a)に示したしわは, 試験片に非常に大きな塑性変形が生じた場合に形成されるものであり, これは材料がかなりの展延性を持っていることを示すものである。一方長さ 100 μ 程度以上の硫化物, またはスカムが存在する場合は, Photo. 1(b), (c) のような亀裂を発生している。これは介在物による Notch-effect が直接の原因となり, Matrix 本来の展延性を示さずに破断したものと考えられる。ここでエリクセン試験時の介在物の形状の違いによる Notch-effect の相違, および亀裂の進行方向について考えてみると, エリクセン試験は二軸変形で, 応力は試料の半径方向と円周方向の二方向に作用し, 半径方向の引張り応力が大である。このような応力が大型硫化物, 球状介在物が存在している個所に加えられた場合に

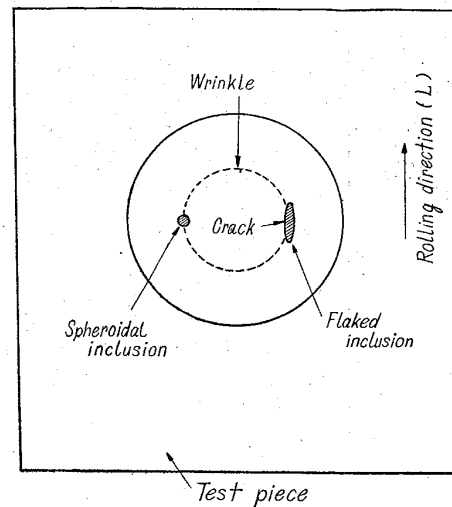


Fig. 1. Schematic diagram of crack-formation of Erichsen test piece.

ついて, Fig. 1 のモデル図を用いて考えてみる。一般に L 方向より C 方向に引張応力を加えた場合の方が介在物の周辺部 (Fig. 1 参照) での応力集中は大きく, 介在物は Matrix から離れ易いといわれている²⁾ので, このことを考慮すると, Fig. 1 のように圧延方向に伸びた介在物が試料内で応力が大きい部分, すなわちしわ発生相当部分に存在する場合は, 当然亀裂が生じ易く, その亀裂の進行方向は圧延方向に平行になると推測できる。球状介在物の場合は形が丸く, 一般にこの種の介在物は非常に小さいので応力集中は比較的小さい。また, 極軟リムド鋼の Matrix は展延性が大きいため, かなり大きな応力集中がなければ, 亀裂の生成および伝播はほとんど生じないと考える。以上のような考察に基いて, 冷延鋼板の張出し加工性に対しては圧延方向に伸びた大型硫化物 (長さ 100 μ 程度以上の MnS) がいちじるしく悪影響をおよぼし, その他の介在物はほとんど悪影響を与えなかつたものと推定する。なお, Photo. 2(c) に示したような異常に大きなスカムが存在している場合には, Notch-effect がいちじるしく, より小さな引張応力で亀裂が入るため, しわ発生位置と無関係に割れるものと考えられる。ここで酸化物系介在物と張出し加工性との関係について若干補足する。第 2 報³⁾で述べるが, スライム法による鋼塊中の介在物の分布状況の調査結果によると, 鋼塊底部に大型の酸化物が存在しているので, これらは鋼板において大型硫化物 (MnS) と同様に張出し加工性を悪くすると思われる。しかし, 鋼板での各鋼塊相当位置の介在物の分布状況の観察結果 (Table 1) でも明らかなように, 鋼塊底部側では異常な大型酸化物は認められず, またエリクセン値が低下する傾向も認められなかつた。この原因は鋼塊底部の大型酸化物の絶対量が

Table 1. Correlation between distribution of inclusions in coil

S in ladle %	Position from ingot top (%)	Clean-ness (%)	Total number of inclusions	L		>75 μ					50 μ ~ 75 μ				
				N	T	<2.5 μ	<5 μ	<7.5 μ	<10 μ	>10 μ	<2.5 μ	<5 μ	<7.5 μ	<10 μ	>10 μ
0.016	8.3	0.19	1190	3 (0.3)							2 (0.2)				
	10.0	0.27	988	8 (0.8)							2 (0.1)	1 (0.1)			
	15.0	0.21	1188	2 (0.2)											
	20.0	0.25	967	1 (0.1)											
	50.0	0.23	802	0 (0)											
	70.0	0.17	615	0 (0)											
	90.0	0.12	455	1 (0.2)											
0.020	8.1	0.25	869	39 (4.5)											
	10.0	0.22	1126	18 (1.6)											
	15.0	0.36	1260	31 (2.5)			1 (0.1)								1 (0.1)
	20.0	0.34	920	22 (2.4)					1 (0.1)						3 (0.3)
	50.0	0.22	815	18 (2.2)											
	70.0	0.17	711	11 (1.5)											
	90.0	0.20	721	16 (2.2)											

Note: * = Number of inclusions [%]

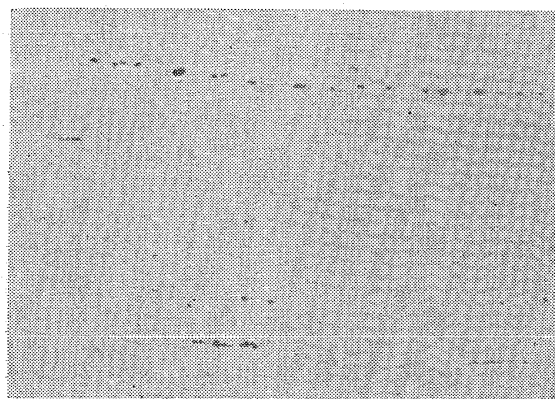


Photo. 5. Shape of aluminate existing with silicate in sheet. ×400 (3/5)

頭部の大型 MnS に比べて少ないので、今回の調査ではその介在物に遭遇しなかつたものと思われる。しかし、他の調査では鋼板中鋼塊底部相当位置に Photo. 5 に示すような Al_2O_3 系介在物をともなつた MnO-SiO₂ 系介在物が認められた。また他の経験では 0.3mm 厚さの鋼板で比較的苛酷な加工を行なつたところ、Fig. 2 に示

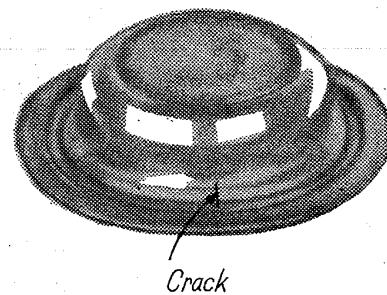


Fig. 2. Schematic diagram of stretch-forming.

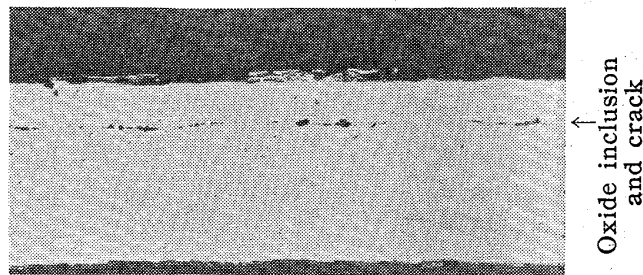


Photo. 6. Example of crack-forming along oxide inclusions by stretch-forming.

×100 (3/5)

and sulphur content in ladle.

25 μ ~ 50 μ					L T N	< 25 μ				
< 2.5 μ	< 5 μ	< 7.5 μ	< 10 μ	> 10 μ		< 2.5 μ	< 5 μ	< 7.5 μ	< 10 μ	> 10 μ
1 (0.1)*					1187 (99.7)	1061 (89.2)	94 (7.9)	26 (2.2)	2 (0.2)	4 (0.3)
4 (0.5)				1 (0.1)	980 (99.2)	720 (72.9)	211 (21.4)	32 (3.2)	11 (1.1)	6 (0.6)
	2 (0.2)				1186 (99.8)	923 (77.7)	213 (17.9)	33 (2.8)	8 (0.7)	9 (0.8)
1 (0.1)					966 (99.9)	668 (69.1)	214 (22.1)	51 (5.3)	13 (1.3)	20 (2.1)
					802 (10.0)	526 (65.6)	192 (23.9)	60 (7.5)	15 (1.9)	9 (1.1)
					615 (10.0)	447 (72.7)	106 (17.2)	39 (6.3)	13 (2.1)	10 (1.6)
					454 (99.8)	342 (75.2)	73 (16.0)	18 (4.0)	11 (2.4)	10 (2.2)
29 (3.3)	3 (0.3)	1 (0.1)	3 (0.3)	3 (0.3)	830 (95.5)	748 (86.1)	68 (7.8)	9 (1.0)	4 (0.5)	1 (0.1)
16 (1.4)	2 (0.2)				1108 (98.4)	1033 (91.7)	66 (5.9)	8 (0.7)	1 (0.1)	
18 (1.4)	1 (0.1)	4 (0.3)	2 (0.2)	2 (0.2)	1229 (97.5)	1139 (90.4)	67 (5.3)	18 (1.4)	4 (0.3)	1 (0.1)
16 (1.7)	1 (0.1)			1 (0.1)	898 (97.6)	820 (89.1)	75 (8.2)	1 (0.1)	1 (0.1)	1 (0.1)
12 (1.6)	2 (0.2)	1 (0.1)		2 (0.2)	797 (97.8)	724 (88.8)	62 (7.6)	10 (1.2)	1 (0.1)	
7 (1.0)	1 (0.1)			2 (0.3)	700 (98.5)	619 (87.1)	69 (9.7)	10 (1.4)	2 (0.3)	
12 (1.7)	1 (0.1)		1 (0.1)	1 (0.1)	705 (97.8)	637 (88.3)	58 (8.0)	10 (1.4)		

L: Length, T: Thickness, N: Number of inclusions

すような個所に亀裂が生じ、その原因は既述の Al₂O₃ 系介在物をともなう MnO-SiO₂ 系介在物であることを認めた。なお、Fig. 2 の亀裂は圧延方向に沿って進行しており、亀裂部直上を圧延方向と平行に研磨した個所の介在物の存在状況を Photo. 6 に示した。

鋼塊中の大型球状酸化物は圧延過程で微細化され、MnO-SiO₂ 系は圧延方向に線状に、Al₂O₃ 系は点滴状の介在物になるので、鋼板中で同一長さの大型硫化物 (MnS) に比べればエリクセン値に対する有害性は多少小さいのではないと思われる。また、この系の介在物の分布量は第 2 報³⁾、第 3 報⁴⁾ で述べるように大型硫化物の量に比べてはるかに少ないため、工業的見地からはその影響度は小さいと思われる。

次に熱延鋼板の振り破面に対する介在物の影響について考察しよう。先の試験結果で大型硫化物が存在すると板厚中央部に亀裂が集中し、一本の断層線が生じることが明らかになっている。この現象も既述のエリクセン試験の場合と類似しており振り応力によって大型硫化物 (MnS) の存在している個所から亀裂が生じ、圧延方向

に平行にその亀裂が進行したためと考えられる。

このようにリムド鋼板の加工性に対していちじるしく悪影響をおよぼす大型の MnS は Table 1 に示したように鋼塊頭部濃厚偏析相当位置に多く分布している。したがってこの種の介在物は S の偏析と密接な関係があると推測される。このことから鋼板中の S 量と加工性との関係を詳細に検討する必要があると考える。その例を Fig. 3 に示すが、同図の上段は冷延鋼板の S 量とエリクセン値、下段は熱延鋼板の振り破面との関係を示している。まづ前者の関係であるが、図中で×印はしわ発生時に亀裂が生じない場合、⊗印は大型硫化物が原因となつて亀裂が生じた場合、△印はスカムが原因となつて割れた場合を示している。これによると S 量の増加とともにエリクセン値は低下し、特に S 量が 0.04% 以上になると大型硫化物による亀裂の発生率が高くなる傾向にある。結局鋼板中 S 量が 0.04% 以上になると大型の MnS の析出量が多くなり、エリクセン試験のしわ発生相当部分にその系の硫化物の存在する確率が高くなることを示しているものとする。この大型 MnS の悪影響が顕著

