

論 文

UDC 621.746.393 : 621.771.019 : 620.19133 : 669.14-412

鋼塊内ザク分布と鋼板の方向絞りにおよぼす鑄型形状の影響*

川和 高穂**・細田 義郎***・坂田 直起***
伊藤 雅治****・三好 俊吉****

Effects of Ingot Weight and Size on Loose Structure and the Reduction of Area in Z-direction of Steel Plate

Takaho KAWAWA, Yoshiro HOSODA, Naoki SAKATA,
Masaharu ITO, and Syunkichi MIYOSHI

Synopsis:

Recent tendency to the enlargement of various structures made of steel plates, such as ships and bridges brings about the need for the production of the large ingots which weigh more than 30 tons. Such large ingots have a loose structure in the center of ingot along axis, which deteriorates not only the homogeneity of solidification structure, but also mechanical properties of end-products, especially reduction of area in tensile test in the thickness direction of plates (Z-tensile test).

Research works on the loose structure and its effects on mechanical properties have been seldom reported before. The present report has proposed a new method using ultrasonic test to measure quantitatively the looseness of the structure of ingots. With this method, the effects of ingot weight and shape on the formation of the loose structure were investigated and clarified. Furthermore, the change of the looseness by rolling was investigated. Investigations have revealed that the reduction of area in Z-tensile test, which is of prime importance on heavy plates, is substantially dependent on the looseness of the plates originating from that of ingots.

1. 緒 言

近年、構造物や船舶の大型化、橋梁の長大化などに伴ない鋼板の極厚化・大単重化が要求され、これに対して鋼塊の大型化が進められている¹⁾²⁾。しかし、鋼塊が大型化されるその品質、特に鋼塊中央部に形成されるザク (Loose structure) が発生し、製品品質の劣化をまねく³⁾。したがって上記鋼板需要に対処するためにはザクの少ない鋼塊の製造が極めて重要となる。

従来、鑄造品の機械的性質におよぼすザクの影響⁴⁾⁵⁾、あるいは特定の鋼塊または鑄片を素材として圧延し鋼板品質と鑄造組織との関係を論じたものは、2, 3 見うけられるが⁶⁾⁷⁾、鋼塊内質の違いが圧延後の鋼板の品質にどのように影響するかを論じたものはほとんど見あたらない。そこで本報告は鑄型形状がザクにおよぼす影響を定量的に明らかにし、引き続きザクが圧延に伴いどのよう

に変化し鋼板の品質に影響するかを明らかにした。鋼板の品質特性としては、特に最近の海洋構造物用高級鋼板の仕様において高品質を要求される板厚方向絞り (以後 Z 方向絞りという) で判定した。

2. ザクの定量方法

鋼塊のザクの測定方法として、従来密度測定²⁾、カラーチェック (ダイチェック)³⁾、X 線透過法⁸⁾などの試験が行なわれているが、それぞれ一長一短があり、ザクを定量的に把握する方法は確立されていない。そこで、大型鋼塊の全域にわたり、精度よく定量できる方法を確立する必要がある。

2-1 試験方法

2-1-1 供試材

150 t LD 転炉で溶製した Table 1 に示す取鍋成分の溶鋼を、下注造塊法により 40 t 扁平下広鑄型および 40

* 昭和 51 年 2 月 20 日受付 (Received Feb. 20, 1976)

** 日本鋼管(株)技術研究所 福山研究所 工博 (Fukuyama Research. Labo., Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 720)

*** 日本鋼管(株)技術研究所 福山研究所 (Fukuyama Research. Labo., Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

**** 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K.)

Table 1. Chemical composition of the ingot for ultrasonic test (%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Sol Al
0.13~0.15	0.33~0.39	1.31~1.39	0.011~0.020	0.009~0.015	0.16~0.18	0.04~0.08	0.030~0.052

Table 2. Dimensions of ingot mold.

Mold	Inner dimension at 1/2 height		Height (H) (mm)	Taper of wide face $\left(\frac{D_T - D_B}{H} \times 100\right)$ (%)	Type
	Narrow face (D_M) (mm)	Wide face (W_M) (mm)			
K 40 A	875	2 150	3 200	-3.1	Big end down
K 40 B	880	2 150	3 200	+6.4	Big end up
K 40 C	880	2 150	3 200	+8.1	Big end up
K 21	763	1 749	2 350	-3.2	Big end down
K 15	725	1 645	2 200	-1.4	Big end down
K 12	615	1 645	2 200	-1.4	Big end down
K 10	585	1 545	1 900	-1.6	Big end down

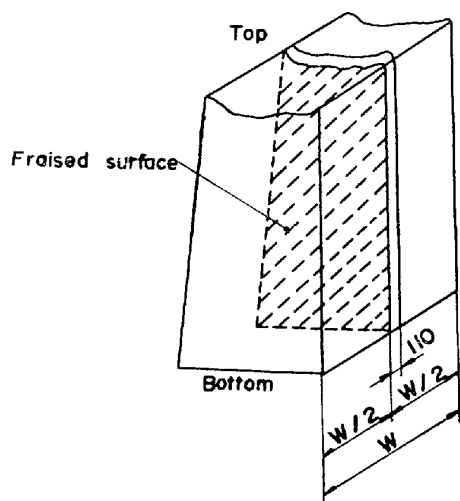


Fig. 1. Sampling position in ingot.

t 扁平上広鑄型に鑄造した。両鑄型の主要諸元を Table 2 に示す。溶鋼の取鍋ノズル下温度は、1 595°C 鑄込高さ 3 100 mm、鑄込速度 161 mm/min である。また押湯枠は内装式である。

上記鋼塊が完全凝固した後、型抜きして常温まで大気放冷した後、Fig. 1 に示すように鋼塊の軸心を含み短辺面に平行な試験片を切り出した。試験片は表裏面ともガス切断時の熱影響を完全に除去するまで機械切削し、表面(軸心側)を▽▽に仕上げ、裏面を▽仕上げして、厚さを 110 mm とした。また密度測定用試験片は、超音波探傷試験終了後の試験片より、鋼塊軸心上の所定位置から採取した。

2.1.2 超音波探傷試験方法

鋼塊のザクを定量する方法として次のごとき超音波探傷試験を実施した。

はじめに鋼塊の超音波探傷試験片全面を、25 mm ピ

Table 3. Ultrasonic testing condition.

Ultrasonic flaw detector	Krautkrämer, type U.S.M.-ZMT
Probe	Normal-beam probe, Quartz 24 mmφ, 2MHz
Coupling medium	Machine oil

ッチにケガキして、その全格子点を探傷した。探傷は Table 3 に示す条件で行ない、試験中の被検部 i 点において第 1 回目底面反射波高が、ブラウン管上の目盛の 80% に達するように超音波探傷器のゲインを調整する。その時のゲインを a_i dB とする。ここでザク組織の程度が重いほど、材料通過過程で音波エネルギーが吸収され減衰するので第 1 回目底面反射波高を 80% するためには、ゲインを増大させる必要がある。一方、当該試験片中でザクの最も少ない部分として、鋼塊中央部から底部区間の表層部(鋼塊の表面から 25 mm~50 mm 柱状晶領域)をとり、この部分をその鋼塊の健全領域とみなす。健全領域における第 1 回目底面波高を、ブラウン管上目盛の 80% に達するようにゲインを調整し、その時のゲイン (dB) を記録する。健全領域で 100 点探傷し、ゲインが 1 dB ごときのヒストグラムをつくり、同一ゲインの測定数が 20 以上となる最小ゲイン a_0 dB を、当該鋼塊の健全部の基準値とした。次に測定点におけるザク指数は、 $\Delta a \equiv a_i - a_0$ と定義した。なお、超音波周波数は 1~4 MHz でテストしたが周波数が高いとザクの検出精度は増すがノイズも増し、又 110 mm の試験片に対する透過性も減少し、一方周波数が低いと透過性はよいがザクに対する検出精度が低下する。これら両者のかね合いから使用周波数は 2MHz に決定した。

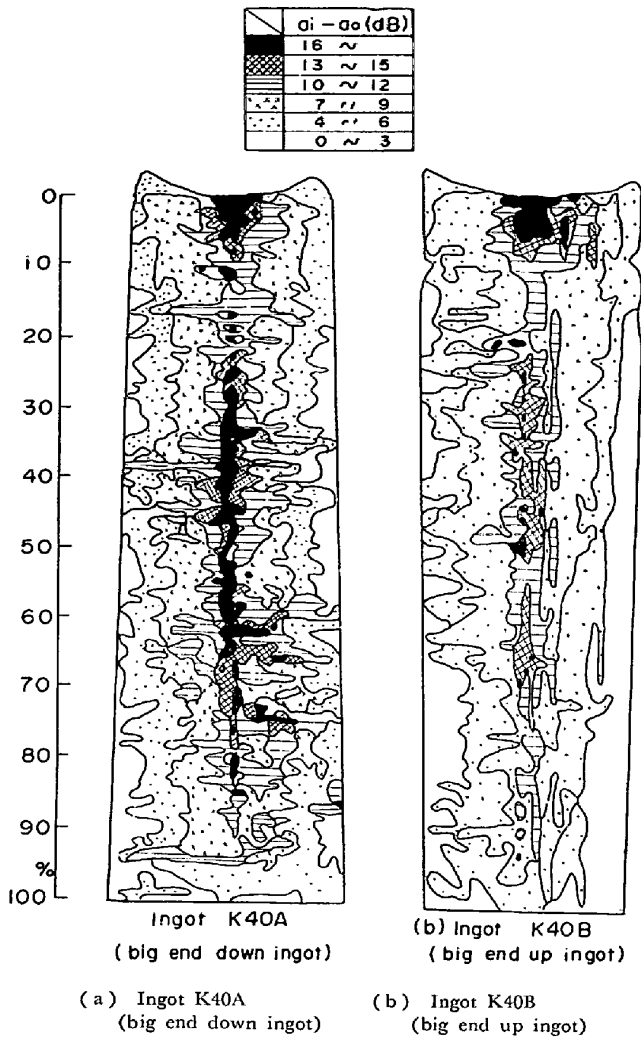


Fig. 2. Distribution of loose structure on longitudinal cross section of ingot.

次に、鋼塊試験片を超音波探傷した場合、結晶粒が粗大であると試験片を通過中に結晶粒により超音波が散乱され底面エコー高さの低下を起こす。そこで本研究においては、一部鋼塊の超音波探傷試験片を铸造のままの場合と焼準した場合について超音波試験を実施して、焼準前後における底面波の減衰状況も比較試験した。

2.1.3 密度測定方法

ザク指数として超音波探傷により前述の Δa を測定したが、これの有効性を検討するために、密度測定を実施した。測定の方法はアルキメデス法によった。

はじめに、標準試料として化学成分既知で偏析の少ない鋼ブロックを鍛造し、焼準した材料により $10 \times 20 \times 30$ mm の直方体試験片(表面 $\nabla \nabla \nabla$ 仕上げ)を製作した。標準試料の密度 ρ_0 を化学組成の荷重平均より算出した。未知試料は標準試料と同一形状寸法・表面仕上げとし、(1)式より算出した。なお採取試料個数は1箇所につき3個とした。

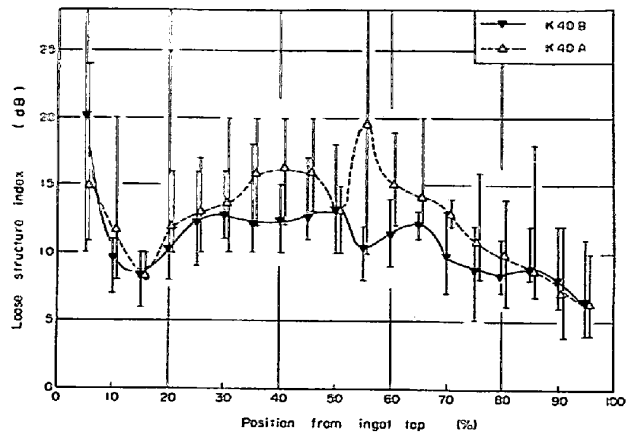


Fig. 3. Reduction of ultrasonic echo along ingot center axis.

$$\rho = \frac{W}{W_0} \cdot \frac{W_0 - W_{0,L}}{W - W_L} \cdot \rho_0 \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、 W : 未知試料の空気中での重さ
- W_0 : 標準試料の空気中での重さ
- W_L : 未知試料のジエチルフタル酸中での重さ
- $W_{0,L}$: 標準試料のジエチルフタル酸中での重さ
- ρ_0 : 7.819 g/cm^3

2.2 試験結果

2.2.1 超音波探傷結果

(1) 鋼塊縦断面のザク指数分布

供試鋼塊 K40A および K40B の厚さ方向縦断面全域に関する超音波減衰量の分布を、Fig. 2 に示す。この結果より鋼塊表面より最低約 100 mm 深さまでの領域に極めて超音波減衰量の小さい部分が存在する。この領域の幅は頭部押湯枠内より中央部、底部へと移行するにつれて広がる傾向がみられる。ただし、下広鋼塊(K40A)の中央部においては部分的に狭くなっている位置が存在する。鋼塊表層部健全部分から軸心に向かうとともに超音波減衰量は大きくなり、軸心とその近傍において最大値を示す。最大値を示す領域 ($\Delta a \equiv a_i - a_0$ が 16 dB 以上の領域) は、下広鋼塊の軸心上に顕著に存在している。

上記結果より、鋼塊マクロ組織とザク指数分布の対応は次のようにまとめられる。

- (i) 鋼塊表層部のチル晶帯および樹枝状柱状晶帯におけるザク指数は極めて小さい。
- (ii) 鋼塊軸心とその近傍の樹枝状等軸晶帯においてザク指数はもつとも大きい。この領域は上広鋼塊よりも下広鋼塊の方が広範囲に存在する。
- (iii) 沈殿晶帯の中に占める粒状等軸晶帯のザク指数は上記両者の中間にある。
- (iv) 逆V偏析線が分布する分枝柱状晶帯は、沈殿晶の等軸晶帯と同程度のザク指数を有する。

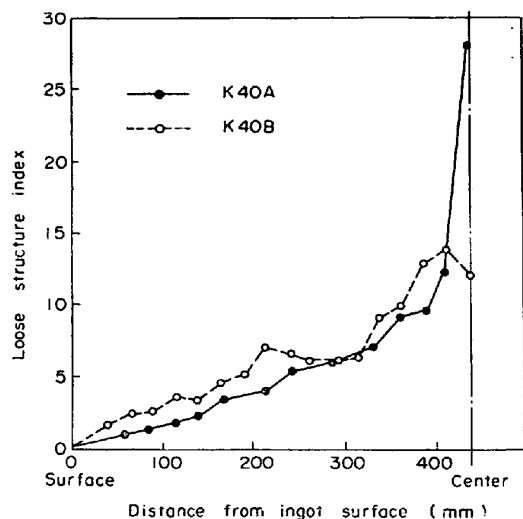


Fig. 4. Distribution of loose structure index at the half-height of ingot.

以上の鋼塊ザク指数分布より、所定鋼塊のザク指数分布の特徴を示すためには、鋼塊軸心上の高さ方向分布と、高さ中央部における厚さ方向分布により定量化できることがわかる。なお軸心上および厚さ方向のザク指数分布はそれぞれその場所を中心とする 9 点および 4 点 (25 mm ピッチ) の測定値の平均値をもつて示した。

(2) 軸心上のザクの分布

K 40A および K 40B 鋼塊の軸心上高さ方向に関するザク指数 (9 点の測定値の平均値) 分布を Fig. 3 に示す。これによると、Top から 10% までは押湯枠内部に相当し、ザク指数の大なる領域である。押湯下方の 15% 付近にザク指数が極小となる領域が存在する。これに続く 20%~70% の間でザク指数が極大となる場所が存在し、両鋼塊のザク指数分布の特徴が出て差がはつきりしている。70% よりボトム側においてはザク指数は単調減少し著しい特徴は示さない。

(3) 厚さ方向のザク分布

K 40A, K 40B 鋼塊の高さ中央部における厚さ方向のザク指数分布を (4 点の測定値の平均値) を Fig. 4 に示す。

ザク指数は鋼塊表層部で小さく表層からの距離とともに増大し、厚さ中央部でさらに一段と増加する傾向がある。K 40A (下広) は中心で著しく高い最大値をとるが、K 40B (上広) は中心より 25 mm 外側で最大値をとる。このようにザク指数は鋼塊厚さ中心もしくはそれから 25 mm 程度外側で最大値をとることがわかる。また厚さ中央部における急激なザク指数増大はほぼ V 偏析帯に相当する区間で起こっている。

(4) 鑄造ままの試験片と焼準試験片の超音波減衰比較

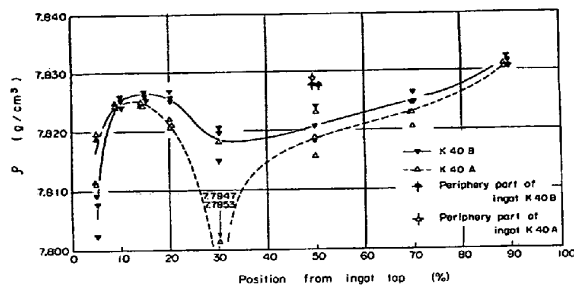


Fig. 5. Distribution of density along ingot center axis.

鑄造ままの鋼塊においては前オーステナイト結晶粒界にフェライトが析出しており、軽度のマクロ腐食試験によりこれがマクロ的ネットワークを形成しているのが観察される。このフェライトネットワークは超音波減衰をきたすので焼準によりこれの有無による超音波減衰量の差を調べた。試験対象材は、鋼塊凝固後の冷却速度の差が最大となるように 40 t 鋼塊 (K 40 B) と 10 t 鋼塊 (K 10) を選定し、高さ中央部において 100 mm 幅につき、鋼塊表層から厚さ中心までを採傷した。その結果、焼準による超音波減衰量の差は高々 3 dB であつた。したがつて、以下の研究を行なうに当たつて無視できる。そこで以後鋼塊試験片は鑄造のままを採傷した。ただし、鋼種が異なると前オーステナイト粒の大きさが著しく変化することは他の実験で確認されたため、以後の試験鋼は同一鋼種に限定した。

2.2.2 密度測定

K 40A および K 40B 鋼塊の軸心高さ方向に関する密度分布を Fig. 5 に示す。なお鋼塊表層部の密度もあわせて示した。

両鋼塊ともに最頭部とトップより 30% 付近で密度が低下する傾向がある。特に下広鋼塊 (K 40A) の密度はトップより 30% で著しく低いものがあり、サンプリング位置のわずかな違いにより測定値が大きく変化する。これに対して上広鋼塊 (K 40B) の場合はバラツキが小さく、平均値の低下量も極めて小さい。トップから 10~15% において両鋼塊の密度はほとんど一致しているが、その他においては上広鋼塊の方が常に大きい密度を示す。

次に鋼塊トップより 50% 高さにおける厚さ方向の密度分布を測定した結果、両鋼塊ともに表層部から中心に向かつて密度は減少し、表層部においてはバラツキが極めて小さいが、中心部で増加する。また上広と下広を比較すると、表層から 1/4 まではほとんど差がみられないが、中心部で下広の方が若干低めとなる。

上記密度分布の傾向は、ザク指数分布の傾向と一致している。

2.2.3 ザク指数と密度の関係

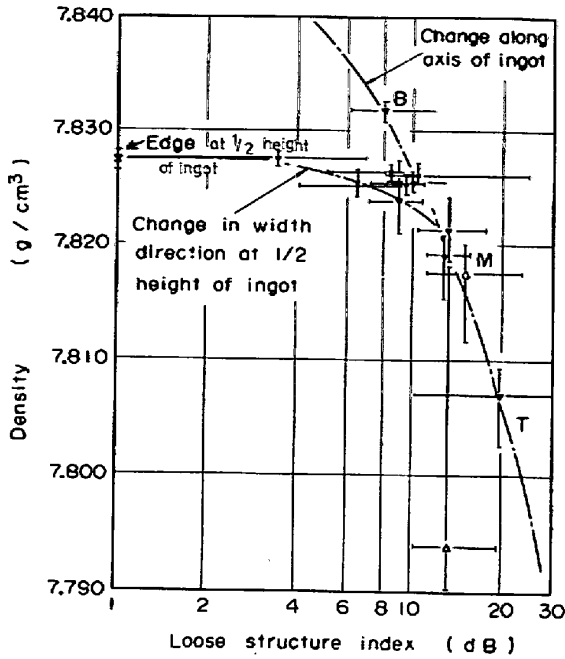


Fig. 6. Loose structure index depending on density.

上記結果よりザク指数と密度の間に密接な相関があることが推定される。

Fig. 6 にザク指数と密度の関係を示す。測定方向を例えば鋼塊軸心上に限定すれば、ザク指数が増加すれば密度が減少することが明らかであり強い相関が認められる。なお一般的には超音波の減衰はポロシティの他介在物もその原因となる。そこで QTM により鋼塊表層部から中心にかけポロシティと介在物の面積率を測定したが、後者は前者の約 1/20 であつた⁴⁾。したがって上記ザク指数はポロシティすなわち密度と直接関係があるといえる。

一般にザクの本質はマクロおよびミクロなポロシティであるが、鋼成分が均一であればその定量値は密度で表わせる。しかしザクを密度で表わすためには、Fig. 5 から明らかなように、約 0.05% 以上の精度が必要である。しかし、このような高精度の密度測定が可能な精度天秤は手元になく、測定不可能であつた。そこで試料重量は約 50 g とし、化学天秤を使用した。鋼塊から多数の試料を切出すことは多くの手数を要する。また、大型鋼塊内でザク分布のパラツキが大きい場合には多数試料の密度測定をし、その平均値を求めることも場合により必要となるが非常に繁雑であり、またその後の調査に支障をきたす。これに対して、超音波探傷法の場合は比較的小範囲から、かなり広範囲に至るまでをマクロ的に能率よく測定でき、さらに非破壊検査法であるという利点がある。よつて本報告では以後、超音波探傷によるザク指数でもつて、ザクの程度を示すことにする。

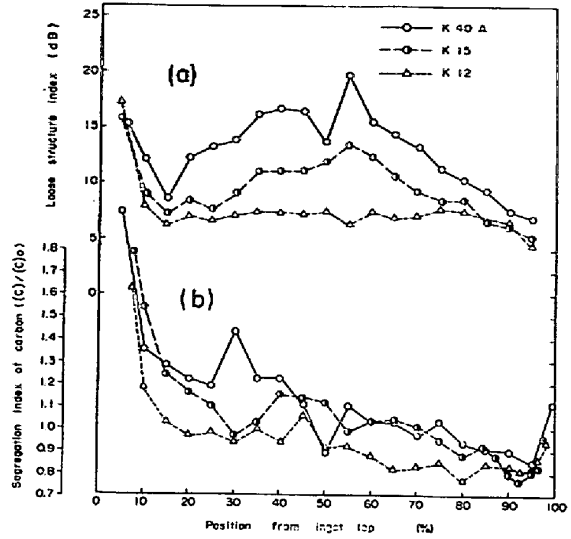


Fig. 7. Comparison of distributions of loose structure and segregation index.

3. 鋼塊形状とザク分布

3-1 試験方法

扁平鋼塊の形状因子として、テーパー・高径比・扁平比があげられる。ここで鋼塊の凝固を考えた場合、扁平比が 2.0 以上の場合、鋼塊幅中心部における厚さ方向の凝固係数 K は一定となり、隣接面からの抜熱の影響を受けなくなる⁹⁾。本報告の対象鋼塊は扁平比 2.3~2.9 であるので、ザクに対する扁平比の影響を無視してよい。以上より本研究では扁平鋼塊のザクに関しては鋼塊軸心を含む幅中心における縦断面を試験対象とした。

3-1-1 供試材

2-1-1 で用いた供試材の他に 150 t LD 転炉で溶製した Table 1 に示す取鍋成分の溶鋼を、下注造塊法により 10 t から 40 t までの鋼塊を鑄造した。溶鋼の取鍋ノズル下温度は 1570°C、使用鑄型の主要諸元は Table 2 に示すとおりである。

上記鋼塊より 2-1-1 で述べた方法で鋼塊試験片および密度試験片を作成し、試験に供した。

3-1-2 試験項目

試験項目として減衰法による超音波探傷、アルキメデス法による密度測定 (2-1-2, 2-1-3 と同じ) および成分分析を実施した。

成分分析は鋼塊軸心上高さ方向の成分変化と鋼塊高さ中央部における厚さ方向成分変化を明らかにするために、所定位置より試料を採取した。試料は 10 mmφ ドリルを用いて約 2cm³ を削りとり分析に供した。

3-2 試験結果

3-2-1 軸心上のザク分布におよぼす鋼塊厚さの影響

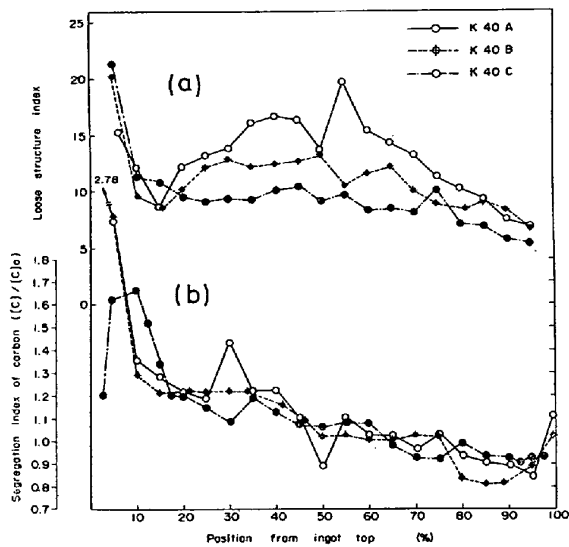


Fig. 8. Comparison of distributions of loose structure and segregation index.

12 t, 15 t および 40 t 下広鋼塊の軸心上高さ方向のザク分布を Fig. 7(a) に示す。

図から明らかなように、鋼塊重量が増加するほど軸心上のザク指数が増加し、同時にザク指数の変動が増大する。特に 40 t 鋼塊の変動が大きい。これは鋼塊縦断面の目視観察で K 40 A 鋼塊のみに 2 次パイプが認められたが (軸心上 TOP より 47~54%, 大きさ 5 mm 以下)、これを超音波で捕捉したか否かによりこのように変動したものと思われる。

3.2.2 軸心上のザク分布に及ぼす鑄型テーパの影響

Fig. 8(a) は鋼塊重量一定 (40 t)、高径比一定 (2.87) の場合に、鋼塊軸心上のザク分布におよぼすテーパの影響を示す。図より明らかなようにザク組織は下広鋼塊よりも上広鋼塊の方が良好であり、同じ上広鋼塊の場合にはテーパが大きいほど良好である。すなわち、高さ中央部において下広鋼塊ではザク指数が大きく、かつ、位置による変動が大きい、上広鋼塊ではザク指数・位置による変動のいずれも小さい。特にテーパの大きい上広鋼塊 K 40 C ではザク指数が小さく、かつ極めて安定している。また押湯枠下端部において K 40 A と K 40 B 鋼塊はザク指数極小値をとるが、K 40 C 鋼塊では明確な極小値をとらない。

以上の結果より、上広鋼塊でテーパをある値以上に大きくすることによりザク組織に対して極めて良好な大型鋼塊の製造が可能であることがわかる。

3.2.3 鋼塊軸心上の偏析

Fig. 7(b), 8(b) に各種鋼塊の軸心上高さ方向の [C] の成分偏析度変化を示す。ここで偏析度としては各位置

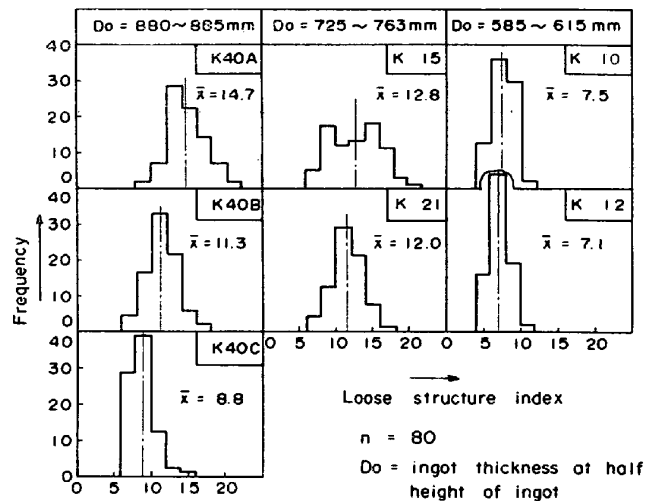


Fig. 9. Distribution of loose structure index at half height of ingot.

における分析値を鋼塊表層部における分析値で除した値を用いた。

ザク分布のグラフと比較すると明らかなように、ザク指数が増加し、かつ変動が大きくなる鋼塊高さ中央部では偏析が増加し、かつ変動も大きいことがわかり、ザクと偏析の間には密接な関係があることが推察される。今、この領域における正偏析を二次偏析と呼ぶことにすると、この 2 次偏析度は鋼塊単重が大きいほど、上広より下広でテーパの大きいほど増加する傾向を示し、鈴木ら¹⁰⁾による実験室的規模の鋼塊における偏析傾向と定性的に一致している。

3.2.4 鋼塊ザク程度の順位

これまでの結果より各鋼塊のザク程度は、鋼塊高さ中央部軸心付近の値で代表しうることが明らかとなった。しかし、25 mm ピッチの測定点ではザク指数値のパラツキが大きく、平均値の意味がなくなることおよび後述の厚板における試験ではトップから 45~60% 範囲を供試材とするため、トップから 45, 50, 55, 60% 軸心上に 90×90 mm のワクを定め、この中で各 60 回のランダム探傷を行ない、合計 80 点の平均値を鋼塊中央部ザク指数の代表値とした。

Fig. 9 は鋼塊を厚さで 3 グループに層別し、各鋼塊の上記測定値のヒストグラムを示す。図によれば各グループで最小値はほぼ一致しているが、高い方の発生頻度が異なり、そのため平均値も各鋼塊で異なっている。この平均値で各鋼塊のザク程度を順位づけると、

$$K 12 < K 10 < K 40 C < K 40 B < K 15 < K 40 A$$

小 ← ザク程度 → 大

となる。

3.3 考察

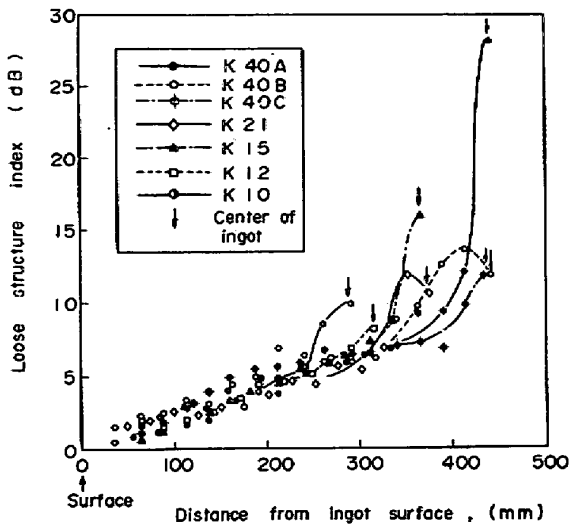


Fig. 10. Change of loose structure index in thickness direction of ingot.

一般に鋼塊の最トップ部のザクに起因する欠陥は、スラブおよび厚板のクロップとして切捨てられるが、運悪く成品に残留してもクロップ切増しにより対処できる。しかし鋼塊中央部のザク性欠陥は、特に極厚鋼板や大単重鋼板の場合には上記処理はほとんど不可能である。したがっておもに鋼塊高さ中央部のザクに注目する。

鋼塊内ザク指数はトップから45~60%軸心上で最大値を示すが (Fig. 7, 8 参照), 最大値を示す位置における鋼塊厚さ方向のザク分布は Fig. 10 に示すごとくである。図によればいずれも表層から内部に向つてザクは同じ勾配でゆるやかに増加するが、中心付近で急増し、その程度は鋼塊間で異なっている。この結果より鋼塊のザク生成機構を次の二種類に大別することができる。

(1) デンドライトアーム間へのミクロ的給湯の難易性により生ずるポロシティーで、その大きさはデンドライトアームのオーダーである (ミクロ・ポロシティー)

(2) 鋼塊の凝固末期に生ずるマクロ的収縮により固液混相が流動し、その流動の難易性により生ずるポロシティーで最も小さいものはミクロ・ポロシティーのオーダーであり、大きいものは目視可能な二次パイプにまでなる (マクロ・ポロシティー)。

Fig. 10 で示される厚さ方向のザク分布で中央部以外は、(1) のミクロ・ポロシティーがデンドライトの肥大によりしだいに増加し、鋼塊形状によらず鑄肌からの距離により一義的に定まることを示している。また厚さ中央部では (2) のマクロ・ポロシティーが生じ、鋼塊形状により異なる値をとる。つまり鋼塊の厚さと高さかほぼ等しい場合にはマクロ・ポロシティーは主にテーパーに依存するものと考えられる。したがって、鋼塊形状と厚さ方向ザク分布の関係は定性的に Fig. 11 のように

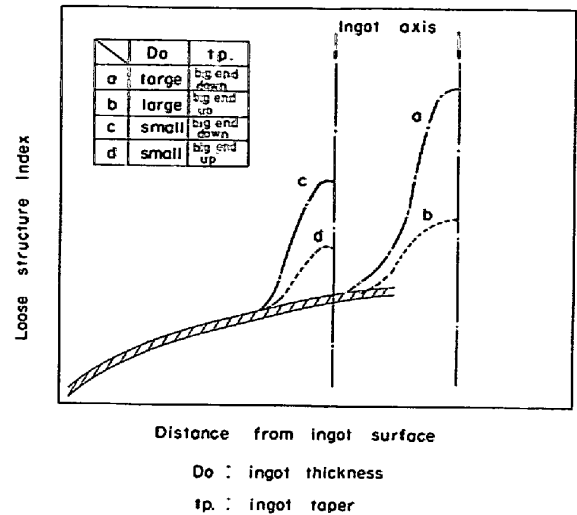


Fig. 11. Schematic diagram on relation between ingot shape and loose structure.

まとめることができる。すなわち鋼塊内ザク指数は、第一に鋼塊の厚さ方向で中心に向つて増加し、第二に鋼塊テーパーに依存して中心部で変化し、下広鋼塊より上広鋼塊の方が小さくなる。以上の関係は鋼塊内部健全性におよぼす vertical core の影響について述べている F. MARBURG¹¹⁾ の考えと定性的に一致する。

4. 厚板のZ方向織りとザク組織の関係

4.1 試験方法

4.1.1 供試材

取鍋成分、鑄型、鑄造条件を3.1.1とほとんど同一条件で鑄造した鋼塊を、厚さ150mmのスラブまたは厚板に圧延し、これを素材として当所厚板工場の四重圧延機または技術研究所の熱間試験圧延機で鋼塊軸方向に圧延し、これより引張試験片を採取した。

ここで実施した厚板のZ方向引張試験は、次の二系列に分類される。第一系列は鋼塊の不均質性(ザク、偏析)が厚板に圧延された場合、どのように残留するかを150mm厚の鋼板で鋼塊幅中央トップからボトムに至る位置に相当する各位置のZ方向織りで判定するものであり、第二系列は鋼塊で最もザク指数の大きい高さ中央部・幅中央部に相当する位置に試験対象位置を限定して、圧下に伴う厚板のZ方向織りの変化を調査したものである。

4.1.2 Z方向引張試験方法

厚板のZ方向引張試験片は、鋼塊内質との関連を調査するため全厚引張りとした。すなわち、板厚150mmについては板厚全長を試験片全長とし、板厚120mm以下については継手を摩擦圧接した。引張試験片の形状は、平行部径10mm、平行部長さ60mm、標点間距離50mm、肩部曲率半径15mm、つかみ部長さ35mm以上

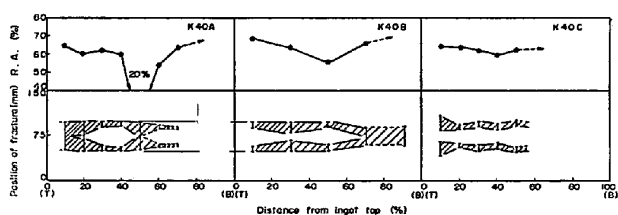


Fig. 12. Reduction of area and position of fracture at Z-tensile test influenced by ingot type.

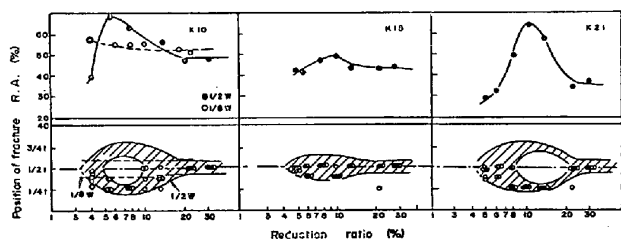


Fig. 13. Reduction of area and position of fracture at Z-tensile test influenced by ingot size.

の丸棒引張試験片である。引張試験機は Instron (10 t-type) を使用し、初期歪速度 10%/min で 5 mm/min の引張速度で試験した。なお、Z 方向織りは圧延まま材と焼準材とを比較したが、その差はほとんどなかったので本研究では以後圧延まま材を主体に調査した。

4.2 試験結果

4.2.1 一定圧下比における Z 方向特性の分布

Fig. 12 にテーパーが異なる 40 t 鋼塊から製造した 150 mm 極厚鋼板の幅中央における Z 方向織りの鋼塊高さ方向分布およびそれに関係すると思われる引張試験片破断位置 (板厚方向破断位置) を示す。これらの結果より次のことがわかる。

(1) 鋼板内で織りが最低となるのは、鋼塊トップから 50% に対応する位置であり、破断位置は板厚中央およびそれから 10~30 mm 外れた位置である。

(2) 上記位置は鋼塊の二次偏析およびザク領域から予想される位置 (30%) とやや異なる。

(3) 板厚中央での破断位置は、V 偏析帯内に対応し、板厚中心より 10~30 mm はずれた破断位置は逆 V 偏析帯またはこれと V 偏析帯の境界に対応している。

4.2.2 圧下に伴う Z 方向織りの変化

Fig. 13 に K10, K12, K21 3 鋼塊の圧下に伴う Z 方向織りの変化および破断位置を示す。これらの結果より次のことがわかる。

(1) 各鋼塊とも、圧下比の増大とともに Z 方向織りは増大して最大値をとりその後しだいに低下し一定値に収束する。最大織りは K10 が最も大きく、K15 が最も小さい。

(2) 最大織りを示す時の圧下比は鋼塊により異なり、それは K10, K15, K21 の順に高圧下比となる。

(3) 圧下比の増大とともに破断位置は $1/2 t \rightarrow 1/4 t \rightarrow 1/2 t$ (t : 板厚) と変化し、最大織りは破断位置が $1/4 t \sim 3/8 t$ 位置の場合に得られる。

(4) 鋼板幅方向の $1/8$ 幅位置では上記傾向と異なり Z 方向織りは圧下比の増加に対して単調減少し、破断位置も $1/2 t$ で一定である。

5. 考察

以上の試験結果より、鑄型形状により鋼塊内質が変化した場合、厚板の Z 方向織りは鋼塊高さ中央部で顕著な差が現われること、さらに一定の鋼塊から種々の圧下比に圧延した場合、Z 方向織りは圧下比により大きく変化することが明らかとなった。そこで、鋼塊内質、圧下比、および厚板の Z 方向織りの相互関係について考察する。

5.1 Z 方向引張破断位置と織りの関係

一般に鋼材の破断織りに影響する因子としては、鋼中のポロシティおよび介在物などの異相面積率が重要であるとされている¹²⁾。ポロシティは圧延により消滅する方向にあるので圧下比の増加は織りの向上に寄与するが、介在物は圧延により変形・伸長するので圧下比の増加は織りを低下させる方向に作用する。したがって織りはザクの圧着と介在物の伸長の両者の影響の兼ねあいで定まるものとされている¹³⁾。しかしこの考えはマトリックスの強度分布がその試験範囲内である場合に限定され、本研究のごとく全厚引張の場合には、鋼塊厚さ方向の成分偏析のため試験範囲内のマトリックス強度分布をも考慮に入れなければならない。そして、破断位置は、これら 3 者の組み合わせによつて定まり、その位置の織りが測定されるということである。この観点から厚板の Z 方向織りにおよぼす鋼塊内質 (ザク, MnS, 成分偏析) を整理すると Table 4 のようになる。この各因子と従来の概念を組み合わせることにより、圧延に伴う破断位置の変化は Fig. 14 のように変化すると考えられる。すなわち、

a) 低圧下比の場合には、板厚中央に未圧着ザクが多

Table 4. Change of loose structure and segregation with seduction.

Factor	Appearance	Change with reduction
Loose structure	Porosity	Reduced and diminished
Segregation	MnS	Elongated
	Enrichment of [C], [Mn], etc	Unchanged

く存在するため偏析によるマトリックス強度の増加でも
支えきれず 1/2 ϵ で破断する. この位置にはザクが多い
ため絞りは低い値となる. (ザク支配)

b) 中圧下比の場合には, ザクは縮小し MnS は伸長
する一方マトリックスの強度分布は圧下により変化しな
いから板厚中央で変形抵抗が大きく, したがって破断は
強度が低下しはじめる板厚中央よりやや外側で, MnS ま

たはザクを起点として生ずる. しかし, この圧下比では
MnS の伸びは比較的小さく, またこの位置のザクは小
型のため絞りは高い値をとる. (ザク-MnS 支配)

c) 高圧下比の場合には, ザクは完全に圧着し, MnS
は著しく伸長する. 特に板厚中央では偏析により MnS
が多いためマトリックスの強度では支えきれずこの位置
で破断する. この時絞りは伸長した MnS のため低い値

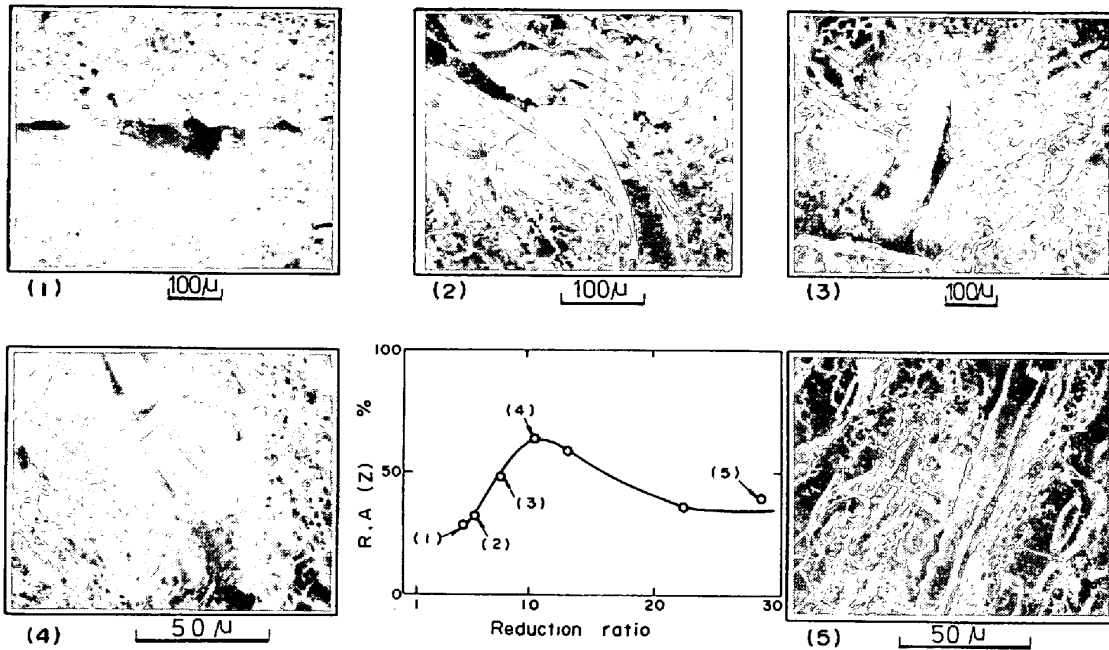


Photo. 1. Appearance of fractured cross section by SEM depending on reduction ratio (21 t ingot).

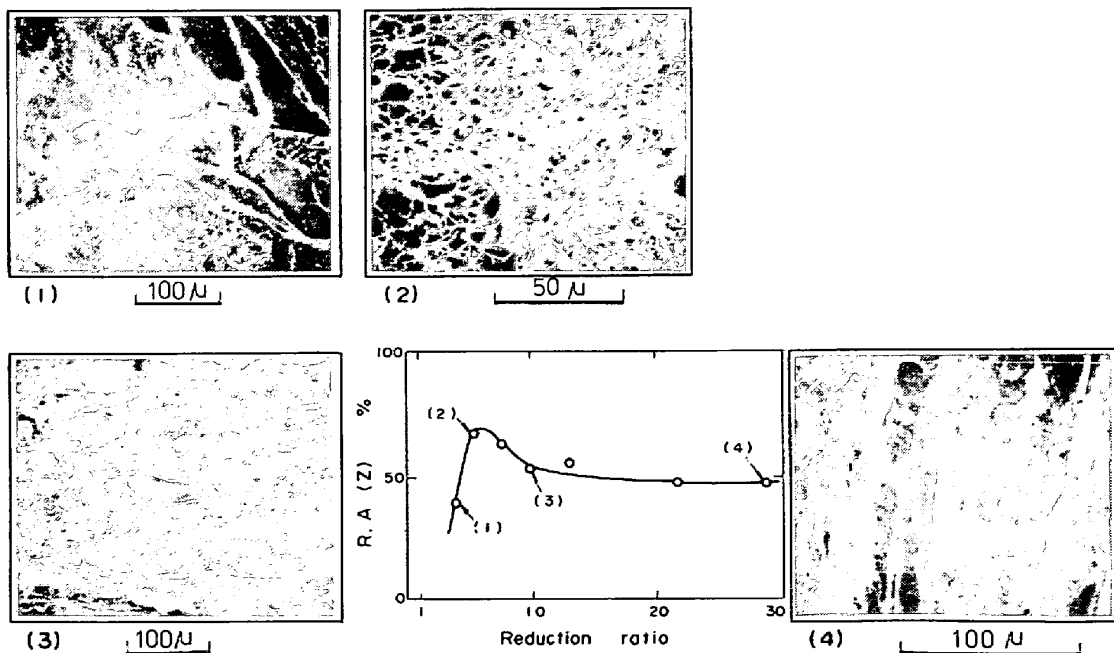


Photo. 2. Appearance of fractured cross section by SEM depending on reduction ratio (10 t ingot).

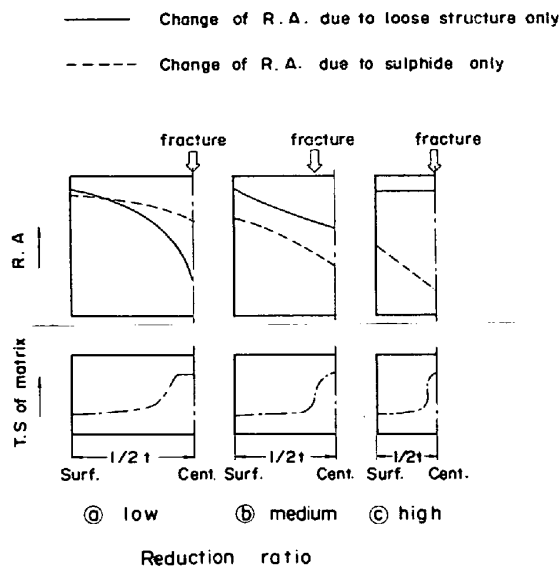


Fig. 14. Diagram explaining the change of fracture position in ingot thickness relating to reduction ratio.

となる。(MnS 支配)

上述の機構は K 21 鋼塊, K 10 鋼塊の引張破断面の走査電顕写真例で裏付けられる (Photo. 1, 2). すなわち, 低下圧下比においては a) の状態であることを示す未圧着ザクがみられ織りは低い. さらに低下圧下比が大きくなるにつれ, b) の状態に移行し, 織りは大きくなり, さらに低下圧下比が大きくなると MnS の伸長が大きくなり c) の状態となり織りは再び低下する. 一方, K 15 鋼塊では Fig. 10 に示すように厚さ中央部のザクが比較的多いために a) の状態が長く続き b) が明瞭に現われないまま c) に移行したと考えられ, そのため破断位置も低下圧下比によらず 1/2 t となっており, また織りの最大値も, K 10 や K 21 鋼塊より低いものと考えられる. また, K 10 の 1/8 幅位置材は鋼塊表層に近いのでザクが少なく, MnS の影響のみが現われ, すべての低下圧下比において c) の状態で進行するため織りが単調に減少するものと考えられる. さらに上述の考え方は, 4.2.1 に述べた 150 mm 鋼板の鋼塊高さ方向織り分布についても適用できよう. たとえば, K 40 A 鋼塊の 50% 付近はザクがかなり残留し, 一方, 2 次偏析は低下しはじめる位置であるため 1/2 t で破断し, 織りは低値をとる. しかしこれよりトップ側の 30~40% では 2 次偏析がより大きく, したがって板厚中央の変形抵抗が大きいため 1/2 t よりも外側で破断する. またボトム側の 60~70% では 1/2 t 部のザクが減少しそれより外側の逆 V 偏析部の MnS で破断し, いずれも織りは 50% 付近より高くなる. かかる鋼塊軸心部のザク程度と偏析によるマトリックス強度分布

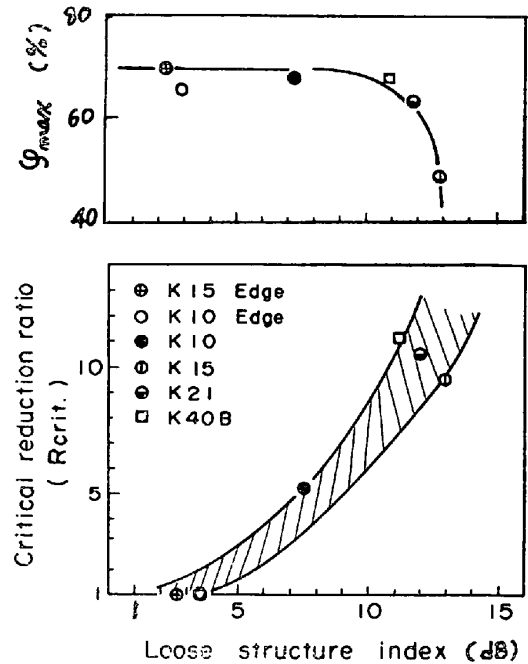


Fig. 15. Maximum reduction of area in Z-tensile test and critical reduction ratio affected by the loose structure index of ingot.

は, 鑄型テーパを上広にかえることにより変化し, +6.4% (K 40 B 鋼塊), +8.1% (K 40 C 鋼塊) とするとザクの軽減が著しいために板厚 1/2 t 付近で破断しがたく, それよりやや外側の 1/4 t ~ 3/8 t で破断する. そのため織りは高値を示す. 上記 3 鋼塊の低下圧下比はすべて 6 であり, この程度の低下圧下比においては, 鋼塊ザクが多ければ a) の状態, 少なければ b) の状態が現われる臨界点付近と思われる, それにより織りが大きく変化するものと考えられる.

以上から, 織りが最大となるのはザクの影響が減少し MnS の影響が現われ始める時と考えられるから, 素材のザク程度が弱い場合には低下圧下率でザクの影響が消え, その時の織りは高く, 逆に素材のザク程度が強い場合は低下圧下率を大きくしないとザクの影響を小さくすることができないが, それに伴い MnS が伸長するため最大織りは低くなると考えられる. そこで織りが最大となる時の低下圧下比を臨界低下圧下比 R_{crit} , その時の織りを $\phi_z \max$. とし, これらと素材 (鋼塊) のザク程度との関係を調べたものが Fig. 15 である. 図から明らかなように, 素材ザクの増加とともに R_{crit} は大きくなり一方 $\phi_z \max$. はザクがある程度 (12 dB 以上) に増加すると急激に低下し, 鋼塊ザク組織の特性が厚板の Z 方向織りを支配する重要な因子であることを示唆している.

5.2 圧延による MnS の変形

次に MnS の影響であるが, 鋼材中の MnS は熱間圧

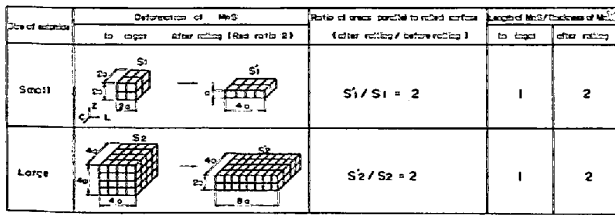


Fig. 16. Scheme of MnS deformation in rolling.

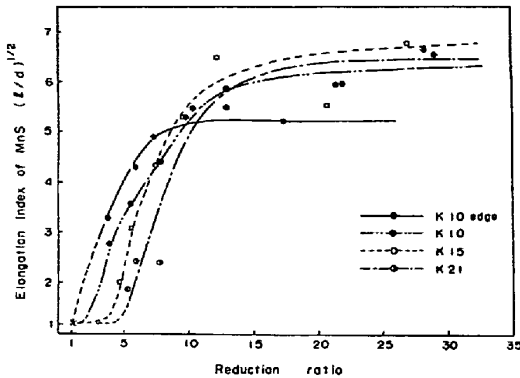


Fig. 17. Elongation index of sulphide depending on reduction ratio.

延により圧延方向に伸長し、これと垂直方向の有効断面積が低下するため材料試験において延性の低下として現われる¹⁴⁾。そこで圧延による MnS の伸長を Z 方向絞りにおよぼす影響という観点から把握するために Fig. 16 のようなモデルを考える。凝固鋼中の MnS の大きさは凝固条件、例えば冷却速度により変化する¹⁵⁾が、本モデルを用いれば鑄造のままの鋼中の MnS の大きさによらず、圧下比が定まれば、圧延面に平行な面への MnS 投影面積比 (S'/S) と (MnS 長さ l)/MnS 厚さ $(d)^{1/2}$ は一義的な関係をもつ。そこで厚板の L 方向断面検鏡面の $1/2t$ 部で、 $(l/d)^{1/2}$ を測定し、これを圧延による MnS の形態変化を示す MnS の伸長係数と定義する。Fig. 17 は MnS 伸長係数と圧下比の関係を示す。これによるとザク指数の小さい健全材ほど低圧下比段階で MnS の伸長が行われること、ある圧下比以上においては MnS 伸長係数はほぼ一定値に収束する傾向を示すことがわかる。ここで MnS 伸長係数が収束を開始する圧下比を MnS 伸長臨界圧下比と称し、 $R_{s, crit}$ で示すと、絞り臨界圧下比 R_{crit} との間に Fig. 18 はの関係がえられる。これは最大絞りを示す圧下比の段階では、MnS はまだ十分伸び切っていないことを示し、 R_{crit} よりさらに 7 だけ圧下比が増すと、MnS の伸長が完了し、それによつて、 ϕ_z の値も一定値に収束することを示している。この Z 方向絞りの収束値は鋼塊が大型のものほど低絞りとなる傾向が認められるが、これは MnS 伸長係

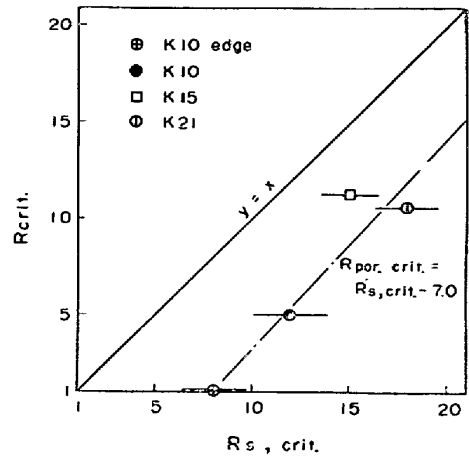


Fig. 18. Correlation between critical reduction ratio of sulphide elongation and that of porosity.

数 $(l/d)^{1/2}$ の値が同じであつても MnS の大きさが、大型鋼塊の方が大きくなり Z 方向絞りへの悪影響が大きくなるためと考えられる。よつて R_{crit} を大幅に越える高圧下比の厚板において Z 方向特性を向上させるには素鋼 [S] レベルを下げるのが非常に効果的であることがわかる。

5.3 小 括

以上 5.1 ならびに 5.2 の考察から厚板の Z 方向絞りに対しては、鋼塊の内質 (特にザク, MnS, 偏析) と圧下比が大きく作用する。したがつて厚板成品の寸法 (特に板厚)、単重、Z 方向絞り規格などが与えられた場合には鋼塊の厚さ、幅、高さ、テーパを最適に選定することが重要である。特に極厚鋼板あるいは大単重鋼板用の大型扁平キルド鋼塊は、テーパの大きい上広鑄型に鑄造することによりザクの少ない鋼塊を製造することが可能であることがわかつた。他方、量産工場における上広鋼塊の鑄造は作業性に問題を含むことが多い。したがつて今後の研究課題として、下広鑄型を使用して上広鋼塊と同等の凝固をさせ、ザクの少ない下広鋼塊を製造する造塊技術の開発も重要である。

6. 結 言

単重 10 t から 40 t までの扁平キルド鋼塊のザク分布と鋼塊形状の関係を調査して次の結果を得た。

(1) 鋼塊ザクの測定方法として超音波探傷減衰法が有効であり、ザク指数を定義した。このザク指数と密度の間には明らかな相関が存在する。

(2) 鋼塊のザクは鑄肌から距離に比例して増加するマイクロ・ポロシティと、鋼塊高さ中央、厚み中央の領域に発生し、鑄型形状により変化するマクロ・ポロシティ

一の2種から成り上広鑄型はマクロ・ポロシティーの減少に効果があることが判つた。さらに、ザクと鋼塊2次偏析の関係を調べると、

(3) ザク指数が大きい鋼塊ほど2次偏析が大きい。
次に各種形状鋼塊を圧延し、次の結果を得た。

(4) 厚板の試験法として全厚Z引張り法を適用した場合、Z方向織りによぼす因子としては未圧着ポロシティー、MnSの他に偏析によるマトリックス強度分布も考慮する必要がある、Z織りが対鋼塊位置、鑄型形状、圧下率で変化するのはこれら3因子の影響度が変化するためである。

(5) すなわち、対鋼塊の高さ中央部幅中央部(30~50%)が最も鑄型形状の差を反映し、一般に低織りとなる位置である。この低下は鑄型テーパーを上広することにより改善され、その効果は極厚板の方が著しい。

(6) 圧下比の増加に伴い、Z織りは初め上昇し最大値を示した後低下し一定値に漸近する。しかし、この挙動は鑄型形状に影響され、ザクの少ない鋼塊材ほど低圧下率で最大織りに達し、かつその時の織りは高い値となる。

(7) 高圧下比側で一定値となる織りは素鋼の[S]レベルが同一ならば、小型鋼塊ほど高い値となる。これは凝固時に析出するMnSが小型になるためと考えられる。

本研究の遂行に当り多大のご支援並びにご協力をいただきました福山製鉄所の幹部、製鋼部および管理部の方々に対して、また有益な助言をいただき、さらには引張試験を担当した福山研究所鋼材研究室の石原利郎君には厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 楠原ら：川崎製鉄技報，6 (1974) 2, p.174
- 2) 高石ら：鉄と鋼，59 (1973) 11, S 439
- 3) 鈴木：日本製鋼所技報，31 (1972) p. 25
- 4) 細田ら：鉄と鋼，60 (1974) 11, S 407
- 5) K. V. PRABHAKAR, et al.: Trans. Indian Institute of Metals, April (1973) p. 11
- 6) 邦武ら：鉄と鋼，56 (1973) 4, S 137
- 7) 田中ら：同上，61 (1975) 4, S 166
- 8) 森：同上，60 (1974) 4, p. 784
- 9) H. RELLERMEYER: Giessen und Erstarren von Stahl (1967), p. 111 [Verlag Stahleisen]
- 10) 鈴木ら：鉄と鋼，59 (1973) 3, p. 431
- 11) E. MARBURG: Trans. AIME Journal of Metals, Feb. (1953), p. 157
- 12) B. I. EDELSON et al.: Trans. ASM, 55 (1962) p. 230
- 13) 成田ら：神戸製鋼技報，16 (1966) 4, p. 239
- 14) 例えば小指：構造用鋼の非金属介在物に関する諸問題，p. 129 [第 24, 26 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会)]
- 15) K. SCHWERDTFEGER, et al.: Arch. Eisenhüttenw., 43 (1972) p. 201