

## 論 文

## 大型キルド鋼塊のザクにおよぼす水素と鋼塊形状の影響

土田 裕\*・宮下 芳雄\*<sup>2</sup>・今井寮一郎\*<sup>3</sup>  
玉井 淳三\*<sup>4</sup>・広瀬 猛\*<sup>4</sup>・田口喜代美\*<sup>4</sup>

## Influences of Hydrogen and Ingot Shape on Loose Structure in Large Ingot of Killed Steel

Yutaka TSUCHIDA, Yoshio MIYASHITA, Ryoichiro IMAI,  
Junzo TAMAI, Takeshi HIROSE, and Kiyomi TAGUCHI

### Synopsis :

In order to produce large ingots of sound inner quality, important factors which influenced the loose structure formation were investigated by employing the ultrasonic testing method.

The loose structure was found to differ both in its formation mechanism and solidifying condition depending on the location under investigation.

The loose structure which appeared in the axial region varied depending on the ingot shape. The degree of looseness could be evaluated by the shrinkage pipe index,  $\alpha$ ; the looseness decreased as the index  $\alpha$  increased. The index is defined as a function of three parameters on ingot shape :

$$\alpha = \varphi - 35.3 [(L/D)/P] + 7.7$$

where,

$\varphi$ : taper of wide face (%),

$L/D$ : height to thickness ratio (-),

$P$ : hot top ratio (%).

On the other hand, the loose structure which appeared in areas other than the axial region varied depending on the hydrogen content in molten steel. It was found to be essential to reduce the hydrogen content in order to decrease the degree of looseness. Its reduction was remarkably effective for the structure especially in the region where inverse  $V$ -segregation appeared.

## 1. 緒 言

近年、各種産業分野の構造物や設備の大型化が進み、それに使用される鋼板は厚肉化、大単重化の傾向にある。したがって、それを製造する鋼塊も大型化している。また、機器の安全性や信頼性を確保するため、製品に対する品質の要求もいつそう厳しくなつてきている。

一方、素材となる極厚鋼板に発生する主欠陥の一つに超音波不良があり、その原因は鋼塊に内在したザクの未圧着、または、それに付随する水素割れなどである。一般に、鋼塊が大型化すると発生するザクの量や大きさは増加する傾向にあり、しかも製品が厚肉化すると、ザクは圧着されにくくなる<sup>1)</sup>。そして、ポロシティとして残留するばかりでなく、水素の集積場所となつて割れを誘発することがある。かかる理由から、超音波欠陥のない

製品を得るためには、ザクの少ない、内質の健全な鋼塊を製造する必要がある。特に予備鍛錬なしに、直接鋼塊を圧延して鋼板を製造する方法においては<sup>2)</sup>、鋼塊内のザクをいかに低減するかが重要な課題である。

従来、上記のような問題に対処する経験的な方法として、上広鋼塊の採用、および脱ガス処理による鋼中水素の低減などの操業が実施されてきている。また、鋼塊のザクに関する報告も多い<sup>3)~14)</sup>。しかし、凝固に伴つて発生するザクの生成機構に不明な点が多く、具体的なザク低減法は必ずしも十分ではないように思われる。

本報告は、種々の形状および大きさの厚板用扁平キルド鋼塊を切断、調査し、ザクにおよぼす水素と鋼塊形状の影響を明らかにしたものである。特に、逆 $V$ 偏析を含む肥大晶領域におけるザクの水素依存性を明確にするとともに、軸心のザクが少ない理想的な鋼塊形状を決定す

昭和 55 年 4 月 4 日日本会講演大会にて発表 昭和 56 年 11 月 2 日受付 (Received Nov. 2, 1981)

\* 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

\*<sup>2</sup> 日本鋼管(株)技術研究所福山研究所 工博 (Fukuyama Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K.)

\*<sup>3</sup> 日本鋼管(株)本社 (Nippon Kokan K.K.)

\*<sup>4</sup> 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K.K.)

る手法を見出した。調査手順として、まず水素濃度の水準が異なる溶鋼から、単重のほぼ等しい代表形状の鋼塊を製造し、ザクにおよぼす水素の影響を把握した。その後、鋼塊軸心部のザクを取り扱い、下広鋼塊の二次パイプの発生条件を鋼塊形状因子で整理して臨界値を導出し、上広鋼塊に応用した。

## 2. 調査方法

### 2.1 供試鋼塊

供試材は、いずれも LD 転炉で溶製した 40~50 kgf/mm<sup>2</sup> 級の厚板用鋼種を、下注造塊法によつて得た扁平鋼塊である。これらの一部については、鑄造に先だち RH 脱ガス装置による脱水素処理を実施し、溶鋼中の水素レベルを低下させた。供試鋼塊の化学成分を Table 1 に示す。

各鋼塊から、軸心を含む厚さ方向の縦断面試片を採取し、機械切削により上面(軸心側)を VVV、下面を V に仕上げ、110 mm の一定厚とした。その試片を、超音波ザク測定、二次パイプの観察、サルファープリント、カラーチェックテストなどに供した。

なお、供試材は 5~40 t 鋼塊(計 20 本)であり、図や表中では便宜的に仮称番号(ほぼ鋼塊単重に相当)を使用する。また通常は、加工試片の鋼塊軸心における最頭部を基点(0%)に、最底部(100%)までを鋼塊高さとして取り扱う。

### 2.2 ザクおよび密度の測定

ザクの測定には、川和ら<sup>8)</sup>と同様、超音波減衰法を主に採用した。また一部の鋼塊については、この大試片の軸心部から小試片を切り出し、アルキメデス法により密度も測定した。

超音波減衰法とは、ザクの程度により音波エネルギーが減衰する性質を利用したもので、当該試片において、各被検部のザク指数<sup>9)</sup> Z[dB] を求めた。(詳細付録参照)

### 2.3 二次パイプの観察

下広鋼塊において、切削加工した試片の上面につき、加工のままの状態、二次パイプの有無を目視観察した。

Table 1. Chemical composition of ingots tested.

C	Si	Mn	P	S	SoIAl	H*
0.12	0.24	0.60	0.008	0.002	0.010	0.8
0.16	0.45	1.45	0.019	0.019	0.042	4.0

\* [H] in mould (ppm)

Table 2. Dimension of mould.

Mould	Inner dimension at narrow face (Dn)(mm)	Inner dimension at wide face (Dw)(mm)	Height (H) (mm)	Taper $\phi$ (%)	Type
K 30 A	818	2100	2700	- 3.1	big end down
K 34	885	2095	2800	+ 7.1	big end up
K 40 B	880	2150	3200	+ 6.3	big end up

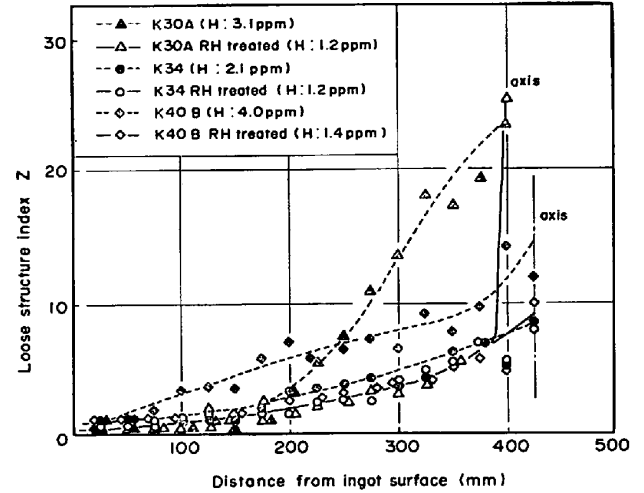


Fig. 1. Distribution of loose structure index in thickness direction at half height of ingot.

## 3. 調査および解析結果

### 3.1 ザクにおよぼす水素の影響

長辺面のテーパは異なるが、平均内径と高さのほぼ等しい三種類の形状の鑄型に、脱ガス処理溶鋼、および非処理溶鋼を鑄造して 6 本の鋼塊を得た。これらは、鑄型形状を Table 2 に示すような、K 30 A(下広・30 t)、K 34(上広・34 t)、K 40 B(上広・40 t) 鋼塊である。

鋼塊高さの 50% 位置における鋼塊厚み方向のザク指数分布(付録参照)、脱ガス処理の有無、および鑄型内の溶鋼中水素濃度とともに Fig. 1 に示した。鋼塊の軸心部を除く領域では、鑄肌からの距離の増大に伴つてザク指数がほぼ直線的に上昇しており、鋼塊形状によらず同様の傾向でザクは悪化している。また、鑄肌から等距離の位置で比較すると、脱ガス処理材のザクの方が非処理材のそれよりも軽度であり、かつ水素濃度が 3~4 ppm, 2.1 ppm, 1.2~1.4 ppm と低下するにしたがつてザクは低減している。この様子は、鑄肌から 200 mm 付近よりも軸心側、つまり逆 V 偏析の発生している肥大晶領域において特に顕著である。カラーチェック法により調査した脱ガス処理材と非処理材のポロシティの分布例を Photo. 1 に示す。検出された赤点の位置は、おおむね鑄肌から 200 mm よりも軸心側であり、サルファープリントとの対応から、大部分は逆 V 偏析の存在する肥大晶領域に分布していることがわかった。また、その

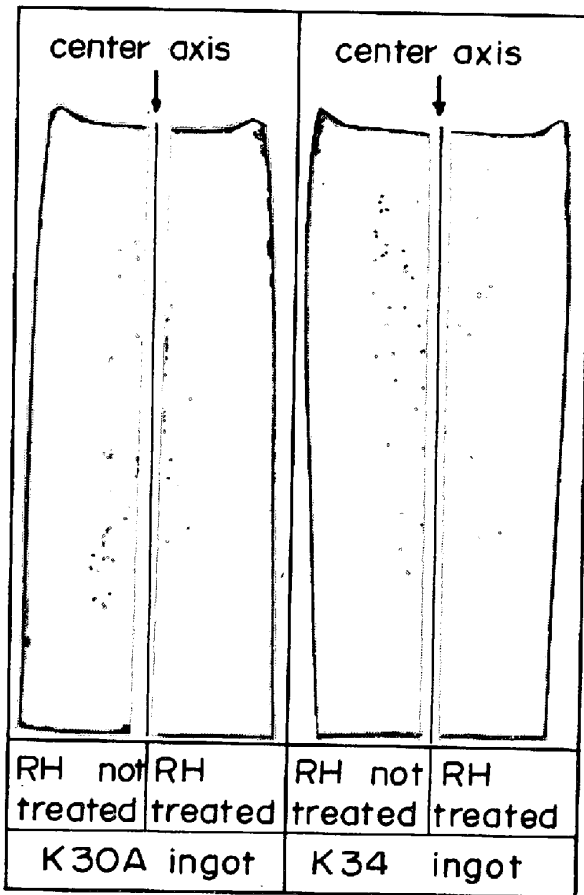


Photo. 1. Effect of hydrogen content on distribution of porosities in ingots. (by color check method)

個数は非脱ガス処理材に比して脱ガス処理材で著しく減少している。ちなみに、脱ガス処理材の赤点の数は、非処理材の約 40% であつた。このように、脱ガス処理による水素低減の効果として、凝固に伴つて生成される水素性のポロシティは大幅に減少し、ザクが軽減している。

一方、鋼塊軸心部のザク指数は、いずれの場合にも上昇し、他の位置のそれと比較して高い値になつている。その絶対値は、上広鋼塊と下広鋼塊とで差を有するが、同一形状の鋼塊間では水素濃度の高低にかかわらずほぼ等しい。Fig. 2 に、各鋼塊の軸心部における高さ方向のザク指数分布 (付録参照) を示す。全体的には、脱ガス処理材のザクが非処理材に比して軽度になつているように見受けられるが、主要な部分に注目すると傾向は異なる。すなわち、二本の下広鋼塊および脱ガス処理した上広鋼塊の一部 (K 40B) で顕著に現れているように、鋼塊の 30~70% 付近には水素濃度の高低にかかわらず大きなザク指数のピークが認められる。つまり、この領域に分布するザクは鋼塊形状に依存し、いわゆる二次パイプか、あるいは異常に大きなポロシティが内在することを示唆している。

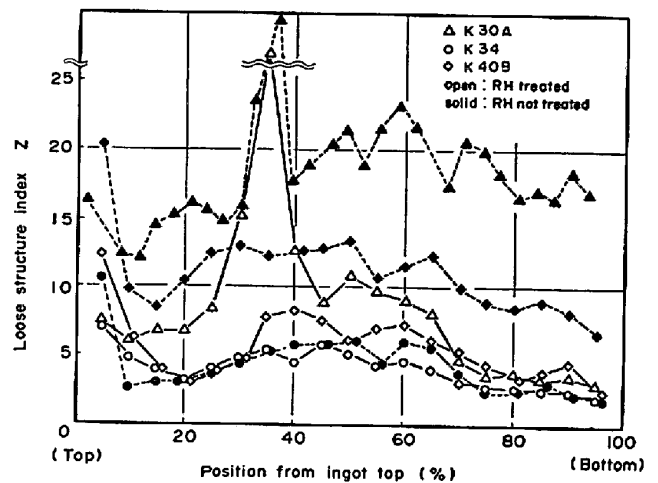


Fig. 2. Distribution of loose structure index along ingot axis.

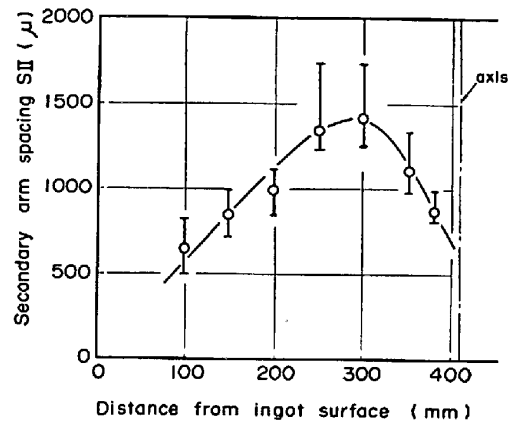


Fig. 3. Distribution of secondary dendrite arm spacing in thickness direction at half height of ingot (K30A, RH not treated).

このように、鋼塊軸心部とそれ以外の領域において、ザクの発生を支配する要因が異なるのは、主に凝固条件の相違に起因すると考えられるので、次項ではこれらの観点から解析を加える。

### 3.2 ザクにおよぼす凝固条件の影響

Fig. 3 に、鋼塊厚み方向における dendrite 二次アーム間隔  $S_{II}$  の分布 (K 30 A, 非脱ガス処理材の測定例) を示した。アーム間隔は、はじめ鋼塊の铸肌から内部へむかつて徐々に広がるが、その後軸心の片側約 100 mm の領域では再び狭くなつている。よく知られているように、dendrite 二次アーム間隔は冷却速度の目安である<sup>15)16)</sup>から、その分布によつて非加速凝固域と加速凝固域<sup>7)9)17)</sup>の存在を知ることができる。つまり、液相線界面が軸心に達するまでは、液相が十分に存在するため加速凝固は生じない。しかし、液相線界面が軸心に到達後は、固液共存相内に存在する液相は次第に少なくなり、しかもほぼ等しく抜熱されるから、固相線の進

行速度は大きくなつて凝固が加速される。

このような現象は、鋼塊の押湯部や底部を除く高さ方向の広い範囲で、ほぼ同時に発生していると考えられる。したがって、凝固が加速される軸心部では、マクロ的な凝固収縮に伴つて大きなポロシティが発生しやすい条件下にある。この際、軸心のいかなる位置に、どの程度のザクが発生するかは、鋼塊形状や凝固組織、あるいは溶鋼の供給速度や移動必要距離などに左右されるものであり、このことについては後で考察する。一方、非加速凝固域では、凝固速度がしだいに小さくなつてゆき、しかもバルクの溶鋼は常に供給されやすい状態にある。それ故、このような条件下で凝固する固液共存相内では、これを形成する凝固組織の粗さに見合う大きさで、ミクロ的な偏析に起因するガス性のポロシティ、あるいは収縮孔が発生するものと考えられる。

上記のように、ザクを形成するポロシティには成因や程度の異なるものがあり、次の二種類に分類した。

(i) ミクロポロシティ：ミクロ的な給湯の難易性に左右され、その程度は水素濃度と凝固組織の粗さの影響を受ける。主として非加速凝固領域で発生し、逆V偏析線内のポロシティもこれに属する。

(ii) マクロポロシティ：凝固末期のマクロ的な凝固収縮と給湯の難易性に左右され、主として鋼塊形状に依存する。鋼塊高さの30~70%位置に相当する軸心部の加速凝固域で発生し、大きなものは、いわゆる二次パイプになる。

### 3.3 ザクにおよぼす鋼塊形状の影響

鋼塊軸心のザクは、Fig. 1 および Fig. 2 から知れるように、他の領域のザクに比して程度が悪く、また厚みの中央に分布することから、圧着されにくい<sup>1)</sup>。したがって、鋼板で発生する欠陥の主因になることが多く、鋼塊のこの位置における健全性は最も重要であり、種々の報告<sup>3)~13)</sup>がある。

著者らは、上広鋼塊の軸心に発生する大きなザク、つまり鋼塊の30~70%位置の収縮孔が、基本的には下広鋼塊で発生する二次パイプと同じ凝固現象に起因するとの考えに基づき、下広鋼塊を主体に試験と調査を実施した。

#### 3.3.1 二次パイプの発生条件

形状の異なる5~40tの下広鋼塊、計15本(12種類)の試片についてPhoto. 2のような判定基準を設け、二次パイプの発生状況を分類した。

まず、Fig. 4で定義する鋼塊形状因子に基づき、従来の手法<sup>10)</sup>により整理を試みたが、後述するように、二次パイプの発生、非発生領域を区分できなかつた。

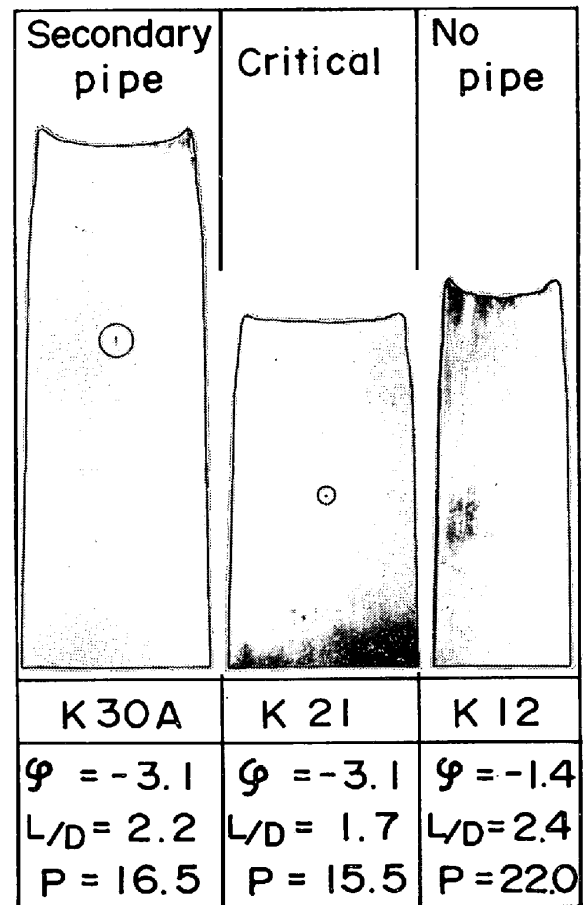


Photo. 2. Secondary pipe which appeared in big-end-down ingot.

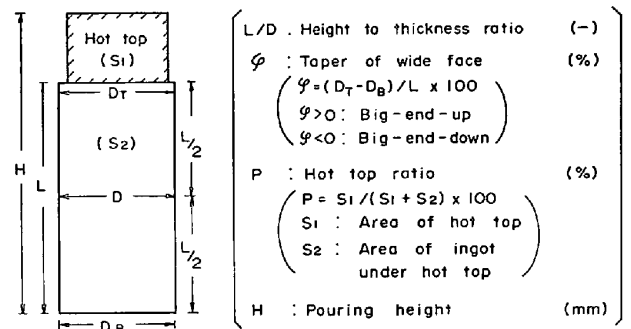


Fig. 4. Definition of ingot shape factors.

つぎに、押湯比(P)を変えて铸造した鋼塊の二次パイプ発生状況から、押湯比も重要な因子であることが知れたので、押湯比と高径比、押湯比とテーパーの関係で整理してみた。すると、二次パイプの発生に対して押湯比の増大は有利に、高径比とテーパー(ここでは負)の増大は不利な方向に作用することが明らかとなつた。そこで、押湯比に注目し、高径比とテーパーの積との関係でプロットしてみるとFig. 5のようになり、二次パイプの発生、非発生領域を明瞭に区分できた。この際、高径比とテーパーの積をパラメータとして採用したのは、

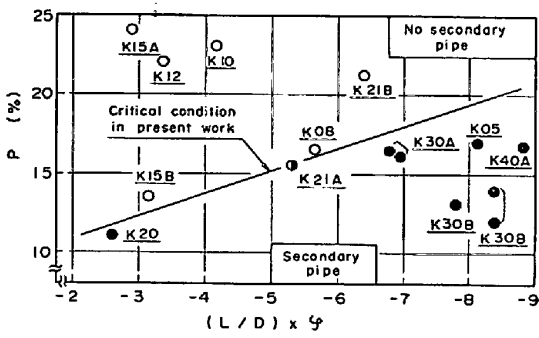


Fig. 5. Secondary pipe which appeared in big-end-down ingots.

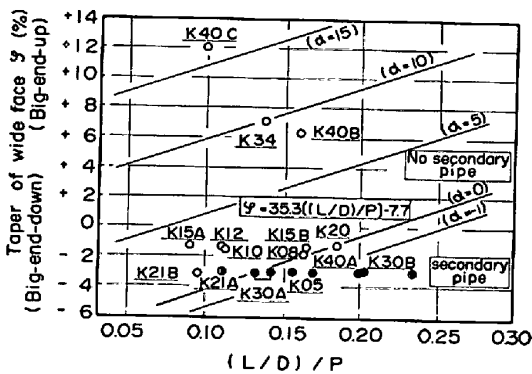


Fig. 6. Relation between shrinkage pipe index,  $\alpha$ , and shape factors of ingot.

二次パイプの生成に対して両因子の作用が同じ傾向をもっているからで、テーパと高径比/押湯比によつても同様に取り扱い得る。

Fig. 6 は、三つの鋼塊形状因子で整理した下広鋼塊の二次パイプ発生条件と、同じ手法で求めた上広鋼塊の相当位置をプロットしたものである。Fig. 6 において、二次パイプの臨界発生条件は(1)式で表される。

$$\phi = 35.3[(L/D)/P] - 7.7 \dots\dots\dots (1)$$

したがつて、収縮孔指数 ( $\alpha$ ) を(2)式のように定義すると、下広鋼塊および上広鋼塊の軸心のザクの程度を  $\alpha$  の大小によつて評価することができるものと推察される。

$$\alpha = \phi - 35.3[(L/D)/P] + 7.7 \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、 $\alpha > 0$  では二次パイプは見えない。しかし、超音波で検出されるザクは存在し、 $\alpha$  の大きい鋼塊ほどザクが改善されると考えられる。

3.3.2 収縮孔指数  $\alpha$  の妥当性

前項で定義した  $\alpha$  の妥当性を確認するため、既存の上広鋼塊よりも大きな  $\alpha$  の値を有する 40t の上広鋳型を設計し、実鋼塊 (K 40 C) でそのザクを調査した。

まず、脱ガス処理した 50 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼種をほぼ同じ条件で鋳造して得た三種類の上広鋼塊, K 34, K 40 B,

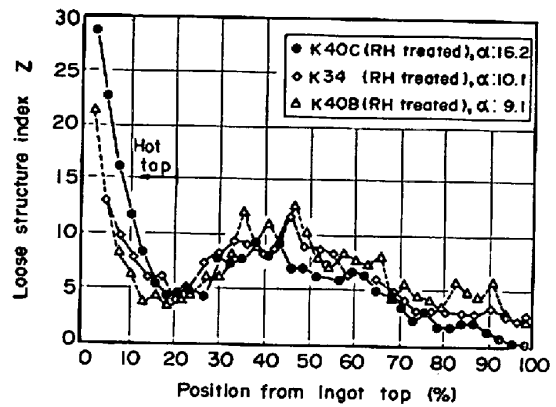


Fig. 7. Distribution of loose structure index along ingot axis. (case for big-end-up ingots)

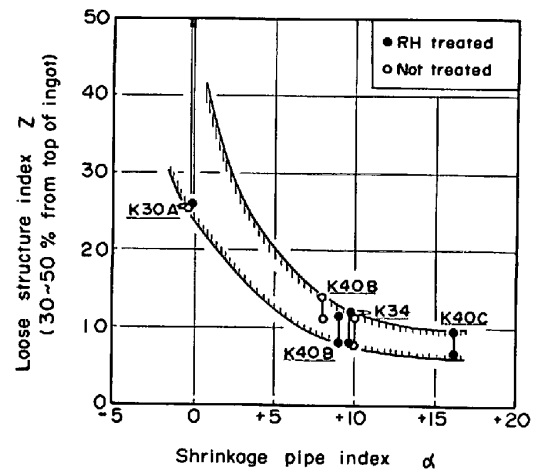


Fig. 8. Relation between shrinkage pipe index and loose structure index at center axis of ingot.

および K 40 C について、そのザクの程度を比較してみる。Fig. 7 に鋼塊軸心のザク指数 (付録参照) の変化を示したが、K 40 C 鋼塊のザクの程度は他の二鋼塊に比して著しく改善されている。特に、ザク低減の主要対象とする鋼塊の 30~70% 位置に注目すると、K 34 や K 40 B 鋼塊で継続的に発生しているザク指数の大きなピークは、K 40 C 鋼塊では少なくなり、また低位に安定している。

一方、代表的な下広、および上広鋼塊について、その軸心で最もザクの悪化する領域、すなわち 30~50% 位置におけるザク指数の最小値~最大値の幅と、 $\alpha$  の関係を Fig. 8 に示した。両指数の間には明確な相関性が存在し、 $\alpha$  の増大に伴つてザク指数が低減している。また、超音波減衰法の特長<sup>9)</sup> から当然予想されることであるが、鋼塊軸心の最低密度 ( $\rho_{min}$ ) と  $\alpha$  との間にも Fig. 9 のような相関性を有する。

以上の調査結果から、 $\alpha$  の大小によつて鋼塊軸心のザクの程度を定量的に評価し得ることが実証された。ま

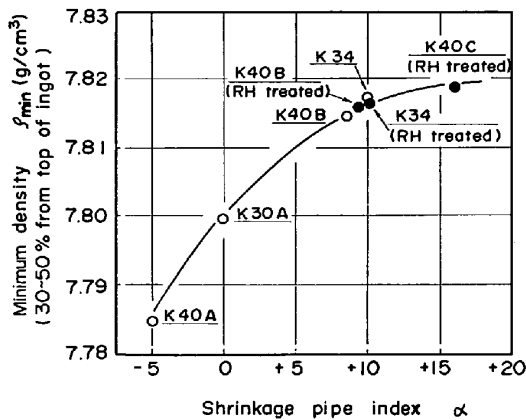


Fig. 9. Relation between shrinkage pipe index and minimum density at center axis of ingot.

た、鋼塊軸心のザクを低減するためには、可能な限り  $\alpha$  の大きな形状の上広鋼塊を選定することが有利といえる。

#### 4. 考 察

##### 4-1 ポロシティの水素依存性

3-1 で記述した非加速凝固域のザクが、水素濃度および凝固の進行に伴って生成するポロシティといかなる関係を有するか、試算してみる。ただし、凝固過程での水素の濃縮現象は、凝固遷移層<sup>19)</sup>先端付近でのマクロ的な偏析と、遷移層内部におけるデンドライト樹間でのミクロ的な偏析の両方の影響を受けているが、検討したところ前者の影響は後者に比して小さかったため、ここでは後者についてのみ取り扱う。

まず、溶鋼中で発生する気泡の安定性については、一般に(3)式がなり立つ。

$$P_g \geq P_a + P_h + P_\sigma \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $P_g$  は気泡内ガス圧、 $P_a$  は溶鋼にかかる大気圧、 $P_h$  は溶鋼静圧、 $P_\sigma$  は表面張力にかかる圧力である。いま鋼塊の 1/2 高さ付近において、デンドライト樹間での気泡生成を仮定し、溶鋼の比重を  $\rho = 7.1^{19)}$ 、溶鋼の高さを  $h = 1.5 \text{ m}$ 、表面張力を  $\sigma = 1700 \text{ dyn/cm}^{20)}$ 、気泡半径を  $r = 500 \mu$  (代表的な二次アーム間隔  $S_{II} = 1000 \mu$  程度) に見積る。すると、 $P_h = \rho \cdot h$ 、 $P_\sigma = 2\sigma/r$  であるから、(3)式における右辺の総圧力を算出でき、水素気泡が発生する臨界圧力  $P_g^*$  は(4)式の値となる。

$$P_g^* = 2.07 \text{ (気圧)} \dots\dots\dots (4)$$

また、任意の温度において(4)式の圧力と平衡する水素濃度は、(5)~(7)式<sup>21)</sup>から求めることができる。

$$1/2H_2 = \bar{H} \dots\dots\dots (5)$$

$$K = [\%H] / \sqrt{P_{H_2}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\log K = -1905/T - 1.59 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $K$  は平衡定数、 $P_{H_2}$  は水素の圧力、 $T$  は絶対温度である。Table 1 に示した供試鋼塊の組成では、その凝固開始温度<sup>22)</sup>が約  $1520^\circ\text{C}$  であるから、(4)~(7)式より、気泡の発生する臨界圧力  $P_g^* = P_{H_2}$  において、水素濃度は  $0.0032\%$  となる。

一方、デンドライト樹間における液相のマイクロ偏析については(8)式<sup>23)</sup>が適用できる。

$$C_L^H = C_0^H (1 - f_s)^{k_0^H} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $C_0^H$  は溶鋼中の初期水素濃度、 $C_L^H$  は樹間に存在する溶鋼中の水素濃度、 $f_s$  は固相率、 $k_0^H$  は水素の平衡分配係数である。鉄の融点近傍における固相の溶解度比から、 $k_0^H = 0.3^{21)}$  を採用した。すると、凝固に伴って生ずる水素の濃度変化は、偏析比  $C_L^H/C_0^H$  として、Fig. 10 の実線で表される。また、水素気泡の生成におよぼす初期水素濃度の影響は、気泡の発生条件(水素濃度 32ppm)を考慮すると、破線の位置に相当する。

Fig. 10 において、水素気泡は偏析比が臨界値(実線と破線の交点)を越えた場合に発生し、その条件は初期水素濃度の上昇とともに低固相率側へ移動する。したがって、初期水素濃度が高いほど低固相率で気泡が発生し始め、最終的な気泡径は大きくなる。また、初期水素濃度が等しい場合でも、デンドライト二次アーム間隔の広いほど発生する気泡径は大きくなる。

このように、非加速凝固域では、鋼塊表層から内部へ向かうほど、および初期水素濃度の高い鋼塊ほどザクが悪化する理由については上記の試算結果に基づいて半定量的に説明できる。

従来、鉄や鋼の凝固に伴う水素の偏析と気泡の生成について種々の報告<sup>20) 24) ~ 26)</sup>もあるが、本報告のような

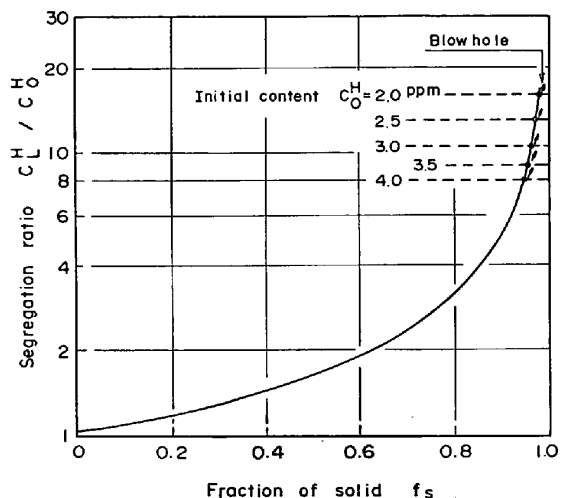


Fig. 10. Relation between segregation ratio and initial content of hydrogen.

大型鋼塊で、かつ低水素濃度の領域で取り扱われた例は見当たらない。著者らは当初、これらの報告のうち、実効分配を考慮し、比較的汎用性のある宇田ら<sup>20)</sup>、高石ら<sup>25)</sup>の解析法を参考に、鋼塊表層から 200~300 mm 付近のデンドライト樹間における水素の偏析と気泡の発生条件を検討してみた。しかし、気泡発生に必要な初期水素濃度は、宇田らの解析法を用いた場合には(宇田らも検討しているが)約 10 ppm、高石らの解析法の場合には 4.5~6 ppm であった。一方、これとは別に、水素の固体内拡散を考慮した解析も試みたが、同様に、気泡発生には 10 ppm 以上の初期水素濃度が必要であった。このように、本供試材では溶鋼中の水素濃度が 4 ppm 以下と低いことから、上記の解析法ではいずれも気泡の発生する条件を見出せず、ザク発生が水素濃度に依存することを説明できなかつた。なお、Photo. 3 に示すような逆 V 偏析中に存在する大型ポロシティも鋼塊内では観察されるが、ここでは解析から除外した。

4.2 鋼塊軸心のザク分布と凝固条件

軸心のザクや、これと密接な関係を有する V 偏析におよぼす鋼塊形状の影響については、川和ら<sup>8)</sup>、北岡ら<sup>11)</sup>、木下ら<sup>12)</sup>、喜多村ら<sup>13)</sup>、田代ら<sup>7)27)</sup>、鈴木ら<sup>28)</sup>、光島<sup>29)</sup>、その他<sup>10)</sup>の報告があり、ザクや偏析の程度を支配する因子として鋼塊のテーパー、高径比、あるいは鋼塊厚などがあげられている。しかし、押湯の効果については

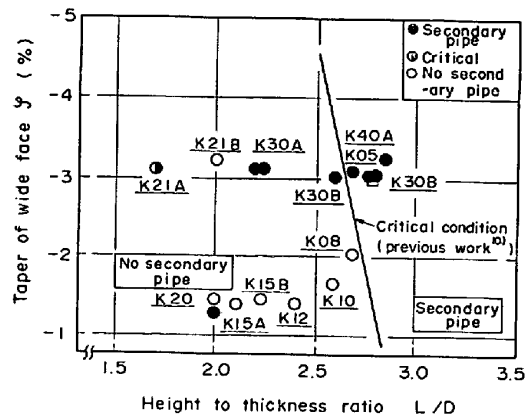


Fig. 11. Relation between taper of wide face and height to thickness ratio.

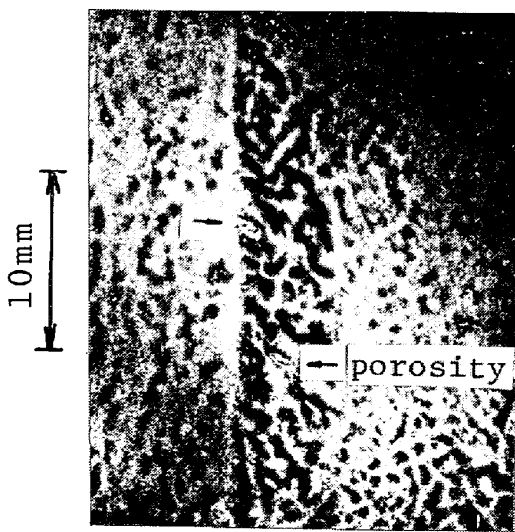
経験的に知られているものの明確にされておらず、田代ら<sup>7)27)</sup>、および光島<sup>29)</sup>がその重要性を若干述べているにすぎない。しかも、三つの鋼塊形状因子を同時に扱った例は見当たらない。

著者らの解析結果では、前述の収縮孔指数  $\alpha$  から知れるように、軸心のザクに最も影響する因子はテーパーであり、次いで高径比、押湯比の順であった。しかも、三つの因子はいずれも重要で不可欠である。例えば、従来知られているテーパーと高径比の関係で下広鋼塊の二次パイプの発生状況をプロットしてみると、Fig. 11 のようになる。図中には臨界値<sup>10)</sup>も記したが、この分類方法では二次パイプの発生、非発生領域を区分できず、押湯比を考慮して始めて整理できた。ただし、押湯比の影響は他の二因子に比して小さい。それゆえ、押湯比があまり大きく変化しない鋼塊を対象とした場合には、従来の報告のように、他因子のみが強調されるものと考えられる。

ところで、各因子がザクに与える本質的な効果は、鋼塊の縦と横の凝固速度に対応する因子(高径比)と給湯作用を助ける因子(テーパーと押湯比)に分けられるが、凝固組織の分布を考慮して、Fig. 7 に見られるような上広鋼塊のザク分布の形成理由を考えてみる。

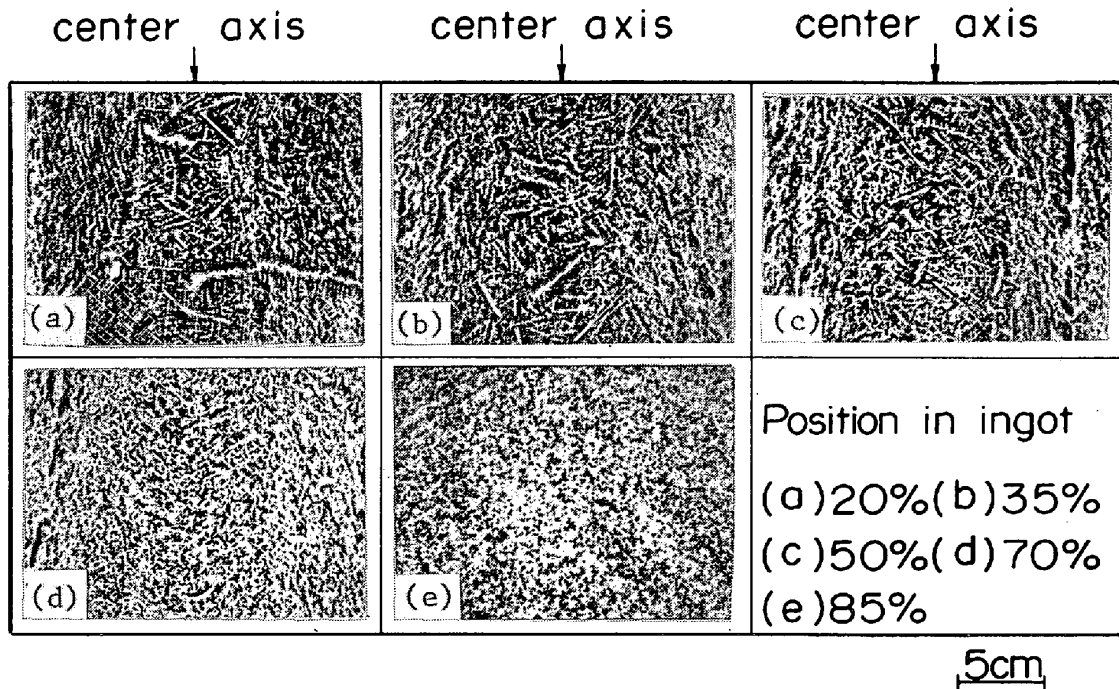
3.1 で述べたように、鋼塊軸心では凝固が加速される現象を有し、また縦と横方向の凝固が重なる位置は主に高径比で定まる。縦と横方向の凝固速度についてはバーテストや伝熱計算で調査されており<sup>4)~7)9)32)</sup>、鋼種や鋼塊形状によりやや差を有するが、炭素鋼の場合の傾向はおおむね一致している。松野<sup>6)</sup>や中西<sup>32)</sup>の測定結果から铸造後の平均凝固速度を求めると、縦方向では横方向の 2~3 倍となっており、両方向の影響が交差するのは鋼塊厚の 1~1.5 倍に相当する高さに位置する。つまり、供試鋼塊のように注入高さや鋼塊厚の比が約 3 の形状で

Inverse V-segregation



(center axis →)

Photo. 3. Inverse V-segregation and internal porosities in the longitudinal section of ingot. (Etched by Oberhoffer's reagent. Ingot: K30A, big-end-down, RH not treated.)



(a) branched columnar (b) branched columnar~equiaxed crystal (c) equiaxed crystal  
 (d) equiaxed crystal+globular crystal (e) globular crystal

Photo. 4. Distribution of casting structures at center of ingot.  
 (Ingot : K40C, big-end-up, RH treated)

は、鋼塊頭部から 60~70% を境として、それより上部側（押湯を除く）で横方向の凝固が支配的となる。そして、軸心部が凝固する時期には、この領域は固液共存状態にあるから、給湯は粒状等軸晶間やデンドライト主軸間、あるいはデンドライト側枝間などを通じて行われる。

Photo. 4 に、上広鋼塊の軸心における高さ方向の凝固組織の分布例を示した。鋼塊の頭部から 20~35% 付近には分岐柱状晶、35~65% には粗いデンドライト状等軸晶が存在し、微細なデンドライト状等軸晶と粒状等軸晶が混在する領域（70% 付近）を経て、80% 付近よりも底部側では微細な粒状等軸晶帯になつている。ここで、凝固遷移層内での液相の流動に関する高橋ら<sup>30)31)</sup>の有効透過理論によれば、液相が流動し得る固相率には臨界値があり、通常の圧力下における凝固では必ずポロシティが発生する。また、そのポロシティの程度は冷却速度や凝固組織の形状、粗さに依存する。特に凝固組織に注目すれば、最もポロシティを形成しやすいのは分岐柱状晶であり、ついでデンドライト状等軸晶、粒状等軸晶の順である。また結晶そのものの流動性は、粒状に近いほど、および細粒ほど良好で、給湯効果が有利になる。

以上の凝固条件によれば、60~70% よりも底部側では大きなポロシティを形成し難い。一方、35~65% では、領域全体がブリジングを生じやすい凝固組織であ

り、しかも凝固が加速的に進行するため、高橋ら<sup>30)31)</sup>の臨界固相率を急速に越え得る。この際、等固相率界面は鋼塊のテーバーに左右されるから、底部側に比して頭部側の凝固は遅くなる。しかしながら、凝固組織の影響を受けて 20~35% 付近はまた閉塞しやすいから、下方への給湯を困難にしている。したがって、30~50% 付近で最もザクが悪化し、底部へむかつて徐々に改善されるというザク分布を形成するものと説明できる。

## 5. 結 言

内質の健全な大型扁平鋼塊を製造するため、種々の調査と解析を実施し、鋼塊のザク、ポロシティについて以下のことを明らかにした。

(1) ザクを形成するポロシティは、その成因と程度によつて、マイクロポロシティとマクロポロシティに大別できる。

(2) ミクロポロシティは、主に鋼塊の軸心部を除く非加速凝固域で発生し、水素濃度と凝固組織の粗さの影響を受ける。逆V偏析内のポロシティもこれに属し、溶鋼中の水素を低減することによつて軽減できる。

(3) マクロポロシティは、鋼塊高さの 30~70% に相当する軸心部の加速凝固域で発生し、主に鋼塊形状に依存する。下広鋼塊で発生する二次パイブもこれに属する。この領域のザクの程度は、鋼塊のテーバー  $\phi$ 、高径



比  $L/D$ , 押湯比  $P$  からなる収縮孔指数  $\alpha$  で評価でき,  
 $\alpha$  の大きな鋼塊ほどザクは低減する.

$$\alpha = \varphi - 35.3[(L/D)/P] + 7.7$$

#### 付 録 (ザク指数の求め方)

まず, 鋼塊の軸心と底面を起点として, 試片全面に 25 mm 間隔の格子を野書きする. その後, 川和ら<sup>8)</sup>と同手法により, 全格子点の超音波探傷(測定周波数 2 MHz)を実施し, 各点の強度を測定する. そして, この値に基づき, 各被検部のザク指数  $Z_i[\text{dB}] = a_i - a_0$  を求める.

ただし,  $a_i[\text{dB}]$  は被検部  $i$  点の探傷値,  $a_0[\text{dB}]$  は鋼塊表層健全部の探傷値である.

一方, 鋼塊厚み方向, および軸心高さ方向のザク指数分布を作図する際には, 厚み方向で 25 mm 間隔, 高さ方向で 5% 間隔に, 3点または9点の平均値として各位置のザク指数  $Z$  を定めた. たとえば, Fig. 1 と Fig. 7 に示したザク指数は, その点を含み上下方向3点 ( $\pm 25$  mm の点) の平均値である. また, Fig. 2 のザク指数は, 上下のみでなく, 左右をも含めた計9点 (50 mm 角内の点) の平均値で表したものである. なお, 詳細な探傷条件, あるいはザク指数とザクの関係などについては, 文献 8) のとおりである.

#### 文 献

- 1) 田川寿俊, 田中淳一, 平沢猛志, 角南英八郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1720
- 2) 中尾仁二, 山場暁太, 青木 至, 川合重之, 間淵秀里, 高石昭吾: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1708
- 3) 野口祐正, 石原弘二, 挾間 保, 須田興世: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1885
- 4) 守川平四郎, 小野寺真作, 荒木田豊: 鉄と鋼, 44 (1969), p. 9
- 5) 高石昭吾, 村田裕信, 箕浦 孝: 鉄と鋼, 59 (1973), S 439
- 6) 松野淳一, 大井 浩: 鉄と鋼, 62 (1976), A 25
- 7) 田代晃一, 渡辺司郎, 田村 至: 鉄と鋼, 62 (1976), A 29
- 8) 川和高穂, 細田義郎, 坂田直起, 伊藤雅治, 三好

- 俊吉: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1668
- 9) 高石昭吾, 村田裕信, 小舞忠信, 水上義正, 種藤泰成, 花井 諭: 学振19委-No. 10059, (昭和52年9月)
- 10) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第49回特殊鋼部会, (1974.5) 日本鋼管(株) (私信)
- 11) 北岡英就, 木下勝雄, 江見俊彦, 岡野 忍, 白石昌司, 川原田昭: 鉄と鋼, 64 (1978), S 160
- 12) 木下勝雄, 北岡英就, 岡野 忍, 江見俊彦: 鉄と鋼, 65 (1979), S 135, 65 (1979), p. 1869
- 13) 喜多村実, 川崎正蔵, 川谷洋司, 有蘭芳昭, 朝永満男: 鉄と鋼, 65 (1979), S 159
- 14) 鈴木是明, 谷口晃造: 鉄と鋼, 58 (1972), S 120
- 15) 鈴木 章, 鈴木 武, 長岡 豊, 岩田至弘: 金属学会誌, 32 (1968), p. 1301
- 16) 鉄鋼の凝固 (日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会凝固部会編) (1977) 付録, 付-3
- 17) E. MARBURG: J. Metals, Feb. (1953), p. 157
- 18) 萩原 巖, 高橋忠義: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 27
- 19) 溶鉄・溶滓の物性値便覧 (日本鉄鋼協会溶鋼・溶滓部会編) (1972), p. 7
- 20) 宇田雅広, 塙 武弘, 大野 悟: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 62
- 21) 学振19委員会: 製鋼反応の推奨平衡値, (1968), p. 135, p. 147 [日刊工業新聞社]
- 22) 鉄鋼の凝固 (日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会凝固部会編): (1977) 付録, 付-13
- 23) E. SCHEIL: Z. Metallk., 34 (1942), p. 70
- 24) B. HARKNESS, A. NICHOLSON, and J. D. MURRAY: JISI, Sep. (1971), p. 692
- 25) 高石昭吾, 小舞忠信, 村田裕信, 平本克房, 関原博通: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1343
- 26) H. FREDRIKSON and I. SVENSSON: Met. Trans., 7B (1976), p. 599
- 27) 田代晃一, 藪木 透, 木村重夫: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1654
- 28) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 1540
- 29) 光島昭三: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1680
- 30) 高橋忠義, 工藤昌行, 吉年慶一: 鉄と鋼, 64 (1978), S 608
- 31) 高橋忠義, 工藤昌行, 大笹憲一, 永井慎一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 649
- 32) 中西泰二: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 237