

© 1983 ISIJ

## 一方向凝固鋼塊の凝固と偏析特性

技術報告

中田 正之\*・北川 融\*・矢野 幸三\*

浅野 信成\*<sup>2</sup>・榊井 明\*<sup>2</sup>・玉置 稔夫\*<sup>2</sup>

## Phenomena of Solidification and Macroseggregation in the Unidirectionally Solidified Ingots

Masayuki NAKADA, Toru KITAGAWA, Kozo YANO  
Shinjo ASANO, Akira MASUI, and Toshio TAMAKI

## Synopsis :

The solidification characteristics and the macroseggregation of the unidirectionally solidified ingots weighing 2~70 t have been examined.

It has been found that neither secondary shrinkage pipes nor V-segregation exist in the ingots and inverse V-segregation exist only in the restricted area near the side wall.

It has been proved that the unidirectionally solidified ingots show the superior nature with respect to the soundness and homogeneity and are very suitable for production of heavy gauge plates by rolling without forging. The reason for the above is supposed that the liquid steel can be fed to the solidification front easily until the final stage of solidification.

The formation mechanism of positive segregation layer beneath the top surface of the ingot has been investigated. It is found that this is formed as the result of inverse V-segregation formation near the mold wall. Based on the formation mechanism, several operational factors to minimize the positive segregation have been pointed out.

## 1. 緒 言

近年、圧力容器等に使用される極厚鋼板の需要が急増している。一般に、圧力容器用極厚鋼板は、鋼塊から低圧下比で製造される上、厳しい品質レベルが要求されるために、鋼塊の健全性、均質性が優れていることが特に必要となる。しかし、従来の鋼塊では、凝固形態が主に二次元的になるために、鋼塊軸心部で凝固界面への溶鋼補給が困難になり、二次パイプが生じやすく、V偏析や広い部分にわたって逆V偏析が生じ、ザクが発生しやすい。一般に、これらの欠陥は、鋼塊を大型にするほど顕著になり<sup>1)~3)</sup>、製品が大単重化、厚肉化するにつれて、未圧着ザク残留および偏析の問題が生ずる可能性がある。

当社では、これらのことをふまえて、大型鋼塊を対象とした、一方向凝固鑄造法の開発を行つて来た。ここでいう一方向凝固鑄造法とは、鋼塊をできるかぎり低注尺化、広幅化し、かつ鑄壁方向への抜熱を抑制することで、軸心部のできるだけ広い部分で凝固界面を水平に保

ち、鋼塊底部から頭部に向かう一方向凝固を達成させて、凝固界面への溶鋼補給を向上させる鑄造法である。この方法によると、原理的に二次パイプはもちろんのこと、二次元的凝固に基づく加速凝固の発生がなくなるため、V偏析が消滅するとともに、逆V偏析の生成が大幅に低減する。このことから本法は、健全性が著しく高い極厚鋼板用鋼塊の製造法として、最適であることが確認されている<sup>4)</sup>。しかし、その凝固特性やマクロ偏析挙動については不明な点が多い。

本報告では、2~70 t の鋼塊の鑄造試験を通して得られた一方向凝固鋼塊の、ザク生成状況、凝固特性およびマクロ偏析挙動の特徴に関する調査結果について述べる。

## 2. 実験方法

Fig. 1 に凝固形態の模式図を、普通造塊法と対比させて示す。軸心付近の凝固界面への溶鋼補給を容易にするために、少なくとも軸心部の一方向凝固を達成するべく設計された鑄型に溶鋼を下注し、鋼塊の凝固特性およびマクロ偏析挙動の調査を実施した。実験は(1)鑄壁

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 1 月 27 日受付 (Received Jan. 27, 1983)

\* 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)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K.K.)

Table 1. The experimental conditions. (total ingot number : 14)

Experimental series	Factor	Ingot width	Ingot height	Weight of ingot	Heat insulation type	Grade of steel
(1)	Heat insulation	560×1360mm ~2600×4500mm	370~870mm	2~70 t	I, II, III, IV	40kg/mm <sup>2</sup> class
(2)	Ingot width	720×2300mm ~2600×4500mm	830~870mm	6~70 t	II, III, IV	40kg/mm <sup>2</sup> class
(3)	Ingot height	1750×1750mm	530, 870mm	13, 22 t	III	40kg/mm <sup>2</sup> class
(4)	Grade of steel	2200×2800mm	775~930mm	41~45 t	III	40, 50kg/mm <sup>2</sup> class 2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> Cr-1Mo steel

Table 2. Chemical composition of steels (%).

Grade of steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	SolAl
40kg/mm <sup>2</sup> class	0.18~0.19	0.21~0.25	0.69~0.73	0.015 ~0.027	0.0007 ~0.0100	—	—	—	0.015 ~0.041
50kg/mm <sup>2</sup> class	0.17	0.21	1.40	0.007	0.0005	0.24	0.06	—	0.016
2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> Cr-1Mo steel	0.14	0.07	0.56	0.005	0.0006	0.19	2.45	1.03	0.020

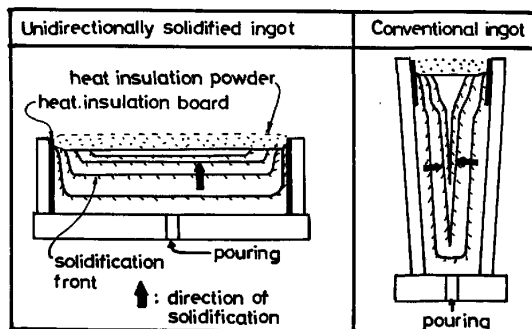


Fig. 1. The comparison of solidification profile.

Type	Heat insulation inside mold
I	Ingot — mold
II	Ingot — D — mold
III	Ingot — E — D — mold
IV	Ingot — Z — S — mold

D : heat insulation board (SiO<sub>2</sub>, 100 or 50mm)  
 E : exothermic board (SiO<sub>2</sub>+Al, 50mm)  
 S : liquid steel (310mm)  
 Z : ZrO<sub>2</sub> refractory (130mm)

Fig. 2. Heat insulation types inside molds.

の断熱条件, (2)鋼塊幅, (3)鋼塊高さ, (4)鋼種の影響を調査するために, Table 1 に示す実験シリーズおよび Table 2 に示す成分組成の溶鋼で行った. 鑄壁の断熱条件は Fig. 2 に示すが, Type III についてはアルミニウムのテルミット反応による発熱型 (発熱量 3400 kcal/kg) のボードを溶鋼側に設置したものである. また Type IV については, ZrO<sub>2</sub> れんが製の枠を鑄型内に設置して, れんがを約 200°C に予熱しておき, その内側と外側の双方に鑄込んで, 外側の溶鋼で断熱を強化した内側の鋼塊について調査したものである. また, 鋼

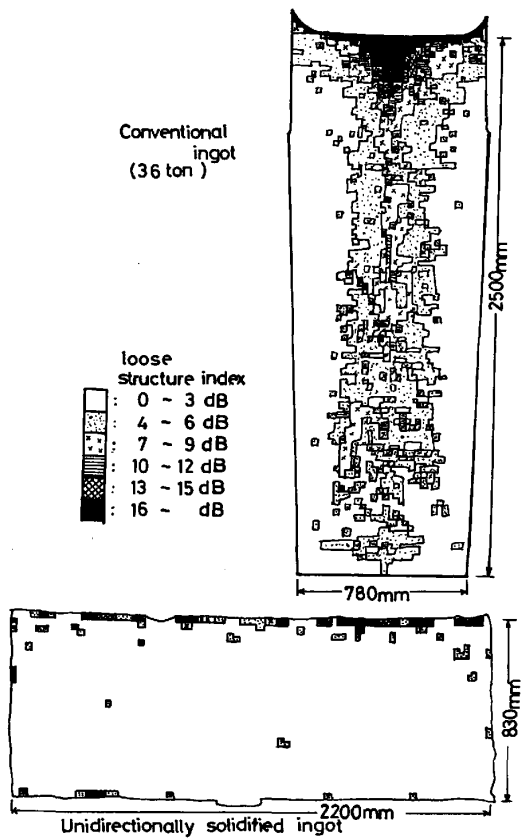
塊凝固時の溶質濃化挙動を調査する目的で, 実験シリーズ(1)の Type III の断熱条件の鑄造で, 鋼塊軸心付近の湯面から 50, 100 および 150 mm の深さの位置について, 残溶鋼濃度の時間変化を調査した. なおすべての実験で鑄型内湯面の保温は, 鑄込み終了後, 発熱パウダーを 123 000 kcal/m<sup>2</sup> 相当分湯面に投入し, さらにその上にシリカ系の断熱剤を 35 kg/m<sup>2</sup> 投入して行つた.

鋼塊は完全凝固後型抜きし, 短辺に平行な中央縦断面を切断加工し, ザク分布状況, 凝固組織およびマクロ偏析に関する調査を行つた. ザク分布は川和ら<sup>5)</sup>の超音波探傷器を用いたザク指数測定法にしたがって決定した. また偏析調査のための分析試料は 7 mm φ ドリルを使用して, 鋼塊軸心位置を上下方向に採るとともに, 一部の鋼塊については縦断面の横半分全面にわたり, 25~50 mm 間隔の格子点位置より採取した.

### 3. 調査結果および考察

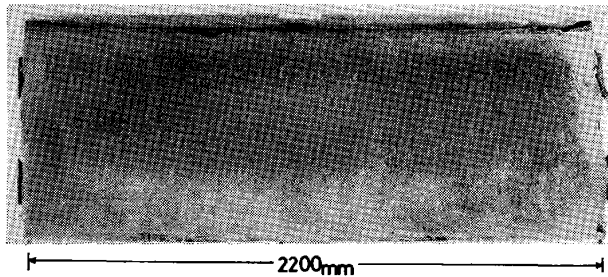
#### 3.1 鋼塊内のザク生成状況

Fig. 3 に一例として, 実験シリーズ(2)のうちの Type III の断熱条件の 45 t 鋼塊のザク指数分布を, 36 t 上広普通鋼塊の結果と対比させて示した. ザク指数は, 数が小さいほど, ザクが少なく均質であることを示す. Fig. 3 から従来の普通鋼塊では, 頭部および軸心近傍でザク指数が高いのに対して, 一方向凝固鋼塊では, 上面直下 50 mm 以内の領域にザク指数の高い部分が存在するが, 他の部分は均一かつ低位のザク指数を示していることがわかる. 普通鋼塊では軸心部で, 二次元的な熱流により, いわゆる加速凝固が起こり, 凝固界面への給湯が不十分になりがちである<sup>6)</sup>が, 一方向凝固鋼塊では軸心部において, 凝固界面が平坦であるため



Experimental series : (2)  
Size of ingot : 2200mm×2800mm×830mm<sup>H</sup> (45 t)  
Heat insulation type : III

Fig. 3. Distribution of loose structure in center section of ingots.



Experimental series : (2)  
Size of ingot : 2200mm×2800mm×830mm<sup>H</sup> (45 t)  
Heat insulation type : III

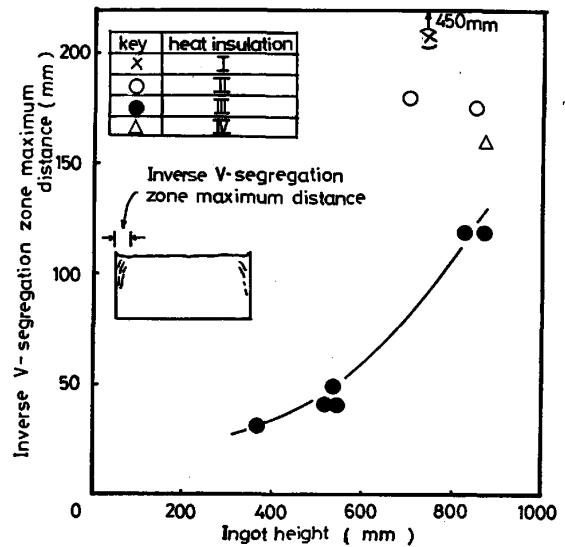
Photo. 1. The example of solidification structure in the unidirectionally solidified ingot.

に、普通鋼塊のような加速凝固が発生せず、ザクが少なくなつたと考えられる。

### 3.2 凝固組織について

前項で示した 45 t 鋼塊の凝固組織を Photo. 1 に示す。鑄壁近傍を除く大部分は、底部から頭部に向かう柱状晶組織になつており、普通鋼塊にみられるような二次パイプ、V偏析は全く存在しない。このことは、実験シリーズ(2)で鋼塊をさらに大型化しても変わらない。

一方、鑄壁側からは、軸心側に向けて分岐柱状晶が伸



Experimental series : (1)  
Heat insulation type : I, II, III, IV

Fig. 4. Relation between inverse V-segregation zone maximum distance and heat insulation inside mold.



Experimental series : (1)  
Size of ingot : 720mm×2300mm×700mm<sup>H</sup> (10 t)  
Heat insulation type : II

Photo. 2. Relation between the inverse V-segregation zone and the sedimental crystals zone.

びている。この鑄壁近傍の限定された部分に、逆V偏析線が存在する。逆V偏析線生成領域の鑄壁からの距離の最大値（以下逆V偏析線生成部の最大距離と称する）は Fig. 4 に示すように鑄壁の断熱条件および、鋼塊高さ

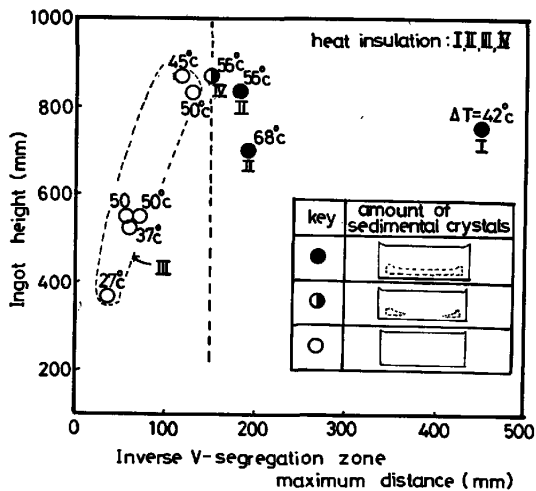
によつて変化することがわかつた。Type III の断熱条件が、今回の実験範囲内では最も逆V偏析線生成部の最大距離を小さくしている。一方、Type IV は Type II と大きな差がなかつたが、これはれんが製の枠の予熱温度が約 200°C と低かつたため、特に凝固初期における铸壁からの抜熱が大きくなつたことに起因すると考えられる。一方、逆V偏析線生成領域には、Photo. 2 の鋼塊 (実験シリーズ(1), Type II の断熱条件) に示すとおり、デンドライトの形状が不明瞭であり、未発達逆V偏析線が共存している。

Photo. 1 の鋼塊には、全く沈澱晶は存在しないが、Photo. 2 に示されるように、底部に沈澱晶が存在する場合もある。一方向凝固鋼塊で見られる沈澱晶は、逆V偏析線生成領域の直下に比較的厚く堆積し、軸心側では薄く存在する傾向にある。しかし、Fig. 5 に示すように铸壁の断熱を強化して、逆V偏析生成部の最大距離を約 150 mm 以下にすると、沈澱晶の生成はなくなる。これらの結果は、逆V偏析線の生成時に排出された結晶細片が、沈降しつつ成長して、沈澱晶になることを示す<sup>6)7)</sup>と考えられる。

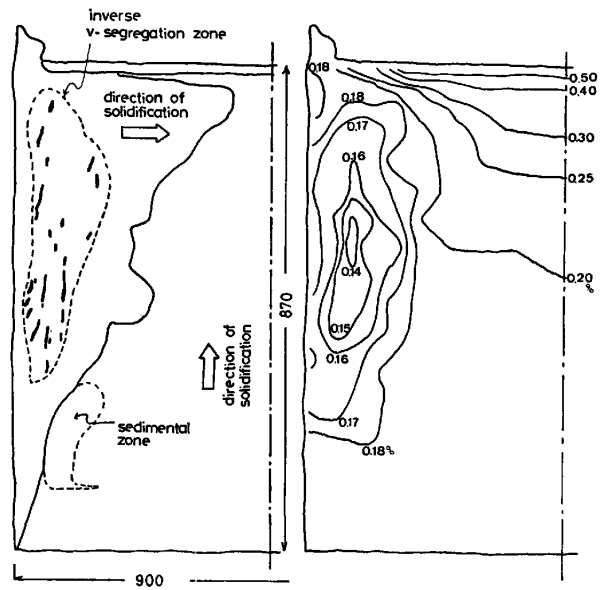
3.3 鋼塊のマクロ偏析

Fig. 6 に実験シリーズ(1), Type IV の断熱条件で得られた、6 t 鋼塊のマクロ組織と炭素の濃度分布の一例を示す。逆V偏析線が存在する領域が負偏析しており、また鋼塊頭部には広く皿状に正偏析帯が存在する。

Fig. 6 の例に示すような炭素濃度の二次元的な分析結果から、①式に従つて数値積分を行い、断面全体での平均濃度  $C_{AVE}$  を計算した。この  $C_{AVE}$  と取鍋の炭素濃度  $C_0$  との比較の例を Table 3 に示すが、 $C_{AVE}$  と



Experimental series : (1)  
Fig. 5. The effect of inverse V-segregation zone maximum distance, ingot height and types of heat insulation on the amount of sedimental crystals.



(1) Position of inverse V-segregation in ingot. (2) 2 dimensional C content distribution  
 $C_0$  : 0.19%, Experimental series : (1)  
Ingot size : 900mm×900mm×870mm<sup>H</sup> (6 t)  
Heat insulation type : IV

Fig. 6. Relation between area of inverse V-segregation and C content distribution.

Table 3. Relation between  $C_{AVE}$  and  $C_0$ .

Heat insulation type	II	IV
$C_{AVE}$	0.195%	0.203%
$C_0$	0.190%	0.190%

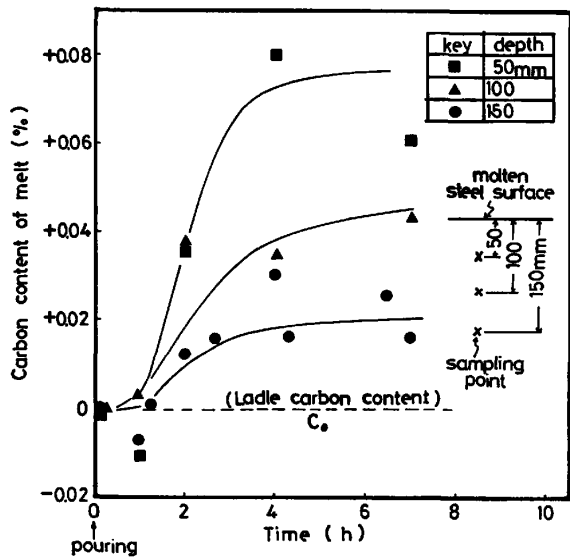
$C_0$  はほぼ等しいことがわかる。

$$C_{AVE} = \frac{\int_0^X \int_0^H c(x, h) dh dx}{X \cdot H} \dots\dots\dots \text{①}$$

これは、逆V偏析線生成部近傍の負偏析の形成が、頭部正偏析の形成に強く影響する<sup>8)</sup>ことを示す。

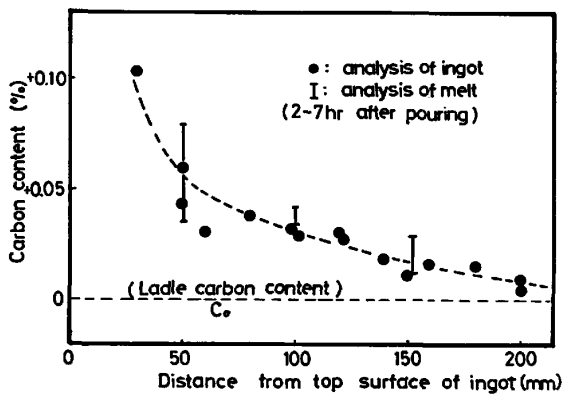
次に、実験シリーズ(1)で Type III の断熱条件の実験と全く同じ条件で铸造し、凝固途中で残溶鋼の溶質濃化挙動の調査を行つた。Fig. 7 の炭素濃度の時間推移でわかるように、铸込みから約 2 h 以降で、溶鋼中の炭素の濃化が大きくなっており、しかも湯面からの深さごとに濃度に変化している。また濃度の上昇は、時間経過とともにゆるやかになつている。2 h 以降の炭素濃度値の範囲と、別に铸込まれた実験シリーズ(1)で Type III の断熱条件の鋼塊凝固後のチェック分析結果と対応づけると、Fig. 8 のようによく一致する。これより、残溶鋼中の濃度分布が、ほぼそのまま正偏析として持ちこたされていることが考えられる。Fig. 9 には一次元の伝熱計算から、逆V偏析線が生成する時期を推定した結果を示す<sup>†</sup>。铸壁の断熱条件は Type III の発熱型のもの

† 熱伝導率などの諸物性がよくわかっている、定盤側からの一次元の伝熱計算を行つて、凝固量  $\alpha$  を求め、Fig. 9 のようにマクロ組織から定盤側からと铸壁側からの凝固した領域の境界が、鋼塊底面となす角度  $\theta$ 、および铸壁側からの凝固おくれ時間に対応する距離  $\beta$  を求めて  $(\alpha-\beta)/\tan \theta + \beta$  の計算を行つた。



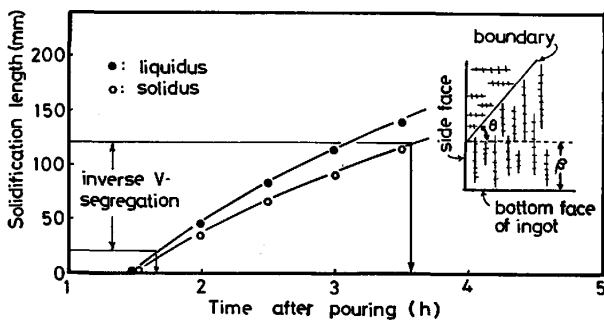
Experimental series : (1)  
 Ingot size : 1750mm×1750mm×870mm<sup>H</sup>(22 t)  
 Heat insulation type : III

Fig. 7. The carbon content of melt during solidification.



Experimental series : (1)  
 Ingot size : 1750mm×1750mm×870mm<sup>H</sup>(22 t)  
 Heat insulation type : III

Fig. 8. Relation between the check analysis of ingot and melt during solidification.



Heat insulation type : III  
 Calculating conditions :  
 Liquidus temperature : 1520°C, Solidus temperature :  
 1480°C, Casting temperature : 1540°C

Fig. 9. Relation between calculation results of solidification length vs time and inverse V-segregation zone.

を用いた場合であり、初期のテルミット反応により、約 1.5 h の凝固遅れが生じている。一方、逆V偏析線は鑄壁から 20~120 mm の間にあり、凝固時に固液共存相内で生成すると仮定すると、鑄込みから約 2~3.5 h の間に形成されることが推定される。これは、Fig. 7 の残溶鋼濃度が急激に上昇する時期とはほぼ一致する。これより、凝固時の逆V偏析線の生成にともなつて、低密度の濃化溶鋼が浮上し、これが湯面直下に滞留して頭部正偏析が形成されることが推察される。

以上のことより、取鍋成分が同じであれば、鋼塊のマクロ偏析強度に影響する因子としては、Fig. 10 に示す三つのパラメータが重要となる。すなわち

- 1) 排出される溶質量に影響する、鑄壁から負偏析部の内側までの最大距離  $a$  (以下、負偏析部の最大距離<sup>†2</sup>と称する)。
- 2) 排出された溶質を受けるバルクの大きさに影響す

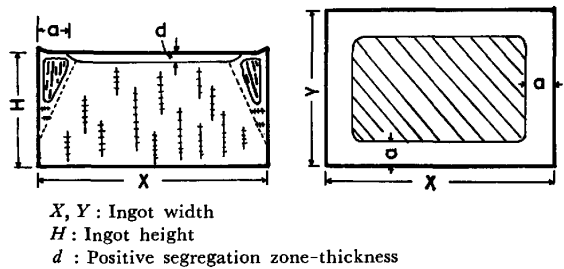
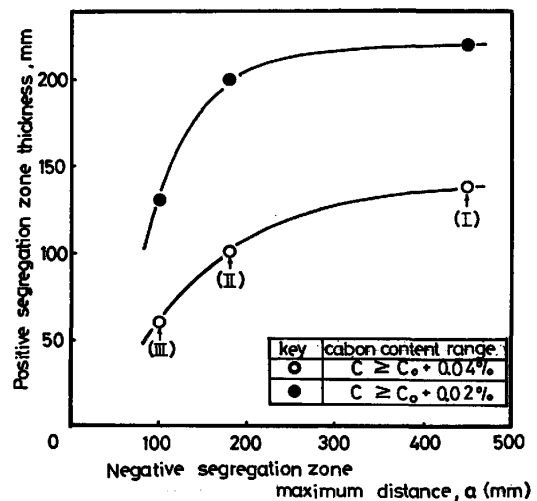


Fig. 10. The factors which affect the positive segregation zone thickness.



Experimental series : (1),  $C_0$  : 0.18~0.19%  
 Ingot size : 1750mm×1750mm×2000mm×2000mm  
 Ingot height : 755~870mm<sup>H</sup>  
 Heat insulation type : I, II, III

Fig. 11. Relation between positive segregation zone thickness and negative segregation zone maximum distance.

<sup>†2</sup>  $a$  の値は、7mmφ のドリルを使用した、25mm 格子間隔のサンプリングで得られたキリコの分析で、負偏析の領域を求めて実測した。

る鋼塊幅  $X$  および  $Y$ .

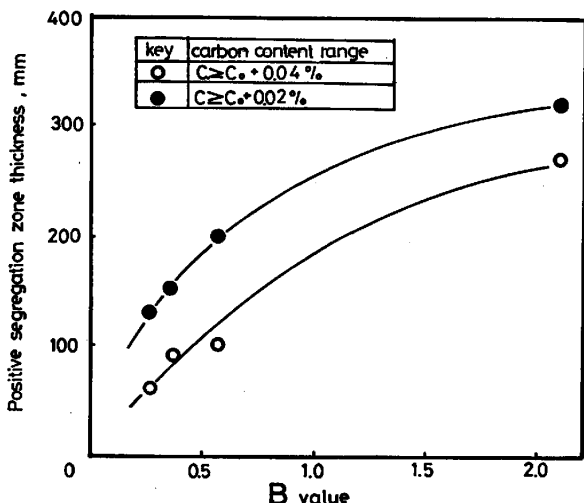
3) 負偏析部の最大距離  $a$  に影響する鋼塊高さ  $H$  である。

Fig. 4 ですでに示したように、鑄壁の断熱条件を変えることで逆V偏析線生成部の最大距離が変化し、それに伴って負偏析部の最大距離も変化する。Fig. 11 には実験シリーズ(1)で、鋼塊幅を 1750 mm  $\phi$  ~ 2000 mm  $\phi$  のサイズにして、高さを 755~870 mm にそろえた 20~22 t 鋼塊の鑄造において断熱条件のみを Type I, II, III に変えた場合の、 $a$  の値と軸心上の正偏析部の厚み  $d$  (炭素濃度が  $C \geq C_0 + 0.04\%$  の部分または、 $C \geq C_0 + 0.02\%$  の部分の厚み) の関係を示す。 $a$  の値を小さくすることで、正偏析部の厚みは小さくなる。

次に、実験シリーズ(2)に示すように、鋼塊高さを 830 mm~870 mm にそろえて、鋼塊幅が 720 mm  $\times$  2300 mm~2600 mm  $\times$  4500 mm と種々異なるものを選んで、鋼塊幅と炭素の頭部正偏析の厚みとの相関を調査した。ここでは逆V偏析線から排出される溶質量と、それを受けるバルクの大きさの比が頭部正偏析に影響すると考えられるので、Fig. 10 に示すように鋼塊を平面図的に見た場合の、 $a$  の部分の面積<sup>†</sup> とその内側の斜線部の面積の比を幾何学的に求めた②式の  $B$  の値との相関を求めた。

$$B = \frac{XY - (X-2a)(Y-2a)}{(X-2a)(Y-2a)} \dots\dots\dots ②$$

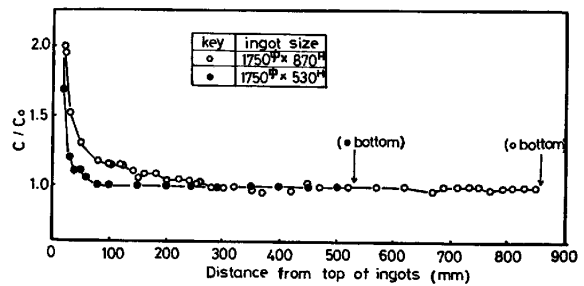
Fig. 12 には  $B$  の値と頭部正偏析厚みの関係を示す。



Experimental series : (2)  
 $C_0$  : 0.18~0.19%, Heat insulation type : II, III, IV  
 Ingot height : 830~870mm

Fig. 12. Relation between  $B$  value and positive segregation zone thickness.

<sup>†</sup> 負偏析生成状況は、鋼塊周方向ではほぼ同じであると考えられるので垂直断面で得られた  $a$  の値から厚み  $a$  の部分の周方向面積を得た。



Experimental series : (3)  
 Heat insulation type : III  
 $C_0$  : 0.18~0.19%

Fig. 13. The effect of ingot height on positive segregation.

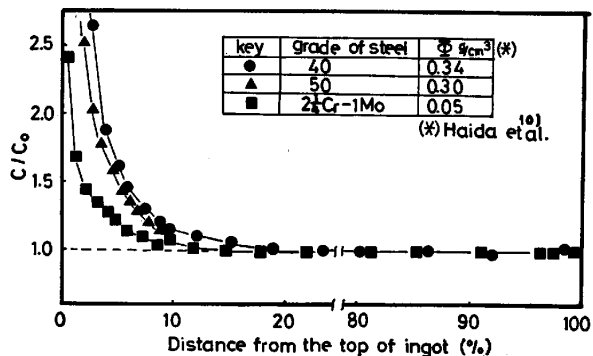
$B$  の値を小さくするほど、頭部正偏析の厚みは減少することがわかる。このことから、 $X, Y$  を大きくするほど、または  $a$  を小さくするほど  $B$  は小さくなるので、注尺が一定であり、かつ鑄壁の断熱条件が同一の場合、鋼塊幅  $X, Y$  を大きくして大単重化するほど  $d$  が小さくなることわかる。このことは、一般に普通鋼塊が大単重化するほどマクロ偏析が悪化する傾向<sup>2)3)</sup> があるのとは、全く逆である。

次に、鑄壁の断熱条件を Type III とし、鋼塊幅を 1750 mm  $\times$  1750 mm にそろえて、高さのみを 530 mm と 870 mm に変えてその影響を調べた結果を Fig. 13 に示す。鋼塊高さが小さいほど、炭素の頭部正偏析は軽減されている。

以上から、40 kg/mm<sup>2</sup> クラス鋼のすべての鋼塊(11 鋼塊)について頭部正偏析の厚み  $d$  (ここでは炭素濃度が  $C \geq C_0 + 0.04\%$  の部分) を  $B$  の値、鋼塊高さ  $H$  で回歸したところ③式が得られた。

$$\log d = -2.329 + 0.610 \log B + 1.540 \log H \quad (r^2 = 0.974) \dots\dots\dots ③$$

次に取鍋成分の影響を見るために、実験シリーズ(4)に示すように、40, 50 kg/mm<sup>2</sup> クラス鋼および 2 $\frac{1}{4}$ Cr-



Experimental series : (4)  
 Heat insulation type : III  
 Ingot height : 775~930mm

Fig. 14. The effect of the chemical composition of ladle melt on positive segregation.

IMo 鋼の三鋼種を、ほぼ同一条件で铸造し、鋼塊軸心の偏析状況の調査を行った。Fig. 14 に軸心のチェック分析の結果を示す。図中には、拜田ら<sup>10)</sup>が普通鋼塊での逆V偏析線の本数を推定する際に求めた、固液共存相内での溶質の濃化に伴う溶鋼密度低下量  $\Phi$  (g/cm<sup>3</sup>) の計算結果も付記した。 $\Phi$  が小さいほど頭部正偏析は軽減されている。このことから、一方向凝固鋼塊の頭部正偏析は、逆V偏析線の形成に強く依存することを裏づけているものと考えられる。

#### 4. 結 言

一方向凝固鋼塊の凝固特性、およびマクロ偏析挙動に関する調査を行ったところ以下のことが判明した。

1) 鋼塊軸心部近傍を一方向凝固することで、普通鋼塊のような軸心部の二次元的な凝固がなくなるため、二次パイプやV偏析は全く生成しない。また、逆V偏析線は鑄壁近傍の限定された部分にのみ存在する。これらのことから、一方向凝固铸造法はザクの少ない健全な大型鋼塊を得るうえで極めて有利な方法であるといえる。

2) 鑄壁の断熱を強化すること、または鋼塊高さを小さくすることにより、逆V偏析線の生成部を鑄壁側に寄せることができる。また、鑄壁の断熱強化によつて、沈澱品の生成を完全になくすことができる。頭部の正偏析は、逆V偏析線から排出された濃化溶鋼が湯面直下に滞留することに強く影響される。また、鑄壁近傍の負偏析生成領域を狭くすることと、鋼塊幅を広くすることで頭部正偏析が軽減される。このことは、大単重の均質性の優れた鋼板を得る上で、極めて有利であると考えられる。

#### 記 号

- $C_{AVE}$  : 鋼塊断面の濃度分布から求めた平均炭素濃度 [%]  
 $C_0$  : 素鋼の炭素濃度 [%]  
 $X, Y$  : 鋼塊幅 [mm]  
 $H$  : 鋼塊高さ [mm]  
 $x$  : 鋼塊幅方向の距離 [mm]  
 $h$  : 鋼塊上下方向の距離 [mm]  
 $c(x, h)$  :  $x, h$  の位置の炭素濃度 [%]  
 $a$  : 鑄壁から負偏析生成部の軸心側までの最大距離 [mm]  
 $d$  : 鋼塊頭部正偏析部の厚み [mm]  
 $B$  :  $\{XY - (X-2a)(Y-2a)\} / (X-2a)(Y-2a)$   
 $C$  : 任意の位置の炭素濃度 [%]  
 $\Phi$  : 固液共存相内での溶質の濃化による密度低下量 [g/cm<sup>3</sup>]

#### 文 献

- 1) 田川寿俊, 田中淳一, 平沢猛志, 角南平八郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1720
- 2) C. ROQUE, P. MARTIN, C.H. DUBOIS, and P. BASTEIN: Rev. Metall., 57 (1960), p. 1091
- 3) 鈴木是明: 日本製鋼所技報 (1981) 40, p. 1
- 4) 上村宗倫, 塚本裕昭, 田中淳一, 山田 真, 滝川信敬, 林田道雄, 那波泰行: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1055
- 5) 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
- 6) 土田 裕, 北川 融, 宮下芳雄, 中田正之: 鉄と鋼, 64 (1978), S 196
- 7) 川和高穂, 北川 融: 第2回日本, スウェーデンシンポジウム (1978), p. 211
- 8) 北川 融, 中田正之, 川上公成, 石黒守幸: 鉄と鋼, 66 (1980), S 781
- 9) 田代晃一, 轟木 透, 木村重夫: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1654
- 10) 拜田 治, 岡野 忍, 江見俊彦, 河西悟郎: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 954