

## 技術報告

UDC 669.14-412 : 669.14-426 : 621.74 : 620.192.43 : 621.771.012

## 条用大型鋼塊の製造について\*

光 島 昭 三\*\*

## Production of Large Steel Ingots for Wire Rod and Bar

Shozo MITSUSHIMA

## Synopsis:

This paper deals with the production of large steel ingots for wire rod and bar. Lately steelmakers attempt to produce larger ingot for productivity, but in this case it is most important to reduce the segregation.

The qualitative problems caused by the segregation are well known as follows;

- (1) Fluctuation of mechanical properties.
- (2) The troubles at the secondary processing such as the fracture during drawing and cold heading.
- (3) The fluctuation of machinability, etc.

The segregation in 3 t, 5 t, 7 t and 10 t killed ingots was investigated and the effect of ingot size on the segregation is considerably made clear.

As the representative procedure to reduce the segregation, the optimization of head volume and top discard ratio, the ingot-case designing and the holding time after the pouring are considered.

## 1. 結 言

わが国の粗鋼生産量は鉄鋼生産技術のめざましい進歩により、著しい伸びを示してきた。これはとりわけ、生産性の向上、省力・省エネルギー・省資源、コスト低減、品質の改善などを目的とした技術開発および各種設備の合理化、大型化によるところが大である。

一方、この傾向は二次・三次加工メーカーも含めた需要家においても同じであり、必然的に要求品質、品種、量は従来と大きく変わり、特に、その一単位あたりの量が增大してきた。

これに対応するため、今まではやや小型に属していた線棒用の鋼塊も、順次、鋼塊単重の増加がはかられつつある。

現在、条用、特に線棒用のキルド鋼塊は 10 t 以下が一般的であるが、これは鋼塊の大型化にともなつて増大する成分偏析・割れなどの品質欠陥、設備能力および成品重量などの制約によるものである。

しかし、大型鋼塊への指向性は上記理由により、こんど、更に強まる事が予想される。したがつて、設備の改善はもちろん、成分偏析、割れ欠陥などの品質改善は、特に急を要するものと考ええる。

本報では、品質上特に問題となる成分偏析に焦点をしぼり、当社で製造している線棒用キルド鋼塊における品質上の問題点、成分偏析状況と鋼塊サイズの関係、成分偏析に対する当社での検討例について、製造技術の観点よりまとめたので報告する。

## 2. 成分偏析とその問題点

当社の条用鋼塊より製造される線材・棒鋼は、おもにワイヤーロープ・バネ・PC ワイヤー・溶接ワイヤー・冷間圧造品・熱間鍛造品などの素材に用いられている。このような用途に要求される品質特性は、おもに縦方向の機械的性質が問題となり、それ以外に、熱処理特性、熱・冷間加工性、被削性、溶接性などが挙げられる。

したがつて、製鋼炉における溶製条件、造塊における鋼塊の鑄造条件は、これらの要求特性により決定されるわけだが、これらの要求特性に対して、特に重要なのは鋼塊の成分偏析、非金属介在物、表面品質、パイプおよび組織不良などの欠陥である。

ここでは、各要求特性に最も関連の深い成分偏析と鋼材品質上の問題点について述べる。

鋼塊内の成分偏析は、鋼材の機械的性質に影響をおよぼす。その一例として、硬鋼線材 SWRH62A を押湯付

\* 昭和 51 年 2 月 16 日受付 (Received Feb. 16, 1976)

\*\* (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd., 2 Nadahamahigashi-machi Nada-ku Kobe 657)

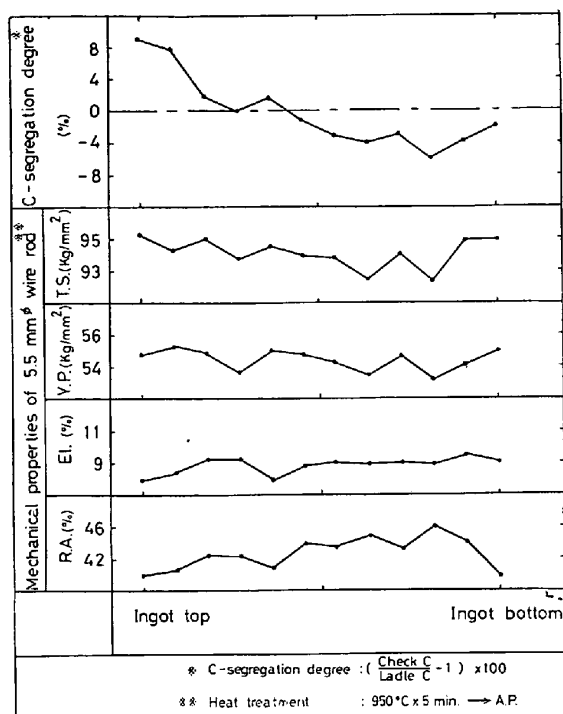


Fig. 1. Segregation of carbon and its influence on mechanical properties in JIS SWRH 62A.

7 t キルド鋼塊に鑄造した場合の鋼塊軸心部における C 偏析と 5.5 mmφ 線材の縦方向の機械的性質について Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、鋼塊軸心部における C 偏析が機械的性質に影響していることが明らかである。

同じように、熱処理時の焼入れ特性も成分偏析の影響をうける。Fig. 2 には、鋼塊底部相当材の焼入れ性試験

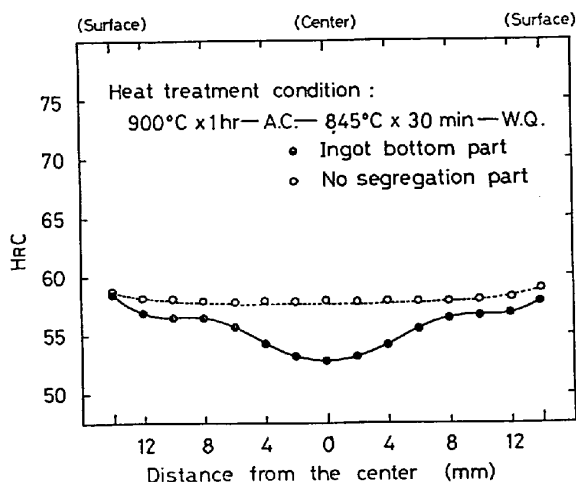


Fig. 2. SAC curve for JIS SCM3 which samples were cut from bottom part on ingot.

Table 1. Typical examples of defects occurring at secondary processing.

Processing process		Defect to occur	Example of defect
Cold working	Drawing	Central bursting	
	Extrusion		
	Cold heading	Cracking at bolt-head	
Heat treatment	Quenching	Burning	
Machining	Lathing	Shorten tool life	
	Drilling		

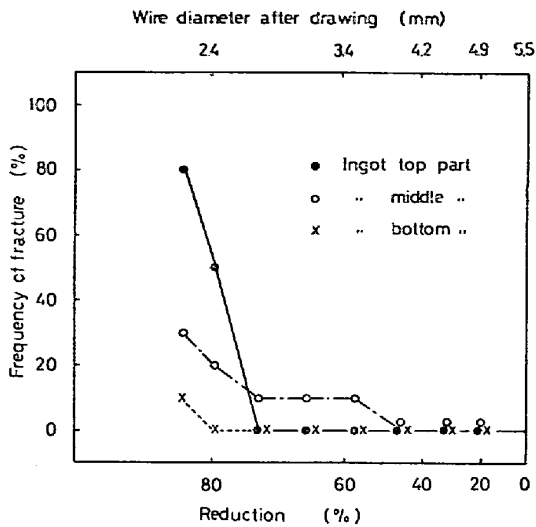


Fig. 3. Influence of segregation for drawability.

の結果を示すが、中心部は負偏析により焼入れ後の硬度がかなり低下していることがわかる。

また、鋼塊内の成分偏析は、以上のように鋼材の基礎的品質特性に影響を与えるだけでなく、二次加工工程においても、トラブルを引き起こす要因となる。Table 1に二次加工工程におけるトラブルで、その原因の一つとして、偏析が関与していると思われる代表例を示す。

Fig. 3はFig. 1で調査した同一の鋼塊におけるT, M, B各部の5.5mmφ線材(但しコントロールドクーリングをしていない)についての生引き伸線時の減面率と断線率の関係を示したものであり、T部の断線率がM部、B部に比較してかなり高い値を示している。これはFig. 1に示したように、鋼塊軸心部の正偏析により、伸び、絞り値が低下することによるものと思われる。

以上のように、成分偏析は条用鋼材の基礎的特性および二次加工工程に大きく影響し、鋼材品質のパラツキをもたらす原因となる。したがって、鋼塊における成分偏析は、極力低減されるべきものである。

### 3. 条用大型キルド鋼塊の成分偏析

前項で述べたように、成分偏析は鋼材の品質特性に大きな影響を与えるため、従来より、多数の研究者・技術者により、この成分偏析を軽減する種々の努力が重ねられている。最近では、加速凝固法<sup>1)</sup>、攪拌凝固法<sup>2)3)4)5)</sup>などにみられるように、凝固条件を積極的に制御し、成分偏析の軽減、組織の微細化をはかる技術が開発されつつあり、一部では実用化の域に達したものも報告されている。

しかしながら一方では、生産性向上などの理由により、鋼塊の大型化が要求され、その結果、鋼塊内のマクロ偏

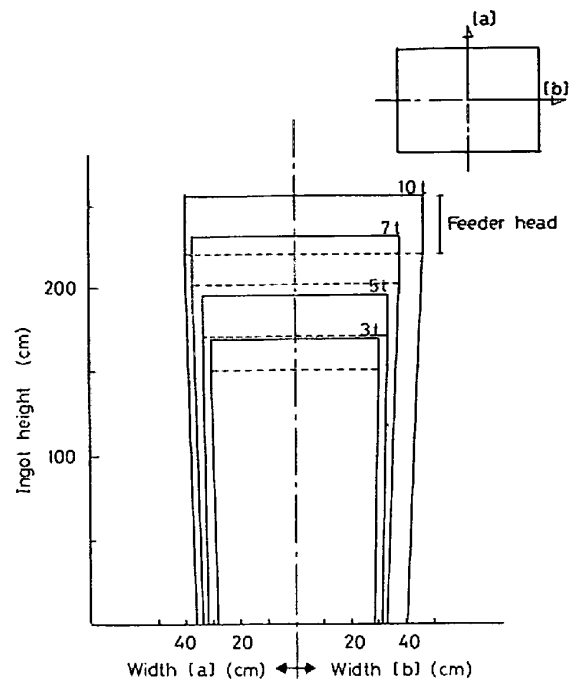


Fig. 4. Profile of K. S. L.'s ingot.

析などに対して、非常に苛酷な条件となつているのが現状である。特に条用鋼塊については、高炭素鋼(最高1.2% C)も製造分野に入つており、成分偏析に対して、より厳しい対策が要求される。

当項では、現在、条用として製造されているキルド鋼塊における凝固形態と成分偏析の概要および鋼塊サイズの影響について述べる。

まず、当報告で用いたキルド鋼の鋼塊単重は3t, 5t, 7t, 10tの4種類であり、その鋼塊形状をFig. 4に示す。

一般的に、条用鋼塊は分塊・圧延の能率を考慮し、鍛造用鋼塊などに比較して高幅比(鑄型高さ/鑄型平均幅)が大きく、Fig. 4の場合、2.5~3.0の高幅比になつているので水平方向の凝固の影響が比較的強いことが予想される。10t鋼塊を縦割りにした時の断面状況をPhoto. 1に示す。

この4種類の鋼塊の凝固形態を把握するために実施したバーテストの結果をFig. 5に示す。Fig. 5より、鋼塊底部の凝固厚さ $D$ と経過時間 $t$ との関係は鋼塊サイズで変わらず、次式で与えられる。

$$D = C\sqrt{t}; \quad C = 46[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}]$$

凝固高さ0.4mより上部では、凝固速度は急激に増大する。鋼塊サイズ別にみると、Fig. 6に示すように、大型鋼塊になるにつれて凝固速度は減少する。さらに、鋼塊頭部では、いずれのサイズの鋼塊とも、凝固速度は減少する。

また、各鋼塊サイズごとのマクロ的な凝固プロフィール

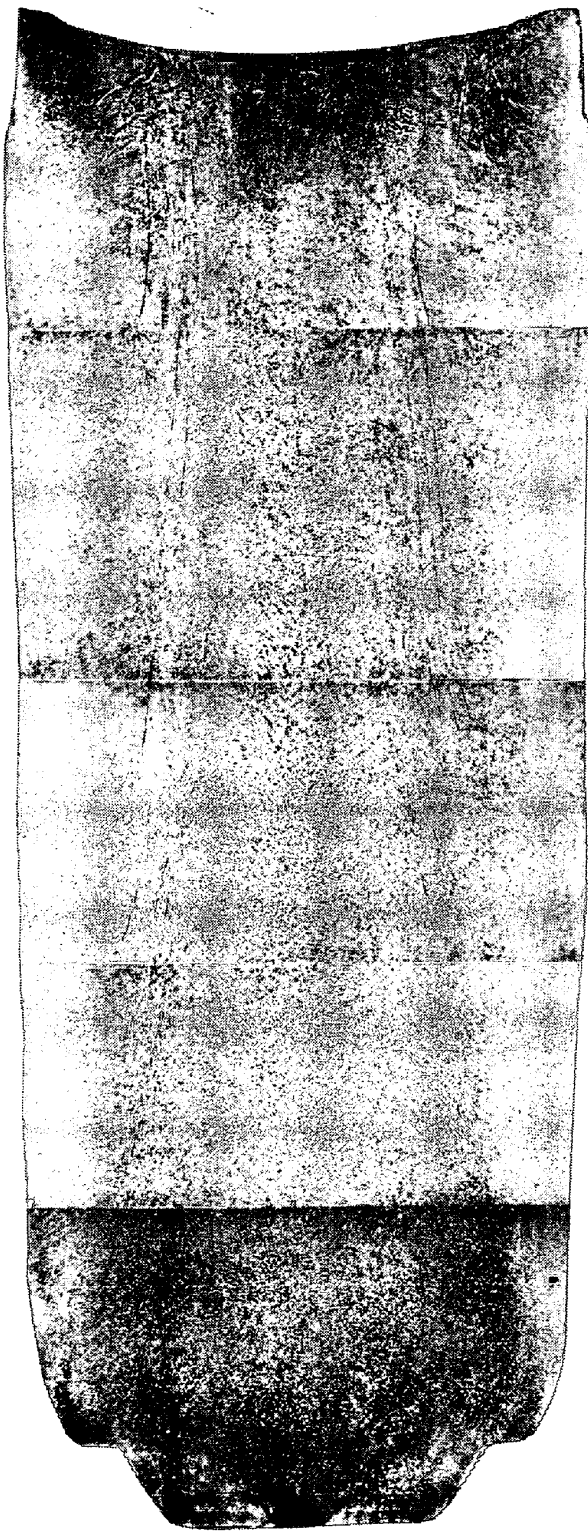


Photo. 1. Macrostructure of 10 t-killed ingot in JIS S40C.

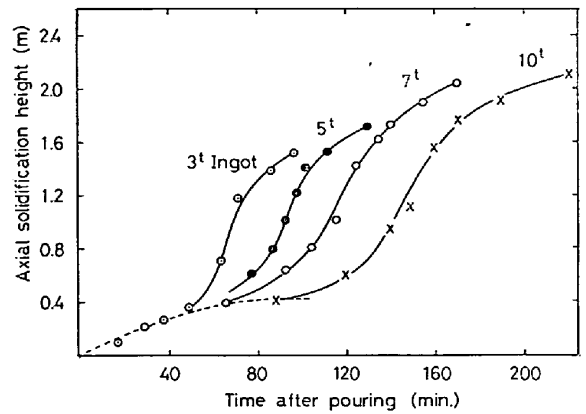


Fig. 5. Result of bar testing.

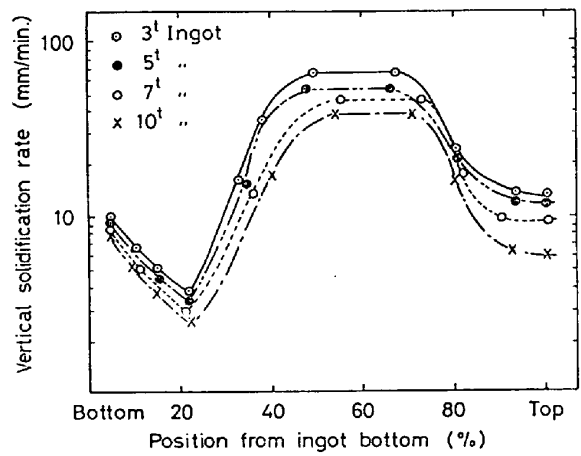


Fig. 6. Vertical solidification rate in ingot.

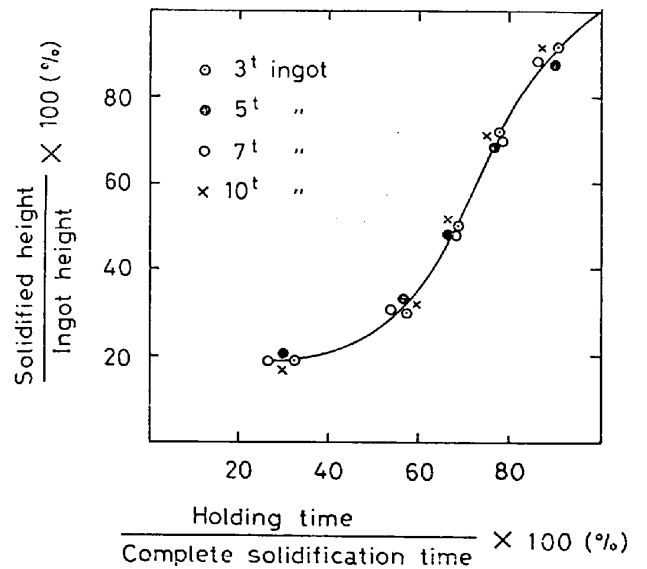


Fig. 7. Solidification progress in various ingots.

を確認するために、相対的な凝固状況、すなわち（経過時間/本体凝固時間）と（凝固高さ/本体高さ）の関係を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。

Fig. 5 で、各鋼塊サイズにおける凝固速度には差が認

められたが、凝固過程での凝固進行形態は Fig. 7 より、ほぼ一致する。

一方、鋼塊サイズと成分偏析の関係については、Fig.

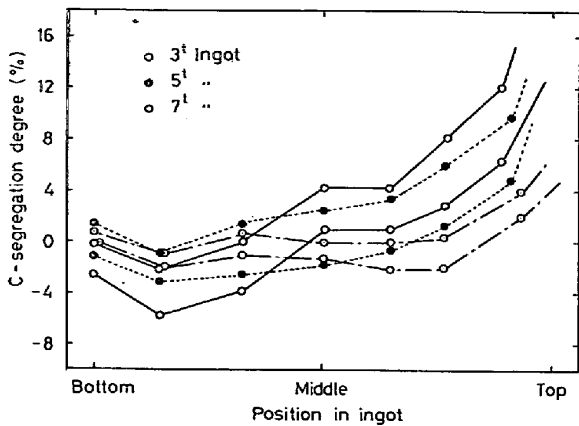


Fig. 8. Relationship between ingot weight and axial C-segregation degree.

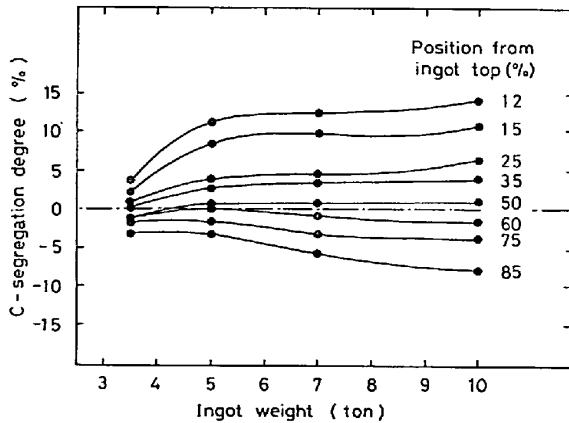


Fig. 9. Relationship between ingot weight and C-segregation degree at various axial position in ingot.

8, Fig. 9 に 3 t, 5 t, 7 t の鋼塊軸心部の C 偏析状況で示す。ここで、偏析率とは (軸心部成分値 - 取鍋成分値) / 取鍋成分値で表わしている。Fig. 8 において、鋼塊底部では沈殿品による負偏析が生じ、中央部から頭部にかけて溶質の濃化による正偏析が生ずるが、この傾向は鋼塊が大きくなるにつれて、一層強まることが確認できる。

鋼塊底部における負偏析の最大値は、Fig. 8 で示すとおり、各鋼塊サイズとも、鋼塊最底部よりほぼ 15 wt% の位置に発生している。そこで、この位置を鋼塊最底部からの高さで示すと、3 t 鋼塊で 350 mm, 7 t 鋼塊で 430 mm に相当する。この位置は Fig. 5 に示した鋼塊のパーテスト結果における垂直方向の凝固速度が急速に増加しはじめる位置に一致する。

このような鋼塊底部の負偏析は、一般的に、柱状晶帯で分岐・増殖<sup>6)</sup>されたデンドライト枝などにより生成された結晶片が、比重差により沈降して形成される粒状

等軸晶 (沈殿品) に起因するといわれている。すなわち、デンドライト枝などにより生成された結晶片の溶質濃度  $C_{gL}$  は当然、溶鋼濃度  $C_L$  よりも低く、 $C_L$  と  $K C_L$  ( $K$ : 平衡分配係数) の間の値となる。そこで、このような溶鋼より溶質濃度の低い結晶片が沈降堆積する領域の溶質濃度を  $C_K$  とする、 $C_K$  は次式で与えられる。

$$C_K = C_L - (1 - \epsilon) (C_L - C_{gL}) \dots\dots\dots (1)$$

ここでは  $\epsilon$  この領域の液相率を示し、 $\epsilon = 1$  は溶液状態を示す。

また、 $K_{gL} = C_{gL} / C_L$  とすると、(1)式より次式が得られる。

$$C_K / C_L = 1 - (1 - \epsilon) (1 - K_{gL}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、鋼塊底部の軸心部において、未凝固溶鋼の溶質濃度が高くなると仮定すると、 $C_L$  は溶鋼濃度、 $C_{gL}$  は柱状晶デンドライト枝の溶質濃度であるため、 $K_{gL}$  は柱状晶領域での実効分配係数に等しく、一定の値となる<sup>7)</sup>。したがって、 $C_K$  は液相率  $\epsilon$  のみの関数となり、時間の経過とともに、鋼塊底部の軸心部に堆積する結晶片が増加し、 $\epsilon$  はしだいに小さくなる。このため、この領域の溶質濃度  $C_K$  は低下し、負偏析を示す。 $\epsilon$  がある一定値、たとえば、 $\epsilon_{\text{minimum}}$  に到達すると、その位置は充分な粘稠状態となっており、その領域に沈降する結晶片がもはやそれ以上多くは到達しえなくなる。それ以降の段階では、 $\epsilon$  は  $\epsilon_{\text{minimum}}$  の状態が続くと考えられ、同時に、未凝固溶鋼の溶質濃度  $C_L$  がしだいに増大するため、 $C_K$  は増加し、正偏析の傾向となる。

このようにして、溶鋼濃度があまり高くない時期に、 $\epsilon$  が最初に  $\epsilon_{\text{minimum}}$  に到達した位置に溶質濃度  $C_K$  の最低値ができ、この位置が最大負偏析部に相当するものと思われる。また、Fig. 8 および Fig. 9 より、鋼塊底部の負偏析は鋼塊サイズが増大するにつれて、程度を増す傾向がみられる。この要因としては、鋼塊の大型化にともない、注入流・熱的対流による溶鋼の流動が強まり、結晶片の沈降が加速されて、沈殿品領域への侵入が促進されるため、前述の  $\epsilon_{\text{minimum}}$  がさらに小さくなつて、負偏析が増大するものと考えられる。

一方、鋼塊中央部から頭部にかけては、Fig. 8 および Fig. 9 で示されるように、正偏析が生じ、その程度は鋼塊サイズが大きくなるにつれて増大する。このような鋼塊頭部濃厚偏析は、一般的に、溶鋼が凝固する段階で排出される溶質の濃化、特に鋼塊底部より順次進展する粒状等軸晶領域の形成により排出される溶質の濃化に起因する。すなわち、ANDREWS と GOMER<sup>8)</sup> および KOHN<sup>9)</sup> の実験でもわかるように、前述のような結晶片の沈降現象により、粒状等軸晶領域が形成されるとその部分にあ

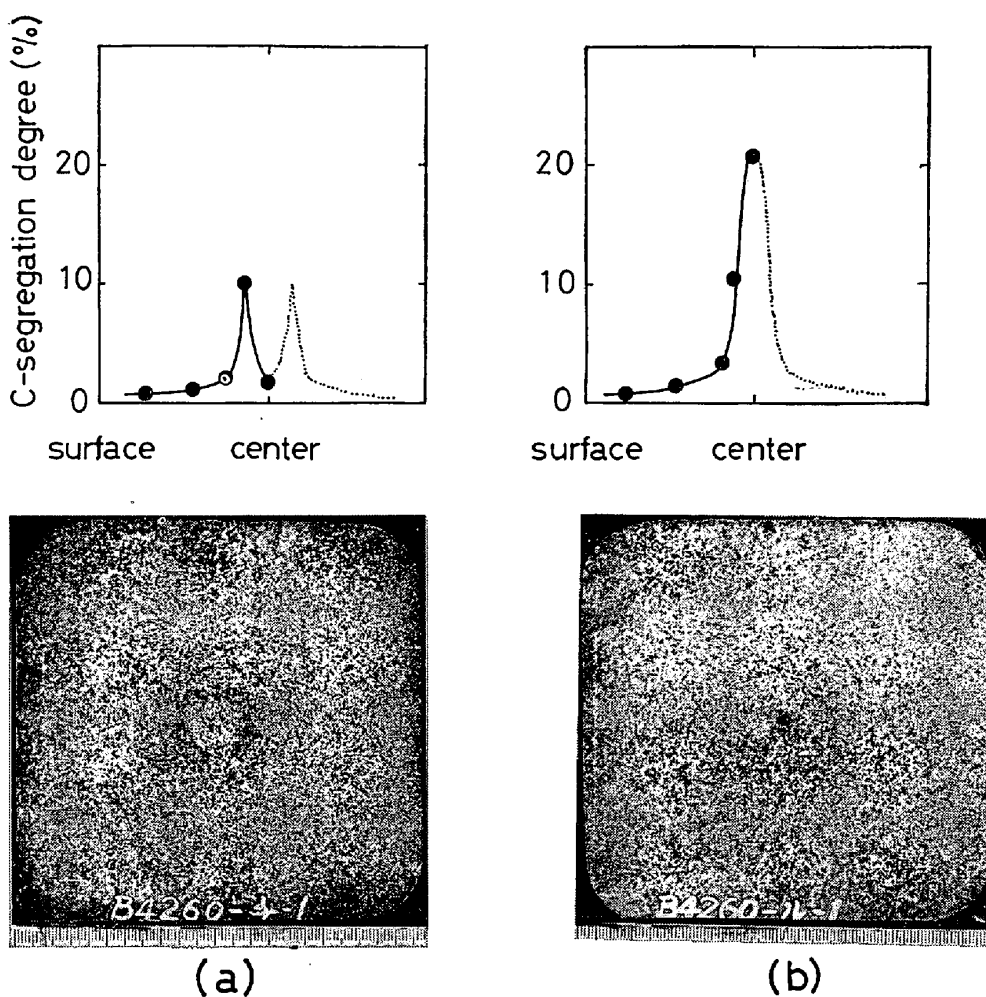


Photo. 2. Appearance of V-segregation at 110 mm sq. billet.

つた未凝固溶鋼は上部に移動させられる。このため粒状等軸晶領域が広がるにつれて、負偏析領域が広がり、それに応じて、鋼塊頭部の未凝固溶鋼は濃化される。

したがって、濃厚偏析の程度は粒状等軸晶領域が増加するにつれて増大する。

鋼塊頭部の濃厚偏析の増大はこの粒状晶領域の増加によるものと思われるが、V偏析、逆V偏析などの濃化溶鋼の捕捉状況をも考慮する必要がある、鋼塊頭部の保温条件などを加味して検討されなければならない。この領域の偏析状態を調査した結果によると、5 t 以上の大型鋼塊において、鋼塊中央部から頭部にかけて Photo. 2 に示されるような V 偏析が確認された。この V 偏析は Photo. 2 のように鋼片断面では軸心付近に点状またはリング状の偏析として現われる。また Fig. 8 において、5 t および 7 t 鋼塊の中央部から頭部にかけての偏析率は、ある程度バラツキをもっており、その原因のひとつとしてこのような V 偏析が考えられる。

#### 4. 成分偏析の軽減について

条用キルド鋼塊が大型化されるにつれて、鋼塊内の成分偏析の程度は前述のごとく増大する傾向を示す。従来より、この成分偏析を軽減するため種々の試験・検討がなされてきた。ここでは、鋼塊の大型化にともなう成分偏析の軽減対策について、代表的な事項について述べる。

##### 4.1 鋼塊頭部の保温について

キルド鋼塊における押湯部は、一般的に押湯枠と保温剤により保温されるので最終凝固領域となり、鋼塊本体凝固時に溶液側に排出される偏析元素・介在物の集積箇所および凝固収縮に対する補償の役目を果たしている。押湯枠は鋼塊の大型化にともない、発熱性押湯枠から断熱性押湯枠に変遷してきた。これは、押湯絶対量の増加により押湯部溶鋼自体の熱容量が大きくなったために、小型鋼塊のように積極的に押湯部溶鋼を加熱・保温する必要性が少なくなったこと、押湯枠の製造技術の進歩により断熱帯の厚さを必要最少限にすることが可能となり

断熱帯の吸熱に対する熱補償の必要性も少なくなつたことなどの理由によるものである。

また、鋼塊頭部の保温剤は、従来、Al や CaSi などの発熱材料により押湯部を加熱し、燃焼後、モミガラなどの断熱物質を添加する方法<sup>10)</sup>、または発熱材料と断熱材料を混合した粉末を添加する方法が用いられていた。しかしながら最近になつて、鋼塊の大型化にともない保温剤の添加量が増大し、投入時の粉塵発生が作業環境上問題となり、板状保温剤も用いられるようになった。板状保温剤は、下注注入の場合、事前にセットしておけば溶鋼の上昇にともない、溶鋼と板状保温剤が静かに接触するため、鋼塊表面被覆剤の飛散が防止され、環境改善の効果が大きい。この種の板状保温剤は、溶鋼からの加熱により燃焼を開始して崩壊すると同時に、含有する鉱物の変態により膨脹して空気断熱層を形成し、保温効果を高める。その膨脹率はもとの板厚の2~3倍にも達する。

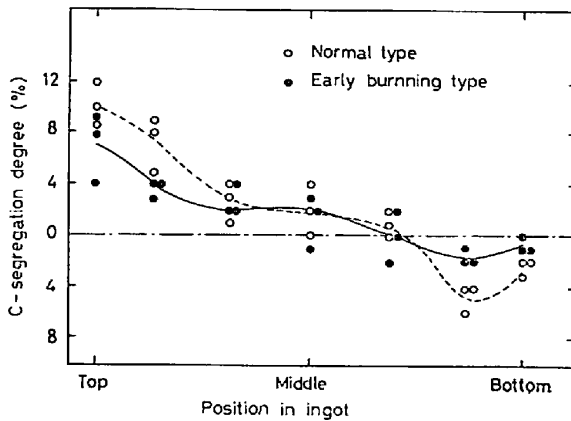


Fig. 10. Effect of exothermic powder on axial C-segregation in ingot.

このような板状保温剤では、燃焼開始時期が遅れる傾向があり、燃焼開始時期を早期化する必要がある。この効果の一例として Fig. 10 に、鋼塊軸心部のC偏析状況に対する早期燃焼型の保温剤の効果の影響を示す。Fig. 10 より、燃焼開始後の最高温度到達時間が早い場合沈殿品の生成が抑制され、鋼塊底部の負偏析が改善されることが明らかである。

また、鋼塊頭部の保温は濃厚偏析に対しても大きな影響を及ぼす。Fig. 11 に普通保温剤と木炭系の保温剤を用いた場合の鋼塊頭部における表面温度の経時変化を示す。普通保温剤を用いた場合、頭部表面温度は約 1500 °C に保たれ、鋼塊頭部は凝固完了時まで溶鋼の状態に維持される。一方、木炭系保温剤を用いた場合、添加直後の頭部表面温度は高発熱量のため普通保温剤の場合より高くなるが、燃焼後の保温効果が小さいため急速に低下し、本体凝固途中で鋼塊頭部は凝固してしまう。このため、二次パイプの発生ならびに頭部濃厚偏析領域の拡

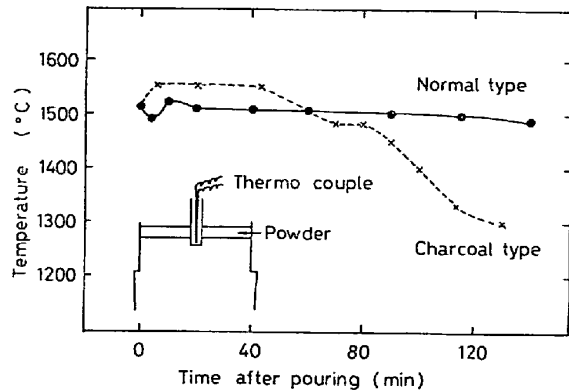


Fig. 11. Effect of exothermic powder on the temperature of the ingot-top surface.

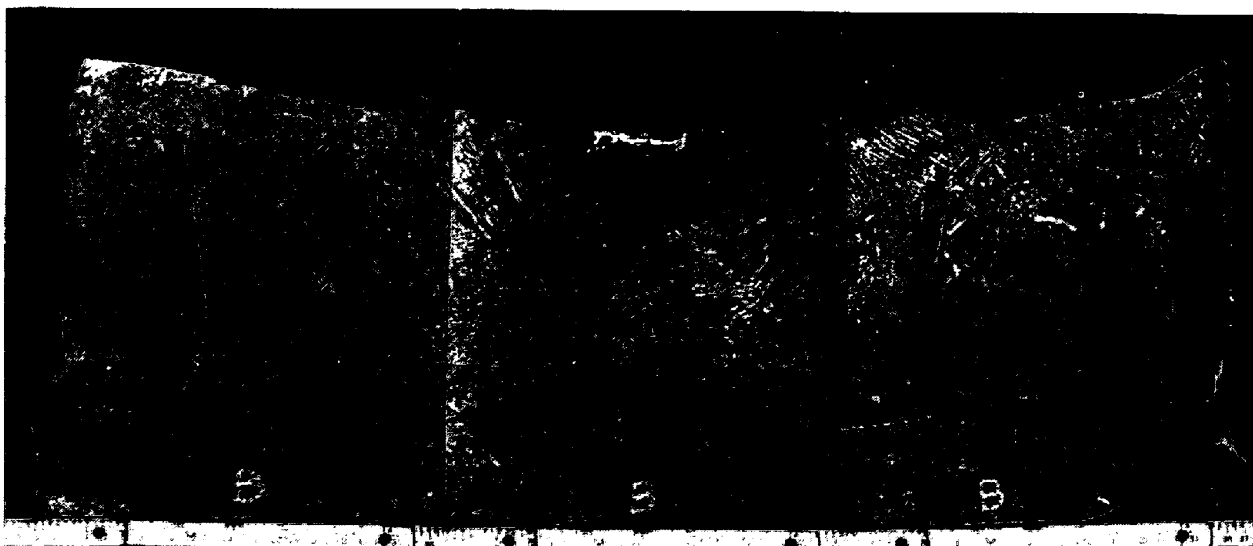


Photo. 3. Vertical cross section of 7 t ingot feeder head.

大が生じる。

したがって、保温剤として要求される特性を考える場合、燃焼時の発熱量も重要であるが、それと同時に、保温持続性もまた重視する必要があることはいうまでもない。

#### 4.2 最適押湯比と頭部切捨について

押湯比が適正でない場合には、頭部濃厚偏析領域が拡大したり、押湯引けにより分塊時のメカニカルパイプ発生領域が増大し、鋼材における成分偏析の増大、パイプの発生、頭部切捨量の増加による歩留の低下などを招く。

このような鋼材の品質欠陥、製造コストの上昇を防止するために、最適な押湯比と頭部切捨量を設定する必要がある。ここで押湯比 (Liquid head volume) とは注入直後における押湯重量/鋼塊重量×100 (wt%) で表わす。

Photo. 3 に 7 t キルド鋼塊の押湯部垂直方向切断面と軸心部偏析状況を示す。この場合、頭部押湯として、十分な効果を発揮していることが確認できる。

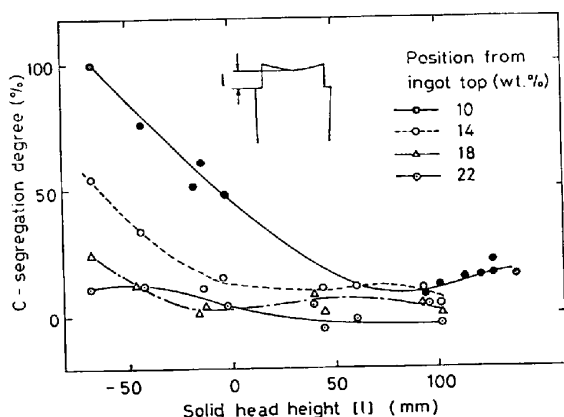


Fig. 12. Relationship between solid head height and C-segregation.

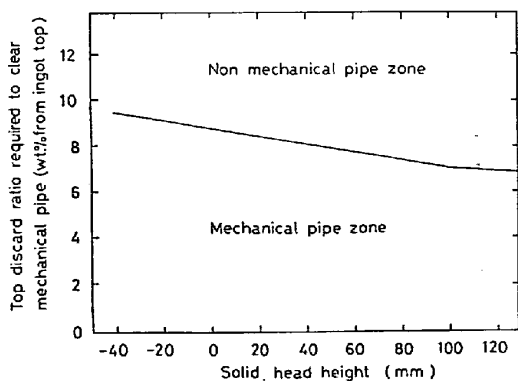


Fig. 13. Relationship between solid head height and top discard ratio required to clean mechanical pipe.

従来より、押湯残存高さ (Solid head height), すなわち押湯引け最低部ショルダーと部との間隔は頭部濃厚偏析およびメカニカルパイプと関係がある事が経験的に知られている。

Fig. 12 に、7 t 鋼塊における押湯残存高さ  $l$  と鋼片での頭部偏析状況の関係について示す。Fig. 12 より、 $l$  が 50 mm 以下の場合、頭部濃厚偏析は急激に増大することがわかる。また Fig. 13 に、押湯残存高さ  $l$  と鋼片でのメカニカルパイプの発生領域との関係を示すが、これより  $l$  がある程度以上になると、メカニカルパイプ発生領域は一定状態になることがわかる。一方、Fig. 14 に 7 t に鋼塊における押湯部残存高さ  $l$  と押湯比の関係を示す。Fig. 12 および Fig. 14 より、押湯比と鋼片頭部の偏析状況を求め、その結果を Fig. 15 に示す。Fig. 15 において、頭部濃厚偏析は約 11% の押湯比で最低になっている。これは Fig. 16 に模式的に示すように、押湯比が小さすぎる場合、押湯としての効果が少なく、本体

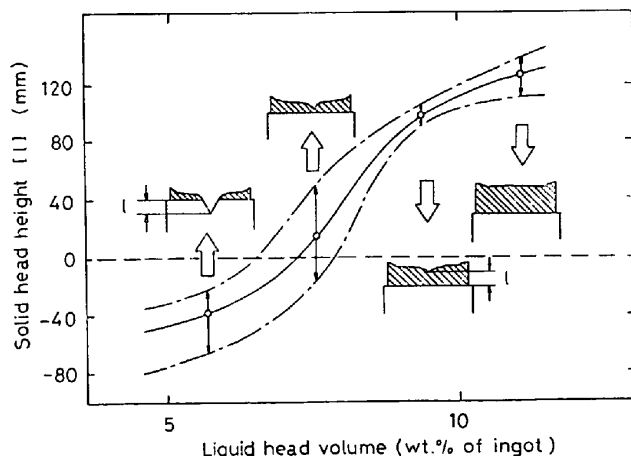


Fig. 14. Relationship between liquid head volume and solid head height.

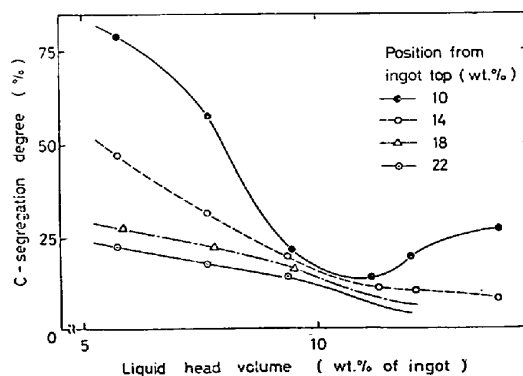


Fig. 15. Relationship between liquid head volume and C-segregation at various position from ingot top.



凝固で生じる頭部濃厚偏析領域が増大し、一方、押湯比が大きすぎる場合は、押湯部内の濃厚偏析が増大することによるものと考えられる。

以上のようにして、最適な押湯比が求められる。しかしながら、4.1 項で述べたように、鋼塊頭部の濃厚偏析は頭部の加熱・保温方法により左右されるため、これをも考慮して決定しなければならない。

また、頭部切捨量については押湯比の他に、分塊圧延の影響を加味しなければならない。鋼塊サイズが大きくなると、鋼塊頭部幅および分塊圧延比の増加により、フィッシュテールが伸び、頭部濃厚偏析領域が鋼片では、もとの鋼塊における位置よりも本体側に移行する。いままでの調査によると、メカニカルパイプ発生限界における頭部切捨量とその鋼塊の重量比は、7 t 鋼塊を 1 とした場合、10 t 鋼塊で 1.3 となり、この現象をよく説明できる。このように鋼塊が大きくなるにつれて、鋼片の頭部切捨量は増加させる必要がある。この具体例として

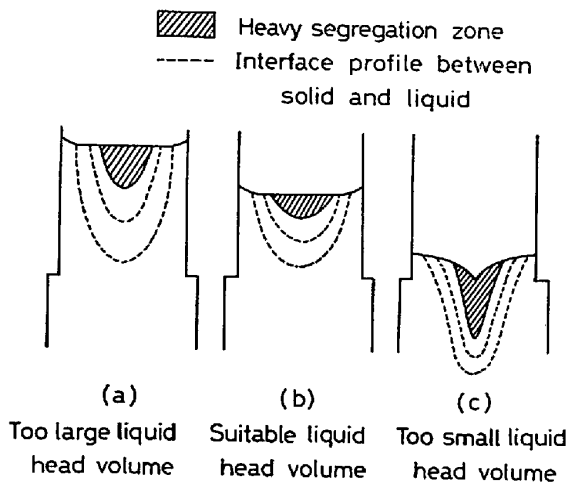


Fig. 16. Influence of liquid head volume on heavy segregation at ingot top.

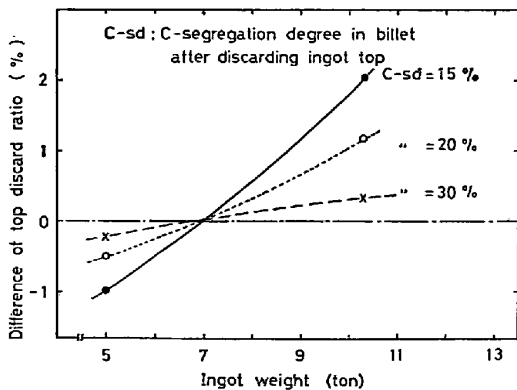


Fig. 17. Relationship between ingot weight and top discard ratio to obtain same C-segregation in billet.

Fig. 17 に、偏析率をパラメーターとした鋼塊サイズと鋼片の頭部切捨率との関係を示す。

### 4.3 鑄型設計と凝固解析

鑄型は凝固現象、特に凝固組織、成分偏析、表面性状などに影響をおよぼす重要な因子として、従来よりさかんに研究されてきた。しかし、これまでの鑄型は高幅比、傾斜比、鑄型比 (鑄型重量/鋼塊重量) などを因子にとり、試行錯誤的に設計されていた。ところが近年、凝固に関する研究が進み、コンピューターを用いて理論計算式を解き、凝固予測を行なつてこれを鑄型設計に反映しようとする試みが行なわれている。

この一例として、条用鋼塊において凝固計算により鑄型形状と凝固形態の関連を求めた。すなわち、7 t 鑄型の形状を Fig. 18 に示すように、一般型 (7A) と鑄型底部内径の小さい型 (7B) の 2 種類について、両者の凝固形態の差異を調査した。計算方法は森<sup>11)</sup>によつて報告されているが、基礎式として、下記に示す 3 次元非定常伝熱方程式を用い、Fig. 19 に示すようなフローチャートに従い、前進差分法により求めた。

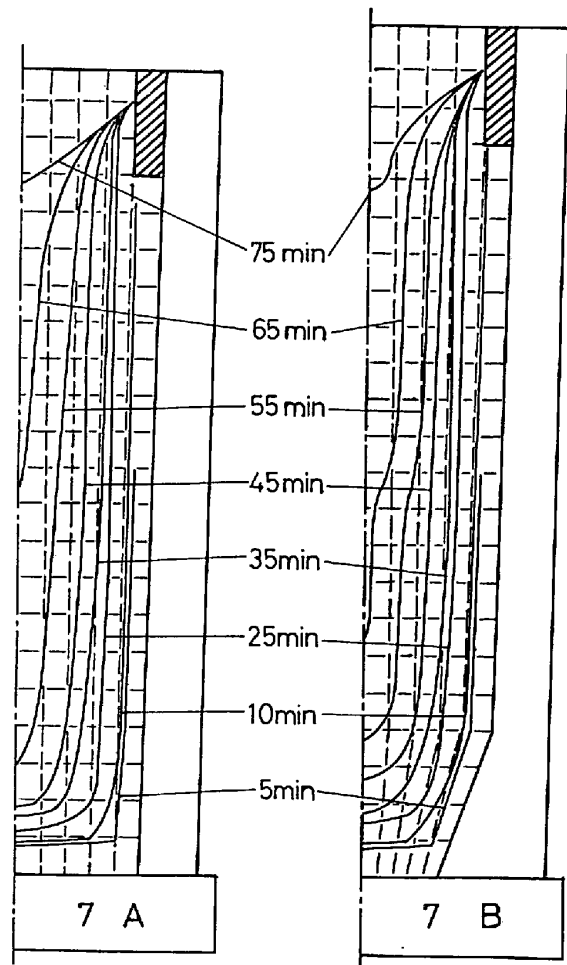


Fig. 18. Model of solidification progress.

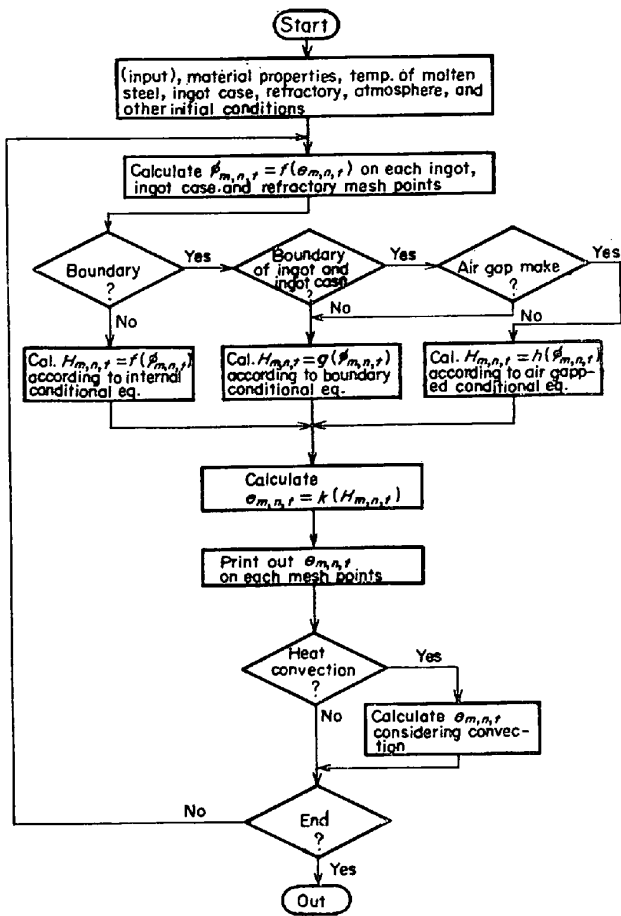


Fig. 19. Flow chart of computer program for calculation of ingot solidification progress.

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

$\theta$  : 温度  $C$  : 比熱  $\rho$  : 密度  $k$  : 熱伝導率

計算条件としては、S40Cを対象とし、鑄型表面温度および溶鋼頭部温度は実測値を用いた。また伝熱方式としては、鑄型と鋼塊の空隙が生成するまで(鑄込後10min)は伝熱伝導、空隙生成後は鋼塊側面で放射伝熱、鋼塊底部では伝熱伝導によるものとした。

以上の凝固計算により得られた凝固界面プロファイルの経時変化を Fig. 18 に示す。この計算結果では、溶質の濃化、凝固時の過冷、沈殿晶などの等軸晶凝固、溶鋼の対流などを加味していないため、Fig. 5 に示したバーテストの結果と一致していない。また凝固界面の形状もオートラジオグラフを用いて鋼塊の凝固形態を調査した報告<sup>8)9)</sup>からもわかるように、Fig. 18 のような単純な凝固形状を示すものでもなく、これから実際の凝固過程を推定するには、無理がある。

しかしながら、この予測は熱移動を中心としたものであるため、鑄型設計に対する一つの指針として、利用す

る価値はあると考えられる。たとえば、Fig. 18 における7t 鑄型の場合の凝固形態をみてみると、鑄型のボトム形状が鋼塊軸心部における凝固に影響を及ぼしている可能性があると考えられる。特に条用鋼塊の場合、高幅比が大きく、最終凝固帯が本体内部に捕捉され、二次パイプ、濃厚偏析帯の発生しやすい鑄型形状のため<sup>12)</sup>、凝固予測が鑄型設計に重要な情報となる。したがって現在、前述の加味されていない条件の定量化、およびこれらの条件を計算式に挿入するための検討をいろいろな角度から進めている。

#### 4.4 鋼塊の静置時間について

鋼塊の凝固時間は Fig. 5 に示したように、鋼塊サイズが大きくなるにつれて、長時間を要する。したがって、実作業においては、凝固完了まで注入場に静置しておく、注入場専有時間が長くなり、造塊能力の不足をきた

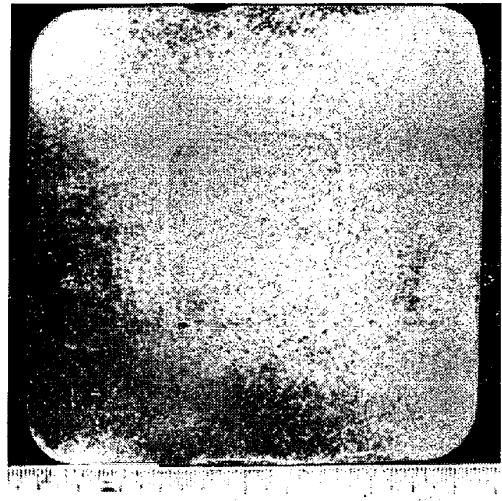


Photo. 4. Abnormal macrostructure in the billet caused by insufficient holding time after pouring.

Table 2. Influence of holding time of ingot after pouring on macrostructure.

Ingot weight	C content (%)	Holding time (min)						
		10	20	30	60	80	105	120
7 t	0.10	-	-	-	-	×	△	○
	0.20	-	-	△	△	△	○	-
	0.30~0.40	-	-	△	△	△	○	-
	0.60	-	-	△	△	○	○	-
10 t	0.10	-	-	×	×	-	△	○
	0.20	○	○	×	△	-	△	○

× Strong abnormal macrostructure of billets  
 △ Abnormal macrostructure of billets  
 ○ Normal macrostructure of billets

す。このため、適当な時期に鋼塊を移動させることが必要となる。しかし、凝固完了前の溶鋼に振動を与えた場合、凝固状況、特に成分偏析・組織に影響することが予想される。

このような要因を考慮して、最適な鋼塊静置時間を把握するため、7 t および 10 t のキルド鋼塊について、注入終了後一定時間静置したのち、鋼塊台車を約 500 m (所要時間 10 min) 移動させ、凝固後の状況を鋼片で調査した。初めの静置時間が短い場合、Photo. 4 に示すように、明瞭な異常組織が現われる。その発生位置は、静置時間にも関係するが、鋼塊の中央部から頭部に相当する。また、7 t、10 t 鋼塊における異常組織発生状況を C 含有量別に Table 2 に示す。

Table 2 よりわかるように、低炭素鋼ほど所要静置時間が長くなる傾向がある。また、このような異常組織を避けるには、普通炭素鋼の場合、7 t 鋼塊で 100 min 以上、10 t 鋼塊では 120 min 以上の静置時間が必要である。この異常組織を顕微鏡で観察すると、フェライトバンド状を呈しており、EPMA 解析によると、この領域における偏析率は約 -50% にもなっている。

このような異常組織の生成機構については、次のように推論している。すなわち、実用鋼塊における凝固は凝固界面に排出された濃化溶鋼によつて、凝固相の濃度がきまる。しかるに、凝固進行中に台車の移動などによつて振動が加わつた場合、濃化溶鋼が攪拌され、凝固界面の溶質濃度が低下し、凝固相の濃度が低下するため、振動をうけている間の凝固相は Photo. 5 のようなフェライトバンド状になるものと考えられる。

一方、Table 2 に示しているが、10 t 鋼塊を注入直後より 20 min 以内に鋼塊台車を移動させた場合には、異常組織が検出されていない。これは注入直後で、溶鋼の対流（注入による慣性および熱対流によるもの）が強いため、凝固界面の洗浄効果がより強く、鋼塊台車の振動による影響が隠されるためと考えられる。また、注入終了後 100~120 min 経過してから鋼塊に振動を与えても、異常組織が発生しないのは、この時期になると、未凝固領域でも固相率が大きくなり、粘性が増して攪拌効果が小さくなるためと考えられる。また C 含有量が増加すると固液共存相の領域が広がり、凝固界面での溶鋼の流動が抑制され異常組織が発生しにくくなることが推定される。

なお、各静置時間で試験された鋼塊における軸心部の C 偏析状況には、差を検出する事はできなかった。しかしながら、異常組織が認められなかった静置時間の場合においても、凝固中の鋼塊に振動・流動を与えると、鑄型の形状にもよるが、ブリッジなどを引きおこすことが予想される。このことより、鋼塊の静置時間の設定には十分な配慮が必要である。

## 5. 結 言

以上、条用大型鋼塊の製造に関し、特に線棒用大型キルド鋼の品質と品質に影響する諸要因について、製造技術の立場より概要をとりまとめて報告した。鋼塊の大型化による品質上の最大の問題点は成分偏析の増大である。成分偏析は鋼の凝固現象上、不可避なものであるが鋼材の機械的性質はもちろんのこと、二次加工性などのバラツキの根源となるので極力軽減しなければならない。また成分偏析と同時に、非金属介在物、鋼塊割れなども鋼塊の大型化により問題となる。このような問題点に対して最近、凝固の理論的解析、凝固形態のコントロールなどの研究が急速に進んでおり、その他の造塊新技術の開発も着実に成果があがりつつある。

鉄鋼製造にたずさわる者の一人として、このような研究・開発を更に促進して、品質上厳しい条件が要求される鋼塊のより大型化を具現すると同時に、ますます厳しくなる需要家の要求に応えていく所存である。

## 文 献

- 1) 鍵和田: 学振製鋼19委員会資料, 19委-8108
- 2) N. P. NIKOLAICHIK and E. N. NIKOLAICHIK: Lit. proizv., (1958) 2, p. 25
- 3) 中川, et al.: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 886
- 4) 小野寺, et al.: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 1768
- 5) F. C. LANGENBERG, et al.: Trans. Met. Soc. AIME, 221 (1961), p. 993
- 6) T. Z. KATTAMIS, et al.: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), p. 1504
- 7) 鈴木, et al.: 日本金属学会誌, 33 (1969) 1, p. 839
- 8) K. W. ANDREWS and C. R. GOMER: Iron Steel Inst. Pub., 110 (1968), p. 363
- 9) A. KOHN: Rev. Met., 65 (1968), p. 245
- 10) D. R. THORNTON: Steel Times, Oct. (1970), p. 107
- 11) 森: 神戸製鋼技報, 24 (1974) 1, p. 68
- 12) 鈴木, et al.: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 431