

## 討10

## 鍛造用大型鋼塊の凝固組織と内部品質

神戸製鋼所 中央研究所 ○岩田至弘 戸田晴彦  
高砂事業所 新実高保 三浦正淑 永田弘之

## 1. 緒 言

現状においては大型鋼塊の内部品質に関してまだ断片的な知識しか得られていないようであり、それを鋼塊の凝固現象との関連で総合化する目的で、3.5 Ni-1.75 Cr-Mo 真空脱酸鋼を上注ぎ真空铸造した鍛造用5.5 t 鋼塊において、金相学的方法を用いて凝固組織を観察し、成分偏析、マクロ偏析、大型介在物の分布状況など内部性状を凝固組織との関係で調査した。また、デンドライトの2次アームの間隔(以下、アーム間隔)、 $L$  ( $\mu$ )、と凝固温度範囲の平均冷却速度(以下、冷却速度)、 $R$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )、との間に  $L = A R^B$  ( $A, B$  は常数)の形の関係<sup>1)</sup>があり、そして、常数  $B$  の値は鋼種とは無関係で、 $-0.33 \sim -0.40$  の間にあり、常数  $A$  の値は鋼種により異なり、その鋼種の凝固特性を示す1つの指標であると考えられている。そこで、本鋼種の常数  $A, B$  を測定して、その凝固特性を調べるとともに、鋼塊内各位置のアーム間隔の測定値から鋼塊内での冷却速度の変動の様子を推定した。

## 2. 実験方法

Table 1 Chemical compositions (%)

供試鋼塊の組成を Table 1 に示す。

鍋中温度は、注入開始時が  $1580^{\circ}\text{C}$ 、  
1.9 min 後が  $1555^{\circ}\text{C}$  であった。注入

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.24	0.07	0.29	0.008	0.010	3.38	1.75	0.38	0.11

時間は、鋼塊本体が 1.9.5 min で、押湯部が 7.5 min であった。

凝固サブ組織(以下、サブ組織)と成分偏析の調査に供するため Fig.1 に示す鋼塊の8水準から試料を各2本ずつ切り出し、 $25 \times 30 \text{ mm}$  の大きさに細分した。サブ組織用試料には  $880^{\circ}\text{C} \times 30 \text{ min} \rightarrow A, C$  の熱処理を施し、鏡面研磨後、Stead 氏液で腐食し、サブ組織を現出した。次に、このサブ組織からアーム間隔を測定した。成分偏析用試料はカントバックにより成分濃度を測定した。

介在物の測定のため、成分偏析用試料からさらに  $10 \times 10 \text{ mm}$  の大きさの試験片を切り出して、その研磨面上で見出される  $25 \mu \phi$  以上の大きさのすべての介在物を写真撮影した。介在物を酸化物と硫化物とに、また、形状を球形と不定形とに区別し、それぞれの介在物の大きさを粒度計を用いて測定した。

アーム間隔と冷却速度の関係式は真空タンマン炉による一方向凝固実験で求め、これを用いて、鋼塊のサブ組織から測定したアーム間隔を冷却速度に換算した。さらに、鋼塊内で観察されるさまざまな形状のサブ組織が出現する際の凝固条件を推定するために、凝固界面近傍の温度勾配、 $G$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )、凝固界面の進行速度、 $V$  ( $\text{cm}/\text{min}$ )、と冷却速度、 $R$ 、とをいろいろ変えて、一方向凝固実験をおこなった。

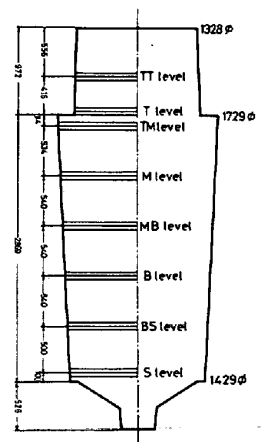


Fig.1 Sampling positions, mm

## 3. 実験結果

3.1. 凝固組織: サブ組織から、チル晶帯、柱状晶帯、分岐柱状晶帯、等軸晶帯が鋼塊内でどのように分布しているかを調べた。その結果を Fig. 2 に示す。

鋼塊本体において、柱状晶帯は鋼塊表面より  $150 \sim 170 \text{ mm}$  まで存在しており、下注ぎ大気铸造した  $20 \text{ t}$  程度の中炭素鋼鋼塊(以下、通常鋼塊)にくらべて著しく広い。分岐柱状晶帯も通常鋼塊にくらべて著しく広

く、上側 2/3 では鋼塊軸心まで占めている。そして、この領域のはほぼ全面でデンドライトの枝が太くなっているとともに側枝がよく発達した複雑な形状のサブ組織が観察される。等軸晶帯は下側 1/3 の軸心部で始めて見出され、しかも、そのかなりの割合はデンドライト状のサブ組織で占められており、粒状等軸晶帯の領域が通常鋼塊にくらべて著しく狭く、それゆえ、本鋼塊の軸心部の凝固組織は通常鋼塊とはきわめて異なっている。

柱状晶帯でのデンドライト主軸の成長方向を概要図で示すと、Fig. 3 のようになり、上側 1/3 ではすべて上向きに成長しているのに対して、下側 2/3 では、鋼塊表面より 100 mm あたりの柱状晶帯の途中

で下向きから上向きに成長方向の逆転しているのが観察される。

押湯部では、鋼塊表面にデンドライト状の等軸晶がいくらか認められるだけで、直ちにデンドライトの枝の太い柱状晶帯になっており、この柱状晶帯も鋼塊表面より 25~50 mm までしか認められず、特に鋼塊表層部のサブ組織が鋼塊本体ときわめて異なっているのが観察される。

マクロ偏析はサルファ・プリントでは認められなかったが、サブ組織で始めて押湯部下端の鋼塊表面より 365 mm の位置に 1 個所だけ軽微な A 偏析が観察された。

3. 2. アーム間隔と冷却速度の関係式： $3 \sim 5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$  の温度勾配で、 $1 \sim 20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$  の範囲の冷却速度で一方向凝固実験をおこない、次の関係式が得られた。

$$L = 368 R^{-0.85} \dots \dots (1)$$

3. 3. サブ組織の形状に及ぼす凝固条件の影響：

Photo. 1 に一方向凝固実験で得たサブ組織を凝固条件とともに示す。この際、冷却速度が小さくなるにつれてデンドライトの枝の太くなるのが観察される。

3. 4. 鋼塊内での冷却速度の変動： Fig. 4 にいくつかの水準で冷却速度が鋼塊内でどのように変動しているかを示した。鋼塊本体の鋼塊表面より 500 mm あたりの冷却速度は、底部で約  $1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$ 、上部で約  $0.3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$  であり、上部のほうが小さい。

3. 5. 成分偏析： 成分偏析が顕著であった C について、相対的に見て鋼塊内でどのような偏析傾向にあるかを Fig. 5 に示す。鋼塊本体において、正偏析は上部の中央部で見出され、負偏析は底部の中央部に認められ、この領域は粒状等軸晶帯におおよそ一致している。最大濃度を  $C_M$ 、最小濃度を  $C_m$ 、平均濃度を  $C_0$  とし、 $(C_M - C_m)/C_0$  の形で成分偏析の大きさを示すと、 $0.33$  となり、 $(C_0 - C_m)/C_0$  の形で負偏析の程度を示すと、 $0.17$  となる。

3. 6. 鋼塊内での大型介在物の分布： EPMA により種々の介在物を定量分析した結果、鋼塊内で見出される大型酸化物の大部分は Table 2 に示すような組成であったが、例外的に押湯部の表層部にシリケートが見出された。硫化物の場合には Mn 以外にかなりの量の Cr が含有されていた。

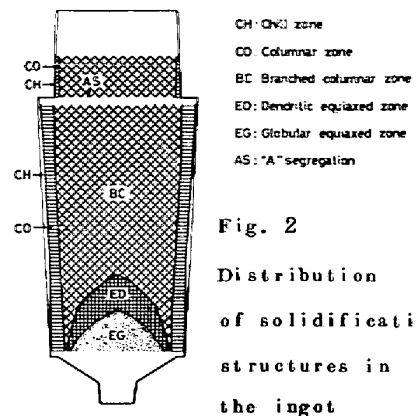


Fig. 2 Distribution of solidification structures in the ingot

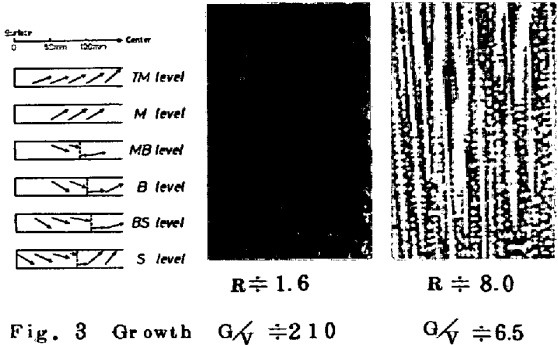


Fig. 3 Growth direction of dendrite stem in columnar zone obtained by unidirectional solidification.  $\times 3$

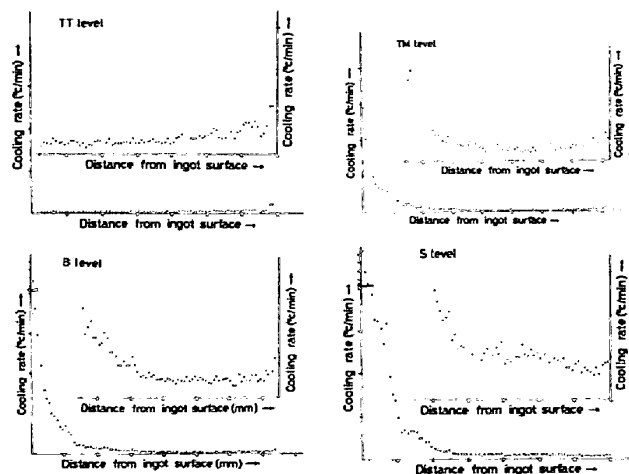


Fig. 4 Variation of cooling rate in the ingot.

鋼塊内での大型介在物の分布状況を Fig. 6 に示す。

(a) 酸化物：球形酸化物は、粒状等軸晶帯の全面で、大きなものを含めて多数見出される。鋼塊本体のそれ以外では、柱状晶帯に接する分岐柱状晶帯で比較的多く見出され、この領域のサブ組織でデンドライト状組織の間のところどころに粒状等軸晶の混在しているのが観察される。押湯部では、TT水準の表面近くに多数見出されるが、鋼塊の内部に向かうにつれて次第に減少していく。

不定形酸化物は、粒状等軸晶帯の全面で、球形酸化物と比較すると少ないが、比較的大きなものを含めてかなり多く見出される。鋼塊本体のそれ以外では、軸心部近くにいくらか多く見出され、また、押湯部直下の分岐柱状晶帯のところどころにきわめて大きなものが認められる。これらの位置では長く伸びた大きなデンドライトに囲まれて、等軸晶に近い形状の比較的微細な枝より成立つサブ組織の存在しているのが観察される。

押湯部では表層部と軸心部を除いた領域にかなり多く見出される。

(b) 硫化物：硫化物の場合には球形と不定形とで分布に差異は認められなかった。鋼塊本体では、分岐柱状晶帯の冷却速度に変動が生じはじめる鋼塊表面より 550 mm あたりから軸心にかけての領域で、冷却速度が鋼塊表面側にくらべて小さくなっている軸心側の位置に多く見出されるとともに大きなものも認められる。押湯部でも鋼塊本体と同じ冷却速度の変動が認められる位置に、同様の大きさのものが多く見出される。

4. 考察

(i)  $L = AR^B$  より得られる常数 A は、低合金鋼 (SCM4) では 610、ステンレス鋼 (25Cr-20Ni) では 210 であることがすでに測定されており<sup>2)</sup>したがって、今回求められた 368 という値から、本鋼種は低合金鋼よりもむしろステンレス鋼に近い凝固特性を有することが判明した。

(ii) 本鋼塊が大型鋼塊であり、鋼塊内で冷却速度の小さな領域が著しく広いために、それらの領域でデンドライトの枝の太いサブ組織が観察されるようになるだろう。

(iii) 柱状晶の成長は溶鋼中にある等軸晶により阻止されると考えられており、また、傾斜鑄型に鑄造した実用鋼塊で、鋼塊下部の中央部にそのような等軸晶が連続的に堆積して、等軸晶帯が形成されることが観察されている。<sup>4)</sup>このような機構から、柱状晶帯や等軸晶帯の広さは溶鋼中の等軸晶の量により規定され、おもに注入温度、

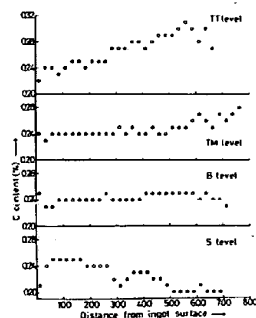
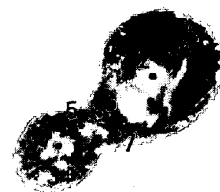


Fig. 5 Variation of solute concentration in the ingot

Table 2 Compositions of the oxide (%)

No.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO
1~2	-	100	-	-
3~7	39.3~ 44.5	26.4~ 38.3	1.3~ 8.6	11.6~ 24.8



× 800

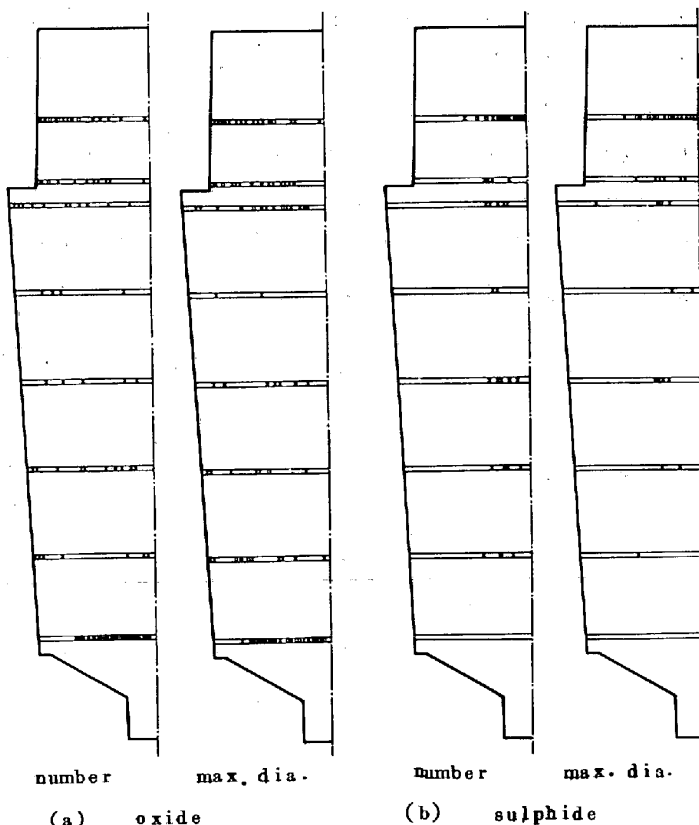


Fig. 6 Distribution of large inclusions in the ingot.

注入方法、鋼の組成の影響を受けることが考えられる。注入温度では、過熱度が大きいと柱状晶帯が広がるが、本鋼塊の場合、過熱度は70℃前後であり、特に大きくはなく、これの影響は小さいだろう。注入方法では、注入による溶鋼流が弱いと柱状晶帯が広がり、本鋼塊の上注ぎ真空鑄造法は下注ぎ法にくらべて溶鋼流が弱く、これが柱状晶帯を広くするのに寄与している可能性が考えられる。鋼の組成では、常数Aの小さいステンレス鋼はそれの大きい低合金鋼に比較して柱状晶帯の著しく広いことが知られている。通常鋼塊にくらべて本鋼塊で、柱状晶帯が広く、また、等軸晶帯が狭くなるのは本鋼種がステンレス鋼に近い凝固特性を有するためであり、それゆえ、鋼の組成の影響がもつとも大きいだろうと思われる。さらに、溶鋼中でデンドライト状の形状が崩れて粒状になる機構が考えられており<sup>5)</sup>、本鋼塊の等軸晶帯の内部で粒状の等軸晶が多くなかったのに対し、おもに溶鋼流がある程度弱くて、デンドライト状から粒状になりにくかった可能性が考えられる。

(iv) 柱状晶は凝固前線の前方の溶鋼流の上流側に向かって伸びることが知られている<sup>6)</sup>したがって、Fig. 3より、柱状晶の前方の溶鋼流は、鋼塊本体の上側1/3では終始上から下向きに流れているのに対して、下側2/3では、最初は下から上向きに、最後には上から下向きに流れるようになり、柱状晶帯の成長時の途中で、溶鋼流の方向の変化するのがわかる。

(v) 通常鋼塊の場合、常数Aの小さい鋼種ほどA偏析の少なくなることが経験的に知られており、本鋼塊でA偏析がわずかしこ出現しなかったのは常数Aの小さな本鋼種の凝固特性のためであろう。

(vi) 粒状等軸晶帯が広がるほど、負偏析部が広がり<sup>4)</sup>、成分偏析の程度が大きくなる<sup>7)</sup>といわれており、本鋼塊では粒状等軸晶帯が著しく狭いために、軽微な成分偏析しか認められなかっただろう。

(vii) 大型酸化物の分布から、球形酸化物は注入時からすでに溶鋼中に存在していて、粒状等軸晶帯など早い時期から mushy 状態にある領域に多く定着し、不定形酸化物は、凝固の進行につれて、Siなどの働きにより球形のものが成長・結合して、不定形になるとともに大きくなる機構が示唆される。

(viii) 硫化物の大きさはその位置の冷却速度に反比例することが知られている<sup>8)</sup>。大型硫化物の分布から、鋼塊の凝固がかなり進行して、溶鋼中のS量がある濃度以上になり、そして、近傍にくらべてゆっくりと冷却される位置に大きな硫化物が多く見出されるだろうことが示唆される。

## 5. 結 言

3.5 Ni - 1.75 Cr - Mo 真空脱酸鋼の凝固特性を明らかにし、また、この鋼種の55t上注ぎ真空鑄造鋼塊の内部品質を調査して、大型の上注ぎ真空鑄造鋼塊に特有の凝固現象に関する基礎的な情報を収集できた。

## 6. 参 考 文 献

- (1) T. F. Bower et al : Trans. Met. Soc. AIME, 236 (1966), P.624.
- (2) 鈴木章, 他 : 日本金属学会誌, 33 (1969), P.658.
- (3) G. S. Cole et al : Met. Trans., 1 (1970), P.1413.
- (4) J. Comon et al : Rev. Met., 65 (1968), P.13.
- (5) N. Nepper et al : Rev. Met., 65 (1968), P.25.
- (6) E. S. Miksch : Trans. Met. Soc. AIME, 245 (1969), P.2069.
- (7) C. Roques et al : Rev. Met., 57 (1960), P.1091.
- (8) K. Schwerdtfeger : Arch. Eisenhüttenw., 43 (1972), P.201.