

討 7

鍛造用大型鋼塊の凝固と内部性状

川崎製鉄 技研 水島研究室

○松野淳一

工博 大井 浩

1. 緒言

内質の健全な鋼塊を製造するためには、凝固時にどのような現象が起っているかと正しく知る必要がある。しかし、特に大型鋼塊の場合には凝固が長時間にわたるため現象が複雑化して、まだ十分解明されていない部分が多く残されているように思われる。著者らは、大型鋼塊における凝固現象に関する知見を得る目的で、合金鋼を含む30t～100t 鍛造用鋼塊について一連の破断調査を行なうとともに、バーテストによる実測と伝熱計算による解析で凝固速度を調査した。その資料をもとに、最も重要と考えられる凝固速度、偏析、および収縮孔の各問題について検討を加えた結果について報告する。

2. 調査鋼塊

破断調査を行なった鋼塊は、炭素鋼(SF50)、低合金鋼(SNCM8)各3本で、ASEA-SKF 取鋼精錬炉で溶製した鍛造用筒型鋼塊である。その内訳を表1に示す。

表1 調査鋼塊内訳

鋼 種	SF50			SNCM8		
	重 量	30t	50t	100t	40t	40t
高径比	1.8	1.8	1.8	1.8	1.4	1.8

3. 凝固速度

3.1 炭素鋼の凝固速度

炭素鋼の3鋼塊について実施したバーテストによる垂直方向凝固速度の実測結果を図1に示す。いかに、時間に関してほぼ直線的な凝固の進行を示している。50t、100tの2鋼塊については、傾斜バーテストによる水平方向凝固速度の測定も行なったが、水平方向の凝固は初期3hr程度までは放射線則に従って進行している。50t鋼塊について伝熱計算による凝固量(固相線位置)と実測値を比較した結果を図2に示す。水平方向の凝固については両者はほぼ一致しているが、垂直方向の凝固量は計算値にくらべて実測値が著しく大きい。このような差異の生ずる理由として、実際の凝固においては沈澱品の堆積が大きな役割を果たしていることが考えられる。

3.2 低合金鋼の凝固速度

図3に低合金鋼40t 鋼塊の垂直方向凝固速度の実測と計算の比較を示す。高径比1.8の場合は6hrまで、1.4の場合は8hrまで実測と計算が一致している。炭素鋼の場合とは異なり、低合金鋼の場合には垂直方向凝固に対する沈澱品堆積の寄与が非常に少ないと考えられる。

4. 成分偏析

4.1 成分偏析におよぼす沈澱品堆積の効果

図4に炭素鋼50tおよび低合金鋼40t鋼塊内のCの分布を示す。高径比1.8の鋼塊と比較すると、炭素鋼にくらべて低合金鋼の負偏析が著しく少ない。また 同じ低合金鋼で

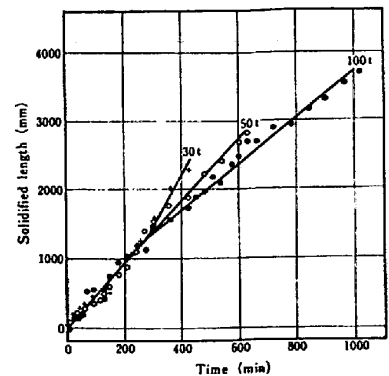


図1 炭素鋼塊の垂直方向凝固速度実測結果

も高径比の小さな鋼塊の負偏析が少ない。
 この結果は、炭素鋼鋼塊においては沈澱品の
 堆積が著しいこと、および高径比の小さな鋼
 塊では沈澱品の軸心部への集中が少ないと考
 えれば良く現象を説明でき、かつ前述の凝固
 速度について得られた結果と良く対応する。

4.2 成分偏析のモデル解析

図4に見られるように、鋼塊内の成分偏析
 は底部の負偏析と頭部の正偏析で特徴づけら
 れている。可なり、上下方向の濃度変化
 が著しく、これは沈澱品の降下に伴う物質移
 動によつてほとんど一義的に説明できるもの
 と思われる。上方で低濃度の固体が析出し
 て下方へ移動すれば、その濃度差の分だけ残
 存溶鋼の濃度が高くなる。その蓄積によつ
 て次第に濃化の度合が大きくなり、最終的に
 は頭部の濃厚偏析が生ずる。このように考
 えれば図4における軸心上の濃度分布が説明
 できるであろう。

そこで、図5に示すように鋼塊内を

- (1) 完全溶鋼
- (2) マツシイゾーン
- (3) 完全固体

の3領域に分け、

- (a) 完全溶鋼内溶質濃度は均一。
- (b) 完全溶鋼からマツシイゾーンに入る
 結晶粒内溶質濃度、および側面におけ
 る凝固面上固体側溶質濃度は完全溶鋼
 内溶質濃度と一定の分配関係にある。

などの仮定を用いて凝固後の鋼塊軸心上溶質
 濃度分布を求めるモデル解析を試みた。

仮定により、完全溶鋼内溶質の物質収支は
 (1) 式で与えられる。

$$\frac{d(V_L C_L)}{dt} = - \left\{ (1 - g_m + k_0 g_m) \times \right. \\ \left. U_m + (1 - g_w + k_0 g_w) U_w \right\} C_L \quad (1)$$

図2

炭素鋼50t鋼塊
 の凝固速度実測
 と計算の比較

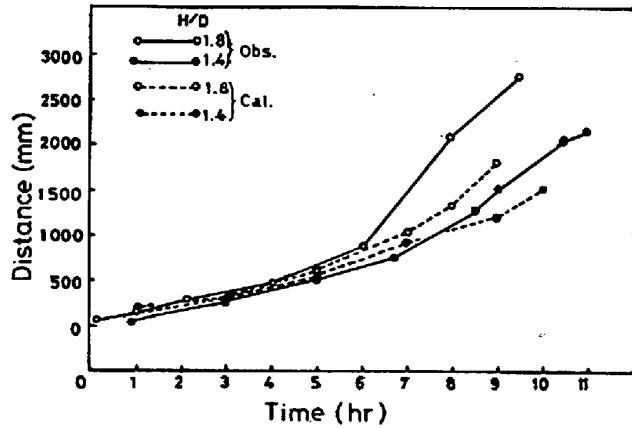
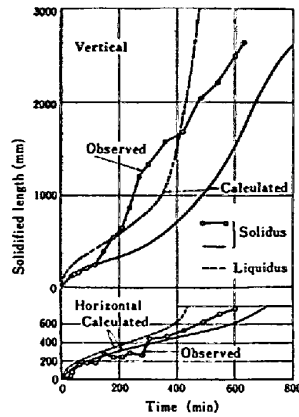


図3 低合金鋼40t 鋼塊の垂直方向凝固速度

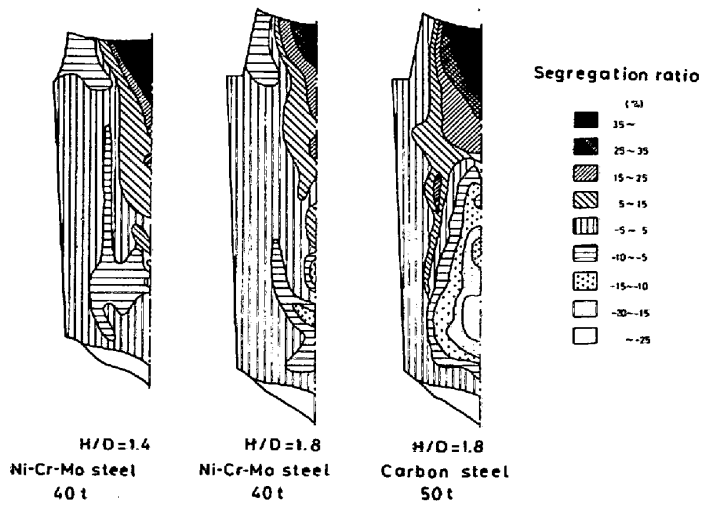


図4 炭素鋼50t鋼塊 および低合金鋼40t鋼塊内
 のCの濃度分布

ただし、

C_L : 完全溶鋼内溶質濃度 (wt%), V_L : 完全溶鋼体積 (m^3), U_M, U_W : 底部および側面における溶鋼体積減少速度 (m^3/hr), g_M, g_W : マツシイゾーン上面および側面凝固面における固体分率 (-), k_0 : 分配係数 (-), t : 時間 (hr)

ここで簡単のために

$$\frac{2g_W}{g_M} \frac{d(\ln R_L)}{d(\ln H_L)} = \text{const} \equiv \alpha \quad \dots (2)$$

とおく。 (1) 式は (3) 式のように整理される。

$$\frac{dC_L}{dH_L} = -\frac{C_L}{H_L} g_M (1-k_0) (1+\alpha) \quad \dots (3)$$

ただし、 R_L, H_L : 完全溶鋼領域の半径および高さ (m)

さらに、マツシイゾーン内に入った沈澱晶は完全凝固までに軸心へ集中するから、その集中度を考慮すると凝固後の溶質濃度は次式で与えられる。

$$C_s = [1 - \beta g_M (1-k_0)] C_L \quad \dots (4)$$

沈澱晶の降水量、いかえればマツシイゾーン上面における固体分率を次式で与える。

$$g_M = g_0 \left[1 - \left(\frac{h_L}{H_0} \right)^A \right] \cdot \frac{H_L}{h_L} \cdot \frac{d h_L}{d H_L} \quad \dots (5)$$

ただし、 A, g_0 : 定数, h_L : 注入直後の湯面とマツシイゾーン上面間の距離 (m), H_0 : 鋼塊高さ (m)

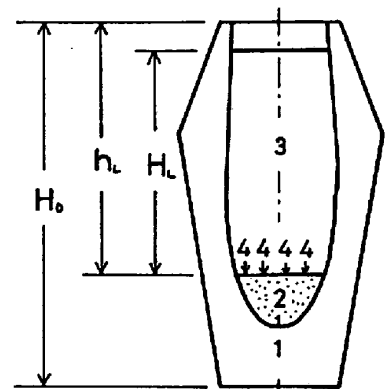
(4), (5) 式を (3) 式に入れて積分することにより、凝固後軸心上濃度分布が (6) 式により与えられる。ただし、 C_0 : 初期濃度 (wt%)

$$\ln \left(\frac{C_s}{C_0} \right) = -g_0 (1-k_0) (1+\alpha) \left[\ln \left(\frac{h_L}{H_0} \right) + \frac{1}{A} \left\{ 1 - \left(\frac{h_L}{H_0} \right)^A \right\} \right] + \ln \left[1 - \beta g_0 (1-k_0) \left\{ 1 - \left(\frac{h_L}{H_0} \right)^A \right\} \right] \quad \dots (6)$$

(6) 式は h_L/H_0 があまり 1 に近くなければ、近似的に (7) 式のように書かれる。

$$\ln \left(\frac{C_s}{C_0} \right) = a \ln \left(\frac{h_L}{H_0} \right) + b \quad \dots (7)$$

実際の鋼塊において (7) 式の関係が成立していることが図 6 のように検証された。図 6 より求めた (6) 式あるいは (7) 式中のパラメーター値の一部を表 2 に示す。表中、 βg_0 は凝固後鋼塊軸心部における沈澱晶割合の最大値を与えるもので、数



1 Solid
2 Mushy zone
3 Melt
4 Falling crystals

図5 凝固中鋼塊のモデル

C_s : 凝固後溶質濃度 (wt%)
 β : 沈澱晶の軸心への集中度
(-)

表2 図6から求めたパラメーター値(Cの場合)

鋼塊	a	b	βg_0
30t	0.681	-0.580	0.47
50t	0.813	-0.680	0.53
100t	1.041	-0.780	0.58

値的にも妥当なものと考えられる。

5. 逆V偏析線の成長過程

逆V偏析線の最大長さを調べるためには、1断面の観察のみでは不十分である。そこで、低合金鋼100t鋼塊についてL断面を2mm間隔で3回段削りして6mmの厚さ範囲に現れた偏析線をすべて重ね合わせて見た。その結果を写真1に示す。重ね合わせにより、1本の偏析線の長さは1断面で見たものより著しく伸びており、最大2,000mmに及ぶものもある。

このように長く成長するためには、成長の過程で多量の濃化溶鋼が補給される必要があり、かつほとんど鉛直面内に存在することから、偏析線は樹枝状晶の空隙を縫って成長するのでなく、樹枝状晶の先端を浮上しながら成長すると考えられる。

6. 収縮孔に対する鋼種、高径比の影響

炭素鋼の鋼塊では高径比1.8でも収縮孔は全く観察されなかった。これに対して低合金鋼では高径比1.8の場合かなり大きな収縮孔が発生していた。この差異は前述のように低合金鋼の場合沈澱品の堆積が少なく垂直方向の凝固速度が遅いため

未凝固ポールが細く深い形状になることによるとして理解できる。このようなポール形状を改善すべく、伝熱計算にもとづいて高径比を1.4としたところ、写真2に示すように収縮孔の発生は防止できた。

低合金鋼の場合に沈澱品の堆積が起り粗い理由は明らかでないが、Bibbyら¹⁾によつて観察されたように、包晶反応を起さない場合は等軸晶が形成されにくい現象との関連が最も強いと考えられる。

1) P. A. Bibby and J. Beech: J I S I, (1973), Apr. P. 290

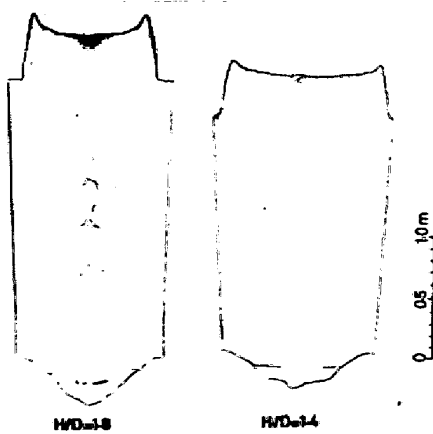


写真2 低合金鋼40t鋼塊の収縮孔 (高径比1.8と1.4の比較)

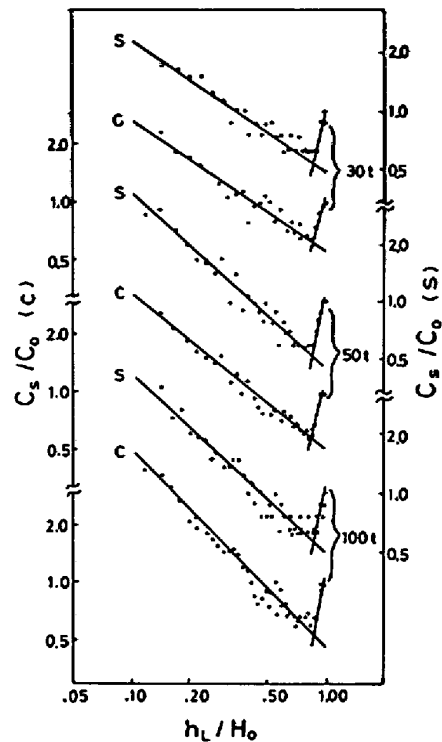


図6 炭素鋼鋼塊におけるCs/C0とhL/H0の関係(両対数)

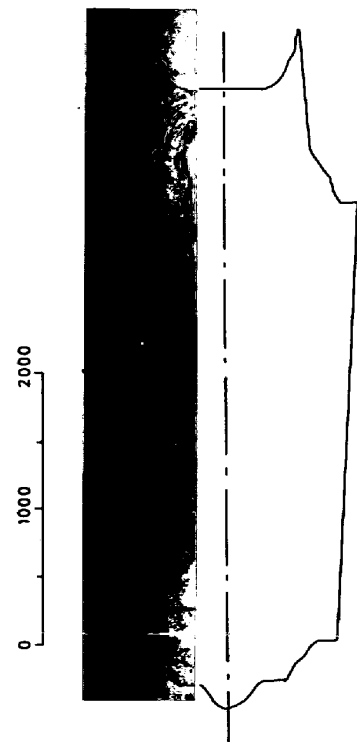


写真1 低合金鋼100t鋼塊の偏析線