

Fig. 5. Relation between cavity depth and flatness, taper of ingots. (stearic acid ingots of rectangle section)

ろう塊についての計算ではステアリン酸の熱伝導率がきわめて小さく、注入時間が短かつた(10~20秒)ため注入中における凝固量を見捨てる。(1)~(3)式において $t=0$ また収縮孔上部の天井厚さは薄いので $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ とし、収縮率はアテアリン酸の収縮率(10%)に収縮孔内のブリッジ重量(3%)を補正して13%とした。このような条件の下で円形断面および矩形断面ろう塊の収縮孔モデルを(1)~(3)式より計算し、実際の収縮孔形状と比較したところよく一致した。

5. 実際鋼塊の収縮孔におよぼす鋼塊形状の影響に関する考察

4の結果を鋼塊の場合に適用するためには注入中における凝固量を考慮しなければならない。

鋼塊収縮孔形状におよぼす鋼塊テーパ、 H/D 扁平度および注入時間の影響は次のように推定される。

5.1 テーパの影響

注入中において凝固が進行しても相対的なテーパはほとんど変わらないので、ろう塊の場合に認められた傾向と同じである。鋼塊収縮孔はテーパが大きくなれば正錐鋼塊において深く、逆錐鋼塊において浅くなる。

5.2 H/D の影響

H/D が大きくなれば、鋼塊表面積が大きくなって、注入時間が一定の場合には注入中の凝固量が大きくなる。逆錐鋼塊においてはろう塊にみられた傾向はより著しくなり、鋼塊収縮孔は H/D の増加とともに浅くなる。正錐鋼塊においては注入中の凝固量によって凝固界面のテーパが正錐である場合と逆錐になる場合がある。前者の場合には鋼塊収縮孔は H/D が大きくなれば深くなるが後者の場合には逆に浅くなる。

5.3 扁平度の影響

扁平度が大きくなれば鋼塊表面積が大きくなり、注入中の凝固量が多くなる。したがってろう塊の場合にみられた傾向はより著しくなり、鋼塊収縮孔は扁平度が大き

くなれば浅くなる。

5.4 注入時間の影響

注入時間が長くなるほど、注入中の凝固量が多くなるので、収縮孔のしめる体積は小さくなり、収縮孔は浅くなる。

H/D および扁平度の大きい鋼塊ほど鋼塊表面積が大きいために、注入時間の影響がより顕著に現われる。

6. 結 言

以上の結果を総括すると次のようになる。

(1) 鋼塊収縮孔は本文中の(1)~(3)式によつて比較的よく表わされる。

(2) 鋼塊収縮孔は鋼塊テーパが大きくなれば、正錐鋼塊においては深くなり、逆錐鋼塊においては浅くなる。

(3) 鋼塊収縮孔は H/D が大きくなれば、逆錐鋼塊において浅くなるが、正錐鋼塊においては注入中の凝固量が少なく凝固界面が正錐である場合には深くなり、上記の凝固量が多く凝固界面が逆錐になる場合には浅くなる。

(4) 鋼塊収縮孔は扁平度が大きくなると浅くなる。

(5) H/D および扁平度の大きい鋼塊ほど鋼塊収縮孔に対する注入時間の影響がより顕著に現われる。

文 献

- 1) 加藤, 今井, 梶岡: 鉄と鋼, 45 (1959), p.970
- 2) 森永, 北川, 佐藤, 星野: 鉄と鋼, 49 (1963), p.1425, 富士製鉄技報, 13(1964), p.141, 12(1963) p.51

(154) 鋼塊の凝固過程における結晶沈澱現象に関する 2, 3 の試験結果について

(大型鋼塊負偏析部の生成機構と酸化物系介在物の成因との関係に関する研究—IV)

日本製鋼所, 室蘭製作所

理博 中川 義隆・〇百瀬 昭次

Some Experimental Results on Settling Phenomena of Equi-Axial Crystals.

(Studies on relations between the mechanism of formation of negative segregation and formation of oxide inclusions in large steel ingots—IV)

Dr. Yoshitaka NAKAGAWA and Akitsugu MOMOSE.

1. 緒 言

著者らは先に3 t 砂型鋼塊に関する一連の試験結果^{1)~3)}について報告し、従来、支持されてきた沈澱晶説が大型鋼塊負偏析部の生成機構の説明に対しては十分でなくむしろ、適当でないことを指摘した。しかし結晶の沈澱作用の有無を確認するためには、さらに多くの試験を重ねることが必要であると考へた。

そこで最も基本的な立場から、まず沈澱晶説の大きな裏付けとなつてゐる水平凝固(Horizontal solidification)試験結果^{4)~6)}について再検討を行なうことにし、同一形状の垂直、水平ならびに45°傾斜させたスラブ状の3コの砂型に溶鋼を同時に鑄込み、凝固終了後、それぞれの

鋼塊の内部性状を調査した。

以下、その結果ならびにそれに基づいて 2, 3 の考察を加えたものについて報告する。

2. 試験方法および調査要領

2.1 試験要領

2.1.1 鑄込溶鋼

溶解炉: 20 t 塩基性電気炉

化学成分: C; 0.25%, Si; 0.37%, Mn; 0.69%, P; 0.0017%, Si; 0.019%

2.1.2 鑄込要領

鑄型形状および鑄込要領は Fig. 1 に示した。鑄込温度は 1525°C である。また、鑄型造型の際には芯金などによる冷却効果の影響のないように十分注意した。

2.2 調査要領

鋼塊を Fig. 1 の鎖線の方法にそれぞれ縦断し、その断面の S プリント、マクロ腐食などにより、性状、組織などを、また炭素、磷、硫黄などの偏析状況を調査した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 実験結果

各鋼塊の縦断面の内部組織の概要を Fig. 2 に示す。これからとくに注目すべき現象を取り上げてみると次のとおりである。

(1) 従来沈澱晶説の根拠となつている。水平鋼塊における上半部に樹状晶部 (columnar dendritic zone) 下

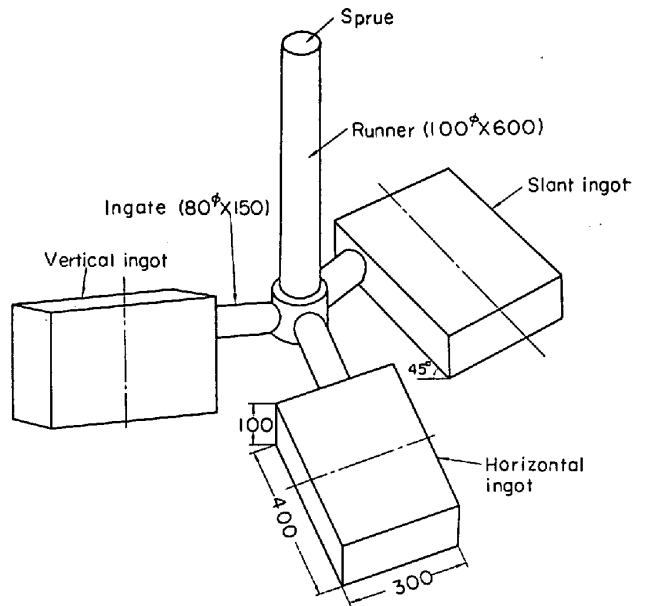


Fig. 1. Shape of experimental ingots and design of sand molds.

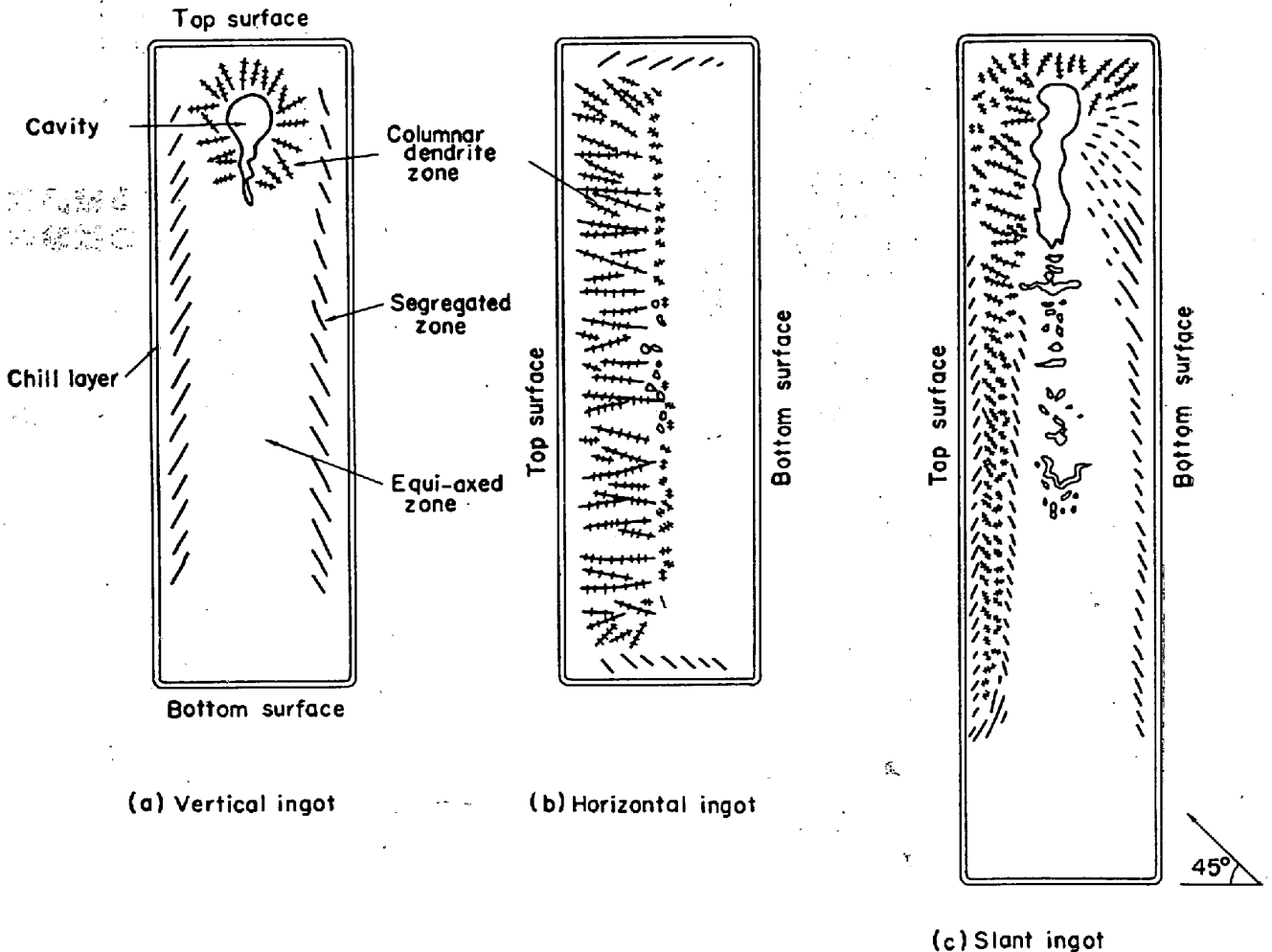


Fig. 2. Schematic diagram of macro-structures of longitudinal sections from experimental ingots.

半部に等軸晶部 (equi-axial zone) 発現の現象は本結果においても示された。また、樹状晶は角隅部を除き鉛直方向に発達し、ほぼ中心部まで達している。

(2) 傾斜鋼塊の上半部にも樹状晶部が発現しているが、樹状晶の成長方向は水平鋼塊におけるように一様でなく、初期段階では鉛直方向に成長しているが、方向性は徐々に乱れ、分断される傾向がみられかつ中心部まで達していない。

(3) 傾斜鋼塊の樹状晶部の内側に上向きの短い偏析線からなる偏析部が発現している。

3.2 考察

つぎに、これらの現象の中まず(1)の水平鋼塊における樹状晶部ならびに等軸晶部の生成機構について考察してみる。

水平鋼塊において上半部に樹状晶部、下半部に等軸晶部が発現する理由としては、従来、沈澱晶説が強く支持されてきた。沈澱晶説によれば、凝固先端近傍の溶湯中に生成された結晶小粒子が比重差により下方に沈降するため、凝固先端部での成長を阻止することなく樹状晶の成長を可能とする。しかし、下半部では上方から沈澱してきた結晶小粒子が凝固先端部に堆積するために樹状晶の成長が阻止されると説明されている。しかしながら、このような考え方に基づいて本試験結果を整理すると、つぎのような問題点を生ずる。

(1) 樹状晶部の凝固速度は、その前面部溶鋼中に生成される結晶小粒子の凝固速度と同程度と考えられるので、この結晶小粒子の成分濃度は、樹状晶部に近いはずである。また、凝固の進行とともに凝固先端部での濃化

は促進され、さらに下方から浮揚した濃化溶鋼もこれに加わるため結晶小粒子の成分濃度は逐次濃化するはずである。これらの結晶小粒子の沈澱により下半部の等軸晶部の形成が支配されるとすれば、等軸晶部での成分濃度は中心に向うにしたがい増加しなければならない。しかるに Fig. 3 に示すように、本結果によれば、下半部等軸晶部の化学成分濃度は、樹状晶部に比べ低値を示し、しかも中心に向う程低値となる傾向がみられ、矛盾した結果を示している。

(2) つぎに、沈澱晶説の立場に立つて考えてみて、さらに一步進めて、沈降結晶小粒子が直接凝固層の成長に影響を与えるよりも、徐々に沈降した結晶小粒子が下半部溶鋼中に suspend した状態で存在し、結晶の成長を促進させる作用を優先すると考えると、中心に向う程凝固速度は遅くなるので、成長した結晶の化学成分濃度は中心に向うにともない低値を示すことも予想される。

また、このように考えた場合、底面からの熱放散は、上面からの熱放散と同程度と考えられるので、上面からの凝固にくらべ底面からの凝固はかなり速いことが推定される。しかるに最終凝固部と考えられる収縮孔の発生位置(あるいはSプリントの濃い部分)はほぼ中心部となっており、そのような形跡は認められない。したがってこれらの結果より沈澱してきた結晶粒子が存在したとしても下半部等軸晶部の形成に対しては、それ程効果的な作業をおよぼさないと考える方が妥当と思われる。

(3) このように沈澱晶説による説明では、本実験結果を理解できない点が多い。そこで著者らはこの種の現象に対しつぎのような説明を試みた。

まず樹状晶と等軸晶の生成条件に着目してみる。TILLER ら⁷⁾により算出された組成的過冷度に関する式に基づいて最大過冷度を求め、核生成温度との関係を調べてみると、樹状晶と等軸晶の生成条件として、凝固先端近傍の溶湯中における温度勾配 G と凝固速度 R との比 G/R の値に臨界値 $(G/R)_c$ が存在し、 $G/R > (G/R)_c$ のときに樹状晶が生成され $G/R < (G/R)_c$ のときに等軸晶が生成されることが導出される。しかるに上面からの凝固の場合は、凝固先端部に各種成分の濃化した溶鋼が浮揚できずにそのまま蓄積されるので凝固の進行とともに各種成分の濃化は著しくなっていく。また、Fig. 3 からわかるように下方から浮揚した濃化溶鋼もこれに加味される。一方、底面からの凝固の場合は凝固先端部に各種成分の濃化した溶鋼が上方に比較的速い速度で浮揚するので、その先端部における濃化はそれほど大とはならない。

その結果、凝固の初期の段階では、凝固先端部における温度勾配は上面の方が底面より大となり、それぞれ Fig. 4 の (a) および (b) に示すような状態を保持しながら、凝固を継続することが考えられる。しかし凝固がある程度進行し下方から浮揚してくる濃化溶鋼の量が増加すると、上半部の溶鋼中の各種成分は増大し、同時にまた凝固先端部近傍の溶鋼中の濃度勾配も徐々に減少し、あわせて濃化領域も中心部に向い拡がっていく。一方、温度勾配は徐々に減少していく。その結果、上半部では Fig. 4 の (a)' に示すような状態が形成されて、依然樹状晶の生長が継続され、他方、下半部では、Fig. 4 の (b)'

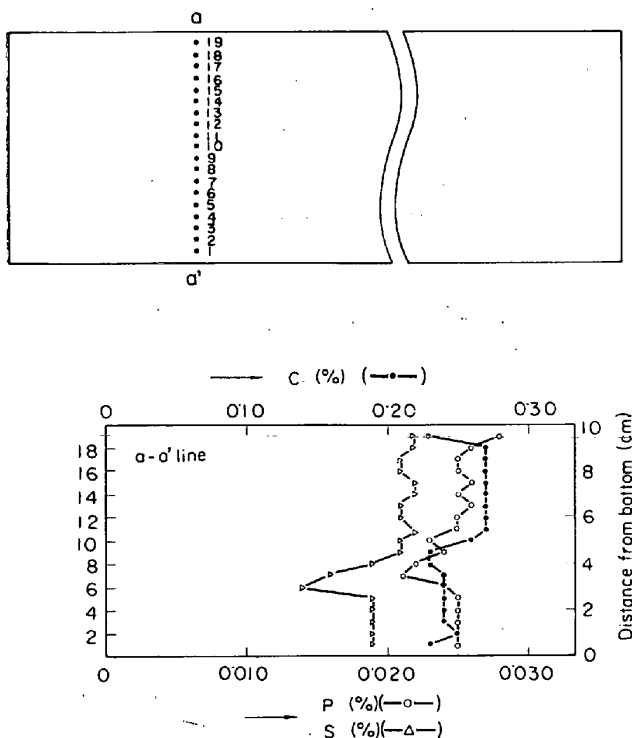


Fig. 3 Distribution of various elements along a-a' line in a longitudinal section from a horizontal ingot.

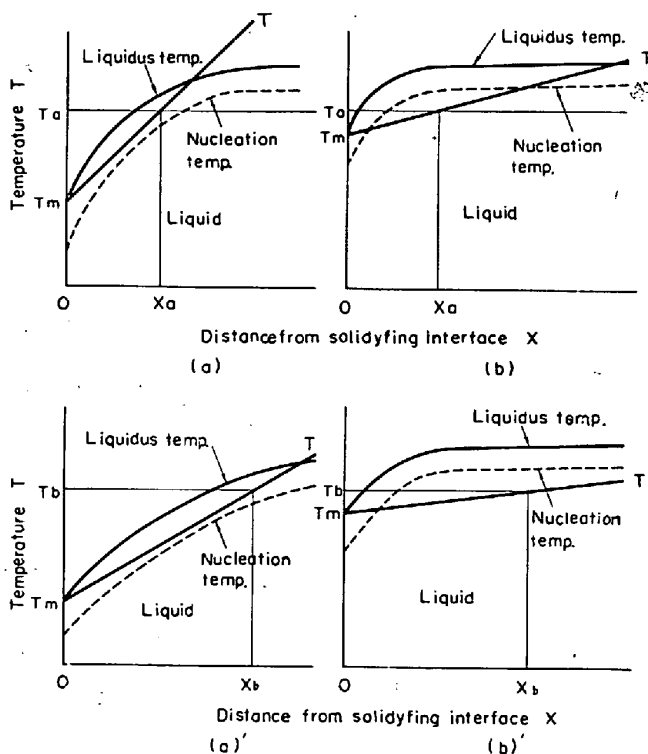


Fig. 4. Interrelation among segregation condition, thermal condition and crystal growth in liquid adjacent to advancing solid-liquid interface.

に示すような状態が形成され、等軸晶の生成ならびに成長が行なわれるものと思われる。通常、鋼塊押湯部によく発達した樹状晶がみられるのは、このFig. 4の(a)'のような状態が形成されることによるものと考えられる。

このようにして両面からの凝固は樹状晶部、等軸晶部をそれぞれ拡大していくが、ある時期に達すると、凝固速度の影響を受け温度勾配の減少が濃度勾配の減少に打ち勝つために、樹状晶凝固先端部近傍の状態もFig. 4の(b)'のような状態を形成するに至る。その結果樹状晶の成長は阻止されて等軸晶の生成が行なわれ、これと下半部の等軸晶部と結合し、鋼塊全体の凝固が終了するものと推定される。

この他、下半部において樹状晶の成長が阻止される理由としては、前述した底面からの凝固先端部近傍に生成される結晶小粒子の重力沈下ならびにこの凝固先端部から浮揚する濃化溶鋼の流体力学的挙動などが考えられるが、詳細は今後の研究に待たざるをえない。

つぎに傾斜鋼塊にみられる諸現象について考察してみる。

傾斜鋼塊上半部に樹状晶部が発現しているが、これは水平鋼塊におけると同様の理由によると考えられ成長の方向が鉛直方向になっているのは傾斜上面に垂直方向に成長した樹状晶が重力の作用により鉛直方向に転換したものである。また、樹状晶の方向が乱れ、分断されかつ中心部まで達していない理由としては、下方から浮揚してきた濃化溶鋼が樹状晶の凝固先端部に沿い上方に移動する際の流体力学的作用が考えられる。このような作用は樹状晶部の内側に発現している上向きの偏析部

の形成機構を考えた際におのずから予想されうる。すなわち下方から浮揚してきた濃化溶鋼は、樹状晶部が形成される過程で凝固先端部に沿って上昇する。その結果樹状晶の方向性は徐々に失われていく。しかし溶鋼の温度が次第に低下し、溶鋼中に等軸晶の生成が開始される時期に達すると、凝固先端部に沿って上昇していた濃化溶鋼は周囲に較べ凝固温度が低いためいわゆる“bridging現象”を引き起こし、樹状晶部と等軸晶部との間に捕捉される。したがって凝固後の偏析部は上述のごとく上向きの短い偏析線の集合した状態を呈している。またこのように考えると、結晶の生成ならびに成長は比重差により生じる自然対流程度の流体の運動によっても影響されることが推定される。

一方もしbridging現象が起きていると考えると、偏析部の内側の部分の等軸晶は結晶の沈澱により生成されたと考えるよりも、むしろ前述の等軸晶の生成条件が満たされて生成されたと考える方が妥当であろう。

4. 結 言

垂直、水平、傾斜の3コの85 kg砂型鋼塊を同時に鑄込み、それらの凝固後の内部性状と化学成分のチェック分析結果に基づいて、結晶の沈澱現象の有無について検討を行なった。

その結果、沈澱現象はたとえ生ずるとしても、従来考えられていたように凝固の機構を左右するほど支配的なものでないことがわかった。また著者らは従来沈澱晶説で説明されてきた諸現象を独自の考え方で説明した。しかしそれはあくまでも定性的な域を脱していない。したがって確固たる結論を下すには今後の定量的な研究が必要である。

文 献

- 1) 中川, 百瀬: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 428
- 2) 中川, 百瀬: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 431
- 3) 中川, 百瀬: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 434
- 4) First Report of the Melting and Metallurgical Committee B.I.S.R.A: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 162 (1949), p. 437
- 5) D. R. F. WEST: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 164 (1950), p. 182
- 6) B. GRAY: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 182 (1956), p. 366
- 7) W. A. TILLER, K. A. JACKSON, J. W. RUTTER and B. CHALMERS: Acta Met., 1 (1953), p. 428