

するという条件があるので、模型実験の結果をそのままひきうつすわけにはいかないがレイノルズ数が同じとみて36 min と同じオーダーの10~20 min 程度と考えてもよいのではなからうか。

2) 自然対流: 一般に流体内に温度差があると密度差を生じ、浮力のため対流を生ずる。鋼塊内の残存溶鋼にも温度差があるならば当然対流が生ずる。残存溶鋼内の温度分布は凝固面近くが中心部に比べて温度が低いと考えられる。中心部温度を t_0 、凝固面近くの温度を t (凝固面からの距離の函数)、凝固面から中心に向う方向を y 、鉛直下方を x 、温度境界層の長さを δ_t 、 x, y に直角の方向には温度変化はないものとして、 y 方向が δ_t 、 x および z 方向が dx, dz の流体部分が沉降するときの力 f は

$$f = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot dx dz \int_0^{\delta_t} (t_0 - t) dy - \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)_{y=0} dx dz$$

..... (3)

g : 重力加速度 ρ : 流体密度
 β : 体膨張率 μ : 粘性係数
 v : 沈降速度

で表わされる。(3) 式の $(dv/dy)_{y=0}$ は Fig. 3 から求められる。また温度分布が $t_0 - t = \Delta t [(1-y)/\delta_t]^2$ で表わされるならば $\int_0^{\delta_t} (t_0 - t) dy = \Delta t \cdot \delta_t / 3$ であるからこれも Fig. 3 から求められる。かくして f は Fig. 3 の①②③の場合におのおの 0.04, 0.11, 0.12 dyne となった。

溶鋼の場合これらの値が明確でないので自然対流の評価はむずかしいが、かりに $\rho = 7.3 \text{ g/cm}^3$, $\beta = 2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, $\mu (dv/dy)_{y=0} \approx 0.4f$ (模型実験からの推定), 凝固面は平滑と仮定すると $f = 0.33 \Delta t \delta_t [\text{dyne}]$ となる。つまり凝固面と接する溶鋼と内部の溶鋼との温度差が 0.3°C あり温度境界層の長さが 1 cm あれば溶鋼の 1 cm^3 に 0.1 dyne の力が働き対流を生ずる。この値は多くの仮定を含んだ定性的なものであり、COLE らが行なったスズの凝固時における温度測定などから求めた結果²⁾ よりも 1/100 程度小さいのでかなり過少評価したものと考える。

3) 収縮による引け: 収縮による引け込みと V 偏析とになんらかの関係があるだろうということは以前からいわれている。われわれの実験では鋼塊が小さいので V 偏析である否か、明確でないが、それに似たものが引けによつて生ずることが確かめられた。また上部の溶鋼が鋼塊の中心部近くまで落ちこむことが認められた。大型鋼塊でも同様の現象が起り得ると考えられ、上部に濃縮した偏析成分が凝固終了近くになつて再び鋼塊中心部に入り込むことが考えられる。

6. 結 言

キルド鋼凝固時の鋼塊内の残存溶鋼の動きについて、模型実験をもとにして若干の考察を試みた。その結果鋼塊内には、① 鑄込時の流動の継続した動き、② 自然対流、③ 収縮による引けの動きが存在することを確認された。

これらの動きにより溶質は鋼塊内を移動し、凝固速度と分配係数の関係にも影響をおよぼして偏析の機構を複

雑にしていると考えられる。

なお自然対流のうちには solute convection というべき沈澱晶の現象や溶質濃化部の浮上の現象があるが、それらについても偏析では考慮すべきである。

文 献

- 1) 例えば篠崎, 泉: 熱および物質移動, 朝倉書店 (1964).
- 2) G. S. COLE and K. A. JACKSON: J. Inst. Metals, 93 (1964~65), p. 153

(80) 3 t 砂型鋼塊の凝固状況と内部性状との関係について

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

日本製鋼所, 室蘭製作所研究所

理博 中川 義隆・〇百瀬 昭次

Relations between Solidifying Condition and Internal Quality of 3-ton Sand Steel Ingots. (Studies on relations between mechanism of inverse segregation and formation of oxide inclusions in large steel ingots—I)

Dr. Yoshitaka NAKAGAWA and Akitsugu MOMOSE.

1. 緒 言

大型鋼塊内部に発生する氧化物系の大型介在物ならびにそれに起因した「砂疵」の問題は健全鋼塊製造上の最も本質的な問題の一つとして古くから関心がもたれ、これまでも数多くの研究が行なわれてきた。しかしいまだに不明な点が多く決定的な対策を構わず段階に至っていない。その大きな原因の一つとして、これまでの研究が主として melt における脱酸反応や耐火物との反応を中心としたものに限られ、造塊過程を中心に凝固機構と関連づけた研究が不十分であつたことが挙げられる。

一般に大型鋼塊内部に発生する氧化物系の大型介在物や砂疵の多くは、鋼塊下半部にみられる負偏析部(通称沈澱晶部)に集中する傾向が認められている。したがつてこの部分における発生を阻止することは、この種の問題の解明に通ずるといつても過言でないと思われる。またそのためには負偏析部の凝固機構を徹底的に究明し、それらの発生とを関連づけていくことが必要と考える。

著者らはこの点に着目し、大型鋼塊の代りに 3 t 砂型鋼塊を用い一連の実験を行ない、同時にこれに関連した基礎実験をも併せて行なつた。その中、本報告では最も基本となる 3 t 砂型鋼塊の凝固状況と内部性状との関係を調査した結果について述べる。

2. 実験方法

6 t エル一式塩基性電気炉で溶製した中炭素鋼(化学成分: C 0.23, Si 0.38, Mn 0.70, P 0.019, S 0.016)を Fig. 1 に示した形状の砂型(表面温度: 120°C)に 1535°C (測温は immersion pyrometer による)で下注法により鑄込み、保温剤および藁で押湯を保温した。その際脱酸剤として 0.03% Al を取鍋にて添加した。ついで簡単な装置を用い横方向および縦方向(軸心部)の凝

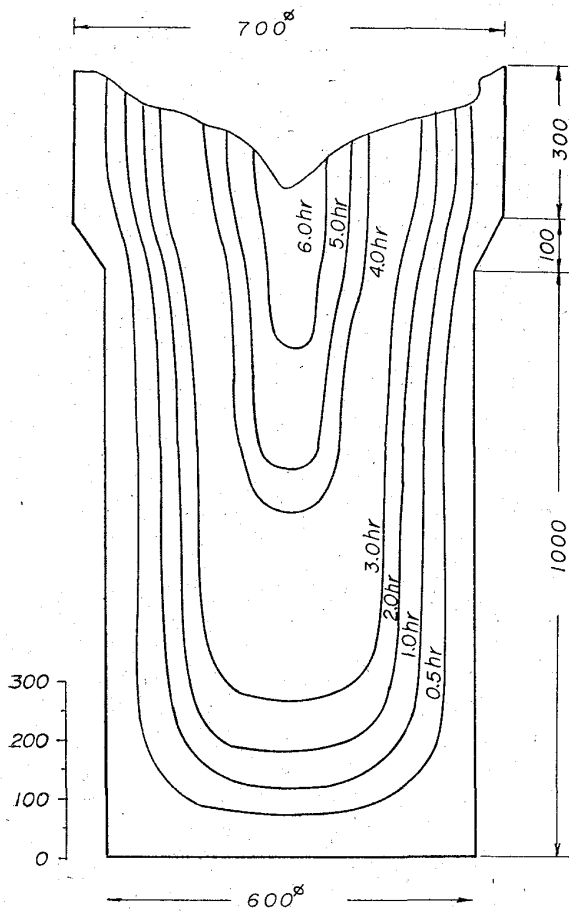


Fig. 1. Equi-solidifying line of 3t sand steel ingot.

固状況測定したり。

凝固終了後鋼塊を縦断し、縦断面のサルファープリント、マクロ組織ならびに縦断面の各位置からコア抜取りによりサンプリングを行ない、化学分析、サンド分析、光学顕微鏡およびX線による介在物検査を行なった。

3. 実験結果

3.1 凝固状況

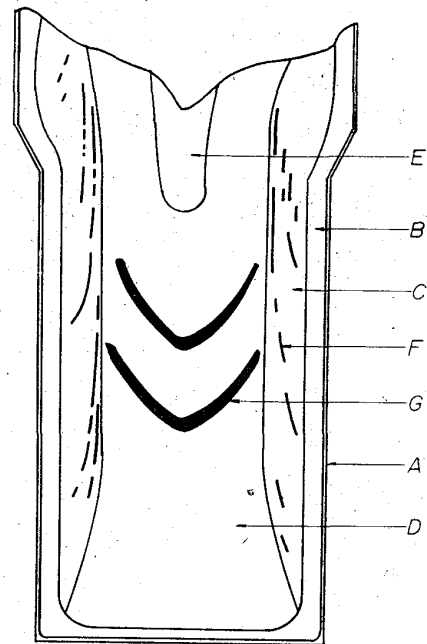
実験結果から求めた等凝固線を Fig. 1 に示す。これからわかるように凝固は単調に進行せず段階的に行なわれたことが推定される。すなわち凝固の進行は casting 後 0.5 hr までは比較的速いが 0.5~3.0 hr の間では逆に緩慢になっている。しかし 3.0~4.0 hr では再び急激に速くなり、以後 4.0~5.0 hr で緩慢になり 5.0 hr から凝固終了までは再び速かに進行している。また縦方向、横方向の凝固を比較すると、全体的な傾向は似ており、凝固速度は縦方向が横方向の約 2 倍になっている。

3.2 内部組織

鋼塊縦断面の凝固組織の概要を Fig. 2 に示す。組織はチル晶領域、柱状晶領域、等軸晶領域、押湯部最大偏析領域に大別される。

A 偏析は数条認められ、いずれも string 状を呈している。発生位置は鋼塊表面から 30 mm (下部)~50 mm (中間部および上部) の柱状晶末端近傍に端を発生し、上部に行くにしたがい内部に入り、ほぼ 130 mm 以内のいわゆる分岐樹状晶領域に収まっている。

一方 V 偏析は A 偏析ほど明りようではなく、しかもあ



- A. Chilled zone
- B. Columnar zone
- C. Branched dendritic zone
- D. Equi-axial zone
- E. Max. segregated zone
- F. Δ Segregate
- G. V Segregate

Fig. 2. Schema of macro-structure of longitudinal section from 3t sand steel ingot.

る巾をもち帯状を呈している。発生位置はいずれも等軸晶領域で、底部から約 400 mm の位置に始まり、約 150 mm の間隔で 2 カ所に現出している。またそれらと相交互してサルファープリントの淡いゾーンが V 状に現われている。

また負偏析部 (Fig. 3 参照) は本体軸心部の底端から約 1/3 の位置を中心に V 偏析下部の等軸晶領域に現出している。

各領域のデンドライトを比較すると、チル晶領域が最も微細でついで等軸晶領域、分岐樹状晶領域の順になっている。一方 A 偏析および V 偏析部では逆にかなり粗になっており A 偏析部で特にその傾向が大である。

本鋼塊では等軸晶領域がかなり広く、したがって V 偏析および負偏析の現出範囲もかなり大である。また側面に較べ底面における柱状晶は短い。

3.3 化学成分の偏析状況

鋼塊縦断面の各種化学成分の分布状況を Fig. 3 に示す。これによれば炭素、硫黄、燐はほぼ同様の傾向を示している。すなわち表層部ではほぼ均一で casting 時の溶鋼に近い値を示しているが、本体下半部では内部に向うにしたがい徐々に減少し、本体軸心部の底端から約 1/3 の位置を中心に負偏析部 (通称沈澱晶部) を形成している。この部分の最も低い値を示す中心部では表層部の約 3/5 の値になっている。一方この負偏析部から上部では逆に内部の方が表層部よりも高く、しかもその傾向は上方に向うにしたがい著しくなっており押湯部ならびに軸心部最大偏析部では表層部の 1.5~3 倍とかなり高くなっている。また A および V 偏析部でも同様に高値を示

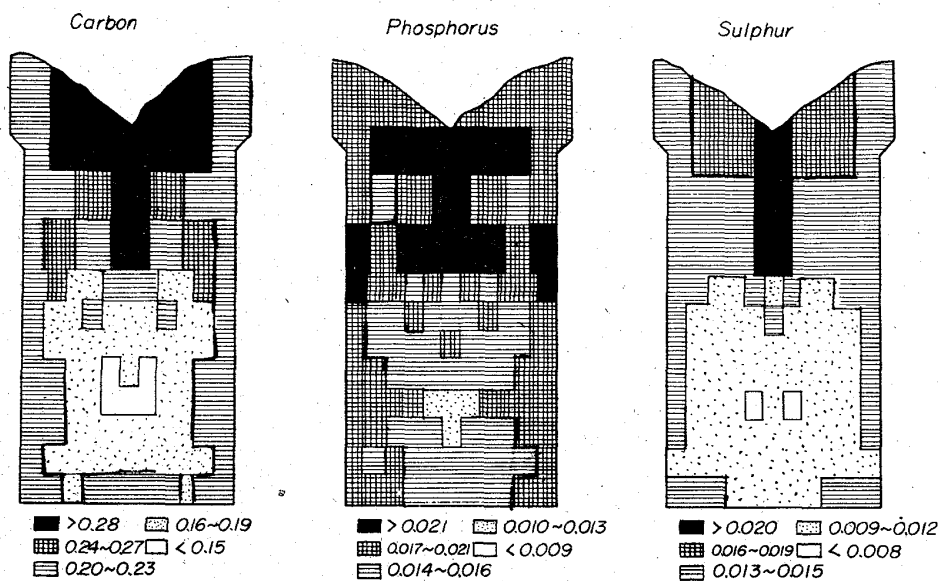


Fig. 3. Distribution of various elements in the 3t sand steel ingot.

し、A、V および最大の各偏析部を比較すると V、A、最大の順に高くなっている。

3.4 酸化物系介在物の分布状況とその形態

酸化物系介在物は最大偏析部を除き、大部分がアルミナ系介在物であった。Fig. 4 に Al_2O_3 の分布状況を示す。これによれば Al_2O_3 は表層部において均一に分布しているが、底部では側面部の2倍近くになっている。しかし鋼塊の下半部では内部に向うにしたがい量を増し、負偏析部の中心近傍で最高値を示し表層部の約3倍になつ

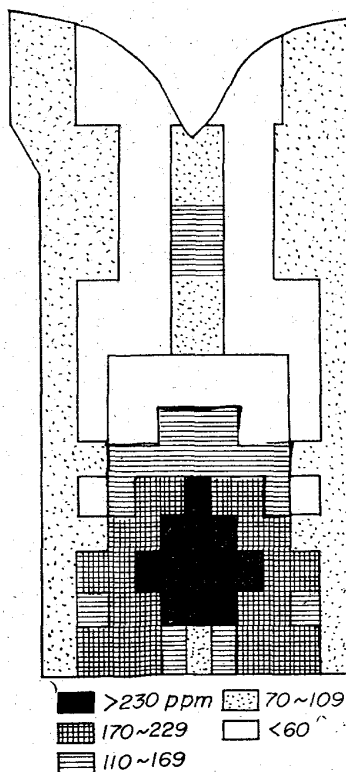


Fig. 4. Distribution of Al_2O_3 in the 3t sand steel ingot.

ている。一方上半部では逆に内部では少なくなっており、表層部の1/2程度になつている領域が広い。しかし軸心部では表層部と同等もしくは幾分多くなっている。これに対し SiO_2 は最大偏析部を除き一般に低く、検鏡結果でもほとんど認められなかったが、最大偏析部では 200~300 ppm とかなり高い値を示した。

X線解析の結果 Al_2O_3 の大部分は $\alpha-Al_2O_3$ であつたが、一部に形態不明のものが認められた。また Al_2O_3 の大きさならびに形態はともに場所的に著しい差異は認められなかった。

4. 考 察

4.1 負偏析部における凝固の遅滞

Fig. 2 に示したように負偏析部の凝固組織は比較的微細な等軸晶からなっている。一方等軸晶部での凝固は RUTTER, CHALMERS²⁾ により提示されたいわゆる組成的過冷下で“pasty zone”を形成しながら dendritic に行なわれ³⁾⁴⁾、結晶(デンドライト)の成長速度は凝固潜熱の逃散速度により決定されると考えられている。しかるに負偏析部における潜熱の逃散速度に着目すると、この部分は軸心部を中心に生成されていることから逃散速度は当然柱状晶部に較べ小になる。したがつて負偏析部での凝固は一般に遅滞する。このことは等軸晶の粒度が微細であること、ならびにFig. 1 に示されるようにこの部分での凝固が比較的広範囲に行なわれることから推定できる。

4.2 負偏析部の生成機構

負偏析部の生成機構としては従来英国鉄鋼協会の Heterogeneity committee⁵⁾ の報告によるいわゆる沈澱晶説が支持されてきたが、この部分の成分濃度が表層部および上部に較べ低いことは、分配係数の概念からも当然予想される。すなわち表層部では凝固速度が比較的速いため、成分濃度は casting 時の溶鋼の濃度に近い値を示す。しかし負偏析部では上述のごとく凝固速度が比較的遅く、また Fig. 2 との比較からもわかるように、側面からの横方向の凝固により string 状の A 偏析が生成されている間に、底面からの縦方向の凝固では、これに相当した偏析が認められないことから、濃化浮揚も十分行なわれていることが予想され、この部分では濃化現象にともなう bulk の濃度もそれほど大にならないことが予想される。その結果負偏析部での分配係数も凝固後の濃度を表層部の濃度以下にするような小さな値をとることが考えられる。

4.3 負偏析部の生成機構と酸化物系介在物の発生との関係

本結果からも示されるように負偏析部に発生する酸化物系介在物の大部分は脱酸生成物である。脱酸生成物が負偏析部に多量に発生し、しかも表層部をはじめ周囲に

較べて多量であるための条件は、負偏析部において脱酸生成物の生成が行なわれ、その残存する全量（一次脱酸生成物の残存量も含めて）が铸込時の溶鋼中ならびに周囲の量に較べ多くなければならないことである。

しかるに負偏析部が生成される時期には酸素および脱酸素の濃化がある程度行なわれており、さらにデンドライトが析出し生長する際には一段とそれが促進され、その上凝固が遅滞するので多量の脱酸生成物の生成が予想される。またこの部分での凝固は *pasty state* を保持しながら行なわれるので、温度は低く、しかもこのような状態が広範囲に存在するので、この部分で生成された脱酸生成物や、すでにこの部分に存在していた脱酸生成物の浮揚は著しく遅延される。その上浮揚の際には生長しつつあるデンドライトの枝間に捕捉され以後の浮揚が阻止されることも十分予想されうる。これらの諸点から負偏析部では上記の条件が満たされていると考える。

以上 2, 3 の考察を行なつたが、これらを一段と立証するためには、今後つぎの諸点についての確認が必要と考える。

- 1) 沈澱晶説の是非
- 2) 濃化溶鋼の浮揚速度ならびに浮揚時の挙動
- 3) 負偏析での凝固の遅滞

5. 結 言

大型鋼塊の内部に生成される負偏析部の生成機構ならびにこれに関連して、この部分に多量に発生する酸化物系介在物の成因を追究するための第 1 段階として、3 t 砂型鋼塊について凝固状況と内部性状との関係を調べた。その結果従来の沈澱晶説とは別の考え方でもこれを説明しようという可能性を見出すことができた。

文 献

- 1) 前川, 中川, 百瀬: 鑄物, 37 (1965), p. 341
- 2) J. W. RUTTER, B. CHALMERS: *Canad. J. Phys.*, 31 (1953), p. 15
- 3) F. WEINBERG, B. CHALMERS: *Canad. J. Phys.*, 30 (1952), p. 488
- 4) W. C. WINEGARD, B. CHALMERS: *Trans. Amer. Soc. Metals*, 46 (1954), p. 1214
- 5) Report on Hetero of Steel Ingot, 7th Report, J. Iron & Steel Inst. (London) (1937), p. 12

(81) 3 t 砂型鋼塊の凝固過程における成分元素の濃化状況について

(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—II)

日本製鋼所, 室蘭製作所研究所

理博 中川 義隆・〇百瀬 昭次

On Condition of Solute Concentration in 3-ton Sand Steel Ingot during Solidification Process.

(Studies on relations between mechanism of formation of inverse segregation and formation of oxide inclusions in large steel ingots—II)

Dr. Yoshitaka NAKAGAWA and Akitsugu MOMOSE.

1. 緒 言

第 1 報では凝固状況と内部性状との関係について述べたが、これを参考にして引続き本報では前報と同一形状の鋼塊について凝固過程中試料採取を行ない、凝固過程における溶質の挙動について調べた結果を報告する。

2. 実験方法

6 t エル式塩基性電気炉で溶製した中炭素鋼(取鍋化学成分: C 0.24, Si 0.31, Mn 0.61, P 0.012, S 0.010)を Fig. 1 に示した形状の砂型 2 コに 1540°C (測温は immersion pyrometer による) で下注法により同時に铸込み、保温剤および薬で押湯を保温した。ついで Fig. 2 に示す試料採取器により铸込後 1 hr, 2 hr, 3 hr, 4 hr, 4.5 hr の各時期に Fig. 1 に示す鋼塊軸心部の各々の位置の溶鋼から同時に試料採取を行ない、採取した試料を水中で急冷した。その際 No. 1 の鋼塊は無処理のまま自然凝固させ、No. 2 の鋼塊には铸込後 1 hr 20 min から約 20 min 間アルゴンガスを吹込み攪拌処理を行なつた。

試料採取に際しては挿入時にスラブが採取器に付着し

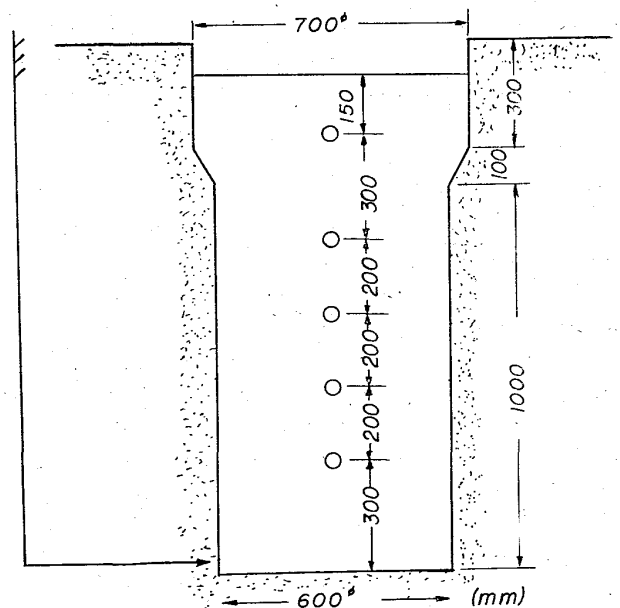


Fig. 1. Shape of experimental ingot and sampled locations.