

Fig. 3. Transverse segregation of C and S on ingot sections.

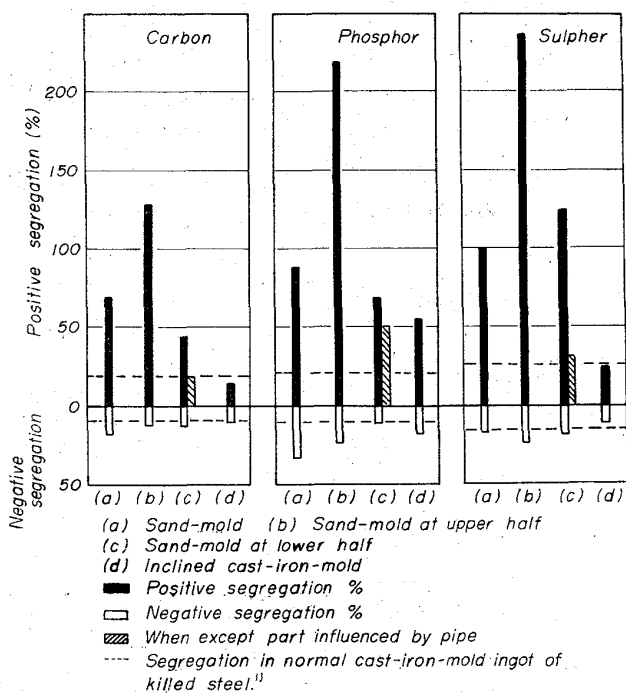


Fig. 4. Maximum segregation in tested ingots.

析があるほかに、砂型鋼塊にその例が見られるごとく鋼塊中心軸上において鋼塊中央より上部で正偏析が、底部で負偏析が存在するが鋼塊肌下は偏析が少ない。これらの偏析程度は凝固条件によつて異なる。

頭部中心の正偏析は上半分砂型鋼塊の頭部に特に著しい。また下半分砂型鋼塊のパイプの周辺にも正偏析がある。負偏析は砂型鋼塊および上半分砂型鋼塊の下部中心に大きく認められるほか、下半分砂型鋼塊の最下部にも認められる。これらの部分はいずれもV偏析の顕著でないところであり、マクロ組織は細かく沈澱晶と関係が深い。

傾斜鋼塊は鋼塊左右半分の組織が一方は柱状デンドライト、他方は粒状の沈澱晶であつたが、C, S等の偏析についても柱状デンドライト側で若干正偏析、沈澱晶側で若干負偏析が見られたが大きな差がなかつた点は注目される。傾斜鋼塊の正負偏析はともに著しく少ないが、これは金型鋼塊であると同時に鋼塊の傾斜によつて凝固機構が変わつたためと考えられる。

4) その他の成分偏析はVおよびA偏析に付随しても認められる。すなわちマクロ組織でVまたはA偏析線に沿つて白く見えるところは、負偏析を、また黒く見えるところは概ね強い正偏析を示した。

5) 押湯について

金型鋼塊では発熱性押湯スリーブと発熱性保温剤を使用して頭部形状は良好であるが、砂型鋼塊では大きなパイプが本体に深く入つた。砂型鋼塊のごとく凝固時間が長い鋼塊では、押湯保温を長く持続させる必要があることがわかる。またその場合押湯の形状も問題になる。

上半分砂型鋼塊は砂型部分が下半分の金型部分に対する極端に大きな押湯とも考えられるが、その性状は成分偏析が助長され、金型部の中心負偏析が大きく砂型部頭部の正偏析が非常に大きくなつていた。このことからみて押湯量が多過ぎた場合マクロ偏析に対しあまり良くないようである。

### 5. 結 言

以上の実験結果から鋼塊内の成分偏析は凝固時の冷却条件に強く影響されるということができよう。

成品あるいは半成品について指摘される成分偏析については、上記のごとく注入条件以外にも考慮の余地のあることがわかつたが、鋼塊の品質の向上のためには、今後さらに凝固と偏析の関係についての研究の必要性が認められる。

なお、本調査にたいし御援助いただいた広瀬豊、鈴木康夫両氏に深謝いたします。

### 文 献

- 1) James W. HALLEY: Basic Open Hearth Steel-making (1964), p. 445 (A. I. M. E.)

## (79) キルド鋼凝固に関する 2, 3 の実験

日本鋼管、技術研究所

工博 飯島 弘・○稲本 金也

Some Experiments on the Solidification of Killed Steels.

Dr. Hiroshi IJIMA and Kinya INAMOTO.

### 1. 緒 言

キルド鋼塊の凝固時における偏析は、凝固過程中的に残存溶鋼に溶質が濃化または稀釈するために生ずるものであつて、その機構は実効分配係数と凝固速度の関係によつて説明されている。しかしそれだけで全部が説明され

るものではなく、そのためにいろいろの手法によつて偏析の機構を明らかにしようとする試みがなされている。

筆者らの実験においても凝固中の鋼塊内に湯の動きがあるとした方が都合よく説明されるような現象がみられたので、鋼塊内の湯動きについて、2, 3 の模型の実験を試みた。その結果について報告する。

2. 予 備 実 験

0.17% C のキルド鋼を 170 mm × 300 mm × 600 mm (高) の周囲を耐火材でかこんだ 鑄型内に注ぎ、凝固が約 1/4 程度進んだところで、カプセルに入れた放射性硫黄 (<sup>35</sup>S) を凝固面近傍に添加した。鋼塊は約 45 min で凝固終了する。凝固後鋼塊を高さ 280 mm の位置で切断し、断面のオートラジオグラフをとつた。その結果を Photo. 1 に示す。<sup>35</sup>S は鋼塊中心より四方に対称的に分布しており、<sup>35</sup>S の挿入側の濃度が高いということはない。この結果は添加後比較的短い時間内に <sup>35</sup>S が溶鋼中で混合されると考えた方がうまく説明できる。そのためには溶鋼中に何らかの動きを想定する必要がある。鋼塊内に想定できる動きを、① 鑄込時の流動の継続されたもの、② 自然対流、③ 収縮による引け、の 3 種類と考え、これらについて次のような実験を行なつた。

3. 実 験 方 法

鑄込時の流動、および自然対流についてはグリセリン水溶液にアルミニウムの微粉を懸濁させたものを用いた。

1) 鑄込時の流動はグリセリン水溶液を、径 1.2~12 cm 高さ 2.4~24 cm のガラス容器に注ぎ、注入終了後の容器内の Al 微粉の動きを観察した。このとき容器の側面、高さの中央位置から光を入射させ、微粉の動きを容器の上部から観察し、注入終了から動きのとまるまでの時間を測る (この時間を以後流動の継続時間 T と記す)。注入は一定の高さにおいたロートを通しておこない、ロート内の水面はつねに一定になるようにする。ロートの先端から容器までが 20 cm 以上になると T にあたえる高さの影響は小さくなる。実験は 20 cm のところで行なつた。下注ぎの場合は容器の大きさは一定として、注入口における流速を変えて実験した。

2) 自然対流の実験は次のように行なつた。グリセリン水溶液を入れた 100 × 50 × 150 (高) mm の容器を 30°C の恒温水槽内に長時間いれておき、Al 粉の動きが認められなくなるまで待つ。その後恒温槽内に少量の冷

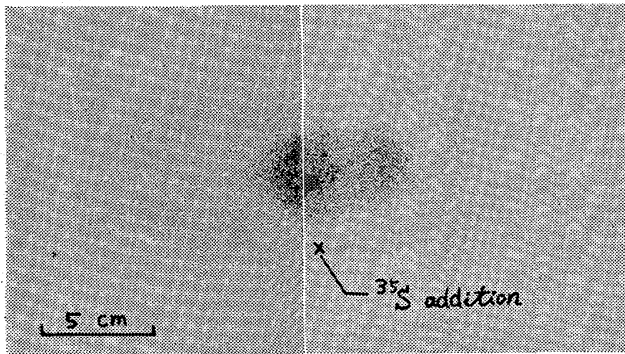


Photo. 1. An example of <sup>35</sup>S distribution at the cross section of small size killed steel ingots.

水を加え、ヒーターを止める。するとグリセリン水溶液と恒温槽の間に 0.3~0.8°C の温度差が生じ自然対流によつて Al 粉が動き出す。この様子を 2~10 sec の露出で写真にとると、動きはフィルム上に黒い線となつて記録される。容器は冷却面を除いて二重ガラスにしてあり、観察は約 20 mm × 1 mm の光を入射して行なつた。

3) 収縮による引けは約 300 kg の鋼塊の凝固終了少し前に <sup>35</sup>S を鋼塊中心部に添加してオートラジオグラフをとることによりその動きを推察した。

4. 実 験 結 果

1) 鑄込時の流動: 鑄込時の流動の継続時間 (T) は液の注入速度、粘度、容器の形状などに関係する。注入速度はロートの高さによつて定まるが、前述のようにある程度以上になると飽和するような傾向を示す。T と液の動粘性係数 (ν) の関係を Fig. 1 に示す。図中の 5 本の直線の勾配の平均は -1.0 である。同様に [流体と容器の接触面積 (S)] ÷ [流体容積 (V)] の関係を求めたところ、勾配 -1.21 が得られた。したがつて流動の継続時間 T は

$$T \approx k \frac{1}{\nu} \left( \frac{V}{S} \right)^{1.21} \dots \dots \dots (1)$$

で近似できる。T を [sec], ν を [centi-stokes], V/S を [cm] にとり k を求めたところ、k=129 なる値を得た。

下注ぎの場合にも T が 1/ν · (V/S)<sup>1.21</sup> に比例するとして、さらに注入ノズルにおける流速 [v] との関係を求めた。その結果を Fig. 2 に示す。この場合 T は

$$T \approx 40.4 \frac{1}{\nu} \left( \frac{V}{S} \right)^{1.21} \log v \dots \dots \dots (2)$$

で近似できる。ノズル径を 1.3φ と 3φ のものを用いたがその差はわずかでほとんど認められなかつた。

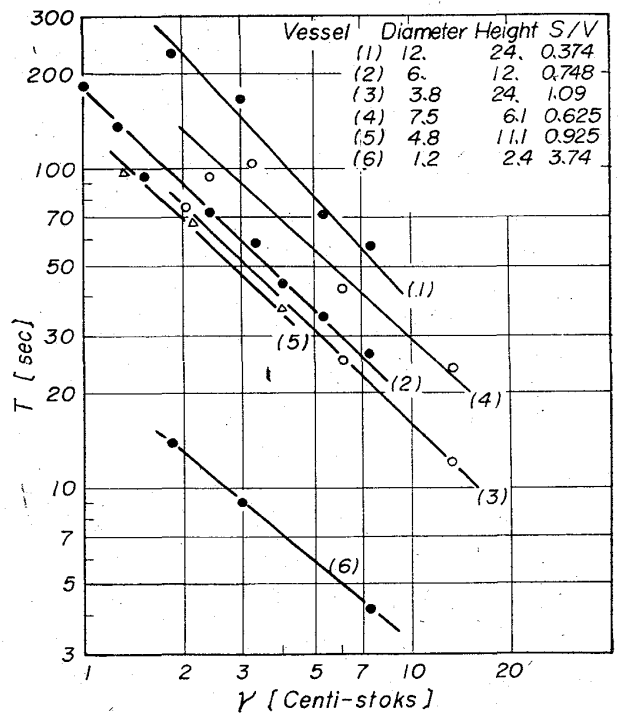


Fig. 1. Relationship between the kinematic viscosity (ν) and the flowing time T.

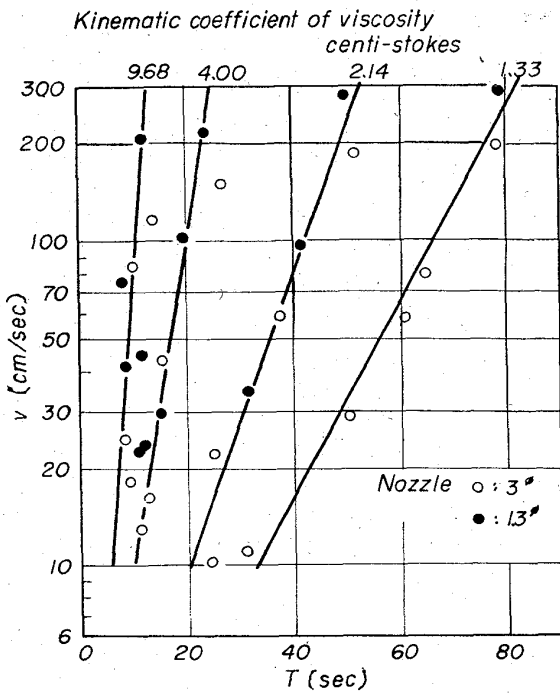


Fig. 2. Relationship between the velocity of pouring  $v$  and the time  $T$ . (bottom pour)

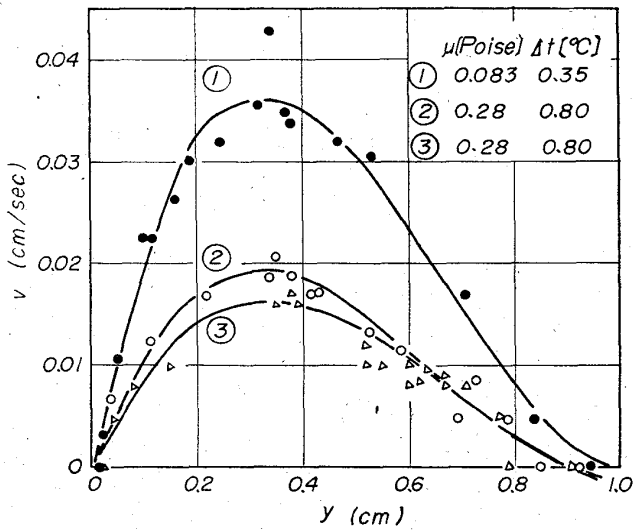


Fig. 3. Velocity distribution of natural convection.

2) 自然対流: フィルム上に記録された Al 粉の移動距離と露出時間から対流の速度分布を求めた (Fig. 3). 図の横軸は冷却面からの距離, 縦軸は沈降の速度である. 速度分布が  $v = ay + by^2 + cy^3$  と仮定して実験値から  $a, b, c$  を求めたところ図の①, ②, ③についておのおの

$a = +0.242, +0.136, +0.107$   
 $b = -0.479, -0.218, -0.208$   
 $c = +0.237, +0.147, +0.100$

が得られた. ただし  $v, y$  の単位は cm/sec, cm である.

3) 収縮による引け: 0.43% C のキルド鋼を 180 mm × 310 mm × 600 mm (高) の鑄型に注ぎ, 凝固終了の

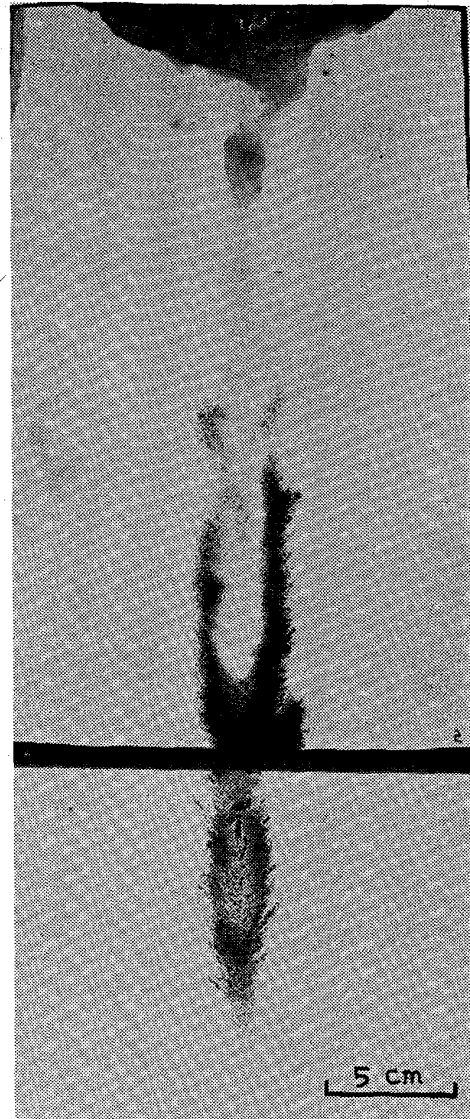


Photo. 2. Autoradiogram of  $V$  segregation.

数分前に  $^{35}\text{S}$  を鋼塊の中央に挿入した. 凝固後鋼塊を縦割りにして, 断面のオートラジオグラフをとった (Photo. 2). 上部から落ち込んできた  $^{35}\text{S}$  を含まない溶鋼が  $^{35}\text{S}$  を含む部分に割り込んだような跡がみられる. またこのとき  $V$  偏析を生ずるかと思われる模様を示された.

### 5. 考 察

1) 流動継続時間について: 模型実験の結果では上注ぎ, 下注ぎで二通りの実験式が得られたが, 本来両者に差はあまりないものと考えられる. 上注ぎの場合注入速度の項がないのは, 実験条件が,  $\log v$  として  $2.30 \sim 2.48$  の範囲なので  $v$  の効果として観測できなかったためと思われる. また下注ぎの場合にノズル径に無関係なものも, 同様実験誤差内にかくれたためであろう.

本報における結果を拡大して, 650 mm × 650 mm × 2,000 mm (高) の容器に  $\nu = 1 \text{ cst}$  のグリソ水溶液を 45 φ のノズルにおける流速が 110 cm/sec で下注ぎしたとすれば, その流動継続時間は約 36 min となる. つぎに同じ大きさの鑄型に, 同じ速度で溶鋼 ( $\nu = 1 \text{ cst}$  とし) て) を注入した場合はどうであろうか. もちろんこの場合は凝固が生じ, 粘度が変化し, 固液界面の摩擦も変化

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  $\delta_t$ 、 $x, y$  に直角の方向には温度変化はないものとして、 $y$  方向が  $\delta_t$ 、 $x$  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       $\rho$ : 流体密度  
 $\beta$ : 体膨張率         $\mu$ : 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 ① ② ③ の場合におのおの 0.04, 0.11, 0.12 dyne となつた。

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  $0.3 ^\circ\text{C}$  あり温度境界層の長さが 1 cm あれば溶鋼の  $1 \text{ cm}^3$  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 らが行なつたスズの凝固時における温度測定などから求めた結果<sup>2)</sup> 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酸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酸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つていない。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酸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:  $120^\circ\text{C}$ ) に  $1535^\circ\text{C}$  (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