

(83) 濃化溶鋼の浮揚に関するモデル実験

日本製鋼所, 室蘭製作所研究所
理博 中川義隆・〇百瀬昭次・谷口晃造

Model Experiment on Froating of Concentrated Molten Steel.

Dr. Yoshitaka NAKAGAWA, Akitsugu MOMOSE and Kōzō TANIGUCHI.

1. 結 言

鋼塊内部に発生する偏析の問題は、いわゆる濃度偏析の他に介在物の生成に著しい関連を有するため、古くから関心もたれ、また学問的にもかなり興味ある現象として多くの研究が行なわれてきた。しかし今日にいたるもいまだにその生成機構すら十分解明されていない現状にある。その大きな原因の1つとして凝固過程中的の溶質成分の移動に関する動力学的な研究が不足していることがあげられる。すなわち鋼塊の凝固過程に生ずるいわゆる濃化現象により、凝固先端部には溶鋼の濃化層が形成されるが、この部分の挙動のいかんは凝固機構と関連して鋼塊内部の偏析の生成に大きな影響を及ぼすと考えられている。しかしながらそれがどのように影響するかについてはいまだ定量的な裏付けがなされていない。たとえば、濃化溶鋼は bulk よりも比重が小となり、浮力を受けて浮揚することが予想されるが、その比重差はどの程度のもので、またどの程度の速度で浮揚するか、あるいは単に浮力のみによる浮揚の他に対流などによる影響はないかどうか、などについては定量的な確証に乏しい。したがって偏析の生成機構を論議する際にも定性的な根拠に基づくことになり、多分に任意性を免れない。

本研究は定量的見地から濃化溶鋼の浮揚の機構を究明し、併せて偏析の生成機構を検討する目的で行なわれたもので、実際溶鋼についての凝固からこれを追究しようとするものである。

その中、本報告では静止流体中における比重差のみに起因した流体の浮揚速度をモデル実験から求めた結果を報告する。

2. 実験要領

2.1 実験上の基礎理論

現段階では、実際溶鋼を用い bulk 中における濃化溶鋼の浮揚速度を求めることは不可能であるため、常温液体を用いた。いわゆるモデル実験により一般式を確立し、これに実際溶鋼の場合の諸条件を適用して求めることにした。

一般に静止母液体中を、それに可溶性で比重の小な別の液体(濃化液体)が浮揚する際にその浮揚速度 v (cm/sec) に影響をおよぼす主要因子としては次のものが考えられる。

- i) 母液体の密度 ρ_A (g/cm³)
- ii) 濃化液体の密度 ρ_B (g/cm³)
- iii) 母液体の粘性係数 μ_A (g·cm/sec)
- iv) 濃化液体の粘性係数 μ_B (g·cm/sec)
- v) 重力加速度 g (cm/sec²)

この他因子としては母液体および濃化液体の表面張

力、濃化液体の母液体への拡散係数等が考えられるが、これらはいずれも浮力および浮揚速度に較べ、きわめて小であるため無視した。また濃化液体の浮揚開始時における流速が問題になるが、本実験では取あえず一定に行かない、この点の影響については別に取扱うことにした。

上記諸因子と浮揚速度との間の函数関係は、次元解析を用いて次のようにして求められる。

いま

$$v = K \rho_A^\alpha \rho_B^\beta \mu_A^\gamma \mu_B^\delta g^\epsilon \quad (K: \text{定数})$$

とおくと次元関係は

$$[LT^{-1}] = [(ML^{-3})^\alpha (ML^{-3})^\beta (M \cdot LT^{-1})^\gamma (ML^{-3})^\delta (LT^{-2})^\epsilon]$$

となるから次元均一の原理を適用して上式の両辺の指数を等しくおくと、

$$[L] \text{ につき } 1 = -3\alpha - 3\beta + \gamma + \delta + \epsilon$$

$$[T] \text{ につき } -1 = -\gamma - \delta - 2\epsilon$$

$$[M] \text{ につき } 0 = \alpha + \beta + \gamma + \delta$$

よつて

$$\alpha = -\frac{1}{7} - \beta$$

$$\gamma = \frac{1}{7} - \delta$$

$$\epsilon = \frac{3}{7}$$

したがつて

$$v = K (\mu_A g^3 \rho_A^{-1})^{1/7} (\rho_B \rho_A^{-1})^\beta (\mu_B \mu_A^{-1})^\delta$$

$$= K \left(\frac{\mu_A g^3}{\rho_A} \right)^{1/7} f \left(\frac{\rho_B}{\rho_A}, \frac{\mu_B}{\mu_A} \right)$$

$$= \left(\frac{\mu_A g^3}{\rho_A} \right)^{1/7} \sum_m \sum_n K_{mn} \left(\frac{\rho_B}{\rho_A} \right)^m \left(\frac{\mu_B}{\mu_A} \right)^n$$

となる。ただし指数 m, n および係数 K_{mn} は任意の値をとることができる。しかし後述するごとく v の対数值と $(\mu_A/\rho_A)^{1/7}$ の対数值との差に対する $(1 - \rho_B/\rho_A)$, (μ_B/μ_A) の各対数值の関係が直線関係にあることから、 v に対する関係式は、

$$v = K \left(\frac{\mu_A g^3}{\rho_A} \right)^{1/7} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_A} \right)^m \left(\frac{\mu_B}{\mu_A} \right)^n \quad \dots\dots (1)$$

の形になることが予想される。したがつて v に対する精度の高い一般式を得るためには、 (ρ_B/ρ_A) , (μ_B/μ_A) の各値をできるだけ多く選定し、より高い精度で m, n, K の各値を決定すればよい。すなわち (1) 式において両辺の対数をとると、

$$\log v = \log K + \frac{3}{7} \log g + \frac{1}{7} \log (\mu_A/\rho_A) + m \log (1 - \rho_B/\rho_A) + n \log (\mu_B/\mu_A) \dots (2)$$

となる。上式において $\log K, \log g$ は一定であるので、もし $\mu_B/\mu_A = \text{一定}$ とすれば、 $n \log (\mu_B/\mu_A)$ は一定になり次式を得る。

$$\log v - \frac{1}{7} \log (\mu_A/\rho_A) = m \log (1 - \rho_B/\rho_A) + K' \dots\dots (2)$$

ここで $K' = \log K + 3/7 \log g + n \log (\mu_B/\mu_A)$ (一定) したがつて、 $(\mu_B/\mu_A) = \text{一定}$ の条件下で (ρ_B/ρ_A) を種

々変え v を測定すれば, (μ_A/ρ_A) は各測定に対して与えられるので $\{\log v - 1/7 \log(\mu_A/\rho_A)\}$ と $\log(1 - \rho_B/\rho_A)$ の関係が求まり, その勾配から m が求まる.

同様に, $(\rho_B/\rho_A) = \text{一定条件下で } (\mu_B/\mu_A)$ を種々変え v を測定すれば, 次式から

$$\log v - \frac{1}{7} \log(\mu_A/\rho_A) = n \log(\mu_B/\mu_A) + K'' \dots\dots\dots (3)$$

ここで $K'' = \log K + 3/7 \log g + m \log(\rho_B/\rho_A)$ (一定) $\{\log v - 1/7 \log(\mu_A/\rho_A)\}$ と $\log(\mu_B/\mu_A)$ の関係が求まり, その勾配から n が求まる.

m, n が決定すれば (1) 式から係数 K が求まるので, 一般式 (1) が導出される.

2.2 実験装置および方法

実験装置の概要は Fig. 1 のとおりであつて, 内径 10 cm, 高さ 65 cm の円筒形のプラスチック製透明容器①の中に静止母液 A が 40 cm の高さまではいっている. またガラス管③ (出口の径 0.5 mm) の中には濃化液 B がはいっている. A 液としては, 各種重量%のグリセリン水溶液, B 液としては各種重量%のエチルアルコール水溶液をそれぞれ用いた. 実験はまず容器①内に各種所定濃度の A 液を 40 cm の高さまで満した後, 所定温度 (本実験では 25°C とした) の水を②に送り A 液を 1 定温度に到達せしめる. 次にメチレンブルーで着色した各種所定濃度の B 液を③内に入れ, A 液と圧力的に平衡する高さになるよう調整する. ついで A 液が十分静止し, 一定温度になるのを見計らいコック④を開き B 液を放出させる.

最初 B 液は A 液よりも高い圧力下で放出されるので, A 液中を比較的速い速度で浮揚するが, 徐々にその速度を減じ約 5~10 min 後に速度的に定常状態が形成される. この状態は約 30 min 続くが, それ以後になると浮揚速度は急激に遅くなる. 測定はこの定常状態の範囲で行なつた.

B 液の浮揚は, 断続的に浮揚する場合と線状に浮揚する場合の両方が観察されたので, 前者の場合は節の 1 つを追跡することにより, 一方後者の場合は B 液の出口①に繋つているガラス管に軽い衝撃を与え, 線状の一部に

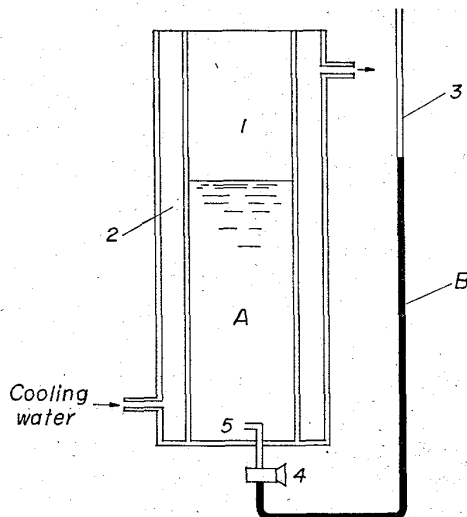


Fig. 1. Experimental apparatus.

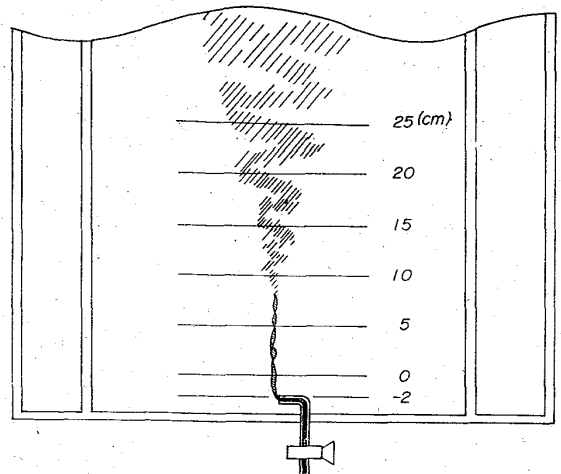


Fig. 2. Measuring range and frothing condition.

節を作りそれを追跡することにより測定した.

測定は肉眼的に行ない, Fig. 2 に示すように B 液が出口①の上方 2 cm の位置から 0~5 cm, 10~15 cm の各範囲を浮揚するに要した時間をストップウォッチで測定した. その際 10 回の測定の平均値を測定値とした. その結果から各範囲における平均浮揚速度が求まる.

また B 液の浮揚状況は Fig. 2 のごとくで, 最初出口の直上を真直浮揚するが (いわゆる層流の状態), ある位置に達すると浮揚に伴う運動の影響により輪状に変形し, 以後輪を上げながら同時に乱れを増しつつ浮揚する.

3. 実験結果および考察

実験結果から 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm の各範囲における $\{\log v - 1/7 \log(\mu_A/\rho_A)\}$ と $\log(1 - \rho_B/\rho_A)$, $\log(\mu_B/\mu_A)$ の各相互関係が求まり, いずれも直線関係を示すことが確認された (図略). 直線の勾配から各範囲における m, n の値が求められ, 共通の値としてつぎの結果を得た.

$$\left. \begin{aligned} m &= 0.67 \\ n &= 0.50 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

つぎに (4) の値を (1) 式に代入して各範囲における係数 K を求めると,

$$K = \left\{ \begin{aligned} &0.191 \text{ (0~5 cm の範囲)} \\ &0.176 \text{ (5~10 cm の範囲)} \\ &0.140 \text{ (10~15 cm の範囲)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となり, (4), (5) から v に関する一般式 (1) は各範囲についてつぎのごとく決定された.

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= 0.191 \left(\frac{\mu_A g^3}{\rho_A} \right)^{0.14} \left(\frac{\mu_B}{\mu_A} \right)^{0.50} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_A} \right)^{0.67} && \text{(0~5 cm の範囲)} \\ v_2 &= 0.921 v_1 && \text{(5~10 cm の範囲)} \\ v_3 &= 0.733 v_1 && \text{(10~15 cm の範囲)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

これらの式から浮揚速度は, ρ_A, μ_B が大なるほど, また ρ_B, μ_A が小なるほど増大することが示される.

つぎに (6) 式を実際溶鋼の場合に適用してみる. 溶鋼の密度および粘性係数に関する一連の測定値は, 鉄-炭素 2 元系の場合のみしか得られておらず, またいずれ

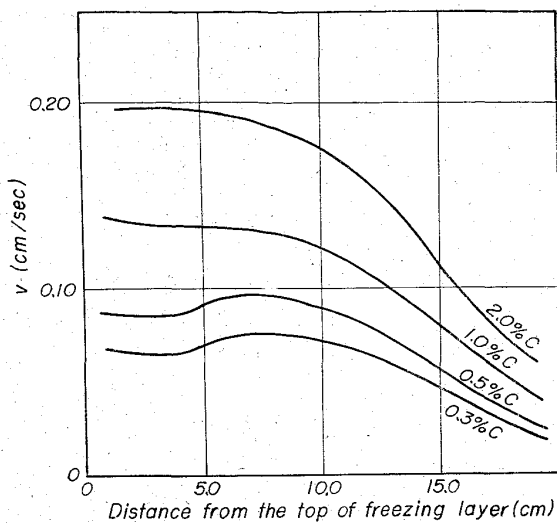


Fig. 3. Floating velocity of concentrated molten steel.

も炭素により最も大きく影響されると考えられるのでこれを用いた。

いま一例として bulk が、炭素 0.2%, 温度 1530°C で均一な状態にある場合を仮定した。一方凝固先端部の濃化溶鋼の状態については、詳細は不明であるため、つぎのように仮定した。すなわち温度は、浮揚する濃化溶鋼の容積が bulk の容積に較べ極めて小であるので、浮揚開始後まもなく bulk と等しくなるものとして、最初の 0~5 cm の範囲では 0.2% 炭素鋼の凝固点約 1510°C と 1530°C の中間 1520°C, 他の範囲では bulk に等しく 1530°C とした。また炭素量は濃化溶鋼中で均一とし過去に行なわれた濃化部近傍における測定結果¹⁾を参考に 0.3%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, の各場合を想定し、おのおのについて求めた。

算出結果を Fig. 3 に示す。これによれば、浮揚速度は最初の層流状態の間(本結果では約 7 cm まで)はそれほど差はみられないが、乱れが生じ始めるとともに次第に速度は低下していくことが示される。また濃化溶鋼の浮揚速度のオーダーは、 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/sec すなわち $10^{-1} \sim 10^0$ cm/min であることが推定される。しかし本実験では、ほんの一点に存在する濃化液体が浮揚する場合を測定したものであり、他方凝固過程にある溶鋼の場合には層状に拡がりをもっていると考えられるので、浮揚流の乱れの状態に差異が予想され、浮揚速度はある程度異なるものと思われる。その他凝固先端部の構造およびその近傍における粘性値については詳細が不明であるため、この点の影響も考慮する必要があると思われる。

いずれにしても濃化溶鋼が mass をともない浮力のみによつて浮揚すると考えると、かなり乱れた状態でも比較的速い速度で浮揚するので、このような作用は、われわれが実際鋼塊の凝固過程で認めるような bulk の濃化に対し、かなり効果的に行なわれることが推定される。したがって、もしこのような作用がさほど効果的でないとするれば、熱的対流が存在し、これが主体となつて作用していると考えるか、あるいは両作用が相半して行なわれていると考えざるを得ない。本結果はこの点に対し何らかの指針を与えるものと思われる。

また浮揚がもし本結果のオーダーの速度で行なわれるとすれば、浮揚にともなう作用が凝固先端部(主として底面からの凝固に対して)の結晶生成におよぼす影響は無視できないであろう。したがって本結果は、従来から論議されている沈澱晶の有無や、さらには沈澱晶部に多量に検出される酸化物系大型介在物や砂疵の発生機構を追究する際の手掛りともなるであろう。

4. 結 言

鋼塊の凝固過程における濃化溶鋼の挙動を調べる手掛りとして、mass をもつた状態での浮揚を想定し、その浮揚速度をモデル実験から求めた。その結果は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/sec と比較的速いことが示され、偏析の生成機構を中心に多くの問題を追究する際の手掛りを得ることができた。

文 献

- 1) 中川, 古沢: 鑄物, 36 (1964), p. 989

(84) V-偏析の成因について

(大型鍛造用鋼塊の凝固ならびに偏析に関する考察—V)

三菱製鋼, 東京製鋼所 田代晃一
〃 長崎製鋼所

荒木 良平・〇芳賀三千億
轟木 透・大賀 栄次

Mechanism of Formation of V-Segregation.

(Study on the solidification and segregation of large steel ingot for forging—V)

Kōichi TASHIRO, Ryōhei ARAKI,
Michio HAGA, Tōru TODOROKI
and Eiji ŌGA.

1. 緒 言

V 偏析の生成機構については過去数多くの発表がなされているが、比較的最近では小野寺ら¹⁾による砂型傾斜凝固鋼塊を使用しての実験結果が報告されている。その主旨は「垂直方向濃度勾配が急になる凝固の後半期では、垂直方向濃縮の波としてメルト中に V 偏析の萌芽が形成され、これが後で V 偏析痕となる」という浮上説である。

筆者らの考えもこれとほぼ類似しているが、前報の A 偏析の成因の項で述べた考え方を基盤として V 偏析、底部負偏析ならびに前述の鋼塊頭部に生じるアバタ状偏析の成因を説明してゆくことにする。

2. 丸型鋼塊の中心部の凝固について

まず V 偏析の成因を解明するに当たり、鋼塊の軸心部における凝固の状況を丸型鋼塊につき繰返し説明する。

第 1 報で述べたように鋼塊の底部凝固は横凝固に較べ鑄型との接触の度合などのために、凝固初期ではほぼ 1.4 倍の速度で進むが、これは凝固の進行に伴つて抛物線的に減少する。一方側面よりの横凝固は初期にはほぼ平板の横凝固に近い抛物線的な凝固速度を示すが、中期以降では円壩の性質が顕われて速度が速まり、中心に近づくに従い急昇する。したがって鋼塊の高径比が大にな