

(62) 固液共存領域を伴う凝固過程の解析

富士製鉄 本社
名古屋大学工学部○ 山本 誠二
工博 鞭 巖

緒言 鋼塊の凝固過程において 凝固面の前部に固液共存領域があつて この領域内の液相で溶質の濃化が起こる場合、溶質の挙動がマクロ偏析と関係していると推察される。本研究では一次元拡散モデルに基づいて、凝固速度、温度および溶質濃度の変化、ならびに凝固の進行に伴うマクロ偏析について検討を行なった。

解析および結果 解析にあたり次の仮定をおく。(1)凝固進行方向に垂直な等温度面と液相内の等濃度面を考える。(2)共存領域内の液相濃度と温度は液相線上で平衡にある。(3)溶質の物質移動は液相中だけで、固相内拡散は無視するが、凝固は固相線温度で完結するものとする。(4)拡散係数以外の物性値は固相液相とも同じである。この場合無次元化した基礎式と初期条件、境界条件は次の通りである。

$$\text{熱収支式: 鋳型} \cdots \frac{\partial \phi_1}{\partial \theta} = \frac{\partial (F_M \frac{\partial \phi_1}{\partial X})}{\partial X} \cdots (1)$$

$$\text{鋼塊} \cdots \frac{\partial \phi_2}{\partial \theta} = \frac{\partial (F_L \frac{\partial \phi_2}{\partial X})}{\partial X} - 1/\gamma \cdot \frac{\partial f_L}{\partial \theta} \cdots (2)$$

$$\text{物質収支式: } \frac{\partial (f_L C_L + \int_0^1 C_S df_S)}{\partial \theta} = \frac{\partial (E f_L \frac{\partial C_L}{\partial X})}{\partial X} \cdots (3)$$

$$\text{偏析度の式: } SG = \int_0^1 C_S df_S / C_{L0} \cdots (4) \quad \text{液相線の式: } \phi_L = 1 - M_L C_L \cdots (5)$$

$$\text{固相線の式: } 0.015 \leq C_{L0} \leq 0.2 \text{ では } \phi_S = 1 - M_{S1} C_{L0} \cdots (6), \quad 0.046 \leq C_{L0} > 0.015 \text{ では } \phi_S = \phi_{Sc} \cdots (7),$$

$$0.4 \leq C_{L0} > 0.046 \text{ では } \phi_S = 1 - M_{S2} C_{L0} \cdots (8)$$

$$[\text{初期条件}] \theta = 0 \text{ で } \phi_1 = \phi_{10}, \phi_2 = \phi_{20}, C_L = C_{L0} \cdots (9)$$

$$[\text{境界条件}] X = -Z_M \text{ で } \theta_2 \geq \theta \text{ では } 1/N_M \frac{\partial \phi_1}{\partial X} = \phi_1 \cdots (10); \quad X = 0 \text{ で } \theta_1 \geq \theta > 0 \text{ では}$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial X} = \alpha \frac{\partial \phi_2}{\partial X}, \phi_1 = \phi_2 \cdots (11), \quad \theta_2 \geq \theta > \theta_1 \text{ では } 1/N_M \frac{\partial \phi_1}{\partial X} = 1/N_L \frac{\partial \phi_2}{\partial X} = \phi_2 - \phi_1 \cdots (12),$$

$$\theta > \theta_2 \text{ では } 1/N_L \frac{\partial \phi_2}{\partial X} = \phi_2 \cdots (13); \quad X = 1 \text{ で } \frac{\partial \phi_2}{\partial X} = 0, \frac{\partial C_L}{\partial X} = 0 \cdots (15)$$

ここで、 $\phi = (T - T_a)/(T_0 - T_a)$, $F = R t_{max}/C_p \rho W^2$, $\gamma = C_p(T_0 - T_a)/L$, $E = D t_{max}/W^2$, $\theta = t/t_{max}$, $X = x/W$, $N = R W/R_s$, $C = C/C_E$, $\alpha = R_L/R_M$, $M = m C_E/(T_0 - T_a)$, $Z_M = W'/W$ である。

上の基礎式を差分近似して数値計算した一例を図2に示す。固液共存領域は凝固開始後間もなくからかなりの幅をもって存在しており、特に凝固開始線が鋼塊中心部に達する頃には鋼塊厚みの1/2程度にまで達している。このように共存領域の幅が広がると溶質の分子拡散によつてはマクロ偏析は現われなくなる。しかしながら実際の鋼塊凝固においては結晶の沈殿による相対的濃化および流動に伴う溶質の移動が考えられる。そこでこれら濃化現象を考慮して見かけの拡散係数を導入するとマクロ偏析を定性的に説明することが可能である。

(記号) t : 時間, t_1, t_2 : 空隙生成と型抜時刻, T : 温度, T_0 : 純鉄の融点, T_a : 外気温度, T_{M0}, T_{L0} : 初期温度, C : 溶質濃度, C_{L0} : 初期濃度, C_E : 共晶濃度, ρ : 密度, C_p : 比熱, R : 熱伝導度, L : 凝固潜熱, R_L : 伝熱係数, m_L, m_S : 液相線および固相線の傾き, x : 鋳型・鋼塊間の界面からの距離, W : 鋼塊厚みの1/2, W' : 鋳型厚み, f : 分率, D : 溶質の拡散係数

(添字) I: 鋼塊, M: 鋳型, L: 液相, S: 固相

(計算条件) $T_0 = 1512^\circ\text{C}$, $T_M = 100^\circ\text{C}$, $C_{L0} = 0.5\%$, $W = 33\text{ cm}$, $t_{max} = 240\text{ min}$

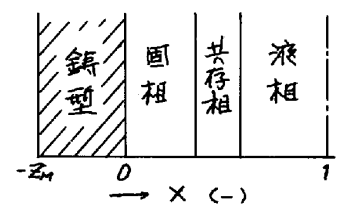


図1 凝固の模式図

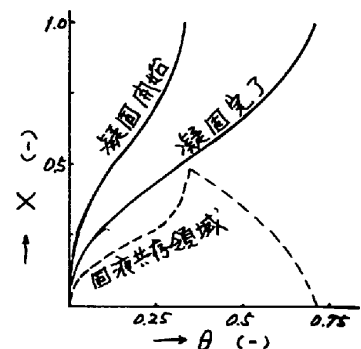


図2 凝固曲線の一例