

(155) 柱状晶・等軸晶遷移条件についての理論的考察

名古屋大学工学部 ○浅井滋生, 鞭 敏

1. 緒言 合金鋳塊の等軸晶帯の形成機構については、従来、多くの研究が発表されているが、それらは大別すると、等軸粒の起源の問題と柱状晶から等軸晶への遷移の問題に分けられる。¹⁾ 後者については、Burden・Hunt²⁾によって定性的な説明が試みられたほか、最近、鈴木、梅田ら³⁾によって流動の効果に着目した考えが提出された。柱状晶・等軸晶遷移機構については、組成的過冷による等軸粒の成長および柱状晶の成長抑制の二機構が熱と物質と運動量の同時移動の観点から説明されることが望まれる。ニニでは、前報⁴⁾の共存相内温度と濃度の解析結果に基づいて、上記の二機構を満足する十分条件を求め、他の研究者ら⁵⁻⁷⁾によって報告された一方向凝固の柱状晶・等軸晶遷移に関する実験データを理論的に調べた。

2. 理論的考察と解析 共存相内融液が液相線上の状態にあるとすれば、共存相・完全液相間の界面での共存相側温度勾配 $(\partial\theta/\partial x)_i$ と濃度勾配 $(\partial c/\partial x)_i$ は(1)式で関係づけられる。 $(\partial\theta/\partial x)_i = m(\partial c/\partial x)_i \dots (1)$

一す、共存相前面の液相側速度境界層は、共存相前面と液本体間の温度差に基づいて起こる自然対流に支配される。また、濃度境界層は速度境界層の影響を受ける結果、共存相前面の液側の濃度勾配 (G_m) は温度勾配 (G) の関数となることが考えられる。また、 $(\partial\theta/\partial x)_i$ と (G) 、 $(\partial c/\partial x)_i$ と (G_m) は共存相・完全液相間の界面における熱収支と物質収支によって関係づけられる。以上述べた関係は液本体の任意の温度と濃度のもとで同時に成立しなければならないことから推察すると、共存相・完全液相間の界面では、固相率 (f_0) は必ずしも零でなく、0~1の範囲の値を取るものと考えられる。この考えは、共存相前面(テンドライト先端)が過冷されているという事実⁸⁾と符合することになる。

上述の考えに基づいて、共存相・完全液相間の界面での熱収支、物質収支を行おうと(2)、(3)式が得られる。 $K\{(\partial\theta/\partial x)_i - G\} = (\Delta H) f_0 R \dots (2)$, $E\{(\partial c/\partial x)_i - G_m\} = R(1-K) C_i f_0 \dots (3)$

(2)、(3)式を(1)式に代入すると(4)式が得られる。 $f_0 \left\{ \frac{C_i R(1-K)}{E} - \frac{(\Delta H) R}{K C_p m} \right\} = \frac{G}{m} - G_m \dots (4)$

(4)式の左辺 $\{ \}$ の中のカッコ内項目は負値

(i) $m < 0$ になるので、左辺は常に正となり、右辺が正の時のみ(4)式が物理的意味を持つこととなる。ここで取扱う共存相は、(5)式で表わされる条件下で成立するものである。 $\Delta G_c \geq \Delta G \geq 0 \dots (5)$ したがって、 $\Delta G \equiv G_m - G$ (5)式は共存相前面液相の境界層内に組成的過冷が存在することを表わしていることから、ニニで取扱う共存相は柱状晶テンドライトであると考えられる。前報⁴⁾の解析結果から、 $f_0 = \lambda(1 - C_i/C_0)$ となるので、(4)式は組成的過冷の増大に伴って、共存相・完全液相界面の固相率は高固相側に移行し、 $\Delta G = \Delta G_c$ で $f_0 = 1$ となり、 $\Delta G > \Delta G_c$ で共存相は消滅することを示している。界面境界層内の流動状態(G_m の値)にかかわらず、柱状晶テンドライトの成長が停止し、かつ界面での組成的過冷を最大にする条件(柱状晶・等軸晶遷移の十分条件)は、 $f_0 \geq 1$ として、(2)式の右に前報⁴⁾の結果を代入すると(6)式のように得られる。

$$-\psi \geq \left\{ (1-K)W^2 + (1-K+AK/2)W - A(1-K) \right\} / \left\{ W(1-K/2) \right\} \dots (6)$$

…(6), T に対し、 $\psi = kG/mc_b R$, $W = (k/E)$

$(1-K/2) - 1$, $A = \Delta H/C_p C_b m$ である。一方、前報⁴⁾の結果から、共存相の成立条件として(7)式が得られる。

$$W > -AK/2(1-K) = W_c \dots (7)$$

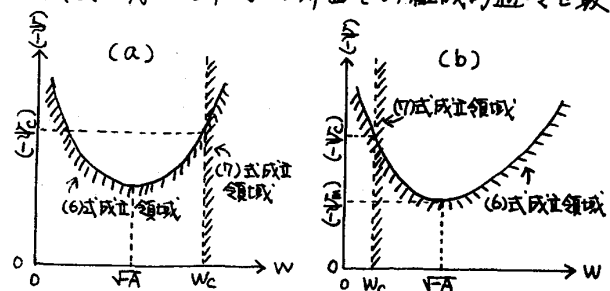


図1: (6)式と(7)式の関係を示す模式図

(7)式の成立領域を模式図として示す。(6)式と(7)式から、柱状晶・等軸晶遷移の十分条件は次のように表わされる。 $\sqrt{AK/2(1-K)} > 1$ のとき、 $-\psi < 2(1-K)/K$ 、 $\sqrt{AK/2(1-K)} \leq 1$ のとき、 $-\psi < 2(1-K)FA + (1-K) + AK/2 \} / (1-K/2) \equiv -\psi_m \dots (8)$

3. 解析結果と実験値との比較 Plaskett⁵⁾、岡本ら⁶⁾によって報告された一方向凝固による柱状晶・等軸晶遷移点を表わす実験データと、(8)式に基づいて計算した理論値と比較した結果を図2に示す。実験データにはばらつきが大きく、かつ、温度勾配の測定上誤差、物性値の不確か事などから、両者を直接比較することには若干問題があるものと考えられるが、ここでは、理論値は実験値の約3倍の値となっている。

次に、研井ら⁷⁾は種々の条件下で溶鋼を一方向凝固させ、得られた凝固組織を等軸晶と柱状晶に分類している。図3に理論値と実験値の比較を示す。図中の直線は理論値の約8.3倍の値を示すが、矢印で示した三個のデータを除けば、この直線はほぼ等軸晶と柱状晶を区別するものと推定される。なお、理論値の(-ψ)が実験値のそれより大きい理由の一つは、本理論値が柱状晶・等軸晶遷移の必要十分条件ではなく、十分条件であることによるものと考えられる。

[記号] C_0 : 液本体濃度(%), C : 共析相内融液濃度, C_p : 比熱(cal/g·°C), E : 混合拡散係数(cm²/sec), f_0 : 共析相内の固相分率(-), G : 共析相前面の液側境界層内温度勾配(°C/cm), G_m : 共析相前面の液側境界層内濃度勾配(%/cm), ΔH : 凝固潜熱(cal/g), K : 平衡分配係数(-), k : 熱拡散係数(cm²/sec), m : 液相線勾配(°C/%), R : 凝固速度(cm/sec), x : 共析相内距離, θ : 共析相内温度(°C), κ : 熱伝導度(cal/cm·sec·°C), ρ : 密度(g/cm³), [添字] i : 共析相・完全液相界面

[文献] 1) 鈴木: 鉄と鋼, 56(1970), p. 1942, 2) Burden and Hunt: Met. Trans., 6A(1975), p. 240, 3) 鈴木, 佐々木, 梅田, 木村: 鉄と鋼, 63(1977) p. 635, 4) 浅井, 靱: 製鋼才19委員会凝固現象協議会提出資料, 19-10029, 凝-215(1977), 5) T. S. Plaskett and W. C. Winegard: Trans. ASM, 51(1957) p. 222, 6) 茨木, 岡本, 岸武: 金属学会誌, 30(1966), p. 1159, 7) 研井, 土田: 凝固部会資料, 14-I-2(1976)

図2 柱状晶・等軸晶遷移点の実験データに基づいた(-ψ)の実測値と理論値の比較

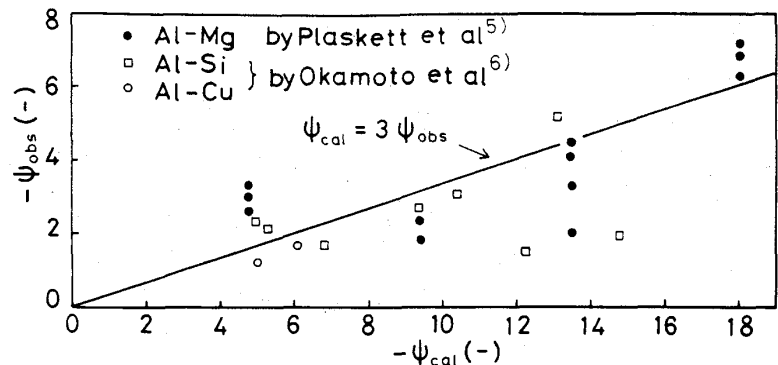


図3 種々の条件下で凝固した鋼の凝固組織と(-ψ)の実測値と理論値の比較

C : Columnar
G.E : Globular Equiaxed
D.E : Dendritic Equiaxed

