

(174) 連鋳の電磁攪拌における反転流に関する理論的考察

名古屋大学工学部 浅井滋生, 西尾信幸, 鞭 蔵

1. 緒言 連鋳では、中心偏析を抑制する目的で、電磁攪拌が採用されるようになってきた。しかし強力な電磁攪拌を行なうと中心偏析は低減しても負偏析帯の形成が助長される。そこで、負偏析帯の形成を抑制し、かつ中心偏析を低減させる攪拌法の開発が要望されている。ここでは、電磁攪拌の基礎実験の結果¹⁾に基づいて、負偏析帯の形成を伴わない等軸晶化法について理論的検討を行なう。

2. 理論 前報¹⁾の実験系のような反転流の場の運動方程式は、 $0 < t < (T/2)$ では、 $\rho(\partial V/\partial t) + \rho(V \cdot \nabla)V = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + J \times B$ ---(1). (1)式は解析的に解けないが、(1)式から、近似的にVの時間関数形を推定する。(1)式で、慣性項 $\{\rho(V \cdot \nabla)V\}$ あるいは乱流粘性項 $(\nabla \cdot \tau)$ のどちらが支配項であっても、これらは $\rho V^2/R$ に比例する。そこで、(1)式を近似的に(2)式で表わす。 $\rho(dV/dt) + k_1 \rho V^2/R = J \cdot B$ ---(2). (2)式を $t=0$ で $V=0$ の条件下で解くと、(3)式が得られる。 $V = \sqrt{JBR/k_1} \rho (1 - e^{-t/\theta}) / (1 + e^{-t/\theta})$ ---(3). ただし、 $\theta = \sqrt{\rho R/4JBk_1}$. (3)式の分母は1~2とあまり大きく変化しないため、これを消去し、さらにMaxwellの電磁気の式に基づいて $J \cdot B$ の関数形を決めると、(3)式は、 $V = k_2 (\sigma \omega / \mu_0)^{1/4} \sqrt{R/p} \cdot B \cdot (1 - e^{-t/\theta})$, $\theta = k_3 \sqrt{R/p} / \{(\sigma \omega / \mu_0)^{1/4} B\}$ ---(4)式となる。(4)式は静止流体が時定数 θ の一次遅れ系で始動することを示す。(4)式の関数形は角井ら²⁾によつて提出された実験式($V = k_4 \cdot B \cdot R \sqrt{\sigma / \mu_0 p} (1 - e^{-t/\theta})$, $\theta = 2\rho / (\sigma B^2)$)に類似している。(4)式のBは固液界面における値であるが、鋳片表面での磁束 B_0 と近似的に、 $B \approx B_0 \exp\{-l_s \beta_r\} \cdot \cos\{l_s \beta_i\}$ で関係づけられる。ここで、 β_r と β_i は $\beta = \sqrt{\gamma^2 + j \mu_0 \sigma \omega}$ の実部と虚部である。また、 B_0 とコイル電流Iとの関係は、 $B_0 = k_4 (N/lP) I$ となる。したがって、(4)式から、流速はコイル電流Iに比例することになる。一方、負偏析帯の形成は、共存相前面の融体が粘性支配域の樹間液を動かし、樹間から濃化液を排出させることにより生ずるものと考えられる。さて、静止液がクリープ流れとして始動する場合の運動方程式は、 $\rho(\partial V/\partial t) = \mu \nabla^2 V$ で表わされるので、運動量輸送距離Lは(5)式となる。 $L = \sqrt{\mu t / \rho}$ ---(5)

3. 考察 前報¹⁾の実験結果より、次のことが明らかとなった。(i)臨界反転サイクル(先の実験では0.5 Hz)以下であれば、結晶は微細化する。(ii)攪拌力が大きいほど、臨界反転サイクルを大きくできる。また、角井ら²⁾の実験によれば、攪拌時間の短い(約3秒)場合、結晶は微細化し、かつ負偏析帯は生じていない。これらの実験結果は上述の理論から次のように説明できる。(5)式から、 $t = 1(0.5 \text{ Hz}) \sim 3 \text{ sec}$ では $L = 2 \sim 5 \text{ mm}$ となり、樹間内における主流の効果は大きくないものと推察される。一方、攪拌力が大きい($B \rightarrow$ 大)ほど、(4)式から θ は小さくなり、テントライトを分断して結晶を微細化する主流はより早く定常値に達する。これは、(ii)の実験結果と符合する。さらに反転流は樹間内液を周期的に逆流させることになり、濃化液の樹間からの排出を抑制し、負偏析帯の形成を抑える効果が期待できる。

4. 結言 電磁攪拌によって生ずる流速を表わす(4)式を提出した。(4), (5)式より、強力(コイル電流の大きい)で、サイクル数の大きい反転流を採用することにより、負偏析帯の形成を抑制し、かつ等軸晶化をはかることが可能と推察される。

〔記号〕B, B: 磁束密度, J, J: 電流密度, k_i : 比例定数 ($i = 1 \sim 4$), l: 固定子内径, l_s : 凝固殻厚さ, N: 巻線の数, P: ポール対数, p: 圧力, R: フルームの半径, 代表長さ, T: 周期, t: 時間, V, V: 流速, γ : 伝播定数, μ : 粘性係数, μ_0 : 透磁率, ρ : 密度, σ : 電気伝導度

〔文献〕1)西尾, 浅井, 鞭: 鉄と鋼, 66(1980) No. 4, 2)角井, 古河, 川田, 秋田, 藤川, 佐々木: 三菱重工業技報, vol. 16(1979) No. 3, p. 308.