

(195) 連鑄未凝固溶鋼の電磁攪拌による流動の理論解析

名古屋大学工学部

・浅井滋生、菅 巖

1. 緒言 連鑄においては、鑄片の中心偏析や軸心部ポロシティを抑制する目的で、電磁攪力による未凝固溶鋼の攪拌が行なわれるようになってきた。一方、強い攪拌はホワイトバンドの形成を促すことから、ホワイトバンドの形成を抑制し、かつ中心偏析を低減させることが望まれる。そのため、電磁攪拌条件に応じた未凝固溶鋼の流動状態や凝固前面に作用するせん断応力などを予知して、攪拌条件と凝固現象の関連を明らかにする必要がある。従来、連鑄電磁攪拌の流動解析は、膨大な数値計算<sup>1)</sup>を必要としたため、操作条件と凝固組織との関係を明らかにするのに利用できなかった。本報では、ブルーム連鑄を対象として、垂直方向に未凝固液を駆動させた場合の流動を電磁流体力学に基づいて解析し、誘起される体積力と速度の分布および凝固前面のせん断応力の解析的表現を求める。

2. 理論解析 Maxwell と Ohm の式から溶鋼中に誘導される磁界と電流の分布を求め、誘起される体積力を得る<sup>2)</sup>。次に、得られた体積力(f)を運動方程式の外力項に代入し、攪拌領域での一次元流れを仮定して積分すると流速(V)と凝固前面のせん断応力( $\tau$ )が得られる。得られた結果を(1)~(3)式に示す。  
 $f \times (X_0 / \mu_0 H_0^2) = (\pi_2 \pi_3 / 2 \lambda R) \cdot (\cosh \delta_r \xi - \cos \delta_i \xi) \dots (1)$ ,  $(V - V_{cas}) \times (\mu_f / \mu_0 H_0^2 X_s)$   
 $= -(\pi_2 \pi_3 / 2 R) \cdot \{ (\cosh \delta_r \xi - \cosh \delta_r) / \delta_r^2 + (\cos \delta_i \xi - \cos \delta_i) / \delta_i^2 \} + (3 \pi_2 \pi_3 / 4 R)$   
 $\cdot (\xi^2 - 1) \cdot \{ \cosh \delta_r / \delta_r^2 + \cos \delta_i / \delta_i^2 - \sinh \delta_r / \delta_r^3 - \sin \delta_i / \delta_i^3 \} \dots (2)$ ,  $\tau / \mu_0 H_0^2$   
 $= (\pi_2 \pi_3 / 2 R) \cdot \{ (\sinh \delta_r) \cdot (1 + 3 / \delta_r^2) / \delta_r - (\sin \delta_i) \cdot (1 - 3 / \delta_i^2) / \delta_i - (3 / \delta_r^2) \cdot \cosh \delta_r$   
 $- (3 / \delta_i^2) \cdot \cos \delta_i \} \dots (3)$ , ただし,  $\pi_2 \equiv \mu_0 \sigma \omega / k^2$ ,  $\pi_3 \equiv k X_s$ ,  $R \equiv \sqrt{1 + \pi_2^2} \cdot \{ \cosh(\delta_r / \lambda) + \cos(\delta_i / \lambda) \}$ ,  $\delta_r \equiv \sqrt{2} \pi_3 \{ 1 + \sqrt{1 + (\pi_2 / 2)^2} \}^{1/2}$ ,  $\delta_i \equiv \sqrt{2} \pi_2 \pi_3 / \{ 1 + \sqrt{1 + (\pi_2 / 2)^2} \}^{1/2}$ ,  $\xi \equiv X / X_s$ ,  $\lambda \equiv X_0 / X$ .

3. 計算結果と考察 流速と体積力の分布を図1に示す。流れは中心部で下降流、周辺部で上昇流で、凝固界面で零となっている。凝固の進行に伴う凝固前面のせん断力の推移を図2に示す。静電磁界方式では、結晶の微細化は凝固前面のせん断応力によって整理できるとの報告<sup>3)</sup>があるが、本報で取り扱う移動磁界方式においても、結晶の微細化やホワイトバンド形成の有無が、簡単に計算可能な(1)~(3)式によって整理可能と考えられる。

[記号] H<sub>0</sub>: 鑄片表面の磁界の強さ, k: 伝播定数, X<sub>0</sub>: 鑄片の半分の厚み, X<sub>s</sub>: 中心から凝固前面までの距離,  $\mu_f$ : 粘性係数,  $\mu_0$ : 透磁率,  $\sigma$ : 電気伝導度,  $\omega$ : 周波数

[文献] 1) S. Asai and J. Szekely: *Ironmaking and Steelmaking*, 2 (1975), 205, 2) W. F. Hughes and F. J. Youngs: *The Electromagneto-dynamics of Fluid*, (1966) [John Wiley and Sons], 3) 杉谷, 小林, 石村, 岡崎, 安元: 製鋼技術 凝固現象協議会資料, 19巻-10154, 凝-252, (1979)

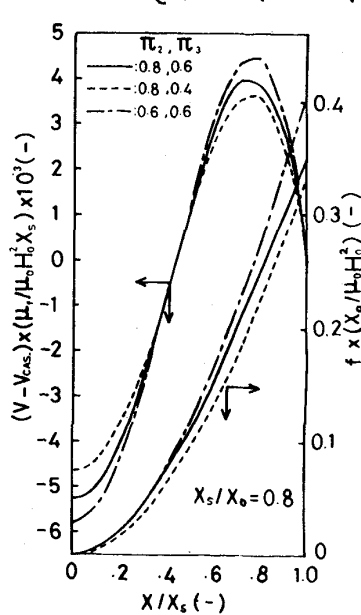


図1 流速と体積力の分布

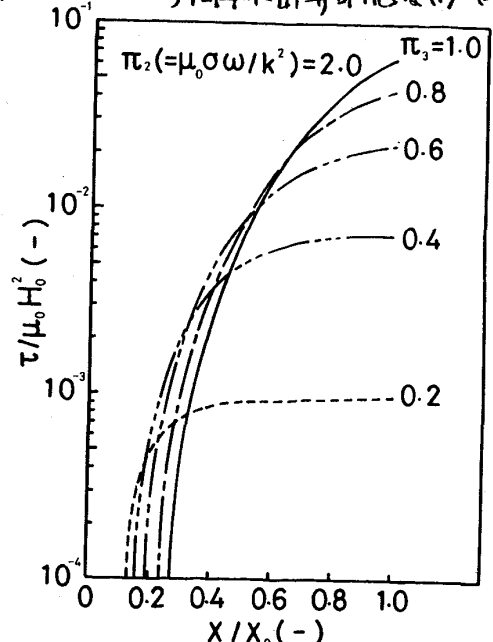


図2 凝固前面のせん断応力