

## (討7) 連続铸造クレーター内の溶鋼の流動, 混合状態の解析

川崎製鉄技術研究所 工博 大井 浩 ○藤井徹也  
松野淳一

## 1. 諸 言

連続铸造クレーター内の未凝固溶鋼は注入流や熱対流の影響によって流動、混合されている。未凝固溶鋼の流動、混合状況は凝固速度や固液共存相の厚さに影響し、铸片の偏析や凝固組織と密接な関係がある。さらに、クレーター内溶鋼中の介在物の挙動を検討するためには、溶鋼の流動、混合に関する知見が必要となる。このように、未凝固溶鋼の流動、混合状況は連铸機の操業技術上重要な因子であるが、これらに関する研究は少ない。

異鋼種間の連続一連続铸造時の濃度変化状況を解析し、クレーター内の未凝固溶鋼の流動、混合状況を求めた。また、得られた結果を使用してクレーター内の固液共存相の厚さについて凝固計算を行なった。

## 2. 実 験

## 2.1 実験方法

前鍋と後鍋で溶鋼成分が異なる異鋼種間の連続一連続铸造時の铸片継目近傍には、铸造方向と厚さ方向に濃度変化のある铸片ができる。この濃度変化は未凝固溶鋼の流動、混合状況の特性によって決まるもので、濃度変化状況を解析すれば溶鋼の流動、混合状況が求まる。そのために、継目近傍のスラブ内成分濃度の変化状況を詳細に測定した。連铸時の取鍋成分と操業条件を表1、2に示す。

表1 取鍋成分

	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni
先鍋	0.13	0.39	1.19	0.020	0.011	0.028	0.09
後鍋	0.12	0.20	0.68	0.021	0.019	0.002	0.01

表2 操業条件

モールド寸法	200×1700mm
引抜速度	0.7 m/Min

先鍋と後鍋の交換が行なわれ、後鍋の溶鋼のタンデッシュへの注入の開始時（この時のメニスカス位置をスラブ継目とする）を中心に前後15 min にわたってタンデッシュとモールドで分析試料採取と测温を行ない、同時に、試料採取時間に対応するスラブ位置を記録した。

## 2.2.2 実験結果

前鍋と後鍋間で濃度差が大きいMn を例に、タンデッシュ、モールド、スラブ表面、および、スラブ中心の濃度変化状況を図1に示す。タンデッシュとモールド間の濃度変化状況には1~3 minの時間遅れがあり、クレーター上部には強い混合域の存在することを示唆している。モールド濃度とスラブ表面濃度はほぼ同一値を示しているが、スラブ表面とスラブ中心間には3~4 minの時間遅れが存在する。

スラブ中心の各成分の濃度変化状況を図2に示す。図中の濃度は前鍋と後鍋濃度で無次元化されている。図から明らかなように、Si、Mn、Ni はほぼ同一値とみなされるが、S、Al はその挙動が異なる。Sは偏析の影響であり、Alの挙動が異なるのは次の理由による。すなわち、後鍋ではAl濃度が低いために介在物はSiO<sub>2</sub>-MnO系のもので大部分であり、タンデッシュやクレーターにおける先鍋と後鍋の溶鋼の混合過程においてAlによるSiO<sub>2</sub>-MnO系介在物の還元反応や溶解酸素との脱酸反応が進行し、生成されたA<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の浮上分離の効果によるものと推察される。

継目から1.5 mにおけるスラブ横断面のMn濃度分布を図3に示す。スラブ短辺からの凝固の影響

73-A26

のおよぶ範囲を除けば、スラブ表面から等距離の位置の Mn 濃度は湾曲の上面、下面の区別なくほぼ等しく、クレーター厚み方向の混合は鑄造方向の混合と比較して十分に大であり、また、溶鋼の流動、混合状況はスラグの上面と下面間に差がなく、クレーター横断面では一様なものと推察される。

3. クレーター内溶鋼の流動、混合の解析

3.1 計算方法

以上に得られた鑄片内の濃度変化状況を考慮すると、クレーター内の溶鋼の流動、混合状態は完全混合、あるいは、ピストン流れの両極端の場合ではなく、不完全混合状態にあるものとして解析する必要がある。流通式装置内の不完全混合状態の定量的表示方法として従来から種々のモデルが提出されているが、拡散モデルが代表的である。凝固速度や固液共存相の厚さ、および、偏析や凝固組織などの凝固現象と溶鋼の流動、混合現象との関係を論じるためには、溶鋼の流動、混合状況の強さの指標を得る必要がある。これらの指標として混合拡散係数を用いることとし、拡散モデルに基づいて解析する。また、図3からも明らかのように、流れに垂直方向の混合は流れの方向への混合と比較して十分に大であるので流れの方向のみの濃度分布を考慮する。

拡散モデルに基づいてメナスカスから Z の位置のクレーター内の物質収支を行なうと、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} + \left( \frac{E_z}{S} \frac{dS}{dZ} + \frac{dE_z}{dZ} - U_1 \right) \frac{\partial C}{\partial Z} \dots\dots(1)$$

C : 濃度、t : 時間、Z : メナスカスからの距離、  
S : クレーター厚さ、E<sub>z</sub> : 混合拡散係数、U<sub>1</sub> : 引抜速度

混合拡散係数 E<sub>z</sub> は (2) 式の条件を満足する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} 0 < Z < Z_f & \text{ で } -d E_z / d Z > 0 \\ Z = Z_f & \text{ で } E_z = 0 \end{aligned} \right) \dots\dots(2)$$

Z<sub>f</sub> : クレーター深さ

(2) 式の条件を満足する E<sub>z</sub> は種々考えられるが一番簡単な(3)式で表わす。

$$E_z = E_z^0 \{ 1 - (m + 1) \xi^m + m \xi^{m+1} \}, \xi = \frac{S^0 - S}{S^0} \dots(3)$$

m : E<sub>z</sub> の分布を決めるパラメータ、添字 0 は Z = 0 点を示す。

クレーター厚さ S は凝固速度式から (4) 式のように求まる。

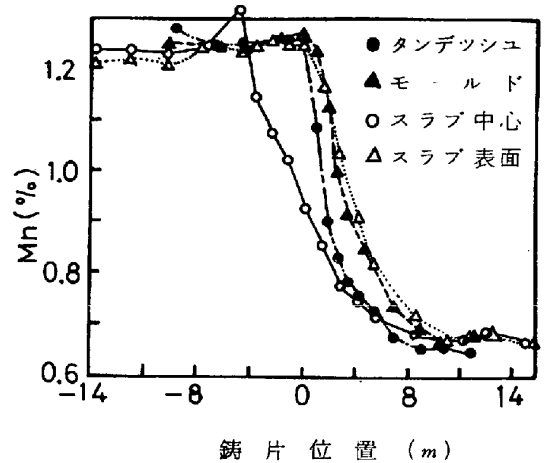


図1. 継目近傍の濃度変化

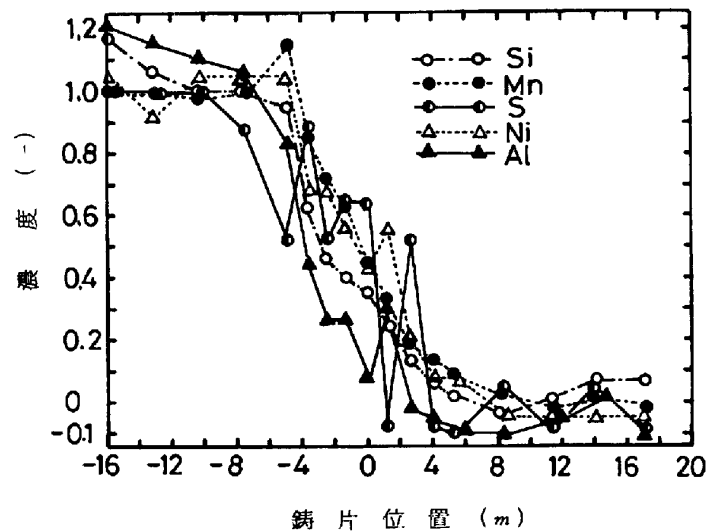


図2. スラブ中心の濃度変化

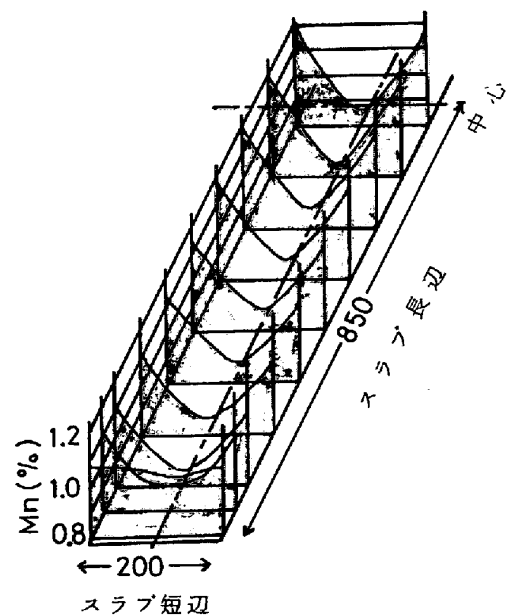


図3. スラブ横断面 Mn 濃度分布

$$S = A - 2\delta, \delta = K\sqrt{Z/U_1} + B \dots (4)$$

A: スラブ厚さ、 $\delta$ : 凝固厚さ、K: 凝固定数、B: 定数

(1) 式の初期および境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} t = 0, 0 \leq Z \leq Z_f \quad & C = C_i \\ t > 0, Z = 0 \quad & C = C_b(t) \\ Z = Z_f \quad & \partial C / \partial Z = 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

$C_i$ : 前鍋濃度、 $C_b(t)$ : モールド濃度

(3) ~ (5) 式の条件のもとで (1) 式の数値計算を行ない、クレーター内の濃度分布の経時変化を求める。次に、(4) 式で決まるそれぞれの凝固位置に対応するクレーター深さの溶鋼濃度と等しいものとしてスラブ内成分濃度が求まる。

### 3.2 パラメータ $m$ 、 $E_z^0$ の決定

図5に示すスラブ横断面のMn濃度分布の測定値に基づいてパラメータ  $m$ 、 $E_z^0$  を決定する。まず、種々の  $m$ 、 $E_z^0$  の値に対して (1) 式の数値計算を行ない、スラブ横断面のMn濃度分布を算出した。これらの結果と図5の測定値間の残差の2乗和が最少となる  $m$ 、 $E_z^0$  の値を数値的に求め  $m = 4.9$ 、 $E_z^0 = 2.1 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{sec}$  なる値を得た。この場合の計算値と測定値の比較を図4、5に示す。計算値と測定値間にはほぼ満足すべき一致が得られ、モデルの有効性が理解できる。

### 3.3 クレーター内溶鋼の流動、混合

$m = 4.9$ 、 $E_z^0 = 2.1 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の場合の混合拡散係数  $E_z$  のクレーター内の分布を図6に示す。冶金装置における混合拡散係数の測定値と比較すると、通常のCOホイリング時の平炉浴内で  $2.0 \sim 3.0 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{sec}^4$ 、電磁誘導攪拌されている100ton取鍋精錬炉で  $1.0 \sim 5.0 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{sec}^5$  であり、これらの値と比較してクレーター上部の溶鋼はかなり激しく混合されているものと考えられる。

### 4. 溶鋼の流動、混合の効果を加味した凝固速度の計算

鋳片の偏析や凝固組織の問題を論じるには固液共存相の存在を無視できない。固液共存相の厚さを求めるには固相線、液相線凝固速度を求める必要がある。固相線凝固速度の計算は多くの方法によって行なわれていて測定値と比較してかなりの精度があるものと考えられる。液相線凝固速度は固相内の伝熱速度に依存するばかりでなく、固液共存相の熱的性質、および、液相内の伝熱速度にも依存し、すでに J. Szekely<sup>6)</sup> らが論じているように、溶鋼の混合状況によって影響される。3において得られた混合拡散係数

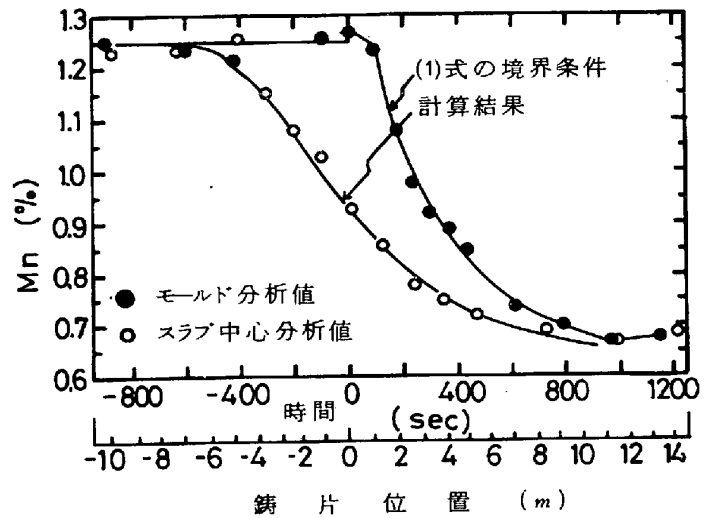


図4. スラブ鋳造方向のMn濃度変化の測定値と計算値との比較

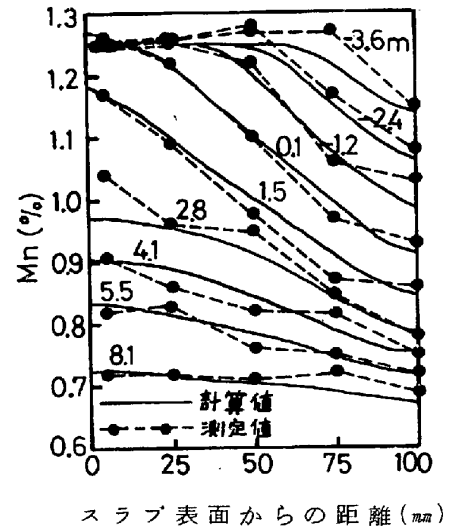


図5. スラブ横断面のMn濃度変化の測定値と計算値の比較

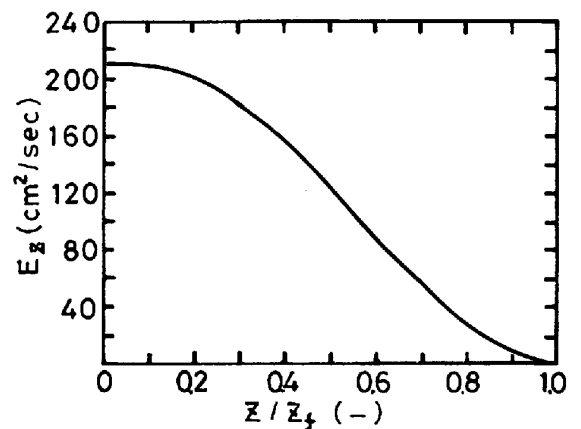


図6. クレーター各位置の混合拡散係数

を使用して溶鋼の混合が凝固速度に及ぼす影響について検討する。

伝熱の基礎式は

$$\rho C U_1 \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{\partial}{\partial X} \left( K_x \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( K_z \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \quad (6)$$

$\rho$  : 密度、 $C$  : 比熱 (凝固潜熱をも含む)、  
 $U_1$  : 引抜速度、 $X$  : スラブ厚さ方向の距離、  
 $Z$  : 鋳造方向の距離、 $K_x, K_z$  :  $X, Z$  方向の有効熱伝導度、 $\theta$  : 温度

$K_x, K_z$  は鋼の熱伝導度  $K_s$  と溶鋼の混合を考慮した有効熱伝導度  $K_e$  を用いて (7) 式で示す。

$$\left. \begin{aligned} \theta \leq \theta_s & \quad \text{で} \quad K_x = K_z = K_s \\ \theta_s < \theta \leq \theta_l & \quad \text{で} \\ K_x = K_z = (\theta - \theta_s) K_e / (\theta_l - \theta_s) + K_s \\ \theta_l < \theta & \quad \text{で} \quad K_x = K_z = K_s + K_e \end{aligned} \right\} (7)$$

$K_e$  は混合拡散係数との関係 ( $K_e = C\rho E_z$ ) から

$$K_e = C\rho E_z^0 \{ 1 - (m+1) \xi^m + m \xi^{m+1} \} \dots (8)$$

スラブ表面での境界条件および物性値は前報に示した値を使用し、反復法 (加速係数 0.5 ~ 0.75) によって (6) 式の数値計算を行なった。

結果を図 7 に示す。溶鋼の混合の強さや注入温度の液相線凝固速度への影響は大であるが、固相線凝固速度への影響は小である。図 7 に基づくデンドライト 2 次アーム間隔の計算値 ( $S = 710 (\Delta T/R)^{-0.318}$ ) と測定値の比較を図 8 に示す。モールド浴表面が  $1518^\circ\text{C}$  の場合の計算値と測定値間にはほぼ満足すべき一致が得られているが、これらの点に関しては未知の要因も多く今後の検討が必要であろう。

5. 結 言

異鋼種間の連続一連続鋳造時の継目近傍のスラブ内濃度変化状況を解析し、クレーター内の溶鋼の流動、混合状況の定量化を試みた。その結果、クレーター各位置での混合拡散係数の値が得られた。またこれらの値を使用して凝固速度の計算を行ない、固液共存相の厚さに及ぼす溶鋼の混合効果について検討した。

[参考文献]

- 1) 根本, 川和, 添田, 他: 鉄と鋼, 57 (1971), P. 646
- 2) 荒木, 青木, 池田: 鉄と鋼, 57 (1971), S680
- 3) O. Levenspiel: Chemical Reaction Engineering, (1972), P. 242 [John Willy]
- 4) J. Szekely: J. Iron Steel Inst., 202 (1964), P. 505
- 5) 藤井, 松野, 大井: 川崎製鉄技報, 4 (1971), P. 1
- 6) J. Szekely and V. Stanek: Met. Trans., 1 (1970), P. 119
- 7) 大井, 松野, 中戸: 鉄と鋼, 58 (1972), S396
- 8) 鈴木, 鈴木, 長岡, 他: 日本金属学会誌 32 (1968), P. 1301

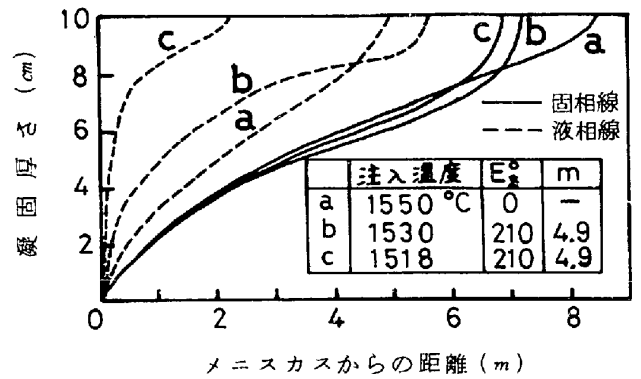


図 7. 凝固厚さの計算結果 ( $U_L = 0.7 \text{ m/min}$ )

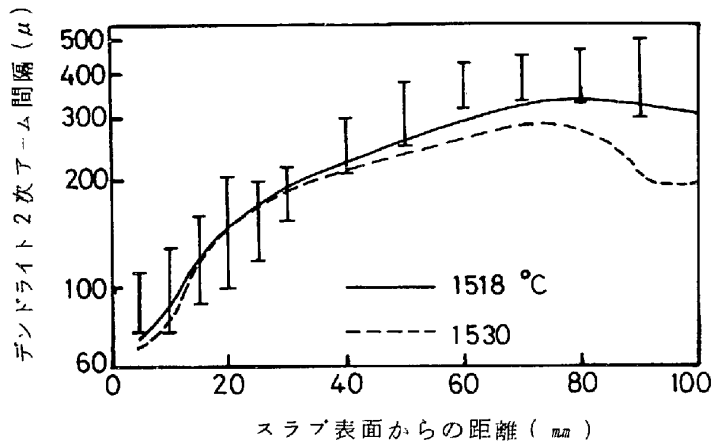


図 8. デンドライト 2 次アーム間隔の測定値と計算値との比較