

## 討12

## 介在物浮上のシミュレーション

新日本製鉄㈱ 特別基礎第二研究センター ○ 沢田 郁夫、中村 正和

名古屋製鉄所

森 正晃

設備技術本部

米山 章史

1. 緒言 連鑄工程タンディッシュ内にて在物の浮上分離を促進する試みが多くなされている。浮上分離効率に及ぼす諸因子としては平均滞留時間Tについて検討されたものが多く、一部溶鋼の逆混合や淀みについて指摘した報告もある。今回は三次元熱対流の数値計算法を用いて、これら諸因子の効果を明かにした。

## 2. 解析手法

## 2.1 三次元熱対流および介在物挙動の直接シミュレーション

タンディッシュ内溶鋼の熱対流、介在物除去効率 $\eta_{\text{calc}}$ 、溶鋼の滞留時間分布特性を評価するために下記のような基礎式で数値シミュレーションを行った。

$$\text{質量保存式; } \operatorname{div} u = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動量収支式; } \operatorname{div}(\rho u u - \mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} u) = -\rho \beta g(h - \bar{h}) \quad (2)$$

$$k, \varepsilon \text{ 収支式; } \operatorname{div}(\rho u \Phi - \mu_{\text{eff}}/\sigma(\Phi) \operatorname{grad} \Phi) = S(\Phi) \quad (\Phi = k, \varepsilon) \quad (3)$$

$$S(k) = G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$S(\varepsilon) = \varepsilon/k (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

$$G_k = \mu_{\text{turb}} \{ 2[ (\partial u/\partial x)^2 + (\partial v/\partial y)^2 + (\partial w/\partial z)^2 ] + (\partial v/\partial x + \partial u/\partial y)^2 + (\partial w/\partial y + \partial v/\partial z)^2 + (\partial u/\partial z + \partial w/\partial x)^2 \} \quad (6)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{turb}} + \mu_{\text{lam}} \quad (7) \quad \mu_{\text{turb}} = C_3 \rho k^2/\varepsilon \quad (8)$$

$$C_1=1.43, C_2=1.92, C_3=0.09, \sigma(k)=1.0, \sigma(\varepsilon)=1.0, \beta = -0.833 \text{ (kg/m}^3\text{deg)}$$

$$\text{エネルギー収支式; } \operatorname{div}(\rho u h - \lambda/C_p \cdot \operatorname{grad} h) = 0 \quad (9)$$

尚、hは温度(°K)を表す。

## 境界条件

ノズル入口、出口; 所定の  $u, k, \varepsilon, h$  を与える。

$$\text{壁面; } u \text{ はノンスリップ } q = -\lambda \operatorname{grad} h = 15000 \text{ (kcal/m}^2\text{hr)} \quad (10)$$

$$\text{表面; } u \text{ はフリースリップ } q = -\lambda \operatorname{grad} h = 7500 \text{ (kcal/m}^2\text{hr)} \quad (11)$$

## 2.2 介在物の三次元軌跡のシミュレーション

介在物はすぐに終末速度に到達するとし、浮上ベクトルをストークス則で評価し、Fig.1に示すように対流ベクトルと浮上ベクトルを逐次考慮して三次元的な介在物軌跡をシミュレーションした。また、一部乱流拡散速度を(12)式で評価し、等方的な乱流拡散をも考慮したシミュレーションも行った。

$$(\text{乱流拡散速度}) = 2\sqrt{2}/\pi \cdot (\text{変動速度の実効値}) = 4/\pi \sqrt{k} \quad (12)$$

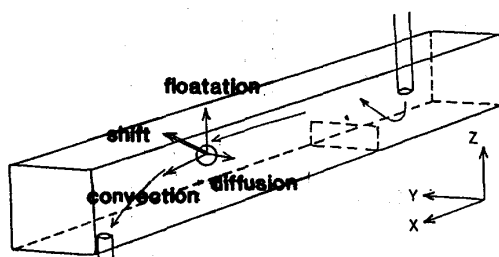


Fig.1 Schematic Illustration of tundish

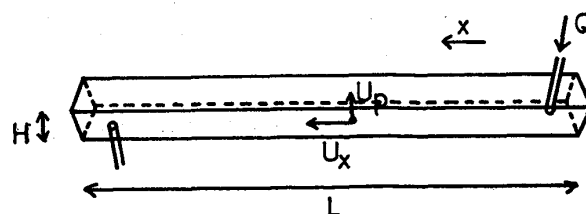


Fig.2 Notations of variables

## 2.3 介在物浮上分離モデル

前述の手法で求められる介在物除去挙動に關与する要因を評価するために以下のような三種類のモデルの検討を行った。

## (1) 平均滞留時間Tのみを考慮するモデル

溶鋼の一次元的な対流と介在物の浮上消失を考慮する。

$$1 - \eta_1 = \exp [ -(L/u_x)/(H/u_0) ] = \exp( -T/t ) \quad (13)$$

## (2) 淀み部を考慮した実質滞留時間T\*に基づくモデル

$$T^* = V(1-\alpha)/Q = T(1-\alpha) \quad (14)$$

$$1 - \eta_2 = \exp [ -(L/u_x)/(H/u_0) ] = \exp( -T^*/t ) \quad (15)$$

Q; 溶鋼体積流量 V; 溶鋼体積  $\alpha$ ; 溶鋼淀み率

## (3) 淀み部及び逆混合を考慮したモデル

溶鋼の一次元的な対流、逆混合、介在物の浮上消失及び(14)式を考慮する。

$$1 - \eta_3 = 4a \cdot \exp(u_x L/2D) / [ (1+\alpha)^2 \exp(au_x L/2D) - (1-\alpha)^2 \exp(-au_x L/2D) ] \quad (16)$$

$$a = \sqrt{1 + 4(u_0 T^*/H)(D/u_x L)} \quad (17)$$

D = 平均乱流拡散係数

尚、(14)、(16)、(17)式中の淀み率 $\alpha$ 、ペクレ数 $u_x L/D$ は、2.2と同様の手法で溶鋼と同じ密度の微小素片100個の三次元軌跡のシミュレーションより(18)~(21)式で算出した。

$$T^* = \sum T_i / 100 \quad (18)$$

$$\alpha = 1 - T^*/T \quad (19)$$

$$\sigma(\theta)^2 = ( \sum T_i^2 / 100 - T^{*2} ) / T^{*2} \quad (20)$$

$$\sigma(\theta)^2 = 2D/uL - 2(D/uL)^2 [ 1 - \exp(-uL/D) ] \quad (21)$$

## 3. 結果及び考察

等温系モデルと非等温系モデルでの溶鋼対流のシミュレーション結果をFig.3,4に示す。非等温系では、溶鋼が側壁耐火物より冷却されるため、溶鋼進行方向に垂直な断面(Fig.4-b)において壁付近では下降流、中心付近では上昇流を生じており、等温系の場合(Fig.3-b)とは全く異なっている。また、非等温系では、ロングノズルより流入後溶鋼は自然対流により浴表面に上昇し、浸せきノズル付近で下降するというパターンをとる。

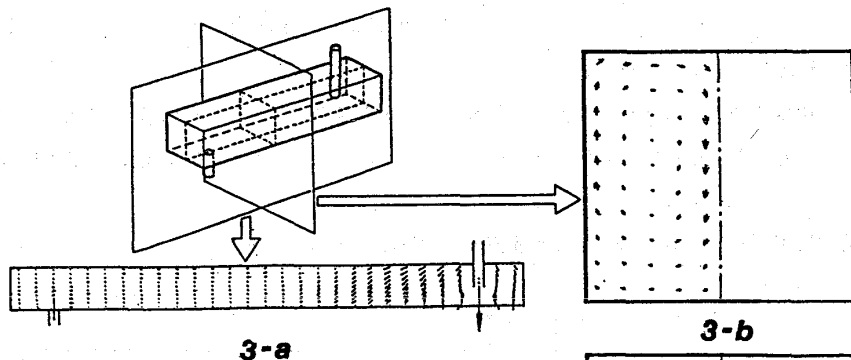


Fig.3 Fluid flow in isothermal system

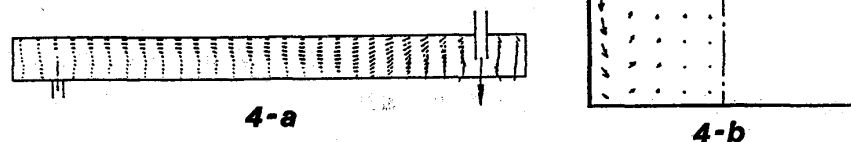
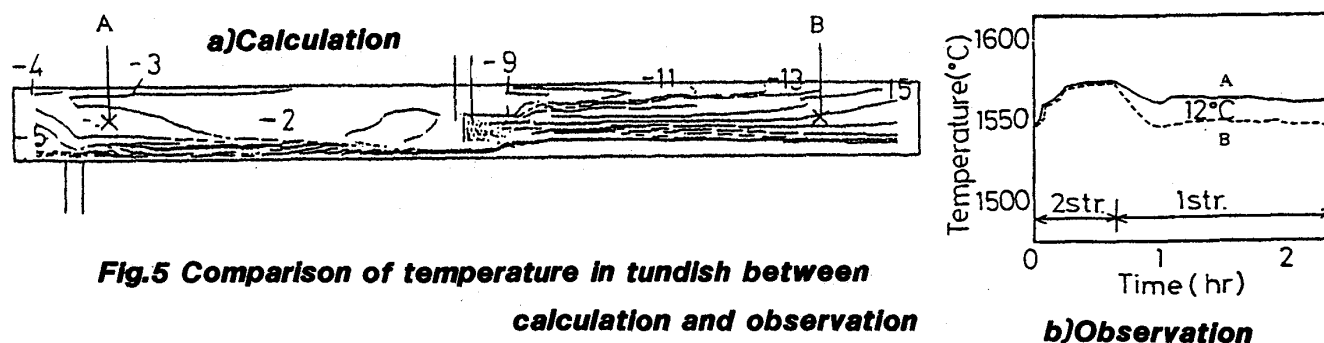


Fig.4 Fluid flow in non-isothermal system

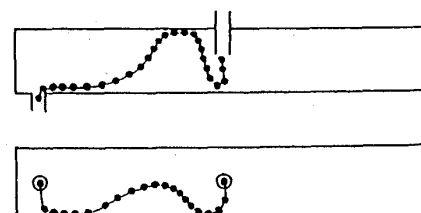


**Fig.5 Comparison of temperature in tundish between calculation and observation**

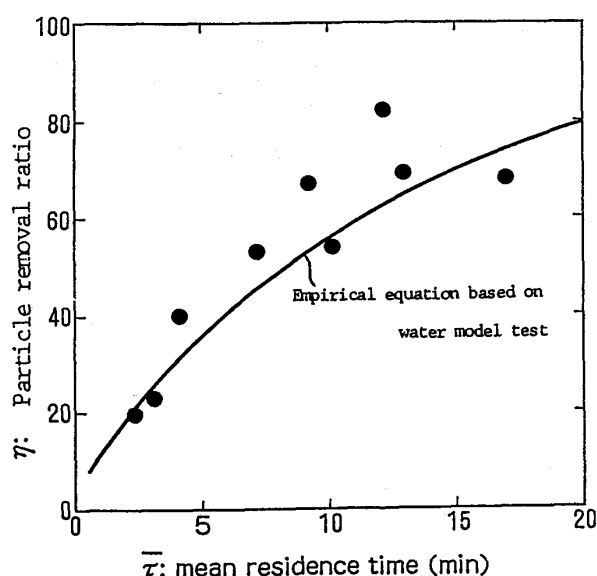
シミュレーションの精度を確認する目的で行われた実機温度測定実験では、Fig.5に示すように良好な結果を得た。また、温水モデルを用いて行われた実験での流れの観察においても計算結果との良好な対応がみられた。

次に、溶鋼中介在物の三次元軌跡のシミュレーション結果の一例をFig.6に示す。ロングノズルより流入された100個の粒子( $d_p=100[\mu]$ の介在物相当)の浮上除去効率を水モデル(等温系)、熱水モデル(非等温系)について比較したのがFig.7,8である。計算結果と測定結果は良い一致を示している。また、熱水モデルでの除去効率は水モデルより勝っている。両ケースにおける溶鋼滞留時間分布を2, 3に示した方法で計算した結果をFig.9-a, bに示すが、実質の平均滞留時間 $T^*$ や逆混合度の指標としてのベクレ数 $u_x L/D$ の違いが浮上効率の違いの原因になっていることが推定される。

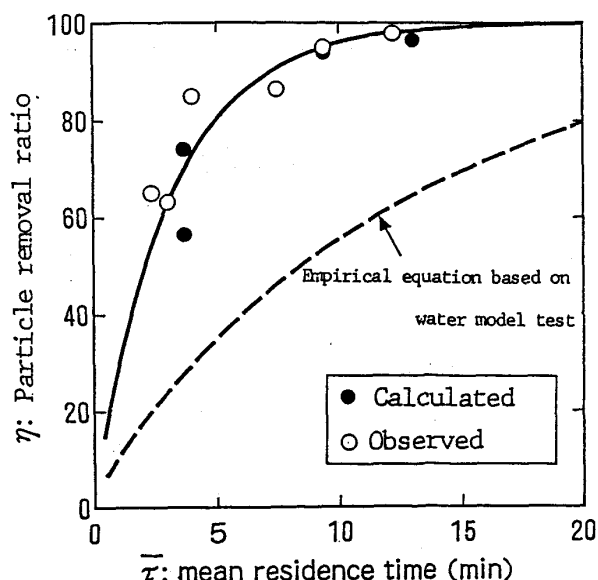
そこで、タンディッシュ溶鋼中介在物の浮上分離メカニズムを明かにし主たる要因を抽出する目的で、除去効率のシミュレーション結果を2, 3で述べた三つのモデルにて評価することを試みた。各々の操作条件における直接シミュレーションにより得られる介在物除去効率 $\eta_{cal}$ の値と、上述各モデルより得られる介在物除去効率 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ の値との比較をFig.10~12に示す。



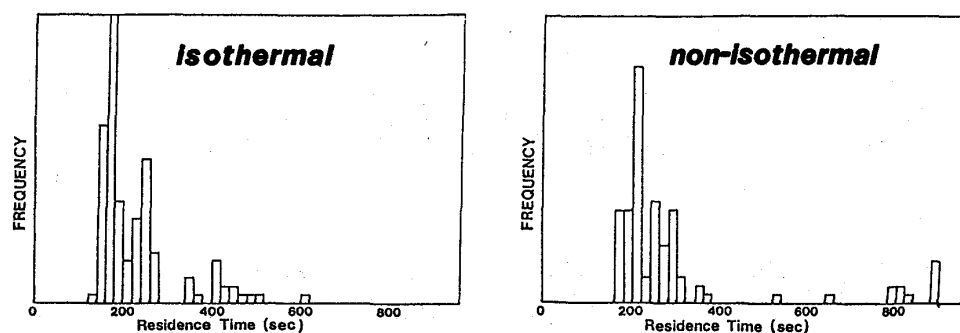
平均滞留時間 $T$ のみを考慮したモデル(1)ではあまり良い整理ができないが、 $T$ と淀み部を考慮したモデル(2)で良好な整理ができることがわかる。**Fig.6 Calculated inclusion trajectory** また、溶鋼の逆混合度を考慮すれば、さらに改善される。



**Fig.7 Comparison between  $\bar{T}$  and  $\eta$  in isothermal system**



**Fig.8 Comparison between  $\bar{T}$  and  $\eta$  in non-isothermal system**



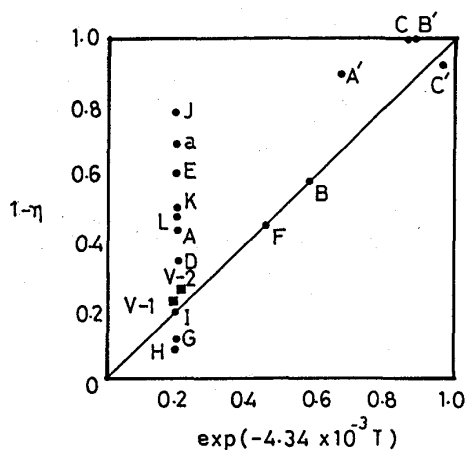
**Fig.9 Calculated residence time distribution**

#### 4 結論

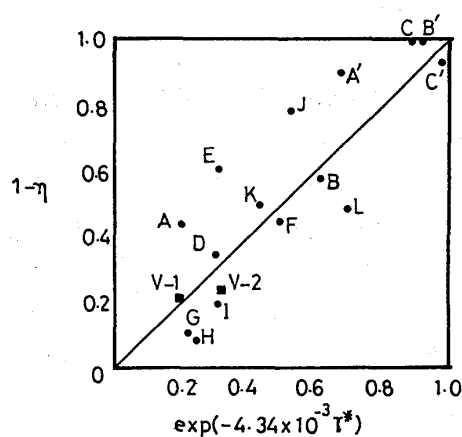
- 1) タンディッシュ内容銅、介在物挙動を数値シミュレーションで予想する手法を確立し、実験との良好な一致を確認した。
- 2) タンディッシュ内容銅流は耐火物壁での抜熱に基づく自然対流により大きく影響される。
- 3) タンディッシュ内容銅中介在物の浮上分離挙動を支配する因子は、主に溶銅の平均滞留時間  $T$ 、淀み率  $\alpha$  及びペクレ数  $u_x L/D$  である。

#### (参考文献)

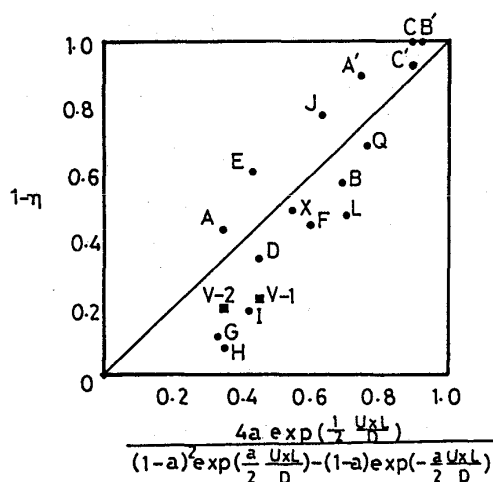
森、小林、小舞、沢田、大橋：鉄と銅 71 (1985) s 260



**Fig.10 Comparison of  $\eta$**



**Fig.11 Comparison of  $\eta$**



**Fig.12 Comparison of  $\eta$**