

## 流動解析による浸漬ノズル詰まりの検討

## Numerical Analysis Study for Clogging Behavior of Immersion Nozzle

岡田 信宏\*  
Nobuhiro OKADA舟金 仁志  
Hitoshi FUNAGANE藤 健彦  
Takehiko TOH

## 抄 録

アルミキルド鋼の連続 casting では、浸漬ノズル内にアルミナが付着するため、溶鋼流路が閉塞していき、鋳型内流動にも悪影響を及ぼすという問題が発生する。耐火物への非金属介在物の付着は、耐火物と溶鋼の反応機構などが研究されているが、溶鋼流動による付着を、数値解析モデルを用いて検討を行った。微細な非金属介在物粒子が、ノズル内の乱流において壁面に付着するには、乱流拡散による粘性底層への侵入が必須であるため、乱流拡散に基づいたモデルを用いて計算を行った。結果、スライディングゲート近傍は粘性底層厚みを考慮した流速依存のモデルによる再現性が良いが、吐出孔の閉塞が再現できなかった。吐出孔の閉塞は Linder モデルまたは Oeters モデルが適していることが明らかとなった。

## Abstract

In continuous casting of aluminum killed steel, alumina adheres to the immersion nozzle, causing the problem that the molten steel flow path closes and adversely affects the flow in the mold. The adhesion of inclusions to refractories had been studied for the reaction mechanism between the refractories and the molten steel. In this study, we investigated the adhesion due to molten steel flow using a numerical analysis model. In order for micro-inclusions to adhere to the wall surface in the turbulent flow in the immersion nozzle, it is essential to pass into the viscous bottom layer by turbulent diffusion, so numerical analysis were conducted using a model based on the turbulent diffusion. As a result, near the sliding gate, nozzle clogging is represented by the velocity-dependent model, but the clogging of the outlet port could not be represented. Linder model and the Oeters model could be represented the clogging of the outlet port.

## 1. 緒 言

鋼の連続 casting では、タンディッシュから浸漬ノズルを介して鋳型内に溶鋼が注入される。鋳型内の溶鋼流動は、鋳片の品質への影響が大きく、浸漬ノズルを通過する溶鋼の流動が安定していることが望ましい。しかしながら、アルミキルド鋼の連続 casting では、長時間の casting を行うと浸漬ノズル内にアルミナなどの非金属介在物（以後、介在物）が付着し、溶鋼流路が閉塞していき、鋳型内流動にも悪影響を及ぼし、鋳片の品質が悪化するという問題が発生する。

この浸漬ノズルの閉塞メカニズムについては、数多くの研究が実施されている。初期の研究では、連続 casting に使用後の浸漬ノズルを調査し、浸漬ノズルの耐火物と付着物を評価した結果について報告されている<sup>1)3)</sup>。笹井らは、浸漬ノズルの材質であるシリカを含有するアルミナグラファイ

トと溶鋼との反応機構を解明するために基礎的な実験を行い、その反応機構を報告している<sup>4)</sup>。

また、浸漬ノズルへのアルミナの付着は、耐火物近くの溶鋼流動も影響があると考えられている。Singh は、溶鋼中の懸濁介在物が耐火物壁面に付着し堆積するメカニズムを報告している<sup>5)</sup>。このモデルでは、濡れ性や表面張力の作用を考慮しているが、耐火物壁面付近での介在物移動過程を考慮していない。谷口らは、介在物付着のモデル実験を行い、耐火物壁面近傍における速度勾配により発生する揚力が作用するメカニズムを報告している<sup>6)</sup>。谷口らのモデルでは、Rubinow-Keller<sup>7)</sup>と Saffman<sup>8)</sup>による理論から壁面への介在物の付着速度を評価したが、下降流中の介在物は壁面から離れる傾向となり、付着現象を説明することができなかった。向井らは、上述したモデルでは、数  $\mu\text{m}$  程度の微少なアルミナ粒子が、浸漬ノズル中の溶鋼流れ場に

\* 先端技術研究所 数理科学研究部 主幹研究員 工学博士 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

において、耐火物壁まで到達し付着する過程を説明することが難しいため、乱流拡散による移動に着目した介在物付着モデルを提案した<sup>9)</sup>。壁面への粒子の付着を乱流拡散が支配的であると考えたモデルは、Linder<sup>10)</sup>やOeters<sup>11)</sup>からも報告されている。

連続鋳造の数値解析モデルは、Thomasらがレビューしているように<sup>12)</sup>、タンディッシュや浸漬ノズルも含め、近年比較的詳細な計算が可能となってきている。しかしながら、浸漬ノズル内の溶鋼流動は、加藤らが報告しているようにアルゴンガスやスライディングゲートの影響を受け、ガス溜まりを伴った複雑な流れ場となっている<sup>13)</sup>。スライディングゲートやストッパーなどの流量制御装置を正確に考慮することや、アルゴンガスの吹き込みによる気液2相流れを考慮した詳細な流体解析は、現在においても困難な状態である。例えば、Guitierrez<sup>14)</sup>らはSaffman力を考慮したモデルによりタンディッシュから浸漬ノズルの溶鋼流れの流体解析を行い、上ノズルへのアルミナ付着速度を検討しているが、スライディングゲートやアルゴンガスは考慮されていない。

このように、浸漬ノズル内の気泡や溶鋼流動を正確に、数値解析を行うことは未だ不可能ではあるが、本検討では、アルゴンガスは考慮せず、スライディングゲートや吐出孔形状を考慮したモデルにおいて、数値解析によるノズル閉塞の検討を実施した。

## 2. 数学モデル

### 2.1 流体解析モデル

流体解析は、商用の流体解析ソフトウェアであるANSYS-FLUENT<sup>®</sup>を用いて計算を行った。流体解析の支配方程式を式(1)～式(3)に示す。式(1)は質量保存則であり、式(2)は運動量の輸送方程式である。式(2)の左辺第2項は運動量の移流項であり、1次精度上流差分法を使用した。式(2)の右辺第2項は粘性項であり、内訳は式(3)に示す通りである。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right) \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ は比重、 $\vec{v}$ は流速ベクトル、 $p$ は圧力、 $\vec{g}$ は重力加速度ベクトル、 $\mu$ は粘性、 $I$ は単位行列、 $T$ は転置行列を示す。

浸漬ノズル内の溶鋼流れは乱流であり、乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた。 $k$ は乱流エネルギー、 $\epsilon$ は乱流エネルギー散逸速度であり、式(4)と式(5)に示されるように計算される。

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (k) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \epsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

ここで、 $\mu_t$ は乱流粘性であり、式(6)として算出される。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$G_k$ は乱流エネルギー生成速度であり、標準モデルの係数は  $C_{1\epsilon}=1.44$ ,  $C_{2\epsilon}=1.92$ ,  $\sigma_\epsilon=1.3$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $C_\mu=0.09$  である。

介在物濃度を  $N$ 、介在物の移動速度を  $\vec{u}_p$  として、式(7)に示す輸送方程式から、ユーザーサブルーチンを作成して計算を行った。 $V_T$ は介在物の耐火物壁面への付着速度であり次節に説明する。

$$\frac{\partial}{\partial t} (N) + \nabla \cdot (\vec{u}_p N) = -V_T \quad (7)$$

溶鋼中の介在物は剛体粒子と仮定し、その移動速度  $\vec{u}_p$  は式(8)から算出する。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{v} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (8)$$

ここで、 $\rho_p$ は粒子の比重、 $\tau_r$ は緩衝時間であり、式(9)として表される。

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} + \frac{24}{C_d \text{Re}} \quad (9)$$

$d_p$ は粒子直径、 $\text{Re}$ は粒子レイノルズ数であり、式(10)で示される。 $C_d$ は粒子の抵抗係数であり  $\text{Re}$  に依存する。

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{v}|}{\mu} \quad (10)$$

式(8)に示す粒子速度が、定常状態に達したものを終端速度といい、 $\text{Re}$ により式(11)～式(13)のように場合分けされる<sup>15)</sup>。

$$\text{Stokes 則 } (\text{Re} < 2) \quad u_p = \frac{g(\rho_p - \rho)d_p^2}{18\mu} \quad (11)$$

$$\text{Allen 則 } (2 < \text{Re} < 500) \quad u_p = \left( \frac{4g^2(\rho_p - \rho)^2}{225\mu\rho} \right)^{1/3} d_p \quad (12)$$

$$\text{Newton 則 } (\text{Re} < 500) \quad u_p = \left( \frac{4g(\rho_p - \rho)}{3 \times 0.44\rho} d_p \right)^{1/2} \quad (13)$$

Saffman力  $F_s$  は式(14)として表され、Saffman力を考慮した終端速度は、式(15)となる<sup>6,8)</sup>。

$$F_s = 1.62 \sqrt{\rho\mu} u_p \sqrt{\left| \frac{\partial v}{\partial n} \right|} d_p^2 \quad (14)$$

$$u_p = \frac{1.62\mu \sqrt{\rho \left| \frac{\partial v}{\partial n} \right|} d_p}{3\pi\sqrt{\mu}} \quad (15)$$

式(9)から計算すると、溶鋼中のアルミナ粒子の緩衝時間は短く、比較的速やかに終端速度に到達する。よって、計算速度を短縮するために、介在物粒子の移動速度は、溶鋼流速から上記終端速度を加えたものとして計算を行った。

図1に、浸漬ノズルの介在物付着分布の模式図を示す。溶鋼流れによる介在物の付着は、溶鋼流れの主流が耐火物壁面から剥離する箇所に多く発生すると考えられる<sup>16,17)</sup>。本検討では、溶鋼流れの剥離が生じやすいスライディングゲートと吐出孔近傍を対象として計算を行った。

図2は、計算を行った形状と数値解析に用いた計算メッシュを示す。ノズル内径を100mmとし、スライディングノ

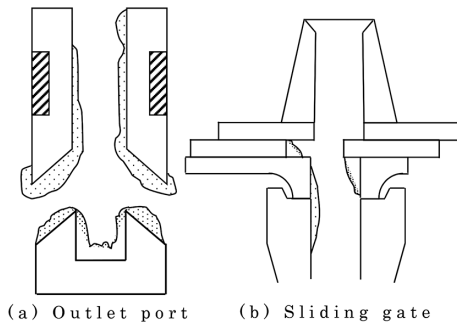


図1 ノズル閉塞の模式図  
Schematic image of nozzle clogging

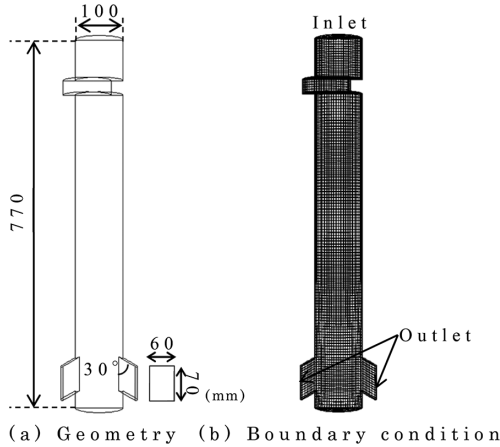


図2 計算形状と計算メッシュ  
Calculation geometry and mesh

表1 計算条件  
Calculation conditions

Molten steel	
Flow rate	2.4 ton/min
Density	7000 kg/m <sup>3</sup>
Viscosity coefficient	0.006 Pa·s
Alumina particle	
Diameter	100 μm
Density	3990 kg/m <sup>3</sup>
Concentration	40 ppm

ノズルの開度は75%とした。ノズル上端から一様な流れが流入するとし、吐出孔先端は自由流出条件とした。吐出孔は高さ70mm、幅60mmとし、角度は下向き30°とした。表1に示す条件で非定常解析を行った。

## 2.2 介在物付着モデル

図3は、Linderによる介在物の付着メカニズム<sup>10)</sup>の説明から、耐火物壁面付近の流れの様子を模式的に示す。浸漬ノズルの内径は50~100mm程度が一般的であり、溶鋼流入量は0.5~6.0ton/min程度である。よって、浸漬ノズル内のレイノルズ数Reは、内径0.08mを代表長さとし、表1で示した値を用いると、 $Re=1.06 \times 10^5$ となり完全に乱流状態である。乱流場においても、壁面近傍では、壁面摩擦の影響により、流速が低下し、層流域を形成する。この層

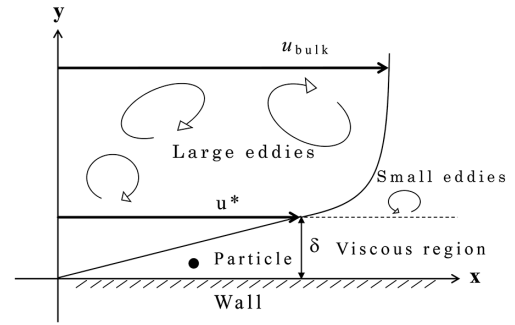


図3 壁面付近の流動の模式図  
Schematic illustration of flow situation close to wall

流域は、層流底層や粘性底層と呼ばれる。この粘性底層の厚み $\delta$ は式(16)から得られる<sup>18)</sup>。ここで、 $\nu$ は溶鋼の動粘性係数であり、 $u^*$ は摩擦速度である。

$$\delta = 5.0\nu/u^* \quad (16)$$

摩擦速度 $u^*$ は、式(17)となる。ここで、 $\tau_w$ は壁面摩擦応力、 $c_f$ は平均摩擦係数である。式(16)と式(17)から粘性底層の厚みは、沖合の流速の1/2乗に半比例する。

$$u^* = (\tau_w/\rho)^{1/2} = (c_f/2)^{1/2} u_{\text{bulk}}^{1/2} \quad (17)$$

Linderは、乱流拡散から、介在物粒子が粘性底層に侵入すれば耐火物壁面に付着すると考え、壁面への付着速度 $V_T$ を式(18)のようにモデル化している。

$$V_T = 0.01d_p \frac{\tau_w}{\rho\nu} \quad (18)$$

同様にOetersも乱流拡散により粘性底層に侵入した介在物粒子の壁面への付着速度を式(19)として算出している。

$$V_T = \frac{0.62\epsilon^{3/4} \times 10^{-2}}{\nu^{5/4}} \left( \frac{d_p}{2} \right)^2 \quad (19)$$

また、向井らは粘性底層に侵入した介在物粒子は、耐火物壁面付近の濃度勾配による界面張力勾配の作用により、壁面へ泳動する機構を報告している<sup>19)</sup>。

本検討では、耐火物壁面への介在物の付着モデルとして次の4つのモデルを検討した。

- 1) 付着速度を沖合の流速の1/2乗に半比例するモデル
- 2) 流速の1/2乗に半比例し、乱流粘性に比例するモデル
- 3) Linderモデル
- 4) Oetersモデル

1)のモデル(以後、モデル1)は流速が遅いほど、粘性底層は厚くなり、介在物が耐火物に付着しやすくなるという考えに基づいたモデルである。2)のモデル(以後、モデル2)は、モデル1に、乱流粘性が高いほど、粘性底層に侵入しやすい効果を追加したモデルである。LinderモデルとOetersモデルは、坩堝中で回転させた耐火物への試験結果と数値解析結果が比較されており、Linderモデルを用いた計算結果の付着介在物量の分布が実験結果に近いことが報告されている<sup>20,21)</sup>。

数値解析モデルにおいて、前述したモデルにより付着速度を算出するための諸量を得ることが可能である。具体的な計算方法として、時間発展式に非定常解析を実施し、介

在物濃度の移流拡散を計算しながら、タイムステップ毎に付着速度を算出する。介在物の付着が生じたセルにおいて、付着した介在物の体積を積算していき、セルが充満した時点で埋め込み境界を用いて固体壁として取り扱うことにより、流路の閉塞を再現した。

### 3. 数値解析結果

図4は、モデル1の計算結果として、3600s後の介在物付着分布と溶鋼流速分布を示す。モデル1の付着速度は、式(16)に示すように、壁面に接するセルの流速 $v$ の1/2乗とアルミナ濃度 $N$ に比例すると仮定したモデルである。付着速度の係数 $\alpha$ は0.1として計算を行った。

$$V_T = \alpha N \frac{1}{\sqrt{v}} \quad (20)$$

図5は、初期形状における流速分布と、3600s後に介在物付着が進行した状態での流速分布を示す。初期 $t=0$ の壁面に介在物が付着していない状態では、図5(a)に示すように、溶鋼はスライディングゲート開部を真っ直ぐに流



図4 モデル1によるノズル閉塞の計算結果  
Calculation result of nozzle clogged in model 1

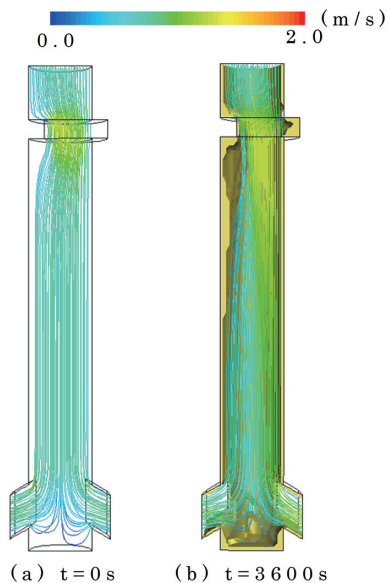


図5 モデル1の浸漬ノズル内の流速分布  
Velocity distribution in immersion nozzle of model 1

れ、スライディングプレート空隙部は流速が停滞し、ゲート閉塞部の下流側でも流れが停滞している領域がある。

モデル1では、流速が遅い部分でアルミナの付着が進行するため、 $t=3600s$ ではプレート空隙部とゲート閉塞部に大量のアルミナが付着する結果となった。また、吐出孔近傍の介在物付着量は比較的少なく、ノズル下端の凹み部(ウエル部)に介在物が堆積している。吐出孔周辺への付着が少ないことを除けば、実機のノズル閉塞に近いと考えられる。

図6は、モデル2を適用した場合の介在物付着状況を示す。モデル1では、付着速度が流速とアルミナ濃度のみ依存し、乱流度合の影響が考慮されていない。モデル2は、流速とアルミナ濃度の影響に加えて、乱流粘性に比例すると仮定したモデルであり、付着速度を式(21)に示す。係数 $\alpha$ は、モデル1と付着量が同定度となるように調整した。

図7は、介在物が付着した状態での流速分布を示す。モデル2では、乱流粘性の影響を考慮したが、考慮してい

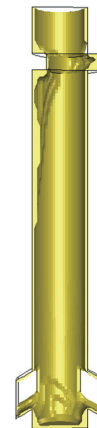


図6 モデル2によるノズル閉塞の計算結果  
Calculation result of nozzle clogged in model 2

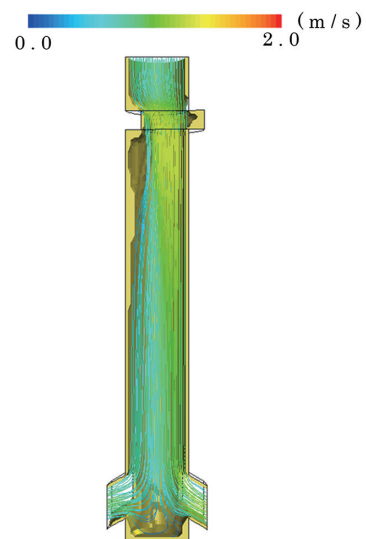


図7 モデル2の浸漬ノズル内の流速分布  
Velocity distribution in immersion nozzle of model 2



ないモデル1と同等の結果となった。これは、ノズル内は全体的に乱流度合が高く、乱流粘性の分布に大差ないことが原因である。本検討では、乱流モデルとして最もスタンダードな  $k-\epsilon$  モデルを用いたが、今後乱流モデルの影響は検討する必要がある。

$$V_T = \alpha N \frac{\mu_t}{\sqrt{v}} \quad (21)$$

次に Linder モデルおよび Oeters モデルを用いた場合の計算結果を図8に示す。図9は、Linder モデルおよび Oeters モデルにおける介在物が付着した状態での流速分布を示す。これらのモデルでは、乱流エネルギー消散速度の高い箇所に介在物の付着が進行しており、モデル1とモデル2では再現できなかった吐出孔周辺の付着が進行している。ただし、介在物の付着が多いといわれているスライディングゲート中央の空隙部には付着が少ない結果となった。

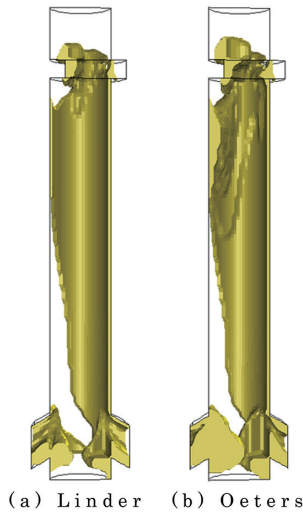


図8 Linder モデルと Oeters モデルによるノズル閉塞の計算結果  
Calculation result of nozzle clogged in Linder model and Oeter model

図10に、検討を行ったノズル閉塞モデルの計算結果の比較を示す。スライディングゲートの上部、中央、下部における水平断面と吐出孔近傍の拡大図を示す。モデル1とモデル2では、スライディングノズル中央部の空隙部に介在物付着が進行しているが、Linder モデルと Oeters モデルの空隙部の付着量が少ない。一方、モデル1とモデル2では吐出孔周辺の付着が進行していないが、Linder モデルと Oeters では吐出孔の閉塞が明確に進行している。

実機におけるノズルの閉塞は、図1に示すように進行すると考えられており、スライディングゲート周辺はモデル1またはモデル2の再現性が良く、吐出孔周辺は Linder モデルと Oeters モデルの再現性が良い結果となった。



図9 Linder モデルと Oeters モデルによる流速分布  
Distribution of fluid flow in Linder model and Oeter model

		Model 1	Model 2	Linder	Oeters
Sliding gate	Upper				
	Center				
	Lower				
Outlet port					

図10 各モデルにおけるノズル閉塞状態の比較  
Comparison of nozzle clogged in calculation models

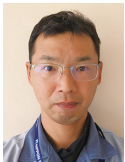
## 4. 結 言

連続鋳造機の浸漬ノズル閉塞に関して、溶鋼流速による介在物の付着を数値解析により検討を行った結果、以下の知見を得た。今後、実機ノズル閉塞状態の調査と数値解析結果との比較検討を進めることにより、ノズル閉塞を評価可能なモデルを完成させることが可能と考えられる。

- 1) スライディングゲート周辺の流速停滞部の付着は、流速の平方根に反比例するモデルによる再現性が良い。ただし、このモデルでは吐出孔の閉塞を再現できない。
- 2) Linder モデルと Oeters モデルは、吐出孔閉塞を上手く再現することはできるが、スライディングゲートの空隙部の付着量は少ない。

### 参考文献

- 1) Kaneko, T., Ohno, T., Mizoguchi, S.: Tetsu-to-Hagané. 66, S868 (1980)
- 2) Fukuda, Y., Ueshima, Y., Mizoguchi, S.: ISIJ Int. 32, 164 (1998)
- 3) Ogibayashi, S., Uchimura, M., Maruki, Y., Mizukoshi, D., Tanizawa, K.: Proceedings of Steelmaking Conf. AIME, 1992, p.337
- 4) Sasai, K., Mizukami, Y., Yamamura, H.: Tetsu-to-Hagané. 79, 1067 (1993)
- 5) Singh, S.N.: Metall. Trans. 5, 2165 (1974)
- 6) Taniguchi, S., Kikuchi, A.: Tetsu-to-Hagané. 78, 423 (1992)
- 7) Rubinow, S.I., Keller, J.B.: J. Fluid Mech. 11, 447 (1961)
- 8) Saffman, P.G.: J. Fluid Mech. 22, 385 (1965)
- 9) Mukai, K., Tsujino, R., Sawada, I., Zeze, M., Mizoguchi, S.: Tetsu-to-Hagané. 85, 307 (1999)
- 10) Linder, S.: Scand. J. Metall. 3, 137 (1974)
- 11) Oeters, F.: Metallurgy of Steelmaking. Düsseldorf, Verlag Stahleisen, 1994, p.323
- 12) Thomas, B.G., Zhang, L.: ISIJ Int. 41, 164 (2001)
- 13) Kato, T., Hara, M., Muto, A., Hiraki, S., Kawamoto, M.: ISIJ Int. 47, 840 (2007)
- 14) Gutierrez, E., Garcia-Hernandez, S., Barreto, J.J.: ISIJ Int. 56, 1394 (2016)
- 15) 水科篤朗, 桐榮良三: 化学工学概論. 東京, 産業図書, 2012, p.230
- 16) Sambasivam, R.: Ironmaking Steelmaking. 33, 439 (2006)
- 17) 塚口友一, 林浩史, 栗本英典, 横谷真一郎, 丸川雄浄, 田中敏広: Tetsu-to-Hagané. 95, 33 (2009)
- 18) 城塚正, 平田彰, 村上明彦: 化学技術者のための移動速度論. 東京, オーム社, 1966, p.147-158
- 19) Mukai, K., Okuno, H., Tsujino, R., Ogata, K.: CAMP-ISIJ. 7, 213 (1997)
- 20) Okayama, A., Okada, N., Takatani, K.: CAMP-ISIJ. 25, 979 (2012)
- 21) Okada, N., Okayama, A., Takatani, K.: CAMP-ISIJ. 25, 980 (2012)



岡田信宏 Nobuhiro OKADA  
先端技術研究所 数理科学研究部  
主幹研究員 工学博士  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



藤 健彦 Takehiko TOH  
日鉄テクノロジー(株)  
富津事業所 資源・プロセスソリューション部長  
環境科学博士



舟金仁志 Hitoshi FUNAGANE  
先端技術研究所 数理科学研究部  
主任研究員 工学博士