

(論文)

粉体インジェクション法における数値解析およびモデル実験による粒子侵入条件の検討

Numerical and Model Analysis of Conditions for Particles to Penetrate a Gas-liquid Interface in Powder Injection Refining



織田 剛^{*}(工博)
Dr. Tsuyoshi Oda



井上 健^{**}
Takeshi Inoue



星川郁生^{***}(工博)
Dr. Ikuo Hoshikawa

Powder injection refining is used for the dephosphorization and desulfurization of hot metal in the steel making process, where the injected powder must penetrate the interface of the hot metal to contribute to a chemical reaction. In this paper, the conventional theoretical critical condition for a single particle is reconfirmed by CFD simulation by the Level Set Method. Following this, a new empirical formula to calculate conditions for a powder mass to penetrate into a liquid is derived statistically through experiments.

まえがき = 当社加古川製鉄所では、1977年に混銑車インジェクション脱硫設備を、1985年には約20%の溶銑を対象に混銑車インジェクション脱りん設備を導入し、さらに1999年にはこれらの設備の増強により、全量溶銑予備処理体制を構築している。

このようなインジェクション処理において反応効率の向上をはかるには、吹込んだ粉体を気泡から溶銑中へ侵入・分散させることが重要である。この課題に対し、従来から多くの報告^{1)~7)}があるが、特にEnghら^{8),9)}、小沢ら¹⁰⁾は単一粒子の液体金属への侵入挙動を力学的に扱った理論式を報告している。また、当社でも濡れ性の異なる粉体を500kg炉溶銑中へ吹込み、侵入挙動を調査¹¹⁾している。図1に溶銑との接触角が約132°のCaO粉体、約50°のCaO-SiO₂粉体を吹込んだ場合の溶銑中全酸素濃度の推移¹¹⁾を示す。溶銑と濡れにくいCaO粉体を吹込んだ場合は大きな変化は認められないが、濡れやすいCaO-SiO₂粉体を吹込んだ場合は大幅に全酸素濃度が増加している。これは、濡れにくいCaO粉体は気泡とともに浮上し、濡れやすいCaO-SiO₂粉体は気泡から溶銑中

に侵入・分散したためと考えられる。ただし、これらの結果は溶銑実験であるが故に定性的な現象把握にとどまっている。本研究では、まず数値解析による単一粒子の液体への侵入挙動理論式の確認を行った後、水モデル実験から液中へ連続インジェクションした粉体の侵入・分散挙動の定量的な整理を試みたので報告する。

1. 数値計算手法

1.1 基礎式

非圧縮粘性流体の連続の式と運動量保存式および標位関数移流方程式^{12),13)}をそれぞれ示す。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + (\mu \nabla^2) \mathbf{u} + (\sigma \nabla \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{g} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \phi = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 \mathbf{u} ：速度ベクトル、 t ：時間、 ρ ：密度、 p ：圧力、 μ ：粘性係数、 σ ：表面張力、 κ ：曲率、 ϕ ：液相界面の標位関数、 \mathbf{n} ：液相界面の法線ベクトル、 \mathbf{g} ：表面張力の重み付き分布関数、 g ：重力加速度。

非スターガード格子を採用した有限体積法を用いて式(1)~(3)を解く。移流項の空間微分には二次精度ENO法、拡散項の空間微分には中心差分法、移流項の時間積分にはAdams-Bashforth法、拡散項の時間積分にはCrank-Nicolson法を用いる。流れは層流であると仮定して、乱流モデルは用いていない。

1.2 表面張力と接触角の取扱い

表面張力にはCSFモデル¹⁴⁾を用いる。接触角を与える場合には、壁面内部に接触角と同一勾配を持つ気液界面を仮想的に発生させる。斜面を落下する液滴の例を図2に示す。表面張力を作用させる気液界面の分布幅内

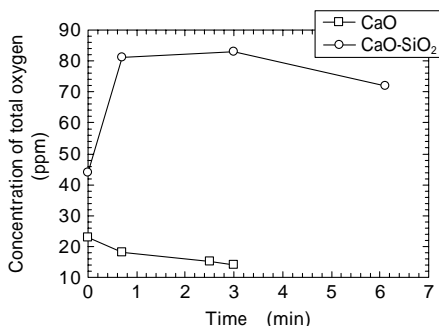


図1 各粉体をインジェクションした場合の溶銑中全酸素濃度推移
Fig. 1 Total oxygen concentration in molten steel during powder injection refining

^{*}技術開発本部 機械研究所 ^{**}鉄鋼部門 神戸製鉄所 製鋼部 ^{***}鉄鋼部門 加古川製鉄所 製鋼部

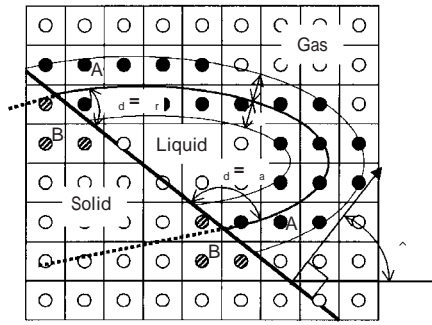


図2 斜面上の液滴周り格子配置
Fig. 2 Schematic grid distribution around droplet on incline

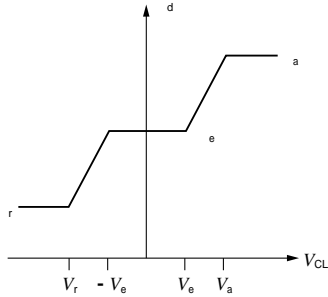


図3 接触角モデル
Fig. 3 Model of dynamic contact angle

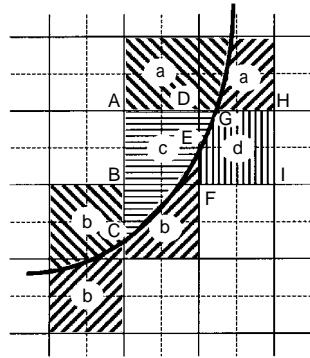


図4 カットセル法
Fig. 4 Cut cell method

に位置するセルを黒丸で、それ以外のセルを白丸で示している。計算領域内の固体壁面にも標位関数を定義しており、これを標位関数 \hat{d} で記す。固気液の三相が接する点における気液界面の単位法線ベクトル \hat{n}_A 、速度ベクトル \hat{u}_A 、壁面の単位法線ベクトル \hat{n}_A 、壁面の単位接線ベクトル \hat{s}_A を、この点に最も近い気体側セル A の中心点の状態で近似する。壁面内部に接触角と同一勾配を持つ気液界面を仮想的に発生させるために、壁面内部のセル B 群に対して以下の式 (4) による補正を行う。

$$\left. \begin{aligned} x &= \cos(\hat{d} + \text{sgn}(\hat{s}_A \cdot \hat{n}_A) d) \\ y &= \sin(\hat{d} + \text{sgn}(\hat{s}_A \cdot \hat{n}_A) d) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

$$V_{CL} = \text{sgn}(\hat{s}_A \cdot \hat{n}_A) \hat{s}_A \cdot \hat{u}_A$$

接触角 d には、平衡接触角 e 以外に前進接触角 a と後退接触角 r という動的接触角がある。本報では、図3に示すような接触点の移動速度 V_{CL} と関連づけた動的接触角のモデル化¹⁵⁾を用いる。ここでは $V_a = -V_r = 2V_e = 0.1(\text{m/s})$

1.3 カットセル法

直交格子系において固体粒子形状を表現するために、本報では図4に示すような T. Ye ら¹⁶⁾が提案する一次関

数と二次関数の組合わせからなる二次精度カットセル法を採用する¹³⁾。

2. 計算手法の検証

2.1 濡れ性を考慮した衝突液滴の変形問題

表1に示す各液滴衝突条件での液滴形状変化について、実験結果¹⁶⁾と本数値解析手法による計算結果の比較を行った。Case 1~5における形状の比較を図5~図8に示す。図6~8では、横軸に無次元化時間を、縦軸に衝突液滴の広がり高さを示している。実験結果と計算結果はよく一致しており、本計算手法により濡れ性の影響を正確に表現できることが分かる。

2.2 カットセル法により表現された円柱周りの流れ

カットセル法を用いて表現した円柱周りの流れを取上げる。x方向とy方向ともに円柱直径の30倍を計算領域とし、216 × 180セルの不等間隔格子で分割する。

表1 実験条件¹⁶⁾
Table 1 Experimental conditions¹⁶⁾

Case	1	2	3	4	5
r_0	1.88	1.85	1.86	1.86	1.87
v_0	1.50	2.09	1.49	1.58	3.76
Re	3,010	4,130	3,320	3,130	7,390
We	58.4	111	57.5	64.1	364
Bo	0.478	0.463	0.472	0.468	0.472
a	60	60	70	92	92
r	22	22	37	60	60
e	34	34	54	76	76

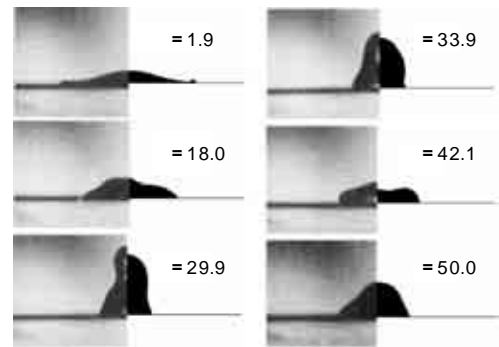


図5 液滴形状における本計算結果(右)と実験結果(左)の比較
Fig. 5 Comparison of droplet shape between current calculation (right) and experimental results (left)

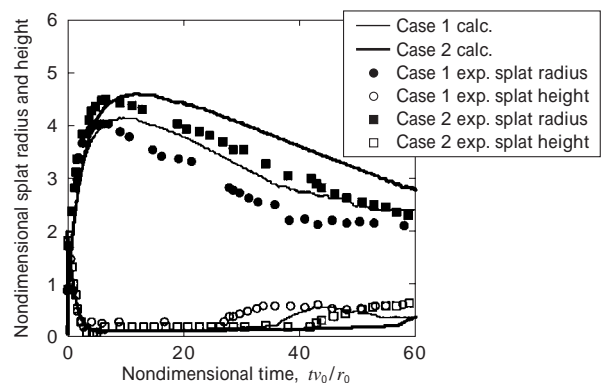


図6 Case 1, 2の比較
Fig. 6 Comparison of case 1, 2

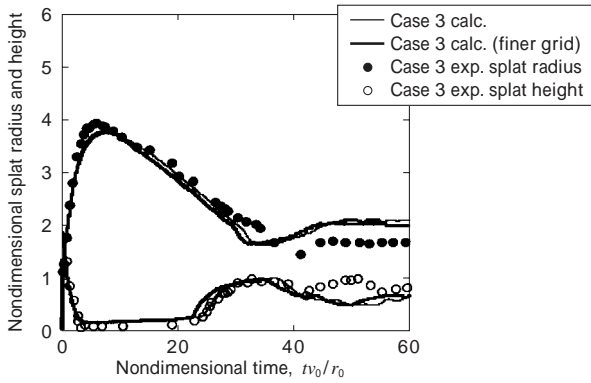


図7 Case 3 の比較
Fig. 7 Comparison of case 3

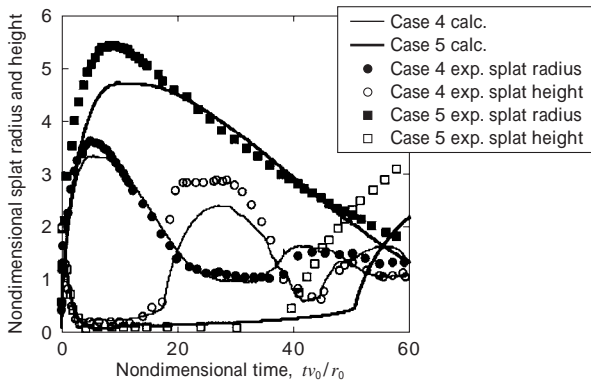


図8 Case 4, 5 の比較
Fig. 8 Comparison of case 4, 5

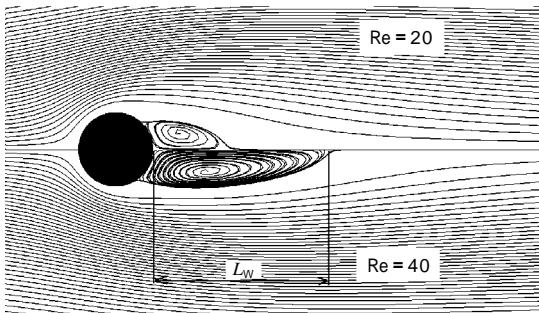


図9 Re 20 と Re 40 での流線
Fig. 9 Streamline for Re. 20 and Re. 40

図9には後流渦長さを、図10には揚力係数と抗力係数の計算結果をそれぞれ示す。従来からの実験結果および計算結果と、今回の計算との比較を表2に示す。T. Ye¹⁶⁾らの計算結果と比較すると2~4%抗力係数 C_D が小さいが、実験結果や計算結果から得られた抗力係数の分布範囲内である。後流渦長さ L_w とストローハル数 S_t で

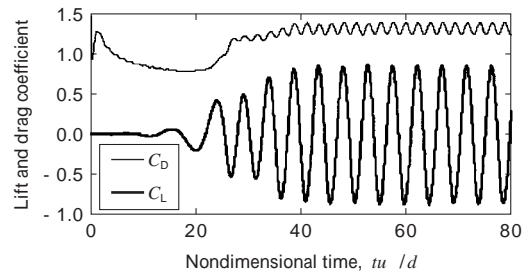


図10 Re 300 での揚力係数と抗力係数の変化
Fig.10 Variation of lift and drag coefficient for Re. 300

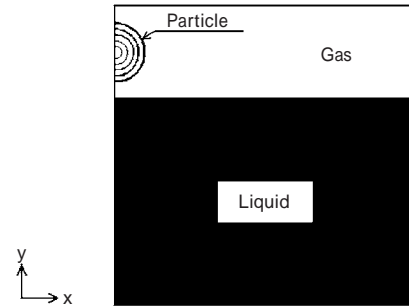


図11 計算領域
Fig.11 Computation domain

は良く一致している。

2.3 単一粒子液面衝突の数値解析

粉体インジェクション法における粒子侵入条件の理論的研究としては、Engh らの理論^{8),9)}が有名である。Engh らによると、ある速度を持って液面に衝突する粒子が流体抵抗と表面張力にうち勝って侵入するための条件は、式(5)によって求めることができる。

$$We_c = 8 \left(1 - \exp\left(-\frac{3}{4} * \right) \right) \cos \theta - 1 + \frac{8}{3} * \dots (5)$$

ここで、 $We_c = \frac{\rho_l v_c^2 r_s}{\sigma}$ 、 $* = \frac{\rho_s}{\rho_l}$ 、 ρ_l : 液相密度、 ρ_s : 固相密度、 v_c : 粒子の液面への臨界侵入速度、 r_s : 粒子半径。

スチロール粒子を用いた条件を取上げて、液面に衝突する単一粒子挙動の数値解析を行う。気相を空気、液相を水として、それぞれの常温での物性値を用いる。粒子の比重は1.02であり、水とスチロール間の接触角は87°である。粒子形状は、直径65(μm)の完全な球形とする。

固体粒子界面でカットセルを行うことにより、粒子形状を正確に表現している。計算はy軸を対称軸とする軸対称二次元で行う。図11に示す一辺325(μm)の正方計算領域を100×100セルの等間隔格子で分割する。粒子にはy方向に初速度1.0(m/s)と1.2(m/s)を与えて

表2 平均抗力係数、後流渦長さ、ストローハル数の比較

Table 2 Comparison of mean drag coefficient, length of wake bubble and Strouhal number

Study	Reynolds number 20		40		80		300	
	C_D	L_w/d	C_D	L_w/d	C_D	S_t	C_D	S_t
Tritton	2.22	-	1.48	-	1.29	-	-	-
Weiselsberger	2.05	-	1.70	-	1.45	-	1.22	-
Dennis and Chang	2.05	0.94	1.52	2.35	-	-	-	-
Fornberg	2.00	0.91	1.50	2.24	-	-	-	-
Mittal and Balachandar	-	-	-	-	-	-	1.37	0.21
Williamson	-	-	-	-	-	0.15	-	0.20
T. Ye ¹⁶⁾	2.03	0.92	1.52	2.27	1.37	0.15	1.38	0.21
Present study	2.03	0.92	1.49	2.27	1.32	0.16	1.33	0.21

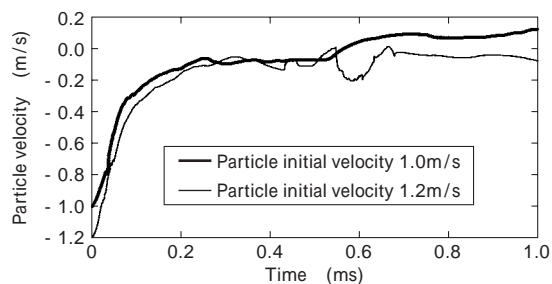


図12 粒子速度の時刻歴

Fig.12 Time history of particle velocity

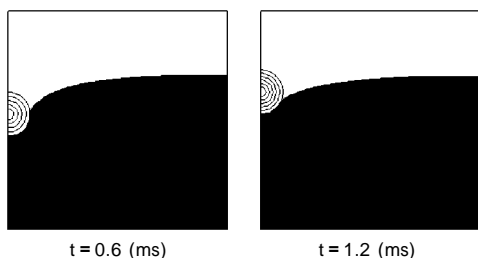


図13 初期速度 1.0m/s での粒子位置

Fig.13 Particle location in case of initial velocity of 1.0m/s

液面に衝突させる。式(5)によると臨界侵入速度は 1.16 (m/s)である。

粒子の速度変化は、周囲の流体から受ける圧力とせん断応力から運動方程式を解いて求める。表面張力は気液の界面のみに作用させ、固液界面には作用させていない。ただし、固気液の3相が接する点では接触角を考慮して気液界面の曲率を決定している。計算結果を図12と図13に示す。式(5)と同様に初速度 1.0(m/s)では

侵入できず、初速度 1.2 (m/s) で侵入できる結果が得られている。

3. 連続粒子の液面衝突問題への理論式拡張

これまでの検討から、十分精度を確認した数値解析と Engh らの理論式は一致しており、両者ともに十分信頼できることが確認できた。しかしながら、単一粒子が液面に衝突する理論式をそのまま多くの粒子が連続して液面に衝突する連続インジェクションに適用するには無理がある。そこで、本報では水モデル実験から単一粒子液面衝突の理論式を改良し、連続粒子の液面衝突問題へと拡張する。

3.1 実験方法

実験に用いた水モデル実験装置を図14に示す。エアと粉体を混合機で混合し、水槽内に吹込んでいる。実験条件を表3に示す。粉体の液中への侵入挙動に影響を与えると考えられるインジェクション条件である、(1)粉体吐出速度、(2)粉体粒径、(3)粉体とガスのスリップ比[粉体とガスの相対速度比]、(4)粉体と液体の濡れ性、の4項目について調査した。実験にはポリスチレン粉体を使用し、粉体吐出速度の影響はガス流量を 50 ~ 200ℓ/min の間の4水準で変化させることにより、粉体粒径の影響は5種類の粒径の粉体を使用することにより、また粉体とガスのスリップ比の影響はノズルの先端形状がストレートのもものと末広のもの2種類を使用することにより、それぞれ調査した。さらに、粉体と液体の濡れ性の影響は、テフロン粒子を水、あるいは界面活性剤

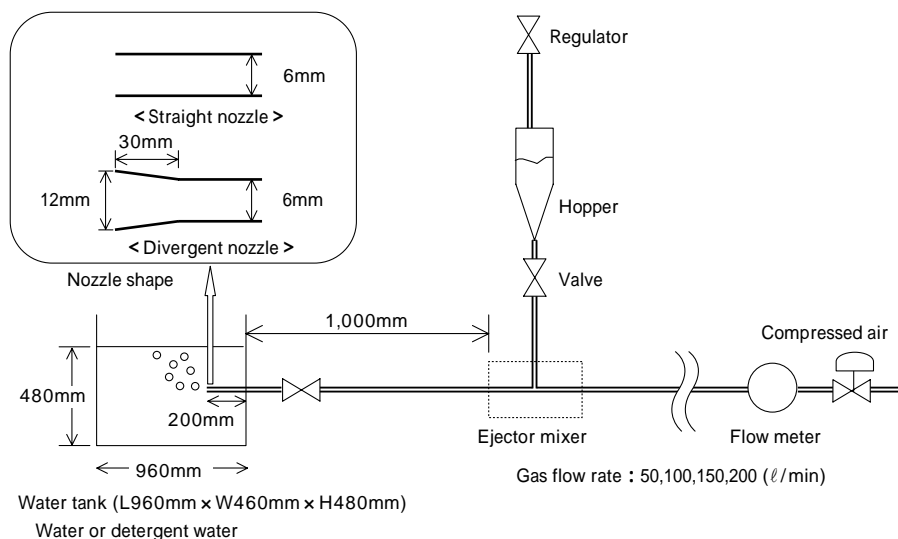


図14 水モデル実験装置

Fig.14 Water-model experimental apparatus

表3 実験条件

Table 3 Experimental conditions

Gas flow rate : 50,100,150,200 (ℓ/min)

Effects to be examined	Items	Material	Relative density (-)	Particle diameter (mm)	Contact angle (deg)		Nozzle shape
					Water	Detergent water	
(1) Particle discharge velocity		Poly-styrene	1.02	0.53, 0.76, 1.01, 1.26, 1.60	87	-	Straight
(2) Particle diameter							
(3) Slip ratio						-	Divergent
(4) Wettability		Teflon	2.3	0.044	115	40	Straight

を添加した水中へ吹込むことにより調査した。

3.2 実験結果

3.2.1 粉体吐出速度の測定（水モデル実験事前調査）

粉体の吐出速度を把握するために、ストレートノズルを用いてポリスチレン粉体を種々のガス流速においてロードセルに吐出し、その荷重と粉体の質量流量から、粉体そのものの吐出速度とガス流速の関係を調査した結果を図15に示す。ガス流速と粉体吐出速度は、ほぼ正比例の関係になっている。また、粒径が小さいほど粉体速度が大きくなる傾向が認められ、粉体吐出速度のガス流速に対する比率（スリップ比）は、約0.5である。

また、ノズル先端形状の影響を図16に示す。両者の粉体吐出速度はほぼ同じであり、ノズル先端を末広にしても吐出する粉体の速度は変化していない。

なお、以降の実験では、これらの関係を用いてインジェクション時のガス流速から粉体速度を定義する。

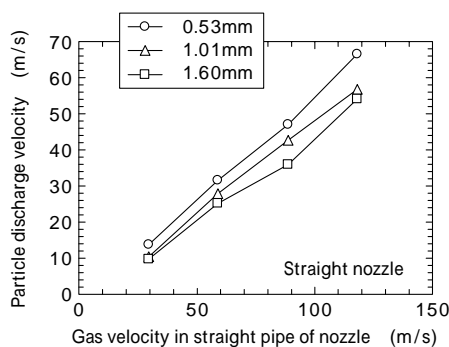


図15 ガス流速と粉体吐出速度の関係
Fig.15 Gas velocity vs. particle discharge velocity

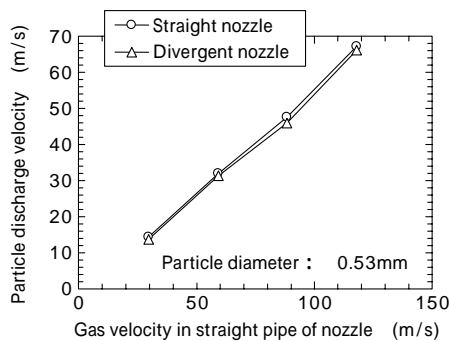


図16 粉体吐出速度に及ぼすノズル形状の影響
Fig.16 Effect of nozzle shape on particle discharge velocity

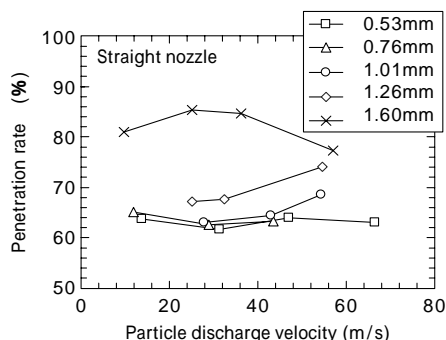


図17 侵入率に及ぼす粉体吐出速度の影響
Fig.17 Effect of particle discharge velocity on penetration rate

3.2.2 侵入率に及ぼす粉体吐出速度、粉体径、スリップ比の影響

ストレートノズルを用いて 0.53 ~ 1.60mm の粒径のポリスチレン粉体を水中へ吹込み、侵入率に及ぼす粉体吐出速度、粉体径の影響を調査した結果を図17に示す。粉体径が大きいほど、侵入率が大きくなる傾向が認められる。一方、粉体吐出速度については、系統的な傾向は認められない。

次に、ストレートノズルと末広ノズルを用いて 0.53 mm のポリスチレン粉体を水中へ吹込み、スリップ比の影響を調査した結果を図18に示す。ストレートノズルに比べ末広ノズルでは、侵入率が若干大きくなる傾向が認められる。図16の結果より、粉体吐出速度は直管部のガス流速のみで決まるため、いずれのノズルを使用しても同じである。一方、ガス吐出速度は、末広ノズルの場合、吐出部の孔径を 6mmから 12mm に拡大し、吐出孔断面積が4倍になっているため、ストレートノズルの1/4に減速しているはずである。したがって、ストレートノズルの場合は、吐出部においてスリップ比が約0.5であるのに対し、末広ノズルではその4倍にあたるスリップ比2になっていると推定され、末広ノズルで侵入率が大きくなったのは、ガスに対する粉体の相対速度が増加したためと考えられる。

3.2.3 侵入率に及ぼす濡れ性の影響

ストレートノズルを用いて、0.044mm のテフロン粉体を水、あるいは水+界面活性剤中へ吹込み、濡れ性の影響を調査した結果を図19に示す。先のポリスチレン粒子に比べ、粒径の小さな粉体を使用しているが、水

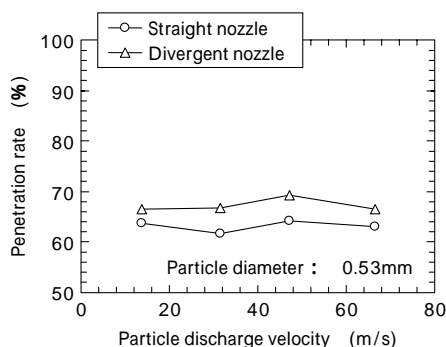


図18 侵入率に及ぼすスリップ比の影響
Fig.18 Effect of slip ratio on penetration rate

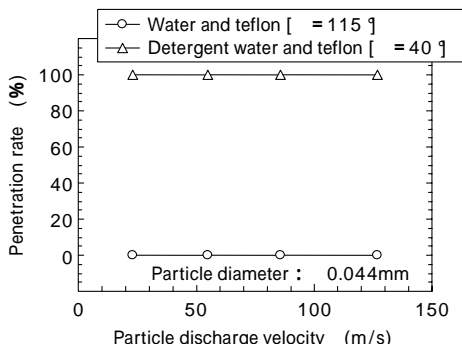


図19 侵入率に及ぼす濡れ性の影響
Fig.19 Effect of wettability on penetration rate

+界面活性剤中へ吹込んだ場合 [接触角 40°] は、テフロン粉体はほぼ全て侵入しているが、水中へ吹込んだ場合 [接触角 115°] は全く侵入しておらず、侵入率に及ぼす濡れ性の影響が大きいことがわかる。

3.3 実験式の導出

これまでの実験結果より連続粉体のインジェクション挙動を見積もる実験式を求め、各要因の影響を定量化する。実験式は小沢らの侵入条件式¹⁰⁾を基にしている。小沢らの式は Engh⁸⁾⁹⁾の式と基本的に同一であるが、粒子が液面に衝突する際にくぼみが発生した場合には、その影響を考慮できるように改良している。どちらも数mmの比較的大きな単一粒子の実験結果を基にしているため、ここでは本実験で得られた結果を用いて微粒子におけるパラメータを決定するとともに、連続粉体を対象とできるように粉体速度を統計的に取扱った。

まず、小沢らの単一粒子に関する侵入条件式を以下に示す。

$$We_c = \frac{4A}{C_D} \left[\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{3C_D}{\chi} \frac{c^* + 0.25}{c^*}\right) \right\} \frac{4(c^* + 0.25)}{3C_D} - 1 + \cos c^* + \frac{2G}{3A} (c^* - 0.5) \right] + 2 \quad (6)$$

ここで、 A ：表面張力にかかるくぼみが生じた場合の補正係数、 C_D ：液体から及ぼされる抗力係数、 G ：浮力と表面張力の比で $G = \frac{r_s}{c} \frac{1}{v_c}$ 、 c ：接触角、 $c^* = \frac{r_s}{c} \frac{1}{v_c}$ 、 v_c ：臨界侵入速度。 We_c は式(7)で表される臨界ウェーバー数。

$$We_c = \frac{r_s}{c} \frac{1}{v_c^2} \quad (7)$$

本実験では粉体を高速で吹込んでおり重力の影響は小さく、式(6)の重力項を無視すると式(8)を得る。

$$We_c = \frac{4A}{C_D} \left[\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{3C_D}{\chi} \frac{c^* + 0.25}{c^*}\right) \right\} \frac{4(c^* + 0.25)}{3C_D} - 1 + \cos c^* \right] + 2 \quad (8)$$

次に、粉体速度の取扱方法を考慮する。式(8)は静止した気液界面に単一粒子が衝突した場合の侵入条件式であるのに対し、本実験では粉体、気液界面ともに移動し、また粉体はあるバラツキを持った速度分布を有している。そこで、式(7)における侵入速度は粉体、気液界面間の相対速度であるとし、粉体は正規分布で吐出するガス流速に対し、一定のスリップ比で吐出すると仮定した。この場合、図20に示すように粉体、気液界面間の相対速度も正規分布していると仮定でき、これらの粉体のうちで臨界侵入速度を超える粉体が液中へ侵入すると考

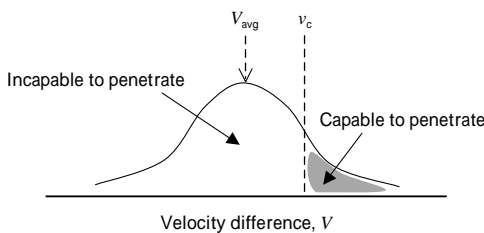


図20 連続粉体インジェクションにおける侵入率計算方法の概略 (粉体と気液界面間相対速度は正規分布であると仮定している)

Fig.20 Schematic sketch to estimate penetration rate in continuous powder injection (Velocity difference between particle and liquid-gas interface is assumed to be distributed along Gaussian distribution)

える。

ある条件における粉体、気液界面間相対速度の平均値を V_{avg} 、標準偏差を σ とした場合、粉体、気液界面間相対速度 V をもつ粉体が粉体全体に占める割合は、式(9)で表すことができる。

$$f(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(V - V_{avg})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (9)$$

したがって、臨界侵入速度 v_c を超える粉体、気液界面間相対速度をもつ粒子の割合は、式(9)を速度 v_c からまで積分することにより求まるので、式(10)で表すことができる。

$$F(v_c) = \int_{v_c}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(V - V_{avg})^2}{2\sigma^2}\right\} dV \quad (10)$$

連続粉体のインジェクションでは、多数の粉体が同時に多くの場所で気液界面を突破して侵入するので、この粉体、気液界面間平均相対速度 V_{avg} を計測することは困難である。そこで、粉体、気液界面間平均相対速度 V_{avg} の支配要因については、以下の様に考える。図21と図22に、ガスのみを吹込んだ場合と粉体を一緒に吹込んだ場合の気泡分布を示す。ガスのみを吹込んだ場合、気泡は噴出とともに周囲の対流によって噴出方向へ移動するが、粉体を一緒に吹込んだ場合は、軌跡がさらに噴出方向へ長く伸びている。このようなガスジェットの挙動については過去に多くの報告¹⁷⁾があるが、粉体を一緒に吹込んだ場合の気泡は、粉体が気泡との気液界面に衝突し、さらに噴出方向へ押出される力を受けているものと考えられる。そこで、 V_{avg} の支配要因は、ノズルから粉体が吐出するときの粉体と搬送ガスの速度比、すなわちスリップ比に依存すると考え、 V_{avg} を式(11)で定義した。

$$V_{avg} = V_p / V_{gas} \quad (11)$$

ここで、 V_p ：ノズルから吐出するときの粉体速度、 V_{gas} ：ノズルから吐出するときのガス速度。

以上の仮定を整理すると以下ようになる。

侵入率は、粉体径 $2r_s$ 、粉体と気液界面間相対速度 V 、

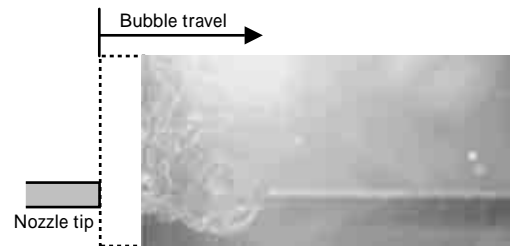


図21 粉体吹込みなしでの気泡分布
Fig.21 Bubble travel without particle

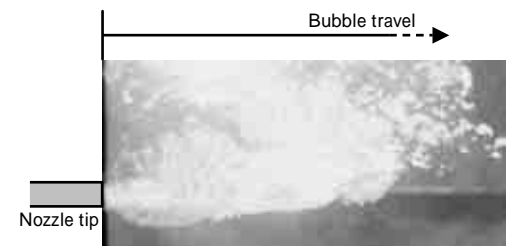


図22 粉体吹込みありでの気泡分布
Fig.22 Bubble travel with particle

表4 図17の実験データをもとに決定したパラメータ

Table 4 Parameters fitted with experimental results shown in Fig.17

Particle diameter (mm)	Velocity ratio V_p/V_{gas}	Penetration rate $P(v_c)$		A	C_D		Critical penetration velocity v_c (m/s)	Mean relative velocity between particle and gas-liquid interface V_{avg} (m/s)
0.53	0.544	0.630	3.59	3.63	1.69	0.79	1.76	1.95
0.76	0.494	0.627					1.47	1.77
1.01	0.473	0.651					1.28	1.70
1.26	0.444	0.696					1.14	1.59
1.60	0.439	0.824					1.02	1.58
Experimental conditions	Measured results	Experimental results	Fitted with experimental results				Derived from Eqs. (7) and (8)	Derived from Eq. (11)

表5 テフロン粒子での計算結果

Table 5 Current calculated results with teflon particles

Experimental condition	Contact angle (deg)	Velocity ratio V_p/V_{gas}	Mean relative velocity between particle and gas-liquid interface V_{avg} (m/s)	Critical penetration velocity v_c (m/s)	Penetration rate $P(v_c)$ (%)
Water and teflon	115	0.949	3.41	5.30	1 (0)
Detergent water and teflon	40	0.949	3.41	-3.04	100 (100)

denotes measurement

臨界侵入速度 v_c の関数である。式(7)(8)(10)参照。粉体と気液界面間の平均相対速度 V_{avg} は、粉体がノズルから吐出するときの粉体とガスの速度比であるスリップ比 (V_p/V_{gas}) に比例し、この相対速度の標準偏差は、全条件で同一である。式(11)参照。

これらの仮定と実験から得られた知見を用いて、パラメータである A, C_D, σ, α を決定し、連続粉体の侵入率を予測する実験式を求める。実験式を求めるときは、図17に示すポリスチレン粉体と水の実験結果を用いる。実験で測定した侵入率と式(10)の $P(v_c)$ が一致するように、式(7),(8),(10),(11)を用いて係数 A と抗力係数 C_D 、粉体 気液界面間平均相対速度 V_{avg} とスリップ比の比例定数 α 、および標準偏差 σ をパラメータフィッティングで決定する。また、臨界侵入速度 v_c は、これらのパラメータを決定した後に、式(7),(8)から求める。その結果を表4に示す。

以上の結果より、臨界ウェーバー数の式(12)と、正規累積分布の式(13)、粉体 気液界面間平均相対速度の式(14)から、連続粉体インジェクションの侵入率を表現する実験式が次のように得られた。

$$We_c = \frac{4A}{C_D} \left[\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{3C_D}{\alpha} \right) \right\}^{\frac{4}{3}} \frac{1 + \cos \theta}{3C_D} + 2 \right] = \frac{r_s}{1} v_c^2 \dots (12)$$

$$P(v_c) = \int_{v_c} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left\{-\frac{(V - V_{avg})^2}{2}\right\} V \dots (13)$$

$$V_{avg} = V_p / V_{gas} \dots (14)$$

ただし、 $A=3.63, C_D=1.69, \sigma=0.79, \alpha=3.59$ 。

これらの実験式を用いて、図19に示した水とテフロン、水+界面活性剤とテフロンの実験条件における粉体 気液界面間平均相対速度 V_{avg} 、臨界侵入速度 v_c 、侵入率 $P(v_c)$ を試算した結果を表5に示す。濡れにくい水とテフロンの実験では、臨界侵入速度は平均相対速度にくらべ大きな値となっており、侵入率もほぼゼロである。一方、濡れやすい水+界面活性剤とテフロンの条件では臨界侵入速度がマイナスとなっており、相対速度がゼロでも侵入する結果となっている。これらの計算値より求めた侵入率は、実験結果とも比較的よく一致しており、実験式の妥当性を示している。

以上の水モデル実験結果を、実験式を用いて算出した計算値と一緒に図23に整理する。シンボルは実測値を、また点線は各粉体について実験式より求めた侵入率

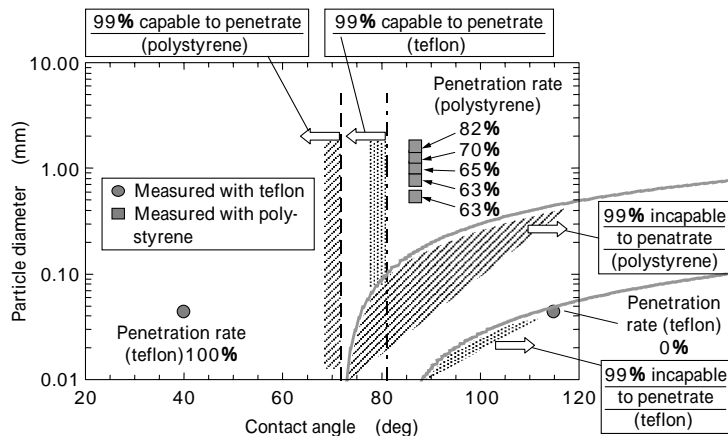


図23 水モデル実測値と実験式による本計算結果の比較

Fig.23 Comparison between results from water-experiment and calculated results by current method

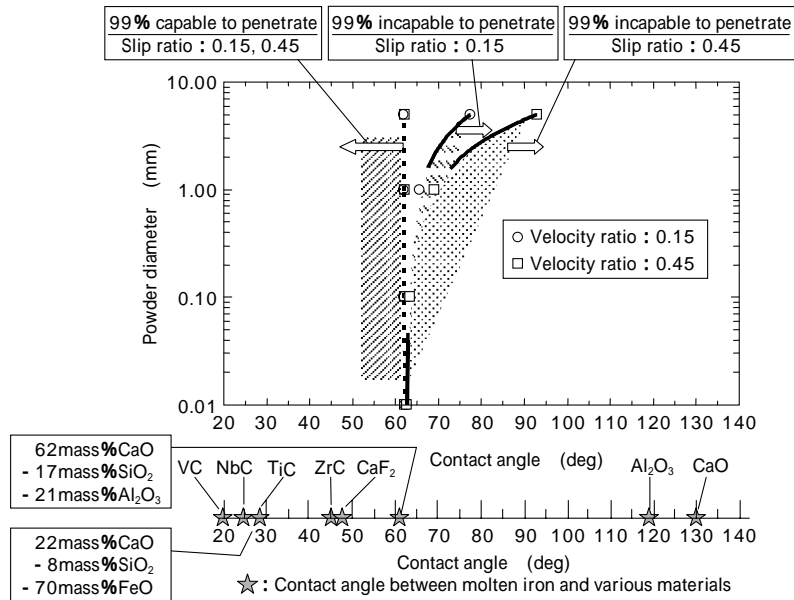


図24 実験式を用いて溶銑条件にて試算した粉体侵入条件
 Fig.24 Penetration conditions of powder injection refining obtained by current empirical formula

99%の臨界線，実線は侵入率1%の臨界線を示す。ポリスチレンについては当然のことながら，またテフロンについても表5で述べたように，各計算値とも実測値と矛盾しない結果となっている。

最後に式(12)~(14)を用いて，溶銑密度 $7,000\text{kg/m}^3$ ，粉体密度 $3,800\text{kg/m}^3$ ，溶銑表面張力 2.0N/m の数値を用いて粉体粒径とスリップ比をパラメータとし，溶銑中への粉体侵入条件を試算した結果を図24に示す。点線は侵入率が99%，実線は侵入率が1%となる臨界線である。スリップ比，粒径が大きくなるほど，濡れにくい粉体でも侵入しやすくなるが，接触角の影響が支配的となっている。したがって，固気比の適正化（スリップ比の適正化）といった従来の技術は，溶銑中への粉体侵入促進に対し，必ずしも十分な効果を得られない可能性がある。また，図中には種々の物質と溶銑との接触角をあわせて示す。石灰は全く侵入しない領域に，各種炭化物やスラグ系酸化物は侵入しやすい領域にある。この結果より，以下のことが考えられる。

脱硫インジェクション処理

CaC_2 の反応効率が石灰にくらべて良好であるのは，正確な接触角データはないものの， CaC_2 の溶銑中への侵入が良好であることが，その一因となっている可能性が高い。

脱りんインジェクション処理

転炉スラグは石灰よりも溶銑中への侵入が有利となり，高い反応効率を得られる可能性がある。

むすび = 液面に衝突する単一粒子の侵入条件について，数値解析結果と理論式が一致することを確認した。しかし，粉体インジェクションのように，多くの粒子が連続

して液面に衝突する現象に対して単一粒子の侵入条件を適用することは困難である。そこで，水モデル実験を行うとともに，微粒の粉体連続インジェクション挙動を表現する実験式を作成し，粉体の侵入・分散挙動の定量化を試みた。その結果，溶銑においても粉体粒径，粉体とガスのスリップ比を大きくすると侵入率が大きくなるものの，粉体と液体との濡れ性が支配的であるとの結論を得た。このことは，溶銑中への侵入促進による反応効率の向上を図るには，固気比の適正化（スリップ比の適正化）といった従来の手法はあまり意味がなく，溶銑との濡れ性が良好な粉体を選択することが支配的要因であることを示している。

参考文献

- 1) E. Kimura : Trans. ISIJ, Vol.23 (1983) p.522.
- 2) 中西恭二ほか：鉄と鋼, Vol.64, No.9 (1978) p.1323.
- 3) Golden. A. : Steelmaking Conf. Proc. Vol.67 (1984) p.323.
- 4) Iron. G. A. et al. : Proc. of Scaninject. (1983) June.
- 5) 成田貴一ほか：鉄と鋼, Vol.69, No.3 (1983) p.392.
- 6) 板谷 宏ほか：鉄と鋼, Vol.70, No.12 (1984) p.S849.
- 7) 丸川雄浄ほか：鉄と鋼, Vol.70, No.12 (1984) p.S850.
- 8) T. A. Engh et al. : Scand. J. Metall., 1 (1972) p.103.
- 9) T. A. Engh et al. : Ironmaking and Steelmaking, No.6 (1979) p.268.
- 10) 小沢泰久ほか：鉄と鋼, Vol.69, No.7 (1983) p.753.
- 11) 小川兼広ほか：CAMP-ISIJ, Vol.10 (1997) p.80.
- 12) 織田 剛ほか：日本機械学会論文集 (B編) 67巻, 662号 (2001) p.2487.
- 13) 織田 剛ほか：日本機械学会論文集 (B編) 68巻, 676号 (2002) p.3237.
- 14) J. U. Brackbill et al. : J. Comput. Phys., 100 (1992) p.335.
- 15) M. Bussmann et al. : Physics of Fluids, 11, 6, (1999) p.1406.
- 16) T. Ye et al. : J. Comput. Phys., 156 (1999) p.209.
- 17) 例えば，森 一美ほか：鉄と鋼, Vol.69, No.15 (1983) p.1714.