

粒子の侵入・浮上挙動に及ぼす粒子速度の影響

Effect of Particle Velocity on Penetration and Flotation Behavior

松澤 玲 洋* 笹井 勝 浩 原 田 寛 沼 田 光 裕
 Akihiro MATSUZAWA Katsuhiko SASAI Hiroshi HARADA Mitsuhiro NUMATA

抄 録

粉体吹き込みプロセスにおける反応効率向上の基礎検討として、粒子速度が侵入・浮上挙動に及ぼす影響を水モデル実験により検証した。単一球を Ar ガスとともに水面へ吹き付け、粒子の挙動を高速度カメラで撮影した。粒子の侵入に伴い気柱が生成し、破断した気柱の一部が粒子表面に気泡として残留した。粒子の侵入速度が低い場合は最大侵入深さの増加に伴って粒子の滞留時間も増加したが、侵入速度が高い場合は最大侵入深さが増加するほどには粒子滞留時間は増加しなかった。これは、粒子表面の残留気泡により浮力が大きくなるためであり、残留気泡の生成を避けるには気柱が生成しない速度で粒子を侵入させることが必要と考えられる。

Abstract

As a fundamental investigation for improvement of reaction efficiency in powder blasting process, effects of particle velocity on penetration and flotation behavior were examined by water model experiment. A single particle was blasted onto water surface with Ar gas, and behavior of the particle was recorded by a high-speed camera. According to penetration of the particle, an air column was generated and a residual bubble was remained on the particle after rupture of the air column. In the case that particle velocity before penetration was low, detention time of the particle increases with increasing of maximum penetration depth. Besides, in the case that particle velocity before penetration was high, detention time did not increase so much with increasing of maximum penetration depth because diameter of the residual bubble and buoyancy became large. To avoid generating residual bubble, the particle should be penetrated with the velocity that an air column is not generated.

1. 緒 言

鋼材に要求される品質レベルの向上により高純度化のニーズは以前にも増して高まっており、精錬工程においては、脱燐・脱硫効率の向上が重要な課題の1つとなっている。脱硫処理が可能な二次精錬設備としては真空脱ガス(RH)や取鍋精錬(LF)が挙げられるが、そのうちRHでは粉体精錬材の吹き付けによる脱硫が行われている。このプロセスでは、真空槽内で溶鉄面に吹き付けられた精錬材の粒子が溶鉄中へ侵入、分散し、溶鉄の環流に伴って下降管から取鍋内へ移動し、ほとんどは取鍋スラグに吸収される。溶鉄は表面張力が大きく、かつ溶鉄と精錬材粒子の密度差が大きいことから、反応効率向上には精錬材粒子を効率的に溶鉄中へ侵入、分散させることが重要と考えられている。

粒子の侵入挙動に関する従来の研究は2つに大別でき

る。一方は微細な粉体を用いた実験であり、マクロな視点で侵入挙動を明らかにすることを主な目的としている。その例として、Enghら¹⁾は水モデル実験より粒子侵入距離の実験式を提示し、Kimura²⁾は粉体吹き付けの条件により侵入形態が変わることを報告している。また近年では粉体吹き付け時の物質移動速度の評価³⁾も試みられている。さらに、液体中への粉体吹き込みプロセスまで含めれば、成田ら⁴⁾が粉体の侵入・分散挙動および均一混合挙動を、織田ら⁵⁾が粒子侵入割合に及ぼす濡れ性(接触角)と粒径の影響を評価している。

他方は粒径が比較的大きな単一球を用いた実験であり、粒子単独の挙動を詳細に観察することを主な目的としている。その例として、小沢ら⁶⁾はガラスなどの球体を水銀表面へ落下させる実験を行い、粒子が液体中に侵入する条件を臨界ウェーバー数として提示している。また、Leeら⁷⁾は

* 室蘭技術研究部 主幹研究員 北海道室蘭市仲町12 〒050-8550

ポリスチレン粒子の水面吹き付け実験により粒子の侵入速度と侵入深さの関係を検証し、気柱の生成により粒子の運動エネルギーが大きくロスすることを報告している。さらに Shimamoto ら⁸⁾、田中ら⁹⁾は水モデル実験により粒子が液体中に侵入する際の現象を詳細に観察、解析している。Shimamoto らによれば、粒子の侵入により水面が引っ張られて気柱が生成し、破断した気柱の一部が粒子表面に付着したまま残留気泡となる。

このように、粒子の臨界侵入条件や最大侵入深さについて検討した研究例は多い。しかし、最大侵入深さが大きくなることで粒子が液体中に滞留する時間がどの程度変化するかは検証されていない。そこで本研究では単一球を水面に吹き付ける水モデル実験を行い、粒子の最大侵入深さと滞留時間の関係を調査した。

2. 実験方法

実験装置の模式図を図1に示す。透明アクリル製でRHを模擬した形状であるが、屈折による歪みの影響を排除するため真空槽（高さ280mm×幅180mm×奥行90mm、いずれも内寸）は矩形とした。また装置内を減圧するために、取鍋に相当する水槽も含めて装置全体を密閉構造とした。真空槽の上蓋に取り付けたバルブを介して、排気やガス吹き込みを行った。

実験は以下の手順で行った。内径5mmの単孔ストレートノズルを真空槽上蓋の中央に取り付け、所定流量のArガスを真空槽内に流した。ノズルは長さ70mmと140mmの2種類を用い、真空槽内の水深は減圧前で80mmとした。真空ポンプにより真空槽内を減圧し、真空レギュレータにより52kPaに保持した。減圧により水深は84mmに増加した。次に単一球（ポリプロピレン球、密度910kg/m³、直径3.2mm）をバルブAとバルブBの間にセットし、バルブAが閉の状態ではバルブBを開にして粒子を落下させ、Arガスとともにノズルから真空槽内の水面へ吹き付けた。粒子の挙動は高速度カメラにより250frame/sで撮影し、あらかじめ求めておいた画像上の長さを実寸の換算式を用いて粒子侵入深さの時間変化を解析した。

実験条件を表1に示す。Ar流量 Q_{Ar} とノズルギャップ h （ノズル先端と静止水面の距離）の異なる10水準とし、粒子の吹き付けを1水準につき3回実施した。

水面へ突入する直前の粒子速度（以下、侵入直前の粒子速度と表記）は、事前実験で測定した。ノズルから吐出した粒子を1000frame/sの速度で撮影し、水面へ突入する直前の2フレーム（0.001s）間の移動距離から粒子速度を算出した。各水準における侵入直前の粒子速度は表1に記載の通りである。

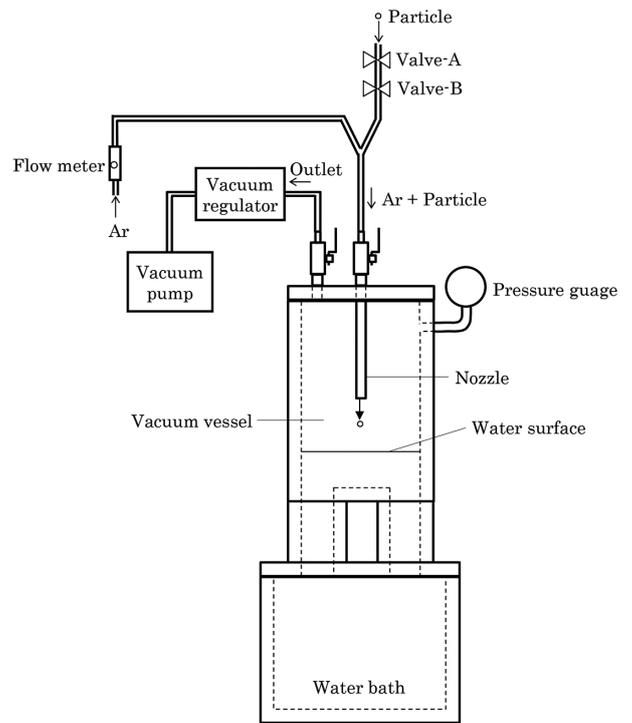


図1 実験装置の模式図
Experimental apparatus

表1 実験条件
Experimental conditions

No.	Ar gas flow rate Q_{Ar} (NL/min)	Nozzle length (mm)	Nozzle gap h (mm)	Particle velocity before penetration (m/s)
A1	0	70	126	1.7
A2	0	140	56	1.1
B1	5	70	126	2.5
B2	5	140	56	3.4
C1	10	70	126	3.4
C2	10	140	56	5.0
D1	15	70	126	5.9
D2	15	140	56	6.7
E1	25	70	126	7.2
E2	25	140	56	10.9

3. 実験結果と考察

3.1 粒子侵入深さの経時変化

粒子の侵入・浮上挙動の例として、水準D2（侵入直前の粒子速度：6.7m/s）における撮影画像を図2に示す。粒子の侵入により水面が引っ張られて気柱が生成し、延伸した気柱はくびれを生じて破断した。破断した気柱の一部は粒子表面に残留して気泡となった。気柱破断後の粒子はある深さに到達したところで侵入が停止し、その後は水面へ浮上した。

一方、水準A2（侵入直前の粒子速度：1.1m/s）のような侵入直前の粒子速度が低い水準では、図3に示すように気柱を生成することなく粒子が水中へ侵入し、残留気泡も観察されなかった。

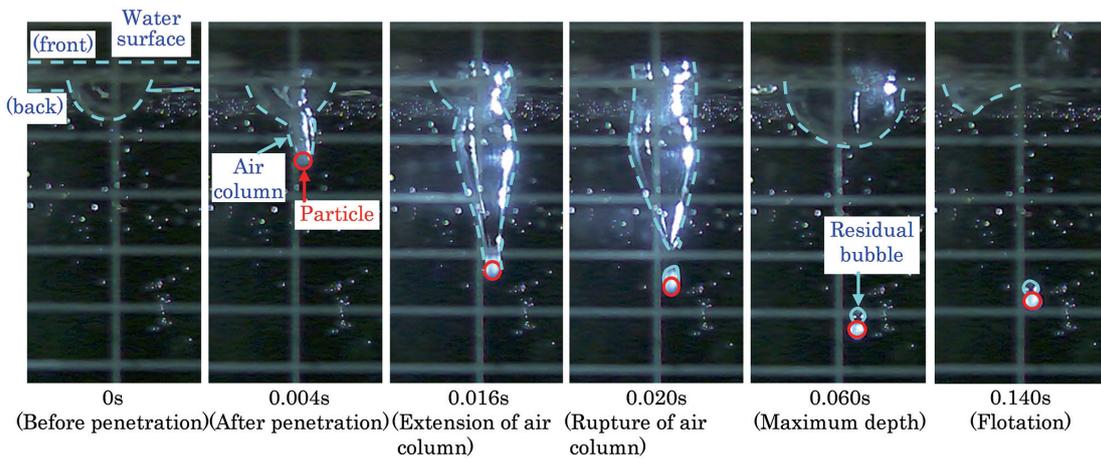


図2 粒子の侵入・浮上挙動 (水準 D2)
Penetration and flotation behavior of a particle (D2)

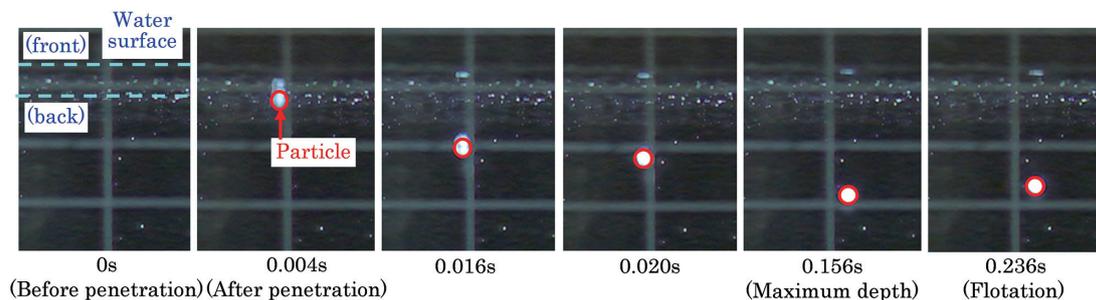


図3 粒子の侵入・浮上挙動 (水準 A2)
Penetration and flotation behavior of a particle (A2)

各水準の粒子侵入深さの経時変化を図4に示す。粒子が最も深くまで侵入したのは水準 E2 であったが、粒子が侵入してから水面に浮上するまでの時間は水準 B1 が最も長くなった。

高速度カメラの撮影画像から評価した項目を図5に示す。(a) 侵入直後の粒子速度は、粒子が水中に侵入した直後の2フレーム(0.004s)間の移動距離から算出した。気柱長さおよび粒子侵入深さは、粒子が水面へ突入する直前の水面凹み深さを基準点とし、基準点から気柱破断直前の固体球上端までの距離を (b) 最大気柱長さ H_{max} 、最深点における固体球中心までの距離を (c) 最大侵入深さ L_{max} とした。(d) 残留気泡径 d_b は、粒子表面に残留した気泡がほぼ球形になった時点の直径とした。(e) 平均浮上速度は、粒子の浮上速度がほぼ一定となった時間範囲で粒子深さの時間変化を直線回帰して算出した。この直線回帰式から水面位置に粒子が浮上する時間を求め、気柱破断から水面に浮上するまでの時間を (f) 粒子滞留時間とした。これは、水面に浮上する前に粒子が水面の凹みに隠れてしまうケースがあったためである。

なお、粒子は必ずしも鉛直下向き方向に侵入するとは限らず、侵入途中で軌跡が大きく横方向に曲がって最大侵入深さが浅くなるケースがあった。そのため、最大侵入深さの位置が粒子侵入の位置から横方向に 20° 以上ずれた粒子

は解析対象から除外した。

3.2 侵入直後の粒子速度

侵入直前の粒子速度と侵入直後の粒子速度を比較して図6に示す。侵入直前の粒子速度が $1.1 \sim 10.9 \text{ m/s}$ であるのに対し、侵入直後は $0.7 \sim 3.4 \text{ m/s}$ となり、侵入直前の粒子速度が高い条件ほど低下率は大きくなった。このことから、水面衝突の際に粒子は運動エネルギーを大きくロスしていると言える。

3.3 最大気柱長さおよび最大侵入深さ

侵入直前の粒子速度と最大気柱長さ H_{max} の関係を図7に示す。 H_{max} が 0 mm のデータは、気柱が生成しなかったことを意味する。本研究の実験条件では、侵入直前の粒子速度が 3.4 m/s より低い場合に気柱は生成しなかった。また、 3.4 m/s より高い場合は侵入直前の粒子速度が高くなるほど H_{max} も増加した。

粒子が液体へ衝突した際の現象について、液体が液膜となって粒子表面に沿うように進展(濡れの進行)が起こり、液膜の移動速度よりも粒子速度が高い場合に気柱が生成するとの機構^{10,11)}が提示されている。本研究では粒子と液体の濡れ性が全ての水準で同一であるため、液膜の移動速度の差はないと見なすことができ、侵入直前の粒子速度を高

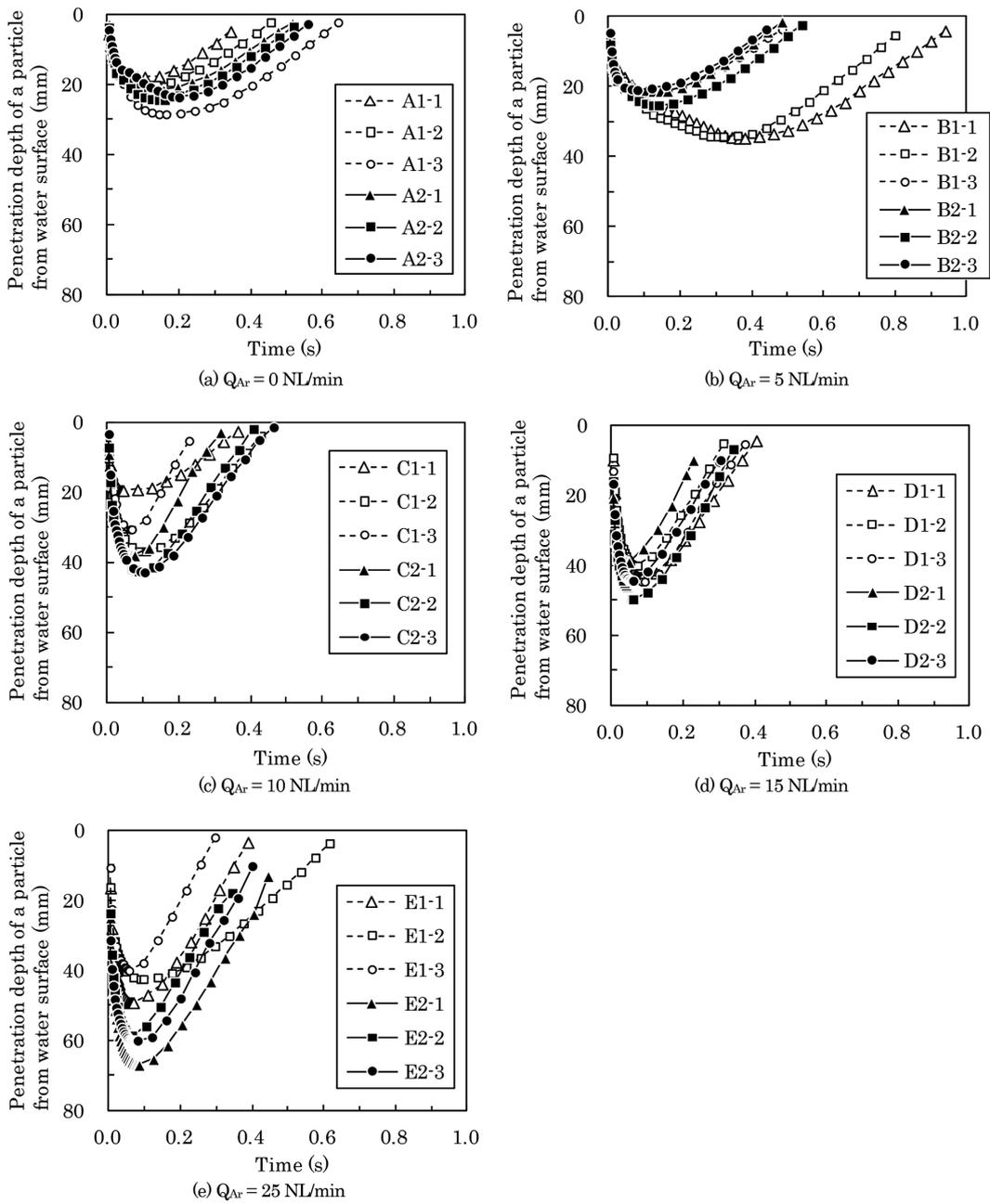


図4 粒子侵入深さの経時変化
Change of penetration depth of a particle from water surface with time

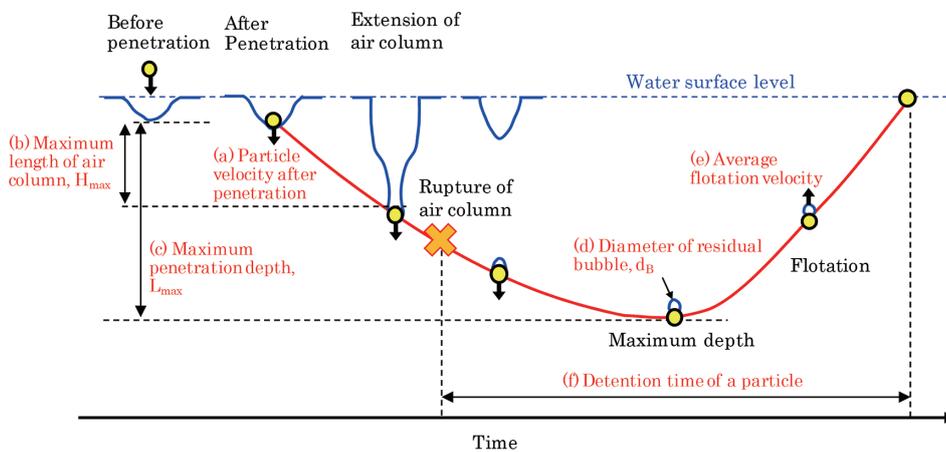


図5 粒子挙動の模式図と本研究における解析項目
Schematic diagram of a particle behavior and analyzed factors in present work

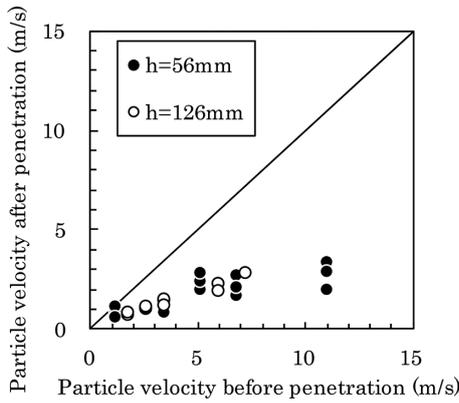


図6 侵入直前と侵入直後の粒子速度の比較
Comparison of particle velocity after penetration with that of before penetration

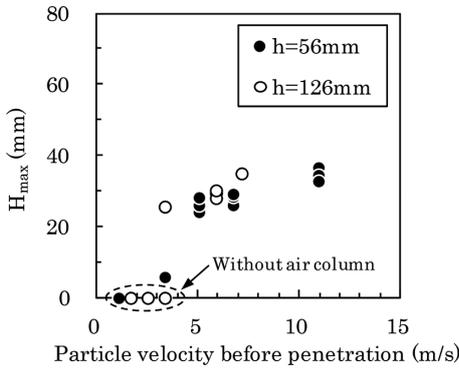


図7 侵入直前の粒子速度が最大気柱長さに及ぼす影響
Effect of particle velocity before penetration on maximum length of air column

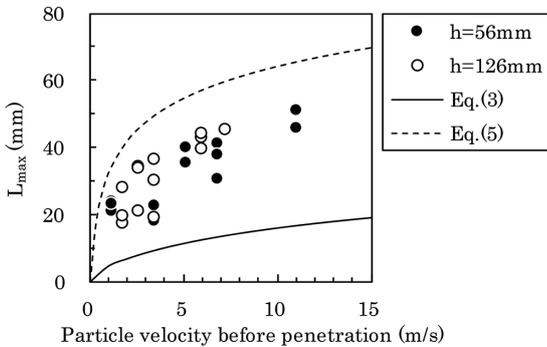


図8 侵入直前の粒子速度が最大侵入深さに及ぼす影響
Effect of particle velocity before penetration on maximum penetration depth

めると閾値を超えた条件において気柱が生成すると考えられる。

侵入直前の粒子速度と最大侵入深さ L_{max} の関係を図8に示す。 H_{max} と同様に、侵入直前の粒子速度が高くなるほど L_{max} も増加した。粒子の吹き付け条件が同一でも最大侵入深さにばらつきが生じる要因としては、粒子がノズルを通過する際のノズル内壁との摩擦、液体への粒子突入角度、粒子の運動エネルギーの一部が回転に消費されること、などが考えられる。

小沢ら⁶⁾によれば、気液界面を垂直に通過する球体の運

動方程式は式(1)で表される。右辺の第1項は流体抵抗力、第2項は重力、第3項は浮力、第4項は界面張力による力である。

$$-\frac{dv_p}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p + \alpha \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_L \right) = \pi r_p^2 \cdot \frac{1}{2} \rho_L v_p^2 C_D \cdot \phi_1 \left(\frac{x}{r_p} \right) - \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p g + \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_L g \cdot \phi_2 \left(\frac{x}{r_p} \right) + 2\pi r_p \sigma_{GL} \cdot \phi_3 \left(\frac{x}{r_p} \right) \quad (1)$$

ここで v_p は粒子速度 (m/s)、 t は時間 (s)、 r_p は球体半径 (m)、 ρ_p は粒子密度 (kg/m³)、 ρ_L は液体密度 (kg/m³)、 C_D は抵抗係数 (-)、 x は球体の液体中への侵入深さ (m)、 g は重力加速度 (m/s²)、 σ_{GL} は液体の表面張力 (N/m) である。また α は仮想質量に関する係数 (-)、 $\phi_1(x/r_p)$ 、 $\phi_2(x/r_p)$ および $\phi_3(x/r_p)$ はそれぞれ C_D 、浮力および表面張力に対する補正係数である。

式(1)を変形して $x/r_p = x^*$ 、 $\rho_p/\rho_L = \rho^*$ と置き、さらに $\phi_1(x^*)$ を定数 ϕ_1 、 $\phi_2(x^*)$ を定数 ϕ_2 、 $\phi_3(x^*)$ を $A(x^* - 1 - \cos\theta)$ 、 $\rho_a^* = \rho^* + \alpha$ 、 $\rho_b^* = \rho^* - \phi_2$ と置くと、式(2)が得られる。 θ は接触角 (°)、 A は液体表面の凹み生成により界面張力が増加する係数である。

$$\frac{dv_p^2}{dx^*} + \frac{3C_D \phi_1}{4\rho_a^*} v_p^2 = -\frac{3A\sigma_{GL}}{r_p \rho_L \rho_a^*} x^* + \frac{2r_p g \rho_b^*}{\rho_a^*} + \frac{3A\sigma_{GL}}{r_p \rho_L \rho_a^*} (1 + \cos\theta) \quad (2)$$

最大侵入深さの半分以上が気柱であることから、粒子の半分が液体へ浸漬したと仮定して小沢らと同様に $\alpha = 0.25$ 、 $\phi_1 = 1$ 、 $\phi_2 = 0.5$ 、 $A = 2.5$ とした。また抵抗係数 C_D は 0.44、重力加速度 g は 9.8 m/s²、水の密度 ρ_L は 1000 kg/m³、水の表面張力 σ_{GL} は 0.073 N/m¹²⁾、ポリプロピレンと水の接触角 θ は 95°¹³⁾ とした。

侵入直前の粒子速度を v_{p0} (m/s) とすると $x^* = 0$ において $v_p = v_{p0}$ であるから、この境界条件で式(2)を v_p^2 について解き、最大侵入深さ $x^* = L_{max}^* (= L_{max}/r_p)$ で $v_p = 0$ とすると、式(3)が得られる。

$$v_{p0}^2 \cdot \exp\left(-\frac{3C_D \phi_1}{4\rho_a^*} L_{max}^*\right) - \frac{4A\sigma_{GL}}{r_p \rho_L C_D \phi_1} L_{max}^* + \left\{ \frac{4A\sigma_{GL}}{r_p \rho_L C_D \phi_1} \left(\frac{4\rho_a^*}{3C_D \phi_1} + 1 + \cos\theta \right) + \frac{8r_p g \rho_b^*}{3C_D \phi_1} \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{3C_D \phi_1}{4\rho_a^*} L_{max}^*\right) \right\} = 0 \quad (3)$$

式(3)による最大侵入深さ $L_{max} (= L_{max}^* \cdot r_p)$ の計算値を図8に実線で示す。計算値は実測値より大幅に小さくなった。本研究の水モデル実験は、小沢らの水銀を用いた実験と比べると液体の表面張力が小さいが、式(3)の計算では水銀実験と同じ値を用いたため、界面張力の影響を過大に評価したと推定される。

次に、界面張力の影響をゼロと仮定した計算を行った。この場合、式(1)において $\phi_3(x/r_p) = 0$ であるから、粒子の運動は式(4)で表される。

$$\frac{dv_p^2}{dx^*} + \frac{3C_D \phi_1}{4\rho_a^*} v_p^2 = \frac{2r_p g \rho_b^*}{\rho_a^*} \quad (4)$$

式(2)と同じ境界条件で式(4)を解くと、式(5)が得られる。

$$L_{\max} = \frac{4r_p \rho_a^*}{3C_D \phi_1} \ln \left(1 - \frac{3C_D \phi_1 v_{p0}^2}{8r_p g \rho_b^*} \right) \quad (5)$$

式(5)の計算値を図8に破線で示すが、計算値は実測値より大きくなり、一致しなかった。ただし、式(3)の計算値よりは実測値に近いことから、界面張力の影響はあるとしても小さいと推定される。

そこで、侵入直後の粒子速度を v_{p0} に用いて式(5)により最大侵入深さを計算した。この場合も粒子の半分が液体に浸漬したと仮定して $\alpha=0.25$, $\phi_1=1$, $\phi_2=0.5$, $C_D=0.44$ とした。その結果を図9に示すが、計算値と実測値は概ね一致した。したがって最大侵入深さは侵入直後の粒子速度にほぼ支配されており、気柱延伸・破断や残留気泡の有無は、最大侵入深さに大きな影響を及ぼさないと考えられる。

3.4 残留気泡径および平均浮上速度

侵入直前の粒子速度と残留気泡径の関係を図10に示す。侵入直前の粒子速度が高くなるほど残留気泡径は大きくなる傾向が見られた。さらに、残留気泡径は図11に示すように水準C1-3を除いて最大気柱長さ H_{\max} との間に相関が見られた。したがって、侵入直前の粒子速度が高くなるほ

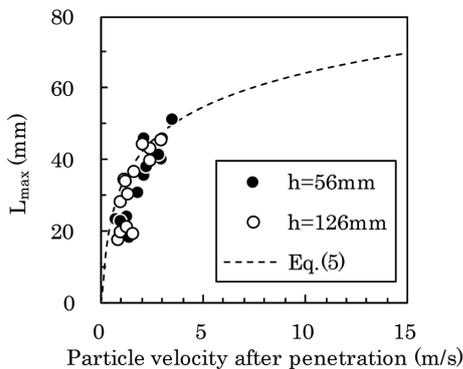


図9 最大侵入深さの実測値と計算値の比較
Comparison of experimental results with calculated value about maximum penetration depth

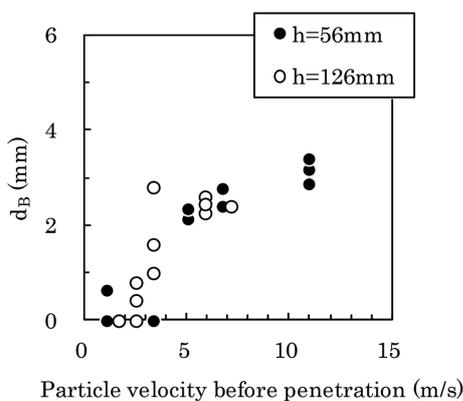


図10 侵入直前の粒子速度が残留気泡径に及ぼす影響
Effect of particle velocity before penetration on diameter of residual bubble

ど気柱が生成しやすくなり、巻き込む気体も増加するため、残留気泡径が大きくなると推定される。

残留気泡径と平均浮上速度の関係を図12に示す。残留気泡径が大きな粒子ほど速く浮上した。これは、残留気泡により粒子の見かけ密度が低くなったためと考えられる。残留気泡が付着した粒子の見かけ密度 ρ_p' (kg/m³) は式(6)で表される。

$$\rho_p' = \frac{d_p^3 \rho_p + d_B^3 \rho_B}{d_p^3 + d_B^3} \quad (6)$$

ここで d_p は粒子直径 (m), ρ_B は気泡密度 (kg/m³) である。

液体中を運動する球体の終末速度 v_t は、レイノルズ数 Re の範囲に応じて式(7)~(9)で与えられる¹⁴⁾。

$$Re < 6 \quad v_t = \frac{g \Delta \rho d_p^2}{18 \mu_L} \quad (\text{Stokes's law}) \quad (7)$$

$$6 < Re < 500 \quad v_t = \left(\frac{4}{225} \cdot \frac{\Delta \rho^2 g^2}{\mu_L \rho_L} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_p \quad (\text{Allen's law}) \quad (8)$$

$$500 < Re < 10^5 \quad v_t = \left(\frac{3g \Delta \rho d_p}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Newton's law}) \quad (9)$$

ここで $\Delta \rho (= \rho_L - \rho_p')$ は液体と残留気泡が付着した粒子の密度差 (kg/m³), μ_L は液体粘度 (Pa·s) である。

本研究における残留気泡径と終末速度の関係を図12に破線および実線で示す。気泡密度 ρ_B は 0.85 kg/m³ (52 kPa, 20°Cにおける Ar の密度), 水の粘度 μ_L は 1.0×10^{-3} Pa·s とした。粒子の平均浮上速度は、残留気泡径が 2 mm 以下で

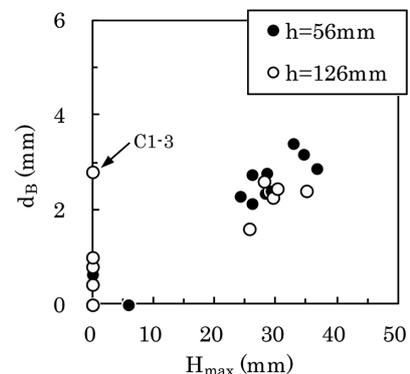


図11 最大気柱長さとして残留気泡径の関係
Relation between maximum length of air column and diameter of residual bubble

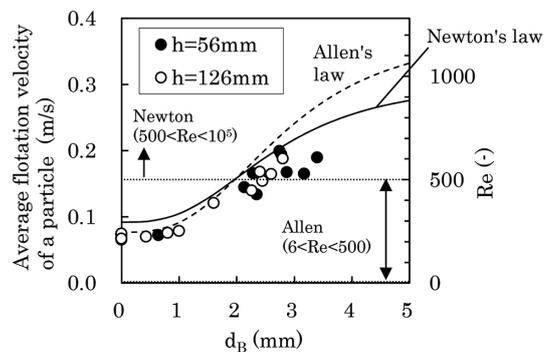


図12 残留気泡径が粒子の平均浮上速度に及ぼす影響
Effect of diameter of residual bubble on average flotation velocity of a particle

は Allen 則に従い、残留気泡径が 2mm 超では Newton 則に従う結果となった。図 12 の右側縦軸に表示した Re で見ると、2mm の残留気泡が付着した粒子の終末速度における Re は約 500 であり、Allen 域と Newton 域の境界に相当する。したがって、本研究で評価した平均浮上速度は妥当な数値と言える。なお、式 (7) の Stokes 則による終末速度は 0.5~4.5m/s、 Re は 1600~14000 となり、適用範囲 ($Re < 6$) を大幅に超過したため図 12 には表示しなかった。

3.5 粒子滞留時間

侵入直前の粒子速度と粒子滞留時間の関係を図 13 に示す。侵入直前の粒子速度が 3.4m/s 以上の水準は、3.4m/s より低い水準よりも粒子滞留時間が短くなる傾向が見られた。これは、侵入直前の粒子速度が 3.4m/s 以上になると残留気泡径が 2mm 以上になりやすく、速く浮上してしまうためである。

最大侵入深さと粒子滞留時間の関係を図 14 に示す。残留気泡径に対応して傾きが異なる 2つのデータ群に分離した。傾きが大きい方のデータ群は残留気泡径が 1mm 未満、傾きが小さい方のデータ群は残留気泡径が 2mm 以上であり、残留気泡径が 1~2mm の場合は 2つのデータ群の中間に位置すると見なせる。このことから、残留気泡が存在すると、最大侵入深さを大きくすることによる粒子滞留時

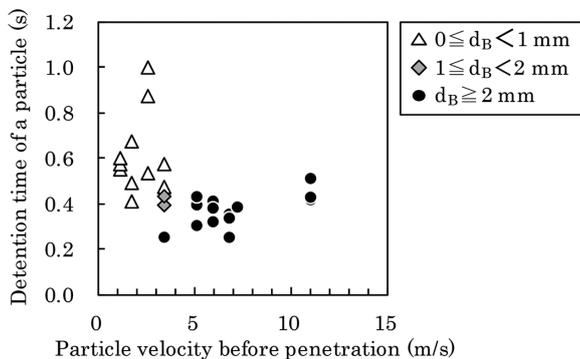


図 13 侵入直前の粒子速度と粒子滞留時間の関係
Relation between particle velocity before penetration and detention time of a particle

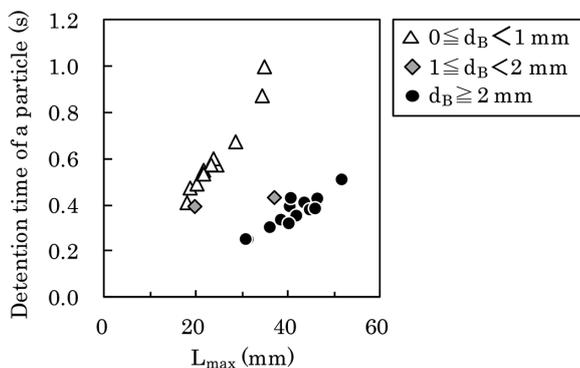


図 14 最大侵入深さと粒子滞留時間の関係
Relation between maximum penetration depth and detention time of a particle

間増加の効果は得られにくくなると言える。従来研究では粒子の侵入深さに主眼が置かれてきたが、本研究の結果から、侵入直前の粒子速度を高めて侵入深さを大きくすることよりも、残留気泡が生成しない条件で粒子を吹き込むことの方が重要と考えられる。気柱や残留気泡の有無に影響しうる因子としては、例えば粒子と液体の濡れ性、圧力、粒径が考えられるが、どの程度影響するかは今後の検討課題である。

4. 結 言

粉体吹き込みプロセスにおける反応効率向上の基礎検討として、単一球を水面へ吹き付ける水モデル実験を行った。粒子の侵入により気柱の生成および破断が起り、破断した気柱の一部が粒子表面に残留して気泡となる様子が観察された。粒子の侵入速度と最大侵入深さ、残留気泡径、粒子滞留時間の関係を解析し、以下の結果が得られた。

- (1) 侵入直前の粒子速度が高くなるほど最大侵入深さは増加した。粒子の最大侵入深さは、侵入直後の粒子速度を初期値に用いることで運動方程式による計算値とほぼ一致した。
- (2) 侵入直前の粒子速度が高くなると残留気泡が生成しやすくなるため、深くまで侵入しても水面へ短時間で浮上した。侵入直前の粒子速度を高めて侵入深さを大きくすることよりも、残留気泡が生成しない条件で粒子を吹き込むことの方が重要と考えられる。
- (3) 最大気柱長さと残留気泡径の間には相関が認められた。残留気泡の生成を回避するには、気柱が生成しない速度で粒子を侵入させる必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Engh, T. et al.: Ironmaking Steelmaking. 6, 268 (1979)
- 2) Kimura, E.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn. 23, 522 (1983)
- 3) 奥野貴大 ほか: CAMP-ISIJ. 28, 656 (2015)
- 4) 成田貴一 ほか: 鉄と鋼. 69 (3), 392 (1983)
- 5) 織田剛 ほか: 神戸製鋼技報. 56 (1), 32 (2006)
- 6) 小沢泰久 ほか: 鉄と鋼. 69 (7), 753 (1983)
- 7) Lee, J. et al.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn. 28, 278 (1988)
- 8) Shimamoto, N. et al.: Mater. Trans. 45 (3), 910 (2004)
- 9) 田中正幸 ほか: 実験力学. 8 (3), 201 (2008)
- 10) Duez, C. et al.: Nat. Phys. 3, 180 (2007)
- 11) 酒井祐介 ほか: 鉄と鋼. 98 (1), 1 (2012)
- 12) 日本化学会編: 化学便覧 基礎編 II. 改訂 3 版. 東京, 丸善, 1991, p.81
- 13) 日本化学会編: 化学便覧 基礎編 II. 改訂 3 版. 東京, 丸善, 1991, p.90
- 14) 水科篤郎 ほか: 化学工学概論. 初版. 東京, 産業図書, 2012, p.230



松澤玲洋 Akihiro MATSUZAWA
室蘭技術研究部 主幹研究員
北海道室蘭市仲町12 〒050-8550



原田 寛 Hiroshi HARADA
プロセス研究所 鋼圧一貫研究部
上席主幹研究員 工学博士



笹井勝浩 Katsuhiro SASAI
プロセス研究所長 工学博士



沼田光裕 Mitsuhiro NUMATA
名古屋技術研究部 上席主幹研究員
工学博士