Regular Article

Effect of Wettability on Penetration and Flotation Behavior of a Particle in Refining Process

Akihiro MATSUZAWA^{1)*}, Katsuhiro SASAI¹⁾, Hiroshi HARADA¹⁾ and Mitsuhiro NUMATA¹⁾

1) R & D Laboratories, Nippon Steel Corporation

Abstract: Powder blasting is often operated in refining process in order to achieve lower sulfur content in molten steel with high desulfurization efficiency. In this study, effects of wettability of a particle on penetration and flotation behavior were examined by water model experiment. A polypropylene particle was blasted onto water surface with Ar gas through a single-hole nozzle, and particle behavior during penetration into water to flotation to water surface was recorded by a high-speed camera. Wettability between the particle and water was changed by applying repellent or hydrophilic material on the particle. 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. The repellent particle floated to the water surface in a short time because maximum penetration depth was small and diameter of a residual bubble was large. On the other hand, the detention time of the hydrophilic particle became longer than the repellent particle because maximum penetration depth was relatively large and the residual bubble was separated from the particle. The reason that wettability between the particle and water affects penetration and floatation behavior is that adhering position of the air column on the particle changed. In the case of repellent particle, the position changed to penetrating direction of the particle. Therefore, the force caused by surface tension of water increases, and the residual air column on the particle after rupture of the air column becomes large.

Keywords: refining process; water model experiment; wettability of a particle; air column; residual bubble; detention time of a particle.

Received on Mar. 16, 2020 ; Accepted on Apr. 28, 2020

* Corresponding author. E-mail : matsuzawa.s5r.akihiro@jp.nipponsteel.com, Address : Nippon Steel Corporation, 12 Nakamachi Muroran Hokkaido 050-8550

© 2020 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

粒子の侵入・浮上挙動に及ぼす濡れ性の影響

松澤 玲洋^{1)*}・笹井 勝浩¹⁾・原田 寛¹⁾・沼田 光裕¹⁾

Effect of Wettability on Penetration and Flotation Behavior of a Particle in Refining Process

Akihiro MATSUZAWA, Katsuhiko SASAI, Hiroshi HARADA and Mitsuhiro NUMATA

1. 緒言

粉体吹き込み¹⁻⁵⁾や粉体吹き付け⁶⁻⁸⁾は精錬反応効率化の手段として広く行われている。粉体吹き込みは溶鉄中に浸漬したランスから粉体を吐出させる方法であり、粉体吹き付けは溶鉄の上方に設置したランスから溶鉄表面へ向かって粉体を吐出させる方法であるが、いずれも粒子が気液界面へ突入し、溶鉄中へ侵入した後に溶鉄表面へ浮上するという過程を経るため、現象としては類似している。

液体中への粒子の侵入・分散挙動に関してはこれまで様々な研究⁹⁻²⁵⁾が行われており、液体と粒子の濡れ性が重要な因子であることが知られている。例えば、Naritaら¹⁴⁾やOdaら¹⁵⁾は種々の材質の粉体を水中へ吹き込む実験を行い、水と濡れにくい粉体は濡れやすい粉体よりも侵入距離や侵入率が低いことを報告している。またOgawaら^{16,17)}はフラックスを溶鋼へ吹き込む実験を行い、溶鋼との濡れ性が良いフラックス粒子は溶鋼中へ分散しやすいことを報告している。

粒子の液体侵入過程についてはIguchiら¹⁸⁻²¹⁾が水面へ粒子を自由落下させる実験により詳細に観察しており、液体と粒子の濡れ性が良好な場合は粒子がそのまま液体中へ分散するが、濡れ性が不良の場合は気柱が生成し、破断した気柱の一部が粒子表面に残留して気泡になると述べている。Duezら²²⁾も同様の実験を行っており、粒子表面を液膜が進展して濡れが進行する速度が粒子速度より小さい場合に気柱が生成する、との機構を提唱して気柱が生成する粒子速度の閾値を定式化している。またKatoh²³⁾らは残留気泡の形成過程について理論モデルによる検討を行い、液体と粒子の接触角が大きくなると残留気泡体積も大きくなることを示している。さらにNakano and Ito²⁴⁾やNakata and Inamuro²⁵⁾は粒子侵入挙動の3次元シミュレーション計算を行い、濡れ性が良い方が侵入しやすくなることを示唆する結果を報告している。

このように、粒子が液体中へ侵入・分散する過程につい

ては多くの研究例があるが、侵入した粒子が液体表面へ浮上する過程や液体と粒子の接触時間に着目した研究はほとんど行われていなかった。そこで、著者らは前報²⁶⁾において単一球を水面へ吹き付ける水モデル実験により侵入から浮上までトータルの粒子挙動を評価し、粒子表面の残留気泡が滞留時間に大きく影響することを示した。本研究では単一球の濡れ性を変えて同様の実験を行い、濡れ性が侵入深さや滞留時間に及ぼす影響を調査した。さらに、滞留時間に大きく影響を及ぼす残留気泡径の支配因子を検討するとともに、濡れにくい粒子で侵入深さが小さくなる機構についても検討した。

2. 実験方法

実験は前報²⁶⁾と同様の手法で行った。すなわち、内径5 mm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70 mmと140 mmの2種類を用い、真空槽内の水深は減圧前で80 mm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52 kPaに保持した後、単一球(ポリプロピレン球、密度910 kg/m³、直径3.2 mm)を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。減圧下で実験を行ったのは、Arガス流速の上昇により粒子の侵入速度を高めるためである。粒子の挙動は高速度カメラにより250 frames/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。

本研究では単一球の表面に市販の親水スプレーあるいは撥水スプレーを十分に吹き付けて濡れ性を変化させた。親水スプレーあるいは撥水スプレーを吹き付けたポリプロピレン板上に静置した水滴の写真をFig.1に示す。水とポリプロピレンの接触角 θ は95°²⁷⁾であるが、この写真より親水スプレー吹き付けの場合は6°、撥水スプレー吹き付けの場合は129°と評価した。実験水準をTable 1に示す。Arガ

2020年3月16日受付 2020年4月28日受理 (Received on Mar. 16, 2020; Accepted on Apr. 28, 2020)

1) 日本製鉄(株) 技術開発本部 (R & D Laboratories, Nippon Steel Corporation)

* Corresponding author. E-mail: matsuizawa.s5r.akihito@jip.nipponsteel.com, Address: Nippon Steel Corporation, 12 Nakamachi Muroran Hokkaido 050-8550

© 2020 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja).

ス流量は0~25 NL/minとし、1水準につき実験を3回行った。なお、A1, B2, D1, D2, E1, E2は前報($\theta=95^\circ$)の実験水準であるが、本研究ではこれらも合わせて解析したため、Table 1にも記載した。

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) v_{p0} は、上記の実験とは別に測定した。ノズルから吐出した粒子を1000 frames/sの速度で撮影し、水面へ突入する直前の2フレーム(0.001 s)間の移動距離から粒子速度を算出した。各水準における v_{p0} はTable 1に記載の通りである。

3. 実験結果

3・1 粒子侵入深さの経時変化

粒子の侵入挙動・浮上の例として水準R3($\theta=129^\circ$)における侵入挙動・浮上の例をFig.2に示す。粒子の突入により水面が粒子に引っ張られ、気柱が生成した。その後、気柱にくびれが生じて破断し、気柱の一部が粒子表面に残留して気泡(Fig.2では直径4.3 mm)になった。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。

Table 1. Experimental conditions.

No.	Wettability	Contact angle, $\theta(^{\circ})$	Ar gas flow rate (NL/min)	Nozzle length (mm)	Nozzle gap (mm)	v_{p0} (m/s)
H1	Hydrophilic	6	5	140	56	3.4
H2	Hydrophilic	6	15	140	56	6.7
H3	Hydrophilic	6	25	140	56	10.9
R1	Repellent	129	0	70	126	1.7
R2	Repellent	129	15	70	126	5.9
R3	Repellent	129	25	70	126	7.2
R4	Repellent	129	25	140	56	10.9
*A1	Normal	95	0	70	126	1.7
*B2	Normal	95	5	140	56	3.4
*D1	Normal	95	15	70	126	5.9
*D2	Normal	95	15	140	56	6.7
*E1	Normal	95	25	70	126	7.2
*E2	Normal	95	25	140	56	10.9

*Conditions in previous work.²⁶⁾

v_{p0} : Particle velocity before penetration

(a) Polypropylene plate with hydrophilic material.

(b) Polypropylene plate with repellent material.

Fig. 1. Contact angle between water droplet and polypropylene plate with hydrophilic or repellent material.

Fig. 2. Penetration and flotation behavior of a particle. (Condition R3, $\theta=129^\circ$)

水準H2 ($\theta = 6^\circ$) における侵入・浮上挙動をFig.3に示す。これも粒子侵入から気柱破断までの挙動はFig.2と同様であり、粒子表面に気泡 (Fig.3では直径3.0 mm) が付着したが、気柱破断後に粒子表面から離脱し、粒子は残留気泡がない状態で水面へ浮上した。

各水準の粒子侵入深さの経時変化をFig.4に示す。 v_{p0} が低い (a) および (b) では濡れ性の違いはあまり明確ではないが、 v_{p0} が5 m/s以上となる (c) ~ (f) では θ が大きくなると侵入深さが小さくなり、短時間で浮上しやすくなった。また $\theta = 6^\circ$ のH2およびH3は浮上時間が長くなったが、これは残留気泡が生成しなかった、あるいは粒子表面から残留気泡が離脱したためである。

高速度カメラの撮影画像から評価した項目をFig.5²⁶⁾に示す。(a) 侵入直後の粒子速度 v_{p1} は、粒子が水中に侵入した直後の2フレーム (0.004 s) 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粒子上端までの距離を (b) 最大気柱長さ $H_{\max}$ 、最深点における粒子中心までの距離を (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。(f) 粒子滞留時間 t_d は気柱破断から水面へ浮上するまでの時間であるが、水面に浮上する前に粒子が水面の凹みに隠れてしまい浮上時間を測定できないケースがあったため、平均浮上速度を算出する直線回帰式を外挿して粒子が水面へ浮上する時間を求めた。

各水準の測定データをTable 2に示す。いずれのケースも気柱が生成したが、H3-1およびR1-3では残留気泡が見られなかった。また、H2の3ケースとH3-2およびH3-3では

気柱破断の0.020~0.076 s後に気泡が粒子表面から離脱した。

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、侵入途中に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H3-2, R3-1, R3-3およびR4-1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 v_{p0} と侵入直後の粒子速度 v_{p1} の関係をFig.6に示す。 v_{p0} が1.7~10.9 m/sであるのに対し、 v_{p1} は0.9~3.8 m/sと大きく減少したが、 θ による違いは見られなかった。したがって、水面衝突時の粒子の運動エネルギー損失に及ぼす θ の影響は小さいと考えられる。

3・3 最大気柱長さおよび最大侵入深さ

v_{p0} と最大気柱長さ $H_{\max}$ の関係をFig.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。 $\theta = 95^\circ$ では v_{p0} が3.4 m/sより低い場合に気柱は生成しなかったが、 $\theta = 129^\circ$ では v_{p0} が1.7 m/sでも気柱が生成した。 $\theta > 90^\circ$ の場合には θ が大きくなるほど気柱生成の臨界粒子速度が低下する²²⁾ことが報告されており、本研究でも同様の結果になった。Fig.7ではいずれの θ でも v_{p0} が大きくなるほど $H_{\max}$ は増加する傾向にあるが、 $\theta = 129^\circ$ の $H_{\max}$ は 6° や 95° の水準よりもやや小さかった。

v_{p0} と最大侵入深さ $L_{\max}$ の関係をFig.8に示す。 $\theta = 95^\circ$ と同様に、 $\theta = 6^\circ$ および 129° においても v_{p0} が高くなるほど $L_{\max}$ は増加する傾向にあった。また $\theta = 129^\circ$ は5.9 m/s以上において 95° や 6° より $L_{\max}$ が小さくなった。この理由については4・3節で考察する。

Ozawaら¹¹⁾の粒子の運動方程式より、表面張力の影響を考慮すると式 (1)²⁶⁾が成り立つ。

Fig. 3. Penetration and flotation behavior of a particle. (Condition H2, $\theta = 6^\circ$)

$$\begin{aligned}
 & v_{p0}^2 \cdot \exp \left\{ -\frac{3C_D \phi_1}{4(\rho_p / \rho_L + \alpha)} \cdot \frac{L_{max}}{r_p} \right\} - \frac{4A\sigma_{GL}}{r_p \rho_L C_D \phi_1} \cdot \frac{L_{max}}{r_p} \\
 & + \left[\frac{4A\sigma_{GL}}{r_p \rho_L C_D \phi_1} \left\{ \frac{4(\rho_p / \rho_L + \alpha)}{3C_D \phi_1} + 1 + \cos \theta \right\} + \frac{8r_p g (\rho_p / \rho_L - \phi_2)}{3C_D \phi_1} \right] \\
 & \cdot \left[1 - \exp \left\{ -\frac{3C_D \phi_1}{4(\rho_p / \rho_L + \alpha)} \cdot \frac{L_{max}}{r_p} \right\} \right] = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

抵抗係数 C_D は 0.44, 球体半径 r_p は 0.016 m, 粒子密度 ρ_p は 910 kg/m^3 , 液体密度 ρ_L は 1000 kg/m^3 , 液体の表面張力 σ_{GL} は

0.073 N/m^{28} , 重力加速度 g は 9.8 m/s^2 である。また A は液体表面の凹み生成により表面張力が増加する係数 (—), α は仮想質量に関する係数 (—), ϕ_1 と ϕ_2 はそれぞれ C_D と浮力に対する補正係数 (—) である。 L_{max} の計算値 ($A=2.5$, $\alpha=0.25$, $\phi_1=1$, $\phi_1=0.5$) を Fig.8 に示すが, θ による L_{max} の差はほとんどなく, 本研究の実測値より大幅に小さくなった。

表面張力の影響を無視 ($A=0$) すると, L_{max} は式 (2) で表される。

*A1, B2, D1, D2, E1, E2: Previous work²⁶⁾ ($\theta = 95^\circ$)
 H1, H2, H3 : Present work ($\theta = 6^\circ$)
 R1, R2, R3, R4 : Present work ($\theta = 129^\circ$)

Fig. 4. Change of penetration depths of a particle from water surface with time.

$$L_{\max} = \frac{4r_p(\rho_p/\rho_L + \alpha)}{3C_D\phi_1} \ln \left\{ 1 - \frac{3C_D\phi_1 v_{p0}^2}{8r_p g(\rho_p/\rho_L - \phi_2)} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) の計算値 ($\alpha=0.5$, $\phi_1=1$, $\phi_2=1$) も Fig.8 に示すが, 実測値よりも大きくなった。したがって, 表面張力による粒子の運動エネルギー損失はあるものの, その影響は Ozawa ら¹¹⁾ の水銀実験よりは小さいと考えられる。

3・4 残留気泡径および平均浮上速度

v_{p0} と残留気泡径 d_B の関係を Fig.9 に示す。図中の矢印は離脱する前の気泡径であることを意味する。ばらつきはあるものの, $\theta=95^\circ$ および 129° の場合は v_{p0} が高い方が d_B は

大きくなった。一方, $\theta=6^\circ$ の場合は v_{p0} が 6.7 m/s 以上になると残留気泡が粒子から離脱した。この理由としては, v_{p0} が高くなるほど深く侵入するため水面へ浮上するまでの間に粒子の濡れが進行しやすいことや, 水中を運動する粒子に随伴する水の流動が強くなることが影響したと推定される。

$H_{\max}$ と d_B の関係を Fig.10 に示す。 $H_{\max}$ が大きくなるほど d_B も増加する傾向にあり, 両者の間には相関があると言える。 θ が気柱生成に及ぼす影響については 4・1 節, d_B に及ぼす影響については 4・2 節で考察する。

d_B と平均浮上速度の関係を Fig.11 に示す。 d_B が同じであ

Fig. 5. Schematic diagram of a particle behavior and analyzed factors in present work.²⁶⁾ (Online version in color.)

Table 2. Experimental results.

No.	Particle velocity after penetration, v_{p1} (m/s)	Maximum length of an air column, $H_{\max}$ (mm)	Maximum penetration depth, $L_{\max}$ (mm)	Diameter of a residual bubble, d_B (mm)	Average penetration angle ($^\circ$)	Average flotation velocity (m/s)	Detention time of a particle, t_d (s)
H1	1	1.6	21.2	32.7	2.0	4.5	0.130
	2	1.8	21.6	31.7	2.1	5.3	0.128
	3	1.5	17.7	28.9	2.0	19.0	0.136
H2	1	1.9	30.5	48.3	3.0 (0)*	3.5	0.080
	2	3.2	32.7	49.4	2.4 (0)*	4.5	0.084
	3	3.6	29.3	48.1	2.4 (0)*	1.3	0.087
H3	1	3.1	34.1	43.5	0.0	5.1	0.091
	2	2.9	22.5	26.5	3.2 (0)*	26.6	0.089
	3	2.7	36.1	51.7	2.7 (0)*	1.0	0.091
R1	1	1.2	12.3	22.0	0.9	5.0	0.089
	2	1.2	9.2	18.9	1.8	17.5	0.112
	3	0.9	8.0	17.5	0.0	5.5	0.070
R2	1	2.2	21.4	32.0	1.5	10.1	0.116
	2	1.7	22.8	30.6	1.7	9.7	0.132
	3	1.4	23.3	33.2	1.7	7.0	0.117
R3	1	3.4	27.3	28.9	2.0	30.0	0.165
	2	3.8	25.1	31.9	4.1	1.7	0.211
	3	1.8	25.6	28.1	2.3	28.1	0.163
R4	1	2.0	24.6	27.8	3.2	23.3	0.173
	2	2.0	29.2	36.3	4.3	5.5	0.170
	3	3.5	26.4	34.4	4.0	16.1	0.225

*Detaching the residual bubble from the particle after rupture of the air column.

**Unavailable result for analysis because average penetration angle is larger than 20° .

れば平均浮上速度は θ によらずほぼ同じであった。前報²⁶⁾と同様に粒子の見かけ密度を考慮した終末速度の計算値と比較すると、残留気泡が2 mm以上で平均浮上速度が計算値をやや下回った。これは残留気泡の存在により粒子の投影断面積が増加し、液体との摩擦力が増加したためと考えられる。

3・5 粒子滞留時間

$L_{\max}$ と粒子滞留時間 t_d の関係をFig.12に示す。左側の(a)

Fig. 6. Comparison of particle velocity before penetration and after penetration.

Fig. 7. Effect of particle velocity before penetration on maximum length of an air column.

Fig. 8. Effect of particle velocity before penetration on maximum penetration depth.

は θ で層別したグラフであるが、 $\theta = 129^\circ$ の場合は $L_{\max}$ が大きくなっても t_d は変わらなかった。一方、 $\theta = 6^\circ$ は $L_{\max}$ が大きくなると t_d も大きくなった。次に、右側の(b)は d_B で層別したグラフであるが、 d_B に対応して傾きが異なる2つのデータ群に分離した。 θ を変えても前報と同様の結果が得られたことから、粒子の濡れ性によらず d_B が t_d に及ぼす影響は大きいと言える。なお、 d_B が2 mm以上のデータ群から上方に外れている4点(図中の点線枠内)は残留気泡の離脱が起こった粒子であり、これらはいずれも $\theta = 6^\circ$ である。したがって、濡れ性が良好な粒子を高い速度で吹き込めば、深くまで侵入するだけでなく残留気泡が生成しても容易に離脱するため浮上もしにくく、滞留時間を長くできると考えられる。

4. 考察

粒子の侵入に伴って生成する気柱が残留気泡の原因となり、粒子滞留時間の減少に繋がることから、気柱が生成する粒子速度の閾値(臨界粒子速度)と θ の関係について検

Fig. 9. Effect of particle velocity before penetration on diameter of a residual bubble. (Arrow means that the bubble was detached from the particle in water.)

Fig. 10. Relation between maximum length of an air column and diameter of a residual bubble.

討した。次に、粒子の濡れ性により残留気泡径が変化する機構について考察した。また、 θ が大きいと残留気泡径が大きくなるだけでなくFig.8に示したように最大侵入深さも小さくなり粒子滞留時間の減少に繋がるため、その機構についても考察した。

4・1 気柱生成の臨界粒子速度

本研究における気柱生成の有無をFig.13に示す。Duezら²²⁾の実験式による臨界粒子速度 v_p^* を実線で示すが、これより v_0 が低い領域でも気柱が生成した。破線は本研究の結果から推定した v_p^* であり、 $\theta \leq 90^\circ$ においてDuezらの実験式では $v_p^* = 7.3$ m/sであるが本研究では3 m/s前後と推

定される。

Duezらと本研究の実験条件をTable 3に示す。本研究がDuezらと異なるのは、(a) 粒径が小、(b) 粒子と液体の密度比が小、(c) キャリアガスによる粒子の吹き付け、(d) 雰囲気圧力が低い、の4点である。まず (a) 粒径については、Duezらの実験において粒径が7.0~25.4 mmと大きく異なっても $\theta \leq 90^\circ$ の v_p^* にほとんど差がなかったことから、粒径が v_p^* に及ぼす影響は小さいと考えられる。次に、(b) 密度比については、粒子密度が液体密度より小さくなるほど粒子が受ける浮力は大きくなるため、液膜の進展は起こりやすくなって v_p^* は高くなると考えられる。一方、(c) の

Fig. 11. Effect of diameter of a residual bubble on average floatation velocity of a particle.

Fig. 12. Relation between maximum penetration depth and detention time of a particle.

Fig. 13. Comparison of experimental results in present work and threshold particle velocity of generating an air column, v_p^* .

Table 3. Comparison of experimental conditions between the previous work and present work.

Author	Particle	Liquid	Blasting method	Pressure above liquid surface
Duez ²²⁾	Diameter: 7.0-25.4 mm Material: Glass/Al/Steel	Water Isopropanol Ehtanol Water-glycerol	Free fall	Atmospheric
Present work	Diameter: 3.2 mm Material: Polypropylene	Water	Ar gas	Reduced (52 kPa)

キャリアガスによる粒子吹き付けについては、キャリアガスにより水面が凹むためキャリアガスのない自由落下条件よりも気柱が生成しやすくなり v_p^* を低下させる要因になると考えられる。(d) の雰囲気気圧力については、自由落下条件であれば気柱生成挙動にほとんど影響しないと推定されるが、キャリアガス吹き付けの条件ではガス流量が同じでも減圧するとガス流速が高くなり、キャリアガスによる水面の凹みが大きくなると推定されるため、 v_p^* が低くなる可能性がある。すなわち、本研究で v_p^* が低くなったのは (c) と (d) に起因すると考えられるが、雰囲気気圧力により v_p^* がどの程度変化するかは今後の検討課題である。

4・2 気柱の付着位置が残留気泡径に及ぼす影響

Sakai and Iguchi²¹⁾ は気柱剥離角という指標により気柱の付着位置を評価している。そこで本研究も気柱剥離角を評価し、 θ の影響や d_B との相関を解析した。気柱剥離角の定義を Fig.14 (a) に示す。気柱の破断直前において、粒子の重心点に対して気柱が粒子に付着する点（粒子－液体－気柱の三相境界）と、粒子の進行方向先端との角度が気柱剥離角である。気柱剥離角が小さくなるほど、気柱の付着位置が粒子の前方にあることを意味する。粒子左側の気柱剥離角 β_L (°) について、気柱の付着位置が粒子中心より後方 ($\beta_L \geq 90^\circ$) の場合は $\sin(180^\circ - \beta_L) = \Delta x_L / r_p$ 、前方 ($\beta_L \leq 90^\circ$) の場合は $\sin \beta_L = \Delta x_L / r_p$ が成り立つため、 β_L は式 (3) あるいは式 (4) で表される。

$$\beta_L = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_L}{r_p} \right) \quad (\beta_L \geq 90^\circ) \quad (3)$$

$$\beta_L = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_L}{r_p} \right) \quad (\beta_L \leq 90^\circ) \quad (4)$$

粒子右側の気柱剥離角 β_R (°) も同様である。この β_L と β_R の平均値 β_{ave} が v_{p0} および θ によってどのように変化するか解析した。さらに、Fig.14 (b) に示すように、気柱破断直後において粒子表面に残留した気柱の付着位置 X_L 、 X_R の中点

と気柱先端の距離を残留気柱高さとして定義した。残留気柱高さが大になるほど、気柱が粒子後方の離れた位置で破断したことを意味する。この残留気柱高さが β_{ave} によりどのように変化するか解析した。

v_{p0} と β_{ave} の関係を Fig.15 に示す。 v_{p0} が高くなるほど、あるいは θ が大になるほど β_{ave} が小さくなる傾向が見られた。さらに、Fig.16 に示すように β_{ave} が小さくなるほど残留気柱高さは増加する傾向にあり、Fig.17 に示すように d_B も大きくなった。すなわち、 v_{p0} が高くなるほど、あるいは θ が大になるほど粒子表面の液膜が進展しにくくなるため気柱の幅は広がりやすくなり、さらに気柱が粒子後方の離れた位置で破断しやすくなるため、 d_B が増加したと考えられる。このように、 β_{ave} により v_{p0} や θ が異なる条件の d_B を統一的に整理することができた。

Sakai らによれば、慣性力と浮力の比を表す無次元数の修正フルード数 Fr^* ($= v_{p0} \{ \rho_p / (\rho_L \cdot g \cdot d_p) \}^{1/2}$, d_p : 粒子直径) が大きくなるほど β は小さくなる傾向にある。このため v_{p0} が高くなると Fr^* は増加し β は小さくなるが、本研究でも同様の結果が得られた。ただし、 θ の影響は Fr^* では説明が

Fig. 15. Effect of particle velocity before penetration on separation angle of an air column.

Fig. 14. Schematic diagram of the air column on the particle. (Online version in color.)

できないため、粒子が高速で運動する動的な状況における濡れ現象や気液界面の挙動に対して θ がどのように影響するかは、今後詳細に検討する必要がある。

4・3 接触角が最大侵入深さに及ぼす影響

最大侵入深さは、水面突入から気柱破断までの侵入距離と、気柱破断から最深点までの侵入距離に分けられる。この両者に対して θ が及ぼす影響を検討した。まず水面突入から気柱破断までの侵入距離（気柱破断深さ）は最大気柱長さ $H_{\max}$ に粒子半径の1.6 mmを加えた長さであるからFig.7とほぼ同じであり、 $\theta=129^\circ$ の気柱破断深さは 6° や 95° の水準よりもやや小さいと言える。水面突入から気柱破断までの間に粒子は浮力、流体抵抗力および表面張力による力を受けるが、本研究において粒子と液体の密度差は一定であるから、浮力の影響は変化しないと考えられる。また θ が大きくなるほど付着仕事は低下して粒子-液体界面がすべりやすくなる²⁹⁾ことから、流体抵抗力は小さくなり、運動エネルギーの消費も小さくなる。したがって流体抵抗力でも気柱破断深さの変化を説明できない。表面張力の影響については、粒子が表面張力から受ける力 F はFig.18に示すように気柱と粒子の接触線の長さ L と表面張力 σ_{GL} の鉛直成分 σ_y の積であるから式(5)で表され、 $\beta=90^\circ$ で F は最大値を取る。なお、 $\sigma_{GL}=0.073 \text{ N/m}^{28)}$ とした。

Fig. 16. Effect of separation angle of an air column on height of a residual air column on the particle.

Fig. 17. Effect of separation angle of an air column on diameter of a residual bubble.

$$F = 2\pi r_p \sigma_{GL} \cos^2 |\beta - 90^\circ| \quad (5)$$

Fig.15において $\theta=129^\circ$ では v_{p0} が高くなるほど β_{ave} が小さくなり、 v_{p0} が7.2~10.9 m/sでは β_{ave} は86~106°であるから F はほぼ最大となる。したがって気柱破断深さが変化したのは表面張力による力の影響と考えられ、残留気泡と同様に気柱破断深さに関しても粒子表面における気柱の付着位置が重要な因子であると言える。

次に、気柱破断から最深点までの侵入距離に及ぼす θ の影響を検討した。水中で粒子が受ける力は浮力と流体抵抗力である。 d_B と気柱破断から最深点までの侵入距離の関係をFig.19に示すが、両者の間に相関は見られなかった。したがって d_B が大きくなって浮力が増加しても、気柱破断後の侵入距離はあまり変化しないと言える。また、同じ d_B で比較すると、 θ が大きい方が侵入距離は小さい傾向にあった。すなわち、流体抵抗力の影響も小さいと言える。した

Fig. 18. Effect of separation angle of an air column on the force caused by surface tension of water. (Online version in color.)

Fig. 19. Relation between diameter of a residual bubble and penetration depth after rupture of an air column.

がって、気柱破断から最深点までの侵入距離に及ぼす θ の影響は小さいと考えられる。

以上の検討から、 θ が大きくなると最大侵入深さが小さくなるのは、気柱が生成してから破断するまでに表面張力から受ける力が増加するためと推測される。なお、今回は気柱破断直前における気柱剥離角を用いて考察したが、厳密には粒子侵入から気柱破断までの気柱付着位置の変化を考慮する必要がある。本研究では粒子侵入の0.012~0.028 s後に気柱が破断しており、この短時間における気柱付着位置の変化は今後の検討課題である。

5. 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い、濡れ性が粒子の侵入深さや滞留時間に及ぼす影響を調査した。さらに、滞留時間に関する粒子表面の残留気泡径や、その原因となる気柱生成について支配因子を解析し、濡れ性により残留気泡径や侵入深さが変化する機構を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 水との接触角が大きな粒子は最大侵入深さが小さく、かつ残留気泡径が大きくなるため、水面へ短時間で浮上した。一方、水との接触角が小さな粒子は最大侵入深さが大きくなり、さらに水中で残留気泡が粒子から離脱するため、滞留時間が長くなった。
- (2) 本研究における気柱生成の臨界粒子速度は、従来研究の自由落下により測定された値より低かった。これはキャリアガスにより水面が凹むことで自由落下よりも気柱が生成しやすくなるためと推察される。
- (3) 侵入直前の粒子速度や接触角が大きくなると残留気泡径が大きくなるのは、気柱が粒子に付着する位置が粒子の進行方向側へ変化し、気柱破断後の残留気泡の幅と高さが増加するためである。
- (4) 接触角が大きい粒子は気柱破断が起こる侵入深さが小さくなるが、気柱破断後の侵入距離に対する接触角の影響は見られなかった。気柱破断深さが小さくなるのは気柱の付着位置が粒子の進行方向側へ変化することで表面張力による力が増加するためであり、これにより最大侵入深さも小さくなると考えられる。

文 献

- 1) S. Kitamura, Y. Mizukami, T. Kaneko, T. Yamamoto, R. Sakomura, E. Aida and S. Onoyama: *Tetsu-to-Hagané*, **76**(1990), 1801 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.76.11_1801
- 2) A. Sakai, T. Tokoro and T. Hirata: *Tetsu-to-Hagané*, **81**(1995), T21 (in Japanese).
- 3) T. Nozaki, K. Nakanishi, H. Morishita, S. Yamada and F. Sudo: *Tetsu-to-Hagané*, **68**(1982), 1737 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.13_1737
- 4) Y. Hara, H. Kitaoka, T. Sakuraya, T. Nozaki and H. Nishikawa: *Tetsu-*

- to-Hagané*, **74**(1988), 823 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.74.5_823
- 5) K. Endoh, H. Takamoto, J. Nakagawa, Y. Obana, H. Takahama, T. Kaneko, A. Inaba and T. Yamamoto: *Seitetsu Kenkyu*, **335**(1989), 20 (in Japanese).
- 6) H. Okano, Y. Tajiri, M. Satoh, S. Fukagawa and K. Shinme: *Sumitomo Met.*, **50**(1998), 65 (in Japanese).
- 7) T. Kirihara, K. Aizawa and Y. Kato: *Tetsu-to-Hagané*, **89**(2003), 827 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.89.8_827
- 8) T. Kirihara, H. Uehara, H. Nakato and Y. Kato: *Tetsu-to-Hagané*, **89**(2003), 1018 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.89.10_1018
- 9) T. A. Engh, K. Larsen and K. Venas: *Ironmaking Steelmaking*, **6**(1979), 268.
- 10) E. Kimura: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23**(1983), 522. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.522>
- 11) Y. Ozawa, K. Suzuki and K. Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **69**(1983), 753 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.69.7_753
- 12) J.-G. Lee and M. Tokuda: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28**(1988), 278. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.28.278>
- 13) T. Okuno, M. A. Uddin, Y. Kato, S. B. Lee and Y. H. Kim: *ISIJ Int.*, **57**(2017), 1902. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-336>
- 14) K. Narita, T. Makino, H. Matsumoto and K. Ogawa: *Tetsu-to-Hagané*, **69**(1983), 392 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.69.3_392
- 15) T. Oda, T. Inoue and I. Hoshikawa: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **56**(2006), 32 (in Japanese).
- 16) K. Ogawa, T. Onoye, H. Matsumoto and K. Narita: *Tetsu-to-Hagané*, **71**(1985), A29 (in Japanese).
- 17) K. Ogawa, T. Makino, H. Matsumoto, T. Onoye and K. Narita: *Trans. Iron Steel Int. Jpn.*, **25**(1985), 1220. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.25.1220>
- 18) N. Shimamoto, M. Iguchi, T. Uemura and N. Yonehara: *Mater. Trans.*, **45**(2004), 910. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.910>
- 19) M. Tanaka, M. Hashimoto, R. Tsujino and M. Iguchi: *J. Jpn Soc. Exp. Mech.*, **8**(2008), 201 (in Japanese). <https://doi.org/10.11395/jjsem.8.201>
- 20) M. Tanaka, R. Tsujino, A. Hiratsuka and M. Iguchi: *J. Jpn Soc. Exp. Mech.*, **9**(2009), 265 (in Japanese).
- 21) Y. Sakai and M. Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **98**(2012), 1 (in Japanese). <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.98.1>
- 22) C. Duez, C. Ybert, C. Clanet and L. Bocquet: *Nat. Phys.*, **3**(2007), 180. <https://doi.org/10.1038/nphys545>
- 23) K. Katoh, R. Minami, T. Wakimoto, Y. Ueda and M. Iguchi: *Jpn. J. Multiph. Flow*, **28**(2015), 547 (in Japanese). <https://doi.org/10.3811/jjmf.28.547>
- 24) M. Nakano and K. Ito: *ISIJ Int.*, **56**(2016), 1537. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-183>
- 25) M. Nakata and T. Inamuro: Proc. 30th Symp. on Computational Fluid Dynamics, The Japan Society of Fluid Mechanics, Tokyo, (2016), B05-4 (in Japanese).
- 26) A. Matsuzawa, K. Sasai, H. Harada and M. Numata: *Tetsu-to-Hagané*, **104**(2018), 1 (in Japanese). <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-041>
- 27) Kagaku-Binran Kisohen (Handbook of Chemistry: Pure Chemistry), 3rd ed., Vol. II, ed. by The Chemical Society of Japan, Maruzen, Tokyo, (1984), 90 (in Japanese).
- 28) Kagaku-Binran Kisohen (Handbook of Chemistry: Pure Chemistry), 3rd ed., Vol. II, ed. by The Chemical Society of Japan, Maruzen, Tokyo, (1984), 81 (in Japanese).
- 29) H. Sakao and K. Mukai: *Tetsu-to-Hagané*, **63**(1977), 513 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.3_513