

液中分散粒子の気泡付着除去特性 —接触角の影響—

新井 宏忠*・飯田 奈穂実*²・松本 克才*³・谷口 尚司*³
中岡 威博*⁴・國井 一孝*⁴・坂本 浩一*⁴

Characteristics of Adhesion and Removal of Suspended Particle in Liquid by Bubble—Effect of Particle Contact Angle—
Hirotada ARAI, Naomi IIDA, Katsutoshi MATSUMOTO, Shoji TANIGUCHI, Takehiro NAKAOKA, Kazutaka KUNII and Koichi SAKAMOTO

Synopsis : Gas injection is generally practiced in refining processes for metallurgy. The expectances for the gas injection involve the homogenization of bath temperature and compositions, and removal of second phase and dissolved impurities from molten metals.

It is widely recognized that inclusions in steel cause defects to the products. Therefore, it is important to remove inclusions from liquid steel. Solid inclusions such as alumina and silica are not wetted by the liquid steel and can be removed by attachment to gas bubbles. The attachment and removal by bubble flotation is expected as one of promising techniques on inclusion removal in liquid steel. The aim of the present work is to investigate the effects of some factors such as particle diameter, agitation speed and particle contact angle to removal rate. In this study, water model experiments have been done under turbulent flow condition using a mechanically agitated vessel. It was confirmed that the removal rate of suspended particles in liquid shows first order kinetics until 4 min in the initial stage. Furthermore, it was found that the collision frequency function has decreased with increasing agitation speed and with decreasing contact angle.

Key words : inclusion; bubble-particle collision and attachment; removal rate constant; contact angle; collision frequency function; liquid steel; water-model experiment.

1. 緒言

液からの粒子の分離・除去に関する操作は、様々な分野で利用されている。材料製造プロセスにおいても、このような操作は重要な位置を占めている。鉄鋼精錬プロセスでは、溶鋼中の介在物除去がこれに当たる。

介在物の起源は、主に脱酸生成物やスラグの巻き込みによるものである。溶鋼中にはこのような非金属介在物が浮遊している。大型の介在物が製品中に残留すると、鋼の品質および材質に悪影響を与えることが知られている。特に品質要求の厳しい薄板、軸受鋼やスチールコードなどでは亀裂や割れ、破断の原因となり、品質や材質の低下とともに、時に重大な事故の原因にもなる。また、耐食性の低下など製品の機能や特性にも悪影響を及ぼす。よって、溶鋼中の介在物は可能な限り除去することが望ましい。

数百 μm 程度の粗大な介在物や凝集・肥大化した介在物は、溶鋼との密度差を利用した浮上分離によって除去が可能である。この分離法は、現在の製鋼プロセスにおいて最も基本的なものである。しかし、数十 μm 程度の微小な介在物は終末浮上速度が小さく、浮上分離の効果は期待でき

ない。したがって、これらの介在物を除去するために様々な手法が提案されている。その1つに熔融金属中への不活性ガスの吹込みが挙げられる。溶鋼中介在物が気泡に付着することはよく知られており、これを利用した介在物除去法の開発が期待されている。

気泡による介在物除去は浮遊選鉱法における基本的な現象を利用したもので、多くの研究が行われている¹⁻⁴⁾。しかし、既往の研究は気泡周囲の液の流れが層流もしくは層流に近い状態に限定されたもので、液中を気泡が直線的に上昇し、気泡の前方の特定の流線に乗った粒子が気泡に付着するという仮定のもとで議論されている場合が多い。したがって、液が乱流状態である場合の気泡-粒子間付着現象に関しては未解明な部分が残されている。

また、液中分散粒子と液との界面特性、特に粒子の接触角は除去効率に大きく影響することが知られている。気泡-粒子間付着に及ぼす接触角の効果について、様々な研究が行われているものの⁵⁾、その機構については十分明らかになっていない。したがって、粒子の接触角が除去効率に与える影響を定量的に検討する必要がある。

そこで、本研究では試料粒子に濡れ性の異なる3種類の

平成18年8月3日受付 平成18年9月14日受理 (Received on Aug. 3, 2006; Accepted on Sep. 14, 2006)

* 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University, 6-6-02 Aoba-yama Sendai 980-8579)

* 2 東北大学大学院生 (現: 日本発条 (株)) (Graduate Student, Tohoku University, now NHK Spring Co., Ltd.)

* 3 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

* 4 (株) 神戸製鋼所 (Kobe Steel Ltd.)

プラスチック粒子を用いて、攪拌槽による粒子除去に関する水モデル実験を行った。本実験では、乱流条件下における粒子除去速度に及ぼす粒子径、攪拌速度および接触角の影響について実験的に検討を行った。

2. 理論的背景

気泡付着除去に関する理論的背景を以下にまとめる。

一般に、気泡を用いた液中分散粒子の除去速度は、次式に示すように1次速度式で与えられることが知られている⁶⁾。

$$-\frac{dN}{dt} = k_g N \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N は粒子個数濃度(m^{-3})、 k_g は除去速度定数(s^{-1})である。

また、気泡による粒子の付着除去を粒子と気泡の衝突現象と考えれば、除去速度は次式のように表すことができる。

$$-\frac{dN}{dt} = \beta N_b N \dots\dots\dots (2)$$

ここで N_b は気泡個数濃度(m^{-3})である。 β は衝突頻度関数($m^3 s^{-1}$)と呼ばれ、単位時間当たりに気泡1個に対して粒子が衝突する頻度を表す。

式(1)、(2)より、 k_g は β と N_b の積で表される。

$$k_g = \beta N_b \dots\dots\dots (3)$$

液中において気泡と粒子が衝突・付着するには、気泡-粒子間の液体を排除する必要があり、それが衝突・付着を阻害する。また、電子分極に基づくLondon-van der Waals力が作用することも考慮しなければならず、そのための補正係数を導入する必要がある。この補正係数は、浮遊選鉱法に関する研究において回収確率 P に相当する⁷⁾。したがって、式(3)はさらに次のように表される。

$$k_g = \beta_0 P N_b \dots\dots\dots (4)$$

β_0 は気泡-粒子間の流体の存在を無視した場合の衝突頻度関数である。

β_0 に関しては、層流、乱流の各条件について様々な理論式が導出されている⁸⁾。よって、気泡付着の研究においては回収確率 P に焦点が置かれる。回収確率 P に関しても、様々な理論的考察、実験的検討がなされている⁹⁾。

この確率はさらに、次の3つの項の積で表される。

$$P = P_c P_a (1 - P_d) \dots\dots\dots (5)$$

P_c, P_a, P_d はそれぞれ衝突確率、付着確率、脱離確率である。これは、気泡と粒子の付着が衝突と付着の2つの過程で起

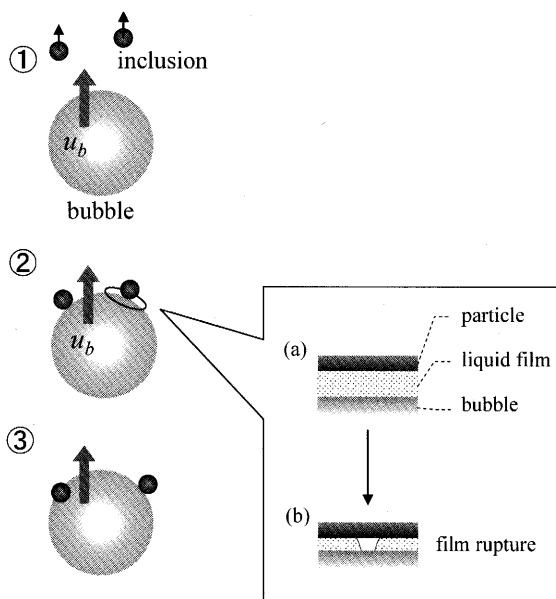


Fig. 1. Process of adhesion between bubble and inclusion. 1: approaching process; 2: collision(a) and adhesion(b) process; 3: flotation of the bubble-inclusion aggregate.

Table 1. Values of A and n for different flow conditions.

Flow conditions	A	n
Stokes flow ($Re < 1$)	$\frac{3}{2}$	2
Intermediate ($0.2 < Re < 100$)	$\left[\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right]$	2
Intermediate ($0 < Re < 300$)	$\frac{3}{2} \left[1 + \frac{(3/16)Re}{1 + 0.249Re^{0.56}} \right]$	2
Potential flow	3	1

こると考えられているからである(Fig. 1)。また、粒子が外力の影響により、気泡から脱離することも考えられている。

以下、それぞれの確率について簡単に述べる。

2.1 衝突確率 P_c

気泡と粒子間に存在する流体の存在を無視すれば、粒子は気泡が通過した経路内の粒子全てと衝突する。この状態では衝突確率は1となる。しかし、流体中においては気泡周囲の流れの影響により、気泡が通過した体積内の粒子全てとは衝突しないため、衝突確率は1以下となる。

この衝突確率については、気泡周囲の流線の方程式を求めることによって理論的に導出されている⁷⁾。一般に、衝突確率は

$$P_c = A \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^n \dots\dots\dots (6)$$

と表される。 d_p は粒子径(m)である。ただし、気泡径は粒子径よりも十分大きいとする。 A, n は気泡レイノルズ数

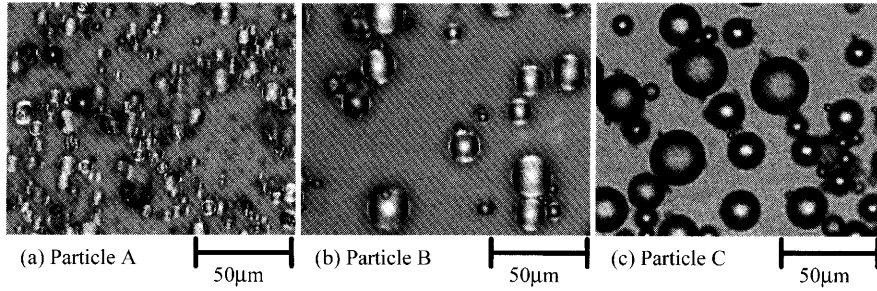


Fig. 2. Microphotographs of particles.

Reによって変化する係数であり、Table 1に代表的な値を示す。なお、気泡レイノルズ数は次のように定義される。

$$Re = \frac{u_b d_b}{\nu} \dots\dots\dots (7)$$

u_b は気泡の上昇速度($m s^{-1}$)、 ν は液の動粘性係数($m^2 s^{-1}$)である。

2.2 付着確率および脱離確率

粒子と気泡が接近すると、粒子と気泡の間には液膜が形成されることが提言されている¹⁰⁾。そのため、気泡に接近した粒子は付着に至るまでに(i)気泡への衝突、(ii)気泡表面上における滑り、(iii)気泡と粒子間に存在する液膜の厚さの減少と破裂といった過程を経ることになる。(i)~(iii)の過程に要する時間は導入時間 t_i と呼ばれ、この時間を経なければ粒子は気泡に付着できない。

そこで付着確率は、気泡表面上を粒子が滑る時間(滑り時間： t_s)よりも導入時間 t_i が短い場合に粒子が気泡に付着するとして、様々な理論式が導出されている⁶⁾。異なる流動状態において導出された付着確率について以下に示す。

$$P_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left\{ \frac{-3u_b t_i}{d_b (d_b / d_p + 1)} \right\} \right] \quad (Re < 1) \dots\dots\dots (8)$$

$$P_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left\{ \frac{-(45 + 8Re^{0.72})u_b t_i}{15d_b (d_b / d_p + 1)} \right\} \right] \quad (0 < Re < 100) \dots\dots\dots (9)$$

$$P_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left\{ \frac{-3u_b t_i}{d_b + d_p} \right\} \right] \quad \text{ポテンシャル流れ} \dots\dots\dots (10)$$

また、付着確率は気泡と粒子の表面化学的なパラメータに左右され、特に接触角の影響は顕著であると言われている⁹⁾。

脱離確率についても同様に、様々な理論式が提案されている。Yoonは粒子-気泡間の静電気力、van der Waals力および疎水力に起因した気泡-粒子間ポテンシャルから理論式を導出している⁹⁾。また、気泡に付着した粒子に作用する脱離力と気泡-粒子間の付着力の力学的バランスから脱

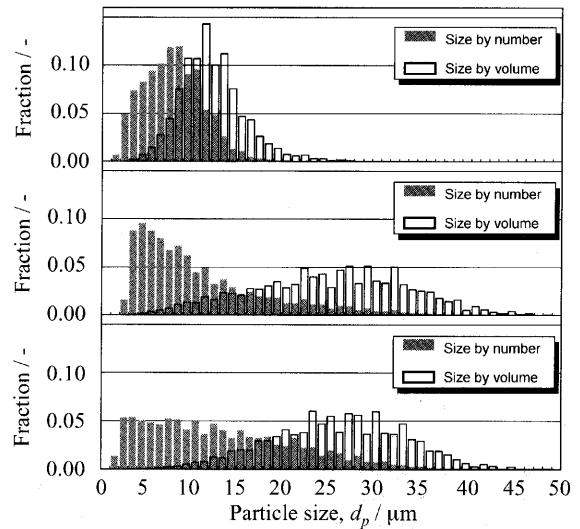


Fig. 3. Particle size distributions based on number and volume fraction.

離確率が考察されている場合もある¹¹⁾。

3. 実験

3.1 試料粒子

実験に用いた粒子はEPOSTAR粒子(ベンゾグアナミン-ホルムアルデヒド縮合物：日本触媒(株)製)、MR-20粒子(アクリル：綜研科学(株)製)、MBX30粒子(ポリメタクリル酸メチル：積水化成工業(株)製)の3種類である。以後、順に粒子A、B、Cと呼ぶことにする。

各々の粒子の光学顕微鏡写真および粒径分布、体積分布をそれぞれFig. 2およびFig. 3に示す。また、粒子の密度をTable 2に示す。いずれの粒子の密度も水の密度よりもやや大きい、粒子径が十分小さいので本実験のように攪拌を加えている場合、槽内に均一に分散し、粒子の沈降は無視できる。

3.2 接触角測定

本研究では、除去速度に及ぼす接触角の影響について検討を行う。本実験で用いた粒子の接触角が未知であるため、以下に述べる浸透法を用いてそれぞれの粒子の接触角を測定した。

Table 2. Properties of particle.

Particle	Material	Mean size d_p [μm]		Density ρ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	
		Based on number	Based on volume		
A	EPOSTAR	Benzoguanamine-formaldehyde condensation	8.41	11.7	1350
B	MR-20	Acrylic	10.7	24.8	1210
C	MBX-30	Polymethyl methacrylate	13.8	24.7	1200

3.2.1 原理

浸透法は、粒子充填層が多数の毛細管から構成されると仮定し、毛細管現象を利用して接触角を測定する方法である¹²⁾。

粒子充填層内に水が浸透していく場合、充填層に加わる圧力は毛管圧と静水圧の和で表すことができる。

$$\Delta P = \Delta P_{\text{cap}} + \Delta P_{\text{hyd}} \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 ΔP は全圧(Pa)であり、 ΔP_{cap} は毛管圧(Pa)、 ΔP_{hyd} は静水圧(Pa)である。

Laplace-Youngの式より、 ΔP_{cap} は次式で表される。

$$\Delta P_{\text{cap}} = \frac{2\gamma_l \cos\theta}{r_c} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 γ_l は液の表面張力(Nm^{-1})、 θ は接触角(deg°)である。 r_c は有効平均毛管径(m)であり、次式で表すことができる¹²⁾。

$$r_c = \frac{2(1-\Phi)}{S_M \Phi \rho_p} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 Φ は粒子の充填率(-)、 S_M は粒子の比表面積(m^2kg^{-1})、 ρ_p は粒子の密度(kgm^{-3})である。

また、粒子充填層と給水器の液面差により生じる ΔP_{hyd} は次式で与えられる。

$$\Delta P_{\text{hyd}} = \rho_l g(h_0 - h) \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 g は重力加速度(ms^{-2})、 ρ_l は液の密度(kgm^{-3})、 h_0 は充填層と給水器の液面差(m)、 h は粒子充填槽内の浸透高さ(m)である。

毛管圧(式(12))と静水圧(式(14))が等しければ、 h は次のように与えられる^{13,14)}。

$$h = h_0 + \frac{2\gamma_l \cos\theta}{\rho_l g r_c} \dots\dots\dots(15)$$

したがって、式(13)、(15)より浸透液面高さを測定することで接触角を算出することができる。

3.2.2 接触角測定実験

測定に用いた装置の概略図を Fig. 4に示す。浸透部のガ

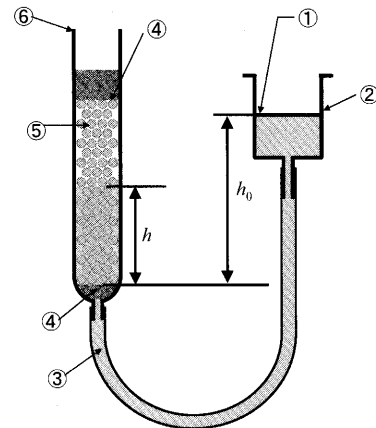


Fig. 4. Experimental setup for measurement of particle contact angle. 1: water; 2: water supplier; 3: rubber tube; 4: cotton; 5: particle; 6: glass tube.

ラス管は内径7mm、外径10mm、高さ153mmである。

実験は粒子充填層に一定の ΔP_{hyd} を加え、浸透が終了する位置を測定した。その高さより、式(15)を用いて接触角を求めた。

3.3 気泡個数濃度の測定

本実験における気泡径および気泡個数濃度を求めた。実験装置は、後述する粒子除去実験と同様である(Fig. 5)。

まず気泡径の測定法について説明する。円筒による気泡像の歪みを補正するため、円筒水槽を角型ジャケットに入れ、内部を水で満たす。攪拌槽左右両方からスリット光を当て、ノズルから発生する気泡をデジタルカメラで撮影した。得られた画像データより、面積相当径を算出し、気泡径を求めた。気泡径は攪拌速度によって変化し、本実験における気泡径は1.5~2.2mmとなった。

次に、同実験装置を用いて攪拌槽内の全気泡体積 V_g を測定した。まず蒸留水で槽を満たし、所定の攪拌速度に設定した後、ガスを吹き込む。ガス吹き込み後、定常状態に達するまでに攪拌槽より溢れた水の体積を測定し、槽内の全気泡体積とした。この体積をそれぞれの条件での平均気泡径に基づく気泡1個当たりの体積で割り、槽内の気泡個数を算出した。その結果を Fig. 6に示す。

3.4 粒子除去実験

実験装置は前報¹⁵⁾と同様である(Fig. 5)。邪魔板は幅20mm、厚さ2mmであり、完全邪魔板条件を満たしてい

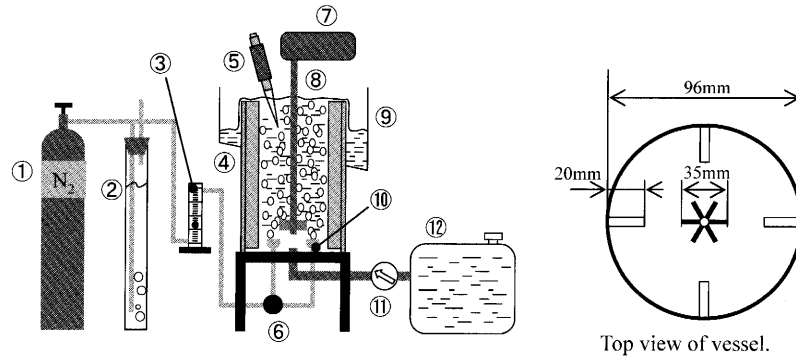


Fig. 5. Scheme of experimental setup for particle removal by bubble flotation and cross-section of cylindrical vessel. 1: gas reservoir; 2: overflow pipe; 3: flow meter; 4: cylindrical vessel with baffles; 5: sampler; 6: gas injection valve; 7: motor; 8: stirrer; 9: overflow receiver; 10: glass filter; 11: magnet pump; 12: water tank.

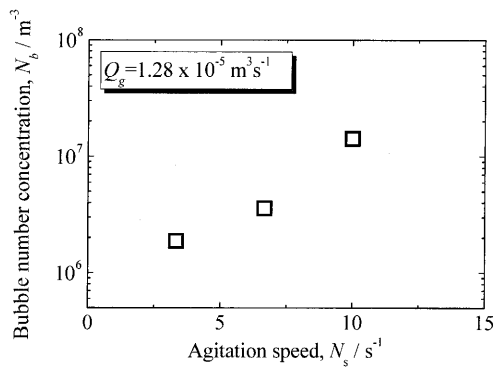


Fig. 6. Bubble number concentration as a function of agitation speed.

Table 3. Contact angle of the particle.

Particle	Contact angle θ / deg
A	(35)
B	90
C	91

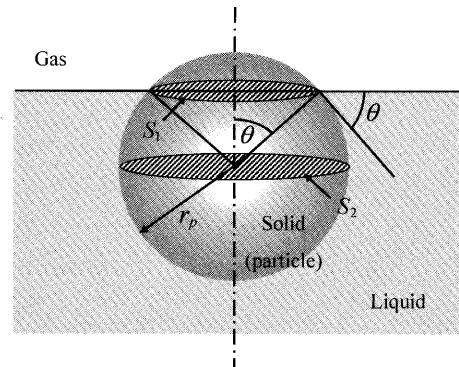


Fig. 7. Scheme of contact angle measurement by optical microscope. r_p : particle radius; θ : contact angle.

る¹⁶⁾。槽底面中央部には、蒸留水を流入させるためのノズルを設けている。これは液を攪拌槽上部よりオーバーフローさせることにより、自由表面に浮上してきた粒子を取り除くためである。

攪拌槽内の流動状態は攪拌レイノルズ数 Re_d で評価される。

$$Re_d = \frac{nd^2}{\nu} \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 n は攪拌速度(s^{-1})、 d は翼径(m)である。一般に $Re_d > 1000$ の範囲では乱流状態と判断される¹⁷⁾。本実験条件では $Re_d > 4000$ となり、攪拌槽内は乱流であることを確認している。

粒子除去実験は以下の手順で行った。
まず、所定量の粒子を超音波分散装置により蒸留水中へ分散させ、攪拌槽内に投入する。攪拌装置により液を所定の攪拌速度 ($3.3 \sim 10 s^{-1}$) で攪拌し、容器底面より窒素ガスを所定流量 ($1.28 \times 10^{-5} m^3 s^{-1}$) 吹き込む。一定時間間隔ごとに容器内の液の一部 (5.0 mL) をサンプリングし、マルチサイザー II (ベックマン・コールター (株) 製) を用い、Electric-Sensing-Zone 法によりサンプル液中の粒子数および粒度分布を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 接触角測定

浸透法により測定した粒子の接触角 θ を Table 3 に示す。測定精度は $\pm 0.2^\circ$ である。なお、粒子 A は水によく濡れるため、浸透法による測定が不可能であった。そこで、以下の手順により θ を求めた。

まず、水滴の上に粒子を浮かべ、光学顕微鏡を用いて粒子の投影面積 S_1 、水面上に現れている粒子の投影面積 S_2 をそれぞれ測定した (Fig. 7)。図より、 S_1 、 S_2 は以下のように表される。

$$S_1 = \pi r_p^2 \dots\dots\dots(17)$$

$$S_2 = \pi r_p^2 \sin^2 \theta \dots\dots\dots(18)$$

r_p は粒子半径 (m) である。式 (17)、(18) より S_1 、 S_2 の比を求

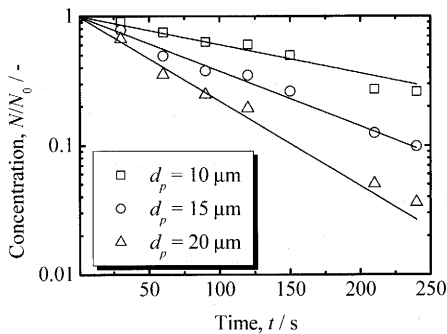


Fig. 8. Change in number concentration with time. Particle C, $N_s=10\text{ s}^{-1}$, $Q_g=1.28\times 10^{-5}\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$.

め、この粒子の θ とした。なお、測定した粒子は十分小さいため、この接触角測定方法では重力による粒子近傍の液面の変形を無視している。

4.2 粒子除去実験

測定した粒子個数濃度の経時変化より、前報¹⁵⁾と同様に式(19)を用いて、オーバーフローによる粒子個数濃度変化の影響を取り除いた。

$$N/N_0 = \exp\left(-\frac{Q_w}{V}t\right) \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 Q_w は水流量(m^3/s)、 V は容器体積(m^3)である。

この結果得られた粒子個数濃度変化をFig. 8に示す。図中の粒子個数濃度は初期粒子個数濃度で規格化してある。

ここで、式(1)より粒子個数濃度の経時変化は次式で与えられる。

$$N/N_0 = \exp(-k_g t) \dots\dots\dots(20)$$

図中の実線は、式(20)による粒子個数濃度の減少を表す。前報と同様に、式(20)を用いて除去速度定数 k_g を求め、以下考察を行う。

なお、L. Zhangらが長時間(10 min)にわたる粒子個数濃度の経時変化を追跡した結果、除去速度は粒子個数濃度の1.37次に比例したが¹⁸⁾、前報と同様に本報においても式(20)が成立する実験初期段階(4 min)に着目して考察を行った。

4.3 除去速度定数の粒子径依存性および接触角の影響

除去速度定数 k_g の粒子径依存性について、実験結果をFig. 9に示す。

接触角の大きい粒子Bおよび粒子Cに関しては、粒子径の増加とともに k_g も増加している。図より、粒子B,Cともに k_g は粒子径に対してほぼ1次の依存性を示した。

前報では、粒子径の増加とともに k_g が増加する要因として回収確率 P の増加によるものであると考察し、特に衝突確率の寄与が大きいことが考えられた。本報では、さらに気泡-粒子間の衝突頻度に着目し、より詳細な気泡附着現象の粒子径依存性について考察する。そこで前述の衝突頻

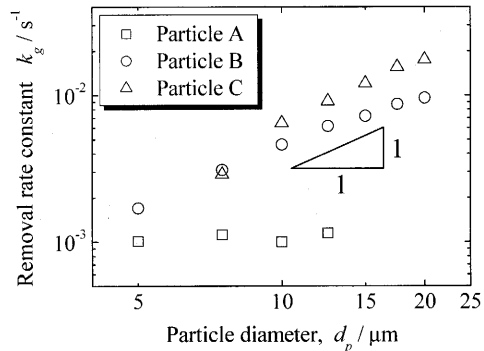


Fig. 9. Removal rate constant as a function of particle diameter for different values of particle contact angle. Particle A: $\theta=35^\circ$; Particle B: $\theta=90^\circ$; Particle C: $\theta=91^\circ$. $N_s=10\text{ s}^{-1}$, $Q_g=1.28\times 10^{-5}\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$.

度関数を導入し、以下検討を行う。

本報では、Pykeらの研究¹¹⁾をもとに回収確率 P の項を含まない衝突頻度関数 β_0 を用いて考察する。Pykeらは、次式の乱流下における気泡-粒子間の衝突頻度関数を導いた。

$$\beta_0 = 5.0 \left(\frac{d_p + d_b}{2} \right)^2 (v_p^2 + v_b^2)^{1/2} \dots\dots\dots(21)$$

ここで、 v_p 、 v_b はそれぞれ液に対する粒子および気泡の乱流変動速度である。本実験において、粒子径は十分小さいので液の流れに追従する。また、気泡径は粒子径よりも十分大きいので($d_b \gg d_p$)、式(21)は次式のように簡略化される。

$$\beta_0 = 5.0 \left(\frac{d_b}{2} \right)^2 (v_b^2)^{1/2} \dots\dots\dots(22)$$

上式より、 β_0 は粒子径に依存せず、 k_g の粒子径依存性に寄与しないことがわかる。よって本実験においては、乱流下の粒子-気泡間の衝突頻度は粒子径に依存しないと考えられる。

附着確率については、粒子径の増加とともに減少することに加え、本実験に用いた粒子B,Cの接触角では附着確率がほぼ1とみなせる^{7,10)}。これは接触角の大きい粒子ほど導入時間 t_i が減少するためである。これについては4.5で詳しく述べる。

以上より、 k_g の粒子径依存性は衝突確率の粒子径依存性によって決定され、大粒径の粒子ほど除去が速やかに進行すると考えられる。よって、流動状態が同じ条件では、接触角の大きい粒子の気泡附着除去効率は衝突確率が非常に重要な役割を担っていると考えられる。つまり、回収確率は衝突確率にほぼ等しい($P=P_c$)とみなせる。

一方、Fig. 9に示すように接触角の小さい粒子Aでは、粒子径に対して明確な依存性を示さなかった。また、 k_g の値は他の粒子と比較して著しく小さく、粒子個数濃度はほとんど減少しなかった。

この粒子が他の粒子と大きく異なるパラメータは接触角のみである。したがって、粒子径依存性および k_g の値の差は接触角によるものと考えられる。

式(6)より、接触角は衝突確率に影響しないことがわかる。一方、付着確率は接触角が小さくなるにつれて減少すると言われており、接触角の小さい粒子Aは付着確率が非常に小さくなるのが考えられる⁶⁾。そのため、気泡に粒子が衝突しても気泡にほとんど付着せず k_g がほぼ0になり、粒子径に対して明確な依存性を示さなかったと考えられる。

したがって、接触角の小さい粒子は乱流下における気泡付着除去が非常に困難であることが実験的に明らかとなった。また、乱流下においては大粒径においても粒子Aの k_g がほとんど増加しなかった。よって、粒子径の増加による除去効率向上は、接触角の小さい粒子では期待できないことが示唆された。

4.4 衝突頻度関数による気泡-粒子間付着の考察

本節では、除去速度に及ぼす攪拌(乱流)の効果および接触角の影響を調査する。Fig. 6に示すように、攪拌により槽内の気泡個数濃度が増加するので、式(3)に示した回収確率を含む衝突頻度関数 β を導入し、以下考察を行う。

β の攪拌速度依存性をFig.10に示す。図より、いずれの粒子においても攪拌速度の増加にともない、 β が減少していることがわかる。また、その依存性はどの粒子においても同様である。したがって、 β の攪拌速度依存性は粒子の接触角に依存しないと考えられる。

回収確率を含まない衝突頻度関数 β_0 は、式(22)で与えられている。式中の $(\bar{v}_b^2)^{1/2}$ は次のように表される¹⁹⁾。

$$(\bar{v}_b^2)^{1/2} = 0.33 \frac{\varepsilon^{4/9} d_b^{7/9}}{v^{1/3}} \left(\frac{|\rho_b - \rho_l|}{\rho_l} \right)^{2/3} \dots\dots\dots(23)$$

ここで、 v は液の動粘性係数($m^2 s^{-1}$)、 ε は乱流エネルギー消散速度($m^2 s^{-3}$)、 ρ_b 、 ρ_l はそれぞれ気泡および液の密度($kg m^{-3}$)である。式(22)、(23)より、 β_0 は次式のように表される。

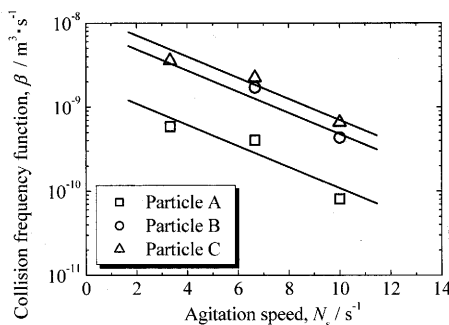


Fig. 10. Collision frequency function as a function of agitation speed for various values of particle contact angle. $d_p = 12.5 \mu m$, $Q_g = 1.28 \times 10^{-5} m^3 s^{-1}$.

$$\beta_0 = 5.0 \left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \left[0.33 \frac{\varepsilon^{4/9} d_b^{7/9}}{v^{1/3}} \left(\frac{|\rho_b - \rho_l|}{\rho_l} \right)^{2/3} \right] \dots\dots\dots(24)$$

上式より、 ε が増加すると β_0 は増大することがわかる。攪拌速度を大きくすると ε は増加するので、気泡と粒子の衝突頻度は増加する。しかし、実験結果では攪拌速度の増加にともない β は減少した。

β が攪拌速度に対して負の依存性を示す要因としては、気泡からの粒子の脱離および気泡-粒子間付着過程に及ぼす攪拌の影響が考えられる。

Pykeらの論文によると、脱離確率は次式で与えられている¹¹⁾。

$$P_d = \exp \left(1 - \frac{1}{Bo^*} \right) \dots\dots\dots(25)$$

$$Bo^* = \frac{d_p^2 \left[\Delta\rho_p g + 1.9\rho_p \varepsilon^{2/3} \left(\frac{d_p + d_b}{2} \right)^{-1/3} \right] + 1.5d_p \left(\frac{4\gamma_l}{d_b} - d_b \rho_l g \right) \sin^2 \left(\pi - \frac{\theta}{2} \right)}{\left| 6\sigma \sin \left(\pi - \frac{\theta}{2} \right) \sin \left(\pi + \frac{\theta}{2} \right) \right|} \dots\dots\dots(26)$$

ここで、 g は重力加速度、 $\Delta\rho_p = \rho_p - \rho_l$ である。 Bo^* はBond numberと呼ばれ、脱離力と付着力の比(脱離力/付着力)として定義されている。

式(25)、(26)より、本実験条件における脱離確率 P_d を粒子径 $30 \mu m$ 、気泡径 $2 mm$ とし、接触角はTable 3の粒子Aの値を用いて計算すると $p_d \approx 10^{-33}$ となり、ほぼ0であった。したがって、本実験条件において脱離は無視でき、 β の減少は脱離によるものではないと結論することができる。

次に、付着過程に及ぼす攪拌の影響を考える。気泡に衝突した粒子は導入時間 t_i を経過した後、気泡に付着する。攪拌速度の増加にともない液の流動が激しくなり、気泡表面近傍の粒子が乱流渦によってバルク液中へ引き戻される可能性が高くなると考えられる。そのため、攪拌速度の増加にともない β が小さくなると考えられる。

また、接触角などの界面化学的なパラメータに関係なく付着が気泡表面近傍における流動によって阻害されると考えられる。そのため、接触角の異なるいずれの粒子も攪拌速度に対して同様の依存性を示したと考えられる。

4.5 衝突頻度関数に対する接触角の影響

Fig.10において、接触角 θ の大きい粒子ほど衝突頻度関数 β が大きいことがわかる。そこで、攪拌速度をパラメータとして β の接触角依存性をFig.11に示す。

図より、 θ の大きい粒子B,Cの β は θ の小さい粒子Aと比較して6倍程度大きい値を示した。よって、 β は θ によって大きく変化することがわかった。

一般に θ が大きいほど、つまり液に対して粒子が濡れに

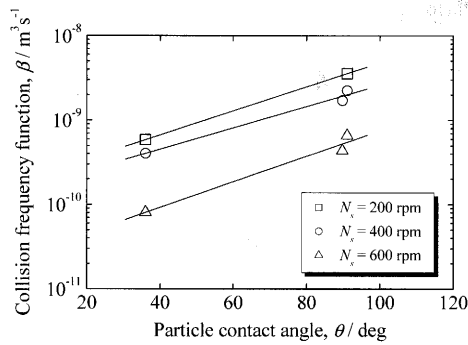


Fig. 11. Effect of particle contact angle on collision frequency function.

$$\bar{d}_p = 12.5 \mu\text{m}, Q_g = 1.28 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

くいほど導入時間 t_i が短くなると提言されている。Z. Daiらの論文では、 t_i と θ の関係が次式で与えられている²⁰⁾。

$$t_i = ab_p^b \dots \dots \dots (27)$$

ここで、 a 、 b は係数である。係数 a は θ の増加にともない減少し、 b は粒子径に依存せず、 $b=0.6$ であると報告されている。したがって、 θ が大きくなると係数 a の値が小さくなり、 t_i が減少することになる。

式(8)、(9)において、 t_i が小さくなると付着確率が増加することがわかる。したがって、 θ によって β が大きくなるのは、 t_i の減少による付着確率の増大によるものと考えられる。

本実験では、接触角の小さい粒子(粒子A)と大きい粒子(粒子B,C)を用いて、それぞれの粒子除去速度を測定した。その結果、接触角の小さな粒子は粒子除去速度が非常に小さくなることが明らかとなった。

溶鋼系において、接触角の大きい粒子としてはアルミナ(144°)、シリカ(115°)などが挙げられ、接触角の小さい粒子としては炭化ケイ素(<30°)、スラグ(<60°)が挙げられる^{13,21)}。したがって本実験結果より、溶鋼に濡れやすく接触角の小さい粒子は気泡に付着せず、除去は困難であると考えられる。よって、溶鋼に濡れやすいスラグの巻き込みは最小限に抑えることが望ましい。また、溶鋼に濡れにくい粒子については、気泡付着による除去効果が期待できることがわかった。

5. 結言

本研究では、乱流下における液中分散粒子の気泡付着・除去に着目し、除去速度に与える諸パラメータの影響につ

いて実験的検討を行った。その結果を以下に記す。

(1) 除去速度定数に対する粒子径依存性を調べたところ、接触角の大きい粒子では、粒子径が大きくなるほど気泡付着除去が速く進行することが明らかとなった。本実験系では、除去速度定数の粒子径依存性はほぼ1次であり、衝突確率の寄与が非常に大きいことがわかった。一方、接触角の小さい粒子は明確な粒子径依存性を示さず、除去速度も非常に小さくなった。

(2) 衝突頻度関数に対する攪拌速度の影響を調べたところ、衝突頻度関数は攪拌速度の増加にともない減少した。また、その依存性は粒子の接触角によらない。この原因は、付着が接触角に関係なく気泡表面近傍における流動によって阻害されたためと考えられる。

(3) 衝突頻度関数に対する接触角の影響を調べたところ、衝突頻度関数は粒子の接触角の増加にともない大きくなることがわかった。これは、接触角が大きくなると導入時間が短くなり、付着確率が大きくなったためと考えられる。

文 献

- 1) L.Wang *et al.*: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 17.
- 2) X.Zheng *et al.*: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1091.
- 3) N.Ahmed and G.J.Jamson: *Miner. Proc. Extr. Metall. Rev.*, **5** (1989), 77.
- 4) L.Zhang and S.Taniguchi: *Int. Mater. Rev.*, **45** (2000), 59.
- 5) R.-H.Yoon and L.Mao: *J. Colloid Interface Sci.*, **181** (1996), 613.
- 6) L.Mao and R.-H.Yoon: *Int. J. Miner. Process.*, **51** (1997), 171.
- 7) R.-H.Yoon and G.H.Luttrell: *Miner. Proc. Extr. Metall. Rev.*, **5** (1989), 101.
- 8) J.Abrahamson: *Chem. Eng. Sci.*, **30** (1975), 1371.
- 9) R.-H.Yoon: *Int. J. Miner. Process.*, **58** (2000), 129.
- 10) A.V.Nguyen, J.Ralston and H.J.Schulze: *Int. J. Miner. Process.*, **53** (1998), 225.
- 11) B.Pyke, D.Fornasiero, and J.Ralston: *J. Colloid Interface Sci.*, **265** (2003), 141.
- 12) S.M.Iveson, S.Holt and S. Biggs: *Colloids Surf. A, Physicochem. Eng. Aspects*, **166** (2000), 203.
- 13) 石井淑夫, 小石真純, 角田光雄: *ぬれ技術ハンドブック ~基礎・測定評価・データ~, テクノシステムズ, 東京, (2001), 37.*
- 14) 神保元二, 小沢英一, 向坂安雄, 小宮山宏, 定方正毅, 吉沢昭宣: *微粒子ハンドブック, 朝倉書店, 東京, (1991), 166.*
- 15) H.Arai, K.Matsumoto and S.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 10.
- 16) 改訂六版化学工学便覧, 化学工学会編, 丸善, 東京, (1999), 430.
- 17) 改訂六版化学工学便覧, 化学工学会編, 丸善, 東京, (1999), 424.
- 18) L.Zhang, S.Taniguchi and K.Matsumoto: *ISIJ Int.*, **29** (2002), 326.
- 19) H.Schubert: *Int. J. Miner. Process.*, **56** (1999), 257.
- 20) Z.Dai, D.Fornasiero and J.Ralston: *J. Colloid Interface Sci.*, **217** (1999), 70.
- 21) R.L.L. Guthrie: *Engineering in Process Metallurgy*, Oxford Univ. Press, (1989), 440.