

液中分散粒子の気泡による付着除去実験 —初期除去速度定数による検討—

新井 宏忠*・中村 修也*²・岡山 敦*³・松本 克才*・谷口 尚司*

Experiment on Adhesion and Removal of Suspended Particle in Liquid by Bubble
—Investigation on Removal Rate Constant at Initial Stage—

Hirota ARAI, Shuya NAKAMURA, Atsushi OKAYAMA, Katsutoshi MATSUMOTO and Shoji TANIGUCHI

Synopsis : It is widely recognized that inclusions in steel cause defects to the products. Therefore, it is important to remove inclusions from liquid steel. The attachment and removal by bubble flotation is expected as one of promising techniques for inclusion removal in liquid steel. The process of particle removal by bubbles is influenced by various factors, including the liquid flow, particle diameter, bubble size. The present work is intended to investigate experimentally the effects of some factors such as particle diameter, gas flow rate and agitation speed to particle removal rate. In this study, water model experiments on bubble flotation have been done under turbulent flow condition using a mechanically agitated vessel. It was confirmed that the change in particle concentration of suspended liquid with time shows first order kinetics until 4 minutes in the initial stage. Furthermore, it was found that the particle removal rate has increased with increasing particle diameter, gas flow rate and agitation speed.

Key words: inclusion; flotation; bubble-particle collision and attachment; inclusion-removal rate constant; gas bubble; liquid steel; water-model experiment.

1. 緒言

溶鋼中には無数の非金属介在物が浮遊しており、大型の介在物が製品に残留すると、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。このような介在物の起源は、主に脱酸生成物やスラグの巻き込みによる微小介在物である。製品中に残留した介在物によって、下工程における強加工時の割れ、薄板の表面傷、線材の破断などの重大な欠陥の原因となる。したがって、溶鋼中介在物の除去は、製品の品質、材質の向上や歩留まりの改善などの観点から非常に重要なプロセスに位置づけられる。

粗大な介在物や凝集により肥大化した介在物は、溶鋼の密度よりも小さいので、浮上分離が可能である。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、微小な介在物は終末浮上速度が小さく、浮上分離の効果は十分期待できない。

その他の手法として、溶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¹⁾、これを利用した介在物除去法の開発が期待されている。

溶融金属中への気泡吹込みは、浸漬ノズルやポーラスプ

ラグなどの様々な装置が考案されており、これらの装置は微細気泡の生成、十分な攪拌の達成に焦点が置かれている²⁾。微細な気泡を生成することによって気泡と溶鋼との接触界面積の増大が期待でき、かつ十分な攪拌を加えることで介在物と気泡との接触頻度が増加すると考えられ、より迅速な介在物除去が期待できると考えられている^{3,4)}。

気泡による介在物除去法は、浮遊選鉱法における基本的な現象を利用したもので、古くから多くの研究が行われている⁵⁻⁷⁾。しかし、これらの研究のほとんどが気泡周囲の液の流れが層流もしくは層流に近い状態で行われている。つまり、静止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、議論されている。これに対して、実操業では液の流れが層流とみなせる場合は少なく、乱流状態であることが多い。

近年、乱流下における付着除去現象の研究もなされてきており、徐々に解明されてきているものの、十分であるとはいえない⁸⁾。その理由として、付着現象そのものが気泡、粒子、液の3相が関与する複雑な現象のためと考えられる。さらに、液の流動状態が乱流である場合、その機構はさらに複雑なものとなり、理論的な考察は困難となって

平成18年5月2日受付 平成18年6月12日受理 (Received on May 2, 2006; Accepted on June 12, 2006)

* 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-02 Aoba-yama Sendai 980-8579)

* 2 東北大学工学部 (現: (株) 神戸製鋼所) (School of Engineering, Tohoku University, now Kobe Steel Ltd.)

* 3 東北大学大学院工学研究科 (現: 住友金属工業 (株)) (Graduate School of Engineering, Tohoku University, now Sumitomo Metal Industries Ltd.)

いる。したがって、現状では水モデルを主体として、水溶液系における気泡による粒子付着除去実験の情報に基づいた研究が主流となっている⁹⁾。

本研究では、この現象の基礎的知見を得ることを目的として、攪拌槽を用いた気泡吹込みによる粒子除去に関する水モデル実験を行った。粒子としてはプラスチック粒子を用い、乱流条件下における粒子除去速度に及ぼす粒子径、ガス流量および攪拌速度の影響について、実験的に検討を行った。

2. 既往の理論

はじめに、気泡付着除去に関する理論的背景について、以下にまとめる。緒言で述べたように、液中の気泡付着除去に関する研究は、浮遊選鉱法といったプロセスを中心になされており、様々な知見が得られている^{10,11)}。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¹²⁾。

$$-\frac{dN_p}{dt} = k_g N_p \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N_p は粒子個数濃度(m^{-3})、 k_g は除去速度定数(s^{-1})である。この除去速度定数は、除去効率を考える際の指標であり、この値が大きいほど除去速度が大きいことを示す。したがって、この値について考察を行うことで気泡付着による除去速度について検討を行うことができる。

静止液中を気泡が上昇する場合、気泡周囲の流れが層流状態であるとみなせる。このときの除去速度定数は式(2)で与えられる¹³⁾。

$$k_g = \frac{3}{2} \frac{Q_s}{d_b} P \dots\dots\dots (2)$$

d_b は気泡径(m)、 Q_s は単位面積当たりのガス吹込み流量(ms^{-1})である。また、 P は気泡によって粒子が回収される効率(回収確率)を示す。気泡径やガス吹込み流量は装置条件や操作条件によって決定される。回収確率 P においては、様々な理論的考察、実験的検討がなされている。この確率は、さらに次のような積で表される。

$$P = P_c P_a (1 - P_d) \dots\dots\dots (3)$$

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・付着(脱離)という過程で起こると考えられているからである(Fig. 1)。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

気泡と粒子の衝突は、粒子と気泡の相対運動の結果として起こる。気泡と粒子の間の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。この状態は衝突確率が1であると定義される。しかし、流体中に

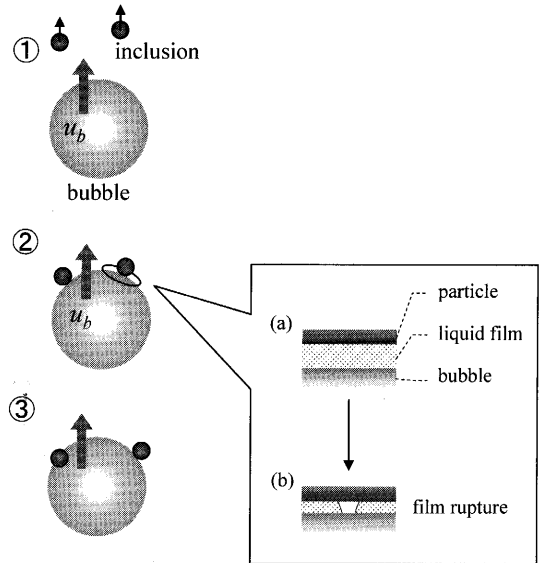


Fig. 1. Process of adhesion between bubble and inclusion.

Table 1. Values of A and n for different flow conditions.¹⁴⁾

Flow conditions	A	n
Stokes flow ($Re < 1$)	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

においては気泡周囲の流れの影響により、気泡が通過する液の体積内の粒子全てとは衝突しない。つまり、衝突確率は1ではない。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で、理論的に導出されている¹⁴⁾。一般に、衝突確率は

$$P_c = A \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^n \dots\dots\dots (4)$$

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十分大きいものとする。 A 、 n は気泡レイノルズ数 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。

$$Re = \frac{u_b d_b}{\nu} \dots\dots\dots (5)$$

u_b は気泡の上昇速度(ms^{-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

粒子が気泡に衝突したとしても、その粒子すべてが気泡に付着できるわけではない。一般に、粒子と気泡が衝突すると、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。そのため、気泡に衝突した粒子は、気泡-粒子間の液膜の形成、気泡表面上における滑り、そして気泡と

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なければならない (Fig. 1)。つまり、気泡に粒子が衝突してから付着までにある時間を要する。この時間は導入時間 t_i と呼ばれる。付着確率は、気泡表面上を粒子が滑っている時間 (滑り時間: t_s) が導入時間よりも大きい場合に粒子が気泡に付着するとして、様々な理論式が導かれている¹⁵⁾。

層流 ($Re < 1$)、中間領域 ($0.2 < Re < 100$)、ポテンシャル流れにおける付着確率は、それぞれ次のように与えられている¹⁶⁾。

$$P_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left\{ \frac{-3u_b t_i}{d_b (d_b/d_p + 1)} \right\} \right] \dots\dots\dots (6)$$

$$P_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left\{ \frac{-(45 + 8Re^{0.72})u_b t_i}{15d_b (d_b/d_p + 1)} \right\} \right] \dots\dots\dots (7)$$

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

脱離確率においても同様に、様々な理論式が提案されており、粒子と気泡間のポテンシャルから理論式が導出されている¹³⁾。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バランスから脱離確率が考察されている。B. Pykeらの論文によると、脱離確率は次式で与えられている⁸⁾。

$$P_d = \exp \left(1 - \frac{1}{Bo^*} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$Bo^* = \frac{d_p^2 \left[\Delta\rho_p g + 1.9\rho_p \varepsilon^{2/3} \left(\frac{d_p}{2} + \frac{d_b}{2} \right)^{-1/3} \right] + 1.5d_p \sin^2 \omega f(d_b)}{|6\sigma \sin \omega \sin(\omega + \theta)|} \dots\dots\dots (10)$$

$$f(d_b) = \left(\frac{4\sigma}{d_b} - d_b \rho_l g \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 g は重力加速度 ($m s^{-2}$)、 σ は表面張力 ($N m^{-1}$)、 ε は乱流エネルギー消散速度 ($m^2 s^{-3}$)である。 θ は接触角 (deg)であり、 $\omega = 180 - \theta/2$ の関係にある。また、 $\Delta\rho_p = \rho_p - \rho_l$ 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)として定義される。

3. 実験

3.1 実験装置

Fig. 2に装置の模式図を示す。攪拌槽は内径96mm、高さ300mmの亚克力製円筒容器で、4枚の邪魔板を取り付けている。邪魔板は幅20mm、厚さ2mmであり、完全

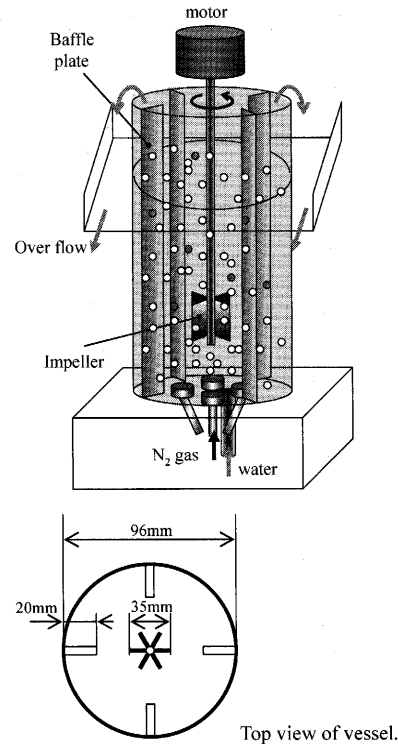


Fig. 2. Scheme of experimental setup and cross-section of cylindrical vessel.

邪魔板条件を満たしている¹⁷⁾。気泡は攪拌槽底部の4ヶ所に設置したノズルから窒素ガスを吹き込むことで、槽内に供給する。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けるようにするためである。また、攪拌羽根は6枚羽根で、翼の直径は35mm、高さ20mm、厚さ2mm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。

$$Re_d = \frac{nd^2}{\nu} \dots\dots\dots (12)$$

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¹⁸⁾。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。

3.2 試料粒子

実験で用いた粒子はMBX30粒子 (ポリメタクリル酸メチル: 積水化成工業 (株) 製) である。粒子の光学顕微鏡写真および粒径分布、体積分布を Fig. 3および Fig. 4に示す。MBX30粒子は粒子径 $30 \mu m$ の体積が最も多い分布となっている。粒子の密度は $1.2 \times 10^3 kg/m^3$ であり、液中での粒子の沈降は無視でき、攪拌槽内に均一に分散している。また、MBX30粒子の水に対する接触角は 91° である¹⁹⁾。

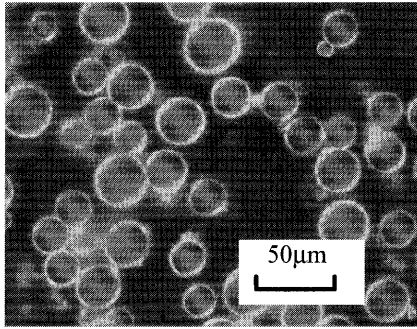


Fig. 3. Microphotograph of MBX-30 particle.

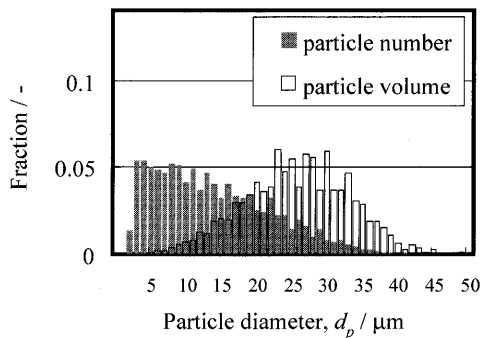


Fig. 4. Particle size distribution of sample particle.

3.3 気泡径測定

本実験系における気泡径を測定した。実験装置は、Fig. 2と同様である。測定は以下の手順で行った。

ノズルから発生する気泡に左右両方からスリット光を当て、その様子をデジタルカメラで撮影した。得られた画像データをコンピュータで画像処理することにより気泡投影面積を求めた。その面積より、面積相当直径として気泡径を算出した結果、気泡径は攪拌速度およびガス流量によって変化し、およそ1.5~2.2mmとなった。よって、本実験条件ではほぼ同一径であることがわかった。

3.4 粒子除去実験

実験は以下のように行った。

まず、超音波攪拌装置により蒸留水中に分散させた粒子(5g)を槽内へ移す。その後、攪拌装置により液を所定の攪拌速度(3.3~15s⁻¹)で攪拌させ、容器底面より窒素ガスを所定流量(0.4~1.9×10⁻⁵m³s⁻¹)吹き込むことで実験を行った。一定時間間隔ごとに攪拌槽上部より深さ5cm、半径の1/2の位置で液の一部(5.0ml)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、粒子数および粒度分布を測定した。

なお、サンプリング位置による粒子個数濃度の違いがないこと、および実験中に粒子が凝集しないことを予め確認している。

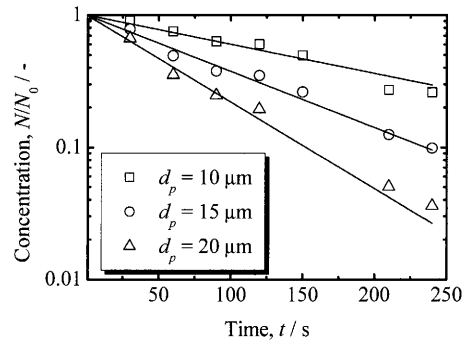


Fig. 5. Change in number concentration with time.

4. 結果および考察

4.1 粒子個数濃度の経時変化

測定した粒子数、粒子個数分布より、粒子個数濃度の経時変化を求めた。前述のように、本実験では攪拌槽上部の自由表面に到達した粒子が再巻き込みされるのを防ぐために、槽底部より蒸留水を流入させ、オーバーフローさせている。測定したサンプル液内の粒子個数濃度の値は、このオーバーフローによる粒子個数濃度の減少分が含まれているので、この影響を取り除く必要がある。

攪拌槽内が完全混合であるとすれば、オーバーフローによる粒子個数濃度の減少は次式で与えられる。

$$N/N_0 = \exp\left(-\frac{Q_w}{V}t\right) \dots\dots\dots(13)$$

ここで、N₀は初期粒子個数濃度(m⁻³)、Q_wは水流量(m³/s)、Vは容器体積(m³)である。本実験に先立ち、上式が成り立つことを実験により確認した。

オーバーフローおよび気泡付着による粒子個数濃度の減少が加算的であると考え、両効果を考慮した粒子個数濃度の経時変化は次式で表される。

$$N/N_0 = \exp\left[-\left(k_g + \frac{Q_w}{V}\right)t\right] \dots\dots\dots(14)$$

そこで、この式を用いて測定結果から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き、気泡のみによる粒子個数濃度を求めた。

式(1)を解くと、粒子個数濃度の経時変化は次式のようにになる。

$$N/N_0 = \exp(-k_g t) \dots\dots\dots(15)$$

この式からもわかるように、粒子個数濃度は時間とともに指数関数的に減少するので、対数軸でプロットした場合、時間に対して直線関係が得られることになる。

そこで測定結果をFig. 5に示す。パラメータは粒子径である。粒子個数濃度は、初期粒子個数濃度で規格化し、対数軸でプロットしてある。実験より得られた粒子個数濃度

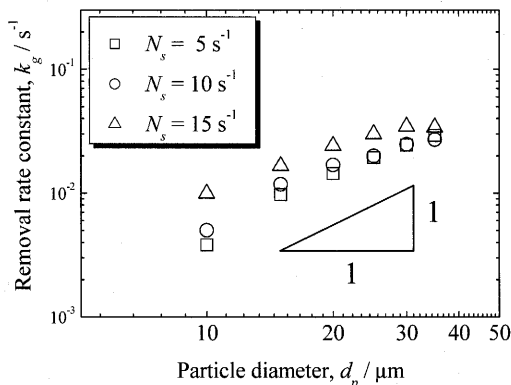


Fig. 6. Removal rate constant as a function of particle diameter.

の経時変化は直線関係が成り立ち、式(15)によく合致している。よって、図の直線の傾きより除去速度定数 k_g を求め、以下考察を行う。

なお、前報では、長時間(10 min)にわたる粒子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¹⁰⁾。本報では、式(15)が成立する初期段階(4 min)の現象に着目して考察を行った。

4.2 除去速度定数のパラメータ依存性

上記の手順を用いて算出した除去速度定数の値に関して、諸パラメータが及ぼす影響を考察する。

4.2.1 粒子径依存性

除去速度定数の粒子径依存性に関して、得られた実験結果をFig. 6に示す。図の横軸は粒子径、縦軸は粒子除去速度定数である。図より粒子径が大きくなると除去速度定数も増加し、除去速度が大きくなることがわかった。この傾向はガス流量、攪拌速度に関係なく全ての条件において見られた。

本実験条件においては液が乱流状態であるので、既往の理論で述べた層流条件における k_g の値(式(2))を実験結果に適用することはできない。しかし、乱流条件下においても粒子が気泡に付着する際に衝突・付着(脱離)という過程を経ることが考えられる。したがって、本研究においても、それぞれの過程の確率を考慮する必要がある。

粒子径の増加にともない k_g が大きくなる要因として、衝突確率 P_c の増加、付着確率 P_a の増加、脱離確率 P_d の低下が考えられる。

付着確率は粒子径の増加にともない減少するとの報告がある⁸⁾。また、一般に脱離確率は粒子径の増加にともない増加する。これは粒子径の増加により、外力(慣性力、重力)の影響を受けやすくなるためである。したがって、付着・脱離確率は粒子径の増加とともに低下するため、実験結果に矛盾する。

以上より、粒子径の増加にともなう k_g の増加には、衝突確率が大きく影響していると考えられる。前述の衝突確率(式(4))に示したように、衝突確率は粒子径が大きくな

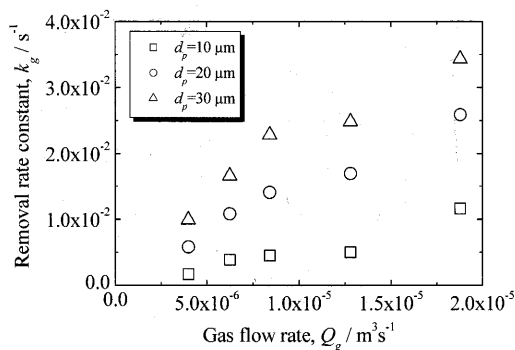


Fig. 7. Effect of gas flow rate on removal rate constant.

るほど高くなる。本実験においては攪拌により液を乱流状態にしているのので、式(4)に示した衝突確率は適用できないが、 k_g は粒子径の増加とともに大きくなることがわかった。

ここで、 k_g の粒子径依存性に着目すると、Fig. 6より k_g は粒子径(10~35 μm)に対してほぼ1次の依存性を示した。前述のように、 k_g の粒子径依存性には衝突確率が大きく関与しているのので、この依存性は衝突確率の粒子径依存性の寄与が大きいと考えられる。

また、 k_g の粒子径依存性及び装置条件の影響として攪拌槽内の流動状態の相違が考えられる。実験では、攪拌羽根を攪拌槽の下部に設置しているのので、攪拌槽上部は攪拌羽根による混合の効果が弱まり、層流に近い流動状態になっていると考えられる。

流れが層流状態に近い場合、衝突確率 P_c は次式で表されている¹⁶⁾。

$$P_c = \left[\frac{3}{2} + \frac{4\text{Re}^{0.72}}{15} \right] \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \dots\dots\dots(16)$$

上式より衝突確率の粒子径依存性は、層流の場合、粒子径に対して2次の依存性を示すことがわかる。したがって、 k_g の粒子径依存性が1次に近い値を示したのは、流動状態の違いに起因するものと考えられる。

4.2.2 ガス流量依存性

除去速度定数のガス流量依存性に関して、粒子径をパラメータとしてFig. 7に示す。図は攪拌速度一定($N_s=10\text{ s}^{-1}$)の条件でガス流量を変えて実験を行った際の結果を示している。図より、ガス流量を増加させると k_g の値は大きくなる傾向が見られる。このことは従来の知見とよく一致する¹⁰⁾。

除去速度が上昇する理由としては、ガス流量の増加にともなう攪拌槽内の気泡個数濃度の増加が考えられる。

ここで、 k_g と気泡個数濃度の関係について考える。気泡による粒子の付着除去が粒子と気泡間の衝突現象と考えれば、衝突理論との類推により、除去速度は次式のように表すことができる。

$$-\frac{dN_p}{dt} = \beta N_b N_p \dots\dots\dots(17)$$

N_b は気泡個数濃度(m^{-3})である。また、 β は衝突頻度関数($m^3 s^{-1}$)と呼ばれるものであり、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。また、これは気泡が単位時間当たりに通過した体積中の粒子と衝突する回数とも考えられる。式(17)を式(1)と比較すると、 k_g は次のように表されることがわかる。

$$k_g = \beta N_b \dots\dots\dots(18)$$

ただし、この衝突頻度関数は回収確率 P を含むので、さらに次のように表される。

$$k_g = \beta_0 P N_b \dots\dots\dots(19)$$

β_0 は気泡と粒子の衝突頻度を示すものである。上式より、 k_g は気泡個数濃度に比例することがわかる。気泡個数濃度はガス流量を用いて表すと次式で与えられる。

$$N_b = \frac{Q_g \tau}{\pi d_b^3 / 6 V} \dots\dots\dots(20)$$

Q_g はガス流量($m^3 s^{-1}$)、 τ は気泡の攪拌槽内における平均滞在時間(s)、 V は攪拌槽体積(m^3)である。ガス流量による気泡径変化を無視すれば、Fig. 7の結果は一定の攪拌速度で測定したものなので、平均滞在時間 τ は一定と考えられる。よって式(19)、(20)より、 k_g はガス流量に比例することがわかる。図をみると、ガス流量に対してほぼ直線関係が成り立つことから、 k_g のガス流量依存性は気泡個数濃度の増加に対応していると考えられる。

また、ガス流量を増加させることで気泡による液攪拌の効果により、除去速度に多少の影響があるものと考えられるが、攪拌羽根により強制的に液攪拌を加えられている条件では、その影響は少ないと考えられる。

4.2.3 攪拌速度依存性

除去速度定数の攪拌速度依存性に関して得られた実験結果をFig. 8に示す。パラメータは粒子径である。

図より、攪拌速度の増加にしたがって k_g の値は増大する傾向を示した。この理由は種々考えられるが、本報の解析では、主に攪拌による気泡個数濃度の増加によるものと考えた。攪拌により液の流動が激しくなることで、気泡が攪拌槽内に滞在する時間が長くなり、その結果、気泡個数濃度は増加し、除去がより速く進行すると考えられる。

また、攪拌は粒子と気泡の衝突・付着プロセスに影響を与えると考えられる。回収確率 P への乱流の効果は明らかではないが、気泡と粒子の衝突頻度に関しては、乱流の効果が理論的に考察されている。気泡と粒子の衝突頻度は、乱流エネルギー消散速度 ε が大きいほど増加することが示されている⁸⁾。攪拌速度を大きくした場合、乱流エネル

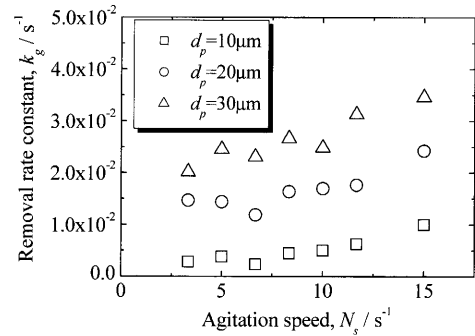


Fig. 8. Effect of agitation speed on removal rate constant.

ギー消散速度は増加するので、気泡と粒子の衝突頻度は増加する。しかし、気泡に粒子が付着するためには気泡と粒子間に存在する液を排除しなければならない。そのため、前述のように気泡表面上では一定時間(導入時間)経過しなければ粒子は気泡に付着しない。攪拌により液の流動が激しくなると、粒子が気泡表面上に滞在している時間が短くなると考えられる。その結果、付着確率が低下すると予想される。

乱流渦の遠心力や重力などの外力によって、気泡から粒子が脱離することも考えられるので、式(9)~(11)より本研究の実験条件における脱離確率を求めた。その値は 10^{-33} 程度となり、気泡からの粒子の脱離は無視できることがわかった。

したがって、攪拌による効果には、衝突頻度の増加と付着確率の減少の2つの影響が考えられる。式(19)において、衝突頻度の増加は β_0 の増加をもたらす、付着確率の減少は P の低下を招く。これらの効果については、今後詳しい考察が必要である。

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、初期の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) 乱流条件下における粒子の気泡付着除去は、粒子径が大きくなるほど速く進行することが明らかとなった。本装置の実験では、除去速度定数は粒子径に対してほぼ1次の依存性を示すことが明らかとなった。この依存性は衝突確率の粒子径依存性の寄与が大きいと考えられる。

(2) ガス流量の増加により、除去速度定数の値は大きくなり、除去速度は大きくなることが明らかとなった。この要因は気泡個数濃度の増加によるところが大きい。

(3) 攪拌数の増加にともない、除去速度定数の値は増加することが明らかとなった。その原因は、攪拌槽内の気泡の個数が攪拌によって増加するためと考えられる。

本研究では、乱流下における付着除去特性を理論的に検討することが困難であるために、実験的に諸パラメータの

依存性について調査を行った。除去速度の粒子径、ガス流量および攪拌速度に対する考察を行ったが、気泡個数濃度はガス流量や攪拌速度によって変化する。今後はこれらの効果を分離し、粒子の気泡付着除去に対する考察を行う必要がある。

文 献

- 1) 竹内秀次：第182・183回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(2004)，72.
- 2) K.Okumura, S.V.Komarov and M.Sano: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 544.
- 3) K.Okumura, M.Hirasawa, M.Sano, K.Mori, N.Hakamada and M.Kitazawa: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 826.
- 4) K.Okumura, M.Ban, M.Hirasawa, M.Sano and K.Mori: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 832.
- 5) L.Wang, H.-G.Lee and P.Hayes: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 17.
- 6) X.Zheng, P.C.Hayes and H.-G.Lee: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1091.
- 7) N.Ahmed and G.J.Jamson: *Min. Proc. Extract. Metall. Rev.*, **5** (1989), 77.
- 8) B.Pyke, D.Fornasiero and J.Ralston: *J. Colloid Interface Sci.*, **265** (2003), 141.
- 9) H.Schubert: *Int. J. Miner. Process.*, **56** (1999), 257.
- 10) L.Zhang, S.Taniguchi and K.Matsumoto: *ISIJ Int.*, **29** (2002), 326.
- 11) L.Zhang and S.Taniguchi: *Int. Mater. Rev.*, **45** (2000), 59.
- 12) R.-H.Yoon and L.Mao: *J. Colloid Interface Sci.*, **181** (1996), 613.
- 13) L.Mao and R.-H.Yoon: *Int. J. Miner. Process.*, **51** (1997), 171.
- 14) R.-H.Yoon: *Int. J. Miner. Process.*, **58** (2000), 129.
- 15) A.V.Nguyen, J.Ralston and H.J.Schulze: *Int. J. Miner. Process.*, **53** (1998), 225.
- 16) R.-H.Yoon and G.H.Luttrell: *Min. Proc. Extract. Metall. Rev.*, **5** (1989), 101.
- 17) 改訂六版 化学工学便覧，化学工学会編，丸善，東京，(1999)，430.
- 18) 改訂六版 化学工学便覧，化学工学会編，丸善，東京，(1999)，424.
- 19) F.J.Holly and M.F.Refojo: *Colloid and Interface Science*, Vol. 3, (1976), 321.