

# 単独気泡による粒子の捕捉効率

## Efficiency of Particle Entrapment by Single Bubble

塚 口 友 一\*  
Yuichi TSUKAGUCHI

### 抄 録

気泡を用いた非金属介在物粒子の除去は、精錬から連続鑄造に至る製鋼プロセスにおいて広範に利用されている。その機構は、気液界面に直接捕捉して浮上除去する他に、気泡後部の乱流渦や気泡が形成する上昇流によって移送するなど複数の現象を介しており、それらの詳細については解明が不十分である。そこで、気泡による非金属介在物粒子除去の最も基礎的な現象である、単独気泡による粒子の捕捉除去の効率を明らかにするべく、本研究に取り組んだ。旋回流を形成する水モデル実験装置を用い、間欠的に気泡を吹き込みながら、懸濁させた樹脂粒子の濃度変化を調査した。その結果、単独気泡による濡れない粒子の捕捉効率は、SutherlandあるいはWeber&Paddockのモデルによる計算値と良い一致を示した。また、単独気泡は濡れる粒子を全く除去しなかった。

### Abstract

**It is popular to remove inclusions by bubbles in steel refining and steel casting processes. However, the mechanism is not clear because some complicated phenomena are concerned with inclusion capturing or inclusion transfer process by bubbles. Therefore, we have commenced a research work to clarify the inclusion remove efficiency by a single bubble. The research work has been carried out by a water model experiment that blows-in bubbles in the swirl flow of particles suspended water. As results, the capture efficiency of non-wettable particles was coincide with the estimated value of Sutherland model or Weber&Paddock model. On the other hand, wettable particle was not removed by a single bubble.**

## 1. 緒 言

気泡を用いた非金属介在物（以下、介在物と略す）粒子の除去は、精錬から連続鑄造に至る多くの製鋼プロセスにおいて利用されている。その機構は、気液界面に捕捉して直接浮上除去する他に、気泡後部の乱流渦や気泡が形成する上昇流によって移送するなど複数の現象を介しており、その内訳については解明が不十分である。そこで、気泡による介在物粒子除去の最も基礎的な現象である、単独気泡による粒子の捕捉除去の効率を明らかにするべく、本研究に取り組んだ。本研究においては、水モデル実験装置を用い、樹脂粒子を介在物に見立て、個々の気泡による除去効率を求めた。

## 2. 本 論

### 2.1 概要

単独気泡による粒子の捕捉効率を求めるには、粒子分散槽に気泡を吹き込み、気泡の個数と軌跡から気泡掃引体積を算出すると共に、粒子濃度の変化を測定して、両者を対比する。気泡が浮上する際に、左右に揺らいだり、螺旋状の軌跡を描いたりすると、その掃引体積の算出が難しくなる。そこで本研究においては、旋回流場に気泡を吹き込むことによって、気泡軌跡のゆらぎを抑制し、掃引体積の見積もりを容易とした。

### 2.2 実験装置

図1に、水モデル実験装置の概要を示す。アクリル製のMain cylinder（円筒容器）はアクリル製角ジャケット内に納め、Magnetic stirrer上に設置した。その側面1か所（底か

\* プロセス研究所 製鋼研究部 主幹研究員 博士(工学) 茨城県神栖市砂山16-1 〒314-0255

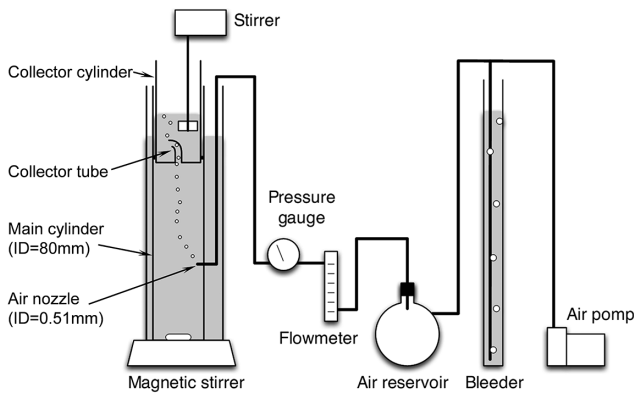


図1 水モデル実験装置  
Schematic view of water model experiment

ら 150mm 上) には内径 0.51mm の SUS 製 Air nozzle を取り付けた。Air nozzle から吹き込まれた気泡が、旋回流場で作用する向心力によって浮上旋回しながら中心へ移動し、Collector tube を通って Collector cylinder 内へ抜け出る構造とした。気泡は、その移動過程において粒子を捕捉し、Collector cylinder 内へ粒子を移送する。

Collector cylinder 内の Stirrer は、羽根の高さ 18mm、羽根の厚み 2mm、直径 34mm の 6 枚羽根タイプである。Main cylinder 内の浴深は 350mm (容量 1759mL)、Collector cylinder 内には 200mL の水を入れて実験した。Air nozzle からの吹き込み流量は、60mL/min とした。

本実験装置において得られる Main cylinder 内流速分布は予めレーザードップラー流速計を用いて測定し、図 2 に示す結果を得た (図中 600rpm のデータは実測値を 10/6 倍したもの)。図 2 の結果より、Magnetic stirrer 回転数 1000 rpm の場合の半径方向、周方向、上下方向の流速を半径  $r$  に対しそれぞれ以下の式に示すように近似した。各流速は、Magnetic stirrer 回転数に対して線形的に変化するとした。

$$v_r = 0$$

$$v_\theta = \begin{cases} 228.4r & (0 \leq r < 0.0025) \\ -8.871r + 0.5932 & (0.0025 \leq r < 0.039) \\ -247.2r + 9.889 & (0.039 \leq r \leq 0.04) \end{cases}$$

$$v_z = \begin{cases} 8.108r - 0.2113 & (0 \leq r < 0.036) \\ 0.08221 & (0.036 \leq r < 0.039) \\ -82.21r + 3.288 & (0.039 \leq r \leq 0.04) \end{cases}$$

### 2.3 使用粒子

Main cylinder 内に懸濁させる粒子は、表 1 に示す 2 種類を用いた。Polystyrene は水に濡れる粒子、Acrylic は水に濡れない粒子である。表 1 に示す接触角は、浸透速度法によって実測した値である。両者の接触角には  $10^\circ$  の差異しかないが、粒子懸濁液を作る際に Polystyrene は容易に分散したのに対し、Acrylic はビーカー壁や水面で凝集しやすく、両者には明らかに濡れ性の違いがあった。

粒子径の分布を各粒子の写真と合わせて図 3 に示す。

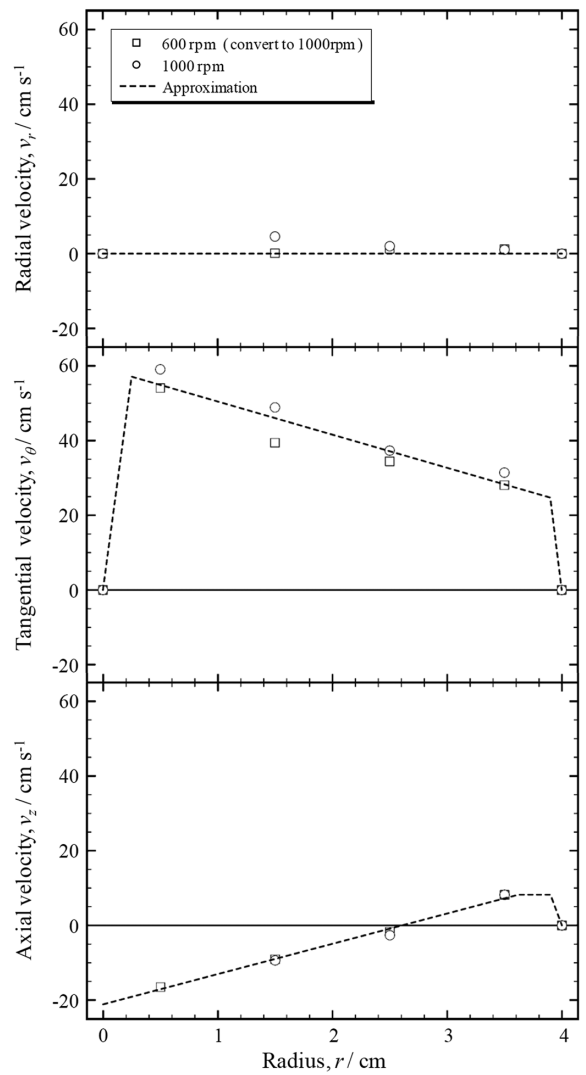


図2 流速分布  
Distribution of flow velocity

表1 粒子の仕様  
Specifications of particles

Material	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Contact angle $\theta$ (degree)	Shape
Polystyrene	1130	80	Spherical
Acrylic	1210	90	Spherical

\* Polystyrene: Soken Chemical & Engineering Co., Ltd. SGP-70, Acrylic: Soken Chemical & Engineering Co., Ltd. MR-20

いずれの粒子も最頻径約  $5\mu\text{m}$  の白色微粉末である。粒子懸濁液は、8.0g の粒子を 500mL の水に、超音波ホモジナイザーを用いて分散させて作った。作った粒子懸濁液を Main cylinder 内に 20mL もしくは 60mL (主に 60mL) 添加して実験を行った。粒子懸濁液を 60mL 添加すると、Main cylinder 内の水は白濁し、その程度の推移から目視でも大まかな粒子濃度変化を観察することができた。

### 2.4 実験手順

Main cylinder 内に気泡を吹き込みながら、粒子捕捉実験を行った。実験手順を以下に示す。なお、気泡を吹き込

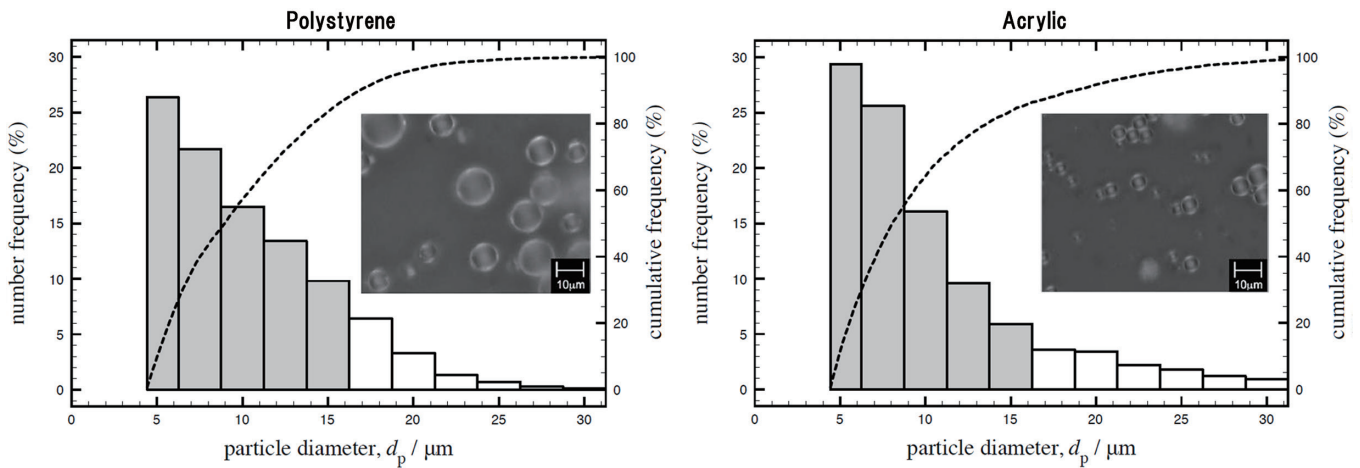


図3 粒子径の分布  
Distribution of particle diameter

ない旋回流場で粒子の凝集が生じない(気泡を吹き込まない場合には、時間が経過しても、粒径分布が変化しない)ことは、事前実験で確認した。

1. Main cylinder 内に純水を所定の浴深 (350mm) になるよう注ぎ入れる。
2. 粒子懸濁液を Main cylinder 内に添加する。
3. Main cylinder 内の水を Magnetic stirrer (回転数 600rpm, 1000rpm で約 1 分間攪拌し、粒子を分散させる。
4. Main cylinder 内の水を 1.6g 採取する。これが初期状態 (気泡吹き込み時間=0) のサンプルとなる。
5. Main cylinder の上部に Collector cylinder を取り付け。
6. Collector cylinder 内に所定量 (200mL) の純水を注ぎ入れる。
7. Collector cylinder 内に Stirrer を取り付け、回転数 180 rpm で弱く攪拌する (粒子の沈降を防止)。
8. Air の吹き込みを所定流量 (60mL/min) で開始。気泡が出始めた時点を経験時間  $t=0$  として計時開始。
9. 所定時間 (3min) 毎に 18min まで、Collector cylinder 内の水を 1.6g 採取する。
10. 採取した水試料中の粒子を、マルチサイザー (コーンターカウンター社製 Multisizer3) を用いてカウントする。

## 2.5 実験結果と考察

### 2.5.1 水に濡れる粒子の結果

図4に示すように、水に濡れる粒子の場合には、Main cylinder 内の粒子濃度 (Collector cylinder 内の粒子濃度から算出) は、粒子径や Magnetic stirrer 回転数とは無関係に、時間経過に伴って単調に低下した。この結果から、水に濡れる粒子は、気泡に付着し除去されることはなく、気泡が Main cylinder から Collector cylinder へ移動する際に生じる液交換によって、拡散していると考えた。

そこで、粒子濃度変化を以下のような単純なモデルで表し、実験結果と対比することによって単位時間あたりの液

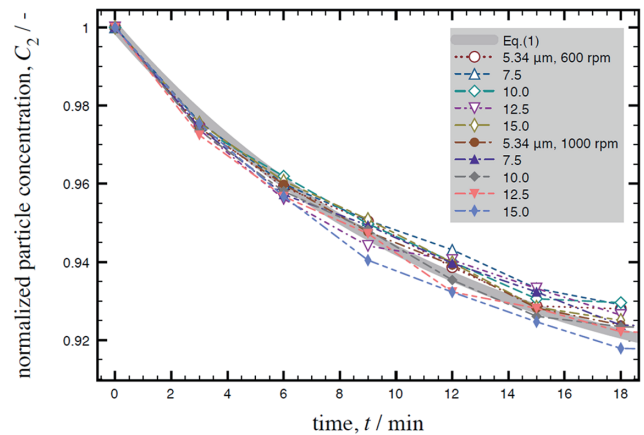


図4 水に濡れる粒子の Main cylinder 内濃度変化  
Change in density of wettable particles in main cylinder

交換体積  $\Delta V$  を見積もった。

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\Delta V}{V_1} (C_2 - C_1) \quad (1)-1$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{\Delta V}{V_2} (C_2 - C_1) \quad (1)-2$$

ここで  $C_1$ 、 $C_2$  はそれぞれ、Collector cylinder および Main cylinder 内の粒子濃度、 $t=0$  において、 $C_1=0$ 、 $C_2=1$ 。

図5に示すように、気泡による粒子の移送がない条件では、Collector cylinder 内粒子濃度と Main cylinder 内粒子濃度とは、両 Cylinder の体積比から決まる一定の平衡濃度に達する。その濃度変化速度をフィッティングするパラメータとして、単位時間あたりの液交換体積を 14.7mL/min と求めた。

### 2.5.2 水に濡れない粒子の結果

図6に示すように、水に濡れない粒子の場合には、時間経過と共に Collector cylinder 内の粒子濃度が Main cylinder 内の粒子濃度を超えて高まった。このことは、水に濡れない粒子が気泡に付着して Main cylinder 内から Collector cylinder 内へ移送されたことを示す。

このときの粒子濃度変化を、前述の(1)式に気泡による

移送に伴う濃度変化項を加えて(2), (3)式のように表した。

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\Delta V}{V_1} (C_2 - C_1) + \frac{V_2}{V_1} k_g C_2 \quad (2)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{\Delta V}{V_2} (C_2 - C_1) - k_g C_2 \quad (3)$$

ここで  $C_1$ ,  $C_2$  はそれぞれ, Collector cylinder および Main

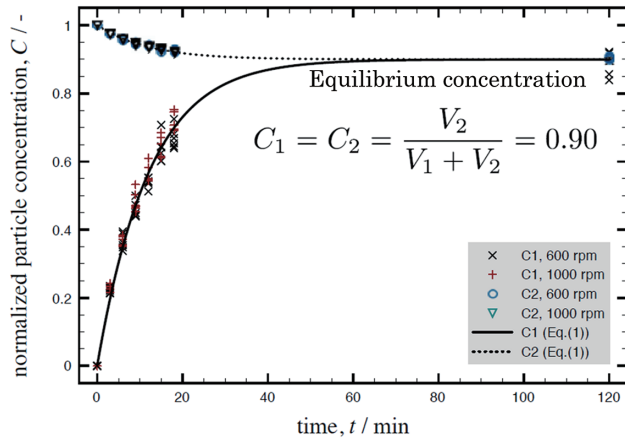


図5 水に濡れる粒子の濃度変化

Change in density of wettable particles in both cylinders

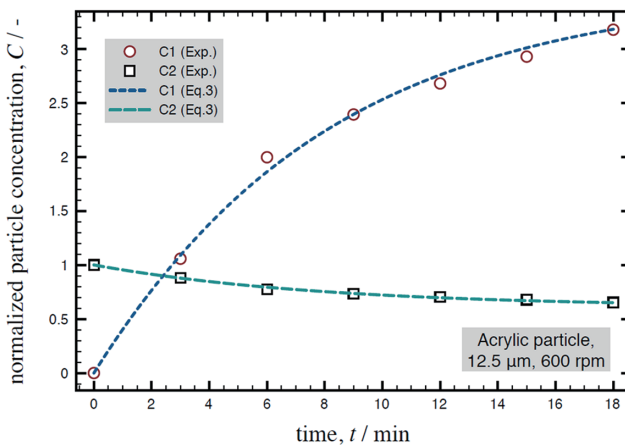


図6 水に濡れない粒子の濃度変化

Change in density of non-wettable particles in both cylinders

cylinder 内の粒子濃度,  $t=0$ において,  $C_1=0$ ,  $C_2=1$ ,  $k_g$  は粒子除去速度定数。

### 2.5.3 粒子除去速度定数

実験は, 内壁面から気泡を吹き込む条件と, Main cylinder の中心から気泡を吹き込む条件の2種類(図7)を行い, 両結果の差から, 向心力により気泡が内壁面から中心まで移動する間に捕捉された粒子数を求めた。

両実験から求めた粒子除去速度定数を, 粒子径に対して図8に整理して示す。その結果を用い, (4)式のように, 全体の粒子除去速度定数から, 中心軸領域において気泡が水流を横切って側壁から中心軸領域まで移動する間の粒子除去速度定数を求めた。

$$k_{g,bulk} = k_g - \alpha \cdot k_{g,axis} \quad (4)$$

ここで  $\alpha$  はL字型ノズル実験で気泡が中心軸上を掃引した距離に対する, 側壁ノズル実験で気泡が中心軸上を掃引した距離の割合。

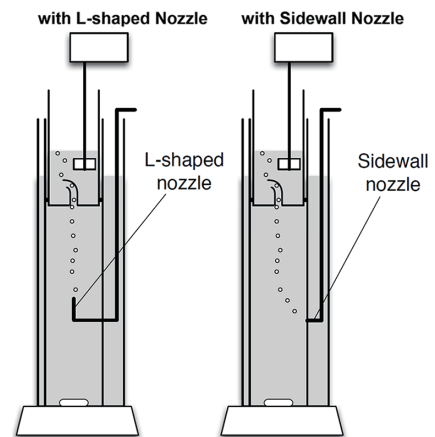


図7 ノズル位置を変えた2種類の実験概要

Schematic view of water model experiments with two types of nozzle settings

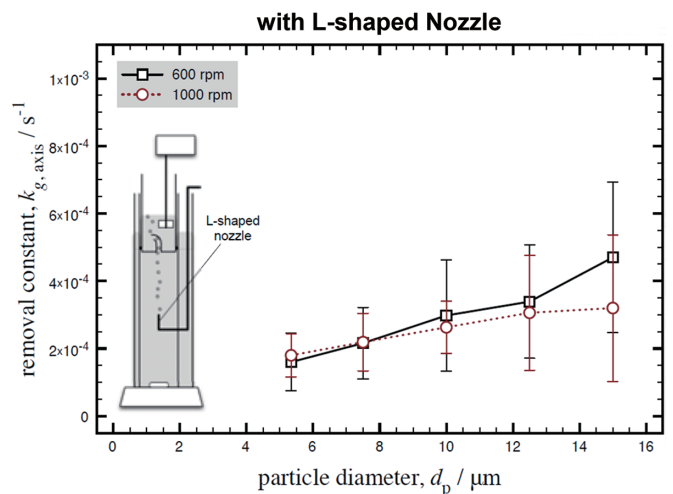
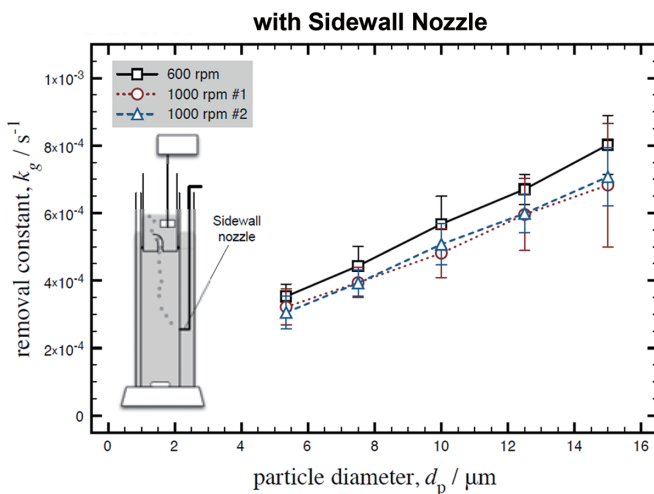


図8 ノズル位置を変えた2種類の粒子捕捉実験結果  
Experimental results with two types of nozzle settings

図9に示すように、旋回領域における粒子除去速度定数は、粒子サイズに対して線形的に増大することがわかった。Magnetic stirrer 回転数の影響に関しては、回転数が大きい方が粒子除去速度定数が低位であった。この理由は、Magnetic stirrer 回転数が大きい場合には側壁から吹き込んだ気泡がすぐに中心軸領域にまで移動して、気泡の掃引距離が短くなったことであると考えた。

### 2.5.4 粒子捕捉効率

次に、さらに一般化した指標として粒子捕捉効率を定義した。前述の粒子除去速度定数は、(5)式のように分解することができる。

$$k_g = \beta_0 \cdot E \cdot C_b \quad (5)$$

ここで  $\beta_0$  は衝突頻度関数 [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]、 $E$  は粒子捕捉効率、 $C_b$  は気泡個数濃度 [ $\text{m}^{-3}$ ]。

$\beta_0$  は気泡が単位時間あたりに掃引する体積に等しく、(6)式のように表せる(図10参照)。

$$\beta_0 = \frac{\pi(d_p + d_b)^2}{4} \cdot u_b \quad (6)$$

ここで  $d_p$  および  $d_b$  はそれぞれ、粒子と気泡の直径、 $u_b$  は流体に対する気泡の相対速度。

気泡径は、Air 流量 60mL/min を高速度カメラ動画からカウントした単位時間あたりの気泡生成数で除した平均気泡体積から、球換算径として求めた。結果を表2に示す。側壁ノズルから吹き込んだ場合の高速度カメラ静止画像の例を図11に示す。図11より、Magnetic stirrer 回転数が大きくなるのに従って、気泡が小さくなり、かつ速やかに中心へ移動する様子がわかる。また、気泡の形状は概ね球形である。

側壁から Air を吹き込んだ場合に、回転数増大に伴って気泡が小さくなるのは、回転流れによる剪断と向心力による吸い出しの作用と考えられる。一方、中心軸上に Air を吹き込んだ場合には、回転数の増大によってむしろ気泡が大きくなった。これは、回転数の増大に伴って Cylinder 中

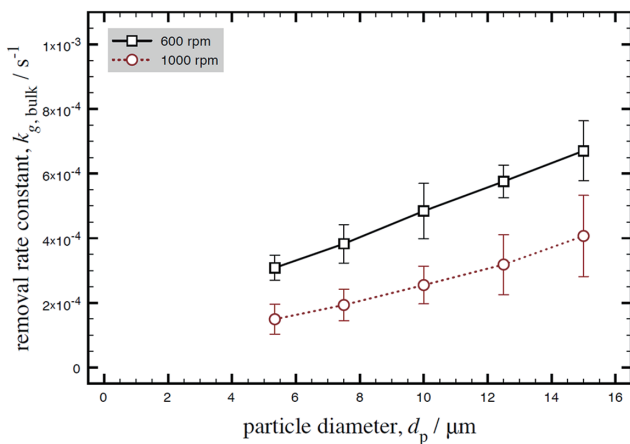


図9 旋回領域における粒子除去速度定数  
Particles removal rate constant in swirl flow region

心部における下向き二次流れが強まり、気泡の浮上速度が低下して気泡同士が接近し、気泡の合体が促進された結果と考えられる。なお、側壁から Air を吹き込んだ場合も、中心軸上に到達した気泡は合体して大きくなり、中心軸上から Air を吹き込んだ場合と差異のない気泡径となることを確認している。

気泡の移動速度は、図2に示した流速データと BBOT (Basset-Boussinesq-Ossen-Tchen) 式を用いた計算から求めた。気泡軌跡の高速度カメラ画像(ミラーを用いて側面からの画像を同時に撮影)から求めた気泡の軌跡(時間-座標)データと BBOT 式の計算結果を対比し、両者が概ね一致することを確認している。

(5)式より粒子捕捉効率(気泡に触れた粒子の内、気泡に付着して系外に除去される割合)は、(5)'式となる。

$$E = \frac{k_g}{\beta_0 \cdot C_b} \quad (5)'$$

(5)'式のように求まる粒子捕捉効率を、粒子径/気泡径に対して図12に示す。旋回領域における粒子捕捉効率は、粒子径/気泡径に対して線形的に増大することがわかった。すなわち、小さい粒子まで効率よく捕捉するには、気泡径の微細化が有効である。図12中の Magnetic stirrer 回転数 600rpm と同 1000rpm の結果に見られる差は、データのばらつき範囲内に収まるので、無視して扱った。

また図12中には、過去の研究で明らかにされている捕

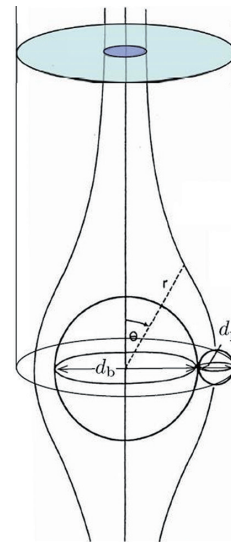


図10 気泡による掃引体積と粒子捕捉  
Sweep volume of bubble to capture particle

表2 ノズルから生じる気泡の大きさ  
Bubble diameter blown-in from nozzles

Nozzle	Rotation speed of magnetic stirrer	Bubble diameter $d_b$
Sidewall nozzle	600 rpm	3.03 mm
	1000 rpm	2.57 mm
L-shaped nozzle	600 rpm	4.17 mm
	1000 rpm	4.40 mm

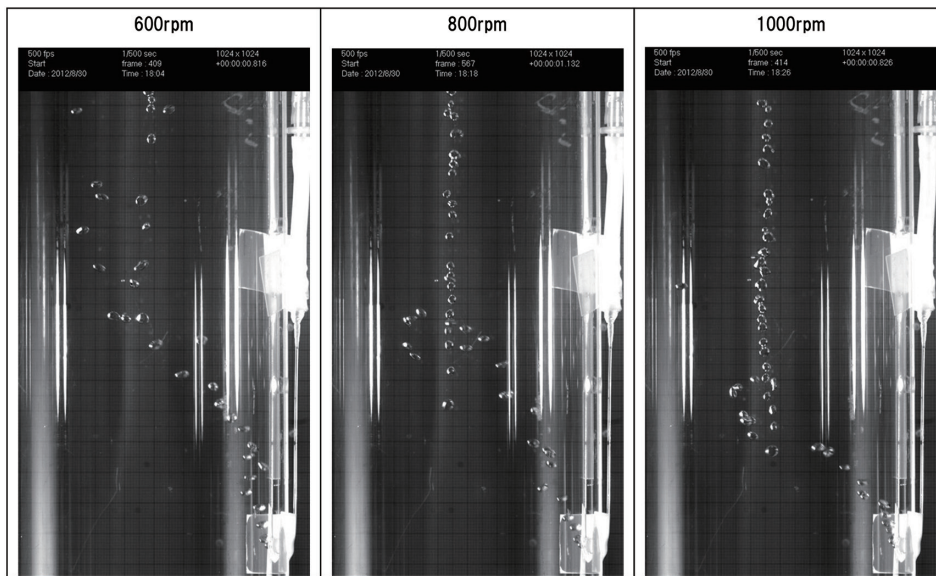


図 11 旋回流場に吹き込まれた気泡の高速度カメラ画像  
High speed camera images of bubbles blown in swirl flow

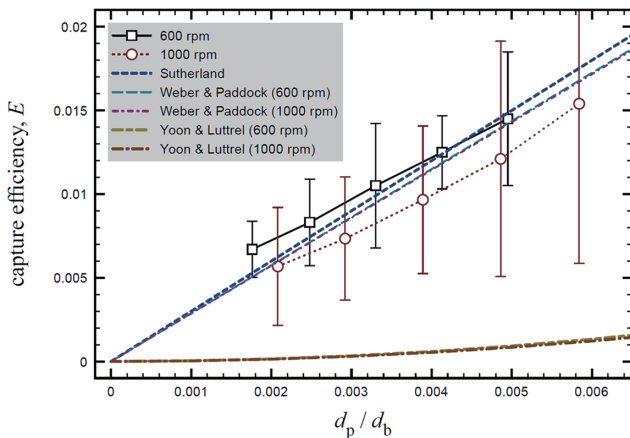


図 12 旋回領域における粒子捕捉効率  
Capture efficiency in swirl flow region

捕捉効率モデルを用いた計算値を併記した。実験結果は、Sutherland や Weber&Paddock がそれぞれポテンシャル流や遷移流領域において構築したモデルの計算結果と良く一

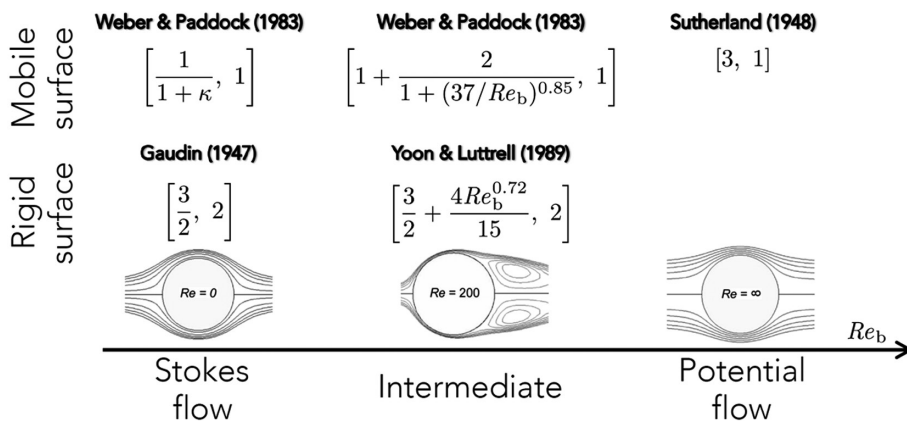
致し、Rigid な気泡表面を仮定したモデルやストークス流におけるモデルよりも高い値となった。

一般に、粒子の捕捉効率は、(7) 式のように表され、その中の係数  $A$  および  $n$  は、流動の激しさ (気泡レイノルズ数) と気泡の表面状態 (Mobile/Rigid) によって図 13<sup>2,4)</sup> のように分別される。図 13 には、それぞれの領域における代表的なモデルを記載した。

$$E = A \left( \frac{d_p}{d_b} \right)^n \quad (7)$$

粒子の捕捉効率が 100% とならないのは、図 10 に模式的に示したように、気泡周囲の流れに乗って粒子が気泡を避けて通るからである。図 13 に示したモデルの比較から、粒子に対して気泡が小さく、流れが激しく (ストークス流よりもポテンシャル流)、気泡表面が変形しやすい場合に、捕捉効率が向上することが示唆される。

図 12 より、捕捉効率 1% で除去しようとする時、粒子径が  $10\mu\text{m}$  の場合には直径  $3\text{mm}$  の気泡、粒子径が  $50\mu\text{m}$  の



Illustrations of streamline are quoted from Int. J. Miner. Process. 239, 72 (2003) by Phan, C.M. et al.

図 13 粒子捕捉効率に関する従来の代表的モデル<sup>2,4)</sup> ([ ]内は(7)式における  $A$  および  $n$ )  
Popular models of particle capture efficiency<sup>2,4)</sup>

場合には直径 15 mm の気泡が必要である。これらの条件で 100 個の気泡が 1 粒子の存在領域を掃引すれば、粒子は 100% 除去されることになる。逆に、気泡径が上記の 1/10 (粒子径 10  $\mu\text{m}$  に対し気泡径 0.3 mm, あるいは粒子径 50  $\mu\text{m}$  に対し気泡径 1.5 mm) の場合には、捕捉効率は 10% まで上昇する。

このように気泡によって除去できるのは、気泡径に対して比較的大きな粒子に限られるので、溶鋼中の介在物を気泡によって効率的に除去するには、かなり小さな気泡を生成させるか、小さな粒子の凝集体と気泡による除去を同時進行させるプロセスが必要である。有害な大型介在物のみを除去すればよいという考え方もあるが、アルミナのように凝集しやすい介在物の場合、浸漬ノズル内や鋳型内でも凝集し大型化するので、有害とされる介在物の大きさよりもかなり小さな介在物まで前工程で除去しなければ、有効な介在物除去プロセスにはならない。

## 2.6 実験結果まとめ

気泡による粒子の除去速度 (粒子除去速度定数  $k_g$ ) は、Sutherland のモデルに従う場合には (8) 式、Weber & Paddock のモデルに従う場合には (9) 式のように求めることができる。本実験条件のように、旋回流中で向心力を受けた気泡が浮上終末速度と同程度の比較的高速で半径方向に移動する場合 (気泡レイノルズ数  $\approx 800 \sim 1000$ )、図 12 中に示したように、両モデルの計算結果は同等の値になる。

$$\frac{dC_p}{dt} = k_g C_p = \frac{\pi(d_p+d_b)^2}{4} u_b \cdot 3 \cdot \left(\frac{d_p}{d_b}\right) \cdot C_b \cdot C_p \quad (8)$$

$$\frac{dC_p}{dt} = k_g C_p = \frac{\pi(d_p+d_b)^2}{4} u_b \cdot \left[1 + \frac{2}{1+(37/\text{Re}_b)^{0.85}}\right] \cdot \left(\frac{d_p}{d_b}\right) \cdot C_b \cdot C_p \quad (9)$$

気泡レイノルズ数  $\text{Re}_b$  は (10) 式のように定義される。

$$\text{Re}_b = \frac{u_b d_b \rho}{\mu} \quad (10)$$

ここで  $C_p$  は粒子の個数濃度、 $\rho$  は気泡と液体の密度差、 $\mu$  は液体の粘度である。

## 3. 結 言

気泡を用いた溶鋼中介在物除去の機構解明を目的に、旋回流場に気泡を吹き込む水モデル実験を行い、単独気泡による粒子除去効率を求めた。その結果、水に濡れる粒子は

除去されない (気泡に付着しない) こと、水に濡れない粒子は Sutherland のモデルあるいは Weber & Paddock のモデルと同等の速度定数で除去されることを確認した。実験結果が示すのは、実プロセスにおいて気泡による介在物の除去効率を高めるのに対し、微細気泡の生成と、介在物の凝集体を同時進行させることの重要性である。

得られた単独気泡による粒子の捕捉効率は、既往の各種モデルから推測される範囲で最も大きい領域に位置するものであった。この旋回流場における実験結果を、静止浴中を浮上する単独気泡に対してそのまま適用できるか否かについて、現在実験的解明に取り組んでいる。さらに、気泡が群を成す場合の粒子移送作用についても研究を進め、気泡を用いた溶鋼中介在物除去機構の全容を解明したい。また、一連の研究成果から演繹的に導出した介在物除去プロセスの開発と実機への適用に取り組み、抜本的な溶鋼浄化を目指す。

## 謝 辞

本研究は、東北大学との共同研究成果の一部をまとめたものです。現東北大学名誉教授の谷口尚司先生には丁寧かつ厳しいご指導を頂き、大変お世話になりました。現香川高等専門学校准教授の嶋崎真一先生とは共に実験を行い、またデータ整理の議論に加えて頂いたことで大変勉強になりました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Hinze, J.O.: Turbulence. New York, McGraw-Hill, 1975
- 2) Sutherland, K.L.: Physical Chemistry of Flotation. XI. Kinetics of the Flotation Process. J. Phys. Chem. 52, 394-425 (1948)
- 3) Weber, M.E., Paddock, D.: Interceptional and Gravitational Collision Efficiencies for Single Collectors at Intermediate Reynolds Numbers. J. Colloid Interface Sci. 94, 328-335 (1983)
- 4) Yoon, R.H., Luttrell, G.H.: The Effect of Bubble Size on Fine Particle Flotation. Min. Proc. Extract. Metall. Rev. 5, 101-122 (1989)



塚口友一 Yuichi TSUKAGUCHI  
プロセス研究所 製鋼研究部 主幹研究員  
博士(工学)  
茨城県神栖市砂山16-1 〒314-0255