

攪拌液中における粒子の浮上, 沈降および巻き込み特性

嶋崎 真一*・和田 敏之*²・谷口 尚司*³

Characteristics of Flotation, Sedimentation and Entrainment of Particle in Agitated Liquid

Shin-ichi SHIMASAKI, Toshiyuki WADA and Shoji TANIGUCHI

Synopsis : The characteristics of particle entrainment from free surface or bottom wall into mechanically agitated water have been studied to clarify the inclusion behavior in liquid metal. The critical agitation speed, n_c , at which a 50% of particle is entrained into bulk water is measured under steady state by using buoyant particles (glass balloon and silica balloon) and sedimental particles (glass bead). It is found that the dependence of n_c on the particle diameter, d_p , is different between the buoyant and the sedimental particle. For the case of the buoyant particle, n_c is independent of d_p , whereas for the sedimental particle n_c increases with increasing d_p . To account for this difference, two transition times are investigated. One is the entraining time, t_1 , which is the time needed to reach a steady state after a sudden imposition of agitation with various speeds. The other is the floating/sinking time, t_2 , which is the time required to reach a steady state after a sudden decrease in agitation speed from a high speed achieving uniform particle dispersion to lower agitation speeds. It is thought that the balance between t_1 and t_2 should determine the amount of entrained particles in bulk water under steady-state experiments. For the case of the buoyant particle, the dependencies of t_1 and t_2 on d_p are almost same, so that the value of n_c does not depend on d_p . On the other hand, for the case of the sedimental particle, the dependence of t_1 on d_p is smaller than that of t_2 , so that n_c increases with increasing d_p . By the VTR observation of the particle entrainment from the free surface or bottom wall, particles are found to be entrained mainly by vertical vortices formed in the agitation vessel.

Key words: agitation vessel; inclusion particle; particle entrainment; vortex; turbulent flow; clean metals; water-model experiment.

1. 緒言

近年の鋼に対する厳しい品質要求に応えるためには、溶鋼中に含まれる非金属介在物を可能な限り除去し、更に鑄造時における介在物再巻き込みなどの汚染を防止することが求められている。

現在のところ、介在物の除去はタンディッシュなどを利用した浮上分離が主体である。溶湯表面まで浮上した介在物粒子は、スラグや溶湯表面のスラグやパウダー層に捕捉され除去される。しかし、溶湯表面に達した介在物がすべて除去されるわけではなく、一部の介在物は熔融金属-スラグ界面に捕捉されることなく、再び溶湯中に戻ってしまう^{1,2)}。また、スラグ滴やモールドパウダーが巻き込まれ、新たな介在物の起源となることも知られている³⁾。浮上による介在物の除去をより効率的に行うためには、自由表面近傍における低密度粒子の挙動を知ることが重要である。

一方、介在物の浮上分離以外でも、粒子の巻き込み現象は様々な分野で問題にされている。Johansen はアルミ精錬における邪魔板付き攪拌槽で、熔融アルミ表面からのドロス巻き込み現象について水モデル実験と数値計算の結果を比較している⁴⁾。また、溶銑脱硫に用いられるKR法(機械式攪拌法)では、溶湯表面の脱硫剤を効率良く溶湯バル

クに巻き込んで分散させることが必要であり、中井らは粒子巻き込み量を攪拌所要動力との関係で整理している⁵⁾。

攪拌槽における粒子巻き込み現象の研究は、固-液2相の化学反応槽に関する研究として古くから行われてきた^{6,7)}。現在までに、均質スラリー生成の最適条件や粒子浮遊化限界条件などに関して多くの実用的な実験式が得られている。しかし、これらの研究は流体よりも密度の大きい高密度粒子に限られており、低密度粒子に関する研究例はほとんどみあたらない。溶鋼中の介在物は溶鋼よりも低密度であるために、これらの研究結果をそのまま適用することには問題がある。

本研究では異相界面近傍における粒子の巻き込み現象を明らかにする目的で、機械式攪拌槽における粒子の巻き込みのモデル実験を行った。

まず粒子浮遊の臨界巻き込み条件を低密度および高密度粒子のそれぞれについて測定し比較・考察を試みた。この考察で得られた仮説を検証するために、巻き込み現象を巻き込み時間と浮上/沈降時間の2つの要因に分けてそれぞれの時間の粒径依存性を測定した。最後に攪拌槽における巻き込み現象の統一的な説明を試みた。

平成14年11月21日受付 平成15年1月19日受理 (Received on Nov. 21, 2002; Accepted on Jan. 19, 2003)

* 東北大学大学院生(現: Université Henri Poincaré Nancy I) (Graduate Student, Tohoku University, now Université Henri Poincaré Nancy I)

*² 東北大学大学院生(現: 新日本製鐵(株)八幡製鐵所) (Graduate Student, Tohoku University, now Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

*³ 東北大学大学院工学研究科(Graduate School of Engineering, Tohoku University, 02 Aza-Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai 980-8579)

2. 定常攪拌下における臨界粒子巻き込み条件の測定

2.1 実験方法

2.1.1 試料粒子

本研究では試料粒子として中空ガラス粒子 (GMB)、中空シリカ粒子 (SB) およびガラス粒子 (GB) の3種類を用いた。Table 1 に粒子の物性を示す。中空ガラス粒子と中空シリカ粒子は水よりも密度が小さく、介在物を模したものである。一方、ガラス粒子の密度は水よりも大きい。なお、これらはいずれも水に濡れやすい粒子である⁸⁾。

2.1.2 実験装置

攪拌槽はアクリル製で、直径および液高さが19cmの円筒形状であり、旋回流動を抑制するための完全邪魔板条件を満たすように⁹⁾ 邪魔板を3枚設置してある。また、攪拌羽根は8枚羽根のパドル形状であり、液高さのほぼ中央に設置した。攪拌槽の寸法を Fig. 1 に示す。攪拌する液体はフィルターを通した水道水である。

実験装置全体の概略図を Fig. 2 に示す。実験では攪拌槽内の粒子濃度を測定するためにフォトダイオードを使用した。この素子は光起電力効果を基本原理とした半導体素子であり、入射光強度に比例した起電力を発生する。

円筒水槽の中心軸上に幅 2mm のスリット光を攪拌槽側方から照射する。周囲を水槽ごと暗幕で覆い外界からの光を遮断した上で、フォトダイオードをスリット光面と垂直になるように攪拌槽前面に設置した。攪拌下で槽内部に巻き込まれた試料粒子からの散乱光をフォトダイオードで測定して起電力に変換し、増幅回路を通した後、オシロスコープで測定した。槽内に投入した粒子量は $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ である。

なお測定に先立って、粒子を投入しない状態で槽内のバックグラウンドの光量を測定し、粒子投入時の測定値を補正した。また、本実験条件下では、フォトダイオードの起電力と巻き込まれた粒子量が比例関係にあることを予備実験で確認してある。なお、本実験条件では、液面からの気泡の巻き込みは観測されなかった。

それぞれの試料粒子について、攪拌羽根の攪拌数 n を $0 \sim 6.67 \text{ s}^{-1}$ の範囲で変化させ、槽内の粒子濃度を測定した。

2.1.3 測定箇所

測定箇所は Fig. 1 に示すように2箇所としている。なお、光源が均一でないために、場所により光の強度に分布が生じる。そこで各測定箇所の光の強度を補正するために、水と密度の等しいポリスチレン粒子を槽内に均一に分散させ、その光強度の比を係数として実験結果を補正した。

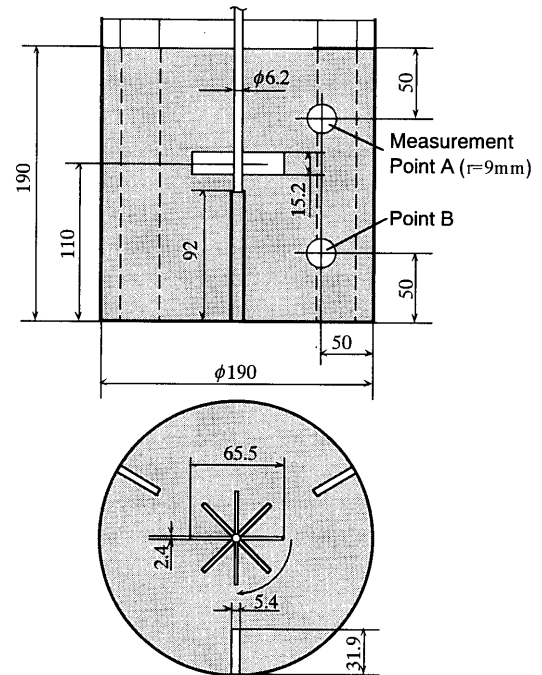
2.2 実験結果

2.2.1 粒子巻き込み量の攪拌数依存性

Fig. 3 に測定結果の一例を示す。図より、巻き込み粒子

Table 1. Particle properties.

particle	density/kg·m ⁻³	diameter/μm
Glass micro balloon	460	54.5~102
Silica balloon	580	241~325
Glass bead	2410	59.0~95.4



length unit : mm

Fig. 1. Schematic diagram of agitation vessel.

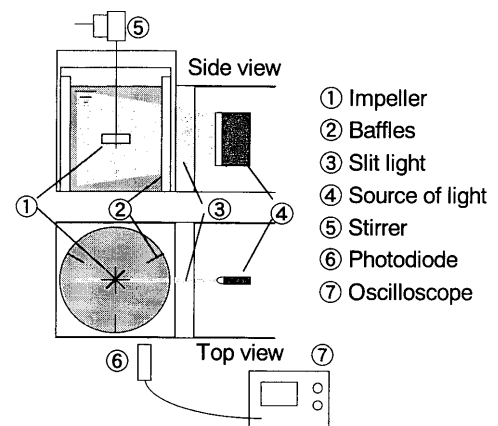


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

量は低攪拌数では少ないが、攪拌数の増加に伴い急激に増加し、その後飽和に達していることが分かる。この傾向は粒子密度や粒径によらず、いずれの実験条件でも同様であった。

以上に示した攪拌数と巻き込み粒子量の関係は式 (1) で良く近似することができる¹⁰⁾。

$$E = E_{\text{sat}} \{1 - \exp(-\alpha \cdot n^{\beta})\} \dots \dots \dots (1)$$

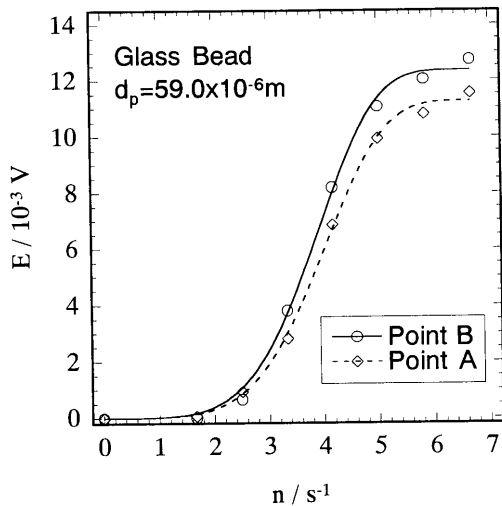


Fig. 3. Relation between agitation speed and amount of entrained particle.

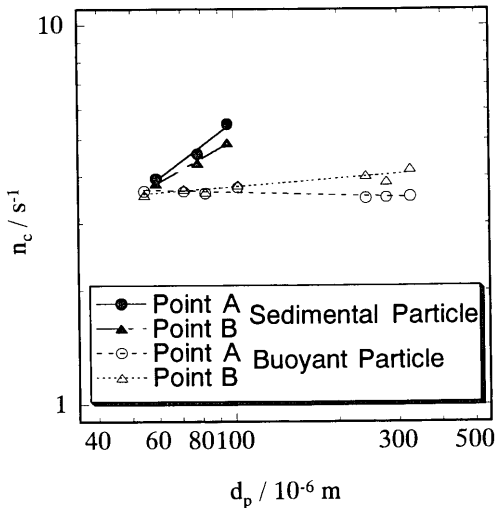


Fig. 4. Relation between particle diameter and critical agitation speed.

式中の定数 α , β および粒子の飽和巻き込み量 E_{sat} の値は回帰計算によって決定した。近似曲線を Fig. 3 に示してあるが、この曲線は実験結果を良く表していることが分かる。ここで $E=(1/2)E_{sat}$ となる攪拌数を臨界攪拌数 n_c と定義した。攪拌数が n_c より小さい場合には粒子は槽内にあまり巻き込まれないが、攪拌数が n_c を超えると大半の粒子は槽内に巻き込まれる。以下ではこの臨界攪拌数を用いて実験結果を整理する。

2.2.2 臨界攪拌数の粒径依存性

Fig. 4 に測定された臨界攪拌数の粒径依存性を示す。

図より高密度粒子については、測定点A点、B点共に粒径が大きくなるに従い臨界攪拌数が上昇することが分かる。この臨界攪拌数の粒径依存性は次式のように表せる。

$$n_c = 0.24 \cdot d_p^{0.68} \quad (\text{Point A}) \dots\dots\dots(2a)$$

$$n_c = 0.48 \cdot d_p^{0.51} \quad (\text{Point B}) \dots\dots\dots(2b)$$

一方、低密度粒子は、高密度粒子と違って臨界攪拌数に粒径依存性がほとんどみられない。これらの関係は次式のように整理できる。

$$n_c = 4.1 \cdot d_p^{-0.025} \quad (\text{Point A}) \dots\dots\dots(3a)$$

$$n_c = 2.7 \cdot d_p^{0.072} \quad (\text{Point B}) \dots\dots\dots(3b)$$

高密度粒子の結果のように、大きな粒子ほど巻き込むために攪拌数を大きくする必要があるということは、直感的にも理解しやすい。粒径が大きくなるとそれだけ粒子の沈降速度が大きくなり、液中に粒子が巻き込まれて浮遊するためには、より強く攪拌する必要があるためである。

一方、低密度粒子では、臨界攪拌数が粒径にほとんど依存しないという結果が得られた。これは高密度粒子と低密度粒子では、攪拌槽への巻き込み挙動が異なることを示している。

なお、Fig. 4 よりA点とB点で n_c と d_p との関係が若干ことなり、 d_p が大きい領域で差異が大きくなっている。これは粒子の相対速度のために、槽内に粒子濃度の分布が生じたためと考えられる。

2.3 臨界攪拌数に関する考察

前述したように、高密度粒子では臨界攪拌数に粒径依存性があったが、低密度粒子では粒径依存性がみられなかった。すなわち、低密度粒子と高密度粒子では粒子の巻き込み現象に何らかの違いがあることになる。この違いを説明するために、ここでは以下のような仮説を立てた。

低密度粒子の巻き込み現象は、

- ・巻き込み頻度：粒子の自由表面からの巻き込まれやすさ
 - ・浮上頻度：粒子の自由表面への浮上しやすさ
- の2つの要因に分けて考えることができる。

すなわち、自由表面に浮いている粒子はある確率でバルクに取り込まれ、槽内に分散する。一方、槽内に分散している粒子はある確率で自由表面に浮上する。この両者は定常状態では釣り合っており、槽内への粒子巻き込み量はこの2つの要因によって決定される。もし、これら2つの頻度が粒径に同程度に依存していれば、結果として両者はキャンセルし合って粒子巻き込み量には粒径依存性が出てこないことになる。

高密度粒子の場合も同様に考えると、

- ・巻き込み頻度：粒子の槽底からの巻き込まれやすさ
- ・沈降頻度：粒子の槽底への沈降しやすさ

の2つの要因があり、この両者の粒径依存性が異なるために臨界攪拌数に粒径依存性が出てきたものと考えられることができる。

この仮説の検討は第3,4章で行う。

3. 非定常攪拌における粒子巻き込み挙動

前章で、粒子の巻き込み現象は1) 巻き込み頻度と2) 浮上/沈降頻度の2つの要因に分けて考えることができ、これら2つの要因によって臨界攪拌数の粒径依存性が決定されるという仮説を立てた。

本章ではこの仮説を検証するための実験を行う。攪拌槽において、これらの頻度を直接測定することは困難であるが、ここでは以下のような実験でその傾向をみることにした。

3.1 粒子の巻き込み時間に関する検討

粒子の巻き込まれやすさの粒径依存性を明らかにする目的で、一定攪拌数において投入した粒子の槽内における分布が定常になるまでの時間を測定する。この時間が長くなるほど粒子は巻き込まれにくく、逆に短いほど巻き込まれやすいといえることができる。

3.1.1 実験方法

実験に使用した攪拌槽および粒子は前章のものと同一である。

まず攪拌をしていない状態で、低密度粒子を水面に浮かべておく。次に決められた攪拌数で瞬間的に攪拌を開始し、槽内に巻き込まれた粒子量の経時変化を測定する。粒子量は初め急激に増加するが、時間の経過とともに飽和していく。この飽和量の95%に達したときの時間を低密度粒子の巻き込み時間 t_1 として定義した。

高密度粒子の場合も同様に巻き込み時間 t_1 を測定する。低密度粒子の場合と異なるのは初期状態で粒子を槽底に沈めておき、槽底からの巻き込みに要する時間を測定することである。

実験は粒子径と攪拌数をパラメータとして行った。また、低密度粒子の測定箇所は Fig. 1 におけるA点、高密度粒子の測定箇所はB点とした。

3.1.2 結果

測定データの一部を Fig. 5 に示す。初めは攪拌していない状態であるが、 $t=0$ において攪拌を開始すると同時に槽内に巻き込まれた粒子量が急激に増加し、その後飽和していることが分かる。飽和値の95%に達する時間をグラフより読み取り測定値とした。

結果を Fig. 6 に示す。図より低密度粒子の場合、巻き込み時間 t_1 は粒子径 d_p が小さくなるほど大きくなることが分かる。すなわち小さな粒子ほど巻き込みに時間がかかり、巻き込まれにくい。また、攪拌数 n が大きくなると巻き込み時間は小さくなるが、巻き込み時間の粒径依存性は攪拌数によらずほぼ一定である。攪拌数による相違を平均化すると巻き込み時間の粒径依存性は次式のように表すことができる。

$$t_1 \propto d_p^{-1.3} \quad (\text{低密度粒子}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

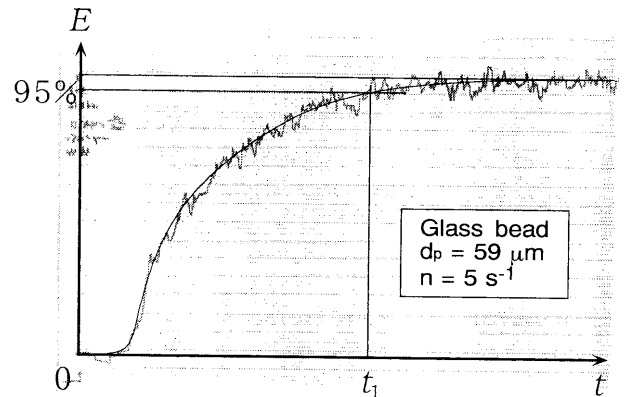


Fig. 5. Example of experimental result.

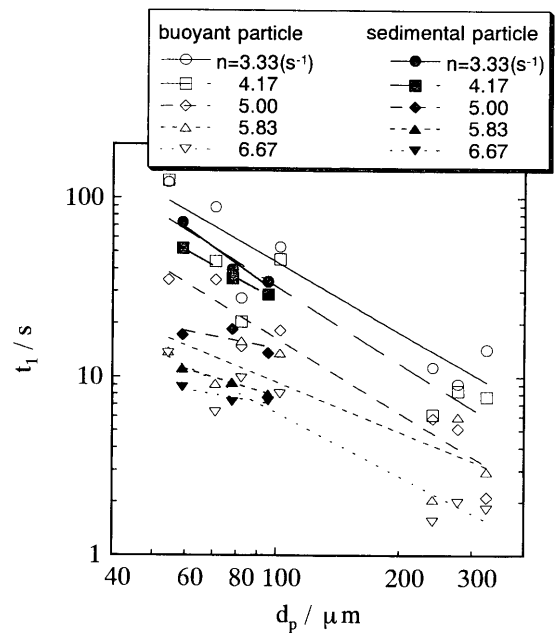


Fig. 6. Relation between particle diameter and entrainment time t_1 .

一方、高密度粒子の場合も巻き込み時間 t_1 に粒径依存性がみられるのは低密度粒子の場合と同様であるが、攪拌数によってその依存性が変化している。攪拌数 $n=3.33 \text{ s}^{-1}$ のときには巻き込み時間は粒子径の約-1.6乗に比例しているが、攪拌数が大きくなるに従ってこの依存性は小さくなっている。これらの関係を式にすると次式のようになる。

$$t_1 \propto d_p^{-1.6 \sim -0.4} \quad (\text{高密度粒子}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

以上より、低密度粒子および高密度粒子は粒子径が小さいほど槽内に巻き込まれにくい傾向があることが見いだされた。

3.2 粒子の浮上/沈降時間に関する検討

ここでは攪拌された槽内において、巻き込まれた粒子が自由表面へ浮上（低密度粒子の場合）あるいは槽底へ沈降（高密度粒子の場合）するのにかかる時間を検討する。

3.2.1 実験方法

実験に使用した装置や粒子は前節のものと同様である。

まず槽内を一定の高撹拌数 ($n=8.33\text{ s}^{-1}$)で撹拌しておき、槽内に粒子を一様に分散させておく。この撹拌数は臨界撹拌数 n_c よりも十分に高く、槽内の粒子は完全に巻き込まれている。次に、瞬間的により低い所定の撹拌数へ変化させると、槽内に分散していた粒子の一部が自由表面へ浮上(低密度粒子の場合)あるいは槽底へ沈降(高密度粒子の場合)し、槽内の粒子濃度が減少してやがて定常に達する。そのときの槽内の粒子濃度の経時変化を前節と同じ測定個所で測定し、定常値の95%に達するまでにかかった時間を浮上/沈降時間 t_2 と定義した。

実験は粒子径と撹拌数をパラメータとして行った。

3.2.2 結果

実験結果を Fig. 7 に示す。図より低密度粒子、高密度粒子ともに粒子径が小さくなるにつれて浮上/沈降時間 t_2 が大きくなり、浮上もしくは沈降に時間がかかるようになることが分かる。また、撹拌数による相違はあまりみられない。撹拌数による違いを平均化すると、浮上/沈降時間 t_2 の粒径依存性は次式で表すことができる。

$$t_2 \propto d_p^{-1.4} \quad (\text{低密度粒子}) \dots\dots\dots (6)$$

$$t_2 \propto d_p^{-1.6} \quad (\text{高密度粒子}) \dots\dots\dots (7)$$

以上より、低密度粒子および高密度粒子は粒子径が小さいほど浮上もしくは沈降に時間がかかる傾向があることが分かった。

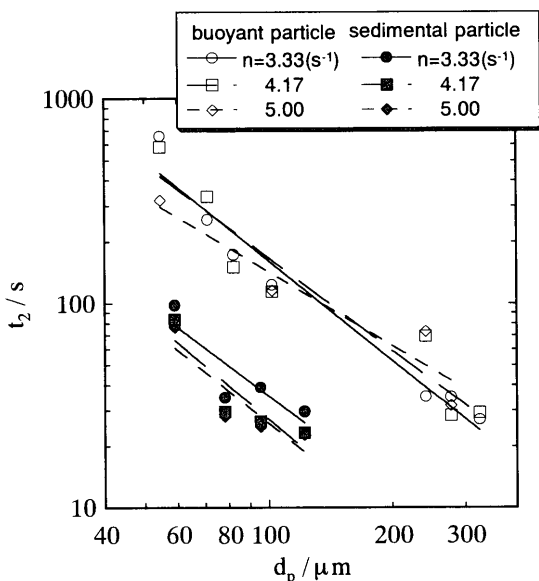


Fig. 7. Relation between particle diameter and flotation/sedimentation time t_2 .

4. 考察

4.1 臨界撹拌数の粒径依存性

3.2 節および 3.3 節の実験により、撹拌槽における粒子の巻き込み時間 t_1 と浮上/沈降時間 t_2 の粒径依存性が明らかにされた。ここでは、これら t_1 と t_2 の粒径依存性が、臨界撹拌数 n_c とどのような関係にあるのかを考察する。

低密度粒子の場合、 t_1 の粒径依存性は -1.3 (式 (4))、 t_2 の粒径依存性は -1.4 (式 (6)) となっており、両者は同程度の値になっている。そのため粒子径を変化させても、巻き込み時間と浮上時間の両方が同じように変化するため、結果として臨界撹拌数に粒径依存性がみられない (式 (3a))。

高密度粒子の場合、 t_1 の粒径依存性は $-1.6 \sim -0.4$ (式 (5))、 t_2 の粒径依存性は -1.6 (式 (7)) となっており、 t_1 の粒径依存性は t_2 のものに比較すると同程度かあるいはそれよりも小さい値となっている。そのために例えば粒子径を小さくしていくと、巻き込み時間 t_1 、沈降時間 t_2 ともに大きくなっていくが、その変化の割合は t_1 の方が大きい。すなわち、粒子径を小さくしていくと、巻き込みに要する時間がより長くなるようになり、結果として臨界撹拌数の粒径依存性が式 (2b) のように現れてきたものと考えられる。

4.2 巻き込み時間に関する考察

4.2.1 均一混合時間との比較

本研究においては粒子巻き込み時間を、撹拌を静止した状態から撹拌を急激に開始し、槽内の粒子濃度がほぼ定常に達するまでに要した時間 t_1 として定義している。これは撹拌槽における均一混合時間と似た概念であり、両者を比較することは非常に興味深い。

撹拌槽の均一混合時間の測定には牛乳を用いた。槽内を一定の撹拌数で撹拌して定常状態にした後、撹拌槽の上部から液表面に $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ の牛乳をトレーサーとして投入した。槽内のトレーサー濃度の経時変化をフォトダイオードで測定し、最終到達濃度の95%に達したときの時間を均一混合時間 t_{mix} とした。この牛乳を用いた均一混合時間は粒子巻き込み時間とほとんど同一の方法で測定されており、両者の違いは撹拌槽をあらかじめ定常の撹拌状態にしておいたかどうかだけである。測定された均一混合時間と巻き込み時間を比較したものを Fig. 8 に示す。

図によると、均一混合時間 t_{mix} は撹拌数を変化させてもあまり変わらないが、粒子の巻き込み時間 t_1 は粒子径や撹拌数に大きく依存している。

このことは、牛乳の分散が液バルクの乱流拡散であるのに対し、粒子の巻き込みは異相界面における粒子挙動に依存していることを示唆しているように思われる。そこでビデオカメラを用いて、異相界面近傍における粒子巻き込み

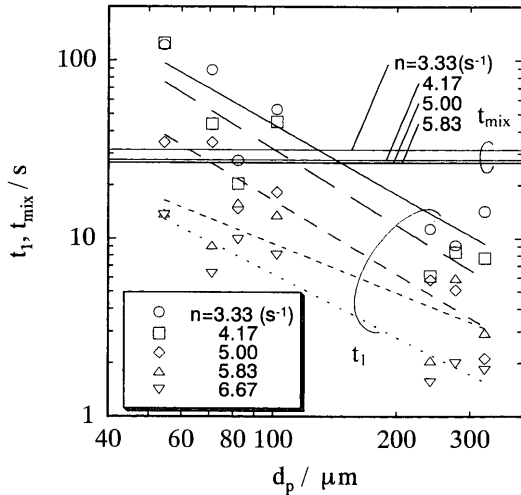


Fig. 8. Comparison between mixing time and entrainment time t_1 .

の様子を直接観察してみた。

4・2・2 ビデオカメラによる粒子巻き込みの直接観察

(1) 自由表面における低密度粒子の巻き込み

Fig. 9 および Fig.11(a) は、自由表面近傍における低密度粒子の巻き込み挙動のビデオカメラ画像および模式図である。図に示すように、自由表面近傍では間欠的に大きな縦渦が発生しており、この渦によって粒子がバルクの奥深くに巻き込まれることが観察された。

低密度粒子の場合、流体よりも粒子密度が小さいので、渦中で回転する粒子は遠心力によって渦の中心に向かう力を受ける。その結果、自由表面に浮遊する粒子は渦の中心に集められ、その後バルクの奥深くまで巻き込まれるものと考えられる。

攪拌槽における縦渦は非定常的に発生しているため、この縦渦による粒子巻き込みを定量的に評価することは困難である。しかし定性的には粒子径が大きいほど粒子は遠心力を受けやすく、渦に集められやすいといえる。また、攪拌数が大きいほど縦渦の発生頻度や発生した渦の回転速度は大きくなる。仮に遠心力とストークスの抵抗力が釣り合っているとすれば、渦中にある粒子の半径方向の泳動速度は粒子径の2乗、回転速度の2乗に比例する。このため粒子の巻き込み時間 t_1 は、粒径が大きいほど、攪拌数が大きいほど小さくなったものと考えられる。

Fig. 8 によると、均一混合時間は26~32秒程度であるが、それに比較して巻き込み時間は1.8~120秒程度と広い範囲の値をとっている。攪拌数が低く粒子径が小さい場合は、牛乳によって測定された均一混合時間よりも粒子の巻き込み時間のほうが長い。このことは、液面に浮遊している低密度粒子を液バルクに巻き込む際には、(牛乳の場合にはみられなかった) 粒子特有の何らかの抵抗が存在するというを示唆している。一方で、本研究で観察されたように渦による粒子巻き込み機構があるために、粒子径や攪拌

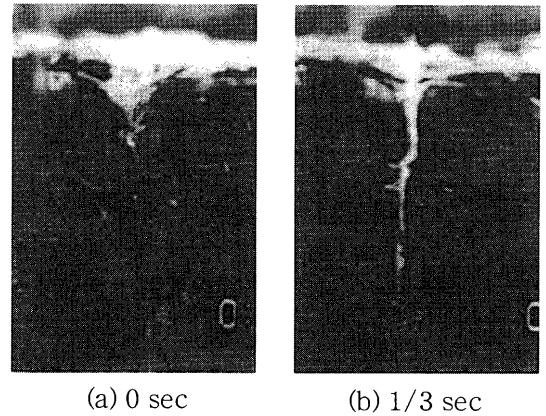


Fig. 9. VTR images of buoyant particle entrainment by vortex (from free surface).

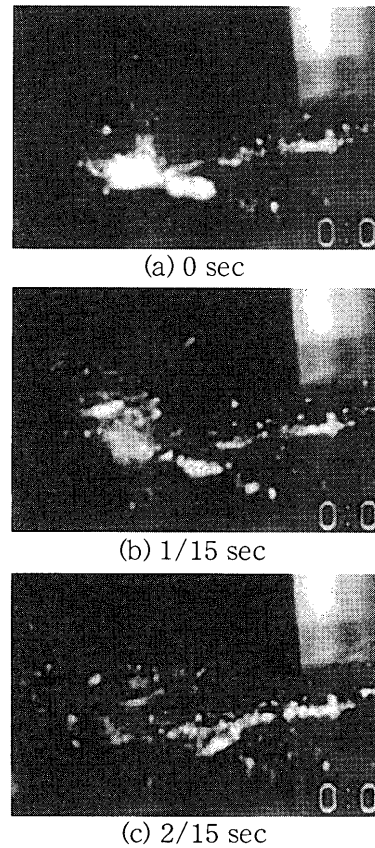


Fig. 10. VTR images of sedimental particle entrainment by vortex (from bottom wall).

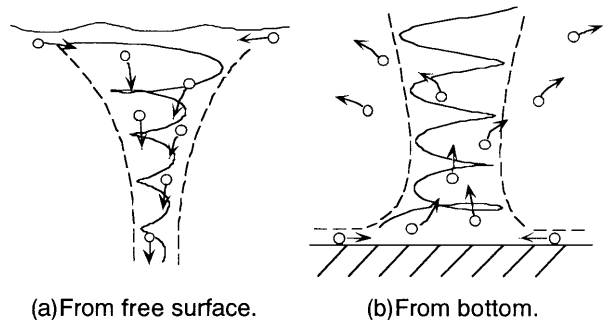


Fig. 11. Schematic view of mechanism of particle entrainment by vortex.

数が大きくなると、低密度粒子はこの抵抗に打ち勝って容易に液バルクに巻き込まれ、巻き込み時間は均一混合時間よりも短くなると考えられる。低密度粒子を巻き込む際の抵抗としては界面張力が考えられるが、現在のところその詳細は不明である。

永田らによって、邪魔板付きの機械式攪拌槽においては、しばしばこのような縦渦が発生することが指摘されている¹¹⁾。またCCモールド内においても、メニスカス近傍の片流れが強くなったときに、浸漬ランスの周囲に同様な縦渦が存在することが指摘されている¹²⁻¹⁴⁾。このような縦渦が存在するときには、液面からの低密度粒子の巻き込みは、渦による影響を大きく受けるものと考えられる。

(2) 槽底における高密度粒子の巻き込み

Fig.10および Fig.11(b)は、槽底付近における高密度粒子の巻き込み挙動のビデオカメラ画像および模式図である。自由表面近傍と同様に槽底部でも間欠的な縦渦の発生が認められるが、低密度粒子の場合と異なり、渦に巻き込まれた高密度粒子はすぐに渦の周辺部へと拡散し、バルクの奥深くまで巻き込まれることはなかった。

槽底は固体壁であるために、流体の付着条件により境界層が発生する。流体の圧力は渦の中心ほど低くなっており、この圧力勾配による内向きの力と、渦の回転による外向きの遠心力が釣り合っている。しかし槽底付近の境界層内では固体壁の付着条件により渦の回転速度が小さくなり、圧力勾配による力だけが支配的になる。結果として境界層内の流体は中心に向かって流れ、いわゆるEkman境界層を形成する¹⁵⁾。

槽底に沈んだ粒子はまずこのEkman境界層の流れに乗って渦の中心に引き寄せられ、流体中に巻き上げられる。しかし境界層の外部に出ると渦の回転によって粒子に働く慣性の作用により、渦中の粒子はすぐに渦からはじき出されてしまう。

このように、低密度粒子と高密度粒子では、縦渦に対する挙動が異なり、結果として巻き込み時間の違いが現れてきたものと思われる。

4.3 浮上/沈降時間に関する考察

浮上/沈降時間は、槽内に一様に分散していた粒子がある攪拌数のもとで浮上/沈降していくのに要した時間である。すなわち、浮上/沈降時間には粒子の浮上/沈降速度が大きく関係しているものと考えられる。そこでFig. 7のグラフの横軸を、粒子径から粒子の浮上/沈降速度にかえてプロットしたものをFig.12に示す。

なお、浮上/沈降時間の測定は、一定の攪拌数 ($n=3.33\sim 5.00\text{ s}^{-1}$) のもとで行っており、槽内は乱流状態となっている。乱流中においては粒子の相対速度が静止流体中のものと異なるために、ここでは著者らによって測定された乱流中における粒子の抵抗係数¹⁶⁾を用いて粒子の浮上/沈降速度を算出した。

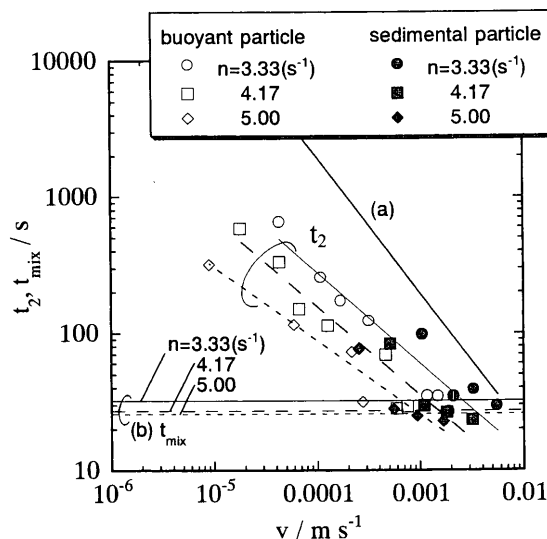


Fig. 12. Relation between slip velocity of particle and flotation/sedimentation time t_2 .

$$\frac{C_D - C_{D0}}{C_{D0}} = 0.619 \cdot Re^{-1.38} \cdot \left(\frac{d_p}{\lambda}\right)^{3.47} \dots\dots\dots(8)$$

ここで C_{D0} および C_D はそれぞれ静止流体中および乱流中における粒子の抵抗係数、 Re は粒子レイノルズ数、 $\lambda = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ はKolmogorovの最小渦径であり液の動粘度 ν と攪拌槽の乱流エネルギー消散速度 ϵ より算出した。攪拌槽の平均の乱流エネルギー消散速度は、攪拌所要動力の測定より、以下の式を用いて評価することができる¹⁷⁾。

$$\epsilon = 0.15 \times \frac{2\pi n T_M}{M} \dots\dots\dots(9)$$

Fig.12における(a)の線は、一定の浮上/沈降速度をもった粒子が、攪拌槽の液高さ分の距離を浮上/沈降するために要する時間であり、拡散による混合作用が全くない場合の浮上/沈降時間に相当する。一方(b)の線は4.2節で求めた均一混合時間であり、浮上/沈降速度を持たない粒子が拡散によって槽内に分散していく時間に相当する。(a)および(b)の直線は、それぞれ攪拌数が低い極限の場合と高い極限の場合の浮上/沈降時間の目安と考えることができる。

図をみると、攪拌数が等しい場合には低密度粒子、高密度粒子とも一つの直線に乗っている。また浮上/沈降時間の測定値は(a)と(b)の2つの直線の間概ね収まっており、攪拌数が低くなると(a)に、攪拌数が大きくなると(b)の直線に近づく傾向がある。これらのことから粒子の浮上/沈降時間は、粒子の浮上/沈降速度と攪拌槽内の乱流拡散の2つの要素の兼ね合いで決定されていると考えられる。

5. 結言

本研究では機械攪拌槽内における粒子の巻き込み現象に関する研究を行った。

まず、粒子の臨界巻き込み条件の測定を低密度粒子と、高密度粒子のそれぞれについて行った。その結果、以下のことが明らかにされた。

(1) 低密度粒子における臨界攪拌数 n_c は、粒子径によらずほぼ一定であった。

(2) 高密度粒子における臨界攪拌数は粒子径に依存しており、その依存性は 0.51~0.68 次であった。

更に粒子の巻き込み挙動を巻き込み時間と浮上/沈降時間の2つの要因に分けて、それぞれについて検討を行った。その結果、以下のことが明らかにされた。

(3) 低密度粒子では、巻き込み時間と浮上時間の粒径依存性が等しく、結果として両者がキャンセルし合うために、臨界攪拌数に粒径依存性がみられない。

(4) 高密度粒子では、巻き込み時間の粒径依存性が、沈降時間の粒径依存性よりも小さく、その結果臨界攪拌数に粒径依存性がみられる。

(5) 粒子の浮上/沈降時間は、粒子の浮上/沈降速度と攪拌槽の拡散の2つの要素の兼ね合いで決定されていると考えられる。

また、粒子の巻き込みの挙動をビデオカメラによって撮影し、観察をした結果、次のことが明らかにされた。

(6) 粒子の巻き込み時間は、攪拌槽内に発生する縦渦への粒子の引き込まれやすさによって決定されている。

記号

C_D	: 静止流体中における粒子抵抗係数 (—)
C_{D0}	: 乱流中における粒子抵抗係数 (—)
d_p	: 粒子径 (m)
E	: 起電力 (= 巻き込み粒子量) (V)

E_{sat}	: 飽和起電力 (= 飽和巻き込み粒子量) (V)
M	: 液質量 (kg)
n	: 攪拌数 (s^{-1})
n_c	: 臨界攪拌数 (s^{-1})
Re	: 粒子レイノルズ数 (—)
t_1	: 巻き込み時間 (s)
t_2	: 浮上/沈降時間 (s)
t_{mix}	: 均一混合時間 (s)
T_M	: トルク (Nm)
v	: 粒子の相対速度 (ms^{-1})
α, β	: 定数
ϵ	: 乱流エネルギー消散速度 ($m^2 s^{-3}$)
λ	: Kolmogorov の最小渦径 (m)
ν	: 動粘度 ($m^2 s^{-1}$)
ρ_l	: 流体密度 ($kg m^{-3}$)
ρ_p	: 粒子密度 ($kg m^{-3}$)

文 献

- 1) D.Bouris and G.Bergeles: *Metall. Mater. Trans.*, **29B** (1998), 641.
- 2) K.Nakajima and K.Okamura: 4th Int. Conf. on Molten Slags and Fluxes, ISIJ, Tokyo, (1992), 505.
- 3) 浅井滋生: 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1984), 90.
- 4) S.T.Johansen, S.Grådahl and T.F.Hagelien: *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, TMS, Warrendale, PA, (1999), 211.
- 5) Y.Nakai, I.Sumi and Y.Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 216.
- 6) Y.Oyama and K.Endo: *Kagaku-Kogaku*, **20** (1956), 666.
- 7) K.Yamamoto: *Kagaku-Kogaku*, **27** (1963), 597.
- 8) ぬれ技術ハンドブック, 石井淑夫, 小石真純, 角田光雄編, テクノシステム, 東京, (2001), 79.
- 9) 化学工学便覧, 化学工学協会編, 丸善, 東京, (1988), 1081.
- 10) S.Taniguchi, Y.Matsukura and A.Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 210.
- 11) S.Nagata, K.Yamamoto, K.Hashimoto and Y.Naruse: *Kagaku-Kogaku*, **23** (1959), 595.
- 12) H.Tanaka, H.Kuwatori and R.Nishihara: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 761.
- 13) H.Qinglin: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 343.
- 14) D.Gupta and A.K.Lahiri: *Metall. Mater. Trans.*, **25B** (1994), 227.
- 15) H.P.Greenspan: *The Theory of Rotating Fluids*, University Press, London, (1968), 28.
- 16) S.Shimasaki, T.Wada and S.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, to be submitted.
- 17) S.Toyama, T.Mochino and M.Togame: *Kagaku-Kogaku*, **7** (1981), 524.