

静止液体中を落下する低密度微粒子群の分散挙動

平山 淳史*・井口 学*2

Dispersion of Low Density Fine Particles Falling in Still Liquid

Atsushi HIRAYAMA and Manabu IGUCHI

Synopsis : A model study was carried out to understand the dispersion of slag particles in the sea, which were introduced onto its surface as a nutritional source for CO₂ fixation with marine phytoplankton multiplication. A mixture of water and fine particles was introduced onto the surface of a water bath using an acrylic pipe. The fine particles were used to decrease the falling velocity to a very low level. The behavior of them in the bath was observed with a CCD camera and a high-speed video camera. They dispersed suddenly on the bath surface just after the attachment of the mixture to the bath surface due to the surface tension force. The falling patterns of them were depended on the initial concentration of the mixture and basically classified into three types. The dispersion in the horizontal direction became greatest at a certain initial concentration. An optimum initial concentration therefore exists for uniform dispersion of fine particles in the bath.

Key words : slag; particle-laden jet; particle plume; dispersion; plankton.

1. 緒言

製鋼スラグ有効利用の一つに、海洋にスラグ粒子を散布して植物プランクトンを増殖させ炭酸ガスを固定化しようとする試みがなされている^{1,2)}。この目的を達成するためには、スラグ粒子を海水面に均一に散布するとともに、できるだけ海水面近傍に均一分散した状態で留まらせて、沈降を妨げる必要がある。沈降防止には微粒子を用いればよいが、スラグ微粒子の散布については、例えば農業を散布するように飛行機や船を用いて行うことが考えられる。この方法は手間がかからず容易である反面、風があれば吹き飛ばされる可能性があり、均一散布はそれほど容易ではないと予想される。一方、船上に設置したタンク等に入れた海水中にスラグ微粒子をあらかじめ均一分散させておき、海水面に散布する方法は、手間はかかるものの、均一散布はそれほど難しくない。どの方法がより効果的であるのかの総合的判断は今後の研究に待たねばならないが、本研究では後者の方法に着目し、粒子分散に関する基礎的研究を行った。

従来、液体中に均一に分散する微粒子の動的挙動、特にそれらの沈降特性は、微粒子の除去に際して重要な因子であることから化学工学の分野で多くの研究が行われている³⁾。ところが、液体中へ局所的に注入された微粒子群の挙動については、以下に示すようにまだまだ不明な点が多く残されている。密度が水よりも大きな1 mm程度の凝集しない粒子を多数混入した水をノズルから水中へ鉛直方向に吹込み、粒子混入噴流 (Particle-laden jet) を形成させた

きの粒子分散挙動^{4,5)}や多数の粒子の自由落下に起因する流れ (粒子プルーム: Particle plume)⁶⁻⁸⁾の特性に関する研究は土木工学の分野で幾つかみられる。ここで噴流とは、ノズルを出るときの流体の慣性力によって水中に誘起される流れのことであり、プルームとは粒子に働く重力によって駆動される流れのことである。粒子混入噴流の場合には、粒子の密度と濃度が噴流の流動特性に及ぼす影響はそれほど大きくないことが分かっている。しかし噴流によって微粒子を分散させようとする、微粒子は噴流中の液体とほぼ同じ流速で移動するため、表面から深い位置まで到達し、海水面近くに留まらせることは難しいと考えられる。なお、噴流を海水面に平行に発生させることも可能であり⁹⁾、興味深い課題ではあるが、この場合の噴流中の粒子挙動についてはよく分かっていない。本研究では、約15ミクロンの微粒子群を慣性力が零の状態でも水表面に導入したときの液体中における落下挙動について調査することを目的とした。この流れ場も粒子プルームに分類されるが、粒子プルームに関する以前の研究は、直径が1 mmオーダーの粒子が浴表面に投入される場合を扱っており、したがって粒子の慣性力の影響が存在し、しかも粒子の終端速度が10 cm/sのオーダーであるという点で本研究とは異なっている。

なお、産業廃棄物の処理や資源の有効利用に関する様々な研究が最近活発に行われている。特に産業廃棄物処理プロセスにおいて、有価金属を回収・再利用するためには成分もしくは粒径の異なる金属微粒子を相互分離する必要がある。分離法としては磁力選別^{10,11)}、静電選別^{12,13)}、浮遊

平成14年7月30日受付 平成14年10月7日受理 (Received on July 30, 2002; Accepted on Oct. 7, 2002)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University)

*2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

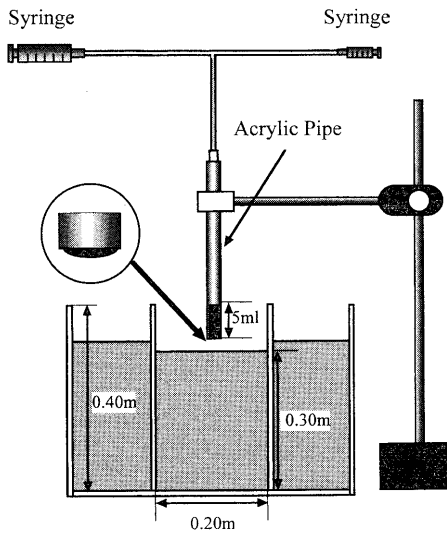


Fig. 1. Experimental apparatus.

選別¹⁴⁻¹⁶⁾、比重選別¹⁷⁾など素材特有の性質を利用した様々な方法が提案されている。比重差を利用した分離には、エアテーブルやカラム型気流選別機などを利用した方法がすでに実用化されているが、微粒子の分離にはコアンダ効果を利用した湿式法、すなわち曲面に沿って粒子を降下させながら分離する方法が有望であると思われる。したがって、本研究はこの分野へも寄与できるものと期待している。

2. 実験装置と方法

Fig. 1に実験装置の概要を示す。内径10mmの亚克力管の上端に二つの注射器を接続し、微粒子を均一に分散させた水を入れたビーカーから大きい方の注射器を用いて5ml吸い上げ、浴の上方に保持した。亚克力管をゆっくりと下げ、イオン交換水を満たした透明亚克力製円筒容器（内径0.20m、水深0.30m）の浴表面に水と微粒子の混合液を接触させ、浴内に落下させた。なお、小さい方の注射器は、亚克力管の下端の液面を下に凸に保ち、管内に空気が入り込むのを防ぐために用いた。亚克力管内混合液中の微粒子の落下速度は後で示すように $3.6 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ と非常に小さく、実験を開始するまでの混合液中において微粒子は鉛直方向に一様に分布していると見なせる。

Fig. 2に微粒子のSEM写真を、Fig. 3に粒度分布を示す。微粒子は塩化ビニリデンアクリロニトリル製、密度 1.04 g/cm^3 、平均粒径 $15 \mu\text{m}$ のほぼ球状のものを使用した。この密度は、実際のスラッグの密度に比べて小さいが、本研究ではまず実験の容易な条件を優先したため、このような密度となった。炭酸ガスの固定化に最適なスラッグ粒子の直径がまだよく分かっていないので、その値が分かれば、粒子の密度や直径を調整することによって実際の場を的確にモデル化することはそう難しくない。

微粒子を分散させた混合液の初期濃度Cを、水 1 m^3 中の

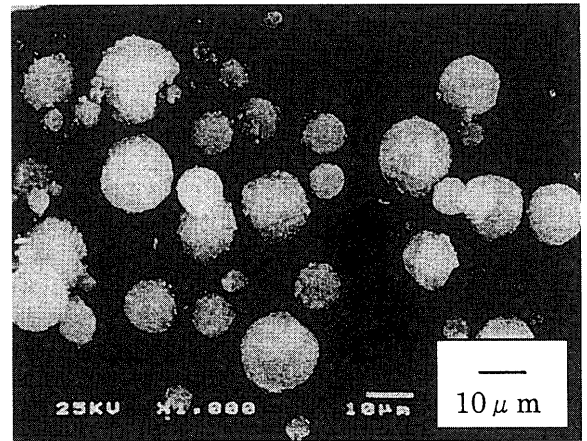


Fig. 2. Photograph of fine particles.

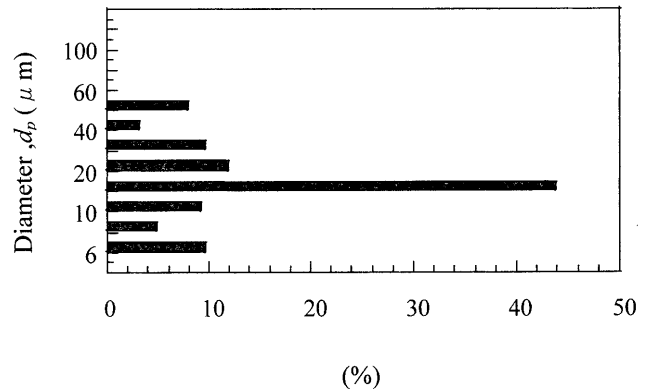


Fig. 3. Particle size distribution.

微粒子の質量と定義し、 $2.0, 5.0, 10, 15, 20 \text{ kg/m}^3$ の5種類とした。この場合、微粒子の凝集はみられなかった。内径10mmの亚克力円管の先端から水中に導入された微粒子群が浴内を落下していく様子をCCDカメラと高速度ビデオカメラを用いて撮影し、画像解析を行うことによって、微粒子群の先端の到達距離と速度、微粒子群の広がり幅などを求めた。また、粒子画像流速計 (PIV: Particle Image Velocimetry) を用いて微粒子の落下速度ベクトルを求めた。

なお、後で示すように微粒子群を浴内に広範囲に分散させるためには、落下挙動が層流から乱流への遷移流になるように初期濃度を調整する必要がある。粒子数を一定にしておいて粒子密度を実際のスラッグの値に近づけると、初期濃度が大きくなる。この場合には、粒子数を減らすことによって遷移流になるように配慮すればよい。

3. 実験結果と考察

3.1 微粒子群の落下挙動

Fig. 4~Fig. 8は各濃度における微粒子群の落下挙動の時間的変化を表している。微粒子群は混合液の下面が浴表面に付着した際、まず表面張力による力の影響を受け、半径方向に亚克力管半径の3倍程度の距離まで急に広がっ

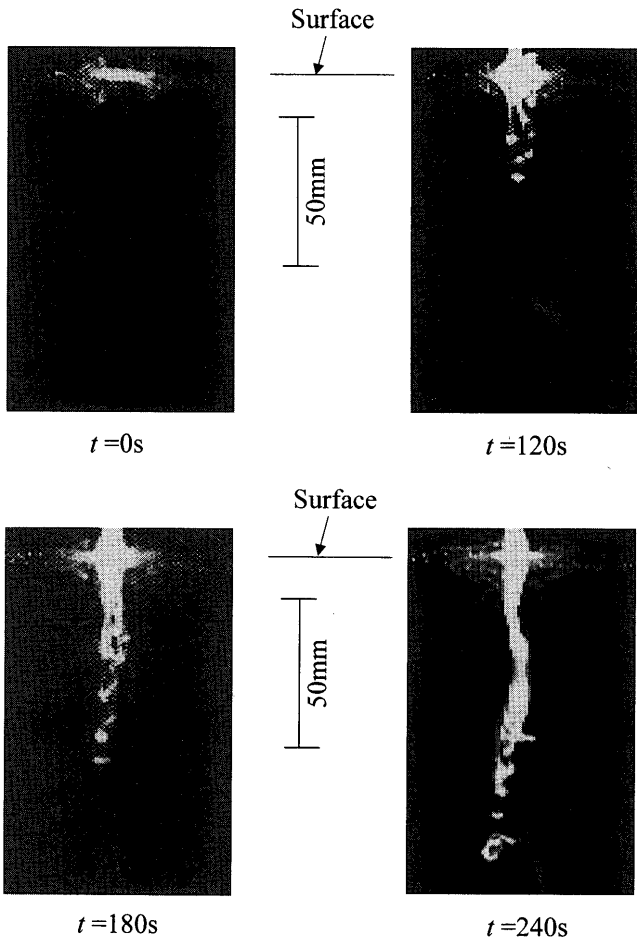


Fig. 4. Falling behavior of fine particles ($C=2.0 \text{ kg/m}^3$).

た。その後アクリル管の出口から落下する微粒子群は流動抵抗の影響を受け、きのこ雲を逆にしたような形状を示しながら鉛直方向に落下した。このように、微粒子は一つ一つが単独に落下するのではなく、周囲の微粒子の誘起した流れの影響を受けながら落下している。

上記落下挙動は、Fig. 9に示すように、微粒子群の初期濃度によって3種類に大別される。濃度が 2.0 kg/m^3 のとき、微粒子群はほとんど広がらず、ゆっくりと蛇行しながら落下した。濃度が 5.0 kg/m^3 の場合には、微粒子群の落下軌道は先端部の軌道の影響を強く受け、先端が蛇行するような落下軌道を示すと、後に続く微粒子群も大きく蛇行し、より不規則な形状へと変形し、半径（水平）方向への広がり幅は大きくなった。 $10\sim 20 \text{ kg/m}^3$ では、微粒子群の先端は蛇行しながら広がるが、それに続く部分はほぼ直線的に落下した。微粒子群の先端が蛇行しながら落下する現象は、粒子混入噴流や粒子プルームでもみられ⁴⁷⁾、フラッピングと呼ばれている。なお、微粒子群の浴表面における挙動については後の3.3.3項で詳しく述べる。

3.2 微粒子群の落下速度

3.2.1 微粒子群内の各粒子の落下速度と濃度の関係

3.1節で示したように、微粒子群は流動抵抗の影響を受け、それらの存在領域は不規則に変形し、半径方向へ蛇行

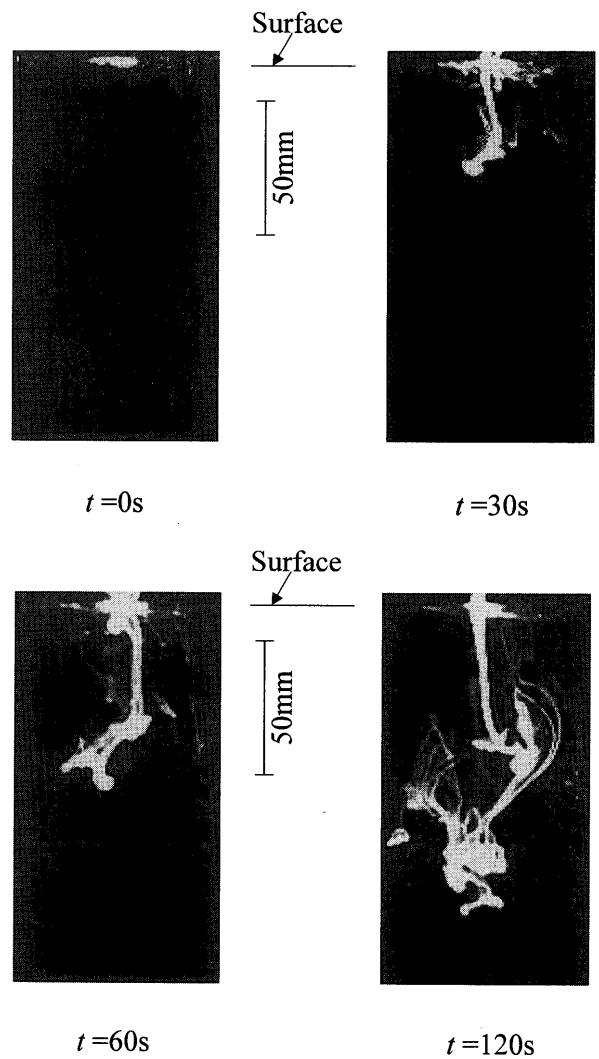


Fig. 5. Falling behavior of fine particles ($C=5.0 \text{ kg/m}^3$).

しつつ広がりながら落下した。そのため、微粒子群の濃度は均一ではなくなり、白く見える高濃度な部分と灰色の低濃度な部分に別れた。Fig.10において、写真中の四角で囲った部分の各微粒子の落下速度ベクトルをPIVで計測した結果をFig.10の下の方の図に表している。ただし、煩雑さを避けるため、ベクトルはかなり間引いている。微粒子群の落下速度は濃度に依存し、高濃度な部分では落下速度は大きく、低濃度な部分では小さくなった。この図からも微粒子は一つ一つ単独で落下するのではなく、周囲の微粒子の作り出した流れの影響を受けながら落下することが分かる。

3.2.2 微粒子群の先端の落下速度と初期濃度の関係

微粒子群の落下挙動は、上述のように先端部の影響を強く受けることが分かった。Fig.11に微粒子群の先端の到達距離 L_p と時間 t との関係を示す。浴表面を基準にし、一定時間ごとに微粒子群の先端の到達距離を測定した。到達距離は初期濃度に依存し、初期濃度が高くなるほど大きくなった。初期濃度が 2.0 kg/m^3 の場合、アクリル管の下端の液面が浴表面に接すると表面張力の作用によって急激に半

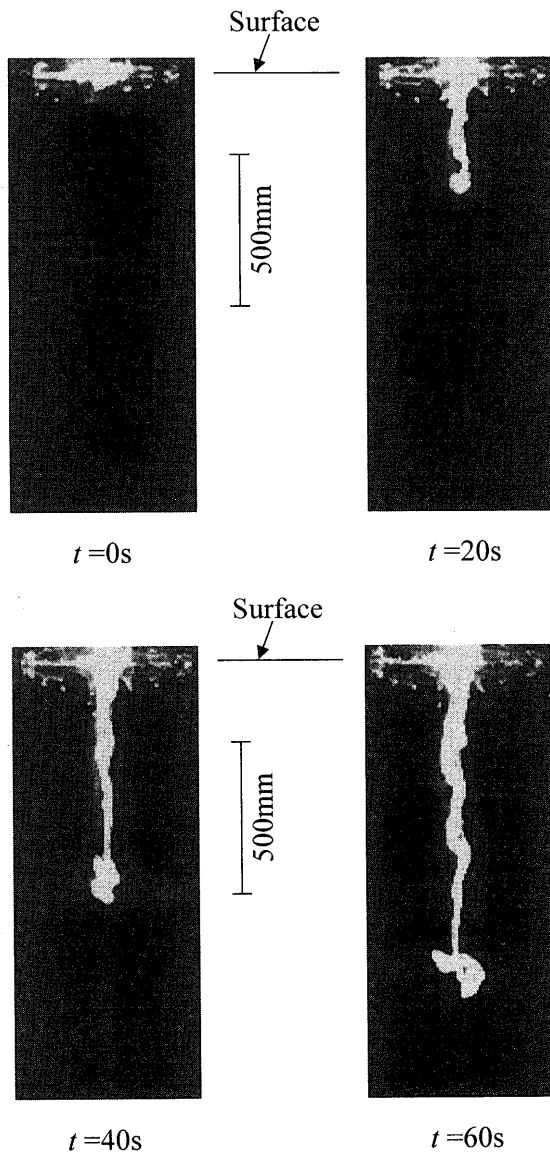


Fig. 6. Falling behavior of fine particles ($C=10 \text{ kg/m}^3$).

径方向へ広がったが、約50秒間、微粒子群の落下は観察されなかった。この場合、初期濃度が低いため、微粒子間の距離が大きくなっている。そこで周囲の微粒子の影響が小さく、微粒子が一つ一つ単独で落下していると仮定して、各粒子の落下速度を計算してみた。単一球形微粒子の終端速度 v_t はストークス近似より

$$v_t = (\rho_p - \rho_f)gd_p^2 / (18\eta_f) \dots \dots \dots (1)$$

と与えられる³⁾。 ρ_p は粒子密度、 ρ_f は流体密度、 g は重力加速度、 d_p は粒径、 η_f は流体の粘度である。本実験で用いた微粒子の場合、終端速度は $v_t = 3.6 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ と非常に小さく、アクリル管下端で周囲の微粒子と微粒子群を形成し、濃度が局所的に高くなるまで時間がかかったためであると考えられる。

Fig.11の測定値をもとにして、微粒子群先端の落下速度 v_p を求め、Fig.12に示す。先端の落下速度は時間の経過とともに次第に減少し、初期濃度に見合った一定値に漸近す

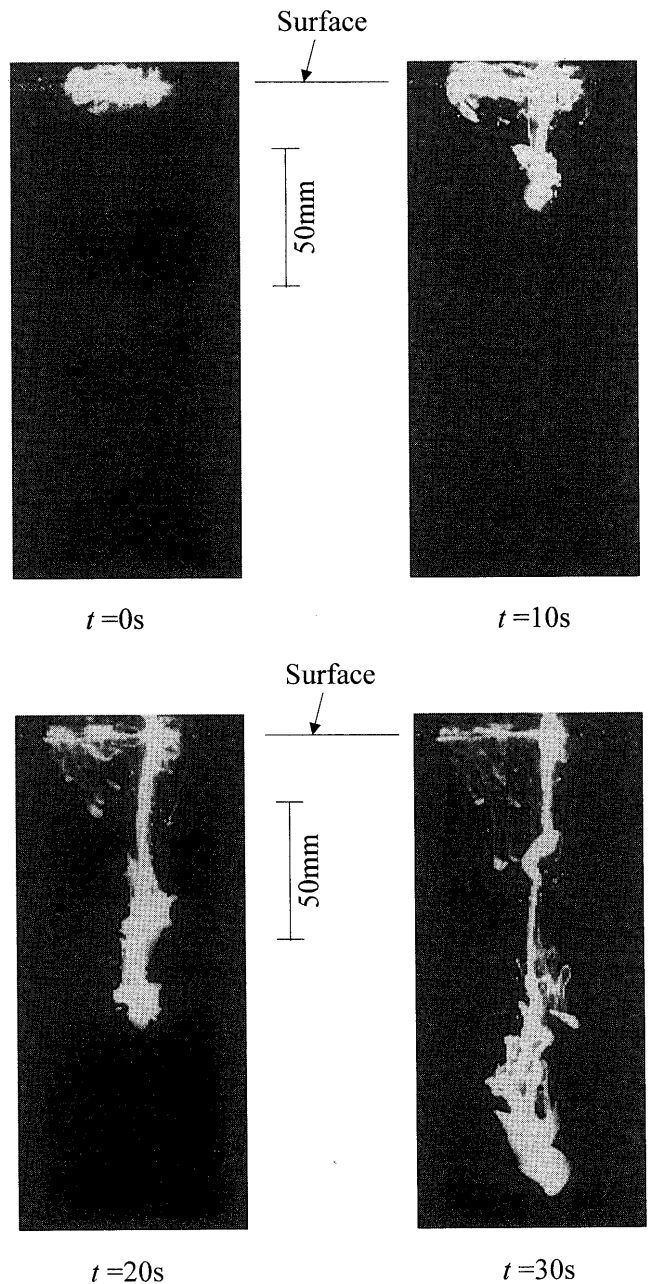


Fig. 7. Falling behavior of fine particles ($C=15 \text{ kg/m}^3$).

る傾向がみられる。これは、微粒子群の先端が落下していくにつれて、流動抵抗によって先端が広がり局所的な濃度が小さくなったためと考えられる。すなわち、流動抵抗は落下速度が大きい部分ほど強く働くので、微粒子群が落下する際には、先端部分が最も大きい流動抵抗を受ける。そのため、微粒子群の先端は流動抵抗の小さい方へ蛇行するので微粒子群は広がる。ただし、この先端速度は上記終端速度よりも非常に大きい。

3.3 微粒子群の半径方向への広がり幅

3.3.1 微粒子群の半径方向への広がり幅による落下挙動の分類

Fig.13に示すように、浴表面から20mm間隔で一定時間ごとに微粒子群の幅を測定し、各位置における平均値を求

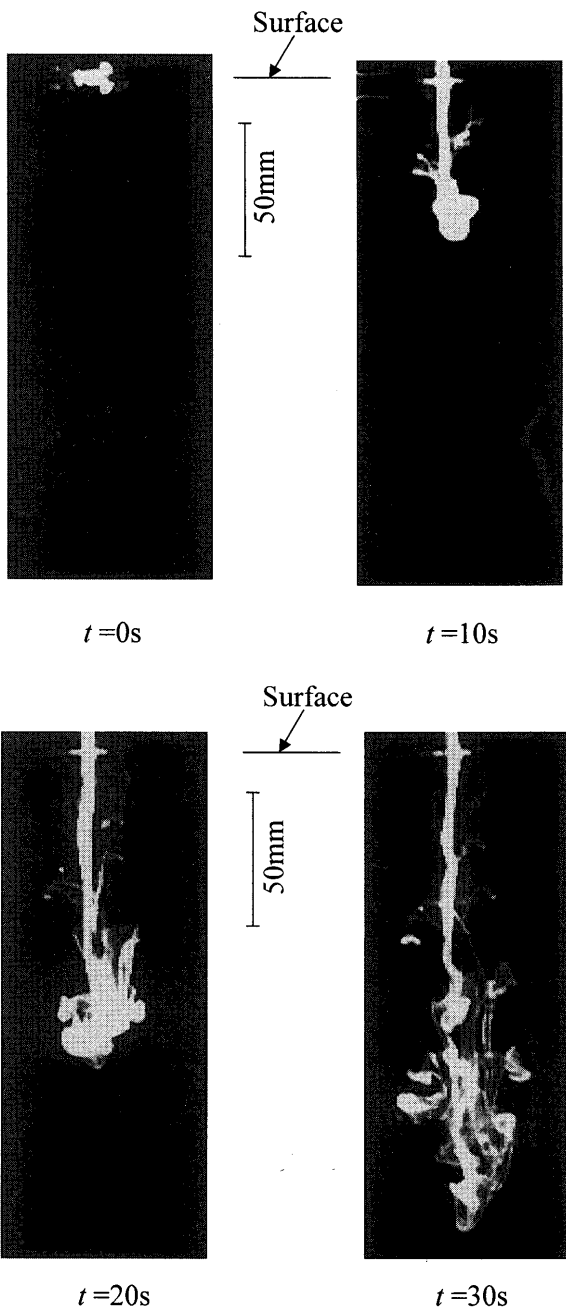


Fig. 8. Falling behavior of fine particles ($C=20\text{ kg/m}^3$).

め、微粒子群の広がり幅 W_p とした。Fig.14に微粒子群の広がり幅 W_p と水深 z の関係を示す。微粒子群の幅は水深約 80mm までは広がるが、それより下ではほとんど変化しなくなった。図中の実線は、粒子混入噴流における広がり幅を表している。従来報告されている粒子プリュームの結果もこの実線にほぼ一致することが分かっている。濃度が 2.0 kg/m^3 のときの広がり幅は実線の値よりも小さく、 5.0 kg/m^3 のときには逆にかなり大きいが、 10 kg/m^3 以上では、落下の初期には濃度にほとんど依存しなくなり、粒子混入噴流の値にほぼ一致している。

Fig.14をもとに、水深 100mm における微粒子群の幅と濃度の関係を Fig.15 に示す。微粒子群の広がり幅は Fig. 9

に示した落下挙動によく対応していることが分かる。

3.3.2 落下挙動の違いが観察される理由

3.3.1項で示したような落下挙動の違いが観察された原因の一つとして、アクリル管下端で形成される混合液の下面と浴表面の付着による初期擾乱の影響が考えられる。Fig.16に示すようにアクリル管下端の液面が浴表面に付着する際、微粒子群には重力による下向きの力と表面張力による半径方向の力が作用する。初期濃度が (1) $10\sim 20\text{ kg/m}^3$ のような高濃度な場合、重力による下向きの力の影響が大きいため液面の付着による初期擾乱の影響をあまり受けず、微粒子群はほぼ真下に落下したと考えられる。それに対して (2) 5.0 kg/m^3 のような濃度の場合、重力による下向きの力の影響が比較的小さくなり、表面張力による力の影響が大きくなる。そのため、液面の付着による初期擾乱の影響をより強く受け、微粒子群の先端が蛇行する。その結果、後に続く微粒子群も大きく蛇行し、広がりながら落下したと考えられる。しかし、(3) 2.0 kg/m^3 の場合、微粒子群は低濃度でありながら、あまり広がらずゆっくりと落下していった。これは、3.2.2項の Fig.11で示したように、この濃度では液面が付着してから約 50秒間微粒子群の落下は観察されなかった。そのため、液面の付着による初期擾乱の影響をあまり受けなかったと考えられる。

ただし、微粒子群の運動は初期擾乱の影響のみで決まる訳ではなく、それらが落下しつつ誘起する流れの影響をより大きく受ける。そこで、微粒子群先端の速度 v_p と $z=100\text{ mm}$ における噴流幅 W_p を代表速度と代表長さとするレイノルズ数 Re_{pp} を導入し、5種類の初期濃度について計算してみた。

$$Re_{pp} = v_p W_p / \nu_f \dots \dots \dots (2)$$

ここで ν_f は流体の動粘度、添え字 pp は粒子プリュームを表す。初期濃度が 2.0 kg/m^3 のとき $Re_{pp}=8$ 、 5.0 kg/m^3 のとき $Re_{pp}=30$ 、 10 kg/m^3 のとき $Re_{pp}=45$ となった。単相噴流の場合には、一般に、このレイノルズ数が数十を超えると乱流に遷移するといわれているが、本研究で対象としている流れ場も初期濃度 2.0 kg/m^3 のときが層流、 5.0 kg/m^3 のときが遷移流、 10 kg/m^3 以上のときが乱流になっているものと考えられる。従来の粒子混入噴流や粒子プリューム内の流れは乱流になっており、 10 kg/m^3 以上のときの広がり幅がそれらの実験結果 (Fig.14の実線) に合致したのは、このような理由によると見なしてよからう。

以上のように、本実験で用いた密度の粒子の場合、浴表面直下での微粒子の均一分散には粒子プリューム内の流れが遷移流となる濃度 5.0 kg/m^3 の場合が最適であると考えられる。ただし、この最適濃度の予測式の導出には、さらに広範囲の条件下での実験が必要である。

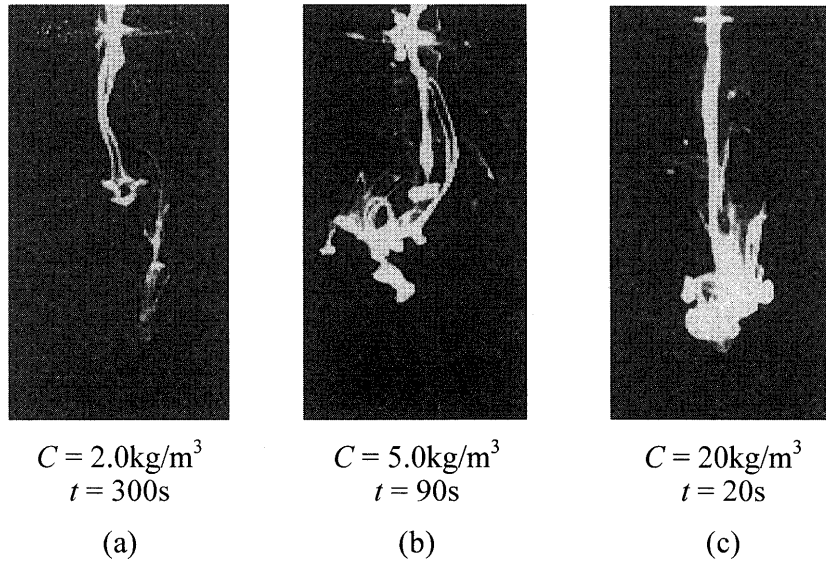


Fig. 9. Classification of falling behavior.

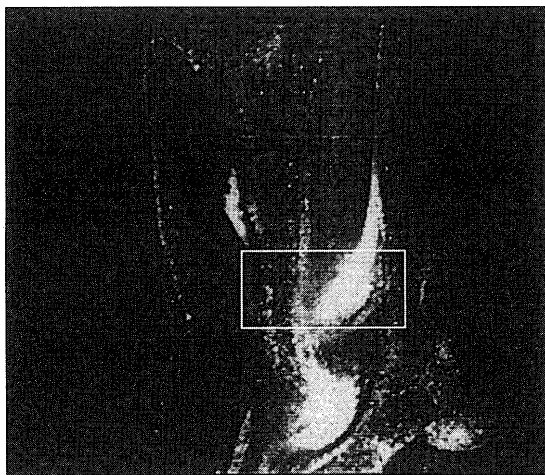


Fig. 10. Velocity vectors of falling particles.

3・3・3 表面張力による微粒子群の半径方向への広がり距離と広がり速度

Fig.17(a)に濃度 5.0 kg/m^3 のときの浴表面での微粒子の広がり距離を示す。前にも述べたが、微粒子群は非常に短い時間内にアクリル管半径の3倍程度の位置まで広がっている。このような表面現象は、他の濃度の場合にもみられた。Fig.17(a)の結果を基に広がり速度を求めると Fig.17(b)のようになる。最大速度は約 25 cm/s にも達しており、広がりが急激に生じることを表している。この現象は、浴表面に混合液が接したときにできる界面が表面張力によって界面

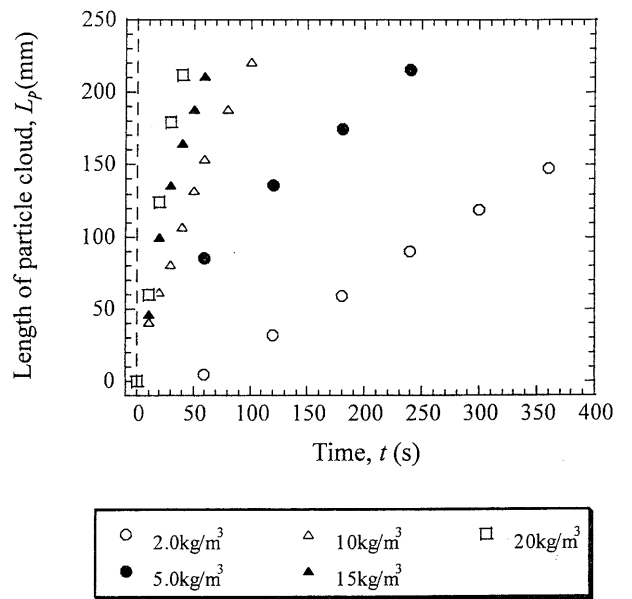


Fig. 11. Relation between L_p and t .

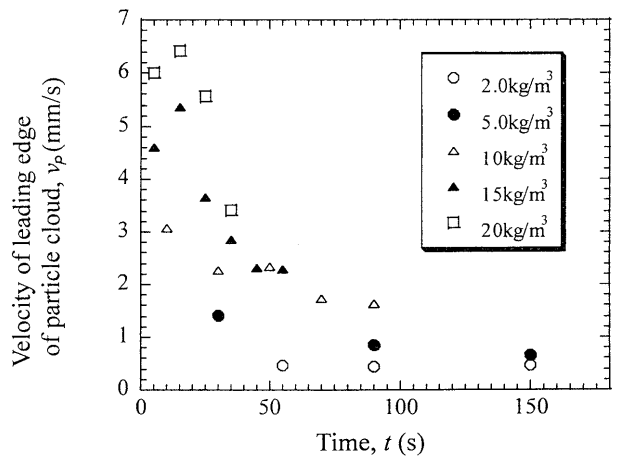


Fig. 12. Velocity of leading edge of particle cloud with time.

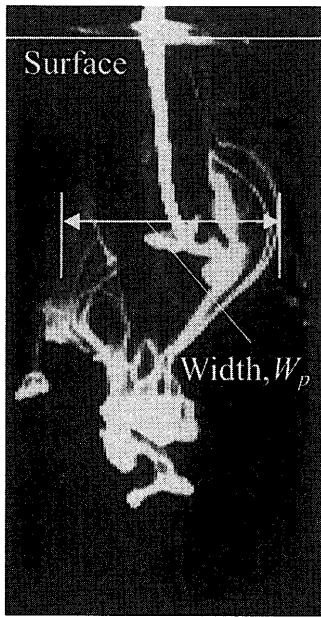


Fig. 13. Definition of the width of particle cloud.

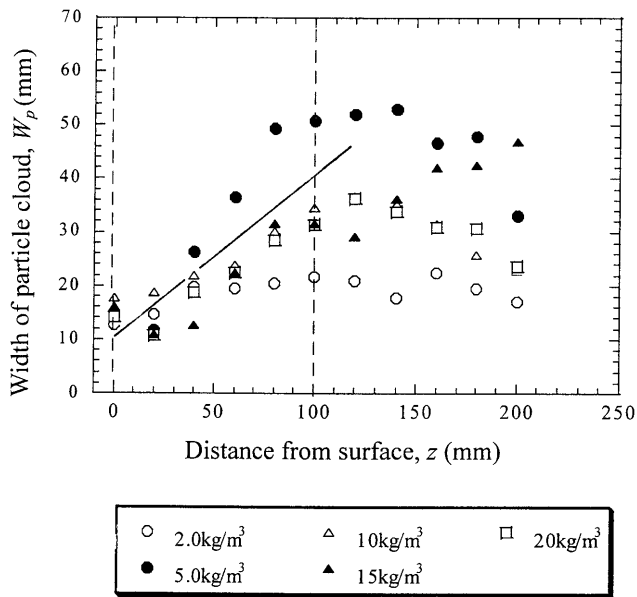


Fig. 14. Width of particle cloud with time (Solid line: particle-laden jet).

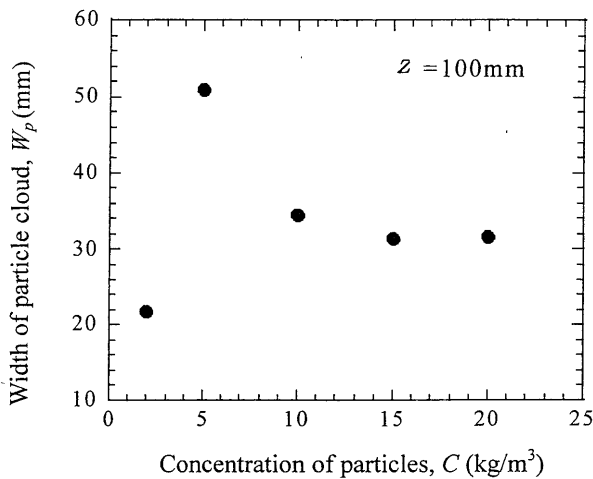


Fig. 15. Relation between W_p and C ($z=100$ mm).

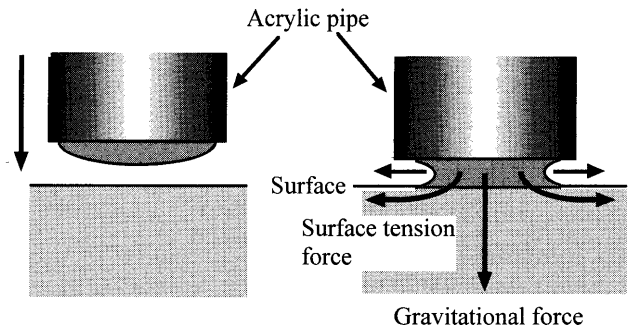
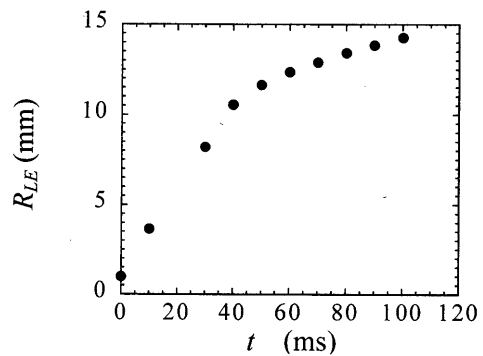
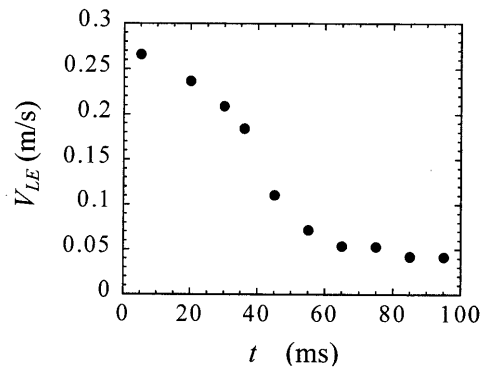


Fig. 16. Forces acting on a mixture of fine particles and water.



(a) Leading edge position



(b) Leading edge velocity

Fig. 17. Position and velocity of leading edge with time.

積をできるだけ小さくしようとするために生じたものであると考えられる。ただし、その詳細については今まではほとんど報告されていないようである。この現象は、微粒子の均一分散にも有効であるが、細かい点については今後の研究に譲りたい。

4. 結言

微粒子と水との混合液を静かに浴表面に接触させ、混合液の慣性力が無視でき、重力の作用だけで微粒子が落下していく条件下で微粒子の分散挙動の観察を行った。得られた主な成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 微粒子群は高濃度な部分と低濃度な部分に別れ、

蛇行しながら落下した。このフラッピング現象は粒子混入噴流や粒子プルームに共通の現象である。個々の粒子の落下速度は局所濃度に依存し、局所濃度の大きい部分ほど速く落下した。

(2) 微粒子群の先端の落下速度は混合液の初期濃度に依存し、初期濃度が高いほど大きくなった。また、微粒子群の落下速度は時間の経過とともに減少し、初期濃度に見合った一定値に漸近する傾向がみられた。これは、先端が半径方向に広がり、局所濃度が全体的に低下するためである。

(3) 2.0 kg/m^3 の初期濃度のとき、微粒子群の広がり幅は小さいが、 5.0 kg/m^3 のときには大きくなり、 10 kg/m^3 以上になると再び小さくなって、初期濃度にほとんど依存しなくなった。 10 kg/m^3 以上の初期濃度のとき、広がり幅は落下初期では粒子混入噴流や粒子プルームの広がり幅にほぼ一致した。広がり幅は液面の付着による初期擾乱と微粒子群自身が落下しつつ誘起する流れの影響を受けることが分かった。広がり幅が最大となるのは、粒子プルーム内の流れが遷移流のときであると考えられるが、混合液の初期濃度や微粒子の直径と遷移流との関係については今後の課題としたい。

(4) 微粒子群と水との混合液が浴表面に接触した直後に、微粒子群は浴表面上を半径方向へ急激に広がった。これは、表面張力の作用によって気液界面積が小さくなるうとして生じる現象であるが、広がり速度は 25 cm/s にも達した。

文 献

- 1) M.Minagawa: Interim Report of Research Committee on Steelmaking Slag Utilizing as a Nutritional Source for CO_2 Fixation with Marine Phytoplankton Multiplication, ISIJ, Tokyo, (2001), 4.
- 2) Y.Sasaki and K.Ishii: Interim Report of Research Committee on Steelmaking Slag Utilizing as a Nutritional Source for CO_2 Fixation with Marine Phytoplankton Multiplication, ISIJ, Tokyo, (2001), 20.
- 3) Handbook of Chemical Engineering, 6th ed., Soc. Chem. Eng. Jpn., Tokyo, (1999), 795.
- 4) Y.Nihei and K.Nadaoka: Proc. National Multiphase Flow Symp. '95, Jpn. Soc. Multiphase Flow, Osaka, (1995), 120.
- 5) Y.Nihei, K.Nadaoka and N.Nakamura: Proc. National Multiphase Flow Symp. '97, Jpn. Soc. Multiphase Flow, Osaka, (1997), 285.
- 6) M.Tamai, H.Shimoyashiki and K.Muraoka: *Suikougaku Ronbunshu*, **37** (1993), 433.
- 7) K.Nadaoka, Y.Nihei and H.Yagi: *Dobokugakkai Ronbunshu*, No. 533, II-34 (1996), 61.
- 8) M.Mizukami, R.N.Parthasarathy and G.M.Faeth: *Int. J. Multiphase Flow*, **18** (1992) No. 3, 397.
- 9) D.T.Walker, C.-Y.Chen and W.W.Willmarth: *J. Fluid Mech.*, **291** (1995), 223.
- 10) Y.Wang and E.Forsberg: *Miner Process*, **11** (1994) No. 2, 87.
- 11) Y.Wang and E.Forsberg: *Magn. Electr. Sep.*, **5** (1993) No. 1, 35.
- 12) C.Y.Cheng, Y.Z.Liu and W.B.Hu: Proc. 18th Int. Mineral Processing Cong., Elsevier, Amsterdam, (1991), 23.
- 13) K.Eichas and K.Schonert: Proc. 18th Int. Mineral Processing Cong., Elsevier, Amsterdam, (1993), 417.
- 14) R.Espinosa-Gomez, J.A.Finch and N.W.Johnson: *Miner. Eng.*, **1** (1998) No. 1, 3.
- 15) D.R.Ketkar, R.Mallikarjunan and S.Venkatachalam: *Int. J. Miner. Process*, **31** (1991) No. 1-2, 127.
- 16) S.Itoh: *J. NIRE*, **6** (1997), 179.
- 17) T.Shakouchi, S.Kato, Y.Matsunaga and K.Odagi: *Preprint of Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **71** (1993), 350.