

混合粒子の直投により発生する2次元粒子群の 流動および堆積特性

THE MOTION AND DEPOSITION OF 2D PARTICLE CLOUDS PRODUCED BY
DIRECT DUMPING OF NONUNIFORM PARTICLES

秋山 壽一郎¹・野中 雅之²・斎賀 仁³・浦 勝⁴

Juichiro AKIYAMA, Masayuki NONAKA, Hitoshi SAIGA and Masaru URA

¹正会員 Ph.D 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生員 学士(工) 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

³学生員 九州工業大学工学部建設社会工学科 (同上)

⁴正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

Motion of suspension clouds propagating along the bottom boundary, resulting from direct dumping of a mixture of fine and coarse particles from the surface of a quiescent water, is investigated. A series of laboratory experiment is conducted by varying inflow condition as well as ambient water depth. It is found that the motion of the suspension clouds can be differentiated into the transition and the gravity current regions. Parameters to adequately describe such flow characteristics as the propagation speed, height, buoyancy etc. of the front of the clouds in each region are quantified. The effects of coarse particles on the spreading of the clouds are also examined.

Key Words : turbidity, gravity current, nonuniform particle, water pollution

1. はじめに

海上空港などの人工島や港湾外郭施設の建設では、底開バージによる土砂直投工が用いられることが多い。これは、本工法が経済性に優れているからに他ならないが、微細土粒子を含む数 km^3 という多量の土砂が水面付近から投下されるため、大規模な濁りを引き起こすことが問題である。このため土砂直投工では汚濁拡散防止対策が不可欠となる。具体的には、水表面近くの濁質拡散防止と微細粒子の沈降促進のための懸垂型シルトフェンスと底面近くの濁質拡散防止のための自立型シルトフェンスが、単体あるいはそれらの組み合わせとして広く用いられている。しかし、その設置法については、目視あるいは経験的または単一粒子の沈降速度等に基づく単純な方法などで決定されており、その効果的かつ合理的な展張・敷設法はいまのところ確立されていない。

シルトフェンスは濁りの低減を図る上で有効な手段であるが、その設置が適正でない場合などでは効果的に機能しないことがある。例えば、古土井¹⁾は、懸垂型と自立型シルトフェンスの両者が設置された状況において、直投土砂が底面に沿って濁水流として流動し、自立型シルトフェンスを乗り越えて短時間

に広範囲な汚濁を引き起こす要因となることを報告している。この事例からも明らかなように、底面に沿って流動する濁りの拡散の状況は目視ではわかりにくく、現行のような設置方法では自立型シルトフェンスを効果的に機能させることは難しい。

従って、自立型シルトフェンスの設置にあたっては、落下から衝突を経て底面に沿って流動する濁水塊の流動特性を把握するとともに、それを適正に予測できることが重要であると考えられる。なぜならば、自立型シルトフェンスの設置高さよりも低い層厚の流動層がフェンスを乗り越え大規模に流動・拡散することはなく、その設置高さを濁水塊の最大層厚よりも高くすることが合理的かつ効果的な自立型シルトフェンスの設置法の目安となると予想されるからである。

投下土砂あるいは濁水塊の落下特性については、サーマル理論²⁻⁴⁾や数値シミュレーション⁵⁻⁸⁾を通じてかなりの程度まで明らかにされている。また、その底面衝突後の挙動については、投棄土砂の分散・堆積を対象とした小川・竹内⁹⁾による半理論的研究、投下量と周囲水水深を変化させ中央粒径が異なる2種類の砂を直投した実験研究とサーマル理論に基づく理論解析より底面衝突後の粒子群の流動特性の検

討と理論予測を行った玉井ら¹⁰⁾の研究、混相 $k-\varepsilon$ モデルに基づく数値シミュレーションにより汚濁の初期拡散状況を定性的に検討した玉井ら¹¹⁾の研究などがある。さらに、底面衝突後の濁水塊や粒子群と類似した流動現象として重力密度流があるが、例えば Huppert & Simpson¹²⁾は、塩水重力密度流先端部の内部Froude数に関する経験式を提案しており、この関係は特性理論に基づくBonnecaze et al.¹³⁾の理論解析のフロント条件として用いられている。しかし、Bonnecaze et al.¹³⁾のモデルは層厚平均モデルであるため、現象の本質である乱流拡散が考慮されておらず、その主要な流動特性量である先端部の移動速度、層厚および濃度について定量的な見解を得るには至っていない。これに対して、最近、著者ら¹⁴⁾は、LESと1流体モデルを用いた数値シミュレーションにより、落下から底面衝突を経て水平流動するまでの一連の微細粒子群の挙動が予測可能であることを示すとともに、シルトフェンスが設置された状況での粒子の堆積状況についてもおおそ推定できることを示した。また、著者ら¹⁵⁻¹⁷⁾は、底面衝突後の直投粒子群の挙動について実験的に検討を加え、底面衝突後の微細粒子群の挙動は遷移領域と重力密度流領域とに区分され、投下量や周囲水深との関係において各領域の粒子群の流動特性を規定する無次元パラメータを明らかにした。

以上の知見は、一部の例外¹¹⁾を除いては一様粒径粒子（厳密には一様ではないが）より構成される粒子群に関するものであり、実問題のように粒度分布を有する土砂の直投により発生する粒子群の挙動についてはほとんどわかっていないのが実状である。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、混合粒子の直投によって発生する落下粒子群の底面衝突後の流動特性について基礎的な知見を得ることを試みたものである。特にここでは、微細粒子とそれより粒径が粗い粒子の混合落下粒子群の底面衝突後の挙動について実験的に検討を加え、粗粒成分が混合粒子群の流動特性に及ぼす影響について調べた。なお、底開バージによる土砂の直投に伴う土砂の流動・拡散・堆積現象は、3次元的な現象であるが、水深に対するバージ船の船長は5倍程度である。このような理由で、船長方向に一様な2次元的な現象として近似的に取扱っている。

2. 実験

(1) 実験装置と実験条件

水深 h の淡水(密度 ρ_a)で満たされた前面アクリル製の水槽(長さ7.5m、深さ1.0m、幅0.1m)中に混合粒子と淡水を混合した単位幅あたりの初期総浮力 $2W_0(=2\varepsilon_0gA_0)$ の濁水塊(初期密度 ρ_0)を三角形断

表-1 実験条件

	水深	中央粒径	粒子の初期 単位幅体積	各粒子の初期 単位幅体積	初期単位幅 總浮力	各成分の初期 単位幅總浮力
	h(cm)	d(cm)	$2A_{p0}(\text{cm}^2)$	$2A_{a0}(\text{cm}^2)$	$2W_0(\text{cm}^3/\text{s}^2)$	$2W_c(\text{cm}^3/\text{s}^2)$
DPU 1-1	50	0.0044	4.063		5770	
DPU 1-2			6.872		9758	
DPU 1-3			9.612		13649	
DPU 2-1	90		4.063		5770	
DPU 2-2			6.872		9758	
DPU 2-3			9.612		13649	
DPM 1-1	50	0.0044	12.054	4.063	17117	5770
		0.0165		7.991		11347
DPM 1-2		0.0044	20.38	6.872	28940	9758
		0.0165		13.508		19182
DPM 1-3		0.0044	28.522	9.612	40502	13649
		0.0165		18.91		26853
DPM 2-1	90	0.0044	12.054	4.063	17117	5770
		0.0165		7.991		11347
DPM 2-2		0.0044	20.38	6.872	28940	9758
		0.0165		13.508		19182
DPM 2-3		0.0044	28.522	9.612	40502	13649
		0.0165		18.91		26853

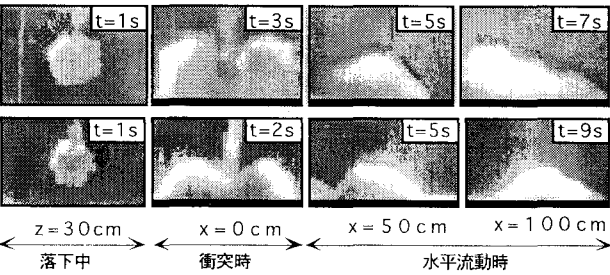


図-1 流動状況の写真
(上：DPU 1-3、下：DPM1-3)

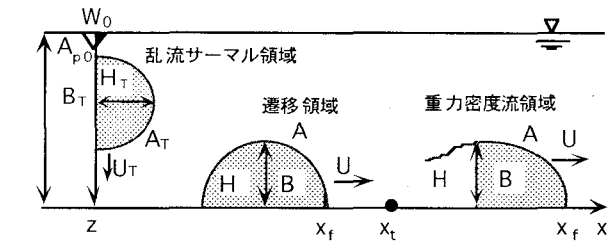


図-2 流れの定義と特性量

面を有する投下装置から直投することで、落下から底面衝突を経て水平流動する粒子群を再現した。なお、投下装置内の粒子は装置底部に堆積しないように攪拌装置で機械的に攪拌されており、投下装置の先端は水表面と一致するように設定されている。また、攪拌強度が大きく現象を左右するような事実は認められなかった。これは、落下時の乱れの方がはるかに大きいためであると考えられる。なお、 W_0 は sgA_{p0} あるいは c_0sgA_0 のようにも表示できる。ここに、 A_{p0} =単位幅当りの投下粒子量、 A_0 =単位幅当

りの投下濁水量、 c_0 =初期体積濃度、 s =粒子の水中比重、 g =重力加速度および ε_0 =濁水の初期相対密度差($=(\rho_0 - \rho_a) / \rho_a$)である。本実験で用いた混合粒子は、比重 $\sigma=2.45$ のガラスビーズ粒子で、微細粒子(中央粒径 $d=0.0044\text{cm}$)とそれより粒径が4倍程度大きい粗粒成分($d=0.0165\text{cm}$)を1:2の比率で良く混ぜたものである。表-1中の実験条件において、DPUとDPMはそれぞれ $d=0.0044\text{cm}$ の一樣粒径微細粒子群と混合粒子群、 W_i は混合粒子群の各成分の初期単位幅総浮力を示している。なお、一樣粒径微細粒子群については、参考文献^{16,17)}で使ったデータと同一である。

(2) 実験内容と方法

実験内容としては、混合粒子群の流動状況を把握するための可視化実験、底面衝突後の粒子群先端部の総浮遊粒子量 W_s の保存状況を調べるための実験および底面に堆積した粒子量 W_d を算定するための実験を同一条件下でそれぞれ独立に実施した。なお、浮遊および堆積粒子量は、粒子群の挙動を規定する重要なパラメータである初期総浮力 W_0 と関係を持たせる目的で総浮力として表示した。

可視化実験では、粒子群の流動状況をCCDカメラで追跡・撮影し、コンピュータ制御が可能なデジタルVTRに収録された画像を解析することにより、その先端移動速度 U と形状を算定した。その際、同一条件下で繰り返し実験を行い、落下粒子群がほぼ左右対称に分離したと認められた5セットのデータに基づきこれらの特性量の算定を行った。

総浮力に関する実験では、粒子群先端部が通過した瞬間に所定の断面に設置された仕切りゲートをすばやく降ろし、仕切りゲートの上流側と下流側に沈積した粒子を丁寧に採集し、その乾燥重量より W_s を求めた。対象とする流れは一過性の非定常現象であるので、仕切りゲートの設置位置を移動させ数断面で同様な実験を繰り返すことで、総浮力の流下方向分布を求めた。

堆積粒子量に関する実験では、浮遊粒子が全て沈積した後で堆積粒子を50cm間隔で丁寧に採集し、その乾燥重量より W_d を算定した。その際、粗粒成分が混合粒子群の流動拡散過程においてどのような働きをするのかを明らかにする目的で、 W_s と W_d のいずれについても粗粒と細粒の各成分の占める割合を求めた。

いずれの計測も同一条件下で繰り返し実験を行い、粒子群の落下挙動がほぼ左右対称と認められた場合に限り、粒子の採集を行った。ただし、見掛け上はほぼ左右対称であっても必ずしも粒子群の全投下量 $2W_0$ が左右均等に分離されるわけではないので、落下粒子群の中心軸から右側の堆積量が W_0 の95~105%のものを信頼できるデータとして採用し

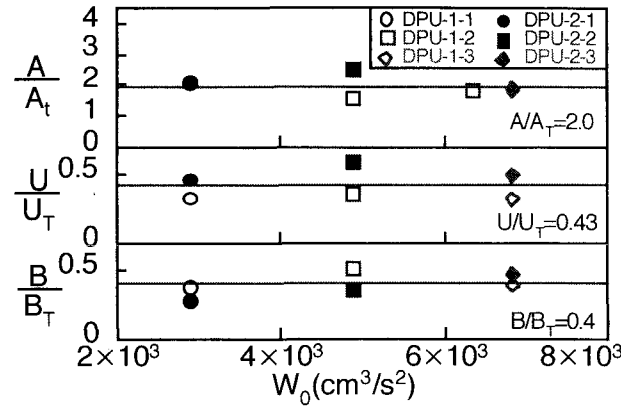


図-3a 底面衝突後の関係(一樣粒子)

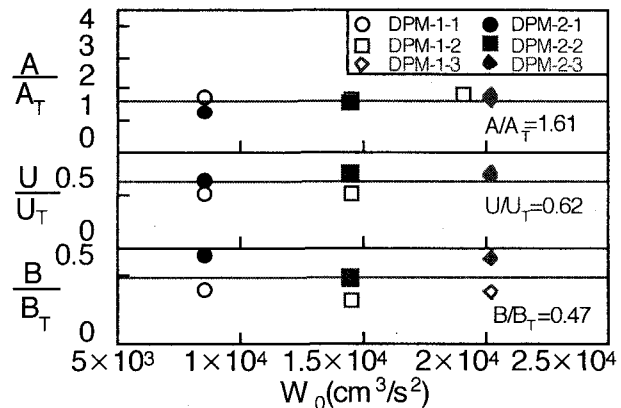


図-3b 底面衝突後の関係(混合粒子)

た。なお、DPUについての実験方法については割愛する。

3. 実験結果

(1) 流況と流れの定義

図-1は、落下粒子群の底面衝突から水平流動に至る流況の一例を示したものである。これより、一樣粒径微細粒子群と混合粒子群のいずれについても、ほぼ左右対称の循環流より構成される落下粒子群が底面衝突を経て左右に分離し、形状を縦長の楕円形状から1/4楕円形状へと変化させながら底面に沿って流動していくことがわかる。このような一連の粒子群の挙動は本研究より粒径が大きな粒子を用いた玉井ら¹¹⁾の実験結果とほぼ同様であるが、一樣粒径微細粒子群の方が鉛直方向への粒子の拡散が大きいことが見て取れる。

以上のような観測結果に基づき、直投粒子群の底面衝突後の流動状況を重力密度流への遷移領域および重力密度流領域の2領域に区分し、主要な流動特性量を図-2のように定義する。なお、同図において、 L 、 H 、 B および U はそれぞれ底面衝突後の粒子群の最大長さ、最大高さ、平均浮力および先端移動速度であり、図中の x_l は後述する遷移領域から重力密度流領域への遷移位置、 x_f は粒子群先端の移動距離である。

(2) 底面衝突直前の粒子群の関係

底面衝突直前の粒子群の落下特性と底面衝突後の x_t での粒子群の単位幅体積比 A/A_T 、移動速度比 U/U_T および平均浮力比 B/B_T と W_0 との関係について調べたものが図-3である。ここに、平均浮力 $B(=\varepsilon g)$ である。同図より、データにややばらつきがあるものの、いずれの比も W_0 とは無関係にほぼ一定値を取っている。また、混合粒子群の方が A/A_T が小さく、 B/B_T は大きくなっている。これは、図-1からも明らかなように混合粒子群では鉛直方向への粒子の拡散が小さくなるためであると考えられる。 U/U_T については、混合粒子群の方が若干大きくなっている。これは後述する粒子群の浮遊粒子量の関係からも明らかなように、遷移領域においては粗粒成分が十分に浮遊されているため、衝突直後では粗粒成分が浮遊しているしている混合粒子群の方が大きなドライビングフォースを有しているためであると考えられる。いずれにせよ、底面衝突後の粒子群の移動速度は落下速度の半分程度まで減少しており、既往の研究^{9,10)}で用いられている $U/V=1.0$ なる関係が正しくないことが確認できる。

本論文で言う水深が大きい小さいという表現は、粒子サーマルとして底面に衝突するような投下条件で、投下条件が同一の場合に水深の大小で衝突後の粒子群の挙動がどのように変化するかという意味である。一様粒径粒子であれば、「粒子サーマルの発達領域」から「自由沈降領域」への遷移点 z^* はおおそ式(1)のようになる⁴⁾。ここで、 $z^*=z/A_0^{1/2}$ 、 s =粒子の水中比重、 g =重力加速度、 K_{sp} =サーマル理論に基づき実験より決まる係数、 α =粒子の沈降速度から決まる係数、 $R_p=dV_f/\nu$ 、 V_f =粒子の沈降速度、 ν =流体の動粘性係数である。

$$z_T^*=(K_{sp})^2(\alpha s g \nu)^{-2/3}(W_0^2/A_0)^{1/2}R_p^{-4/3} \quad (1)$$

式(1)は、例えば $s=1.47$ 、 $d=0.0044\sim0.0165\text{cm}$ 、 $A_0=12.5\sim37.65\text{cm}^2$ 、 $W_0=2900\sim8900\text{cm}^3/\text{s}^2$ の条件下では、 $z_T^*=900R_p^{-4/3}$ のようになる⁴⁾。この関係と観測結果をあわせると、本実験での水深50cmと90cmのいずれのケースも粒子サーマルの状態で底面に衝突する条件となっている。ただし、本現象は高濃度固液混相流であり、スケール効果があるため、プロトタイプスケールでの z_T^* の値を得るためには、式(1)においてプロトタイプスケールに近い状況での係数値を求め、これがモデルスケールの結果と同様な値を取るかどうかを確認する必要がある。

(3) 底面衝突後の粒子群の流動特性

底面衝突後の粒子群の単位幅体積 A 、最大高 H 、先端移動速度 U および平均浮力 B と無次元流下距離 $x/A_m^{1/2}$ との関係について検討したものが図-4であ

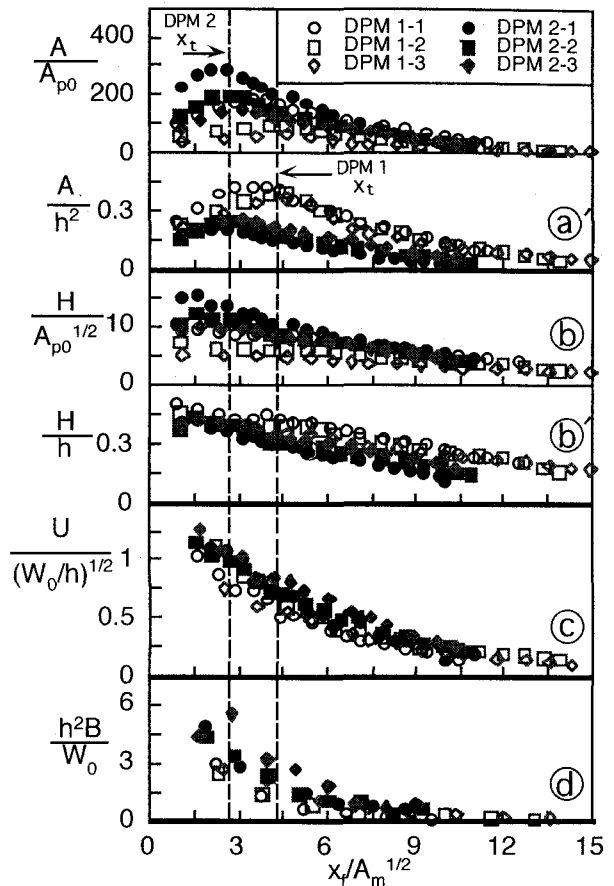


図-4 混合粒子群の流動特性と流下距離との関係

る。底面衝突後の粒子群の流動特性は、投下条件(粒子の初期単位幅体積、初期総浮力、粒子粒径粒子混合比)および周囲水条件(水深)で規定されと考えられるので、これらの諸量を用いて流動特性量は無次元化されている。ただし、本研究では粒子の粒径および混合比は一定としているので、これらの影響は考慮されていない。同図において、④のようにダッシュなしの図は投下条件である単位幅当りの投下粒子量 A_0 で、④'のようにダッシュ付きの図は周囲水条件である水深 h を用いてそれぞれ無次元化されている。一方、粒子群の流下距離 x_t は、落下粒子群の単位幅体積 A が最大となる衝突直前の値 A_m で無次元化されている。これは、 A_m が投下条件と水深の両者の影響が反映した最も適正な特性量と考えられるからである。なお、落下粒子群であっても粒子群が固まりとして落下するサーマル的な落下形態である限り、 A_m の値はサーマル理論により予測可能である¹⁴⁾。

図-4aより、無次元断面面積 A/A_0 と A/h^2 はいずれも流下方向に一旦増加し、その後徐々に減少する傾向が認められる。この増加から減少に転ずる位置をもって、遷移領域から重力密度流領域への遷移点位置 x_t と定義した。 x_t の値は、水深の浅DPM14.4水深の大きいDPM2で約2.6であった。一方様粒子の場合はDPU1で、約4.0、DPU2で約3.4であり、水

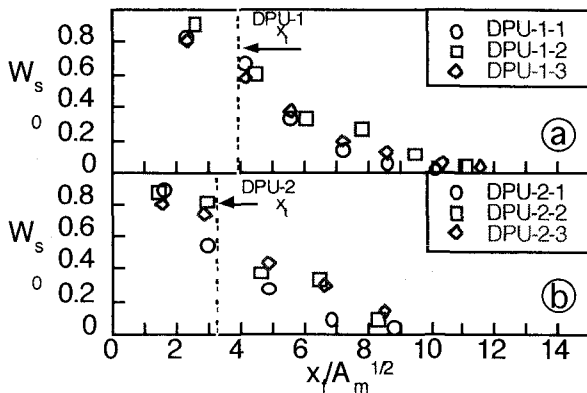


図-5 一様粒径粒子群の浮遊粒子量と流下距離の関係 (a: DPU1、b: DPU2)

深が大きいほど x_i の値が減少する傾向があることがわかった。このような遷移領域の減少が生じる理由としては、落下距離が大きくなると混合粒子群の落下時の粗粒と細粒成分の分離が進行するため、投下点付近への粗粒成分の沈積が生じるためであると考えられる。次に、遷移領域では A/h^2 、重力密度流領域では A/A_{p0} の方がデータのまとまりが良く、遷移領域では h 、重力密度流領域では A_{p0} が現象を支配する主要なパラメータであることがわかる。ただし、一様粒径粒子による濁水塊では投下量と水深とに無関係に A は h^2 で極めて良くまとまる^{16,17)}。しかし、混合粒子では投下量によらず A は h^2 でまとまるが、一様粒径粒子の場合とは異なり水深の影響が残っている。これは、混合粒子が落下する際に粒子の成分分離が生じたためであると考えられるが、現象が極めて複雑な高濃度固液混相流であるため、その詳細は不明である。

図-4bより、無次元最大高さ $H/A_{p0}^{1/2}$ と H/h はいずれも流下方向に減少する傾向が認められ、一様粒径粒子の場合ほど明確ではないが、図-4aと同様に遷移領域では $H/A_{p0}^{1/2}$ より H/h の方が、重力密度流領域では H/h より $H/A_{p0}^{1/2}$ の方が相対的に良好な結果を与えることがわかる。このように、遷移領域では h 、重力密度流領域では A_{p0} が支配的であることが確認できる。これは、遷移領域での粒子群の形状およびそのスケールが落下距離と関係しているからであり、重力密度流領域では総浮力の絶対量が大きく影響するからであると考えられる。

図-4cより、無次元先端移動速度 $U/(W_0/h)^{1/2}$ は流下方向に緩やかに減少する傾向が認められ、粒子群の形状に関する結果とは異なり、いずれの領域においても水深と投下条件のいずれも重要であることがわかる。

図-4dより、無次元平均浮力 h^2B/W_0 も流下方向に単調に減少する傾向が認められ、 B についてもいずれの領域においても水深と投下条件のいずれも支配的であると考えられる。

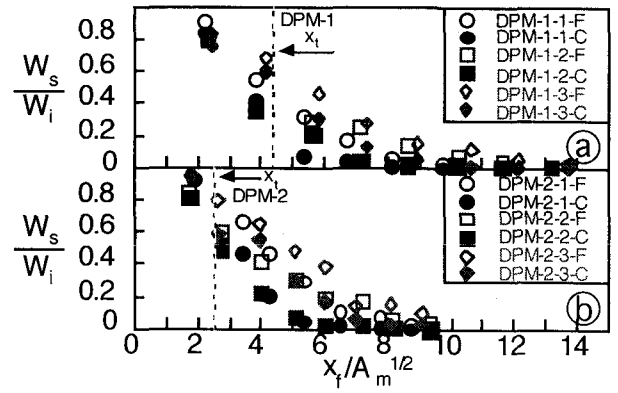


図-6 混合粒子群の浮遊粒子量と流下距離の関係 (a: DPM1、b: DPM2)

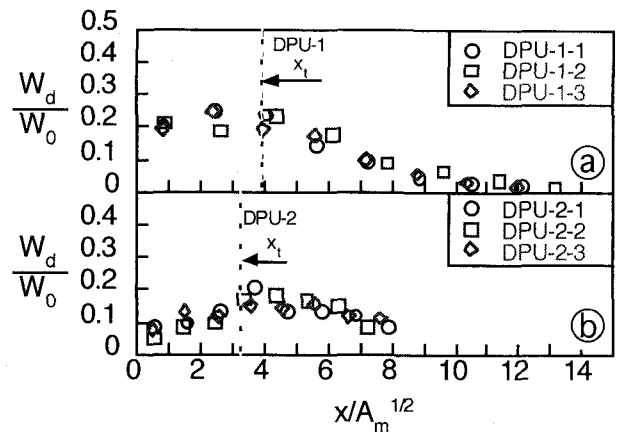


図-7 一様粒径粒子群の堆積粒子と流下距離の関係 (a: DPU1、b: DPU2)

(4) 底面衝突後の粒子の浮遊・堆積特性

図-5および図-6は、それぞれ一様粒径微細粒子群の無次元総浮遊粒子量 W_s/W_0 および混合粒子群の無次元浮遊粒子量 W_s/W_i と無次元流下距離 $x/A_m^{1/2}$ との関係について調べたものである。なお、図-6b中のCASE番号に付したFとCはそれぞれ細粒と粗粒成分を示しており、各成分の W_d は各粒径に対応する初期総浮力 W_i で正規化されている。これより、水深の大小にかかわらず、投下量の絶対量の影響は小さいが、水深によって細粒成分と粗粒成分の分布状況が大きく異なることがわかる。すなわち、DPM1では一様粒子群の場合と比較して、細粒成分はより下流側でも浮遊される傾向が強い。これは、水深が浅い場合では粒子群の落下時に細粒成分と粗粒成分の分離があまり進行せず、一体となって底面沿って流動するためであると考えられる。一方、DPM2では落下距離の増加に伴う細粒成分と粗粒成分の分離が顕著になり、浮遊粒子群の粗粒成分が投下点付近に急激に沈積する。また、粗粒成分の細粒成分への影響は弱く、細粒成分の浮遊粒子量流下向分布は一様粒子群のそれとほぼ同様な傾向を示すとわかる。

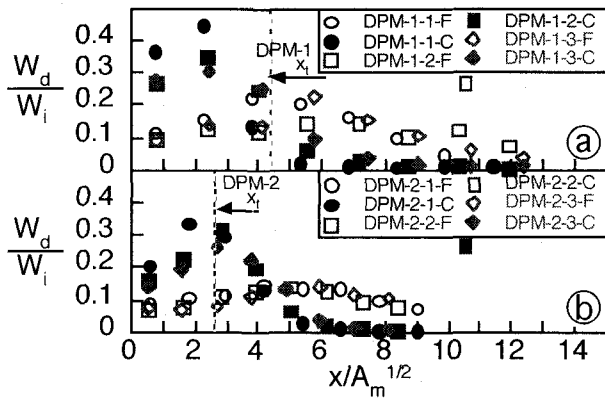


図-8 混合粒子群の堆積粒子量と流下距離の関係 (a: DPM1, b: DPM2)

図-7および図-8は、それぞれ一様粒径微細粒子の無次元堆積粒子量 W_d/W_0 および混合粒子群の無次元堆積粒子量 W_d/W_i と無次元流下距離 $x/A_m^{1/2}$ との関係について調べたものである。ここで、 x は直投点直下から流下方向に測った距離である。これより、浮遊粒子の状況を反映して投下量の絶対量の影響はやはり小さいが、DPM1では細粒成分が一様粒子群の場合よりもより広範囲に拡がる傾向が認められる。一方、DPM2では落下距離の増加に伴う細粒成分と粗粒成分の分離が顕著になり、粗粒成分の沈積が投下点付近に集中するとともに、細粒成分の堆積分布形状は一様粒子群のそれとほぼ同様な傾向となることが認められる。このように、混合粒子群の落下距離が細粒成分の広がりに対して極めて重要な役割を果たすことがわかる。

4. まとめ

投下条件が同一の場合、粒子サーマルとして落下した後に底面に、衝突する混合粒子群では水深が大きくなると、投下点付近への粗粒成分の沈積が生じ、遷移領域が減少するが、細粒成分の拡がりの程度には影響しない。一方、水深が小さくなると、遷移領域の減少は認められないが、粒子群は粗粒成分の影響を受け、細粒成分がより広範囲に拡がる。これは、水深が大きくなると、粒子群の落下時に細粒成分と粗粒成分の分離が進行するためであると考えられる。従って、混合粒子群では水深が大きくなると、濁りがより広範囲に拡がる可能性があるなどの有益な知見が得られた。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費(代表者：秋山壽一郎、基盤研究B(2)、課題番号12555149)の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古土井光昭：港湾工事における濁りの挙動に関する研究，大阪大学学位論文，1989.
- 2) 玉井昌宏・村岡浩爾・室田 明：固体粒子群の落下挙動と誘起流動に関する研究，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.143-154，1995.
- 3) Buhler, J. & Papantoniou, D.A.: Swarms of coarse particles falling through a fluid, *Proc. of the Int'l Symposium on Environmental Hydraulics*, Vol.1, pp.135-140, 1991
- 4) 秋山壽一郎・山下直樹・浦 勝・陶山正治：直投粒子群の流動・拡散現象と乱れ特性に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.1261-1266，2001.
- 5) 堀江 毅：MAC法による直投土砂の初期拡散に関する数値解析，運輸省港湾技術研究所技術資料，No.471, pp.1-34，1983.
- 6) Li, C.W.: Convection of particle thermals, *J. of Hydraulic Research*, Vol.35, No.3, pp.363-376, 1997.
- 7) 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅夫：改良型DEMAC 法による粒子群の沈降・分散挙動の解析，海岸工学論文集，第39巻，pp. 971-975，1992.
- 8) Ying, X., Akiyama, J. and Ura, M.: Motion of dense fluid released into quiescent water with finite depth, 土木学会論文集，No.635/II-49, pp.141-152, 1999.
- 9) 小川 元・竹内益雄：土捨船による投棄土砂の分散，土木学会論文集，第161号，pp.39-49, 1969.
- 10) 玉井昌宏・村岡浩爾・室田 明・町田博紀：土砂直投工における濁りの初期拡散過程に関する研究，土木学会論文集，No.515/II-31, pp.77-86, 1995.
- 11) 玉井昌宏・村岡浩爾：土砂直投工により発生する濁りの挙動特性に関する数値解析，水工学論文集，第42巻，pp.541-546, 1998.
- 12) Huppert, H.E. & Simpson, J.E.: The slumping of gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 99, pp.785-799, 1980.
- 13) Bonnetcaze, R. T., Huppert, H. E. and Lister, J.R.: Particle-driven gravity currents, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.250, pp.339-369, 1993.
- 14) 秋山壽一郎・応 新亜・浦 勝・重枝未玲：有限な水深を有する静水中に直投された微細粒子群の数値シミュレーション，土木学会論文集，No.663/II-53, pp.43-53, 2000.
- 15) 秋山壽一郎・浦 勝・応 新亜・中西弥生：静水中に瞬間的に投下された重い流体塊の底面衝突後の挙動，水工学論文集，第43巻，pp.1115-1120, 1999.
- 16) 秋山壽一郎・浦 勝・応 新亜・井手野 創・中西弥生：静水中に瞬間的に投下された濁水塊の底面衝突後の挙動に関する実験的研究，水工学論文集，第44巻，pp.1245-1250, 2000.
- 17) 秋山壽一郎・浦 勝・井手野 創・中西弥生：直投粒子群の底面衝突後の流動特性に関する実験的研究，水工学論文集，第45巻，pp.1267-1272, 2001.

(2001. 10. 1受付)