

粒径分布が直投土砂の 落下挙動と濁りの拡がりに及ぼす影響について

THE EFFECTS OF SIZE DISTRIBUTION ON THE MOTION AND DIFFUSION OF PARTICLE CLOUDS

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・柴田 謙吾³・杉山 誉⁴
Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Kengo SHIBATA and Takashi SUGIYAMA

¹フェロー会員 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正会員 博士(工学) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (同上)

The falling motion of particle clouds, produced by direct dumping of particles consisting of fine and coarse component of particles into a body of water with finite depth, and the horizontal motion of the clouds spreading along the bottom, subsequently formed by impingement of the falling clouds on the bottom, are investigated via the particle thermal theory and experimental study. It is demonstrated that such major flow characteristics as the falling velocity, maximum half width and average concentration of the clouds can be predicted by the theory. It is also shown that the horizontal motion of the clouds and the depositional profile of particles are significantly influenced by the existence of coarse component of the particles, which plays an important role to transport fine component of the particles away from a dumping point and hence to cause water contamination in wider area.

Key Words : water quality, turbidity, particle thermal, thermal theory

1. はじめに

人工島や港湾外郭施設の建設などを目的とした底開バージによる土砂直投工では、微細土粒子を含む数千 m^3 もの土砂が数mから20m程度の水域に投下される。このため、土砂の分散による施工効率面の低下¹⁾²⁾や、微細土粒子による水質汚濁が発生する。直投工の施工効率や濁りの拡がり、さらにこれを低減させる汚濁拡散防止幕の設置法などを評価・検討する上で、まず直投土砂の挙動や土砂の拡散・堆積特性を明らかにする必要がある。特に、落下土砂の底面衝突によって形成された濁水塊は、予想以上に広範囲な土砂の拡散を引き起こすことが知られているものの³⁾、水面下の現象であるため、その挙動や対策法には不明な点が多く残されている。

直投土砂の落下特性は、投下条件と水域条件の影響を強く受け、底面衝突後の濁りの拡がりには落下特性と深く関わっている⁴⁾。一般にバージ船長/船幅は4~5、バージ船長/底開バージ開口幅は10数倍程度であるので、直投土砂の流動・拡散・堆積現象は船幅方向に卓越している。

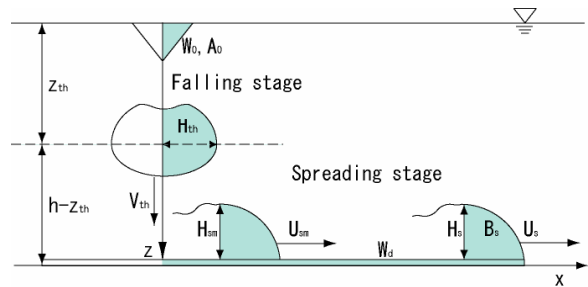


図-1 落下および底面衝突後の粒子群

また、船長/水深は関西国際空港建設で行われた土砂直投工では5~6程度であった。このような理由で、ここでは船長方向に一樣な2次元現象として近似的に取り扱う。この場合、投下点について現象は左右対称なので、投下条件は、単位奥行き当りの初期総有効重力 $2W_0 (=2c_0sgA_0)$ 、初期単位幅体積 $2A_0$ 、粒子の粒径 d あるいは粒径分布、および粒子の水中比重 $s (=(\sigma-\rho_w)/\rho_w)$ となる。水域の条件は、潮流と成層がない状況では、水の密度 ρ_w 、粘性 μ および水域水深 h となる。ここで、 g =重力加速度、 c_0 =濁水の初期体積濃度($0 \leq c_0 \leq 1$)および σ =粒子の比重である。落下から底面衝突を経て、水平流動する2次元粒子群の主要

な特性量を図-1に示す。なお、添字0は投下時の諸量を示している。

十分に水深が大きい水域では、落下粒子群は acceleration phase から、粒子群として落下する thermal phase を経て、個々の粒子が自由沈降する swarm phase へと遷移する。しかし、実水域の水深は有限であるので、投下条件と水域水深との相対的な関係で、落下粒子群はいずれの落下形態でも底面へ衝突あるいは着底することとなる。例えば、捨石マウンドの施工では swarm phase で底面へ着底し、埋立を目的とした土砂直投工では thermal phase で底面に衝突する可能性が大きい。後者の場合には粒子の舞上がりが強くなり、底面に沿った濁りの拡がりの原因となる。

落下粒子群の挙動や濁りの拡散過程を予測する手段としては、数値解析法^{9)~12)}、確率統計的な方法あるいはそれを部分的に組み込んだ方法¹¹⁾¹³⁾、乱流サーマル理論に基づく方法^{4)14)~22)}などがある。数値解析法は、粒子群の落下から底面衝突後の粒子の堆積挙動までを一貫して解析できることや、水域の潮流の影響を考慮できることなど、複雑な状況を取り扱えることが大きな利点である。しかし、現象が高濃度の固-液混相乱流であるため、実スケールのような大きな領域を対象として、個々の粒子を Lagrange 的⁶⁾に取り扱うことは事実上不可能なので、一流体モデルとして Euler 的に取扱われるのが通常である。確率統計的な方法は、物理的な根拠には乏しいものの、その他の方法では解析が難しい swarm phase の粒子の分散プロセスを取扱う手段として、捨石マウンドの施工効率の検討などに用いられている。乱流サーマル理論に基づく方法は、理論的にも明解かつ簡便であり、経験的な知見と組み合わせることで、thermal phase での落下粒子群の挙動を解析できるところに利点がある。例えば、著者ら⁴⁾は、粒子サーマル理論と実験研究に基づき、2次元の一樣粒径粒子群(以下、一樣粒子群という)の落下挙動について次のような知見を得ている。

(a) 投下条件(A_0, W_0)で無次元化された一樣粒子群の thermal phase での無次元の最大拡がり半幅 $H^* (=H/z_0)$ 、平均有効重力 $B^* (=B/B_0)$ および落下速度 $V^* (=V/V_0)$ と無次元落下距離 $z^* (=z/z_0)$ との間には、式(1)~式(3)の関係が成立する。ここで、 V_0 は落下粒子群の代表速度($=c_0 \sigma g W_0^{1/4}$)、 $z_0 = A_0^{1/2}$ である。また、係数 K_p は経験的に得られる係数であり、粒子の性質はこの K_p の値を介して現れる。

$$H^* = K_{1p} z^* \quad (1); \quad B^* = K_{2p} z^{*-2} \quad (2); \quad V^* = K_{3p} z^{*-1/2} \quad (3)$$

粒子群の落下形態が thermal phase から swarm phase へ変化する境界での粒子 Reynolds 数 $R_p (=dV_f/\nu)$ を R_{pT} とすると、 K_{1p} と K_{3p} は $R_{pT} \leq 12.0$ 、 $R_{pT} = 0.06 \sim 6.0$ の広い範囲でそれぞれ約 0.55 と約 0.90 の一定値、 K_{2p} は $R_{pT} > 12.0$ で約 1.6、 $R_{pT} \leq 12.0$ で約 1.9 の値を取る。ここで、 V_f は個々の粒子の沈降速度、 ν は水の動粘性係数である。

(b) thermal phase から swarm phase への無次元遷移水深 z_{T}^* は、 R_p の範囲に応じて式(4)と式(5)で与えられる。こ

こで、 ϕ は $\phi = (sgv)^{2/3} (W_0^2/A_0)^{1/2}$ で定義される投下条件に基づく無次元パラメータである。

$$z_{T}^* \doteq 3.05 K_{3p}^2 \phi R_p^{-4/3} \quad \text{for} \quad R_p \leq 12 \quad (4)$$

$$z_{T}^* \doteq 0.58 K_{3p}^2 \phi R_p^{-2/3} \quad \text{for} \quad R_p > 12 \quad (5)$$

(c) 有限な水深では、落下粒子群は底面の存在によりサーマルの循環運動が弱められ、底面に衝突する以前に式(1)~式(3)で表される thermal phase の特性からずれを生じる。この関係から外れ始める無次元落下距離 z^* を z_{in}^* とすると、その位置は式(6)で与えられる。ここで、 h^* は無次元水域水深($=h/A_0^{1/2}$)である。

$$z_{in}^*/h^* \doteq 0.6 \quad (6)$$

以上の研究は、一樣粒子群を対象としたものであり、実問題のように粒度分布を有する粒子群については、若干の研究¹⁷⁾²²⁾がなされているにすぎない。著者ら²²⁾は、水域水深が濁りの拡がりに及ぼす影響に焦点を絞り、粒径が異なる粒子を混合した粒子群(以下、混合粒子群という)の底面衝突後の流動・堆積特性について検討を加えた。本研究は、一樣粒子群に関する上記(a)~(c)の知見を踏まえると共に、混合粒子群の粒径の組成がその落下挙動、底面衝突前後および底面衝突後の粒子群の拡がりや堆積特性などに及ぼす影響について、粒子サーマル理論と実験研究に基づき検討を加えたものである。

2. 実験の概要

両面アクリル製の水槽(長さ7.5m、深さ1.0m、幅0.2m)を用い、投下装置に貯留された濁水(比重 $\sigma=2.48$ のガラスビーズと水を攪拌したもの)を初期総有効重力 $2W_0 (=2 \times 10000 \text{ cm}^3/\text{s}^2)$ 、初期単位幅体積 $2A_0 (=2 \times 25 \text{ cm}^2)$ で水深 $h (=90 \text{ cm})$ の静水中にほぼ瞬間的に直投することで落下粒子群を発生させた。

用いた混合粒子は、細粒子(粒径 $d=0.0044 \text{ cm}$ 、沈降速度 $V_f=0.15 \text{ cm/s}$)と粗粒子(0.0445 cm 、 5.47 cm/s)を混合した2粒径混合粒子 (Case1 ~ Case9) と、粒径 0.0044 cm 、 0.0109 cm ($V_f=0.89 \text{ cm/s}$) および 0.0445 cm の粒子をそれぞれ 10%、75% および 15% の割合で混合した3粒径混合粒子 (Case10) である。Case1 ~ Case9 では、全投下粒子量に対して細粒子の占める比率(以下、混合比 α という)を系統的に変化させた。Case10 については、実現象の粒度分布形状³⁾を模して作成した。なお、細粒子と粗粒子の沈降速度の比は約 36 倍である。混合粒子の粒子 Reynolds 数 R_p を算定する上で混合粒子の代表粒径 d_m が必要となるが、ここでは細粒子と粗粒子の各粒径に対して混合比 α で重みを付けた粒径をもって d_m とした。表-1 に各ケースにおける細粒子と粗粒子等の各粒径粒子量が全投下粒子量に占める割合とその他の条件を示す。

計測・解析方法としては、粒子群の形状および落下・

表-1 実験条件

Case	粒径 $d(\text{cm})$	各粒径の 割合	平均粒径 $d_m(\text{cm})$
Case1	0.0044	1	0.0044
	0.0445	0	
Case2	0.0044	0.9	0.0084
	0.0445	0.1	
Case3	0.0044	0.7	0.0164
	0.0445	0.3	
Case4	0.0044	0.5	0.0245
	0.0445	0.5	
Case5	0.0044	0.3	0.0325
	0.0445	0.7	
Case6	0.0044	0.2	0.0365
	0.0445	0.8	
Case7	0.0044	0.1	0.0405
	0.0445	0.9	
Case8	0.0044	0.05	0.0425
	0.0445	0.95	
Case9	0.0044	0	0.0445
	0.0445	1	
Case10	0.0044	0.10	0.0153
	0.0109	0.75	
	0.0445	0.15	

移動速度に関する流動特性量は、デジタル録画された画像をコンピュータ解析することで求めた。また、堆積粒子量($W_d(\text{cm}^3/\text{s}^2)$ で評価)の分布は、浮遊粒子が全て底面に沈積した後に、堆積粒子を40cm間隔で採集し、その乾燥重量から求めた。その際、濁りの拡がりに対する粗粒成分の影響を調べる目的で、全堆積量に対して細粒子と粗粒子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象と認められた場合に堆積粒子を採集し、 $W_d > 0.95W_0$ を満足する3つのデータに基づき、堆積特性の検討を行った。

3. 混合粒子群の落下挙動

図-2は、Case2($\alpha=0.9$)、Case4(0.5)、Case7(0.1)の2粒径混合およびCase10の3粒径混合の落下粒子群の状況を示したものである。これより、いずれも粒子サーマルとして一体となって落下しており、混合比 α が小さくなるほど、(1)粗粒子が細粒子に比して相対的に早く沈降するため、混合粒子群の形状が縦長の楕円形となること、(2)粗粒子の占める割合が大きくなるため、混合粒子群の落下速度も大きくなること、などがわかる。(3)3粒径混合のCase10の平均粒径 d_m は約0.015cm/sであり、Case3とほぼ同程度であるが、その落下挙動はおおよそCase2

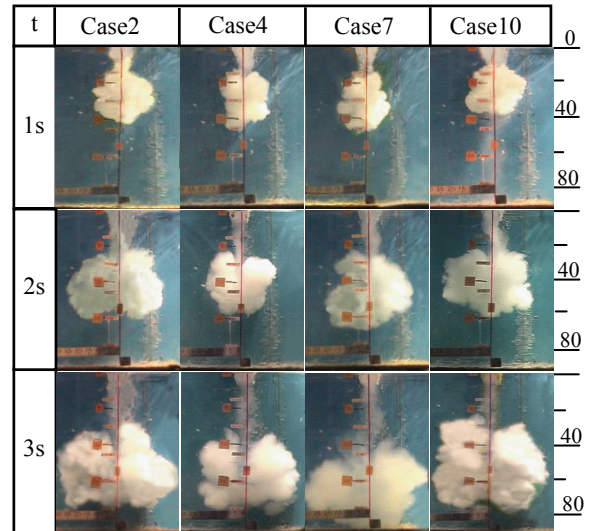


図-2 混合粒子群の落下状況 (目盛り : cm)

表-2 落下粒子群の係数 K_{ip} と z_{ih}^*/h^* の値

	$R_p \leq 1.0$	$1.0 < R_p \leq 30$	$R_p > 30$
K_{1p}	0.60	$-0.0034R_p + 0.60$	0.50
K_{2p}	2.10	$-0.024R_p + 2.12$	1.40
K_{3p}	0.90	$0.014R_p + 0.89$	1.31
z_{ih}^*/h^*	0.54	$0.0034R_p + 0.54$	0.64

とCase4の間になっていることも確認できる。これらのことから、同一投下量におけるthermal phaseでの混合粒子群の落下挙動は、混合比 α に応じた特性を呈し、その粒径は d_m で代表できると予想できる。

図-3は、それぞれCase1~Case10の落下混合粒子群の無次元の最大拡がり半幅 H^* 、平均有効重力 B^* および落下速度 V^* と落下距離 z^* との関係を示したものである。図中の実線①と②は、それぞれ、thermal phaseにおける細粒子のみ(Case1)と粗粒子のみ(Case9)の関係を示したものである。 V^* は z^* が大きくなると、thermal phaseの特性から大きく外れ始めるが、thermal phaseでは各特性量が実線①と②の間に存在しており、 $H^* \propto z^*$ 、 $B^* \propto z^{*-2}$ 、 $V^* \propto z^{*-1/2}$ なる関係が良好に成立していることが確認できる。これらのことから、thermal phaseにおける混合粒子群も先述した粒子サーマル理論で表せることがわかる。なお、 B^* については僅かな違いが認められるが、これは、 B が H や V のように直接算定できる特性量ではなく、画像解析より任意の時間での落下粒子群の単位幅体積 A を求め、 $B=W_0/A$ より間接的に算定しているためである。

図-4は、粒子サーマル理論における係数 K_p と粒子Reynolds数 R_p との関係について調べたものである。図中には、一様粒子群の実験データ⁴⁾も併せて示してある。これより、3粒径混合を含む混合粒子群と一様粒子群との間に大きな違いが認められないことや、 K_p は $R_p=0.1 \sim$ 数100の範囲で最大でも1.3倍程度しか変化しないことが

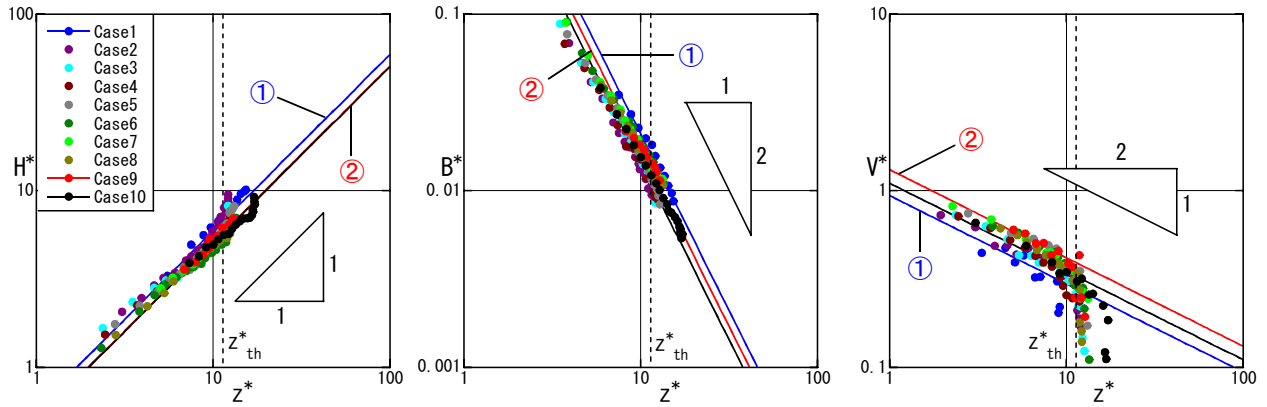


図-3 混合粒子群の無次元特性量(H^* , B^* , V^*)と無次元落下距離 z^* との関係

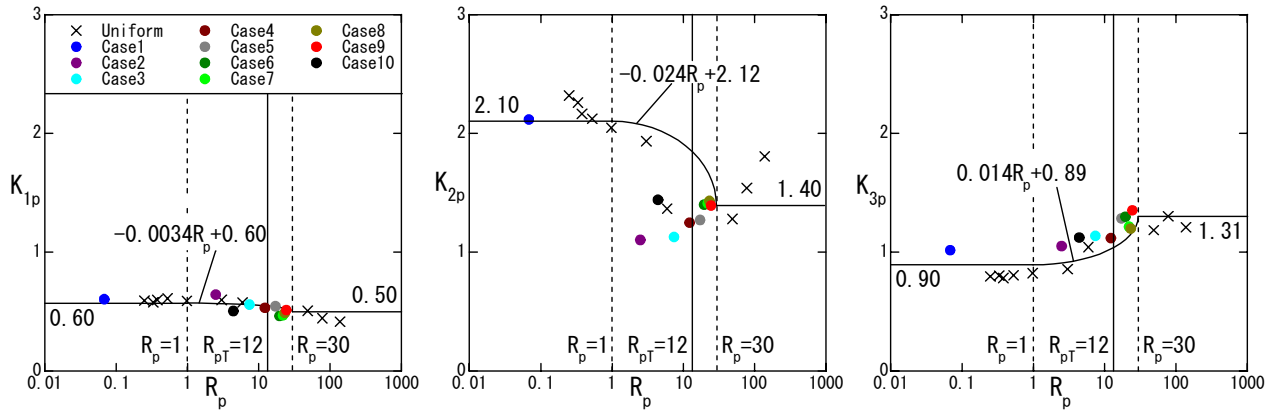


図-4 粒子サーマル理論における係数値 K_{ip}

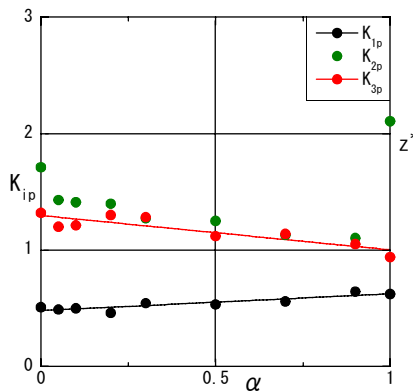


図-5 混合比 α と係数値 K_{ip} との関係

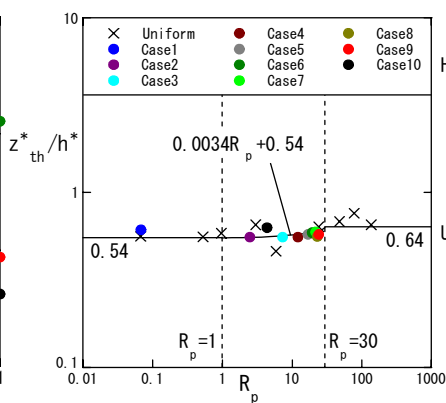


図-6 z_{th}^*/h^* と粒子Reynolds数 R_p との関係

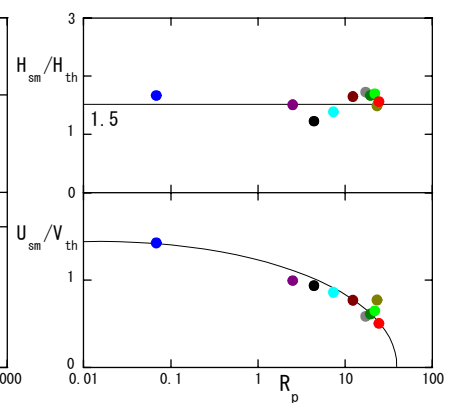


図-7 底面衝突後の特性量との関係

わかる。ただし、 K_{2p} は先述した理由で、 K_{1p} と K_{3p} に比べて係数値の散らばりが大きくなっている。図中で縦の実線で示した $R_{pT}=12$ は、粒子沈降速度 V_f を R_p が大きい領域($R_p > \text{約}30$)と小さい領域($R_p \leq \text{約}1.0$)に対して、Rubeyの式を近似表示した時に両者が等しくなる R_p の値である。従って、厳密には、 K_{ip} の各係数は、 $R_p \leq 1.0$, $1.0 < R_p \leq 30$, $R_p > 30$ の範囲で異なる値を取る可能性がある。 K_{2p} についてはやはり先述した理由で違いが認められるが、 K_{1p} と K_{3p} については図-4でこれが確認できる。表-2は、混合粒子を含む落下粒子群の係数 K_{ip} をまとめて示したものである。 K_{ip} は、 $R_p \leq 1.0$ と $R_p > 30$ でほぼ一定値を取り、 $1.0 < R_p \leq 30$ で R_p に応じて変化する。図-5は、 $1.0 < R_p \leq 30$ では R_p と混合比 α とに対応関係があることか

ら、 α に対する係数 K_{ip} の依存性を調べたものである。これより、 K_{1p} と K_{3p} には式(7)のような関係が成立している。

$$K_{1p} \cong 0.14\alpha + 0.5 \quad ; \quad K_{3p} \cong -0.29\alpha + 1.3 \quad (7)$$

図-6は、落下粒子群の挙動がthermal phaseの特性から外れ始める無次元落下距離 z_{th}^*/h^* と R_p との関係について調べたものである。なお、図中には投下条件(投下量 W_0 , 粒子粒径 d)と水域の条件(水域水深 h)を変化させて得られた一様粒子群の実験結果²³⁾も併せて示してある。これより、2粒径混合粒子群のみならず、3粒径混合粒子群についても、表-2のような値を取ることがわかる。 z_{th}^*/h^* は R_p が大きくなると、若干大きくなる傾向が見られる。これは、図-2で見たように、 R_p が大きくなると粒子群の形

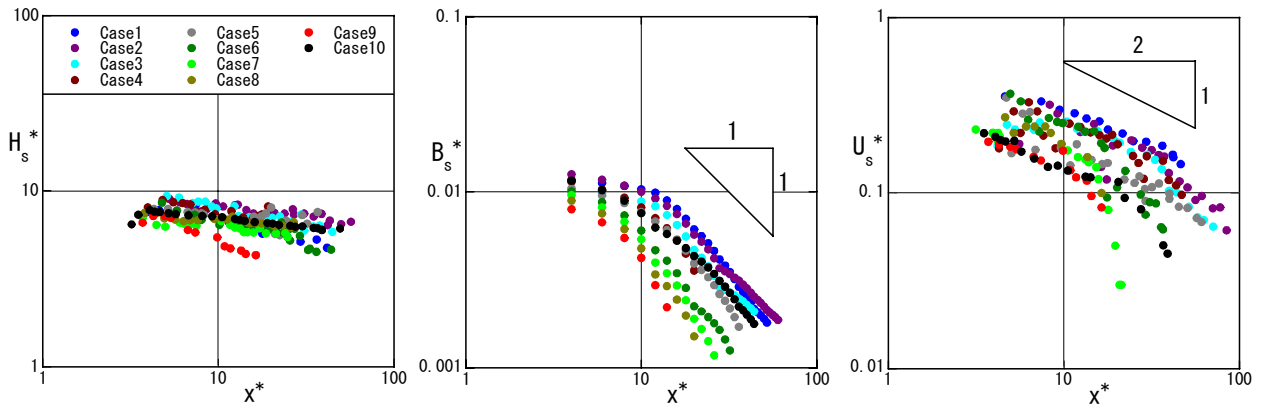


図-8 混合粒子群の無次元特性量(H_s^* , B_s^* , U_s^*)と無次元流下距離 x^* との関係

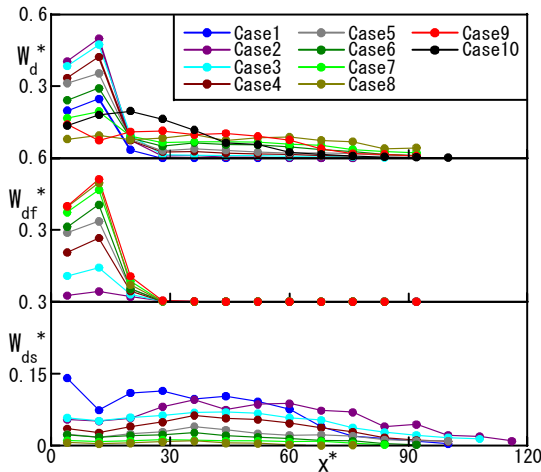


図-9 無次元堆積量 W_d^* と無次元流下距離 x^* との関係

状が縦長になるので、僅かながら深い水深でthermal phaseの特性から外れ始めるようになるからである。

以上より、式(1)~式(3)において、 d_m に基づく R_p に対応する係数 K_p を用いることで、thermal phaseにおける落下混合粒子群の挙動を予測できる。なお、今回得られた K_p や z_{th}^*/h^* の値が上記1.(a)で示した一様粒子群のものとは異なっているが、これは今回より正確に K_p の R_p に対する依存性を調べたからであり、混合粒径粒子群であるが故に生じたものではない。

4. 混合粒子群の底面衝突後の挙動

図-7は、落下粒子群の z_{th} での最大拡がり半幅 H_{th} と底面衝突後に水平流動する粒子群の最大層厚 H_{sm} との比 H_{sm}/H_{th} 、およびそこでの落下速度 V_{th} と底面衝突後の最大先端移動速度 U_{sm} との比 U_{sm}/V_{th} と R_p との関係をそれぞれ調べたものである。 H_{sm}/H_{th} は R_p 、言い換えれば混合比 α にはさほど依存せず、 $H_{sm}/H_{th}=1\sim 2$ 程度となることや、 U_{sm}/V_{th} は R_p の増加とともに減少する傾向が見て取れる。

図-8と図-9は、底面衝突後の粒子群の無次元の最大層厚 $H_s^*(=H_s/A_0^{1/2})$ 、平均有効重力 $B_s^*(=B_s/(W_0/A_0))$ 、先端移動速度 $U_s^*(=U_s/(W_0^2/A_0)^{1/4})$ 、および堆積粒子量 $W_d^*(=W_d/W_0)$ と

無次元流下距離 $x^*(=x/A_0^{1/2})$ との関係をそれぞれ示したものである。なお、 W_d^* に付けた添字 s と f は、それぞれ細粒子と粗粒子を表している。

これらより、底面衝突後の混合粒子群の流動特性としては、(1) H_s^* はほぼ一定値で流下した後に徐々に減少していくことや、 α が小さくなると H_s^* も小さくなっていくこと、(2) B_s^* はおおよそ x^* の-1乗で減少することや、 α が小さくなると B_s^* も小さくなっていく傾向があること、(3) U_s^* はおおよそ x^* の-1/2乗で減少し、混合比 α が小さくなると U_s^* も小さくなっていく傾向や、さらに流下するとさらに減速していくこと、などが認められる。

堆積粒子量 W_d^* としては、(1)粗粒子は投下点直下周辺に堆積し、 α の変化に応じてその量が減少すること、(2) α が小さくなると、全堆積量が一樣になる傾向があることや、同一投下量の細粒子のみの一様粒子群に比べ、細粒子成分がより遠方まで運ばれ堆積する傾向があること、などがわかる。

水平面上の保存性サーマルは、浮力~慣性領域では内部Froude数 $F_s(=U_s/(B_s H_s)^{1/2})$ が一定値を取ることが知られているが²⁴⁾、保存性サーマルであっても流下に際して初期総有効重力が保存されないため、 U_s 、 B_s および H_s がどのような関係に従うのかはよくわかっていない。著者ら²⁵⁾²⁶⁾は、(1)水平面上での保存性および一様粒径粒子より構成される粒子サーマルの実験研究と数値シミュレーションを通じ、保存性サーマルの先端移動速度は一定速度から x^* の-1/2乗で、平均有効重力は一定値から x^* の-1乗で減少し、最大層厚はほぼ一定に保たれることや、その結果として内部Froude数 F_s は一定に保たれること、(2)粒子サーマルでは、浮力~慣性領域以降は流下とともに流動層内の浮遊粒子の沈積が生じるため、これらの特性量はいずれもより急激に減少していくことを明らかにしている。

以上のことから、底面衝突後に水平流動する混合粒子群は、浮力~慣性領域における水平面上の保存性サーマルと同様な流動特性を有しており、そこでは混合比 α の変化に応じて上述したような流動特性量と堆積粒子量の変化が生じると考えられる。しかし、その挙動を明らかにするためには、更なる検討が必要である。

5. 結論

本研究から以下に示す(1)~(4)の知見が得られた。今後は、混合粒子群の落下挙動から底面衝突後の流動・拡散・堆積特性までを一貫して解析できる数値モデルを開発し、本実験結果との比較検討を試みる予定である。

(1)混合粒径粒子群の落下速度などの落下特性や、これらがthermal phaseの特性から外れ始める水深は、表-2に示す係数 K_p を用いることで、粒子サーマル理論でおおよそ予測できる。その際の粒子Reynolds数 R_p としては、代表粒径 d_m に対応したものをを用いる必要がある。また、 $R_p=1\sim 30$ の範囲では、 R_p と混合比 α の間に対応関係があるので、 K_p は式(7)のように α の関数として表すことができる。

(2)混合粒子群の底面衝突前後の粒子群の H_{sm}/H_{th} は、混合比 α にはさほど依存せず、 $H_{sm}/H_{th}=1\sim 2$ 程度であるが、 U_{sm}/V_{th} は α の増加とともに減少する。

(3)混合比 α が小さくなると、混合粒子群の細粒子成分は細粒子成分のみの粒子群に比べより遠方まで運ばれ堆積する。また、全堆積粒子量は一様化する傾向がある。従って、投下土砂の粒径の組成によって、濁りの拡がり状況は相当に変化する。

(4)以上より、2次元混合粒子群の落下挙動は粒子サーマル理論で予測でき、底面衝突後の粒子群の高さは衝突前の1.5倍程度であるので、図-8のように底面衝突を経て水平流動する粒子群の高さをおおよそ推定することができる。底面に沿った濁りの拡がりを抑制するためには、水平流動する粒子群の層厚より高くなるように、直立型防止幕の設置位置や設置高さを設定すればよいので、本研究の結果はそのための目安となる。ただし、水平面上での粒子サーマルの挙動をより明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 松見 吉晴・泉 一幸：底開式バージによる投入捨石群の堆積形状に関する予測モデル，海岸工学講演会論文集，第39巻(2)，pp.966-970，1992。
- 3) 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。
- 4) 秋山 壽一郎・斎賀 仁・J. シン・浦 勝：直投土砂の濁りの拡がり水域水深の影響，水工学論文集，第47巻，pp.1141-1146，2003。
- 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) 小田 一紀・重松 考昌・大西 信幸・井上 雅夫：改良DEMARC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。
- 7) Li, C. : Convection of particle thermals, *J. of Hydraulic Research*, Vol.35, No.3, pp.363-376, 1997.
- 8) 蔣 勤・国栖 広志・渡辺 晃：土砂投入に伴う汚濁の拡散

- 過程に関する数値シミュレーション，海岸工学論文集，第44巻，pp.1031-1035，1997。
- 9) 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。
 - 10) Ying, X., Akiyama, J. and Ura, M. : Motion of dense fluid released into quiescent water with finite depth, *J. of Hydraulic, Coastal and Environment Engineering*, No.635/II-49, pp.141-152, 1999.
 - 11) 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。
 - 12) Singh, J., Akiyama, J. and Shige-eda, M. : Numerical simulation of asymmetric gravity current induced by direct dumping of sediments, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.49, pp.1399-1404, 2005.
 - 13) 矢内 栄二・大槻 忠：水中落下土砂の拡がり幅の水深の影響について，海岸工学講演会論文集，第30回，pp.613-616，1983。
 - 14) Neves, M.J. & Almeida, P.D. : The influence of density on thermal motion, Proc. of the Int'l Symposium on Environmental Hydraulics, Vol.1, pp.141-146, 1991.
 - 15) Noh, Y. & Fernando, H.J.S. : The transition in the sedimentation pattern of a particle cloud, *Physics of Fluids*, A5(12), pp.3049-3055, 1993.
 - 16) 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。
 - 17) 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。
 - 18) 秋山 壽一郎・浦 勝・応 新亜・今宮 盛雄・陶山 正治：静水中に瞬間的に投下された重たい流体塊の流動特性に関する研究，水工学論文集，第42巻，pp.529-534，1998。
 - 19) Luketina, D. & Wilkinson, D. : The transition to the swarm phase for a particle cloud, *13th Australian Fluid Mech. Conference*, pp.195-198, 1998.
 - 20) 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。
 - 21) Buhler, J. & Papantoniou, D.A. : On the motion of suspension thermals and particle swarms, *J. of Hydraulic Research*, Vol.39, No.6, pp.643-653, 2001.
 - 22) 秋山 壽一郎・野中 雅之・斎賀 仁・浦 勝：混合粒子の直投により発生する2次元粒子の流動および堆積特性，水工学論文集，第46巻，pp.1229-1234，2002。
 - 23) 秋山 壽一郎・斎賀 仁・飯田 英明・岡本 圭祐：有限な水域での直投粒子群の落下挙動と底面粒子の舞い上がりが濁りの拡がりへ与える影響，水工学論文集，第48巻，pp.1159-1164，2003。
 - 24) Huppert, H.E. and Simpson, J.E. : The slumping of gravity currents, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.99, No.4, pp. 785-799, 1980.
 - 25) 秋山 壽一郎，浦 勝，井出野 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44巻，pp.1267-1272，2001。
 - 26) 秋山 壽一郎・重枝 未玲・山崎 勉・野中 雅之：水平面上における保存性・非保存性サーマルの数値シミュレーション，水工学論文集，第47巻，pp.1147-1152，2003。

(2005. 9. 30受付)