

# 直投土砂の濁りの拡がり水域水深の影響

## EFFECTS OF WATER DEPTH ON THE SPREAD OF A PARTICLE CLOUD PRODUCED BY DIRECT DUMPING

秋山 壽一郎<sup>1</sup>・斎賀 仁<sup>2</sup>・ジャスワント シン<sup>3</sup>・浦 勝<sup>4</sup>  
Juichiro AKIYAMA, Hitoshi SAIGA, Jaswant SINGH and Masaru URA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>ME 九州工業大学大学院 研究生 (同上)

<sup>4</sup>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)

The transition condition from the thermal phase to swarm phase of a particle cloud, produced by direct dumping of particles into a quiescent body of water, is predicted on the basis of the single-phase Boussinesq thermal theory proposed by the authors. The condition is verified for a wide range of dumping condition and particle size, and is found to be functions of the amount of dumped material, the size and density of particles. It is also shown that in a finite water depth the diffusion and deposition characteristics of particles along the bottom boundary are significantly affected by the phase of a falling particle cloud. When a particle cloud impinges on the bottom as the thermal phase, a turbidity current is formed and transports suspended particles in substantial distance away from a dumping point.

When particles fall as the swarm phase, the current is not formed and consequently falling particles deposit near the dumping point.

**Key Words :** turbidity, particle thermal, thermal theory, turbulence

### 1.はじめに

人工島の建設などを目的とした土砂直投工や廃土の水域への投棄では、水表面付近から多量の土砂が投下されるため、大規模な水質汚濁が発生する。投下点付近での局所的な土砂の落下運動とそれによって誘起された密度流的な汚濁拡散現象は、水質汚濁対策を目的として敷設されるシルトフェンスの効果的な設置方法と直接関係しているだけではなく、投下点から離れたFar Field領域を対象とした数値シミュレーションの初期条件を与えるものでもあり、そこでの汚濁拡散現象を明らかにすることは重要かつ有益である。

底面に沿う濁りの拡がり、落下粒子群の底面衝突後に形成される濁水密度流の流動・拡散過程に深くかかわっており<sup>1)</sup>、底面衝突時の落下粒子群の流動状態はこの濁水密度流の拡がりの程度を規定している<sup>2)</sup>。従って、底面に沿う濁りの拡がりの程度を明らかにするためには、投下条件と水域水深の関係において、落下粒子群がどのような形態や落下状態で底面に衝突するのが重要となる。

土砂の直投に起因する局所的な汚濁拡散現象を説明・予測する手段としては、数値解析<sup>3-7)</sup>、確率統計

的な方法<sup>8)</sup>あるいはそれを部分的に組込んだ方法<sup>9)</sup>、乱流サーマル理論<sup>10-17)</sup>などがある。数値解析は粒子群の落下挙動から底面衝突後の挙動までを一貫して解析できるなど、複雑な状況に対処できることが大きな利点であるが、直投によって発生する落下粒子群は高濃度の固-液混相乱流現象であるため、取り扱える粒子の濃度や個数などに関する強い制約があり、最新のCFD技術をもってしても適用上の限界がある<sup>3-7)</sup>。確率統計的な手法は、物理的な根拠には乏しいが、個々の粒子の自由沈降的な落下形態(swarm phase)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。乱流サーマル理論は理論的にも明解で簡便であり、実験的な知見と組み合わせることで、粒子群として流動する粒子サーマル的な落下形態(thermal phase)での落下粒子群の挙動を十分な精度で予測することが可能であり、ここで対象としている土砂直投に伴う局所的な汚濁拡散現象を解析する手段として有用である。

乱流サーマル理論を用いた例としては、①粒径が大きく投下量が少ない場合にはswarm phaseとなり、粒径が小さく投下量が多い場合にはthermal phaseとなることを実験的に明らかにした上で、Baines & Hopfinger<sup>13)</sup>による単相の非ブスネスク

乱流サーマル理論を発展させ、thermal phaseとswarm phaseの挙動を統一的に説明するための固-液混相サーマル理論を提案した研究<sup>13)</sup>、②簡単な軸対称サーマル理論を用いて粒子群の落下速度や拡がり幅について論じた研究<sup>11)</sup>、③非ブシネスクサーマル理論を用いてサーマルの密度効果について論じた研究<sup>10,17)</sup>、④微細粒子よりなる濁水塊を対象とし、単相のブシネスクサーマル理論の抵抗係数や連行係数などについて定量的に明らかにした研究<sup>14)</sup>、⑤単相のブシネスクならびに非ブシネスクサーマル理論について検討を加え、thermal phaseの落下粒子群の挙動が単相のブシネスク乱流サーマル理論で記述できることを理論的・実験的に明らかにした研究<sup>16)</sup>などがあり、その他にもNoh & Fernando<sup>12)</sup>やLuketina & Wilkinson<sup>15)</sup>など多数存在する。

静水中にほぼ一様な粒径粒子を直投したときに生じる落下粒子群の挙動は、投下条件(単位奥行き当たりの初期総有効重力 $W_0 (=c_0 s g A_0)$ 、単位奥行き当たりの初期体積 $A_0$ 、粒子粒径 $d$ 、粒子の水中比重 $s$ および水域水深 $h$ )に支配される。ここに、 $g$ は重力加速度、 $c_0$ は濁水の初期体積濃度( $0 \leq c_0 \leq 1$ )である。水域水深が十分に大きく、多量の土砂が投下される場合では、落下粒子群の挙動は一般に粒子群として流動するacceleration phaseからthermal phaseを経て、個々の粒子のswarm phaseへと遷移する。しかし、有限な水深では、落下粒子群が底面へ衝突あるいは着底するときの落下形態は水域の水深に規定されている。特に、土砂直投工では通常20m以下の比較的浅い水域に数千 $m^3$ という多量の土砂が投下されるため、投下条件と水域水深を勘案すると、落下粒子群はthermal phaseのまま底面に衝突すると考えられる。

このような $W_0$ などの投下条件による落下形態の違いや遷移過程は、粒子の直投によって生じる粒子クラスターが引き起こす乱れの強さと深く関係している。いまのところ、粒子クラスターが引き起こす乱れの強さに関する普遍的な知見が得られているわけではないが、 $d=0.0165\text{cm}$ と $0.027\text{cm}$ の粒子を用いた限定された投下量での実験結果よれば<sup>16)</sup>、 $(v^2)^{0.5}/V_f \cong 2.0$ 程度以上であれば、落下粒子群が粒子サーマルとして落下すること、 $(v^3)^{0.5}/V_f$ が後述する無次元落下距離 $z^*$ の $-1/2$ 乗で減衰することなどがわかっている。ここに、 $(v^3)^{0.5}$ =粒子サーマルの中心軸上の流速の時系列より得られた乱れ強度、 $V_f$ =個々の粒子の沈降速度である。

以上のように、落下粒子群の底面に沿う濁りの拡がりには、底面衝突時の粒子群の落下形態が深くかかわっており、その形態は投下条件と水域水深との関係で捉える必要がある。すなわち、底面に沿う濁りの拡がり程度を測る上で、thermal phaseからswarm phaseへの遷移水深 $z_f$ と水域水深 $h$ と

表-1 実験条件

| CASE | d<br>(cm) | h<br>(cm) | s         | $\epsilon$ | $A_0$<br>( $\text{cm}^2$ ) | $W_0$<br>( $\text{cm}^3/\text{s}^2$ ) |        |
|------|-----------|-----------|-----------|------------|----------------------------|---------------------------------------|--------|
| U1-1 | 0.0044    | 50        | 1.48      | 0.236      | 12.5                       | 2,900                                 |        |
|      |           |           |           | 0.238      | 20.9                       | 4,900                                 |        |
|      |           |           |           | 0.29       | 24                         | 6,860                                 |        |
| U1-2 |           | 1.48      | 0.237     | 12.5       | 2,900                      |                                       |        |
|      |           |           | 0.239     | 20.9       | 4,900                      |                                       |        |
|      |           |           | 0.292     | 24         | 6,860                      |                                       |        |
| U2-2 |           | 1.48      | 0.241     | 37.7       | 8,900                      |                                       |        |
|      |           |           | 0.128     | 23.1       | 2,900                      |                                       |        |
|      |           |           | 0.245     | 25         | 3,000★                     |                                       |        |
|      |           |           | 0.217     | 23.1       | 4,900                      |                                       |        |
| U3-2 |           | 1.48      | 0.186     | 37.7       | 6,860                      |                                       |        |
|      |           |           | 0.241     | 37.7       | 8,900                      |                                       |        |
|      | 0.128     |           | 23.1      | 2,900      |                            |                                       |        |
| U4-2 | 1.53      | 0.217     | 23.1      | 4,900      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.186     | 37.7      | 6,860      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.241     | 37.7      | 8,900      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.128     | 23.1      | 2,900      |                            |                                       |        |
| U5-2 | 1.53      | 0.245     | 24.5      | 3,000★     |                            |                                       |        |
|      |           | 0.217     | 23.1      | 4,900      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.186     | 37.7      | 6,860      |                            |                                       |        |
| U6-2 | 1.54      | 0.2       | 25        | 4,900      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.235     | 25        | 6,860      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.28      | 25        | 9,000      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.245     | 25        | 3,000★     |                            |                                       |        |
| U7-2 | 1.54      | 0.367     | 25        | 9,000      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.408     | 25        | 10,000     |                            |                                       |        |
|      |           | 0.469     | 25        | 11,500     |                            |                                       |        |
| U8-2 | 1.54      | 0.409     | 25        | 10,000     |                            |                                       |        |
|      |           | 0.469     | 25        | 11,500     |                            |                                       |        |
|      |           | 0.531     | 25        | 13,000     |                            |                                       |        |
| U9-2 | 1.57      | 0.204     | 25        | 5,000      |                            |                                       |        |
|      |           | 0.408     | 25        | 10,000     |                            |                                       |        |
|      |           | 0.437     | 35        | 15,000     |                            |                                       |        |
| CASE | d<br>(cm) | 混合比       | h<br>(cm) | s          | 0.286                      | 25                                    | 7,000  |
|      |           |           |           |            | 0.374                      | 30                                    | 11,000 |
|      |           |           |           |            | 0.437                      | 35                                    | 15,000 |
| M1   | 0.0044    | 1:1       | 90        | 1.48       | 23.1                       | 2,900                                 |        |
|      | 0.0088    |           |           |            | 23.1                       | 4,900                                 |        |
|      |           |           |           |            | 37.7                       | 6,860                                 |        |
| M2   | 0.0044    | 1:2       |           |            | 37.7                       | 8,900                                 |        |
|      | 0.0088    |           |           |            | 23.1                       | 2,900                                 |        |
|      |           |           |           |            | 23.1                       | 4,900                                 |        |
| M3   | 0.0044    | 1:3       |           |            | 37.7                       | 6,860                                 |        |
|      | 0.0088    |           |           |            | 37.7                       | 8,900                                 |        |
|      |           |           |           |            | 23.1                       | 2,900                                 |        |
|      |           |           |           |            | 23.1                       | 4,900                                 |        |
|      |           |           |           |            | 37.7                       | 6,860                                 |        |
|      |           |           |           |            | 37.7                       | 8,900                                 |        |

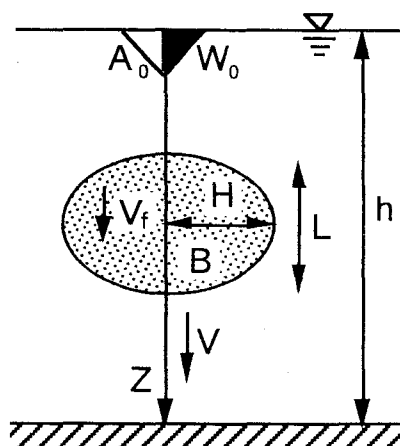


図-1 粒子群の流動状況の定義と特性量

の大小関係が特に重要となる。この遷移水深については、Noh & Fernando<sup>12)</sup>、Buhler &

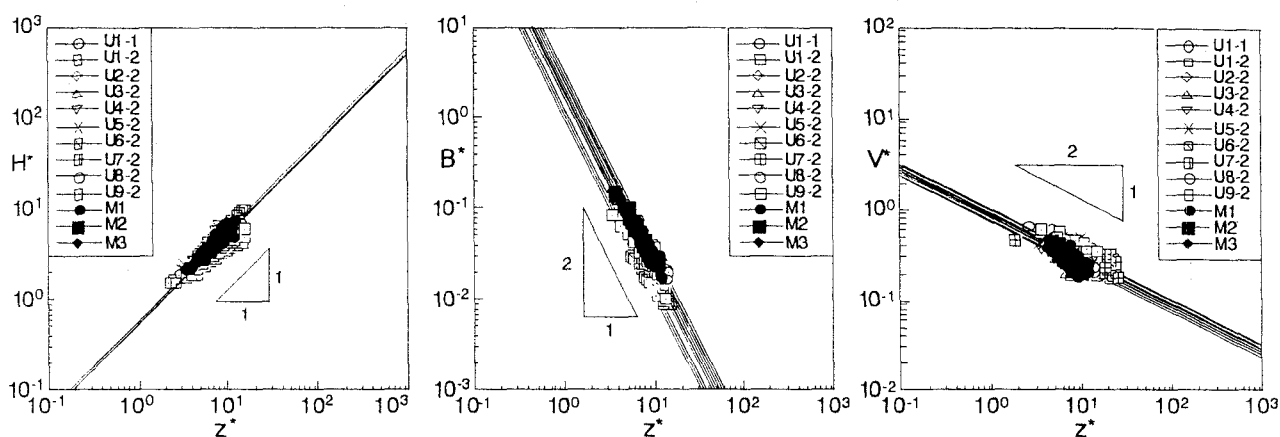


図-2 落下粒子群の無次元特性量( $H^*$ ,  $B^*$ ,  $V^*$ )と無次元落下距離 $z^*$ との関係

Papantoniou<sup>17)</sup>, Luketina & Wilkinson<sup>15)</sup>などによって検討がなされており、Noh & Fernando<sup>12)</sup>は  $R_p$  = 一定の条件下で、 $z_T V_f / \nu \propto (W_0 / V_f \nu)^{0.3}$ なる関係を提案している。ここに、 $R_p$  = 粒子 Reynolds 数 ( $= d V_f / \nu$ ) である。Buhler & Papantoniou<sup>17)</sup>と Luketina & Wilkinson<sup>15)</sup>は  $z_T \propto W_0^{1/2} / V_f$ なる関係を提案している。このように、 $W_0$ と $V_f$ が重要な支配パラメータであると考えられるが、 $z_T$ について定量的にわかっているわけではない。

本研究は、このような背景を踏まえ、粒径が小さな落下粒子群を取扱った前報<sup>16)</sup>を更に発展させたものであり、以下のような新しい知見を含んでいる。

- ① 粒径が比較的小さな落下粒子群に関するより広範囲な投下条件下での実験結果と理論予測との検証、
- ② 混合落下粒子群と比較的粒径が大きな落下粒子群の遷移水深に関する結果と検証、
- ③ 遷移水深の予測式の適用範囲と粒子 Reynolds 数との関係、
- ④ 広範囲な条件下での粒子サーマル理論の係数の同定、
- ⑤ 遷移水深と水域水深との関係から見た落下粒子群の底面衝突後の濁りの拡がりに関する検討、
- ⑥ 実スケールでの投下条件下での落下形態に関する検討。

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、ここでは船長方向に一樣な2次元的な現象として近似的に取扱っている。

## 2. 実験

実験装置は、長さ7.5m、深さ1.0m、幅0.1~0.2mの両面アクリル製の水槽に流入装置を取り付けたものであり、水槽に貯留された静水中に比重 $\sigma = 2.45$ でほぼ一樣な粒径のガラスビーズを単位奥行き当たりの初期総有効重力 $W_0 (= sgA_0)$ で直投し、2次元落下粒子群を発生させた。ここに、 $A_0$  = 空隙を除いた粒子塊の単位奥行き当たりの初期体積、 $s$  = 粒子の水中比重および $g$  = 重力加速度である。ただし、左右対

称な現象であるので、 $W_0$ は総投下量の半分で定義している。

実験条件は表-1に示すとおりであり、一樣粒径粒子を直投したUシリーズと混合粒子に関するMシリーズとを実施した。混合粒子は細粒成分(中央粒径 $d = 0.0044\text{cm}$ )とそれより粒径が2倍大きい粗粒成分を1:1、1:2あるいは1:3の比率で良く混ぜたものであり、各粒子の中央粒径の混合比による重み付き算術平均をもって代表粒径とした。

計測・解析方法としては、粒子群の落下状況と底面衝突あるいは着底後の状況をCCDカメラで撮影し、高性能VTRに収録された画像をコンピュータ解析することで、落下粒子群と底面衝突後の濁水密度流の速度 $V$ および形状を求めた。いずれのケースにおいても同一条件下で5回繰り返し実験を行いデータの精度を高めた。また、Uシリーズでは表-1中に★印を記したケースに限り、底面衝突後の粒子群の流動状況の撮影と堆積粒子量の算定を行った。堆積粒子量は、浮遊粒子が全て沈積した後に底面に堆積した粒子を0.4m間隔で丁寧に採集し、その乾燥重量より算定した。その際、同一条件下で繰り返し実験を行い、投下点直下から片側の総堆積量が全投下量の半分の95~105%となった3データを信頼できるものとして採用した。

## 3. 考察

### (1) 粒子サーマル理論

thermal phaseにおける落下粒子群、すなわち粒子サーマルの主要な流動特性量は、以下に概略を示すブシネスク乱流サーマル理論の近似解で十分に記述できる<sup>16)</sup>。理論の詳細については参考文献<sup>14,16)</sup>を参照されたい。なお、粒子サーマルの主要な特性量は、図-1に示すとおりで、 $H$  = 最大拡がり半幅、 $L$  = 長さ、 $B$  = 平均有効重力、 $V$  = 落下速度である。また $A_0$ と $W_0$ はそれぞれ単位奥行き当たりの初期体積と初期総有効重力である。

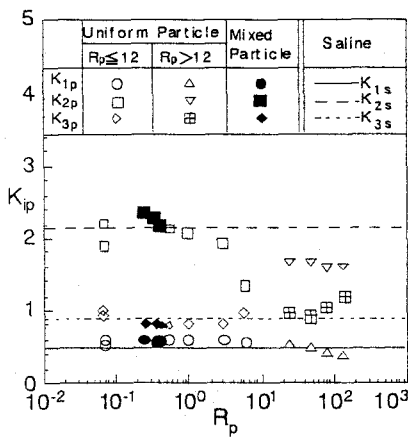


図-3 サーマル理論 $K_{ip}$ の係数値と粒子 Reynolds数 $R_p$ との関係

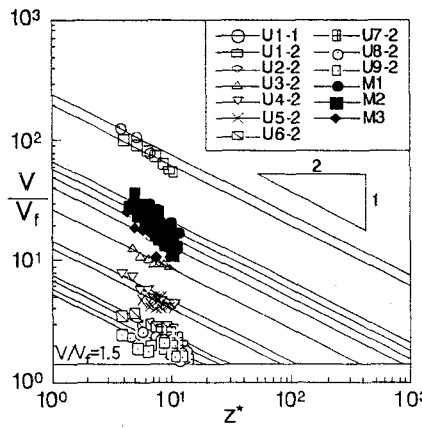


図-4 無次元落下速度 $V/V_f$ と無次元落下距離 $z^*$ との関係

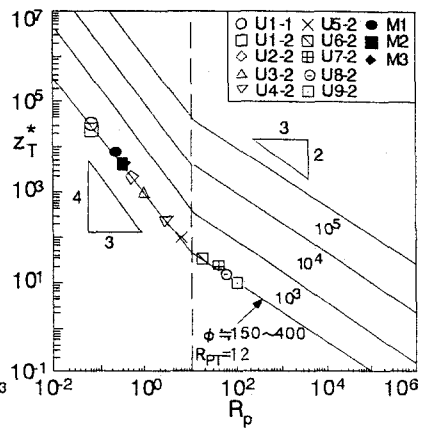


図-5 無次元遷移水深 $z_T^*$ と粒子 Reynolds数 $R_p$ との関係

投下条件( $A_0$ ,  $W_0$ )で無次元化した乱流サーマルの無次元最大拡がり半幅 $H^*$ 、無次元平均有効重力 $B^*$ 、無次元落下速度 $V^*$ を各々 $H^*=H/z_0$ 、 $B^*=B/B_0$ 、 $V^*=V/V_0$ のように定義すると、式(1)~(3)のような関係が成立する。ここに、 $B_0=W_0/A_0$ 、 $V_0$ =サーマルの代表速度( $=\varepsilon_0 g W_0$ ) $^{1/4}$ 、 $z^*$ =無次元落下距離( $=z/z_0$ )、 $z_0=A_0^{1/2}$ 、 $W_0=(\varepsilon_0 g A_0)$ 、 $\varepsilon_0$ =サーマルの初期相対密度差( $=(\rho_0-\rho_a)/\rho_a$ )、 $\rho_0$ =サーマルの初期密度および $\rho_a$ =周囲流体の密度である。保存性乱流サーマルでは係数 $K_{is}$ の関数形は式(4)~(6)で与えられる。

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

$$K_{1s} = \frac{(S_1/S_2)\sqrt{FE_d}}{2} \quad (4)$$

$$K_{2s} = \frac{(F/S_1)}{\{(S_1/S_2)\sqrt{FE_d}/2\}^2} \quad (5)$$

$$K_{3s} = \frac{[1/\{(3/4)(1+A_m)S_2(E_d/\sqrt{F})+C_d\}]]^{1/2}}{\{(S_1/S_2)\sqrt{FE_d}/2\}^{1/2}} \quad (6)$$

ここに、 $F$ =断面アスペクト比( $=H/L$ )、 $A_m$ =付加質量係数( $=2F$ )、 $C_d$ =抵抗係数、 $S_1$ =サーマルの断面積比、 $S_2$ =幾何学的平均長さ周囲長との比、 $E_d$ =連行係数( $=q_c/CV$ )、 $C$ =周囲長および $q_c$ =単位時間あたりの連行量である。

粒子サーマルでは、上記の定義で $\varepsilon=cs$ および $cA=A_p$ のように置くことができる。thermal phaseでの落下粒子群の挙動は、図-2に示すように混合粒子も含めて、 $H^* \propto z^*$ 、 $B^* \propto z^{*-2}$ および $V^* \propto z^{*-1/2}$ なる関係に従い、様々な投下条件に対して乱流サーマル理論がよく成立することが確認できる。しかし、サーマル内部の個々の粒子の沈降速度の影響等のため、係数 $K_{ip}$ は保存性サーマルとは異なる。そこで、落下粒子群に対する係数を $K_{ip}$ とし、 $K_{ip}$ と粒子 Reynolds数 $R_p$ ( $=dV_f/\nu$ )との関係を調べたものが図

-3である。比較のために、図中には保存性サーマルの係数も同時に示してある。ここで、 $\nu$ は水の動粘性係数である。これより、粒子サーマルでは $K_{2p}$ は $R_p$ に若干依存し、 $R_{pT} > 12.0$ で $K_{2p}$ 約1.6、 $R_{pT} \leq 12.0$ で約1.9なる値を取る。しかし、 $K_{1p}$ と $K_{3p}$ は $R_{pT} \leq 12.0$ 、 $R_p = 0.06 \sim 6.0$ の広い範囲で $K_{1p} \approx 0.55$ 、 $K_{3p} \approx 0.90$ の一定値を取ることがわかる。また、混合粒子の場合もほぼ同様な値を取る。

## (2)thermal phaseからswarm phase

### への遷移条件

以上のように、thermal phaseでの粒子群の落下速度は、 $V/V_0 = K_{3p} z^{*-1/2}$ なる関係で精度よく表すことができる。この関係を個々の粒子の沈降速度 $V_f$ を用いて書き換えると、粒子群の落下速度 $V$ と個々の粒子の沈降速度 $V_f$ との比 $V/V_f$ と $z^*$ との関係は、式(7)のようになる。ここで、 $V_f$ は例えば式(8)のRubeyの式で与えられる。

$$\frac{V}{V_f} = \frac{(W_0^2/A_0)^{1/4}}{V_f} K_{3p} z^{*-1/2} \quad (7)$$

$$V_f = (sgd)^{1/2} \left[ \left( \frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3} \right)^{1/2} - \left( \frac{36v^2}{sgd^3} \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

図-4は、 $V/V_f$ と $z^*$ との関係を示したものである。これより、すべてのデータが $V/V_f \geq 1.0$ の範囲に存在しており、一般にthermal phaseにおける粒子群の落下速度は個々の粒子の沈降速度よりも大きいことがわかる。

$R_p$ が小さい領域を対象とすると、式(8)において $sgd^3/\nu^2 \rightarrow 0$ として、 $V_f \approx sgd^2/18\nu$ で近似できる。これと $R_p$ の定義より、 $R_p$ と $V_f$ との関係が $R_p = (18/sg\nu)^{1/2} V_f^{3/2}$ のように得られる。さらに、この関係と式(7)を用い、thermal phaseからswarm phaseへの遷移が流速比 $V/V_f = \alpha$ となる $z^* = z_T^*$ で起

こるとすると、 $R_p$  が小さい領域に関する遷移水深  $z_{TS}^*$  が式(9)のように得られる。 $\alpha$  の値については、thermal phase から swarm phase への遷移プロセスを実験室で再現するには実験水槽の水深の制約とこれに伴う投下条件の制約が生じるので、普遍的な見解は得られていない。このような理由で、広範囲な投下条件下での結果ではないが、Noh & Fernando<sup>12)</sup> と Luketina & Wilkinson<sup>15)</sup> などの実験結果を参照すると、 $\alpha = 1.0 \sim 2.0$  の範囲で遷移するようである。ここでは、その平均値である  $\alpha = 1.5$  を用いることとする。同様に、 $R_p$  が大きい領域を対象とすると、 $sgd^3/\nu^2 \rightarrow \infty$  として、 $V_f = (2sgd/3)^{1/2}$  となる。 $R_p$  が大きいときの  $K_{3p}$  が  $R_p$  が小さいときと同様な値を取ると仮定すると、 $R_p$  が大きい領域に関する  $z_{TL}^*$  が式(10)のように得られる。なお、この仮定は図-3から明らかなように、本実験条件の範囲では検証されている。このように、 $R_p$  が小さい場合と大きい場合では、 $R_p$  と  $V_f$  との関係が異なってくるために、 $z_{TL}^*$  の  $R_p$  に対する依存性も異なってくる。

$$z_{TS}^* = \left(\frac{1}{18}\right)^{-2/3} \alpha^{-2} K_{3p}^2 \phi R_p^{-4/3} \text{ for } R_p \leq 12.0 \quad (9)$$

$$z_{TL}^* = \left(\frac{2}{3}\right)^{-2/3} \alpha^{-2} K_{3p}^2 \phi R_p^{-2/3} \text{ for } R_p > 12.0 \quad (10)$$

式(9)と式(10)を等値することで、 $z_{TS}^*$  と  $z_{TL}^*$  との境界粒子 Reynolds 数  $R_{pT}$  が  $R_{pT} = 12$  ( $d = 0.03 \text{ cm}$ ) のように得られる。ここで、 $\phi$  は投下条件に基づく無次元パラメータであり、 $\phi = (sg \nu)^{-2/3} (W_0^2/A_0)^{1/2}$  で定義される。さらに式(10)を用いると、室内実験が不可能な状況、すなわち水深が大きな水域に大きな粒径粒子を多量に投下した時の遷移水深を推定することができる。

thermal phase から swarm phase への遷移が  $V/V_f = 1.5$  となる  $z^*$  の値である  $z_{TL}^*$  で起こるとして、各投下条件での  $z_{TL}^*$  を図-4より求め、 $z_{TL}^*$  と  $R_p$  との関係を調べたものが図-5である。図中に示された実線は、式(9)と式(10)に本研究の実験範囲の  $\phi$  値の平均値あるいは仮想的な  $\phi$  値を代入して得られる  $z_{TL}^*$  の推定曲線である。これより、同一粒径粒子群では、 $\phi$  すなわち投下量が大きくなると、 $z_{TL}^*$  が大きくなることがわかる。なお、 $V_f$  として式(8)を用いると、式(9)と式(10)のように陽的に表現できないが、図-5と同様な結果が得られる。これより、混合粒子も含めて、広範囲な投下条件に対して両式が良好に成立していることが確認できる。

得られた関係式に基づき、実スケールでの遷移水深  $z_{TL}^*$  を検討してみる。条件としては、玉井・村岡<sup>13)</sup> の数値シミュレーションと同様な条件(粒子の空隙

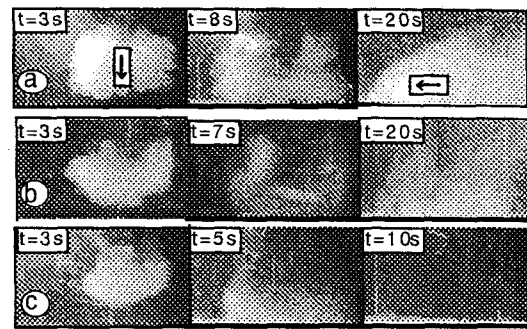


図-6 流動状況図 (a:U2-2, b:U4-2, c:U6-2)

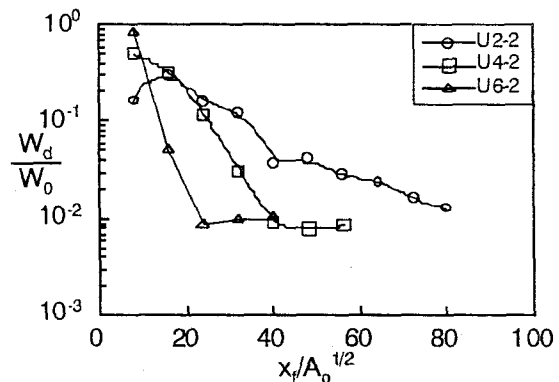


図-7 堆積粒子量  $W_d/W_0$  と無次元流下距離  $x_f/A_0^{1/2}$  との関係

率  $\lambda = 0.4$ 、空隙込みの投下量  $V_{p0} = 3000 \text{ m}^3$ 、底扉の開口幅  $D = 4.0 \text{ m}$ 、土粒子の密度  $\rho_p = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 、粒子の平均粒径  $d = 0.1 \text{ cm}$ 、粒子の沈降速度  $V_f = 15.6 \text{ cm/s}$ 、バージ船長  $L = 50 \text{ m}$ 、水深  $h = 20 \text{ m}$ ) を用いる。 $d = 0.1 \text{ cm}$  なので、式(10)を用いると、 $z_{TL} = (1.5)^{-2} (2sg \nu R_p/3)^{-2/3} K_{3p}^2 W_0$  となり、投下量は  $W_0$  で評価される。この場合の遷移水深は、 $z_{TL} = 1200 \text{ m}$  となり、水域水深よりはるかに大きい。このため、十分に強い thermal として底面に衝突することになる。また、同一投下量であれば、 $d = 0.5 \text{ cm}$  で  $z_{TL} = 310 \text{ m}$ 、 $1.0 \text{ cm}$  で  $150 \text{ m}$  となり、この場合も thermal phase で衝突すると予測される。

### (3) 水域水深と濁りの拡がりの関係

濁りの拡がりとは粒子の堆積量と堆積形状で評価できると考えられる。そこで、この観点から落下形態と濁りの関係について検討を加える。上述したように、底面に沿った濁りの拡がりには投下条件(投下量、粒子粒径)と水域の水深に依存するが、ここでは粒子粒径と水深の影響について検討する。

図-6は、 $W_0$  を一定 ( $= 3000 \text{ cm}^3/\text{s}^3$ ) に保った状態で粒子粒径  $d$  を  $0.0088$ 、 $0.0165$  および  $0.0445 \text{ cm}$  に変化したときの落下粒子群と底面近くでの濁りの拡がりの様子を示したものである。これより、 $d$  が大きくなるにつれて、thermal phase から swarm phase へと変化していく様子や底面近くでの濁りの拡がりが著しく異なってくる様子などが観察できる。各ケースでの  $z_{TL}^*$  の値は、 $d$  が小さい順に  $130$  ( $z_{TL} =$

270cm)、40(85cm)および15(35cm)となる。また、 $z_t$ と $h$ との比 $z_t/h$ はそれぞれ3、0.95および0.40であり、 $z_t$ とphaseの違いとの関係が的確に予測されていることがわかる。

図-7は、全投下量で除した粒子の堆積量を示したものである。これらより、swarm phaseでは落下粒子群は分散的挙動を取るため、これに対応して堆積形状は正規分布状になり、堆積量は投下点直下から離れるに従い、急激に減少することがわかる。thermal phaseからswarm phaseへ遷移した後に底面に到達するCASE U4-2では、thermal phaseでのthermalの発達とそこでの落下粒子濃度の均質化が図られるため、swarm phaseの状態では堆積するよりも、より広範囲に粒子が拡散・堆積する。thermal phaseで底面に衝突するCASE U2-2では、衝突時に形成される濁水密度流のため、粒子群が底面に沿って流動・拡散し、濁りの拡がり最大となる。また、thermalの衝突とその循環運動のために、投下点直下に堆積した粒子の巻上げが生じ、投下点直下よりもやや離れた地点で最大の堆積量となる。このように、有限な水深では $z_t$ と $h$ との大小関係によって、濁りの拡がりや粒子の堆積形状が大きく異なってくる。

#### 4. 結論

本研究より以下のような結論が得られた。

(1) thermal phaseからswarm phaseへの無次元遷移水深は $z_t^*$ は、粒子Reynolds数 $R_p$ が12以下では式(9)、それ以上では式(10)で与えられる。

(2) 遷移水深 $z_t$ と水域水深 $h$ の関係において、落下粒子群の底面衝突後の濁りの拡がり規定され、 $h < z_t$ の場合にはthermal phaseで底面に衝突するため、衝突時に発生する濁水流のため濁りの拡がりが大きくなる。従って、式(9)と式(10)は、与えられた投下条件と水域水深との関係において、濁りの拡がりの抑制や施工の効率化を図るための一つの目安となる。

今後は、投下条件および水域水深との関係において底面に沿う濁りの拡がりの程度について定量的に明らかにしたいと考えている。

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) 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。
- 3) 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。
- 4) 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅夫：改良型DEM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。
- 5) Li,C.W.:Convection of particle thermals, *J. Hydraulic Research*, Vol.35, No.3, pp.363-376,1997。
- 6) 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。
- 7) Ying,X., Akiyama,J. and Ura,M.: Motion of dense fluid released into quiescent water with finite depth,*J. of Hydraulic,Coastal and Environmental Engineering*, No.635/II-49,pp.141-152,1999。
- 8) 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。
- 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) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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、No.509, II-30,pp.143-154,1995。
- 14) 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。
- 15) Luketina,D. & wilkinson,D:The transition to the swarm phase for a particle cloud, *13th Australian Fluid Mech. Conference*,pp.195-198,1998.pp.
- 16) 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。
- 17) 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。
- 18) Baines, W.D & Hopfinger, E.J. : Thermals with large density difference, *Atmospheric Environment*, Vol. 18, No. 6,pp.1051-1057,1984。

(2002. 9. 30受付)