

直投粒子群の落下挙動と底面粒子の舞い上がりについて

九州工業大学工学部 正会員 秋山 壽一郎
九州工業大学大学院 学生員 ○飯田 英明、斎賀 仁
九州工業大学工学部 非会員 岡本 圭祐

1.はじめに

落下粒子群がthermal phaseの特性からずれを生じる点での水深と落下速度、底面に粒子が存在する場合とそうでない場合での直投粒子群による粒子の巻き上げ量、底面衝突後に水平流動する濁水流の挙動と粒子の堆積特性の違いなどについて調べた。

2.実験

静水中には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 $W_0(=c_0sgA_0)$ 、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)および水域の条件(水域の水の密度 ρ_a および粘性 μ 、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。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する。

実験装置は、長さ7.5m、深さ1.0m、幅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、水槽に貯留された水深 h の静水中に比重 $\sigma=2.45$ でほぼ一様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 で直投し、2次元落下粒子群を発生させた。

実験は、①水域水深を一定に保ち、投下粒子の粒径を様々に変化させたCASE A、②投下粒子の粒径を2通りに変化させ、それぞれの粒径について5通りの水深に変化させたCASE Bの2通りを行った。なお、CASE Aでは底面は固定床であるが、CASE Bでは図-1に示すように、投下点直下の底面にある幅で凹部を設け、そこに粒子を平らに充填した場合(以下では、これを「敷砂」と略称する)、および凹部を設けない固定床について実験を行った。

3.実験結果及び考察

図-2は、無次元粒子堆積量 W_d/W_0 と無次元距離 $x/A_0^{1/2}$ の関係である。これより次のことが見て取れる。

- ・底面衝突時の粒子群のスケールよりも遥か遠方まで堆積粒子は拡がり、拡がりの程度は無次元水深 $h/A_0^{1/2}$ の増加とともに大きくなる。
 - ・堆積形状は投下点から離れると相似的であるが、直下付近では $h/A_0^{1/2}$ で複雑に変化する。また、敷砂がある場合と固定床で、投下点直下近くでの堆積形状に違いが生じる場合があり、固定床で投下点からやや離れた地点で最大堆積量となるパターンとその逆のパターンとがある。
 - ・粒子粒径 $d=0.0088\text{cm}$ では、いずれの $h/A_0^{1/2}$ においても、敷砂がある場合と固定床で堆積形状の違いは少なく、堆積量の増加はほとんど認められない。
 - ・粒子粒径 $d=0.0044\text{cm}$ では、 $h/A_0^{1/2}$ が14以下では、敷砂がある場合と固定床で堆積形状の違いは少ないが、それ以上では堆積量の増加が認められる。
- このように、同じ投下量と同じ粒径粒子であっても、堆積形状や堆積量は水域水深の影響を強く受ける。

以上のような粒子の堆積特性は、粒子群の落下挙動および底面衝突後の粒子群の挙動に深く関係している。また、これらの粒子群の挙動は、図-2で見たように投下条件のみならず、水域水深の影響を強く受ける。そこで、以下では粒子サーマル理論に基づき、底面衝突後の粒子群の挙動を規定する条件について検討を加える。水域水深より遥かに深いところまでthermal phaseが維持されるような投下条件であっても、水深が有限な場合において粒子サーマルは底面に衝突する以前に式(3)で与えられるthermal phaseの特性からのずれを生じる。これは底面の存在のため、サーマルの循環運動が

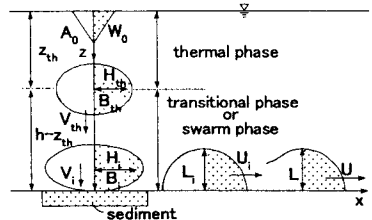


図-1 落下粒子群と底面衝突後の粒子群の挙動

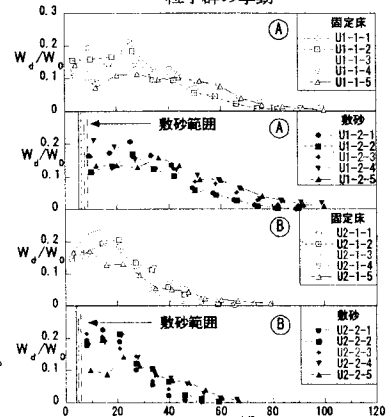


図-2 堆積粒子量 W_d の分布
(A: $R_p=0.06$, B: $R_p=0.53$)

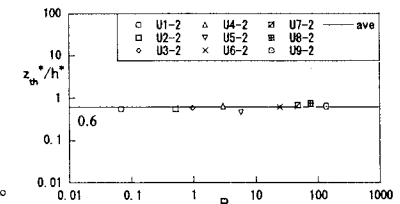


図-3 z_{th}/h^* と R_p との関係

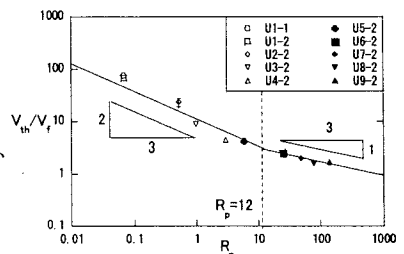


図-4 V_{th}/V_t と R_p との関係

弱められるためである。式(3)の関係から外れ始める無次元水深 z^* を z_{th}^* とし、そこでの速度比 V/V_f を V_{th}/V_f とする。

図-3は、 z_{th}^*/h^* と R_p との関係について調べたものである。ここで、 h^* =無次元水域水深($=h/A_0^{1/2}$)である。なお、CASE Aでは初期総有効重力 W_0 は様々に変えられており、CASE Bでは水域水深 h が5通りに変えられている。

これより、 z_{th}^*/h^* は幅広い W_0 と R_p および h について、 $z_{th}^*/h^* \approx 0.6$ の一定値を取ることがわかる。一方、 z_{th} での粒子群の落下速度を V_{th} とすると、図-4から明らかなように、 V_{th}/V_f は W_0 と h には依存しないが、 R_p に強く依存し、 $R_p \leq 12$ で $V_{th}/V_f \sim R_p^{-2/3}$ 、 $R_p > 12$ で $V_{th}/V_f \sim R_p^{-1/3}$ の関係があることがわかる。また、 z_{th}^*/z_T^* には図-5のような関係があり、 R_p が大きくなるにつれて、 $z_{th}^*/z_T^* \rightarrow 1.0$ となる。これは、個々の粒子の沈降速度が、 R_p の小さい領域では $V_f \approx \text{sgn}^2/18v$ 、 R_p が大きい領域では $V_f \approx (2\text{sgn}d/3)^{1/2}$ のような関係があり、 z_T^* には式(5)が成立するためである。

落下粒子群の衝突による数砂の巻き上げ率 β について検討を加える。 β を式(4)のように定義する。ここに、 P =巻き上げ量、 $H_{th}=z_{th}$ での粒子群の最大拡がり半径、 $t_p = z_{th}$ から底面まで距離 $(h-z_{th})$ を落下速度 V_{th} で落下するのに要する時間 $(=(h-z_{th})/V_{th})$ である。上述したように、 z_{th}^*/h^* は約0.6の一定値を取る。また、 H_{th} と V_{th} は、 z_{th}^*/h^* が与えられれば、式(1)と(3)で予測できる。なお、 P は図-2に示した粒子堆積量の分布で、数砂がある場合の全堆積量から固定床のそれを差引くことで推定した。

t_p は、底面衝突直前から衝突後に粒子の舞い上がりが最大となり、濁水塊としてスランピングを開始する直前までに要する時間 t_{pe} と密接な関係があると推察される。そこで、 t_p と画像解析から求めた t_{pe} との比 t_p/t_{pe} について検討した結果が、図-6である。図から明らかなように、 $R_p=8 \sim 20$ の間で傾向の違いが認められる。これは、先述したように、 $R_p=12$ を境にして V_f が変化し、 t_{pe} に影響を与えるためである。図から、幅広い W_0 と R_p および h について、 $R_p \leq 12$ で $t_p/t_{pe} \approx 3.0$ 、 $R_p > 12$ で $t_p/t_{pe} \approx 1.5$ のように、 t_p と t_{pe} の間には一定の関係が成立しており、巻き上げに要する時間スケールとして、 t_p を用いることができることがわかる。

図-7は、 $R_p=0.53$ と 0.06 での砂の巻き上げ率 β と無次元水深 $h/A_0^{1/2}$ との関係について調べたものである。CASE Bの投下条件では、 $R_p=0.53$ では全ての $h/A_0^{1/2}$ に対し、 $\beta=0$ となる。一方、 $R_p=0.06$ では、 $h/A_0^{1/2} \geq 16$ で $\beta > 0$ であり、 $\beta=3.8$ 程度であり、それ以外では $\beta=0$ であった。いまのところ β は定量的に評価できるデータ数とはなっていないが、 β が決まれば、上述した方法で P を算定することができる。これについては今後の課題である。

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

$$\beta = \frac{P}{H_{th} t_p V_{th}} \quad (4) \quad z_{TL}^* = \left(\frac{2}{3}\right)^{-2/3} \alpha^{-2} K_{3p}^2 \phi R_p^{-2/3} \text{ for } R_p > 12.0$$

4. 結論

有限な水域水深における直投粒子群の落下挙動、その衝突による砂の巻き上げが底面衝突後の濁りの拡がりについて及ぼす影響などについて検討を加えた。その結果、以下のような基礎的な知見を得た。

- (1) 堆積粒子は、底面衝突時の粒子群のスケールよりも遙か遠方で拡がる。この拡がりの程度は、同じ投下量と同じ粒径粒子であっても、堆積形状や堆積量は水域水深の影響を強く受ける。
- (2) 水深が有限な場合では粒子サーマルは底面に衝突する以前に、thermal phaseの特性からのずれを生じる。そこでの無次元水深 z_{th}^* は、幅広い範囲の投下量と粒子Reynolds数および水域水深について、 $z_{th}^*/h^* \approx 0.6$ の一定値を取る。また、 V_{th}/V_f は、 R_p には強く依存し、 $R_p \leq 12$ で $V_{th}/V_f \sim R_p^{-2/3}$ 、 $R_p > 12$ で $V_{th}/V_f \sim R_p^{-1/3}$ なる関係がある。
- (3) β が定まれば式(4)を用いて、数砂の巻き上げ量ある程度推定可能である。

参考文献：秋山壽一郎ら：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。

秋山壽一郎ら：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、2004

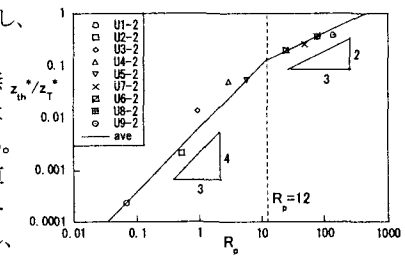


図-5 z_{th}^*/z_T^* と R_p との関係

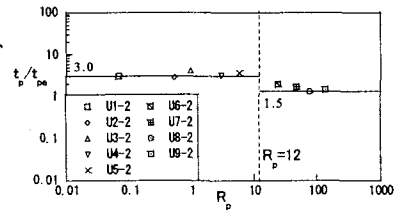


図-6 t_p/t_{pe} と R_p との関係

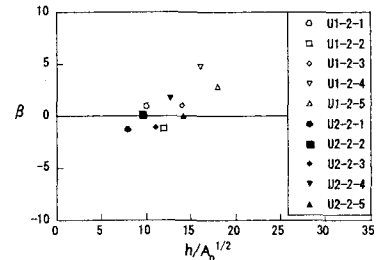


図-7 β と $h/A_0^{1/2}$ との関係