

静水中に直投された一様粒径粒子群の流動・拡散現象に関する研究

九州工業大学大学院 学生員 ○山下 直樹、非会員 佐藤 伸広
九州工業大学工学部 正 員 秋山 壽一郎

1. はじめに

人工島の建設などを目的とした土砂直投工では、大規模な汚濁が発生することが問題である。本研究は、粒子サーマルの落下形態における高濃度落下粒子群の流動特性について実験的に明らかにしたものである。s

2. 実験

実験装置は、長さ7.5m、深さ1.0m、幅0.1m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、静水中に初期単位幅総浮力 $W_0 (=c_0sgA_0)$ の粒子群を瞬間的に投入することにより落下粒子群を発生させた。ここで、 A_0 は初期単位幅体積、 g は重力加速度、 c_0 は初期体積濃度および s は粒子の水中比重である。粒子群の流動状況を CCD カメラで撮影し、高性能 VTR に収録された画像を解析し、落下速度 V および形状を求めた。また、軸方向距離 $z=0.2, 0.4$ および $0.6m$ の位置に電磁流速計を設置し、瞬間流速を測定した。観察結果に基づき、落下粒子群を図1のようにモデル化する。

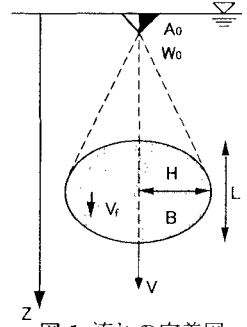


図1 流れの定義図

3. 実験結果

図2は粒子群の落下速度 V と個々の粒子の沈降速度 V_f との比 V/V_f と無次元落下距離 $z^* (=z/z_0)$ との関係を示したものである。ここで、 $z_0=A_0^{1/2}$ である。これより、粒子群の落下速度は個々の粒子の沈降速度よりも数倍から数10倍大きいことがわかる。

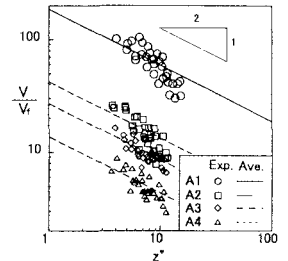


図2 無次元落下速度 V/V_f と無次元落下距離 z^* との関係

図3は、図2で $V/V_f=1.0$ となる値 $z_{1.0}^*$ と粒子 Reynolds 数 $R_p (=dV_f/\nu)$ との関係調べたものである。ここで、 d は粒子の中央粒径、 ν は水の動粘性係数である。粒子サーマル的な落下形態では式(3)の関係が成立し、 $V_0=(W_0^2/A_0)^{1/4}$ であることを考慮すると、 $V/V_f=[(W_0^2/A_0)^{1/4}/V_f]K_{sp}z^{*-1/2}$ なる関係が得られる。一方、本研究で用いた粒子粒径の範囲では近似的に $V_f \propto d^2$ なる関係が成立するので、 R_p は無次元表示した沈降速度を用いると、 $R_p=(\alpha sg \nu)^{-1/2}V_f^{3/2}$ のようになる。これより、後述するように今回の実験条件では K_{sp} は R_p に依存しないので、 $z_{1.0}^* \propto \beta R_p^{-4/3}$ なる関係が得られる。ここで、 α は粒子の沈降速度に関する無次元の定数、 $\beta=(\alpha sg \nu)^{-2/3}(W_0^2/A_0)^{1/2}(K_{sp})^2$ である。図3から、上述した関係が確かに成立しており、粒子サーマル的な落下形態と自由沈降的な落下形態との大まかな遷移条件は、 $z_{1.0}^* \approx 900R_p^{-4/3}$ のようになると考えられる。上述した関係によれば、一般的に β は投下粒子の性質と投下量に依存することになるが、粒子の性質は大きく変化するわけではなく、投下量も $(W_0^2/A_0)^{1/2} \propto A_0^{1/2}$ であるので A_0 の絶対量よりその影響は小さい。加えて、本実験では実験条件の範囲が比較的に狭いため、 β をほぼ一定値として表現することが可能となっていると考えられる。

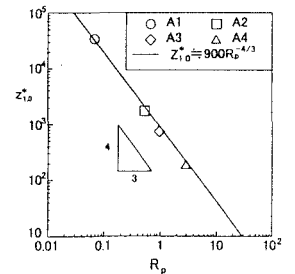


図3 遷移点 $z_{1.0}^*$ と粒子 Reynolds 数 R_p との関係

次に、落下粒子群の主要な流動特性量について検討する。投下条件 (A_0, W_0) で次元化した無次元最大層厚 H^* 、無次元平均浮力 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。ここで、 $V_0=(c_0sgW_0)^{1/4}, B_0=W_0/A_0$ である。単相の乱流サーマル理論¹⁾によると、式(1)~(3)のような関係が成立することが理論的にわ

かっており、係数 K_i は式(4)～(6)で与えられる。

$$H^* = K_1 z^* \quad (1) \quad ; \quad B^* = K_2 z^{*-2} \quad (2) \quad ; \quad V^* = K_3 z^{*-1/2} \quad (3)$$

$$K_1 = (S_1/S_2)\sqrt{FE_d}/2 \quad (4) \quad ; \quad K_2 = (F/S_1)/\left\{(S_1/S_2)\sqrt{FE_d}/2\right\}^2 \quad (5)$$

$$K_3 = \left[1/\left\{(3/4)(1+A_m)S_2(E_d/\sqrt{F})+C_d\right\}^{1/2}/\left\{(S_1/S_2)\sqrt{FE_d}/2\right\}^{1/2}\right] \quad (6)$$

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 =幾何学的平均長さと同周長との比、 E_d =連行係数(=q_e/CV)、 C =周囲長および q_e=連行係数である。

図4より、式(4)～(6)の関係が成立していることが確認できる。さらに、 K_{ip} は一般に R_p の関数と考えられるので²⁾、落下粒子群 K_i である K_{ip} と R_p との関係調べた図5より、 K_{ip} は同程度の粒径であっても今回のように投下量が多い場合には R_p の影響をほとんど受けず、 $K_{1p} \approx 0.65$ 、 $K_{2p} \approx 2.10$ 、 $K_{3p} \approx 0.82$ で近似できることがわかる。一方、単相サーマルの K_i は、 $K_1 = 0.50$ 、 $K_2 = 2.10$ 、 $K_3 = 0.90$ である。つまり、粒子サーマル的な落下形態における落下粒子群と単相サーマルの違いは、乱流サーマル理論では係数 K_i を介して現れる。

K_i 値にこのような違いが生じた要因を調べるために、落下粒子群から得られた式(4)～(6)中の各パラメータの値を用いて K_{ip} の検証を行う。上記の範囲の W_0 での単相サーマルの各パラメータの値は、 $F \approx 0.63$ 、 $S_1 \approx 0.79$ 、 $S_2 \approx 2.25$ 、 $E_d \approx 0.40$ であり、落下粒子群では $F_p \approx 0.67$ 、 $S_{1p} \approx 0.79$ 、 $S_{2p} \approx 2.32$ 、 $E_{dp} \approx 0.53$ である。これより、両者の違いは F と E_d が著しいことがわかる。さらに、これらの落下粒子群の値と単相サーマル理論との比較より得られた抵抗係数値 $C_d \approx 0.5$ を式(4)～(6)に代入して得られる係数を K_{ip}' と表示すると、 $K_{1p}' \approx 0.65$ 、 $K_{2p}' \approx 2.0$ 、 $K_{3p}' \approx 0.8$ となり、 K_{ip} とほぼ同様の値となる。以上より、粒子サーマルの係数も式(4)～(6)で与えられ、粒子サーマルと単相サーマルの F と E_d の値が異なることが、 K_i と K_{ip} の違いを生じていることが確認できる。

次に、粒子サーマル的な落下形態における落下粒子群の中心軸上の流速の時系列より得られた最大流速 v と最大流速前後の乱れ強度 $(v'^2)^{0.5}$ を落下粒子群の代表速度スケール V_0 で正規化した速度比 v/V_0 と $(v'^2)^{0.5}/V_0$ と z^* との関係について調べたものが図6である。これより、やや散らばりは認められるものの、粒子群の落下速度 V と同様に、いずれの流速比も z^* の $-1/2$ 乗に比例することが確認できる。さらに、いくつかの速度比について検討してみると、CASE B-1 で $(v'^2)^{0.5}/v \approx 0.060$ 、 $v/V \approx 2.8$ 、 $(v'^2)^{0.5}/V_f \approx 2.1$ 、CASE B-2 で $(v'^2)^{0.5}/v \approx 0.063$ 、 $v/V \approx 3.0$ 、 $(v'^2)^{0.5}/V_f \approx 1.8$ であり、いずれの速度比もほぼ同様の値となっている。以上の結果に基づくと、 $(v'^2)^{0.5}/V_f \approx 2.0$ 程度であれば十分な乱れが発生し、落下粒子群は乱流サーマルとして流動・拡散すると推察される。

4. 結論：本研究により以下のような結論が得られた。

- (1) 粒子サーマル的な落下形態における高濃度落下粒子群の挙動は、単相ブシネスクサーマル理論で記述できる。
- (2) サーマル的な落下形態から自由沈降的な落下形態への遷移条件は、 $z^*_{1,0} \approx 900R_p^{-4/3}$ で与えられる。
- (3) 限定された条件下ではあるが、 $(v'^2)^{0.5}/V_f \approx 2.0$ 程度であれば十分な乱れが発生し、粒子群は乱流サーマルとして落下する。

参考文献：(1) 秋山ら：水工学論文集、第42巻、1998。(2) Akiyama et al. : JHHE, Vol. 18, No. 2, 2000.

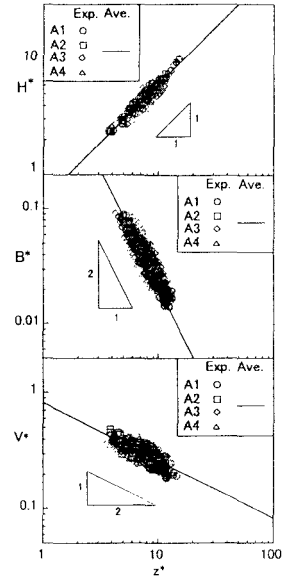


図4 無次元特性量 (H^* , B^* , V^*) と無次元落下距離 z^* との関係

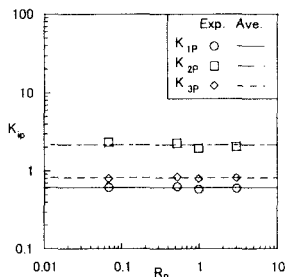


図5 サーマル理論の係数 K_{ip} と粒子 Reynolds 数 R_p との関係

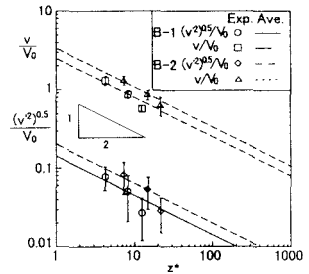


図6 速度比 v/V_0 、 $(v'^2)^{0.5}/V_0$ と無次元落下距離 z^* との関係