

II-52

浮遊粒子の飛高と飛距離に関する数値シミュレーション(第二報)

九州大学工学部 正会員 平野宗夫
九州大学工学部 正会員 大本昭憲
九州大学大学院 学生員 田中俊哉
九州大学工学部 学生員 内田誠二郎

1. まえがき

前報で、筆者らは主流方向に流れの卓越する二次元剪断乱流場に於いて、河床近傍から浮上する浮遊粒子の飛距離および飛高の分布特性量を Lagrange 的数値シミュレーションにより求めいくつかの知見を得た。しかしながら浮流砂運動の観察から浮上過程は、最近活発な研究の行なわれている乱れの組織的運動²⁾と関連づけて考えるのが妥当と考えられる。即ち、河床近傍で発生した低速流体塊の渦は上昇運動に伴って、発達・減衰・消滅という一連の過程を閉じ、これに呼応して浮流砂も浮上・流送過程を経て掃流へと移行する。本研究では、浮流砂の運動を明らかにするための第一段階として、浮上後の流送過程を Lagrange 的手法による数値シミュレーションを行ない、飛距離の確率分布およびその特性量についての計算値と実測値との比較検討を行なった。又、浮上過程については写真撮影を行ない若干の考察を試みた。

2. 実験装置およびその方法

実験に使用した開水路は、全長 5 m、幅 25 cm、高さ 20 cm のアクリライト製可変勾配水路である。水路底面は、中央粒径 $d_{50} = 3.4$ mm のほぼ均一な砂を敷き並べて粗面とし、流量、水深、勾配を組み合わせ、等流状態のもとで実験を行なった。浮遊粒子の飛距離の測定は、水路中央部の水面および水深に於いて、比重 1.05 のポリスチレン粒子を内径 3.5 mm のガラス管より投入し、サンプル数 200 個について各粒子が底面に到達するまでの距離を目視により読み取った。その際、粒子の投入速度はヘッドタンクの水位を調節して局所平均流速に等しくなるように設定した。次に、浮遊粒子の飛高およびそこに到るまでの距離は、固定床上に一個ずつ放たれたポリスチレン粒子を、水路側方にシャッターを解放状態にして設置された 35 mm カメラで撮影し、写真より測定を行なった。ポリスチレン粒子の沈降速度分布を図 1 に示す。

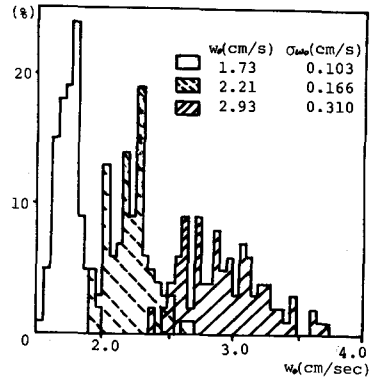


図-1 粒子の沈降速度分布

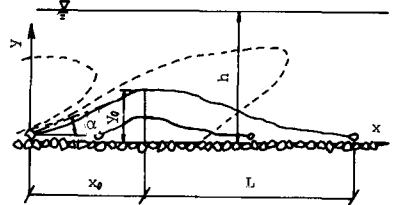


図-2 粒子運動の模式図

3. 数値シミュレーション

(1) シミュレーションの概要 河床近傍を掃流状態で流送していた粒子は、上昇運動を起した低速流体塊の渦に捕捉されて座標 x_0 まで輸送され、それ以降ランダムな運動を呈しながら平均的には下降運動を続けるものとする。シミュレーションは、座標 x_0 に於いてこの大規模渦運動から逸れた後の運動を追跡する。図 2 に於いて時刻 t_0 に座標 x_0 に位置した粒子の $t = t_0 + \Delta t$ 時間後の座標 x の各成分 $(X(x_0, t), Y(x_0, t))$ は次のように記述される。

$$X(x_0, t) = x_0 + \int_{t_0}^t u_p(x_0, t') dt', \quad Y(x_0, t) = y_0 + \int_{t_0}^t v_p(x_0, t') dt' \quad (1)$$

ステップ時間 $\Delta t = 0.01 u_* / \kappa$ として (1) 式を離散化すると、

$$X^{i+1} = X^i + L_x^i, \quad Y^{i+1} = Y^i + L_y^i \quad (2)$$

となる。ここに、 L_x^i, L_y^i は各々 Δt 時間での x 方向および y 方向の移動量であり、浮遊運動を一次マルコフ過程とすると次のようになる。

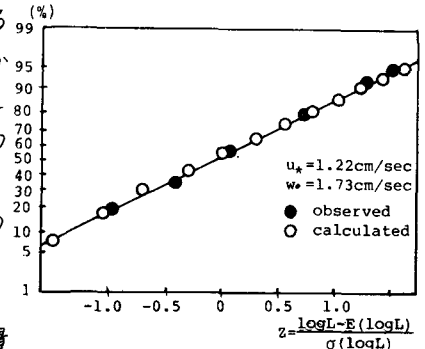


図-3 飛距離の確率分布

$$\dot{L}_x = \bar{L}_{x0} + \dot{L}_{x0} + \dot{L}_{x0}^{(i-1)} R_L(\Delta t), \quad \dot{L}_y = \bar{L}_{y0} + \dot{L}_{y0} + \dot{L}_{y0}^{(i-1)} R_L(\Delta t) \quad (3)$$

$$\text{但し, } \bar{L}_{x0} = \bar{u} \left[\frac{1}{2} (\bar{Y}^i + \bar{Y}^{i+1}) \right] \Delta t, \quad \dot{L}_{x0} = u' \left[\frac{1}{2} (\bar{Y}^i + \bar{Y}^{i+1}) \right] \Delta t \quad (4)$$

$$\bar{L}_{y0} = -w_0 \Delta t, \quad \dot{L}_{y0} = v' \left[\frac{1}{2} (\bar{Y}^i + \bar{Y}^{i+1}) \right] \Delta t$$

ここに、 $\bar{u}$ は局所平均流速、 u' 、 v' はEuler的乱れ速度、 w_0 は静水中に於ける終末沈降速度である。 R_L はLagrange的自己相関係数で指数分布を仮定する。又、二次元正規分布を仮定した遷移確率密度関数は、 $P(L_x)$ を事前確率、 $P(L_y|L_x)$ を事後確率として次式のように変換される。

$$P(L_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left[-\frac{(L_x - \bar{L}_x)^2}{2 \sigma_x^2} \right]$$

$$P(L_y|L_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-r^2)} \sigma_y} \exp \left[-\frac{1}{(1-r^2) \sigma_y^2} \left\{ L_y - \left(\bar{L}_y + r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (L_x - \bar{L}_x) \right) \right\}^2 \right] \quad (5)$$

ここに、 σ_x 、 σ_y は各々 L_x 、 L_y の標準偏差で $\sigma_x = \sqrt{u^2 \Delta t}$ 、 $\sigma_y = \sqrt{v^2 \Delta t}$ とする。 r は相互相関係数で次式より得られる。

$$r = - (1 - \gamma/h) \left(\frac{u_0 \Delta t}{\sigma_x \sigma_y} \right)^2 \quad (6)$$

シミュレーションの計算手順は、前報¹⁾と同様の方法に従っている。

(2) 計算結果と実験結果の考察 種々の水理条件下で、水面および1/2水深より計2000個の粒子を放出し各粒子が粘性底層に到達するまでの距離(ここでは、飛距離と称す)を数値計算した。図3は計算結果の一例であり飛距離の確率分布を正規確率紙にプロットしたもので、横軸には飛距離の常用対数を正規化して表示している。計算値と実測値とは比較的良く一致していることが窺え、両者とも投入位置が水面及び1/2水深のいずれに於いても飛距離の確率分布は対数正規分布であることが確認された。平均飛距離と平均流速との関係を図4に示す。横軸は局所平均流速を河床から投入高さまで積分して得られた平均流速を沈降速度で、縦軸は平均飛距離を投入高さで無次元化している。浮遊粒子への乱れの寄与が小さく比較的緩やかな流れでは、平均飛距離は $\bar{L} = \frac{\bar{u}}{w_0} y_0$ で表わされるが、本実験範囲では実測値はこの値および計算値を大きく上回っている。この原因としては、河床近傍での組織的乱れに関与していることが示唆され、シミュレーションでは浮遊粒子は上昇運動にある大規模渦運動に再び遭遇しないものと仮定しており、これを考慮したモデルの修正が必要と思われる。

4. 浮上過程の実験結果

上昇運動を起した粒子の最大高さ(飛高と称す) y_0 、起動点から最高点までの距離 x_0 そして上昇勾配 $\tan \alpha$ の各頻度分布を図5、図6および図7に示す。 x_0 、 y_0 、そして $\tan \alpha$ のいずれも図中の対数正規曲線と良好な一致を示していることがわかる。なお、平均飛高についてAbbot等による実験では $\frac{u_0}{w_0} = 3.13$ に於いて $\bar{y}_0/h = 0.43$ に対し、本実験では $\bar{y}_0/h = 0.39$ とほぼ近い値を示している。又、 $\bar{x}_0$ 、 $\bar{y}_0$ 、および $\tan \alpha$ は、 $u_0 = 4.22 \sim 4.83$ cm/sの範囲では沈降速度 $w_0 = 1.73$ cm/sと $w_0 = 2.21$ cm/sに顕著な差異は見られなかった。

参考文献 1) 平野, 大本, 田中 昭和38年4月

2) B.J. Cantwell Ann. Rev. Fluid Mech. 13 467 1981

3) M. Bayazit Jour. of Hydr. Research NO.1 1972 4) J.E. Abbot & J.R.D. Francis Phil. Trans. Soc. A285 225

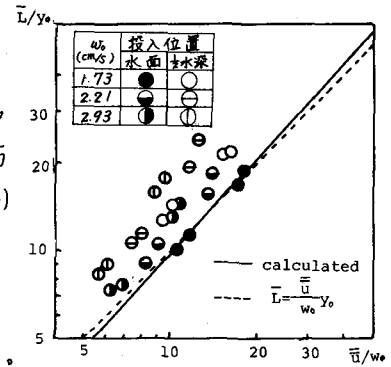


図-4 $\bar{L}/y_0$ と $\bar{u}/w_0$ との関係

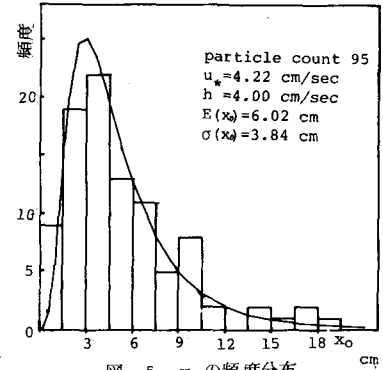


図-5 x_0 の頻度分布

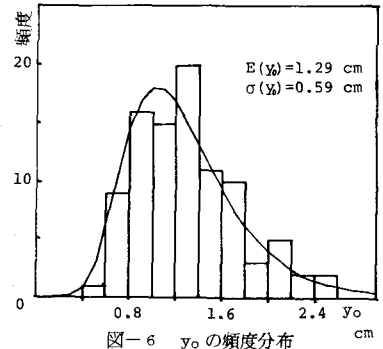


図-6 y_0 の頻度分布

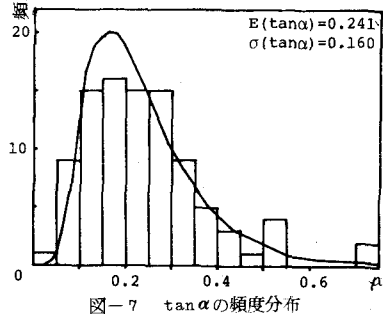


図-7 $\tan \alpha$ の頻度分布