

浮流砂の基礎的研究

九州大学工学部 正会員 大本照憲
九州大学工学部 学生員 田中俊哉
九州大学工学部 学生員 黒瀬智雄

1. まえがき

本研究は、主流方向に流れの卓越する二次元せん断乱流場に於ける浮流砂の挙動を Lagrange 的に追跡することにより、浮流砂の飛距離および飛高に関する分布特性を明らかにするために、浮流粒子の遷移確率が正規分布に従うものと仮定して模擬乱数を発生させ数値シミュレーションを行なったものである。

2. 数値シミュレーションの概要

河床上にある浮遊粒子が鉛直方向の外力を受け浮遊状態に移行した場合の運動に着目する。時刻 $t=0$ に (X_0, Y_0) に存在した粒子の $t=t$ 時間後の位置 $X(a, t), Y(a, t)$ は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} X(a, t) &= \int_0^t U_p(Y(a, t'), t') dt' \\ Y(a, t) &= \int_0^t V_p(Y(a, t'), t') dt' \end{aligned} \right\} \text{---(1)}$$

ここに、 U_p, V_p は浮遊粒子の Lagrange 的速度である。粒子の運動を模式化すると図-1 のようになり、式(1)を離散化して時刻 $t=i\tau$ に位置 (X^i, Y^i) に存在した粒子の t 時間後の位置 (X^{i+1}, Y^{i+1}) を表わすと

$$\left. \begin{aligned} X^{i+1} &= X^i + \int_{t^i}^{t^{i+1}} U_p dt' = X^i + L_x^i \\ Y^{i+1} &= Y^i + \int_{t^i}^{t^{i+1}} V_p dt' = Y^i + L_y^i \end{aligned} \right\} \text{---(2)}$$

となる。ここに、 L_x^i, L_y^i は各々 t 時間後の X 方向および Y 方向の浮遊粒子の移動量であり、ここでは次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} L_x^i &= \overline{L_{x0}^i} + L_{x0}^{i'} + (L_{x0}^{(i-1)} - L_{x0}^{i'}) R_L(\tau) \\ L_y^i &= \overline{L_{y0}^i} + L_{y0}^{i'} + (L_{y0}^{(i-1)} - L_{y0}^{i'}) R_L(\tau) \\ \overline{L_{x0}^i} &= \int_{t^i}^{t^{i+1}} \overline{u(Y)} dt' \quad \overline{L_{y0}^i} = -w_0 \cdot \tau \\ L_{x0}^{i'} &= \int_{t^i}^{t^{i+1}} u'(Y) dt' \quad L_{y0}^{i'} = \int_{t^i}^{t^{i+1}} v'(Y) dt' \end{aligned} \right\} \text{---(3)}$$

ここに、 $\overline{u(Y)}$ は局所平均流速、 u', v' は流体粒子の Euler 的乱れ、そして w_0 は終末沈降速度である。又、 $R_L(\tau)$ は Lagrange 的相関係数で次のような指数関数を仮定する。

$$R_L(\tau) = \exp(-\tau/\tau_L) \text{---(4)}$$

ここに、 τ_L は浮遊粒子の Lagrange 的タイムスケールであるが、浮遊粒子が乱れに十分追従しているものと考え、今本らの関係式

$$\tau_L = \begin{cases} 0.12 (y/h)^{1/3} (h/u_*') (\bar{u}/u_*') & 0.1 < y/h < 0.6 \\ 0.145 (y/h)^{2/3} (h/u_*') (\bar{u}/u_*') & 0.6 < y/h < 0.9 \end{cases} \text{---(5)}$$

より求める。次に、流体粒子の遷移確率 $\phi(L_{x0}^i, L_{y0}^i)$ は正規分布に従うものとして次のようにおく。

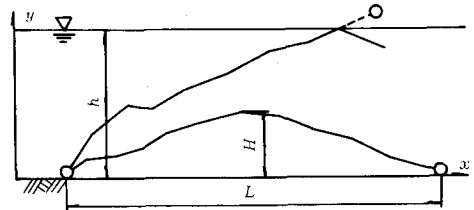


図-1 粒子運動の模式図

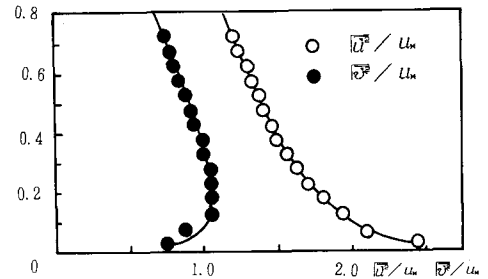


図-2 乱れ強度の深さ方向の分布²⁾

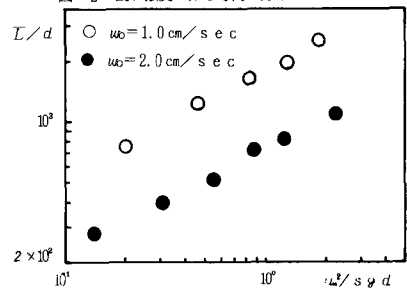


図-3 L/d の ω^2/sgd による変化

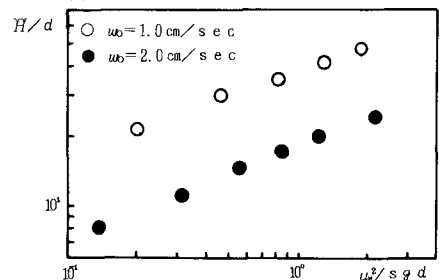


図-4 H/d の ω^2/sgd による変化

$$\Phi(L_{10}^i, L_{10}^i) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\frac{(L_{10}^i - \bar{L}_{10}^i)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(L_{10}^i - \bar{L}_{10}^i)^2}{\sigma_y^2}\right\}\right\} \dots (6)$$

ここに、 $\sigma_x = \sqrt{u^2} \tau$, $\sigma_y = \sqrt{v^2} \tau$ ($\tau < \tau_c$) である。

L_{10}^i, L_{10}^i は上式の下に計算機による模擬乱数を発生させて求め、ステップ時間では、 $\tau = 0.05 \text{ h}/u_*$ より求めた。なお、 $\sqrt{u^2}$, $\sqrt{v^2}$ は図-2に示すGrassの測定²⁾を用いている。次に境界条件として浮遊粒子が自由水面より上方に飛び出す場合には図-1に示すように一旦粒子を自由水面まで戻した後に浮遊を継続させる。

3. 計算結果とその考察

河床から500個の粒子を飛び出させ、各粒子について飛距離および飛高を求めた。計算に用いた粒子の沈降速度は $w_0 = 1.0$ および 2.0 cm/sec である。結果を図-3~9に示す。図-3および図-4は、各々横軸に無次元掃流力を取り、縦軸には平均飛距離および平均飛高を粒径で無次元化して表わしたものである。飛距離、飛高とも巾間散的に増大している。図-5は平均飛距離の平均飛高に対する比と無次元掃流力との関係を示したもので、Stationary saltation³⁾では無次元掃流力によらずこの比は一定の値を示すのに対して、浮流砂では無次元掃流力とともに増大する傾向を示している。図-6に飛距離および飛高の変動係数と無次元掃流力との関係を示した。飛距離についてはバラツキが大きく明らかなでないが、飛高に関しては無次元掃流力に関わらず $\text{VarH} \approx 1.0$ 程度の値となっている。図-7および図-8は、各々浮遊粒子の飛距離および飛高の頻度分布であり、非対称でかなり歪んだ分布形を示している。図-9は、跳躍した浮遊粒子の鉛直方向の存在確率分布について、 $y = 0.04 \text{ m}$ に於ける存在確率が正規化している。図中には、Rouse分布式、Lane-Kalinske分布式を併示しており、Rouse分布およびLane-Kalinske分布のそれに類似している。

4. むすび

以上、本研究では浮遊粒子の飛距離および飛高の分布特性並びに濃度分布についての数値シミュレーションを行なった。今後、これらの計算結果と実測値との比較を行ない、相関係数、Lagrange的タイムスケールに関する仮定の妥当性などについて検討する予定である。

参考文献 1) 今本浅野石垣今西 京大防災研年報 20B, 1977

2) A. J. Grass J. Fluid Mech. vol. 50 1971

3) 石原藤次郎編 水工水理学

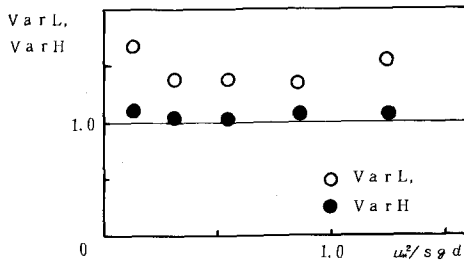


図-5 VarL, VarHと $u^2/s_g d$ との関係

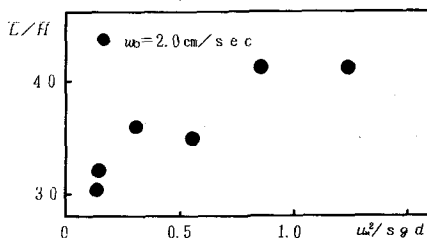


図-6 L/H と $u^2/s_g d$ との関係

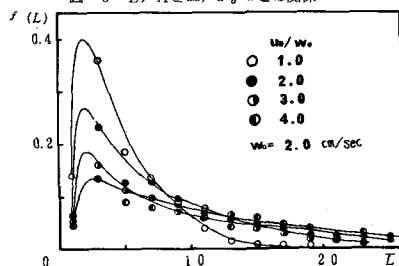


図-7 飛距離の頻度分布

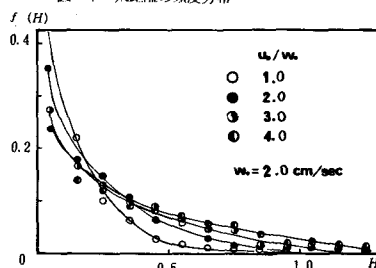


図-8 飛高の頻度分布

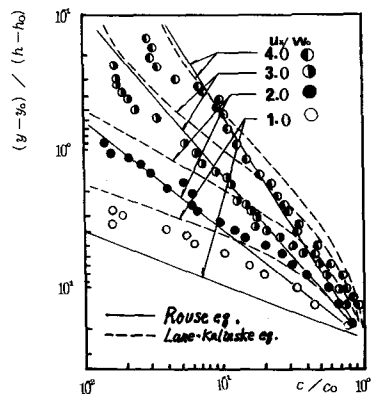


図-9 浮遊粒子の鉛直濃度分布