

九州大学 工学部 正 員 平野宗夫
清水建設 正 員 志岐 寛
九州大学 工学部 学生員 大本照恵

1. まえがき

浮流砂を取りあつかう手法としては、拡散方程式によるものと、確率論的手法に基づく手法の二つが考えられる。前者には、Rouse 分布や Lane-Kalnske 分布などがあり、後者には、砂粒子の深さ方向の不規則移動量が正規分布に従うものとしてシミュレーションによって濃度分布を求めた Yalin¹⁾の研究や、乱れ強度が深さ方向に一樣なものとし、粒子の速移確率に Laplace 分布を用いて解析的に求めた石川²⁾の研究などがある。本研究においては、まず流水中の粒子の軌跡を測定してその統計的性質を調べる。次に、Yalin の一次元濃度分布の手法を二次元に拡張して、流れ方向に濃度分布が変化する場合の計算式を導き、水路実験によりその適合性を検討する。

2. 実験装置および方法

実験水路は、長さ 5 m 幅 25 cm 深さ 20 cm の両面アクリライト製の可変勾配水路であり、底面には砂をはりつけている。また、上流には整流装置を備え、下流には可動ゼリを設けている。実験は等流状態で行ない、流速分布は小型プロペラ流速計により測定した。粒子の軌跡は、比重 1.06、粒径 1.2 mm のポリスチレン粒子を上流より投入し側面から 16 mm カメラにより撮影した。粒子の軌跡を模式的に表わすと図 1 のようである。撮影したフィルム上で粒子の移動量 ξ を時間間隔 $\Delta t = 1/32 \text{ sec}$ で測定し、これを平均移動量 $\bar{\xi}$ 、標準偏差 σ_ξ 、 σ_η 、 ξ と η の相関係数 r を水深 10 層に分け各層ごとに求めた。次に、二次元濃度分布を検討するために上流端より 90 cm の位置に Line Source を設け、パール・フレイの濁水を一定量供給し続け、Line Source から 60, 160, 260 cm 下流の 3 点でサイフォン式採水装置を用いて濃度分布を測定した。

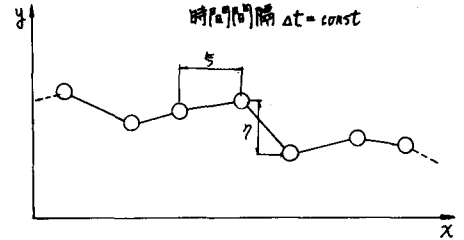


図-1 粒子の軌跡

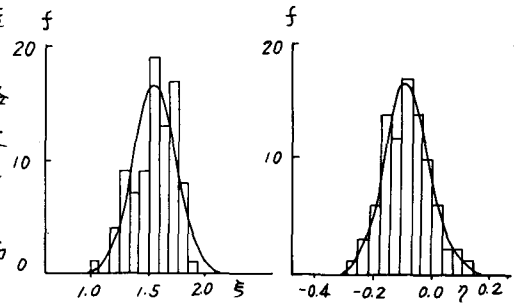


図-2 ξ, η の頻度分布

3. 実験結果および考察

図 2 は、 ξ および η のヒストグラムである。実線は粒子の平均移動量 $\bar{\xi}$ 、 $\bar{\eta}$ および標準偏差 σ_ξ 、 σ_η を用いた正規曲線であり、河床と水面近傍を除いてはほぼ正規分布で近似できることが実験的に確かめられた。図 3 および図 4 はそれぞれ σ_ξ 、 σ_η の y 方向の分布である。図中の実線は Raul³⁾によって行われた Hot Film 流速計による乱れ強度の測定結果であり、バラツキは大きいがほぼ同程度の乱れであることがわかる。次に、図 5 は時間間隔 Δt を変えた場合の σ_ξ および σ_η を示したものである。 $\Delta t \leq 5/32 \text{ sec}$ の範囲では σ_ξ 、 σ_η は Δt と Linear に変化している。

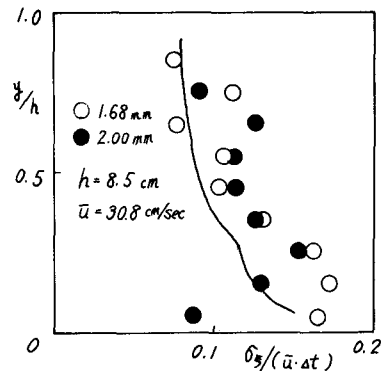


図-3 σ_ξ の深さ方向の分布

4. 二次元確率モデル

粒子の移動量 ξ, η を確率変数とする遷移確率は正規分布に従うものとし、次のように表わす。

$$\phi(\xi, \eta) = \frac{1}{2\pi\sigma_\xi\sigma_\eta\sqrt{1-r^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-r^2)}\left\{\frac{(\xi-\bar{\xi})^2}{\sigma_\xi^2} - \frac{2r(\xi-\bar{\xi})(\eta-\bar{\eta})}{\sigma_\xi\sigma_\eta} + \frac{(\eta-\bar{\eta})^2}{\sigma_\eta^2}\right\}\right] \quad (1)$$

粒子が任意時刻 t に座標 $(x-\xi, y-\eta)$ に存在する確率を $f(x-\xi, y-\eta)$ とすると、ステップ時間 Δt に座標 (x, y) に存在する確率は次式で表わされる。

$$f(x, y; t+\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-\xi, y-\eta; t) \phi(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (2)$$

定常な状態に達すれば

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-\xi, y-\eta) \phi(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (3)$$

と表わされる。これを離散表示すると次のようになる。

$$f(x, y) = \sum_{n_x} \sum_{n_y} f(x-n_x\Delta x, y-n_y\Delta y) \phi(n_x\Delta x, n_y\Delta y) \Delta x \Delta y \quad (4)$$

ここに、 $\Delta x, \Delta y$ は下流領域をセグメントに分割したときのセグメントの幅および高さである。図6は、実験と同一条件の下に行なった濃度のシミュレーション結果と実験結果である。図からわかるように実験による方が下方へ早く拡散している。これは y 方向標準偏差 σ_y を過小に評価したこと、河床および水面近傍の遷移確率が正規分布と仮定したこと、さらに境界条件の与え方等が影響しているのではないかと考えられる。なお、シミュレーションには、 $\bar{\xi} = u\Delta t, \bar{\eta} = w\Delta t$ (w は沈降速度)とし、 ξ と η の相関係数 r は次式で与えられる。

$$r = -\left(1 - \frac{y}{h}\right) \frac{u^2}{\sqrt{u^2 + \sqrt{v^2}} \sqrt{v^2}} \quad (5)$$

ここでは、 x 方向および y 方向の乱れの強さ $\sqrt{u^2}, \sqrt{v^2}$ の代わりにそれぞれ σ_u, σ_v を用いた。

5. おまけ

本研究では、粒子の遷移確率を正規分布で近似できることを実験的に確かめ、そのパラメータを詳細に調べた。そしてYalinの一次元確率モデルを二次元に拡張したモデルを用いて濃度分布を求めた。河床および水面近傍での遷移確率や境界条件については今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- (1) Yalin, M.S and Krishnapan, B.M; A Probabilistic Method for Determining the Distribution of Suspended Solids in Open channel. Int Symp. on River Mech. Sedi. Trans. Proc. Vol 1 1973
- (2) 吉川秀雄・石川忠晴; 流砂運動のモデル化とそれに基づく流砂量の算定法について. 土木学会論文集第267号 1978年1月
- (3) Raul, S.M and Richardson, E.M; Some Turbulence Measurements in Open Channel Flow. Proc. ASCE 1969 Hy. January

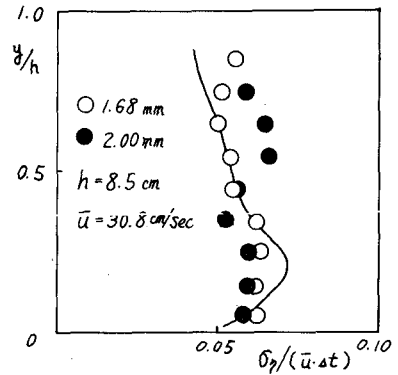


図-4 σ_y の深さ方向の分布

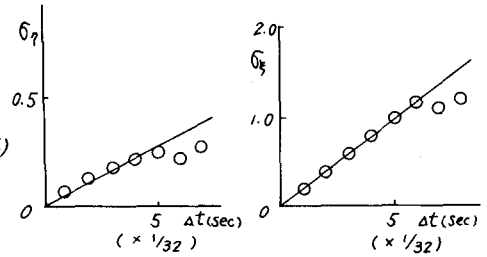


図-5 σ_y, σ_x と Δt の関係

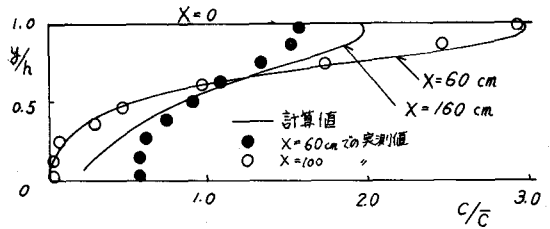


図-6 実測値と計算値の比較