

礫床河道における浮遊砂輸送の基礎的研究

The basic study of suspended sediment transport on rib beds

北海道大学大学院 ○学生員 守屋 敦志 (Atsushi Moriya)
 北海道大学大学院 フェロー 黒木 幹男 (Mikio Kuroki)

1. はじめに

山地斜面から生産された土砂は、溪流に入り、河道を経由し海へ輸送される。大規模な洪水時には、多量な降雨とともに土砂も河川に流入する。河道においても、上流からの流出土砂の堆積、溪岸侵食、乱流等は周辺集落へ影響を及ぼし、さらに下流河道への土砂流出は、河床の上昇をもたらして水位を上昇させて洪水、氾濫等の災害を発生させている。このような災害を防止するためにも、生産から輸送、堆積という土砂輸送の解明が不可欠である。本研究では、礫床河道上を浮遊砂が流下する際に発生する、非平衡浮遊砂輸送の解明を目的とし、山地河川部における礫床河道を想定した実験水路において、濃度分布と、それと密接に関連する流速分布を測定し、数値計算との比較を行った。

2. 実験方法

実験に使用した水路は、幅 30cm、長さ 15m の可変勾配水路(写真-1)で、河床には平均短軸約 1cm の玉石を高さ 2cm に渡って敷き詰め、水路上流端の給砂装置から、粒径 0.23mm の細砂を毎秒 1.58cm³ 供給し、浮遊砂の濃度分布および、流速分布の測定を行った。濃度分布の測定は給砂地点から、4m、4.5m、5m、6m、8m の計 5 ヶ所で円管を設置し、サイフォン方式で採水した。用いた円管は外径 7mm、内径 6mm の銅製で、水深方向には、中心間隔 1cm ごとに採水を行った。採水後、水と砂の全体積 V_t と砂粒子の乾燥重量 W_s を測定し、濃度を求めた。実験条件を表-1 に示す。また流速分布の測定は、直径 1.2mm のプロペラ流速計を用いて行った。

3. 流速分布

板倉・岸らによると浮遊砂を含む流れの流速分布は粗面においては

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{y}{k_s} + \phi_1 \frac{y}{k_s} \right) \quad \frac{u_* k_s}{\nu} > 70 \dots ①$$

$$\phi_1 = \alpha \frac{k_s}{L} \dots ②$$

α : Monin-Obukhov 係数で $\alpha=7$ である。式中の L は

$$\frac{1}{L} = \frac{\kappa \cdot g \cdot s \cdot w_0 \cdot \bar{c}}{u_*^3} \dots ③$$

と表される。 k_s : 相当粗度, $\alpha=7$, $\kappa=0.4$ と定義され、浮遊砂流のエネルギー散逸を表す特性長を表すモニン・オブコフ長さ(Monin-Obukhov length)と呼ばれる。ここに、 $\bar{c}$: 浮遊砂の断面平均濃度、 s : 河床砂粒の水中比重。と表される。今回 $\bar{c}$ は全断面に渡っての断面平均濃度清水流

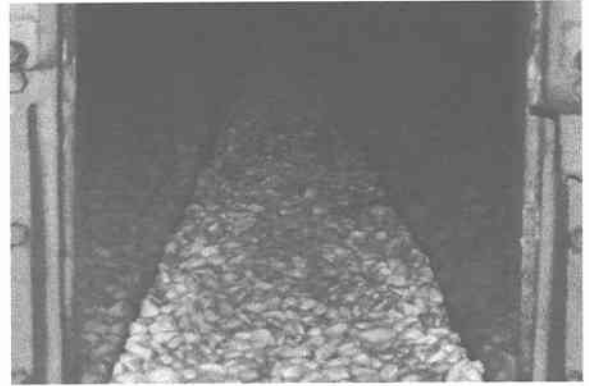


写真-1 実験水路

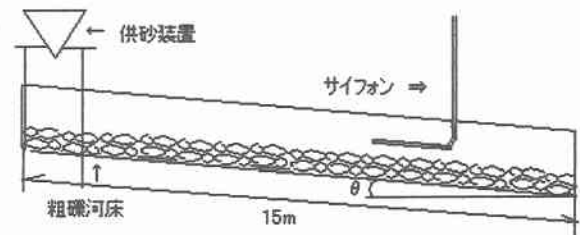


図-1 水路の模式図

	Q (l/s)	u_* (m/s)	k_s	I
実験 I	15.4	0.100	1.17	1/50
実験 II	19.6	0.132	1.12	1/50

表-1 実験条件

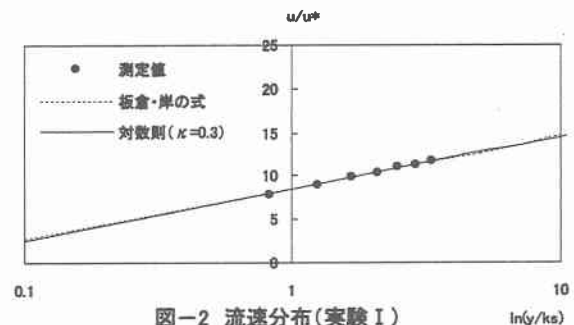


図-2 流速分布(実験 I)

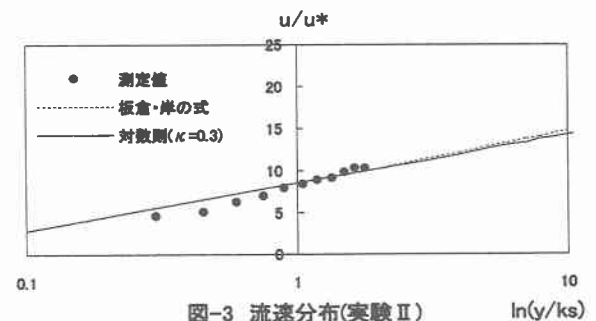


図-3 流速分布(実験 II)

では $c=0$ 、 $L=\infty$ となるので

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{y}{k_s} \right) \quad \frac{u_* k_s}{\nu} > 70 \dots ④$$

となる。浮遊砂を含む流れでは上式の流速分布式の傾き ($\kappa=0.4$) が浮遊砂の効果により、 $\kappa < 0.4$ となる。

相当粗度 k_s は

$$\frac{u_m}{u_*} = 6.0 + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{R}{k_s} \right) \dots ⑤$$

から求める。

4. 浮遊砂濃度分布

基礎式は浮遊砂の 2 次元拡散方程式と水面、河床および、上流端での境界条件からなる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(Cu) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \dots ⑥$$

$$w_0 C + \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \dots ⑦$$

$$\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = -k \cdot w_0 C_E \dots ⑧$$

$$C(z) = C_0 \dots ⑨$$

C : 濃度、 u : 主流方向の流速、 ε_s : 拡散係数 ($\varepsilon_s = \beta \varepsilon_m$)、 ε_m : 流れの渦動粘性係数、 β : 比例定数、 w_0 : 浮遊砂の沈降速度、 C_0 : 上流端での浮遊砂の濃度、 x , z : 主流方向、水深方向の座標、 C_E : 平衡底面濃度、 k : 河床から浮遊砂が巻き上がる割合 (pick-up rate)。ここで k 値はまず、 $k=0$ (巻上げがない場合) と、 $k=1$ (河床が細砂で覆われている場合) を仮定して、実験 I の条件において、実験値と計算値の比較を行った。図-3、図-4 からどちらも実験値とは一致しない。 $k=0.6$ 程度でおおよそ一致する。また w_0 は Rubey の式から算定した。板倉・岸らによると浮遊砂の渦動粘性係数 ε_m は

$$\varepsilon_m = \kappa \cdot u_* \cdot z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \left(1 + \alpha \frac{z}{L} \right)^{-1} \dots ⑩$$

次に平衡底面濃度 C_E は、板倉・岸の基準面濃度 C_b に等しいものとし、次式から求める。

$$C_b = K \left\{ \alpha_* \frac{1}{\tau_*} \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \cdot \frac{u_*}{w_0} \Omega - 1 \right\} \dots ⑪$$

$$\Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \cdot \frac{\int_0^\infty \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{B_* \eta_0}{\tau_*} - 1 \dots ⑫$$

$$\alpha = \frac{B_*}{\tau_*} - \frac{1}{\eta_0} \dots ⑬$$

$$\eta_0=0.5, B_*=0.143, \alpha_*=0.14, K=0.008, b=0.05h$$

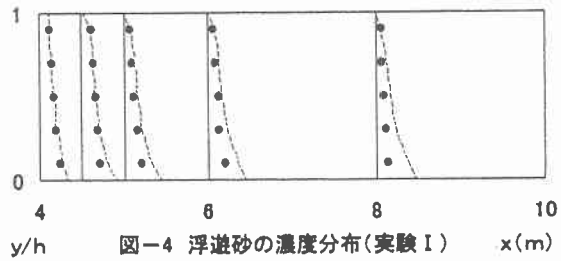


図-4 浮遊砂の濃度分布(実験 I)

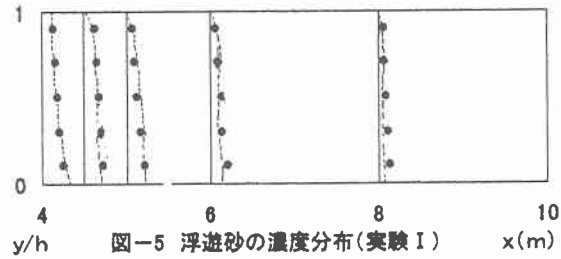


図-5 浮遊砂の濃度分布(実験 I)

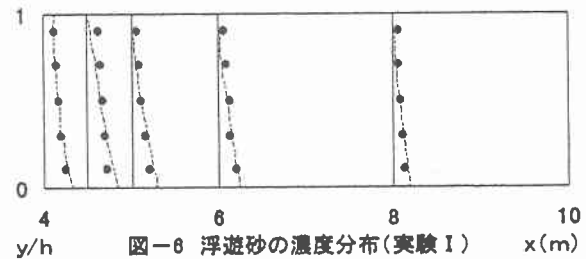


図-6 浮遊砂の濃度分布(実験 I)

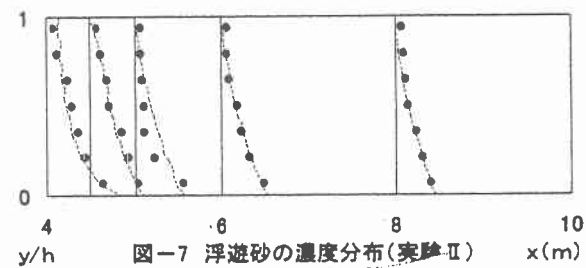


図-7 浮遊砂の濃度分布(実験 II)

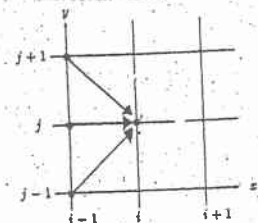


図-8 差分スキーム

5. 実験値と解析値の比較

まず実験 I と II の濃度分布についての比較をすると、Iの方が濃度分布の減少が、実験、数値計算ともに早くなっている。これは相対水深が小さいため u_* が小さく、 C_E が小さくなるためと考えられる。計算結果では上流から流下した浮遊砂が非平衡状態から平衡状態になる過程が再現されている。河床での境界条件式に含まれる k 値は、実験 I・IIともに、0.6 程度で実験値との整合が良い。また板倉らの流速分布式は、今回の実験のように低濃度での浮遊砂流についても、カルマン定数 κ を変化させずとも、適切な流速分布を表現することができる。

参考文献) 板倉忠興: 河川における乱流拡散現象に関する研究、北海道開発局土木試験所報告、第 83 号、1984