

II-279

急勾配で相対水深が小さい場での流砂特性

立命館大学 正員 ○大同淳之 パシフィックコンサルタンツ 正員 松田浩一

1. はじめに 急勾配河道では、粒径の1～2倍程度の水深で流砂現象が生じている。したがって、相対水深 h/d が大きい水路実験での流砂量とは異なったものがあるのではないかと考え、 h/d が小さい範囲の流砂現象を測定し、 h/d の大きい領域の流砂量との比較を行った。

2. 実験による考察

2-1 実験の範囲 実験に用いた砂の粒径および水理条件の範囲は、表1に示す。砂の移動を、集団粒子によるトレーサー法と1個の粒子のトレーサー法によって測定した。

2-2 Pickup Rate および Step Length に表れる特性

rest period、step length が独立で、それぞれの場が均質なとき、いずれも指数分布で、 λ_1, λ_2 の二つのパラメータで表されるとされている¹⁾。しかし、この実験では残留確率は指数分布であるとしても、平均移動距離、標準偏差は2変数では矛盾が生じた。そこで、平均移動距離、標準偏差についてはガンマ分布であるとしてパラメータを定める。ガンマ分布のパラメータは次のように表される。

$$\text{残留確率 } f(t) = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (1)$$

$$\text{平均移動距離 } \bar{x} = \int_0^x x \cdot f_1(x) dx = \lambda_2 t r / \lambda_1 \quad (2)$$

$$\text{標準偏差 } \sigma^2 = (\lambda_2 t / \lambda_1^2) r(r+1) \quad (3)$$

$$\text{平均移動速度 } d\bar{x}/dt = \lambda_2 r / \lambda_1 = (\lambda_2 / \lambda_1^2) t \{r(r+1)\} \quad (4)$$

上式の表現を用いるとき、pickup rate は λ_2 で、平均 step length は、 $r/(\lambda_1 d)$ で表される。これらを h/d の大きい、緩勾配と実験値との比較を図1、図2に示す。step length は緩勾配での実験と変わらず $r/(\lambda_1 d) = 100$ とみなせるが、pickup rate については、 h/d の大きい緩勾配の流れに対して同じ τ_* において10～50%小さくなっている。

2-3 均一粒径の場合の流砂量式

流砂量を、(移動距離)×(移動速度)で表す。

$$q_B = \left\{ 1 / (k_1 d^2) \right\} k_2 d^3 (\lambda_2 r / \lambda_1) = (k_2 / k_1) d (\lambda_2 r / \lambda_1) \quad (5)$$

$$q_B / (u_* d) = (k_2 / k_1) (1 / u_*) (\lambda_2 r / \lambda_1) \quad (6)$$

ここに、 k_1 は1個の砂の占有面積係数、 k_2 は砂の体積係数である。実験から $k_2 / k_1 = 0.4$ とみなされた。他の実験結果との比較のため、有効摩擦速度（底面摩擦に消費される流体力として、 τ_{*c} を差し引いた。）で表した結果を図3に示す。 h/d の小さい時は流砂量が少なくなっている。

3. 急勾配で h/d が小さいときに pickup rate におよぼす要素とその大きさ

Pickup rate に関係する外力は、砂に作用する平均流とその乱れである。乱れは大きな平均流に支配されるので、砂の高さでの平均流の変化を求めればよい。

表1 実験の範囲

d_m cm	I	h/d	τ_*
1.35	0.050～0.045	2.15～2.67	0.065～0.078
0.85	0.050～0.022	2.02～6.59	0.052～0.123
0.60	0.041～0.032	3.50～5.42	0.083～0.129

$$\sigma/\rho = 2.65$$

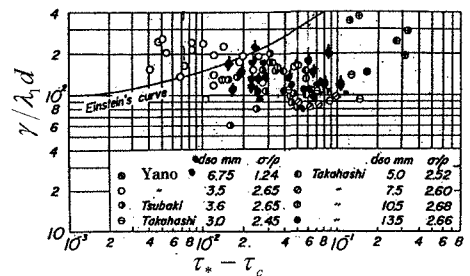


図1 step length の比較

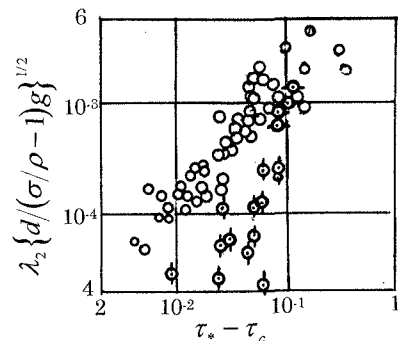


図2 pick up rate の比較

3-1 底面付近の流速の減少量

従来より流砂のある流れでは、底面付近で流速が一様化することが指摘されている^{2) 3)}。また、流砂のない流れでも F_s 数が増すほど抵抗係数が増加することが指摘されている。ここで扱う現象は、この2つのことが重なった場合といえる。前者の現象を説明するためには、砂が移動している高さの面に流れの運動量の差が砂の輸送によって生じることが説明できればよい。

roughness sublayer 内においては、床面上に突起して移動中の礫または突起物があるとき、そのまわりで上昇または下降する流れが生じていると考える。高さ z の水平方向単位面積当たり1個の石、または1個の突起による上昇する質量と下降する質量の差を $\rho q'$ とする。この場合の q' は主流の速度勾配および礫の遮蔽面積が大きいほど大きいと考えられるので $q' \propto cd^2(du/dz)$ 、 c は係数で石の面積に関する項である。単一面積当たり J 個の石の突起があるとき、河床から z の高さに生じるせん断力は、その点の流速を u とすると、

$$\tau \propto \rho J q' u \propto \rho J c u d u / dz \quad (7) \quad \text{となる。roughness sublayer}$$

内では乱れによる応力に礫または突起の存在による応力が付加されると考えると、 $\tau = \rho l^2 (du/dz)^2 + \rho \beta u (du/dz)$ 、 $\beta = Jc$ (8)

となる。この式を解くと、⁴⁾

$$\begin{aligned} u/u_* = (1/\kappa) \ln \left\{ (z/k_s) \left(1 + \sqrt{1 + F_s / \left\{ \kappa (z/k_s) \right\}} \right) + F_s / 2\kappa \right\} \\ + 2F_s / \left\{ \kappa^2 (z/k_s) \left(1 + F_s / \kappa (z/k_s) \right) \right\} + \left(\sqrt{2/2} \right) \sqrt{F_s / \kappa^3} \left(1 / \sqrt{z/k_s} \right) \\ + 1/\kappa \ln \kappa + C_2 \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $F_s = \beta / 2\kappa k_s$ で砂の作用を表す。式(11)は $F_s = 0$ のとき、当然のことながら次式になる。

$$u/u_* = (1/\kappa) \ln(z/k_s) + C_2 \quad (10) \quad C_2 \text{ は流砂がないときでも}$$

Fr 数の増加によって小さくなる。その大きさは岩垣によって示されている。式(11)の右辺第二項、第三項を左辺に移項し、この左辺と第一項の $\{ \}$ で括られた量の対数の間には $1/\kappa$ の勾配の直線関係が成立することになる。

β は単位面積中の突起している砂礫の個数 $J \times C \times 1$ 個の砂礫の遮蔽面積であるから $C = 1/4$ とし、 J は水路の上および横から移動中の砂礫を写真に撮り、単位面積当たりの個数から求めた。式(9)と実験値の比較を図4に示す。同じ水理条件で F_s が異なるのは、この考え方の適否を探るため砂礫の数を調節したためである。図4の滑面上に砂を流して実験したので、式(9)を $u_* z / \nu$ で表示している。この整理法によると砂礫の転動の影響のある範囲の流速が、影響の及ばない範囲を含めて片対数紙上 $1/\kappa$ の勾配を持つ直線関係で示される。そうして κ の値はいずれも0.4の値が成立する。この方法で流砂量に対応した礫の個数を決めれば、その時の流速分布が得られる。roughness sublayer 内で式(9)と式(10)の差が砂の流動による流速の減少になる。これが pickup rate が減少する理由である。4. 結び 急勾配で h/d が小さい場では、 h/d の流れの大きい流れに比して、pickup rate が小さくなる。この原因である流速の低下量を式(9)で表されることを述べた。

(参考文献) 1) 矢野ら: 京都大防災研年報, 第11号B, 1968 2) 岩垣: 応用水理学中(1), 丸善, 昭35 3) 中川ら: 土木学会論文集, 第423号, pp. 73-81, 1990 4) 大同: 水理講演会, vol. 27, 1983

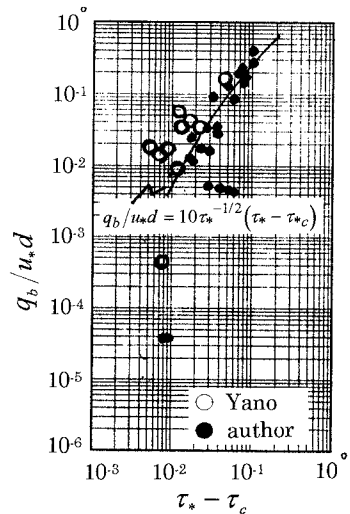


図3 流砂量の比較

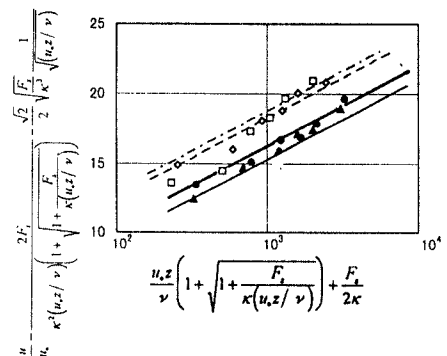


図4 流砂のある時の流速分布