

急こう配水路における掃流砂量

Bed load in steep channel

立命館大学理工学部 大同 淳之

1. はしがき

山地河川では、i)河床こう配が急であるため、流砂過程に緩こう配でのそれとは違ったものがあるのではないか、ii)河床材料の粒径分布の範囲が広いのに対し、水深は砂れき径とほぼ同じで、掃流力は限界掃流力を少し上廻る程度であるため、選別篩分けになりやすい、等の問題がある。

もちろんこれらの問題はすでに取上げられ、すぐれた成果があげられているが、粒径の範囲が広くて、限界掃流力付近の測定が少ないようである。限界掃流力の近くの流砂量式を、 τ_* で図示すると、 τ_* 軸に鉛直に示され、 τ_* のわずかな変化が流砂量に大きな変化を与える。本文は、粒径の範囲の広い砂れきを対象に限界掃流力をそれほど上廻らない領域で、できる限り急こう配を対象にして、流砂量の測定をした。そうして流砂量 q_B を、 $q_B = \text{移動層内の砂れき容積} \times \text{砂れきの平均移動速度}$ 、と表したとき、従来、両者が包括して取扱われているのを、平均移動速度、砂れき容積を個別に分けて、それぞれがどのような関係で表されるかを検討した。

その結果、平均移動速度が u_*^3 に、また砂れき容積は粒径に比例するとして、結果として従来から導かれている $\tau_*^{3/2}$ に比例することになり、係数も従来用いられている係数に近いことを示す。またこの流速係数の小さくなる原因として、砂れきを伴う流れの流速を、流砂量の関数として表現する。

最後に、混合砂れきの流砂量の測定結果を示し、全面流動の場合と選別流動が行なわれるときを比較すると、後者の場合については、 $d_i/d_m < 1$ については、しゃへい係数をより小さく取る必要があることを示すつもりである。

2. 急こう配水路の掃流砂量

ii) 急こう配水路における掃流砂量の測定

副0.3 m、長さ12 mの水路を用いて掃流砂量の測定を行なった。一部の実験においては掃流砂量の測定と平行して、水路床の砂れきと同じ粒径の着色砂れきを水路床表面におき、着色砂れきの流下方向の移動分布および原点に残留している個数を測定した。

実験は、河床形態が transition または flat bed に属する領域で行なった。この実験で観察された砂れきの移動状態は、いわゆる転動、跳躍の状態である。砂れきの運動は stochastic であるから、それに適応した力学的取扱が必要であるが、結果的には、従来より提案され

ている $q_B = \alpha \tau_* u_*$

の形で表されるであろう。

i) 急こう配における掃流砂量の従来の研究

水山²⁾は、芦田、道上式³⁾

$$\phi = \frac{\beta}{\mu_1} \tau_{*c}^2 (1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}) (1 - \frac{u_{*c}}{u_*}) \quad (1)$$

の急こう配への適用をはかり、次のように表現した。

$$\phi = \frac{12 - 24\sqrt{1}}{\cos \theta} \tau_*^{(1.5 - \sqrt{1})} (1 - \alpha^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}) (1 - \alpha \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}) \quad (2)$$

ここに $\phi = q_B / \{(\sigma/\rho - 1)gd^3\}^{1/2}$ 、 $\tau_* = u_*^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd\}$

u_* = まさつ速度で、添字 e はそれぞれ有効せん断力、c は限

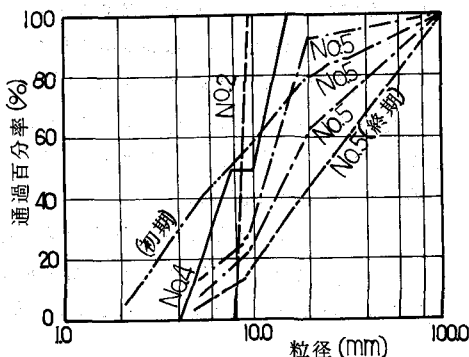


図1 実験に用いた砂れきの粒度分布

界時のそれを示す。式(2)の α は、水山によって導入された移動限界掃流力と停止限界掃流力との比である。

いずれの式も係数 β は、砂れきに作用する流速 u_b を $u_b = \beta u_*$ と表したときの流速係数で、芦田、道上式では、8.5、水山は緩こう配については、流れの基面をれき表面より0.25d下方にとっていることから、れき表面の流速をみたす β として、 $\beta = 5.03$ を用い、急こう配($i > 0.02$)に対しては実験値から、

$$\beta = (5 - 10\sqrt{i}) \tau_*^{-\sqrt{i}} \quad (3)$$

を提案している。

iii) 実験結果に対する考察

測定値を芦田、道上式のパラメーターに従って表示すると図2をうる。測定結果は対数表示で、45°のこう配上に表示される。基本的に上式の考え方が妥当であることを示している。図の傾

斜は、式(1)に従うと、 β/μ_f に相当する。

限界掃流力は、一様砂れきについては、芦田ら¹⁾の研究結果にしたがって h/d の影響を考慮し、混合砂れきでは、水山の研究にしたがって $d_i/d_m > 1$ では、 $\tau_{*c}/\tau_{*e} = 1$ として資料を整理した。

今回の測定値は、 $\beta/\mu_f = 17$ より下に位置している。急こう配では、従来より流れの抵抗が増すことが指摘されているので、 β が急こう配になると小さくなることから、この傾向を示しているものと考えられる。またそれぞれの粒径について、 τ_{*e} が大きい領域では、良く測定値を説明している。ただ、 τ_{*e} が小さくなってきて、 τ_{*c}/τ_{*e} が小さくなるにしたがって、ズレが生じ始める。もちろんズレた値については、その値にふさわしい β 、 μ_f を用いることによって説明されるものであるが、さらに限界掃流力付近での砂れきの運動について補正を必要とするものであることが分かる。なお水山の式は、 τ_* が1内外ではよく現象と説明しているが、 τ_* が0.1以下では、式(2)が示すように、急こう配が上位となり、現象とは逆になる。

IV) 均一砂れきの流砂量

単位幅あたりの流砂量 q_B を、従来の式と同様に、

$$q_B = \text{移動層内の砂れきの容積} \times \text{砂れきの集団平均流速} \quad (4)$$

として表されるものとする。そうしてせん断力の配分は、

$$\tau = \tau_G + \tau_C \quad (5)$$

表 1 実験を行った範囲

No.	粒径	平均流径	最大径	最小径	標準偏差	こう配	h/d_m	τ_{*c}/τ_{*e}
1	一様	6.0 mm				0.02~0.10	2.5~30.0	0.6~0.1
2	"	8.3				"	3.8~11.0	0.7~0.1
3	"	12.0				"	1.7~6.3	0.5~0.1
4	混合	9.0	14.0	4.0	1.53	0.02~0.05	3.0~8.5	0.9~0.7
5	"	8.3	100.0	2.0	3.27	"	2.9~10.9	0.5~0.1

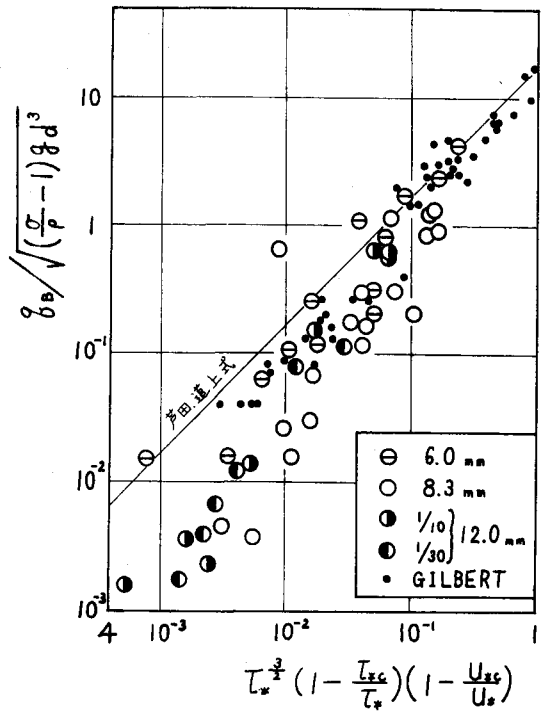


図 2 測定値の表示

ここに τ_G は流砂に伝達されるせん断力、 τ_F は流体に伝達されるせん断力である。

1) 砂れきの集団平均移動速度 $\bar{v}_s$

移動している砂粒の平均移動速度 $\bar{v}_s$ は、

$$V_s = u_b(1 - u_{*c}/u_*), \quad u_b = \beta u_* \quad (6)$$

として表されることが多い。

実験において、水路砂面におかれた着色れきをトレーサーとして測定した。各時間ごとの砂れき粒子の移動距離から求めた砂れきの集団の平均移動速度 V_s は、無次元化して、図2のように表される。

この V_s を用いて、流砂量 q_B の測定値から逆算した移動層の実質容積高さを求めると図3になる。ただこの値は、後述するように $\bar{v}_s$ が実際より大きく見積まれていると考えられる。

この測定された V_s は転動、跳躍および停止している状態を含めてのみかけの速度である。かりに、移動状況を跳躍で代表されると仮定すると、さきに求めた V_s は、

$$V_s = \frac{1 \text{ step の長さ} \times \text{回数}}{(1 \text{ step の移動時間} + \text{休止時間}) \times \text{回数}} \quad (7)$$

として求められたものである。より正確に流砂の現象を式(4)にしたがってモデル化するときは移動休止時間を除いたできるだけ真の速度に近い平均移動速度を求め、式(4)に代わって

$$q_B = c(\bar{v}_s \cdot p_1) \quad (8)$$

ここに p_1 は単位時間中に全体が $\bar{v}_s$ で移動する時間確率として表わすほうが実際に近いモデルであろう。

平均休止時間は、単位面積からの砂れきの離脱確率より行う。砂れきの離脱確率は、トレーサーの原点残留確率の時間的変化の測定から求められる。原点残留確率 p_0 での時間的変化は、定常状態では

$$p_0(t) = e^{-\lambda_2 t} \quad (9)$$

と表される。砂面が常に初期状態と同じ状態を保つとき、単位時間当りの離脱確率は λ_2 となるから、粒子の平均休止時間は $1/\lambda_2$ と表される。そこで式(7)を書直して、 l を1stepの距離とすると、

$$\bar{v}_s = V_s \{1 + (V_s/l \lambda_2)\}^{-1} \quad (10)$$

と表わすことができる。括弧中の $\bar{v}_s/l \lambda_2$ は種々の移動形態を含めた平均速度 $\bar{v}_s$ と跳躍形式で移動した場合の速度 $l \lambda_2$ との比である。

λ_2 は測定値、 l については測定値にちらばりが大きいので、中川、辻本⁵⁾の研究を参考にして100 d と

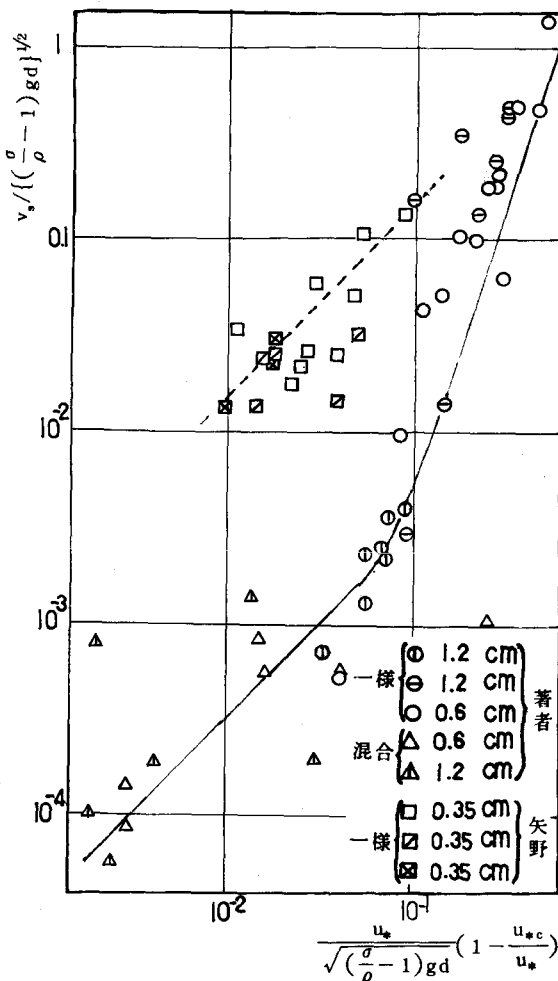


図3 トレーサーから求めた平均移動速度

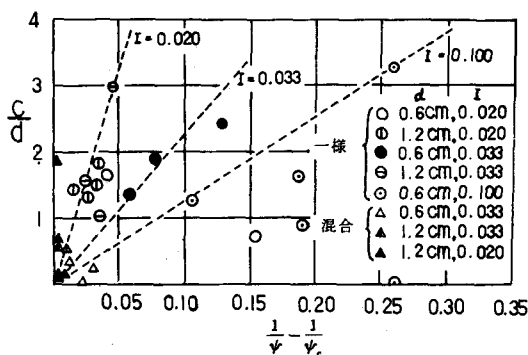


図4 q_B/V_s として求めた砂れき移動厚さ

仮定して求めた結果は図6のとおりである。 λ_2 を直接測定できたものに限って、図示した。

λ_2 の測定値は図5に示す。同図に矢野ら⁴⁾の測定値を付記した。もし、 λ_2 が $1/\psi - 1/\psi_c$ の1乗に比例すると仮定すると、こう配が急になると、飛出し確率 λ_2 が減少するようである。また混合砂れきでは、 $d_1/d_m > 1$ では λ_2 が大きくなり、 $d_1/d_m < 1$ では、小さくなる。

図6より、係数をきめると、 $u_* = u_{*c}$ の部分を除いて、

$$\frac{\bar{v}_s}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd}} = 2 \times 10 \left\{ \frac{u_*}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd}} \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right)^3 \right\} \quad (11)$$
 となる。

この係数は、式(6)からは、れきに作用する流速係数に關係する。この値が妥当であるかどうかは、砂れきを伴う流れの流速を明らかにする必要がある、iii)において考察する。

ii) 移動層中の砂れきの容積

水路床上に水が流れたとき、水路床表面下の任意の点に作用するせん断力とせん断抵抗の釣り合いから⁴⁾

$$\tan \theta = \frac{c_s(\sigma - \rho)}{c_s(\sigma - \rho) + \rho(1 + h_0/d)} \tan \phi \quad (12)$$

を満足するよりも小さいこう配では、砂れきの移動は、いわゆる集合流動は生じないと表されている。ここに、 c_s は砂れき層内の砂れきの容積濃度、 θ ：水路こう配 ϕ ：まさつ角、 h_0 ：表面流の水深、 d ：粒径である。

式(12)を書直すと、砂れきの移動の厚さ h_s は、

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{c_s \cos \theta \cdot (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_* \quad (13)$$

ここに c_s ：流動層の粒子濃度、と表わされる。 $c_s = 0.6$
 $\tan \theta = 0.1$ とすると、 $(h_s/d) = 2.79 \tau_*$ となる。図4と比較すると、図4の値は、式(13)の予測値より大きい、図4が大きく見積られているとしたのはこのためである。以上の結果から、式(12)で示されるこう配以下では、移動層内の砂れきのみかけの高さ c は、れき1箇分を想定して、

$$c = A_1 d \quad (14)$$

ここに A_1 は係数、と表わすことにする。

iii) 流砂のある流れの流速分布

従来より、流砂量の算定にあたって、河床に砂堆が発達した場合を除いて、流速が流砂量と独立に扱われている場合が多い。河床形状による抵抗に比して、流砂そのものによる抵抗は相対的に小さいとも予想されるが、砂粒の運動を評価する上において、流速を正確に見積ることは重要である。

流砂のある流れでは、従来より床面付近で流速が対数則から離れて、一様になろうとする傾向が示される。この傾向は、流砂の存在にかかわらず、不規則粗面でも見られるものである。不規則砂面では別に考察するとして、れきの量が流速に及ぼす効果を表

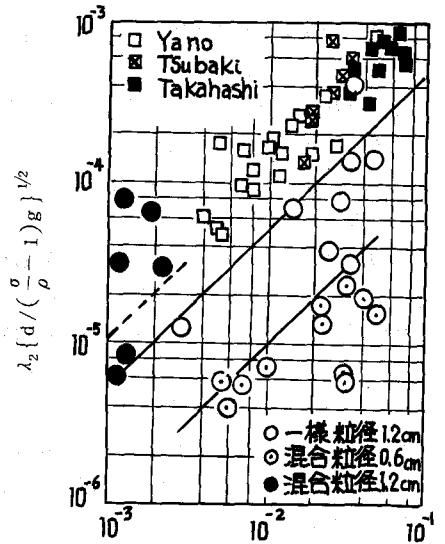


図5 λ_2 の測定値 $\frac{1}{\psi} - \frac{1}{\psi_c}$

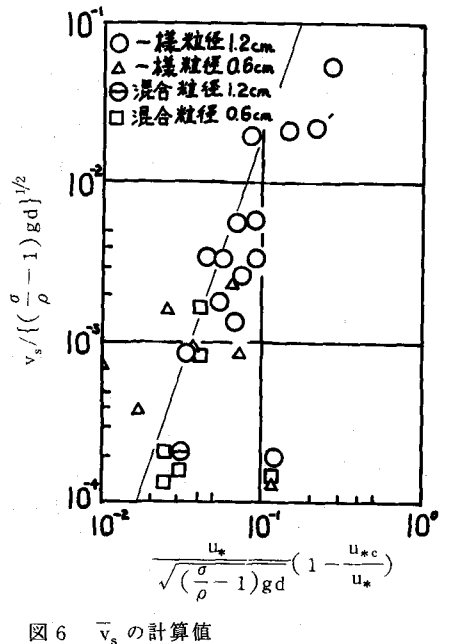


図6 $\bar{v}_s$ の計算値

現できるよう、平坦河床上で、れきの存在による流速の変化を考察する。

式(14)で、掃流砂れきの輸送に費される力は、流体についてみると、流速の変化によるエネルギー消費として表れるものと考えられる。このエネルギー消費を、れきの転動、跳躍に伴うせん断応力の増加を、モデル的に、れきの回転に伴う流体の質量輸送から生じる運動量の変化として表わすことを試みた。

a) れきの回転に伴う流れの表現

れきの回転に伴って、そのまわりに生じる流れを厳密にとくことは困難で、かつ、ここでは関係項を見出すのが目的であるから、大胆な仮定のもとに、球のまわりの流れを求めよう。

砂れきを球とみなし、この球を静止流体中で軸のまわりで回転させたとき、 ϕ 方向の流速 v_ϕ は、Navier-Stokes の式

$$\mu \{ \nabla^2 v_\phi - (v_\phi / r^2 \sin^2 \theta) \} = 0 \quad (15)$$

を r 方向および θ 方向の流速を零、 $\partial v_\phi / \partial \theta = 0$ で、 $r = \infty$ で $v_\phi = 0$ 、 $r = R$ (球表面) でかつ $\theta = 90^\circ$ のとき、 $v_\phi = \omega R$ の条件で求めると

$$v_\phi / \omega R = (R/r)^{m+1} \quad (16)$$

ここに、 ω は角速度、 $m = -(1/2) + \sqrt{c_\theta + (1/4)}$

となる。この結果は、静止流体中でかつ 2 次元的に流れを求めたものである。この結果を用いて、粒子が回転するとき、このまわりの流れを、式(15)に補正係数 N をかけて

$$v_\phi / (\omega R) = N (R/r)^{m+1} \quad (17)$$

と表わすことにする。

砂れきが角速度 ω で回転するとき、回転軸のある平面を境として、 z 方向に生じる質量の差 $\rho Q'$ は、面の上方から下方に移動するものと、下方より上方に移動するものの差であって、

$$\rho Q' = 2\rho \int_0^{\pi/2} \int_R^\infty v_\phi dr \cdot r \cdot d\theta - (-2\rho \cdot \int_{\pi/2}^\pi \int_R^\infty v_\phi \cdot dr \cdot d\theta) = \rho \alpha N \omega R^3 \quad (18)$$

ここに、 α はれきのまわりの流れを式(17)で表したことによる補正係数である。

速度こう配 du/dz が存在する流れにおかれた粒子の回転の角速度は、

$$\omega = (1/2) \Gamma_s (du/dz) \quad (19)$$

ここに Γ_s は粒子と流体との密度差に関係すると予想され、粒子の比重が流体より大きくなるに従って $\Gamma_s < 1$ となる係数である。式(19)を式(18)に代入すると

$$\rho Q' = \rho \Gamma_s N (\alpha/z) R^3 (du/dz) \quad (20)$$

と表わすことができる。

b) れきの存在に伴うせん断力

単位幅、単位時間あたりの流砂量を q_B 、砂れき 1 個あたりの体積を AR^3 、砂れきの平均移動速度を v_s 、砂れきの平均跳躍高さを z_s とすると、河床から高さ z_s までの鉛直単位面積に存在する砂れきの個数 K が

$$K = q_B / (AR^3 \cdot v_s \cdot z_s) \quad (21)$$

と、河床から z_s まで平均して存在するとすると、高さ z_s までの単位高さあたり、 $\rho K Q'$ の流体の質量が z 方向に輸送されていると考える。この輸送された質量が z の面で、 x 方向に $\bar{u}$ の速度で移動するから、この運動量の差によるせん断力 τ は

$$\tau = \rho K Q' \bar{u} = \rho \beta_1 \bar{u} (du/dz), \quad \beta_1 = \Gamma_s K N \frac{\alpha}{2} R^3 = \frac{1}{2} \Gamma_s' K R^3 \quad (22)$$

と表わすことができる。すくなくとも、局所的にこのようなエネルギー消費の機構の存在があると考えられる。

河床から z_s までの部分では、乱れによるせん断力のほかに、この砂れきの存在によるせん断応力が加わるものとする。乱れによる応力は、混合長理論によって表わすと

$$\tau = \rho u^2 (du/dz)^2 + \rho \beta, \quad u (du/dz)^2 \quad (23)$$

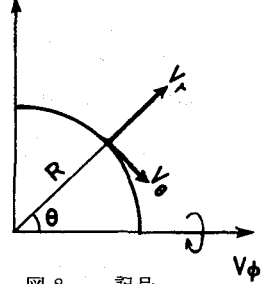


図 8 記号

と表される。この式を解くにあたって式(23)の速度 u を、つぎのように近似する。すなわち河床面のごく近傍では、式(23)の右辺第1項は、第2項にくらべて小さいとすると、 $\tau_0/\rho = \beta u (du/dz)$ となり、 $z=0$ で、 $u=0$ の解は $u/u_* = \sqrt{2z/\beta_1}$ となる。式(23)の u をこの値で代表させると、式(23)は

$$\tau/\rho = l^2 (du/dz)^2 + \sqrt{2\beta_1} u_* \sqrt{z} (du/dz) \quad (24)$$

となる。 $l_1 = \kappa(z - \delta_s)$ 、ここに κ は Karman 常数、 δ_s は、粘性底面と同じような取扱いのできる底面近傍に設ける特性厚さとする、式(24)は

$$\frac{du}{dl} = \frac{u_*}{\kappa} \frac{\nu}{u_* l_1} \left\{ \frac{\sqrt{(\frac{u_* l_1}{\nu})(1 + \frac{\beta_1}{2\kappa l_1})}}{l_1} - \frac{\sqrt{2\beta_1} \frac{u_*}{\nu} \sqrt{\frac{l_1}{\kappa}}}{2l_1} \right\} \quad (25)$$

この式を積分し、 $u_* l/D$ が大きいところでは、 $l_1 = \kappa z$ とし、さらに $z = \delta$ で $u = u_\delta$ とすると

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{F_r}{\kappa z} + \frac{F_r}{2k}} \right) + \frac{2F_r}{\kappa z} \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{F_r}{\kappa z}}} + \frac{\sqrt{2}}{2\kappa} \sqrt{\frac{F_r}{\kappa z}} + A_r \quad (26)$$

$$A_r = \frac{1}{\kappa} \left[-\ln \left\{ \frac{\delta}{k} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{F_r}{\kappa \delta} + \frac{F_r}{2k}} \right) + \frac{F_r}{2\kappa \delta} \right\} - \frac{1}{\kappa \delta} \frac{2F_r}{1 + \sqrt{1 + \frac{F_r}{\kappa \delta}}} - \frac{\sqrt{2}}{2\kappa} \sqrt{\frac{F_r}{\kappa \delta}} \right] + \frac{u_\delta}{u_*}$$

ここに $F_r = \beta_1/2\kappa$ である。 $\beta_1 = 0$ のとき

$$u/u_* = (1/\kappa) \ln(z/k) + A_{r0} \quad (27)$$

となって従来の式となり、式(26)との差が、流砂の存在によって生じた流速の変化である。

ちなみに、滑面上を流砂が流れる場合については、式(26)は

$$\begin{aligned} \frac{u}{u_*} &= \frac{1}{\kappa} \ln \left\{ \frac{u_* z}{\nu} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{F_s}{\kappa \frac{u_* z}{\nu}}} + \frac{F_s}{2\kappa} \right) \right\} + \frac{2F_s}{\kappa^2 \frac{u_* z}{\nu} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{F_s}{\kappa \frac{u_* z}{\nu}}} \right)} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{F_s}{\kappa^3}} \frac{1}{\sqrt{\frac{u_* z}{\nu}}} + A_s \\ A_s &= \frac{u_* \delta}{\kappa} \left\{ -\ln \frac{u_* \delta}{\nu} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{F_s}{\kappa \frac{u_* \delta}{\nu}}} + \frac{F_s}{2\kappa} \right) - \frac{2F_s}{\kappa^2 \frac{u_* \delta}{\nu} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{F_s}{\kappa \frac{u_* \delta}{\nu}}} \right)} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{F_s}{\kappa^3}} \frac{1}{\sqrt{\frac{u_* \delta}{\nu}}} \right\} + \frac{u_\delta}{u_*} \end{aligned} \quad (28)$$

ここに $F_s = \beta_1 u_* / 2\kappa \nu$ である。

式(28)の右辺第2項、第3項を左辺に移項すると、この左辺と右辺第1項の $\{ \}$ で括られた量の対数との間には $1/\kappa$ のこう配の直線関係が成立することになる。さきに述べた底面付近における流速が、対数則からはずれることは、式(28)によれば、任意の高さの流速が z の対数項以外の z にも関係していることから生じているものといえる。

c) 実験値と式(28)の比較

この式の妥当性を検査するため、実験値との比較を行った。イ) 式(17)中の N は静止水中で球を回転させてまわりの流速を測定し、 $N = 0.3$ 、 α は $1/2$ とした。ロ) 式(19)中の Γ_s については滑面上に軽量骨材を1個ずつ流し、その回転速度を測定した。

その角速度は、図9に示すように、れきの置かれたその位置の流れの速度こう配に従わず、転動したときに受けた角速度を保持していることが示された。したがって $\Gamma_s = 1.0$ とした。

ハ) 流速の測定値との対比、河床からの高さ z の測定に疑問を残さないよう滑面水路に軽量骨材を流し、流速分布を測定した。実験は水のみ流

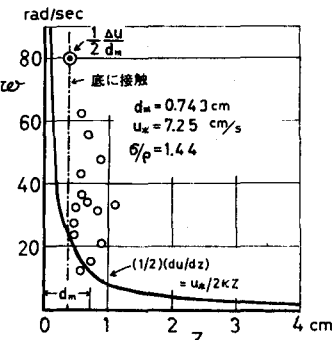


図9 砂れきの回転速度測定例

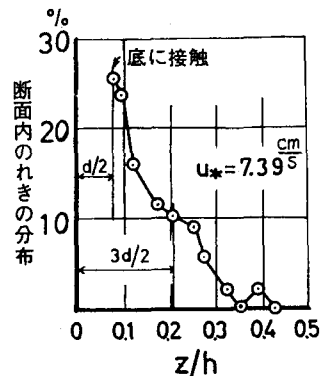


図10 れきの跳躍高さの分布

した場合と、砂れきが床面に堆積しない程度まで流砂がある場合の流速分布を図11に示す。流砂のある場合は底面付近で流速が一樣になろうとしている。

水面および側面より写真をとって、れきの量を求め Z_s は移動中の砂れきの 65 % が含まれる高さにとり係数は、さきに述べた値を用いて F_s を求め、式(28)を計算した結果と測定値との比較を図12に示す。図中の F_s の値に変化があるのは、上流からの給砂量を調節してその影響を見るためである。この調整法によると、砂れきの転動の影響のある範囲が、影響の及ばない範囲も含めて、片対数紙上に $1/\kappa$ のこう配をも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。

図13は式(28)を数値計算で厳密にといった場合と式(28)の解を比較したもので、この結果からは、式(28)の近似が許されるものと思われる。

以上の結果、式(28)は流砂のある場合の底面付近の流速の変化を表わすことができると考えられる。

式(28)によると、滑面の場合の

$$U/U_* = 5.5 + 5.75 \log U_* u/\nu$$

の常数 5.5 に対して、 q_B が増すにしたがって、常数の低下を示す。 q_B と Ar の関係は、図11からも傾向はうかがえる。移動床の場合は、基準高さが変動して正確に表現できないがこれについては後刻報告する。

IV) 流砂量公式

式(11)と式(14)より $q_B = A_1 d \cdot 20 \times 10^0 \cdot u_*^3 (1 - u_{*c}/u_*)^3 \cdot P$ となる。この式を無次元化し、最後の項は便宜的に書直すと

$$\phi = 12 \cdot \tau_*^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^{3/2}, \quad p$$

となる。この式は、林ら⁶⁾の式と同形である。この式を $P = 1$ として、実験値に適用すると図13のようになる。式(14)の A_1 の値は、この場合 0.6 となり、観察結果とも一致する。

P の値は、 $1 - (v_s/\lambda_2 l)$ で、 v_s の値は図3、 λ_2 は図4より積みとることができ、 l の値は中川、辻本あるいは林、尾崎の研究より推定できるであろう。

従来、 $v_s \propto u_* (1 - u_{*c}/u_*)$ 、 $c \propto \tau_* (1 - \tau_{*c}/\tau)$ として式が組立てられているのに対し、 $c \propto A_1 d$ としたものである。常数は水路こう配によって変ることもあり得ると考えられ、流砂量に直接ひびく重要な値であるから、今後さらに資料を収集して確定させるつもりである。

3 混合砂れきの流砂量

1) 混合砂れきの流砂量についての従来の研究

混合砂れきの取扱いは、しゃへい係数をいかに評価するかである。そし

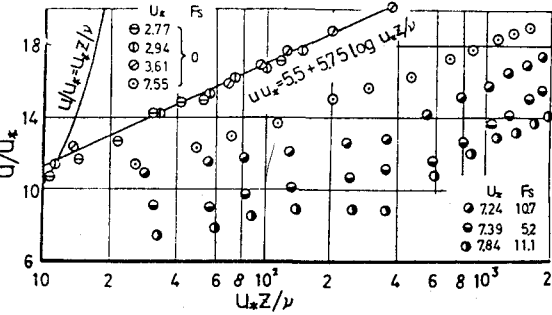


図11 流砂を伴う流れの流速分布

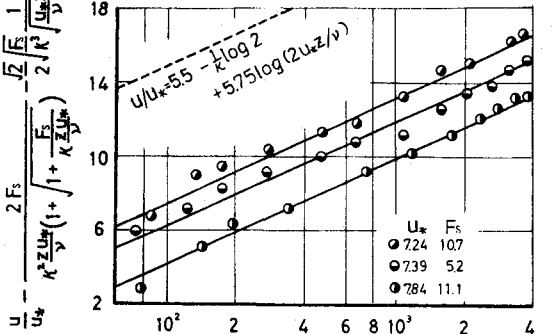


図12 式(28)と測定値との比較

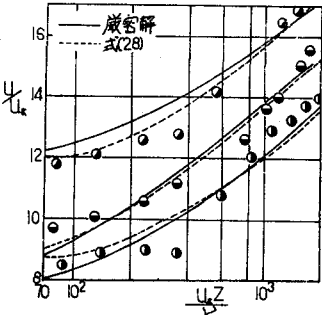


図13 式(28)と厳密解との比較

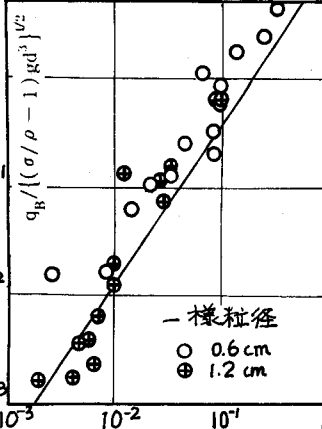


図14

て、しゃへい係数は、砂れきの移動限界によって評価される、従来の成果を図14に示す⁷⁾。また水山は混合砂れきの取扱いでは、移動開始限界掃流力よりも停止限界掃流力で表わすべきだとし、 $d_i/d_m > 1$ では τ_{ci}/τ_{cm} は1をとるべきだとしている。

II) 砂れきの掃流砂量の測定

表1、図1に示す条件で実験を行った。平均径9.0mmの混合砂れきは全面流動、平均径8.3mmの混合砂は選択流動である。前者は上流より砂を補給して河床の粒径分布から一定であるようにし、後者は給砂せずに行った。したがって後者では、流砂量測定直後の河床平面の粒径分布を測定して表面での各粒径の占有割合をしらべた。

測定結果を従来の整理法にしたがって図15に表示した。図には、林、尾崎、石橋による理論値を示す。混合砂れきの流砂量は、一様砂れきの流砂量式に、 d_i/d_m の値によって与えられる、しゃへい係数を乗ずることによって表される。実験値と理論値とは、標準偏差の小さい $d_m = 9\text{mm}$ のときはほぼ理論値に近いが、選択流出の行なわれている $d_m = 8.3\text{mm}$ の場合には、若干のずれが生じている。著者の用いた一様砂の流砂量式と林らの式との調整をして、かつ測定値に合うようしゃへい係数を求めると図16のようになる。しゃへい係数は図5の離脱確率 λ_2 からも求められる。 $d_m = 9\text{mm}$ の場合について λ_2 より求めたしゃへい係数と、流砂量式から逆算したしゃへい係数とはほぼ一致する。選択流出では、しゃへい係数が大きくなることが示される。

4. むすび

I) 急勾配で、砂れきの平均移動速度をトレーサー法で求め、この速度から、れきの休止時間を、離脱確率を用いて、消去することをはかり、真の速度に近いものを得ようとして、この結果 $\bar{v}_s$ が、 u_*^3 に比例することが得られた。

II) 移動中の砂れき容積は A_2d とし、その結果 $q_B \propto \tau_{*e}^{3/2}$ の形に表して、この比例係数が従来の式と同じになることを示した。

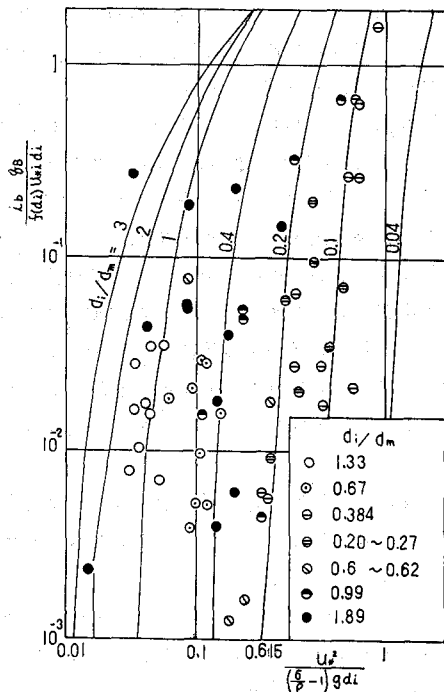


図15 混合砂れきの実験結果

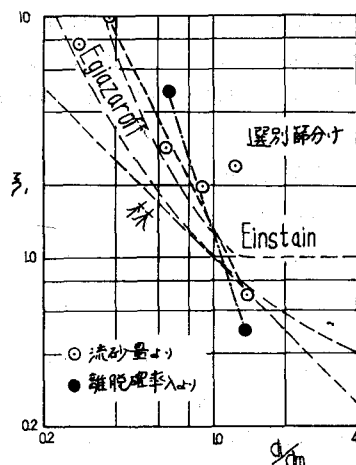


図16 実験から推定されるしゃへい係数

- 1) 芦田、高橋、大同、水山：急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究、京大防災研年報16号 昭48
- 2) 芦田、高橋、水山：山地河道の掃流砂量 新砂防107号
- 3) 芦田、道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集 206号 1972
- 4) 矢野、土屋、道上：砂れきの流出機構の確率過程としての特性について、京大防災研年報 11号 昭43
- 5) 中川、辻本：水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第244号 1975
- 6) 林、尾崎：掃流砂量に関する基礎的研究、第23回水理講演会論文集 1979
- 7) 林、尾崎、石橋：混合砂礫の掃流砂量に関する研究、第24回水理講演会論文集 1980
- 8) 高橋、土石流の流動に関する基礎的研究 京大防災研年報20号A 1970