土木学会第53回年次学術講演会（平成10年10月）

Ⅱ－248

掃流力が河床の粒径ｄ$_s$の限界掃流力相当時にｄ$_s$以上の粒径の流砂機構

立命館大学理工学部　正員　大同淳之

１．はしがき　渓流では h/d が３程度で礫の移動が観測される．h/d が小さい場での砂の移動は，h/d によって pickup rate，水路床を構成する粒径ｄ$_s$とその上を移動する粒径ｄとの比ｄ$_s$/d によって移動特性が異なるので、全流砂量は、平均粒径で代表できず粒径ごとの移動量の和となる。本文は粒径ｄ$_s$で構成される水路床が安定、すなわち河床に作用するせん断力τ_0が$\tau_0/\tau_{cs}\fallingdotseq 1$のときに、d>ｄｓの砂礫の移動過程を測定して、混合粒径の流砂量式の基礎資料を得んとするものである。

２．相対水深が小さい場での粒径の違いによる移動機構の差

混合粒径の流砂の移動は、相対水深が小さいとき流れの規模と砂の大きさで次のように分類される

表１　ｄ$_s$の砂面に乗った径ｄの砂の移動形式

τ_*の大きさ	d$_s$の砂面に乗った砂の移動可能径
1) $\tau_*<\tau_{*cs}$	ｄ＜ｄ$_s$　砂面安定
2) $\tau_*\fallingdotseq\tau_{*cs}$	ｄ＞ｄ$_s$、ｄ＜ｄ$_s$　砂面安定
3) $\tau_{*cs}<\tau_*$	砂面が不安定

本文は２）の領域を扱う。

３．一様粒径ｄ$_s$の砂床上におかれたｄ＞ｄ$_s$の流径ｄの掃流力τ_0が$\tau_0/\tau_{cs}\fallingdotseq 1$のときの流動域

３．１　d>ｄｓの砂の転動可能条件

砂面上にd>ｄｓの砂が乗る条件は別に扱うとして、流れの強さがｄ$_s$の砂が動かない範囲で、ｄ$_s$より大きい砂ｄの転動条件を求める。図１に示す球状の直径ｄの砂の転動限界は、図中のＡ点を支点として転動で動くとするとき、図中に示す記号を用いて、

$$\left\{(\alpha-\rho)Kvd^3g\cos\theta-\frac{\rho}{2}C_Lk_a d^2\bar{u}^2\right\}\left(\frac{d}{2}\sin\phi\right)+\frac{\rho}{2}C_Dk_a d^2\bar{u}^2\left(\frac{d}{2}\cos\phi+a\right)=0 \qquad 1)$$

Kv, Kaは、砂の体積係数および面積係数、$\bar{u}$は砂に作用する流速の平均値，aは砂の重心と流速の作用点との距離である。１）式で決まる限界流速$\bar{u}$を$\bar{u}^2=K_c\bar{u}^2_{*c}$とし流れの規模がｄ$_s$の限界掃流力に等、しいときｄ＞ｄ$_s$の砂の転動可能領域は a=0 のとき２）式のようになる．ここに摩擦角ϕはｄ／ｄ$_s$の関数である。砂面は流れによってみかけ上平坦にならされているとしても凹凸をもつ不均一な場である。固定したｄ$_s$の面の上に砂面を傾けて石の動きはじめる角を摩擦角ϕとして測定した結果は図２のような面的に分布を示す。この値を２)式に用いる。K$_c$は勾配が緩いときには岩垣式[3]、勾配が急なときは芦田らの式[4]を用い，$C_D=C_L=0.4$, Ka/Kvは石が

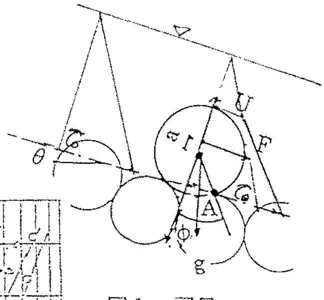

図１　記号

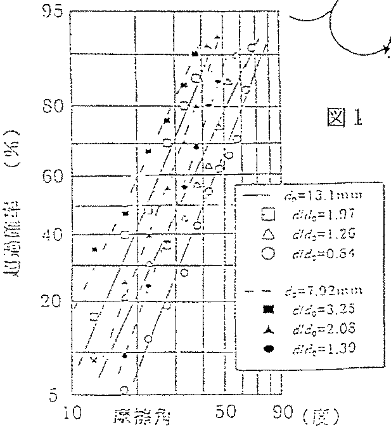

図２　河床の摩擦角の分布

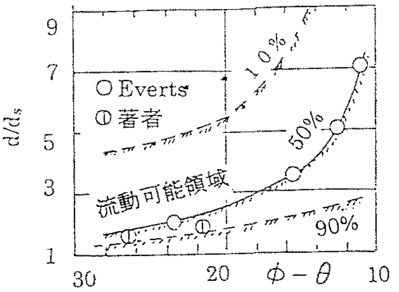

図３　$\tau_*\fallingdotseq\tau_{*cs}$ のときに d/d$_s$の砂の移動可能領域

$$\frac{d}{d_s}<Kc\frac{\beta Ka}{Kv}\frac{\left\{\frac{C_D}{2}\left(1+\frac{a}{(d/2)\cos\phi}\right)+\frac{C_L}{2}\tan\phi\right\}}{\cos\theta\ \tan\phi} \qquad 2)$$

Keyword: 流砂量．混合粒径．相似則
連絡先（525 8577 草津市野路東 Tel 077-566-1111, Fax 077-561-2667)

球状として3／2として計算した、砂面を形成する粒径 d_s が動かず，d_s より大きい粒径dの移動可能な範囲は図3に示される．表2で実験した結果は範囲内にある．摩擦角は50%相当値を用い2）式に0.9を掛けた値がEverts[5)]の実験結果と一致する。著者の実験は活発に移動した粒径を示し、最大径ではない。もちろん摩擦角は図2のように分布をもつので、境界線は図3のように幅をもつ。

3．2　$\tau_* \fallingdotseq \tau_{*cs}$ の条件での移動可能流砂量

砂の移動は間欠的で常に単一粒子である．河床に作用するせん断力は，砂が存在するとき，水のせん断力に砂の質量力のx方向分力の加わり，時間的，場所的に変化する．流れは1）式を変形した3）式を越える規模が必要である．

$$\tan\phi \le \frac{c_D}{2}\frac{k_a}{k_v}\frac{u^2}{d} \bigg/ \left\{\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)g\cos\theta - \frac{C_L}{2}\frac{k_a}{k_v d}u^2\right\} \qquad 3)$$

流動可能な流砂量をエネルギーから求める．二つの断面間の流れのエネルギーの平衡は，$E_{W1}+Z = E_{W2}+E_f+E_{in}$　4）．ここに E_{W1}、E_{W2} は断面1，2における水のエネルギー、Zは基準面の差、E_f は底面せん断力により失われるエネルギー、Einは抗力として砂に供給されるエネルギーである。d_s で構成されている砂面上でdの砂を流すためには、Einが必要でその分だけ水深の増加が必要で、与えられた水理条件の下で、動かし得る砂の量は、このEinの範囲となる。一方、砂が流れの中をN箇移動しているとき、砂粒子のエネルギーの平衡は、砂の移動距離Lの平均値を区間として $\phi s + E_{in} = E_s + W_f$　5)，ここに、ϕs：砂粒子のポテンシャル差, Ein; 砂が水から受けるエネルギー，Es; 運動中の砂のエネルギー，w_f；砂の移動に伴う散逸エネルギーである．

$$\phi s = (\alpha-\rho)NK_r d^3 gI(L/2) \qquad 6)$$

$$E_{in} = N\rho C_D K_A D^3\left\{\overline{(u-u_s)}^2/2\right\}(L/2) \qquad 7)$$

である。

可能流砂量は，E_{in} を求めることに相当する．

7）式の（$u-u_s$）は砂の運動式

$$\sigma\frac{\pi d^3}{6}\frac{du_s}{dt} = C_D\frac{\rho}{2}\frac{\pi d^2}{4} - \left\{(\sigma-\rho)\frac{\pi d^3}{6}g\cos 0 - C_L\frac{\rho\pi d^3}{4}(u-u_s)^2\right\}u_s - \frac{\rho}{2}\frac{\pi d^3}{6}\frac{du_s}{dt} + (\sigma-\rho\cos 0)\frac{\pi d^3}{6}g\sin\theta \qquad 8)$$

表2　$d > d_s$ の流量可能測定範囲

d_s	d	d/d_s	h／d	I_0
1.67^{cm}	1.67^{cm}	1.0		0.038
〃	2.64	1.58	2.1〜3.0	〃
〃	2.92	1.74	2.1〜3.0	〃

砂の中心軸の角運動式，床面での接触点での条件

$$(I+I_V)d\omega/dt = F(d/2), \qquad u_s-(d/2)\omega = 0 \qquad 9)$$

ここに，I；砂の中心軸の慣性二次モーメント，I_v；仮想質量力の慣性二次モーメント，ω；砂の中心軸に関する角速度，を用いた，t=0 で u_s=0 の解は，

$$(u-u_s) = \frac{3}{4}\left\{\frac{A_r C_D}{\{(\sigma/\rho)-\cos\theta\}}\frac{u_*}{\sin\theta}\frac{u_*^2}{gd} + u_*\tan\{(\sigma/\rho)-\cos\theta\}\sin\theta\frac{g(t_*-t^*)}{u_*}\right. \qquad 10)$$

である．Lの値は $L = k_L d$，　$k_L = 100$ とできる．単位面積あたりN箇の砂が動いているとき，抵抗の線形性を仮定すると，動いている砂による水深の増加は，つぎのようにあらわされる．

$$\Delta h' = (N/2\rho g\sin\theta)C_d k_a d^2(u-u_s) \qquad 11)$$

しかし，$d/d_s>1$ のとき摩擦角が減少して砂が移動しやすい条件下にある．

3．3　実験

表2の砂で実験を行なつた．水深の基準線は d_s の頭部を連ねた線から d_s／4下げた位置とする．図4に d/d_s による限界掃流力の減少を示す．流砂量と水深の増加量を図5に示す．Δh をいくらにするかで流砂量がきまるが，式との比較はもう少しﾃﾞｰﾀの集積して行なう．

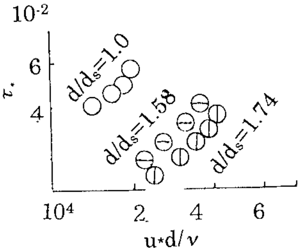

図4　d/ds>1における限界掃流力の減少

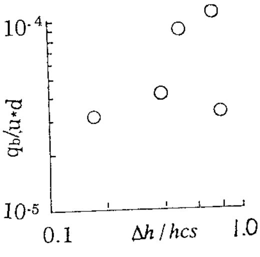

図5　流砂による水深の増加

1）岩垣；土木学会論文集、第41号、1956,
2）芦田ら；京大防災研究報16号B昭48,
3）Everts; C.H; ASCE.ww4,Nov,73
4）関根ら；土木学会論文集，351,/ -2，84
5）土屋ら；京大防災研年報.,12，B，s 44