

早稲田大学 大学院 学生員 藤堂 正樹
 電源開発 株式会社 正員 井筒 庸雄
 早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫

1 序論

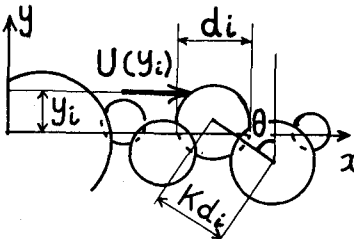
実河川の河道上には大小様々の混合砂礫が存在する。この混合砂礫は相互に干渉し合い流送過程をより複雑なものとし、結果として河床材料の粗粒化等の問題を呈する。そこで実河川の河床変動を調べる為には混合砂礫による離脱過程の把握が不可欠となる。混合砂礫の流砂現象に関する従来の研究では、Eginzaroff, 芦田・道¹⁾らにより、粒径別限界掃流力が異なり、掃流力の比較的小さい範囲では粒径毎の流砂量曲線は均一砂の場合のものとは異なることが報告されている。流送過程を考える場合、粒子と流体とのエネルギー交換に着目して考察を加えるのは自然である。そこで筆者らの提案した均一砂の場合の流砂量推定式を混合砂礫床の場合に拡張しようと試みた。筆者らは流砂現象を Euler 的に取り扱おう立場にたつ。則ち、河床面からの粒子の離脱過程と、河床面上を通過する粒子速度とにより流砂量を決定する。その際、単位時間での河床面からの粒子の離脱率は、流体が抗力により粒子に与えるエネルギーと、着目粒子が隣接粒子を乗り越えるに必要なエネルギーとの比で決まる。さらに抗力によるエネルギーの算定には“乱れ”の影響を考慮せねばならず、それ故、離脱率は確率分布量にないと考えた。粒子の移動速度については、 U_* を用いたレイノルズ数との関数関係が得られている。²⁾

2 混合砂礫の流砂量推定式

筆者らの流砂量推定式では、図1に示すような混合砂礫床を考えた。まず、iクラスの粒径 d_i を持つ粒子の移動に必要な限界流速 U_{ci} 、及び粒子に働らく代表流速の位置 Y_i と決め、次式を満たす時、移動開始と考える。

$$U(Y_i) = \bar{U}(Y_i) + U' \geq U_{ci} \quad (1)$$

$\bar{U}(Y_i)$; Y_i における時間平均流速 U' ; U の変動値
 尚、流則 \bar{U} は対数則分布、 U' は正規分布に従うものと



Y_i ; 代表流速作用位置
 d_i ; iクラス粒子粒径
 θ ; 乗り越し角
 K ; 距離係数

図1; 説明図

する。そこで、“乱れ”の乱流強度 $\sqrt{u'^2}$ 、 Y_i 、相当粗度 ks_i の評価が重要となる。するとiクラス粒子1個当たりの、単位時間での平均離脱率 \bar{R}_{si} は次式の通り。

$$\bar{R}_{si} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \right) \cdot \frac{\beta}{K(1 - \cos\theta)} \cdot \frac{(\bar{U}_{exi})^3}{g d_i^2} \cdot P_i T_u \cdot \frac{T_E}{T_u} \cdot \frac{1}{T_E} \quad (2)$$

A_1 ; 面積係数, A_2 ; 体積係数, ρ_f ; 流体密度, ρ_s ; 粒子密度, β ; エネルギー交換係数, g ; 重力加速度
 \bar{U}_{exi} ; U_{ci} を越える流速の確率平均値, P_i ; $U(Y_i) \geq U_{ci}$ となる確率, T_u ; U' の持続時間, T_E ; U' のエネルギー周期
 ここで \bar{U}_{exi} , P_i は摩擦速度 U_* , $\sqrt{u'^2}$ より定まる値であり、 T_u は浅野³⁾の実験より0.02 (sec)とした。
 \bar{R}_{si} が決まると流砂量が決定できる。iクラス粒子の単位時間・単位中流砂量 \mathcal{Q}_{Bi} は次式の通り。

$$\mathcal{Q}_{Bi} = \gamma \cdot (N_i / 1) \cdot A_2 d_i^3 \cdot \bar{R}_{si} \cdot v_i \cdot (\text{単位時間}) \quad (3)$$

$(N_i / 1)$; 河床単位面積上に露出しているiクラス粒子の個数/1個, γ ; 移動可能な状態にあるiクラス粒子と、露出しているiクラス粒子の個数比, v_i ; iクラス粒子の移動速度, ここで従来より用いられている流砂量関数と比較するために、 \mathcal{Q}_{Bi} を無次元化し、 \mathcal{Q}_{Bi}^* と表わすと。

$$\mathcal{Q}_{Bi}^* = \mathcal{Q}_{Bi} / f(d_i) U_* d_i \quad (4)$$

$f(d_i)$; 混合砂礫床単位面積上でiクラス粒子の露出率。以下にこの流砂量式について検討を加える。

3 混合の効果が流砂量に与える影響

流砂量決定の大きな要因となる $\sqrt{u^2}$, Y_i , k_s , 及び γ 等について、混合により受ける影響を検討する。

(a) 乱流強度 $\sqrt{u^2}$ について； 混合砂礫床の単純なモデルとして 5mm, 2mm 径のビーズ球を混合比を変えて敷き並らべ、風洞中で熱線流速計により流速測定を行った。図2に結果を示す。横軸は対数分布則より得られる河床底面からの距離である。比重は共に 2.5, $U_* \approx 120$ (cm/s)。図から混合により $\sqrt{u^2}/U_*$ はほとんど変化が認められない。粒径、混合比の問題はあるがこの程度の混合砂礫床では $\sqrt{u^2}/U_*$ は一定値とみなせる。流砂の現象、特に粒子の離脱を考える際には、河床面ごく近傍での値が重要であり、図から類推して $\sqrt{u^2}/U_* = 2.0$ という値を用いた。

(b) k_s, Y_i, γ について； 相当粗度 k_s の見積りには困難な要因が多いが、ここでは上記のビーズ球による混合砂礫床に対して、その河床面の持つ平均的抵抗という意味で捉えた。則ち上記の河床面に対して流速の対数分布則を仮定し、 U_* と共に算出した。 Y_i については、河床面を写真にとり、ビーズ球の突出高さを読み取るにより決定した。それによると、代表流速の作用位置は均一粒径の時は $Y/k_s \approx 0.2$, 混合河床では粒径により $Y/k_s \approx 0.1 \sim 0.3$ と変化することが推定された。一般に大粒径のものはほど Y/k_s の値は大きくなる。しかし k_s については局所的に異なる値を持つと考えられる。例えば大粒径粒子の背後では境界層の剥離により生じる渦のため流速分布が異なることが予想され、 k_s 一定とは考えづらい。混合粒径河床上で粒子の離脱等、局所的な問題を扱う場合には、補正係数が必要となる。この係数が (3) 式中の γ であり、筆者らの実験データ、及び Schlichting の円柱背後の後流の実験データ⁴⁾ を参考にして、均一粒径で $\gamma \approx 1/8$, 混合河床では $\gamma \approx 1/4 \sim 1/10$ と推定した。

(c) 混合砂礫床における流砂量； (2) 式の中で実験結果より $\beta = 2.0 \times 10^{-3}$, $A_1 = \pi/4$, $A_2 = \pi/6$, $\rho_s/\rho_f = 2.5$ として算出された流砂量曲線を図3に示す。ここでは芦田・道上による結果を示す。図中 d_m は河床砂の平均粒径。計算式においても、平均粒径より小さい粒子は均一砂の場合よりも掃流されにくいことが確認できる。これは大粒径粒子による遮蔽によるものであろう。大粒径粒子の場合は、この逆の傾向が予想される。筆者らの推定式は、この遮蔽効果を、粒子の受け取るエネルギーの粒径毎の差異として把握したものである。

4 結び

以上述べた推定式は、掃流力の大きい領域では実験値よりも大きい値をとる。これは、この領域で生じる砂連砂堆等の影響が考えられる。そこで、 $\beta, k_s, \sqrt{u^2}$ 等について、河床形態の変化をも考慮して検討する必要がある。最後に本研究の遂行に際して協力を得た、松梨史郎君（早稲田大学）に感謝します。

参考文献； (1) 芦田・道上；混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京大防災研年報14号B (2) 吉川・井筒藤堂；掃流砂の機構に関する基礎的研究土論集(投稿中) (3) 浅野；開水路流れにおける乱れの時空間構造に関する研究，京大学位論文 (4) H.Schlichting；Boundary-Layer-Theory

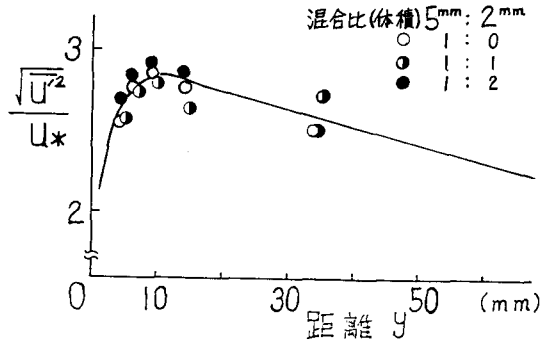


図2；乱れの分布

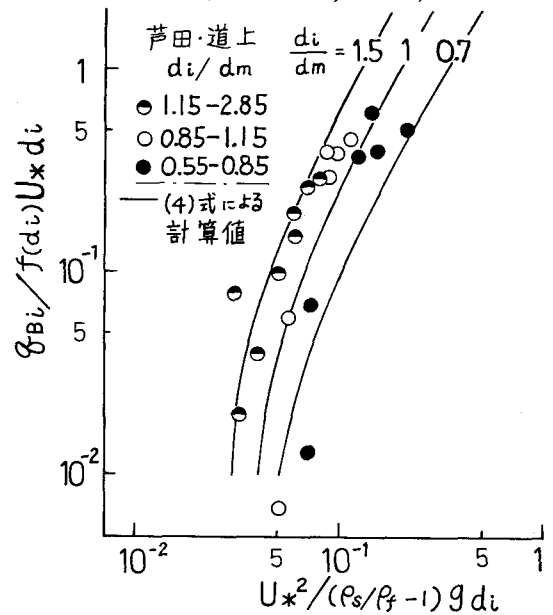


図3；混合砂礫床での粒径別流砂量