

II - 205

滑面固定床上の堆積限界掃流砂量

徳島大学大学院 学生員 穴瀬康雄

徳島大学工学部 正 員 岡部健士

徳島大学大学院 学生員 松井義幸

1. まえがき 一部に固定床区間を含む河道の河床変動問題や、三面張り流路工あるいはダムのサンドパイパス水路の土砂輸送能問題を取り扱う際には、その基礎として固定床上の堆積限界掃流砂量を解明する必要がある。筆者らは先の研究¹⁾²⁾において、一様砂を対象とした堆積限界掃流砂量式を提案し、その流況に対応する抵抗則を定式化した。本研究では、理論の一部を修正するとともに、混合砂問題への拡張を試みた。

2. 一様砂の流砂量 単位幅流砂量 q_s は、河床単位面積あたりに存在する土砂容積 V と砂礫の平均移動速度 v_s の積で表される。芦田・道上の流砂理論を用いると、 V および v_s は、それぞれ次のようにモデル化できる。

$$V = (u_*^2 - u_{*B}^2) / (\mu_m s g) \quad (1)$$

$$v_s = u_b - \sqrt{\mu_m / \mu_c} u_{*B} \quad (2)$$

ここに、 u_* : みかけの摩擦速度、 u_{*B} : 底面近傍の摩擦速度、 μ_m, μ_c : 砂礫の動・静止摩擦係数、 s : 砂礫の水中比重、 g : 重力加速度、 u_b, u_{*B} : 流体抗力の代表流速(河床からの高さ $y=d$ の流速を用いる)である。代表流速のうち、 u_{*B} は、砂礫の移動限界摩擦速度を用いた滑面对数則から求められる。一方、 u_b は、つぎに説明する流砂の存在を考慮した流速分布関数から求められる。

流砂を伴う流速分布関数は、プラントルの混合長理論に基づき、流体に作用するせん断応力 τ_f および混合長 ℓ を次のように仮定することによって定式化された。まず、流れを水深方向に、粘性底層(①: $0 \leq y \leq \delta_L$)、砂礫の影響を受ける遷移層(②: $\delta_L \leq y \leq \alpha d$)、および通常の乱流層(③: $y \geq \alpha d$)の3領域に分割して考え、ついで、各領域における τ_f および ℓ を

$$\textcircled{1} \tau_f = \tau_B = \rho u_{*B}^2, \ell = 0 \quad \textcircled{2} \tau_f = \tau_s = (\tau_B + \tau_0) = \rho u_s^2, \ell = \kappa'(y - \delta_L) \quad \textcircled{3} \tau_f = \tau_0 = \rho u_*^2, \ell = \kappa y$$

とした。ここに、 ρ : 水の単位重量、 α : 遷移層厚さに関する係数(=1.2¹⁾)、 κ, κ' : Kármán定数である。この流速分布式を水深方向に積分し、平均流速式を求めるとつぎようになる。

$$\begin{aligned} v/u_* &= (u_{*B} \delta_L / v)(\alpha d - \delta_L / 2)(u_{*B} / u_*) / h + (A - 1/\kappa)(1 - \alpha d / h) \\ &+ \frac{v}{u_* h (\kappa')^2} \left[\zeta \ln(2) + 1 + \frac{1}{2} \ln(\zeta) + \frac{1}{2} \zeta \{ \ln(\zeta) - 2 \} - \frac{1}{8\zeta} \{ \ln(\zeta) + 2 \} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{-4\zeta + 2}{4\zeta^2 - 1} \right) \right] \\ &+ \frac{v}{u_* h (\kappa)^2} [(n - m) \{ \ln(4) - 1 \} + n \ln(n) - m \ln(m)] \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $\zeta = \kappa' u_s (\alpha d - \delta_L) / v$ 、 $\xi = \zeta + \sqrt{\zeta^2 + 1/4}$ 、 $m = \kappa \{ u_* (\alpha d) / v \}$ 、 $n = \kappa (u_* h / v)$ である。ここに v : 平均流速、 ν : 水の動粘性係数、 h : 水深、 A : 流速分布式内で決定される定数である。

上記の式から、単位幅流砂量 q_s および単位幅流量 q はそれぞれ次のようにまとめられる。

$$q_s = V \cdot v_s = f_{nc.1}(u_*, u_{*B}, d, \mu_m, \sqrt{\mu_m \mu_c}, u_{*c}) \quad (4)$$

$$q = f_{nc.2}(u_*, u_{*B}, d) \quad (5)$$

なお、文献1)によると、 $\mu_c = 0.5$ 、 $\sqrt{\mu_m / \mu_c} \cong 0.8$ 、 $u_{*c} = f_{nc.3}(d)$ である。

3. 堆積限界条件の検討 一様砂を対象とした前報の理論においては、堆積限界の条件として、 $u_{*B} = u_{*c}$ を用いていた。そのため、(4)および(5)式から、ある任意の q に対して、 q_s が一意に決定された。しかし、同様の条件を混合砂問題に適用することは困難と思われる。つまり、堆積が全ての粒径成分において同時に生じるとは言えず、また、必ずしも最大粒径から堆積が始まるとも言えない。河床面近傍の流速分布形や粒子相

互の遮蔽効果に支配されて各粒子の運動特性が変化するので、場合によっては、最小粒径から先に堆積すること十分に考えられる。ここでは、新たに堆積限界の条件について検討を行った。

筆者らは、これまでに図-1に示した一様砂(A, B-sand)を用いて堆積限界の実験¹⁾を行っている。そこで、(5)式において q に実験流量を与え、 u を様々に変化させた時の u_B を求めたのち、(4)式から q_s を計算した。図-2は、計算結果を適当な無次元数によって整理したものである。 $u_B/u_c = 1.0$ を示す破線と、各曲線の交点が、これまでの堆積限界条件を用いて計算されていたものに相当する。いずれの曲線についても、 $u_B/u_c = 1.0$ の付近で最大値を持つことがわかる。同時に、その最大値は、破線上に描点で示した実験値と比較的よく合っている。これらのことから、堆積限界条件は、 q_s が最大になるときであると考えた。

4. 混合砂の流砂量 任意の粒径混合をもつ土砂群を粒径 $d_i (i=1 \sim n)$ 、配合割合 $f_s(d_i)$ の離散的集合体として取り扱う。各々の粒径について一様砂に関する流砂モデルを適用するならば、粒径 d_i の砂礫の平均移動速度 v_{si} は、つぎのよう表される。

$$v_{si} = u_{bi} - \sqrt{1/\varepsilon_i} \sqrt{\mu_m/\mu_c} u_{bc} \quad (6)$$

ここに、 u_{bi}, u_{bc} : 粒径 d_i の砂礫に関する流体抗力の代表流速、 ε_i : 粒子相互の遮蔽効果を考慮した抗力の有効面積比である。なお、抵抗則（流速分布関数）は、(5)式中の d を平均粒径 d_m にしたものを用いた。文献1)によると、 $\sqrt{\mu_m/\mu_c}$ は粒径の大小に応じて変化させるべきものかもしれないが、ここでは一定値とした。粒子相互の遮蔽効果は、流砂がかなり高濃度とならない限り働かないと思われたので $\varepsilon_i = 1$ とした。

混合砂を対象とした堆積限界掃流砂量式は、次式のようなである。

$$q_s = (u_c^2 - u_B^2) / \left\{ sg \sum (\mu_m f_s(d_i) / v_{si}) \right\} \quad (7)$$

今のところ、本モデルの妥当性を検討できるだけの十分な実験ケースは用意できていないが、図-1に示すc-sandを用いて試験的に行った実験結果があったため、3.と同様の計算を行った。図-3において、3本の曲線は、 $\sqrt{\mu_m/\mu_c}$ に3種類の値を与えた際の計算値、破線で示されているのは実験値である。この実験条件に関しては、 $\sqrt{\mu_m/\mu_c} = 0.7$ としたときの計算値が、最も実験値に近づいた。文献1)によると、この値は妥当なものであることがわかる。

5. おわりに 現在のところ、本モデルによる堆積限界掃流砂量の算定には繁雑な計算が必要となっている。今後は、河床変動計算などに組み入れることを前提に、汎用性の高い形式に定式化し直すことを検討したい。

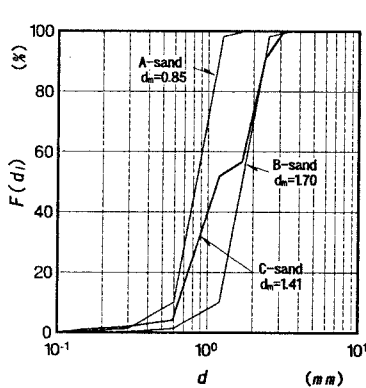


図-1 実験砂の粒度分布

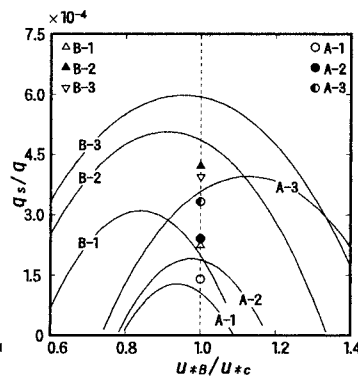


図-2 一様砂の流砂量式の特長

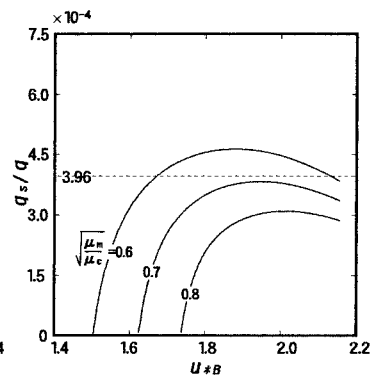


図-3 混合砂の流砂量式の特長

「参考文献」 1)岡部・穴瀬・山下：水工論文集 第38巻，pp. 633-640，1994

2)穴瀬・岡部・松井：土木学会第49回年講，2-A，pp. 404-405，1994