

山地溪流での河床変動を扱う際の実用モデルと試行例(3)－細粒成分土砂の取り扱い－

日本工営(株) ○伊藤隆郭, 長山孝彦, 渡部春樹, 山崎祐介, 京都大学名誉教授 藤田正治

1. はじめに: 筆者らは山地溪流における実用的な 1 次元河床変動モデルを開発・適用してきており、モデルでは、勾配の小さい扇状地域へ流砂が連続して受け渡されるような工夫も行っている²⁾。計算結果と流砂観測データの比較のため、実出水で観測された観測枡や濁度計の計測値と比較した³⁾。その結果、掃流砂量は比較的良い一致を見たが、細粒成分は、ある粒径階での土砂濃度の再現がよいものの、土砂量全体の予測には過大な予測結果が得られ³⁾、特に、浮遊砂の基準面濃度の改良が必要となった。前報⁴⁾の浮遊砂の基準面濃度の扱いに続いて、細粒成分土砂の計算上での扱いについて、現有知見を整理した。なお、細粒成分土砂の時空間の追跡には、乱流構造の扱いには改良を加えず、一部、巻き上がり・沈降と拡散型モデルによる枠組みを用いる。

2. 実用的な 1 次元河床変動モデル: 崩壊・土石流と云った間欠的に発生する一次的な生産土砂(1 次生産)は、土石流等の形態で流下し河床勾配が 3~5° の領域で堆積することは経験的に知られている。さらに、一次生産土砂は流水の作用を受け、掃流・浮遊・ウォッシュロード⁵⁾の形態で流水と連続的に流下することも知られている(2 次生産)。1 次生産の土砂移動形態のうち、水面付近に清水層が形成される土砂流は、流水流の影響が強く、河床勾配が 12° 程度以下の領域で形成される。したがって、河床勾配が 10° 以下の領域では、流水の作用によって、土砂流~掃流・浮遊の土砂移動形態となり、掃流砂量式や浮遊砂の巻き上がり・沈降モデルによる計算が出来るようになる²⁾。

この場合、従前によく知られた河床変動に関する式

系を用いることになるため、河床侵食・堆積に対して侵食速度等の湧きだし・吸い込み項を用いずに、式系の定数同定を行う必要がない。

1) 浮遊砂の基準面濃度: 既往検討⁴⁾では、既往の実験データに対して外挿線を引き、以下に示すように定式化した²⁾。現状では、基準面濃度を頭打ちとする α については、前報⁴⁾により、 α は 1/3 程度で最大値は 1.0、Garcia-Parker⁵⁾ 等よりも小さいような実用的には 1/3 とする扱いで良いと云った結論を得た。

$$w_k/u_* \geq 0.01 : C_{ek} = 0.0152 \left(\frac{1}{w_k/u_*} - 1 \right)^{0.8} \quad (1)$$

$$w_k/u_* < 0.01 : C_{ek} = \alpha C_* \quad (2)$$

ここに、添字 k : 粒径階の番号, w_k : 砂礫の沈降速度, u_* : 摩擦速度, C_{ek} : 浮遊砂の基準面濃度, C_* : 砂礫の静止堆積濃度である。図-1 の赤線は、式(1)、式(2)や既往研究を比較したものである。静止堆積濃度 $C_* = 0.6$ とした場合、 $\alpha = 1.0$ のときは基準面濃度が 0.6 (図中 C)、 $\alpha = 1/3$ のときは基準面濃度が 0.2 (D) である。(B) は、 $0.3^5)$ である。

2) 河床変動モデル: 混合砂による時間発展は、流砂の出入り、浮遊砂の乱流拡散や巻き上・沈降による河床位の時間変化や粒径の時間変化を解くことになる。今回、式(4)の巻き上がり E に対する取り扱いを行ったため、式系全体は閉じると共に、経験的な係数を持ち込むことが無くモデルが構成されることになる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{B} \sum_k \left\{ \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial B_b q_{bk}}{\partial x} + \frac{1}{1-\lambda_s} B_s (E_{sk} - D_{sk}) \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (A c_k) + \frac{\partial}{\partial x} (A u c_k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \varepsilon_{sk} \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + B_s (E_{sk} - D_{sk}), \quad (4)$$

$$E_{sk} = w_k c_{ek}, \quad D_{sk} = w_k c_{ak} \quad (4)$$

$$c_{ak} = c_k \alpha / (1 - e^{-\alpha}), \quad (5)$$

$$\alpha = 15 w_k / u_* (1 - a/h), \quad a/h = 0.05 \quad (6)$$

ここに、添字 k : 粒径階の番号, q_{bk} : 流下方向 x の粒径階 d_k の単位幅の掃流砂量, E_{sk}, D_{sk} : 粒径 d_k の浮遊砂の河床付近における単位面積当たりの浮上量と沈降量, z_b : 河床高, λ_b, λ_s : 掃流砂、浮遊砂の空隙率, B : 河道幅, B_s : 流砂幅, c_k : 浮遊砂の粒径 d_k の断面平均濃度, u : 断面平均流速である。式(3)、式(4)において、浮遊砂に加えて、ウォッシュロード(W.L.)を含む場合には、次項で示すように取り扱いが異なってくる。

3) 細粒成分の取り扱い: 図-2 は土石流から掃流砂流のアナロジーで細粒土砂の流れを類推した流れのモデルのイメージ⁶⁾ である。図の右側が泥流から浮遊砂流における遷移モデルである。移動床河床底面付近に掃流等の流砂移動層が形成されるとすれば、浮遊砂流はその上方に乗り乱流拡散が卓越する流れとして扱うことが出来るとした考え方である。ただし、W.L.を含むような細粒成分の流れにおいては、移動床流れとして、そもそも存在するかどうか等も既往研究には殆どなく、同図のようなアナロジーを満たすかどうか不明である。

さて、W.L.を含む細粒成分の取り扱いには、これまで

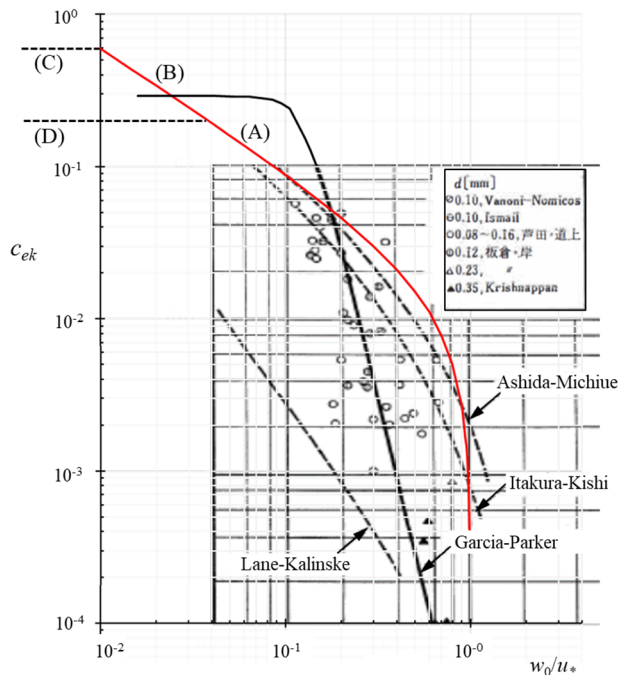


図-1 基準面濃度の定式化と上限値の設定

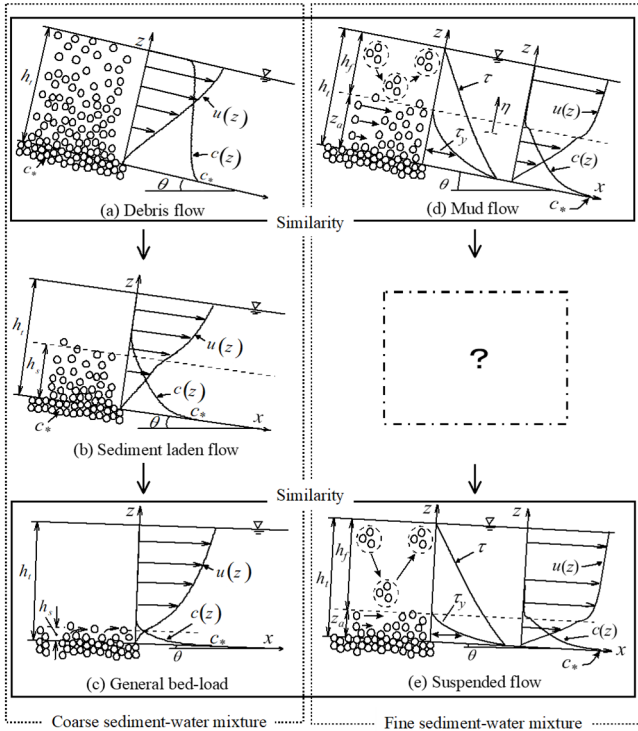


図-2 流れのモデル⁶⁾

幾つかのアプローチがあるようである。

- ①河床・側岸侵食により砂礫の周囲に存在する W.L.を生産量(巻上量)として扱う方法
- ②ダム貯水池のような流れの緩い場で、流水により侵食をする現象を経験式で表現したものを適用する方法
- ③ ①・②の扱いも可能とするが、河床材料・生産場の粒度分布から、移動限界=浮上境界の粒径(約 0.1mm)よりも小さい土砂は除外するか泥水とする方法。
- ④W.L.等の細粒成分が流水(液相)に取り込まれ、流体と同様の振る舞いをするような相遷移として扱う方法。

図-3は、これらの①~④を模式的に示したものである。①、②については、それぞれ、例えば、江頭ら⁷⁾、岩下ら⁸⁾の既往研究があり、①はW.L.の生産を場の最大値程度に見積もる可能性があり、②は急流溪流の流れ場にそのまま適用が可能かどうかの検証が必要と思われる。③は従前から実用に多く供される方法で、著者らの方法も同様である。④は、現象が難解であり^{6),9)}、

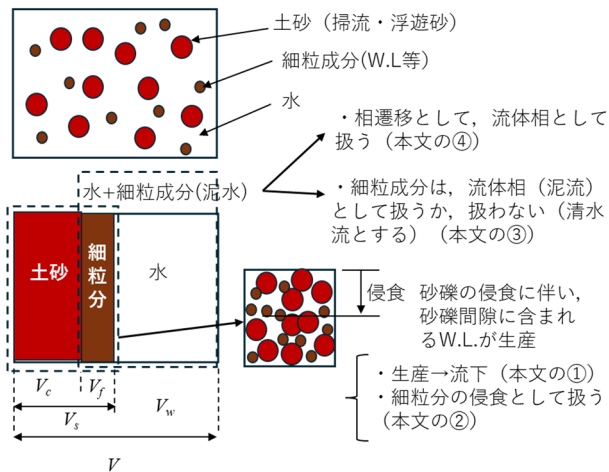


図-3 細粒分の扱いの整理図

未だ統一的に表現されている段階にはなく、定式化も実用に供されるレベルには達していないと考えられる。①や③は、既往の取り扱いであるので、一部、実験式の段階であるが、②について、定式化しておく。

浮遊砂とW.L.を式(4)のように、巻上・沈降型にする場合、式(4)の D_{sk} が、 $D_{sk} + D_{wk}$ のように置き換えられる。

まず、W.L.の沈降水量 D_{wk} は、底面摩擦速度と浮上境界を示す摩擦速度との大小で次式のように算定される。

$$D_{wk} = w_k c_{ak} (u_* \leq u_{*dk}), 0 (u_* \geq u_{*dk}) \quad (7)$$

ここに、 u_{*dk} : 粒径 d_k の M.L. 粒子が沈降不可能になる摩擦速度であって、沈降限界の摩擦速度とほぼ等価で、沈降速度 w_k と同程度と見積もられる ($u_{*dk} \cong w_k$)。実際の計算においては、式(5)、式(6)の浮遊砂における沈降水量 D_{sk} と同様の算定法を用いる。例えば、芦田・道上式での扱い¹⁰⁾と同様になると、 $\xi_0 = w_{sk}/\sigma_p$ 、砂粒子の鉛直方向の変動速度 w_p とその標準偏差 $\sigma_p (= 0.75u_*)$ を用いる計算となる。

一方、W.L.の巻上量 E_{wk} には、既往研究が意外と少なく、例えば、岩下ら⁸⁾による実験式を用いることも想定される。ここでは、同式を示すが、この式の適用等については、主として大きい容量の貯水池内での堆積土砂の侵食を扱ったものであり、安易な適用には注意が必要である。

$$E_{wk}/u_{*wk} = P_{bk}\beta(u_*^2/u_{*wk}^2 - 1)^n (u_* \leq u_{*wk}), 0 (u_* \leq u_{*wk}) \quad (8)$$

$$u_{*wk}^2/(sgd_k) = a\{\lambda_w/(1 - \lambda_w)\}^{-b} \quad (9)$$

ここに、 P_{bk} : 粒径階において粒径 d_k が河床中に占める割合、 β, n : 経験定数であって、岩下らによれば、 $(\beta, n) = (4.0 \times 10^{-5}, 1.5) \sim (10.0 \times 10^{-5}, 1.0)$ の範囲が示されている。更に、 u_{*wk} は、粒径 d_k の W.L. 粒子の浮上境界の摩擦速度、 s : 砂粒子の水中比重、 g : 重力加速度、 λ_w : W.L. の空隙率、 a, b : 岩下らによる経験定数である ($a = 20 \sim 40, b = 2.0$)。 β, n, a, b の経験定数や式(8)・式(9)が一般性を有するかは、今後の更なる検証が必要である。

3. おわりに: 前報⁴⁾に続き、山地溪流における実用的な河床変動計算モデルの確立を目指した取り組みのうち、細粒土砂の扱いについて整理した。浮遊砂の時空間の追跡には、巻き上がり・沈降と拡散型モデルによる枠組みを用いるとすれば、既往の浮遊砂研究の成果を山地河川の流砂現象にそのまま適用することになる。一方、W.L.成分のような細粒成分を扱おうとする場合には、幾つかの取り扱い方があり、最善手法の結論を出すには更なる研究を待つ必要があるようである。

参考文献: 1) 渡部ら: 令和2年度砂防学会研究発表会概要集(砂防学会予稿と略), 207-208, 2020, 2) 伊藤ら: 令和6年度砂防学会予稿, 21-22, 2024, 3) 濱原ら: 令和3年度砂防学会予稿, 373-374, 2021, 4) 伊藤ら: 令和7年度砂防学会予稿, 37-38, 2025, 5) 関根雅人: 移動床流れの水理学, 共立出版, 2005年2月14日, 6) 伊藤隆郭: 立命館大学学位論文, 2001, 7) 江頭ら: 水工学論文集, 44, 735-740, 2000, 8) 岩下ら: 電力土木, No.212(1998.1号), 98-103, 9) 西口幸希: 京都大学学位論文, 2014, 10) 芦田ら: 京大防災研年報, 13号B, 233-242, 1970.