

二層流モデルによる土石流の二次元氾濫シミュレーション

岐阜大学工学部 ○高濱淳一郎

岐阜大学流域圏科学研究センター 藤田裕一郎

アジア航測(株) 吉野 弘祐

1. はじめに 著者らは、土石流の堆積過程において土石流から掃流状集合流動への遷移過程における砂礫層と水流層の非定常状態を合理的に解析するために二層流モデルを提案し、一次元水路による実験との比較を行い、全体的な堆積侵食の傾向や堆積に伴う水流層の分離過程を再現できることを示した¹⁾。本報では二層流モデルを水平二次元シミュレーションに拡張する方法について述べ、数値実験を行った結果を示す。

2. 基礎方程式 二層流モデルでは、図-1 に示すように水流層と砂礫移動層との interface を通した水流のフラックス s_I (上向き正) と interface の速度ベクトル $\vec{u}_I = (u_I, v_I)$ に応じた運動量フラックスを導入して導かれる保存則に基づいて各層毎の支配方程式が導かれている。このモデルを水平面上に x, y 軸を設定した座標系を用いて二次元に拡張すると支配方程式は次式で示される (運度方程式(5)(6)は x 方向のみ示している)。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial M_w}{\partial x} + \frac{\partial N_w}{\partial y} = s_I \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial M_s}{\partial x} + \frac{\partial N_s}{\partial y} = s_T - s_I \quad (2)$$

$$\frac{\partial(c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x c_s M_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y c_s N_s)}{\partial y} = c_s s_T \quad (3) \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} = -s_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{wx} u_w M_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{wy} v_w M_w)}{\partial y} - s_I u_I = \frac{1}{\rho_w} \left\{ -p_I \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_{wx} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\gamma' \rho_s M_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{sx} \rho_s u_s M_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{sy} \rho_s v_s M_s)}{\partial y} + \rho_w s_I u_I = -p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_I \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_{wx} - \tau_{bx} \quad (6)$$

ここに、添え字の s, w はそれぞれ砂礫層と水流層に関する物理量を示し、 $M = uh$, $N = vh$, u, v はそれぞれ x 方向, y 方向の層平均流速, h は流動層厚, ρ は層平均密度, P は層厚に渡って積分した圧力である。また, p_I, p_b はそれぞれ interface における圧力, 河床における圧力, c_s, c_* はそれぞれ砂礫層平均濃度, 停止堆積層濃度, z_b は河床高, s_T は侵食速度, τ_{wx}, τ_{bx} はそれぞれ interface におけるせん断応力の x 方向成分, 河床面せん断応力の x 方向成分である。また, γ, γ', β は流速と濃度の分布に基づく補正係数であるが, 以下の解析ではすべて1とした。解析にあたっては一次元モデルに採用した一様濃度近似¹⁾を導入し, 河床面せん断応力と interface におけるせん断応力は江頭らの構成則²⁾を一様濃度に適用したものを用い, 侵食速度は江頭らの侵食速度式³⁾を二層流に拡張したものを用いる。

二次元化された二層流支配方程式に基づいて解析するためには, 砂礫層と水流層の流向が異なる流れ場を取り扱う必要が生じる。ここでは, 以下に示すような評価法を導入した。interface に作用するせん断応力の x, y 方向成分 τ_{wx}, τ_{wy} については, 両層の平均流速方向の差異を考慮するため, 次式のように与えることとした。

$$\tau_{wx} = \rho_w f_w (u_w - u_I) \sqrt{(u_w - u_I)^2 + (v_w - v_I)^2} \quad (7) \quad \tau_{wy} = \rho_w f_w (v_w - v_I) \sqrt{(u_w - u_I)^2 + (v_w - v_I)^2} \quad (8)$$

ここに, f は水流層の抵抗係数であり, interface の流速は砂礫層の流速分布形に基づいて計算している。一次元モデルにおける侵食堆積速度式は次式で与えられている¹⁾³⁾。

$$s_T = |v_I| \tan(\theta_{fd} - \theta_e) \quad (9)$$

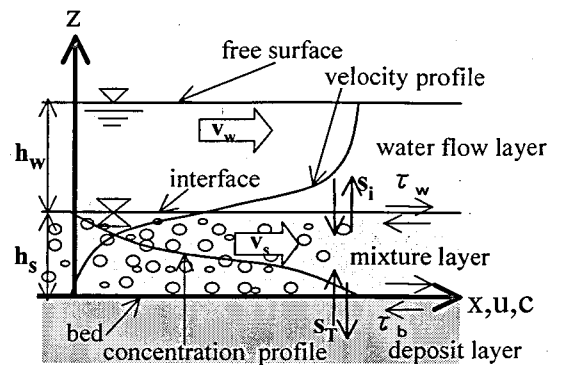


図-1 二層流モデルの模式図

ここに、 v_i は全層平均流速であり、 θ_{fd} は流下方向の勾配となる。ここでは式(9)を二次元流れ場に拡張するため、砂礫層と水流層の流下方向が異なることを考慮して、砂礫層の流下方向に見た勾配を θ_{fd} とし、 v_i は砂礫層フラックスと水流層のフラックスの砂礫層流向成分との和を全流動層厚 h_i で除して与えた。

$$|v_i| = \left| \left(\overline{M_w} \cdot \overline{e_s} + \overline{M_s} \right) / h_i \right| \quad (10)$$

ここに、 $\overline{M_w}$ 、 $\overline{M_s}$ はそれぞれ水流層、砂礫層のフラックスベクトル、 $\overline{e_s}$ は砂礫層の平均流速方向の単位ベクトルである。さらに、砂礫層の停止と再移動を判断・評価するために、宮本⁴⁾が土塊の運動の二次元シミュレーション計算において提案した方法を準用し、二層流に適用した。

3. 数値実験 まず、図-2に示すような固定床水路を有する二つ折れの固定床斜面(上流側 18° 、下流側 4°)の水路上流端から一定濃度・一定量の土石流を定常供給する条件で数値実験を行った。標高2cmの地点が斜面の勾配急減位置である。メッシュサイズは5cmとした。供給開始から5秒後の計算結果を図-3。図から分かるように緩勾配域へ流入した土石流が堆積し、分離した水流は水路内を流下する一方で、水路からあふれて下流へと流下している状況が計算されている。

つぎに、二つ折れの飽和移動床斜面(上流側 18° 、下流側 4°)の上流端中央部から一定流量の清水を一定時間給水する条件で数値実験を行った。メッシュサイズは2cm、侵食可能深は5cmに設定してある。図-4は最終河床形状に関する等高線図である。上流端近傍では侵食可能深まで侵食が進行しており、固定床が露出している。下流側では堆積氾濫が生じており、上流側で固定床が露出して侵食が生じなくなったことに伴い、下流への供給土砂濃度が減少するため、堆積部の上部にみずみちが形成されていることがわかる。以上の結果は、本モデルによって両層の非定常性や流向の差異を考慮した解析が可能であることを示唆している。

4. おわりに 二層流モデルを土石流の二次元氾濫シミュレーションに拡張し、簡単な数値実験を行って考察を加えた。下層の砂礫層と上層の水流層とで流下方向が異なる流れ場においても本モデルでは解析が可能との結果を得た。すなわち、流路内で土石流(砂礫層)の堆積が進行し、流路から水(泥水)があふれて氾濫するような現象解析や土石流の氾濫堆積過程において自然堤防が形成されるような流れ場に対しても有効なモデルであると考えられる。今後、二次元化にあたって導入した評価法について詳しく議論する予定である。

参考文献 1)高濱ら：土石流の堆積侵食過程に関する実験と二層流モデルによる解析，水工学論文集，第46巻，677-682，2002。2)江頭ら：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，第41巻，789-794，1997。3)江頭ら：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，485-490，1988。4)宮本：土塊の運動の二次元シミュレーション，砂防学会誌，第55巻2号，5-13，2003。

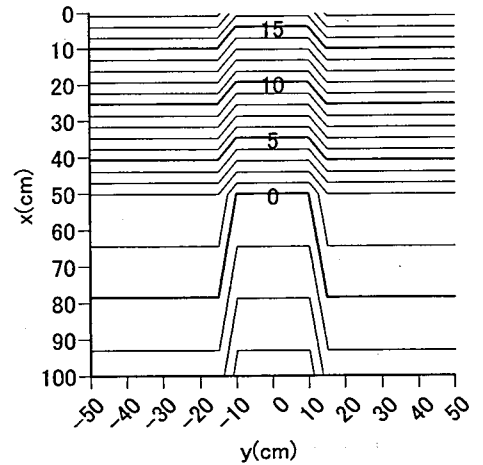


図-2 固定床水路を有する固定床斜面の等高線図 (等高線間隔は1cm)

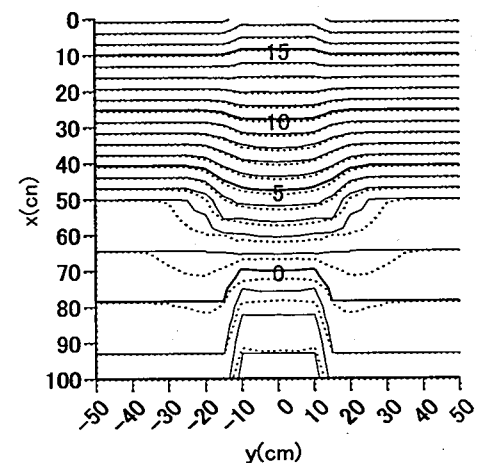


図-3 5秒後の砂礫移動層表面標高(実線)と自由表面標高(点線)に関する等高線図 (等高線間隔は1cm)

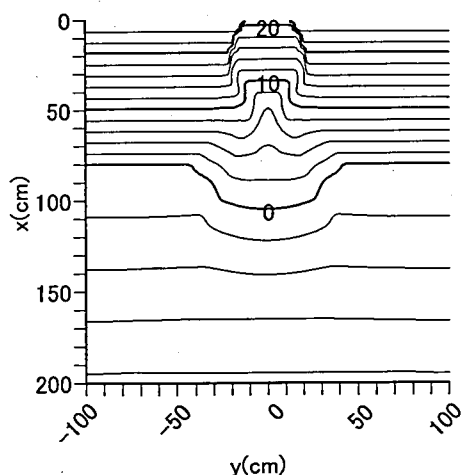


図-4 最終河床形状に関する等高線図 (等高線間隔は2cm)