

緩勾配区間に流入する土石流の堆積過程に関する研究

岐阜大学工学部 正会員 高濱淳一郎
 岐阜大学工学部 正会員 藤田裕一郎
 岐阜大学大学院 学生員 近藤 康弘
 岐阜大学工学部 学生員○蜂谷 圭

1. はじめに 土石流の堆積過程を解析する際に掃流状集合流動や掃流砂の領域を連結して取り扱う必要が生じることは稀ではない。掃流状集合流動の構成則に関する研究¹⁾²⁾³⁾において議論されているように水流層と砂礫移動層の構成則は本質的に異なり、土石流の集合流動状態から掃流砂への遷移を解析するには、この点を反映した議論が必要となる。本研究では、集合流動の水流層と砂礫移動層とのinterfaceの取り扱いに留意して、二層流モデルの各層の支配方程式を誘導し、土石流から掃流状集合流動への流れの遷移、及び堆積侵食に関する解析を行い、従来の土石流シミュレーションモデル、及び実験結果との比較を行った。

2. 解析に用いた基礎方程式 流れが土石流から掃流状集合流動に遷移するとき、砂礫移動層上部に水流層が現れる。このとき、砂礫移動層上面を通して上方への水のフラックスが存在する。逆に、掃流状集合流動から土石流に遷移するときは、二層の interface を通して水流層から砂礫移動層へ水が流入する。つまり、図-1 に示すように土石流、掃流状集合流動では interface を通じての質量と体積のフラックスが介在する。したがって、水流層、砂礫移動層を検査体積として設定すると、interface は実質検査面ではなく、任意に移動する検査面として取り扱う必要がある。また、砂礫層から水流層へのフラックスは水流層にとっての体積と運動量の湧き出しとして解釈される。水流層が interface を通して単位時間あたりに獲得する体積量を s_i とすれば、水流層、混合物全体、及び砂礫部分の体積保存則と河床位方程式はそれぞれ次のようになる。

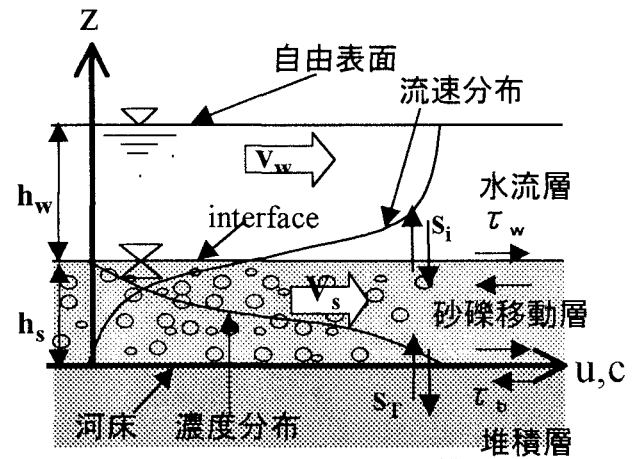


図-1 集合流動の模式図

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w h_w)}{\partial x} = s_i \quad (1) \quad \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s h_s)}{\partial x} = s_T - s_i \quad (2) \quad \frac{\partial(c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(c_s v_s h_s)}{\partial x} = c_s s_T \quad (3) \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} = -s_T \quad (4)$$

ここに、 h_w は水流層厚、 h_s は砂礫移動層厚、 v_w は水流層の平均流速、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度、 c_* は堆積層濃度、 s_T は河床面を通した砂礫層内への湧き出し量（侵食速度）である。

interface を通した質量交換は、interface の速度に対応した運動量の交換を伴うので、水流層、砂礫層の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_i u_i &= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_w \\ \frac{\partial(\rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_i u_i &= \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b \end{aligned} \quad (5) \quad (6)$$

ここに、 ρ_s は砂礫層の平均密度、 ρ_w は水流層の密度、 u_i は interface における x 方向の流速、 P_w は水流層に作用する圧力、 P_s は砂礫層に作用する圧力、 τ_w は interface に作用するせん断応力、 τ_b は河床面せん断応力、 β_w 、 β_s は各層における運動量補正係数である。本研究では、数値計算の基礎式として浅水流モデルの基礎方程式に用いられる座標系を用い、運動量補正係数を一定値 ($\beta_w = \beta_s = 1$) とした運動方程式を用いて解析を行った。

3. 解析に用いた抵抗側と侵食堆積速度 水流層、砂礫層に関する支配方程式を閉じるためには、 τ_w 、 τ_s 、 s_T 、 s_i を評価する必要がある。そこで、次の近似と仮定を導入する。

①砂礫層濃度を一様濃度 ($c = c_*/2$) とする。

②河床面における摩擦角は静止摩擦角とし、流動層内では、見かけの摩擦角としての動摩擦角を与える。

③近似①によって計算される砂礫層厚が全流動層厚より大きくなるときは、土石流として取り扱う。

仮定①②より s_T が求まれば、式(1)(2)より s_i が求まる。

各せん断応力には、江頭らの構成則³⁾を一様濃度に適用したものを用いる。まず、interface におけるせん断応力 τ_w は江頭らの仮想河床を導入した対数則³⁾を用い、また河床面せん断力には江頭らの土石流、層流状集合流動の構成則³⁾を用いそれぞれ次式のように与える。

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_i| (v_w - u_i) \quad (9)$$

$$\tau_b = (\rho_s - \rho_w) g h_s \frac{1}{1+\alpha} \cos \theta \tan \phi + \rho_w f_s |v_s| v_s \quad (10) \quad (\alpha = 0.25)$$

侵食速度は江頭らによる侵食速度式⁵⁾を二層流に拡張して評価する。

$$s_T = v_i \tan(\theta - \theta_e) \quad (11)$$

ここに、 v_i は二層流全体の平均流速、 θ_e は全層平均濃度 c_i に対応する平衡勾配であり、それぞれ以下のように与える。

$$v_i = v_s \frac{h_s}{h_i} + v_w \frac{h_w}{h_i} \quad (12) \quad \tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho-1)c_i}{(\sigma/\rho-1)c_i + 1} \tan \phi \quad (13) \quad c_i = c_s \frac{h_s}{h_i} \quad (14)$$

interface での速度 u_i は、砂礫層の流速分布形を用いて、平均流速との比から計算する。流速分布形は与えられた勾配、水流層厚と砂礫層厚との比、および砂礫層厚と粒径との比を用いて計算する。

4. 解析結果 図-2 には勾配18°の水路の下流に勾配4°の水路を接続させた一次元水路に、単位幅流量 $q_m = 94.8 \text{ cm}^2$ 、供給濃度 $c = 0.302$ の土石流を10秒間供給した場合の解析結果、及び実験結果を示している。各図とも上側に二層流モデルによる計算結果、下側に江頭らの土石流の流動堆積シミュレーションモデル⁶⁾（一層流モデル）による計算結果がそれぞれ実験による堆積形状とともに示してある。実験による堆積形状は実際には礫移動層表面の形状に対応しており、図中の時刻は土石流が勾配変化点に到達した時点からの経過時間である。

一層流モデルによる計算では、土石流の先端部が勾配変化点に到達した後、堆積が生じ、そこから流速の小さい厚い流動層が流下した。これに対し、二層流モデルでは、勾配変化点到達後に流れの上部に水流層が出現し、掃流状集合流動となる。先端部では砂礫層から分離した水流層が流下しており、流動層先端部は一層流モデルより速く流下した。このような結果は現実に起こりうることであり、このような簡潔なモデルで合理的な評価ができることを示唆している。

また、二層流モデルによる砂礫流動層表面と実験値とを比較すると、最終堆積時において実験値より若干下回るものの、それ以外ではよく合致しており、概ね実験値を説明できているようである。

5. おわりに 集合流動の水流層と砂礫層との interface の取り扱いに留意して、各層に対する支配方程式を誘導し、土石流から集合流動への遷移と堆積過程に関する解析を行った。本研究による支配方程式は、水流層が砂礫移動層と完全に分離して流下する過程を取り扱うことができる。今後、実験を実施して広い範囲で比較して、interface の取り扱いに関する検討を行い、精度の向上を図りたい。

参考文献(1)高橋：土石流の停止・堆積に関する研究(3)京都大学防災研究所年報, 25B-2, pp.327-348, 1982 (2)橋本ら：土砂の集合流動について, 第30回水理講演会論文集, 235-240, 1986 (3)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 4)Jun-ichiro Takahama, Kuniaki Miyamoto:

Resistance Principles and Sediment Discharge of High-Density Flow. Proceedings of the International Sabo Symposium, pp.159-166, 1995 (5)江頭・芦田・佐々木：土石流の流動機構, 第32回水理講演会論文集, pp.485-490, 1988(6)芦田・江頭ら：土石流の流動・堆積機構, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-2, pp.411-422, 1988 (7)矢島：土石流の流動と堆積機構に関する研究, 京都大学卒業論文, 1988

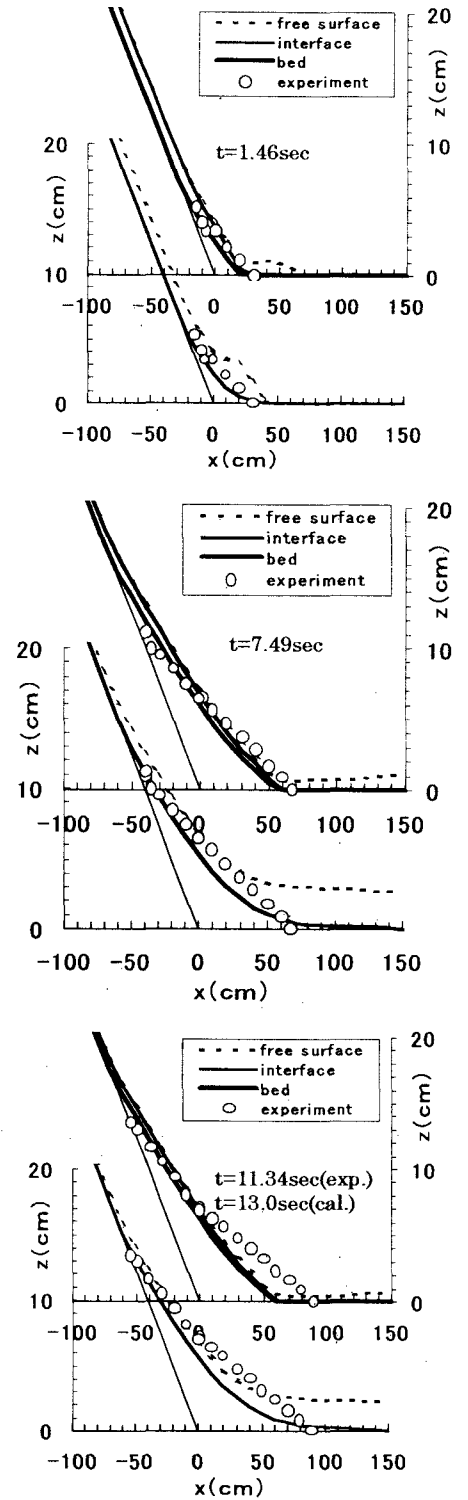


図-2 二層流モデルによる計算結果と一層流モデル、及び実験値との比較