

土石流から掃流状集合流動に遷移する流れの 解析法に関する研究

ANALYSIS METHOD OF TRANSITIONAL FLOW FROM DEBRIS FLOW TO SEDIMENT SHEET FLOW

高濱淳一郎¹・藤田裕一郎²・近藤康弘³

Jun-ichiro TAKAHAMA, Yuichiro FUJITA and Yasuhiro KONDO

¹正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³学生員 岐阜大学大学院 工学部工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Present study deals with transitional flow from debris flow to sediment sheet flow. An analysis method with two layer model presented here is derived on the consideration of an "interface" between flow layers of water and sediment and mass, volume and momentum fluxes through it. The model consists of mass and volume conservation of water and sediment including an equation describing level change of immobile bed as well as momentum equation of the both layer. Result of analysis agree well with those of previous experiments and can improve the defeat of single layer analysis.

Key Words : Debris flow, sediment sheet flow, interface, transitional flow, two layer model

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してはいくつかの研究¹⁾²⁾³⁾がなされていて、これらの研究で共通するのは、土石流の構成則を集合流動の砂礫移動層に適用し、上部の水流層の構成則を議論するという二層流の取り扱いになっている点である。これは、水流層と砂礫移動層の構成則が本質的に異なることによるものであり、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。また、平成11年6月末の広島災害にみられたように、上流部にかなりの土砂が堆積したとしても、土砂から分離した水流(濁流)による流木輸送など下流域への影響を予測評価する必要がある。

そこで、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(体積保存則、運動量保存則)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、およ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存在する。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。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w h_w)}{\partial x} = s_i \quad (1)$$

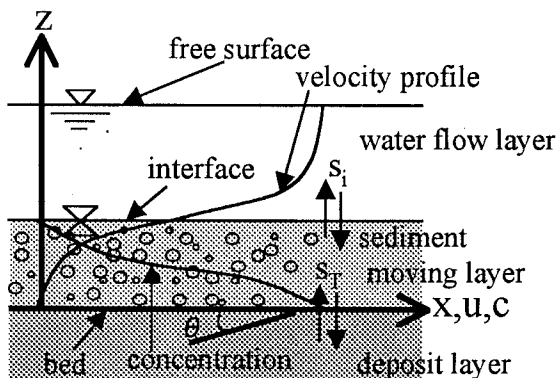


図-1集合流動の模式図

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s h_s)}{\partial x} = s_T - s_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(c_s v_s h_s)}{\partial x} = c_* s_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -s_T \quad (4)$$

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）、 z_b は河床位である。

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、図-1に示す x 方向の運動方程式は水流層、砂礫層についてそれぞれ次式で与えられる。

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

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

ここに、 ρ_s は砂礫層の平均密度で、 $\rho_s = (\sigma - \rho)c_s + \rho$ 、 σ は砂礫密度である。また、 ρ_w は水流層の密度、 u_i はinterfaceにおける x 方向の流速、 θ は河床勾配、 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、数値シミュレーション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た。そして、運動方程式中の運動量補正係数を一定値（ $\beta_w = \beta_s = 1$ ）として式(2)、(3)と砂礫層密度の定義式から誘導した下記の運動方程式により解析を行った。

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w M_w)}{\partial x} - s_i u_i = -g h_w \frac{\partial(h_w + h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\tau_w}{\rho_w} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s M_s)}{\partial x} + \left\{ \left(\frac{\rho_s}{\rho_s} - 1 \right) s_T + \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) s_i \right\} v_s + \frac{\rho_w}{\rho_s} s_i u_i \\ &= -g h_s \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{1}{2 \rho_s} g h_s^2 \frac{\partial \rho_s}{\partial x} - \frac{\rho_w}{\rho_s} g h_s \frac{\partial h_w}{\partial x} + \frac{\tau_w}{\rho_s} - \frac{\tau_b}{\rho_s} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $M_w = v_w h_w$ 、 $M_s = v_s h_s$ 、 ρ_{s*} は堆積層密度である。

3. 解析に用いた抵抗則と侵食堆積速度

水流層、砂礫層に関する支配方程式を閉じるためには、各せん断応力 τ_w 、 τ_s 、侵食堆積速度 s_T 、interfaceを通じた体積交換 s_i を評価する必要がある。そこで、以下の近似、および仮定⁴⁾を導入する。

- ①砂礫層濃度を一様濃度（ $c_s = c_*/2$ 、 c_* は堆積層濃度）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。
- ③①の濃度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①、②により、侵食堆積速度が求まれば、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、次式のように与える。

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

ここに、

$$f_w = \left[\frac{1}{\kappa} \left\{ \left(1 + \frac{\eta_0}{h_w} \right) \ln \left(1 + \frac{h_w}{\eta_0} \right) - 1 \right\} \right]^{-2}$$

ここで、 κ はカルマン定数、 η_0 はinterfaceから仮想河床までの距離で、平均濃度 $c = c_*/2$ での間隙スケールに相当する長さを与える。

河床面せん断力には江頭らの土石流、掃流状集合流動の構成則³⁾を用い、次式のように与える。

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

ここに、

$$f_s = \frac{W + GY_k}{\frac{4}{9} \frac{1}{f(c_s)} GY_k^2 \left[(W + GY_k)^{3/2} + \frac{2}{5} \frac{1}{GY_k} \{ W^{3/2} - (W + GY_k)^{3/2} \} \right]^2} \left(\frac{h_s}{d} \right)^2$$

$$f(c_s) = k_f \frac{(1 - c_s)^{5/3}}{c_s^{2/3}} + k_g \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) c_s^{1/3}, \quad W = \frac{h_w}{h_s} \sin \theta$$

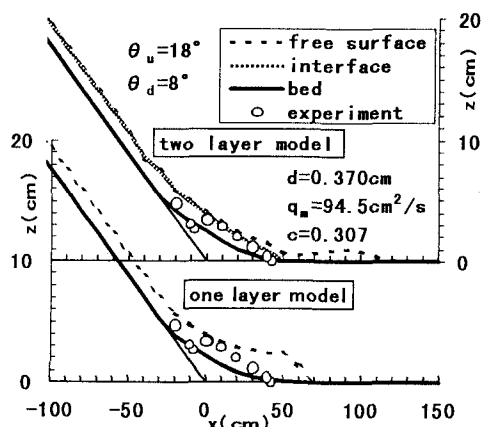


図-2(a) 勾配変化点到達時より2.23秒後

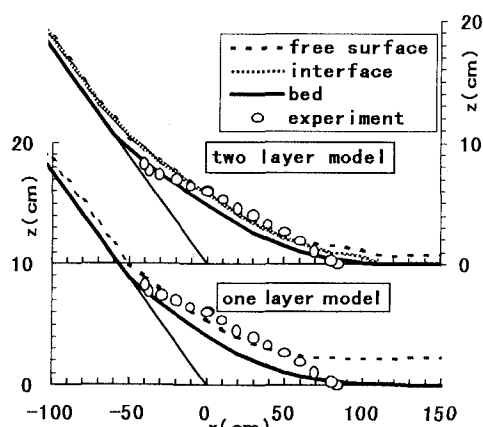


図-2(c) 勾配変化点到達時より8.40秒後

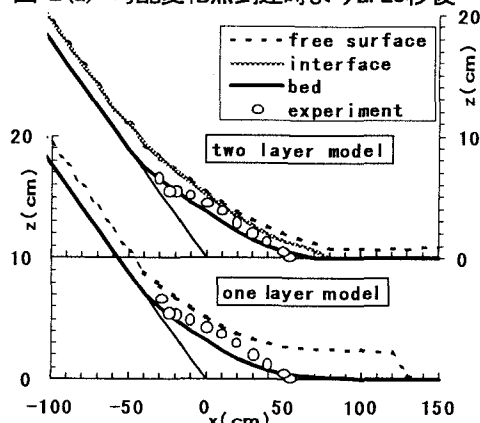


図-2(b) 勾配変化点到達時より4.67秒後

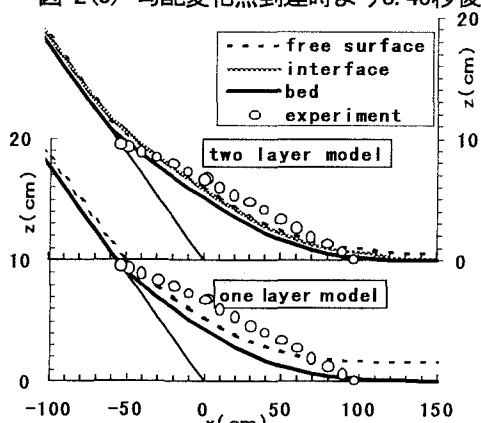


図-2(d) 勾配変化点到達時より11.34秒後
(計算値は13.0秒後)

図-2 土石流の堆積に関する二層流モデルと一層流モデルによる計算値、及び実験値(上流勾配18° 下流勾配8°)

$GY_k = \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_s + 1 \right\} \sin \theta - \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_s \cos \theta \frac{1}{1 + \alpha} \tan \phi$
 k_f, k_g は経験定数でそれぞれ0.16~0.25, 0.0828,
 d : 粒径, e : 反発係数(0.85), ϕ は砂礫の内部摩擦角
 で $\tan \phi = 0.8$ である. なお, 原著で α は濃度の関数と
 なるが, 本解析では一定値 ($\alpha = 0.25$) とした.

侵食速度は江頭らによる侵食速度式⁹⁾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.

$$v_i = v_s \frac{h_s}{h_i} + v_w \frac{h_w}{h_i} \quad (12)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_i}{(\sigma/\rho - 1)c_i + 1} \tan \phi \quad (13)$$

$$c_i = c_s \frac{h_s}{h_i} \quad (14)$$

ここに, h_i は砂礫移動層厚と水流層厚とを合わせた全
 流動層厚である. 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によって定まる. 河床面
 において降伏応力が外力を上回るときは, 底面において両
 者が釣り合うように外力分布を平行移動させて, 抵抗係
 数や流速分布形を計算している.

4. 解析結果

一次元水路における土石流の堆積に関する実験^{6,7)}と
 の比較を行った. 計算方法には, スタガードスキームに
 よるリーブフロッグ法を採用した. 図-2(a)~(d)には勾
 配18°の水路の下流に勾配8°の水路を接続させた固定床
 一次元水路に, 単位幅流量 $q_m = 94.5 \text{ cm}^2$, 供給濃度
 $c = 0.307$ 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. 一方, 図-3(a)~(d)は下流
 側勾配を4°とし, 単位幅流量 $q_m = 94.8 \text{ cm}^2$, 供給濃
 度 $c = 0.302$ で10秒間供給した場合の結果である. 各図
 とも, 上側に二層流モデルによる自由表面, interface,
 及び, 河床高の計算結果が示されており, 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(一層流モ
 デル)による自由表面, 及び河床高の計算結果が実験に
 よる堆積形状とともに示されている. 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, 図-2(d),
 図-3(d)には最終堆積時の実験結果が示されている.

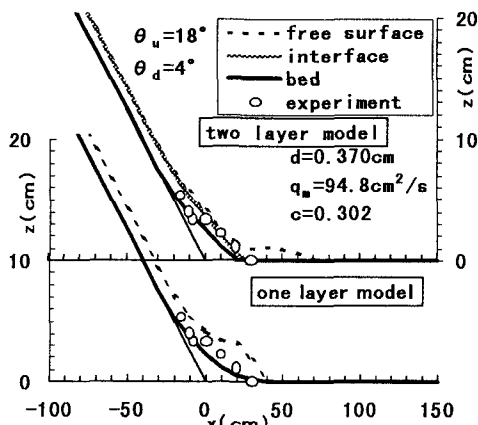


図-3(a) 勾配変化点到達時より1.46秒後

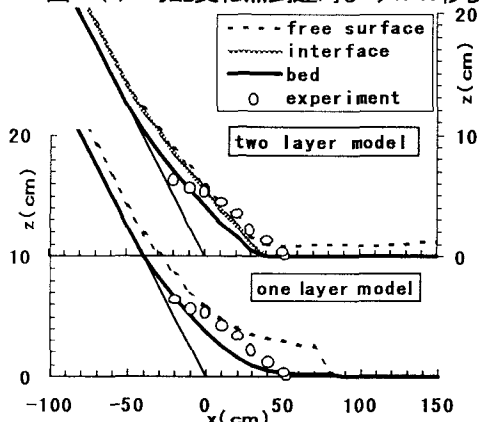


図-3(b) 勾配変化点到達時より3.73秒後

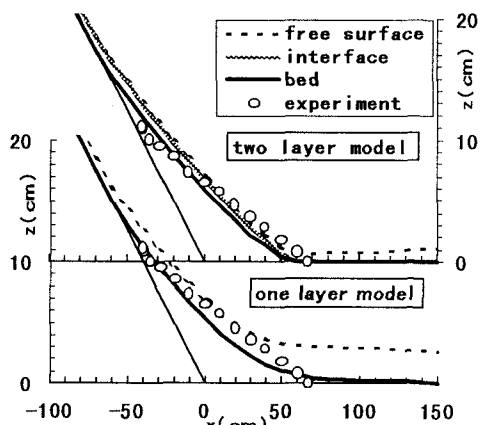


図-3(c) 勾配変化点到達時より7.94秒後

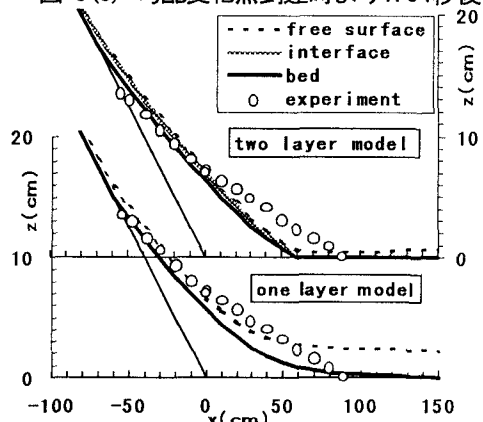


図-3(d) 勾配変化点到達時より11.14秒後
(計算値は13.0秒後)

図-3 土石流の堆積に関する二層流モデルと一層流モデルによる計算値、及び実験値(上流勾配 18° 下流勾配 4°)

一層流モデルでは、土石流のフロント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することになる。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。そして先端部では砂礫層から分離した水流層が固定床上を流下し、その後続流の砂礫層厚は水流層厚に比べ非常に小さく、流動層先端部は一層流モデルより速く流下する。今回の解析では、固定床上の流れを取り扱っているため、分離した水流層が先端部を形成し、その後続流の砂礫層厚も小さくなっていると解釈される。このような結果は現実には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したまわるものの、それ以外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。砂礫

層の抵抗則は砂礫層の濃度(分布)に依存するが、今回の解析では、砂礫層濃度を一定としている。また、砂礫層濃度はinterfaceの体積フラックスにも関係する。今後、実験を実施して広い範囲で比較して、interfaceの取り扱いや砂礫層濃度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, 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

(1999.9.30受付)