

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

TWO LAYER MODEL FOR ANALYSIS OF DEPOSITION AND EROSION PROCESSES OF DEBRIS FLOWS

高濱淳一郎¹・藤田裕一郎²・近藤康弘³・蜂谷圭⁴

Jun-ichiro TAKAHAMA, Yuichiro FUJITA, Yasuhiro KONDO and Kei HACHIYA

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正会員 工修 日本ミクニヤ株式会社 大阪支店 (〒552-0022 大阪府大阪市港区海岸通3-3-3)

⁴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 deposition-erosion process of debris flow with transition between fully dispersed debris flow and sediment sheet flow. A two layer is derived to unify these two kind of flows. An "interface" is introduced between upper layer which is mainly consist of water and lower layer which is mainly consist of sediment. This 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. Numerical analyses were carried out to explain experiments of deposition-erosion process of debris flow and sediment sheet flow on the rigid or movable bed. Calculated results agree well with experimental data for wide range of condition.

Key Words : debris flow, deposition-erosion process, two layer model

1. はじめに

我が国は気候的・地形的特色から、土砂災害の発生頻度が高い国といえる。その中でも土石流災害は大きな被害をもたらしてきており、ハードおよびソフトの両面における対策が重要となっている。土石流発生時の土砂流出予測は対策を講じる上で最も基本的な情報を与えるものであり、中でも、想定規模や流路条件に対して土石流の到達距離や堆積規模を予測評価することはきわめて重要である。土石流の堆積過程では、勾配の減少とともに鉛直方向の濃度分布が変化していくために土砂移動状況が大きく異なることも稀ではない。そのため解析の際には土石流状態から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性が生じる。このような遷移過程に対して、高橋ら¹⁾は各流砂形態を分類し、形態毎に個別の抵抗則を与えて解析する方法を示し、橋本ら²⁾は掃流状集合流動状態における独自の流砂量関数を用いて流砂量の空間的不均衡に基づいた解析法を提案している。一方、江頭ら³⁾は、江頭らの構成則⁴⁾に基づいて平衡状態における濃度分布、流速分布の厳密解を数値計算によって求め、厳密解から抵抗係数と支配

方程式中において濃度と流速が分布を持つことにより導入される形状係数や運動量補正係数に関する簡便な経験則を勾配と濃度の関数として作成して二層流の場に適用している。以上の研究に共通するのは流れの支配方程式が全層を対象とした一層流で与えられていることである。

著者らは、掃流状集合流動の砂礫層と水流層の構成則は本質的に異なるため、本来非定常状態における両層の挙動は各層の構成則を反映したものになるべきであると考え、土石流の集合流動状態について、その低濃度層（水流層）と高濃度層（砂礫移動層）とのinterfaceを想定して、体積保存則、運動量保存則に基づいた砂礫層と水流層それぞれの層の支配方程式をたてて解析する一次元計算モデル（二層流モデル）を提案した⁵⁾。

本研究では、勾配変化点を有する水路を用いて土石流の堆積侵食実験を実施し、二層流モデルによる計算結果と実験結果とを比較し、その適用性について検討した。とくに実用上の観点から、侵食堆積区間の全体的な傾向や最終堆積形状、土砂の到達距離に着目して設定条件間の比較を行った。なお、堆積実験において、非定常性に起因すると思われる河床の折れ曲がり形状が見られたが、この点については別稿⁶⁾で議論している。

2. 解析に用いた基礎方程式

解析には、流れを上層の水流層と下層の砂礫層とに分離した二層流モデルの支配方程式⁵⁾を用いる。

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

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

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

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

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_I u_I \quad (5)$$

$$= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_w$$

$$\frac{\partial(\rho_s \gamma v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_I u_I \quad (6)$$

$$= \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b$$

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、 v_s は砂礫移動層の平均流速、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度であり、 $c_s = c_*/2$ としており、 c_* は堆積層濃度(0.6)である。ここで、全層平均濃度が $c_*/2$ 以上となるときは全層砂礫層として計算し、砂礫層濃度は全層平均濃度($c_*/2$ 以上)となる。 s_T は侵食速度、 s_I は水流層がinterfaceを通して単位時間あたり単位面積あたりに獲得する体積量で、 s_I は二層状態で $c_s = c_*/2$ とすることから求められる。 θ は河床勾配、 z_b は河床位、 ρ_s は砂礫層(混合物)の平均密度、 ρ_w は水流層の密度である。 u_I はinterfaceにおける x 方向の流速であり、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。 g は重力加速度、 P_w は水流層に作用する全圧力、 P_s は砂礫層に作用する全圧力、 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である。式中の β_w 、 β_s は各層の運動量補正係数、 γ 、 γ' は濃度と流速の相関に関する形状係数³⁾である。本研究では、静水圧分布を仮定し、上述の形状係数と補正係数をすべて1とした下記の運動方程式で解析を行った。なお、本研究では x 軸を河床面に沿って設定しているが、河床面の曲率に伴って発生する項は省略している。

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w M_w)}{\partial x} - s_I u_I = g h_w \sin \theta - g h_w \cos \theta \frac{\partial(h_w + h_s)}{\partial x} - \frac{\tau_w}{\rho_w} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s M_s)}{\partial x} + \left\{ \left(\frac{\rho_s}{\rho_s} - 1 \right) s_T + \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) s_I \right\} v_s + \frac{\rho_w}{\rho_s} s_I u_I \\ = g h_s \sin \theta - g h_s \cos \theta \frac{\partial h_s}{\partial x} - \frac{\rho_w}{\rho_s} g h_s \cos \theta \frac{\partial h_w}{\partial x} \\ - \frac{1}{2\rho_s} g h_s^2 \cos \theta \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + \frac{\tau_w}{\rho_s} - \frac{\tau_b}{\rho_s} \end{aligned} \quad (8)$$

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。また、圧力勾配には、interfaceに作用する圧力の x 方向成分も評価している。

また、interfaceに作用するせん断応力 τ_w と河床面せん断応力 τ_b には江頭らの構成則⁴⁾を一様濃度 c_s に適用したものを用いる。

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

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

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

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

$$W = \frac{\tau_w}{\rho_w g h_s} \quad f(c_s) = k_f \frac{(1 - c_s)^{5/3}}{c_s^{2/3}} + k_g \frac{\sigma}{\rho_w} (1 - e^2) c_s^{1/3}$$

$$G Y_k = \{ (\sigma / \rho_w - 1) c_s + 1 \} \sin \theta - (\sigma / \rho_w - 1) c_s \cos \theta$$

ここに、 σ は砂礫密度、 ϕ は砂礫の内部摩擦角である。 κ はカルマン定数であり、 η_0 はinterfaceから仮想河床までの距離で、江頭らは⁴⁾interfaceの位置を濃度0.05に選び、この濃度に相当する粒子間隙スケールで与えている。ここでは、平均濃度 c_s での間隙スケールに相当する長さを与える。 k_f 、 k_g は経験定数でそれぞれ0.16～0.25、0.0828、 d は粒径、 e は反発係数(0.85)である。原著では、(10)式中の α は濃度の関数となるが、ここでは、芦田・江頭ら⁷⁾が実験により近似的に仮定した一定値(0.25)を与えて解析する。

侵食速度 s_T は江頭らの侵食速度式⁸⁾を二層流に拡張して次式のように評価する。

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

ここに v_t は二層流全体の平均流速、 θ_e は全層平均濃度 c_t に対応する平衡勾配であり、全流動層厚を h_t とおけばそれぞれ以下のように与えられる。

$$v_t = v_s \frac{h_s}{h_t} + v_w \frac{h_w}{h_t} \quad (12)$$

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

$$c_t = c_s \frac{h_s}{h_t} \quad (14)$$

3. 実験条件

実験は、土石流の堆積過程と掃流状集合流動への遷移過程、河床状態(固定床あるいは移動床)による相違、および清水の供給による土石流の再侵食過程を調べることを目的として実施した。実験には勾配変化点を有する全長6m、幅10cmの矩形水路を用いた。実験には $d_{50} = 0.342$ cmの一樣砂を用い、河床にも粗度として張り付けてある。実験は表-1に示し実験条件のように一定

量の土砂と水を一定時間供給する方法で実施した。表中の「上流」, 「下流」は勾配変化点を境にした上下流区間を意味し, 上流側勾配は 18° である。また, 表中の「固」は固定床, 「移」は飽和移動床としたことを示し, q_s , q_w はそれぞれ単位幅給砂量, 単位幅給水量であり, 右端の列には混合物の供給時間を示してある。

4. 土石流の堆積過程に関する実験と解析

(1) 固定床実験

図-1は, Run1-1-3 (下流勾配 2° , 供給濃度0.407) におけるinterfaceの時間的変化と最終堆積形状について実験結果と計算結果とを比較したものである。計算結果には二層流モデルの他に, 比較のため, 流れの全層を砂礫層として解析したモデル (ここでは一層流モデルという) についても示してある。なお, 以下における同種の比較では, 土石流が勾配変化点に到達した時点をも $t=0$ として示している。また, 比較図は, 一部を除いて各図とも下流側水路底に沿って設定したx軸を横軸にしており, 原点を勾配変化点にとって, 下流側方向を正, 上流側方向を負としている。図中の△印は実験値における砂礫層表面, あるいは水流層と砂礫層とのinterface位置の実験値を示しており, □は河床の実験値を示している。水流層の先端部位置がビデオカメラで読みとれた場合にはそれを○印で表している。計算結果は, 破線が自由表面 (free surface) を, 細実線が二層流モデルにおける砂礫移動層と水流層とのinterfaceを, 太線が河床 (bed) を表している。実験では土石流の堆積に伴って水流層が出現し, 水流層が流れの先端部を形成している。二層流モデルでは, このような水流層の分離が表現されており, その先端部位置や, 砂礫層の表面 (interface), 及び最終堆積形状も概ね表現できている。一方, 一層流モデルでは, 土石流が堆積する一方で, 流速が小さく流動層の厚い砂礫移動層が流下しており, 土砂の堆積による流砂形態と流れの抵抗の変化を表現できていないことがわかる。

つぎに, 上述の条件から下流側水路を急勾配にするとともに, 供給濃度を低くしたRun1-2-2 (下流勾配 4° , 供給濃度0.349), 及びRun1-3-1 (下流勾配 8° , 供給濃度0.300) に関する比較結果をそれぞれ図-2, 及び3に示す。これらの図から判るように下流側水路を急勾配にし, 供給濃度を低くしていくと, 実験による堆積区間は下流側へと移行していくが, このような勾配や供給濃度の変化に対する二層流モデルの計算結果は実験結果とよく一致している。

全ケースを通じて, 実験では勾配変化点近傍において砂礫移動層表面に上に凸の折れ曲がり形状が見られた。この折れ曲がり形状は, 時間の経過とともに遡上していきながら, その形状を鈍化させ, 最終的には消滅して直線状になっていった。一方, 計算結果では常に砂礫移動

層表面, 堆積面ともほぼ直線状の縦断形となっていた。

(2) 移動床実験

図-4では勾配変化点の下流側区間のみを移動床としたRun2-2-2 (下流勾配 4° , 供給濃度0.392) の堆積過程を全区間を固定床としたRun1-2-3と比較して, interfaceの時間的変化と最終堆積形状の実験結果と計算結果とを示した。下流区間の河床状態を除けば両ケースともほぼ同じ条件である。まず, 両ケースの実験結果を比較すると, 堆積の初期過程である $t=1.60$ 秒後では下流区間を移動床としたRun2-2-2の方が砂礫移動層表面の凸の折れ曲がり形状が顕著に見られる。その後, 両者に有意な差は見られなくなるが, 強いていえば, 下流区間が固定床のRun1-2-3では最終堆積形状がほぼ直線状のわずかに下に凸の緩やかな形状を描いているのに対して, 下流側が移動床のRun2-2-2では直線的だがわずかに上に凸の堆積面形状を呈している。また, 堆積区間の最下流端の位置は, 固定床としたRun1-2-3の方がやや下流側に位置していた。計算における再現性についてみると, 実験で現れた上述の折れ曲がり形状を除けば, 実験値を概ね表現できていると考えられる。

全区間を移動床としたRun3-1-1 (下流勾配 2°) 及び, Run3-2-1 (下流勾配 4°) についても同様の図を示すと図-5のようである。上流側区間では敷き均し後, 飽和させた土砂 (厚さ4cm) が初期に侵食されるため, 上流区間を固定床とした実験に比べて高濃度の土砂が勾配変化点へと流入することになる。また, 実験, 計算ともに, 上流区間の路床上の土塊は時間の経過とともに土石流によって水路床まで侵食されるために上流端から順に固定床となっていく, 土塊が移動する全区間が移動床状態を継続するわけではなかった。全区間を移動床とした場合は実験によるinterfaceの縦断形状に折れ曲がりが見られるものの, その角度は上流側水路床を固定床とした実験で見られたほど鋭角的でなく, 縦断形状はテラス状となっていて, そのような形状の継続時間も河床を固定床とした実験で比べて短くなっている。また, 勾配変化点近傍の砂礫移動層表面の縦断形状も, 初期過程において若干の折れ曲がりが見られるが, 全期間を通じてみるとほぼ直線状といえる。計算値とこれらと比較すると, 水路全区間における砂礫移動層表面の位置が実験結果よりも低くなっており, この傾向は堆積の初期過程や下流勾配を 2° としたRun3-1-1において顕著である。この理由の一つとしては, 上流側河床での計算による侵食量が実験結果よりも小さくなっていったために, 下流区間への土砂流入量が少なくなったことが考えられる。

以上のような若干の違いは見られたが, 本モデルによって移動床上の土石流の侵食堆積現象についても概ね表現できている。本モデルは流砂形態の区分を導入する必要がなく, 砂礫層や水流層の非定常流れ場を直接計算する簡潔なモデルであり, 実用性は高いと考えられる。

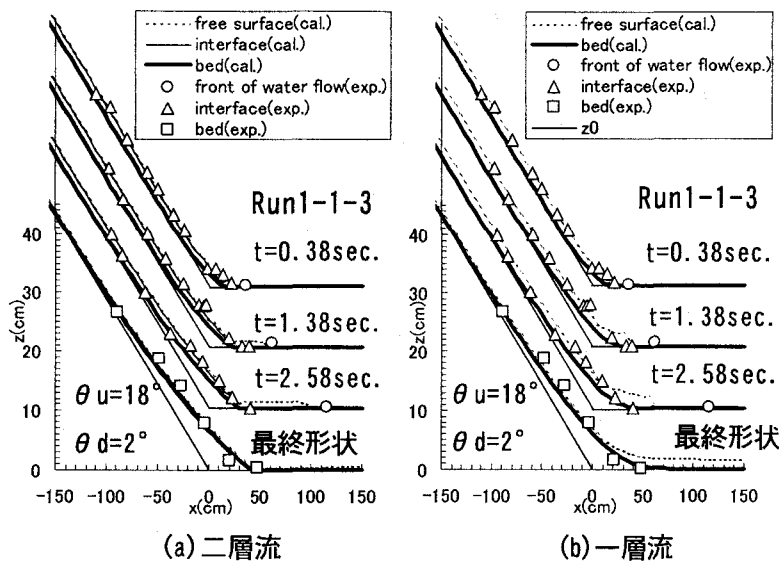


図-1 Run1-1-3 の実験結果と計算結果

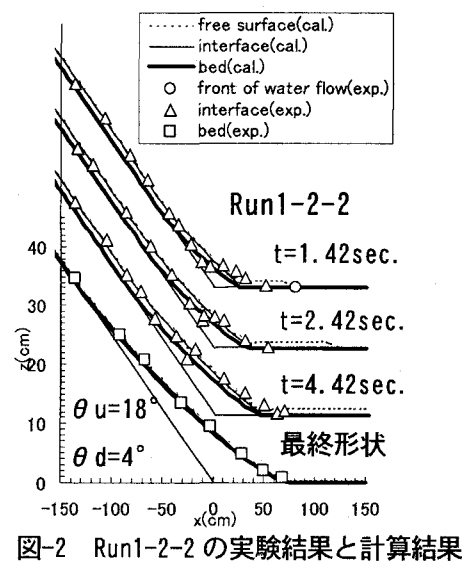


図-2 Run1-2-2 の実験結果と計算結果

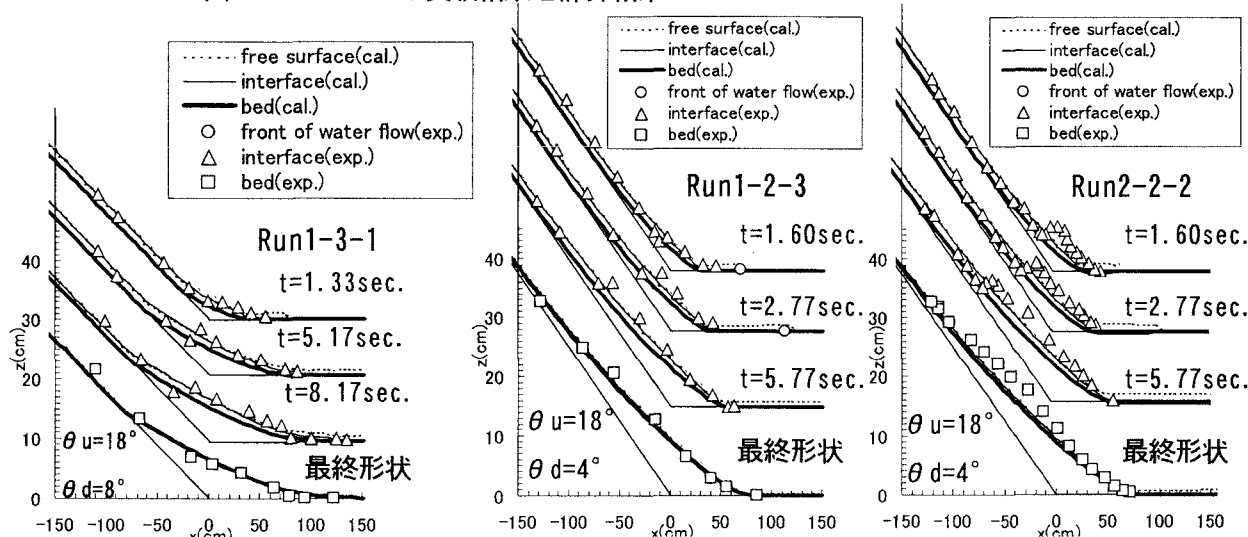


図-3 Run1-3-1 の実験結果と計算結果

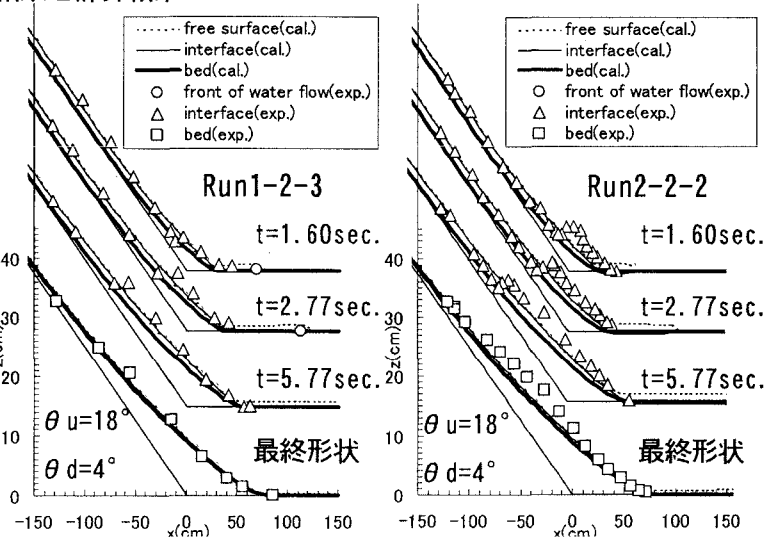


図-4 河床状態の違いによる堆積過程の比較と計算結果

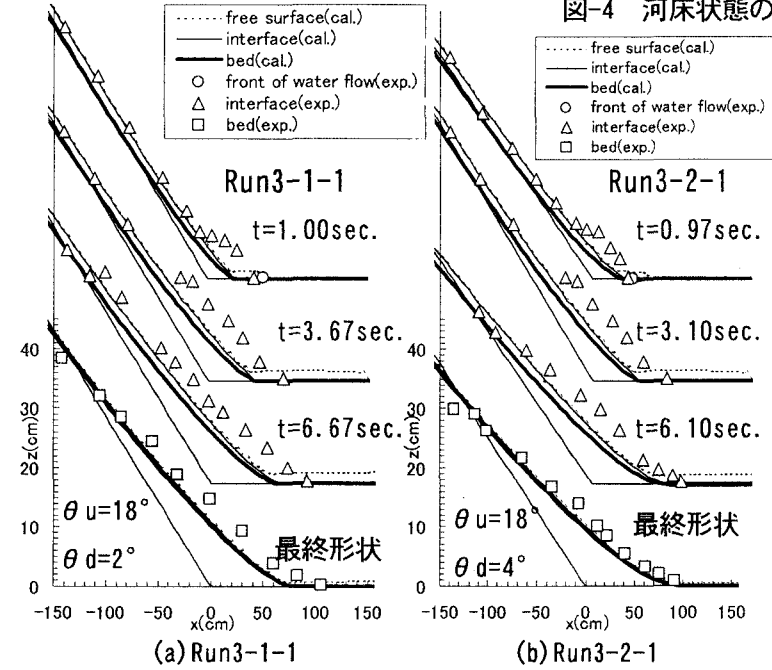
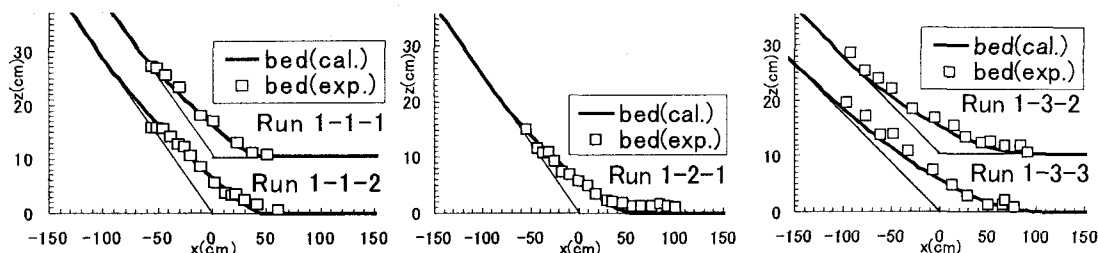


図-5 全区間が移動床の実験結果と計算結果

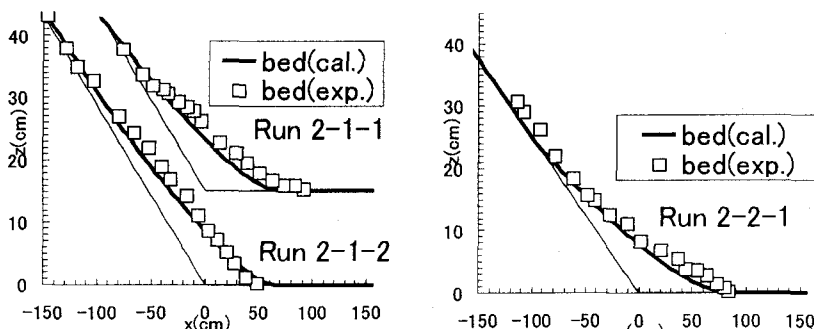
表-1 実験条件

Run No.	上流状態	下流状態	勾配	q_s	q_w	濃度	時間 (sec)
1-1-1	固	固	2°	39.2	89.7	0.304	5.30
1-1-2	固	固	2°	46.8	88.4	0.346	6.02
1-1-3	固	固	2°	55.5	80.7	0.407	6.15
1-1-4	固	固	2°	55.5	81.6	0.405	7.11*)
1-2-1	固	固	4°	39.2	88.8	0.306	5.90
1-2-2	固	固	4°	44.4	82.9	0.349	10.88
1-2-3	固	固	4°	55.5	84.2	0.397	11.41
1-2-4	固	固	4°	55.5	84.6	0.396	5.81*)
1-3-1	固	固	8°	35.6	82.3	0.300	10.86
1-3-2	固	固	8°	44.4	82.4	0.350	5.68
1-3-3	固	固	8°	55.5	81.7	0.405	6.68
2-1-1	固	移	2°	37.7	88.1	0.300	10.49
2-1-2	固	移	2°	51.5	76.2	0.403	10.42
2-2-1	固	移	4°	37.0	85.6	0.302	10.85
2-2-2	固	移	4°	54.6	84.7	0.392	11.24
3-1-1	移	移	2°	40.6	93.3	0.303	10.26
3-2-1	移	移	4°	38.6	90.2	0.300	10.71

上流側河床勾配は18° , q_s, q_w の単位は (cm²/s)
 *) 1-1-4, 1-2-4 は土石流供給後、清水だけをそれぞれ14.4秒間、3.30秒間供給した



(a) 下流側勾配2° (b) 下流側勾配4° (c) 下流側勾配8°
図-6 最終堆積形状に関する実験値と計算値 (全区間が固定床)



(a) 下流側河床勾配2° (b) 下流側河床勾配4°
図-7 最終堆積形状に関する実験値と計算値 (下流区間のみが移動床)

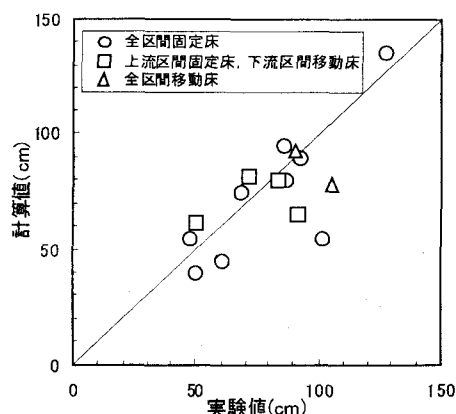


図-8 土石流の最終到達距離に関する実験値と計算値

(3) 最終堆積形状、及び土砂到達距離

図-6, 7は、先に示したケース以外の土石流の堆積実験における最終堆積形状と二層流モデルによる計算結果とを比較したものである。これらの図からもわかるように、実験の最終形状に対する二層流モデルの $t=15$ 秒における計算結果は、下流側勾配、供給土砂濃度、供給時間などの実験の設定条件を変えた場合や移動床上で侵食堆積が生じるといった路床条件など、幅広い実験条件に対して実験の最終堆積形状とよく合致している。この図-1~7における土石流の最終堆積区間の下流端位置、すなわち土砂到達距離について実験値と計算値とを比較すると図-8のようである。土石流対策を講じる上で、想定規模や流路条件による土石流の到達距離の変化を予測評価することはきわめて重要であり、図-1~8の結果は本モデルが幅広い条件に対して土石流の到達距離予測しうる可能性を示しており、このモデルの有用性を示唆するものとなっている。

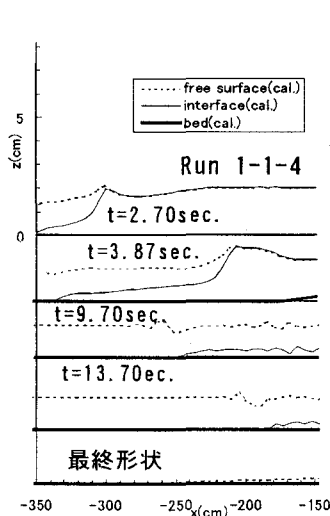
では砂礫移動層厚が厚くなり、かつ盛り上がっている。これは、この部分でinterfaceを通じて水流層から砂礫移動層へ水流フラックスがあること、および水流層から大きな圧力が砂礫層に作用していることによると考えられる。再侵食過程の計算結果では、再侵食による土砂移動が実験よりも遅くなる傾向が見られ、砂礫移動層厚も実験よりも小さくなって、その上流端位置は実験値よりも上流側となっている。すなわち、計算値では砂礫移動層が上流側まで薄く分布している。途中経過では両者にこのような違いがみられるが、最終堆積形状は両者でかなりよく一致している。

図-10は、土石流を5.8秒供給後、清水を3.3秒供給したRun1-2-4における実験値と計算値とを比較したものである。この実験においても、計算では再侵食による土砂移動が実験よりも遅くなる傾向が見られ、最終堆積形状についても実験では下流区間で薄い堆積層が形成されているが、計算ではこのような堆積層が見られず、その分土砂到達距離が短く評価されている。このように、本モデルでは清水供給時間が短い場合の再侵食過程については必ずしも適用性が十分高いとは言えない。しかしながら、これらの点と導入した近似や仮定を吟味することで容易に改良できるので、今後広い条件に対応できるようになると考えられる。

5. 土石流の再侵食過程に関する実験と解析

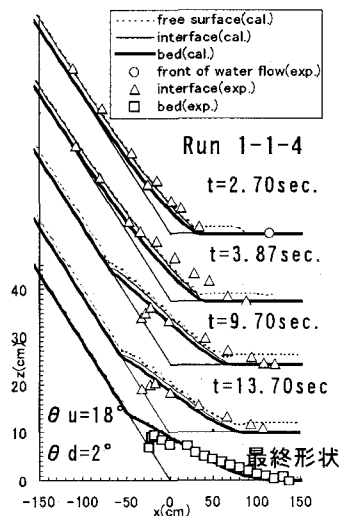
図-9にはRun1-1-4に関する実験値と計算値とが示されている。図の(a)は水路床上流区間における流れの計算値のみを示している。この実験では、土石流を7.1秒供給後、土砂の供給を止めて、清水のみを14.4秒間継続流として供給している。土石流の勾配変化点到達の2.7秒後に土石流先端から水流層が流下し始める一方、上流区間では時間の経過とともに明確となった二層流状態の区間が下流へと伝搬していく。この二層流区間の下流端

6. おわりに



(a) 上流区間拡大図

図-9 土石流の再侵食過程に関する実験結果と計算結果



(b) 下流区間全体図

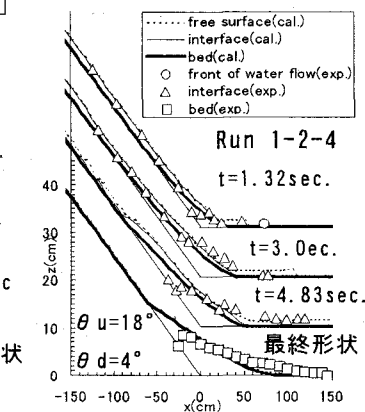


図-10 静水の供給時間が短い場合の再侵食過程に関する実験結果と計算結果

本研究では、提案してきた内部境界を考慮した一次元計算モデル（二層流モデル）を勾配変化点を有する水路における土石流の堆積侵食実験に適用し、実験結果と比較してその適用性について検証した。

水路を固定床とした実験では、土石流は堆積に伴って水流層が分離し、それが流れの先端部を形成していたが、本モデルではこのような土石流の堆積とそれに伴う水流層の分離・流下過程をよく表現することができた。これらの実験では、初期過程において砂礫移動層表面には上に凸の折れ曲がり生じていた。しかし、計算では堆積の初期過程から堆積面は直線状であって、初期過程を十分表現することができなかった。実験で見られたこの形状は、勾配変化点上流側を固定床とした場合に顕著に現れた。全区間を移動床とした場合にはそれほど顕著ではなく、全体を通じてほぼ直線状であった。この折れ曲がり形状は堆積の初期過程においてのみ現れ、堆積区間の遡上とともに鈍化して消滅するものであり、また、折れ曲がり部よりも下流区間については計算値と実験値との適合性は良いために、上述の相違は一次元計算の対象となる現場における流出土砂の総量や到達距離の予測といった実用上の問題には影響が小さいものと考えられる。実際この点は、下流側勾配、供給濃度、供給時間、河床状態（固定床あるいは移動床）を変えた広い条件での実験について解析を実施した結果からも確認された。すなわち、土砂災害対策に必要な最終堆積形状や土砂の最終到達距離は良く予測されており、本モデルの有用性の高いことが示された。さらに現地でしばしば見られる土石流堆積後の清水による再侵食過程に関しても実験を実施し、計算結果と比較した。計算では、再侵食による土砂移動が実験よりも遅くなる傾向が見られたが、最終堆積形状については概ね評価できる結果が得られた。

以上のように検証結果は、二層流モデルは流砂形態の区分を導入する必要がなく、且つ砂礫層や水流層の非定

常流れ場を直接計算する簡潔なモデルではあるが、それによって合理的な評価が行えることを示唆している。

堆積実験において砂礫層表面に見られた上に凸の折れ曲り形状は、勾配急減点近傍における流れの非定常性や河床状態（固定床・移動床）と密接に関係するものと考えられる。この点については稿をあらためて議論したい。

参考文献

- 1) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳土石流による土砂流出の予測，水工学論文集，第44巻，pp.717-722，2000。
- 2) 平野宗夫・橋本晴行・多川博章・玉松潤一郎：樹林帯に作用する土砂・水混相流の流体力と土砂堆積，水工学論文集，第41巻，699-704，1997。
- 3) 江頭進治・本田尚正・高濱淳一郎・伊藤隆郎・有村真一：土石流の再現および構造物等による土砂流出について，1999年6月西日本の梅雨前線豪雨による災害に関する調査研究，平成11年度科学研究補助金（特別研究促進費）(1)，研究代表者福岡捷二，研究成果報告書，p.83-102，2000。
- 4) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郎：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。
- 5) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法に関する研究，水工学論文集，第44巻，683-686，2000。
- 6) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・蜂谷圭・坂本麻矢：勾配急減点における土石流の堆積過程に関する実験とその解析，水工学論文集，第46巻，2002。
- 7) 芦田和男・江頭進治・神矢浩：斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第27号B2，pp.331-340，1984。
- 8) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，pp.485-490，1988。

(2001. 10. 1 受付)