

土石流のシミュレーションと災害の防止軽減

Simulation and Disaster Prevention of Debris Flows

高濱 淳一郎

Jun-ichiro TAKAHAMA

1. はじめに

我が国は国土における山地面積の割合が大きく、また雨量の比較的多い季節を有するといった地形や気候などの条件などから、これまで多くの土砂災害に悩まされてきた。その中でも土石流災害は我が国の自然災害、とくに死者を伴う災害の中で近年大きな比重を占めているため、崖崩れ、地すべりとともに、その防止・軽減対策は社会的に重要な課題となっている。

土石流は三十年ほど前までは実態や発生、流動のメカニズムが解明されておらず、「幻の災害」と呼ばれてきた。現在では数多くの観測・調査結果や理論的・実験的研究の成果を基にした総合的な土石流対策が展開されている。また、平成13年4月1日からは「土砂災害等警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(通称:土砂災害防止法)が施行されている。この土砂災害防止法では、土砂災害(土石流・地すべり・崖崩れ)により被害を受けるおそれがある区域を指定し、情報伝達や警戒避難体制を整備し、住民への周知をはかるとともに、とくに著しい危害が生じるおそれのある区域では特定の開発行為に対して許可制を導入し、建築物の構造規制を設けることが定められており、著しい損壊が生じるおそれのある建築物に対しては移転等の勧告を行う等の措置を講じることとされている。現在ではこのように新たな法整備に基づいた総合的な土石流対策が行われている。

災害に直結する土石流の影響の範囲とその程度を知るためには、流れが物体に及ぼす力や、その流動深、堆積深、速度、およびそれらの結果得られる氾濫範囲など災害に結びつく物理的な諸量を予測することが必要である。そのため、土石流のメカニズムに関する研究成果に依拠した数値シミュレーションが活用されるようになってきている^{1)~13)}。土石流の氾濫シミュレーションでは、谷の出口においてシミュレーションを用いずに流出土砂量を定める方法が取られていた時期もあったが、最近では、流れの上流部から谷の出口までを直接シミュレートすることで流出土砂量を計算するようになってきている。土石流発生時の土砂流出予測は土石流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。ここでは、谷の出口に流出する土石流を予測評価方法として、流れを連続体として取り扱う場合の土石流シミュレーションを対象として、その支配方程式について概説し、掃流砂などを対象とした河床変動計算における基礎式との違いを示す。ついで、土石流から掃流状集合流動への遷移過程を解析するための二層流モデルをその適用例とともに紹介する。最後に、土石流の急変部(狭窄部)における流動現象に関する水路実験結果を示し、土石流の圧力勾配を考慮した侵食堆積現象の評価法について紹介し、その適用結果について示すことにする。

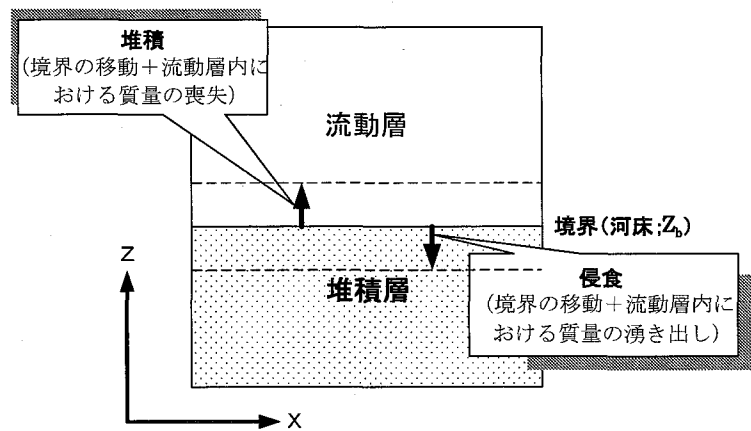


図-1 土石流の流下に伴う侵食・堆積と土石流流動層の質量変化

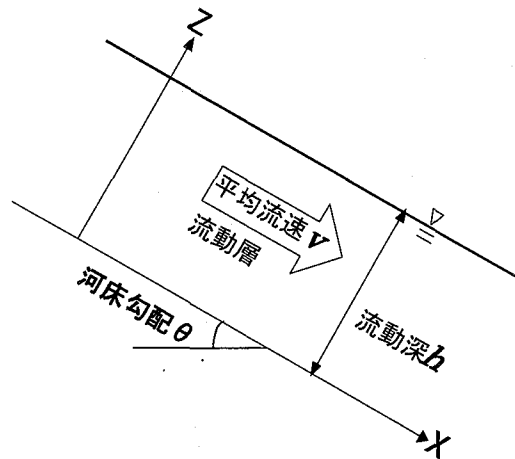


図-2 一次元流れの模式図

2. 土石流解析の枠組み

土石流の流動層をラグランジェ的に追跡すると、流動層の質量（体積、密度）が時間的に急激に変化していることがわかる。このことは、土石流流動層の質量変化を直接計測しなくても、侵食・堆積（流動層にとっての質量の獲得・喪失）が短時間、短区間で生じることからも容易に理解される。そこで、この流動層の変化に着目した形で土石流の支配方程式を導き、質量（体積、密度）が支配方程式にどのような形で現れるかについて述べる。

土石流の流動層を検査体積として設定すると、図-1に示すように、土石流の侵食・堆積現象は「境界（河床）の移動（昇降）」に伴う「検査体積内における質量の“湧き出し・喪失”」と解釈することができる。こう考えると、侵食・堆積に伴う境界（河床）の移動による質量保存則の湧き出し項は、質量の獲得・喪失量を意味することとなる。簡単のため、図-2に示す1次元流れを対象とする。境界（河床）の移動に伴う流れの空間（体積）変化を示す保存則は、土石

流の構成材料（水と固体粒子）が縮まない物質として取り扱えることから、 s_T を単位面積単位時間あたりの体積変化量（侵食・堆積量）として、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = s_T \quad (1)$$

と表すことができる。上式右辺の湧き出し項は検査体積を流動層全層に対応させて定義したことによって現れるものである。このことを、検査体積・検査面の概念を用いて説明する。連続体力学では流体運動を取り扱う際の検査体積・検査面として次の三つの概念がある¹⁴⁾。

(i) 流れ場に固定された検査面 (fixed control surface)

この場合、検査面を通じて流体粒子の出入りがある。

(ii) 任意の方法 (arbitrary manner) で流れ場を運動する検査面

この場合も検査面を通して流体粒子の出入りがある。

(iii) ある体積の中の流体粒子がある時間後にも同じ粒子で構成されるような検査体積

このような検査体積を実質検査体積 (material volume) という。時刻 $t=t_0$ の体積中の流体粒子と時刻 $t=t_0 + \Delta t$ の体積中の流体粒子は粒子の軌跡を通して1対1の対応付けが可能である。すなわち、時刻 $t=t_0$ での検査面内にある流体粒子はすべて $t=t_0 + \Delta t$ での検査面内にあり、それ以外の流体粒子を含まないことを意味している。よって、検査面を通して流体粒子の出入りはない。

土石流の質量保存則を実質検査体積で取り扱うと湧き出し項は現れないことになる。式(1)では、検査体積の下方境界を侵食堆積に伴い変動する河床としており、(ii)の取り扱いとなっている。したがって、この境界面の変動が実質検査体積の境界面と“ずれる”ため、この“ずれ”に対応する項として上式右辺の湧き出し項が現れる。なお、実質検査体積による保存則は、Reynoldsの輸送定理 (Reynolds' Transform Theorem) を用いて固定検査面あるいは任意検査面における保存則として表現することができ、式(1)の左辺は実質検査体積の検査面と固定検査面との“ずれ”に対応している。そして、このようなこの体積変化に伴い、土石流流動層の質量が次の保存則に示されるように変化する。

$$\frac{\partial(\overline{\rho_m}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_m \overline{\rho_m}vh)}{\partial x} = m_T \quad (2)$$

ここに、 $\overline{\rho_m}$ は土石流流動層の平均密度、 m_T は単位時間あたりの質量変化量（侵食・堆積質量）、 γ_m は後述する形状係数である。そして、体積変化の内、砂礫部分だけを取り出すと砂礫の体積保存則は

$$\frac{\partial(\bar{c}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_c \bar{c}vh)}{\partial x} = c_* s_T \quad (3)$$

と表される。ここに、 $\bar{c}, c_*$ はそれぞれ流動層の平均濃度、堆積層の濃度である。また、 γ_m, γ_c はそれぞれ質量と濃度の形状係数（分布補正係数）であり、次式で定義される。

$$\gamma_m = \frac{\int_0^h \rho_m u dz}{\overline{\rho_m}vh} \quad (4)$$

$$\gamma_c = \frac{\int_0^h c u dz}{\bar{c}vh} \quad (5)$$

式(1)、(2)、(3)における右辺の m_T, s_T が流動層内における“湧き出し項”として解釈され、正ならば侵食を、負ならば堆積を意味し、河床を通した質量のやりとりとして解釈される。土石

流の侵食堆積現象は微視的に見た土石流の運動と対応しているため、湧き出し項の評価と構成則との間には整合性が要求されることがわかる。また、この内部湧き出し項は流動層と堆積層の境界の高さである河床高 z_b の時間的変化を用いて、

$$m_T = \rho_m^* \left(-\frac{\partial z_b}{\partial t} \right) \frac{1}{\cos \theta} \quad (6)$$

$$s_T = -\frac{\partial z_b}{\partial t} \frac{1}{\cos \theta} \quad (7)$$

と表現される。ここに、 ρ_m^* は堆積層の密度である。掃流砂などを対象とした場合の砂礫の連続式では式(3)において砂礫層の砂礫部分の体積変化に相当する左辺第1項が無視され、左辺第2項が流砂量の x 方向微分となる。掃流砂を対象とした河床変動解析では、式(3)の左辺第1項

$\frac{\partial(\bar{ch})}{\partial t}$ が無視されるために、流砂量の空間的不均衡に相当する $\frac{\partial(\gamma_c \bar{c} v h)}{\partial x}$ を流砂量関数を用いて評価

することで、河床変動量が計算される。しかし、土石流では流動層濃度が大きく変化するため、 $\frac{\partial(\bar{ch})}{\partial t}$ を無視することが出来ない。また、河床面せん断応力に及ぼす流動層濃度の影響が大

きいことから流動層濃度の評価は重要となってくる。つまり、土石流の解析では侵食堆積速度を別途評価してやる必要が生じる。侵食堆積速度の評価には、運動方程式中の重力項と河床面せん断応力（降伏応力）の大小関係が用いられるが、狭窄部などの流路急変部などの影響は

考慮されていない。

次に、流動層を検査体積とした場合の運動方程式を示す。検査体積の下方境界である河床では流速がゼロであるから、侵食堆積による質量の獲得喪失はあっても、運動量の獲得喪失はない。したがって、土石流流動層の運動方程式は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_m \overline{\rho_m v h}) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta \overline{\rho_m v^2 h}) = \overline{\rho_m g h \sin \theta} - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b \quad (8)$$

ここに、 P は圧力で、深さ方向の濃度を一定と近似すれば $P = \frac{1}{2} \overline{\rho_m g h^2 \cos \theta}$ 、 τ_b は河床面せん断力である。 β は運動量分布補正係数であり、それぞれ、次式で与えられる。

$$\beta = \frac{\int_0^h \rho_m u^2 dz}{\overline{\rho_m v^2 h}} \quad (9)$$

ここで、簡単のため、 $\gamma_m = \gamma_c = \beta = 1$ とし、断面平均量につけた記号 “ $\bar{}$ ” を省略する。式(8)の左辺をフラックスの変化に伴う運動量変化と密度変化に伴う運動量変化に分けると次式のようになる。

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2 h)}{\partial x} \right\} + vh \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + v \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \right) = \rho_m g h \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b \quad (10)$$

式(10)の左辺第2項を式(1)、(2)の質量・体積保存則を用いて書き換えると、運動方程式中に湧き出し項が次式のように現れる。

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2 h)}{\partial x} \right\} + (m_T - \rho_m s_T) v = \rho_m g h \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b \quad (11)$$

ここで、運動方程式(10)、(11)において密度変化による項（湧き出し項）が他の項と比較して無視できるならば、運動方程式(8)は近似的に次式で表される。

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2 h)}{\partial x} \right\} = \rho_m gh \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b \quad (12)$$

従来の土石流氾濫シミュレーションモデル（たとえば水山ら⁵⁾，中川・高橋ら¹⁾）では式(12)の近似式が用いられている。

さて、今度は運動方程式(8)の左辺を速度変化に伴う運動量変化と質量変化に伴う運動量変化に分ける。

$$\rho_m h \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left\{ \frac{\partial(\rho_m h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m v h)}{\partial x} \right\} = \rho_m gh \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b \quad (13)$$

式(13)の左辺第2項を式(2)を用いて書き換えると、湧き出し項が次式のように現れる。

$$\rho_m h \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + m_T v = \rho_m gh \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b \quad (14)$$

固定床上の水の流れでは、式(14)の左辺第2項はゼロになるが、それからの連想で、もしここで、式(14)において左辺第2項を無視すると式(11)との比較から、湧き出し項による影響を大きく削除してしまうことがわかる。この運動方程式の左辺を展開することで、質量変化に伴う項が現れるが、固定床上の水の流れでは、これらの変化に伴う項は現れない。

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、土砂移動状況が大きく異なっていくことも稀ではないので、その解析の際には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。その中の掃流状集合流動の構成則に関しては既にいくつかの研究¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾がなされているが、これらの研究で共通するのは、流れの下層部にある集合流動の砂礫移動層に土石流の構成則を適用し、上部は水流層として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、全層的な土石流から集合流動状態を通じて掃流砂へと遷移する過程を解析するには、この点を適切に反映した議論が必要となる。また、このような取り扱いは、土石流による土砂が上流部にかなり堆積したとしても、土砂から分離した水流（濁流）によって混入していた流木が輸送され、下流域への災害を拡大する場合などを予測評価する際に必要とされるものである。

このような土石流の掃流状集合流動への遷移過程について、中川・高橋ら³⁾は河床勾配を用いて土石流、掃流状集合流動等の領域区分を行い、領域毎に個別の抵抗則を与えた解析方法を示している。また、平野・橋本ら¹⁸⁾は、椿・橋本ら¹⁹⁾の土石流の構成則を掃流状集合流動の砂礫移動層に適用し、限界掃流力の概念を導入して流砂量関数を導き¹⁶⁾、従来の掃流砂などを対象とした河床変動解析手法と同様に、流砂量の空間的不均衡に基づいた土砂の堆積侵食過程を解析している。一方、江頭ら¹²⁾は、江頭らの構成則¹⁷⁾に基づいて二層流の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、土石流の場合と同じ堆積侵食速度を用いて二層流の場に適用している。同時に、彼らは¹²⁾は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ついても厳密解に基づいた近似式を与えている。

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。このような二層流状態とみなされる土砂流出現象を予測評価するためには、各層毎の支配方程式に基づく解析が有効である考えられる。ここでは、著者らによる二層流モデルについて概説し、その適用例について示すことにする。

3. 土石流の二層流モデル 20)21)22)

(1) 基礎式

土砂を混入した流れが土石流から掃流状集合流動に遷移するときには、砂礫移動層上部に水流層が現れることが知られていて、このとき、砂礫移動層上面を通して上方へ移動するの水のフラックスが存在すると考えられる。逆に、例えば勾配が増加して掃流状集合流動から土石流に遷移するときは、二層間の *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-3 に示すように、土石流と掃流状集合流動では遷移現象に *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、

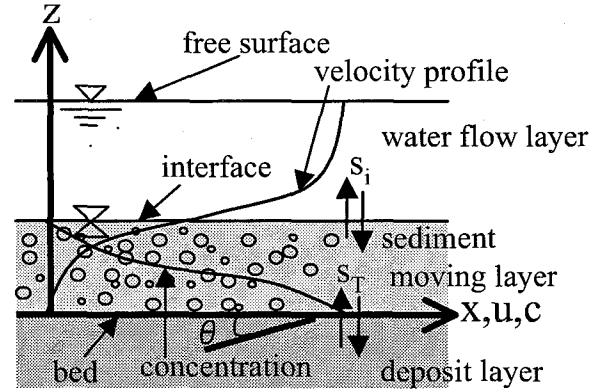


図-3 掃流状集合流動の模式図

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り、砂礫層から水流層へのフラックスは水流層にとってみれば体積と運動量の湧き出しとして解釈される。

そこで、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を s_I とすれば、水流層、混合層全体、及び砂礫流動層の体積保存則と河床位方程式は、図-2 に示す座標系のもので、それぞれ次のようになる。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (v_w B h_w)}{\partial x} = s_I \quad (15)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (v_s B h_s)}{\partial x} = s_T - s_I \quad (16)$$

$$\frac{\partial (c_s h_s)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (\gamma c_s v_s B h_s)}{\partial x} = c_* s_T \quad (17)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{s_T}{\cos \theta} \quad (18)$$

$$\frac{\partial (\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (\rho_w \beta_w B v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_I u_I = \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - p_I \frac{\partial h_s}{\partial x} - \tau_w \quad (19)$$

$$\frac{\partial (\rho_s \gamma v_s h_s)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (\rho_s \beta_s B v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_I u_I = \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + p_I \frac{\partial h_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b \quad (20)$$

ここに、添え字の s, w はそれぞれ砂礫移動層と水流層の量を表す。 B は流路幅、 h は各層の流動層厚、 v は各層の平均流速、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度であり、 c_* は堆積層濃度である。 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ある。 θ は河床勾配、 z_b は河床位、 ρ は各層の平均密度である。 u_I は *interface* における x 方向の流速であり、砂礫移動層の流速分布形を用いて平均流速との比から計算している。 g は重力加速度、 P は各層の側方に作用する圧力、 p_I は *interface* 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であり、次章で説明する。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である。なお、ここでは河床面の曲率

に伴って発生する項は省略している．式(17),(19),(20)に現れる補正係数と形状係数はそれぞれ次式で定義される．

$$\gamma = \frac{\int_0^{h_s} c u dz}{c_s v_s h_s} \quad (21)$$

$$\beta_s = \frac{\int_0^{h_s} \rho_m u^2 dz}{\rho_s v_s^2 h_s} \quad (23)$$

$$\gamma' = \frac{\int_0^{h_s} \rho_m u dz}{\rho_s v_s h_s} \quad (22)$$

$$\beta_w = \frac{\int_0^{h_s} u^2 dz}{v_w^2 h_w} \quad (24)$$

ここに， c, u, ρ_m はそれぞれ河床からの高さ z の位置における濃度，流速，密度で， $\rho_m = (\sigma - \rho_w)c + \rho_w$ である．圧力 P_s の厳密な表現は次式で表される．

$$P_s = \rho_w (\sigma / \rho_w - 1) g h_s^2 \cos \theta \int_0^1 \left[\int_0^1 c dz' \right] dz' + \frac{1}{2} \rho_w g h_w (2h_w + h_s) \cos \theta \quad (25)$$

ここに， $z' = z/h_s$ である．ここで，式(26)で定義される γ_p を導入すれば， P_s は式(27)のように表される．

$$\gamma_p = \int_0^1 \left\{ \int_0^1 c dz' \right\} dz' / \int_0^1 \left\{ \int_0^1 c_s dz' \right\} dz' = 2 \int_0^1 \left\{ \int_0^1 c dz' \right\} dz' / c_s \quad (26)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma_p \rho_w (\sigma / \rho_w - 1) g c_s h_s^2 \cos \theta + \frac{1}{2} \rho_w g h_w (2h_w + h_s) \cos \theta \quad (27)$$

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¹⁷⁾を一様濃度 c_s に適用したものを用いる．

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_I| (v_w - u_I) \quad (28)$$

$$\tau_b = (\sigma - \rho_w) c_s g h_s \left(\frac{c_s}{c_*} \right)^{1/5} \cos \theta \tan \phi + \rho_w f_s |v_s| v_s \quad (29)$$

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

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

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

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¹⁷⁾ 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．

侵食速度 s_T は江頭らの侵食速度式¹⁰⁾を二層流に拡張して次式のように評価する．

$$s_T = v_i \tan(\theta - \theta_e) \quad (30)$$

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，全流動層厚を h_i とおけばそれぞれ以下のように与えられる．

$$v_i = v_s \frac{h_s}{h_i} + v_w \frac{h_w}{h_i} \quad (31)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho_w - 1) c_i}{(\sigma / \rho_w - 1) c_i + 1} \tan \phi \quad (32)$$

$$c_i = c_s \frac{h_s}{h_i} \quad (33)$$

また, interface を通した水流のフラックス s_I は, 砂礫移動層濃度 c_s を与えることで間接的に評価している.

この二層流モデルを二次元汎濫シミュレーションに使用することも可能である. この場合, 上層の水流層と下層の砂礫移動層の流速が平面的に異なるような領域を取り扱うことが可能となる.

(2) 二層流モデルの適用性

ここで, 水理実験との比較等による二層流モデルの適用性について紹介する. 水路実験は, 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 $d_{50} = 0.342 \text{ cm}$ の一様砂を用い, 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.

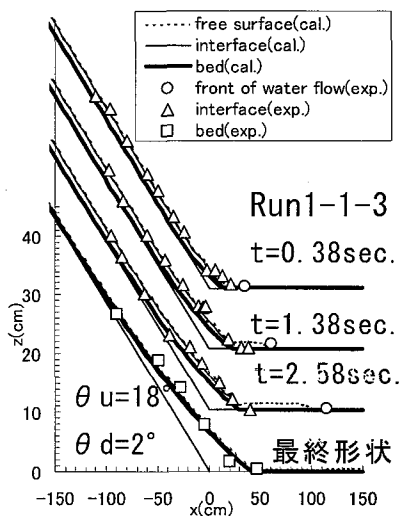
表-1 実験条件

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 (cm^2/s)

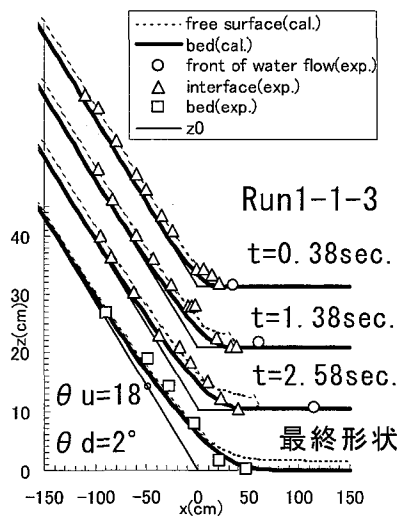
*) 1-1-4, 1-2-4 は土石流供給後, 清水だけをそれぞれ 14.4 秒間, 3.30 秒間供給した

図-4 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 $t=0$ 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 $\triangle$ 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, $\square$ 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 $\circ$ 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.



(a) 二層流

図-4 Run1-1-3 に関する実験値と計算値



(b) 一層流

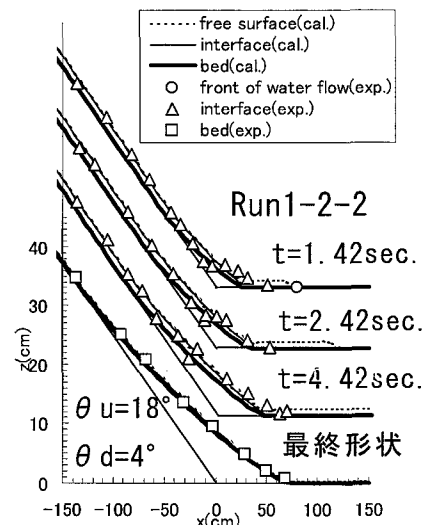


図-5 Run1-2-2 に関する実験値と計算値

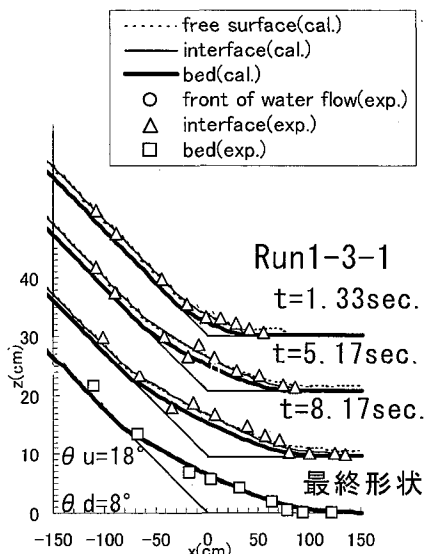
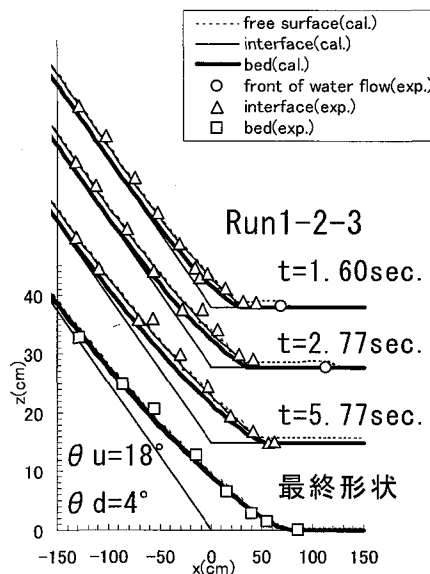
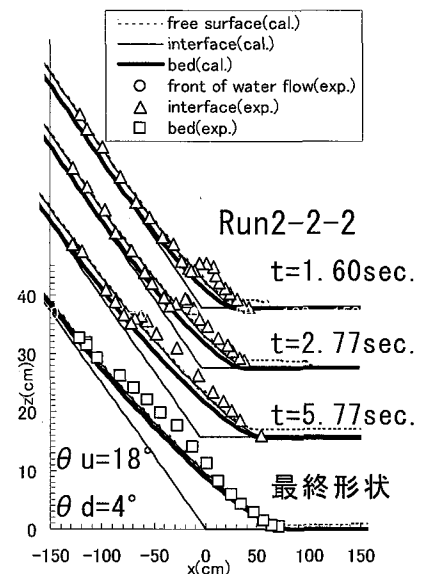


図-6 Run1-3-1 に関する実験値と計算値



(a) 全区間固定床

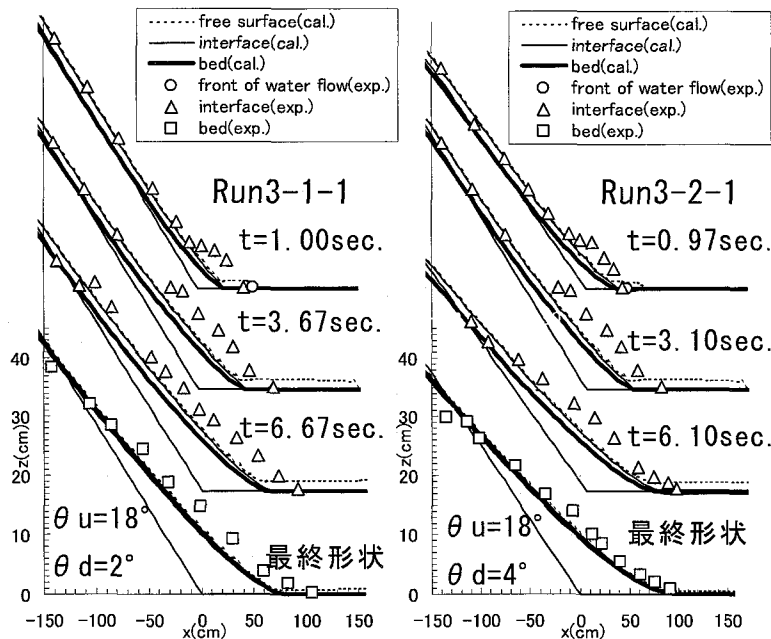


(b) 下流区間のみ移動床

図-7 河床状態の違いによる堆積過程の比較と計算結果

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-5, 及び 6 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。



(a) Run3-1-1

(b) Run3-2-1

図-5 全区間が移動床の実験結果と計算結果

図-7 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-8 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

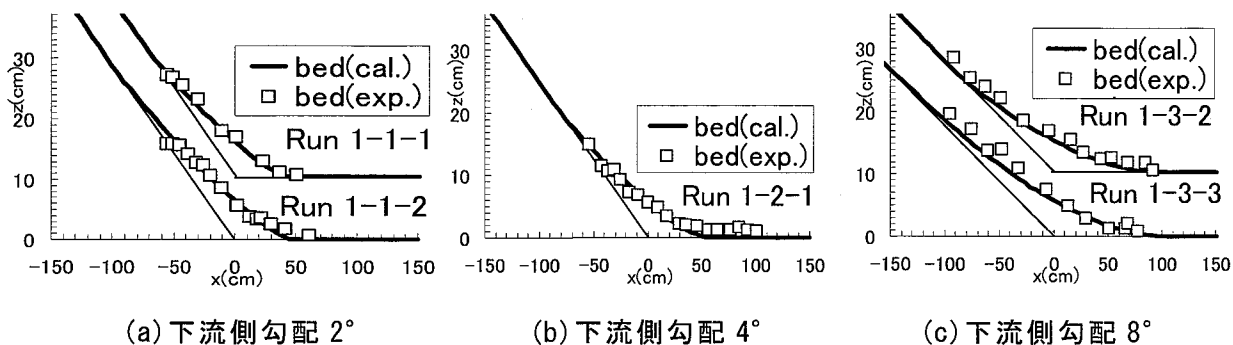


図-9 最終堆積形状に関する実験値と計算値（全区間が固定床）

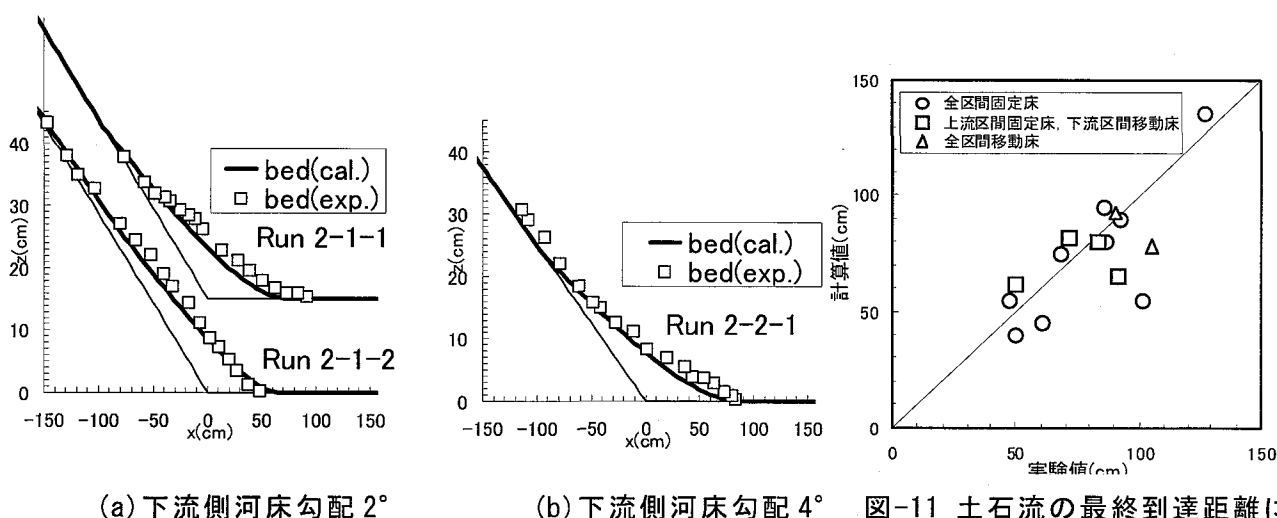


図-10 最終堆積形状に関する実験値と計算値
（下流区間のみが移動床）

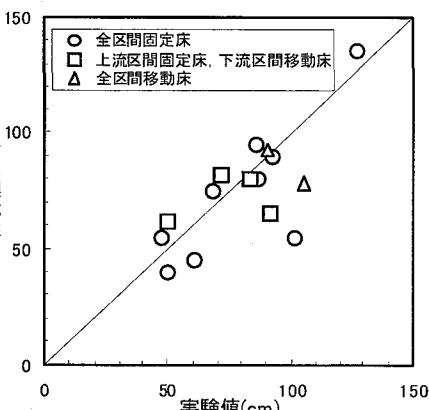


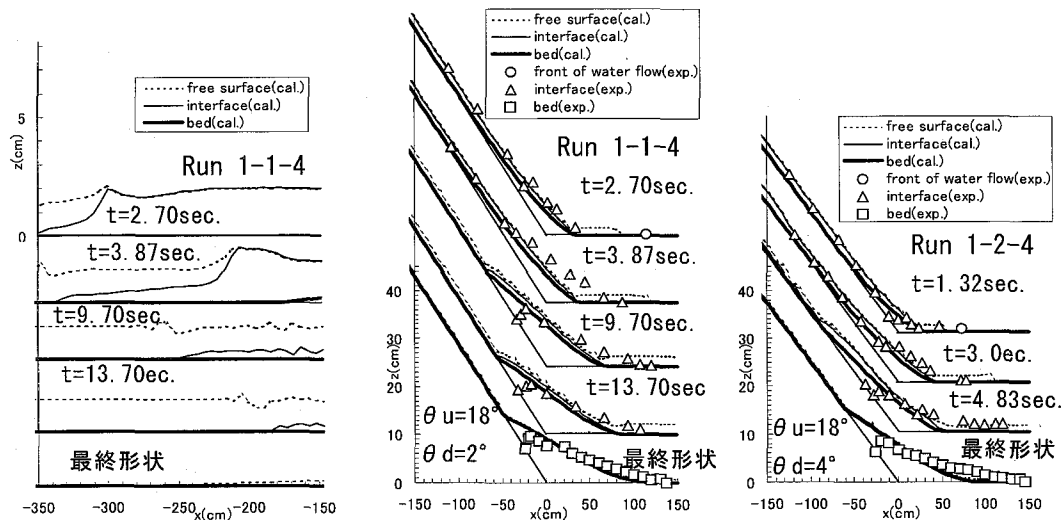
図-11 土石流の最終到達距離に関する実験値と計算値

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、二層流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。

図-9, 10 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-4~10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-11 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-4~11の結果は二層流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。

図-12 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



(a) 上流区間拡大図 (b) 下流区間全体図
図-12 土石流の再侵食過程に関する実験結果と計算結果

図-13 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

を止めて、清水のみを 14.4 秒間後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-13 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。

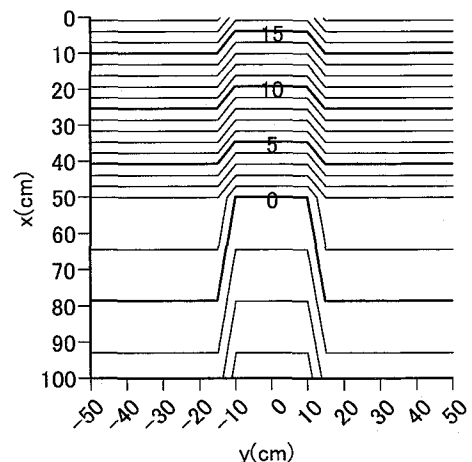


図-14 固定床水路を有する固定床斜面の等高線図

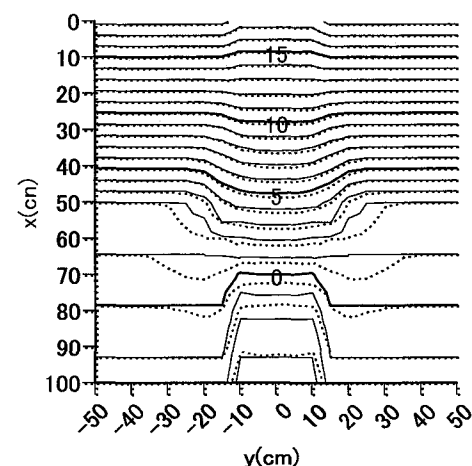


図-15 5 秒後の砂礫移動層表面標高 (実線) と自由表面標高 (点線) に関する等高線図 (等高線間隔は 1cm)

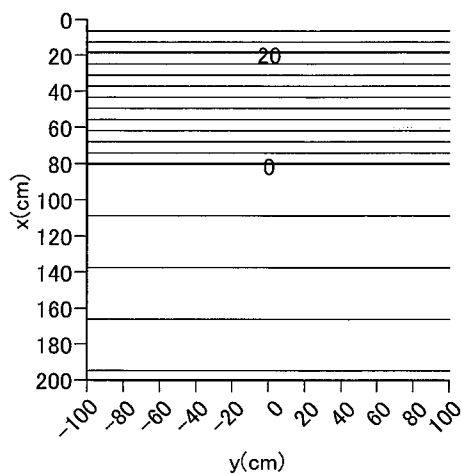


図-16 飽和移動斜面の初期形状に関する等高線図（等高線間隔は2cm）

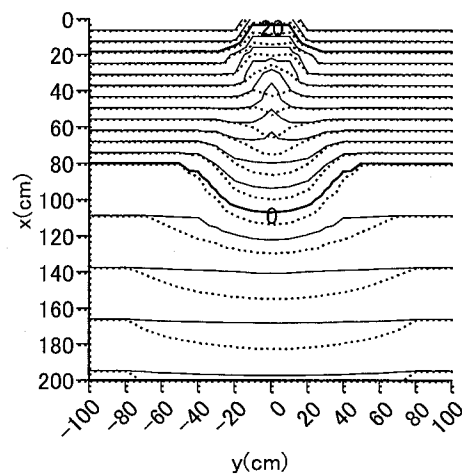


図-19 12秒後の砂礫移動層表面標高(実線)と自由表面標高に関する等高線図（等高線間隔は2cm）

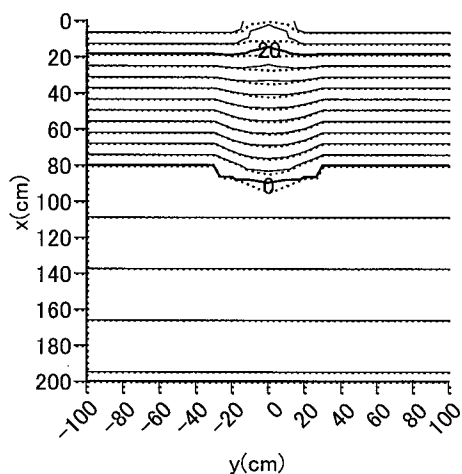


図-17 2秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と自由表面標高（点線）に関する等高線図（等高線間隔は2cm）

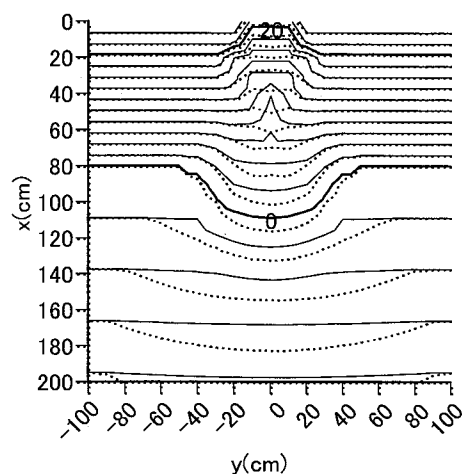


図-20 18秒後の砂礫移動層表面標高(実線)と自由表面標高(点線)に関する等高線図（等高線間隔は2cm）

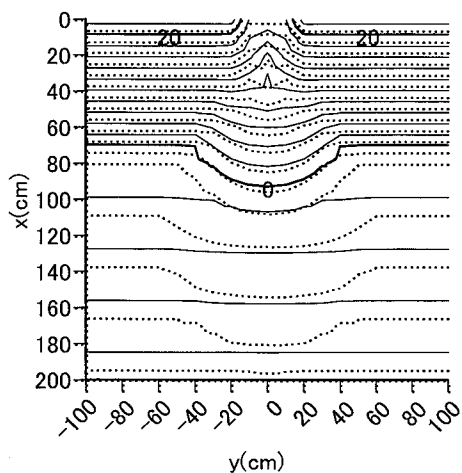


図-18 6秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と自由表面標高（点線）に関する等高線図（等高線間隔は2cm）

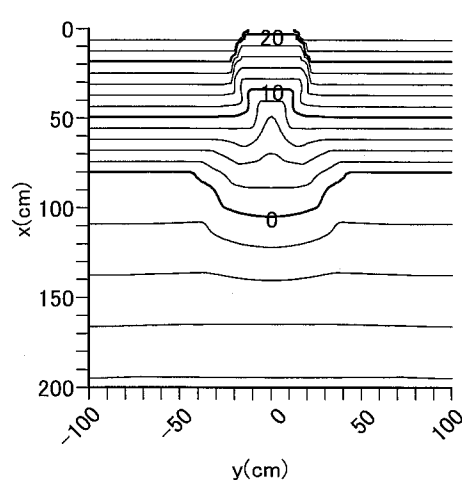


図-21 最終河床形状に関する等高線図（等高線間隔は2cm）

つぎに、二層流モデルによる二次元氾濫解析結果について示す。まず、図-14 の等高線鳥瞰図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° ）の上流端から一定濃度 30% の土石流を単位幅あたり $70\text{cm}^2/\text{s}$ で幅 20cm に渡って定常供給する条件で数値実験を行った。固定床水路底部の幅は 20cm であり、低部標高は左右斜面の標高より 2cm 低くなっている。また、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、供給した土砂の粒径は 0.2cm である。供給開始から 5 秒後の計算結果の等高線図を図-15 に示す。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、図-16 の等高線図に示すような二つ折れの飽和移動床斜面（上流側 18° ，下流側 4° ，河床材料の粒径は 0.5cm）の上流端中央部（幅 20cm）から一定流量（単位幅あたり $100\text{cm}^2/\text{s}$ ）の清水を一定時間（10 秒間）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-17, 18, 19, 20 には砂礫移動層表面（interface）標高，および自由表面標高，の等高線図の時間的变化（2 秒後，6 秒後，12 秒後，および 18 秒後）が示してある。同図では 10cm ピッチで出力した計算結果に対応している。また、図-9 は最終河床形状に関する等高線図であり、全計算点の出力結果に対応している。図から分かるように上流端近傍では侵食可能深まで侵食が進行しており、固定床化している。下流側では堆積氾濫が生じており、一次元モデルの場合と同様に堆積に伴う水流層の分離が表現されている。また、上流側での固定床化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。図から分かるように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、一次元モデルの場合と同様に堆積に伴う水流層の分離が表現されている。また、上流側で固定床が露出する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。

4. 土石流解析モデルにおける急変部の取り扱い

渓谷に見られる狭窄部のような地形が急激に変化する場所では、土石流の流動の変化が大きくなるとが予測される。しかし、このような領域における土石流の挙動を詳細に調べられた事例はあまりない。また、土石流の侵食堆積現象の評価は運動方程式中の重力項と河床面せん断応力（降伏応力）の大小関係で議論されることが多く、このような流路の急変部を対象した議論には至っていない。そこで、ここでは、著者らによって行われた狭窄部を通過する土石流による不等流状態に関する実験結果を紹介し、侵食堆積現象の評価に流れの急変部の効果を導入した解析法とその適用結果について示す。

まず、二層流モデルによる二層の運動方程式（19），（20）を足し合わせて全層に対する運動方程式とすると次式のようになる。

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w + \gamma_d \rho_s v_s h_s)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial(\rho_w \beta_w B v_w^2 h_w + \rho_s \beta_s B v_s^2 h_s)}{\partial x} = \rho_w g h_w \sin \theta + \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} - \tau_b \quad (34)$$

運動方程式の圧力項を付加し、このときの平衡勾配を θ_{ep} とすると次式のようなになる。

$$\{(\sigma - \rho_w)c_i + \rho_w\}gh_i \sin \theta_{ep} - \cos \theta_{ep} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} - (\sigma - \rho_w)c_i gh_i \cos \theta_{ep} \tan \phi = 0 \quad (35)$$

ここに、 $h_i = h_s + h_w$ 、 $P_{w0} = P_w / \cos \theta_{ep}$ 、 $P_{s0} = P_s / \cos \theta_{ep}$ である。この θ_{ep} を式 (30) に示した侵食堆積速度式に導入することによって流路の狭窄・拡幅による影響を侵食堆積現象の評価に導入する。このとき、圧力勾配を考慮した平衡勾配 θ_{ep} は θ_{e0} を用いて次式のように表される。

$$\tan \theta_{ep} = \tan \theta_{e0} + \frac{\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x}}{\{(\sigma / \rho_w - 1)c_i + 1\}} \quad (36)$$

式 (36) より θ_{ep} は土石流フロント部のような水面勾配がある領域では、 θ_{e0} よりも小さくなり、侵食されやすい領域となり、逆の場合では、侵食が抑制され、条件によっては堆積する。

図-22 に狭窄部を流動する土石流に関する実験値と式 (36) を平衡勾配として侵食堆積速度を評価した数値計算結果を示す。図の最上段には流路幅の縦断図が示してある。実験では、河床が黒丸 (●) で示されており、狭窄部で河床低下が生じている。計算 (太実践) によってもそのことが表現されている。しかしながら、計算による自由表面は直線状となっており、実験値を表現できていない。この移動床における圧力項導入の効果は以下のように考えられる。狭窄部へ進入した土石流は漸縮区間で側壁の作用を受け、高さ方向に逃げるため狭窄区間手前から狭窄区間では狭窄部へ侵入する土石流よりも流動深が厚くなる。そのため、流動深が薄い狭窄部より上流の土石流と流動深が厚くなった狭窄区間との土石流の間に圧力差が生じ、しかも、その圧力の向きは上流側方向となる。つまりこの間、下流側方向に重力 (河床面せん断応力)、上流側方向に降伏応力と圧力が働いており、その釣り合いからこの区間の平衡勾配を求めると、狭窄部ではない区間の平衡勾配より大きくなる。逆に、狭窄区間を抜けた流動深の厚い土石流は、漸拡区間で側壁の作用から開放され逃げ場が広がるため、土石流の流動深が薄くなる。そのため、土石流と流動深が厚くなった狭窄区間と流動深が薄い狭窄部の間に圧力差が生じ、しかも、

□ free surface(exp) × interface(exp) ● bed (exp)
..... free surface(cal) — interface(cal) — bed (cal)

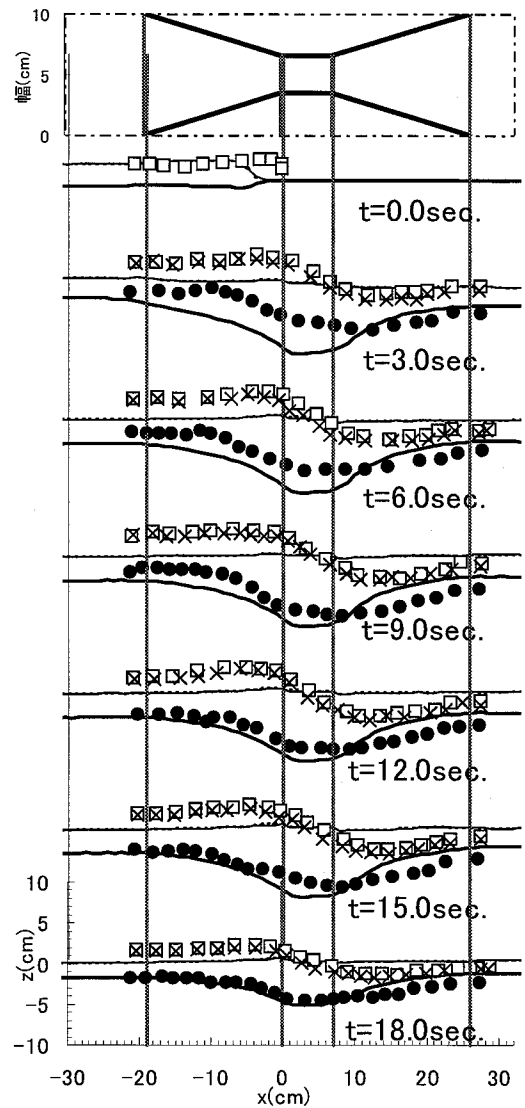


図-22 狭窄部における土石流流動実験結果と圧力勾配を導入した計算結果との比較 (移動床)

その圧力の向きは下流側方向となる．つまりこの間，下流側方向に重力（河床面せん断応力）と圧力，上流側方向に降伏応力が作用し，その釣り合いから平衡勾配を求めると狭窄部ではない区間の平衡勾配より小さくなる．ゆえに狭窄部内の平衡勾配が他の区間より大きく，また小さくなるために，このような下に凸の形状を表現できるようになった．

5. おわりに

土石流シミュレーションの支配方程式について概説し，土石流のシミュレーションでは掃流砂を対象としたシミュレーションとは違って侵食堆積速度を別途評価する必要があることを示した．ついで，土石流から掃流状集合流動への遷移過程を取り扱うための二層流モデルについて概説し，その適用例を示した．最後に，流路の急変部における土石流の流動状況を水路実験により紹介し，流路急変による影響を流れの圧力勾配を平衡勾配に導入することで考慮する方法について説明し，水路実験に適用した結果を示した．現地における土石流の観測事例は数多く得られるようになってきたが，最上流部で土石流がどのように発生したのかについては，直接計測されることはほとんどない．土石流シミュレーションによる予測評価を行う上で必要となってくるため，最上流部における現地観測が実施されることが望ましい．最後に表題にある災害の防止軽減に直接言及出来なかったことをお詫びする．

参考文献

- 1) 高橋保・中川一・佐藤広章：扇状地における土砂氾濫災害危険度の評価，京都大学防災研究所年報，第 31 号 B-2，pp.655-676，1988.
- 2) 高橋保・中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，新砂防，Vol.44，No.3，pp.47-52，1991.
- 3) 中川一・高橋保・澤田豊明・里深好文：計画土石流の設定と避難計画，京都大学防災研年報，第 35 号 B-2，pp.347-371，1996.
- 4) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，第 44 巻，pp.717-722，2000.
- 5) 椿東一郎・橋本晴行：土石流の勾配急変による堆積機構，第 28 回水理講演会論文集，pp.711-716，1984.
- 6) 橋本晴行・溜池博文・元野一生・椿東一郎：ラグランジュ的手法を用いた土石流の 2 次元堆積形状の計算法，第 29 回水理講演会論文集，pp.555-560，1985.
- 7) 平野宗夫・疋田誠・森山聡之：活火山流域における土石流の発生限界と流出規模の予測，第 30 回水理講演会論文集，pp.181-186，1986.
- 8) 平野宗夫・橋本晴行・田崎武詞・宮島正悟：勾配の急減と幅の急拡による土石流の堆積過程一粒子の停止距離について一，水工学論文集，第 35 巻，pp.453-458，1991.
- 9) 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.
- 10) 江頭進治・本田尚正・安東容輔：地すべり堆積土砂の二次侵食による土砂流出，水工学論

文集, 第 40 卷, pp.863-868, 1996.

- 11) 江頭進治・本田尚正・宮本邦明: 姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション, 水工学論文集, 第 42 卷, pp.919-924, 1998.
- 12) 江頭進治・本田尚正・高濱淳一郎・伊藤隆郭・有村真一: 土石流の再現および構造物等による土石流調節について, 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, 研究課題番号 11800010, 平成 11 年度科学研究費補助金 (特別研究促進費) (1), 研究代表者福岡捷二, 研究成果報告書, pp.83-102, 2000.
- 13) 水山高久・阿部宗平・下東久巳: 土石流氾濫シミュレーションと模型実験による土石流災害の再現, 新砂防, Vol.40, No.3, 17-22, 1987.
- 14) 棚橋隆彦: 連続体の力学(1)—物質の変形と流動—, 理工図書, pp.3-4, 1985.
- 15) 高橋保: 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.
- 16) 橋本晴行・平野宗夫・掃流状集合流動の抵抗則と流砂量, 土木学会論文集, 545/II-36, pp.33-42, 1996.
- 17) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭: 掃流砂量に関する力学的解釈: 水工学論文集, 第 41 卷, 789-794, 1997.
- 18) 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 卷, 699-704, 1997.
- 19) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司: 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文集, No.317, pp.79-91, 1982.
- 20) 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に遷移する流れの解析法に関する研究, 水工学論文集, 第 44 卷, pp.683-686, 2000.
- 21) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘・蜂谷圭: 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 卷, pp.677-682, 2002.
- 22) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・吉野弘祐: 二層流モデルによる土石流の二次元氾濫解析法に関する研究, 工学論文集, 第 48 卷, pp.919-924, 2004.