

二層流モデルによる土石流の二次元汜濫解析法 に関する研究

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION MODEL FOR UNIFYING DEBRIS FLOW AND SEDIMENT SHEET FLOW

高濱淳一郎¹・藤田裕一郎²・吉野弘祐³

Jun-ichiro TAKAHAMA, Yuichiro FUJITA and Kousuke YOSHINO

¹正会員 博士(工学) 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 流域圏科学研究センター (〒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)

The present study deals with deposition-erosion processes of debris flow with transition between fully dispersed debris flow and sediment sheet flow. A two-layer flow model proposed by the authors was applied to two-dimensional numerical simulation of debris flows, and simple numerical experiments were carried out. It was indicated that a two-dimensional numerical simulation using the two-layer flow model can analyze phenomena in which velocity directions of upper-layers of water flows are different from that of lower layers of sediment-water mixture flow.

Key Words: debris flow, two layer model, two-dimensional numerical simulation

1. はじめに

著者らは、掃流状集合流動の砂礫移動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、その水流層と砂礫移動層とのinterfaceを想定して、体積保存則、運動量保存則に基づいた水流層と砂礫移動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)¹⁾を提案した。そして、二層流モデルを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²⁾。このことは、二層流モデルは流砂形態の区分を導入する必要がなく、且つ砂礫移動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。本研究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説明し、数値実験を行った結果を述べる。

2. 解析に用いた基礎方程式

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を通じ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。

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

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

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

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_w}{\partial t} + \frac{\partial (\beta_{wxx} u_w M_w)}{\partial x} + \frac{\partial (\beta_{wxy} v_w M_w)}{\partial y} - s_I u_I \\ &= \frac{1}{\rho_w} \left\{ -P_I \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_{wx} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

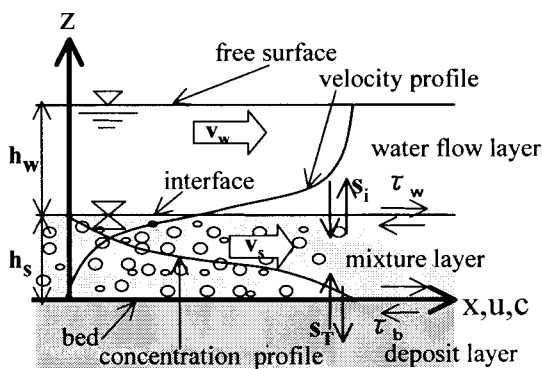


図-1 二層流モデルの模式図

$$\frac{\partial N_w}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{wxy} u_w N_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{wyy} v_w N_w)}{\partial y} - s_i v_i \quad (6)$$

$$= \frac{1}{\rho_w} \left\{ -p_i \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial y} - \frac{\partial P_w}{\partial y} - \tau_{wy} \right\} \\ \frac{\partial(\gamma' \rho_s M_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{sxx} \rho_s u_s M_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{syy} \rho_s v_s M_s)}{\partial y} \\ + \rho_w s_i u_i \quad (7)$$

$$= -p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_i \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_{wx} - \tau_{bx} \\ \frac{\partial(\gamma' \rho_s N_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{sxy} \rho_s u_s N_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{syy} \rho_s v_s N_s)}{\partial y} \\ + \rho_w s_i v_i \quad (8)$$

ここに、添え字の s, w はそれぞれ砂礫移動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 方向の砂礫移動層あるいは水流層の層平均流速、 h は各層の流動層厚、 ρ は各層の層平均密度、 P は各層についてその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_* はそれぞれ砂礫移動層平均濃度、停止堆積層濃度、 z_b は河床高、 s_T は侵食速度である。 τ_{wx} 、 τ_{wy} はそれぞれ interface におけるせん断応力の x 方向成分と y 方向成分であり、 τ_{bx} 、 τ_{by} はそれぞれ河床面せん断応力の x 方向成分と y 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⁾²⁾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³⁾を一様濃度に適用したものを、侵食速度は江頭らの侵食速度式⁴⁾を二層流に拡張したものを用いる¹⁾²⁾。なお、本研究では、以前の近似解に導入していた近似と仮定¹⁾²⁾を以下のように若干修正する。

- ①砂礫移動層濃度は一様濃度 ($c_s = c_*/2$) とする¹⁾²⁾。
 - ②河床面では粒子衝突に伴う圧力 p_d とゼロとする¹⁾²⁾。
- これにより、平衡状態における河床面の応力は近似解と

厳密解とで一致する。流動層内では p_d と骨格応力 p_s との比を一定¹⁾²⁾とせず、濃度の関数³⁾として $p_s/(p_s + p_d) = (c_s/c_*)^{1/5}$ で与える。

③①によって計算される砂礫移動層厚が全流動層厚より大きくなるときは、流れの全層が砂礫移動層として取り扱う。このとき、 $c_s \geq c_*/2$ となる。

④砂礫移動層の流速分布形や砂礫移動層の抵抗係数を算出する際に流動層内で降伏応力が外力を上回る場合は、外力を補正していた¹⁾²⁾が、本研究では全層平均濃度 c_i に対応する平衡勾配を用いて抵抗係数を計算する。これは、宮本⁵⁾らが江頭らの構成則³⁾を用いて非定常流れ場において降伏応力が外力（駆動力）を上回るような領域に対しても河床面せん断応力を合理的に評価するために提案した方法と一致する。後述するように、江頭ら³⁾の構成則に基づく河床面せん断応力中の抵抗係数を評価する際に、土石流の平衡状態における河床面での外力と降伏応力との釣り合い式を用いている。

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、砂礫移動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。

$$\tau_{wx} = \rho_w f_w (u_w - u_i) \sqrt{(u_w - u_i)^2 + (v_w - v_i)^2} \quad (9)$$

$$\tau_{wy} = \rho_w f_w (v_w - v_i) \sqrt{(u_w - u_i)^2 + (v_w - v_i)^2} \quad (10)$$

interface の流速 u_i 、 v_i は一次元流れの場合と同様に砂礫移動層の流速分布形に基づいて計算している。また、 f_w は江頭らによる水流層の構成則³⁾を一様濃度 c_s に適用した抵抗係数であり、次式で与えられる。

$$f_w = \left[\frac{1}{\kappa} \left\{ \left(1 + \frac{\eta_0}{h_w} \right) \ln \left(1 + \frac{h_w}{\eta_0} \right) - 1 \right\} \right]^{-2} \quad (11)$$

$$\eta_0 = \sqrt{k_f} \{ (1 - c_s)/c_s \}^{1/3} d \quad (12)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 k_f は実験定数で 0.16 ~ 0.25、 d は砂粒子径である。

一方、河床面せん断応力は、降伏応力と流動応力との和として次式のように与える。

$$\tau_{bx} = \tau_y \frac{u_s}{\sqrt{u_s^2 + v_s^2}} + \rho_w f_s u_s \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \quad (13)$$

$$\tau_{by} = \tau_y \frac{v_s}{\sqrt{u_s^2 + v_s^2}} + \rho_w f_s v_s \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \quad (14)$$

ここで、降伏応力 τ_y は先に示した修正した近似②に基づいて、河床面の最急勾配 $\theta_{\max}$ を用いて次式のように与えている。

$$\tau_y = (\sigma - \rho_w) c_s g h_s \left(\frac{c_s}{c_*} \right)^{1/5} \cos \theta_{\max} \tan \phi \quad (15)$$

ここに、 ϕ は砂礫の内部摩擦角である。また、抵抗係数 f_s は同じく④で示した方法に基づき次式のように与えている。

$$\cdot) \tilde{G}_{yk} \neq 0$$

$$f_s = \frac{\tilde{W} + \tilde{G}_{yk}}{\frac{4}{9} \frac{1}{f(c_s)} \frac{1}{\tilde{G}_{yk}^2} \left[(\tilde{W} + \tilde{G}_{yk})^2 + \frac{2}{5} \frac{1}{\tilde{G}_{yk}} \left\{ \tilde{W}^{5/2} - (\tilde{W} + \tilde{G}_{yk})^2 \right\} \right]^{1/2}} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} \quad (16)$$

$$\cdot) \tilde{G}_{yk} = 0$$

$$f_s = 4 f(c_s) \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} \quad (17)$$

ここに、

$$\tilde{W} = -\{(\sigma/\rho_w - 1)c_s + 1\} \sin \tilde{\theta}_e + (\sigma/\rho_w - 1)c_s \cos \tilde{\theta}_e \tan \phi \quad (18)$$

$$\tilde{G}_{yk} = \{(\sigma/\rho_w - 1)c_s + 1\} \sin \tilde{\theta}_e - (\sigma/\rho_w - 1)c_s \cos \tilde{\theta}_e (c/c_*)^{1/5} \tan \phi_s \quad (19)$$

$$f(c_s) = k_f \left\{ (1 - c_s)^{5/3} / c_s^{2/3} \right\} + k_g (\sigma/\rho_w) \{1 - e^2\} c_s^{1/3} \quad (20)$$

$$\tan \tilde{\theta}_e = \frac{(\sigma/\rho_w - 1)c_i}{(\sigma/\rho_w - 1)c_i + 1} \tan \phi \quad (21)$$

ここに、式(21)は江頭ら³⁾による平衡状態における河床面での外力(駆動力)と降伏応力との釣り合い式から導かれる。また、 k_g は経験定数で $k_g = 0.0828$ 、 e は砂礫の反発係数である。

侵食速度式は次のようにして二次元に拡張した。まず、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⁾²⁾³⁾。

$$s_T = |v_t| \tan(\theta_{fd} - \theta_e) \quad (22)$$

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_i に対応する平衡勾配であり、一次元流れに対しては全流動層厚を h_i 用いてそれぞれ以下のように与えていた。

$$v_t = \frac{M_s + M_w}{h_i} \quad (23)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho_w - 1)c_i}{(\sigma/\rho_w - 1)c_i + 1} \tan \phi \quad (24)$$

$$c_i = c_s \frac{h_s}{h_i} \quad (25)$$

ここでは式(22)を二次元流れ場に拡張するため、 v_t の流向を砂礫移動層の流向に一致させることとし、砂礫移動層と水流層の流下方向が異なることを考慮して、砂礫移動層の流下方向に見た勾配を θ_{fd} とし、 v_t は水流層の

フラックスの砂礫移動層流向成分と砂礫移動層のフラックスとの和を流れ全体の流動層厚 h_i で除して与えた。

$$v_t = \frac{\left(\overrightarrow{M_w} \cdot \overrightarrow{e_s} + \left| \overrightarrow{M_s} \right| \right)}{h_i} \quad (26)$$

ここに、 $\overrightarrow{M_w}$ 、 $\overrightarrow{M_s}$ はそれぞれ水流層、砂礫移動層のフラックスベクトル、 $\overrightarrow{e_s}$ は砂礫移動層の平均流速方向の単位ベクトルである。

さらに、砂礫移動層の停止と再移動を判断・評価するために、宮本⁶⁾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た。宮本⁶⁾は、支配方程式(運動方程式)を差分化して数値的に土塊の運動を解析するとき、土塊の停止は一般に差分時間内に現れるため、その時間を知るために差分化した支配方程式を基に土塊の停止条件を与えている。土塊の停止条件は土塊の運動量ベクトルがゼロベクトルになることで与えられるため、二次元場でのベクトル方程式を解くことになる。しかし、圧力勾配ベクトルは土塊の運動量ベクトルとは互いに一次独立にあるため、運動量ベクトルがゼロベクトルになるためには水面勾配ベクトルがゼロベクトルであるという物理的に意味のない条件下で解が存在することが宮本⁶⁾によって指摘されている。そこで、宮本⁶⁾は停止条件式に近似を導入することで停止条件を与えている。この宮本による方法を以下のように二層流に適用した。まず、砂礫移動層の運動方程式(7)(8)を固体摩擦応力に着目して差分時間を Δt として時間差分すれば次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{+\Delta t} \\ (\rho_s N_s)_i^{+\Delta t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i \\ (\rho_s N_s)_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \Delta t - \begin{pmatrix} \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \end{pmatrix} \Delta t \quad (27)$$

ここに、 τ_{yx} 、 τ_{yy} はそれぞれ降伏応力 τ_y の x 、 y 方向成分であり、 F_x 、 F_y はそれぞれ次式で与えられる。

$$F_x = -\frac{\partial \rho_s u_s M_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s M_s}{\partial y} - \rho_w s_i u_i - p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_i \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_{wx} - \tau_{bDx} \quad (28)$$

$$F_y = -\frac{\partial \rho_s u_s N_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s N_s}{\partial y} - \rho_w s_i v_i - p_b \frac{\partial z_b}{\partial y} + p_i \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial y} - \frac{\partial P_s}{\partial y} + \tau_{wy} - \tau_{bDy} \quad (29)$$

ここに、 τ_{bDx} 、 τ_{bDy} はそれぞれ式(13)(14)中の流動応力の x 、 y 成分である。

ここで、宮本の用いた近似⁶⁾を導入し、次式を満たす実根 $\Delta t'$ が $0 < \Delta t' \leq \Delta t$ の範囲にあることを停止条件とした。

$$\begin{aligned} \left| \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t'} \\ (\rho_s N_s)_i^{t+\Delta t'} \end{pmatrix} \right| &= \left| \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^t \\ (\rho_s N_s)_i^t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \Delta t' \right| - |\tau_y| \Delta t' \\ &\equiv \left| \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t} \\ (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t} \end{pmatrix} \right| - |\tau_y| \Delta t' = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

式(30)では、降伏応力以外の力積によって変化する砂礫移動層の運動量ベクトルの絶対値が降伏応力による力積の絶対値以下になれば停止することを意味している。宮本の方法では、土塊が時刻 $t + \Delta t'$ でいったん停止しても、そのまま停止し続けるかを再度チェックしているが、ここでは簡単のため、時刻 $t + \Delta t'$ で砂礫移動層が停止した場合、時刻 $t + \Delta t$ まで停止し続けるものとする。そして、次の計算ステップにおいて土塊に作用する力が降伏応力を上回る条件、すなわち次式を満足するときに砂礫移動層が再移動するものとした。

$$\left| \begin{pmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \end{pmatrix} \right| > |\tau_y| \quad (31)$$

ここで、再移動を判断する際の τ_y には宮本⁶⁾と同様に最大静止摩擦力を与えている。また、 F_{0x} 、 F_{0y} は停止時における砂礫移動層に作用する力であり、次式で与えられる。

$$F_{0x} = -\frac{\partial \rho_s u_s M_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s M_s}{\partial y} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} &-p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_l \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_{wx} \\ F_{0y} &= -\frac{\partial \rho_s u_s N_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s N_s}{\partial y} \\ &-p_b \frac{\partial z_b}{\partial y} + p_l \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial y} - \frac{\partial P_s}{\partial y} + \tau_{wy} \end{aligned} \quad (33)$$

式(31)の条件を満たすとき、再移動した砂礫移動層の運動量を次式のように与える。

$$\begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t} \\ (\rho_s N_s)_i^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \end{pmatrix} - |\tau_y| \begin{pmatrix} e_{sx} \\ e_{sy} \end{pmatrix} \Delta t \quad (34)$$

$$\begin{pmatrix} e_{sx} \\ e_{sy} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{F_{0x}^2 + F_{0y}^2}} \begin{pmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \end{pmatrix} \quad (35)$$

式(34)は降伏応力が土塊に作用する駆動力と逆向きに作用することを意味している。

3. 数値実験結果

まず、図-2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

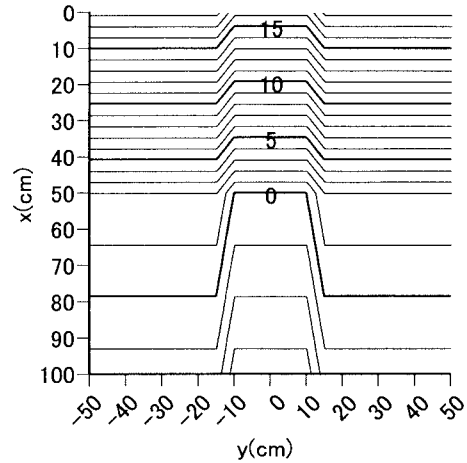


図-2 固定床水路を有する固定床斜面の等高線図
(等高線間隔は1cm)

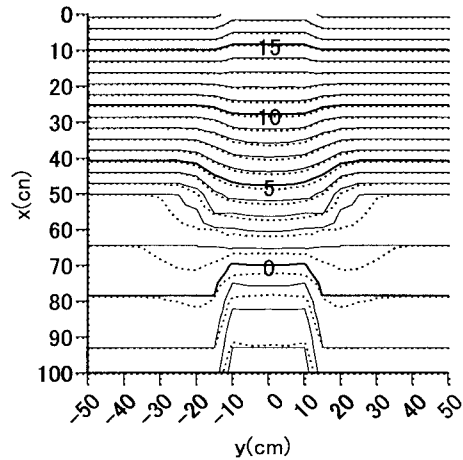


図-3 5秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と
自由表面標高（点線）に関する等高線図
(等高線間隔は1cm)

$70\text{cm}^2/\text{s}$ 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-3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-4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-5, 6, 7, 8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

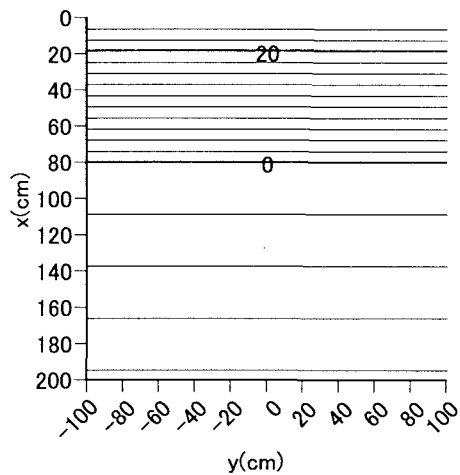


図-4 飽和移動斜面の初期形状に関する等高線図
(等高線間隔は2cm)

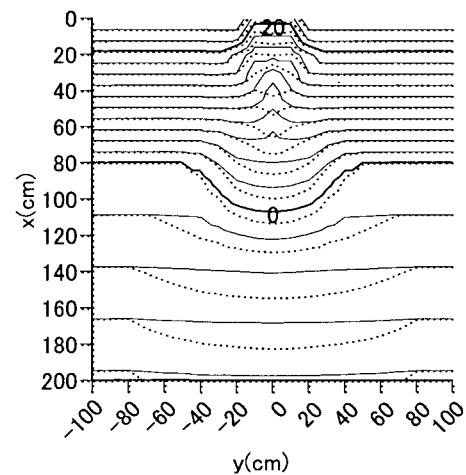


図-7 12秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と
自由表面標高に関する等高線図
(等高線間隔は2cm)

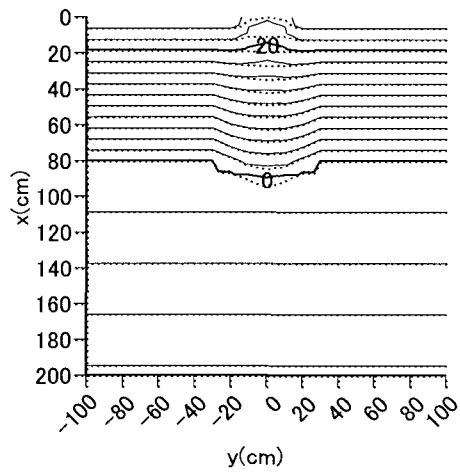


図-5 2秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と
自由表面標高に関する等高線図
(等高線間隔は2cm)

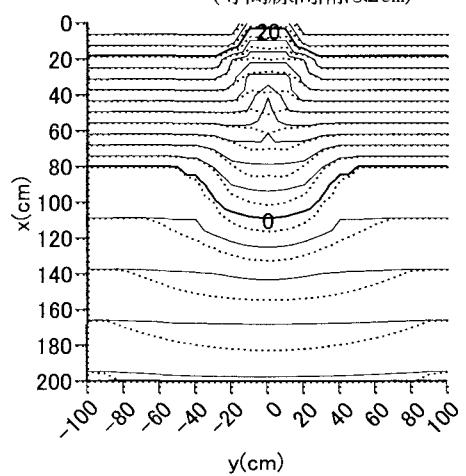


図-8 18秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と
自由表面標高に関する等高線図
(等高線間隔は2cm)

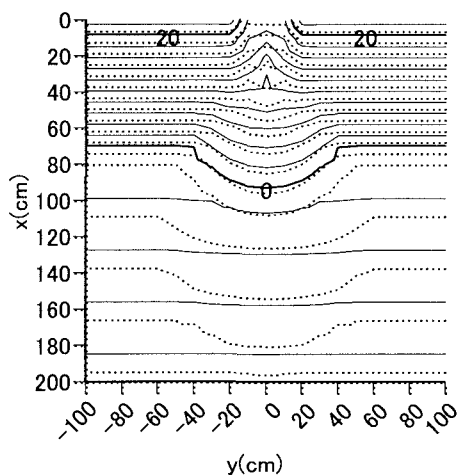


図-6 6秒後の砂礫移動層表面標高（実線）と
自由表面標高に関する等高線図
(等高線間隔は2cm)

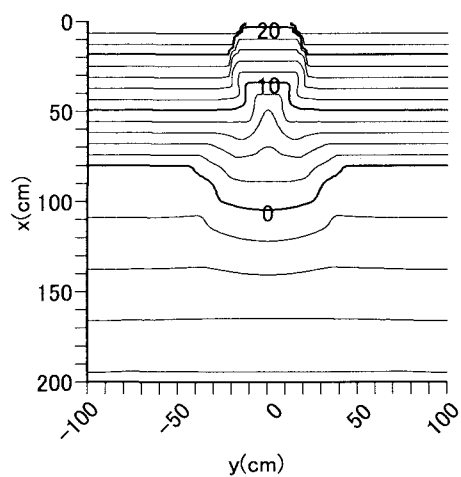


図-9 最終河床形状に関する等高線図
(等高線間隔は2cm)

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。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。数値実験の結果、流路に土石流が堆積し、流水（泥水）が流路から溢れて氾濫するような現象や、低濃度の土砂や流水の供給によって堆積の上部にみずみちが形成されることを表現できることなどが確認された。すなわち、下層の砂礫移動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であることが示唆された。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とともに水路実験との比較検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 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，pp.683-686，2000.
- 2) 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，pp.677-682，2002.
- 3) 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巻，pp.789-794,1997.
- 4) 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.
- 5) 宮本邦明・伊藤隆郭：支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法，砂防学会誌，Vol.55，No2，pp.24-35，2002.
- 6) 宮本邦明：土塊の運動の二次元シミュレーション，砂防学会誌，Vol.55，No.2，pp.5-13，2003.

(2003.9.30受付)