

立命館大学理工学部 正会員 ○ 伊藤隆郭  
 筑波大学農林工学系 正会員 宮本邦明  
 立命館大学理工学部 正会員 江頭進治

**1. はじめに** 土石流の流動・堆積に関する数値解析においては、主に、連続体の保存則が用いられる。構成則については、研究者間において、流れに対する力学的な解釈が異なり、統一的な見解が得られていないもの<sup>1)4)</sup>、実用上、その挙動がある程度予測できる段階にある<sup>5)7)</sup>。土石流の侵食・堆積現象を取り扱う場合、これまで、大きく分けて2つの方法がある。ひとつは、侵食速度に関する構成則を構築して、流れの連続式の湧き出し項として適用する方法である<sup>6)7)</sup>。もうひとつは、流れの粒子濃度を平衡濃度として取り扱う方法である<sup>5)</sup>。本研究においては、一流体モデルの支配方程式を適用して土石流の侵食・堆積に関する1次元の数値計算を平衡濃度モデルを用いた解析を行い、得られる計算結果に基づいて、土石流の計算法に関する知見を得ることを目的としている。

**2. 支配方程式** 1流体モデルの基礎方程式は、図-1に示す座標系を導入すると次式のように表される。

$$\begin{aligned} & \text{(混合物全体の体積の連続式)} & \text{(砂礫の連続式)} & \text{(粒子濃度式)} \\ & \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 & (1), \quad \frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}M}{\partial x} + c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} = 0 & (2), \quad \bar{c} = \frac{i_e}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - i_e)} & (3) \end{aligned}$$

$$\text{(混合物の運動量保存則)} \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta \bar{u}M}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\bar{\rho}_m} \quad (4) \quad \text{ここに、} H: \text{水位}(H = h_t + z_b), h_t: \text{水深},$$

$z_b$ : 河床位,  $M$ :  $x$ 方向のフラックス,  $c$ : 砂礫の体積濃度,  $\bar{c}$ : 砂礫の断面平均濃度,  $i_e$ : エネルギー勾配,  $\phi_s$ : 砂粒子の内部摩擦角,  $c_*$ : 静止堆積層の体積濃度,  $\beta$ : 運動量補正係数,  $\sigma$ : 砂礫の密度,  $\rho$ : 水の密度,  $\bar{\rho}_m$ : 混合物の断面平均密度 ( $\bar{\rho}_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho$ ),  $\bar{u}$ :  $x$ 方向の速度,  $g$ : 重力加速度,  $\tau_{bx}$ : 河床に作用する $x$ 方向のせん断応力である。

ここで、次の2点に注意を要する。式(2)の砂礫の連続式は、局所平均粒子濃度 $c$ に対して、 $Dc/Dt \equiv 0$ から導かれたものであるため、平均濃度 $\bar{c}$ に対する時間発展の計算は困難である。式(4)においては、土石流の侵食・堆積が流動層内の流れに及ぼす影響や平均濃度の空間変化は無視されている。著者らは、定常・等流という単純な流れの場合において、固定床流れと移動床流れの違いについて、流速・粒子濃度の鉛直分布、および、流れの抵抗に着目して検討し、これらは、河床近傍における外力と粒子の静的な固体摩擦応力との分布形上の違いによって生じるものであることを明らかにしている<sup>8)</sup>。冒頭の侵食速度に関する構成則を適用する計算は、土石流を固定床上のものとして取り扱っているのに対し、上式のように平衡濃度を用いる方法は、河床において外力と粒子の静的な降伏応力が釣り合っていることを念頭に置いているため、土石流を移動床上のものとして取り扱っていることになる。

**3. 河床せん断力** 河床せん断力は、土石流・土砂流の領域において式(5)のように定義する。ここで、江頭・宮本らの研究成果を適用すれば、このとき、河床せん断応力は次式のように表される<sup>9)</sup>。

$$\tau_{bx} \equiv \bar{\rho}_m f_b |\bar{u}| \bar{u}, \quad f_b = (\bar{u}/u_\tau)^{-2} \quad (5)$$

$$\text{(土石流)} \quad \frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{2}{5} \left[ \frac{G - Y}{f_d + f_f} \right]^{1/2} \frac{h_t}{d} \quad (6)$$

$$G = (\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1, \quad Y = \alpha(\sigma/\rho - 1)\bar{c} \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta}, \quad \alpha = 0.8-0.9,$$

$$f_d = k_d(1 - e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}, \quad f_f = k_f(1 - c)^{5/3}c^{-2/3}$$

$$\text{(土砂流)} \quad \frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{\bar{u}_s}{u_\tau} h'_s + \frac{\bar{u}_w}{u_\tau} (1 - h'_s) \quad (7)$$

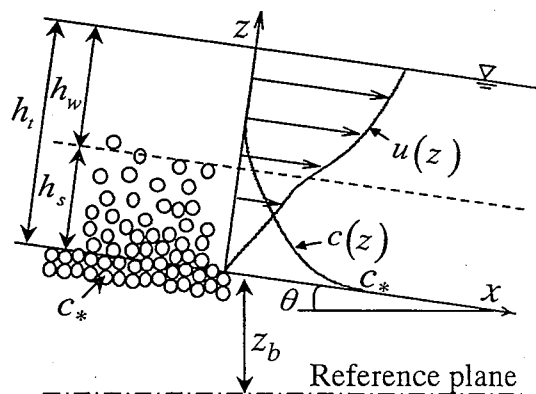


図-1 流れのモデルと座標系の定義

$$\cdot \text{粒子流動層の平均流速}(\bar{u}_s) \quad \bar{u}_s/u_\tau = (4/15)(f_d + f_f)^{-1/2} (h_t/d) h'_s \sqrt{1 - h'_s} \quad (8)$$

$$\cdot \text{水流層の平均流速}(\bar{u}_w) \quad \frac{\bar{u}_w}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \frac{(\eta'_0 + 1 - h'_s)}{\sqrt{1 - h'_s}} \ln \left[ \frac{\eta'_0 + 1 - h'_s}{\eta'_0} \right] - \frac{1}{\kappa} \sqrt{1 - h'_s} + \frac{u_i}{u_\tau} \quad (9)$$

$$\cdot \text{Interfaceにおける流速}(u_i) \quad u_i/u_\tau = (2/3)(f_d + f_f)^{-1/2} h'_s \sqrt{1 - h'_s} (h_t/d) \quad (10)$$

$$\eta'_0 = \eta_0/h_t$$

$$h'_s = \frac{i_e}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}_s(\tan \phi_s - i_e)}$$

ここに、 $f_b$ :抵抗係数、 $u_\tau$ :摩擦速度、 $h_s$ :高濃度層の厚さ、 $\kappa$ :カルマン定数、 $u_i$ :粒子高濃度層と水流層との境界における高濃度層の流速、 $d$ :砂礫粒子の粒子径、 $\eta_0$ :土砂流において、自由水面近傍に現れる清水流層の流速分布の仮想原点<sup>8)</sup>、 $l_0$ :粒子間隙スケール<sup>8)</sup>である。式(1)-(4)を連立し、式(5)-(10)を代入して数値的に解くことにより、流れが計算され、土石流の侵食・堆積は流れの計算の結果として現れる。

**4. 計算結果とその解析** 数値解析は、長さ 10.0m で河床勾配が 15° の移動床水路において行っている。河床には、砂粒子を鉛直下方無限に敷き詰め、水路上流端より定期的に単位幅流量 150 cm<sup>2</sup>/s を給水し、河床の侵食状態を検討している。なお、上流端において、便宜的に給水と共に給砂を行っており、その体積濃度は 0.01 である。この際、給砂している土砂の粒子径は河床に敷き詰めたものと等しい。砂粒子の材料特性値は次のようである。

$$d = 0.2 \text{ cm}, \quad \sigma/\rho = 2.65,$$

$$\phi_s = 34.0 \text{ (deg.)}, \quad c_s = 0.52,$$

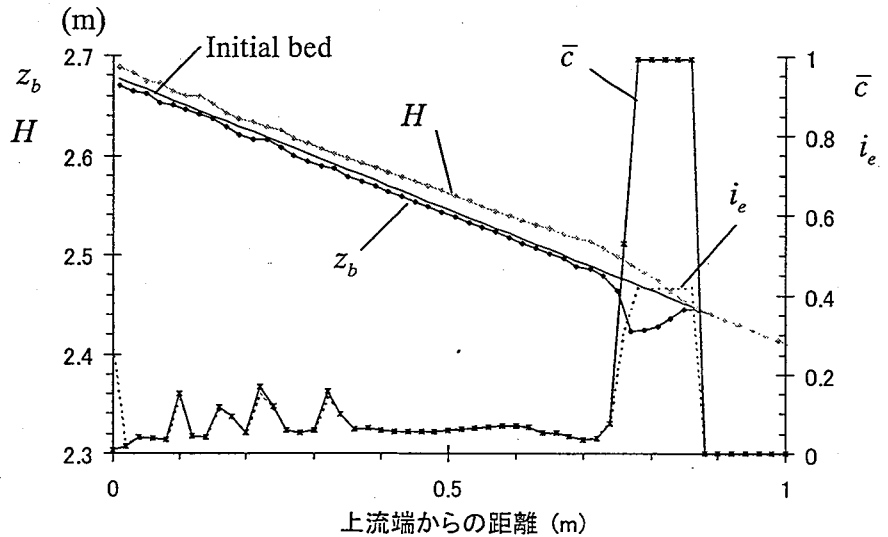
$$e = 0.85 \text{ である。}$$

計算は、スタッガードスキームによるリーブ・フロッグ法を用いている。式(3)の平衡濃度はフラックスと同じ点に配置して、時間に対して後退差分のように扱う。さらに、粒子濃度は 1 を越えないようにし上限値を設けている。有限差分において、

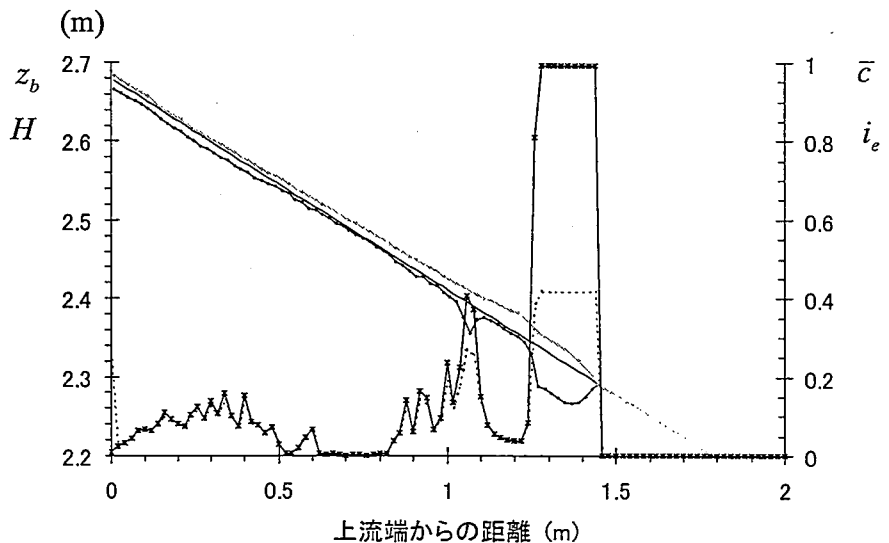
$\Delta x = 2 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 0.0001 \text{ sec}$  を用いている。図-4(a)-(d)は、上流端から給水後、1.2 秒および 1.6 秒後の水位、河床位、粒子濃度およびエネルギー勾配の縦断変化を示したものである。図によると、まず、上流端から供給される水流によって徐々に河床が侵食されていることが見てとれる。次に、土石流のフロント部についてみる。この種の土石流のフロントによる侵食計算において、一度、大きな侵食が進むと河床形と水面形が逆位相になり、河床の擾乱が上流側に伝搬することにより、水面形が河床形と逆位相を保ったままになることが報告されている<sup>10)</sup>が、ここではそのような結果はみられない。図の一部の領域において、エネルギー勾配が若干小さい箇所が生じている。これについては、今後の検討課題ではあると共に、結果の妥当性を検討するためには、実験データとの比較が必要である。

**4. おわりに** 土石流の一次元解析法に関する知見を得るために、従来、平衡濃度モデルと呼ばれているものに対して、さらなる理解を深めるため、数値シミュレーションを行った。今後、運動方程式において省略されている項、特に、運動量保存則における河床侵食・堆積が流れに及ぼす項の影響を考慮するとともに、本論文中に若干述べた砂礫相と清水相とに速度差が生じるような問題について検討したい。なお、本研究の一部は、財)砂防・地すべり技術センター研究開発助成金の補助を受けて推進している。ここに記して感謝致します。

**参考文献** 1)高橋:京大防災研年報, 20B-2, 405-435, 1977, 2)高橋ら:京大防災研年報, 39B-2, 333-346, 1996, 3)江頭ら:京大防災研年報, 32B-2, 487-501, 1989, 4)椿ら:土木学会論文報告集, 317, 79-91, 1982, 5)水山ら:新砂防, Vol. 40, No. 3, 17-22, 1987, 6)江頭ら:水工学論文集, 40 巻, 863-868, 1996, 7)高橋ら:京大防災研究所年報, 30B-2, 611-626, 1987, 8)江頭ら:水工学論文集, 41 巻, 789-794, 1997, 9)伊藤ら:水工学論文集, 46 巻, 671-676, 2002, 10)高濱ら:水工学論文集, 44 巻, 683-686, 2000.



(a) 通水 1.4sec.後の縦断面図



(a) 通水 1.6sec.後の縦断面図

図-4 計算結果