

# 混合粒径に対応した汎用土石流 1 次元・2 次元シミュレータの開発と適用

京都大学大学院農学研究科 ○中谷加奈・水山高久  
 長野県姫川砂防事務所 松本直樹  
 (株) ニュージェック 和田孝志  
 立命館大学理工学部 里深好文

## 1. はじめに

悲惨な土石流による被害の防止・軽減には、被害領域や規模を高精度で予測することが重要であり、予測を行う際に土石流数値シミュレーションが有効なツールであることは知られている。しかし、既存の土石流シミュレータには扱いやすい GUI の実装されたものが少なく、高度な砂防や数値計算の知識・技術を持つ一部の専門家以外が手軽に計算を実施することは困難であった。また、一般的な土石流数値シミュレーションは一樣粒径で実施されることが多い。しかし、実際の土石流は幅広い粒径範囲を持った混合粒径材料で構成されており、土石流の流動・堆積には粒度特性が影響を及ぼすことが知られている。

このような背景から、高度な知識や技術を有さない一般ユーザーにも扱える GUI を実装し、且つ土石流の流動・堆積過程をよりよく再現し得る多粒径に対応した土石流数値シミュレーションモデルを搭載した汎用土石流シミュレータ Kanako 2D (Ver. 2.10) を開発した。

## 2. 手法

MS VisualBasic.NET を開発環境として、計算部においては松本らによって提案された粒径変化を考慮した一次元・二次元領域における混合粒径モデル<sup>1)</sup> をベースとした。また、里深らによって提案された砂防えん堤を設置した領域を計算するモデル<sup>2)</sup> を利用することで、一次元領域においては不透過型、スリット型、格子型の砂防えん堤を設置することを可能とし、高さや種類の異なる砂防えん堤を複数基設置した場合の計算も可能とした。GUI 部においては、これまで開発してきた一樣粒径を対象とした KANAKO2D<sup>3)</sup> を改良して、混合粒径に対応した入出力機能等の GUI を実装した。

## 3. 数値解析モデル

混合粒径モデルにおける 2 次元土石流計算の基礎方程式を以下に示す。なお、一次元計算では土石流中の土砂の体積保存に関して各粒径階ごとに計算している。

### (1) 水・土砂を含めた全容積の保存式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = i \quad (1)$$

### 2) 土砂体積の保存式

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + u \frac{\partial C_k h}{\partial x} + v \frac{\partial C_k h}{\partial y} = i_k C_* \quad (2)$$

### (3) $x$ 方向（流下方向）の流水の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} \quad (3)$$

### (4) $y$ 方向（横断方向）の流水の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} \quad (4)$$

### (5) 河床変動の式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (5)$$

ここに、 $h$ : 流動深、 $u$ :  $x$  方向の流速、 $v$ :  $y$  方向の流速、 $C_k$ : 粒径階  $k$  の土砂濃度、 $z$ : 河床位、 $t$ : 時間、 $i_k$ : 粒径階  $k$  の侵食・堆積速度、 $i$ : 全粒径階の侵食・堆積速度、 $\rho$ : 間隙流体の密度、 $C_*$ : 河床堆積物の体積濃度、 $H=h+z$ 、 $\tau_x$ 、 $\tau_y$ :  $x$ 、 $y$  方向の河床せん断力である。なお、一次元計算では  $y$  方向成分を考慮しない方程式を用いる。

一次元領域においては、鉛直方向に二層に分けて各粒径階ごとに土砂濃度を計算し、平均粒径  $d_m$  はそれらの濃度から次式で求められる。

$$d_m = \frac{C_1 d_1 + C_2 d_2 + \dots + C_k d_k + \dots + C_{k_{max}} d_{k_{max}}}{C_1 + C_2 + \dots + C_k + \dots + C_{k_{max}}} \quad (6)$$

$d_k$ : 粒径階  $k$  の粒径、 $k_{max}$ : 最大粒径階である。

侵食・堆積速度は次のように与えている。

(堆積の場合:  $i < 0$ )

$$i = \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{q}{h} \quad (7)$$

$q$ : 土石流の単位幅流量、 $C_\infty$ : 平衡土砂濃度、 $C$ : 混合粒径砂礫全体の土砂濃度、 $\delta_d$ : 堆積速度係数であり、粒径階別の堆積速度  $i_k$  は下記の様になる。

$$i_k = -w_{0k} C_k + i \frac{C_k}{C} \quad (8)$$

$w_{0k}$ : 粒径階  $k$  の粒子の沈降速度 (Rubey の式) である。  
(侵食の場合:  $i \geq 0$ )

粒径階別の侵食速度は次のように表している。

$$i = \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{q}{d_{mbed}} \quad (9)$$

$$i_k = \begin{cases} if_{bk} & (u_* > u_{*ck}) \\ 0 & (u_* \leq u_{*ck}) \end{cases} \quad (10)$$

$\delta_e$ : 侵食速度係数、 $d_{mbed}$ : 河床表層での平均粒径、 $f_{bk}$ : 河床表層での粒径階  $k$  の存在割合、 $u_*$ : 摩擦速度 ( $= (g \tan \theta_w)^{1/2}$ )、 $u_{*ck}$ : 粒径階  $k$  の限界摩擦速度である。

二次元領域においては、一次元計算と比較して縦断勾配が緩くなり横断方向へも応力が分散することから、土石流内部での粒子の上下方向の入れ替わりは少ないと考えられるため、次に示す粒子数の保存則を用いて流動中の粒子の平均粒径の時空間的変化を算出し、これを用いて一様粒径を仮定した計算を行っている。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Ch}{d_m^3} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Cuh}{d_m^3} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Cvh}{d_m^3} \right) = \frac{iC_*}{d_m^3} \quad (11)$$

#### 4. Kanako 2D (Ver. 2.1\_) の GUI 部

主要機能は一様粒径を対象とした Kanako 2D

(Ver. 2.0\_) と同様であり、起動時には、河床の縦断図と平面図を上下に並べて、1次元領域と2次元領域は連続して表示される。1次元地形における河床形状、砂防ダムの詳細、観測点位置、供給土石流のパラメータ入力は、基本的にマウスで設定できる。2次元入力画面では、扇状地等の形成データを容易に設定可能である。

混合粒径へ対応した機能として、粒径階数や各粒径階の大きさや濃度についても画面上で設定できるようにしている (図1)。

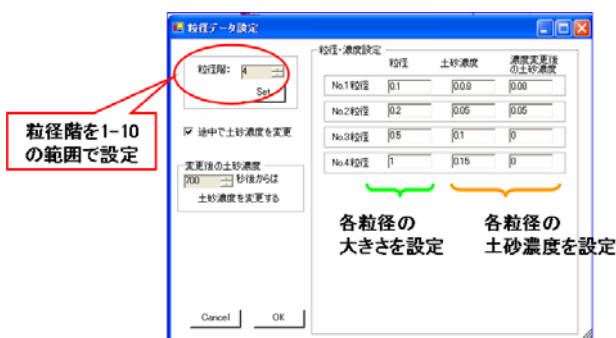


図1: 粒径データ設定画面

計算開始後、2画面上でアニメーションが表示される。主画面では、河床縦断形状や土石流水面形状の変化、平面図での水深・堆積厚変化、各観測点における総流量・総流砂量・粒径毎の流砂量についてのハイドログラフが表示される (図2)。2次元画面上では設定地形

上での水深や堆積厚変化 (図3)、平均粒径が表示され (図4)、大粒径が先端に集まる傾向が読み取れる。

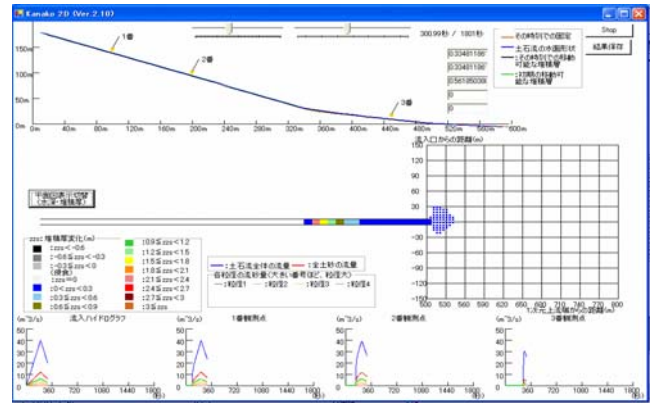


図2: 計算画面例 (主画面・堆積厚変化表示)

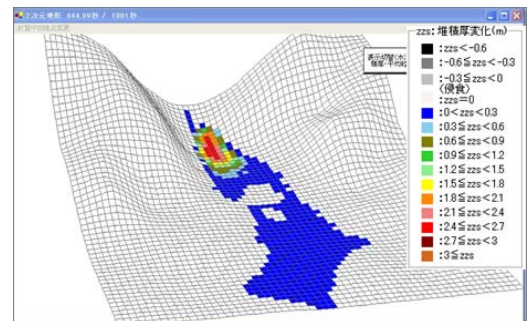


図3: 計算画面例 (2次元画面・堆積厚表示)

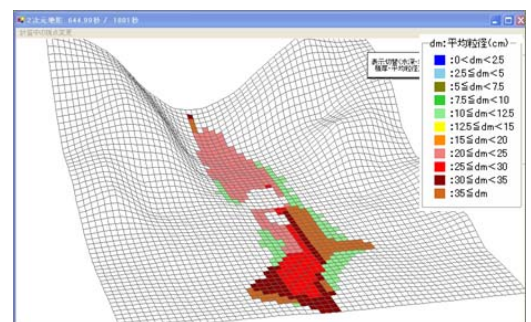


図4: 計算画面例 (2次元画面・平均粒径表示)

#### 5. おわりに

GUI 実装によって情報の視覚化が図られて、一般ユーザーにも土石流の流動・堆積過程の再現や対策工の効果検討等を目的とした多様な条件下での土石流数値シミュレーションの実施が手軽に実行可能となった。また、混合粒径モデルの導入によって、土石流の先頭部に巨礫が集中する分級現象を再現することも可能となり、一様粒径で計算した場合と比較してより実現に近い精度の高い計算が可能になったといえる。

(参考文献) 1) 松本直樹ら (2008): 粒径変化を考慮した土石流汎濫予測手法に関する研究, 平成20年度砂防学会研究発表会概要集  
2) 里深好文ら (2005): 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol. 58, No. 1  
3) 中谷加奈ら (2008): GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第4回土砂災害に関するシンポジウム