

# 数値シミュレーションを用いた文化財が存在する 山麓地域における土石流災害防止に関する検討

Study on preventing debris flow disaster on heritage existing mountainous area  
applying numerical simulation

中谷加奈<sup>1</sup>・和田孝志<sup>2</sup>・里深好文<sup>3</sup>・水山高久<sup>4</sup>

Kana Nakatani, Takashi Wada, Yoshifumi Satofuka and Takahisa Mizuyama

<sup>1</sup>京都大学 博士課程 農学研究科 森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Ph.D. student, Kyoto University, Dept. of Erosion Control Engineering

<sup>2</sup>株式会社ニュージェック 河川グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

River Eng. Group, ENGINEERING CONSULTANTS NEWJEC Inc.

<sup>3</sup>立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>4</sup>京都大学教授 農学研究科 森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Professor, Kyoto University, Dept. of Erosion Control Engineering

Mizuo is small alluvial fan area located at Western part of Kyoto, which is designated as debris flow hazard stream by Kyoto prefecture. Debris flows can cause severe damage because of their high density, high velocity, and huge destructive power. In the alluvial fan there are many facilities like houses, elementary school, clinic and highway. Moreover there exists some historical heritage such as Seiwa Emperor shrine and mausoleum. Therefore protection of Mizuo area will be necessary and important. This paper presents debris flow numerical simulation by using Kanako; a user friendly GUI equipped debris flow simulator with good visualization and easy explanation. The simulation showed that a sabo dam is a very effective countermeasure for debris-flow protection.

**Key Words :** debris flow, numerical simulation, GUI, historical heritage, Mizuo area

## 1. はじめに

水尾谷溪流は、京都市右京区嵯峨水尾地内に位置する土石流危険溪流である。流域直下には人家や小学校、診療所、主要交通網である京都日吉美山線等の保全対象が位置するため、小規模な溪流であるが、土石流が発生した場合には甚大な人的・経済的被害が生じることが懸念される。また、清和天皇社や清和天皇陵、愛宕神社などの史跡が存在する地域でもあり、歴史都市防災の視点からも重要な地域といえるであろう。

土石流災害による被害を防止・軽減する有効な手法の一つとして、砂防ダムなどの砂防構造物の建設が挙げられる。砂防構造物の土砂調節効果の検証や、構造物が無い場合との被害規模を比較する際に、土石流数値シミュレーションモデルやそれらを実装したプログラムが有効なツールとして利用される。本研究では、著者らが開発したGUIを実装した土石流数値シミュレーションシステム'Kanako 2D'<sup>1)</sup>を用いて、水尾谷溪流についてのシミュレーションを行った。対策工無しと有りの場合を比較して、下流側での氾濫・堆積状況がどのように変化するか、どのような対策工を設置することが効果的かを検証した。

## 2. 土石流シミュレーションシステム ‘Kanakano’

‘Kanakano’はGraphical User Interface (GUI)を実装した汎用土石流シミュレータであり、本研究では一次元領域から二次元領域までを統合的に計算できる結合モデル<sup>2)</sup>を搭載した‘Kanakano 2D (Ver.2.02.1)’を用いてシミュレーションを実施した。なお、Kanakanoは(財)砂防・地すべり技術センターのWebサイト上で無料公開されている。

### (1) システム概要

KanakanoはMS VisualBasic.NET上で開発され、MS Windows OSが持つグラフィック機能、インタラクティブなUI (User Interface) 機能が搭載されている。システムは、初期条件入力や計算結果表示を担うUI部分と、シミュレーションを行う計算部分の二つの部分から成り、UI部を実装したことにより高度な砂防・数値計算における専門知識が乏しいユーザーにも、入出力を直感的に行うことが出来、簡単に土石流の流下・堆積過程や砂防構造物の設置効果等を計算・検証することが可能となっている(図1)。

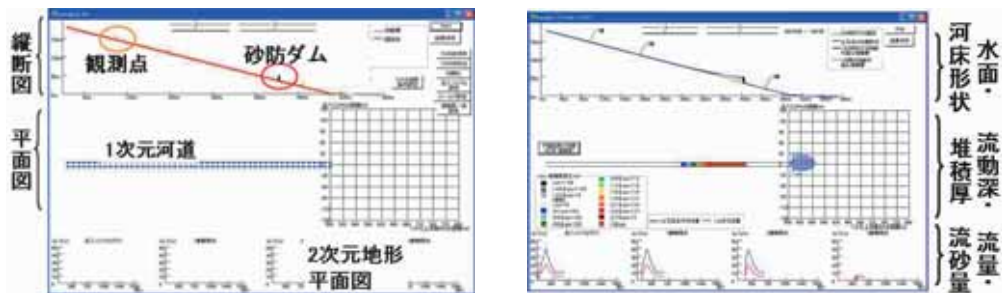


図1 Kanako入力画面一例(左図)と計算画面一例(右図)

### (2) 数値解析モデル

Kanakano 2Dでは結合モデル<sup>2)</sup>を採用している。結合モデルでは時間ステップ $\Delta t$ 毎に、急勾配の谷部では山地河川における土石流の流動・堆積過程を再現する1次元計算<sup>3)4)</sup>、扇状地などの緩勾配領域では堆積・氾濫過程について2次元計算<sup>5)</sup>を連続して行う。

従来の土石流数値計算においては、急勾配である谷部分では1次元計算、緩勾配である扇状地では2次元計算が用いられ、1次元計算で得られた下流端の流量・流砂量を2次元計算の流入条件として用いることが通常であったが、この手法では1次元計算と2次元計算が一方の関係であり、領域の境界である谷出口で顕著な土砂生産が起こるような場合に再現性の高い計算が行えなかった。結合モデルでは、1次元計算領域下流端部における流量と流砂量を2次元計算の流入条件として用い、更に2次元計算領域上流端部の河床位と流動深を1次元計算の下流端境界条件として用いることで、領域の境界である谷出口付近において1次元計算領域と2次元計算領域での結果が相互に影響する統合的なモデルとなり、従来と比較してより合理的な計算が可能となっている。

土石流の流動・堆積に関する支配方程式としては高橋ら<sup>6)</sup>のモデルが使用され、これを差分化することによりシミュレーションモデルが構築されている。また本システムで採用したモデルでは、勾配に応じて適用する平衡土砂濃度式を変えることにより、土石流だけでなく掃流状集合流動や掃流砂などの流動形態の異なる土砂流出についても統合的に検討可能となっている。なお、本研究では一様粒径を対象としている。

#### a) 基礎方程式

結合モデルで用いた2次元土石流計算の基礎方程式を以下に示す。なお、1次元計算では以下の方程式のy方向成分について考慮しないものを用いる。

水・土砂を含めた全容積の保存式

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

土砂の体積の保存式

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = iC_* \quad (2)$$

$x$ 方向（流下方向）の土石流の運動方程式

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

$y$ 方向（横断方向）の土石流の運動方程式

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

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、 $C$ ：土砂濃度、 $z$ ：河床位、 $t$ ：時間、 $i$ ：侵食・堆積速度、 $\rho$ ：土石流の密度、 $C_*$ ：河床堆積物の体積濃度、 $\theta_{wx}$ 、 $\theta_{wy}$ ： $x$ 、 $y$ 方向の水面勾配、 $\tau_x$ 、 $\tau_y$ ： $x$ 、 $y$ 方向の河床せん断力である。

b) 侵食・堆積速度式

侵食・堆積速度を表す式は、  
侵食 ( $C_\infty \geq C$ ) のとき

$$i = \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{q}{d} \quad (6)$$

堆積 ( $C_\infty < C$ ) のとき、慣性的運動を無視すると、

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

である。ここに、 $q$ ：土石流の単位幅流量、 $d$ ：平均粒径、 $C_\infty$ ：平衡土砂濃度、 $\delta_e$ ：侵食速度係数、 $\delta_d$ ：堆積速度係数である。

c) 河床せん断力

$x$ 方向の河床せん断力を表す式は、  
 $C \geq 0.4C_*$ （土石流）のとき

$$\frac{\tau_x}{\rho h} = \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} d^2}{8h^3 \left\{ C + (1-C) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \left[ \left( \frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right]^2} \quad (8)$$

$0.01 < C < 0.4C_*$ （掃流状集合流動）のとき

$$\frac{\tau_x}{\rho h} = \frac{1}{0.49} \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} d^2}{h^3} \quad (9)$$

$C \leq 0.01$  または  $h/d \geq 30$ （掃流砂または泥流状乱流土石流）のとき

$$\frac{\tau_x}{\rho h} = \frac{gn_m^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (10)$$

である。ここに、 $\sigma$ ：砂粒子密度、 $g$ ：重力加速度、 $n_m$ ：マニングの粗度係数である。 $y$ 方向の河床せん断力も同様に表される。

d) 平衡土砂濃度

平衡土砂濃度  $C_\infty$  は以下のように表される。

$\tan \theta_w \geq \tan \phi$  のとき

$$C_\infty = C_{\max} = 0.9C_* \quad (11)$$

$\tan \phi > \tan \theta_w > 0.138$  (土石流) のとき

$$C_\infty = \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \quad (12)$$

$0.138 \geq \tan \theta_w > 0.03$  (掃流状集合流動) のとき

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2 \quad (13)$$

$\tan \theta_w \leq 0.03$  (掃流砂) のとき

$$C_\infty = \frac{(1 + 5 \tan \theta_w) \tan \theta_w}{\frac{\sigma}{\rho} - 1} \left( 1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left( 1 - \alpha_c \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right)$$

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta_w}$$

$$\alpha_c^2 = \frac{2 \left( 0.425 - \frac{\sigma \tan \theta_w}{\sigma - \rho} \right)}{1 - \frac{\sigma \tan \theta_w}{\sigma - \rho}} \quad (14)$$

ただし、 $\tau_* = \frac{\rho}{\sigma - \rho} \frac{h \tan \theta_w}{d}$  であり、 $\tau_* \leq \tau_{*c}$  のとき  $C_\infty = 0$  である。ここに、 $\theta_w$ : 流れ方向の水面勾配、

$\phi$ : 内部摩擦角、 $\tau_*$ : 無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力である。

### (3) 初期条件設定

Kanakoでは上流端から供給する土石流の流量、土砂濃度、地形条件としての河床位を図1左図の様な入力画面上で設定すると、(2)で記述した式を用いて各時刻での各計算点における流量、流砂量、河床位、水深等が算出されて、図1右図の様な出力画面において結果がリアルタイムにアニメーション表示される。

砂礫の密度、河床の容積濃度、マンシングの粗度係数、侵食速度係数などは土石流の数値計算で一般的に用いられる推奨値を初期設定値としているが、設定ファイルの数値を変更することでユーザーが自由に変更できるため、各パラメータのチューニングを行うことも既存のシミュレータと同様に可能である。

## 3. シミュレーション適用例

### (1) 地区概要

計算対象とした水尾谷溪流は、溪流面積0.18km<sup>2</sup>、平均溪床勾配1/2~1/4と急峻な地形を呈する。谷出口から約700m集落を縦貫して水尾川本流に合流し、集落には人家や小学校、診療所、老人ホームや主要交通網である京都日吉美山線等の保全対象が位置しており、小溪流とはいえ土石流災害が生じた場合の被害は甚大と予想される(図2)。また、水尾は第56代清和天皇のゆかりの地として知られており、清和天皇を氏神として奉った「清和天皇社」は1100年以上前から里人によって受け継がれ奉祀されてきた(写真1)。清和天皇陵や清和天皇社へ山登りを兼ねて足を運ぶ来訪者、観光客は年間を通じて多く、水尾は重要な史跡地としても保全する必要性が高い地区といえるであろう。

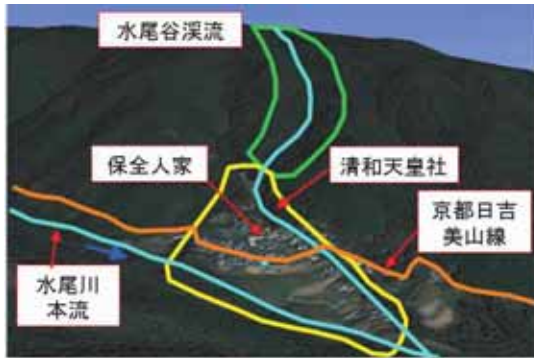


図2 流域正面景 (出典:Google Earth)



写真1 清和天皇社

## (2) 流入ハイドログラフ

渓流の上流端勾配を元に、高橋らによる平衡土砂濃度式(15)を用いて京都府の設定した計画土砂量(3760m<sup>3</sup>)を輸送し得る土砂濃度、総流量を算出する。土石流ピーク流量については、土石流総流量との関係式<sup>7)</sup>(16)から導出した。

平衡土砂濃度式

$$Cd = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (15)$$

ここに、 $\sigma$ :砂礫の密度(=2550 kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho$ :流体相の密度 (=1180 kg/m<sup>3</sup>)、 $\phi$ :砂礫の内部摩擦角(=35°)、 $\theta$ :計画地点から上流160mの平均河床勾配 (=13.36°)、 $Cd$ :土石流濃度(0.30 ≤  $Cd$  ≤ 0.54、最大値は0.9 $C^*$ )、 $C^*$ :河床の容積濃度 (=0.6)である。

土石流ピーク流量:平均的なピーク流量と土石流総流量の関係式

$$Q_{sp} = 0.01 \sum Q \quad (16a)$$

$$\sum Q = \frac{Vdqp \cdot C^*}{Cd} \quad (16b)$$

$Q_{SP}$ :土石流のピーク流量(m<sup>3</sup>/s)、 $\sum Q$ :土石流総流量(m<sup>3</sup>)、 $Vdqp$ :流出土砂量(空隙込み・m<sup>3</sup>)である。

上述した式より土石流濃度は0.44、総流量・ピーク流量は5102m<sup>3</sup>、51.02m<sup>3</sup>/sが算出された。これらより、供給ハイドログラフを図3の様に設定した。

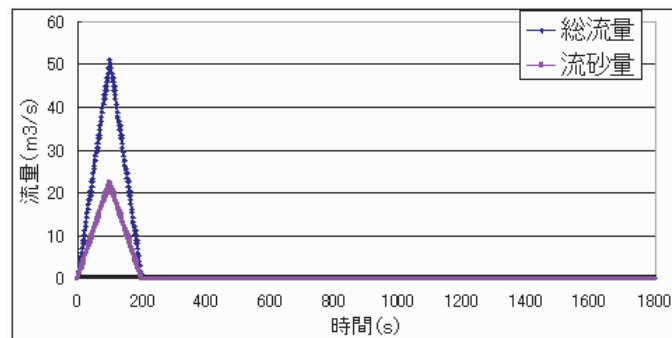


図3 計算で用いた水尾谷の供給ハイドログラフ

## (3) その他の計算条件

数値計算に用いた各パラメータ値を表1に示す。流域面積が小さいことから土石流の流動継続時間は30分未満であると考え、総計算時間は1800秒とし、河道内における初期堆積土砂厚は1次元・2次元領域とも無しとした。

なお、本研究では上流端から土石流が供給される場合を検討したが、降雨等による流量増加が誘引となって河道内の土砂侵食が起これり計算領域内で土石流が発生・発達する場合も起これりうるので、供給ハイドログラフや移動可能土砂などの土石流条件を変更した検討も必要だと考えられる。



表1 計算に用いたパラメータ

パラメータ	数値	堆積速度係数 <sup>6)</sup>	0.05
計算時間(s)	1800	マンシングの粗度係数(s/m <sup>1/3</sup> )	0.03
計算の時間間隔(s)	0.01	1次元の計算点間隔 (m)	20
土砂の粒径(m)	0.05	1次元領域計算点個数	48
砂礫の密度(kg/m <sup>3</sup> ) $\sigma$	2550	2次元の $x$ 計算点間隔(m)	5
流体相密度(kg/m <sup>3</sup> ) $\rho$	1180	2次元の $y$ 計算点間隔(m)	5
河床の容積濃度	0.60	2次元平面の $x$ 方向計算点個数	60
重力加速度(m/s <sup>2</sup> )	9.8	2次元平面の $y$ 方向計算点個数	60
侵食速度係数 <sup>6)</sup>	0.0007		

#### 4. シミュレーション結果・考察

水尾谷について施設無、砂防ダムを1次元領域に設置した2ケースで計算を実施し、ピーク流量が2次元領域の一定地点に達した時点と、計算終了時における2次元領域での計算結果について考察を行った。図4は水尾地区概要(図4左)とKanakoで表示される1次元領域(図4右上)2次元領域(図4右下)における水尾谷の対応を示す。2次元領域での通常時における水尾谷流路は図4右下の色が付いて示される範囲となる。

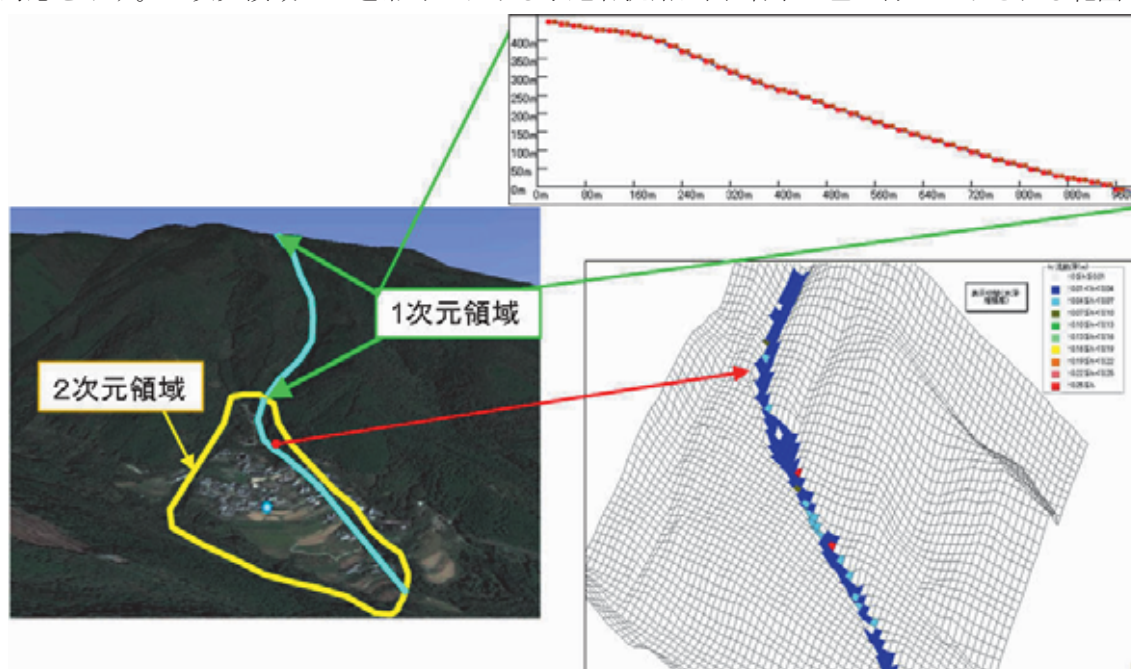


図4 水尾地区(左図)とKanakoでの1次元領域(右上図)2次元領域(右下図)の対応

##### (1) 施設無

施設無しの場合における、ピーク流量が2次元領域上流域(図5a矢印地点)に到達した時刻(145秒後)と計算終了時(1800秒後)における水深と堆積厚の変化を図5(a-d)に示す。

水尾谷における施設無の計算結果から、大規模な土石流が発生・流動した場合には、集落内の人家・老人ホーム・診療所などの保全対象が集中する広域で水・土砂が流路を溢れ出し、氾濫することがわかる。図5dから1800秒後において土砂堆積厚は、流路外では0.3m以下と小さいが、流路内においては中流から下流域に渡って最大3m以上と非常に大きい。また、2次元領域へ流入する土砂量は約3000m<sup>3</sup>であり、上流端から土石流として供給された土砂量の80%が施設無の場合には保全対象の位置する2次元領域へと流下することが示された。このような結果から、被害軽減を図るために対策を考慮する必要性が示された。一方で、清和天皇社は日本各地で古来から存続する史跡と同様、流域内で高台の安全領域に位置<sup>8)</sup>しているため、本検討で設定した大規模な土石流が発生した場合においても、被害は免れることも明らかとなった。

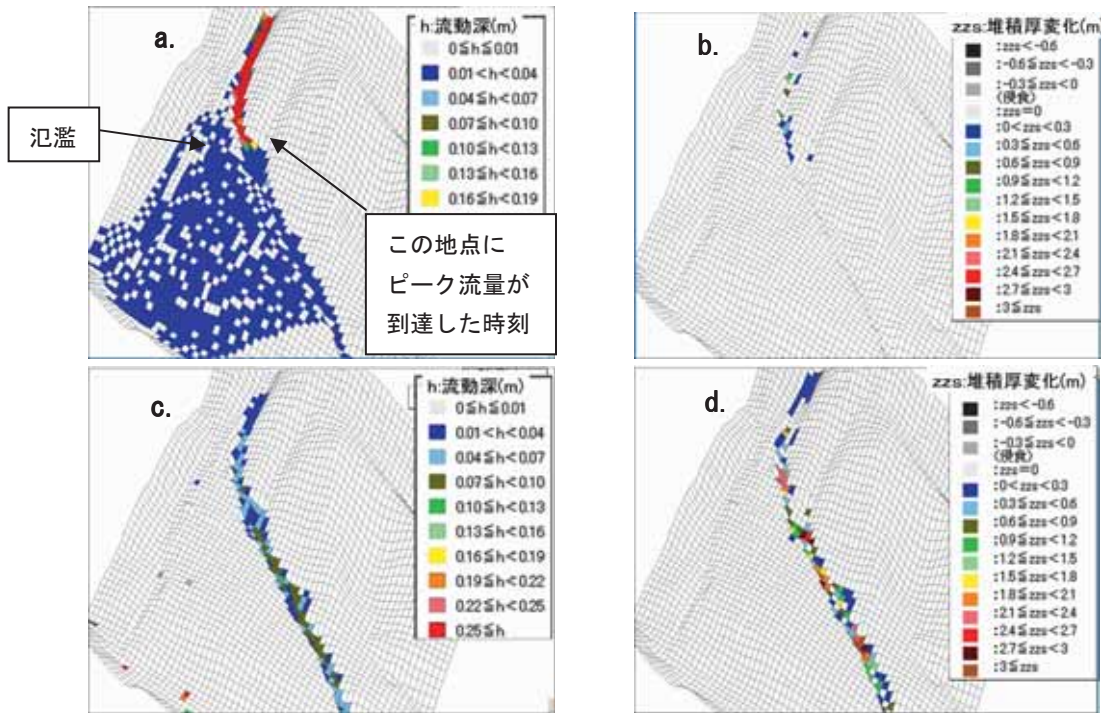


図5 無施設時のピーク流量が a図矢印地点に到達した時刻（145秒後）における水深（a）と堆積厚変化（b）と1800秒後の水深（c）と堆積厚変化（d）

## (2) 施設（不透過型砂防ダム）有り

砂防構造物による被害軽減策としては、急勾配である谷（1次元領域）において砂防ダム等の構造物を設置することで、扇状地（2次元領域）へ流入する土砂を減少させることが有効な対応策として挙げられる。本研究では、1次元領域の下流端付近に不透過型砂防ダムを設置したケースで検討を行った。図6（a-d）は、上流端から930m地点に高さ18mの不透過型砂防ダムを設置した場合の、ピーク流量が2次元領域中流域（図5a 矢印地点）に到達した時刻（529秒後）と1800秒後の水深（図6a、c）と初期からの堆積厚変化（図6b、d）を示している。

なお、砂防ダムを930m地点に設置したのは、数値解析モデルの都合上1次元領域の最下流端およびその直上においては砂防ダムを設置した計算が精度良く実施出来ないこと、及び1次元領域の下流端付近において920-940m地点間での河床勾配が比較的緩やかで砂防ダムによる土砂調節効果が大きいと推定されたからである。ダム高さを18mとしたのは、10-20mの範囲で1m毎に高さを変化させて計算を行った結果、高さ18m未満の砂防ダムを設置する場合にはよりダム高が大きい方が土砂調節効果が大きくなり、18m以上の高さの砂防ダムを設置した場合には土砂調節効果が高さ18mの場合とほぼ同様であったためである。

図6の様に不透過型砂防ダムを設置した場合は、1800秒間を通じて氾濫は発生せず流れは河川内に留まり、ピーク流量到達時刻も大幅に遅れる。砂防ダムによって2次元領域へ流入する土砂量は $40\text{m}^3$ と、施設無の場合と比較して98%減少し、土砂の殆どは1次元領域でカットされることがわかる。流路内の最大土砂堆積厚変化についても0.02mの堆積厚変化が生じる領域が僅かに発生する程度で、施設無の場合と比較して大きく減少する。

## 5. おわりに

本研究では、Kanako 2Dを用いて水尾谷流域における土石流の流動・堆積領域での被害状況推定や対策施設計画、施設効果の検証を行った。計算結果からは、土石流が発生した場合には人家や診療所、老人ホーム、小学校などの保全対象に被害を及ぼす氾濫が起こりうることが確認された。一方で、1100年以上前から水尾地区において里人に奉祀されてきた清和天皇社については、土石流災害被害の危険が低く、古来より安全度の高い地域に建てられていることが確認された。しかし、清和天皇社などの史跡だけが守られても、清和天皇ゆかりの土地としての水尾地区が被災することは、歴史都市防災という観点からは好ましくない。

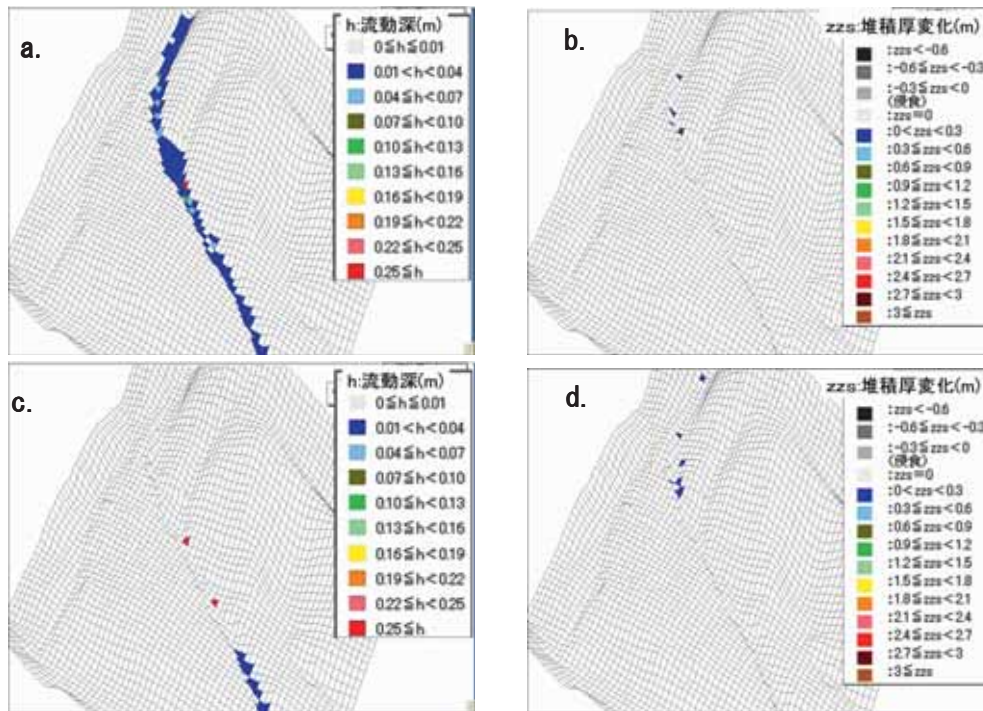


図6 1次元領域に砂防ダムを設置した場合、ピーク流量が図5a矢印地点に到達した時刻（529秒後）の水深（a）と堆積厚変化（b）と1800秒後の水深（c）と堆積厚変化（d）

また、数値シミュレーションの結果より、適切な砂防ダムなどの砂防構造物を設置することで被害が大幅に軽減されることも導かれた。しかし、水尾谷流域では道路の整備状況や地形条件から、砂防施設を設置する際の資材の搬入や構造物建設が困難であると考えられる。このため、構造物設置だけでなく避難や予警報システム整備、住民の土砂災害への防災意識を向上などのソフト対策を充実させ、土石流災害による被害の防止・軽減を図ることが必須事項であると考えられる。

**謝辞：**最後に、本研究において様々なご協力を頂いた京都府京都土木事務所河川砂防室と三井共同建設コンサルタント株式会社の関係各位に深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 中谷加奈, 和田孝志, 里深好文, 水山高久：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論文集, p. 149-154, 2008.
- 2) 和田孝志, 里深好文, 水山高久：土石流の 1 次元・2 次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌, Vol. 61, No. 2, p. 36-40, 2008.
- 3) 里深好文, 水山高久：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, p. 14-19, 2005.
- 4) 里深好文, 水山高久：格子型砂防ダムによる土石流の調節に関する数値解析, 砂防学会誌, Vol. 57, No. 6, p. 21-27, 2005.
- 5) 中川一, 高橋保, 里深好文, 川池健司：1999 年ベネズエラのカマリグランド流域で発生した土砂災害について, 京都大学防災研究所年報, 44B-2, p. 207-228, 2001.
- 6) 高橋保, 中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol. 44, No. 3, p. 12-19, 1991.
- 7) 国土交通省：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）, p. 43-51, 2007.
- 8) 武居有恒：地すべり・崩壊・土石流—予測と対策—, 鹿島出版会, p. 7-16, 1980.