

汎用土石流シミュレータ Kanako の実地形への適用

APPLICATION OF A DEBRIS FLOW SIMULATION 'KANAKO' TO A DEBRIS FLOW DANGER TORRENT

中谷加奈¹・Sumaryono²・里深好文³・水山高久⁴

Kana NAKATANI, Sumaryono, Yoshifumi SATOFUKA and Takahisa MIZUYAMA

¹ 学生会員 農修 京都大学大学院博士課程 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)

² Ministry of energy and mineral resources Geology Agency, Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation
(Diponegoro road No.57 Bandung 40122, Indonesia)

³ 正会員 工博 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)

⁴ 正会員 農博 京都大学大学院教授 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)

Debris flows can cause severe damage because of their high density, high velocity, and huge destructive power. Therefore, numerical simulations are important for predicting the scale of debris-flow damage and planning efficient countermeasures, such as sabo dams, to prevent or reduce damage. This paper presents a case study of a debris-flow numerical simulation using Kanako, a graphical user interface (GUI)-equipped debris flow simulation system that provides good visualization and a clear explanation. Kanako was applied to the Mizuo area, West Kyoto. This area is an alluvial fan, an area that is highly likely to be hit by a debris flow. The simulation clearly showed that a sabo dam is a very effective countermeasure for debris-flow protection.

Key Words : debris flow, numerical simulation, sabo dam, GUI

1. はじめに

土石流は、その速度や含有する多量の土砂によって大きな破壊力を持ち、しばしば甚大な社会的・経済的被害を引き起こす。これらの被害を軽減する有効な手法としては、砂防ダムや導流工等の砂防構造物の建設が挙げられる。土石流災害規模の予測¹⁾や、砂防構造物の土砂調節効果を検証する²⁾場合において、土石流数値シミュレーションモデルは有効なツールとして多数開発されてきた。

一方、これらを活用するために必要となるユーザーインターフェイス(UI)整備は遅れており、シミュレーションを扱うには高度な専門知識が必要とされていた。UIが比較的事業化された水工学分野のシミュレータとしては

FLO-2D や MIKE が挙げられるが、前者は主として清水の2次元氾濫モデル、後者は沿岸・環境・海岸モデルであり、砂防の領域である山地河川における土石流数値シミュレーションに適しているとはいえない。このため、一般の砂防技術者は計算業務を自力で行うことが難しく、

専門家に一任せざるをえず、砂防の分野で数値シミュレーションを有効なツールとして活用する機会は減少する傾向にあったといえよう。すなわち、計算の精度やモデルの妥当性といったこれまで研究者が行ってきた努力だけでは、総合的な技術力の向上には結びつかない。現状の問題を解決するため、GUIを実装した汎用土石流シミュレータ Kanako^{3),4)}開発を筆者らは進めてきた。

本研究では Kanako を用いて京都市右京区水尾地区における土石流危険渓流についてのシミュレーションを実施した。対策工の有無による堆積状況を比較し、下流側での氾濫・堆積状況の変化や、効果的な対策工の設置案を検証した。

2. 土石流シミュレータ Kanako

Kanako はGraphical User Interface (GUI)を実装した汎用土石流シミュレータである。本研究では、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⁵⁾を搭載したVer.2.01を用いてシミュレーションを実施する。

(1) システム概要

KanakoはMS VisualBasic.NET(VB.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る。基本的にユーザーはマウス等のポインティングデバイスを利用することで、計算条件を簡単に設定することが可能であり、アニメーション表示によりシミュレーション結果を直感的に把握できる。

Kanakoは従来の土石流シミュレータと異なりUI部が実装されているため、ユーザーとシステム間で情報を入力出力する際に「情報の視覚化⁶⁾」が行われる。このことによって、人間の持つ認識特性を十分に活用し、情報理解を早く、深くすることが可能となる。Kanakoにおいて具体的な情報の視覚化例を挙げると、初期条件として供給ハイドログラフや地形条件を設定する際や、計算過程における水深や堆積厚変化が、数値の羅列ではなく図やアニメーションとしてパターン化されて抽象化表示(図-1)される点である。これにより、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・堆積過程を計算することが可能となる。

(2) 数値解析モデル

Kanako Ver.2.01では結合モデル⁵⁾を採用しており、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^{7),8)}、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⁹⁾を行い、領域の境界である谷出口付近では、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。土石流の流動・堆積に関する支配方程式として高橋ら¹⁰⁾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、本システムでは一様粒径を対象としている。

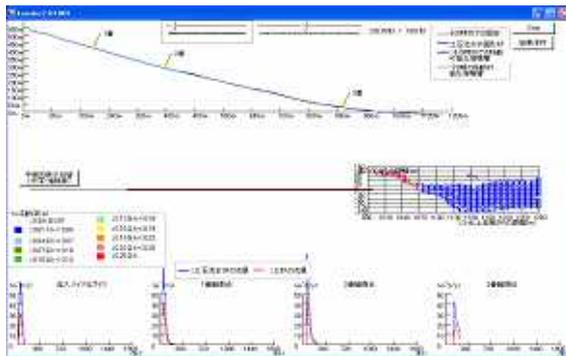


図-1 Kanako 2.01シミュレーション実行画面一例

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。

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

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

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, ρ :土石流の密度, C_* :河床堆積物の体積濃度, θ_{wx}, θ_{wy} :x,y方向の水面勾配, τ_x, τ_y :x,y方向の河床せん断力である。

(3) 主要機能

Kanako Ver.2.01における主要機能を表-1に示す。

表-1 kanako2.01 主要機能

主機能	機能詳細	説明	
入力	河床形状	1次元領域の縦断形状・川幅	
		2次元領域の地形条件	
	砂防構造物	砂防ダム(1次元): 種類{不透過, コンクリートスリット}・高さ・設置位置・基数	
		導流工(2次元):設置領域・高さ	
		流量観測点	数・設置位置 (1次元)
	供給ハイドログラフ	上流端から供給する土石流の流量・濃度	
	初期堆積厚	計算開始前の河床堆積土砂厚	
フィールド	計算点数		
出力	計算実行中リアルタイムアニメーション表示	画面の地形上に流動深・堆積厚を表示 流量観測点における流量・土砂量の表示 (1次元)	

特筆すべき点は、砂防構造物を複数基設置する場合や、異なる種類の不透過型・コンクリートスリット型の各種砂防構造物についての計算が、一つのシミュレータ上で実行可能としたことである。

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川渓流は、京都市右京区嵯峨水尾地内に位置する土石流危険渓流である。対象流域の流域面積は0.22 km²、平均渓床勾配は1/2～1/4で極めて急峻な地形を呈し、流域直下には人家や小学校、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いる。

(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(6)を用いて京都府の設定した計画土砂量(5540 m³)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⁽¹¹⁾(7a,7b)から導出した。

【平衡土砂濃度式】

$$Cd = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (6)$$

ここに、 σ :砂礫の密度(=2550 kg/m³)、 ρ :流体相の密度(=1180 kg/m³)、 ϕ :砂礫の内部摩擦角(=35°)、 θ :計画地点から上流160mの平均河床勾配(=15.89°)、



図-2 流域正面景(出典:Google Earth, 提供:(株)三井共同建設コンサルタント)



写真-1 保全対象人家

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】

$$Q_{sp} = 0.01 \sum Q \quad (7a)$$

$$\sum Q = \frac{Vdqp \cdot C_*}{Cd} \quad (7b)$$

ここに、 Q_{sp} :土石流のピーク流量(m³/s)、 $\sum Q$:土石流総流量(m³)、 $Vdqp$:流出土砂量(空隙込み)(m³)である。

上述した式より、総流量・ピーク流量は6155 m³、61.55 m³/sが算出された。渓流において土石流供給時間は100秒間として、供給ハイドログラフは図-3の様に設定した。

(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-2に示す。

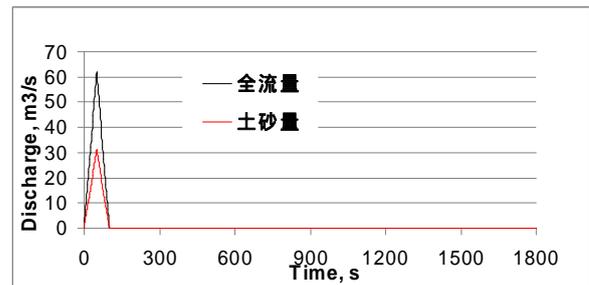


図-3 計算で用いた水尾川の供給ハイドログラフ

表-2 計算に用いたパラメータ

パラメータ	数値
計算時間(s)	1800
計算の時間間隔(s)	0.01
土砂の粒径(m)	0.1
砂礫の密度(kg/m ³) σ	2550
流体相密度(kg/m ³) ρ	1180
河床の容積濃度	0.60
重力加速度(m/s ²)	9.8
侵食速度係数 ⁽¹⁰⁾	0.0007
堆積速度係数 ⁽¹⁰⁾	0.05
堆積速度における慣性力を考慮した係数 ⁽¹⁰⁾	0.9
マンングの粗度係数(s/m ^{1/3})	0.03
1次元の計算点間隔(m)	20
1次元計算での流動閾水深(m)	0.05
1次元領域計算点個数	49
2次元のx計算点間隔(m)	5
2次元のy計算点間隔(m)	5
2次元計算での流動閾水深(m)	0.01
2次元平面のx方向計算点個数	60
2次元平面のy方向計算点個数	60

溪流の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秒とした。

4. シミュレーション結果・考察

水尾川について3ケースで計算を実施し、ピーク流量が2次元領域に達した時点と、計算終了の1800秒後における2次元領域での計算結果について考察を行った。3ケースはそれぞれ施設無し、砂防ダムを1次元領域に設置、2次元領域に導流工を設置した場合である。

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）における水尾川の対応を示している。また、2次元領域での通常時における水尾川流路は図-4右下の色が付いて示される範囲となる。また、2次元領域での通常時における水尾川流路は図-4右下の色が付いて示される範囲となる。

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（180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。

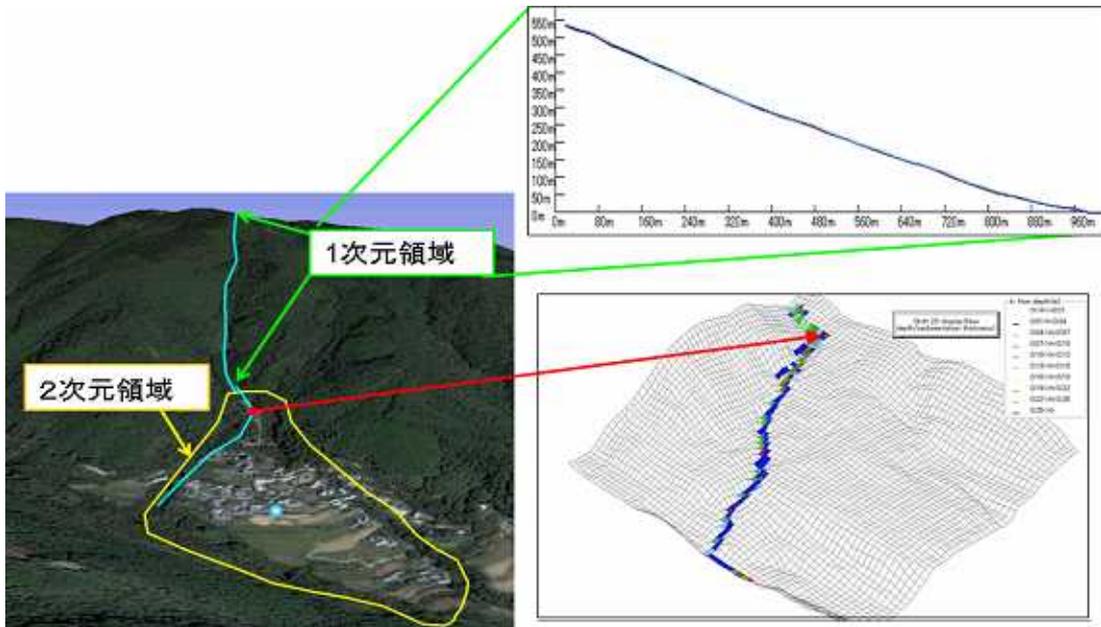


図-4 水尾地区（左図）とKanakoでの1次元領域（右上図）2次元領域（右下図）の対応

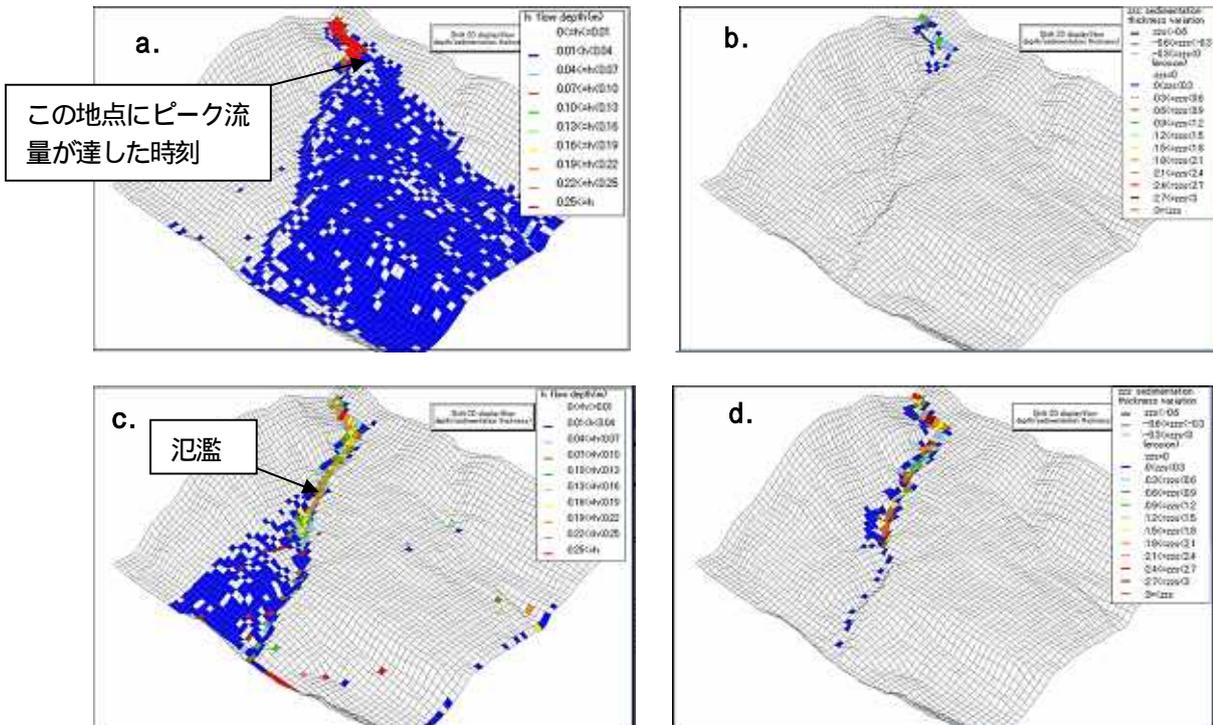


図-5 無施設時のピーク流量が a図矢印地点に到達した時刻（180秒後）における水深（a）と堆積厚変化（b）と1800秒後の水深（c）と堆積厚変化（d）

これらより、水尾川では大規模な土石流が発生・流動してきた場合、広域にわたって水・土砂が流路を溢れ出し、氾濫することがわかる。図-5cで1800秒後において土砂堆積厚は、流路外では0-0.3mと小さいが、流路内においては上流域の一部で最大3 m以上と非常に大きい。このような結果から、被害軽減のための対策を考慮する必要があることが明らかとなった。

砂防構造物による被害軽減策としては、2つの方法が考えられる。第一に、1次元領域において砂防ダム等の構造物を設置して2次元領域へ流入する土砂を減少させることである。第二に、2次元領域において導流工等の構造物を設置することで人家等の保全対象へ土石流が流動しないように、流動方向を制御することが挙げられる。

図-6(a-d)は、上流端から862.5m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次元領域上流域(図-5a矢印地点)に到達した時刻(842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。この場合には、1800秒間を通じて氾濫は発生せず、流れは河川内に留まる。ピーク流量到達時刻も大幅に遅れ、流路内の最大土砂堆積厚も1.8-2.1mへと減少する。

図-7は、2次元領域において図中に示す2箇所に高さ2mの導流工を設置した場合の、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(190秒後)と1800秒後の水深(図-7a, c)と堆積厚変化(図-7b, d)を示している。

この場合、一部で流動深0.07m未満の流路外への溢流

もみられるが(図-7c)、土砂は流路内に留まっており、流れはほぼ河川内に留まり氾濫を防いだことがわかる。ピーク流量到達時刻は、わずかではあるが遅らせている。また、河川内の土砂堆積厚変化は最大3 m以上の地点も見受けられるものの、二箇所に設置した導流工付近では堆積しており、下流まで流下する土砂を減少させていることがわかる。

これらの結果から、砂防構造物を設置することは被害軽減に有効であることが示された。特に、1次元領域に適切な砂防ダムを設置した場合には、2次元領域に流入する水・土砂は大幅に減少し、ピーク流量到達時刻も大幅に遅らせることがわかった。

5. おわりに

本研究では、Kanakano Ver.2.01を用いて実地形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。

水尾川での計算結果からは、土石流が発生した場合に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。また、適切な砂防ダムや導流工などの砂防構造物を設置することによって、被害が大幅に軽減されることも導かれた。

しかし、この地域では道路の整備状況から、砂防施設を設置する際には、資材の搬入が非常に困難であるため、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の充実は必須である。

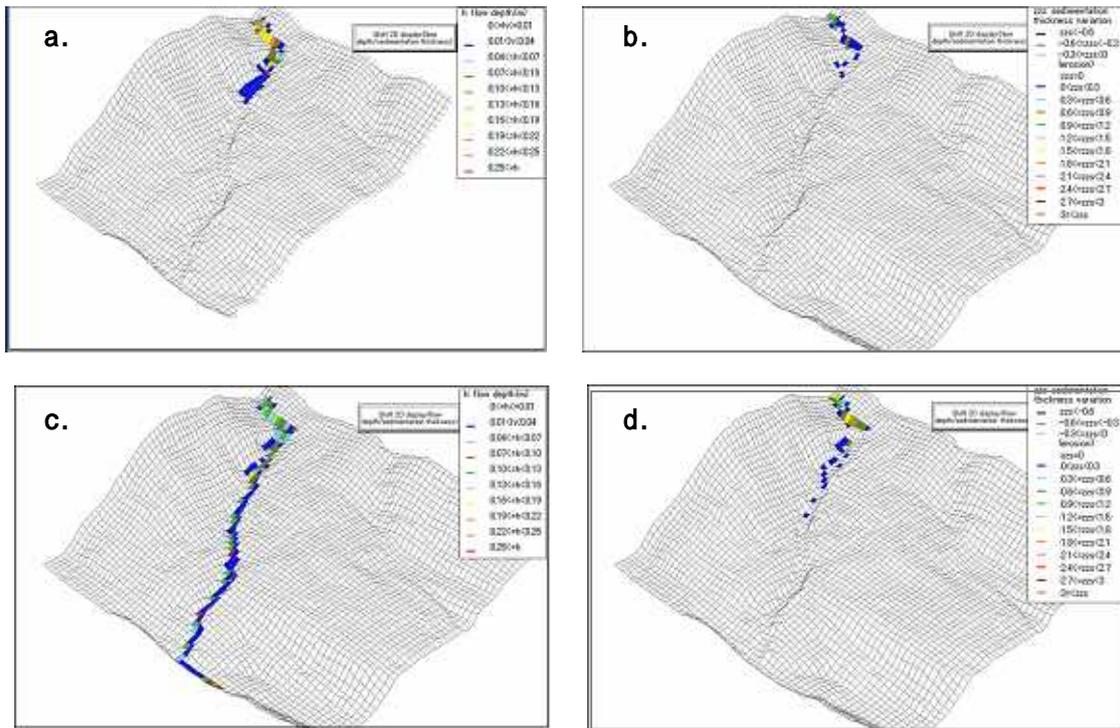


図-6 1次元領域に砂防ダムを設置した場合、ピーク流量が図4a矢印地点に到達した時刻(842秒後)の水深(a)と堆積厚変化(b)と1800秒後の水深(c)と堆積厚変化(d)

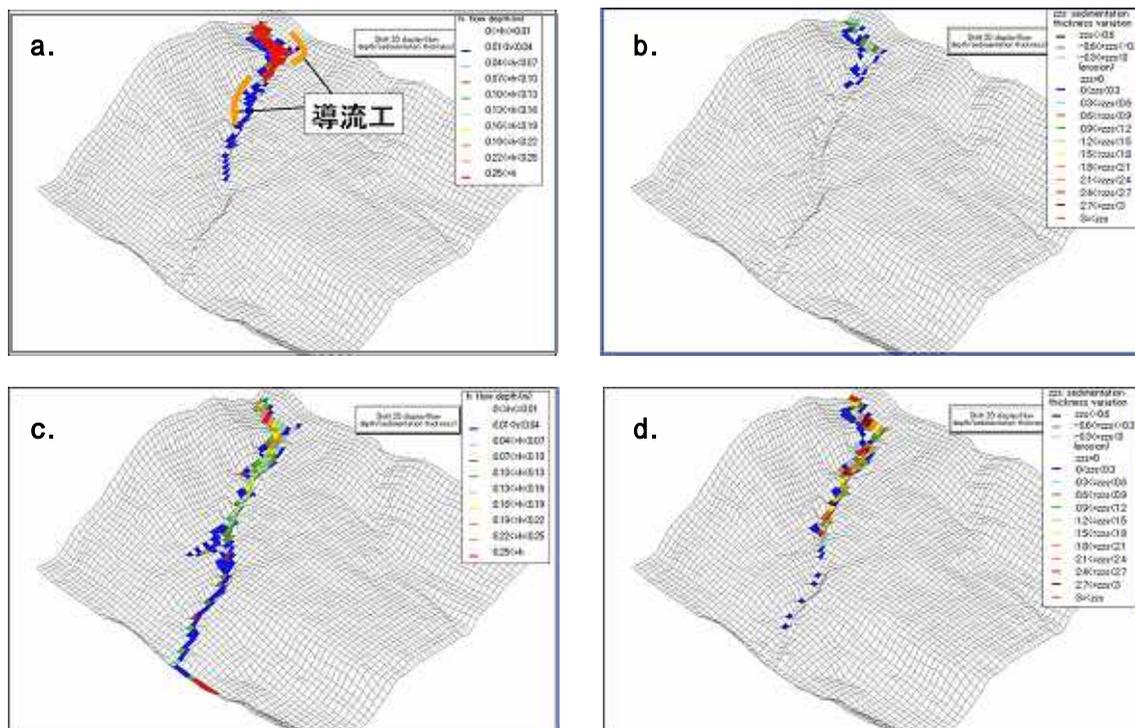


図 - 7 2次元領域 (a)図矢印地点の2箇所)に導流工を設置した際、ピーク流量が図4a矢印地点に到達した時刻 (190秒後) の水深 (a) と堆積厚変化 (b) と1800秒後の水深 (c) と堆積厚変化 (d)

このような防災教育・啓発においても、Kanakoを有効に活用できる状況もが考えられる。なぜなら、KanakoではGUIが実装されているため、高度な砂防・数値計算の専門知識が乏しい場合でも、簡単に初期条件が設定でき、アニメーション表示によって直感的に被害範囲や砂防施設の効果を確認することが可能だからである。

しかし、専門家以外のユーザーが自力で適切な砂防構造物の種類・数・サイズ・位置の最適解を探すことは難しい。今後は、最適解を提案できるアルゴリズムを構築し、汎用シミュレータへ実装することを課題としたい。

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) 江頭進治, 伊藤隆郭: 土石流の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門Web 会誌, Vol.12, No.2, 2004.
- 2) 芦田和男, 江頭進治, 村岡猛, 里深好文: 砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号 B-2, p.421-439, 1987
- 3) 中谷加奈, 里深好文, 水山高久: GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発, 砂防学会誌, Vol.61 No.2, p.41-46, 2008.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 飯田進史, 五十嵐孝浩, 高木茂知: 分散シミュレーション統合技術を適用した水害危機管理行動支援システムに関する一考察, 河川技術論文集 Vol.9, p.161-166, 2003.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 中川一, 高橋保, 里深好文, 川池健司: 1999年ベネズエラのカム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.
- 10) 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.
- 11) 国土交通省: 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編), 2007.

(2008.9.30受付)