

令和元年5月30日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06769

研究課題名（和文）等高線地形モデルを用いた斜面崩壊・土石流・河道内土砂輸送の統合解析法構築

研究課題名（英文）Development of Integrated Simulation Model of Landslide, Debris Flow and Sediment Transport Employing Contour Based Topographical Model

研究代表者

山野井 一輝（Yamanoi, Kazuki）

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・特別研究員

研究者番号：30806708

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では3次元の流域地形を1次元チューブの集合に分割できる等高線地形モデルを用いることで、降雨流出・斜面崩壊・土石流・土砂流出統合型の数値モデルを構築した。これを用いることで、降雨と地形を入力条件として、流域内の任意の地点における水位、土砂濃度および堆積深さの時空間分布を直接推定可能である。構築したシミュレーションプログラムは、2017年九州北部豪雨の被災域である赤谷川流域に適用し、斜面部の崩壊・侵食プロセスと谷底部の堆積過程が適切に再現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで時空間スケールが異なることからそれぞれ別個に研究されてきた降雨流出、斜面崩壊および土石流・土砂流出過程のシミュレーションモデルを、等高線地形モデルを用いることで統合したことに学術的な意義がある。また本研究により実現したシミュレーション手法は、土砂災害や、土砂生産の影響を受けた下流部での氾濫災害を対象にした被害予測や被害想定、河道設計、降雨観測を元にした警戒避難に応用可能な基礎技術となりうるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, an integrated model of the rainfall runoff, landslide, debris flow and sediment transport was developed employing contour-based topological model which can express the 3D watershed topography as a set of 1d stream tubes. Applying this integrated model, water level, sediment concentration, and deposition depth at any point can be obtained from rainfall and digital elevation model. An example of the application to a small catchment showed good agreement with the actual phenomena happened in the Northern-Kyushu heavy rainfall disaster in 2017.

研究分野：防災工学

キーワード：斜面崩壊 土石流 ストリームチューブ すべり面探査 安定解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

豪雨時に発生する斜面崩壊、崩土の流動化による土石流の発生、土石流の発達・流下、および河道での水・土砂の流出は連続的な現象である。例えば平成29年九州北部豪雨災害では、福岡県朝倉市赤谷川流域において、最大積算雨量が698.1mm(田中・佐山, 2017)に達する豪雨をもたらしたが、この豪雨が浸透していく過程の中で山地上流部において多数の斜面崩壊が発生し、それが流動化して土石流として谷底の集落部に到達し、さらにその土砂が河床や周辺部に堆積することで河積が大きく減少したことで、甚大な洪水氾濫が発生した。このような現象を、観測可能な降雨条件を元に予測できれば、ハード・ソフト対策双方に様々な応用が期待できるが、このためには、各過程の物理モデルを統合した連続シミュレーション手法の確立が必要不可欠である。しかしながら現状で、幅広い時空間スケールを持つ個々の現象群を、同一の地形モデル上で扱うことが困難なことを一因として、このような連続解析は実現していない。

Moore et al. (1988) は、等高線と流線で分割された樹形図状チューブの集合（以下、等高線地形モデル）で流域を分割する手法を提案しており、流域の水文過程や表面侵食・堆積等の評価(Moore and Grayson, 1991) や、無限長斜面安定解析と結びつけた斜面崩壊の予測(Wu and Sidle, 1995; Liu et al., 2016) に用いられている。等高線地形モデルの概要は図-1に示す。本地形モデルは、流域地形を1次元チューブの集合で表現できることから、降雨浸透モデル、断面二次元の斜面崩壊モデル、および土石流モデルを一つの地形モデル上で統合することが可能と期待できる。

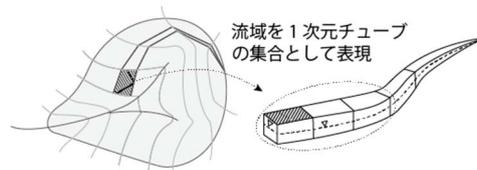


図-1 等高線地形モデルの概要

2. 研究の目的

以上に述べた背景から、本研究では、等高線地形モデルを用いた降雨浸透、斜面崩壊、土石流、および下流河川における土砂流出の統合シミュレーションモデルの構築を目的とする。この目的達成のため、等高線地形モデル抽出手法の効率化と既往災害領域を対象とした抽出、モデル構築および解析プログラムの構築、および既往災害領域を対象としたシミュレーションの実施をそれぞれ小目的と設定し、研究を進展させる。

3. 研究の方法

(1) 等高線地形モデル抽出手法の効率化と既往災害領域を対象とした抽出

本研究では、等高線地形モデルの抽出に、先行研究(Moore and Grayson, 1991; Wu and Sidle, 1995) によって開発されたプログラムを用いた。この際、プログラムのI/O部分にGRASS-GISのスク립トを実装することで、抽出作業の半自動化を行い、抽出作業の効率化を行った。また、以上の方法を用い、平成29年7月九州北部豪雨災害によって被災した福岡県朝倉市乙石川流域を対象として地形モデルの抽出を実施した。抽出の元となる等高線データには、国土院基盤地図情報の10mメッシュDEMを利用した。得られた等高線地形モデルと九州北部豪雨での斜面崩壊発生域および氾濫域の概要を図-2に示す。本研究では等高線と流線に囲まれた要素をエレメントと、またエレメントが流線の方向に連なった一連のつながりをチューブと呼称する。図-2によると谷底部のチューブに概ね沿った形で氾濫が発生していることが確認できる。

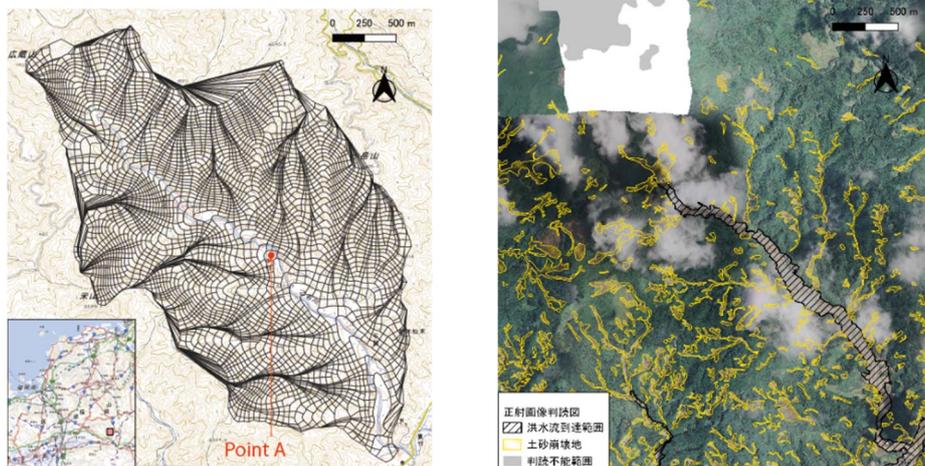


図-2 乙石川を対象に抽出した等高線地形モデル(左)と平成29年九州北部豪雨での被災域(右)

(2)モデル構築および解析プログラムの構築

本地形モデルでは、合流は許すが分流は許さない樹形図状の1次元チューブの集合として流域が表現される。この特性を活かし、1次元 diffusion wave による降雨流出モデル、高橋・中川(1991)の理論に基づく土石流・河床変動モデル、および断面二次元の斜面崩壊モデル(久保田・中村, 1991)を本地形モデルに実装した。

本研究ではチューブを構成するエレメントの変数を図-3 のようにスタaggerドに配置した。本研究では、土石流・表面流と浸透流を同時に考慮するため、水と土砂の混合物からなる流体、流体中の土砂成分、および河床それぞれに対する保存則は式(1)~(3)のようになる。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial u_s h_s}{\partial x} + \frac{\partial h_b}{\lambda \partial t} + \frac{\partial u_b h_b}{\lambda \partial x} = p \quad (1)$$

$$\frac{\partial C h_s}{\partial t} + \frac{\partial C u_s h_s}{\partial x} = i C_* \quad (2)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + i = 0 \quad (3)$$

ここに、 h_s, u_s は表面流の水深、流速であり、 h_b, u_b は浸透流の水深、流速、 λ は土層の空隙率、 p は降雨強度、 C は土砂濃度、 C_* は河床の濃度であり $1 - \lambda$ で与えた。座標系は図3のようにチューブの下流側方向にx軸をとり、複数のチューブが合流する地点では、流入する流量をすべて合算したものと下流側の流出量との差分を空間差分として与える。 z_b は河床位であるが、斜面崩壊の計算では、土層上端の標高として与える。

また、表面流および浸透流の運動方程式は、

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} = g \sin \theta_w - \frac{\tau_b}{\rho h} \quad (4)$$

$$u_b = k \sin \theta_w \quad (5)$$

のように与える。 θ_w は水面勾配である。本研究では表面流と浸透流は同一の水面を有するものと仮定している。河床面せん断力 τ_b の評価には高橋・中川[1991]の式を用いる。侵食・堆積速度 i は、斜面崩壊解析の結果を用い下記のように場合分けして与えた。

$$i = \begin{cases} \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{u_s h_s}{d} & (z_s \geq z_b, C_\infty \geq C) \\ \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{u_s h_s}{d} & (z_s \geq z_b, C_\infty < C) \\ i_l & (z_s < z_b) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 C_∞ は平衡土砂濃度、 d は代表粒径、 δ_e, δ_d, i_l は定数である。 z_s はすべり面の標高であり、斜面崩壊モデルによって算出される。斜面崩壊モデルは、簡易 Janbu 法による安定解析と、Dynamic Programming に基づく最小安全率断面探査を組み合わせた手法(久保田・中村, 1991)に基づく手法を用いた。

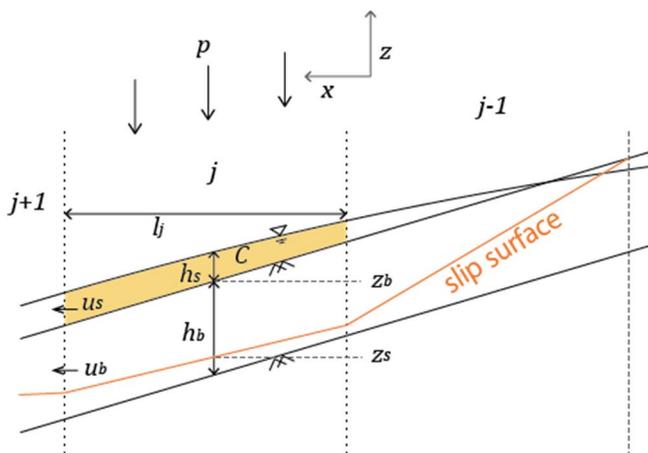


図-3 本シミュレーションにおける変数配置

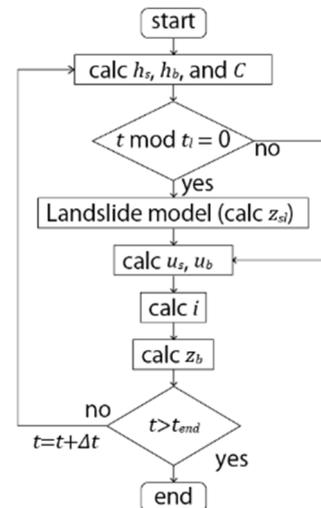


図-4 計算プログラムのアルゴリズム

4. 研究成果

乙石川流域を対象に、構築した統合モデルの適用を行った。降雨条件はアメダス朝倉における観測値(図-6)を与えた。また、飽和透水係数 $k = 0.0015[\text{m/s}]$ 、土層厚 $D = 2.0[\text{m}]$ 、空隙率 $\lambda = 0.4$ 、斜面粘着力 $c = 0.35[\text{kN/m}^3]$ 、 $\delta_e = 0.0007$ 、 $\delta_d = 0.05$ 、 $i_l = 0.01[\text{m/s}]$ 、 $h_{cr} = 0.1[\text{m}]$ とした。

流域中央部の Point A(図-2)における流量と流砂量の計算結果を図-6 に示す。降雨は4時間毎に3つのピークを有しており、2回目のピーク $T=15\sim 16$ が最大の降雨強度(約 100mm/h)であるが、流量のピークは最後のピーク ($T=19\sim 20$) 付近となった。また、 $T=10, 16, 36$ [h]の各時刻における水深および地形変化の分布と斜面崩壊発生域の分布を図-7 に示す。二回目の降雨ピーク付近で斜面崩壊が斜面の中腹で複数発生し、それが3回目のピークにかけて流下し、谷底部に堆積域を生じさせたことが分かる。なお現段階では土壌パラメータや降雨の空間分布までは考慮できておらず、今後これらを考慮することで計算結果の再現性がどの程度向上するかについて追加検討を進める予定である。

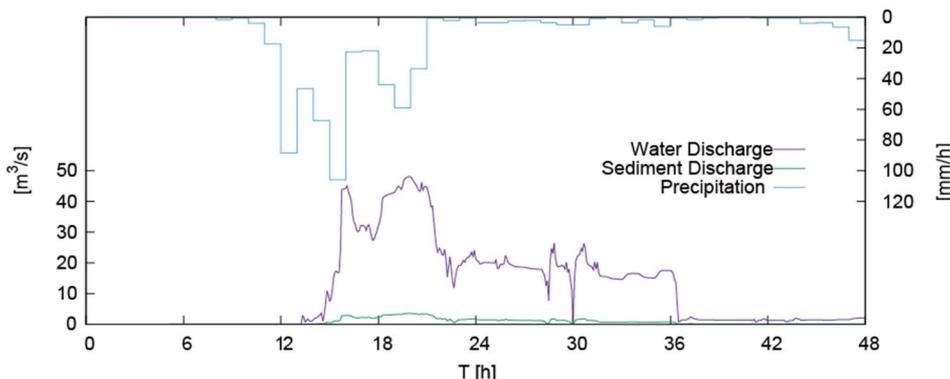


図-6 与えた降雨条件および流域中央部における流量・流砂量の時間変化

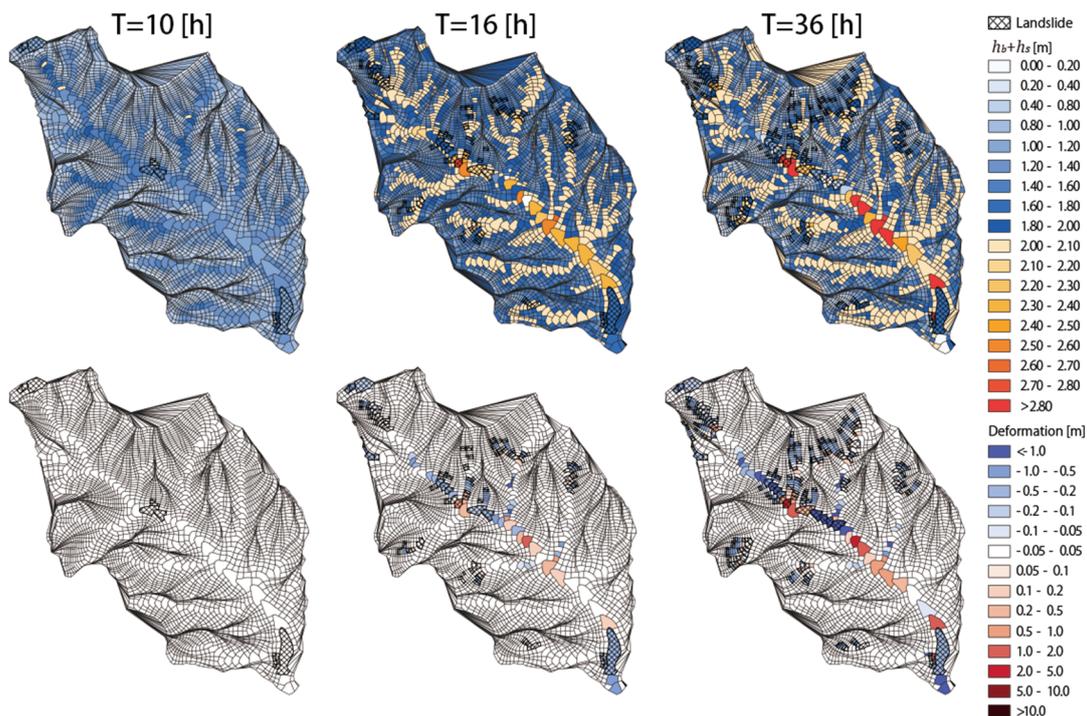


図-7 異なる時刻における水深(上)および地形変動量(下)の計算結果

引用文献：

- 久保田哲也・中村浩之(1991)臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法, 地すべり, Vol. 27, No. 4, p. 18-25
- Liu, C., Hu, M., Lu, P., Li, W., Scaioni, M., Wu, H., Huang, Y. and Ye, B. (2016) : Assessment of regional shallow landslide stability based on airborne laser scanning data in the Yingxiu area of Sichuan Province (China), European Journal of Remote Sensing, Vol. 49, No. 1, p. 835—860
- Moore, I. D., O'Loughlin, E. M. and Burch, G. J. (1988) A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications, Earth Surface Processes and Landforms, No. 13, p. 305-320
- Moore, I. D. and Grayson, R. B. (1991) Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data, Water Resources Research, Vol. 27, No. 6, p. 1177-1191

高橋保・中川一(1991)豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 44, No. 3, pp. 12-19
田中茂信, 佐山敬洋(2018): 降雨の極値統計と流出・氾濫現象の現地調査およびモデリング, 2017年九州北部豪雨災害調査報告書, 京都大学防災研究所, pp.72-79
Wu, W. and Sidle, R. C. (1995) A distributed slope stability model for steep forested basins, Water Resources Research, Vol. 31, No. 8, p. 2097-2110

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

- ①堤大三, 孝子倫図, 山野井一輝, 藤田正治: ストリームチューブによる地形分割を基にした表層崩壊解析手法, 砂防学会誌, Vol.72, No.2, 2019 (査読有)
- ②山野井一輝, 大谷英之, 陳建, 大石哲, 堀宗郎: 水・土砂の流出氾濫統合モデルの構築と HPC による朝倉市杷木地区への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 74, No. 5, pp.I_889-I_894, 2018 (査読有)
- ③Nakatani K., Yamanoi, K., Hasegawa, Y., Hayashi, S., Miyata, S., & Fujita., M: Advanced Hazard Information and Methods for Appropriate Evacuation during Sediment Disasters, Proceedings of INTERPRAEVENT2018 in the Pacific Rim pp. 1303-1309, 2018 (査読有)

〔学会発表〕(計 4件)

- ①山野井一輝, 孝子倫図, 堤大三, 藤田正治: 九州北部豪雨災害を対象としたストリームチューブ地形分割に基づく斜面崩壊-土石流統合モデルの適用, 砂防学会研究発表会岩手大会, 2019
- ②中智昭, 堤大三, 山野井一輝: Topotube を利用した表層崩壊解析法の地震災害への適応, 砂防学会研究発表会岩手大会, 2019
- ③山野井一輝, 鈴木豪太, 藤田正治: 朝倉市赤谷川流域を対象とした平成 29 年九州北部豪雨による斜面崩壊と洪水の統合解析, 京都大学防災研究所研究発表講演会, 2018
- ④鈴木豪太・山野井一輝・藤田正治: 土砂動態モデルを用いた平成 29 年 7 月九州北部豪雨での赤谷川流域におけるハザード群発生の解析, 砂防学会研究発表会鳥取大会, 2018

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。