

土石流による地形変化と降雨流出・氾濫の予測型シミュレーション

○山野井一輝¹⁾²⁾, 大石哲²⁾, 川池健司¹⁾, 中川一¹⁾

1) 京都大学防災研究所 2) 理化学研究所計算科学研究センター

1. 研究の背景

土砂災害をもたらす雨が与えられた時、どこで、どの程度の確かさで被害が生じるか、を予測することは、災害のリスク把握の観点から重要である。例えば斜面崩壊を対象とする場合、降雨の浸透プロセスと、土壌の安定計算を組みあわせることで、それが可能になるが(例えば堤ら, 2019), 自然斜面内の非一様な浸透・強度定数の測定・予測が困難であることにも起因して、完全な予測の確立には至っていない。また、土石流についても、発生プロセスの予測が困難であることから、降雨を入力とした正確な予測は比較的難しい。対して、雨量が大きく、流域内で多数の崩壊・土石流が生じ、これが集積して下流部で生じる土砂・洪水氾濫(例えば, 2017年九州北部豪雨赤谷川の事例, 2018年7月豪雨広島県坂町・呉市近辺の事例など)を対象とする場合、個々の斜面崩壊や土石流が必ずしも正確に予測できなくても、下流部の現象は予測できる可能性がある。

本研究では、このような立場から統計的な斜面崩壊予測モデルと高橋らの土石流モデルを組み合わせた土砂移動計算によって地形変化を計算し、その後洪水流出・氾濫計算を実行することで、土石流による地形変化の影響を受けた状態での洪水・氾濫の被害領域の推定を試みた。

2. 計算手法

本研究では、土石流は最上部で微小な斜面崩壊が発生し、それが流下しながら発達して流下するものとみなす。また、一度土石流が生起して流下した後後続出水における、掃流砂・浮遊砂による土砂移動は、土石流に起因するものと比べて相対的に小さいものと仮定する。また、全ての斜面崩壊・土石流は同時に発生するものと仮定する。

以上のような仮定のもと、本研究では、降雨と地形を入力とする斜面崩壊予測モデルによって、擬似的な斜面崩壊データを生成する。次にこれを入力とした土石流シミュレーションを実行して、土砂移動による地形の変化量を算出する。最後に、変化後の地形で降雨流出・洪水氾濫シミュレーションを実行することで、土砂移動の影響下での洪水氾濫の被害領域の予測型シミュレーションを実行する。

2.1 斜面崩壊の予測モデル

斜面崩壊の予測モデルには、ロジスティック回帰分析に基づくモデルを利用した。ここでは、平成30年7月豪雨のデータを対象に、国土地理院が公開し

ている斜面崩壊の判読データを元に10m解像度に変換した崩壊の発生・非発生情報を目的変数とし、国土基盤地図情報10mメッシュDEMから作成した地形量と、XRAINによる観測値から算定した期間内最大土壌雨量指数を説明変数とした。このとき、ある10m×10mの領域(セル)で斜面崩壊が生起する確率 p は、下記式で与えられる。

$$p = \frac{\exp(\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5)}{1 + \exp(\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5)}$$

ここに、 $x_1 \sim x_5$ はそれぞれ最大土壌雨量指数[mm]、の集水面積[m²]の常用対数、勾配[degree]、最急勾配方向曲率、および等高線接線方向の曲率である。 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ は回帰分析の結果得られる係数であり、花崗岩の領域と流紋岩の領域でそれぞれ、表1のように得られた。この斜面崩壊予測モデルを用いることで、降雨と地形および地質分類から、該当地点で斜面崩壊が生起する確率が得られる。ここで、10m×10m解像度で生成した疑似乱数を利用することで、確率データを擬似的な斜面崩壊データに変換できる。本研究ではこの疑似崩壊データを、土石流シミュレーションの入力に用いる。

2.2 土石流シミュレーションモデル

ここでは、高橋モデルに基づく土石流シミュレーションモデルを構築して用いた。基礎式は和田ら(2008)を参考にした。座標系はデカルト座標で、基礎式の差分化には拡散型の人工粘性を考慮したMacCormack法を用いた。また、正方形の領域分割を行い、OpenMP-MPIによるハイブリッド並列化を施した。

2.3 降雨流出・洪水氾濫シミュレーションモデル

降雨流出・洪水氾濫シミュレーションには、山野井ら(2018)の手法を用いた。計算の基礎式は表面流が浅水流方程式、地中の浸透流をダルシー式であり、デカルト座標における有限体積法により計算するものである。当モデルでは掃流砂・浮遊砂による土砂移動も計算可能であるが、本研究では、水の移動のみを考慮した。

表1 ロジスティック回帰分析の結果

係数	花崗岩領域	流紋岩領域
α_0	-18.535	-16.7415
α_1	0.0417	0.0415
α_2	-0.7764	-1.7775
α_3	0.0467	0.0114
α_4	10.2806	5.3754
α_5	-37.8506	-50.9587

3. 計算条件と計算結果

平成 30 年 7 月豪雨で被害が生じた広島県坂町周辺領域を対象とし、同豪雨で観測された降雨を入力とした一連のシミュレーションを実行した。まず、崩壊予測モデルで得られた斜面崩壊の位置と、実際の崩壊の位置の関係を図-1(a)に示す。予測された斜面崩壊の位置は、実際のものと一致してはいないが、対象領域内での大まかな場所と、個数密度は近い結果が得られた。次に、実崩壊と疑似崩壊それぞれのデータを入力とした土石流シミュレーションにより、得られた地形変化（侵食・堆積）の計算結果を図1(b),(c)に示す。特に下部に示した(b)と(c)の結果を比較しても大きな差異がないことから、実際の崩壊データの代わりに、2.1 の予測モデルで得られた斜面崩壊を計算に用いても、近い結果が得られた。すなわち降雨データからの予測によって生成された崩壊データからでも、ある程度正確に下流部の地形変化が計算されたことが分かる。

次に、同豪雨の降雨データを用いて降雨流出・洪水氾濫シミュレーションを実行した。地形データには、元地形と、予測崩壊起源の土石流によって変化した地形を双方用いた。それぞれの場合の最大水深を (d),(e)に、その差を(f)に示す。(f)は土砂の移動現象が浸水深に及ぼした寄与とみなせる。特に土石流の流下によって元河道内に顕著な堆積が生じて河積が減少し、その結果河道から溢れる流量が増加する

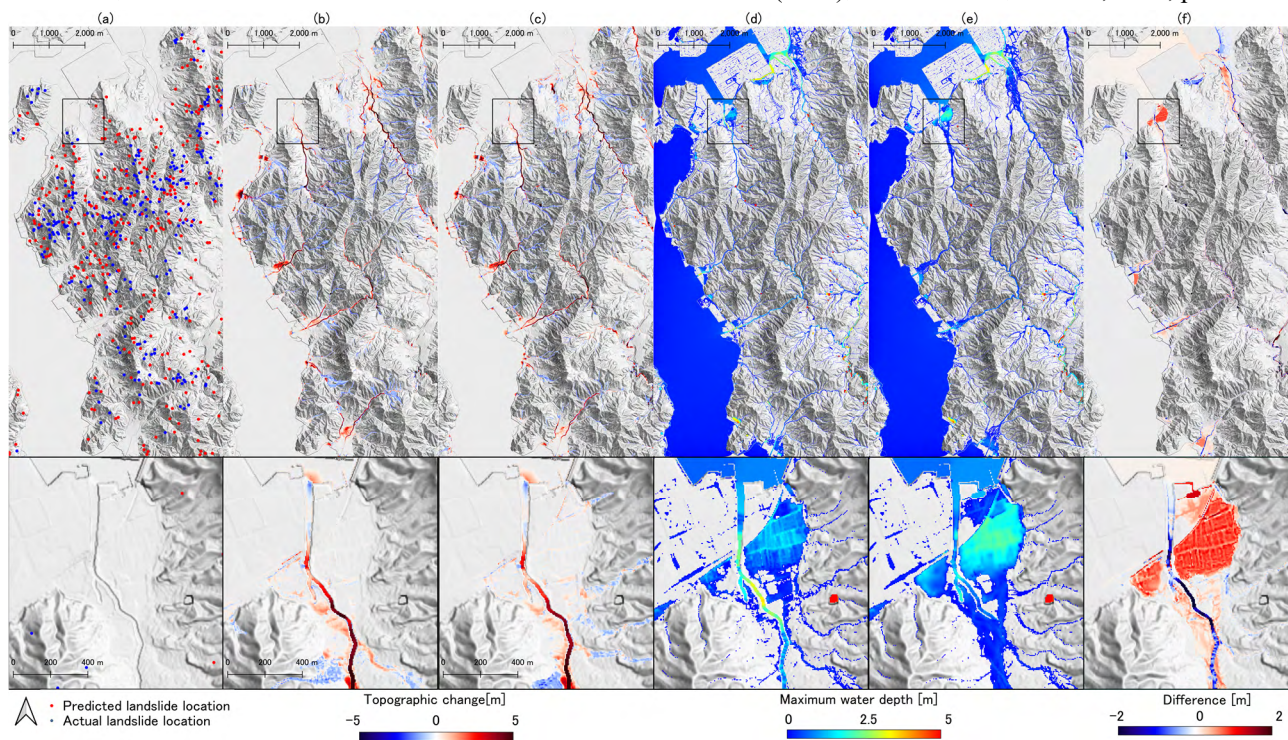


図-1 (a)予測モデルで得られた斜面崩壊と実際の崩壊の位置関係、(b),(c)それぞれ実崩壊と予測崩壊データを入力とした土石流シミュレーションで得られた地形変化、(d),(e)土石流発生前および予測崩壊による土石流発生後の地形を入力とした降雨流出・洪水氾濫シミュレーションで得られた最大水深、(f)地形変化の最大水深への寄与 ((e)の(d)に対する差分)。下部の図は総頭川下流部の拡大図。

ことで、下流域の最大浸水深が顕著に増加する結果となった。

4. 結論

斜面崩壊の統計的な予測と疑似崩壊データの生成、これを用いた土石流シミュレーションおよび、地形変化後の地形を用いた降雨流出・氾濫過程の計算を連続的に行うことで、流域下流部における地形の変化と、これによる浸水深の変化を定量的に示すことができた。ただし、2.節で述べたように、本研究では適用において多くの仮定を置いている。特に、複数の土石流の発生タイミングが異なる場合や、後続の出水による地形変化がどの程度現象に寄与するかについて、今後検証が必要である。

謝辞：本研究では文科省科研費(課題番号 19K15105)の補助を受けた。また、DIAS によって提供された XRAIN データ、国土地理院提供のデータを利用した。また計算の実行には京都大学情報環境機構の計算資源を利用した。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献：

- 堤ら (2019), 砂防学会誌, Vol.72, No.2, pp. 3-13
- Yamanoi, K. et al, Preprints 2020, 2020040118 (doi: 10.20944/preprints202004.0118.v1).
- 山野井ら(2018), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, I_889-I_894,
- 和田ら (2008), 砂防学会誌, Vol.61, No.2, p.36-40