

土石流氾濫領域の確率的予測モデルを用いた気候変動影響評価

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 ○鹿倉佳央梨
京都大学 防災研究所 山野井一輝, 川池健司, 小柴孝太

1. はじめに

気候変動下において土石流による被害がどのように変化するかを評価することは、重要な課題である。一方で、直接降雨条件を入力する土石流の数値シミュレーション方法は確立しておらず、例えば流下する土砂量（生産土砂量）等、何らか入力条件に対し間接的に降雨条件を反映することが必要である。

これを目的に、野口ら¹⁾は、2018年7月豪雨を対象に、降雨条件から推定可能な最大60分間積算雨量と土壌雨量指数および平均地形勾配をもとに、小～大規模の土砂生産が発生する確率を算出可能な土砂生産推定モデルを構築した。これにより、降雨条件を入力として、土砂の生産量を予測すること、生産された土砂の移動を予測することで土砂が到達する確率を推定することを実現した。一方で、土砂生産量を予測する際に用いる地形や降雨の指標は何が最適か、という部分はこれまで十分に検討されていない。そこで、そこで本研究では、野口らのモデルをもとに、2018年7月豪雨で被災した広島県南部を対象に、降雨指標、地形指標を複数使用して土砂生産確率モデルを構築し、その指標の妥当性について検討した。また、その確率モデルを将来降雨に適用することで、現在の降雨条件と将来の降雨条件で推定される土石流被害領域がどのように変化するかを考察した。

2. 規模別土砂生産確率モデルの構築とその性能評価

2.1 データセットの作成

2018年に広島県で発生した土砂災害における降雨データと地形データから、土砂生産の規模別発生確率を予測するモデルを構築した。対象領域は、広島県南部領域における花崗岩地質、土地利用が山地の部分であり、作成する指標のメッシュサイズは100m四方とした。

降雨データには短期降雨指標と長期降雨指標を組み合わせ用い、短期降雨指標に、最大30分、60分雨量を考え、長期降雨指標に、短期降雨指標と同時刻の、24時間雨量、48時間雨量、72時間雨量を考えた。降雨には約250m解像度1分間隔の降雨データであるXRAINを用いた。

地形指標として国土地理院のDEM（10mメッシュ）から平均勾配、集水面積、断面曲率、平面曲率を算出した。土砂生産の発生場所と規模について、LiDAR標高の災害前後における差分（1mメッシュ）から、差分が負である領域を侵食領域とみなし、メッシュ内で積算し絶対値を取ることで、それを土砂生産量とした。

2.2 順序ロジスティック回帰分析

作成したデータをもとに順序ロジスティック回帰分析によって、土砂生産の規模別確率を算出する回帰モデルを作成した。

作成した土砂生産量を0を除き降順に並べた際の上位10% ($V_1 = 716.55[\text{m}^3]$)及び上位30% ($V_2 = 313.90[\text{m}^3]$)にあたるデータを閾値とし、土砂生産量 $V(\text{m}^3)$ の規模 Y を大規模 $Y = 1(V \geq V_1)$ 、中規模 $Y = 2(V_2 \leq V < V_1)$ 、小規模 $Y = 3(0 < V < V_2)$ 、生産なし $Y = 4(V = 0)$ の4段階に分類した。このとき、 $Y = j$ となる確率 P_j は式(1)で表される。

$$Pr(Y = j | \mathbf{x}) = \frac{\exp(-\alpha^j - \beta^j \mathbf{x})}{\sum_j \exp(-\alpha^j - \beta^j \mathbf{x})} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ は説明変数ベクトル、 α^j は線形式の定数項、 $\beta^j(\beta_1^j, \beta_2^j, \beta_3^j, \dots, \beta_m^j)$ は、各説明変数の係数である。これらのパラメータは最尤法によって算出した。

2.3 土砂生産確率モデルの性能評価

作成したデータをもとに、降雨指標の組み合わせにより6ケースで順序ロジスティック回帰分析を行った。

算出された回帰式に、災害時のデータを代入することで確率を計算し、その確率に対して、閾値を0から1まで変化させ、それぞれの閾値において発生・非発生に分類した。予測結果と実際の土砂生産状況を比較し、表1のように分類し、縦軸に捕捉率、横軸に空振り率(式(2))をとり、それぞれの閾値における結果をプロットすることで図1のようにROC曲線を描いた。ROC曲線同士を比較するため、曲線の下面積(AUC)を算出し、比較した。図1内の各規模での値がAUCである。それぞれのケースにおいて各規模のAUCの和が最も大きい最大30分雨量・24時間雨量を用いたモデルが最適であると判断し、これを将来降雨に適用した。

表1：実際の土砂生産状況と予測結果の判定

		予測結果	
		発生	非発生
実際	発生	TP	FN
	非発生	FP	TN

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}, FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (2)$$

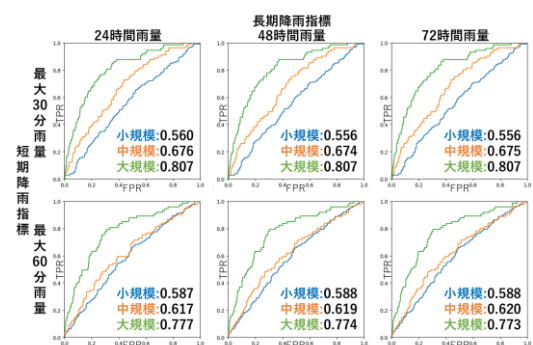


図1：各ケースのROC曲線とAUC

3. 土砂生産確率モデルの将来降雨への適用

将来気候に対する降雨指標の作成にあたり、全国 5km メッシュアンサンブル気候予測データから坂町周辺の 1 点のデータを抽出したものを将来実験、過去実験とともに 720 年分用いた。この降雨データから最大 30 分雨量と 24 時間雨量の 100 年確率降雨を算出した。それを土砂生産確率モデルへ入力し、規模別の確率をメッシュごとに算出した。各メッシュに疑似乱数を与え、どの規模で土砂生産が発生するかを決定し、それぞれの規模の代表値を土砂生産量として与えた。各カテゴリーの代表量は大規模：1192.6 m³、中規模：469.5 m³、小規模：109.1 m³とした。得られた生産土砂量は各メッシュ領域内の中心 20m 四方の範囲に集約させ、流動化した状態で設置した。これを入力として Yamanoi et al.²⁾のモデルを用い、侵食なしの条件でその流下・堆積を 5m 解像度で推定した。確率的不確実性を評価するために、1 つの降雨パターンに対して 100 ケースの異なる疑似乱数を用い、それぞれ算出した。

表 3：各ケースの降雨指標

ケース	30 分雨量[mm]	24 時間雨量[mm]
過去条件	71.7	141.7
将来条件	86.19	174.4

4. 結果及び考察

4.1 過去条件と将来条件での土砂堆積厚の比較

600 秒後の土砂堆積厚のアンサンブル平均は図 2 のようになった。将来条件では過去条件より全域的に土砂堆積の横幅が広がっている。また、将来条件では北部の避難所周辺まで土砂が到達していることが分かる。次に 600 秒後の土砂堆積厚が 10cm 以上の確率を図 3 に示す。ここでの確率とは 100 アンサンブルでの回数を算出したものである。将来条件では全域的に 80%以上の範囲が広がっている。また、将来条件において総頭川下流での確率が高くなっていることが分かる。

4.2 過去条件と将来条件での流動深の比較

最大流動深のアンサンブル平均は図 4 のようになった。将来実験では過去実験よりも避難所周辺の流動深が 20cm ほど高くなっていることが分かる。次に、最大流動深が 20cm 以上となる確率を図 5 に示す。将来条件においてほぼすべての避難所で 80%以上となり、流動深の到達確率が上昇していることが分かる。

5. 結論と今後の課題

本研究の結果から、広島県南部において土石流による土砂生産量を規模別に確率予測する場合、降雨指標として最大 30 分積算雨量と、それと同時刻までの 24 時間積算雨量を、地形的指標として平均勾配、集水面積、曲率を用いたモデルが適切であると示された。また、そのモデルから気候変動による降雨の変化を考慮し土石流シミュレーションを行った結果、将来の土石流による被害は拡大し、現在避難所として指定されている場所においても被害が及ぶ可能性が高くなることが分かった。課題として、花崗岩以外のエリアへのモデルの適用や、用いた確率降雨のバイアス補正を行う必要がある。

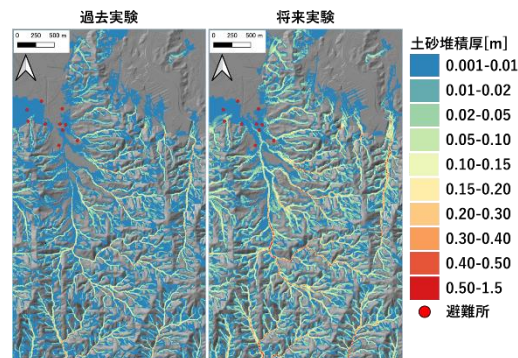


図 2：600 秒後の土砂堆積厚のアンサンブル平均

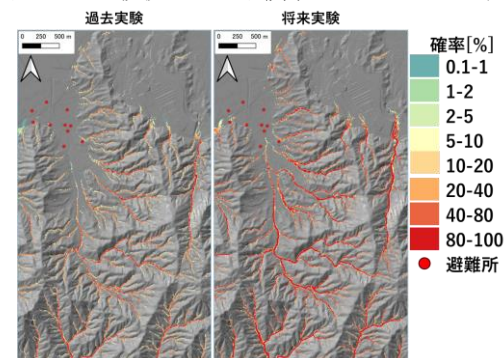


図 3：600 秒後の土砂堆積厚が 10 cm 以上の確率

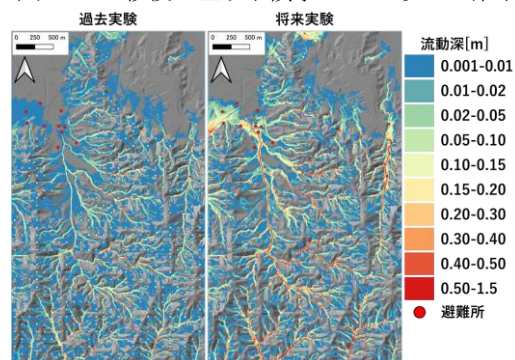


図 4：最大流動深のアンサンブル平均

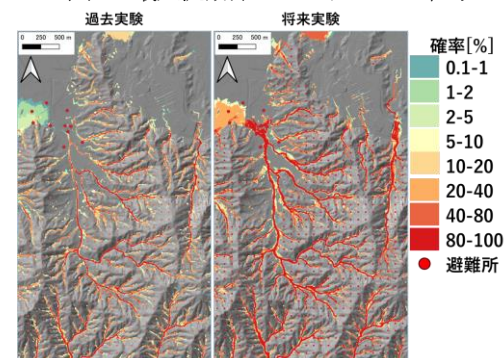


図 5：最大流動深が 20 cm 以上の確率

参考文献

- 1)野口ら, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, I_877-I_882, 2020.
- 2) Yamanoi et al., Journal of Flood Risk Management, 15(2), e12776, 2022