

土石流氾濫領域の確率的予測とその気候変動評価
Study on Probabilistic Prediction of Debris Flow Affected Area Considering Climate Change

○鹿倉佳央梨・山野井一輝・川池健司・小柴孝太

○Kaori SHIKAKURA, Kazuki YAMANOI, Kenji KAWAIKE, Takahiro KOSHIBA

In this study, using landslide disaster data from the July 2018 heavy rainfall in Hiroshima Prefecture, we constructed a probabilistic and categorical model to predict the scale (i.e large, medium, and small) of sediment production based on rainfall and topographical conditions employing ordinal logistic regression analysis. The combination of explanatory variables in the model was selected by comparing AUC of the models. Using the probabilistic model, we predicted the probability of sediment production by size for future rainfall and simulated debris flows using the amount of large, medium, and small size sediment created based on the model as the initial input condition, and examined the damage that could occur in future sediment disasters.

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量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

(1) データセット

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て用いた。短期降雨指標に、最大30分雨量、最大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) 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。

(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、表1の組み合わせ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2のように分類し、縦軸に捕捉率(式(2))、横軸に空振り率(式(3))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Case1の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：各ケースの指標

ケース	地形指標	降雨①	降雨②
Case1	平均勾配	最大	24時間雨量
Case2		30分	48時間雨量
Case3		雨量	72時間雨量
Case4	断面曲率	最大	24時間雨量
Case5		60分	48時間雨量
Case6		雨量	72時間雨量
	+平面曲率		

表2：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

$$\text{捕捉率} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$\text{空振り率} = \frac{FP}{TN + FP} \quad (3)$$

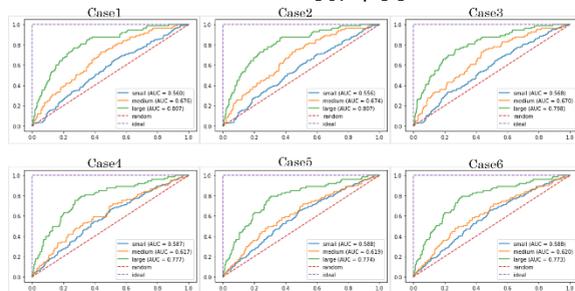


図1：各ケースのROC曲線とAUC

4. 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、気候変動適応技術社会実装プログラム SI-CATによって作成された空間解像度 5km の降雨量データから、将来実験 600 年分、過去実験 100 年分のデータから坂町周辺の1点のデータを抽出し、それらを 100 年ごとに分割し、表3のようにそれぞれで最大 30 分雨量と 24 時間積算雨量を算出した。それを土砂生産確率モデルへ入力することで、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、侵食可能な深さをゼロとしてその流下・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]
将来①	71.7	141.7
将来②	86.19	174.4
将来③	97.42	373.3
将来④	73.22	312.3
将来⑤	75.11	84.44
将来⑥	89.13	213
現在①	52.37	70.18

5. 結果及び考察

将来①100 ケースについて、土砂通過確率、堆積厚の平均値と標準偏差、土砂通過確率、土砂堆積が 0.5m 以上になる確率を図2, 3に示す。総頭川上流から中流にかけて、ほとんどの地域で土砂通過率は 90%を超え、特に中流部において、堆積が 0.5m を超える確率が高くなるのが分かった。

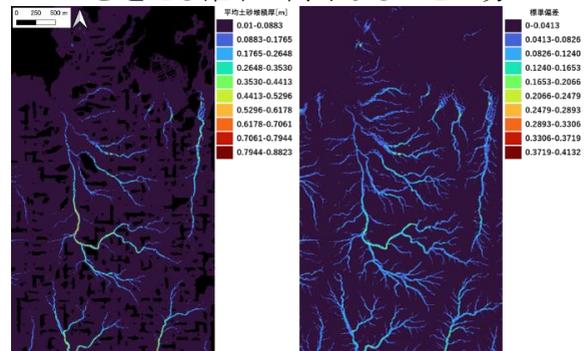


図2：計算結果平均土砂堆積厚と標準偏差

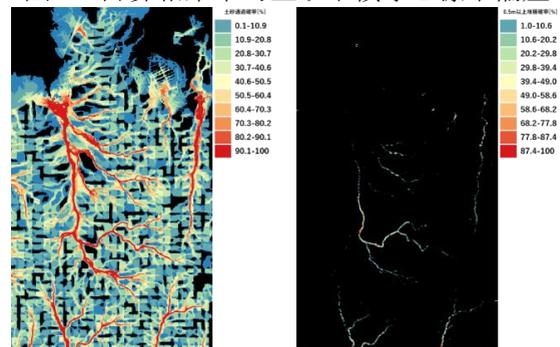


図3：土砂通過確率と0.5m以上堆積確率

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