

地すべり危険度得点と地下水分布情報を用いた セル分布型流出解析に基づく表層崩壊予測

PREDICTION OF SHALLOW SLOPE FAILURES
BASED ON A DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF ANALYSIS
USING LANDSLIDE HAZARD SCORE AND GROUNDWATER DISTRIBUTION

梶川 勇樹¹・宮崎 雅大²・大石 瑞穂³・河野 勝宣⁴・黒岩 正光⁵

Yuki KAJIKAWA, Masahiro MIYAZAKI, Mizuho OISHI,

Masanori KOHNO and Masamitsu KUROIWA

¹鳥取大学 学術研究院工学系部門 (〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地)

E-mail: kajikawa@tottori-u.ac.jp

²鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科 (現 大成建設株式会社)

³鳥取大学 工学部社会システム土木系学科 (現 株式会社一条工務店)

⁴鳥取大学 学術研究院工学系部門 (〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地)

E-mail: kohnom@tottori-u.ac.jp

⁵鳥取大学 学術研究院工学系部門 (〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地)

E-mail: kuroiwa@tottori-u.ac.jp

Key Words: shallow slope failure, rainfall-runoff analysis, landslide hazard scour, groundwater distribution

1. はじめに

近年, 我が国では集中豪雨が増加傾向にある. 例えば, 1 時間降雨量 80 mm 以上の発生回数をみると, 1976 年~1985 年では年平均 10.7 回であったのに対し, 2006 年~2015 年では年平均 18.0 回と約 1.7 倍に増加している¹⁾. 一方, 土砂災害発生件数をみると, 豪雨によるもののみではないものの, 1982 年~1991 年では年平均約 900 件であったのに対し, 2009 年~2018 年では年平均約 1,380 件と 1.5 倍に増加している²⁾. 近年の集中豪雨の増加傾向を鑑みると, 砂防事業が促進されたとしても, 今後も豪雨に伴う土砂災害の発生件数の増加は十分予想される. したがって, 土砂災害を未然に防ぐためにも, 豪雨による土砂崩壊 (表層崩壊) の発生を定量的かつ高精度に予測できる手法の確立が求められている.

従来, このような降雨による表層崩壊予測に関し, 数多くの研究が行われてきた^{3)~7)}. 現在, 気象庁が運用しているタンクモデルに基づく土壌雨量指数を利

用した予測手法³⁾は, 1 km 格子で広域を対象とすることができ非常に有用な手法である. しかしながら, 各斜面における地質・植生・地下水分布等は考慮しておらず, 斜面個別の崩壊予測は困難である. より精緻な斜面個別の崩壊予測を目的として, 数値標高モデル (DEM) を利用した手法も開発されてきた^{4)~7)}. 特に, 永谷ら⁷⁾は, 土質情報等の実測データ^{4)~5)}を必要とせず, 斜面の安定性と降雨条件による崩壊判定を導入した分布型流出解析に基づく予測手法を提案している. 提案した手法を, 比較的広域な数百 km² の面積を有する流域へ適用し, ある程度の精度で崩壊地分布の再現に成功している. しかしながら, 流域内の地質の違い等は考慮できておらず, 支川レベルでの再現性は十分ではない.

そこで著者らは, 永谷ら⁷⁾による崩壊判定に加え, 河野ら⁸⁾が提案した地すべり危険度得点と, 流出解析から得られる各斜面の地下水分布情報を新たに崩壊判定に導入することを考えた. 地すべり危険度得点⁸⁾は, DEM から得られる地形に起因する条件のみ

ならず，地質や植生を加味して地すべり危険度を評価し，点数化したものである．また，地下水分布情報は，土壤雨量指数³⁾の概念を参考に，流出解析から得られる斜面個別の地下水深を表したものである．これらを崩壊判定に活用することで，より精度の高い予測が可能になるのではと期待される．

以上より，本研究は，地下3層のセル分布型流出解析モデルを開発するとともに，永谷ら⁷⁾が提案した崩壊判定に地すべり危険度得点と地下水分布情報を加えた，新たな表層崩壊予測手法を提案したものである．提案した手法を，平成21年7月中国・九州北部豪雨による山口県佐波川流域での表層崩壊に適用し，本手法の妥当性について検討している．

2. セル分布型流出解析と表層崩壊予測手法

解析は，①対象流域のモデル化，②流出解析の実施，③流出解析結果を用いた崩壊予測の順で進める．以下，流出モデルおよび崩壊予測手法の概要を示す．

(1) セル分布型流出解析モデルの概要

流出モデルとして，Huang et al.⁹⁾のモデルを改良し，図-1に示すような地下3層のセル分布型流出解析モデルを開発した．ここで，第3層は基底流量を表現するための層であり，後出図-3の基岩面下にあたる．計算セルを斜面部と河道部に分け，表面流と浸透流を計算した．以下に斜面部の基礎方程式を示す．河道部では，河道横断形状に矩形断面を仮定し，基礎方程式は式(1)～(4)に河道幅を考慮したものとなる．
[表面流]

$$\frac{\partial h_0}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f_1 \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{n} h_0^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

[浸透流]

$$\lambda_i \frac{\partial \bar{h}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial x} = f_i - f_{i+1} \quad (3)$$

$$\bar{q}_i = k_i I \bar{h}_i \quad (4)$$

ここに， t ：時間， x ：流下方向距離， h_0 ：表面流の水深， q ：単位幅表面流量， r ：有効降雨強度， f_1 ：第1層の浸透能， n ：マンニングの粗度係数， I ：斜面勾配， λ_i ：第 i 層の有効間隙率， \bar{h}_i ：第 i 層の水深， \bar{q}_i ：第 i 層の単位幅浸透流量， f_i ：第 i 層の浸透能， k_i ：第 i 層の透水係数である．

(2) 表層崩壊予測手法の概要

図-2に本研究での表層崩壊予測手法の概念図を示す．まず，永谷ら⁷⁾が提案した地形条件と降雨条

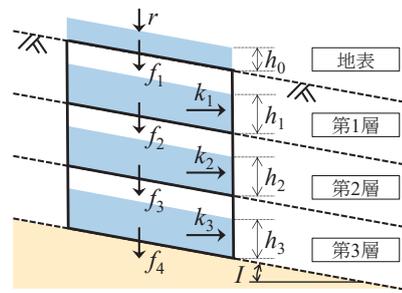


図-1 地下3層構造のモデル化

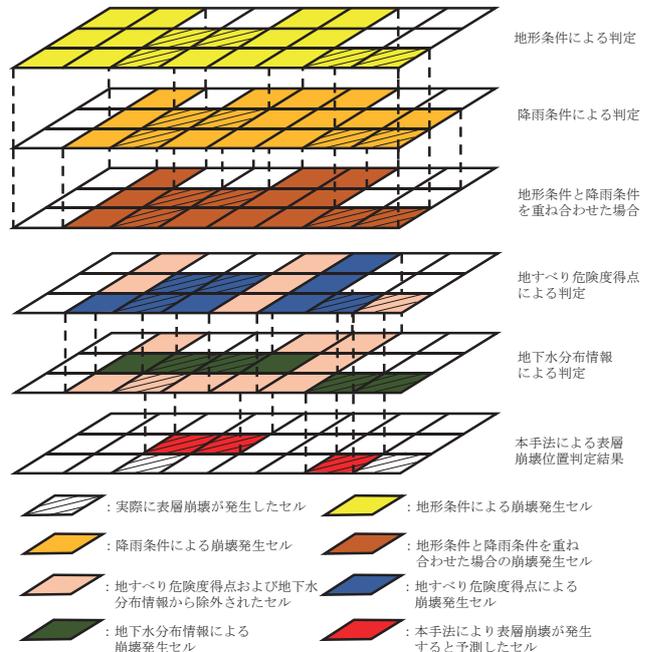


図-2 表層崩壊予測手法の概念図

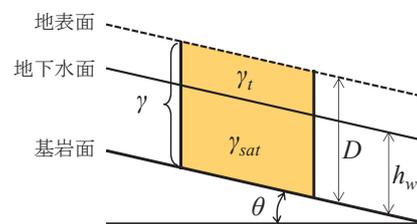


図-3 斜面の断面図

件より，崩壊が発生する可能性のあるセルを限定する．次に，限定したセルにおける地すべり危険度得点と流出解析による地下水分布情報より，各々で設定した基準値を超えたセルについて崩壊が発生したと判定する．上記手法は手順を代入しても同様の結果となる．以下，各判定手法について説明する．

a) 地形条件（斜面の安定性）

地形条件としては，図-3に示すような無限長斜面を仮定し，次式から求まる安全率 F_s が判断基準値 F_{sc} を下回った段階で崩壊が発生すると判断した．

$$F_s = \frac{\alpha_c D}{\gamma D \sin \theta \cos \theta} + \left[1 - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \left(\frac{h_w}{D} \right) \right] \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \quad (5)$$

$$\gamma = \gamma_{sat} \left(\frac{h_w}{D} \right) + \gamma_t \left(1 - \frac{h_w}{D} \right) \quad (6)$$

$$\gamma_{sat} = (1 - n_s) G_s \gamma_w + n_s \gamma_w \quad (7)$$

ここに、 α_c : 土層厚から想定すべり面の粘着力への変換係数、 D : 崩壊土層厚、 θ : 斜面傾斜角(= $\arcsin I$)、 γ_w : 水の単位体積重量、 γ : 崩壊土層の単位体積重量、 γ_{sat} : 飽和単位体積重量、 γ_t : 湿潤単位体積重量、 φ : 想定すべり面の内部摩擦角、 h_w : 流出解析により算出される中間流の水深、 G_s : 土粒子の比重(= 2.65)、 n_s : 崩壊土層の空隙率である。内部摩擦角 φ については、永谷ら⁷⁾と同様、土層内の水深 h_w がゼロで安定状態にある斜面の安全率 F_s が 1.05 となる φ を逆解析により設定した。崩壊土層厚 D およびその水深 h_w の設定については後述する。

b) 降雨条件

降雨条件としては、実効降雨の考え方を使用し、先行降雨の影響を時間経過に応じて低減可能な指標とする下記の雨量指数 R' を用いた。本研究では、雨量指数 R' が斜面崩壊の判断基準 R'_c を上回った段階で崩壊が発生すると判断した^{7),10)}。

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad (8)$$

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2(r_1 - r_w)^2} \quad (9)$$

$$R_w = \sum 0.5^{t/T_1} R \quad (10)$$

$$r_w = \sum 0.5^{t/T_2} r \quad (11)$$

ここに、 R_w : 長期実効雨量、 r_w : 短期実効雨量、 R_1 : 長期雨量指数、 r_1 : 短期雨量指数、 a : 重み係数、 R_{fw0} : 原点 ($R_w = r_w = 0$ の時の R_{fw})、 R : 計算開始からの累加雨量、 r : 当該時刻における時間雨量、 t : 発生降雨前の時間数、 T_1 : 長期実効降雨の半減期、 T_2 : 短期実効降雨の半減期である。 R_1 、 r_1 、 a 、 T_1 、 T_2 の各パラメータについて、本研究では実測崩壊地点に対する予測の空振りが無く、最もの中率が高い値を試行錯誤的に決定した。崩壊履歴の無い流域への適用では、初期値に他流域の既知の値を流用し⁷⁾、その後の実測値を参考にパラメータを修正していくこととなる。

c) 地すべり危険度得点による条件

河野ら⁸⁾は、約 16,000 箇所におよぶ中国地方の地すべり地形を対象に、AHP (Analytic Hierarchy Process) 法と GIS (Geographic Information System) を用いて、地すべりハザードマッピングを試みている。AHP 法による評価項目として「標高」、「斜面傾斜角」、「斜面型」、「集水度」、「地質」および「植生」の 6 つを設定し、さらに、各評価項目の重要度を点数化している。各項目の合計点を 100 点満点で表し、これを地すべり危険度得点として示している。得点が高いほど、地すべりの発生可能性が高いことを表す。本研究では、この地すべり危険度得点を利用し、予備解析と実測崩壊地点との比較から試行錯誤的に決定したある基準値を超える得点を有するセルで崩壊が発生すると判断した。

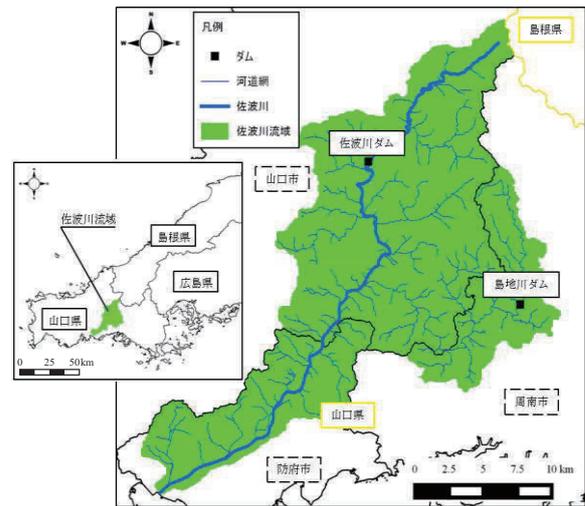


図-4 佐波川流域図

d) 地下水分布情報による条件

土壌雨量指数³⁾は、3 段タンクモデルの各タンクにおける貯留量の合計であり、土砂災害警戒情報の判断基準に用いられるなど、十分な活用実績を有している。本研究では、その土壌雨量指数の概念を援用し、図-1 に示した地下第 1 層および第 2 層の水深の合計を地下水分布情報として利用することとした。すなわち、各セルにおける地下水分布情報がある基準値を超えた場合、そのセルで崩壊が発生すると判断した。地下水分布情報を地下第 1 層および第 2 層で設定した理由については、次章にて述べる。

3. 平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨時における山口県佐波川流域への適用

本研究で提案した表層崩壊予測手法を、平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨時の山口県佐波川流域に適用し、予測結果と実際の崩壊地点との比較から、本手法の妥当性について検討する。

(1) 佐波川流域での土砂災害

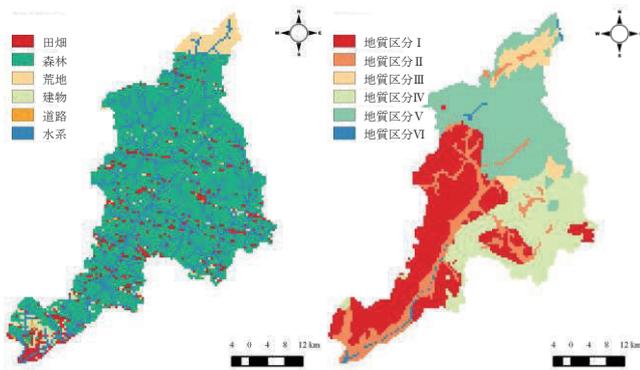
図-4 に示すように、佐波川は山口県中部を流れる幹川流路延長 56km、流域面積 460km² の一級河川である。平成 21 年 7 月 19 日～21 日にかけて梅雨前線が活発化し、佐波川流域下流の防府市では 3 日間総雨量 332 mm という猛烈な雨を記録した。それに伴い、土石流等の土砂災害も多数発生し、その被害の多くが防府市に集中した。山口県内の死者数は 17 名であったが、14 名が防府市での被災であった¹¹⁾。

(2) 流域のモデル化

地形モデルの作成には、計算時間の制約上、10m 格子 DEM を 250m 格子に解像度を下げたものを使用した。最急勾配法により落水線を作成し、Shreve¹²⁾



図-5 佐波川流域の擬河道網図



(a) 土地利用区分 (b) 表層地質区分
図-6 佐波川流域の擬河道網図

によるマグニチュード理論を用いて擬河道網を作成した。図-5 は作成した擬河道網図である。図-5 中の各河道には、位数理論¹³⁾に基づき位数を振っている。

(3) 流出解析モデルの適用とその結果

図-6 は (a) 土地利用区分および (b) 表層地質区分を、表-1 は図-6 に対応させて試行錯誤的に決定した流出解析パラメータをそれぞれ示している。解析は、初期条件として地下第1層の飽和度を0%、第2層を50%、第3層を100%として開始し、助走期間を含む2009年6月12日～7月27日までの888時間を対象とした。降雨については1 km 格子の解析雨量を使用した。また、図-4 に示される佐波川ダムおよび島地川ダムの放流量データを入手できなかったため、図-5 に示される八坂と和田の計算セルでは実測流量を与えた。川幅は表-1 に示されるように、位数ごとに同様の値を与えた。

図-7 は漆尾および新橋における実測流量と解析流量との比較を示している。漆尾ではピーク流量に差が見られるものの、新橋では良好に一致している。

表-1 流出解析パラメータ

		田畑	森林	荒地	建物	道路	水系
粗度係数 n		0.27	0.12	0.25	0.9	0.4	0.093
		地質区分I (硬成岩類)	地質区分II (未固結堆積岩類)	地質区分III (固結堆積岩類)	地質区分IV (変成岩類)	地質区分V (火山岩類)	地質区分VI (その他)
透水係数 k_i (m/s)	第1層	2.6×10^{-2}	1.6×10^{-2}	1.2×10^{-2}	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	1.6×10^{-2}
	第2層	3.6×10^{-4}	3.4×10^{-4}	2.9×10^{-4}	3.4×10^{-4}	3.7×10^{-4}	3.3×10^{-4}
	第3層	3.8×10^{-5}	3.6×10^{-5}	3.4×10^{-5}	2.9×10^{-5}	3.4×10^{-5}	3.8×10^{-5}
浸透能 f_i (m/s)	第1層	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}				
	第2層	2.4×10^{-6}	1.3×10^{-6}	2.0×10^{-6}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-6}	2.0×10^{-6}
	第3層	1.9×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.3×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.1×10^{-7}
	第4層	5.4×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.2×10^{-8}	3.4×10^{-8}	2.9×10^{-8}	1.1×10^{-8}
層厚* (m)	第1層	0.42	0.36	0.45	0.48	0.42	0.40
	第2層	1.50	0.80	0.30	1.80	1.20	1.30
	第3層	3.30	2.70	1.70	2.30	1.80	2.20
位数		1	2	3	4	間隙率* (全層) λ_i or n_i	
川幅 (m)		15	20	35	85	0.35	

* 第1層、第2層層厚および間隙率は表層崩壊予測でも使用

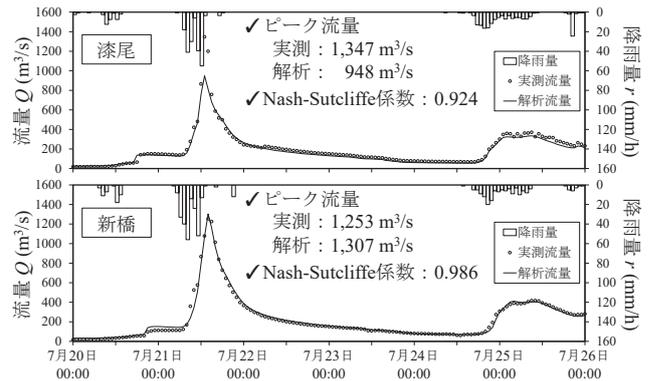


図-7 実測流量と解析流量との比較

また、洪水波形の再現性は両地点とも非常に良い。ここで、流出モデルの客観的な精度検証に用いられる Nash-Sutcliffe (NS) 係数¹⁴⁾を確認する。NS 係数は 0.7 以上で再現性が高いとされ、最大値は 1 となる。図-7 を見ると、両地点とも NS 係数は 0.9 を超えており、再現性は非常に良いと判断できる。

以上より、本流出モデルは、平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨時の流出状況を高い精度で再現できており、従って地下水分布も良好に再現できているものと評価し、次の表層崩壊予測のステップに進む。

(4) 表層崩壊予測手法の適用とその結果

平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨時の佐波川下流防府市での土砂災害は、7 月 21 日正午前後に同時多発的に発生したとの報告がある¹⁵⁾。そこで本研究では、地下水分布情報として、7 月 21 日 12:00 の流出解析結果を使用した。崩壊土層厚 D は、前出図-1 の第 3 層が図-3 の基岩面下にあたることから、第 1 層と第 2 層の層厚の合計とした。表-1 を見ると、設定した D は一般的な表層崩壊深さ $0.5 \sim 2.0$ m¹⁶⁾ に一致する。ただし、 D には斜面勾配の影響も考えられる⁷⁾ことから、その設定には今後更に検討を要する。また、土層内水深 h_w および地下水分布情報も同様に、第 1 層および第 2 層の水深の合計とした。図-8 に (a) 実測崩壊地点、(b) 崩壊土層厚 D の分布、(c) 地すべり危険度得点、および (d) 地下水分布情報をそれ

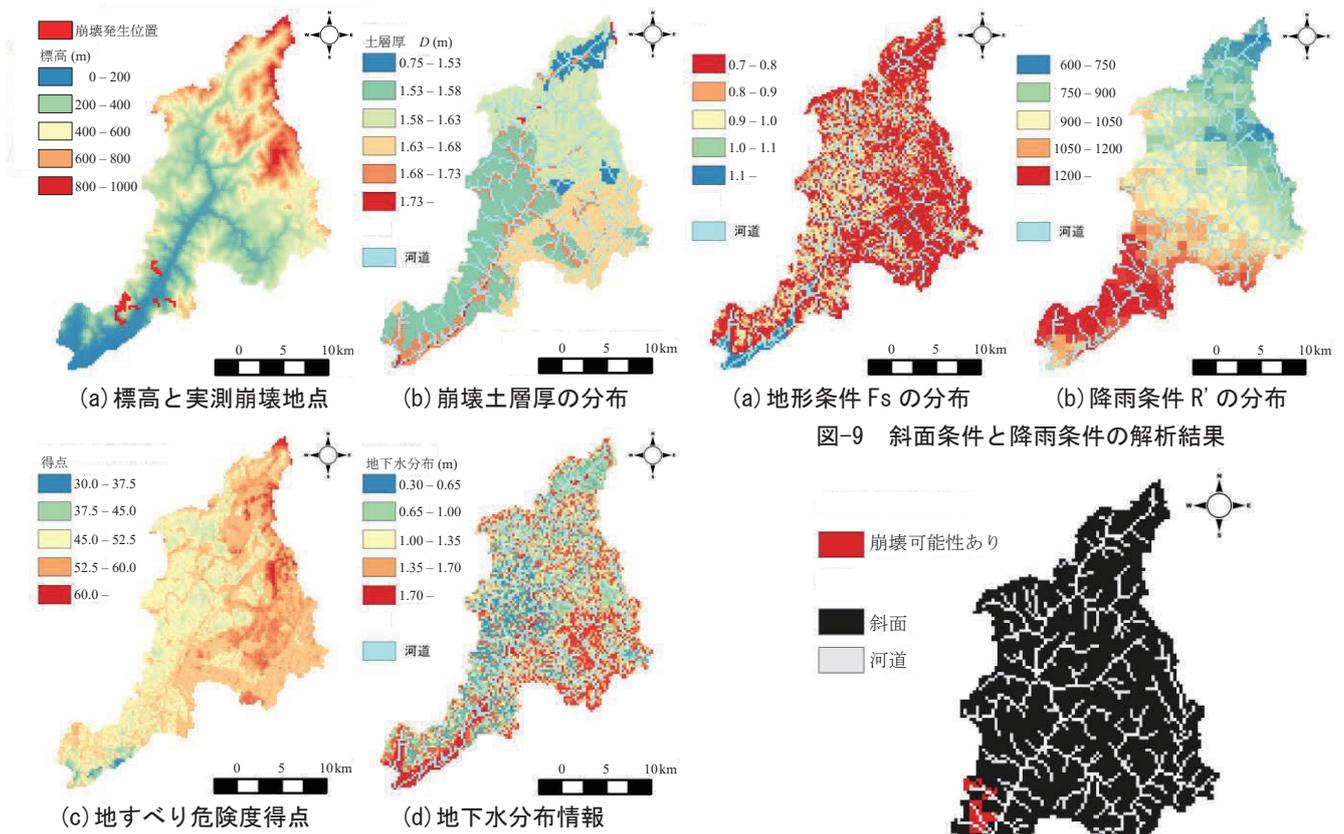


図-8 実測崩壊地点および解析条件の分布状況

表-2 表層崩壊予測の解析パラメータ

地形条件			
判定基準: F_{sc}	0.895	変換係数: α_c	0.15
降雨条件			
判定基準: R'_c	1,185	重み係数: a	17.0
長期雨量指数: R_1	190	短期雨量指数: r_1	80
長期実効降雨の半減期: T_1	162	短期実効降雨の半減期: T_2	2
地すべり危険度得点と地下水分布情報の判定基準			
地すべり危険度得点	44.3	地下水分布情報	1.496

ぞれ示す。また、降雨条件の解析で必要となる雨量については流出モデルと同様、解析雨量を使用した。

表-2に解析パラメータを示す。地形条件および降雨条件の各パラメータは、永谷ら⁷⁾の研究を参考に試行錯誤的に決定しているが、判定基準については図-8(a)の実測崩壊地点を見逃さない値を設定した。地すべり危険度得点と地下水分布情報の判定基準は、的中率が高く、且つ実測崩壊地点付近が判定できている値を試行錯誤的に決定した。

解析結果として、まず、図-9に(a)地形条件による安全率 F_s および(b)降雨条件による雨量指数 R' の分布をそれぞれ示す。また、図-10は地形および降雨条件から判定された崩壊の可能性のある地点を示している。これらの図は即ち、永谷ら⁷⁾の手法による結果を表す。図-10から分かるように、図-8(a)の実測崩壊地点全てを見逃さないよう判定基準を設定すると、予測結果は過大評価となっている。これは、

図-9 斜面条件と降雨条件の解析結果

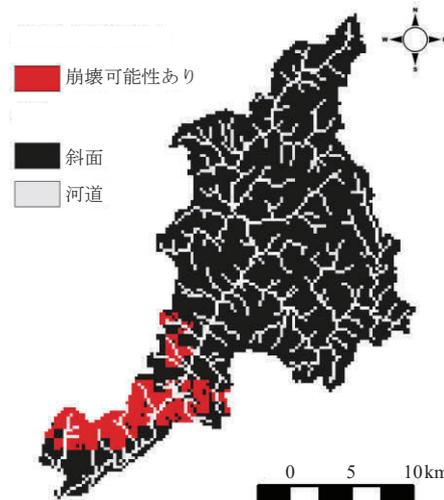


図-10 地形条件と降雨条件による崩壊判定結果

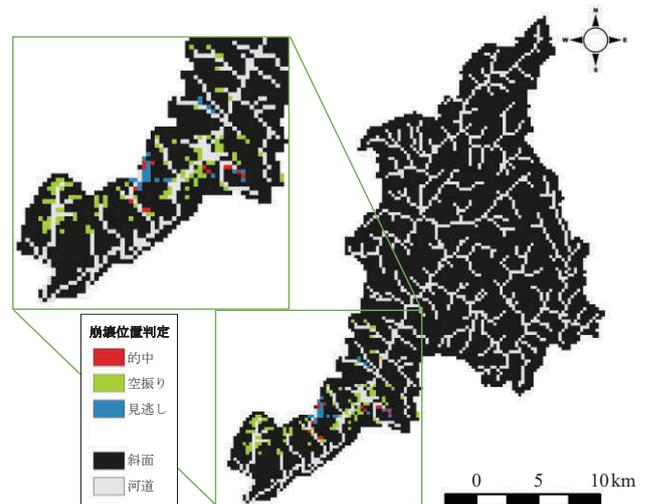


図-11 本予測手法による崩壊判定結果

永谷ら⁷⁾の手法による崩壊予測の精度向上には、新たな判断材料が必要であることを示している。

図-11は本研究で提案した予測手法による結果を示している。ここで、“的中”とは崩壊が発生すると予測して実測でも崩壊が発生したセル，“空振り”とは崩壊が発生すると予測したが実際には崩壊が発生しなかったセル，“見逃し”とは崩壊が発生しないと予測したが実際には崩壊が発生したセルを指す。本

手法による的中率は 10.7%，見逃し率は 65.8%であり，定量的な予測精度はあまり良くない。しかしながら，定性的な予測崩壊地点について図-10 と図-11 を比較すると，本手法はかなり実測に近い結果を得ることができている。また，250m の比較的粗い DEM を用いたにもかかわらず，支川レベルでの詳細な崩壊位置を出力できている。250 m 格子では解析結果のみならず，実測崩壊地点の表現も困難であり，これが的中率を低下させた一因にもなっている。したがって，100m や 50m 程度のより解像度の高い DEM を利用することで精度の向上が期待でき，また，それに合わせて崩壊予測パラメータを修正していくことで，更なる精度向上が可能になると考えている。

4. おわりに

本研究では，降雨に伴う土砂災害の防止に資することを目的とし，従来の地形条件と降雨条件⁷⁾に加え，地すべり危険度得点⁸⁾と地下水分布情報を利用したセル分布型流出解析に基づく表層崩壊予測手法を提案した。提案した手法を，平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨時の山口県佐波川流域に適用した。本研究で得られた成果を以下に纏める。

- [1] 地下 3 層構造のセル分布型流出解析モデルを開発した。対象豪雨時における佐波川流域への適用から，その洪水波形を良好に再現することができ，また，Nash-Sutcliffe 係数も 0.9 以上と本流出モデルの妥当性を示すことができた。
- [2] 本手法を用いて，対象豪雨時における佐波川流域での表層崩壊予測を試みた。実測との比較より，的中率 10.7%，見逃し率 65.8%と定量的な精度はあまり良くなかったものの，定性的な崩壊地点の予測は，粗い DEM であったにもかかわらず，実測にかなり近い結果を得ることができた。

以上のような結果が得られたが，本研究では佐波川流域のみの適用に留まっている。そのため，今後は他流域への適用を試みるとともに，高解像度 DEM の利用，および解析パラメータの影響についても検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究は，一般社団法人中国建設弘済会「平成 30 年度技術開発支援制度」助成の一部を受けて実施したものである。また，3 名の匿名査読者の方々からは大変貴重な意見を頂いた。ここに記して，謝意を表します。

参考文献

- 1) 認定特定非営利活動法人日本防災士機構：防災士教本，pp.201-215，2019.
- 2) 国土交通省：平成 30 年の土砂災害発生状況，<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/h30doshasai2.pdf>，(2020 年 6 月 1 日閲覧).
- 3) 岡田憲治：土壌雨量指数，測候時報，Vol. 69，pp.67-100，2002.
- 4) 三隅良平，小口高，真木雅之，岩波越：分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険域のリアルタイム予測，自然災害，Vol. 23，No. 3，pp.415-432，2004.
- 5) APIP, Sayama, T., Tachikawa, Y. and Takara, K.; Lumping of a physically-based distributed model for sediment runoff prediction in a catchment scale, *Ann. J. Hyd. Eng.*, JSCE, Vol. 52, pp.43-48, 2008.
- 6) 田村圭司，内田太郎，秋山浩一，盛伸行：高精度空間情報を用いた表層崩壊発生危険度評価手法に関する研究，土木研究所報告，No. 214，pp.47-61，2010.
- 7) 永谷言，水野直弥，石田裕哉，小澤和也，寶馨：分布型流出モデルの斜面崩壊予測への応用，土木学会論文集 F5(土木技術者実践)，Vol. 68，No. 1，pp.16-26，2012.
- 8) 河野勝宣，野口竜也，西村強：AHP 法および GIS を用いた中国地方における地すべりハザードマッピングの試み，日本地すべり学会誌，Vol. 57，No. 1，pp.3-11，2020.
- 9) Huang, J., Hinokidani, O., Yasuda, H., Ojha, C. S. P., Kajikawa, Y. and Li, S. Q.: Effect of Check Dam System on Water Redistribution in the Chinese Loess Plateau, *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, Vol. 18, No. 8, pp.929-940, 2013.
- 10) 社団法人地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズム及び危険度予測，2006.
- 11) 社団法人土木学会 地盤工学委員会 斜面工学研究小委員会：2009 年 7 月山口豪雨災害調査報告書(速報版)，2009.
- 12) Shreve, R. L.: Infinite topologically random channel network, *J. Geology*, Vol. 74, No. 2, pp.178-186, 1967.
- 13) Horton, R. E.: Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geol. Soc. Amer.*, Bulletin, Vol. 56. No. 3, pp.275-370, 1945.
- 14) Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *J. Hydro.*, Vol. 10 pp.282-290, 1970.
- 15) 古川浩平，海堀正博，久保田哲也，地頭蘭隆，権田豊，杉原成満，林真一郎，池田暁彦，荒木義則，柏原佳明：2009 年 7 月 21 日山口県防府市での土砂災害緊急調査報告，砂防学会誌，Vol. 62，No. 3，pp.62-73，2009.
- 16) 社団法人砂防学会：改訂砂防用語集，山海堂，2004.

(2020. 7. 1 受付)