

GISを用いた空間分析による実効雨量を考慮した 斜面崩壊危険度マップの作成

HAZARD MAPPING FOR SLOPE FAILURE CONSIDERING
EFFECTIVE PRECIPITATION BY SPATIAL ANALYSIS USING GIS

松浦 拓斗¹・浦田 真成¹・椋木 俊文²

Takuto MATSUURA, Masanari URATA and Toshifumi MUKUNOKI

¹熊本大学大学院自然科学教育学部土木建築学専攻 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39番1号)

E-mail: 212d8328@st.kumamoto-u.ac.jp

E-mail: 222d8355@st.kumamoto-u.ac.jp

²熊本大学大学院先端科学研究部社会環境部門 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39番1号)

E-mail: mukunoki@kumamoto-u.ac.jp

Key Words: slope failure, effective precipitation, GIS-based evaluation

1. はじめに

自然斜面は、降水条件によって急激に危険度が増加するため、平時において様々な降水条件を想定した危険度を評価することが重要である。一般的に、傾斜角度や集水面積などの地形条件、表層地質などの地質条件に加えて、植生条件が斜面の危険度評価のパラメーターになりえる¹⁾。例えば植生は正規化植生指標(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)と呼ばれる値を衛星画像から得ることで広域的に山岳地域の植生の状態を把握することができる。これらの条件に加え、豪雨に伴う地下水位の変動を捉えることは容易ではないため、降水量と地下水位の相関の評価が研究テーマとして着目されている³⁾。ここで、土壌中に残留する水分量を近似的に表現できる方法として実効雨量がある。実効雨量は時間経過に伴う地下水位の変動状況を捉えることができる。

一方、解析対象が広域であることを考慮すると、衛星画像の利用は有効である。一般に、崩壊地の検出方法は、画像の目視判読法とイベント前後の画像差分法がある。特に、NDVIに着目して、崩壊前後の衛星画像を差分することにより求めた植生減少領域を崩壊領域とすることで広域なデータ処理が可能となる。

以上の背景を鑑み、本研究の目的は、GISを用いた空間分析により、実効雨量を用いた時間経過に伴う危険性変化を考慮した斜面崩壊危険度マップを作成することである。本研究では、令和2年7月の熊本県南部で発生した

土砂災害発生地域を対象とし、検討する崩壊素因は、樹種、樹齢、表層地質とする。まず「全崩壊面積において特定属性を含む崩壊面積が占める割合」を比較基準に、これらの3つの素因GISデータの属性を崩壊しにくい属性から崩壊しやすい属性へ1から5のランク分けをそれぞれ行う。次にランク分けを行った3つの素因GISデータと最大実効雨量が異なる4つの実効雨量GISデータを重ね合わせ、降雨時間が継続することによる地下水位上昇を想定した斜面崩壊危険性の変化を検討する。この時、実効雨量GISデータに対しても同様にランク分けを行う。最後に実際に発生した斜面崩壊との比較する。また、崩壊素因に、実効雨量を加えた危険度評価マップを作成することで、地下水位上昇を想定した危険領域を可視化する。画像処理及び空間分析にはArcGIS Pro 2.7.0を使用した。

2. 解析対象地と崩壊領域の抽出

(1) 対象領域の降雨状況

本研究の対象領域は熊本県葦北郡芦北町である。図-1は、芦北地区における令和2年7月豪雨時の雨量変化を示している。降雨のピークを含む7月3日午前0時から7月10日午前0時までの1週間の間で、累積雨量が800 mmを超えていたことがわかる。この地域の時間雨量の最大値は、7月4日午前3:00~4:00の1時間で、80.75 mm/hが観測された。以上のような集中豪雨を起因として、7月4日未明に芦北町を含む熊本県南部で多くの斜面が崩壊した。

(2) 衛星画像のNDVI画像差分による崩壊地形の抽出

a) 対象領域の衛星画像

本研究では宇宙技術開発株式会社衛星画像データサービスが提供するSPOT6号及び7号の衛星画像を使用した。図-2は本研究での解析対象領域の発災後の1.5 m分解能のパンシャープ衛星画像である⁴⁾。また、災害発生前後の2020年4月10日と、2020年8月31日の2枚の画像を使用した。以後検討する領域は図-2の範囲に限る。

b) NDVIの概要と植生減少領域の抽出

衛星画像の輝度値の差分では、画像の解像度の観点から、正確な崩壊地を抽出することは困難であった。崩壊地の植生の変化は顕著であることを考慮し、衛星画像のNDVI値に着目した。NDVIとは、近赤外域の反射率と赤色光の反射率を用いて植物の活性度を-1から1の値で表現したもので、次式(1)で定義される。

$$NDVI = \frac{[NIR]-[Red]}{[NIR]+[Red]} \quad (1)$$

ここで、NIRは近赤外域バンドの反射率、Redは可視域赤色バンドの反射率を表す。値が-1に近いほど植生が不健康、または植生が存在しない状態を表し、1に近いほど健康な状態を表す。16ビット画像の輝度値の変化量を-1から1の値を持つNDVI値に変化することにより、変化した領域の画素を明瞭に捉えることができる。三浦ら⁹⁾は、2004年新潟県中越地震における斜面崩壊地を崩

壊前後のNDVIを差分することにより、広域に抽出した。本研究では、三浦らの検討手法に準じて崩壊前後のNDVI処理画像を差分し、植生減少領域の抽出を行った。

図-3、図-4はArcGISの[NDVI]ツールを使用し、崩壊前後の衛星画像から作成したそれぞれのNDVI値の算出結果である。この2枚の画像をArcGISの[変化の計算]ツールを用いて得られたピクセル値の差分画像に[属性の抽出]ツールを用いて負の変化量を持つ領域を抽出した。この抽出した領域は豪雨前後で植生が減少していることを示し、この領域内に崩壊領域が包括されているとした。

c) 傾斜角による閾値による推定崩壊地の抽出

NDVI差分における負の変化量を持つ領域には、農作物の収穫といった斜面崩壊以外の要素も含まれている。このような領域を除去するため、傾斜角度による閾値を設定した。傾斜角度GISデータは国土院が提供する5mDEM(Digital Elevation Model：数値標高モデル)を用いて作成した。データによって更新年月日は異なるが、いずれのデータも2020年7月以前に更新されたものである。そのため、傾斜角度GISデータは本研究の対象災害である令和2年7月豪雨による地形の変化は一切反映されていないという前提のもと、あくまで発災前の地形を示すものとして利用する。一般に、表層崩壊は傾斜角度30°以上の急傾斜地で発生するとされている⁹⁾。本研究では閾値として傾斜角度30度以上のGISデータを作成し、[インターセクト]ツールよりNDVI差分による負の変化量を持つ

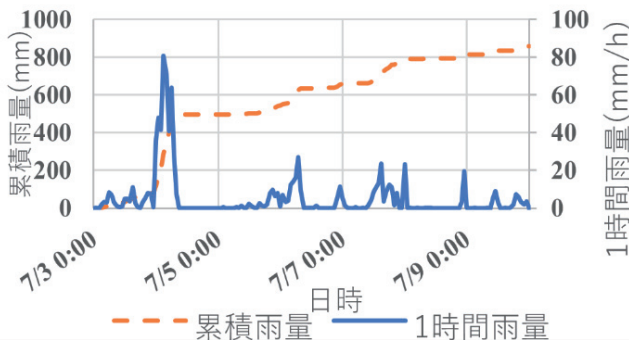


図-1 令和2年7月豪雨の芦北町の観測雨量

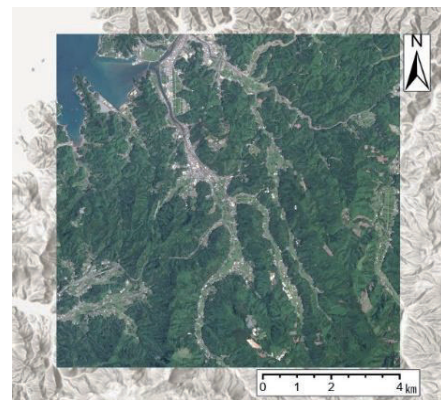


図-2 発災後の衛星画像

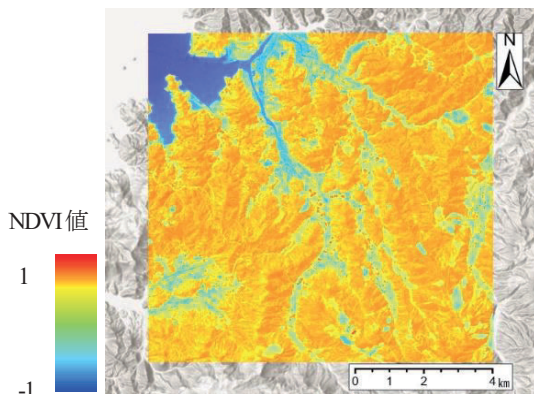


図-3 豪雨前NDVI画像(4月10日時点)

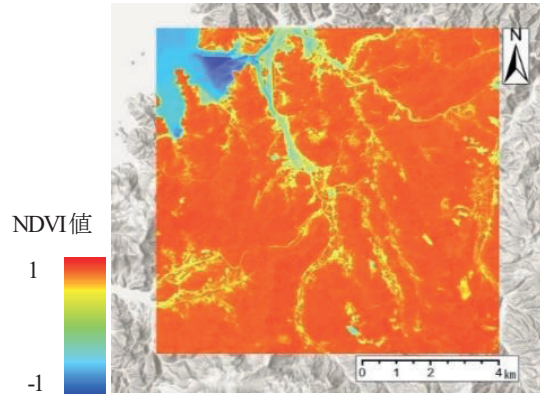


図-4 豪雨後NDVI画像(8月31日時点)

領域と重ねることで推定崩壊地の抽出を行った。抽出した結果を図-5に示す。この推定崩壊地を用いて各素因GISデータの属性の崩壊傾向を評価する。

3. 評価パラメーター

(1) 斜面崩壊素因GISデータ

各崩壊素因GISデータは熊本県農林水産部森林局 森林整備課より提供された森林簿を使用した。

a) 樹種

樹木根系は斜面崩壊に対する抑止効果があることがわかっている。また、根の張り方の違いにより、広葉樹の方が針葉樹よりも斜面崩壊への抑止力になりやすい。一方、スギやマツなどの針葉樹の方が広葉樹よりも根系量が多い傾向があるとされている⁷⁾。そこで、本研究では樹種の違いを着目することにした。

b) 樹齢

若い樹木は十分に根を張り切れていないという観点から、斜面の安定性には樹齢も関係していると言われている⁸⁾。本研究においても、樹齢の違いによる崩壊率の傾向についての検討を試みる。

c) 表層地質

表層地質については、斜面崩壊リスクを検討する上での代表的な指標の一つとして、数多くの議論がされている。したがって、表層地質を崩壊素因の一つとした。

(2) 実効雨量GISデータ

降雨指標としては、実効雨量と1時間雨量の2つがある。本研究では、土中に残留する雨水の危険度の変動を評価したいため、実効雨量GISデータを斜面崩壊誘因の降雨指標とした。なお、実効雨量GISデータはXRRAINリアルタイム雨量データの1時間降水量をもとに作成した。

ここで実効雨量 R_w を矢野⁹⁾が提案した式を用いて示す。

$$R_w = \sum \alpha_i \cdot R_i \quad (2)$$

α_i は*i*時間前の減少係数、 R_i は*i*時間前の1時間雨量を表

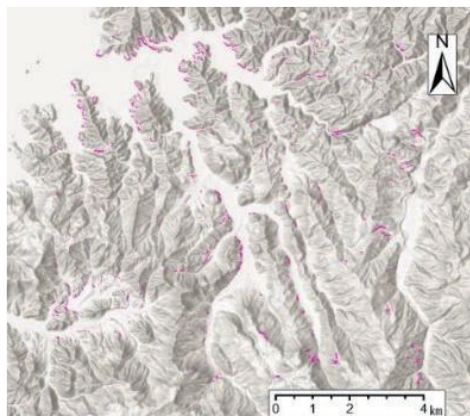


図-5 推定崩壊地

し、減少係数 α_i は次式(3)で定義される。

$$\alpha_i = 0.5^{i/T} \quad (3)$$

また、 T は半減期(h)を表す。半減期とは、降雨の影響力が降った直後の半分になるまでの時間のことである。したがって、実効雨量を算出するために必要なパラメーターは1時間雨量と半減期のみである。

実効雨量は、土壌に残留している雨量を表現しているという点では土壌雨量指数¹⁰⁾と似ているが、初期値の影響を受けず、少ないパラメーターでの評価が可能のため、比較的容易に算出することができる。本研究の半減期の設定に関しては、対象領域の表層地質を砂・礫・粘土等の堆積岩類と火山岩類の2つに分類し、堆積岩類の半減期は浦田¹¹⁾より示された72時間、火山岩類の半減期は栗原¹²⁾の提案した表層地質別半減期をもとに、36時間を適用した。また、実効雨量のGISデータは任意の時間の1時間降水量のTIFFデータを式(2)に適用し、作成した。

(3) 比較対象の崩壊斜面

図-6は、図-2で示した推定崩壊地内にある斜面崩壊現場の写真である。この斜面崩壊¹³⁾は、平均勾配 36° の平滑斜面の中腹に位置し幅20~50 m、長さ55 m、崩壊深さ3~5 mの崩壊となっている。現地調査によると崩壊の原因としては、軟質砂岩のクラック面に流水・地下水の存在痕跡が推測される土砂の付着が確認されるため、浸透水・地下水による間隙水圧が上昇し、強度の小さい軟質砂岩部が流出したものと推測される。また、周辺住民に対するヒアリング調査によると7月4日午前5時15分に発生したという情報が得られている。

4. 解析手順

(1) 各種GISデータのランクの設定

素因の影響度を定量的評価するためには、各素因GISデータに含まれる複数の属性をカテゴリー分け及び共通



図-6 崩壊時刻が実測された斜面崩壊

の評価軸を設定する必要がある。Ayalewら¹⁴⁾は、複数のGISデータを用いた地すべり危険度の定量的評価を行った。そこで、本研究では、降雨を起因とした斜面崩壊の発生しやすさを共通の評価軸としてAyalewらが提唱したDensityをもとに、各素因GISデータの属性をカテゴリー分けとその定量化を行った。この際、評価軸として各GISデータの属性に対してDensity という(4)式で表される値を与えている。

$$Density = \frac{\text{対象カテゴリー内の斜面崩壊の合計面積}}{\text{発生した斜面崩壊の総面積}} \times 100 \quad (4)$$

このDensityの値が大きければ大きいほど、地すべりの発生可能性が高いとした。本研究では、この'Density'を'崩壊比率'という言葉で定義した。同様の手法で各属性のカテゴリーの崩壊比率を算出し、その値に降順で5段階評価を行い、5に近いほど斜面崩壊が発生する可能性が高いとした。この5段階評価を行ったカテゴリーをランクと定義する。

(2) 実効雨量のランクの定義及び加重合計の適用

a) 実効雨量のランク

八代に同位置で地下水と降水量を確認できる箇所が7か所あり、浦田ら¹⁰⁾はここに対して実効雨量と地下水位は強い正の相関があることを示した。八代で検討された地質と研究対象地域の芦北では地質条件が異なることから、同程度の相関があるかどうかについては、今後詳細な検討が必要と考えるが、本研究でも正の相関があるという前提のもと以下、解析を進めた。

対象領域における令和2年7月豪雨の降雨期間での実効雨量の最大値は、417 mmであることが分かった。実効雨量GISデータに与えるランクは各素因GISデータのランク分類の手法とは異なり、降雨期間の実効雨量最大値を基準に0 mmから80 mm刻みで、5つのカテゴリーに分類した後、値が小さいカテゴリーから順に、1から5のランクを割り当てた。また、ランク5は実効雨量320 mm以上の値とした。

本研究では対象領域の最大実効雨量が異なる4つの任意時間の実効雨量GISデータを適用することで地盤内の雨水が増加していく状態を想定した。以上より、実効雨量を80 mmおきに評価すると、実効雨量80 mm以下(ランク1)は7月3日15時に、実効雨量160 mmから240 mm(ランク3)は7月4日2時に相当することが分かった。また、実効雨量160 mmから320 mm以上(ランク3からランク5)は7月4日5時の相当することが分かった。そして、実効雨量240 mm以上(ランク4からランク5)は7月4日8時であった。

b) 加重合計

以上の実効雨量GISデータと各素因GISデータのランクを用いて加重合計を実行する。加重合計とは、複数の

GISデータが持つ共通のスケールに重みを付けて合計することで対象領域を評価する空間分析手法である¹⁵⁾。各素因GISデータの降雨を起因とした斜面崩壊の発生しやすさを評価軸に決定したランクを用いて加重合計を実行する。この時、各GISデータに与える重みの合計値が100%になるように設定する必要がある。そこで、本研究では、重みの配分を決めるにあたり、傾斜配分するにも十分な情報が得られなかったため、重みを同等と仮定して、すべての素因に25%の重みを与えた。

加重合計による出力結果は、各ピクセルが有する4種類のカテゴリーのランクと与える重みの積の総和である。この値を危険度と定義し、出力される危険度値の空間分布を危険度マップとして示す。

5. 結果及び考察

(1) 各種素因GISデータのランクの決定

表1~表3は、樹種、樹齢、表層地質の各カテゴリーに崩壊地面積と崩壊比率に基づいて得られたランクを示している。

樹種は、針葉樹、広葉樹、竹林、未立木地、岩石地、特殊林の6つのカテゴリーに分類した。表1より、針葉樹と広葉樹が崩壊地全体の90%以上を占め、針葉樹は広葉樹の倍以上の崩壊比率であることがわかる。これは根系の量よりも根の張り方の特徴による崩壊への抑止力の影響が大きいと考えられる。

樹齢については、対象領域において、23年以上の領域では崩壊がなかったため、22年以下の範囲を小さい方から6年ずつに分類し、18-22年の樹齢のみ5年として計5つのカテゴリーに分類した。

表2より、最も崩壊比率が大きかったのは6-11年で、

表-1 樹種に関する崩壊比率およびランクの定義

カテゴリー	崩壊地面積(m ²)	崩壊比率(%)	ランク
針葉樹	154,884	65.1	5
広葉樹	70,101	29.8	4
竹林	7,282	3.0	3
未立木地	4,010	1.7	2
岩石地	634	0.3	1
特殊林	0	0.0	1

表-2 樹齢に関する崩壊比率およびランクの定義

カテゴリー	崩壊地面積(m ²)	崩壊比率(%)	ランク
6-11年	134,361	57.2	5
12-17年	79,343	33.8	4
0-5年	19,073	8.1	3
18-22年	2,135	0.9	2
23-年	0	0.0	1

表-3 表層地質に関する崩壊比率およびランクの定義

カテゴリー	崩壊地面積(m ²)	崩壊比率(%)	ランク
安山岩	107,331	45.7	5
砂岩・泥岩・チャート	85,088	36.2	4
砂・礫・粘土	42,150	17.9	2
輝緑凝灰岩	364	0.2	1

表-4 加重合計による危険度評価と各危険度の割合

重み(%)	樹種:25 樹齢:25 表層地質:25 実効雨量:25			
検討日時	7月3日15時	7月4日2時	7月4日5時	7月4日8時
実効雨量(mm)	0~80	160~240	160~	320~
実効雨量のランク	1	3	3,4,5	4,5
面積割合	面積割合(%)			
危険度				
4.75及び5.00	0.0	0.0	29.0	65.2
4.25及び4.50	0.0	65.9	52.3	26.8
3.75及び4.00	65.8	26.3	15.7	7.4
3.25及び3.50	26.4	7.1	2.8	0.6
2.75及び3.00	7.2	0.6	0.2	0.0
2.25及び2.50	0.6	0.0	0.0	0.0
1.75及び2.00	0.0	0.0	0.0	0.0

全体の過半数の比率であることがわかる。また、6-17年が全体の崩壊箇所の90%以上を占めた。一方で、18年以上の崩壊比率は1%未満であった。

表層地質は、安山岩、砂岩・泥岩・チャート、砂・礫・粘土、輝緑凝灰岩の4つのカテゴリーに分類した。表3より、崩壊比率は安山岩が最も大きい。砂岩・泥岩・チャートは2番目に大きく、これら2つのカテゴリーで全体の80%を超えていることがわかる。また、得られた崩壊比率をもとに各カテゴリーにランクを与えた。一方、対象領域では安山岩、砂岩・泥岩・チャートの分布域が斜面崩壊に大きく関連していることが推測される。

(2) 得られた危険度マップ

5.(1)において、各素因GISデータのカテゴリーに対するランクが決定された。表4はこれらの結果と実効雨量GISデータのランクに25%の重みを与え、加重合計を行うことで得られた各時間の危険度分布の面積割合である。この割合は、各危険度を示したピクセルの合計面積を総面積で除して得られた値である。なお、この結果は与える重みがすべて25%であるため、算出された危険度は0.25ずつ変化する。また、図7から図10は表4に基づく各時点における危険度マップである。表4および図7から図10にて実効雨量が増加することにより時間経過に伴う斜面崩壊の危険性の変化の評価を行うことができた。

(3) 既知の崩壊斜面との比較

本研究では、各素因GISデータ及び実効雨量GISに与える重みの配分を均一と仮定し、すべてに25%の重みを与えて得られた結果であることを踏まえて、以下考察する。

表-5は、図-6に示した崩壊を含む周辺領域の危険度評価結果である。7月3日15時時点では、危険度は4.00を下回るが、7月4日2時以降では危険度が4.00を超えていることが分かった。また、ヒアリング調査によって、この斜面が崩壊したとされる7月4日5時の危険度は4.50を示した。このことからこの対象斜面は本研究で示す危険度分布に従うと、各素因GISデータ及び実効雨量GISに与える重みの配分を均一であった場合、危険度4.50になったときに

表-5 実測斜面上の危険度判定結果

検討日時	7月3日15時	7月4日2時	7月4日5時	7月4日8時
実効雨量(mm)	0~80	160~240	240~320	320~
実効雨量のランク	1	3	4	5
危険度判定	3.75	4.25	4.50	4.75

崩壊する斜面であると考えられる。このことから本研究で示す危険度分布に従うと、実効雨量の増加に伴い危険度が上昇し、4.50以上となった領域で崩壊が発生しやすくなる可能性があることが把握できた。一方、図-9及び図-10は、図-6に示した崩壊が発生した時刻以降における危険度マップであり、危険度が4.75及び5.00の領域が示されている。図-5の推定崩壊地と比較すると崩壊していない斜面が存在することが確認された。このことより、危険度評価の精度向上のためには樹種、樹齢、表層地質、実効雨量以外の要因についても検討対象とする必要があると判断される。

6. まとめ

本研究では、令和2年7月4日に発生した九州豪雨による熊本県葦北郡の地盤災害を対象に、樹種・樹齢・表層地質・実効雨量を考慮した斜面災害の危険度マップの作成を試みた。以下にまとめを示す。

- ① 降雨イベント前後の衛星画像から求めたNDVI画像を差分することで植生減少領域を抽出し、傾斜角30度以上の閾値を与えることで崩壊領域を求めた。
- ② 樹種、樹齢、表層地質に任意時間の実効雨量を加え、GISを用いて空間分析することで実効雨量の増加に伴う斜面の危険度の上昇を表すことができた。
- ③ 本解析によって危険度が4.75及び5.00と示された領域は、①で求めた崩壊領域よりも多いことが分かった。このことは、本研究で与えた樹種・樹齢・表層地質・実効雨量の条件において崩壊・非崩壊の違いを検討できる領域を抽出可能であることを示唆している。

また、本論文をまとめるにあたって、見えてきた課題を以下に示す。

- A) カテゴリーの面積を考慮した評価とDensityの妥当性を評価することにより、崩壊比率の精度の向上を目指す。
- B) 地形条件を導入するなど、素因の拡充し、危険度4.5以上の判定結果で未崩壊であった領域の崩壊要因を検討する。
- C) 崩壊比率等を反映したランク区分を行い、素因GISのランク区分の精度向上をさせる。
- D) 本論文で崩壊訴因に与えた重みを一律25%としたが、精度向上を目指した客観的な重み設定手法を提案する。

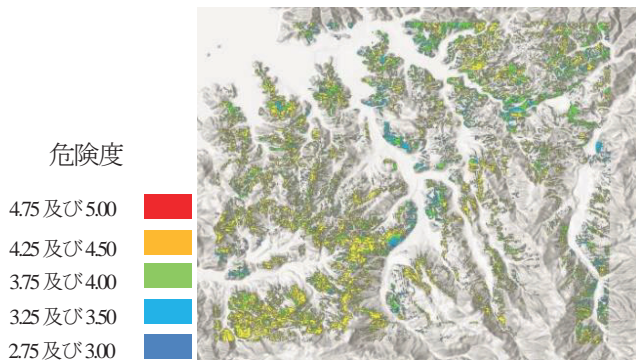


図-7 7月3日15時の危険度マップ

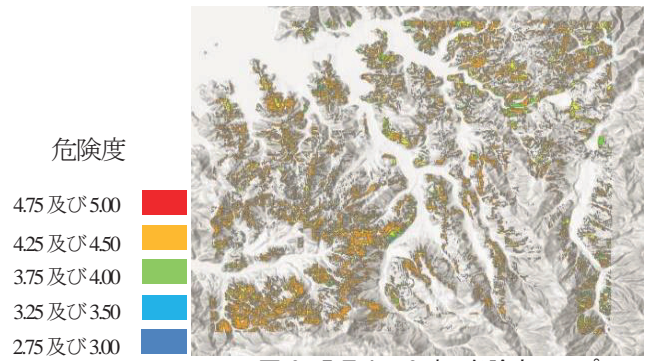


図-8 7月4日2時の危険度マップ

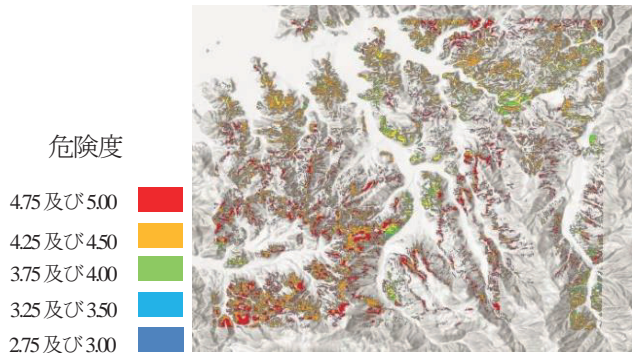


図-9 7月4日5時の危険度マップ

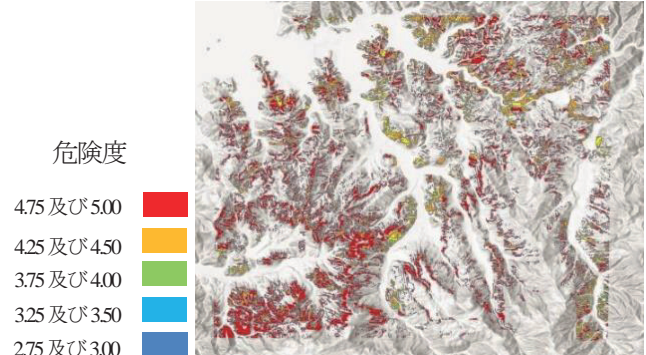


図-10 7月4日8時の危険度マップ

参考文献

- 1) Poughasemi, H.R., Mohammady, M., Pradhan, B.: Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, *Catena*97, pp.71-84, 2012.
- 2) Emadi-Tafti, M., Ataie-Ashtiani, B., Hosseini, S.M.: Integrated impacts of vegetation and soil type on slope stability, *Ecological Modelling*, pp.1-15, 2021.
- 3) 海野寿康, 中里裕臣, 井上敬資, 高木圭介: 破砕帯地すべり地区における地下水位計測と実効雨量に基づく地下水位の降雨応答特性, *日本地すべり学会誌 第45巻, 3号*, p219-226
- 4) Esriジャパン: GIS基礎解説 パンシヤープンとは, 2022年5月現在.
- 5) 三浦弘之, 翠川三郎: 高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた新潟県中越地震での斜面崩壊地の検出, *日本地震工学会論文集 第7巻, 第5号*, pp.1-13, 2007.
- 6) 国土交通省: 土砂災害防止法の概要.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/dosyahou_review/01/110803_shiryu2.pdf, 2022.5.30
- 7) 永田秀尚, 阪口透, 小嶋智: GISを用いた不安定斜面分布の地形地質要因解析, *応用地質*, 第46巻, 第6号, pp.320-330, 2006.
- 8) 阿部和時: 樹木根系の分布特性と斜面の保護・安定効果, *緑化工技術*, 第10巻第3号, pp.1-9, 1984.
- 9) 矢野勝太郎: 前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究, *砂防学会誌(新砂防)*, pp.3-13, 1990.
- 10) Ishihara, Y. and S. Kobatake (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, *Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ.*, 29, 27-43.
- 11) 浦田真成, 松浦拓斗, 椋木俊文: 斜面崩壊危険度評価のための実効雨量を用いた地下水位の予測, *土木学会西部支部研究発表会*, (2022.3), p295-296, 2022
- 12) 栗原淳一, 山越隆雄: 流出特性に基づいた土石流発生予測のための実効雨量に関する研究, *土木研究所成果報告書*, pp.629-634, 2006.
- 13) 砂防学会: 令和2年7月豪雨による九州地方の土砂災害に関わる緊急調査報告(速報)
<https://jsece.or.jp/wpcontent/uploads/2020/08/R2M7/sokuhou.pdf>, 2022.5.30.
- 14) Ayalew, L., Yamagishi, H.: The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology* 65 (2005) 15-31, 2005.
- 15) Esri: 加重合計関数
<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-weighted-sum-works.htm>, 2022.5.30.

(2022.5.30 受付)