

# 地形情報を利用した豪雨時の 深層崩壊に対する危険斜面抽出手法の提案

伊藤 真一<sup>1</sup>・小田 和広<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

<sup>2</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

近年、局所突発的な集中豪雨や大型の台風の増加に伴い、各地で土砂災害が頻発している。地球温暖化の影響から、今後も土砂災害の増加が予測される。したがって、将来的な防災計画の策定のためにも、土砂災害の危険性が高い斜面をあらかじめ抽出しておくことは重要である。そのためには、危険斜面を簡便かつ効率的に抽出できる新たな手法の開発が求められる。

本稿では、複数の解析手法を組み合わせることで土砂災害に対する危険斜面抽出手法を提案する。近年、社会的問題となっている深層崩壊に着目し、この提案手法を地形情報から得られたデータに適用した。その結果、深層崩壊に対する危険斜面の抽出が可能であることを明らかにした。

キーワード 深層崩壊, 豪雨, 斜面防災

## 1. はじめに

国土の7割以上が山地で構成されている我が国では、毎年各地で降雨による土砂災害が発生している<sup>1,2</sup>。地球温暖化の影響から、局所的かつ突発的な集中豪雨や大型な台風の発生件数が増加しており、それに伴う土砂災害の増加が危惧されている。したがって、土砂災害防止対策は我が国における社会的命題であるといえる。しかし、我が国には斜面が無数に存在し、防災に費やすことができる時間や費用には限度があるため、全ての斜面に対する調査・対策は困難である。ゆえに、まず、防災対策の第一段階として、土砂災害発生の危険性が高い斜面（以下、危険斜面と呼ぶ）をあらかじめ抽出しておくことが重要である。

ところで、土砂災害の発生要因には素因（地形、地質等）と誘因（降雨、地震等）がある。誘因は発生時期や発生場所、発生規模等の予測が困難である。したがって、まずは素因を基に、危険斜面を抽出しておくことが実務上有効である。そのためには、土砂災害の危険性が高い素因を有する斜面を抽出できる新たな机上判定手法の開発が求められる。この机上判定手法が広く普及するには、簡易で低コスト、かつ効率的な手法が望ましい。さらに、無数の斜面が存在する我が国で適用するためには、大量のデータを処理できる手法でなくてはならない。

上述の条件を満たしうる机上判定手法として、従来、数多くの危険斜面抽出手法が提案されてきた<sup>3,4</sup>。これらの手法は、人口知能技術や統計学的手法を道路防災総

点検のデータに適用することで危険斜面抽出を試みているが、解析結果の精度が低いことや、結果が使用者の主観的な判断に左右されること等の問題点を有している。

筆者らは、様々な土砂災害に対する危険斜面を抽出するために、定性的なクラスタリングを可能とする自己組織化マップ<sup>5</sup>（Self-Organizing Map）（以下、SOMと呼ぶ）と判別分析手法の一種である数量化Ⅱ類<sup>6</sup>を併用した手法を提案してきた。そして、この手法に道路防災総点検のデータを適用することで、表層崩壊や落石に対する危険斜面の抽出を可能としてきた<sup>7</sup>。

本稿では、SOMと数量化Ⅱ類に加えて、定量的なクラスタリングを可能とする非階層的クラスタ分析<sup>8</sup>を組み合わせることで新たな危険斜面抽出手法（以下、提案手法と呼ぶ）を提案する。さらに、様々な土砂災害に対する危険斜面抽出手法の開発のために、近年、社会的問題となっている深層崩壊<sup>9</sup>を研究対象とした。深層崩壊は大規模で一気に崩壊に至るため、交通ネットワークの機能低下から人的被害まで多大な損失を引き起こす。さらに、河道閉塞による天然ダム形成や崩壊土砂の土石流化等の二次災害の危険度も高い。ゆえに、本稿では、深層崩壊に対する提案手法の適用性の検証を目的とする。ところで、深層崩壊が問題となる地域では詳細な地質情報が得られない場合が多い。この問題点を解消するために、本稿では、もう一方の代表的な素因である地形に着目した。すなわち、地形図等から得られる情報を数値データに変換し、提案手法へ適用する。これにより、深層崩壊に対する提案手法の適用性の検証を試みる。

## 2. 解析手法

### (1) 自己組織化マップ (Self-Organizing Map)

SOM<sup>9)</sup>は競合学習型ニューラルネットワークの一種であり、入力層と出力層の2層から構成される。SOMは高次元のベクトル集団を2次元マップ上に写像する(図-1参照)。図-1に示すように、特徴が類似しているベクトル集団はマップ上の近い位置に配置され、特徴が類似していないベクトル集団は遠い位置に配置される。これにより、定性的な判断を促し、クラスターを視覚的に捉えやすいという長所を有している。しかし、SOMには短所も存在する。SOMによるクラスタリングは定性的な判断となるため、使用者によってクラスタリング結果に差異が生じる可能性がある。例えば、図-2に示すように、ある使用者は白丸で囲まれた領域をクラスターとするが、別の使用者は黒丸で囲まれた領域をクラスターと判断する可能性がある。このような使用者によるクラスタリング結果の差異は、客観的な判断が求められる机上判定においては大きな問題であるといえる。

### (2) 非階層的クラスター分析

SOM以外のクラスタリング手法として統計学的手法の一種であるクラスター分析<sup>8)</sup>が挙げられる。クラスター分析は、階層的クラスター分析と非階層的クラスター分析に大別される。非階層的クラスター分析は、階層的クラスター分析と比較して、計算方法の詳細な設定は不可能であるが、短時間での計算が可能であるという長所を有しており、膨大なデータに対して有効である。ゆえに、土砂災害に対する机上判定手法としては非階層的クラスター分析の方が有用であると判断し、本稿では、非階層的クラスター分析(以下、クラスター分析と呼ぶ)を用いる。クラスター分析は計算によって、各ベクトル集団のクラスターを決定できる。すなわち、定量的なクラスタリングが可能である。しかし、クラスター分析も短所を有している。クラスター分析は、クラスター数をあらかじめ決定する必要があるが、このクラスター数に誤りがあると、クラスター分析の結果は意味をなさない。したがって、正確なクラスター数の決定が必要である。

### (3) 数量化Ⅱ類

数量化Ⅱ類<sup>10)</sup>は、数量化理論の中で、カテゴリーデータである説明変数によってカテゴリーデータである目的変数を取り扱う手法である。本手法は主に判別分析に用いられる。すなわち、数量化Ⅱ類は、1つの集団を2群に分割する際、その集団に属する各ベクトル集団が2群のうちのいずれに属するかという目的変数を推定する。数量化Ⅱ類によって、カテゴリーデータである説明変数は全て数量化され、その数量化された値はカテゴリースコアと呼ばれる。あるベクトル集団に該当するカテゴリー

スコアの総和がそのベクトル集団のサンプルスコアとなる。このサンプルスコアと1群と2群の境界の値である判別の midpoint を比較することで、目的変数はいずれの群に属するかを定量的に推定できる(図-3参照)。

### (4) 提案手法

本稿では、SOMとクラスター分析、数量化Ⅱ類を組み合わせた手法を提案する。提案手法のフローを図-4に示す。まず、抽出した崩壊斜面をSOMに適用し、視覚的にクラスター数を決定する。次に、SOMを用いて決定したクラスター数をクラスター分析に入力し、定量的なクラスタリングを行う。そして、クラスター分析の結果をSOMのマップ上にプロットする。ここで、このクラスター数の決定に誤りがあれば、図-5に示すように、クラスター分析の結果はSOMのマップと合致しない。その際は、クラスター数を変更し、再度クラスター分析に適用する。この手順を繰り返すことで、図-6に示すような、最もSOMのマップと合致するクラスターが得られる。このクラスターは、SOMとクラスター分析を併用して得られたクラスターであるので、最も客観的に決定されたクラスターであるといえる。次に、得られた崩壊斜面のクラスターに非崩壊斜面を合わせて複数の抽出基準を作成する。そして、抽出基準毎に数量化Ⅱ類をそれぞれ適用することで、危険斜面を抽出する。最後に、数量化Ⅱ類のサンプルスコアと判別の midpoint を用いて、抽出された危険斜面の順位付けを行う。

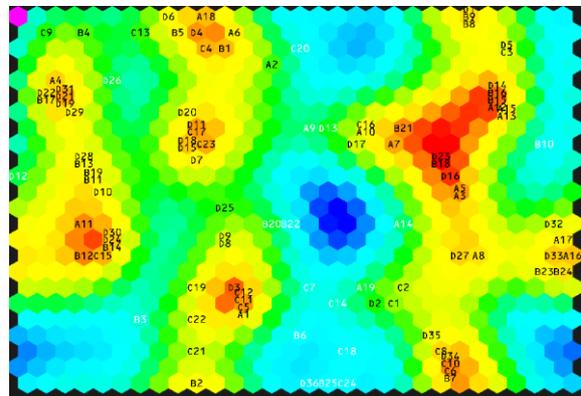


図-1 SOMのマップ

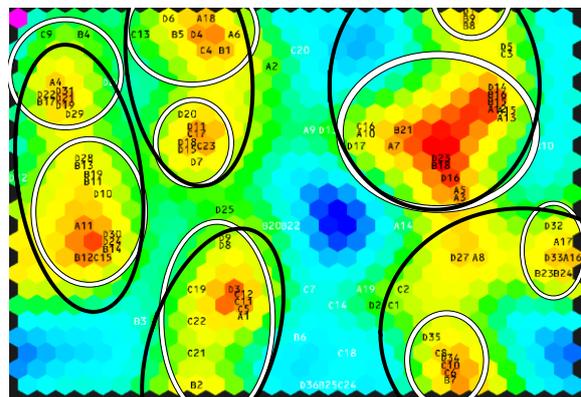


図-2 使用者によるクラスタリング結果の差異

従来、数量化Ⅱ類のみを用いて危険斜面を抽出する机上判定手法は提案されていた<sup>3)</sup>。しかし、数量化Ⅱ類のみを用いた手法では各崩壊斜面の素因の特徴を考慮できない。すなわち、全ての崩壊斜面と非崩壊斜面を合わせて数量化Ⅱ類に適用すると、各崩壊斜面が有している素因の特徴の影響が相対的に小さくなり、解析結果の精度は低下する。それに対して、提案手法は、まず、崩壊斜面のクラスタリングを行い、同一のクラスター内に含まれる崩壊斜面の素因的特徴を統一する。そして、得られた抽出基準毎に数量化Ⅱ類を適用することで、各クラスターの崩壊斜面と類似した特徴を有する危険斜面の抽出が可能となる。

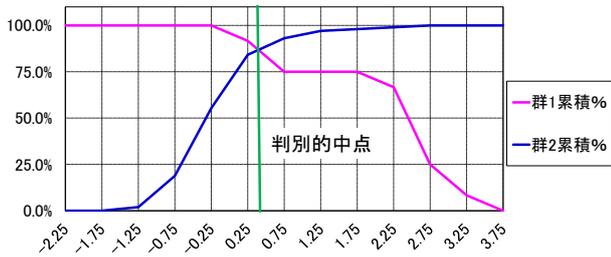


図-3 数量化Ⅱ類の累積判別グラフ

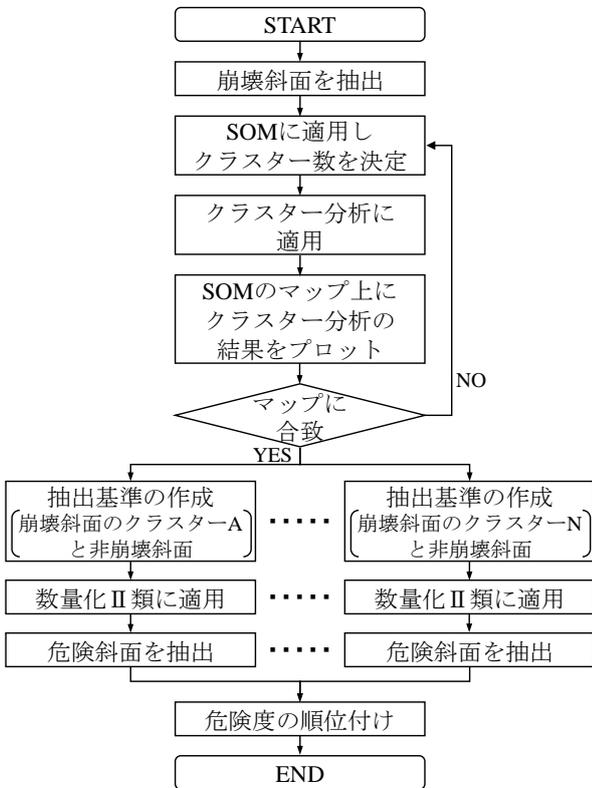


図-4 提案手法のフロー

また、提案手法によって、危険斜面が多数抽出されることが予想される。現場での適用性を考慮すると、危険度の順位付けは必須である。すなわち、危険斜面が膨大に抽出されたとしても、順位付けが行われていれば、危険度の高い斜面からの調査・対策が可能である。ところで、提案手法では複数の抽出基準が作成される。抽出基準毎でカテゴリースコアや判別的中点は異なるので、単純に斜面のサンプルスコアの大きさを比較し、順位付けを行うことはできない。しかし、抽出基準が異なる場合であっても、サンプルスコアと判別的中点の差の比較は可能である。判別的中点は各斜面の崩壊・非崩壊を推定する境界の値(図-3参照)である。このことから、サンプルスコアと判別的中点の差は、各斜面の土砂災害に対する危険度を示していると考えられる。したがって、サンプルスコアと判別的中点の差を比較することで、提案手法によって抽出された危険斜面の順位付けを行うことができる。

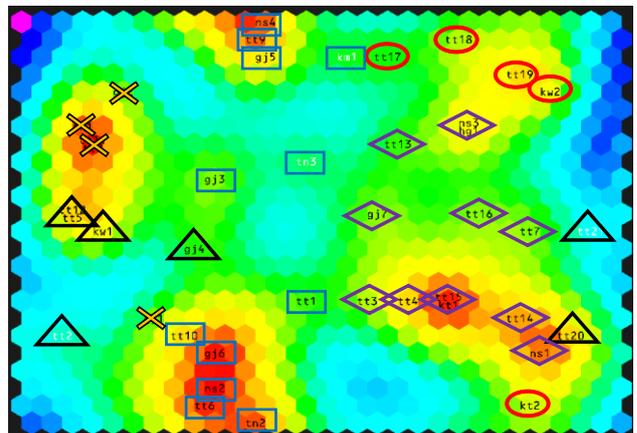


図-5 誤ったクラスター数(クラスター数:5)を入力した場合のクラスタリング結果

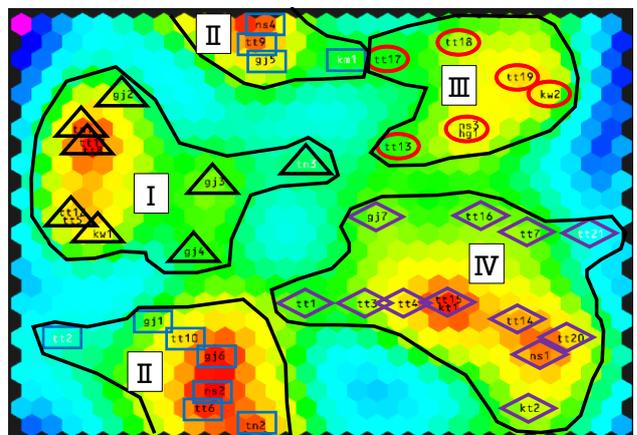


図-6 正しいクラスター数(クラスター数:4)を入力した場合のクラスタリング結果

### 3. 地形情報のカテゴリーデータ化

地形情報を提案手法に適用するためには、地形図等から得られる情報をカテゴリーデータに変換する必要がある。本稿では、地理情報システム（Geographic Information System）を用いて、変換を行った。検討対象斜面は台風12号によって深層崩壊が発生した奈良県内のとある地域の斜面を用いている。まず、図-7に示すように、縮尺1/5000の地形図上に尾根筋と谷筋の線を引く。緑線が尾根筋、赤線が谷筋、青線が川、橙色の部分崩壊斜面を示している。ここで、尾根筋で囲まれた領域が一つの集水域となるので、この集水域を一つの斜面とする。これにより、101ヶ所の非崩壊斜面が抽出できた。また、崩壊斜面に関しては、台風12号によって実際に深層崩壊が発生した奈良県内の41ヶ所の斜面を用いている。

表-1に本稿で用いた斜面評価指標とそれに対するカテゴリーデータを示している。各斜面評価指標の定義については既往の論文<sup>10</sup>に記載している。このデータ（崩壊斜面41ヶ所、非崩壊斜面101ヶ所）を用いて、深層崩壊に対する提案手法の適用性を検証する。

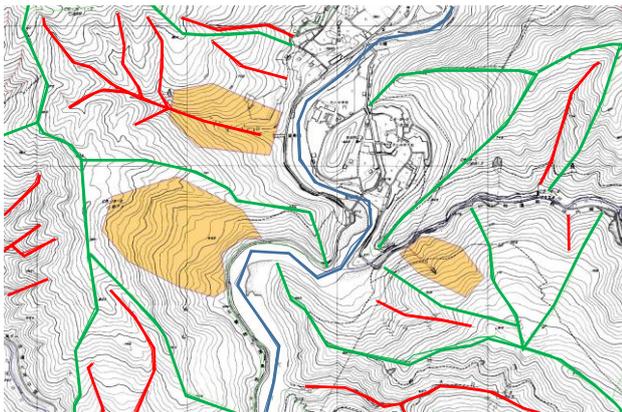


図-7 地理情報システムの適用例

表-1 斜面評価指標とカテゴリーデータ

斜面評価指標		カテゴリーデータ	斜面評価指標	カテゴリーデータ	
谷密度	0	0	0次谷地形	該当しない	
	0~0.003	0.333		該当する	
	0.003~0.005	0.666	該当しない	0	
川or谷	谷	0	遷急線	該当しない	
	川	1		該当する	
攻撃斜面	該当しない	0	遷緩線	該当しない	
	該当する	1		該当する	
乱れ地形	該当しない	0	傾斜	$\theta < 25$	
	該当する	1		$25 < \theta < 30$	0.25
逆地形	該当しない	0		$30 < \theta < 35$	0.5
	該当する	1		$35 < \theta < 40$	0.75
多段式地形	該当しない	0	$40 < \theta$	1	
	該当する	1			

### 4. 解析結果

#### (1) 崩壊斜面のクラスタリング結果

まず、地理情報システムを用いて得られた41ヶ所の崩壊斜面のクラスタリングを行う。SOMとクラスタ分析を併用して得られた崩壊斜面のクラスタリング結果を図-8に示す。図-8の結果から、SOMのマップとクラスタ分析の結果は合致している。ゆえに、この4つのクラスターが最も正確なクラスターであると判断できる。各クラスター内に含まれる崩壊斜面の斜面評価指標に対する分布状況を表-2に示す。

クラスター①に含まれる崩壊斜面は12ヶ所である。特徴としては、遷急線と遷緩線が全ての斜面で該当し、0次谷地形や滑落崖の該当率も高い。しかし、多くの斜面の水は谷に流れ込み、攻撃斜面は該当していない。

クラスター②に含まれる崩壊斜面は12ヶ所である。特徴としては、全ての斜面の水が直接川に流れ込み、攻撃斜面も多く斜面で該当している。しかし、0次谷地形以外の典型的な地すべり地形は概ね該当していない。

クラスター③に含まれる崩壊斜面は8ヶ所である。特徴としては、クラスター①と同様に、斜面の水が谷に流れ込み、攻撃斜面は該当していない。さらに、遷急線や遷緩線の該当率も、他の3つのクラスターと比較して、低いことがわかる。しかし、多段式地形を除く典型的な地すべり地形は、クラスター①やクラスター②よりも多く該当している。

クラスター④に含まれる崩壊斜面は9ヶ所である。特徴としては、全ての斜面評価指標が概ね該当している。このことから、4つのクラスターの中で、最も深層崩壊に対する危険性が高いクラスターであるといえる。

以上のようにして、崩壊斜面を特徴毎に4つのクラスターに分類することができた。

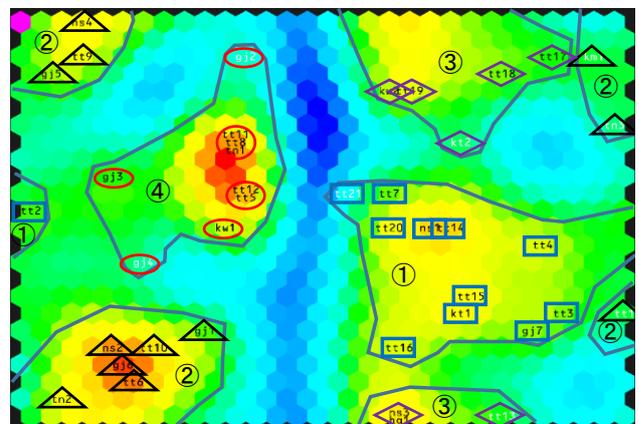


図-8 SOMとクラスタ分析を用いた崩壊斜面のクラスタリング結果

表-2 各クラスターに含まれる崩壊斜面の斜面評価指標  
に対する分布状況

(a) クラスター①

斜面評価指標		該当数	斜面評価指標		該当数	
谷密度	0	0	0次谷地形	該当しない	2	
	0~0.003	4		該当する	10	
	0.003~0.005	5		滑落崖	該当しない	1
	0.005~	3			該当する	11
川or谷	谷	11	遷急線	該当しない	0	
	川	1		該当する	12	
攻撃斜面	該当しない	12	遷緩線	該当しない	0	
	該当する	0		該当する	12	
乱れ地形	該当しない	7	傾斜	0<25	1	
	該当する	5		25<θ<30	5	
逆地形	該当しない	8		30<θ<35	4	
	該当する	4		35<θ<40	2	
多段式地形	該当しない	4	40<θ	0		
	該当する	8				

(b) クラスター②

斜面評価指標		該当数	斜面評価指標		該当数	
谷密度	0	2	0次谷地形	該当しない	0	
	0~0.003	4		該当する	12	
	0.003~0.005	4		滑落崖	該当しない	2
	0.005~	2			該当する	10
川or谷	谷	0	遷急線	該当しない	3	
	川	12		該当する	9	
攻撃斜面	該当しない	3	遷緩線	該当しない	4	
	該当する	9		該当する	8	
乱れ地形	該当しない	10	傾斜	0<25	2	
	該当する	2		25<θ<30	4	
逆地形	該当しない	11		30<θ<35	3	
	該当する	1		35<θ<40	3	
多段式地形	該当しない	11	40<θ	0		
	該当する	1				

(c) クラスター③

斜面評価指標		該当数	斜面評価指標		該当数	
谷密度	0	1	0次谷地形	該当しない	0	
	0~0.003	6		該当する	8	
	0.003~0.005	1		滑落崖	該当しない	1
	0.005~	0			該当する	7
川or谷	谷	8	遷急線	該当しない	4	
	川	0		該当する	4	
攻撃斜面	該当しない	8	遷緩線	該当しない	8	
	該当する	0		該当する	0	
乱れ地形	該当しない	3	傾斜	0<25	0	
	該当する	5		25<θ<30	4	
逆地形	該当しない	2		30<θ<35	3	
	該当する	6		35<θ<40	1	
多段式地形	該当しない	7	40<θ	0		
	該当する	1				

(d) クラスター④

斜面評価指標		該当数	斜面評価指標		該当数	
谷密度	0	2	0次谷地形	該当しない	0	
	0~0.003	3		該当する	9	
	0.003~0.005	3		滑落崖	該当しない	1
	0.005~	1			該当する	8
川or谷	谷	0	遷急線	該当しない	0	
	川	9		該当する	9	
攻撃斜面	該当しない	0	遷緩線	該当しない	0	
	該当する	9		該当する	9	
乱れ地形	該当しない	3	傾斜	0<25	1	
	該当する	6		25<θ<30	5	
逆地形	該当しない	0		30<θ<35	3	
	該当する	9		35<θ<40	0	
多段式地形	該当しない	2	40<θ	0		
	該当する	7				

(2) 数量化Ⅱ類の適用

次に、各クラスターの崩壊斜面に対して非崩壊斜面を合わせて4つの抽出基準を作成し、数量化Ⅱ類に適用した。各抽出基準の数量化Ⅱ類の推定結果を表-3に示す。

表-3の結果から、非崩壊斜面の中で崩壊と推定された斜面は抽出基準Aから10ヶ所、抽出基準Bから11ヶ所、抽出基準Cから12ヶ所、抽出基準Dからは0ヶ所である。本稿では、非崩壊斜面の中で崩壊と推定された斜面を深層崩壊に対する危険斜面としている。これは、非崩壊斜面の中でも、崩壊と推定された斜面は非崩壊と推定された斜面よりも、同程度の降雨が発生した場合に深層崩壊に対する危険性が高いと考えられるためである。表-3の結果を重ね合わせた最終的な推定結果を表-4に示す。この最終的な推定結果は、表-3の推定結果を単純に足し合わせた結果とは多少異なる。これは、複数の抽出基準で崩

表-3 数量化Ⅱ類による推定結果

(a) 抽出基準 A (クラスター①と非崩壊斜面)

		実績群	
		崩壊	非崩壊
推定群	崩壊	11	10
	非崩壊	1	91

(b) 抽出基準 B (クラスター②と非崩壊斜面)

		実績群	
		崩壊	非崩壊
推定群	崩壊	11	11
	非崩壊	1	90

(c) 抽出基準 C (クラスター③と非崩壊斜面)

		実績群	
		崩壊	非崩壊
推定群	崩壊	7	12
	非崩壊	1	89

(d) 抽出基準 D (クラスター④と非崩壊斜面)

		実績群	
		崩壊	非崩壊
推定群	崩壊	9	0
	非崩壊	0	101

表-4 最終的な推定結果

		実績群	
		崩壊	非崩壊
推定群	崩壊	38	31
	非崩壊	3	70

壊と推定された斜面が存在することが原因である。例えば、ある斜面Cが抽出基準Aと抽出基準Cで崩壊と推定された場合、その斜面Cは1つの斜面であるにも関わらず、表-3の結果では2つの斜面としてカウントされている。このような重複を除去して得られた結果が、表-4に示す最終的な推定結果である。表-4の結果から、提案手法を用いて抽出された危険斜面は合計31ヶ所である。

### (3) 危険度の順位付け

数量化Ⅱ類のサンプルスコアと判別的中点の差を用いて、抽出された31ヶ所の危険斜面の順位付けを行った。危険斜面の中で、深層崩壊に対する危険度が高かった斜面の写真を写真-1に示す。写真-1の斜面は、非常に急斜面であり、基盤岩が剥き出しになっている。また、この基盤岩は非常に脆弱であり、所々で湧水が確認された(写真-2参照)。さらに、写真-1の斜面の向かい側に位置する斜面は台風12号によって深層崩壊が発生している。このことから、提案手法を用いて危険度が高いと推定された斜面は、深層崩壊発生の可能性が十分考えられる。したがって、提案手法は深層崩壊に対する危険斜面抽出手法として有効であるといえる。



写真-1 提案手法によって抽出された危険斜面



写真-2 危険斜面における脆弱な基盤岩

## 5. 結語

本稿では、SOMとクラスター分析、数量化Ⅱ類を組み合わせた危険斜面抽出手法を提案し、深層崩壊に対する提案手法の適用性を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 提案手法では、SOMとクラスター分析を併用することで、より正確なクラスタリングが可能となった。
- (2) 提案手法では、数量化Ⅱ類のサンプルスコアと判別的中点の差を用いることで、抽出された危険斜面の順位付けが可能となった。
- (3) 地理情報システムを用いて、地形情報をカテゴリーデータに変換することができた。さらに、それらのカテゴリーデータに提案手法を適用することで、深層崩壊に対する危険斜面を抽出できた。

**謝辞:** 本研究は、新都市社会技術融合創造研究会における「ゲリラ豪雨に対応した道路のり面監視方法に関する研究(H25-)」の成果の一部を活用して行われたものである。貴重なサポートをいただいた関係者各位に誠意を表す。

### 参考文献

- 1) 公益社団法人地盤工学会：平成 23 年台風 12 号による紀伊半島における地盤災害調査報告書，2011.
- 2) 石川芳治他：2013 年 10 月 16 日台風 26 号による伊豆大島土砂災害，砂防学会誌，pp61-72，2014.
- 3) 沖村孝，杉本博：統計学的手法による自然斜面崩壊の研究，土木学会論文集，第 290 号，pp89-97，1979.
- 4) 大加戸彩香，小山倫史，丸木義文，中井卓巳，大西有三：自己組織化マップによる道路斜面点検データの有効活用に関する研究，斜面・のり面の維持管理と防災マネジメントに関するシンポジウム，pp1-6，2011.
- 5) 大北正昭他：自己組織化マップとそのツール，シュプリンガー・ジャパン，pp1-53，2008.
- 6) 菅民郎，藤越康祝：質的データの判別分析数量化Ⅱ類，現代数学者，pp1-191，2011.
- 7) 小田和広，伊藤真一：SOM と数量化Ⅱ類を組み合わせた道路斜面の安定度評価手法の提案，平成 25 年度近畿地方整備局研究発表会，2013.
- 8) 村瀬洋一，高田洋，廣瀬毅士：SPSS による多変量解析，オーム社，pp273-298，2012.
- 9) 千木良雅弘：深層崩壊—どこが崩れるのか—，近未来社，pp1-193，2013.
- 10) Shinichi Ito, Kazuhiro Oda, Keigo Koizumi: A Method for Risk Assessment to Deep-Seated Catastrophic Landslides caused by Heavy Rain based on Artificial Intelligence and Mathematical Statistics, *The 24th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Korea, 2014