

自己組織化マップを用いた 道路斜面の健全性評価手法に関する提案 Soundness evaluation of slopes along national roads using Self-organizing Maps

関西大学 社会安全学部

小山 倫 史

Faculty of Safety Science,
Kansai University

Tomofumi KOYAMA

SUMMARY

In the conventional way of soundness evaluation by Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), Japan, the soundness of road slopes has been evaluated using regular inspection table. However, it has been reported that slope failures occurred in many road slopes which had been judged as “sound”. In this study, therefore, Kohonen’s Self-Organizing Maps (SOM) was applied to evaluate the soundness of slopes along national roads. The SOM is effective tool for clustering and visualizing complex high-dimensional data on a single low-dimensional map, saving information among original data without any external criteria. The objective of this study is to extract unstable road slopes whose features are similar to the ones collapsed in the past using SOM.

Key Words

Slope stability, national road, soundness, Self-organizing maps (SOM)

1. はじめに

我が国は環太平洋造山帯に属し、地盤の隆起と活発な火山活動により国土の約7割が急峻な山地で形成されている。そのため、都市間の交流を図るためには、移動経路に山地を通る必要が生じ、道路や鉄道を斜面下や崖下に建設せざるを得ず、斜面災害は重大な問題である。

従来の道路維持管理手法は、道路防災総点検

要領^[1]に基づき、安定度調査表に記載された点検項目による配点の重み付けの合計によって「対策が必要と判断される（要対策）」、「防災カルテを作成し、対応する（カルテ対応）」、「特に新たな対応を必要としない」の3段階に総合評価を行っている。しかし、この点検手法は、あらかじめ設定されている点検項目を専門技術者（主に地質の専門家）が目視によって評価するもので、マニュアルを用いて安定度調査表を作成し

でも、点検実施者の技量に拠るところが大きく、その判定にばらつきがあるというのが現状である。また、従来の安定度調査表を用いた点数付けによる方法では、補強・補修方法に関する意思決定において、考慮すべき変状要因が陽な形で現れない（評価点数のみ）ため、斜面変状の特徴に合った補強・補修がなされていない可能性がある。さらに、安定度調査表では配点の合計が高い道路斜面ほど健全性が低いと評価されるが、過去に被災した斜面の中に、上記の方法で健全性が高いと評価されたものが含まれているという問題が指摘されている。

平成8年度に実施された国道路防災総点検の結果によると、斜面、法面、擁壁の点検箇所5,699箇所のうち、1,536箇所が要対策、あるいはカルテ対応が必要であると判定されている^[1]。安定度調査表は斜面ごとに作成され、既に膨大な数の点検結果が紙データベースで保存されており、必ずしも維持・補修に関わる意思決定に有効利用されていない。維持・補修の必要な点検箇所が膨大に存在しているため、全ての斜面に対して計器を設置した計測・モニタリング、補強・補修の実施は極めて困難であり、優先順位を付けるなどとして、対策を施すべき道路斜面を抽出する必要がある。

以上の背景より、本研究では、自己組織化マップ（Self-Organizing Maps, 以下SOM）^[2]を用いて、道路斜面のクラスタリングを行い、過去に崩壊した斜面を健全性評価の基準とし、同じ崩壊要因を持つ危険度の高い斜面を抽出することを試みた。

2. 自己組織化マップ（SOM）

2.1 自己組織化マップ（SOM）の概要

SOM（Self-Organizing Maps）は、1982年に Helsinki 工科大学（フィンランド）の Teuvo Kohonen^[2]によって提案され、ニューラルネッ

トワークの一種として位置づけられた人口知能技術である。SOMは、入力データの類似度をSOMの基本的な形の中で描画し、高次元データ間に存在する非線形な統計学的関係を簡単な幾何学的関係を持つ像に変換する。通常は2次元のノード格子状に表示する^[3]（図1参照）。SOMは位相および距離といった最も重要な関係を保存しながら、データの要素を表示画面上に圧縮あるいは写像することができるため、ある種の抽出を生成することができる^[2]。マップ上のノードは、データ空間内の局所的周辺のデータポイントを代表しており、元のデータの次元に対応する次元数のノード値が記憶される。SOMは入力するデータにあらかじめ出力値がどの分類（クラス）に属するかを与える必要がなく、入力データの持つ情報を素直に反映したマップを作成することができる。従来の統計解析・多変量解析とは決定的に考え方が異なり、SOMが示すマップは、「客観的な事実への認識を与えるもの」ではなく、「様々な認識の有り方を客観化して示すことのできる道具」と言える^[2]。地盤工学分野では、斜面崩壊予測システム、吹き付け法面の変状抽出や複合物理探査など様々な分野で用いられている^{[4][5][6]}。

SOMの全体マップを解釈するために重要な

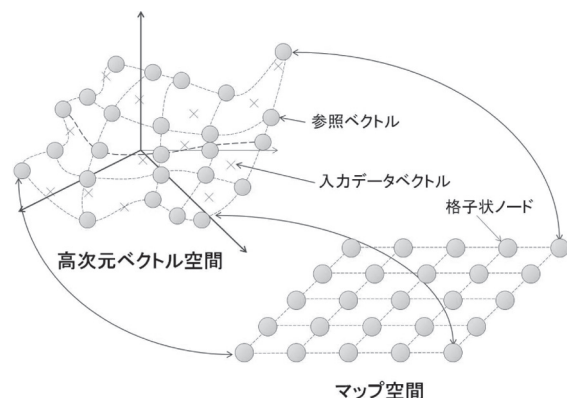


図1 ベクトル空間からマップ空間への写像
（文献[3]に加筆）

が、「要素マップ」(component map: 変数成分のマップ)である。SOMは入力する学習データの次元数と同じ次元数を持った次元要素を持つため、各変数成分だけを抽出して可視化してマップを作成することができる。全体マップと要素マップを比較することで、各要素が全体マップに対する寄与の度合いおよび、要素間の相関関係を分析することができる。

2.2 解析方法^[7]

SOMは、入力データ空間からノードの2次元配列上への写像を定義している。参照ベクトルと呼ばれる全てのモデルベクトル $\mathbf{m}_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}, \dots, \mu_{in}]^T$ はそれぞれノード i と結びつけられている。 \mathbf{m}_i の初期値は乱数を用いて得られる。入力ベクトル $\mathbf{x} = [\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_n]^T$ は可変のスカラの重み μ_{ij} を介して並列に全てのニューロンと結合している。入力ベクトルは全ての \mathbf{m}_i と比較され、最整合の位置が定義される。多くの実際応用ではユークリッド距離 $\|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\|$ を最小にするノードが最整合ノード(勝者ユニット)と定義され、添え字 c によって表わす。

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{m}_c\| = \min \|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\| \quad (1)$$

非線形射影が形成される際には、ある幾何学的距離内までの配列内で位相的に近い複数のノードは、同じ入力ベクトル \mathbf{x} から学習を行う。

$$\mathbf{m}_i(t+1) = \mathbf{m}_i(t) + h_{ci}(t) [\mathbf{x}(t) - \mathbf{m}_i(t)] \quad (2)$$

ここに、 $t = 1, 2, 3, \dots$ は離散的な時間座標であり、関数 $h_{ci}(t)$ は格子に定義される近傍関数である。

$$h_{ci}(t) = h(\|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_i\|, t) \quad (3)$$

なお、 \mathbf{r}_c および \mathbf{r}_i は、それぞれの配列の中で、ノード c と i の位置ベクトルであり、 $\|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_i\|$ が増加するにつれて $h_{ci} \rightarrow 0$ となる。これは、最整

合ノードにより近いノードが遠いノードよりも最整合ノードから大きな影響を受けることを意味している。ノード c の周りの配列点の近傍集合を N_c と定義すると、 $i \in N_c$ ならば $h_{ci} = \alpha(t)$ 、 $i \notin N_c$ ならば $h_{ci} = 0$ とする。ここに、 $\alpha(t)$ ($0 < \alpha(t) < 1$) は学習率係数であり、 $\alpha(t)$ および N_c の半径は双方とも時間について単調減少する。以上、SOMの学習アルゴリズムをまとめると、図2のようになる。

本研究では、学習パラメータについて、マップサイズを 30×24 、学習率係数(1回の学習における強さ)を 0.01、近傍半径 N_c を 30、学習回数 t を 10,000 回と設定して解析を行った。

2.3 本研究で使った SOM

通常使用されている SOM (Basic SOM) は、

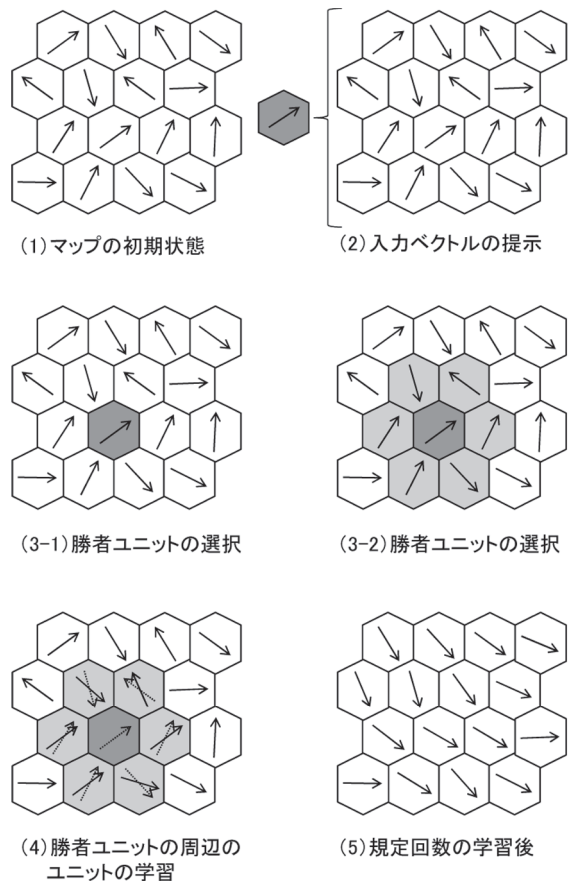


図2 SOMの学習アルゴリズム

学習の際、入力データが学習される位置によって学習量が変化するため、ベクトル同士の関係が正常な位置に配置されないという問題点がある。すなわち、Basic SOMでは、勝者ユニットが中央付近に選ばれた場合と、辺付近に選ばれた場合とで学習量に差が生じてしまう。そこで、マップの上下左右を結合することで学習量の変化をなくしたトーラス型 SOM (Torus SOM) が開発されている^[8]。

Torus SOMは、入力ベクトルを学習するためのユニットが格子状に並んでいる。マップの上下左右のユニットも相互に結合しており、学習円がはみ出した場合は、マップの対称な位置が学習される。このため、入力ベクトルは入力ベクトルと最も似た重みベクトルを持つ勝者ユニットの位置に拠らず均等に学習され、Basic SOMよりも正確なマップが作成される。従って、本研究では Torus SOM^{[8][9]}を用いた。

3. SOMの道路斜面健全性評価への適用

従来、道路斜面の健全性評価に必要な点検は、道路防災総点検や道路巡回など、主に目視観察による判断に依るものであった。しかし、今後、効率的な斜面管理を行うためには、斜面の健全性を定量的に評価することが望ましく、例えば、物理探査手法の導入により弾性波速度値 (P波、S波) などの物性値変化から判定する方法^[5]が研究されているが、探査手法が多岐にわたるなど、道路管理者側での合理的な選択に課題が残されている。

SOMは、多次元データレコードをそのデータ空間での位相を保存した状態で低次元 (主に2次元) に写像することができる。分類基準 (外的基準や教師信号) を外部から与えることなしに、多次元のデータ空間に存在する非線形な統計学的関係を、データ空間の繋がり (位相) を保持しながら、視覚的に認識可能なマップ上に

表現することに特長がある。

道路斜面のデータは多くの点検項目からなる多次元データであると解釈でき、紙データベースの既存の点検結果が膨大な数存在しているということを考慮すると、SOMを用いれば、その多数存在する多次元データを2次元 (あるいは3次元) 空間上に可視化することで効果的に整理できる。SOMはデータ空間の位相的順序を保持しながらクラスタリングすることができるため、変数間で非線形な関係性があるデータにおいても適用することができる。従来採用されてきた多変量解析は、予測を偏向させる特異な値が入っていないかなどの外的判断による範囲の規定が必要であったが、SOMを用いることで、予測に基づく特異値の除外をせずにデータセットを解析することが可能であり、入力データと地盤の工学的パラメータの相関について事前に検討する必要がないという利点が挙げられる。

3.1 道路斜面の点検データおよび評価項目

道路斜面健全性評価検討委員会 (平成17~19年度、国土交通省近畿地方整備局) で整理された防災点検結果に長期劣化着目項目を含んだ斜面地域別の入力データセットを作成し、SOMにより危険度の高い斜面を抽出する。なお、今回SOMに入力する20個の入力項目は、表1に示すように安定度調査表の結果に基づいており、各項目 (要因) に該当するか否かといった本来数値で表されていない質的な結果を0から1の間の値で数値化している。

国土交通省近畿地方整備局管内の河川国道・国道事務所における自然斜面の点検データのうち、平成8年度の道路防災総点検時に落石・崩壊を対象とした斜面270箇所を用いてSOMによる解析を行った。本研究では、膨大に紙データベースで存在する既存の安定度調査表を利用して道路斜面の健全性を再評価することを目的

表1 安定度調査の点検項目に基づく入力ベクトルと入力値

項目	入力項目	評点区分	入力値	項目	入力項目	評点区分	入力値
地形	崖錐地形	該当する	1	表層の状況	湧水状況	湧水あり	1
		該当せず	0			しみ出し程度	0.5
	崩壊跡地	該当する	1			なし	0
		該当せず	0		表面の被覆状況	裸地～植生主体	1
	遷急線明瞭	該当する	1			複合	0.5
		該当せず	0			木主体	0
	台地の裾部	該当する	1	変状	当該斜面の変状	複数該当・明瞭なものあり	1
		該当せず	0			あり・不明瞭なもの	0.5
	脚部浸食	該当する	1			なし	0
		該当せず	0	隣接する法面・斜面等の変状	複数該当・明瞭なものあり	1	
	オーバーハング	該当する	1		あり・不明瞭なもの	0.5	
		該当せず	0		なし	0	
	集水型斜面	該当する	1	形状	高さ	$H \geq 50m$	1
		該当せず	0			$30 \leq H < 50$	0.6
土石流跡地	該当する	1	$15 \leq H < 30$			0.3	
	該当せず	0	$H < 15$			0	
尾根先端等凸型斜面	該当する	1	勾配	$i \geq 70^\circ$	1		
	該当せず	0		$45^\circ \leq i < 70^\circ$	0.5		
				$I < 45^\circ$	0		
土質・地質	崩壊性の土質	顕著	1	構造	崩壊性の構造（流れ盤）	該当する	1
		やや顕著	0.5			該当せず	0
	該当せず	0	崩壊性の構造（不透水基盤上の土砂）		顕著	1	
	崩壊性の岩質	顕著			1	やや顕著	0.5
		やや顕著			0.5	該当せず	0
	該当せず	0					
表層の状況	表土及び浮石・転石の状況	不安定	1				
		やや不安定	0.5				
		安定	0				

としているため、入力項目（属性）は地形・構造、土質・地質などの安定度調査表の要因（素因）項目とした（表1参照）。

270箇所データのうち4箇所は過去の被災（斜面崩壊）箇所であり、健全性の低い斜面の基準とした。SOMのマップ上でこれらの斜面と類似性が高いと判断された斜面は、同様の要因により崩壊する可能性が高く、健全性が低いと言える。なお、本研究で用いた過去の被災箇所のうち、F26、F33、F36は平成21年の8月9日から10日にかけての台風9号に伴う大雨によって被災（斜面崩壊）したことが分かっている。

3.2 SOMによるクラスタリングの結果

学習後のSOMによるマップ上での各道路斜面の分布を図3に示す。全体マップを3次元のマップとして表示すると、図4のようになる。類似性の高いデータの集合を意味するクラスターは、山を形成している部分に当たる。この際、色によって類似度の度合いが模式的に示される。近接した参照ベクトル m_i の平均距離が小さいなら青色が用いられ、赤い色合いは距離が近いことを示す際に用いられる^{[2][8][9]}。

SOMによるマップは、2次元平面のノード上に、データを、位相的近傍の順序に配置させる

ため、縦・横方向は直行座標系を意味するものではなく、データがどの様に分布するかを読み取ることで分析を行う。また、データ間のユークリッド距離の大小によって判断される類似度が2次元のノード格子上に写像される。本研究では、実際の被災箇所を、危険度の基準として用いており、これらと類似性の高い斜面を、被災箇所と同じ崩壊要因を持つ可能性が高く、優先的に変位の計測・モニタリングや補修などの対策を施すべき道路斜面として抽出する。

図3、4より全体マップは5つのクラスタに分類でき、それぞれ、クラスタ A, B, C, D, E と名付け、入力項目（要因）ごとに得られる20個の要素マップを用いて考察を行った。なお、各斜面の名称について、番号の前の記号K, KY, F, H, HY, T, Oは各々斜面を管轄している河川国道・国道事務所の地域を表している。また、健全度評価の基準となる4箇所の過去の被災箇所（F26, F33, F36, K30）を図3中の○印で示す。

全体マップと要素マップを重ね合わせて感度分析を行うことにより、クラスタ区分に対する成分の影響や各成分と実際の被災箇所との関連性を把握することができる。なお、要素マップは全体マップへの要素の寄与度が階調濃淡によって表されており、黒色が濃いほど寄与度が大きいことを示している（図5参照）。以下に、分析結果の考察をまとめる。

- (a)クラスタ A は、「隣接する法面・斜面等の変状」、「勾配」の影響が認められる。また、クラスタ A は詳細に分類するとクラスタ A-1, A-2に区分することができる。クラスタ A-1は、「尾根先端等凸型斜面」、「不透水基盤上の土砂」の影響が認められ、クラスタ A-2は、特に「流れ盤」の影響が認められる。
- (b)クラスタ B は、「集水型斜面」、「崩壊性の土質」、「不透水基盤上の土砂」の影響が認めら

れる。

- (c)クラスタ C は、「崩壊跡地」、「崩壊性の土質」の影響が認められる。クラスタ Cには実際の被災箇所 F26 が配置され、同じクラスタに分類された斜面は、被災箇所と同じ崩壊要因を持っている可能性があり、優先的に計測・モニタリングを行う必要があると考えられる。また、対策工を検討する際には、クラスタ C に影響の認められる要因を踏まえた補強・補修対策を行う必要がある。
- (d)クラスタ D は、「崖錐地形」、「崩壊跡地」、「尾根先端等凸型斜面」、「崩壊性の土質」、「隣接する法面・斜面等の変状」、「流れ盤」の影響が認められる。

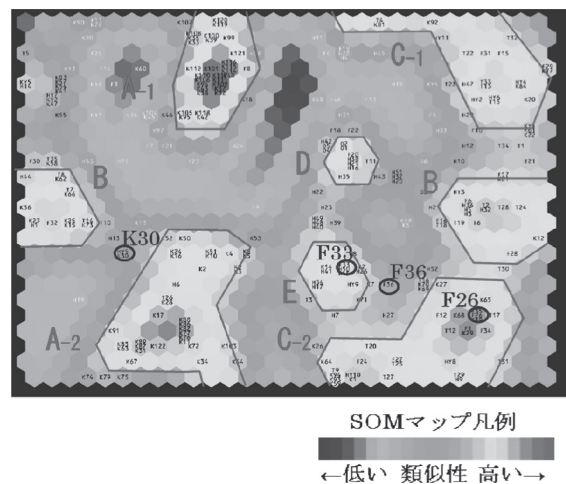


図3 素因項目による全体マップ

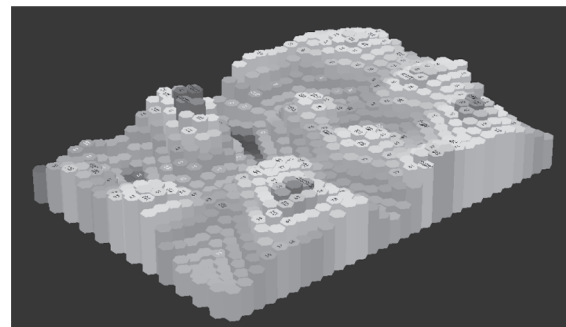


図4 全体マップの3次元表示

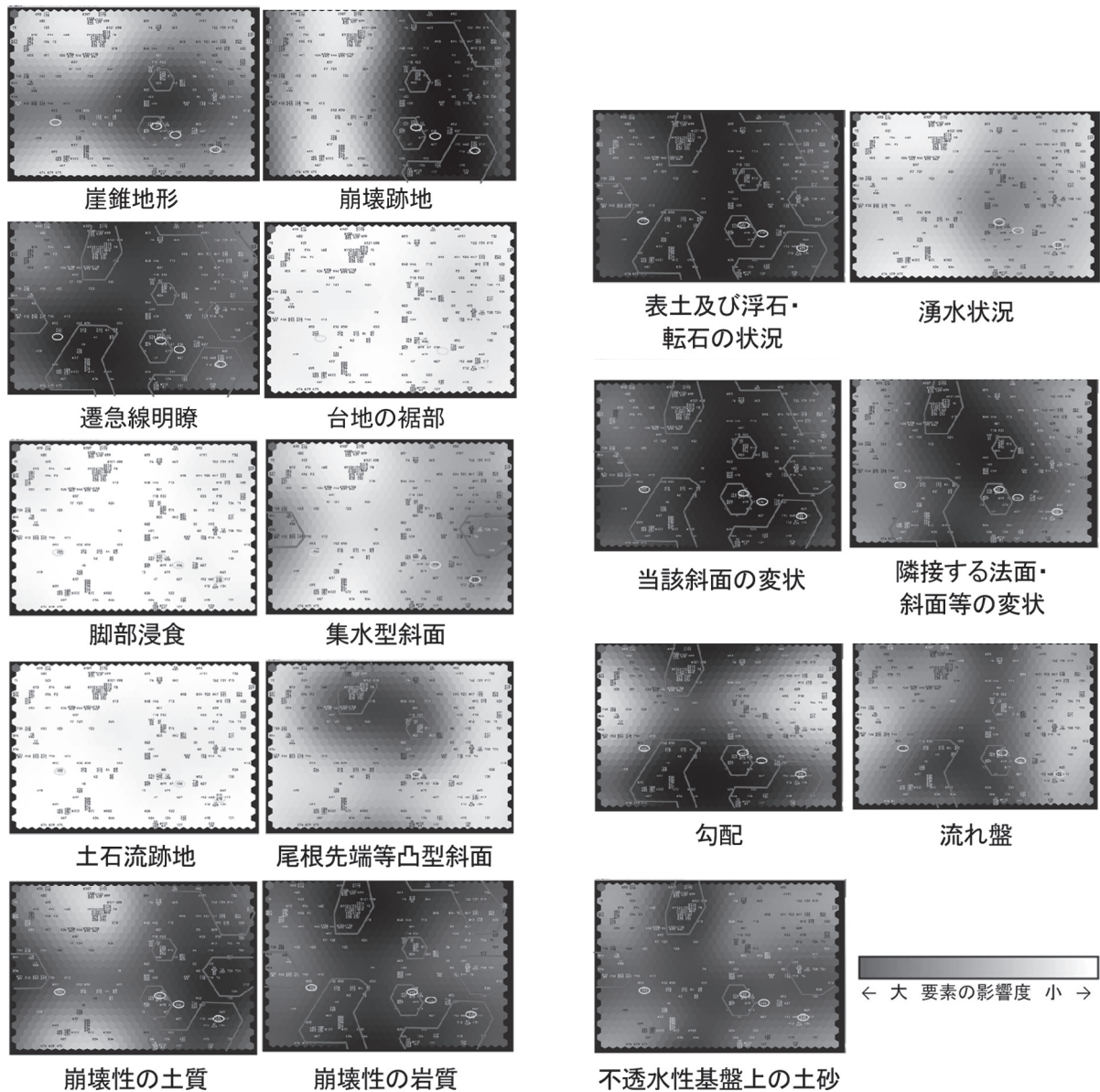


図5 要素マップの一部

(e) クラスタ E は、「崖錐地形」、「崩壊跡地」、「崩壊性の土質」、「隣接する法面・斜面等の変状」、「勾配」、「流れ盤」、不透水基盤上の土砂」の影響が認められ、クラスタ E には、実際の被災箇所 F33 が配置され、同じクラスタに分類された斜面は、被災箇所と同じ崩壊要因を持っている可能性があり、優先的に計測・モニタリングを検討する必要がある。また、対策工を決定する際には、クラスタ E に影響

の認められる要因を踏まえた補強・補修対策を行う必要がある。

(f) 「台地の裾部」、「脚部浸食」、「土石流跡地」は要素マップ全体が白く表示されている。このことは、上記の項目に該当する道路斜面が少なく、健全性評価に与える影響がほとんどないことを意味する。また、「湧水状況」、「表面の被覆状況」は要素マップ全体が灰色で表示されている。従って、これらの項目も健全性

評価に与える影響がほとんどないことを示している。特に、地下水は、斜面崩壊の重要な要因の一つであるが、「湧水状況」は全体マップにほとんど関与していない。これは、地下水の情報として「湧水状況」のみが点検項目として挙げられているが、湧水量の調査方法が確立されておらず、定量評価がなされていないことが原因であり、今後検討を要する課題として挙げられる。

(g)「崩壊性の岩質」, 「浮石・転石の状況」, 「当該斜面の変状」はほとんどの斜面に該当し、そのためマップ全体が黒く表示されている。従って、これらの項目は今回対象とした地域の多くの斜面に共通して見られることを意味する。

(h)実際の被災箇所4箇所には、「遷急線明瞭」, 「崩壊性の土質」, 「浮石・転石の状況」, 「当該斜面の変状」, 「勾配」, 「不透水基盤上の土砂」の影響が共通して見られる。「遷急線明瞭」, 「浮石・転石の状況」, 「当該斜面の変状」の項目は、多くの斜面に共通して見られるのに対し、「崩壊性の土質」, 「勾配」, 「不透水基盤上の土砂」は被災した斜面近傍のみに現れることから、これらの項目は健全性評価において重要な点検項目であると考えられる。

以上のように、SOMを用いることで、これまで膨大な数の紙データベースで保存されていた安定度調査表による点検結果を全体マップ1枚に集約することが可能となった。また、要素マップを用いて感度分析を行うことで、斜面をその特徴ごとに分類することができた。本論文では、安定度調査表の項目である要因（素因）のみを考慮して健全性評価を行ったが、実際の災害は素因が災害を引き起こす条件を満たした斜面に、何かしら「誘因」（地震や降雨など）が作用して発生するものであり、今後、「素因」と「誘因」をあわせて分析する必要がある。

4. 結論

本研究では、国土交通省近畿地方整備局による道路防災総点検により得られた道路斜面の安定度調査表を基に、自己組織化マップ（SOM）を用いて、変状のモニタリング・計測、補強・補修などの対策を優先的に施すべき道路斜面の抽出を試みた。以下に本研究より得られた知見をまとめる。

- 類似性の高いデータがマップ上でクラスタを形成する」という SOM の特徴を利用することで、過去に被災した斜面を基準とし、これらと同じ崩壊要因を持ち、優先的に対策を施すべき斜面を抽出することができる。また、全体マップと要素マップを重ね合わせて感度分析をすることで、抽出された斜面と過去の被災箇所がどの要素を共通して持っているのか把握することができる。本論文では、過去の被災箇所と同じクラスタに分類された斜面の健全度が低い、すなわち崩壊の可能性が高いとして抽出したが、被災箇所が分類されなかったクラスタが必ずしも健全性が高いことを示しているとは限らないため、今後、斜面安定性および健全性の関係について定量的に評価することも重要であると考えられる。
- 安定度調査表の点検項目を基に作成した入力項目を用いて、図3に示す全体マップを作成した。今回、過去の被災箇所4箇所を健全性の基準として用いているが、共通して「崩壊性の土質」, 「勾配」, 「不透水基盤上の土砂」の要素の影響が見られた。「崩壊性の土質」が該当するのは浸食に弱い土質、水を含むと強度低下しやすい土質、その他に未固結の崩積土及び落石・崩壊が多発しやすい当該地域特有の土質の場合である。従って、降雨が発生した際には、強度低下が発生しやすい斜面であった可能性がある。今後、過去の被災箇所

のデータを増やしてマップを作成することで、どのような要因が重要な点検項目であるのか把握することができると考えられる。

- 「湧水状況」は全体マップにほとんど寄与していなかった。これは「湧水状況」という項目が、点検を実施した時期によって大きく影響され（すなわち、降雨の直後に点検を実施すれば、湧水が観察されるケースが多くなる）、点検で地下水の情報が充分把握されていないことが原因であると考えられる。地下水の情報を取得するためには、常時、計測・モニタリングを実施することが望ましいが、全ての斜面についてこれらを実施することは困難である。従って、地下水情報を健全性評価に反映させるためには、点検レベルで確認できる簡易な計測・モニタリング手法の確立が必要である。

謝辞

本稿は国土交通省近畿地方整備局、新都市社会技術融合創造研究会、「ゲリラ豪雨時における道路斜面安定性評価に関する研究」（2010～2013年）の一環で実施したものである。関係各位に記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- [1] 財団法人道路保全技術センター (2006). 平成

18年度道路防災総点検要領 (豪雨・豪雪等)。

- [2] T.コホネン (2005). 自己組織化マップ 改定版, シュプリンガー・ジャパン, pp.172-173.
- [3] 古川徹生, 自己組織化マップ Self-Organizing Map とは : <http://www.brain.kyutech.ac.jp/~furukawa/data/som.html> (2016年1月15日確認)
- [4] 白木渡, 長瀬裕俊, 宮下英明, 伊藤則夫 (1998). 自己組織化マップ (SOM) を用いた斜面崩壊予測システム 構造工学論文集 Vol.44A pp.453-459.
- [5] 田村祐樹, 藤村尚 (2005). 自己組織化マップによる熱赤外線画像処理と吹き付けのり面劣化に関する研究 第40回地盤工学研究発表会講演概要集 pp.77-78.
- [6] 宮川歩夢, 辻健, 松岡俊文, 山本剛 (2010). 自己組織化マップを用いた複合物理探査による堤防内土質性状の分類 土木会論文集 C Vol.66, No.1 pp.89-99.
- [7] 島崎尚史, 瀬木寛人, 松浦弥三郎, 大木誠, 大北正昭 (2006): トーラス型自己組織化マップのための追加学習法の提案および検討 第7回自己組織化マップ研究会2006 講演番号 : SOM2006-07.
- [8] 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎 (2005). 自己組織化マップの応用 海文堂出版, pp.3-10.
- [9] 徳高平蔵, 大北正昭, 藤村喜久郎 (2007). 自己組織化マップとその応用 シュプリンガー・ジャパン.

(原稿受付日: 2016年1月26日)