

既存データを活用した自己組織化マップによる優先順位付き土中水分量計測のり面 抽出手法の提案

Proposal for a Technique with Self-organizing Map for Ordering Slopes in which Moisture Content should be Measured

櫻谷慶治 Keiji SAKURADANI (西日本高速道路株式会社)
松本聡碩 Akihiro MATSUMOTO (大阪大学工学部)
伊藤真一 Shinichi ITO (大阪大学大学院工学研究科)
小泉圭吾 Keigo KOIZUMI (大阪大学大学院工学研究科)
小田和広 Kazuhiro ODA (大阪大学大学院工学研究科)

高速道路では、通行車両の降雨時土砂災害被災を防ぐため事前通行規制が実施されているが、通行規制実施後も災害が発生しない空振り事例や、通行規制実施前に災害が発生する見逃し事例が報告されている。著者らはこの問題解決のため、土中水分量を指標とする危険度評価の研究を進めている。同指標を活用するには、高速道路上での計測点を明らかにする必要がある。そこで本論文では、既存データを活用して、西日本高速道路株式会社が管理する多数の高速道路のり面の中から土中水分量を計測すべきり面を優先順位付きで抽出する自己組織化マップを活用した手法を提案する。同手法により、747のり面の中から23のり面を優先順位付きで抽出した。

キーワード：防災点検、高速道路のり面、表層崩壊、自己組織化マップ (IGC : G13)

1. はじめに

我が国は自然災害が多く、その対応と対策は各施設管理者にとって常に課題となっている。道路管理においては、昭和43年の飛騨川バス転落事故を契機にその管理施策が大きく見直され、道路防災点検や降雨時事前通行規制の導入、必要な対策工の施工がなされている。西日本高速道路株式会社(以下NEXCO西日本)においても高速道路供用開始前の初期点検、車上目視や車上感覚による日常点検、近接目視かつ触診や打音による詳細点検など多くの点検¹⁾が実施されており、その結果、切土、盛土、トンネル、橋梁など工種毎に膨大なデータが蓄積されている。ただし、点検結果と発生した変状や災害との関係性を定量的に評価することは難しく、現状では中期計画立案に活用されるに留まっている。

高速道路における降雨時事前通行規制²⁾は、昭和48年に連続雨量による基準が導入されたのが始まりである。以降、全国の高速道路へ展開され、平成13年には組合雨量基準の追加と連続雨量の定義の統一(2mm/h以下6hでリセット)がなされ、現在では全ての高速道路で統一された設定方法に基づき、区間毎に設定された基準値によって運用されている。しかし、通行規制実施後も災害が発生しない空振り事例や、通行規制実施前に災害が発生する見逃し事例の報告もあり、規制基準の設定方法の改善や指標の変更、追加といった対応が検討されている。

ところで、高速道路におけるり面災害では表層崩壊

に起因するものが多くの割合を占めている。著者らは、表層崩壊に対して降雨量より直接的な誘因である土中水分量に着目した研究³⁾を進めている。この研究を通じ、降雨時における土中の擬似的な飽和状態の発現後に変位が発生することが確認されている。したがって、土中水分量を計測することは、防災対策上有効であり、現行基準を補足するための新たな指標になると考えられる。ただし、この技術の実用化のためには、NEXCO西日本が管理する約3,500kmの高速道路の中から土中水分量を計測すべきり面を抽出するという課題が残されている。そこで、本論文では土中水分量を計測すべきり面を、既存のデータを活用し抽出する手法を提案することを目的とした。

抽出手法を検討する上で、土中水分量の計測のり面に着目した研究は、著者らの知る限り行われていなかったため、類似の手法として危険斜面を抽出する手法を参考とした。既往の危険斜面抽出手法としては、まず、採点方式によるものが挙げられる⁴⁾。この手法は、a) 崩壊発生に影響する要因(斜面評価指標)、b) 各要因の内容(カテゴリー)、c) カテゴリーに与える崩壊発生への評点(カテゴリースコア)、d) 評点の和から崩壊か、非崩壊かを判断する基準点(判別的中点)の4種類の内容をあらかじめ専門家が決めておき、これらの情報を活用して、危険度を判定する手法である。この手法は、調査すべき項目があらかじめ決定されているため、利便性が高いものの、カテゴリースコアや判別的中点の決定は専門家の経験的な知識に依るものであり、客観性に欠けると

いう問題点も有している。NEXCO 西日本では、採点方式で取りまとめたのり面のデータを既に保有しており、本論文において、著者らはその活用方法について検討を行った。

次に、統計学的手法による危険斜面抽出手法が挙げられる。代表的なものとして数量化Ⅱ類があり、近年では、競合学習型ニューラルネットワークの一種である自己組織化マップ^{5)~8)} (Self-Organizing Map, 以下 SOM. 詳細は後述) も注目されている。日外ら⁹⁾は、岩盤斜面の危険度評価に関して、現地調査結果に数量化Ⅱ類を適用し岩盤崩落に対する危険度を推定するシステムを提案している。更に、現地調査結果の異常値を SOM 解析により選定し、危険度推定には用いないことで精度向上が図られたことを報告している。白木ら¹⁰⁾は、斜面崩壊全般を対象に崩壊時の降雨量と崩壊規模を推定する既存システムに対し、SOM 解析を用いて推定に用いるデータの絞り込みを行い、推定精度の向上が図られたことを報告している。また小山¹¹⁾は、防災総点検結果に対し SOM 解析を行い、更に過去の被災履歴のデータと重ね合わせることで、クラスタ毎の健全度を評価し健全性の低い斜面を抽出できることを報告している。いずれの場合も、SOM が斜面の特徴を分類することに有効であることを示しており、本研究の目的に対して適用可能であるといえる。ただし、SOM 解析におけるクラスタリングは主観的な判断に任されており、客観的でないという欠点を有している。一方、SOM 以外のクラスタリング手法として、ベクトル集団間の距離や類似度を用いて、客観的にクラスタリングを行うクラスタ分析¹²⁾がある。ただし、クラスタ分析はクラスタの個数をあらかじめ決定しなければならず、クラスタ数の決定に誤りがあるとクラスタ分析の結果が意味をなさないという欠点を有している。

以上述べてきた既往の危険斜面抽出手法を踏まえ、本論文では既往の手法を併用することでそれらの欠点を補完し、土中水分量を計測すべきのり面の抽出手法の提案を行う。具体的には、まず、NEXCO 西日本が保有する評点が与えられている切土のり面データに対し SOM 解析を行いクラスタの個数を決定する。次に、その個数を用いたクラスタ分析を行い、クラスタリングを行う。そしてクラスタ間の優先順位付けとしてクラスタ内の災害発生頻度に着目し、更に同一クラスタ内の優先順位付けとして切土のり面の評点を活用することを新たに提案する。すなわち、第 1 章では、研究の背景と目的を述べる。第 2 章では、使用した切土のり面データについて紹介する。第 3 章では、SOM とクラスタ分析を用いて切土のり面をクラスタリングする。第 4 章では、第 3 章のクラスタリング結果を用いて土中水分量のモニタリング候補地の優先順位付けを行う。第 5 章では、第 3 章及び第 4 章の結果に基づき、対象のり面の抽出手法をとりまとめる。最後に、第 6 章で本論文を総括し成果と展望について述べる。

2. 使用したデータ

2.1 本章の概要

NEXCO 西日本では、高速道路の供用開始前の初期点検を始め様々な点検が実施されており、それら点検結果や変状、災害の履歴といった膨大なデータが蓄積されている。本章では、これらデータの中から分析の対象としたデータの概要と、更に分析のために行ったデータの絞り込み及びデータ項目の再整理について述べる。

2.2 対象データの概要

本研究では、土中水分量を計測すべきのり面を抽出する手法を提案することが目的であることから、のり面を評価している調書を活用することとした。特に、土中水分量の計測地の選定のためには、当該のり面の保護工情報や、さらに崩壊危険度を評価するような土質情報、地形情報も含まれているものが求められる。そのような条件から、本研究では切土のり面安定度評価表（以下評価表）を用いることとした。表-1 は評価表の評価項目一覧を示している。評価表は点検要領¹³⁾に基づいて実施される道路防災点検で使用される安定度調査表を基に、いくつかの評価項目を追加し作成した、NEXCO 西日本独自の個々の切土のり面カルテである。評価表の主たる評価項目は「地形」、「土質・地質・構造・地下水」、「対策工」、「変状」等の 4 つである。以下に追加したそれらの内容と主な評価方法について説明する。

まず、「地形」として、①のり面が位置する箇所の後背地における形状（のり面と後背地）、②これまでの高速道路を管理する上で得られている崩壊に起因する後背地の変状（後背地の変状）、③のり面高さの 3 項目を設定した。更にそれぞれの項目について要因を設定した。すなわち、①のり面と後背地については、集水地形、地すべり地形、崩壊地形、崖錐地形、尾根斜面の 5 つ、②後背地の変状については、亀裂・段差、凹地、池沼、湿地・親水植物の 4 つを設定した。③のり面高さは 4 段階の高さ区分に分割し要因とした。

「土質・地質・構造・地下水」として、①表層土、②地質、③地質構造の 3 項目を追加した。①表層土については、その厚さに関する 3 段階の区分に不明を加えた 4 つの要因、②地質については、砂岩、泥岩など 4 つの区分に不明を加えた 5 つの要因、③地質構造については、流れ盤、断層、不明の 3 つの要因をそれぞれ設けた。

「対策工」は、道路建設時またはその後の補修や対策工の効果を評価し、危険度を下げるために追加した。路面に最も近い 1 段目ののり面保護工の種別、のり面全体の代表的な保護工の種別、落石対策工の有無、表面の被覆状況、のり面勾配の 5 項目を設定した。各項目の中には、それぞれ 3 から 5 つの要因を設けている。

「変状」等は、詳細点検等の結果からのり面損傷の記録を安定度に反映させるために追加した。のり面そのものの変状を、プロテクトがある場合と無い場合とでそれ

ぞれ区分している。また、排水施設の損傷に関して3つの要因に区分した。最後に、供用開始後5年未満の災害発生件数が多く15年以上では少なくなるという既往の災害履歴情報から、供用期間区分も同様に追加した。

ところで、表-1は、項目、要因、該当の有無、項目番号のみを示しているが、実際の評価表では要因毎に評価点が設定され、更に4つの崩壊形態(地すべり、のり面崩壊、表層崩壊、落石)に対して要因の重み係数を設定しており、のり面毎の崩壊形態に応じた評価点が算出されている。本論文では、既存のデータのあり方に関しては議論しないため、簡単のためその部分を省略した。なお、NEXCO西日本では約3,500kmの高速道路を関西、中国、四国、九州の4地域に分割し管理を行っているが、本評価表は関西管内で試行的に作成されたものであり、3,782の切土のり面で作成されている。本研究では、このうち連続する約120kmの高速道路区間を代表路線として抽出し、747の評価表を対象として分析することとした。

2.3 データの絞り込み

土中水分量を計測すべきのり面を抽出するため、まず一次スクリーニングを実施した。本論文では「過去に表層崩壊が発生しているのり面と地形・地質の特徴が似ているのり面は危険度が高い」という前提に基づき分析を行う。ただし、対策工の状況や供用期間などにより危険度は異なるものと考えられる。前節で述べたように、評価点はこれらを総合的に考慮して算出されているため、点数の高いのり面を分析対象として絞り込むことは合理的な方法であるといえる。

ここで、分析対象とした747の評価表の評価点のヒストグラムを図-1に示す。なお、ここでの評価点は、土中水分量を評価することによって捉えられる災害種別である表層崩壊に対する重み係数を用いて算出されているものである。評価点が70以下の階級に多くのデータが集中していることがわかる。そこで、絞り込みの対象を評価点が71以上の階級とし、その結果、40のり面を抽出した。また、同階級に属さないものの表層崩壊履歴のあるのり面が10のり面存在していたが、上述した前提で分析を行うため、これらも分析対象として追加した。以上より分析対象として計50のり面を抽出した。

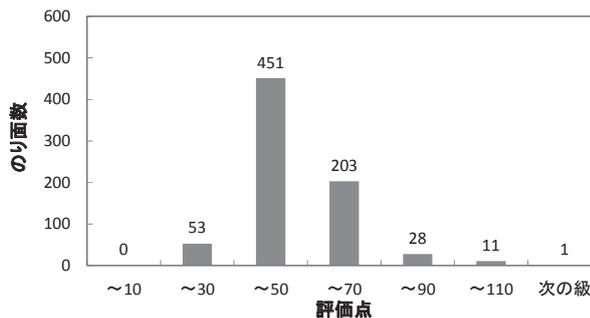


図-1 のり面安定度評価表の評価点ヒストグラム

表-1 切土のり面安定度評価表

| 路線名 | ●●自動車道 | ●●●高速道路事務所 | KP(自～至) | |
|--------------|--|---------------------------------|-------------|------|
| 地層名 | ●●層群 | No | のり面高(m) | |
| 項目 | | 要 因 | 該当の有無(1or0) | 項目番号 |
| 地形 | 法面と後背地 | 集水地形 | 0 | 1 |
| | | 地すべり地形 | 0 | 2 |
| | | 崩壊地形 | 0 | 3 |
| | | 崖錐地形 | 0 | 4 |
| | | 尾根斜面 | 0 | 5 |
| | 後背地の変状 | 亀裂、段差 | 0 | 6 |
| | | 凹地 | 0 | 7 |
| | | 池沼、湧水 | 0 | 8 |
| | | 湿地、親水性植物 | 0 | 9 |
| | のり面高さ | 15m以下 | 1 | 10 |
| | | 15～30m | 0 | 11 |
| | | 30～50m | 0 | 12 |
| | | 50m以上 | 0 | 13 |
| 小計 | | | | |
| 土質・地質・構造・地下水 | 表層土(段丘、崖錐、風化土) | 厚さ 1m以下 | 0 | 14 |
| | | 厚さ 1～3m | 0 | 15 |
| | | 厚さ 3m以上 | 0 | 16 |
| | | 厚さ 不明 | 1 | 17 |
| | 地質(神戸層群(二上層群)(三紀層)) | 礫岩・砂岩 | 0 | 18 |
| | | 砂岩・泥岩 | 0 | 19 |
| | | 泥岩・凝灰岩主体 | 0 | 20 |
| | | 砂岩・泥岩・凝灰岩・亜炭 | 0 | 21 |
| | 地質構造 | 岩種不明 | 1 | 22 |
| | | 流れ盤 | 0 | 23 |
| | | 断層(破砕帯等)、向斜軸付近 | 0 | 24 |
| | 崩壊履歴 | 不明 | 1 | 25 |
| | | 表層崩壊履歴あり | 0 | 26 |
| | | 崩壊履歴あり | 0 | 27 |
| | | 地すべり履歴あり | 0 | 28 |
| | 落石 | 不明 | 0 | 29 |
| | | 浮石・転石多数 | 0 | 30 |
| | | 浮石・転石あり | 0 | 31 |
| | | 落石履歴・小落石あり | 0 | 32 |
| | 地下水 | 不明 | 1 | 33 |
| | | 湧水あり | 0 | 34 |
| | | しみ出し程度(植生あり) | 0 | 35 |
| 湧水なし(植生なし) | | 0 | 36 | |
| 小計 | | | | |
| 対策工 | 1段目のり面(代表工種1～5を選択) | (1)吹付け工・切土補強土工 | 0 | 38 |
| | | (2)吹付けコンクリート | 0 | 39 |
| | | (3)ブロック積みコンクリート | 0 | 40 |
| | | (4)防火ブロック | 0 | 41 |
| | | (5)植生工 | 1 | 42 |
| | のり面工(代表工種1～5を選択) | (1)抑止杭・グラウンドアンカー工(のり枠工又は支圧板等含む) | 0 | 43 |
| | | (2)吹付け工・切土補強土工 | 0 | 44 |
| | | (3)コンクリート及びモルタル吹付け工 | 0 | 45 |
| | | (4)その他 | 0 | 46 |
| | | コンクリートブロック張り・コンクリート張り・擁壁工 | 0 | 47 |
| | 落石対策工 | (5)集水井・水抜きボーリング | 0 | 47 |
| | | (6)植生工 | 1 | 48 |
| | | 落石防護網 | 0 | 49 |
| 表面の被覆状況 | ポケット式落石防護網 | 0 | 49 | |
| | 落石防護柵工 | 0 | 50 | |
| | 植生工主体 | 0 | 50 | |
| | のり面保護工の比率30%以下 | 1 | 51 | |
| のり勾配(のり中央部) | のり面保護工の比率30～70%程度 | 0 | 52 | |
| | のり面保護工の比率70%以上 | 0 | 53 | |
| | (1)標準勾配より緩勾配 | 0 | 54 | |
| | (2)標準勾配 | 1 | 55 | |
| 小計 | | | | |
| 変状(プロテクト有) | (3)標準勾配より急勾配 | 0 | 56 | |
| | 肌落ち、ガリ浸食、洗掘、ハイビング孔、陥没、はらみ出し、亀裂、根曲がり、倒木、その他 | 0 | 57 | |
| | 著しい変形・亀裂等(早期対応) | 0 | 58 | |
| | 複数該当・明瞭なものあり(AA,A) | 0 | 59 | |
| 変状(プロテクト無) | 1つに該当・不明瞭なものあり(B) | 0 | 60 | |
| | 該当せず | 1 | 60 | |
| | 肌落ち、ガリ浸食、洗掘、ハイビング孔、陥没、はらみ出し、根曲がり、倒木、亀裂、その他 | 0 | 61 | |
| | 著しい変形・亀裂等(早期対応) | 0 | 62 | |
| 排水施設 | 複数該当・明瞭なものあり(AA,A) | 0 | 62 | |
| | 1つに該当・軽微なものあり(B) | 0 | 63 | |
| | 該当せず | 1 | 64 | |
| | 本体の損傷、接続部不良、その他の損傷・障害 | 0 | 65 | |
| 点検なし | 近傍に崩壊履歴のり面あり | 0 | 66 | |
| | 近傍に崩壊履歴のり面なし | 1 | 67 | |
| 供用期間 | 5年未満 | 0 | 68 | |
| | 5年以上15年未満 | 0 | 69 | |
| | 15年以上 | 1 | 70 | |
| 小計 | | | | |
| | | | 70 | |
| | | | 71 | |
| | | | 72 | |
| 評価点 | | | | |

2.4 データ項目の再整理

前節で抽出した50のり面の評価表について再整理を行う。前節で述べた前提条件に従い、類似した斜面を抽出する上で、そのり面が本来持つ特徴を評価することとした。すなわち対策工や変状などを評価要因から除外し、SOM解析などを行うこととした。また、土質、地質などの項目の中に「崩壊履歴」が含まれているが、SOM解析の評価要因に含めると、崩壊履歴のあるり面と崩壊履歴のないり面に二分される結果になり、まだ崩壊していないり面の中から、崩壊しているり面と似た特徴を持つり面を抽出することができなくなるため、評価要因から除外した。また、対象のり面のデータを確認すると表層土の厚さは全て「不明」となっていたため、同項目も対象外とした。以上の作業により、分析の対象として再整理した項目と要因を表-2に示す。つまり、個々のり面は29個の評価要因を持つ高次元のベクトルと見なすことができ、分析対象となる50個のり面はその集団である。

3. SOM とクラスタ分析の適用

3.1 本章の概要

本章では、第2章で抽出したのり面と表-2に示す整理後の評価項目・要因から、土中水分量を計測すべきのり面の優先順位を決定する分析手法について述べる。第2章で747から50まで対象のり面の絞り込みを行った。ただし、その情報量は表-2に示す29の評価項目であり、分析対象として29次元のデータである。このような高次元のデータの特徴評価を、人の手で行うことは現実的

表-2 整理後の評価項目・要因

| 路線名 | ●●自動車道 | ●●高速道路事務所 | KP(自～至) | |
|--------------|--------|----------------|-------------|------|
| 地層名 | ●●層群 | No | のり面高(m) | |
| 項目 | | 要因 | 該当の有無(1or0) | 要因番号 |
| 地形 | 法面と後背地 | 集水地形 | 0 | 1 |
| | | 地すべり地形 | 0 | 2 |
| | | 崩壊地形 | 0 | 3 |
| | | 崖崩地形 | 0 | 4 |
| | | 尾根斜面 | 0 | 5 |
| | 後背地の変状 | 亀裂、段差 | 0 | 6 |
| | | 凹地 | 0 | 7 |
| | | 池沼、湧水 | 0 | 8 |
| | | 湿地、親水性植物 | 0 | 9 |
| | のり面高さ | 13m以下 | 1 | 10 |
| | | 15～30m | 0 | 11 |
| | | 30～50m | 0 | 12 |
| | | 50m以上 | 0 | 13 |
| 土質・地質・構造・地下水 | 地質 | 中生層堆積岩類 | 0 | 14 |
| | | 火成岩類 | 0 | 15 |
| | | 有馬層群 相生層群 | 1 | 16 |
| | 地質構造 | 流れ盤 | 0 | 17 |
| | | 断層(破砕帯等)、向斜軸付近 | 0 | 18 |
| | | 亀裂性岩盤 | 0 | 19 |
| | | 高角度亀裂性岩盤 | 0 | 20 |
| | | 熱水変質帯 | 0 | 21 |
| | | その他 | 1 | 22 |
| | 落石 | 浮石・転石多数 | 0 | 23 |
| | | 浮石・転石あり | 0 | 24 |
| | | 落石履歴・小落石あり | 0 | 25 |
| | | 落石・転石なし | 1 | 26 |
| | 地下水 | 湧水あり | 0 | 27 |
| | | しみ出し程度(植生あり) | 0 | 28 |
| 湧水なし(植生なし) | | 0 | 29 | |

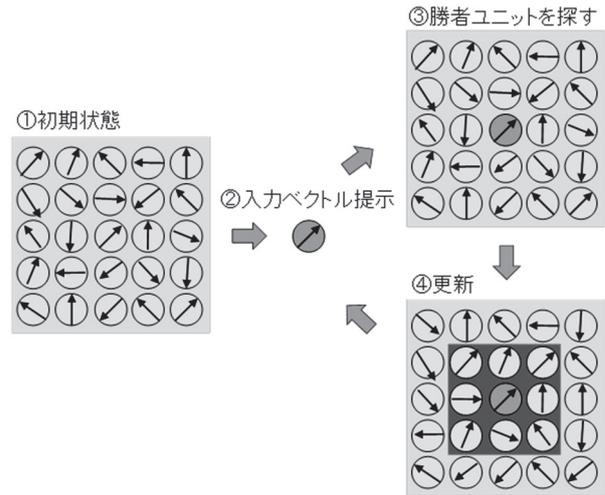


図-2 SOMの解析手順⁸⁾

ではない。そこで本研究では、高次元データの特徴分析を得意とする、人工知能の一種であるSOMを活用することとした。さらに、クラスタリングが主観的となるSOMを補うため、客観的な評価が可能なクラスタ分析を併用し、優先順位を決定することとした。以下、SOMの概要と分析手順、クラスタ分析の概要と分析手順、最後に、分析結果とそれに対する考察を行う。

3.2 SOMの概要

SOMは、競合学習型ニューラルネットワークの一種で、高次元のベクトル集団を2次元マップ上に写像するものである。このとき、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、逆に、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、人間では判断できない高次元ベクトル集団の類似性に対して定性的な判断を促し、クラスタを視覚的に捉えやすいという長所を有している。

図-2にSOMの解析手順を示す⁸⁾。同図では、個々の高次元ベクトルを簡易的に2次元の矢印で表している。SOMによる解析は以下の手順によって行われる。

- (1) 2次元マップ上に高次元ベクトル集団をランダムに配置する。
- (2) 入力ベクトルを提示する。
- (3) 入力ベクトルと最も類似したマップ上のベクトル集団を勝者ユニットとする。
- (4) 勝者ユニット、及びその近傍のベクトル集団が入力ベクトルに近づく。
- (5) (2)から(4)のプロセスをT回(通常数千回～数万回程度)繰り返す。

以上の手順により、ベクトルの類似性を視覚的に表すマップが形成される。すなわち、本研究では、表-2に示す29次元の評価要因で特徴付けられるのり面の類似性が判断可能になる。ただし第1章でも触れたとおり、SOM解析結果を用いたクラスタリングは、主観的なものであることに注意が必要である。そのため本研究では、

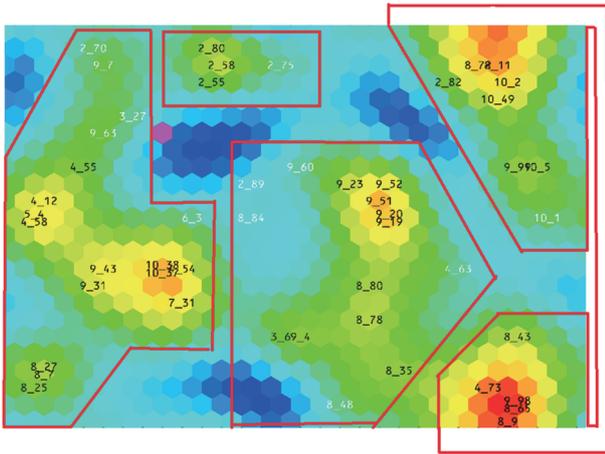


図-3 SOM 解析結果

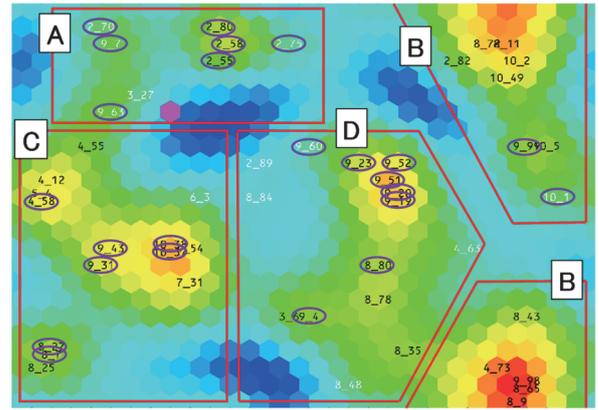


図-4 クラスタ分析結果

SOM 解析の結果は、クラスタ分析時のクラスタ数の決定に用いることとした。

3.3 SOM 解析の結果と考察

第 2 章で分析対象として抽出したのり面を対象に SOM 解析を実施した。結果から得られた全体マップを 図-3 に示す。図中の番号は、分析を行ったのり面の番号であり、番号間の距離が近いほど特徴が類似していることを示している。同マップは長方形で示しているが、ベクトル計算上マップ上端と下端、左端と右端は繋がっており、のり面番号の配置は絶対座標としての意味は持たない。また同マップ中の色は、対象ベクトルのユークリッド距離が近いものを暖色で、遠いものを寒色で表現している。本研究では、青色部分をクラスタの境界とみなすこととした。その結果、今回対象とした 50 のり面は、図-3 中に赤枠で示すように視覚的に 4 つのクラスタに分類することが妥当と判断した。

3.4 クラスタ分析

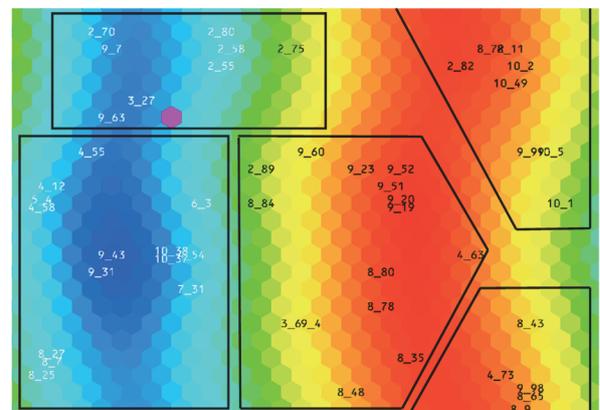
クラスタ分析は、ベクトル集団間の距離や類似度を用いて、クラスタを構成するという統計学的手法の一種である。以下にクラスタ分析の解析手順を示す。

- (1) 使用者がクラスタの個数を決定する。
- (2) 初期クラスタ中心が選択される。
- (3) それぞれのベクトル集団が最も近いクラスタ中心に割り当てられ、クラスタ中心が更新される。
- (4) 新しいクラスタ中心と初期クラスタ中心との間の最大変化量が計算される（このとき、最大変化量が指定した最小変化量よりも大きい場合は(3)の段階へ戻る）。
- (5) 最大変化量が指定した最小変化量よりも小さい場合や、指定した最大反復回数に達した場合にクラスタは決定される。

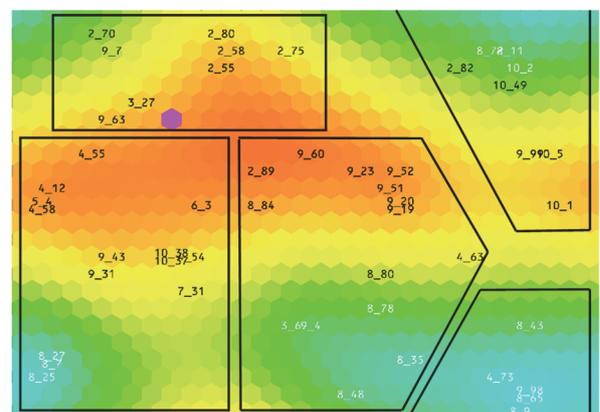
以上のようにして、クラスタ分析は、客観的なクラスタの決定が可能である。しかし、クラスタ分析は、クラスタの個数をあらかじめ決定する必要がある、このクラスタ数の決定に誤りがあるとクラスタ分析の結果は意

味をなさない。したがって、ここでは前節の SOM 解析の結果から、4 つのクラスタに分類することとした。クラスタ分析の結果を前節の SOM 解析から得られたマップ上に示したものが 図-4 であり、それぞれクラスタ A, B, C, D とした。また、同図中濃紫色の丸印で囲っている番号は、「表層崩壊履歴あり」ののり面である。

ところで、図-4 に示すクラスタ分析によるクラスタリング結果は、図-3 の主観的な視覚的判断によるクラスタリングとは、クラスタ A と C の分類が異なっている。つまり、SOM 解析のみであれば、図-3 のような誤った分類を起こす可能性があるが、クラスタ分析を援用



(a) 湧水あり



(b) 流れ盤

図-5 代表的な要素マップ

することにより、客観的なクラスタ分類が可能となったことを示している。

3.5 各クラスタの特徴

SOM 解析では、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たマップ(要素マップ)を作成することができる。今回の解析で得られた要素マップのうち、特徴的なものを図-5 に示す。図-5(a) の要素マップでは、多くのクラスタで色の分布が同様であることから、「湧水あり」という要素が解析結果に一定の影響を及ぼしていることが分かる。一方、図-5(b) の要素マップでは、同一クラスタ内にて大きく色の変化が起こっている箇所がある。このことから、「流れ盤」という要素の影響が小さいことが分かる。このように、要素マップと全体マップの比較を通じ、各要素の全体マップへの寄与度を評価することができる。同手法を用いて、クラスタ分析結果から得られた各クラスタの特徴を以下に述べる。

(1) クラスタ A

クラスタ A は、崖錐地形を含み、しみ出し程度の湧水があるのり面により主に形成されており、7 のり面が該当している。

(2) クラスタ B

クラスタ B は、中古生層堆積岩類に属し、のり面高さが 50m 以上で湧水のあるのり面により主に形成されており、13 のり面が該当している。

(3) クラスタ C

クラスタ C は、中古生層堆積岩類で転石・浮石がなく、しみ出し程度の湧水を有するのり面により主に形成されている。15 のり面が該当している。

(4) クラスタ D

クラスタ D は高さが 30m~50m で、転石・浮石がないのり面で主に形成されている。15 のり面が該当している。

SOM 解析とクラスタ分析によって、50 のり面が4つにクラスタリングされ、全てのクラスタに表層崩壊履歴のあるのり面が振り分けられた。また、SOM 解析の要素マップを用いて各クラスタの特徴を評価したが、ここで得た特徴からのみでは斜面崩壊の危険度や土中水分量の計測のり面の優先度を定量的に決定することは難しい。一方、各クラスタにおいて、クラスタ内の全のり面数に対する表層崩壊履歴のあるのり面数の割合は異なっている。この点に着目したクラスタ間の相対評価や、最終的な土中水分量計測候補のり面の優先順位付けを次章以降で行う。

4. クラスタ間及びクラスタ内の優先順位付け

4.1 本章の概要

第3章では、50 のり面に対して SOM 解析とクラスタ

表-3 土中水分量計測のり面優先順位

| クラスタ | 災害発生頻度 | のり面番号 | 対策工評価点 | 優先順位 | 対策工被覆割合の確認 | 最終順位 |
|------|--------|-------|--------|------|------------|------|
| D | 0.4133 | 8.84 | -4.50 | 1 | | 1 |
| | | 3.6 | -11.50 | 2 | | 2 |
| | | 8.35 | -14.50 | 3 | | 3 |
| | | 8.48 | -27.50 | 4 | | 4 |
| | | 2.89 | -31.00 | 5 | | 5 |
| | | 8.78 | | | | |
| | | 4.63 | -61.00 | 7 | 70%以上 | — |
| C | 0.3600 | 6.3 | -7.50 | 8 | | 7 |
| | | 8.25 | -11.25 | 9 | | 8 |
| | | 4.12 | -15.00 | 10 | 70%以上 | — |
| | | 4.54 | -31.00 | 11 | | 9 |
| | | 4.55 | | | | |
| | | 5.4 | | | | |
| | | 7.31 | -40.00 | 14 | 70%以上 | — |
| A | 0.2178 | 3.27 | -14.00 | 15 | | 12 |
| B | 0.1060 | 8.65 | -10.00 | 16 | | 13 |
| | | 9.98 | | | | |
| | | 10.2 | | | | |
| | | 10.5 | -10.75 | 19 | | 16 |
| | | 2.82 | -24.00 | 20 | | 17 |
| | | 4.73 | -31.00 | 21 | | 18 |
| | | 8.9 | | | | |
| | | 8.43 | | | | |
| | | 8.72 | | | | |
| | | | | 8.11 | -36.25 | 25 |
| | | 10.49 | | | | |

タ分析を行い、4つのクラスタに分類した。ただし、どのクラスタの優先度が高いのか、また、同一クラスタ内のどののり面の優先度が高いのかは判断できていない。そこで本章では、第3章の解析結果を用いて土中水分量計測のり面の優先順位付け手法を提案する。本研究では、実際の表層崩壊履歴を危険度の基準として用いることとし、危険度が高いのり面ほど土中水分量の計測候補としての優先順位も高くすることとした。表層崩壊履歴のあるのり面が含まれているクラスタは、崩壊したのり面と類似した特徴を有しているため、それ以外のクラスタより表層崩壊に対する危険度は高いといえる。またそれとは反対に、表層崩壊履歴のあるのり面が含まれないクラスタは、表層崩壊履歴のあるのり面が有する特徴を持っていないため、本研究では土中水分量計測候補から除外することとした。ただし、今回対象としたのり面では、表層崩壊履歴のあるのり面を含まないクラスタはないため、この理由から土中水分量計測候補の対象外となるのり面はない。

次節では、クラスタ間の相対評価を行い、その後、同一クラスタ内の評価を行い、土中水分量を計測するのり面の優先順位付けを行う。

4.2 対象のり面の優先順位付け

第3章で抽出したのり面に対して、土中水分量を計測する優先順位を考慮するため、まず各クラスタの災害発生頻度を算出する。災害発生頻度が高いクラスタの方が危険度の高いクラスタといえ、優先順位も高くすべきであるといえる。ここでの発生頻度は式(1)によって定量的に算出した。すなわち、各クラスタにおいて何年に1箇所災害が発生したのかを算出し、相対的な危険度によるクラスタ間の順位付けを行った。算出された各クラ

スタの災害発生頻度は表-3 に示している。災害発生頻度はクラスタ D が最も大きい。クラスタ C のそれは D とほぼ等しい。一方、クラスタ A の災害発生頻度はクラスタ D の約半分、クラスタ B のそれはクラスタ D の 4 分の 1 程度である。

次に、表-1 で示した評価表の対策工評価点の絶対値が小さいほど対策工が手薄であることに基づき、クラスタ内での優先順位を決定した。なお、表層崩壊履歴のあるり面は、対策工が完了しており危険度が著しく低下していると考えられるため、優先順位付けの対象からは除外した。更に、本研究では土中水分量を計測するのり面を抽出することを目的としているため、例えば全てコンクリート吹付が施工されているり面のように、土壌水分センサが設置できないようなり面は対象外とすべきである。その確認を表-1 で示した評価表の対策工被覆割合で行い、被覆割合が 70%以上のり面に対して、評価表ではなく高速道路の全資産（構造）を管理している別調書で個別確認を行い、対象のり面とすべきかどうかの最終判断を行った。なお、全てコンクリート吹付が施工されているような場合には優先順位付けの対象外とし、植生保護工のように土中水分量が計測可能な面積が大きければ、優先順位はそのままとすることとした。今回分析対象としたのり面の中で 70%以上の被覆割合となった 4-12, 4-63, 7-31 のり面で個別確認を行った。いずれのり面も大部分をコンクリート吹付け工、コンクリート吹付け枠工など植生以外の保護工が施工されており、土中水分量の計測には適さないり面であった。よって、これらのり面は最終的な順位付けから除外した。本節における一連の確認結果を表-3 に示した。

$$\text{災害発生頻度} = \frac{\text{災害発生履歴のあるり面数}}{\text{クラスタ内全のり面の平均供用年数}} \quad (1)$$

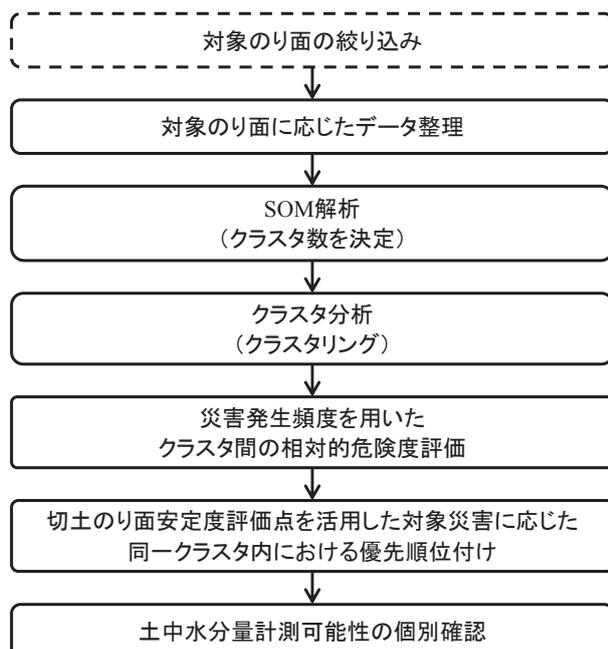


図-6 優先順位付き土中水分量計測のり面抽出フロー

5. 土中水分量計測のり面の優先順位付き抽出手法の提案

ここでは、第 3 章で示した SOM 解析とクラスタ分析によるクラスタリング手法と、第 4 章で示した優先順位付け手法をフローとして再整理し、土中水分量計測のり面の優先順位付け抽出手法として提案する。さらに、本手法における利点と今後の課題について述べる。

図-6 に、本研究で提案する手法のフローを示す。同フローによるメリットは、既存のデータを最大限活用しつつ膨大なデータの中から SOM 解析と統計学的手法の活用により簡易な作業で数百のり面の中から優先順位を付けて対象のり面を抽出できることである。しかも、評価表にデータがあるものであれば、例えば土石流や地すべりに対しても同フローにより多くの対象箇所の中から優先順位付きで対象箇所の抽出が可能である。ただし、本研究においては、同フローの最上位にある対象のり面の絞り込みにおいて、定性的な作業が残っている。この作業の定量化が今後の課題である。

6. まとめ

本研究では、既存の評価表と SOM 解析等を活用し、土中水分量を計測すべきのり面を、優先順位を付けて抽出する手法を提案した。本研究で得られた知見を下記にまとめる。

- (1) NEXCO 西日本関西支社が独自に作成した切土のり面安定度評価表から表層崩壊に関わると考えられる 29 個の要因を抽出することができた。そして、29 個の要因を変数とするベクトルとして個々のり面を特徴付けることができた。
- (2) SOM 解析とクラスタ分析を併用する客観的なクラスタリング手法を提案した。そして、それを評価表の評価点が高い、もしくは崩壊履歴のあるり面の集団に適用し、集団を 4 つのクラスタに分類することができた。
- (3) A から D の 4 つのクラスタに分類するのり面の特徴を明らかにできた。
- (4) クラスタ毎の災害発生頻度は、クラスタ D が最も大きく、クラスタ C も同程度である。
- (5) 評価表の評価点を用いることにより、同一クラスタ内の相対評価が可能となり、その結果、全体の優先順位付けが可能となる。

なお、本研究で提案した手法のうち、対象のり面の絞り込みを定性的に行っているため、この作業の定量化が今後の課題である。また、本研究で得られた知見は、著者ら独自のものであり、西日本高速道路株式会社の公式な見解でないことを付記しておく。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 保全点検要領(構造物編), pp.7-20, 2015.
- 2) 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および危険度予測, pp.110-112, 2006.
- 3) 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 小田和広, 伊藤真一, 福田芳雄, Maria Q. FENG, 竹本 将: 降雨時の表層崩壊に対する高速道路通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.73, No.73, pp.93-105, 2017.
- 4) 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および危険度予測, 丸善, p.75-77, 2006.
- 5) 大北正昭他: 自己組織化マップとそのツール, シェプリンガー・ジャパン, p.1-53, 2008.
- 6) 徳高平蔵, 藤北喜久郎, 山川烈: 自己組織化マップ応用事例集, 海文堂出版, p.1-17, 2002.
- 7) マーク M. ヴァン. フッレ: 自己組織化マップー理論・設計・応用, 海文堂出版, p.1-85, 2001.
- 8) 徳高平蔵, 岸田悟, 藤北喜久郎: 自己組織化マップの応用 多次元情報の2次元可視化, 海文堂出版, p.9, 1999.
- 9) 日外勝仁, 齋藤敏明, 伊東佳彦, 橋本祥司: 数量化理論Ⅱ類および自己組織化マップによる岩盤斜面危険度評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.771, III-68, pp.51-60, 2017.9.
- 10) 白木渉, 長瀬裕俊, 宮下英明, 伊藤則夫: 自己組織化マップ(SOM)による斜面崩壊予測システム, 構造工学論文集, Vol.44 A, pp.453-459, 1988.
- 11) 小山倫史: 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, 社会安全学研究第6号, p.147-155, 2016.
- 12) 村瀬洋一, 高田洋, 廣瀬毅士: SPSSによる多変量解析, オーム社, p.273-298, 2012.
- 13) 国土交通省: 点検要領, 171p, 2006.

(2017年6月25日 受付)