

自己組織化マップを用いた 物理探査の複合評価手法に関する研究

山本龍^{1*}・楠見晴重²・中村真³・辻健⁴・中村香澄⁵

¹関西大学大学院 理工学研究科 ソーシャルデザイン専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²関西大学 学長 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁴京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 地殻工学講座地質工学分野
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-1-110)

⁵国土交通省近畿地方整備局福知山国道河川事務所
(〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)

*E-mail: k095797@kansai-u.ac.jp

近年では、老朽化法面の健全度を評価するために、様々な物理探査が着目されている。単独の物理探査による地山の物理的情報では地山状態を解釈するのに限界があり、解釈限度を補間するために複数の物理探査が用いられることが多い。そこで本研究では、自己組織化マップ (Self-Organizing Maps : SOM) を用いて複数の物理探査データのクラスター分類評価を試みた。さらに、著者らが提案する弾性波速度と比抵抗の変換解析による間隙率と飽和度との比較から、各クラスターが有する地盤物性値についても定量的に評価した。各クラスターの分布はボーリング調査による地盤情報と整合性が高く、また変換解析を併用することで、定性的かつ定量的な複合評価が可能であることが示された。

Key Words: geophysical exploration, self-organizing maps, clustering, conversion analysis, rock properties,

1. はじめに

我が国において、高度経済成長期に伴いモータリゼーションの進展に歩調を合わせながら、急ピッチで道路の建設および整備が行われてきた。こうした道路建設の背景の下、現在全国で20万箇所を超える法面の中には、劣化や老朽化が著しいものも少なくない。そのため、法面防災の観点から、「既存構造物の点検技術およびその結果により健全度を正確に評価する技術」や「健全度レベルに応じて適切に補修、補強する技術」が求められている。法面の耐久性や安定性に関する問題は、吹付けコンクリートの耐久性だけではなく、地山自体の安定性にも大きく左右されるため、近年では老朽化法面の健全度を評価するために、様々な物理現象を利用して非破壊で地下を可視化する技術である物理探査が着目されている。単独の物理探査による地山の物理的情報では地山状態を解釈するのに限界があり、解釈限度を補間するために複数の物理探査が用いられることが多い。しかしながら、複数の物理探査に

よる地盤情報を定量的に総合評価する手法は確立されておらず、技術者の専門的な知識や経験に基づく高度な判断が要求され、解釈にばらつきが生じる可能性があるのが現状である。

そこで著者らは、弾性波速度と比抵抗から、地盤物性値である間隙率と飽和度に変換して地盤評価する手法¹⁾を提案しているが、2種の物理量でも十分とは言えず、さらに異なる物理量で複合評価できることが望ましい。本研究では、情報処理工学の分野で幅広く用いられている自己組織化マップ (Self-Organizing Maps : SOM) ^{2) 3)}に着目し、複数の物理探査データのクラスター分類評価を試みた。SOMによる地盤評価事例は、岩盤斜面の危険度評価⁴⁾や、南海トラフ沈み込み帯における断層面の物性評価⁵⁾や、堤防内土質性状の分類⁶⁾の幾つかあるのみで、ここでは老朽化法面の地盤性状評価の適応性について検討した。さらに別途検討した弾性波速度と比抵抗から地盤物性値に変換した結果と、SOMによる地盤のクラスター分布を比較することで、各クラスターの地盤物性値の定量的な評価を行った。

2. 研究対象法面の概要

本研究対象地点は図-1に示すように、京都府福知山市三和町大身地区における国道9号に隣接した長さ200数十m、高さ約50mの切土法面である。比較的規模の大きな吹付け法面（A地区）を図-2に、保護工が施されていない自然法面（B地区）を図-3に示す。A地区ではモルタル吹付けの亀裂、せり出し、法尻の一部ではらみ出しなどが確認されており、B地区では法面での開口亀裂およびせり出しなどが確認されている。当該地点の地質状況は、中生代三畳紀からジュラ紀の丹波層群にあり、主に砂岩層、砂岩頁岩互層、緑色岩層（玄武岩質溶岩）より構成される。

3. 研究対象法面で実施された物理探査

調査で実施された物理探査は、弾性波トモグラフィ探査、比抵抗トモグラフィ探査、表面波探査、電磁波トモグラフィ探査であり、年2回の定期的な計測も行われている。A地区およびB地区ともに全ての物理探査が実施されているが、A地区においては厚いモルタルや吹付けモルタル背面のラス網が計測に影響したため、地山の弾性波速度と比抵抗においては、地表から浅層付近の地山状態を反映していない可能性があり、物理探査の結果に課題が残るものとなった。そこで本研究では、比較的良好的なデータが取得できたB地区における物理探査の結果を用いた。

各物理探査の測定条件としては、法面の縦断方向に測線を取り、測線上の法肩部と法尻部の2箇所ではボーリング調査が行われている。ボーリング調査の総掘進長は、B-3孔（法肩部）が17m、B-4孔（法尻部）が15m、ボーリング孔間の測線長は16.1mである。本研究では、ボーリング孔間の測線断面における物理探査データを複合評価の対象とした。

図-4に、B地区において2008年夏に計測された物理探査の結果を示す。P波速度は深度が深くなるにしたがって地盤を伝播する速度が速くなる傾向を示す結果となった。比抵抗分布においては、地表部およびB-4孔の深度4m以下の低比抵抗域で、地下水位下の飽和状態が推測できる。S波速度においては、深度6m程度までの400m/sec以下の部分は崩積土または強風化の部分と推定される。電磁波速度は、伝播する電磁波速度が速ければ低含水率、遅ければ高含水率という関係性を有している。つまり、法肩部の地表付近およびボーリング孔内側面付近で高い含水状態を示していることが分かる。

また、本研究で用いる物理探査データは取得方法が異なるため、取得された探査深度および解析のセルサイズが異なる。そこで各探査データの解析セルサイズ

を統一する必要があるため、内挿法（線形補間）によってセルサイズを0.5mに統一した。実施した探査中、最も細かい解析セルサイズを基準とし、他の探査データのセルデータ数を、内挿法を用いて増やす方法を採用したため、すべり面のような局所的な異常分が、内挿法により平均化されてしまうということはない。

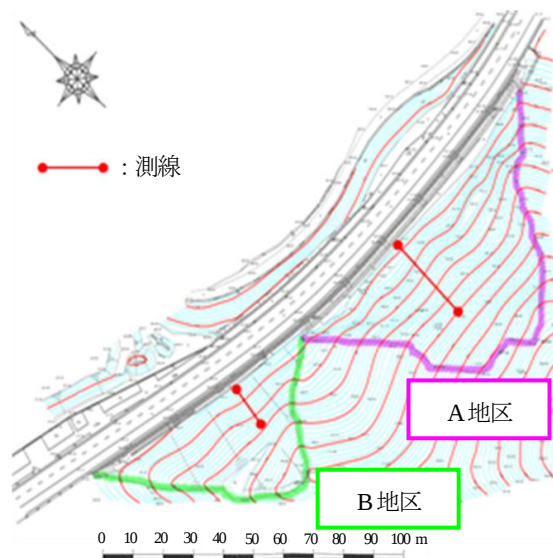


図-1 研究対象法面



図-2 吹付け法面（A地区）



図-3 自然法面（B地区）

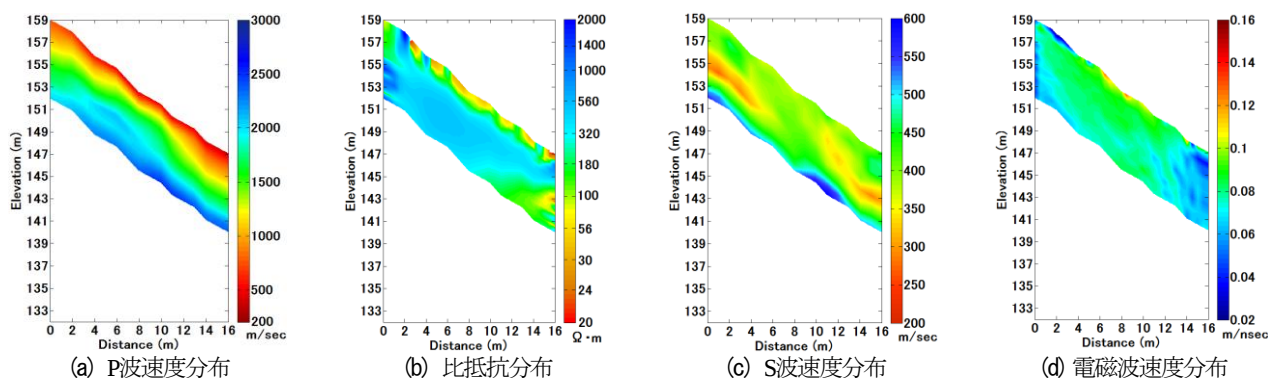


図-4 B地区において2008年夏に計測された物理探査の結果

4. 変換解析による地盤物性評価

弾性波速度と比抵抗は、それぞれ飽和度と間隙率との関係を有することから、飽和度と間隙率をパラメータとして弾性波速度と比抵抗を関係付けることができる。弾性波速度については式(1)に示す Wyllie⁷⁾の式が、比抵抗については式(2)に示す Archie⁸⁾の式が一般に知られている。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1-\phi}{V_m} + \frac{\phi \cdot Sr}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-Sr)}{V_a} \quad (1)$$

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot Sr^{-n} \quad (2)$$

ここに、 V_p は岩盤の弾性波速度、 V_m は岩石実質部の弾性波速度、 V_f は間隙水の弾性波速度、 V_a は間隙空気 of 弾性波速度、 ϕ は間隙率、 Sr は飽和度、 ρ は岩盤実質部の比抵抗値、 a, m, n は地質の違いによる係数である。

Archieらの式については、既往の研究⁹⁾¹⁰⁾によれば、この式は砂層ではよく適合するが、岩盤でありよく適合しないとされているので、本システムでは式(3)の並列回路モデル¹¹⁾を採用するものとした。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad (3)$$

ここに、 F は地層比抵抗係数($F=a\phi^{-m}Sr^{-n}$)、 ρ_c は粘土等による間隙中の伝導性粒子の比抵抗、 ρ_0 は岩石実質部の比抵抗である。

式(1)および式(3)は、間隙率 ϕ と飽和度 Sr を変換して、図-5に示すような、ひとつの岩盤要素(小要素に分割したセル)について、それぞれ次の連立した方程式として表される。

$$V_p = f(\phi, Sr) \quad (4)$$

$$\rho = g(\phi, Sr) \quad (5)$$

また、変換解析に用いるパラメータは、検討地点におけるボーリングコアまたは同地点から採取された岩塊を用いて室内試験を行い評価することができる。本研究において室内試験によって得られたパラメータを表-1に示す。地山の比抵抗と弾性波速度、そして変換パラメータが既知であれば、式(4)と式(5)から未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

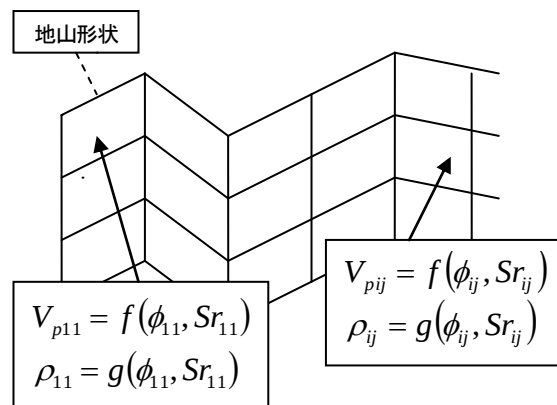


図-5 変換解析における岩盤要素のイメージ

表-1 変換解析に用いたパラメータ

岩種		緑色岩	砂岩頁岩 互層	砂岩
変換パラメータ	a	0.43	0.08	0.10
	m	1.04	1.32	1.61
	n	1.64	1.72	2.53
P波速度	V_m (m/sec)	6400	5700	4000
	V_f (m/sec)	1500	1500	1500
	V_a (m/sec)	330	330	330
比抵抗	ρ_w (Ωm)	50	50	50
	ρ_c (Ωm)	1600	1150	1600

5. 自己組織化マップを用いたクラスター分類

(1) 自己組織化マップ (SOM) の概要

自己組織化マップ (Self-Organizing Maps ; SOM)²⁾³⁾は、ヘルシンキ大学のコホネンによって1979年に発表され

た教師なしニューラルネットワークの一種である。SOMの大きな特徴は、物理量の異なる高次元データ間の非線形な統計学的関係を、簡単な幾何学的関係に変換することができることである。具体的には、類似した特徴を持つデータは近くに、異なった特徴を持つデータは遠くに配置されたマップを作成し、高次元のデータを二次元平面に写像することができる。作成したマップ上の初期クラスター候補群に対してクラスター分類を行い、各クラスターの特徴を定性的に読み取ることで複合的な評価を行う。図-6にSOMの計算過程を示す。始めに、解析を行う前の準備として、入力ベクトルとは別に、入力ベクトルと同じ次元をもつ個々のノードを2次元平面にランダムに配置されたベクトルを与え、マップを初期化する（図-6(a)）。マップの初期化後、マップに対して入力ベクトルを学習させ、個々のマップ上でのノードと入力ベクトルを比較し、次式に示されるデータ間の類似度を表すユークリッド距離が最小になる勝者ベクトルを探索する（図-6(b)）。

$$d = \|x_i - m_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n [x_{ik} - m_{jk}]^2} \quad (6)$$

ここに、 d はユークリッド距離、 x_i は入力ベクトル、 m_j はマップ上の参照ベクトルである。次に、勝者ベクトルおよびその周辺の近傍ベクトルは次式に従って入力ベクトルを学習する。近傍サイズは学習とともに小さくしていく（図-6(c)）。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + h_{\alpha}(t)[x_i(t) - w_i(t)] \quad (7)$$

ここに、 $w(t)$ は学習能力、 $h_{\alpha}(t)$ は近傍ベクトルのサイズを決定する近傍関数、 t は学習での時刻である。勝者ベクトルの探索と学習を複数回繰り返すと、マップ上では類似性の高いベクトルが隣接するように配置され、マップのクラスター化が可能となる（図-6(d)）。最後にクラスター化されたマップに対して、入力ベクトルを当てはめることによって、各入力ベクトルがどのクラスに分類されるかが分かる（図-6(e)）。

(2) k-means法

本研究では、客観的にクラスター分類を行うために、k-means法¹²⁾を用いた。k-means法では、あらかじめクラスターの数を k と設定し、各データに対してランダムにクラスターを割り振る。割り振ったデータをもとに各クラスターの中心を計算する。計算は通常割り当てられたデータの各要素の平均が使用される。各データとクラスターの中心間との距離を求め、各データを最も近い中心のクラスターに割り当て直す。これらの処理で全データのクラスターの割り当てが変化しなかった場合は処理を終了する。それ以外の場合は新しく割

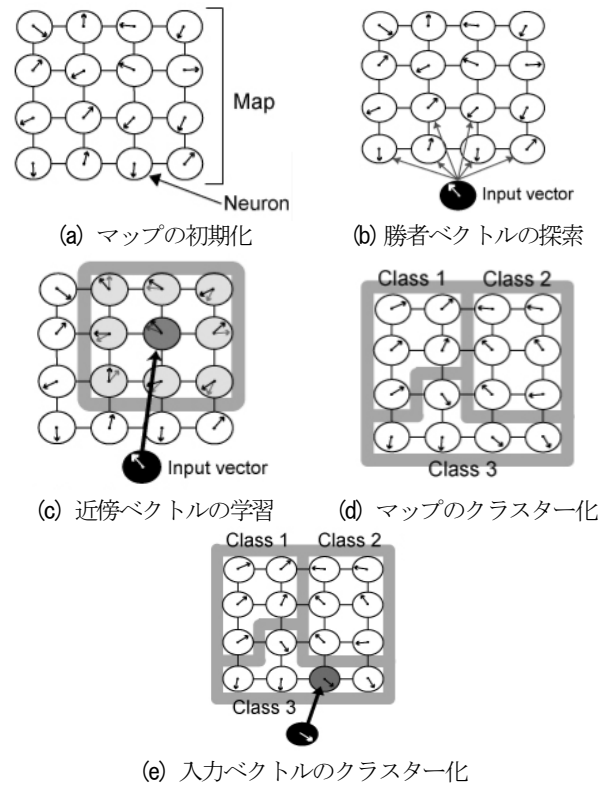


図-6 SOMの計算過程

り振られたクラスターから中心を再計算し、一連の処理を繰り返す。この計算の特性上、初期クラスターの中心位置をランダムに決定して計算を進めていくため、初期値によって最終的な分類結果に多少の差異が生じる。そこで、最終的な分類結果を評価するための評価関数として、次式で示される Davies-Bouldin Index(DB Index)¹³⁾を用いた。

$$DBindex = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{i \neq j} \left\{ \frac{\Delta(X_i) + \Delta(X_j)}{\delta(X_i, X_j)} \right\} \quad (8)$$

ここに、 k : クラスターの数、 $\delta(X_i, X_j)$ はクラスター X_i と X_j におけるクラスター中心間のユークリッド距離、 $\Delta(X_i)$ はクラスター X_i の中心と各クラスターとのユークリッド距離の平均値を表す。k-means法による分類を複数パターン実施し、DB Indexを最小にとる結果を適切な分類結果として決定した。

6. 法面の地盤性状評価

本章では、4章で述べた変換解析による地盤評価の結果と、5章で述べたSOMを用いた地盤のクラスター分類評価の結果を用いて、総合的な法面の地盤性状評価について検討する。変換解析による間隙率および飽和度の結果を図-7に示す。SOMによって作成された各物理探査データのマップ図およびk-means法によって分類されたクラスター分布図を図-8、各クラスターが有する物理量の相対的な大きさを「●」の数で表したものを

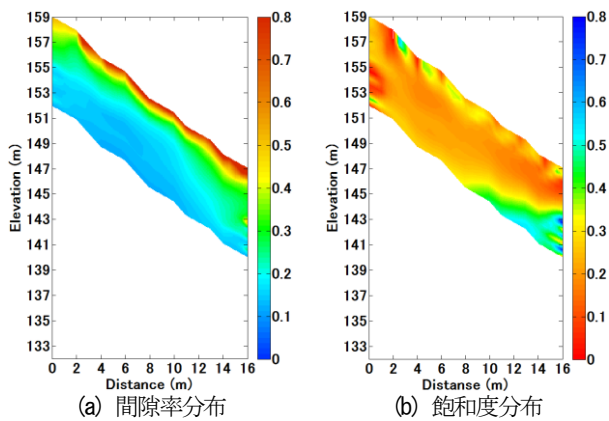


図-7 変換解析による結果

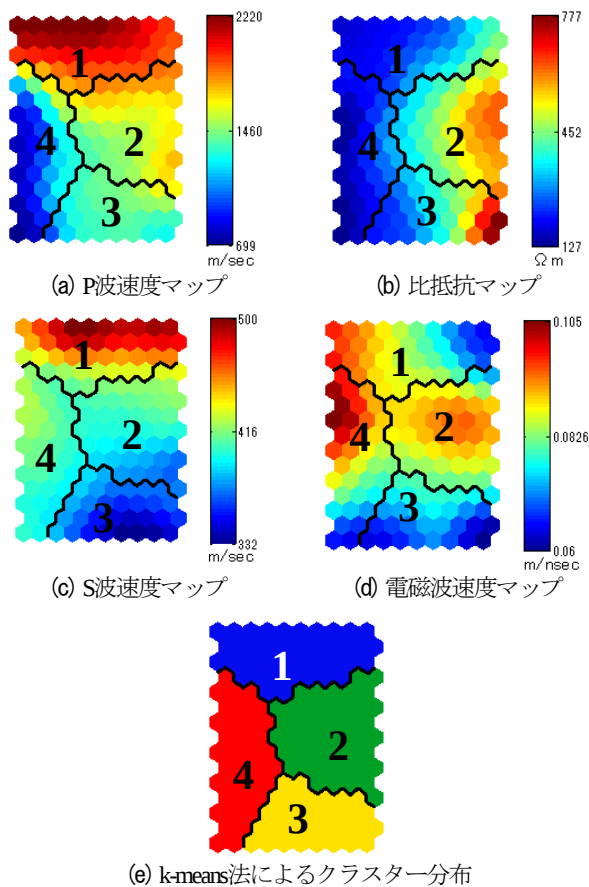


図-8 各物理探査データのマップ図とクラスター分布図

表-2 各クラスターが有する物理量の相対的な大きさ

Cluster	P波速度	比抵抗	S波速度	電磁波速度
1	●●●	●	●●●	●●
2	●●	●●	●●	●●●
3	●●	●●●	●	●
4	●	●	●●	●●●

表-2, クラスター分類図とボーリング調査結果との比較を図-9に示す. さらに, 変換解析による結果とSOMによるクラスター分類評価を比較し, 各クラスターの地盤物性値を表-3に示す. 表-2および図-9から, クラスター4は, 岩級区分がD~CL級, RQDが0%で, 特にP

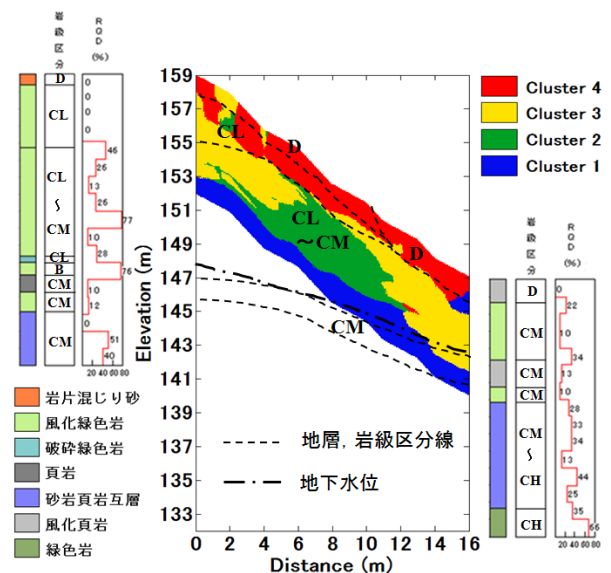


図-9 クラスター分類図とボーリング調査結果との比較

表-3 変換解析から得られた各クラスターの地盤物性値

Cluster	間隙率		飽和度	
	分布	平均値	分布	平均値
1	0.11~0.18	0.13	0.04~0.77	0.37
2	0.14~0.50	0.19	0.06~0.80	0.24
3	0.14~0.25	0.16	0.16~0.25	0.22
4	0.33~0.80	0.49	0.01~0.40	0.23

波速度が低く, さらに表-3から間隙率が特に高いことが分かり, 風化の影響が強い領域であると考えられる. クラスター3とクラスター2は共に岩級区分がCL~CM級, RQDが0~46%に属し, 間隙率分布も同程度であるが, クラスター3は特にS波速度および電磁波速度が低く, 飽和度が0.16~0.25と全体的に低いことから, 亀裂が多く透水性の高い領域であると考えられる. クラスター2は, 特に電磁波速度および比抵抗が高く, さらに飽和度が0.06~0.80と局所的に高い箇所もあるが, 平均値が0.24と全体的に低いことから, 透水性が比較的高い領域であると考えられる. クラスター1は, 岩級区分が概ねCM級, RQDが13~46%, 特に電磁波速度および比抵抗が低い. また, 間隙率が低く, 比較的硬質な岩盤であると推測できるが, 同じクラスター1でも飽和度が0.70~0.80と全体的に高い領域においては, 地下水による含水状態の高い領域である. 一方, 地下水位より上位に位置している飽和度が0.04~0.40と比較的低い領域では, 水みちの存在が推測できる.

以上より, SOMとk-means法を組み合わせたクラスター分類結果と, 変換解析による地盤物性値を検討することで, 詳細なクラスター評価が可能となり, さらにボーリングによる地質情報とも概ね整合的であることから, 本研究で提案する手法の有効性が認められた.

7. まとめ

本研究では、複数の物理探査の結果を総合的に解釈するため、情報処理工学の分野で幅広く使われている SOM に着目し、k-means 法を用いて物理探査で得られた物理量のデータを 4 つのクラスに特徴付けて分類を行った。さらに、変換解析による地盤物性値との比較を行った。以下に本研究で得られた所見を示す。

- 1) 弾性波トモグラフィ探査、比抵抗トモグラフィ探査、表面波探査、電磁波トモグラフィ探査の 4 種の物理探査から得られた次元の異なる物理量 (P 波速度、比抵抗、S 波速度、電磁波速度) を SOM と k-means 法を組み合わせた分類手法に用いることで、ボーリング調査で得られた RQD の大小や岩級区分、推定される地層構造とも概ね整合的な結果が得られた。
- 2) 変換解析結果の間隙率分布と飽和度分布との比較から、各クラスターと地盤物性値の数値分布がよく対応している結果が得られた。このことから、物理探査の複合評価において、P 波速度、比抵抗、その他の物理量が得られるのであれば、変換解析による評価手法と、SOM および k-means 法を組み合わせた評価手法を併用することで、より定量的な物理探査のクラスター分類評価ができるものと考えられる。
- 3) 本論文では簡易的に評価するため 4 つのクラスター数で分類を行ったが、各クラスターのデータの特徴をさらに細分化して分類することで、法面を構成する岩石の分布およびその性状をより詳細に抽出することが可能であると考えられる。また、同じ研究対象法面において定期的な計測をすることによって、各探査データの時系列変化においても変換解析手法と、SOM と k-means 法を組み合わせた手法を用いることで、風化や帯水状況といった地盤内部の状況の変化を定性的かつ定量的に評価することも可能であると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、現地計測データを提供して下さった、新都市社会技術創造融合研究会「物理探査の連続計測による斜面地盤の工学的手法に関する研究」プロジェクトの皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 楠見晴重, 高橋康隆, 中村真: 比抵抗値・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法, 土木学会論文集 F, pp.603-608, 2006.
- 2) Kohonen, T.: Simultaneous order in nervous nets from a functional standpoint, *Biological Cybernetics*, Vol.50, pp.35-41, 1982.
- 3) Kohonen, T.: *Self-Organization and Associative Memory*, Heidelberg: Springer, 1984.
- 4) 辻健, 松岡俊文, 中村恭之, 徳山英一, 倉本真一, Bang, N.: 自己組織化マップを用いたアトリビュート解析による南海トラフ沈み込み帯におけるプレート境界面の物性評価, 物理探査, Vol.57, pp.121-134, 2004.
- 5) 日外勝仁, 斎藤敏明, 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, pp.51-60, 2004.
- 6) 宮川歩夢, 辻健, 松岡俊文, 山本剛: 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, 土木学会論文集 C, Vol.66 No.1, pp.88-99, 2010.
- 7) Wyllie, M.R.Gregory, A.R. and Gardner, L.W.: Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21(1), pp.41-70, 1956.
- 8) Archie, G.E.: The Electrical Resistive Log as Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Trans.A.I.M.E.* Vol.146, pp.54-62, 1976.
- 9) 千葉明彦, 熊田政弘: 花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定, 物理探査, Vol.47, No.3, pp.161-172, 1994.
- 10) 岩本宏, 熊田政弘, 飯博行: 花崗岩の比抵抗および間隙水の関係, 土木学会第 50 回年次学術講演会, pp.64-65, 1995.
- 11) 西方卯佐男, 大友譲, 小里隆孝, 澤井清人: 比抵抗及び弾性波探査結果を用いた岩級区分の算定について, 土木学会第 51 回年次学術講演会, pp.13-14, 1996.
- 12) 宮本定明: クラスター分析入門 ファジィクラスタリングの理論と応用, 森北出版株式会社, 1999 年.
- 13) Davies, D. L. and Bouldin, D. W.: A cluster separation measure, *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, Vol.1, No.2, pp.224-227, 1979.

A STUDY FOR THE COMPOUND EVALUATION OF GEOPHYSICAL EXPLORATIONS BY SELF-ORGANIZING MAPS

Tatsuru YAMAMOTO, Harushige KUSUMI, Makoto NAKAMURA, Takeshi TSUJI
and Kasumi NAKAMURA

In recent years, geophysical exploration is the remarkable method to evaluate the soundness of the aging slope. However, there is a limit of the interpretation by a geophysical exploration, so two or more geophysical explorations are used to make up for the limit of the interpretation. In this paper, we tried to evaluate the cluster classification of the ground state by two or more geophysical explorations with self-organizing maps (SOM), and compared the cluster classification with the results of the analysis to convert the combination of the seismic velocity and the resistivity into the porosity and the saturation. It was possible to evaluate the ground state of each cluster by SOM.