

新都市社会技術融合創造研究会

物理探査の連続計測による斜面地盤の 工学的評価手法に関する研究

プロジェクトリーダー 関西大学 楠見晴重
幹事 ニュージェック 中村 真

研究のコンセプト

本研究は、地震、豪雨などに対する斜面防災と斜面健全性の評価および対策斜面の長寿命化に資する研究として実施するものである。さらに、老朽化した道路法面の性能評価として、種々の物理探査法を用いて連続的に計測を行い、斜面の健全性評価法を構築することを目的とする。

研究の概要

主として老朽化した吹付法面の斜面内部の地盤状況を種々の物理探査法を用いて連続的に計測し、計測された物理量もしくは変換解析等によって得られた複数の地盤物性値を用いて斜面内部におけるそれらの時系列解析を行い、斜面の性能特性について検討するとともに、斜面の健全性評価手法を構築する。

研究期間

平成19年12月～平成22年12月

研究メンバー(終了時)

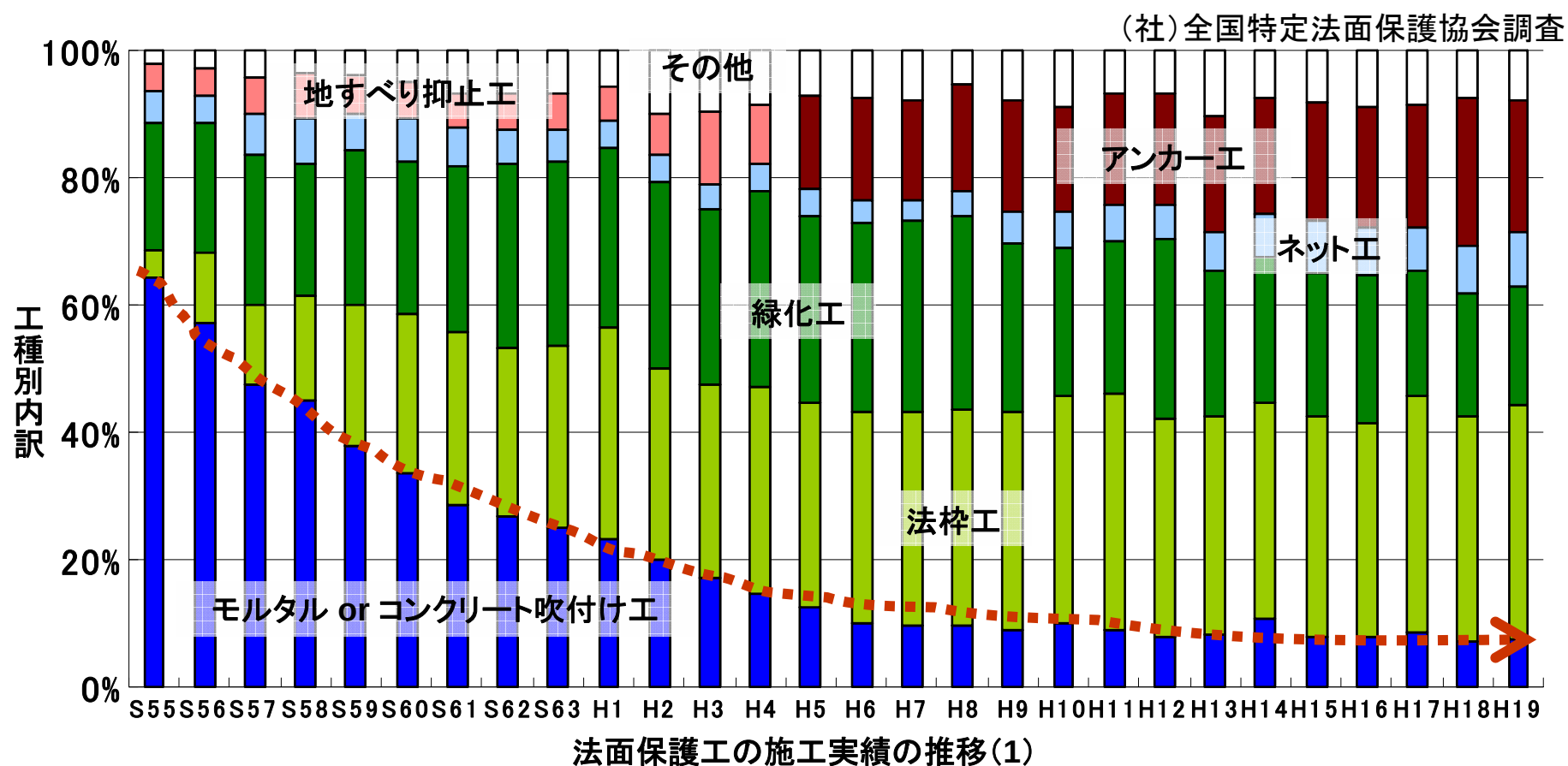
	所属・役職	氏名
プロジェクトリーダー	関西大学環境都市工学部 都市システム工学科 教授	楠見 晴重
アドバイザー	NPO法人 環境・エネルギー・農林業ネットワーク	芦田 譲
学	京都大学大学院工学研究科	三ヶ田 均
	京都大学大学院工学研究科	岸田 潔
官	近畿地方整備局 企画部 技術調整管理官	山本 剛
	近畿地方整備局 道路部 道路管理課 課長	野中 砂男
	近畿地方整備局 道路部 道路構造保全官	宇佐美 光博
	近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 副所長	中村 香澄
	近畿地方整備局 近畿技術事務所 副所長	小段 栄一
産	(株)ニュージェック 技術開発グループ	中村 真*
	(株)環境総合テクノス 土木部	片山 辰雄
	(株)日本地下探査 関西支店	畠中 与一
	サンコーコンサルタント(株) 関西中部支社 大阪支店 技術部	辻野 裕之
	川崎地質(株) 保全技術部	鈴木 敬一
	西日本高速道路エンジニアリング関西(株)	上出 定幸
	応用地質(株) 関西支社 ジオテクニカルセンター	利岡 徹馬
	(株)興和 工事部	小林 雄三
オブザーバ	(財)道路保全技術センター 近畿支部 支部長	森山 敏雄
	関西大学大学院理工学研究科ソーシャルデザイン専攻	山本 龍

* 幹事

活動実績

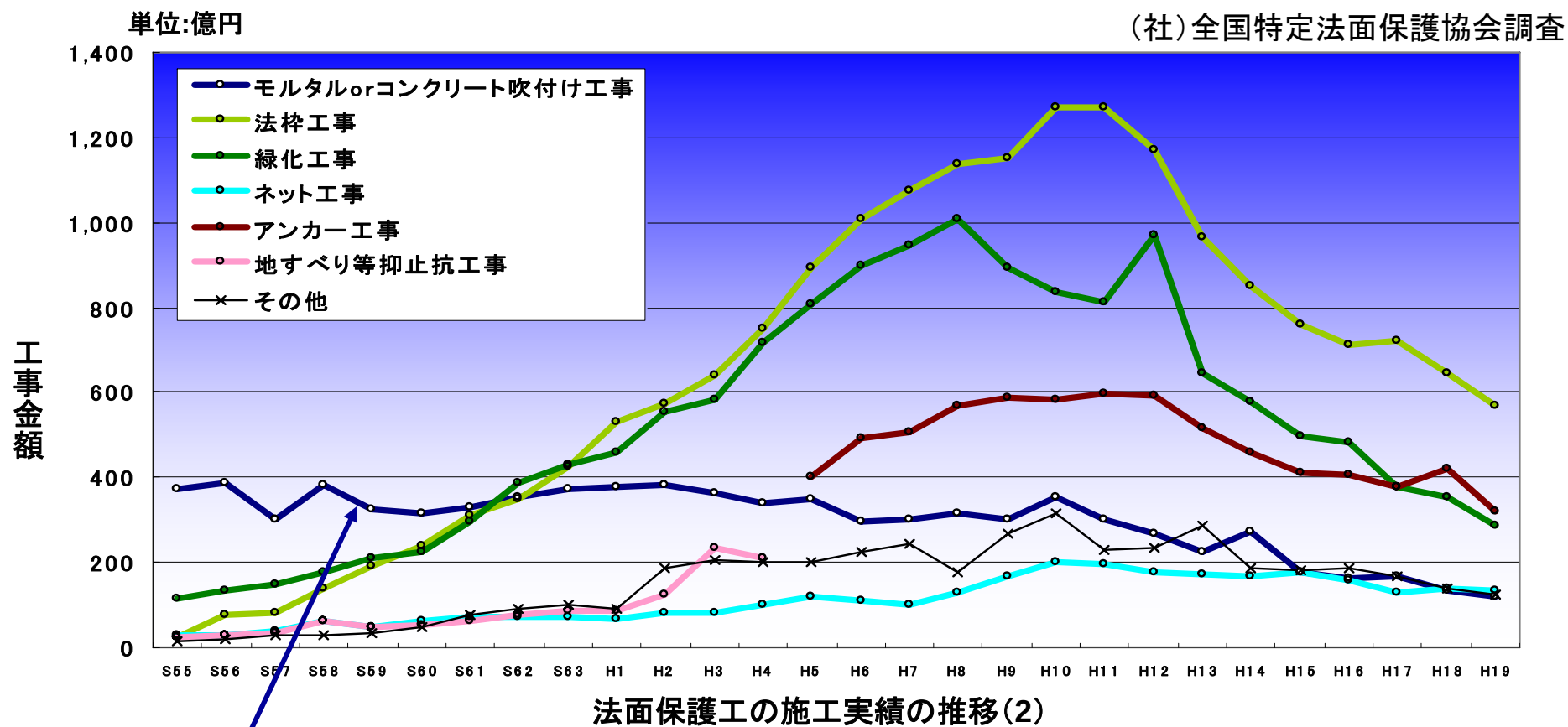
会議回数	開催日	主な議題等
1	H19.12.14	プロジェクトの趣旨説明と今後の活動方針協議
現地視察	H20.1.24	研究対象個所の視察
2	H20.3.7	現地調査計画を踏まえた研究方針協議
3	H20.5.29	現地ボーリングコア等確認と各社測定計画策定に際しての協議
4	H20.7.4	各社測定計画協議
現地調査	H20.7.22～8.26	各社第1回測定
5	H20.9.26	各社第1回測定報告
現地調査	H20.11.17～12.26	各社第2回測定
6	H21.1.30	各社第2回測定報告
7	H21.5.22	話題提供
現地調査	H21.7.1～7.22	各社第3回測定
8	H21.8.28	各社第3回測定報告
現地調査	H21.11.17～12.25	各社第4回測定
9	H22.1.29	各社第4回測定報告
10	H22.5.18	話題提供、各社健全性評価手法の提案
現地調査	H22.7.1～8.25	各社第5回測定
11	H22.9.24	各社第5回測定報告
12	H23.1.21	研究総括

研究の背景



年度別に見た吹付け法面の施工件数の内訳は、近年大幅に減少している。

研究の背景



工事金額から見た施工件数ではあまり変化がない。

➤ 高度経済成長期以降建設された膨大な数の吹付け法面は、現在劣化が進んでいる。

老朽化した吹付法面の現状



はらみ出しによるモルタルの亀裂

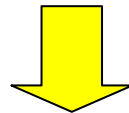


モルタルの剥離



土砂化による崩壊

背面地山状態を可視化する。



法面における斜面安定に関する地盤評価を行ない、適切な維持管理を行なう。

研究サイトの概要

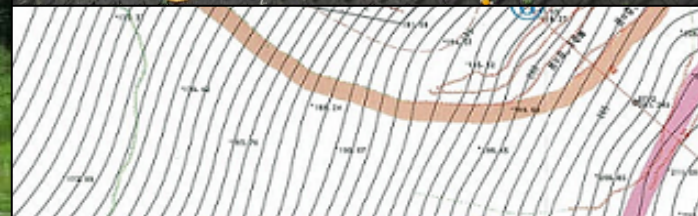
京都府福知山市三和町大身地区

国道9号切土法面

<地質>

中生代三畳紀～ジュラ紀の丹波層群にあり、主に砂岩層、頁岩層あるいは砂岩頁岩互層より構成される。





国道9号線の南側に隣接した、
長さ200数十m、高さ約50mの
比較的大規模な法面である。



法面

研究項目

物理探査によるモニタリング

1) 各種物理探査による定期観測(年2回実施)

- ①熱赤外線探査
- ②電磁波トモグラフィ・連続波レーダ探査
- ③比抵抗トモグラフィ探査
- ④弾性波トモグラフィ探査
- ⑤表面波探査
- ⑥たわみ振動測定・FDEM探査

評価法の検討

2) 計測結果の評価手法の検討 (各探査における物理量による評価)

3) 物理探査の工学的評価手法の構築 (新しい試みによる評価)

- ①変換解析による評価
- ②自己組織化マップ(SOM)による評価

4) 斜面地盤の健全度判定手法の提案

H20,21年度実施



H22年度実施

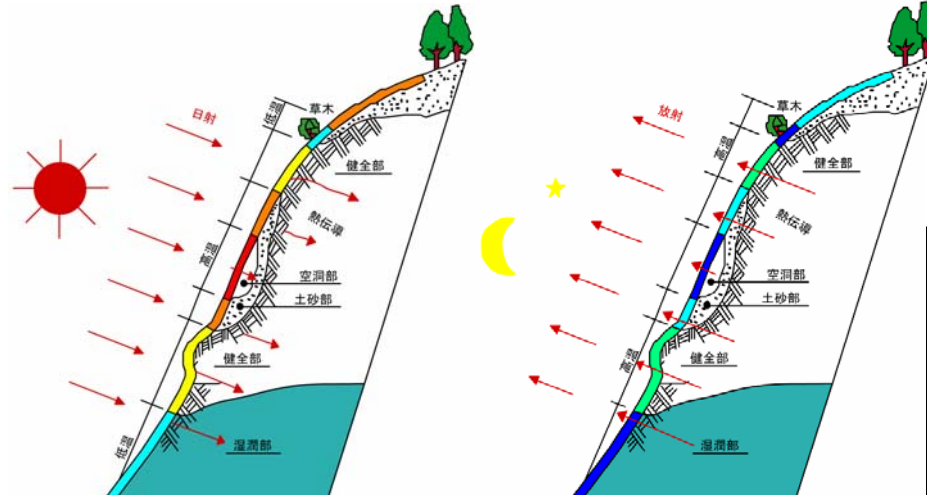


熱赤外線探査による検討

熱赤外線探査は物体から放射される熱赤外線エネルギーを検出し、その表面温度を平面的に映像化することによって物体内部の状態や性質を調査する非破壊探査技術である。

吹付法面は、日中には日射により温められ、夜間には蓄積された熱エネルギーを放射し冷やされるといったほぼ一定のサイクルを繰り返している。外的影響を受けた吹付法面は、地山の変状や湧水、吹付の厚さなど、熱伝導率の違いによって熱移動に差を生じ、いくつかの規則性を持った表面温度分布を示す。

この規則性を利用して、吹付法面の状態を推測しようとするのが熱赤外線映像法であり、下記に吹付法面における、日中、夜間の熱移動模式図、熱移動モデルを示す。



日中の熱伝導模式図

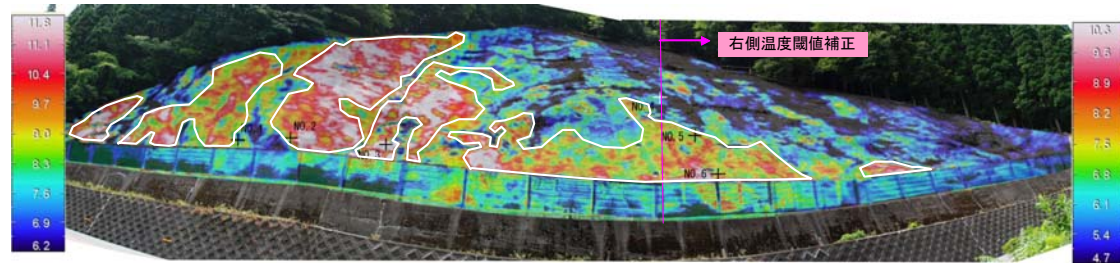
夜間の熱伝導模式図

日中・夜間の温度変化の解釈

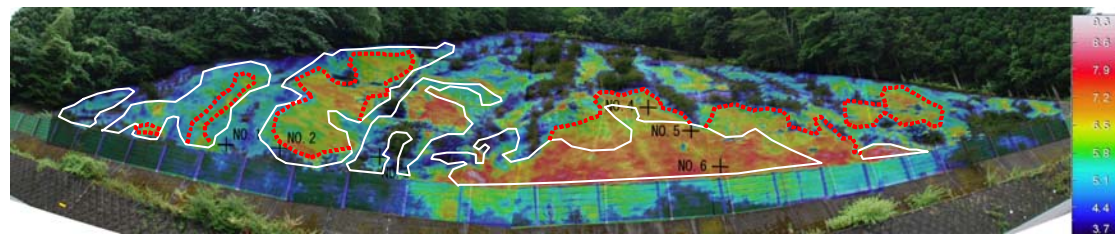
吹付背面の性状	日中の表面温度	深夜・早朝の表面温度	2時期の温度変化
空洞部	特に高温(⑦)	低温(①)	特に大
土砂部	高温(⑥)	低温(②)	大
湿潤部	低温(②)	低温(①)	特に小
健全部	やや高温(⑤)	やや低温(③)	小

温度差画像による評価例(A地区:吹付け法面)

H20年度夏期の2時刻(朝夕)温度差画像

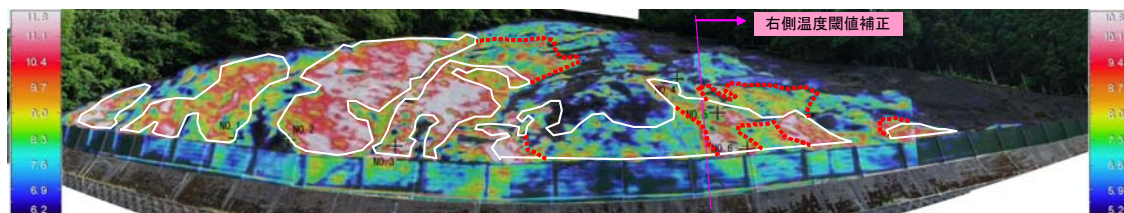


H21年度夏期の2時刻(朝夕)温度差画像



H22年度夏期の2時刻(朝夕)温度差画像

※赤破線の範囲:平成20年度
と比べ違いが見られたところ



- ➡ 2時刻の温度差画像を用いる手法で、健全性評価の対象となる吹付けのり面背面での地山との密着性(空洞の存在)や地山の風化程度(土砂部などの存在)を推定することが可能である。

電磁波トモグラフィによる検討

電磁波トモグラフィは、医療用X線CTスキャンとほぼ同じ原理を用い、内部が不可視の断面を可視画像化する技術である。

測定では、送信源として電磁波を用いて、調査範囲内を透過させ、受信信号を得る。

各測定点の受信信号の伝搬時間と振幅を読み取り、受信信号の伝搬時間から速度分布図、振幅から振幅比分布図を、逆計算により求める。通常の電磁波トモグラフィでは、電磁波伝搬速度の断面図が得られるが、本研究では次の手順により電磁波伝搬速度を体積含水率に換算して表示した。

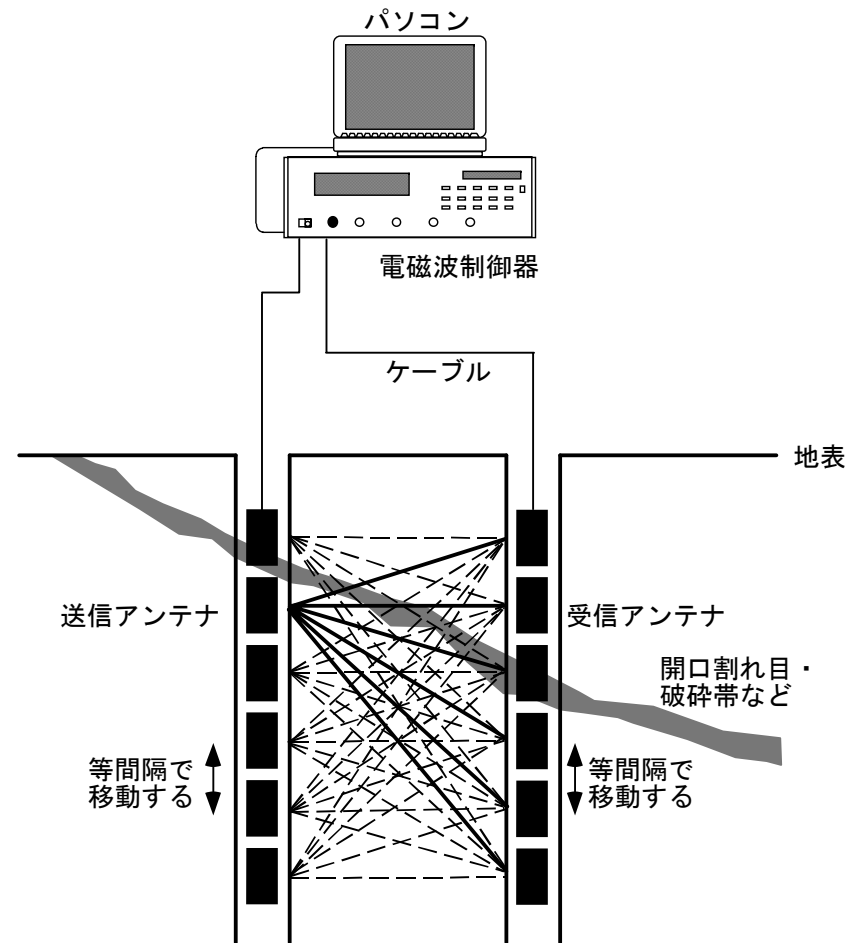
①電磁波伝搬速度 を比誘電率 に換算

$$\varepsilon_r = \left(\frac{C}{v} \right)^2 \quad (1)$$

②Topp et al.(1980)の式を用いて比誘電率を体積含水率 に換算

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\varepsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (2)$$

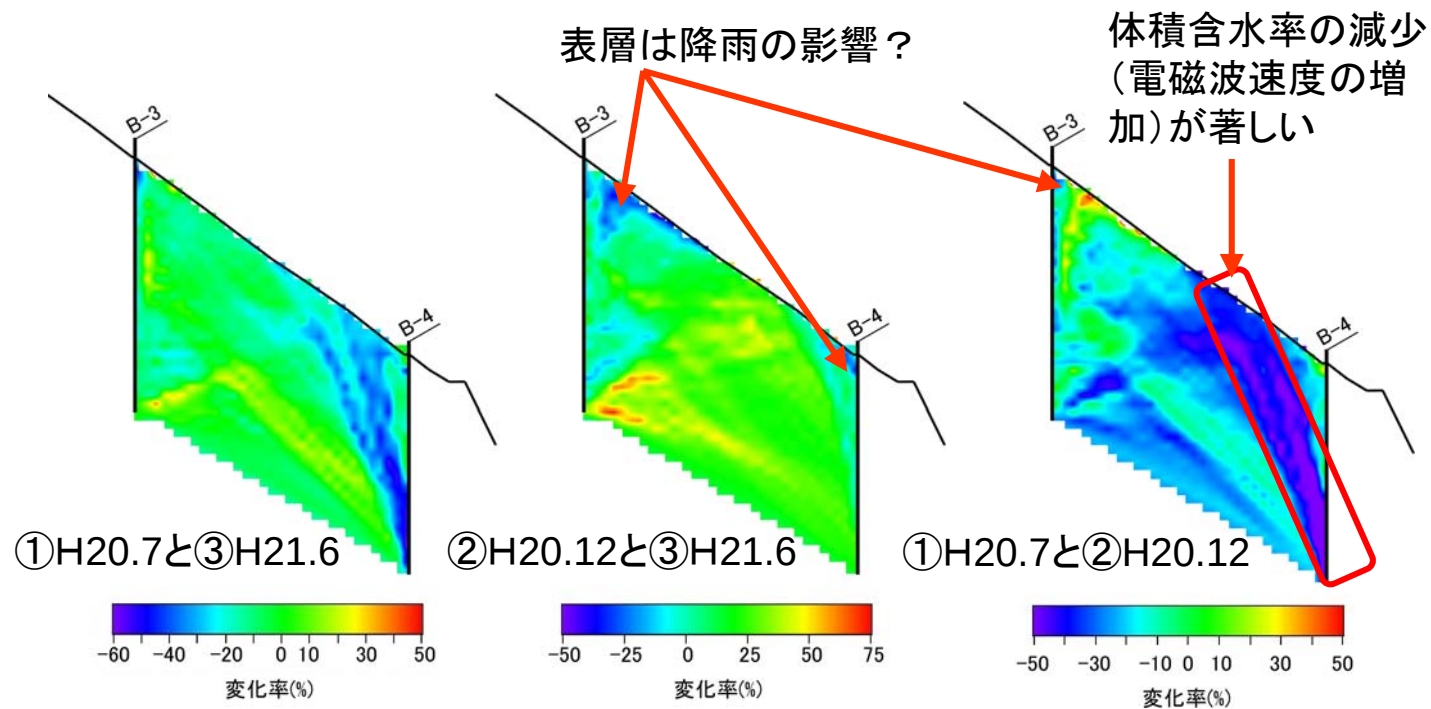
右図に、電磁波トモグラフィの概念図を示す。



電磁波トモグラフィの概念図

体積含水率による評価例(B地区: 自然法面)

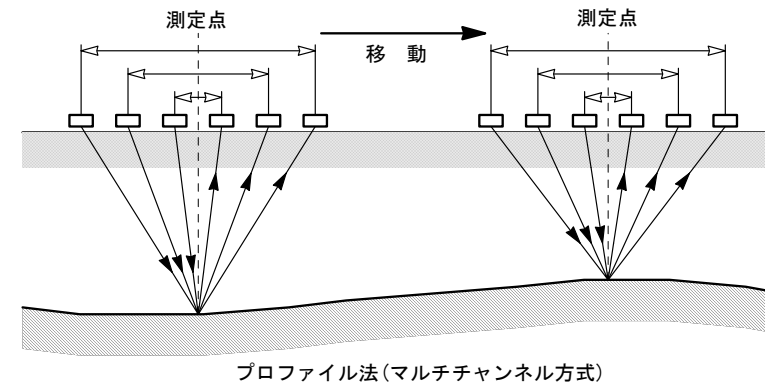
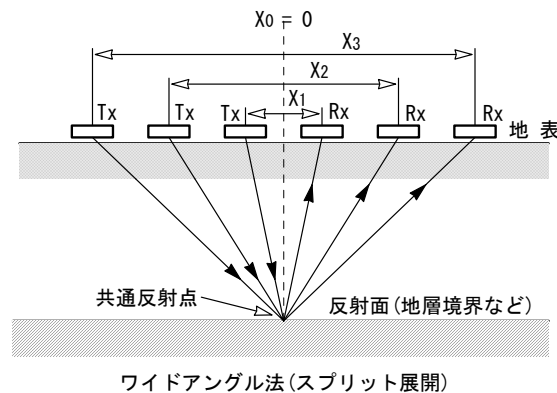
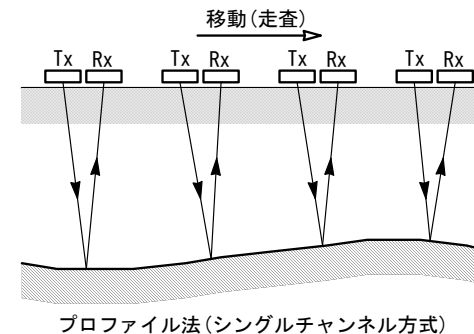
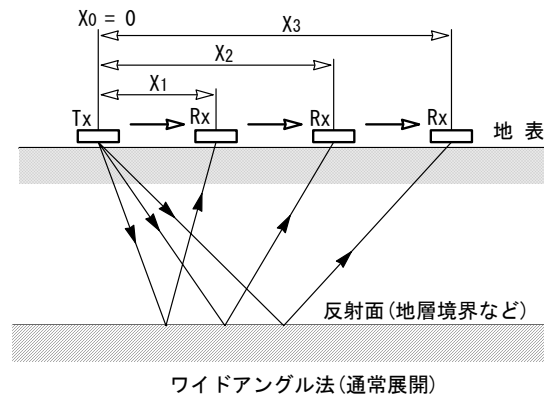
体積含水率変化



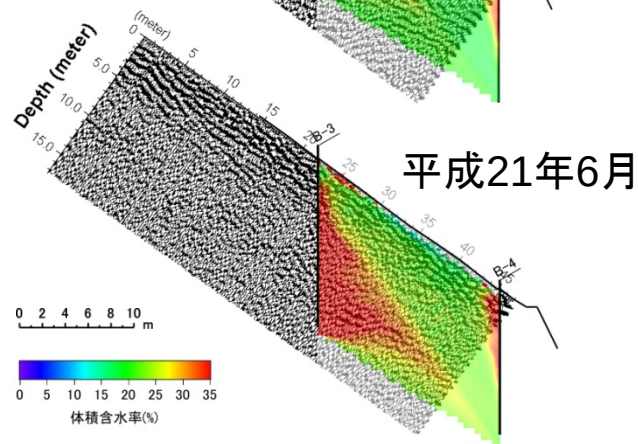
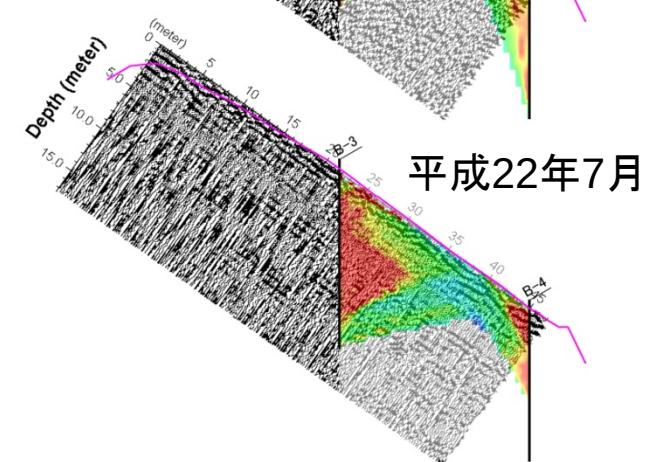
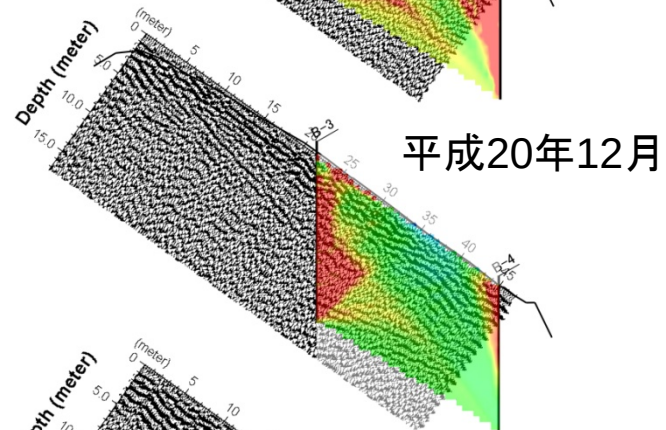
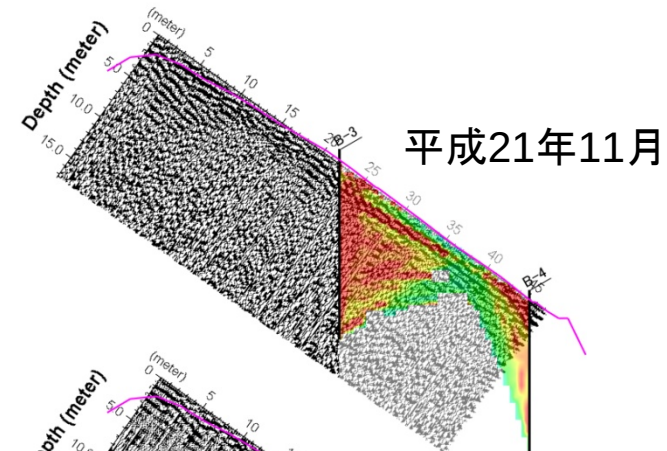
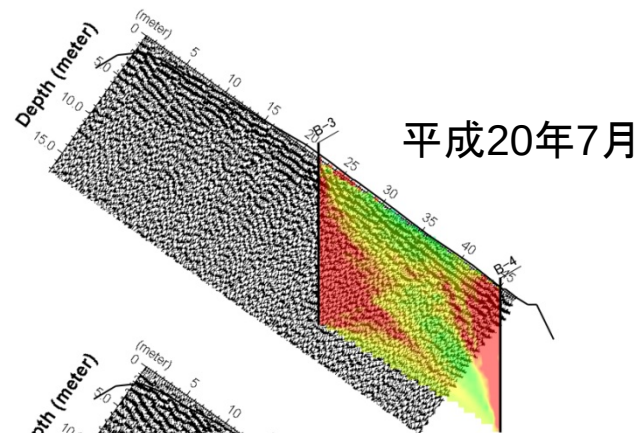
- ➡ B-4孔側に、高角度で変化率の大きい領域が認められた。この部分は、乾湿を繰り返していると考えられ、風化帯の可能性もある。また、この高角度は層理面を捕らえている可能性がある。

連続波レーダ探査による検討

連続波レーダ探査は、送信源として電磁波(MF～VHF帯)を用いる反射法探査である。地表面から地中に向けて照射した電磁波のうち、地中の反射面から戻ってくる反射信号を検出することによって、反射面までの深さと平均伝搬速度などを求めることができる。



探査結果による評価例(B地区:自然法面)

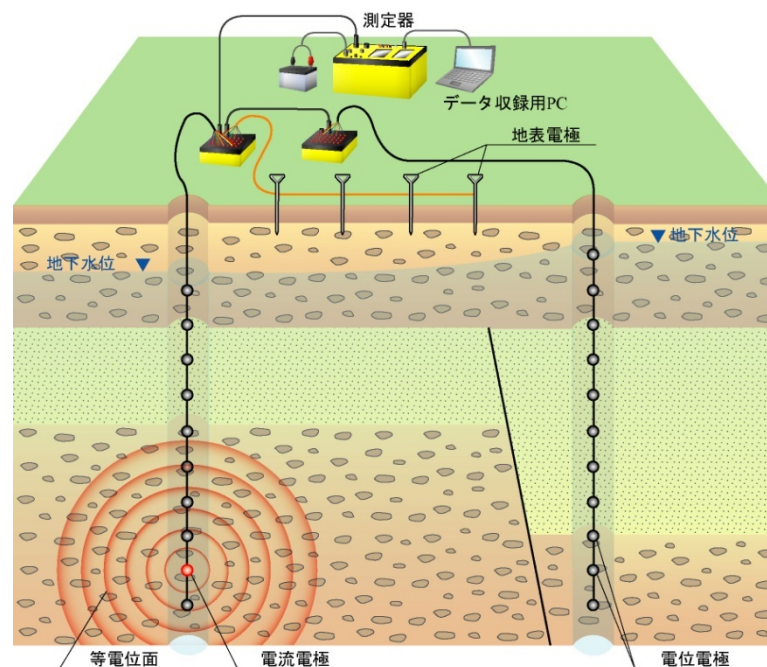


連続波レーダにより捕らえられた反射面は、測定時期により反射面の明瞭さが異なり、降雨量と関係があることが考えられる。

比抵抗トモグラフィ探査による検討

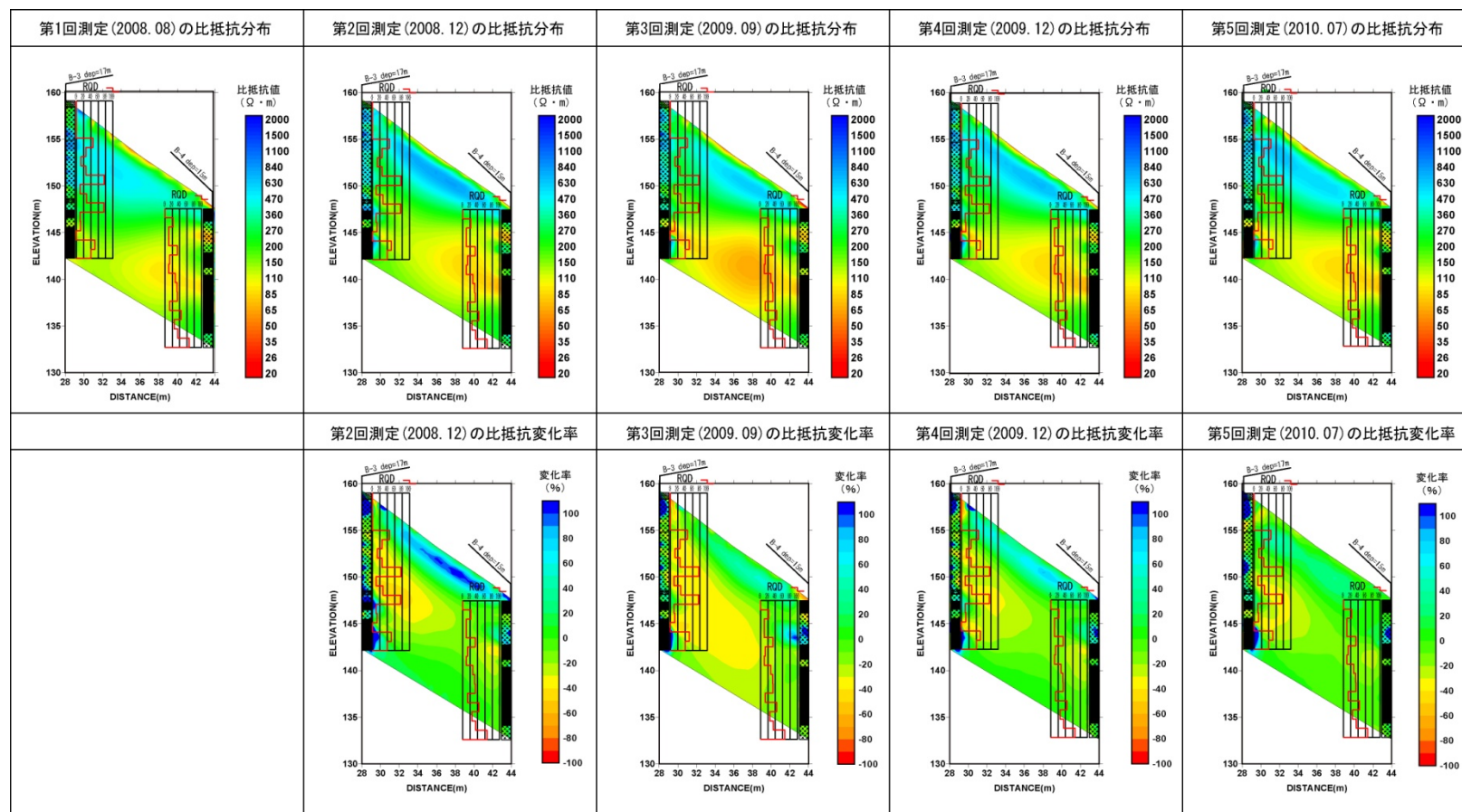
比抵抗トモグラフィ探査は、探査対象領域の周囲を取り囲むように電極を配置し、地下の構造を比抵抗分布として捉え、地下水の賦存状態および亀裂の分布状況についての基礎資料を得ることを目的に実施する。

今回実施した比抵抗トモグラフィは、地表とボーリング孔に配置された電極で囲まれたエリア内の比抵抗分布を測定する形であり、地表のみから行う探査に比べて解析精度の向上が期待できる。比抵抗は同じ地質でも地下水の介在の有無によって変化(地下水が介在すると電気が流れやすくなり、比抵抗が低下する)することから、地下水の賦存状況(飽和・不飽和)および地質構造を面的に推定する基礎資料となる。



比抵抗トモグラフィの概念図

比抵抗分布による評価例(B地区:自然法面)

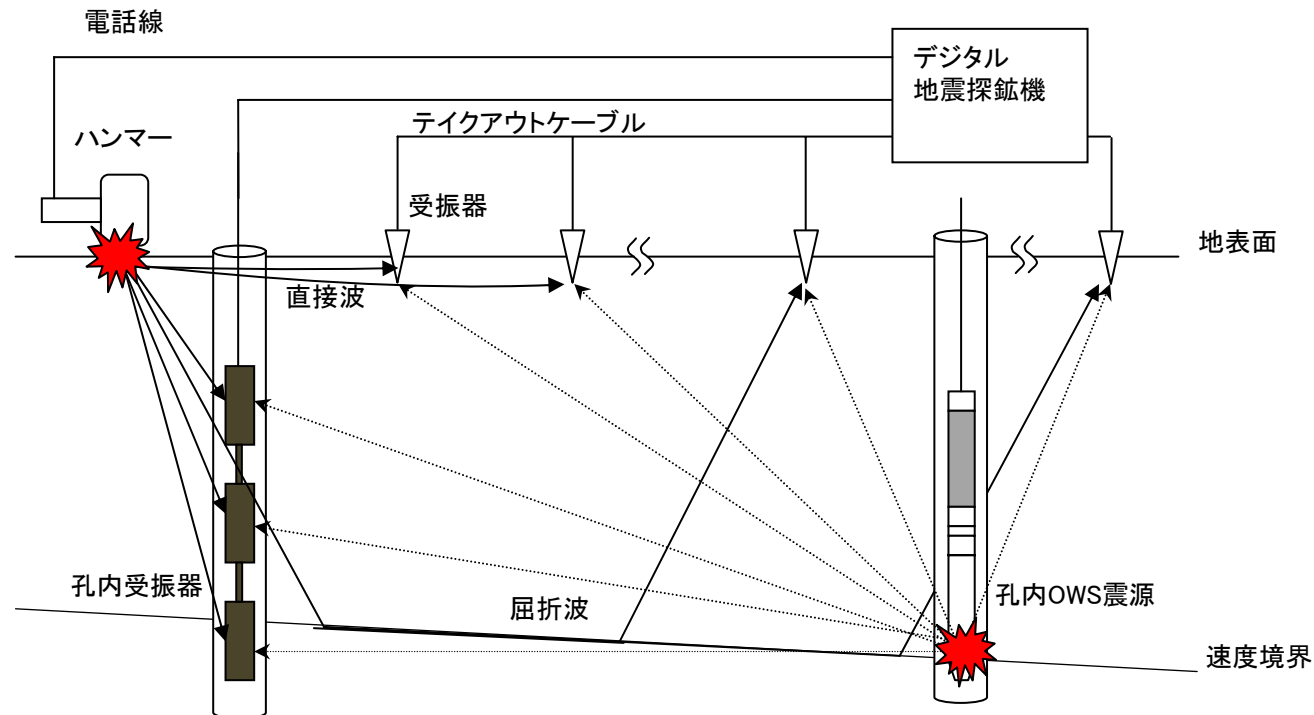


※変化率の基準は第1回測定データ

- ➡ 当該地の経時変化を捉えるために、モニタリングを実施した結果、脆弱部として推定した範囲で変化を捉えることができ、比抵抗探査を用いてモニタリングすることで、地質状況の変化を捉えることができる可能性を示した。

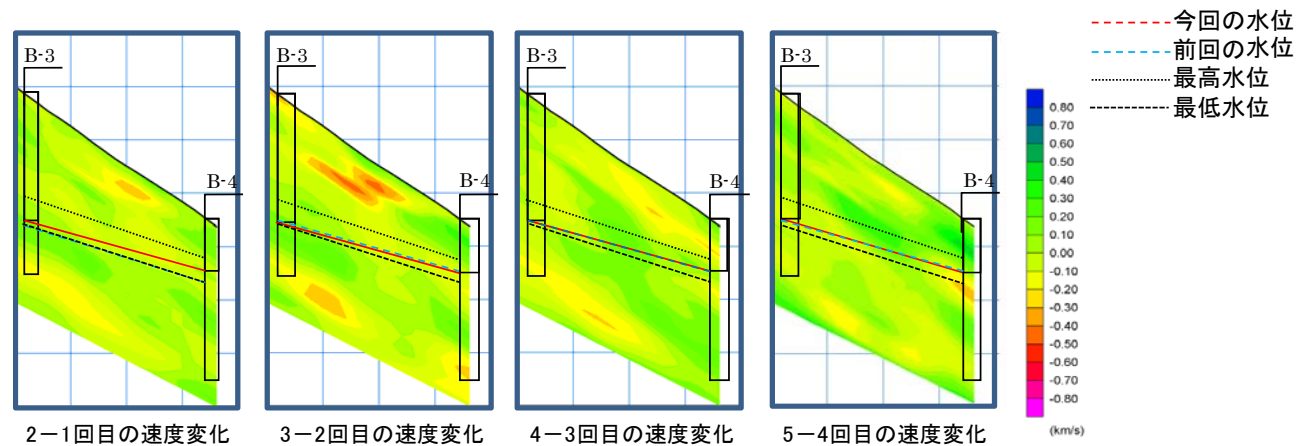
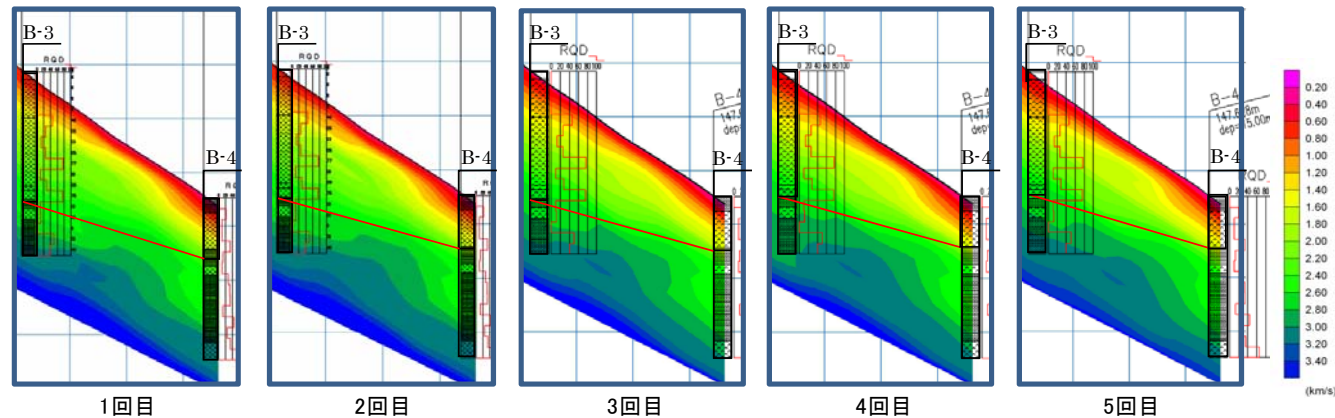
弾性波トモグラフィ探査による検討

弾性波トモグラフィ探査は、地表付近やボーリング孔内で人工的に起こされた弾性波が地表と孔内に設置された受振器に直接伝播、または弾性的性質の相違する地層の境界で屈折し伝播する現象を利用するもので、地層が有する弾性波速度値や地下構造が推定できる。



弾性波トモグラフィの概念図

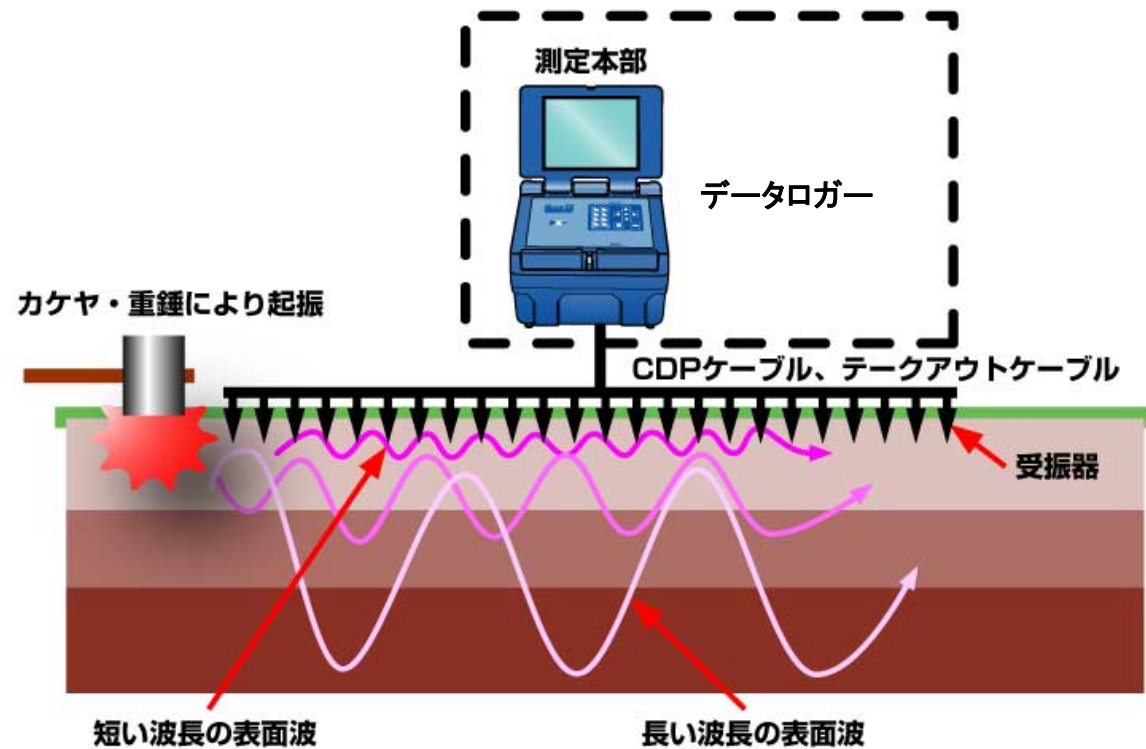
弾性波速度分布による評価例(B地区:自然法面)



- ➡ 弾性波探査により斜面地盤の風化部の分布など、現状を把握することは可能である。
しかし、数年といった短い期間での岩盤状況の変化を捉えることは、測定・解析精度の観点から困難であると考える。

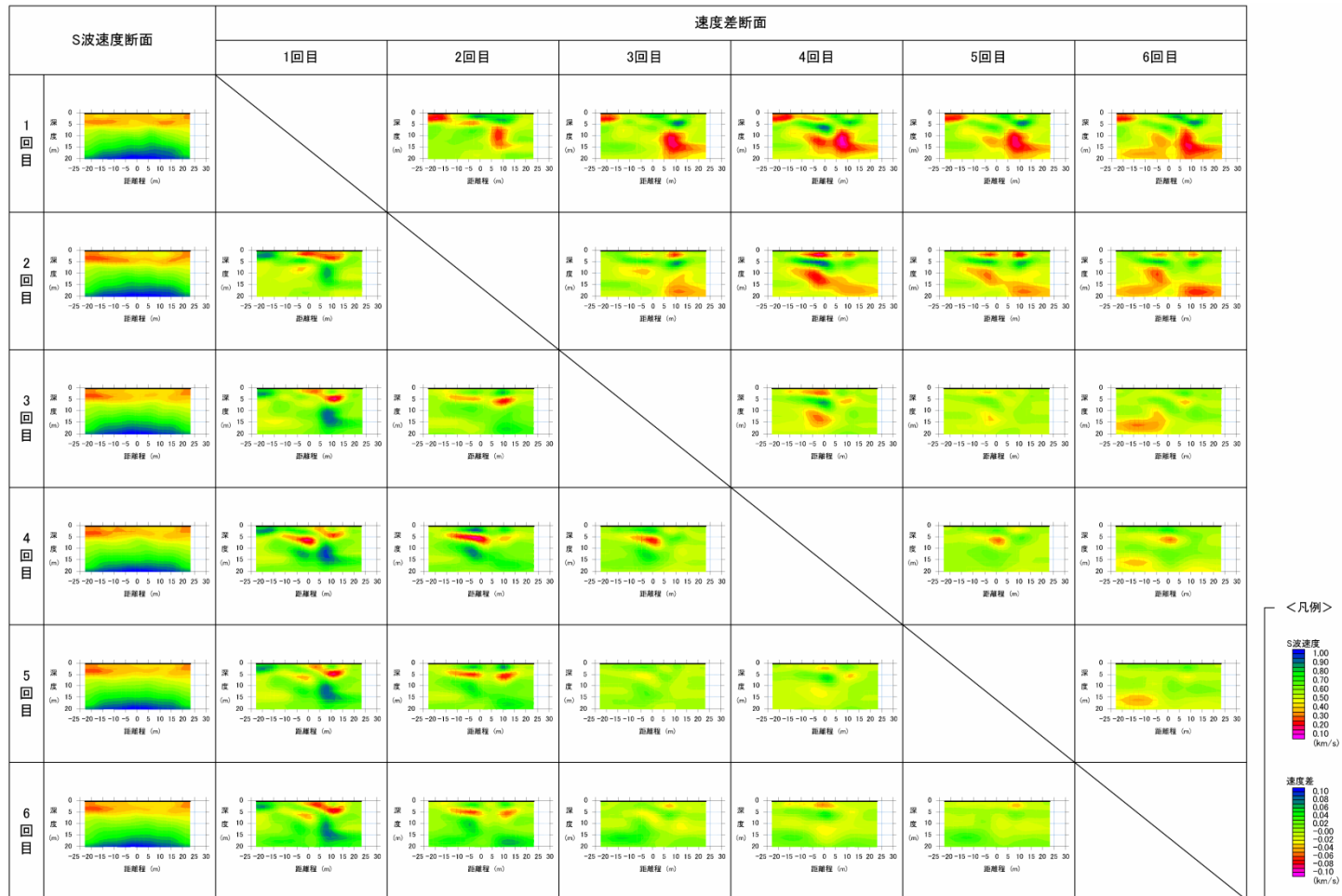
表面波探査による検討

表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波(レイリー波)を多チャンネルで測定・解析することにより深度20m程度までの地盤のS波速度を二次元断面として画像化する探査手法である。測定・解析が簡単なため、素早く低コストでS波速度構造を求めることが可能である。S波速度は物質の硬さなど工学的な目安となる剛性率に直接関係する値であり、地盤の動的特性の把握・検討などに有益である。



表面波探査の概念図

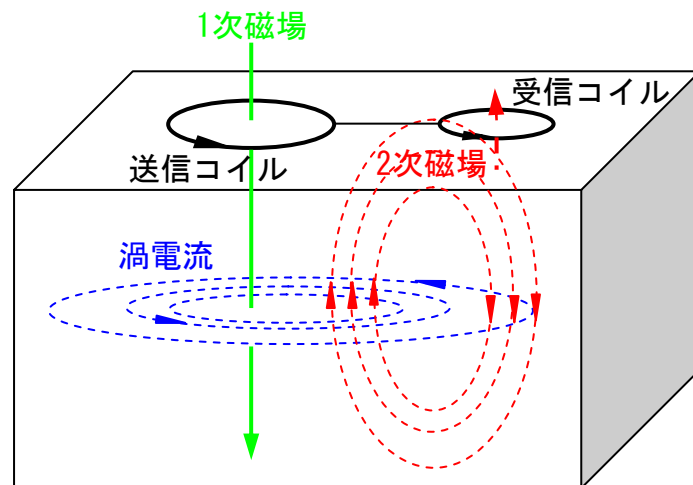
S波速度分布による評価例(B地区:自然法面)



➡ 各回のS波速度分布には再現性があるため、それらの速度差を求めることにより、岩盤状況の経時変化を捉えることが可能であると考えられる。

FDEM探査による検討

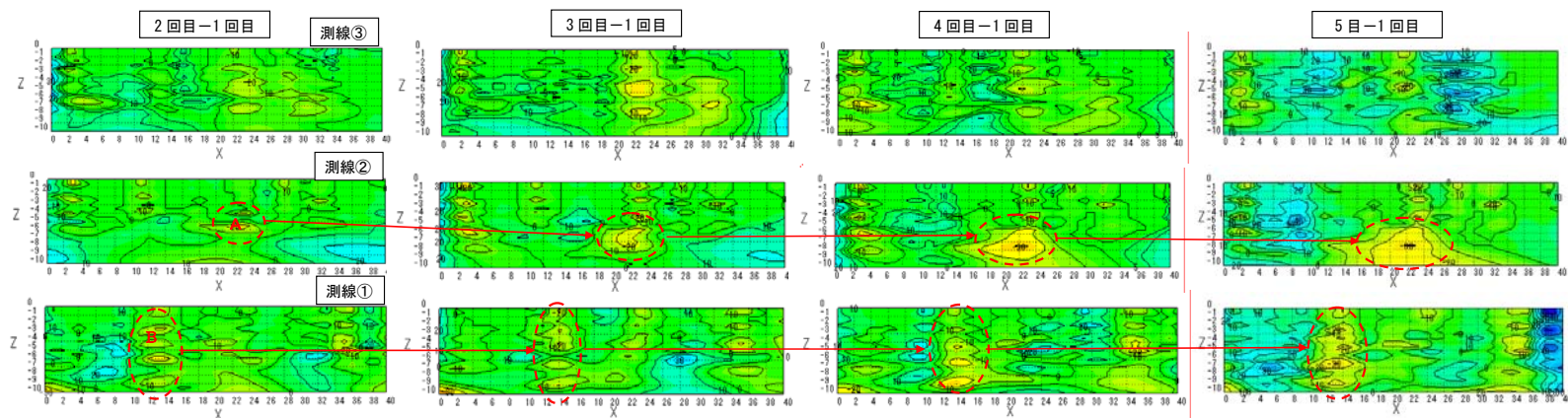
FDEM探査法とは、周波数領域EM探査法 (Frequency Domain Electromagnetic Method) の略称で、物理探査では電磁法に属する。周波数領域とは、電磁波が低周波になるほど深くまで透入する性質を利用し、周波数をいくつか変えて探査し、周波数を深度のパラメータとしたデータを取得し、逆解析法によって地盤の比抵抗分布を求めるものである。提案するFDEM探査法は、16周波数の高周波電流を自動発信させて探査する点に特長があり従来の手法に比べ地層の分解能が高い。



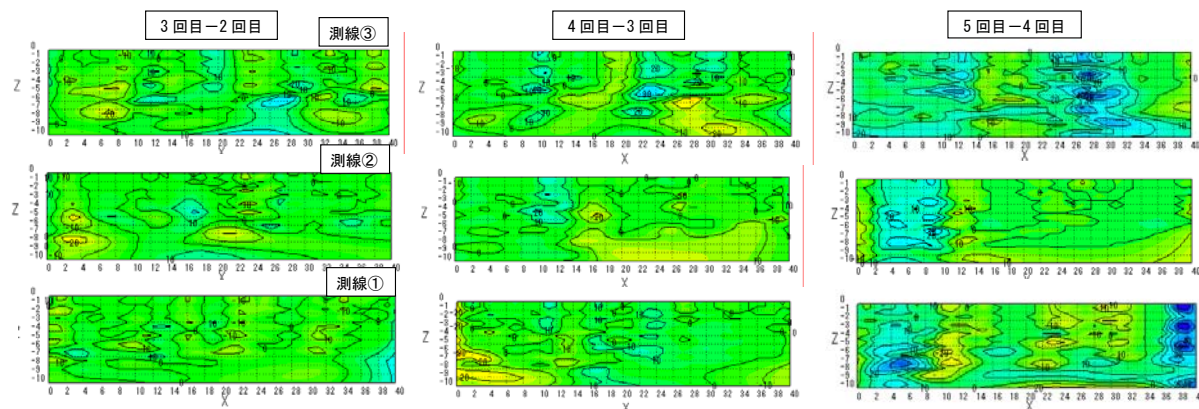
FDEM探査の概念図

比抵抗分布による評価例(A地区:吹付け法面)

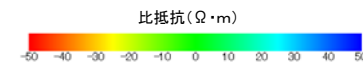
各回の測定結果と1回目との差分比抵抗



各回の測定結果と前回との差分比抵抗



測定回	年月日
1回目	2008年11月5日
2回目	2008年12月23日
3回目	2009年7月13日
4回目	2009年12月16日
5回目	2010年8月25日



➡ 半年に1回あるいは3ヶ月に1回などの割合でモニタリングすることで長期的な地山変化を捉えることができる可能性があるということが結論される。

新しい試みによる評価

昨年度に引き続き、弾性波探査と電気探査に着目し、原位置で得られた弾性波速度分布・比抵抗分布を間隙率分布・飽和度分布に変換するシステムを用いた地盤評価を行なうとともに、今年度は新たにさらに複数の探査結果を複合的に評価することができる自己組織化マップ(Self-Organizing Maps : SOM)による評価を試みた。

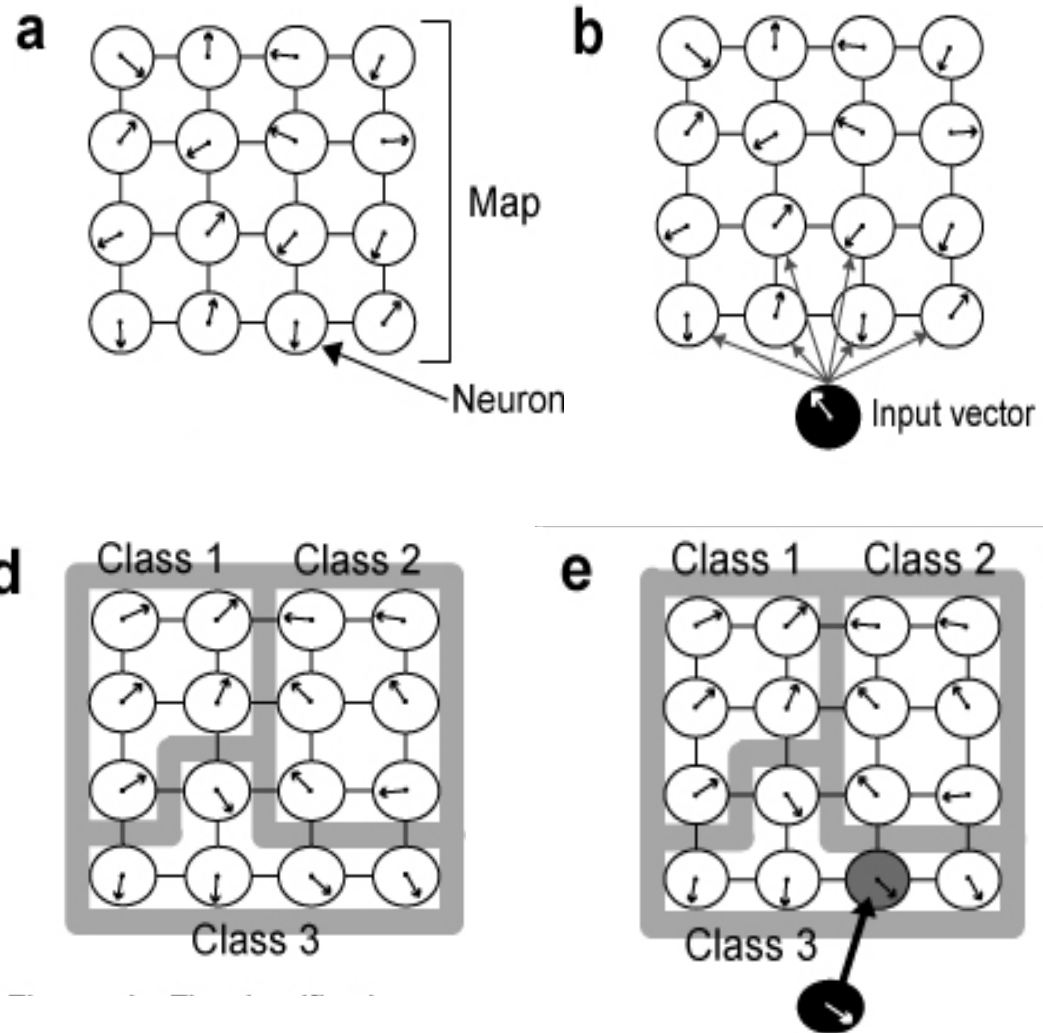
SOMの概要

自己組織化マップとは、ヘルシンキ大学のコホネンによって発表された教師無し学習ニューラルネットワークである。

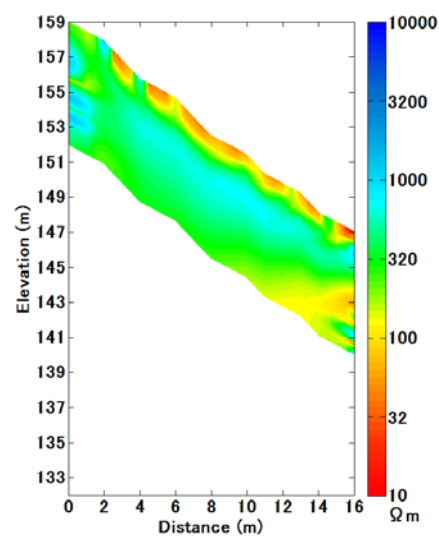
特徴として、入力パラメータ群をその類似度に応じて分類する能力があげられる。具体的には、類似した特徴を持つデータは近くに、異なった特徴を持つデータは離れた位置に配置されたマップを作成することができる。

解析フローチャート

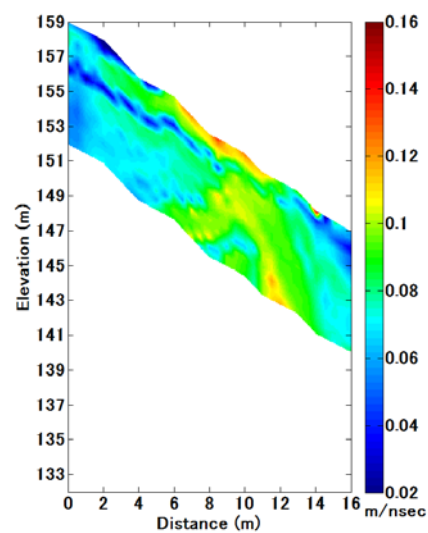
- a. マップの作成
- ↓
- b. 勝者ユニットの探索
- ↓
- c. 近傍ユニットの学習
- ↓
- d. マップのクラス化
- ↓
- e. 入力ベクトルのクラス化



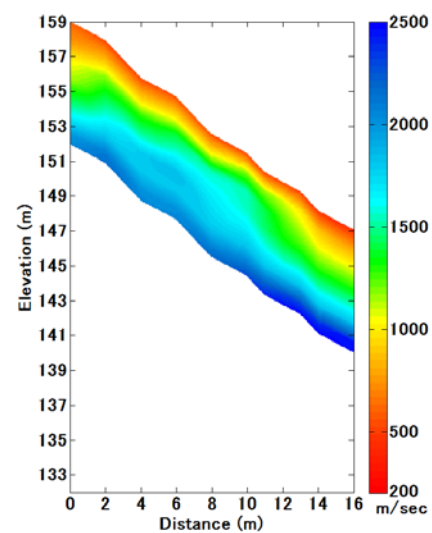
各探查結果図(B地区;自然斜面)



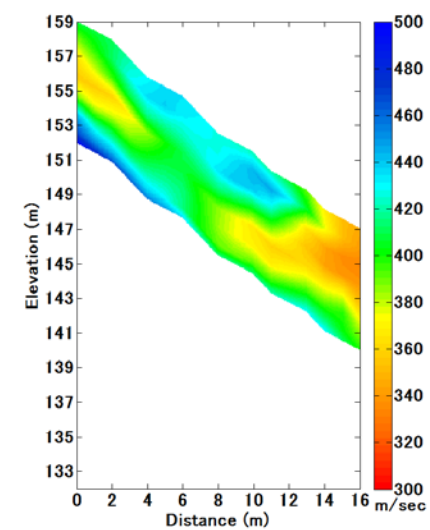
比抵抗分布図



電磁波伝播速度分布図



P波速度分布図

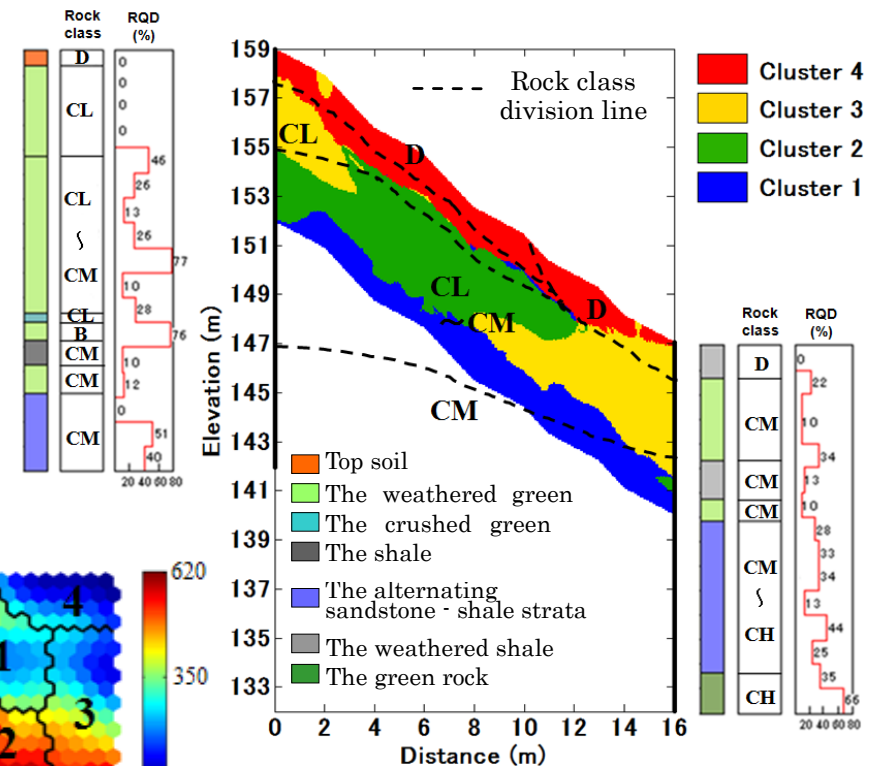


S波速度分布図

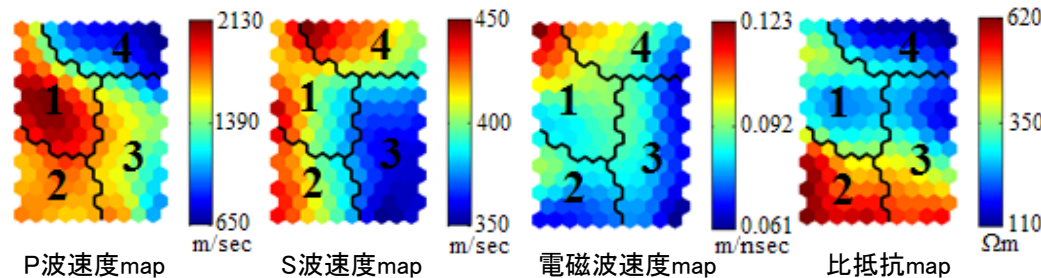
各物理量の相対値

クラスター	P波速度	S波速度	電磁波速度	比抵抗
4	●	●●	●●	●
3	●●	●	●	●●
2	●●	●●	●	●●●
1	●●●	●●	●●●	●●

クラス分類図



マップ図



- ➡ 各クラスターが有する物理量の特徴を総合的に把握することで、法面地盤の風化度評価, 含水率の大小評価, 亀裂性岩盤エリアの推定, 地質構造を反映した岩盤性状を推定できる可能性を示すことができた。

まとめ

本研究では、老朽化した道路法面の性能評価として、京都府福知山市三和町大身地区の国道9号切土法面において、種々の物理探査法を用いて連続的に計測を行った。

また、斜面の健全性評価法を構築することを目的として、夏季と冬季を主に複数回、これらの調査を実施して、調査結果の差分評価を実施した。

さらに、種々の物理探査および複合評価手法において工学的評価法の構築を試み、その適用性について検証することができた。
