
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

研究の目的

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

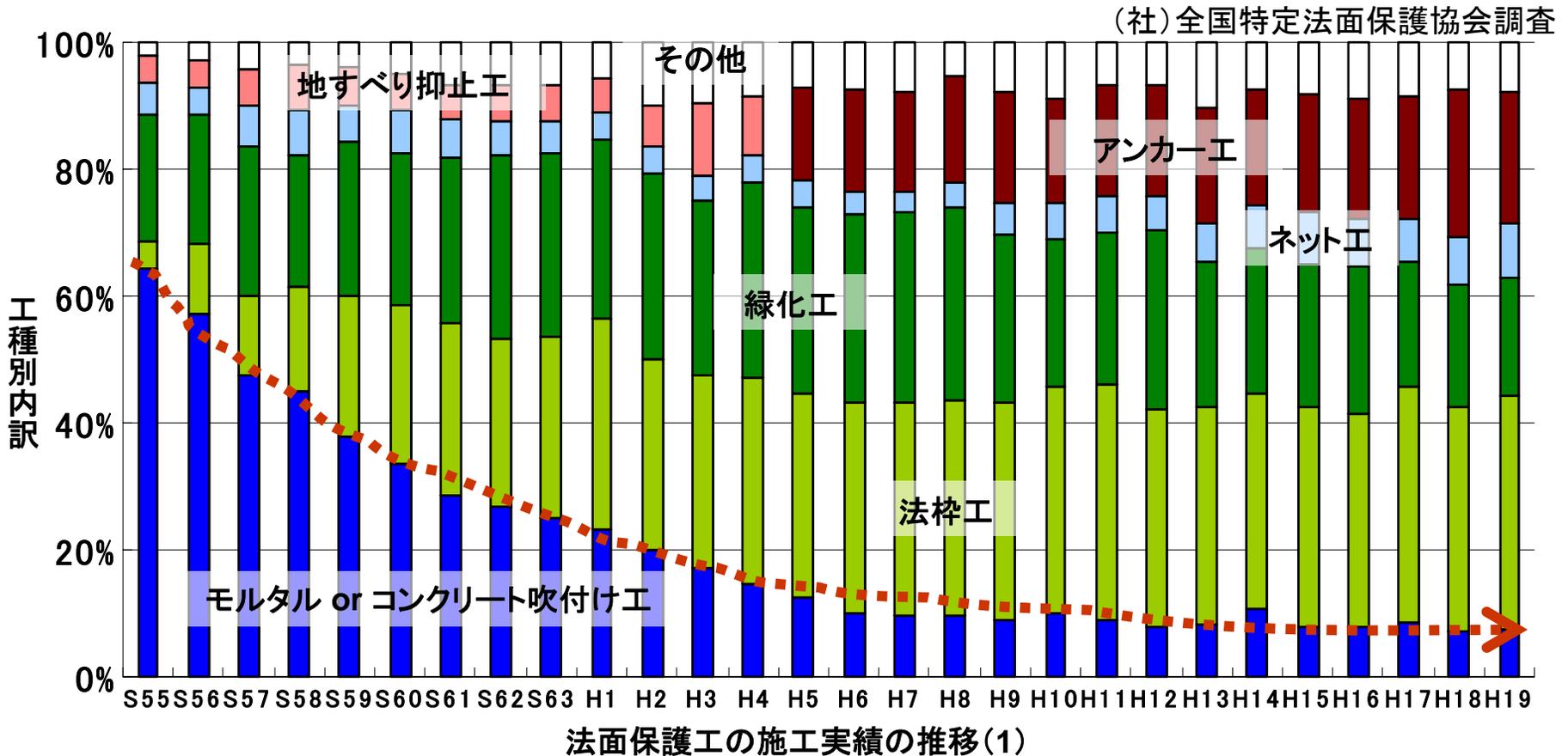
	所属・役職	氏名
プロジェクトリーダー	関西大学環境都市工学部 都市システム工学科 教授	楠見 晴重
アドバイザー	NPO法人 環境・エネルギー・農林業ネットワーク 理事長	芦田 譲
官	近畿地方整備局 道路部 道路管理課 課長	野中 砂男
	近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 副所長	古野 幸夫
	近畿地方整備局 近畿技術事務所 所長	山本 剛
	近畿地方整備局 近畿技術事務所 副所長	小段 栄一
学	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻地質工学分野	薛 自求
	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻地質工学分野	辻 健
	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻ジオフィジクス分野	尾西 恭亮
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	辻野 裕之
	川崎地質(株) 保全技術部	山田 茂治
	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
	ライト工業(株) 建設事業部	宮川 充
	(株)興和 工事部	小林 雄三
	日本物理探査(株) 関西支店	風嵐 健志
オブザーバー	(財)道路保全技術センター 近畿支部 主任研究員	満下 淳二

* 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(実施中)
6	H21.1.30	各社第2回測定報告(予定)

研究の背景

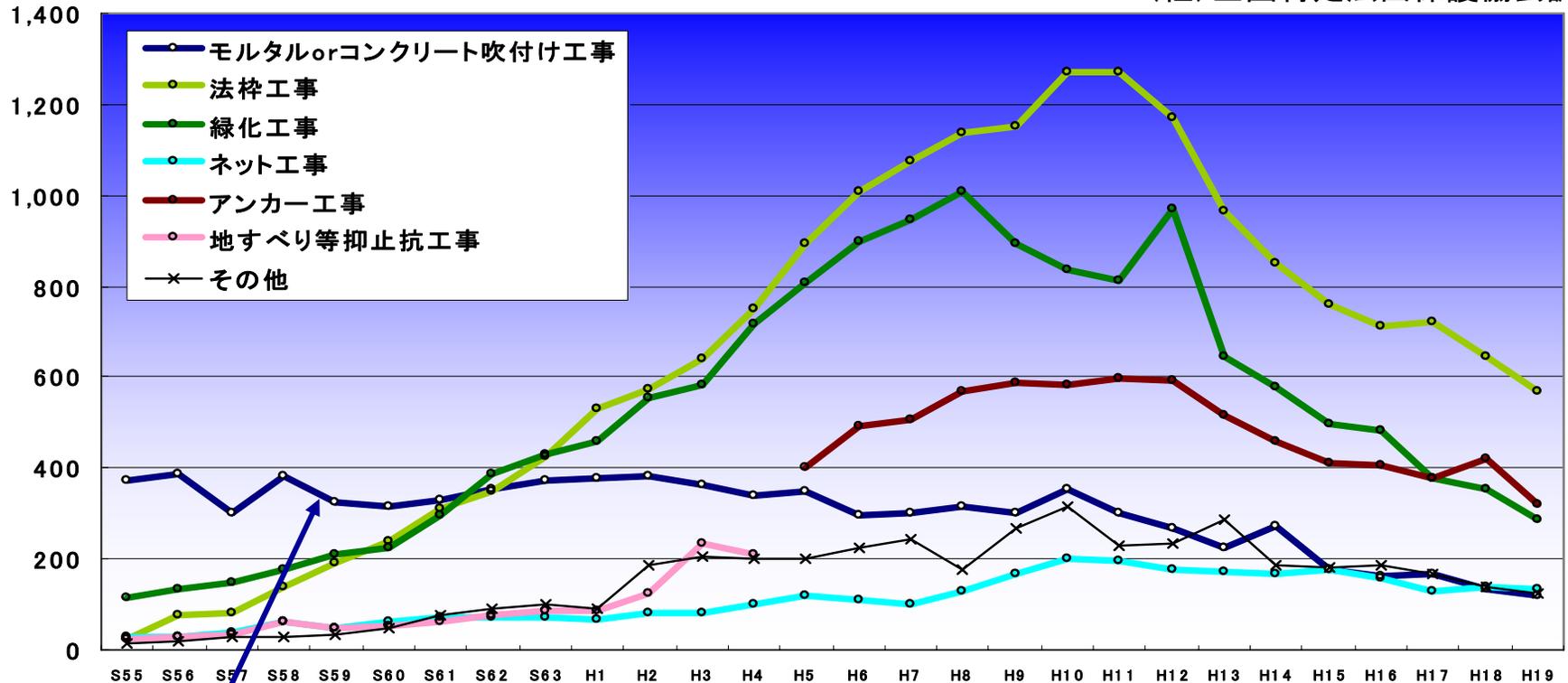


年度別に見た吹付け法面の施工件数の内訳は、近年大幅に減少している。

研究の背景

単位:億円

(社)全国特定法面保護協会調査



法面保護工の施工実績の推移(2)

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

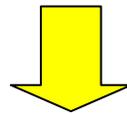


モルタルの剥離



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

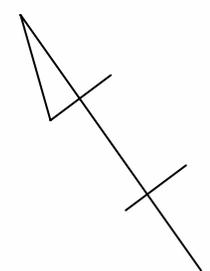
京都府福知山市三和町大身地区

国道9号切土法面

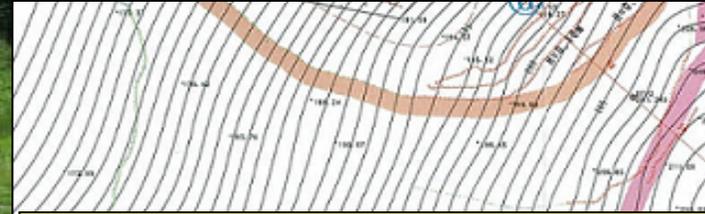
<地質>

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。





弾性波探査
C測線 L=0.11km

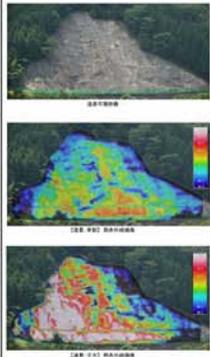
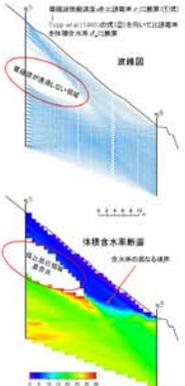
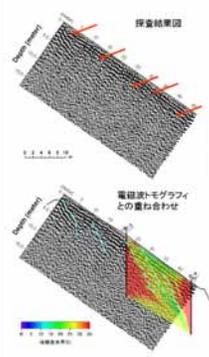
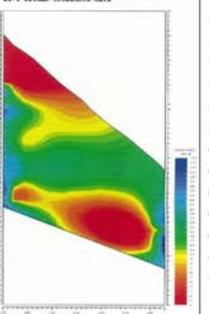
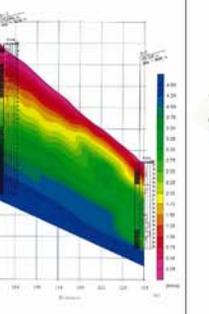
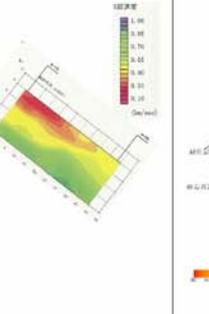
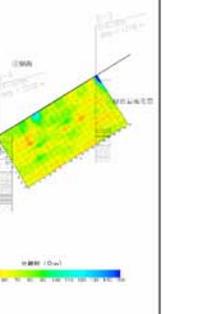


国道9号線の南側に隣接した、長さ200数十m、高さ約50mの比較的大規模な法面である。



既往手法による評価

- ① 熱赤外線探査による検討
- ② 電磁波トモグラフィによる検討
- ③ 連続波レーダ探査による検討
- ④ 比抵抗トモグラフィ探査による検討
- ⑤ 弾性波トモグラフィ探査による検討
- ⑥ 表面波探査による検討
- ⑦ FDEM探査による検討

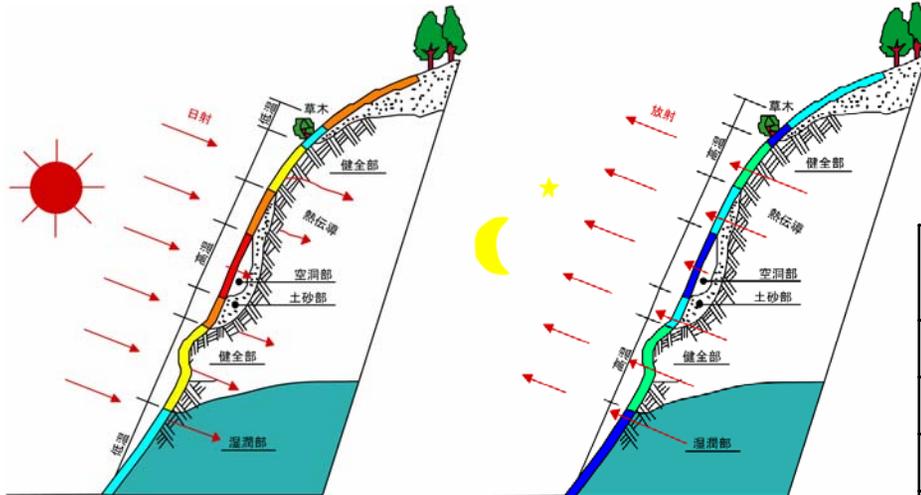
物理探査手法	熱赤外線探査	電磁波トモグラフィ探査	連続波レーダ探査	比抵抗トモグラフィ探査	弾性波トモグラフィ探査	表面波探査	FDEM探査
断面	A地区(吹付け法面)	A地区(吹付け法面)	B地区(自然斜面)	A地区(吹付け法面)	A地区(吹付け法面)	A地区(吹付け法面)	B地区(自然斜面)
測定結果例	 <p>図1 吹付け法面 図2 吹付け法面 図3 吹付け法面</p>	 <p>電磁波トモグラフィによる探査結果の一例(注: 図1は電磁波トモグラフィの結果を示し、図2は体積含水率断面を示す。)</p> <p>図1 電磁波トモグラフィの結果</p> <p>図2 体積含水率断面</p>	 <p>探査結果図</p> <p>電磁波トモグラフィとの重ね合わせ</p>	 <p>比抵抗トモグラフィの結果</p>	 <p>弾性波トモグラフィの結果</p>	 <p>表面波探査の結果</p>	 <p>FDEM探査の結果</p>

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。



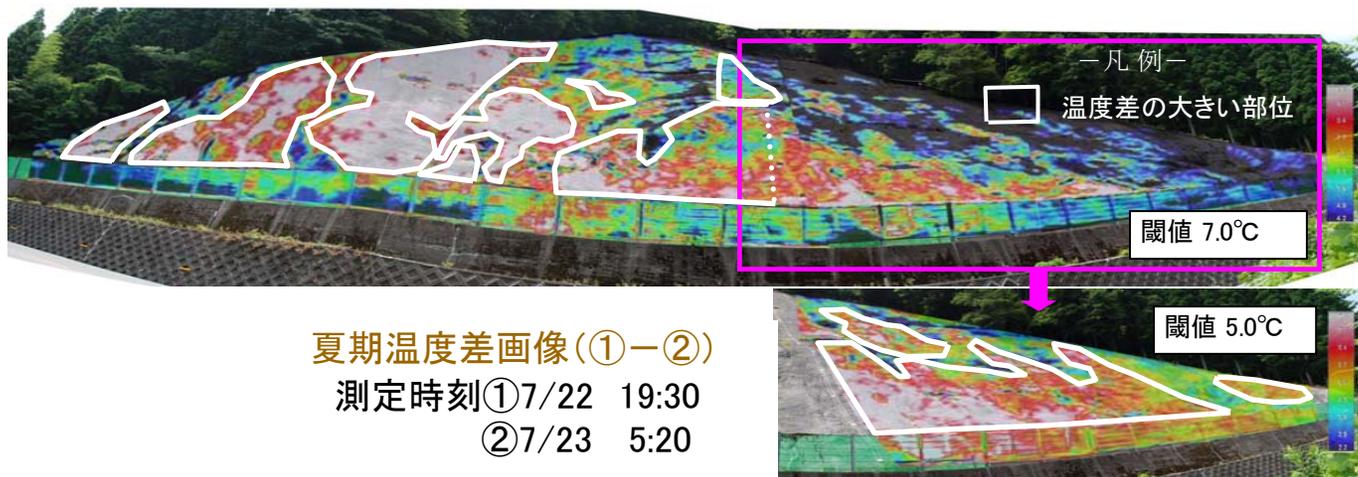
日中の熱伝導模式図

夜間の熱伝導模式図

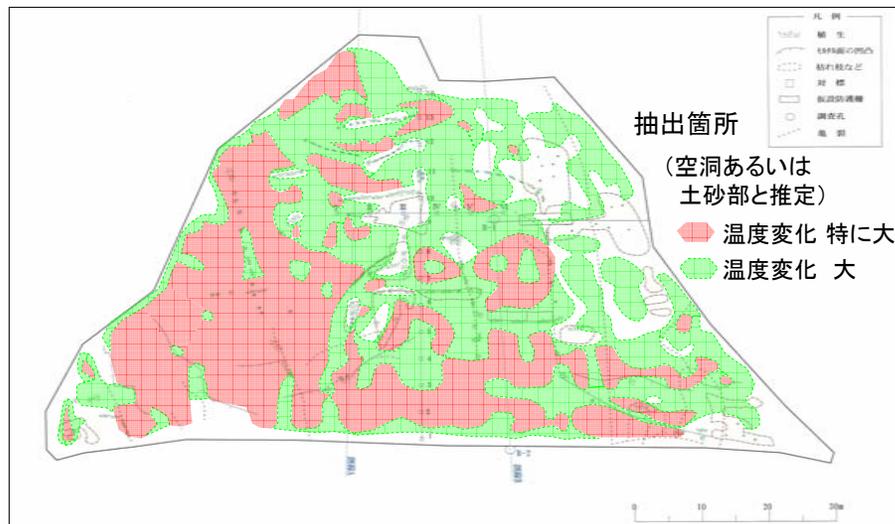
日中・夜間の温度変化の解釈

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)



温度差画像で温度変化が大きい部位は、白線でマッピングされる範囲に抽出できる。(差画像から作成した判読図を右に示す)



熱赤外線判読図

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。

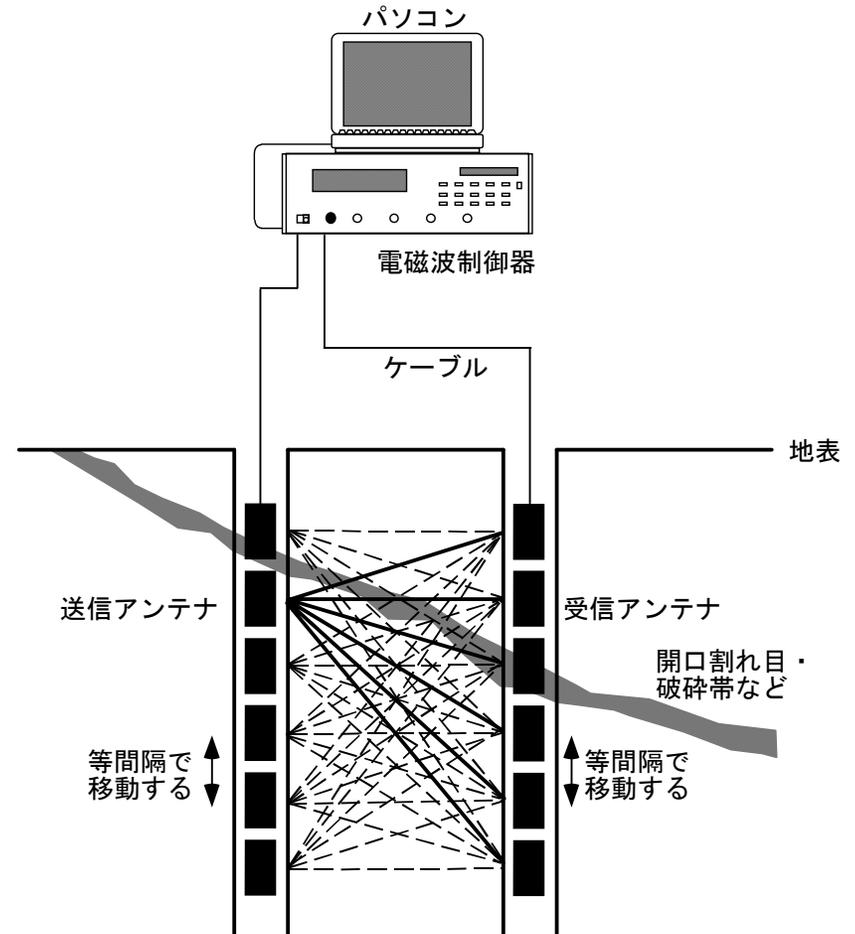
①電磁波伝搬速度を比誘電率に換算

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

②Topp et al.(1980)の式を用いて比誘電率を体積含水率に換算

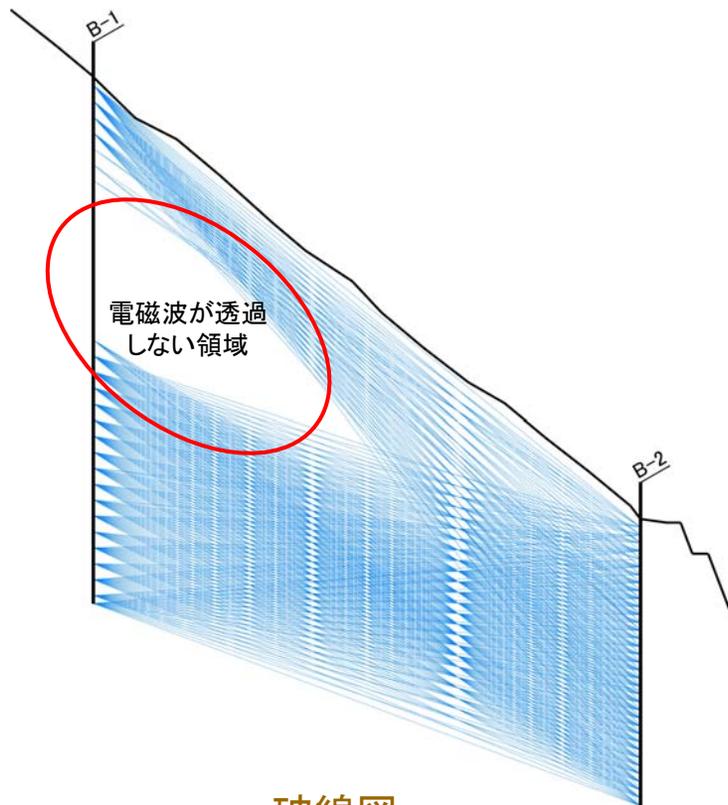
$$\theta = -0.0503 + 0.0292\varepsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (2)$$

右図に、電磁波トモグラフィの概念図を示す。

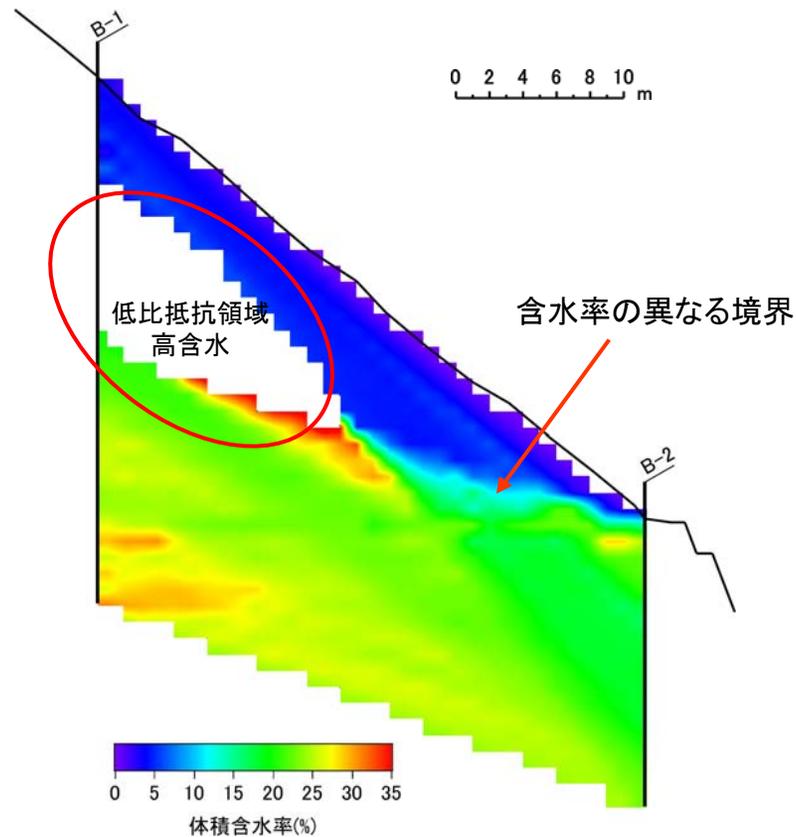


電磁波トモグラフィの概念図

体積含水率による評価例(A地区:吹付け法面)



破線図

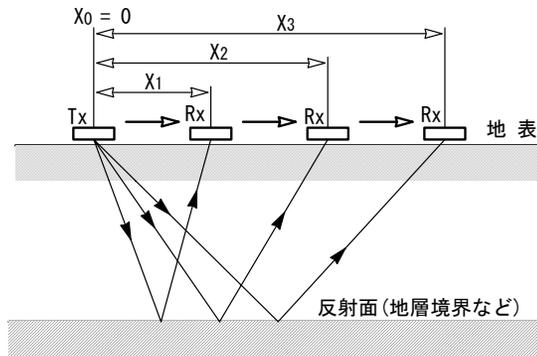


体積含水率断面

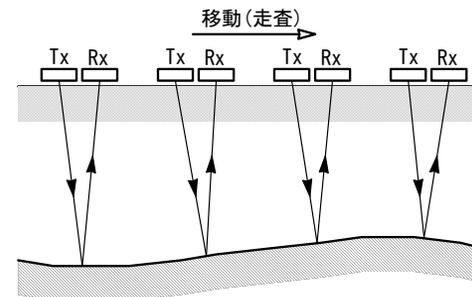
表層部は体積含水率が5%以下の領域である。
標高の高いB-1孔側はその直下に、非常に強いコントラストのある、低比抵抗領域（恐らく $50\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下）があり、この領域は含水率も高いと想定される。

連続波レーダ探査による検討

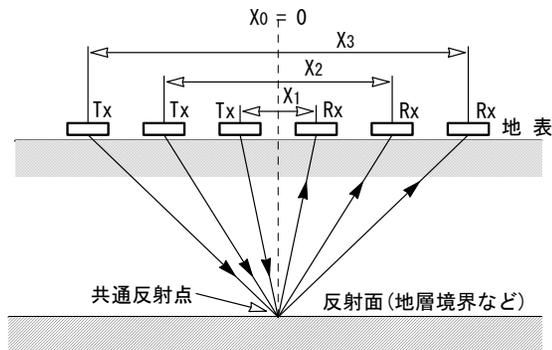
連続波レーダ探査は、送信源として電磁波(MF～VHF帯)を用いる反射法探査である。地表面から地中に向けて照射した電磁波のうち、地中の反射面から戻ってくる反射信号を検出することによって、反射面までの深さと平均伝搬速度などを求めることができる。



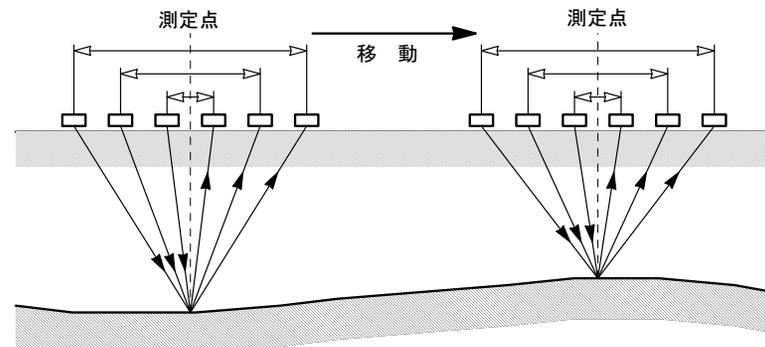
ワイドアングル法(通常展開)



プロフィール法(シングルチャンネル方式)

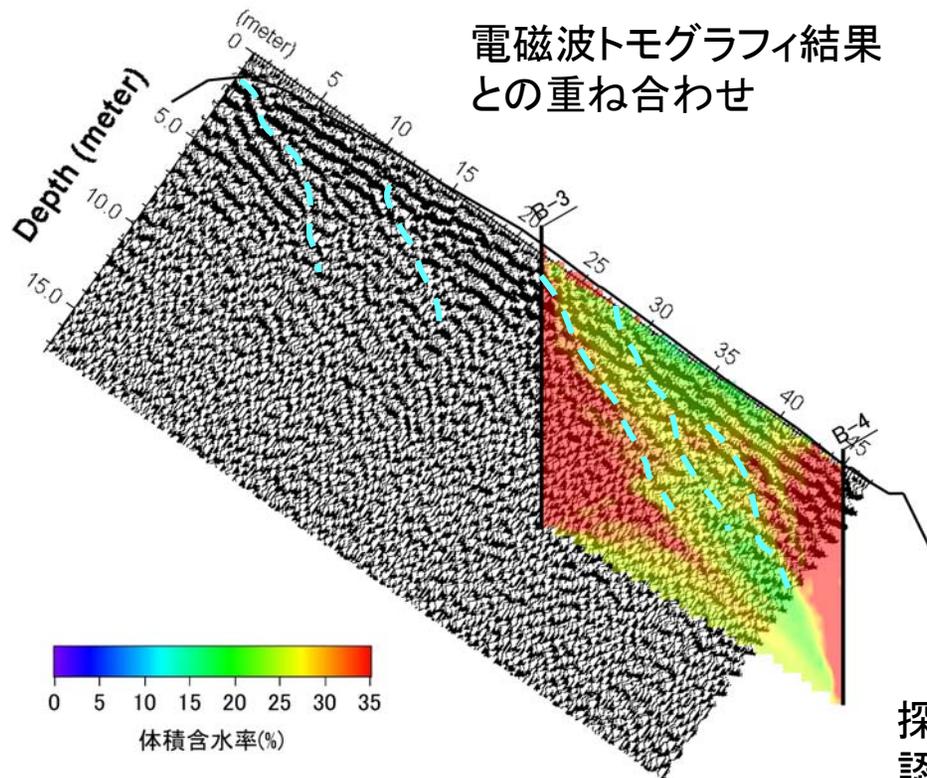


ワイドアングル法(スプリット展開)



プロフィール法(マルチチャンネル方式)

探査結果図による評価例(B地区:自然法面)



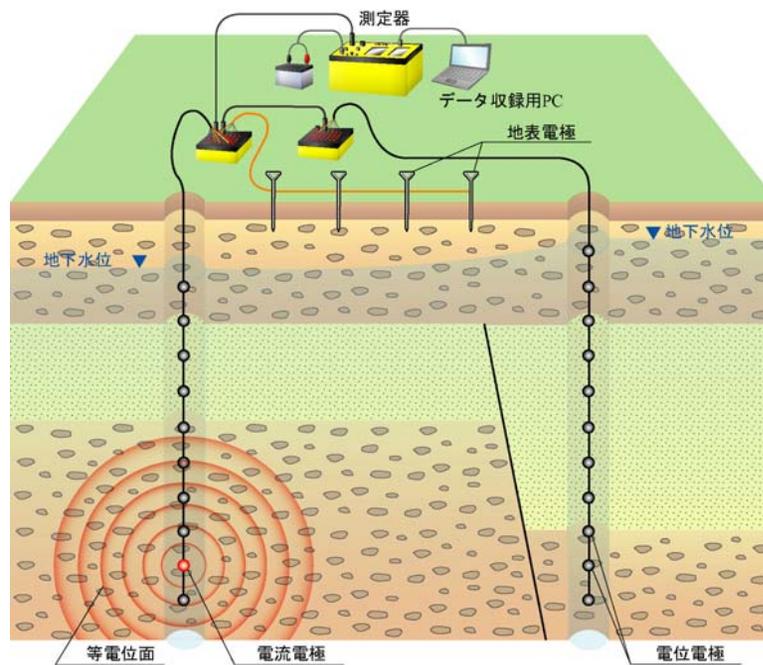
探査結果図

探査結果図に示すように高角度の反射面が認められる。
地層の傾斜は流れ盤であり、60度近い高角度と考えられる。
電磁波トモグラフィの結果とも整合的である。

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。

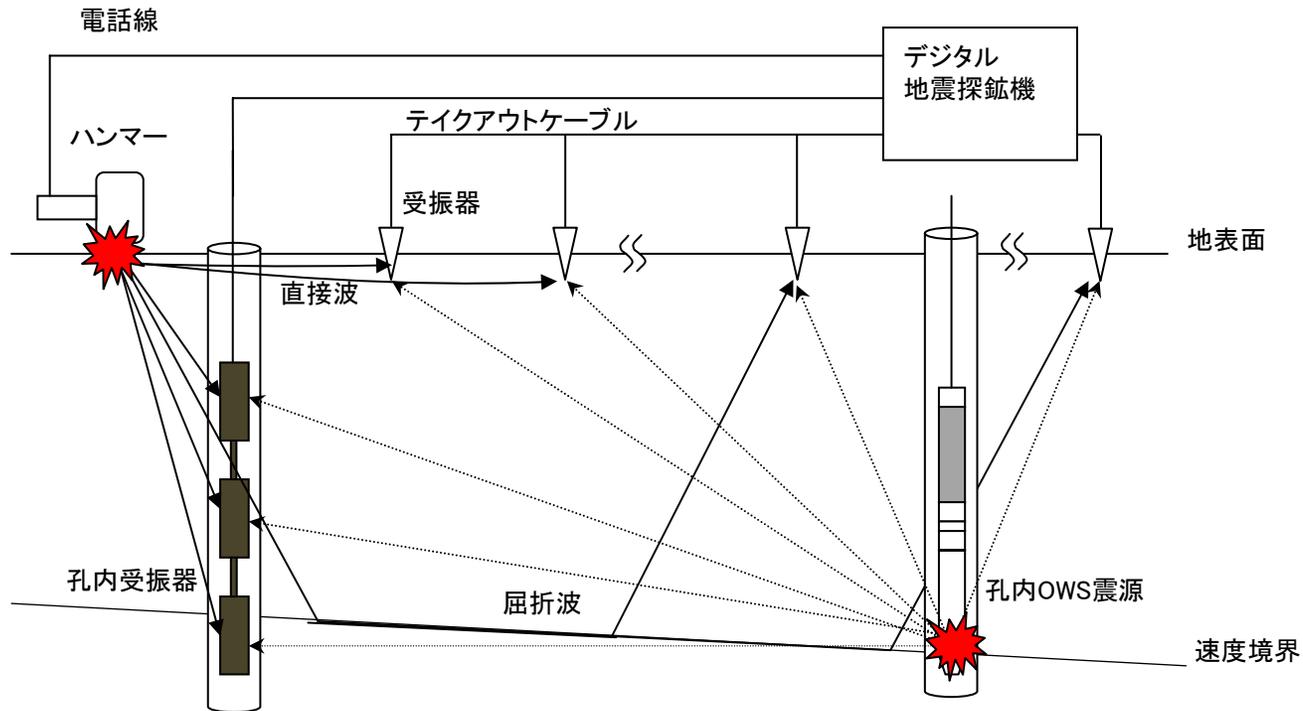
今回実施した比抵抗トモグラフィは、地表とボーリング孔に配置された電極で囲まれたエリア内の比抵抗分布を測定する形であり、地表のみから行う探査に比べて解析精度の向上が期待できる。比抵抗は同じ地質でも地下水の介在の有無によって変化(地下水が介在すると電気が流れやすくなり、比抵抗が低下する)することから、地下水の賦存状況(飽和・不飽和)および地質構造を面的に推定する基礎資料となる。



比抵抗トモグラフィの概念図

弾性波トモグラフィ探査による検討

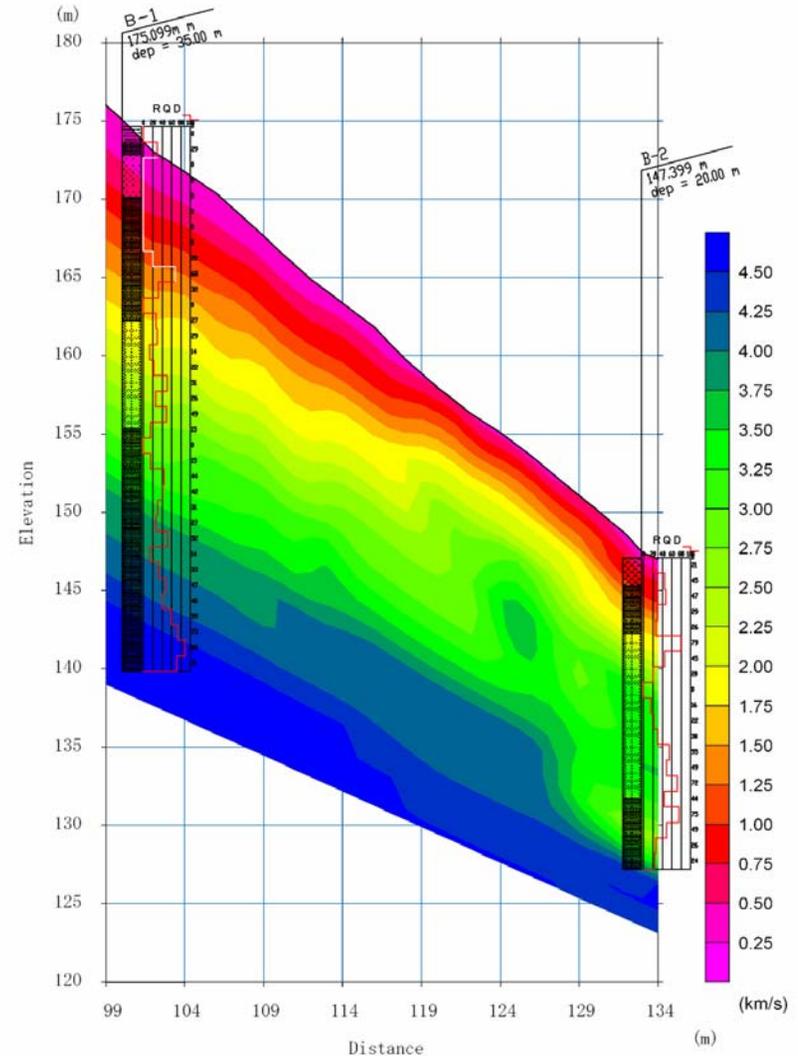
弾性波トモグラフィ探査は、地表付近やボーリング孔内で人工的に起こされた弾性波が地表と孔内に設置された受振器に直接伝播、または弾性的性質の相違する地層の境界で屈折し伝播する現象を利用するもので、地層が有する弾性波速度値や地下構造が推定できる。



弾性波トモグラフィの概念図

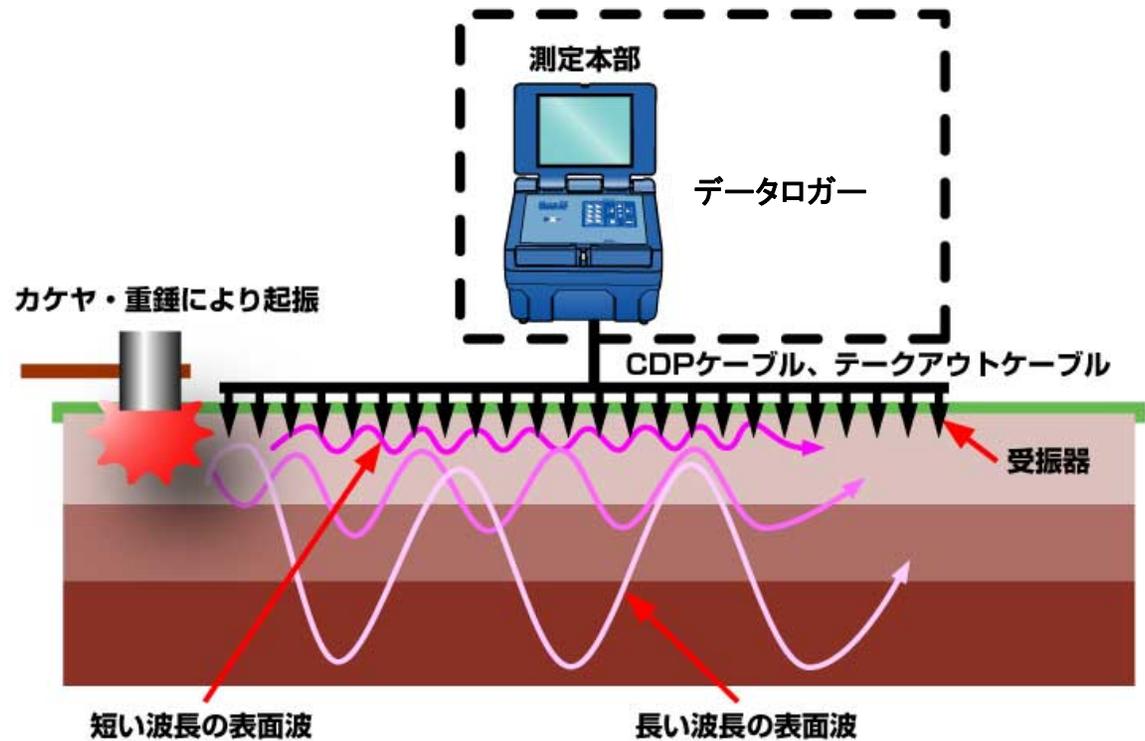
弾性波速度分布による評価例(A地区:吹付け法面)

吹付け法面であるA地区の計測結果では、吹付けコンクリートの影響を大きく受けた。また、孔内水位が低いことに起因して、発振点を十分に取れなかった。しかし、弾性波速度構造としては全体として地表から深部に向かって速度が増加する傾向を示し、有意な速度逆転層は認められないことがわかった。



表面波探査による検討

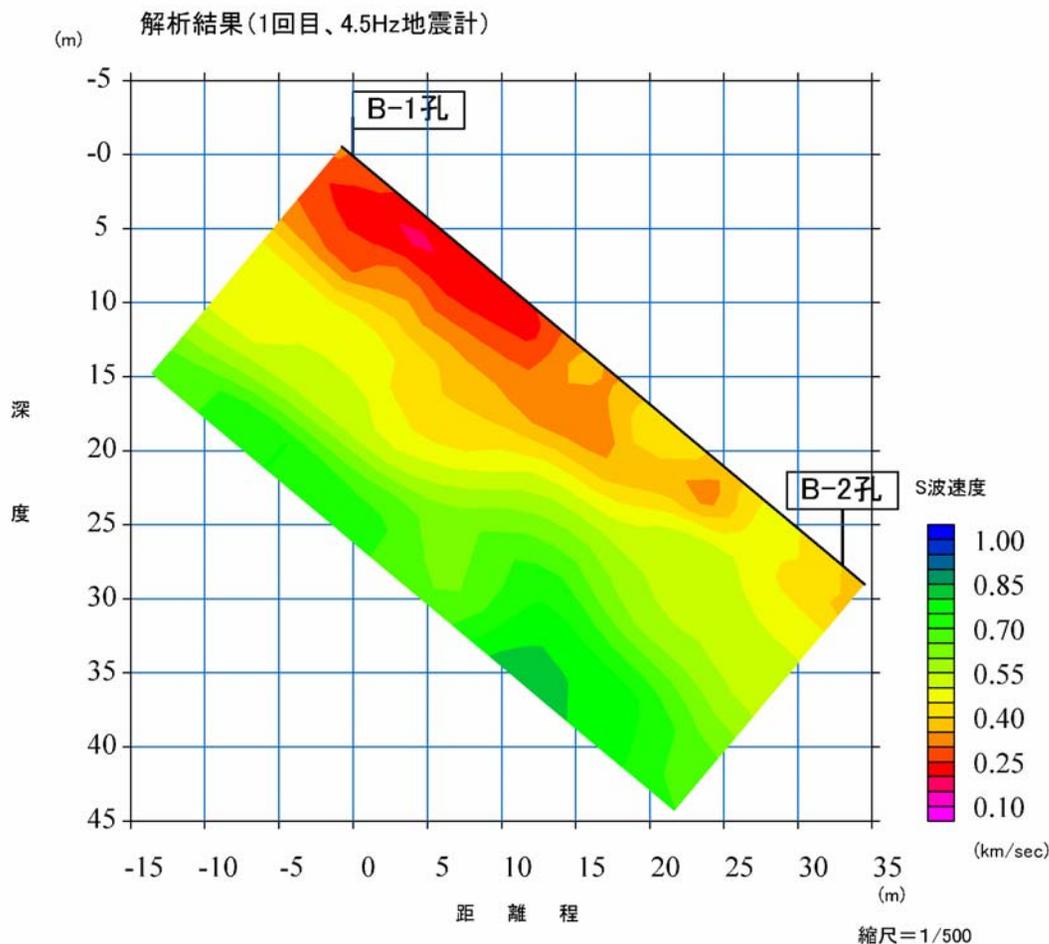
表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波(レイリー波)を多チャンネルで測定・解析することにより深度20m程度までの地盤のS波速度を二次元断面として画像化する探査手法である。測定・解析が簡単のため、素早く低コストでS波速度構造を求めることが可能である。S波速度は物質の硬さなど工学的な目安となる剛性率に直接関係する値であり、地盤の動的特性の把握・検討などに有益である。



表面波探査の概念図

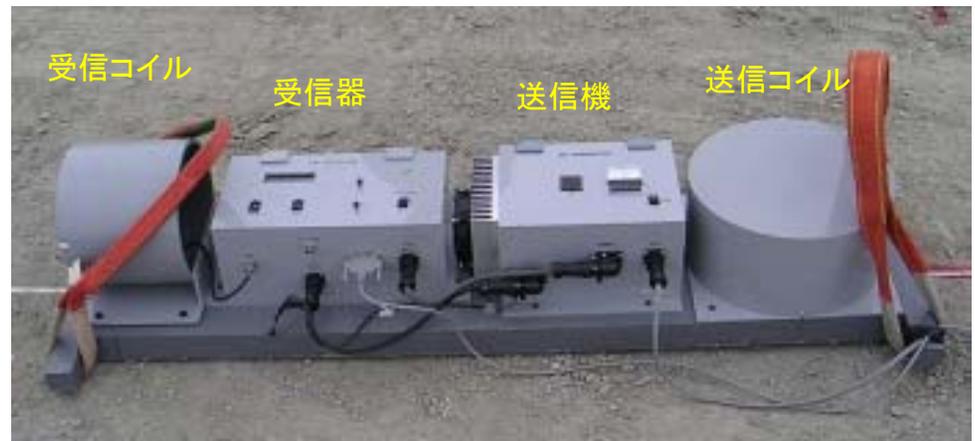
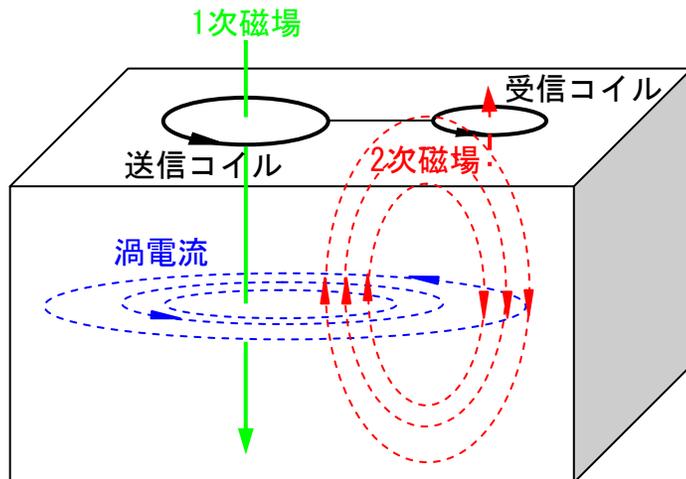
S波速度分布による評価例(A地区:吹付け法面)

吹付け法面であるA地区の計測結果では、表層から深部に向かって速度が大きくなる傾向を示した。全体にS波速度は850m/s以下であり、速度分布を求めた範囲は風化岩が分布するものと推定される。表層の深度8m程度までの400m/s以下の部分は、土砂状(崩積土)と推定され、法面の上部で厚く、図の距離程25m付近まで分布していることがわかった。



FDEM探査による検討

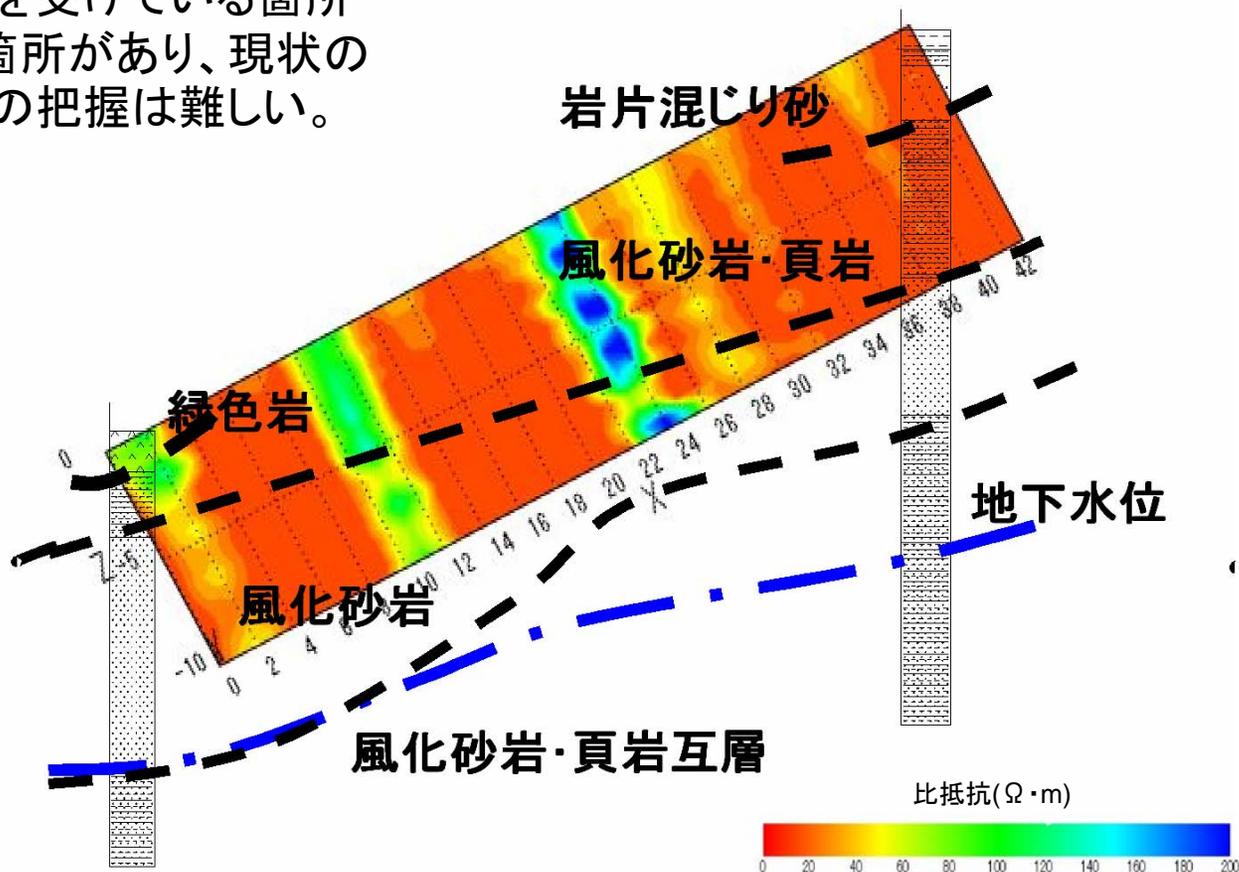
FDEM探査法とは、周波数領域EM探査法 (Frequency Domain Electromagnetic Method) の略称で、物理探査では電磁法に属する。周波数領域とは、電磁波が低周波になるほど深くまで透入する性質を利用し、周波数をいくつか変えて探査し、周波数を深度のパラメータとしたデータを取得し、逆解析法によって地盤の比抵抗分布を求めるものである。提案するFDEM探査法は、16周波数の高周波電流を自動発信させて探査する点に特長があり従来の手法に比べ地層の分解能が高い。



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)

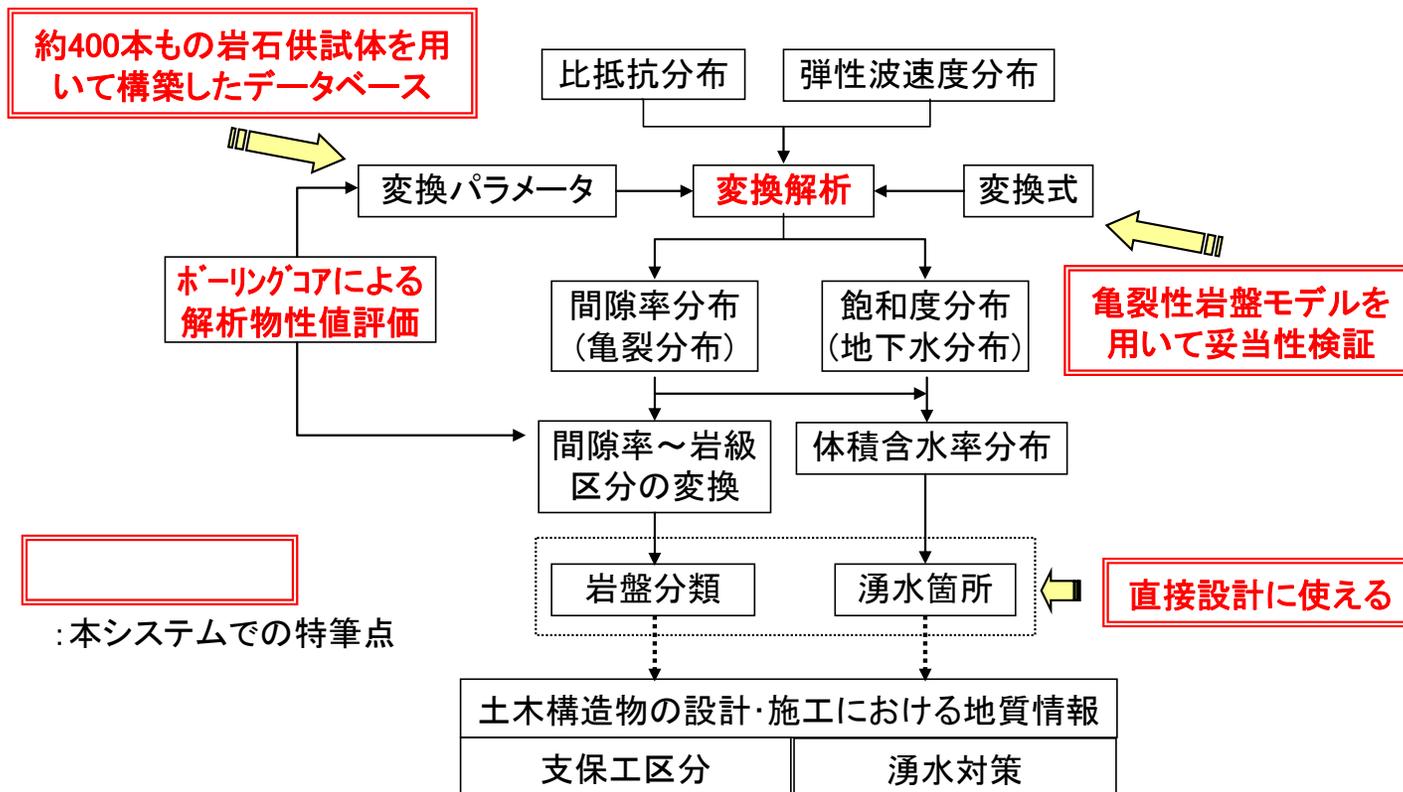
吹付け法面であるA地区の計測結果では、測定値はラス網の影響を受けている箇所と影響を受けていない箇所があり、現状のデータでは地質構造等の把握は難しい。



新しい試みによる評価

種々の物理探査を用いて、斜面内部の地盤状況を評価する方法が有効であることは確認できた。しかしながら、物理探査により得られた物理量と背面地盤の性状の定量的な関係は十分解明されているとはいえない。

そこで本研究会では、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、より正確に地盤評価を行なうことを試みた。



変換解析の概要

解析領域を有限のセルに分割し、各セルごとに下記連立方程式を解く

$$\begin{cases} V_p = f(\phi, S_r) \\ \rho = g(\phi, S_r) \end{cases}$$



一義的に解が求まる

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

(Willyの式)

ここに

V_p : 岩盤の弾性波速度

V_m : テストピースの弾性波速度

V_f : 間隙水の弾性波速度

($\doteq 1.5\text{km/sec}$)

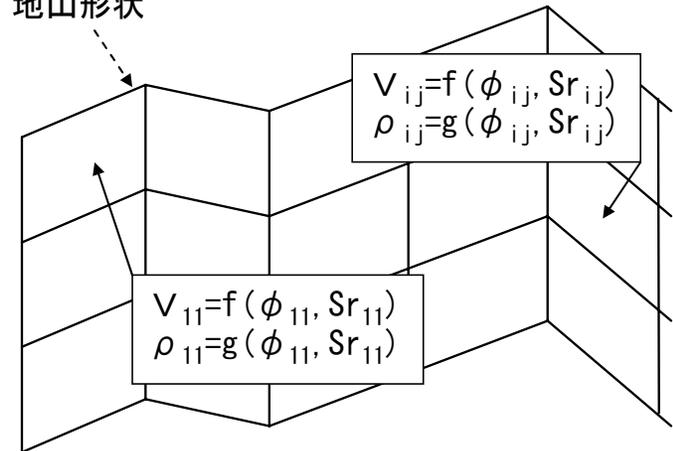
V_a : 間隙の空気における弾性波速度

($\doteq 0.33\text{km/sec}$)

ϕ : 間隙率

S : 飽和度

地山形状



$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_o}$$

ここに

F : 地質比抵抗係数

$F = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n}$ (Archieの式)

a, m, n : 地質の違いによる係数

ρ : 岩盤の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

ρ_w : 間隙水の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

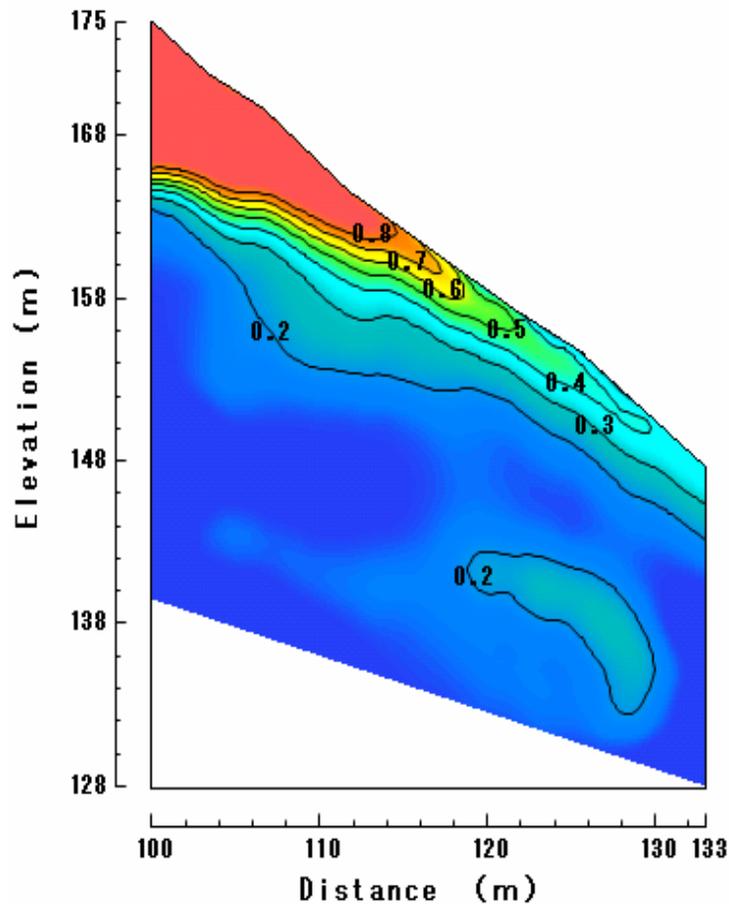
ρ_c : 岩盤中の導電粒子の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

ρ_o : 岩盤実質部の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

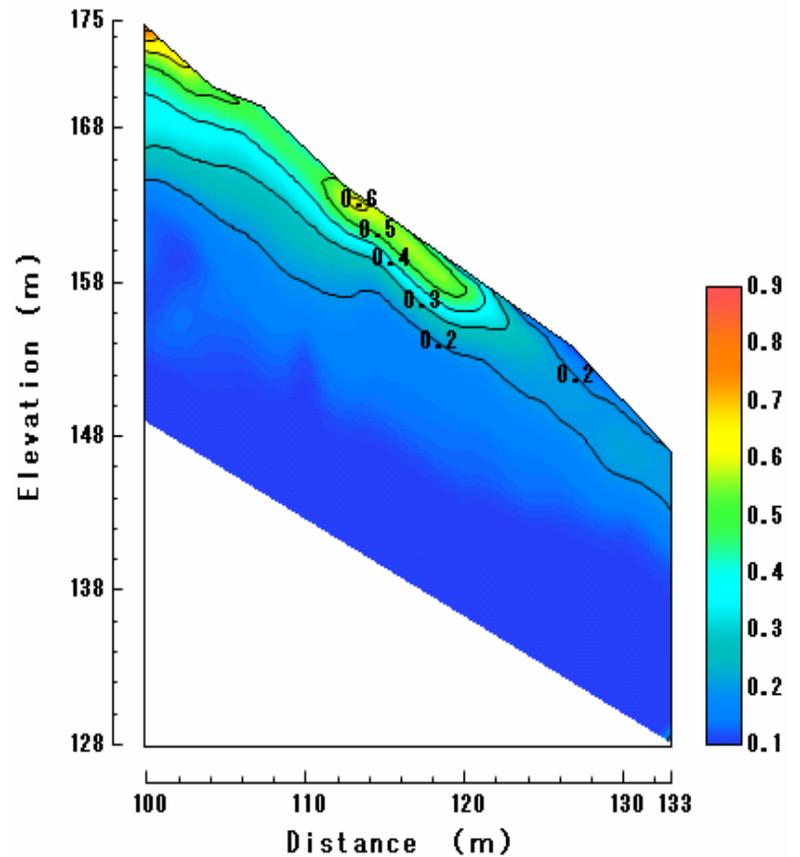
ϕ : 間隙率

S : 飽和度

変換解析(間隙率)による評価 A地区(吹付け法面)

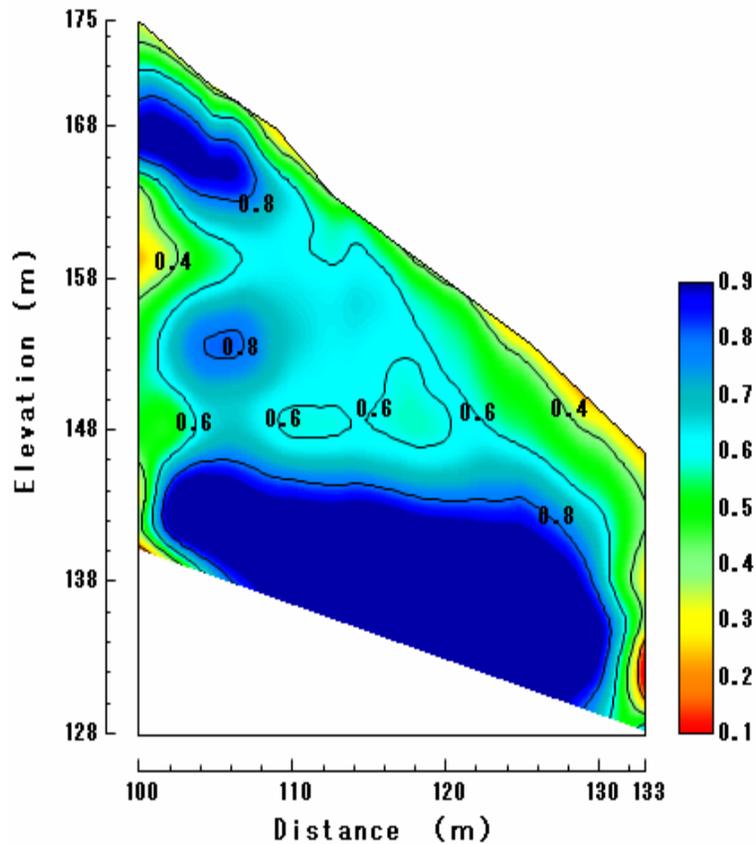


間隙率分布 2008/8/18

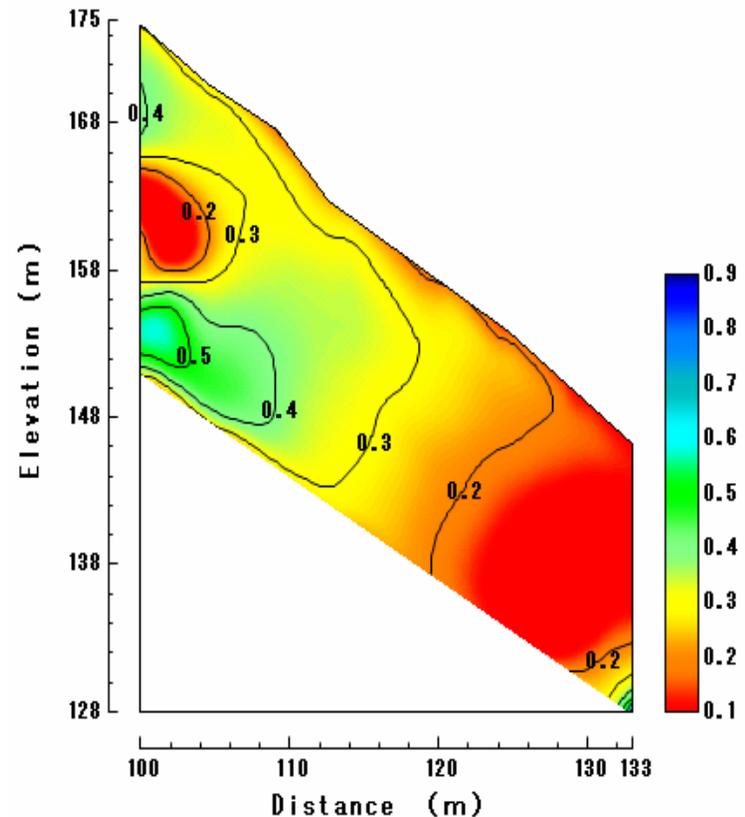


間隙率分布 2008/12/10

変換解析(飽和度)による評価 A地区(吹付け法面)

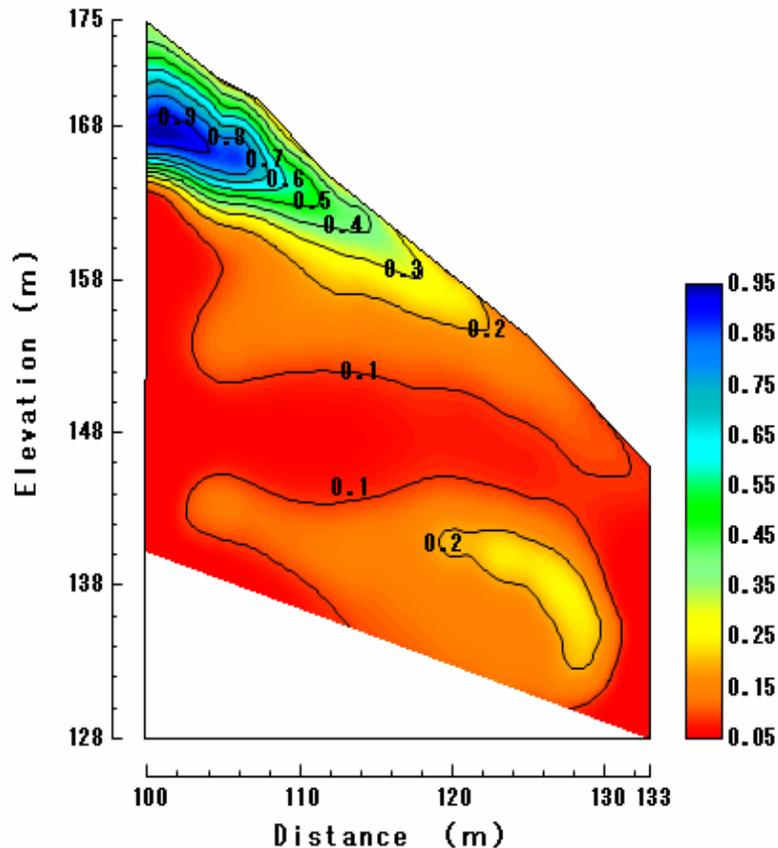


飽和度分布 2008/8/18

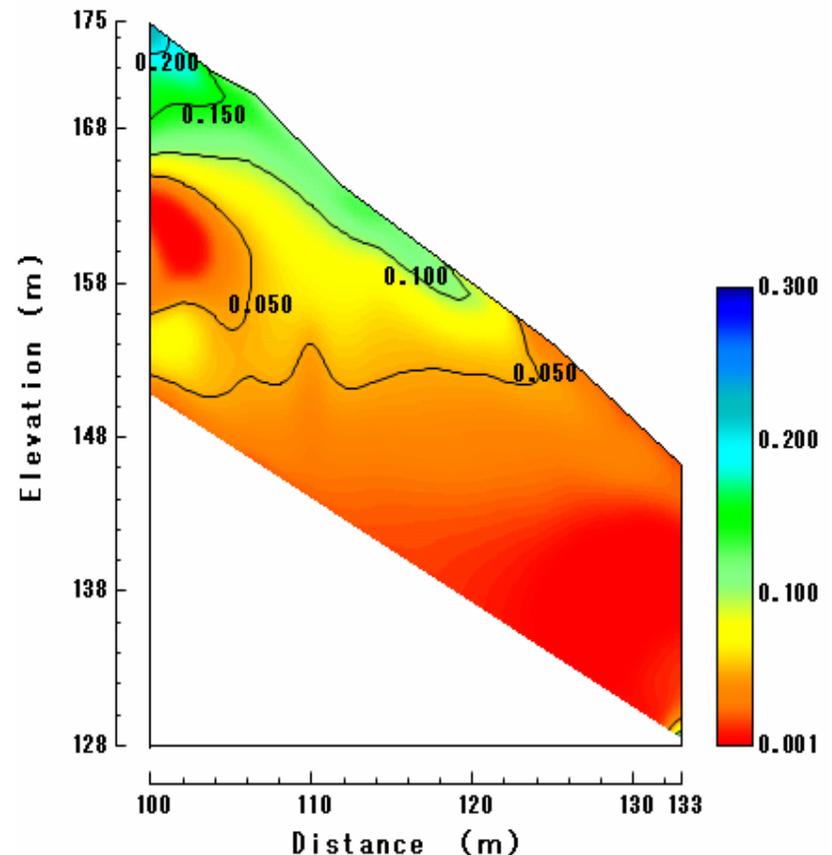


飽和度分布 2008/12/10

変換解析(体積含水率)による評価 A地区(吹付け法面)

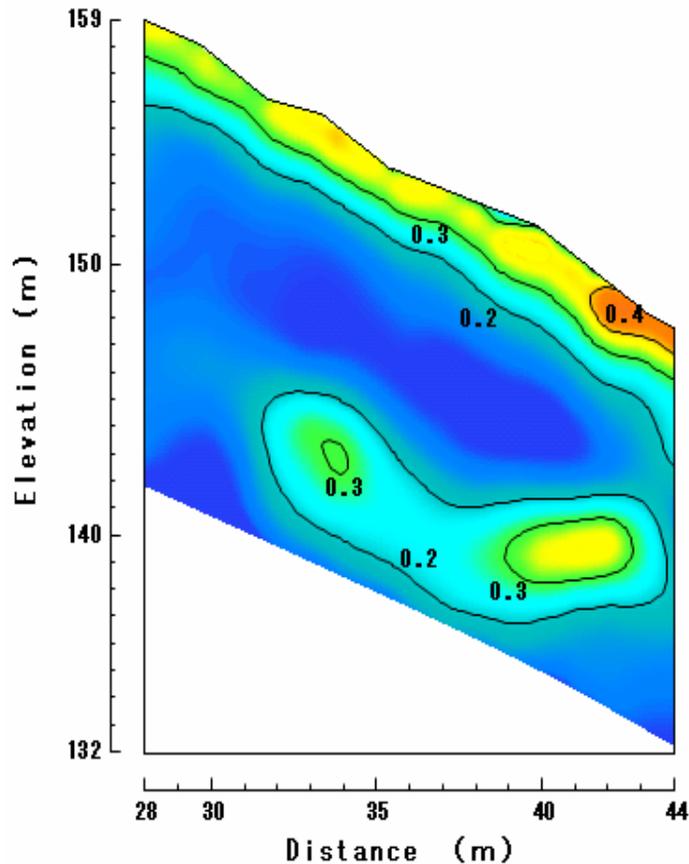


体積含水率分布 2008/8/18

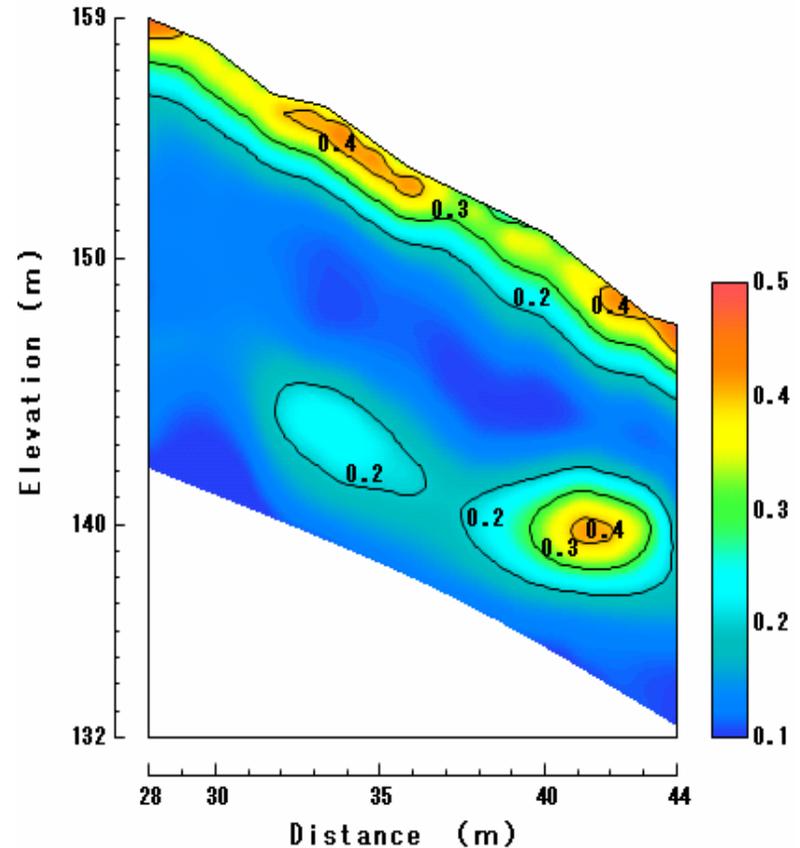


体積含水率分布 2008/12/10

変換解析(間隙率)による評価 B地区(裸地法面)

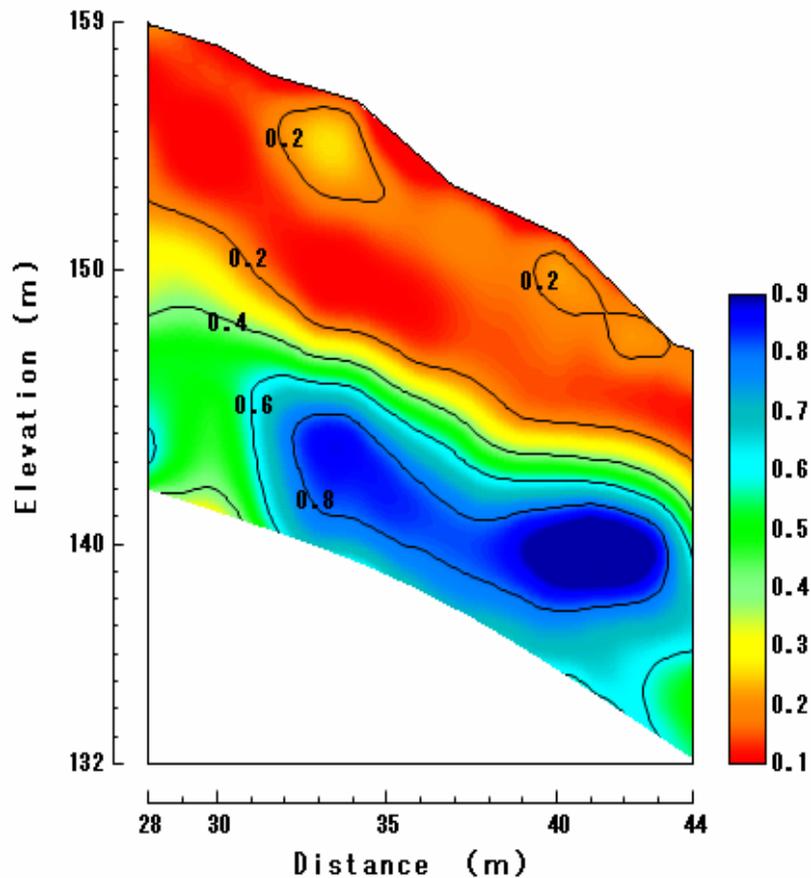


間隙率分布 2008/8/18

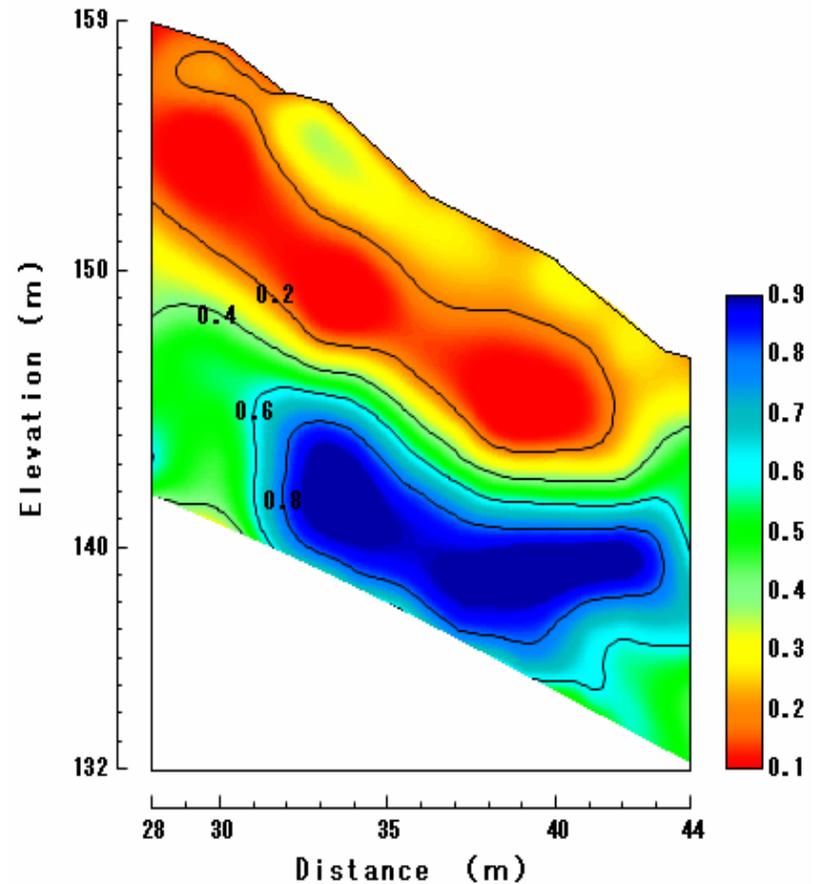


間隙率分布 2008/12/10

変換解析(飽和度)による評価 B地区(裸地法面)

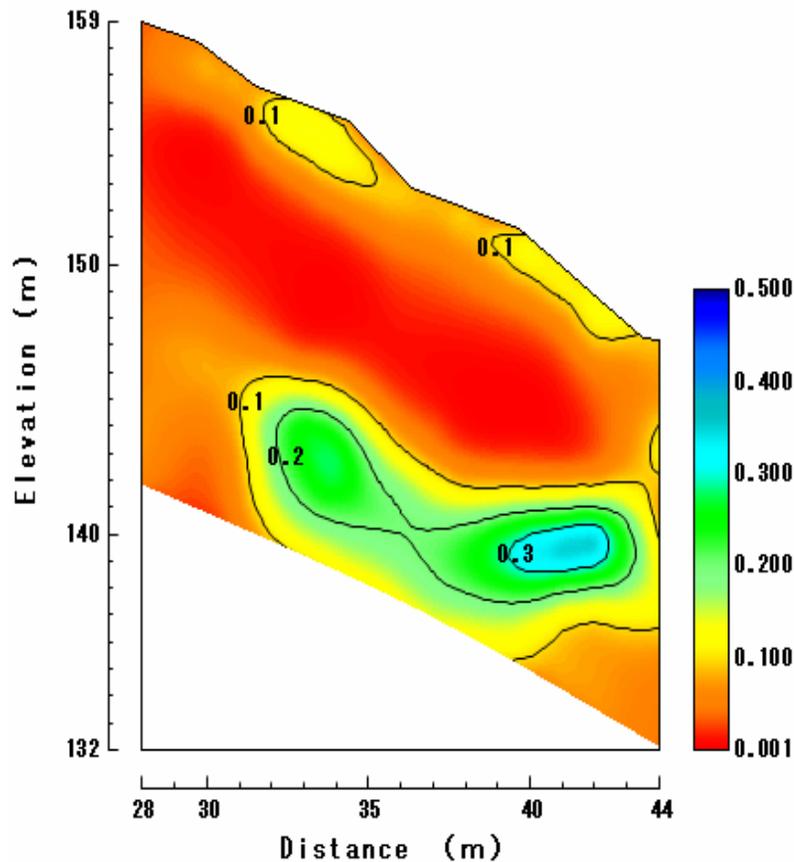


飽和度分布 2008/8/18

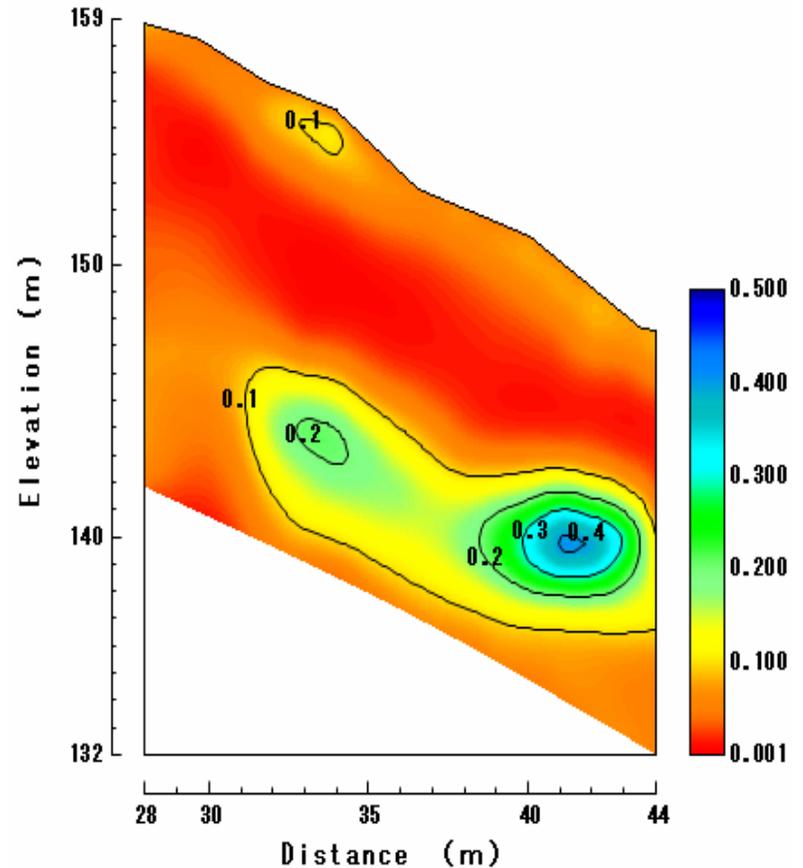


飽和度分布 2008/12/10

変換解析(体積含水率)による評価 B地区(裸地法面)



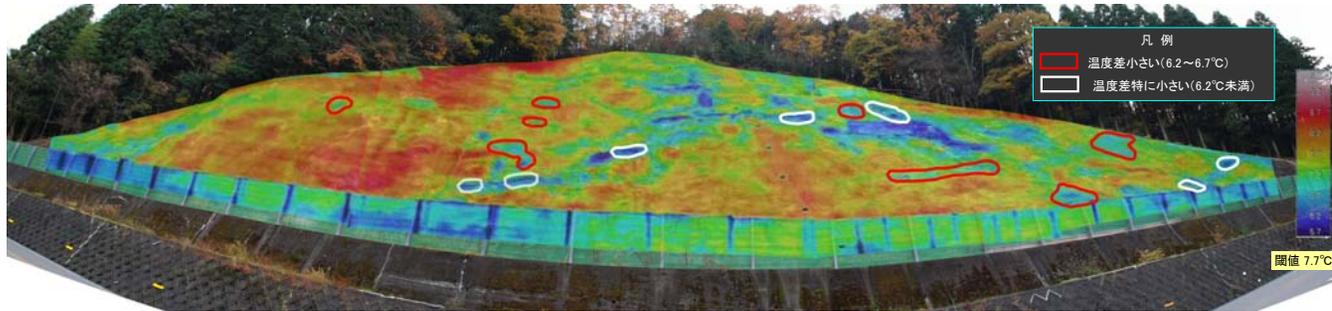
体積含水率分布 2008/8/18



体積含水率分布 2008/12/10

複数回の測定による差分比較

温度画像による差分比較(A地区:吹付け法面)



夏期ー冬期 温度差画像(①ー②)

測定時刻 ①7/23 5:20

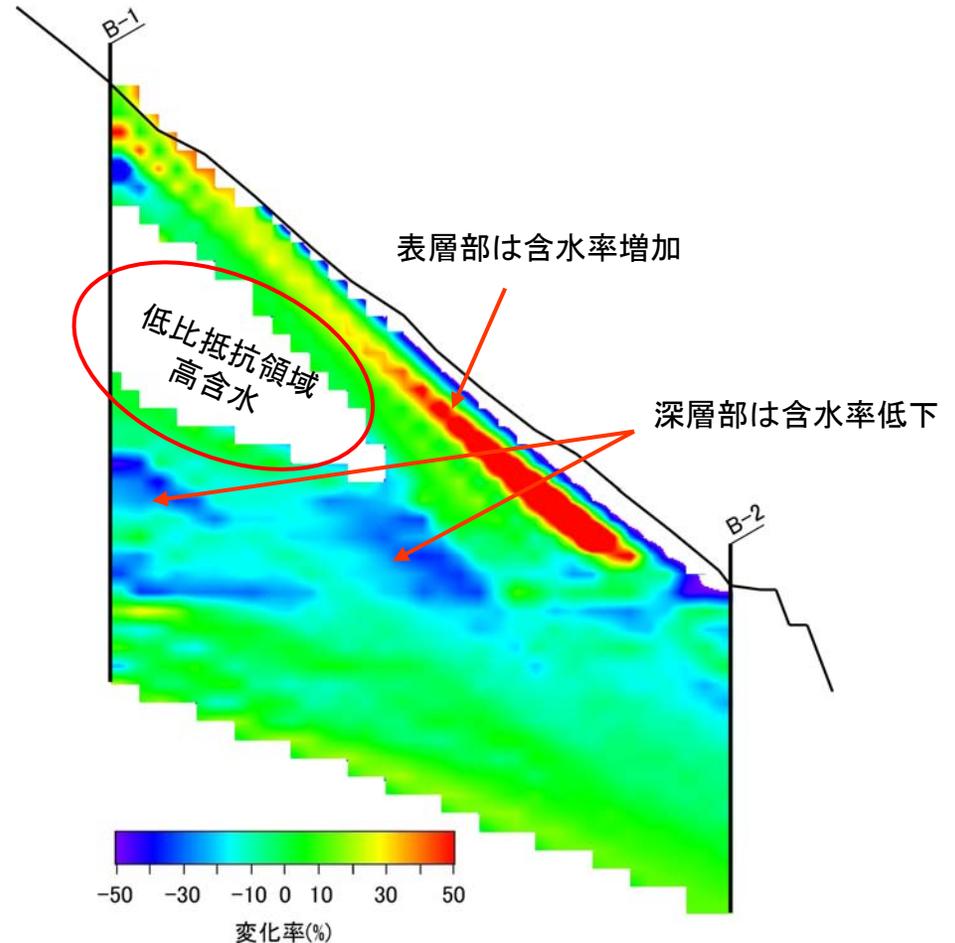
②11/28 13:00



地下水の分布域(水みち等)の推定に、夏期および冬期での2時期の温度差画像を用いて、解析を試みた。その結果、温度変化の小さい部位において、地下水分布域の特定が有効になる可能性が示唆された。

体積含水率による差分評価(A地区:吹付け法面)

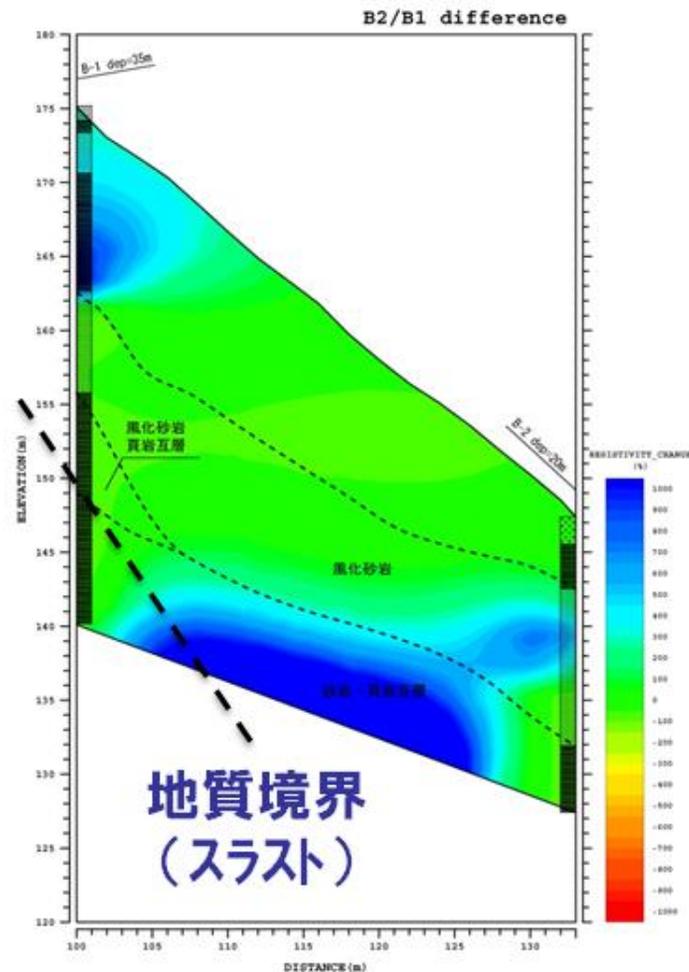
7月と12月の個々の結果では大きな違いはみられないが、変化率で評価すると表層部は体積含水率が増加しているのに対して、深層部では低下している。ボーリング孔内の水位は7月より12月の方が低下しており、この変化率と整合していると考えられる。



比抵抗分布による差分比較(A地区:吹付け法面)

比抵抗の変化については、1回目測定(8/6)と2回目測定(12/11)を比較すると、低温化の影響で地表付近の一部は2回目の方が高比抵抗となっており、その結果として変化が大きく現れている。
また、深部についてはB-2孔で観測されている地下水位は1回目測定時には約GL-28.5mで、2回目測定時には観測されていない。
よって、1回目測定時に対して2回目測定時には岩盤内の飽和度が大きく低下していたため、結果として比抵抗に大きな変化が現れており、この傾向は4層構造の最下部の砂岩・頁岩互層の層で顕著である。

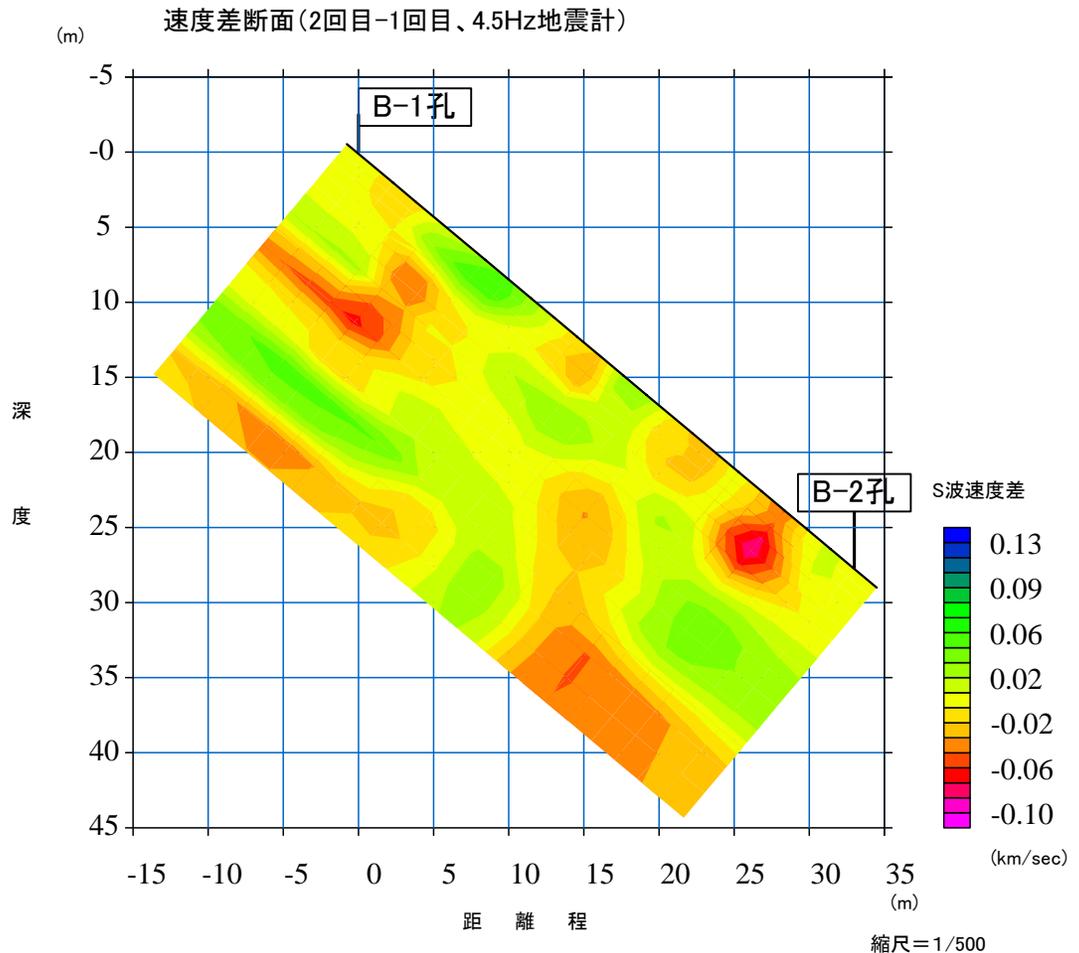
変化率



S波速度分布による差分比較(A地区:吹付け法面)

速度差分布を見ると、系統的な変化というよりはむしろランダムな分布となっており、岩盤の速度変化ではなく、表面波探査の測定・解析による速度のばらつきを表わしているものと考えられるほうが妥当と思われる。

この図から、速度差分布の大部分は±30~40m/s程度以下であるので、これ以上の速度変化が系統的に見られれば、岩盤の有意な速度変化として捕えられる可能性がある。



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。

さらに、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。

その結果、種々の物理探査において斜面内部の地盤状況を評価する方法が有効であることを確認した。

今後の活動予定

- ボーリング結果等に基づく岩級区分から、各種法の有益性の検討。
- 複数回測定することにより、法面の変状把握の可能性の検討。
- 健全度判定手法の提案。