

時間領域電磁探査法による大規模地すべり地比抵抗調査

中里裕臣* 井上敬資** 鈴木尚登* 寺田剛***

*企画管理部

**施設工学研究領域広域防災担当

***北海道開発局（前東北農政局）

キーワード：キャップロック，地下水，広域地質調査

I 緒言

山形県鶴岡市の七五三掛^{しめかけ}地すべり地（寺田ら，2010）では，凝灰角礫岩を不動層として上位に向かって凝灰岩薄層を挟む泥岩，粗粒玄武岩が層状に分布し，すべり面は泥岩中もしくは泥岩層の上端，下端に位置する。最大すべり面深度は 120m におよび，粗粒玄武岩および泥岩の層厚は場所により大きく変化する。最も地表側に分布する粗粒玄武岩は一般に強風化を呈するが，泥岩に対して高い透水性を示し，キャップロックとしてすべり面への地下水供給源になると共に，亀裂の発達する弱風化～新鮮部ではより高い透水性を示し，後背斜面から地すべりブロックに至る地下水流動部を構成すると推定されている。

このような地質状況に応じて地すべり対策工の効率的な実施と長期的な地すべりの安定化を図るためには，地下水流動場となる粗粒玄武岩の分布（層厚）および岩相（風化程度）の把握が重要となるが，数 km^2 に及ぶ地すべり地全体に高密度のボーリング調査を行うことは経済的に困難である。そこで，本研究では経済的な調査が可能な物理探査の中から後述する理由により，電磁探査法の 1 つである時間領域電磁法（Time domain electromagnetic method, 以下 TDEM 法）を選定し，1 次元探査を高密度で実施することにより，比抵抗の 3 次元分布を求め，それを基に粗粒玄武岩の分布・性状を 3 次元的に把握することを試みた。TDEM 法は深さ数 10 ～ 数 100m の探査に適し，高効率の探査法とされるが（物理探査学会，1998），日本では地熱探査，金属鉱床探査および石油探査などの深部資源探査での利用が多く（物理探査学会，1998），土木分野でも土被り 300m のトンネル路線調査（原ら，1996）の事例が見られるなど，地表下 100m 程度までを探査対象とした実績が少ない。このため本研究では，探査結果とボーリング結果との比較により大規模地すべり調査における TDEM 法の適用性を検討した。

II 探査手法

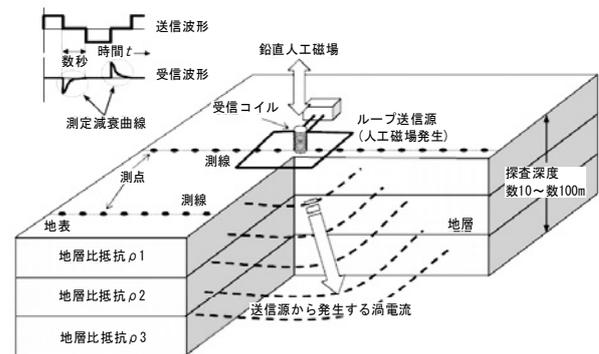


Fig.1 TDEM 法の概要（物理探査学会，2008）

Outline of TDEM method

2.1 探査手法の検討

本研究で調査対象とする粗粒玄武岩は，下位の泥岩に対して比抵抗が高く，両者の比抵抗コントラストが大きいことが期待されるため，適用する物理探査法としては比抵抗を求める電気探査法もしくは電磁探査法が候補として挙げられる。粗粒玄武岩は大規模な活動的地すべりブロックとその背後の山間地に位置する地すべりブロックにかけて広範囲に分布するため，このような現場で利用可能な探査技術を比較検討したところ，電線，電極設置の必要な 1 次元，2 次元比抵抗法電気探査を多数実施することは複雑な地形条件と立木等の障害から困難と考えられた。一方，電磁探査法では探査深度に対してセンサの展開規模が比較的小さく，大地と非接触で計測が可能で装置の移動が容易な手法があることから，ここでは電磁探査法を採用することとした。探査点間の移動能率の面では，自然信号もしくは遠方の固定送信源を利用し，受信機のみを移動させる超長波地磁気地電流法（very low frequency magnetotelluric method, VLF-MT 法），地磁気地電流法（magnetotelluric method, MT 法），人工送信源地磁気地電流法（controlled-source magnetotelluric method, CSMT 法）が有利である。しかし，VLF-MT 法は利用周波数が限られ深度方向の情報が得られず，後 2 者は地表下数 km を対象とする深部探査法であるため地表付近の分解能が不足する問題点がある。現場で送受信を行う手法としては周波数を変化させて深度方向の情報

を得る周波数領域電磁法 (frequency domain electromagnetic method, FDEM 法) と、信号切断後の経過時間 (以下、過度時間) と共に変化する 2 次磁場から深度方向の情報を得る TDEM 法 (Fig.1) がある。前者の一般的な装置では送受信機間 (探査深度程度) をデータケーブルで接続する必要があるが林間地での移動率が低い。ヘリコプター等を利用し空中で電磁波の送受信を行う空中電磁法は、広域調査法として特に探査能率に優れるが、数 km² 未満の調査範囲ではコストが割高になる。一方後者は、一般的には探査深度数 100 ~ 数 1000m を対象とする資源探査の分野で利用される手法であるが、数 10 ~ 数 100m の探査深度を対象とする土木分野向けの装置も開発されている。また、送受信アンテナを調査地点ごとに設置する必要があるが、径数 10m の送受共用アンテナを利用することで山間地においても数分で設置が可能であり高能率で 1 次元探査が可能である。以上により、ここでは TDEM 法を採用した。

2.2 TDEM探査手法の最適化

本研究では粗粒玄武岩の分布状況を広域的に、高分解能でかつ経済的に把握することが課題である。そこで、探査装置としては小型軽量で、信号切断直後の過度時間分解能が高く、浅部探査に適した TEM-FAST48 (AEMR 社製) を使用し、12.5m 四方の送受信共用アンテナにより解析深度 50 ~ 100m 程度を目標とした 1 次元探査を実施した。さらに林間地ではアンテナを 2 組用意し、数名からなる班の 2 班体制で 1 班が測定中にもう 1 つの班が次点のアンテナ設置を行うことで、1 点あたりの移動および探査時間 20 分、最大 18 点/日の探査能率を実現した。探査データは解析ソフトウェア TEM Researcher (AEMR 社製) ver.6 および 8 を用いて 1 次元逆解析を行った。本ソフトウェアでは 6 層構造までの設定が可能だが、後述の見かけ比抵抗変化パターンから想定される構造が 2 - 4 層であることから 4 層構造を仮定し、100 Ω m 均質、各層厚 20m を基本初期モデルとして解析を行った。

TDEM 法のアンテナケーブルは、対象探査深度に応じて適切に選択する必要がある。Fig.2(a) は No.189 地点における 12.5m 四方アンテナのケーブルの導体径と送信電流の違いによる探査結果の違いを示している。信号切断後 25 μ sec 以降のデータ (より地下深部に相当) はアンテナによらず同一の値を示すが、それ以前の地下浅部に相当するデータは、同一地点にもかかわらず、ケーブル径および送信電流値によって異なる。これは、信号切断直後のアンテナの自己誘導の影響によるもので、最も浅層まで有効なデータが得られるのは導体断面積 0.25mm² ケーブル、1A 送信の場合である。これより太い 0.5mm² や 1.25mm² ケーブルでは、信号切断直後は上記の影響で左下りの曲線となってしまう、地表下数 m といった浅部の情報は正確に得られない。一方、細かいケ

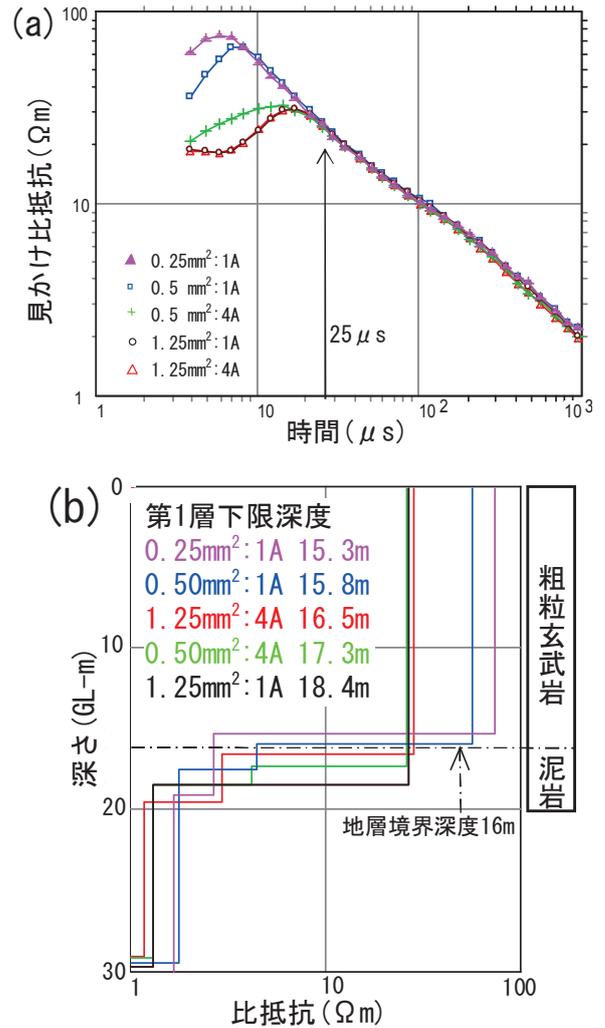


Fig.2 ケーブル・送信電流による浅部応答の比較 (a)時間一見かけ比抵抗曲線, (b)逆解析結果

Comparison of responses in early time corresponding to cable or sending current

(a) time-apparent resistivity curve, (b) inversion result

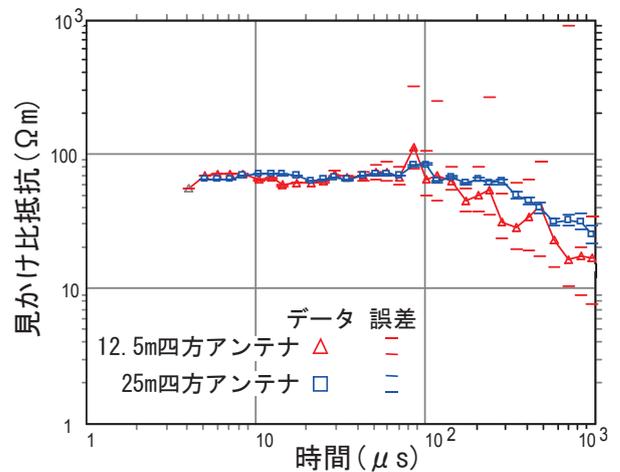


Fig.3 アンテナ径拡大による高圧線によるノイズの低減 Reduction of noise from power line with expansion of antenna diameter

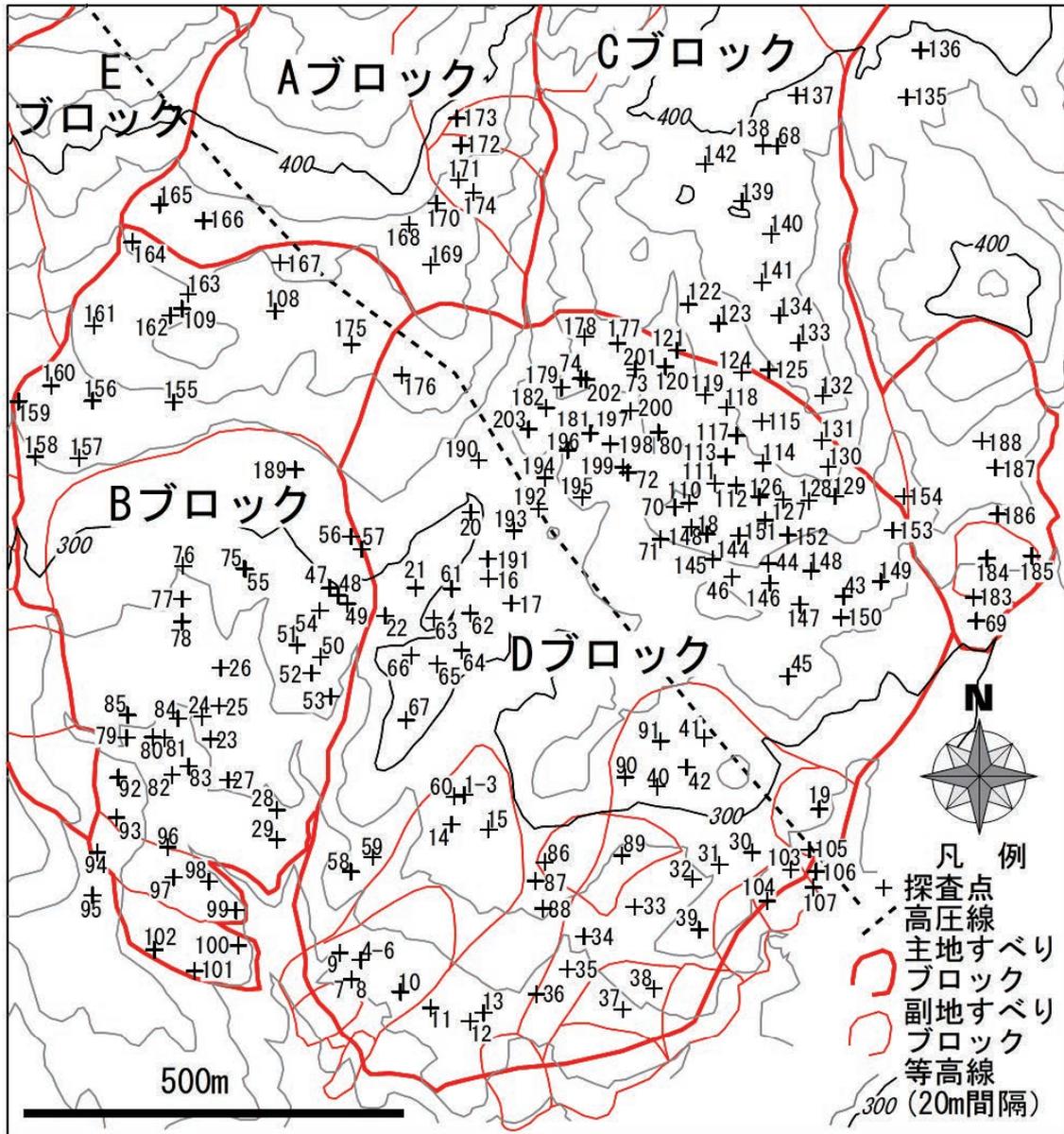


Fig.4 探査地点位置図

Locality map of survey points

ケーブルや送信電流が小さい場合は一般的に遅い時間で信号/ノイズ比 (以下 S/N 比) が小さく、データのばらつきが大きくなり、深部の情報を精度良く得られない。粗粒玄武岩の層厚は、斜面の上部で 100m 以上に及ぶことがボーリングにより把握されているため、ここでは 1.25mm² ケーブル使用、4A 送信を基本測定条件として、より深部の情報が精度良く得られるようにした。Fig.2 (b) は Fig.2 (a) の各データを逆解析した結果であり、粗粒玄武岩に相当する第 1 層の比抵抗は、より早い時間で高い見かけ比抵抗を示す 0.25mm² ケーブル、1A 送信の場合で高い値を示す。しかし、第 1 層の層厚は各ケースで大きく変わらず、近傍ボーリングにおける粗粒玄武岩下端深度の 16m に対し 15% 以内の結果を示し、地表付近の探査情報が欠如する場合でも、浅層の高比抵抗層下端深度が求められることを示している。

また、高圧線近傍では、特に深部のデータのばらつきが大きくなり、解析が困難となることが多かった。Fig.3 は高圧線真下の No.192 地点において、12.5m 四方アンテナと 25m 四方アンテナによる探査データを比較したもので、遅い時間すなわち深部のデータのばらつきが、アンテナ径の拡大により低減されることを示している。

2.3 調査地概要と探査点配置

七五三掛地すべりは、月山西麓の大規模地すべり地形群の南西端部に位置し、新第三紀中新世の硬質な凝灰角礫岩を基岩として、下位から泥岩、粗粒玄武岩が累重する流れ盤斜面からなっている。東北農政局庄内あさひ農地保全事業所の調査によれば、すべり面は泥岩上面もしくは泥岩中にあるが、主として粗粒玄武岩の層厚の違いによりすべり面深度は地すべりブロックにより大きく異

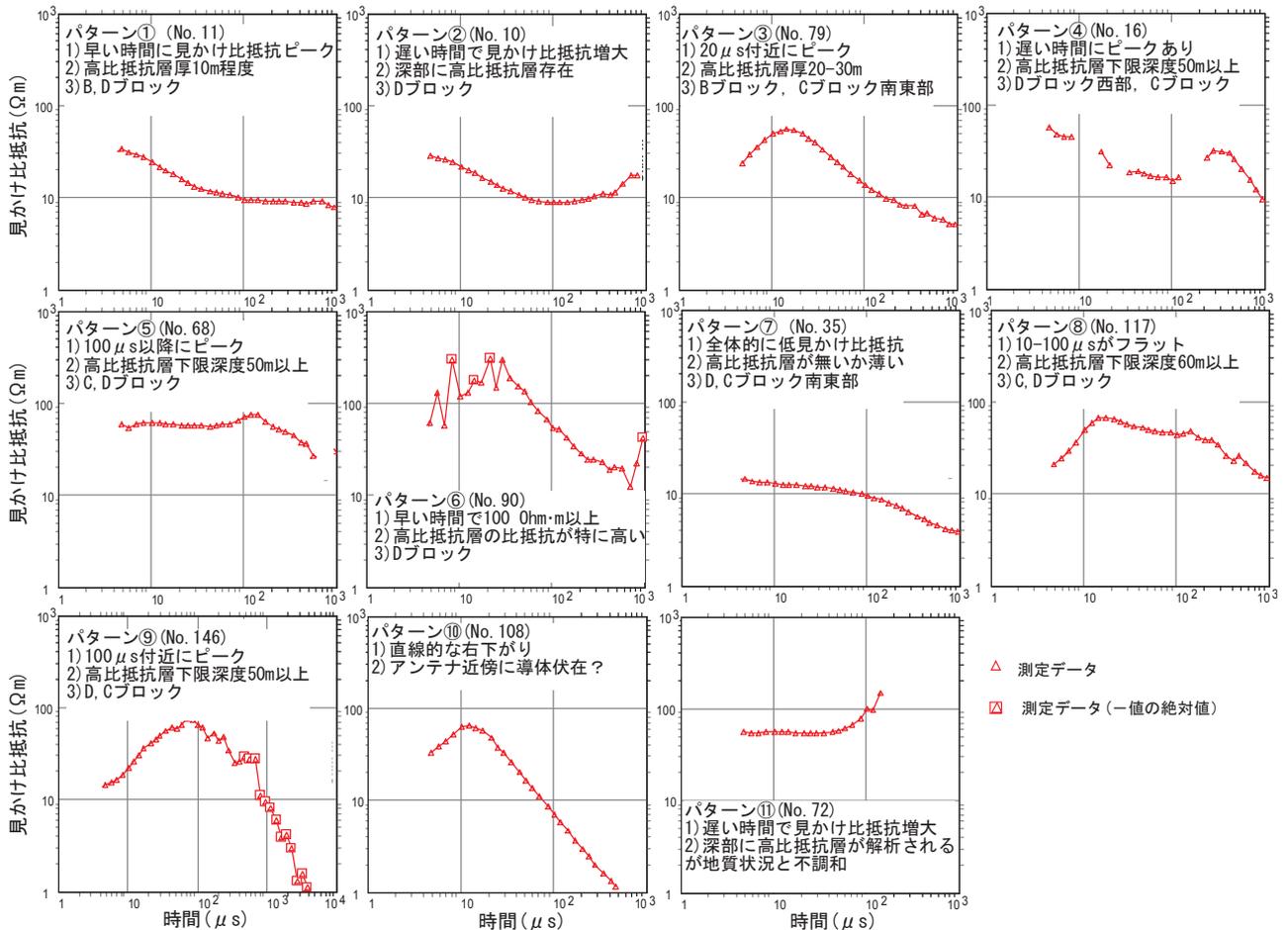


Fig.5 代表的な見かけ比抵抗曲線パターン

Typical pattern of apparent resistivity curve

なっている。2009年の災害時に大きく活動し現在は沈静化しているサブブロックを含むBブロックの中・下部では粗粒玄武岩層厚は28～40mであり、Bブロック上部から背後のAブロックにかけては50m以上と厚くなる。融雪期を中心とする緩やかな活動に対し対策が進められているDブロックの中・上部および背後斜面のCブロックでは粗粒玄武岩下端深度は120mに及ぶが、ブロック末端の南東部では粗粒玄武岩を欠き、下位の泥岩が地表に分布する。この七五三掛地すべりの約1300m四方の範囲において、2010年3月から2013年3月にかけてのべ21日間で203点（一部重複地点を含む）のTDEM法1次元探査を実施した（Fig.4）。探査結果の検証のため、調査ボーリング近傍には探査点を配置するように留意した。各探査の諸元は付表1, 2にまとめた。1日あたりの最大探査地点数は、水田主体の緩傾斜地を1名で探査した2011年11月24日と林間地を前述の2班体制で探査した2012年11月16日の実績である18点であった。

Ⅲ 探査結果と考察

3.1 見かけ比抵抗曲線パターン区分

各探査点における過度時間に対する見かけ比抵抗曲線は、場所により特徴が異なり、大きく10種類の応答パターンに分類できる（Fig.5）。おおむね早い時間から遅い時間に（浅層から深層に）向かって高比抵抗→低比抵抗もしくは低比抵抗→高比抵抗→低比抵抗の変化を示し、2～4層の層構造が推定された。このため、逆解析では4層構造を仮定して各層の層厚および比抵抗を求めた。

3.2 解析結果の取り扱い

1次元逆解析を行う中で、浅部の高比抵抗の比抵抗値が9999Ωmに発散しても、比抵抗モデルから計算される見かけ比抵抗曲線と実測データとのフィッティングは良好である場合が見受けられた。Fig.6の(a)と(b)は同じデータに対し、層比抵抗の上限をそれぞれ1000Ωm, 9999Ωmに設定して逆解析した結果である。下段の比抵抗柱状図では地表から2層目の比抵抗がそれぞれ設定上限値に解析される違いがあるが、逆解析のフィッティング程度を示す平均二乗残差（rms error）はいずれも約5%と良好であり、2層目の下端深度は33.5mと同一の

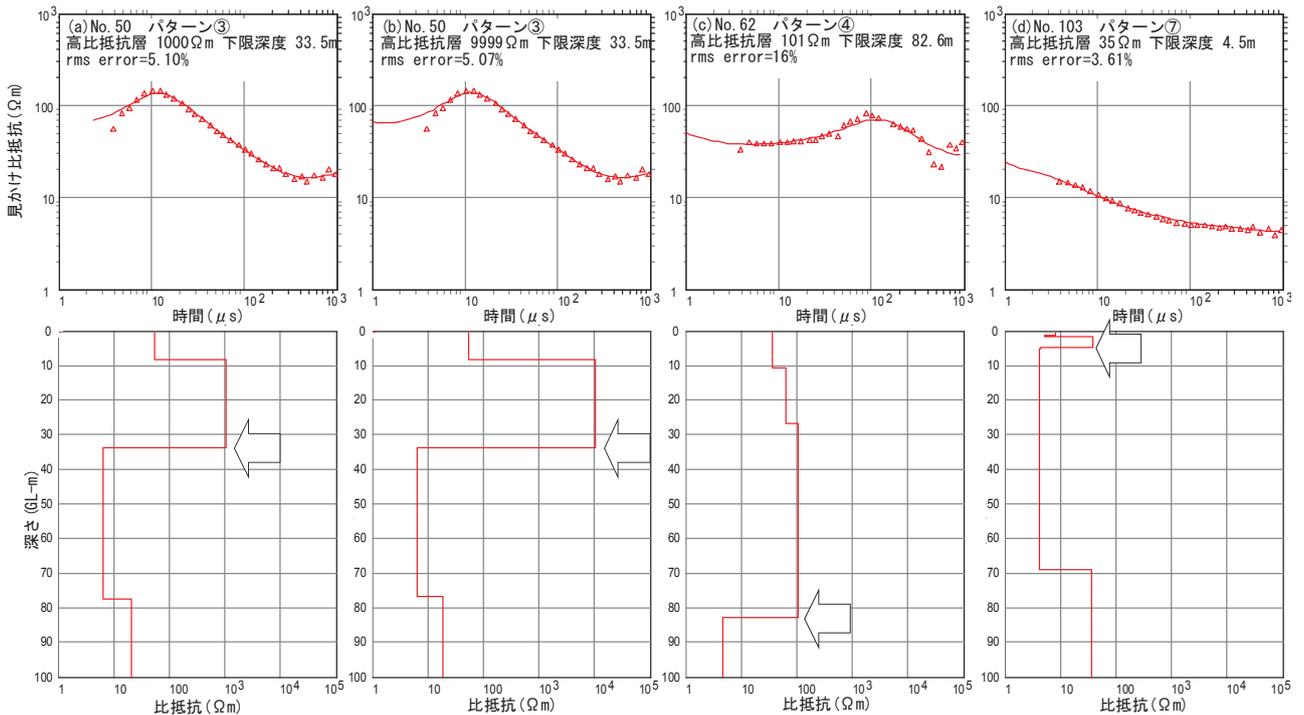


Fig.6 高比抵抗層下端深度の解析（上段：△測定見かけ比抵抗と逆解析結果の理論見かけ比抵抗曲線，
下段：逆解析による比抵抗柱状図（折れ線）と高比抵抗層下端深度（矢印））
Analysis of lower boundary depth of higher resistivity layer

結果が得られた。表層の高比抵抗層は粗粒玄武岩に相当すると考えられるが、上記のようにその比抵抗値が異なっても逆解析のフィッティング程度や層厚に影響しないため、高比抵抗層の比抵抗から風化度を評価することは難しいと判断した。このため、地質構造を考慮して粗粒玄武岩に相当すると考えられる表層の高比抵抗層とその下位のおおむね 10 Ω m 以下の低比抵抗層との境界深度を高比抵抗層下端深度と定義し (Fig.6 の矢印)，以降では各探査点における高比抵抗層下端深度のみを基に検討を進めた。

3.3 ボーリング近傍探査点における高比抵抗層下端深度

Fig.7 は、ボーリング近傍探査点における高比抵抗層下端深度とボーリングによる粗粒玄武岩層下端深度を比較したもので、逆解析の平均二乗残差による区分も行っている。両者は、全データで $R^2=0.72$ と比較的高い相関を示すが、粗粒玄武岩下端深度 60m 未満の探査点で $R^2=0.76$ と相関が高く、60m 以上の探査点では $R^2=0.02$ と相関は認められない。探査による高比抵抗層下端深度がボーリングによる粗粒玄武岩下端深度より小さめに解析される点の平均二乗残差はおおむね 10% 未満であり、逆解析は良好に行われていることを示す。No.133 探査点ではボーリングコア比抵抗が得られていることから、コア比抵抗に基づく比抵抗モデルから順計算で得られる理論測定値と実際の測定値を比較した (Fig.8)。ここでは深度 20 ~ 46m に比抵抗約 50 Ω m の風化砂岩を挟む

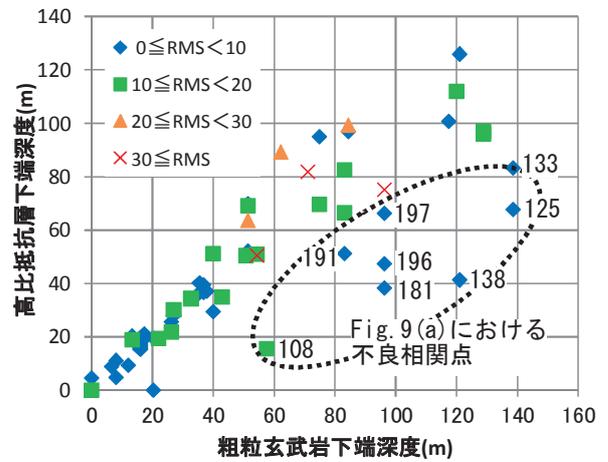


Fig.7 粗粒玄武岩下端深度と高比抵抗層下端深度の比較
番号は探査点 No.
Comparison of lower boundary depth between dolerite and higher resistivity layer

粗粒玄武岩が深度 139m まで分布し、そのコア比抵抗の範囲は 21 ~ 2156 Ω m であり、層構造モデルとしては 130 ~ 800 Ω m の範囲とした (Fig.8 下段比抵抗柱状図参照)。粗粒玄武岩の下位はコア比抵抗 9 ~ 18 Ω m の砂岩泥岩互層で、層モデルとしては 10 Ω m を与えた。Fig.8 下段の緑色折れ線で示される比抵抗モデルに対する TDEM 法の理論測定データは、Fig.8 上段の緑色の見かけ比抵抗曲線になるが、赤三角で示される実際のデータとは早い時間（浅い部分）の一部を除いて一致しない。

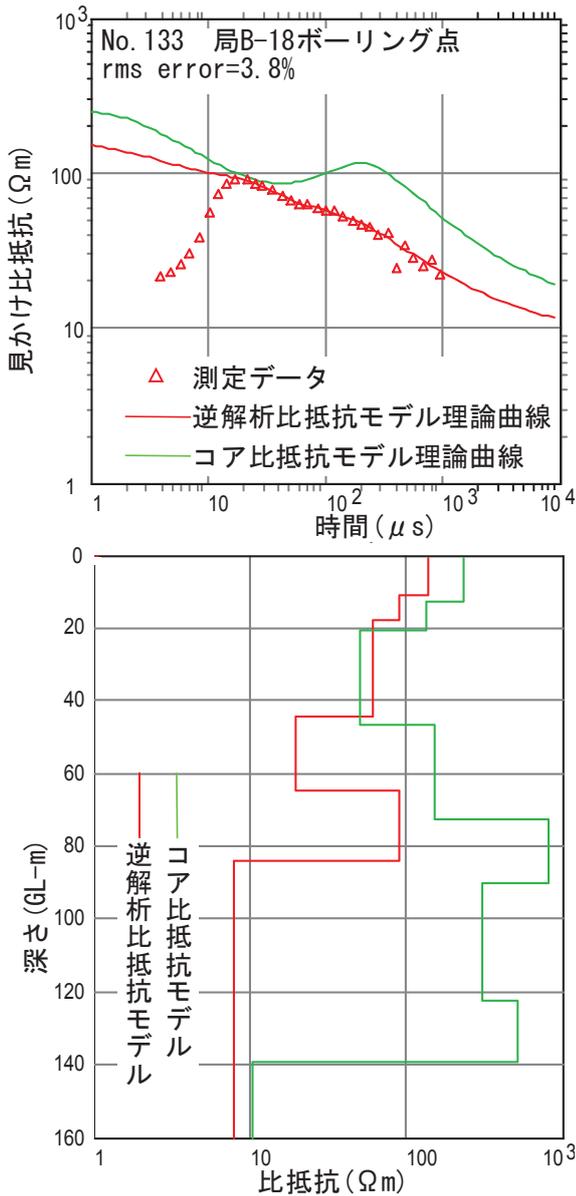


Fig.8 コア比抵抗に基づく比抵抗構造と探査結果の不一致例
 Example of disagreement between inversion result and resistivity structure based on core resistivity

このような地質構造（比抵抗構造）と探査結果の不一致の原因は不明であるが、60m 以上であっても粗粒玄武岩下端深度と相関のある探査結果が得られていることに着目し、調査範囲では TDEM 法探査による高比抵抗層下端深度は、粗粒玄武岩層下端深度に相当すると考える。

3.4 高比抵抗層分布と地下水流動

Fig.9(a) は TDEM 法探査によって得られた高比抵抗層下端深度等値線図である。この図からは、C,D ブロックで高比抵抗層厚 50m 以上の部分が広く分布し、C ブロックから D ブロックにかけて NNE-SSW 方向に層厚 70m 以上の部分が分布する。そして、D ブロック南東側の末端部は高比抵抗層が薄く、20m 未満を示す。ボーリングデータに基づき D ブロックについて作成された

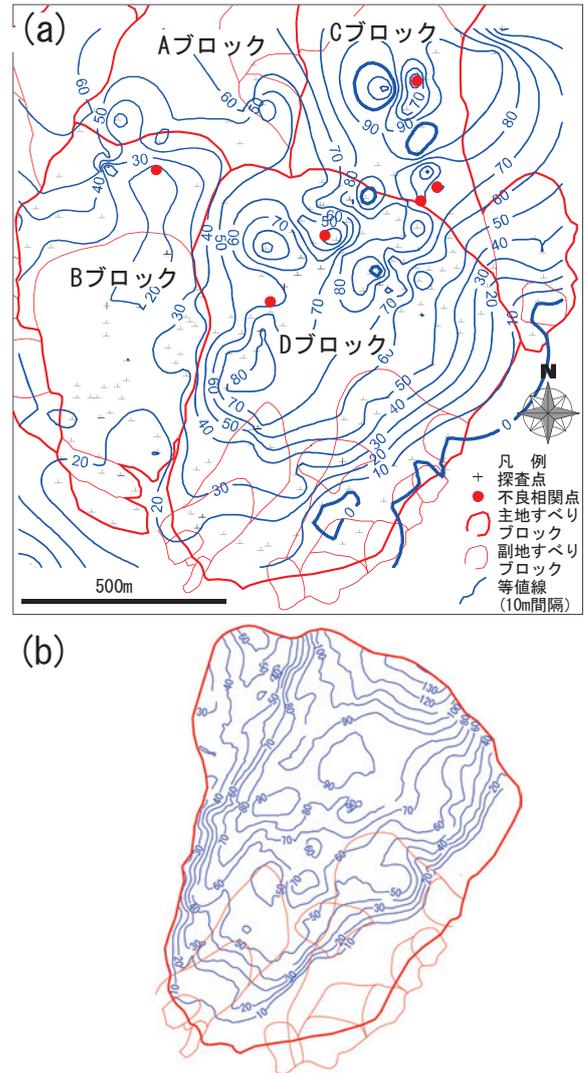


Fig.9 (a) 高比抵抗層下端深度分布図, (b) D ブロック粗粒玄武岩下端深度分布図 (庄内あさひ農地保全事業所資料)
 (a) lower boundary depth map of higher resistivity layer, (b) lower boundary depth map of dolerite in the D block

粗粒玄武岩下面深度等値線図 (**Fig.9(b)**) と比較すると、**Fig.9(a)** で高比抵抗層下端深度が 70m 以上の部分では **Fig.7** で検討したボーリング結果と探査結果の不良相関点とともにボーリングと離れた点で下端深度が小さく解析された点により複雑な等値線分布を示す。しかし、細かい起伏を無視すれば、高比抵抗層下端深度の分布傾向は粗粒玄武岩下端深度分布と調和的である。また、西側の B,A ブロックでは高比抵抗層厚はおおむね 30m 程度、最大でも 60m 程度であり、C,D ブロックと対照的な違いを示す。これらの特徴は、すでにボーリング調査により把握されていたものであり、それが追認できたことで本手法の有効性が示されたと考えられる。

Fig.10 は **Fig.9** データと地表標高から高比抵抗層および D ブロックにおける粗粒玄武岩の下面を標高表示したものである。C ブロックから D ブロックにかけての高比抵抗層および粗粒玄武岩の層厚の大きい部分の下面

IV 結 言

山形県鶴岡市の七五三掛地すべりに地下水を供給するキャップロックに相当する粗粒玄武岩の分布の把握のため、山間地における探査能率および粗粒玄武岩と下位の泥岩との比抵抗コントラストを考慮して TDEM 法電磁探査による 1 次元探査の多点適用を試みた。小型軽量探査装置の採用と現地作業の高能率化により、探査深度 50 ~ 100m の 1 次元探査を山間地においても 1 日あたり最大 18 点実施可能とし、約 1300m 四方の範囲について粗粒玄武岩相当層の層厚分布を把握した。ボーリング地点近傍の探査結果の比較から、探査による高比抵抗層下端深度と粗粒玄武岩下端深度は良い相関を示し、TDEM 法電磁探査が調査初期の概査やボーリング間の補間に有効であることを確認した。しかし、粗粒玄武岩下端深度が 60m を超えると相関が悪くなり、解析された高比抵抗層厚の大きい領域には層厚が小さく解析され層厚分布を複雑にする探査点が見受けられた。このようなところでは、特に深部データの S/N 比を改善するために、送信アンテナ径の拡大が必要と考えられる。また、逆解析において高比抵抗層比抵抗の解析結果への寄与が小さかったため、風化度と比抵抗との関係は検討できなかった。今後、高比抵抗層の探査解析精度の向上を図るため、TDEM 法浅部探査用細径ケーブルアンテナや垂直電気探査を併用し、地表付近から精度の高い比抵抗情報を得ることを検討する必要がある。

謝辞：本研究は平成 23 年度および平成 24 年度東北農政局庄内あさひ農地保全事業所受託業務の一環として、平成 25 年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「沿岸域における効率的な深層地下水探査手法の開発」の支援を受けて行われた。本研究の実施に当たり、山形大学農学部奥山武彦教授、同大学学生諸氏、庄内あさひ農地保全事業所および株式会社日さくの関係各位にご協力いただいた。ここに感謝申し上げます。

参考文献

寺田 剛・鎌田知也・森 一司・中原正幸(2010)：2009 年山形県鶴岡市七五三掛(しめかけ)地すべり災害における緊急対策および恒久対策，地盤工学会誌，58，634-635
 物理探査学会(1998)：物理探査ハンドブック手法編第 6 章電磁探査，297-398，物理探査学会，東京。
 原 敏昭・西牧 均・和田一成・斎藤 章・関根一郎(1996)：TDEM 電磁探査法によるトンネル調査，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，396-400
 物理探査学会(2008)：新版物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル 2008ー，物理探査学会，539p.

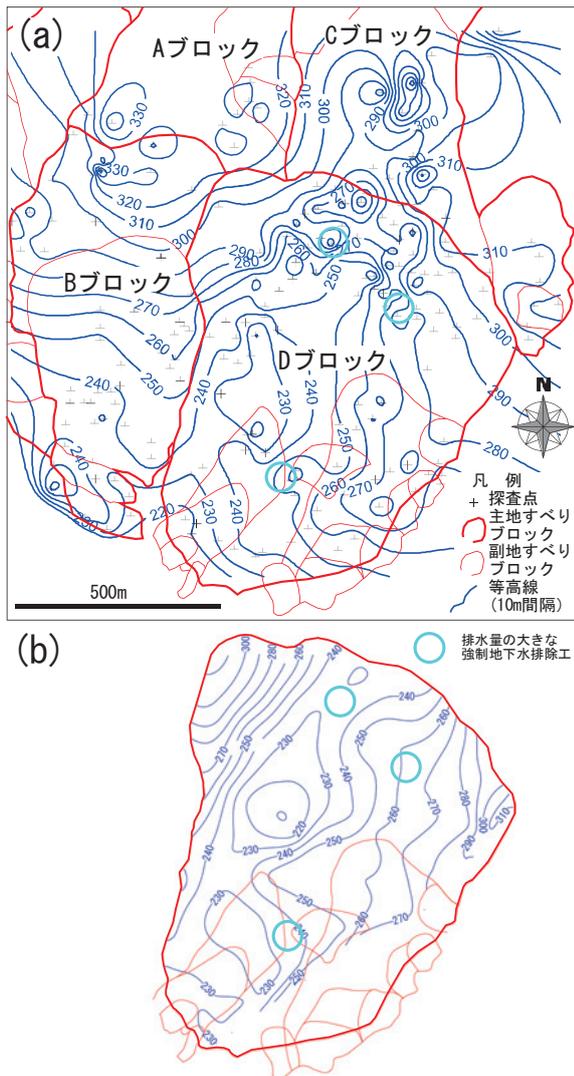


Fig.10 (a) 高比抵抗層下面等高線図，(b) D ブロック粗粒玄武岩下面等高線図(庄内あさひ農地保全事業所資料)
 ○は排水量の大きい強制地下水排除工位置
 (a) base counter map of higher resistivity layer,
 (b) base counter map of dolerite in the D block

は船底状を呈していることから、これらの部分は山側からの地下水流動部として機能し、D ブロックの地すべり活動に影響を与えている可能性が高い。Fig.10 の○印は排水量が 600L/min 以上と大きい強制地下水排除工(ディープウェル)の位置を示しており、粗粒玄武岩の厚い部分での豊富な地下水の存在を示している。

以上の検討から、調査地区において TDEM 法電磁探査によりキャップロックである粗粒玄武岩の分布概要を把握することができ、TDEM 法電磁探査が調査初期の概査やボーリング間のデータ補間に有効であることが確認できた。

Appendix 1 TDEM 探査諸元(1)

Parameters of TDEM survey (1)

No.	現場番号	探査日	時刻	地すべり ブロック	応答曲線 パターン	高比抵抗 層下端深 度(m)	高比抵抗層 比抵抗(Ωm)	近傍ボー リング	粗粒玄武 岩下端深 度(m)	等厚厚線図用仮座標データ			探査諸元				備考		
										基底標高 (m)	下端深度 (m)	地表標高 (m)	アンテナ径 (mm)	ケーブル 電流(A)	測定 時間	rms error			
1	753	2010/03/08	16:53	D-1	④	69.2	2000.0	bv20-1	51.4	215.9	69.2	285.0	25.0	0.5	2.9	5.0	7.0	11.0	
2	753-3	2010/03/08	16:59	D-1	④	69.8	2000.0	bv20-1	51.4	215.2	69.8	285.0	25.0	0.5	1.0	5.0	5.0	5.8	
3	75363	2010/03/08	17:04	D-1	④	63.6	2000.0	bv20-1	51.4	221.4	63.6	285.0	25.0	0.5	2.8	10.0	9.0	28.0	
4	753-2	2010/03/17	16:59	D-1-1	③	21.0	66.2			222.0	21.0	243.0	12.5	0.5	1.0	5.0	5.0	9.7	
5	753-22	2010/03/17	17:04	D-1-1	③	21.3	72.1			221.7	21.3	243.0	12.5	0.5	1.0	10.0	5.0	7.4	
6	753-23	2010/03/17	17:12	D-1-1	③	20.4	75.7			222.7	20.4	243.0	12.5	0.5	1.0	15.0	7.0	34.0	ノイズ影響大
7	75310	2010/03/30	9:37	D-1-1	②	21.7	498.5			220.3	21.7	242.0	12.5	0.5	1.0	5.0	5.0	18.0	
8	753B10	2010/04/15	14:06	D-1-1	②	20.7	2000.0			221.4	20.7	242.0	12.5	0.5	1.0	10.0	5.0	3.9	
9	753B19	2010/04/15	14:21	D-1-1	③	28.9	2000.0			213.1	28.9	242.0	12.5	0.5	3.1	10.0	5.0	10.0	
10	753B18	2010/04/15	14:32	D-1-1	②	12.0	38.2			231.1	12.0	243.0	12.5	0.5	3.0	10.0	5.0	6.7	
11	753B18e	2010/04/15	14:42	D-1	①	11.7	38.7			238.3	11.7	250.0	12.5	0.5	3.0	10.0	5.0	2.6	
12	753B18ee	2010/04/15	14:52	D-1	①	11.8	36.0			239.2	11.8	251.0	12.5	0.5	2.9	10.0	5.0	5.8	
13	753B18eeu	2010/04/15	15:07	D-1	①	13.1	28.9			240.9	13.1	254.0	12.5	0.5	2.9	10.0	5.0	5.9	
14	753bv201n	2010/04/15	15:52	D-1	④	37.3	36.6			245.7	37.3	283.0	12.5	0.5	2.9	10.0	5.0	7.8	
15	753bv201ns	2010/04/15	16:07	D-1	⑤	52.8	2000.0			230.2	52.8	283.0	12.5	0.5	2.9	10.0	4.0	7.8	
16	753kyoku1	2010/04/15	17:08	D-1	④	70.8	898.1			234.2	70.8	305.0	12.5	0.5	2.9	10.0	5.0	9.4	高圧線
17	753kyoku1'	2010/04/15	17:22	D-1	④	62.6	2000.0			241.4	62.6	304.0	12.5	0.5	2.9	10.0	5.0	39.0	ノイズ影響大
18	753kyoku4	2010/04/15	17:42	D-1	④	67.7	2000.0			273.3	67.7	341.0	12.5	0.5	2.7	10.0	5.0	33.0	ノイズ影響大
19	753kyoku12	2010/04/15	17:54	D-2-6	⑦	0.0	—	局12	0.0	281.0	0.0	281.0	12.5	0.5	2.7	10.0	5.0	15.0	
20	753-a	2010/04/29	13:07	D-1	⑤	50.5	43.2	B-25	50.8	247.5	50.5	298.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	13.0	
21	b	2010/04/29	13:21	D-1	③	46.8	2000.0			242.2	46.8	289.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	5.4	
22	c	2010/04/29	13:35	D-1	③	46.0	2000.0			243.0	46.0	289.0	12.5	0.5	1.0	5.0	3.0	2.1	
23	d	2010/04/29	16:36	B-1	③	30.1	2000.0	B-2	27.0	234.9	30.1	265.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	17.0	ノイズ影響大
24	e	2010/04/29	16:47	B-1	③	28.2	243.8	B-2	27.0	236.9	28.2	265.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	7.8	
25	f	2010/04/29	16:59	B-1	③	23.1	421.6			242.3	23.1	265.4	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	11.0	ノイズ影響大
26	g	2010/04/29	17:12	B-1	②	19.4	120.3	B-6	22.0	247.5	19.4	266.9	12.5	0.5	3.4	10.0	4.0	13.0	ノイズ影響大
27	h	2010/04/29	17:47	B-1	①	14.1	179.9			246.8	14.1	260.8	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	20.0	ノイズ影響大
28	i	2010/04/29	18:05	B-1	①	16.6	166.7			242.3	16.6	258.9	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.3	
29	j	2010/04/29	18:19	B-1	②	8.8	33.1	B-10	6.5	246.4	8.8	255.2	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	3.0	
30	k	2010/04/30	8:19	D-2	⑦	0.0	—			284.0	0.0	284.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.5	
31	l	2010/04/30	8:32	D-2	②	9.0	52.0			273.0	9.0	282.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.5	凝灰角礫岩検知?
32	m	2010/04/30	8:43	D-2	①	9.9	95.0			266.1	9.9	276.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.1	
33	n	2010/04/30	8:56	D-2	⑦	0.0	—	局11	20.4	271.0	0.0	271.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	3.2	凝灰角礫岩検知?
34	o	2010/04/30	9:10	D-2	⑦	0.0	—			264.0	0.0	264.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.0	泥岩分布域
35	p	2010/04/30	12:13	D-2	⑦	0.0	—			257.0	0.0	257.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.0	泥岩分布域
36	q	2010/04/30	12:25	D-2	⑦	14.7	34.0			242.3	14.7	257.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	2.2	泥岩分布域
37	r	2010/04/30	12:37	D-2-4	⑦	0.0	—			258.0	0.0	258.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	3.7	泥岩分布域
38	s	2010/04/30	14:49	D-2-4	①	9.4	43.8	D21-B-3	12.0	252.6	9.4	262.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	1.7	
39	t	2010/04/30	13:49	D-2	①	0.0	—			286.5	0.0	286.5	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	1.0	泥岩分布域
40	u	2010/04/30	14:19	D-2	⑥	52.1	2000.0			253.9	52.1	306.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	9.6	
41	v	2010/04/30	14:31	D-2	⑥	50.4	2000.0	B-局3	54.3	258.3	50.4	308.7	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	32.0	高圧線
42	w	2010/04/30	14:43	D-2	⑥	42.7	175.6			270.8	42.7	313.5	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	17.0	ノイズ影響大
43	x	2010/04/30	15:04	D-2	③	36.6	—	B-局8	36.8	290.4	36.6	327.0	12.5	0.5	1.0	10.0	5.0	9.4	
44	y	2010/04/30	15:18	D-2	⑤	54.4	2000.0			282.6	54.4	337.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	16.0	
45	z	2010/04/30	15:31	D-2	⑥	50.5	2000.0			283.1	50.5	333.6	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	10.0	
46	aa	2010/04/30	15:43	D-2	⑥	52.2	49.2			286.7	52.2	338.8	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	7.4	
47	101	2010/05/28	16:23	B-D	③	34.3	2000.0	B-11	32.8	264.2	34.3	298.5	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	20.0	ノイズ影響大
48	102	2010/05/28	16:32	B-D	③	33.5	2000.0			265.0	33.5	298.5	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	6.8	ノイズ影響大
49	103	2010/05/28	16:40	B-D	③	31.8	2000.0			266.7	31.8	298.5	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	34.0	ノイズ影響大
50	104	2010/05/28	16:56	B-D	③	33.5	2000.0			260.4	33.5	293.9	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	4.5	
51	105	2010/05/28	17:05	B-D	③	37.2	445.9	B-9	37.8	256.7	37.2	293.9	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	7.9	
52	106	2010/05/28	17:16	B-D	③	37.9	2000.0			254.1	37.9	292.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	5.0	
53	107	2010/05/28	17:28	B-D	③	23.5	2000.0			257.5	23.5	281.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	1.9	
54	108	2010/05/28	17:40	B-D	③	30.6	2000.0			265.8	30.6	296.4	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	7.7	
55	109	2010/05/28	17:54	B-1	③	18.9	2000.0	BV3-3	13.4	266.1	18.9	285.0	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	11.0	
56	110	2010/05/28	18:06	B-D	③	29.4	2000.0	B-4	40.0	282.8	29.4	312.2	12.5	0.5	3.4	10.0	5.0	7.2	ノイズ影響大
57	111	2010/05/28	18:20	B-D	⑥	51.2	2000.0	B-4	40.0	261.0	51.2	312.2	12.5	0.5	3.4	12.0	4.0	12.0	ノイズ影響大
58	203	2010/06/14	16:47	D-1	③	39.8	2000.0			229.4	39.8	269.2	12.5	0.5	3.2	10.0	5.0	31.0	ノイズ影響大
59	204	2010/06/14	17:12	D-1	③	35.0	260.1	BV19-5	43.0	234.9	35.0	269.9	12.5	0.5	3.2	15.0	4.0	11.0	ノイズ影響大
60	205	2010/06/14	17:27	D-1	⑤	52.1	176.3	bv20-1	51.4	233.4	52.1	285.5	12.5	0.5	3.2	10.0	5.0	7.3	
61	206	2010/06/15	10:04	D-1	⑤	66.4	160.7	B-局1	83.2	234.6	66.4	301.0	12.5	0.5	3.2	10.0	5.0	10.0	ノイズ影響大
62	207	2010/06/15	10:16	D-1	④	82.6	101.2	B-局1	83.2	218.4	82.6	301.0	12.5	0.5	3.2	10.0	5.0	18.0	ノイズ影響大
63	208	2010/06/15	10:30	D-1	⑤	53.1	60.5			247.9	53.1	301.0	12.5	0.5	3.2	10.0	5.0	8.1	
64	209	2010/06/15	10:52	D-1	⑤	80.7	32.5			229.4	80.7	310.0	12.5	0.5	3.2	10.0	5.0	14.0	
65	210	2010/06/15	11:49	D-1	④	73.0	110.3			238.0	73.0	311.0	12.5	0.5	3.3	10.0	4.0	12.0	
66	211	2010/06/15	16:50	D-1	④	72.8	87.5			235.2	72.8	308.0	12.5	0.5	3.3	10.0	5.0	27.0	ノイズ影響大
67	212	2010/06/15	12:04	D-1	④	81.8	2000.0	B-局5	71.1	225.2	81.8	307.0	12.5	0.5	3.3	10.0	5.0	33.0	
68	213	2010/06/15	14:14	C	⑤	86.1	51.5			307.1	86.1	393.2	12.5	0.5	3.2	15.0	5.0	6.5	
69	214	2010/06/15	15:29	C-1	⑦	4.7</													

Appendix 2 TDEM 探査諸元 (2)

Parameters of TDEM survey (2)

No.	現場番号	探査日	時刻	地すべりブロック	応答曲線パターン	高比抵抗層下端深さ(m)	高比抵抗層比抵抗(Ωm)	近傍ボーリング	粗粒玄武岩下端深さ(m)	等厚厚線図用仮座標データ				探査諸元				備考	
										基底高(m)	下端深さ(m)	地表標高(m)	アンテナ径(m)	ケーブル径(mm)	電流(A)	スウェッチ	測定時間		rms error
1101		2012/10/17	14:10	D	④	112.01	152			227.99 [†]	112.01	340	12.5 [†]	0.5 [†]	3.2	17	5	6.2	
1112		2012/10/17	14:20	D	④	58.8	21.7			287.2 [†]	58.8	346	12.5 [†]	0.5 [†]	3.3	17	4	6.5	
1123		2012/10/17	14:45	D	④	73.3	270			274.7 [†]	73.3	348	12.5 [†]	0.5 [†]	3.2	17	4	8.1	
1134		2012/10/17	15:11	D	④	87.7	2000			266.3 [†]	87.7	354	12.5 [†]	0.5 [†]	3.3	10	4	21.9	
1145		2012/10/17	15:25	D	④	80.2	60.4			275.8 [†]	80.2	356	12.5 [†]	0.5 [†]	3.3	10	4	3.4	
1156		2012/10/17	16:00	D	④	100.7	53.9	B局15	117.4	266.3 [†]	100.7	367	12.5 [†]	0.5 [†]	3.3	18	4	3.2	
1167		2012/10/18	10:04	D	④	64.9	27.9			268.07 [†]	73.23	341.3	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	4	5.3	
1178		2012/10/18	11:40	D	⑧	76.9	18.1			282.1 [†]	76.9	359	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	14.0	
1189		2012/10/18	11:50	D	⑧	73.43	2000			285.57 [†]	73.43	359	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	17	5	6.4	
11910		2012/10/18	13:50	D	⑧	70.85	2000			287.15 [†]	70.85	358	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	17	4	8.3	
12011		2012/10/18	14:15	D	⑧	111.94	21.3	B局21	120	241.06 [†]	111.94	353	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	13.0	
12112		2012/10/18	14:28	C	⑧	102.2	36.5			255.8 [†]	102.2	358	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	5.5	
12213		2012/10/18	14:53	C	⑧	83.7	16.8			284.3 [†]	83.7	368	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	8.0	
12314		2012/10/18	15:07	C	⑧	80.1	25.8			291.9 [†]	80.1	372	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	5.3	
12415		2012/10/18	15:36	C	⑧	81.3	16.9			288.7 [†]	81.3	370	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	7.2	
12516		2012/10/18	15:55	C	⑧	67.6	16	B局18	138.6	310.4 [†]	67.6	378	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	3.3	
12617		2012/10/19	9:30	D	④	54.43	28.7			293.57 [†]	54.43	348	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	4.1	
12718		2012/10/19	9:44	D	⑥	52.6	44.3			299.4 [†]	52.6	352	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	3.8	
12819		2012/10/19	9:57	D	⑥	55.64	2000			297.359 [†]	55.641	353	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	5.4	
12920		2012/10/19	10:14	D	⑥	56.76	2000			297.24 [†]	56.76	354	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	5.4	
13021		2012/10/19	10:27	D	⑥	57.8	410			305.2 [†]	57.8	363	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	5.1	
13122		2012/10/19	10:40	D	⑥	53.5	151			318.5 [†]	53.5	372	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	8.4	
13223		2012/10/19	10:57	C	⑥	不明	-	B局18	138.6	不明	-	384.4	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	17.0	
13324		2012/10/19	11:20	C	⑧	83.24	86.9	B局18	138.6	305.76 [†]	83.24	389	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	3.8	
13425		2012/10/19	11:36	C	⑧	45.52	78.5			343.48 [†]	45.52	389	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	3.3	
13526		2012/10/19	13:20	D	④	95.92	15.2	B局26	129	293.08 [†]	95.92	389	12.5 [†]	0.5 [†]	1.0	18	5	17.0	
13627		2012/10/19	13:34	D	④	36.93	62			359.07 [†]	36.93	396	12.5 [†]	0.5 [†]	1.0	18	5	4.0	
13728		2012/10/19	13:51	C	④	97.1	2000	B局26	129	294.9 [†]	97.1	392	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	10.0	感度不足 傾向はいい
13829		2012/10/19	14:29	C	⑧	41.31	18	B局25	121	358.69 [†]	41.31	400	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	7.8	ノイズ影響大
13930		2012/10/19	14:59	C	⑧	59	27.1			338 [†]	59	397	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	6	17.0	
14031		2012/10/19	15:15	C	⑧	107.6	11.3			288.4 [†]	107.6	396	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	10.0	
14132		2012/10/19	15:35	C	④	106	23.5			283 [†]	106	389	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	22.0	深部ほどノイズ影響大
14233		2012/10/19	16:07	C	④	125.9	2000	B局25	121	265.1 [†]	125.9	391	12.5 [†]	0.5 [†]	3.7	18	5	8.5	深部ほど高比抵抗
143101		2012/11/14	9:55	D	④	99.3	2000	B局4	84.38	242 [†]	99.3	341.3	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	10	5	21.0	深部ほどノイズ影響大
144102		2012/11/14	10:17	D	⑨	75.3	995			266 [†]	75.3	341.3	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	28.0	
145103		2012/11/14	10:25	D	⑨	72.4	234.3			266.4 [†]	72.4	338.8	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	7.8	
146104		2012/11/14	10:59	D	⑨	61.1	2000			274.9 [†]	61.1	336	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	18	7	10.0	
147105		2012/11/14	11:11	D	⑨	48.3	2000			286.7 [†]	48.3	335	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	7	18.0	
148106		2012/11/14	11:28	D	⑨	44.6	2000			286.4 [†]	44.6	331	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	10.0	
149107		2012/11/14	11:42	D	⑨	26.9	2000			296.1 [†]	26.9	323	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	15.0	浅部でノイズ影響大
150108		2012/11/14	12:04	D	⑨	39.5	2000	B局8	36.75	287.5 [†]	39.5	327	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	8.0	浅部でノイズ影響大
151109		2012/11/14	14:47	D	⑨	38.9	2000	DW10		304.1 [†]	38.9	343	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	31.0	
152110		2012/11/14	15:18	D	⑨	53.2	282.5	DW10		287.8 [†]	53.2	341	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	16.0	
153111		2012/11/14	15:55	D	⑨	20.6	135			308.4 [†]	20.6	329	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	5.0	
154112		2012/11/14	16:28	C	⑨	23.8	2000			307.2 [†]	23.8	331	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	4.2	
155113		2012/11/15	9:47	B	⑨	39.1	2000			296.9 [†]	39.1	336	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	22.0	カーブなめらかだがfitting悪い
156114		2012/11/15	10:31	B	④	35.7	419.9			291.3 [†]	35.7	327	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	14.0	深部ほどノイズ影響大
157115		2012/11/15	11:00	B	⑨	27.9	2000			293.9 [†]	27.9	321.8	12.5 [†]	1.25 [†]	1.0	15	5	15.0	
158116		2012/11/15	11:21	B	⑨	33.8	101.2			286.2 [†]	33.8	320	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	5.7	
159117		2012/11/15	11:37	B	⑨	26.7	2000			298.3 [†]	26.7	325	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	7.9	
160118		2012/11/15	11:45	B	⑧	50.4	2000			275.8 [†]	50.4	326.2	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	2.1	
161119		2012/11/15	13:38	B	⑨	52.7	45.8			300.3 [†]	52.7	353	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	4.2	
162120		2012/11/15	13:56	B	⑨	50.1	2000			308.9 [†]	50.1	359	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	9.8	
163121		2012/11/15	14:04	B	⑨	52	2000			307 [†]	52	359	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	7.2	浅部でノイズ影響大
164122		2012/11/15	14:22	B	⑨	59	2000			301 [†]	59	360	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	16.0	
165123		2012/11/15	14:47	A	⑨	60	2000			310 [†]	60	370	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	23.0	
166124		2012/11/15	15:05	A	⑩	23	35.1			349 [†]	23	372	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	2.6	高圧線
167125		2012/11/15	15:20	B	⑥	53.1	2000			307.9 [†]	53.1	361	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	13.0	高圧線
168126		2012/11/15	15:37	A	⑧	47.72	13.3			329.58 [†]	47.72	377.3	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	6	5.5	
169127		2012/11/15	15:50	A	⑧	43.25	2000			334.25 [†]	43.25	377.5	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	6	23.0	
170128		2012/11/15	16:09	A	⑨	61.7	31.3			316.3 [†]	61.7	378	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	7.1	
171129		2012/11/16	9:34	A-1-1	⑨	60.8	21.7			317.2 [†]	60.8	378	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	6.5	
172130		2012/11/16	9:46	A-1-1	⑨	61	2000			320 [†]	61	381	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	6.8	
173131		2012/11/16	10:04	A-1-2	⑨	62.7	49.2			326.3 [†]	62.7	389	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	8.8	
174132		2012/11/16	10:20	A-1-1	⑧	31	2000	集水井		336 [†]	31	367	12.5 [†]	1.25 [†]	3.7	15	5	1.9	集水井の影響あり?
175133		2012/11/16	10:56	B	⑩	24.8													

Resistivity Structure Investigation of Large-scale Landslides Using Time-domain Electromagnetic Method

NAKAZATO Hiroomi*, INOUE Keisuke*, SUZUKI Hisato* and TERADA Takeshi**

*National Institute for Rural Engineering, NARO

**Hokkaido Regional Development Bureau

Summary

The application of the multipoint survey of the time-domain electromagnetic (TDEM) sounding was carried out for understanding the thickness distribution of dolerite, which supplied groundwater to landslide as caprock. The application of a small and light weight equipment and the efficiency improvement of field work enabled the sounding (survey depth: 50-100 m) of 18 points or more in a day, even in the mountainous area. We conducted such TDEM sounding of 203 points within the range of 1.7 km², and estimated the thickness distribution of the dolerite in the Shimakeke landslide, Yamagata Prefecture. The sounding results near the borehole points showed that there are high correlations between the lower boundary depth of higher resistivity layer and that of dolerite. It was confirmed that the multipoint TDEM sounding was effective for the running survey and interpolation between boreholes. However, it is necessary to improve signal-to-noise ratio such as the expansions of the sending and receiving antenna diameter so that the correlation may be lowered when the dolerite layer thickness exceeds 60 m. Moreover, because the contribution of the resistivity value of the higher resistivity layer to the analytical result was small in the inversion analysis, the relation between the weathering degree and the resistivity was not able to be examined. It will be necessary to improve the analysis accuracy concerning the higher resistivity layer by data acquisition with the fine cable antenna for near surface and using together the vertical electrical prospecting etc.

Key words: caprock, groundwater, wide-area geological investigation