

高周波 CSMT 法の浅層探査への適応性

半田 駿*

Application of the High-frequency CSMT Method to Surveys in Shallow Subsurface Regions

Shun HANDA*

* Faculty of Agricultural Science, Saga University, Honjo machi 1, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

The surveys using the high-frequency CSMT system were carried out to make clear the electrical conductivity structures in the landslide area in Izumi and in the test-field of Shirasu banks in Satuma-sendai.

Although the survey in Izumi was conducted along a short line in a narrow flat area, relatively good data were obtained because of the short span of electrodes in this system. The 2-D resistivity model indicates that a high-conductive layer possibly highly satisfied with water lies just upon impermeable tuff breccia. Beneath the test-field of Shirasu banks, it is found that the deep layers on March are rather dry than those on January after rainfall test. These results indicate that the high-frequency CSMT method is relatively effective to survey shallow subsurface structures.

Key words : High frequency CSMT, Electrical conductivity, 2-D model, Groundwater, Landslide

1. はじめに

MT (Magnetotelluric : 磁場-地電流) 法は、電磁波の磁場成分と電場成分の比である特性インピーダンス (Z) が、周波数 (f) と媒質の電気伝導度 (σ) の関数であることを利用して、地下の電気伝導度分布を推定する方法である (Kaufman and Keller, 1981 ; 物理探査学会, 1999)。この Z を用いて、見掛比抵抗 (ρ_a) は、 $\rho_a = Z^2 / (\omega\mu)$ で与えられる。ただし $E = ZH$ であり、 ω は角周波数、 μ は透磁率である。

Maxwell 方程式は、電場 (E) と磁場 (H) が時間に関する周期関数の場合、

$$\text{rot}(E) = j\omega\mu H \quad (1)$$

$$\text{rot}(H) = \sigma E - j\omega\epsilon E \quad (2)$$

と書ける。ただし、 ϵ は誘電率、 j は虚数単位である。通常の MT 法では、用いられる周波数はせいぜい 10 kHz 以下であるので、(2) 式の右辺第 2 項の誘導電流は無視で

きる。これが成立するのは $\omega\epsilon/\sigma \approx 0.510^{-10} \cdot \rho f \cdot \epsilon/\epsilon_0 \ll 1$ のときで、 $\epsilon/\epsilon_0 = 10$ 、 $\rho = 1/\sigma = 100 \Omega\text{m}$ とすると、 f が 20 MHz 程度以下の時である。また、媒質の変化が鉛直方向のみの場合、(1)、(2) 式は H 、 E についての拡散方程式となる。このとき、振幅が $1/e$ になる深度をスキンドeps (δ) と呼ぶが、この δ は $503 (\rho/f)$ m となる (ただし e は自然対数の底)。MT 法では、これを可能探査深度 (可探深度) の目安としている。

スキンドeps の定義から、電磁波の周波数を変化させることにより、深部から浅部までの探査が可能となるのが容易に理解できる。ところで低周波では、地電流の強度は周波数に比例するため微弱になり、良好なデータを得るためには長い電極間隔が必要である。しかし、例えばスキンドeps が数 10 km となる周期数 100 秒の地磁気変動を用いた深部探査でも、電極間隔は通常 50~100 m 程度である。このことから MT 法は、可探深度が電極間隔に依存する電気探査法と比較して、特に深部の探査に有効であることが分かる。また、同一電極 (間隔)

* 佐賀大学農学部 〒840-8512 佐賀市本庄町 1

キーワード : 高周波 CSMT 法, 電気伝導度, 2 次元モデル, 地下水, 斜面崩壊

で複数周波数の信号が受信できることも有利な点である。

2. 高周波 CSMT 装置

MT 法で信号源に人工電波 (Controlled Source) を用いる方法を、特に CSMT 法と呼んでいる。この方法は 1 Hz~3 kHz の周波数を利用するのが一般的であるが、送信には大型の可搬型発電機が必要である等、装置が大きくなり、また商用周波数帯域を含むためノイズに弱い欠点がある。そこで我々は、これより高い 1 k~150 kHz の周波数帯域での測定が可能な高周波 CSMT 装置を開発した (半田ほか, 2002; 板井ほか, 2005)。この周波数帯域の可探深度は、例えば大地の比抵抗が 100 Ω m の場合、スキンプスが約 13~130 m であるので、土木への応用等、実用性の高い深度に相当する。

周波数帯域を上げることにより、以下のように装置の小型化、測定の迅速化が可能となる。従来の低い周波数を用いる CSMT 法では、上記のように大規模な送信装置が必要であった。しかしアンテナによる電波の放射は、高周波になるほど効率が良くなるため、アンテナは小型で済み、かつ小電力 (バッテリー) 駆動が可能となる。また測定でも、電場強度が大きいいため短い電極間隔を採用でき、測定能率の向上と同時に高密度の探査、狭隘な探査域にも対応が可能となる。さらに、MT 法では周波数領域データを用いるのが普通であるが、短時間に多くの波が測定できる高い周波数では、当然測定時間も短縮できる。そのため従来の MT では 1 測点に 20 分程度必要であった測定時間が 1.5 分程度になる。

本論文では、この高周波 CSMT 法を用いた斜面崩壊跡地及びシラス試験堤防探査について述べ、それらの結果の分析から、この方法の浅部探査への適応性について検討を加える。

3. 針原川斜面崩壊地への適用

探査の概略

1998 年 7 月 10 日、鹿児島県出水市の針原川上流部右岸での斜面崩壊により大規模な土石流が発生し、下流の針原地区が大きな被害を受けた (針原川土石流災害記録誌編集委員会, 2001)。2002 年 11 月に、崩壊した斜面に囲まれた図-1 の薄い網目で示された谷部 (CD: 測線長 20 m)、及び針原川右岸の平地部 (GH: 同 16 m) で、崩壊域の電気伝導度構造を明らかにするために高周波 CSMT 探査を実施した。斜面崩壊原因の解明には、地下水分布を知ることが重要である。高含水率層は高い電気伝導度を持つので、この探査によって得られる地下電気伝導度構造は、ここでの斜面崩壊の原因解明に重要な情

報を提供できると考えられる。

本探査では、信号源として地上に設置した水平ループアンテナを用いた (図-1 の白丸)。送信周波数は 1 kHz から 100 kHz までの 16 周波数である (半田ほか, 2002)。測線での測点間隔は 2 m とし、電極は 4 m 間隔で測線に沿って設置した。ただし、測線 CD の途中には排水用の U 字溝があり (図-1 の F)、この部分では測定が出来なかった。

電磁探査では、測点周囲の金属構造物が測定結果に悪影響を及ぼすことがよく知られている (例えば; Vogelsang, 1995)。斜面はブロックで覆われており、ブロックの鉄筋が測定に影響する可能性が高いことから、崩壊に直接関係する地点ではあるが、この斜面での測定は実施しなかった。斜面の尾根部についてはこのような施工がなく、4 m の電極間隔確保がcaろうじて可能であった (測点 9)。しかし、得られた周波数毎の測定値は揃っておらず、良好なデータとはいいがたい。また、針原川右岸部での測線 GH は、アンテナまでの距離が 46.5 m と

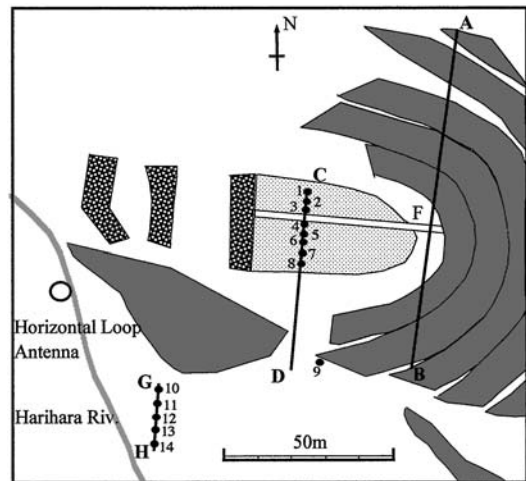


図-1 出水市針原川右岸の斜面崩壊跡地での探査測線 (CD, GH)。○は水平ループアンテナの位置、●は高周波 CSMT 測点であり、AB ではボーリング等による地質断面図が得られている (矢ヶ部・小林, 1998)。

Fig. 1 The survey lines in the landslide area in Izumi. An open circle and closed circles indicate a horizontal loop antenna and the observation sites in the high-frequency CSMT survey, respectively. The geological cross section along AB is obtained by Yakabe and Kobayashi (1998).

短い、地形の制約からこれ以上の送-受信点間距離を確保出来なかった。

比抵抗モデル

これらのデータを用いて、比抵抗断面図を得た。図-3に、モデル計算に用いた見掛比抵抗と位相のデータの一部を黒丸で示す。ただし、測線 GH と測点 9 のデータには、上記のように問題があるため、モデル計算では参考としてのみ用いた。電気探査と同様に、MT 法で得られた見掛比抵抗は直ちに地下の比抵抗値を示すものではなく、また横軸の周波数はスキンドプスの定義から深度情報を担っているとしても、これらのデータから正確な比抵抗断面を得るためには、インバージョンを含む何らかのモデル計算が必要である。ここでは、表層地形を考慮した有限要素法による 2 次元インバージョンにより、比抵抗モデルを構築した (例えば：Ogawa, 1987)。

水平ループアンテナ (鉛直磁気双極子) を用いる本探査の場合、アンテナからの電磁波はスキンドプスの約 5 倍以下の距離では球面波となり (ニアフィールド)、平面波の仮定の下に成立する MT 法での解析手法を用いると大きな誤差が生じる。このことから、CSMT 探査では十分な送-受信点間距離の確保が重要となる。しかしこの探査では、測線 CD までの距離 (73 m) は平面波近似が成立する条件 (ファーフィールド近似) を満たしていないため、これらのデータをモデル計算に用いる場合、何らかの補正が必要となる (ニアフィールド補正)。半田ほか (2007) は、3 次元差分法を用いた数値計算を実施している。本来ニアフィールド補正のためには、送-受信点間の 3 次元比抵抗構造を用いなければならないが、それは不可能である。そこで、水平ループアンテナによる 30 Ωm の均質大地での計算結果から得られた電場、磁場成分値を用いて、データを球面波領域から平面波領域への変換 (ニアフィールド補正) を行った。

インバージョンによって得られた比抵抗モデルを図-2 に示す。一般に、MT 法での有限要素法を用いたモデル計算では、下部境界では電場、磁場成分ともに十分小さいと仮定する。この条件はスキンドプスの 3 倍以上で満たされるため、下部境界は深度 450 m に置いた。しかし、73 m という短い送-受信点間距離を考慮すると、深部については意味がないため、図では深度 25 m までを示した。図-3 には、見掛比抵抗と位相について、データ (●) に加えモデル計算の結果 (□) も示した。モデルのフィットネスは比較的良好だが、位相については、例えば測点 1 のように、測定値と計算値が大きく異なる地点もある。なお、データの誤差を図に示したが、いずれも小さく記号によって隠されている。

この図から、表層が低比抵抗であること、10 m 深度ま

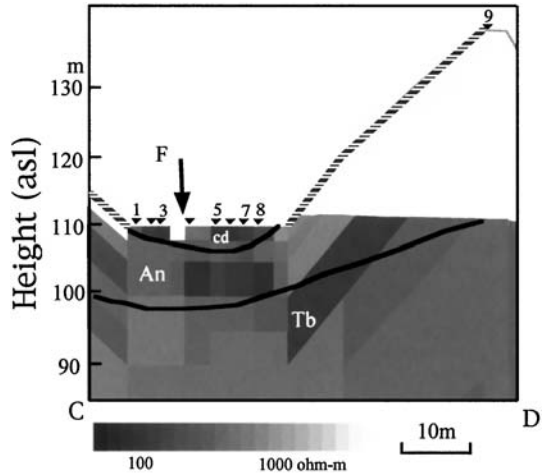


図-2 図1のCD測線での比抵抗断面図。図中の数字は測点番号、Fは推定断層位置(矢ヶ部・小林, 1998)、縞の大線はブロックで覆われた斜面を示す。cd: 崩壊堆積物、An: 輝石安山岩、Tb: 凝灰角礫岩

Fig. 2 The resistivity cross section along the line CD shown in Fig. 1. Numbers in the figure are the site name. The stripe lines indicate the slope covered with concrete blocks. cd: landslide deposits, An: pyroxene andesite Tb: tuff breccia, F: fault.

では谷の中央部 (F) を境として右側 (測点 4~8) で低比抵抗、左側 (測点 1~3) でやや高比抵抗となることが分かる。調査域では、新規火山岩類である風化程度の異なる輝石安山岩が広く分布する。その下に不透水性の凝灰角礫岩が分布するが、図-1のFを境として左右で地質構造がやや異なることから、ここが断層であると考えられている (矢ヶ部・小林, 1998)。図-1のABに沿った3本のボーリングから地質断面が推定されており、図-2に示した地質構造は、これを探査測線まで地形に沿って平行移動したものである。これらを参考にすると、表層の低比抵抗は崩壊堆積物と考えられるが、Fより右側 (測点 4~8) の深度 10 m 付近の顕著な低比抵抗層は、風化安山岩層と凝灰角礫岩の境界上面にあり、帯水層と考えられる。崩壊直後での調査では、推定断層 (F) からと思われる、崩壊地中央部からの多量出水が確認されている。このことから、崩壊原因については、「断層面と安山岩・凝灰角礫岩境界に挟まれた崖錘状堆積物への浸透水・地下水の集中に密接に関係している」(矢ヶ部・小林, 1998) と指摘されている。今回の探査で明らかに

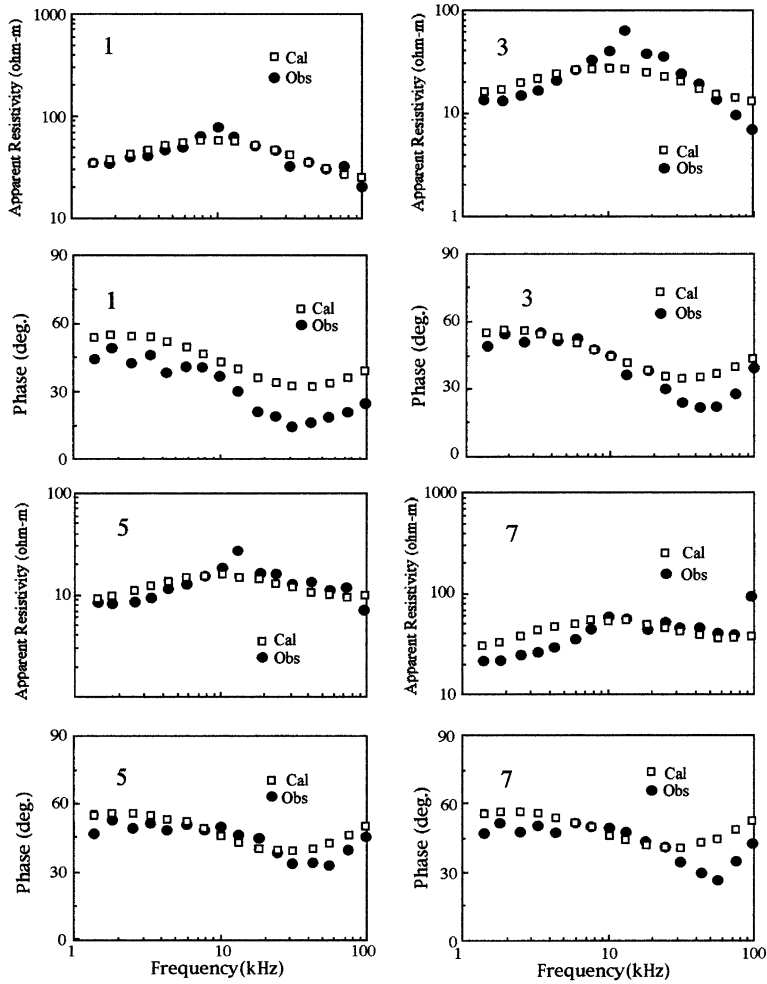


図-3 2次元モデルによる見掛け比抵抗及び位相 (□) と観測データ (●) との比較

Fig. 3 Apparent resistivities and phase calculated in the 2D modeling and obtained by the survey, which are indicated by open squares and closed circles, respectively.

なった低比抵抗層の存在はこの考えを支持するものであり、崩壊の機構解明に重要な知見を与えるものである。

4. 川内川シラス堤防への適用

探査の概略

国土交通省は薩摩川内市の川内川で、豪雨時にすべり破壊等の変状が繰り返し発生する、「シラスを用いた堤防」の強化対策として提唱されている「裏法尻ドレーン工法」の効果検証を目的として、湛水試験を実施した。この実験では、図-4に示すように、引き堤（新堤）と旧堤間に、現地盤から高さ3mの試験堤防を設置し、2005年12月9日13時から16日17時までの間で1,500 mm

程度のスプリンクラーによる散水、及びこれらの堤防によって締め切られた湛水池への112時間の洪水外力付与のための給排水がなされた（川内川河川事務所、私信）。図中の斜線長方形部はドレーン工の位置を示す。

この実験では、堤体内の湿潤線及び浸透状況のモニター及び基礎地盤水位の経時変化把握のために、水位計、テンシオメーター、及び土壌水分計が設置されている。これらのデータを用いた排水後の水移動の検証と、土壌水分量分布決定のための下部境界条件を得る目的で、翌年の1月10日と3月29日の2回、高周波CSMT探査を実施した。探査測線は図-4に示すように、締切堤防（Test bank）を横断する2本（L1, L2）と、新、旧

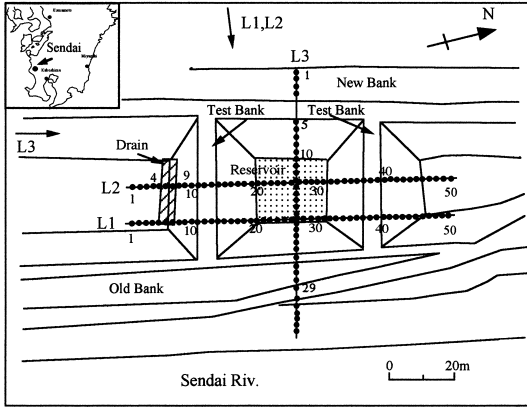


図-4 薩摩川内市におけるシラス堤防試験場での高周波 CSMT 探査測線 (L1, 2, 3)。黒丸は測点を、数字は測点番号を示す。矢印はアンテナからの電波の方向

Fig. 4 The high frequency CSMT-survey lines of L1, L2 and L3 in the test-field of the Shirasu banks in Satuma-sendai. Closed circles with numbers indicate observation sites. The directions of the antenna are shown by arrows.

堤を横切る 1 本 (L3) で、電極設置方向は測線に平行であり、電極間隔及び測点間隔はいずれも 2m である。測点数は L1, 2 が 50 点で L3 は 35 点である。なお、L1, 2 の全測定所要時間はそれぞれ約 1.5 時間であった。用いたアンテナは鉛直ループアンテナ (水平磁気双極子) であり、送信方向の概略を図-4 の矢印で示した。図から電波の到来方向は、おおよそ測線に直交していることが分かる。鉛直ループアンテナを用いる CSMT 探査では、測定電場方向 (電極方向) と電波到来方向のなす角度は 45° 以上でなければならないが、最も条件の厳しい L2 測線の #50 地点でもこの条件を満足している。なお、送受信点間距離は、L1, 2 は 120~145 m, L3 は 110 m であり、用いた周波数は、2 kHz~150 kHz の 16 周波数である。

比抵抗疑似断面

図-5 は、各測点での周波数毎の見掛比抵抗を連続的に並べた 1 月と 3 月の比抵抗疑似断面図である。2 回の測定結果は、後述の地形 (堤防) による影響を除くと全般的にはよく似ており、測定の再現性が良いことが分かる。この図は、周波数が低いほど電波は深部まで到達するので、擬似的に比抵抗断面を示すことになる。しかし、例えば表層が高比抵抗と低比抵抗の地点では同じ周波数でもその表す深度は異なっており、当然、真の深度分布

は何らかのモデル計算を用いて決定しなければならない。

鉛直ループアンテナの場合、水平ループアンテナと異なり、ニアフィールドとなる距離はスキンドeps の 3 倍程度以下と短い、これらのデータも低周波で見掛比抵抗が低下するニアフィールドの影響があるため、鉛直ループアンテナによる補正係数を用いて補正を行った (半田ほか, 2007)。補正に用いた均質大地の比抵抗は、L1, 2 測線用のアンテナを設置した児童公園で実施した電気探査の値を参考にして 60 Ωm とした。なお、試験堤防斜面に位置する L2 測線の #5~#8 測点では、コンクリート等の設置物のため測定が出来なかった。また L3 測線は、データの良好な新堤上から旧堤の河川側端までを示した。周波数 150 kHz の全データは、分散が大きいため本図からは除いた。この周波数でデータの質が良くないのは、アンテナの電気特性から、周波数が高くなるに従い送信電波強度が低下し、その結果の良好な受信データが得られなくなるためと考えられる。

同図には正確な測線位置と地形断面図も示した。MT 法では、測定値、特に電場が地形の影響を強く受けることが知られている。確かに、堤防上の測点では見掛比抵抗がほぼ全周波数で大きく変化している。例えば堤防上の道路端にある #11 では、1, 3 月の測線 L1, 2 いずれでも低い見掛比抵抗値が出現する。しかし、このような地形効果は、次に示すように 2 次元以上のモデル計算で原理的には除去が可能である。

2 次元比抵抗モデル

上記に示した見掛比抵抗データを用いて、針原川斜面崩壊地と同様、インバージョン法により堤防の形状を考慮した 2 次元比抵抗モデルを得た。モデルは、鉛直方向には 10 層からなり、スキンドeps を考慮して最深部は 450 m とした。図-6 に L1 測線での、1 月と 3 月の深度 30 m までの比抵抗断面を示す。両モデルともに試験堤防下で不均質な比抵抗分布が見られる。これは、おそらくインバージョンでも地形 (堤防) の影響が完全には除去できていないためであると思われる。なお、図中の黒塗りの長方形はドレーン工の概略位置を示す。

この比抵抗モデルから探査域が全体的には均質に近いことが分かる。例えば 1 月での各層の相乗平均値は、最小が第 6 層 (深度 20~30 m) の 100 Ω・m, 最大は第 3, 4 層 (4~14 m) の 120 Ω・m であり、その差は小さい。しかし、1, 3 月共に第 5 層と第 6 層の境である 20 m 深度には、ほとんど全測線下で比抵抗境界が存在するように見える。上記のように、この第 6 層は上の層よりやや低比抵抗なので、ここに地下水層が存在する可能性が高い。

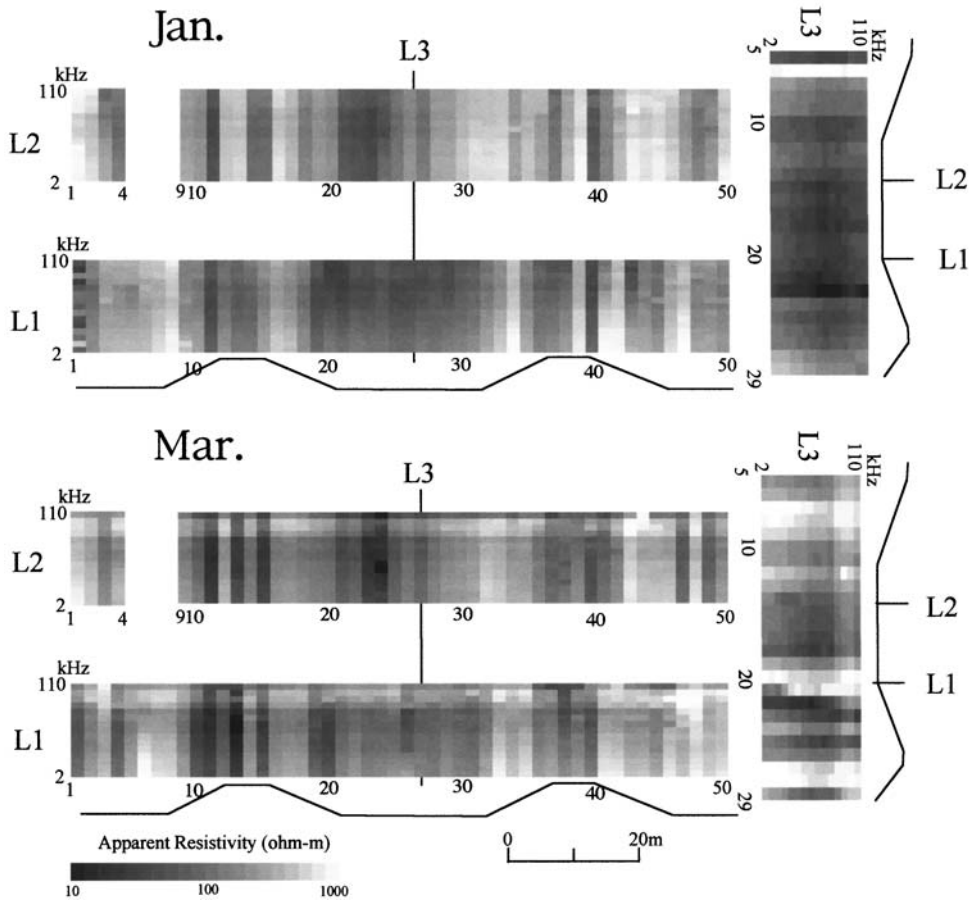


図-5 1, 3月での3測線での見掛比抵抗疑似断面図。図の下(L1, 2), 及び右(L3)は堤防の断面図
 Fig. 5 The resistivity pseudo-sections along three lines of L1, L2 and L3, which observed on January and March. The cross sections of the banks are also shown.

1月と3月での比抵抗構造変化

疑似断面図(図-5)を比較すると、全測線、特に湛水池下で3月が全体的に白っぽくなり見掛比抵抗が増加していること、測線L3でその傾向が顕著であることが分かる。確かに、図-6の比抵抗モデル全層の平均値でも、1月は110Ω・mに対し3月は145Ω・mと大きくなる。

ところでこのような浅部では、比抵抗の増減は含水率の変化によって生じたと考えてよい。探査実施日の10日前までの総雨量を鹿児島気象台・川内市のデータと比較すると、1月は6mm、3月は29mmで、むしろ3月の方が多し。前20日を比較しても、それぞれ20、73mmと、この傾向に変わりはない。探査時の目視でも、1月と異なり、3月時では湛水池底での水たまりを含む湿潤な状態が確認できた。ところが比抵抗モデルでは、雨量の多い3月でも表層の比抵抗はそれほど変わらず、10m以

深の深部では、比抵抗は図のようにむしろ増加する。このことから、この程度の雨量では深部の比抵抗減少は生じず、降雨以外に比抵抗変化の原因があると考えられるべきである。

実験では1,500mmという大量の雨を降らせたが、予想より堤防内の浸潤面の進行が遅く(川内川河川事務所、私信)、かなりの水が湛水池底から地下に流出していたと推測されている。実験場は引き堤建設のため、宅地等を撤去、整備した場所に建設されたが、特に溢水対策はなされていない。ボーリング調査から、測線L1の#50付近では通水性の高い砂層が存在するとの指摘もあり、比抵抗モデルでもここは2m以下の層で、1,3月間の変化が大きい場所である。このことから、3月で深部の見掛比抵抗が高くなったことは、実験時に大量の水が地下に流れ込んだ影響が25日後の測定時(1月)には

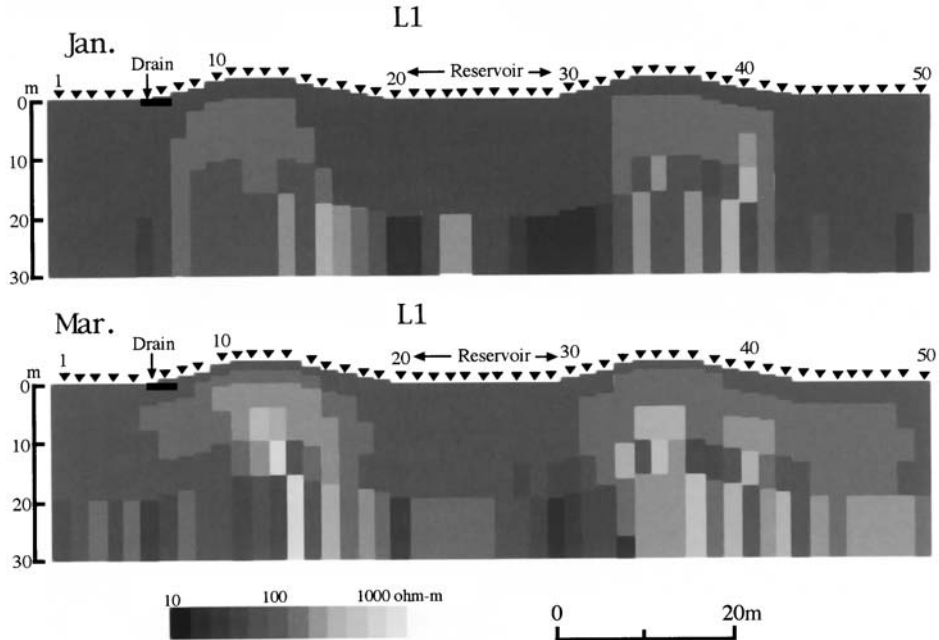


図-6 測線 L1 での 1, 3 月の比抵抗モデル。三角形は測点の位置を示す。

Fig. 6 The resistivity models along the survey line of L1, using the data on January and March. Triangles indicate the observation sites.

まだ残っており、3月になりこの影響が解消されやや乾燥化したことによると考えられる。

5. 高周波 CSMT 探査の優位性と問題点

針原川斜面崩壊地の測線は、図-1 に示したように急斜面に挟まれた谷部及び小河川の河岸部で、いずれも極めて狭隘な場所である。図-2 で示す比抵抗断面から明らかのように、測点間隔 2 m であるが、10 m 深部でも谷中央部を境とする比抵抗構造の差異が明確に検出できており、高周波 CSMT 探査法が深部でも高い水平分解能を有することが分かる。また装置の小型化、及び短い電極間隔での測定が、特に狭い探査域での探査に有利であることも示している。同時に、比較的高周波の電波を用いることから、送-受信点間の地形による電波の減衰が大きいため、アンテナ設置場所の選定が難しいとの問題点も明らかになった。

高周波 CSMT 探査は、比較的高周波の電波を用いるため、測定時間が短いことが大きな特徴の 1 つである。このことから、測線長 100 m、測定間隔 2 m の川内川シラス堤防でも、測定時間が約 1.5 時間と短時間で探査が可能となった。今後、地下構造探査では、地下の可視化と共に、多くの測点データが必要な 3 次元構造が要求

されるようになる。このため、短時間での探査の可否は極めて重要な要素である。この点も高周波 CSMT 探査の大きな優位性である。

さらにシラス堤防探査では、湛水実験による地下深部への水の移動と考えられる比抵抗時間変化が検出された。これらの結果は高周波 CSMT 装置による探査が、地下水の挙動を知る有力な手段である事を示すものである。

謝 辞

針原川斜面崩壊跡地、川内川シラス堤防実験共に調査が出来たのは、鹿児島大学工学部北村良介教授のご尽力によるものである。ここに深謝の意を表します。また両観測では、吉田雄司（九州計測器株式会社）、板井秀典（ジオクロノロジージャパン株式会社）両氏の全面的な協力を得た。川内川シラス堤防実験では、国土交通省川内川河川事務所にお世話になった。併せて感謝の意を表します。

2名の匿名の査読者の指摘は、論文の質の向上に大変有効であった

引用文献

- 物理探査学会 (1999) : 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, p. 335.
- 半田 駿・小里隆孝・朴 美京・吉田雄司 (2002) : 高周波 CSMT 装置の開発, 物理探査, **55** : 199-206.
- 半田 駿・板井秀典・吉田雄司 (2007) : 地下空洞のニアフィールド遷移域での3次元電磁応答, 物理探査 (印刷中).
- 針原川土石流災害記録誌編集委員会 (2001) : 針原川土石流災害記録誌, pp225.
- 板井秀典・半田 駿・北村良介・吉田雄司 (2005) : 高周波 CSMT 装置を用いたニアフィールド領域での地下壕探査, 物理探査, **58** : 147-155.
- Kaufman, A.A. and Keller, G.V. (1981) : The magnetotelluric sounding method, p.583, Elsevier, New York.
- Ogawa, Y. (1987) : Two-dimensional resistivity modeling based on regional magnetotelluric survey in the Northern Tohoku district, Northeastern Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 349-366.
- Vogelsang, D. (1995) : *Environmental Geophysics*, p. 23, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 矢ヶ部秀美・小林哲夫 (1998) : 1997年7月10日鹿児島県出水市土石流災害調査報告, (社)地盤工学会, p 52.

要 旨

地下浅部調査を目的とした高周波 CSMT 装置を用いて, 鹿児島県出水市針原川右岸の斜面崩壊跡地, 及び同薩摩川内市でのシラス堤防の調査を実施した。針原川では, 斜面崩壊により埋められた幅 20 m 程の平地を利用して探査を実施したが, 電極間隔が 4 m と短いことにより, 比抵抗モデルが構築可能となるデータが得られた。得られたモデルから, 崩壊斜面側で, 不透水性の凝灰角礫岩上に帯水層と見られる低比抵抗層が存在すること, 推定断層を挟んだ反対側には見られないことが明らかになった。このことは, 斜面崩壊の機構解明に重要な知見を与えるものである。また, 2 回の川内川シラス堤防での調査の比較から, 湛水後約 3.5 ヶ月には乾燥を示す高比抵抗域が増加することが明らかになった。これらの結果はいずれも, 高周波 CSMT の地下浅部探査に対する有効性を示すものである。

受稿年月日 : 2007 年 12 月 2 日

受理年月日 : 2008 年 2 月 15 日