### 3.2 断層周辺の不均質構造を解明するための電磁気探査

## (1)業務の内容

(a) 業務題目 断層周辺の不均質構造を解明するための電磁気探査

(b) 担当者

所属機関		役職	氏名
国立大学法人	東京工業大学火山流体研究センター	教授	小川 康雄
国立大学法人	東京工業大学理工学研究科	教授	本蔵 義守
国立大学法人	東京大学地震研究所	准教授	上嶋誠
国立大学法人	京都大学防災研究所	教授	大志万 直人
国立大学法人	京都大学防災研究所	助教	吉村 令慧

(c) 業務の目的

糸魚川ー静岡構造線断層帯(以下、「本断層帯」)を横断する測線で自然電磁場を用 いた電磁探査(広帯域MT法探査)を行い、比抵抗構造を解析することによって、断層周 辺の不均質構造を解明する。測線は反射法地震探査・重力探査測線と重なるようにし、 地震学的な情報と補完的な構造を得る。広帯域MTでは、地震学的なパラメータと独立な 比抵抗という物理量で地下をイメージでき、水平方向に急激に変わる構造や、断層破砕 帯などの鉛直に立った構造に対して敏感であるという利点がある。

- (d) 5 ヵ年の年次実施業務の要約
  - 1) 平成 17 年度:

本断層帯南端部(下円井活動セグメント・市之瀬活動セグメント)で広帯域 MT 観測を5kmの測線で実施し、断層周辺の深度5km程度までの不均質構造を解明した。

2) 平成 18 年度:

本断層帯の南部・北部セグメント境界付近である諏訪湖付近において、広帯域 MT 観測を本断層帯に直交する15kmの測線で実施し、断層周辺の深度5km程度までの 不均質構造を解明した。

3) 平成 19 年度:

本断層帯の南部・北部セグメント境界付近である諏訪湖付近において、広帯域 MT 観測を本断層帯に直交する 50kmの測線で実施し、断層周辺の深度 20km 程度までの 不均質構造を解明した。

4) 平成 20 年度:

平成18、19年度に調査を実施した諏訪湖を通る測線の西側において、広帯域MT 観測を実施し、取得済みのデータとともに再解析することによって深度20kmまでの 不均質構造を高精度化した。

5) 平成 21 年度:

本断層帯の北部セグメントの崖の湯を横断する広帯域 MT 観測を実施した。またこ

れまでの5ヵ年にわたる調査観測のまとめを行った。

#### (2) 平成17~21 年度の成果

#### (a) 業務の要約

本断層帯において、自然電磁場を用いた電磁探査(広帯域 MT 法探査)を行い、比抵抗 構造を解析することによって、断層周辺の不均質構造を解明した。本断層帯南部セグメン ト南端部での観測からは、西に傾斜する比抵抗構造が解析され、本断層帯が南部において 西傾斜であることと調和的な構造が得られた。また、本断層帯北部・南部セグメント境界 と考えられる諏訪湖周辺の観測からは、諏訪湖直下に鉛直状の低比抵抗異常が深度5kmま で存在することがわかった。さらに低比抵抗異常の深部延長が南西に傾斜し、糸静線と伊 那谷の間の深度10km付近ではU字型の低比抵抗異常となることがわかった。この低比抵抗 異常の周囲には地震が発生しており、この低比抵抗体は、せん断帯であると考えられる。 牛伏寺セグメントの崖の湯を通る測線においても同様の鉛直状の低比抵抗異常が解析され た。

(b) 業務の成果実施方法

1) 平成 17 年度:

本断層帯南部セグメントの南端にて、広帯域 MT (周波数 300Hz~0.5mHz) 観測を行った。 測線は、なるべく御勅使川沿いの反射法地震探査測線に近づけるように配慮したが、人工 的な電磁気ノイズを避けるために、御勅使川の約1km南方とした(図1)。観測点は 200 ~300mおきに 20 点を配置し、測線長はおよそ5kmとした。観測は、8月末から用地交渉 を開始し、11月に東京工業大学・京都大学防災研究所・東京大学地震研究所などの協力で 実施された。機器設置の一部と観測点の保守については、住鉱コンサルタントに発注した。 観測には、東京工業大学の所有する 10 台の広帯域 MT 観測装置を用いた。観測期間中の地 磁気信号は弱く、周波数 0.1Hz 以下の低周波数信号については品質が十分でないが、周波 数 0.1Hz から 320Hz のデータについては、ほとんどの観測点で取得できたため、上部地殻 の構造を出すことは可能となった。データ処理に当たっては、国土地理院江刺観測場で連 続測定されている広帯域 MT データを、レファレンスとして使用した。



図1 平成17年度の広帯域MT観測点(赤丸)。観測点は、御勅使川の約1km南方にある。

2) 平成 18 年度:

図2に示すように、諏訪湖南方に西南西-東北東方向の広帯域MT(300Hzから1/2000Hz) 測線を設定し、断層周辺の深度5km程度までの構造を解明した。観測点の配置に当たっては、平成19年度に計画されていた反射法地震探査と同一測線とするように努めた。まず断層を横切る測線長15km、測点数20点の広帯域MT観測を実施した。MTに関しては、各観測点で10日間の観測を実施した。また人工的なノイズを軽減させるために、レファレンス観測点データとして、国土地理院江刺観測場のデータを使用した。さらに断層近傍および諏訪盆地内では、可聴周波数AMT(10KHz~0.3Hz) 観測を12点で実施し、より詳細な浅部不均質構造の解明を目指した。AMTについては、各観測点で日中1~2時間の測定を行い、レファレンス観測点をMT観測点130(南西端から4点目の観測点)に設置した。



図2 広帯域MT観測点(赤丸)と可聴周波数領域AMT観測点(青丸)。

3) 平成 19 年度:

平成19年度に実施した調査は、(1) 諏訪湖を南西-北東方向に横断する50kmの 測線で行った広帯域MT観測(10点)、さらに(2) この測線に平行する3測線で行 った可聴周波数領域(10KHz~0.3Hz)AMT観測(各測線で18点)である。前者は深度 15~20km程度までの広域的な深部構造を解明するために行われ、後者は諏訪湖周辺 の深度5km程度までの3次元的な比抵抗不均質構造を明らかにすることを目的と した。

図3のように諏訪湖南方に南南西-北北東方向の広帯域MT(300Hzから1/2000Hz) 測線を設定し、断層周辺の深度15km程度までの構造を解明した。基本的に反射法地 震探査と同一測線とするように努め、断層を横切る測線長50km、測点数10点の広 帯域MT観測を実施した。また、この測線に平行する3測線でAMT観測をそれぞれ 18点で実施した。時系列データ処理に関しては、MTについては国土地理院江刺観測 場のデータを参照して処理をした。AMTについては、辰野町のMT観測点(320)に レファレンス観測点を設置し、日中1~2時間の測定を行った。



図3 広帯域MT観測点(■)と可聴周波数領域AMT観測点(■)。

4) 平成 20 年度:

図4に示すように、平成18年度および平成19年度の測線の南西端の15kmに関して、前年度より測点間隔をつめて、およそ1.5km間隔で広帯域MT観測点を10点配置した。観測は平成20年11月から12月に実施した。データ処理に際しては、国土地理院江刺観測場の広帯域MT連続観測データを参照信号として使用して、ローカルな電磁ノイズの影響を軽減した。解析においては、前年度同様に2次元的な構造を仮定し、走向をN45<sup>ow</sup>としてGroom-Baileyテンソル分解を行い、地表付近の局所的な構造を取り除いた。この後に、Ogawa & Uchida(1996)の方法で2次元比抵抗インバージョンを実施した。



- 図 4 平成20年度の広帯域MT観測点(○)、平成18~19年度の観測点広帯域MT観測点 (■)と可聴周波数領域AMT観測点(■)。
  - 5) 平成 21 年度:

平成21年度については、これまでの観測のまとめを行うとともに、牛伏寺セグ メントにおいて広帯域MT観測を実施した。測線は、牛伏寺セグメント中央部の崖 の湯を通る5kmの測線で10観測点からなり(図5)、広帯域MT観測は平成21年9 月に実施した。観測点はほぼ500m置きに配置され、測線中央で牛伏寺セグメント を横断する。データ処理については、まず観測されたインピーダンスにGroom-Ba iley decompositionを施し、走向をN20°Eと決めた後に、2次元インバージョンに よって比抵抗構造を推定した。



図5 平成21年度の広帯域MT観測点。牛伏寺セグメントの崖の湯を通る。

(c) 業務の成果

1) 平成 17 年度:

まずGroom-Baileyの方法を用いて、周波数320Hzから0.1Hzに至るまで2次元走 向がN30°Wに集中する傾向を見出した(図6)。この走向は、地表の断層の走向と調 和的である。次いで、0.1Hzから320Hzまでのデータについて、走向をN30°Wに固定 して、インピーダンステンソルを分解した。分解されたインピーダンスと走向に 直交する成分の地磁気変換関数を用いて、2次元インバージョン (Ogawa & Uchi da, 1996) を行った。

解析されたモデル(図7)の特徴は以下のとおりである。(1)断層の西側には、 深度約500m~1000m付近に低比抵抗層がある。これは断層位置から西側に向けて 徐々に深くなる傾向があり、地質学的な断層の傾斜と調和的である。(2)高比抵抗 基盤が西に向かって急激に深くなる。



図6 各周波数範囲について推定された2次元走向のヒストグラム。上が北を示す。なお 走向の推定には90度の不定性が在る。



図7 距離 0km が地表の断層位置に相当する。断層の西側では、深度約 500m~1000m 付近 に低比抵抗層が顕著である。深部では、高比抵抗基盤が西に向かって急激に深くな る。

2) 平成 18 年度:

諏訪湖南方に西南西-東北東方向の広帯域MT(300Hzから1/2000Hz)測線を設定 し、断層周辺の深度5km程度までの構造を解明した。

解析では初めに2次元走向について検討した。図8に示すように、テンソル分解 によると、100Hz 以上の高周波数では走向が北西-南東に揃う傾向が強いが、さら に低周波数になるにつれてあまり顕著ではなくなり、むしろ最も低い周波数帯では 南北走向となる傾向がある。浅部では断層の走向に調和的な北西-南東方向が電磁 気的にも走向であると考えられるが、深部に行くにつれてそれが南北方向になるこ とを示唆している。ここでは、これ以降、北西-南東方向を走向に選び、2次元解 析を行うこととした。

データの質を考慮して、780Hz から 0.01Hz までの周波数範囲のデータを用いた。 ただし、茅野セグメント近傍では人工ノイズが強く、低周波数のデータは欠測になっている。まずモデル解析の前処理として、走向を固定した上でテンソル分解によって distortion を除いた。ついで、TE モード(電場が走向方向)および TM モード (電場が走向と直交方向)の見掛比抵抗および位相をデータとして、2次元インバ ージョンを行った。用いたプログラム・コードは Ogawa & Uchida (1996)によるもの である。見掛比抵抗のエラーフロアを 10%とし、繰り返し計算によって RMS が 2.75 で収束した。計算値と観測値の適合については、図9に擬似断面で示す。

図 10(上)に得られたモデルを示す。諏訪盆地より西側の山地では低比抵抗層が 東に向けて厚くなるが、その構造は北部セグメントの断層(牛伏寺セグメント)で 断ち切られている。盆地内では低比抵抗が鉛直状に分布し、pull-apart basin であ ることを裏付けているように思われる。この深い鉛直状の低比抵抗層は堆積物であ ると考えられるが、これが諏訪盆地の異常震度の原因である可能性がある。さらに、 この構造は東側の南部セグメントの断層(茅野セグメント)で断ち切られている。 茅野セグメントは深部でやや西に傾斜する可能性があるようにも見える。

また、図 10(下)には得られたモデルの標準偏差を示してある。電磁気探査では 低比抵抗構造に感度が高くなる傾向も見られるが、おおむね深度 2km までは 1/3 桁 以内で構造が決まっている。よって、盆地の両翼部における横方向の比抵抗の不連 続は確かであると思われる。また、より深部についてはモデルの比抵抗が上がるこ とも反映してやや感度が下がる。しかしながら、盆地内の鉛直状の低比抵抗につい ては、その深部においても周囲より感度が高く検出されていることがわかる。



図8 各周波数範囲について推定された2次元走向のヒストグラム。上が北を示す。なお 走向の推定には90度の不定性が在る。



図9 計算値と観測値の擬似断面による比較。それぞれ縦軸が周期、横軸が距離となっている。左のカラムが見掛比抵抗、右のカラムがそれに対応する位相で、上からTMモード計算値、TMモード観測値、TEモード計算値、TEモード観測値となっている。見掛比抵抗については暖色系が低比抵抗、寒色系が高比抵抗を表し、位相については暖色系が高位相、寒色系が低位相を表す。



G 10 (上) 2 次元インハーション解析によろて得られた比抵抗モデル。カノースケ ールは比抵抗の常用対数値(単位Ω) (下)得られた比抵抗モデルのそれ ぞれのピクセルの対数比抵抗値の標準偏差。

3) 平成 19 年度:

諏訪湖を通る測線を北東側および南西側に延長し、測線長50kmのデータセット を取得し、諏訪湖周辺の深部構造解析を行った。測線長50kmの広帯域MTの測線に ついて、N45°Wを走向に選び、テンソル分解の後に2次元解析を行った。解析結果 を図11に示す。Gは牛伏寺セグメント(北部セグメント)、Cは茅野セグメント(南 部セグメント)を表す。平成18年度の観測で諏訪湖直下に見出されたほぼ鉛直状 の低比抵抗異常が、さらに深部では南西側に傾斜する様子が見える。この低比抵 抗の延長は深度10~15kmに横たわる。諏訪湖の北東側においても、深度10~15km に数100Ωの低比抵抗層がある。

一方、諏訪湖の直下には、深度5~15kmに鉛直状の高比抵抗異常がある。これ は、地震波トモグラフィでも検出されている。アスペリティが検出された可能性 も考えられる。図12で比抵抗モデルと地震の震源分布(気象庁一元化震源)を比 較してみると、低比抵抗層が広がる南西側で地震が多く発生しており、低比抵抗 層の周辺部で起きているように見える。



図 11 (上) 2次元インバージョン解析によって得られた比抵抗モデル。カラースケールは比抵抗の常用対数値(単位Ω)。Gは牛伏寺セグメント、Cは茅野セグメントの地表でのトレースを表す。(下)解析されたモデル比抵抗の標準 偏差を常用対数で表したもの。暖色系ほど構造が良く決まっていることを意味する。



図12 比抵抗構造と震源分布(白丸)の比較。

4) 平成 20 年度:

平成19年度のデータセットの解析で、諏訪湖の南西側に低比抵抗異常の深部延 長が見出されたが、観測点がまばらであったため、さらに観測点を追加し観測点 の密度を高めたデータセットを作成した。既存のデータと併合して行った2次元 解析を図13(上)に示す。前年度においても、諏訪湖直下に見出されたほぼ鉛直 状の低比抵抗異常が、さらに深部では南西側に傾斜する様子が見えていたが、さ らにその西側に観測点を密に配置したことによって、その延長がU字型をした低 比抵抗異常として解析された。この構造の有意性を調べるために、各モデルのピ クセルの対数比抵抗値の標準偏差を図13(下)に示す。U字型の低比抵抗の標準 偏差は0.3から0.4程度で比較的小さいので有意な構造であると推定される。



図 13 (上) 2次元インバージョン解析によって得られた比抵抗モデル。カラースケ ールは比抵抗の常用対数値(単位Ω)。Gは牛伏寺セグメント、Cは茅野セ グメントの地表でのトレースを表す。(下)解析されたモデル比抵抗の標準 偏差を常用対数で表したもの。暖色系ほど構造が良く決まっていることを意味する。

ついで、得られた比抵抗モデルとDouble-differenceトモグラフィー(以下、「D D法」)(武田,私信,2008)による震源分布との対応について、図14で比較した。 これまでに一元化震源分布でも本断層帯の南西側に地震が多く発生していること が知られているが、図14を見ると、U字型の低比抵抗異常の周辺に震源が分布し ているように思われる。この低比抵抗はせん断帯に対応するものである可能性が ある。

一方、諏訪湖の北東側の霧ケ峰・蓼科火山(図14中の水平距離5~15km)の深度15km以深にも低比抵抗異常が現れるが、その周辺に顕著な地震活動はない。



図 14 比抵抗構造と DD 法による震源分布(白丸)の比較。震源データは、武田(2008, 私信)による。

5) 平成 21 年度:

牛伏寺セグメントの崖の湯を通る広帯域MT測線のデータを2次元解析した。まず、Groom-Baileyテンソル分解によって、走向を推定した。図15に示すように、 周波数100Hzから0.1Hzまでは顕著な走向が表れていないが、0.1Hz以下になるとN 20°E方向に走向が揃う。これは地表の断層の走向方向とは異なるが、地殻深部の 走向を表しているものと考えられる。

ついでN20°E方向を走向とする座標系をとり、Groom-Baileyテンソル分解ののち にOgawa & Uchida(1996)コードを用いて2次元解析を行った。解析結果を図16に示 す。周波数0.1HzでTEモードとTMモードの応答が異方的になるので、それを説明す るためには、鉛直状の低比抵抗異常が崖の湯の深部に存在していることが必要と なった。これはサンアンドレアス断層 (Becken et al., 2008) やニュージーラン ドのアルパイン断層 (Wannamaker et al., 2009) で見いだされているせん断帯で ある可能性がある。



図15 Groom-Bailey分解によって各観測点で推定された2次元走向のヒストグラム。



図 16 (左) 2次元インバージョン解析によって得られた比抵抗モデル。カラースケ ールは比抵抗の常用対数値(単位Ω)。(右)解析されたモデル比抵抗の標 準偏差を常用対数で表したもの。暖色系ほど構造が良く決まっていることを 意味する。

# (d) 結論ならびに今後の課題

広帯域MT観測によって、これまで構造が良く分かっていなかった本断層帯周辺の地殻の 不均質構造を解析した。南部セグメント南端では、断層の西側の深度約500m~1000m付近 に低比抵抗層があり、断層位置から西側に向けて徐々に深くなる傾向があること、また高 比抵抗基盤が西に向かって急激に深くなることが解析され、地殻構造が基本的に西傾斜で あることが分かった。しかしながらこれが断層構造と一対一対応をするわけではない。 諏訪湖周辺では、断層帯の深部比抵抗構造を測線長50 kmの測線で深度20 kmまでの範囲 で解明することができた。諏訪盆地直下の鉛直状の低比抵抗異常はその深部では南西側に 傾くが、伊那谷との間でU字型の低比抵抗異常になることが推定された。地震のDD法によ る震源位置と比較すると、U字の低比抵抗周辺に地震が起きているように見える。この低 比抵抗異常は、せん断帯であると考えられる。鉛直状の低比抵抗異常は、牛伏寺セグメン トの崖の湯においても見えている可能性がある。

横ずれ断層であるニュージーランドのアルパイン断層(Wannamaker, et al., 2009)や サンアンドレアス断層(Becken et al., 2008)では、断層深部にある流体を含んだ"せん 断帯"が低比抵抗異常として解析されている。諏訪湖周辺で見出された地殻深部の低比抵 抗も同様なせん断帯であると考えられている。

## (e) 引用文献

- Becken, M., O. Ritter, S.K. Park, P.A., Bedrosian, U. Weckmann, and M.A., Weber, Deep crustal fluid channel into the San Andreas Fault System near Parkfield, California, Geophys. J. Int., 173, 2, 718-732, 2008.
- Groom, R.W. and Bailey, R.C.: Decomposition of magnetotellurics impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortions, J. Geophys. Res., 94, 1913-1925, 1989.
- 3) Ogawa, Y. and T. Uchida, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, Geophys. J. Int., 126, 69-76, 1996.
- 4) Wannamaker, P.E., T.G. Caldwell, G. R. Jiracek, V. Maris, G.J. Hill, Y. Ogawa,
  H. M. Bibby, S. B. Bennie, and W. Heise, The fluid and deformation regime of an advancing subduction system; Marlborough, New Zealand, Nature, 460, 733-U90, doi:10.1038/nature08204, 2009.