

広帯域 MT 探査による九重連山周辺の比抵抗構造推定 Wide-band Magnetotellurics Survey on Kuju volcanic Group, Kyushu island

塩谷 太郎^{1*}; 宇津木 充¹; 相澤 広記²; 上嶋 誠³; 小山 崇夫³; 神田 径⁴
SHIOTANI, Taro^{1*}; UTSUGI, Mitsuru¹; AIZAWA, Koki²; UYESHIMA, Makoto³; KOYAMA, Takao³;
KANDA, Wataru⁴

¹ 京都大学理学研究科, ² 九州大学大学院理学研究院附属・地震火山観測研究センター, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 東京工業大学火山流体研究センター

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University., ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

九州の大分県と熊本県の県境には久住山、星生山などが連なっており、九重連山と呼称される。星生山周辺では活発な噴気活動が見られ、1995年にその北側斜面で蒸気爆発を起こしている。この活動で、従来の噴気活動のあった南東部に新たな噴気孔が形成されている(井村・鎌田,1996)。また吉川他(2004)は地震波トモグラフィによって九重火山南部の地下11km程度の領域においてマグマ溜まりが存在する可能性を指摘している。九重火山における近年の火山活動、及び過去の研究成果を受け、本研究では火山体浅部から深部(10km程度)に至る詳細な3次元比抵抗構造を推定し

- 火山体浅部の熱的状态の推定すること
- 深部のマグマ供給系を捉えること

を目的として広帯域 MT 法(Wide-band Magnetotellurics)による調査を実施した。

観測は9月初頭から10月末日までの期間に5日間のキャンペーン観測を5回行い、九重連山を中心とした約30km四方において計67観測点を設置した。使用機材は Phenix 社製電磁探査装置 MTU-5A(京大火山研究センター所有2台、防災研所有1台)、Metorionix 社製電磁探査装置 ADU(東大地震研所有7台)、ELOG(九州大学所有10台)を用いた。各観測点では機材を約10日?2週間程度設置し、電磁場の連続観測を実施した。MTU-5A及びADUは電場2(東西、南北)成分及び磁場3(東西、南北、上下)成分を計測するのに対しELOGは電場2成分のみを計測する。アクセスの難しい九重火山山頂部では、機材が軽く設置作業が簡便なELOGを用いて電場観測のみを、その他のアクセスの容易な点ではMTU-5A、ADUを用いて電場・磁場観測を行った。得られた時系列データにFFTをもちいて周波数領域に変換し、周波数ごとのインピーダンスを求めた。またGamble et al. (1979)のリモトリファレンス処理を、MTU5Aについては国土地理院が公開している岩手県江刺の磁場連続観測データ、ADUについてはGERD社より提供頂いた岩手県安代の磁場データを用いて行った。発表では観測の詳細を示すとともに、得られたデータの一次処理結果を中心に報告する。

本観測は「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の一環として行った。京都大学技官の井上寛之様、九州大学技官の内田和也様、塚島祐子様、九州大学学生の橋本直幸様、山本隆寛、山下俊介様、杉田隼人様、山下陽平様、蝦名直也、戸塚修平様、岩佐光太郎様には観測時に多大な貢献を頂いた。また長谷様、佐波様をはじめGERD社の皆様には快くりモート点の磁場データ利用に承諾頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

鴨川低地断層帯周辺の AMT 法による比抵抗構造 AMT resistivity soundings across the Kamogawa-teichi fault zone, Boso Peninsula

山谷 祐介^{1*}; 伊藤 忍¹; 宮川 歩夢¹; 住田 達哉¹; 小森 省吾¹
YAMAYA, Yusuke^{1*}; ITO, Shinobu¹; MIYAKAWA, Ayumu¹; SUMITA, Tatsuya¹; KOMORI, Shogo¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

鴨川低地断層帯は、房総半島南部を東西に横切る断層帯である。この断層帯は、主に鴨川低地北断層および南断層からなるが、過去の活動履歴に関する資料や活断層である証拠が乏しく、実態が不明確であるとされている(地震調査委員会, 2004)。これまで、これらの断層を調査する目的で浅部の弾性波探査、電気探査やボーリングなどが行われているが、活断層の存在を示す証拠は得られていない(たとえば、千葉県, 2001)。ただし、第四紀あるいは過去数十万年以降に活動した可能性については否定されていない。一般に、断層活動に伴う破碎帯周辺は透水性が高く、水が浸入することにより低比抵抗領域として検出される可能性がある。我々は、当断層帯の過去の活動性を議論するための情報の一つを得るために、比抵抗構造探査を計画した。

北断層および南断層を横切る約 12 km の測線上で AMT 法による比抵抗探査を 2014 年 12 月に実施した。各観測点で得られた電磁場変動の時系列データから、10400-0.35 Hz の周波数帯において MT インピーダンスを求めた。これらのインピーダンスから算出される見かけ比抵抗および位相を入力として、2次元構造を仮定したインバージョンによる構造推定を行った。

予備的な解析結果による深さ 1.5 km までの比抵抗断面は、1-100 Ω m 程度と比較的比抵抗が低く、主に海成層で構成されたこの地域の地質を反映している。比抵抗はコントラストは大きくないが、地質区分との対応が良く、地質区分の新しい順に、三浦層群が低比抵抗 (3 Ω m 以下)、保田層群が低-中比抵抗 (3-30 Ω m) および嶺岡層群が高比抵抗 (30 Ω m 以上) と解釈できる。一方、推定活断層の直下あるいは周辺には顕著な低比抵抗帯は認められず、少なくとも探査深度の範囲では、断層活動に関連する水が検出する量で存在する可能性は低い。Miyachi et al. (2006) は、反射法探査の結果から、従来活断層とされてきた断層は、組織地形として成立したものであり、活断層は存在しないか活動度が極めて低いと結論した。今回得られた比抵抗断面は彼らの主張と矛盾せず、この地域では地震を伴うような断層活動の経験がないか、あるいはその時期は不明であるが活動後長期間が経過し、すでに固着している状態が考えられる。

キーワード: 比抵抗, 活断層, 鴨川低地断層帯, マグネトテルリクス法

Keywords: resistivity, active fault, Kamogawa teichi fault zone, magnetotellurics

房総半島外房地域の比抵抗構造 Resistivity structure of the Sotobo area in Boso Peninsula, Central Japan

奥田 真央^{1*}; 茂木 透²; 小泉 直輝³; 服部 克巳³; Han Peng³; 山崎 智寛³; 吉野 千恵³
OKUDA, Mao^{1*}; MOGI, Toru²; KOIZUMI, Naoki³; HATTORI, Katsumi³; HAN, Peng³; YMAZAKI, Tomohiro³;
YOSHINO, Chie³

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター, ³ 千葉大学大学院理学研究科

¹Graduate School of science, Hokkaido University, ²Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, ³Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

Boso peninsula is located in a tectonically complicated area where the Pacific plate, the Philippine Sea plate and the North-American plate converge. The Philippine Sea plate is subducting along the Sagami trough, where megathrust earthquakes have repeatedly occurred. Near the megathrust earthquake source region, slow slip events (SSEs) have occurred at least five times within 20 years and the recurrence interval has decreased [Ozawa et al., 2014]. The studies of SSEs have been advanced actively. For example, it was indicated that SSE is a major driving process for earthquake swarms [Hirose et al., 2014]. On the other hand, Obara [2007] argued that SSE may be related to fluid liberated from down-going slab by dehydration process. But the details of the subsurface structure where it occurred have not still understood well.

A magnetotelluric (MT) survey was carried out between November and December in 2014 to investigate the structure relating to SSE and subduction of the Philippine Sea plate under the continental plate. Time series of the MT data were recorded using the MTU-5 system manufactured by Phoenix Geophysics Co. Large artificial electromagnetic noise was observed in this area during operation time of DC trains. Reduction of the serious noise will be essential to investigate deeper depth. In this preliminary stage, we analyzed only data for two hours per a day that was obtained from 2 to 4 a.m. to avoid the DC train noise. However the lower frequency bands (0.1 - 0.001 Hz) data still have not well identified due to local noise. We used the data at the frequency band of 320 to 1 Hz and applied the remote reference method referring the other site observed in same time. We acquired apparent resistivity and phase on each site based on the above process, and we also computed the phase tensor and induction vectors. The phase tensor was nearly circle at each frequency, and the induction vectors have not point to the specific direction in the frequency range. Finally we inverted the apparent resistivity and phase data and drew out a MT model.

MT images have showed basically three layer structure. Top layer, having 10 Ω -m, is extending to the several hundred meter depth and underlying the very low resistivity layer (>1 ohm-m). According to the drilling data, these two layers are interpreted as Shimosa and Kazusa Group respectively. The bottom of Kazusa group in the west area seems to be deeper than that of the east area of the survey area and has showed basin like structure. The resistive layer is distributed at several kilo-meters depths in the northeast area. This layer was interpreted as pre-Tertiary bed rocks. As shown here, we imaged subsurface structure of the Sotobo area at depths of several kilo-meters in this stage using noise free frequency band data. However we would like to delineate image the deeper area than the result of this survey to elucidate the structure of SSE or the relation of the two plates, so we need to remove noises from obtained data and observe wider area in the next stage.

Keywords: Magnetotelluric, Resistivity structure, Boso Peninsula, Kazusa Group

地電位差計を用いた大分県中南部の広帯域 MT 観測 Broad-band telluric and magnetotelluric measurements in Oita prefecture, Kyushu, Japan

相澤 広記^{1*}; 上嶋 誠²; 高村 直也³; 宇津木 充⁴; 井上 寛之⁴; 塩谷 太郎⁴; 内田 和也¹; 塚島 祐子¹;
若林 翌馬¹; 藤田 詩織¹; 松島 健¹; 小山 崇夫²; 神田 径⁵; 吉村 令慧⁶; 山崎 健一⁶; 小松 信太郎⁶;
志藤 あずさ⁷

AIZAWA, Koki^{1*}; UYESHIMA, Makoto²; TAKAMURA, Naoya³; UTSUGI, Mitsuru⁴; INOUE, Hiroyuki⁴;
SHIOTANI, Taro⁴; UCHIDA, Kazunari¹; TSUKASHIMA, Yuko¹; WAKABAYASHI, Asuma¹; FUJITA, Shiori¹;
MATSUSHIMA, Takeshi¹; KOYAMA, Takao²; KANDA, Wataru⁵; YOSHIMURA, Ryokei⁶; YAMAZAKI, Ken'ichi⁶;
KOMATSU, Shintaro⁶; SHITO, Azusa⁷

¹九州大学地震火山観測研究センター, ²東京大学地震研究所, ³NT システムデザイン, ⁴京都大学火山研究センター, ⁵東京工業大学火山流体研究センター, ⁶京都大学防災研究所, ⁷京都大学地球熱学研究施設

¹Kyushu University, ²ERI, University of Tokyo, ³NT system design, ⁴Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, ⁵KSVO, TITECH, ⁶DPRI, Kyoto University, ⁷Institute for Geothermal sciences, Kyoto University

ここ 10 年間、3 次元インバージョンコード (e.g., Siripunvaraporn et al., 2009; Kelbert et al., 2012) が相次いで開発、公開されたことにより、地磁気-地電流 (MT) データから 3 次元比抵抗構造を推定することが可能になった。信頼性の高い 3 次元構造を得るためには対象領域を稠密に覆うよう多数の観測点でデータを取得する必要がある。さらにターゲット領域外の構造も見たい領域に大きな影響を及ぼす可能性があるため、広い領域で MT データを取得することが望ましい。しかしながら現在でも観測によって 100 を超えるような多くの観測点で MT データを得ることはそれほど簡単ではない。特に深さ数 10 km までに感度がある広帯域 (1000~0.0001Hz) のデータを得ようとすると、器材の手配、土地交渉、設置、電源の維持、撤収と多大な労力を要する。これは広帯域 MT の観測装置が高額で探査で使用できる台数が限られること、1 セット 30 kg 以上と器材が重いこと、消費電力が 12~18W と大きいことによる。

MT 法の比抵抗構造推定においては、通常、各観測点での電場-磁場の応答関数 (インピーダンス)、水平磁場-鉛直磁場の応答関数 (ティッパー) をインバージョンの入力データとして用いる。ここで観測の労力を少しでも減らすため、電場-磁場両者を取得する観測点数を減らし、電場だけの観測点を多く設置し、異なる地点の電場-磁場間のインピーダンスを用いて比抵抗構造を推定する「磁場電場分離型 MT 法」が提案、実施されている (e.g., Unsworth et al., 1997, 後藤, 1999)。「磁場電場分離型 MT 法」においては電場と磁場を記録できる従来の広帯域 MT 探査ロガーが用いられてきたが、安価で省電力な電場ロガーがあれば多点観測の労力を大幅に削減できると考え、新たな地電位差計を開発した。地電位差計は 24bitAD 変換でオーバーサンプリング (14.336KHz) したデータを FIR フィルタで処理し、高速 (1024Hz) および低速 (32Hz) で SD カードに記録する。ゲインは ± 2.5V 固定で入力インピーダンス 200 Gohm の下、GPS 時計による正確な時刻情報を付加した 2ch の地電位差データを記録する。データを取得する時間帯、FIR フィルタの特性はユーザーによって自由に変えることが出来る。本発表では開発した地電位差計と従来の広帯域 MT 探査装置を同じ場所で並行観測した結果、ならびに実際のフィールドへ適用した結果を示す。電位差計を用いた広帯域 MT 観測は 2014 年 9~10 月に九重山周辺のおよそ 70 点で初めて行われた。2015 年 2~3 月には大分県南部の 40 点で探査を新たに実施予定である。

山崎断層帯主部南東部を構成する琵琶甲断層の地下比抵抗構造の高精度化 Modification of resistivity structure beneath the Biwako fault, the southeastern part of the Yamasaki fault system

伊東 修平^{1*}; 山口 覚²; 小田 佑介²; 村上 英記³; 加藤 茂弘⁴; 上嶋 誠⁵; 片上 智史¹
ITO, Shuhei^{1*}; YAMAGUCHI, Satoru²; ODA, Yusuke²; MURAKAMI, Hideki³; KATO, Shigehiro⁴;
UYESHIMA, Makoto⁵; KATAKAMI, Satoshi¹

¹ 大阪市立大・理・地球, ² 大阪市立大院・理・地球, ³ 高知大・自然科学系・理学部門, ⁴ 兵庫県立人と自然の博物館自然・環境評価研究部, ⁵ 東京大学地震研究所

¹Department of Geosciences, Osaka City Univ., ²Department of Geosciences, Graduate school of Science, Osaka City Univ.,
³Natural Sciences Cluster-Science Unit, Kochi Univ., ⁴Division of Natural History, Hyogo Museum of Nature and Human Activities, ⁵Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

山崎断層帯は、那岐山断層帯、山崎断層帯主部、草谷断層からなり、さらに山崎断層帯主部は最新活動時期の違いと平均変位速度から北西部と南東部に分けられる(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013)。北西部は大原断層、土万断層、安富断層、暮坂峠断層からなり、南東部は琵琶甲断層と三木断層からなる。琵琶甲断層は、走向N50Wのほぼ垂直傾斜で北東側隆起の成分を持つ左横ずれ断層である。

地下数kmの活断層の構造を知るのに audio-frequency magnetotelluric 法 (AMT 法) は、強力な手法である。特に、高角な断層面や断層周辺に破碎帯の存在が期待される横ずれ断層の地下構造を求めるのに優れている。

これまでに、山崎断層帯主部での地磁気地電流調査は北西部で7測線、81観測点で行われてきた。一方、南東部では1測線、8観測点でしか行われていない。そのため南東部、さらには山崎断層帯主部全体の地下構造を議論するには、不十分であると判断される。そこで、琵琶甲断層で地磁気地電流調査を追加し、詳細な比抵抗構造モデルの構築を試みた。

観測

観測は、琵琶甲断層のトレンチ調査(産業技術総合研究所, 2013)が行われた兵庫県加西市琵琶甲地点を中心として、琵琶甲断層と直交する長さ8kmの測線上で行った。MT応答関数の算出に Remote reference 法 (Gamble *et al.*, 1978) を用いるため、測線北端から15km離れた人工的電磁気ノイズの少ない場所に磁場参照点を設置した。各観測点で、電場水平2成分と磁場3成分の測定を行った。昼間に観測機器の設置、回収を行い、夜間に計測を行った。

解析

電場、磁場のそれぞれ水平2成分から、Remote reference 法に基づいて、MT応答関数を算出した。そして、Phase tensor 法 (Caldwell *et al.*, 2004) を用いて比抵抗構造の次元と走向を求め、Akaike's Bayesian Information Criterion (ABIC) による平滑化拘束付き2次元比抵抗インバージョンコード (Ogawa and Uchida, 1996) を使用し、2次元比抵抗モデルを求めた。得られたモデルは、断層近傍北側の浅部に低比抵抗領域、深部に高比抵抗領域、断層近傍南側の浅部に高比抵抗領域、深部に低比抵抗領域の存在で特徴付けられる。

解釈

断層近傍では、地下の低比抵抗領域と高比抵抗領域の顕著な比抵抗境界が、琵琶甲断層西セグメントの地表トレース、東セグメントの地表トレースの延長位置と対応していることが見出された。さらに、測線北側には低比抵抗領域が卓越していることが確認された。これら比抵抗構造の特徴を琵琶甲断層と関連付けて、次のように解釈した。琵琶甲断層は、複数のセグメントに分けられ、東側のセグメントはより北東に位置する。本断層は左横ずれ断層であるので、2つのセグメント間は引張場となり、破碎が発達しやすい。ここで本研究の測線は西側のセグメントの東端近くに位置していることを考えると、この破碎帯に水が入ること、本断層の Fault core が、断層を横切る水の流れを妨げることで、低比抵抗領域になったと解釈した。一方で、断層南側は、低比抵抗領域の原因を明確には特定できなかったが、未知の断層破碎帯が存在することが示唆された。

キーワード: 琵琶甲断層, 山崎断層帯, 活断層, 比抵抗構造, 地磁気地電流法

Keywords: Biwako fault, Yamasaki fault system, active fault, resistivity structure, Magnetotelluric method

中国・四国地方の基盤的比抵抗構造研究 (序報) A report on the fundamental investigations of an electrical resistivity structure beneath Chugoku and Shikoku regions

塩崎 一郎^{1*}; 山本 健直¹; 濱田 哲好²; 村上 英記³; 吉村 令慧⁴; 大志万 直人⁴; 飯尾 能久⁴;
上嶋 誠⁵

SHIOZAKI, Ichiro^{1*}; YAMAMOTO, Takenao¹; HAMADA, Akiyoshi²; MURAKAMI, Hideki³; YOSHIMURA, Ryokei⁴;
OSHIMAN, Naoto⁴; IIO, Yoshihisa⁴; UYESHIMA, Makoto⁵

¹ 鳥取大学大学院工学研究科, ² 鳥取大学工学部, ³ 高知大学理学部, ⁴ 京都大学防災研究所, ⁵ 東京大学地震研究所

¹Graduate School of Engineering, Tottori University, ²Faculty of Engineering, Tottori University, ³Faculty of Science, Kochi University, ⁴Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ⁵Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

本研究では、地震・火山噴火による災害の軽減に貢献するために、中国・四国地方において基盤的な比抵抗構造調査を行い、地殻・マントル上部の空間・構造的不均質性を明らかにすることを目的とする。山陰地域では、歪み集中帯外における地震発生と比較的長い期間に噴火記録のない火山と地殻流体との関連を解明すること、内陸地震発生域と内陸地震空白域(第3種及び第四紀火山下)および深部低周波地震域の構造的不均質性、また、四国地方では、地殻地震および深部低周波地震の発生様式と構造的な地域性等について、沈み込む海洋プレートから供給が想定される流体と関連づけることが重要である。本講演では、新たに得られたデータを取り入れた中国・四国地方における基盤的比抵抗構造調査の概要を報告する。

これまでに京都大学防災研究所並びに鳥取大学工学部を中心とする研究グループは、山陰地方や四国地方外帯において電気比抵抗構造と地震活動の間に密接な関連がみられることを示してきた。例えば、山陰地方東部では、鳥取地震(1943年, M=7.2)の地震断層である吉岡・鹿野断層をはじめとして、顕著な地震の震源域およびそれらを含み日本海沿岸部に沿う帯状の地震活動域を横切る測線で調査を実施し、ほぼ東西方向に伸びる地震活動帯に沿って、高比抵抗領域である地震発生層の下、地殻深部に低比抵抗領域の存在を明らかにした。

しかしながら、上述のこれまでに筆者を含む山陰地方の電気比抵抗を研究するグループが提唱してきたモデルと調和しない研究成果(例えば、尾崎他, 2011)も示され、深部低比抵抗領域は連続して存在しない可能性が出てきた。内陸地震が地震活動帯直下の不均質構造に起因する局所的な応力集中により発生する(飯尾, 2009)ならば、この不均質構造について今後はさらなる面的な構造データの充実を図ることが必要であるととともに既存データをもとにした広域の比抵抗構造の空間的特徴を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では鹿野・吉岡断層西方延長地域において広帯域MT観測を行った。観測地域は鳥取地震(1943年, M7.2)の震源域と鳥取県中部の地震(1983年, M6.2)の中間に位置する。観測には、フェニックス社製の測定器MTU-5及び5Aを使用し、地磁気3成分ならびに電場2成分を測定した。観測は、2014年9月下旬から10月上旬にかけて5地点で行った。見かけ比抵抗探索曲線及び位相差曲線および、東西走向を仮定した鹿野・吉岡断層西方延長部の予想的な2次元構造解析から、大局的に見た場合、既存の鳥取東部測線や鳥取中部測線で得られた比抵抗構造と同様の構造であるが、詳しくみると地殻内の低比抵抗領域の位置が少し南へずれているという結果を得た。

一方、四国地方においては、これまでの筆者らの研究から主に外帯での調査結果から、上部地殻内に顕著な低比抵抗領域が存在すること、それが中央部・西部では無地震域と明瞭な関連が見られることが示唆された。この観測成果は、低比抵抗領域をもたらすもの、おそらくは地殻流体(水)が、地震発生に関して重要な役割を果たす可能性を示す。その地殻流体の供給源の一つの候補として沈み込むフィリピン海プレートの脱水反応に伴う水が想定されるが、西南日本弧では、北部地域において海洋プレートの沈み込みの様子がまだ完全にわかっていない。西南日本弧において海溝から背弧側までの全体像をつかむ上でも、中国・四国地方広域の深部比抵抗構造探索をもとにした定量的な議論の展開が望まれる。

四国地方の比抵抗調査空白域において大局的な比抵抗構造の地域特性を解明するために、経度及び緯度方向に10分毎のメッシュを設定し、基盤的比抵抗構造研究を開始した。観測点周辺の電磁ノイズ環境調査結果をふまえ、四国地方東部から中央部にかけて5地点を選び、2014年11月下旬から12月中旬にかけての約2週間、上述の広帯域MT法観測を実施した。観測の結果得られた見かけ比抵抗及び位相差の探索曲線の特徴は、見かけ比抵抗値の全体的なシフト成分を除けば、全観測点で探索曲線の周波数方向の変化の傾向は共通していることが明らかになった。

参照磁場として使用させて頂いた岩手県沢内村の記録は日鉄鉱コンサルタント株式会社の無償提供データである。新たに得られた山陰地方のデータは2014年度鳥取県環境学術研究事業により取得された。また、四国地方の研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けた。最後に、鳥取大学工学部の宇都智史、畑岡寛、山本真二、池添保雄、福成将之、津吉祐典、吉田昌平の各氏には観測をサポートして頂いた。ここに謝意を表す。

キーワード: 電気比抵抗, 基盤的研究, 中国・四国地方

Japan Geoscience Union Meeting 2015

(May 24th - 28th at Makuhari, Chiba, Japan)

©2015. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SEM33-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 18:15-19:30

Keywords: electrical resistivity, fundamental investigation, Chugoku and Shikoku region

中央構造線断層帯（和泉山脈南縁）での稠密 AMT 観測の概要 Dense AMT observations across the Japan Median Tectonic Line Izumi fault zone

大内 悠平^{1*}; 吉村 令慧²; 田中 大資²; 米田 格²; 山崎 友也²; 大志万 直人²
OUCHI, Yuhei^{1*}; YOSHIMURA, Ryokei²; TANAKA, Daisuke²; YONEDA, Itaru²; YAMAZAKI, Tomoya²;
OSHIMAN, Naoto²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

中央構造線断層帯は、近畿地方の金剛山地東縁から伊予灘にかけて約 360km にわたってのびる領家帯と三波川変成帯の地質境界に位置する活断層帯である。中央構造線断層帯（和泉山脈南縁）では、吉村他（2014）によって広帯域 Magnetotelluric (MT) 観測が行われ、地下数 10km を対象とする比抵抗構造の推定が行われている。推定された比抵抗断面では、断層帯を境に比抵抗コントラストが確認できるが、測点間隔が数 km と粗いこともあり地下浅部の解像度が十分とは言えない。この測線は活動時期の新しい五条谷断層と活動時期の古い菖蒲谷断層をともに横切る設定となっている。活断層周辺での比抵抗構造に関するこれまでの研究によれば、断層のダメージゾーンに沿って顕著な低比抵抗領域が存在することが報告されている（例えば Unsworth *et al.*, 1997; Yamaguchi *et al.*, 2010）。断層の活動時期の違いによる比抵抗の相違が確認できると考える。ダメージゾーンのより詳細な構造を推定するため、稠密な Audio-frequency MT (AMT) 観測を行った。

本研究の AMT 観測では、五条谷断層と菖蒲谷断層を横切るように南北約 5km の測線を設定し、2014 年 11 月 9 日～16 日に昼間の数時間分のデータと昼間から翌朝にかけてのデータを合計 38 の測点で電磁場 5 成分の測定を行った。結果として測点間距離が平均 130m という高密度な測定を実現することができた。

各観測点で得られた電場と磁場の時系列データから、10400Hz～0.35Hz の MT 応答関数を算出した。各観測点では相互的にリモートリファレンス処理を行っている（Gamble *et al.*, 1979）。参照点は、同時間帯に測定した相対的にノイズの少ない観測点を使用するのに加え、さらに、長周期側の応答推定の品質改善を行うため、国土地理院江刺観測点の MT 連続観測データも用いた。これらの処理により、各観測点で比較的良好な探索曲線が求まった。

本発表では、最終的な観測点ごとの MT 応答関数を示すとともに予察的な比抵抗構造についても報告する予定である。

キーワード: 中央構造線断層帯, 地磁気地電流法, ダメージゾーン, 浅部比抵抗構造

Keywords: the Japan Median Tectonic Line Fault Zone, magnetotelluric, damage zone, shallow resistivity structure

L1 正則化によるスパース推定法を用いた磁場3次元構造イメージング・その2 The 3-D magnetic imaging using the L-1 norm regularization, Part II.

宇津木 充^{1*}
UTSUGI, Mitsuru^{1*}

¹ 京都大学
¹ Kyoto Univ.

近年、空中磁気観測で得られる磁場データから地下の3次元磁化構造を求める為の新たな解析手法がいくつか提案されている。これらのうち Li and Oldenburg, 1996, Portniaguine and Zhdanov, 1999, Portniaguine and Zhdanov, 2002, Pilkington, 2013 はスパースな解を求める為の制約を課した解析手法を用いている。磁場 (または重力) データから地下構造を求める場合、一般にデータよりも未知パラメータの数が多く、解くべき方程式は ill-posed な線形方程式となる。このためインバージョンを行う際に解を安定させるため解に制約を与える事が広く行われるが、その条件にどのようなものを探るかにより得られる解の性質は大きく異なる。例えば一般的によく用いられる平滑化条件を課した場合、解の一意性が保障されない事と相まって実際の構造をぼかした unfocused な解が得られてしまい、構造の解釈を行う事が困難になってしまう。こうした事を是正する為、上に挙げた研究では、観測データを再現できるよりスパースな (即ち非ゼロ成分が少ない) 解が得られるような制約を課し、結果解像度の高い解を得ようと試みている。ところで近年、Lasso (Tibshirani, 1995) と呼ばれるスパース推定法が注目され機械学習、画像解析やゲノム情報解析などの分野で用いられている。この方法は解の L1 ノルム (解ベクトルの各成分の絶対値の和) が最小となる制約を課した最適化方法で、この方法によりスパースな解が得られることが知られている。但し Lasso では解の非ゼロ成分の数が観測データの次元以下に制限される、相関の高い説明変数群が有った場合そのうちの一つに解が集約されてしまう (磁化構造解析の場合、この性質により、例えば有限な広がりを持つ帯磁領域が有った場合にその重心に磁化がコンセントレートされてしまう) など、実用上、特に磁化構造解析のような $p < n$ 問題 (未知パラメータ数 n が観測データ数 p より大きい) に適用する場合に欠点となる点があることが報告されている。こうした点を改良した L1 推定方法として L2 ノルム制約を併用した Elastic Net (Zou and Hastie, 2005)、平滑化を併用した S-Lasso (Hebiri and van de Geer, 2010) などが挙げられる。

昨年度の合同大会では Elastic Net を磁化構造解析のスキームに導入した結果について報告したが、その後の検討からこの解析方法では有限な大きさを持つ磁気源による磁気異常を入力としてインバージョンを行うと、磁気源の重心位置に非ゼロ解が集中し正しい磁気源の大きさを再現できない場合がある事が分かった。そこで L1 ノルム制約と平滑化を併用した S-Lasso の導入、深さ方向のレゾリューションを向上させるため深さ方向に L1 正則化パラメータを変化させる (adaptive lasso の応用) といった改良を加えた。本研究ではこうした L1 ノルム制約に基づいたスパース推定法を磁化構造解析に適用した結果を報告する。

キーワード: L1 正則化, 磁化構造解析, 空中磁気
Keywords: L1 regularization, magnetic inversion, aeromagnetic survey

北海道東部地域における地磁気三成分永年変化 Geomagnetic three-component secular changes in eastern Hokkaido, NE Japan

三嶋 渉^{1*}; 橋本 武志²; 茂木 透²

MISHIMA, Wataru^{1*}; HASHIMOTO, Takeshi²; MOGI, Toru²

¹北海道大学大学院理学院, ²北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

¹Graduate School of Science, Hokkaido University, ²Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

北海道東部地域(道東地域)では、全磁力の永年変化に地域性があることが知られている(大島・他, 1994; 橋本・他, 2012)。この地域は、太平洋プレートの沈み込みを反映して西北西-東南東方向の短縮歪みの場にある(例えば、石川・他, 1999)。また、南岸域には顕著な高磁気異常があり、磁化の強い岩体が分布していることが示唆されている(Sugisaki et al., 2001)。これらのことから、Nishida et al. (2004)は、この地域の全磁力永年変化に見られる地域性の原因が、プレートの沈み込みに伴う応力積荷を反映したピエゾ磁気効果ではないかと考えた。北海道大学では、この仮説を検証することを念頭に、従来から展開している8カ所の全磁力連続観測点において、2009年から三成分絶対測量を実施している。2014年秋までに各地点で2回ないし3回の絶対測量を行い、成分ごとの変化傾向が捉えられたのでその概要を報告する。

全磁力については、従来から気象庁の女満別観測所を参照点として、単純差による外部起源磁場の除去処理を行っているが、本研究では、偏角・水平分力・鉛直分力についても、同様に女満別を参照点として成分ごとの単純差を求めた。その結果、各成分についてもその永年変化率に地域性が見られることが明らかになった。このことから、従来から指摘されてきた全磁力永年変化率の地域性は、オリエンテーション効果による見かけのものではないことが事実となった。各成分の特徴を概観すると、水平分力と鉛直分力は、全磁力と同じく、変化率の大きい観測点は南岸域に偏っている。また、偏角については、南岸域と内陸部で変化傾向のセンスが逆になっている可能性がある。

観測回数が少ないため、現時点での考察はまだ予察的なものであり、議論の精度を上げていくためには、今後も根拠強く絶対測量を継続する必要がある。また、Nishida et al. (2004)が全磁力について行ったのと同様に、ピエゾ磁気効果モデルの数値計算を三成分について行うことで、仮説に対する検証の可能性が広がると考えている。

キーワード: 地磁気三成分絶対測量, 地磁気永年変化, 北海道東部地域

Keywords: geomagnetic three-component absolute measurements, geomagnetic secular change, eastern Hokkaido

日本における誘導電磁場の分布 Distribution of electromagnetic fields induced in Japan

富永 博紀^{1*}; 遠藤 新¹; 藤田 茂²; 藤井 郁子²
TOMINAGA, Hiroki^{1*}; ENDO, Arata¹; FUJITA, Shigeru²; FUJII, Ikuko²

¹ 気象庁, ² 気象庁気象大学校

¹Japan Meteorological Agency, ²Meteorological College, Japan Meteorological Agency

日本は中緯度帯に位置するため地磁気誘導電流の振幅は小さいと考えられており、これまで地磁気誘導電流による災害の報告例はない。しかしながら、日本は海に囲まれており、海岸付近では海水と岩石が接して電気伝導度が急激に変化するため大きな電位差が誘導されることが予想される(海岸線効果)。社会インフラが整った過去数十年間には体験したことがないような大規模な地磁気擾乱が発生した場合に、どこでどのような地磁気誘導電流が生じるのか、あらかじめ調べておく必要がある。そのために、まずは、地表に誘導される電磁場の現実的な分布を調べることにした。

我々は、Uyeshima and Schultz (2000) の有限差分法コードを利用して、磁気圏の地磁気変化が3次元的な電気伝導度分布を持つ地球表面に誘導する地磁気・地電場を周波数領域で計算した。計算に用いた周期は、200秒、800秒、3600秒である。グリッドに関しては、日本地域の詳細な地磁気・地電場分布を調べるのが目的であるので、25°N-50°N、125°E-150°Eの範囲については12.5km x 12.5kmの1様グリッド、この範囲外では徐々に大きくなるグリッドを用いている。

地球の電気伝導度分布については、海底地形データ(ETOPO1)と堆積物の厚さ分布データ(Laske and Masters, 1997)を用いて地表面から深度12.5kmまでの3次元的な電気伝導度分布を求め、12.5km以深については成層構造を仮定した。深度12.5kmまでは、海水と堆積物の電気伝導度をそれぞれ3、0.1S/mとし、岩石の電気伝導度は0.01、0.001S/mの2通りを用いて、グリッド内に異なる物質の境界があるときにはグリッド内でコンダクタンスが保存するように電気伝導度を定めた。

誘導源となる地磁気擾乱は、地球半径の10倍の位置に環電流を置いた場合に生じる磁場を用いた。赤道環電流であれば、日本地域には南北方向の変動をもたらすことになる。あらゆる方向の変動に対応させるために、環電流の方向を赤道面に対し30度あるいは60度傾けた場合の計算も行った。

周期ごと、岩石の電気伝導度ごとに、ある場所において、すべてのソース電流パターンでの計算の中から最も振幅が大きな誘導電場を選び、それらを統合して、日本地域の最大誘導電場分布図を作成した。それによると、日本の海岸を縁取るように大きな振幅の誘導電場が得られ、岩石の電気伝導度が0.01S/mよりも0.001S/mの場合のほうが振幅が大きかった。電場の最大振幅は、0.001S/mで半無限1様な地球の場合と比べて、約2倍となる。また、振幅は短周期のほうが大きい場合が多い。これは海岸線効果から予想される誘導電場と調和的である。特に、津軽～渡島半島、富山湾、伊豆半島、南九州東岸において大きな誘導電場が得られたが、これらの地域では、いずれも海が遠浅ではないという特徴があった。加えて、(1) ソース磁場が海岸線の方向と平行なときに海岸線沿いに大きな振幅が現れる、または、(2) 湾型構造の走行がソース磁場と平行なときに湾奥で電流の集中が起こる、という現象が見られた。

磁場について分布を見ると、電気伝導度の不均質を反映して、非1様な分布となった。赤道環電流ソースの場合、日本の地表面での東西方向の磁場変化は非常に小さいが、鉛直方向には海岸線を中心とし振幅が大きな場所が見られる。南北成分については、海岸線が南北方向に分布する東北や九州では1様な電気伝導度の場合に似ているが、関東～中国地方にかけて1様な場合よりも弱められている。

続いて、計算で得られた地磁気・地電位からインピーダンステンソルを計算し、日本地域での分布を求めた。このモデルでは地形と堆積物分布による不均質しか考慮していないにも関わらず、複雑な応答関数分布が得られ、海水・堆積物の分布が誘導電磁場に非常に大きな影響を及ぼしていることがわかる。例えば、北海道では、道南、道北、日高・十勝、道東のように、インピーダンステンソルの振る舞いがブロック化されており、ネットワークMTによる電場分布の特徴(Uyeshima et al., 2001)を大雑把に表現しているように見える。全体的に、磁場ソースが海岸線に平行な場合と垂直な場合で応答関数の振る舞いが異なっており、結果的に地方ブロックが構成されている。日本での構造探査における3次元的な観測や解釈の必要性が改めて示された。

柿岡、鹿屋、女満別のMT応答関数の実測(Fujii et al., submitted)と比較すると、定性的には特徴を再現できているが、振幅や項ごとの振る舞いには差があることがわかった。各地域の正確な地磁気・地電場が必要な場合は、より詳細な3次元モデルが必要であると考えられる。そのためには、日本各地の電気伝導度分布のデータベース化が望まれる。

キーワード: 電磁誘導, 地磁気誘導電流, インピーダンステンソル

Keywords: electromagnetic induction, geomagnetically induced currents, impedance tensor

最尤法を用いた地球内部電気伝導度分布の推定 Estimating the distribution of electrical conductivity in the earth with the maximum-likelihood method

岩下 耕大^{1*}; 藤 浩明²
IWASHITA, Kodai^{1*}; TOH, Hiroaki²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学大学院理学研究科付属地磁気世界資料解析センター

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Kyoto University

我々は、モデル誤差を反映する目的関数を用いたインバージョンにより、地球内部の電気伝導度分布の推定を行った。逆問題を解くにあたって広く用いられている最小二乗法では、目的関数をデータのスフィットとモデルパラメータに関する罰則項の線型結合とし、これを最小にするようなモデルパラメータの推定値を求められる事が多い。データの予測値は、モデルに、このモデルパラメータの推定値を当てはめ、順計算を行うことにより得られる。しかしながらこの手法は、確率論の観点からすれば、モデルに誤差が無いという条件が暗に仮定されている。

我々はこの仮定を用いずに、最尤法を使って逆問題を解くことを試みた。最尤法を用いて得られた結果は、モデルの不確かさも反映しており、一般には最小二乗法で得られた結果と必ずしも一致しない。具体的には、2003年11月に起きた磁気嵐の地上観測網によるデータにこの手法を適用し、表層に既知の海陸分布を持つ球対称導体球の電気伝導度を推定した。すなわち、まず磁気嵐を含む三日間の69観測所における全球毎分値からその月の五静穏日を用いて求めた平均地磁気静穏日変化を差し引き、得られた変化磁場を内外分離した。分離した外部磁場変化を海陸分布を表す電気伝導度不均質を表層に貼付けた球対称導体球に印加し、内部磁場を計算した。この内部磁場が観測データから分離した実際の内部磁場と一致するように球対称構造を変化させれば、最適な地球内部電気伝導度構造を求める事ができる。

これまでに行った予備的な合成インバージョンでは、最尤法は最小自乗解とは異なる解を与える事、また、最尤法によってモデルの良し悪しをある程度判定できる事などが明らかになった。しかし、実データを用いた逆問題においては、適用可能な先験情報（例えば、電気伝導度は負でない実数である事など）を可能な限り組み込む事や有効な罰則項を目的関数に含める必要がある。

講演では、合成データへの誤差の加え方や初期モデルが結果に及ぼす影響などについても議論する。

キーワード: 電気伝導度, 磁気嵐, 逆問題

Keywords: electrical conductivity, magnetic storm, inversion

固気液3相を考慮した多孔質体モデルの比抵抗値の直接計算 Direct simulation of resistivity on porous model obtained from high-resolution X-ray CT

竿本 英貴^{1*}; 片桐 淳¹; 高田 尚樹¹; 高橋 学¹
SAOMOTO, Hidetaka^{1*}; KATAGIRI, Jun¹; TAKADA, Naoki¹; TAKAHASHI, Manabu¹

¹ 産業技術総合研究所

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

比抵抗を利用した地下のイメージングは、物理探査の分野で従来から活発に行われており、地盤内における液化領域の推定や地下水流動に伴う地下汚染領域の推定、薬液注入による地盤改良領域の確認など、その簡便さと面的情報を得られる利点から幅広い用途に用いられてきた。多孔質体である岩石や地盤材料の比抵抗値は、間隙に流体が混入されていることから、間隙率や飽和度、多孔質体を構成する粒子の形状、間隙流体の比抵抗値など、多くの物性に依存することが知られている。

この依存関係を利用して、得られた比抵抗値からこれまでの実測結果や室内実験結果との対比や経験式との比較によって、比抵抗値の分布が岩石や粘土といった地盤材料種別の分布や、地盤の飽和度の分布として変換される。当然ながら、実測した条件や経験式が成り立つ範囲内では比抵抗からの変換は有効であるが、適用範囲外である場合には注意が必要である。上記の依存関係は、基本的には多孔質体内における電流の流れ方に依っているため、間隙率や飽和度が変わることによって多孔質体内の電流密度分布がどのように変化するかを把握することは重要である。

ここでは比抵抗値と間隙率や飽和度といった地盤物性の依存関係を、微細構造を考慮した上で定量的に把握することおよび経験式の適用範囲外における比抵抗値に関する知見を得ることを目的として、多孔質体の微細構造を考慮した数値解析によって比抵抗値を直接算出することを試みる。具体的には、これまで著者らが蓄積してきた高解像度 X 線 CT に基づく詳細な 3 次元多孔質体モデルに対し、定常電流場の方程式を数値的に解くことで多孔質モデル内の電流密度分布を把握し、電流密度分布の体積平均とオームの法則を用いることで、マクロ物性としての比抵抗値を求める。

このアプローチは、微細構造を X 線 CT などの何らかの方法で事前に入手しておく必要があるものの、電磁気学に基づいて決定論的・定量的に多孔質体の比抵抗値を求めることができるという利点がある。加えて、微細構造を把握しているため、経験式中のパラメータと微細構造の関連性を考察しやすい点、境界条件を変更して通電する方向を変化させることにより比抵抗の異方性を議論できる点なども特長として挙げられる。

本報告では、多孔質体の微細構造を有限要素メッシュによって表現し、間隙比、飽和度、通電方向を変化させた場合についてのパラメトリックスタディーを行い、これらのパラメータの変化とともに比抵抗がどのように変化するかを求めた。得られた数値解析結果を既往の実測結果と比較・検討することで本手法の妥当性を検証した。また、微細構造内の電流密度分布や電流線解析を併せて実施し、実験では取得できない情報の抽出を試みた。

キーワード: 比抵抗, 多孔質体, 有限要素法, X 線 CT, 屈曲度

Keywords: resistivity, porous media, finite element method, X-ray CT, Tortuosity

岩石試料の高密度比抵抗測定に向けた数値計算手法の開発 Development of resistivity modeling code designed to high-density electrical prospecting for cylindrical rock samples

鈴木 健士^{1*}; 吉村 令慧²; 大志万 直人²
SUZUKI, Takeshi^{1*}; YOSHIMURA, Ryokei²; OSHIMAN, Naoto²

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻, ² 京都大学防災研究所
¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² DPRI, Kyoto University

近年、地震発生場や火山活動場などの電気伝導度構造を明らかにするための電磁気探査が広く実施されている (例えば、Ogawa et al., 2001; Yoshimura et al., 2009)。電気伝導度という物性値は、流体をはじめとする良導体の存在に対して敏感な反応を示すので、地殻における水の分布を探るには特に有効な情報であると言える。

得られた電気伝導度構造の解釈には、良導相がもつ電気伝導度の値・良導体の量・連結の程度などの情報が必要である。室内実験による、ある条件下での母岩や間隙水の電気伝導度については多くの報告があるが、その量と連結の程度については一意に決めることが難しい。従って、比抵抗構造を解釈するときにはいくつかの混合側や実験式 (例えば、Archie, 1942; Hashin and Shtrikman, 1962; Glover et al., 2000) などを用いて、どちらか一方を仮定することでもう一方を推定するという手順を踏んでいる。この仮定が構造解釈に幅を生んでいるため、仮定した良導体のつながり方が正しいか否かについては検証を行う必要があるが、これまでに十分な検証がなされていないのが現状である。

この問題の検証のためには、地中において良導体がどのようにつながっているかを調べることが理想だが、実際に観察するという手段は現実的ではない。そこで次に考えられるのは、様々な手法によるイメージングの対比が可能な岩石試料を用いた検証である。高密度な電気探査によって高い分解能をもつ比抵抗構造を求め、ここから推定される物性値を他のイメージング手法で得られた値と詳細に対比することができれば、上述した問題を検証することができるだろう。

本研究では岩石の比抵抗イメージングの前段階として、不均質構造を電氣的に検知することが可能かどうか数値実験による事前検討を行った。3次元の有限差分法による比抵抗モデリングは、現在に至るまでに様々な数値計算コードの開発が報告がされているが (例えば、Dey and Morrison, 1979; Spitzer, 1995; Zhang et al, 1995, Loke and Barker, 1996)、これらはすべて実際のフィールドを探索対象とした半無限媒質を想定するコードであり、今回想定するケースのように有限の体積を持ち、円筒形状をした媒質に対しては適用するのが難しい。そこで本研究では、岩石試料の外部形状である円筒形を正確に扱えるコードを開発した。

コードの性能を確認するにあたり、円筒形状を考慮した解析解との比較は困難である。加えてデカルト座標系でコーディングされた数値計算との解の比較は、境界形状の正しい取扱いの評価に向かない。そこで、導電性プラスチックと導電性エポキシ樹脂を用いたアナログ実験結果との対比という形で性能評価を行った。その結果、新しく開発した計算コードによる外部境界、特に円筒形状のエッジ部近傍の計算結果は、アナログ実験による測定結果と調和的であることを確認した。さらにアナログ実験によって厚さ 1mm 以下の層状不均質構造を検出し、開発したコードによるフォワードモデリングを行うことで、その比抵抗値の推定を行った。

キーワード: 岩石実験, 電気比抵抗, 数値実験

Keywords: rock experiments, electrical resistivity, numerical simulations