

有限要素法による電磁場計算の高精度化

Improving accuracy of electoromagnetic fields in finite element method

*木下 雄介¹、小川 康雄¹、鈴木 惇史¹*yusuke kinoshita¹, Yasuo Ogawa¹, Atsushi Suzuki¹

1.東京工業大学

1.Tokyo Institute of Technology

Electromagnetic induction problem in two- or three-dimensional heterogeneous media needs numerical solutions. In particular, for magnetotelluric problem, we need both horizontal electric and magnetic fields at the surface. If we use finite element method and solve for electric fields, electric field will be obtained with reasonable accuracy, but the magnetic field at the ground surface is estimated using rotation of electric field using a cell below the ground surface. Normally, we use a linear functions as a shape function, which gives an interpolation function within the element. This conventional approach underestimates the magnitude of magnetic field, where derivative is replaced by a finite difference. This problem can be demonstrated using a simple one-dimensional problem, the accuracy of the magnetic field calculation is dependent on the thickness of the first cell under the ground. To overcome this difficulty, usually, we use fine grid cells near the ground surface, which will lead to a large number of unknowns in the finite element solution. We have introduced a new type of shape function which exactly describes the solution within the uniform element cell. Using this shape functions, the magnetic field at the ground surface can be by far more accurately obtained, even with cells with large sizes. We will demonstrate this merit on calculation using two-dimensional resistivity structure for TM mode.

地上磁場観測データに基づく地球内部電気伝導度構造の時間領域インバージョン
Time-domain inversion of the electrical conductivity profile in the Earth using
ground-based magnetic observatory data.

*岩下 耕大¹、藤 浩明²

*Kodai Iwashita¹, Hiroaki Toh²

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附属地磁気世界資料解析センター
1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Data
Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Kyoto University

We estimated radial electrical conductivity distribution in the Earth using both vector geomagnetic observatory data and a forward solver in time-domain. The major difference between the time-domain and frequency-domain approach rests in the way of processing the finite-length time series of transient inducing and induced fields. In the frequency-domain, response functions are usually estimated at discrete frequencies, by splitting the time-series into multiple segments and applying Fourier transformation to each segment. As the periods increase, quality of response functions is reduced in the case of the frequency-domain approach. In addition, the frequency-domain approach should not be applied to the transient data since Fourier transformation premises periodicity for the time-series in concern. On the other hand, the time-domain approach exploits all the data in the time-series by fitting the entire waveform of the magnetic field including rapid variations such as sudden storm commencements. The quality of long period signals that are able to penetrate the deeper region of the Earth is not reduced in the time-domain. We can, therefore, estimate the deep distribution of conductivity using shorter time-series than in the frequency-domain. Specifically, we applied the time-domain approach to the vector geomagnetic observatory data with one minute sampling interval all around the globe. In order to extract the induced field, we subtracted the vector average for 5 quietest days of the month from the raw time-series. Contrary to the newly available data sets from recent low-Earth-orbiting satellite missions, the traditional ground-based data has biased distribution over the globe. We eliminated observatories in some congested places. We then separated the residual time-series into internal and external origin. The separated internal magnetic field can be reproduced using forward response of the radially symmetric conducting sphere to the separated external magnetic field. A heterogeneously conducting shell was placed at the top of the radially symmetric sphere so as to account for large scale surface contrast such as ocean-continent distribution. We solved an inversion problem with an objective function consisting of linear combination of data misfit and a regularization term that constrains the smoothness of the conductivities. Moreover, we estimated the internal Gauss coefficients' sensitivities for each shell of the radially symmetric conducting spheres by F-test and revealed that the lower mantle conductivity has a large influence on the magnetic field on the surface of the Earth after about more one day from the instance when the external magnetic field was applied. As a result, we estimated a conductivity profile of the Earth. This is the first profile that was estimated by a combination of inversion in time-domain and the vector geomagnetic observatory data over the globe. We will further discuss the necessary length of time-series in order to estimate the lower mantle conductivity accurately.

キーワード：電気伝導度、磁気嵐

Keywords: conductivity, magnetic storm

月面地下構造解析のための岩石誘電特性におけるイルメナイトと空隙の影響

Experimental relationship between dielectric properties and ilmenite content with the effect of porosity for the understanding of Moon's subsurface structure

*中村 教博¹、三國屋 しおり、宮本 毅²、熊本 篤志³

*Norihiro Nakamura¹, Shiori Mikuniya, Tsuyoshi Miyamoto², Atsushi Kumamoto³

1.東北大学大学院理学研究科地学専攻、2.東北大学東北アジア研究センター、3.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Earth Sciences, 2.Center for Northeast Asian Studies, 3.Department of Geophysics

Mare basalt stratigraphy on the Moon helps to advance our understandings of a lunar volcanic evolution and the thermal history of the Moon. Lunar Radar Sounder (LRS) onboard Kaguya spacecraft employed 5 MHz electromagnetic wave to receive a backscattering wave from both the lunar surface and buried layers at depths of a few hundreds of meters within major lunar maria. Kaguya LRS study found a heterogeneous distribution of horizontal subsurface features, which correlates negatively with high concentration of ilmenite (FeTiO_3) as a strong absorber for low frequency electromagnetic waves. Although bulk rock density (or equivalently porosity) and chemical composition are critically important parameters in predicting the subsurface layering, their quantitative relations with dielectric properties are not clear for Apollo returned lunar samples with variable porosities and variable compositions. Previous experimental studies suggested that the real part of the dielectric properties is constant and independent of TiO_2 content when normalized to a constant porosity, suggesting less absorption. However, this studies contradicts the LRS observation with a strong absorption. In this presentation, we show the effect of ilmenite content on complex dielectric properties (dielectric constant and loss tangent) with the effect of porosity, using lunar analog samples as a mixture of ilmenite and cement. Measurements of dielectric properties of the analog samples at 5 MHz demonstrated that both dielectric constant and loss tangent have power-law dependences with the content of ilmenite. The power-law relations between ilmenite contents and complex dielectric constant for analog samples were derived in a range of ilmenite content up to 30 wt% by a least square regression. In addition, by considering a mixture of the poreless lunar analog samples and air, I derived a new experimental relationship between dielectric properties and ilmenite content with the effect of porosity by Lichtenecker's mixture formula. The power-law dependence of complex dielectric constant with the content of ilmenite gives a quantitative estimation of lunar dielectric constant through a radar sounding, and explains why LRS could detect subsurface layers beneath high concentration area of ilmenite in lunar maria.

Development of Two-Dimensional Inversion of Marine DC resistivity survey

Development of Two-Dimensional Inversion of Marine DC resistivity survey

*石須 慶一¹、Chatchai Vachirastienchai²、Weerachai Siripunvaraporn²、後藤 忠徳¹

*keiichi ishizu¹, Chatchai Vachirastienchai², Weerachai Siripunvaraporn², Tada-nori Goto¹

1.京都大学工学研究科、2.マヒドン大学

1.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2.Faculty of Science, Mahidol University

Deep-towed marine DC resistivity survey has been developed recently to detect the shallow boundary roof of the electrically resistive gas-hydrate zone, which is not imaged well by seismic reflection surveys. Similar to the land DC resistivity, its response is the apparent resistivity as a function of electrode spacing which needs to be inverted in order to obtain a "true" resistivity structure. Here, we developed a two-dimensional inversion of marine DC resistivity survey based on the model space Occam's inversion method. The finite-difference (FD) method is applied in the forward modeling calculation to solve potential difference between electrodes, which is later used to generate the apparent resistivity. The accuracy of the forward code was tested with various synthetic models. We found that our forward code produces the results as accurate as the analytical solution for layered Earth case, particularly when the sub-seafloor structure has high conductivity. For complicated structures, it produces the results similar to those from other forward codes.

For the inversion, we first started applying to the synthetic models consisting of layered Earth. The inversion spent about 2 iterations to converge from an initial RMS of around 19 to 1 RMS. The inverted model clearly image the shallower boundary of resistivity anomaly imbedded into the sub-seafloor structure. Our preliminary results imply that our developed inversion code is promising for the real surveys.

キーワード：電気探査、海洋探査、比抵抗

Keywords: DC-resistivity survey, Marine exploration, Resistivity

2011年東方沖地震発生域における比抵抗構造～特に海溝軸方向の比抵抗構造変化について～
Along axis variation in electrical resistivity distribution around the 2011 Tohoku-oki earthquake

*市原 寛^{1,2}、笠谷 貴史²、馬場 聖至³、山野 誠³

*Hiroshi Ichihara^{1,2}, Takafumi Kasaya², Kiyoshi Baba³, Makoto Yamano³

1.神戸大学、2.海洋研究開発機構、3.東京大学地震研究所

1.Kobe University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

The 2011 Tohoku-oki earthquake (M9.0) was associated with huge fault slip over 80 m in the shallowest part of the plate interface where aseismic slip behavior was widely believed (e.g. Iinuma et al., 2012; Fujiwara et al., 2011). A key factor to understand the "anomalous" fault behavior is pore fluid around the plate interface because it controls shear strength of fault. In order to discuss fluid distribution around the rupture zone, we acquired marine magnetotelluric data between 2009 and 2012 based on ocean bottom electro-magnetometers (OBEM) at 22 sites along three parallel survey lines; one line crosses the center of fault ruptured zone including the shallowest huge slip area (line C, along latitude 38N); another line crosses the north end of ruptured zone where tsunami origin was estimated (Ichihara et al., 2013) despite the significant fault slip is not estimated (line B, along latitude 39N); and the other line crosses the south part of fault ruptured zone where azimuth of trench axis is significantly different with the north lines (line D, along latitude 37.5N).

We estimated resistivity distribution beneath the line C using the 2-D inversion code based on Ogawa and Uchida (1996). The estimated resistivity profile shows a low resistivity zone in the shallowest part of plate interface. On the other hand, resistivity is relatively high in the deeper plate interface. They indicate that the huge fault slip occurred in the pore fluid rich area whereas the fault slip is small in the dehydrated area. In the presentation, resistivity distribution beneath the line B and line C will be shown to discuss variations of resistivity structures in along-axis direction.

キーワード：2011年東北沖地震、電気伝導度、比抵抗、magnetotelluric法、東北日本弧

Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, Electrical conductivity, Resistivity, magnetotelluric, northeastern Japan arc

沈み込むスラブ中の炭酸塩鉱物の電気伝導度

Electrical conductivity of carbonate in subducted slab

*小野 重明¹、三部 賢治²*Shigeaki Ono¹, Kenji Mibe²

1.国立研究開発法人海洋研究開発機構、2.東京大学

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Univ. of Tokyo

Carbon is recycled, mainly as carbonates, by means of a subduction process into the deep Earth. The extent of the deep mantle cycle that largely depends on the preservation of carbonates during subduction is so far unknown. Previous experimental studies demonstrate that Mg- and Ca-bearing carbonates should be stable in mantle conditions. Therefore, it is important to investigate the physical properties of carbonate minerals for an understanding of the behavior of carbon in the deep mantle. Recent advances in geophysical observations have allowed mapping of the electrical conductivity of the Earth's mantle interior. Electrical conductivity measurements on carbonates at high pressures and high temperatures can help the estimation of the distribution of carbon in the deep mantle.

The starting material were synthetic carbonates, magnesite (MgCO_3), aragonite (CaCO_3) and dolomite ($(\text{Mg,Ca})\text{CO}_3$). In this study, a conventional multi-anvil high-pressure apparatus was used [1]. The cell assembly was kept at 383 K in an oven, and was removed just before the compression experiments began. The experiments were performed at pressures up to 6 GPa and temperatures up to 1000 K. Alumina was used as an insulator between the electrical resistivity measurement lines and the heater lines. The resistivity of alumina used in this study was sufficiently higher than that of the sample at high pressures and high temperatures. The complex impedance was measured with a Solartron 1260 Impedance/Gain-Phase Analyzer with a 1296 Dielectric Interface over a frequency range of 0.05 Hz to 1 MHz. The impedance data of the samples were acquired at temperatures in the range of 500 to 1000 K at each 50 K interval. The measured conductivity was fitted to an Arrhenius equation to calculate the activation enthalpy, energy, and volume.

The activation enthalpies of dolomite and magnesite decrease as pressure increases. In contrast, that of aragonite increases as pressure increases. It is known that the activation volume is related to the electrical conduction mechanism. In the case when extrinsic ionic conduction is the dominant mechanism of the electric conductivity, it is expected that the activation volume would have a positive value. Therefore, the ionic conduction mechanism would be dominant in aragonite [2]. In contrast, the negative activation volume would be expected for minerals with a hopping conduction mechanism. Thus, magnesite and dolomite exhibit hopping conduction at high pressures and high temperatures.

The electrical conductivities of magnesite [1] and dolomite [3] were of the same order of magnitude as that of olivine. Therefore, it is difficult to identify the Mg-dominated rock bodies in the upper mantle from the perspective of electrical conductivity. In contrast, the electrical conductivity of aragonite [3] was one to two orders of magnitude higher than that of olivine. When the Ca-dominated carbonate rocks, such as marine sediments, in the subducted slabs are dragged into the deep mantle, the electrical conductivity of the aragonite-dominated rock bodies is higher than that of the surrounding rocks in the upper mantle. It is known that the electrical conductivity of wet rock, which contains a hydroxyl ion component in its minerals and/or a fluid phase, is higher than that of dry mineral. The calcium carbonates could contribute to the higher electrical conductivity in the same way as the water effect.

[1] Mibe & Ono (2011) Electrical conductivity of MgCO_3 at high pressures and high temperatures,

Physica B, 406, 2018-2020.

[2] Ono & Mibe (2013) Electrical conductivity of aragonite in the subducted slab, *Eur. J. Mineral.*, 25, 11-15.

[3] Ono & Mibe (2015) Influence of pressure and temperature on the electrical conductivity of dolomite, *Phys. Chem. Minerals*, 42, 773-779.

キーワード：電気伝導度、炭酸塩鉱物、沈み込むスラブ、高温高圧

Keywords: Electrical conductivity, Carbonate, Subducted slab, High pressure and high temperature

浅間山の3次元比抵抗構造

Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano

*白井 嘉哉^{1,2}、小川 康雄^{1,2}、相澤 広記³、神田 径^{1,2}、橋本 武志⁴、小山 崇夫⁵、山谷 祐介⁶、三品 正明、鍵山 恒臣⁷

*Yoshiya Usui^{1,2}, Yasuo Ogawa^{1,2}, Koki Aizawa³, Wataru Kanda^{1,2}, Takeshi Hashimoto⁴, Takao Koyama⁵, Yusuke Yamaya⁶, Masaaki Mishina, Tsuneomi Kagiya⁷

1.東京工業大学大学院理工学研究科、2.東京工業大学火山流体研究センター、3.九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、4.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、5.東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センター、6.産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所、7.京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

1.Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2.Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 3.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 4.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, 5.Volcano Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 6.Fukushima Renewable Energy Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 7.Aso Volcanological Laboratory Institute for Geothermal Sciences Graduate School of Science Kyoto University

Asama volcano is an andesitic composite volcano located in central Japan. The present active crater locates at the eastern part of the complex. At the west of the crater, there is a horseshoe-shaped caldera, which was formed after the collapse of an old stratovolcano at around 24,000 years ago. In order to reveal the relationship between volcanic activities and subsurface structure, two-dimensional resistivity structure of Asama volcano has already been obtained by Aizawa *et al.* (2008) from the data of dense magnetotelluric survey. However, three-dimensional steep topography around Asama volcano can distort the observed response functions. Therefore, in this study, we performed three-dimensional inversion with the same data set as the previous study. In the inversion, we utilized the scheme proposed by Usui (2015), which enabled us to incorporate precise topography around the mountainous area into the computational mesh with the aid of the unstructured tetrahedral element.

The measurement stations used in the inversion consist of 36 magnetotelluric stations and 37 audio-magnetotelluric stations, and we used full components of the impedance tensor and the vertical magnetic transfer function. Though some stations of them measured only electric fields, the different locations of electric and magnetic fields were taken into account in the inversion algorithm. Galvanic distortion parameters were also estimated as model parameters in addition to subsurface resistivity values.

In the obtained resistivity structure, there is a spherical resistive body at the altitudes from 0.5 to 1.5 km under the collapse caldera. From impedance phases, Aizawa *et al.* (2008) inferred that the resistive body was isolated. By the three-dimensional inversion, we confirmed that the resistive body under the caldera was isolated. We found that hypocenter locates around the isolated resistor under the caldera. Aizawa *et al.* (2008) suggested that this resistive body is old solidified magma and it impedes the ascending magma. The result of our analysis supports the suggestion.

In addition, at the depths deeper than 0 km below sea level, resistivity of the west of the summit was relatively higher than surrounding area. This higher resistivity area is elongated to WNW-ESE direction and locates over the location of dyke intrusions estimated from seismic and geodetic measurements (Takeo *et al.*, 2006). This high resistivity area also corresponds to high P-wave

velocity and high-density area revealed by Aoki *et al.* (2010). They suggested that the high velocity is due to the solidification of repeatedly intruded magma. Our result is consistent with this interpretation since the porosity of solidified magma is considered to be low and it can lead to high resistivity in that area. On the other hand, the surrounding conductive area may consist of higher porosity rocks with saline water.

キーワード：MT法、火山構造、3次元地形、3次元インバージョン、非構造四面体要素

Keywords: magnetotelluric method, volcanic structure, 3-D topography, 3-D inversion, unstructured tetrahedral element

L1・L2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：実データへの適用
Sparse 3-D magnetic inversion using combined L1-L2 norm regularization: real data analysis.

*宇津木 充¹

*Mitsuru Utsugi¹

1. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

1. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

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L1ノルム正則のみ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。また係数行列の各列ベクトルの相関の高い場合(こうした状況はポテンシャル場の場合に非常によく現れる)解が過度に集中するなど、実用上、特に磁化構造解析のような $p \ll n$ 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。本研究では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方法を用いた。但しこの場合、インバージョンを行うに当たり決めなければならない正則化パラメータが2つ現れるが、このパラメータの決定方法としてL-curve法を用いた。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実際に観測された実データに適用し磁化構造解析を行った結果について報告する。

キーワード：インバージョン、磁化構造、スパース正則

Keywords: inversion, geomagnetic structure, sparse regularization

フィリピン・タール火山における最近の静穏状態と電磁気観測から推測される新たな活動？

New activity occurring on Taal Volcano, Philippines? - Indications from Electromagnetic (EM) observations

*笹井 洋一¹、アラニス ポール²、長尾 年恭¹、ズロトニツキ ジャック³、ジョンストン マルコム⁴

*Yoichi Sasai¹, Paul Alanis², Toshiyasu Nagao¹, Jacques Zlotnicki³, Malcolm Johnston⁴

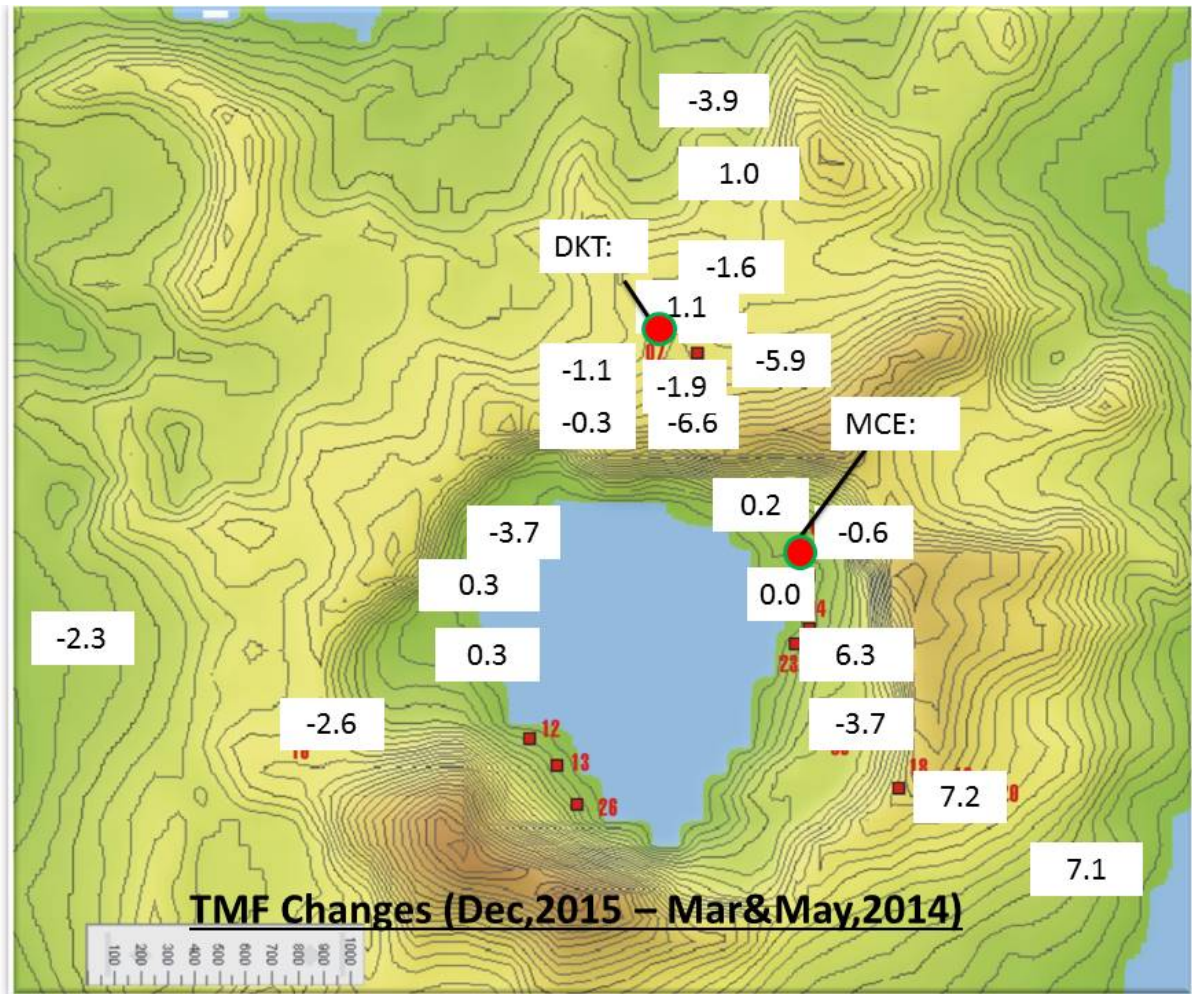
1.東海大学・海洋研究所・地震予知研究センター、2.フィリピン火山地震研究所、3.フランス国立科学研究センター、4.合衆国地質調査所

1.Earthquake Prediction Research Center, Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University, 2.Philippine Institute of Volcanology and Seismology, 3.National Scientific Research Center, 4.United States Geological Survey

我々は2005年以来、フィリピン・ルソン島中央部にあるタール火山で電磁気観測を行ってきた。この火山では2005-2006年と2010-2011年に地震活動が活発化して、タール湖中央のVolcano島から全住民が避難した。2005年と2010年の事件では顕著な地磁気と自然電位の変化が観測された。Volcano島の直下には直径3kmの高比抵抗体がMT観測によって発見され、気液二相状態の熱水だまりと推定された(Yamaya et al., 2013; Alanis et al., 2014)。また島の東側浅部に強いS波減衰域が存在し、活動的なマグマの存在が示唆されている(Kumagai et al., 2014)。2013年から現在まで、タール火山は静穏状態である。2015年はエル・ニーニョ現象の影響で降水量が少なく、主火口湖の水位は低下しており、主火口湖の東岸における地熱地帯は湖面から露出した状態で、特に活発化している様子は見えない。しかし繰り返しの全磁力測量を行い2014年3-5月と比較した所、第1図に示す通りVolcano島の北側で全磁力が減少し、南側で増加していることが判った。これは2010-2011年活動に際して、地震活動の消長に伴って観測された変化と同じである。熱水だまりの膨張を茂木モデルで近似すると、ピエゾ磁気効果によってこのような全磁力変化のパターンが期待される。即ち表面上は静穏化しているにもかかわらず、Volcano島の直下にある熱水だまりは膨張していることを示唆している。全磁力の連続観測点が北側に偏り基準観測点が欠測しているために、2014年3-5月と2015年12月のいつの時点からこの変化が起こっていたかは特定できていない。

キーワード：タール火山、熱水だまり、全磁力変化、ピエゾ磁気効果

Keywords: Taal Volcano, Hydrothermal reservoir, TMF changes, Piezomagnetic effect



1次元異方層構造におけるMT応答関数による走向判定の理論的考察

Analytical Investigations of the Magnetotelluric Directionality Responses in 1-D Anisotropic Media

*岡崎 智久¹、大志万 直人²、吉村 令慧²*Tomohisa Okazaki¹, Naoto Oshiman², Ryokei Yoshimura²

1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所

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

媒質の電気伝導度が電流の方向によって異なることを異方性といい、地磁気地電流法（MT法）による地下の電気伝導度構造の解釈においても議論されるようになってきている。しかし、異方性の有無や性質に関しては、それぞれの観測データに対して試行錯誤でモデル化しているのが現状である。共通の判断基準を得るためには、地下構造の次元性や走向方向の推定する次元判定手法を、異方性も判別できるように拡張することが求められる。

Marti et al. (2010)はMTインピーダンスの回転不変量（WAL不変量；Weaver et al. 2000）に基づく次元判定手法を異方媒質に適用して応答を調べ、異方性を区別できる判定手法を提案した。1,2次元の異方モデルに対して数値計算を行い、そのうち半無限空間の場合には解析解に基づいて結果を立証している。本発表では、数値計算のみ示された1次元異方媒質に対するWAL法による走向判定を一般の層構造の場合に解析した結果を紹介する。

まず、異方性の主軸方向が全ての層で一致する場合にWAL判定走向がその主軸方向に一致することを示す。走向が不定形となり実用上は不安定になる場合があり、その条件を2種類の走向に対してそれぞれ導く。一方は異方性があれば常に正しい値を与えるが、他方は位相に基づいているため電気伝導度に空間変化がない半無限空間などの場合は不定形となることを示す。

次に、一般の異方層構造に対して、長周期でのインピーダンスを周波数（の平方根）について1次まで展開して解析する。判定走向の長周期極限における解析的な表式を導出し、コンダクタンス（電気伝導度と層厚の積）の鉛直方向の総和が最大となる方位を指すことを見る。さらに位相テンソル(Caldwell et al. 2004)の振舞いも考察する。長周期極限では半無限空間に帰着し単位テンソルとなるが、周波数の最低次の寄与は2つの部分から成る。一方はテンソル円の半径を変えるもので、等方な層構造でも見られる電気伝導度の空間変化による位相変化を表す。もう一方はテンソル楕円を歪ませるもので、媒質全体での異方性を測る指標となる。楕円の長軸方向はWAL判定走向と一致することがわかる。

最後に、先行研究との比較を行う。Marti et al. (2010)で扱われたモデルに対して、得られた表式を適用すると走向が約3度異なる。これは数値計算が有限周期に対して行われることに起因すると思われる。その場合、電磁場が減衰するためにインピーダンスには上層の構造がより反映されると考えられる。実際、数値結果は理論的表式よりも上層の異方性主軸方向に近い値をとっておりこの考察と調和的である。

Caldwell, T.G., Bibby, H.M., Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. int.* 158, 457-469.

Marti, A., Queralt, P., Ledo, J., Farquharson, C., 2010. Dimensionality imprint of electrical anisotropy in magnetotelluric responses. *Phys. Earth Planet. Inter.* 182, 139-151.

Weaver, J.T., Agarwal, A.K., Lilley, F.E.M., 2000. Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. *Geophys. J. Int.* 141, 321-336.

断層不連続部の地下比抵抗構造—山崎断層帯の例—

Electrical resistivity structure beneath the fault segment gap: A case study of the Yamasaki fault zone, southwest Japan

小田 佑介¹、*山口 覚¹、村上 英記²、加藤 茂弘³、伊東 修平¹、大内 悠平¹、上嶋 誠⁴
Yusuke Oda¹, *Satoru Yamaguchi¹, Hideki Murakami², Shigehiro Katoh³, Shuhei Ito¹, Yuhei Ouchi¹, Makoto Uyeshima⁴

1.大阪市立大学大学院理学研究科、2.高知大学教育研究部自然科学系、3.兵庫県立人と自然の博物館、4.東京大学地震研究所

1.Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, 2.Natural Sciences Cluster - Science Unit, Kochi University, 3.The Museum of Nature and Human Activities, Hyogo, 4.ERI, The University of Tokyo

1. はじめに

ある活断層系で将来発生する可能性のある地震の規模を推定することは、防災案策定の上で最も重要な条件の一つであり、それには松田(1975)で代表されるような、地表地震断層の長さを基とした経験則が広く用いられている。一方、地表地震断層の長さや発生した地震の規模が対応しない例も多く報告されている(e.g. 金田・岡田, 2002; 島崎, 2008; 遠田, 2013)。この問題の解決のためには、電磁気探査・地震波探査・重力などの地球物理学的な調査結果と地質・地形調査結果から地下構造を推定することが望ましいとされる(地震調査研究推進本部, 2010)。

我々は、電磁気探査法のうち、地磁気地電流法(Magnetotelluric法:MT法)を用いて山崎断層系や郷村断層系の地下比抵抗構造を明らかにし、顕著な低比抵抗領域(Fault Zone Conductor: FZC)が活断層下に存在することを明らかにしてきた(e.g. Yamaguchi *et al.*, 2010)。

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、総延長120kmにおよぶ横ずれ運動が卓越する断層帯である。山崎断層帯主部は北西部活断層群(大原断層・土万断層・安富断層・暮坂峠断層)と南東部活断層群(琵琶甲断層・三木断層)に分けられ、両者の間(安富断層と琵琶甲断層の間)には顕著な不連続が認められる。この断層帯で将来に発生が予想される地震のマグニチュード(M)は、北西部活断層帯が活動する場合にはM7.7の、南東部活断層群ではM7.3の、また両断層群が連動して活動した場合にはM8.0程度の地震が発生することが予想されている(地震調査研究推進本部, 2013)。

地表では不連続である安富断層と琵琶甲断層との境界部(領域Ⅰ)において、地表で活断層トレースが認められる断層セグメントの地下で見いだされたFZCが認められると、両セグメントが連動する可能性が推察される。逆に、この領域においてFZCとは異なる、特徴的な構造が認められると、両断層セグメントが連動破壊する可能性は低いと判断される。暮坂峠断層においては、その走向方向の延長で地表の断層トレースが途切れている地域(領域Ⅱ)でFZCが認められると、地下では断層がこの領域まで延びており、シナリオ地震のマグニチュードがより大きくなると予測される。

本発表では、山崎断層帯主部の北西部と南東部の間を横切る測線で行ったMT法探査により作成した、領域ⅠとⅡを含む地域の電気比抵抗構造モデルの特徴とその解釈を報告する。

2. 観測

領域Ⅰと領域Ⅱの2つの領域を横切る全長16kmの測線を設定し、2013年に11点、2015年に8点の、計19の観測点で磁場3成分と電場水平2成分の測定を行った。その際、Remote Reference処理(Gamble *et al.*, 1979)を行うために、測線から西方に約28km離れた地点に磁場参照点を設置し、磁場水平2成分の測定を行った。

3. 解析

SSMT2000(Phoenix Geophysics社)を用いてRemote Reference法に従って、10,400~0.35HzのMT応答関数を算出した後、信頼度の低い測定値を除去した。そして、Phase Tensor法(Caldwell *et al.*, 2004; Bibby *et al.*, 2005)を用いて、比抵抗構造の次元と走向を判定した。この応答を元に、Ogawa and Uchida(1996)のインバージョンコードを用いて二次元比抵抗モデル(FKSモデル)を作成した。

3. 結果

FKSモデルでは、大局的には3つの低比抵抗領域が認められ、そのうちの2つの領域は、それぞれ、安富断層と琵琶甲断層（領域Ⅰ）、および暮坂峠断層の走向方向に延長した領域（領域Ⅱ）に対応する。これらの低比抵抗領域は、山崎断層系の変位蓄積に伴って形成されたダメージゾーンに、地下水・天水が浸入することによって形成されたと解釈した。

領域ⅠにFZCに相当すると考えられる低比抵抗領域が存在する事から、山崎断層北西部と南東部の間には、両セグメントが不連続であること示唆する特徴的な構造は認められなかった。

領域ⅡにFZCに相当すると考えられる低比抵抗領域が存在する事から、暮坂峠断層は地下において、少なくとも本測線の地点までは伸びていると判断した。

キーワード：電気比抵抗構造、活断層、山崎断層帯、地磁気地電流法

Keywords: conductivity structure, active fault, Yamasaki fault zone, Magnetotellurics

独立成分分析によるMT磁場データの改善

Improving horizontal magnetic components in MT data using independent component analysis

*奥田 真央¹、茂木 透¹*Mao Okuda¹, Toru Mogi¹

1.北海道大学大学院理学院

1.Graduate School of Science, Hokkaido University

房総半島は過去20年間に少なくとも5回のスロースリップイベントが発生している。我々は、この地域の比抵抗構造を求めることを目的としてMT観測を行った。観測されたMTデータには大量の人工ノイズが含まれており、算出した見掛け比抵抗と位相からニアフィールドの影響を受けていることが確認された。一般的に、ローカルノイズの除去にはリモートリファレンス法 (Gamble et al., 1979) が適用されるが、大きな効果は得られなかった。そこで本研究では、より強力なノイズ除去を行うため、房総半島で得られたデータに対し独立成分分析 (ICA) を適用した。

ICAは多変量解析法の1つで、混合された信号を分離するために用いられる手法である。一般的に、観測信号 $x(t)$ と原信号 $s(t)$ の関係は未知の作用素 A を用いて $x(t) = As(t)$ で表されると仮定する。本研究では、 A の逆行列 W を求めるために Aapo Hyvarinen (2000) によって発展された FastICA アルゴリズムを適用した。

ICAには房総半島の磁場データに加えて、江刺 (岩手県) や女満別 (北海道) で観測された磁場データを入力成分とした。ICAは適用後、縦軸が一意に決定されない為、各成分のパワーの評価がしにくいという問題点がある。そこで、本研究では、シグナル成分を残し、それ以外の成分を θ とした行列を作成し、 $x(t) = W^{-1}u'(t)$ という関係式を用いて原信号空間に戻す作業を行った。最後に、改良した磁場の水平成分を用いて見掛け比抵抗と位相を算出した。

ICA適用前後の磁場の時間変化を比較すると、ノイズが取り除かれ、シグナル成分を取り出すことができたことが分かる。算出された見掛け比抵抗と位相は低周波数側でニアフィールド現象の影響の改善がみられる。これらの結果から、ICAはMT磁場データの人工ノイズ除去に有用であるといえる。しかしながら、より深部の比抵抗構造を評価するためには、磁場データだけでなく、電場データの改善が必要である。

キーワード：MT法、独立成分分析

Keywords: MT methods, independent component analysis

有限伝導度無限媒質中の食い違い震源および波動場から生じるピエゾ磁気効果起源の磁場変動
Temporal variations in magnetic signals generated by the piezomagnetic effect for
dislocation sources in a uniform medium

*山崎 健一¹

*Ken'ichi Yamazaki¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Fault ruptures in the Earth's crust generate both elastic and electromagnetic (EM) waves. If the corresponding EM signals can be observed, then earthquakes could be detected before the first seismic waves arrive. In this study, I consider the piezomagnetic effect as a mechanism that converts elastic waves to EM energy, and I derive analytical formulas for the conversion process. The situation considered in this study is a whole-space model, in which elastic and EM properties are uniform and isotropic. In this situation, the governing equations of the elastic and EM fields, combined with the piezomagnetic constitutive law, can be solved analytically in the time domain by ignoring the displacement current term. Using the derived formulas, numerical examples are investigated, and the corresponding characteristics of the expected magnetic signals are resolved. I show that temporal variations in the magnetic field depend strongly on the electrical conductivity of the medium, meaning that precise detection of signals generated by the piezomagnetic effect is generally difficult. Expected amplitudes of piezomagnetic signals are estimated to be no larger than 0.3 nT for earthquakes with a moment magnitude of ≥ 7.0 at a source distance of 25 km; however, this conclusion may not extend to the detection of real earthquakes, because piezomagnetic stress sensitivity is currently poorly constrained.

キーワード：ピエゾ磁気効果、食い違い震源、時間変化、磁場、電気伝導度

Keywords: piezomagnetic effect, dislocation source, temporal variations, magnetic field, electrical conductivity

火山体電磁モニタリングのための非構造格子を用いた節点ベース三次元有限要素法
Three-dimensional node-based FEM method using unstructured grid for electromagnetic
volcano monitoring systems

*南 拓人¹、宇津木 充¹

*Takuto Minami¹, Mitsuru Utsugi¹

1.京都大学大学院理学研究科 火山研究センター

1.Aso volcanological Laboratory, Department of Earth and Geophysics, Division of Earth and
Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

In recent years, magmatic and/or phreatic eruptions occurred in many volcanos in Japan. In Aso volcano in the centre of Kyushu island, Japan, for example, a magnetic eruption occurred on November 25th, 2014, for the first time since the last magmatic event approximately 22 years ago. To monitor the activity of Aso volcano, our group in Kyoto University have been operating an electromagnetic (EM) monitoring system, ACTIVE (Array of Controlled Transient Electromagnetics for Imaging Volcano Edifice; Utada et al, 2007), around the active first crater of Aso volcano. ACTIVE system in Aso volcano consists of one transmitter that transmits electric currents into the ground through two electrodes, and several induction-coil receivers that observe only the vertical component of the magnetic field, b_z . By means of this system, we succeeded in detecting temporal changes in ACTIVE response functions, amplitude ratios of b_z to the transmitted electric current (nT/A), before and after the magmatic eruption on Nov. 25th, 2014.

In order to quickly analyze data obtained by the ACTIVE-type EM volcano monitoring systems, we developed a new three-dimensional forward code, by adopting the node-based finite element method (FEM). We use unstructured tetrahedral grid to represent arbitrary conductivity structure and complicated topography of volcanos. We directly solve the induction equation only in terms of the magnetic field, since only the magnetic fields are obtained in ACTIVE observations. The reasons why we adopted the conventional node-based FEM are that (1) the node-based FEM is superior to the popular edge-based FEM methods (e.g., Schwarzbach and Haber, 2013) from the perspective of the computational memory, (2) the continuity of the magnetic field is naturally guaranteed provided they are defined at nodes, (3) linear problems in node-based FEM are easily solved by iterative methods, e.g. Conjugate Gradient (CG) method, and thereby (4) we can easily implement parallel computations using MPI. It was illustrated that our forward code is able to calculate the accurate vertical component of the magnetic field, in comparison to the analytical solution of Ward and Hohmann (1988), when a horizontal electric dipole is located just on 1-D layered structure. Now we are trying to improve the convergence ratio in COCG (Conjugate Orthogonal CG; van der Vorst and Melissen, 1990) solver using the divergence free condition of the magnetic field.

In the presentation, we first introduce the ACTIVE system operated in Aso volcano and share some observed data before and after the magmatic event. Second, we show the methodology of our new three-dimensional node-based FEM code and show its accuracy through some numerical experiments.

キーワード：火山、モニタリング、有限要素、三次元

Keywords: volcano, monitoring, finite element, three-dimensional

深層学習技術を用いた地磁気変動推定の検討

Examination of Estimation of Geomagnetic Changes Using Deep Learning Technology

*香取 勇太¹、大久保 寛¹、竹内 伸直²

*Yuta Katori¹, Kan Okubo¹, Nobunao Takeuchi²

1.首都大学東京、2.東北大学

1.Tokyo Metropolitan University, 2.Tohoku University

我々の研究グループでは、連続地磁気観測を行った結果として、地震発生時における地震断層運動に伴う微小な地磁気信号の観測に成功している。この微小地磁気信号は、地震発生時の地中内の応力変化が引き起こすピエゾ磁気効果による信号と考えている。これまで観測された地震ピエゾ磁場変化は、共通して地磁気信号が地震断層運動に伴うように、徐々に連続的に変化する観測結果が得られ、地震発生から観測点まで地震が到達するまでの数秒間の間における微小な変化であった。

この磁場変化を計算機で自動検知が可能にするためには、クリアすべき課題があると考えている。そこで、我々は深層学習技術に着目し、地磁気推定の分野に適用することを提案する。深層学習技術は画像や音声信号の処理に用いられるだけでなく金融業界まで実用化されている事例があり、様々な用途で用いられている。今回我々は、深層学習技術を用いたリアルタイム地磁気推定を想定したうえで、複数観測点間の地磁気推定を検討した。本発表では、高精度に短時間の地磁気信号を予測し、ローカルな地磁気異常を検出することを目指した複数観測点間の地磁気推定を試みた結果とこれからの展望を報告する。

キーワード：地磁気推定、深層学習

Keywords: estimation of geomagnetic field, deep learning

地殻変動データベースシステムを活用したプロトン磁力計データサーバの構築

Development of Data Server for Proton Magnetometer with the Crustal Deformation Database System

*海田 俊輝¹、市來 雅啓¹、出町 知嗣¹、山口 照寛²

*Toshiki Kaida¹, Masahiro Ichiki¹, Tomotsugu Demachi¹, Teruhiro Yamaguchi²

1.東北大学大学院理学研究科、2.北海道大学大学院理学研究院

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Hokkaido University

Recognized the importance of demagnetization monitoring to phreatic/hydrothermal eruptions, we have developed a data server system for proton magnetometer time-series data processings. PM201-SCS (Neo-Science, Co. Ltd.), one of the most popular proton magnetometer in Japan, is equipped with semi-real time data transfer system. The time-series data are transferred with an e-mail once a day through 3G network in the PM201-SCS. After receiving the e-mails from PM201-SCS at each site, the developed server right away performs the following data processing automatically: (1) diagnose status of each site's magnetometer, (2) convert the e-mail data into user-friendly formats including WIN-format (cf. <http://eoc.eri.u-tokyo.ac.jp/WIN/index.html>), (3) reduce noise, and (4) store the data in the Crustal Deformation Database system (CDD). CDD was developed by Yamaguchi et al., (2010), and user can use functions such as drawing and download the time-series from Web browser. Our server enables users to access the daily time-series through the CDD. In this presentation, we will introduce the details of the server using an example of time-series data observed around Zao volcano.

キーワード：プロトン磁力計、地殻変動データベースシステム

Keywords: Proton Magnetometer, Crustal Deformation Database System

地上磁場観測データに基づく地球内部電気伝導度構造の時間領域インバージョン
Time-domain inversion of the electrical conductivity profile in the Earth using
ground-based magnetic observatory data.

*岩下 耕大¹、藤 浩明²

*Kodai Iwashita¹, Hiroaki Toh²

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附属地磁気世界資料解析センター
1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Data
Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Kyoto University

We estimated radial electrical conductivity distribution in the Earth using both vector geomagnetic observatory data and a forward solver in time-domain. The major difference between the time-domain and frequency-domain approach rests in the way of processing the finite-length time series of transient inducing and induced fields. In the frequency-domain, response functions are usually estimated at discrete frequencies, by splitting the time-series into multiple segments and applying Fourier transformation to each segment. As the periods increase, quality of response functions is reduced in the case of the frequency-domain approach. In addition, the frequency-domain approach should not be applied to the transient data since Fourier transformation premises periodicity for the time-series in concern. On the other hand, the time-domain approach exploits all the data in the time-series by fitting the entire waveform of the magnetic field including rapid variations such as sudden storm commencements. The quality of long period signals that are able to penetrate the deeper region of the Earth is not reduced in the time-domain. We can, therefore, estimate the deep distribution of conductivity using shorter time-series than in the frequency-domain. Specifically, we applied the time-domain approach to the vector geomagnetic observatory data with one minute sampling interval all around the globe. In order to extract the induced field, we subtracted the vector average for 5 quietest days of the month from the raw time-series. Contrary to the newly available data sets from recent low-Earth-orbiting satellite missions, the traditional ground-based data has biased distribution over the globe. We eliminated observatories in some congested places. We then separated the residual time-series into internal and external origin. The separated internal magnetic field can be reproduced using forward response of the radially symmetric conducting sphere to the separated external magnetic field. A heterogeneously conducting shell was placed at the top of the radially symmetric sphere so as to account for large scale surface contrast such as ocean-continent distribution. We solved an inversion problem with an objective function consisting of linear combination of data misfit and a regularization term that constrains the smoothness of the conductivities. Moreover, we estimated the internal Gauss coefficients' sensitivities for each shell of the radially symmetric conducting spheres by F-test and revealed that the lower mantle conductivity has a large influence on the magnetic field on the surface of the Earth after about more one day from the instance when the external magnetic field was applied. As a result, we estimated a conductivity profile of the Earth. This is the first profile that was estimated by a combination of inversion in time-domain and the vector geomagnetic observatory data over the globe. We will further discuss the necessary length of time-series in order to estimate the lower mantle conductivity accurately.

キーワード：電気伝導度、磁気嵐

Keywords: conductivity, magnetic storm

霧島硫黄山の1次元比抵抗構造

One-dimensional resistivity structure of Iwo-yama, Kirishima Volcanoes

*塚本 果織¹、相澤 広記²、宇津木 充³、小山 崇夫⁴

*Kaori Tsukamoto¹, Koki Aizawa², Mitsuru Utsugi³, Takao Koyama⁴

1.九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2.九州大学地震火山観測研究センター、3.京都大学火山研究センター、4.東京大学地震研究所

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University,

2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3.Aso

Volcanological Laboratory, Kyoto University, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

九州地方の霧島連山に位置する活火山の硫黄山は、16~17世紀に形成されたとされる(田島他、2014)霧島連山の中で最も新しい火山である。硫黄山から韓国岳周辺では2013年12月より深さ1~5kmで地震が増加し、2015年7月からは火山性地震がたびたび発生するようになった(気象庁火山活動解説資料)。さらに2015年12月14日には硫黄山で12年ぶりに温度80°Cの噴気が火口南西部に出現した。その後の水準測量では2015年6月~12月の期間で隆起が確認され、膨張圧力源が硫黄山火口東、深さ700mに推定された(松島他、2015)。硫黄山周辺の地震の震源の上面は地下1km付近に揃っているように見え、過去の比抵抗構造調査によると深さ1km以浅に粘土層の存在が推測されている(Aizawa et al., 2013, EPS)。これらのことから硫黄山周辺地下への高温流体の供給量が増加し、粘土層に遮られ間隙水圧が上昇し、地震が増加していると推測される。この仮説の検証のため、我々は硫黄山周辺で広帯域(200~0.0005Hz)MT観測を行った。噴気発生直後の2015年12月21日~2016年1月12日の期間に、火口周辺5箇所電場2成分、1箇所電磁場5成分のデータを取得した。本発表では得られたデータから硫黄山地下の平均的な1次元比抵抗構造を示し、地震との関連を議論する予定である。

参考文献

Aizawa, K. et al., 2013, Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima Volcanoes as inferred from broadband magnetotelluric data: J. Geophys. Res. 119 198-215

気象庁 火山活動解説資料 (平成28年1月 霧島)

松島・他, 2015, 精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下運動: 火山噴火予知連絡会資料

田島・他, 2014, 霧島火山、えびの高原周辺における最近15,000年間の活動史: 火山 59 55-75

浅層地下水地域における自然電位観測

Self potential (SP) survey at the Rokugo alluvial fan in Akita Prefecture, Japan

*田中 宏尚¹、網田 和宏²、坂中 伸也¹*Koushou Tanaka¹, Kazuhiro Amata², Shin'ya Sakanaka¹

1.秋田大学大学院国際資源学研究科、2.秋田大学大学院理工学研究科附属理工学研究センター

1.Graduate School of International Resource Sciences, Akita University, 2.Research Center for Engineering Science, Akita University

自然電位観測は古くは金属鉱床の探査法として普及したが、近年では熱水対流系の中心域の検出などを目的として、多くの地熱・火山地帯で観測が行われるようになった。これらの観測において、熱水対流系の中心域から離れた地点では、いわゆる「地形効果」が認められることが多く、斜面を流下する表層付近の地下水によって自然電位が発生した結果であると解釈されてきた。

このように、自然電位分布と地下水流動との間の関係性についてはよく知られているところであるが、実際の地下水の流速や流量などの情報と自然電位との関係を明らかにするような調査・研究はあまり行われてこなかった。地下水流動の詳細を明らかにすることは、水資源分野においては特に重要であり、例えば、地域住民が地下水を利用して生活を営んでいるような「浅層地下水地域」において地下水流動の様相を知ることができれば、地下水の管理・保全計画の策定が容易になることなどが期待される。そこで本研究では、水位や勾配など、地下水に関する諸情報が直接観測で明らかになっているような浅層地下水地域において自然電位観測を実施し、水位変化などに対応した自然電位分布が観測できるものであるのかどうかについて検討をすることを主な目的とした。特に今回は、その手始めとして、いわゆる「地形効果」の検出可能性について検討した。

観測の対象地域には秋田県の六郷扇状地を選択した。本地域は、扇頂部から平地に向かって開く典型的な半円錐状の扇状地になっており、その大きさは南北約5km、東西約4km、面積約14km²の規模である。また本地域内には、扇頂から平地に下る斜面のほぼ中央に、約3kmの間に複数の観測用の井戸が設置されており、これまでの記録もあり、地下水位に関するデータが充実している地域でもある。観測は、2015年9月から11月に行った。現在のところ4測線で、109地点の電位測定を行っている。

観測地点の配置に関して、扇頂部から扇端部へ向けてほぼ直線上に測点が並んでいる測線で得られた観測結果では、標高の低下に対して電位が上昇するといった、明瞭な地形効果を確認することはできなかったが、測線内の一部区間においては、電位と標高の間に地形効果とみなしてよいような関係がみられた。仮にこれらの区間における電位上昇を地形効果であると考えた場合、標高1mあたり-1.0mV/mから-7.3mV/mの値であることが分かった。

キーワード：自然電位、地下水、地形効果

Keywords: Self Potential, groundwater, topographic effect

野島断層注水実験に伴う自然電位変動の原因

Sources of self-potential variations associated with Nojima water injection tests

*村上 英記¹*Hideki Murakami¹

1.高知大教育研究部自然科学系

1.Research and Education Faculty, Kochi University

1995年兵庫県南部地震(Mw=6.9)の地表地震断層である野島断層において、断層の回復過程を調べるために繰り返し注水実験がおこなわれている。注水実験では、野島断層近傍に設置された1800m孔に注水をおこない、注水孔から水が流出する際の圧力変化や、近傍に設置された800m孔の湧水量や歪計の変化、周辺部の微小地震活動、そして地表における自然電位計測を実施している。1997年の注水実験において、注水に同期して自然電位の変動が観測されて次のような特徴があることが分かった：1)注水の操作に同期して自然電位が変動する、2)注水孔周辺の電位が負側に変動する、3)注水孔から離れると変動の大きさが小さくなる。これらの自然電位変動の特徴は、注水孔から水が流出する際に発生する流動電位を注水孔のケーシング・パイプが伝えるというモデル(Line Source Model:LSM)により解釈できる。以

後、2000年、2003年、2004年、2006年、2009年の注水実験においても同様の変化が観測されており、1997年から2003年までのデータから地下の透水係数が小さくなっていると推定した(Murakami et al., 2001,2007)。同様な結果は、湧水量や歪データの解析からも得られている。

注水に伴う自然電位変動の基本的な特徴は、繰り返し注水実験において同様に観測されているが、2004年以降とりわけ2006年以降、注水孔に最も近いA測線の注水孔から40m以遠における自然電位変動が負側ではなく正側に变化した。これは、LSMモデルでは説明できない変動である。変動は注水の開始と停止に同期した変動なので、注水を原因とする自然電位変動であることは間違いない。しかし、従来のLSMモデルでは説明ができない。LSMモデルでは、水が流れて行く方向に発生する正の電荷については無限遠、少なくとも測定範囲外としていた。注水孔から半径40m~70m以内の測定範囲内に正の電荷が存在すれば注水孔から離れた地点で自然電位変動が電位的に正側に变化する場合がある。正の電荷が注水孔から一定の距離に環状に分布しているというモデル(Circular Source Model : CSM)で表現してLSMとの重ね合わせで地表の電位分布がどのようになるのかを検討した(村上, 2014)。しかし、注水孔から少し離れたB測線における変動には正側に变化する自然電位の変動は観測されていない。これは、注水孔から流出した水が等方的に拡散している場合には不都合である。また、注水孔からの距離に対する変動の大きさの分布のLSMモデルに対するズレの特性がうまく説明できないという問題もある。

本発表では、上記のような問題点を解決することが可能なモデルの一つとして、LSMモデルにA測線の自然電位変動が正側に変動した地点の地下に正負の電荷を持つモデル(Dipole Source Model)を持ち込むことでローカルな自然電位変動の特性を定性的には説明できるようになったこと、及び残る課題について紹介する。

謝辞 本研究の観測は、『地震予知のための新たな観測研究計画』の研究課題「断層の回復過程の研究 - 野島断層および周辺活断層の深部構造の研究-」(京都大学)、『地震予知のための新たな観測研究計画(第2次)』の研究課題「断層における注水実験および応力状態の時間変化」(京都大学)において実施された注水実験の際に行った。観測にあたり協力をいただきました西上欣也教授(京都大学)、大志万直人教授(京都大学)、山口 覚教授(大阪市大)、吉村令慧准教授(京都大学)をはじめとする関係者の皆様に感謝いたします。

キーワード：野島断層、自然電位、流動電位

Keywords: Nojima Fault, self-potential, streaming potential

高解像度比抵抗イメージングにむけた円筒形岩石試料に対する4極法測定の試み

An attempt of a four-terminal measurement to the cylindrical-shape rock sample for the high-density resistivity imaging

*鈴木 健士¹、吉村 令慧²、大志万 直人²

*Takeshi Suzuki¹, Ryohei Yoshimura², Naoto Oshiman²

1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所

1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DPRI, Kyoto University

近年、地震発生域における地下構造の解明や火山活動域における地下熱水系およびマグマだまりのイメージングを目的として、電気・電磁探査による電気比抵抗構造探査が広く実施されている(例えば、Yoshimura *et al.*, 2009; Nurhasan *et al.*, 2006; Aizawa *et al.*, 2004など)。求められた比抵抗構造から、熱水系の様相や地震発生メカニズムに関連する流体の分布を知るためには、含水率を比抵抗値と結び付ける必要がある。現状、比抵抗イメージから含水率を求める際にはArchie の式(Archie, 1942) などの経験式を用いているが、既往の経験式は特定の岩石や測定条件に基づいて得られたものであり、実際の地中においてもすべて成り立つとは限らない。高精度の流体量推定を行うためには、こういった経験式をどの物理条件にまで適用して良いのか明らかにしておく必要がある。そのためには室内実験によって得られる知見が欠かせない。

そこで本研究では、圧縮試験後の岩石試料内に局在化する微小クラック群を比抵抗構造の不均質として検出することを目的に、岩石試料の高解像度比抵抗イメージングの実現を目指している。本研究での測定対象物は、せん断破壊実験で用いられるサイズの岩石試料である。せん断破壊実験は地震を模擬した室内実験の一つであり、これによって岩石試料内に生じる微小クラック群は、地震によって形成される断層に準えることができる。岩石試料に内在する微小クラック群の非破壊計測はすでに実施されており、X線CTスキャンによる詳細な3次元イメージングなどが報告されている(例えば、Kawakata *et al.*, 1999など)。こういった試料に対する高解像度比抵抗イメージングが実現できれば、フィールドにおいては困難な、破壊域の直接的観察結果と比抵抗イメージの多面的な対比が可能になる。この対比は経験式が現実をどこまで表現できているのかを評価できる新たな試みであり、得られた知見は精度の高い流体量推定に向けて重要な情報となる。

これまでに、岩石試料に対する実験の準備として、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模擬実験を通して実験の実現可能性を評価してきた。また、電極の大きさを2.5mmに設定した多くの電極を高密度に配置する測定により、面的な電位分布を得ることができた他、面上配列するクラック群を模した層状のエポキシ樹脂も電位差の変化として検出することができた。その一方で、花崗岩試料に対して同様の実験を試みたところ、模擬実験と同等の電極サイズでは接触抵抗が大きくなりすぎてしまい、その結果、実験系からの漏えい電流が発生してしまったので、測定を行うことが出来ずにいた。

今回はこの問題を解決するために、フローティング測定によって電流の漏れだしを低減

した実験系を構築し、岩石試料に対する4端子測定を試みた。その結果、10mm四方の正方形電極を用いた実験においては一定量の電流を安定して試料に流すことができ、電圧も精度よく測定することができた。

発表では、現在すすめている高密度な電極配置での岩石実験について紹介し、実験の精度について議論するとともに、将来的な高解像度比抵抗イメージングへの展望について述べる。

キーワード：岩石実験、電気比抵抗、電気探査

Keywords: rock experiments, electrical resistivity, electrical measurements

四国西部域の広域比抵抗構造

Large-scale electrical resistivity structure around the Western Part of Shikoku

*吉村 令慧¹、山崎 健一¹、小川 康雄²、川崎 慎吾¹、中川 潤¹、小松 信太郎¹、米田 格¹、大内 悠平³、鈴木 惇史⁴、齋藤 全史郎⁴、寺石 真弘¹

*Ryohei Yoshimura¹, Ken'ichi Yamazaki¹, Yasuo Ogawa², Shingo Kawasaki¹, Jun Nakagawa¹, Shintaro Komatsu¹, Itaru Yoneda¹, Yuhei Ouchi³, Atsushi Suzuki⁴, Zenshiro Saito⁴, Masahiro Teraishi¹

1.京都大学防災研究所、2.東京工業大学火山流体研究センター、3.京都大学大学院理学研究科、4.東京工業大学理学研究科

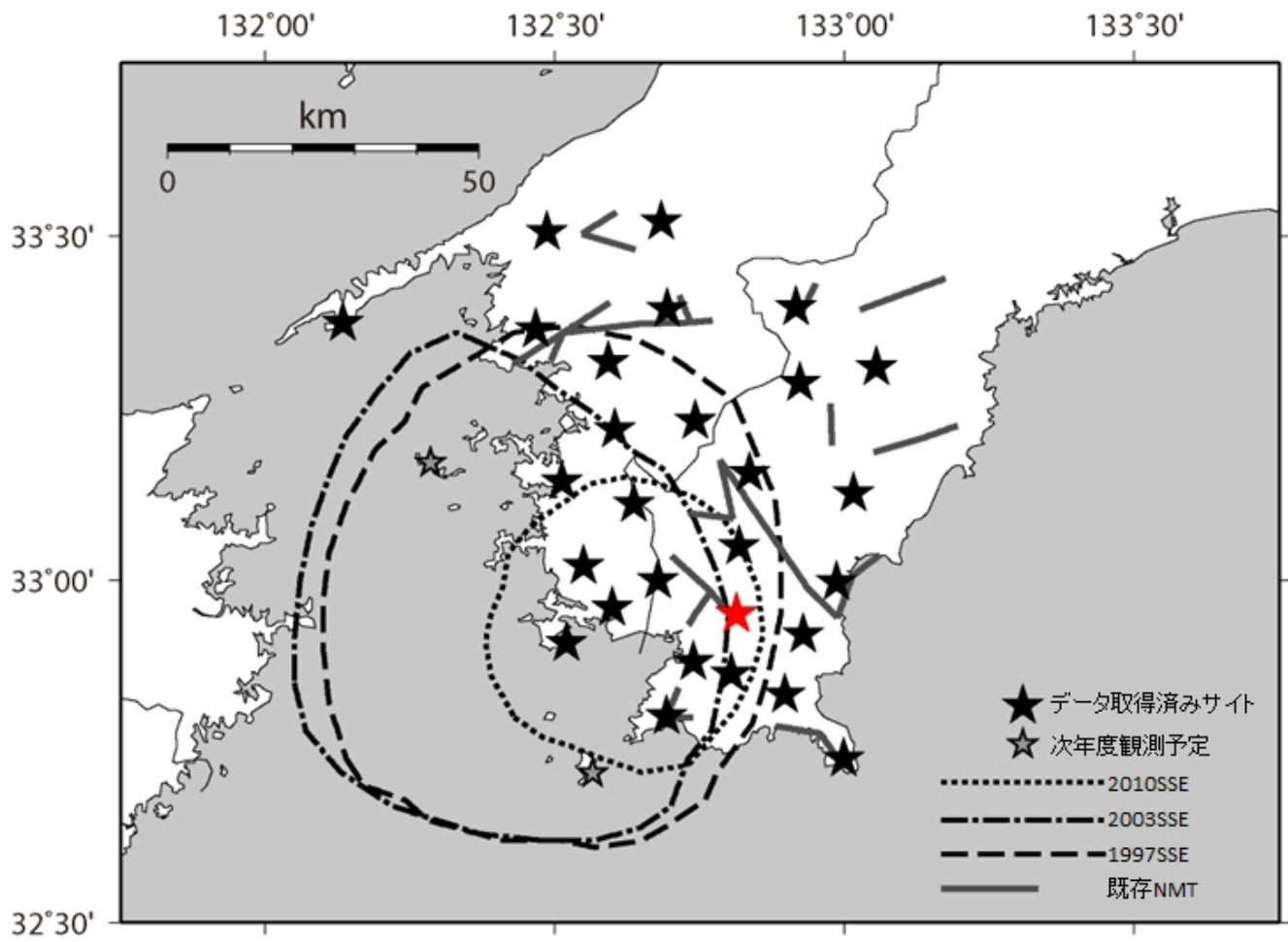
1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 3.Graduate School of Science, Kyoto University, 4.Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology

豊後水道では、約6年間隔でのスロースリップイベント（SSE）の発生が検出されている（例えば、国土地理院、2010）。SSEは、プレート境界面上で高速破壊域になると考えられている領域の深部延長部に発生しており、その発生場の状態解明は、メカニズムやプレート間カップリングの多様性を理解する上で重要である。そこで我々は、豊後水道SSE発生域周辺の三次元比抵抗構造を明らかにすることを目的に、四国西部域において30点の広帯域Magnetotelluric (MT) 観測を計画・実施している。加えて、SSEの発生メカニズムに流体が関与するならば、その分布およびそれを反映した比抵抗構造も、SSEの発生サイクル内で時間変化する可能性があると考え、2015年1月より京都大学防災研究所宿毛観測室において比抵抗構造の時間変化のモニタリングのための長周期MT連続観測も開始した。

本発表では、モニタリングの可能性評価や最適配置を考える上で必要不可欠である、バックグラウンドの三次元比抵抗構造推定の現状を報告する。2016年2月現在、28観測点での広帯域MT観測を完了し、BIRRPコード（Chave and Thomson, 2004）を使用した時系列解析により、300Hzから1万秒の周期帯において良質なMT応答関数を推定した。MT応答の位相テンソルやインダクションベクトルの分布から、SSE発生領域を囲む比抵抗構造のコントラストが存在する可能性が示唆される。広帯域MT観測の概要や得られたMT応答の特徴、予察的な三次元構造解析結果などを報告する予定である。

キーワード：比抵抗構造、豊後水道、スロースリップイベント

Keywords: electrical resistivity structure, Bungo Channel, slow slip events



AMT高密度観測データから得られた中央構造線断層帯（和泉山脈南縁）の浅部比抵抗構造
Shallow Resistivity Structure around the MTL Fault Zone (Izumi segment) deduced from the dense AMT observations

*大内 悠平¹、吉村 令慧²、田中 大資³、米田 格²、山崎 友也²、大志万 直人²

*Yuhei Ouchi¹, Ryokei Yoshimura², Daisuke Tanaka³, Itaru Yoneda², Tomoya Yamazaki², Naoto Oshiman²

1.京都大学理学研究科、2.京都大学防災研究所、3.山形大学医学部 メディカルサイエンス推進研究所
1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Institute for Promotion of Medical Science Research, Yamagata University faculty of Medicine

中央構造線断層帯の和泉山脈南縁セグメントでは、北側に五条谷断層、南側に菖蒲谷断層が東西方向に並走している。この地域では広域構造の解明を目的とした広帯域Magnetotelluric (MT) 観測による比抵抗構造調査が実施されている（京都大学防災研究所、2015）。推定された広域比抵抗構造では、断層帯を境に比抵抗コントラストが確認できるものの、地下浅部の解像度は十分とは言えず、近接する五条谷断層と菖蒲谷断層の周辺構造の差を議論することは難しい。そこで本研究では、高密度な観測により両断層周辺の詳細構造を明らかにすることを目的に、2014年11月に稠密なAudio-frequency MT (AMT) 観測を実施した。

和歌山県高野口町周辺において約5kmの測線を設定し、計38観測点で電磁場データを取得した。測定間隔は平均140mと非常に密な観測である。内37観測点で良質なMT応答が推定できた。その応答を用いた2次元インバージョン解析の結果、先行研究に比較して非常に高分解能な浅部構造が推定された。この推定された詳細な構造の中からロバストな特徴的構造を抽出するために、本研究では新たなモデル確度評価法を考案し適用した。新たな手法では、ランダムに抽出した観測点の組合せ（400組）ごとに2次元インバージョンを行い、その平均構造ならびに標準偏差分布を求めている。

得られた比抵抗モデルから以下のような特徴的が確認された。①菖蒲谷断層は約30度で傾斜する低比抵抗領域（河川堆積物で構成される菖蒲谷層に対応）の上面に位置すること、②五条谷断層は不明瞭であるものの高比抵抗体（和泉層群に対応）内の不均質構造部に位置し、その直下には明瞭な低比抵抗領域内コントラストが存在することが検出された。低比抵抗内コントラストは地質境界と考えるのは難しく、深部から供給される流体分布の差に起因すると解釈した。混合則を用いると、低比抵抗内コントラストは10%~数%の含水率の差を有し、堆積層としては妥当な値を示している。この不均質構造が力学的弱構造として五条谷断層の活動を規定している可能性が考えられる。

キーワード：地磁気地電流法、中央構造線断層帯、高密度観測

Keywords: Magnetotelluric, The Japan Median Tectonic Line Fault Zone, The dense observations

山崎断層帯主部南東部を構成する三木断層の地磁気地電流調査

Magnetotelluric survey of the Miki fault, the Yamasaki fault system, southwest Japan

勝村 真司²、*倉光 伸¹、山口 寛¹、小田 佑介¹、三島 稔明¹、村上 英記³、加藤 茂弘⁴Shinji Katsumura², *Shin Kuramitsu¹, Satoru Yamaguchi¹, Yusuke Oda¹, Toshiaki Mishima¹, Hideki Murakami³, Shigehiro Katoh⁴

1.大阪市立大学大学院理学研究科、2.大阪市立大学理学部、3.高知大学教育研究部自然科学系、4.兵庫県立人と自然の博物館

1.Department of Geosciences, Graduate school of Science, Osaka City University, 2.Department of Geosciences, Faculty of Science, Osaka City University, 3.Natural Sciences Cluster - Science Unit, Kochi University, 4.The Museum of Nature and Human Activities, Hyogo

はじめに

断層運動に伴って、活断層の近傍に破碎が発達する。この破碎域に天水や地下水が浸入することによって、顕著に低い電気比抵抗（以降 比抵抗とよぶ）を示す領域が形成される場合がある。また、断層運動に伴って断層面に沿って発達する粘土層は、断層を横切る方向の地下水の流れを妨げる。そのために断層の片側だけに顕著な低比抵抗領域が形成される場合もある（e.g. Ritter *et al.*, 2005）。いずれの場合でも、活断層の地下には特徴的な比抵抗構造が存在することが期待され、活断層の地下構造を比抵抗分布から推定することが可能である（e.g. Unsworth *et al.*, 1997; Goto *et al.*, 1998, 2005; Yoshimura *et al.*, 2009; Yamaguchi *et al.*, 2010）。比抵抗分布から地下数km前の活断層の構造を知る法発としてaudio-frequency magnetotelluric法（AMT法）は強力な手法の一つである。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。

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、総延長120kmにおよぶ。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。

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、南東部では琵琶甲断層の1測線、17観測点でしか行われておらず、三木断層では行われていない。そのため南東部および山崎断層帯主部全体の地下構造を議論するには、三木断層の地下比抵抗構造探査が必要であると判断した。三木断層は、北西—南東方向に延びる走向傾斜N60°W、傾斜75°Eの活断層である（兵庫県, 1999）。

観測

三木断層のトレンチ調査（吉岡ほか, 2008）が行われた兵庫県小野市市場地点を中心として、三木断層と直交する長さ2.5kmの測線を設け、この測線上の12点でAMT法探査を行った。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25km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。

結果

得られたモデルには、2つの高比抵抗領域と2つの低比抵抗領域が認められた。前者は断層位置よりも北東側の深部と南西側に浅部に、後者は、断層近傍で、断層地表域よりもより北東側の浅部と南西側の深部に存在する。

表層部では、高比抵抗と低比抵抗領域との間には、ほぼ鉛直で明瞭な比抵抗境界がある。ここは産業技術総合研究所（2008）による三木断層の地表位置とほぼ対応する。

三木断層の北東側の100m以深では、北東方向に浅く傾斜するやや低比抵抗な領域が特徴的である。断層付近で行われたボーリング調査を参考に作成された地質断面図（産業技術研究所，2003）では、この低比抵抗領域の下面と対応するような逆断層の存在が推定されている。

本発表では、観測の概要・データ解析・モデル解析の結果を述べた後に、得られたモデルの解釈を行う。

キーワード：三木断層、山崎断層帯、活断層、比抵抗構造、地磁気地電流法

Keywords: Miki 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調査（2015年度）

A research report on the fundamental investigations of an electrical resistivity structure beneath Chugoku and Shikoku regions, southwestern Japan(2015)

*塩崎 一郎¹、畑岡 寛¹、野口 竜也¹、村上 英記²、大志万 直人³、飯尾 能久³

*Ichiro Shiozaki¹, Hiroshi Hataoka¹, Tatsuya Noguchi¹, Hideki Murakami², Naoto Oshiman³, Yoshihisa Iio³

1.鳥取大学大学院工学研究科、2.高知大学理学部、3.京都大学防災研究所

1.Graduate School of Engineering, Tottori University, 2.Faculty of Science, Kochi University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

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4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。

（1）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。

これと調和的な研究成果が測地学研究から示された。国土地理院GPS電子基準点データ解析により、鳥取・島根北部が南部に対して相対的に東に5mm/年で変位しており、歪みが集中しつつあることが判明し、この「ひずみ集中帯」と1943年鳥取地震、1983年鳥取県中部の地震、2000年鳥取県西部地震との関連が示唆された（西村（2015））。

しかしながら、先述の山陰地方の電気比抵抗研究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、塩崎他（2015））も示され、1943年鳥取地震の地震断層である鹿野・吉岡断層西方延長部の低比抵抗領域が空間的にどのように連続するのかを解明するための調査研究の重要性が示された。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。同時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、主に、鳥取県東部・中部の広域電磁気データを活用し、比抵抗構造の次元及び走向解析を行い、鹿野・吉岡断層及びその周辺域の電磁気学的構造の次元および走向方向の特徴の抽出を試みた。その解析結果を報告する。

（2）一方、四国地方においては、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し、それと中央部・西部では無地震域との明瞭な関連が示唆された。これは、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。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査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2014年度に開始した。本年度は四国地方中東部から中西部にかけて10地点を選び、2015年10月下旬から11月下旬にかけての約1ヶ月間、広帯域MT法観測を実施した。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、原則として地磁気3成分と電場2成分を測定した。南側の4地点で得られた見かけ比抵抗及び位相差の探査曲線の特徴は、周波数依存の傾向は共通することが

明らかになった。しかし、北側サイトでは、JR予讃電気鉄道からの漏洩電流により電場が乱されたため、深部構造を解析するためにはデータの質を改善する必要がある。また、インバリアントインピーダンスを用いた1次元構造解析から、これまでに四国地方で得られた上部地殻比抵抗構造と地震活動の対応関係と調和的であるという予察的研究成果を得た。

謝辞：本研究の観測では、東京大学地震研究所ならびに京都大学防災研究所共同研究により借用した機器を利用した。岩手県沢内村の参照磁場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。山陰地方データの再解析には2015年度鳥取県山陰海岸ジオパーク調査研究支援補助金事業の交付を受けた。また、四国地方の基盤的比抵抗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。また、鳥取大学工学部の宇都智史、清島裕貴、吉野空木、山本真二、池添保雄の各氏には観測をサポート頂いた。ここに謝意を表す。

キーワード：電気比抵抗、基盤的構造調査、中国・四国地方

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