

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 Kagiyama⁷

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

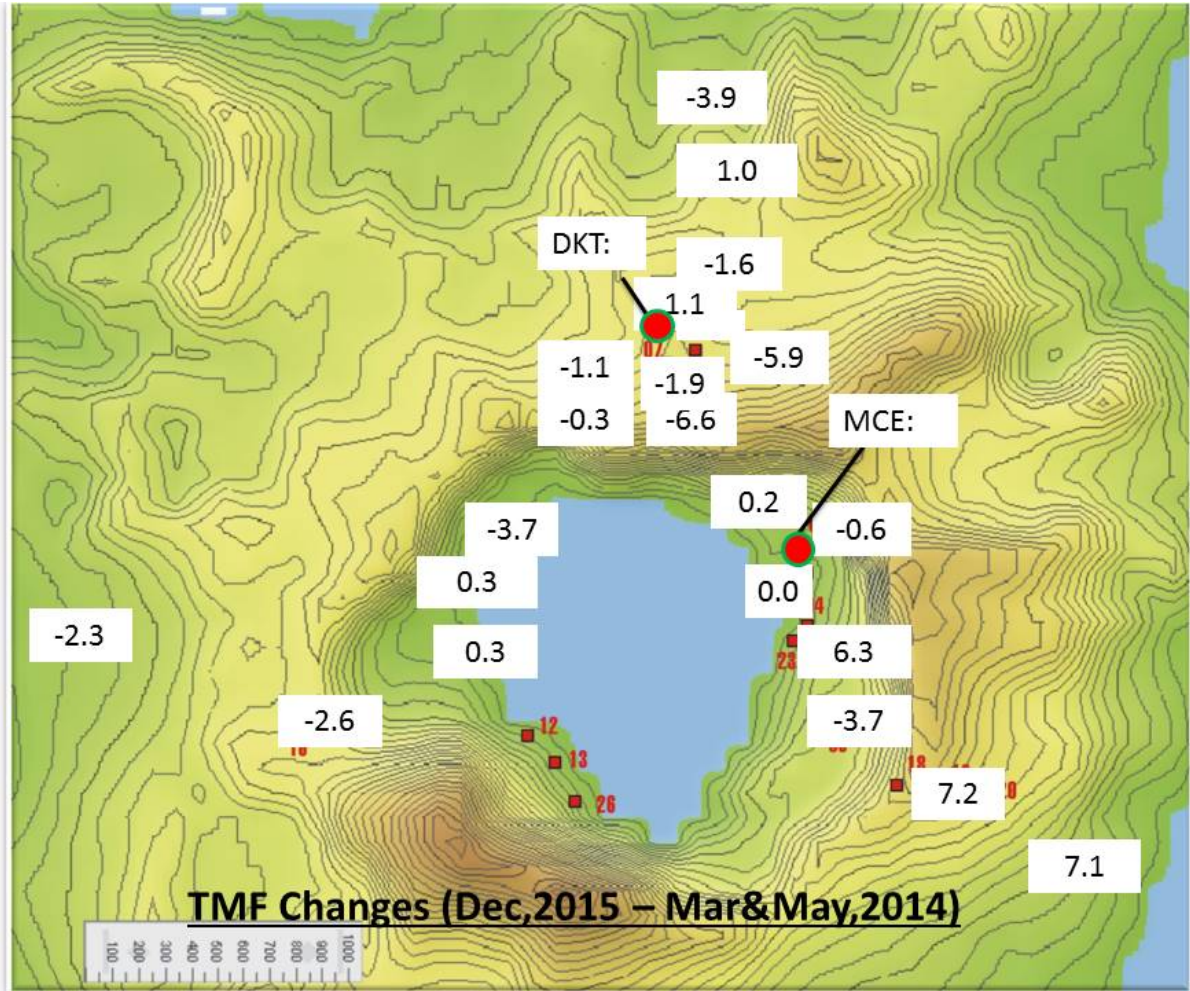
1.東海大学・海洋研究所・地震予知研究センター、2.フィリピン火山地震研究所、3.フランス国立科学研究センター、4.合衆国地質調査所

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