

導体地球の過渡応答: 理論及び観測ステップ応答の比較

Transient response of the conducting Earth: Comparison of the observed and theoretical step response

藤 浩明^{1*}, 浜野 洋三²

TOH, Hiroaki^{1*}, HAMANO, Yozo²

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻, ² 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

¹ Graduate School of Science, Kyoto Univ., ² IFREE, JAMSTEC

Transient response of the Earth in time domain is very useful to delineate electrical properties of our planet down to the lower mantle depths. Among many possible configurations of the external geomagnetic field, abrupt change in the dipole field of external origin (q_1^0) is of particular interest here because it can be actually created by variations of the magnetospheric ring current and is of significant strength in the sense that it is clearly observable. The step response, F_1^0 , of the conducting Earth for the dipole field, therefore, was examined in this study for a time range from a few hundred seconds through longer than 100 hours using vector geomagnetic time-series at the time of intense geomagnetic storms such as the Halloween storm event in 2003 observed simultaneously by ground geomagnetic observatories worldwide.

In general, the so-called impulse response of a physical system is given by time derivative of its step response. A well-known example of those responses is that the first derivative of the Heaviside's step function is equal to the Dirac's delta function. Time-series of observable quantity can be expressed by a convolution of the source and the impulse response from the time origin to an instant in concern. Thus, temporal variation of the poloidal geomagnetic field, $p_n^m(t)$, at the Earth's surface is also given by a convolution of source variation, $q_n^m(t)$, and the Earth's impulse response that conveys the electrical property of our planet. Here, n and m are the degree and the order of the spherical harmonic geomagnetic field, respectively. The convolution, however, can be evaluated more easily in frequency domain rather than time domain making use of FFT. The time derivative is also replaced by $i \times \omega$ in frequency domain, where ω is the angular frequency of the electromagnetic (EM) variation in concern. Temporal variation of the Earth's step response, $F_n^m(t)$, is then derived by inverse Fourier transform back into time domain.

In the present study, $F_1^0(t)$ was estimated using hourly or one-minute values of g_1^0 and q_1^0 coefficients obtained by spherical harmonic analyses of geomagnetic storms and using the relation: $p_1^0(t) = g_1^0(t) + q_1^0(t)/2$. The curve of $F_1^0(t)$ is basically an increasing function of time, which implies that the electrical conductivity of the Earth is also increasing with depth. However, $F_1^0(t)$ flattened significantly for the time range between some dozen minutes and hours indicating that there may exist a region of enhanced electrical conductivity at mantle transition zone depths. Preliminary model studies using Hamano's (2002) three-dimensional (3-D) time domain EM induction scheme yielded an estimate for the probable depth range of the enhanced electrical anomaly that was very localized around the 410km seismic discontinuity. If the localized depth estimate is true, the transient response of the conducting Earth has possibly captured the thin water filter atop the 410km discontinuity proposed by Bercovici and Karato (2003).

In this presentation, we will further examine the probable depth range for the electrical conductivity anomaly by comparing the observed step response with the theoretical step response of spherically symmetric and/or fully heterogeneous earths. A direct conversion method of the observed step response into the electrical conductivity profile based on an iterative uniform sphere approximation will be applied and compared with the model calculation as well. The effect of Sq noise on the observed step response will also be examined and argued.

大陸上部マントルの標準電気伝導度構造 オーストラリアのMTデータから A reference electrical conductivity model of continental upper mantle estimated from the MT data in central Australia

市來 雅啓^{1*}, 藤田 清士², Wang Liejun³, Whatman Jim³, Hitchman Adrian³
ICHIKI, Masahiro^{1*}, FUJI-TA, Kiyoshi², Liejun Wang³, Jim Whatman³, Adrian Hitchman³

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 大阪大学大学院工学研究科, ³ 豪州国立地球科学研究所

¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²Graduate School of Engineering, Osaka University, ³Geoscience Australia

To investigate the one-dimensional reference electrical conductivity profile beneath continents, we conducted a magnetotelluric (MT) observation with long dipole span near Alice Springs, central Australia. We utilized geomagnetic data acquired at the Alice Springs geomagnetic observatory operated by Geoscience Australia. Using the BIRRP processing code (Chave and Thomson, 2004), we estimated the MT response functions for periods from 100 to 10 to 5 sec. The phase tensor analysis revealed that the shallower upper mantle (up to several thousand seconds in period) is two-dimensional, while the deeper upper mantle is three-dimensional. We focused the two-dimensional part, from which we can extract one-dimensional model. The pioneering work demonstrated by Agarwal et al.(1993) suggests that we should use Berdichevsky average, determinant or TE-mode response to model one-dimensional conductivity structure in two-dimensional environments. From the view point of galvanic distortion in regional two-dimensional structures supposed that Groom-Bailey decomposition would be performed, Berdichevsky average response involves phase mixing as well as static shift, while determinant and TE-mode responses involve only static shift. Adopting Faraday's law, we can correct static shift of TE-mode using geomagnetic transfer function (Ledo et al.,2002), while such a procedure for correcting static shift of determinant responses has not yet been developed. Following the procedure of Ledo et al.(2002), we estimated TE-mode responses with static-shift free. We inverted the TE-mode MT responses into a one-dimensional conductivity profile using Occam inversion (Constable et al.,1987), and plan to compare the one-dimensional structure with electrical conductivity profiles predicted from compositional models of the earth's upper mantle by calculating phase diagrams in the CFMAS (CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂) system.

スタグナントスラブの3次元電気伝導度構造

The three-dimensional conductivity structure of the stagnant slab: preliminary result

多田 訓子^{1*}, 馬場 聖至², 歌田 久司²

TADA, Noriko^{1*}, BABA, Kiyoshi², UTADA, Hisashi²

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学地震研究所

¹JAMSTEC, ²ERI, University of Tokyo

We performed a three-year-long seafloor electromagnetic (EM) survey in the Philippine Sea, including the western edge of the Pacific Ocean, to image electrical features of a deep mantle slab and the surrounding mantle in three-dimensions (3-D). The project iterated one-year-long deployment of ocean bottom electromagnetometers (OBEMs), involving a total of 37 instruments installed at 18 sites. The data obtained have been analyzed in the order of their recovery based on a magnetotelluric (MT) method.

In this study, we attempt to obtain a 3-D electrical conductivity model from the observed data. The seafloor topography is known to significantly affect the EM response functions obtained by OBEMs. We assume that the distorted EM fields are separated into long-wavelength (more than a few tens of km) and short-wavelength (less than a few tens of km) components, and propose their separate treatment: The long-wavelength parts are incorporated into a newly developed 3-D inversion code (Tada et al., submitted), and effects of the short-wavelength topographies are corrected with other 3-D forward code (e.g. FS3D; Baba and Seama, 2002).

From a preliminary 3-D electrical conductivity model, we find three significant features so far. (1) The conductivity of the Pacific Plate is much lower than that of the Philippine Sea Plate in the top of the upper mantle. (2) The difference of conductivity between the Pacific Plate and the Philippine Sea Plate becomes small at the depth of 200km. (3) The conductivity beneath the central Mariana Trough is lower than that of surrounding area at the depth of somewhere between 100 and 200 km. We will explain more detail about the 3-D result and discuss it in the presentation.

キーワード: スタグナントスラブ, 3次元電気伝導度構造, 海底 MT 法, インバージョン

Keywords: Stagnant slab, 3-D conductivity structure, Marine MT method, Inversion

3D Magnetotelluric imaging of the Marmara Sea and westward extension of the North Anatolian Fault 3D Magnetotelluric imaging of the Marmara Sea and westward extension of the North Anatolian Fault

Tulay Kaya^{1*}, Yasuo Ogawa¹, Bulent Tank², Takafumi Kasaya³, M. Kemal Tuncer⁴, Yoshimori Honkura¹, Naoto Oshiman⁵, Masaki Matsushima¹

KAYA, Tulay^{1*}, OGAWA, Yasuo¹, TANK, Bulent², KASAYA, Takafumi³, M. Kemal Tuncer⁴, HONKURA, Yoshimori¹, OSHIMAN, Naoto⁵, MATSUSHIMA, Masaki¹

¹Tokyo Institute of Technology, ²Bogazici University, ³JAMSTEC, ⁴Istanbul University, ⁵Kyoto University

¹Tokyo Institute of Technology, ²Bogazici University, ³JAMSTEC, ⁴Istanbul University, ⁵Kyoto University

Turkey is seismically very active country that has hosted large destructive earthquakes throughout the history. The sources of these devastating events are two main fault zones which are the North and East Anatolian Fault Zones. The last two demonstrative earthquakes on the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) occurred at the eastern edge of the Marmara Sea, confirming migration of big events from east to west on this transform fault. In view of there is a seismic gap in the Marmara Sea and seismic energy accumulation increases day by day at its eastern edge, occurrence of the next destructive earthquake in the Marmara is inevitable. Seismic, geodetic and other studies showed complexity of the structure suggesting various estimates about the extension of the NAFZ through the Marmara Sea. In this study, we benefit from the high depth resolution of the Magnetotelluric (MT) method to resolve the electrical resistivity structure beneath the Marmara Sea and disclose its relation with the geologic structure. In order to investigate extension of the NAFZ beneath the Marmara Sea we deployed long period ocean bottom electromagnetic data at 16 sites which form 4 profiles perpendicular to the possible traces of the NAFZ. Variation of the geoelectric strikes from east to west shows different oriented faults in the Marmara Sea and points out necessity of 3D modeling in this region. The highly conductive anomaly in electrical resistivity models extends from crustal depths to the lithosphere and merges with the melted mantle material at the eastern part of the Marmara Sea. This conductive anomaly is surrounded by relatively resistive anomalies which imply continuation of the fault structure from land to the Marmara Sea. Our results clear the location of the highly conductive and resistive anomalies that has crucial implications in two aspects; conductive anomaly may trigger the micro-seismic activity and resistive anomalies may act as asperity zones where stress accumulation results in large earthquakes.

キーワード: Ocean Bottom Electromagnetics (OBEM), North Anatolian Fault Zone (NAFZ), Magnetotellurics (MT), Marmara Sea, Resistivity / Conductivity, Fluid-controlled seismicity

Keywords: Ocean Bottom Electromagnetics (OBEM), North Anatolian Fault Zone (NAFZ), Magnetotellurics (MT), Marmara Sea, Resistivity / Conductivity, Fluid-controlled seismicity

MT法およびAMT法から推定される新潟県中越地域の地震基盤までの厚い堆積構造 Thick sedimentary layers above the seismic basement in the Chuetsu area, Central Japan, inferred from MT and AMT surveys

高倉 伸一^{1*}, 吉見 雅行¹, 堀川 晴央¹, 手島 稔²

TAKAKURA, Shinichi^{1*}, YOSHIMI, Masayuki¹, HORIKAWA, Haruo¹, Minoru Teshima²

¹産総研, ²日鉄鉱コンサルタント

¹AIST, ²NMC

我々は新第三系堆積層が厚く堆積し、長周期地震動を原因とする被害がたびたび起こる新潟県中越地域において、MT法およびAMT法電磁探査を実施した。当該地域を含む新潟堆積盆地では、地質データや地震探査データを用いて地下構造モデルの構築が進められている。電磁探査の目的は、地表から地震基盤までの比抵抗構造を求め、従来の方法と異なるアプローチによって地下構造モデルの検証を行うことにある。地質構造の走向を横切る北西 - 南東方向の測線に沿って、MT法データは34点で、AMT法データは91点で取得された。当該地域はノイズレベルが高いため、S/N比の高いMT法データを取得するのは困難と予想された。そこで、強い自然信号が生じたときにデータが取得できるように、最大16台の測定器を使いリモートリファレンス方式による長時間測定を多測点で同時に行った。また、データ処理では、信号強度の強い時間帯を選び、S/N比の高いデータを編集し、データの品質の向上を目指した。その結果、比抵抗構造の定量解析に使用できるMTパラメータを得ることができた。測線に沿って2次元解析を適用し、AMT法データからは深度約1.5kmまでの詳細な比抵抗断面を、MT法データからは深度約15kmまでの深部比抵抗断面を求めた。それらの比抵抗断面を地質データや坑井データを用いて解釈するとともに、既往の広域地下構造モデルと比較した。MT法から求めた高比抵抗基盤は地震基盤と考えられる基盤岩類と整合的であり、信頼性の高い比抵抗断面が得られたと判断できた。また、低比抵抗帯は西山層、椎谷層、上部寺泊層、下部寺泊層からなる新第三系堆積層に対応し、それらは背斜部では浅く薄く、向斜部では深く厚くなっている。最も低比抵抗な部分は主に上部および下部寺泊層に対応する。地表付近の高比抵抗層は火山岩類や第四系堆積岩類と対応し、詳細な比抵抗断面から背斜構造や向斜構造の位置や規模が推定される。

本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構の新潟工科大学敷地内における深部地震動観測システムプロジェクトの一環である「柏崎深部地震動観測サイト周辺の広域地下構造調査」の一部として実施した。

キーワード: MT法, AMT法, 比抵抗構造, 新第三系堆積層, 地震基盤, 地下構造モデル

Keywords: MT, AMT, resistivity structure, Neogene sedimentary layer, seismic basement, subsurface structure model

SQUID 磁力計の高感度地磁気計測への応用の提案と実用化の検討

A proposal and a feasibility study of highly sensitive geo-electromagnetic field measurements using SQUID magnetometers

河合 淳^{1*}, 宮本 政和¹, 小山 大介¹, 河端 美樹¹, 足立 善昭¹, 樋口 正法¹, 上原 弦¹, 尾形 久直¹

KAWAI, Jun^{1*}, MIYAMOTO Masakazu¹, OYAMA Daisuke¹, KAWABATA Miki¹, ADACHI Yoshiaki¹, HIGUCHI Masanori¹, UEHARA Gen¹, OGATA Hisanao¹

¹ 金沢工業大学先端電子技術応用研究所

¹ Applied Electronics Laboratory, Kanazawa Institute of Technology

超伝導量子干渉素子 (SQUID) は高感度な磁気センサとして知られ、一般的な検出周波数帯域は DC から数 10kHz であり、ノイズ密度は 10^{-15} T/ Hz (fT/ Hz) のオーダーである。これは従来のフラックスゲート磁力計やプロトン磁力計に比べ 1000 倍程度高感度である。この SQUID を用いた高感度な地磁気計測システムを、地殻活動に伴う電磁気現象の研究に役立てることはできないだろうか？

実は国内における SQUID による地磁気計測は過去にも試みられており、古くは Kitamura による報告がある。(1978) 残念ながら当時の技術では野外における SQUID の安定動作の維持が難しく、実験的なものに終わっていたが、SQUID の野外計測応用に向けた課題等が示された。その後、地震や噴火といった地殻変動に起因する電磁気現象が示唆されるようになり、液体窒素で動作する高温超伝導 SQUID を用いて地震や火山活動に関する電磁波を検出しようという試みがなされた。(Kamata 2000, Kasai 2001, Nomura 2002, Machitani 2003) しかしながら、環境ノイズによる影響への対策や SQUID 動作の長期安定性の検証など、短期間の実験で SQUID の有効性が示されたとは言いがたい。他方、近年海外では、廃坑を利用した研究施設 (フランス: LSBB) において SQUID による長期の低周波磁気計測が行われており、地震波に励起された 100pT から 1nT 程度の電磁信号を検出したとの報告もある。(Waystand 2009)

当研究所では液体ヘリウムで動作する低温 SQUID を利用して、ヒトの脳から発生する微弱な磁気を計測する脳磁計 (MEG: Magnetoencephalogram) システムを開発し、実用化を進めてきた。そこで構築した技術をもとに、改めて地磁気や地殻活動に伴う電磁気現象の定点観測に向けた高感度計測ツールとしての SQUID システムを提案し、長期連続運用を通じてその有効性を検証したいと考えている。今回そのための第一次 SQUID 計測システムを試作したので、その特性を報告するとともに、今後の予定を紹介する。

今回試作した計測システムは、XYZ の 3 成分を検出する SQUID、SQUID を冷却する液体ヘリウム容器 (クライオスタット)、SQUID をドライブする電子回路 (FLL: Flux Locked Loop)、増幅回路、フィルタで構成されている。システムノイズは 100Hz で約 15fT/ Hz、0.01Hz で約 2pT/ Hz であり、低周波でのノイズは電子回路の温度ドリフトが支配的である。高周波ノイズの影響を低減するために SQUID チップの周りには電磁シールドを施し、フィルタと組み合わせた総合的な周波数帯域を 500Hz 程度に制限した。また、地磁気の日変動を考慮して、検出可能な最大磁場を ± 150 nT に設定した。クライオスタットの容量は約 30L で、1ヶ月間の連続運用が可能である。データ収録には市販の 16bit のデータロガーを用い、サンプリングは最大 1kHz である。また、GPS による時刻校正を行う。まずは、この試作システムを当研究所敷地内の地中約 1m に設置し、長期間の連続計測を行いながら野外計測における課題や問題点を確認し、実用性の検証を行う予定である。

発表者は地球物理の専門家ではない。従って本発表を通じて、SQUID を用いた高感度地磁気計測の科学的意義の有無も含め、実用化への課題や問題点など専門家諸氏の厳しい意見を賜ることができれば幸いである。

本研究の一部は、公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金により行われた。

キーワード: スクイッド, 地球電磁気, 高感度計測, 超伝導

Keywords: SQUID, geo-electromagnetic fields, highly sensitive measurements, superconductivity

2011年東北地方太平洋沖地震後に生じた電離圏変動起因の地磁気変動 Geomagnetic variation associated with seismogenic ionospheric disturbance

望月 香織^{1*}, 鴨川 仁¹, 柿並 義宏², 織原 義明³, 湯元 清文⁴, 茂木 透², 服部 克巳⁵

MOCHIZUKI, Kaori^{1*}, KAMOGAWA, Masashi¹, KAKINAMI, Yoshihiro², ORIHARA, Yoshiaki³, YUMOTO, Kiyohumi⁴, MOGI, Toru², HATTORI, Katsumi⁵

¹ 東京学芸大学物理学科, 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 東海大学地震予知研究センター, ⁴ 九州大学 宙空環境研究センター, ⁵ 千葉大学大学院理学研究科

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ., ²Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, ³Earthquake Prediction Reserch Center, Tokai University, ⁴Space Environment Research Center, Kyushu University, ⁵Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では津波のみならず地震波および津波起源の電離圏変動 (Kakinami et al., submitted to Geophys. Res. Lett., 2012) が生じた。本研究では、これらの電離圏変動が日本全国の地磁気データにどのように影響を与えたか述べる。Utada ら (EPSL, 2011) によれば津波による海流内電流起因の地磁気変動が、大きく生じていたことが報告されている。しかし、変動の中には、前述の電離圏変動起因とみられる変動がみられた。震央から南領域 (600km 以内) については、津波起因の音波および重力波が電離圏 E 領域に伝搬し電離圏ダイナモにより地磁気変動を生じさせていると推察される。一方、北領域については、変動が見られるものの現時点で明瞭なメカニズムは与えられていない。

キーワード: 地震, 地磁気変動, 電離圏擾乱

Keywords: Earthquake, Geomagnetic variation, Ionospheric disturbance

ボアホール観測による地震時の鉛直電場の特徴

Characteristics of vertical electric fields derived from borehole measurements in association with an earthquake

本蔵 義守^{1*}, 松本 拓己², 松島 政貴³, 小川 康雄¹

HONKURA, Yoshimori^{1*}, MATSUMOTO, Takumi², MATSUSHIMA, Masaki³, OGAWA, Yasuo¹

¹ 東京工業大学火山流体研究センター, ² 防災科学技術研究所, ³ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹ Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, ² National Institute for Earth Science and Disaster Prevention,

³ Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

We have shown many examples of electric fields associated with natural and artificial earthquakes, but they are all horizontal components and no information has been derived for the vertical component. In theoretical arguments, the vertical electric field should vanish at the surface of the Earth and hence surface measurements are unlikely to be significant. We therefore attempted to measure vertical electric fields using a borehole casing pipe as an electrode with a surface coil surrounding the borehole at the Earth's surface. In fact, Takahashi and Fujinawa established such a measurement system for two boreholes in the Boso peninsula and we used this system for our measurements. At one site, the borehole length is 803 m and at the other site it is 106 m. Both sites are equipped with electrodes at the surface for measurements of two horizontal components of electric field. The electrode span ranges from 9 m to 36 m. Both sites are located in electrically noisy environments and precise measurements of electric field turned out to be almost impossible. Nonetheless, fairly clear signals could be observed for the main ground motion of an earthquake of magnitude 7.0 which occurred in the vicinity of Torishima on January 1, 2012. In the deep borehole case, the magnitude of vertical electric field is half of that of horizontal electric field, whereas in the shallow case the vertical electric field is one order of magnitude smaller than the horizontal electric field. This is quite understandable in view of the expectation that the vertical electric field should be smaller and smaller towards the surface of the Earth. This result indicates that seismic dynamo effect signals can be detected by borehole measurements. The theory of seismic dynamo effect predicts that the resonance between the seismic velocity and ions motion in groundwater at depth should occur at the cyclotron frequency corresponding to the total magnetic field. This should be verified through the transfer function of electric field to seismic velocity. We finally point out that clearer electric-field signals would be observed if measurements are made at the bottom of deep borehole and the detection of seismic wave there in terms of electric field would become possible well before the arrival of seismic wave at the surface of the Earth.

キーワード: 地震ダイナモ効果, 電場, 地震波, ボアホール

Keywords: seismic dynamo effect, electric field, seismic wave, borehole

自然電位分布の透水係数による影響：数値計算と実データへの適用例 Effects of permeability on Self Potential: numerical experiment and application to a real data

尾崎 裕介^{1*}, 三ヶ田 均¹, 後藤 忠徳¹, 武川 順一¹, 辻村 真貴², Fatma HACHANI²

OZAKI, Yusuke^{1*}, MIKADA, Hitoshi¹, GOTO, Tada-nori¹, TAKEKAWA, Junichi¹, TSUJIMURA, Maki², Fatma HACHANI²

¹ 京大院工, ² 筑波大学大学院生命環境科学研究科

¹Kyoto Univ. Grad. School of Eng., ²Graduate School of Life and Environmenta

本研究では、透水係数の自然電位分布への影響の評価と、自然電位分布から透水構造が推定可能であるかの検討を行う。自然電位とは、自然に発生している電位であり、地下水流動が主な発生原因である。自然電位分布は、電気伝導度・流動電位係数・透水係数に影響される事が知られているが、地下水流動に重要なパラメータである透水係数の自然電位分布への影響はあまり評価されていない。そこで、本研究では水頭分布から自然電位分布を計算する数値シミュレーターを新たに開発し、透水係数の自然電位分布への評価を行った。

数値シミュレーションは、均質な斜面に降雨によって地下水流動を発生させるモデルと、透水性に不均質構造を配置し水頭を標高と同じ位置に設定して地下水流動を発生させたモデルの双方に対して実施した。降雨条件でのシミュレーション結果により、発生する自然電位の大きさは地下水面の標高の変化量と比例関係にあり、地表から地下水面までの深さとは関係性が薄いことが分かった。また、発生する自然電位分布の大きさは斜面全域の透水性や降雨量が支配的なパラメータであることが明らかになった。不均質な透水構造を配置した場合のシミュレーションでは、地表面での自然電位分布に不均質構造両端の境界直上にピークを持つ自然電位異常が発生することが確認された。不均質構造による自然電位異常は不均質構造周辺の地下水流動パターンを反映しており、特に高透水性の不均質構造がある場合には低透水性の不均質構造よりも大きな自然電位異常を発生させることが分かった。

次に実際に愛媛県西条市で取得した自然電位分布のシミュレーションも行った。取得した自然電位分布に対しては、透水構造が均質で電気伝導度と流動電位係数に不均質構造を与えたモデルと、透水係数・流動電位係数・電気伝導度の全てに不均質構造を配置した2つのモデルの双方ともが、その分布特徴を説明可能であった。一方で、地下水流動のシミュレーション結果での涵養域と湧水域と、実際に観測結果を比較したところ、透水性に不均質構造を配置したモデルでは両者がよく一致した。この結果より、透水性に不均質構造が存在するモデルの方が実際の地下水流動と自然電位分布を説明する妥当なモデルであると考えられる。このように、自然電位分布の解釈においては透水構造を加味することが重要であることが示唆された。また、地下水流動と自然電位分布の情報を組み合わせることで地下透水構造が推定できることが今後期待できる。

キーワード: 自然電位, シミュレーション, 透水係数, 地下水流動

Keywords: Self Potential, Simulation, Permeability, Groundwater Flow

三宅島 2000 年噴火前後の自然電位分布変化について On temporal variation of SP spatial distribution on Miyakejima Island before and after the 2000 summit eruption

上嶋 誠^{1*}, 長谷 英彰¹, 相澤 広記¹, 小山 崇夫¹, 西田 泰典², 三宅島火山電磁気研究グループ¹

UYESHIMA, Makoto^{1*}, HASE, Hideaki¹, AIZAWA, Koki¹, KOYAMA, Takao¹, Yasunori Nishida², Research Group of Geoelectromagnetism on Miyakejima Volcanic Island¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 北海道大学

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²Hokkaido University

三宅島 2000 年噴火前の 1991, 1995, 1996 年には, 三宅島全島での自然電位マッピングが行われ, 顕著な W 型自然電位異常が安定して存在していたことが確認された (Sasai et al., 1997). 海岸線付近の電位を 0mV とし, 高度を上げるに従って, 標高約 500m 程度のところで -500 ~ -600mV に落ち込み, さらに (現在はカルデラとなっている) 雄山山頂へ向かうと 0 ~ 100mV に上昇した. Sasai et al. (1997) では, この W 型自然電位異常は, 地下水の斜面に沿う水流と山頂での噴気活動を伴う熱水対流による上昇流との重ね合わせで説明できると議論したが, Ishido (2004) では, 変質帯ないしは熱水帯の低比抵抗帯が山体内下部の高電位を持ち上げる効果を考慮する必要性を指摘した.

三宅島では, 1997 年から 2000 年の全島避難の期間まで, 島内通信回線を用いた長基線地電位差観測を実施していた. その中で, 海岸線近くの大露池 (アカコッコ館) を基準として標高約 400m の村営牧場の電位を連続的にモニターしていた. Sasai et al. (2002) で紹介されているように, 村営牧場観測点は上記の W 型異常を反映して, 噴火前はほぼ -400mV の電位を維持していた. その負の電位は, 2000 年 6 月末の最初のマグマ貫入, 7 月 8 日のカルデラ形成, さらにその後引き続いて起こった数回の山頂噴火でも大きな変化は無く, 8 月 18 日の大噴火の時に約 2 時間で 150mV 上昇し, -250mV になり, その電位レベルは, 観測が途絶える 9 月まで維持されていた.

この電位変化の確からしさを検証するため, 2001 年 8 月, 2005 年 3 月, 2011 年 9 月に島南南西部の富賀神社からカルデラ壁 (気象庁火口カメラ) に至る南測線, 2005 年 3 月, 2005 年 12 月に島北部の下根崎からカルデラ壁 (すおう穴) に至る北測線でそれぞれ自然電位マッピングを行った. その結果, 南北測線とも標高 300 ~ 600m に至る負異常の極値をとっていたところで電位の上昇が認められ, 上記の長基線観測の変化が実証されたほか, 現在に至ってもその自然電位分布の変化が継続していることが明らかとなった. これは, 大局的な熱水対流系の変化か比抵抗構造の変化が噴火後 10 年余りたっても継続していることを示唆する.

キーワード: 三宅島, 2000 年噴火, 自然電位, 熱水活動, 比抵抗

Keywords: miyakejima, 2000 summit eruption, self potential, hydrothermal activity, resistivity

空隙スケールシミュレーションで得られた多孔質地質媒体中の定常電流のローカルフラックスの統計的性質 Statistics of the Local Electric Currents in Porous Geo-Materials Obtained by Pore-Scale Computer Simulations

中島 善人^{1*}, 中野 司¹

NAKASHIMA, Yoshito^{1*}, NAKANO, Tsukasa¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST (GSJ)

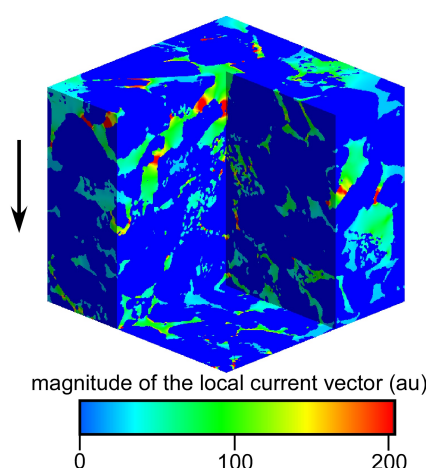
電気探査・電磁気探査は、地層中に流れる電気を計測する物理探査法であるが、電導性流体にみたされた多孔質地質媒体の複雑な形状をした空隙中をどのように電流が流れているかについては不明な点が多い。そこで、X線CTで得た絶縁体固体試料の空隙スケールの3次元デジタル画像の空隙部分に定常電流を流す数値シミュレーションを行った(Refs 1, 2)。一例を図に示す(ペレア砂岩画像、0.64mm x 0.64mm x 0.64mm、固体部分は濃紺、黒い矢印方向に巨視的な電位勾配を与えた)。局所的な電流ベクトルの統計をとった結果、以下のことがわかった。(i) 局所的な電流ベクトルの大きさは、対数正規分布に従う。隘路から空隙サイズの大きな部分に流れ込んだ時の電流の幾何学的拡大、および空隙ネットワークの分岐・合流点における電流の混合が対数正規分布の原因である。(ii) 「空隙は、電流値の大きい部分と小さい部分(よどみ領域)の2つに分類できる」という伝統的なコンセプトは、このシミュレーションで確認できた。しかし、対数正規分布はユニモーダルなので、両者を客観的な閾値で分離するのは困難である。(iii) 巨視的な電位勾配の逆方向に流れる電流も見つかったが、統計的には数が少ないので、系全体の電荷移動の視点では無視できる存在である。同様に、電流値の大きい空隙(対数正規分布の long tail 部分に相当)も数が少ないので、結局、系全体の電荷移動を主に担っているのは、電流値は低いものの画素数が非常に多いよどみ領域である。なお、本研究の一部は科研費基盤研究A(No. 23241012)の助成を受けている。

参考文献:

[1] Y. Nakashima and T. Nakano (2012) Transport in Porous Media (in review)

[2] Y. Nakashima and T. Nakano (2011) Journal of Applied Geophysics. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.021>

キーワード: フォーメーションファクター, アーチーの法則, 電気伝導度, 空隙スケールシミュレーション, 拡散, X線CT
Keywords: formation factor, Archie's law, electric conductivity, pore-scale simulation, diffusion, x-ray microtomography



広帯域 MT 探査による富士山の比抵抗構造 (序報)

Resistivity structure around the focal area of M6.4 earthquake beneath Mt. Fuji volcano

相澤 広記^{1*}, 山谷 祐介¹, 上嶋 誠¹, 長谷 英彰¹

AIZAWA, Koki^{1*}, YAMAYA, Yusuke¹, UYESHIMA, Makoto¹, HASE, Hideaki¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

2011年3月15日に富士山直下でM6.4の地震が発生した。発生時期から東北太平洋沖地震に誘発された地震であると考えられる。本発表ではこの富士山直下地震震源域を中心として展開した広帯域MT探査による比抵抗構造を報告する予定である。この調査に先立つ2009年には70点の稠密AMT観測により富士山浅部(深さ2kmまで)の比抵抗構造が推定されており、富士山直下地震の浅部延長は周辺よりやや低比抵抗領域であることが明らかになっている(相澤他2011年, 連合大会)。今回の広帯域MT調査の狙いは、この浅部低比抵抗領域が震源域と連続しているかを明らかにし、誘発地震のメカニズムを推定することである。

広帯域MT調査は2011年6月から12月までMetronix社のADU07システムを用いて行った。富士山は直流電車で囲まれ劣悪なノイズ環境のため、1観測点あたり1ヵ月間データを取得し、夜間のレスポンスをスタックすることにより10kHzから1000秒までの周波数応答を求めた。観測点数は25点であり、そのうち20点は2009年度のAMT観測と測定場所を共通としてある。このため2009年度と2011年度の浅部比抵抗構造の変化についても報告する予定である。

フィリピン・タール火山の比抵抗構造 -周辺の海の構造の評価- Resistivity imaging by magnetotelluric method on Taal volcano, Philippines -Evaluation of the sea effect-

山谷 祐介^{1*}, 笹井 洋一², 竹内 昭洋², 茂木 透³, アラニス ポール², 橋本 武志³, 長尾 年恭²

YAMAYA, Yusuke^{1*}, SASAI, Yoichi², TAKEUCHI, Akihiro², MOGI, Toru³, Paul Alanis², HASHIMOTO, Takeshi³, NAGAO, Toshiyasu²

¹ 東京大学地震研究所, ² 東海大学海洋研究所地震予知研究センター, ³ 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

¹ERI, Univ. Tokyo, ²EPRC, IORD, Tokai Univ., ³ISV, Fac. Sci., Hokkaido Univ.

Taal volcano, located in the Taal caldera lake, the southern part of the Luzon Island, is one of the most active volcanoes in Philippines. We conducted a magnetotelluric resistivity survey to clarify the distribution of ground water and magma reservoir beneath the volcano. AMT and wideband MT data were measured along two lines, which were crossing the main crater lake (MCL) at the center of the volcano island, and the southwestern flank. The impedance tensor and induction vector were calculated from the time series data. Prior to a 2-D analysis, the phase tensor analysis suspected the electromagnetic strike direction in the study area as N35E, which is approximately perpendicular to our survey lines. Here, during the 2-D analysis, it is required to consider the sea effect to the MT data because the study area is surrounded by the ocean, being about 15 km distant from there. The measured induction vectors pointing toward the ocean are obviously affected by the seawater. The 3-D forward model assuming a simplified bathymetry with 0.3 ohm-m seawater evaluated this effect. The calculated induction vectors explained well the observed ones at a frequency band below 0.01 Hz, reflecting the sea effect. However, this effect to the impedance above 0.3 Hz was not so large as to give critical artifacts to a resistivity structure suspected by a 2-D analysis. Therefore, the apparent resistivity and impedance phase above 0.3 Hz were inverted to resistivity sections, by using the 2-D resistivity inversion scheme developed by Ogawa and Uchida (1996). The 2-D bathymetry was fixed during the inversion. The inverted resistivity section across the MCL indicates a relatively resistive body (30-100 ohm-m) at 1-3 km (b.s.l.) surrounded by conductive layer. Since this feature is common to the other resistivity section, the conductor can shape a kind of the shell spherically covering the resistive body. This resistive body can be interpreted as a volcanic gas reservoir or intruded rocks during past eruptions. The saturation of lake water and alteration due to volcanic fluid and heat can generate a surrounding conductor.

キーワード: 火山, タール, マグネトテルリック, 比抵抗構造

Keywords: volcano, Taal, magnetotelluric, resistivity structure

山崎断層系安富断層・暮坂峠断層の地下比抵抗構造の研究(2)

Audio-frequency magnetotelluric surveys across the Yasutomi and Kuresaka-touge faults (2)

窪田 高宏^{1*}, 山口 覚¹, 上田 哲士², 村上 英記³, 加藤 茂弘⁴, 三島 稔明¹, 南 雄一郎¹

KUBOTA, Takahiro^{1*}, YAMAGUCHI, Satoru¹, UEDA, Satoshi², MURAKAMI, Hideki³, KATO, Shigehiro⁴, MISHIMA, Toshiaki¹, MINAMI, Yuichiro¹

¹ 大阪市立大学大学院理学研究科, ² 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ³ 高知大学理学部, ⁴ 兵庫県立人と自然の博物館・環境評価研究部

¹ Graduate School of Sci., Osaka City Univ, ² JOGMEC, ³ Faculty of Science, Kochi Univ, ⁴ Division of Natural History, Hyogo Museum of Nature and Human Activities

はじめに

山崎断層系は、北西-南東走向の左横ずれ断層である大原・土万・安富・暮坂峠断層の北西部活断層群と、北西-南東走向の左横ずれ断層である琵琶甲・三木断層および北東-南西走向の右横ずれ断層である草谷断層からなる南東部活断層群から構成され、総延長は90km近い。那岐山断層帯は、大原断層の西側に連なる、那岐山南麓と津山盆地の段丘・丘陵地を区切る北側隆起の逆断層帯である。走向はほぼ東西で、総延長は約32kmに及ぶ。

地震調査研究推進本部(2003)は、山崎断層帯を那岐山断層帯、山崎断層帯主部(大原断層-三木断層)、草谷断層の3つの起震断層に区分し、さらに主部を最新活動時期の相違に基づき北西部と南東部に区分して長期評価を行っている。それによると、今後30年以内の地震発生確率は、那岐山断層帯で0.07-0.1%、山崎断層帯主部の北西部で0.06-0.8%、同南東部で0.03-5%、草谷断層ではほぼ0%であり、山崎断層帯主部の南東部は「我が国の主な活断層の中ではやや高いグループ」に属し、那岐山断層帯と山崎断層帯主部の北西部は「我が国の主な活断層の中では高いグループ」に属する。

我々は、2009年~2011年に安富断層と暮坂峠断層の地下構造を明らかにするためにこれら断層を南北に横切る3つの測線でAMT探査(Audio-Frequency magnetotelluric survey)を行った。本発表ではこのうち東と西の二つの測線(東側線, 西側線)の結果について報告する。

観測

東側線では、2010年に8点で観測を行い、2011年に安富断層、暮坂峠断層の地表トレース付近の4点で追加観測を行った。西側線では、上田らが2009年に安富断層の北側で6点、暮坂峠断層の南側で5点の観測を行っている(Ueda et al., 2010)。2011年に同じ測線上で、両断層に挟まれた地域の2地点で、追加観測を行った。また、いずれの観測点でもRemote reference解析(Gamble et al., 1979)を可能にするために、東側線の中央から北東に約20kmの所に参照磁場点を設け、並行して観測を行った。

解析

解析ソフトウェアパッケージ(SSMT2000)を用いて、幅広い周波数帯域(10,400Hz~0.35Hz)のMT応答関数を算出した。この中で信頼性が高いと判断した周波数のMT応答関数のみを以降の解析に用いた。比抵抗構造の次元とその走向をPhase Tensor法(Caldwell et al., 2004)で判定した。東側線と西側線における比抵抗構造の走向方向はそれぞれN60W-S60E, 東西と求まった。

東側線の疑似断面

見かけ比抵抗は安富断層より南側は全般的に低比抵抗値(<100 m)を、北側は全般的に高比抵抗値(>1000 m)となっている。ただし、TEモードの暮坂峠断層直下と暮坂峠断層の南側約3kmの500Hz以下の周波数帯ではやや高い比抵抗値を示す。

また、位相差は全般的に低位相値(30°-40°)を示しているが、安富断層直下の100-1000Hzでは45°程度の値を示している。

西側線の疑似断面

見かけ比抵抗は安富断層より北は全般的に低比抵抗値(<100 m)を、安富断層より南の1000Hz以上の周波数帯では低比抵抗(<100 m)、それ以下の周波数帯では、高比抵抗(>1000 m)となっている。ただし、TEモードでは高比抵抗な部分は2つに分かれている。

また、位相差は安富断層の南側では全般的に低位相(30°-40°)、北側では全般的に高位相値(50°-60°)である。ただし、TEモードの安富断層の南側の100Hz以下の周波数帯域は高位相値(50°-60°)である。

本講演では断層を横切る東側線、西側線の地下比抵抗構造モデルも示す予定である。

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SEM22-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 15:30-16:45

キーワード: 電気伝導度構造, 活断層, 地磁気地電流法
Keywords: conductivity, active fault, magnetotelluric

東海地域南部（掛川市周辺）における比抵抗構造探査 - 序報 - A preliminary report on resistivity structure survey in southern Tokai region

山下 太^{1*}, 熊谷 博之¹
YAMASHITA, Futoshi^{1*}, KUMAGAI, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

東海地域では巨大地震が繰り返し発生しており、近い将来にも発生することが予測されている。これまで歴史的、地質学的、測地学的データに基づき、この地域の過去の巨大地震の断層モデルが推定されてきた（例えば、Ando, 1975; Ishibashi, 1981）。近年では、鷺谷（2007）及び熊谷他（2009）が東海地域南部（掛川～磐田）において主断層の他に伏在断層が存在するモデルを提案している。その理由は、そのような断層が存在することで観測された測地・地質データをよりよく説明できることによる。しかしながら断層の存在を示す明瞭な地形学的証拠は未だ見つかっていない。そこで我々は東海地域南部の比抵抗構造を調査するため、掛川市周辺でMT探査をおこなうこととした。この地域では観測された電磁気シグナルが商用の電気ノイズによって汚染されることが予測されたため、通常よりはるかに長期間の観測を計画した。そのような長期観測を実施するため、汎用の商用データロガーを用いた新しい測定システムを開発し、試験的な測定をおこなった。この新システムは消費電力が低く長期観測に適しているが、サンプリング周波数は最高で200 Hzに限られている。そこで我々はまず高周波数のデータを取得するために短期間の観測をおこなった。およそN33°W方向の直線上に10点の観測点を設置し、測線長は約20 kmとした。この測線方位は熊谷他（2009）によって推定された伏在断層の走向に対し垂直である。観測により 10^{-3} から 10^2 Hzのデータを取得できたが、いくつかの観測点では低周波数のレンジでデータがノイズで汚染されている。そこでリモートファレンス法によるデータ処理をおこない、データの質を改善させた。全観測点において高周波数での見かけ比抵抗は低く、およそ10 ohm-mである。これは堆積層に起因していると考えられる。低周波数では見かけ比抵抗が北部の観測点で高くなる傾向があり、1 k ohm-mに達している。今後、数年をかけて高精度の低周波データを取得し、この地域の比抵抗構造を推定する予定である。

Ando, M., *Tectonophys.* 27, 119-140, 1975.

Ishibashi, K., *Earthq. Pred.*, Ewing Ser. 4, 297-232, 1981.

熊谷博之・藤原治・佐竹健治・鷺谷威, 地球惑星科学連合大会, T225-P005, 2009.

鷺谷威, 地球惑星科学連合大会, S151-006, 2007.

キーワード: 比抵抗構造, 東海地方, 東海地震, 伏在断層

Keywords: resistivity structure, Tokai region, Tokai earthquake, buried fault

九州地方の地殻・上部マントルの3次元比抵抗構造から診る沈み込み帯における流体の移動と島弧火山 Upwelling Fluids and Island-Arc Volcano in Subduction Zone: 3D Electrical Resistivity Structure of Lithosphere in Kyushu

畑 真紀^{1*}, 大志万 直人², 吉村 令慧², 上嶋 誠³

HATA, Maki^{1*}, OSHIMAN, Naoto², YOSHIMURA, Ryokei², UYESHIMA, Makoto³

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 京都大学防災研究所地震防災研究部門, ³ 東京大学地震研究所

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ³ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

沈み込み帯における島弧火山の形成には、沈み込むプレートとともに地球内部へと持ち込まれる流体(海水)が重要な役割を担うと考えられている。地球内部へと持ち込まれた流体は、ある圧力-温度条件に達すると脱水反応により放出され、沈み込み帯のソリダス温度以下にあるマントルの部分熔融を引き起こす要因となる。また、沈み込むプレートの物理的不均質の差異は、マントルでの部分熔融、および、火成活動に影響を及ぼすと考えられている。

西南日本弧の九州地方では、海嶺をはさみ北部と南部で形成年代、および、沈み込む角度が異なるフィリピン海プレートが、ユーラシアプレート下に約5~7cm/yearで西北西方向に沈み込んでいる。九州の火山フロントは、沈み込むフィリピン海プレートと関連して南北方向に形成されており、第四紀の火山のほとんどが火山フロントに沿って存在する。しかしながら、九州の火山フロントには無火山地帯が約100kmに亘って存在するという特徴がある。また、九州北部には、火山フロントから離れた背弧域に活発な火山活動をしめす地域が存在する。このように特徴的に形成された火山分布の要因を理解するには、沈み込むプレートを含めた大規模な地下構造の解明が重要であると考えられる。

本研究で使用したNetwork-Magnetotelluric(MT)法は、扱う周期がおよそ1~10000秒であるため、上部マントルに至る深さまでをカバーする探査深度を有する[上嶋, 1990]。また、電磁場を用いる特性上、溶融体(メルト)を含めた流体の存在を確認するには特に有効な方法である。よって、流体が関与する沈み込み帯の大規模構造を知るには、最適の観測方法といえる。九州におけるNetwork-MT法観測では、ほぼ九州全域にわたってS/N比の良いデータが取得されている。本研究では、沈み込むプレートに起因した流体と火山分布との関連を推定することを目的に、Network-MT法データを使用した3次元電気比抵抗インバージョン解析を実施した。

得られた比抵抗構造モデルの最大の特徴は、火山帯下に背弧側深部から連なる低比抵抗な領域(アノマリー)が存在することであった。背弧側から火山フロントへと連なるアノマリーの存在は、太平洋プレートが沈み込む東北地域においても、MT法[Mishina, 2009]や地震波トモグラフィー法[e.g., Hasegawa et al., 1991]によって報告されている。また、本研究で得られた低比抵抗領域は、火山それぞれで水平・垂直方向への広がりという規模の点で異なる特徴を持つものであった。本発表では、得られた3次元比抵抗構造モデルを用いて、九州における沈み込むプレートと火山分布との関係を特に火山フロントへの流体の移動という観点で考察した結果について報告する。

2007年能登半島地震震源域周辺の3次元比抵抗構造 Three-dimensional electrical resistivity structure around the 2007 Noto Hanto Earthquake

吉村 令慧^{1*}, 大志万 直人¹, 市原 寛², 上嶋 誠³

YOSHIMURA, Ryokei^{1*}, OSHIMAN, Naoto¹, ICHIHARA, Hiroshi², UYESHIMA, Makoto³

¹ 京都大学防災研究所, ² 海洋研究開発機構, ³ 東京大学地震研究所

¹Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The 2007 Noto Hanto Earthquake (M6.9) occurred near the west coast of the Noto Peninsula which is located in the back arc area of Central Japan, on 25 March 2007. The focal mechanism of this damaging earthquake shows a reverse fault with a small amount of strike-slip component with a strike of approximately N55E and high angle dip. The two largest aftershocks, both M5.3, occurred within one day near the offshore and onshore edges of the aftershock region. Yoshimura et al. [2008] carried out a wide-band magnetotelluric survey in the onshore area covering the eastern half of the source region, and obtained two-dimensional resistivity models along five profiles as a preparatory step for imaging three-dimensional structure. As the results, they pointed out that a conductive body, which seems to represent fluid-filled zone, is located beneath the mainshock hypocenter and the active aftershock region.

In order to verify the relationship between seismicity and electrical resistivity structure, we carried out additional two-dimensional modelings and three-dimensional analysis by using data of Yoshimura et al. [2008]. As a consequence of additional two-dimensional models, it is revalidated that the distributions of deep conductors correspond with the aftershocks activity. Using the results of two-dimensional analyses along nine profiles as initial and prior models, three-dimensional inversion (WS-INV3DMT: Siripunvaraporn et al., 2005) was applied to the data of Yoshimura et al. [2008]. The full components the impedance tensor at 14 periods 26 sites were inverted. Significant characteristics of the obtained preliminary model are: (1) distribution of resistive blocks at shallow depth seems to correspond to undulation of gravity basement structure (AIST, 2007); (2) a conductive body, beneath the mainshock hypocenter, spreads to the eastern edge of the active aftershock region.

In this presentation, we will show a whole image of two-dimensional and three-dimensional resistivity models compared with main and aftershock activity and discuss the sensitivity of remarkable features of models.

キーワード: 比抵抗, 2007年能登半島地震

Keywords: resistivity, the 2007 Noto Hanto Earthquake

3-D magnetotelluric inversion with minimum gradient support 3-D magnetotelluric inversion with minimum gradient support

Luolei Zhang^{1*}, Takao Koyama¹, Hisashi Utada¹, Peng Yu², Xiao Chen², Jialin Wang²
ZHANG, Luolei^{1*}, KOYAMA, Takao¹, UTADA, Hisashi¹, PENG YU², XIAO CHEN², JIALIN WANG²

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan, ²School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai, 200-092, China

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan, ²School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai, 200-092, China

3-D MT inversion has progressed fast in recent a few decades. Madden and Mackie (1993) developed first practical 3-D inversion of magnetotelluric (MT) data by using the conjugate gradients (CG) to solve equations of inversion. Newman et al. (2000) introduced non-linear conjugate gradients (NLCG) in 3D MT inversion. Zhdanov (2000) used quasi-linear approximation in 3-D Electromagnetic inversion. Siripunvaraporn et al. (2005) proposed a new scheme of 3-D inversion in data space. Most of the inverse algorithms cited above involve a regularized inversion using a smoothness constraint. These algorithms provide smooth solutions, but few are suitable for clearly imaging geo-electrical interfaces. In the present study, we introduce a new constraint to address this limitation. Portniaguine and Zhdanov (1999, 2002) proposed a focusing geophysical inversion using the minimum gradient support (MGS) functional and used the MGS functional in gravity and magnetic inversion. Zhang (2009, 2010) used this theory to invert 2-D MT data and obtain clear images of geo-electrical interfaces.

In our research, the subsurface resistivity structure is divided by cubes. The conductivity in each cube is assumed uniform. Through changing the cube's volume, the accuracy of inversion can be ensured. Integral equation (IE) method by modified Neumann series (MNS) which was proposed by Singer (1995) and Avdeev et al. (2000) is used for forward calculation, which allows us to avoid calculation of large-scale linear equations. GPBi-CG is used to get the solution in modified Neumann series, and the efficiency is increased. The quasi-Newton method is used to optimize the objective functional. This approach is a kind of Newton method with simplified calculation of the Hessian matrix by using BFGS update (Koyama, 2002). In addition, BFGS update does not require search for the exact minimum point on line unlike the NLCG, and therefore iteration times of 3-D forward calculation can be reduced. For derivation of the sensitivity matrix, we use the method which was presented by Newman (2000).

We investigated some synthetic models and compared the results with those obtained by a smoothing inversion. For synthetic models having sharp geo-electrical interfaces, the MGS inversion was found to image structures with sharp interfaces more clearly and accurately with smaller RMS data misfit. On the other hand, the synthetic test indicated that the MGS inversion provides larger RMS data misfit and so is not advantageous compared to smoothing inversion for models with smooth interfaces.

キーワード: magnetotelluric, inversion, minimum gradient support, quasi-Newton method

Keywords: magnetotelluric, inversion, minimum gradient support, quasi-Newton method

スタティック効果が3次元MT法インバージョンに与える影響 Influence of statics shift in 3D magnetotelluric inversion

谷 昌憲^{1*}, 三ヶ田 均¹, 後藤 忠徳¹, 武川 順一¹, siripunvaraporn weerachai²

TANI, Masanori^{1*}, MIKADA, Hitoshi¹, GOTO, Tada-nori¹, TAKEKAWA, Junichi¹, SIRIPUNVARAPORN, weerachai²

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² マヒドン大学

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, ²Mahidol University, Thailand

近年、面的にMT法観測を行い、得られた応答関数に3次元MT法インバージョンを適用し、比抵抗構造を推定する探査が盛んに行われるようになってきた(例えば Uchida and Sasaki, 2006)。特に3次元MT法インバージョンを地熱貯留層の物理探査に対して適用し、熱水貯留層やキャップロック層の立体的な分布を明瞭に可視化した例もある(例えば Uchida and Sasaki, 2006)。また2次元MT法インバージョンと比べると、複雑な3次元構造に対して、地下深部の構造推定精度が高いことが知られている。

しかしながら、3次元MT法インバージョンは比較的最近になり実際に使用されるようになったため、いくつかの考察されていない問題点があげられる。本研究では、この問題点の中で、観測点周辺の局所的な比抵抗異常体が3次元MT法インバージョン結果に対して与える影響に着目した。実際に3次元MT法観測を行う場合、複数の観測点での表層の地質状況は様々で各点ごとに特徴的な比抵抗をもっている。各観測点周辺で異なる局所的な比抵抗異常が存在している場合、各点で観測されるMT応答関数は局所的な異常体の影響を受け変化する(例えば Groom and Bailey, 1989)。このように局所的な異常体の影響を受けたMT応答関数に3次元MT法インバージョンを適用した場合、実際の構造とは異なるモデルが解として推定される。実際に近い比抵抗構造を推定するには、表層付近の局所的な比抵抗異常の影響を考慮する必要がある。

そこで本研究では観測点付近の局所的な比抵抗異常体がMT法探査の観測値に与える効果として、電場の振幅を変化させるスタティック効果に注目する。このスタティック効果が3次元MT法インバージョン対し与える影響を検討するためWSINV3DMT(Siripunvaraporn et al., 2005)を基に、スタティック効果の影響を受けた3次元MTデータを扱えるインバージョンコードを開発した。まず始めにスタティック効果を含む応答関数を数値計算によって作成して、スタティック効果を考慮することが必要かを検討した。その結果、比抵抗構造が本来の比抵抗構造からは大きく歪むことを確認した。次に、同じデータに対して局所的な異常体を表層のモデルで再現できるよう改良を施した3次元MT法インバージョンを適用した。その結果、スタティック効果を加味した3次元MT法インバージョンにより、インバージョン結果が改善されることを確認した。今後は、よりインバージョン結果を改善する為に新しいコードに基づいたスタティック効果の補正法が望まれる、また今後開発する予定である。

キーワード: MT法, インバージョン, スタティック効果

携帯電話通信網を利用した MT 観測データの遠隔監視 Remote monitoring using mobile network for magnetotelluric observation

海田 俊輝^{1*}, 市来 雅啓¹, 出町 知嗣¹, 平原 聡¹

KAIDA, Toshiki^{1*}, ICHIKI, Masahiro¹, DEMACHI, Tomotsugu¹, HIRAHARA, Satoshi¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹Tohoku University

地殻流体電磁気長周期地磁気地電流プロジェクトでは、東北地方の上部マントル電気伝導度構造の解明を目標とし、先端的な機材 (LEMI-417) を用いて、地磁気地電流 (Magnetotelluric; MT) 観測をおこなっている。これまでに得られたデータの解析から、比抵抗構造と地震波速度構造の関連が明らかにされつつあり (Ichiki et al., 2011)、残る観測点のデータ収集が急がれる。

当該観測はオフラインでおこなうため、次回保守時まで観測の状態がわからない。一連の観測プロセスにおいてヒューマンエラーのないよう常に心がけているものの、電極の不調や動物による電極ケーブルの損傷等によって、観測に支障をきたすことがある。1ヶ所につき2ヶ月以上の観測データが必要であるが、観測機材の数に限りがあるために、一度に数ヶ所ずつしかデータ収録を行うことができない。そのためにも観測データの異常を早期に発見し対応出来る体勢を整えることは計画的な機動観測を行う上で重要である。

近年、携帯電話によるデータ通信サービスは、定額料金サービスの提供やサービスエリアの拡大など、利用環境の整備が進んできている。有線通信サービスと比較して、安全性や安定性に欠くものの、サービスエリア内であればどこでも通信可能である。東北大学では、携帯電話通信端末を利用した通信システムを構築し、地震・GPS 観測データの伝送や遠隔保守に利用している (例えば、平原・堀, 2009; 出町他, 2011)。

そこで我々は、上述の既存のシステムを応用し、携帯電話通信網を利用した MT データ監視のための通信システムの構築を試みた。当該 MT 観測点では、NTT docomo FOMA ネットワークのサービスエリア内に位置する点が多数確認されている。観測機器と通信システムの電源は、機動観測を考慮しバッテリーのみとしている。そこで、少なくとも設置後最初の保守時までシステムが動作するように、タイムスイッチを用いて稼動時間を制御している。本システムによって、稼動時間帯に観測機器にアクセスすることにより、波形のリアルタイム監視が可能となった。本システムは、2011年11月21日に仙台市泉区観測点に設置し運用中である。本講演では、システム概要や運用状況、問題点について報告する。

キーワード: MT 観測, 遠隔監視, 携帯電話通信網

Keywords: Magnetotelluric(MT) observation, remote monitoring, mobile network

精度の高いMTレスポンスを得るための漏洩電流の影響を受けた Network-MT 電場データの前処理 (2)

Preprocessing of Network MT electric field data contaminated by leak currents to obtain the accuracy MT response (2)

村上 英記^{1*}

MURAKAMI, Hideki^{1*}

¹ 高知大学理学部

¹ Faculty of Science, Kochi University

従来のMT法に比べて長基線電場計測をおこなうNetwork-MT法には幾つかの利点がある。例えば、長期間安定した計測ができることやローカルなノイズの影響を受けにくいというものである。しかし、表層の比抵抗の大きな地域(西日本など)では、直流電車の漏洩電流による影響は直流電車の線路近傍のみならず広範囲で観測され、精度の高いMTレスポンスを得るのが難しいことが多い。統計的にロバストな手法を用いたコードBIRRP(Chave and Thomson, 2003)などを使ってもなお難しい場合がある。漏洩電流の特性によっては、ローパスフィルタ処理や電車の走行本数が少ない夜間値のみを使用することでMTレスポンスの精度を改善することが出来る場合もある。しかし、これらの手法のみでは改善が難しいデータ(中部地方のネットワークMT電場データ;阿木観測点・美濃福岡観測点)について、多変量解析手法(主成分分析)を適用した前処理をすることでMTレスポンスを改善する試みについて昨年報告(村上ほか, 2011)した。

昨年の報告では、JR中央線を挟んだ美濃福岡と阿木について主成分分析を前処理として施すことでMT応答関数が改善することを報告した。前処理をしない美濃福岡のデータでは、夜間値30日分のデータをBIRRPで処理すると y_x については周期100秒くらいまでは比較的バラツキが小さくエラーバーも小さな値が得られているが、 y_x はバラツキが大きくエラーバーも大きいものであったが、前処理をほどこし漏洩電流成分と考えられる成分を削除してMT応答関数を求めると、周期1000秒近くまで y_x , y_x についてはともにバラツキも少なくエラーバーも小さい推定値を得られることを報告した。しかし、 y_x , y_x については検討の余地が残されていることを報告した。今回、主成分分析の結果を詳細に検討しなおし次のようなことがわかった。昨年は主成分分析で得られた第1主成分を漏洩電流成分として除去していたが、第1主成分は南北方向(JR中央線に直交する方向)に流れる漏洩電流成分を主に表しており、第2主成分(以下も含めて)が観測点での誘導電場を表すようになっているために、電場の東西成分についての改善が著しいことがわかった。しかし、第1主成分を除くことで誘導電場の南北方向の成分も一部削除しているために y_x の絶対値が過小評価されたり、バラツキが改善されない場合があることなどが分った。今回は、各計測チャンネルのノイズ特性を検討し、一律に主成分解析を実施するのではなく選別したデータを使用する、第1主成分を全てのチャンネルで棄てるのではなく、計測チャンネル毎に捨て方を変える、磁場とのマルチコヒーレンスを見ながら捨て方を変えるなどの検討を進めた結果について報告する。

キーワード: MT 応答関数, ネットワークMT, 漏洩電流, 多変量解析

Keywords: MT response function, Network-MT data, leak currents, multivariable analysis

四国地方のMT 応答関数の再解析 Reanalysis of the MT response in the Shikoku district

山本 健太郎^{1*}

YAMAMOTO, Kentarou^{1*}

¹ 高知大学大学院総合人間自然科学研究科

¹Kochi University Graduate School of Integrated arts and Sciences

本研究では、四国地方の比抵抗構造における諸問題を検討するための第一歩としておこなった既存の Network-MT 観測データを使った MT 応答関数の再解析について報告する。四国地方では、東部・中部・西部においてそれぞれ幾つかの比抵抗構造が推定されている。東部については Network-MT を用いた Yamaguchi et al.(1999) や広帯域 MT による鳥取大学 (2011) の比抵抗構造モデルがある。中部については MT 観測による塩崎 (1993) のモデルが、西部については広帯域 MT 観測による鳥取大学 (2009) や山下ほか (2009,2010) のモデルがある。これらの成果を比較すると次の2点が課題として浮かび上がる。まず、四国中央部では大陸地殻に相当する領域 (下部地殻) の比抵抗値が 10^4 m となっているが、その両側の西部・東部の広帯域 MT 観測に基づくモデルでは数百 m と2桁ほどの違いがある。次に、紀伊半島下の低周波微動発生領域が低比抵抗であることを Yamaguchi et al.(2009) は指摘しており、低周波微動の活動が顕著ではない四国東部の比抵抗モデルでも潜り込むプレートの海洋地殻が低比抵抗であることが示されているが、四国中央部で求められているプレート相当領域の 10^4 m の値や下限、また四国西部では地殻下部からマントルにかけて比抵抗コントラストがなく低周波微動領域についても明瞭な比抵抗領域として認識されていない。これらの課題を明らかにするためには、従来求められている周期 1000 秒までの MT 応答を含めてそれ以上の周期までの精度の高い MT 応答関数を求める必要がある。

解析に使用した電場データは、大洲、宇和、城川、大杉、土佐山田、阿波池田、牟岐で観測された Network-MT データである。磁場データとしては気象庁柿岡地磁気観測所のデータを使用した。Network-MT データが 10 秒サンプリングであるため、地磁気データについても 1 秒値から 10 秒値に変化したものを使用した。また、今回の解析では時刻補正情報から Network-MT 観測データの時刻誤差は 1 秒以下のずれと考えられるので今回の解析では特別な時刻補正を行っていない。MT 応答関数の計算は BIRRP(Chave and Smith, 2003, 2004) を使用した。解析に使用したデータ日数は、西部の大洲、宇和、城川は 4 日分を 10 セット、中央部は土佐山田、大杉が 1 日分を 40 セット阿波池田が 1 日分を 95 セット、東部の牟岐は 1 日分を 40 セットである。ノイズの小さな大洲、宇和、城川、牟岐については生データを使用して MT 応答関数を求めたが、ノイズの大きな大杉、土佐山田、阿波池田については MT 応答関数を求める前に電場データの前処理を試みた。前処理としては多変量解析の手法である主成分分析を使用した。これは、漏洩電流が同位相ノイズとして各計測チャンネルにのっていると考えられるので、変動の大きな同位相成分を抽出してノイズ成分の影響を小さくするという考えで行った。今回は、各観測点について周期 100 秒から 10000 秒までの MT 応答関数を求めた。

中央部の 10^4 m の高比抵抗領域については、見掛け比抵抗に周期 100 秒から 10000 秒において 10^4 m から 10^5 m に上昇するものがあるので、存在する可能性を示した。また、これらのほぼすべての見掛け比抵抗が上昇あるいは一定となっており、海洋地殻の 10^4 m の低比抵抗領域を MT 応答関数から確認することはできなかった。低周波微動域である西部の MT 応答関数について、広帯域で求めた周期 1000 秒より 1 桁伸ばした周期 10000 までの MT 応答関数から深部に低比抵抗領域を示すものは確認できなかった。山下 (2012) によると西部の微動発生域の低比抵抗層は薄いため、見掛け比抵抗の傾きが小さくなる程度の変化しか示さないと推測している。東部については牟岐の MT 応答関数を求めた、これは Yamaguchi et al.(1999) と同様の結果を示した。今後は深部の低比抵抗の存在を解明するため、中部・東部のノイズの大きい観測データの解析を行う予定である。

キーワード: ネットワーク MT, MT 応答関数, 深部低周波微動

Keywords: Network-MT, MT response, Deep low-frequency tremor

地震動に伴う電磁誘導から生じる磁場変動

Variations in the magnetic field arising from the motional induction that accompanies seismic waves in far-field regions

山崎 健一^{1*}

YAMAZAKI, Ken'ichi^{1*}

¹ 京都大学防災研究所

¹Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Variations in the electromagnetic field that accompany earthquakes are generated by various mechanisms, of which the present study focuses on variations in the magnetic field arising from motionally induced electric currents that accompany seismic waves at a large distance (several hundred kilometres) from the epicentre. As a simple but informative case, a situation is considered in which seismic waves are approximated by plane waves and the conductivity of the Earth's crust has a stratified structure. Solutions of Maxwell's equations corresponding to this situation have analytical expressions. Analysis of the solutions verifies that SH waves do not generate variations in the magnetic field, thereby implying that Rayleigh waves are dominant in generating variations in the magnetic field at a significant distance from earthquake epicentres.

Using the obtained solutions, variations in the magnetic field due to Rayleigh waves are quantitatively discussed in terms of a crust with a simple structure. Numerical examples demonstrate that the amplitudes of the generated variations in the magnetic field show a monotonic increase with increasing conductivity, although depression of the amplitudes due to the skin effect of electromagnetic waves cannot be ignored. In addition, the amplitudes of the generated magnetic field are sometimes sensitive to the conductivity of both the shallow and deep crust. Given the difficulty of precisely determining the conductivity of the deep crust, it is generally problematic to obtain precise estimates corresponding to the actual Earth. Nevertheless, calculations assuming a simplified conductivity structure provide an upper limit to the possible amplitudes of variations in the magnetic field due to seismic waves. For example, the amplitudes of variations in the magnetic field arising from a Rayleigh wave with a displacement amplitude of 10 cm and a period of 30 sec are as large as 0.1 nT, which is close to the limit of detection by fluxgate magnetometers under typical observation conditions. It is also suggested that phase differences between seismic ground motions and EM variations are not influenced by detailed conductivity structures, and they occur within a rather narrow range of values determined by the direction orientation of the ambient geomagnetic field. In the future, when data with an accuracy of 0.01 nT are available, this property may be used to distinguish variations arising from motional induction, from variations arising from other origins.

キーワード: 電磁誘導, 地震波, 磁場

Keywords: motional induction, seismic wave, magnetic field

Characteristics of ULF emission for determination of earthquake precursors for strong earthquakes near Sumatra

Characteristics of ULF emission for determination of earthquake precursors for strong earthquakes near Sumatra

suaidi ahadi^{1*}, gunawan ibrahim¹, sarmoko saroso²
AHADI, suaidi^{1*}, gunawan ibrahim¹, sarmoko saroso²

¹Institut Teknologi Bandung, ²Nasional Institute of Aeronautics and Space, Indonesia

¹AHADI, suaidi^{1*}, gunawan ibrahim¹, sarmoko saroso²

Earthquake precursor studies using magnetic-field power spectra in the ULF band have been affirmed as a way to identify earthquake precursors effective for short-term. In this paper we studied the characteristics of the earth's magnetic waves associated with earthquakes, which we regarded as a sign (signature) before the earthquake.

Several methods of signal analysis have been used in this research, including spectral analysis in the Pc-3 range (10-45 seconds), ratios of the Power Spectral Density (PSD) between Hs (Zs) in Kototabang (KTB, located near the epicenter) and Pelabuhan Ratu (PEL, located far from the epicenter), and the correlation between Hs (Zs) in KTB and PEL. The goal of the signal analyses is to assure that the disturbance signal (perturbation) really reflects the lithospheric activity.

The results of the above-stated analyses are as follows: For a few strong earthquakes in Sumatra in 2008-2011, perturbations in the geomagnetic field had signatures which could be regarded as earthquake precursors. We also found relationships between the earthquake magnitude, epicentral distance, and the magnetic perturbation amplitude averaged over a period before and after the main earthquake (main shock). That is, the magnetic perturbation amplitude had a positive correlation with the earthquake magnitude, and a negative correlation with the epicentral distance..

キーワード: earthquake, precursor, short term, ULF band

Keywords: earthquake, precursor, short term, ULF band

東北太平洋沖地震前後に宮城県丸森町で観測された電磁場変動 (2)

Characteristics of electromagnetic data at Marumori in Miyagi prefecture before and after Tohoku M9.0 earthquake (2)

長谷 英彰^{1*}, 上嶋 誠¹, 山谷 祐介¹, 小河 勉¹, 市来 雅啓²

HASE, Hideaki^{1*}, UYESHIMA, Makoto¹, YAMAYA, Yusuke¹, OGAWA, Tsutomu¹, ICHIKI, Masahiro²

¹ 東京大学地震研究所, ² 東北大学理学研究科

¹Earthquake Research Institute, Tokyo University, ²Graduate School of Science, Tohoku University

電場や磁場の時系列観測データの中から地震に伴うシグナルを検出する試みがこれまでに数多く行われている。MT 観測で測定している電磁気データの周期帯では、そのデータのほとんどが電離層や磁気圏起源の電磁場変動によるインダクション効果を含んでおり、その効果は太陽活動の状態によって大きく変化し、地表で観測される電磁気データの時系列レスポンスも変化に富んでいるのが一般的である。そのため一見するとインダクション効果ではないと思われる変動も実はインダクション効果によるものであることが多くあり、インダクション効果以外のシグナルを議論するときは、インダクション効果によるレスポンスとシグナルの識別を明確に示す必要がある。しかしながら、地震に伴うシグナルとインダクション効果との識別について明確に示されていないことも多い。

我々のグループでは、2010年11月中旬から2011年4月下旬まで宮城県丸森町において電磁場連続観測を行っており、東北地方太平洋沖地震が発生した今年3月11日前後のデータも取得している。本研究では、これらの電磁場時系列データの中に地震に伴うシグナルが含まれているか検証を行うにあたり、観測データから求められた周波数応答関数を用いて、観測点の時系列データに含まれるインダクション効果のレスポンスを推定した。そして観測データと推定されたインダクションレスポンスの比較から、地震に伴うシグナルが観測データに含まれているかどうかの検証を行った。本講演ではこれらの解析結果について議論を行う。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 電磁場変動, 周波数応答関数, MT インダクション効果

Keywords: The Tohoku M9.0 earthquake, electromagnetic changes, frequency response function, MT induction effect