

## 電流源と独立な MT 応答関数の時間的変動について

# 佐藤 真也 [1]; 後藤 忠徳 [2]  
[1] 京大・工; [2] 京都大学

## On the temporal changes in MT responses independent from source field

# Shinya Sato[1]; Tada-nori Goto[2]  
[1] Engineering, Kyoto Univ.; [2] Kyoto Univ.

MT responses have been used for visualizing subsurface resistivity structure and recently are used for discussing temporal changes in subsurface environment. However, the temporal changes in MT responses often are considered triggered by unstable source field (e.g., Romano et al., 2014). Romano et al. (2014) reported that the negative correlation between Ap index and apparent resistivity with period band of 10 - 100 seconds, and additionally they considered that the cause is not artificial noise. We therefore must pay attention to the source's condition when discussing the temporal changes in MT responses, and then we must judge whether the changes reflect the source's condition or subsurface environment. Romano et al. (2014) focused on the general relationship between geomagnetic conditions and MT responses. However, some temporal changes in MT responses in their paper cannot be explained easily by source's condition. We therefore derive the temporal changes in MT responses with the period band of 10 - 100 seconds, where MT responses depends largely on source field. Then, evaluating the strength and spatial characteristics of geomagnetic activity, we discuss the cause triggering the changes. We show that the MT responses can reflect the changes in subsurface environment even if the analyzed period-band is affected largely by source field.

We use the MT data obtained at Kakioka Magnetic Observatory, Japan (KAK) with 1 Hz sampling rate for local data and the magnetic field data at Memambetsu Magnetic Observatory, Japan (MMB) for reference data. The data at each month are divided into three sections a) 1 - 10, b) 11 - 20 and c) 21 - last day of the month. We derive the MT responses with the period of 64 seconds using FDICA-MT (Frequency Domain Independent Component Analysis based MT processing algorithm (Sato et al., 2019 submitted)). Romano et al. (2014) reported the MT responses become unstable under the condition of Ap index lower than 10. We therefore define that the sections with averaged K index over 20 are affected not so largely by the strength characteristics of geomagnetic activity. Also, we use the inter-station transfer functions (IS-TFs) between the geomagnetic-field data obtained at KAK and MMB for evaluating the spatial characteristics of geomagnetic activity. However, IS-TFs are not indicating correct value when there are several spatial characteristics of geomagnetic variations (Sato and Goto, to be submitted). We use IS-TFs together with Multi-Channel Nonnegative Matrix Factorization (MC-NMF (Sato and Goto, 2018)). MC-NMF can expose whether there are several spatial characteristics of geomagnetic variation or not. As a result, we can judge whether IS-TFs indicate correct value. The sections satisfying both i) no changes in IS-TFs and ii) no changes in spatial characteristics of geomagnetic variation are defined not largely affected by spatial characteristics of geomagnetic activity.

It is exposed that the MT responses with the period of 64 seconds derived from each section change temporally. In many sections, either strength characteristics or spatial characteristics of geomagnetic activation is not satisfied. However, some responses change temporally even under the condition that there is no large abnormality of strength and spatial characteristics of geomagnetic activity. Comparing the total rainfall before and after the changes, there is ten times difference. Therefore, the temporal changes in MT responses can be considered reflecting subsurface environmental changes at the shallow depth (e.g., rainfall effect). In summary, evaluating the strength and spatial characteristics of geomagnetic activation, the MT responses are available for discussing the subsurface environmental changes even if the analyzed period-band is affected largely by source field.

MT 法は地下電気抵抗率構造の可視化に用いられてきたが、近年では地下構造の時間的変動を議論する目的で用いられることもある。しかしながら、一般的に MT 応答関数の時間的変動が発生した場合、原因として電流源が疑われる (例えば, Romano et al., 2014)。Romano et al. (2014) は地磁気の擾乱度と周期 10-100 秒における見掛比抵抗には、負の相関を報告し、その主な原因はノイズではないと断定した。そのため、MT 応答関数の時間的変動の原因について議論する際、地磁気の状態について考慮し、地下由来のものか電流源由来のものか判断する必要がある。また、Romano et al. (2014) の報告例では、MT 応答関数と地磁気擾乱の全体的な傾向の相似度について議論を行っている。しかしながら、時間的に変動した MT 応答関数の中には、その全体的な傾向から外れており、単純に電流源由来と断定できないものも多く存在する。そこで、本研究では、電流源の影響を受けやすいとされる周期 10-100 秒の MT 応答関数の時間的変動を導出する。その後、地上磁場変動の強弱・空間特性を考慮した上で、電流源だけでは説明が困難な MT 応答関数の時間的変動の原因について議論を行う。電流源の影響を受けやすい周期帯においても、MT 応答関数は地下環境の変化を十分反映できることを示す。

解析するデータは、気象庁柿岡地磁気観測所 (KAK) で取得された 1 秒サンプリングの MT データで、Reference データは気象庁女満別地磁気観測所 (MMB) における磁場データを用いる。各月のデータをイ) 1-10 日、ロ) 11-20 日、ハ) 21-月末日の 3 区間に分け解析を行う。周波数領域独立成分分析に基づく MT データ解析法 (FDICA based MT processing algorithm: FDICA-MT (Sato et al., submitted)) を用いて、各区間で周期 64 秒の MT 応答関数を導出する。データに欠損がある区間や、導出した MT 応答関数の推定誤差が大きい区間は、ノイズの影響が考えられるため、解析や議論から除外する。Romano et al. (2014) によれば、Ap 指数が 10 程度未満 (K 指数にして 20 程度) の場合、MT 応答関数は不安定となるため、平均 K 指数が 20 よりも大きい区間を、地磁気の強弱特性の影響を受けにくい区間とする。また、水平磁場は電流源の影響を

受けやすいため、KAK-MMB 間の水平磁場変換関数 (Inter-station transfer functions: IS-TFs) を地磁気の空間特性評価に用いる。しかしながら、IS-TFs は、異なる空間特性を持った地磁気変動が複数存在した場合、正しい値を示さない (Sato and Goto, to be submitted)。そのため、多チャンネル非負値行列因子分析 (MC-NMF, Sato and Goto, 2018) と IS-TFs を併用し、地磁気の空間特性を評価した。MC-NMF を用いることで、異なる空間特性を持った地磁気変動が複数存在するかどうか知ることが出来、その結果、IS-TFs は正しい値を示すか判断することが可能となる。IS-TFs が時間的に変動せず、かつ、異なる空間特性を持つ地磁気変動が存在しない区間を、地磁気の空間特性の影響を受けにくい区間と考える。

前述の各区間で導出した周期 64 秒の MT 応答関数は時間的に変動していることが明らかとなった。多くの区間では、1)K 指数が 20 以上、2)IS-TFs が変動しない、という条件のうちどちらかを満たしていなかった。しかしながら、地磁気変動の強度特性・空間特性に異常がない条件下においても、MT 応答関数が時間的に変動しているケースも存在した。MT 応答関数の時間的な変動が発生している前後の総降雨量を比較すると、1 桁異なることが明らかとなった。それ故、その区間において発生した MT 応答関数の時間的な変動は地下環境、特に降雨による表層の変化を反映している可能性が考えられる。以上より、地磁気の強度・空間特性を評価することで、周期 64 秒という電流源の影響を受けやすい周期帯においても、地下環境変化の議論に用いることも可能であると結論を出す。

## ACTIVE から推定される 2014-2015 年阿蘇山マグマ噴火時における連続的な比抵抗構造時間変化モデル

# 南 拓人 [1]; 宇津木 充 [2]; 歌田 久司 [3]; 鍵山 恒臣 [4]  
[1] 名大・環境・地震火山研究センター; [2] 京大・理・火山研究センター; [3] 東大・地震研; [4] 京大・理

## A series of 3-D resistivity change models of Aso volcano from 2014 to 2015, as inferred by five ACTIVE data sets

# Takuto Minami[1]; Mitsuru Utsugi[2]; Hisashi Utada[3]; Tsuneomi Kagiya[4]  
[1] EVRC, Nagoya Univ.; [2] Aso Vol. Lab., Kyoto Univ.; [3] ERI, Univ. Tokyo; [4] Graduate School of Science, Kyoto Univ.

The latest magmatic eruptions started in Aso volcano in November 2014, after 20 years of the quiescent stage. A research group of Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, has conducted five campaigns of ACTIVE (Utada et al. 2017) observations from May 2014 to August 2015, including the magmatic eruption period (from November 2014 to May 2015). ACTIVE is a controlled-source electromagnetic volcano monitoring system consisting of transmitters with earthing electric dipoles and an array of induction-coil receivers that measure the vertical component of the induced magnetic field. Minami et al. (2018) revealed temporal variation in the three-dimensional (3-D) resistivity structure from August 2014 to August 2015, by focusing on the two data sets. However, there remained the other three data sets that have not used in the analysis, i.e. those obtained in May 2014, November 2014, and February 2015.

In this study, we performed three additional inversions to reveal detailed evolution of the hydrothermal system of Aso volcano over the magmatic eruption period from November 2014 to May 2015. Using the five ACTIVE data sets, we resolved the evolution of the change in the 3-D resistivity structure from May 2014 to August 2015 into four snapshots of 3-D resistivity change models for Period 1 (May 2014 to Aug. 2014), Period 2 (Aug. 2014 to Nov. 2014), Period 3 (Nov. 2014 to Feb. 2015), and Period 4 (Feb. 2015 to Aug. 2015). In Period 1, which corresponds to the rainy season, the resistivity decreased in the surface layer, probably due to heavy rainfall. Furthermore, a resistive change was modelled just beneath the bottom of the first crater of Nakadake, which is consistent with the lowered water level and drying of the crater lake in this period. In Period 2, the surface resistivity in turn increased. It is likely because the surface layer dried after the end of the rainy season. In Period 2, a resistive change 400 meter beneath the crater bottom was modeled in the same zone as Minami et al. (2018). This can be due to drying of the hydrothermal system driven by ascending magma just before the start of magmatic eruptions in November 2014. From Period 3 to 4, the trend of resistive change is reversed to conductive change at the depth of 400 m. We interpreted this change in the trend as recovering of ground water in the hydrothermal system after the peak of the magmatic activity in February 2015. In this presentation, we plan to report details of our inversion method and explain the features of the four 3-D resistivity change models.

## 地磁気火山監視における人工衛星主磁場モデルの有用性について

# 浅利 晴紀 [1]; 長町 信吾 [1]; 増子 徳道 [1]; 高橋 幸祐 [2]; 小山 崇夫 [3]  
[1] 気象庁地磁気観測所; [2] なし; [3] 東大・地震研

### On the utility of satellite main field model for magnetic monitoring of volcanoes

# Seiki Asari[1]; Shingo Nagamachi[1]; Norimichi Mashiko[1]; Kosuke Takahashi[2]; Takao Koyama[3]  
[1] Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency; [2] none; [3] ERI, University of Tokyo

Continuous magnetic observations are widely practiced on active volcanoes as one of physical observation methods to monitor and evaluate volcanic activities. They are expected to detect signs of eruption relatively early in magnetic field changes arising as a long-term precursor associated with thermal demagnetization evolving with magma supply within the body of volcanoes. A report indeed exists that a prognostic feature already began to emerge about five years in advance to the 1986 eruption on Izu-Oshima, the basaltic volcanic island. In analyzing those data it should be a key to properly isolate volcanic signals on timescales of months to years. This is generally not an easy task. Marginally affected by inductive contributions at the relevant frequencies, data still consist of variations of different origins. Among them are also apparent variations due to the so-called DI-effect on total intensity observations.

Here, we specifically discuss influences of the geomagnetic main field variations on the continuous measurements and its subsequent evaluation of volcanic activities. For a reference model of the main field, CHAOS-6 is adopted which is produced by DTU Space based upon satellite magnetometry. It is one of time-dependent main field models that ensures the highest ever precision and spatiotemporal resolution. Of particular notice is its update frequency; for recent few years the model period has been extended every few months by incorporating the latest data. CHAOS-6 is vastly superior to the IGRF model in that even the most recent variability of the main field can be well delineated.

We present two kinds of analyses to demonstrate the utility of satellite main field model for magnetic monitoring of volcanoes. Either would be a case where a proper conclusion is hardly drawn, if the information at hand was restricted, as before, to station data and the IGRF model alone.

The first is an assessment of reference station data in regard to their long-term stability and accuracy in describing the main field evolution. The University of Tokyo runs a reference station of Izu-Oshima, OSM, about 4.8km to the northwest of the crater. Around 2015 the trend of OSM proton data w.r.t. CHAOS-6 total intensity changed by +3.6nT/yr. Overhauser data at a neighboring station TBT of Japan Meteorological Agency (JMA) have a trend in common. Meanwhile, the trend change is +2.2nT/yr at the university's former reference station, NOM, about 3.5km to the west of the crater. It is implied that the area around OSM is particularly seriously influenced by some local magnetic changes. The comment "Remagnetization tendency slowing" in the activity evaluation report is to be revised down, if either the satellite model itself is used, or NOM is taken back again, as the total intensity of the island's reference field.

The other analysis is an attempt to evaluate the DI-effect due to the geomagnetic secular variation. For this to be done a long and stable reference of the three-component secular variation is necessary. Not eligible are, however, records of vector variometers at reference stations, their baseline being undetermined. A time-varying satellite model may be applied in place. A case is reported here for proton stations, MIK1 and MIK2, of JMA at the north edge of the central cone summit of Izu-Oshima. Despite their proximity in between (40 meters), the MIK1 and MIK2 trends differ considerably: +2.8nT/yr and +6.2nT/yr w.r.t. OSM for 2007-2012, respectively. By referring to CHAOS-6 vector time-varying field in a forward calculation of the DI-effect from results of our in-situ measurements (with a 5'-resolution surveying compass and its self-customization into a dip measure) at MIK1 and MIK2 as well as of our absolute observation at OSM, it is revealed that the trend gap is explained by the DI-effect to a notable extent, though not fully. The MIK1 and MIK2 trends after the correction are +1.9nT/yr and +4.0nT/yr, respectively.

活火山における地磁気連続観測は、火山活動の監視・評価を目的とした物理観測手法の一つとして広く実施されている。持続的なマグマの供給に起因する山体内の熱消磁はその周囲に磁場の変化を誘発する。これが噴火に至るまでの長期の前駆現象として検知可能であると期待され、地磁気観測は特に噴火の予兆を比較的早期に捉える手段として目されている。実際、玄武岩質の伊豆大島では、1986年中規模噴火から5年程も遡って発現していたとする観測報告が在る。このような解析では、数か月から数年スケールの火山性変化の適切な抽出が鍵となる。同帯域では、誘導による影響は微小であるが、起源を異にする磁場変化が混在するため、一般に精度の高い抽出の実現は容易ではない。全磁力観測の場合、所謂DI効果による見掛けの変化もまた含まれる。

ここでは、特に主磁場の変化が火山における地磁気連続観測、ないし火山活動評価に及ぼす影響に焦点を当てる。主磁場変動の参照としてDTU Space (デンマーク国立宇宙センター) による人工衛星観測データに基づくモデルCHAOS-6を用いる。現存では最高の精度と時空間分解能を提供する時間発展主磁場モデルの一つであるが、特筆すべきは、その更新頻度である。近年では数か月毎に最新データが取り込まれてモデル期間が随時延長されている。主磁場変動の直近で尚且つ詳細な描像が得られる点において、CHAOS-6はIGRF国際標準地球磁場モデルに比して非常に大きな優位性を持つ。

本講演では、地磁気火山監視における衛星モデルの有用性を示すものとして、伊豆大島における二つの解析事例を挙げる。何れも、従前通り使用可能な情報を火山地磁気観測データとIGRFモデルに限った場合、結論を導くことが困難で

あった事例である。

一つは、火山参照点データによる主磁場変動の記述の安定性と正確性の評価である。東京大学は伊豆大島の火山参照点として山頂火口の北西約 4.8km に位置する地磁気基準点 OSM を運用している。2015 年の前後で同点におけるプロトン全磁力観測と衛星モデルの差に+3.6nT/年のトレンド変化が出現した。また、近隣にある気象庁の津倍付参照点 TBT におけるオーバーハウザー全磁力にも OSM 全磁力とほぼ同じトレンドが見られる。他方、火口西約 3.5km の旧基準点 NOM では衛星モデルに対するトレンド差の変化が+2.2nT/年に留まる。これは特に OSM の位置する地区にて主磁場以外の何らかの変化が生じている可能性を示唆するものである。伊豆大島の全磁力永年変化の基準として、衛星モデルそのものを選択する、或いは、NOM に戻すならば、山上の全磁力連続点の変動に基づくこれまでの活動評価「帯磁傾向の鈍化」は下方修正されよう。

もう一つの事例は、永年変化による DI 効果の評価を試みである。この評価には長期の安定した三成分の永年変化が参照として要される。しかし、火山参照点などにおける変化計を用いた三成分観測の多くはその基線値が不確定であり、実際のデータの長期安定性は保証されない。これに対し、時間変動する衛星モデルを以て代用することで DI 効果を見積もる手段は考えうる。ここで挙げるのは、伊豆大島の内輪山北部に位置する気象庁の三原北プロトン全磁力観測点 MIK1 と MIK2 に見られるトレンド差に対する DI 効果の寄与である。両点を隔てる距離は僅か 40m に過ぎないが、そのトレンドの差は大きく、それぞれ 2007-2012 年において OSM に対し+2.8nT/年および+6.2nT/年である。このトレンド差への DI 効果による寄与を見積もるため、CHAOS-6 を三成分永年変化の参照として適用する。MIK1 と MIK2 のプロトンセンサー近傍にて（測量用 5' 読みコンパスおよびその改造による伏角測定器を用いて）実施したその場測定と OSM 絶対観測によって得られた各点の偏角伏角から直接 DI 効果を算出すると、不完全ではあるがその寄与が明瞭に認められる。DI 補正後の OSM に対する MIK1 と MIK2 のトレンドはそれぞれ+1.9nT/年および+4.0nT/年である。

## 雲仙火山極浅部で発生する特徴的な地震と比抵抗構造の関係性

# 橋本 匡 [1]; 相澤 広記 [2]  
[1] 九大・理・地惑; [2] 九大地震火山センター

## Relationship between Non-double couple earthquakes and resistivity structure, Unzen volcano, Japan

# Tasuku Hashimoto[1]; Koki Aizawa[2]  
[1] Kyushu Univ.; [2] SEVO, Kyushu Univ.

Volcanic Earthquakes indicated low frequency under the Unzen volcano since 1995 stopped eruptive activity. However, these showed steadily increase tendency the volcanic earthquake occurrence number of times beneath Heisei-Shinzan lava dome and Mt. Fugen (1~2km below sea level) from 2010 (Japan Metrological Agency (JMA)). The notable point is that few hypocenters were located at above sea level occurring sporadically. Shallow earthquakes above sea level were reported 6 times in 2018 and 4 times in 2019 by JMA. The P-wave arrivals of the earthquakes above sea level show the downward motion at all stations of JMA, MLIT, and Kyushu university. The coda, which shows relatively longer period oscillation, continues approximately 20 to 30 seconds. Hashimoto et al. (2019 JpGU) was reported the preliminary analysis of the shallow earthquakes obtained from the dense seismic records. To obtain more accuracy determination hypocenters of shallow earthquakes we established 12 seismic stations around Mt.Fugen and Heisei-Shinzan lava dome (2km x 2km). As a result, shallow earthquakes have features that many seismic stations get downward motion on the other hand a few seismic stations get upward motion. And hypocenters were decided 200m in depth below Heisei-Shinzan lava dome. Mildon et al. (2016) reported the similar non-double couple (non-DC) earthquakes at Krafla volcano, Iceland, however characteristic earthquakes occurring at Unzen volcano have a little different that hypocenters are very shallow beneath Heisei-Shinzan lava dome and first motion polarities has a few upward motions.

We will present analysis of the shallow earthquakes obtained from the dense seismic records from August 2018 to August 2019. And 2 seismic stations were established on the lava dome (Heisei-Shinzan). Furthermore, focal mechanism is estimated non-DC earthquake by assumed occurring closing crack and shear at the same time (Shimizu et al., 1987) (Hayashida et al., 2019 JpGU). Besides magnetotelluric observation carried out at around Mt. Fugen and Heisei-Shinzan from October to November 2018 to research contribution of the fluid for these shallow earthquakes. We recorded telluric fields at 12 sites around Mt. Fugen and Heisei-Shinzen lava dome, and recorded MT fields at two sites at the mid flank of the Unzen volcano. This study discusses the relationship between characteristic shallow earthquakes and hydrothermal system assumed result of MT observation.

雲仙火山では 1995 年の噴火活動停止以来、火山性地震は比較的少ない傾向を示していたが、2010 年頃から徐々に普賢岳～平成新山直下の浅部（海抜下 1~2km 付近）において発生回数が増加するようになった（気象庁火山活動解説資料）。2017 年 2 月より、普賢岳周辺において海水準より浅い位置で散発的に発生する地震が報告されている。気象庁によると海水準より浅部で発生する地震は 2018 年~2019 年の 6 月までに 10 イベント報告されている（気象庁火山活動解説資料）。この浅い地震の初動極性は、気象庁や九州大学の定常観測点のデータを見ると引きが卓越しており、p 波初動から数秒は比較的短周期であるが、コーダ部分は長周期であり、地震の継続時間は約 20~30 秒間続くという特徴がある。橋本他 (2019, JpGU) では 2018 年 8 月から 11 月の期間において、この極めて浅部の地震の震源の決定を試みた。震源決定精度をあげるために、臨時地震観測点 12 点（オフライン、上下動成分のみ）を雲仙普賢岳周辺の 2 km x 2 km の範囲に設置した。その結果多くの観測点で初動極性は引きが卓越するが、いくつかの観測点では初動極性が押しであること、震源が平成新山直下の深さ約 200m と極めて浅い場所に位置することが分かった。引きの初動極性が卓越した火山性地震はアイスランドのクラブラ火山地下 2 km 付近の深度で報告されているが (Mildon et al., 2016), 雲仙火山で発生する特徴的な地震は、溶岩ドーム地下の極めて浅部で発生している点、初動が押しの観測点がわずかに存在する点が異なっている。

本発表では 2018 年 8 月から 2019 年 8 月の期間において発生した雲仙火山浅部の地震の解析結果について報告する。2019 年 4 月より平成新山に設置した地震観測点 2 点（オフライン、3 成分）のデータも加えて震源決定を行い、さらに closing crack と shear の同時発生を仮定した手法 (Shimizu et al., 1987) (林田他, 2019, JpGU) を用いて、非ダブルカップル地震のメカニズムを推定する。Mildon et al., 2016 より、引きの初動極性が卓越したアイスランドのクラブラ火山で発生した火山性地震は地下の流体の影響が指摘されている。雲仙極浅部で発生する地震に対する流体の寄与を調べるため 2018 年 10 月~11 月に普賢岳～平成新山周辺領域において広帯域 MT 観測を実施した。普賢岳周辺において地電位差 2 成分を 12 観測点、雲仙火山周辺において地磁気 3 成分-地電位差 2 成分を 2 地点で観測し、それらのデータから推定される比抵抗構造より、熱水系と極めて浅部で発生する初動が引きで卓越する地震の関連について論じる。

## 2016年熊本地震の余震活動と比抵抗構造の関係を詳細にみることで考えられること

# 相澤 広記 [1]  
[1] 九大地震火山センター

### Relation between electrical resistivity and earthquake: Lessons from the 2016 Kumamoto earthquakes

# Koki Aizawa[1]  
[1] SEVO, Kyushu Univ.

The MJMA 7.3 Kumamoto earthquake that occurred at 1:25 JST, on 16 April 2016 not only triggered aftershocks in the vicinity of the epicenter, but also triggered earthquakes that were 50 to 100 km away from the epicenter of the main shock. The aftershocks and triggered earthquakes are located mainly along a NE-SW striking line. The active seismicity can be divided into three regions: (1) the vicinity of the main faults, (2) the northern region of Aso volcano (southwestern region of Kuju volcano), and (3) the regions around three volcanoes, Yufu, Tsurumi and Garan (100 km northeast of the mainshock epicenter). Notably, the zones between these regions are distinctively seismically inactive. The 1-D resistivity structure by using the 247 broad-band MT sites (Aizawa et al., 2016) showed that earthquakes occurred in resistive regions adjacent to conductive zones or resistive-conductive transition zones. By adding the new broad-band MT data, we will show the 3-D resistivity structures around (1) the Kumamoto earthquake, (2) Kuju volcano, and (3) Tsurumi volcanoes, and argue its relationship to the hypocenters quantitatively.

#### Acknowledgment

We are greatly indebted to the land owners for their permission for field campaigns. The geomagnetic data used for the remote-reference processing were provided by the Kakioka Geomagnetic Observatory of JMA. This work is partly supported by MEXT KAKENHI Grant Number JP16H06298, the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program, and Earthquake Research Institute, The University of Tokyo under Joint Usage Program.

2016年熊本地震震源域周辺では、地震発生以前から九州大学によるオフライン臨時観測網が設置されていた。このデータに定常点のデータ、地震発生後に大学連合により展開された観測網のデータを加えることで精度が高い震源カタログが作成されつつある。さらに地震波速度構造 (Shito et al., 2017) を考慮した Double Difference 法による震源再決定もあわせて震源分布の特徴が議論されている (Mitsuoka et al., 2019, in preparation)。その結果、これまで内陸地震の下限深度と考えられていた深さのさらに下方に新たに余震活動が生じたことや、本震の大すべり域では余震活動が低調であること、余震域が周辺に拡大していった様子、遠地にトリガーされた地震が阿蘇、九重、鶴見など活動的火山周辺を避けて発生していることなど、多くのことが分かるようになってきた。本発表ではこれらの高精度の震源分布と比抵抗構造を比較することで得られる知見を述べる。

比抵抗構造については、これまで九州で行われてきた広帯域 MT 観測、電位差観測点のデータを 80km x 80km 程度のリージョナルな領域に注目してそれぞれ 3 次元解析した結果を用いる。熊本地震震源域周辺では 170 観測点を、九重山周辺では 110 点、鶴見岳一別府周辺では 80 点の観測データをそれぞれ用い 3 次元比抵抗構造を推定し、震源分布やすべり分布と比較した。その結果、本震や前震など比較的規模の大きい地震の破壊開始点は低比抵抗体のへりに位置すること、地震活動が火山地下の低比抵抗体で阻害されたことに加え、これまで内陸地震の下限深度と思われていた深さからさらに深部にしみだした余震活動は低比抵抗体の周辺部に位置することや、熊本地震とその余震はそもそも低比抵抗体が数多く存在する領域で発生したことなど、さまざまなことが分かってきた。本発表ではそれらの関係性をできるだけ定量的に示し、そこから示唆される意味について論じたい。

#### 謝辞

MT 応答関数推定には気象庁柿岡地磁気観測所の磁場データを参照点として使用しました。本研究は地震調査研究推進本部「平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」、「別府一万年山断層帯 (大分平野一由布院断層帯東部) における重点的な調査観測」、文部科学省科研費「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(JP16H06298)、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」の支援を受けました。広帯域 MT 観測装置の使用は東京大学地震研究所共同利用の助成を受けました。

## 学部学生向け地学実験における空中磁気探査ツールとしての市販ドローンの試用

# 吉村 令慧 [1]; 石川 尚人 [2]; 酒井 敏 [2]; 加藤 護 [2]; 小木曾 哲 [2]  
[1] 京大・防災研; [2] 京大・人環

## Trial use of a commercially-supplied drone as an aeromagnetic survey tool in an experiment for bachelor course students

# Ryokei Yoshimura[1]; Naoto Ishikawa[2]; Satoshi Sakai[2]; Mamoru Kato[2]; Tetsu Kogiso[2]  
[1] DPRI, Kyoto Univ.; [2] Human and Environmental Studies, Kyoto Univ.

Since most of the bachelor students have not studied earth science as science education until they entered university, it is important to provide subjects that attract their interest in earth science in experimental courses as well in terms of broadening the base of the field. On the other hand, traditional/textbook-like methods are utilized in experimental courses, and the content is not necessarily something that accelerates the interest of students. In the introductory level of education, we examined the possibility that it could be a means to attract students' interest by actively using state-of-the-art/much-talked-out technologies.

In this presentation, we report an attempt to use a commercially-supplied drone as a tool for airborne magnetic exploration at the course of the general education in Kyoto University for undergraduate students. In this class, the students took part in trial and error, and successfully conducted airborne magnetic surveys by using Phantom 4 (DJI) and FLFG 17 (Tierra Tecnica: Fluxgate Magnetometer and Logger). We introduce what we are doing and how we overcame the problem, and to look at the future direction.

大学入学までの理科教育として、地球科学の学びを経験した学部学生が少ない現在、実験授業において地球科学に興味を引く題材を提供することは、分野のすそ野を広げる意味でも重要である。一方、実験的授業ではその性質上、伝統的/教科書的な手法を題材とすることが多く、必ずしも学生の興味を加速させる内容とはなっていない。導入レベルの教育では、最新かつ話題の技術を積極的に活用することで、学生の興味を引き付ける手段となる可能性を検討した。

具体的に、京都大学の全学共通科目「探究型地球科学課題演習」における、市販ドローンを空中磁気探査のツールとして活用した試みを報告する。この講義では受講学生は、DJI 社製 Phantom 4 ならびに、テラテクニカ社製 FLFG17 (フラックスゲート磁力計・ロガー) システムを用いて、試行錯誤により空中磁気探査を実現した。何を狙いに、どのように課題を克服したのかを紹介し、今後の方向性を展望したい。

## 繰り返し注水実験から推定される野島断層の回復過程

# 村上 英記 [1]; 大志万 直人 [2]; 吉村 令慧 [2]; 三浦 勉 [2]; 加茂 正人 [2]  
[1] 高知大・自然科学系; [2] 京大・防災研

## Healing process of the Nojima fault damage zone deduced from repeated water injection experiments

# Hideki Murakami[1]; Naoto Oshiman[2]; Ryohei Yoshimura[2]; Tsutomu Miura[2]; Masato Kamo[2]  
[1] Natural Sciences Cluster, Kochi Univ.; [2] DPRI, Kyoto Univ.

<http://sc1.cc.kochi-u.ac.jp/~murakami/>

The 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake (Mw 6.9) ruptured the Nojima fault, Awaji Island, southwest Japan. To investigate the healing process of a fault damage zone after a large earthquake, repeated water injection experiments have been conducted every few years in an 1800-m-long borehole near the Nojima fault from 1997 to 2018. In experiments, the variations of self-potential have been observed around the borehole. From the resulting data, the hydraulic parameters of the fault damage zone decreased until 2003, and then, it stabilized or increased slightly through 2018. These changes in hydraulic parameters indicate that the fault damage zone stabilized within 8 years after the occurrence of the earthquake.

淡路島の西岸部を北東-南西方向に走る長さ約 10km の野島断層は、1995 年兵庫県南部地震 (Mw6.9) の際に断層南東側 (山側) が南西方向に約 1-2m 右横ずれし、約 0.5-1.2m 隆起した。1995 年兵庫県南部地震に先行する野島断層を含む六甲-淡路島断層帯の地震活動は約 1100-2400 年前と推定されている (産業技術総合研究所,2002)。このように繰り返し地震を引き起こす断層では、次の地震に向けてどのようなことが起きているのだろうか。地震を引き起こすためには、歪みを蓄積する必要がある。そのために一度動いた断層面の固着 (回復過程) が進行することが期待される。

1995 年兵庫県南部地震以降の野島断層の回復過程をモニターすることを目的として、深さ 1800m で断層破砕帯を貫くボーリング孔を使用して 1997 年から 2018 年末までに 8 回の注水実験が実施された。この注水実験では、断層の固着過程を注水孔から周辺に水が拡散する際の透水特性により評価する。注水実験時には、隣接するボーリング孔の湧水量とボーリング孔内の歪、周辺の微小地震活動、アクロスによる地震波速度、そして自然電位の計測が実施された。2013 年を除く注水実験では、深さ 540m のボーリング孔の継ぎ手部分から漏水をしていたと推定されるため、野島断層の破砕帯のコア部分ではなくその周辺部の透水特性の時間変化について自然電位計測の結果から述べる。

注水孔周辺の地表面における自然電位は注水時に次の 3 つの特徴を示す: 1) 注水孔周辺が電氣的に負に変化する、2) 変動量は注水孔からの距離が大きくなると小さくなる、3) これらの変化は注水の開始・停止に同期している。これらの特徴は、ボーリング孔から流出した水が周囲の岩石中を流れることにより発生する流動電位がボーリング孔ケーシングパイプを伝わり地表に電位変動を伝えるというモデルで説明できる (Murakami et al., 2001,2007)。注水の流量 (J) と地表面の電位変動から推測する電流量 (I) の比は、水理係数 (透水係数, 空隙率, 屈曲度の関数) と電氣的係数 (水の誘電率, ゼータ電位の関数) の比として表すことができる。注水には、注水実験の現場の近くを流れる小川の水を使用しており、2 回の化学分析から成分に大きな変化は認められなかったため電氣的係数の経年変化は考えにくい。そのため、流量 (J)/電流量 (I) の経年変化は地下の水理係数の変化を表していると考えられる。流量 (J)/電流量 (I) は、1997 年から 2003 年にかけて減少し、2018 年の結果は 1997 年から 2000 年の上限値よりも小さいが 2003 年よりも大きいという結果になっている。2004 年以降のデータには流動電位モデルで説明できない変動も含まれているため、検討の余地が残るものの 1997 年から 2003 年にかけての減少は地震後の数年で断層周辺部の透水性が減少したことを示している。本発表では、モデルで説明できない変動についての検討についても触れる予定である。

本研究は、東京大学地震研究所特定共同研究 (A) 課題番号 1906 「注水実験による内陸地震の震源断層の詳細な構造と回復過程の研究」により実施された。

## 3次元有限要素法を用いた2011年東北沖地震による地殻変動および内部応力のモデリング

# 橋間 昭徳 [1]  
[1] 東大地震研

### Modeling of crustal deformation and internal stress due to the 2011 Tohoku-oki earthquake, Japan

# Akinori Hashima[1]  
[1] ERI, Univ. Tokyo

The 2011 Tohoku-oki earthquake caused as large as 5 m displacements on land, and tens of meters in the offshore. Megathrust earthquakes of this kind forms large strain and stress in the surrounding areas, which are relaxed in decadal timescale. Its surface expression is postseismic deformation. Two mechanisms have been considered for postseismic deformation: the afterslip around the mainshock and viscoelastic relaxation in the asthenosphere. Analysis of postseismic deformation is thus crucial for studies of earthquake generation and viscosity structure.

In this study, we construct a finite element model incorporating the Pacific and Philippine Sea slab geometries based on seismicity. Elastic structure is assigned following the studies of seismic tomography. Fault slip is expressed by a constraint equation defining relative displacements between two sides of the fault. We impose fixed boundary condition on the sides and bottom of the model region.

Using this model, we compute 3-year displacements due to viscoelastic relaxation assuming various viscosity structures. Then, we invert the residual displacements subtracting computed from the observed to obtain afterslip distribution. The optimum model is determined by the minimum of the summation of residuals. Viscosity structure is explored by starting from simple uniform structure and adding the effect of known structure in a stepwise way such as the layering, the oceanic/continental contrast, the cold nose, depth variation of the Philippine Sea slab, and the anomalous low viscosity layer at the bottom of the Pacific plates.

The optimum viscosity structure contains the low viscosity region at the depth of 150-300 km on the continental side and the bottom of the Pacific plates. The elastic thickness on the continental side is 25 km and the cold nose exists within the horizontal distance smaller than 200 km from the trench. The depth of the Philippine Sea slab is determined at 100 km. The low viscosity region at the bottom of the Pacific plate is indispensable to explain the observed westward displacements in the offshore. The inverted afterslip exists between the north and south of the mainshock between past tsunamigenic sources. The displacements due to viscoelastic relaxation and afterslip are of the similar magnitude but distributed complimentary; viscoelastic effect in the south Tohoku and afterslip effect in the north Tohoku and Kanto. The observed horizontal and vertical displacements can thus be explained by considering the both effects.

Using the optimum model, we compute temporal change of the crustal stress. Basically, the stress due to the northeast Japan is extensional of the order of 0.1-1 MPa directing the source region. This stress is gradually propagated westward and the stress pattern changes from normal-fault to strike-slip type. Such stress evolution can explain postseismic change in the focal mechanisms of the crustal earthquakes. Also, it is consistent with change in the seismic velocity on land.

2011年東北沖地震は陸域で最大5m、海域で数十mの変動を引き起こした。このような巨大地震は周辺領域に大きな歪と応力変化をもたらす、その後、数年～数十年スケールの時間をかけてゆっくり解消される。その地表での表れが余効変動である。余効変動を引き起こすメカニズムは、本震の震源域の延長部における余効すべりとアセノスフェアにおける粘弾性緩和の2つが考えられている。したがって、余効変動の解析は、震源過程や粘性構造の推定のために極めて重要である。

本研究では、東北沖地震の余効変動を解析するため、観測に基づく太平洋・フィリピン海プレート上面の形状を取り入れた有限要素モデルを構築した。弾性構造は地震波トモグラフィによる構造を与えた。断層すべりは、断層面の上面と下面に相対変位を与える拘束条件により表現した。また、境界条件はモデル領域の側面と底面で変位固定条件とした。

このモデルを用い、様々な粘性構造を仮定して粘弾性緩和による3年間の変位を計算する。東北沖地震後3年間の観測変位データから粘弾性緩和による計算変位を差し引いた残差変位をインバージョンし、プレート境界面上の余効すべりを求める。そして、粘弾性緩和と余効すべりによる計算変位と観測変位の残差の自乗和を最小にするようなモデルを最適モデルとする。粘性構造としては、簡単な一様粘性構造から出発し、既存研究の知見にもとづき陸側マントルウェッジの成層構造、海側マントル、陸側マントル先端の低温部(Cold nose)、フィリピン海プレートの深さの下限、太平洋プレート下部の低粘性領域の効果を段階的に追加した構造モデルを検討した。

解析の結果得られた最適粘性構造では、低粘性領域が大陸側の深さ150-300kmと沈み込む海洋プレートの屈曲部分の下部に存在し、大きな粘性緩和を起こす。大陸側の弾性層の厚さは25km、Cold noseの存在領域は海溝から200kmまで、フィリピン海プレートの沈み込みの下限は100kmとなった。海域で観測されている西向きの変位は、太平洋プレート下部の低粘性層における粘弾性緩和を考慮しなければ説明できない。また、得られた余効すべりは本震すべり域の北端と南端に過去の津波地震の波源域との間に挟まれるように存在する。

粘弾性緩和と余効すべりによる地震後の変動の大きさは同程度だが空間分布が異なる。粘性緩和は東北地方南部、余効すべりは関東地方と東北地方北部の変位に寄与する。両者の寄与は相補的で、両者を合わせると全域の観測変位を水平・上下成分ともに説明することができる。

以上で得られたモデルを用いて、地殻応力の時間変化を計算した。東北日本における応力変化は基本的に震源域方向への0.1~1 MPa オーダーの伸張応力である。時間とともに、応力変化は西方に広がる一方、応力パターンは正断層タイプから横ずれタイプへと変化する。このような応力変化は、巨大地震後のプレート内地震のメカニズム解の変化を説明することができるほか、巨大地震に伴う陸域の地震波速度の変化とも調和的である。

## 層構造を持つ弾性媒質中の変位・応力源から生じるピエゾ磁場の波数空間における表現式

# 山崎 健一 [1]  
[1] 京大・防災研

### An analytical solution of the piezomagnetic field generated by a point dislocation source in a stratified elastic medium

# Ken'ichi Yamazaki[1]  
[1] DPRI, Kyoto Univ.

In this presentation, a general procedure is presented to derive a closed form expression (i.e. analytical solution) of the piezomagnetic field generated by a point dislocation/expansion source in a layered elastic medium. Although a similar problem has been treated by Okubo & Oshiman (2004) by using a numerical integration, the present work derives an analytical solution. The governing equations described by partial differential equations are reduced to a set of ordinary differential equations after a suitable transformation of variables; thus, they can be solved analytically. An advantage of employing analytical solutions is that analytical solutions for elastic media can be extended to those for viscoelastic media by means of the "Correspondence Principle" [c.f. Bonafede et al., 1986]. The solution for layered viscoelastic media will be presented in the next meeting.

この発表では、弾性乗数が層構造をもつ媒質中に点状の圧力あるいは食い違い源が置かれた場合にピエゾ磁気効果によって生じる磁場（ピエゾ磁場）の表現式を波数空間において閉じた形（解析解）で求めるための一般的手順、および層が少ない場合についての具体的な形を報告する。

ピエゾ磁場を計算する目的は、地震や火山噴火に伴う地磁気変化の原因を明らかにすること、あるいは、地磁気変化の観測値から応力・変位源に関するパラメータを推定することである [e.g. Ueda et al., 2005; Napoli et al., 2007; Yamazaki, 2013]。その計算の基礎として、多くの場合、単純化された媒質中の応力・変位源から生じるピエゾ磁場の表現式 [e.g. Sasai, 1991; Utsugi et al., 2000] が用いられる。しかし実際の地殻は決して一様な半無限媒質ではない。少なくとも深さ依存性を持っている。もしも弾性不均質がピエゾ磁場に大きく影響するならば、地震・火山噴火に伴う地磁気変化に関する観測研究を進めるうえで修正を加える必要がある。

Okubo & Oshiman [2004] は、層構造弾性媒質中の球状圧力源（山川—茂木モデル）から生じるピエゾ磁場を計算する手順を提案した。彼女らの方法は、変位—応力場は閉じた形の表現式（解析解）で求める一方で、対応する磁化分布とそこから生じるピエゾ磁場は数値積分で評価するものである。だが、Currenti et al. [2008] が指摘しているように、圧力源あるいは食い違い変位源が点とみなされる場合、ピエゾ磁場も解析解で表現することができる。それを具体的に示すのが本報告である。

今回報告する計算手順では、問題の軸対称性を利用して、偏微分方程式で記述される支配方程式を波数空間における常微分方程式に帰着する。Okubo & Oshiman が利用した弾性場の解はこうして得られたものであるが、同様の方法は磁場についても適用可能であり、磁化分布が波数空間で与えられたならば磁場分布の解析解も波数空間で得られる。弾性場とピエゾ磁気効果による磁化分布を結びつける線形の構成法則は、波数空間においても線形関係式として記述することができる。これらによってピエゾ磁場の表現式を閉じた形で書き下すことができる。

弾性層構造媒質から生じるピエゾ磁場を計算するだけならば、先行研究のような数値積分による方法で十分である。解析解を求めた理由は、対応原理 [e.g. Bonafede et al., 1986] を利用することで粘弾性層構造媒質から生じるピエゾ磁場の表現式に拡張できるからである。ピエゾ磁場の計算においても粘弾性の考慮が重要であることは、粘弾性半無限媒質を仮定した先行研究 [Currenti et al. 2008] でも示されているので、これは重要な拡張である。粘弾性層構造媒質から生じるピエゾ磁場の表現式とその応用については、次の学会で報告する予定である。

## 地殻岩石の応力磁気効果によるコサイスマックかつグローバルな過渡的・静的地球電磁気変化の解析解(1)トロイダル変位起源成分

# 小河 勉 [1]  
[1] 東大・地震研

### Analytic solutions of coseismic global transient/static geoelectromagnetic variation due to the piezomagnetism of crustal rocks(1)

# Tsutomu OGAWA[1]  
[1] ERI, Univ. Tokyo

In quantitative theoretical studies on coseismic geoelectromagnetic (GEM) variations (GEMVs) due to the piezomagnetic (PM) effect of crustal rocks, principal attention has been paid to the geomagnetic change between the periods before and after fault motions. It is, however, expected in principle that the GEMVs due to the PM effect begin as the fault motions start and continue through the radiation and propagation of stress variation accompanying traveling seismic waves. The present study pays attention to the derivation of mathematical expression of the GEMVs excited during the sequence of the process of elasticity. In quantifying the transient behavior of the GEMVs, it is necessary to consider the electrical conductivity structure of the earth in the frequency band in which the electromagnetic (EM) induction is necessary to be considered. In addition, in case that the GEMVs in wide area is considered, it is necessary to consider whether the ionosphere is negligible in the quantification. Considering above, the present study aims to show the derivation of the analytic solutions of coseismic and global GEMVs caused by the toroidal displacement (TD) by a fault motion and the magnetization variation due to the PM effect, using the spherical harmonic analysis (SHA).

Four reasons to pay special attention to the TD can be pointed out. The mathematical expression of the TD is simpler than that of the spheroidal displacement (SD) for, firstly, the number of the components is smaller. Secondly, in the quantification using the modeled earth structure, as the outer core realistically considered is fluid, the spatial region for the analysis shrinks to the crust and the mantle only and, as a result, the number of terms to be considered becomes smaller which makes it easier to consider whether the ionosphere is negligible. In addition, since the TD is divergence-free, the resultant stress variation is, thirdly, worth being paid attention to for its effective generation of the magnetization variation based on the principle of the PM effect that the hydrostatic pressure is insensitive in causing the magnetization variation. Moreover, as the divergence of the SD causing the density variation in an elastic body excites the gravity variation, the elastic and gravity fields couple to one another, while the TD does not excite the gravity variation. It suggests, fourthly, to GEM studies the analyses of the coupling between the TD and the GEMVs.

The analytic solutions are derived for a tensor seismic moment in the crust given as a point source in the space in which the properties varies only in the radial direction discontinuously. Elastically, the earth interior is regarded to be composed of the crust and the mantle, with the traction-free boundary at the earth surface and the core-mantle boundary. Electrically, the earth structure is simplified to be four-layer: the ionosphere, the atmosphere, the crust and the mantle, with the outer space and the outer core regarded to be insulating and perfectly conducting, respectively. Assuming isotropic and homogeneous properties in each layer, the analytic solution of the transient and static GEMVs can be simply and explicitly derived in the time domain with the SHA based on deriving the expression of the magnetization variation due to the PM effect in the crust caused by coseismic stress variations accompanying a fault motion which travel with the propagation of seismic waves, with the initial magnetization in the crust. The boundary conditions gives the equations of the eigen frequency for the elastic field and the eigen time constant for the EM fields. The analytic solutions in the time domain can be expressed as the superposition of normal modes.

The solutions and behaviors of elastic and electromagnetic fields are shown together with the quantitative consideration whether ionosphere is negligible.

地殻岩石の応力磁気効果によるコサイスマックな地球電磁気変化の定量的理論研究においては、これまでは断層運動の終了後と開始前の静的な地磁気の差の算出に主に着目されてきた。しかし応力磁気効果による地球電磁気変化は原理的には断層運動の開始とともに始まり地震波の放射と伝播に伴う応力変化によって励起され続ける。一連の弾性過程を通じて励起される地球電磁気変化の解析的表現の導出が本研究の主眼の一つである。その際に、過渡的な地球電磁気変化の評価については、電磁誘導を考慮すべき周波数帯域では電気伝導度構造を考慮する必要がある。加えて特に広域的な変化を考慮する際には、電離圏の考慮の要否を検討する必要がある。以上を考慮し、本発表では特に断層運動に伴うトロイダル変位場の発生による応力変化が応力磁気効果を通じて磁化の時間変化を発生させることにより生じるコサイスマックかつグローバルな地球電磁気変化の解析解を球面調和解析により導出した結果を示す。

トロイダル変位場に最初に着目した理由は4点ある。第1に数学的表現上はスフェロイダル変位場と比較して成分の数が少ないため単純である点において、第2には現実的な地球の構造をモデル化して定量的評価を行う際、外核が液体であるために解析対象空間領域がマントルと地殻だけに狭まり、よって項数が減る点で、電離圏の考慮の要否の検討が容易である。加えてトロイダル変位場は無発散なベクトル場であるため、第3に応力磁気効果は静水圧に対して感度がない物性であるので磁化時間変化をより効率よく発生させ得る応力変化が着目すべき点である。更にスフェロイダル変

位場の発散は弾性体中の密度場の変化となってコサイスマックな重力変化の励起源となり、弾性場と重力場が結合する一方、トロイダル変位場は重力変化を励起しない。そのため第4にトロイダル変位場は地球電磁気変化とは結合する弾性場であり、その挙動は地球電磁気学に固有なテーマを与える点である。

場の解析解は、地震モーメントテンソルを地殻内部に点震源として与え、動径方向1次元に不連続に物性が変化する空間に対して導出する。弾性的には地球内部を地殻とマンツルの2層構造とみなして地表とコアマンツル境界を無トラックションとする。電氣的には宇宙空間及び外核の電気伝導度はそれぞれ0及び無限大の極限を取り、電離圏、大気圏、地殻及びマンツルの4層構造と単純化するものとする。各層に等方均質な物性を仮定すれば、地殻岩石の初期磁化を与えて断層運動によるコサイスマックな応力変化の地震波による伝播と地殻内における応力磁気効果とによる磁化変化の算出から、過渡的及び静的な地球電磁気変化の解析解は球面調和解析により時間領域で単純かつ陽に得られる。その際、境界条件より弾性場の固有周期と電磁場の固有時定数とが満たす方程式が導かれる。よって時間領域解析解は正規モードの重ね合わせで表現できる。

本発表では導出された解析解とともに、物性定数の代入から地表で観測される弾性場及び電磁場の挙動、特に電離圏の考慮の要否を定量的に示す。

## 環電流型磁場変動による薄層球殻モデルの電磁誘導計算

# 大志万 直人 [1]  
[1] 京大・防災研

## Electromagnetic Induction in a Conducting Spherical Thin Shell in which the Electrical Conductivity is Distributed Non-uniformly

# Naoto Oshiman[1]  
[1] DPRI, Kyoto Univ.

EM induction studies on thin sheet approximation of conductor have been made since Price(1949). Recently, most of all thin-sheet numerical modeling with finite electrical conductivities for global electromagnetic induction are based on methods of quasi-analytical solutions after representing the EM fields in terms of toroidal and poloidal potential. Kuvshinov and Pankratov(1994), Koyama and Utada(1998), Kuvshinov et al.(1999), and Sun and Egbert(2012) have developed numerical solvers for global EM induction including a surface thin sheet shell structure.

On the other hand, since the mid-1990s, several simulators for global EM induction in a 3D sphere have been developed on the basis of the finite difference method (FDM) or the finite element method (FEM or the edge-based FEM) for solving the EM differential equation (e.g. Everett and Schultz, 1996; Maritinec, 1999; Uyeshima and Schultz, 2000; Yoshimura and Oshiman, 2002). However, in those simulators, a thin sheet approximation, which is very useful for modeling ocean distribution on the Earth's surface, is not well implemented.

Based on Price(1949)'s theory, Rikitake(1992) proposed numerical methods to solve EM induction problems of axially symmetrical cases of finite electrical conductivity distribution in a spherical thin shell, such as a spherical shell having a hole, including the potential value at the origin of the spherical coordinates. In the method, since the inside of the shell is empty, coupling induction effects between the shell and conductive layers beneath the shell cannot be evaluated. However, thin shell models in which the electrical conductivity distribution represents land-ocean distribution of the earth are very useful to study global induction phenomena in the Earth's ocean.

In 2017 SGEPS fall meeting, I presented the method of full 3D induction modeling of thin sheet spherical shell, namely cases of non-axial and non-uniform distribution of the electrical conductivity of the thin sheet shell, based on the method for solving axial symmetrical problems proposed by Rikitake(1992). The calculation code is further extended to a case of a ring current type source of inducing magnetic field. In this presentation, several calculated results obtained from spherical thin sheet models having the land-ocean distribution under the inducing magnetic field of the ring current source type will be shown in comparison with model calculation results under the uniform inducing field case.

薄層の電磁誘導問題についての理論的研究は、Price(1949)の成果にそのルーツをさかのぼることができる。近年、グローバルな薄層球殻を構造に含む電磁誘導問題の解法としては、求める場をトロイダル成分とポロイダル成分に分離したうえで、積分方程式を基にして解くというような手法が主として活用されてきた。例えば、Kuvshinov and Pankratov(1994)、小山・歌田(1998)、Kuvshinov et al.(1999)、また、最近では、Sun and Egbert(2012)などで、モデルの表面上に薄層球殻の電気伝導度構造を設定することが可能である。

一方で、1990年代半ばごろから、電磁誘導の方程式を解くために差分法、有限要素法、辺要素有限要素などの手法を用いた、3次元グローバル電磁誘導モデリングのための様々な数値シミュレーターが提案されてきた。例えば、Everett and Schultz(1996)、Maritinec(1999)、Uyeshima and Schultz(2000)、Yoshimura and Oshiman(2002)などである。しかし、これまでに開発されてきたこれら微分方程式を基礎にした一連のシミュレーターでは、地球表面の海陸分布などをモデル化するのに威力を発揮する薄層近似を、モデルの中に取り込むことまでは至っていない。

Rikitake(1992)は、Price(1949)の理論を有限な電気伝導度の軸対称薄層球殻モデルに適用し、差分法を基礎として数值的に直接解くという手法を提案している。このモデル解法では、薄層球殻内部は、電磁伝導度構造を持たない真空領域として扱われているものの、グローバルな電磁誘導問題を解くために、微分的手法を基礎とした解法(差分法、有限要素法など)に係わる研究推進のためには、非常に適した課題であると考えられる。そこで筆者は、数年前からこの解法に係わる研究を行ってきており、すでにRikitake(1992)が扱った軸対称問題についての解法に係わる問題点とその解決手法に関しては、2015年度のCA研究会で、また、3次元球殻モデルへの実際の適用結果に関しては1997年SGEPSS秋の総会でもすでに報告してきた。その後、この3次元薄層球殻計算コードを、一様磁場の場合だけではなく誘導磁場が環電流型の場合にも適用できるように拡張した。今回は、海陸分布を設定した薄層球殻モデルに関して、環電流型磁場変動の場合と一様磁場変動により薄層球殻中に誘導される電流分布の違いなどに関して報告する。

## 地磁気・地電流データに含まれる電磁場コヒーレントノイズの除去に関する数値実験

#小川 大輝 [1]; 浅森 浩一 [1]; 濱 友紀 [2]  
[1] 原子力機構・東濃地科学センター; [2] 日鉄鉱業

### Numerical experiment for reduction of coherent noise included in magnetotelluric data

# Hiroki Ogawa[1]; Koichi Asamori[1]; Yuki Hama[2]  
[1] Tono Geoscience Center, JAEA; [2] NMC

In magnetotelluric (MT) surveys, the remote reference method (Gamble et al., 1979) has been widely utilized to reduce noise included in observed data by calculating the cross-correlation between electromagnetic components at a local site and those at a reference site. However, it is difficult to remove coherent noise, which is correlated between the electromagnetic fields, besides it is hardly distinguishable from the natural MT signal.

This study presents an attempt to reduce the coherent noise from observed MT data. The time-series data were transformed into the time-frequency data by means of continuous wavelet analysis. Following this, frequency-domain independent component analysis (FDICA) was applied to those data. Since the observed data are assumed to be composed of the MT signal, the coherent noise, and the incoherent noise, the time-frequency data were classified into the XY mode and the YX mode so that both input and output of FDICA in each mode would have three components. The input data in each part of FDICA consist of electric and magnetic fields at the local site and magnetic field at the reference site. Of the three output components (the separated signals), the separated signal indicating the MT signal was assumed to show the maximum ratio of cross power spectrum between itself and the reference magnetic component to auto power spectrum, according to Negi et al. (2010). Regarding the remaining two separated signals, we identified the one correlating highly with the local magnetic component as the coherent noise. The median of the absolute values of the signal was calculated, and the value during the noise-generated period was eliminated if it exceeded the median. In the case where two separated signals other than the MT signal correlated highly with the local magnetic component, values of those two signals or the one which had higher correlation coefficient were eliminated so as not to change the ratio of reconstructed local electric to magnetic component drastically. After reconstructing the local electromagnetic components, they were divided into several fine sections along a time axis. The sections which had outliers of the off-diagonal components of the magnetotelluric impedance tensors were eliminated to remove the remaining coherent noise after conducting FDICA. Lastly, apparent resistivity and phase curves were derived from the final magnetotelluric impedance tensor calculated by above procedures and the remote reference method.

In this experiment, the observatory located in Kirishima City, Kagoshima Prefecture, and the Esashi Station of the Geographical Survey Institute of Japan were used as the two sorts of local sites, while that located in Nishiwaga town, Iwate Prefecture, as the reference site. We used 15-hour data sampled at a rate of 15 Hz and acquired at each site in January 2015. Coherent square wave noise was added to all of the horizontal electromagnetic components of the data at the local sites. Each amplitude of the square wave noise was set randomly ranging from 1 to 5 times as large as the median of the amplitude of the corresponding raw time-series component.

As a result of applying the proposed method to the observed data mentioned above, the quality of the magnetotelluric spectra in both two local sites improved so greatly that the trends of their apparent resistivity became clearer. In the frequency band above 0.01 Hz, especially, values of the reconstructed apparent resistivity were much closer to those before contamination. These results verify that the effect of the coherent noise on the observed data was reduced by the proposed method.

Acknowledgement: We thank the Nittetsu Mining Consultants Co. Ltd. for kindly letting us use their continuous MT records in Kagoshima Prefecture along with the reference geomagnetic records in Iwate Prefecture.

自然電磁場を信号源とする MT 法 (Magnetotelluric Method) では、探査領域の測点と遠方の参照点での電磁場成分の相互相関をとることで、測点で観測されたデータに対するノイズの寄与を小さくするリモートリファレンス法 (Gamble et al., 1979) が広く利用される。しかし、電磁場間で相関が高いコヒーレントノイズは自然電磁場による応答との区別がつきにくいだけでなく、リモートリファレンス法を用いても除去が困難であることがよく知られている。

本研究では、MT 法の観測データにおけるコヒーレントノイズを除去し高品質な電磁場スペクトルデータを取得する手法を考案した。本手法は、連続ウェーブレット解析によって時系列を時間・周波数信号に変換した後、それらに周波数領域独立成分分析 (Frequency-Domain Independent Component Analysis: FDICA) を適用するものである。FDICA の際、自然電磁場変動に関連する信号 (シグナル)、コヒーレントノイズ、非コヒーレントノイズの 3 種類の源信号から観測データが構成されると仮定した。そのため、時間・周波数信号を東西の磁場変動に関連する XY モードと南北の磁場変動に関連する YX モードに大別することで、各々のモードの FDICA において入出力信号成分が 3 成分ずつになるようにした。両モードとも入力信号成分は、測点の水平電磁場 2 成分と参照磁場 1 成分から構成される。また、信号におけるノイズの寄与が小さくなるに従い、信号と参照磁場との相互パワースペクトルと、信号の自己パワースペクトルの比が

大きくなる（根木ほか, 2010）．そのため，3成分からなる出力値（分離信号）のうち，参照磁場との相互パワースペクトルと自己パワースペクトルの比が最大となる分離信号成分が，シグナルを表しているとした．残りの2成分については，コヒーレントノイズを受けた測点の水平磁場との相関係数が大きい分離信号成分が，コヒーレントノイズを表しているとした．その分離信号成分の絶対値の中央値を計算し，ノイズ加算時間帯において中央値を超える値を0に置換した．シグナル以外の2つの分離信号成分のいずれも測点の水平磁場と大きい相関係数を示す場合は，復元させた測点の水平電場と水平磁場の比を急変させないように，両方または相関係数がより大きい方の分離信号成分のノイズ加算時間帯の値を除去した．こうしてコヒーレントノイズと判断した分離信号成分を処理したデータから，測点の水平電場と水平磁場を復元した．その後，それらを時間軸上で複数の微小区間に分け，各々の区間で計算したインピーダンス非対角要素の外れ値をとる区間を判定し，これらを除去した．このようにして，FDICAで検出しきれなかったコヒーレントノイズを除去した上で，各周波数における電磁場スペクトルデータを算出した．さらにリモートリファレンス法をこれらに適用することで，最終的な見掛比抵抗・位相曲線を求めた．

本数値実験では，鹿児島県霧島市及び国土地理院江刺観測場の2測点と，岩手県西和賀町の参照点を用いた．いずれの時系列も2015年1月に，15 Hzのサンプリング周波数により15時間分ずつ取得された．また，2測点各々の時系列の水平電磁場4成分に対して，コヒーレントノイズを想定した矩形波ノイズを加算した．ここで加算した矩形波ノイズの振幅は，時系列の各々の成分の振幅の中央値の1～5倍の範囲で，ランダムに変化させた．

以上の2測点の観測データに本手法を適用した結果，電磁場スペクトルデータの品質が改善し，見掛比抵抗の傾向が明瞭になった．特に0.01 Hz以上の周波数帯域では，矩形波ノイズを加算する前の見掛比抵抗に非常に近い値が得られた．この結果は，観測データに混入したコヒーレントノイズの影響が本手法の適用により低減されたことを示唆する．

謝辞：日鉄鉱コンサルタント株式会社所有の鹿児島県・岩手県の常設MT測点のデータを，測点及び参照点データとして使用させていただきました．謝意を表します．

## 独立性及び複帯域性に基ついた自然電磁場データからのノイズ除去の試み

# 佐藤 真也 [1]; 後藤 忠徳 [2]

[1] 京大・工; [2] 京都大学

## Challenge in noise reduction from natural EM data based on independence and multiband

# Shinya Sato[1]; Tada-nori Goto[2]

[1] Engineering, Kyoto Univ.; [2] Kyoto Univ.

It is important to conduct a MT survey near a population area when surveying an active fault for evaluating disaster risk. However, it is difficult to visualize the subsurface resistivity structure because electromagnetic (EM) noises contaminate the EM data acquired at such area. Near a population area, two conditions are expected: a) most time-series of EM data are contaminated by large EM noises, and b) the number of EM signals and noises is more than the number of observed components (i.e., underdetermined system). Many methods for noise reduction of MT data have been suggested and have succeeded to derive MT responses with high accuracy from noisy data (e.g., Egbert, 1997; Chave and Thomson, 2004; Weckmann et al., 2005). However, these are not assumed to be used under such a great noise-level environment. The noise reduction method based on Independent Component Analysis (ICA) at Frequency Domain was suggested by Sato et al. (2017; 2019, submitted), and can decompose noisy data into EM signals and EM noises with high accuracy. However, the accuracy of ICA-based method degrades when three or more large noises are included in MT data at a station. We therefore must remove EM noises directly from EM data under an underdetermined system in order to derive MT responses at a population area with high accuracy. We newly propose noise reduction method maintaining its accuracy under an underdetermined system focusing on their statistical independence and characteristics of multiband. The proposal method is named Independent Multiband EM-Signal Analysis (IMEMSA).

Here, we introduce the algorithm of IMEMSA shortly. IMEMSA is designed combining ICA and Nonnegative Matrix Factorization (NMF: Kameoka et al., 2009 or Multi-Channel NMF: Sawada et al., 2013; Sato and Goto, 2018). ICA can estimate source signals with high accuracy under overdetermined and determined systems. However, it cannot be applied theoretically under an underdetermined system. NMF can estimate the components Basis constituting source signals focusing on signals' characteristics of multiband theoretically even under an underdetermined system. However, NMF has its instability to work properly. Additionally, NMF's cost function focuses on only large amplitude, and this is the reason for its difficulty to apply to EM data including large noises. For example, when electric field data and magnetic field data have S/N below 0.1 and 0.5 respectively, EM signals cannot possibly be reconstructed by NMF. At first in IMEMSA, we apply ICA to EM data and obtain independent separated components. Using magnetic field data at a remote site, we divide the separated components into two class: a) including EM signals much (defined here as  $Y_s$ ) and b) including noises much ( $Y_n$ ). We make the spectrogram of  $Y_s$  combining  $Y_s$  obtained at each frequency. Applying NMF to the spectrograms, NMF can start near the EM signals and derive Basis. We apply the same process to  $Y_n$ , and NMF can start near the noises and derive Basis. These obtained Basis are classified into noises and EM signals using reference data. As a result, we can separate and extract EM signals and noises from the underdetermined system.

In the presentation, we introduce the detail algorithm of IMEMSA and the application example to synthetic data.

災害リスク評価などのために、MT法が活断層調査に用いられているが、大都市近郊での実施例は限定的である。都市域ではノイズの電磁 (EM) データへの混入により、地下構造解析が困難となる場合が多いためである。この時、時系列の大部分に大きな振幅を持ったノイズが混入していること、かつ、観測データの数よりも EM 信号・ノイズの数の方が多いこと (劣決定問題) が予想される。様々なノイズ除去法がこれまで提案されてきたが (例えば、Egbert, 1997; Chave and Thomson, 2004; Weckmann et al., 2005)、このような環境下での解析は想定されていない。また、独立成分分析 (ICA) に基づき直接ノイズを EM データから分離する手法 (Sato et al., 2017; Sato et al., submitted, 2019) も提案されたが、1箇所 の EM データに対して大きなノイズが3成分以上混合した場合、分離精度は低下する。それ故、都市域での EM データから高い精度で MT 応答関数を導出するためには、劣決定条件下で直接 EM データからノイズを抽出・除去する必要がある。本研究では、信号とノイズ間における 1) 独立性および 2) 複帯域性に着目することで、劣決定条件下においても、EM データからノイズを除去できる手法、すなわち独立複帯域 EM 信号解析 (Independent Multiband EM-Signal Analysis: IMEMSA) を新たに提案する。

ここでは IMEMSA のアルゴリズムについて、簡単に紹介する。IMEMSA は ICA と非負値行列因子分析 (NMF: Kameoka et al., 2009; Sawada et al., 2013; Sato and Goto, 2018) の両アルゴリズムを用いたものである。ICA は優決定条件下では、原信号の推定を高い精度で可能である一方、劣決定条件下では適用することが難しい。NMF では、信号の複帯域性に着目し、理論上では劣決定条件下においても、原信号を構成する要素 "Basis" を推定可能な手法であるが、信号分離の安定性に問題が残る。NMF の目的関数は、大きな振幅の信号・ノイズへの重みが大きく、(音声データとは異なり) 様々な信号・ノイズを含む EM データに適用は困難である。例えば、電場の S/N が 0.1、磁場の S/N が 0.5 程度の場合、EM 信号を NMF では表現できない可能性がある。そこで IMEMSA では、まず EM データに対し ICA を適用し独立な分離信号を得る。分離信号に対して、参照観測点で取得された磁場データを基準に、EM 信号を多く含んでいるもの ( $Y_s$ ) と、ノイズ

を多く含んでいるもの( $Y_n$ )とに分類する。各周波数で得られた $Y_s$ を結合し、 $Y_s$ に関するスペクトログラムを生成し、NMFを適用することで、EM信号の近傍でBasisを探索することが可能である。 $Y_n$ に関しても同じ処理を施すことで、ノイズの近傍でBasisを探索することが出来る。こうして得られたBasisから、Referenceデータを用いて、EM信号・ノイズに相当するものを判別する。その結果、劣決定条件下においても、EM信号・ノイズの分離・抽出が可能となる。発表では、IMEMSAの詳細なアルゴリズムと、仮想データへの適用例を紹介する。

## 阿蘇火山中央火口丘の磁化構造について

# 宇津木 充 [1]

[1] 京大・理・火山研究センター

## Magnetic structure of the central cone of Aso volcano .

# Mitsuru Utsugi[1]

[1] Aso Vol. Lab., Kyoto Univ.

On Aso volcano, to reveal the subsurface magnetic structure of the volcanic bodies, some aeromagnetic surveys were conducted in previously: on 2002 by Kyoto Univ, 2004 and 2005 by CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry), and 2013 by MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism) and Nippon engineering consultants CO., LTD. On this study, we tried to analyze these previous data, and tried to obtain detailed subsurface 3D magnetic structure of Aso volcano.

To the IGRF residuals of the observed data, terrain effect correction and linear trend surface analysis were applied. Further, block mean of this data over each 50m x 50m x 50m region was calculated, and this result was used as the input data of the 3D magnetic inversion.

Using this data as an input, the magnetization intensity distribution inside the volcanic bodies was determined by L1-L2 norm regularized magnetic inversion. For this process, we divided the central cone of Aso volcano of about 10 x 10 km and the depth up to 2.5 km into 200 x 200 x 50 small blocks (where, the dimension of each block is 50m x 50m x 50m), and we determined the magnetization of each block. At this time, it was assumed that the magnetization was constant in each block, and the direction of magnetization was parallel to the current direction of the earth's magnetic field. In this presentation, detailed results of our magnetic inversion will be introduced.

On this research, we provided the magnetic data from CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry), MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), and Nippon engineering consultants CO., LTD, and received the permission for data use.

阿蘇火山ではこれまでに、山体構造の把握を目的に、中岳火口及び中央火口丘上空でヘリコプターを用いた空中磁気観測が行われた。2002年には中岳上空2km x 2kmの範囲で、複数の高度における空中磁気観測が行われた。2004年及び2005年には、電力中央研究所の主導のもと、草千里～中岳を含む約6km x 6kmの範囲で空中磁気観測が行われた。さらに2013年には、国土交通省及び大日本コンサルタントにより東西約14km、南北8kmの領域で空中磁気観測が行われた。本研究では、これらのデータを再解析し、2014年噴火前の阿蘇火山の山体磁化構造を求めた。

解析に先立ち地形効果の除去を行った。山体が一様に磁化した場合に期待される磁気異常を計算し、IGRF補正済みの実測値との残差が最小になるよう一様磁化の値を求めた。この一様磁化の値は対象領域の平均的な磁化に相当すると考えられるが、計算の結果約3A/mと見積もられた。次に、観測範囲のスケールを超える長波長な磁気異常の影響を除去するため1次傾向面解析を施し線形トレンドを除去した。構造解析に於いては、地下を一様なグリッドに分割し、各々のグリッドの磁化強度を未知パラメータとしてインバージョンで最適解を推定する。この際のグリッドサイズが磁気異常を再現できる最短波長を規定するが、実測データに含まれる最短の波長をこれに揃え計算の安定度を増すため、地形補正、傾向面補正済みのデータに対し、上空の各50m x 50m x 50mの範囲でblock meanを求め、これをインバージョンの入力データとした。

インバージョンにあたっては、阿蘇火山中央火口丘を含む10 x 10km、深さ2.5kmまでの領域を200 x 200 x 50の小ブロックに分割し、各々のブロックの磁化を求めた。この際、単に残差を最小にするのではなく、正則化項を付加した目的関数(残差項と正則化項をパラメータで結合したLagrange関数)を最小化することを行った。なお正則化項についてはモデルのL1ノルム及びL2ノルムからなるものを用いた。L1ノルム正則化項を用いる事でモデルに疎(スパース)性がもたらされることが知られており、これにより、より解像度の高い結果が得られることが期待される。本発表では、この磁化構造インバージョンの解析結果について詳細を紹介する。

\*本研究に当たっては、電力中央研究所、国土交通省、大日本コンサルタント様にデータを供与頂きましたと共に、データ使用についての許諾をいただきました。ありがとうございました。

## 霧島硫黄山におけるドローン空中磁気測量

# 小山 崇夫 [1]; 金子 隆之 [2]; 大湊 隆雄 [3]; 渡邊 篤志 [3]; 本多 嘉明 [4]  
[1] 東大・地震研; [2] 東大地震研; [3] 東大・震研; [4] 千葉大・環境リモセン研究センター

### Aeromagnetic survey by drone in Iwoyama, Kirishima volcano

# Takao Koyama[1]; Takayuki Kaneko[2]; Takao Ohminato[3]; Atsushi Watanabe[3]; Yoshiaki Honda[4]  
[1] ERI, University of Tokyo; [2] ERI, UTokyo; [3] ERI, Univ. Tokyo; [4] CEReS, Chiba Univ.

In Mt. Iwoyama, Kirishima, volcanic tremors have occurred since the end of 2013, and then some fumaroles are observed. A small phreatic eruption has occurred in the south of the edifice on 19th April 2018, in which the last eruption has occurred about 250 years ago. According to geodetic deformation measurements, inflation of the edifice was detected. The pressure source location is inferred at about 1km below the surface. Also, according to MT surveys, a clay layer is detected in the shallow area due to hydrothermal alteration. Therefore, the phreatic explosion may have happened due to vaporization of volcanic fluid through cracks of the clay layer (Tsukamoto et al., 2018). It is important to observe thermal change and gas emission at such a crack prior to explosions in order to understand the process of the phreatic explosion.

We have conducted high-resolution aeromagnetic survey by drone in Iwoyama in order to detect temporal variation of subsurface thermal distribution by repeating measurements in the future. In our survey, the DJI Matrice 600 Pro multicopter is used and Geometrics G-858 cesium optical pumping magnetometer is installed on it. The magnetic sensor is hung down at 5m from the drone. A GNSS receiver with barometric altimeter is also installed in order to correct the time and measure the position. It totally flew more than 15 km by 10 flights in a half of days. The flight courses were programmed prior to flights, and thus they can be reused again in the future surveys, and retrieve geomagnetic data along the same course.

We have carried out flights in 50 m and 100 m above the surface. In the west of survey area, geomagnetic total intensity anomaly by 750 nT at 50 m above and 500 nT at 100 m above were found. In the east, which is just above the Mt. Iwoyama, the anomalies are 400 nT at 50 m above and 100 m above. It indicates that demagnetization is occurred beneath the Mt. Iwoyama as inferred. By conducting repeated surveys, we try to detect the temporal variation of the thermal condition in the future.

霧島硫黄山では、2013年末頃から火山性微動が観測され、その後噴気が復活するなどその活動を活発化させて、2018年4月19日におよそ250年ぶりの噴火となる水蒸気爆発が南側で発生した。地殻変動観測では以前より深さおよそ1kmを圧力源とする膨張が観測されており、また、比抵抗構造探査からは顕著な熱水変質した粘土層の存在が示唆されており、この水蒸気爆発はその圧力膨張源によって熱水が粘土層を割って上昇し、減圧膨張によって引き起こされたと考えられる (Tsukamoto et al., 2018)。今後は弱点となったその割れ目が弁となり、過剰圧により再び熱水を運びあげる役目をする可能性があるため、そのような熱異常を事前に観測することが今後の火山活動の推移を見る上で重要である。

本研究では、地下の熱異常分布の時間変化の検出を目標とし、今後繰り返し面的観測を実施できるように、ドローンを用いて空中磁気測量を試みた。ドローンはDJI社製マルチコプターMatrice600Pro、磁力計はGeometrics社製セシウム磁力計G-858を使用した。磁場センサーはドローン機体磁気の影響を軽減させるため、およそ5m下方に吊り下げた。また、時刻校正と測位データ取得のため、気圧高度計付き携帯型GNSS受信機も併せて搭載した。総測線長さは15km強で、およそ半日、10フライトをかけて測定した。フライトコースは事前にプログラミングしており、今後そのプログラムコースを再度使用することで、同一測線上の繰り返し観測が可能となる。

本観測では、対地高度50mと100mとでフライト測定を実施した。測定域西側では、対地高度50mの測線上でおよそ750nT pp、対地高度100mの測線でおおよそ500nT ppの全磁力異常が見られたのに対し、硫黄山上空にあたる測定域東側では、それぞれおよそ400nT pp、200nT ppの全磁力異常であった。このことは、予想されるように、硫黄山下では高温による熱消磁が起り、測定される全磁力異常が小さくなっていると考えられ、今後この異常の時間変化を検出することによって、地下の熱活動の変化を捉えることを試みる。

### 3-D multiphase flow modeling: a method to constrain electrical conductivity structure of volcanoes

# Marceau Gresse[1]; Takao Koyama[2]; Makoto Uyeshima[3]; Tsuneo Ishido[4]; Yuichi Morita[5]; Yoichi Sasai[6]; Jacques Zlotnicki[7]; Hideaki Hase[8]; Wataru Kanda[9]; Yasuo Matsunaga[10]; Koki Aizawa[11]; Hideki Ueda[12]; Tawat Rung-Arunwan[13]; Maki HATA[14]; Yusuke Yamaya[15]

[1] ERI; [2] ERI, University of Tokyo; [3] ERI, Univ. Tokyo; [4] AIST; [5] ERI, UTokyo; [6] EPRC, IORD, Tokai Univ.; [7] CNRS (France); [8] KSVO, Tokyo Tech; [9] KSVO, Tokyo Inst. Tech.; [10] Tokyo Tech; [11] SEVO, Kyushu Univ.; [12] NIED; [13] Mahidol Univ., Thailand; [14] ERI, the University of Tokyo; [15] FREA, AIST

Measuring the electrical conductivity of rocks is a classical approach used to investigate volcanic edifices at depth. The electrical conductivity of rocks has two main contributions: (1) the conduction in the bulk pore fluid, induced by fluids saturation, ionic strength, and temperature of pore water, and (2) the surface conductivity, related to secondary minerals. These two contributions are controlled by complex interactions between hydrology, geology, tectonic settings and magmatic forcing. As a consequence, the interpretation of electrical conductivity images is strongly non-unique and thus, remains poorly constrained on volcanoes.

Here, we demonstrate that extracting accurate physical information (e.g. temperature, gas saturation, pressure) from an electrical conductivity distribution is achievable using multi-phase flow modeling. Indeed, multiphase flow modeling represents the coupled transport of fluids (liquid, gas), and heat through porous and fractured rocks. Therefore, such simulation can be directly connected to electrical conductivity of rocks.

We applied this technique to characterize the electrical conductivity structure of Miyake-jima volcano obtained from a Magnetotellurics survey. Results of the 3-D multiphase flow model successfully explain the electrical conductivity structure of the volcano in term of temperature, fluids saturation and their distributions. We reveal a deep conductive body (1-5 ohm&#8901;m) formed by a high-temperature, liquid-dominated plume connected to the fumarolic area inside the Oyama crater. In addition, we explicate the shallow resistive layers (500-1000 ohm&#8901;m) as unsaturated and low-temperature deposits. These results are consistent with surface observables (soil temperature, direct and diffuse degassing) and the distribution of hypocenters. This multidisciplinary approach brings new insights into a better understanding of volcanic edifices and their structures.

## メッシュ状に配置した Network-MT データによる阿蘇カルデラと雲仙火山の地下の 3次元比抵抗分布

# 畑 真紀 [1]; 上嶋 誠 [2]; 田中 良和 [3]; 橋本 武志 [4]; 吉村 令慧 [5]; 大志万 直人 [5]  
[1] 東大・地震研; [2] 東大・震研; [3] 京大; [4] 北大・理・地震火山セ; [5] 京大・防災研

### 3-D electrical resistivity models beneath two active volcano groups in a graben by Network-MT data of reticular arrangements

# Maki HATA[1]; Makoto Uyeshima[2]; Yoshikazu Tanaka[3]; Takeshi Hashimoto[4]; Ryokei Yoshimura[5]; Naoto Oshiman[5]

[1] ERI, the University of Tokyo; [2] ERI, Univ. Tokyo; [3] Kyoto Univ.; [4] ISV, Hokkaido Univ.; [5] DPRI, Kyoto Univ.

Mt. Aso with a large caldera and Mt. Unzen, which are composed by active Quaternary volcanoes, lie at the Beppu-Shimabara graben. The graben travels across the island of Kyushu almost in an E-W direction. Aso caldera was formed at the central part of the graben by a series of huge eruptions, with a volcanic explosivity index of 7, during 270-90 ka. A post-caldera cone of Naka-dake in Aso caldera is a quite active volcano, which experienced magmatic and phreatomagmatic eruptions that spewed volcanic ash at a maximum height of 11,000 m into the air during 2014-2016. On the other hand, Unzen, a back-arc volcano at the western edge of the graben showed a dome-forming eruption at Fugen-dake cone during 1990-1995, preceded by a significant eastward migration of volcano-tectonic seismicity from Tachibana bay to the summit. The total amount of extruded dacitic lava was  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$  DRE, and the repetitive partial collapses generated  $\sim 10,000$  pyroclastic flows [e.g., Nakada et al., 1999; Yamamoto et al., 1993].

In and around Aso caldera and Unzen volcano, network-MT surveys for the electric field (the electric potential difference) were carried out during 1993-1998 by using long metallic wires/dipoles of the commercial telephone company's networks [e.g., Uyeshima et al., 1995; Tanaka et al., 1998; Hashimoto et al., 1999; Hata et al., 2015]. We determined two components of network-MT response functions between the potential differences for respective dipoles and the two horizontal components of the magnetic field at the Kanoya Geomagnetic Observatory. Three-dimensional (3-D) inversion analyses were performed by using network-MT data in a period range from 480 to 20,480 s for obtaining each electrical resistivity model beneath Aso caldera and Unzen volcano. In addition, the 3-D resistivity models for each volcano were obtained based on separate data sets of reticular dipole arrangement which respectively cover the two target regions. Through the 3-D inversion analyses, we used a data space Occam's inversion code modified for the network-MT data of long dipoles [e.g., Siripunvaraporn et al., 2004]. In this presentation, we show details of the respective 3-D resistivity models beneath Aso caldera and Unzen volcano.

### 3-D resistivity modeling of Kusatsu-Shirane volcano, with revisited magnetotelluric data

# Kuo Hsuan Tseng[1]; Yasuo Ogawa[2]; S. Bulent Tank[3]; Yoshiya Usui[4]; Wataru Kanda[5]; Masato Fukai[6]  
[1] EPS, TITech; [2] VFRC, Titech; [3] EPS, Titech

KOERI, BU; [4] Earth and Planetary sciences, Tokyo Tech.; [5] KSVO, Tokyo Inst. Tech.; [6] Earth and Planetary science, Tokyo Tech.

Kusatsu-Shirane Volcano is an active andesitic volcano which situated north of the Kanto Plain. Three pyroclastic cones, Motoshirane, Shirane and Ainomine, were formed in Late Pleistocene. The Shirane pyroclastic cone has three major craters at the summit: Yugama, Mizugama and Karegama. The previous studies in geochemistry and seismology fields provided a basic comprehension of the hydrothermal system beneath these craters. Moreover, the 2-D resistivity modeling with magnetotelluric data in the past study demonstrated the resistors and conductors beneath Kusatsu-Shirane Volcano which supplied the understanding of subsurface structures in hydrothermal system of Shirane. Considering the Shirane may have 3-D structures which could prone to error in the 2-D modeling interpretation due to the galvanic effect, a 3-D modeling is necessary to further comprehend the hydrothermal system beneath Shirane pyroclastic cone.

For monitoring the effect of the hydrothermal system changes due to an activity in 2013, we did a magnetotelluric survey in 2017 for obtaining the present data, and combined them with past magnetotelluric and audio-frequency magnetotelluric data, which was permitted in the previous study for 2-D modeling, in the model inversion. The resistivity model was generated with tetrahedral elements and considering the topographic effect. Another model only permitted the past data for comparison.

The final model demonstrated two major conductors. One conductor has 1000 to 500 meters thickness located at 300 meters depth beneath Yugama crater, and extends to the east slope of Shirane pyroclastic cone until Sesshougawara fumarole zone. Another deep conductor on the west of Yugama crater has 600-1000 meters thickness and connects with Manza geothermal field. The model also demonstrated a bell-shape resistor beneath Yugama crater.

The conductor beneath Yugama crater is corresponding to the assumption of hydrothermal system in the previous geochemistry studies. The bell-shape resistor denotes the cap structure of hydrothermal system. With referring to the borehole data, this cap structure represents a clay cap that block the path of heated water. Combining the microseismic monitoring data and inflation data, the fracture in the cap rock is inferred to be the path of upward fluid flow. The newest model demonstrates an obvious difference in the connection between major conductors, which was denoted separately in the previous 2-D model. This result indicates that the system of Manza geothermal field may have stronger relationship with Yugama system than we assumed before. We additionally found a large downward extension of conductor at the southeastern slope of Kusatsu-Shirane Volcano, where is close to Sesshougawara fumarole zone, by comparing the same modeling section with past 2-D model.

The newest 3-D resistivity model provides additional information of the subsurface structures beneath Kusatsu-Shirane Volcano. The comprehension of hydrothermal system beneath Yugama crater is promoted due to the new interpretation.

### 3次元CSEM逆解析法による海底熱水鉱床イメージング

# 石須 慶一 [1]; 後藤 忠徳 [2]; Siripunvaraporn Weerachai[3]; 笠谷 貴史 [4]; 岩本 久則 [5]  
[1] 京大・工; [2] 京都大学; [3] Mahidol University, Thailand; [4] JAMSTEC; [5] 海洋研究開発機構

#### Imaging of SMS deposits using an inversion algorithm for 3-D marine CSEM survey data

# Keiichi Ishizu[1]; Tada-nori Goto[2]; Weerachai Siripunvaraporn[3]; Takafumi Kasaya[4]; Hisanori Iwamoto[5]  
[1] Kyoto Univ.; [2] Kyoto Univ.; [3] Mahidol University, Thailand; [4] CEAT, JAMSTEC; [5] JAMSTEC

Hydrothermal circulation of sea-water through permeable ocean crust leads to formation of seafloor massive sulfide (SMS) deposits, which have potential for mining. Controlled-source electromagnetic (CSEM) surveys can be used to map SMS deposits due to the low resistivity features compared to surrounding sediments. 2D inversion algorithms of CSEM surveys have been used for imaging of SMS deposits. However, 2D inversion often images artefacts for SMS deposits because the deposits have 3D structures. We have developed a 3D CSEM inversion algorithm to image resistivity structures of the deposits. By applying the inversion algorithm to synthetic and real data, we found the 3D CSEM inversion algorithm is useful for mapping resistivity structures of SMS deposits.

## Elucidation of crustal fluid distribution in NE Japan backarc active zone by wideband MT observation

# Masato Fukai[1]; Yasuo Ogawa[2]

[1] Earth and Planetary science, Tokyo Tech.; [2] VFRC, Titech

Fluids play an important role in magmatism, metamorphism and crustal deformation processes that cause volcanic and seismic activity. In the subduction zone, it is considered that a large amount of fluids is released into the mantle by dehydration of the subducted oceanic plate, but it remains well unconstrained where fluids migrate and accumulate and how the corresponding distribution of volcanic activity takes place. Tohoku Japan is one of the most geophysically observed subduction zones, but there are many unknown points in the fluid distribution in the crust, in the forearc and backarc. Ogawa et al. (2001) is one of the crustal fluid studies in the Tohoku-Japan backarc. They performed two-dimensional resistivity modeling of the northeastern backarc active zone, and detected low resistivity zone in the mid-crust, which was considered as fluid distribution. They found that the earthquake hypocenters cluster at the edges of the mid-crustal conductors.

In our present study, we re-analyzed the data of Ogawa et al (2001) by three-dimensional modeling using the full tensor impedances. We also included forarc data which are located in the eastern extension of the dataset.

## Does the tsunami-generated magnetic field arrive earlier than the sealevel change?

# Zhiheng Lin[1]; Hiroaki Toh[2]

[1] DACGSM, Kyoto Univ.; [2] DACGSM, Kyoto Univ.

The motion of the seawater in the geomagnetic field can generate the induced electromagnetic (EM) field. Tsunamis, therefore, can generate the EM field which has been detected by ground and seafloor EM stations. Ground EM stations can only receive the poloidal component of the tsunami-generated magnetic field, while seafloor stations can receive not only the poloidal component but also the toroidal component with better signal-to-noise ratios (Schnepf et al., 2016). The tsunami-generated vertical magnetic field,  $b_z$ , and the sealevel change by tsunamis have a direct relationship with each other (Tyler, 2005).

By detecting the sealevel change, we can build a tsunami early warning system; the same is applicable by detecting the tsunami-generated magnetic field. Minami et al. (2015) show that the tsunami-generated  $b_z$  has the phase lead with respect to the sealevel change by tsunamis. It means that the magnetic field may be more effective for early warning purposes than the sealevel change. In the 2006 and 2007 Kuril earthquake events,  $b_z$  arrived earlier than the tsunami-generated  $b_z$  and  $b_z$  which are considered in phase with the sealevel change (Toh et al., 2011). However, in the 2010 Chile earthquake event, the tsunami-generated  $b_z$  has been reported to have arrived in phase with the sealevel change (Sugioka et al., 2013).

In order to clarify the relationship between  $b_z$  and the sealevel change by tsunamis, we compared the arrival time of  $b_z$  and the sealevel change in the 2009 Samoa and 2010 Chile tsunami events. Since the tsunami-generated magnetic signal contains a variety of frequency components, we compared the phase lead of  $b_z$  with the sealevel change for different frequencies.

Our magnetic and sealevel change data were observed at Site SOC8 by the TIARES experiment conducted at the French Polynesian seafloor from 2009 through 2010 (Suetsugu et al., 2012). This data contain the tsunami signals of the 2009 Samoa and 2010 Chile earthquake events. Sampling intervals of sealevel change and magnetic signals are 1 second and 1 minute, respectively. We compared the tsunami arrival time of  $b_z$  and sealevel change. The  $b_z$  signal was processed by a zero-phase filter to remove variations whose periods were not in the tsunami period band (5min~60min). Raw sealevel change was deconvoluted by following the procedure by Araki and Sugioka (2009). We then compared the tsunami arrival time of  $b_z$  and sealevel change for the periods of 7min, 15min, and 30min. We used a wavelet analysis method to show the frequency dependence of the tsunami arrival time.

Our preliminary result shows that the tsunami-generated  $b_z$  have a small phase lead to the sealevel change, which is in harmony with Minami et al. (2015). In addition, at longer periods, the tsunami-generated  $b_z$  has larger phase lead to the sealevel change. Although this result still needs further examination, it may lead to building the tsunami early warning system based on the detected magnetic field.