

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400443

研究課題名(和文) 広帯域 - ネットワークMTを融合した先進的3次元電気伝導度インバージョン手法開発

研究課題名(英文) Development of an advanced inversion code for obtaining 3-D electrical conductivity structures by combining Wideband and Network MT data

研究代表者

上嶋 誠 (Uyeshima, Makoto)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：70242154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：電気伝導度は、地下の状態、特に水やメルトの存在に敏感な物理量であるが、従来の構造推定において、電気伝導度値と構造長の両スケールについての不定性が問題視されてきた。観測量から正しいスケールをもつ構造を再現することを目的として、本研究では、広帯域MT法とネットワークMT法において、表層不均質で歪められない観測量のみを用いて3次元構造を推定する手法の開発を目指した。このうち、広帯域MT法における位相テンソルと鉛直 - 水平磁場変換関数に基づいた3次元インバージョンコードの開発を終え、いわき誘発地震帯での観測実データに適用した。結果の吟味から、正しいスケールをもつ構造が再現できていたことが確認された。

研究成果の概要(英文)：Electrical conductivity is one of the most important geophysical properties and especially sensitive to existence of subsurface water or melts. Non-uniqueness in scales of conductivity values and structural lengths, however, has long been debated in the previous studies to estimate the conductivity structure. For the purpose of reproducing structures with the true scales from the observation parameters, we tried to develop 3-D inversion schemes where only the observation parameters free from distortions due to existence of near-surface small-scale resistivity heterogeneity are used. We succeeded in coding a 3-D inversion by using only the phase tensor and the induction vectors which can be obtained from the wide-band MT survey. We applied the code to the real data obtained in the Iwaki area with significant earthquake swarm activities induced by the 2011 great Tohoku earthquake. By examining the results, we confirmed that the true scales were reproduced in the real data application.

研究分野：地球電磁気学

キーワード：電気伝導度構造 3次元 インバージョン コード開発 表層不均質の影響除去 位相テンソル 磁場変換関数 ネットワークMT

1. 研究開始当初の背景

電気伝導度は、地下の状態、特に塩水やメルトなどの高電気伝導度間隙流体の存在やその連結度に敏感な物理量である(例えば上嶋, 2005)。このため、沈み込むプレートからもたらされる水の循環の実態や地震・火山発生メカニズムを解明する目的で列島各地においてその構造を決定するための広帯域 MT 法観測やネットワーク MT 法観測が精力的に実施されてきた(例えば上嶋, 2009.)。

地磁気地電流(MT)法では、地表において電場・磁場の測定を行い、その周波数領域での水平電場 - 水平磁場間応答関数、鉛直磁場 - 水平磁場間変換関数を求める。そのインヴァージョンにおいては、上空に電磁場ソースを置き、その地下への浸透状況(地球は有限電気伝導度を持つため、誘導電流によるジュール散逸が発生し、方程式系は拡散方程式となる)を解いた上で地表での応答関数や変換関数を計算し、それらが観測値に合うように電気伝導度を決定する。

本研究開始当時には、電気伝導度構造研究において、それまで2次元解析が主流であったところから、計算機の格段の性能向上や相次いで3次元解析コードが開発されて世に出回るようになった(例えば Siripunvaraporn et al., 2005)背景を受け、世界各地で3次元解析が実施されるようになっていた。

しかし、2の研究の目的のところでも詳述する、小スケール表層不均質の影響を受けた MT 応答関数の歪を除去して、いかに比抵抗値と長さにおいて正しいスケールをもった電気伝導度構造を推定するかは、2次元解析の時代とかわらず、依然として MT 法において解決すべき重大な問題点の一つとして、その解決が待たれていた。

2. 研究の目的

MT 法における本質的な問題点として、小スケール表層不均質によるインピーダンスの歪みがあげられる。もともと MT 法によってなぜ地下の電気伝導度が求められるかは、地下を流れる誘導電流を反映した地表磁場と地表電場の比をとるためであると理解できる。しかし、観測点付近に横方向不均質があると(電流密度の連続性から)電場は不連続となり、電場の絶対値は歪められる。この歪みは表層不均質に応じて非常に短波長成分をもちえる。従って、通常の MT 観測のように、空間的に離散的な観測でその歪みを完全に把握することは困難で、観測値に空間的エリアジングが生じることになる(例えば Uyeshima, 2007)。それは、どうしても未観測領域の割合が大きくなる3次元構造推定を目指した面的観測において、より深刻な問題となる。

2次元解析においては、上述の電場の絶対値の歪みをインヴァージョンの中で補正するいくつかの手法が考案され(例えば Ogawa

and Uchida, 1996), 広く用いられてきた。しかし、その歪の補正にはどうしても任意性があり、同一データを用いても歪の補正の仕方によって異なったスケールをもった構造が得られる場合や、インヴァージョンにおける初期構造設定によって歪の補正が変わり、やはり同一データから出発しても異なったスケールを持った構造が推定されてしまうことなどが経験された。

そういった場合に、推定された電気伝導度の絶対値に不安があると、電気伝導度と他の地球物理学的観測量 - 例えば地震波速度構造や減衰など - と直接比較して地下の物性を推定することは困難であり、構造の長さスケール(例えば深さ)に不安があると、地殻変動のソース(例えば震源や応力源)の位置と得られた電気伝導度構造とを比較対照して、地殻変動の発生メカニズムを探ることは困難となる。

ただ、ここで問題にしてきた電場絶対値の歪みは、電磁場間の位相や、電流密度に依存する磁場には影響を与えない。このため位相(あるいは位相を拡張させた位相テンソル(Caldwell et al., 2004))や磁場は、表層不均質によらない情報を保存する。また、長基線で電場を測定することが出来れば、それより小スケールの不均質の影響は相殺される。ネットワーク MT 法は、このことに着目して、電話回線網を用いることで面的長基線電場観測を実現したものであった(Uyeshima et al., 2001, Uyeshima, 2007)。こうして、本研究代表者は、内外の研究者と共同して、ネットワーク MT 法(Siripunvaraporn et al., 2004)や位相テンソルを用いた(Patro et al., 2013, 雑誌論文⑩)3次元インヴァージョンコードを開発してきた。また、鉛直 - 水平磁場変換関数に対するインヴァージョンコードは、Siripunvaraporn and Egbert (2009)によって開発された。ところが、位相テンソルや鉛直 - 水平磁場変換関数だけからでは、正しいスケールを復元することは困難で、初期モデル依存性が残ってしまうことが指摘されていた。ネットワーク MT 法応答関数は、小スケール表層不均質の影響を受けない理想的な性質をもつものの、観測のために必要なメタル電話回線が失われつつあり、今後新しく観測を実施することはますます困難になることが予想された。

こういった事情をふまえ、本研究では、まず、広帯域 MT 法において小スケール表層不均質の影響を受けない位相テンソルと鉛直 - 水平磁場間変換数を同時に扱うインヴァージョンコードを開発することにし、さらにネットワーク MT 法応答関数もあわせたインヴァージョンコードの開発を目指した。

3. 研究の方法

Siripunvaraporn and Egbert (2009) や Patro et al. (2013)に基づき、位相テンソ

ルと鉛直 - 水平磁場変換関数を同時に扱う 3次元インバージョンコードを構成した。また、さらに Siripunvaraporn et al. (2004) もあわせて、ネットワーク MT 応答関数も扱えるコードの開発を目指したが研究終了時点で収束性に問題が残された。従って、ここからは、位相テンソルと鉛直 - 水平磁場変換関数を同時に扱う 3次元インバージョンコードについて言及する。

インバージョンで最小化を目指す試験関数は、データミスフィット項に、インバージョンを安定化させるためのモデルの滑らかさを表現する項を加えて構成する。その試験関数のモデルに関する微分をゼロとすることにより、モデル更改式を得る。

モデル更改式を解いてインバージョンプロセスの k 番目のモデルから $k+1$ 番目のモデルを得るために、 $M \times M$ の逆行列を求めるモデルスペース法と $N \times N$ の逆行列を求めるデータスペース法が考えられる。本研究では、Siripunvaraporn et al. (2005)からの開発の流れに従い、演算を少なくできるデータスペース法を採用した。ここで、 M, N は、それぞれ、総モデルブロック数、総データ数であり、3次元問題では圧倒的に M が N より大きな値となる。

モデルの探索は、基本的に OCCAM 法 (Constable et al., 1987) に従う。インバージョンの初期段階においてはデータミスフィット項とモデル滑らかさ項の重みづけ係数の値を適当に振ってやることで、ともかく更新されたモデルのデータミスフィットが小さくなるような重み係数を用いて、モデルを更新していく。あるターゲットミスフィットよりミスフィットが小さくなるモデルが得られるまで、モデル更新を繰り返す (第一段階)。ターゲットミスフィットレベルを下回るモデルが得られた後は、そのターゲットミスフィットレベルの中で、なるべく滑らかなモデルを探索する (第二段階)。そして、そのターゲットのミスフィットの中で、最も滑らかなモデルを最終モデルとする。通常、データミスフィットがデータの誤差の範囲に入ることを想定して、(誤差で規格化された) ターゲットミスフィットを 1 に設定するのが自然であるが、現実の問題では、おそらく数値計算や誤差見積もりの精度の問題から、第二段階まで達することができず、RMS ミスフィットにして 2 程度のモデルが最終モデルとなることが多い。

4. 研究成果

(1) いわき誘発地震域での広帯域 MT 実データへの適用

2011 年東北太平洋沖地震の後に活発な誘発地震活動が発生したいわき地域で実施した広帯域 MT 観測実データに、本研究で開発した位相テンソル、鉛直 - 水平磁場変換関数 3次元インバージョンコードを適用した。インバージョンによって、図 1 上段に示し

た観測値を図 1 下段のように再現するモデルが推定された。

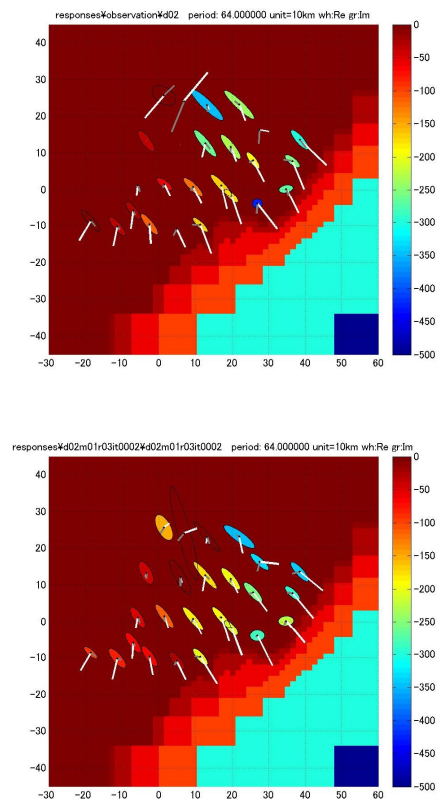


図 1. 周期 64 秒の位相テンソル (楕円で表示) と鉛直 - 水平磁場変換関数 (インダクションベクトルで表示). 上段に観測値, 下段に図 2 で示す構造から計算されたモデル値を示す。

図 2 に、得られたモデルの平面図を示すが、寒色系の色で示した、電気の流れにくいところ地震が発生している傾向が読み取れる。

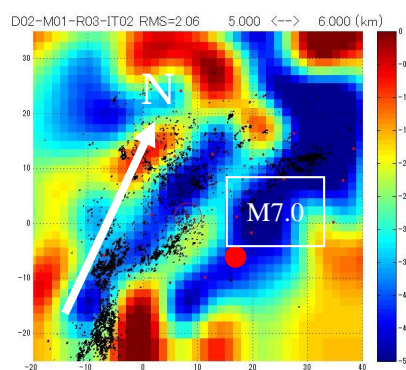


図 2. 5-6km 深さでの電気伝導度構造平面図。この地域での M7 最大地震の位置を赤丸で示している。

(2) 初期モデル依存性の検討

位相も鉛直 - 水平磁場変換関数も、基本的には電気伝導度構造の鉛直、水平方向の変化を示す観測量であり、絶対値を表すものではない。このため、図 2 で得られた構造が真の

スケールを持った構造であるかどうかの保証はない。このため、インバージョン結果の初期モデル依存性を、2つの方法で検証した。1つめの検証は、インバージョンにおいて初期モデルを変化させることで、最終モデルが変化することが無いかの検証であった。以前、例えば位相テンソルのみを用いて同様の検証を行った時の結果 (Patro et al., 2013) とは異なり、どの初期モデルに基づいても図2で示したモデルとほぼ同様なスケールをもったモデルが再現された。

さらに2つめの検証として、図2のモデルからモデル観測値を計算し、その計算値を観測値として扱い、初期モデルを変えつつインバージョンを行った。1つめの検証との違いは、図2という答えを知っていることである。この検証によっても、正しいスケールが再現されることが明らかとなり、本研究で開発したインバージョン手法が、3次元インバージョンとして望ましい性質を有していることが確認できた。

(3) 正しいスケールの再現に関する考察と今後の課題

ここまで述べてきたように、いわきにおける実データへの適用では、満足する結果が得られた。一方で、純粋に頭の中で作成したモデルに対しては、それが一様構造の中に1つ異常体が存在するような非常に単純なモデルでも、初期モデル依存性が存在して、異なる初期モデルに対して異なるスケールをもった構造が返されてしまうという望ましくない性質が現れていた。

実データの適用においては、地形を考え、海水の電気伝導度は3~4 S/mに固定して、インバージョンを実施する。この状況で、初期構造を変えることが、位相テンソルや磁場変換関数にどのような影響を与えるかを調べたところ、いわゆる海岸線効果といわれる、海岸線から離れていくにしたがって観測値が変化し、その変化の空間スケールが、電磁誘導の長さスケールに応じて変化することが確認できた。すなわち、電気伝導度が高い場合は変化のスケールは短く、低い場合は長くなっていた。つまり、この観測値の変化の空間スケールに、電気伝導度の絶対値の情報が含まれていたわけであった。

こうして、位相テンソルと磁場変換関数のみを用いたインバージョンにおいて、正しいスケールが再現される条件が明らかとなった。日本においてある程度大スケールの構造を決定する場合、必ずモデルに周囲の海底地形を入れることになるため、本研究で開発されたコードはかなりの確率で有効に働くものと考えられる。

一方で、内陸や火山体のごく浅い狭い範囲をターゲットにする場合には注意が必要である。引き続き、現時点で完成させることが出来なかったネットワークMT応答関数をあわせたコードの完成に向けての努力を続け

たい。

[引用文献]

- Caldwell, T.G., H.M. Bibby, and C. Brown, The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, 457-469., 2004.
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G., Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, 289-300, 1987.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76, 1996.
- Siripunvaraporn, W., and Egbert, G., WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 173, 317-329, doi:10.1016/j.pepi.2009.01.013, 2009.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y. and Uyeshima, M., Three-dimensional magnetotelluric inversion: data space method, *Phys. Earth Planet. Int.*, 150, 3-14, 2005.
- Siripunvaraporn, W., Uyeshima, M. and Egbert, G., Three-dimensional inversion for Network-Magnetotelluric data, *Earth Planets Space*, 56, 893-902, 2004.
- 上嶋誠, 電気伝導度構造から探る地殻の水の存在, *地学雑誌*, 114, 862-870, 2005.
- Uyeshima, M., EM monitoring of crustal processes including the use of the Network-MT observations, *Surv. Geophys.*, 28, 199-237, 2007.
- 上嶋誠, MT法による電気伝導度構造研究の現状, *地震 第2輯*, 61, S225-S238, 2009
- Uyeshima, M., Utada, H. and Nishida, Y., Network-MT method and its first results in central and eastern Hokkaido, Japan. *Geophys. J. Int.*, 146, 1-19, 2001.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

- Ichihara, H., Mogi, T., Tanimoto, K., Yamaya, Y., Hashimoto, T., Uyeshima, M. and Ogawa, Y., Crustal structure and fluid distribution beneath the southern part of the Hidaka collision zone revealed by 3-D electrical resistivity modeling, *Geochem. Geophys. Geosystems*, doi:10.1002/2015GC006222, 2016 (査読有).
- Aizawa, K., Sumino, H., Uyeshima, M., Yamaya, Y., Hase, H., Takahashi, H.,

Takahashi, M., Kazahaya, K., Ohno, M., Rung-Arunwan, T. and Ogawa, Y., Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mount Fuji, Japan, *Geology*, 44, 127-130, doi:10.1130/G37313.1, 2016 (査読有).

Ichiki, M., Ogawa, Y., Kaida, T., Koyama, T., Uyeshima, M., Demachi, T., Hirahara, S., Honkura, Y., Kanda, W., Kono, T., Matsushima, M., Nakayama, T., Suzuki, S., Toh, H., Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, 120, 7937-7965, doi:10.1002/2015JB012028, 2015 (査読有).

Hata, M. and Uyeshima, M., Temperature and melt fraction distributions in a mantle wedge determined from the electrical conductivity structure: Application to one non-volcanic and two volcanic regions in the Kyushu subduction zone, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2709-2717, doi:10.1002/2015GL063308, 2015 (査読有).

Xu, GJ., Tang, J., Huan QH. and Uyeshima, M., Study on the conductivity structure of the upper mantle and transition zone beneath North China, *Chinese J. Geophys.*, 58, 566-575, doi: 10.6038/cjg20150219, 2015 (査読有).

Hata, M., Oshiman, N., Yoshimura, R., Tanaka, Y. and Uyeshima, M., Three-dimensional electromagnetic imaging of upwelling fluids in the Kyushu subduction zone, Japan, *J. Geophys. Res.*, 120, 1-17, doi:10.1002/2014JB011336, 2015 (査読有).

Ichihara, H., Sakanaka, S., Mishina, M., Uyeshima, M., Nishitani, T., Ogawa, Y., Yamaya, Y., Mogi, T., Amita, K. and Miura, T., A 3-D electrical resistivity model beneath the focal zone of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (M 7.2). *Earth, Planets and Space*, 66, doi:10.1186/1880-5981-66-50, 2014 (査読有).

Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Kanda, W., Utsugi, M., Yoshimura, R., Yamaya, Y., Hashimoto, T., Yamazaki, K., Komatsu, S., Watanabe, A., Miyakawa, K. and Ogawa, Y., Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima volcanoes as inferred from broad-band magnetotelluric data, *Journal of Geophysical Research*, 119, 198-215, doi:10.1002/2013JB010682, 2014 (査読有).

Aizawa, K., Koyama, T., Uyeshima, M.,

Hase, H., Hashimoto, T., Kanda, W., Yoshimura, R., Utsugi, M., Ogawa, Y. and Yamazaki, K., Magnetotelluric and temperature monitoring after the 2011 sub-Plinian eruptions of Shinmoe-dake volcano, *Earth Planets Space*, 65, 539-550, doi:10.5047/eps.2013.05.008, 2013 (査読有).

Patro, P.K., Uyeshima, M. and Siripunvaraporn, W., Three-dimensional inversion of magnetotelluric phase tensor data, *Geophysical Journal International*, 192, 58-66, 2013 (査読有).

[学会発表](計14件)

上嶋誠, 市來雅啓, 坂中伸也, 田村慎, 東北南部横断(阿賀野-鮫川)測線における広帯域MT観測について(序報), 日本地球惑星科学連合大会 2016, 2016年5月23日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).

上嶋誠, 小川康雄, 市來雅啓, いわき誘発地震帯での3次元比抵抗イメージング, 研究集会「内陸地震, なんで地震はそこで起こるか?」, 2015年9月1日, 京都大学阿武山地震観測所(大阪府・高槻市).

Uyeshima, M. and Siripunvaraporn, W., Three-Dimensional Inversion of MT Phase Tensor Combined with Geomagnetic Transfer Function, 12th AOGS Annual Meeting, 2015年8月4日, シンガポール(シンガポール国).

Uyeshima, M., Ogawa, Y., Ichiki, M. and Siripunvaraporn, W., Development of 3-D inversion code using phase tensors and induction vectors and its application to the Iwaki source regions of normal faulting sequences, 26th IUGG General Assembly, 2015年6月28日, プラハ(チェコ国).

上嶋誠, 小川康雄, 市來雅啓, いわき誘発地震帯での3次元比抵抗イメージング, 日本地球惑星科学連合大会 2015, 2015年5月28日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市).

Uyeshima, M. and Siripunvaraporn, W., Three-dimensional inversion of MT phase tensor combined with geomagnetic transfer function, 22th EM Induction Workshop, 2014年8月24-30日, ヴァイマール(ドイツ国).

Uyeshima, M., Ogawa, Y. and Ichiki, M., PT and IV imaging of source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, 22th EM Induction Workshop, 2014年8月24-30日, ヴァイマール(ドイツ国).

Hata, M., Uyeshima, M., Oshiman, N., Yoshimura, R. and Tanaka, Y., Thermal Structure and Melt Fraction beneath Kyushu in the Southwest Japan Arc: Interpretation of the 3D Electrical Resistivity Model by Using Network-MT Data, 22th EM Induction Workshop, 2014年8月24-30日, ヴァイマール(ドイツ国).

Hata, M., Uyeshima, M., Handa, S., Shimoizumi, M., Tanaka, Y., Takeshi Hashimoto, T., Kagiya, T., Utada, H., Munekane, H., Ichiki, M., Fujita, K., 3D Electrical Resistivity Imaging by Geomagnetic Transfer Function Data based on the Structure Determined by Network-MT Data beneath Kyushu in the Southwest Japan Arc, 22th EM Induction Workshop, 2014年8月24-30日, ヴァイマール(ドイツ国).

長谷英彰, 小山崇夫, 山谷祐介, 小河勉, 上嶋誠, 坂中伸也, 市原寛, 高倉伸一, 吉村令慧, スタティックシフトを考慮した東北地方庄内平野の三次元比抵抗構造, 地球電磁気・地球惑星圏学会・秋大会, 2013年11月3日, 高知大学(高知県・高知市).

畑真紀, 上嶋誠, 下泉政志, 田中良和, 鍵山恒臣, 歌田久司, 大志万直人, 吉村令慧, 市来雅啓, 九州地方における磁場変換関数データのコンパイル: Network-MT データと磁場変換関数データの統合解析に向けて, 地球電磁気・地球惑星圏学会・秋大会, 2013年11月3日, 高知大学(高知県・高知市).

Hata, M., Oshiman, N., Tanaka, Y. and Uyeshima, M., Upwelling Fluids interpreted by 3D Electrical Resistivity Structure beneath island-arc volcanoes in Kyushu, southern Japan, IAVCEI, 2013年7月23日, 鹿児島県民交流センター(鹿児島県・鹿児島市).

上嶋誠, Network-MT 法の紹介 - 広域深部電気伝導度構造解明を目指して -, 日本地球惑星科学連合大会 2013, 2013年5月22日, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 招待講演.

Uyeshima, M., Yamaguchi, S., Murakami, H., Tanbo, T., Yoshimura, R., Ichihara, H. and Omura, K., On elucidation of the regional anomalous phase contained in the Network-MT data in the Chubu district, central Japan, 3DEM workshop, 2013年5月9日, 北海道大学(北海道・札幌市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上嶋 誠 (UYESHIMA, Makoto)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 70242154

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし