

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21109003

研究課題名(和文)地殻流体の電磁イメージング

研究課題名(英文)Electromagnetic Imaging of Geofluid

研究代表者

小川 康雄(Ogawa, Yasuo)

東京工業大学・火山流体研究センター・教授

研究者番号：10334525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 129,400,000円、(間接経費) 38,820,000円

研究成果の概要(和文)：東北日本弧の中央部に位置する宮城県鳴子周辺で電磁気観測を高密度に行い、地殻・上部マントルの3次元比抵抗構造を推定した。活動的な火山である鳴子や鬼首では、地殻深部から地表に向かう鉛直状の低比抵抗異常が解明された。この低比抵抗帯は、その上面がほぼ脆性塑性境界に対応することから、メルトではなく高塩濃度の流体だまりであろう。マントルに関しては、沈み込むプレートの上面から低比抵抗帯が立ち上がり、その延長が脊梁山地に向かうものと、さらに分岐して日本海側の火山列に至るものが見いだされた。下部地殻条件の含水岩石実験からは、これらの低比抵抗を説明するために、高塩濃度の塩水の存在が必要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：From the detailed magnetotelluric observations around the Naruko volcano in the central NE Japan arc, we analyzed three-dimensional resistivity structure of the crust and the upper mantle. We found sub-vertical conductors beneath active volcanoes, Naruko and Onikobe, which imply existence of saline fluid reservoir. In the upper mantle, we imaged a conductor on top of the down-going plate. The conductor extends towards the Moho under the backbone ranges. We also found that it also has a branch toward west beneath volcanoes along the Japan Sea. From the experimental resistivity measurements of a fluid bearing rocks under lower crustal conditions, we found that those crustal conductors, found by magnetotelluric measurements, need high salinity fluids.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・個体地球惑星物理学

キーワード：比抵抗 流体 高温高压岩石実験 MT観測

1. 研究開始当初の背景

地殻・マントルを構成する岩石の比抵抗値は、岩石が含む流体の量およびその連結度によって、8桁にも変動する。従って、自然界の電磁場変動を用いて比抵抗構造を解明することにより、地殻・マントルの流体の量とその連結度を高感度に捉えることができる。代表者(小川)らは多くの内陸地震発生地域で一連の電磁気探査を行ってきた。その結果、地震の震源域は高比抵抗であるが、震源域直下の下部地殻に常に低比抵抗異常が存在することが明らかになり、震源域と密接に関係して地殻流体の溜まりが存在することを世界で初めて明らかにした。しかし代表者らのこれまでの研究には、以下の解決すべき問題点がある。(1)地震観測点が少ない為、地震波速度構造モデルがMT観測から得られる比抵抗構造に比べて地殻内では解像度が劣る。(2)火山地域と内陸地震震源域に見られる低比抵抗異常の関連が不明である。(3)MT観測の帯域が狭いため地殻流体(低比抵抗異常)の源であるマントルの比抵抗構造が不明である。(4)MT観測装置が少ないため3次元構造を2次元モデルで近似している。(5)低比抵抗構造の解釈が定性的で、物質学的な考察が不十分である。

2. 研究の目的

沈み込み帯における流体相の3次元的な分布(Geofluid map)を、電磁気観測から解明することが本研究の目的である。典型的な沈み込み帯である東北日本弧の中央部に位置する宮城県鳴子地域周辺で電磁気(MT:magneto-telluric)観測を高密度に行い、地殻・上部マントルの3次元比抵抗構造を推定する。また、比抵抗構造から流体の量と連結度を推定する為、含水岩石の高温高压実験を行う。この結果と、A01-1(地震波観測班)による地震波トモグラフィやA02(化学・物性班)による実験結果を参考にして、Geofluid Mapを作成する。また、Geofluid MapとA02の結果をもとに地殻流体が地震火山活動に及ぼす影響を定量的に解明する。

3. 研究の方法

(1a) 地殻構造と流体：火山と内陸地震震源域の流体分布の関連を明らかにする為、鳴子周辺は最適地である。鳴子周辺で稠密な広帯域MT(0.5mHz~300Hz)観測を実施し、地殻の3次元比抵抗構造解析を行う。さらにA01-1(地震観測班)A2(化学物性班)と協調して、Geofluid Mapを作成する。(1b) 上部マントル構造と流体：鳴子を含む広域的スケールで、長周期MT観測(DC~0.1Hz)

を行い、3次元比抵抗構造解析を行う。A01-1(地震観測班)A2(化学物性班)と協調して、Geofluid Mapを作成する。(2) 高温高压比抵抗実験：上部マントルと地殻の比抵抗構造から流体分布を推定する為、含水岩石のバルクおよび流体のみの比抵抗測定実験を行う。A01-1(地震観測班)の地震波速度モデルと比較検討することによって、流体の分布や連結度を考察する。さらに、A02(化学・物性班)、A03(モデル班)の成果を有機的に取り込み、比抵抗構造から、流体分布と輸送過程を考察する。

4. 研究成果

4.1 広帯域 MT 観測による鳴子周辺の地殻の 3 次元比抵抗構造の解明

これまで広帯域 MT 観測を用いて、内陸地震発生場の中部地殻には流体リザーバが存在することが示されていた。しかしながら、多くの場合、観測点が測線上に配置され、2次元構造で近似した構造が推定されていた。そのため、流体リザーバの3次元的な広がりについて言及できず、地震学的な構造と比較することが困難であった。地殻流体プロジェクトでは、東北日本中央部の鳴子火山周辺を模式地として、3-5 km グリッドの面的な観測によって、高精度な3次元地殻構造を解明した。活動的な火山である鳴子火山や鬼首火山では、地殻深部から地表兆候に向かうほぼ鉛直状の低比抵抗異常が解明された。この鉛直状の低比抵抗はその上端付近で地震活動が活発であることから、高塩濃度の流体リザーバであると推定される。また、この低比抵抗異常の深部延長については、必ずしも鉛直下方にはならず、鬼首、鳴子とも深部延長は側方の西側につながっている。小安峡においても同様の鉛直状の低比抵抗異常が見いだされるが、その比抵抗値は、鳴子や鬼首のそれと比べると、一桁高く、塩濃度が低い可能性がある。

4.2 長周期 MT 観測による東北地方中央部の マントルの 3 次元比抵抗構造の解明

ウェッジマントルを含む東北地方上部マントル沈み込み帯電気伝導度構造の研究は、1980年代の2次元有限要素法モデリングの研究から構造モデルが提出されず、Geofluid Map 作成と同時に東北地方の新しい3次元電気伝導度モデルの構築も地殻流体プロジェクトの重要なテーマであった。我々は新たに低消費電力フラックスゲートタイプのウクライナ製 LEMI-417M とカナダ製 NIMS システムを導入し、良好な周期60000秒までの地磁気地電流応答データの取得に成功した。その結果、地震波速度トモグラフィで沈み込む太平洋ス

ラブと並行かつ直上に観察されていた低速度体と非常に調和的な形で高電気伝導体が存在することを初めて確認できた。厚さは 20 km より薄く電気伝導度は約 1 S/m 程度である。この低速度体 / 高伝導度体の到達点が東北中央脊梁の火山下付近であるというのがこれまでのイメージであったが、山形・宮城南部付近では、高伝導体はモホ面下で背弧側へ反流している様子が見られ、それらが丁度月山の直下へとつながっている。これらの結果は日本海側の背弧火山の成因を示唆する一つの結果であると同時に、ウェッジマントル内での複数の小スケール、ポロイダル流の存在を示唆していると考えられる。

4.3 流体やメルトを含む岩石の電気伝導度測定実験

室内実験で測定された地殻構成岩石の電気伝導度は観測で得られる地殻の電気伝導度値に比べて非常に低いことは、地球科学において未解決の問題の一つである。多くの研究者は、岩石中に飽和した流体が電気伝導度の上昇に寄与していると考えているが、流体相を含む岩石の電気伝導度測定の系統的な実験は高温高压下では、今まで殆んど行われてきた例はない。これは、高温高压条件下で超臨界状態である流体を系内に閉じ込めて測定することが極めて困難であることが理由の一つとして挙げられる。水は超臨界状態で固相を溶解するために溶液中のイオン濃度は高くなり、電気伝導度に大きく寄与すると考えられる。そのため、1 気圧で測定されたデータから水の量を単純に見積もることは不可能である。この研究グループでは、これらの下部地殻における高電気伝導度異常が何に起因し、もし水などの流体相が存在するならばどの程度の量が下部地殻や高電気伝導度異常領域に存在しているのかを実際の下部地殻条件を実験室で再現を試みた。

下部地殻条件での水に飽和した地殻岩石の電気伝導度測定を推し進めてきた。電気伝導度測定中に水が系から逃げないようにするために、単結晶石英カプセルを用いて試料を上下から金属電極で挟み込むむセル構成で電気伝導度測定を行った。試料には実験中の電気伝導度変化、測定後の試料の電子顕微鏡観察の結果は、流体が測定中もカプセル内に保持されていたことを示した。実験系は単純な石英-水系、石英-塩水系からより花崗岩に近い組成を持つアルバイト-水系、アルバイト-塩水系に関して、電気伝導度を流体量、塩濃度の関数として測定を行ってきた。石英-水系に関しては、水の量が増えるにしたがって電気伝

導度値は高くなるが、観測で得られているような高電気伝導度値には達しない。石英-塩水系では、電気伝導度は石英-水系に比較して非常に高くなり、温度依存性が小さいので低温でも電気伝導度異常を生み出せる。ただし、高塩濃度であれば地殻の高電気伝導度異常を説明できるが、海水程度の塩濃度では高い流体量が必要となる。アルバイト-水系の電気伝導度は、温度依存性が小さく、電気伝導度は 0.1 S/m 程度であり、塩水を必要としなくても地殻の高電気伝導度異常を説明できる。但し、東北日本の活断層直下の中部地殻で観測されているスポット状の高電気伝導度異常 (~ 1 S/m) を説明するには、水に過飽和なアルバイト岩で測定されている電気伝導度でも十分ではないようである。次に、アルバイト-塩水系の電気伝導度測定を行なったところ、塩濃度、流体量の増加に伴って電気伝導度が上昇し、石英-塩水系に比べて電気伝導度が高くなる結果が得られた。又、角閃岩の脱水実験から得られた電気伝導度も塩水の存在が必要な事を示唆した。これらの研究を通じて、地殻で観測される局所的に異常に高い電気伝導度値を説明するためには、流体中の塩の存在が必要となると結論できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 114 件)

Ichihara, H., S. Sakanaka, M. Mishina, M. Uyeshima, T. Nishitani, Y. Ogawa, Y. Yamaya, T. Mogi, K. Amita and T. Miura, A 3-D electrical resistivity model beneath the focal zone of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (M7.2), Earth Planets Space, 66, 2014(in press). 査読有

Wang, L., A. Hitchman, Y. Ogawa, W. Siripunvaraporn, M. Ichiki, K. Fuji-ta, A 3-D resistivity model of the Australian continent using magnetometer array data, Geophys. J. Int., 2014 (in press). 査読有

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

Shimojuku, A., Yoshino, T. and Yamazaki, D., Electrical conductivity of brine-bearing quartzite at 1 GPa:

implications for fluid content and salinity of the crust, *Earth Planets Space*, 65:2, 2014. 査読有

Kanda, W. and Ogawa, Y., Three-Dimensional Electro-magnetic Imaging of Fluids and Melts Beneath the NE Japan Arc Revisited by Geomagnetic Transfer Function Data, *Earth Planets Space*, 66:39, 2014. 査読有

Heise, W., T. G. Caldwell, E.A. Bertrand, G.J. Hill, S.L. Bennie, and Y. Ogawa, Changes in electrical resistivity track changes in tectonic plate coupling, *Geophys. Res. Lett.*, 40:1-5. doi: 10.1002/grl.50959, 2013. 査読有

Honkura, Y., N. Oshiman, M. Matsushima, S. Baris, M. Kemal Tunçer, S. Bülent Tank, C. Çelik, and E. T. Çiftçi, Rapid changes in the electrical state of the 1999 Izmit earthquake rupture zone, *Nature Commun.*, 4, doi:10.1038/ncomms3116, 2013. 査読有

Kaya, T., T. Kasaya, S. B. Tank, Y. Ogawa, M. K. Tuncer, N. Oshiman, Y. Honkura, M. Matsushima, Electrical characterization of the North Anatolian Fault zone in the Marmara Sea, Turkey by ocean Bottom electromagnetic method, *Geophys. J. Int.*, 193, 664-677, 2013. 査読有

Koyama, T., A. Khan, and A. Kuvshinov, Three-dimensional electrical conductivity structure beneath Australia from inversion of geomagnetic observatory data - Evidence for lateral variations in transition-zone temperature, water content, and melt, *Geophys. J. Int.*, 196, 3, 1330-1350, 2014. 査読有

Matsushima, M., Y. Honkura, M. Kuriki, and Y. Ogawa, Circularly polarised electric fields associated with seismic waves generated by blasting, *Geophys. J. Int.*, 194, 200-211, 2013. 査読有

Patro, P.K., M. Uyeshima, and W. Siripunvaraporn, Three-dimensional inversion of magnetotelluric phase tensor data, *Geophys. J. Int.*, 192, 58-66, 2013. 査読有

Yoshino, T., T. Katsura, Electrical conductivity of mantle minerals: Role of water in conductivity anomalies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 41, 605-628, 2013. 査読有

Hata, M., Oshiman, N., Yoshimura, R., Tanaka, Y., and Uyeshima, M., Fluid upwelling beneath arc volcanoes above the subducting Philippine Sea Plate: Evidence from regional electrical

resistivity structure, *J. Geophys. Res.*, VOL. 117, B07203, doi:10.1029/2011JB009109, 2012. 査読有

Yoshino, T., A. Shimojuku, S. Shan, X. Guo, D. Yamazaki, E. Ito, Y. Higo, K. Funakoshi, Effect of temperature, pressure and iron content on the electrical conductivity of olivine and its high-pressure polymorphs. *J. Geophys. Res.*, 117, B08205, doi:10.1029/2011JB008774, 2012. 査読有

Zhang, B., T. Yoshino, X. Wu, T. Matsuzaki, S. Shan, T. Katsura, Electrical conductivity of enstatite as a function of water content: implications for the electrical structure in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 357-358, 11-20, 2012. 査読有

Zhang, L., T. Koyama, H. Utada, P. Yu, and J. Wang, A regularized three-dimensional magnetotelluric inversion with a minimum gradient support constraint, *Geophys. J. Int.*, vol.189, no.1, pp. 296-316, 2012. 査読有

Fuji-ta, K., Katsura, T., Ichiki, M., Matsuzaki, T., Kobayashi, T., Variations in electrical conductivity of rocks above metamorphic conditions, *Tectonophysics*, 504, 116-121, 2011. 査読有

Guo, X., Yoshino, T., Katayama, I., Electrical conductivity anisotropy of deformed talc rocks and serpentinites at 3 GPa, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 188, 69-81, 2011. 査読有

Ichihara, H., M. Uyeshima, S. Sakanaka, T. Ogawa, M. Mishina, Y. Ogawa, T. Nishitani, Y. Yamaya, A. Watanabe, Y. Morita, R. Yoshimura, Y. Usui, A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09301, doi:10.1029/2011GL047382, 2011. 査読有

Toh, H., K. Satake, Y. Hamano, Y. Fujii, and T. Goto, Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JB007873, 2011. 査読有

²¹ Yoshino, T., Noritake, F., Unstable graphite films on grain boundaries in crustal rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 306, 186-192, 2011. 査読有

- 22 Kanda, W., M. Utsugi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, I. Fujii, T. Hasenaka, N. Shigeno, A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 189, 158-171, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.11.002, 2010. 査読有
- 23 Yoshino, T., Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals. *Survey in Geophysics*, 31, 163-206, 2010. 査読有
- 24 Yoshino, T., T. Katsura, D. Yamazaki and E. Ito, Electrical conductivity of mantle peridotite at the uppermost lower mantle condition. *J. Phys. Conf. Ser.*, 215, 012102, 2010. 査読有
- 25 Aizawa, K., Y. Ogawa, and T. Ishido, Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics, *J. Geophys. Res.*, 114, B01208, doi:10.1029/2008JB005910, 2009. 査読有
- 26 Honkura, Y., Y. Ogawa, M. Matsushima, S. Nagaoka, N. Ujihara, and T. Yamawaki, A model for observed circular polarized electric fields coincident with the passage of large seismic waves, *J. Geophys. Res.*, 114, B10103, doi:10.1029/2008JB006117, 2009. 査読有
- 27 Ichiki, M., K. Baba, H. Toh and K. Fuji-ta, An overview of electrical conductivity structures of the crust and upper mantle beneath the northwestern Pacific, the Japanese Islands, and continental East Asia, *Gondwana Res.*, 16, 545-562, 2009. 査読有
- 28 Wannamaker, P.E., T.G. Caldwell, G. R. Jiracek, V. Maris, G.J. Hill, Y. Ogawa, H. M. Bibby, S. B. Bennie, and W. Heise, The fluid and deformation regime of an advancing subduction system; Marlborough, New Zealand, *Nature*, 460, 733-U90, doi:10.1038/nature08204, 2009. 査読有
- M. Seki, M. Ichiki, A. Shimojuku, Y. Wada, Variation in Electrical conductivity of Rhyolitic melt, *Geofluid-3 Symposium*, 2014年3月1日, 発表場所:東京工業大学、日本
- T. Yoshino, B. Zhang, Electrical conductivity of partial molten peridotite: effects of volatile components and shear deformation, *Geofluid 3: Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones Symposium*, Tokyo Tech, 1st March, 2014
- Graham J. Hill, T. Grant Caldwell, Yasuo Ogawa, Hugh M Bibby, Stewart L Bennie, Edward A Bertrand, Harry Keys, Structure of the Tongariro Volcanic Complex Magmatic System, New Zealand: Insights from Magnetotelluric Imaging, *IAVCEI*, 2013年7月23日、鹿児島
- 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年5月22日、千葉県幕張
- 小川康雄・岡田知己、鳴子周辺カルデラ地域の地殻深部比抵抗異常と地震波速度構造、地殻流体研究会、2013年3月3日、修善寺
- 芳野極、電気伝導度から見た地球内部の水、第60回日本地球化学会年会、2012年9月12日
- T. Yoshino, Electrical conductivity of volatile-bearing partial molten peridotite, *AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly*, Singapore, 16th August, 2012
- K. Fuji-ta, T. Katsura, M. Ichiki, and M. Seki, Variation in Electrical Conductivity of Hydrous Rock and Mineral, *Joint Symposium of Misasa-2012 and Geofluid 2*, 2012年3月19日, 鳥取県・三朝町、日本
- Y. Ogawa, H. Fukino, M. Ichiki, W. Kanda, Three-dimensional electro-magnetic imaging of fluids in NE Japan and its seismological and volcanological implications, *Geofluid2 workshop*, 2012年3月18日、Misasa

[学会発表](計18件)

主な招待講演を示す。

Ogawa, Y., Ichiki, M., Kanda, W., Three dimensional resistivity structure under Quaternary calderas in NE Japan, *Geofluid3 symposium*, 2014年3月1日, Tokyo Institute of Technology (招待講演)

K. Fuji-ta, S. Yamashita, T. Yoshino,

T. Yoshino, T. Katsura, A. Shimojuku, Effect of volatile components on electrical conductivity of mantle materials, *AGU fall meeting 2011*, San Francisco, 7th December, 2011.

T. Yoshino, Origin of lithosphere-asthenosphere boundary inferred from laboratory conductivity

measurements, Workshop on "Ocean Mantle Dynamics: From Spreading Center to Subduction Zone", Kashiwa, 4th October 2011.

T. Katsura, T. Yoshino, Effect of volatile components on electrical conductivity of the deep mantle, IUGG 2011, Melbourne, 2nd July, 2011.

Ogawa, Y., Electromagnetic geofluid imaging of NE Japan, international symposium on geofluids, Geofluid1, 2011年3月17日、Tokyo Institute of Technology

T. Yoshino, Origin of the low velocity zone: perspectives of electrical conductivity and melt morphology, *AGU Fall meeting, San Francisco*, December 2010.

T. Yoshino, Laboratory-based conductivity structure in the mantle, *WPGM Taipei*, June, 2010.

T. Yoshino, T. Katsura, K. Baba, H. Utada, Laboratory-based conductivity structure in the mantle transition zone, EGU Vienna, May, 2010.

芳野極, 流体を含む岩石の電気伝導度, 地球惑星科学連合大会、幕張国際会議場、2010年5月

〔図書〕(計5件)

Toh, H. and Y. Hamano, Springer, Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss, in press, 500頁(予定)

Toh, H. and A. De Santis, Springer, Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss, in press, 500頁(予定)

Toh, H. and T. Minami, InTech, Earthquake Research and Analysis - Seismology, Seismotectonic and Earthquake Geology, 2012, 全370ページ

Rasson, J.L., H. Toh and D. Yang, Springer, Geomagnetic Observations and Models, 2011, 全343ページ

藤浩明・地球電磁気・地球惑星圏学会学校教育WG編、京都大学学術出版会、「太陽地球系科学」「地球内部の電気伝導度」(第11章分担執筆)、2010、全320ページ

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計1件)

名称: つまり検出システム

発明者: 卜楠、市來雅啓、上野 直宏

権利者: 卜楠、市來雅啓、上野 直宏

種類:

番号: 特許第5083956号

取得年月日: 2012年9月14日

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.geofluids.titech.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川康雄 (Yasuo Ogawa)

東京工業大学・火山流体研究センター・教授

研究者番号: 10334525

(2) 研究分担者

藤田清 (Kiyoshi Fujita)

大阪大学・工学系研究科・教授

研究者番号: 00283862

神田径 (Wataru Kanda)

東京工業大学・火山流体研究センター・准教授

研究者番号: 00301755

松島政貴 (Masaki Matsushima)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 20242266

芳野極 (Yoshino Takashi)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号: 30423338

藤 浩明 (Hiroaki Toh)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 40207519

上嶋 誠 (Makoto Uyeshima)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 70242154

市來 雅啓 (Masahiro Ichiki)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号: 80359182

小山崇夫 (Takao Koyama)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 00359192