

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22326

研究課題名（和文）電磁探査法による地下流体の4Dイメージング技術の開発

研究課題名（英文）Development of 4D imaging technique for subsurface fluids using electromagnetic methods

研究代表者

石須 慶一（Ishizu, Keiichi）

東京工業大学・理学院・研究員

研究者番号：80880054

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：地熱増産システムや火山噴火予知への注目から、地下流体の三次元空間分布に加え、その空間分布の時間変化を解明できる技術が必要とされている。本研究では電磁探査法モニタリングを用いた非破壊で地下流体の時空間分布を解明できる技術を開発した。具体的には、電磁探査モニタリングデータから地下比抵抗構造の時空間変化を推定できる数値解析技術（4Dイメージング技術：3D空間+1D時間軸）の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した電磁探査法による4Dイメージング技術では、地表の観測から地下流体の時空間分布を把握できる。本技術は、様々な地下流体へ適用可能であるため、地熱増産システムなどの資源分野のみならず、マグマ水蒸気噴火予知などの防災分野、核廃棄物地層処分などの環境分野にも貢献できる。また、本技術は、非破壊で地下流体の時空間分布を調査できるため、既存の地下掘削を用いた技術に比べて低コストである。

研究成果の概要（英文）：The focus on geothermal production enhancement systems and volcanic eruption prediction has led to a need for technology that can elucidate not only the 3D spatial distribution of subsurface fluids but also the temporal variation of that spatial distribution. In this study, I have developed a technique for elucidating the spatio-temporal distribution of subsurface fluid using electromagnetic monitoring. Specifically, I have developed a numerical analysis technique (4D imaging technique: 3D space + 1D time axis) that can estimate the spatio-temporal variation of subsurface resistivity structure from electromagnetic monitoring data.

研究分野：地球物理

キーワード：電磁探査 4Dイメージング 地下流体 モニタリング 逆解析 比抵抗 時空間変化 物理探査

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

地下流体は、エネルギー源である地熱流体、人間活動を支える地下水等の多岐にわたる。そのため、地下流体の空間分布を把握することは、地球に関連する様々な分野で重要である。近年、地熱増産システムや火山噴火予知への注目から、地下流体の三次元空間分布(3D)に加えて、時間変化を含んだ4Dイメージングが必要とされている。4Dイメージングとは、地下流体の3D空間分布( $x,y,z$ )のみならず、時間軸( $t$ )を含めた4D情報を取得する技術である(図1)。本研究では、地下流体の存在に敏感な物性値である比抵抗(電気の流れにくさ)情報を算出できる電磁探査法を用いて、非破壊で地下流体の時空間分布の解明を行う。実際に、電磁探査法を用いて、地熱流体や石油貯留層の時間的な変動を捉える試みが行われてきた。既存の電磁イメージング技術では、地下流体の時間的な変動を考慮する一方、流体の空間分布が2D( $x,z$ ): $y$ 方向変化はない)であると仮定してきた。しかしながら、地下流体の空間分布は3Dである。そのため、地下流体の現実的な時空間分布を捉えるためには、3D空間分布に時間方向を加えた4Dイメージングが不可欠である。

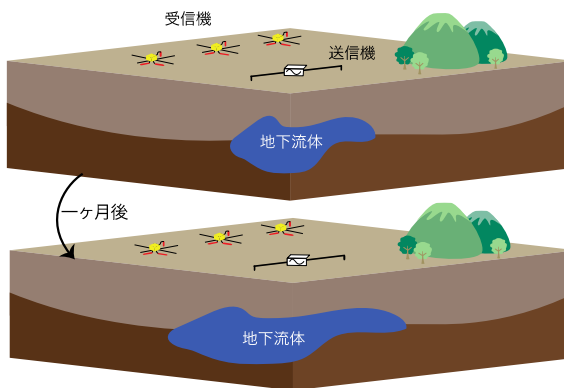


図1. 電磁探査法による地下流体の4Dイメージングの概念図。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地下流体の3D空間分布とその時間変化を捉えることができる電磁探査法を用いた4Dイメージング技術を開発することである。

## 3. 研究の方法

(1)電磁探査による4Dイメージング技術の開発:地下流体の時空間分布を捉えることができる電磁探査法による4Dイメージング技術を開発する。仮想データや野外実データで得られたデータに適用して、本イメージング技術の有効性を確認する。

(2)電磁探査モニタリングデータの取得:群馬県草津白根山で電磁探査モニタリングデータを取得する。群馬県草津白根山はこれまで水蒸気噴火が発生してきた歴史があり、地下熱水の時空間変化が期待されている。

## 4. 研究成果

(1)時間変化前の地下モデルの推定:地下流体の時空間変化を解明するためには、時間変化前の状態を正確に把握する必要がある。そこで、電磁探査が地熱・火山地域の地下比抵抗モデルを真の地下比抵抗構造に近く求めることができるのか数値実験を用いて調査した。この数値実験モデルは時間変化前の状態のものである。その結果、地下数kmに存在する高温の地下流体だまりを含む地下比抵抗モデルが電磁探査によって正確に再現できることがわかった(図2)。電磁探査を実際に秋田県湯沢地熱地域で実施し、着目する時間変化前の3D比抵抗構造の取得に成功した(図3)。

(2)地下流体の時空間変化のフィージビリティテスト:地下流体の時空間変化が発生した場合、地表での電磁探査レスポンスとして観測可能か数値実験を用いて調査した。数値実験では、地下流体の時間変化の発生が報告されている福島県奥会津地熱地域の地下比抵抗モデルを検討した。その結果、半年程度の時間間隔で起きる地下流体の時空間変化を地表での電磁探査受信機で検出できることがわかった。上記の数値実験により、電磁探査法モニタリング技術の地下流体の時空間分布解明への有効性が示された。

(3)電磁探査による4Dイメージング技術の開発:電磁探査データから地下比抵抗構造の時空間変化を推定できる数値解析技術の開発を行った。具体的には3D空間分布に時間方向を加えた4Dイメージングの開発を進めた。開発した4Dイメージングでは、時間変化前の3D比抵抗モデルをまず推定する。その後、時間変化前の3D比抵抗モデルを逆解析時の先験モデルとして利用し、時間変化後の3D比抵抗モデルを推定する。このような解析プロセスにより、高い精度で地下比

抵抗構造の4Dイメージングが可能となった。

(4) 電磁探査モニタリングデータの取得：群馬県草津白根山で電磁探査モニタリングデータの取得を行った。調査期間は、2020年から2021年にわたるものである。今後は、草津白根山で取得した実データに開発した4Dイメージングを適用し、火山地域の地下流体の時空間分布を解明する。

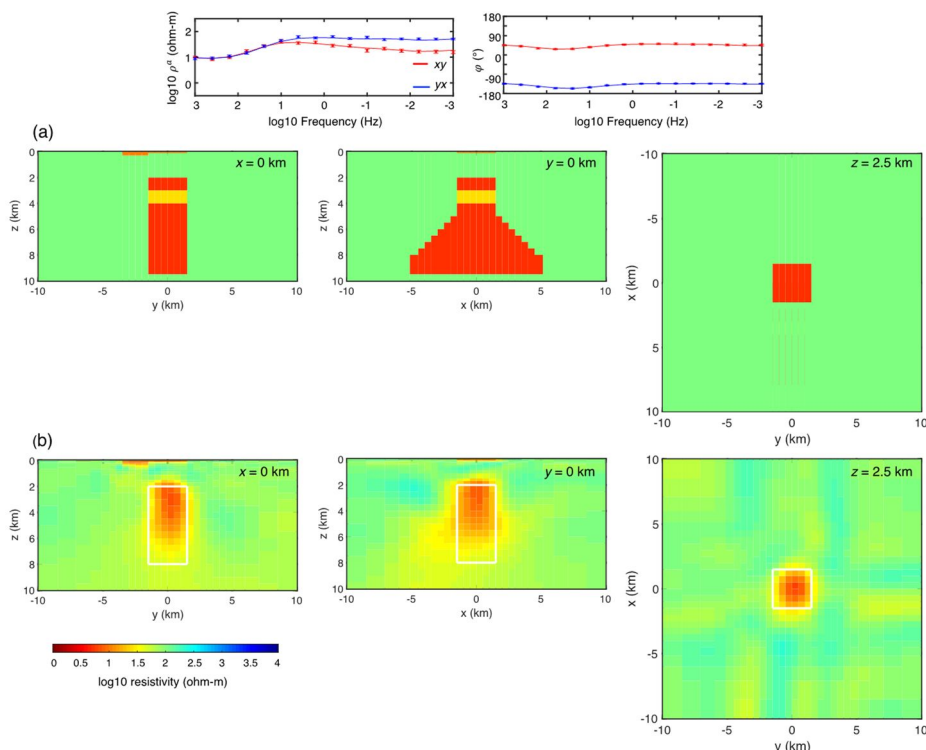


図2 数値実験により、電磁探査法が地下数 km に存在する高温の地下流体だまりを表す低比抵抗異常体を正確に再現できることを示す例 (Ishizu et al., 2021)。 (a) は、仮想データ作成に用いた真の比抵抗モデルを示す。(b) は、仮想データを逆解析して推定された比抵抗モデルを示す。

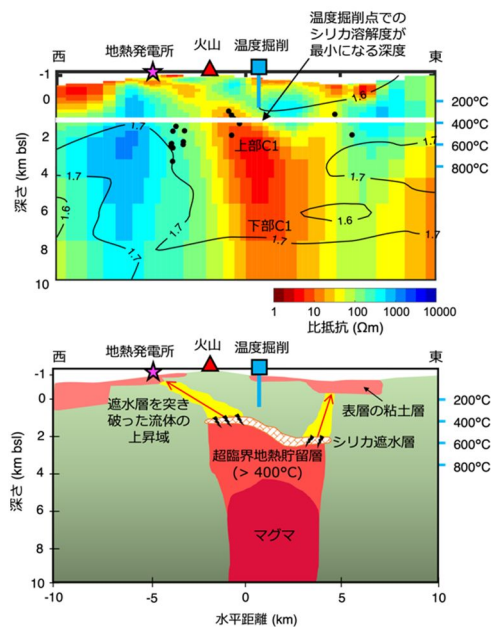


図3 上：秋田県湯沢地熱域で観測した電磁探査データの解析により推定された地下比抵抗構造の東西方向断面図。下：比抵抗構造を基にした湯沢地熱域の地熱システムの模式図。深さは海拔を0 mを基準とした深さを示す (Ishizu et al., 2022 を改変)。

1. Ishizu, K., Ogawa, Y., Mogi, T., Yamaya, Y., & Uchida, T. (2021). Ability of the magnetotelluric method to image a deep conductor: Exploration of a supercritical geothermal system. *Geothermics*, 96, 102205.
2. Ishizu, K., Ogawa, Y., Nunohara, K., Tsuchiya, N., Ichiki, M., Hase, H. et al.,

(2022). Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: a case study from Yuzawa geothermal field, NE Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB022911.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishizu Keiichi, Ogawa Yasuo	4. 巻 86
2. 論文標題 Offshore-onshore resistivity imaging of freshwater using a controlled-source electromagnetic method: A feasibility study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 GEOPHYSICS	6. 最初と最後の頁 E391 ~ E405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/geo2020-0906.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishizu Keiichi, Ogawa Yasuo, Mogi Toru, Yamaya Yusuke, Uchida Toshihiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Ability of the magnetotelluric method to image a deep conductor: Exploration of a supercritical geothermal system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102205 ~ 102205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geothermics.2021.102205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishizu Keiichi, Ogawa Yasuo, Nunohara Keishi, Tsuchiya Noriyoshi, Ichiki Masahiro, Hase Hideaki, Kanda Wataru, Sakanaka Shinya, Honkura Yoshimori, Hino Yuta, Seki Kaori, Tseng Kuo Hsuan, Yamaya Yusuke, Mogi Toru	4. 巻 127
2. 論文標題 Estimation of Spatial Distribution and Fluid Fraction of a Potential Supercritical Geothermal Reservoir by Magnetotelluric Data: A Case Study From Yuzawa Geothermal Field, NE Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB022911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB022911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ishizu Keiichi, Siripunvaraporn Weerachai, Goto Tada-nori, Koike Katsuaki, Kasaya Takafumi, Iwamoto Hisanori	4. 巻 86
2. 論文標題 A cost-effective three-dimensional marine controlled-source electromagnetic survey: exploring seafloor massive sulfides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 GEOPHYSICS	6. 最初と最後の頁 1 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/geo2021-0328.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Keiichi Ishizu, Yasuo Ogawa
2. 発表標題 A feasibility study of offshore-onshore resistivity imaging of freshwater using a controlled source electromagnetic method
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keiichi Ishizu, Yasuo Ogawa, Keishi Nunohara, Noriyoshi Tsuchiya, Masahiro Ichiki, Hideaki Hase, Wataru Kanda, Shinya Sakanaka, Yoshimori Honkura, Yuta Hino, Kaori Seki, Kuo Hsuan Tseng, Yusuke Yamaya, Toru Mogi
2. 発表標題 Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: a case study from Yuzawa geothermal field, NE Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須慶一、Weerachai Siripunvaraporn、後藤忠徳、小池克明、笠谷貴史、岩本久則
2. 発表標題 効率的な3次元海洋電磁探査法
3. 学会等名 物理探査学会第145回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須 慶一、小川 康雄、布原 啓史、土屋 範芳、市來 雅啓、長谷 英彰、神田 径、坂中 伸也、本藏 義守、日野 裕太、関 香織、Kuo Hsuan Tsen、山谷 祐介、茂木 透
2. 発表標題 MTデータによる超臨界地熱貯留層の空間分布と流体割合の推定：東北湯沢地熱域での例
3. 学会等名 物理探査学会第145回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須 慶一、小川 康雄、布原 啓史、土屋 範芳、市來 雅啓、長谷 英彰、神田、徑、坂中 伸也、本藏 義守、日野 裕太、関 香織、Kuo Hsuan Tsen、山谷 祐介、茂木 透
2. 発表標題 MTデータを用いた超臨界地熱貯留層の空間分布と流体割合の推定： 湯沢地熱域における ケーススタディ
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ishizu, Ogawa, Y
2. 発表標題 Coastal resistivity imaging of freshwater using a controlled source electromagnetic method
3. 学会等名 The 14th SEGJ International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須慶一、Weerachai Siripunvaraporn、後藤忠徳、小池克明、笠谷貴史、岩本久則
2. 発表標題 費用対効果の高い13次元海洋電磁探査法
3. 学会等名 資源素材学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ishizu, Ogawa, Y
2. 発表標題 Offshore-onshore resistivity imaging of freshwater using a controlled source electromagnetic method
3. 学会等名 IAGA-IASPEI 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須慶一、小川康雄、茂木透、山谷祐介、内田利弘
2. 発表標題 MT法を用いた深部低比抵抗体のイメージング能力について：超臨界地熱資源探査の例
3. 学会等名 物理探査学会第144回(2021年度春季)学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須慶一、小川康雄、茂木透、山谷祐介、内田利弘
2. 発表標題 MT法を用いた深部低比抵抗体のイメージング能力について：超臨界地熱資源探査の例
3. 学会等名 JPGU
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石須 慶一，小川 康雄，布原 啓史，土屋 範芳
2. 発表標題 MT 法による秋田県三途川カルデラ南部域の地熱資源探査（序報）
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石須慶一，小川康雄
2. 発表標題 CSEM 法を用いた海陸シームレス地質構造の解明に向けてのフィジビリティスタディ
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 石須慶一, 後藤忠徳, 小池克明, Weerachai Siripunvaraporn, 笠谷貴史, 岩本久則
2. 発表標題 曳航・海底受信機で測定されたCSEM データの三次元逆解析
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------