

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01302

研究課題名（和文）深海底における長基線電場観測によるマントル遷移層研究の展開

研究課題名（英文）Development of a deep-sea long-baseline electric field observation system for the study of mantle transition zone

研究代表者

清水 久芳（Shimizu, Hisayoshi）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：70302619

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：海域におけるマントル遷移層の電磁気探査の機会を増加させることを目的として、有人潜水艇による比較的単純な作業で設置と回収が可能な、深海長基線地球電場観測システムを開発した。上部マントルの電磁気探査では雑音として除去される地磁気静穏日変化と海洋潮汐に誘導された電磁場変動を電磁誘導のソースとして用いる解析方法の開発を行なった。電磁気応答関数の数学的・物理的な妥当性を決定する要因を明らかにし、複数の磁場変動ソースの影響が電磁気応答関数に混入していることを判別可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、有人潜水艇を用いた比較的単純な作業により、1 km のケーブルの敷設を伴う海底地球電場観測システムの設置・回収が可能となった。今後、同様の装置を用いたマントル遷移層の電気伝導度と、これに基づいたマントルに含まれる水の量に関する観測研究が進展することが期待される。また、電磁気応答関数の妥当性に関する判別方法は、電磁気応答関数に含まれる、より一般的な雑音の影響評価等、広く適用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a deep-sea long-baseline electric field observation system that can be deployed and recovered by a manned submersible with relatively simple operations, with the purpose to increase opportunities for electromagnetism exploration of the mantle transition zone in the oceanic area using the system. We have developed methods that uses the solar quiet daily variations and electromagnetic field induced by ocean tides, which are usually removed as noise in electromagnetic surveys of the upper mantle, as sources of electromagnetic induction in the mantle. Factors that determine the mathematical and physical validity of the electromagnetic response function are clarified, and this made it possible to distinguish the influence of multiple sources of magnetic field variation that contaminate the electromagnetic response function.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：海底長期観測 地球電場 電磁気応答関数 マントルダイナミクス

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

上部マントルを構成する鉱物の多くは、結晶に水を取り込まない性質を持つが、0.1重量%以下のごく少量の水は、結晶間や結晶の金属イオン欠損に存在し得ることが知られている。このような少量の水の存在がマントル物質の粘性・弾性波速度・電気伝導度などに影響をもたらす、プレート下の柔らかい層（アセノスフェア）の原因となる可能性が示唆されている。上部マントルを構成する物質は、およそ410 kmの深さより深部で結晶の構造が変化（相転移）し、およそ660 kmの深さで下部マントルの物質になる。この上部マントルから下部マントルの物質へと構造が遷移する領域は、マントル遷移層と呼ばれる。マントル遷移層の主要構成鉱物も水を取り込まない性質をもつが、高温高压実験研究により、これらの鉱物が含み得る水の量は上部マントル物質に比べて格段に多いことが明らかになった。マントル遷移層の鉱物が全て水に飽和した場合、その総量は現在の海水量の数倍になる可能性がある。マントル遷移層に存在する水の量が明らかになれば、マントルおよび核（コア）を構成する物質の高温高压実験結果と統合することにより、より正確に固体地球内部に含まれる水の量を明らかにできると期待され、これは、原始太陽系における、地球をはじめとする惑星や衛星の形成に関する研究の基礎情報となる。また、マントル遷移層に存在する水の水平方向の分布は、対流による熱的・物質的進化を経た現在のマントルの姿を反映しており、マントルの進化過程を議論するための有益な情報となる。

2. 研究の目的

マントル遷移層に存在する水の量は、地球物理観測による構造探査によって得られた物性の推定値と、温度・圧力・水の量を制御した高温高压実験による物性の測定値を比較することにより求められる。マントルを構成する鉱物の電気伝導度は、その内部に含まれる水の量に敏感であり、水の量の推定に有用である。

地球内部電気伝導度の推定には、電磁場観測に基づく探査（電磁気探査）が行われる。上部マントルやマントル遷移層を対象とする電磁気探査では、一般に、自然電磁場変動観測から求められる周波数領域の電磁応答関数が用いられる。この応答関数には、地球外部起源の磁場変動と、この変動により地球内部に誘導された電磁場変動の情報が含まれる。マントル遷移層の深度における電気伝導度推定には1日以上周期における応答関数が必要であり、多くの場合、地磁気観測点の長期磁場観測データから推定された応答関数が用いられる。しかし、地磁気観測点は陸域に局在しているため、より広域のマントル遷移層電気伝導度分布を得るためには、海域における探査が不可欠である。

海域の上部マントルを対象とした海底電磁気探査では、海底電磁力計（OBEM）が用いられる。OBEMでは電極間隔が約5 mの電位差測定を行い、これから電場を求める。しかし、マントル遷移層の情報を持つ周期帯の電場変動を得るためにはこの電極間隔では感度は不十分であり、感度を確保するためには1 kmかそれ以上のより広い電極間隔で電位差測定を行う必要がある。我々は過去に、マントル遷移層の探査を目的として、無人探査機（ROV）を用いてケーブルを海底に1~10 km展開し電位差を測定する深海長基線地球電場観測システム（EFOS）を開発した。また、得られたデータから電気伝導度を推定し、海域下マントル遷移層に含まれる水の量を制約することに成功した（Matsuno et al., 2017）。

過去に開発されたEFOSは、電位差計測装置（計測部）と海底ケーブル展長装置（展張部）により構成され、これらの設置と回収は、海洋研究開発機構の無人潜水艇（ROV）「かいこう」による極めて複雑な作業に依存していた。また、計測装置を格納する耐圧容器にガラス球を用いていたため爆縮の危険性があり、設置・回収作業を有人探査機で行うことが不可能であった。結果として、これらはEFOSを用いた電磁気探査の機会を限定させる要因となった。多くの海域においてマントル遷移層の電磁気探査を行うためには、EFOSによる観測機会の増加を可能とするような機器開発が不可欠である。国内外の研究者が深海長基線電場観測に参入し、マントル遷移層研究の新たな展開を可能とする改良型EFOSの開発が本研究の目的である。

自然電磁場変動を用いた電磁気探査では、地球外部起源磁場変動の空間的な特徴を考慮した解析やモデリングが必要となる。例えば、周期3時間よりも短い周期帯では、外部磁場変動は水平方向に振動する横方向に一樣な磁場で近似でき、また、周期1日以上では、地心双極子磁場の軸方向の一樣な磁場が外部から与えられると近似できる。しかし、周期3時間から1日の周期帯には、短周期側で期待される電磁場変動に加え、空間的に複雑な構造を持つ地磁気静穏日変化と海洋潮汐に誘導された電磁場変化が存在する。従来のデータ解析法および構造解析法では、これらの電磁場を適切に分離して扱うことができず、3時間から1日の周期帯では信頼性の高い電磁気応答関数が得られていない。これは上部マントル最下部構造に対する感度の低下をもたらす。結果として、マントル遷移層の電気伝導度の不確定性を増大させる。マントル遷移層の電気伝導度をより正確に推定するためには、電場測定に関する技術的課題だけでなくこの解析上の課題を解決する必要もある。これまで雑音として扱われていた地磁気静穏日変化や海洋潮汐起源の磁場変動を信号とした構造解析を可能とする手法の開発、および、数学的・物理的妥当性から電磁気応答関数の異常な振る舞いの原因を判別する方法の開発も、本研究の目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 有人潜水艇で設置・回収が可能であり、過度に複雑な操作を必要としない改良型深海長基線地球電場観測システムを開発する。
- (2) 改良型システムを用いて約1年間の試験観測を実施し、新たに得られたデータと既存の海底電磁場データを用いてマントル遷移層の電気伝導度構造推定を行い、結果をもとにマントル遷移層内部の水の量を推定する。
- (3) 地磁気静穏日変化および海洋潮汐によって誘導された磁場変動を信号として用いた地球内部電気伝導度構造解析手法を開発する。
- (4) 電磁気応答関数の異常な振る舞いが複数の外部起源磁場変動に起因する場合を判別することを目的として、電磁気応答関数の数学的・物理的な妥当性を決定する要因を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 本研究では、海底ケーブル展長装置（展長部）およびチタン製耐圧容器に格納された電位差計測装置（計測部）を用いて改良型システムを構築することとした。

機器設置時には展長部と計測部を架台に固定し、システム全体を自由落下によって海底に沈降させることとした。システムの海中における沈降速度を制御するために、係留系を接続して投入すること、および、海底における有人潜水艇の作業を鑑みて、吊り下げ用の可動アームを持った架台を設計し、作製した（図1(a)）。展長部と計測部は、それぞれの下部2箇所において、潜水艇による引き抜きが容易なパイプを用いて架台に固定することとした（図1(b)）。投入時の機器構成を図1(c)に示す。ガラス球を含む係留系は、観測システムが海底着底後に船上からの信号により切り離し、自己浮上で海面に到達した後に回収する。海底における機器展開時には、有人潜水艇により、1. 架台の吊り下げ用アームを計測部側に倒す（図2(a)）、2. 展長装置を架台に固定しているパイプを引き抜き、展長装置を開放する、3. 有人潜水艇で展長装置を確保して海底から10 m程度の高度まで上昇し、計測部側に1 kmのケーブルを展長する（図2(b)）、の作業を行う。機器回収時には、1. 展長したケーブルを計測部から除去する、2. 計測部を架台に固定しているパイプを引き抜き、計測部を開放する、3. 有人潜水艇で計測部を海面まで引き上げ、回収する、という手順で作業を行うこととした。

また、有人潜水艇の物資搭載能力が十分であれば、展長部および計測部を潜水艇で海底まで輸送することが可能であるため、機器設置において架台を用いない方法も考案した。この場合には、海底における機器の開放作業を必要とせず、潜水艇による作業をより単純化することができる。また、係留系とその周辺機器が不要となり、係留系の回収作業を含む、船上における作業を大幅に軽減させることも可能である。

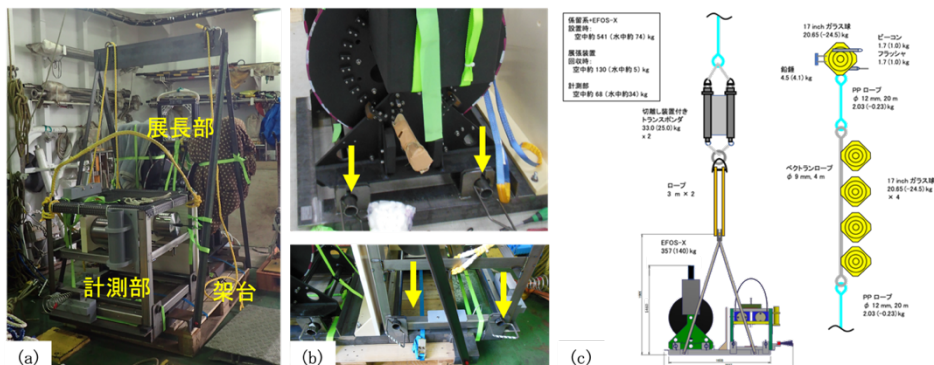


図1. 開発した改良型深海長基線地球電場観測システム。(a) ケーブル展長装置(展長部)と計測装置(計測部)を架台に搭載したシステム(深海潜水調査船支援母船「よこすか」船上)。(b) 展長部および計測部を架台に固定するパイプ。(c) システム投入時の機器構成(2021年航海時)。

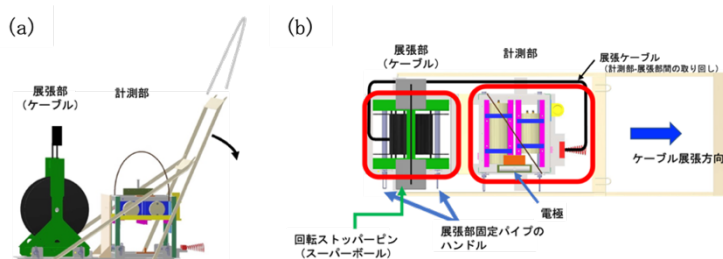


図2. 有人潜水艇を用いた設置・展開作業の概念図。(a) 架台の吊り下げ用アームを計測部側に倒す。(b) 展長部のパイプを引き抜いた後、計測部側にケーブルを展長する。

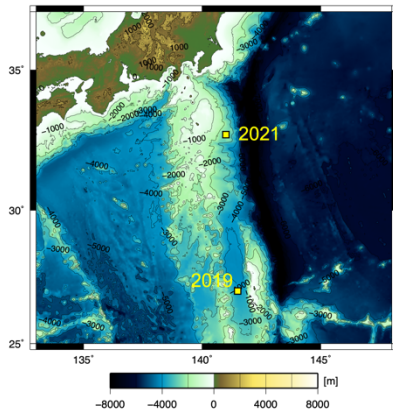


図 3. 採択された航海での予定観測機器設置地点。

(2) 架台を含む構成の改良型深海長基線地球電場観測システムを用いた試験観測を実施するため、有人潜水調査船「しんかい 6500」を搭載する深海潜水調査船支援母船「よこすか」観測航海公募に申請し、本課題の研究代表者を主席研究者とする観測航海が、2019 年の YK19-09S 航海、および、2021 年の YK21-09S 航海として採択された。両航海共に、既存の海底電磁場観測データと同時解析することを目的として、それぞれ、小笠原海盆（図 3 の 2019 で示された地点）および伊豆諸島青ヶ島東方沖海域（図 3 の 2021 で示された地点）における約 1 年間の観測を計画した。YK19-09S 航海、YK21-09S 航海共に、改良型深海長基線地球電場観測システムと同時観測用の OBEM を「よこすか」に搭載し準備を整えたが、2019 年は台風の影響により、また、2021 年は前線の影響による海況不良により、観測予定地点に到達できず、観測機器を設置できなかった。

(3) 外部磁場変動が地磁気静穏日変化である場合について、積分方程式法、および、差分法の 2 つの方法で、緯度・経度で 1 度の解像度を持つ電気伝導度構造に対するグローバル電磁誘導（球状地球に対する電磁誘導）の数値計算を可能とした。海洋潮汐により誘導される電磁場については、積分方程式法を用いたグローバル電磁誘導計算を実現するための開発を行なったが、上部マントルの電気伝導度推定に用いるためにはより高解像度の数値計算を要するため、さらなる開発が必要である。また、過去に北西太平洋において OBEM で観測した海底電磁場データを解析し、潮汐成分を抽出した。観測点および電磁場成分によって異なるが、M2（周期 12.42 時間）および O1（周期 25.82 時間）、P1（周期 24.07 時間）分潮が十分な振幅を持つことが多く、電気伝導度解析に用いることができる可能性があることを確認した。

(4) 複素数で表される電磁応答関数を (i) 因果的（因果律を満たす）な最小フェーズの成分、(ii) 因果的であるが、最小フェーズではない成分、(iii) 因果的ではない成分の 3 つの場合に分類し、(i) では実部と虚部の間、および、絶対値の対数と位相の間の、両方の分散関係が満たされること、(ii) では絶対値の対数と位相の間の分散関係は満たされないが、位相は異常であっても系統的に振る舞うこと、(iii) では両方の分散関係は共に満たされないが、位相は異常であっても系統的に振る舞うこと、および、電磁応答関数の逆数をとることにより因果的な応答関数になりうることを示した。また、これらを観測された応答関数に適用する方法をまとめた (Zorin et al., 2020a)。海底観測のように観測点より上方に高電気伝導度領域が存在し、この領域とその周辺との電気伝導度コントラストが高い場合には、電磁応答関数が因果的ではなくなる可能性があることを明らかにし、過去の海底観測データにもこのような事例がみられることを示した (Zorin et al., 2020b)。電磁応答関数の位相の振る舞いがここで明らかにした系統性を持たない場合には、この応答関数は複数の外部磁場変動の影響を含む可能性が高いことが示唆される。

<引用文献>

- ① Matsuno, T., Suetsugu, D., Baba, K., Tada, N., Shimizu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A., Obayashi, M., Utada, H., Mantle transition zone beneath a normal seafloor in the northwestern Pacific: Electrical conductivity, seismic thickness, and water content, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 462, 189-198, 2017.
- ② Zorin, N., Aleksanova, E., Shimizu, H., Yakovlev, D., Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I - theory, *Earth Planets and Space*, 72:9, doi:10.1186/s40623-020-1133-4, 2020a.
- ③ Zorin, N., Alekseev, d., Epishkin, D., Shimizu, H., Yakovlev, D., Validity of the dispersion relations in magnetotellurics. Part II: synthetic and field data, *Earth Planets and Space*, 72:139, doi:10.1186/s40623-020-1273-4, 2020b.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zorin Nikita, Aleksanova Elena, Shimizu Hisayoshi, Yakovlev Denis	4. 巻 72
2. 論文標題 Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I - theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-1133-4	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 該当する

1. 著者名 Zorin Nikita, Alekseev Dmitry, Epishkin Dmitrii, Shimizu Hisayoshi, Yakovlev Denis, Zaytsev Sergey	4. 巻 72
2. 論文標題 Validity of the dispersion relations in magnetotellurics. Part II: synthetic and field data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01273-4	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 該当する

1. 著者名 Matsuno Tetsuo, Baba Kiyoshi, Utada Hisashi	4. 巻 222
2. 論文標題 Probing 1-D electrical anisotropy in the oceanic upper mantle from seafloor magnetotelluric array data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1502 ~ 1525
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggaa221	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Baba, K., Matsuno, T., Tada, N., Shimizu, H., Utada, H.
2. 発表標題 Electrical conductivity structure of old oceanic mantle in the northwestern Pacific: Achievements for Normal Oceanic Mantle Project
3. 学会等名 2021 International Symposium on Deep Earth Exploration and Practices（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Baba, K.
2 . 発表標題 Ocean bottom electromagnetometers of Earthquake Research Institute
3 . 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Koyama, T., Fujita, S., Fujii, I., and Baba, K.
2 . 発表標題 Estimation of electrical conductivity in the mantle transition zone by using the Sq source model GAIA,
3 . 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Wan, X., Shimizu, H., Utada, H.
2 . 発表標題 Sensitivity of local electromagnetic response functions from Sq field to the electrical conductivity in the upper mantle
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R. Li, 清水久芳、馬場聖至、歌田久司
2 . 発表標題 Examination of criteria to remove the influence of the Sq-field variations from electromagnetic field spectra for a better estimation of regional electromagnetic responses.
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Nikita Zorin, Hisayoshi Shimizu
2. 発表標題 Application of the dispersion relations in magnetotellurics
3. 学会等名 Conductivity Anomaly 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noriko Tada, Kiyoshi Baba, Hiroshi Ichihara, Toyonobu Ota, Takumi Kobayashi, Hisashi Utada, Daisuke Suetsugu
2. 発表標題 The initial report of the electromagnetic observation on the seafloor in the Ontong Java Plateau
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Noriko Tada, Kiyoshi Baba, Hisashi Utada
2. 発表標題 Lateral heterogeneity of nominally 'normal' oceanic upper mantle in the northwestern Pacific
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第144回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisashi Utada
2. 発表標題 Plane-wave and flat Earth approximations in EM induction studies
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第144回講演会（招待講演）
4. 発表年 2018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
研究分担者	多田 訓子 (Tada Noriko) (00509713)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	馬場 聖至 (Baba Kiyoshi) (70371721)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	
研究分担者	歌田 久司 (Utada Hisashi) (70134632)	東京大学・地震研究所・特任研究員 (12601)	

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			
ロシア連邦	Nord West Ltd.	Moscow State University	Shirshov Institute of Oceanology	他3機関