

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540491

研究課題名(和文)非双極子磁場とマントル最下部不均質

研究課題名(英文)Heterogeneity at the bottom of the mantle and geomagnetic non-dipole field

研究代表者

清水 久芳(Shimizu, Hisayoshi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：70302619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：マントル最下部の電気伝導度不均質の影響により赤道域における非双極子成分である鉛直成分を生成するためには、元になる磁場が単純であると仮定した場合、トロイダル磁場の存在が肝要であることを電磁流体解析により示した。マントル最下部からトロイダル磁場変動が入力したとき、電気伝導度不均質が存在すると、地表で観測できる磁場が生成される。この磁場変動とこれに伴う電場を検出できれば、マントル最下部不均質の電気伝導度構造を制約することが可能である。

研究成果の概要(英文)：In case that the heterogeneous mantle electrical conductivity and simple magnetic field at the core-mantle boundary are the cause of the vertical magnetic field component at the equatorial region, it is essential for the simple magnetic field to contain the toroidal magnetic field component. The heterogeneous mantle converts the toroidal magnetic field at the core-mantle boundary to an observable magnetic field at the Earth's surface. Detection of the magnetic field and accompanying electric field variation enables us to constrain the electrical conductivity of the heterogeneous block at the bottom of the mantle.

研究分野：地球電磁気学

キーワード：地磁気 核-マントル境界 電気伝導度

1. 研究開始当初の背景

地球の外核で生成される地球主磁場は、主に地球自転軸方向の双極子磁場で表される。この他に非双極子磁場も存在し、赤道付近では鉛直方向の成分も見られる。しかし、研究開始当初の均質ダイナモモデルでは、赤道における鉛直磁場は十分に再現されていなかった。

マントル最下部には非常に強い地震波速度の不均質が存在することが示唆され、物質や相の違いが不均質の原因であると考えられる。このような不均質が存在すれば、電気伝導度も不均質を持つ事が期待され、地表において観測される磁場にこの影響が見られる可能性がある。

マントル最下部の電気伝導度不均質と地表において観測される磁場の関係は明らかではなく、また、マントル最下部にどのような強さの電気伝導度不均質が存在するかも不明であった。

本研究では、マントル最下部電気伝導度不均質と、その影響によって生成、誘導される電磁場の関係を明らかにする。また、観測された電磁場から、マントル最下部の電気伝導度構造に制約を与える事が可能かを考察する。

2. 研究の目的

本研究では、(1) マントル最下部に電気伝導度不均質が存在する場合、外核流体の運動にどのような影響を与え、また、どのような磁場が結果として生成されるか、(2) マントル最下部の電気伝導度不均質の影響により、核-マントル境界における磁場が地表ではどのように観測されるか、(3) 地表で観測される電磁場からマントル深部の電気伝導度構造を制約することは可能か、の3点を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) マントル最下部における電気伝導度不均質が核内部の磁場と流れに対する影響を、単純な系を想定し、電磁流体理論に基づいて見積もる。

(2) マントル最下部に電気伝導度不均質がある場合に、核-マントル境界から入力される磁場と地表における磁場の関係を明らかにする。特に、入力される磁場がトロイダル磁場の場合とトロイダル磁場の場合でどのように異なるかに着目し、非双極子磁場とマントル最下部電気伝導度との関係を明らかにする。

(3) 観測された非双極子磁場変動を用いて、マントル最下部電気伝導度不均質の制約可能性について考察する。

4. 研究成果

(1) 核-マントル境界上の、赤道のある点に接する平面を考え、核側には電気伝導度が一般的な流体が、マントル側には東西方向に電気

伝導度が周期的に変化する固体が存在するとする。また、軸双極子磁場を模した南北方向に一樣な磁場と、zonal 流を模した東西方向の流れが存在するとし、この流れは深さに依存するとする。電磁流体力学理論を用いた解析によると、与えた磁場と流れによって鉛直方向に誘導起電力が発生するが、上記のようなマントル内部電気伝導度不均質が存在しても、両者からは水平方向の磁場のみが生成されることを示した。非常に単純な系を考える際には、トロイダル磁場が存在すること、および、核-マントル境界付近に水平電流が存在し、これがマントルに流れだす場合について考える必要があることが示唆された。ただし、軸双極子磁場が卓越する場合にはトロイダル磁場は核内部で東西方向の成分を持ち、赤道面に対して反対称となることが期待されるため、赤道においては支配的なトロイダル磁場が0となって、水平電流は局所的に0となる。従って、マントルの電気伝導度もしくはトロイダル磁場の赤道面に対する対称性が崩れる事が、ここでの鉛直磁場生成に寄与すると考えられる。

上記の結果をふまえ、核内部で線形的に増加するトロイダル磁場が存在する場合について、電磁流体力学理論に基づく解析を行った。ここでは、より一般的に、地球自転の影響も考慮した。東西方向のトロイダル磁場に対応する南北方向の電流が、核に接するマントル最下部で不均一に流れる事により2次的な磁場が発生する。核-マントル境界において与えたトロイダル磁場の1/10の鉛直方向磁場を得るには、マントル最下部の1次元の電気伝導度を100 S/m としたとき、不均質には10000 S/m 程度の非常に高い電気伝導度が必要となる。

ローレンツ力とコリオリ力の影響により、核内部に主に水平方向の流れが駆動されるが、この流れは、地磁気永年変動から推測されるそこの流れの速さ 10^4 m/s に対して無視できる。速く回転している系においては一般に、回転角速度ベクトルの方向に伸びた流れの構造(テイラー柱)が見られるが、考えた系ではローレンツ力の影響のため、このような構造は作られない。核表層の数10~300キロメートルの領域が安定成層しているという地震学的な観測があるが、電気伝導度不均質による流れがほぼ水平方向であるため、この成層の影響は無視できる。

(2) 実際に観測される磁場には数年程度の時間スケールを持つ変動があり、これには、マントル内部の電磁誘導の影響を無視することができない。核-マントルのシステムで生成および誘導される電磁場全てを統一的に解くことは非常に困難である。(1)により、マントル最下部電気伝導度不均質が核内部の流れにほとんど影響を及ぼさないことが示されたので、ここでは核-マントル境界において与えられた磁場変動と地表における

電磁場の関係を、不均質をもつマントル内部における電磁誘導を数値計算により求める。また、比較のため、(1)で重要であることが示されたトロイダル磁場に加えて、ポロイダル磁場が入力する場合についても考える。

マントルの電気伝導度構造として、Shimizu et al.(2010)および Baba et al.(2010)を参照し、図1(a)に示される構造を仮定した。マントル最下部については、最下部100 kmに、図1(b)の破線で示す領域に高電気伝導度不均質が存在するとした。

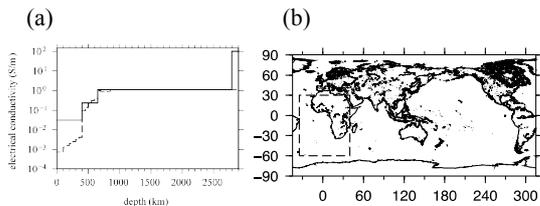


図1 仮定したマントル内電気伝導度構造(a)とマントル最下部不均質の位置と大きさ(b)。

核-マントル境界においてポロイダル磁場が入力する場合に地表で観測される磁場を図2に示す。ここでは、次数(n)2、階数(m)2の球関数モード、変動周期24年を仮定している。同位相成分については、マントル最下部に不均質が存在することの顕著な影響は見られないが、誘導成分にその影響が見られる。これは、磁場変動は電気伝導度が高い領域では遅く出現することを示す。

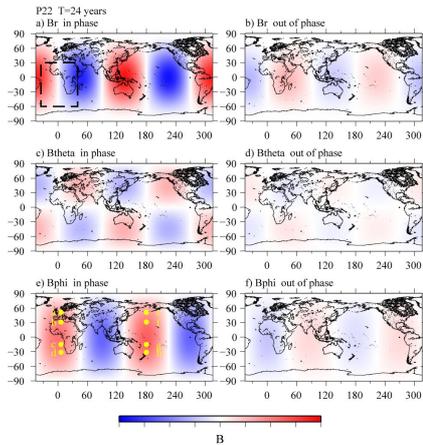


図2 n=m=2のポロイダル磁場が与えられたときに地表で期待される磁場。上から、r(動径方向)、theta(南向き)、phi(東向き)成分を表す。また、左が入力と同位相成分、右が誘導成分を示す。

核-マントル境界においてトロイダル磁場が入力したときの地表における磁場と電場を図3と図4にそれぞれ示す。ここでは、n=2、m=0の球関数モード(東西方向の磁場、北半球と南半球では逆向き)、変動周期24年を仮定している。このトロイダル磁場モードは、軸双極子磁場と核内部の東西方向の流れによって生成され、核内部に存在することが示唆されている。

マントル内部の電気伝導度構造が球対称構造の場合にはトロイダル磁場の影響を地表の磁場としては観測できないが、マントル最下部に不均質を仮定した影響により、不均質体上部付近において、垂直成分も含めた顕著な磁場のシグナルが見られる(図3)。また、誘導磁場成分も同じ領域に見られ、地表における磁場変動は、核-マントル境界の変動より遅れて出現する。

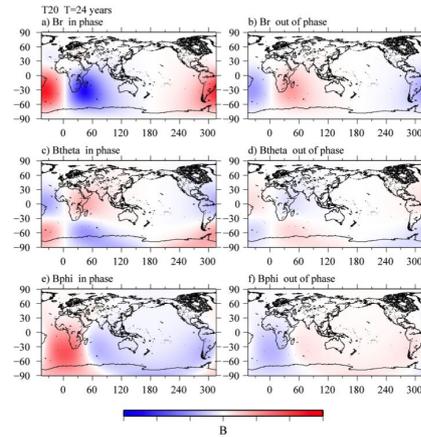


図3 n=2、m=0のトロイダル磁場が与えられたときに地表で期待される磁場。上から、r(動径方向)、theta(南向き)、phi(東向き)成分を表す。また、左が入力と同位相成分、右が誘導成分を示す。

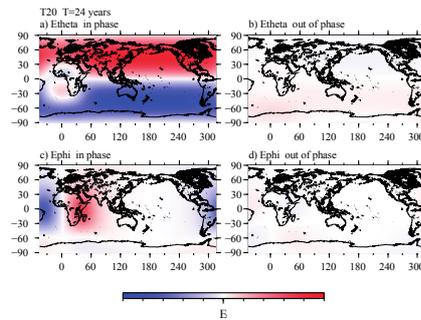


図4 n=2、m=0のトロイダル磁場が与えられたときに地表で期待される電場。上から、theta(南向き)、phi(東向き)成分を表す。また、左が入力と同位相成分、右が誘導成分を示す。(境界条件により、動径成分は0。)

一方、トロイダル磁場が核-マントル境界に存在することにもなる電場は地表全域で見られる(図4)。異常体上部以外における地域の電場は、マントルの電気伝導度構造が球対称の場合とほぼ同じである。また、電場には顕著な誘導成分がみられない。これは、核-マントル境界において磁場が変動することと同じ時間に地表で電場変動が観測されることを示し、磁場変動とは異なる時間に地表で観測されることを示している。

(3) ポロイダル磁場が核-マントル境界から入力する場合、地磁気変動の出現時間差の空間分布から、マントル最下部の電気伝導度不均質を推定することは、原理的には可能であ

る。しかし、本研究で考慮したマントル最下部の 100 km の厚さで 100 S/m の電気伝導度を持つ層に、10000 S/m の電気伝導度不均質が存在するという、非常に高い電気伝導度を仮定した場合においても、高電気伝導度体上とその他の地域における磁場変動出現の時間差は 1 年未満である。これまでに検出された全世界的な地磁気ジャーク（地磁気の時間 1 階微分が急激に変化する現象）の出現時間差がマントル最下部の電気伝導度不均質を反映していることが示唆されている（Nagao et al., 2003）が、計算された 1 年未満という時間差は、観測された 2 年以上という時間差と比べて有為に短い。また、地表において誘導される電場は、1000 km 以上の長さをもつ海底ケーブルでも観測不可能な大きさである。これらは、ポロイダル磁場入力の場合は、地磁気変動からマントル最下部電気伝導度不均質に制約を与えることは、非常に困難であることを示す。

一方で、トロイダル磁場が入力する場合には、磁場と電場の観測により、核における磁場変動の原因と、マントル最下部電気伝導度不均質に対して制約を与えることが可能であることを示唆する。つまり、局所的な磁場変動が観測され、その磁場成分の分布が図 3 に示されるのと同様であるとすると、これは、トロイダル磁場とマントル最下部電気伝導度不均質の影響によって作られた磁場変動である可能性があることを示唆する。また、電場観測により、この磁場変動が出現する以前に対応する変動が検出できたとなると、磁場と電場変動の強さと両者の時間差から、電気伝導度不均質を制約できる可能性があることを示唆する。

2007.0 年に、南大西洋を中心に局所的な地磁気ジャークと考えられる変動が観測された（例えば、Chulliat et al., 2010）。セネガルの Mbour 観測所では、東向き成分のジャークの強さ（ジャーク前後の傾きの差）は、約 $20\text{nT}/\text{yr}^2$ であった。人工衛星を用いた観測から求められた磁場成分ごとの変動分布（Olsen et al., 2014）は、高電気伝導度異常域の中心が南大西洋にあるとし、核-マントル境界でトロイダル磁場が変動した場合（図 3）と極めて似た分布を示す。また、これに対応すると考えられる電場変動が 2006.0 年にあったことが、北西太平洋域に展開された海底ケーブルによる電位差観測により検出されている。上記の 10000 S/m の電気伝導度異常域が大西洋南部を中心に分布すると、観測された電磁場変動が調和的に説明でき、これは、トロイダル磁場が核-マントル境界で変動すると考えられる場合については、実際に電気伝導度不均質を制約できることを示す。しかし、海底ケーブルによって得られた電位差データには、海流と地球主磁場による電磁誘導によって生じた電位差等、他の原因の電位差変動も含まれている可能性があり、2006.0 年にみられた変動が、

2007.0 年の局所的な地磁気ジャークに対応するものかについては、さらに検証する必要がある。

<引用文献>

- Shimizu, H., Koyama, T., Baba, K., and Utada, H., Revised 1-D mantle electrical conductivity structure beneath the north Pacific, *Geophys. J. Int.*, 180, 1030-1048, 2010.
- Baba, K., Utada, H., Goto, T., Kasaya, T., Shimizu, H., and Tada, N., Electrical conductivity imaging of the Philippine Sea upper mantle using seafloor magnetotelluric data, *Phys. Earth Planet. Int.*, 183, 44-62, 2010.
- Nagao, H., Iyemori, T., Higuchi, T., and Araki, T., Lower mantle conductivity anomalies estimated from geomagnetic jerks, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JB001786, 2003.
- Chulliat, A., Thebault, E., and Hulot, G., Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L07301, doi:10.1029/2009GL042019, 2010.
- Olsen, N., Luhr, H., Finlay, C.C., Sabaka, T.J., Michaelis, I., Rauberg, J. and Toffner-Clausen, L., The CHAOS-4 geomagnetic field model, *Geophys. J. Int.*, 197, 815-827, 2014.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 6 件)

清水久芳、地球電磁場ジャークとマントル深部電気伝導度、日本地球惑星科学連合大会、2015 年 5 月 24 日、幕張メッセ（千葉県・千葉市）

Hisayoshi Shimizu、Influence of the electrical conductivity heterogeneity in the D" layer on the flow and magnetic field at the surface of the core、American Geophysical Union Fall Meeting, Dec. 15, 2014, San Francisco (USA)

Hisayoshi Shimizu、Influence of the electrical conductivity heterogeneity in the D" layer on the flow and magnetic field at the surface of the core、International Symposium on Study of Earth's Deep Interior, 2014 年 8 月 3 日、湘南国際村センター（神奈川県・三浦郡）

清水久芳、CMB 電気伝導度不均質と非双極子磁場、日本地球惑星科学連合大会、2014 年 4 月 29 日、パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市）

Hisayoshi Shimizu、Influence of electrical conductivity heterogeneity in the D" layer on

geomagnetic jerks、International Symposium on Study of Earth's Deep Interior、July 5, 2012、Leeds (United Kingdom)

清水久芳、D''層内電気伝導度不均質による地磁気ジャーク時空間分布への影響、日本地球惑星科学連合大会、2012年5月25日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 久芳 (SHIMIZU, Hisayoshi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：70302619