

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340124

研究課題名（和文） マントル遷移層の含水率に関する観測的及び実験的研究

研究課題名（英文） Observational and experimental study on water content in the Earth's mantle

研究代表者

藤 浩明 (TOH HIROAKI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40207519

研究成果の概要（和文）：

マントル中の「水」は、マントルの物性を大きく変え、またその対流様式にも強い影響を与えている。本研究では、高い貯水能力を持つと予想されるマントル遷移層に着目し、その含水率を海底観測と室内実験から解明する事を目的とした。室内実験の結果、ごく微量(<0.1 wt%)の水では、観測された電気伝導度に有意な違いをもたらさない事が分かり、海底観測からは、北西太平洋海盆下で数‰程度の水しか含まない比較的乾いたマントル遷移層の存在が確認された。

研究成果の概要（英文）：

Water in the Earth's mantle as a trace element significantly modifies physical properties of our mantle as well as its convection mode. In this study, we focused on the mantle transition zone, which has been revealed to have high potential for water storage, and aimed at delineating its water content by both seafloor electromagnetic (EM) observation and high-pressure/temperature experiments. The laboratory experiments showed that a small amount of water (<0.1 wt%) cannot have a significant impact on electrical conductivity of the mantle minerals in the transition zone, while the seafloor EM observation revealed a relatively dry (up to a few permil) transition zone beneath the Northwest Pacific Basin.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2012年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	8,700,000	2,610,000	11,310,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：内部構造、電気伝導度、マントル遷移層、含水率、海底電磁気観測、高温高压室内実験

## 1. 研究開始当初の背景

金星と地球は、赤道半径や平均密度など物理的な定数だけを比べると、極めて酷似した

星である。にも関わらず、これら二つの星は、それぞれ異なる進化の過程を歩み、非常に異なる表層環境や惑星としての特質を獲得し

た。惑星電磁気学的な両者の違いは、固有の磁場を持つ星（地球）とそうでない星という点に集約される。

金星が固有磁場を持たない理由については、古くから（1）磁場ダイナモを維持できるだけの液体核が存在しない、（2）自転速度が遅いため磁場発生効率が悪い、といった議論がなされて来た。しかし現在では、金星のマンテルが対流していない為、核マンテル境界での冷却効率が悪く、十分な厚さの液体核が存在するにも関わらず、液体核内でダイナモ効果を伴うほど活発な熱対流運動が起きていないのであろう、と推測されている。

この様にマンテル物性は、その星の運命を左右する重要な物理量である。地球について言えば、マンテル対流が維持され続ける為には、粘性低減剤としての「水」が沈み込みなどの地学現象を介して、地表からマンテル内へ逆流する必要がある。この意味で「マンテル内水循環」は、現在の地球の状態や進化の過程を知る為重要な研究課題である。特に、地球化学に残された第一級の問題である「地震波で見た地球は全マンテル対流であるのに、地球化学的には枯渇した上部マンテルと地球化学成分に富む下部マンテルに何故明瞭に分かれているのか？（例えば、Bercovici and Karato, 2003）」は、この「マンテル内水循環」の問題と深く関わる。

地球内部電気伝導度は、マンテル内の「水」マーカーとして有力な物理量である。特に、マンテル遷移層の主要構成鉱物が最大約3wt%の「水」を含み得る事が明らかになって以来（例えば、Inoue et al., 1995）、WadsleyiteやRingwooditeについての含水電気伝導度実験（Huang et al., 2005; Yoshino et al., 2008）が行われる様になり、地球内部電磁誘導現象を利用したフィールド観測（Booker et al., 2004; Toffelmier and Tyburczy, 2007）によって得られたマンテル遷移層深度における電気伝導度が室内実験の結果と比較して議論される様になった。

これらの先行研究により、マンテル遷移層内の電気伝導度と含水率がある程度定量的に議論可能になり、場所によっては遷移層内の「水」によるものと思われる電気伝導度異常も発見されるに至った。しかし、室内実験においては「水」の存在が Karato (1990) が予想した通りに電気伝導度を飛躍的に高めるかどうかについて未だ論争が続いているのに加え、フィールド観測では長期的な電磁気観測が行いにくく、また、表層の電気伝導度不均質の影響を受け易い大陸においてしかマンテル遷移層深度の電気伝導度観測例が存在しない。そこで本研究では、安定した電磁気観測が可能な海底における長期データを沈み込みの影響が小さい地域（北西太平洋海盆）と大きい地域（西フィリピン海盆）

でそれぞれ採取し（図1及び2）、得られた電気伝導度モデルを新たに行う含水高温高圧電気伝導度測定実験結果と照合する事により、マンテル遷移層における含水率の地域性を定量的に明らかにする事を目指した。

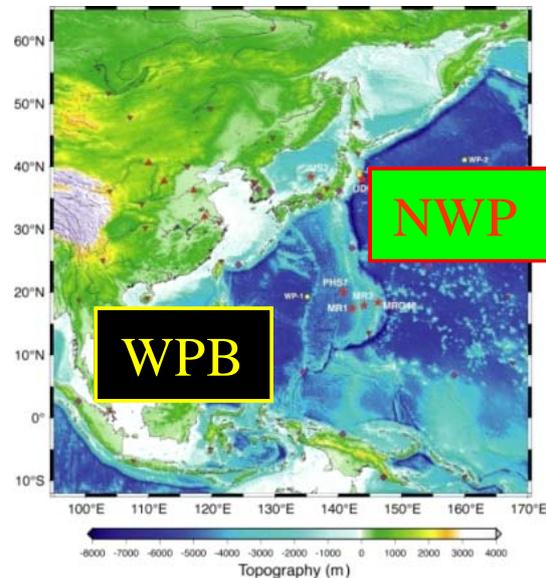


図1. 北西太平洋海盆（NWP）と西フィリピン海盆（WPB）の海底長期電磁場観測点の位置。

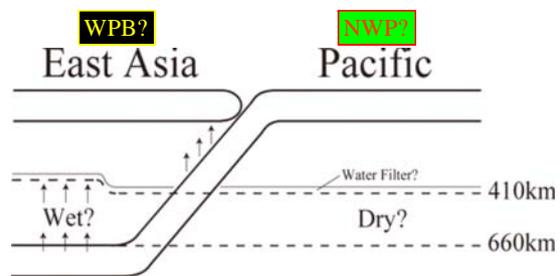


図2. 海底長期電磁場観測によるスタグナント・スラブに関する対照実験概念図。Ichiki, Baba, Toh and Fuji-ta (2009) による。

## 2. 研究の目的

本研究では、①マンテル遷移層の電気伝導度を海溝で沈み込んだ海洋プレートが遷移層深度で滞留してスタグナント・スラブとなり、その影響を強く受けている地域とそうでない地域で電磁場変化の海底長期観測から求め、②それらを水を加えた Wadsleyite と Ringwoodite の高温高圧実験結果と比較する。これにより、プレートの沈み込みによるマンテル遷移層への注水効率を事例解析に

基づいて定量的に明らかにできる。この結果は、地球内部構造の発達史や現在のマントルダイナミクスを議論する上で、重要な手掛かりを与える。

また、①における電気伝導度の推定精度を向上させる為、従来からよく行われている周波数応答関数を用いる方法に加え、磁気嵐時の導体地球過渡応答を時間領域で求める方法も併用する。両者の比較により、室内実験と定量的に照合可能な高精度地球内部電気伝導度の推定を図る。

### 3. 研究の方法

高温高压室内実験では、無水および含水状態の電気伝導度測定を行い、マントル遷移層の主要構成鉱物である Wadsleyite と Ringwoodite の電気伝導度がどの程度含水率に依存するかを精査した。その際、初期サンプルの含水率を変えた実験を行い、マントル遷移層の電気伝導度に及ぼす「水」の影響問題を再評価可能なデータを得る事に留意した。これらの室内実験は、研究分担者の芳野が中心となって実施した。

海底長期電磁気観測は、スタグナント・スラブの影響が非常に小さいと考えられる北西太平洋海盆の NWP 点 (北緯 41 度, 東経 160 度, 水深 5600m) と、地震波トモグラフィ (例えば Fukao et al., 2001) の結果から遷移層深度で日本海溝から沈み込んだ太平洋プレートが滞留していると考えられる西フィリピン海盆の WPB 点 (北緯 19 度, 東経 135 度, 水深 5700m) の二点で交互に行った。その為、海洋研究開発機構などの研究船運航機関の公募に応募し、どちらの点についても研究期間を通じて毎年海域実験を実施した。これにより両点で少なくとも一年以上の海底長期電磁場変化の連続時系列を既存のデータに加える事ができた。これらの海域実験は、主に海洋研究開発機構の研究分担者である浜野を中心に実施した。

新たに得られた時系列データは既存のデータと統合し、電磁場各成分間の比である地球電磁気学的な応答関数を周波数解析により求めた。外部磁場変化により地球内部で起きる電磁誘導の程度を表すこれらの応答関数は、一般に長周期のものほど地球深部の電気伝導度構造を示すと考えられる為、本研究の結果得られた海底長期電磁場時系列は、遷移層深度の電気伝導度の推定精度向上させる為に役立った。応答関数としては、電場水平二成分と磁場水平二成分間の比である地磁気地電流 (MT) 法テンソルと、磁場鉛直成分と磁場水平二成分間の比である磁探法

(GDS) スカラー変換関数の二つを用い、短周期すなわち浅部構造では MT テンソルに、長周期すなわち深部構造では GDS 変換関数にフィットさせる一次元電気伝導度インバー

ジョンを行い、NWP 点・WPB 点双方における電気伝導度プロファイルを作成した。一次元構造解析用に MT テンソル・データをスカラー・インピーダンスに換算する際には、テンソル行列式を用いた。また、MT テンソルは海陸分布など大規模水平不均質によって海洋中の電場が広域的に歪んでおり絶対値がバイアスされていると考えられる為、換算したスカラー・インピーダンスが歪みの影響を受けていないと考えられる GDS 変換関数と整合する様にバイアス補正を行った。さらに、導体地球の過渡応答を時間領域で計算する方法を新たに開発し、これを磁気嵐の様な急激な外部磁場変化に適用した事例解析を行って、周波数領域での構造解析で得られた二つの地球深部一次元電気伝導度プロファイルを検証した。これらの解析・モデリング・検証は、研究分担者の浜野や海外研究協力者 (チェコ・カレル大の J. Velinsky 氏) の協力を得ながら、研究代表者の藤が中心となって実施した。

### 4. 研究成果

本研究の開始前、室内実験の分野ではマントル遷移層の電気伝導度に及ぼす「水」の影響については二つの異なる実験結果が存在していた。すなわち、微量の「水」でも高電気伝導度になり得るという結果 (例えば Dai and Karato, 2009) とその逆 (例えば Yoshino et al., 2008) である。本研究で再測した所、Yoshino et al. (2008) の結果が裏付けられ、ごく微量 (0.1 wt%) 以下の含水率では、観測された電気伝導度に有意な違いをもたらさない事が確認された (Yoshino and Katsura, 2012)。

図 3 に NWP 点で得られた一次元電気伝導度構造を、図 4 にモデルとデータのフィットを各々示す。NWP 点では過去データの蓄積があった事に加え、地球内部電磁誘導現象の源となる外部磁場変動が起きやすい太陽活動の極大期であった事が相俟って、図 5 に示す通り精度の高い電気伝導度プロファイルが深さ約 800km 超まで決まった。図 3 のモデルによれば、スタグナント・スラブの影響が小さい北西太平洋海盆下のマントル遷移層は 0.1S/m のオーダーの電気伝導度を持つ事が分かった。これを本研究で実施した含水遷移層構成鉱物の電気伝導度測定実験結果を踏まえて解釈すると、北西太平洋海盆下では数%程度の「水」しか含まない比較的乾いたマントル遷移層の存在が示唆された。一方、西フィリピン海盆下では、図 6 に示す通り観測期間中の外部磁場擾乱が非常に少なかった為、深部構造の高精度決定には至らず、両者の直接比較はできなかった。しかし、遷移層電気伝導度そのものは、北西太平洋海盆下より高い値が得られた為、西フィリピン海盆

下に高含水率遷移層が存在する可能性は否定できない。

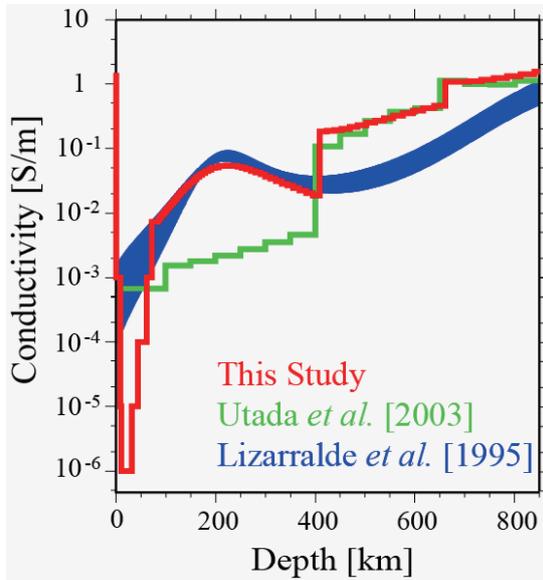


図3. NWP点下の一次元電気伝導度プロファイル。北西太平洋海盆下では遷移層電気伝導度が、0.1S/mのオーダーである事が分かる。

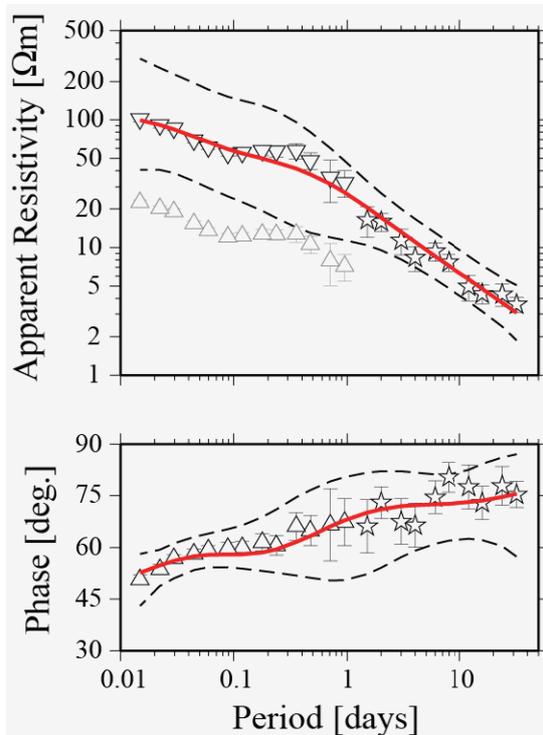


図4. 図3のモデルの理論応答(赤実線)と実際の観測応答。△がMTテンソルから求めたスカラー・インピーダンス, ☆がGDS変換関数。点線は、 $\rho$ +インバージョン(Parker and Booker, 1996)による見掛け比抵抗(上段)とその位相(下段)の95%信頼区間。

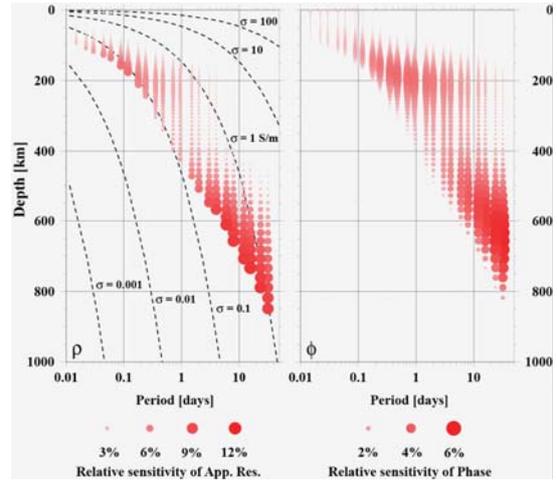


図5. 観測された各周期における見掛け比抵抗(左)とその位相(右)の各深度の構造に対する寄与(赤丸)。このデータが、図3に現れている深さ約200kmの高電気伝導度層とマントル遷移層の構造に十分な感度を持っている事が分かる。最大到達深度は、800kmを超えている。

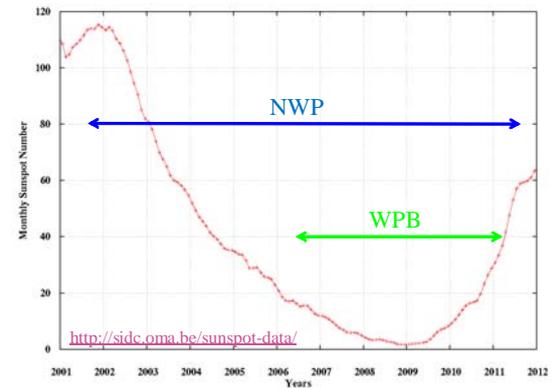


図6. 最近の太陽黒点数の月別推移(赤線)。NWP点では過去データの蓄積が充分であったので、図3のモデルが得られた。WPB点での観測開始が太陽活動が極小に向かう時期であった為、深部構造の不確実性が高くなっている。

### 5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計4件)  
 (1) Yoshino, T. and T. Katsura, Re-evaluation of electrical conductivity of anhydrous and hydrous wadsleyite, Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 337-338, pp. 56-67,

DOI: 10.1016/j.epsl.2012.05.023, 2012, 査読有.

(2) Yoshino, T., E. McIsaac, M. Laumonier and T. Katsura, Electrical conductivity of partial molten carbonate peridotite, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 194-195, pp.1-9, doi:10.1016/j.pepi.2012.01.005, 2012, 査読有.

(3) Yoshino, T., Ito, E., Katsura, T., Yamazaki, D., Shan, S., Guo, X., Nishi, M., Higo, Y., Funakoshi, K., Effect of iron content on electrical conductivity of ferro-periclase with implications for the spin transition pressure, J. Geophys. Res., 116, B04202, doi:10.1029/2010JB007801, 2011, 査読有.

(4) Toh, H., Y. Hamano, T. Goto and H. Utada, Long-term seafloor electromagnetic observation in the Northwest Pacific may detect the vector geomagnetic secular variation, Data Sci. J., 9, IGY100-IGY109, doi:10.2481/dsj.SS\_IGY-004, 2010, 査読有.

[学会発表] (計6件)

(1) Toh, H., Comparative study on the electrical properties of the oceanic mantle with and without influence of stagnant slabs. 地殻流体研究会 2013, 2013年3月2日, ラフォーレ修善寺.

(2) Toh, H., T. Minami, Y. Hamano and H. Sugioka, Seafloor Electromagnetic Station with Differential Pressure Gauge. SGEPPS Fall Meeting, October 22, 2012, Sapporo Convention Centre.

(3) Toh, H., Transient response of the conducting Earth: Comparison of the observed and theoretical step response. 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会, 2012年5月25日, 幕張メッセ国際会議場.

(4) Toh, H., Effect of solar daily variations on MT and GDS signals. 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会, 2011年5月26日, 幕張メッセ国際会議場.

(5) Toh, H. and Y. Hamano, Comparative study on water content in the asthenosphere and the transition zone beneath the Northwest Pacific Ocean. American Geophysical Union, Fall Meeting, December 22, 2010, Moscone Convention Center, San Francisco, USA.

(6) Toh, H. and Y. Hamano, The Earth's global response: Internal/external separation of the temporal geomagnetic field. 地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会, 2010年11月3日, 沖縄県市町村自治会館.

[図書] (計3件)

(1) H. Toh and Y. Hamano, Springer, Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss. 2013, 500.

(2) H. Toh and T. Minami, InTech, Earthquake Research and Analysis, 2012, 183-198.

(3) Rasson, J.L., H. Toh and D. Yang, Springer, Geomagnetic Observations and Models, 2011, 1-25.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤 浩明 (TOH HIROAKI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 40207519

### (2) 研究分担者

浜野 洋三 (HAMANO YOZO)

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス  
領域・上席研究員

研究者番号: 90011709

### (3) 研究分担者

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