

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20403006

研究課題名（和文） 日豪共同長基線電場観測による大陸上部マントル標準電気伝導度モデルの構築

研究課題名（英文） A Quest for Reference Electrical Conductivity Profile in Continental Upper Mantle through Long Dipole Telluric Observations in Cooperation between Australia and Japan

研究代表者

市來 雅啓 (ICHIKI MASAHIRO)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：80359182

研究成果の概要（和文）：

大陸下上部マントルの基準となる電気伝導度構造を求める為、東西・南北各 1km 間の電位差変動観測点をオーストラリア大陸中心の砂漠地帯に 2 点完成させた。収集したデータを解析したところ、カナダ楯状地での構造に比べ電気伝導度が低いという結果を得た。Ca, Fe, Mg, Al, Si, 主要 5 元素間の任意の化学組成と鉱物の室内電気伝導度測定から地球内部の電気伝導度構造を推定する計算方法も開発した。大陸上部マントルの標準化学組成を与えて電気伝導度構造を計算したところ、観測による構造より高伝導である計算結果が得られ、標準化学組成と標準電気伝導度構造は現時点では調和的でない。

研究成果の概要（英文）：

We installed the two telluric observation sites, the dipole spans of which are about 1 km, in the central part of Australian Continent in order to elucidate reference electrical conductivity profile in continental upper mantle. The electrical conductivity profile analyzed using the obtained data shows more resistive than the Canadian Shield's result. We also developed a procedure in which electrical conductivity profile could be calculated from arbitral chemical composition among the principal five elements (Ca, Fe, Mg, Al, Si) and from the laboratory experimental data of the mineral conductivity. Standard chemical composition model in continental upper mantle gave more conductive profile than the observed one through the procedure. The result reveals that standard chemical composition and electrical conductivity profile in continental upper mantle is not consistent with each other.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：地球惑星電磁気学

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：地球惑星内部構造・電気伝導度・地殻マントル物質・地球内部の炭素・

MT 法・海洋ダイナモ

1. 研究開始当初の背景

(1) 長基線 MT 法(水平電場－水平磁場応答解析)・GDS 法(水平電場－水平磁場応答解析)の組み合わせにより、海底下と大陸下種々のテクトニクスでのマントル深部電気伝導度

構造が解明されつつあり、注目を集めている。しかし大陸下は海洋下と異なり、基準となる標準モデルが無い為以下の問題が生じている：

①観測によって得られた電気伝導度構造の

どの深さが異常であるのか判らない。

②大陸下のマントル標準構成物質(化学組成)の電気伝導度構造による検証が試みられているが、地震波速度構造の様な標準モデルが無い為に遮られている。

(2) 大陸下深部マントル電気伝導度構造研究は実質一例のみ存在する(Neal et al,2000)が、MT法・GDS法を原理的に履行不能な高緯度地域(カナダ楕状地)の観測データによるもので信憑性が疑わしい。

(3) 太古代原始大気中の二酸化炭素量による炭素量は、現在の大気・海洋等で確認されている炭素量より多いと考えられているが、その炭素の行方は明らかになっていない。地球内部に水や炭素(石墨)が存在すると、そこでは電気伝導度が大きな値を持つことが期待されるが、大陸の上部マントルでは少なくとも地球内部の水は少ないと示唆されている。

2. 研究の目的

(1) 大陸下の基準となる標準電気伝導度構造を、オーストラリア大陸中央部で長基線地電位差観測を実施することにより推定する。

(2) 得られた電気伝導度構造モデルから、

①大陸上部マントルの標準化学組成モデルとの比較

②「大陸上部マントルは太古代始原大気の大気量二酸化炭素の貯蔵庫？」という仮説の検証

をそれぞれ行う。

3. 研究の方法

(1) 長基線 MT法・GDS法による大陸標準電気伝導度構造の推定

①観測：マントル深部の電気伝導度構造探査に特化した長基線地電位差の長期連続観測をオーストラリア中心部アリススプリングス周辺にて行う。長基線地電位差観測は自前での電位線敷設・埋設によって行う。東西、南北それぞれ約 1km を無人の砂漠地域に耕運機で溝を掘って十字に埋設し、中心部に砂漠地帯での高温・砂塵対策を考慮した観測システムを設計・開発して設置する。磁場の記録は、1991 年から稼働しているアリススプリングス定常観測点のデータを用いる。オーストラリアが大陸標準電気伝導度モデルを求める上で最適な理由は、MT・GDS法を適用可能な地磁気中緯度に位置することと、アフリカのように地球中心核起源のプリュームによる影響がないと考えられるからである。アリススプリングスを選んだ理由は、海洋による影響(海流・潮流の影響や海水の電磁誘導によって生じる電磁場)を受けないことが過去の研究(Lilley et al., 1993)から期待

されるからである。

②解析：データ解析は Chave and Thomson(2004)による応答関数計算プログラムと Constable et al.(1987)による 1次元電気伝導度構造解析プログラムによる解析を行う。中国での結果(Ichiki et al., 2001)の様に、大陸地域はマントル深部において1次元構造であると期待される。①で述べた場所の選定効果を確認する為、得られた結果を Nealらの結果と比較する。

(2) 大陸上部マントル標準化学組成に基づく電気伝導度構造モデル計算と炭素大陸貯蔵仮説の検証

①大陸下のマントル標準化学組成と高温高压による鉱物の電気伝導度測定値から、物質科学による大陸下の標準電気伝導度構造モデルを計算する。具体的には図1の手順で計算を行う。用いたプログラム、データは下記の通り；大陸上部標準化学組成モデル：Rudnick et al.(1998)、熱力学計算プログラム：Perple_X (Connoly 2005)、熱力学データベース：SFO05、力学境界層温度構造計算：McKenzie et al.(2005)、鉱物電気伝導度室内実験：Xu et al.(2000)、Constable (2006)、Romano et al.(2006)、Katsura et al.(2007)、Yoshino et al.(2008)、混合法則：Hashin-Strickman 境界(Hashin and Strickman, 1962)。このような物質科学計算による電気伝導度構造計算は初の試みであるので、参考に海洋下の電気伝導度構造モデルも Pyroliteの化学組成(MacDonough and Sun, 1995)を入力として計算する。

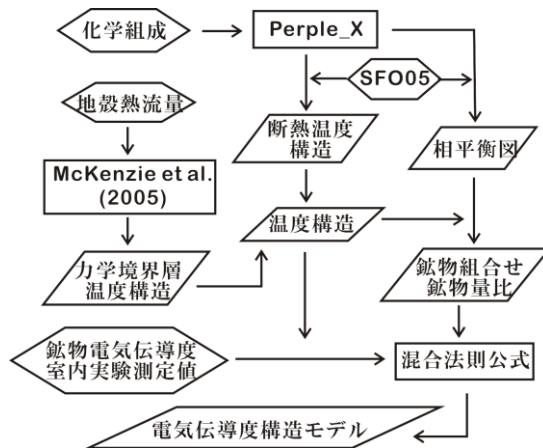


図1 物質科学による電気伝導度構造モデル計算手順

②観測と物質科学計算による電気伝導度構造モデルを比較し大陸下のマントル標準化学組成の検証を行う。観測モデルが物質モデルよりも高伝導の場合、炭素が大陸上部マントルに石墨の形態で固定されていると仮定して、その量がどの程度になるか計算する。

4. 研究成果

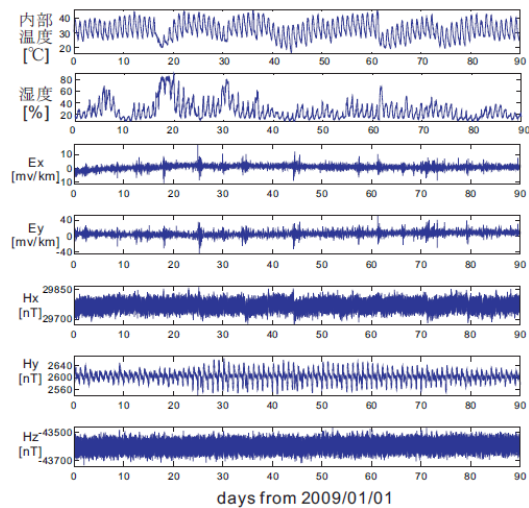
(1) 砂漠地帯での長基線地電位差観測システムの設計・開発とデータ取得

砂漠地帯での高温・砂塵対策を考慮した格納容器と太陽電池パネルを組み合わせた観測システムを設計・開発し、長基線地電位差データを無人環境で長期間システムの不具合なく取得することに成功した。図2が開発した観測システムの外観と内部の写真、図3が取得した地電位差データである。



図2 開発した長基線電場観測システム

設計方針は、廉価・単純構造・誰でも扱えるが過酷な環境に耐えられることを大目標にした。量産化されているデータロガー(白山工業製 LS-7000)を採用してコストを下げ、砂塵対策に極力冷却ファン使用せず、反対に生じる高温対策には、上記の 50°Cまで動作保障されている低消費電力低発熱ロガーを採用し、且つ温湿度を常時モニターすることで対応した。落雷への対策としてバリスタを配電盤に設置し、データロガー内部と併せ二重の雷対策を施した。



ノウハウが皆無の中、日本人初の経験で砂漠での地電位観測手法を確立できたことは大きなインパクトを持つ。その上申請時に比べ大幅なコスト削減でシステム構築できた点は特筆すべきで、後程詳述する新たにもう一点の観測点の設置が決定的に重要であることが明らかになったが、コスト削減の恩恵で2点目の観測点設置も本プロジェクトにて前倒しで行うことにも成功した(図4)。

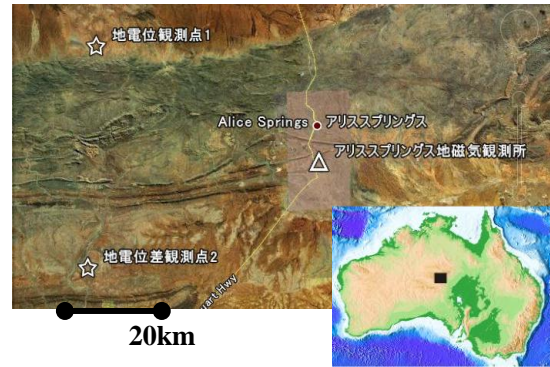


図4 地電位差観測点の位置。観測点1を2008年11月、観測点2を2011年2月に設置した。

(2) MT 解析結果

電気伝導度構造に関して、オーストラリアは単純な成層構造(1次元構造)でなく複雑な構造であることが分かった。MT 応答関数解析結果を図5に示す。振幅の応答関数に相当する見かけ比抵抗 (ρ_a) に関して、平行成分間の応答が直行成分間のものに相当する大きさを持っている。

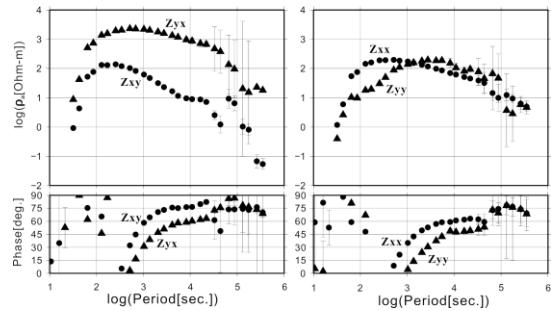


図5 MT 応答関数。横軸は周期[秒]の対数。左: 互いに直行する電場-磁場間の応答関数 右: 互いに平行な電場-磁場間の応答関数 上: 見かけ比抵抗(振幅比に相当) 下: 位相(磁場に対する電場の位相ずれ)

本研究では Zxy, Zyx の応答関数を平均して1次元の電気伝導度構造を推定した。図6に得られた電気伝導度構造と応答関数の合いを示す(rms=4.5)。位相応答に関しては不十分であるが、見かけ比抵抗は良好な合いを再現している。今回の観測と解析手順は応答関数の平均操作に至る状況も含めて Neal らのカナダ楕状地の解析と同様で、直接比較することに意味がある。比較ではオーストラリアの結果はカナダ楕状地の結果より遥かに低い。図にはないが、応答関数で比較しても今回の見かけ比抵抗は Neal らの結果より高い。結果的に大陸下の電気伝導度構造は過去の研究よりも低いことを示唆しており今回の重要な成果である。但し今回の結果はマントル遷移層まで 10^{-3} [S/m]程度で、大陸下の低い温度構造を考慮しても過度に電気伝導度が低い。複雑な構造を1次元で解析したことが一因であ

ると考えられ、地殻構造のみを観測・解析した2乃至3次元電気伝導度構造を先見情報として与え、マントルのみを1次元解析する同時インバージョンを行うべきだと考えている。その為には2観測点以上でのデータが不可欠であるが、最終年度に2点目の観測点敷設も終わらせることができた(図4参照)。

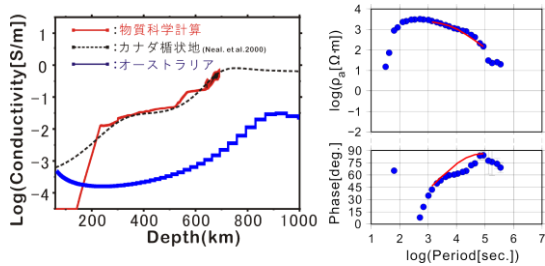


図6 左:求められた電気伝導度構造(青線)。黒点線は Nealらによるカナダ楕状地の結果。赤線は 4.(3)物質科学計算による電気伝導度構造。右:求めた電気伝導度構造(左図青線)から計算される応答関数(赤線)。青丸は Z_{xy} , Z_{yx} 応答関数の平均。

(3) 物質科学計算との比較

3.(2)による計算手順で物質科学に基づく電気伝導度構造を問題なく計算できており、任意の温度圧力、且つ主要5元素(Ca, Fe, Mg, Al, Si)間の任意組成を考慮できる電気伝導度構造の計算手順を世界に先駆けて確立することができた。観測で求められた電気伝導度構造から地球内部の温度や化学組成を推定する汎用的な手法に道筋が付いたことを意味し、画期的成果である。一般に室内実験における論文では、橄欖石など単独鉱物の特定の温度圧力条件での電気伝導度測定や一定温度での圧力に対する鉱物組み合わせの変化など自由度1の実験結果を求めることが目的となっており、観測で求められた電気伝導度構造から温度構造や化学組成を推定するにはそれらを参照するだけでは不十分であった。今回熱力学計算プログラム *Perple_X* を組み込むことで、大きな自由度を考慮しながら電気伝導度構造を解釈できる段階に引き上げることができた。

今回の計算で大陸下の標準化学組成モデルから計算した電気伝導度構造は観測で求められた構造よりも高伝導であることが明らかになった。Rudnickらの標準化学組成を用いて計算した電気伝導度構造を図6に示す。深さ200km以深では奇しくも Nealらの結果とよく一致している。200km以浅では Nealらの結果より電気伝導度が低い今回の観測による電気伝導度構造よりは高い傾向を示唆している。

(4) オーストラリア大陸中央での海洋潮汐に対応した地球磁場変動の発見

MT 応答関数の計算過程でアリスプリングスの磁場変動のパワースペクトルに海洋潮汐(M_2 分潮)に対応した強い強度の磁場変動が観測されていることを発見した(図7)。海洋潮汐による陸上磁場への影響は海岸から高々500km内陸迄と考えられていた。地球電磁気学海洋ダイナモ分野に於ける過去の概念を大幅に変更する重大な発見で、広範な展開が期待される成果であり、国内外問わず大きなインパクトを持つ。反面、MT・GDS解析において地球内部の電気伝導度構造に起因する電磁場を汚染しているという新たな問題点も浮上した。この素過程を解明しなければ電気伝導度構造が間違っただけで推定されかねない。今後オーストラリアのような大きな大陸中央で海洋潮汐に対応する磁場変動が観測される素過程を研究する必要がある。

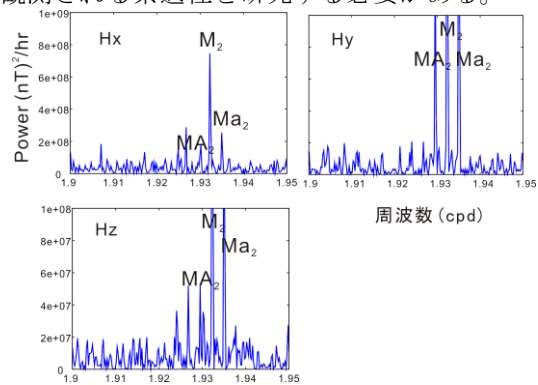


図7 地磁気3成分のパワースペクトル。海洋潮汐 M_2 に対応する強い強度が見られる。

(5) 大陸上部マントルからの CO_2 脱ガス速度の見積り

大陸上部マントルに蓄積された太古代の CO_2 が脱ガスすることによる温室効果を炭素循環モデル計算で議論し、超氷河期から温暖化に向かう際に大きな役割を果たし得ることを初めて示した。大陸下部地殻に存在するグラニュライト変成相と呼ばれる高温-超高温を被った岩石(例えば紫蘇輝石花崗岩)に CO_2 流体包有物が多く含まれることは古くから知られており、その起源は大陸上部マントルと考えられてきた。これまでは超氷河期から温暖化に向かう際の温室効果ガスは火山からの脱ガスの大気組成への寄与が卓越し、造山運動による寄与は小さいとされてきたが、我々は新しい炭素循環モデルを提案し、大陸のアルカリ玄武岩や橄欖岩中の捕獲岩を参考に炭素含有量を仮定し、脱ガス速度が $6 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{18}$ mol/my という値を得た。脱ガス速度、炭素含有量、造山運動速度は互いに依存関係にあり、電気伝導度は炭素含有量と関係する。今後は他のデータから脱ガス速度を束縛することで反対に代表的な大陸上部マントルの炭素含有量を推定し、電気伝導度構造と比較する。但し電気伝導度は石墨量の

情報しか与えないので、存在形態として炭酸塩鉱物・CO₂流体・石墨間の分配係数を考慮する必要がある。

(6) 今後の展望

申請当初の仮説を覆す多数の結果が得られ、事態は全く混沌としてきた。申請当初の最終目標(大陸標準の電気伝導度構造を求めること)到達には、想定外の困難な障害が潜んでおり、道程が長きに渡ることが明らかになったが、(4)の発見などは別分野での展開・発展が大いに期待できる新発見である。今後それらの素過程を解明した上で電気伝導度構造解析の戦略を(2)の末尾で記述したように改訂し、最終目標に必ず漕ぎ着ける。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 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 Research*, 16, 545-562, 2009, 査読有
- ② 上嶋誠, MT法による電気伝導度構造研究の現状, *地震* 第2輯, 61, S225-S238, 2009, 査読有.
- ③ Omori, S. and M. Santosh, Metamorphic decarbonation in the Neoproterozoic and its environmental implication, *Gondwana Research*, 14, 97-104, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 市來雅啓, A upper mantle electrical conductivity profile beneath the Australian continent and a comparison with a laboratory-based model, American Geophysical Union Fall Meeting, 2010年12月14日, 米国・サンフランシスコ・モスコーンセンター
- ② 市來雅啓, 大陸上部マントルの標準電気伝導度構造: 観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会第126回総会および講演会, 2009年9月28日, 金沢市・金沢大学角間キャンパス
- ③ 市來雅啓, 岩石熱力学と室内実験から推定される上部マントル電気伝導度構造, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月28日, 千葉市・幕張メッセ国際会議場
- ④ 大森聡一, Metamorphic decarbonation in the Neoproterozoic and its environmental implication, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月25日, 千葉市・幕張メッセ国

際会議場

[その他]

- ① ラジオ出演: 2008年7月22日(火)にオーストラリア国営ABCラジオで本プロジェクト内容に関して、共同研究者の Hitchman Adrian がインタビュー出演。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市來 雅啓 (ICHIKI MASAHIRO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 80359182

(2) 研究分担者

藤田 清士 (FUJITA KIYOSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00283862
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
上嶋 誠 (UYESHIMA MAKOTO)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 70242154
大森 聡一 (OMORI SOICHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 90267469
山本 伸次 (YAMAMOTO SHINJI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・特別教育研究プロジェクト研究員
研究者番号: 30467013

(3) 連携研究者

なし

(4) 共同研究者

HITCHMAN ADRIAN
Geosciece Australia・Earth Monitoring Group・Project Leader
WANG LIEJUN
Geosciece Australia・Earth Monitoring Group・Geophysicist
WHATMAN JIM
Geosciece Australia・Earth Monitoring Group・Technical Specialist
SIRIPUNVARAPORN WEERACHAI
マヒドン大学(タイ)・理学部・准教授