海底拡大系下の非対称電気伝導度構造

藤 浩 明*

Asymmetric Electrical Structures Beneath Mid-Ocean Ridges

Hiroaki TOH *

Abstract

A comparative study of deep mantle structures beneath spreading centres revealed asymmetry of lithosphere and mantle. Multidisciplinary marine expeditions were conducted at two survey sites: one around a super-fast spreading ridge in the East Pacific Rise, and the other around a slow and stable ridge segment of the continental breakup region, the Gulf of Aden. At the former site, a Mantle Electromagnetic and Tomography experiment (MELT) was conducted with a large number of seismometers and electromagnetometers deployed at the seafloor to image the shape and the geometry of partial melt bodies below the fast spreading centre. At the latter, a seafloor magnetotelluric array was deployed to obtain a two-dimensional electrical conductivity structure beneath the continental breakup region, and the structure was compared with precise swath mapping and sea surface gravimetry. At both sites, the deep electrical conductivity structures showed remarkable asymmetry with respect to the ridge crest. Partial melt bodies that correspond to the seafloor-producing factory at the surface could not be observed right below the ridge crest, but they significantly shifted by several tens of kilometers from the ridge crest. The asymmetry also appeared in bathymetry, gravity and seismic structures. This implies that the mid-ocean ridges are created at the contacts of different oceanic mantles rather than right above the symmetric partial melt bodies.

Key words : asymmetry, seafloor spreading centre, deep electrical conductivity

キーワード : 非対称性, 海底拡大軸, 深部電気伝導度

I. はじめに

近年, 海半球ネットワーク (深尾, 1998) の進展もあり, 日本周辺を含む太平洋全域に測地・地球物理観測網が展開されている。また, 地震学や電磁気学などの複数の分野にまたがった年単位の海底地球物理観測が, 中央海嶺や島弧・海溝系を横断する広域アレイにより行われる様になった。

ここでは, 中央海嶺系で実施された2つの海底電磁気観測の結果を用い, 超高速拡大軸と遅い拡大軸下部の深部マントル構造を比較してみたい。中央海嶺の拡大速度は, 全世界で平均すれば年間約5 cmであり, ここで言う高速/低速拡大軸とは, 拡大速度が各々年間10 cmを超えるものと2~3 cmにも達しないものを指す。

海底電磁気分野では, 外部磁場擾乱により地球

* 富山大学理学部

* Department of Earth Science, Toyama University

内部にどのような電流系が生じるかを電磁誘導現象を利用して調べ、深部電気伝導度構造を推定する。自然磁場変化をソースとして利用するという意味においては、自然地震を用いた地震波トモグラフィになぞらえる事ができるが、支配方程式が波動ではなく拡散方程式になる点が、地震学とは本質的に異なる。すなわち、地球外部の電離圏・磁気圏に起源を持つ磁場変化が、地球内部に波動としてどう伝わったかではなく、どのように拡散(減衰)していったか、を捉える事により、地球内部電気伝導度構造を求める。この時、地震学の様に震源パラメータと構造とを同時に推定する事はせず、周波数解析により相関の高い「電磁場成分間の比」を「導体地球の周波数応答関数」として抽出し、その空間分布と周期依存性を地球内部構造に焼き直す。求める「比」として、電場・磁場の水平成分を用いる方法が、よく知られているMagnetotelluric (MT) 法である。近年、海底データの長期取得が可能になった事や、ロバスト統計を用いた周波数解析法の発達(Chave *et al.*, 1987)が精度の良い応答関数の推定を可能にした事、および浅部不均質構造に起因するデータの汚染を除去する手法が急速な進歩を遂げた事(Groom and Bailey, 1989)により、海底 MT 法によっても上部マントル全体をイメージングできる様になった(Nolasco *et al.*, 1998)。

以下、東太平洋海膨で行われた Mantle Electromagnetic and Tomography experiment (MELT 実験)の結果と、大陸分裂域であるアデン湾シバ海嶺で行われた海底 MT 観測の結果を、超高速拡大軸と低速拡大軸の比較に焦点を絞って記す。

II. 超高速拡大軸の 2 次元電気伝導度構造

MELT 実験は、1995 年秋から 1997 年夏にかけて東太平洋海膨南緯 17 度付近で行われた、海底地震・海底電磁気両分野にまたがる国際共同観測である。海底地震計の敷設期間は 1995 年秋から 1996 年春、海底電磁気分野の観測は 1996 年春から 1997 年夏にかけてであった。海底地震分野は米国の RIDGE 計画を中心に進められたが、海底電磁

気分野は日米仏豪の 4 か国共同で実施され、筆者はその日本代表を務めた。超高速拡大軸として知られる東太平洋海膨の中でも、Garret Fracture Zone とイースター・マイクロプレートにはさまれた全長 2000 km に達する最も長い海嶺セグメントを東西に横断する測線(図 1)上に、各々 50 台を超える海底地震計・海底電磁気測器群が投入された史上最大規模の海底長期観測であった。このセグメントが選ばれた理由は、(1) 東太平洋海膨の中でも最も長いセグメントであり、構造の 2 次元性が高いと考えられる、(2) 両側拡大速度が 14.5 cm/y と十分速い、の 2 点である。このセグメントを使って高精度の 2 次元地震波速度/電気伝導度断面を求め、高速海底拡大系下部の部分溶融体構造の形状・分布から、中央海嶺下のマントル・ダイナミクスが受動的上昇流により支配されているのか、それとも、大西洋同様能動的上昇流により支配されているのかを決定づけるのが、MELT 実験の最大の目的であった。受動的上昇流とは、上部のプレート運動に伴いやむを得ずマントル物質が中央海嶺下に上昇してくる形態を指し、能動的上昇流とは、溶けたマントル物質が自身の浮力で上昇してくる形態を指す。

ここで、MELT 実験における地震学的成果について、簡単にレビューしておく。広角反射法により求められた海洋地殻の厚さは 5 ~ 6 km であり、海嶺軸をはさんだ両側で均質であった(Canales *et al.*, 1998)。にも関わらず、この地域の深部部分溶融体構造は、実体波で見ても(Toomey *et al.*, 1998)表面波で見ても(Forsyth *et al.*, 1998)極めて非対称性が強く、深さ 100 km までの感度を持つ周期 25 秒のレイリー波の位相速度異常からは、低速度ピークが拡大軸直下ではなく西側に数十 km 程度ずれている事がわかった。Scheirer *et al.* (1998)によれば、この方向はホット・スポット系から見たこのセグメントの絶対運動方向と一致する。また、Shear Wave Splitting により太平洋プレート側に顕著な異方性が検出され(Wolfe and Solomon, 1998)、これは実体波の走時にも現れている(Toomey *et al.*, 1998)。レシーバー関数を使ったマントル遷移層の厚さの見積もり

図 1 南緯 17 度における MELT 実験の測線図.

Fig. 1 Seafloor observation array of the MELT experiment at 17°S.

図 2 南緯 17 度における東太平洋海嶺の比抵抗東西断面.

深部部分溶融体中心は海嶺軸（横軸原点）直下ではなく、西の太平洋プレート側に数十 km ずれており、この方向はホット・スポット系から見たこの付近の東太平洋海嶺の絶対運動方向と一致する。また、東のナスカプレートの電気伝導度は太平洋プレートのそれと比較して著しく低く、部分溶融体構造と併せて強い「非対称性」を示す。

Fig. 2 A two-dimensional section of electrical resistivity beneath the East Pacific Rise at 17°S.

The deep partial melt body is shifted by several tens of kilometers to the west from the ridge crest at the surface. The westward shift coincides well with the absolute motion of the ridge segment with respect to the hotspot reference frame. The strong conductivity contrast between the Nazca Plate and the Pacific Plate shows asymmetry as well as the shift of the partial melt body.

(Shen *et al.*, 1998) からは、このセグメント下部で厚さの顕著な変化はない、すなわちアイスランド直下の上昇流とは違って、下部マントルに起源を持つ上昇流により東太平洋海膨下部の部分溶融体がつくられているのではない事が明らかになった。

拡大軸下部に存在する部分溶融体のサイズ（横方向に数百 km）から、東太平洋海膨では「受動的マントル上昇流が支配的」である事がわかり、実験の所期の目的は達成したものの、得られた地震波速度構造は予想だにできなかった「表層こそ均一だが、深部では強い非対称性と異方性を伴う」構造であった。

では、電磁気学ではどんな結果が得られたのであろうか？ 図1の東西測線上に32サイトの海底MT観測点が設けられ、合計50台を超える海底磁力計・海底電位差計・海底電位磁力計が投入された。解析に使用した周波数は、周期256秒から約1日にわたる15周波数である。図2に、この測線から求められた2次元比抵抗断面を示す。深さ200 km、海嶺軸をはさんで±約300 kmの範囲の構造を、電気伝導度の逆数である比抵抗 [$\Omega \cdot m$] を用いて描いてある。寒色系が電流を通しにくい部分、暖色系が電流を通し易い部分を表し、各々地震波速度の速い/遅い部分と対応する。モデル推定に利用する観測データとしては、Nolasco *et al.* (1998) による海底地形補正法を用いて海底地形の影響を除去したMTインピーダンス・テンソルを使用した。これらのデータのうち、TEモード（海嶺軸と平行に電流が流れるモード）のデータを用いて、Uchida (1993) による2次元ABICインバージョンを利用してモデルを推定した。

図2から読み取れる事は、超高速拡大系付近のマントル電気伝導度構造は、地震波速度構造と同様、「強い非対称性」を持つ、という事である (Evans *et al.*, 1999)。深部部分溶融体に相当する地下百数十 km の高電気伝導度異常体は、太平洋プレート側に有意にずれており海嶺軸直下にはない。また、海洋プレートに相当する部分の電気伝導度は、海嶺軸をはさんで東側と西側とで非常に異なる。前者は表面波の結果と、後者は実体波の

結果と極めて良く符合する。また、地球内部の電気伝導度は、物質の状態（溶けているかいないか）・組成（特に水や炭素等の揮発性成分の含有率）・温度と相転移に敏感な物理量であるので、後者はナスカ・プレート部分のマントルには「水」がなく、太平洋プレート側にはまだ残っている、と解釈すれば説明できる。この事から筆者は「中央海嶺をはさむ2つの海洋プレート下のマントルは全く別物、すなわち、中央海嶺は組成の異なるマントルの境界上にできている可能性がある」という発想を得たのだが、これについては次に述べる低速拡大軸での結果と併せ、最終章で論じる。

III. 低速拡大軸の2次元電気伝導度構造

2000年12月から2001年1月にかけ、大陸分裂域であるインド洋アデン湾において、東京大学海洋研究所の白鳳丸により総合地質・地球物理研究航海が行われた。ちょうど両世紀にまたがる期間に実施されたこの航海は、アデン新世紀航海 (Aden New Century Cruise: ANCC) と名づけられ、地形・ドレッジ・地球化学的手法を用いた熱水系探査・地震・電磁気など多岐にわたる観測が実施された。アデン湾海底地形の全貌をマルチ・ナロー・ビーム・システムで初めて明らかにし、またアデン湾奥で熱水系を伴うと見られるホット・スポット海山を発見するなど、既に幾つかの成果が報告されている (Tamaki and Fujimoto, 2001)。筆者らは、低速拡大軸下部の深部電気伝導度探査を目的として、この付近で最も発達したセグメントであるシバ海嶺に、5台の海底電位磁力計 (Ocean Bottom Electro Magnetometer; OBEM) からなる海底MTアレイを展開した (Toh *et al.*, 2001)。ANCCに参加した海底地震計は、シバ海嶺西方のセグメント付近で地震活動度および震源の精密決定に用いられた (Yamada *et al.*, 2001) ため、残念ながら海底地震分野との連携はならなかったが、代わりにシバ海嶺において既に高精度地形・重力マッピング (Leroy *et al.*, 2000) を行っていたフランスとの共同研究を実現する事ができた。

図3に、海底電磁気測線を示す。投入した5台

図 3 アデン湾での海底電磁気測線。

右図赤枠内のアデン湾が調査海域。シバ海嶺はアデン湾東部に位置するこの地域最大のセグメントである。筆者らはここで 5 台の OBEM からなる海底 MT アレイを展開した（挿入図）。

Fig. 3 Bathymetry of the Sheba Ridge in the Gulf of Aden and the seafloor MT array (inset).

図 4 低速拡大軸の一つである大陸分裂域のアデン湾における 2 次元比抵抗断面図。

深さ約 30 km に存在する高電気伝導度異常の中心は、海嶺軸（＝横軸原点）の南西約 60 km に位置しており、これはこの地域の地形およびマントル・ブーゲー異常に見られる「非対称性」とよく一致する。

Fig. 4 A two-dimensional electrical section of the Sheba Ridge, the Gulf of Aden.

A high conductivity anomaly at a depth of around 30 km does not exist right below the ridge crest (=the origin of the horizontal axis), but is shifted by approximately 60 km southeastward. The asymmetry is in good agreement with those observed in bathymetry/gravity of this region.

の OBEM のうち 1 台を除きサンプリング間隔は 0.1Hz、磁場の最小分解能は全て 10pT（地球主磁場の大きさの 100 万分の 1 程度）であった。また、2000～2001 年は太陽活動の極大期近傍であったため、3 週間という短い観測期間内でも磁気嵐を 1 つ観測する事ができた。その結果、周期 240 秒から約 1 日にわたる MT インピーダンス・テンソル、すなわち、地球内部構造を表す周波数応答関数を求める事ができた。

図 4 に、アデン湾シバ海嶺の 2 次元比抵抗断面を示す。横軸が計約 250 km と半分以下になっている以外は、比抵抗値の凡例を含め、高速拡大軸断面と同様である。インバージョン法も高速拡大軸の場合と同じだが、海底地形の影響をデータから直接取り除く事はせず、海底地形の実測値を 2 次元で組み込める様に改良したものをを用いている。またここでは、TE モードだけでなく TM モード（電流が海嶺軸に直交して流れるモード）のデータも含めたインバージョンを行っている。

図 4 から、低速拡大軸においても、マントル電気伝導度構造に強い「非対称性」が現れているのが見て取れる。高電気伝導度異常は、海嶺軸直下ではなく南西にずれて存在しており、この構造を Leroy *et al.* (2000) の地形・重力と比較してみると、地形的高まりは海嶺軸の南西側に多く分布している事がわかった。また、フリーエア異常と海底地形データを用いてマントル・ブーゲー異常を計算してみると、やはり海嶺軸の南西に負の異常が長く伸びたマップが得られた。更に、電磁気測線の北東部と南西部で各々平均水深を求めてみると、南西の端では北東部より約 100 m 程度水深が浅くなっている。この事は、測線の南西端のマントルは、北東端のマントルより暖かく密度が小さい事を示唆するものと考えられる。

この様に、地形・重力にも拡大軸周りの非対称性が顕著に現れており、それは深部電気伝導度構造に見られた非対称性と一意に対応している可能性が高い。しかし、高速拡大軸と比較すると、セグメント長が 200 km 程度と約 10 分の 1 しかないため、構造の 3 次元性が 2 次元近似の妥当性を弱め、誤った地球内部の描像が得られている可能性も否

定できない。これについては、Mackie *et al.* (1993) による 3 次元モデル計算プログラムを用い、海底地形の 3 次元性と地下構造の 3 次元性の影響を各々独立に検証 (Toh *et al.*, 2003) し、推定された 2 次元モデルで観測データを十分説明できるとの結論に達した。

IV. ま と め

高速拡大軸および低速拡大軸のマントル構造に共通して見られた特徴は、拡大系付近の深部構造には拡大速度によらず強い「非対称性」が存在する、という事である。これらの事例から、上部マントルの物質は非常に混ざりにくく、その結果として中央海嶺は「物質境界」上にでき易いのではないかと推測できる。言い換えれば、中央海嶺をはさむ 2 つの海洋プレート下のマントルは、全く別物である可能性がある。高速拡大系の中で最も 2 次元性の高いセグメントを選んで行われた MELT 実験で得られた深部構造は、予想に反して非常に「いびつ」なものであった。ことに、地震・電磁気双方に見られた海嶺軸をはさんだ各物理量の東西コントラストは、物質の違いを想起させるに十分である。地球電磁気学的には、この違いは組成の違い、すなわち「水」の有無以外には考えにくい。高速拡大系で見られた強い S 波偏向異方性も、電気伝導度の場合オリビンに溶解込んだ水素がもたらす結晶軸異方性 (Karato, 1990) で定量的に説明可能ではないかと予想される。更に、対照実験の場として選んだ大陸分裂域の「遅く余り動かない海嶺セグメント」の深部構造も強い非対称性を伴い、この非対称性は地形・重力からも支持される。

一般に、マントル内の対流活動は、プレートの沈み込みにより支配されている。受動的マントル上昇流が卓越する太平洋では、沈み込みによって地球の皮膚が否応無く地球深部へと引きずり込まれるのに伴い、新しい海底を生産すべく中央海嶺が誕生している。逆に、低速拡大系では、恐らく能動的上昇流が支配的であると考えられる。しかし、アイスランドの様に中央海嶺とホット・スポットの相互作用が強い場合を除き、中央海嶺の根が下部マントルに起源を持つ事は少ない。従って、

中央海嶺がどこにできるかは、上部マントルに卓越する不均質に大きく左右される、と考えるのが自然ではないだろうか。すなわち、中央海嶺は本来よく動き得るものであり、それが実際どこにできるかは上部マントルの状態による。できる場所の一つの候補が「物質境界」である、というのが本稿の主旨である。但し、ここで取り上げた深部構造は、全長6万5千km以上に及ぶ中央海嶺の極く一部にしか過ぎない。中央海嶺の多くが物質境界上に存在するかどうかを確かめるには、もっと多くの地球物理断面を採り、観測事例を積み重ねてゆかねばならない。

最後に、本稿で紹介した電氣的構造が、他分野との接点すなわち地球科学的意義を持つためには、「地球内部の水」という視点が欠かせない事を、改めて指摘しておきたい。すなわち、マントル内に注入された「水」の存在形態・分布を多分野共同の総合観測から明らかにし、地球内部の水がどのようにマントルの粘性を下げ、電気伝導度を高くし、また地震波速度を遅くするか、といった問題を解く事無しに、マントル・ダイナミクスの新展開は図りにくいであろう。そのためにも、今後は「水」注入の現場である沈み込み帯での再観測が重要である。世界最大のマントル下降域に位置する日本に最も近い海底拡大系は、背弧海盆の過去または現在進行形の海底拡大系である。海洋地殻を掘り抜き、マントルまで直接到達できる「ライザー掘削船」という新しい武器を手にした今、背弧拡大系の海洋深部掘削は、海底物理学・岩石学およびマントル・ダイナミクスの各分野に大きな進歩をもたらすものと考えられる。

謝 辞

MELT 実験への参加に際しては、文部科学省科学研究費補助金（国際学術研究）「東太平洋海膨下の溶融体構造に関する電磁気学・地震学的調査（課題番号：07041089）」を、また、ANCCでは基盤研究（A）（2）「国際海嶺共同研究—地球環境変動システムと中央海嶺（課題番号：11694057）」および稲盛財団平成13年度研究助成金を使用させて頂いた。記して感謝致します。

文 献

- Canales, J.P., Detrick, R.S., Bazin, S., Harding, A.J. and Orcutt, J.A. (1998): Off-axis crustal thickness across and along the East Pacific Rise within the MELT area. *Science*, **280**, 1218-1221.
- Chave, A.D., Thomson, D.J. and Ander, M.E. (1987): On the robust estimation of power spectra, coherences and transfer functions. *J. Geophys. Res.*, **92**, 633-648.
- Evans, R.L., Tarits, P., Chave, A.D., White, A., Heinson, G., Filloux, J.H., Toh, H., Seama, N., Utada, H., Booker, J.R. and Unsworth, M. J. (1999): Asymmetric electrical structure in the mantle beneath the East Pacific Rise at 17 S. *Science*, **286**, 752-756.
- Forsyth, D.W., Webb, S.C., Dorman, L.R. and Shen, Y. (1998): Phase velocities of Rayleigh wave in the MELT experiment on the East Pacific Rise. *Science*, **280**, 1235-1238.
- 深尾良夫 (1998): 地球内部を覗く新しい目—海半球ネットワーク (2) —. 月刊地球, **20**, 313-320.
- Groom, R.W. and Bailey, R.C. (1989): Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *J. Geophys. Res.*, **93**, 1913-1925.
- Karato, S. (1990): The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. *Nature*, **347**, 272-274.
- Leroy, S., Gente, P., Fournier, M. and the Scientific party (Al-Khatiri, A., Beslier, M.O., Blais, A., d'Acremont, E., Merkouriev, S., Patriat, P. and Perrot, J.) (2000): *Mission Encens-Sheba/MD117*. IF RTP, Brest.
- Mackie, R.L., Madden, T.R. and Wannamaker, P.E. (1993): Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations - Theory and comparisons to integral equation solutions. *Geophysics*, **58**, 215-226.
- Nolasco, R., Tarits, P., Filloux, J.H. and Chave, A.D. (1998): Magnetotelluric imaging of the Society Islands hotspot. *J. Geophys. Res.*, **103**, 30287-30309.
- Scheirer, D.S., Forsyth, D.W., Cormier, M. and Macdonald, K. (1998): Shipboard geophysical indications of asymmetry and melt production beneath the East Pacific Rise near the MELT experiment. *Science*, **280**, 1221-1224.
- Shen, Y., Sheehan, A.F., Dueker, K.G., de Groot-Hedlin, C. and Gilbert, H. (1998): Mantle discontinuity structure beneath the southern East Pacific Rise from P-to-S converted phases. *Science*, **280**, 1232-1235.
- Tamaki, K. and Fujimoto, H. (2001): Outline of Aden New Century Cruise. *Onboard Report of Aden New Century Cruise* (Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo), 6-15.

- Toh, H., Goto, T., Tsuzukiya, Y. and d'Acremont, E. (2001): Study of deep mantle dynamics beneath slow spreading ridge by electromagnetic methods. *Onboard Report of Aden New Century Cruise* (Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo), 109–123.
- Toh, H., Goto, T., d'Acremont, E. and Leroy, S. (2003): Asymmetric electrical 2D section of a slow spreading ridge: Sheba ridge, gulf of Aden. *Geophys. Res. Lett.*, submitted.
- Toomey, D.R., Wilcock, W.S.D., Solomon, S.C., Hammond, W.C. and Orcutt, J.A. (1998): Mantle seismic structure beneath the MELT region of the East Pacific Rise from P and S wave tomography. *Science*, **280**, 1224–1227.
- Uchida, T. (1993): Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC. *J. Geomags. Geoelectr.*, **45**, 841–858.
- Wolfe, C.J. and Solomon, S.C. (1998): Shear-wave splitting and implications for mantle flow beneath the MELT region of the East Pacific Rise. *Science*, **280**, 1230–1232.
- Yamada, Y., Tamaki, K. and d'Acremont, E. (2001): OBS experiment. *Onboard Report of Aden New Century Cruise* (Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo), 124–131.

(2003 年 5 月 9 日受付, 2003 年 7 月 22 日受理)