

西南日本背弧の海底電磁気観測

藤浩明 (富大院理工)^{1*}、笠谷貴史 (海洋研究開発機構)、下泉政志、新貝雅文 (九州職能大)、大志万直人、吉村令慧 (京大防災研)、塩崎一郎 (鳥取大工)、山崎明 (気象研)、藤井郁子 (気象庁地磁気観測所)、村上英記 (高知大理)、山口覚 (神戸大理)、上嶋誠 (東大地震研)、*京大院理地磁気センター

Seafloor EM Experiments in the Backarc Region of Southwest Japan

Toh^{1*}, H., T. Kasaya², M. Shimoizumi³, M. Shingai³, N. Oshiman⁴, R. Yoshimura⁴, I. Shiozaki⁵, A. Yamazaki⁶, I. Fujii⁷, H. Murakami⁸, S. Yamaguchi⁹ and M. Uyeshima¹⁰

¹Dept Earth Sciences, Univ. Toyama, ²IFREE, JAMSTEC, ³Kyushu Polytechnic College, ⁴DPRI, Kyoto Univ., ⁵Faculty of Engineering, Tottori Univ., ⁶Meteorological Research Institute, ⁷Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency, ⁸Faculty of Science, Kochi Univ., ⁹Faculty of Science, Kobe Univ. and ¹⁰ERI, Univ. Tokyo
*Now at WDC for Geomagnetism, Kyoto Univ.

Abstract. Seafloor EM observations have been conducted by several research cruises in the back-arc region of southwest Japan since summer of 2006. A north-south seafloor EM array as long as 180km extended to the north of the boundary between Tottori and Hyogo Prefectures has been occupied by OBEMs and OBEs each year and completed to date. Here we show the outline of the sea experiments and results of preliminary data analysis and modeling with special attention to the connection of the mantle beneath the back-arc region to the already found lower crustal conductors on land. Interpretation of the derived 2D model and its relationship to the seismic and volcanic activities in this region in terms of dynamics in the wedge mantle is further inferred.

1. はじめに

本研究の目的は、山陰地方の沿岸部下部地殻に普遍的に見られる低比抵抗体 (図 1 及び図 2) とこの地域の地震及び火山活動との関係を、背弧ウエッジマントル内の物性・ダイナミクスを通じて明らかにする事にある。その為に、短期間の観測でも探査深度が稼げる地球電磁気学的手法を用い、ここで報告する海底電磁気観測と既存及び今後予定されている高密度陸上広帯域 MT 観測とを連携させ、西南日本背弧において海陸接合 3 次元比抵抗イメージングを行う事を最終的な目的とする。本稿では、現在までに終了した海底観測の結果について報告する。

図 1 に見られる下部地殻低比抵抗体は、そのすぐ上側の上部地殻内で地震が多発するという特徴を持つ。この事は、この下部地殻低比抵抗体の連なりと山陰地方の震源分布との

対応が良い事にも、如実に現れている（図 2）。鳥取県西部地震の震源域下部で確認された深部低周波地震（Ohmi and Obara, 2002）の存在を考え合わせれば、この低比抵抗異常と震源分布の対応には、地殻深部の間隙流体が介在していると推定できる。従って、本研究では、この下部地殻低比抵抗体の成因と間隙流体の供給源を、MT 法のみならず GDS 法・VGS 法といった複数の地球電磁気学的構造探査法を併用し高い精度で明らかにする事を目指す。

さらにこの地域では、地殻深度の地震活動に東西で明瞭な違いがある事も分かっている。すなわち、30km 以浅の震源分布を長期的に見ると（図 2）、大山火山より東では線状配列し、かつ、東に行くほどその線の先が尖ってくるのに対し、大山より西では大きな面的広がりを持つ様になる（塩崎他, 2003）。さらに、震源の深さ分布を見ると（山根他, 2000）、（1）大部分の地震が深さ 15km 程度より浅い上部地殻で起こっている事、（2）大山より東では下部地殻深度で全くと言ってよいほど地震が起きていないが、西では広域的に地震が発生している事、などが分かる。

また西南日本弧では、火山の様相が東北日本弧とは一変する。すなわち、単成火山が卓越し西に行くほど小規模な山体が群れをなす傾向があり、かつ、5Ma 程度のアルカリ玄武岩が分布する隠岐諸島と瀬戸内側の間に割り込む様に、世界最大の溶岩ドームを持つ大山やドーム+カルデラの構造を持つ三瓶山といった新しい (<1Ma) 酸性の火山が分布している（Kimura et al., 2003）。これら比較的新しい火山の中には、プレート物質の関与を示唆するアダカイト質マグマを産するものもあり、プレートからの脱水やプレート自身の熔融がこの地域の火山活動の原因となっている事は間違いないが（Iwamori, 1991）、それだけでは西南日本弧火山の多様性を説明する事はできない。

これらの地震学的・火山学的特徴は、地殻構造の 3 次元性やマントル深度に複数の脱水域・マグマソースが存在する事を意味し、その統一的な理解には地震学及び地球化学的手法だけでは限界がある。本研究で行う 3 次元構造イメージングに、地球電磁気学的手法を採用した理由もそこにある。すなわち、電磁探査は、短期間の観測でも探査深度が大きく取れる物理探査法であり、かつ、比抵抗は水やメルトの存在に高い感度を持つ。また、本稿共著者の多くは、近年山陰地方の広帯域・高密度電磁気観測に携わってきたが、今後予定されているものを含めれば、陸上観測では既に 3 次元構造解析に足るだけのデータが得られつつあり、あとは海域観測を待つのみという状況にある。下部地殻低比抵抗体の発見に加えてこれらの事が、複数の海域測線からなる本研究の着想に至った理由の一つである。

本研究の発想を得たもう一つの理由は、浅海電磁探査法の最近の進歩である。活発な漁業活動や強い潮流が存在する為に、これまで浅海での電磁探査は困難とされてきた。しかし近年、九州職業能力開発大学校及び海洋研究開発機構の研究者の努力により、浅海でも実用に耐える OBE・OBEM の開発が進んでいる。浅海域は、設営的困難が伴う反面、深海底には届かない短周期外部磁場変化が直接捉えられるという利点を持つ（藤, 2005）。陸域では 3 次元データが揃いつつある西南日本の背弧でこれまで海域観測が実施できなかったのは、浅海の占める面積が大きいこの地域に応用できる装置群を我々が持たなかったからでもある。海陸接合 3 次元比抵抗モデルを作成する為には、浅海での海底電磁気観測が必

須であるが（図3）、今漸くそれが実現可能な状況になったと言える。本研究で浅海電磁探査に成功すれば、採掘可能なガス・ハイドレート探査への応用など、海底調査技術に対する波及効果も大きい。従って、これまで開発に成功した浅海電磁探査システムを実観測に投入し、その有効性を実証する事も、本研究のもう一つの重要な目的となる。

2. 海底電磁気測線と取得した時系列データ

図4に本研究で実施した、或いは、観測中／計画中の海底観測点分布を示す。この内本稿では、最も東側に設けた計七点からなる鳥取／兵庫県境沖南北測線の結果を示す。この測線上の大丸はOBEMの、小丸はOBEの敷設点である。これらの観測点の詳細については、Table 1を参照されたい。

この測線上で、1Hz以上の高速サンプリングが可能な装置は1ヶ月半程度の、長周期計については半年程度の時系列を取得し、各々時計補正・傾斜補正を施した後、第十世代IGRF (Maus and Macmillan, 2005) を用いて偏角補正も各観測点毎に行った。

図5に、最も北のサイト005で観測した、地磁気北向き成分と電場東向き成分の同時時系列を示す。2006年12月14日（日本時間）の毎分値一日分である。この日は、振幅200nT程度の磁気嵐主相が丁度観測された時に対応し、時間領域でも電場と磁場の明瞭な逆相関が見て取れる。図6は、最も南のサイト101における電場水平二成分と鹿屋の地磁気水平二成分同時データである。この図にも、時間領域で明らかな相関が現れている事が分かる。これらの補正済み時系列を用い、rrrmt ver.8 (Chave et al., 1987)による周波数解析を行った。

3. 周波数応答関数

得られたMT応答については、次節で予備的二次元構造解析結果と共に例示する。この節では、VGS/GDS応答と位相テンソル (Caldwell et al., 2004) 解析の結果について述べる。また本稿では、東西走向を仮定している為、TEモードが(Bx, Ey)、TMモードが(By, Ex)の組に対応する。東西走向の妥当性については、位相テンソルの段で述べる。

図7は、OBEMによる観測を行った四点全てにおけるVGS応答である。この図で振幅比が実線より大きくなっている観測値（例えば、陸寄りの観測点である001と103の全周期及び004・005の長周期側）をそのまま地下構造に焼き直すと、海水より高い電気伝導度を持つ良導体が存在すると考えなければならなくなる。これは非現実的なので、むしろ日本海が閉じている事により、海岸寄りや長周期側で海水中に誘導電流が流れにくくなっている、と解釈すべきである。従って、VGS応答を構造解析に使用する場合には、注意が必要である。ただし、振幅比が実線より小さく求められている沖側の深海観測点（004と005）における短周期応答は、構造解析に利用できる可能性がある。

図8の左右に、MT法とVGS法のskewnessを各々示す。どちらの指標も構造の3次元性が低い事を示唆している。図9の位相テンソルとGDS応答もこれを支持し、かつ、構造走向を東西に仮定しても、第一次近似的には妥当である事も見て取れる。

4. 予備的な2次元構造解析

図 10 左に TM mode の海底 MT 応答だけを使って求めた 2D 電気伝導度断面を、右に data への fit を示す。RMS は 2.365 であった。Inversion には、Uchida and Ogawa (1993) の ABIC 最小化コードに、Utada (1987) の三角 FEM forward engine を組み込んだものを使用した。また、笠谷(2002)の陸上比抵抗構造と既知の海底地形は、先験情報として取り入れ固定した。

構造断面には、サイト 104 と 004 の間に位置する地形的高まり（隠岐海嶺）の下に高電気伝導度異常が現れており、その根を深さ 100km 程度迄追跡する事ができる。隠岐海嶺の西には第三紀に活動した火山島としての隠岐島後が存在する事を考慮すると、隠岐の火成活動を支えたマグマソースが、さらに東へ続いている事を示唆する。

陸上の広帯域電磁気観測で確認された下部地殻低比抵抗体との関連で面白いのは、背弧マントルで今回新たに見つかった高電気伝導度異常が、この下部地殻低比抵抗体と連結している様に見える点である。ただしこの点については、今後 TE モードや他の電磁応答を併用してさらに検証を進めなければ、確定的な事は言えない。

5. まとめ

2006 年より二ヶ年をかけ、鳥取/兵庫県境沖海底電磁気南北測線を完成した。測線上の七点で数十日から百数十日に亘る海底電磁場の時系列を採取する事ができ、その内四点の MT-TM 応答を用いて予備的 2 次元構造解析を行った。

その結果、①隠岐島後を活動させたマグマソースはさらに東へ続いている可能性がある、②陸上観測で確認された下部地殻低比抵抗体は、背弧ウェッジマントルと直接接している可能性がある、の二点が示唆された。

今後は、MT-TE モードや他の電磁応答の追加及び 2 次元コードの改良を行って、これら二点の検証を行うと共に、平成 20 年度に予定している隠岐島後を通る測線も完成させ、本来の目的である「西南日本背弧の 3 次元電気伝導度構造を陸海双方のデータを用いて推定する事」の実現を目指す。

謝辞

本研究で実施した海底観測には、鳥取県海洋練習船「若鳥丸」、海洋研究開発機構／東京大学海洋研究所学術研究船「淡青丸」及び気象庁海洋気象観測船「清風丸」（舞鶴海洋气象台）による支援が不可欠でした。また、本研究の必要経費は、京都大学防災研究所平成 18 年度研究推進特別事業費、山田科学振興財団平成 18 年度研究援助金、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 19340127）及び東京大学地震研究所平成 19 年度一般共同研究（2007-G-12）により賄われました。以上の船舶と関係機関に対し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

Caldwell T.G., H.M. Bibby, and C. Brown (2004) The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.* **158**, 457–469 doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x.

- Chave, A.D., D.J. Thomson and M.E. Ander, On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions, *J. Geophys. Res.*, **92**, 633-648, 1987.
- Iwamori, H. (1991) Zonal structure of Cenozoic basalts related to mantle upwelling in southwest Japan. *J. Geophys. Res.*, **96**, 6157-6170.
- 笠谷貴史他, 兵庫県北部域での地殻比抵抗構造, 京大防災研年報, No.45 B, 571-576, 2002.
- Kimura, J.-I. et al., Late Cenozoic volcanic activities in the Chugoku area, Southwest Japan arc: Volcanic activities during back-arc basin opening and subduction re-initiation, *Island Arc*, **11** 22-45 (2003).
- Maus, S., and S. Macmillan (2005), 10th Generation International Geomagnetic Reference Field, *Eos Trans. AGU*, 86(16), 159.
- Ohmi, S. and Obara, K., 2002, Deep Low-Frequency Earthquakes beneath the Focal Region of the Mw 6.7 2000 Western Tottori Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 29:10.1029/2001GL014469.
- 塩崎一朗, 宇都智史, 大志万直人, 鍵山恒臣 (2003) 中国地方の第四期火山の深部比抵抗構造に関する研究—特に、鳥取県西部地震 (2000、M7.3) の余震域の東縁に位置する大山火山周辺の無地震域に着目して—, 東京大学地震研究所広報, No40, 2-8 頁.
- 藤 浩明 (2005): 海底電磁気観測の現状と将来, 物理探査, **56**, 227-239.
- 山根隆弘・中西一郎・神谷眞一郎, 南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの P 波速度構造と西南・中部日本の地震活動および火山活動, 東京大学地震研究所彙報, **75**, 335-374, 2000.
- Uchida, T., and Ogawa, Y., 1993, Development of Fortran code for two-dimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint, Geological Survey of Japan Open-File Report, No. 205, 115p.
- Utada, H. (1987) A direct inversion method for two-dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, PhD. Thesis, Univ. Tokyo, 409pp.

Table 1 Site Details (*WGS84)

測点#	装置	北緯*	東経*	水深*[m]	Sampling	観測開始	観測期間
001	JM100	36.1568108	134.3338620	1157.5	8 Hz	2006.09	約 40 日
002	KPC-E	36.2853661	134.3231200	1199.0	1 Hz	2006.09	Lost
003	JM102	36.4505501	134.304504	1252.5	8 Hz	2006.09	約 2 日
004	JM101	37.0849152	134.281296	2294.4	8 Hz	2006.09	約 40 日
005	UTHD	37.3699847	134.3136073	2575.7	60 s	2006.09	約 172 日
101	KPC-E	35.8003654	134.3672940	243.3	1 Hz	2007.07	約 45 日
102	JF1	36.0177956	134.3505100	650.0	8 Hz	2007.07	約 45 日
103	JM102	36.2870636	134.319473	1236.0	8 Hz	2007.07	約 45 日
104	JF2	36.4673958	134.3031160	1159.0	8 Hz	2007.07	約 45 日
301	KUHD	36.1503870	131.9002380	1535.0	60 s	2007.07	-

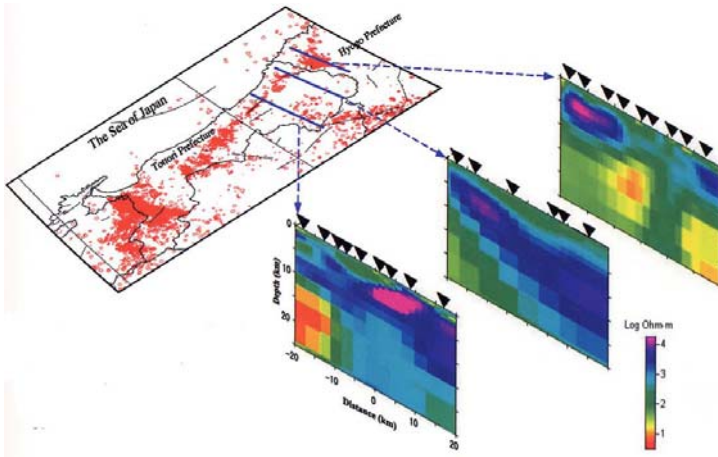


図 1. 西南日本の日本海側沿岸に連なる下部地殻低比抵抗体。
Fig. 1 Distribution of the lower crustal conductors found beneath the Japan Sea coast of southwest Japan.

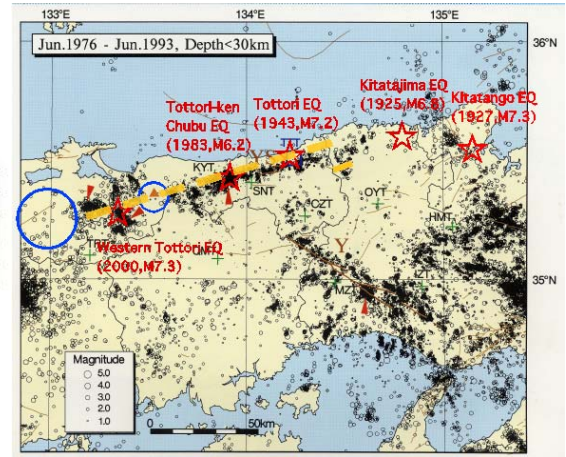


図 2. 震源分布と下部地殻低比抵抗体との対応。
Fig. 2 Lineation of epicenters and the lower crustal conductors.

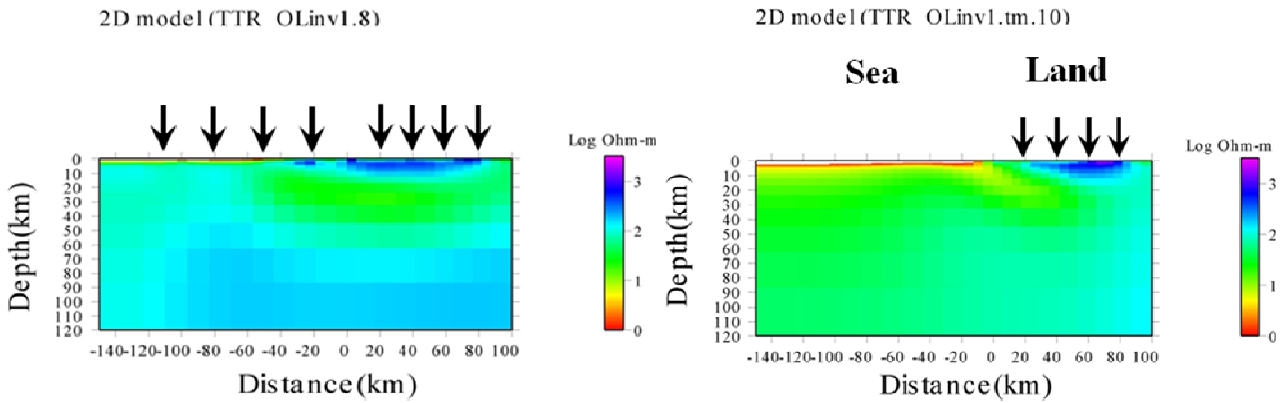


図 3. 2D 合成 inversion 例。表層に海底地形と厚さ 5km の一様な上部地殻 ($10^3\Omega\text{m}$) を並べ、その下の halfspace ($10^2\Omega\text{m}$) 中に海陸境界(横軸原点)に跨る $10\Omega\text{m}$ の下部地殻低比抵抗体を置いたモデルを、海陸アレイ(8 観測点; 左)と陸上アレイ(4 観測点; 右)の合成データで各々 inversion を行った。海陸アレイによるモデルの方が、より正解に近い。
Fig. 3 Examples of synthetic inversions for a land-sea array (left) and a land-only array (right). It is clear that the land-sea array ends up with a correct 2D model, while it is hard to constrain the structure beneath the seafloor by the land-only array alone.

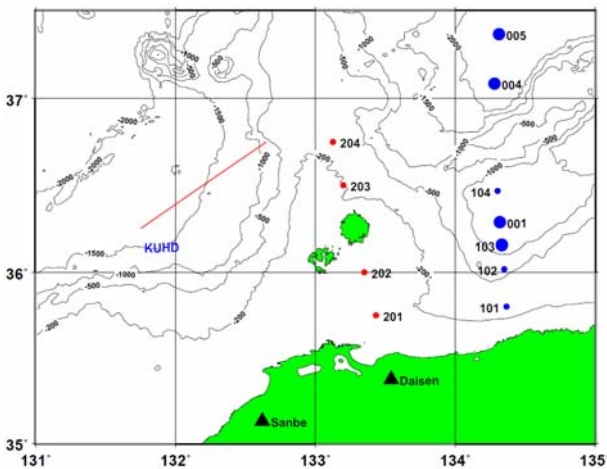


図 4. 観測点配置と等深線。実線は竹島実勢 EEZ。
Fig. 4 Site map on bathymetric contours with EEZ.

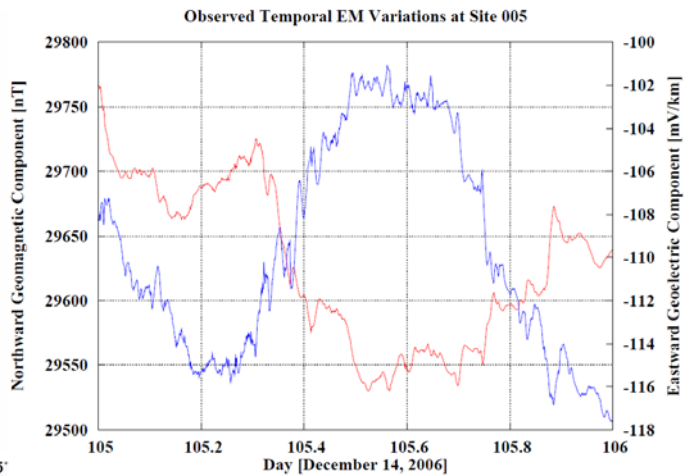


図 5. サイト 005 における Bx-Ey 逆相関同時時系列。
Fig. 5 Inversely correlated EM time-series at 005.

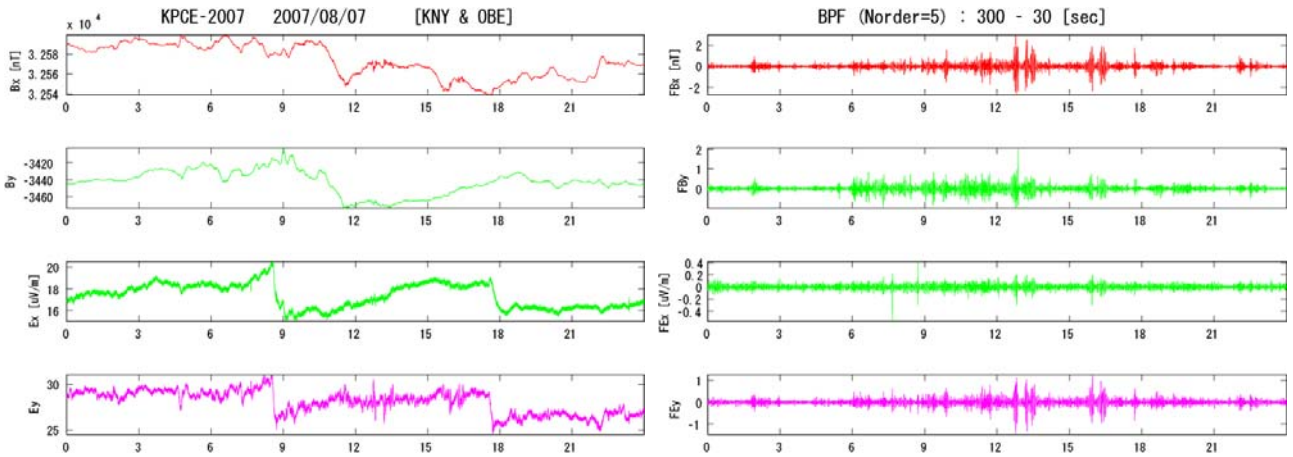


図 6. サイト 101 における電場水平二成分(下二段)と鹿屋における地磁気水平二成分(上二段)。左は生時系列であり、右は周期 5 分から 30 秒迄の band-pass filter を通したものである。
 Fig. 6 Horizontal geoelectric components at Site 101 (lower two) and horizontal geomagnetic components at KNY (upper two). Raw time-series (left) and filtered (30s – 5min; right) data are shown.

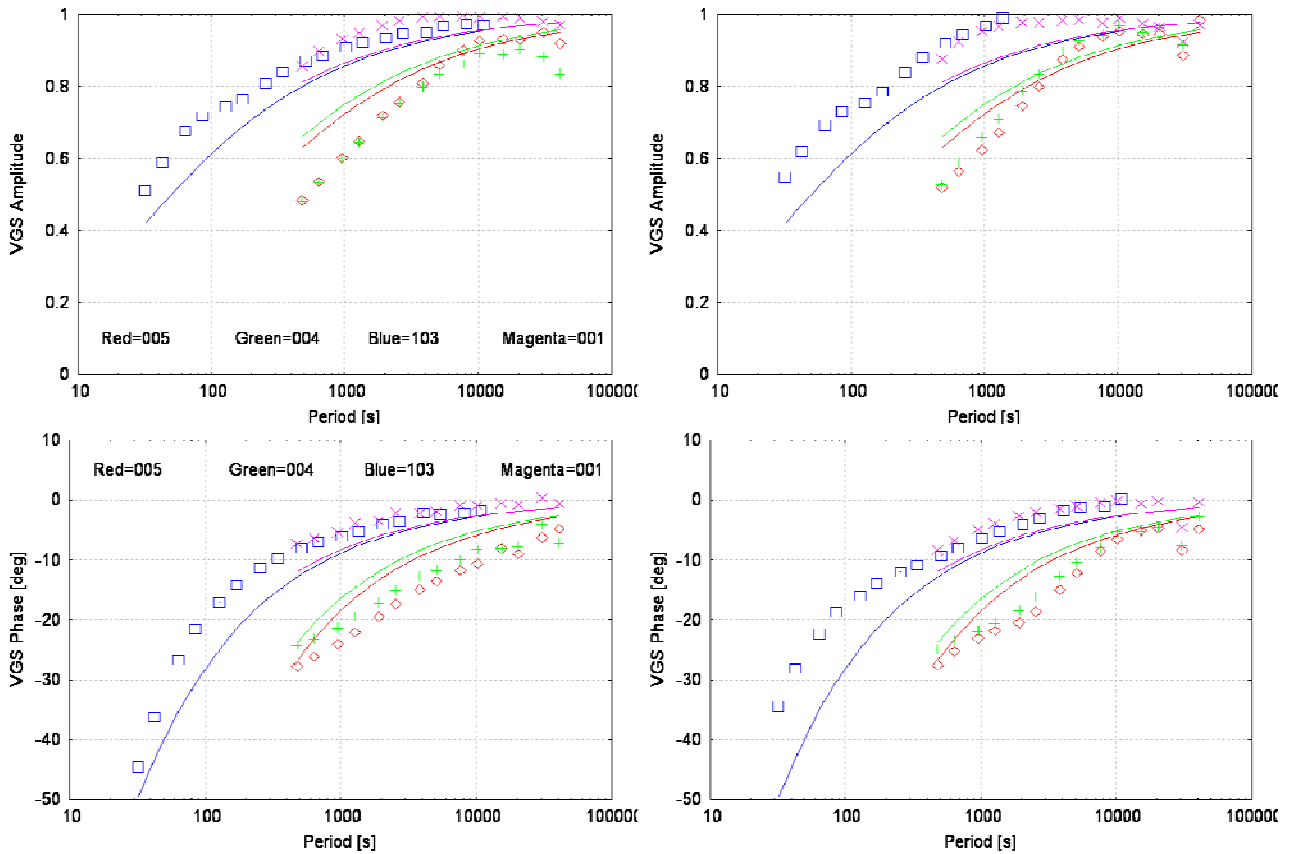


図 7. VGS 応答。振幅比 (上段) と位相差 (下段)。左列は TE モード、右列は TM モードに対応する。点が観測値、実線が無限に深い海の中での VGS 予測値である。
 Fig. 7 VGS responses. Amplitudes (upper) and phases (lower) for TE (left) and TM (right) modes. Observed (symbols) and predicted (solid lines) responses are shown. Infinite seawater depth was assumed in prediction.

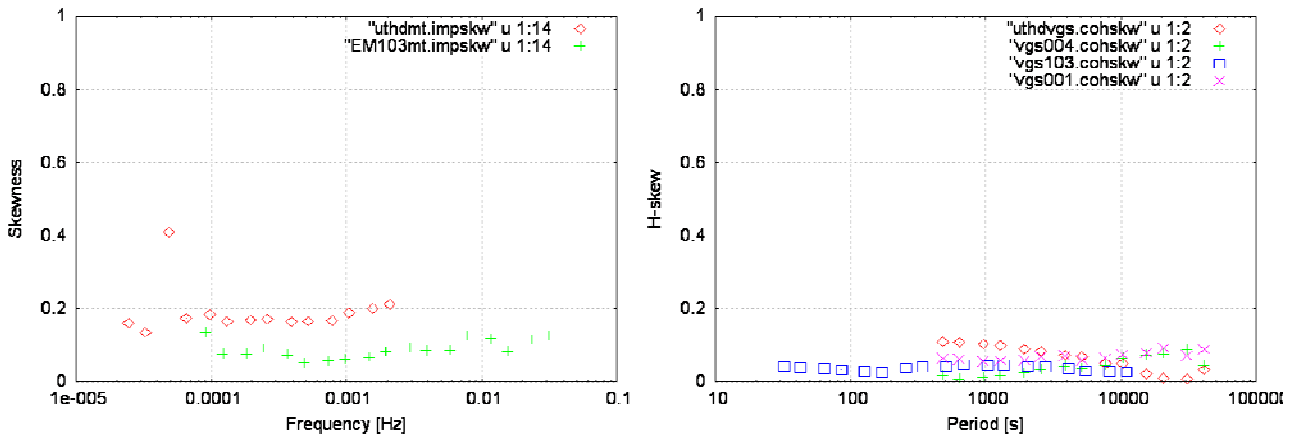


図 8. サイト 005 と 103 の MT skewness (左) と全 OBEM 観測点における H-skew (右)。
 Fig. 8 MT skewness at Sites 005 and 103 (left). H-skew at all OBEM sites is also shown in the right panel.

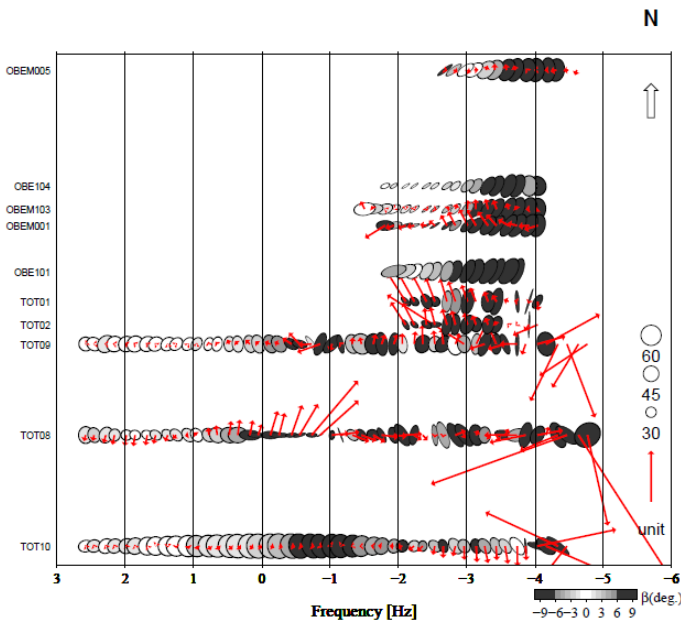


図 9. 位相テンソル楕円と GDS arrows. 縦軸は緯度。最北の海底観測点 (005) から最南端は四国・馬路 (TOT10) 迄を示す。インダクション・ベクトルは、陸上沿岸点 (TOT1 と TOT2) で顕著に日本海を指す。この帯域で縦方向に揃う海底の位相テンソル楕円は、構造の二次元性を示唆する。

Fig. 9 Phase tensor ellipses and GDS arrows. The ordinate is latitude [N]. It ranges from the northernmost seafloor site (005) through southernmost land site (TOT10) at Umaji in Shikoku. The GDS arrows at coastal sites (TOT1 and TOT2) clearly point to Japan Sea. The phase tensor ellipses at the seafloor align in the NS direction over this frequency range, suggesting two-dimensionality of the subsurface electrical structure.

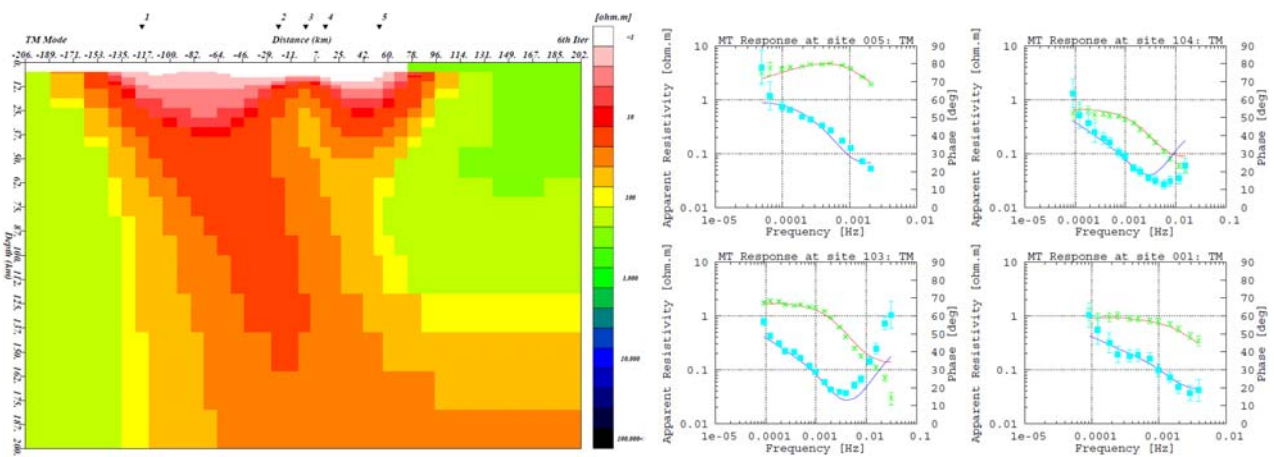


図 10. TM モードの MT 応答から求めた 2D 電気伝導度断面 (左) と使用した全海底観測点における fit (右)。
 Fig. 10 A 2D electrical section by MT-TM inversion (left). Fits at the 4 seafloor sites is also shown in the right panel.