

非一様薄層導体近似を用いた西南日本背弧域における 海底地形効果の推定

南拓人（京大院理）○、藤浩明（京大院理地磁気センター）、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）、†現在、大阪市大理.

Estimation of the bathymetric effect in the back-arc region of SW Japan using non-uniform thin sheet approximation

Minami^{1*}, T., T. Hiroaki², H., T. Kasaya³, M. Shimoizumi⁴, M. Shingai⁴, N. Oshiman⁵,
R. Yoshimura⁵, I. Shiozaki⁶, A. Yamazaki⁷, I. Fujii⁸, H. Murakami⁹, S. Yamaguchi¹⁰ and
M. Uyeshima¹¹

¹Dept Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto Univ., ²WDC for Geomagnetism,
Kyoto Uni., ³IFREE, JAMSTEC, ⁴Kyushu Polytechnic College, ⁵DPRI, Kyoto Univ.,
⁶Faculty of Engineering, Tottori Univ., ⁷Meteorological Research Institute, ⁸Kakioka
Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency, ⁹Faculty of Science, Kochi Univ.,
¹⁰Faculty of Science, Kobe Univ. † and ¹¹ERI, Univ. Tokyo

†Now at Faculty of Science, Osaka City Univ.

Abstract. The eastern part of the San-in region in southwest Japan is classified as an area of high seismicity and volcanic activity, and our group has carried out many EM surveys in this area. On land, both Network-MT and densely distributed wideband MT observations from northern region of Hyogo to Shimane Prefectures have been conducted. In addition, we started seafloor MT observations in 2006 in the back-arc region of southwest Japan. Here we report dimensionality of the electrical conductivity structure beneath the San-in region, taking the bathymetric effect into account using non-uniform thin sheet approximation. As a result, the possibility that there is an elongated conductive body beneath the coastal area of the San-in region was implied.

1. はじめに

西南日本背弧域は、特徴的な火山・地震活動を持つ地域である。30km以浅の震源分布をみると、大山火山より東では震源が東西に線上配列する一方、大山火山より西側では面的広がりを持つようになる(Shiozaki et al., 2003)。また、約500 万年前にできたとされるアルカリ玄武岩質の隠岐の島と瀬戸内の間に、約100 万年前に生成された酸性の新しい火山である大山が割り込むように配置し

ている(Kimura et al., 2003)。これらの火山/地震活動の特徴を理解するため、この地域ではこれまで地震学的手法に加え、広帯域 MT、ネットワーク MT など電磁気学的手法による地下構造探査が広範囲で行われてきた。しかし、大山火山は日本海沿岸に位置しており、山陰における地震学的及び火山学的メカニズムを理解するためには、山陰沖における地下構造の探査が不可欠である。近年、技術的に困難であった浅海における海底 MT 観測が可能になり、本研究グループでは 2006 年より山陰沖において、海底電位差磁力計(OBEM)、海底電位差計(OBE)を用いた海底電磁場観測を開始した。その結果、現在この海域において、隠岐の島の陸上観測点を含めた計 11 観測点において地上・海底電磁場データが得られている(図 1)。

本研究の目的は、これまで西南日本背弧域で得られた豊富な陸域データに加え、2006年以降に得られた山陰沖の電磁場データを用いることで、大山火山付近の地震学的及び火山学的メカニズムを明らかにすることである。本研究グループでは、この地域における二次元・三次元構造解析の準備段階として、位相テンソル(Caldwell et al., 2004)、インダクションベクトル(e.g., Toh and Honma, 2008)を用いた多次元性の解析を行ってきた。これに加え、山陰沖の海底地形がこれらの応答関数に対して与える効果を、非一様薄層導体近似計算(Mckirdy et al., 1985)を用いて新たに推定した。本稿では、海底地形効果の推定結果を含め、この地域における電氣的構造の多次元性について議論する。

2. 観測結果

まず、山陰沖で得られた観測結果を紹介する。図2はインダクションベクトル(実部)を周期毎に色分けして表示したものである。短周期ではベクトルの向きがバラつくが、長周期では北西方向に揃うことが見て取れる。隠岐の島の短周期

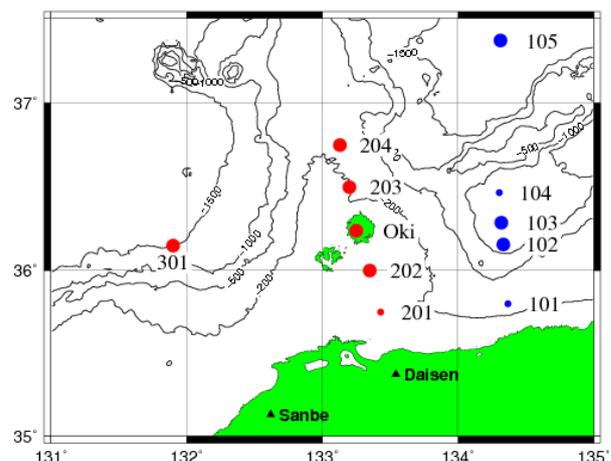


図 1. 山陰沖の観測点(青丸：2007 年以前、赤丸：2008 年以降；大○：電磁場を観測、小○：電場のみ観測)。

Fig.1 Sites off the San-in region (blue circle: before 2008, red circle: after 2008; big circle: electric and magnetic fields, small circle: only electric fields).

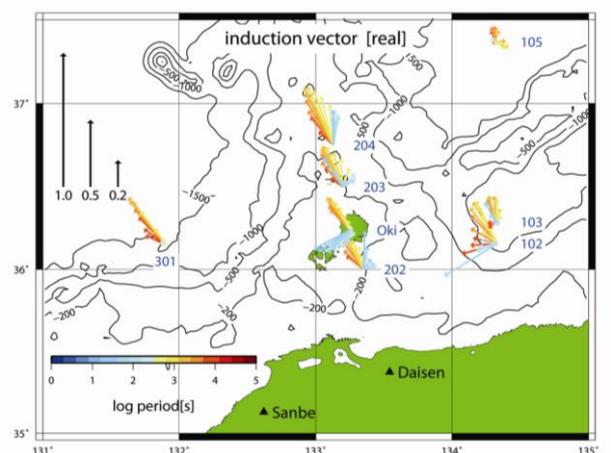


図 2. インダクションベクトル(実部)の周期依存。 Fig.2 Induction Vectors (real) depending on periods.

側のベクトル(水色)が南西を指すのが特徴的であるが、これは観測点が南西の海岸付近に位置するためであると考えられる。次に、この地域の位相テンソル楕円を図3に示す。東側の測線、西側の測線共に長周期になるほど β 角の絶対値が大きくなる傾向があることが見て取れる。これらのインダクションベクトル、位相テンソルの各値は隠岐の島を除き、全て観測された電磁場時系列を元に計算した。それゆえこれらの観測結果には、海水中を流れる電流が大きく影響していると考えられる。本研究では、山陰沖の海底地形がこれら観測結果にどのように影響しているかを、非一様薄層導体近似計算(Mckirdy et al., 1985)によって見積もった。その詳細を次節で述べる。

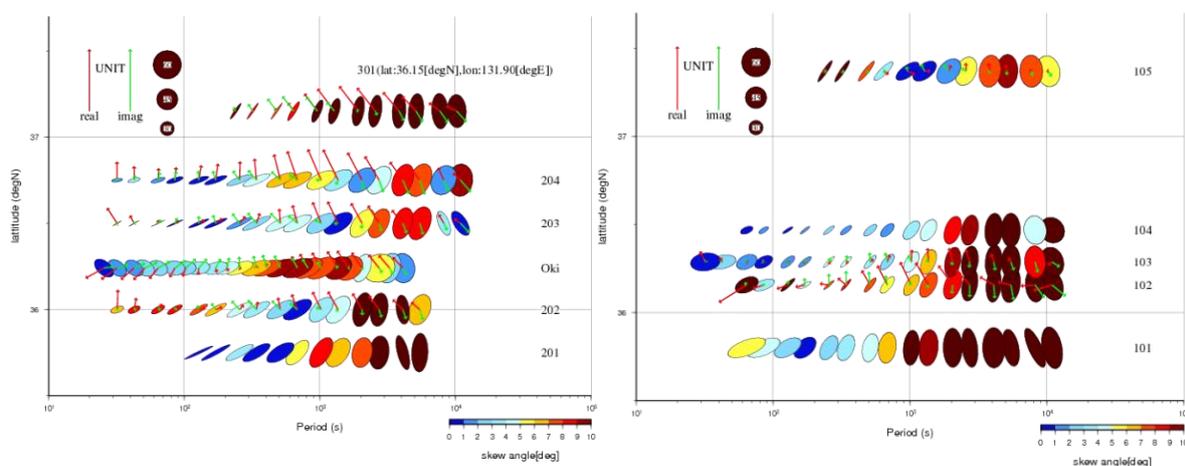


図 3. 位相テンソル楕円(左：大山を含む南北測線、右：鳥取 - 兵庫県境を含む南北測線)。
Fig.3 Eclipses of phase tensors (left: on the western NS array, right: on the eastern NS array).

3. 薄層計算の設計

本研究では薄層計算の設計は図4のように、また各パラメータには表1の値を用いた。計算において薄層下の構造は一次元二層構造とし、地殻に相当する第一層を $500\Omega\text{m}$ 、マントルに相当する第二層を $10\Omega\text{m}$ とした。計算は240~2048秒の全14の周期で行った。各周期において、計算領域は一辺が第一層におけるskin depthの3倍以上の正方形となるよう設定し、薄層の厚さ(図4のd)を計算領域における最大水深、また第一層の厚さを $(25-d)\text{km}$ として設定した。これにより、計算では周期によらず水面下25kmから第二層が始ま

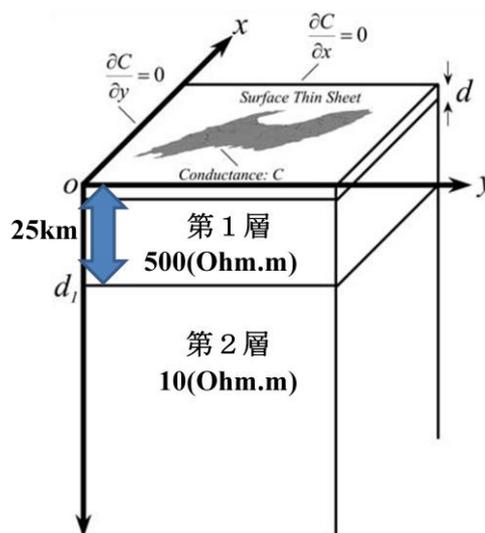


図 4. 薄層計算の設計。
Fig.4 Construction of the calculation of thin sheet approximation.

ることとなる。また、メッシュ間隔は全周期において、14km(<最小観測点間隔)として計算を行った。

周期(s)	δ_{sw} (km)	δ_1 (km)	計算領域 一辺(km)	最大水深 (m)	薄層の厚 さ(m)	一辺のメ ッシュ数
2048.0	11.4	509.3	1527.9	8255	8300	107
1920.0	11.0	493.1	1479.4	5263	5300	105
1365.3	9.3	415.8	1247.5	5197	5200	89
1280.0	9.0	402.6	1207.9	5023	5100	85
1024.0	8.1	360.1	1080.4	5017	5100	77
960.0	7.8	348.7	1046.1	5007	5100	75
682.7	6.6	294.0	921.7	4817	4900	65
640.0	6.4	284.7	903.0	4817	4900	65
512.0	5.7	254.6	842.9	4629	4700	61
480.0	5.5	246.6	826.7	4593	4600	59
341.3	4.6	207.9	749.4	4315	4400	53
320.0	4.5	201.3	736.2	4277	4300	53
256.0	4.0	180.1	693.7	3370	3400	49
240.0	3.9	174.3	682.3	3370	3400	49

表 1. 計算に用いたパラメータ (δ_{sw} 、 δ_1 はそれぞれ海水中と第一層の表皮深度)。

Table.1 Parameters for the calculations of thin sheet approximation. δ_{sw} and δ_1 are skin depths of the sea water and the first layer, respectively.

4. 薄層計算の結果

薄層計算では、薄層の上面の電磁場が陸上で観測される電磁場に相当し、下面の電磁場が海底での観測値に相当する。例として、周期1024sに対する薄層下面のインダクションベクトルを図5に示す。左図が実部ベクトルで右図が虚部ベクトルを表す。左図からは、実インダクションベクトルの長さは急勾配の海底地形の急勾配付近で大きく、地形が緩やかな場所ではベクトルが短く傾向が見て取れる。また、実部ベクトルの向きは海底地形と対応が良く、水深が深くなる方向を向く。本研究の対象領域である山陰沖では、大山から北に伸びる隠岐の島付近で、地形的高まりから周辺の水深の深い領域へ、実部ベクトルが流れだすような向きとなっている。また右図からは、反転させていない虚部ベクトルが海底地形を這い上がるような、すなわち実部ベクトルとは概ね逆向きを指す傾向があることが見て取れる。

周期1024秒 インダクションベクトル(左：実部、右：虚部)

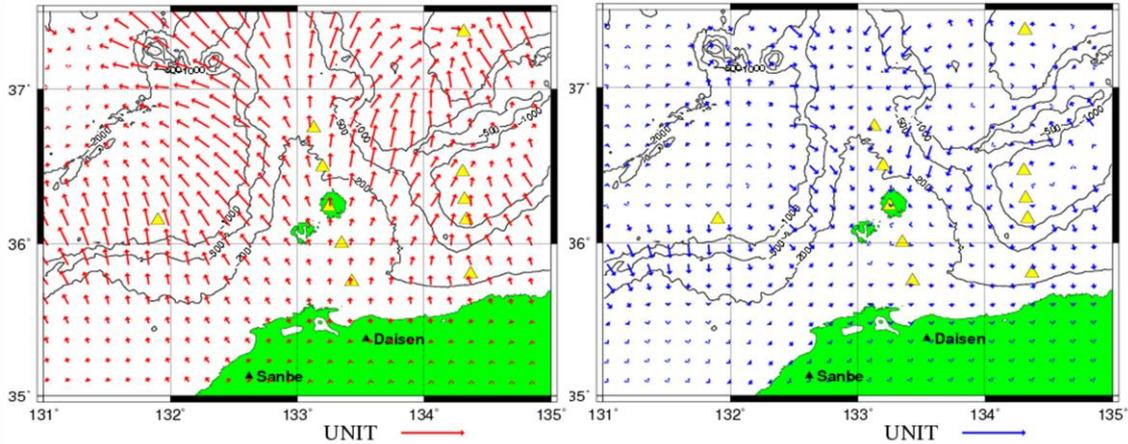


図5. 薄層近似によるインダクションベクトル(左：実部、右：虚部、周期1024s)。
Fig.5 Induction vectors calculated by thin sheet approximation (left: real, right: imaginary, period: 1024s).

次に、広域における位相テンソル β 角の絶対値コンターを図6に示す。図では、寒色が $|\beta|$ の小さい領域、暖色が $|\beta|$ の大きい領域を表す。この図より、若狭湾や石川県能登半島など海岸の地形が入り組んでいる地域では、 $|\beta|$ が大きくなる傾向が見て取れる。また薄層上面と下面を比べると、下面の方が $|\beta|$ がやや大きくなる傾向がある。次に位相テンソル $|\beta|$ の周期変化を図7に示す。上段が薄層上面、下段が薄層下面に対応しており、右の図ほど周期が長い。この図より薄層の上面下面いずれにおいても、周期が長くなるにつれて $|\beta|$ は小さくなる傾向が見て取れる。これら薄層計算の結果を次節で観測結果と比較する。

周期512秒 (薄層下面)

周期512秒 (薄層上面)

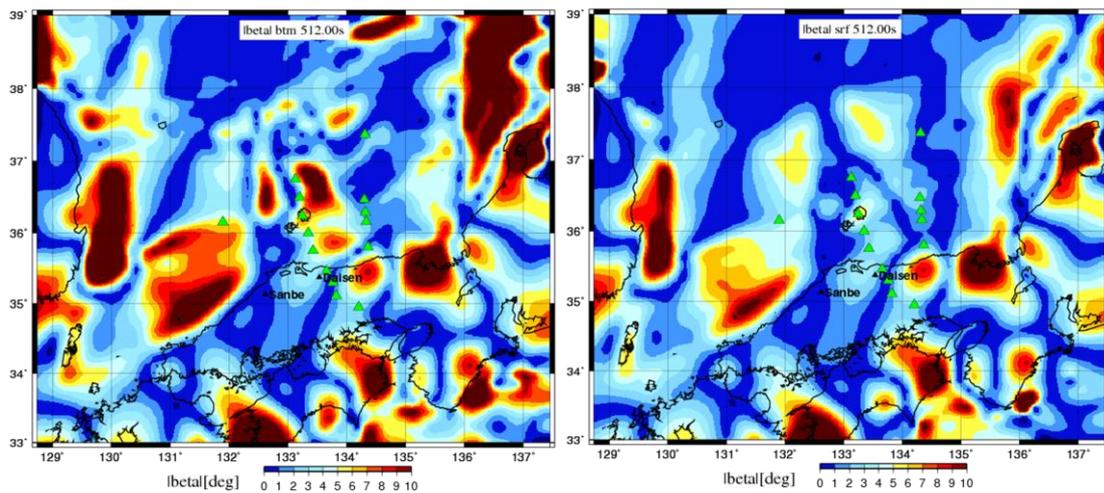
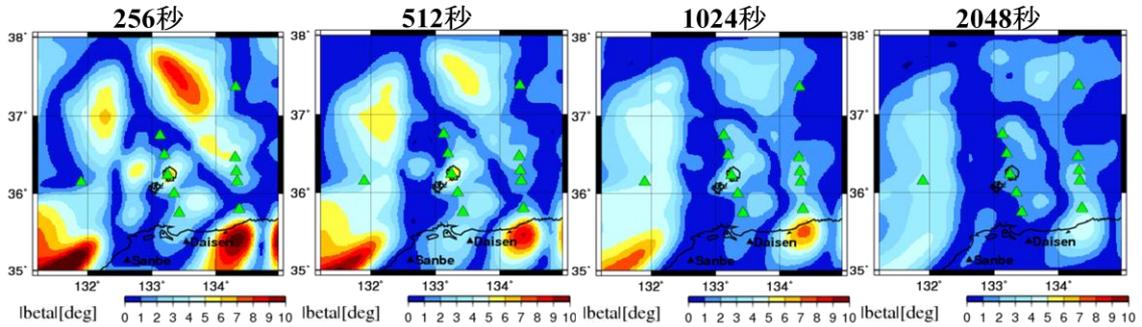


図 6. 薄層計算による位相テンソル β 角の絶対値。
Fig.6 Color maps of the absolute values of beta angles calculated by thin sheet approximation (left: lower surface of the thin sheet, right: upper surface of the thin sheet, period: 512s).

ベータ角(陸上)



ベータ角(海底)

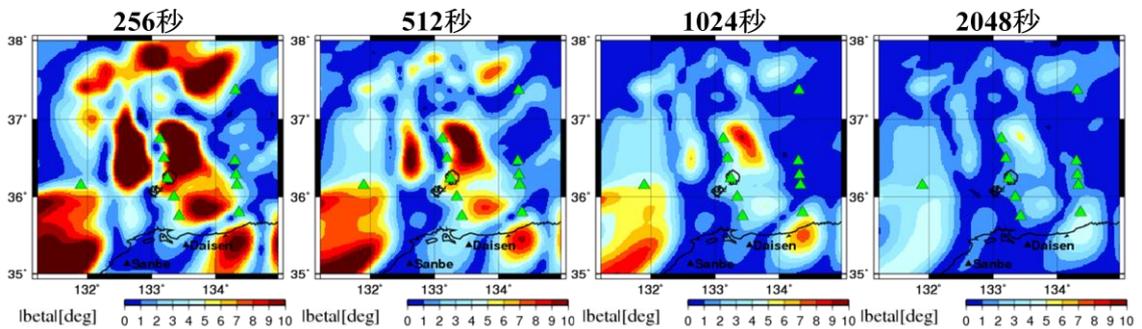


図7. 位相テンソル β 角絶対値の周期依存性。

Fig.7 Frequency dependence of the absolute values of beta angles calculated by thin sheet approximation (top : on the upper surface of the thin sheet, bottom : on the lower surface of the thin sheet, periods: 256s, 512s, 1024s, 2048s).

5. 観測と薄層計算の比較及び考察

観測されたインダクションベクトル(実部)から、薄層近似で計算した地形効果によるインダクションベクトル(実部)を引いたベクトルを図5に示す。この図8から、残差ベクトルは、周期約1000秒以上では北西を、1000秒以下では南を指す傾向が見て取れる。この結果は、この地域において浅部には南方向に、深部では北西方向に低比抵抗体が存在することを示唆する。ただし、本研究で設定した薄層下の比抵抗値は、実際の比抵抗値よりもやや低い可能性が高い。その場合、実際と比べて薄層中の電流が弱められ、地形の効果を過小評価していることになる。地

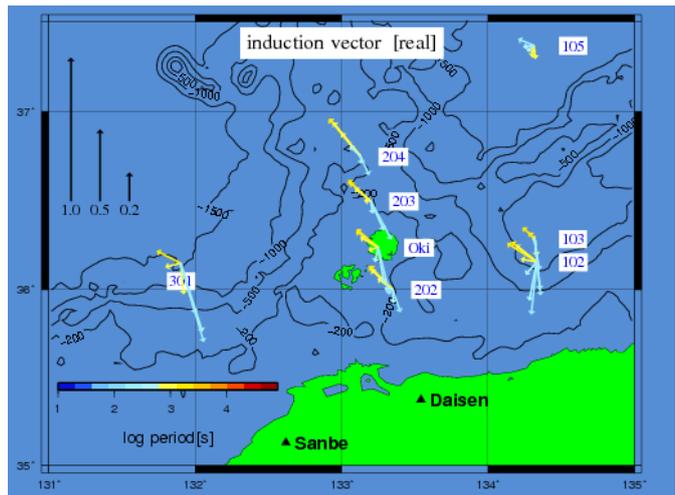


図8. インダクションベクトルの実部(観測-薄層計算)。Fig.8 Residual induction vectors (real). Thin sheet estimates are subtracted from the observed induction vectors.

形効果が計算結果よりも大きい場合、海底地形に起因するインダクションベクトルの長さは計算結果よりも長くなり、図8において北西を向いている長周期側インダクションベクトル（観測 - 地形効果）は短周期側同様に南を指す可能性がある。これは、海域より南に低比抵抗体が存在することを示唆する。

次に大山から南北に伸びる海陸測線において $|\beta|$ を比較した結果を図9に示す。

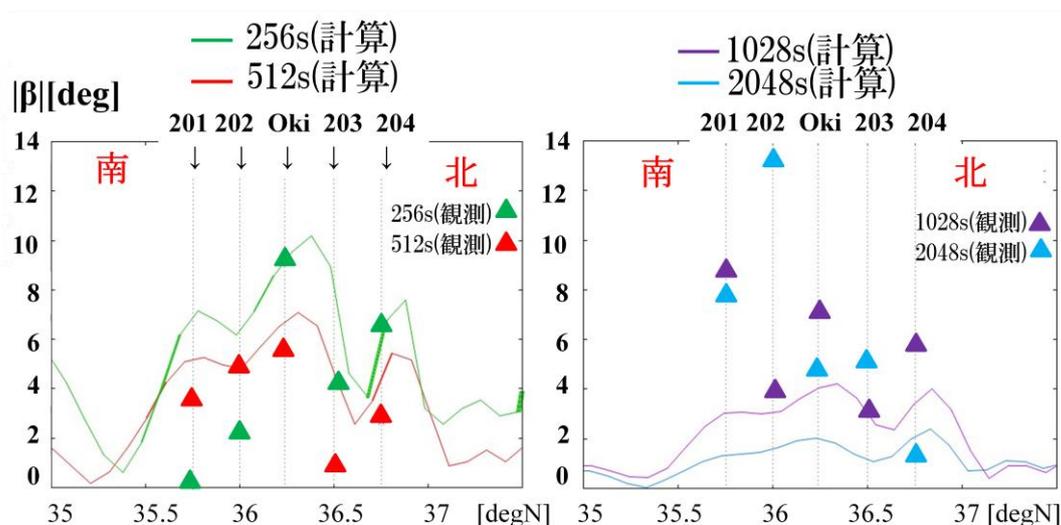


図9. 大山を含む海陸測線における位相テンソル β 角絶対値の比較。

Fig.9 Absolute values of beta angles of phase tensors on the land-sea array including Mt. Daisen.

左図が周期1000秒以下の短周期、右図が1000秒以上の $|\beta|$ である。この図より、短周期側の $|\beta|$ は、地形効果で説明がつくが、長周期側では概ね観測値の方が大きく、地形効果によって観測された $|\beta|$ を説明するのは困難であることがわかる。

6. まとめ

本研究では、非一様薄層導体近似を用いて、山陰沖のインダクションベクトル、位相テンソル β 角に対する海底地形効果を推定した。その結果、地形効果を除いたインダクションベクトル（実部）が、1000秒以下の短周期で南方向、1000秒以上の長周期で北西方向に揃うことが明らかになった。ただし、薄層下の比抵抗値は、実際に想定される地殻・マントルの比抵抗値に比べ低めに設定してあるため、長周期側の残差ベクトルも、実際には南を指している可能性を否定できない。また、位相テンソルの $|\beta|$ に関しては、周期512秒以下の短周期では計算された値と観測値がほぼ同じであるのに対し、周期1000秒以上では、観測値の方が大きくなった。この結果から、 $|\beta|$ に対して短周期では海底地形効果が、長周期では地下比抵抗構造がそれぞれ支配的である可能性が高い。

以上の解析より、西南日本背弧域の地下浅部における低比抵抗体の存在が示唆される。今後、この地下比抵抗異常が実在するかどうかを調べるため、取得

した電磁気データに対して二次元ないし三次元の高次元構造解析を行い、さらに定量的な議論を行う必要がある。

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」（舞鶴海洋気象台）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.
- McKirdy, D. McA. and Weaver, J. T. (1985) Induction in a thin sheet of variable conductance at the surface of a stratified earth –II. Three-dimensional theory, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **80**, 177-194
- Kimura, J.-I. et al., (2003) 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.
- 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.
- Toh, H. and Honma, S. (2008) Mantle upwelling revealed by genetic algorithm inversion of the magnetovariational anomaly around Kyushu island, Japan, *J. Geophys. Res.*, **113**, B10103, doi:10.1029/2006JB004891.