西南日本背弧における導体地球の長周期応答

南拓人（京大理）°*、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，京都大学大学院理学研究科.

Long-period electromagnetic responses of the conducting Earth in the back-arc region of Southwest Japan

Minami[1*], T., T. Hiroaki[2], H., T. Kasaya[3], M. Shimoizumi[4], M. Shingai[4], N. Oshiman[5], R. Yoshimura[5], I. Shiozaki[6], A. Yamazaki[7], I. Fujii[8], H. Murakami[9], S. Yamaguchi[10] and M. Uyeshima[11]

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

Abstract. In the back-arc region of southwest Japan, seafloor EM observations have been conducted since summer of 2006. In addition to the existing NS seafloor EM array extended to the north of the boundary between Tottori and Hyogo Prefectures, EM field data were newly acquired in 2008 at sites in the volcanic region extended to the north from Mt. Daisen, and at Site KUHD that is the only site located in the west of this volcanic region. Here we focus on the analysis of the long-period data from two sites: Site 005 and Site KUHD. These two sites are located in non-volcanic regions, i.e., in the east and west of the volcanic region, respectively. In order to obtain useful information about the seismic and volcanic activities in this region, we compare KUHD with 005 in terms of MT and GDS responses.

1. はじめに

本研究の目的は、海底電磁気観測を通して西日本背弧地域における地下の比抵抗構造を調べ、この地域の地震メカニズム解明や予知に役立つ情報を得ることである。

これまでの研究で、西日本背弧の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伴うことがわかっている。地殻の比抵抗が低くなる、すなわち地殻に電流が流れやすくなるには、以下の三つの原因が考えられる。

・温度　　一般に，温度が上がると比抵抗は小さくなる。
・組成　　例えば，岩石が水を含むと比抵抗は小さくなる。
・相転移　例えば，岩石が融解すると比抵抗は小さくなる。

地殻は冷えた岩石からなっているので、温度の影響は考えにくい。また同じ理由で、乾燥した岩石の融解も現実的ではない。この事は、低比抵抗体が地殻中に存在する場合、加水等の組成異常によるものである可能性が高い事を示唆する。地殻中の水やメルトの存在は地震発生のメカニズムに関係するため、地下比抵抗構造の解明は地震発生メカニズムの研究に対して有益な情報をもたらすと考えられる。

またこの地域では、地殻深度の地震活動に東西で明瞭な違いがあることも知られている。30km 以浅の震源分布を見ると、図 1 に見られるように、大山火山より東では震源が線上配列し、東に行くほどその線の先が尖っていくのに対し、大山より西では大きな面的広がりをもつようになる（塩崎他、2003）。さらに震源の深さ分布を見ると(山根他、2000)、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、大山より東では下部地殻深度でほとん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がわかる。

以上のことを踏まえ、本研究では、2007 年以前のデータと新しく 2008 年に得られたデータの比較という観点で、解析する観測点を Site 005 と Site KUHD の 2 点とした。この 2 点は大山の北に伸びる火山地域を挟むように、それぞれ東と西に位置し、どちらも着底位置は水深 1500m を越える。どちらも観測期間が半年以上と長い事、またサンプリング間隔が 1 分で比較が容易である事も、この 2 点を選んだ理由である。この 2 点を比較することで、火山地域の背景的地下構造が明らかになることが期待でき、かつ、火山地域の東西で地下構造が異なる場合には、大山東西の地震発生メカニズムの解明に関する有益な情報が得られる可能性がある。

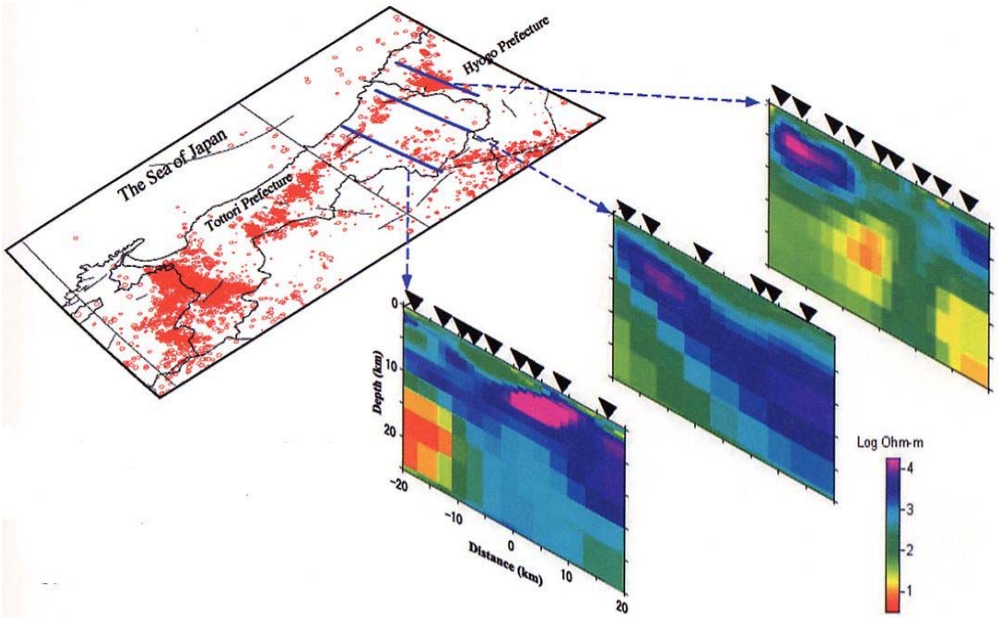

図 1. 西南日本の震源分布と陸域地下比抵抗構造(2007 年度科研費基盤 B 計画調書(代表:大志万) より引用)。
Fig. 1 Distribution of the Epicenters and the structure of crustal conductors on land in southwest Japan.

2. 観測

西南日本背弧で行っている海底電磁気観測の測点分布図を，図２に示す．この図の等深線から分かるように、2007 年までに得られたデータ（青○）は水深の深い非火山地域、2008 年に取られたデータ（赤○）は大山から北に伸びる水深の浅い火山地域に位置する。同じく 2008 年に回収された KUHD は火山地域から西に外れた対馬海盆に位置し、ここも現在は非火山地域で水深は 1500m を越えている。本研究では、図３のように火山地域を挟んで東西に位置する 005 及び KUHD の非火山地域 2 点に着目して、長周期電磁応答の比較を行った。表 1 に KUHD、005 両点を含めた観測点の詳細を示す。

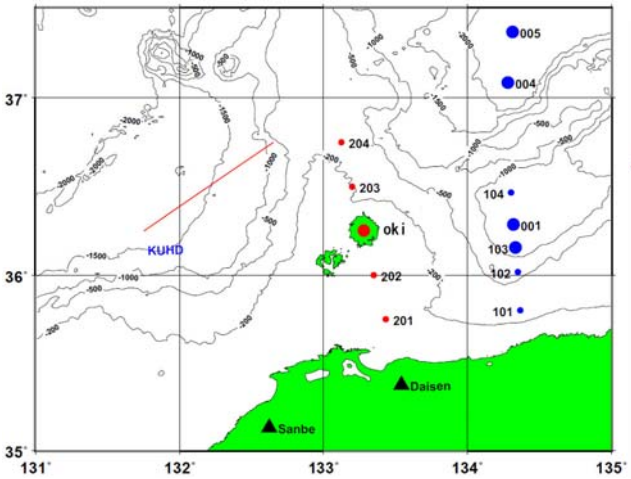

図 2. 観測点配置と等深線。
Fig. 2 Site map on bathymetric contours.

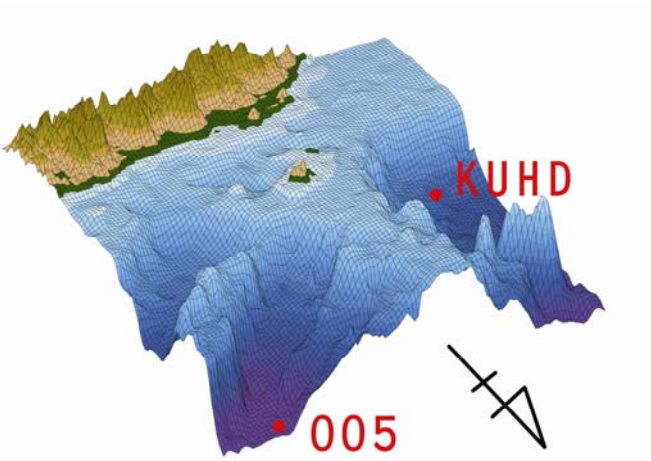

図 3. KUHD と 005 の位置関係。
Fig. 3 Positions of KUHD and 005.

Site	サンプル間隔	観測期間		観測日数	北緯(度)	東経(度)	海抜(m)
KUHD	1分値	07/10/10	08/06/16	251	36.15	131.90	1535
隠岐	1/8 秒値	08/06/18	08/07/28	41	36.24	133.25	-300
202	1 秒値	08/06/11	08/07/30	50	36.00	133.35	170
203	1 秒値	08/06/11	08/07/29	49	36.50	133.20	250
204	1 秒値	08/06/11	08/07/27	47	36.75	133.13	231
005	1分値	06/08/31	07/02/18	172	37.37	134.31	2576

表 1.　観測点詳細。005 のみ 2007 年以前の観測点。残りは 2008 年にデータを回収。Oki は隠岐の島（島後）の陸上観測点。
Table 1 Site Details. Only data at 005 were acquired before 2008, and the others were in 2008. Oki is the site on Oki Island.

3.　時系列の補正

海底電位磁力計，すなわち，OBEMから取り出した生時系列は、そのままでは周波数解析を行うことができない。なぜなら、長期間の観測中に、OBEMは水平からいくらか傾き、時にはその傾きも変化させながら、電磁場の観測を続けるからである。また、OBEMの時計が長い観測期間の間にずれる可能性もある。従って、得られた生時系列を各データ毎に

その観測点における、正しい座標、正しい時刻での値に直さなくてはならない。
　以下に、今回行った時系列補正の流れを示す。ただし、2008 年に新たに得られたのはKUHDのデータだけであったので、本研究で時系列補正を行ったのはKUHDの時系列のみである。

①生データ（磁場[nT]、電位差[mV]）
②傾斜補正：X軸とＹ軸が水平面内にくるように，傾斜平均値を用いて座標変換。
③X軸を磁北に向ける：静穏日データのHy平均が０になるよう座標を水平回転
（KUHDの静穏日には 08/02/24（Kp指数=0）を選び、補正を行った。
参考URL→http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index-j.html）
④X軸を真北に向ける：IGRF-10 を用いてKUHD点の偏角を計算し、X軸が真北を向くよう座標を水平回転。
⑤時計補正：時計の遅れを補正して真の時刻に直す。
（今回、KUHDの時計は遅れが８ヶ月で１秒程度であったため、時間補正は省略した）
⑥ハイパスフィルタをかけて長周期成分を除く

　後節で述べる高速フーリエ変換（FFT）を用いた周波数解析において 2^{14}=16384 を最大FFT長としたかったため、16384*60s≒273h以上の長周期を除いた。次節で詳述するが、本研究で用いた周波数解析パッケージ rrrmt version8（Chave et al., 1987）には、長周期側は長くても最大FFT長/3 までの周期しか得られないような計算パラメータを与えたので、273h以上のハイパスフィルタをかけても、長周期側の周波数解析の結果に悪影響を及ぼすことはない。

4.　周波数解析
　周波数解析のパッケージには rrrmt version8（Chave et al., 1987）を使用した。rrrmt は複素フーリエ変換を用いた, データ中のoutlierの存在にあまり左右されずに統計量推定が可能な周波数解析プログラムである。
　地球内部電磁誘導では、導体地球の周波数応答関数を、観測した電磁場各成分間の「比」として求める場合が多い。今回使用した rrrmt は、入力信号、出力信号の間の各周波数におけるフーリエ成分の比をとり、コヒーレンスと周波数応答関数を計算する。入力に対する出力の振幅の比は、周波数応答関数の絶対値として現れ、時間領域での遅れや進みは、周波数応答関数の位相の形で現れる。この振幅比と、位相差を速く効率よく求めるには、複素フーリエ変換を用いるのが適している。
　rrrmt のようなFFTによる周波数解析では、解析精度を保つため、時系列を 20 以上に区切って、各々を解析しその算術平均をとる。重ね合わせる時系列の数を「スタック数」と呼ぶが、このスタック数が 20 以下になると、得られる結果の推定誤差が大きくなってしまう事が多い。また，フーリエ変換の最大FFT長は，2 の累乗に取ると計算の高速化が図れ

る。今回の 005 とKUHDの解析ではデータ数が３０万程度であったので、スタック数が 20 程度になるように､最大FFT長=2 の 14 乗=16384､最小FFT長=2 の 4 乗=16 とした。最小FFT長に関しては、できるだけ短い周期まで応答関数を求めるため、2 の 4 乗とした。FFT長の種類は 2 の 4~14 乗の計 11 種類であり、各FFT長でＴ/3 およびT/4 の二つの周波数を採用したので、得られた周波数の数は 11*2=22 個であった。サンプル間隔が 60 秒なので、周期, 16/4＊60(s) < T < 16384/3＊60(s)での、すなわち、周期 4 分ー約 90 時間における解析となった。以上のような条件で、KUHD、005 の 2 点の時系列を用い、MT法では出力は電場水平２成分、入力は磁場水平２成分、GDS法では出力は磁場鉛直成分、入力は磁場水平２成分として rrrmt を実行した。

（1） MT応答

図 4 と図 5 は, それぞれ KUHD と 005 の MT コヒーレンスと Skewness のグラフである。Skewness は MT インピーダンステンソルの回転不変量のみで定義される値であり、地下構造が高次元になるほど大きくなる性質を持つ。図 4、図 5 を見ると、KUHD 、005 共に、周期が 10000 秒より短い領域では、コヒーレンスは 0.8 程度と高く、Skewness は 0.2 程度と小さい。しかし、周期が 10000 秒を過ぎた辺りから、周波数解析の仕様上は充分推定可能であるにも関わらず、どちらのサイトでもコヒーレンスが大きく下がり、Skewness の値もばらつき始める。005 においては周期 100000 秒付近ではコヒーレンスがほぼゼロに等しく、有意な MT 信号が得られていない。

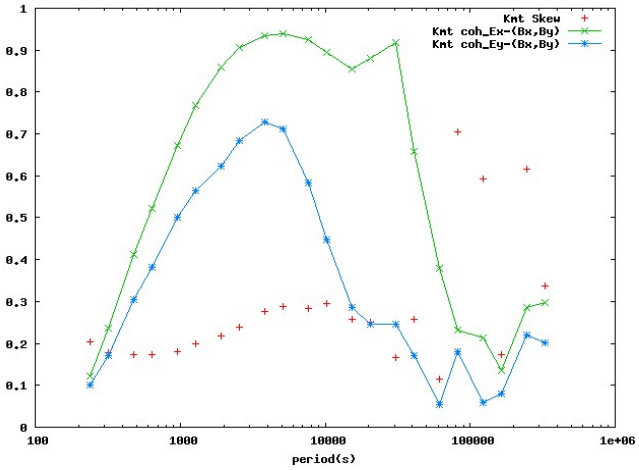

図 4. KUHD の MT コヒーレンス。
Fig. 4 MT coherence at KUHD.

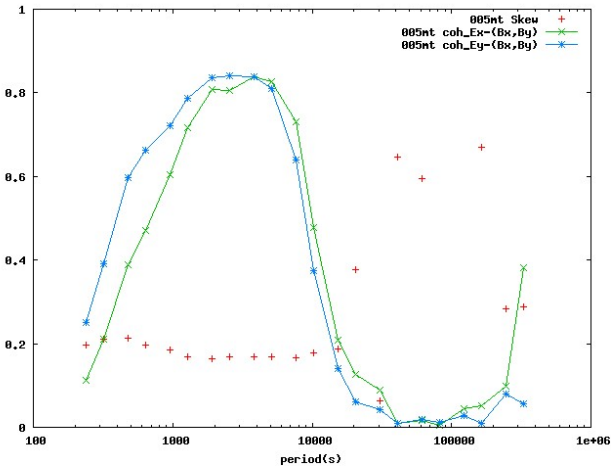

図 5. 005 の MT コヒーレンス。
Fig. 5 MT coherence at 005.

次に、両点の見掛け比抵抗とＭＴインピーダンステンソルの位相の値を，図６～９に掲げる。これらの図 6～9 から分かるように､KUHD と 005 の MT 応答は非常によく似ている。見掛け比抵抗において特徴的なのは、両サイトとも yy 成分は xy、yx 成分より小さいのに比べて、xx 成分は yy、yx 成分と同程度の大きさを持つという点である。この結果は、磁場の南北方向の変動に対して，電流がそれと平行に同じく南北方向に流れるような、3 次

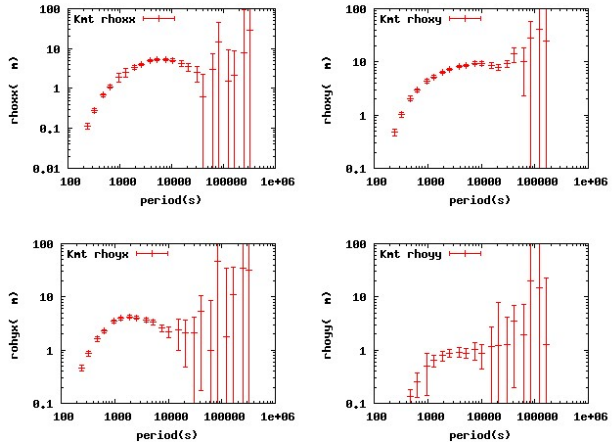

図 6. KUHD の見掛け比抵抗。
Fig. 6 Apparent resistivity at KUHD.

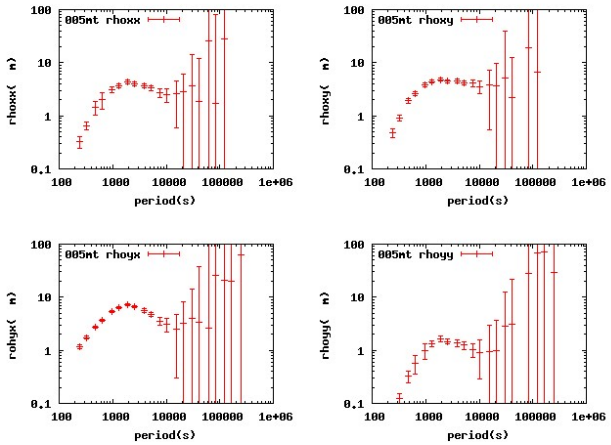

図 7. 005 の見掛け比抵抗。
Fig. 7 Apparent resistivity at 005.

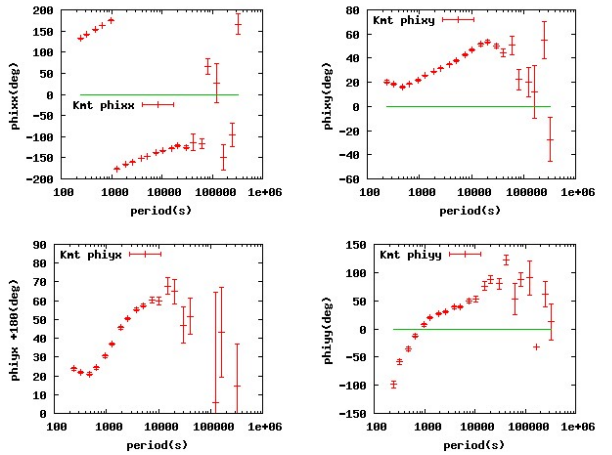

図 8.KUHD における MT インピーダンスの位相。
Fig. 8 Phase of MT impedance at KUHD.

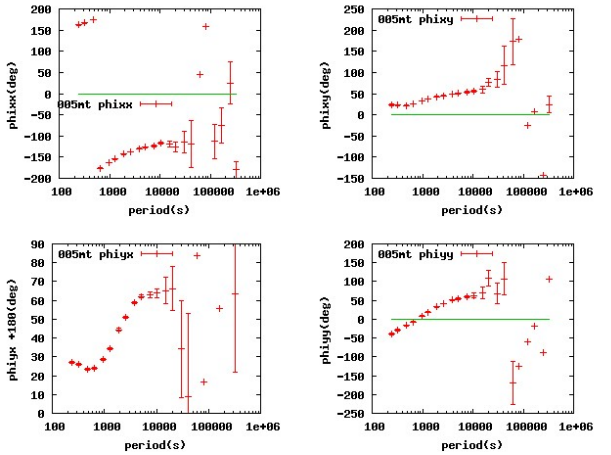

図 9. 005 における MT インピーダンスの位相。
Fig. 9 Phase of MT impedance at 005.

元的比抵抗構造の存在を示唆する。また位相においては全体的に右上がりで 45 度を越えている。これは、見掛け比抵抗において長周期側ほど振幅が小さくなっていることと符合する。見掛け比抵抗と位相の計算結果より、両サイトの地下構造はよく似ており、共にある一定の深さから比抵抗が小さくなるような地下構造であることが予想される。また特徴的なのは、見掛け比抵抗、位相共に周期 10000 秒程度から推定誤差が増大することである。周期 10000 秒～1 日は Sq の周期帯にあたり、外部磁場の鉛直成分変化を伴う Sq の影響により、MT 法における平面波近似が破れている可能性がある。これを確かめるために、GDS 法による解析を行った。次にその結果を示す。

（2）GDS 応答

図 10、11 に，rrrmt による解析で得られた両サイトの GDS コヒーレンス値を示す。これらの図を見ると、GDS コヒーレンスの値は，005、KUHD 両サイトにおいて，周期 3 時間～1 日付近で高くなっている。周期 3 時間は、MT 応答において推定誤差が増大し始め

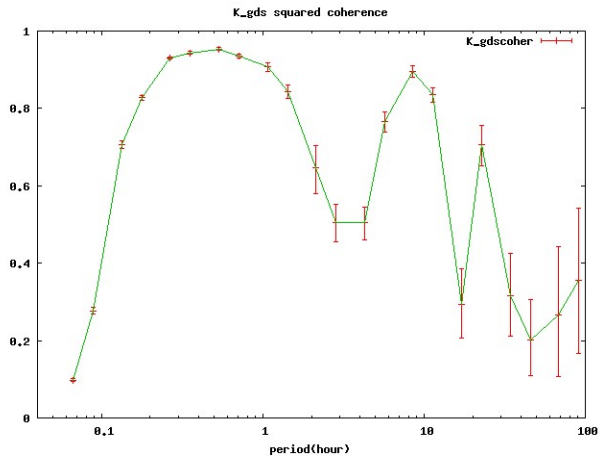

図 10. KUHD における GDS コヒーレンス。
Fig. 10 GDS coherence at KUHD.

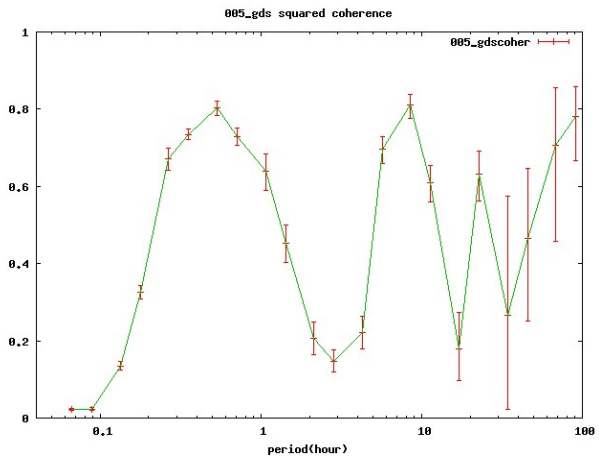

図 11. 005 における GDS コヒーレンス。
Fig. 11 GDS coherence at 005.

る周期 10000 秒にほぼ一致する。従って，この GDS 解析の結果から、周期 3 時間～1 日の周期帯において，外部磁場変動が鉛直成分変化を伴うために、同周期帯における MT コヒーレンスは低くなり，GDS コヒーレンスが増大した、と解釈することができる。周期が 3 時間～1 日で鉛直成分変化を伴う外部磁場変動は，Sq とその高調波である可能性が高い。

（3）Sq の除去

Sq とその高調波を除去するため、元時系列に対し周期 6, 8, 12, 24 時間の正弦波を最小二乗法を用いて順に当てはめて取り除いた。その結果、Sq 周期帯における GDS コヒーレンスの高まりはやや解消されたが、完全に取り除くことはできなかった(図 12, 13)。また KUHD において、MT コヒーレンスが長周期側で著しく回復することもなかった(図 14, 15)。

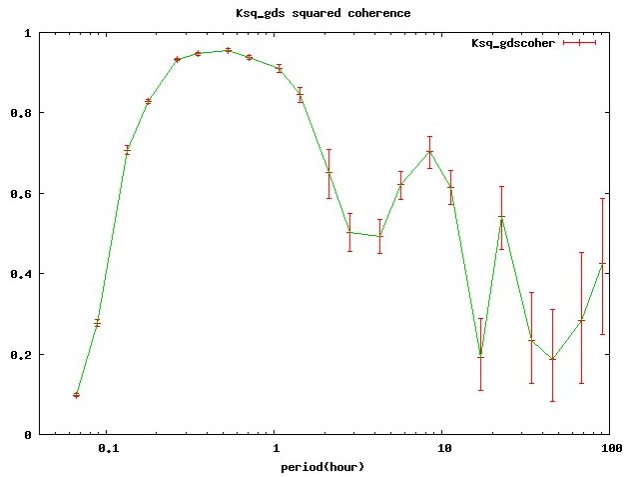

図 12. KUHD の GDS コヒーレンス(Sq 除去後)。
Fig. 12 GDS coherence at KUHD with Sq removed.

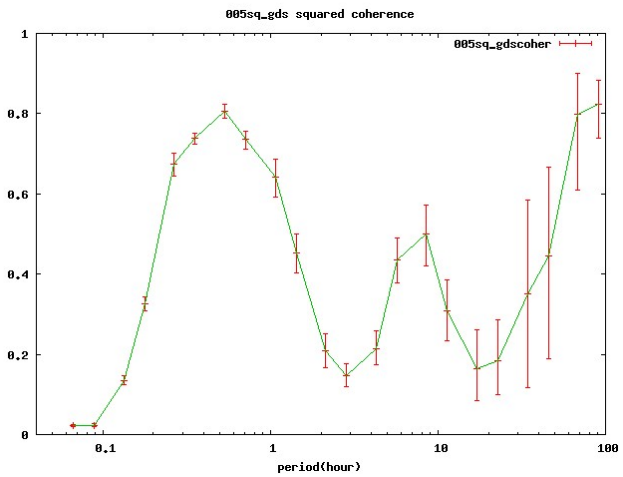

図 13. 005 の GDS コヒーレンス(Sq 除去後)。
Fig. 13 GDS coherence at 005 with Sq removed.

5. まとめ

KUHD、005 で得られた MT 法の観測応答は，非常によく似ていた。この事は，定性的には、両サイト共にある程度深さにアセノスフェアに対応する高電気伝導度層が存在する

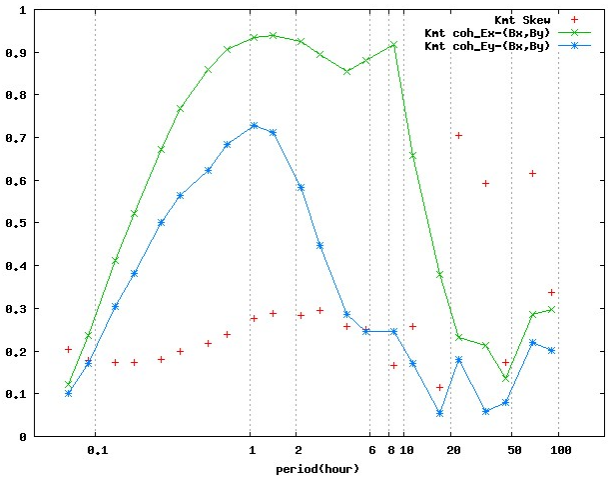

図 14. KUHD の MT コヒーレンス(Sq 除去前)。
Fig. 14 MT coherence at KUHD before Sq removal.

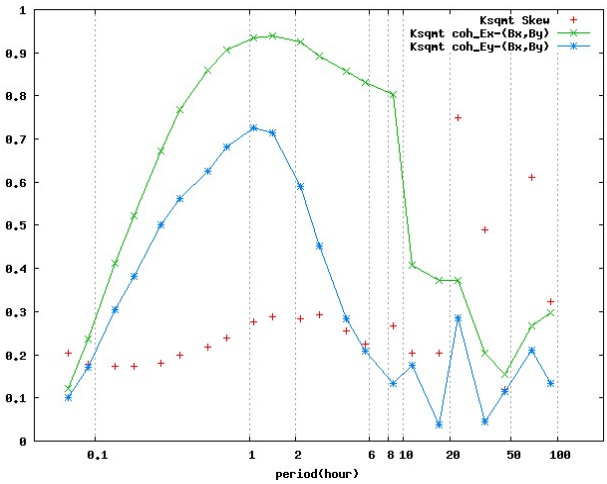

図 15. KUHD の MT コヒーレンス(Sq 除去後)。
Fig. 15 MT coherence at KUHD after Sq removal.

と予想される。またこの比抵抗構造は、両サイトの位置関係から、大山以北の火山地域における背景的基礎構造である可能性が高い。ただし今回の解析では、3 時間以上の周期帯において推定誤差が大きく周波数応答関数が求められなかった。GDS 解析の結果、この周期帯には Sq の影響が存在する事が分かった。元時系列に対し Sq 周波数の正弦波を取り除き再度解析を行ったが、Sq の影響を完全に取り除くことはできなかった。今後、Sq の周期帯でも正しい MT 応答を求めるために，新たな方策を考える必要がある。

謝辞

2008 年 8 月の乗船観測の際には, 海洋研究開発機構並びに淡青丸乗組員の皆様に大変お世話になりました。また，京都大学大学院理学研究科太陽惑星系電磁気学講座及び地磁気世界資料解析センターの先生方、先輩方には、沢山の貴重な助言を頂きました。これらの方々に，この場を借りて深くお礼申し上げます。

参考文献

Chave, A.D., D.J. Thomson and M.E. Ander (1987) : On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions, J. Geophys. Ress., 92, 633-648.

塩崎一郎・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、No. 40，2−8 頁.

山根隆弘・中西一郎・神谷眞一郎 (2000) : 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.