紀伊半島北西部有田川非火山性群発地震域における 広帯域MT観測

Wideband MT survey in Aridagawa nonvolcanic earthquake swarm area in NW Kii Peninsula

上嶋誠(東大地震研)・山口覚(大阪市大理)・Patro, P.K.・小河勉・加藤愛太郎(東大地震研)・ 長谷川浩二 (神戸大理)・上田哲士 (神戸大院理)・相澤広記・長谷英彰(東大地震研)

M. Uyeshima (ERI, U. Tokyo), S. Yamaguchi (Osaka City U.), P.K. Patro, T. Ogawa, A. Kato (ERI, U. Tokyo), K. Hasegawa, T. Ueda (Kobe U.), K. Aizawa, H. Hase (ERI, U. Tokyo)

Abstract

In order to obtain geophysical insight on the origin of the non-volcanic earthquake swarm activity in the Aridagawa area, NW part of the Kii Peninsula, wideband MT survey was performed in July-August, 2009. Seven sets of Metronix ADU07 were deployed in the area along an observation line in NNW-SSE direction, and one ADU07 was set in Okura Village, Yamagata, as a remote reference. The profile length was about 25km from Kainan City to Hidakagawa Town.

Impedance tensors were estimated with the aid of the robust processing code rrrmt (Chave and Thomson, 1989) for two bands with 1024Hz and 15Hz sampling frequencies. For the former and the latter bands, we used two component horizontal magnetic field data at Okura station in Yamagata (operated by us), and Sawauchi station in Iwate (operated by the Nittetsu Mining Consultants Co. with Phoenix MTU5), respectively, as remote references. Due to initial malfunction of the instruments, intense noise and weak geomagnetic activities, data quality was generally not very good especially in the northern stations.

From the phase tensor analysis (Caldwell et al., 2004), regional 2-D strike direction could not be uniquely determined. The GB decomposition (Chave and Smith, 1994, Toh and Uyeshima, 1997) analysis indicated that the optimal regional strike is in the EW direction. Thus, we tried to obtain a 2-D resistivity structure along N-S profile with the aid of the REBOCC 2-D inversion code (Siripunvaraporn and Egbert, 2000). Just beneath the center portion of the profile, where micro-earthquake foci were located at depths deeper than 4km, conductive anomaly can be detected. The swarm activities seem to be related to the existence of connected interstitial water.

1. はじめに

紀伊半島北西部和歌山市より南側の三波川帯, 秩父帯に対応する領域では, 非常に活発な非火山性群発地震活動が発生している. その南縁に当たる有田川流域の微小地震の震源分布については,

Kato et al. (2010)によって詳細に地震学的調査が行われた. その結果, 地震活動が顕著なクラスター化を呈し, 4 k m程度の深さまで鉛直につきだすような震源分布を示していることが明らかとなった. さらに, 微小地震の多くはポアッソン比の低い領域で発生しており, 微小地震発生域には流体が存在している可能性が考えられる.

この地域の微小地震活動には、地下からの流体移動の関与の可能性が指摘されてきた。そのため、有田川群発地震域の地下で、流体がどのように分布しているのかを明らかにする研究の一環として、日本で最初の Metronix 社 ADU07 広帯域 MT 装置 (2008 年度に新しく地震研究所で導入) を用いた比抵抗構造探査を当該地域で実施した。

2. 観測の概要

観測には Metronix 社 ADU07 測定機,MFS06 インダクションコイルからなる広帯域 MT 観測装置 8 式を用い,そのうち,1 式は remote reference として,山形県大蔵村に設置した.当初,海南市から日高川町に至る NNW-SSE 走向で測線長約 $25 \, \mathrm{km}$ の $2 \, \mathrm{測線}$ (あわせて予定観測点 $13 \, \mathrm{点}$)での観測を計画していたが,観測機器の初期的不具合,顕著な人間活動によるノイズの存在,低調な磁気擾乱等の悪条件が重なり,良好なデータを取得できなかったため,西側測線 $7 \, \mathrm{点}$ ($1 \, 1 \, 0 - 1 \, 7 \, 0$)と東側測線 $2 \, \mathrm{点}$ ($3 \, 3 \, 0$, $3 \, 4 \, 0$)のみにおいて観測を実施することになった(第 $1 \, \mathrm{図}$).

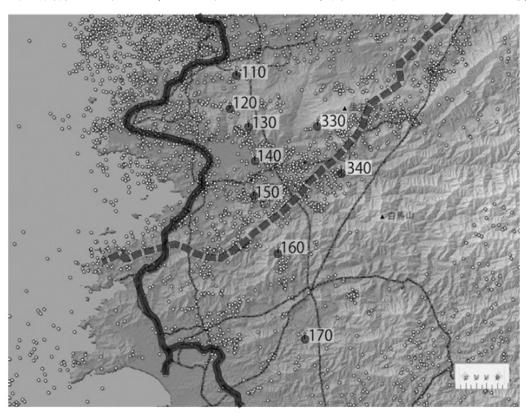


Fig. 1. Wide-band MT observation sites are shown by grey circles with site numbers. The survey was done from 14, Jul., 2009 to 13, Aug., 2009. Epicenters of non-volcanic seismic swarm activity are plotted by small circles after the JMA seismic catalog (from 30, Nov., 2004 to 30, Nov., 2005). DC railways (thick grey lines), a high voltage DC transmission line (a thick broken line) and high voltage AC transmission lines (thin grey lines) are also shown.

観測タイミングは、スクリプトによって自由に設定することが可能であり、32Hz サンプリングで連続してデータを取得する一方、毎日、深夜2:00~3:00 にかけて1024hz データを取得した. 観測地域は、第1図に示すように、直流電車や、長距離のものとしては国内でも2か所にしか例をみない高圧直流送電線などがとり囲んでいて、深夜の1:30 頃までと早朝4:30 頃からは、人工ノイズの混入が顕著に認められた. ただし、深夜のみ取得していた1024Hz データのスペクトルから、電磁場データにシューマン共振が含まれていることが確認でき、この時間帯および周期帯のデータでは、有田川エリアにおいても自然シグナルが卓越していたことが確認できた(第2図).

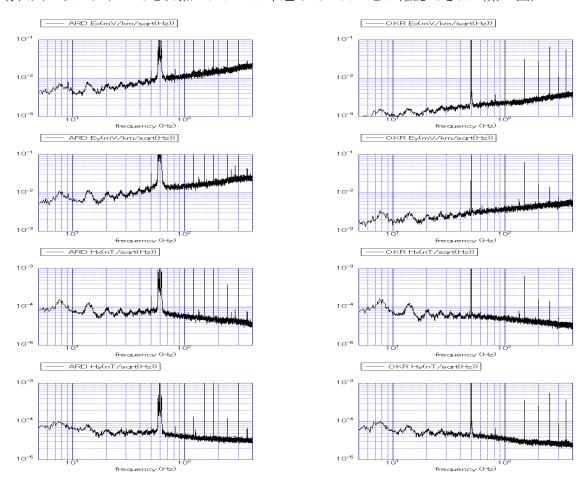


Fig. 2. Comparison of spectra estimated from EM time series of 1024 Hz sampling. Left-hand panels are spectra at the Aridagawa 110 site and right-hand panels are those at the Okura remote reference station. Those spectra are obtained with 50 stacks of raw spectra from 16384 points FFT by using time series from 2:00:00 to 2:13:20 on 15, Jul, 2009. Units of the vertical axes are mV/km/(Hz)^{1/2} and nT/(Hz)^{1/2}, respectively for electric and magnetic field. Baseline lengths for voltage difference observation are 23 and 26 meters at Aridagawa 110 site, and 40 and 30 meters at Okura station, for Ex and Ey components, respectively. From top to bottom, spectra for Ex, Ey, Bx and By components are shown.

3. 解析手順

1024Hz データについては、毎晩取得していた 1 時間分すべてのデータを用い、MT 応答関数を

求める際には、山形県大蔵村大蔵観測点の水平磁場 2成分データを remote reference として用いた. 一方、 32Hz データについては、深夜 1:30 から 4:30 までのデータのみを用いることとし、antialiasing filter をかけた後 15Hz にリサンプルし、 Phoenix 社の広帯域 MT 観測装置によって連続 的に取得されている岩手県西和賀町沢内観測点の水平磁場 2成分 15Hz データを remote reference として用いた. MT 応答関数の推定には、Chave and Thomson (1989)による robust remote reference MT data processing (rrrmt)コードを用いた. こうして、1s より短周期側では 1024Hz データ、1s より長周期側では 15Hz データより推定された応答関数を用いることにした.

数 Hz から 10s にかけての周期帯でのインピーダンス決定精度は悪く,数 100s 以上の長周期ではさらに推定誤差が大きくなったため,後の構造解析では 256Hz から 273s までの impedance を用いることにした。データの質はあまり良くないものの,全体として長周期側で見かけ比抵抗が低くなり数 10s 付近で位相が高い値を示す傾向が認められ,地下の低比抵抗帯の存在を示唆した。

4. 構造次元推定

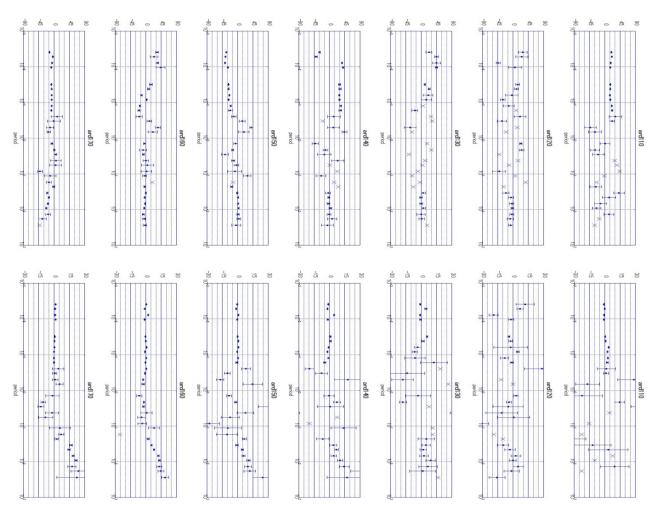


Figure 3. Results from the phase tensor analysis I. α and β values are plotted in top and bottom panels. From right to left, results of site 110-170 are shown. Range of the vertical period axis is from 10^{-3} to 10^{3} s. Ranges of the horizontal angle axes are $\pm 90^{\circ}$ and $\pm 30^{\circ}$ for α and β values, respectively. For α , clockwise rotation angles from the geographic north are shown.

まず、phase tensor 解析(Caldwell et al. 2004)による α 、 β 値を用いて regional 構造の次元性判定を行った(第3図)。全体として α 、 β 値の決定精度は悪く、周期依存性が滑らかではなく、また誤差が大きく求められた(第3図では誤差が±20°を超えるものについては×印で示している)。しかし、256Hz から数 Hz に至る短周期帯と数 10s から 100s までの帯域では、 α 、 β 値とも比較的精度良く決定されている場合があり、その周期帯、観測点についての全体的な傾向をまとめると、以下のようになった。まず前者の短周期帯では、おしなべて β 値は 0° に決定されているものの、 α 値は観測点によるばらつきが大きい。一方、後者の長周期帯では、特に 140 から 170 に至る南側の点において β 値が 5°を超えて大きくなる傾向があり、2 次元性が成立しないことを示唆するが、 α 値は観測点による違いが小さくほぼ 0°であると判定することが出来た。一方、 α のに対し、長周期帯で異なっている様子が読み取れ、短周期帯でほぼ一次元性が成立していることが推定された。

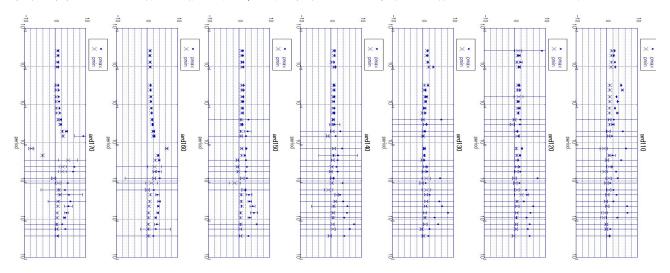


Figure 4. Results from the phase tensor analysis II. Φ min and Φ max values are plotted by dots and crosses, respectively. From right to left, results of site 110-170 are shown. Range of the vertical period axis is from 10^{-3} to 10^{3} s. Range of the horizontal axis is ± 10 .

これら一連の解析から,長周期側に着目し,ほぼ東西に走る主要な地質境界や構造線,地震発生

帯の走向を参照して、当観測地域における regional 2 次元構造の走行方向は東西であると判定した. この regional 走向のもとで GB 分解によって得られた 2 次元 regional インピーダンスを、第 5 図に示す.

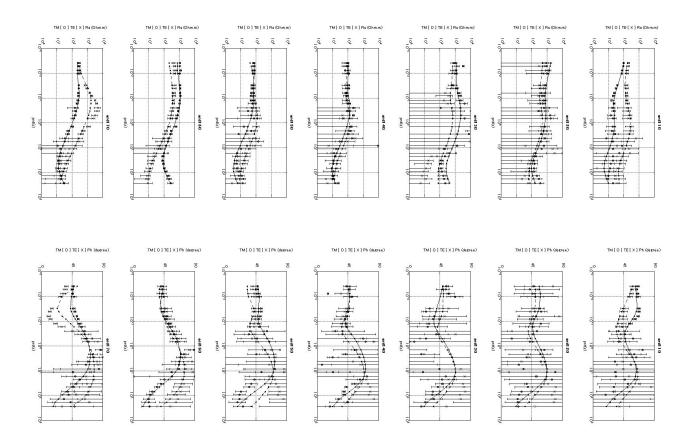


Figure 5. 2-D regional responses obtained from the GB decomposition analysis. TM and TE mode responses are shown by dots and crosses, respectively. Apparent resistivity and phase values are shown in top and bottom panels. From right to left, responses of site 110-170 are shown. Also shown are model responses based on the 2-D resistivity model (Fig. 6). TM and TE model responses are shown by solid and broken lines, respectively. Ranges of the horizontal axes for apparent resistivity and phase are respectively 10^{0} - 10^{4} Ω m and 0-90 degree. Range of the vertical period axis is from 10^{-3} to 10^{3} s.

5. 2次元構造解析結果と今後の課題

上記 GB 解析によって得られた 2 次元 regional インピーダンスを用い、Siripunvaraporn & Egbert、2000 による REBOCC 2-D inversion コードを用いた 2 次元構造解析を行った。現時点での最良モデルとして、「TM、TE 両モードの見かけ比抵抗と位相」を用いたインヴァージョンによって推定された比抵抗モデルを第 6 図に示し、観測値とモデル応答関数との比較を第 5 図に示す (RMS = 1.6)。第 6 図に示されているように、site 150 あたりで鉛直に立ちあがるかのように見える群発微小地震活動域の下部、site 120-150 の領域で低比抵抗帯が決定され、そこに連結した間隙流体が存在し、群発地震活動にその間隙流体が関与している可能性が指摘できる。また、南側の

site160-170の地下にも別の低比抵抗帯が決定されている.

ここでは、「TM, TE 両モードの見かけ比抵抗と位相」を用いた解析結果のみを示しているが、実

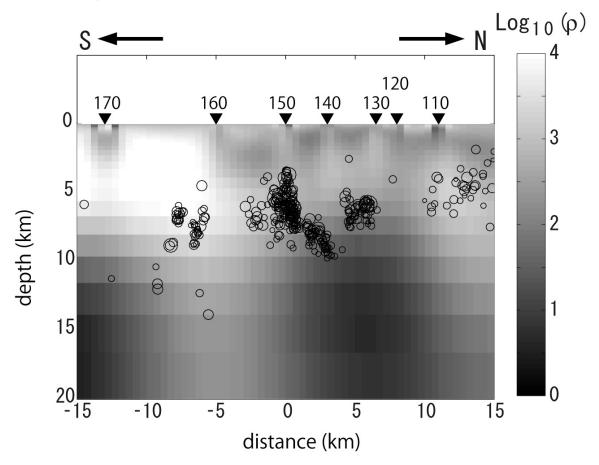


Fig. 6. A 2-D resistivity structure obtained from the REBOCC 2-D inversion scheme (Siripunvaraporn and Egbert, 2000) by using apparent resistivity and phase values of both TM and TE modes. RMS misfit of this model is 1.6. Also shown are the hypocenters (within 1 km apart from the profile and from 30, Nov., 2004 to 30, Nov., 2005) after the JMA seismic catalogue. Synthetic responses based on this model are compared with observations in Fig. 5.

際には「TM モードのみの見かけ比抵抗と位相」,「TM モードの見かけ比抵抗と位相+TE モードの位相」を用いた解析も行った。それらの解析から得られた構造には,第6図に示した構造と同じく,中下部地殻に低比抵抗域が存在し,観測点 120-150 と観測点 160-170 直下の南北に分かれてその低比抵抗域が分布するという共通したイメージが得られていて,この地域の群発地震活動震央域の地下に南北に分かれた低比抵抗帯が存在することは確からしい。しかし,用いたMT応答関数の種類によって,その低比抵抗帯の上面の深さについては相違が認められた。 $30~\Omega m$ となる深さで低比抵抗帯の上面を定義したとすると,第6図に示した「TM, TE 両モードの見かけ比抵抗と位相」を用いた解析では北側,南側の低比抵抗帯とも約10km となり,群発地震発生域の下限に位置することになる。しかし,「TM モードのみの見かけ比抵抗と位相」を用いた解析においては,低比抵抗帯の上面は北側について約4km,南側については約2km となり,「TM モードの見かけ比抵抗と位相」を用いた解析からは,南北両低比抵抗帯とも約4km と決定され,群発地震

域全域ないしはその下部が低比抵抗域に重なることになる.この低比抵抗上面の深さの違いは,それぞれのinversionにおいて推定された static shift レベルの違いによるものであった.このように,低比抵抗帯の上面の深さについて,従って,群発地震域と低比抵抗帯との深さ方向の相対位置関係については、現在のところ,あまり確定的なことはいえない.

本報告においては、4節で述べたように、長周期に着目して2次元性を仮定し、regional な2次元走向を求めた. しかし、数 10s から長周期側で β が大きくなることから、長周期側で3次元性が卓越してくることは確実である. 走行方向の構造変化や、測線西側に存在し良導体である海水の影響を吟味するため、第2測線での観測を完了させる必要がある. また、今回の観測、解析では良好なインピーダンスが推定できなかった数 Hz-10s と 100s 以上の長周期帯での観測値を得るため、インピーダンス解析手法の吟味、再観測を実施する必要性や、そうして得られるインピーダンスを用いての3次元構造解析が、今後の課題として残された.

謝辞

本研究を実施するにあたって、MT 観測のための所有地使用を快くお認め下さった地元の方々に厚く感謝の意を表します。ULF 帯域のインピーダンスを推定するための remote reference データとして、日鉄鉱コンサルタントによって岩手県西和賀町沢内において取得されている 15Hz サンプリング水平磁場観測データを使用させて頂きました。本研究は文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けました。また、一部、東京大学地震研究所共同利用研究プログラムからの援助も受けました。

引用文献

- Caldwell, T.G., Bibby, H.M. and Brown C, The magnetotelluric phase tensor. Geophys. J. Int., 158: 457-469, 2004.
- Chave, A.D. and Smith, J.T., On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions, J. Geophys. Res., 99: 4669-4682, 1994.
- Chave, A.D. and Thomson, D.J., Some comments on magnetotelluric response function estimation, J. Geophys. Res., 94: 14215-14225, 1989.
- Groom, R.W. and Bailey, R.C., Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local 3-Dimensional galvanic distortion, J. Geophys. Res., 94: 1913-1925, 1989.
- Kato, A., Sakai, S., Iidaka, T., Iwasaki, T. and Hirata, N., Non-volcanic seismic swarms triggered by circulating fluids and pressure fluctuations above a solidified diorite intrusion, Geophys. Res. Lett., in press, 2010.
- Siripunvaraporn W. and Egbert, G., An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data, Geophysics, 65: 791-803, 2000.
- Toh, H. and Uyeshima, M., One-dimensional model study of the PNG dataset using site-independent Groom-Bailey decomposition, J. Geomag. Geoelectr., 49: 843-856, 1997.