



AMT法による山崎断層系土万断層の地下比抵抗構造探査

山口, 覚 ; 小川, 康雄 ; 氏原, 直人 ; 藤田, 清士 ; 井口, 博夫 ; 大志万, 直人 ; 石橋, 克彦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 11:9-15

(Issue Date)

2007-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00518506>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00518506>



AMT 法による 山崎断層系土万断層の地下比抵抗構造探査

Audio frequency Magnetotelluric surveys at the Hijima Fault,
the Yamasaki fault system

山口 覚¹⁾
Satoru Yamaguchi
小川 康雄²⁾
Yasuo Ogawa
氏原 直人³⁾
Naoto Ujihara
藤田 清士¹⁾
Kiyoshi Fujita
井口 博夫⁴⁾
Hiroo Inokuchi
大志万 直人⁵⁾
Naoto Oshiman
石橋 克彦⁶⁾
Katsuhiko Ishibashi

概要：山崎断層系土万断層において、可聴周波数帯の電磁場変動を信号源とする地磁気地電流探査（AMT 探査： Audio Frequency Magnetotelluric Survey）を行なった。断層を横切る約 6km の測線を設定し、測線上の 10 地点で測定を行った。すべての観測点で 10,400Hz から 10Hz の帯域で連続した MT 応答関数を得た。このデータを基に断層の 2 次元比抵抗モデルを求めた。この比抵抗モデルは断層近傍の表層地質構造の違いを反映し、そこに断層沿いの低比抵抗領域の影響が重なった構造と解釈された。また、山崎断層系は神戸・姫路の近傍で人工的電磁気雑音が多い地域であるが、少なくともその北西部においては AMT 法で地下比抵抗構造調査が可能であることが実証された。

キーワード：山崎断層系, 土万断層, AMT 探査, 2 次元比抵抗構造

1. はじめに

山崎断層は岡山県美作市付近から兵庫県三木市にかけて、西北西-東南東にのびる総延長 80km に及ぶ活断層である。この断層は北西から、大原断層、土方（ひじま）断層、安富（やすとみ）断層、暮坂峠（くれさかとうげ）断層、琵琶甲（びわこう）断層、および三木断層の各断層から構成されている（活断層研究会, 1991）。これらは最新の活動時期の違いから北西部（大原断層、土方断層、安富断層、暮坂峠断層）と南東部（琵琶甲断層、三木断層）に区分される。山崎断層北西部ではマグニチュード 7.7 程度の、南東部ではマグニチュード 7.3 程度の地震が発生する可能性があり、今後 30 年間

に地震が発生する確率は北西部で0.06・0.8%, 南東部では0.5・1.2%である。我が国の主な活断層の中では、それぞれ、やや高いグループと高いグループに属する(地震調査研究推進本部, 2003)。本研究をおこなった土万断層は、確実度 I, 活動度 B 級の断層である(岡田, 東郷, 2000)(第1図)。

活断層に沿って顕著な低比抵抗帯が存在することは、地殻比抵抗研究グループ(Electromagnetic Research Group for Active Fault: ERGAF)が世界に先駆けて、山崎断層系安富断層において発見した(ERGAF, 1982)。その後、同様の低比抵抗帯の存在が世界各地で報告されている(例えば, Unsworth et al., 1997; Ritter et al., 2005)。このような低比抵抗帯は Fault Zone Conductor (FZC) と呼ばれ、断層を特徴づける重要な要素の一つである。例えば、山口ら(2002)は野島断層において、1995年兵庫県南部地震の際に大きな変位を示したセグメントには顕著な FZC が存在するが、変位をほとんど示さなかったセグメントではこのような FZC が存在しないことを示した。また、Unsworth et al. (1997) はサンアンドレアス断層において、クリープしているセグメントと固着しているセグメントとの間で異なる FZC が描出されることを指摘している。

近年の電磁気学的調査手法およびデータ解析方法の進歩は著しい。前者の例として広帯域 MT 装置や多電極電気探査装置が挙げられる。後者のうち、データ解析については RRRMT 法(Chave and Thomson, 1989)、Phase Tensor 法(Caldwell et al., 2004)などが、モデル解析に関しては ABIC を用いた 2 次元インバージョンプログラム(Uchida and Ogawa, 1993; Ogawa and Uchida, 1996)などが挙げられる。

本報告では、姫路、神戸などの大都市に近く、かつ、将来地震が発生する危険度が高いとされている山崎断層系土万断層で行った、新しい手法での電磁気探査の概要と予察的な 2 次元比抵抗モデルを示す。観測には Audio Frequency Magnetotelluric Method (AMT 法)を用いた。この手法は広帯域 MT 法の一つであり、可聴周波数帯の自然電磁場変動を信号源とする。地球電磁気学的手法は自然界の微弱な電磁場変動を信号源とするために、一般に、人工的電磁気雑音に弱い。大都市よりやや離れているとはいえ、山崎断層系近傍においても大きな人工的電磁気雑音が存在することが予想される。このような状況下で AMT 法が断層の地下構造探査に利用できるか否かを検証することも目的とする。

2. 観測

土万断層を横切る長さ約 6km の測線を設け、この測線に沿って 10 点の観測点を設けた(第2図)。断層の近傍では観測点を密に配置した。観測にはカナダ、Phoenix 社製 MTU-5A を使用し、各点で磁場 3 成分と電場 2 成分を測定した。測定時間は観測点によって異なり、3 時間から 17 時間である。測定にあたっては、データ解析時に Remote reference 法を用いることに備えて、人工的電磁気雑音の少ない測線北側に位置する観測点(観測点 1 または観測点 2)では、全日に渡って連続的に測定を行った。そして、ほかの 2 代の測定装置を順次、移動させながら測定を行った。

3. データ解析

MT 応答関数は、Phoenix 社から提供されている SSMT2000 を用い、Remote reference 法(Gamble et al., 1978)に基づいて算出した。測線の北側に位置する観測点 1 もしくは観測点 2 の磁場を参照磁場とした。なお、観測点 1 および観測点 2 の MT 応答関数を求める場合には、人工的電磁気雑音の小さい他点を参照磁場点とした。解析した周波数範囲は 10,400Hz から 0.35Hz である。このうち、自然界の電磁場信号が弱い 1kHz 周辺、商用電源周波数の高調波である 115Hz、および 10Hz よりも低い周波数帯(この周波数帯には、電車からの漏洩電流に起因すると思われる人工的ノイズの影響が大きく認められる)は以降の解析から除外した。また、いくつかの周波数の MT 応答関数では、隣接する周波数における値と大きく異なる値を示す場合があった。このような周波数の結果も除外した。

一般に、比抵抗構造の走向に平行な電場とそれと直交する磁場成分の組合せを TE モード、逆の組み合わせを TM モードと呼ぶ。本解析では比抵抗構造の走向は断層の走向(N60°W-S60°E)に等しいと仮定した。観測結果を、2つのモードの見かけ比抵抗値と位相差として示す(第3図)。

4. モデル解析およびその結果

TE モードのみかけ比抵抗値は表層付近の局地的な比抵抗不均質の影響を受けやすいので、TM モードのみかけ比抵抗値と位相差、TE モードの位相差の 3 種類のパラメータを基に予察的な 2 次元比抵抗モデルを求めた。インバージョンに当たっては、ABIC による最適平滑化拘束付き 2 次元インバージョンコード(Uchida and Ogawa, 1993)を使用した。また、minimum error を 5% に設定した。20 回の反復計算を行い、ABIC が最小となったモデルを最適モデルとみなした(第4図)。このモデルの normalized root mean square は 4.9 である。MT 応答関数の推定誤差に基づいて、各比抵抗ブロックの比抵抗値の許容範囲を算出した結果、観測点 1 と観測点 10 に挟まれる範囲で 2km 以浅の構造は信頼度が高いことを確

認した。

得られた2次元比抵抗モデルは、大局的に3つの領域に分けられる。北部（観測点1～観測点5）には中程度（数100Ωm）の比抵抗値を示す領域が、断層の地表トレースを含む中部（観測点6, 7, 8）には、2つの顕著な低比抵抗領域が認められる。浅部の比抵抗領域は幅300m程度であり、最小比抵抗値は約20Ωmである。一方、深部の低比抵抗領域は、深さ1km付近を中心として幅1kmにわたって存在する。この領域の最小比抵抗値は約10Ωmである。南部（観測点8, 9, 10）の浅部には高比抵抗（1000Ωm以上）な領域が存在する。

5. 考察

本解析から深さ約2km付近までの信頼できる比抵抗断面を決定することができた。このことによってAMT法を用いて、山崎断層系の地下比抵抗構造を探索することは実行可能であることが実証された。

より深部までの構造を明らかにするためには磁場観測点の選定が重要であることが分かった。本研究で解析に用いたもっとも低い周波数は10Hzであり、これが最大可探深度（約2km）を決めている。可探深度を深くすることによって、例えば、震源分布と比抵抗構造の対応を直接に比較することが可能になり、断層の地下構造や状態がより明らかにできる。そのためためには、解析可能な周波数帯域をより低周波数側に広げる必要がある。すべての観測点において、低周波数側のMT応答関数にRemote reference処理を行った後でも、見かけ比抵抗値が周波数の減少に伴って急増し、位相差が0度に近い値を示す傾向が認められた。これは磁場参照点と各観測点とに共通してcoherentな電流ノイズが混入していることを示唆している。このような電流ノイズの原因として鉄道線路からの漏洩電流が考えられる。これを避けるためには磁場参照点を測線から十分に離すことが必要である。

本研究で得られた土万断層の2次元比抵抗構造は、大局的には、地質構造の違いを反映し、その上に断層近傍の低比抵抗帯（FZC）の影響が重なっていると解釈される。観測点1は舞鶴帯の、観測点2～観測点7は超丹波帯の、観測点8～観測点10は丹波帯の岩石が地表に分布する地域に対応する。断層の地表トレース近傍では、断層地表位置を北端とするような低比抵抗領域が存在する。これはFZCと解釈した。本断層におけるFZCは、幅約300mで最小比抵抗値は約20Ωmである。

深さ1kmを中心として幅約1kmの顕著な低比抵抗領域が断層の南側に存在している。この深部の低比抵抗領域と浅部の低比抵抗領域が一連のものであるか否か、また、それらの成因は興味深い問題である。しかしこの問題については、最終的な比抵抗モデルが確定してから議論を進めるべきであろう。最終的な比抵抗モデルの決定にあたっては、比抵抗構造の走向を地質情報とは独立して、電磁気パラメータからのみ決定（例えばphase tensor法；Caldwell et al., 2004）すること、およびTM, TE両モードの見かけ比抵抗値と位相差を説明できるモデルを確立することが必要である。

山崎断層系に属する諸断層周辺の表層地質は断層によって異なっている。本解析で示唆された様に、比抵抗構造が表層地質構造によって規定されているならば、断層によって比抵抗構造が異なることが予想される。一方、地表断層トレース沿いの低比抵抗領域や逆に深部には表層地質構造とは独立した、おそらく山崎断層系に共通した構造が存在することが予想される。断層の比抵抗構造のうち、断層の周囲環境によって異なる構造と、多くの断層に共通する構造とを分離することは、断層の地下構造を解明する上で重要な鍵である。この問題を解決するためには山崎断層系の諸断層に対して同様の観測、解析を行ない、断層の走向方向に平行な方向の比抵抗構造変化を決定することが必要である。

謝辞：本研究は、京都大学防災研究所平成17年度萌芽的研究の援助を受け、神戸大学都市安全研究センターの平成18年度プロジェクト研究「巨大地震発生メカニズムと構造物リスク評価に基づく減災戦略」の一環としておこなった。記して感謝いたします。観測を許可して下さった土地所有者や管理者の方に感謝いたします。

筆者：1) 山口覚, 神戸大学理学部, 講師, 2) 小川康雄, 東京工業大学火山流体センター, 教授, 3) 氏原直人, 東京工業大学大学院理工学研究科, 学生 (現 海上保安庁), 4) 藤田清士, 神戸大学理学部, 助教 (現 大阪大学, 講師), 5) 井口博夫, 兵庫県立大学, 環境人間学部, 教授, 6) 大志万直人, 京都大学防災研究所, 教授, 7) 石橋克彦, 都市安全研究センター, 教授

参考文献

Caldwell T. G., H. M. Bibby, and C. Brown, The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, 457-469, 2004.
Chave, A. D. and Thomson D. J., Some comments on magnetotelluric response function estimation, *J. Geophys. Res.*,

94, 14215-14225, 1989.

Electromagnetic Research Group for the Active Fault, Low electrical resistivity along an active fault, the Yamasaki fault, *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 103-127, 1982.

Gamble T. D., W. M. Goubau, and J. Clarke, Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53-68, 1978.

兵庫県, 山崎断層帯に関する調査成果の概要, p.25, 2003.

地震調査研究推進本部地震調査委員会, 山崎断層帯の長期評価について, p.38, 2003.

活断層研究会編, [新編] 日本の活断層 - 分布図と資料 -, 東京大学出版会, p.437, 1991.

Ogawa, Y. and Uchida, T., A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76, 1996.

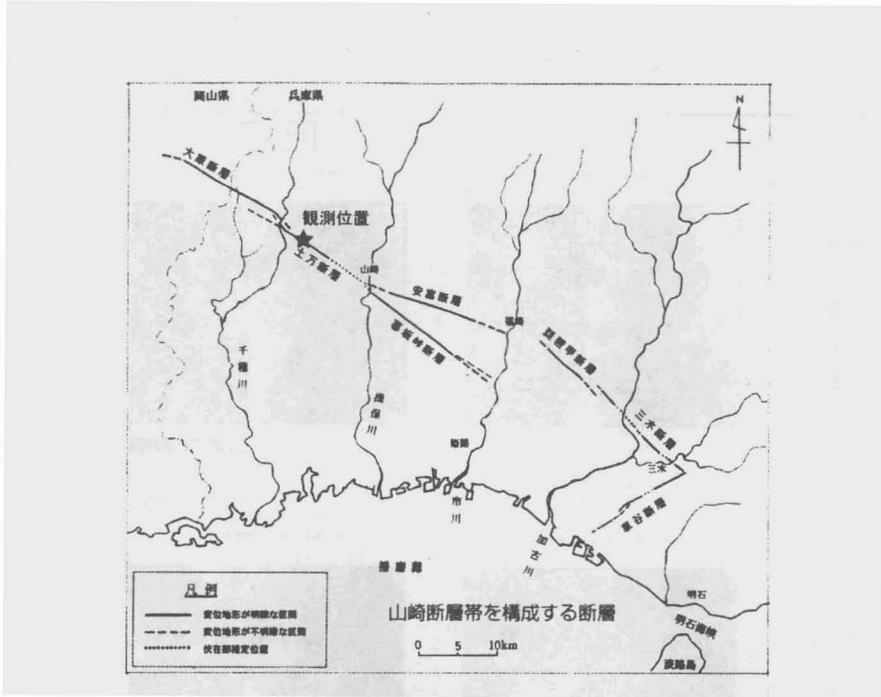
岡田篤正, 東郷正美, 近畿の活断層, 東京大学出版会, p.395, 2000.

Ritter, O., A. Hoffmann-Rothe, P. A. Bedrosian, U. Weckmann, and V. Haak, Electrical conductivity images of active and fossil fault zones, 165-186, in 'High-strain zones: Structure and physical properties', GSA Special Publication 245, 2005.

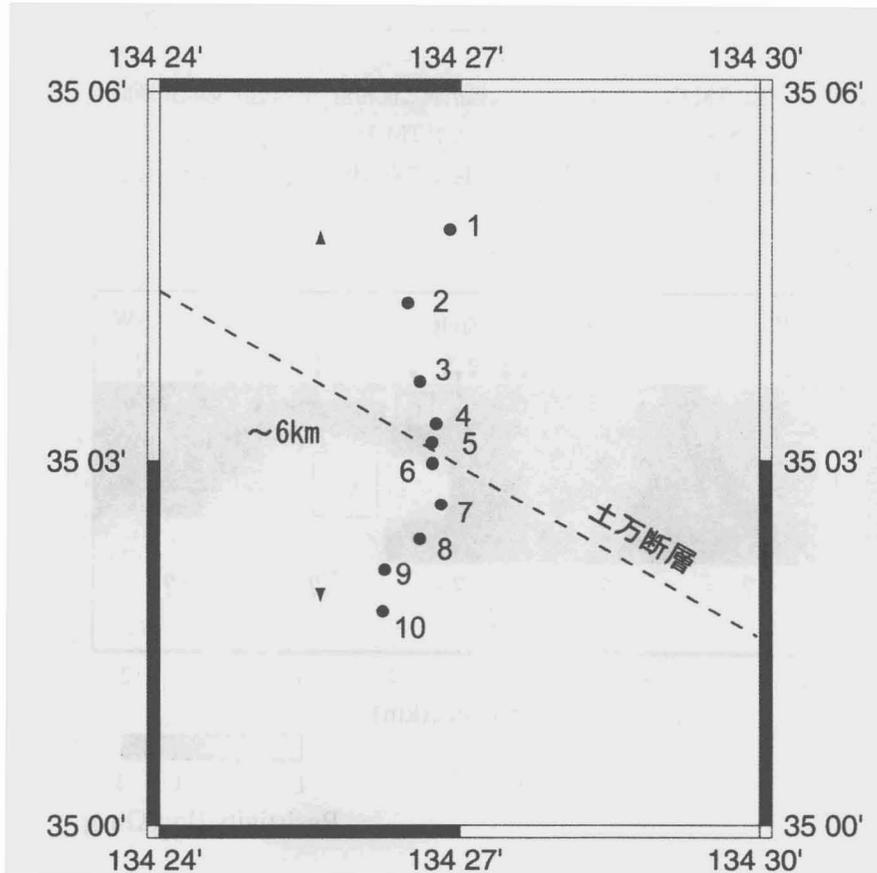
Uchida, T. and Y. Ogawa, Development of Fortran codes for two-dimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint, Geological Survey of Japan Open-File Report, No.205, pp. 115, 1993.

Unsworth, M. J., P. E. Malin, G. D. Egbert, and J. R. Booker, Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California, *Geology*, 25, 359-362, 1997.

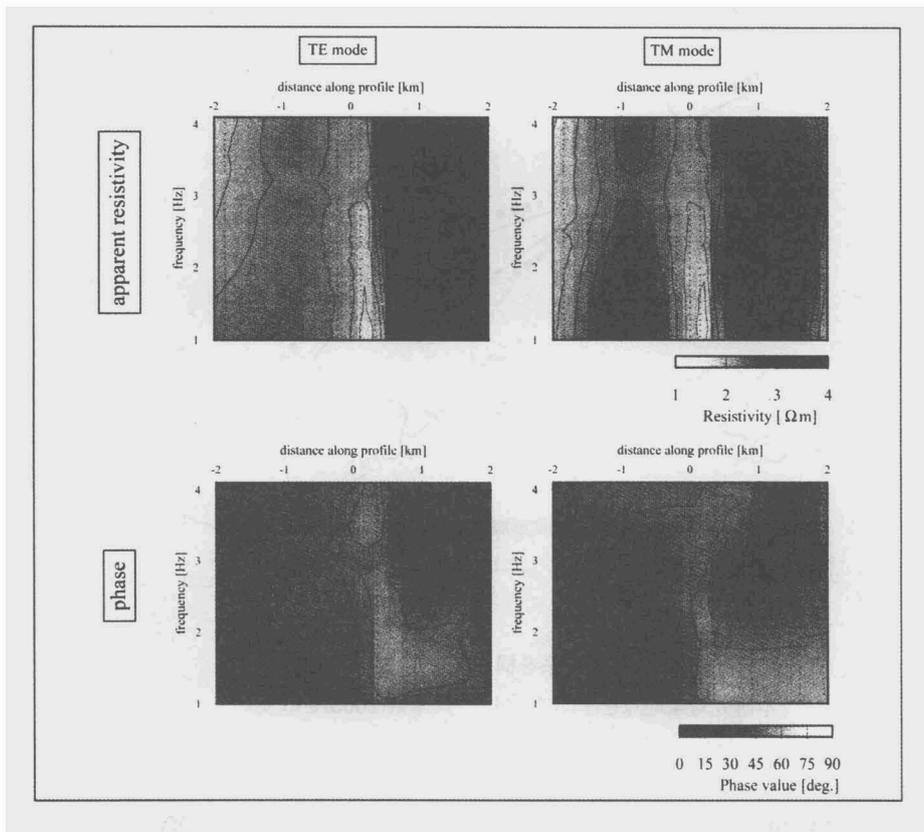
山口覚, 首藤史朗, 橋本武志, 村上英記, 高木典子, 野島断層南部の2次元比抵抗構造と断層活動度の関連, 地震, 55, p.143-151, 2002.



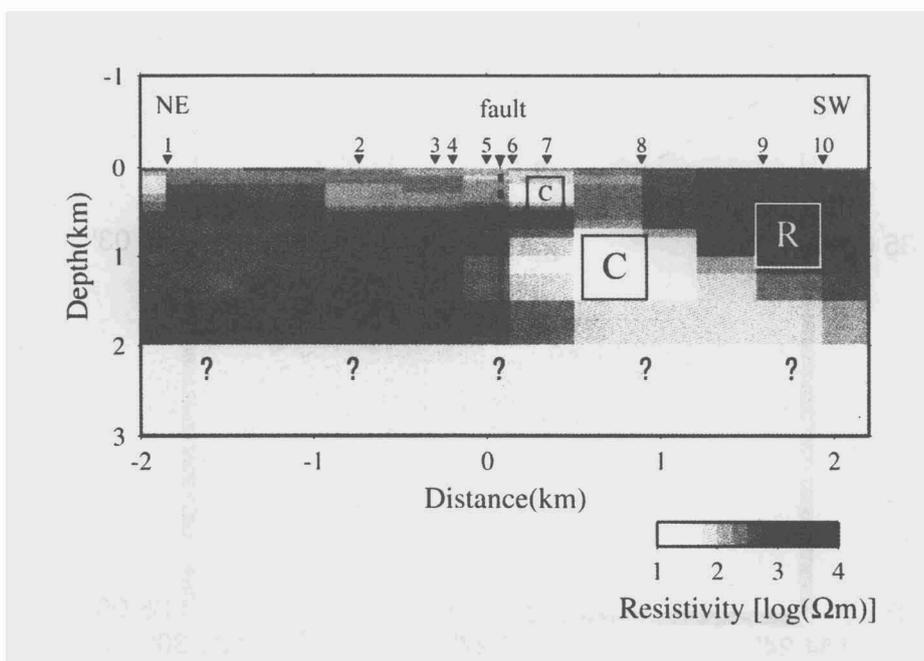
第1図 山崎断層系を構成する断層と観測位置
本研究対象地点を星印で示す。(兵庫県(2003)を改変)



第2図 観測点の分布
破線は土万断層の地表トレースを示す。



第3図 TE, TM 両モードの見かけ比抵抗値と位相差（観測値）の疑似断面
 左側の列がTEモードの結果を、右側の列がTMモードの結果を、そして、
 上段が見かけ比抵抗値、下段が位相差を示す。図中の点は解析に使用した観測値を示す。



第4図 土方断層を横切る2次元比抵抗モデル
 Rは高比抵抗な領域を、Cは低比抵抗な領域を、Mは中間的な比抵抗値を示す領域を表す。
 図中の破線は断層推定位置を示す。

Audio frequency Magnetotelluric surveys at the Hijima Fault, the Yamasaki fault system

Satoru Yamaguchi
Yasuo Ogawa
Naoto Ujihara
Kiyoshi Fujita
Hiroo Inokuchi
Naoto Oshiman
Katsuhiko Ishibashi

Abstract

Audio-magnetotelluric (AMT) surveys were carried out to investigate the electrical conductivity structure beneath the Hijima fault. This fault is one of the major segments of the Yamasaki fault system which is the representative major active fault in southwestern Japan. We made a north-south trending profile across the Hijima fault. AMT observations were made at ten points along the profile. Good quality data were obtained in the period range between 10400Hz and 10Hz. Two-dimensional resistivity model was determined by the two-dimensional inversion method. The resistivity model is characterized a conductive zone along the surface trace of the fault (FZC) on the regional resistivity structure which is decided by regional geological structure. This study verified that the AMT method is useful to survey a subsurface resistivity structure of the Yamasaki fault system, even though it is located in the area where moderately high artificial electromagnetic noise from the highly populated cities (Himeji, Kobe) is expected.