

山崎断層帯大原断層東端部および土万断層の地下比抵抗構造

小田佑介¹, 山口 覚², 窪田高宏², 村上英記³, 加藤茂弘⁴, 上嶋 誠⁵

¹大阪市立大学理学部, ²大阪市立大学大学院理学研究科, ³高知大・自然科学系・理学部門,
⁴兵庫県立人と自然の博物館, ⁵東京大学地震研究所

Electrical resistivity structure beneath the Hijima fault and the area to the eastern end of the Ohara fault, Yamasaki fault system, southwest Japan

Yusuke Oda¹, Satoru Yamaguchi², Takahiro Kubota², Hideki Murakami³,
Shigehiro Kato⁴, Makoto Uyeshima⁵

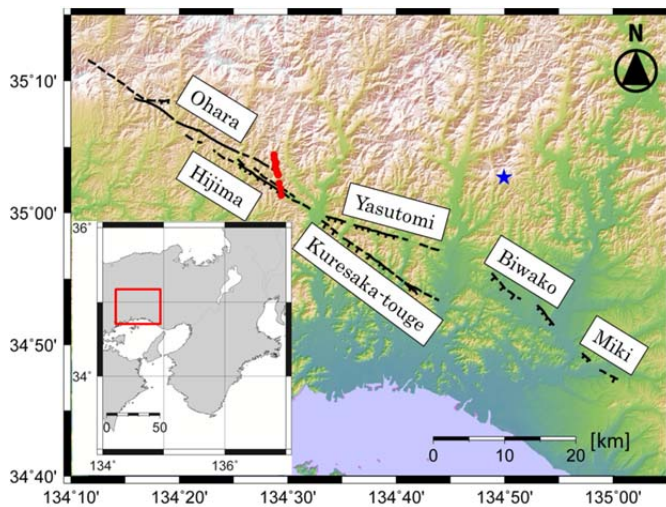
¹Geosciences, Osaka City Univ., ²Geosciences, Graduate School of Osaka City Univ., ³Natural
Sciences Cluster-Science Unit, Kochi Univ., ⁴Hyogo Museum of Nature and Human Activities,
⁵ERI, University of Tokyo

—Abstract—

A surface fault trace may not always show faithfully subsurface fault structure. An area near the end of a surface fault trace is the key area to clarify relationship between a surface trace and subsurface structure of a fault. We report the result of Audio-frequency Magnetotelluric (AMT) survey at 11 stations along a transect of 6km laid across near the eastern end of the Ohara fault. The data were subjected to dimensionality analysis, following which two-dimensional inversion for the TE and TM modes were carried out. This model is characterized by (1) a moderately resistive zone being deeper than 1.4km beneath the area between two surface fault traces, (2) highly conductive zone beneath the surface trace of the Hijima fault, and (3) characteristic pair of resistive and conductive zones beneath the area to the eastern end of the Ohara fault. A moderately resistive zone between fault traces is interpreted to be unfractured area, therefore the Ohara and Hijima faults are not connected each other at least to the depth. Highly conductive zone is interpreted to be common feature of the Hijima fault as similar zones have been found along two transect across the Hijima fault. Characteristic pair of resistive and conductive zones has been found in the two resistivity models along the transect across the Ohara fault. This pair may be feature of the Ohara fault. Though the surface trace of the Ohara fault is not clear in the area of our survey, the subsurface resistive structure shows existence of the Ohara fault, here.

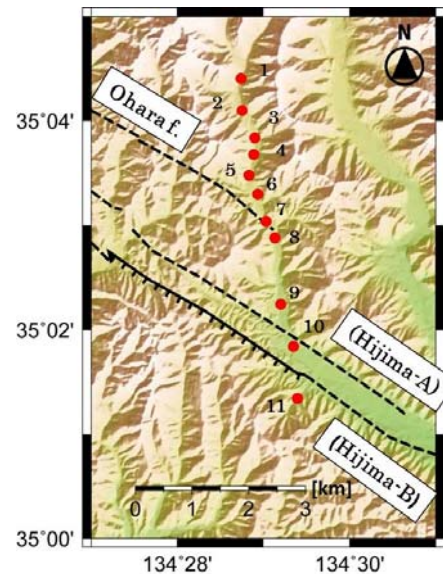
1. はじめに

山崎断層帯は、那岐山断層、山崎断層帯主部、草谷断層からなる西南日本を代表する活断層帯である。山崎断層帯主部は大原断層、土万断層、安富断層、暮坂峠断層からなる北西部活断層群と、琵琶甲断層、三木断層からなる南東部活断層群に区分される(第1図)。この断層で発生する地震の推定最大マグニチュードは北西部で7.7、南東部で7.3である(地震調査委員会, 2003)。このような評価は断層の地表形態、トレンチなどを基に推定されているが、断層の地表形態が地下の形状を忠実に反映しているとは限らないと考えられる。そこで、本研究では、特に、地表ではその形状が不明瞭である断層セグメント末端付近に注目して、地磁気地電流法(Magnetotelluric法)を用いて地下構造を明らかにした。具体的には、山崎断層帯大原断層東端付近および地表トレースの明瞭な土万断層を横切る1本の測線を設け、地磁気地電流法の一つであるAudio-frequency Magnetotelluric (AMT) 探査を行った。



第1図 山崎断層帯主部の位置と観測点分布

Fig.1 Location of the main part of Yamasaki Fault System and our observation stations
Red dots denote AMT observation stations and blue star denotes the remote site.



第2図 観測点周辺の断層の分布

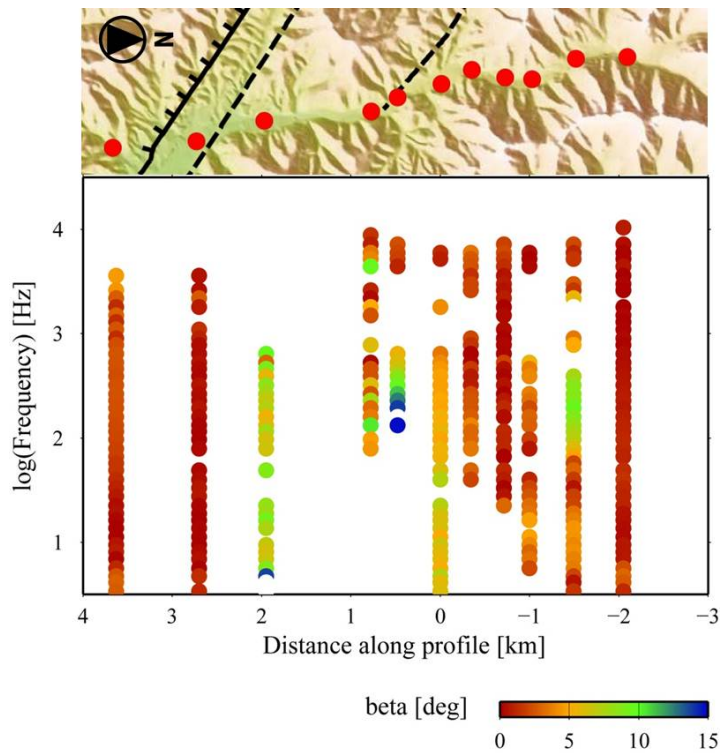
Fig.2 Surface fault traces in our study area.
Surface fault trace of the Ohara fault. A clear fault trace of the Hijima fault (Hijima-B) and another unclear surface fault trace (Hijima-A). Red dots show AMT observation stations.

2. 観測

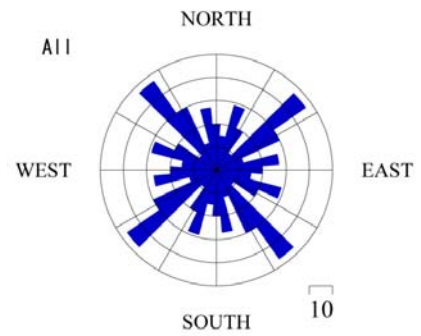
山崎断層帯大原断層東端付近の地表トレースが曖昧になっている領域および併走する2つのセグメント(本稿では北側のセグメントを Hijima-A, 南側のセグメントを Hijima-B と呼ぶ)からなる土万断層を横切る全長およそ6kmの測線 OHE を設定した. この測線上に11観測点(北から順に site1, site2, ..., site11 とする)を設け, 2012年11月にAMT探査を行った(第2図). その際, Remote reference 処理を行うために磁場参照点を兵庫県市川町笠形山の山中に設置し磁場2成分を測定した. また, Audio-frequency 帯の磁場変動は夜間の方が大きい(Garcia and Jones, 2002) 事と, 夜間の方が人工的なノイズが小さい事から, 観測装置を昼間に設置し, 夜間に測定を行った(ただし, 一部の観測点を除く).

3. データ解析

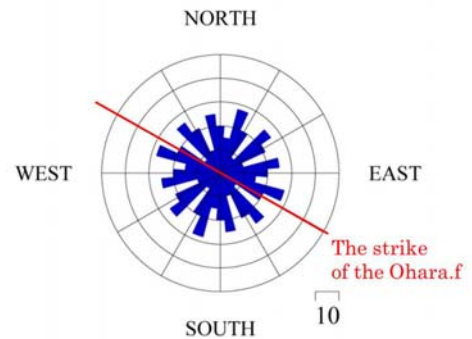
観測で得られたデータから解析ソフトウェアパッケージ SSMT2000 (Phoenix 社, カナダ) を用いて, 10,400Hz~0.35Hz の MT 応答関数を算出した. 算出された MT 応答関数から信頼度の低いいくつかの周波数帯域のものを除外し, Phase Tensor 法 (Caldwell et al., 2004) を用いて Distortion 解析を行った. Phase Tensor 法に基づき算出された, すべての観測点における Skew angle (β) (第3図) によると, 大原断層東端付近では β の値が大きく, 3次元であるが, それらを除くほとんどの点では β が 5° 以内であることから大局的には2次元構造であると判断した. 次に, Regional strike (α) の分布から, 比抵抗構造の走向を判定した. すべての観測点の β の値が 3° 以下の MT 応答関数から算出した α の分布 (第4図) によると, $N45^\circ E-S45^\circ W$, $N45^\circ W-S45^\circ E$ が卓越した. しかし, これは観測点1点 (site10) の影響が非常に大きく, 大局的な比抵抗構造の走向を反映していないと判断された. そのため, その観測点を除いて, 再度, α の分布を調べた (第5図) が, 明確な卓越方向がみられなかった. そこで, 比抵抗構造の走向方向を, 本研究で注目した大原断層と土万断層の走向方向である $N60^\circ W-S60^\circ E$ と仮定した. これは, 第5図において $N65^\circ W-S65^\circ E$ がわずかに卓越していることから, α の分布と矛盾しないと判断した.



第3図 すべての観測点における Skew angle (β)
Fig.3 β -frequency section along the model profile.



第4図 すべての観測点における α の分布
Fig.4 Rose diagram showing regional strike calculated from MT responses of all stations.



第5図 site10を除いた場合の α の分布
Fig.5 Rose diagram showing regional strike calculated from MT responses except site10. Red line indicates the strike of the Ohara fault.

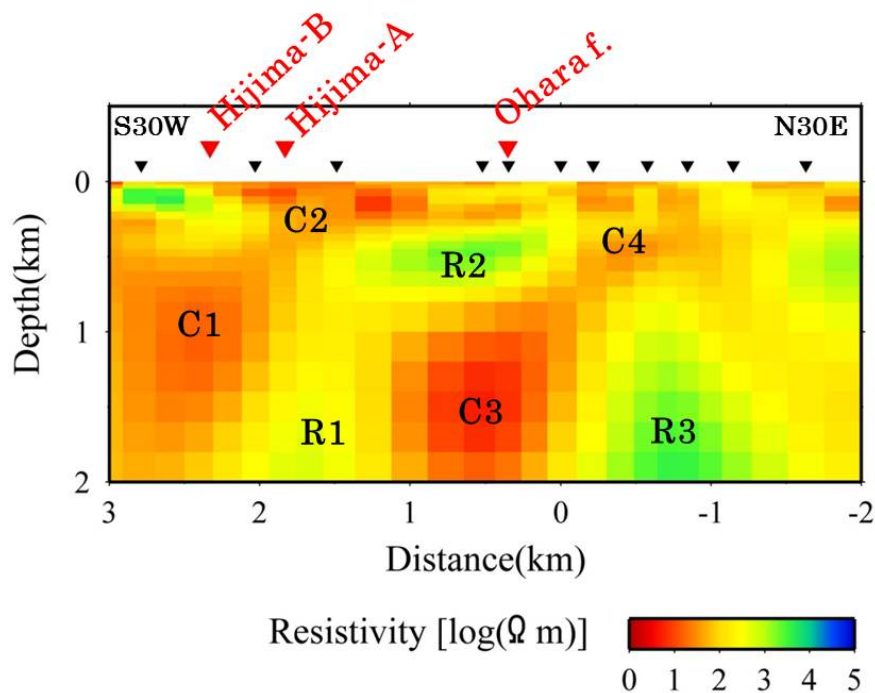
第

4. モデル解析

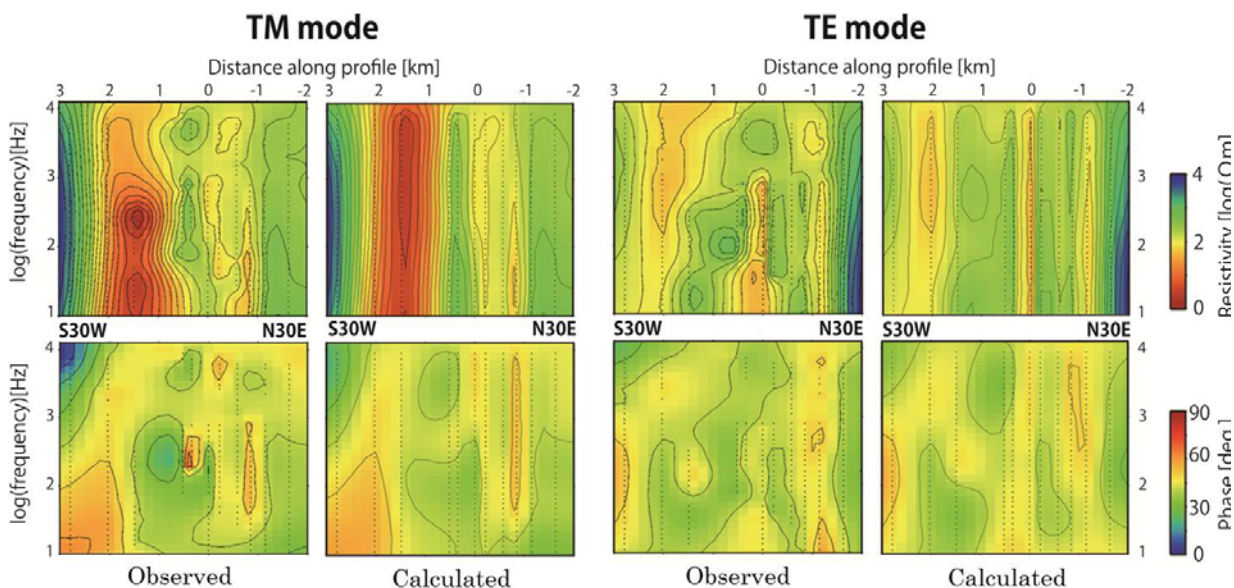
比抵抗構造の走向が大原断層の走向に平行であるという仮定のもと、大原断層と直交する直線 (N30°E-S30°W) において、Ogawa and Uchida (1996)の平滑化拘束付き2次元比抵抗構造インバージョンプログラムを用いて、2次元比抵抗モデルを推定した。その際、初期比抵抗値を100Ωm一様とし、見かけ比抵抗のエラーの最小値を5%、位相差のエラーの最小値を1.43°とした。そして、60回の反復計算を行った結果、8回目に、RMSが1.92で最小値をとり、そのモデルを本研究の最適比抵抗モデル（以降、OHEモデルと呼ぶ）とした（第6図）。第7図に、観測値から算出されたTE、TMモードのMT応答関数から作成した疑似断面と推定されたモデルから計算されたMT応答関数から作成した疑似断面を示す。

OHEモデルは次の7つの領域で特徴づけられる。

1. Hijima-Aの地表トレス直下から南下方に広がる低比抵抗領域 C1 (<30Ωm)
2. Hijima-Aの地表トレス直下の地表付近に存在する低比抵抗領域 C2 (<30Ωm)
3. 大原断層東端の直下の深さ0.9km以深に存在する低比抵抗領域 C3 (<30Ωm)
4. 大原断層東端の北側約1kmの0.6km以浅に存在するやや低比抵抗な領域 C4 (<100Ωm)
5. 土万断層と大原断層東端の間の深さ1.4km以深に存在するやや高比抵抗な領域 R1 (300~1000Ωm)
6. 大原断層東端の直下から南に約1.5kmにかけて、深さ0.3~0.9kmに存在する高比抵抗領域 R2 (>1000Ωm)
7. 大原断層東端の北側約1kmの深さ1km以深に存在する高比抵抗領域 R3 (>1000Ωm)



第 6 図 2次元比抵抗モデル (OHE モデル)
 Fig.6 Optimum two-dimensional resistivity model (OHE model).



第 7 図 観測値とモデル計算値の MT 応答関数の疑似断面
 Fig.7 Pseudo sections of observed and calculated apparent resistivity and phase for TE and TM modes.

5. 考察

5.1. OHE モデルの解釈

(1) 土万断層の地下比抵抗構造

土万断層の地表トレースの地下には地表付近に低比抵抗領域 C2 が、地表トレース直下から南下方にかけて低比抵抗領域 C1 が存在する。これらは、土万断層のダメージゾーンに水が浸入したことによって低比抵抗になったものと解釈した。

(2)大原断層と土万断層の間の地下比抵抗構造

土万断層の破碎によって生じた低比抵抗領域 C1 の北にやや高比抵抗な領域 R1 が存在する。これは、大原断層と土万断層の間の断層運動によって破碎されていない領域と判断され、大原断層と土万断層は少なくとも地下 2km までは繋がっていないと推定される。

(3)大原断層東端の地下比抵抗構造

大原断層東端の地表位置の地下には、浅部に高比抵抗領域 R2 が、深部に低比抵抗領域 C3 が存在する。この低比抵抗領域 C3 は大原断層のダメージゾーンに水が浸入したことによるものと考えられるが、その北端は大原断層の地表位置よりおよそ 300m 北に位置している。

5.2. 先行研究との比較

大原断層および土万断層全体の特徴を捉える為に、本研究の観測測線より西の比抵抗構造に関する研究である上田 (2011) の OHR モデルと OHJ モデル、および Yamaguchi et al. (2010) の HJM モデルとの比較を行った。第 8 図にそれぞれの観測点の分布を、第 9 図にそれぞれの 2 次元比抵抗モデルを示す。

OHJ モデル、HJM モデルおよび本研究の OHE モデルにおいて、土万断層の地表位置の南側に低比抵抗領域が共通して存在する。これより、土万断層は、断層地表トレースの南側に走向に沿って連続した低比抵抗帯で特徴づけられることがわかった。

OHR モデル、OHJ モデルと OHE モデルにおいて、大原断層の地表位置の地下に、浅部に高比抵抗領域と深部に低比抵抗領域が対となって存在する。OHJ モデルと OHE モデルの間に位置する HJM モデルでは、大原断層の地表トレースが存在するとされる位置にはこの比抵抗領域の組は見出されていない。これは、この付近の観測点の間隔が広く、十分に解像されていないためと推定される。この浅部の高比抵抗領域と深部の低比抵抗領域の組を大原断層の地下比抵抗構造の特徴と判断した。本測線付近では地表トレースが曖昧になっているが、地下では、本測線より西側の断層地表トレースが明確な部分と同様の特徴を示すことから、少なくとも本測線付近までは大原断層が延伸していると推定される。

6. まとめ

山崎断層帯大原断層東端付近および土万断層を横切る測線において AMT 探査を行い、地下比抵抗構造を推定した。さらに、推定された比抵抗モデルに加え、山崎断層帯の地下比抵抗構造に関する研究 (Yamaguchi et al., 2010; 上田, 2011) も考慮し、以下のことが得られた。

- (1)大原断層と土万断層は少なくとも地下 2km までは繋がっていない。
- (2)土万断層の直下から南側に、走向に沿って連続した低比抵抗帯が存在する。
- (3)大原断層東端付近の曖昧になっている断層トレースの地下にも、大原断層に沿う特徴的な比抵抗領域の組み合わせがみられたことから、少なくとも本測線付近までは大原断層が延伸していると推定される。

謝辞

観測にあたり、観測機材を貸して下さった京都大学防災研究所、京都大学火山研究センター、北海道大学地震火山研究センターの各機関の方々に感謝いたします。また、快く土地の使用を許可して下さい下さった観測点の土地所有者の方々に對し、ここに感謝の意を表します。

なお、本研究は、東京大学地震研究所 国際・学際共同研究「地形学・地震学および地球電磁気学的手法を統合的に用いた断層地下構造の解明—地表から起震断層まで—」(2012-D-06) によって行った。

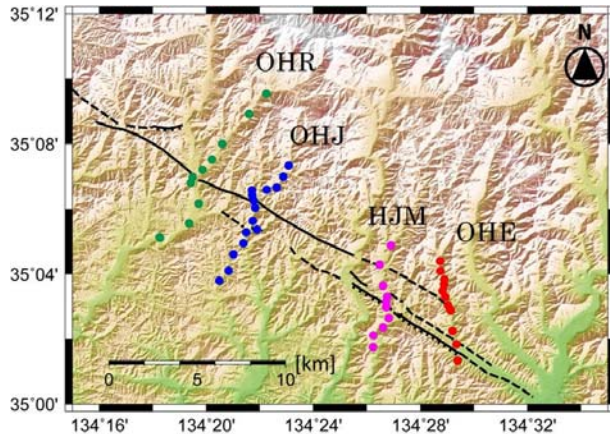
引用文献

- Caldwell G. T., H. M. Bibby, and C. Brown, 2004, The magnetotelluric phase tensor, *Geophysics. J. Int.*, 158, 457-469.
- Garcia X. and A. G. Jones, 2002, Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding, *Geophysics*, Vol.67, No.2, p.448-458.

Yamaguchi S., Y. Ogawa, K. Fujita, N. Ujihara, H. Inokuchi, and N. Oshiman, 2010, Audio-frequency magnetotelluric imaging of the Hijima fault Yamasaki fault system, southwest Japan, *Earth Planets Space*, p.401-410.

上田哲士, 2011, 山崎断層系の地下比抵抗構造の研究, 神戸大学大学院理学研究科修士論文, 77p.

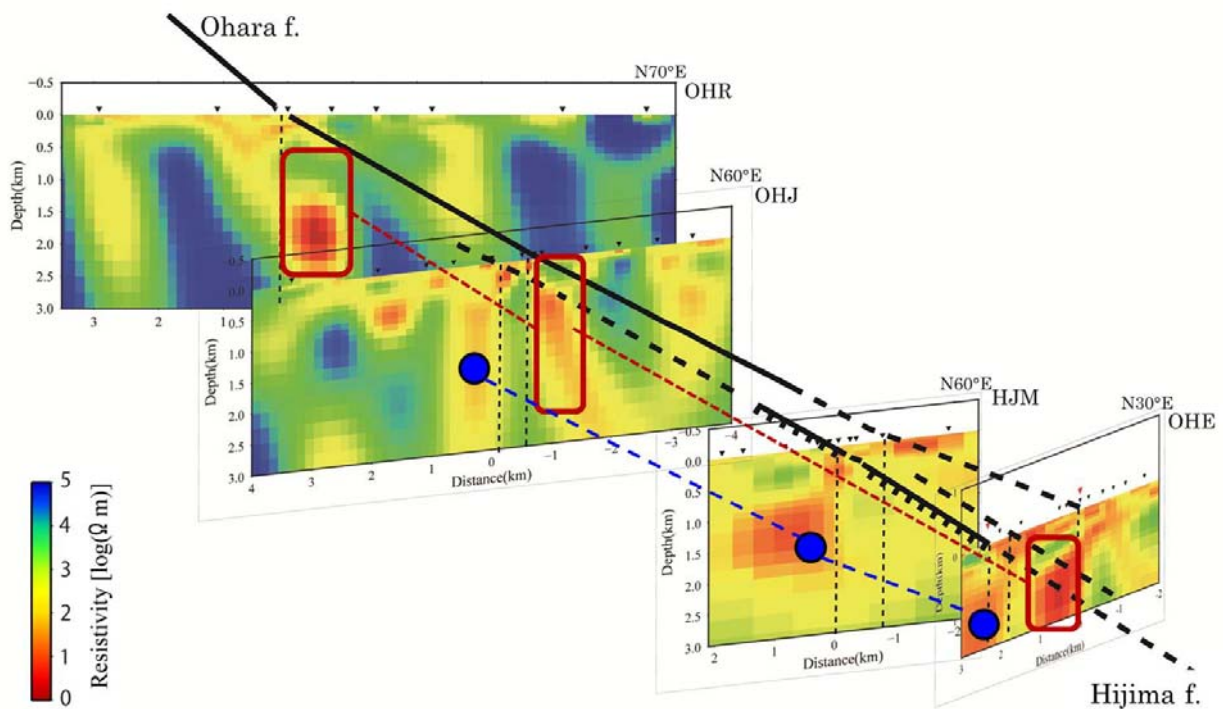
地震調査委員会, 2003, 山崎断層帯の長期評価について, 地震調査研究推進本部, 38p.



第 8 図 先行研究を含む 4 本の測線の観測点の分布

Fig.8 The distribution of observation sites of 4 lines.

OHR (green dots), OHJ (blue dots), HJM (purple dots) and OHE (red dots).



第 9 図 先行研究を含む 4 本の測線の地下比抵抗モデル

(青丸が土万断層に沿う低比抵抗領域, 赤枠内が大原断層の低比抵抗領域と高比抵抗領域の組み合わせを示す).

Fig.9 Two dimensional resistivity model along OHR, OHJ, HJM, and OHE lines.

Blue circles indicate highly conductive zones beneath the surface trace of the Hijima fault, and red squares indicate pairs of resistive and conductive zones beneath the surface trace of the Ohara fault.