

10. 丹那・浮橋断層の電気抵抗構造

活断層電磁気研究グループ*

(昭和 58 年 1 月 31 日受理)

要 旨

1979 年 10 月～11 月に、伊豆半島北部の丹那・浮橋断層およびその周辺地域において、地殻表層部の電気抵抗分布の調査を行なった。活断層の構造の特徴を明らかにするのが目的である。調査には、大きく分けて (a) 人工電位法と (b) 電磁誘導法を用いた。人工電位法では Schlumberger 法による垂直探査、および双極子法や傾度法による水平探査を実施した。電磁誘導法では、主として 17.4 kHz の人工電磁波を用いた水平探査 (VLF 探査) を行なった。

人工電位法では、電流電極の間隔を 2 km まで拡大して地中に電流を流し、電気抵抗分布を調べた。この方法で深さ 1 km までの比抵抗構造が明らかになった。これに対して、VLF 探査では、地下 15～50 m の範囲での電気抵抗水平分布が得られた。

この地域の地下構造の大きな特徴は、断層を境にして東と西とで電気抵抗分布が顕著に異なるということである。人工電流による傾度法の結果を見ても、VLF 探査の結果を見ても、得られた見かけ比抵抗は断層の東側で大きく、西側で小さい。Schlumberger 法による垂直探査結果をも考慮すると、断層の東側では約 10 m の厚さの高抵抗の表層に続いて、深さ数 10 m までは抵抗が低い、それより深部では 1 km 以上の深さまで抵抗が高いと推定される。これに対して断層の西側では、表層数 m は比較的抵抗が低く、それより数 10 m の深さまでは抵抗が高い。さらに深部では断層の東側とは対称的に抵抗が低くなっていると考えられる。

断層の直下では、丹那断層でも浮橋断層でも 1 km 以上の深さにわたって抵抗が低い。浮橋断層を横切る東西線上の VLF 探査では、断層を含む約 200 m の範囲で顕著な見かけ比抵抗の減少が見られた。

1. ま え が き

活断層電磁気研究グループでは、活断層の電磁氣的構造を解明する目的で、全国の断層から典型的な活断層を選んで集中的な調査研究を実施してきた。1975 年から数年間は兵庫県の山崎断層について総合的な電磁気調査を行なった。山崎断層は西北西-東南東方向

* 活断層電磁気研究グループ

研究代表者 秋田大学鉱山学部 乗富一雄

共同研究者

秋田大学鉱山学部 上田康熙・高橋利昌

弘前大学理学部 鍋谷祐夫・河野良二・白石勇一

東北工業大学 瀬戸正弘・早坂 孝

東京大学地震研究所 行武 毅・吉野登志男・歌田久司・笹井洋一・石川良宣・本蔵義守 (現在東京工業大学)・小山 茂

東京大学理学部 当舍利行・日置幸介

気象庁地磁気観測所 河村 謙 (現在気象庁観測部)・大地 洗・外谷 健

名古屋大学理学部 水谷 仁・村上英紀 (現在高知大学)

京都大学教養部 住友則彦・半田 駿 (現在佐賀大学)

京都大学理学部 田中良和

鳥取大学教養部 宮腰潤一郎

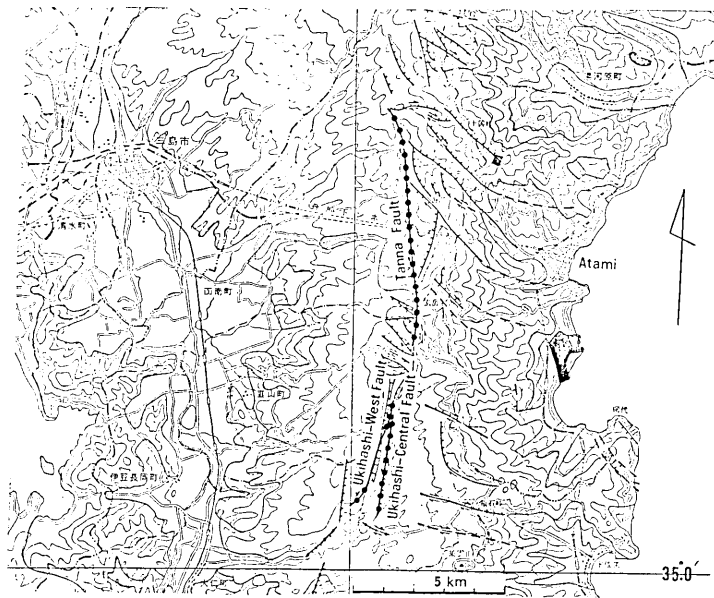


Fig. 1. Locations of the faults.⁹⁾

に約 80 km に及ぶ、水平左横ずれ断層である。調査の結果、断層に沿って電気抵抗の低い地域が続いていることが明らかになった⁹⁾。断層破砕帯に地下水が浸透してこの低比抵抗帯を形作っていると考えられ、電気抵抗分布が断層破砕度と密接に関係していると推定される。

断層構造を調べる目的で、同じく水平横ずれ断層である伊豆半島の丹那・浮橋断層について電気抵抗分布の調査を行なったので、ここではその結果について報告する。

丹那・浮橋断層は伊豆半島北部に分布する北伊豆断層系と呼ばれる断層群に属する断層で²⁾、1930年11月26日に起ったマグニチュード7.0の北伊豆地震の際に顕著な水平横ずれ変位を起した断層として有名である。断層の走向は南北で東側が北に、西側が南にずれる左横ずれの変位を行なった。変位量は丹那断層で最大3.5 m、浮橋断層で最大2 mに達したといわれる^{2), 3)}。国土地理院による三角測量結果を見ると、この水平左ずれの変位は地震後も継続しており、1933年から1977年の44年間に断層付近で約20 cmの相対変位が観測されている⁴⁾。この水平横ずれの動きは少くとも過去50万年前から続いていると推測される^{5), 6)}。約50万年前に噴出したと推定される多賀・湯河原火山の熔岩や火山噴出物の分布に、断層を境に東と西で約1 kmのくい違いが見られる。単純に平均すると、1000年間で約2 mの変位をしてきたことになる。また国鉄の丹那トンネル内でも断層が認められることから、丹那断層は地表から少くとも160 m以上の深さまで存在すること、断層面は西へ約80°傾斜していることが確かめられている。このような水平横ずれの断層構造が、電気抵抗分布にどのように反映されているかを調べるのが、本研究のひとつの目的である。

2. 測定地域と観測方法

1979年10月24日から11月2日までの期間、総勢28名の参加者が協力して、Fig. 1に示す丹那断層および浮橋断層と、その周辺地域において電気抵抗分布の調査を行なった。大別して二通りの調査を実施した。ひとつは、電気抵抗の鉛直分布を調べる垂直探査であり、他は水平方向の分布を調べる水平探査である。測定方法としては、人工的に制御された電流を地中に流して、地表面で電位差を測定し電気抵抗を求める人工電位法と、比較的周波数の高い電磁場の变化を測定して電気抵抗を求める電磁誘導法とを用いた。

人工電位法に用いた送信機は、Scintrex社製I. P. Transmitter IPC-7 (15 kW) と横浜電子研究所製の強制分極式送信器 G-5004-A (2 kW) とである。いずれの場合も、電極の分極を避けるために、地中に流す電流の極性を一定の時間間隔で反転している。IPC-7 (15 kW) では、電流は正-零-負-零と切り換えられて1サイクルを構成する。それぞれの時間間隔は一定で、この実験では、通常8秒で観測した。このように比較的長時間、同一極性で一定電流を流したのは、直流抵抗を求めるのが目的だからである。場所によっては4秒、2秒という短い時間間隔で行なったところもある。これに対して、G-5004-A (2 kW) では、正-負だけの反転を行ないそれぞれ5秒間流し、10秒で1サイクルとなる矩形波状の電流を用いた。

電流電極にはステンレス・スチール棒を、電位電極には分極の少ない銅-硫酸銅電極を使用した。電流電極として使用したステンレス・スチール棒は、1本が直径8 mm長さ80 cmである。接地抵抗を下げるために、1か所数10本のステンレス・スチール棒を数m四方に打ち込んだ。電位電極は、直径7.5 cmのプラスチック円筒の底に厚地の布を張って、硫酸銅液を満たし、中に銅電極を浸したものである。地表を平らに整え、円筒底の布地を地面に密接させ、正負各1個の電極を対として測定した。

電磁誘導法としては、愛知県依佐見より放射される17.4 kHzの電波を受信し、地表での電磁波を測定して見かけ比抵抗の水平分布を調査した。利用した周波数から、この方法をVLF (Very Low Frequency) 探査と呼ぶことにする。この他ELF (Extremely Low Frequency) 周波数帯の8~20 Hzの自然電磁場変化の測定をも実施する計画であったが、観測地域の近傍を走る国鉄や私鉄の電車からの漏洩電流による擾乱が著しく、この周波数帯の測定を行なうことはできなかった。

VLF探査法にはGeonics社製のEM-16Rを使用した。電波の到来方向に垂直な水平磁場成分と、地表面での電波到来方向の電場成分とを同時に測定して、見かけ比抵抗および電場と磁場との位相差を算出した。EM-16Rには磁場測定の検出器としてはフェライト芯のコイルが使用されている。電場の測定にはステンレス・スチール電極を電波の到来方向に約10 m離して地中に打ち込み、その間の電位差を測定する。

この他にも、誘導磁力計による地磁気脈動の観測や、フラックスゲイト型磁力計によって人工電流の作る磁場の測定なども実施した。

3. 電気抵抗垂直探査

鉛直方向の電気抵抗分布を調べるのに、人工電位法を用いた。電極配置はSchlumberger法に依った。Fig. 2に垂直探査を実施した位置を示す。実線は電極配置に利用した道路で、両端の黒丸が電極間隔を最大限に拡大したときの電流電極の位置である。TA1は丹

那盆地内で丹那断層に沿って電極間隔を拡げていったもので、断層面内に電流を流し込んだ測定である。これに対し TC1, TC4 はそれぞれ丹那盆地内、および丹那断層南端において、断層と直交して電流電極を配置した測定である。浮橋断層に沿って電極を配置したのが TA2 であり、電流電極の間隔を最大 4 km まで拡大した。TC2, TB2 は断層の東側の構造を知るために行なった測定で、TB1 は断層の西側の構造の調査が狙いである。これら垂直探査の結果は、Fig. 2 に柱状図の形で示してあるが、以下に個々の測定結果についてその概略を記述する。

3-1. 丹那断層

TC1

丹那盆地の中央の断層上に中心点を設け、断層と直交する東西方向に電極を配置した。電流電極を A, B とすると、間隔 $AB/2$ を最大 800 m まで拡大した。使用した送信機は G-5004-A で電極間隔 $AB/2$ が 800 m のとき 1.5 A の電流を地中に流した。見かけ比抵抗 ρ と $AB/2$ との関係を図示したのが Fig. 3(a) である。3 層モデルを仮定して、測定に最もよく適合するよう各層の比抵抗と境界面の深さを求めた結果が、図の下の方に横向き柱状図の形で示してある。この場合横軸は深さを表す。このモデルについて得られる見かけ比抵抗と $AB/2$ との関係が図中に実線で示されている。電気抵抗が低いのが特徴である。表層約 4 m はおよそ $35 \Omega\text{-m}$ であるが、深さ 4 m から 25 m までの第 2 層は僅か $15 \Omega\text{-m}$ という低い比抵抗を示す。25 m 以深の第 3 層は第 2 層に比べていくらか

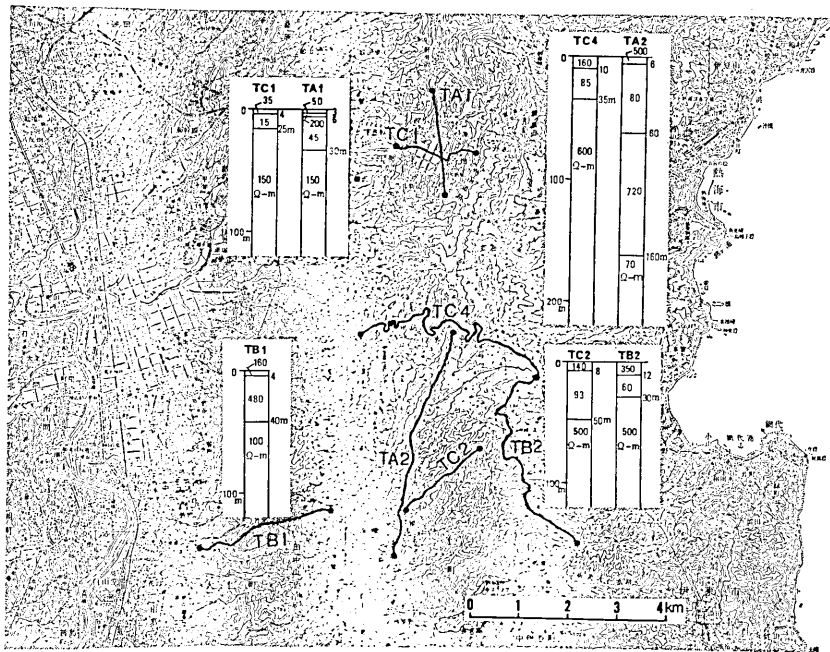


Fig. 2. Locations of the vertical electric soundings and their results. Soundings were made by Schlumberger electrode arrangements. Solid lines are roads along which current electrodes were extended, and solid circles indicate the locations of the current electrodes of the maximum separation.

高比抵抗であるが、それでも $150 \Omega\text{-m}$ に過ぎない。この第 3 層は 1000 m 以上の深さまで続いている。

TA1

丹那盆地の中央の断層上に中心点を設け、断層沿いに電極を配置し、 $AB/2$ を最大 1 km まで拡げた。使用した送信機は G-5004-A で、電極間隔最大するとき 1.2 A の電流を流した。見かけ比抵抗 ρ と電極間隔 $AB/2$ との関係を Fig. 3(b) に示す。 $AB/2$ が 10 m で見かけ比抵抗に極大が現れるので、4 層モデルを仮定して、各層の比抵抗と深さを求めた。結果は図の下部に横軸に深さをとって示されている。第 2 層に $200 \Omega\text{-m}$ と比較的高比抵抗が現れる。しかし第 3 層の比抵抗は低く、 $45 \Omega\text{-m}$ である。第 4 層はおおよそ 35 m の深さから始まり、少くとも 1 km 以上の深さまで続く。この層の比抵抗は、TC1 の第 3 層と同じく $150 \Omega\text{-m}$ である。

TC4

富士見パークウェイ沿いに、 $AB/2$ を 2 km まで延長した。使用した送信機は IPC-7 (15 kW) で、 $AB/2$ が 2 km の地点で 4.8 A の電流を流した。中心点を断層上と推定されるところに設置したが、後述するように、結果から判断すると断層面より若干東側に中心点を置いたらしい。

見かけ比抵抗と電極間隔の関係を Fig. 3(c) に示す。結果がぎくしゃくしているのは、測定に利用した道路に屈曲が多く、測線を直線状にとれなかったためである。一応 3 層構造を仮定して、各層の比抵抗と深さを求めた。結果は図の中に柱状図の形で示してある。第 2 層が 10 m から 35 m の深さで、 $85 \Omega\text{-m}$ と低い比抵抗を示す。 35 m より深い部分は少くとも 3 km の深さまで $600 \Omega\text{-m}$ とやや高い比抵抗となっている。

3-2. 浮橋断層

TA2

浮橋断層上に中心点を置き、断層沿いに $AB/2$ を 2 km まで拡げた。使用した送信機は IPC-7 (15 kW) で、最大の電流電極間隔のときの電流値は 5.2 A であった。

Fig. 3(d) に見かけ比抵抗と電流電極間隔の関係を示す。 $AB/2$ が $50\sim 70 \text{ m}$ で見かけ比抵抗に極小が、 $AB/2$ が 300 m で極大が現れる。4 層構造を仮定して、各層の比抵抗と深さを求めたのが同図の中の横向きの柱状図である。第 2 層は $80 \Omega\text{-m}$ と低比抵抗であるが、おおよそ 60 m の深さから $720 \Omega\text{-m}$ の高比抵抗層が現れる。しかし、 160 m の深さになると再び $70 \Omega\text{-m}$ の低比抵抗となり少くとも 2 km の深さまで続く。

3-3. 浮橋断層東側地域

TB2

伊豆半島北部で南北に連なる山脈の尾根沿いに有料自動車道路伊豆スカイラインが走っている。この道路沿いに 2 組の垂直探査を実施した。ひとつは $AB/2$ が最大 500 m までの小スパンの実験で、もうひとつは $AB/2$ が $300\sim 1500 \text{ m}$ の大スパンの実験である。小スパンと大スパンでは、電極の中心部の位置が異なる。大スパンの中心は、Fig. 2 に示した TB2 の最大 AB 間隔点の中央部に置いたが、小スパンでは、TB2 測線の南端から北西に直線上に延びる道路沿いに実験を行ない、直線部分の中央を中心点とした。使用した送信機は IPC-7 (15 kW) で、小スパン実験で最大 1.2 A の電流を、大スパンでは最大 2.0 A の電流を流した。

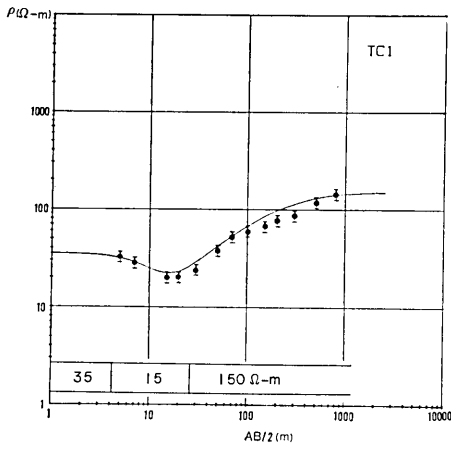


Fig. 3(a). TC1

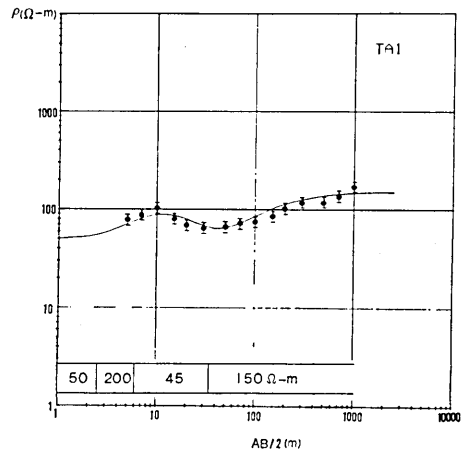


Fig. 3(b). TA1

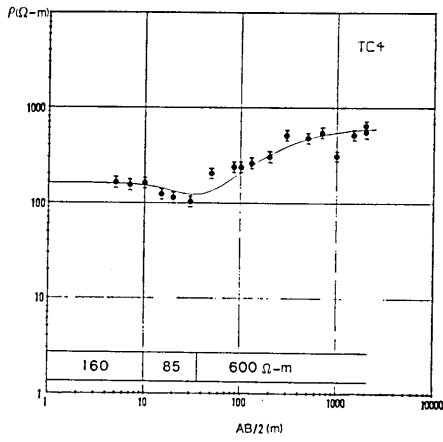


Fig. 3(c). TC4

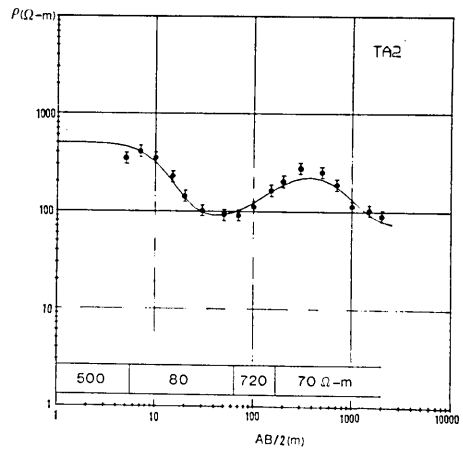


Fig. 3(d). TA2

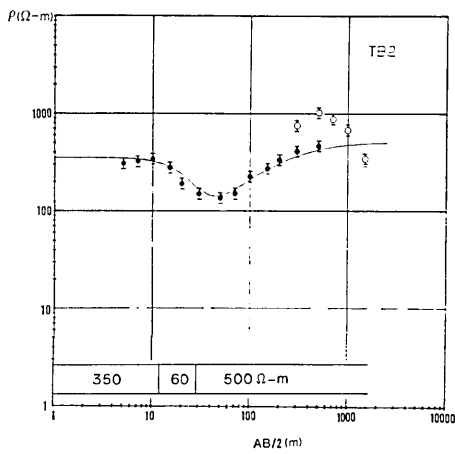


Fig. 3(e). TB2

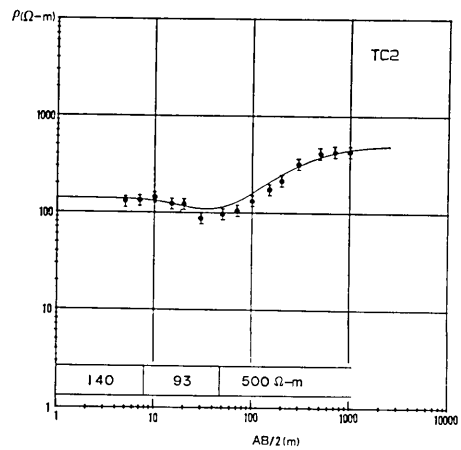


Fig. 3(f). TC2

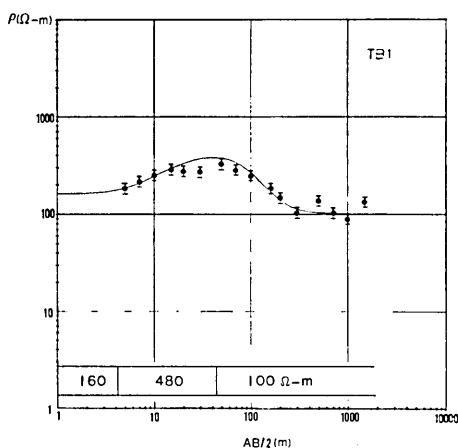


Fig. 3(g). TB1

Fig. 3. Results of vertical soundings at the sites shown in Fig. 2. Apparent resistivities (ρ) are plotted against $AB/2$, where AB is the distance between the current electrodes. Solid lines are curves of ρ against $AB/2$ computed from the best fit models shown in the lower part of each diagram.

Fig. 3(e) に得られた結果を示す。大スパンの実験と小スパンの実験とで結果が多少異なる。黒丸が小スパンの実験の結果で、白丸が大スパンの実験結果である。大スパンの実験では道路が曲りくねっているため測線が直線状にとれなかったが、このことが結果に影響しているとも考えられる。ここでは小スパン実験を主体として解析を進め、大スパンの実験結果は解析の参考にするにとどめた。

3層構造を仮定して解析すると、第2層が $60 \Omega\text{-m}$ と抵抗が低い。この層は深さが 11 m から 30 m までおよそ 20 m の厚さになる。第3層は $500 \Omega\text{-m}$ と高比抵抗で、30 m の深さから少なくとも 500 m の深さまで続いている。大スパンの結果を見ると、深さ 500 m 以上で見かけ比抵抗が減少しており、深部は再び低比抵抗となっている可能性がある。

TC2

TB2 の測定を行なった山地と断層の走る浮橋盆地の中間地域で垂直探査 TC2 を実施した。 $AB/2$ を最大 1000 m まで拡大した。使用した送信機は IPC-7 (15 kW) で、最大 1.4 A の電流を流した。

Fig. 3(f) にその結果を示す。電流電極間隔を拡げてゆくと、 $AB/2$ が 30 m で見かけ比抵抗は極小となり、それ以後 $AB/2$ 1000 m まで見かけ比抵抗が増加する。3層構造を仮定すると、第2層は $93 \Omega\text{-m}$ 、第3層は $500 \Omega\text{-m}$ という結果が得られる。第2層はおよそ 8 m の深さから 50 m までで、第3層の高比抵抗層は 50 m の深さから 1000 m 以上まで続いていると考えられる。この結果は、TC4 や TB2 の測定で得られた比抵抗構造と似ている。

3-4. 浮橋断層西側地域

TB1

浮橋断層の西側の丘陵地帯で、東北東-西南西方向に測線をとって、垂直探査を実施した。 $AB/2$ を最大 1500 m まで拡大した。使用した送信機は G-5004-A (2 kW) で、周期 10 秒の矩形波電流を最大 2.0 A まで地中に流した。

結果は Fig. 3(g) に示す通りである。電流電極を拡大してゆくと、断層東側の測定と違って、途中で見かけ比抵抗の極大が現れる。3層構造を仮定して構造を求めると、断層

の東側とは逆に、第 2 層が高比抵抗で、第 3 層が比較的 low 比抵抗である。得られた比抵抗値は、Fig. 3(g) にみられるように、それぞれ $480 \Omega\text{-m}$ 、 $100 \Omega\text{-m}$ である。第 2 層は 4~40 m の深さで、第 3 層の $100 \Omega\text{-m}$ 層は 40 m の深さから 1500 m 以深まで続く。

3-5. 垂直探査結果のまとめ

Schlumberger 法による垂直探査を実施した結果、丹那・浮橋断層の電気抵抗分布について、ふたつの特徴が明らかになった。ひとつは丹那断層中央部で 1 km 以上の深さまで比抵抗が低いことである。もうひとつは、丹那断層南端から浮橋断層地域で、断層を境界として東と西とで比抵抗垂直構造が明瞭に異なることである。

丹那断層の中央部では 2 組の垂直探査を行なった。ひとつは断層沿いに電流を流し、他は断層に直交して電流を流したものである。これらの結果は、Fig. 2 に柱状図の形で示してある。いずれの場合も 30 m より深い部分では、 $150 \Omega\text{-m}$ と比較的抵抗の低い岩石が、少なくとも 1000 m 位の深さまで続いている。その上部には TC1 の測定では $15 \Omega\text{-m}$ 、TA1 の場合は $45 \Omega\text{-m}$ の抵抗の低い層が存在する。TA1 ではその上に $200 \Omega\text{-m}$ のやや抵抗の高い、厚さ 3.5 m の層が現れるが、TC1 ではそのような層は認められない。この違いが何によるのか、その原因は、はっきりとはわからないが、水平方向の構造の不均質による可能性も考えられる。TA1 測線の東には測線の数 m のところから盆地内に取り残された形で小さな丘が残っている。この丘を構成している岩石は盆地内の地層に比べて緻密で安山岩の岩片等をも含み、抵抗は高いと推定される (松田, 私信 1982)。このような水平方向の構造の不均質さが、TA1 測定の結果に影響して、浅い部分に見かけ上高抵抗層が現れた可能性もある。この考えが正しいとすると、TC1 の結果の方が、断層直下の構造をよく表現しているといえる。表層 数 m を削ぎとると、厚さ 10 m 位の極めて抵抗の低い、 $15 \Omega\text{-m}$ の層があり、それより深い部分は $150 \Omega\text{-m}$ 程度のかかなり抵抗の低い層が 1 km 以上の深さまで続いている。深い部分については、TA1 の測定結果もまったく同じである。この付近の丘陵地では深部の抵抗値が数 $100 \Omega\text{-m}$ である。これと比較すると、丹那断層中央部では、1 km 以上の深さまで low 比抵抗であるといえる。

丹那断層南端から浮橋断層にかけての地域では、第 2 図に見られるように、5 か所で垂直探査を行なった。断層東側山地の測定 TB2、TC2 では、表層 8~12 m の下の第 2 層は $60\sim 90 \Omega\text{-m}$ と抵抗が低く、30~50 m から始まる第 3 層は、少なくとも 1 km の深さまで $500 \Omega\text{-m}$ と抵抗が高い。これに対して断層の西側の TB1 では、逆に第 2 層の抵抗が高く第 3 層が低い。第 2 層はおよそ 40 m の深さまで $480 \Omega\text{-m}$ の抵抗で、それより深い第 3 層は、およそ 1 km の深さまで約 $100 \Omega\text{-m}$ と比較的 low 比抵抗値をとる。丹那断層南端で断層を東西に横切る測線 TC4 上で行なった実験では、第 2 層が $85 \Omega\text{-m}$ 、第 3 層が $600 \Omega\text{-m}$ で、その抵抗値、層の厚さとも TC2 の結果と極めてよく一致している。電位差を測定した位置が地表における断層の推定位置から約 300 m 東へずれた位置にあったため、TC4 の結果は TC2 と同じく、断層東側の構造を反映しているのであろうと推定される。断層沿いに電流を流した TA2 の測定では、東側の構造と西側の構造の折衷型とでもいべき構造が得られた。第 2 層の抵抗が低く第 3 層が高いのは、東側の構造と似ているが、最下層が 160 m から 2 km 以上の深さにわたって $70 \Omega\text{-m}$ と low 比抵抗である点は、断層西側の構造と似ている。しかし、上部構造が断層東側の構造に似ているとはいっても、TC2 や TB2 で高抵抗の第 3 層は数 10 m の深さから 1 km 以上の厚さ

があるのに対し、断層沿いの TA2 では第 3 層に当る高抵抗層の厚さはおよそ 100 m しかない。したがって浮橋断層直下の電気抵抗分布は、全体としてみれば、丹那断層中央部と同じく、低比抵抗構造として特徴づけられる。

4. 電気抵抗水平探査

4-1. 丹那断層

丹那断層中央部の丹那盆地と丹那断層南端部において、VLF 法と人工電流を用いた傾度法により、断層を横切る東西方向の見かけ比抵抗分布を調べた。

(a) 丹那盆地における傾度法測定

丹那盆地の東と西から電流を地中に流し、盆地の中央部を西北西-東南東方向に走る 3 本の道路沿いに電位差を測定した。電極および測点配置を Fig. 4 に示す。大きな黒丸が電流電極の位置で、先に断層を横断する Schlumberger 配置によって垂直探査を実施した際 (TC1)、電流電極間隔を最大に拡大した地点である。電極間隔は 1600 m である。この電極を通して、5.8~5.9 A の電流を流した。使用した送信機は G-5004-A である。電位差測定には、電極として銅-硫酸銅電極を用い、電極間隔を 20 m にとった。Fig. 4 に示す盆地の中央部の 3 本の道路 N, C, S 沿いに 20 m 間隔で測定を行なった。

測定した電位差から、均質地下構造を仮定して計算した見かけ比抵抗を、N, C, S の測線それぞれについて Fig. 5 に示してある。C 測線中央部の矢印が、Schlumberger 電極配置による垂直探査 (TC1) を行なった際の電極の中心位置である。当然のことながら、この点での見かけ比抵抗値は、Schlumberger 配置で電流電極を最大に拡大した場合の見かけ比抵抗値と一致している。つまり Fig. 5 の傾度法により得られた見かけ比抵抗値は、垂直探査 TC1 の最深度 (柱状モデルでは第 3 層) の比抵抗を与える。Fig. 5 は Fig. 2 の柱状モデルでいえば 10 m 以深の第 3 層の比抵抗の北西-南東方向の分布を示すと見なせばよい。

Fig. 5 には、それぞれの測線上における断層を横線で示してある。中央測線 C では、断層を含み南東側では、見かけ比抵抗が 200 Ω -m を越す比較的高抵抗のところが多く、その分布はぎくしゃくして変動が大きい。これに対して、断層の北西側では約 140 m の範囲にわたって、100~200 Ω -m の比較の見かけ比抵抗値の揃った平坦な分布が広がる。この傾向は南側の測線 S でも明瞭に認められる。S 測線では断層は測線の南東の端に位置している。したがってこの測定の結果は、断層の北西側の構造を反映している。断層から北西約 400 m にかけては見かけ比抵抗は 100~200 Ω -m の範囲でほとんど平坦である。これら 3 測線の測定結果から断層を境にして、東側では比較的高比抵抗が現れ、高比抵抗と低比抵抗とが入り混じって複雑な分布をしているのに対し、断層の西側では、平坦な低比抵抗帯が続く、といえそうである。この丹那断層の特徴は、傾度法だけでなく、後に述べる VLF 法によっても確かめられた。これらの結果は、断層の東側で構造が不均質なことを示唆している。

Fig. 5 の C 測線で断層の北西側約 250 m, S 測線では断層の北西側約 500 m の地点に 50~60 Ω -m の低比抵抗が現れる。これらの点はちょうど小川を横切る点に当る。小川沿いに見かけ比抵抗の低い帯が走っているとみられる。この低比抵抗帯の原因としては、地中に埋設された人工構築物の可能性も否定できず、現在のところはっきりしない。

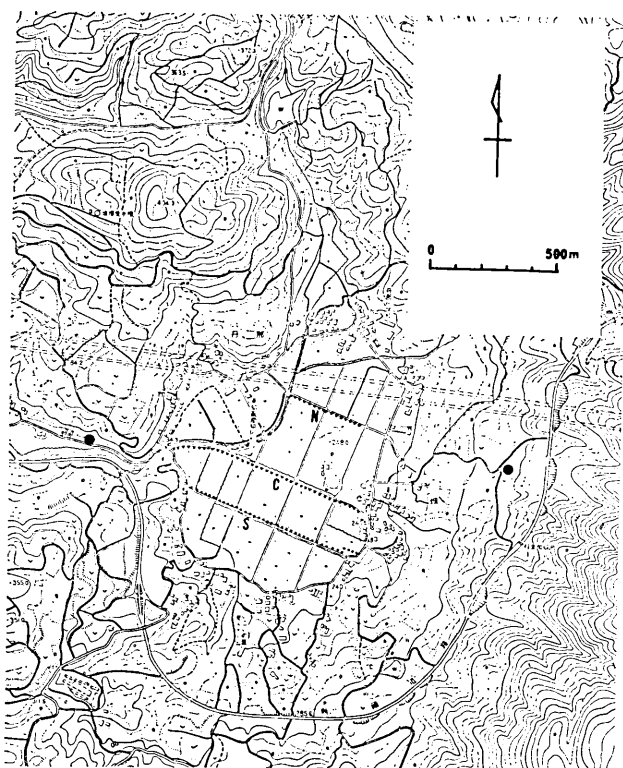


Fig. 4. Measuring points for the gradient method across the Tanna fault. The large circles are the locations of the current electrodes. Potential differences were measured along three survey lines, N, C and S. Small dots along the lines designate the measuring points.

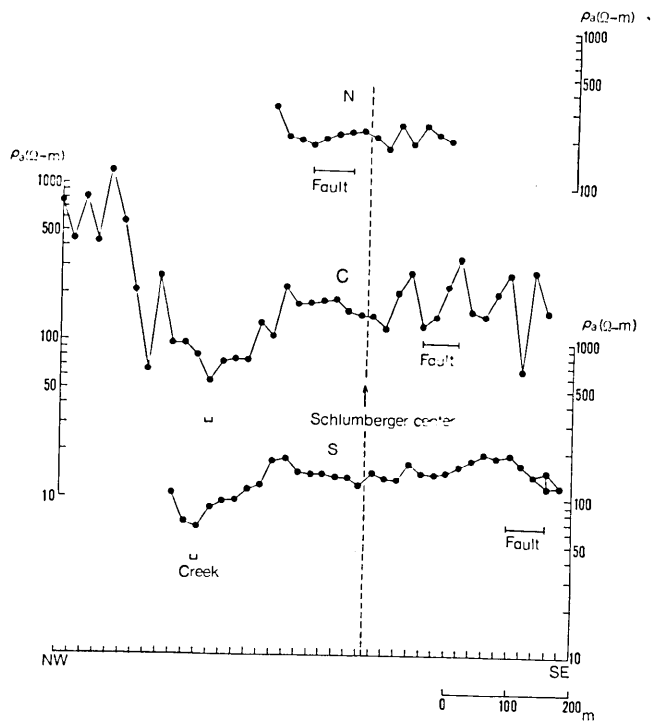


Fig. 5. Apparent resistivity profiles across the Tanna fault obtained by the gradient method.

C 測線をさらに北西にたどると、小川を越したあたりから急に見かけ比抵抗が増加し、 $1000 \Omega\text{-m}$ を越えるところも出てくる。この原因は、見かけ比抵抗の急激な増加は断層北西側の破碎帯の境界を示すものか、あるいは抵抗の高い基盤岩の盛り上りを示すものであろうと考えられる。

(b) VLF 法による見かけ比抵抗分布測定

Geonics 社製 EM-16R を用い、 17.4 kHz の電磁波を受信し、地表面での電場磁場の測定から見かけ比抵抗を求めた。Fig. 6 に丹那盆地内での VLF 測定点の分布を示す。

先に述べた Schlumberger 配置による垂直探査の結果 (TC1, TA1) を見ると、丹那盆地では表層近くで抵抗値は $15 \Omega\text{-m}$ と最低で、深部になると $150 \Omega\text{-m}$ となる。 17.4 kHz に対する表皮効果を考え、その浸透深度を計算すると、比抵抗 $15 \Omega\text{-m}$ の均質地殻に対して 15 m 、比抵抗 $150 \Omega\text{-m}$ に対して 47 m という値が得られる。したがって 17.4 kHz の電磁場変化を測定して求められる見かけ比抵抗は、深さにして $15\sim 50 \text{ m}$ までの範囲の地殻の比抵抗を反映していると推定される。

VLF 法測定によって得られた見かけ比抵抗を東西断面上に投影したのが Fig. 7 であ

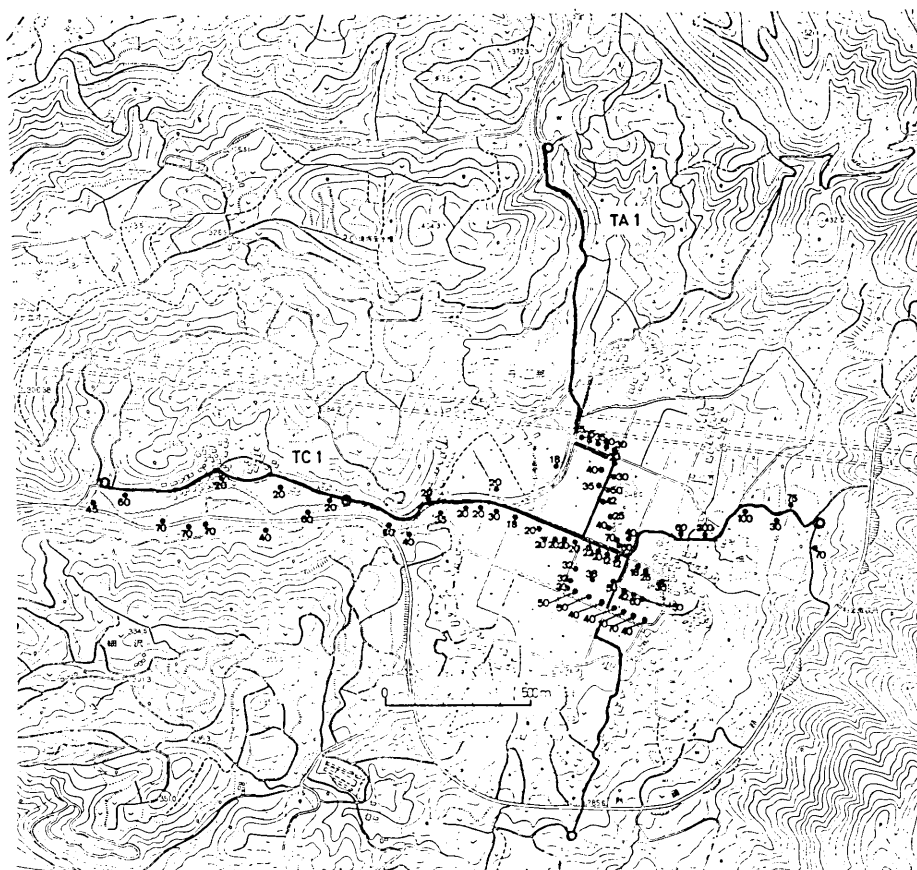


Fig. 6. Apparent resistivities (in $\Omega\text{-m}$) obtained by VLF measurements in the Tanna basin.

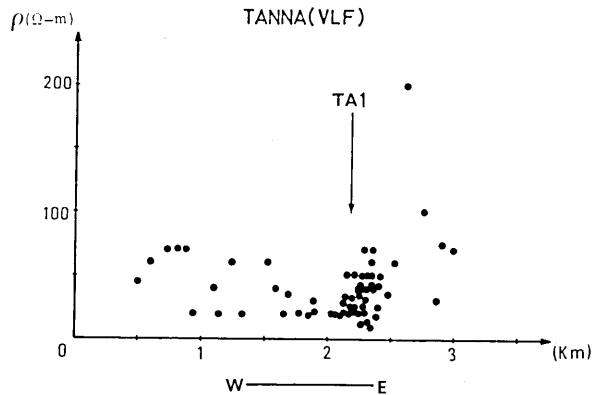


Fig. 7. Apparent resistivities obtained by the measurements of VLF (17.4 kHz) electromagnetic variations in the Tanna basin. All values are projected on to an east-west plane. TA1 indicates the approximate location of the Tanna fault, where the vertical sounding TA1 was made.

る。これを見ると、丹那盆地では全体として抵抗の低いのが明瞭である。200 Ω -m の値を示す 1 点を除いてすべて 100 Ω -m 以下である。丹那断層の位置が矢印 (TA1) で示されているが、断層を境にして東側では見かけ比抵抗が比較的高い 50~100 Ω -m の地点の多いのが目立つ。最大の見かけ比抵抗 200 Ω -m を与える地点も断層の東に位置する。これに対して断層の西側では約 1 km の範囲にわたりほとんどの点で見かけ比抵抗は約 20 Ω -m と低い値を示し、ほぼ一定である。さらに西へゆくと、見かけ比抵抗はやや増加し、数 10 Ω -m の値を示す所が多くなる。

断層の西側に低抵抗値の領域が広がり、東側で高抵抗を示す場所が現れる様子は、前に述べた傾度法の結果と極めてよく一致する。しかし、得られた見かけ比抵抗値が、例えば断層西側の低抵抗帯で、VLF 法では約 20 Ω -m であるのに対し、傾度法では約 100 Ω -m である。この見かけ比抵抗値の違いは、ふたつの方法による探査深度の違いから来ている。VLF 法の結果は深さ 20~50 m の比抵抗分布を反映しているのに対し、傾度法により得られた見かけ比抵抗は深さ数 10 m から約 1000 m までの比抵抗分布を反映していると考えられる。探査深度が違ってもかかわらず、断層を境にした見かけ比抵抗の特徴的分布が両者で一致するのは、浅い部分から 1000 m 位の深さまでの構造が、断層の西側では低比抵抗で、断層の東側では高比抵抗であることを意味している。

(c) 南部丹那断層を横切る傾度法測定

断層を境界にして東西での構造の違いは、南部丹那断層を横切って実施した傾度法の結果にも明瞭に認められる。Fig. 2 に示した TC4 沿いに Schlumberger 電極配置による垂直探査を実施した際、AB/2 が 2 km の地点で電流電極を固定し、TC4 測線沿いに電位傾度を測定した (Fig. 8(a))。電位電極の間隔は 100 m であった。使用した送信機は IPC-7 (15 kW) で地中に流した電流は 0.18~4.8 A (870 V) である。

得られた結果を東西方向の直線上に引き直してプロットしたのが Fig. 8(b) である。Fig. 8(b) の上半分が見かけ比抵抗値で、大部分が 100 Ω -m から 1000 Ω -m の範囲に分布している。AB/2 が 2 km に固定されていることから、この方法で得られた見かけ比抵

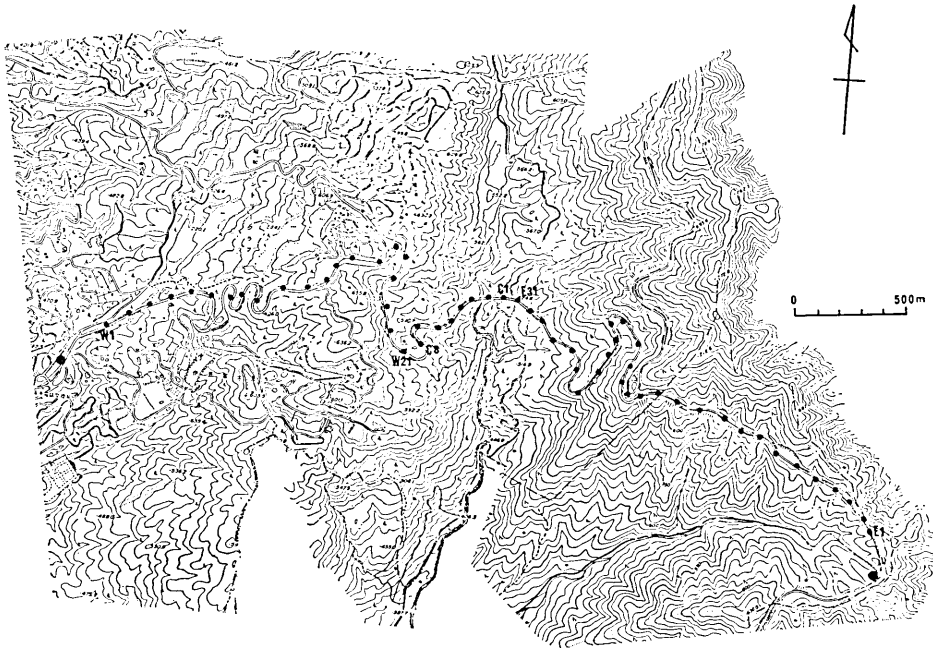


Fig. 8 (a)

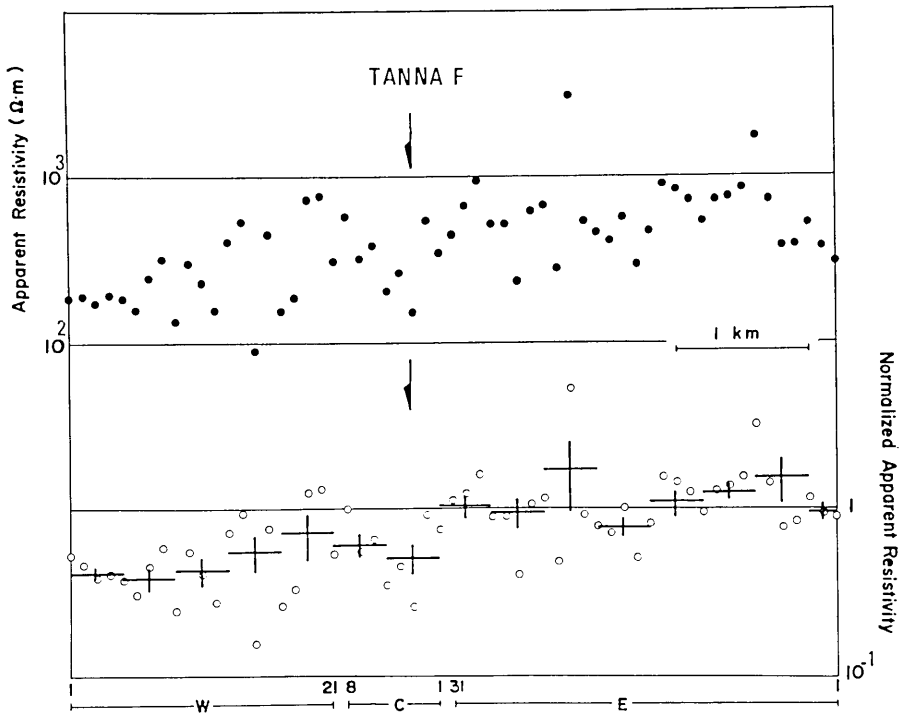


Fig. 8 (b)

Fig. 8. Horizontal profiling of apparent resistivity across the southern part of the Tanna fault (TC1) by means of the gradient method.

(a) Locations of the measuring points. Electric currents were driven into the ground from the end points designated by the large circles. Small circles are locations of electrodes between which the potential differences were measured. The potential electrodes were all separated by 100 m.

(b) Apparent resistivity profile.

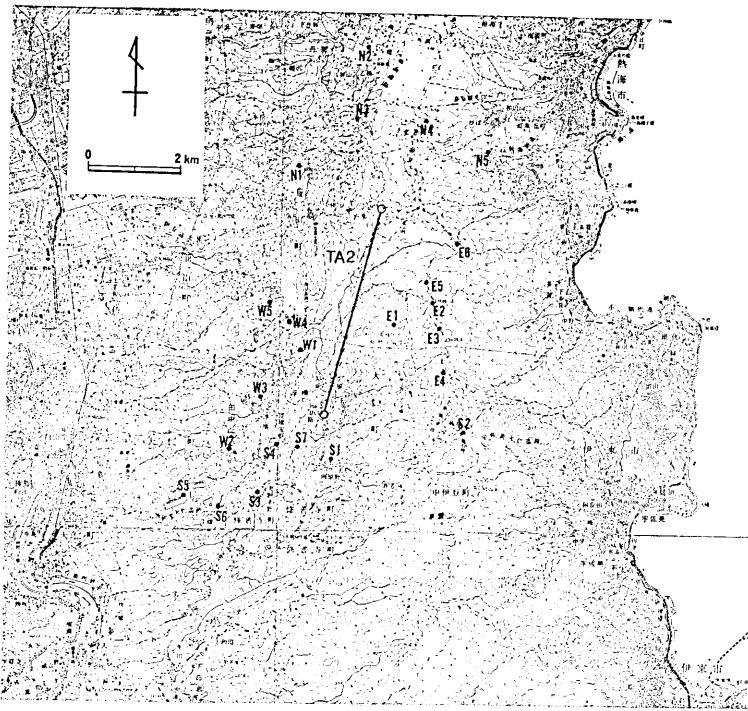


Fig. 9(a). Bipole-dipole measurements. Electric currents were driven into the fault through electrodes designated by open circles at both ends of TA2. N1-5, E1-6, S1-7, W1-5 are the locations where the electric potentials were measured.

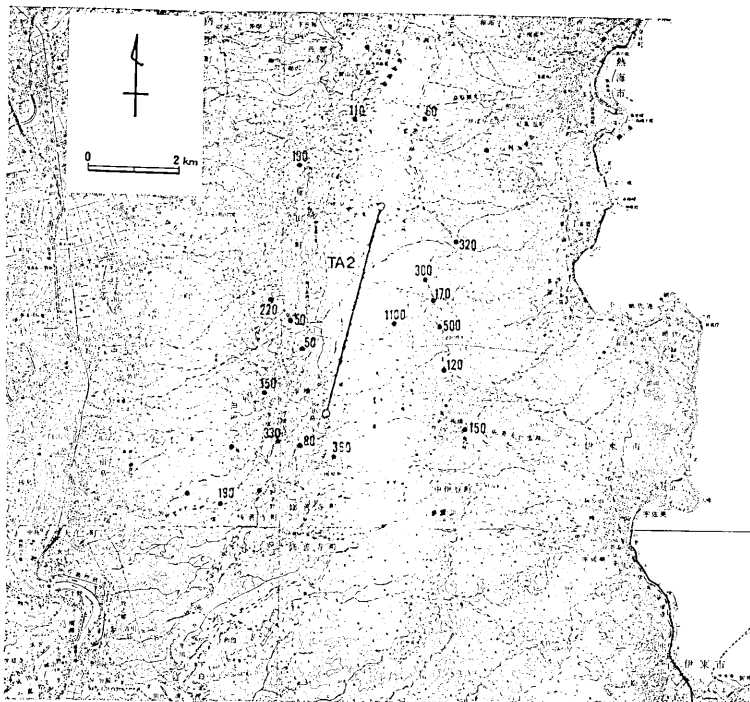


Fig. 9(b). Apparent resistivity obtained by the bipole-dipole method. In units of $\Omega\cdot m$.

抗分布は、Fig. 2 (または Fig. 3(c)) に示した TC4 の柱状図で第 3 層の高比抵抗層の水平方向の変化を反映していると考えられる。丹那断層は、矢印で示したように、この図のほぼ中央に位置する。概して断層の東側の値の方が、西側より高いのがわかる。

この傾向をより明確に示したのが、Fig. 8(b) の下半分の図である。TC4 測線について垂直探査で得られた構造 (Fig. 2 または Fig. 3(c) の柱状図) の与える見かけ比抵抗値を基準にして、各点で得られた見かけ比抵抗を示したものである。したがって基準化された見かけ比抵抗が例えば 0.5 であるということは、その点の見かけ比抵抗は TC4 で得られた構造の与える見かけ比抵抗の 1/2 倍にあたることを意味する。さらにこのことは、第 3 層の比抵抗値が TC4 の構造 (600 Ω-m) の 1/2 であることを示唆している。これらの値を 400 m 毎に平均して示したのが、図の十字の印である。縦棒は標準偏差を表す。これを見ると、基準化された見かけ比抵抗は断層の東側がほぼ 1 であるのに対して、西側ではその約半分になっているのがわかる。

4-2. 浮橋断層

(a) Bipole-dipole 法による見かけ比抵抗測定

非常に長い電流電極間隔をとって地中に電流を流し、周辺の多くの点で短い間隔の電位差を測定して、断層の東と西での見かけ比抵抗分布の違いを調べた。電流電極を断層そのものに埋設した場合 (TA2; Fig. 9) と断層の東の山地に埋設した場合 (TB2; Fig. 11) と、2 通りの実験を行なった。

断層内に電流を流した実験での電流電極配置および電位差測定点を Fig. 9(a) に示す。

TA2 の両端の白丸が電流電極の位置で、N1~5, E1~6, S1~7, W1~5 が電位差を測定した点である。電流電極 TA2 の間隔は 5 km で、送信機として IPC-7 (15 kW) を使用し、5.3~5.4 A の電流を流した。電位差の測定は電極間隔 50 m で行なった。次に述べるようにこの地域では比抵抗は一般に低く大部分が 50~300 Ω-m の範囲であるため、地中の電位傾度が小さくなり、電位差を測定できたのは電流電極から僅か 3 km 位の範囲に限られた。

このようにして求めた見かけ比抵抗が Fig. 9(b) に示されている。ここで求めた最低の抵抗値は 50 Ω-m である。最高値は断層東側の山間部で得られ、1100 Ω-m に達した。断層を横切る東西断面上にこれら見かけ比抵抗を投影し

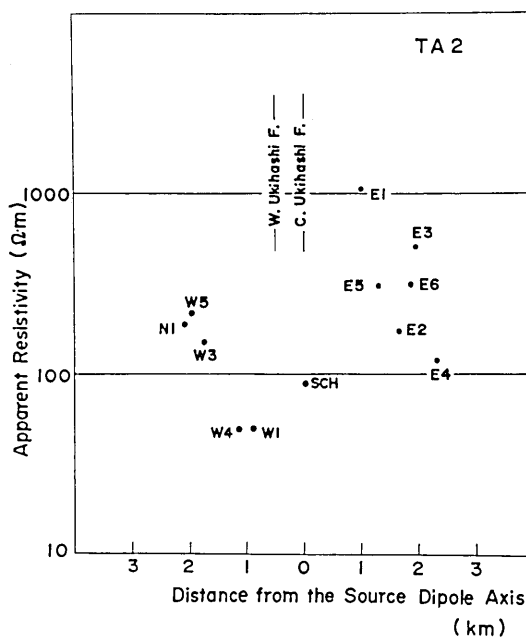


Fig. 10. Distribution of apparent resistivity across the Ukihashi fault obtained by the bipole-dipole method when the current electrodes were placed on the fault (TA1).

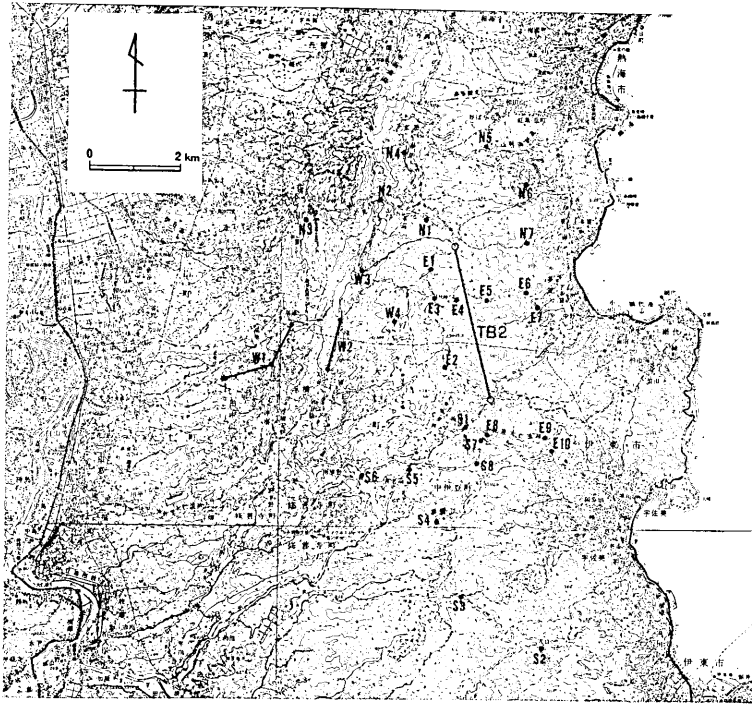


Fig. 11(a). Bipole-dipole measurements for electrodes TB2.

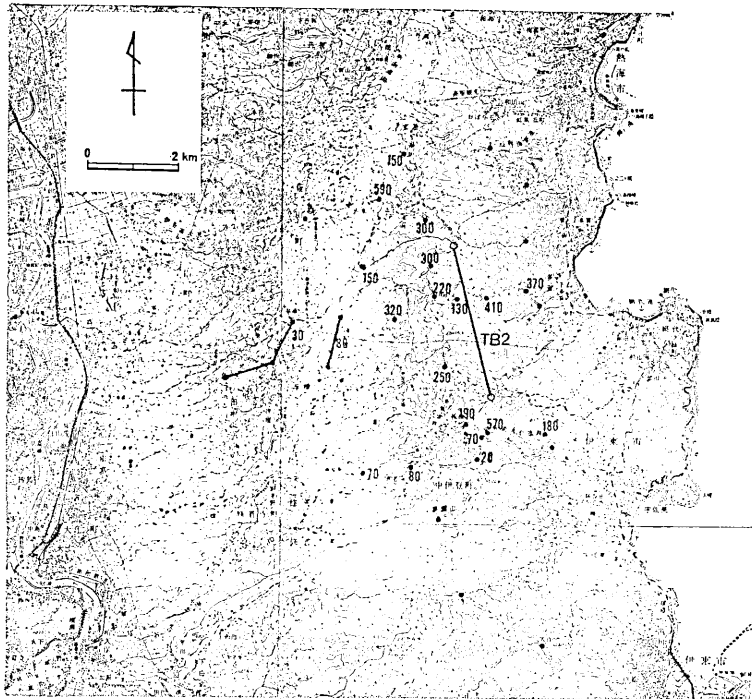


Fig. 11(b). Apparent resistivity obtained by the bipole-dipole method. In units of $\Omega\text{-m}$.

たのが Fig. 10 である。地下構造が水平方向に均質なら、電流を流し込んだ断層に対して、見かけ比抵抗は東西対称になるはずである。しかし Fig. 10 では、明らかに断層の西側より東側の方が抵抗が高い。浮橋断層は Fig. 1 で見られるように、浮橋中央断層と、その西側に平行して走る浮橋西方断層から成る。Fig. 10 は浮橋中央断層から浮橋西方断層にかけて抵抗が低いことを示している。

電流電極を断層東部の山地に移し、Fig. 11(a) TB2 の両端から電流を流して同様の測定を行なった。電流電極間隔は 3.5 km で流した電流は 4.4~6.3 A であった。電位差測定点 W1, W2 では電極間隔を 1200 m まで拡大した。得られた見かけ比抵抗を Fig. 11(b)

に示す。Fig. 10 と同様に、得られた見かけ比抵抗を、断層を横切る東西断面上に投影したのが Fig. 12 である。これらの図を見ても、断層の東側が高抵抗で西側が低抵抗となる様子が窺える。

(b) VLF 法による見かけ比抵抗分布測定

浮橋断層周辺においても、17.4 kHz の人工電磁波を受信して、地殻表層部の電気抵抗測定を行なった。使用した測定器は Geonics 社製 EM-16R である。前にも述べたように、この方法で求められる電気抵抗は、この地域ではせいぜい 20~30 m までの深さの範囲のものである。

Fig. 13 に測定点の分布と見かけ比抵抗値を示す。同図には Schlumberger 配置による垂直探査を実施した測線も参考までに記してある。測線 TA2 がほぼ断層に沿った測線で、TB2 は南北に走る山陵の尾根沿いの測線である。この尾根より東側では場所によって 900 Ω-m という高い抵抗が現れることがある。これに対して西側では一般的に抵抗が低い。この傾向は東西断面上に見かけ比抵抗値を図示した Fig. 14 を見ると一層明瞭である。断層の位置と山陵の尾根の位置(山伏峠)が横線で示されている。断層の西側の丘陵地帯にはいと、約 200 Ω-m の抵抗が見られるところもあるが、ほとんどの点で 150 Ω-m 以下で、電気抵抗は低い。

浮橋断層の南の部分の横断する測定結果だけを図示したのが Fig. 15 である。浮橋中央断層直上では約 40 Ω-m で、その東および西の台地での最高値と比較すると 90~110 Ω-m 抵抗値が低い。浮橋西方断層についても、ほぼ同様のことがいえる。周囲が 100~150 Ω-m であるのに対して断層直上では約 70 Ω-m と低くなっている。兵庫県の山崎断

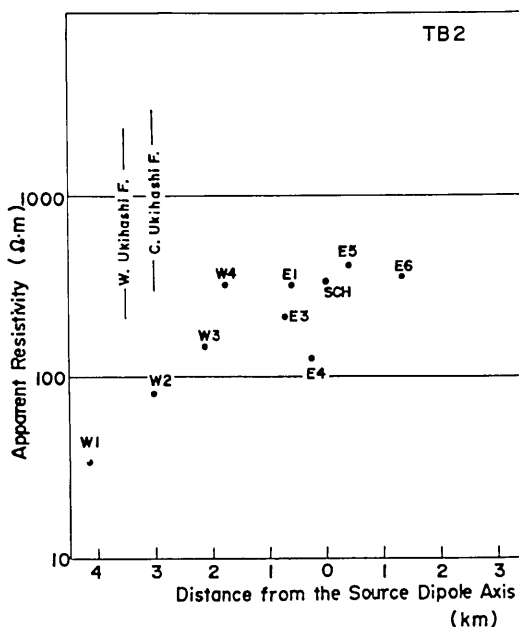


Fig. 12. Distribution of apparent resistivity across the Ukihashi fault obtained by the bipole-dipole method (TB2).

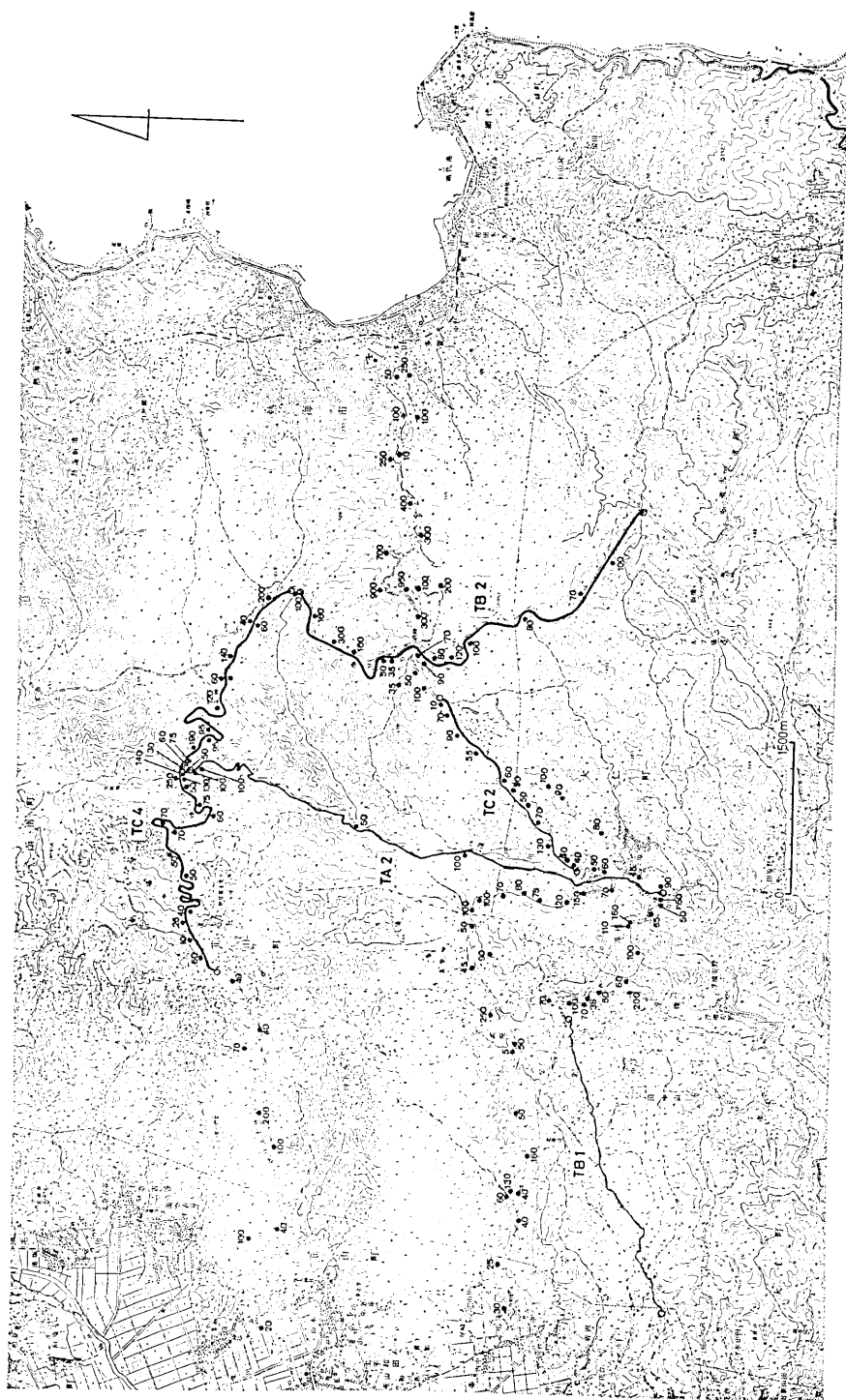


Fig. 13. Apparent resistivity obtained by VLF method. In units of Ω -m.

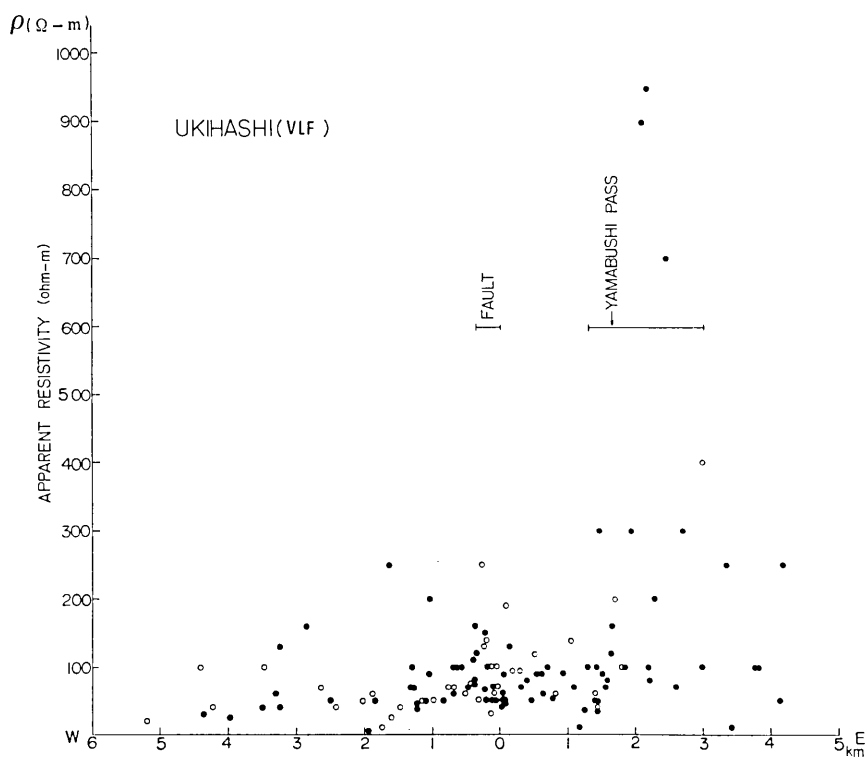


Fig. 14. Distribution of apparent resistivities obtained by the VLF method. The apparent resistivities were projected on the east-west plane across the fault. Distance from the fault is taken in the abscissa. Open circles are results along the survey line TC4 in Fig. 13.

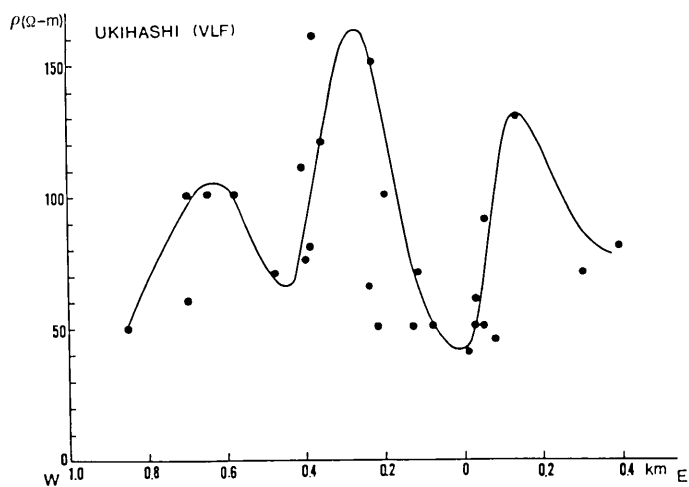


Fig. 15. Apparent resistivity profile across the faults. The central Ukihashi fault is located at the origin (0 km), and the western Ukihashi fault at about 4 km west.

層で、断層の直上では周囲に比べて抵抗が著しく低くなっていることが明らかになったが²⁾、浮橋断層でも全く同じことが見られる。その原因としては、ひとつには山崎断層の場合と同じく、断層破砕面に地下水が浸透して抵抗を低下させていること、さらには、断層が地形的には谷を形成し、その上を水を含んだ堆積層が覆っていることが考えられる。

5. 結 び

丹那・浮橋断層およびその周辺で、人工電位法や電磁誘導法などによって地殻表層部の電気抵抗を測定した。全般に電気抵抗の低いのが、この地域の特徴である。伊豆大島や三宅島など火山地域では $10 \text{ k}\Omega\text{-m}$ を超える比抵抗が得られるのが珍しくないのに対し、この地域ではせいぜい高くても数 $100 \Omega\text{-m}$ である。これは、この地域の岩石の風化破碎の度合いが著しく、多量に水を含んだ火山角礫岩や硫気粘土などが広く分布するためであろう。

しかし、詳しく微細構造を調べれば、断層でさらに抵抗が低くなっているのがわかる。浮橋断層を横切る東西線上の VLF 法測定結果では、 17.4 kHz に対する見かけ比抵抗値が浮橋中央断層および浮橋西方断層上で周辺より数 $10\sim 100 \Omega\text{-m}$ 低く、約 $50 \Omega\text{-m}$ となっている。兵庫県山崎断層で断層直上の電気抵抗が低い事実とよく似ている。異なるのは、山崎断層では低比抵抗帯の幅が数 10 m であるのに対し、浮橋断層では約 200 m あることである。もしこれが破砕帯によって生ずる低抵抗帯であるならば、浮橋断層の方が山崎断層より断層面の破砕浸蝕の度合いが進んでいることを示すのであろう。

丹那・浮橋断層の電氣的構造についてのもっとも大きな特徴は、断層を境にして東と西とで電気抵抗分布が異なるということである。VLF 法と傾度法によって電気抵抗水平分布を調べたが、丹那盆地の測定では、いずれの方法によっても、丹那断層の北西側で見かけ比抵抗が低いのに対し、断層の南東側にはいと高抵抗が現れる。この地域の探査深度が、VLF 法で約 $20\sim 50 \text{ m}$ 、傾度法で数 100 m であることを考慮すると、断層を境にした電気抵抗分布の非対称性は、およそ 10 m から 1 km の深さまで及んでいるといえる。

断層を挟んでの電気抵抗分布の非対称性は丹那断層南端部から浮橋断層にかけても見られる。VLF 法の結果は地表付近の構造の複雑さを反映してばらつきが多いが、断層の東の山岳部で $1000 \Omega\text{-m}$ に近い高い見かけ比抵抗が現れる。丹那断層南端部の傾度法の結果には、東西の非対称性がさらに明瞭に現れる。断層を境にして西側の見かけ比抵抗が、東側の約 $1/2$ になる。これは深さ数 100 m までの電気抵抗が断層の東より西側の方が低い

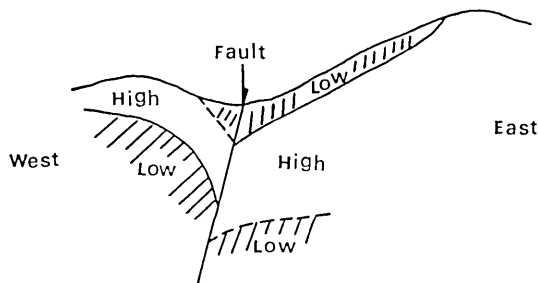


Fig. 16. A schematic diagram of resistivity profile across the faults.

ことを示している。この結果は、垂直探査によって得られた第3層の比抵抗が、断層の東で $500\sim 700 \Omega\text{-m}$ であるのに対して、西側で $100 \Omega\text{-m}$ と低い事実と調和している。

以上の様子をまとめて、比抵抗構造の概略を推定すると厚さ数 m $\sim 10 \text{ m}$ の第1層を除いて Fig. 16 のようになるのではないかとと思われる。断層の東側では、表層は

60~90 Ω -m の低比抵抗層である。厚さは断層の近くでは 25~50 m あるが、断層から遠ざかり山地にはいと薄くなり約 15 m である。その次の層の抵抗は 500~700 Ω -m と高い。浮橋断層の東側 (TC2) では、この高比抵抗層は 1 km 以上の深さまで続いている。しかし浮橋断層沿いの測定では、約 160 m の深さから 70 Ω -m の低比抵抗層が再び現れる。これに対して、断層の西側では TB1 の測定結果を見ると、表層は 480 Ω -m と高比抵抗で約 40 m の厚さがある。次の層は断層の東側とは逆に約 100 Ω -m の低比抵抗層になっている。このことは傾度法の結果からも確認される。丹那・浮橋断層は、断層を境界にして、東と西とで電気抵抗構造が顕著に違っているのが特徴といえる。

この調査を実施するにあたっては、次の機関や地区の方々に大変お世話になった。御協力頂いたことに、心からお礼を申し上げる次第である。静岡県総務部地震対策課、函南町役場、菰山町役場、大仁町役場、函南町丹那地区、畑地区、大仁町浮橋地区、田中山地区、静岡県道路公社伊豆管理事務所、日通伊豆開発株式会社伊豆富士見ランド。なおこの研究は文部省科学研究費補助金（自然災害科学特別研究）を受けて実施した。

参 考 文 献

- 1) ELECTROMAGNETIC RESEARCH GROUP FOR THE ACTIVE FAULT, 1982, Low electrical resistivity along an active fault, the Yamasaki Fault, *J. Geomag. Geoelectr.*, **34**, 103-127.
- 2) 松田時彦, 1972, 1930 年北伊豆地震の地震断層. 伊豆半島 (杉山隆二編), 東海大学出版会, 73-93.
- 3) SATO, H., 1973, A study of horizontal movement of the earth crust associated with destructive earthquakes in Japan, *Bull. Geogr. Survey. Inst.*, **19**, 89-130.
- 4) 国土地理院測地部, 1974, 山北および丹那地区精密ひずみ測量結果, 地震予知連絡会会報, **11**, 94-95.
- 5) KUNO, H., 1936, On the displacement of the Tanna Fault since the Pleistocene, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **14**, 621-631.
- 6) 久野 久, 1936, 最近の地質時代における丹那断層の運動について, 地理学評論, **12**, 18-32.
- 7) 久野 久, 1962, 旧丹那トンネルと新丹那トンネル, 科学, **32**, 397-401.
- 8) 地質調査所, 1978, 伊豆半島活断層図.

10. *Electrical Resistivity Structure of the Tanna
and the Ukihashi Faults.*

By ELECTROMAGNETIC RESEARCH GROUP FOR THE
ACTIVE FAULT.

In order to investigate the geoelectric structure of active faults, measurements of the earth resistivity were conducted in an area including the Tanna and the Ukihashi faults in 1979. Two types of techniques were employed in the measurement. One was the direct current method, in which artificially controlled electric currents are driven into the ground. The other was the electromagnetic induction method, in which the resistivity is estimated from simultaneous observations of electric and magnetic variations at the ground surface. The direct current methods were used both for the vertical soundings and for the horizontal profilings. For the vertical soundings, Schlumberger arrays were employed for the electrode arrangements. For the horizontal profilings the bipole method and the gradient method were used. As an induction method, electromagnetic waves of 17.4 kHz of an artificial source were measured. This method (VLF survey) was used for the horizontal profilings.

Marked difference were obtained in the resistivity structure across the faults. Lateral surveys by the gradient method as well as the induction method gave a higher apparent resistivity to the east of the faults and a lower one to the west. Vertical soundings revealed that at greater depths the resistivity was high in the eastern area of the fault and low in the west, whereas at shallow depths it was low in the east and high in the west. Measurements conducted right above the fault indicated that the resistivity was low to the depth of at least 1 km.