

野島断層 500 m 孔を用いた比抵抗連続観測 —— 3次元モデルを用いた見掛け比抵抗変化の予測 ——

大志万 直人・住友 則彦・安藤 雅孝

要 旨

1995年の兵庫県南部地震(M7.2)発生後、地震断層である野島断層を貫通して掘られた500m孔を利用した多電極方式の比抵抗連続観測を96年12月から開始した。この観測の目的は、断層の回復過程に伴う比抵抗変化を観測しようというものである。ここでは、観測システムで計測される見掛け比抵抗変化量についての3次元比抵抗モデルを用いた検討と、96年12月-97年12月の約1年間の期間における観測結果についての報告を行なう。

キーワード：比抵抗観測、野島断層、ボアホール、比抵抗構造、比抵抗変化

1 はじめに

中国の唐山地震(M7.8, 1976年7月28日)の2~3年前から多数の観測点で比抵抗の一定傾向を持つ長期変動が観測され、そのうちの1点では、地震発生直前に比抵抗の急激な変化が観測されている。この長期的な比抵抗変動は、降雨量の年周変化には対応せず、震央周囲の長期変動を示す井戸の水位データと良い相関が見られることが明らかにされている(Chu et al., 1996)。この事実は、クラックの増加と水の侵入ということを想像させる。一方、70年代後半から精力的に行なわれて来た山崎断層などの活断層近傍での比抵抗構造に関する調査・研究により、活断層には破砕帯に対応すると見られる低比抵抗帯が断層走行に平行に存在していることがわかった(例えば、Electromagnetic Research Group, 1983; Yukutake, 1985; Honkura et al., 1985)。これは、破砕帯中にまわりと比較して水が多く含まれていることによると考えられている。さらに、活断層周辺で観測された各種の水の移動を示唆する異常現象(吉岡, 1980; Miyakoshi, 1986)と、下部地殻に存

在する低比抵抗領域などから、活断層を”aquaduct”とみなす考えも生まれた(Yukutake, 1985)。山崎断層に関しては、地震に先行する比抵抗変化も観測されている(Sumitomo and Noritomi, 1986)。

活断層を比抵抗変化を用いモニターするという研究は他にも、USA等でも精力的に行なわれて来ていて、例えば、Park and Fitterman(1990)は、CaliforniaのParkfieldを含む地域で、長基線観測による電場変動により、比抵抗変化を検出しようとする試みを行なっている。しかし、今まで観測期間中に周辺で発生した4個のM4.0以上の地震と遠距離ではあるが規模の大きい3個の地震(1989 Loma Prieta, 1992 Landers, 1994 Northridge)に伴う比抵抗変化は検出されていない(Park, 1997)。また、同じSan Andreas断層で直流法による比抵抗変化観測も行なわれてきた(例えば、Morrison and Fernandez, 1986)。

我々は、96年12月30日から「野島断層解剖計画」の一環として野島断層周辺に掘られた3本の孔の内の500m孔を利用した比抵抗連続観測を開始した。この目的は、断層の回復過程に伴う比抵抗変

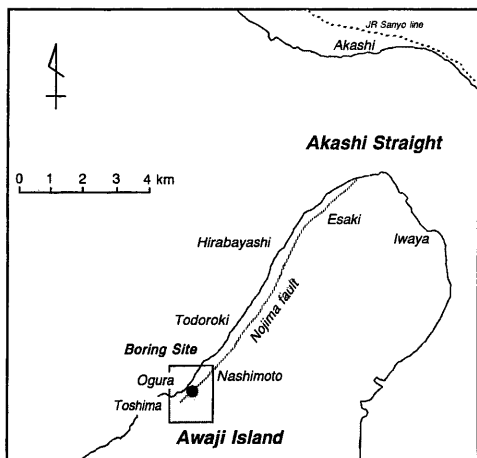


Fig. 1: The Nojima fault in Awaji-shima island and the boring site of Nojima fault-zone Prove are shown.

化を観測しようというものである。すでに、これらの観測についての概要は、京都大学防災研究所・野島断層解剖計画(1998)や、大志万(1998)でも報告されているが、本論文では、96年12月-97年12月の約1年間の期間における観測結果と、3D比抵抗モデルを用いた比抵抗変化量の予測についての検討結果の詳細について報告する。

2 観測システム

淡路島北淡町にあるボーリングサイトの位置をFig.1に示す。500m孔は、「野島断層解剖計画」の中で、800m, 1800m孔のパイロットボーリングのために掘られたもので(例えば、安藤ら(1998)を参照。)、95年11月から掘削を開始し96年4月にその工事が完了した。

500m孔のボーリング工事完了後の4月29日に、孔内の4ヵ所に独立した電極を設置した。電極設置に関しては、当初、500m孔全体を用いて、5個の電極を設置する予定であったが、途中から、断層付近から水を採取し水位変化やラドン濃度変化を観測する計画が加わり、孔の地表から400mの部分までケーシングを入れ、断層面付近にストレイナーを設置することになったため、孔内に設置する電極数を4個に減らした。また、その設置間隔も、裸孔の部分のみを利用するという事で、60mに変更した。幸い、500m孔は、その長さが550mまで掘削され

たため、最終的には、独立した電極として3個の電極を設置し利用できることになった。4個目の電極(最も浅い位置にある電極)は、孔の400m部分まで入っているケーシングに接触している。

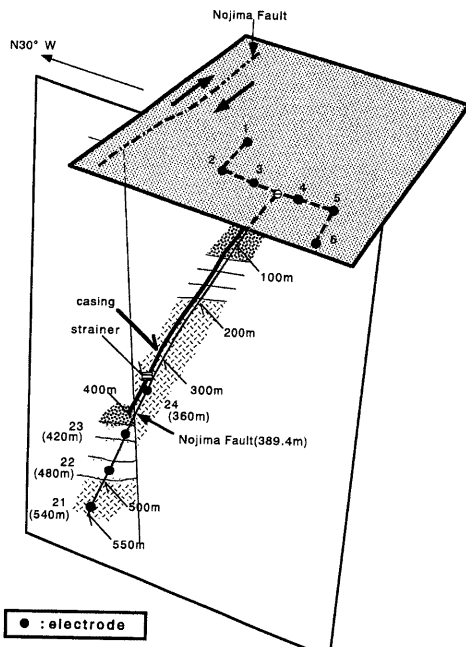


Fig. 2: This figure shows the electrode configuration installed in the 500m borehole. Four electrodes were installed at an interval of 60m from the 540m point along the borehole (Nos.21, 22, 23 and 24). Six electrodes (Nos.1-6) were also set up on the ground surface for measuring resistivity changes associated with a recovery process of the ruptured fault together with the electrodes inside the borehole. The geological structure shown in this figure was determined by Take-mura et al.(1996).

この500m孔は、地表部分で約60度の傾斜角を持ち、孔の先端部分では約68度の傾斜角を持っている。また、掘削方向はN30°Wである。この孔内に、底から550m長の孔に沿って60m間隔で、計4個の電極を設置してあることになる。

電極には鉛電極を使用した。これは、孔内のケーブルである外径約12mmのEPゴム絶縁クロロブレンキャプタイヤケーブル(5芯)の外側約1mの部分に、2mm径の鉛線を巻き付けた構造になっ

Table 1: Used gridding in x, y and z directions for 3D resistivity modeling

x (No. of grid : 95)		y (No. of grid : 95)		z (No. of grid : 72)	
Region($x \geq 0$)	Δx	Region($y \geq 0$)	Δy	Region	Δz
0 – 500m	20m	0 – 500m	20m	0 – 1.0km	20m
500m – 2.0km	250m	500m – 2.0km	250m	1.0 – 2.0km	200m
2.0 – 5.0km	500m	2.0 – 5.0km	500m	2.0 – 34.0km	2.0km
5.0 – 15.0km	1.0km	5.0 – 15.0km	1.0km	—	—

ている。このような鉛電極が、1本のケーブル先端から60m間隔でそれぞれ独立した状態で計4個付いている。また、地表には、6個のステンレス電極を約50cmの深さに設置して、総計10個の多電極の比抵抗連続観測システムとしている。

Fig.2以上に説明した電極配置の模式図を示す。野島断層面の位置までケーシングが入っているが、その先は裸孔のままで、この部分に鉛電極21, 22, 23が設置されている。一方、電極24は、ケーシング部分に接触している。また、500m孔地点は、ボーリング工事終了後、約3mの厚さの土砂の埋立が行なわれ整地されている。図中に示された地質構造は、500m孔より採取されたコアサンプルを基にして竹村ら(1996)によって決められたものである。

比抵抗の計測は4極法を用い、計10個の電極の内から4個を選び電流電極と電位電極を設定しながら4時間おきに断続的自動計測を行なっている。ソース電流は周期2秒の交替直流を用い、1つの電極組み合わせにつき、25周期分の計測値をスタッキングして1回の計測値としている。計測している電極組み合わせ総数は85組あり、全ての組み合わせについて比抵抗計測が終了するのに、約2.5時間要する。

3 比抵抗変化の予測

この節では、前節で述べた比抵抗変化観測システムで、どの程度の見掛け比抵抗変化量を観測しうるのかについての定量的な検討を行なう。もちろん断層の回復過程に伴う比抵抗変化と言っても、具体的には、断層のどの部分がどれだけの比抵抗変化を起こすのかについての確たる予想は定まっているわけではない。従って、この節で報告するのは、例えば比抵抗構造のある部分の比抵抗値がある量だけ変化した場合に、どのような見掛け比抵抗変化としてそれを検出できるかという予測である。

例えば、Wilt and Goldstein(1981)は、dipole-

dipole法によって地下のある比抵抗層(部分)の時間変化をモニターするための基礎的な考察を行なっている。彼らはこれをModel perturbation studiesと称し、比抵抗構造中の、ある比抵抗ブロックが変化したときdipole-dipole法を用いたとき観測される見掛け比抵抗変化が何%になるかを議論している。ここでも、この例に習って、断層面に沿って発達している破砕帯の比抵抗変化が生じたときに、どのような変化を観測システムが検出するのかを、検討することにする。

このような予測を精密に行なうためには、比抵抗変化観測システムが設置されている断層周辺のバックグラウンドとしての精密な比抵抗構造をあらかじめ求めておく必要がある。さらには、比抵抗変化を生じる破砕帯の形状や電極との位置関係が、どのようになっているかが重要なファクターになる。このため、大志万ら(1998)で解説されているように、500m孔周辺では各種の比抵抗探査が実施されている。特に、横野・大志万(1998)により、この比抵抗観測システムに用いられている500m孔内の電極を用い、地下から電流を流し込み、表層で電位差を観測するhole-to-surface法を用いて、野島断層周辺での3次元比抵抗分布構造が求められている。しかし、以下のモデル計算では、バックグラウンドの比抵抗構造としてはかなり単純化した構造モデルを用いている。しかし、バックグラウンドの比抵抗構造として単純化した構造を使用した見掛け比抵抗の変化予測とは言え、現時点での観測システムの評価としては十分に意味があると考えられる。

3次元比抵抗モデル計算には、例えば、佐々木(1984)のように有限要素法を用いた解法もあるが、ここでは、Dey and Morrison(1979)による差分法を用い、緩和法によって連立方程式を解くスキームを採用した。なおこのDey and Morrison(1979)の方法を基礎にして、Lowry et al.(1989)や、水永・牛島(1991)等により、電極近傍での電位計算の精度を向上させる方法や、Masne and Poirmeur(1988)

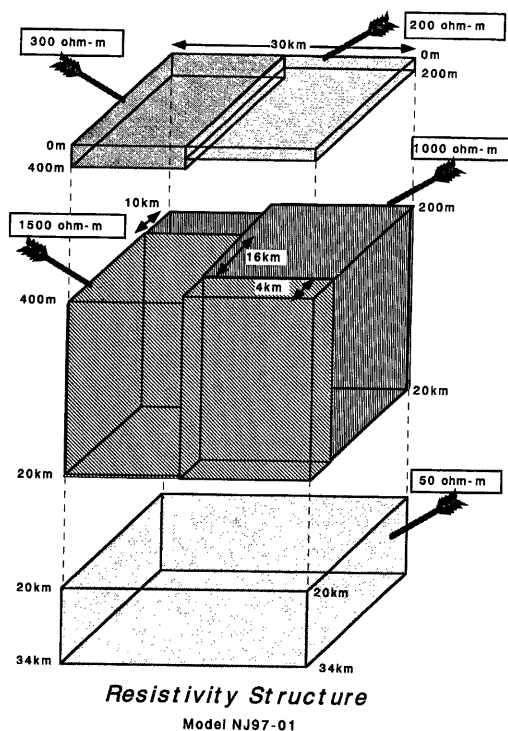


Fig. 3: A background resistivity structure used in the model calculation. The resistivity structure of the very shallow portion near the fault will be shown in Figs.4(a) to 7(a). The finite difference method of Dey and Morrison(1979) is adopted to solve the boundary value problem.

で用いられているプログラムなどが提案されているが、本研究では、Dey and Morrison(1979)の差分法により離散化し、緩和法を適用している。

計算に使用した格子点間隔などは、Table 1に示すとおりである。今回のモデル計算では、想定した、モデル領域は $30\text{km} \times 30\text{km} \times 34\text{km}$ （深さ）である。Table 1では、水平方向の x, y 方向の、それぞれ正の領域の分割についてのみ示してあるが、 x, y 軸に対してそれぞれ対称な分割になっている。また、設定した境界条件は、地表面では電流が地表面から流れ出さないとし、モデル領域の底と側面では、ソースより充分遠くにあるものとして、電位を0とした。

Fig.3に、モデル計算に使用したバックグラウンドの比抵抗構造を示す。断層の両側それぞれで、 $200\text{m} \sim 20\text{km}$ の深さの領域を $1\text{k}\Omega\text{m}$ 、 $400\text{m} \sim 20\text{km}$ の深さの領域を $1.5\text{k}\Omega\text{m}$ の比抵抗値とし、これらは、これまでの右横ずれの断層運動の結果として総計 16km

のオフセットを生じている構造になっている。また、この断層の両側では、上下方向の運動成分の積算により、断層を挟んで 200m の段差を生じている。これら基盤に対応する $1 \sim 1.5\text{k}\Omega\text{m}$ の比抵抗領域の上には、それぞれ、 200m の厚さの $200\Omega\text{m}$ 比抵抗層と 400m の厚さの $300\Omega\text{m}$ 比抵抗層を堆積層に対応するものとして想定した。

さらに、断層面の部分には、断層面周辺の比抵抗構造の拡大図であるFig.4～Fig.7の(a)にも示すように、厚さ 20m の断層破砕帯に対応する層を、断層面に沿って深さ 400m の位置から 20km の深さまで入れてある。この節で扱う変化予測モデルでは、この断層破砕帯の比抵抗値が一様に $10\Omega\text{m}$ から $1000\Omega\text{m}$ へと変化したときに、どのような見掛け比抵抗変化が観測システムにより検出されるのかをシミュレートしている。

500m 孔内と地表の電極に対応するモデル中での

電極は、Fig.2 の実際の電極の位置関係を考慮して、Fig.4 から Fig.7 の (a) 図中の記号●、○で示されているような位置に計 10～12 個設定してある。ここで、●は電流電極を示し（図中 C と表示）、○は電位電極を示している。これらの 10 個の電極を用いる場合、電流電極と電位電極のペアとして色々な組み合わせが可能であるが、以下では、電流電極ペアとして 4 種類の場合を想定し、それぞれの電流電極の場合に測定される見掛け比抵抗変化を、残る電極を電位電極ペア（図中では電極ペアに番号を付けてある）として用いた場合に分けて示す。なお、Fig.4(a)、Fig.5(a)、Fig.6(a) 中の No.6、および、Fig.7(a) の No.8 の電極ペアは、 zx 平面に垂直、つまり y 軸方向の電極ペアを表わす。

計算結果は、Fig.4 から Fig.7 中の (a) に示すような 4 種類の電極ペア（Source Dipole 1 - 4）を電流電極としたとき、それぞれの図中に示された番号の電極ペアが電位電極である時に計測される比抵抗変化を、対応する図 (b) に示すことにする。例えば、Fig.4(b) には、Fig.4(a) で示されたそれぞれの番号の電極ペアで計測される見掛け比抵抗の変化値が示してあることになる。ただし、結果を示した (b) 図中の縦軸は、破碎帯に対応する低比抵抗層の値が $30\Omega m$ である時に、それぞれの電位電極ペアで計測される見掛け比抵抗の値を 1 としたときの、比抵抗変化量を示し、図の横軸は、変化してゆく破碎帯の比抵抗値を示している。結果を、Fig.4 から Fig.7 に示す。

Source Dipole 1 の場合：Fig.4 に電極配置と見掛け比抵抗変化を示す。電流電極は今回示す 4 例の中では最もスパンが長い電極組合せで、破碎帯を挟む電極配列となっている。この電流電極に対して、Fig.4(b) に示されたものの中で検出感度が高い電位電極は、No.4 と No.5 の電極ペアである。一方、図に直交する電極ペアである No.6 のものは、ほとんど変化せず、感度が低い。

Source Dipole 2 の場合：Fig.5 に電極配置と見掛け比抵抗変化を示す。電流電極は破碎帯に接しながらその左側に位置している。この電流電極に対して、Fig.5(b) に示されたものの中で検出感度が高い電位電極は、No.5 の電極ペアであり、No.4 のものも比較的良好な感度を示す。一方、図に直交する電極ペアである No.6 のものは、この例でもやはりほとんど変化せず、感度が低い。

Source Dipole 3 の場合：Fig.6 に電極配置と見掛け比抵抗変化を示す。電流電極は破碎帯の左側に少し離れて位置している。この電流電極に対し

て、Fig.6(b) に示されたものの中で検出感度が高い電位電極は、No.1 の電極ペアであり、今回示す例の中では、その感度が最も高く破碎帯の比抵抗値が $30\Omega m$ のときと比べて 20 倍近くも変化を生じる。No.1 の電極ペアは、破碎帯を挟むように設置されているペア電極である。No.2 と No.3 のものも良好な感度を示す。この例でも、図に直交する電極ペアである No.6 のものは、ほとんど変化せず、感度が低い。

Source Dipole 4 の場合：Fig.7 に電極配置と見掛け比抵抗変化を示す。この場合には、電流電極は地表にある。この電流電極に対して、Fig.7(b) に示されたものの中で検出感度が高い電位電極は、No.1 と No.2 の電極ペアである。No.2 の電極ペアは、破碎帯を挟むように設置されているペア電極である。今回の電流電極と No.2 の電位電極との位置関係は、Fig.4 に示されている Source Dipole 1 の場合の電流電極と No.5 番の電位電極の位置関係と、ちょうど、逆の関係になっている（ただし、地表側の電極ペアのスパン長は、完全に同じではない）。この場合、相反定理により電流電極と電位電極の位置関係が逆転しても、同じ結果が現われるはずであるが、計算結果は、それを支持する結果となっている。

500m 孔では比抵抗検層を行っていないが、野島断層の平林地区で地質調査所が掘削したボーリング孔の検層結果 (Ito, 1996) や、「野島断層解剖計画」の 1800m 孔内の検層結果では、破碎帯に対応する部分の比抵抗値は、約 $30\Omega m$ 程度である。また、500m 孔内の電極を利用した Dipole Mapping による比抵抗探査でも、観測結果を説明するためには、断層面に約 $10\Omega m$ 程度の低比抵抗層を想定する必要がある (横野・大志万 (1998))。

破碎帯の比抵抗が断層の回復に応じて変化する場合、比抵抗の変化が、計算した $10 \sim 1000\Omega m$ の全範囲で変化するとは考えにくく、現状が $30\Omega m$ 程度であるとなると、変化量としては、その値のせいぜい数 10～数 100% の変化であろうと予想される（これでも変化の予想範囲としては、非常に大きい）。そこで、 $10 \sim 100\Omega m$ の変化範囲を考えると、例えば、Fig.5 に示す電極組合せの場合には、最大で 150%（電位電極ペア No.5）の見掛け比抵抗変化を観測することになる。

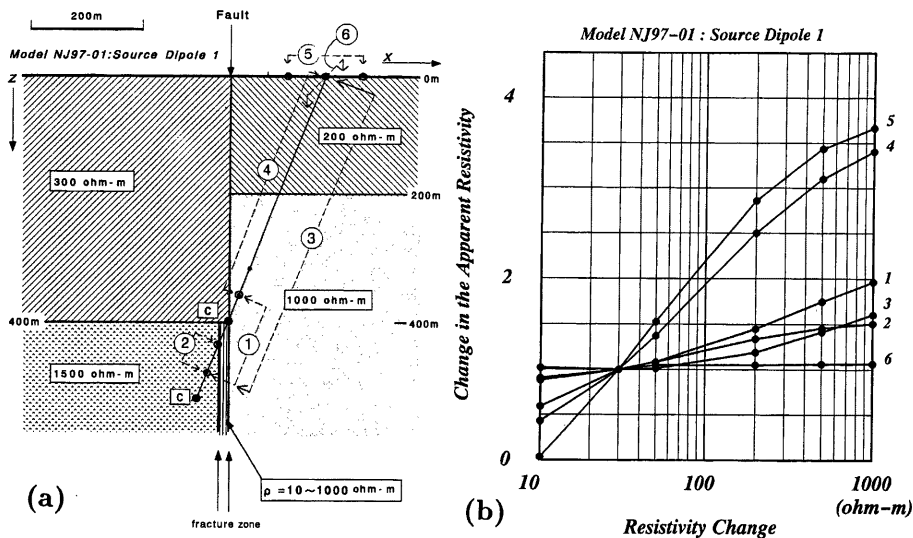


Fig. 4 : (a) Source Dipole 1 and 6 receiver dipoles, C: current electrodes, (b) resistivity changes observed with the receiver dipoles of Nos.1 to 6. Changes plotted in the figure are normalized with the apparent resistivity values when the resistivity of the fracture zone is $30\Omega\text{m}$.

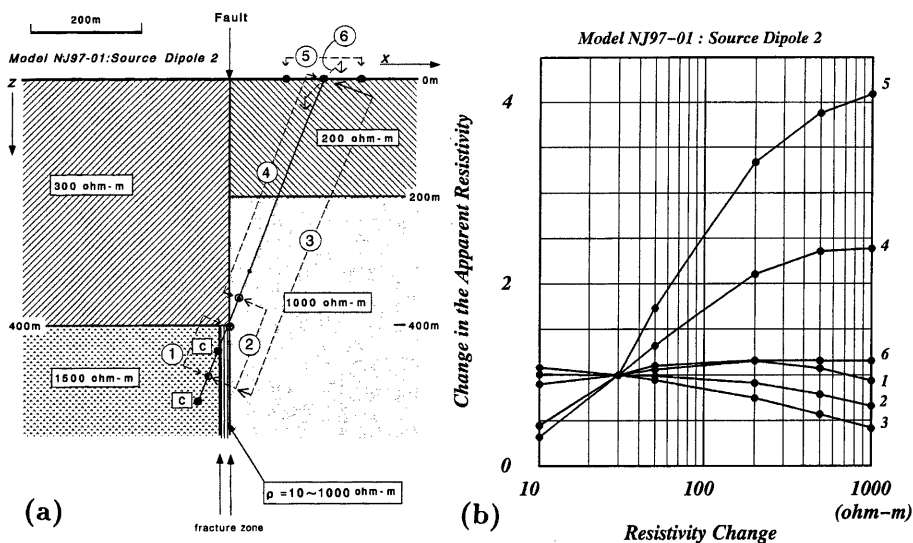


Fig. 5 : (a) Source Dipole 2 and 6 receiver dipoles, (b) resistivity changes observed with the receiver dipoles of Nos.1 to 6.

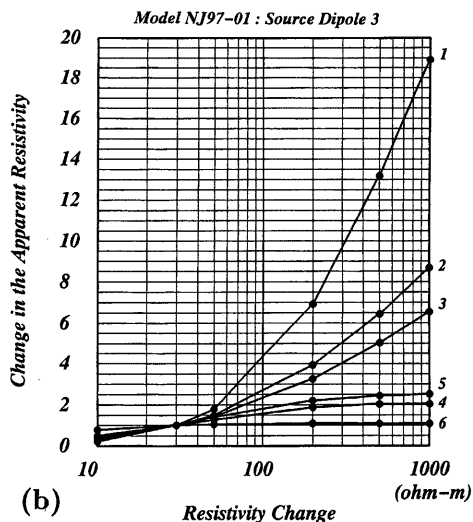
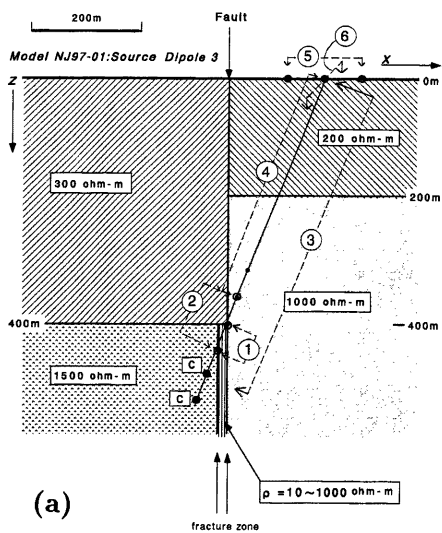


Fig. 6 : (a) Source Dipole 3 and 6 receiver dipoles, (b) resistivity changes observed with the receiver dipoles of Nos.1 to 6.

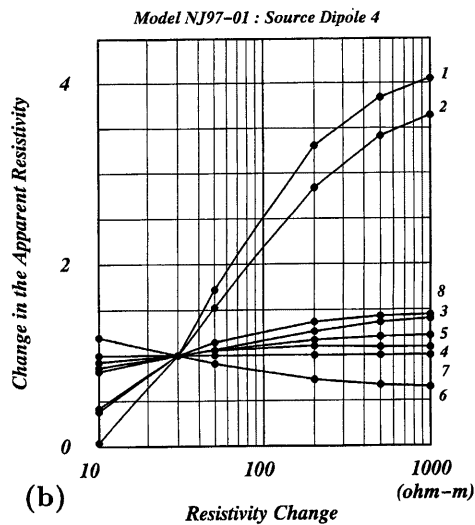
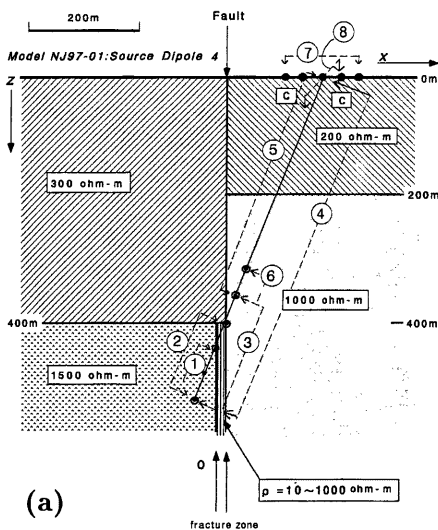


Fig. 7 : (a) Source Dipole 4 and 6 receiver dipoles, (b) resistivity changes observed with the receiver dipoles of Nos.1 to 9.

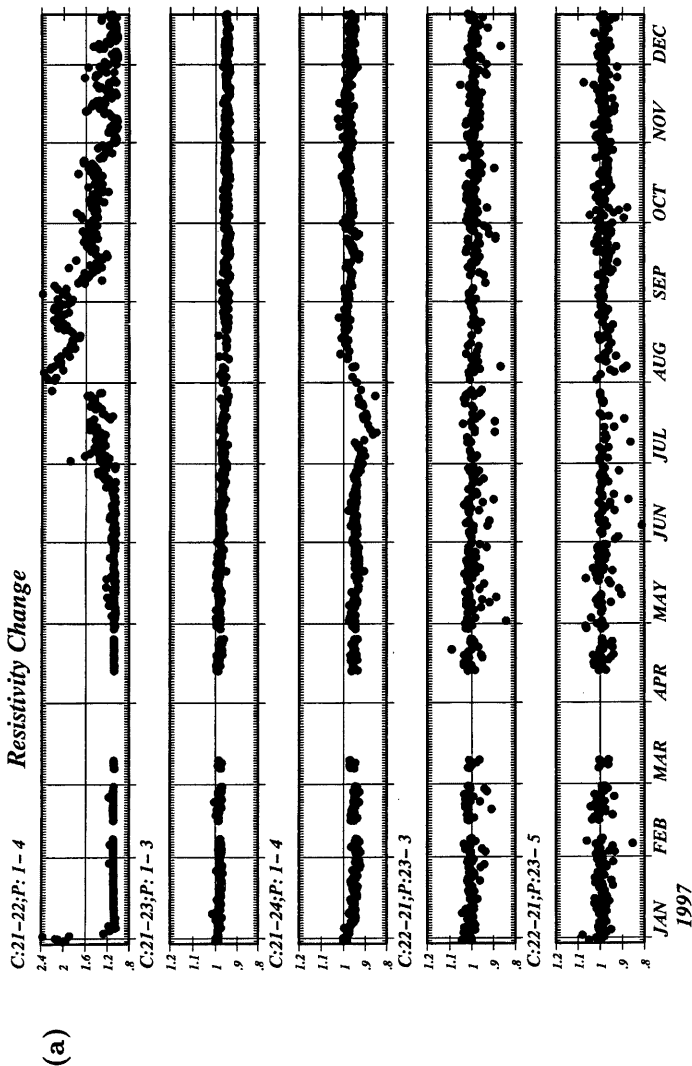
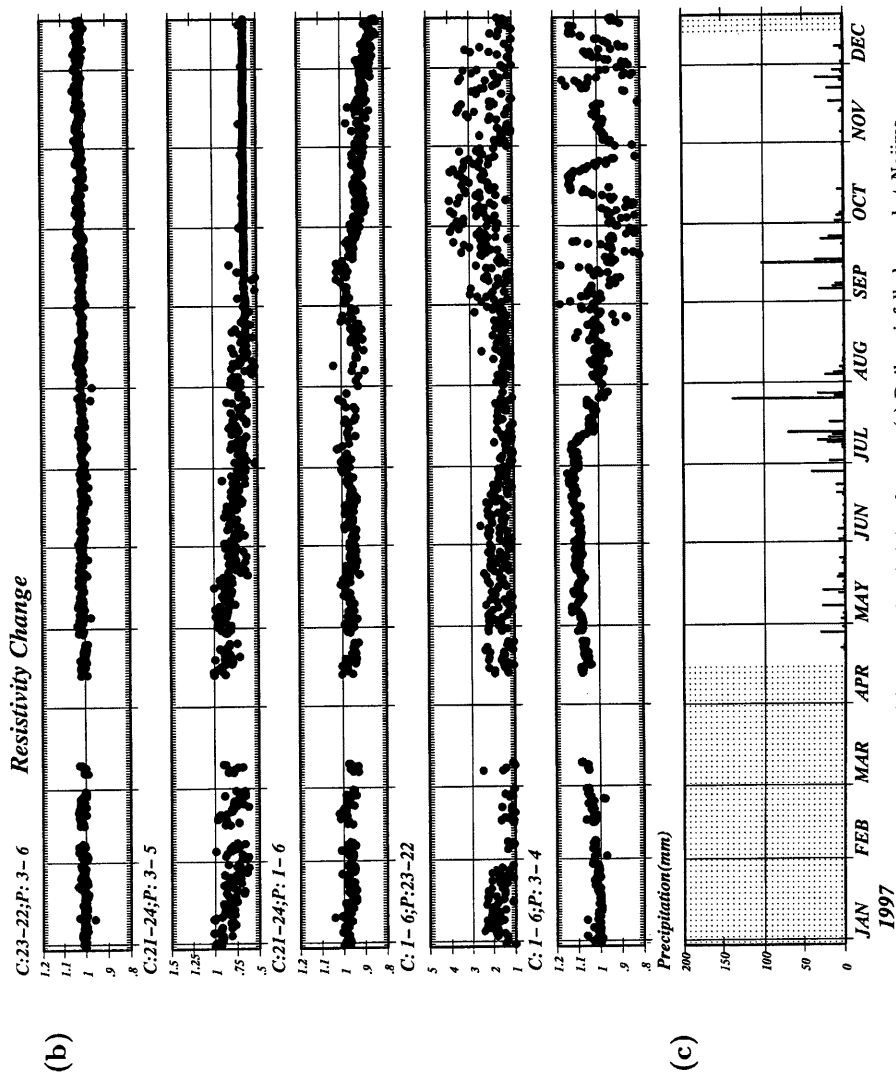


Fig. 8 : (a) Observed resistivity changes during the period from Dec., 1996 to Dec., 1997. Changes plotted in the figure are normalized with the observed values in the first stage of the whole observation period. Numbers shown in the figure indicate No. of electrodes. C: current electrodes, P: potential electrodes.



4 観測結果

96年12月～97年12月までの期間の比抵抗変化をFig.8に示す。この図では、観測開始の値でノーマライズして、つまり観測開始時の値を1として、変化を示してある。また図中に示されている番号は、Fig.2に示されている電極番号を示す。Cは電流電極のペア電極番号を示し、Pは電位電極のペア電極番号を示している。観測値の内、電車からの漏洩電流によるノイズの影響が比較的少ない夜間のデータの日平均値をプロットしたものである。電極の組み合わせによっては、夜間でもノイズの影響を受け、かなり計測値がばらつく組み合わせもある。

2月中旬の欠測は1800m ボアホールを用いて実施された注水実験（島崎ら（1998）；村上ら（1998））の際に、流動電位観測のため孔内電極を使用したため比抵抗観測の中断したことによる。また、3月上旬の中断は、1800m ボアホールを利用した電磁気観測の際の観測中断であり、3月中旬から4月中旬までの欠測は電流送信器出力部分に入っていた安全用フューズ切断によるデータの欠測である。従って、3月16-25日の期間に実施された注水実験に関して比抵抗変化観測のデータを取れなかったのは非常に残念であった。しかし、注水前後の値の比較では、有意な量のオフセット的な変化は見られないことから、仮に比抵抗観測システムが正常に稼働していても、注水に関連した比抵抗変化を捕らえた可能性は低いようである。

97年7月までは、比較的安定した比抵抗変化を示していたが、97年7月に入り変動が目立つようになった（6月下旬から変化が始まっているように見える組み合わせもある）。地表電極が絡む組み合わせで、特に変動が顕著であるので、この電極周辺のごく表層に原因を持つ変動であろう。500m 孔周辺は、ボーリング工事終了後から96年12月上旬にかけて約3mの盛り土が行なわれているが、この盛り土の圧密等の変化によるものと見られ、おそらく、特に97年6月以降の降雨が圧密などに直接影響しているのであろうと考えられる。Fig.5(c)に4月19日-12月16日の期間に野島断層観測室で観測された降雨量の1日毎の積算値を示す。ただし網掛けの部分の期間は観測データがない。

5 おわりに

第3節で示した比抵抗変化の予測シミュレーションでは、厚さが20mで約20km×20km広がりを持つ領域の比抵抗が一斉に変化したと仮定した上での

計算結果である。現実的には、断層の回復過程においてそのようなことが生じるとは考えにくい。その意味では、予想される変化量は、第3節で示した量よりもずっと小さいものであろう。したがって、現実の3次元比抵抗構造を取り入れたうえで、さまざまな可能性についての検討を加えて行くことが必要である。

今回は、実際の比抵抗観測における問題については、詳しい検討を行なわなかったが、前節で示した観測結果は、すでに述べたように、夜間値を用いたものである。使用している観測装置は、周期2秒の交替直流を用いたものであるが、電車等からの漏洩電流による影響を完全には、取りきれていない面があり、1つの電極組み合わせ当たり25周期分の計測値をスタッキングして1回の計測値としている方式等の改良というような課題は、まだ残されている。電極の組み合わせによっては、S/N比が低下し、夜間のみのデータでも、日毎の見掛け上の変動が大きい電極組合せもある。このような点を今後改善し、全ての電極組合せを用いた比抵抗変化のイメージング（例えば、Tripp et al.(1984), Daily and Owen(1991), 内田(1993)など）を実施して行く予定である。

一方、現実の3次元比抵抗構造という観点に戻って考えてみれば、横野・大志万（1998）の結果によれば、地震断層面に沿って、低比抵抗層が薄く分布していることが明らかにされているが、それがどの程度の深さまで続いているのかは、明らかではなく、現時点では、550m程度の深さ、つまり500m孔の深さ程度までしか確認できてはいない。その意味では、これまでの研究から実際に明らかにされている野島断層周辺の3次元比抵抗構造の状況を考えると、まだ、真の意味での観測システム評価は完成しているとは言えない。しかし、深部まで十分な精度で、数10mの厚さの低比抵抗層の連続性を比抵抗探査により明かにすることは、各種の探査法を用いたとしても、まだまだ困難があるというのが現状である。

既に述べたように、比抵抗変化予想シミュレーションの際には、観測域周辺で精密な3次元比抵抗構造の決定が必要になって来る。つまり、ある種のモニターを行なう際には、その観測量に關しての周辺での分布構造を合わせて決めておく必要があるわけである。その意味で、本研究は、その緒に着いたばかりであると言える。

謝 辞

野島断層500m孔の比抵抗観測は多くの方々の協

力を得てはじめて観測を開始することができた。ここに感謝の意を表わしたい。孔内への電極設置では住鉦コンサルタントの川西氏・西岡氏をはじめとする多くの方々の協力を得た。また、JRC の 2 人の城森氏と東氏には、孔内電極および観測装置の設置で協力して頂いた。さらに、地表電極の設置は、神戸大学の山口覚・井口博夫氏、京都大学理学部の田中良和氏をはじめとする多くの方々の協力を得て実施した。今回の数値計算には、京都大学大型計算機センターの計算機 (M-1800) を使用した。

参考文献

- 安藤雅孝・島崎邦彦・竹村恵二 (1998): 総論; 断層解剖計画, 月刊地球, 号外 No.21, 5-12.
- Ito, H. (1996) : Structure and physical properties of the Nojima fault, 断層解剖計画シンポジウム, 平成 8 年度京都大学防災研究所共同利用研究成果報告書, 37-59.
- 内田利弘 (1993) : ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗 2 次元インバージョン, 物理探査, 46, 105-119.
- 大志万直人 (1998): 野島断層 500m 孔における比抵抗連続観測, 月刊地球, 号外 No.21, 27-32.
- 京都大学防災研究所・野島断層解剖計画 (1998) : 野島断層 500m ボアホールにおける比抵抗連続観測 (1996 年 12 月-1997 年 10 月), 地震予知連絡会会報, 59, 473-476.
- 佐々木裕 (1984) : Dipole Mapping における 3 次元構造のモデル計算, 物理探査, 37, 7-14.
- 島崎邦彦・安藤雅孝・西上欽也・大志万直人 (1998): 野島断層小倉における注水試験, 月刊地球, 号外 No.21, 33-37.
- 竹村恵二・村田明広・宮田隆夫・林愛明・外田智千 (1996): 断層解剖計画における掘削コアの記載 (層序と構造, 年代), 断層解剖計画シンポジウム, 平成 8 年度京都大学防災研究所共同利用研究成果報告書, 115 - 119, 1996
- 横野豊・大志万直人 (1998): 野島断層での hole-to-surface dipole 法による 3D 比抵抗構造探査, 月刊地球, 号外 No.21, 76-81.
- 水永秀樹・牛島恵輔 (1991): 流電電位法の 3 次元モデリング, 物理探査, 44, 215-226.
- 村上英記・橋本武志・大志万直人・住友則彦・山口覚・本蔵義守 (1998): 注水実験時の電磁気観測, 月刊地球, 号外 No.21, 54-58.
- 吉岡龍馬 (1980): 山崎断層, 塩田温泉の塩素濃度の変化と地震, 地震予知研究シンポジウム (1980), 159-162.
- Chu, J.J., X. Gui, J. Dai, C. Marone, M.W. Spiegelman, L. Seeber, and J.G. Armbruster (1996): Geoelectric signals in China and the earthquake generation process, J. Geophys. Res., 101, B6, 13869-13882.
- Daily, W. and E. Owen (1991) : Cross-borehole resistivity tomography, Geophysics, 56, No.8, 1228-1235.
- Dey, A. and H.F. Morrison (1979): Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures, Geophysics, 44, 753-780.
- Electromagnetic Research Group for the Active Fault (1982): Low Electrical Resistivity along an Active Fault, the Yamazaki Fault., J. Geomag. Geoelectr., 34, 103-127.
- Handa, S. and N. Sumitomo (1985) : The Geoelectric Structure of the Yamasaki and the Hanaori Faults, Southwest Japan., 37, 93-106.
- Honkura, Y., A.M. Isikara, D. Kolcak, N. Orbay, S. Sipahioglu, N. Ohshiman, and H. Tanaka (1985): Magnetic anomalies and low ground resistivity as possible indicators of active fault location: Preliminary results of electric and magnetic observations from the western part of the North Anatolian Fault Zone, J. Geomag. Geoelectr., 37, 169-187.
- Lowry, T., M.B. Allen, and N. Shive (1989): Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques, Geophysics, 54, 766-774.
- Masne, D.L. and C. Poirmeur (1988): Three dimensional model results for an electrical hole-to-surface method: Application to the interpretation of a field survey, Geophysics, 53, 85-103.
- Miyakoshi, J. (1986) : Anomalous Time Variation of the Self-Potential in the Fractured Zone of an Active Fault Preceding the Earthquake Occurrence., J. Geomag. Geoelectr., 38, 1015-1030.

- Morrison, H.F. and R. Fernandez(1986) : Temporal variation in the electrical resistivity of the earth's crust, J. Geophys. Res., 91, 11618-11628.
- Park, S.K.(1997) : Monitoring resistivity change in Parkfield, California: 1988-1995, J. Geophys Res., 102, B11, 24545-24559.
- Park, S.K. and D.V. Fitterman(1990) : Sensitivity of the telluric monitoring array in Parkfield, California, to changes of resistivity, J. Geophys Res., 95, B10, 15557-15571.
- Sumitomo, N. and K.Noritomi(1986) : Synchronous Precursors in the Electrical Earth Resistivity and the Geomagnetic Field in Relation to an Earthquake near the Yamazaki Fault, Southwest Japan., J. Geomag. Geoelectr., 38, 971-989.
- Tripp, A.C., G.W. Hohmann, and C.M. Swift(1984): Jr, Two-dimensional resistivity inversion, Geophysics 49, 1708-1717.
- Wilt, M.J. and N.E. Goldstein(1981) : Resistivity Monitoring at Cerro Prieto, Geothermics, 10, No.3/4, 183-193.
- Yukutake, T.(1985) : A review of studies on the electrical resistivity structure of the crust in Japan., Earthq. Predict. Res., 3, 345-364.

**Continuous Resistivity Measurement using the 500m Borehole
at the Nojima Fault in Awaji Island, Japan.
– Resistivity Change Evaluation using 3D DC-resistivity Modeling –**

Naoto OSHIMAN, Norihiko SUMITOMO and Masataka ANDO

Synopsis

In the southern tip of the Nojima fault accompanying the 1995 Hyogo-ken-nanbi earthquake, we have made continuous resistivity measurements since Dec., 1996 in order to observe a recovery process of the fractured fault with using borehole electrodes at a depth of about 500m and electrodes at the earth's surface. We will describe the measurements system, resistivity changes evaluation obtained by 3D DC-resistivity modeling, and observed results.

Keywords: resistivity, borehole observation, Nojima fault