

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

吉野登志男¹⁾・歌田久司・行武 毅²⁾

東京大学地震研究所

¹⁾ 現在 131-0046 東京都墨田区京島 3-55-10

²⁾ 現在 192-0352 東京都八王子市大塚 58-63

Variations in Earth Resistivity at Aburatsubo, Central Japan (1983～1997)

Toshio YOSHINO¹⁾, Hisashi UTADA and Takesi YUKUTAKE²⁾

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

¹⁾ Present address 3-55-10 Kyoujima, Sumida-ku, Tokyo 131-0046, Japan

²⁾ Present address 58-63 Otsuka, Hachioji, Tokyo 192-0352, Japan

Abstract

Highly sensitive measurements of resistivity variations have been carried out at the Aburatsubo Geophysical Observatory in Kanagawa prefecture, in central Japan, since 1968. The following observations were reported by Yamazaki (1980b, 1983), based on the results obtained during the period from 1968 to 1982.

(1) There are variations at tidal frequencies. The apparent correlation leads to the interpretation that resistivity changes of 10^{-4} correlate with the Earth's strain of 10^{-7} due to tidal loading.

(2) There is a coseismic step-wise change in resistivity. This change was ascribed to the Earth's residual strain due to earthquakes.

(3) Gradual resistivity changes of 10^{-5} ～ 10^{-6} with a duration of several hours sometimes precede the coseismic step.

Although important observations were made, previous work was not able to provide a physical interpretation of resistivity changes. The authors have been continuing measurements since 1983.

In 1990 a new device of measuring earth resistivity and three components of acceleration of ground motions was installed, which enabled digital recording at a sampling rate of 50 Hz.

From recent investigations, the following has been clarified which might help us to reveal the mechanism of resistivity changes.

(1) There are periodic and non-periodic variations of non-seismic resistivity changes. Most significant are annual and tidal variations. The former reaches maximum and minimum respectively in April and in October with an amplitude of 10^{-2} . The annual change may be explained by the temperature effect confirmed by a laboratory experiment, but it is also possible to explain it by annual changes of the infiltration distance of sea water. On the other hand, the results of past work were recognized for resistivity changes of 10^{-4} at tidal periods. Typical non-periodic resistivity changes of 10^{-3} with a duration of several ~ ten days were found to have a good correlation to changes in the atmospheric pressure. Ratio of resistivity

to pressure change was estimated as $3\sim 6\times 10^{-5}/\text{hPa}$. Precipitation of 40~50 mm was occasionally found to cause a gradual resistivity change of 10^{-4} . The presence of precursory changes was examined for the resistivity record from 1983 to 1997, but no anomalous changes were recognized just before the coseismic steps after classifying the non-periodic resistivity changes of various causes.

(2) New and detailed properties of coseismic resistivity changes were described. The polarity of the coseismic step was found to have no relation to the push-pull of seismic waves, but to show a clear seasonal variation, i.e., resistivity increases in summer and decreases in winter. It was also found that this seasonal change correlates well with the annual variations of resistivity. Looking at the time variations in more detail, it was found that the coseismic change never starts at the time of P-wave arrival but at arrival of S or surface wave. High-speed digital recording revealed a new type of co-seismic resistivity change, which showed a waveform similar to a seismogram of surface wave due to the Far East Off Hokkaido Earthquake (October 4, 1994).

Key words : *Earth resistivity, Coseismic resistivity change, Resistivity variometer, Aburatsubo*

1. はじめに

岩石の比抵抗はこれを構成している鉱物組成の違いによって異なるが、温度、圧力、含水量にも大きく依存する。もし地殻に応力が作用すれば、岩石の状態変化にともなって地殻内の比抵抗が変化するであろうと推測される。このような比抵抗変化を検出する目的で油壺では1950年代から測定が試みられた。たとえば横山(1952)は横河電機製作所のL-10型大地比抵抗測定器を使用し、Wennerの四電極法により、比抵抗の測定を行い、油壺の海洋潮汐に伴う地殻伸縮変化と比抵抗変化がよく対応していること、さらに大地の歪が 10^{-6} の大きさに対して、比抵抗変化は比抵抗値の 10^{-4} から 10^{-3} に達することを見出した。その後山崎(Yamazaki, 1965, 1966)は室内実験によって岩石の歪と比抵抗の関係を精力的に調べた。その結果、油壺の岩石の比抵抗は圧縮歪に対して数100倍にも増幅することを明らかにし、前記の比抵抗変化も地殻歪の変化に対応するものであると推測している。引き続き山崎(1973, 1980a)は 10^{-6} オーダの高感度で連続観測ができる比抵抗変化計を開発し、地殻変動観測壕内で1968年5月より連続観測を開始した。比抵抗連続観測の開始後、潮汐周期の比抵抗変化に重なって地震の際に地震動の開始とほぼ同時にステップ状の変化を観測した。このような地震に伴う比抵抗変化は1982年までに64例観測された。しかも、この内34例については地震の前に異常な比抵抗変化が認められたと報告している(山崎, 1980b, 1983)。また、ステップ状の変化は地震によって比抵抗が増加する場合と減少する場合がある。この現象は地震の発震機構に直接関係しており、観測点が地震初動の押しまたは引きの領域にはいることによって極性(増減)が決まるのではないかと考えられた(Rikitake and Yamazaki, 1969, 山崎, 1978)。

しかしその後観測は筆者らによって継続され、新たな事実が見い出された。たとえば、地震に伴う比抵抗変化の極性は発震機構には関係なく明瞭な季節変化があることがわかった(吉野・行武, 1991)。また、従来の比抵抗変化の記録は打点記録計で1時間に20mmの送り速度で行っていたが、この記録計に加え、吉野・行武は1990年3月よりTEAC製のデジタルレコーダDR-F1と加速度計3成分を設置して地震動によってトリガーを掛け、50 Hz (または20 Hz) のサンプリング速度で比抵抗と加速度3成分を同時に記録する

ようにした。これにより極めて短周期の変化を解析することができるようになった。時間の解像度が上がった結果、それまで地震動と同時に変化すると見られていた比抵抗変化を詳しく見ると P 波でなく、多くの場合 S 波の到来時に変化が開始していることがわかった。さらに長期間の変動にも着目して調べたところ、比抵抗は 4 月頃に極大、10 月頃に極小となる 10^{-2} オーダの年周変化があることもわかった (吉野・歌田・行武, 1994)。また、数日～10 日の時間スケールの 10^{-3} オーダの比抵抗変化も認められた。この論文では、主として山崎 (1983) の報告以降明らかになったこれらのいろいろな時間スケールの比抵抗変化の特性や原因を潮汐・温度・歪・気圧などとの関連で検討する。また、1983 年以降の地震時の比抵抗変化について地震の前に異常な変化があるかどうかについても調査した結果についても報告する。

2. 観測点の位置、環境および比抵抗構造

観測は地震研究所の油壺地殻変動観測所で行っている。観測所は Fig. 1 の地図に示すように東京から南へ約 60 km、神奈川県の三浦半島の西海岸にある。油壺観測所付近の地質は新第三紀中新世三浦層群三崎層に属し、この付近一帯の地質はスコリア質粗粒砂岩と記載されている (小玉ほか, 1980)。

観測所は Fig. 2 に示すような配置になっている。1968 年より 1977 年までは観測壕 Vault 1 の R1 内に、その年以降は観測壕 Vault 2 の R2 に電極を埋設し連続観測を行っている。海岸から R1 の電極の位置までは約 15 m、R2 内の電極の位置までは約 25 m である。R2 の電極の高さは 1994 年 6 月 8 日の平均海面から 2.1 m である。観測壕 Vault 2

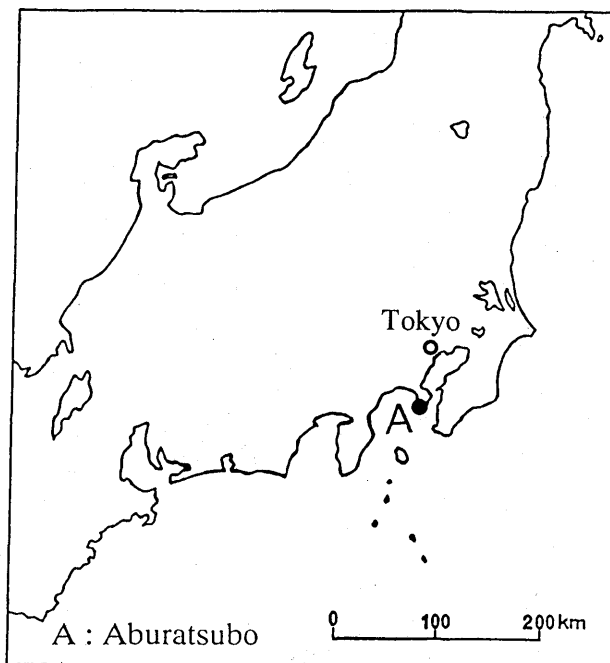


Fig. 1. Location of observation site.

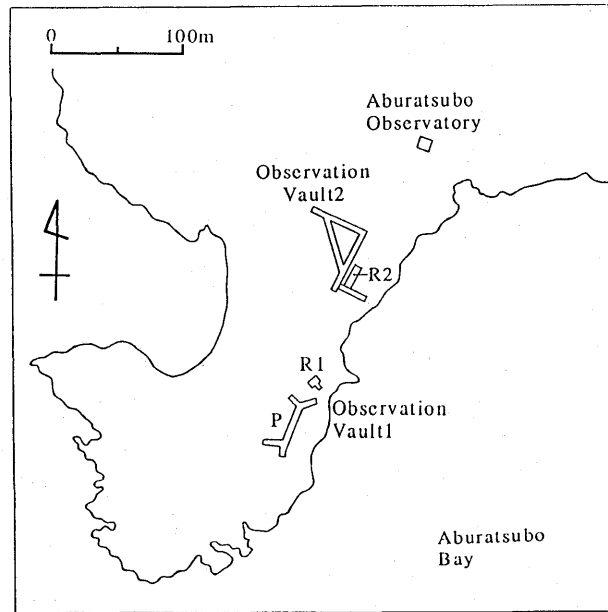


Fig. 2. Location of observation vaults. Observations were carried out in Vault 1 during the period of 1968-1977, and in Vault 2 from 1977 to present.

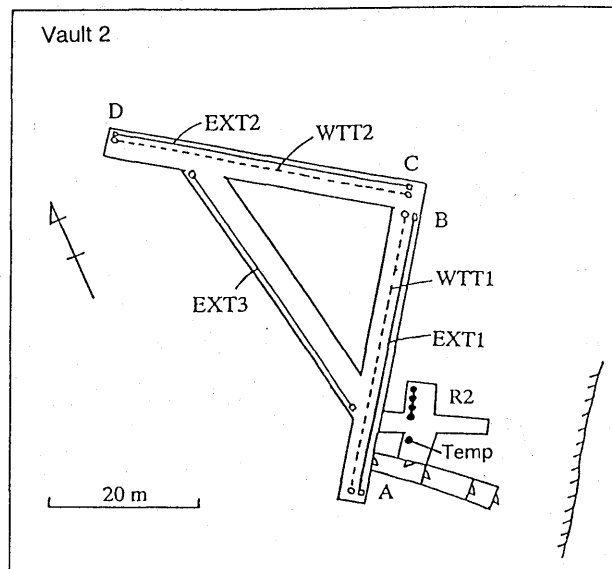


Fig. 3. Plan view of observation vault 2. R2 denotes Resistivity observation room. In R2, solid circles are four electrodes for resistivity measurements. Temp in R2 denotes the sensor for temperature measurements. Ext 1-3 and Wtt 1-2 indicate silica tube extensometers and water tube tiltmeters, respectively.

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

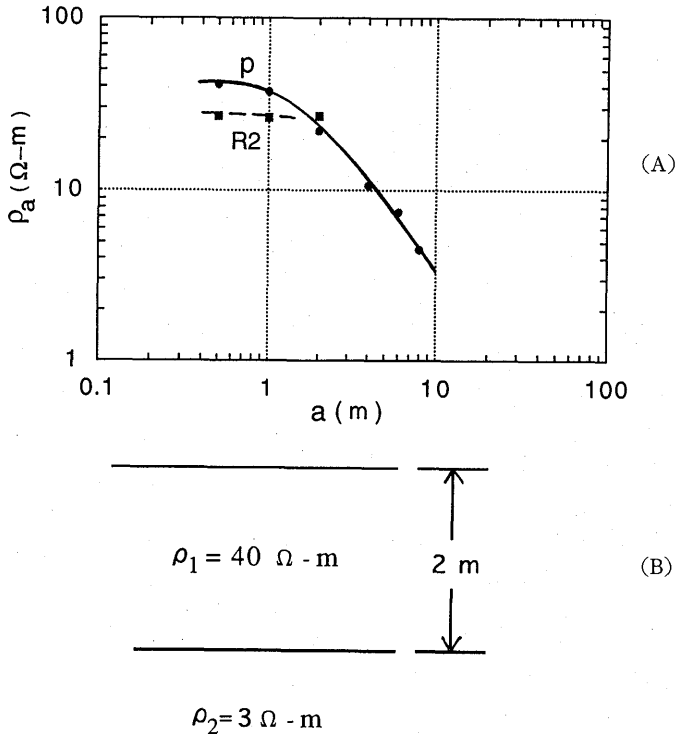


Fig. 4. Apparent resistivity sounding curves from the former extensometer vault P and from the resistivity observation vault R2 (A). An optimum model of the ground resistivity structure inverted from the sounding curve P is shown in (B).

の土のかぶりは入口側は5m, 奥の方は10m程である。海岸線に極めて近い場所に作られているため、観測値に対して海洋の影響が大きいことに注意する必要がある。観測壕R1内では電極はN81°W方向に埋設されていた。Fig. 3は現在観測を行っているR2内の比抵抗の電極(黒丸4個を結んだ所)と伸縮計(Ext1, Ext2, Ext3)及び傾斜計(Wtt1, Wtt2)の位置を示す。4本の電極はN20°E方向に配置されている。電極を埋設してある室R2は戸及び壁で他の室と仕切られている。室内の温度は年間を通じて $17 \pm 0.60^{\circ}\text{C}$ に保たれている。湿度は90%前後である。電極の近くの黒丸(Temp)は地下約1mまでの温度を計測しているセンサーの位置を示す。壕内の地面は礫や岩状で固いが、地下約30cmから1mまでは砂状になっている。1994年4月と5月の2回観測室R2内から岩石、礫、砂を採取し、含水率を測定した。それらの含水率は2回とも重量比で16～17%の範囲であった。

観測壕の地下の比抵抗構造を1997年9月5日に測定した。測定は地中に交替直流を流し込む Wenner 法で行い、計器は横河電機製作所の3244型大地比抵抗測定器を使用し、直読値から大地の見掛け比抵抗を計算した。Fig. 4 (A)はこの見掛け比抵抗値を縦軸に、電極間隔 a を横軸にとって結果を示した。図中のPはVault1の壕P内の見掛け比抵抗値である。電極間隔 a は0.5mから8mまで行った。2層の水平成層構造を仮定して、この見掛

け比抵抗値にもっとも適合するよう求めたモデルを同図 (B) に示した。壕 P の比抵抗構造は、表面から地下 2 m までは $40 \Omega\text{-m}$ 、それ以下は $3 \Omega\text{-m}$ になっている。この $3 \Omega\text{-m}$ の低い値は海水が浸透しているためと考えられる。壕 P 内部の温度 (1997 年 11 月 7 日測定) は約 16°C 、湿度は約 95% であった。同図 (A) の R2 は壕 R2 内の見掛け比抵抗値である。壕 R2 では電極間隔 a は 0.5 m, 1 m, 2 m の 3 点でしか測定ができないため、壕 R2 の比抵抗構造は表層が $27 \Omega\text{-m}$ であるが、それよりも深いところはよく判らない。

3. 比抵抗の測定方法

比抵抗変化計の動作原理を Fig. 5 によって述べる。4 本の電極を一直線上に等間隔 a (m) に埋め、外側 2 本の電極に一定電流 I (Ampere) を流し、内側 2 本の電極に生じる電位差を V (Volt) とすれば、大地の見掛け比抵抗 ρ ($\Omega\text{-m}$) は

$$\rho = 2\pi a (V/I) \quad (1)$$

という関係によって求められる。外側の電極に流す電流を一定にすれば、内側 2 本の電極間の電位差を測定することにより大地の比抵抗変化を求めることができる。内側電極間 P_1, P_2 間に微小な電圧変化が生じたとすると、その電圧変化は増幅器に加えられ、サーボモータを電圧変化量に比例した角度だけ回転する。このサーボモータはギヤで平衡器のポテンショメータ (可変抵抗器) PA と回転角度を直流電圧に変換するためのポテンショメータ PB に直結している。平衡器のポテンショメータ PA は増幅器の入力電圧が零になるように回転する。他方のポテンショメータ PB はその回転角度を直流電圧に変換する。即ち比抵抗の変化を記録する。サーボモータからポテンショメータへの回転部の応答

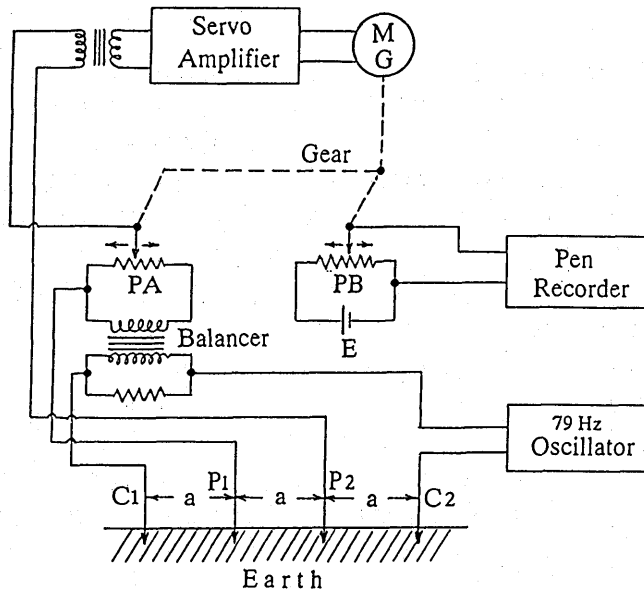


Fig. 5. Block diagram of the resistivity variometer.

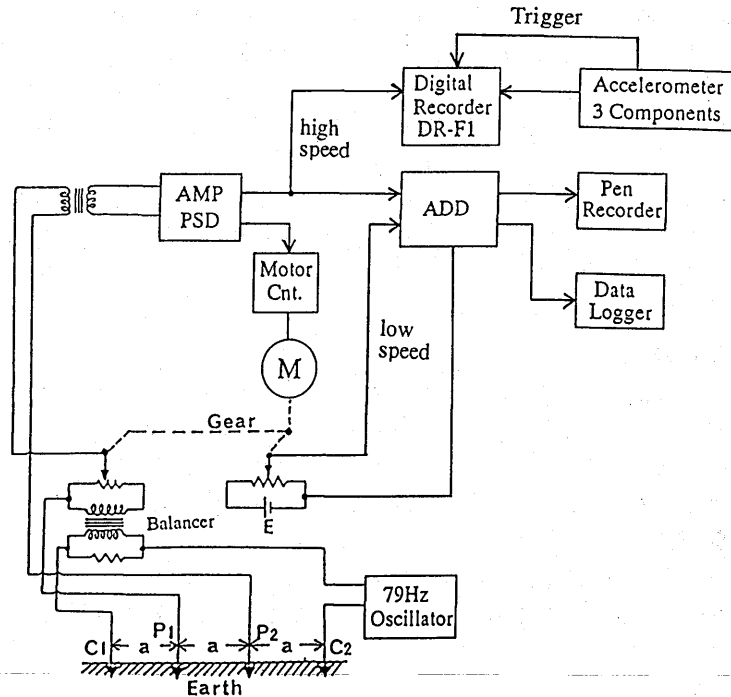


Fig. 6. Block diagram of the improved resistivity variometer equipped with digital recorders.

時間は、サーボモータが信号に応答し、回転が終了するまでに要する時間で決まり 2～3 秒程度である。したがってこの回路ではそれ以上速い変化は記録できない。しかしながら、記録は 10^{-6} 程度の微小な変化まで検出可能である。

油壺での観測の場合、電極間隔は 2 m、電流は交流 79 Hz (33 Hz に切り替えも可能) で 100 mA、電極の方向は N 20° E で行っている。電極は電流電極、電位電極とも 1968 年 5 月から 1986 年 9 月までは直径 20 mm、長さ 30 cm の炭素棒を、1986 年 9 月以降は直径 28 mm、長さ 60 cm の鉛管を電気分解して作った鉛—塩化鉛電極を用いている。比抵抗変化計の制御部、増幅部、記録部は観測所内に電極は壕内に設置し、それらはケーブルで結んでいる。1968 年より 20 年以上もの間、比抵抗変化の記録は横河電機製作所の打点記録計で 1 時間に 20 mm の送り速度で行っていた。

1990 年に地震波形に対応した速い記録をも取れるように変更したのでそのブロック図を Fig. 6 に示す。変更した部分の動作原理を説明する。

モータを使って抵抗ブリッジのバランスを自動的に追尾する動作原理は前記と変わらない。電極 P₁, P₂ 間の微小な電圧変化は増幅器 (AMP) で増幅し、それを位相検波回路 (PSD) で 79 Hz 信号の振幅の変動分のみを取り出す。この出力信号はディジタルレコーダ DR-F1 と直流サーボモータに行く。ディジタルレコーダに行った信号は加速度計でトリガーを掛け、地震の起きたときだけ加速度波形と共に記録する。この信号は回転部の応答が関与せず高速応答するので、50 Hz (又は 20 Hz) でサンプリングを行うことができる。

もう一つの信号は直流サーボモータの制御器 (Motor Cnt.: V/F 変換, 分周などを行う) に行き, サーボモータを電圧変化量に比例した量だけ回転させる. モータの回転時間は制御器内の分周比を設定することにより数秒, 1 分, 4 分, 16 分, 1 時間, 2 時間と変えることができる. モータの回転時間を速く設定すると, AMP/PSD の入力部の電圧が速くゼロにセットされてしまうので, ここでは 16 分に設定している. このことによって 16 分間程までの P1, P2 間の微小な高速電圧変化をデジタルレコーダに記録することが可能となる. 長周期の記録は高速応答成分と低速応答成分を加算器 (ADD) で合成し, 打点記録計や Data Logger に記録する.

4. 比抵抗の時間変化

記録された比抵抗変化には潮汐現象に関連した半日周期 (10^{-4} オーダ) や 1 年周期 (10^{-2} オーダ) のような周期的変化が顕著である. そのほか数日~10 日の非周期的変化 (10^{-3} オーダ), 地震の際にステップ状の変化 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$ オーダ) などが見られる. 変化量から見ると年周変化が最も大きく, 地震の際のステップ状の変化は小さい.

4.1 周期的変化

油壺における平常時の比抵抗には 1) 潮汐周期で変動する 10^{-4} オーダの変化 2) 4 月頃極大になり, 10 月頃極小になる 10^{-2} オーダの年周変化がある. まず, 変化量の大きい年周変化について記す.

4.1.1 年周変化

油壺で観測される比抵抗変化の中で年周変化が最も振幅が大きい. この年周変化は 4 月頃極大に, 10 月頃極小となり, その振幅は 10^{-2} オーダである. 1983 年 1 月の比抵抗値 (ρ_0) を基準にした比抵抗変化

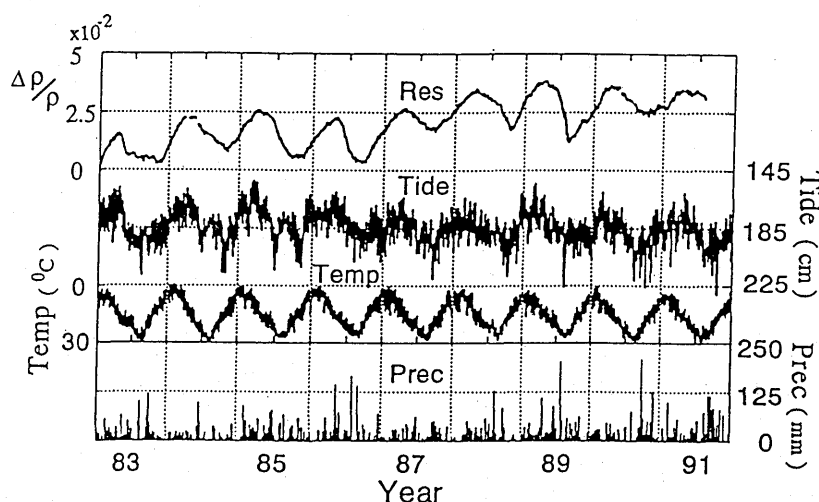


Fig. 7. Variations of resistivity, tide, air temperature, and precipitation for the period from 1983 to 1991. Plotted are values taken every day at 0 o'clock (JST) for resistivity, daily mean values of tide and air temperature and daily total values for precipitation.

$$\Delta \rho / \rho_0 = (\rho / \rho_0) - 1 \quad (2)$$

の毎日 0 時 (JST) の値を 1983 年 1 月から 1991 年 7 月までの 8 年 7 ヶ月間を图示したのが Fig. 7 の Res である。振幅約 2×10^{-2} の年周変化が顕著に認められる。比抵抗の日変化は 10^{-4} オーダで年周変化に比べると 2 桁も小さいから、1 日の特定時刻 1 点のサンプリングでも年周変化をみる上では日変化の影響を大きく受けることはない。この年周変化は経年変化も認められる。比抵抗値はこの 8 年 7 月の期間に少しずつ増加している。比抵抗の年周変化の原因を明らかにするために海洋潮汐や温度、雨量の変化を調べてみた。同図の Tide は油壺湾における潮位の日平均値、Temp は油壺より約 3 km はなれた気象庁の三浦観測点における外気温の日平均値である。両者は比抵抗変化と比べ易くするため、下向きを増加する方向にとって示した。同図の Prec は、三浦における日雨量である。

潮位は 1984, 1985 年の 7～9 月を除くとほぼ 4 月頃を極小、10 月頃を極大とする増減を繰り返している。比抵抗変化と潮位変化とは逆相関の関係にあり、潮位の増加に伴って比抵抗は減少している。気温は 1 月頃に極小、8 月頃に極大となる年周変化を示す。気温が上昇すると比抵抗は減少するが、気温変化に約 2～3 ヶ月遅れて変化する。比較のため Fig. 8 に 1978 年から 1992 年までの油壺地殻変動観測所所得られた伸縮、傾斜の日平均値の変化を示す (油壺地殻変動観測所, 1993)。伸縮計、傾斜計の位置は Fig. 3 に示す。この図から明らかなように伸縮、傾斜の記録に顕著な年周変化は見られない。したがって以下には比抵抗変化と潮位、温度変化との関係について検討する。

比抵抗の年周変化の原因を究明するためにまず Fig. 7 の比抵抗と潮位、温度について、これらの間の相関を調べた。方法は FFT によるスペクトル解析で行った。FFT のプログ

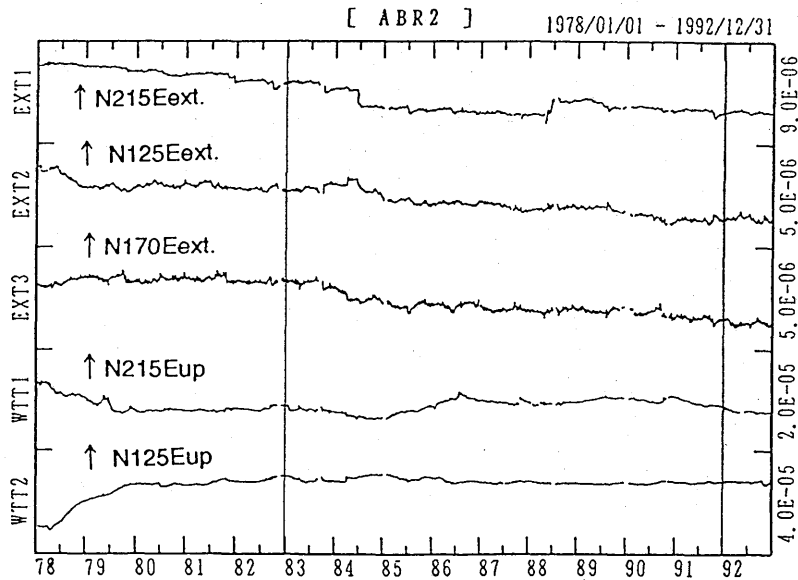


Fig. 8. Variations of extensions (Ext 1～3) and tilts (Wtt 1, 2) for the period from 1978 to 1992. Plotted are daily mean values (after Aburatsubo Geophysical Observatory, 1993).

ラムでデータは2のべき乗の数で実行されるため、線形補間により比抵抗、潮位、温度の各値の2年分の730個を512個に変換し、また欠測値は内挿して求め計算した。その結果を Fig. 9 に示す。図中の (A) は比抵抗と潮位の、(B) は比抵抗と温度のコヒーレンス (上図) と位相 (下図) を示す。位相の進み (正) は比抵抗変化より潮位変化または温度変化が先行することを表す。横軸は周期で単位は日数で表す。点線は1年を示す。比抵抗と潮位のコヒーレンスは1年の場合0.73である。周期が短くなるとコヒーレンスは小さくなるが、周期10日程から数日で再び大きくなる。位相は1年で19.2度で、日数に直すと19日になる。温度とのコヒーレンスは周期1年の場合0.77で、潮位とほぼ同じである。位相のずれは48.3度で、日数に直すと49日となる。

この結果、比抵抗の年周変化と気温変化との間に相関があることが判ったが、前記の温度データは壕の外の気温変化なので、比抵抗観測を行っている壕の地下の温度を1996年1月から直接測り、より詳しく比抵抗変化との関係を調べることにした。Fig. 3の壕R2のTempに深さ1mの穴を掘り、そこに深さ2cm, 34cm, 50cm, 66cm, 98cmの位置に温度センサー (サーミスタ) を埋設して、1分毎の連続測定を行った。温度の測定に使用した測定器は海洋電子 (株) 製の陸上型精密温度測定装置で型式はLPT-001である。この装

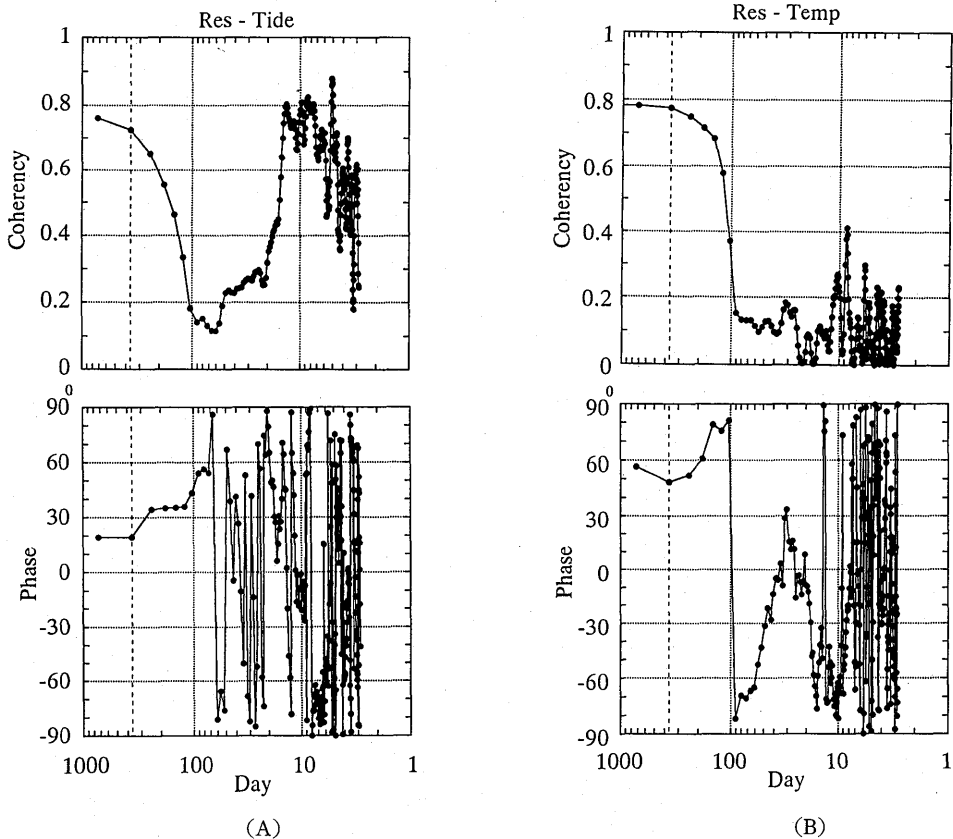


Fig. 9. Period dependence of coherences and phases between resistivity and tides (A), and those between resistivity and air temperature (B).

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

置は温度センサー部と計測部に分かれている。温度センサー部はステンレス製のパイプ (10 Φ×1 m) にサーミスタ 4 個を組み込み地中に埋めた。また、パイプの内外の差を調べるため、パイプの外で深さ 50 cm のところにサーミスタを埋めた測定も行っている。計測部は 13 ch まで測定可能である。これはデータ回収時の温度変動を避けるため別室に設置した。温度センサー部と計測部はケーブルで接続している。測定器の分解能は 1/1000℃ で、精度は 1/100℃ である。

1 分毎の測定値から 1 時間平均値を求め 1996 年 1 月から 1997 年 4 月までの各深さの温度変化をプロットしたのが Fig. 10 (A) である。この図で深さ 34 cm までは細かい短周期変動が見られるが、深くなるにつれ短周期変動は減衰して振幅は小さくなっている。年周変化も深さとともに減衰し、深さ 2 cm では約 1.1℃、98 cm では約 0.6℃ の変化となる。地中 50 cm の深さに埋設したセンサーによる温度変化はパイプ内の深さ 34 cm と 66 cm の間に収まっており、パイプの内外の差による大きな違いはないと推測される。この温度変化と比較するため、1995 年 3 月から 1997 年 4 月までの比抵抗変化の日平均値を図示した

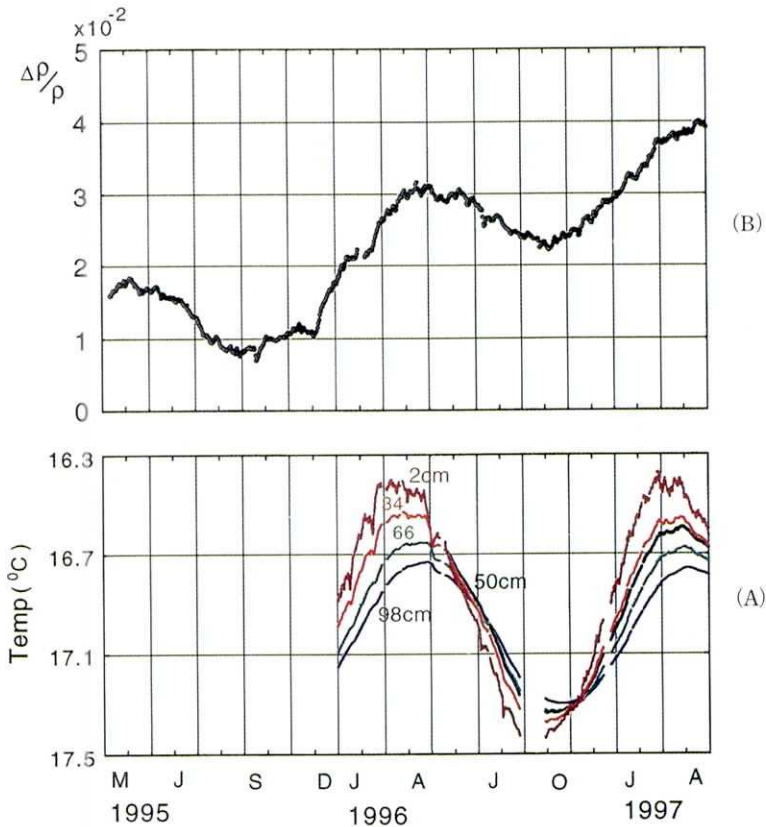


Fig. 10. Ground temperatures at depths of 2, 34, 50, 66, and 98 cm for the period from January 1996 to April 1997 (A), and variations of resistivity for the period from March 1995 to April 1997 (B). Plotted are hourly mean values of ground temperature and daily mean values of resistivity.

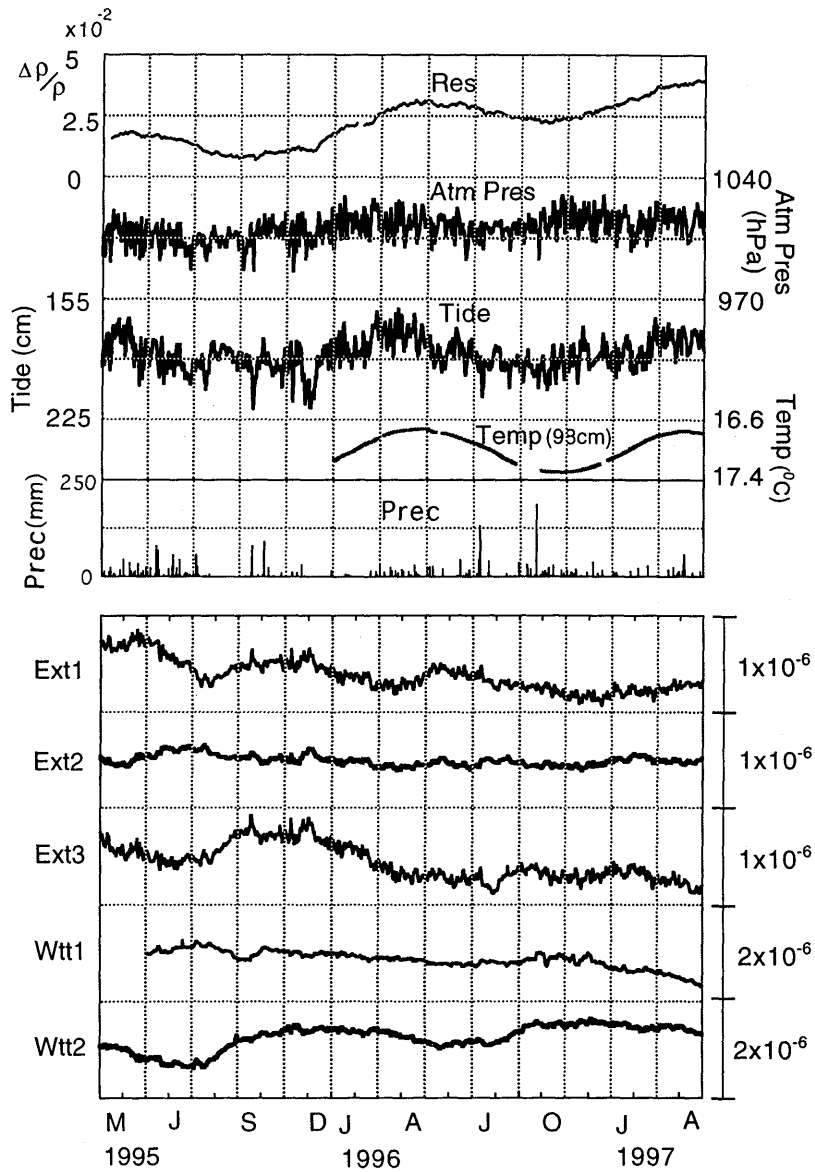


Fig. 11. Variations of resistivity, atmospheric pressure, tide, ground temperature at 98 cm below ground level, and precipitation in the vault (upper panel) and those of extensions in three directions, Ext 1-3, and tilts in two directions, Wtt 1 and 2 (lower panel). Plotted are daily mean values in the period (March 1995-April 1997) except for ground temperature which is shown by hourly mean values and for precipitation by daily total values.

のが同図 (B) である。両図を比較すると比抵抗変化と最もよく位相が合っているのは地中 98 cm の温度変化である。詳しく見ると比抵抗変化に短周期の変化が見られるのに対し、地下 98 cm の温度変化の方には短周期の変化が見られない。

比抵抗と伸縮、傾斜のデータを約 2 年間同じ記録計で記録した。1995 年 3 月から 1997 年 4 月までの前記の比抵抗 (Res), 伸縮 (Ext 1～3), 傾斜 (Wtt 1, 2) の日平均値と、合わせて気圧 (Atm Pres), 潮位 (Tide) の日平均値, 地下 98 cm の温度 (Temp 98 cm) の 1 時間平均値, 三浦における日雨量 (Prec) を図示したのが Fig. 11 である。比抵抗 (Res) は Fig. 10 (B) と同じもので、縦軸のスケールが短くなっている。比抵抗にはおよそ 1.5×10^{-2} の年周変化が認められる。1983 年から 1991 年の期間では約 2×10^{-2} であったのに対し、この期間の振幅はそれに比べ小さい。また、比抵抗値自体の経年的増加傾向は最近でも続いており、1995 年 3 月から 1997 年 4 月までの 2 年 2 ケ月の期間に約 2.5×10^{-2} 増加している。同期間の伸縮 (Ext 1～3), 傾斜 (Wtt 1, 2) の記録は Wtt 2 を除けば顕著な年周変化は見られない。以上のデータから比抵抗の年周変化は潮位と地中温度の変化と相関が高いことが判った。そこでそれらの因果関係を明らかにする目的で、まず、比抵抗変化と潮位変化の関係について検討する。

観測場所は海岸に近いので海水の浸透があり、観測点直下では海岸における潮位変動による水位変動があるのではないかと考えられる。観測場所の比抵抗構造はよくわからないので壕 P の比抵抗構造 Fig. 4 (B) が採用できるものと仮定する。また 3 Ω -m 層は浸透してきた海水を含んだ層であると考えことにする。浸透している水面に振幅 Δz の変動があったときに期待される見かけ比抵抗変化を単純な 1 次元モデルで推定した。その結果 $\Delta z = \pm 1 \text{ mm}, \pm 1 \text{ cm}, \pm 10 \text{ cm}$ について、Table 1 のような結果を得た。モデル計算の結果によれば、見かけ比抵抗変化は水面変動が小さな場合にはほぼ水面変動の振幅に比例し、比例係数は約 4×10^{-3} (/cm) となる。比抵抗の年周変化はおよそ $1.5 \sim 2 \times 10^{-2}$ なので、海水が浸透して低比抵抗層までの深さが 5 cm ほど変動すれば比抵抗の年周変化量を説明できることになる。

次に比抵抗変化と温度変化の関係について検討する。大久保 (1996) は油壺の観測壕内から岩石を採取し、この岩石の比抵抗の基本的な性質を調べた。Fig. 12 はその中から比抵抗の温度依存性を含水率を 10.38% から 39.48% まで変えて測定した結果である。観測壕内の状態では含水率が体積比で約 30% なので、含水率 30.46% のデータを使用すると、この場合の温度依存性 ($d \log \rho / dT$) は -0.013 である。温度変化は小さいという近似を行い、

Table 1. Relative change in apparent resistivity ($\Delta \rho / \rho$) for changes at a depth to the 3 Ω -m layer (Δz) when the ground resistivity structure is given by Fig 4 (B).

| Change in the depth to the 3 Ω -m layer (Δz) | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|---|---|
| $\pm 1 \text{ mm}$ | 3.9×10^{-4} |
| $\pm 1 \text{ cm}$ | 3.9×10^{-3} |
| $\pm 10 \text{ cm}$ | 3.9×10^{-2} |

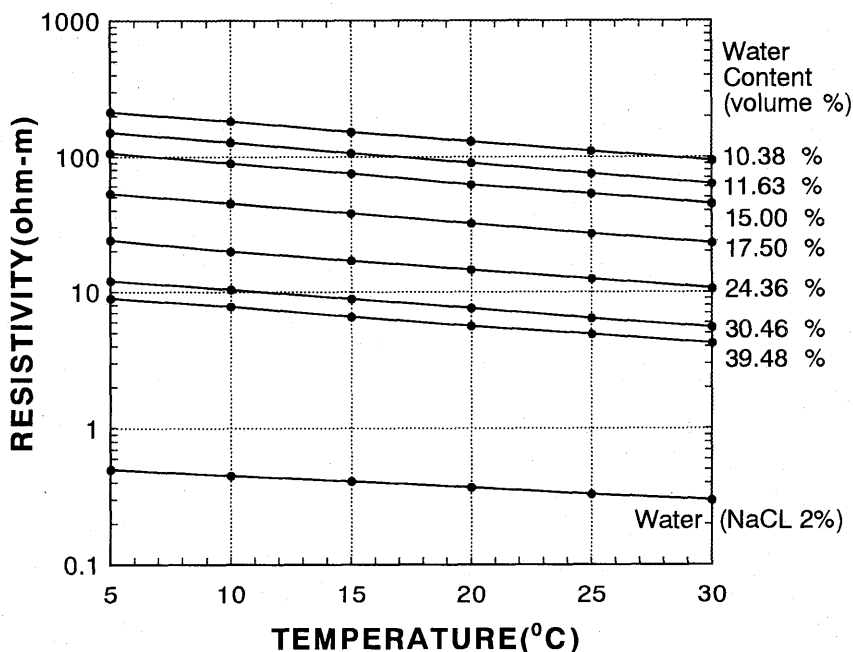


Fig. 12. Temperature dependence of resistivity of water containing rocks with water content (volume %) as a parameter (after OKUBO, 1996).

比抵抗変化と温度変化の間に $d\rho/\rho_0 = -0.03 dT$ という関係式を得た。

Fig. 10 を見ると地中 98 cm の温度の年周変化は約 0.6°C である。これがもし比抵抗変化をもたらすとすると、前記の関係式を用いると、約 1.8×10^{-2} の比抵抗の年周変化となる。これは、この期間に観測された比抵抗の年周変化約 1.5×10^{-2} にほぼ等しい。したがって、観測された比抵抗の年周変化は観測壕の岩石の温度変化によってもたらされていると考えられることも可能である。

4.1.2 潮汐周期変化

比抵抗、気圧、潮位、地中温度 (98 cm)、伸縮 (Ext 1~3)、傾斜 (Wtt 1, 2) の 1 時間平均値を 1996 年 8 月 13 日から 20 日までの 8 日間図示したのが Fig. 13 である。潮汐周期の比抵抗変化は、その 100 倍もの変化をする年周変化の影響を受け、大きく変形する。8 月 13 日から 16 日頃までは年周変化の影響を受け、潮汐周期 (半日周期) の波形が大きく変形している。17 日頃から 20 日まではその影響が小さく半日周期の波形が見られる。比抵抗の半日周期の変化はこの期間を対象にする。この半日周期の振幅は 10^{-4} オードと見積もることができる。伸縮計 Ext 1~3 は共に半日周期で 10^{-7} オードの変化をしている。比抵抗変化/伸縮変化は 10^3 となる。気圧と地中温度 (98 cm) には半日周期の変化は認められず、この周期帯の比抵抗変化とは無関係といえる。

山崎 (1965, 1966, 1969) は潮汐周期の比抵抗変化は、海水の荷重による歪が直接の原因であると考えた。これを説明するために室内実験によって岩石の歪と比抵抗の関係を調べ油壺の岩石の比抵抗は 10^{-5} 程度の圧縮歪に対して数 100 倍も増幅することを示した。し

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)

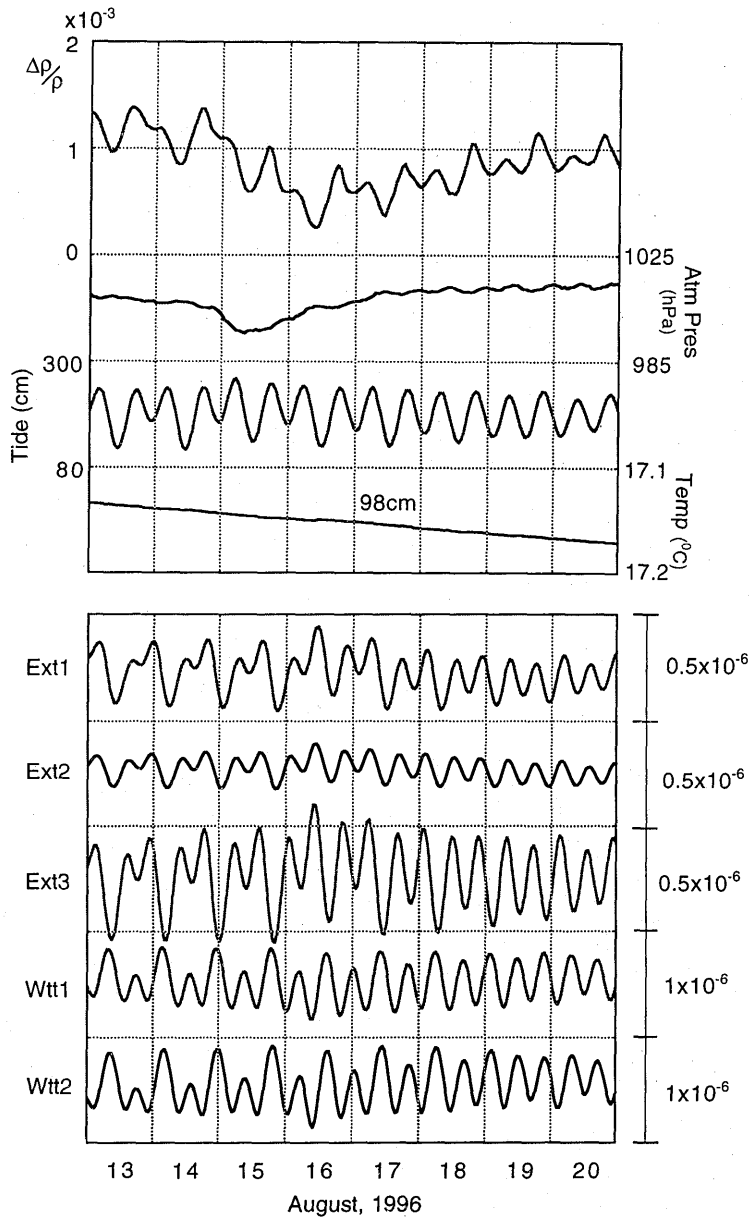


Fig. 13. Variations of resistivity, atmospheric pressure, tide and ground temperature at 98cm below ground level in the vault (upper panel) and those of extensions in three directions, Ext 1-3, and tilts in two directions, Wtt 1 and 2 (lower panel). Plotted are hourly mean values during the period (August 13-20, 1996).

かし、伸縮計の観測によれば Ext1~3 共に半日周期で 10^{-7} オーダの変化をしている。これに対して比抵抗変化は 10^{-4} のオーダであるから、半日周期の比抵抗変化が潮汐荷重によって引き起こされるのであれば、歪に対する増幅率は 1000 倍にもなる。このことから山崎は、油壺の岩石は微小歪に対しては比抵抗変化率が非線形に増大する性質があると結論した (YAMAZAKI, 1974 a, 山崎, 1974 b)。しかしながら、半日周期の変化は海水の浸透による可能性も考えられるので、次節で他の時間スケールの変動と一緒に検討する。

4.2 非周期的変化

4.2.1 数日~10 日の変化

比抵抗 (Res), 気圧 (Atm Pres), 潮位 (Tide), 伸縮 (Ext1) の日平均値, 地中温度 (Temp 98 cm) の 1 時間平均値, 雨量 (Prec) の日量を 1996 年 6 月から 8 月までの 3 ケ月間図示したのが Fig. 14 である。この図では、比抵抗、気圧、潮位、伸縮に共通して数日~10 日間程継続する非周期的変化が見られる。これらの変化量を 6 月 4 日頃, 6 月 19 日頃, 8 月 15 日頃について図から読みとり表にしたのが Table 2 である。ただし、7 月 11 日頃の変化は 7 月 7 日から 11 日の合計 271 mm の降雨による比抵抗変化が予想されるので除いた。まず、気圧と潮位変化の関係を検討すると、気圧変化に伴う水位変化は約 1 cm/hPa であるから、観測された潮位変化量は気圧変化によって引き起こされる水位変化量とほぼ等しい。したがって観測された潮位変化は気圧変化によって引き起こされたと解される。潮汐周期と同じように、10 日程度の変動が海水の荷重による歪が比抵抗を生じていると考え、比抵抗変化/伸縮変化は 10^4 となる。これは、歪が同程度である潮汐周期の変化の場合よりもさらに 10 倍も大きい。したがって、この時間スケールの比抵抗変化が歪によってもたらされている可能性は否定される。

次に、比抵抗変化が浸透している海水面の変動によって発生している可能性について、2 つの特徴的な周期的変化 (半日周期と 1 年周期) と非周期的変化 (10 日) の時間スケールを用いて単純なモデルにより検討する。

比抵抗の年周変化の振幅は 10^{-2} 、半日周期では 10^{-4} である。一方、10 日の変化の振幅は 10^{-3} である。海岸における潮位の時間変化によって陸側に圧力変動が浸透し、結果として海岸付近では地下水位の時間変化が生ずる。簡単のため媒質は一様であると仮定し、水平方向の水位変化による圧力勾配が、水平方向の地下水流動をもたらすと仮定すると、水位 $h(x, t)$ の分布は近似的に 1 次元の拡散方程式

$$\partial^2 h(x, t) / \partial x^2 + A \partial h(x, t) / \partial t = 0 \quad (3)$$

で表わすことができる。ただし拡散係数 A は水の粘性係数、媒質の空隙率、水の圧縮率、浸透率などに依存する。与えられる水位変動が正弦波的で $e^{i\omega t}$ の依存性があるとすれば、

$$\partial^2 h(x, \omega) / \partial x^2 + \lambda^2 h(x, \omega) = 0 \quad (4)$$

となる。ただし、 $\lambda^2 = i\omega A$, $\omega = 2\pi f$, f は周波数である。 $1/\lambda$ は特徴的な水位変動の浸透距離を与え、周期が長い変動ほど内陸部まで水位変化が浸透するという関係を示す。拡散を支配する物理パラメータのうち、媒質の浸透率 (Permeability) はその場所の地質や岩質

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

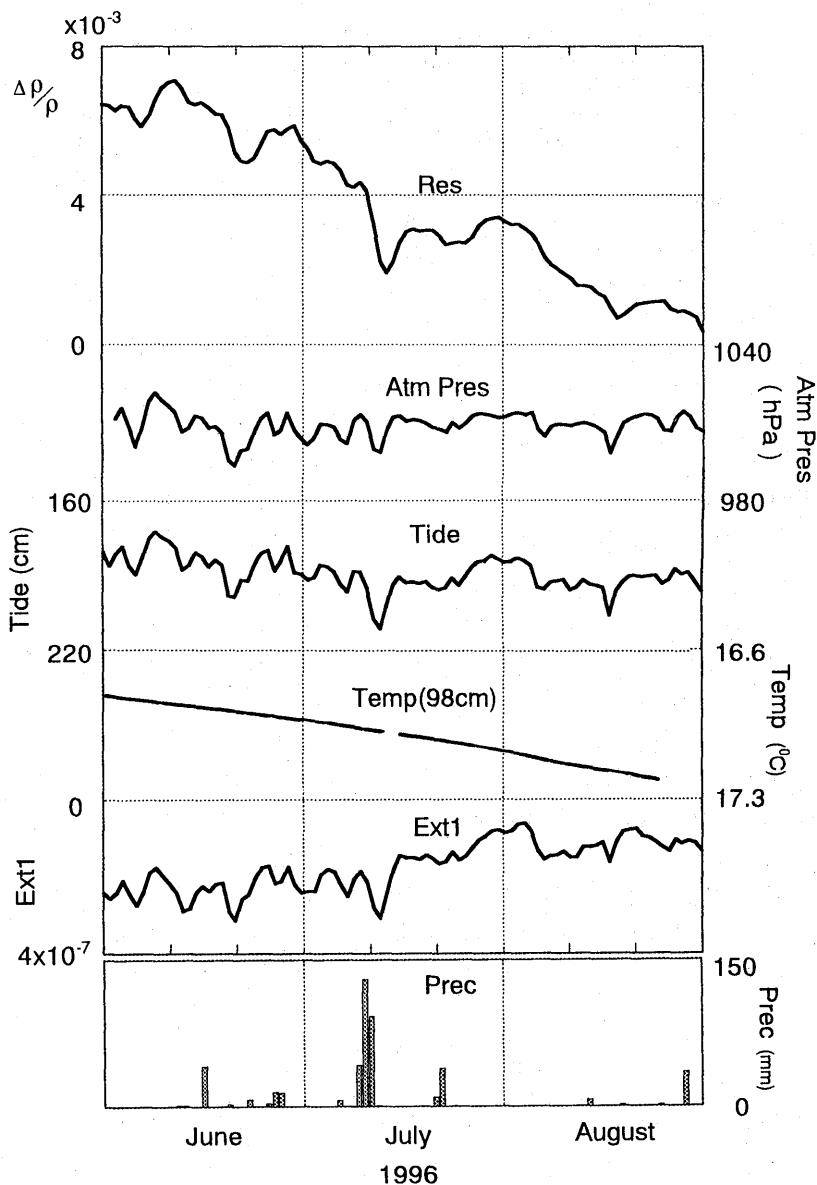


Fig. 14. From the top are variations of resistivity, atmospheric pressure, tide and ground temperature (98 cm), and extension (Ext 1) for the period from June to August, 1996. Precipitation is shown at the bottom. Plotted are hourly mean values, except for precipitation which is shown by daily total values.

によって何桁もの違いがあることが知られている。したがって、係数を決定するためには海岸からはなれた地点での地下水位の連続観測等を行なう必要がある。今のところ拡散係数について具体的な値を与えることができないので、ここでは3つの異なる時間スケール

Table 2. Relations between changes in atmospheric pressure, sea level, extension, and apparent resistivity.

| day | Atmospheric pressure (hPa) | Tide (cm) | Extension | Resistivity ($\Delta \rho / \rho$) |
|---------|----------------------------|-----------|-----------------------|--------------------------------------|
| June 4 | - 15 | + 14 | + 7 x10 ⁻⁸ | - 7 x10 ⁻⁴ |
| June 19 | - 14 | + 14 | +10 x10 ⁻⁸ | -10 x10 ⁻⁴ |
| Aug. 15 | - 10 | + 11 | + 6 x10 ⁻⁸ | - 6 x10 ⁻⁴ |

Table 3. Changes in sea level, apparent resistivity, equivalent water level change, diffusion parameter ν and phase for different time scales.

| Time scales | Tide | Resistivity ($\Delta \rho / \rho$) | Equivalent water level change | Diffusion parameter ν | Phase ($^{\circ}$) |
|-------------|-------|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Half day | 1 m | 3 x10 ⁻⁴ | 0.8 mm | 59.3 | 15.9 |
| 10 days | 16 cm | 1 x10 ⁻³ | 3 mm | 147.8 | 9.0 |
| One year | 25 cm | 2 x10 ⁻² | 5 cm | 361.5 | 3.7 |

(半日, 10 日, 1 年) の比抵抗変化が水位変化を反映しているという立場にたった時, それぞれが矛盾なく説明できるのかどうかについて検討してみることにする. 検討すべき周期とそれぞれの周期において観測データから求めた潮位および比抵抗変化の振幅を Table 3 にまとめる. また, 前節でもとめた地下水位の変化による比抵抗変化の係数 ($4 \times 10^{-3} / \text{cm}$) を用いて比抵抗変化に等価な地下水位の変化を求めた. 観測場所は海岸から約 25 m 離れているので, 潮位を h ($x=0$), 求めた等価地下水位を h ($x=25 \text{ m}$) とおくことにより, (4) 式の解

$$h(x) = h(0) e^{-\lambda x} \quad (5)$$

から λ を見積もることができる. 媒質が均質の場合には λ は周期 T 対して $T^{-1/2}$ の依存性があるので,

$$\nu = \lambda \cdot T^{1/2} \quad (6)$$

として ν を各周期について求めた. もしこのモデルが現象を説明しているのなら, λ の周期性を考慮しているので, ν はほぼ周期によらない値になることが期待される. ところが, Table 3 に見られるように, ν は周期によって異なる値をとることがわかる. すなわち, 仮に半日周期の ν を用いると, 観測点下の水位変化は 10 日スケールで 5 cm, 1 年周期では 15 cm となり, 観測されているよりもはるかに大きな比抵抗変化をもたらすことになる. 逆に, ν として 1 年周期の値を採用すれば, 他の周期の比抵抗変化は観測値よりもはるか

に小さなものとなる。また、Table 3 には求められた ν の値を用いたときの潮位 $h(x=0)$ と観測点下の等価地下水位 $h(x=25\text{ m})$ の位相差

$$\text{phase} = \arctan[\text{Im } h(x=25\text{ m}) / \text{Re } h(x=25\text{ m})] \quad (7)$$

も示している。もし比抵抗変化がこのようなメカニズムで起こっているのなら、この位相差は潮位と比抵抗変化の位相差に等しくなるはずである。ところで、前節で述べたように年周変化についての潮位と比抵抗変化の位相差は約 19 度であるので、表に示したモデルの値 (3.7 度) とはやや異なる。このように、海水の浸透の効果で異なる周期の比抵抗変化を矛盾無く説明することはやや難しいように思われる。ただし、位相差の違いを無視できれば、年周変化についてはこのモデルで説明可能かも知れない。

4.2.2 降雨による比抵抗変化

岩石の比抵抗は含水量に大きく依存する。油壺の大地の比抵抗も降雨によって変わることが予想されるので、降雨と比抵抗の関係について調べた。

普通降雨のある場合には気圧変化が伴う。気圧の変化は歪や地下水位の変化をもたらす、そのことによって比抵抗が変わることも考えられるので、最初に気圧変化だけがあって降雨のなかった場合を取り出して両者の影響を分離することを試みた。Fig. 15 は降雨のない期間の比抵抗変化と気圧変化の比を 1996 年 1 月から 1997 年 4 月までの記録から求め、その大きさを 1 月～12 月の時間軸に対して画がいたものである。比抵抗は気圧 1 hPa の変化につき $3 \sim 6 \times 10^{-5}$ 変化する。6, 7, 11 月の値が大きい、全体の数が少ないので季節的变化があるかどうかは判らない。次に降雨のあった期間の比抵抗変化を Table 4 に示す。No. 2, No. 5 はそれぞれ 43 mm, 50 mm の降雨であるが比抵抗に変化は現れない。No. 1, No. 3, No. 6, No. 8 は降雨時に比抵抗変化があるが、気圧変化によっても説明可能な量である。No. 7 の降雨は 41 mm に対し、比抵抗変化は 98×10^{-5} である。この変化は気

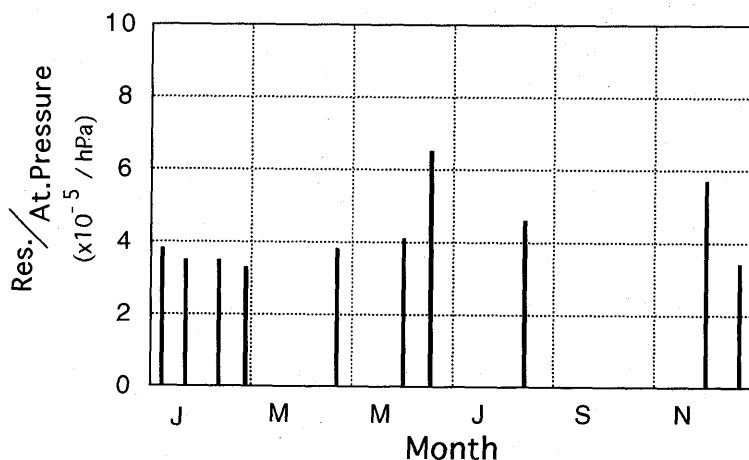


Fig. 15. Ratio of resistivity to atmospheric pressure change for the period from January 1996 to April 1997.

Table 4. Relations between changes of precipitation, apparent resistivity, and atmospheric pressure.

| Record No | Day | Precipitation (mm) | Resistivity ($\times 10^{-5}$) | Atmospheric pressure (hPa) |
|-----------|------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1 | May 21-22, 1996 | 20 | 22 | 10 |
| 2 | June 14, 1996 | 43 | No change | No change |
| 3 | June 25-26, 1996 | 31 | 15 | 8 |
| 4 | July 7-11, 1996 | 271 | 180 | 14 |
| 5 | July 20-21, 1996 | 50 | No change | No change |
| 6 | Aug. 29, 1996 | 36 | 22 | 6 |
| 7 | Nov.11-13, 1996 | 41 | 98 | 12 |
| 8 | Dec. 5, 1996 | 37 | 68 | 20 |

圧変化から推定される比抵抗変化 ($36 \sim 72 \times 10^{-5}$) を上回る量である。そこで 11 月 11-13 日の前 10 日間を調べてみると、断続的に計 43 mm の降雨があった。地面が水分を含んでいる状態のためかも知れない。No. 4 は 271 mm の降雨で、比抵抗は 180×10^{-5} 変化している。これは気圧変化から推定される比抵抗変化 ($42 \sim 84 \times 10^{-5}$) を上回るからその差は降雨による比抵抗変化と推定される。結局、降雨による比抵抗は地面の乾湿状態により 40 ~ 50 mm の降雨でも変化が表われる (10^{-4} オーダ) 場合と表われない場合がある。また、271 mm の場合は 10^{-3} オーダの変化があり、多量の降雨の場合は変化すると推定される。

4.3 地震による比抵抗変化

4.3.1 地震の際の比抵抗変化の記録

山崎は地震の際の比抵抗変化について 1982 年 7 までのデータについて報告している (山崎, 1980 b, 1983)。それ以降の地震による比抵抗変化は 1997 年 3 月までに 96 個観測された (付録の Table A-1 ~ A-7 および Fig. A-1 ~ A-96)。地震時の比抵抗変化量は 10^{-6} から 10^{-4} である。その中の一例を Fig. 16 に示す。1984 年 2 月 13 日 18 時 40 分に、関東南方沖 (油壺からの震央距離 120 km) で起こったマグニチュード 5.3 の地震の際に記録された比抵抗変化である。Fig. 16 と Fig. A-14 は同じものである。曲線 (H) と (L) はそれぞれ高感度と低感度の比抵抗の記録である。比抵抗変化の地震前後の様子をつかむため、比抵抗変化を中心に前後 6 時間表示した。H の感度は図中に表示したものであり、L の低感度は H の 1/5 になっている。緩やかな変化は潮汐周期の変化である。中程の EQ の矢印で示したものがコサイスミックな比抵抗変化である。この記録の時間分解能では地震動と同時に比抵抗変化が起こっているように見え、変化量は 0.15×10^{-4} で、減少している。これに対応した歪変化は、当時の伸縮計には検出する精度がなかったので記録されていない。力武・山崎 (1969) はこの例のようなステップ状の比抵抗変化は伸縮計では検出できないほど微小な歪変化によって引き起こされたものであると考えた。歪変化に対する比抵抗変化率を歪比抵抗変化率 (山崎の論文では岩石歪増倍率という語句が使われている。山崎, 1973 他) と呼ぶことにする。地震のマグニチュードと震央距離から Wideman and Major

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

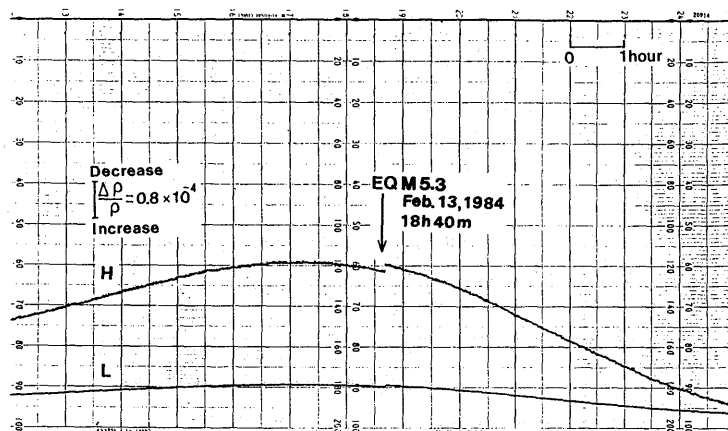


Fig. 16. Changes in earth resistivity observed at Aburatsubo in association with earthquake occurrence by the high (H) and low (L) sensitivity channels. $\Delta\rho/\rho$ indicates the sensitivity of rate of resistivity change for the high sensitivity channel.

(1967) のグラフをもとに油壺観測点での残留歪変化を見積り、それと観測されたコサイスミックな比抵抗変化を比較すると、歪比抵抗変化率は約 1000 となり、比抵抗変化はきわめて微小な歪変化を増幅して検出していると解釈した。Fig. 16 の例では地震時の比抵抗は減少しているが、増加する場合もある。変化量の大きいものでは東京都東部の地震 (M 6.0, 震央距離 56 km, -4.7×10^{-4} , 1988 年 3 月 18 日, Fig. A-47) や伊豆半島東方沖地震 (M5.2, 震央距離 43 km, $+3.6 \times 10^{-4}$, 1988 年 7 月 31 日, Fig. A-50) などがある。遠い地震ではアリユーションの地震 (M6.5, 震央距離 3300 km, 比抵抗は振動的变化, 1986 年 5 月 8 日, Fig. A-30), 北海道東方沖地震 (M8.1, 震央距離 1140 km, $+0.5 \times 10^{-4}$, 1994 年 10 月 4 日, Fig. A-80), 十勝地方南東沖の地震 (M7.8, 震央距離 940 km, -0.6×10^{-4} , 1993 年 1 月 15 日, Fig. A-78) などがある。これらの記録例からもわかるように、半日位の時間幅では潮汐周期の比抵抗変化が卓越する。地震に先行して潮汐変化からずれる異常変化が見られるとして多くの事例が報告されている (Rikitake and Yamazaki, 1976, 1977, 山崎, 1980 b, 1983)。その異常変化を示したとされる量は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ オーダである (山崎, 1980 b, 吉野・歌田, 1997)。しかし、本報告 (4.1 節および 4.2 節) で明らかにしてきたように油壺の比抵抗は 10^{-4} オーダの潮汐周期の変化をしており、それに重畳して 10^{-2} オーダの年周変化をしている。更に、気圧変化により $10^{-3} \sim 10^{-4}$ オーダの変化をする。また、降雨により例えば 40～50 mm の場合 10^{-4} オーダの影響を受けることもある。このため一見地震の前に異常と思われる変化の見られることがある。これ等の効果を考慮すると、地震の前の異常変化はほとんどの場合が消去され、少なくとも 1983 年～1997 年の間においては、地震の前に 4.1, 4.2 節で示した要因によって説明のできないような異常変化は見られなかった。

4.3.2 地震による比抵抗変化と加速度 3 成分の同時記録

前節で述べたように、通常の紙記録では地震とコサイスミックな比抵抗変化との関係を詳しく調べるためには時間分解能が充分ではない。そこで記録方式の改善を行いデジタルレコーダに地震の起きた時トリガーを掛け、50 Hz サンプルングで比抵抗と加速度の波形を同時に記録するようにした。加速度センサーは TEAC 製の圧電型加速度トランス

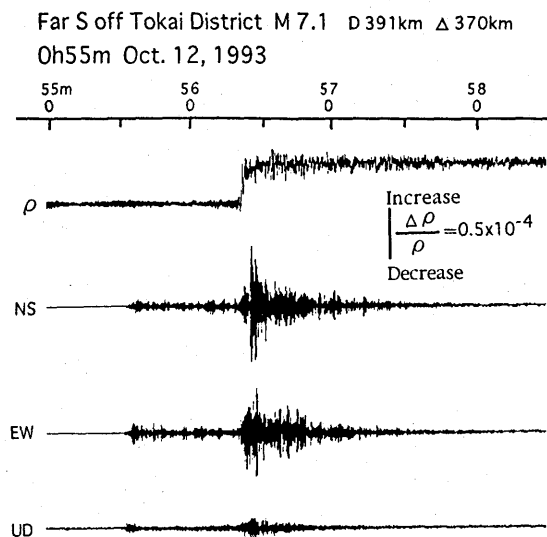


Fig. 17. Changes in earth resistivity (ρ) and records of accelerometer 3 components (NS, EW, and UD) observed at Aburatsubo in association with the earthquake, "Far South off Tokai District" M7.1. D and Δ denote focal depth and epicentral distance from Aburatsubo, respectively.

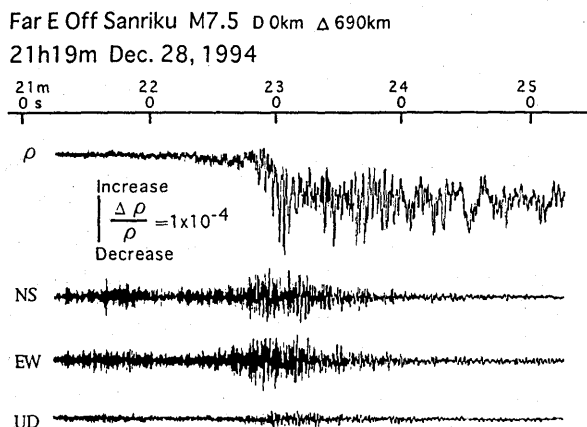


Fig. 18. Changes in earth resistivity (ρ) and records of an accelerometer three components observed at Aburatsubo in association with the earthquake, "Far East Off Sanriku" M7.5.

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)

Off Fukushima Pref M6.6 D 51km Δ 360km

Oh24m Feb. 17, 1996

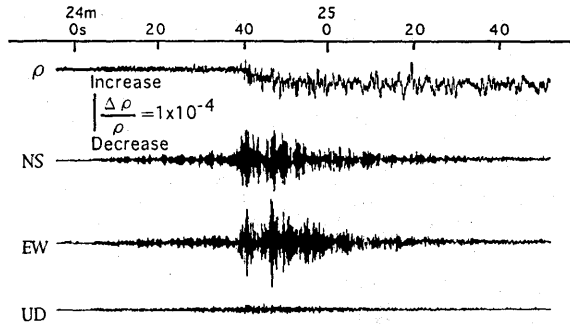


Fig. 19. Changes in earth resistivity (ρ) and records of an accelerometer three components observed at Aburatsubo in association with the earthquake, "Off Fukushima Pref." M6.6.

SE off Boso Peninsula M5.2 D 69km Δ 85km

16h40m Nov. 28, 1996

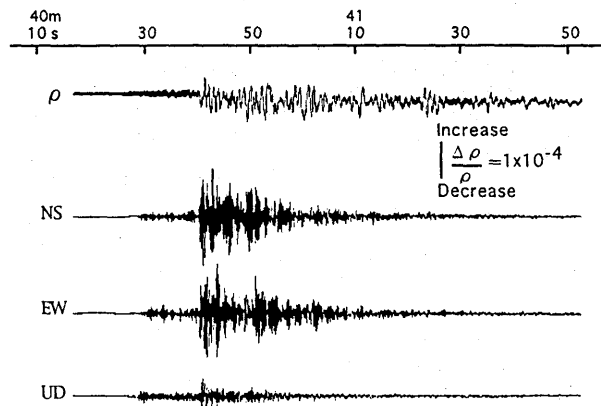


Fig. 20. Changes in earth resistivity (ρ) and records of an accelerometer three components observed at Aburatsubo in association with the earthquake, "Southeast off Boso Peninsula" M5.2.

デューサ 707LFZ 使用している。3 軸 (X, Y, Z) のもので、感度は 100mV/G、応答周波数範囲は 0.2~5,000 Hz である。この記録システムで時間分解能の高い測定を行なった結果、地震に伴う比抵抗変化に 2 種類あることが判明した。ひとつは地震動によってステップ状に変化するタイプで、これまで「コサイスマック変化」とよばれてきたものである。これに対して新たに判明したのは地震動に対応して振動的に変化する比抵抗変化の存在である。

いわゆるコサイスマック変化の例を Fig. 17 から Fig. 21 に示す。図中で ρ は比抵抗、NS, EW, UD は加速度計のそれぞれ南北、東西、上下成分である。D は深さ、 Δ は震央

吉野 登志男 他

Eastern Yamanashi Pref M5.8 D 20km Δ 70km

23h35m March 6, 1996

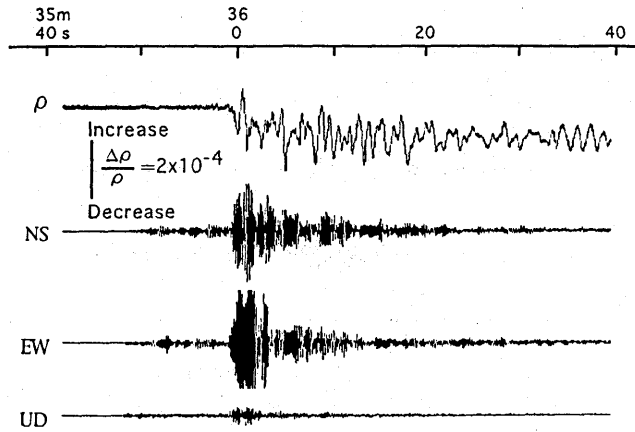


Fig.21. Changes in earth resistivity (ρ) and records of an accelerometer three components observed at Aburatsubo in association with the earthquake, "Eastern Yamanashi Pref." M5.8.

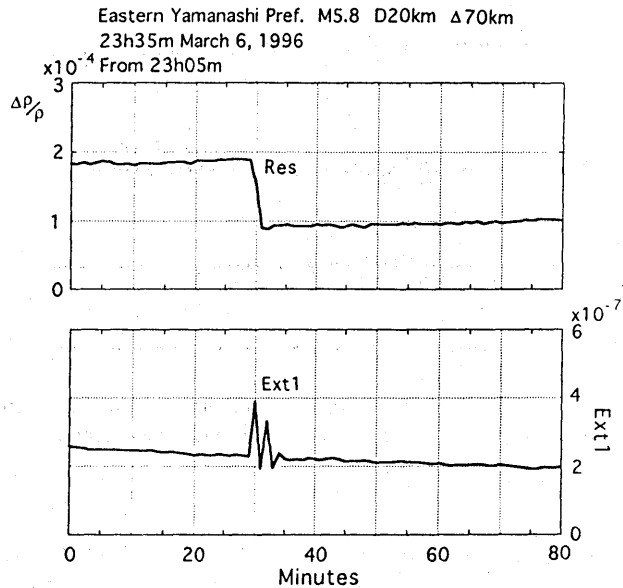


Fig.21 (B). Changes in earth resistivity (Res) and extension (Ext 1) observed at Aburatsubo in association with the same earthquake. Plotted are minutely means for each two seconds data.

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)

E off Hokkaido M8.1 D 30km Δ 1140km

22h Oct. 4, 1994

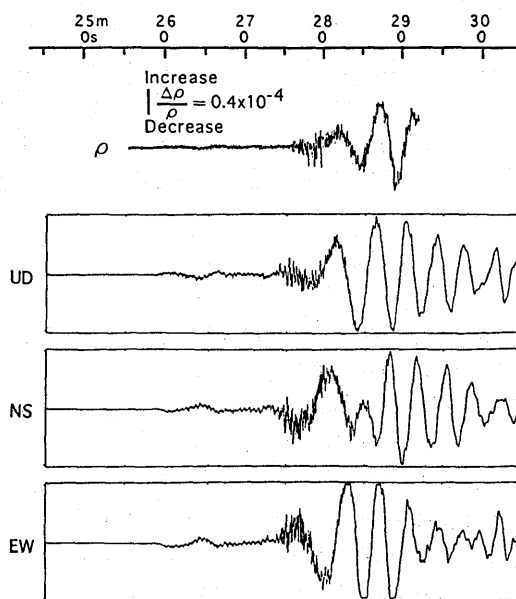


Fig. 22. Changes in earth resistivity (ρ) observed at Aburatsubo and records of seismic velocity components (UD, NS, and EW) obtained by a broad-band seismometer (STS-1) at Tsukuba seismological observatory for the earthquake, "East off Hokkaido" M8. 1.

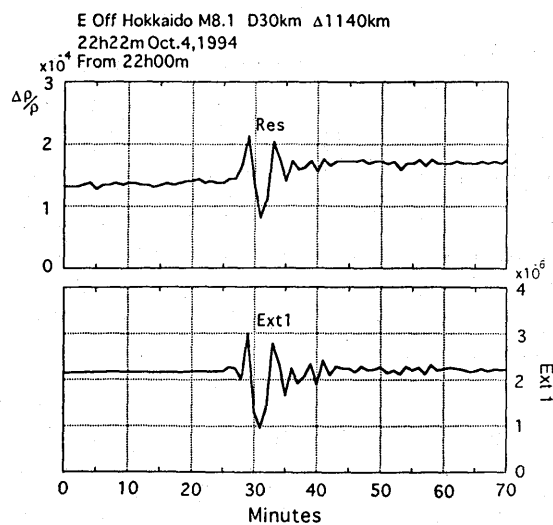


Fig. 22 (B). Changes in earth resistivity (Res) and extension (Ext 1) observed at Aburatsubo in association with the same earthquake. Plotted are minutely means for each two seconds date.

距離を示す。時間分解能を上げてみると、比抵抗はいずれも初動では変化せず、S波の到達したところで変化が始まっているのがわかる。伸縮計にも地震時の変化が記録されている場合がある。その例として1996年3月6日に起きた山梨県東部地震（M5.8、震央距離70 km）によって引き起こされた比抵抗変化（Res）と伸縮変化（Ext1）をFig. 21（B）に示す。これらは2秒毎の1分平均値である。この比抵抗変化は横軸の時間スケールが違うがFig. 21と同じものである。比抵抗の方はステップ状の変化に対し、伸縮は地震時に数分間振動した後、元のレベルに戻る。伸縮変化と比べるとコサイスマックな比抵抗変化が永久変形に対応したものだと考えにくい。

これに対して第2のタイプの比抵抗変化はこれまでに1例が観測されただけであるが、1994年10月4日に起きた北海道東方沖地震（M8.1、震央距離1140 km）によって引き起こされたものである。Fig. 22はその時の比抵抗変化と筑波観測所の広帯域地震計（STS-1型）による速度3成分の記録で、5 Hzのローパスフィルターを通した波形とを比較したものである。通常コサイスマックな比抵抗変化はステップ状であるのに対して、この時は周期30秒程度のゆっくりした変動が記録された。油壺に設置した加速度計の周波数特性は0.2 Hzまでなので、筑波観測所の広帯域記録を代用した。この時の表面波にともなう歪変化も記録されている。Fig. 22（B）に比抵抗（Res）と伸縮（Ext1）の2秒毎の1分平均値を示す。この比抵抗変化も横軸の時間スケールが違うがFig. 22と同じものである。この図を見ると、比抵抗変化の振幅は 1.2×10^{-4} 、伸縮計Ext1の歪量は 2×10^{-6} なので、それらの比（歪比抵抗変化率）は60となる。

大久保（1996）は、室内実験によって油壺の岩石の比抵抗変化の性質を調べたが、1軸圧縮歪に対する変化では、含水率による依存性や岩石の粒度による層構造に対する圧縮軸の方向によって比抵抗変化率に異方性があることなどを見出した。この結果を参照すると、観測壕内の含水率（重量％、16％）を与えた場合、圧縮軸が層構造に垂直な時には歪比抵抗変化率は160、平行な場合には35であると見積もることができる。また、垂直な場合には歪が小さくなるにつれて変化率が大きくなるという山崎（1974a, 1974b）が指摘した傾向が見られるが、平行な場合には歪によらずほとんど一定であることも明らかにした。Fig. 22（B）の比抵抗変化について見積もられた歪比抵抗変化率（=60）はまさに岩石に対する圧縮実験で得られた歪比抵抗変化率の範囲内に収まる。このことはFig. 22の比抵抗変化こそが歪変化によって引き起こされた比抵抗変化であり、表面波に伴う歪変化によるものであることを示唆している。もしこの考えが正しいとすると、潮汐周期の変化における歪比抵抗変化率は大きすぎることになる。したがって、潮汐周期の比抵抗変化は別のメカニズムで発生している可能性もあることを指摘することができる。

4.3.3 比抵抗変化の極性（増減）について

地震に伴うステップ状の比抵抗変化は、地震に伴って増加する場合と減少する場合がある。これは地震の震源機構に関係しており、観測点が地震初動の押しまたは引きの領域にはいることによって極性がきまるのではないかと考えられた（Rikitake and Yamazaki, 1969, 山崎, 1978）。しかしながら、その後の研究によって比抵抗の増減には明瞭な季節変化があることなどから、そのような考え方は再考されるようになった（吉野・行武, 1991, Utada *et al.*, 1998）。今回この関係を再検討した。Table 5は油壺における地震時の比抵抗変化の増減と地震の押し、引きを示したものである。見やすくするため上から5個が比抵

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

Table 5. Relation between resistivity changes and push-pull associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

| Date | Time | Magnitude | Resistivity change ($\times 10^{-4}$) | Push(P) Pull(T) | Epicentral location |
|---------------|-------|-----------|---|--------------------|------------------------|
| June 8, 1985 | 1 29 | 4.8 | +0.35 | T | Central Chiba Pref |
| Oct. 4, 1985 | 21 25 | 6.1 | +2.5 | P | Southern Ibaraki Pref |
| Oct 18, 1987 | 3 41 | 4.8 | +0.1 | T | Eastern Yamanashi Pref |
| July 5, 1989 | 2 28 | 4.7 | +0.67 | P | E off Izu Peninsula |
| Aug. 5, 1990 | 16 13 | 5.1 | +1.4 | P | Hakone region |
| Feb. 22, 1983 | 11 48 | 4.9 | -0.27 | T | Southern Kanto |
| Jan. 1, 1984 | 18 03 | 7.3 | -1.2 | T | S off Kinki |
| Apr. 24, 1984 | 13 11 | 6.7 | -0.2 | P | S off Honshu |
| Apr. 11, 1985 | 1 26 | 6.8 | -1.2 | T | Near Torishima Is. |
| Mar. 6, 1989 | 23 39 | 6.0 | -1.2 | T | Near Choshi City |
| Feb. 20, 1990 | 15 53 | 6.5 | -4.6 | P | Near Izu-Oshima Is. |

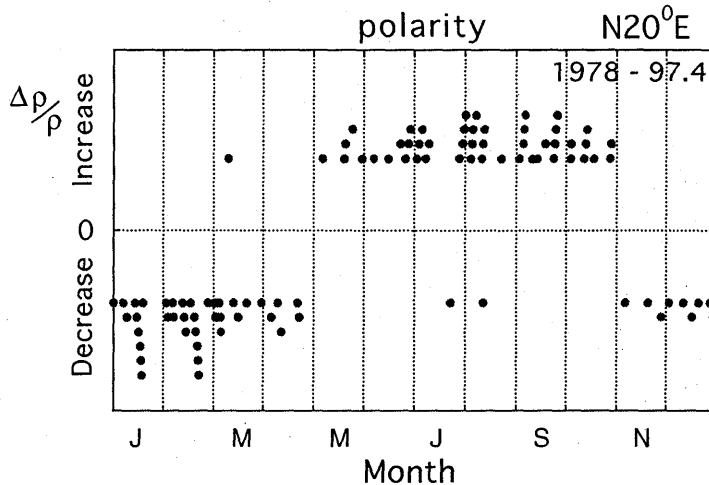


Fig. 23. Polarity of coseismic resistivity changes observed by the electrode set aligned in the direction of N20°E for the period from 1978 to 1997.

抗変化が増加, 次の6個が減少のものを並べた。油壺における押し引きは地震研究所の観測点(武山, 館山, 大島他)および気象庁の観測点(横浜, 東京, 綱代他)のデータによった。この表からも明らかなように比抵抗変化の増減と発震機構とに明瞭な相関はない。

Fig. 23は1978年1月から1997年4月までに記録された全てのコサイスマックな比抵抗変化について, その極性の季節変化の様子を見やすいように1~12月の時間軸に対して重ねてプロットしたものである。電極の配置方向はN20°Eである。例外的な3月の増加,

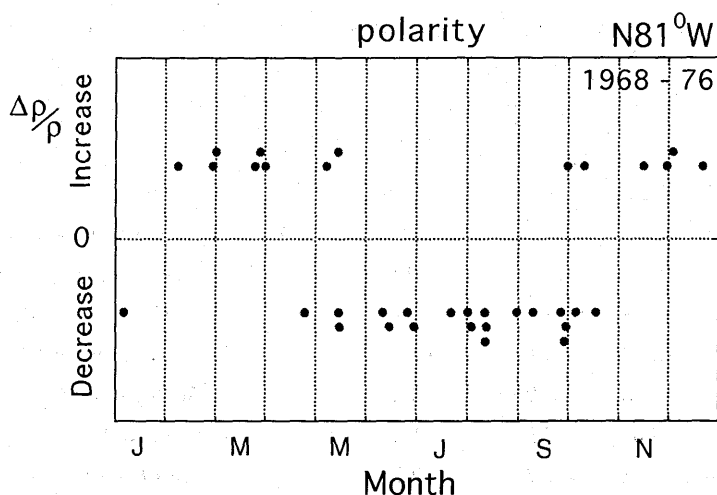


Fig. 24. Polarity of coseismic resistivity changes observed by the electrode set aligned in the direction of N81°W for the period from 1968 to 1976.

7月8月の減少の3例を除くと5月から10月までのすべての変化は増加、それ以外の期間の変化は減少する方向になっている。コサイスミックな比抵抗変化の極性は年周変化を抑制する方向に変化するようにみえる。すなわち、比抵抗の年周変化が増加傾向の場合は減少、年周変化が減少傾向の場合は増加のステップがコサイスミックに見られるのが一般的傾向であると考えられる。ところで、このような傾向が見られるのは現在の測定場所(R2)における変化であるが、異なる場所(R1)で行なわれていた1968年から1976年までの測定結果を同様にまとめると、Fig. 24 のようになり、増減の傾向が全く逆になることがわかった。両者は直線距離にして約100m離れている以外に、電極配置の方向がほぼ90度異なっている。すなわちR1では海岸線にほぼ直交する方向(N81°W)に電極を並べて測定していたのに対して、現在のR2では海岸線にほぼ平行な方向(N20°E)である。このようにコサイスミックなステップ状比抵抗変化が比抵抗の年周変化を抑制あるいは促進する方向に起こるということは、ステップ状変化の原因が季節変化を起こす機構と密接に関係していることを物語っている。季節変化を起こすものとして現在もっとも有力であると考えられるのは前に述べたようにひとつには海水の浸透であり、ひとつには温度変化である。海水面の年周変化に伴って、海水の陸地への浸透距離が変化する。この結果観測点直下の水位に年周変化が起こり、比抵抗変化として観測されることが考えられる。一方、地表面温度の年周変化が地中に伝播して、観測点付近の岩石の温度変化を生じ、比抵抗変化につながることを予想される。そのいずれによって年周変化が引き起こされるかは、現段階では明らかでないが、いずれにしても地震動によって年周変化に擾乱が加えられたと考えられる。温度変化についてはひとつのモデルが提唱されている(Utada *et al.*, 1998)。温度の年周変化の振幅は地表面で最大で深くなるほど小さくなる。この温度勾配が岩石に含まれる溶液の深さによる温度の違いをつくり、地表面から深部への比抵抗勾配を生み出す。地震動によって温度の異なる溶液の混合が起こると比抵抗変化が起こることが期待される。その際の比抵抗変化の極性は年周変化による温度勾配と密接に関係している。同じ

ようなことが海水の浸透についてもいえる。海水の浸透の度合によって海岸線から内陸にかけて地下水面の深さあるいは含水率の違いを生ずる。海水面が平均海水面より上下すると、それに応じて観測点直下の地下水面の勾配は正になったり負になったりする。地震動によって地中の孔隙の再配置が起こると地下水や含水率の変動を生じ、年周変化を促進あるいは抑制する比抵抗変化のおこることが予想される。現在、温度効果については水溶液比抵抗の温度変化など室内実験と矛盾しないことが確かめられているが、海水浸透効果については水の浸透率など岩石の物性についてこれから明らかにする必要がある。温度効果と海水浸透効果のいずれが卓越しているかは今後の研究課題である。またステップ状変化が P 波によってでなく S 波または表面波の到達によって起こるというのも興味深い現象である。ただだんに地震動の振幅の違いによっておこるのか、あるいは地震波の性質が本質的に重要であるのかいまのところ明らかでない。たんなる圧縮膨張だけでは岩石内空隙の変化が溶液の連結度を大きく変化させることは困難であるが、ずり応力が働く溶液の連結度を顕著に変化させるような空隙の再配置が起こるというのであれば、P 波ではなく S 波や表面波によって比抵抗が変化することも理解できるが、これも今後の課題である。

5. 測定系の状況

5.1 電極と地面の接触抵抗について

前節でコサイスミックな比抵抗変化は振幅の大きい地震動に対応していることが示されたが、このことは電極と地面との間の接触抵抗が振動で変わったためにすぎないのではないかという疑問を起こさせる。この疑問に答えるため、鉛-塩化鉛電極と炭素電極という材質の異なる 2 種類の電極を使い、地震時に比抵抗の変化が違うかどうか Fig. 25 のような回路を用いて測定を行った。C1, C2, P1, P2 は鉛-塩化鉛電極、P3, P4 は炭素電極である。P1, P2 と P3, P4 は約 13 cm 離れている。C1, C2 の間に電流を流して P1, P2 及び P3, P4 間の電位差を測定した。Fig. 26 は鳥島近海の地震 M6.8 の観測例で上が鉛-塩化鉛電極 (Pb-PbCl₂)、下が炭素電極 (C) による変化である。これをみると比抵抗変化の開始時刻が S 波の到来時刻であり、変化量も同じであることがわかる。Fig. 27 は箱根付近の地震 M5.1 の観測例であるが、変化の開始時刻は同じである。変化量は変化が開始してから

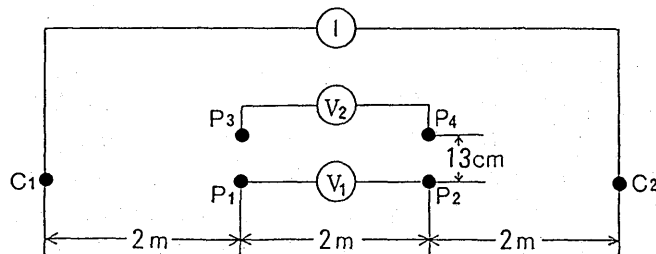


Fig. 25. Electrode arrangements for the resistivity measurements. C₁, C₂, P₁, and P₂ are lead-lead chloride (Pb-PbCl₂) electrodes, while P₃ and P₄ are carbon (C) electrodes. Current is induced into the ground using C₁ and C₂ and potential difference is measured using P₁ and P₂ or P₃ and P₄.

Near Torishima Is. M6.8 D385km Δ 381km
8h 43m June 17, 1989

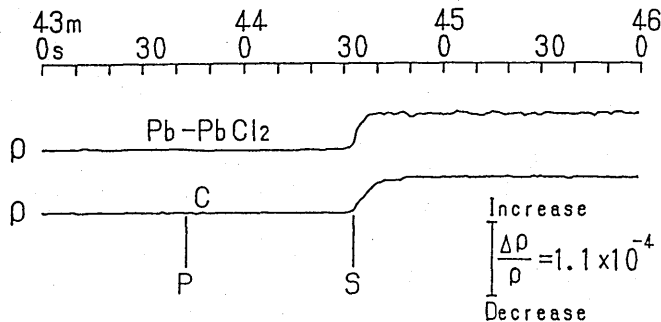


Fig. 26. Comparison of coseismic resistivity changes obtained simultaneously by lead-lead chloride electrodes and carbon electrodes. The changes were observed to be associated with the earthquake, "near Torishima Is." M6.8 (about 381 km south from Aburatsubo).

Hakone Region M5.1 D14km Δ 48km
16h 13m Aug. 5, 1990

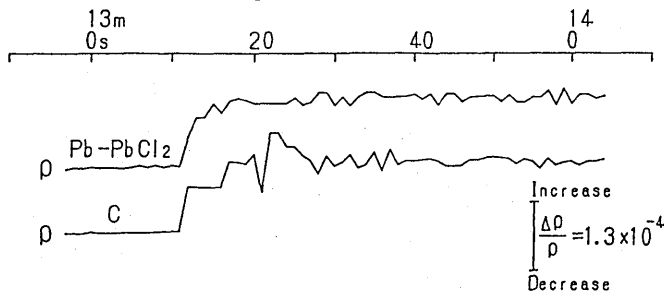


Fig. 27. Comparison of coseismic resistivity changes obtained by lead-lead chloride electrodes and carbon electrodes. The changes were observed to be associated with the earthquake, "Hakone region" M5.1 (about 48 km northwest from Aburatsubo).

ら 10 秒ぐらいまでの振動的な変化の部分は炭素電極の方がやや大きい。また、変動がおさまるまでの時間も異なる。しかし最終的には両者ともほぼ同じ値に落ち着いている。この例で振動的な部分や立ち上がりの様子が異なるのは、実際に地震動によって電極がゆすぶられた効果であるのかも知れない。しかしながらステップの量については、異なる電極を用いても常に同じであることがわかった。したがって、ステップ状の変化は基本的に電極がゆすぶられた結果接触抵抗が変わったことが原因ではないと考えることができる。

5.2 感度について

比抵抗変化計の感度は次のように求めたので記して置く。

比抵抗変化は $\Delta\rho/\rho$ で表わされるから、 $\Delta\rho$ と ρ を記録系とは独立に測定して記録された値と比較すれば感度を求めることができる。まず Fig. 5 で P1, P2 間の電位差 V を測定

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

し, (1) 式で ρ を計算する. ただし電極間隔 a は 2 m, 電流 I は 100 mA である. 次に非常に小さいな比抵抗変化に対する感度を求めるために P1 と P2 の間に大地と並列に大きな抵抗を入れる. P1 と P2 の間の大地抵抗はおおよそ 220 Ω なので, 1 M Ω の抵抗を並列につなぐと 10^{-4} オーダの比抵抗変化に相当する電位差変化を作ることができる. この時の電位差の変化量 ΔV を横河電機のデジタルマルチメータ Model7562 (6 1/2 桁) を使用して読み取る. (1) 式の V に ΔV を代入することによって $\Delta \rho$ が求まる. こうして得られる $\Delta \rho / \rho$ と記録紙上の変化量およびデジタル記録から読み取った変化量を比較して, Table 6 のように感度を求めた.

Table 6. Sensitivity of resistivity variometer.

| Period | Sensitivity | Recorder |
|-----------------------|-------------------------------|------------------|
| Aug. 1982～April 1994 | 8×10^{-6} / scale | Analog recorder |
| April 1994～April 1997 | 3.13×10^{-6} / digit | Digital recorder |

6. まとめ

神奈川県の油壺では地殻変動観測壕内において大地の比抵抗の精密連続観測を実施してきた. 観測当初から 1982 年までに行なわれた観測結果から, 以下のような知見が報告された (山崎, 1980 b, 1983).

(1) 潮汐周期で変動する比抵抗変化. これは 10^{-7} の歪に対して 10^{-4} の比抵抗変化で, 海水による大地の荷重歪に対応すると解釈された.

(2) 地震に伴うステップ状の比抵抗変化. 地震にともなう大地の永久変形歪に対応する比抵抗変化であると考えられ, ステップの増減 (極性) は初動の押し引きに関係しているという指摘がなされた.

(3) 地震に伴う比抵抗変化は 64 個観測され, その内 34 個に前兆的な継続時間が数時間で大きさが 10^{-5} ～ 10^{-6} オーダの比抵抗変化. この変化の原因は特定されていない.

このように重要な観測がなされたものの, 変化の物理機構については十分に解明がなされたとは言い難い. その原因の一つとして, 解析の対象が数日～数秒までの 10^{-4} オーダの比抵抗変化に限られていることが考えられた. 筆者らは 1983 年以降, この観測を継続しており, また, 1990 年には 50 Hz のサンプリング速度で比抵抗と加速度 3 成分を同時に記録する新たな測定装置を設置した.

1983 年以降, 次のようなことが判ってきた.

(1) 比抵抗には周期的変化と非周期的変化がある.

周期的変化としては年周変化と潮汐周期の変化が顕著である. 年周変化は 4 月頃に極大になり, 10 月頃に極小となる. その大きさは 10^{-2} オーダである. 年周変化の原因としては, 地中温度の変化によって室内実験結果と矛盾なく説明できるが, 海水の浸透による影響も考えられる. 潮汐周期の変化は 10^{-4} オーダで, この変化の原因については海水による大地の荷重歪に対応するという従来の知見を再確認した. 非周期的な比抵抗変化としては, 継続時間が数日～10 日で大きさが 10^{-3} ～ 10^{-4} オーダの現象がある. これは気圧の変

化によく対応しており、気圧 1 hPa の変化につき比抵抗は $3 \sim 6 \times 10^{-5}$ 変化する。降雨によっても降雨量や地面の乾湿状態によって異なるが、例えば 40~50 mm の降雨の場合 10^{-4} オーダの変化する場合も見られる。このようなさまざまな要因による比抵抗変化の特徴を明らかにした上で、従来の研究で指摘された地震の前の異常な比抵抗変化の有無について調べたが、1983 年から 1997 年の記録には地震の前に原因不明の異常な変化は見られなかった。

(2) コサイスミックなステップ状の比抵抗変化のより詳しい性質があらかになった。ステップ状の比抵抗変化の極性(増減)には年周変化が見られ、地震波の初動の押し引きに関係ないことがわかった。また年周変化は、電極配置の方向が N 20° E の場合(現在の測定方向)は、夏に増加して冬に減少するという傾向がある。この傾向は比抵抗値そのものの年周変化によく対応しており、比抵抗が増加傾向の場合は減少ステップ、年周変化が減少傾向の場合は増加ステップとなることがわかった。さらに、電極配置の方向が N 80° W の場合(観測壕 Vault 1 の 1976 年以前のもの)を調べたところコサイスミックなステップの極性は、現在のものと逆であったことがわかった。この事実は、変化のメカニズムを考える上で重要な条件であると考えられる。

またコサイスミックな比抵抗変化が、P 波の到着では変化せず、S 波の到着とともに始まることもわかった。さらに 1994 年 10 月 4 日に起きた北海道東方沖地震の際の記録から、コサイスミックな比抵抗変化には、ステップ状の変化の他に表面波に伴う波動的な変化もあることがわかった。

謝 辞

比抵抗の連続観測は、油壺観測所の高橋辰利氏による長年にわたるご協力によるところが多い。石井 紘教授には油壺観測所の地殻歪データの使用を承諾され、また観測に多くのご配慮を頂きました。地震地殻変動観測センターの中尾 茂氏には地殻歪データ使用の際協力頂きました。笹井洋一助教授には日頃から有益な議論と助言を頂きました。山野 誠助教授には温度測定について助言を頂きました。東京大学理学部付属地殻化学実験施設の大野正夫氏には助言を頂きました。FFT による比抵抗などのデータのスペクトル解析に地震研究所 COE 研究員(現在、愛知教育大学教育学部)の後藤忠徳氏に協力して頂きました。開発工学(株)の広野 究氏には比抵抗変化計を高速応答方式に変更する際、助言と協力を頂きました。地震予知研究推進センターの上嶋 誠氏および吉田真吾氏には原稿を査読していただき、有益な意見を頂きました。皆さんに厚くお礼申し上げます。

文 献

- 油壺地殻変動観測所, 1993, 油壺における地殻変動連続観測 (1978 年~1992 年), 地震予知連絡会会報, 50, 232-236.
- 大久保 天, 1996, 岩石の比抵抗変化の実験的研究—神奈川県油壺の凝灰岩について—, 修士論文
- 小玉喜三郎・岡重文・三品昂, 1980, 三崎地域の地質, 地質調査所.
- RIKITAKE, T., and Y. YAMAZAKI, 1969, Electrical conductivity of strained rocks. The first paper. Residual strains associated with large earthquakes as observed by a resistivity variometer, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 47, 99-105.
- RIKITAKE, T., and Y. YAMAZAKI, 1976, Resistivity changes as a precursor of earthquake, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 497-505.

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)

- RIKITAKE, T., and Y. YAMAZAKI, 1977, Precursory and coseismic changes in ground resistivity, *J. Phys. Earth*, **25**, S161-S173.
- UTADA, H., T. YOSHINO, T. OKUBO and T. YUKUTAKE, 1998, Seismic resistivity changes observed at Aburatsubo, Central Japan, revisited, *Tectonophysics*, **299**, 317-331.
- WIDEMAN, C. J. and M. W. MAJOR, 1967, Strain steps associated with earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **57**, 1429-1444.
- YAMAZAKI, Y., 1965, Electrical conductivity of strained rocks. The first paper. Laboratory experiments on sedimentary rocks., *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, **43**, 783-802.
- YAMAZAKI, Y., 1966, Electrical conductivity of strained rocks. The second paper. Further experiments on sedimentary rocks., *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, **44**, 1553-1570.
- 山崎良雄, 1969, 岩石変形と電気伝導度変化, 学位論文
- 山崎良雄, 1973, 岩石変形と比抵抗 (比抵抗変化計の開発), 地震 **2**, 26, 55-66
- YAMAZAKI, Y., 1974 a, Coseismic resistivity steps, *Tectonophysics*, **22**, 159-171.
- 山崎良雄, 1974 b, 岩石変形と比抵抗 (3), (前駆的变化, Rise-time および岩石歪増倍率) 地震 [2], **26**, 55-56.
- YAMAZAKI, Y., 1975, Precursory and coseismic resistivity changes, *Pure Appl. Geophys.*, **113**, 219-227.
- 山崎良雄, 1978, 1978 年伊豆大島近海地震に伴う大地比抵抗変化—油壺の「比抵抗変化計」記録について—, 地震研究所彙報, **53**, 973-985.
- 山崎良雄, 1980 a, 比抵抗変化計のテレメータシステム, 地震研究所彙報, **55**, 737-754.
- 山崎良雄, 1980 b, Preseismic の比抵抗変化 (1), 地震研究所彙報, **55**, 755-794.
- 山崎良雄, 1983, Preseismic の比抵抗変化 (2), 地震研究所彙報, **58**, 477-525.
- 横山 泉, 1952, 潮汐荷重による土地変形と地殻比抵抗の変化 (第 1 報), 第 287 回地震研究所談話会, 昭和 27 年 3 月 18 日.
- 吉野登志男・行武毅, 1991, 神奈川県油壺において観測された地震に伴う大地比抵抗変化について, CA 研究会論文集, 149-159.
- 吉野登志男・歌田久司・行武毅, 1994, 神奈川県油壺において観測された地震に伴う大地比抵抗変化について (2), CA 研究会論文集, 168-180.
- 吉野登志男・歌田久司, 1997, 油壺において観測された地震に伴う大地比抵抗変化について—前兆をよりの確に捉えるには—, CA 研究会論文集, 129-134.

(Received March 17, 1998)

(Accepted September 18, 1998)

付 録

観測資料

地震の際の比抵抗変化の記録

Table A-1～A-7 に 1982 年 8 月より 1997 年 3 月までの油壺における比抵抗変化を伴った地震とそれによる比抵抗変化に関するデータを示す。Table は左から右へ順次、記録番号 (record No), 発震時 (Date, Time), 経度 (Longitude), 緯度 (Latitude), マグニチュード (M), 深さ (D), 震央距離 (Δ), 震央位置 (Epicentral Location) および比抵抗変化 (Resistivity change) の極性 (Polarity), 比抵抗変化率 ($\Delta\rho/\rho$) を示す。このデータの内地震に関するものは、1995 年 5 月までは気象庁の「地震月報」により、同年 6 月以降は同庁の「震源速報」により記した。Fig. A-1～A-96 に同期間の地震による比抵抗変化を中心にした 12 時間の記録を示す。記録番号 1～79 までは打点記録計の 15 秒毎の打点、記録紙送り速度：20 mm/h による記録を示し、図中の H は高感度、L は低感度 (H の 1/5) を示す。80 以降はデジタルレコーダによる 2 秒毎の 1 分平均値を示す。下記に特徴ある変化について記す。

Fig. A-19 の地震の 1.5 時間程前急に变化しているが観測装置の不調によると推定される変動である。Fig. A-47 は東京都東部の地震による変化である。震央距離が 56 km と近くマグニチュードが 6.0 と大きいため、比抵抗変化は 4.7×10^{-4} とこの観測で最大のものとなった。図では 0.4×10^{-4} の変化のように見えるが、地震の時に打点 4 まで変化しそこでオフセットが掛かって打点 8 まで戻ったものである。地震の 3 時間程前から周期 40 分程の変動がみられる。これは地震の前日が 1 日中雨 (雨量 9 mm) で、18 日も明け方まで雨 (雨量 4 mm) が降っており、その影響ではないかと推定される。

Fig. A-50 の記録では一見高感度 H の方は 0.6×10^{-4} 減少し、低感度 L の方は記録の幅で高感度の約 5.7 倍変化したようにみえる。しかし低感度の変化量は高感度の 1/5 でなければならない。この時期の記録は高感度 H、低感度 L 共に、96 目盛りになると 48 目盛りのオフセットが掛かるようになっていて、したがって、地震の時に比抵抗が減少したのではなく、反対に増加し、値が端へきたため高感度、低感度ともにオフセットが掛かったものと推定される。このように考えた場合、変化量は 3.6×10^{-4} の増加である。記録が少し太くなっているが、観測装置の不調によるものである。

Fig. A-54 の記録も一見高感度 H の方は減少し、低感度 L の方は増加したようにみえる。この記録も地震の時に高感度の記録は減少したのではなく、反対に増加し、値が端へきたためオフセットが掛かったものとすれば高感度と低感度の変化量が合う。Fig. A-57 は地震時に比抵抗が -2.3×10^{-4} 変化している。地震起こる約 6 時間前の 15 時 20 分頃から約 40 分間記録がほぼ平坦になっている。これは潮汐による変化と異なっている。しかし、同じような現象は地震の前日の 7 時 5 分頃から約 40 分間と、地震後の 21 日の 14 時 30 分頃から約 40 分間に記録されている。地震の前々日に 45 mm、前日に 24 mm の雨が降った。

Fig. A-58 の比抵抗は -1.2×10^{-4} 変化している。地震の起こる約 3 時間 30 分前の 20 時 10 分頃に 1 目盛り程の段差がみられるが、5 日の 17 時 50 分頃にも同じような記録がある。地震の前々日に 5 mm、前日に 16 mm の雨が降った。

Fig. A-59 は地震時に比抵抗が $+0.6 \times 10^{-4}$ 変化している。地震の起こる約 3 時間前の 6

神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)

時少し前から 7 時にかけて記録が少し凸凹している。これも地震前日の 19 時から 23 時にかけてと、地震後の 17 日 21 時から 23 時にかけて同じような記録がある。また、地震の起こる前日に 48mm、当日に 1mm の雨がいった。

Fig. A-64 は東京湾の地震による変化である。マグニチュード 4.8 で、震央距離が 59 km と近いにもかかわらず変化量は小さい。

Fig. A-77 は記録が少し太くなっているが、観測装置の不調によるものである。

Fig. A-80 は北海道東方沖地震による比抵抗の変化である。地震時の比抵抗は増加、減少を繰り返す振動的变化をしている。振動が終ったあとの比抵抗は地震前に比べ 0.2×10^{-4} 増加している。

Table A-1. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo. M, D and Δ denote the magnitude, focal depth and epicentral distance from Aburatsubo, respectively.

| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|--------------|--------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|---------------------|---|
| 1 | Aug. 12 1982 | 13h33m | 139° 34' | 34° 53' | 5.7 | 30 | 31 | S off Kanto | $- 1.6 \times 10^{-4}$ |
| 2 | Sept. 6 1982 | 10 47 | 140 58 | 29 23 | 7.0 | 180 | 650 | Near Torishima | + 0.21 |
| 3 | Feb. 22 1983 | 11 48 | 140 08 | 35 44 | 4.9 | 70 | 78 | Southern Kanto | - 0.27 |
| 4 | Feb. 27 1983 | 21 14 | 140 09 | 35 56 | 6.0 | 72 | 97 | Southern Kanto | - 2.6 |
| 5 | May 21 1983 | 19 46 | 140 25 | 35 17 | 5.0 | 49 | 74 | SE coast of Tokyo | + 0.20 |
| 6 | May 26 1983 | 11 59 | 139 05 | 40 21 | 7.7 | 14 | 586 | W off N Tohoku | + 1.6 |
| 7 | June 21 1983 | 15 25 | 139 00 | 41 16 | 7.1 | 6 | 682 | W off N Tohoku | — |
| 8 | Aug. 8 1983 | 12 47 | 139 02 | 35 31 | 6.0 | 22 | 66 | Kanto-Chubu border | + 1.2 |
| 9 | Oct. 3 1983 | 22 33 | 139 31 | 34 00 | 6.2 | 15 | 128 | Near Miyakejima | — |
| 10 | Dec. 30 1983 | 11 30 | 140 45 | 35 41 | 5.3 | 52 | 117 | E coast of Kanto | - 0.24 |
| 11 | Jan. 1 1984 | 18 03 | 136 51 | 33 37 | 7.3 | 388 | 320 | S off Kinki | - 1.2 |
| 12 | Jan. 17 1984 | 20 13 | 141 15 | 36 27 | 5.6 | 43 | 208 | E off Kanto | - 0.07 |
| 13 | Jan. 18 1984 | 0 31 | 141 16 | 36 27 | 5.9 | 43 | 208 | E off Kanto | - 0.04 |
| 14 | Feb. 13 1984 | 18 40 | 140 11 | 34 11 | 5.3 | 114 | 120 | S off Kanto | - 0.15 |
| 15 | Feb. 14 1984 | 1 53 | 139 06 | 35 35 | 5.2 | 25 | 66 | Kanto-Chubu border | - 0.33 |

(to be continued)

Table A-2. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|--------------|--------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|-----------------------|---|
| 16 | Feb. 21 1984 | 20h51m | 140° 08' | 36° 08' | 5.0 | 79 | 117 | Northern Kanto | - 0.12 x10 ⁻⁴ |
| 17 | Mar. 6 1984 | 11 17 | 139 12 | 29 20 | 7.9 | 452 | 651 | Near Torishima | - 1.5 |
| 18 | Apr. 24 1984 | 13 11 | 138 50 | 30 52 | 6.7 | 407 | 483 | S off Honshu | - 0.20 |
| 19 | Sept. 5 1984 | 15 13 | 139 14 | 34 56 | 3.9 | 15 | 44 | S off Kanto | - |
| 20 | Sept. 5 1984 | 16 17 | 139 15 | 34 56 | 4.5 | 12 | 43 | S off Kanto | + 0.18 |
| 21 | Sept.14 1984 | 8 48 | 137 34 | 35 49 | 6.8 | 2 | 203 | Central Chubu | + 1.7 |
| 22 | Sept.19 1984 | 2 2 | 141 33 | 34 03 | 6.6 | 13 | 213 | Se off Kanto | - |
| 23 | Jan. 7 1985 | 7 8 | 140 07 | 35 32 | 4.7 | 71 | 61 | Central Chiba Pref | - 0.35 |
| 24 | Apr. 11 1985 | 1 26 | 139 17 | 29 58 | 6.8 | 415 | 642 | Near Torishima Is | - 1.16 |
| 25 | June 8 1985 | 1 29 | 140 15 | 35 32 | 4.8 | 64 | 70 | Central Chiba Pref | + 0.35 |
| 26 | Aug. 12 1985 | 12 49 | 141 54 | 37 42 | 6.4 | 52 | 323 | E off Fukushima Pref | + 0.39 |
| 27 | Oct. 4 1985 | 21 25 | 140 10 | 35 52 | 6.1 | 78 | 93 | Southern Ibaraki Pref | + 2.5 |
| 28 | Nov. 6 1985 | 0 30 | 140 14 | 35 21 | 5.0 | 63 | 63 | Southern Boso Pen | - 0.24 |
| 29 | Feb. 12 1986 | 11 59 | 141 05 | 36 25 | 6.1 | 44 | 190 | S off Ibaraki Pref | - 0.85 |
| 30 | May 8 1986 | 7 47 | 174 50 | 51 25 | 6.5 | 33 | 3300 | Aleutian Is | - |

(to be continued)

Table A-3. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|--------------|--------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|-------------------------|---|
| 31 | June 24 1986 | 11h53m | 140° 43' | 34° 49' | 6.5 | 73 | 115 | SE off Boso Peninsula | + 1.7 x10 ⁻⁴ |
| 32 | Oct. 13 1986 | 19 23 | 139 10 | 34 59 | 4.6 | 4 | 50 | E off Izu Peninsula | + 0.04 |
| 33 | Nov. 22 1986 | 9 41 | 139 32 | 34 33 | 6.0 | 15 | 60 | Near Nijima Is | — |
| 34 | Dec. 30 1986 | 9 38 | 137 56 | 36 38 | 5.9 | 3 | 225 | Northern Nagano Pref | — 0.28 |
| 35 | Jan. 9 1987 | 15 14 | 141 47 | 39 50 | 6.6 | 72 | 555 | Northern Iwate Pref | — 0.27 |
| 36 | Jan. 14 1987 | 20 03 | 142 56 | 42 32 | 7.0 | 119 | 870 | Hidaka Mountains Region | — 0.13 |
| 37 | Feb. 6 1987 | 21 23 | 141 56 | 36 56 | 6.4 | 30 | 235 | E off Fukushima Pref | — 0.61 |
| 38 | Feb. 6 1987 | 22 16 | 141 54 | 36 58 | 6.7 | 35 | 235 | E off Fukushima Pref | — 0.84 |
| 39 | Apr. 7 1987 | 9 40 | 141 52 | 37 18 | 6.6 | 44 | 311 | E off Fukushima Pref | — 1.8 |
| 40 | Apr. 23 1987 | 5 13 | 141 38 | 37 05 | 6.5 | 47 | 279 | E off Fukushima Pref | — 0.05 |
| 41 | June 30 1987 | 18 17 | 140 05 | 36 11 | 4.9 | 57 | 121 | SW Ibaraki Pref | + 0.1 |
| 42 | Oct. 18 1987 | 3 41 | 139 09 | 35 31 | 4.8 | 32 | 66 | Eastern Yamanashi Pref | + 0.1 |
| 43 | Dec. 12 1987 | 13 51 | 140 40 | 29 40 | 6.6 | 198 | 647 | Near Torishima Is | — 0.1 |
| 44 | Dec. 17 1987 | 11 08 | 140 30 | 35 22 | 6.7 | 58 | 87 | Kujukuri Coast Boso Pen | — 2.5 |
| 45 | Jan. 16 1988 | 20 42 | 140 25 | 35 23 | 5.2 | 48 | 77 | Kujukuri Coast Boso Pen | — 0.6 |

(to be continued)

Table A-4. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|--------------|--------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|------------------------|---|
| 46 | Feb. 3 1988 | 14h43m | 140°10' | 34°51' | 5.0 | 74 | 61 | SE off Boso Peninsula | - 0.4 x10 ⁻⁴ |
| 47 | Mar.18 1988 | 5 34 | 139 39 | 35 40 | 6.0 | 96 | 56 | Tokyo Pref | - 4.7 |
| 48 | Apr. 1 1988 | 7 22 | 140 10 | 35 33 | 4.6 | 75 | 67 | Central Chiba Pref | - 0.06 |
| 49 | July 29 1988 | 16 13 | 139 13 | 34 59 | 3.9 | 9 | 43 | E off Izu Peninsula | + 0.2 |
| 50 | July 31 1988 | 8 40 | 139 13 | 34 58 | 5.2 | 5 | 43 | E off Izu Peninsula | + 3.6 |
| 51 | Aug. 1 1988 | 10 39 | 139 10 | 34 58 | 4.8 | 5 | 43 | E off Izu Peninsula | + 0.4 |
| 52 | Aug. 2 1988 | 20 16 | 139 12 | 34 57 | 5.2 | 2 | 43 | E off Izu Peninsula | + 0.5 |
| 53 | Aug.16 1988 | 14 14 | 139 52 | 35 05 | 5.3 | 69 | 27 | Southern Boso Pen | + 0.8 |
| 54 | Sept. 5 1988 | 0 49 | 138 59 | 35 30 | 5.6 | 30 | 74 | Eastern Yamanashi Pref | + 3.6 |
| 55 | Sept.26 1988 | 17 13 | 141 11 | 35 33 | 5.8 | 36 | 149 | Near Choshi City | + 0.1 |
| 56 | Oct. 28 1988 | 15 13 | 140 14 | 35 06 | 5.1 | 76 | 57 | Se off Boso Peninsula | + 0.8 |
| 57 | Feb. 19 1989 | 21 27 | 139 55 | 36 01 | 5.6 | 55 | 97 | SW Ibaraki Pref | - 2.3 |
| 58 | Mar. 6 1989 | 23 39 | 140 43 | 35 42 | 6.0 | 56 | 116 | Near Choshi City | - 1.2 |
| 59 | June 17 1989 | 8 43 | 138 21 | 31 53 | 6.8 | 385 | 381 | Near Torishima Is | + 0.6 |
| 60 | July 4 1989 | 22 18 | 139 08 | 34 58 | 4.9 | 1 | 47 | E off Izu Peninsula | + 0.6 |

(to be continued)

Table A-5. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|--------------|-------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|--------------------------|---|
| 61 | July 5 1989 | 2h28m | 139° 07' | 34° 59' | 4.7 | 2 | 47 | E off Izu Peninsula | + 0.67x10 ⁻⁴ |
| 62 | July 7 1989 | 0 01 | 139 08 | 34 59 | 5.2 | 5 | 47 | E off Izu Peninsula | + 0.1 |
| 63 | July 9 1989 | 11 09 | 139 07 | 35 00 | 5.5 | 3 | 48 | E off Izu Peninsula | + 0.82 |
| 64 | Oct. 10 1989 | 15 28 | 140 04 | 35 35 | 4.8 | 78 | 59 | Central Chiba Pref | — |
| 65 | Oct 14 1989 | 6 20 | 139 30 | 34 49 | 5.7 | 21 | 41 | Near Izu-Oshima Island | + 1.1 |
| 66 | Nov. 2 1989 | 3 25 | 143 03 | 39 51 | 7.1 | 0 | 598 | Far E off Sanriku | — |
| 67 | Feb. 20 1990 | 15 53 | 139 14 | 34 46 | 6.5 | 6 | 61 | Near Izu-Oshima Island | - 2.3 |
| 68 | June 1 1990 | 10 22 | 140 44 | 35 39 | 6.0 | 59 | 115 | Near Choshi City | + 1.1 |
| 69 | June 27 1990 | 6 55 | 139 07 | 35 00 | 5.4 | 148 | 48 | E off Izu Peninsula | + 0.2 |
| 70 | Aug. 5 1990 | 12 36 | 141 07 | 36 24 | 5.8 | 39 | 194 | E off Ibaraki Pref | + 0.4 |
| 71 | Aug. 5 1990 | 16 13 | 139 06 | 35 12 | 5.1 | 14 | 48 | Hakone region | + 1.4 |
| 72 | Aug.23 1990 | 8 47 | 140 24 | 35 21 | 5.4 | 50 | 74 | Kujukuri Coast Boso Pen. | + 0.2 |
| 73 | Sept.24 1990 | 6 13 | 138 38 | 33 06 | 6.6 | 60 | 245 | Far S off Tokai district | + 0.5 |
| 74 | Mar.15 1991 | 9 1 | 140 07 | 35 32 | 4.6 | 81 | 62 | Central Chiba Pref | - 0.1 |
| 75 | Aug. 6 1991 | 23 50 | 141 10 | 35 49 | 5.9 | 43 | 158 | Near Choshi city | + 0.4 |

(to be continued)

Table A-6. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

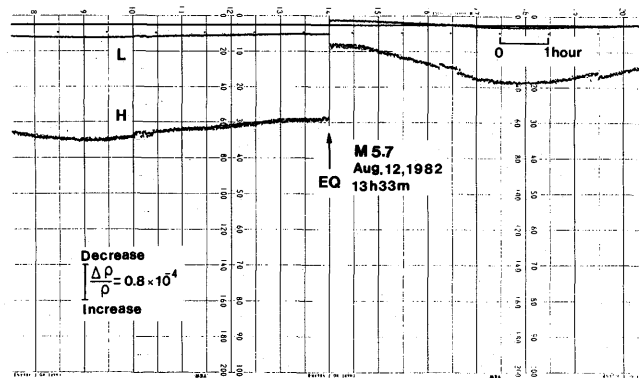
| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|---------------|--------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|--------------------------|---|
| 76 | Sept. 3 1991 | 17h45m | 138°50' | 33°41' | 6.3 | 33 | 179 | Near Miyakejima Is. | + 1.1×10^{-4} |
| 77 | Feb. 2 1992 | 4 4 | 139 48 | 35 14 | 5.9 | 92 | 17 | Tokyo Bay region | - 2.4 |
| 78 | Jan. 15 1993 | 20 06 | 144 21 | 42 55 | 7.8 | 101 | 940 | SE off Tokachi | - 0.6 |
| 79 | Oct. 12 1993 | 0 54 | 138 15 | 32 02 | 7.1 | 391 | 370 | Far S off Tokai district | + 0.5 |
| 80 | Oct. 4 1994 | 22 23 | 147 41 | 43 22 | 8.1 | 28 | 1140 | E off Hokkaido | + 0.2 |
| 81 | Dec. 28 1994 | 21 19 | 143 45 | 40 26 | 7.5 | 0 | 690 | Far E off Sanriku | - 1.1 |
| 82 | Jan. 7 1995 | 7 37 | 142 19 | 40 13 | 7.1 | 48 | 620 | NE off Iwate Pref | - |
| 83 | Jan. 7 1995 | 21 34 | 139 59 | 36 18 | 5.4 | 71 | 130 | SW Ibaraki Pref | - |
| 84 | Jan. 17 1995 | 5 46 | 135 02 | 34 36 | 7.2 | 16 | 426 | Awajishima Is. region | - 0.15 |
| 85 | Mar. 23 1995 | 7 24 | 140 01 | 36 06 | 4.9 | 56 | 110 | SW Ibaraki Pref | - 0.2 |
| 86 | Apr. 18 1995 | 20 26 | 138 35 | 35 04 | 4.5 | 24 | 86 | Northern Suruga Bay reg. | - |
| 87 | Feb. 17 1996 | 0 24 | 142 32 | 37 19 | 6.6 | 51 | 360 | off Fukushima Pref | - 0.5 |
| 88 | Mar. 6 1996 | 23 35 | 138 57 | 35 28 | 5.8 | 20 | 70 | Eastern Yamanashi Pref | - 1.2 |
| 89 | Sept. 11 1996 | 11 37 | 141 12 | 35 38 | 6.2 | 53 | 150 | E off Chiba Pref | + 0.5 |
| 90 | Nov. 20 1996 | 11 27 | 141 17 | 34 21 | 6.0 | 54 | 175 | SE off Boso Peninsula | - 0.2 |

(to be continued)

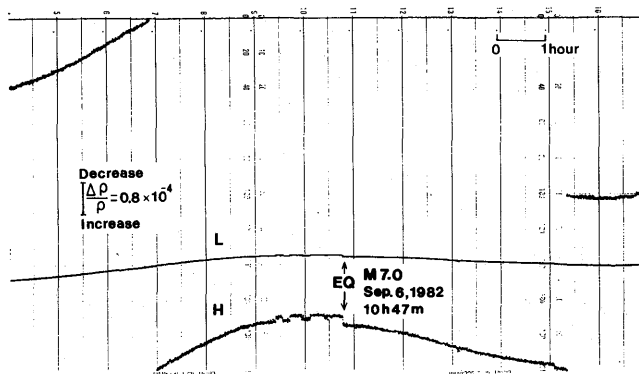
Table A-7. List of resistivity changes associated with earthquakes observed at Aburatsubo.

| Record No | Date | Time | Longitude (East) | Latitude (North) | M | D (km) | Δ (km) | Epicentral location | Resistivity change ($\Delta \rho / \rho$) |
|-----------|--------------|--------|------------------|------------------|-----|--------|---------------|-----------------------|---|
| 91 | Nov. 28 1996 | 16h40m | 140° 20' | 34° 38' | 5.2 | 69 | 85 | SE off Boso Peninsula | $- 0.2 \times 10^{-4}$ |
| 92 | Dec. 21 1996 | 10 28 | 139 52 | 36 06 | 5.4 | 53 | 110 | Southern Ibaraki Pref | - 0.4 |
| 93 | Mar. 3 1997 | 20 10 | 139 11 | 34 58 | 4.5 | 8 | 45 | E off Izu Peninsula | - 0.2 |
| 94 | Mar. 3 1997 | 23 09 | 139 10 | 34 58 | 5.0 | 3 | 46 | E off Izu Peninsula | - 0.9 |
| 95 | Mar. 4 1997 | 0 30 | 139 10 | 34 58 | 4.9 | 0 | 46 | E off Izu Peninsula | - 0.2 |
| 96 | Mar. 4 1997 | 12 51 | 139 10 | 34 57 | 5.7 | 2 | 47 | E off Izu Peninsula | - 1.6 |

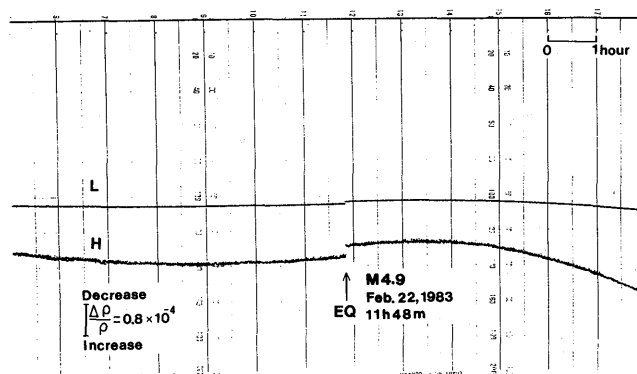
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



1

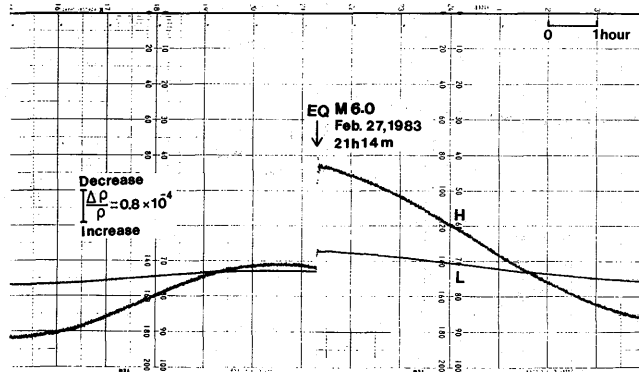


2

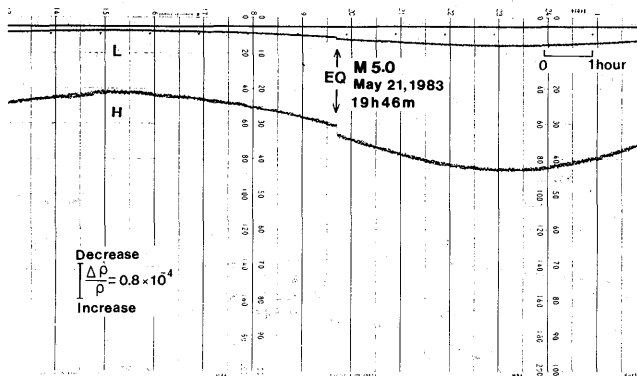


3

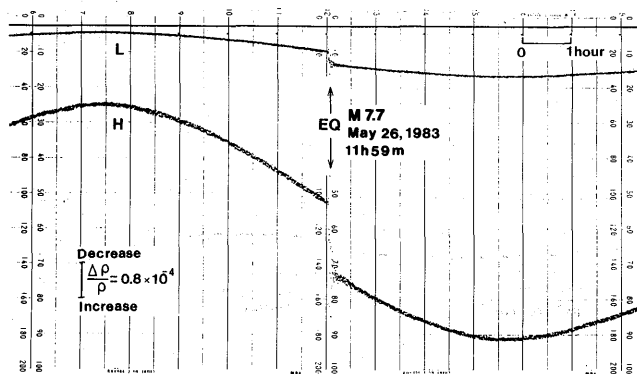
Fig. A. Changes in earth resistivity observed at Aburatsubo in association with earthquake occurrence.



4



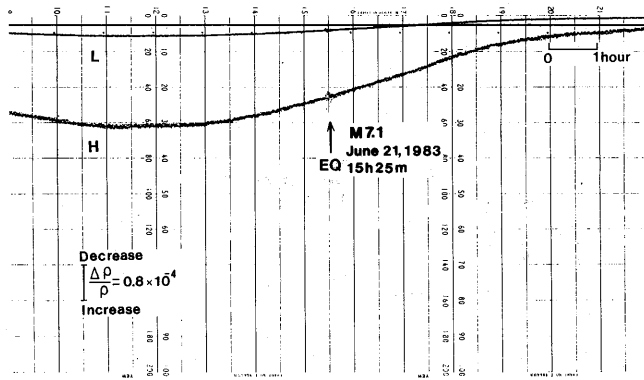
5



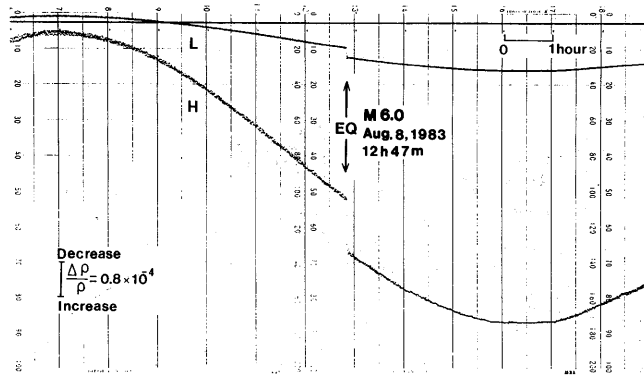
6

Fig. A. (continue)

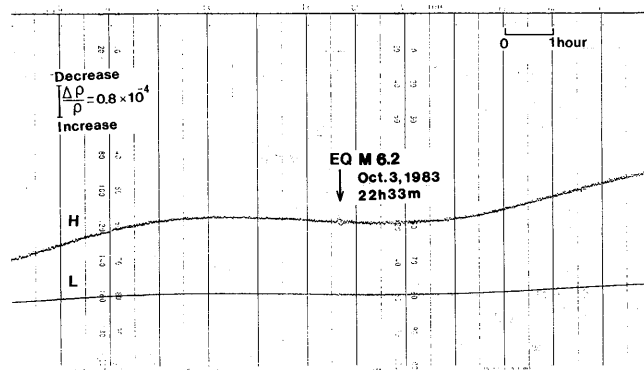
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



7

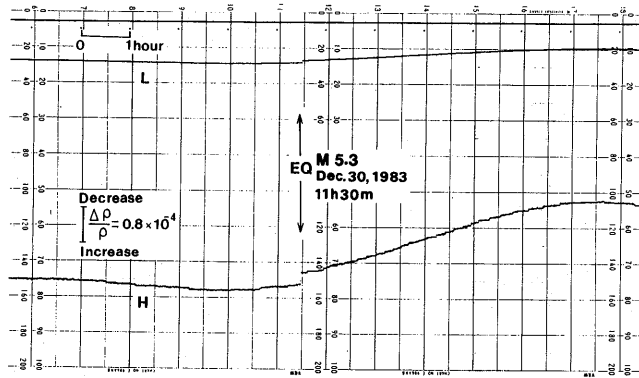


8

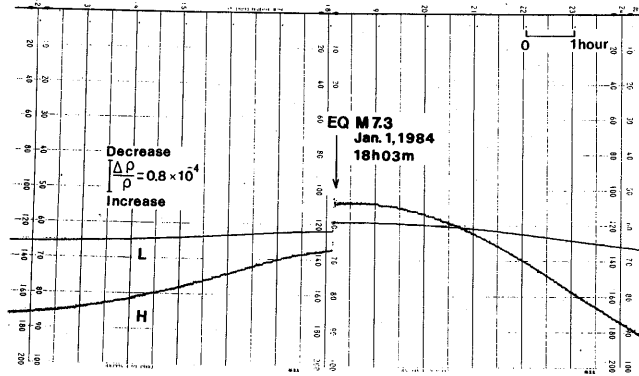


9

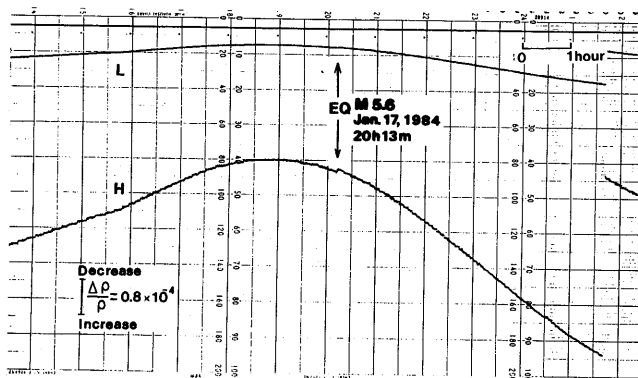
Fig. A. (continue)



10



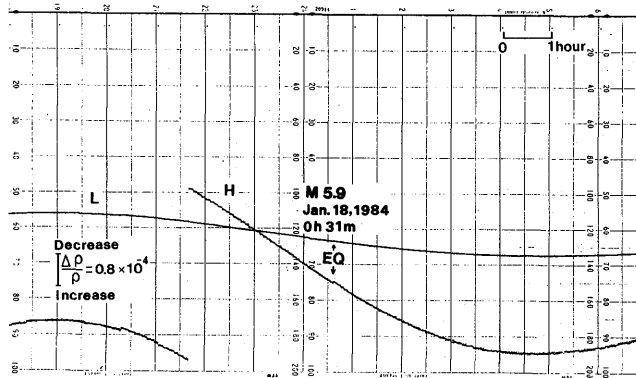
11



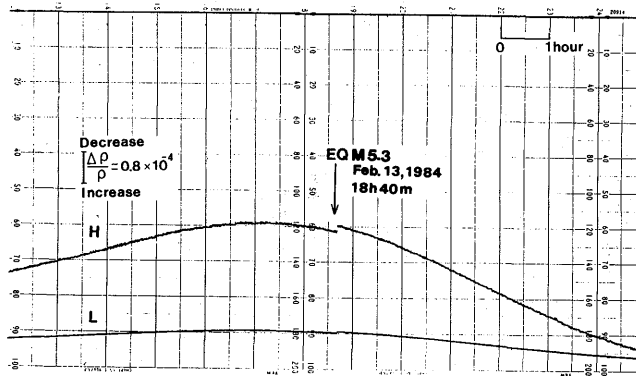
12

Fig. A. (continue)

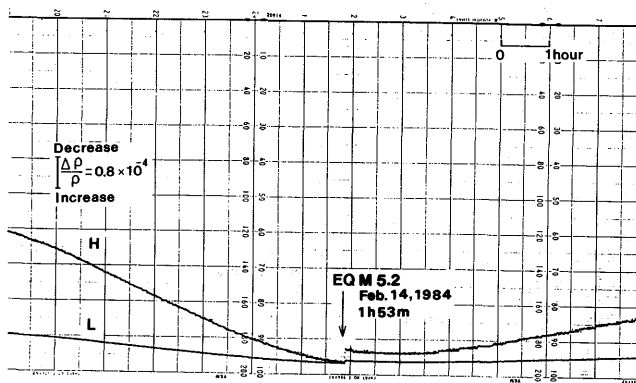
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



13

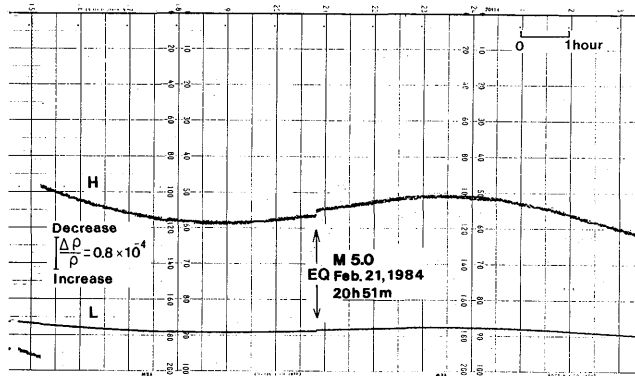


14

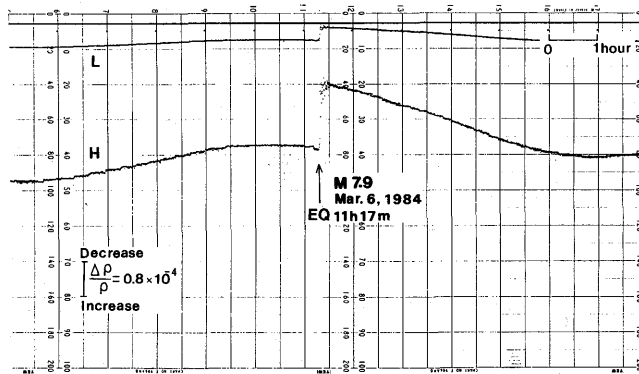


15

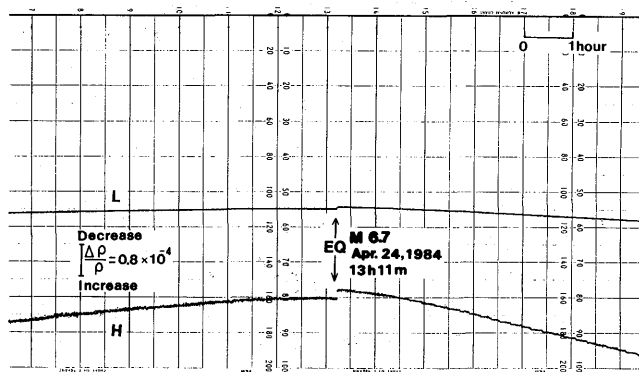
Fig. A. (continue)



16



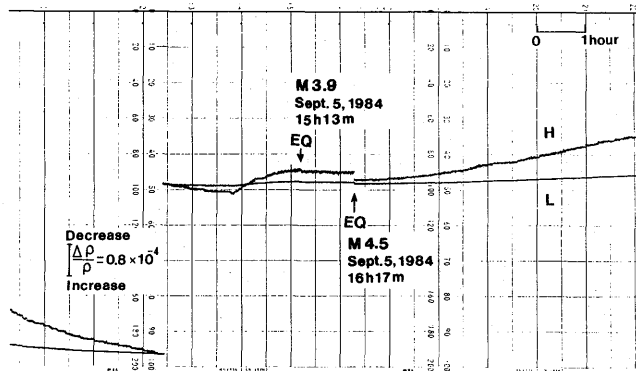
17



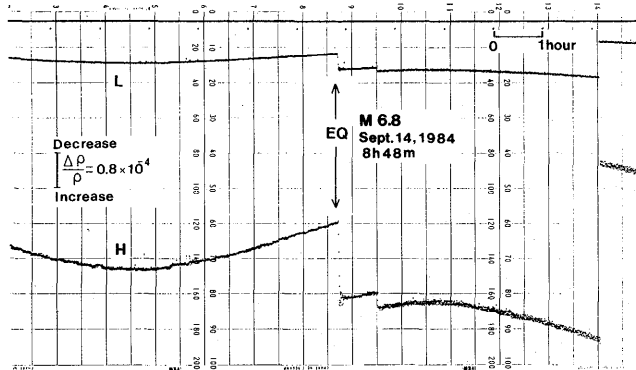
18

Fig. A. (continue)

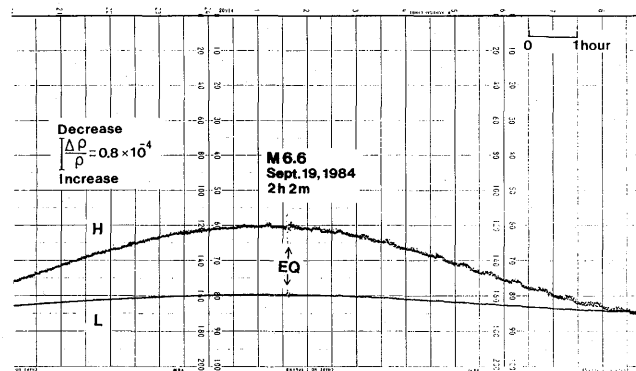
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



19
20

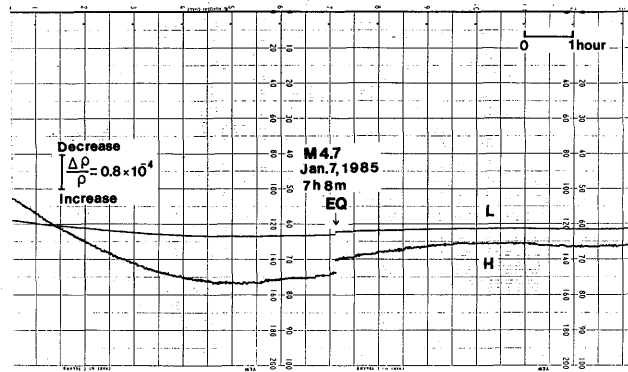


21

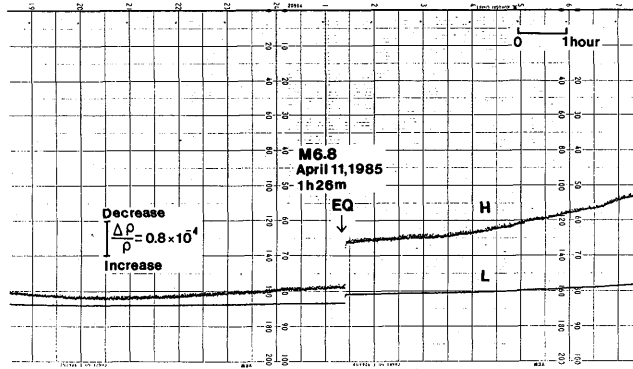


22

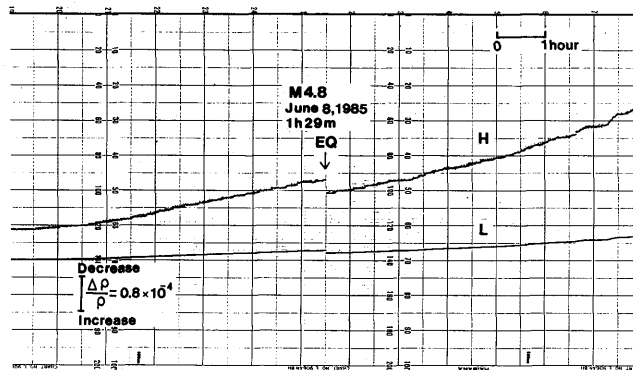
Fig. A. (continue)



23



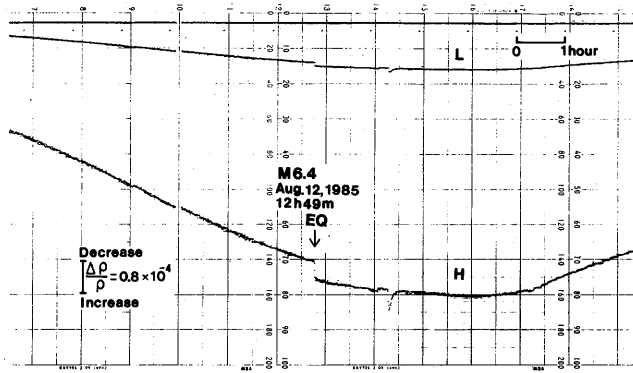
24



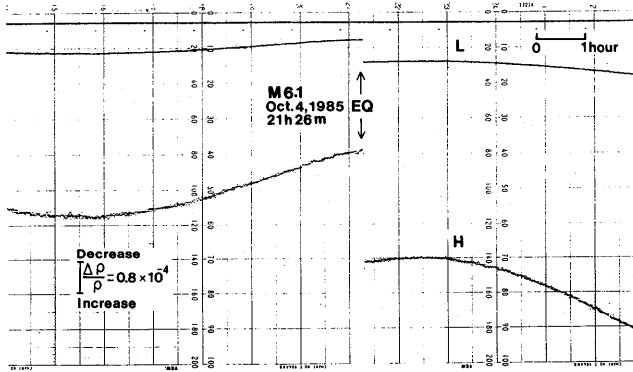
25

Fig. A. (continue)

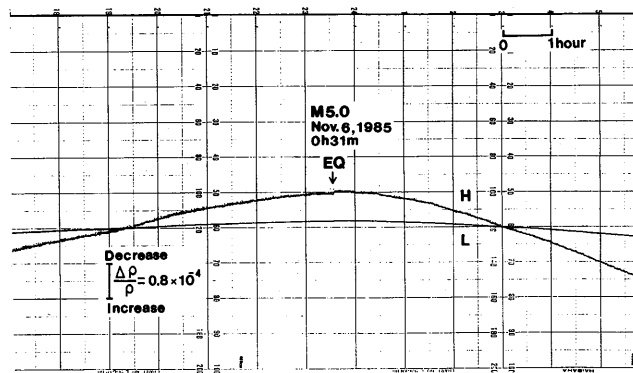
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



26

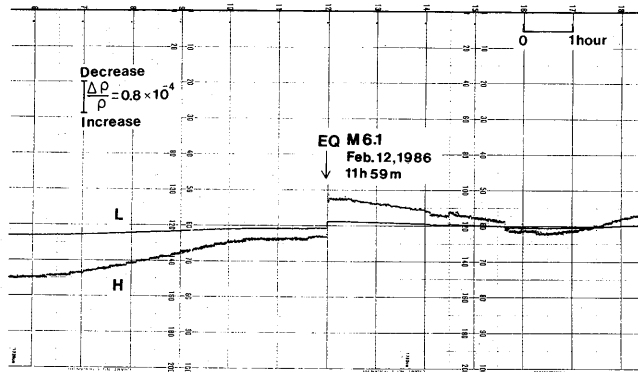


27

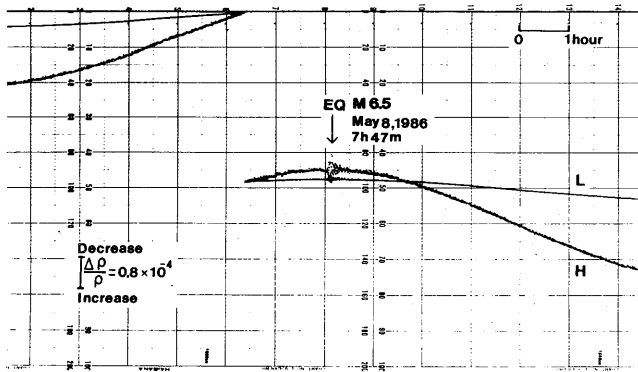


28

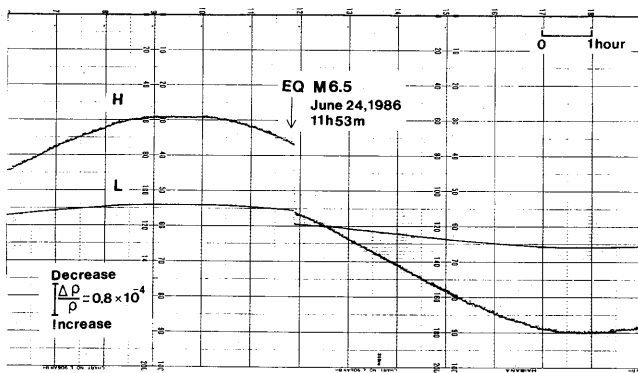
Fig. A. (continue)



29



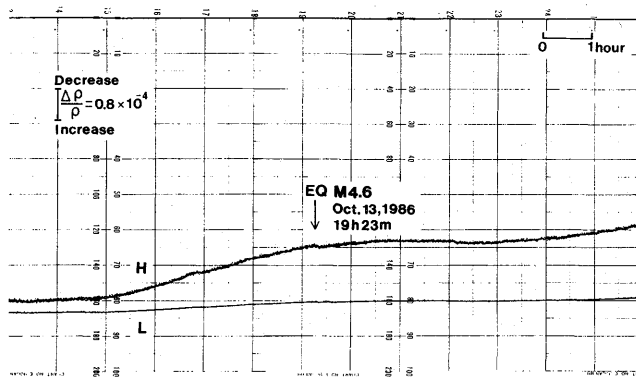
30



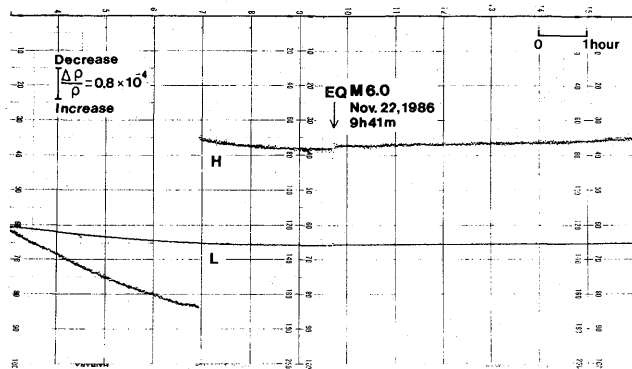
31

Fig. A. (continue)

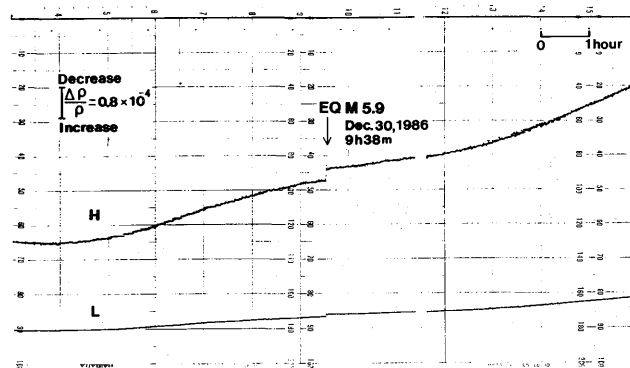
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)



32

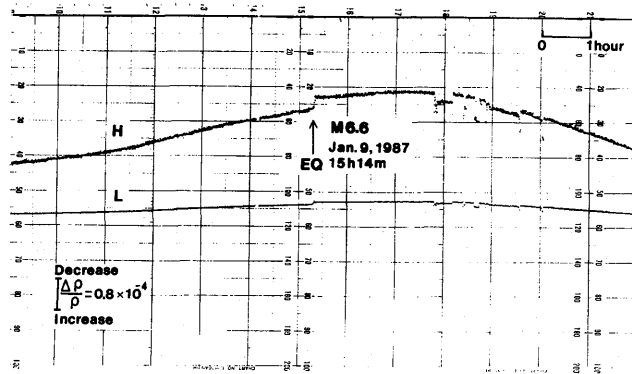


33

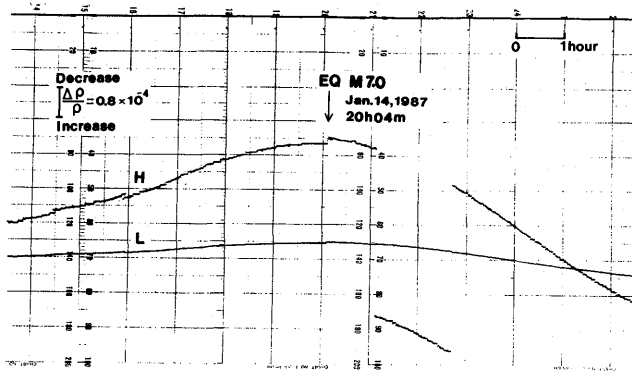


34

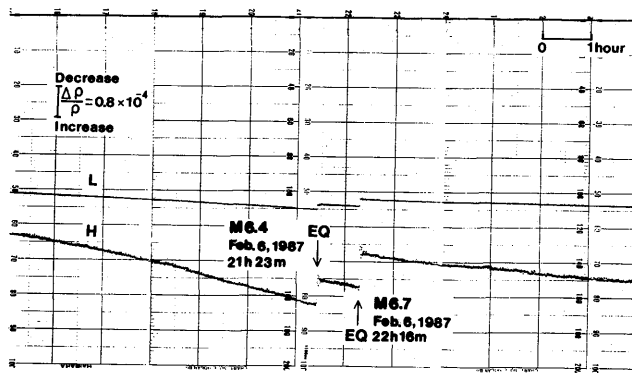
Fig. A. (continue)



35



36

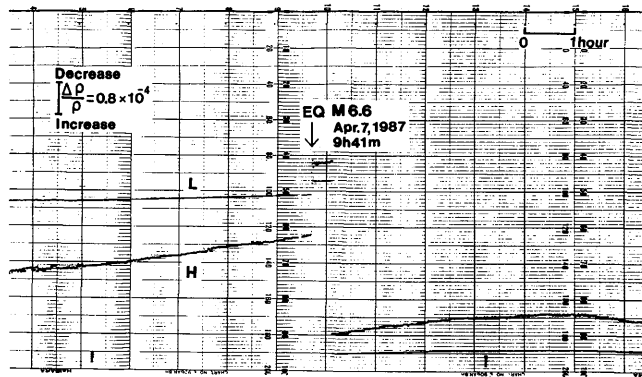


37

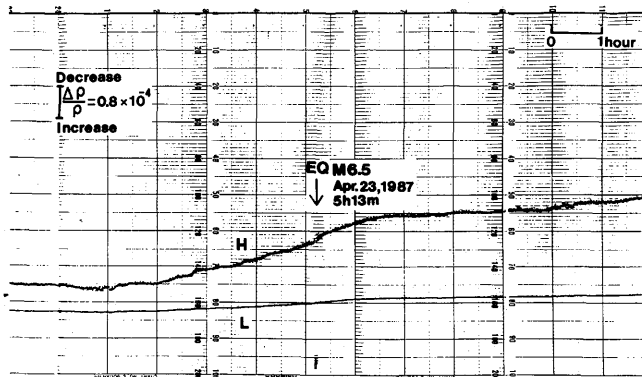
38

Fig. A. (continue)

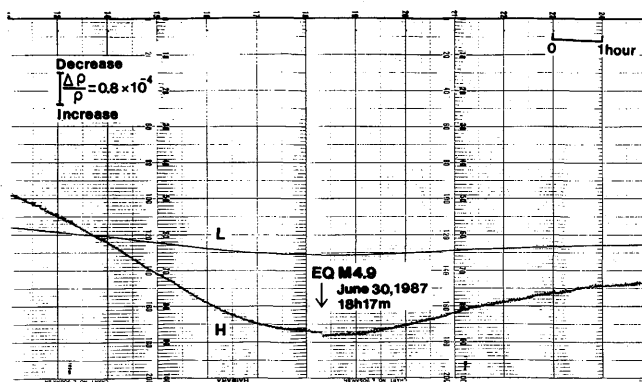
神奈川県油壺における大地比抵抗変化（1983年～1997年）



39

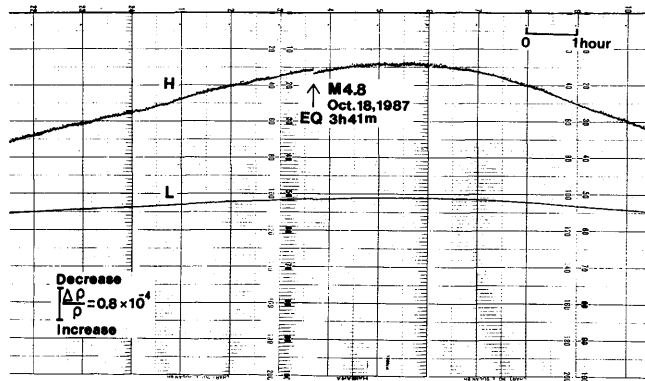


40

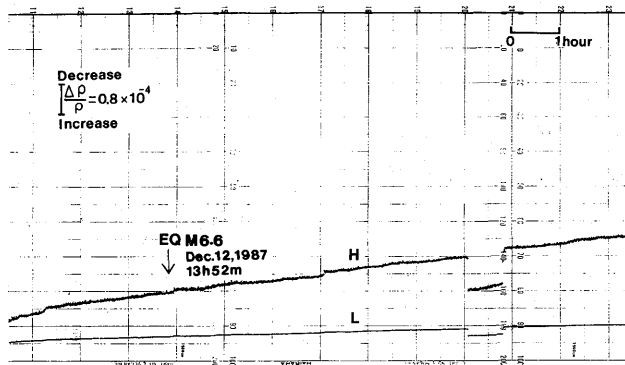


41

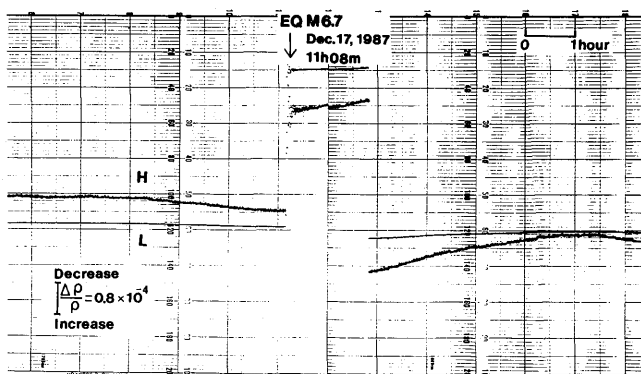
Fig. A. (continue)



42



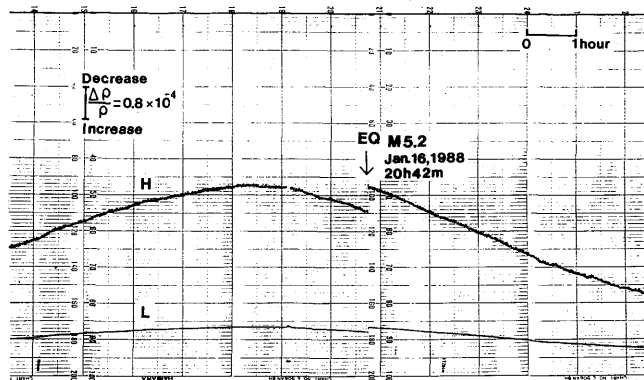
43



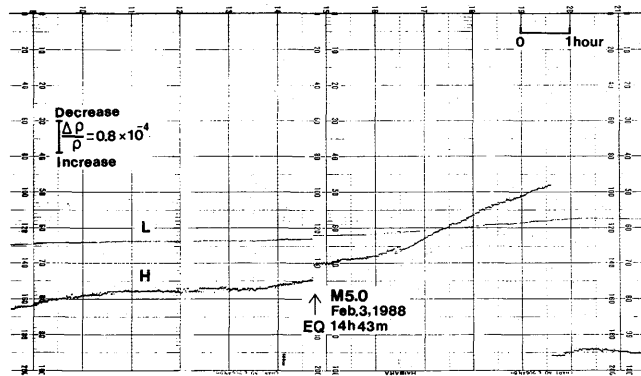
44

Fig. A. (continue)

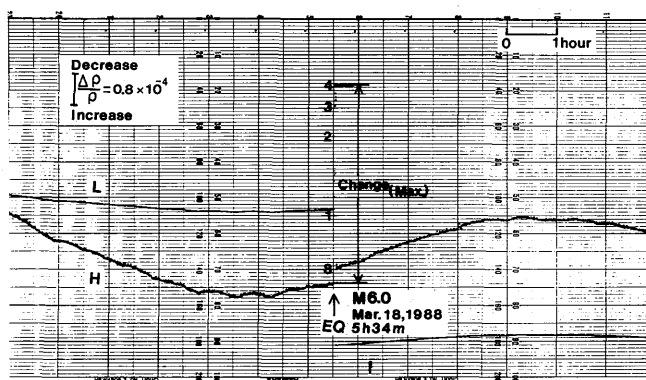
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)



45

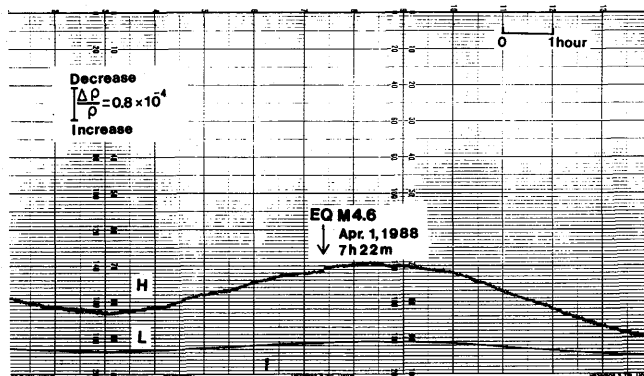


46

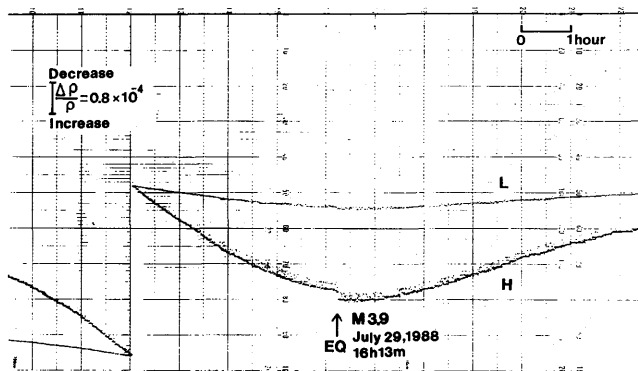


47

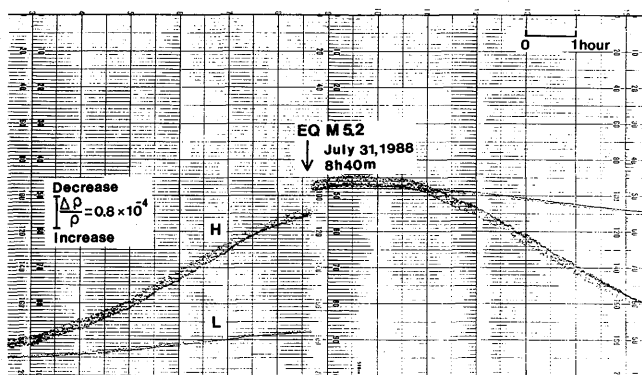
Fig. A. (continue)



48



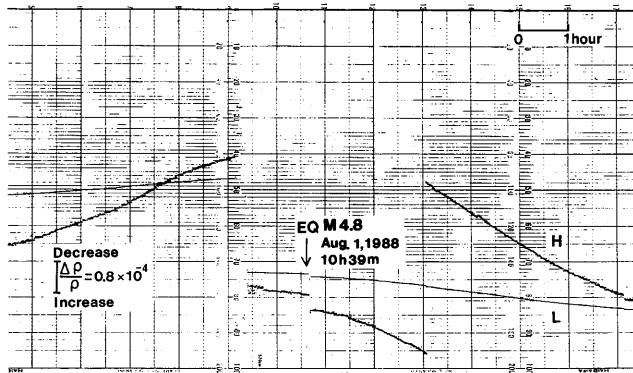
49



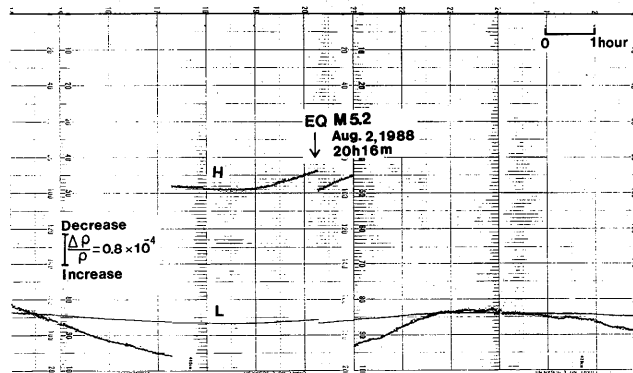
50

Fig. A. (continue)

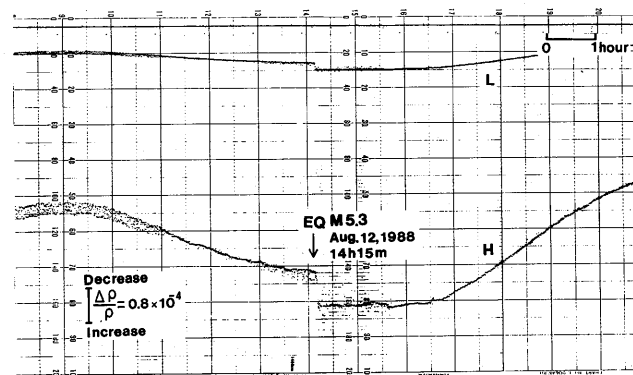
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



51

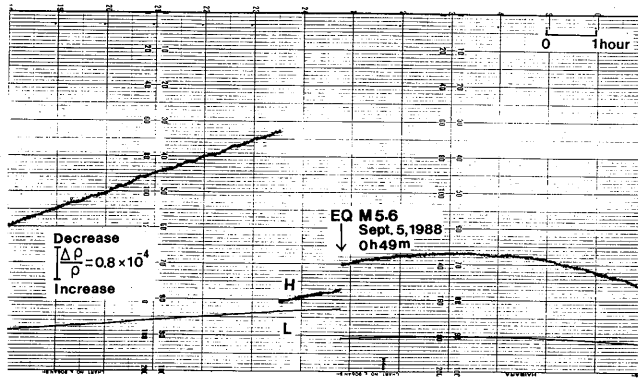


52

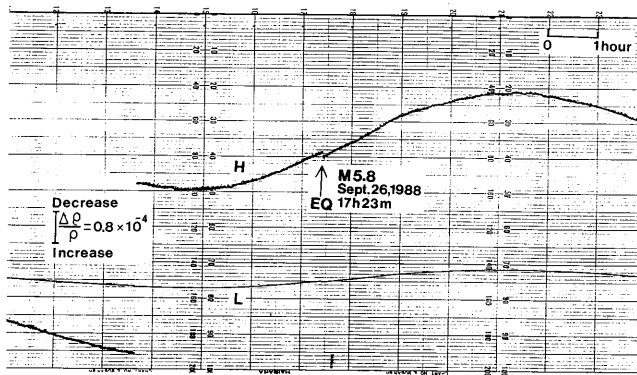


53

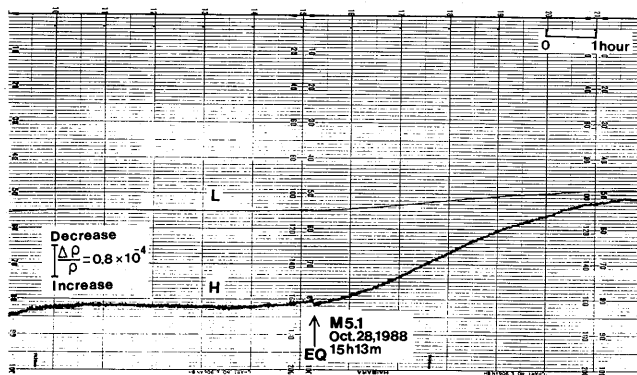
Fig. A. (continue)



54



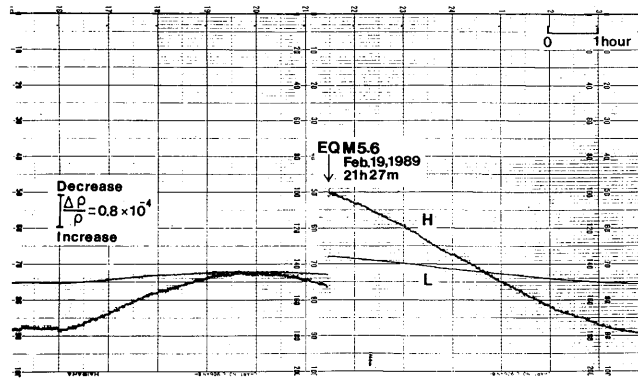
55



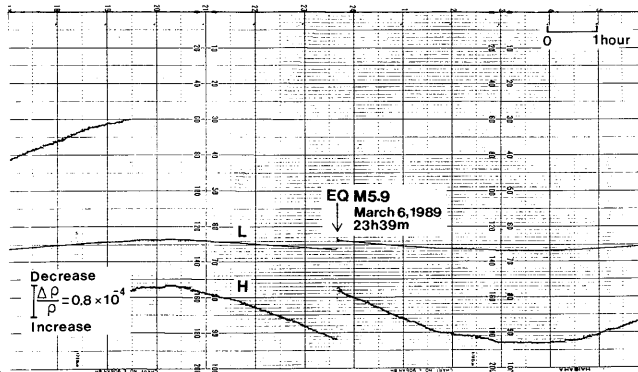
56

Fig. A. (continue)

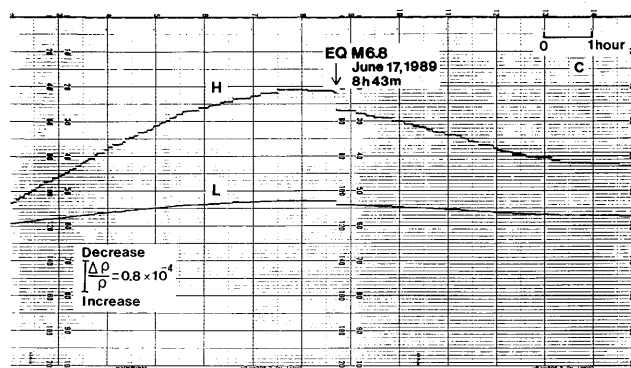
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



57

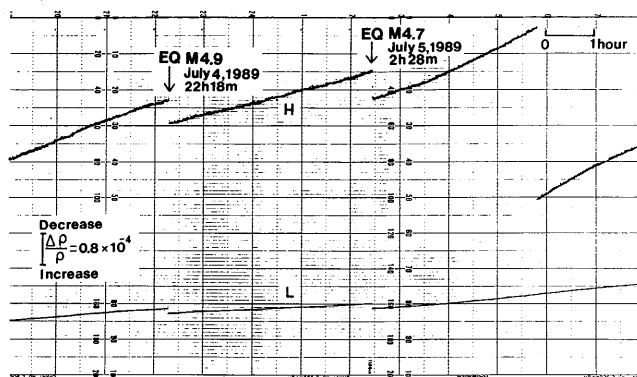


58

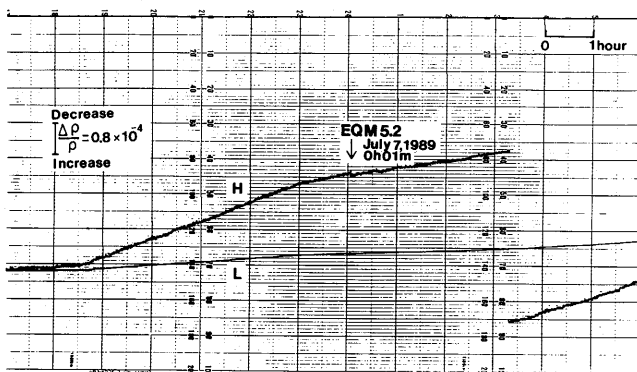


59

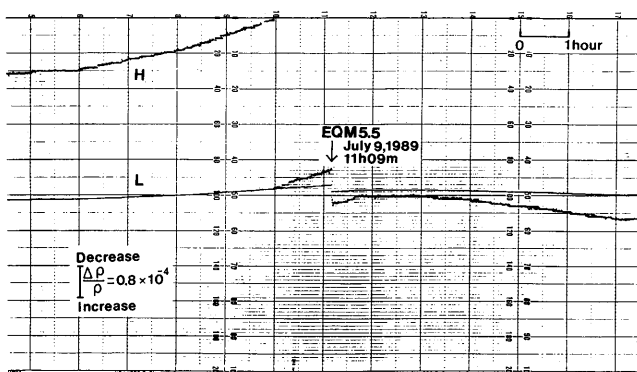
Fig. A. (continue)



60
61



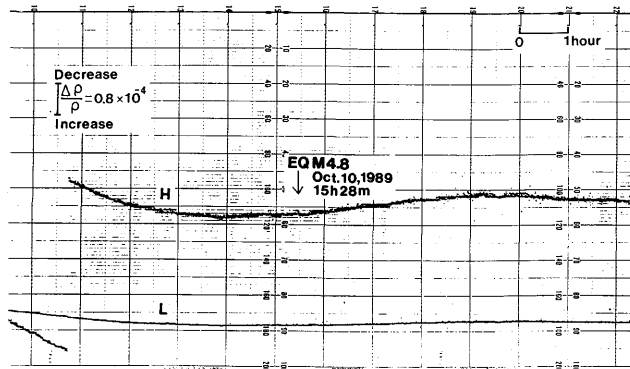
62



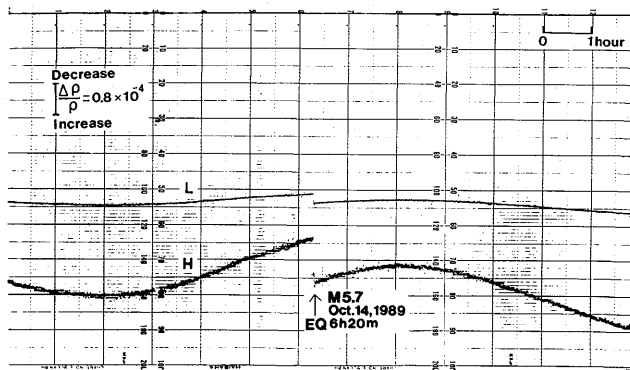
63

Fig. A. (continue)

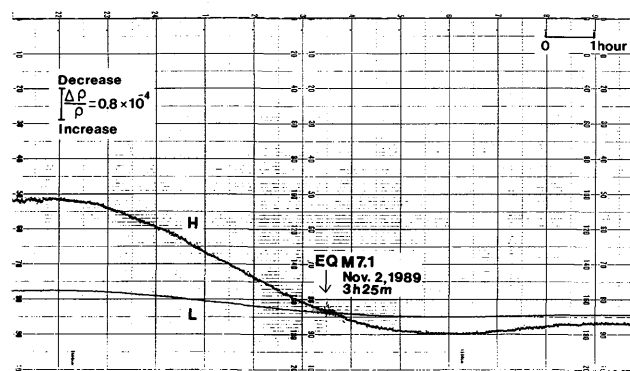
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年~1997 年)



64

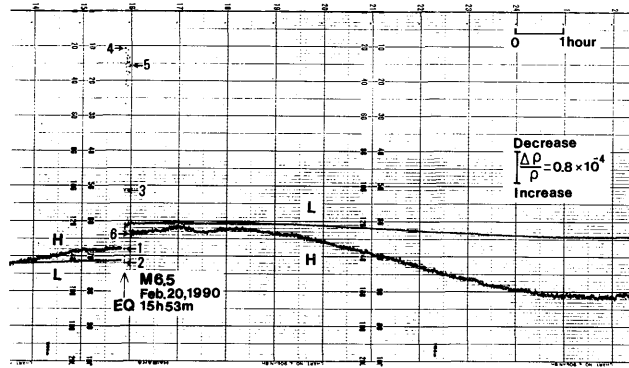


65

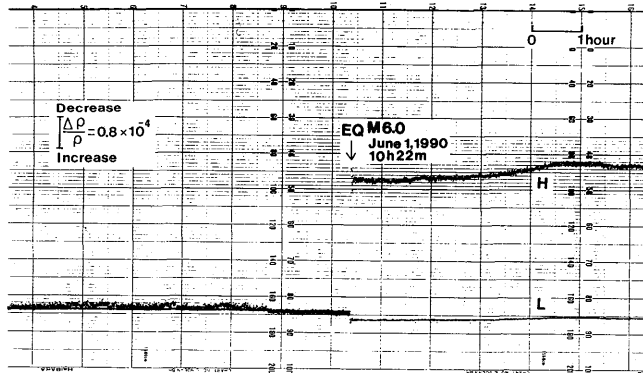


66

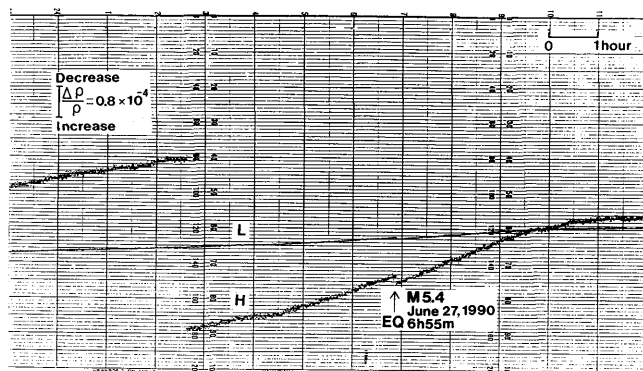
Fig. A. (continue)



67



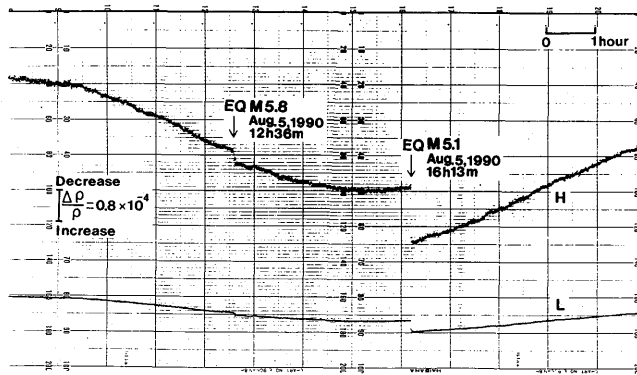
68



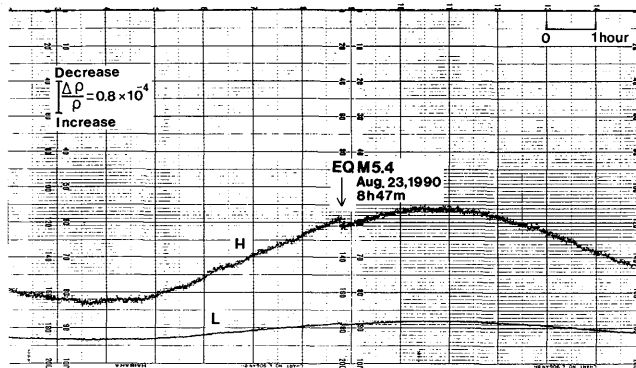
69

Fig. A. (continue)

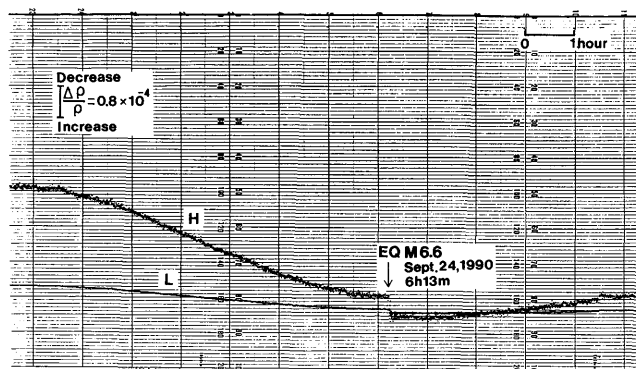
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



70
71

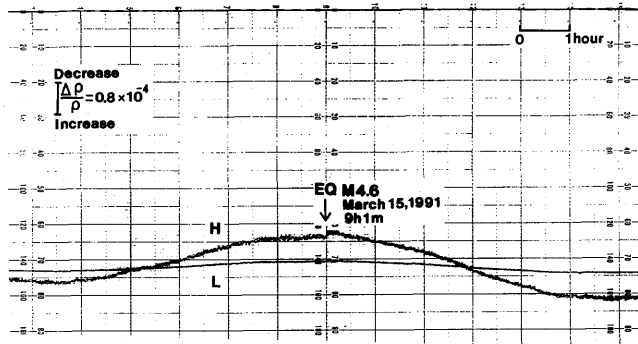


72

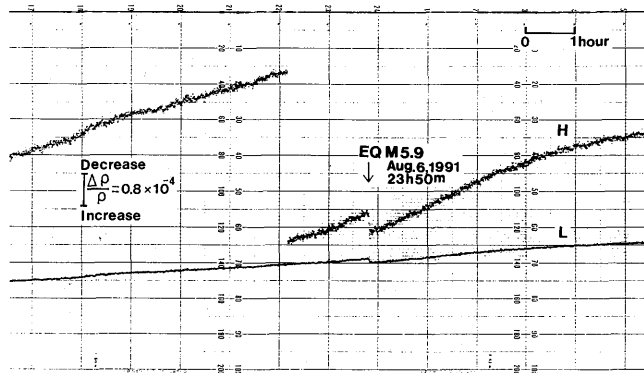


73

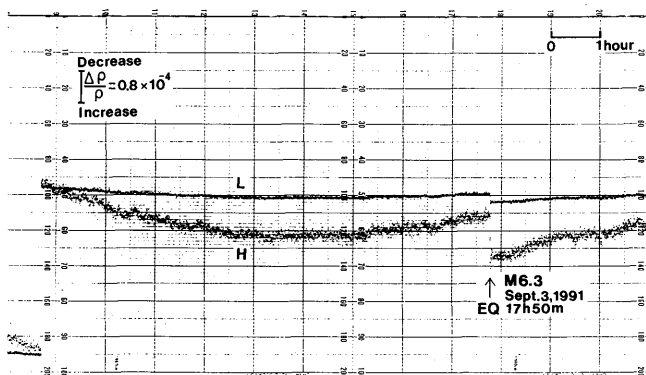
Fig. A. (continue)



74



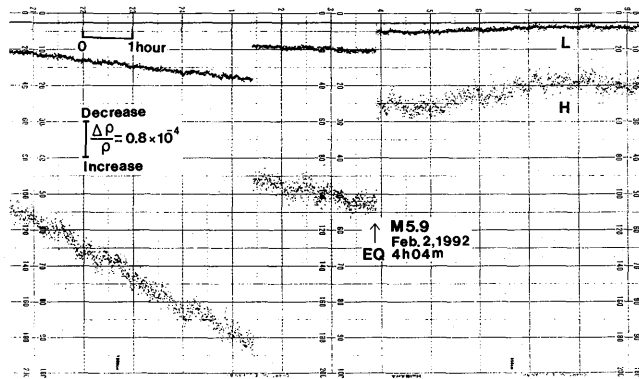
75



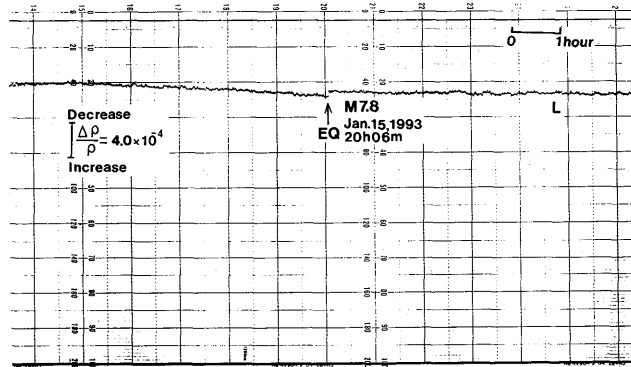
76

Fig. A. (continue)

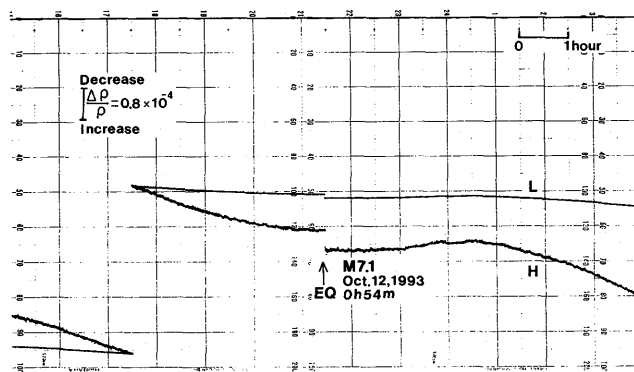
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



77

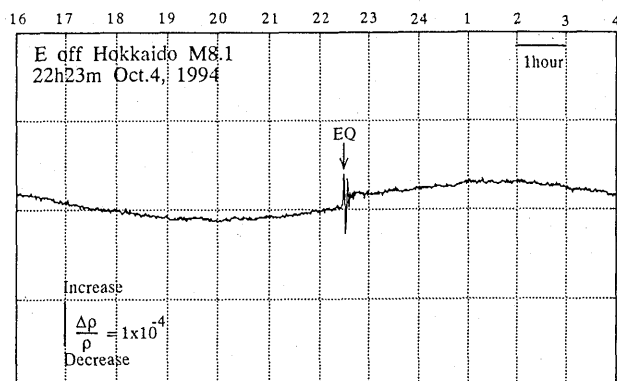


78

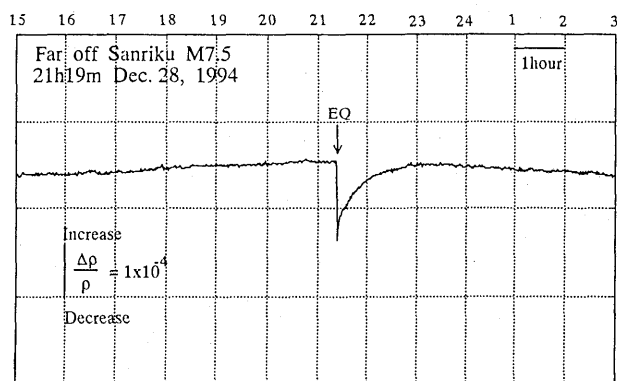


79

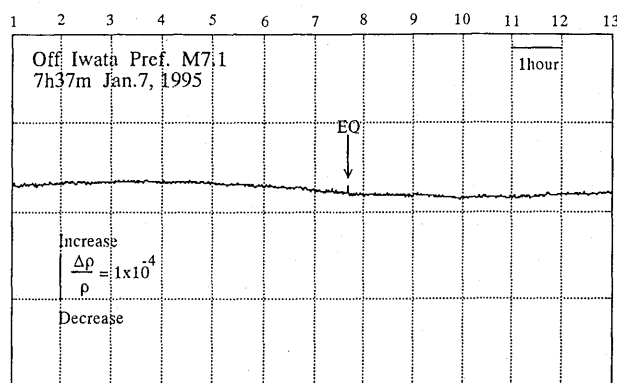
Fig. A. (continue)



80



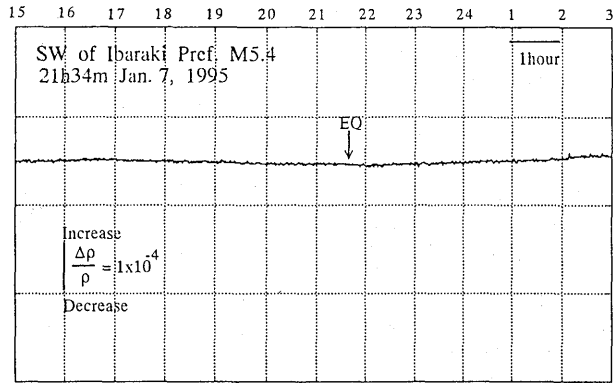
81



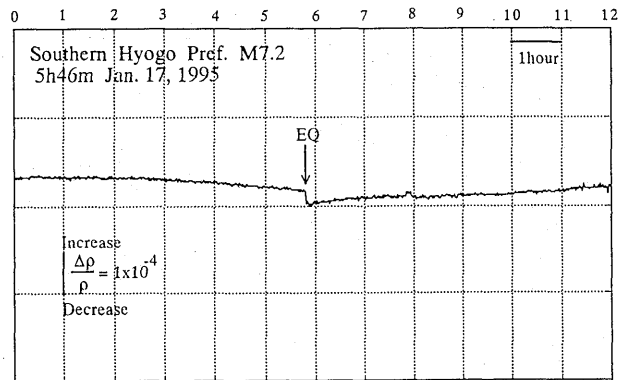
82

Fig. A. (continue)

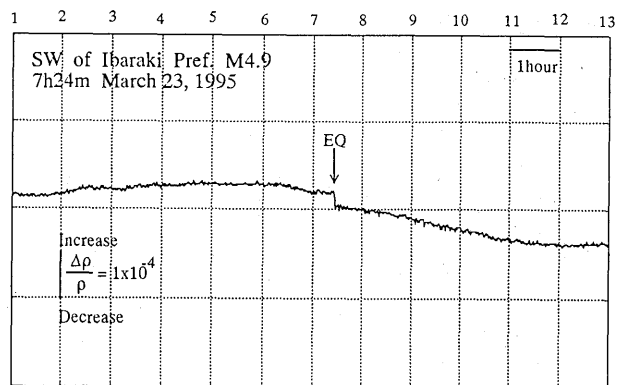
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



83

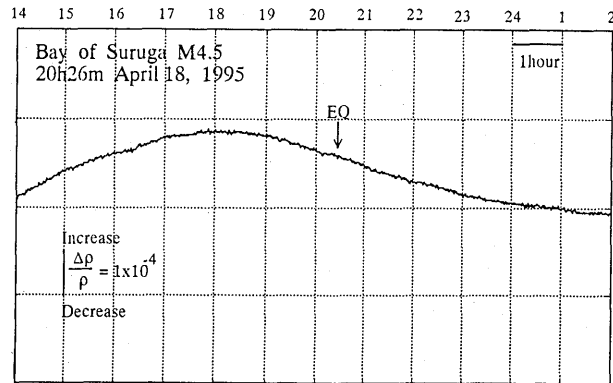


84

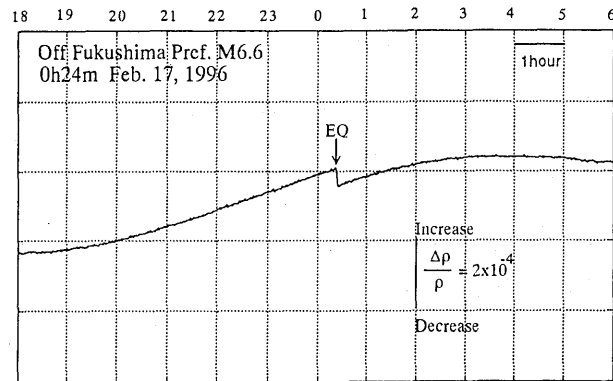


85

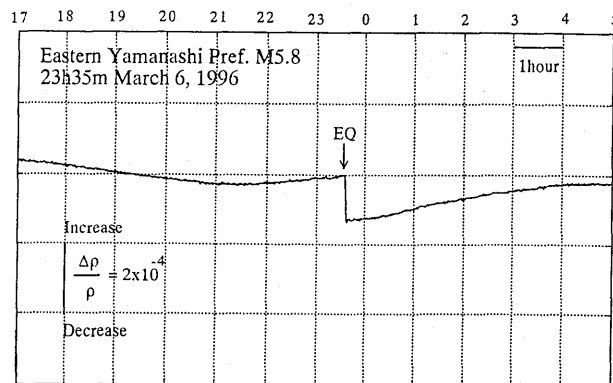
Fig. A. (continue)



86



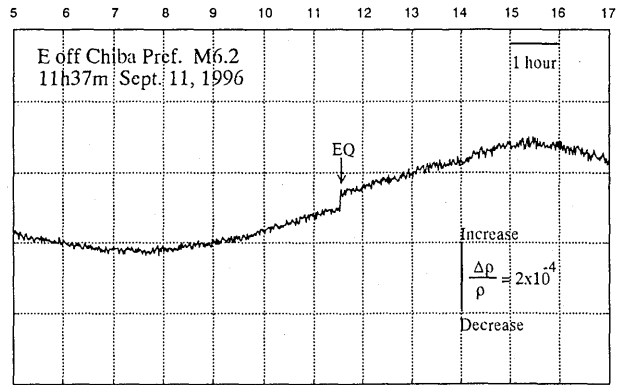
87



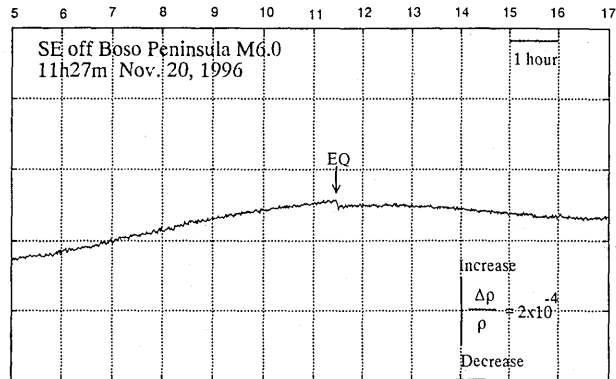
88

Fig. A. (continue)

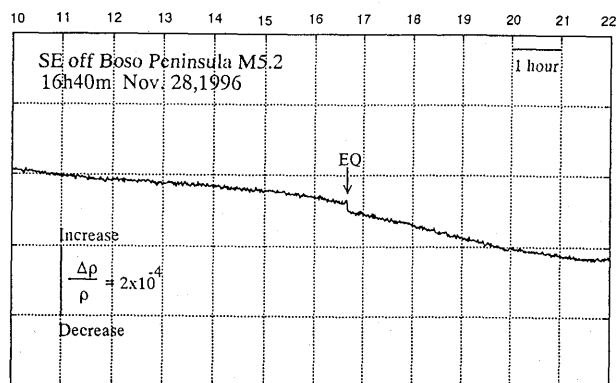
神奈川県油壺における大地比抵抗変化 (1983 年～1997 年)



89

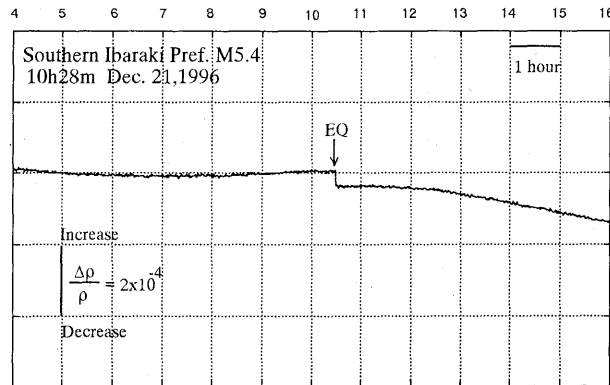


90

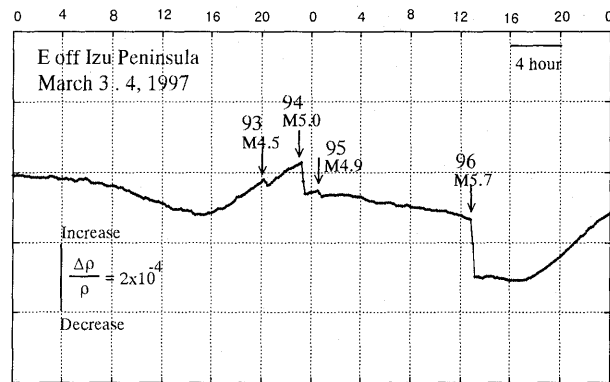


91

Fig. A. (continue)



92



93
94
95
96

Fig. A. (continue)