

比抵抗連続観測の安定性について

—地震に関連した変動の検出のために—

京都大学理学部 藤原 智

京都大学教養部 住友則彦

秋田大学鉱山学部 狐崎長琅

On the Stability of Continuous Observations of Electrical Earth Resistivity,
to Detect Precursory Changes in Relation to Earthquakes

Satoshi FUJIWARA* , Norihiko SUMITOMO** and Chorou KITSUNEZAKI***

*Geophysical Institute, Faculty of Science, Kyoto University

**Department of Earth Sciences, College of Liberal Arts and Sciences, Kyoto University

***Institute of Mining Geology, Mining College, Akita University

1. はじめに

短期的な地震予知の手段の1つとして、大地の比抵抗の変化を監視することがあげられる。本稿では、人工電流を用いた4極法による比抵抗連続観測における測定値の安定性、そのなかでもとくに降雨の影響について報告する。

1979年より山崎断層に沿った安富町春において、シュランベルジャー型の電極配置による見かけ比抵抗（以下、単に「比抵抗」と呼ぶ）の連続観測が行なわれている¹⁾。比抵抗を地表で観測する場合には、降雨による表層での比抵抗変化による擾乱を避けることができない。今回、降雨の影響をできるかぎり避けるために、深さ20mのポアホール（ボーリング孔）を掘削し、その中に電位電極をあらたに埋設した。また、これとは別に、電極系がすべて地中に配置できる場所として兵庫県中部の旧生野鉱山を選び、そこに比抵

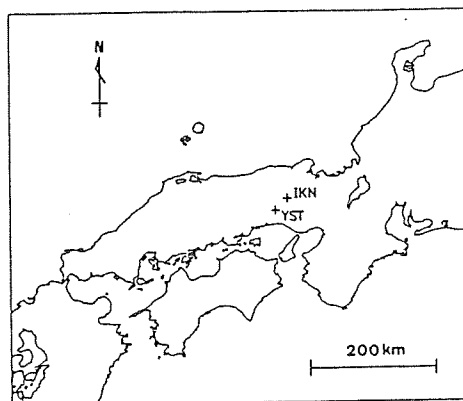


Fig.1. Location of observation stations, Ikuno (IKN) and Yasutomi near the Yamasaki fault (YST).

抗計を新しく設置した (Fig.1).

山崎断層での比抵抗連続観測に関しては、以前から比抵抗そのものが変化したとは考えられない異常変動が観測されることがあった。この異常変動が今回新しく設置されたボアホール内の電極についても観測されており、ボアホール内の電極による比抵抗連続観測の結果は満足のものも得られなかった。したがって、本稿では、山崎断層の比抵抗の連続観測については、異常変動についておよび異常変動が現われない南北成分での観測における降雨の影響について報告する。

旧生野鉾山の坑内では地殻変動などの観測が行なわれており、これらの記録と比抵抗変化と比較することが可能である。地殻変動には、地下水による影響が現われている。旧生野鉾山における比抵抗連続観測では、降雨の直接影響と思われる短期的な変動はほとんどみられないため、精度のよい観測が可能である。これより、地中での微妙な”水”の挙動を比抵抗変化として検出することを目標に観測を続けている。

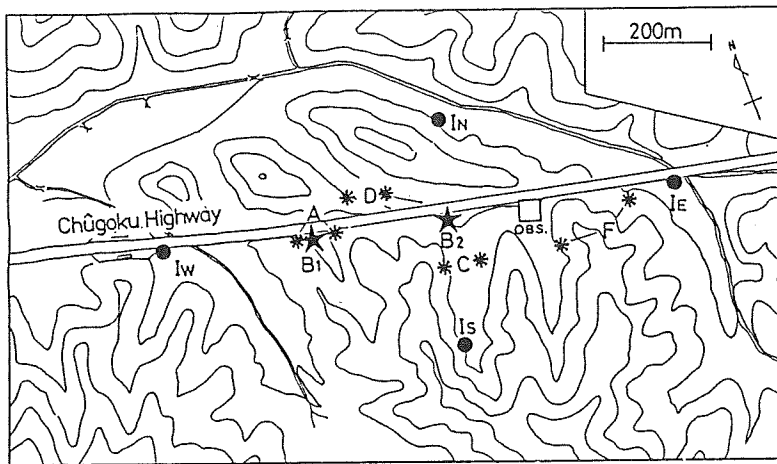


Fig.2. Arrangements of electrodes at Yasutomi.

I: current electrodes B: potential electrodes in boreholes
A, C, D and F: potential electrodes

2. 山崎断層における連続観測

2-1 従来からの異常変動

山崎断層における電極配置は、Fig.2 に示されている。(IE, IW) および (IN, IS) はそれぞれ東西、南北測線の電流電極である。また、A, B, C, D および F は電位電極の設置場所を示している。地震に関連した山崎断層での比抵抗の変動は SUMITOMO and NORITOMI²⁾ に報告されている。しかし、ときには数分~1日の周期をもつ10%を超える異常変動が観測されており、

真に地震に関連する微小な変動の検出を困難にしている。この異常変動の原因を調べるために、共通の電流電極 (IE, IW) をもつ電位電極を複数ヶ所に設置して同時観測を行なった。結果は、Fig.3 に示されているように、同じ信号電流源に対しても、受信する電位電極の位置によって異常変動の形態はほとんど同じであるが、振幅は異なることがわかった。このことより、ときおり観測される異常変動は受信電極付近のかなり小さい領域に原因をもつものであることが考えられる。興味深いことは、Fig.3 に示されているように、この異常変動は降雨によってその振幅が激減することである。

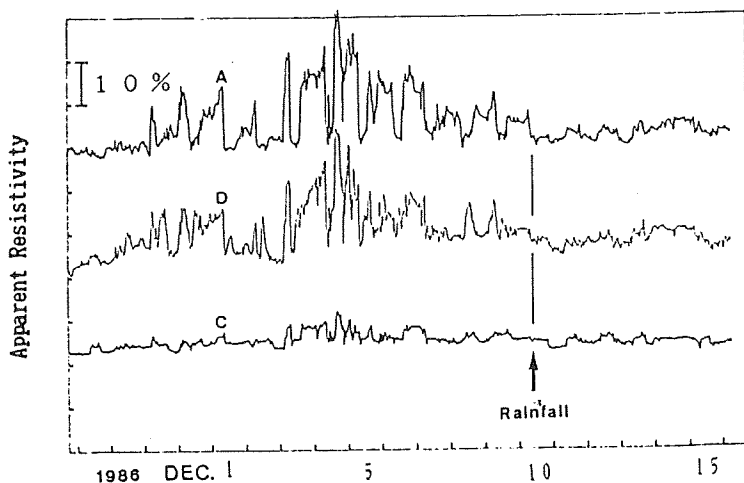


Fig.3. An example of unusual changes of apparent resistivity observed at Yasutomi.

この異常変動が外来ノイズの影響によって生じているものかどうかを調べるために、比抵抗計のアンプの入力部での波形をモニターすることを試みた。信号電流源から出力されているシグナル (周期4秒の矩形波) に比べて他の不規則ノイズはきわめて小さく、とくに高周波成分はほとんどフィルターで除去されており、異常変動は外来ノイズの影響ではないことがわかった。

つぎに、断層に直交する南北方向 (IN, IS) に電流を流した場合の点A, CおよびDなどでの観測結果によると異常変動がほとんどみられないことがわかった。これらの点を考慮すると、異常変動の有力な原因として、中国自動車道に沿って続いているフェンスに信号電流がバイパスして流れていることが考えられる。気象影響によってフェンスの接地抵抗が変わるために、このバイパス量が大きく変化することは十分に考えられる。実際に、フェンスが途切れている場所で両側のフェンスを電線でつなぐと、数%の比抵抗変化が認められる。現在設置されている東西方向の電流電極は、フェンスより2mほどしか離れていない。フェンスの影響からのがれるためには、電流電極を移動せざるを得ないが、用地に関する問題などで困難がある。

2-2 ボアホール内の電極による観測

地中深くでは、短期的にみた降雨の影響は小さい、今回は、他の目的（地下水位観測など）もあり、秋田大学により深さ20mのボアホールが Fig.2 のB1およびB2の2地点に掘られた。電極は鉛製で表面を塩化鉛で被覆してあり、Fig.4 に示されているように、深さが4mごとに独立してとりつけられている。これらの電極は、ボアホール内で塩化ビニールパイプの外側の地下水を通して大地の電位をはかっている。今回は、B1およびB2の深さ20mの電極を一对および深さ8mの電極を一对選んで電位電極とした。

深さ20mと8mの電極による入力波形を比抵抗計内のバンドパス・フィルターに通したものが、Fig.5 に示されている。細かい波形の乱れは、Fig.2 にOBS.で示されている場所にあるテレメーター装置からのノイズである。それぞれの深さにおける観測結果は、このノイズにいたるまでほとんど同じ振幅の波形であり、深さによる大きな違いはないことがわかる。

ボアホール内の電極による観測結果が、Fig.6 に示されている。この図には、地表での点AおよびFでの観測結果もあわせて示されている。比抵抗計の出力には、前述されている異常変動

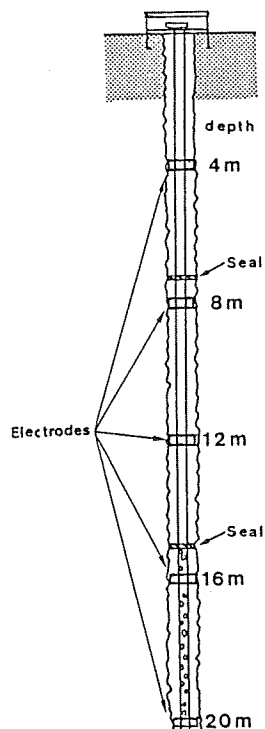


Fig.4. Potential electrodes in boreholes at Yasutomi.

がボアホール内の電極についても現われており、ボアホールは異常変動の除去については有効ではなかったと考えられる。ただし、深さ8mの電極による比抵抗値は深さ20mのものより異常変動の振幅について10%ほど大きいことから、異常変動の原因がより地表近くにあることが推測される。これは前述されているフェンスに電流がバイパスしているという考えを裏付けるものである。ボアホール内の電極の特性などについては、今後、電流電極を移動するなどして異常変動の原因を解決した後に詳しく調べる予定である。

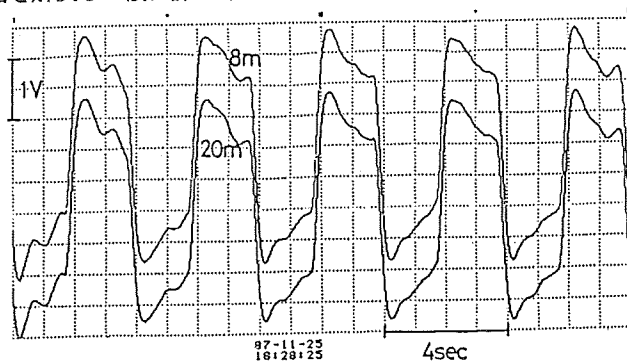


Fig.5. Received wave forms of potential electrodes in boreholes. (band-pass filtered)

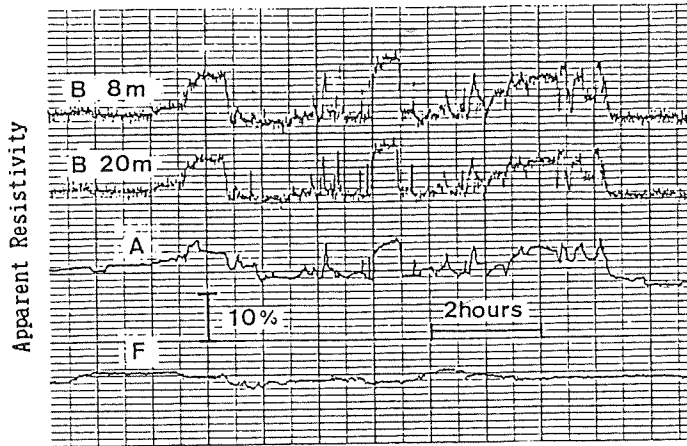


Fig.6. Comparisons of unusual changes of apparent resistivity observed at Yasutomi.

2-3 降雨による擾乱

前述されているように、比抵抗の東西成分には異常変動が大きくみられるので、記録から降雨の影響による比抵抗の変動を明確に区別するのは困難である。しかし、南北成分はノイズも小さく安定した記録がとられているので、以下には、この南北成分の降雨による影響を調べた。

4極法では電流出力は定電流となっているので、送信側からみた出力電圧は電流電極の接地抵抗に比例して変動する。この出力電圧をモニターすることで、電流電極の接地抵抗すなわちごく表層での大地の乾燥の程度を知ることができる。

降雨の前後での受信側の入力電圧すなわち比抵抗の変動の1例が、Fig.7 に示されている。この図には、出力電圧モニターの記録もあわせて描かれている。残念ながらこのときの降雨の正確なデータはないが、出力電圧が大きく変化している直前から雨が降り始めている。降雨がないかまたは少量のときには、比抵

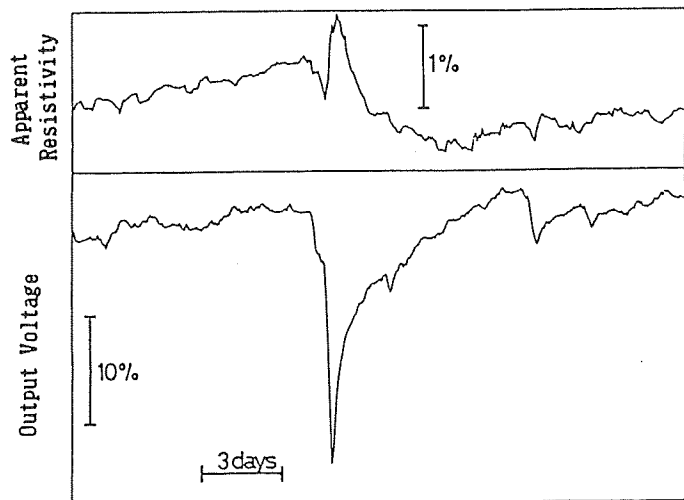


Fig.7. Records of apparent resistivity and output voltage for current electrodes. Output voltage falls quickly when it rains.

抗と出力電圧はほぼ比例している。ただし、比抵抗の変動量は出力電圧の変動の約 1/10 である。まとまった降雨があると、出力電圧は大きく降下する。このとき、比抵抗ははじめ出力電圧に比例して降下しているが、ある程度降水が大地にしみわたると急に上昇する。これは土壤水のイオン濃度が雨水によって薄められて電気伝導度が減少することによるものではないかと考えられる。

電流電極間隔が広いほど、ごく表層での比抵抗変化による擾乱の影響は効きにくい。南北成分の電流電極間隔は約 400 m であり、この場合、比抵抗連続観測における降雨による短期的な擾乱が、数%ほど存在することがわかった。

3. 旧生野鉦山における連続観測

降雨の影響をできるかぎり避けるためには、電極をすべて地中深くに設置すればよい。この目的で、旧生野鉦山内の火薬庫跡の坑道に比抵抗計を新しく設置した。Fig.8 に、旧生野鉦山での電極配置が示されている。この坑道内では気温が年間 0.1°C 程度しか変わらないために、比抵抗計のアンプ部についても温度ドリフトの心配がなく、精度よく観測ができるという利点もある。1分ごとの観測値は、テレメーターにより京都大学防災研究所まで送信されている。

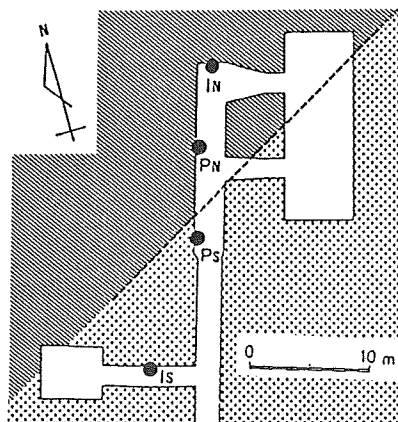


Fig.8. Arrangements of electrodes in a tunnel of the old Ikuno mine.
I: current electrodes
P: potential electrodes

また、この旧生野鉦山内では、京都大学理学部により多数の伸縮計や傾斜計を用いた地殻変動や極微小地震の観測などが続けられており、比抵抗変化との相関を調べるのに好都合である。また、坑道内では、自然電位の連続観測も行なわれている³⁾。

地震の震源域においてはダイラタンシーにより比抵抗が変化することが予想されるが、4極法の探査深度内（簡単には、シュランベルジャー法の場合、電流電極間隔の半分としてよい）が震源域に含まれることはきわめてまれであると思われる。しかし、地震に関連した応力変化などで“水”が移動することが考えられる²⁾。したがって、震源域以外でも地震に関連した変動を検出するためには、この“水”の動きを比抵抗変化として取りだすことができればよいであろう。旧生野鉦山での観測では、この“水”の動きを検出することを考慮にいれて、岩の割れ目から水がしみだしている場所（Fig.8 に点線で示されている岩体接触面）をはさむように電極を埋設した。

岩の割れ目からしたり落ちる水の量（以下、「しみだし水」と呼ぶ）は、福田⁴⁾によると、伸縮計に現われる岩盤のひずみと関連していることが指摘されている。しかし、この比抵抗計の感度は比抵抗値について $10^{-5} \sim 10^{-4}$ の変動の検出が限度であり、岩盤のひずみが増幅されて比抵抗値に現われるとしても、実際には、地球潮汐によるひずみ変化 (10^{-8}) は比抵抗変化としてはまったく検出できておらず、岩盤のひずみ変化 ($10^{-8} \sim 10^{-7}$) そのものを比抵抗変化として検知するのは不可能であると思われる。神奈川県油壺の比抵抗変化計では岩盤のひずみが大きく増幅されて比抵抗値に現われるいわゆる「なまず岩」の効果が観測されている⁵⁾。しかし、旧生野鉾山ではこの効果は認められなかった。

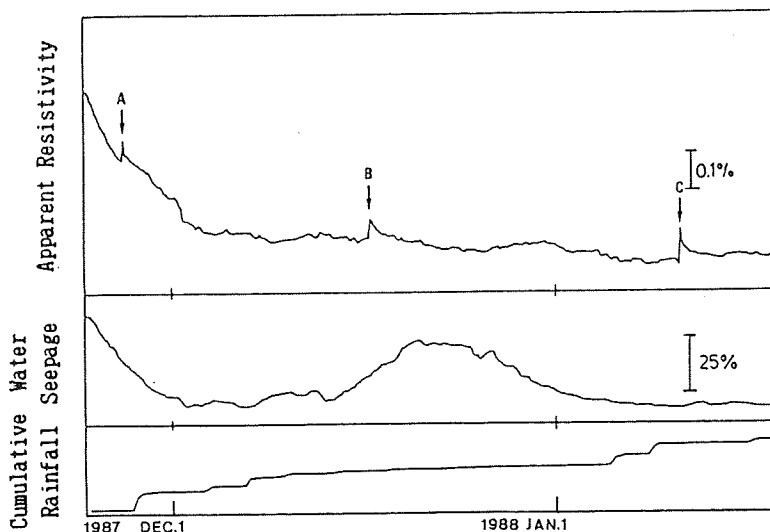


Fig.9. Records of apparent resistivity, water seepage and cumulative rainfall observed at Ikuno.

Fig.9 には、設置してから約2ヵ月間の比抵抗、しみだし水および積算雨量の記録が示されている。図中の比抵抗としみだし水には良好な相関が認められるが、12月後半の変動はそれぞれ異なっている。これは、比抵抗値の変動が岩体中の水に依存するものであるとすれば、岩体中の水の量としみだし水が単純には比例していないためであることも考えられるが、これだけのことからはっきりしたことはわからない。冬季においては、降水が少なく、しみだし水も少ない。今後、大雨が降ったあとの比抵抗の変動が興味深い。

Fig.9 中のA、BおよびCの3ヵ所ではほぼ瞬間的なステップ状の変化がみられる。数時間から数日のうちにゆっくりともとの値に戻っているところから、観測機器または電極に異常があったとは考えがたい。このうち、AおよびBの変化については地殻変動などに対応する変動はみられ

ず、原因はわかっていない。

Cのステップ(+0.1%)前後の変化が、Fig.10に示されている。このステップ状変化は、旧生野鉦山の近くに発生した地震($\Delta=10\text{km}$, $M=2.6$)と同時に生じている(正確には地震の前後1分以内)。この地震と同時に変動がみられたのは、傾斜計1成分(Fig.10)だけである。しみだし水は時間的にも量的にも分解能がよくないためもあり、変動は認められない。他の伸縮計などには変化がみられないので、岩のひずみの変化はほとんどなかったものと考えられる。この地震の4時間前にも、別の場所で、別の地震が発生しており、傾斜計に地震と同時に大きな変動がみられるが、比抵抗には変動がみられない。傾斜計は振動に対して敏感であるので、地震動そのものは4時間前の地震のほうが大きかったものと考えられる。比抵抗のCでのステップ状変化の原因は、現在のところ不明である。しかし、われわれは、地震発生とともになんらかの原因で岩の割れ目中の"水"が瞬間的に移動したのではないかと考えている。この際の物理的過程については今後の課題であるが、"水"の移動を別の方法で確かめる必要がある。

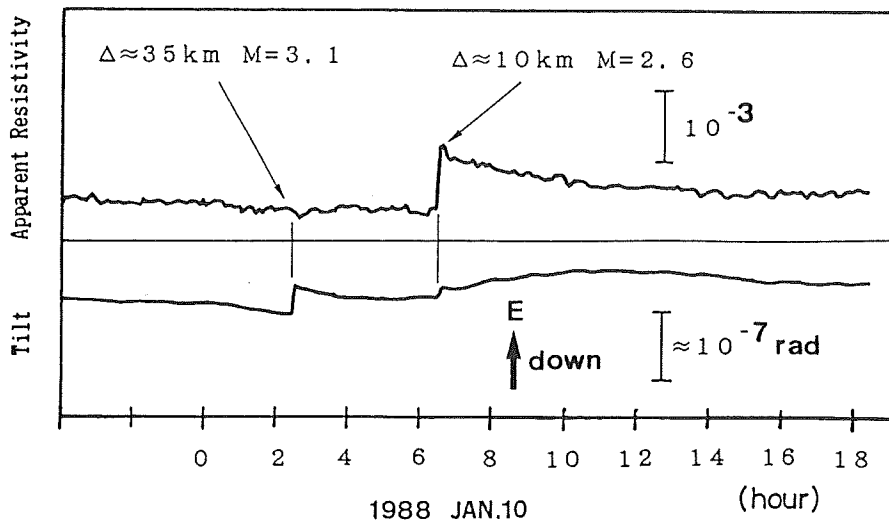


Fig.10. Co-seismic changes of apparent resistivity and tilt (by a Horizontal Pendulum Tiltmeter) observed at Ikuno.

4. まとめ

山崎断層における比抵抗の連続観測の場合、比抵抗の観測値には深部での比抵抗変化の情報におもに降雨による表層での擾乱が10%程度重なることがあるので、深部の比抵抗変化が10%以下の場合、これをノイズから分離するのは困難である。ノイズの少ない電極配置を探して、電流電極も今回の電位電極のように地中深くに埋めれば精度はあげられると思われるが、大きな

出力電流を流すためにボアホール内で接地抵抗を下げるのはむずかしい。しかし、異常変動が取り除かれれば、現在の精度でも地震の前兆現象は十分に検知できると思われる。

これに比べて、旧生野鉱山内での観測値はきわめて安定している。また、感度も山崎断層のものより100倍近くも大きくとることができた。比抵抗連続観測の目的の1つである「地震に関連した”水”の移動の検出」も十分可能であると思われる。今回は短スパンの観測であったが、長スパンの電極配置のものも併用して広域での”水”の挙動を調べる必要がある。今後も精度の高い連続観測を行なって、”水”の移動の物理過程も明らかにしていきたい。

本稿を綴りおわるに際して、山崎断層における観測については、安富町および日本道路公団福崎管理事務所には多大な便宜をはかっていただいた。旧生野鉱山での観測については、三菱金属株式会社 生野工場および(株)シルバー生野の各位には多大な便宜をはかっていただいております。また、京都大学理学部の藤森邦夫助手には、観測機器の設置および保守においてさまざまな御助力をいただいた。京都大学理学部の小笠原宏氏には比抵抗計の改良について御助言をいただいた。坑内の電極は神戸学院大学教養部の大塚成昭助教授らによる自然電位観測用の電極を使わせていただいている。これらの方々に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 塩崎一郎・岩越朗・山口覚・大塚成昭・住友則彦・乗富一雄, 山崎断層における電磁気総合観測, CA研究会論文集, 175-188, 1984.
- 2) SUMITOMO, N. and K. NORITOMI, Synchronous Precursors in the Electrical Earth Resistivity and the Geomagnetic Field in Relation to an Earthquake near the Yamasaki Fault, Southwest Japan, J. Geomag. Geoelectr., 38, 971-989, 1986.
- 3) 大塚成昭・大村誠・福田正浩・藤森邦夫・住友則彦, 地殻変動観測坑内における自然電位差変化の観測, CA研究会論文集(本論文集), -, 1988.
- 4) 福田正浩, 地殻変動連続観測記録に現われる降雨の影響について-生野地学観測室の場合-, 京都大学理学研究科修士論文, 1988.
- 5) 山崎良雄, 岩石変形と比抵抗変化, 地震2, 20, 138-140, 1967.