

地殻変動観測坑内における 自然電位差変化の観測

神戸学院大学 教養部 大塚 成昭
京都大学理学部 大村 誠
福田 正浩
藤森 邦夫
京都大学教養部 住友 則彦

OBSERVATIONS OF SELF-POTENTIAL DIFFERENCES IN THE TUNNELS OF CRUSTAL MOVEMENTS OBSERVATION STATIONS

Shigeaki OTSUKA
Faculty of General Education, Kobe-Gakuin University
Makoto OMURA, Masahiro FUKUDA, Kunio FUJIMORI
Geophysical Institute, Kyoto University
and
Norihiro SUMITOMO
Department of Earth Sciences,
College of Liberal Arts and Sciences, Kyoto University

1. はじめに

地震前兆現象の一つとして自然電位差変化(地電流)の異常が古くから注目されており、これまでも幾つかの観測報告がある。最近の例では1984年5月30日に山崎断層付近に発生したM5.6の地震に先行して自然電位差の異常変化があったという報告がある¹⁾。また、ギリシャでは自然電位差変化の異常を用いて地震予知に成功したという報告もある²⁾。

自然電位差変化の観測は、通常、地表付近で行われているが、降雨や気温変化などが電極(およびその近傍)におよぼす気象影響の有無が問題となるであろう。そこで、電極を含めた観測システムにおよぼす気象影響の非常に小さい場所として京都大学地殻活動総合観測線の二つの地殻変動観測坑(地下約40mおよび約108m)を用いることとした。また、この場合、地殻変動、湧水量、その他種々の観測結果との比較も容易であり、自然電位差変化の原因の物理的解明に役立つと思われる。これと同じ様な目的で行われている自然電位差変化の観測として、例えば、山崎断層安富観測坑(地下約8m)¹⁾や名古屋大学地殻活動総合観測線の鉛直ボーリン

グ坑（地下30～150m）での観測などがある。ここでは1986年6月から1987年1月までの約半年間のデータを予備的に解析した結果について報告する。

2. 観測場所および観測計器

自然電位差変化の連続観測は、六甲鶴甲断層運動観測室（以下、六甲鶴甲と略す）および生野地学観測室（以下、生野と略す）の2つの京都大学理学部の地殻変動観測坑内において実施している。これらの観測室の位置および観測坑内の電極配置をFig. 1 (a), (b)とFig. 2 (a), (b)に示す。

六甲鶴甲は、JR西日本（旧国鉄）山陽新幹線六甲トンネルの鶴甲斜坑掘削時の旧水抜き坑を利用して設けられている。この観測室の環境その他の特徴については田中・他（1972）および大塚・他（1982）で述べられているので^{(4), (5), (6)}、ここではその主な特徴について簡単に述べる。観測室は地表からの深さ約108mの所にあり、全体がいわゆる六甲花崗岩の岩体の中に

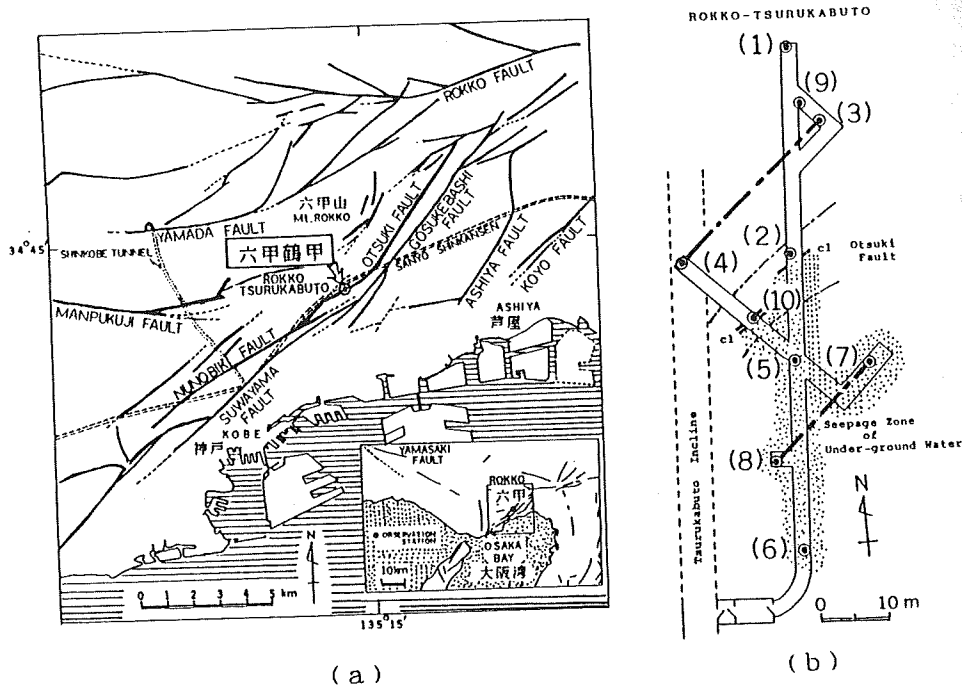
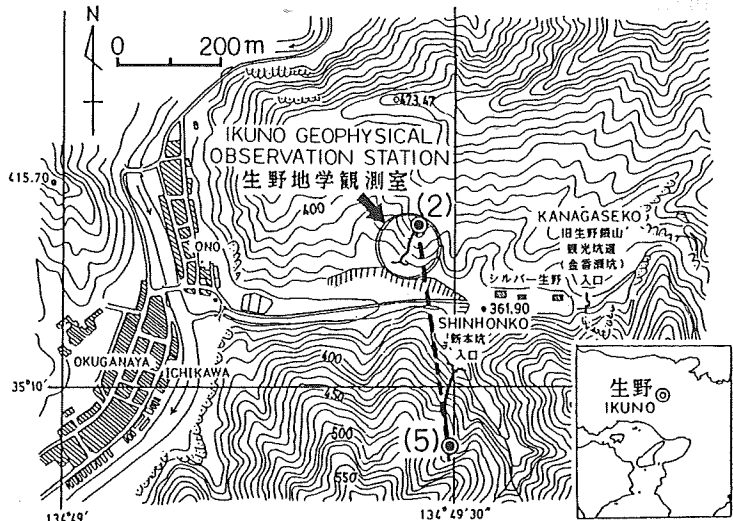


Fig. 1. (a) Location of the Rokko-Tsurukabuto observation station, and distribution of active faults in and around the Rokko mountains area. (b) The arrangement of electrodes in the observation station and the rock condition in the vicinity of the observation tunnel. The rock on the south side of the Otsuki fault is considerably fractured and the underground water is seeping there, the shaded zone in the plan.

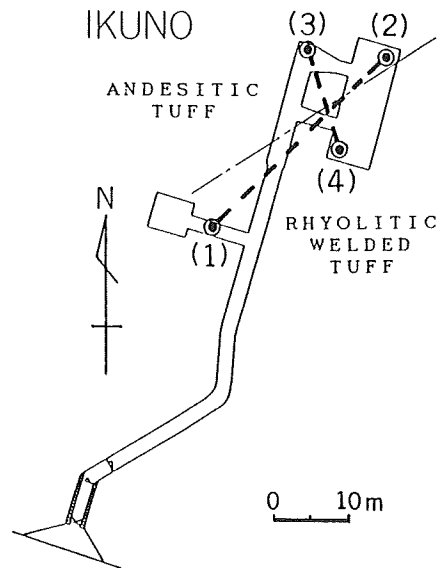
ある。 Fig. 1 (a), (b) に示すように六甲山地断層系の代表的な活断層の一つである大月断層を横切って設けられている。厚さ数十cmの断層粘土の南東側（以後、単に南側と呼ぶ）一帯は破碎帯となっており湧水がある。一方、北西側（以後、単に北側と呼ぶ）の岩盤はかなり風化しては

いるが、破碎帯ではなく湧水はない。このような断層破碎帯の内外で自然電位差変化に違いが有るか否か、自然電位差変化と最も関係がある他の現象は何かなど自然電位差変化についての基礎的なことからについて調べていきたい。また、HIYAKOSHI (1986) ¹⁾ の報告にあるような地震に関する変化が観測されるか否かについても注目したい。

生野地学観測室は旧生野鉾山（銀山）域内にある。この観測室の特徴については田部井・他 (1985) および福田 (1988) で詳しく述べられている。^{7)・8)} 観測室は旧火薬庫を利用しており、その地表からの深さは約40mである。岩質は観測室内を東北東



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Location of the Ikuno geophysical observation station and electrodes. (b) The arrangement of electrodes in the observation tunnel.

—西南西方向に横切る岩体接触面を境にして、北側（坑道奥側）が安山岩質凝灰岩，南側（坑口側）が流紋岩質熔結凝灰岩である。電極間隔を長く取るためにFig. 2 (a) に示すようにこの観測室の他に新本坑内にも電極(5)を設置してある。

六甲鶴甲が市街地に近く，都市ノイズが大きいのに比べて生野は比較的ノイズが少なく，また，電極間隔を長く取ることもでき，観測条件は良い。さらに，六甲鶴甲と生野の両観測室での観測結果を比較することにより，広い範囲で共通の変化が有るか否か調べることができであろう。

電極は，直径33mm，長さ約30cmの炭素棒を用い，接地抵抗減少剤（商品名：イピアース）に炭素粉末を混合したものを電極の周囲に入れ接地抵抗を小さくしている。六甲鶴甲の電極配置はFig. 1 (b) に示すとおりであり，電極間隔20m～30mで断層近傍の電位差変化を詳しく調べられるようにしてある。設置は1984年11月に行った。生野では1985年4月にまず地殻変動観測坑内にFig. 2 (b) に示す電極(1)～(4)を設置した。当初，電極(1)～(2) [間隔31m]，および電極(3)～(4) [間隔15m] をそれぞれ電極セットとして観測を開始したが，1986年12月にFig. 2 (a) に示すように，地殻変動観測坑から数百メートル離れた新本坑内に新たに電極(5)を設置し，電極セット(1)～(2)を解除し，電極セット(2)～(5) [間隔425m] で観測することとした。また，この報告で用いるデータの期間の観測は行われていないのでFig. 2には記入していないが，1987年7月に現在史跡旧生野銀山の観光坑道として入口付近が公開されている金香瀬坑を利用して長い電極間隔(100m以上)の電極セットを増設した。

信号は，遮断周波数0.01Hzのハイカット・フィルター内蔵の絶縁型直流増幅器を用い，成分によって5倍または10倍した後テレメーター装置へ入力している。

この報告では解析に用いなかったが，1986年11月下旬から1987年3月中旬までの約4箇月間，生野の坑道内においてフラックスゲート磁力計による磁場3成分の観測を行った。

3. 観測結果

六甲鶴甲における自然電位差変化の記録をFigs. 3, 4に，生野における自然電位差変化の記録をFigs. 5, 6に，各々気象要素の変化などと共に示す。

六甲鶴甲には多数の電極が設置されているが，この報告で用いるデータの期間では，断層の北側，南側共にN45°E方向（断層の走向に平行な方向）各々一成分ずつのみ [電極セット(3)～(4)および(7)～(8)] が利用可能である。

生野については1986年12月13日までは地殻変動観測坑内でのみの観測であったが，この時以

ROKKO-TSURUKABUTO

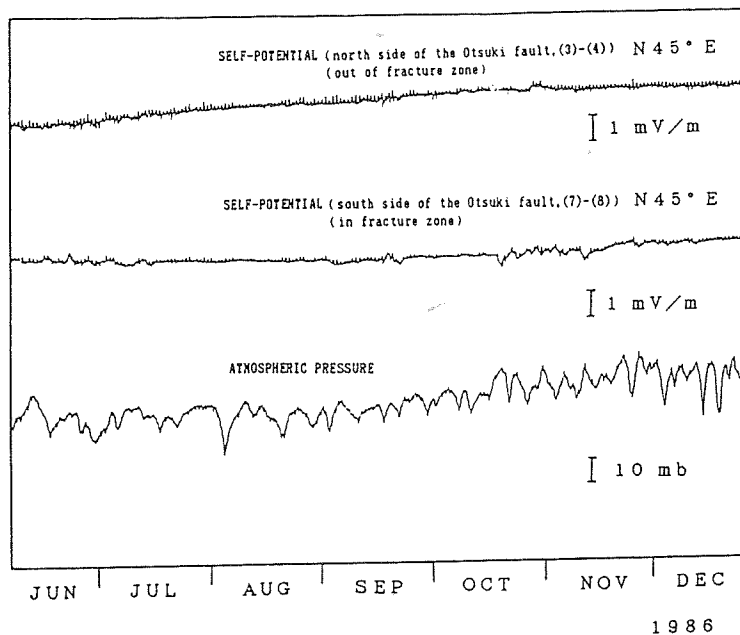


Fig. 3. Records of the self-potential changes and the atmospheric pressure changes at the Rokko-Tsurukabuto observation station.

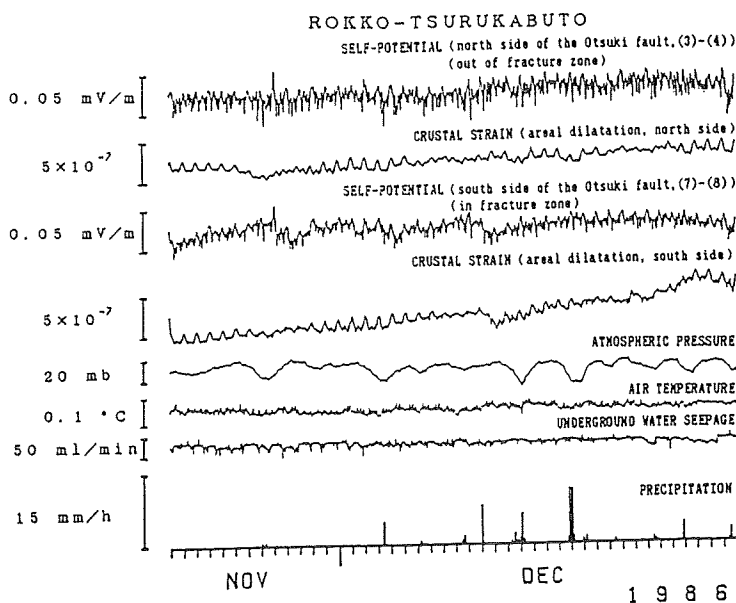


Fig. 4. Detailed traces of the self-potential changes and other geophysical phenomena at the Rokko-Tsurukabuto observation station.

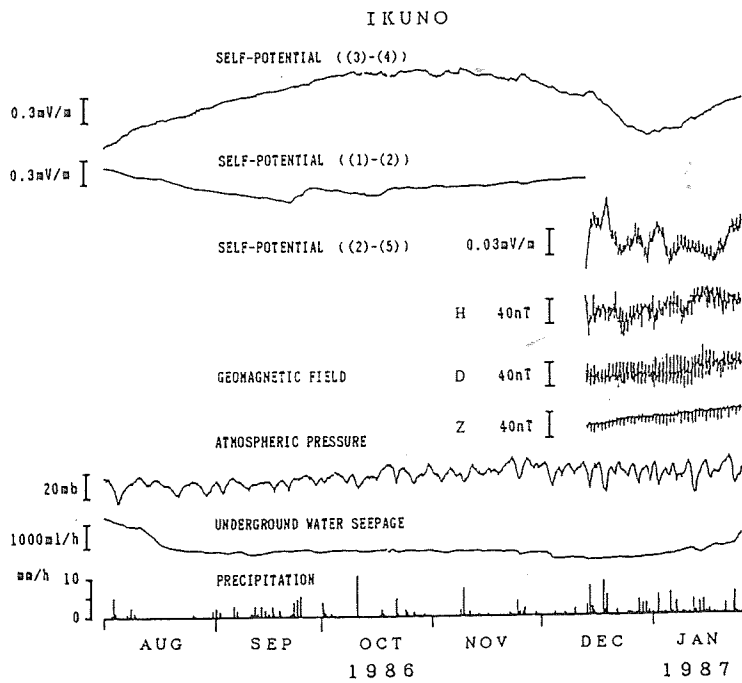


Fig. 5. Records of the self-potential changes and other geophysical phenomena at the Ikuno geophysical observation station.

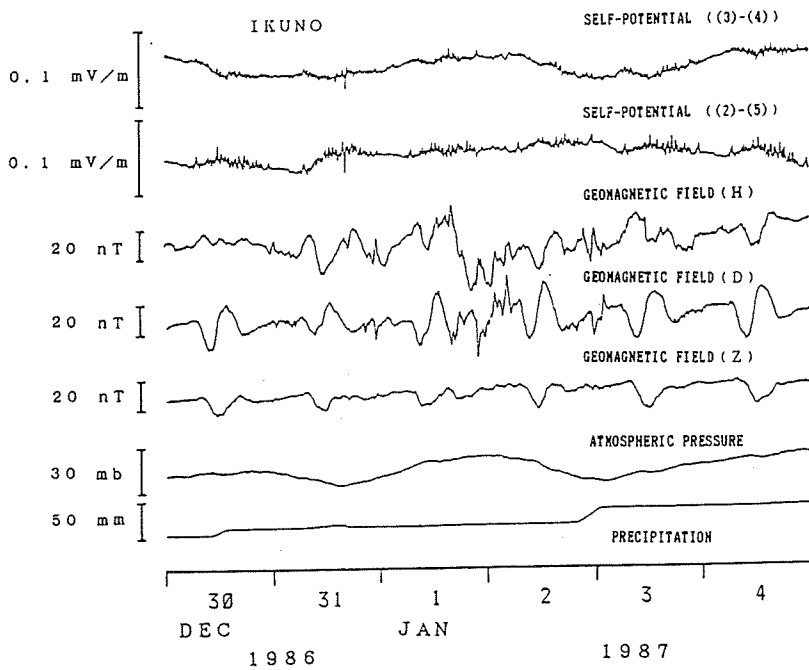


Fig. 6. Detailed traces of the self-potential changes and other geophysical phenomena at the Ikuno observation station.

降は新たに新本坑内に設置した電極(5)を用いて一部長い電極間隔(425m)での観測に変更した。したがって、1986年12月13日以前は電極セット(1)-(2)および(3)-(4) [いずれも短い電極間隔]での観測結果を、それ以降は電極セット(2)-(5) [長い電極間隔] および(3)-(4) [短い電極間隔, 継続]での観測結果を示してある。

六甲鶴甲, 生野両観測室における自然電位差変化の記録には人工擾乱を含む日周変化以下の短周期変化の他に, 周期3~8日程度の長周期変化が認められる(以後, 周期3~8日の変化を長周期変化, 周期3日以下のものを短周期変化と呼ぶ)。この長周期変化は顕著な時期とそうでない時期とがある。六甲鶴甲では6月~7月中旬と9月下旬~11月上旬頃に顕著であり, 特に, 大月断層の破碎帯の中での記録に明瞭に現れている(Fig. 3)。一方, 生野でもこの長周期変化は9月下旬から12月上旬にかけて顕著となっている(Fig. 5, 電極(3)-(4))。この変化の原因である可能性が最も高いものの一つとして気圧変化が考えられる。ただし, 生野の電極セット(1)-(2)に見られる9月と10月の大きな変化は降雨によるものと思われる。しかし, これは地表観測での降雨の電極への直接影響とは異なり, 降雨が2. で述べた岩体接触面に沿って浸透した結果その極近傍の電位分布を乱したものと思われる。それが岩体接触面に近接し, これにほぼ平行な電極セット(1)-(2)に顕著に現れたものと思われる。Figs. 4, 6には自然電位差変化を拡大して示すと共に比較のために気圧変化, 気温変化, 降雨, 湧水量, 地殻歪(面積歪)変化および地磁気変化の記録を併せて示す。

4. 予備解析結果と考察

六甲鶴甲における自然電位差変化は, Figs. 3, 4に見られるように, 大月断層の破碎帯内 [南側, 電極(7)-(8)]と破碎帯外 [北側, 電極(3)-(4)]で相違があると思われる。また, Figs. 3, 5に見られるように, 六甲鶴甲,

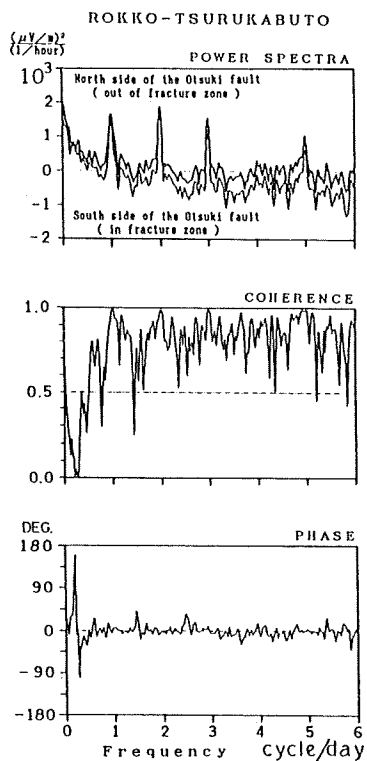
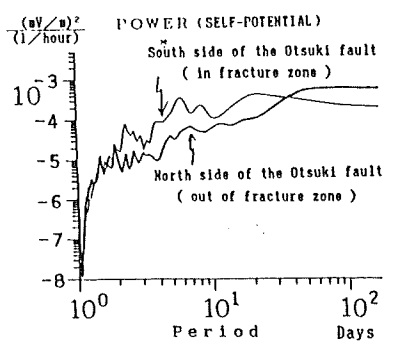
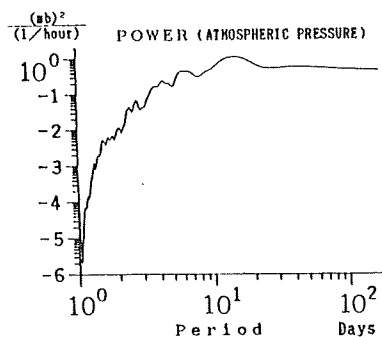


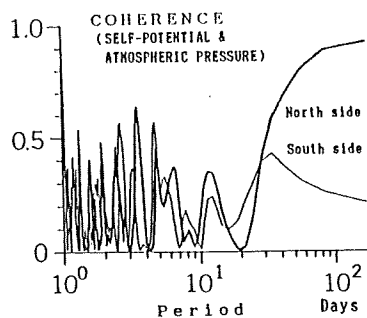
Fig. 7. Comparison of the self-potential changes observed on both sides of the Otsuki fault at the Rokko-Tsurukabuto observation station.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Correlation between the self-potential and the atmospheric pressure at the Rokko-Tsurukabuto observation station.

- (a) Power spectral densities of the self-potential changes on both sides of the Otsuki fault.
 (b) Power spectral density of the atmospheric pressure changes.
 (c) Coherences between the self-potential and the atmospheric pressure.

生野両観測室における自然電位差変化は共にほぼ同じ時期に周期3~8日の長周期変化が顕著になる傾向がある。一方、同様の長周期変化が顕著なもの一つに気圧変化がある。これらの各現象間の相関をさらに詳しく調べるためにスペクトル解析を行った。スペクトル解析は、日野(1978)⁹⁾にしたがって、一時間値1024個を用い、トレンドを除去し、ハニングのデータ・ウィンドウを掛けた後、FFT法で行った。

はじめに六甲鶴甲についての結果を示す。自然電位差変化の大月断層破砕帯の内と外との比較のために、それぞれのパワースペクトル、コヒーレンスおよび位相をFig. 7に示す。パワースペクトルの図から短周期帯(振動数約0.5 cycle/day以上(周期約2日以下))ではパワーで2~3倍(振幅で約1.5倍)破砕帯の外である北側の方が大きく、長周期帯(周期3~8日)では破砕帯内である南側の方が振幅がやや大きいことが分かる(Fig. 3(a)も参照)。

次に、コヒーレンスと位相について見ると、短周期帯では、コヒーレンスは0.5以上、位相はほぼ0度である。したがって、断層破砕帯の内外で短周期帯の電位差変化はほぼ同期していると考えて良い。ところが、長周期帯では、コヒーレンスは0.5以下であり、位相は安定せず、断層破砕帯の内と外とで異なる変化様式であることが分かる。

以上のことから、短周期帯の変化は観測

地点全体に周囲からかかっている外部電場そのものの変化を反映しており、破碎帯の外の方が振幅が大きいのは、破碎帯に比べて含水率が小さく比抵抗が大きいためと考えられる。これに対して長周期帯の変化は断層破碎帯の媒質の状態変化を大きく反映しているものと考えられる。

自然電位差変化と他の物理量との相関を調べた結果、最も相関が高いのは気圧変化に対してである。地殻歪（面積歪）変化との相関は気圧変化との相関程には明瞭ではないが、気圧変化との相関が高い時期は、地殻

歪変化との相関も高い傾向にある。六甲鶴甲における自然電位差変化と気圧変化とのコヒーレンスの一例をFig. 8に示す。

先にも述べたように、長周期変化は顕著な時期とそうでない時期とがあるので、気圧変化とのコヒーレンスの時間変化を調べた結果をFig. 9に示す。

長周期変化（周期3～8日）に注目すると、断層の北側（破碎帯の外）では全期間を通じてコヒーレンスが0.5を超えることがないのに対し、南側（破碎帯の中）では解析期間が1986年10月14日～11月23日のところで気圧変化とのコヒーレンスが高くなっているのが認められる。

次に、生野についても同様の解析をした結果について述べる。人工擾乱を含む日周変

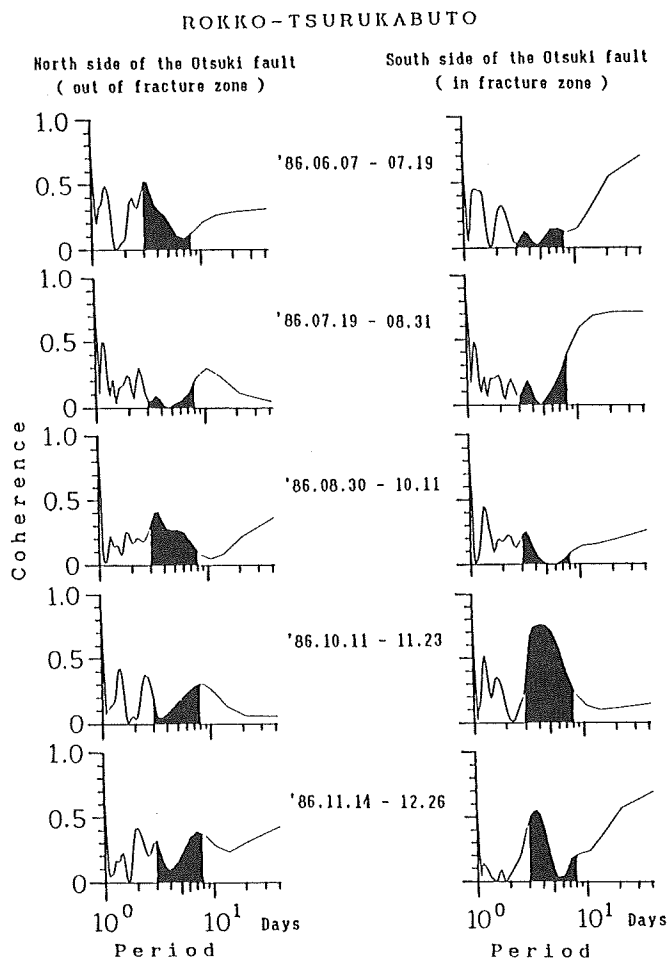


Fig. 9. Time changes of coherences between the self-potential and the atmospheric pressure at the Rokko-Tsurukabuto observation station.

化以下の短周期変化の振幅は六甲鶴甲の約1/2である。長周期変化は短い電極間隔の記録の方により大きく現れている(ただし、Fig. 5では長い電極間隔の記録のスケールが短い電極間隔の記録の10倍に拡大してある)。ここでは電極間隔を変更する前の期間を前半と後半に分け、変更後を1つの期間として3つの期間について気圧変化とのコヒーレンスを調べた結果をFig. 10に示す。長周期変化に注目すると、電極セット(1)-(2)、(3)-(4)のいずれの成分も第一の期間に比べて第二の期間の方がコヒーレンスが高いのが分かる。第三の解析期間では、短い電極間隔(電極(3)-(4))ではコヒーレンスのピーク値が0.5を超えており、相

関がやや高いのに対し、長い電極間隔(電極(2)-(5))では0.5以下で、相関は低い。

六甲鶴甲と生野とを比較すると、Figs. 9, 10において、生野で自電位差変化と気圧変化との相関が高くなる第二の解析期間は六甲鶴甲の南側でのコヒーレンスが高くなる解析期間と一致している。また、コヒーレンスの値の周波数平均値(周期3~8日)の時間変化をFig. 11に示す。これを見ても、六甲鶴甲と生野とにおいてほぼ同じ時期に自然電位差変化と気圧変化の相関が高くなる傾向が認められる。

このことは気圧変化の自然電位差変化への影響が顕著になったりそうで

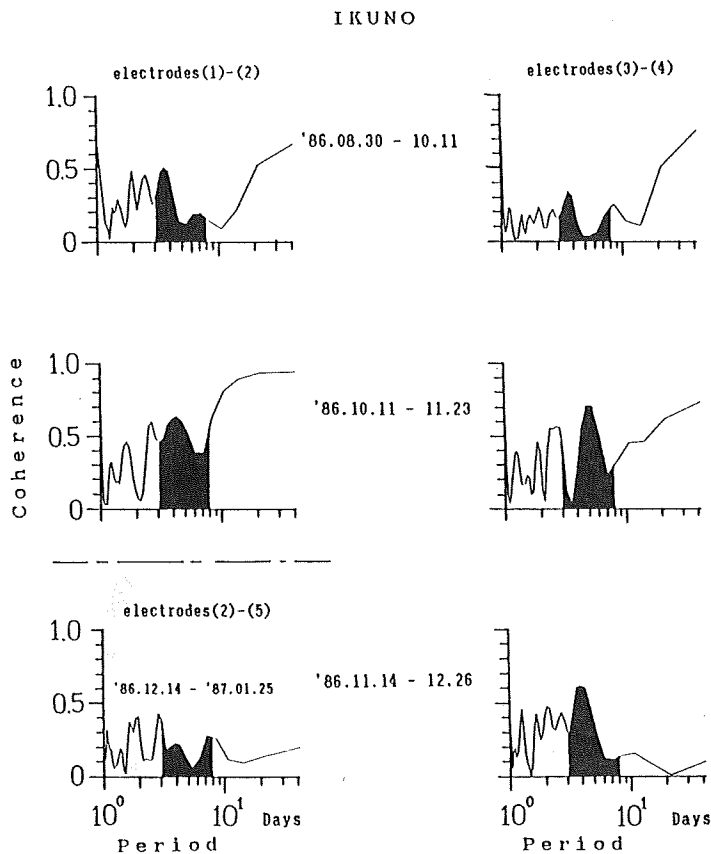


Fig.10. Time changes of coherences between the self-potential and the atmospheric pressure at the Ikuno observation station.

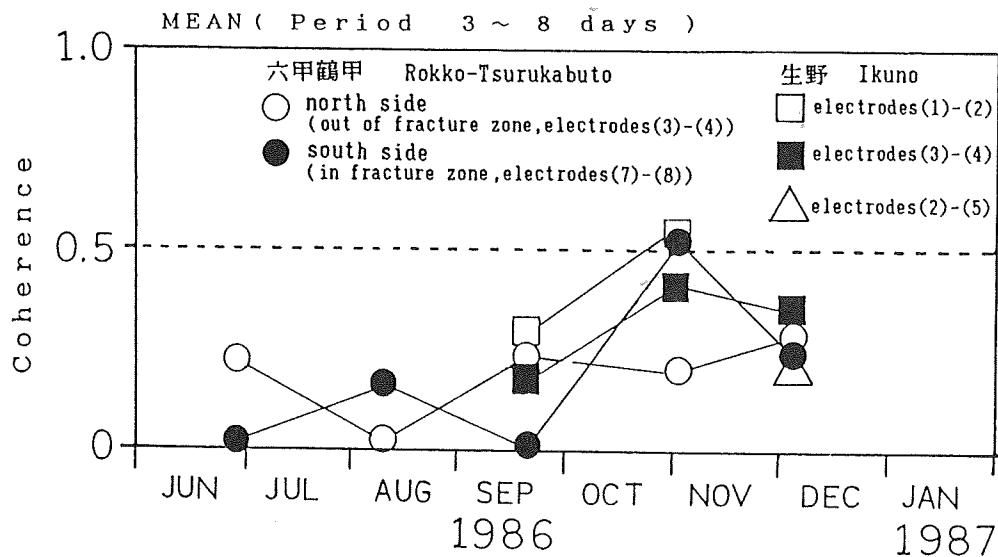


Fig.11. Time changes of the frequency mean values of coherences between the self-potential and the atmospheric pressure at the Rokko-Tsurukabuto station, and those at the Ikuno station.

なくなったりしていることを意味する。また、この変化が六甲鶴甲では破碎帯内部でより顕著であることや、生野では長い電極間隔での観測よりも短い電極間隔での観測に明瞭に見られることから、局所的な地殻の状態変化を反映しているのかも知れない。例えば観測点近傍の岩盤や破碎帯の含水率や地下水面の変化などが考えられる。そのような地下水の状態変化は、主に降雨に支配されていると考えられる。六甲鶴甲と生野程度の距離(約60km)ではその変化がほぼ同時に生じているものと思われる。しかし、Fig. 4を見る限り自然電位差変化と湧水量との相関は必ずしも明瞭ではない。これは湧水量の測定精度が不十分であることによるのかも知れない。

5. まとめ

約半年間の観測資料の解析結果ではあるが、

- ① 地下坑道に電極を設置することにより、電極を含め観測システムは気象影響をほとんど受けないようにしたが、気圧変化に見られるのとほぼ同じ周期帯(周期3~8日)の変化が観測されること、
- ② さらにそれが季節的变化をしているらしく、また、その変化は約60km離れた六甲鶴甲と生

野とがほぼ同期していること、

- (3) そのような変化は断層破碎帯の中で顕著に観測され、破碎帯の外ではそれほど明瞭ではなく、電極間隔が長い場合より電極間隔の短い場合により顕著であることから、かなり局所的な地殻の状態の変化を反映しているらしいこと、

などが分かった。

今後の課題として、

- (1) データの蓄積を待って、周期3～8日の変化が本当に気圧変化によるものかどうか、より明確にすることが必要である。また、もしそれが気圧変化によるものだとすれば、4.で推定したように地下水の状態変化に依存しているのかどうか自然電位差変化を生じさせている物理的機構を明確にすることが必要である。
- (2) 観測される自然電位差変化には、地電流そのものの変化によるものと、観測地点付近の地殻の状態変化に伴う比抵抗変化によるものがありうる。この何れであるかを判定するためには比抵抗変化の観測が必要であり、藤原・他により生野で観測が開始された¹⁰⁾。
- (3) 気圧変化以外の現象、例えば地殻歪変化などとの関係についてもデータの蓄積を待ってもっと詳しく調べる必要がある。

謝 辞

六甲鶴甲での観測については、JR西日本新幹線岡山保線所神戸支所の方々に、また、生野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)シルバー生野の方々に多大の便宜をはかって頂いており、厚くお礼申し上げます。生野での観測設備設置および関連データ利用に際し、京都大学大学院生小笠原 宏・田部井隆雄の両氏の協力を得ました。ここに謝意を表します。

なお、計算処理の一部を京都大学大型計算機センターで行ったことを付記します。

参考文献

- 1) MIYAKOSHI, J., 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, 1986.
- 2) VAROTSOS, P. and K. ALEXOPOULOS, Physical Properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, **110**, 73-98, 1984.

- 3) 名古屋大学理学部附属地震予知観測地域センター, 名古屋大学理学部地震予知観測地域センター, 9, 1980.
- 4) 田中 豊・林 守孝・加藤正明・小泉 誠・藤田和夫, 六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測(序報), 京都大学防災研究所年報, 15B, 15-28, 1972.
- 5) 田中 豊・林 守孝・加藤正明・藤田和夫, 六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測(第一報), 京都大学防災研究所年報, 15B, 29-41, 1972.
- 6) 大塚成昭・田村良明・藤森邦夫・田中 豊, 六甲鶴甲観測室における地殻変動観測(I), 測地学会誌, 第28巻, 第3号, 134-151, 1982.
- 7) 田部井隆雄・藤森邦夫・田中 豊, 生野における地殻変動の連続観測(1977~1983), 測地学会誌, 第31巻, 189-201, 1985.
- 8) 福田正浩, 地殻変動連続観測記録に現れる降雨の影響について - 生野地学観測室の場合 -, 京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士論文, 1988.
- 9) 日野幹雄, スペクトル解析, 1978.
- 10) 藤原 智・住友則彦・狐崎長琅, 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 -, CA研究会論文集, - , 1988.