

活断層における地電位差観測 (1)

——北陸観測所坑内および牛首断層における観測——

渡辺 邦彦・小泉 誠・和田 安男
松尾 成光・平野 憲雄・住友 則彦

SELF-POTENTIAL OBSERVATIONS AT ACTIVE FAULTS (1) ——OBSERVATIONS IN THE HOKURIKU OBSERVATION VAULT AND ON THE USHIKUBI FAULT——

By *Kunihiko WATANABE, Makoto KOIZUMI, Yasuo WADA, Shigemitsu MATSUO,*
Norio HIRANO and Norihiko SUMITOMO

Synopsis

Geoelectric phenomena seem to be sensitive to geophysical activities. Active faults are also considered to be sensitive to geophysical conditions of the crust. Therefore, experimental observations of self-potential variations have been carried out on the fault zones.

A small-size fault runs throughout the observation vault of the Hokuriku observatory, Disas. Prev. Res. Inst. of Kyoto Univ.. An array observation of self-potential variations has been carried out in the vault. Spatial distribution of self-potential reflects the spatial distribution of underground water in the vault. Leakage current from the railway shows two major directions of its vector. This may concern the relation between locations of trains and transformer substations of the railway.

In order to detect the self-potential variations caused by explosion seismic waves, self-potential observations were carried out just on the Ushikubi fault, an active fault in Toyama Pref.. Slite variations of self-potential probably caused by elastic waves were recognized.

Array distribution of electrodes is effective to improve the reliability of self-potential observations.

1. はじめに

「活断層が地震予知のツボである」という文言が聞かれなくなって久しい。しかし、内陸地震予知を考える人たちの間では、“活断層や破碎帯は地殻活動に敏感な場所である”との考えは、相変わらず根強い。山崎断層地震予知テストフィールド計画はこういった趣旨を検証する目的があった(尾池ほか:1976)¹⁾。そして、1984年のいわゆる山崎断層の地震の際には、幾項目かの前兆的变化やコサイスマック、ポストサイスマックな現象が記録された(Koizumi et al.: 1985, Sumitomo et al.: 1986, Miyakoshi: 1986, Watanabe: 1991)²⁻⁵⁾。一般に、活断層における地殻活動関連現象は、浅田(1985)⁶⁾の箴言にもあるように、地球電磁気や地球化学現象に現れ易いようである。しかし、活断層で観測されるこれら地殻活動関連現象は、その振幅は大きい、現象出現のメカニズムを理論的に説明するのが困難な場合が多い。場の不均質や地下水の挙動に関わるであろうことは推察されるが、確定的ではない。従って、活断層において多項目の観測・解析を

総合的に実施することは、活断層が敏感な場所であるとの仮説を検証するとともに、内陸地震予知研究に有効な示唆を与えることと考える。

今回筆者らは地電位差観測に着目した。そして、活断層・破碎帯という構造が地電位変化に及ぼすであろう特徴的影響を実験的に調べることを計画した。その手始めに、北陸観測所観測坑道内の断層の周辺に電極を配置して、地電位差の群列観測を開始した。また、大規模活断層である牛首断層上において地震計と地電位差計を併用して人工地震を観測し、弾性波動が地電位変化に及ぼす影響を及ぼすかの実地調査も試みた。これらについて以下に述べる。

2. 北陸観測所観測坑道内における地電位差観測

2.1 観測の目的

防災研究所付属地震予知研究センター北陸観測所は、福井県鯖江市街東方の三里山西麓にある。その観測坑道は Fig. 1 に示すように格子状で、坑道の全域が流紋岩質凝灰岩であり、その中央部をほぼ南北に断層が通っている（岸本ほか：1970）⁷⁾。

現在、北陸観測所観測坑道内（以下、北陸坑内または坑内と称する）では、各種地震計による地震波動の観測の他に、傾斜計観測、3次元相対変位計による断層破碎帯の変位観測、断層破碎帯からの漏水観測などが実施されている。また坑内にはボーリング孔が2本（BH-1とBH-2）あり、その水位・水質の測定も可能である。地電位の変化は未知の部分が多く、将来はこれらの諸観測結果との総合解析も期待し得る。これらの状況から、北陸坑内は断層の挙動を総合的に解析するための好適フィールドと考えられ、その一環とし

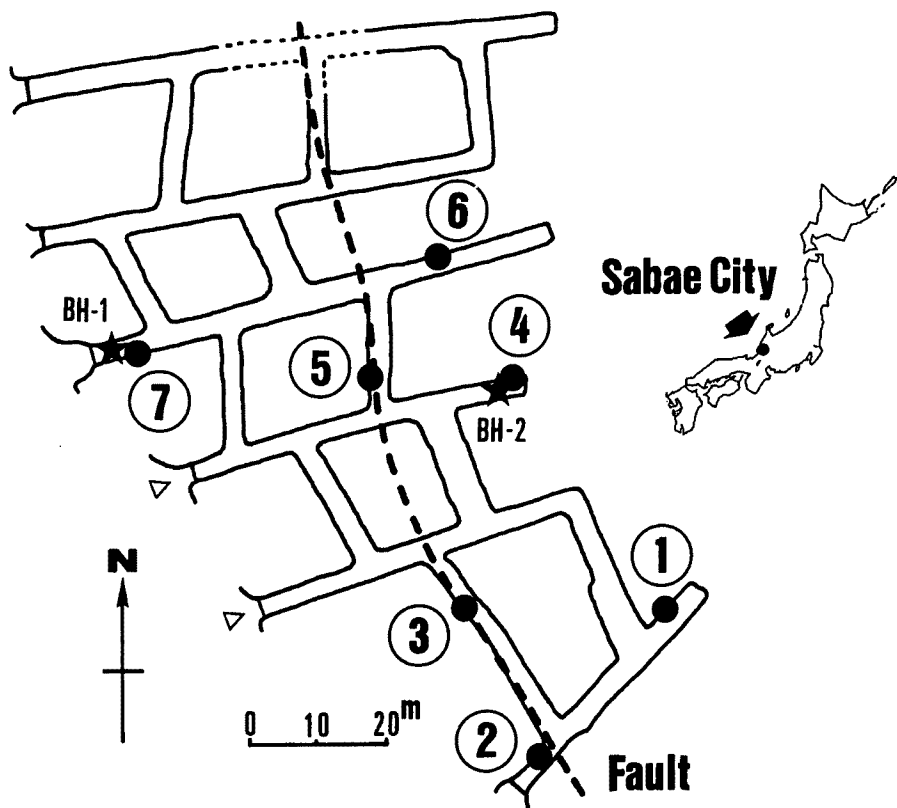


Fig. 1. Hokuriku Observation Vault and distribution of electrodes. Solid circles, a dashed line and stars are electrodes, the fault and bore holes, respectively.

て、断層破碎帯に着目した地電位差観測を計画した。

2.2 北陸坑内の状況

坑内の断層は坑壁の観察から、走向はほぼ $N20^{\circ}W \sim S20^{\circ}E$ 、断層面は東下がり、 $dip\ angle$ が約 $50 \sim 80$ 度と思われ、破碎帯の内部に断層粘土を含んでいる。破碎帯の中は地点により異なるが、約 $10\text{ cm} \sim 50\text{ cm}$ 程度であろう。この断層の変位の方向など、詳しいことは分かっていない。

坑道の入口に近い部分は、全体的に比較的湿潤で、坑壁も濡れた部分が多い。坑内の南西部には断層破碎帯を伝っての漏水が認められ、坑内南西部が湿潤なのは、主としてこのためと考えられる。坑内中央部から北部は全体的に壁も濡れてはおらず、坑道の断層もこの部分からの漏水はない。坑内北部の断層周辺は崩落があり、危険のため現在は使用していない。

この断層の詳しい情報を得るために坑道の中央部の格子状通路で囲まれた一つのブロックに着目して、坑道内のコンクリート捲き立て工事施行前の1988年に弾性波探査、電気探査、電磁波探査の3方法による総合探査を実施した（応用地質株式会社：1988）⁸⁾。その結果では、断層に関わる特に顕著な（例えば、岩盤の表面のゆるみを越えるほどの）構造の異常を検出するには至らなかった。おそらく、破碎帯の中が調査域ではそれほど厚くはなかったことや、調査部分の断層が周辺より特に水分を多く含んでいるということがなかったことなどによるものであろう。

現在、坑内の中央部分の壁面は危険防止のためコンクリート捲き立てが施されている。捲き立ての下地には金網が張られている。周辺部の一部には鉄枠で簡易補強された屋根付き通路が設けられている。これらに用いた金属材料が地電位差観測に及ぼすかも知れない影響が懸念され、後に述べる電極の配置はなるべくこれらの構築範囲を避けた。

2.3 観測システム

地電位差の観測には、用いる電極とその設置方法が大切である。今回は、フェニックス社製の物探用の鉛一塩化鉛平衡電極を用いた。電極の配置は Fig. 1 に示した。正確な電極位置は未測量であるので、今回の解析には坑道図面から求めた相対座標を用いた。断層破碎帯の影響を調べる目的で、断層線上に電極を3本（②、③、⑤）、断層の東側に3本（①、④、⑥）、断層の西側に1本（⑦）を設置した。坑内は岩盤で掘削は困難なので、床面の砂礫を $5 \sim 10\text{ cm}$ 程度掘って電極を設置し、周囲を床の礫や泥で固めて塩水を撒く方法にした。

電極④のみは、コンクリートを捲いた壁面と床のコンクリート通路との間隙に設置した。それ以外の電極は、素掘のままの坑内部分の床に直接設置した。断層線上の電極②、③の2本、および入口に近い電極⑦の設置地点はかなり水分の多い地点である。同じ断層線上でも、電極⑤の地点は比較的乾いている。それぞれの電極からのシールドケーブルを坑内の1箇所に集めて観測した。

塩水撒きはおおよそ2週間から1カ月に1度の頻度で行なった。坑内の湿度が高いせい、この程度の頻度でも常に電極の周囲はおおむね湿った状態が保たれていた。この電極の経時安定性は未知であるが、特に塩水捲きに関わるドリフトは認められなかった。

測定は、電極③を規準電極とし、夫々の電極と電極③との電位差を記録する方法とした。遮断周波数 1 Hz で 12 dB/oct のパワースフィアフィルターおよび10倍増幅器を用いて、打点式レコーダーで長期変動を観測するとともに、デジタル記録器（DR-F1）で適宜収録した。観測は1991年6月末から開始した。

坑内の2箇所のボーリング孔は夫々直径 10 cm 、深さ 10 m である。地電位差観測と同時に、これら2箇所のボーリング孔での水位測定も開始した。フロートと回転抵抗計を用いた方式であり、分解能は $2 \sim 5\text{ mm}$ 以内と思われる。坑内奥のボーリング孔（BH-2）の水位は床面下約 4.5 m であり、坑口に近いボーリング孔（BH-1）の水位はほとんど床面である。坑道は奥から入口に向かって僅かに下り傾斜であるが、2箇所のボーリング孔の床面の高低差は 1 m 以内である。従って、孔奥（BH-2）と孔口（BH-1）の地下水位

には約 3.5 m の差があり、同じ水脈を見ているのではないと思われる。残念ながら、水位測定は機器のトラブルがあって十分な連続記録が得られず、今回の解析には用いない。しかし地下水の挙動と地電位の関連は地電位差の測定においては基本的に重要な問題であり、早急に測定・解析を進める予定である。

坑内ではこの他に地震計はもちろん、傾斜計による測定や、3次元相対変位計による断層の変位測定が行なわれている。傾斜計の観測からは、断層を挟むシーソー運動が示唆されている(平野:1989)⁹⁾。また、3次元相対変位計の観測からは、地球潮汐や気圧に対する断層破碎帯の特徴的な変動が示唆されている(谷口ほか:1988)¹⁰⁾。将来はこれらの測定結果との総合解析が有意義と考えている。

2.4 観測結果

(1) 自然電位の空間分布

91年6月の観測開始以来92年3月までほぼ連続して、打点式記録計による地電位差の測定を行ってきた。打点式記録の例を Fig. 2 に示す。これには、集中的な降雨によると思われる地電位差変化が見られるが、通常は地電位差のレベルはほぼ一定である。また水位に変化が出ているが、BH-1 と BH-2 でレスポンスが異なっていることが判る。

Fig. 2 にも認められるように、昼間は約 2 km 西方を走る電車の影響や都市ノイズが大きいが、電車が止まる夜22時30分頃から翌朝06時頃までは比較的静穏である。約9カ月の観測期間を通じて、電極に起因すると思われるドリフトや塩水撒きの影響と思われる変化は認められなかった。

そこで、打点式記録から夜間の平均的な地電位差レベルを読み取り、電極③を規準とした場合のおおよその静的な自然電位分布を求めた。それを Fig. 3 にコンター図として示す。これからは、坑内の静的な自然電位の空間分布は、断層の存在に支配されているように見えない。むしろ、坑内の湿度が高い部分が相対的に自然電位が高いように思われる。

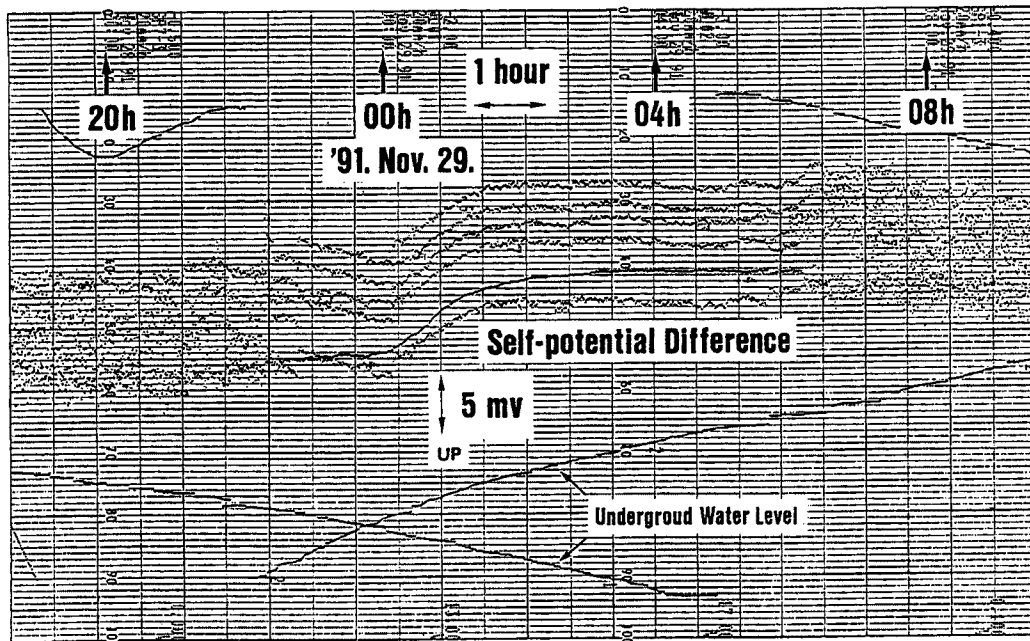


Fig. 2. An example of plotted records. Six components of self-potential differences and two components of underground water levels are illustrated. These traces are distorted by a heavy rain, however, self-potential levels are almost stable usually.

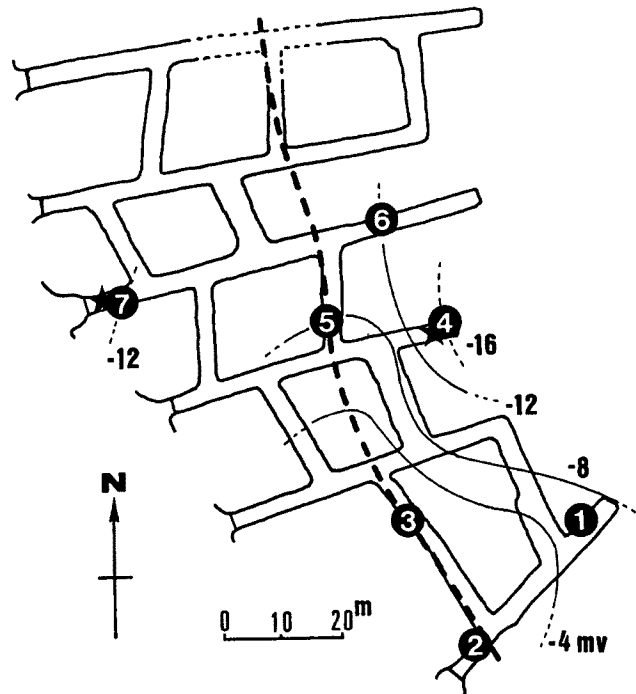


Fig. 3. Spatial distribution of static self-potential level.

(2) 電車による漏洩電流

地電位差観測で記録された電車の漏洩電流を解析すると、地下構造の情報を得ることができるであろう(藤原ほか：1986)¹¹⁾。観測坑の西方2~2.5 kmの所をほぼ南北にJR北陸線と福井電鉄が走っている。JR北陸線は交流電車なので、漏洩電流の影響は考えなくてよい。しかし福井電鉄は直流であるので、これによる漏洩電流が地電位差変化として記録される。電車は06時過ぎに始発が動きだし22時過ぎに終電車が走る。通常の場合夜間は電源を切る(福井電鉄)¹²⁾。Fig. 2の打点式記録には昼間の漏洩電流による擾乱と夜間の静穏化が見られる。従って、これらの擾乱は福井電鉄からの漏洩電流と考えてよからう。

DR-F1の記録を用いて、電極⑥と電極①の間の地電位差(以下⑥-①成分と称する)と、電極⑦と電極⑥の間の地電位差(⑦-⑥成分)に記録された漏洩電流によると思われる記録例と、それに対応する地電位差変化ベクトルをFig. 4に示す。測定は1秒のLPFを通して5 Hz サンプリングで行った。それを11個の移動平均をとり図示する。地電位差値は1 km 当りの値に規格化して表示した。

図に細実線で示した地電位差変化箇所は、⑥-①成分、⑦-⑥成分ともに記録上で同相の電位差が対応して記録された場合の主だった部分で、これはほぼN90-100°W~N80-90°E方向の電流に相当する。これに対し、細破線で示した箇所は、⑥-①成分と⑦-⑥成分が記録上で逆相になっている。これはほぼN15-40°E~N140-165°W方向の電流に相当する。昼間の地電位差変化のベクトルは大部分これらの2方いずれかであり、その中間的な方向は卓越しない。

一般に電車の電流はレールを伝って変電所に戻る。レールから漏れて大地を流れて変電所に戻るのが、いわゆる漏洩電流である。従って、漏洩電流の方向は、測定地点近傍の比抵抗構造に依ると同時に、電車と変電所の位置関係やレールと大地の接地抵抗の空間分布などに依存すると考えられる(電気学会・電食防止研究委員会：1986)¹³⁾。従って、最寄りの変電所に対して電車がどちら側にあるかで、漏洩電流の方向が変わることが考えられる。昼間の地電位差ベクトルが殆ど上記の2方向のいずれかであってその中間が目立っていないことは、昼間の地電位差変化は大部分が電車の漏洩電流であり、しかもレールと大地の接地抵抗に局所性

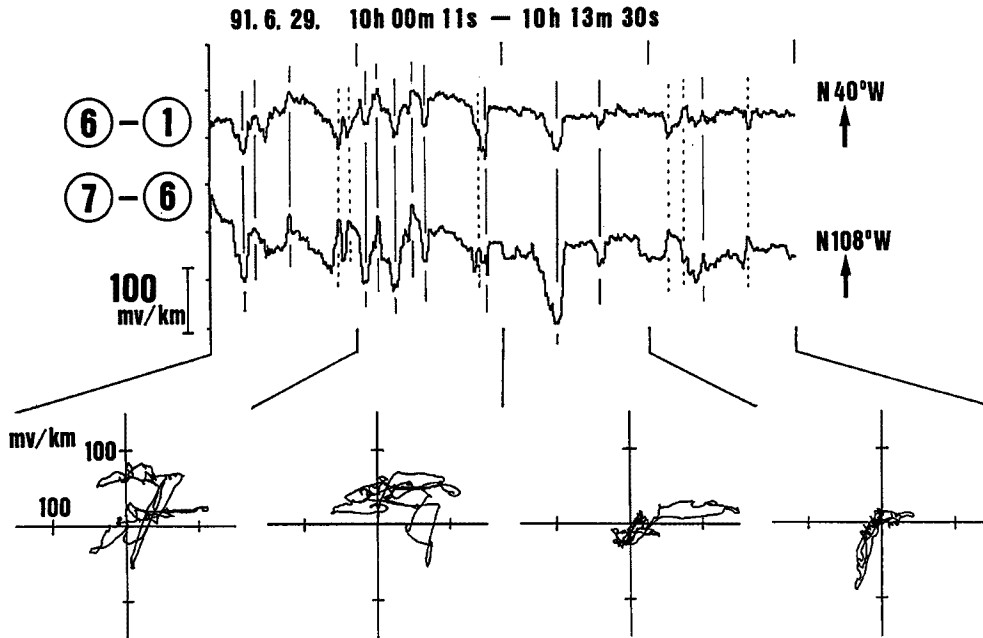


Fig. 4. Examples of leakage current recorded in the Hokuriku Observation Vault. Lower figures are the horizontal vector graphs of self-potential differences caused by leakage currents.

があり、その結果、電車が変電所のどちら側にあるかだけによって漏洩電流がいずれかの方向に集中するためと解釈できる。

3. 牛首断層上における人工地震観測

3.1 観測の目的

人工地震の利点は震源の情報が判っていることである。今回我々は、弾性波動によって地盤が歪むと見かけ上地電位差が生じるのではないかと、そして断層破砕帯の場合その程度が大きいのではないかと考えた。そこで人工地震を利用しての弾性波と地電位差の断層上における並行観測を計画した。

Martner & Sparks (1959)¹⁴⁾によれば、弾性波動が地表の風化層に下方から入射した場合、風化層の下面に“electrical potential”を生じ、それが地表に伝わって地電位変化として観測される、といわれる。従って、弾性波動の到達より先に地電位差変化が観測されることになり、彼らは爆破観測でその先行地電位差変化を観測している。また Long & Rivers (1975)¹⁵⁾は、弾性波動によって地盤が歪むと地盤の電気抵抗が変わり、結果として地電位差変化を観測できるとし、やはり人工地震による観測結果を示している。

一般的に断層破砕帯は周囲に比して変形し易く、含水の程度も高いと考えてもよからう。そのような場所を弾性波動が通過すれば、波動による地盤歪を原因とする見かけ比抵抗の変化も周辺より大きなことが考えられ、結果的に大きな地電位差変化を観測できる可能性がある。そこで、爆破地震動研究グループによって実施された1991年10月17日の人工地震を利用して頂き、弾性波動による地電位差変化の有無を活断層上で調べるための観測を実施した。観測地点は、富山県大山町南部の檜峠で、牛首断層の直上と思われる地点である。10月17日の“shot 3”の発破点からは南西方向に約6 km 離れている。

従来、人工地震震源を利用した地球電磁氣的観測は幾度か試みられている（例えば、Sakai et al.: 1992)¹⁶⁾。期待される電磁氣的変化の振幅が小さいことを想像して、発破点の近傍で観測を実施する場合が多かった。その場合に逆に懸念されるのは、発破の実施そのものに伴う種々の擾乱、すなわち、雷管の電流

や爆破孔に詰めた水の動きに伴う流動電位変化や爆破振動による計器そのものの振動の影響など、定量的に解決が困難な要素が混入することであった。そのようないわゆる近傍影響を逃れるために、今回の我々の観測は爆破点から少し離れた静穏な山中で行なった。

牛首断層は跡津川断層の北西側を並行して走る活断層で、日本の活断層（1991）¹⁷⁾によれば、确实度 I、活動度 A～B 級で走行はほぼ NE-SW とされている。川崎ほか（1990）¹⁸⁾は標高データの解析から、跡津川—牛首断層系は地表からモホ面にまで達する大きな構造であるとしている。構造に伴う地電位差変化が期待されるとすればこのような大構造が望ましく、その意味では観測の目的に合致した断層と考えられる。しかし、和田ほか（1990）¹⁹⁾によれば牛首断層沿いの現在の微小地震活動は不活発とされている。地震活動が断層の現在の活動度を表わすと考えれば、牛首断層は現在のところは跡津川断層より活動度が低い断層と言えるかもしれない。

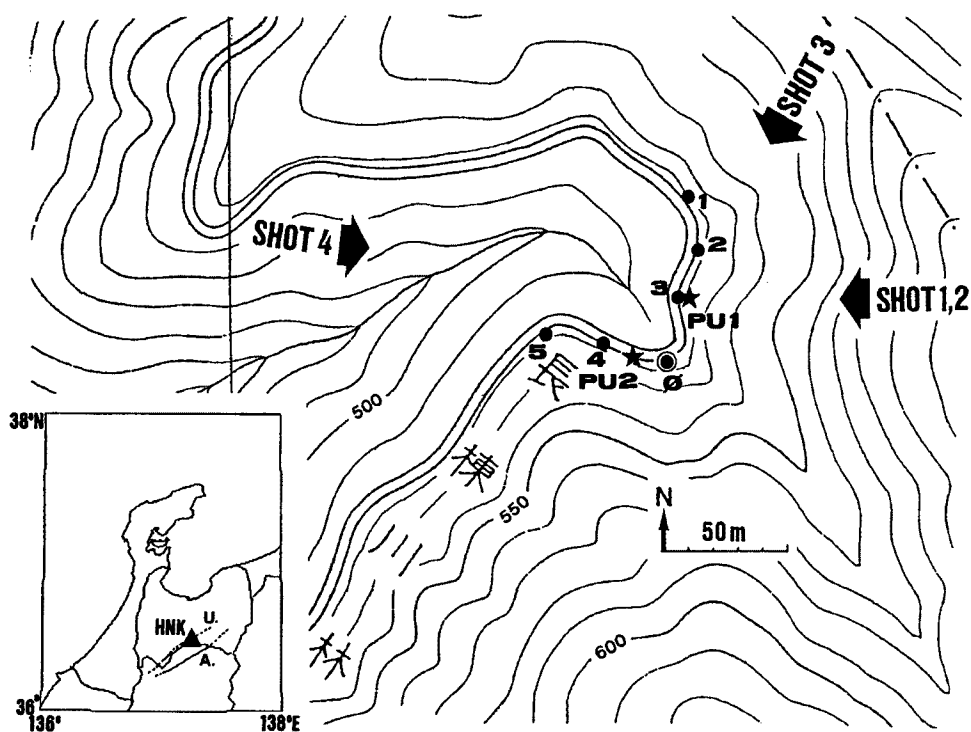


Fig. 5. Topography and distribution of electrodes at the Hinoki-Toge station. U. and A. mean the Ushikubi fault and the Atotsugawa fault, respectively. The Ushikubi fault may run from southwest to northeast in this figure.

3.2 観測システム

牛首断層が通っていると考えられる箇所、電極設置点の高低差がなるべく少なく、かつ2方向に展開できる場所を地形図と現地の地形を見て探した結果、富山県南部の檜峠の南方の林道で観測した。断層路頭の確認はできなかったが、断層破碎帯上かその近傍と考えられる。観測地点と電極、地震計の配置を Fig. 5 に示す。地電位差観測にはフェニックス社の鉛—塩化鉛平衡電極を、地震観測にはマークプロダクツ社の換振器 L22D（上下動）を用いた。道路の屈曲部に規準電極（0番）と観測自動車をついた。電源はバッテリーである。北方から規準電極へ向かって電極①、②、③番と地震計 PU1 を、規準電極から西に向かって地震計 PU2 と電極④、⑤をついた。これらの電極列を夫々北側線、西側線と称する。電極は道路の山側に、地震計は道路脇の露岩上に設置した。観測後に巻尺とクリノメータによる簡単な測量を行い相対位置を

求めた。これと2.5万の1の地図から規準点座標等を求めた。

観測は、地電位差・地震計出力の双方とも、微小地震観測用に製作した 30 Hz・Low-pass filter 付きのアンプを通してデジタル収録器 (TEAC 製 DR-F1) で 200 Hz サンプルングで行なった。なおこのアンプは大容量コンデンサーで直流成分をカットしている。地震波動の振幅は葉量と震央距離から推定できるので、shot に応じてアンプ倍率およびレコーダの測定レンジを変更した。地電位差としては規準電極に対する各電極の相対電位を測定した。アンプ倍率は通常の変動状態が常に充分観測できる程度に設定した。DR-F1 が最大 8 成分入力であるので、ch. 1~5 に規準電極に対する各電極の地電位差 5 成分を、ch. 6, 7 に地震計出力を、ch. 8 に外部時計の刻時マークを記録した。外部時計の補正值は、観測の前後に JJY を記録して求めた。

人工地震は1991年10月17日の01時02分から32分にかけて4発実施された。観測に関わる諸定数を Table 1 に示す。また、夫々の爆破からの檜峠観測点に至る方位を Fig. 5 に併せて示す。

3.3 観測結果

shot 1, shot 2 は檜峠から見て中部山岳地帯を越えた東方で、震央距離が夫々およそ 135 km, 85 km であった。これらについては、明瞭な弾性波動は観測できなかった。おそらく、途中経路の減衰が大きいためかと推測されるが、この問題を議論するのは本稿の主旨ではない。shot 1, 2 の弾性波の到達予想時刻頃に地電位差の明瞭な変化は認められなかった。

Fig. 6 に shot 3 の際の観測記録を示す。上から順に、規準電極 (No. 0) に対する各電極の電位差、すなわち、地電位差①-0, ②-0, ③-0, ④-0, ⑤-0, および地震計 PU1, PU2 出力と刻時マークである。地震波動は着震時が01時22分01.65秒でその最大振幅は PU1, PU2 ともにおよそ 7 mkin_{p-p} であった。地震波動の振幅は予測した程度であった。

記録チャンネルの 1~5 が地電位差である。地震波初動から約 4 秒後に顕著な孤立波形が認められる。これと同様な波形は約 40 分間の観測時間中にも何度か記録されており、弾性波動とは無関係と思われる。これらの波形やノイズの振幅はほぼ電極間隔に比例しており、個々の電極やアンプ以降の観測システムに起因するものではないことが判る。

記録を子細に見ると shot 3 の弾性波動の最大振幅の直後辺りに、通常的地電位差ノイズに比べてやや長周期の地電位差変化が認められる (図中矢印)。この部分に着目して時間軸を拡大して Fig. 7 に示す。これによると、北測線 (チャンネル 1, 2, 3) では 0.1 秒程度の時間巾で下に凸の地電位差変化が認められる。この振幅は入力に換算して、ch. 1 (電極間隔 64 m) で約 0.3 mv, ch. 2 (46 m) で 0.25 mv, ch. 3 (23 m) で 0.15 mv であった。この振幅はほぼ電極間隔に比例していると考えてよく、約 4.7~6.5 mv/km となる。西測線 (チャンネル 4, 5) では S/N 比が良くないが対応する位置に上に凸の変化として現れ、同様に ch. 4 (29 m) で 0.18 mv, ch. 5 (58 m) で 0.3 mv 程度の振幅が認められる。これは 5.2~6.2 mv/km であり北測線とはほぼ同じである。この部分の地電位差変化ベクトルはほぼ NE-SW 方向で、牛首断層の走行に並行に近い。Long & Rivers (1975)¹⁵⁾ は、9 m の電極間隔のところに 15 Hz の上下動振動が入射した場合、“100~300 μv per mm/sec” の割合の地電位差変化があったとしている。この割合を我々の電極間隔と地震波動の振幅に適用すると、0.05~0.15 mv/km の地電位差変化に相当する。これは実際の我々の測定結果の

Table 1. Distribution of electrodes and seismometers. Both directions and distances are measured from the standard electrode (No. 0)

electrode & pickup	direction	distance
1	N 8° E	64.0 m
2	N 11° E	45.8 m
3	N 9° E	23.4 m
4	N 75° W	28.8 m
5	N 85° W	57.5 m
PU1	N 13° E	24.5 m
PU2	N 73° W	17.9 m

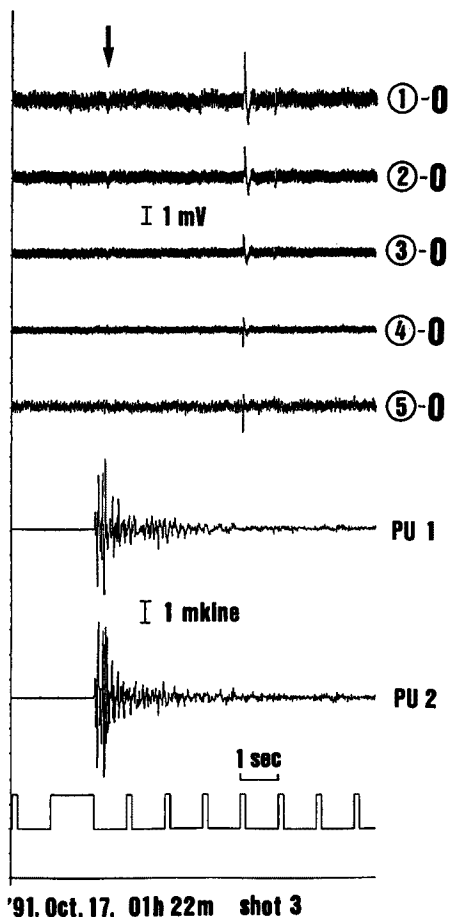


Fig. 6. Examples of records of self-potential differences (from ch. 1 to ch. 5) and seismographs (chs. 6 and 7) with time marks (ch. 8). An arrow denotes the significant signals which may caused by elastic waves from seismic explosions.

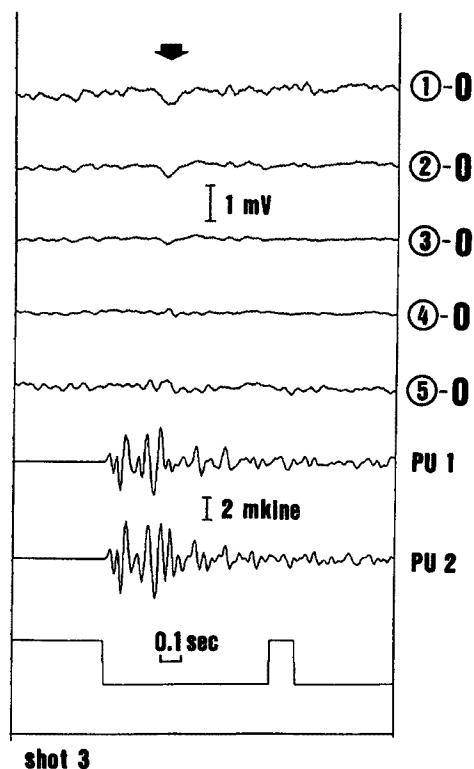


Fig. 7. Detailed variations around the signals mentioned in Fig. 6.

1/6-1/2である。地盤の比抵抗値の許容巾を考えれば、我々の加速結果を Long & Rivers (1975)¹⁵⁾の説で説明することも可能である。

4. 議論とまとめ

北陸観測所坑道内における断層の存在が自然電位分布に与える影響を調べるには、7箇所の電極だけでは密度に欠け、それなりの探査が必要である。しかし、求まった結果が坑内の湿度度に関わるようななだらかな分布を示したことから、全体としての静的な自然電位分布の傾向は現わされていると考えられよう。

電車の漏洩電流のベクトルが代表的な2方向に集中することが分かった。今後は⑦-⑥成分、⑥-①成分以外の電極組合せについても解析を行い、断層など居所的な構造の影響の有無を調べる必要がある。列車のダイヤグラムや路線周辺の地形や変電所の位置との関係なども含めて、次回の解析に待つことにする。

北陸坑内や檜峠での観測はいずれも電極を多数配置する、いわゆる群列方式を採用した。これは個々の電極自体に関わるノイズを識別し、観測の信憑性を高めるためである。今回の測定結果はおおむね電極間隔に

比例した振幅で記録されている。これは、言い換えれば、測定結果は観測システムに起因するものでなく地電位差を測定したものと言える。

人工地震観測に関して、富山営林署、富山大学・川崎一郎博士、京大防災研究所・伊藤潔博士・松村一男博士、中山武氏にお世話になった。鳥取大学・宮腰潤一郎教授・塩崎一郎氏にはいろいろ議論を頂いた。また鉛一塩化鉛電極に関して東大地震研究所・吉野登志男氏から、電鉄路線に関して福井電気鉄道株式会社から、夫々資料を頂いた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 尾池和夫・岸本兆方：地震予知テストフィールドとしての山崎断層，地震予知研究シンポジウム(1976年12月13日・14日・15日)，1976，pp. 83-90.
- 2) Koizumi, N., R. Yoshioka and Y. Kishimoto: Earthquake Prediction by Means of Change of Chemical Composition on Mineral Spring Water, *Geophysical Research Letter*, Vol. 12, 1985, pp. 510-513.
- 3) Sumitomo, N. and K. Noritomi: Synchronous Precursors in the Electrical Earth Resistivity and the Geomagnetic Field in Relation to an Earthquakes near Yamasaki Fault, Southwest Japan, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, Vol. 38, 1986, pp. 971-989.
- 4) Miyakoshi, J.: Anomalous Time Variation of the Self-Potential in the Fractured Zone of an Active Fault Preceding the Earthquake Occurrence, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, Vol. 38, 1986, pp. 1015-1030.
- 5) Watanabe, K.: Strain Variations of the Yamasaki Fault Zone, Southwest Japan, Derived from Extensometer Observations, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 41, 1991, pp. 29-52.
- 6) 東京大学理学部地殻化学実験施設：(浅田敏教授退官記念講演) 地震予知と地球化学，1980.
- 7) 岸本兆方・田中 豊・尾池和夫・義江修二：鯖江地殻変動観測室観測序報，京大防災研年報，第13号A，1970，pp. 109-119.
- 8) 応用地質株式会社：北陸微小地震観測所坑道内トモグラフィー報告書，1988.
- 9) 平野憲雄：北陸微小地震観測所坑道内における傾斜変動，*月刊地球*，Vol. 11, No. 1, 1989, pp. 52-55.
- 10) 谷口慶祐・西尾雅至・竹内克夫・野々口勝美・尾池和夫：断層破碎帯に設置した3次元相対変位計による観測，地震学会講演予稿集(昭和63年度春期大会)，1988，pp. 229.
- 11) 藤原 智・住友則彦・塩崎一郎：電気鉄道からの漏洩電流の性質と電気探査への応用(2)，*京大教養部地学報告*，Vol. 21, 1986, pp. 17-24.
- 12) 福井電気鉄道株式会社：私信，1992.
- 13) 電気学会・電食防止研究委員会編：電食・土壤腐食ハンドブック，1986.
- 14) Martner, S. T. and N. R. Sparks: The Electro Seismic Effect, *Geophysics*, Vol. 24, No. 2, 1959, pp. 297-308.
- 15) Leland Timothy Long and Wayne K. Rivers: Field Measurement of the Electro seismic Response, *Geophysics*, Vol. 40, No. 2, 1975, pp. 233-245.
- 16) Sakai, H., H. Oda, T. Nakayama and H. Doi: Electromagnetic changes at explosion seismic experiment, *J. Phys. Earth*, Vol. 40, 1992, pp. 447-458 (in Press).
- 17) 活断層研究会編：「新編」日本の活断層，東京大学出版会，1991.
- 18) 川崎一郎・松原 勇・川畑新一・和田博夫・三雲 健：跡津川一牛首断層系と長波長地形，*京大防災研年報*，第33号B-1，1990，pp. 75-84.
- 19) 和田博夫・三雲 健・小泉 誠：飛騨地方北部および富山湾・能登半島周辺の最近の地震活動，*京大防災研年報*，第33号B-1，1990，pp. 57-74.