

断層破碎帯に設置した 3次元相対変位計による観測(2)

谷口 慶祐・石原 裕之・榎谷 聡志
山岸 洋一・田中 敬太・玉野 宏

Observation with Three Dimensional Relative
Movement Meters across the Fracture Zone (2)

Keisuke TANIGUCHI, Hiroyuki ISHIHARA, Satoshi ENOKIYA,
Youchi YAMAGISHI, Keita TANAKA and Hiroshi TAMANO

Received April 30, 1992

抄 録: 我々は断層破碎帯を境界とするブロック運動の研究をするため、3次元相対変位計を開発し、京都大学防災研究所付属地震予知研究センターの北陸観測所(福井県鯖江市)の観測坑内に断層破碎帯をまたいで設置した(谷口他1988)。今回は、観測システムの変更点、解析方法の変更点、観測記録に対する信頼性について述べる。

索引語: 破碎帯, 相対変位, 観測システム, 気象要素

Abstract: In order to study the movement of the crustal block bounded by the fracture zone, we set up the Three Dimensional Relative Movement Meters across the fracture zone in the tunnel of Hokuriku observatory, Kyoto Univ. (TANIGUCHI et al, 1988). In this paper we report the improvement points of the observation system, those of the method of analysis and data credibility.

Key Words: fracture zone, relative movement, observational system, meteorological factors

1. は じ め に

Fig. 1 は、現在観測を行っている場所の近傍の地殻構造を示すため、活断層研究会(1980)によって求められた北陸地方の活断層分布図を参考に福井市、鯖江市の位置を加筆した図で、活

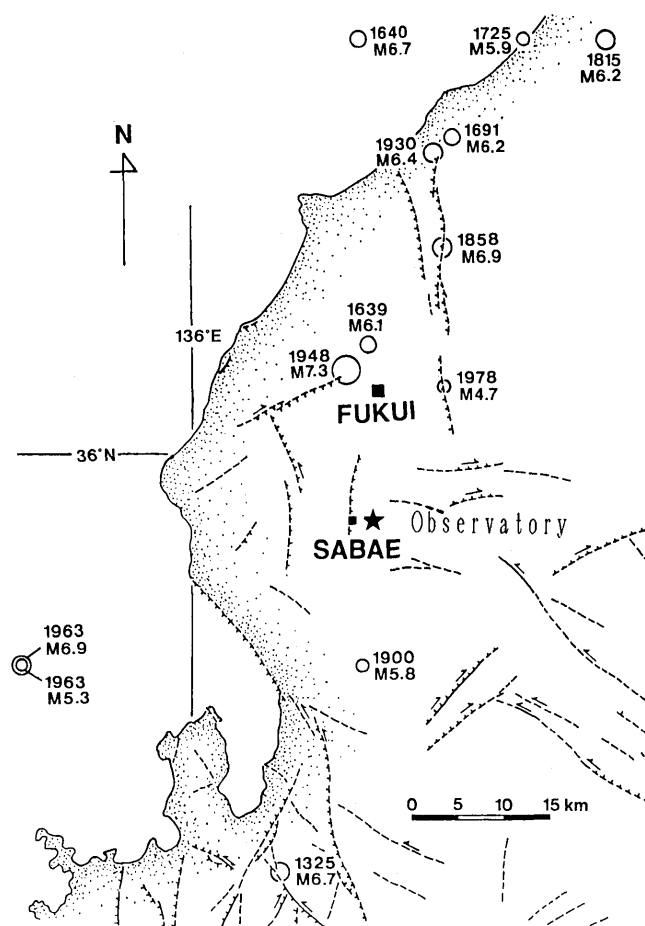


Fig. 1 The location of Hokuriku observatory, main cities, the distribution of active faults and main earthquakes.

断層や主な地震の震源が示されている。掲載されている地震は、宇佐見（1966）の巻末に付せられた付表（日本付近の主な地震の表）に掲載された歴史時代から1964年までの主な地震（歴史時代については被害地震、近年についてはどこかの測候所で震度Ⅳ以上を記録した地震）に、それ以後1978年までについて同じ基準で選んだものを加えたものである（活断層研究会，1980）。線は活断層を示し、実線に矢印もしくは突起が付いたものは確実度Ⅰ（活断層であることが確実なもの）で、矢印が横ずれの方向を表し、突起が出ている側が沈降している。点線に矢印もしくは突起が付いたものは確実度Ⅱ（活断層であると推定されるもの）で、ただの点線は確実度Ⅲ（活断層の疑いのあるリニアメント）である。

この図に示した鯖江市を南北に走る活断層は、鯖江断層である。この断層は、福井平野の南に接する東西約10 km、南北13 kmのほぼ四角形の盆地地形をしている武生・鯖江平野の中央部を南北に走る長さ8 kmの活断層で、断層崖を成し、変位基準は段丘面である。西側が10 m以上隆起

し、横ずれ成分は認められず、その確実度はⅡ、活動度はBである。岡山(1931)、小笠原(1949)、桑原(1962)等によって調査が進められ、活断層である可能性が示された。ここで確実度と活動度(活断層研究会、1980)について説明すると、確実度(Certainty as active fault)とは、第四紀に活動している断層であることの確からしさを表すもので、確実度Ⅱとは、活断層であると推定されるものである。すなわち、位置・変位の向きは推定できるが、活断層であることが確実であると判定できるような決定的な資料に欠けるもので、例えば以下のような場合、1) 2~3本程度以下の尾根や谷が横ずれを示す場合、2) 断層崖と思われる地形の両側の地形面が時代を異にする場合、3) 明瞭な基準地形がない場合(山地など)である。また活動度(Degree of fault activity)とは、その断層の第四紀における活動程度を表し、第四紀の平均変位速度を s ($m/1000$ 年)とすると、 $A: 10 > s \geq 1$, $B: 1 > s \geq 0.1$, $C: 0.1 > s \geq 0.01$ である。

また鯖江断層を含む武生・鯖江平野の微小地震の活動は非常に低い(渡辺・平野、1978; 竹内・平野、1985)。見野(1986)は、武生・鯖江平野における水準測量の結果から、濃尾地震や福井地震の際、鯖江断層を境とするブロック運動があったと述べ、また湧泉跡及び現在湧泉のある場所が鯖江断層を表す断層崖に沿って線状配列していると述べている。

我々は、断層破砕帯を境界とするブロック運動の様子を調べる目的で、3次元相対変位計を製作し、鯖江断層近隣の福井県鯖江市の京都大学防災研究所地震予知研究センター付属北陸観測所の観測坑内に断層破砕帯をまたいで設置し、断層破砕帯の両側の相対的な動きを連続観測している。また補助的なデータを得るため他の観測機器も設置している。

2. 観 測

断層破砕帯でのブロック運動を検出するため、観測坑内において1986年8月29日から観測を開始し、現在観測坑内には破砕帯を挟んだ3次元相対変位計3台、破砕帯を挟んでいない3次元相対変位計1台、傾斜計2台、湧水量計、坑内温度計、気圧計、観測所敷地内の百葉箱に温度計、雨量計を設置している。Fig. 2に観測坑内の見取図を示す。この観測坑の内部には、見取図に示すように先ほど述べた鯖江断層と走行がほぼ等しい断層破砕帯が走っており、鯖江断層との距離は数kmである。ただし断層とは見なせるが正式に研究対象となったことがなく、その活動の状態や歴史についてはわかっていない。しかしこの地域のブロック運動になんらかの役割をしているか、もしくは鯖江断層を境とするブロック運動とよく似た動きがこの断層破砕帯で見られる可能性が高いと思われる。この破砕帯は走向が $N 15^{\circ} W$ 、傾斜は $60^{\circ} E$ 下がりで、破砕帯とそれを挟む両岩盤の岩種はいずれも凝灰岩である。

図中に示したA~Iは観測機器を表しており、A~C: 破砕帯をはさんだ3次元相対変位計、D: 破砕帯をはさまない3次元相対変位計、E, F: 傾斜計、G: 湧水量計、H: 坑内温度計、I: 気圧計である。

観測システムは大きく分けると、地殻変動連続観測システムと、トリガー方式による地震観測システムがある。ブロックダイアグラムをFig. 3に示す。連続観測システムは以前はハンドヘルドコンピュータを用いたもので、センサーの出力をA/D変換した後、ハンドヘルドコンピュータのメモリーにいったん蓄え、定期的にかセットデータレコーダに記録するものだった。しかし現在では、パーソナルコンピュータを用いたテレメータシステム(谷口他、1992)となっている。なおこのシステムではセンサーの出力を時定数24.6分のローパスフィルターに通して

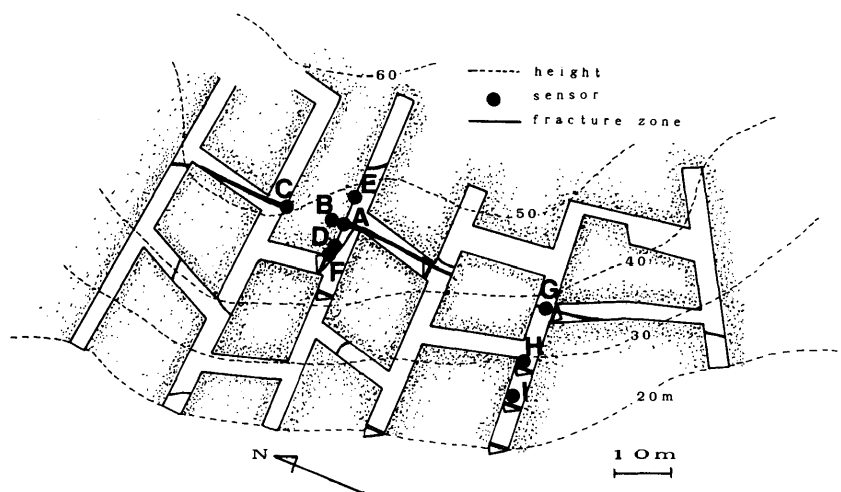


Fig. 2 The shape of observation tunnel and the arrangement of sensors. The tunnel extends from the foot of small mountain toward its interior. the thick solid lines denote the fracture zones. Main fracture zone runs in about NS direction, same as Sabae fault. In this area tuff and tuff breccia distribute. The letters "A", "B" and "C" denote the positions of the Relative Displacement Meter across the fracture zone. "D" denotes that of the same typal instrument across the unfracture zone. The letters "E" and "F" denote the tiltmeters on both sides of the fracture zone. The letters "G", "H" and "I" denote the sensor for water discharge at the fracture zone, the thermometer and the barometer, respectively.

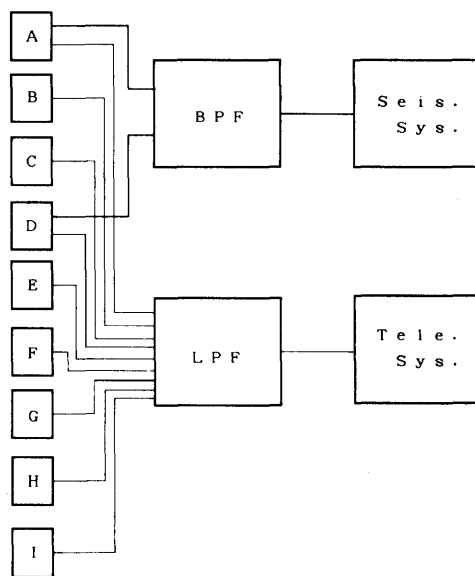


Fig. 3 The diagram of observational systems. Letters "A" to "I" are denote the same in Fig. 2.

いる。また遠地地震を観測するため、破砕帯を挟んで設置した3次元相対変位計(A)と、破砕帯のないところに設置した3次元相対変位計(D)の合計6成分をバンドパスフィルターに通した後記録することとした。バンドパスフィルターは、短周期の電気ノイズと表面波より長周期の変動を取り除くため、3.48分~1.253秒の時定数とした。用いたデータレコーダDR-F1は、データをA/D変換した後直接MS-DOSでフォーマットしたフロッピーディスクに書き込むことができ、パーソナルコンピュータで直接読むことができる。また収録条件はメニューの選択によって簡単に設定でき、変更することもできる。今回の観測では、10 Hzサンプリングで10分間収録し、1データあたり2バイトである。8チャンネルなので一度の地震で48000個のデータが収録される。ディスクのデータ容量は約1 MB(約500 Kワード)なので少なくとも10個の地震に対する表面波を収録し保存することができる。このため数カ月間無人観測ができる。記録範囲は ± 2.5 Vで、収録はチャンネル1の記録が ± 50 mVを超えたことによって開始される。ただし入力前30秒からの信号を収録させる。これは表面波の到着以前からのデータをとるためである。時計にはタイムコードをシリアルに出力するものを用いている。次にセンサーについて述べる。

(1) 3次元相対変位計

3次元相対変位計は、岩盤上の2点間の相対変位を連続で測定する機器で、この研究のために新たに開発したものである。この機器は、2カ所の岩盤に固定端を取り付け、それぞれの固定端から長さ約50 cmのスーパーインバールパイプを伸ばし、その先に差動変圧型変位センサーを取り付けたもので、向かって左側のパイプには、三方向に差動トランス型変位センサーのコイルを取り付け、右側のパイプには、コアを取り付けてある。コアにはマイクロメータを取り付けてあり、 $10\mu\text{m}$ 単位でコアを変位させることができ、オフセット消去や感度測定に用いている。成分1はほぼ垂直方向の相対変位を表わし、成分2は岩盤の横ずれ(ほぼ南北方向)の動き、成分3はパイプの延びている方向(ほぼ東西方向)の動きを表す。1986年8月29日3次元相対変位計(A)を断層破砕帯をはさんで設置し、破砕帯での変位とそうでない所での変位を比較できるよう破砕帯を挟まない3次元相対変位計(D)を1987年8月13日に設置した。破砕帯を挟んだ変位計(B)は1989年夏、変位計(C)は1989年冬にそれぞれ設置した。Table 1に、3次元相対変位計の総合感度を示す。また設置状況をTable 2に示す。

3次元相対変位計に用いているセンサーは本来その軸方向の変位を検出するものであるが、軸と直交する方向の変位があった場合、それがセンサーの出力に与える影響がどの程度かを調べる必要があるため測定した(Fig. 4)。図中の上の結果は軸方向に変位を与えた場合のセンサーの出力、下の結果は同じ変位を直行する方向に与えた場合のものである。その出力はそれぞれ12.12 V, 74 mVとなり、変位に換算すると $58.5\mu\text{m}$, $0.36\mu\text{m}$, その比は0.62%となった。これ

Table 1 The total sensitivities of Three Dimensional Relative Displacement Meters

	A	B	C	D
①	$4.613\mu\text{m/V}$	3.502	4.507	1.560
②	4.711	3.325	4.326	1.582
③	4.780	3.305	4.342	1.600

Table 2 The parameters of Three Dimensional Relative Displacement Meters

	A	B	C	D
水平方向からのずれ	8.5° E上がり	1.0° E上がり	9.0° E上がり	4.7° E下がり
垂直方向からのずれ	上が6.5° Sへ傾く	上が7.0° Nへ傾く	上が4.0° Sへ傾く	上が5.2° Nへ傾く
西北方向からのずれ	N74° E	N114° W	N80° E	N84° E
固定端間の長さ(cm)	124.8	195.8	229.6	125.0

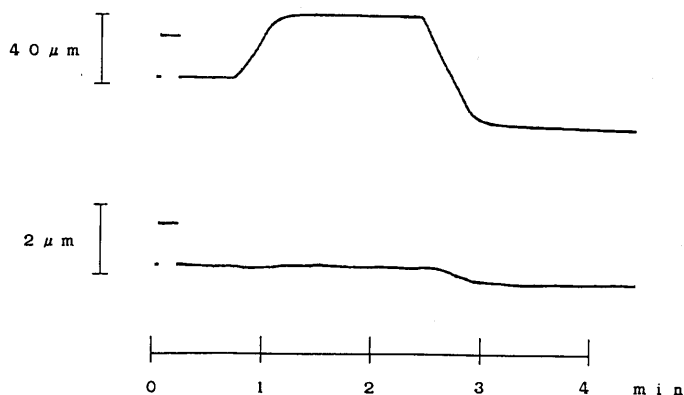


Fig. 4 The example for the influence of displacement in sensor's radial direction.

は地球潮汐や地震を観測する上で十分小さいといえる。

(2) 湧水量計, 坑内温度計, 気圧計

1987年8月13日に湧水量計, 坑内温度計を設置し観測を開始した。湧水観測は, 観測坑内の記録室の奥を走る断層から滴り落ちる湧水をいったん集め, その水を雨量計で受けるものである。雨量計は転倒升型で雨量0.5 mmにつき1回升が転倒し, 接点が1回開閉する。その回数を積算しD/A変換して記録する。接点の開閉1回につき2.8 mVづつ出力が増し, 200回でリセットされる。雨量計の受水口の直径は20 cmなので2.8 mVの出力(0.5 mmの雨量に相当する)は湧水量にすると約15.71 ccである。

また坑内温度計は観測坑内の記録室奥に設置してあり, その換算式は

$$Y(^{\circ}\text{C}) = 1.628 \times X(\text{V}) + 10.072$$

である。また気圧計の換算式は,

$$Y(\text{mb}) = 93.19 \times X(\text{V}) + 971.6$$

である。

3. 解析及び結果

地球の固体部分は剛体ではないため、海水と同様に月及び太陽の引力によって生じる起潮力を受けて変形する。さらに、海の潮汐で海水が移動して潮位が上下するため、海底にかかる圧力が変化し、それによっても地球は変形する。実際にはこの2つは同じ周期をもつ現象であるため、重力計、傾斜計、伸縮計などの観測記録だけでは分離することができず、この2つを合わせて地球潮汐と呼んでいる。潮汐現象は周期的であるため、通常一定の振幅、位相をもつ正弦関数の重ね合わせとして表現され、その一つ一つを分潮と呼ぶ。分潮は半日周期、日周期及び長周期潮の3つのグループに分けることができる。そのうち、 M_2 分潮と O_1 分潮はそれぞれ12.4206時間及び25.8193時間の周期をもつ月の半日潮、月の赤緯変化による日周期であるが、これらは振幅が大きく、その周期が他の分潮とかなり離れており、さらに24時間周期で変わる気象的な擾乱とかその半分の12時間周期とも離れているため比較的短い期間のデータから信頼性の高い値が得られる。

(1) 地球潮汐の分離

地殻変動連続観測のデータには次の関係がある。ある時刻 t における観測データを $Ob(t)$ 、ドリフトを $D(t)$ 、地球潮汐を $Tide(t)$ 、イレギュラノイズを $Noise(t)$ とすると、

$$Ob(t) = D(t) + Tide(t) + Noise(t)$$

が成り立つ。地球潮汐だけを解析するためには、これらを分離する必要がある。今回はベイズ型地殻変動解析プログラム (ISHIGURO et al, 1983; ISHIGURO and TAMURA, 1985: 以下BAYTAPG) を用いて分離を行う。結果をFig. 5に示す。この図は破碎帯を挟む3次元相対変位計(A)の東西方向の成分(1989 2/16~8/23)である。上から順に観測データ、トレンド、地球潮汐、イレギュラノイズである。さらに拡大したものをFig. 6に示す。これは同じ記録であるが期間は、4/23~5/10である。また同じ期間の破碎帯を挟まない変位計(D)の同

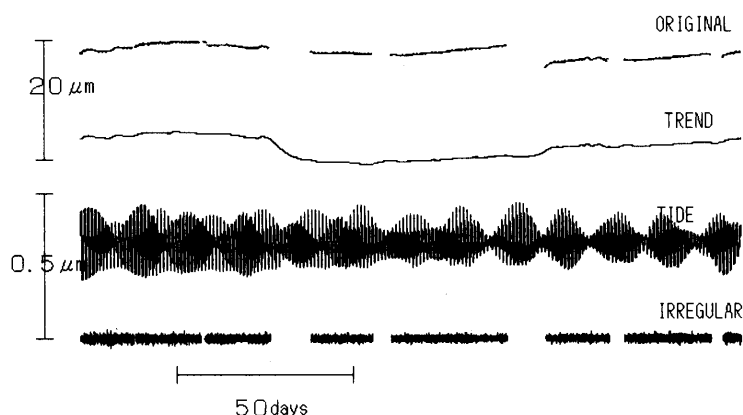


Fig. 5 The third component of relative displacement across the fracture zone with instrument (A) from Feb. 16 to Aug. 23, 1989. From the top, the original data, smooth trend, tidal component and the irregular noise.

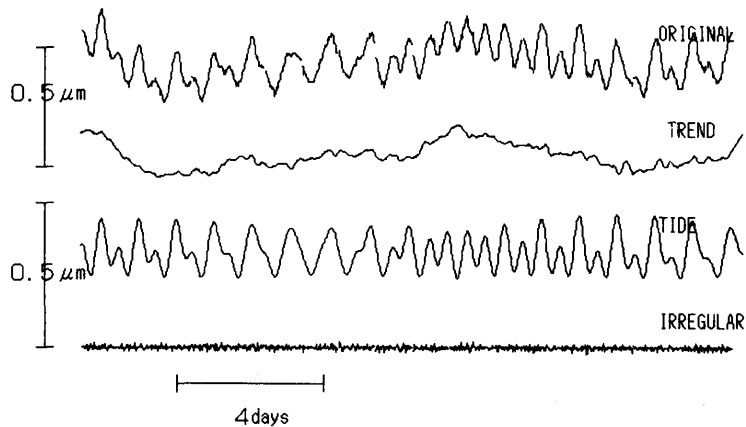


Fig. 6 The third component of relative displacement across the fracture zone with instrument (A) (original data, trend, tidal component, irregular noise) from April 23 to May 10, 1989.

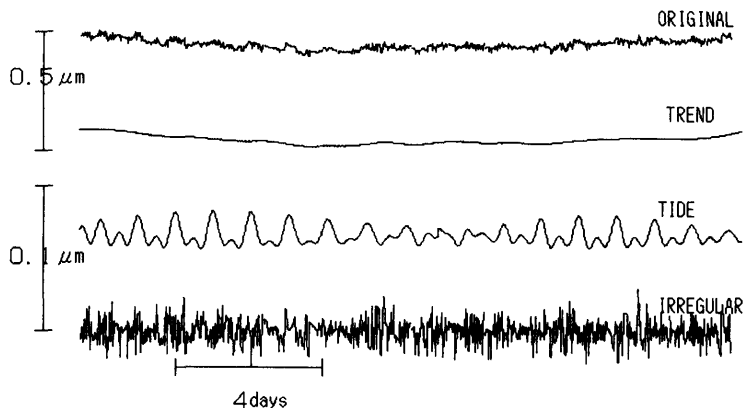


Fig. 7 The third component of relative displacement across the unfracture zone with instrument (D) (original data, trend, tidal component, irregular noise) from April 23 to May 10, 1989.

じ方向のものと湧水量、坑内温度、気温、気圧、雨量をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。これらの記録を見て気づくことをいくつか上げると、

- 1) 破碎帯を挟んだものの場合にはイレギュラノイズは地球潮汐に比べて十分小さい。ところが破碎帯を挟まないもののノイズは地球潮汐の振幅と同じくらい大きく、地球潮汐を正確に分離していない可能性がある。そこで試しに理論地球潮汐にトレンドとノイズを混ぜたものを BAYTAPG で解析することとする。結果を Fig. 9 に示す。(a) は基となった理論地球潮汐、(b) はそれにトレンドとノイズを足し合わせ、あらためて分離したものである。この図から破碎帯を挟まないものの記録の S/N 比ぐらいでは、潮汐の振幅や形はほとんど影響を受けないことがわかる。

- 2) 志知と岡田 (1979) は地殻変動の観測データに生じる擾乱の原因について詳しく述べて

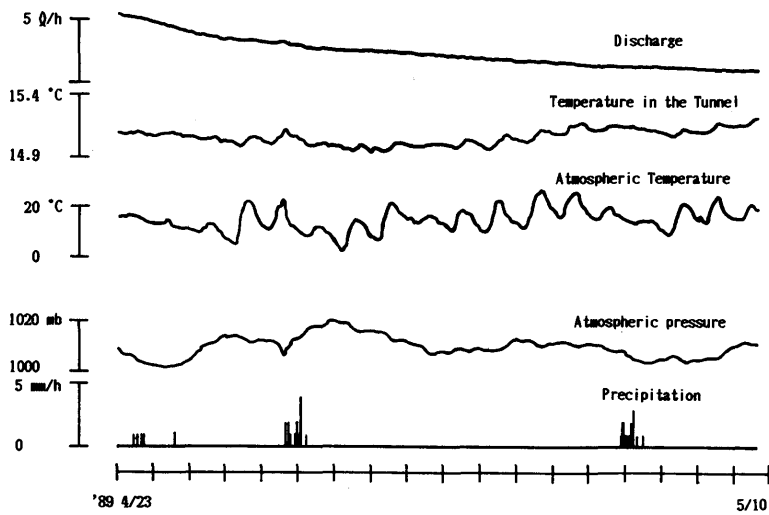


Fig. 8 The charts of water discharge, temperature in the tunnel, atmospheric temperature, atmospheric pressure, and precipitation from April 23 to May 10, 1989.

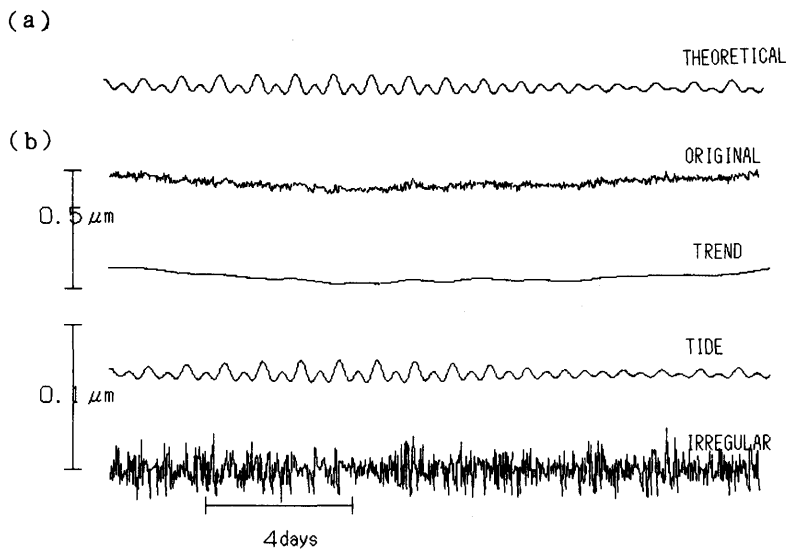


Fig. 9 (a) Theoretical earth tide. (b) Result calculated with Bayesian tidal analysis program of theoretical earth tide added with trend and large irregular noise.

いる。長周期のノイズの原因として上げられるのは観測機器の設置場所付近の地形、地質構造、地殻の非弾性的な流動、観測坑の変形、観測機器を固定している箇所の岩盤の変形、観測機器の変形等である。これらが及ぼす影響は周期が数日よりも長いので、地球潮汐に対して大きな影響は与えない。しかし一般に気温や坑内温度の変化は1日周期であるため

影響を及ぼす。Fig. 8 から明らかなように 4/23 ~ 5/10 の期間では坑内温度の変化は $15.07 \pm 0.13^\circ\text{C}$ で、日変化の振幅は約 0.2°C である。これによる影響の主なものはスーパーインバー棒の熱収縮である。いま棒の長さを 1.25 m とすると、スーパーインバーの線膨張係数は $1.3 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ なので、その長さの変化は約 $0.03 \mu\text{m}$ である。この値は破碎帯を挟んでいない変位計の地球潮汐の約 10% であり、大きな影響はない。しかし岩盤上に設置した相対変位計で捉えた東西方向の地球潮汐の振幅は同程度である。そのため注意が必要である。ところで、坑内温度を測定している場所が入口に近いのでそこでの温度変化は、相対変位計を設置してある地点よりも大きいと思われる。また坑内温度と観測記録の比較からその相関はみられない。そのためあまり考慮する必要はないと思われるが、破碎帯をはさまない相対変位計の記録を解析する場合、特に小さな振幅変化を問題にする場合は、温度変化の影響を考慮しなければならない。

- 3) 湧水量は梅雨などの雨量の多い時期には約 30 liter/hour にも達する。Fig. 8 に示した期間では最大約 5 liter/hour で徐々に減少している。これはこの期間以前に多量の降水があり、それによって湧水が一端増加した後徐々に減少していることを示している。またこの期間にもわずかな降水が 3 回あり、その都度湧水量もわずかながら増加している。湧水量の変化が相対変位計にどのような影響を及ぼすかを Fig. 10 に示す。この図は、湧水量が 30 liter/hour を越すような場合、地球潮汐の振幅や位相が明らかに影響を受けていることを示している。そこで地球潮汐を解析対象とする場合は、湧水量が 5 liter/hour 以下の期間のデータを用いることとした。また気圧変化に対しては地球潮汐を解析する上では考慮しなくてもよいと思われる。

またこの他に考慮すべき点とその結果について述べると、

- 4) 相対変位計に用いている電源回路の電圧の 1 Hz 以上の短周期ノイズは $\pm 3 \text{ mV}$ 以下であ

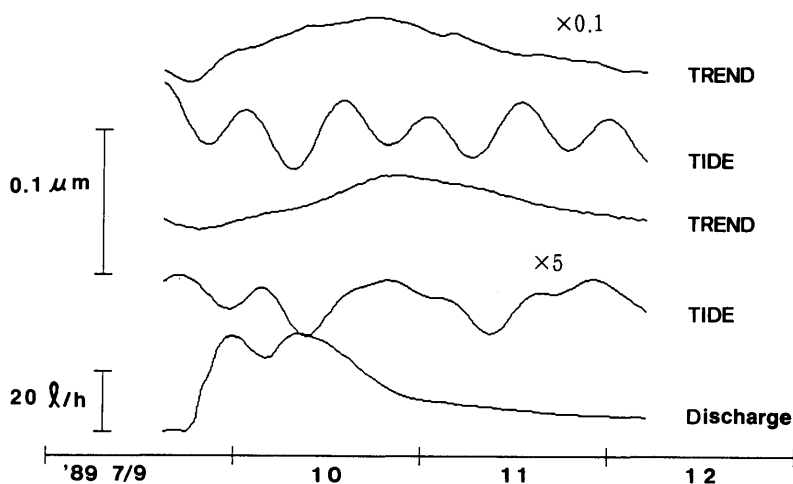


Fig. 10 The example of harmful effect by heavy discharge on the Relative Displacement Meter. Upper two traces are for the third component of instrument across the fracture zone and the under are for that for across the unfracture zone.

る。この変化が記録上に与える影響は $\pm 0.014 \mu\text{m}$ である。これは破砕帯を挟んでいない相対変位計にとってはかなり大きいといえる。しかし地球潮汐と比較して極端に短周期であること、BAYTAPGではほとんど完全に除去可能であることなどから、考慮を必要としないと考えられる。また温度変化による電源電圧のドリフトは $0.002\% / ^\circ\text{C}$ つまり相対変位計に与える影響は $0.00015 \mu\text{m} / ^\circ\text{C}$ である。トンネル内の温度の日変化が 0.2°C 程度であることから無視できるほど小さい。

- 5) 地球潮汐による重力変化によってセンサーの重量が変化すると、相対変位計の棒が地球潮汐の周期で上下に振動し、見かけ上の相対変位を引き起こすこととなる。これがもし大きな量であるならば観測上問題となる。実験として100 gのおもりを棒の先端に吊したところ上下方向の出力は3.5 Vだった。これは変位に換算すると、約 $16 \mu\text{m}$ に相当する。センサーの質量は測定していないが、仮に多めに見積って1 kgとし、重力加速度の潮汐の振幅を0.2 mgal とすると、潮汐変化によるセンサーの重量の変化は0.0002 gでこれによる上下方向の変位は、 $0.000032 \mu\text{m}$ となる。よってこの影響は無視できるほど小さいと考えられる。

最後に、いつもお世話になっている北陸観測所の平野憲雄氏に深く感謝します。

参考文献

- ISHIGURO, M., H. AKAIKE, M. OOE and S. NAKAI, 1983: A Bayesian approach to the analysis of earth tides, in Proc. 9-th International Symposium on Earth Tides, ed J. T. Kuo, 283 - 292, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- ISHIGURO, M. and Y. TAMURA, 1985: BAYTAP-G in TIMSAC- 84, Computer Science Monographs, **22**, 56 - 117.
- 活断層研究会, 1980, 日本の活断層, 東京大学出版会, 204 - 211.
- 桑原正見, 1962, 武生・鯖江盆地の地形, 資源研彙報, **56・57**, 41 - 50.
- 見野和夫, 1986, 北陸南部地域の活断層(2) — 鯖江断層 —, 地震, **39**, 567 - 577.
- 小笠原義勝, 1949, 福井地震の被害と地変, 地理調査所時報, **2**, 2 - 13.
- 岡山俊雄, 1931, 美濃越前山地内部の断層地形 (一), 地理評, **7**, 920 - 942.
- 志知龍一・岡田義光, 1979, 坑内における歪観測, 測地学会誌, **Vol. 25**, No. 2, 101 - 134.
- 竹内文朗・平野憲雄, 1985, 北陸微小地震観測所の震源マップの概要について—約一万個の地震のデータのとりまとめ—, 京大防災研年報, **28 B-1**, 257 - 270.
- 谷口慶祐・村上英紀・竹内克夫・西尾雅至・野々口勝美, 1988, 断層破砕帯に設置した3次元相対変位計による観測(1), 京都教育大学紀要, Ser. B, Nos. 71 / 72, 23 - 37.
- 谷口慶祐・梶本和裕・実光顕, 1992, テレメータシステムの開発, 京都教育大学紀要, Ser. B, No. 81, 73 - 95.
- 宇佐見龍夫, 1966, 日本付近の主な被害地震の表, 震研彙報, **44**, 1571 - 1622.
- 渡辺邦彦・平野憲雄, 1978, 北陸地方の地質構造と微小地震活動, 地震, **33**, 79 - 89.