

六甲高雄観測室における地殻変動と地下水の観測

—— 1995年兵庫県南部地震に関連した変化 ——

藤森 邦夫・山本 剛靖・大塚 成昭・石井 紘

OBSERVATIONS OF CRUSTAL MOVEMENTS AND DISCHARGE AT ROKKO-TAKAO STATION

—— CHANGES ASSOCIATED WITH THE 1995

HYOGO-KEN-NANBU EARTHQUAKE ——

By *Kunio* FUJIMORI, *Takeyasu* YAMAMOTO, *Shigeaki* OTSUKA and *Hiroshi* ISHII

Synopsis

The Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake ($M=7.2$) occurred in and near Kobe city on January 17, 1995. Rokko-Takao station for monitor of crustal deformation lies in the hypocentral region of this earthquake.

It was found by the geodetic measurements that strain rates and upheaval rate changed in 1991. Change of strain rate were observed by a borehole strainmeter in October 1994. Anomalous increase of discharged groundwater started in November 1994. These changes are considered to be precursors of the earthquake. No anomalous change was detected just before the earthquake.

1. はじめに

1995年1月17日5時46分、明石海峡を震源とする兵庫県南部地震 ($M=7.2$, $H=14$ km) が発生した。その余震は、Fig. 1 Upper (Left) に見られるように、六甲山の南東側山麓から淡路島の北西岸まで北東-南西方向にほぼ直線状に分布する。この余震群の地表には、五助橋断層、諏訪山断層、須磨断層、ならびに野島断層など多くの北東-南西走向の活断層が存在する¹⁾。

六甲高雄観測室は、諏訪山断層から北西約3 kmの距離にあり、この地震の震源域のほぼ直上に位置する。当観測室では、測地測量と地殻変動連続観測、ならびに湧水量の観測が行われてきており、これらの観測結果は、M7級の大地震の震源域における観測データとして貴重なものである。

本報では、地震予知の観点から、地震の前兆的变化が認められるかどうかを主にして、得られたデータについて報告する。

2. 六甲高雄観測室

六甲高雄観測室は、神戸市の六甲山地をほぼ南北に横断する全長約7 kmの2本並列した自動車用トンネル（新神戸トンネルと第二新神戸トンネル）をそのほぼ中央部で繋ぐ連絡用トンネルを観測坑道として

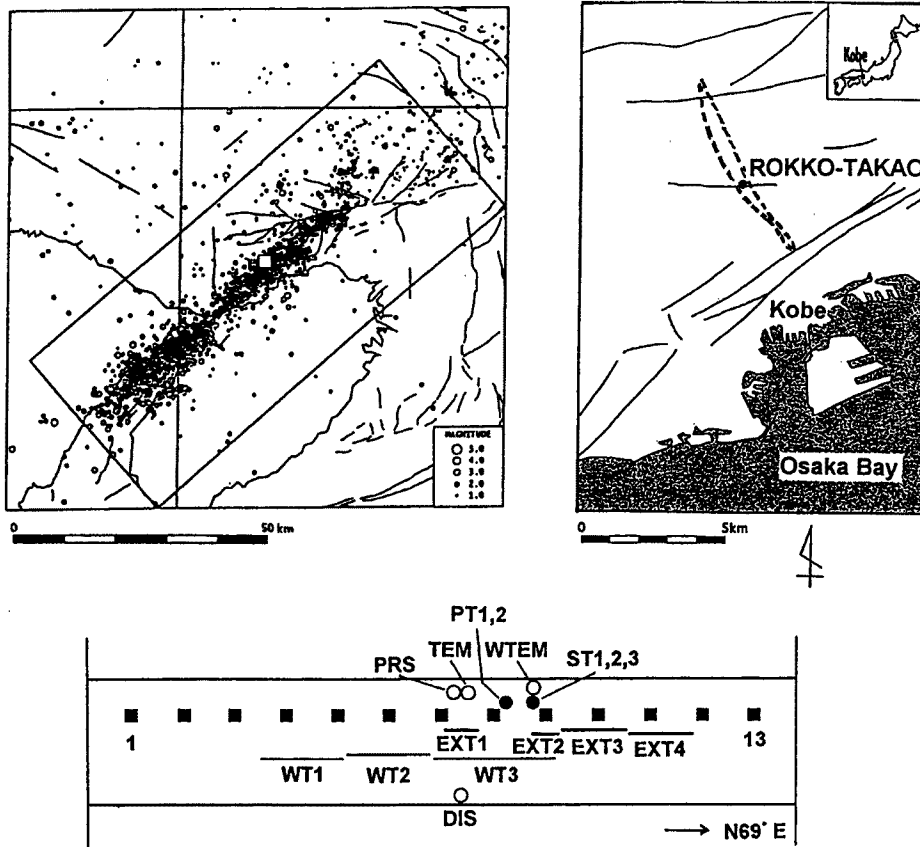


Fig. 1. Upper (Left): After shock distribution³⁾ of the Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake and location of Rokko-Takao station (●). Upper (Right): Location of the station (●), Shin-Kobe tunnels (==), and active faults (—). Lower: Arrangement of instruments and geodetic sites (■).

いる (Fig. 1 Upper (Right))。観測坑道は、N 69° E-S 69° W の方向であり、長さが約 340 m、幅と高さが約 3 m である。また、観測坑道は、東-西走向の万福寺断層と交差しており、中央部にある破碎帯から湧水がある。なお、岩質は花崗岩である。

観測は 1989 年に開始され、順次、観測項目が追加されてきた。観測計器の配置を Fig. 1 Lower に示す。観測坑道と自動車用トンネルとは扉 1 枚で隔てられているだけであるので、坑内温度の日周変化は約 0.1°C、年周変化は 1°C を超える。一方、被り深度が約 240 m と深いためか、地殻変動に与える降雨の影響はほとんど無い。

3. 測地測量

25 m 間隔に設置された 13 基の測定台から構成される 300 m のほぼ直線状の基線 (六甲高雄基線) において、光波測距と水準測量が、1989 年以降、毎年 3 月に行われてきた³⁾。

長さ変化: 測定点 1 から各測定点までの長さ変化を Fig. 2 に示す。各区間の長さ変化は一様でなく、伸びの区間もあるが、縮みの区間が多い。特に、区間 (10-11) の縮みが大きい。また、全般的にみて、1991 年から 1992 年にかけて変化の傾向を変えている。300 m の基線長においては、地震までの 5 年間に約 0.7

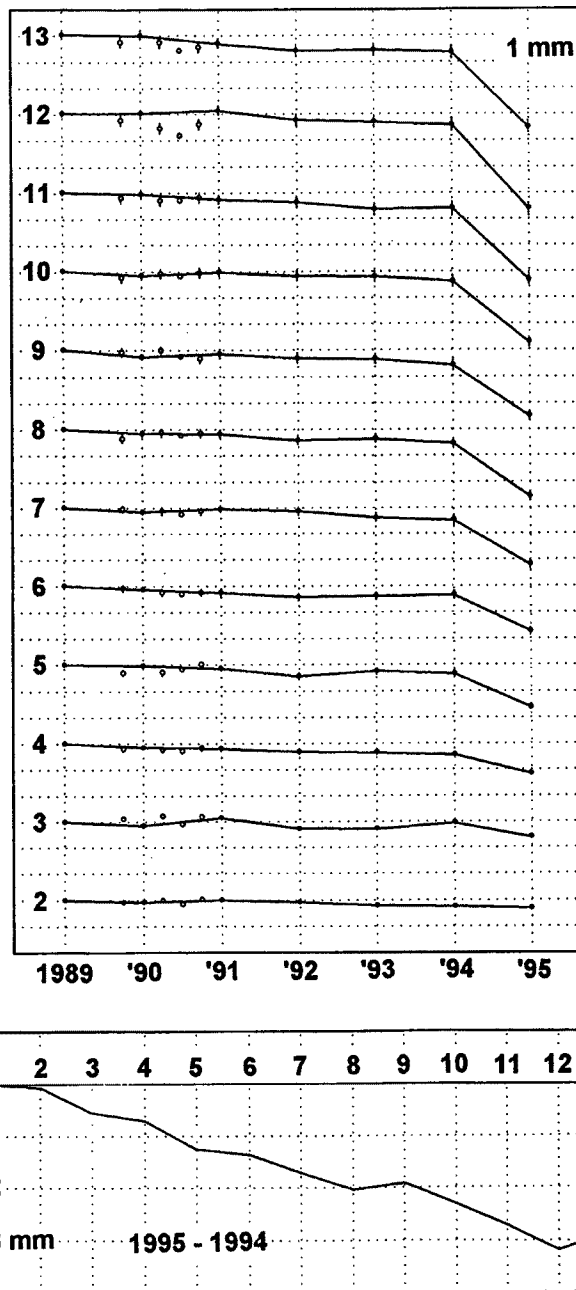


Fig. 2. Upper: Changes of baseline Lengths referred to site 1 in 1989 - 1995.
Lower: Change of baseline lengths in 1994 - 1995.

mm ($2.3\mu\text{strain}$) 縮み, 地震時には約 2.8 mm ($9.3\mu\text{strain}$) 縮んだ。

高さ変化：1989年の測定値を基準とし, 測定点1を不動点とした各測定点の高さ変化を Fig. 3 に示す。地震までの5年間に, 基線全体としてのシーソー的傾動を混えつつ, 区間(7-8)を境に基線の東側が西側に対して約 1.5 mm 隆起した。この変動は, 1990年~1991年に始まったように見られる。地震時には, 東側隆起の約 $10\mu\text{rad}$ の傾動が生じた。なお, 区間(7-8)付近には, 約 5 m 間隔で水準測量用の測定点が1994年に新たに設置されており, これらの変動から, 傾動が一様ではなく, 短波長の起伏を含んで

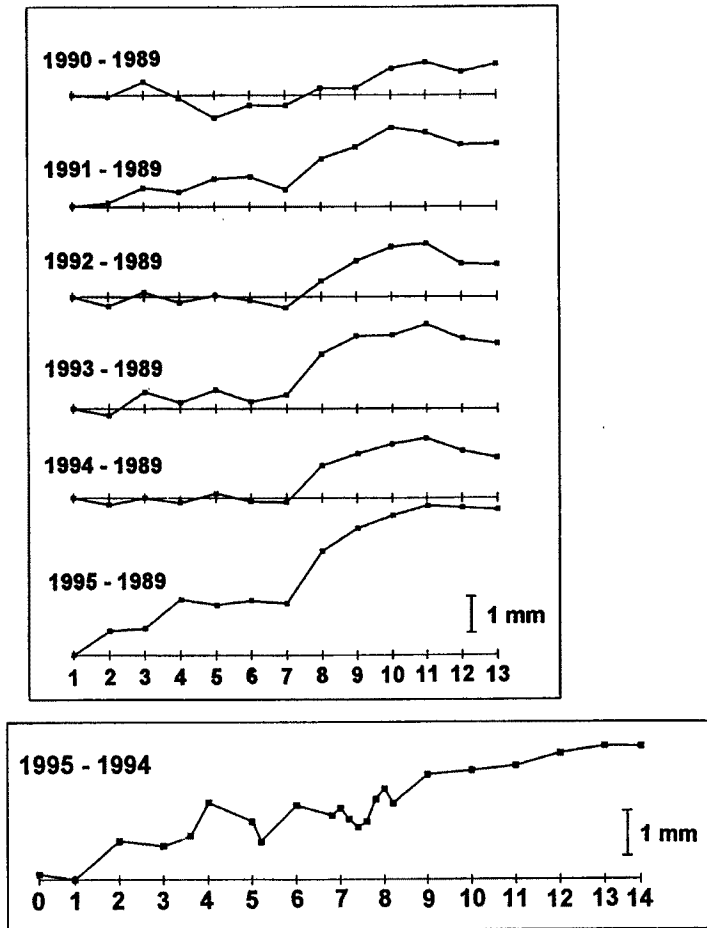


Fig. 3. Upper: Height Changes of respective sites referred to site 1 (1989-1995).
Lower: Height Change (1994-1995).

いることが分かる。

この基線において、測定点7より東側における長さ変化や高さ変化の大きいことが、1993年3月の測量結果を得た時点で明らかとなった。これらの変動は、万福寺断層に関係すると思われる。

4. 地殻変動連続観測

連続観測によって得られている記録を Fig. 4 に示す。伸縮計 EXT 1 と水管傾斜計 WT 1 と WT 2 は、1989年から観測が行なわれており、長期間の記録が得られている。他の伸縮計や傾斜計などは、測地測量の結果を確認するために、1993年から1994年にかけて増設された。なお、観測坑道は1本しかないので、伸縮計と水管傾斜計の設置方向は、全て $N 69^{\circ} E - S 69^{\circ} W$ である。

4.1 伸縮計と傾斜計

伸縮計 EXT 1 は、ほぼ一様な $0.7 \mu\text{strain}/\text{year}$ の歪速度で縮んでおり、明瞭な速度変化は見いだせない。水管傾斜計 WT 1 は、1991年頃に約 $3 \mu\text{rad}$ の東側隆起の変化を示したが、WT 2 は $0.5 \mu\text{rad}/\text{year}$ の

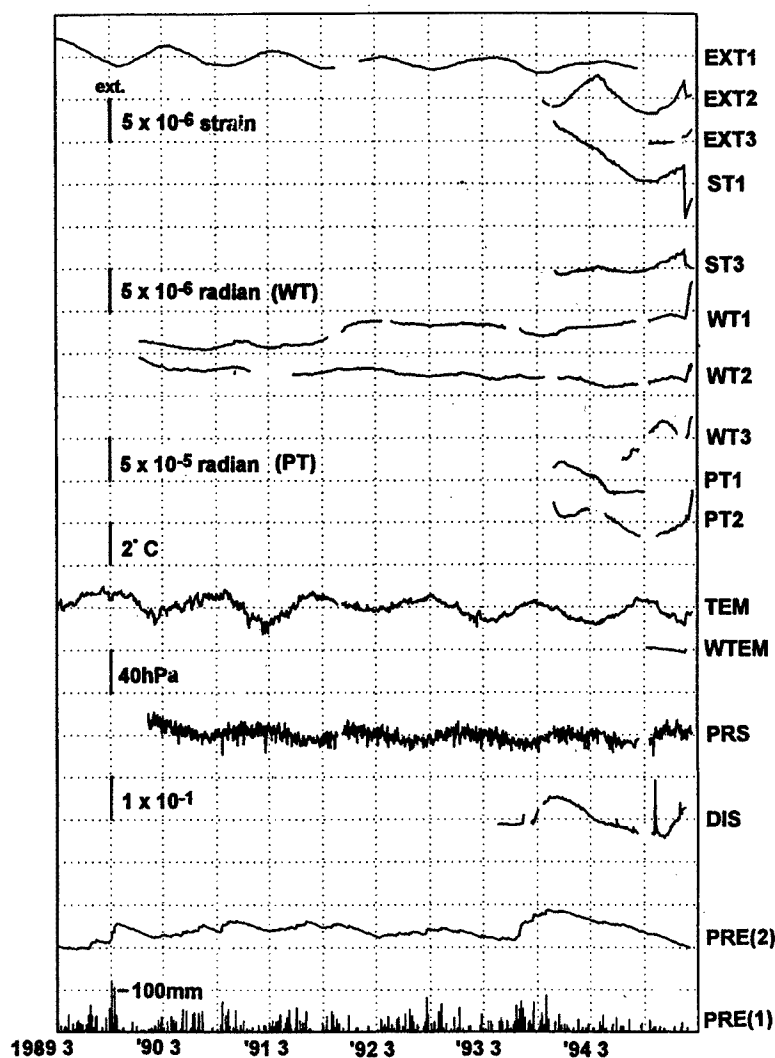


Fig. 4. Data (daily value) of strains, tilts, room temperature, atmospheric pressure, discharge and precipitation at the station.

一様な西側隆起である。他の計器については、設置後の期間が短く年周変化の大きさが見積もれないことと記録の欠測もあることから、現時点では、傾向の変化については明かでない。震研93型平行2枚バネ式可搬型傾斜計PT1とPT2の変化量は大きいですが、これらの計器は測地測量の区間(7-8)に設置されており、水準測量で短波長の高さ変化が観測されたことと調和的である。

地震前後50日間の伸縮計と傾斜計の記録をFig.5とFig.6にそれぞれ示す。これらの計器のコサイスミックな変化は大きく機械的な原因で生じたものも含まれている可能性があるため、コサイスミックなステップは除かれて示されている。地震直前には、明瞭な変化が認められない。地震後の変化は、全成分とも大きな余効的変動を行っている。歪変化の様相は、様々であるが、傾斜変化は、北東方向の隆起である。なお、地震後、坑内温度(TEM)が約0.5°C上昇し、日変化の振幅が小さくなっている。この温度変化の原因は、後に述べる湧水量のコサイスミックな増加により、自動車トンネルから観測坑道への通気孔が塞がれたためである。

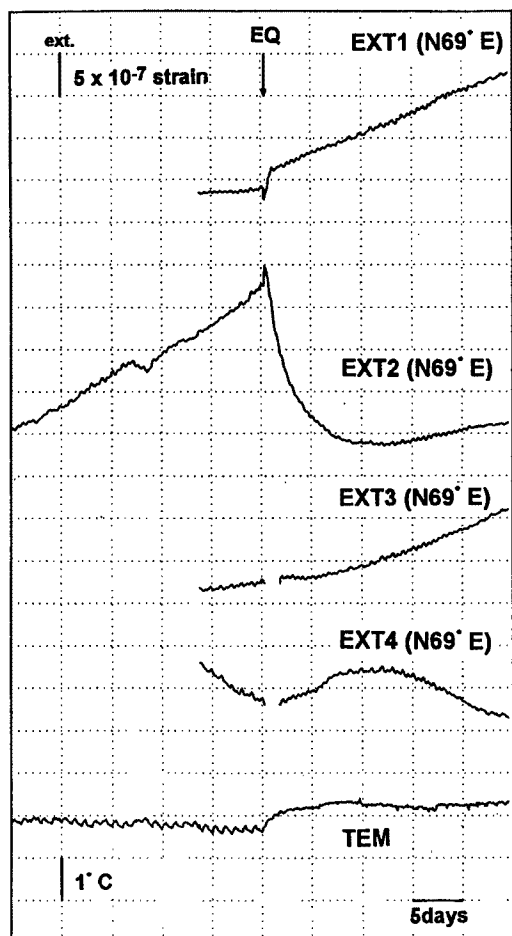


Fig. 5. Strain data (hourly value) observed by extensometers during 50 days before and after the earthquake.

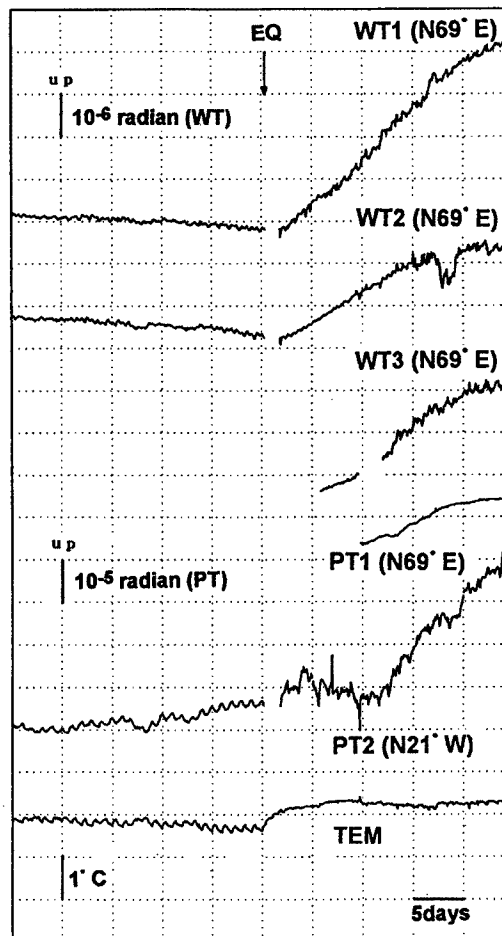


Fig. 6. Tilt data (hourly value) observed by water-tube tiltmeters and pendulum tiltmeters during 50 days before and after the earthquake.

4.2 ポアホール歪計

設置されている歪計は、石井らにより最近開発された3成分のポアホール歪計 (NBS 58-3 C) である。1993年7月、深さ1.2 mのポアホールに埋設された。なお、本報では、この歪計の3成分をST 1 (N 81° W-S 81° E 方向)、ST 2 (N 39° E-S 39° W 方向)、ならびにST 3 (N 21° W-S 21° E 方向)と表記する。ST 2は、設置当初よりノイズが多く不調であり、断続的にしか記録が得られていない。

ST 1とST 3の記録をFig. 7に示す。ST 1は大きな縮みの歪変化を示していたが、1994年8月頃から歪変化速度が小さくなり、同年10月頃からは伸びに転じた。そして、コサイスミックに $6\mu\text{strain}$ を超える縮みのストレイン・ステップがあり、地震後急速に回復している。ST 3の歪変化速度も同じ時期に変化している。しかし、ST 1とST 3の記録に見られる数日程度の周期の変化は、温度変化と一致している。そこで、温度変化の影響を除去するため、ST 1とST 3の差がとられた。ST 1-ST 3は、60°異なる方向の歪の差であるので、歪としての意味を持たないが、歪状態が変化したか否かは分かる。明らかに、1994年10月に歪の傾向が変化している。

設置からの期間が短いことから、記録には設置の影響が含まれていると考えられ、また、年周変化の振幅もまだ不明である。従って、歪変化の量的解析には、後1年程度の観測を待たねばならない。

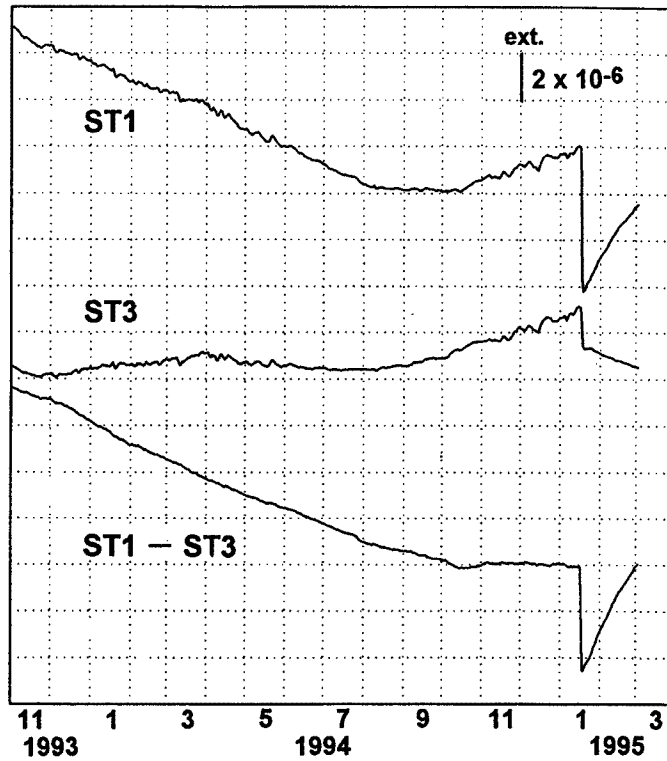


Fig. 7. Strain data (daily value) observed by a multi-component small borehole strainmeter.

地震前後 50 日間の ST 1, ST 2, および ST 3 の記録を Fig. 8 に示す。地震直前には、明瞭な変化が認められない。地震によるストレイン・ステップは、N 71°W-S 71°E 方向に $7.5 \mu\text{strain}$ の縮み、N 19°E-S 19°W 方向に $3.4 \mu\text{strain}$ の伸びである。地震直後から、全成分とも大きな余効的変動を行っている。

5. 湧水量

観測坑道の側溝を流れる湧水を三角堰でせき止めることにより、湧水量の観測を行っている。この観測は、1993 年 4 月に開始された。湧水量変化は気圧変化と対応しており、気圧変化との相関をとることにより気圧影響が除去されている。気圧影響が除去された湧水量変化には、地球潮汐による変化が見られる。

湧水量の変化、日降雨量、および積算日降雨量ーリニアトレンドを Fig. 9 に示す。積算日降雨量ーリニアトレンドは、降雨による地下水量の変化を近似的に示す。当観測室の湧水量には、単発の降雨による影響は見られず、集中した降雨から約 1.5 カ月遅れて湧水量が増加しその後減少する長周期の変化として、降雨の影響が現われている。湧水量に見られる短周期の変化は、遠地地震によるものであり、コサイスマックに増加し、時定数 2～3 日の指数関数的に減少する。これまでに、6 個の遠地地震による変化が観測された。

湧水量は、1994 年 11 月上旬から増加を始めている。この増加に対応するほどの降雨は観測されていないので、明らかに異常な変化である。兵庫県南部地震までに約 7% 増加し、コサイスマックには約 10 倍に増加した。地震前の湧水量の増加は、前兆的变化と考えられる。この増加率は、1994 年 12 月 28 日に発生した三陸はるか沖地震によるコサイスマックな変化を含むものの、地震までほぼ一定であり、直前に明瞭

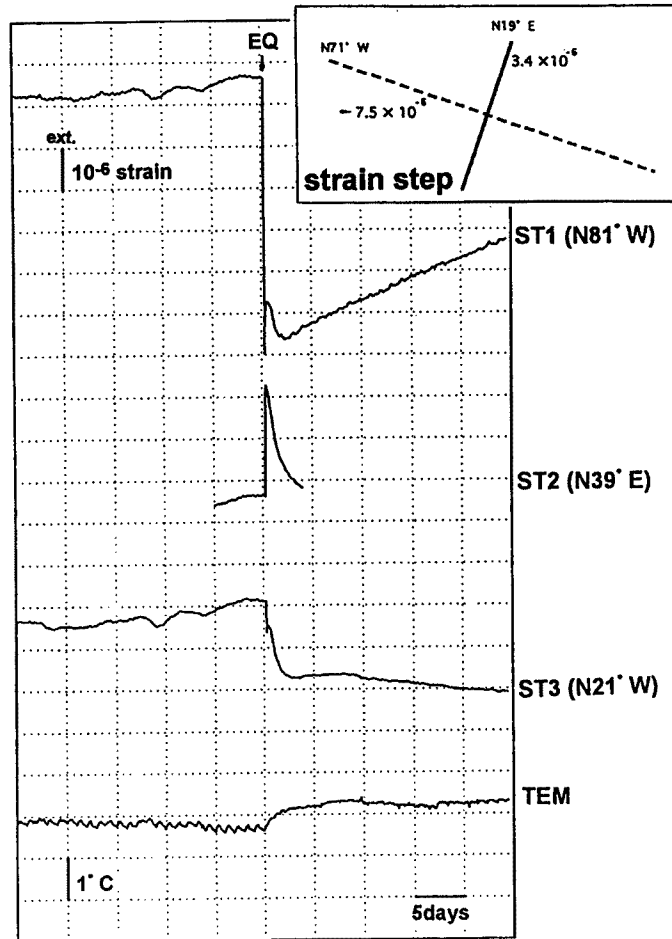


Fig. 8. Strain data (hourly value) observed by the strainmeter during 50 days before and after the earthquake.

な変化は見られない (Fig. 10)。ちなみに、増加を始めた時期は、猪名川町での群発地震活動が活発化し始めた時期と一致する。また、地震前の増加量は、コサイスミックなものに比べて、約 $1/140$ である。

Fig. 11 に地震前後の湧水量変化を示す。地震以前は約 0.65 l/秒 であったが、地震後約 1 週間は約 6.5 l/秒 と大量の湧水があった。この時は、観測坑道の壁から水が吹き出していた。その後、徐々に減少している。

6. ま と め

六甲高雄観測室で得られた結果を解釈すると以下のようなものである。測地測量において変化が始まったのは、1991 年頃と考えられる。その前駆期間は 3~4 年であり、中期の前兆的变化とも考えられる。歪と湧水量においては、1994 年 10 月または 11 月からである。その前駆期間は約 3 カ月であり、短期の前兆的变化と考えられる。そして、直前には、前兆的变化は認められなかった。当観測室は震源域の直上に位置するとはいえ、震央からは約 20 km 離れており、直前の変化はもっと震源近くであれば観測されたかもしれない。これらの変動が今回の地震に関連したものであるかどうかを確定するには、継続した観測が必要で

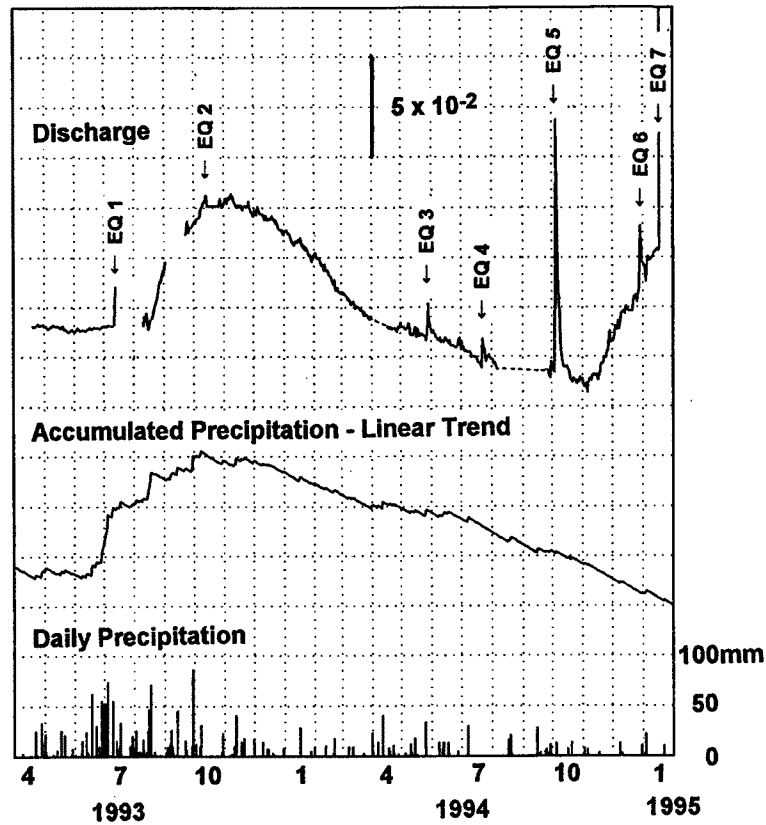


Fig. 9. Discharge change (daily value), daily precipitation and earthquakes. EQ 1 : The Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake. EQ 2 : The earthquake far off the Tokaido. EQ 3 : The earthquake in the central Part of Shiga Prefecture. EQ 4 : The earthquake in the northern part of the Japan Sea. EQ 5 : The Hokkaido-Toho-Oki Earthquake. EQ 6 : The Sanriku-Haruka-Oki Earthquake. EQ 6 : The earthquake off the Sanriku. EQ 7 : The Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake.

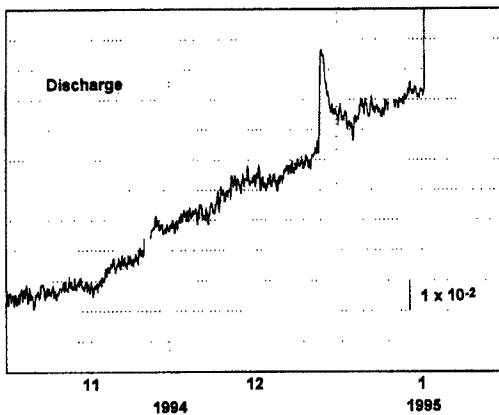


Fig. 10. Discharge change (hourly value) before the Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake.

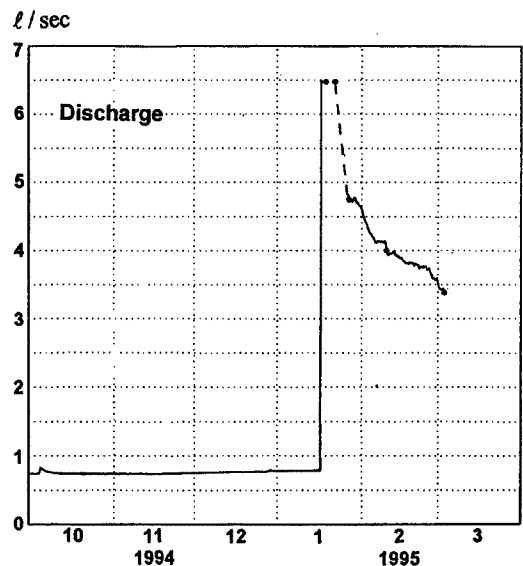


Fig. 11. Discharge change before and after the earthquake.

あり、また、今後の事例を待たねばならない。

地殻変動連続観測においては、設置されている全ての計器に変化が観測されているわけではない。観測坑道を万福寺断層が横切っており、地殻の歪は均一ではない。変動の大きく生じる場所と生じない場所とがあるように推定される。変動の大きく生じる場所、いわゆる“つぼ”を見だし、そこで観測することが重要であると思われる。

地震に伴う湧水量の変化は、顕著である。地震で生じる地殻歪により万福寺断層の破碎帯が圧縮され、そこに含まれる水が絞り出されることにより湧水量がコサイスミックに増加すると考えている。断層破碎帯は広がりをもっているであろうから、地殻歪が及ぼす面への微小な変化が湧水量の変化として増幅されて反映されるものであろうと考えている。

7. お わ り に

当観測室は、被りの深い自動車用トンネルの一部を利用して地殻変動の観測を行うテスト、ならびに活断層近傍における観測を目的としている⁴⁾。今回得られた結果は、このような観測点の有効性と必要性が示された。地震予知のためには、観測点の設置を再考する必要があると思われる。

最後に、六甲高雄観測室は、神戸市道路公社の御好意により設けられている。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 活断層研究会編：新編日本の活断層，東京大学出版会，1991，pp. 273-299.
- 2) 京都大学防災研究所地震予知研究センター：私信.
- 3) Yamamoto, T. : High Precision Measurements of Crustal Strains on an Underground Baseline by an Electro-Optical Distance Meter, Jour. Geod. Soc. Japan, Vol. 37, 1991, pp. 319-331.
- 4) 藤森邦夫・山本剛靖・東中基倫・石井 紘・大塚成昭：六甲高雄観測室における小型多成分ポアホール歪計による観測，京大防災研年報，第37号 B-1，1994，pp. 265-271.