

## 逢坂山地殻変動観測所における地下水位の 連続観測について

重富 國宏・橋田 匡邦・藤井 伸蔵

### OBSERVATIONS OF GROUNDWATER LEVEL AT OSAKAYAMA

By *Kunihiro SHIGETOMI, Masakuni HASHIDA*  
and *Shinzo FUJII*

#### Synopsis

Observations of groundwater level have been carried out since December 1976 at Osakayama tunnel in order to investigate relations between groundwater level changes and strain changes and earthquake occurrence.

Results obtained till now are as follows.

Semidiurnal fluctuations of groundwater level due to earth tide have been observed and from Fourier analysis amplitude of  $M_2$  component is about 0.1 cm.

It has been confirmed that annual fluctuations of strain are due to fluctuations of groundwater level caused by seasonal variations of precipitation.

Coseismic changes of groundwater level related to earthquakes have been recorded but anomalous changes of groundwater level obviously related earthquake occurrence are not found.

#### 1. はじめに

伸縮計・傾斜計による、いわゆる地殻変動の連続観測は、通常水平坑道内において実施されているが、山の被りが浅い場合は降雨による擾乱を受ける。

地殻変動の連続観測に及ぼす降雨の影響については、これまでもいろいろな角度から議論されている<sup>1)~5)</sup>。

降雨による影響を考える場合、まず第一に考えられるのは、降雨にともなう地下水位の変化による観測点近傍の圧力変化である。地殻変動の連続観測が実施されている水平坑道内で地下水位の直接的な情報が得られれば、圧力変化のメカニズムを知る有力な手がかりとなる。また降雨による影響も含めた、地下水位と地震発生との関係の問題も興味のある問題である<sup>6)~9)</sup>。

逢坂山地殻変動観測所では、水平坑道内に深さ 19 m の井戸を掘削し、地下水位の連続観測を実施している。これまでに得られた観測結果のうち、日変化と年周変化について報告する。

#### 2. 観 測

Fig. 1 に観測所近傍の地形図と観測坑道内の計器を示す。観測井戸は図の WL である。山の被りは約 60 m である。

井戸の深さは坑道床面から 19 m であり、直径は 20 cm である。床面からは塩ビのパイプでケーシング

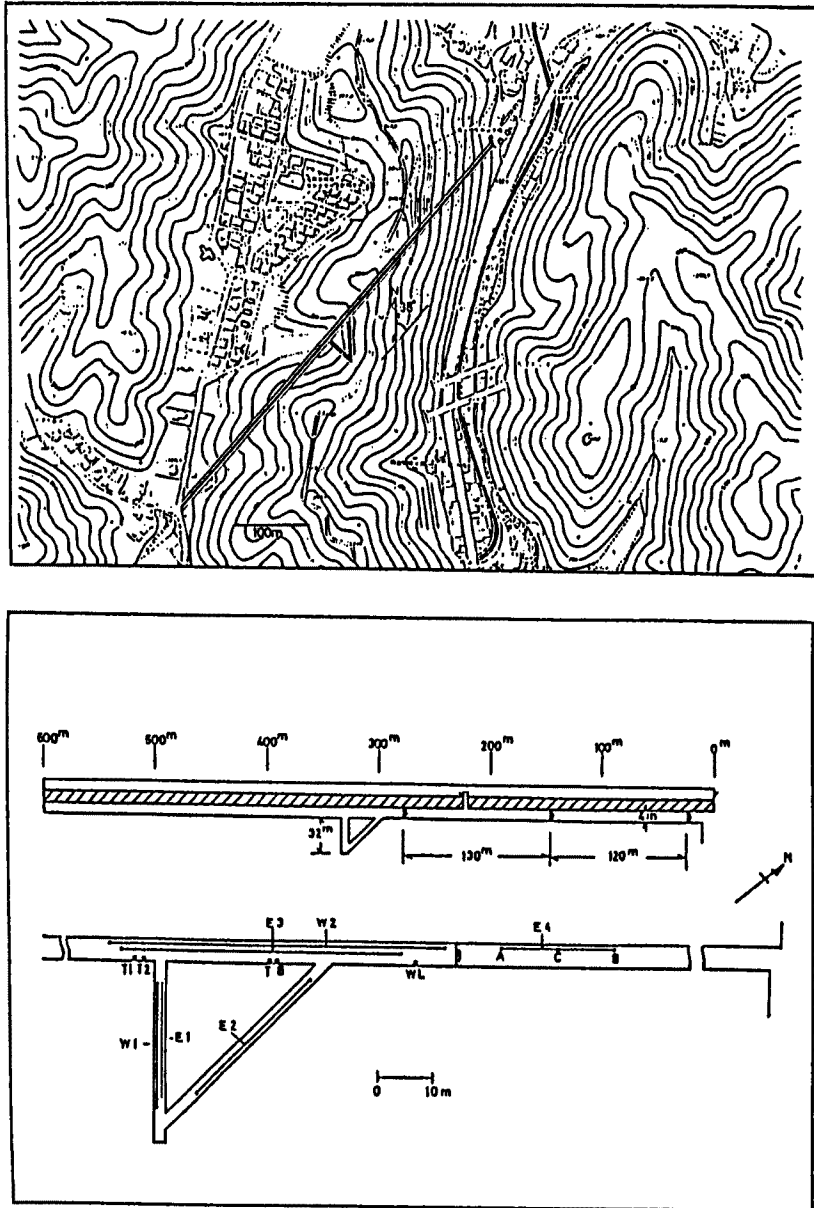


Fig. 1. Topography near the observation tunnel (upper) and locations of instruments in the observation tunnel (lower), WL: Well; E1, E2, E3, E4: Extensometers; T: Thermometer; B: Barometer.

をしている。地下水面が坑道床面より高いため、直径 20 cm のステンレス・パイプで約 220 cm かさ上げしている。平均的な水面の高さは床面より約 150 cm である。観測方式はフロートによる自記記録である。感度は 1/1 である。ステンレス・パイプには、セクション・ペーパーを貼り付け、カウンター・バランスの位置を記録紙取り換え時に記入することになっている。これによって、ドラム送りの故障や、インク切れ等による連続記録の方に欠測があっても、ほぼ 1 週間毎に、水位の変化を押えることができる (Photo 1)。

観測開始は 1976 年 12 月である。Fig. 2 に記録例を示す。記録例 a は、1987 年 11 月 17 日から 1987 年 12 月 1 日までのものであるが、記録紙取り換え時に、その時の時刻にかかわらず、記録紙の左端にペンをセットす

るようにしているの、記録紙に表示してある時刻と実際の時刻とは一致していない。この方法の方が時刻を押えるのには有利である。この記録例は降雨による影響を受けない時期のものであるが、このような静穏な時期には、水位計は日変化を記録する。記録例 **b** は1987年5月19日から1987年6月1日までのものであるが、5月13日から5月14日にかけて115 m/m、5月17日に35 m/m、5月22日から5月23日にかけて27 m/mの降雨があった時期のものである。降雨があった場合には、通常水位は上昇するが、上昇量は単純には降雨量には比例しない。矢印が付してあるところの急激な水位の上昇は地震時 ( $M=5.0$ ,  $\Delta=35$  km)の動きである。なおこれまで観測された地震時の動きは、発震機構にかかわらず、すべて水位は上昇している。

### 3. 日 変 化

Fig. 3 は、水位計の記録を58日間のフーリエ解析してみたものであるが、 $M_2$ 分潮と $S_2$ 分潮とがきれいに分離されていることがわかる。観測点から海岸線までの距離、潮汐ひずみに対する海洋潮汐の大きさ<sup>10)</sup>を考慮すると、水位計が記録している日変化は、地球潮汐変化であると考えられる。記録紙上にあらわれる、みかけの半日周期の振幅は0.5 cm~1.0 cmである。フーリエ解析から求めた $M_2$ 分潮の振幅は約0.1 cmである。この値は他で報告されている<sup>11)~13)</sup>値より小さい。地下水位の日変化に及ぼす気圧の影響については、台風の通過時などの急激な気圧変化の場合を除いて小さい。また温度による影響は、坑道内の温度の変化は小さいため、ほとんどあらわれない<sup>14)</sup>。次に地下水位に潮汐変化を生じさせる、メカニズムについてであるが、例えば体積変化型と圧力変化型とが考えられる (Fig. 4, a, b)。この2つのモデルは完全に独立なものではない<sup>13)</sup>が、**a**の場合、等価のタンクを考えたときのタンクのVolumeの問題になり、**b**の場合は被圧水を含む層の体積弾性率の問題となる。伸縮計から得られた平面歪を $3 \times 10^{-8}$ と仮定すれば、潮汐変化の振幅は約0.5 cmであるから、井戸の半径を10 cm、水の密度を $1 \text{ g/cm}^3$ とすれば、**a**では、 $5 \times 10^9 \text{ cm}^3$ の体積のタンクになり、その場合の半径Rは12 mであり、**b**では体積弾性率Eは $2 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$ になる。どちらのモデルがより現実的であるかは決定的にはわからないが、井戸は少なくとも岩盤の間を掘削しているわけで、**b**のモデルの方がより現実的であると考えられる。

### 4. 年 周 変 化

#### 4.1 降雨量との関係

Fig. 2の**b**にみられるように、地下水位は降雨により上昇するが、降雨量と地下水位の上昇の量とは単純には比例しない。Fig. 5は地下水位の日値と降雨量であるが、降雨があったにもかかわらず、ほとんど地下水位の上昇をみないことがある。地下水位の変化は、それ以前の降雨量によって規定されるようである。Fig. 5の**a**は積算降雨量であり、**b**は平均降雨量による積算値である。**a**と**b**との差をプロットしてみると、降雨量0の日もあるため、やや不自然だが、全体としてみると地下水位の変化とよく似た変化を示している。Fig. 6は同様のことを月間値でみたものである。1年毎に**a**と**b**の差を求めたため、経年的な変化は相異してくるが、年周変化については、比較的良好な変化を示している。地下水の変動を考えた場合、平均的

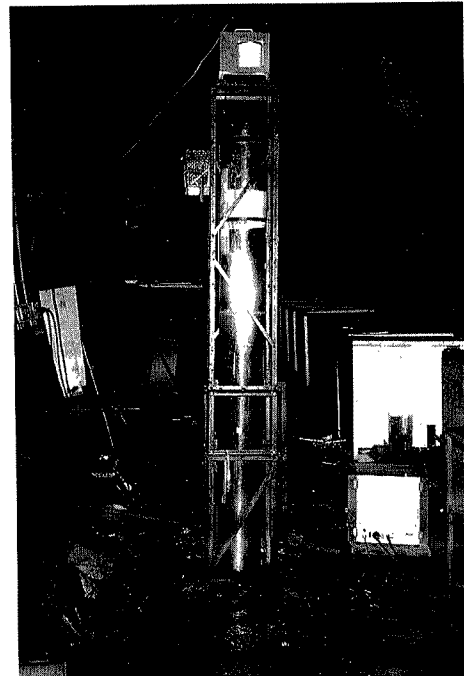
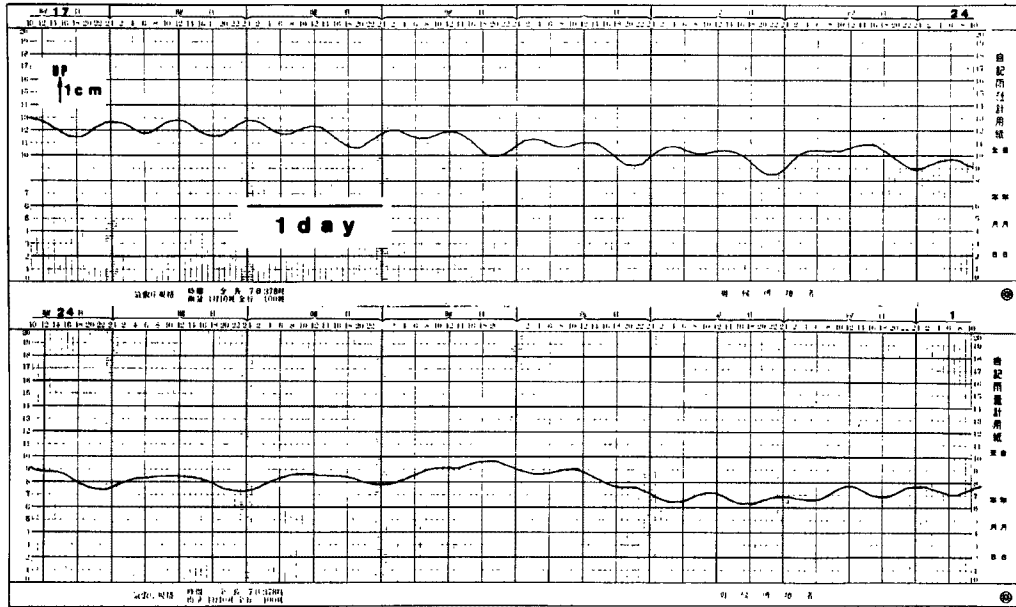
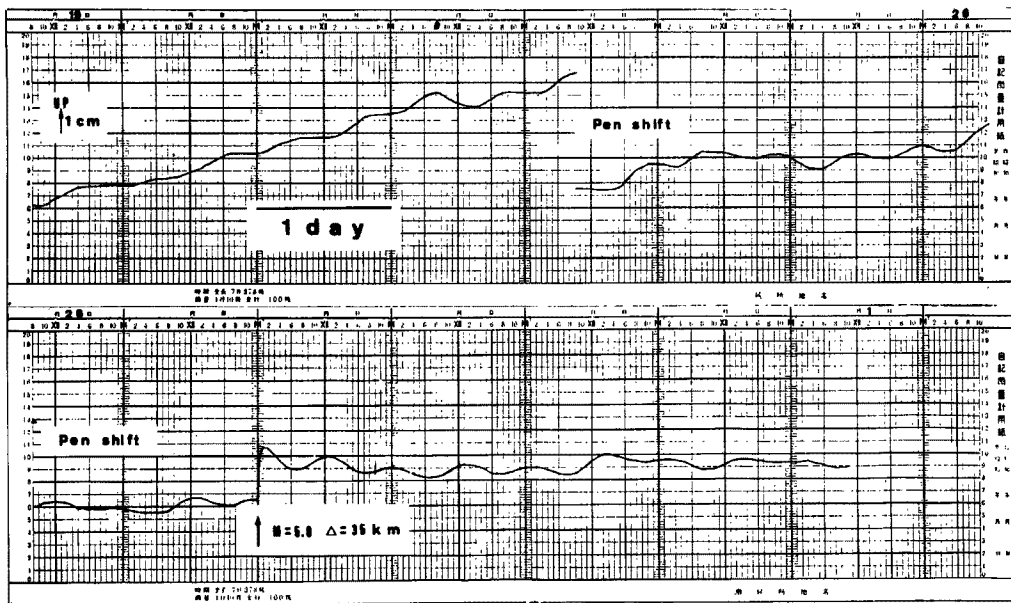


Photo. 1. Observation well.  
Depth from tunnel floor: 19 m.  
Height from tunnel floor: 2.2 m  
Mean level from tunnel floor: 1.5 m



a



b

Fig. 2. Examples of records. a: Records under calm condition. b: Record at the time of rainfall. Arrow indicates changes by earthquake ( $M=5.0 \Delta=35 \text{ km}$ ).

な流出量があると考えれば、bは流入量と流出量がつり合っている状態か、その差が一定である状態だと考えられ(平均的雨量が、平均的な流出量だと考えると)、aとbの差はそれからの偏差、すなわち供給過剰あるいは供給不足を示していると考えられる。それが地下水位の変化に反映するのではないかと考えられる。Fig. 6のaとbとの差の曲線は1ヶ月シフト(図では右に)させた方がより地下水位変化に似てくるようである。降雨による流入量の増減の時間的ずれを示すものであろう。10 cmの水位上昇には約100 mmの過剰雨量が対応している。このように細かい点を抜きにすれば、地下水位の年周変化は降雨量の変化によって説明できる。

4.2 ひずみ変化との関係

Fig. 7は、伸縮計E<sub>1</sub>による記録と地下水位記録の日値と、気圧、降雨量をプロットしたものであるが、伸縮変化と地下水位変化は非常によく似ている。これを見る限り、逢坂山のひずみの年周変化は、地下水位の年周変化によるものであると考えられる。Fig. 8は1980年10月1日から1981年8月31日までの伸縮計各成分の記録と地下水位記録とを比較したものであるが、地下水位の上昇に対して、伸縮計E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>は縮みを示すが、E<sub>1</sub>と直交する成分E<sub>3</sub>、E<sub>4</sub>

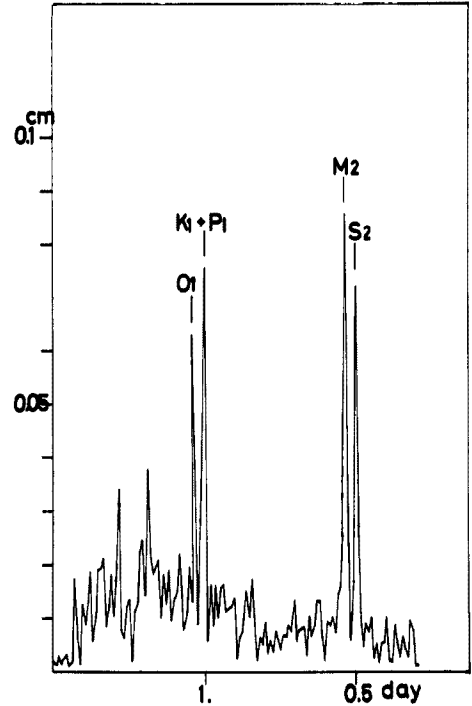


Fig. 3. Fourier spectra of records of groundwater level.

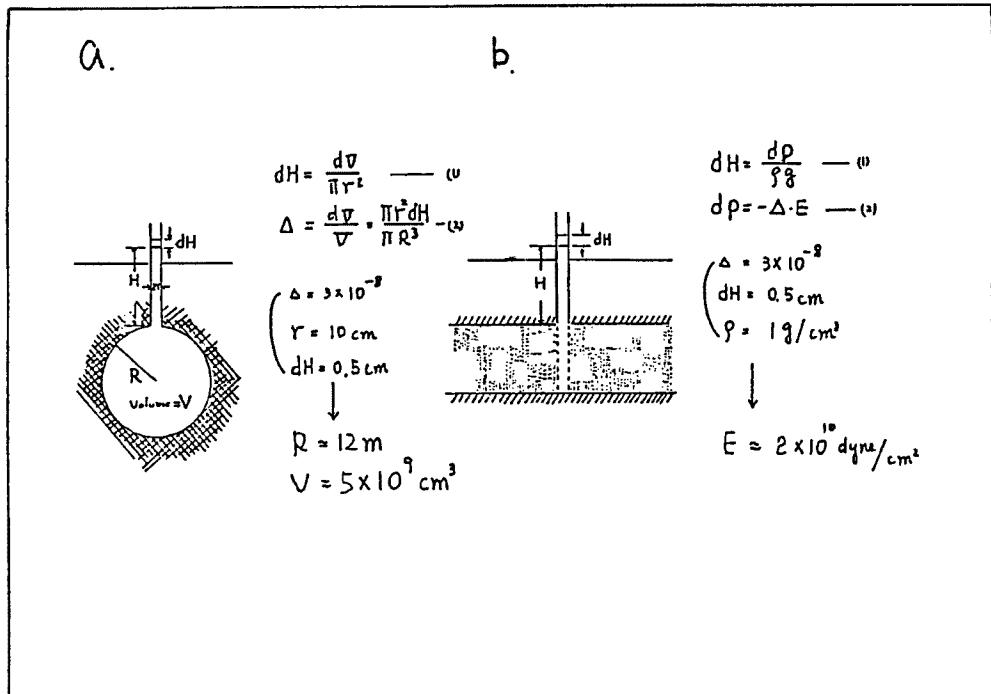


Fig. 4. Idealized models of the observation well.  
 a: Well ending a finite cavity.  
 b: Well drilled into a confined aquifer.

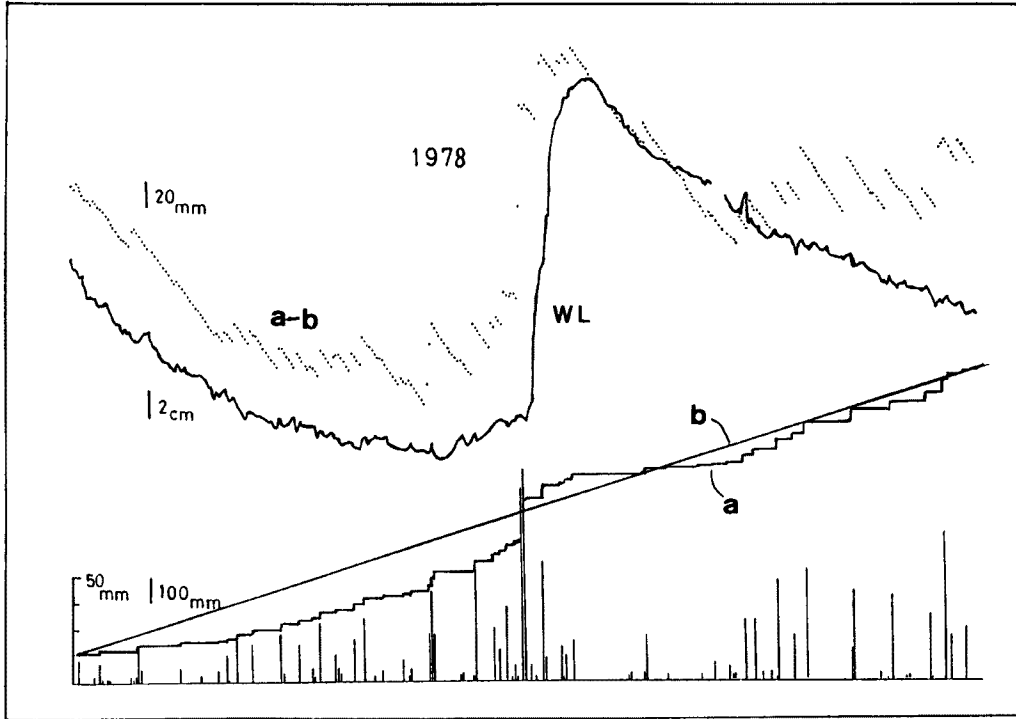


Fig. 5. Comparison between groundwater level changes and precipitation. **a**: Accumulated values of daily precipitation, **b**: Accumulated values of average rate of daily precipitation.

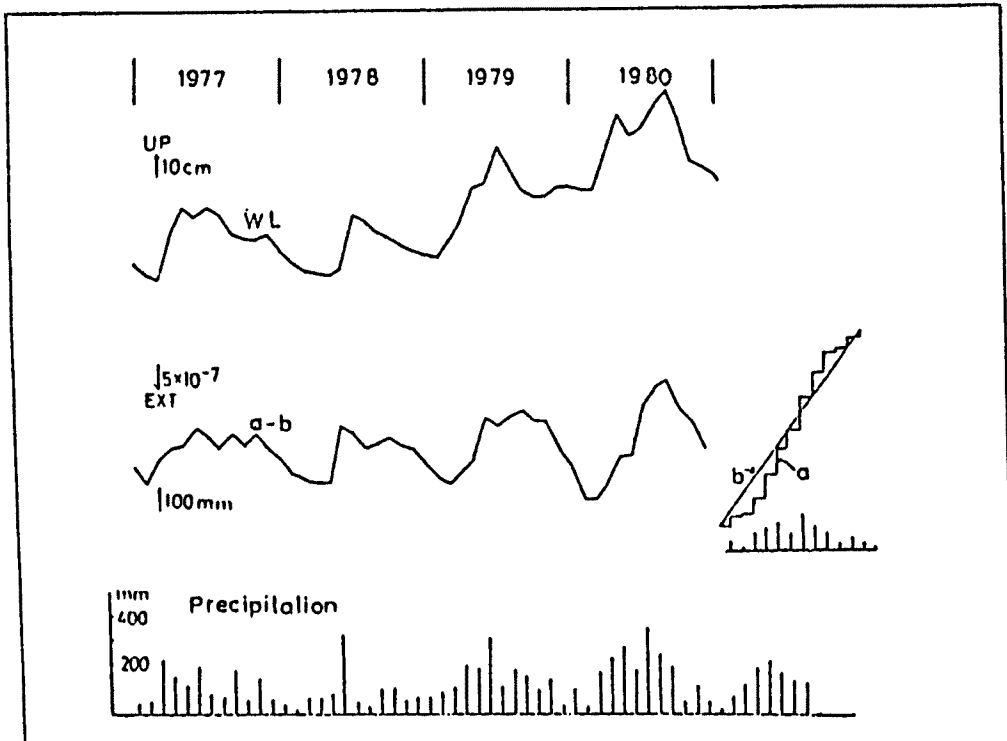


Fig. 6. Same as Fig. 5 represented by monthly values.

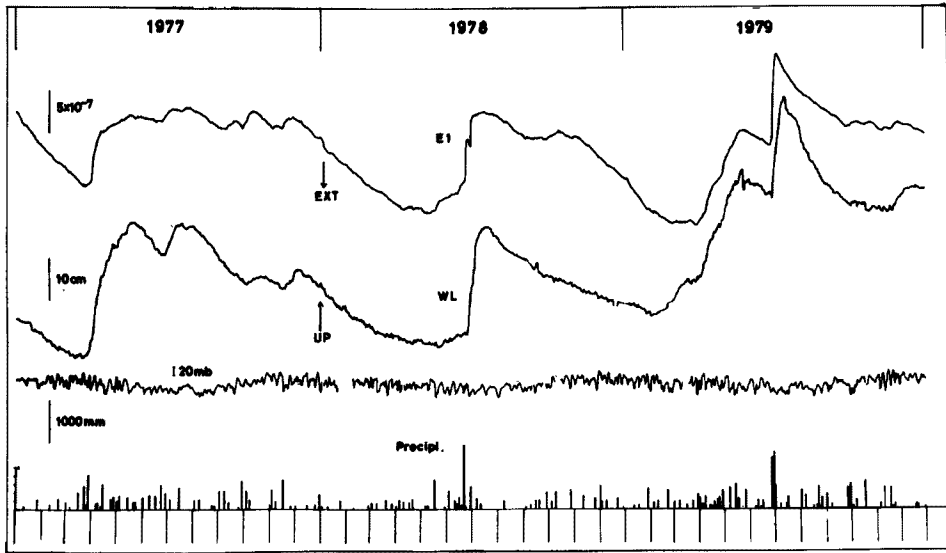


Fig. 7. Comparison between ground water level changes and strain changes, precipitation, barometric changes.

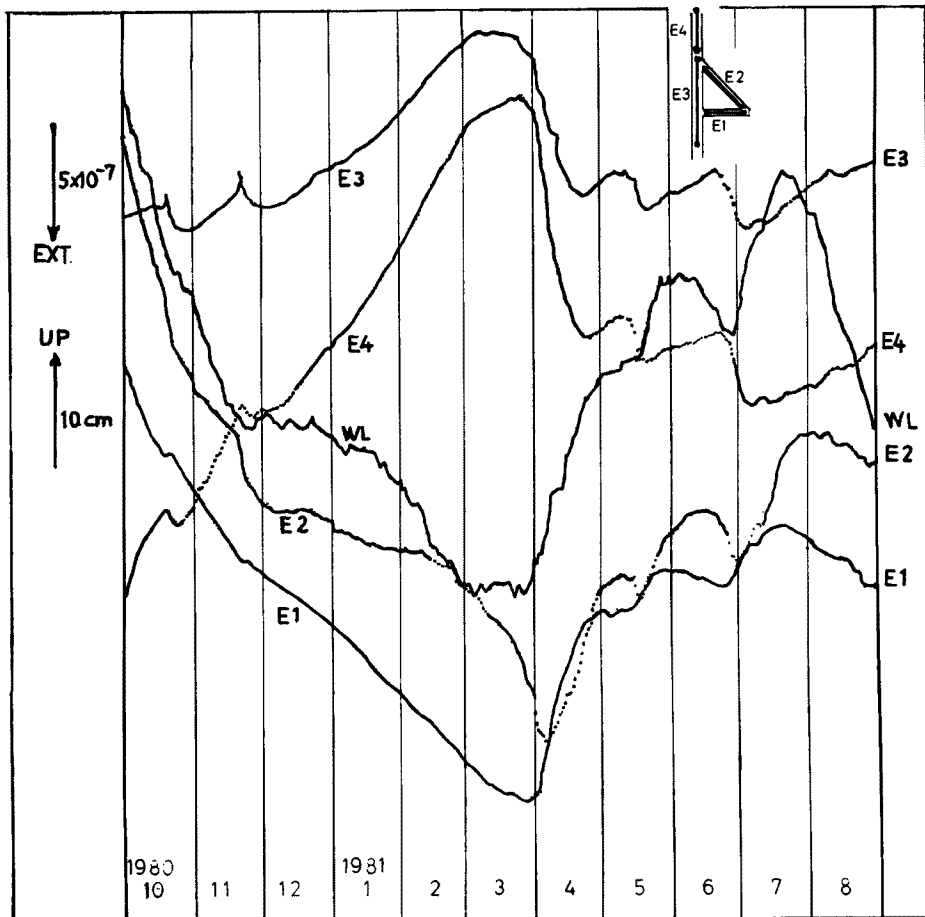


Fig. 8. Comparison between groundwater level changes and strain changes observed by each component extensometer.

は伸びを示す。

同一方向に約 20 m はなして設置した  $E_3$  と  $E_4$  は同じセンスで変化するが、変化量は  $E_4$  の方が大きい。**Fig. 8** にみられるように、地下水位の変化に対して各成分によって、伸び縮みのセンス及びひずみ量が違っている。これはどういう力が観測坑道に作用した場合に相当するかを検討してみた。**Fig. 9** は **Fig. 8** と同じ期間での地下水位変化と  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  の各成分の各10日間のひずみの差から求めた主軸の向きを示している。これをみると、地下水位の上昇・下降にともない主軸の向きが変化していることがわかる。地下水位の上昇時には主坑道とはほぼ直交する方向から圧縮力が加わっている場合と同等のひずみ変化を示す。そこで、水位の上昇によって、主坑道方向に直交する圧縮力が作用し得るかということになるが、逢坂山の場合、坑道内に井戸を掘削してみると、被圧水の水頭面が床面から平均 150 cm 高いところにあることからみて、この坑道近傍は岩盤のフィシャーを通して上ってきた水でみたさされていると考えられる。坑道は一種の水抜きになっていると考えられる。**Fig. 10** は観測坑道の断面と地下水圧面を模式的に描いたものであるが、この地下水圧面が降雨によってもたらされる圧力の増加によって上昇すれば、主坑道に直交する圧縮力が作用すると考えられる。この場合、 $E_3$  は伸び、 $E_1$ ,  $E_2$  は縮みを示す。次に分枝坑道の影響を考えてみると、ひずみ変化に主として効いているのは、スケールの大きい主坑道によるものであるが、分枝坑道の掘削の影響も無視できず、圧縮力の向きが、主坑道と完全に直交しない（約  $15^\circ$  の角度をもつ）のも、 $E_3$  と  $E_4$  のひずみの大きさの相違もそのためだと考えられる。分枝坑道が存在するため、等水圧面が **Fig. 10** の b のようになっていると考えれば、定性的には各成分の変化の違いを説明できる。

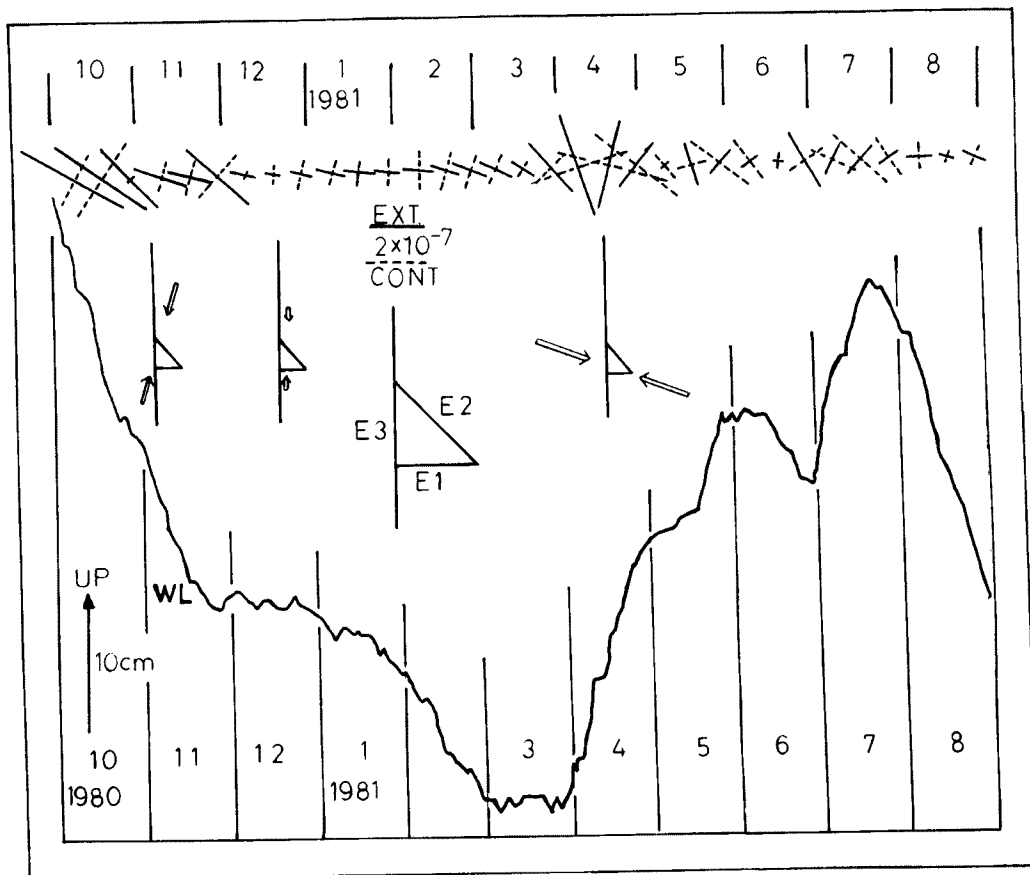


Fig. 9. Groundwater level changes and time variations of principal strains.



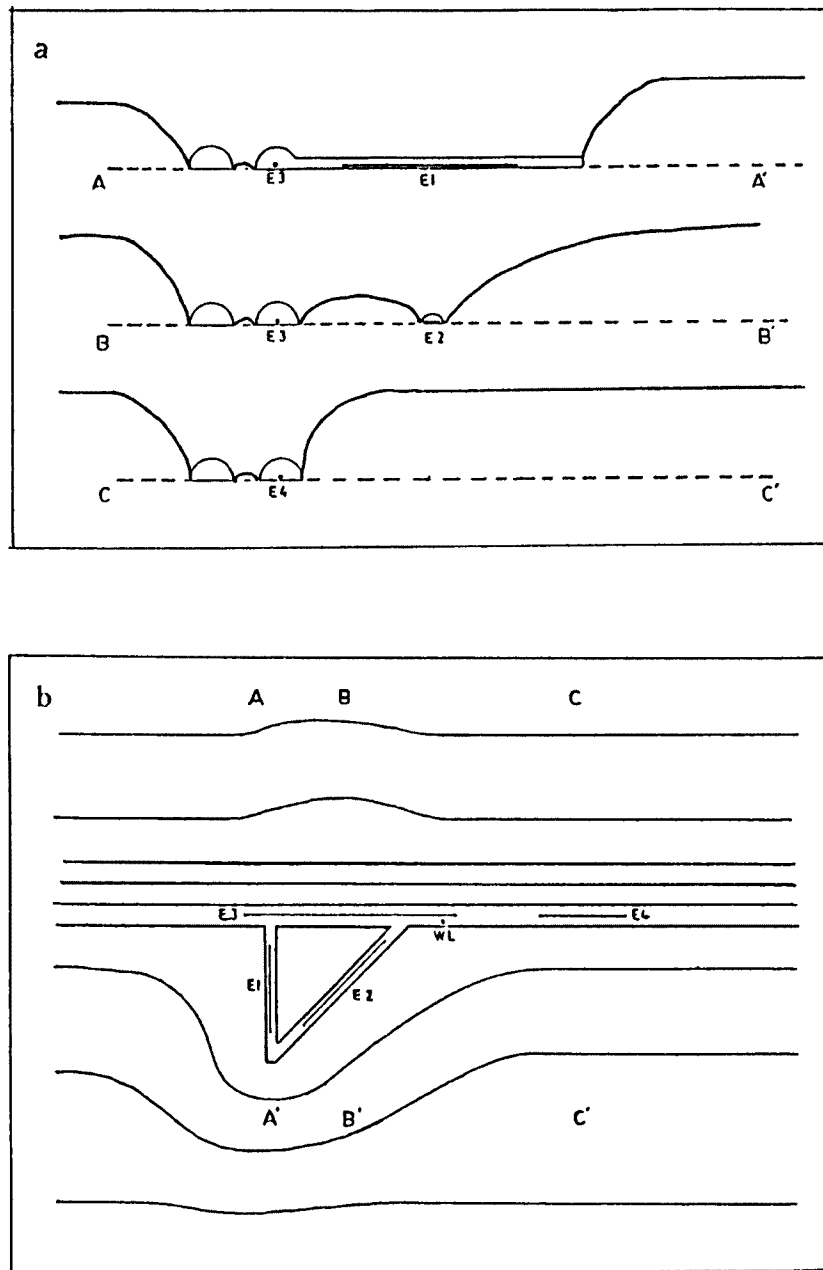


Fig. 10. Upper: Cross sectional views of the observation tunnel and exaggerated drawdown curve of groundwater level around the tunnel. Lower: Contour lines of groundwater level around the tunnel.

## 5. おわりに

以上みてきたように、逢坂山の場合、ひずみ観測にあらわれる年周変化は、地下水位の変化にともなう観測坑道と直交する方向に作用する圧縮力の変化によるものであることがわかった。そして、その地下水位の変化は、基本的には降雨による地下水の増減によって規定されるものと考えられる。一方地下水の出入をそう考えなくてもよいと思われる日変化ぐらいの周期変化については、地下水位計は潮汐変化を記録する。こ

の潮汐変化については、地下水位の変化と伸縮計各成分の変化はほとんど位相を同じくしている。したがって潮汐ポテンシャルに対しては、伸縮計と地下水位計は互いに独立なセンサーとして働いていると考えられる。このことからみても、地下水位の変化は単に降雨による地下水の増減による変化のみを反映しているのではなく、観測点周辺に働く Tectonic な力をも反映している可能性は十分にある。その意味で地下水位の連続観測は、他の地殻変動連続観測の擾乱源としての降雨の単なる Indicator というのではなく、それ自身立派な地殻変動の有力な観測手段と考えられる。

特に、山の被りがすでにある水平坑道内に掘削した井戸を用いた観測の場合、圧力変化に敏感な被圧水の変化を観測できるため有利である。

観測開始以来、逢坂山の周辺で発生した地震時、あるいは地震前後の地下水位の変動については、検討を加えて、又別に報告したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 山内常生・志和龍一・飯田汲事：地殻変動の連続記録に現われる降雨によるノイズについて，測地学会誌，16，(1970)，pp. 202-208.
- 2) 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司：秋田地殻変動観測所における地殻変動連続観測(2)―降雨による地殻ひずみについて―，同上，19，(1973)，pp. 135-144.
- 3) 田中寅夫：傾斜計・伸縮計記録に現われる降雨の影響とそのシミュレーション，同上，25，(1979)，pp. 91-100.
- 4) 志和龍一・岡田義光：抗内における歪観測，同上，25，(1979)，pp. 101-134.
- 5) 高田理夫・古沢 保・竹本修三・山田 勝：降雨及び湧水量変化の地殻ひずみの観測に及ぼす影響について―岩倉観測室の場合―，京大防災研年報，第24号 B-1，(1981)，pp. 71-76.
- 6) 尾池和夫・志和龍一・浅田 敏：中国における地震予知. 地震Ⅱ，28，(1975)，pp. 75-94.
- 7) 岡田義光・渡辺 茂：富士川観測所における地殻変動連続観測(2)，測地学会誌，22，(1976)，pp. 77-93.
- 8) 山口林造・小高俊一：1978年伊豆大島近海地震の前兆―伊豆船原，柿木における地下水位の変化―，地震研究所彙報，53，(1978)，pp. 841-854.
- 9) 梅田康弘・山崎純一：阿武山における地殻変動の連続観測(1972-1977)，測地学会誌，24，(1978)，pp. 153-162.
- 10) 橋田匡邦・重富國宏：逢坂山地殻変動観測所における潮汐ひずみの地形による影響，同上，27，(1981)，pp. 11-22.
- 11) Todd, D. K : Ground Water Hydrology, Jhon Wiley and Sons, Inc, 1959, pp. 149-176.
- 12) Melchior, P : The Earth Tide, Pergamon press, 1966, pp. 274-283.
- 13) Bredehoeft, J. D : Response of Well-Aquifer Systems to Earth Tides, JGR, Vol. 72, No. 12, 1967, pp. 3075-3087.
- 14) 橋田匡邦・重富國宏：材質の異なる基準尺を用いた伸縮計の比較観測，測地学会誌，30，(1984)，pp. 264-273.