

汲水による地盤のひずみの観測

小 沢 泉 夫

OBSERVATIONS OF GROUND STRAINS CAUSED BY PERIODIC WATER DRAWINGS

By *Izuo OZAWA*

Synopsis

The observations of the ground strains caused by the periodic water-drawings have been performed by means of the horizontal and the vertical components of the extensometers, rotationmeter, water-tube tiltmeter and pendulum type tiltmeters at Osakayama Observatory since July 1964. According to these observations, the radial component of this strain is much larger than the transverse, vertical, tilting and subsidencial components. The former component has a simple shape and little phase lag refer to the water-drawing. The effects are negligible in the secular change of the ground strains.

1. 序

地下水、石油、天然ガスなどの汲み上げによって地盤がどんな変化をするかということは公害防止の見地から見て必要にして興味のある研究課題であるばかりでなく、自然現象の中にも汲水による地盤の変動をモデルとして研究してもよいものがたくさん考えられる。逢坂山観測所では1964年7月12日から観測所の近くに掘られた養魚用水用の井戸のポンプ汲水の開始によってたまたま周期的な汲水による地盤のひずみに及ぼす影響を観測せざるを得なくなったのでこの問題を研究して今日に至った。従来汲水による地盤のひずみは主として沈下の研究で、主に沈下計、水準儀、時として傾斜計によるものであったけれども¹⁾、逢坂山は地殻変動の観測所で水平成分のひずみ計すなわち伸縮計が問題の井戸の方向に直線状に配列²⁾されていたので、さらに観測点をより近く、より遠くに増設して井戸からのいろいろな距離における直線ひずみの状態をしらべた。

2. 観 測

短周期の変化—逢坂山観測所には明治9年と明治30年に掘られた長さ 676 m と 665 m の2本の旧鉄道トンネルがある。このトンネルは多くのトンネルのように等高線とほぼ直角の方向に掘られている。この地方の地盤は秩父古生層に属する粘板岩と頁岩の錯そうした地層から成立しているといわれ、風化層の厚さも可成り厚いようである。このトンネルの大江入口（大谷入口は付近の谷とともに完全に埋め立てられている）からトンネルの延長線上 94 m の所に養魚用水用のポンプ井戸が掘られ、平常約30分ごとに約7分を要して1トンの水が衝撃的に汲み上げられている。この井戸の位置の選定は恐らくトンネルが掘られてから約90年の経過により、このトンネルの入口付近には地下水が集中して来ているのであろうと予想して掘られたものであろう。この井戸の深さは 45 m で、土質は風化土と井戸屋から報告されている。

著者はこの井戸での汲水の影響を研究するために伸縮計、水平成分、5成分12台、垂直成分3台、水管傾斜計1台、水平振子型傾斜計3成分5台、回転ひずみ計1台を合計12カ所に置いて観測した。これらの計測器の規格、性能、井戸からの設置位置などを Table 1 に示す^{3), 4), 5)}。地下水の汲み上げは1964年7月12日から始められ、初めのうちは約40分から1時間ごとに行なわれたが、数ヶ月後には約30分ごとに汲み上げら

Table 1 Constants and settings of the instruments.

Sign	Direction of observation.	Type of instrument.	Distant from well.	Sensitivity.	Speed of recording.
W ₂	S 38° W extension	Sassa-type	137 m	$3.0 \times 10^{-8}/\text{mm}$	27 cm/day
T ₁₃₇	S 38° W tilt	horizontal pendulum	137 m	0.011"/mm	27 cm/day
W.T.	S 38° W tilt	water-tube	170-230 m	$0.00173''/\text{mm}$ $0.63 \times 10^{-8}\text{cm}/\text{mm}$	36 cm/day
V ₅	vertical extension	V-59-D-type	210 m	$0.97 \times 10^{-8}/\text{mm}$	4 cm/day 2 mm/min.
R ₂	S 38° W extension	pivot-type	220 m	$1.25 \times 10^{-8}/\text{mm}$	4 cm/day
L ₃	S 38° W extension	H-59-B-type	264 m	$0.145 \times 10^{-8}/\text{mm}$	33.1cm/day
N ₃	north extension	H-59-B-type	264 m	0.266- $1.03 \times 10^{-8}/\text{mm}$	27 cm/day
E ₃	east extension	H-59-B-type	264 m	$0.283 \times 10^{-8}/\text{mm}$	4 cm/day
V ₃	vertical extension	V-59-B-type	264 m	$0.458 \times 10^{-9}/\text{mm}$	27 cm/day
C ₁	S 52° E extension	H-59-B-type	334 m	0.0323- $0.0562 \times 10^{-8}/\text{mm}$	42.4cm/day
L _{3'}	S 38° W extension	H-59-B-type	398 m	$0.0459 \times 10^{-8}/\text{mm}$	36 cm/day
W ₁	S 38° W extension	Sassa-type	468 m	$1.20 \times 10^{-8}/\text{mm}$	4 cm/day
R ₁	S 38° W extension	roller-type	468 m	$1.30 \times 10^{-8}/\text{mm}$	4 cm/day
L ₄	S 38° W extension	H-59-D-type	505 m	0.0345- $0.683 \times 10^{-8}/\text{mm}$	42.4 cm/day
L ₂	S 38° W extension	H-59-B-type	606 m	$0.209 \times 10^{-8}/\text{mm}$	10.4 cm/day
R ₀	$\frac{\partial U}{\partial X} S 52^\circ E$ $\frac{\partial U}{\partial X} S 38^\circ E$	Rotationmeter	220 m	$1.2 \times 10/\text{mm}$	4 cm/day

れるようになった。Fig. 1 に観測所付近の地図を、Photo. 1 にトンネルの入口付近と井戸のある小屋の写真を示す。また、Fig. 2 (a, b, c, d, e, f, g, h, i) に汲水が行われたときの地盤のひずみ、傾斜変化水平回転ひずみの変化などの観測記象を示す。たとえば井戸から 142 m と 246 m とにある直線ひずみの S 38° W 方向 (トンネルの方向) の成分の記象を見ると分かるように汲水をしている 7 分間はほとんど直線状に土地はトンネル方向に伸び汲水が終るとすぐ指数曲線状に約 20 分を要してもとのひずみの状態に戻る。幸いにしてつぎの汲水までに土地はもとの状態に戻っているように思われる。142 m (W₂) と 264 m (L₂) の地点との間に影響の位相のずれは 0.55 分以上の量は見出されない。それ以上短い時間については不明である。さらに遠い S 38° W 方向の成分、398 m 地点の L_{3'}、505 m 地点の L₄ では影響の形は近距離で



Fig. 1 Map of the adjacent of Osakayama Observatory.
⊙ is position of the well.

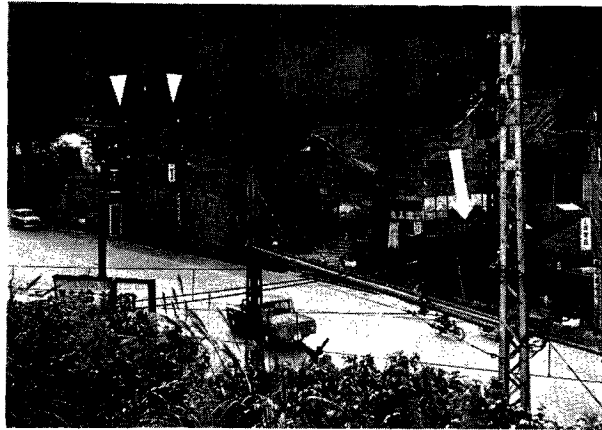


Photo. 1 Doors of Osakayama observatory and the well hut.
▽ are the doors, ⇩ is the well hut.

は鋸歯型であるのに対してサイン曲線型と崩れてきている。その影響の大きさは L_3' で $1.8 \sim 2.0 \times 10^{-9}$, L_4 で 4×10^{-11} である。 W_2 , L_3 と L_3' , L_4 との地点の間, 約 300 m の地点には優勢な漏水帯があるが, 恐らくこの漏水帯より近い所と遠い所とで影響の形を異にさせているように思われる。なお 468 m 地点の W_1 , R_1 は計器の感度の関係でそれらしい変化は確認されない。また, 606 m 地点の L_2 には遠距離であることと他の不規則変化のためにこの影響は見出し難い。264 m 地点の N_3 -成分は $S 38^\circ W$ とよく似た鋸歯の型をしており E_3 -成分は変化がほとんど認められず, 垂直成分 (V_3) も同じように汲水時に伸びの変化を示している。しかし同じ垂直成分 V_5 もそうであるように波形は水平成分に較べると著しく変形しているようである。300 m の漏水帯を越えた 334 m 地点の $S 52^\circ E$ 方向の直線ひずみ (トンネル方向に直角) C_1 は充分高感度であるがそれらしい明瞭な影響は認め難く, あったにしてもその波形は著しく不規則なものになっているようである。また 137 m 地点のトンネル方向の傾斜計 (水平振子型) には 2×10^{-3} 秒以上のそれらしい変化は認められず, 水平の直線ひずみの変化の明瞭であるのに対して対称的であった。ただ間けつ

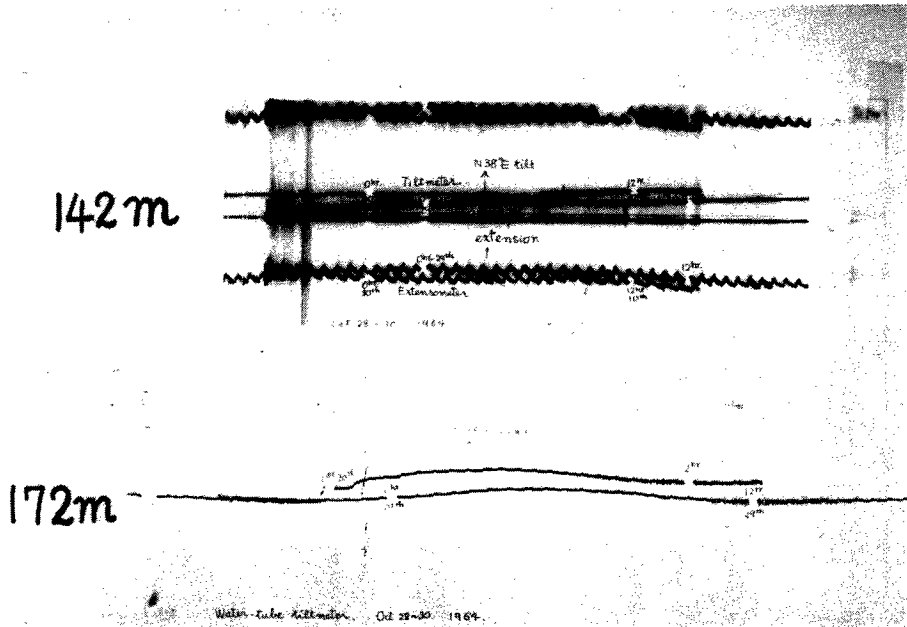
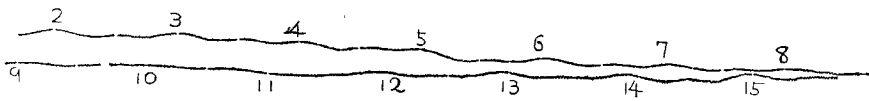


Fig. 2 (a) Uppers are the records of the extensometer, W_2 (upper and lower curves) in the $S 38^\circ W$ direction, and lower is the record of the water-tube tiltmeter in the $S 38^\circ W$ direction.



R2 ext. Feb. 1~15, 1969

Fig. 2 (b) Record of the extensometer, R_2 in the direction $S 38^\circ W$.

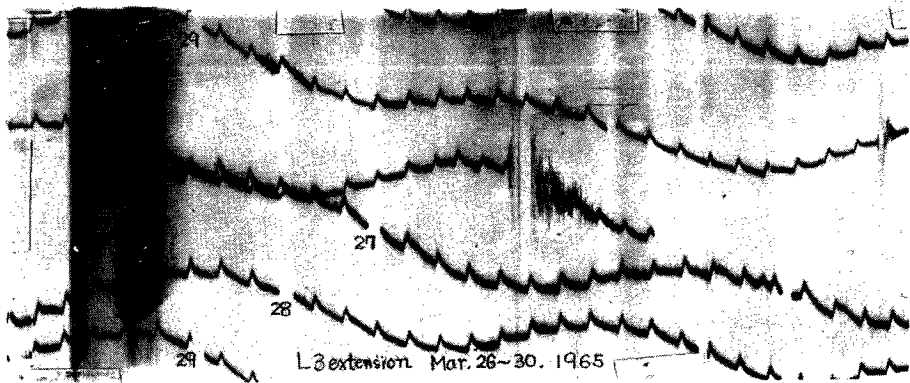


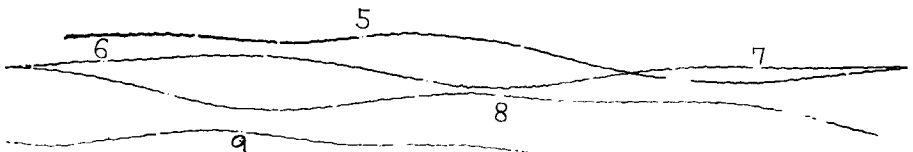
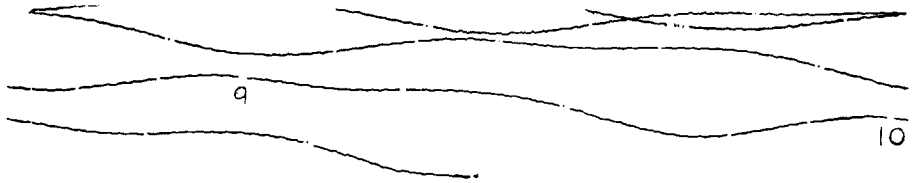
Fig. 2 (c) Record of the extensometer, L_3 in the direction $S 38^\circ W$. This record write an after shock of the Aleutian earthquake whose magnitude is 7.0.



L3' Jun.28~Jul.6 1965



Fig. 2 (d) Record of the extensometer, L_3 in the direction S 38°W.



L4 Aug 4~10 1969 S38°W ext.

Fig. 2 (e) Record of the extensometer, L_4 in the direction of S 38°W.



C1 Aug 4~10 1964 S52°E ext.



Fig. 2 (f) Record of the extensometer, C_1 in the direction of S 52°E.

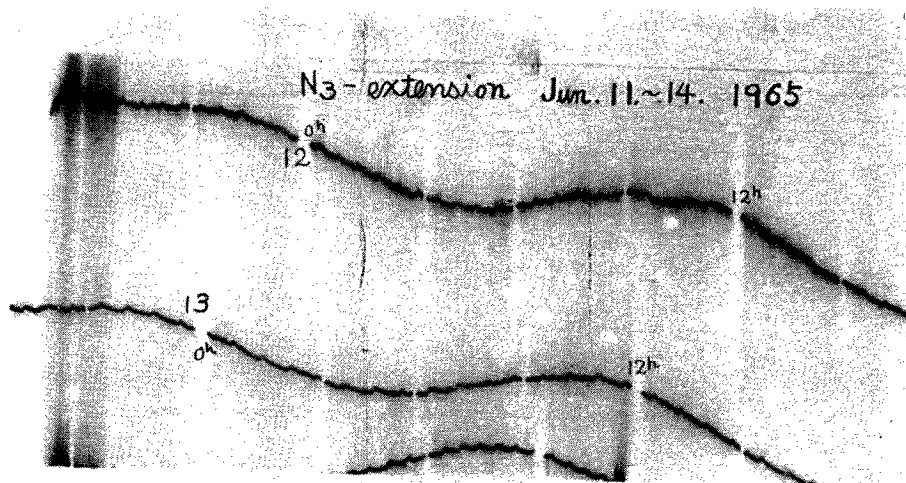


Fig. 2 (g) Record of the extensometer, N_3 in the direction of North.

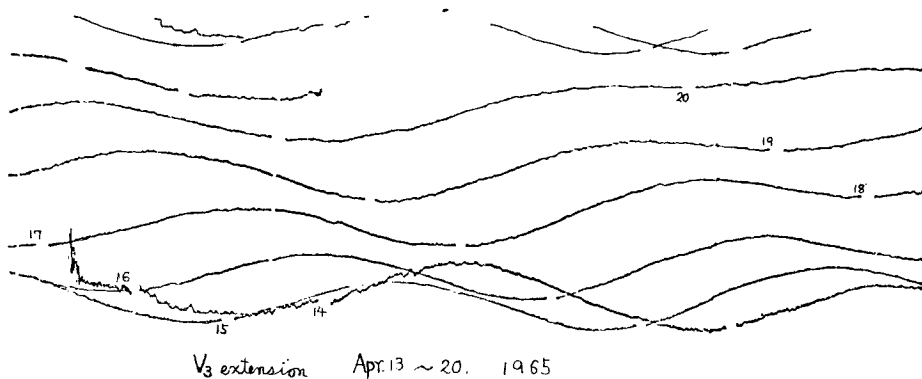


Fig. 2 (h) Record of the extensometer V_3 in the direction of vertical.



R_0 Oct. 19 ~ Nov. 2 1968 OSAKAYAMA

Fig. 2 (i) Record of the rotationmeter R_0 component

的な階段状変化が認められる程度であった。また平均 172 m 地点の水管傾斜計は水管傾斜計の基線長 60 m の間に井戸に近い方が 10^{-6} cm 程度の相対沈下を示すのが観測される。この変化も汲み上げ時刻との間に 0.5 分以上位相の遅れは見出されない。また汲水の影響の回復に要する時間は 20 分程度と推定される。このことは恐らく後に述べる長周期の変化にたいして影響を及ぼさなかったぎょう幸的汲水間隔であったことであろう。これらの影響をまとめて Table 2 に示す。

Table 2 Observed changes caused by the water-drawing.

Sign of component	Observed change	Evaluated rigidity
T_{137}	$10^{-3''}$	$>2.4 \times 10^8$
W_2	5.0×10^{-8}	1.0×10^8
W.T.	2.5×10^{-6} cm*	0.92×10^{11}
L_3	$3.0-2.0 \times 10^{-9}$	0.7×10^9
V_3	$-0.057-0.066 \times 10^{-8}$	10^9
R_2	$0.37-0.50 \times 10^{-8}$	10^9
N_3	1.03×10^{-9}	10^9
E_3	0.28×10^{-9}	10^9
C_1	0.3×10^{-9}	10^9
L'_3	$0.32-0.34 \times 10^{-9}$	10^9
L_4	$0.041-0.055 \times 10^{-9}$	10^{10}

* is relative subsidence

3. 短周期変化に対する考察

今モデルの相違による相違までの議論は後に譲ることとし、簡単のために半径 a なる球状の空洞内の静水圧 P が汲水によって消滅したことによって生ずる半無限弾性体の変形は、球の中心の深さを h 、観測点の座標を井戸に原点を持ち z 軸を鉛直下方にとった円柱座標 r, θ, z の変位の成分 u_r, u_θ, u_z は⁶⁾ 剛生率を μ とすると

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{C}{2\mu} \left\{ \frac{r}{[r^2 + (h-z)^2]^{3/2}} + \frac{(3-4\sigma)r}{[r^2 + (h+z)^2]^{3/2}} - \frac{6zr(h+z)}{[r^2 + (h+z)^2]^{5/2}} \right\}, \\ u_\theta &= 0, \\ u_z &= \frac{C}{2\mu} \left\{ \frac{h-z}{[r^2 + (h-z)^2]^{3/2}} + \frac{(3-4\sigma)(h+z) - 2z}{[r^2 + (h+z)^2]^{3/2}} + \frac{6z(h+z)^2}{[r^2 + (h+z)^2]^{5/2}} \right\}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $C = \frac{1}{3}Ph^3$, σ はポアソン比

と求められている。いま $\sigma = 0.25$ と仮定して、地表におけるひずみの成分 $e_{rr}, e_{\theta\theta}, e_{zz}$ を求めると、

$$\left. \begin{aligned} e_{rr} &= \frac{C}{2\mu} \left\{ \frac{3h^2 - 5r^2}{(r^2 + h^2)^{5/2}} \right\}, \\ e_{\theta\theta} &= \frac{3}{2} \frac{C}{\mu} \frac{1}{(r^2 + h^2)^{3/2}}, \\ e_{zz} &= \frac{C}{2\mu} \frac{2h^2 - r^2}{(r^2 + h^2)^{5/2}}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

また動径方向の傾斜成分 t_r は

$$t_r = \frac{-9C}{2\mu} \cdot \frac{hr}{(r^2 + h^2)^{5/2}}, \dots\dots\dots(3)$$

となる。

現実の水源の形は3軸楕円体で垂直には最も短いものであろうから傾斜と垂直ひずみはより小さいものが期待されよう。また半無限遠体なら全体に小さいひずみが計算されよう。いま

$$P=45 \text{ m} \times 980 \text{ dyn} \times 1 \text{ g/cm}^3,$$

$$\frac{3}{4} \pi a^3 = 10^6 \text{ cm}^3,$$

と仮定し、(2)式と(3)式を用いて、各観測点にあたる r と観測されたひずみを用いてこれに応ずる剛性率 μ のオーダーを推算して Table 2 に示した。これによると W_2, T_{137} では μ は 10^8 , W.T. で 0.92×10^{11} , L_3 で 10^9 , L_3', L_4' で 10^{10} というように非常に小さい値として求められた。これは恐らくトンネルが等高線に直角に古くから掘られているためにトンネルの真下附近に地下水脈が集中し汲み上げによる水圧の変化が観測点の近くに及んでいるためであろう。また規則的な変化はトンネルの方向では遠くまで及んでいたがそれと 42° の角度をなす東西方向、直角の方向では極めて小さかった。このようなことから考えるとこの地域の地盤を構成する粘板岩の堆積状態が瓦屋根のような構造となっており、その重なりあっている主傾斜の方向には伸縮は容易であるがそれに直角な方向にはほとんど変化は起らず、起こったとしても2次の不規則なものになってしまうものであろう。このことは傾斜変化の影響、ことに水平振子型傾斜計のように極小区域で観測したとき、が小さいこと、垂直ひずみに対する影響が不規則になりやすいことなどの理由ともなるのであろう。

さらに Table 2 に示した観測された直線ひずみと井戸からの距離との関係を Fig. 3 に示した。井戸からの距離の方向すなわち $S38^\circ W$ 方向の直線ひずみ W_2, R_2, L_3, L_3', L_4 はほぼ一つの直線の上に乗せられるようである。この直線は変化するひずみを y , 井戸からの距離 r をメートルであらわすとごく大まかな計算では

$$\log_{10} y = 5.60 - 5.89 \log_{10} r$$

となり変化するひずみは井戸からの距離の約6乗に反比例する。半無限遠体で一様な媒質のときは、(2)式

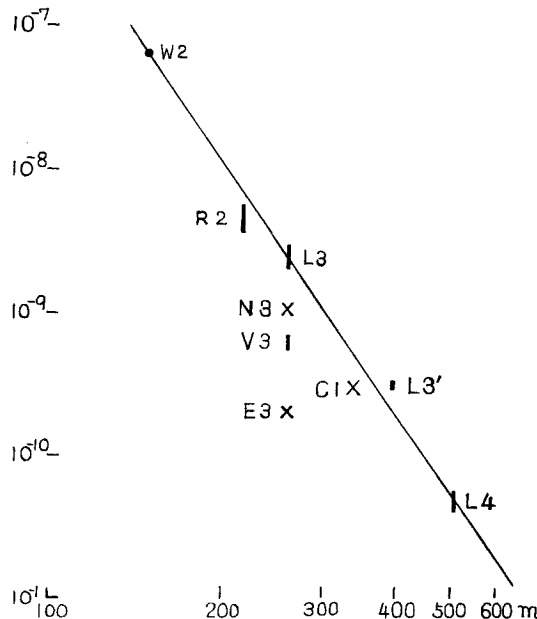


Fig. 3 Relations between affected linear strains by water-drawing and their distance from the well.

によると距離の3乗に反比例するが6乗であるのは深さと共に弾性常数が増大するためであろう。また垂直ひずみ (V_3), 距離に直角あるいは斜めの方向のひずみ (C_1, E_3, N_3) が直線より小さい領域に入っている。これは垂直成分では定性的には(2)式と一致する方向にある。しかし距離の方向とある角度をなす水平の方向や傾斜変化の小さいことは(2)式だけでは説明できない。また、この場合距離の方向には収縮になる所は観測されなかった。

同様な型の変化を他の場所で探した結果 E_1, N_1 (ともに 380 m の地点) を $1 \times 10^{-9}/\text{mm}$ 程度の感度にしたとき Fig. 4 (a) に示されるように E_1 は極めて小さい 10^{-10} のオーダーの階段状曲線の系列として記

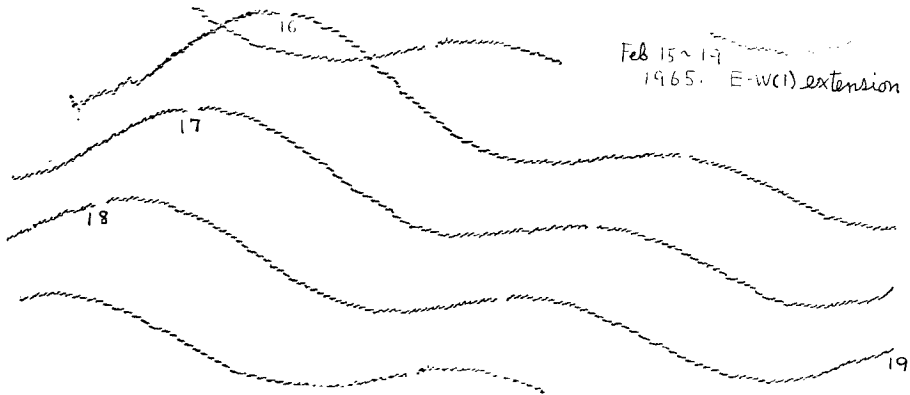


Fig. 4 (a) Record of the extensometer, E_1 in the direction of the east at Osakayama.

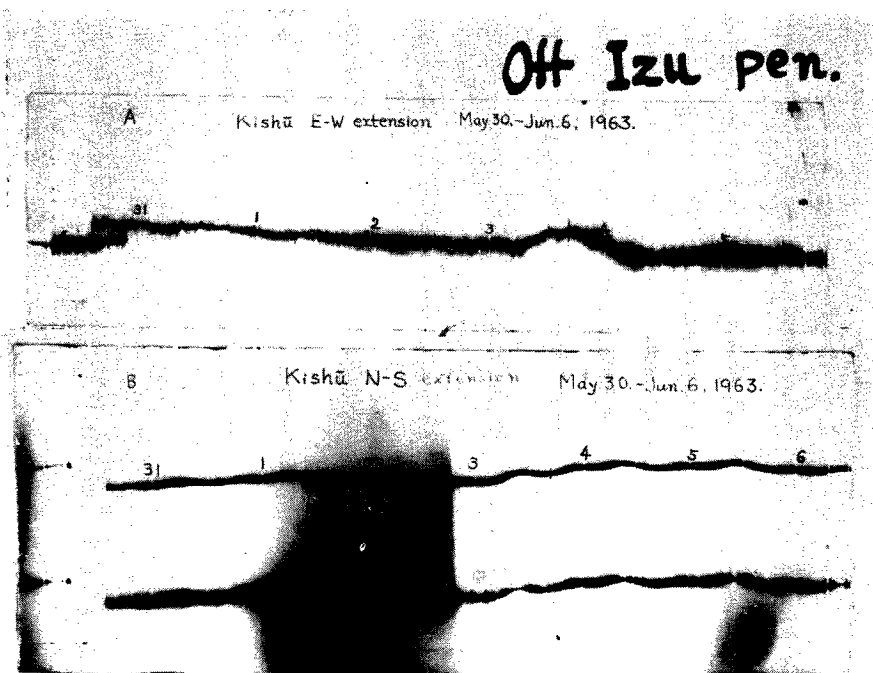


Fig. 4 (b) Records of the extensometers in the directions of the east and the north at Kishu Mine.

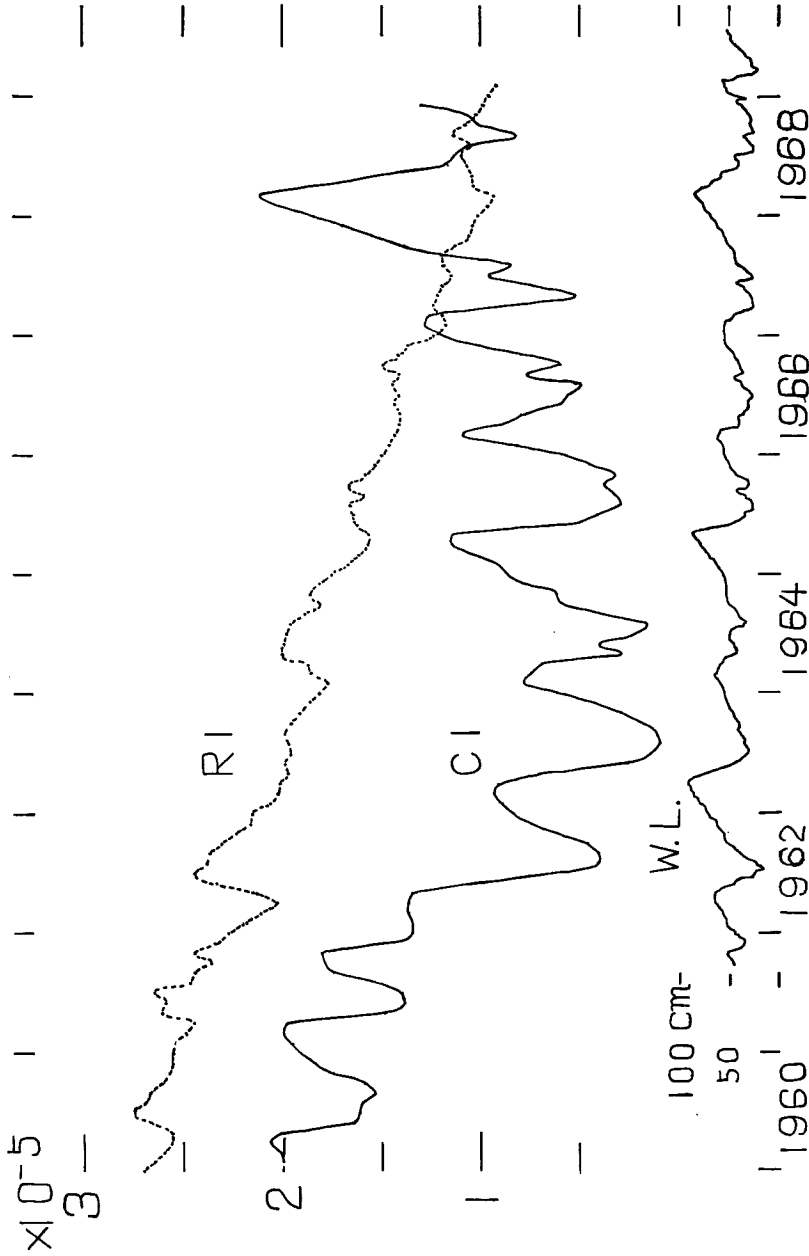


Fig. 5 Observed curves of the extensions in the direction S 38° W (R1) and in that of S 52° E (C1), and that of water level(W.L.).

録された、これに直角方向の N_1 は 10^{-8} のオーダーの不規則変化は多くあらわれるが $10^{-9} \sim 10^{-10}$ の不連続変化は記録されなかった。 E_1 の階段状曲線の原因はいま議論している問題の井戸以外の場所の汲水あるいは漏水の影響とも考えられるかもしれない、また観測し得る滑らかな曲線の極限とも考えられる。

Fig. 4 (b) は紀州鉾山の坑道内で観測した E 方向 N と方向との直線ひずみの記象を示す。N 方向は滑らかな変化を示しているのに対して E 方向は極めて不規則な変化を示している。ついでに数日あるいは数10日に及ぶ長い期間の変化について見ると短周期の場合とは逆に N の変化は大きく E の変化は小さい。このことは逢坂山の E_1 と N_1 、 E_3 と N_3 についても言えることである。

4. 観測一長周期の変動

地下水の汲み上げは長期の地盤沈下をもたらすことは周知のことであるけれども 1 日約50トンの汲水が果して地殻の長期変動の観測にどの程度の影響をどの位の範囲に及ぼすかを検討して見た。いくつかの例として、ほぼ等高線に直角なトンネル方向の直線ひずみ、 R_1 、とこれに直角な $S 52^\circ E$ 方向の直線ひずみ、 C_1 、と垂直方向の直線ひずみ、 V_3 、および井戸から 244 m、トンネル入口を入れて 160 m の地点にある深さ 6 m の井戸にたまっている水の床から面までの深さとを Fig. 5 に示した。Fig. 5 によると C_1 、 R_1 、はともに1964年頃から現在まで経年変化の方向は R_1 は収縮速度がやや増大する方向に、 C_1 は収縮から伸長の方向に転じている。この変化は正確には1963年から始まっており、井戸が掘られ汲水の始まる前の年から始まっている。トンネル内の井戸の水面の深さの変化と C_1 の伸長と R_1 の収縮とは全くよくそれらの位相も振幅と一致しており、これら相互の相関は極めて高い。地下水位の変化は土地のひずみの変化と関係が極めて深いことが明瞭に示される。ついでながら地下水位の変化は土地のひずみの変化に影響を与えるということに留まるのみであるということは断言できない。深層地下水の変化は地盤変動、また地下の岩石の破壊に発展し、小地震の誘発の契機となることも当然考えられる。Fig. 5 で著るしい変化は1967年から1968年にかけての異常変化で、1968年は京都市周辺に群発地震のあった年であった。結論としては1日50トン程度の汲水は 250 m 以上離れた地域の長期変動を変えるほどの影響を与えなかったことである。ここで一考したいことは汲水は約30分ごとに繰返し行なわれており、1回の汲水の影響は25分余りであって、汲水の影響が完全になくなってからつぎの汲水が行なわれていたために汲水は長期の地盤の変動に影響を残さなかったのであろう。逆に汲水側の立場からすれば前の汲水の影響が残っているうちにつぎの汲水をすれば地下水位は次第に低下して行きついには井戸は干上ってしまうのであろうから浅層地下水の汲上げに関する限りは地盤の長期の変動を与えることはないであろう。

5. 要 約

逢坂山地殻変動観測所の近くで開始された地下水の汲上げの影響がどの位の距離まで地盤のひずみに影響を及ぼすかについて、伸縮計の配列観測及び水管傾斜計、ローテーションメーターなどの観測を行なって、短周期の変化と長周期の変化とについてしらべた。井戸からの距離の方向の直線ひずみの成分の変化は短周期のものは井戸水を汲み上げるとほとんど同時に現われ変化の形も単純で、井戸から 505 m 離れた所でも 10^{-11} の伸びの変化が認められ、その変化量は井戸からの距離の 5.9 乗に反比例していた。この影響は地殻変動、地球潮汐の観測には大きな障害を与えなかったが大地震による土地のひずみ振動の観測、地震発生に関連する微小変化の観測にはその対策に苦しむ影響を残した。また距離（動径）方向の成分は 334 m 以上の距離ではその影響が複雑な形になったためか明瞭な変化は認められない。また、垂直方向のひずみ、沈下、傾斜変化は水平ひずみへの影響に較べて非常に小さかった。水平の回転ひずみには比較的大きな影響が認められた。

長周期の変化は1963年から大きな変動が始まっているがこれは今問題にしている井戸が掘られる以前のことと汲水の影響があるとすれば、1964年7月から始まる変化は認められなかった。これは問題の井戸が深さ

が 45 m で浅層の井戸であること、また汲上げ間隔は 1 回の汲水の影響が消える時間より長時間であったためであろう。

これに似た変化を逢坂山の他の場所、紀州鉾山の観測についてしらべた結果は、これらの変化はある特定の方向に顕著で、この方向と直角の方向にはほとんど現われないことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 細山謙之輔：地下水揚水による土地傾動，地震，第 2 輯，第 5 卷，(1952)，第 3 号，pp.101~108.
- 2) 小沢泉夫：地殻変動の近距離多点観測 (第 2 報)，京都大学防災研究所年報，第 11 号 A (1968)，pp. 229~238.
- 3) 小沢泉夫：高感度伸縮計と地殻のひずみの Array 観測，材料，第 17 卷，第 181 号，(1968)，939~944.
- 4) 江頭庸夫：自記水管傾斜計，京都大学防災研究所年報，第 8 号，(1965)，pp. 59~69.
- 5) 小沢泉夫：回転ひずみ計の試作と潮汐剪断ひずみの観測，測地学会誌，第 12 卷，第 1 号 (1966)，pp. 12~17.
- 6) McCann G.D. and C.H. Wilts: San Pedro 地区—Long Beach における地盤沈下の数学的解析，速水頌一郎訳，大阪府土木部港湾課出版，(1954)，pp. 1~110.