

# 京都市および上和知地震前後の地殻のひずみの観測

小 沢 泉 夫

## OBSERVATIONS OF CRUSTAL DEFORMATIONS IN THE PERIODS OF THE EARTHQUAKES AT KAMI-WACHI AND KYOTO CITY

By *Izuo OZAWA*

### Synopsis

There were about twenty sensible earthquakes felt around Kyoto City in a month after August 18, 1968. At these days, speed changes of tiltings and extendings of the crust at Osakayama were observed since march, 1968. Furthermore, the forerunners seemed to appear about half a day and half an hour before both remarkable earthquakes. Especially, the forerunner in half an hour before the earthquake at Kyoto City was a simple expansion.

The radii of these seismic origins, the rebounded energies and the seismic magnitudes of these earthquakes were also calculated by means of the abrupt changes in the crustal strain during these earthquakes.

### 1. 序

地殻変動の連続観測で地震の前駆現象が報告された例は多く、その総合報告には西村英一<sup>1)</sup>の傾斜計によるもの、小沢泉夫<sup>2),3)</sup>の地殻変動連続観測全般についてのものがある。また外国でも P. Caloi<sup>4)</sup>の傾斜計によるものなどがある。

水準測量の繰り返しや、時には肉眼でも海岸や活断層で大地震の前に地殻変動があったと報告されたことがある。一部には地殻変動は地震の後続現象として起こるもので、上記のような前駆現象は大地震の前に前震があってその前震の後続現象（アフターワーキング）であるという説もある。この考えは究極では地震動と地殻変動とは同一のもので大きな加速度を伴う大地震はしばしば加速度が極めて小さい変位の極めて大きい地震を伴うものであるという別の表現を使ったということに過ぎない。

西村英一<sup>5)</sup>は1960年の大台原地震のとき半径 100 km 以内にある近畿 6 点の観測所で0.5秒から数秒に及ぶ異常傾斜のあったことを報告している。この研究は大きな組織的な努力の成果であった。しかしなおわれわれの現有の知識では未解決の謎で満たされている。さらに西村英一もこの問題にふれたことのある R. Tomaschek<sup>6)</sup>の最遠距離地震の前駆現象に至ってはざん新な説であるが、その疑問は益々大きくなるばかりである。近年著者の研究<sup>8)</sup>と類を同じくする F. Press<sup>7)</sup>の研究は西村、Tomaschekの研究に歩みよりを見せたとはいえなお焼石に水の効果を与えたに過ぎない。

近年の力学—光学的地殻変動観測計器は高速度の変化でないかぎりその特性は満足できる状態になっている。しかし遺憾なことにその多くは取扱が充分でなく、また熟練した研究者が観測の第一線から退いてしまい、数多くの好機を逃している。見掛上古典的に見える器械もこれに代わるべき自動的な計器が完全に活用される迄はそのつなぎの使命を果さねばなるまい。

著者は幸いにして1968年8月18日の上和知および8月27日の京都市内の地震の際震央の至近距離（震源の

深さよりも小さい)でその前後の地殻のひずみを組織的に観測することができたのでこの論文でこの研究を報告したい。

## 2. 観 測

逢坂山観測所は東経 $135^{\circ}51.5'$ 、北緯 $34^{\circ}59.6'$ にあって一方が小丘で完全に閉ざされた全長675および664 mの主坑道のほかに2本のトンネルを継ぐ2本の副坑道を持っている。観測所が設けられたのは1947年9月でその後年と共に設備を増大し、現在は長いトンネルを利用して、 $S38^{\circ}W$ 方向に水平と垂直の配列観測を、NとE方向に水平配列観測、 $S38^{\circ}W$ 方向に傾斜のWとN成分の配列観測を行なっている。

Fig. 1に配列観測の始められた1960年以降の観測の中の $S38^{\circ}W$ 方向の成分の中の $L_1$ (H-59-B型伸縮計)、 $S52^{\circ}E$ 方向成分の $C_1$ (H-59-B型伸縮計)、N方向の中の $N_1$ (H-59-C型伸縮計)で観測した伸びの成分の永年変化曲線と、自記水管傾斜計Wtで観測した $N38^{\circ}E$ 方向の傾斜の永年変化曲線とを示す。この図からは $L_2$ には1964年初期から、 $N_1$ には1962年の初期から、 $C_1$ には1964年から大きな異常と思われる変化があるが、この論文の主題との関連は分らない。しかしこれらの曲線のいずれもが1967年からその平均的永年変化が減少している。なお自記水管傾斜計には $-0.7''/\text{year}$ に相当する水漏れがあったので、図の曲線に対しては $+0.7''/\text{year}$ の補正をするのが適当である。

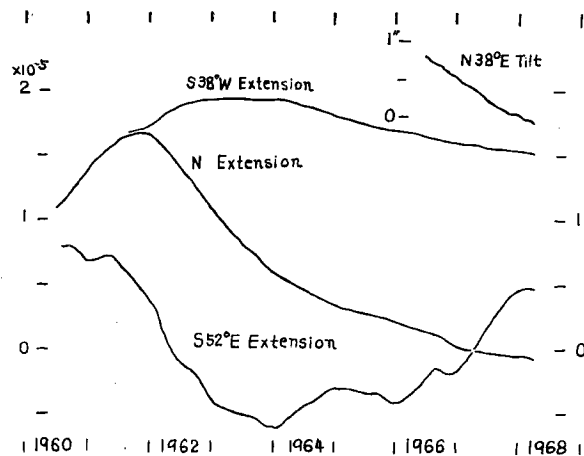


Fig. 1 Secular changes of tilting in  $N38^{\circ}W$ , and of extensions in  $S38^{\circ}W$ , in  $S52^{\circ}E$  and in the north at Osakayama.

Fig. 2はWt,  $L_2$ ,  $C_1$ ,  $N_1$ の経日変化曲線とトンネル内にある井戸水の水位の経過変化線と、京都気象台における日降水量とを示す。降水量が大きいとき伸びおよび傾斜曲線は旬日の異常を示すがこれらは間もなく大半は回復しているようにも思われる。もし近年に異常を求めるとすれば、それは1968年3月からの傾斜、ひずみともに大きな異常である。この異常と降水量との関係はと求めても、1967年10月27日と28日に合計95.2mmの降雨があって以来4月末まで3日間の合計降水量が34mm以上になったことはなかった。また逢坂山には長期の積雪はないから雪解けということも考えられない。ただ坑内にある井戸の水位の上昇が3月頃から大きくなっていった。総水量に変化がなく地層が収縮すれば空隙率は減少するので長期にわたって水位の上昇が当然起こる。Fig. 2は $N_1$ ,  $S52^{\circ}E$ の大きな縮みから地層体積の収縮は明瞭である。このことはよく水位上昇の原因をよく説明している。

その後7月2日に114.5mmの降雨があり、7月には総計275.5mmの降雨があって、傾斜、伸縮の両方に旬日大きい影響が現われたが、これらの影響も真夏のことで7月下旬には回復あるいは回復に転じた。

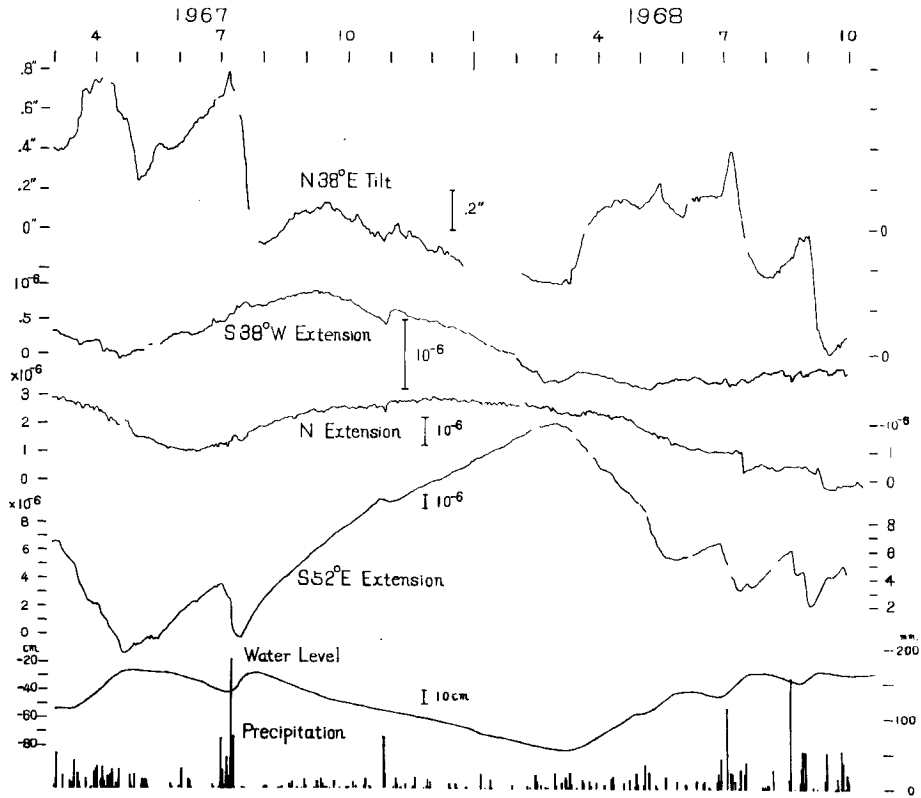


Fig. 2 Observed curves of daily values of tilt in N 38° E, of extensions in S 38° W, in S 52° E and in the north, of level of ground water, and of precipitation at Osakayama.

8月18日に昨夜半来の雷雨(総降水量 172.0 mm)の最もげしかった頃、18日午前1時頃から異常な土地の伸縮と傾斜とが観測され始め、ことにトンネルの中央部、地表から最も深い部分の最も堅固な岩盤の上へすえつけられた伸縮計 L<sub>4</sub> (S38°W 成分、全長 34 m) は平常は平坦な潮汐変化を記録していたのが  $10^{-6}$  に及ぶ伸長を示し、その伸びの進行時速は  $35 \times 10^{-8}$  にも達した。このような異常変化は地表から深い所ほど大きい傾向を示した。この異常が始まって後13時間たった16時12分に上和知(震央 135.4°E, 35.3°N,  $h=20$  km)で顕著地震が起こり、逢坂山では震度3、(舞鶴では震度4)であった。なおこの震央距離は 54 km と求められる。これから相継いで有感地震が起こり、1ヶ月の間に震度3が2回、震度2が6回、有感地震の合計が20回に及んだ。この中で大きかったのは上記のものと同様と8月27日21時58分に京都市内稍々北部の地震(135.78°E, 35.03°N,  $h=10$  km)であった。このときの震度は3で、奈良、大阪でも3と報告された。この地震の P-S 時は京都大学地球物理学教室で1.4秒、京都気象台で1.7秒で水平動成分では P 波は S 波に較べて非常に小さく、震央は地球物理教室より極く僅か西北西で震源の深さは約 10 km と推定される。なお8月25日から27日迄の総降水量は 91.5 mm であった。またこの地震は直後に震度2の地震1回と震度1の地震1回とを伴った。27日には地震発生約9時間前の13時頃から異常ひずみと異常傾斜が始まった。さらに地震発生約30分前からどの方向の伸縮計も伸びの異常変化を示した。これらの地震の前後の観測記録を Fig. 3 (a), (b), (c), (d), (e) Photo. 1 (a), (b) に示す。まず地震発生の日前後に始まった変化について述べると、8月18日の変化は18日午前1時頃から突然始まった。Fig. 3 (a) で示すように

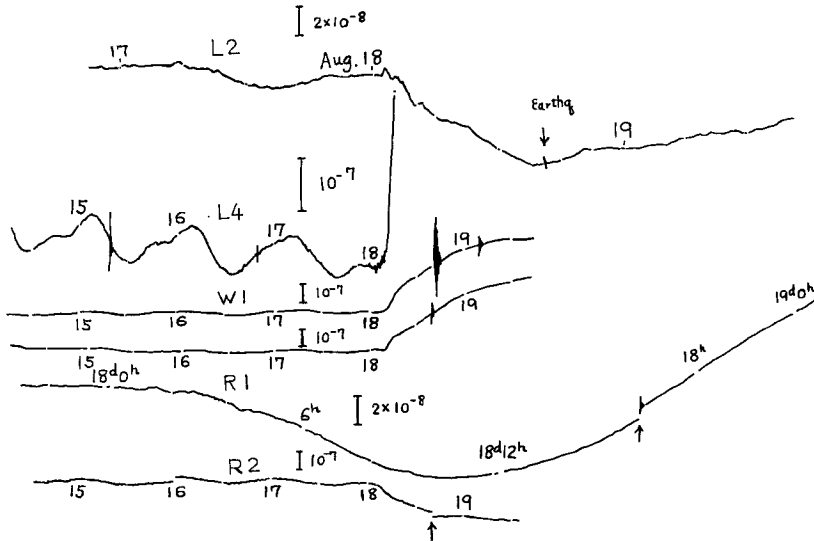


Fig. 3(a) Extension curves in S 38° W on an array observation before and after the earthquake at Kamiwachi.

S38°W 方向では長さ350mの配列線の南西端から順に北東に L<sub>2</sub>, L<sub>4</sub>, R<sub>1</sub> (ローラー型伸縮計), W<sub>1</sub> (佐々式伸縮計), L<sub>3</sub> (H-59-B 型伸縮計), R<sub>2</sub> (ジボット型伸縮計) と配列してある。L<sub>2</sub> は1時から突然縮みの異常が始まり、地震の起こる1時間程前から伸びに転じた。約 100 m 離れた所にある L<sub>4</sub> は前に述べたように3時頃から急速度で伸び始めた。W<sub>1</sub> と R<sub>1</sub> は同じ場所にあるのでその変化はほとんど同じで2時頃から伸び始め地震後も約20時間伸び続けた。L<sub>3</sub> は1時頃から収縮し始め10時頃から伸びに転じ地震後も約1日伸び続けた。R<sub>2</sub> は L<sub>2</sub> と似た変化で1時頃から収縮し始め地震発生の際にはその伸び縮みの変化はなくなっていた。また R<sub>2</sub> は他の成分は地震の時僅が伸びているのとは反対に可成りの収縮を示した。また長さ約140 m の配列観測をしている E と N 方向の観測では Fig. 3 (b) に示すように N<sub>1</sub>, N<sub>3</sub> (H-59-B 型伸縮計) とともに1時頃から伸びの異常を示し始め、N<sub>1</sub> は10時頃に伸びの極大となり、翌19日10時頃から約半日でもとの状態に戻った。N<sub>3</sub> は地震のとき収縮を示したが地震後も伸びが進行した。E<sub>1</sub> (H-59-C 型伸縮計), E<sub>3</sub> (H-59-B 型伸縮計) はともに1時頃から急速度の収縮を示していた。また長さ約 30 m 配列観測をしている垂直成分伸縮計 V<sub>3</sub> (V-59-B 型), V<sub>5</sub> (V-59-D 型) は Fig. 3 (b) に示すようにともに1時頃から約3時間急な収縮を示し、その後急に伸びの変化に転じこの変化は地震の起こるときまで続いた。また S52°E 方向の伸縮計 C<sub>1</sub> は Fig. 3 (c) に示すように2時頃から急速に収縮し始め地震後もしばらく縮み続けた。また廻転わずみ計は1時頃から3~4時間急速に異常を示し地震の発生する頃には回復に転じており18日中にその異常は回復した。上述のように S38°W 方向の伸縮は両端の L<sub>2</sub> と R<sub>2</sub> は同様な収縮異常を示し、中央部は大きな伸びの異常を示した。すなわち約 400 m の波長のしわ状の変化を示したことが分かる。また傾斜変化は長さ 340 m の配列線上の3点ともに18時1~3時頃から南東方向の急速な傾斜が始まり地震後もその変化は約1日続いた。この異常傾斜量は地震の起こる迄に0.4~0.5秒に達した。

京都市の地震では前駆的異常の継続時間は上和知の時より短く、地震発生の際9時間前から始まり、ほぼ類似の変化が認められた。異っていることは地震の起こる9時間前の変化の始まった27日13時頃より以前、すなわち26日2時、あるいは25日20時頃から既に異常らしいもの始まりこれらいくつも重畳しているようである。ことに著しいことは地震発生の際40~30分前に急にどの方向の成分も伸びの変化を示し始めたこと

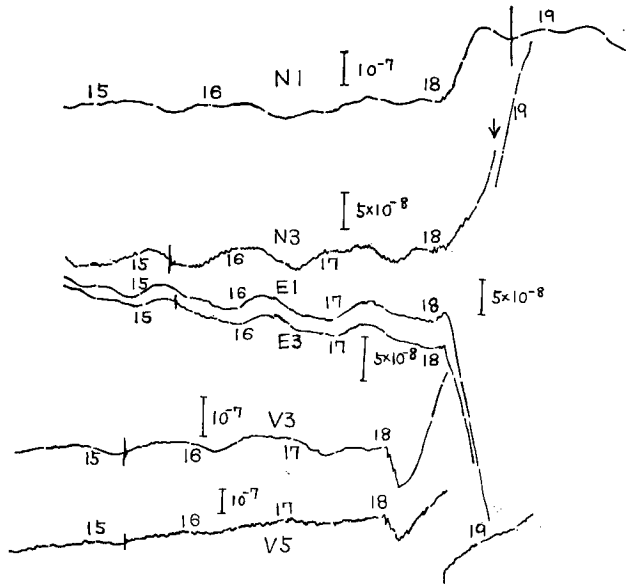


Fig. 3(b) Extension curves in the north, in the east and in the vertical before and after the earthquake at Kamiwachi.

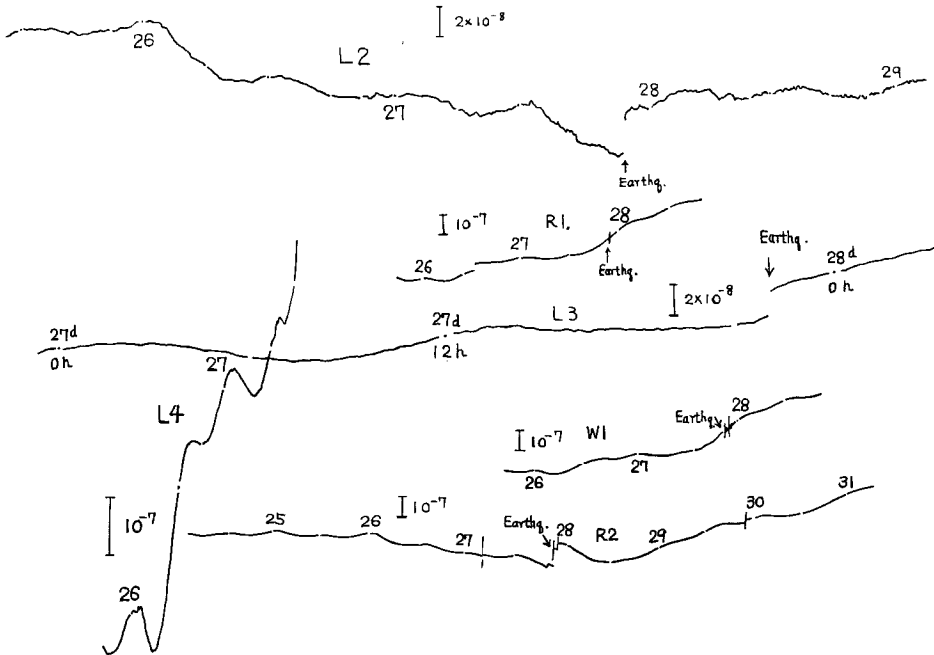


Fig. 3(c) Extension curves in S 38° W on an array observation before and after the earthquake at Kyoto City.

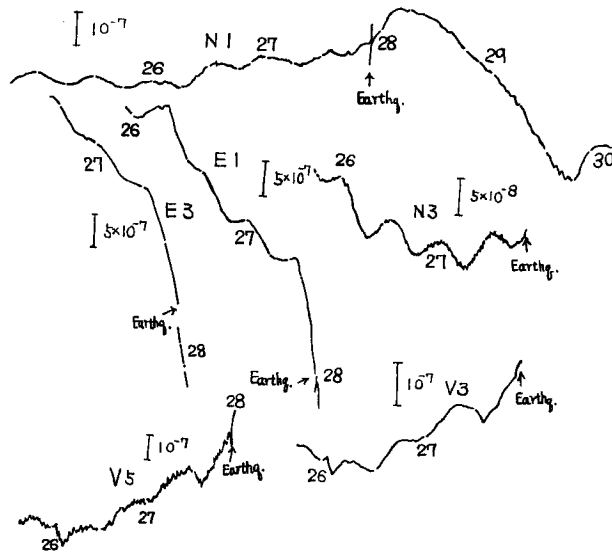


Fig. 3(d) Extension curves in the north, in the east and in the vertical before and after the earthquake at Kyoto City.

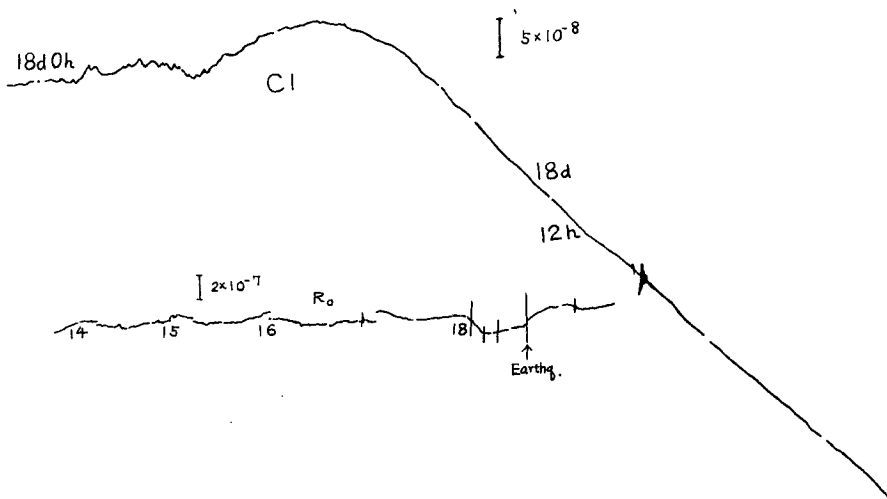


Fig. 3(e) Records of extensometer  $C_1$  in the direction of  $S 52^\circ E$  and of rotationmeter  $R_0$  in the component of  $\partial(S52^\circ E)/\partial(S38^\circ W)$

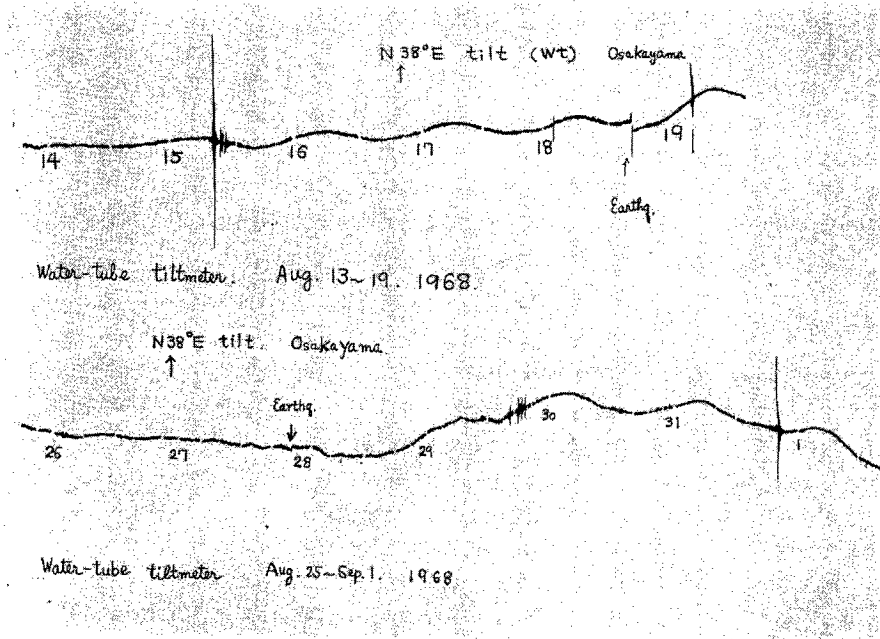


Photo. 1(a) Tiltgrams observed with water-tube tiltmeter in N 38° E before and after the earthquakes at Kamiwachi and Kyoto City.

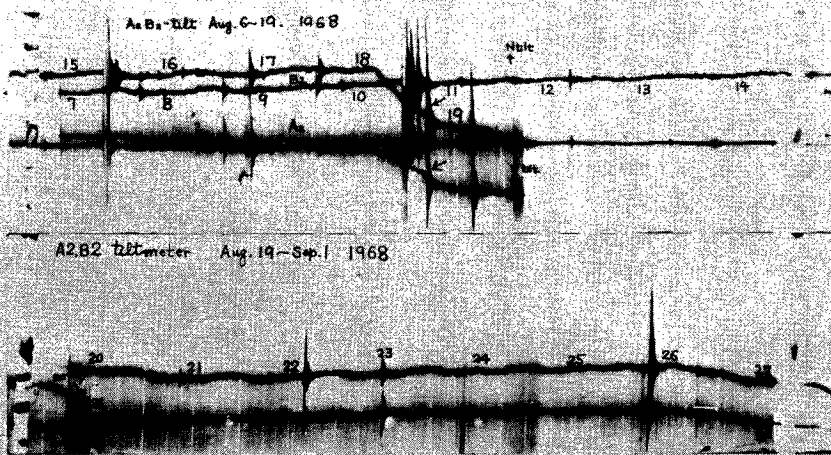


Photo. 1(b) Tiltgrams observed with horizontal pendulum type's tiltmeters in the west (A<sub>2</sub>) and the north (B<sub>2</sub>) before and after the earthquake at Kamiwachi and Kyoto City.

であった。この部分の変化と地震のときの突然ひずみとを示す写真(円印の部分)を **Photo. 2 (a), (b), (c), (d)** に示す。

坑内の井戸の水位の変化は7月19日以降8月25日迄は一樣に低下しており、9月1日には上昇し始めていたことが認められたが、この間のことは分らない。

坑内にある中型気圧計の記録では18日は7時に最高で 992.2 mb, 1時と18時が最低でともに 988.0 mb, であって、27日は最高は0時の 986.4 mb, 最低は18時の 982.6 mb であった。すなわち18日, 27日両日とも1日の最高, 最低の差は 4 mb 以下であった。気圧変化 1 mb に対する土地のひずみの変化は高々 $10^{-8}$  であるので上に述べた変化に対しては気圧の影響は取るに足りないと思われる。

### 3. 考 察

8月18日以降引き続いて起こった地震はたまたま稀に長い乾燥期に終りを告げた豊かな雨季の開始と共に始まった。また、半日前後の異常の始まった18日1時, 27日13時, 26日2時ははげしい降雨のあった頃である。降雨と地震の発生との関係は古来論議されてきたことである。たとえば岩盤の間隙に地下水が浸透したとき岩盤の最大応力は浸透水の水圧だけ減少することがモーア説を用いて説明されたりしている。モーア説の適否は議論があるとしても水が岩石の破壊を促進することは明らかな事実で、現にボーリングにも水が使われたりしている。たとえ水の浸透が割目からの破壊を起さなくても割目があることによって応力の及ばなかった影になっていた弱い部分が割目に水が満たされることによって割目の遮断壁の効果が消滅したために破壊されることも考えられる。また、広範囲の降雨により、地表に部分的破壊または流動が起こり、悪循環的に地下深くあるいは広範囲に破壊が進行することも充分考えられる。実際に地下 100 m 以上の坑道で最も堅固な所を選んで設置された S38°W 方向の伸縮計  $L_4$  は8月18日の地震の前に時速 $35 \times 10^{-8}$  という高速度の伸びを示している。Kelvin 固体の内部応力  $\tau$  は剪断ひずみを  $r$ , その進行速度を  $\dot{r}$ , 剛性率を  $\mu$ , 粘性係数を  $\eta$  とすると

$$\tau = 2\mu r + 2\eta \dot{r}$$

で与えられる。ここで  $\mu$  は $10^{11} \sim 10^{12}$ ,  $\eta$  は地殻全体としては $10^{22}$ 程度と見積られている。時として地殻の起こった直後の震源付近では $10^{14}$ の値<sup>10)</sup>が求められたこともある。今、 $\dot{r} = 35 \times 10^{-8} / \text{hour} \approx 10^{-10}$ ,  $\eta = 10^{22}$  とすると粘性による応力は弾性による応力より遙かに大きく、岩石の最大応力 ( $10^9$ ) 常圧より遙かに大きい  $2 \times 10^{12}$  になる。もし全応力が最大応力 $10^9$ より小さいとすればこのためには  $\eta$  の値は $10^{19}$ より小さくなければならない。恐らくわれわれの場合  $L_4$  の設置されている付近の基盤には大きなき裂があって内部応力がある値以上に大きくなったために滑動したのであろう。また地殻の破壊とは内部にある沢山の割目の滑動であると考え、浸透水圧は地表から深いほど高いから深い所ほど破壊または滑動が起りやすくなる。このことは地下数 100 m 位迄の坑道では極く浅い部分を除くと、深い所ほど異常が大きいことと一致する。またこのような異常は降雨がその原因のすべてというよりはたまたま滑動または破壊し易い状態にあったものが降雨を契機として滑動し始めたのであろう。その理由はこの変化が降水量と良い直線関係はなく時によって異常に大きいこと、また時によっては永久に残るようにも思えるからである。今回の地震もこのケースと考えることに不自然はないであろう。このケースに類似したものには1966年3月10日の京都市北部の地震<sup>10)</sup>がある。

地震前後の伸びの観測曲線からは10時間前後の前駆現象のあることが分かるがこれらの曲線から年変化, 日変化, 潮汐変化などの周期的変化を除いた異常変化を **Fig. 4 (a), (b)** に示す。(a) は上和知地震のもの, (b) は京都市地震のものである。図中時間軸は異常の始まった時刻から計った時間数である。これらの曲線を用いて体積変化  $\Delta$  および最大剪断ひずみ  $r_{\max}$  を求めてそれぞれの図中に点線および鎖線で示した。いずれの地震でも異常が始まりだしてから一定時間(約3時間)高速度の体積減少が続き、3~4時間停滞して後、地震の前迄の収縮が再び始まる。そうして地震のときはいわゆる突然ひずみといわれる段違い



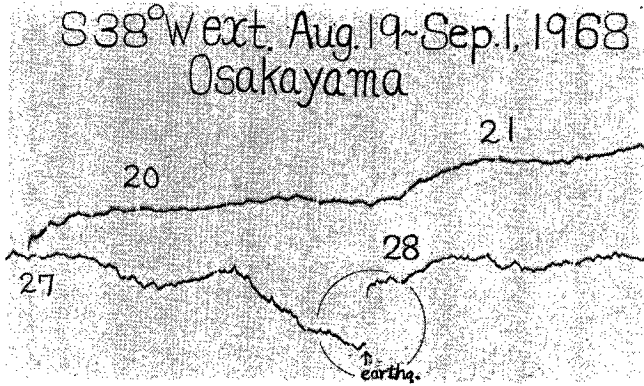


Photo. 2(a) Extensogram  $L_2$  in  $S38^\circ W$  before and after the earthquake at Kyoto City.

Photo. 2(b) Extensogram  $C_1$  in  $S52^\circ E$  before and after the earthquake at Kyoto City.

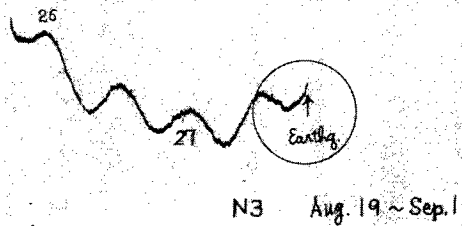
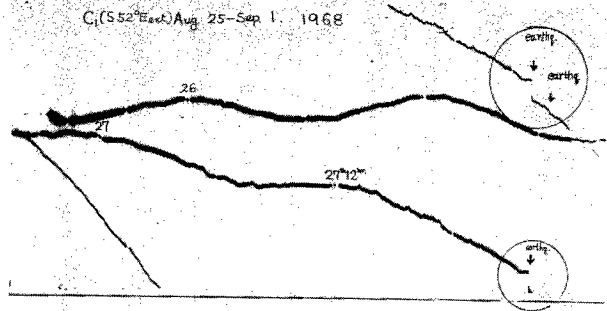
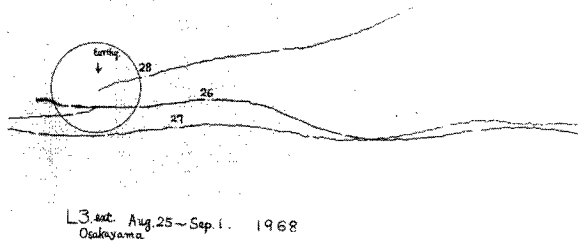


Photo. 2(c) Extensogram  $N_3$  in the north before and after the earthquake at Kyoto City.

Photo. 2(d) Extensogram  $L_3$  in  $S38^\circ W$  before and after the earthquake at Kyoto City.



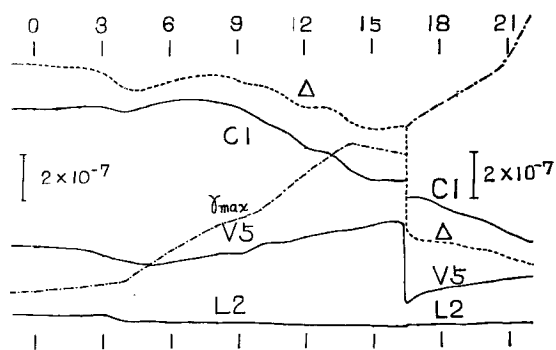


Fig. 4(a) Anomalous extensions in various directions before and after the earthquake in Kamiwachi — $\Delta$  is dilatation, and  $\gamma_{max}$  is maximum shear.

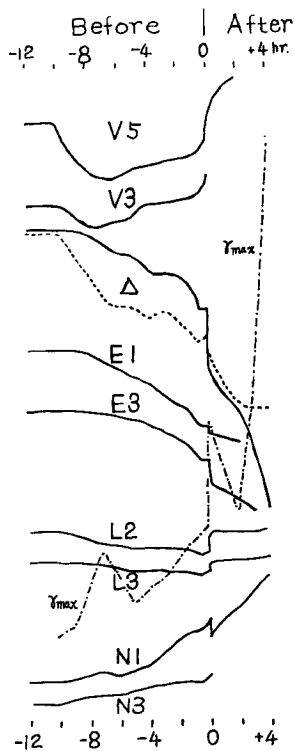


Fig. 4(b) Anomalous extensions in various directions before and after the earthquake in Kyoto City.  
— $\Delta$  is dilatation, and  $\gamma_{max}$  is maximum shear.

変化が起こる。この段違い変化では体積変化はそれほど大きくはなく、剪断ひずみが特に大きい。それから地震後約2時間の間大きい体積変化が起こった。Table 1 に異常が始まってから3時間の間に起こったひずみの成分を示す。

この表から分かるように上和知地震のときも、京都市地震のときも体積ひずみ  $\Delta$  の絶対値は最大剪断ひずみ  $\gamma_{\max}$  よりも大きいことである。しかし面積変化は小さく、この体積ひずみの大部分は垂直ひずみによるものであった。つぎに地震の直前までに蓄積した異常ひずみの成分を求めて Table 2 に示す。

Table 2 から分かることは体積ひずみの絶対値は最大剪断、ひずみよりは大きくはなくむしろ小さい。また両方の地震の場合を比較すると最初の3時間の変化は震央距離の極く小さい京都市地震のときの方がはるかに大きく、地震発生までの蓄積総量は上和知地震の方が大きい。

つぎに京都市地震の直前約30分間に起った変化の発生時刻から地震発生までの時間とその変化量を Table 3 に示す。

Table 3 の変化では約1時間前からと見られるものと約30分前からと見られるものがあるが、約30分前と見られるものが著るしいのでこれを用いてひずみの成分を求めて、Table 4 に示す。

Table 3, 4 から分かるように水平・垂直すべての方向に伸びが正であることを示し、流体的膨脹の様相を示している。すなわち  $\Delta$  は  $\gamma_{\max}$  にへらべて3倍近い大きさである。

つぎに地震のときの突然ひずみ (Abrupt change) の成分を求めて Table 5 に示す。

この地震のときの突然ひずみは、垂直成分が強い振動に対して考慮すべき点があるので面積ひずみと最大剪断ひずみとを比較すると両方の地震の場合ともに最大剪断ひずみの方が遙かに大きくなっている。面積ひずみは両方とも小さい。この突然ひずみの大きさと、観測地から震域までの距離を上和知のときは 57.9 km、京都市内のときは 10.0 km として前論文<sup>9)</sup>と同様の方法でつぎのような量を求めた。

	上和知地震	京都市内地震
地殻の破壊領域の半径 ( $r_0$ )	360~450 m	185~229 m
ひずみエネルギーの変化 ( $E_t$ )	$0.68 \sim 1.38 \times 10^{20}$ erg.	$0.93 \sim 1.76 \times 10^{18}$ erg.
$E_t$ から求めたマグニチュード	5.3~5.6	4.1~4.3

Table 1 The components of the anomalous strains 3 hours after the start of the earthquakes on August 18 and 27, 1968.

	August 18, 1968.	August 27, 1968.
$e_{\gamma\gamma}$	$-7.78 \times 10^{-8}$	$-7.93 \times 10^{-8}$
$\Delta$	$-8.31 \times 10^{-8}$	$-18.33 \times 10^{-8}$
$\gamma_{\max}$	$4.68 \times 10^{-8}$	$13.76 \times 10^{-8}$
$e_1$	$2.07 \times 10^{-8}$ in $171.5^\circ$	$1.67 \times 10^{-8}$ in $127.8^\circ$
$e_2$	$-2.61 \times 10^{-8}$ in $81.5^\circ$	$-12.07 \times 10^{-8}$ in $37.8^\circ$

Table 2 The components of the total anomalous strains in the periods for half a day before the earthquakes on August 18 and 27, 1968.

	August 18, 1968.	August 27, 1968.
$e_{\gamma\gamma}$	$-13.59 \times 10^{-8}$	$-10.53 \times 10^{-8}$
$\Delta$	$-37.96 \times 10^{-8}$	$-38.31 \times 10^{-8}$
$\gamma_{\max}$	$60.10 \times 10^{-8}$	$35.46 \times 10^{-8}$
$e_1$	$-42.24 \times 10^{-8}$ in $102.9^\circ$	$3.84 \times 10^{-8}$ in $144.4^\circ$
$e_2$	$17.86 \times 10^{-8}$ in $12.9^\circ$	$-31.62 \times 10^{-8}$ in $54.4^\circ$

Table 3 Second anomaly of the crustal strains before the earthquake on August 27, 1968.

Sign of instrument	Component	Start of anomaly before earthquake	Size of anomaly
L <sub>2</sub>	S38°W extension	31 min.	0.376 × 10 <sup>-8</sup>
L <sub>3</sub>	"	{ 52 " 27 "	0.83 " 0.68 "
R <sub>2</sub>	"	70 "	0.8 "
C <sub>1</sub>	S 52°E extension	31 " 72 "	2.33 " 3.23 "
N <sub>1</sub>	North extension	30 "	0.88 "
V <sub>3</sub>	Vertical extension	65 "	3.3 "
V <sub>5</sub>	"	45 "	1.65 "
R <sub>0</sub>	$\frac{\partial(S52^\circ E)}{\partial(S38^\circ W)}$	32 "	2.4 "
Wt	N38°E tilt	60 "	-0.003"
A <sub>2</sub>	West tilt	30 "	+
B <sub>2</sub>	North tilt	30 "	+

Table 4 The strain components of the anomaly in the period for half an hour directly before the earthquake on August 27, 1968.

$e_{\gamma\gamma}$	2.00 × 10 <sup>-8</sup>
$\Delta$	4.96 × 10 <sup>-8</sup>
$\tau_{\max}$	1.93 × 10 <sup>-8</sup>
$e_1$	2.44 × 10 <sup>-8</sup> in 115.3°
$e_2$	0.52 × 10 <sup>-8</sup> in 25.3°

Table 5 The strain components of the abrupt changes on August 18 and 27, 1968.

	August 18, 1968.	August 27, 1968.
$e_{\gamma\gamma}$	-36.25 × 10 <sup>-8</sup>	-5.26 × 10 <sup>-8</sup>
$\Delta$	-34.95 × 10 <sup>-8</sup>	-7.81 × 10 <sup>-8</sup>
$\tau_{\max}$	6.61 × 10 <sup>-8</sup>	9.28 × 10 <sup>-8</sup>
$e_1$	3.96 × 10 <sup>-8</sup> in 351.1°	3.36 × 10 <sup>-8</sup> in 43.0°
$e_2$	-2.66 × 10 <sup>-8</sup> in 81.1°	-5.92 × 10 <sup>-8</sup> in 133.0°

なお地震のときの突然ひずみの面積変化は上和知地震のときは正であったのに対して京都市内の地震のときは負であった。このことは地震波の初動が上和知のときは“押し”であったのに対して京都市内のときは“引き”であった。この初動の波の疎密関係と突然ひずみの面積変化の正負の関係が何時ものように<sup>9)</sup>逆の関係にあった。

つぎに地震後3時間の間に起こったひずみ(突然ひずみは含まない)の成分を求めて Table 6 に示す。

Table 6 The components of the anomalous strains in 3 hours after the earthquakes.

August 18, 1968.		August 27, 1968.	
$e_{\gamma\gamma}$	$7.88 \times 10^{-8}$		$21.45 \times 10^{-8}$
$I$	$-0.08 \times 10^{-8}$		$17.46 \times 10^{-8}$
$r_{\max}$	$18.99 \times 10^{-8}$		$6.57 \times 10^{-8}$
$e_1$	$5.52 \times 10^{-8}$ in $16.98^\circ$		$2.59 \times 10^{-8}$ in $12.62^\circ$
$e_2$	$-13.48 \times 10^{-8}$ in $106.98^\circ$		$-3.99 \times 10^{-8}$ in $102.62^\circ$

Table 6 から分かるように地震後3時間の面積ひずみ(減少)は地震のときの突然ひずみの面積、ひずみ成分よりは大きい変化を示している、しかし最大剪断ひずみの方はより大きいとも言えない。

以上の地震発生前後の過程を要約すると、まず地震の約5ヶ月余り前から異常変化があった。ついで地震の13時間あるいは9時間前から突如として異常変化が始まり、最初の3時間の間に急速度の体積の減少が起こり、しばらくこの変化は停滞して2~3時間して再び地震の起こる直前迄体積の減少が再び起こった。それからほとんど震央にあった京都市内の地震のときは地震の前約30分間に著しい単純な体積膨脹あるいは単なる伸長に近い変化が起こり地震の発生となった。地震の起こったとき急激なひずみの変化が起こったがこのときの変化は主にせん断ひずみの変化であった。それから約3時間再び著しい体積の減少が続いた。地震の前30分間の変化は地殻の一部が突如膨脹し、それが破壊したかのような変化を示している。此のような過程は地殻下部での物質の相変化説、地震機械(熱機関)説、泡沫仮説などでは肯定されてもよいことであろう。

さて、地震のときに変化した地殻内部の弾性エネルギーについて少し論議しよう。近年断層の長さや弾性エネルギーとの関係が多くの人によって研究されている。断層はたとえていえば地殻という弾性エネルギーの蓄えられた袋の破れ口でここからエネルギーが逃げていったといえはいるかもしれない。物質が壊れるとき割目ができるが、破壊寸前のひずみあるいはひずみ力の分布は特に割目にあたる所が大きいということではなく一様に分布しているといわれる。また割目ができるときその物体に一様な応力が分布するような平衡状態に達したときその割目の近傍(割目を直径とする円内)を除いては等剪断ひずみ線は同心円的であるといわれるから恐らくエネルギーについては更に完全な同心円に近いであろう。このようなことからつぎの考えに到達することに困難ではないであろう。すなわち地震の前、エネルギーの蓄えられる所は断層のような破壊の周辺に一様に分布していた。また地震の直前最大応力にほとんど等しくなった所は断層を直径とする球あるいは半球状の領域であった。断層が大きいとき当然この領域はマントルにもかかってくるであろう。当然その領域の垂直断面はP波線の線形をしたような垂直に短い廻転楕円体のような形になるが全くマントルが関与しないことはないであろう。またマントルが関与したからといってもこの様子が変り方は少ないであろう。著者がいっている  $r_0$  は破壊領域というよりはひずみが最大になった領域と表現した方が無難であろう。また地震により解放されたエネルギーの分布は地殻の弾性常数に特に異方性のない限り震源からの距離のほぼ2乗に反比例する。しかし地震の前に蓄積されたエネルギー分布とは全く異ったもので関係が深いといった程度のものであろう。また8月27日の顕著地震の後28、29日にかけて大きな異常が水管傾斜計や南北成分の伸縮計  $N_1$  や  $S38^\circ W$  方向の伸縮計  $R_2$  などの記録に明瞭に記録されている。もしこれが弾性

余効変形であるとするれば震源付近(変形の大きい部分)の固体粘性  $\eta$  は $10^{15} \sim 10^{16}$ といった非常に小さい値に計算される。またこの変化が降雨とか地下水とかいったものでなく地殻内部の変化であると分れば岩漿云々といったような興味ある話題が生れることになるが、この確証が得られないのが残念である。

以上地震前後の地殻変動の観測から長い乾燥期の後の豪雨が地震発生の誘因となったのではないかということが地殻変動の観測から考えられること、約6ヶ月前から異常な地殻変動が起こっていたこと、地震発生の約半日前から異常変化のあったこと、この変化と地震の発生との関係にはなお疑問がある。また地震発生の約30分前から単純膨脹が起こった。それから地震のとき剪断ひずみを主とする突然ひずみが起こり地震後しばらくの間大きな体積変化が起こったことが確められた。なお、これらの2つの顕著地震の震源領域の半径、地震のとき解放された弾性エネルギーの量を計算して地震のマグニチュードを求めた。

#### 謝 辞

終りにこの研究の整理に当って数値計算など御手伝頂いた山沢美弥子、洲崎千代の諸嬢、また観測計器の整備、設置などに御助力頂いた森本喜一郎、多中勝美、藤井伸蔵の諸技官に心から感謝致します。降水量の資料を頂いた京都气象台に厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Nishimura, E.: 1962, Anomalous Tilting Movement of the Ground before Destructive Earthquakes, Das Symposium über rezente Erdkrusten Bewegungen Mai 1962 in Leipzig. 1-8.
- 2) 小沢泉夫: 地殻変動の連続観測, 地震, 第2輯, 第20巻, 1967, 228-230, 268-270.
- 3) 小沢泉夫: 逢坂山における地殻の歪の観測, 京都大学防災研究所創立5周年記念論文集, 1956, 14-19.
- 4) Caloi, P.: About Some Phenomena Preceding and Following the Seismic Movements in the Zone Characterized by High Seismicity. Contributions in Geophysics in Honour of B. Gutenberg, Pergamon Press. 1958.
- 5) 西村英一: 1961, 地殻変動の連続観測, 地震, 第2輯, 第14巻, 260-266.
- 6) Tomaschek, R.: Earth Tilts in the British Isles Connected with Far Distant Earthquakes. Nature, 176, 1955, 24-27.
- 7) Press, F: Displacements, Strains, and Tilts at Teleseismic Distances, Journal of Geophysical Research, Vol. 70, 1965, 2395-2412.
- 8) 例えば 小沢泉夫: 地震の時の地殻の急速なひずみの観測より求めたひずみエネルギーの変化, 地震, 第2輯, 第17巻, 1964, 222-231.
- 9) Ozawa, I.: On the Observations of the Abrupt Change of the Elastic Energy in the Remarkable Earthquakes, Special Contributions of the Geophysical Institute, Kyoto University, 5, 1965, 125-137.
- 10) 小沢泉夫: 京都市近傍の地震前後の地殻のひずみの観測, 地震, 第2輯, 第19巻, (1966), 217-225.