

# 可変容量型ひずみ地震計および 傾斜計による連続観測

尾池 和夫・小泉 誠・平野 憲雄

## CONTINUOUS OBSERVATION BY STRAIN SEISMOGRAPHS AND TILTMETERS OF VARIABLE CAPACITANCE TYPE

By Kazuo OIKE, Makoto KOZUMI and Norio HIRANO

### Synopsis

From the theoretical point of view it is clear that comparably large strain step will remain at the near field of focal region after the occurrence of an earthquake. To observe this strain step quantitatively with high reliability, observational instruments must have the mechanical strength and the high sensitivity for long period waves. It can not be expected for the present tiltmeters and extensometers to satisfy these conditions, therefore strain seismographs and tiltmeters of variable capacitance type were developed.

The strain seismographs were setted up at Kamitakara station, and during about one year, various type fo seismic strain waves have been recorded. They are showed in four photographs and give some sugestions for the study of focal mechanism. For instance, these observed wave forms are in good accordance with the theoretical ones calculated from dislocation theory.

The tiltmeters which have been newly designed are constructed from the vertical pendulum with a short natural period (0.5 sec) and the variable capacitance type transducer. Because of short natural period of the pendulum, the disturbances by the long period surface waves of distant shocks are negligible. The pendulum is suspended by a leaf spring of 60 mm length and 0.1 mm thickness, therefore the instruments are very strong for the acceleration of short period seismic waves.

### 1. 序

地殻変動の連続観測を行う場合に、降雨・気圧・気温などの気象要素の変化が及ぼす影響を最小限に止める必要がある。そのために、通常、地表面から離れて深い坑道内を観測場所に選んでいる。しかし、この方法は盤圧による坑道自身の変形などの障害もあり、十分な効果を期待できない。したがって、さらにボーリング坑などを利用する観測方式、あるいは解析的に影響を取去る方法が研究されている。

一方、連続観測を実施する際には、器械の調整などを行うことによって記録に与える人為的な影響も無視できない。これを防ぐには、transducer の設置点から記録装置を分離することはもちろん、永久変位が生じた時の再設置などの操作も、すべて遠隔操作によらなければならない。可変容量型ひずみ地震計および傾斜計は、この遠隔操作による遠隔記録方式に重点を置いて開発された。

これらの計器を観測に使用する目的は、高感度・早送りの記録を得ることにもある。100 秒以下の周期の地震波動や数時間以上の周期を持つ地殻変動については、豊富な資料があるが、両者の中間領域である 100 秒～数時間周期の地殻の動きは、特に地震発生前後に限って見ても未だ十分な観測は行われていない。地震発生時の比較的短時間に永久変位などの地殻変動が現われることは、理論的にも十分予想されることであり、これを詳しく観測することによって、地震発生機構を調べるための貴重な資料が得られると思われる。

地震発生後に残る永久ひずみ量を正確に観測することは特に重要であろう。

実体波や表面波などの地震波動に比べて、地震発生による永久変位は距離に従ってより急速に減衰する。そのため、震源近くでの観測が非常に重要となる。しかし、震源近くでは短周期の波動によって観測計器に大きな加速度が加えられ、記録線の基準位置に狂いを生じさせることになる。したがって、計器を機械的に強力なものにし、設置方法を十分検討したうえ、種類の異なる観測方式を同時に実施しなければ、永久ひずみなどの精密な観測を実現することはできないであろう。

可変容量型傾斜計は、従来の水平振子型傾斜計が細い線で mass を吊下げ、機械的に高感度を得ているのと異なり、厚さ 0.1~0.3 mm、巾数 cm の鋼鉄バネで mass を垂直に吊下げ、機械的に傾斜量を拡大する部分が全く存在しない方法を採用した。これによって機械的な強度を増すことができるという特徴を持っている。

ひずみ地震計および傾斜計の原理・構造・記録方式はすでに詳しく発表されている<sup>1)2)</sup>。これらの計器は上宝地殻変動観測所坑内に設置され、現在連続観測に使用されている。坑内での設置場所は Fig. 1 に示されている。ひずみ地震計の transducer は、水平振子を拡大装置に応用した光学式の伸縮変化記録装置と共に<sup>3)</sup>、同一の熔融水晶棒に取付けられ、傾斜計は岩盤上のコクソリート台に設置されている。

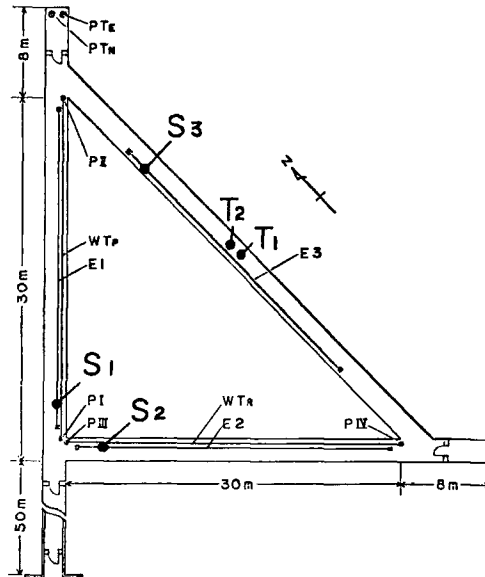


Fig. 1 Arrangement of the instruments at Kamitakara observation station. S1, S2 and S3 show the transducers of strain seismographs. T1 and T2 are the tiltmeters. Others are extensometers and tiltmeters of different type.

## 2. 可変容量型 transducer

Transducer の回路は Fig. 2 の上部に示され、Fig. 2 の下部は伸縮計の場合に例をとった説明図である。C, C' の condenser は説明図にあるように、中央の極板の変位に従って容量の増減が逆となる差動型に作られている。測定対象となる中央の極板の変位量を  $\delta l$ 、極板間の容量を  $C=C'$ 、2次コイルと C による並列回路の共振周波数を  $f$ 、出力電圧を  $E$  とすると、 $\delta l$  に対する出力電圧の変化は、

$$\frac{\delta E}{\delta l} = \frac{\delta C}{\delta l} \cdot \frac{\delta f}{\delta C} \cdot \frac{\delta E}{\delta f}$$

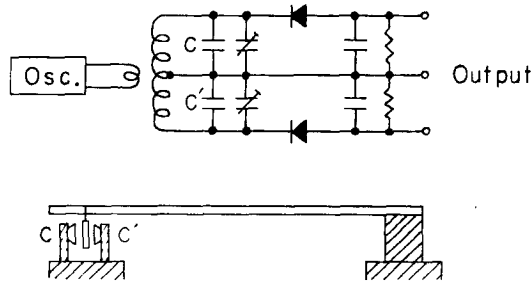


Fig. 2 Electric circuit of variable capacitance type transducer and an example of the variable capacitor in the case of extensometer. OSC. means the 5Mc sine wave oscillator.

となり、これは1次式では表現されない。したがって大きな変位量に対して出力電圧との間に比例関係が成立ってはいない。しかし、実際に測定した結果では、観測目的とする範囲については充分の精度で直線関係の成立を見ることができる。Fig. 3はこの測定結果の一例である。地殻変動観測の際に見られるように、永久変位によって徐々に中央の極板が平衡位置からはずれて行く場合には、一定の水準を過えた時自動的に元の平衡位置に極板を移動することによって、長期間特性を安定に保つことができる。

実際に動作させた場合の諸特性について、上室地殻変動観測所のひずみ地震計を例にとって示すと次のようになる。

発振周波数	5 Mc
一次コイル入力電圧	2 Volt (P-P)
二次コイルの最大出力電圧	5 Volt (P-P)
極板の有効半径	2.5 cm
極板間の距離	0.2 mm
電圧感度	20 m Volt/ $\mu$

特に高感度を得るためには、コイルのQを高くし、極板間の距離を小さくすればよいが、この場合は前に述べたように、感度の直線性を悪くすることになるので、むしろ、直流増幅器に頼った方が良好な結果が得られる。現在観測目的とされている程度の地殻変動量（例えば0.001"の傾斜、 $10^{-10}$ のひずみ）を記録しようとする場合には前置増幅器は特に必要としない。

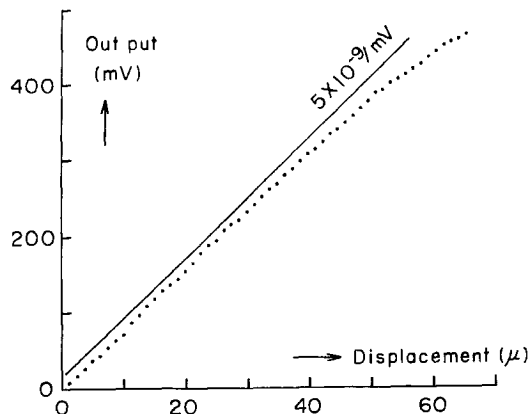


Fig. 3 An example of relation between the displacement and the output voltage.

変位—電圧の変換を行なうための transducer としては、この可変容量型の他に差動変圧器を応用したものが考えられる。両者を比較した場合、可変容量型 transducer の持つ最大の長所は簡単に高感度のものが製作できる点にある。大ざっぱに見積って差動変圧器の約1000倍程度の感度を出すことは容易である。このことは、計器に機械的不安定さを持った拡大装置を何ら必要とせず、短周期大振中の地震波などの影響を防ぐ目的には大きな利点となる。また、差動変圧器に見られる吸引力のような、振子などに及ぼす電氣的な力が非常に小さい。しかし、すでに述べたように変位量に対する感度の直線性が成立つ範囲は、差動変圧器に比較して狭く、また、湿気による感度の低下も見られる。これらの欠点により、応用範囲が限られるが、ひずみ地震計や傾斜計に使用した限りでは、計器を防湿構造とし、また、極板の基準位置を自動的に調整することによって、これらの欠点による支障は見られていない。

### 3. ひずみ地震計による長周期地震波動の観測

上室で観測実施中のひずみ地震計は水平方向3成分で、transducer の出力信号は10分～1時間の band-pass filter を通してひずみ地震計用記録計に、また low-pass filter を通して伸縮計用打点記録計に、それぞれ接続されている。これらの各成分についての方向、感度等を Table 1 に示す。基準尺の長さは3成分とも 25m である。

Table 1 Direction and sensitivity of horizontal strain seismographs at Kamitakara station.

Direction	Strain Seismograph		Extensometer	
	Component	Sensitivity	Component	Sensitivity
N45° E	S-1	$1 \times 10^{-10}/\text{mm}$	E-1	$1 \times 10^{-9}/\text{mm}$
N45° W	S-2	$1 \times 10^{-10}$	E-2	$1 \times 10^{-9}$
NS	S-3	$1 \times 10^{-10}$	E-3	$1 \times 10^{-9}$

現在設定されている程度の感度で観測を約一年間続けた結果、震央距離 $10^\circ$ 以内では magnitude 5～6 以上の規模の地震について、また $90^\circ$ 以内では magnitude 7 以上の規模の地震については実体波、表面波ともに十分使用できる記録が得られている。それらの記録の中から種々の代表的な例を Photo. 1～4 に紹介する。

Photo. 1 は  $d=10^\circ$  程度の浅発地震の際しばしば見られる記録である。3本の記録のうち上側の2本は1968年9月21日の浦河沖の地震で、N45°E および NS 方向の成分であり、下側の1本は1968年10月8日に起った同じ浦河沖の地震で、NS 方向の成分である。P波およびS波の Pulse と表面波が明瞭に記録されている。下側の2本の記録は、同一地域に起った二つの地震の同じ方向の成分を比較したものであるが、実体波の波形が異っていることから発震機構に差があると推定され、このことは数時間にわたって引続いている長周期表面波の出現の様子からみても容易に確かめられる。

Photo. 2 は浅い遠地地震の例で、1968年8月10日および15日に起った二つの地震であり、震源は両者ともセレベス島付近で、上室における同一成分の記録を比較して並べてある。Photo. 1 の例と同じく実体波、表面波ともに、両者で異った波形が観測されており、やはり発震機構に差があると推定される。二つの地震について、P波の初動分布図を作成すると、押引きの分布が非常に異っていることが確かめられる。また、周期の特に長い大きな変動が表面波の部分に見られ、特に8月10日の地震について顕著に現われているが、これは strain step response に相当する動きである。この種の記録は大地震の際、時々得られ、理論的に予想されるひずみ量と定量的にも大きく矛盾はしないが<sup>4)</sup>、真の地殻の永久ひずみが観測されているか

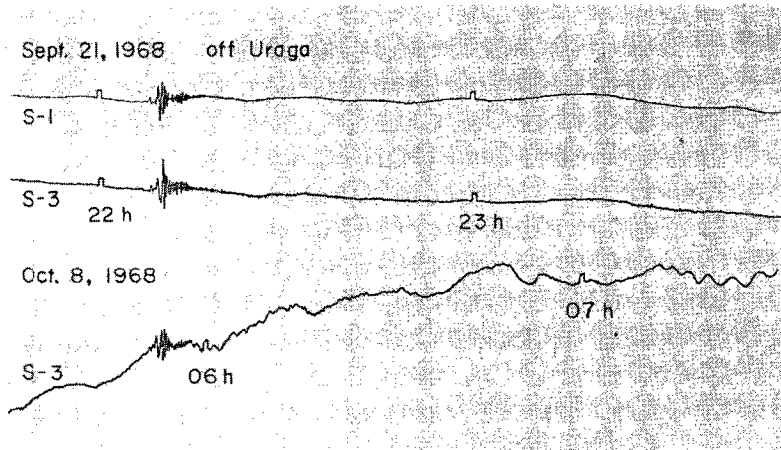


Photo. 1 Seismic strain for shallow earthquakes which occurred at the same region. Lower two traces show very different aspects in both body and surface wave forms, which means that these two shocks differ in focal mechanism.

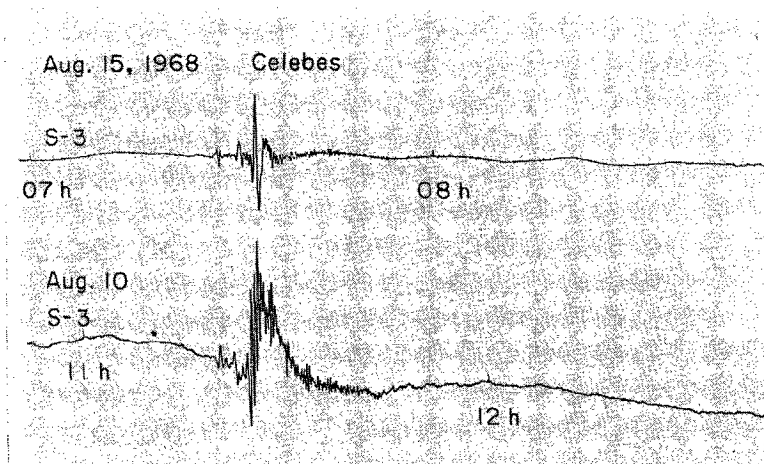


Photo.2 Two distant shocks near Celebes Is. region recorded by the same strain seismograph. Upper:  $M=7.6$ ,  $\Delta=36^\circ$ , lower:  $M=7.4$ ,  $\Delta=39^\circ$ .

どうかを確認することが今後に残された問題であろう。

**Photo. 3** は近距離に起った地震の際の永久ひずみと思われる記録の例である。震源は豊後水道で、やはり浅発地震である。この程度のひずみ量は従来の伸縮計等には観測されない程の微小変化であり、短周期地震計に記録された地動振巾も小さく、振動のためひずみ地震計に機械的な変形を起したとは考えられない。記録された地震の中で最も近距離のものは、1968年7月1日の埼玉!!中部の地震であるが、この場合にはさらに大きなひずみ量が観測された。

**Photo. 4** は深発地震の例であり、1968年10月8日、震源は小笠原諸島で深さ約 300 km である。P 波到着時から各成分とも一方的に伸びあるいは縮みの変化を続け、大振巾の S 波が続いている。この地震の際

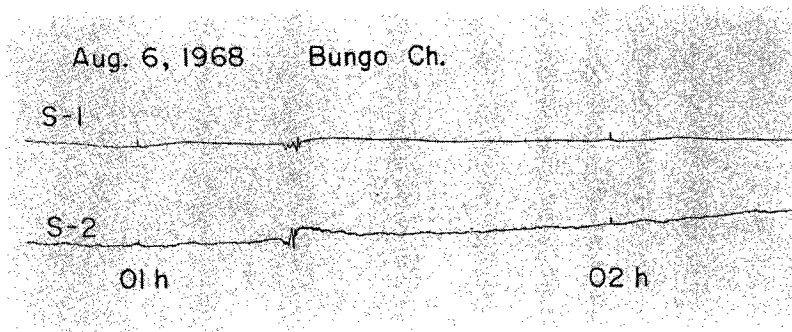


Photo.3 Strain step observed after the arrival of the S pulse in the case of a near earthquake.

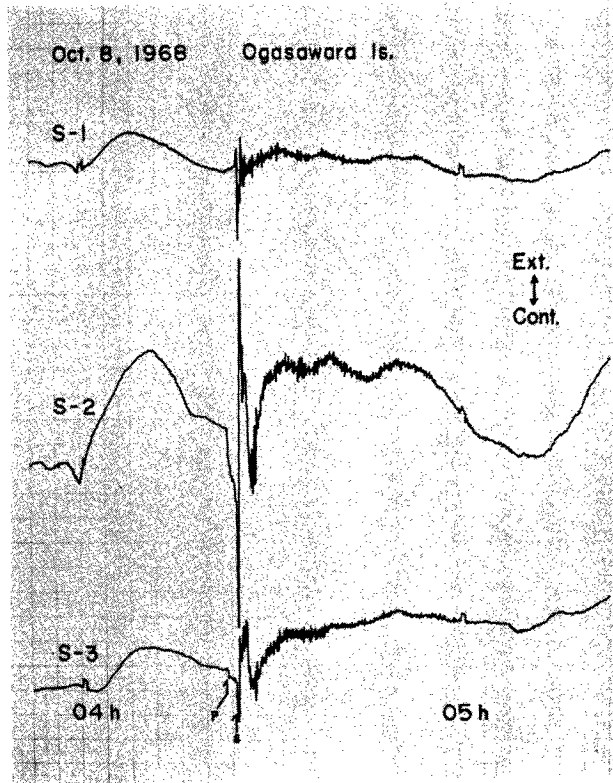


Photo. 4 A deep earthquake of Ogasawara Is. region.

には振巾が大きく、スケールアウト防止装置が動作しているが、写真はその記録から本来の波形に復元したものである。

**Photo. 1~4** に示された例を見ても、従来の短周期あるいは長周期地震計では十分観測出来なかった、永久変位まで含めての地震発生時の動きが、ひずみ地震計によって観測されることが期待される。断層面でずれが起った場合の任意の点での地動は、くいちがいの弾性論によって詳しく表現されている。これを使って永久変位まで含めて計算された地震波の形と、**Photo. 1~4** に示された記録例を比較すると、両者の間

に多くの共通点が見出される<sup>5)</sup>。このことはひずみ地震計の記録が地震発生機構の研究に役立つことを示しているが、理論波形との定量的比較などを行って、より詳細に調べる必要がある。

このひずみ地震計の基準尺は、光学式記録装置を使用した伸縮計と共通で、この伸縮計は可変容量型 transducer を設置する約1年前から動作している<sup>3)</sup>。この観測結果と、われわれの方式による伸縮計の記録とを比べた結果、transducer 設置直後はかなり異った動きを示し、約3カ月間で徐々に差が減少し、その後両者は一致している。このことから設置後3カ月で計器が安定し、その後は2種類の記録方式いずれについても、基準尺の動きを忠実に記録していることがわかる。

#### 4. 傾斜変動の観測

可変容量型傾斜計を開発した目的は、遠隔記録方式を傾斜変動観測に関して採用すること、および地震発生の直前から直後にわたって短時間に起る傾斜変動を精密に観測することにある。

従来、地殻の傾斜変動を観測する場合には、水管傾斜計や水平振子型傾斜計が主として使用されている。前者は、数 m～数10 m 離れた2点間の垂直変動の差を記録し、後者は地殻の一点の傾斜を記録する。可変容量型傾斜計は、この水平振子型傾斜計の持つ短所を補うために製作されたものである。この短所は、非常に細い線を使用して水平振子を吊り、機械的に傾斜量を拡大する方式に由来するもので、地震波動の影響で吊線の支点にずれを生じ、最悪の場合には切断することもしばしばある。これは、地震発生直後の地殻変動を観測する目的に対しては致命的な欠点となる。

可変容量型傾斜計は、傾斜量を拡大する方式が原理的に従来のもものと異っている。すなわち、感度を高める作用はすべて transducer の持つ電気的原理に依存し、機械的な構造は極めて単純化されている。振子は長さ 20.6 cm の垂直振子で、単に角度変化を変位量に変換するだけの役目を持つ。したがって、その構造は約 2 kg の mass を、厚さ 0.1 mm、巾 60 mm、長さ 1 cm 以下の鋼鉄バネで吊下げるものであり、機械的に強いことは言うまでもない。また振子の固有周期は必然的に短くなり、表面波など長周期でしかも大振幅の地震波動の影響は非常に少なくなる。

2. に述べた感度の直線性についても、振子の長さ 20.6 cm の場合、傾斜量 $\pm 10''$ 程度の範囲で成立し、実際の観測には十分の精度を持っている。また、感度についても、市販の記録計を使用して、 $0.001''/\text{mm}$  程度まで容易に観測することができる。記録方式の詳細についてはすでに発表されている<sup>2)</sup>。約一年間、種々の方法で試験観測を実施し、上記の特徴は確かめられたが、反面改良すべき点も明らかにされた。以下、これらの試験観測の結果を検討する。

1968年5月、上宝地殻変動観測所坑内に可変容量型傾斜計2成分(NS, EW)を設置した。Fig. 1にその設置場所を示した。2台とも同一のコンクリート台(60 cm $\times$ 100 cm, 高さ約10 cm)の上に置かれている。最初は約 $0.002''/\text{mm}$ の感度を出し、両成分を記録させて、earth tideの振巾を水平振子型傾斜計による観測と比較して確かめ、その後2成分ともEW方向に設置して、長期間のdriftを調べた。

Fig. 4は約25日間の記録例である。いずれも東西成分の記録に感度が同一になるよう、振巾の補正を行ったもので、T1, T2は可変容量型傾斜計、PTEは水平振子型傾斜計の観測記録である。TとPTEとは同一のコンクリート台上ではなく、約25 m離れた場所に置かれている。Earth tideの振幅、および位相は、相互にほぼ一致しているにもかかわらず、この期間中、一方に記録線がdriftを示し、3成分ともその量および方向が相互に異っている。PTEとTとは設置場所が離れているので、設置点での局所的傾斜変動を観測している計器としては、むしろ一致した記録が得られないのが当然であろう。

T1とT2は同じコンクリート台上に置かれているにもかかわらず傾斜方向が逆であり、この期間中にT1, T2とも約 $0.4''$ の傾斜量を示した。この記録上の傾斜変化が実際の地面の傾斜であるとは考えられず、おそらく器械の構造またはコンクリート台の性質に由来するものであろう。T1, T2は同じ方向の傾斜を観測するように設置されているが、器械の構造からみて対称の方向になっている。すなわち、transducerの器械台は3本の支脚で支持されているが、荷重が片側の1支脚に多くかかり、記録にあらわれる傾斜方向も

この方向に下る傾向である。一方、コンクリート台が未だ完全に固っていないという事も影響していると思われる。ひずみ地震計に関しては安定した記録が得られるまでに約3ヶ月かかったことも考え合わせると、計器の構造を改良し、岩盤に直接設置する方法をとらなければならない。

**Photo. 5** は近地地震の記録例で、震源地は豊後水道である。この時の水平振り型傾斜計の記録には特に

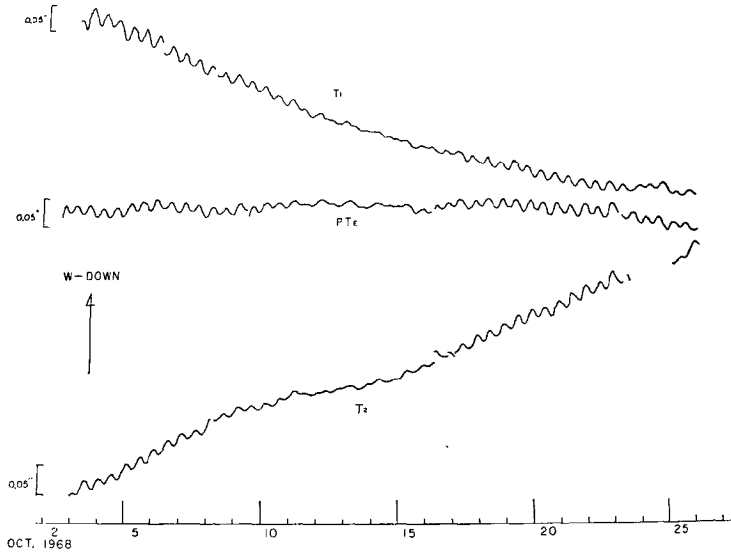


Fig. 4 Tilting movements recorded by the three tiltmeters of the same E-W components. PTE: horizontal pendulum type, T1 and T2: variable capacitance type.

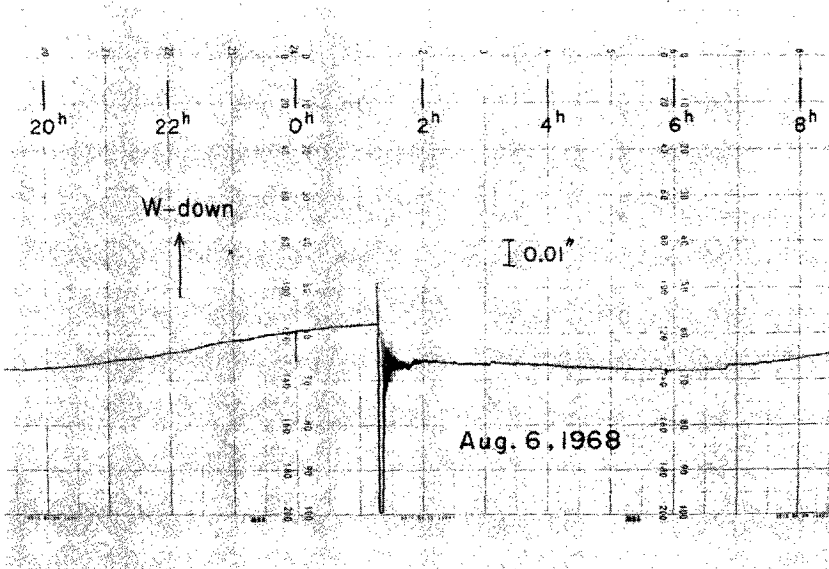
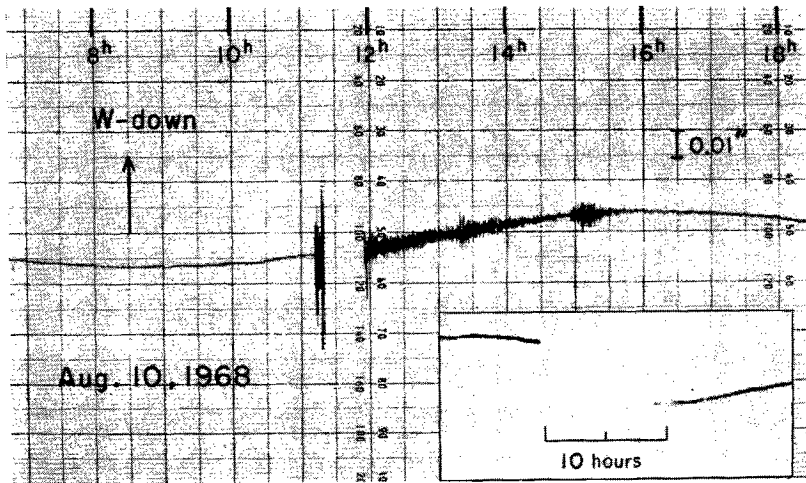


Photo. 5 Record of tiltmeter for a near shock, which was also observed by strain seismographs and showed in Photo. 3.

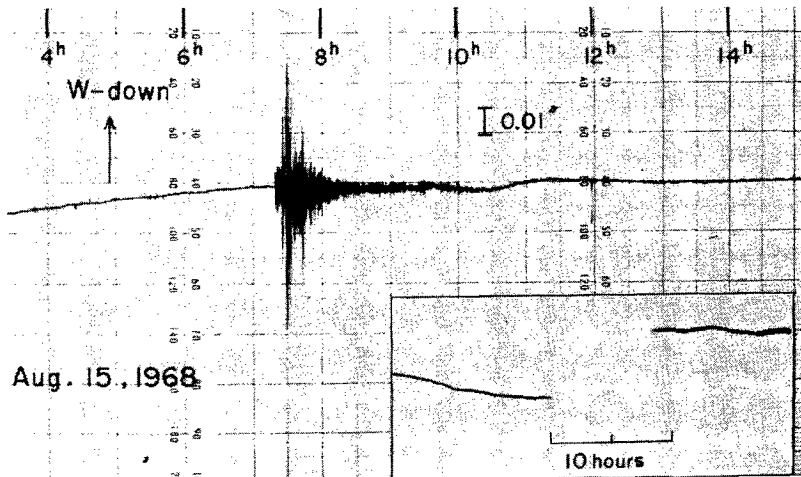


ずれが認められていないが、可変容量型傾斜計には傾斜量に換算して $0.02''$ 程度のずれが観測された。ひずみ地震計においては永久ひずみと思われる記録が得られているが (Photo. 3), この傾斜計にあらわれたずれは短周期地震波動の影響による計器自体の狂いも含まれているかもしれない。極板の間隔が  $0.3\text{ mm}$  程度であるから振子が極板に接触し器械的な平衡位置にずれを生じたものと考えられる。このような欠点を補うためには、垂直振子の減衰定数を非常に大きくすることも有効であると考えられる。

Photo. 6 (a) および (b) は、遠地震の記録例で、震源地はいずれもセレベス島附近である。右下は水平振り型傾斜計の記録で、記録紙上の感度は可変容量型の約 $\frac{1}{4}$ である。水平振り型傾斜計の記録線にずれがみられるが、可変容量型傾斜計には認められない。これは両傾斜計の器械的な構造の相異によるもの



(A)



(B)

Photo. 6 Distant shocks which occurred at the same focal region. The seismic strain for them are showed in Photo. 2. Small photographs are the records of the horizontal pendulum type tiltmeter, which show large steps caused by the disturbance of long period surface waves.

である。水平振子の周期が約50秒であるから長周期の地震波動特に表面波の影響を大きく受ける。光学記録を採用しているため、地震時の振幅がわからないが、可変容量型傾斜計で記録された振巾に比べはるかに大きいと思われる。また、振子の振動が減衰するのに要する時間も水平振子型傾斜計の場合は地震後約10時間に及んでいる。可変容量型傾斜計では、このような長周期の地震波動による影響ははるかに小さく安定していることがわかる。

計画から観測結果の解析まで終始御指導下さった岸本兆方教授に深く感謝いたします。また、観測実施に際し、上宝地殻変動観測所長一戸時雄教授をはじめ所員の方々には多大の御援助を賜わり、観測記録の整理には細善信技官に協力していただいた。これらの各位に謝意を表します。なお、この研究は文部省災害科学特定研究費の補助により実施された。

#### 参 考 文 献

- 1) 岸本兆方, 尾池和夫, 津嶋吉男: 可変容量型ひずみ地震計について, 防災研究所年報, 第11号 A, 1968, 67.
- 2) 尾池和夫, 小泉 誠, 平野憲雄, 松尾成光: 可変容量型傾斜計の試作, 防災研究所年報, 第11号 A, 1968, 53.
- 3) 一戸時雄, 富永 進, 加藤正明: 上宝地殻変動観測所における土地傾斜変化の観測 (第一報), 防災研究所年報, 第11号 A, 59.
- 4) Wideman, C. J. and M. W. Major, Strain steps associated with earthquakes, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 57, No. 6, 1967, 1429.
- 5) 尾池和夫: 移動震源から期待される地動波形, 地震学会講演, 1968.