

# 可変容量型歪計の試作

田中寅夫・加藤正明

## ON A STRAINMETER OF VARIABLE CAPACITOR TYPE

By Torao TANAKA and Masaaki KATŌ

### Synopsis

In this article, a newly devised strainmeter and the results of preliminary observation of the ground strain at the Kamigamo Geodetic Observatory of Kyoto University is reported. The principle of this instrument is based on a variable capacitor transducer, and the frequency change of the crystal oscillator due to the ground strain is raised by frequency multipliers. It has been ascertained that the stability of the instrument is enough to observe the earth tides and the crustal strain of short period.

### 1. ま え が き

地球潮汐、地かく変動あるいは地震波などによる土地の歪を測定する伸縮計や歪地震計で、歪を電氣的容量変化に換えて拡大記録させる方法は H. Benioff<sup>1)</sup> によって考案された。最近では M. W. Major ら<sup>2)</sup> によって可変容量を利用した歪計で地球潮汐から地震波まで観測した結果が報告されている。この歪計は非常にすぐれた性能をもっており、地球潮汐などの観測では  $2 \times 10^{-10}$ 、地震波の場合は周期 200 秒で  $2 \times 10^{-11}$  の歪を検出できる感度をもつといわれている。こんどわれわれの試作した歪計も同じように可変容量による周波数の変化によって土地の歪を測定する方法を採用しているが、Major らの方法とは少し異なるものである。この型の歪計は、振動系を拡大装置として光学記録させる方法では困難な遠隔観測も簡単にでき、大地震の発生の際などに急激な歪が生じたときも、機械的なガタがないためその検出が容易であるなどの利点をもっている。われわれの歪計は当初、構造物などの外力による変形を測定する目的で製作したものであるが、後でのべるように、地球潮汐の観測をおこなうにも充分な高い感度をもっている。そこで、この歪計をもちいて地球潮汐や地かく変動、とくに地震発生の際に生ずる土地の歪を検出する目的のもとに、普通地かく変動の連続観測をおこなっている比較的湿度の高い横坑中で長期間安定した連続観測をおこなうことができるかどうかを検討するため、この歪計を京都市北区上賀茂本山町にある京都大学理学部所属の地学観測所横坑内に設置して予備観測を実施してきたので、その結果について報告する。

### 2. 歪計の構造

一般に歪計は適当に選んだ 2 点間の距離の変化を測定するものであるが、地かく変動や地球潮汐あるいは地震波などによる土地の伸縮を測定するために使用される歪計あるいは歪地震計は、基準尺となる溶融シリカなどによって作られた棒の一端を地面に固定し、他端とその近くの地面の間に拡大装置を備えつけて、両地点間の相対変位量を拡大記録するものである。今度試作した歪計では、基準尺の自由端と地面からの基礎台上に円板をそれぞれ固定し、基準尺のはさむ地面の相対的変位によって生ずる円板の間隔の変化を電氣的容量変化にかえる。この容量変化を周波数の変化として取り出し、10倍、100倍あるいは1000倍に周波数通倍

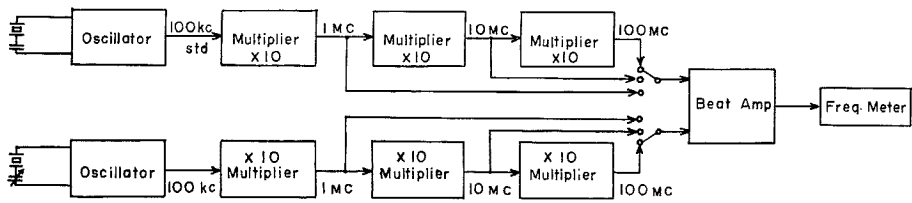


Fig. 1. Block diagram of the strainmeter of variable capacitor type.

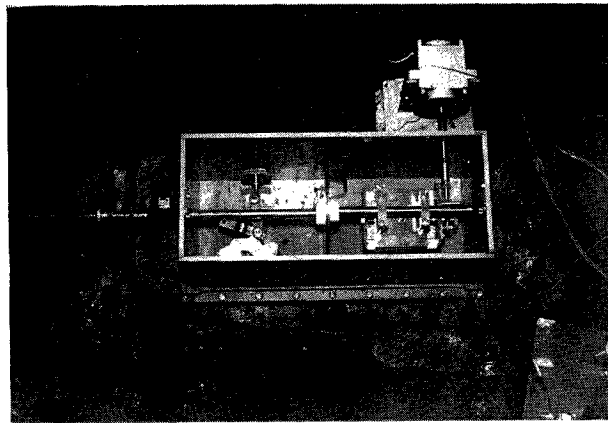


Photo. 1. View of the variable capacitor of the strainmeter.

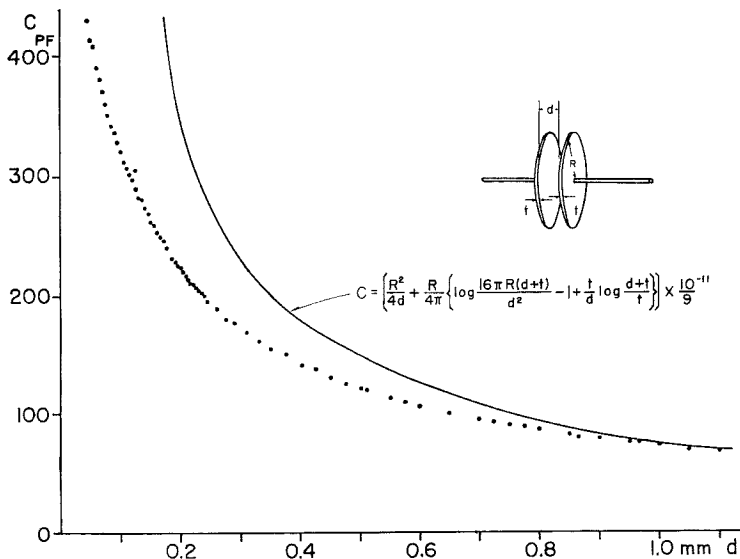


Fig. 2. Variation of capacitance by distance between the plates.

して, 同じように周波数通倍した標準周波数との差を周波数計に記録させるという方法をとっている。この歪計の Block diagram を Fig. 1 に示す。以下に各部について少し詳しくのべる。

まず基準尺としては, 現在のところ暫定的に直径 10 mm の super invar 棒を使用しているが将来本観測をおこなうときは super invar pipe を使用するつもりである。可変容量を形成する 2 枚の円板は直径約 10 cm, 厚さ 1 mm の真鍮板をクロムメッキしたものである。Photo. 1 に可変容量部分を示したが, 写真にみえるように, 2 枚の円板の横方向のずれの影響を少なくするために片方の円板を少し大きくしている。super invar 棒と円板の間は teflon により絶縁している。2 枚の円板の間隔と容量との関係を実測した結果を Fig. 2 に示す。点は実測値を, 太い実線は理論値を表わしている。実測値が理論値より小さくなってきているのは主として, 2 枚の円板が完全に平行になっていないことによるものと解釈される。

この円板によって作られる可変容量を水晶振動子と直列に接続し, Meacham の電橋安定化回路による発振器の電橋の一辺に挿入して, 直列共振周波数より高い周波数で発振させる。いま, この水晶振動子に直列に入れた容量を  $C_s$  とするとき, この  $C_s$  を入れた場合の発振周波数  $f'$  と直列共振周波数  $f$  の差  $\Delta f$  は,

$$\Delta f \equiv f' - f = \frac{1}{4\pi QR_1(C_0 + C_s)} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。こゝで  $R_1$  および  $C_0$  はそれぞれ水晶の等価抵抗および並列容量を表わす。なお現在使用している水晶振動子は DT カット 100 Kc/s で, 15°C 付近で温度係数が最小値をとるようにしている。これは現在地かく変動の連続観測をおこなっている横坑中の温度が大体 15°C に近い温度であることを考慮したことによる。さてこの水晶振動子についての値,  $R_1 = 71.5 \Omega$ ,  $C_0 = 27 \text{ pF}$  (リード線の容量も含む) および  $Q =$

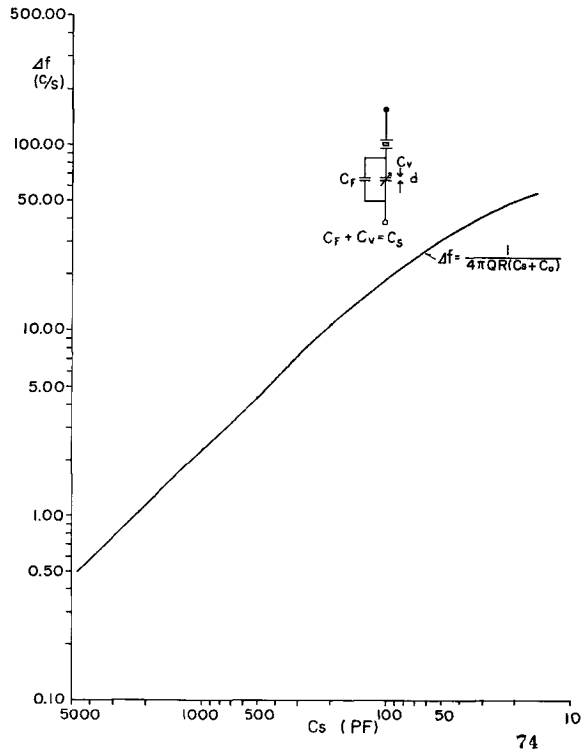


Fig. 3. Frequency change for the capacitance  $C_s$ .

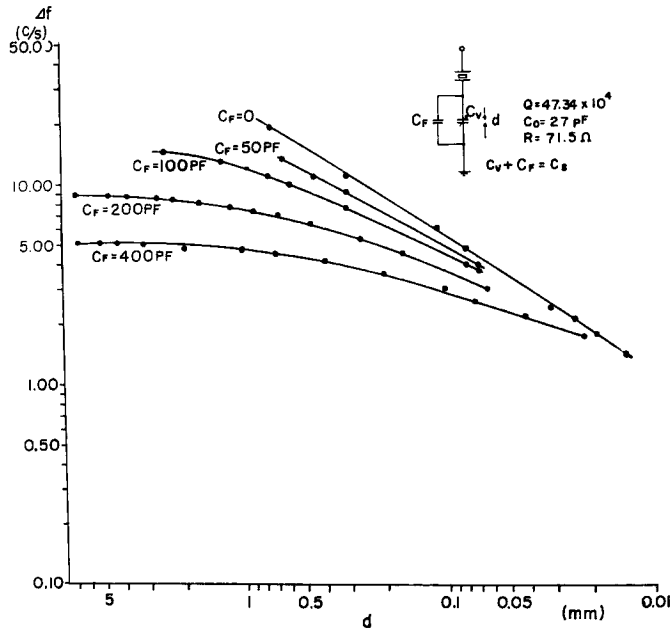


Fig. 4. Frequency change by distance between the plates.

$47.34 \times 10^4$  を (1) 式に代入すれば  $\Delta f$  と  $C_s$  の関係が得られる。Fig. 3 にこの関係を図示した。 $C_s$  を小さくすれば発振周波数が高くなり水晶振動子の直列共振周波数と発振周波数との差が大きくなるため発振が不安定になる傾向にある。発振周波数の調整あるいは感度の調整のために、平行円板による可変容量に並列に適当な固定容量  $C_F$  をて入れて発振させるとき、円板の間隔  $d$  (mm) と  $C_F$  (pF) に対する発振周波数の変化  $\Delta f$  を図示すれば Fig. 4 のようになる。図から明らかなように、円板の間隔を狭くして容量を増加させ、固定容量  $C_F$  を減らせば、同じ変位量に対して  $\Delta f$  が大きくなり、したがって感度が増すことになる。このようにして円板の間隔によって周波数変調した  $100 \text{ K c/s} + \Delta f \text{ c/s}$  の出力は周波数通倍器によって  $100 \text{ M c/s}$  まで周波数通倍する。感度を減ずるために  $1 \text{ M c/s}$  あるいは  $10 \text{ M c/s}$  までの通倍で出力を取り出すこともできる。他方標準用としてさらに1台の発振器で  $100 \text{ K c/s}$  の発振をおこなわせ、同様に周波数通倍し、両者を混合して周波数変化を beat として取り出し電子管式平衡記録周波計によりペン書き記録させる。現在使用している周波計の周波数測定範囲は  $49 \text{ c/s}$  から  $51 \text{ c/s}$  までであり、 $1/50 \text{ c/s}$  の周波数変化まで記録することができる。したがって  $100 \text{ M c/s}$  まで通倍したときを考えると、 $1/50 \text{ c/s}$  の変化は  $100 \text{ K c/s}$  では  $1/50000 \text{ c/s}$  の変化に対応し、Fig. 4 によれば、円板の間隔が  $0.5 \text{ mm}$ 、 $C_F = 100 \text{ pF}$  のとき、 $0.1 \text{ mm}$  の隔間の変化に対して約  $1 \text{ c/s}$  の周波数の変化を生ずるので、結局  $1/500 \mu$  の隔間の変化まで検出できることになる。これは基線長を  $10 \text{ m}$  とすれば  $2 \times 10^{-10}$  の歪まで測定できることを示し、感度の点だけから言えば基線長を  $50 \text{ m}$  にすれば  $4 \times 10^{-11}$  の歪まで測定することが可能である。たゞここで注意すべきことは、発振器の安定性である。 $100 \text{ M c/s}$  まで通倍した場合  $1/50 \text{ c/s}$  は  $100 \text{ K c/s}$  に対して  $1/50000 \text{ c/s}$  に相当するので、発振器が  $2 \times 10^{-10}$  の範囲内で安定であることが要求される。GT カット又は高安定の AT カットの水晶振動子を使用すれば、最近の水晶振動の技術ではこの程度の安定性は困難でないといわれているので、上に述べたような感度で観測を実行することも不可能ではないと考えられる。現在使用している発振器の安定性は  $2 \times 10^{-9}/\text{day}$  程度であり、 $10 \text{ M c/s}$  までの通倍の場合には発振器の安定性について問題はなく、 $3 \text{ m}$  の基線長でも  $10 \text{ M c/s}$  通倍で  $5 \times 10^{-9}$  程度の感度は簡単に得られることが実験の

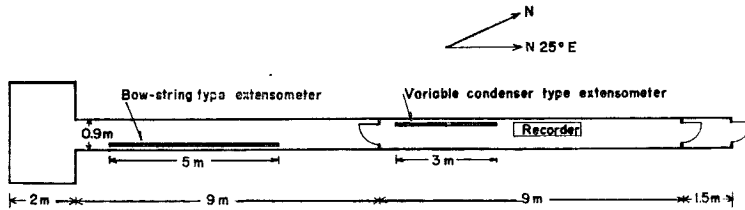


Fig. 5. Horizontal tunnel of the Kamigamo Geodesic Observatory.

結果わかっている。なお電源電圧安定のため定電圧装置を使用している。

### 3. 上賀茂地学観測所横坑および歪計の設置

上賀茂地学観測所の横坑の大体の様子は Fig. 5 に示す通りであり、最奥部の部屋に水平振り型傾斜計 4 成分、通路の部分に 5 m の基線長をもつ Bow-string 型伸縮計、一戸式重力計、気圧計および温度計が設置されている。こんど試作した歪計は、この伸縮計より扉をはさんで約 3 m 横坑の出口側に、基線長を 3 m として設置した。坑内で歪計の設置された状況は Photo. 1 および Photo. 2 に示す通りである。感度検定および発振周波数調整をおこなうため、モーターにより 1 枚の円板を移動させて円板の間隔を変えることができる。この横坑の床面は底部の岩盤の上に砂利を敷いた上、練瓦を並べその上からコンクリートをぬったものであるから、歪計の基準尺の両端は、この床を掘り抜き、床面から深さ約 1 m の所の岩盤へ鉄製ボルトを打ち込み、その周囲を約 40 cm × 40 cm のコンクリートで固めた基礎台に設置している。横坑内の温度の日変化は 1/10°C 以内であるので水晶振動子は恒温槽に入れてない。また記録器のペンがいずれかの端へ達したときは補償用の小容量 condenser を働かせ自動的にペンを記録紙の中央へ戻すようにしている。この方法により scale out による欠測をかなり有効に防止することができ、記録される周波数の範囲が数倍あると同様の結果になる。平行円板の間隔の変化に対する周波数の変化は、Fig. 6 に見られるように直線にはならないが、この補償用 condenser で記録可能になる範囲は 40 c/s から 60 c/s の間であるから、この範囲内では殆んど直線的とみなしてさしつかえない。基礎台を設置したのは 1963 年 8 月 28 日で同年 12 月 1 日より予備観測を開始した。

### 4. 観測結果および考察

Bow-string 型伸縮計によるこれまでの観測からこの横坑は、とくに伸縮変化については気圧変化による変形が非常に著しく、地かく変動の観測にはあまり適した横坑でないことが明かにされている。

得られた歪計の記録の一部分を Photo. 3 に示した。記録紙上の 1 目盛が 1/50 c/s の変化に対応し、記録紙の送り速度は 1.8 cm/hour である。気圧、降雨などによる土地の変形が大きいため 10 Mc/s 通倍で  $C_F$  を約 600 pF として感度を落して観測を実施してきた。平行円板の間隔を 1/100 mm ずつ変化させたとき 10 M c/s

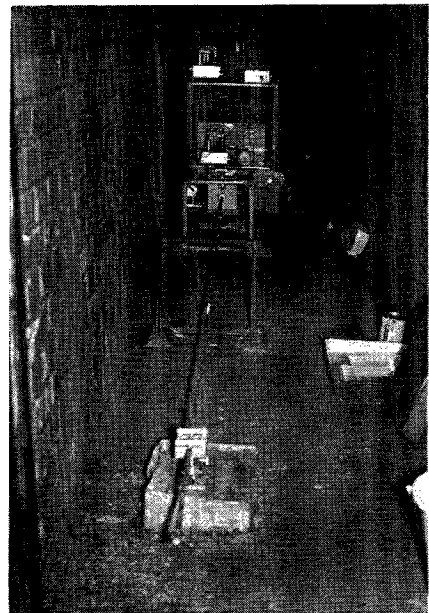


Photo. 2. The strainmeter of variable capacitor type.

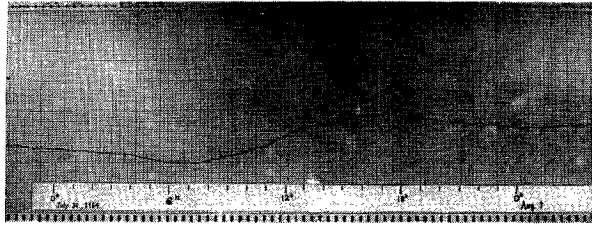


Photo. 3. An example of the record.

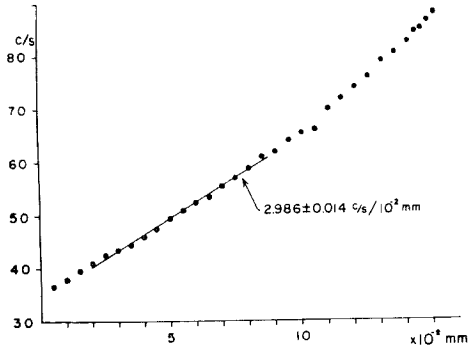


Fig. 6. Frequency change by distance between the plates when multiplied up to 10 M c/s.

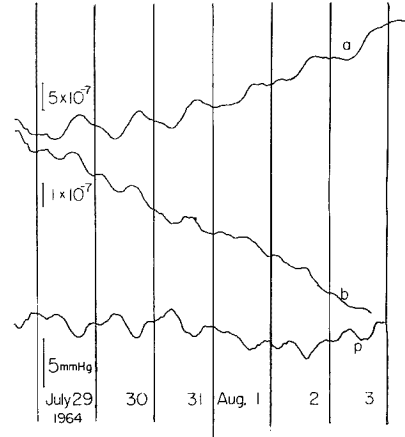


Fig. 7. The ground strain observed by the strainmeters of variable capacitor type (a) and of bow-string type (b), and the atmospheric pressure (p).

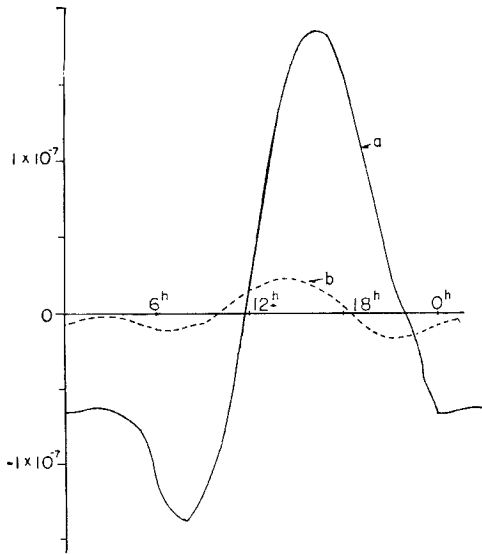


Fig. 8. Mean daily variation of the ground strain observed by the strainmeters of variable capacitor type (a) and bow-string type (b).

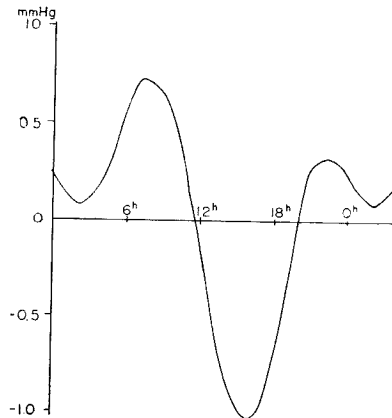


Fig. 9. Mean daily variation of the atmospheric pressure.

通倍後の周波数を Fig. 6 に示した。40 c/s から 60 c/s までの測定値について最小自乗法でその勾配を決定した値は  $2.986 \pm 0.014 \text{ c/s}/10^{-2} \text{ mm}$  と求められた。基線長を 3m としているので、記録紙の最小目盛である 1/50 c/s に対応する歪は  $2.23 \times 10^{-8}$  となる。試作した歪計および Bow-string 型伸縮計によって得られた記録の一部を気圧変化と共に Fig. 7 に示した。両方共気圧の上昇に伴ない、土地の収縮を示している。Fig. 8 に、この 2 台の伸縮計および歪計により得られた 1964 年 7 月 22 日から 9 月 7 日までの平均日変化曲線を、また Fig. 9 に同じ期間の気圧の平均日変化曲線を示したが、その形は気圧変化と逆の形をしており、1 mm Hg の気圧変化に対して Bow-string 型伸縮計では約  $2 \times 10^{-8}$ 、試作した歪計では約  $1.8 \times 10^{-7}$  の歪を示している。細部においてやゝ形の相異がみられるのは、可変容量型歪計が横坑の入口に近く、したがって気圧変化による変形も大きく、また気温の変化による土地の変形の影響をより多く受けているためと考えられる。

Fig. 7 においては 2 台の装置によって観測された長期間にわたる伸縮変化の方向が異っているが、これは設置場所による極く局所的な原因によって生ずる相異、すなわち両者の中間に扉があり、長期間の変化はとくに降雨により非常に大きな影響を受けるため、地下水の状態をはじめとして坑内の状況がかなり違っているために生じたものと解釈される。

以上の予備観測から、非常に湿度の高い横坑中においても殆んど支障なく連続観測を実施できることが明らかとなった。

## 5. あとがき

約 1 年間にわたって上賀茂地学観測所の横坑において、試作した可変容量型歪計の試験的観測をおこなってきた。その結果、湿度には余り影響されず、連続観測が可能であることがわかった。現在の設置場所では気圧などによる土地の変形が大きく、充分感度を上げて観測することができないので逢坂山地かく変動観測所へ移設して、さらに大きい基線長で本格的な観測を始めるべく目下準備中である。

おわりに当りこの研究に対し終始変らぬ御指導を給わった故西村英一教授および一戸時雄教授に深甚なる謝意を表すとともに、器械の設計製作などについて多くの御指導御尽力を頂いた郵政省電波研究所、蛭田鏡博士はじめ水晶振動研究室の方々に厚く御礼申し上げる。またこの観測に技術的な多大の御援助を頂いた津島吉男技官その他の方々に感謝の意を表する次第である。なおこの研究の一部は建設省技術助成金によるものであることを附記して謝意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) Benioff, H.: A linear strain seismograph, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 25, 1935, pp. 283-309.
- 2) Major, M.W. et al.: On elastic strain of the earth in the period range 5 seconds to 100 hours, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 54, 1964, pp. 295-346.