

6. 固有周期の安定な坑井用小型長周期地震計・ 傾斜計の開発*

地震研究所 坑井用小型長周期地震計
開発プロジェクトチーム**

(昭和 54 年 5 月 23 日受理)

1. 開発の背景

野外における長周期地震観測あるいは地殻変動観測といった分野は、地震計測のなかでも比較的進歩のおくれている部類に属している。言うまでもなく、その一番の理由は、操作性が良く特性の優れた可搬式測器が得難かったことにある。この方面の研究を打開する目的で種々の装置が考案されており、地震研究所・小型長周期地震計開発プロジェクトチーム (1974) による PEELS Type 73 もその一例である。同地震計は、MATUMOTO *et al.* (1977) による周辺装置と組合わせて用いることにより、かなりの悪条件下でも手軽に長周期地震観測を行える、コンパクトな装置である。振子の吊り方としては、水平動に Paschwitz 型、上下動に Kirnos 型が採用されているが、この PEELS Type 73 に限らず、石本式以来、長周期水平動地震計や傾斜計としては、水平振子の原理を用いたものがその大部分を占めている (柳沢, 1978)。よく知られているように、水平振子の固有周期 T_0 は、振子の腕の長さ l および回転軸と鉛直軸のなす角 i を用いて、

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g \sin i}}$$

で与えられる。小型の地震計、すなわち小さな l で大きな固有周期を得るには、角 i を微小にとる必要がある。したがって、容易に予想される通り、この固有周期は地盤の傾斜に対し敏感なものとなる。もしこの振子が傾斜計として使われる場合、傾斜に対する感度は振子の固有周期の 2 乗に比例するので、事態はもっと深刻である。測定すべき地盤傾斜によって傾斜感度が変わってしまうという、厄介な状況に置かれることになる。

現実の長周期地震観測や高感度傾斜観測において、もっとも悩まされるのは、ドリフトの問題である。ドリフトには、零点ドリフトと感度ドリフト (固有周期ドリフト) の双方があり、これがため、頻繁な零点調整や感度検定 (固有周期チェック) といったわずらわしい作業に追われることとなる。この内、零点ドリフトに関しては、MATUMOTO *et al.* (1977) のように電気的な負帰還を行うことにより、観測作業の負担を軽減させることが可能である。しかしながら、感度ドリフト (固有周期ドリフト) については、水平振子の

*Borehole Easy-operation Long-period Seismometer の頭文字と、1979 年度発表の意味から BELS Type 79 と命名。

**安藤誠一 (技術部)、岡田義光 (富士川地殻変動観測所)、安芸敬一 (マサチューセッツ工科大)、大工原保・鈴木喜吉・原智美 (技術部)

原理に基いている限り、避けることは不可能である。したがって、この難点から逃れるためには、水平振子とは原理を異にする、長周期地震計・傾斜計の開発が必要となる。その方向への試みとして、交叉吊振子を用いた坪川ほか (1970) の TEM 型傾斜計や、単振子を用いた測器 (たとえば ALLEN, 1972; 岡田ほか, 1975) が開発されている。もっとも、これらの装置で実用されている固有周期は 2~3 秒程度である。今回は、以上のような背景を踏まえ、新しい方式の振子による、固有周期数秒~数 10 秒の長周期水平動地震計・傾斜計の実現を目指すこととした。また、これからますます需要が増えると思われる坑井用計器として使えるよう留意したが、幸いなことに、この方式の振子は、坑井用として仕立て上げるのに好都合な形状を有している。

2. 原理

この振子の原理そのものは、ROMBERG (1961) により既に提案されており、試作も行われているが、何故かその後普及せぬまま現在に到っている。その理由としては、振子の吊上げや支点到に用いるべき優秀なバネ材が入手困難であったこと、フィードバックに不可欠な、小型で優秀な変位変換器が存在しなかったこと、等が考えられる。

振子の吊り方としては、Fig. 1 に示す如く、La Coste 型長周期上下動地震計の鍾りをそのまま鉛直下方へもっていったような形である。ここで、吊りバネの張力を弱くすれば単振子に近い特性となり、強くすれば振子が上に跳ね上ってしまう。その中間の適当な張力のところで、振子は無定位状態に近くなり、長い固有周期が得られるという訳である。La Coste (1935) の場合と同様、零レングスのバネを用いて、支点間の距離がバネの真の伸びと同じになるようにすれば、理論的には、完全な無定位振子が生れる。

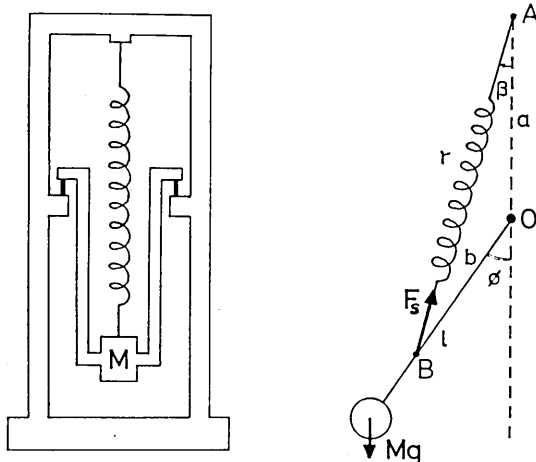


Fig. 1. Principle of the pendulum (after ROMBERG, 1961).

Where, M =mass, F_s =spring force, r =length of spring, $a=\overline{OA}$, $b=\overline{OB}$, l =length of pendulum, ϕ =angular displacement of pendulum.

Fig. 1 において、振子の支点 O のまわりのモーメントに関する運動方程式を立てると、

$$Ml^2\ddot{\phi} = -Mg \cdot l \sin \phi + F_s \cdot a \sin \beta \quad (1)$$

となる。(1)式に、バネ力 $F_s = k_s(r - r_0)$ (k_s : バネ定数, r_0 : 初期長さ), また $\sin \beta = (b/r) \sin \phi$ を代入し、 $\phi \ll 1$ と仮定すれば、

$$\ddot{\phi} = -\frac{g-U}{l}\phi \quad (2)$$

$$U = \frac{k_s ab}{Ml} \left(1 - \frac{r_0}{a+b} \right) \quad (3)$$

を得る。(3)式の U は、振子の構成で決まる定数である。なお、 ϕ の 2 次の項による影響を考慮すると、 $r_0 = 0$, 即ち零レングスバ

ネの使用が望ましい。(2)式は自由振動を表わし、その固有周期は次式で与えられる。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g-U}} \quad (4)$$

長い固有周期を得るには $g \approx U$ にとればよい。すなわち、零レングスのバネ ($r_0=0$) を用いるとすれば、その強さを $k_s a \approx (l/b) Mg$ に選べばよい。次に、この振子に地盤傾斜を与えたとき、その特性がどう変化するかを調べ、水平振子の場合との対比を行ってみることにする。

(1) 系が非感度方向に θ 傾いた場合

Fig. 2 に示すような状態で、このとき零点位置の移動はないが、重力が実効的に $g \cos \theta$ になるので、固有周期 T は次のようになる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \cos \theta - U}} \quad (5)$$

(4), (5) 式より U を消去すれば、

$$T = T_0 / \sqrt{1 - (1 - \cos \theta) (T_0/T_{00})^2} \quad (6)$$

$$T_{00} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (7)$$

ここで、 T_{00} は長さ l の単振子の固有周期である。振子の腕の長さ l をパラメータとして、 θ に対する固有周期変化を図示すれば、Fig. 3 中の上方に向かう曲線群を得る。ここで、 T_0 としては、10 秒の場合と 50 秒の場合とが例にとられている。図中、 θ の小さいとこ

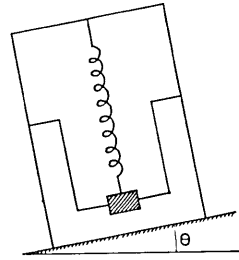


Fig. 2. The case tilted in the plane of non-oscillation; θ =angle of tilt.

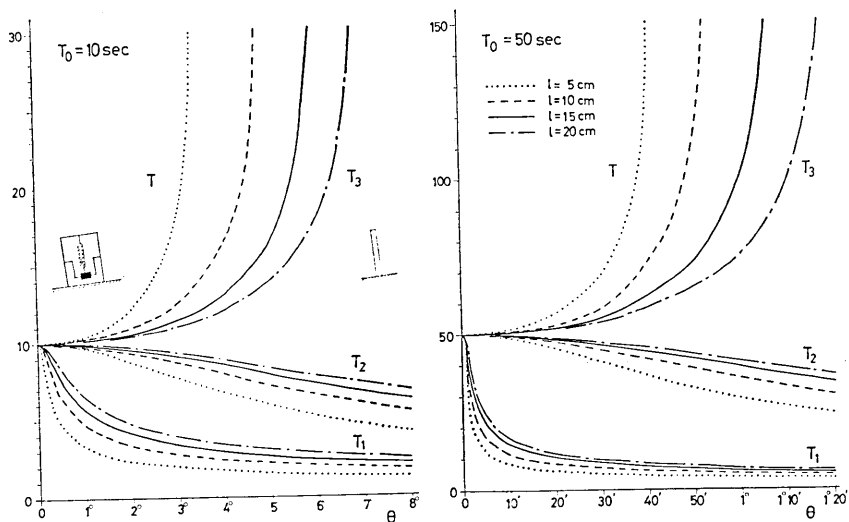


Fig. 3. The change of characteristic period due to tilt in non-oscillating plane (T in eq. (6)) and in oscillating plane (T_1 - T_3 in eqs. (18)-(20)).

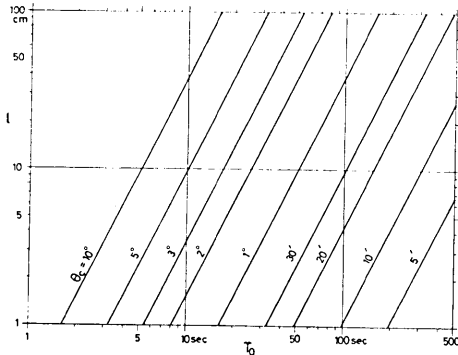


Fig. 4. Critical angle at which pendulum begins to be unstable.

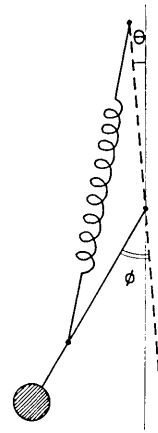


Fig. 5. The case tilted in the plane of oscillation; θ =angle of tilt.

ろでは曲線がフラットであり、傾斜に対する固有周期の変化がほとんどないことがわかる。 θ をどんどん大きくすると T も大となり、ある臨界角 $\theta = \theta_c$ で $T = \infty$ に達する。ここで振子は不安定となり、これ以上傾斜させると、振子は上方に跳ね上がったままとなってしまふ。臨界角 θ_c は、(6) 式右辺の分母を 0 にする条件より、

$$\sin \frac{\theta_c}{2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{T_{00}}{T_0} \right) \tag{8}$$

で与えられる。Fig. 4 は、この式を図に表わしたものである。たとえば、20秒の固有周期を腕の長さ 6 cm の振子で実現した場合、この振子は 2° の傾斜を与えると不安定になることが読みとれる。同じ固有周期であれば、腕の長い振子ほど、傾斜に対する特性変化が少なく、また安定である。

(2) 系が感度方向に θ 傾いた場合

Fig. 5 に示すような状態で、この振子を傾斜計として用いた場合に相当する。運動方程式としては、(1) 式の替りに次のようになる。

$$Ml^2 \ddot{\phi} = -Mg \cdot l \sin(\phi - \theta) + k_r ab \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \sin \phi \tag{9}$$

零点位置 $\phi = \phi_0$ は、(9) 式において $\ddot{\phi} = 0$ とおき、 $\tan \phi_0 = g \sin \theta / (g \cos \theta - U)$ から求められる。 $\phi_0, \theta \ll 1$ とすれば、この釣合位置は次式で与えられる。

$$\phi_0 = \frac{g}{g - U} \theta \tag{10}$$

(4) 式を用いて、この式から U を消去すれば、

$$\phi_0 = \left(\frac{T_0}{T_{00}} \right)^2 \theta \tag{11}$$

を得る。(11) 式は、地盤傾斜に対する増倍率を表わすものであるが、この式は、水平振子ほか一般の長周期振子でも成立つ関係式である。次に、ある平衡点のまわりの振子の運動を考えてみる。まず、 $\phi = \phi_0 + \phi_1$ 、 $\phi_1 \ll 1$ として (9) 式を変形すれば、次の運動方程式を得る。

$$\ddot{\phi}_1 = -\frac{\sqrt{g^2 + U^2 - 2gU \cos \theta}}{l} \phi_1 \quad (12)$$

零点は適当に補償するとして、 $\phi = \theta + \phi_2$ 、 $\phi_2 \ll 1$ とすれば、 ϕ_2 に関しては次のような運動方程式が成立つ。

$$\ddot{\phi}_2 = -\frac{g - U \cos \theta}{l} \phi_2 \quad (13)$$

また、同様に $\phi = \theta + \phi_3$ 、 $\phi_3 \ll 1$ とすれば、

$$\ddot{\phi}_3 = -\frac{g \cos \theta - U}{l} \phi_3 \quad (14)$$

となる。(12)~(14) 式に対応する固有周期は、以下のように与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = 2\pi \sqrt{l / \sqrt{g^2 + U^2 - 2gU \cos \theta}} \quad (\text{around } \phi = \phi_0) \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g - U \cos \theta}} \quad (\text{around } \phi = \theta) \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \cos \theta - U}} \quad (\text{around } \phi = 0) \end{array} \right. \quad (17)$$

(4) 式を用いて U を消去すれば、これらはそれぞれ次のように表わされる。

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = T_0 / \sqrt[4]{1 + 2(1 - \cos \theta) (T_0/T_{00})^2 [(T_0/T_{00})^2 - 1]} \doteq T_0 / \sqrt[4]{1 + \phi_0(\phi_0 - \theta)} \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 = T_0 / \sqrt{\cos \theta + (1 - \cos \theta) (T_0/T_{00})^2} \doteq T_0 / \sqrt{1 + \frac{1}{2} \phi_0 \theta} \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 = T_0 / \sqrt{1 - (1 - \cos \theta) (T_0/T_{00})^2} \doteq T_0 / \sqrt{1 - \frac{1}{2} \phi_0 \theta} \end{array} \right. \quad (20)$$

(18)~(20) 式で表わされる、傾斜に対する固有周期変化を Fig. 3 に示した。このうち、(20) 式の T_3 は、非感度方向への傾斜に対する固有周期の式 (6) と全く同一である。なお、(18) 式の T_1 は、振子の釣合点 $\phi = \phi_0$ のまわりの微小運動に対するものであり、 $\phi_0 \ll 1$ の条件より、ごく微小の θ でしか現実的な意味を持たない量である。いずれにせよ、 $\theta = 0$ 近辺では曲線がフラットであり、地盤傾斜に対する固有周期の安定性がうかがえる。

(3) 水平振子の場合との比較

水平振子の場合、(4)、(6)、(18) 式に対応する固有周期は、それぞれ次式で与えられる。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \sin i}} \quad (4)'$$

$$T = T_0 \sqrt{\frac{\sin i}{\sin(i - \theta)}} \quad (6)'$$

$$T_1 = T_0 \sqrt{\frac{\sin i}{\sin \sqrt{i^2 + \theta^2}}} \doteq T_0 / \sqrt[4]{1 + \phi_0^2} \quad (18)'$$

腕の長さ $l = 15 \text{ cm}$ の振子で固有周期 10 秒の地震計を構成した場合を例にとり、傾斜に対する固有周期の変化を、両振子で較べてみたのが、Fig. 6 である。なお、この場合、水平振子の回転軸と鉛直軸のなす角 i は、 $20'45''.541$ である。感度方向への傾斜に対する固有周期変化((18)、(18)' 式)は、両振子ともほぼ同じで、 $\theta = 0$ での微係数は 0 であるが、非感度方向への傾斜に対しては、Romberg 型振子が微係数 0 なのに対し、水平振子では

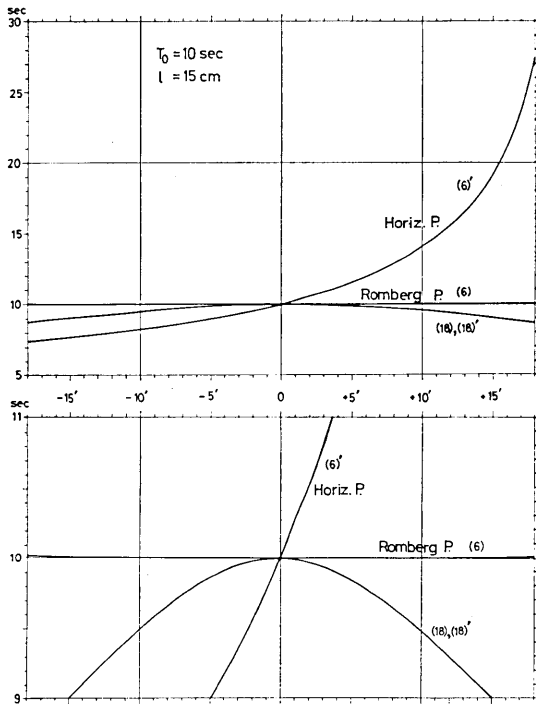


Fig. 6. The comparison of change in characteristic period due to tilt in non-oscillating plane (eqs. (6) and (6)') and in oscillating plane (eqs. (18) and (18)').

Table 1. The comparison of change in characteristic period (T) and in tilting sensitivity (S) due to the ground tilt in plane of non-oscillation.

θ	Horizontal Pendulum		Romberg Pendulum	
	T	S	T	S
+10'	13.895	193.08	10.0035	100.053
+ 8'	12.760	162.81	10.0022	100.034
+ 6'	11.864	140.75	10.0013	100.019
+ 4'	11.133	123.95	10.0006	100.008
+ 2'	10.523	110.74	10.0001	100.002
0	10	100	10	100
- 2'	9.554	91.27	10.0001	100.002
- 4'	9.160	83.90	10.0006	100.008
- 6'	8.811	77.63	10.0013	100.019
- 8'	8.499	72.23	10.0022	100.034
-10'	8.218	67.54	10.0035	100.053

0.24 秒/1 分角である。この時の固有周期および傾斜感度変化を、数値で Table 1 に示した。

3. 構造

試作品の製作にあたっては、小型長周期地震計 PELS Type 73 の開発に用いられた技術が最大限利用されている。振子には変位変換器のほかに 2 つの電磁変換器が取り付けられた。これは、変位・速度を取り出すほかに、フィードバックによる位置矯正や、テストパルスによる振子の検定など、多彩な使用法を可能にするためである。部品としても、吊りバネには PELS 上下動に用いられたのと同じもの(バネ材=スパン C)を使用し、支点には Bendix 社 (U.S.A.) のピボット型十字バネ、変位変換器に SONY 社のマグネセンサを使用している。吊上げバネは、取付部の寸法があるため、総体としての零レングスバネ特性を得るには、バネ自身の初期長さを負の値にとる必要がある。なお、設計・

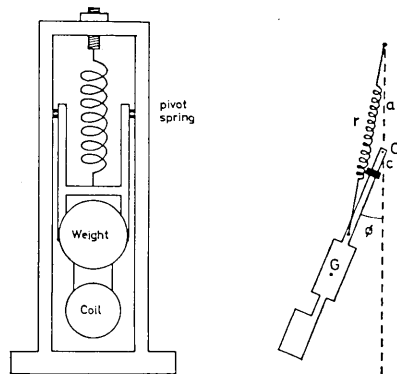


Fig. 7. Schematic of actual pendulum.

製作にあたっては、全体を坑井内に設置することを意識し、なるべく縦長の形状となるよう留意した。

実際に構成された振子について運動方程式を立ててみると、以下ようになる。Fig. 7で、支点Oのまわりのモーメントを、振子に働く各力について求めてみると、

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{重} & \text{力} & -Mg \cdot H \sin \phi \\ \text{吊 上 げ} & \text{バネ力} & k_s(r-r_0) \cdot ab/r \sin \phi \\ \text{支 点} & \text{バネ力} & -k_p \cdot \phi \\ \text{マ グ ネ セ ン サ} & \text{吸引力} & -k_m c \phi \cdot c \\ \text{空 気 的} & \text{制動力} & -D\dot{\phi} \\ \text{電 気 的} & \text{制動力} & -G_1 I_1 - G_2 I_2 \\ \text{外} & \text{力} & -M\ddot{x} \cdot H \cos \phi \end{array} \right.$$

ここで、 M : 振子質量, H : 支点から振子重心への距離, k_p : 支点バネのバネ定数, k_m : マグネセンサ吸引力定数, c : 支点からマグネセンサ取付位置への距離, G : コイルの動電定数, I : コイル電流, \ddot{x} : 感度方向の地動加速度, であり、それ以外の記号は Fig. 1 と同じである。振子の慣性モーメントを K とすると、運動方程式は、 $\phi \ll 1$ として以下のようになる。

$$K\ddot{\phi} = \left[-MgH + k_s ab \left(1 - \frac{r_0}{a+b} \right) - k_p - k_m c^2 \right] \phi - D\dot{\phi} - G_1 I_1 - G_2 I_2 - MH\ddot{x} \quad (21)$$

今、コイル抵抗を R_{C1} , R_{C2} , 外付抵抗を R_{D1} , R_{D2} とすれば、 $I_1 = G_1 \dot{\phi} / (R_{C1} + R_{D1})$, $I_2 = G_2 \dot{\phi} / (R_{C2} + R_{D2})$ と表わせるので (21) 式は次のようになる。

$$K\ddot{\phi} + \left[D + \frac{G_1^2}{R_{C1} + R_{D1}} + \frac{G_2^2}{R_{C2} + R_{D2}} \right] \dot{\phi} + \left[MgH - k_s ab \left(1 - \frac{r_0}{a+b} \right) + k_p + k_m c^2 \right] \phi = -MH\ddot{x} \quad (22)$$

(22) 式は、良く知られた強制振動の式であり、次のような形にまとめることができる。

$$\ddot{\phi} + 2h\omega_0 \dot{\phi} + \omega_0^2 \phi = -\frac{1}{l} \ddot{x} \quad (23)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\left[MgH - k_s ab \left(1 - \frac{r_0}{a+b} \right) + k_p + k_m c^2 \right] / K} \quad (24)$$

$$h = \frac{1}{2\omega_0 K} \left[D + \frac{G_1^2}{R_{C1} + R_{D1}} + \frac{G_2^2}{R_{C2} + R_{D2}} \right] \quad (25)$$

$$l = \frac{K}{MH} \quad (26)$$

ここで、(26) 式の l は、相等単振子長と呼ばれる量である。 l を用いて、(24) 式を固有周期の形に書き直せば、

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g-U}} \quad (27)$$

$$U = \left[k_s ab \left(1 - \frac{r_0}{a+b} \right) - k_p - k_m c^2 \right] / MH \quad (28)$$

となる。(28) 式の U の形は複雑であるが、(3) 式同様、振子の構成で決まる定数であって、(27) 式に示される固有周期は、(4) 式と全く同一である。

上述の検討を経て完成した試作品の構造を、Fig. 8 に示す。バネの吊上げ機構は、吊り位置 (Fig. 1 における長さ α) の調整と、バネとフレームを結ぶピアノ線の長さの調整が可能である。これにより、バネの張力と、全体としての初期長さを自由に可変でき、振子周期を 2 秒から 20 秒程度まで容易に設定できる。水平振子式の場合、基盤三点支持の支柱の出し入れは、振子の零点と固有周期の両方に影響するので、目的とする長い振子周期を零点と同時に設定する作業は、なかなか困難である。しかしこの Romberg 型振子では、零点と固有周期を独立して調節することが可能であり、この方式の優れた利点の一つといえよう。

試作器の諸元は以下の通りであるが、これらは暫定的なものであり、将来変更される可能性を含む量である。

- イ. 寸法 本体、径 12 cm. 高さ 54 cm.
- 坑井用容器、径 14 cm. 高さ 68 cm.
- ロ. 重量 本体約 8 kg. 坑井用容器約 21 kg.
- ハ. 相当振子長 15 cm.
- ニ. 振子の固有周期 2 秒から 20 秒まで可変.
- ホ. コイル抵抗 約 $2400 \Omega \times 2$.
- ヘ. 変位変換感度 重心位置換算で $2 \text{ mV}/\mu\text{m}$.

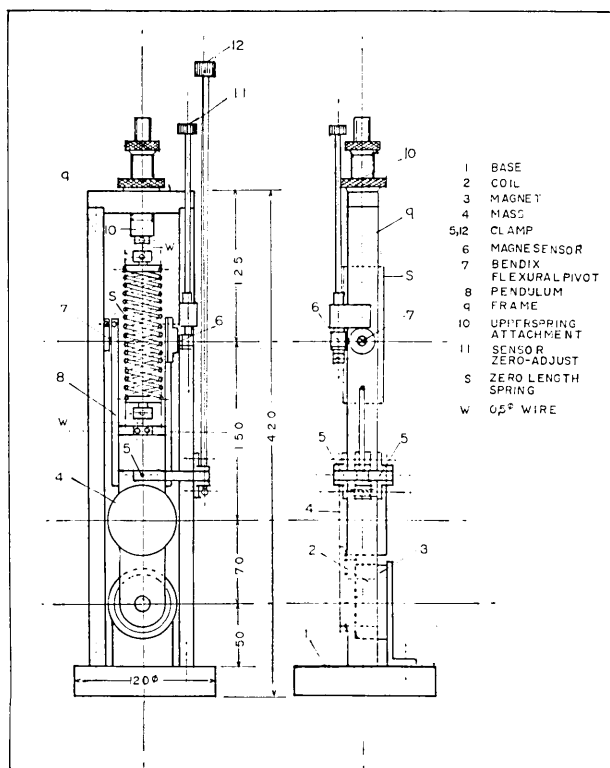


Fig. 8. Schematic of prototype model.

- ト. 直線範囲(±1%) 重心位置換算で ±2.5 mm.
- チ. 速度変換感度 0.5 V/kine.

4. 試験観測

試作器は2台作られ、異なる環境下で試験観測が行われた。1台は坑井用容器に納められ、地震研究所車庫裏に掘った約2mの穴に埋められた。Fig. 9は埋める前の外観で、設置の際には、三脚から取り外して右の容器内に納められる。計器底部に見られるのはヒーターで、設置の際にロウをいったん溶かし、また固めることで大体の鉛直姿勢を整えたのち、マイクロモーターで微調を行って零点を出す方法をとった。地表に近く、また都会地のため、擾乱は相当に大きく、観測法としては、フィードバックをかけて振子の位置を安定化させ、長周期地震計としての性能を見ることに主眼が置かれた。得られた遠地地震の記録の一例を Fig. 10 に示す。

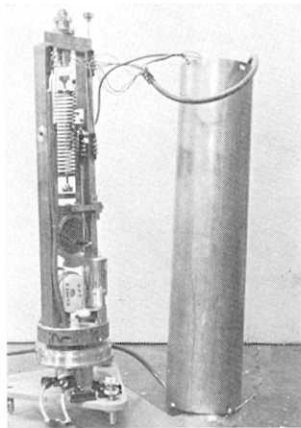


Fig. 9. Outview of prototype model which was buried in a borehole.

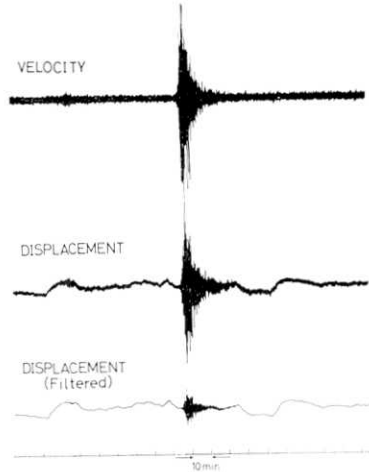


Fig. 10. An example of recorded trace.

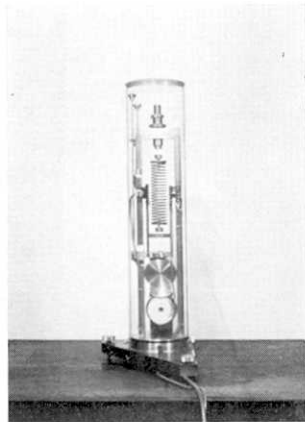


Fig. 11 Outview of prototype model which was settled in a vault.

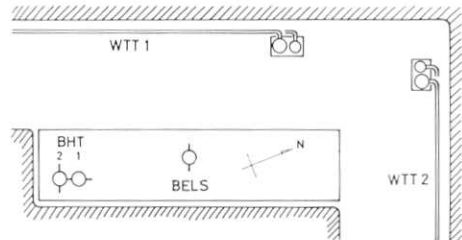


Fig. 12. The arrangement of instruments in the vault for tilt observation (the Fujigawa Crustal Movement Observatory).

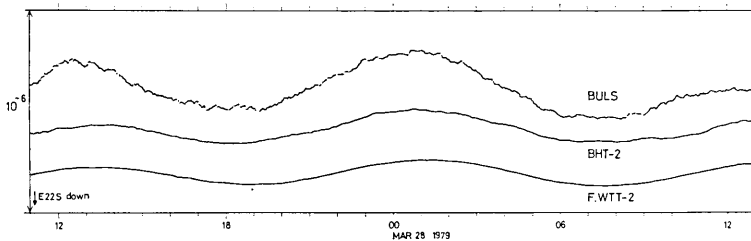


Fig. 13. An example of a tidal record compared with one obtained by a simple pendulum type borehole tiltmeter (BHT) and a float type water-tube tiltmeter (F. WTT).

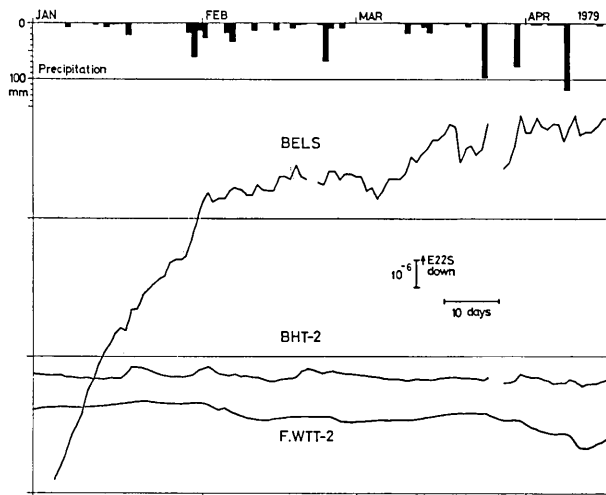


Fig. 14. Summary of observation for secular ground tilt.

一方、もう1台は三点支持の基台上に固定され、富士川地殻変動観測所の坑内に設置された (Fig. 11)。同じ観測坑内には、同一成分の水管傾斜計および単振り型の坑井用傾斜計が据えられており、ここでは傾斜計としての性能の確認に重点が置かれた。各計器の設置状況は Fig. 12 の通りである。記録は、変位出力をハイカットして打点記録計に記録させ、振りへのフィードバック等を行っていない。得られた記録の一例を Fig. 13 に、また永年変化の様子を Fig. 14 に、それぞれ水管傾斜計および坑井用傾斜計の記録と並べて示した。地球潮汐はおおむね良好に記録しているようであるが、永年的変化に関しては、設置直後のドリフトは別としても、非常にガタガタしている。これは、縦長の本体を三点支持の台にのせた設置法に問題があったようである。

5. あとがき

一連の実験および試験観測を経て、この振子を用いた装置が、長周期地震観測および傾斜観測の実用に、十分耐えられるものであることが立証された。この振り (Romberg 型) の持つ優れた特徴は、以下のような点である。

(1) 地盤傾斜に対する固有周期の変化が無視できるほど小さいので、負帰還回路と組合わせて長周期地震計を構成すれば、零点ドリフト・固有周期ドリフトの双方がない、き

わめて安定した特性が得られること。また、傾斜計として用いた場合にも、地盤傾斜による感度変化がなく、好都合であること。

(2) 固有周期の調節と零点の調節は全く独立に行えるので、設置後の調整が非常に容易であること。

(3) 縦長の形状を有しているため、坑井観測用に最適であること。

なお、原理からして、この型の振子で構成できる地震計は水平動成分のみである。水平動と上下動とを較べた時、前者は坑井内に深く設置すればするほど S/N が上がるが、後者はある程度以上の深さではそれほど S/N の向上は著しくないとのことである。現実の観測では、たとえば従来の上動成分をある深さにまで埋め、水平動成分はここで述べた方式のものを地中深く埋設するといったことが考えられよう。

今回試作された装置は、長周期水平動地震計として、また傾斜計として、充分その機能を果すことが確かめられたが、より完成されたものとするためには、感度検定装置の附加が不可欠であろう。また、別の方向への発展として、もう少し弱い吊りバネを使用して、茶筒の大きさくらいのポータブルな長周期地震計を構成するとか、また、支点を自在継手のような構造にして、1台で2成分の観測を行えるようにするとか、色々の工夫が考えられる。そのような方向への開発・試作も既に進められているが、それらについては次報に待ちたい。

今回製作されたものと似た例として、倒立振子をスプリングで吊上げた構造の地震計が、SACKS (1966) により作られている。その特性は、ここに述べられた振子と同じように素晴らしいものであるが、更に性能を向上させる目的で、同地震計は真空容器の中におさめられており、とてもポータブルなものとはいえない。

今回の装置が、今後改良を加えていくと同時に、フィールドでの長周期地震観測や潮汐観測に広く用いられ、より良い研究が推進されることを願うものである。

本開発は、地震研究所昭和53年度プロジェクト研究費によって行われたものである。試験観測にあたっては、地殻変動部門の松本滋夫・渡辺茂両氏の協力を得た。又、ロウの溶解等については、強震計観測センター田中貞二講師より有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- ALLEN, R.V., 1972. A borehole tiltmeter for measurements at tidal sensitivity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**, 815-821.
- 地震研究所小型長周期地震計開発プロジェクトチーム, 1974, 小型可搬長周期地震計の開発(その1), 地震研究所研究速報, **13**, 17-22.
- LA COSTE, L.J.B., 1935, A simplification in the conditions for the zero-length spring seismograph, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **25**, 176-179.
- MATUMOTO, H. and M. TAKAHASHI, 1977, Development of the portable easy-operation long-period seismometer. Part 2: Peripheral device, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **52**, 11-27.
- 岡田義光・渡辺 茂・笠原慶一, 1975, 富士川観測所における地殻変動連続観測(1), 測地学会誌, **21**, 179-190.
- ROMBERG, F.E., 1961, An oscillating system for a long-period seismometer for horizontal motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **51**, 373-379.
- SACKS, I.S., 1966, A broad-band large dynamic range seismograph, *The Earth Beneath the Continents*, *Am. Geophys. Union*, 543-553.

- 坪川家恒・長沢 工・柳沢道夫・村田一郎・田島広一・佐藤忠弘, 1970, 電磁型傾斜計による観測, 測地学会誌, 16, 209-231.
- 柳沢道夫, 1978, 歴史的にみた地球潮汐観測用傾斜計, 海洋科学, 10, 649-661.

6. *Development of the Borehole Easy-operation Long-period Seismometer (BELS Type 79) which has a Stable Period.*

By Project Team for the Development of the Borehole Small-size Long-period Seismometer, Earthquake Research Institute.

The most troublesome factor in the observation of long-period oscillation or ground tilt is the problem of drift. As to the drift of zero-point, we can reduce it by the technique of negative feedback. On the other hand, we cannot avoid the drift of characteristic period (or drift of tilting sensitivity) as far as we use the principle of horizontal pendulum, which is the most popular way to construct the long-period seismometers. That is because the period of horizontal pendulum is essentially sensitive to the ground tilt.

In this circumstance, we intended to devise a long-period seismometer which has a stable period for the ground tilt. For the suspension of the pendulum we adopted the method originally suggested by Romberg in 1961. This type of pendulum has the following features.

(1) The change of characteristic period due to ground tilt is negligibly small. So, if we construct a long-period seismometer with this pendulum and combine it with negative feedback, we can obtain a very stable system which is free from both types of drift.

(2) As adjustment of period and zero-point can be carried out independently, the settlement of this instrument is quite easy.

(3) The shape of the pendulum is just adequate for the use in a borehole. The prototype model constructed in this study has dimensions of $120\phi \times 540$ (diameter \times height in mm), a weight of 8 kg and is equipped with two kinds of transducers. One signal is proportional to the displacement by use of the Magnesensor (SONY Inc.) while the other two are proportional to the velocity using ordinary moving coils. The characteristic period of the pendulum can be varied from 2 sec to 20 sec, by changing the position of the attachment point of the suspension spring.

Total performance of this seismometer was found to be satisfactory through the test observation of natural earthquakes at a borehole site and earth tide observation in the vault.