

フロート型自記水管傾斜計の試作

地震研究所 技 術 部

(昭和48年1月20日受理)

1. ま え が き

現在、広く地殻変動の連続観測に用いられている水管傾斜計の歴史は Michelson, A.A. (1919) にはじまる。わが国ではこれが高橋(1933)、萩原(1947)によってさらに実用的なものに改良され、幾多の実地試験を経て今日の標準型にいたっている。[この間の経緯については山田(1973)参照]。

後述するように、水管傾斜計はその設置にしても観測にしても少なからぬ手数がかかる。ほかに簡便な傾斜計がいろいろ考案されているにもかかわらず、現在地殻変動の観測、特に地震予知研究に関するそれにおいて重用されているのは、ひとえにその長期安定性への信頼によるものである。事実、水管傾斜計の検出する土地傾斜の永年変化が充分水準測量の結果と比較し得るものであることが確認されるにいたった[笠原(1973)]。これらの実績から見て水管傾斜計は今後もますます重要な役割をもつものと思われる。

このように有用なものではあるが、従来の水管傾斜計には手動読取りに頼るという基本的な欠点がある。そのため、観測には毎日の定時入坑が必要となる。これでは長期にわたる場合特に観測の連続性も保証し難い上に、観測員にとって大きな負担であるし、他の高感度計器に与える擾乱も無視し得ない。観測坑の無人化によりこれらの改善をはかるためには、どうしても水管傾斜計の自動化が必要なのである。1965年に始まる松代群発地震の調査においてその必要性は一層切実なものになった。当時地震活動に伴なう地殻変動を観測するため、松代地震観測所の坑内に水管傾斜計2成分が設置されたが、変動進行の微細経過を見逃さないためには、日夜をわかない手動読取りを行なわざるを得なかったのである。

水管傾斜計の自動化は以前から多くの人々によって試みられてきた。その多様さはここに列挙し難いほどであるが、水位変化の検出原理を大別すれば、

- 1) 測定マイクロメータの遠隔操作(基本的には手動型の延長)

のほかに、

- 2) 機械的手段(例:フロートの変位)
- 3) 光学的手段(例:水面反射の光量変化)
- 4) 電気的手段(例:容量変化, 抵抗変化, 超音波)

など、実にいろいろな考案が提出されてきた。水管傾斜計の最大の特徴が安定性にあることを考えれば、自動化に当っても水面を擾乱することはさげなければならない。この見地からは3)または4)の原理に基づくことが望ましい。

最近地震研究所において採用された超音波型水管傾斜計(Sing-around法)による水位

変化検出, 山田 (1973) はその点理想的と思われる。しかし普及の可能性を考えるとこれは複雑かつ高価すぎるうらみがあり, 今後の需要の広さを考えると, もうひとつ普及型に相当するものが要望される。

フロート型自記水管傾斜計は, 各地殻変動観測所からこのような要望にもとづいて設計・試作されたものである。その基本的構造は既存のいくつかの傾斜計と同様²⁾に基づくものであるが長期安定性を損わないよう構造に留意し, さらに電気的検出にも差動型回路を採用してある。京都大学防災研究所では早くから桜島, 屯鶴峯, 上宝などの観測所においてフロート型の水管傾斜計を据え, 実用観測を行なっている。われわれの試作品はこれらを参考にして一昨年いらい油壺地殻変動観測所での試験観測を経て, 現在では弥彦・鋸山・松山の各観測所にも順次設置し, ほぼ満足すべき成果をあげるにいたった。観測記録の解析はいずれ各観測所からの報告にまつこととして, 本文ではとりあえず計器の構造・性能などについて報告する次第である。

2. 原理および構造

(i) 全体の構成と機構

フロート式自記水管傾斜計は, 従来の読取式水管傾斜計の如く, 一対の容器にフロートを浮かべ, 水位の変動に従って動くフロートの運動を光学的あるいは電気的に検出して傾斜変化を求めようとするものである。原理的には読取式のものと同様である。即ち, Fig. 1 において, A・B 両容器の水位がA→A', B→B'の如く変化したとすれば, 水位の変化 $\Delta h = \{(A \sim A') - (B \sim B')\}$ で傾斜の変化は $\Delta h/L$ (Lは計器の長さ) であらわされる。水位を電氣量(この場合電圧)に変換すれば, 電氣量についても上と同様の関係が得られ, [傾斜変化] = $\Delta h/L = f(\Delta e)$ となる。(Δe)は(Δh)に対応する電圧変化である。こ

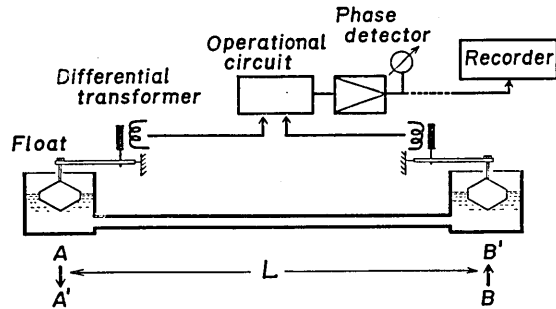


Fig. 1 Schematic diagram of a float-type water-tube tiltmeter.

ここでフロートは如何なる条件においても水位と一体の運動をすることが要求されるが, 仮に多少のちがいが生じたとしても左右の容器に同等に起るものについては, 両者の減算を行うことによってその影響は相殺されると考えられる。全体の構成としては, 水位検出部, 水位変化の差を作る演算回路, 指示計器にその量を表示させる指示部, さらに記録させる記録計の4部分よりなる。

第2図は本計器の主要部分をなす水位検出部である。各部分の機構について簡単に説明を加える。容器は肉厚5mm, 150φ×150mmの亚克力樹脂製である。上蓋は差動変動変圧器の載っている部分で, 気密を保つため○リングを入れてある。フロートはソロバン玉の形をしたガラス製の中空容器で, 安定をよくするため底部に鉛の散弾を入れこれをパラフィンで固めてある。自重は200gr, 従ってそれだけの浮力をもって釣合を保っている。

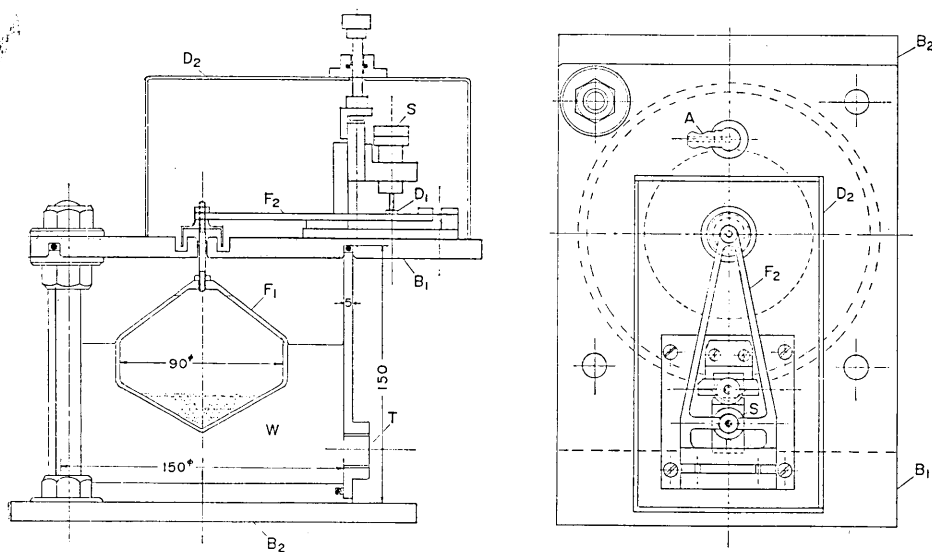


Fig. 2 Schematic view of a float-type water-tube tiltmeter,

- A : air pipe joint
- B_{1,2} : B₁...upper base, B₂...lower base
- D_{1,2} : D₁...dust core, D₂...dust cover
- F_{1,2} : F₁...float, F₂...float lever
- S : sensor
- W : water reservoir.

フロートの安定性については、心軸の上端がばねで固定されるからそれほど問題はないにしても、若干の考慮を払った。水面動揺時の安定は重心と浮心との関係即ち傾心 (Meta-center) の位置如何によるが、それがほぼフロートの幾何学的中心にくるようにした。従って、喫水線はややその上方にある。傾斜時の復原力も大きくなるようやや浅い円錐形とし、表面張力が一定になるよう垂直壁の部分設けた。

また、上蓋に付着した露滴が落下した際直ちに流下するよう上部も円錐形とした。このようなフロートおよび水面の振動周期は約0.4秒の実測値を得た。フロートを支える軸が上蓋を通る部分は軸と孔との間を大きくして組立を容易にし、図に見られる油壺を設けて気密を保つようにした。フロートを支持するレバーはアルミニウム製で、ばねは種々の材料で実験を行った結果厚さ0.14 mm、巾5 mmの発条鋼が最良であった。ばねは厚くとも薄くとも感度が充分得られない。また、かなり乱暴な水面動揺の後も計器の感度に影響がなくてはならない。

この支持部分の重量は28 grである。差動変圧器はフロートの上下運動を1/5に縮小する位置に取付けてある。それは1 μ の水位変化の検出能力、差動変圧器の不均衡時の吸引力の影響、なるべく大きなダイナミック・レンジを得ることなどの事項を考慮することによって定まったものである。

(ii) 水管の内径のきめ方

水管傾斜計が自記記録できれば伸縮計と同様に正確な Strain step を記録することが期待されるから、地震学の研究を進めてゆく上に重要な役割を果すであろう。読取式の水管傾斜計の観測中地震によるゆっくりした水面の上下振動を体験することがあるが、土地の傾動に対してなるべく忠実に水面が運動するためには容器の大きさに対して水管の太さを適当に選んで計器全体を臨界制動の状態にしておくことが大切である。これについて京都大学防災研究所の江頭庸夫 (1965) は次の式を提供している。臨界制動の状態を得る水管の直径を d_c とすると、

$$d_c = 2 \left(\frac{\eta}{\rho} \right)^{1/3} \left\{ \frac{4 L D_1^2 \cdot D_2^2}{g(D_1^2 + D_2^2)} \right\}^{1/6}$$

ここで、 D_1, D_2 は左右の容器の直径、 L は水管の長さ、 g は重力の加速度 (980 cm/sec^2)、 η は水の粘性係数 (0.0114 poise , 15°C)、 ρ は水の密度 (1.00 gr/cm^3) である。 $D_1 = D_2 = 15 \text{ cm}$ としてわれわれの観測所について本式によって求めてみると、

北信, 富士川	$L = 40 \text{ m}$	$dc = 1.57 \text{ cm}$
弥彦	30 "	1.50 "
油壺, 鋸山	25 "	1.46 "

の値を得る。

(iii) 電子回路からレコーダまで

本計器の電子部分は株式会社コロナ電子の標準製品を使用している。即ち、差動変圧器 (CD-34)、位相増巾器 (CEM-1)、演算ユニット (CU-2) の番号のものである。差動変圧器は微小変位の検出装置として周知のものであるが、本計器の使用者のために簡単に説明を加えることにする。全体の構成は Fig. 1 に示す如く、フロートの上下運動を縮小して

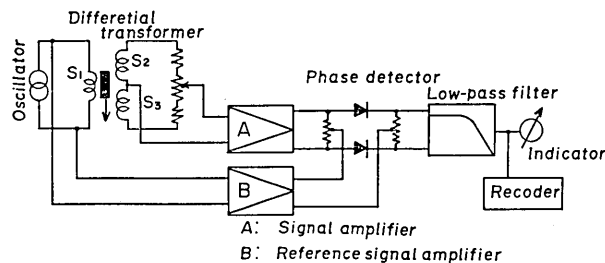


Fig. 3 Block diagram of a differential transformer system.

差動変圧器の鉄心に伝える。Fig. 3は演算回路を除いた単独水位変化を検出する場合の計測回路図である。差動変圧器は励磁コイル S_1 と、これと全く対称の位置にある S_2, S_3 の3個のコイルからなる。

両コイルに誘起する電圧は鉄心の中心位置からの距離の函数としてあらわれる。鉄心の位置により一方のコイルの電圧は増加し、他方は減少する。出力として得られる両コイルの差電圧は鉄心の変位に対しかなり良好な直線性が得られる。図で明らかな如く、この回路は等価的に交流ブリッジを形成する。その出力は位相検波回路によって取出される。こ

の方法は検出電圧を増巾する主増幅器Aのほかに、その交流成分と同位相で振巾がこれに数倍する一定電圧を増巾器Bによって加えてやることにより、鉄心の平衡点付近の微小電圧成分に対して増巾器の雑音やドリフトなどの不安定要素を除去し、方向弁別した直流出力を得ようとするものである。演算ユニットは、A、B両差動変圧器の出力についてA+BまたはA-Bの演算を行ない、あるいはA、B単独にも出力を取出せる装置である。

その主体はCT-37と称する独自の変成器である。その構造は2個の1次巻線と1個の2次巻線からなる。A、B両差動変圧器の出力は、それぞれ整合回路を経て2個の1次巻線に結ばれる。2次巻線には両者の和の電圧があらわれる。B側には位相反転回路が含まれていて、これを通れば減算となる。なお、演算回路にはA、B両差動変圧器に共通な励磁用発振器を備えている。

(iv) 総合特性

感度：本計器の最高指示感度はDレンジにおいて $1 \text{ div.} = 0.2 \mu$ 、これに対応する水位変化はその5倍、 1μ である。以下A、B、Cの4段階に亘る感度切替が可能で、それぞれ $1/5$ づつ感度に変化する。これを自記する記録計(横河 ERB 12-30-123 中央 0 mV)は $\pm 5 \text{ mV}$ 、100等分の記録目盛を有する。感度検定によっても明らかであるが、Dレンジにおいては記録紙上の 1 div. が水位の 0.2μ に対応する。従って、 $1 \mu = 5 \text{ div.}$ である。一方水管傾斜計の長さが 30 m の場合の感度は $1 \mu = 0.0067''$ 、即ち $1.5 \mu = 7.5 \text{ div.} = 0.01''$ の関係が得られる。

安定性・温度特性・耐湿性など：本計器の部品はすべて従来の伸縮計と同じものを同様の条件のもとで使用しているので、経験的にある程度の確信を有するが、高湿度の坑道内にて使用する関係上現在の差動変圧器に故障絶無を期待することは困難と思う。

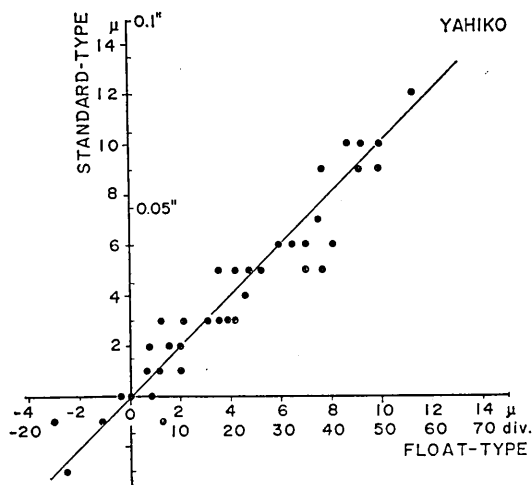


Fig. 4 Readings on a float-type tiltmeter in comparison with the manual readings on a standard water-tube tiltmeter (Yahiko Crustal Movement Observatory, E. R. I.).

3. 実用試験

(i) 較正

計器の設置が終わったならば較正を行なう。その方法はピペットによって 0.88 cc の水を増減すると 25μ (両容器について)の水位変化が得られる。これを演算ユニットの切替スイッチによってA、B、A-Bについて段階的に繰返し記録紙上でそれぞれ一貫してよく調和しているかを調査し、必要があれば位相増巾器の調整を行なう。

(ii) 標準水管傾斜計との比較

フロート式自記水管傾斜計は設置後日なお浅く長期観測における信頼性も充分検討されていない。基線の修整は日常しばしば行なわなければならない。

ならないし、計器自体の故障も絶無ではない。従って、長期安定性については読取式水管傾斜計は常にその基準となるもので、併置は当分必要欠くことのできないものとする。Fig. 4 は両者の関係を最近の弥彦観測所の資料について調べたものである。読取式水管傾斜計は熟練した観測者にとってはほぼ 1μ の精度で読取が可能である。これに対してフロート式は $0.2\mu/\text{div}$ の感度で記録されるから、読取式のばらつきはある程度やむを得ないとしても両者はかなりよい一致を示している。

(iii) 長期観測の実例

フロート式自記水管傾斜計は現在油壺、鋸山、弥彦、松山の四観測所において設置し、読取式と比較観測中である。そのうち松山のものには演算ユニットを用いない片側記録方式（他端は直径約 30 cm の水容器）である。片側式は左右の容器の水面の面積比で定まる感度低下はそれほど問題にならないにしてもドリフトの点で若干劣る。それらの結果はいずれ各観測所より報告されるであろうが、記録の実例として弥彦観測所において読取式と比較したものを Fig. 5 に示す。これだけの安定性があれば、従来毎日定時の入坑観測が不可欠であった水管傾斜計の読取りは週一回程度で充分間に合うことになる。これにより観測者の負担が大巾に軽減され、入坑が他計器に与える擾乱も防止できるであろう。

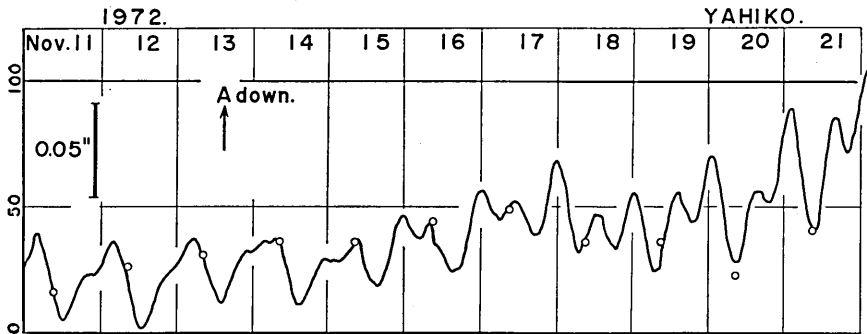


Fig. 5 Continuous records of a float-type water-tube tiltmeter as compared with the data from manual reading type circles. (Yahiko Crustal Movement Observatory, E.R.I.)

4. ま と め

以上今回技術部において試作したフロート式自記水管傾斜計の製作から実用試験までのあらましを述べた。その結果低価格で充分信頼性ある連続観測結果の得られることが明らかになった。しかし、長期安定性については今後観測を継続しつつ、改良を進めてゆかなければならない。特に電子部品を坑道内の高湿度の環境から防護することも重要であるが、耐水性の強い素子の試用も進めるべきである。その一例として、株式会社ソニーの開発になるマグネセンサーへの転換を計画中である。これによってさらに長期安定性の向上が期待ができると考えられるが、実用試験の上発表の機会を得たい。やや細部の問題であるが最近容器の気密性向上に伴ない空気管による誤差の問題が生じた。

空気管は本来坑道内の気圧傾度から水位の安定を保つ目的のものであるが、気密がよくなったために容器内の気圧が外気圧変化に即応出来なくなるとかえって誤差の原因となったも

のと考えられる。従って、状況によっては空气管は両端数 m を残し外気に開放しておくのがよい場合もある。

試作品の外観を Photo. 1 に掲げておいた。

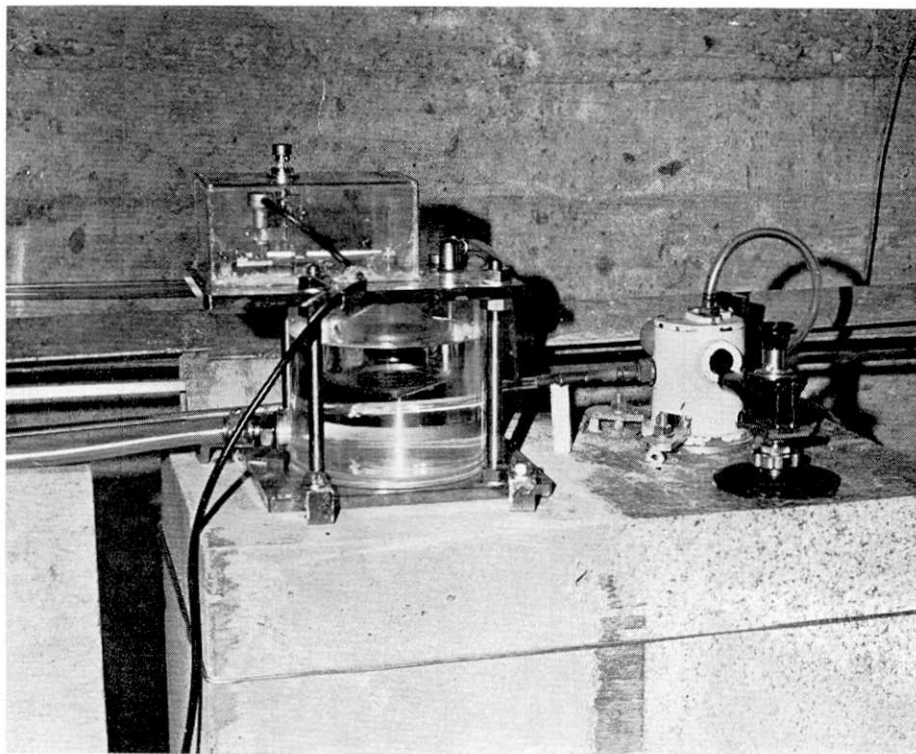


Photo. 1 Float-type water-tube tiltmeter (left).

5. 謝 辞

本計器の製作にあたり貴重な資料の提供をいただき、御教示を賜わった京都大学理学部の田中豊講師、同防災研究所の加藤正明助手に厚く御礼申し上げます。また、本報告をまとめるにあたり終始有益な助言と激励を与えられた笠原慶一教授ならびに山田重平氏に深く感謝致します。終りに試験観測に御協力いただいた油壺、鋸山、弥彦、松山の観測担当の各位に感謝の意を表します。

文 献

- 山田 重平：水管傾斜計による地殻変動の観測，地震研究所研究速報第 10 号第 1 冊 (1973)
江頭 庸夫：自記水管傾斜計，京都大学防災研究所年報 8 (1965) pp. 59-69.
西口 謙：計測・制御・差動トランスとその応用，オーム社 (1965).

A Float-type Water-tube Tiltmeter.

By Technical Division,
Earthquake Research Institute.

The instrument here presented is basically a water-tube tiltmeter, which is equipped with a float system in each of the water vessels. The water level change, and movement of the float, due to the ground tilting is detected and recorded electronically with a differential transformer. Practically, the signals from a pair of the vessels are combined in the pushpull sense so that the common errors due to the atmospheric changes and the power supply drifting may be canceled out.

The instrument's structures and specifications are described together with the results of laboratory tests. Long-term tests at several observatories prove that the present model has the sufficient sensibility and stability. Labors and disturbances due to the observer's frequent entering a vault, which has been necessary for manual reading of water-tube tiltmeter, will be reduced significantly by this model.