

## 野外トレンチ観測用改良型ハーフフィールド水管傾斜計の開発

園田保美・古澤 保・寺石真弘・大谷文夫

### 要 旨

地表面での野外観測に使用できるトレンチ埋設型のハーフフィールド水管傾斜計を開発した。低消費電力で、保守に手数がかからないことを目標とし、火山や地すべり地域での観測にも適する。シリコンオイルを媒体として、フロートは磁気吸引力で水槽中心に保持される。フロートの変位は渦電流センサーで検出する。宮崎観測所の坑道内および桜島火山の野外トレンチでテスト観測を行った。

キーワード：水管傾斜計，ハーフフィールド型傾斜計，トレンチ埋設型傾斜計，地殻変動連続観測，傾斜観測

### 1. はじめに

水管傾斜計は、通常水平坑道内に設置するが、観測用坑道の掘削には多大の経費と時間を要し、掘削可能な場所も限られる。野外で地面に溝を掘りその底部に設置する、トレンチ埋設型の水管傾斜計が実用的な感度を有するものとして構築できれば、坑道内観測の制約から逃れられる事になる。地表設置の傾斜計としては加藤ら(1986)により室戸岬測候所に設置されたもの、白井ら(1994)により東海大学湘南校舎構内で試験されたものなどがある。いずれも約50m長のものである。これらの傾斜計では、不凍液の使用や、ハーフフィールド型の採用など、地表設置がもたらすさまざまな条件をクリアするための試みが行われた。

宮崎観測所では、地震予知などの目的をもつ坑道内観測と全く同等の性能を地表で期待する、というのではなく、火山や地すべり地での観測など比較的大きな変動が期待されるような条件において、これまでの坑道内観測での経験を生かして、立地条件のきびしくない傾動観測ができないかという観点から、下記のような環境を想定した野外観測用埋設型水管傾斜計を試作する事にした。

考慮した外部環境に対する条件は

[1]野外のトレンチ底への設置のため気温の日変化や降水などの影響を直接に受けるので、これら

の気象擾乱が大きくても、傾斜観測値に及ぼす影響が少ないこと。

[2]地表植生の違いや、日射の具合によって、温度が観測機器全長にわたり均一ではなくても、その影響が少ないこと。

使用に際しての条件として

[3]火山、地すべり地などでの観測でよく遭遇するような商用電力の得られない場所でも、太陽電池、風力発電、バッテリーなどの電源を使って観測を行う。

[4]以上のような悪環境での使用にかんがみ、設置およびその後の保守の手数ができるだけ少ないこと。

最後に

[5]製作コストが低いこと。

このような条件に適するものとして、両端の計測用水槽を結ぶ水管の断面積全体に液体を満たした通常の連通管形式(フルフィールド型)の水管傾斜計ではなく、断面の下半分のみを液体として、両水槽の水面が水管全長を通じてつながっている、ハーフフィールド型を採用することにした。この形式の場合、水面の位置が、連通管内の圧力のバランスで決まるのではなく、連続した水面自体が重力の等ポテンシャル面になるので、液内に温度不均つまり密度差があっても、影響を被ることが少ない。また全体の温度変化によって熱膨張によ

る体積変化が生じて、その変化分を広い水面全体でまかなうので、連通管式のものに比べて、水面高さが変化する量が少なくてすむ。(寺石ら、1997)

媒体の流体としては蒸発による液面低下を避けるためシリコンオイルを使用する。シリコンオイルは低粘性のものを使用するものの、水に比べれば粘性が高いので、周波数特性がかなり低周波数までハイ・カットされることになり、坑道内にくらべて雑微動が大きいと考えられる地表での観測に適した特性である。またデータ収録という面からも低サンプリングレートでの収録にふさわしい特性といえる。センサーとしては低消費電力の渦電流方式センサーを使用して、フロート高さを直接測る構造とする。なお、上記のようにシリコンオイルを使用するので言葉どおりの「水管」傾斜計ではないが、他に適切な表現もないので、以下、本稿では、この原理による計器に対する呼称として「水管傾斜計」「水槽」などの言葉を従前どおり使用することとする。

本傾斜計の開発により、これまでの地殻変動連続観測の常識からすればけた違いに簡単な工事で、10mを超えるスパンの傾斜観測が出来る事になる。これによって、火山、地すべり関係のみならず、いままで不可能と考えていた地震発生に関連する地殻変動の臨時的な連続観測の可能性も生まれる。

本稿では、まずこの傾斜計の開発にいたる経過として、宮崎観測所で製作された前身のフルフィールド型傾斜計についても簡単に述べ、その後、主題の傾斜計について詳述し、最後に短期間ではあ

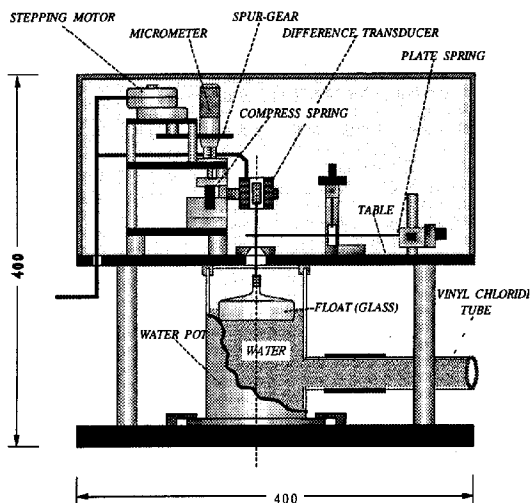


Fig.1 Type I water-tube tiltmeter.  
(full-filled type)

るがフィールドに実際に設置して得られたデータを示す。

## 2. 水管傾斜計の開発A<I, II型機>

宮崎観測所の水管傾斜計は設立当初の1975年以来、フロート位置の検出は光テコを用いた光学方式によっており、1980年までの記録はプロマイド印画紙への光点露光で行っていた。この方法では印画紙現像後まで傾斜変化を見る事ができない、デジタル・データではないなどの問題があった。その後、一定時間毎に受光センサーをモーターで駆動させて光点を走査する方法でデジタル化を図ったが、まだ、連続記録ではなく、装置の機械的な摺動部の故障が避けられず、欠測が生じるなどの問題が残った。

1985年から、日向灘地殻活動総合観測線(高田ら、1987)として、槇峰他の観測点をテレメータ化するにあたり、完全に電気式の変換装置が必要とされ製作されたのが、Fig. 1に示すI号機である。フルフィールド型で、蒸留水使用の差動トランス型水管傾斜計である。水面高検出水槽とフロートはガラス製である。差動トランスのコアはフロートに直接取り付けられているが、フロート本体は板バネ支点のアームで支持されている。差動トランス支持摺動部はステッピング・モーターとマイク

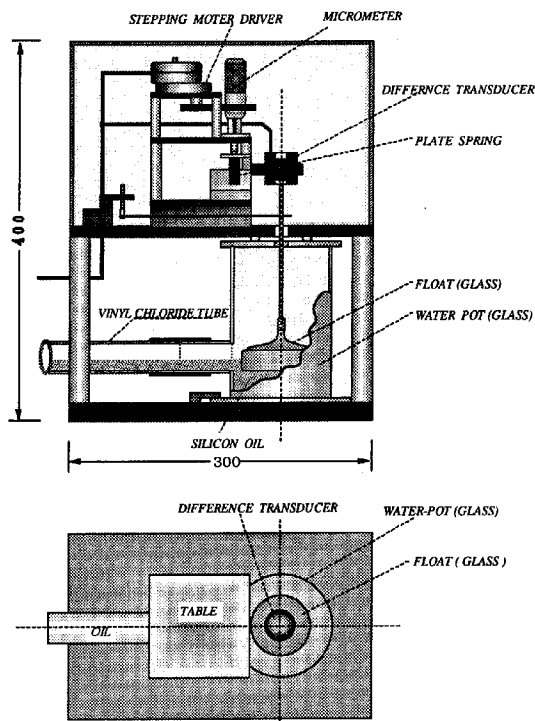


Fig.2 Type II water-tube tiltmeter.  
(half-filled type)

ロメーターで駆動され、零点調節や較正が行える。最新のものに比べて、複雑な構造で大型となっている。設置にあたっては蒸留水中の気泡の除去に手数がかり、観測開始後も蒸発した分だけ水を補充する必要があるため、連続観測を長期にわたり継続するにはメンテナンスが大変である。この形式の傾斜計センサー部は宮崎観測所工作室において全部で26台(13成分)製作され観測線の各観測点で使用されている。なお、宮崎観測所では、光学方式の変換部に差動トランス変換装置を追加した兼用型を使用している。

Fig.2は、1996年、大隈観測室に設置した、ハーフフィルド型、水管傾斜計Ⅱ型である。基本構造はⅠ型と同じであり、ただ、液面高さを変えてハーフフィルド型にしている。媒体流体としてシリコンオイルを初めて採用した、今回製作した機器の原理面でのプロトタイプといえる機種である。この傾斜計による2年余の観測データでハーフフィルド型の特性が確認でき、今回製作機器の設計に際して非常に参考となった。(寺石ほか、1997)

### 3. 水管傾斜計の試作B<Ⅲ型機>

Fig.3に示す今回の改良型水管傾斜計もハーフフィルド型水管傾斜計である。センサー部に渦電流センサーを使用し、構造がシンプルでコンパクトとなり、全体のサイズも小型になっている。媒体液体として不揮発性であるシリコンオイルを使用している。両端のセンサー部水槽は外径100mmパイプを利用したアクリル樹脂製である。また両者を連結するパイプも、外径40mmの同パイプを利用しており各部材の間をFRPポリ樹脂で溶着して容器全体がアクリル樹脂製の一体化した構造として、従来ガラス水槽と硬質塩化ビニールパイプをゴム管で結合していたのに比べ、高精度で設置でき、外圧の影響を受ける部分を減らし、また経年的な劣化も減らすことができる。

超スーパーインバル棒で製作した3本の支柱で水槽上部に支えられたジュラルミン製円盤に渦電流方式の変位センサーを支持するスライド部を取り付け、マイクロメータ及び圧縮バネでセンサーを上下移動させて零点調整、較正をすることが

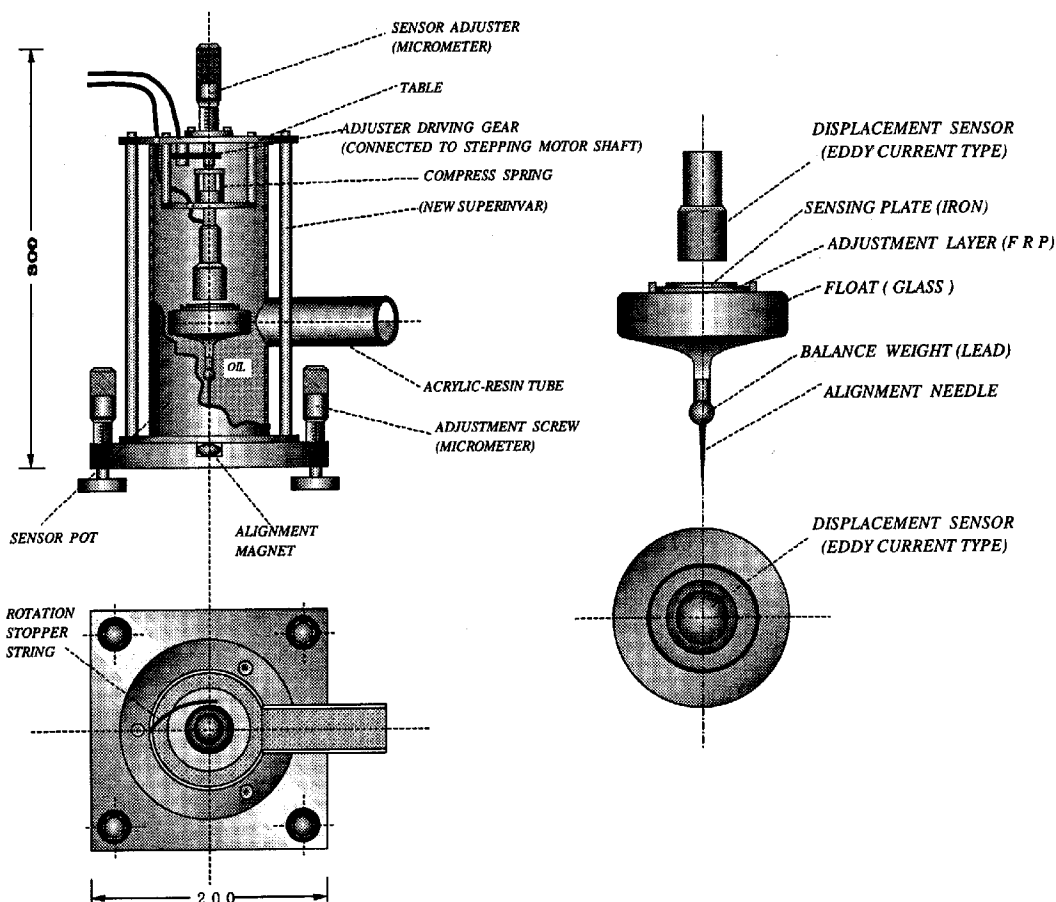


Fig.3 Newly designed half-filled water-tube tiltmeter without float suspension mechanism. (type III)

できる。

変位センサーはフロート上面を平面にしてここに直接とりつけた検知盤の位置を測定する構造にして、地震時にフロートの鉛直軸が傾くような運動が発生しても、センサーと検知盤との横方向の位置変化が少なくなるようにした。また、検知盤を精度よく水平に取り付けるため、フロートを液面に浮かせた状態でその上面に液状のFRPポリ樹脂を流し、その表面が水平を保ったまま固化させた。この上に検知盤を載せることで、フロート形状の対称性のわずかな狂いのために傾斜が生じていてもそれが補償されている。

フロートは外径70mmの密閉ガラス製である。フロートの支持機構としては直接拘束するものは何も設けず、水槽下部中央の磁石とフロート下部のalignment needleとの吸引力で、水槽中央に保持される構造としている。この部分の原理は石井ら(1992)の震研90型と同様であるが、needleがフロートに直付けされている点異なる。ハーフフィールド型のため、フロート位置に極端な上下がないため、90型より簡単な構造となっている。従来のアームを板バネで支える方式ではフロートの上下運動が円弧運動となり、バネの復元力の影響もあるため、液面高さの最適な位置に限られ、精度よく測れる範囲も狭かった。しかし、今回の方式では完全に上下運動となるため、センサーが追随し、ハーフフィールドの水面が保持される限り、液面高さに制限は受けない。磁石とneedleとの間の吸引力はフロートが下がるほど大きくなるが、測定値にどのような影響がでるか調べるために、次のような測定を行った。

フロートの位置を一定にして、センサーをマイクロメータで動かして、変位0.5mm毎の出力を記録する(Fig.4-a)。この場合、磁石による吸引力は変化しない。次いで、Fig.4-cのような装置で、液面の位置を自由に変化できるようにして、センサー位置を一定に保ったままで、液面の位置を0.5mmづつ変えて、同様の記録をとる。この場合、フロートと磁石の距離が順に変化している。両者の出力値を比較したのがFig.4-bであり、両者の間に系統的な差が生じていないことがわかる。つまり、約1cmの範囲で上下させる限りでは磁石吸引力の変化をとくに考慮する必要はないといえる。使用する水管の外径が40mmであることを考えると十分な条件であろう。Fig.5-aでわかるように、変位-出力の関係が完全にリニアになるのが中心部の6mm程度に限られるので、この部分を中心に使用するとすればさらにこの影響が無視できる。な

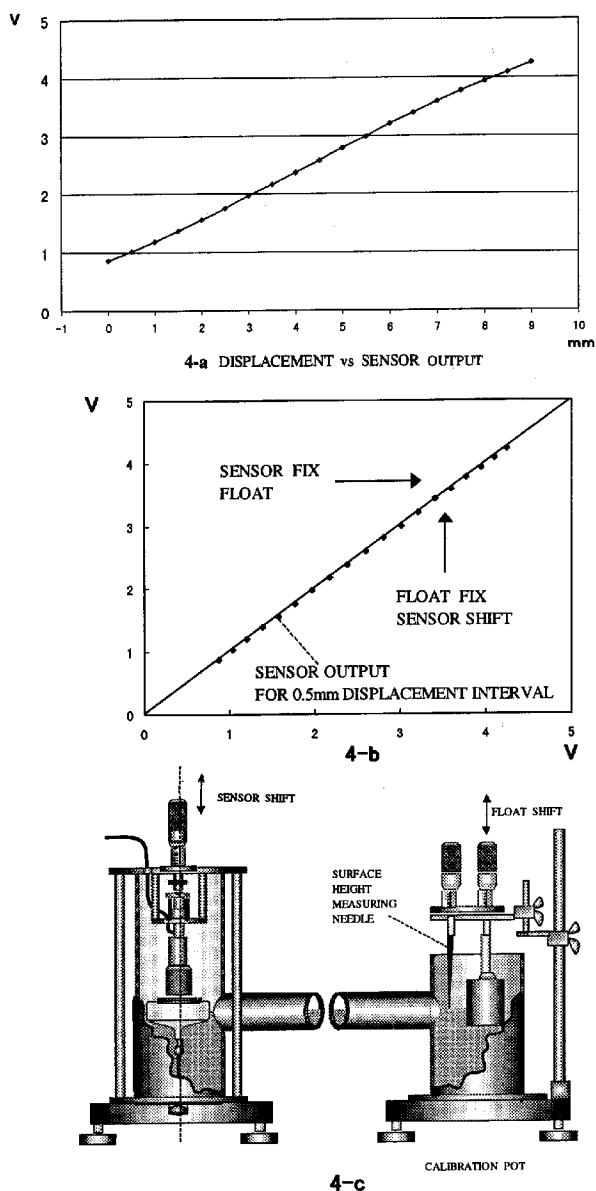


Fig.4 Calibration of displacement sensor and test of effect of magnetic attraction in alignment system.

おフルスケール6mm、スパン10mで出力を16bit AD変換すれば、1 digitが約 $10^{-8}$  radianに相当する。

#### 4. 坑道内実験

地震予知研究センター宮崎観測所坑道入口通路に、上記Ⅲ型機を長さ10m長で設置して観測実験を行った。地球潮汐も良好に見られる記録が得られた(Fig.5)。POT2は入り口を入ったすぐの場所であり、10m奥のPOT1に比べ、細かい擾乱が多い。また、作業に始終出入りする場所に仮設している

### ENTRANCE TUNNEL in MIYAZAKI OBS. VAULT

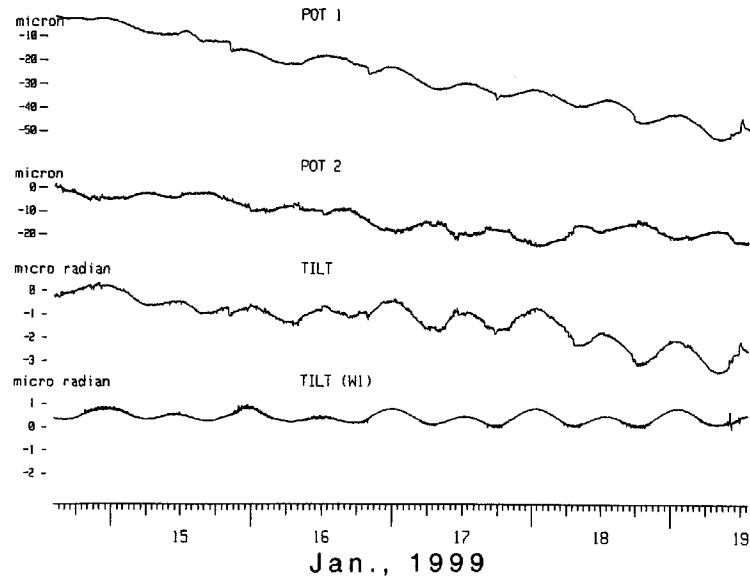


Fig.5 Record of test observation at entrance tunnel in Miyazaki observatory vault by type III instrument. (from top to bottom: POT1 level, POT2 level, tilt and record of routine tilt observation in the same direction in the observatory by type I instrument.)

のでノイズは避けがたい。両水槽の観測データのドリフトが大きく当初原因が解らなかつたが、水管の支持点が少なかったためアクリルパイプが自重とシリコンオイルの重量とでしだいにたわみ、液面低下を起こしていると判明、全長にわたって鉄製アングルで支えると、大きなドリフトは止まった。

両水槽の記録に独立に時々ステップが発生し、

これも原因が不明だったが、フロートの軸周りの回転にまったく拘束がない構造のため、フロートがたまたま回転したときに、出力電圧変化がある事が判明した。前章のような工夫をこらしているが、偏心や傾斜を皆無にはできなかったためだと思われる。この対策として最終的には、太さ 1mm 程度の糸をフロートと水槽内壁間に十分たわませて渡してやり、回転に対する抵抗を与えることで

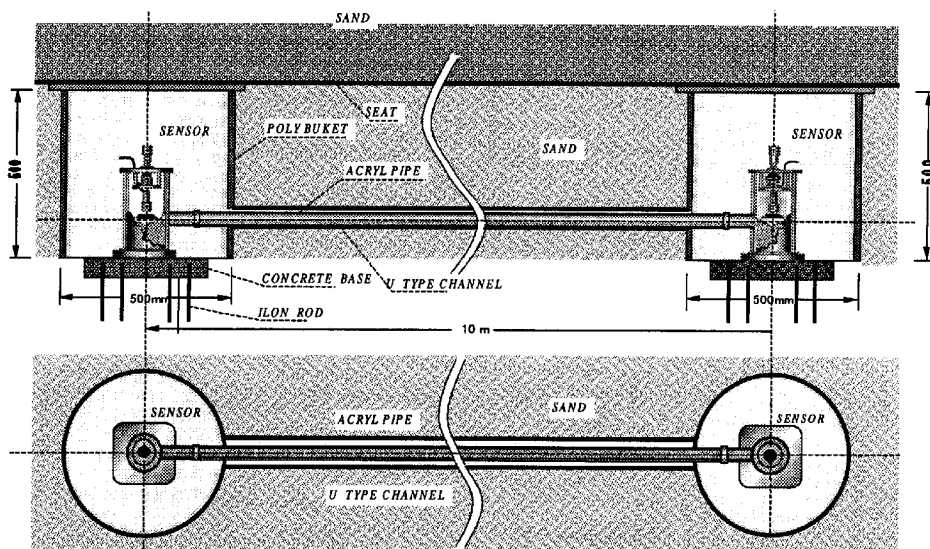


Fig.6 Schematic view of installation of type III instrument in ground surface trench.

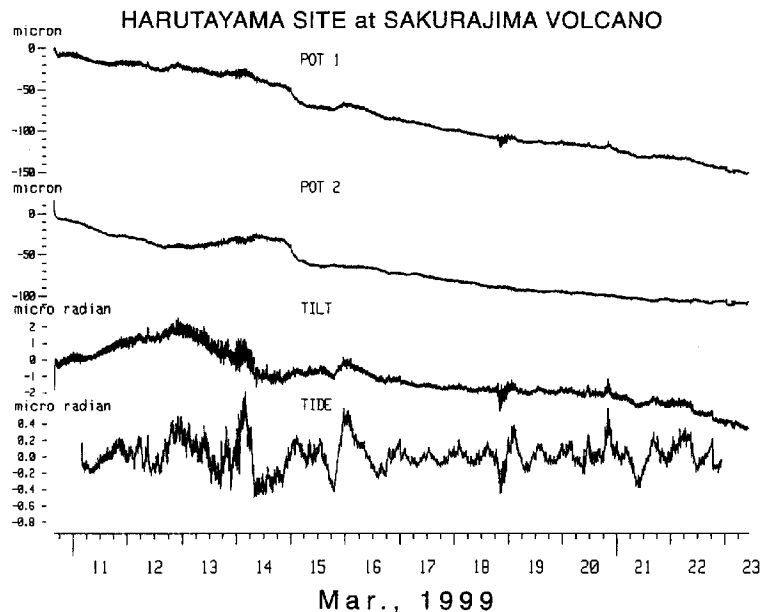


Fig.7 Record of filed test of type III instrument. (from top to bottom: Pot1 level, Pot2 level, tilt and trend removed tilt)

回転止めとした。その結果記録の飛びがなくなり良好なデータを記録している。

宮崎観測所での坑道内実験で、このハーフフィールド型水管傾斜計は環境条件の整った良い場所であるならば正常な観測データを得られる事が確認出来た。又、現在本坑道でルーチン観測を行っている従来型の水管傾斜計のW1成分(38.5m長)と同じ方向であるため、この記録との比較も出来て大変参考になった。Fig.5 最下段にはこのW1成分も傾斜値で同一スケールとして示す。テスト観測の記録と従来型による観測結果とは完全に地球潮汐の位相が一致し、潮汐振幅も同オーダーである。これから、本来の目的である野外観測環境条件下で正常なデータが得られるか確認し又いろいろ出てくるであろう改良点を今後の地殻変動観測研究に生かしていきたい。

## 5. 野外実験

火山活動研究センター桜島観測所のハルタ山観測室構内に10m長の水管傾斜計を設置して観測実験を行った。設置状況をFig.6に示す。両端の水槽設置孔は50cm四方、深さ1mで両者を結ぶ溝は深さ70cm全長10mである。2m毎にブロックを置き溝型鋼を渡して、その上にアクリルパイプを置き雨樋のカバーをして全体を埋設している。パイ

プ同士の継ぎには今回はビニールチューブを使用するが、本格的な観測の場合はFRPポリ樹脂を巻いて熔着して継ぐ。外気等による環境変化を防ぐため土砂で埋め戻しさらに土盛り、排水溝、ビニールシート等で降雨、気温による温度変化をなるべく抑えるようにした。

その結果得られた観測結果の一部をFig.7に示す。上から両水槽の水(オイル)面高変位、差をとった傾斜値、最下段は、潮汐がどれだけ記録されているかを見るため、簡単な積算によりトレンド成分を差し引いたものである。前半部は低気圧が通過して、降雨の影響や、大きな気圧変化がありさらに3月12日には火山の噴火、それをはさんで活発な地震活動があった。この時期は記録がかなり乱れている。しかし、後半、17日以降は、地球潮汐が認められる。ただし、POT1には18日深夜、20日深夜などイレギュラーな動きがありその影響が重畳している。このうち、18日には約20mmの降雨があった。典型的な降雨の影響は15日に両POTに見られるような変化であり、この時は8時間で30mm程度降ったが差をとれば消えている。いずれにせよ、テストを開始したばかりであり、まだ何度か掘り起こしたりしている状況で、記録の中身について論じるところまでは至っていないが、潮汐を含む記録は得られている。ハード面の改良とともに、気温、気圧の並行データでの補正と、

データの適当なフィルタリングにより改善される余地も大きく、これからの課題である。

謝 辞

## 6. おわりに

野外トレンチ観測用として、改良型ハーフフィールド水管傾斜計の試作を行った。媒体として水ではなくシリコンオイルを使用し、フロート変位測定センサーとして渦電流センサーを採用、フロートの支持として磁石吸引力を用いたことが主要な特徴である。野外観測用としての基本的な要請にはこたえられるものが試作できた。

地震予知研究センター宮崎観測所・日向灘地殻活動総合観測線の全観測点に設置する水管傾斜計を13年前から製作設置してきた経験に基づきこの開発を行ったが、今回製作した水管傾斜計のシステムは初代の時と比べると従来型の持っているいろいろな問題点が改良されている。今回の目的では感度よりも測定レンジを大きくすることに留意したが、十分な感度を持つように設計すれば現在の総合観測線各点の水管傾斜計をこの方式の傾斜計に取替えることも可能である。

今回開発製作した改良型傾斜計は桜島火山、それにインドネシアのグントール火山に1999年に設置予定である。

これらの観測計器の設計、製作は宮崎観測所の工作室で行われた。一観測所の工作室として工作機械・工具とも十分ではない状況ですこしづつ整備しながらこれだけのものを開発するのは、限られた予算で必要に迫られて、という状況でもあり、少なからず苦労があった。しかし、観測の現場における計器の開発は、得られたデータがすぐに設計にフィードバックされることや、現場の状況に合わせたこまやかな配慮など、意義深い点も多い。今後も未解決の問題点に対しさらに開発・改良製作を進めていきたい。

本研究は地震予知研究センターの平成10年度プロジェクト研究として行った。

防災研究所火山活動研究センター石原和弘教授には、桜島観測所ハルタ山観測室での観測実験を設定していただき、誠に有難うございました。又、井口正人助教授、高山鐵朗技官はじめ同センターの皆様には、ハルタ山での観測等さまざまな面でご協力ご教示をいただきました。改めてお礼申し上げます。東京大学地震研究所石井紘教授、高知女子大大村誠助教授には地震研究所室戸観測所を見学させて頂き、観測計器を製作する上で大変参考になりました。有難うございました。

## 参考文献

- 石井 紘・松本滋夫・鈴木喜吉・平田安廣・高橋辰利・若杉忠雄・渡辺 茂・加藤照之(1992): 震研90型水管傾斜計の開発と観測—メカニカルな拘束のないフロート型—, 地震研究所集報, Vol.67, pp79-87
- 加藤正明・平原和朗・田中寅夫・細 善信・津嶋吉男(1986): 室戸における地殻傾動の連続観測, 京都大学防災研究所年報, Vol.29B-1, pp.85-96
- 白井直樹・平田 裕・網川秀夫・浅田 敏(1994): 地表付近に埋設した50m長ハーフフィールド型水管傾斜計による連続観測, 地震第2輯, Vol.47, pp.189-192
- 高田理夫・古澤 保・大谷文夫・寺石眞弘・園田保美(1987): 日向灘地殻活動総合観測線, 京都大学防災研究所年報, Vol.30B-1, pp.29-40
- 寺石眞弘・大谷文夫・園田保美・山本圭吾・Muhamad HENDRASTO・高山鐵朗(1997): 大隈観測室における傾斜観測, 京都大学防災研究所年報, Vol.40B-1, pp.27-32

## Development of Half-filled Type Water-tube Tiltmeter for Trench Installation

Yasumi SONODA, Tamotsu FURUZAWA, Masahiro TERAISHI and Fumio OHYA

## Synopsis

We developed a half-filled type water-tube tiltmeter for the purpose of installation in ground surface trench in spite of in observation vault. Measurement liquid surface is made of silicon oil and

floats have no mechanical suspension. The sensor of float height is eddy current type displacement sensor with low power dissipation and wide measurement range. Test observation has carried out at Sakurajima volcano.

**Keywords:** tiltmeter; water-tube tiltmeter; ground surface trench installation; ground tilts observation; continuous observation of ground movements