

震研 90 型水管傾斜計設置の方法と結果

渡辺 茂*・平田安廣*・内田正之**

Installation Method of ERI-90 Type Water-tube Tiltmeter and Observed Tilt Data

Shigeru WATANABE*, Yasuhiro HIRATA* and Masayuki UCHIDA**

はじめに

富士川地殻変動観測所での地殻変動連続観測は、1970 年 7 月 7 日に開始され 33 年が経過している。

富士川観測所には地殻変動連続観測の主たる計器として石英管伸縮計や水管傾斜計がある。石英管伸縮計は連続観測開始当初から 1978 年 10 月まで電氣的出力センサーとして差動トランスを使用していたが、それ以降現在に至るまでマグネセンサ (SONY マグネスケール株式会社) を使用している。

水管傾斜計は現在読取水管傾斜計と自記水管傾斜計とがあるが、観測開始時には読取水管傾斜計しか設置されていなかった。自記水管傾斜計は、超音波型水管傾斜計による観測を 1975 年 4 月から 1976 年 8 月まで行ったが良好な観測結果を得ることができなかった。そこで、1976 年 12 月にフロート型水管傾斜計 (地震研究所技術部 1973 年) を導入し、読取水管傾斜計と並行して観測を行ない現在に至っている。

富士川観測所での読取水管傾斜計とフロート型水管傾斜計の傾動変化は、年周や長期的傾動傾向に差異はなく、読取水管傾斜計とフロート型水管傾斜計のデータはそれぞれ信頼性があるといえる。しかし、フロート型水管傾斜計の電氣的出力センサーも石英管伸縮計同様マグネセンサを使用しているが、フロート型水管傾斜計用のマグネセンサは SET-D というタイプで、生産が中止され久しく、現在手持ちのセンサーにも限りが出てきた。

地震研究所では、フロート型水管傾斜計の問題点を改良した震研 90 型水管傾斜計 (石井ほか, 1992) が開発された。開発以降上述した事情もあり、現在までに地震研究所

の地殻変動観測所・観測点の横坑に 90 型水管傾斜計を適宜設置してきており、良好なデータを得ている。

本年 7 月、富士川地殻変動観測所に 90 型水管傾斜計を設置したので、その作業経過について報告する。

90 型水管傾斜計設置準備

1. 台石設置

可能であるならば 90 型水管傾斜計も、現在設置されている読取水管傾斜計・フロート型水管傾斜計の設置してある既存の台石に設置することが望ましい。しかしスペースに無理があるため、新規に 90 型水管傾斜計設置用台石を作ることにした。台石は読取水管傾斜計・フロート型水管傾斜計が設置してある台石に隣接した 4 ヶ所に設置することとした (図 1)。WTT-1 (AB 成分) のスパンは約 43 m、WTT-2 (CD 成分) は約 42 m である。この工事は 2002 年 1 月に行なった。

台石設置の仕様と工程は以下のように行った。

1) 台石設置場所のコンクリート床を電動カッターでみぞ切りし、コンクリート床との縁切りを行なった (図 2)。その内側に型枠を組み、コンクリートを流し込みコンクリート製台石を設置した (図 3)。

2) 台石の大きさは、A・B 成分を縦 (傾斜観測方向) 800 mm、横 600 mm とし、C・D 成分は設置スペースの関係上、縦 (傾斜観測方向) 600 mm、横 800 mm とした。台石を大きめにしたのは、将来他の計器を設置できる余裕を考慮したためである。高さは連通管 (パイレックスガラス管) の据付位置を考慮し、既存の水管傾斜計台石より 100 mm 高くした。また、各成分毎の台石上面の高さは、許容範囲を 10 mm 以内とし、できるだけ同じ高さとなるよう仕上げることにした (図 4)。

3) 各成分の中間点には検定装置取付けのための台石を 2 ヶ所設けた。寸法は縦 300 mm、横 300 mm とし、高さは水管傾斜計設置後の水面の高さ関係を考慮に入れ、両端の台石よりも 100 mm 高くなるように仕上げた (図 5)。

4) 各コンクリート台石の上面は凹凸ができないよう水

2003 年 9 月 8 日受付, 2003 年 10 月 24 日受理。

* 東京大学地震研究所技術部総合観測室。

** 東京大学地震研究所技術開発室。

* Technical Supporting Section for Observational Research, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

** Laboratory for Technical Support and Development, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

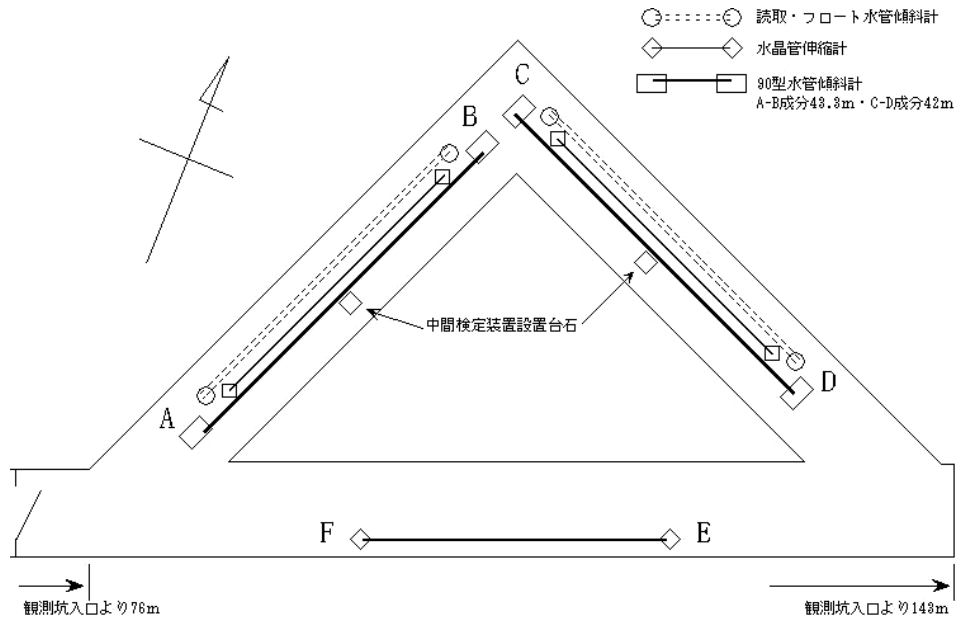


図 1. 観測坑内概略図



図 2. コンクリート床の縁切り作業



図 4. 既存の台石の脇に設置されたコンクリート台石



図 3. 型枠にコンクリートを流し込んだ後(手前がB端・奥がC端)

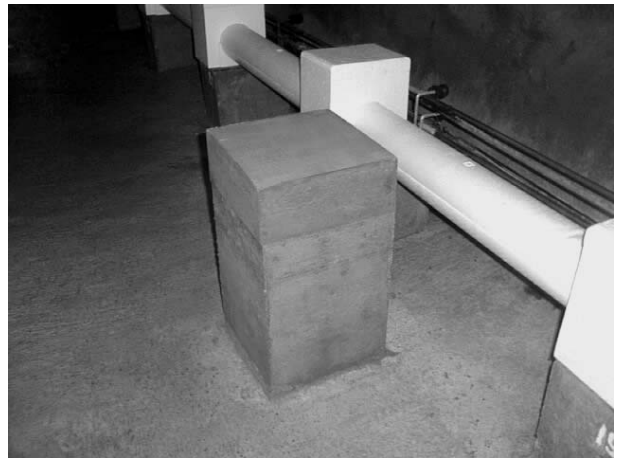


図 5. 完成した中間検定装置設置用台石

平にすることが重要である。なお、台石施工完了後確認のため台石の上面の高さ関係を測定したところ最大で10mm程度の誤差があったが、水管傾斜計設置条件に支障をきたすものではなかった。なお、台石上面が平らに仕上がっていないところもあったので砥石で平らに研磨した。

5) 作業に際しては、既存の観測計器に触れないよう十分に監督監視が必要である。縁切りの際、電動カッター使用時には集塵装置を取付けて作業を行なっても坑内が粉塵で充満するので、観測計器にはビニール等で十分な防塵対策をする。

2. 90型水管傾斜計設置に必要な部品と調整

90型水管傾斜計設置に必要な部品名称と使用個所を第1表に示す。この内、いくつかの部品について設置前に行っ

ておくことや留意すべき点を以下に記す。

1) フロート

フロートは設置前にアルミ円盤を取付けるためのステンレス支柱棒の取付けをしておく。ステンレス支柱棒はフロートの浮き加減の調整の際、垂直となるように取付ける。

フロートの浮き加減とステンレス支柱棒の垂直は、鉛玉の量と位置で調整する。鉛玉とパラフィンに適当な分量で混ぜ合わせフロートの中に入れる。60°程度のお湯を入れた容器にフロートを入れる。パラフィンが溶ける程度にお湯の温度を保ちながら、鉛玉の量と位置を調整する。フロートを浮かした状態でフロートの浮き加減とステンレス支柱棒の垂直を確認し、フロートとステンレス支柱棒に印をつけておく。パラフィンと鉛玉が固まった後にフロートとステンレス支柱棒を接着剤で接合する。

表 1. 90型水管傾斜計設置に関する必要部品

部品名称	材質	数量	用途・備考
三角台	ステンレス	4台	この上にガラスポットを置く
水平調整用ネジ	ステンレス	12本	三角台の水平を調整し、固定する
磁石上下位置調整ネジ	ステンレス	2本	磁石の位置を調整する
磁石 (Nd-Fe-B ネオジウム)	Ni メッキ仕上げ	2個	円筒形 直径：20mm, 厚さ：8mm
針	エリンバー	2本	フロートの底部に取付ける
座金	ステンレス	12台	三角台の台座
ガラスポット固定用ネジ	ステンレス	12本	ガラスポットがズレないように固定する
ポット固定緩衝部材	アクリル	12個	ガラスポット固定の緩衝のため
フランジ付ガラスポット	パイレックス	4器	蒸留水を入れフロートを浮かせる
フロート	パイレックス	4個	水面の位置に連動し上下する
ステンレス支柱棒	ステンレス	4本	フロート上部に取付ける
フロート・支柱棒接合部材	アクリル	4個	フロートと支柱棒の接合に使用する
アルミ円盤	アルミ	4枚	ステンレス支柱棒に取付ける
ステンレス円盤	ステンレス	4枚	ガラスポットのフランジ上面の置く
センサー調整用ステージ		4台	中央精機製 Z軸ステージ LV-213-1
センサー取付けL金具	ステンレス	4個	リニアセンサーを固定する
リニアセンサー	渦電流センサー	4個	Baumer electric IWRM-30U9502
アクリル円筒	アクリル	4台	坑内水滴等の保護カバー
連通管	パイレックス	90m	曲がり管・T字管を含む, 1.5m, 25 ^φ
シリコンチューブ 25×19	シリコン	10m	パイレックスガラス管の接続に使用
シリコンチューブ 13×10	シリコン	5m	T字管と検定ポットの接続に使用
蒸留水	工業用純水	50ℓ	ガラスポット・連通管内に注入する
中間検定用ポット	ステンレス	2器	センサー感度検定用, 震研技術部製作
検定ポット用ステージ		2台	Z軸ブラケットステージ LZ-126-S1
検定用ステージ取付け台座	ステンレス	2枚	検定用ポット用ステージを取付ける
マイクロメーター		2本	センサー感度検定時に使用

2) 針と磁石

傾斜計設置後の実際の観測では、ガラスポット内に入出入りする蒸留水の移動によりフロートが水平方向へ移動してしまう。そうなると、ステンレス支柱棒がステンレス円盤の孔に接触してしまい、フロートが水面の昇降変化に連動しなくなってしまう。針と磁石はこの移動を防ぐため必要な部品である。針は、フロートの底部に接続する。また、長期に渡り蒸留水の中に入っているため、磁性がありかつ腐食しにくい材質を使用している。フロートとの接続は釣り糸 2 号以下の細いものを使用する。この作業は設置時に行う。また、今回は磁力の強い磁石を使用したため、磁力を軽減できるように磁石とガラスポットとの間にアルミ製の円板を入れることにした。磁石も針同様腐食防止を考慮し、表面は Ni メッキしてある。

3) 部品の清掃

中間検定ポットのような金属製の各部品は前もってアセトンやエタノールなどで表面の油や付着物をよく拭き取っておく。ガラスポットや連通管のガラス類と曲がり管や T 字管の連通管を接続するシリコンチューブは、特に内面をよく水洗いしておくことが重要である。設置の際、ガラスポットや連通管に蒸留水を注入するために使用する容器なども当然同様である。また、これらの部品と蒸留水などは設置以降の初期的ドリフトを抑えるため、坑内温度になじませておく。設置の数週間前には観測坑内に入れておくことが必要である (図 6) (図 7)。

3. 中間検定部

中間検定装置は、検定用ステージ Z 軸ブラケットステージに中間検定用ポットを取付け、検定用ステージ取付け台座に取付けたものである。中間検定部は、中間検定用台石に中間検定装置を取付けばよい。今回、中間検定用台石に検定用ステージ取付け台座を固定するためのステンレス



図 6. あらかじめ観測坑内に仮設置したガラスポット一式



図 7. あらかじめ観測坑内に搬入された蒸留水・連通管・シリコンチューブ

ボルトを予め中間検定用台石に埋め込んでいなかった。そこで、中間検定用台石に振動ドリルで穴を開け、8φ のステンレス製アンカーボルトを埋め込んだ。検定用ステージ取付け台座はステンレス製であるため埋め込んだボルトの位置を計り、その寸法に合わせ検定用ステージ取付け台座に穴をあけ固定することにした。検定用ステージ取付け台座固定の際、台石表面が平らに仕上がっていないとすわりが悪く、検定時の誤差要因にもなりかねない。台石表面に凹凸があれば、砥石で研磨し平らに仕上げ、台座のガタツキがないようにする (図 8) (図 9) (図 10)。

4. 増幅器と収納容器

リニアセンサーは個体差があり、その感度は概ね 2~3 mV/μm 程度である。ただし、分解能は充分あるので、高精度の記録器であるならばセンサー出力を直接記録してもナノラジアンを上回る傾斜観測は可能である。しかし、センサー出力ケーブルを規格以上に延長した場合はセンサー出力が保障されないため、出力信号の安定のために増幅器をセンサー付近に置く必要がある。増幅器と収納容器をそれぞれ製作し、増幅器は収納容器に納めた。富士川観測所の観測坑は湿気が非常に多いため、収納容器は防水パッキンのある容器に各信号線の太さに合わせた防水型ケーブルグランドを取付け、湿気の侵入を防ぐように加工した。増幅器の倍率は 11 倍に設定した。

設置手順

90 年型水管傾斜計の設置手順は以下のように行った。

- ① 三角台上に水平調整用ネジ、磁石上下調整ネジ、ガラスポット固定用ネジを取付ける。
- ② 各台石に三角台用座金を置き、三角台を座金の上に載せる。
- ③ 三角台中央部の磁石上下調整ネジの上に磁石とアル



図 8. 中間検定台石に検定ステージ取付けのための穴開け

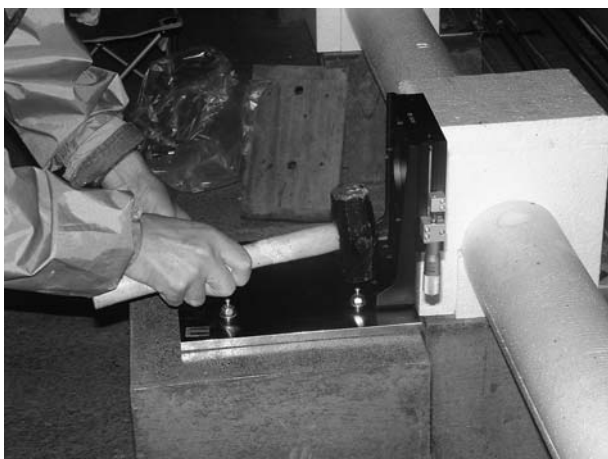


図 9. アンカーボルトで検定ステージを取付け



図 10. 中間台座に取付けられた検定部

ミ円板を置く (図 11) (図 12).

- ④ ガラスポットを三角台の上に静かに載せる。ガラスポットの側面とガラスポット固定用ネジとの間にポット固定緩衝部材を挟む。ガラスポット固定用ネ

ジを調整し、ガラスポットの中心が三角台中央部に位置するように仮止めする。

ここまでの作業を終えたらガラスポット内に塵が入らないようアクリル円筒などで蓋をしておく。

- ⑤ 連通管 (パイレックスガラス管) をガラス管支持金具上に配置する。曲がり管はガラスポットの傍へ、T 字管は中間検定装置の傍に配置する。各成分で連通管の長さの不具合があった場合はガラス管を切断し、調整を行う。ガラス管の切断は、ガラス管に平ヤスリでキズをつけて一気に折るとよい。折った断面は鋭角となっているので、ガラス管接続の際はシリコンチューブに傷が付かないようにしておく。これは、火力のあるバーナーで断面が丸みを帯びた形状になるまで溶かし、頃合いを見て自然冷却する。明るい所で行っているとガラス管が完全に冷却したか分かりにくいので、気を付けないと火傷するので注意する (図 13) (図 14)。

- ⑥ シリコンチューブを 8 cm 程度にカッターナイフで切断し、蒸留水に浸けておいたシリコンチューブで連通管を接続する。シリコンチューブを蒸留水に浸けるのは、シリコンチューブが乾いていると連通管に接続しにくいからである。中間検定用ポットに T 字管を、両端のガラスポットには曲がり管を接続する (図 15) (図 16)。

- ⑦ ガラスポットに蒸留水を注入する。今回は蒸留水の注入に大きめのじょうろを使用した。蒸留水の注入はできるだけ空気が連通管内部に流れ込まないように慎重に行う。連通管内に細かな気泡が入り込まないようにするには、ガラスポット内の蒸留水をガラスポットの高い位置に保ち、じょうろ内の蒸留水を切らさないようにし注入を続けることが必要である。両端のガラスポットが蒸留水で満たされたら注水を終了する (図 17)。

- ⑧ 連通管に入り込んだ空気の抜き取り作業を行う。細かい気泡は見つけにくいのだが、連通管の下部から光を当てると小さな気泡の確認も容易にできる。気泡を確認したら、連通管とシリコンチューブの間に細くて先の丸いステンレスの針金を差し込み、蒸留水と一緒に気泡を抜き出す。針金を抜き差しする際には、シリコンチューブにキズがつかないように注意する。この作業は時間をおいて何回か行う。針金を通した箇所は、蒸留水が漏れないようにシリコンチューブとガラス管が密着するようにドライバーの柄の部分などで圧迫しておく。また、気泡抜きをした箇所には油性のマジックで印をつけておく (図 18) (図 19)。

- ⑨ ガラスポット内の蒸留水を適量にし、フロート底部

に針を取付けた後フロートを水面に浮かせる。蒸留水を加減し、針先と磁石との間隔を調整する(図20)(図21)。

- ⑩ ステンレス円盤をガラスポットのフランジ面に静かに置く。この時、ステンレス円盤の中央にあいている孔の中心にフロートのステンレス支柱棒がくるようにする。ステンレス支柱棒上部にアルミ円盤を固定する。ステンレス円盤の上にレベルを置き、水平となるよう三角台水平調整用ネジで調整する(図22)。
- ⑪ センサー取付けL金具をセンサー調整用Z軸ステージに固定し、Z軸ステージをステンレス円盤に取付ける。リニアセンサーをセンサー取付けL金具に仮止めしておく。アルミ円盤とリニアセンサーが平行になっていることを確認する。アルミ円盤とリニアセンサーの間隔を2~3mm程度にし、ウォーターポンププライヤーでリニアセンサーを固定する(図23)。

- ⑫ アクリル円筒を被せ、リニアセンサーの出力ケーブルを取出し増幅器に接続する。電源を入れ、リニアセンサー出力を2.5~3V程度になるようセンサー



図 13. 連通管の切断作業

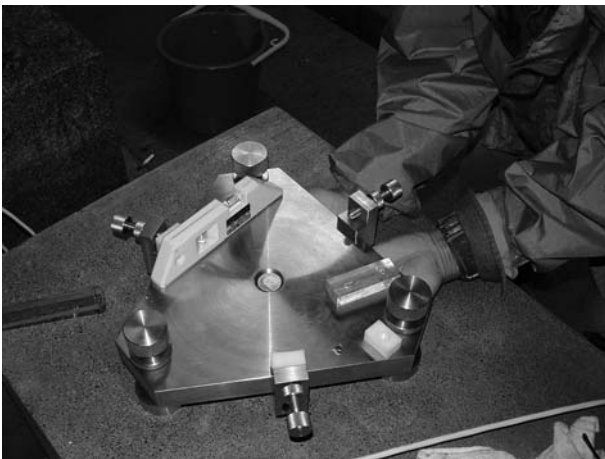


図 11. 三角台のレベル出し、磁石の取付け



図 14. 連通管切断部分の溶解



図 12. 三角台磁石設置部分の中央に設置された磁石



図 15. シリコンチューブでガラスポットと連通管の接続



図 16. 中間検定ポットと連通管の接続



図 19. 連通管に入り込んだ気泡の除去作業



図 17. ガラスポットに蒸留水の注入



図 20. 蒸留水の入ったポットに浮かされたフロート



図 18. 連通管に入り込んだ気泡

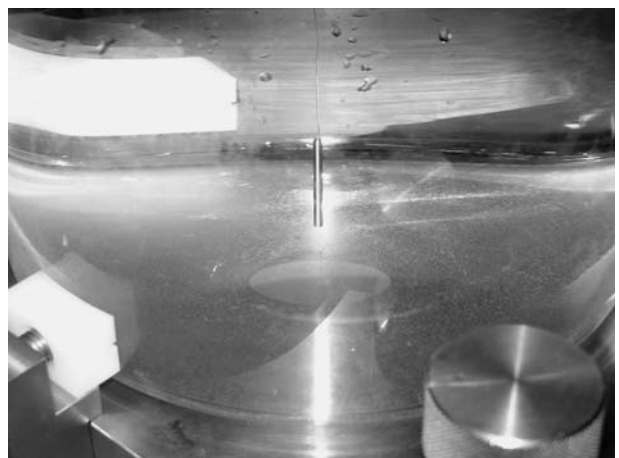


図 21. フロート下部より吊り下げられた針と三角台に設置された磁石

調整用 Z 軸ステージの粗調整ツマミで調整する。増幅器出力も、リニアセンサー出力のオフセットを調整後に微調整ツマミを調整し、0V 付近となるよう

調整をする。しばらくは安定しないのでこの作業は適当な時間間隔で繰り返し行う (図 24) (図 25) (図 26) (図 27)。

90 型水管傾斜計の感度検定と観測データ

90 型傾斜計設置後の初期ドリフトは 2~3 日でほぼ収まったようである。潮汐変化もきれいに描き始めたので、各端センサーの感度検定を行った。感度検定は中間検定ポットを昇降させて行う。この方式には、自動的にリニアアクチュエーターで行う方法と手動でマイクロメーターを動かす方法やその他、蒸留水を注入する方法などもある。今回は手動でマイクロメーターを動かす方法で行った。坑内に静かに入り、中間検定装置にマイクロメーターを取付け、クランプを外す。その後マイクロメーターを数ミクロン廻し、検定用ポットを押し上げ、水位が落ち着くのを待ってから行った。1 回の変位量を 1mm とし 10 分間隔で変位を与える。各成分とも 2 回押し上げてから 2 回引き下げた。中間ポットを 1mm 昇降させた時に各ポットの水面

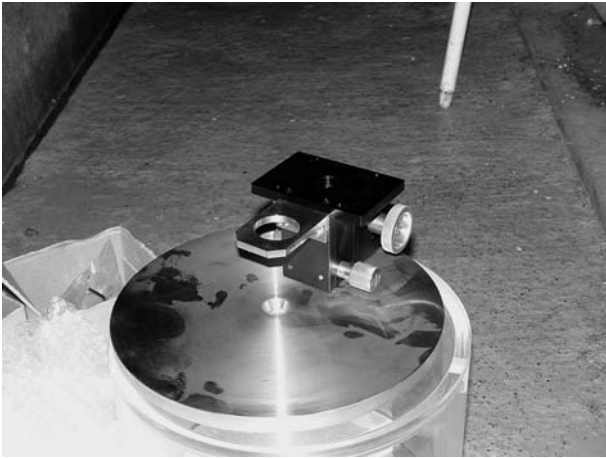


図 22. Z 軸ステージが取付けられたステンレス円盤



図 23. Z 軸ステージに取付けられたリニアセンサー

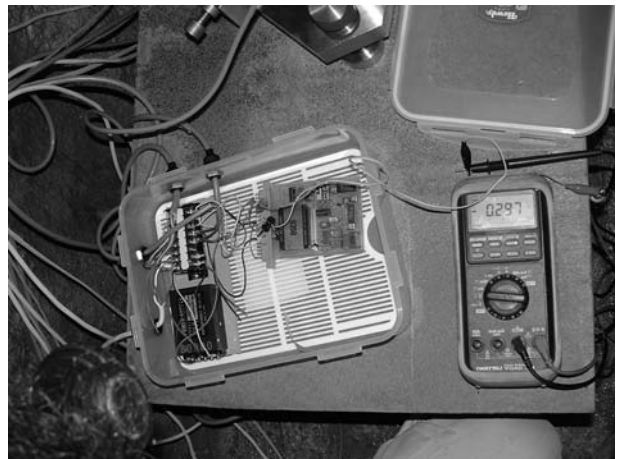


図 25. 防水対策をした容器に納められた増幅器



図 24. 設置が終了しアクリル円筒を乗せて設置完了



図 26. 設置が完了した水管傾斜計



図 27. 既存台石に設置されているフロート型・読取型水管傾斜計と新規台石に設置された 90 型水管傾斜計 (B 端・C 端付近)

変化は $5.75\mu\text{m}$ となる。この変化量は、傾斜に換算すると約 $0.14\mu\text{rad}$ である。検定中はじっと静かに待機している。データは常時収録をしているロガー (Datamark LS 3300PtV) にサンプリング 1 分で収録される。使用したマイクロメーターは $1\mu\text{m}$ の精度があり、一回転 $500\mu\text{m}$ である。感度検定は、潮汐の影響が小さい日の 7 月 22 日と 8 月 5 日を選んで実施した。7 月 22 日の感度検定の押し引きは、A・B 成分は 2 回行なったが、C・D 成分は 1 回の押し引きしか行っていない。8 月 5 日に行なった感度検定の波形を図 28 に、2 回の感度検定結果を表 2 に示す。

90 型水管傾斜計設置後初期ドリフトが収まった 7 月 16 日から 8 月 31 日までの約 7 週間の観測記録を図 29 と図 30 に示す。図 29 は、A・B 成分の 90 型水管傾斜計 (Eddy sensor) とフロート型水管傾斜計 (Magne sensor)、それ

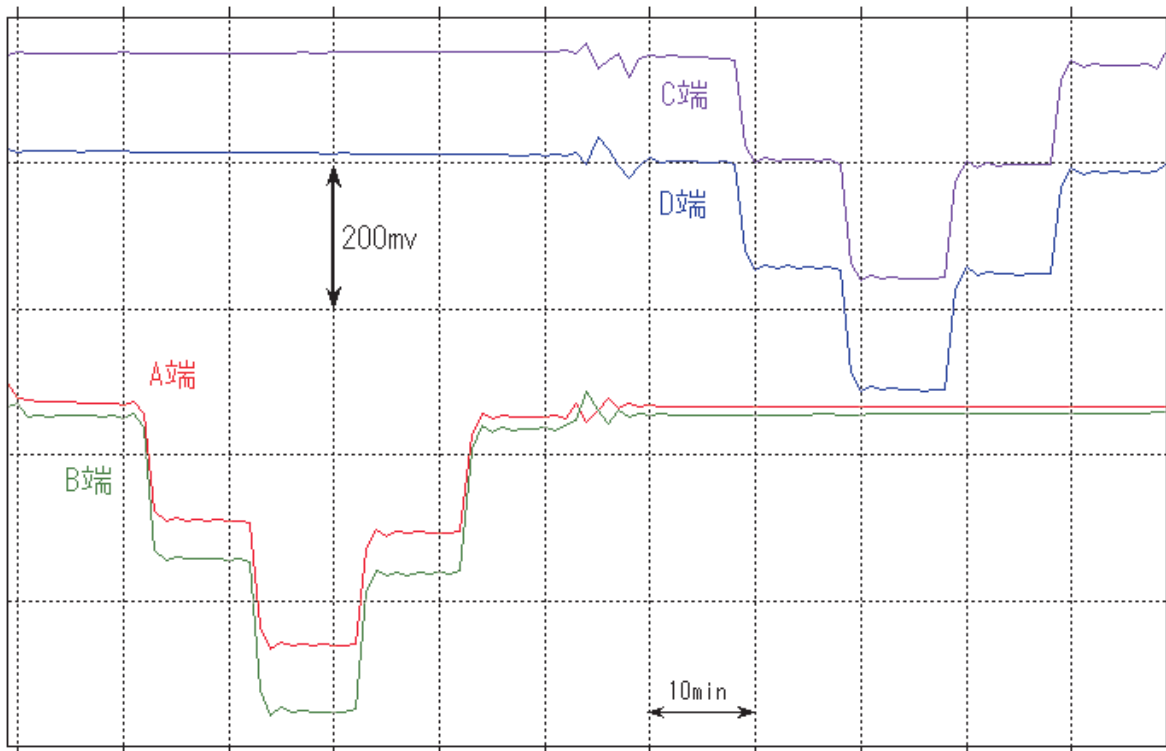


図 28. 8 月 5 日に行った感度検定の波形

表 2. マイクロメーターによる感度検定をもとに計算された各端の検定結果

検定実施 年月日	富士川観測所観測計器感度検定成分 (各センサー感度, 単位: $\text{mV}/\mu\text{m}$)				
	M: 平均値 (押し, 引きの平均).				
	(EDDY)A 端	(EDDY)B 端	(EDDY)C 端	(EDDY)D 端	備 考
03/07/22	M=2.6 $\text{mV}/\mu\text{m}$	M=3.2 $\text{mV}/\mu\text{m}$	M=2.1 $\text{mV}/\mu\text{m}$	M=2.2 $\text{mV}/\mu\text{m}$	ほぼ半月.
03/08/05	M=2.6 $\text{mV}/\mu\text{m}$	M=3.2 $\text{mV}/\mu\text{m}$	M=2.4 $\text{mV}/\mu\text{m}$	M=2.4 $\text{mV}/\mu\text{m}$	半月.

Wtt-1 A-B成分 N22E (2003.7.16-8.31)

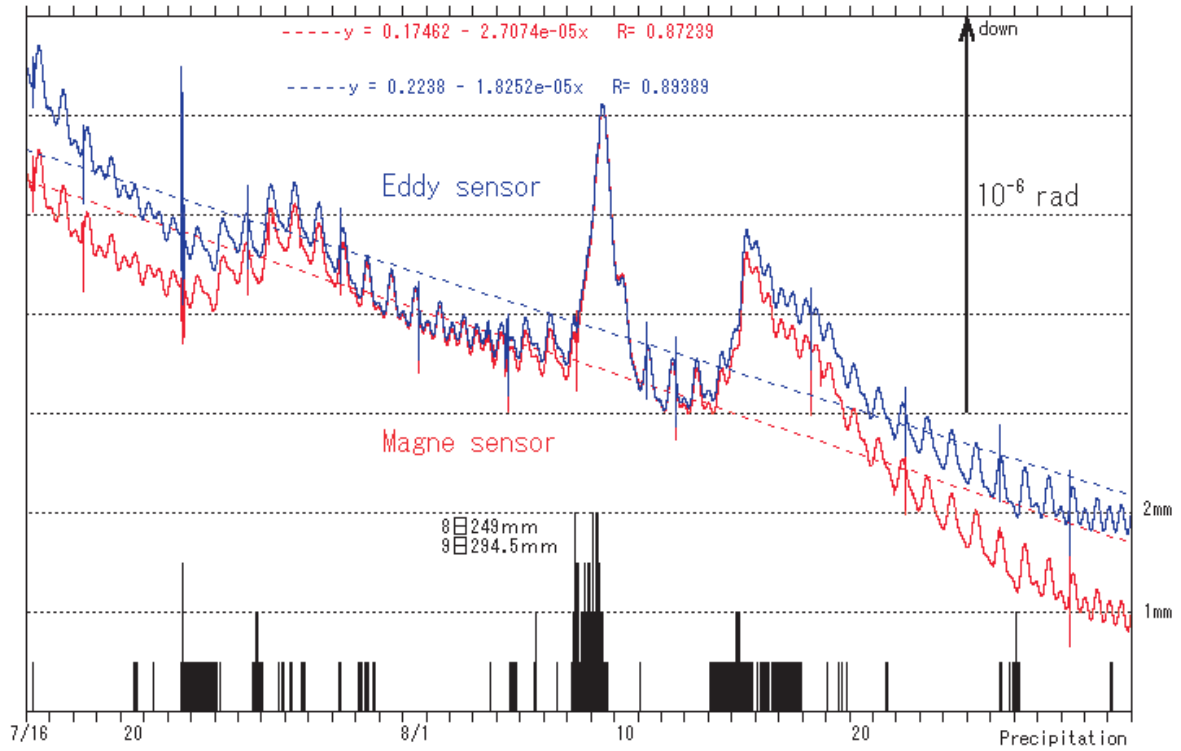


図 29. A-B 成分のフロート水管傾斜計 (赤) と 90 型水管傾斜計 (青) の比較 (7 月 16 日~8 月 31 日)

Wtt-2 C-D成分 N68W (2003.7.16-8.31)

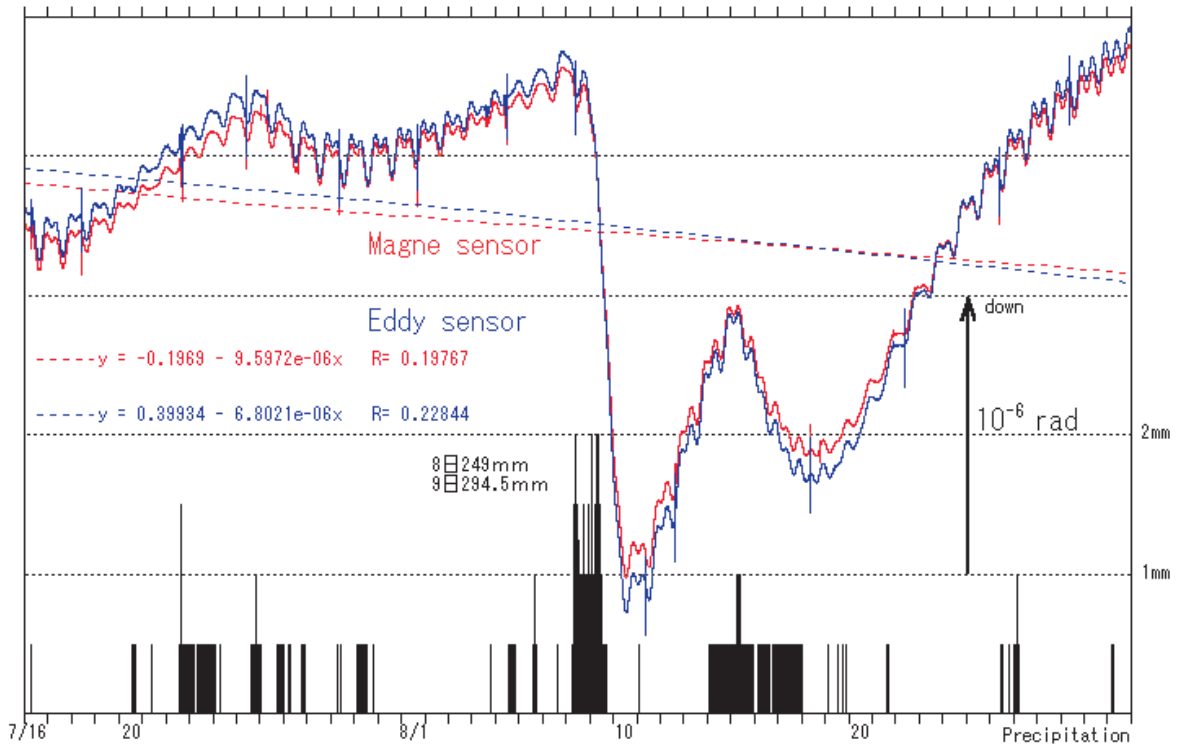


図 30. C-D 成分のフロート水管傾斜計 (赤) と 90 型水管傾斜計 (青) の比較 (7 月 16 日~8 月 31 日)

に降雨量をプロットしてある。図 30 は C・D 成分である。90 型水管傾斜計 (Eddy sensor) の感度は 8 月 5 日に行なった感度検定結果の値を採用した。8 月 8 日、9 日にかけて、540 ミリを越える降雨と低気圧の通過に伴う影響により $1\sim 2\mu\text{rad}$ 程度の擾乱がある。観測記録は、双方の傾斜計の A・B 成分、C・D 成分ともに、この擾乱変化や潮汐変化の大きさが良く合っていると見える。なお、記録上に髭のように見える個所は、読取水管傾斜計の読取などの作業のため定期的に入坑したことによる擾乱である。

おわりに

地震研究所の地殻変動観測施設は 20 観測点以上あるが、その内横坑の観測点は 7 観測点である。90 型水管傾斜計 (Eddy sensor) は、1992 年に鋸山観測所に設置されて以降、今回富士川観測所への設置により全ての横坑に設置された。富士川観測所への 90 型水管傾斜計設置により、90 型水管傾斜計とフロート型水管傾斜計 (Magne sensor)

を並行して観測している観測点は油壺観測所と弥彦観測所の 3 観測所となった。

地殻変動の連続観測は、長期に渡り安定した観測が必要である。富士川観測所での約 7 週間の 90 型水管傾斜計とフロート型水管傾斜計の観測結果は、ナノラジアン程度の差異で一致しており、これまで観測してきたフロート型水管傾斜計が観測不能となったとしてもデータの連続性は確保される。湿気の多い坑内に設置してある観測計器は、センサーの故障など観測に支障をきたす問題が発生することがある。そのような場合には適宜感度検定が不可欠なのである。今後も定期的な保守を行い、可能な限り並行観測を続け、データの信頼性の向上につながる努力をする。

文 献

- 石井 紘ほか, 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—, 地震研究所彙報, 67, 79-87.
東京大学地震研究所技術部, 1973, フロートを用いた水管傾斜計について, 東京大学地震研究所速報, 16, 1-8.