

大隅観測室における傾斜観測

寺石 眞弘・大谷文夫・園田保美・山本圭吾・Muhamad HENDRASTO*・
高山鐵朗

*インドネシア火山調査所火山解析部

要 旨

日向灘地殻活動総合観測線大隅観測室に設置した傾斜計は、液体の自由表面が両端の水槽から水管全体にわたるハーフ・フィールド型の水管傾斜計で、さらに水管内の液体に、水に比べ粘性の大きいシリコンオイルを使ったという点で従来の水管傾斜計と大きく違っている。この傾斜計により従来の計器とは異なる特異な記録が得られ、これまでに得られた観測記録とハーフ・フィールド型傾斜計の特徴について考察した。

キーワード：水管傾斜計，ハーフ・フィールド型，地殻変動観測，固有周期

1. はじめに

地震予知研究センター宮崎観測所では1996年10月より日向灘地殻活動総合観測線大隅観測室において、水管に半分だけ液体を満たすハーフ・フィールド型の水管傾斜計を設置し傾斜観測を開始した。大隅観測点は本観測線の各観測点のなかでも、坑口から計器までの距離が最も短く、坑内温度の日周、年周変化なども大きい。筆者らはすでに、同様な条件の高城観測室の伸縮計で、膨張率の小さい基準尺を使用して在来材のものとの比較観測をおこなった(古澤ら、1993)が、今回、水管傾斜計で温度変化の影響が小さいとされるハーフ・フィールド型を設置、テストしてみることにした。

本観測線では、他の6観測点すべてに水管傾斜計を設置しているが、これらの点ではいずれも、両端の水槽を結ぶ水管内では全断面を水が満たす一般的な方式の水管傾斜計で観測を行っている(大谷ら、1992;寺石ら、1996)。(以後、一般的なタイプを、ハーフ・フィールド型と区別して「フル・フィールド型」と表現する)大隅観測室においてはこれらの観測点で使用している計器とほとんど同じ材質、構造ではあるが、水管を水平に取り付け、液体の自由表面が両端の水位検出部の水槽から水管全体にわたるように設置した。本稿では他の観測点、特に地理的にも近く観測坑も似た構造を持つ串間観測室の観測結果

等と比較しながら、大隅観測室における水管傾斜計の特徴について報告する。

2. ハーフ・フィールド型水管傾斜計について

ハーフ・フィールド型の傾斜計は古くは Michelson・Gale (Michelson, 1914) により 153m 長のものが作られたが、重力の等ポテンシャル面を直接形成するという、原理的な明快さにも関わらず、以来、国内外ともにその例は少ない。Ottawa (Bower, 1978), California (Beavan et al, 1977), 国内では国土地理院、東海大学による静岡県切山導水トンネルに2基設置されたもの(興津ら、1992)など、その多くは、距離の長い傾斜計で、温度分布の不均一性、または温度の時間変化の影響を小さくするためにこの方式を採用したものと考えられる。

ハーフ・フィールド型水管傾斜計の特性はすでに論じられている(網川ら、1985;浅田ら 1987; Agnew, 1986) が、ここであらためて主要な特徴をフル・フィールド型と対比してまとめておく(Fig.1)。

[1] 空間的な温度変化の影響をうけにくい。連続した液面の場合、常に等ポテンシャル面を形成していると考えられるが、液面が途切れている場合にはパスカルの原理による圧力平衡が成立しており、温度差があれば、密度が異なり液面高さが異なる可

能性がある。

[2] 時間的な温度変化による液面変化量が少ない。温度の年周変化などによる体積変化がある場合、表面積が広い方が、液面高さの変化が少なくてすむ。したがって、水面高さ測定でフルスケールに対する相対分解能が同じであれば、ハーフ・フィルド型の方が、分解能を高くできる。

[3] 系全体の傾斜による出力変化と、計測水槽近傍の局所的な変動による出力変化との区別がつく。ハーフ・フィルド型の場合、系全体の傾斜の場合は、両水槽に逆向き・同量の液面高さ変化が現れるが、水槽近傍のみに局所的な高さ変化が生じた場合は、中間の自由液面+相手方の水槽液面の表面積と、その水槽の液面面積との逆比で液面高さが変化するため、両水槽の高さ変化が非対称となる。通常、相手水槽への影響は小さくなり、

いわば、中間の自由表面で水位が補償されるといえよう。フル・フィルド型の場合はいずれの場合も、両水槽に向きが逆で対称的な記録となり、両者の区別がつかない。

[4] 固有振動周期が長い。振動モードがハーフ・フィルド型の場合は液面が左右に傾くモードとなり、フル・フィルド型の場合は管内の液体が左右に往復するモードとなる。

[5] 計器設置にあたっての難易点。フル・フィルド型の場合は水管内部に気泡が生じることが多く、この気泡を完全に取り除くのが難しい。筆者らは、真空ポンプを利用して、減圧した状態で気泡抜きをして、水蒸気のみを残ししか残らないと思われる状態で、大気圧に戻して気泡を消している。ハーフ・フィルド型の場合は、以上のような困難はないが、水管路に高い水平度が求められ

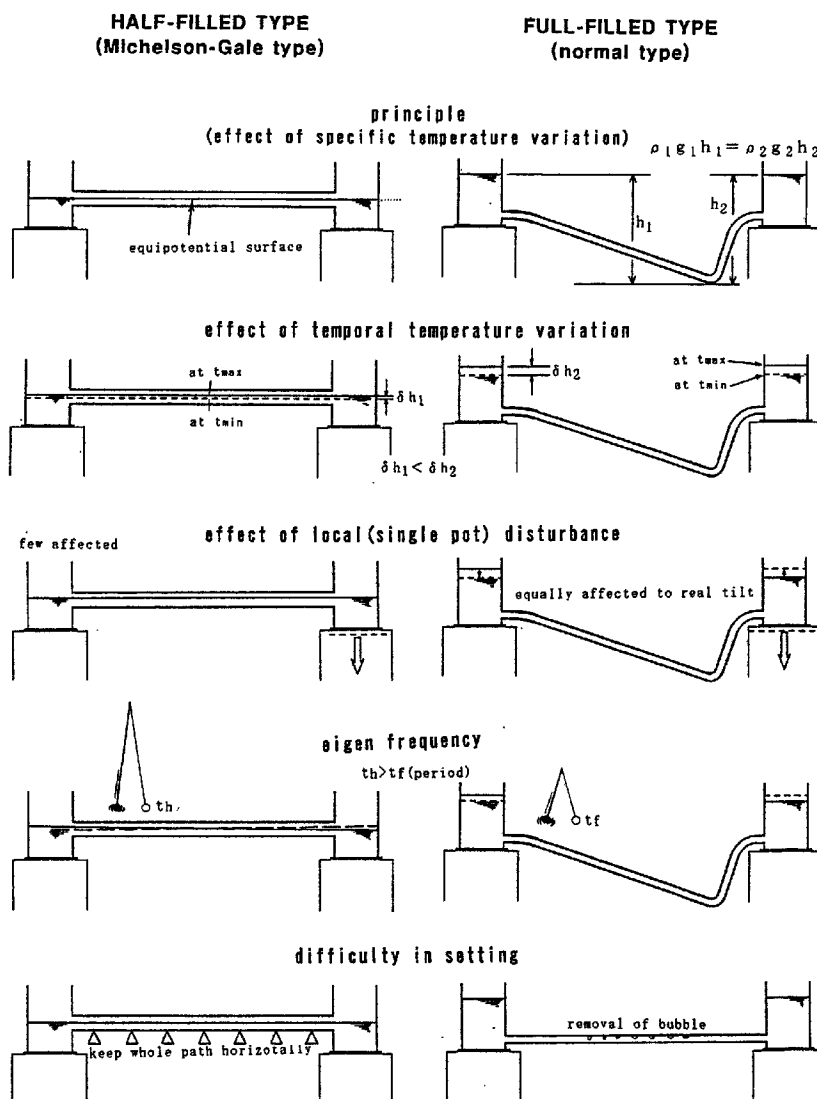


Fig.1 Characteristics of half-filled type watertube tiltmeter.
(Comparison with normal type tiltmeter)

る。この条件も水管内の水深を大きくとれば、免れ得る。

3. 観測点と観測計器

大隅観測室は九州大隅半島の中央部に位置し、防災研究所火山活動研究センターの噴火予知広域観測網の一点でもある。観測坑はコンクリート巻き立ての幅・高さ2m、長さ20mの直線坑道で、坑口に設けられている送信室からすぐに観測坑となっている。観測点の配置と坑道の形状をFig.2に示すが、総合観測線の観測点および収録システムについては既に報告されている(高田ら, 1987)。

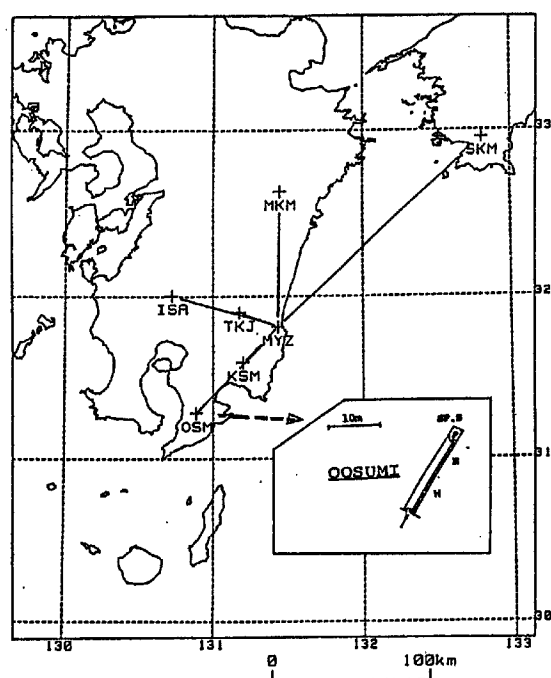


Fig. 2 Location of the stations within the Hyuganada Network and top views of observation vaults of Oosumi. W: Watertube tiltmeter, E: Super-invar-bar extensometer,

観測計器は水管部に内径2cm長さ4mの硬質塩化ビニール管をつなぎ全長16.7mとし、両端の液面高さ測定部の水槽に内径9cmのガラス槽を使用している。また両水槽の中間に較正に使うため、小型ガラス水槽をはさんでいる。水位検出部はガラス製のフロートを使用し、フロート上部が板ばねで支持されており最上部に差動トランスのコアが取り付けられている。差動トランスのコイルは、取り付け部のマイクロメーター軸をステッピング・モーターで回転させ遠隔操作で変位を与えることができる構造

で、較正、調整に使用する。また、使用液体として他の観測点では蒸留水を使用しているが、空気と接する液面が広がるハーフ・フィールド型の場合液体の蒸発量が大きくなることを考慮し、表面にシリコンオイルを浮かすことも考えたが、新しい試みとして、完全にシリコンオイルのみを用いることにした。オイルは市販品のなかで粘性の低いものを選んでいる。

4. 観測結果

Fig.3に、1996年11月8日～1997年4月30日の期間のデータを示す。グラフは毎日0時の値をプロットしたものでW-a、W-b、はそれぞれ坑道入り口と坑道奥の水槽の液面の変位を、W(a-b)はその差を取ったものを示し、液面の下がり及び坑道奥方向下がりプラスとしている、なお雨量は宮崎観測所での日雨量である。Fig.3に見られるように、観測開始後3ヶ月ほどは計器設置当初のドリフトと思われる急激な液面下がりが見受けられ、1月中旬には収まり、その後は降雨の影響による大きな変動が目立っている。

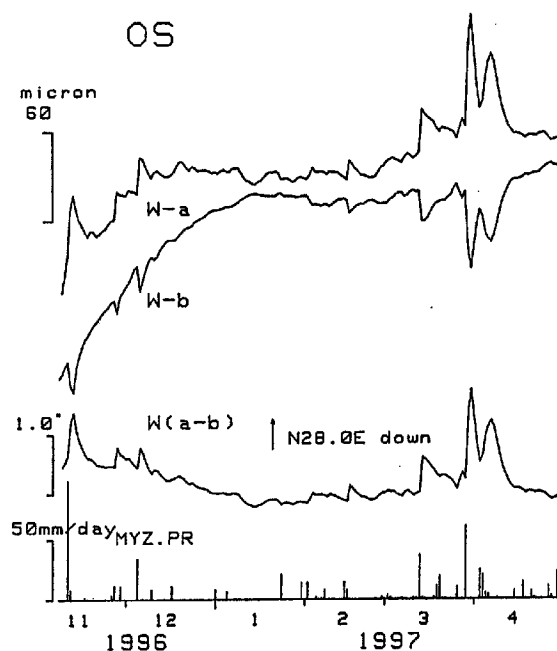


Fig. 3 Records of the liquid level change and variations of ground-tilts for Nov.1996-Apr.1997.

W-a : Float displacements of the pot near an entrance of the vault.

W-b : Float displacements of the pot at the opposite point of the vault.

4.1 降雨による影響

降雨の影響は、2つの水槽で反対方向のセンスであることから、2章の特徴[3]から判断すると、系全体、すなわち坑道自体が実際に、奥が下がるように傾斜し、その上に、坑道口の水槽の振幅が大きいのは、坑道口附近だけの変動が重なっていると解釈される。本観測坑は16mの短いスパンではあるが、坑口が取り付け道路をはさみ、沢に面しているため、通常は流れがほとんどない沢に大量の雨水が流れ込み、岩盤に浸透した水で坑口付近を持ち上げるような力が作用すると考えられる。

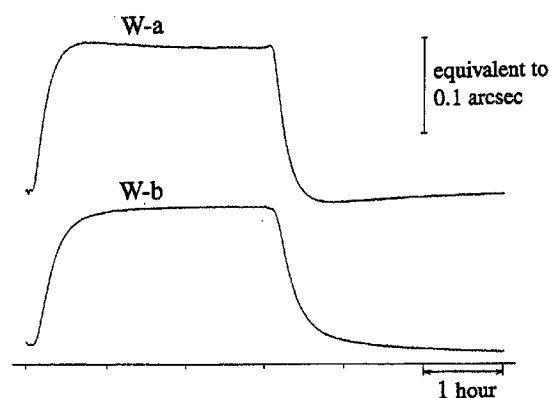


Fig. 4 Response to step function (abrupt volume increase and decrease at the center of the liquid tube) Earth tides components and linear trends are eliminated.

4.2 ステップ入力に対するレスポンス

中間の較正用水槽に一定体積の重りを出し入れして、水管中央の液面高さにステップ状の変化を与えたときの反応を、Fig.4 に示す。上段が坑口、下段が奥の水槽の水面高さの変化であり、上向きが水面の上昇を示す。時定数が非常に大きくなることが予想されたので、投入と、引き上げは同日には行わず、約3週間の間を置いているが、それぞれ3時間分の記録をつないだものを示す。また、それぞれ、地球潮汐成分とリニアトレンドを差し引いているので、ステップ入力に対する正味のレスポンスとみることができる。投入から実際に液面が上昇し始めるまで、約3分かかっており、これは、液面を表面波が伝播するのに要する時間に対応する。さらにそれ以後の液面の上昇は時定数が、10~17 分のゆっくりした変動を示し、これは、シリコンオイルの粘性の影響であり、両水槽とも過制振 (over dumping) となっている。すなわち、倍率は、十分に低周波では1になるが、周波数が上がれば急速に落ちる。

4.3 いろいろな周波数における記録

以上のような特性を実際の記録上で見るため、さまざまな周波数帯の入力の場合として tilt step がある近地地震、遠地地震の表面波、及び地球潮汐の記録を Fig.5 に示した。いずれも、串間観測室の記録と比較して示す。

近地地震として、Fig.5-1 が1996年12月3日に日向灘で起きた M6.6 の地震時の記録である。大隅

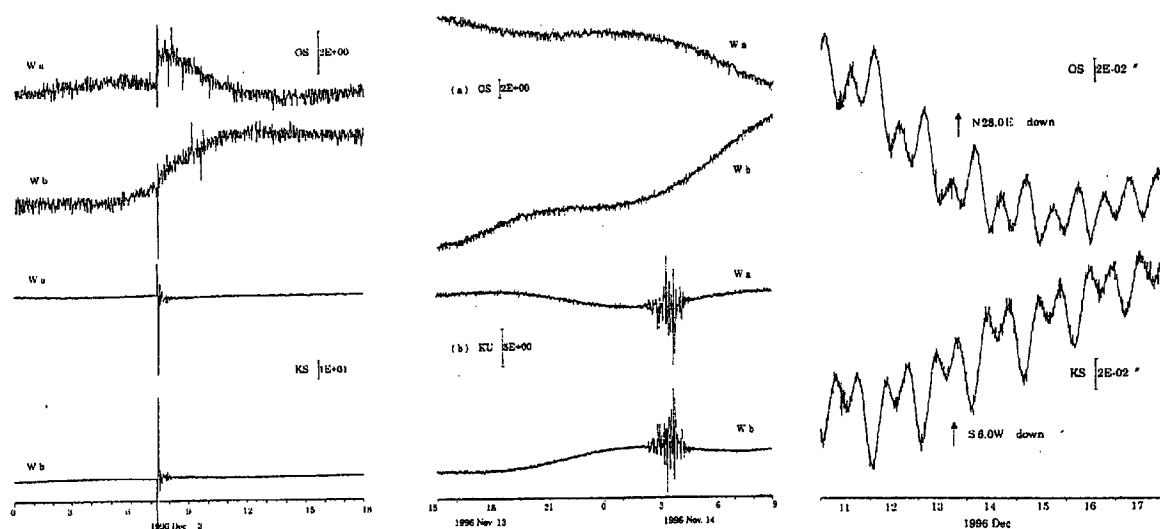


Fig. 5 Records of the liquid level change at the occurrence of the earthquake. (a) Oosumi (b) Kushima

Fig.5-1 (left) Hyuganada, Dec.3,1996, M6.6

Fig.5-2 (center) Peru. Nov. 13, 1996, M7.3

Fig.5-3 (right) earth tides record.

では、記録上では coseismic には坑口では機械的なガタと思われるステップが生じている(震源に起因するいわゆる coseismic な tilt step は、前節に示したように、記録上では step としては表れない)が、その後の約 5 時間にわたる変化は、両水槽にセンスが逆でほぼ同じ量が出ており、システム全体の傾斜の記録といえる。これは本来の coseismic な tilt step と余効変動を含むものだと考えられる。Fig.5-2 は、同 11 月 13 日バレーの太平洋岸で起きた M7.3 の地震時の記録である。大隅の記録では、表面波の周波数領域では痕跡も認められない。以上 2 例は、一分値データのプロットで、プロットの倍率は、大隅の方が串間比べて拡大している。(近地地震 5 倍、遠地地震 1.25 倍)

一方、地球潮汐の周波数帯域では良好な反応があり明瞭な潮汐記録が得られている(Fig.5-3)。この図のみ、両水槽の差を取った傾斜の値をプロットしている。潮汐については、4-2 節のデータの処理にあたり、44 日間のデータに対して両水槽各々につき、BAYTAP (石黒ら, 1984)を使用して分潮を求めたが、両水槽の結果は非常によく一致し、主要分潮の振幅では数%の差しかみとめられなかった。海洋潮汐の影響まで考慮していないが、理論潮に対する比率も 0.5 近くの値が出ている(両水槽の値を差し引いて 1 となる)ので、半日周潮以上の周期では、良好な記録がえられているものと考えられる。

5. まとめ

以上、大隅観測室のハーフ・フィールド型傾斜計の設置について報告し、短い観測期間ではあるが、得られた観測例をいくつか示した。ハーフ・フィールド型は本来、固有周期が長いものであるが、シリコンオイルを使っているため、その粘性の影響もあり、半日周潮より短い周期に対しては、ほとんど無感となった。今回は定量的な議論はしないが、中央変位に対する較正結果から、系全体の傾斜に対する特性への変換をすることが、傾斜計としての感度を求める上で必要となる。また、観測開始から 1 年未満のため、温度の年周変化が得られていないが、これらのデータが得られてから、温度の影響を詳しく検討することも今度の課題である。

参考文献

- 浅田敏・網川秀夫;ハーフフィールド型水管傾斜計における温度変化の影響について(1987):地震Ⅱ, Vol.40, No.1, pp.125-126.
- 石黒真木夫・佐藤忠宏・田村良明,大江昌嗣(1984):地球潮汐データ解析 —プログラム BAYTAP の紹介—,統計数理研究所集報,第 32 号,第 1 号, pp.71-84
- 大谷文夫・寺石眞弘・園田保美・古澤 保(1992):日向灘地殻活動総合観測線による地殻変動連続観測,京都大学防災研究所年報,第 35 号 B-1, pp.299-312.
- 興津 修・平田 裕・浅田 敏・網川秀夫・菊池新市・平井英明(1992):切山導水トンネル内における 100m 長及び 330m 長ハーフフィールド型水管傾斜計による傾斜観測,地震Ⅱ,第 45 号,第 2 号, pp.259-261.
- 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,第 30 号 B-1, pp.29-40.
- 網川秀夫・浅田敏・井野盛夫;ハーフフィールド型水管傾斜計のノイズのスペクトラムについて(1985):地震Ⅱ, Vol.38, No.4, pp.609-610.
- 寺石眞弘・大谷文夫・園田保美・古澤 保(1996):日向灘地殻活動総合観測線による地殻変動連続観測 —経年変化と季節変動—,京都大学防災研究所年報,第 39 号 B-1, pp.227-240.
- 古澤 保・大谷文夫・寺石眞弘・園田保美(1993):線膨張率の異なる 2 種のスーパー・インヴァー棒伸縮計の比較観測,測地学会誌,第 39 号,第 4 号, pp.363-373.
- Agnew, D. C. (1986): Strainmeters and tiltmeters, Rev. Geophys., Vol.24, No.3, pp.579-624.
- Beavan R. J. and R. Bilham (1977): Thermally induced errors in fluid tube tiltmeter, Jour. Geophys. Res., Vol.82, pp.5699-5704.
- Bower, D. R. and N. Courtierr (1978): Long baseline tilt observations in a mine near Ottwa, Canad. Geophys. Union Meeting.
- Michelson, A. A (1914): Preliminary results of measurements of the rigidity of the earth, Astrophysical Jour., Vol.39, No.2, pp.105-138.

Tilt observation with half-filled type watertube tiltmeter at Oosumi observatory

Masahiro TERAISHI, Fumio OHYA, Yasumi SONODA,
Keigo YAMAMOTO, Muhamad HENDORASTO* and Tetsuro TAKAYAMA

* Volcanological Survey of Indonesia, Volcano Analysis Division

Synopsis

A half-filled type watertube tiltmeter, whose liquid surface is continuous between two measurement pots, was installed at Oosumi observatory in the observation network of crustal activities in the Hyuganada region, Kyushu, Japan. Silicon oil is used as liquid of the instrument. An instrument of this type has a long characteristic period and silicon oil is very viscous, therefore the response to forced tilt is negligible for the shorter period than that of semi-diurnal earth tides. Some other characters of this instrument are also recognized from the records in a brief observation.

Keywords: watertube tiltmeter; half-filled type; observation of crustal deformation; characteristic period;