

室戸における地殻傾動の連続観測

加藤 正明・平原 和朗・田中 寅夫
細 善信・津嶋 吉男

OBSERVATION OF GROUND TILTS AT MUROTO

By *Masaaki KATO, Kazuro HIRAHARA, Torao TANAKA,*
Yoshinobu HOSO and Yoshio TSUSHIMA

Synopsis

In order to detect ground tilts associated with subduction of the Philippine Sea plate, two components of water-tube tiltmeters (E-W=47.5 m, N-S=51.6 m) were installed in September 1985 at the Muroto-misaki meteorological station, JMA.

Detectors of water level were designed to operate over a wide dynamic range ($0 \sim \pm 7.5$ mm), and set only thirty centimeters beneath the ground surface. A low-pass filter with a cut-off frequency of 0.001 Hz was introduced to diminish short-period oscillations of water level.

Signals of the water levels of the four detectors and other meteorological data are stored on RAM in a data logger and then accessed from the Disaster Prevention Research Institute by telephone calls.

1. ま え が き

1.1 本研究を計画するに至った経緯

京都大学防災研究所総合移動観測班は、西南日本の活断層を中心とする地殻活動の活発な地域の精密診断を行なうため、地震予知に有効な諸観測を機動的に実施することを目的としている。

ところで、西南日本における地殻活動は、西南日本が属しているアジアプレートの下にフィリピン海プレート、さらには太平洋プレートが沈み込んでいることから、これらの海洋プレートとアジアプレートとの相互作用によって地殻内部に集積される応力にその原因があることはよく知られている。したがって、個々の活断層の周辺にどのような応力が蓄積されつつあるかを知るために、活断層およびその周辺地域をめぐって機動的な観測を行なうことが是非とも必要である。これらの活動の原動力となっている、アジアプレートとフィリピン海プレートの相互作用の状況を逐次把握して、まず西南日本全体の地殻活動の大勢を知って、それに基づいて個々の地域、活断層の観測結果を解析して行くことが非常に大切であり、かつ有効な方法であると考えられる。

四国、南海、東海沖にはマグニチュード8を越える巨大地震が、およそ100年あまりの間隔で発生しているが、この巨大地震に伴って、室戸岬や紀伊半島の先端では地震前には土地が次第に沈降し、地震時には、はね返って隆起するという上下変動が繰り返されていることが、水準測量や海岸段丘の調査などから明らかになっている。したがって、このような土地の傾動を連続して精密に監視することにより、フィリピン海プレートの沈み込みとそれに伴う四国・近畿地域を含むアジアプレートとの相互作用、地殻内部の応力の蓄積

について基礎的な資料が得られるはずである。さらに、両プレート間で発生する巨大地震の予知につながる重要な情報も得られることが期待できる。

1.2 観測点の選定

アジアプレート南端の変形に伴って観測される上下変動は、徳島県中部付近を軸として南へ行くほど増大し、室戸岬で最大となる。この上下変動を観測するために、水管傾斜計による連続観測の他に、検潮儀による観測、水準測量その他を計画しているが、なかでも水管傾斜計による連続観測は精度が高く、異常傾動の検出には欠かすことができない。土地の傾動の局地的な不均質性を避け、かつ、検出するのに十分な水位変化を得るためには、数10 mのスパンを取ることが望ましい。また、設置に際しては温度変化による水柱の膨脹・収縮を避けるため可能な限り平坦な地形の場所が望まれる。

気象庁室戸岬観候所 ($134^{\circ}10.7' E$, $33^{\circ}14.9' N$, $H=185 m$) は室戸岬の最南端に位置しており、上述の観測目的に絶好の立地条件を有している。また、構内の敷地も比較的平坦である。さらに、このような地表近くの傾動観測は、通常、気温とか降雨といった気象的擾乱を受けるため、これらを補正することが不可欠であるが、同観候所の構内では、まさにこのような補正に必要な気象観測データが専門的に集録されている。以上の理由により、室戸岬観候所構内へ水管傾斜計を設置することに決定した。Photo 1 の航空写真に矢印で観測点の位置を示す。

2. 計器および観測・伝送システム

2.1 コンクリート室の設置と水管ならびに空気管の埋設

Fig. 1 に示すように水管傾斜計を直交する2方向に設置した。基線長は東西方向 (AB) が47.5 m、南北方向 (CD) が51.6 mである。水位検出部 (WL) は、A, B, C, D 4個所のコンクリート室に設置してある。コンクリート室の側面図と平面図を Fig. 2 に示す。コンクリート室の沈下ならびに傾動を防ぐため、まず地下3.2 m (Aのみ4.2 m) まで直径40 cmの穴をくり抜き (周囲は礫まじりの風化物で岩盤には到達していない)、鉄筋を入れコンクリートを流し込み $200 cm \times 120 cm \times 30 cm$ のコンクリート基礎部に接続し、その上に、Fig. 2 に示すようなコンクリート室を設置した。水管には内径25 mmの透明塩ビ管を用いている。この水管を内径100 mmの塩ビ管 (空気管用) と一緒にしてコンクリートU字溝に入れ地表面下50～



Photo 1 Aerial photograph of the Cape of Muroto. An arrow shows the location of the Muroto-misaki meteorological station, JMA ($134^{\circ}10.7' E$, $33^{\circ}14.9' N$, $H=185 m$).

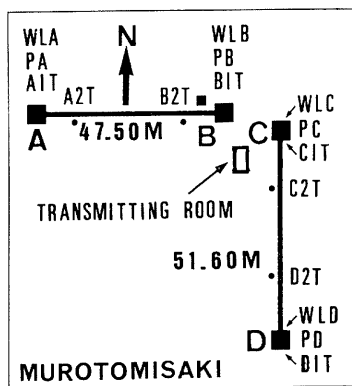


Fig. 1 Installation of instruments. A, B, C and D: Concrete room for setting a detector of water level, a thermometer and a barometer. WLA, WLB, WLC and WLD: Detector of water-level. PA, PB, PC and PD: Barometer. A1T, B1T, C1T and D1T: Thermometer set in each concrete room. B2T, C2T and D2T: Thermometer set in the air-tubes.

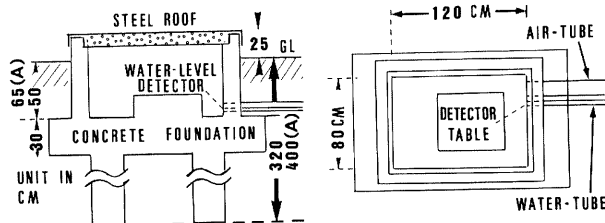


Fig. 2 Side view (left) and plane figure (right) of the concrete room.

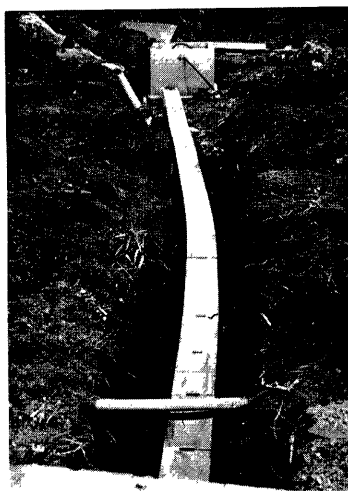


Photo 2 U-shaped concrete covers in which a water-tube and an air-tube are set.

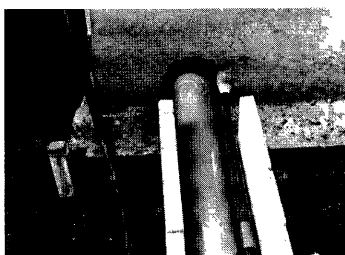


Photo 3 Foundation of a concrete room. A water-tube and an air-tube are seen.

100 cm に埋設してある。埋設前の写真を **Photo 2** と **Photo 3** に示す。コンクリート室は鉄板屋根によって不完全ではあるが外気から遮断されている。水位検出部の上部には鉄板の蓋が置いてあり、この蓋と屋根の間に断熱のために発泡スチロールの板をはさんでいる。

2.2 水位検出部の構造

地表付近に水管傾斜計を設置する場合、温度影響(日変化ならびに年変化)により水位が大幅に変動する。従ってダイナミックレンジはできるだけ大きくとることが望ましい³⁾。今回、設置した検出部は2液体傾斜計用として開発されたもの³⁾ とほぼ同じである。**Fig. 3** に水位検出部の設計図を示す。フロートとアーム支点との間隔は 200 mm、アーム支点と差動トランスとの間隔は 40 mm であり、水位変動を5分の1に縮小している。この機構により 0 ~ +7.5 mm の水位変動を記録することが可能である。アームの回転軸を支持するための真鍮板は下部の真鍮板(ガラス容器の下面と接触している)とスーパーインパールの棒で接続されており、温度変化による影響を避けている。アームは、水平方向は2枚の鋼板パネ(厚さ 70 μ , 幅 5 mm, 長さ 10 mm)で、垂直方向は2本のステンレス線パネ(径 0.19 mm, 長さ 10 mm)で支えられており、回転軸は極めて安定している。パネのモーメントによる影響は約 1% であり、土宝観測所と山良観測室で使用している水管傾斜計の場合に比べると1桁小さくなっている^{4) 6)}。差動トランスには SCHAEVITZ 社製の 050 HR を用い、変位に対して linear な直流出力電圧を得るための回路には DC-AMP 方式⁷⁾を採用している。DC-AMP 基板を **Photo 4** に示す。

2.3 温度計と気圧計

温度センサ IC には μ PC 616A を使用している⁷⁾。電子回路を送信室に置いているため、センサから電子回路までの距離が長くなり、成分によっては信号ケーブルで短周期のノイズを拾っている場合がある(**Fig. 6** 参照)。このため、電子回路をセンサ側へ設置変更する予定である。気圧計は、ペローズに差動トランスのコアを取付け、変位に対して linear な出力電圧が得られるようにしてある⁷⁾。使用している差動トランスならびに回路は水位検出部と同じである。

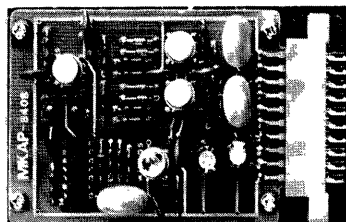


Photo 4 DC-AMP for a differential transformer.

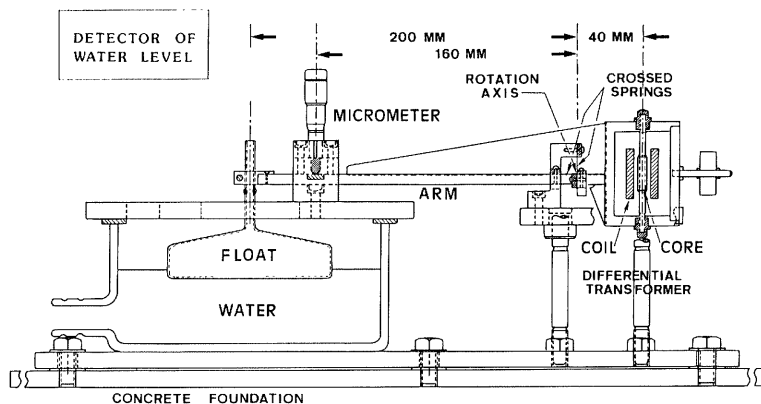


Fig. 3 Detector of water level.

2.4 室内実験

南国の室戸岬ではあるが、冬の何日かは1日の最低気温が -5°C 以下になる。水位検出部を設置してあるコンクリート台の地表面からの深さがわずか30 cmしかないため、冬期における水の凍結を防止するためエチレングリコール(比重1.115)を水3に対して1の割合で混入し1985年9月より傾動観測を開始した²⁾。1985年10月にピペットを用いた感度検定⁶⁾を行なったところ、ピペットで加えた混合液の量と液位変化がlinearな関係にならないなど、理解に苦しむ現象が確認されたので、宇治市の防災研究所の実験室で、エチレングリコールと水の混合液を用いた場合の傾斜計の感度検定、エチレングリコールの水への拡散速度などに関する室内実験を開始した。

Fig. 4の左側に、内径25 mmの透明塩ビ管を曲げて作ったU字型の管にエチレングリコール95 cmと水285 cmを入れた状態を示す。この状態では、両端の液位に10.9 cmの差が生じる。もし、エチレングリコールの水への拡散速度が十分に大きければ10.9 cmの液位差は急速に零に近付くはずである。ところが、実験開始より2カ月経過後も10.9 cmの液位差は保存されたままであった。この実験から、エチレングリコールの水に対する拡散速度は極端に小さいことが予想される。もしかすると、エチレングリコールは水には溶解せず、分離したままの状態になっているのではなかろうか(?)。この疑問に対する解答を引き出すために、もう1つ別の実験を行なった。まず、水75%とエチレングリコール25%の混合液を作り十分にかくはんして比重を測定したところ1.04という値が得られた。この混合液をFig. 4の右側に示すような細長い管に入れ2カ月間放置した。2カ月後に管の上部の混合液をピペットで100 cc採取し比重測定を行なったが、全く同じ値(1.04)が得られ、比重が変化していないことが確認された。第2の実験により、エチレングリコールと水は分離しないことがわかった。さらに、混合液の比重が1.04になるという事実より、エチレングリコールが水に溶解する際には0.7%程度の体積減少変化が生ずることが確認された。以上の実験結果より、このような複雑な挙動を示す混合液を水管傾斜計に用いるのは不適當であるとの結論に達した。

次に、混合液ならびに水を用いて行なった感度検定実験について述べる。室内実験で使用した水位検出部は室戸岬に設置したものと全く同じである。実験装置は折返し点を持つ全長30 mのマラソコース型とした。Photo 5に示すように、同じ台の上に2つの水位検出部を設置してある。Photo 6は折返し点を示す。折返し点の水管を高くしてある部分に空気を入れ、水を左と右とに遮断した場合、水管傾斜計がどのような動作をするかを実験するため、上部に開閉装置(コック)を取付けてある。このコックを開け空気を入れた後コックを閉じ、水を左右に完全に分離した後、ピペットで片側の水槽に水を入れた時の2つの水位検出部の水位変化を測定した、その結果、水位上昇のほぼ100%が水を加えた方の水槽で検出され、反対側の水槽の水位は全く変化しないことが確認された。この実験は、水管の途中に空気が入り、水が左右に完全に遮断された場合には、傾斜計として全く動作しなくなることを示している。

さらに、水管の中に大量の空気が混入していても水管の下部でわずかも水が連結してさえいれば、水管傾斜計は完全に動作することを、ピペットによる水の注入量と出力電圧が完全にlinearになるという実験結果により確認した。

2.4の締めくくりとして、水管傾斜計の動的特性について述べる。全長30 mの場合、水を用いた場合の振

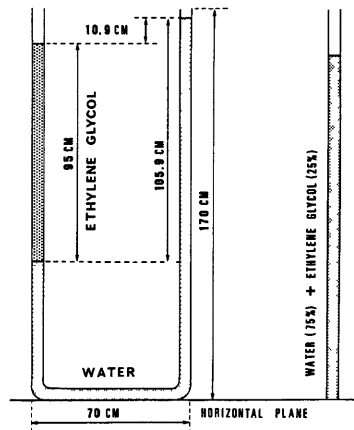


Fig. 4 Two kinds of vinyl tubes filled with water and ethylene glycol.

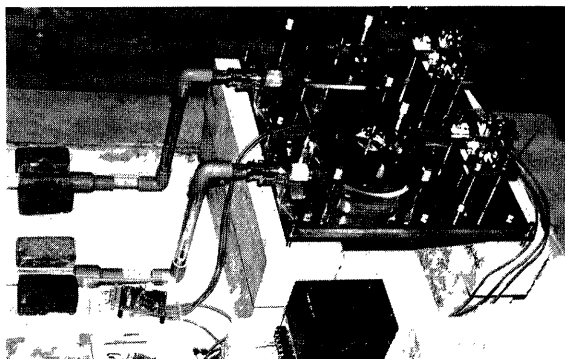


Photo 5 Two sets of detectors of water level set on the same stand.

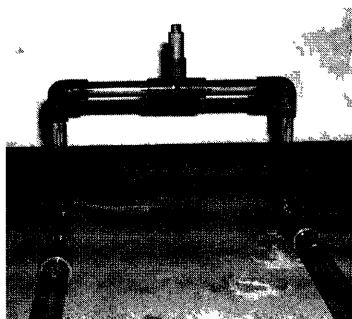


Photo 6 Device for pouring a proper quantity of air into a water-tube.

動周期は55秒、減衰定数は0.3になることを実験により確認した。これらは理論から計算される値とほぼ一致している。エチレングリコールと水の混合液を使用した場合には減衰係数は0.6となった。室戸岬で水を使用した場合の周期と減衰係数を全長52mとして計算すると、周期は75秒、減衰係数は0.4となる。

2.5 混合液を蒸留水と入替える方法

2.4で述べたように、混合液を用いることが不適当であるとの結論を得たので、1986年3月に蒸留水に入替える作業を行なった（Photo 7参照）。入替作業は以下に行なった。まず、水槽と塩ビ管を切離し、混合液の入っている塩ビ管の先端と60リットル用ポリバケツ（30リットルの蒸留水を入れておく）の下端を軟質塩ビチューブで接続し、チューブの中には蒸留水を満たし空気を完全に抜いておく。次にコックを開けると、バケツと水管との落差が約1mあるので、バケツの水位が低下し、混合液は反対側の塩ビ管の末端よ



Photo 7 Apparatus for replacing a mixture of water and ethylene glycol by distilled water.

り排出され、空気を混入させることなく数分間で完全に蒸留水と入替った。このような方法により入替作業を成功させた。

冬期の凍結は、水位検出部を発泡スチロールで覆うことにより多分防止できると予想している。1986年1, 2月頃のコクリート室の温度記録を検討することにより対策をたてたい。

2.6 感 度 検 定

Fig. 3 の水位検出部の設計図に見られるように、アームの回転軸から 160 mm のところに鏡面仕上げのステンレス板が張付けてあり、これをマイクロメータで押すことにより差動トランスの感度検定を行なえるようにしてある。Fig. 5 に、混合液を蒸留水と入替え水位検出部を再設置した後に行なった感度検定の結果を示す。直線の勾配は、マイクロメータの変位 1 mm 当りの DC-AMP の出力電圧で表わしてある。水位変化 1 mm 当りの出力電圧に換算するには、160 mm (正確には $A=160.0$ mm, $B=159.8$ mm, $C=158.5$ mm, $D=161.0$ mm) を 200 mm で割った値を掛けてやればよい。

2.7 フィルターと自動零点調整回路

風が強く吹いて気圧の短周期変動が卓越すると、水位が大幅に変動し、時には入力電圧範囲を越えて振動することがある。このような変動を除去するために、20 分以下の変動を 12 db/oct で取除くフィルターを 1986 年 3 月 20 日に導入した。3 月 20 日以後の記録では短周期変動が大幅に減少している (Fig. 7 および 8 参照)。

温度変化による水位の変動や蒸留水の蒸発による水位低下などにより、水位電圧出力信号が記録可能な電圧範囲 ($0 \sim \pm 1V$) からはずれた時に一定のステップ電圧を自動的に与え、常に記録がスケール・アウトしないように、フィルターの後に自動零点調整回路⁷⁾を設けている。

2.8 伝送システム

室戸観測室 (子局) から宇治防災研究所 (親局) へのデータの伝送には、公衆電話回線利用の長周期地殻変動データ収録装置 (沖電気工業株式会社製; 尾池和夫博士, 渡辺邦彦助手 (京大防災研究所) らの仕様によ

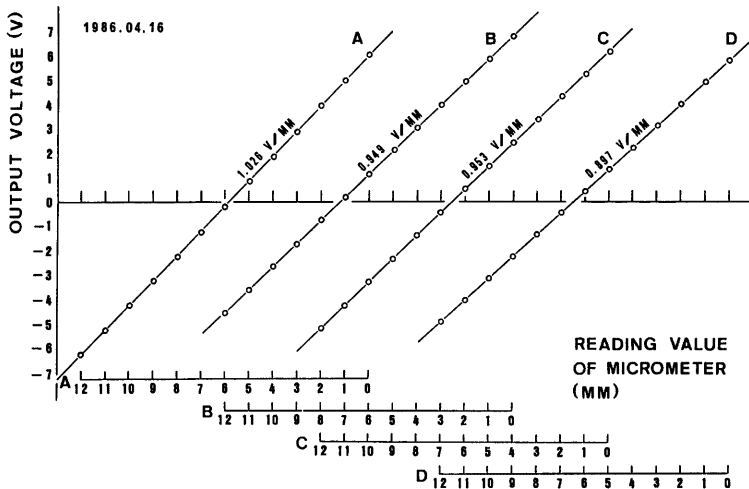


Fig. 5 Relation between the displacements of four micrometer's heads and the output voltages.

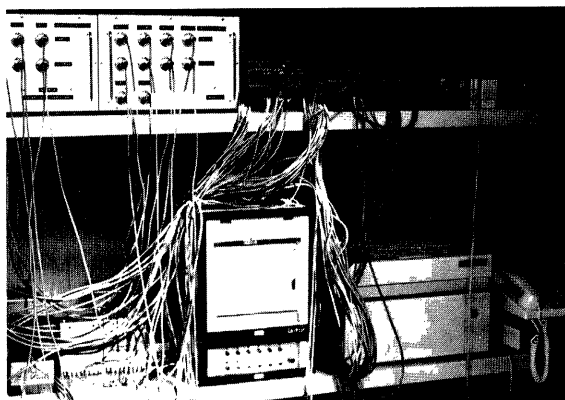


Photo 8 Transmitting room.

って製作された)を使用している。

入力電圧範囲は0～1 IVである。24チャンネル・アナログマルチプレクサを通して後12ビットでA/D変換され32キロバイトのメモリに収録される。収録されたデジタル信号はMODEM, NCUを経由して300 bpsで伝送される。親局からのダイヤル呼出しにより、1局のデータ(24チャンネル, 1時間サンプリングで10日分)は13分かかってカセットテープに収録される。なお、現地の送信室では12打点記録計でアナログ・モニター記録も行なっている。送信室をPhoto 8に示す。

3. 観測結果と考察

Fig. 6, 7および8に1986年3月14日から4月18日までのデータを示す。Fig. 6は温度ならびに気圧のデータである(シンボルはFig. 1を参照のこと)。Fig. 6より、水位検出部を設置してあるコンクリート室内の温度日変化は複振幅で $\pm 2^{\circ}\text{C}$ を越えないこと、A室は本陰に設けられているので日変化の振幅が小さいこと、4つのコンクリート室の1日より長い周期の温度変化は互によく似ていること、コンクリート室より空気の管の中に12m入ったところに設置してある温度計の日変化は極めて小さいことなどの事実気付く。

Fig. 7および8に、東西および南北方向の水管傾斜計のデータを示す(自動零点調整回路が動作してステップを生じている個所があるが補正は行っていない)。水位低下は1日当り10 μ 程度である。国内では、すでに数カ所で水管傾斜計による観測が行なわれており報告もなされている⁸⁾⁻¹⁰⁾。これらの報告の中には、かなり顕著な水位の年周変化が見られる場合がある¹⁰⁾。従ってFig. 7および8に示した観測期間における水位低下は、年周変化の一時期の状態を現わしているにすぎない可能性もあることに注意すべきである。長期間の観測から、季節変動をも含めての水位低下量を明らかにして行くことが必要である。

東西成分の傾動永年変化には、この期間、ほとんどドリフトが見られない。これに対して、南北成分では非常に大きな南下りの変化が見られる。この原因として、水位検出部再設置直後のために計器にメカニカルなひずみが残っており、その余効が現れていること、南北成分は傾動の年周変化が大きく、Fig. 8はその変化の大きな時期に相当していることなどが考えられる。データの蓄積を待って結論を出したい。

Fig. 7および8の傾動変化曲線(WLA-WLBおよびWLC-WLD)には雨および気圧の影響が明瞭に現われている。雨の影響は必ずしも日雨量に比例してはいない。雨の降り方によって影響の現れ方が異なってくるようである。気圧の影響は短周期になるほど顕著であり、長周期ではほとんど影響が見られないよう

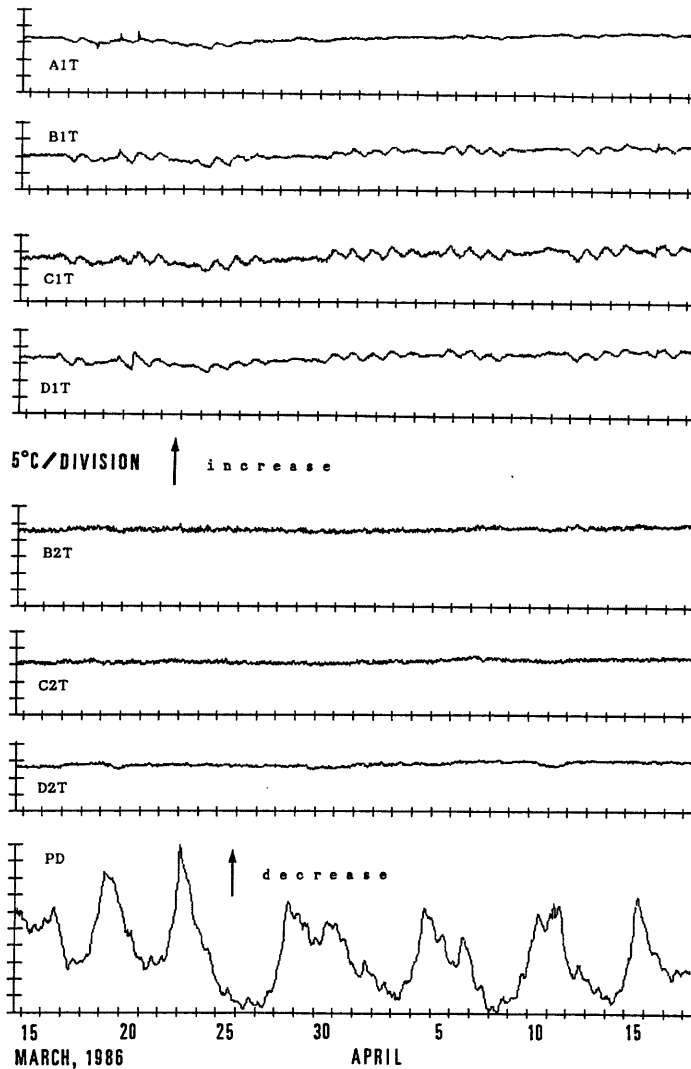


Fig. 6 Temperatures in the four concrete rooms and air-tubes, and atmospheric pressure in the D-room. Each symbol is shown in Fig. 1.

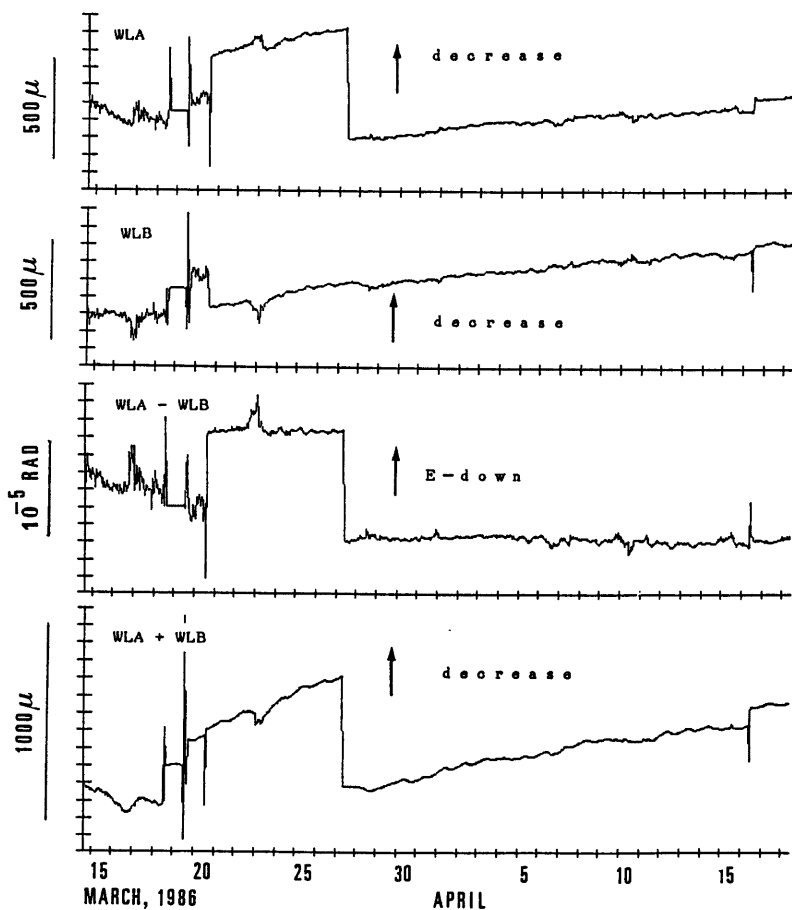


Fig. 7 Water levels WLA and WLB, the difference (expressed in tilt) between WLA and WLB, and the sum of WLA and WLB.

ある。

Fig. 7 および 8 の傾動変化にはほぼ半日周期の波が卓越しており、しかも時間とともに振幅が変化しているように見える。そこで、3月24日の23時から4月15日の6時までの1時間毎の512個のデータを使用して、傾斜、コンクリート室の温度、気圧についてFFT法とMEM法を用いて周波数解析を行なった。傾斜2成分には、 M_2 分潮の周期である12.42時間に明瞭なピークが現われており、地球潮汐を記録していることが確認された。当然のことながら、コンクリート室の温度には24時間の周期にピークが、気圧には12時間の周期にピークが現われており、12.42時間にはピークは存在していない。

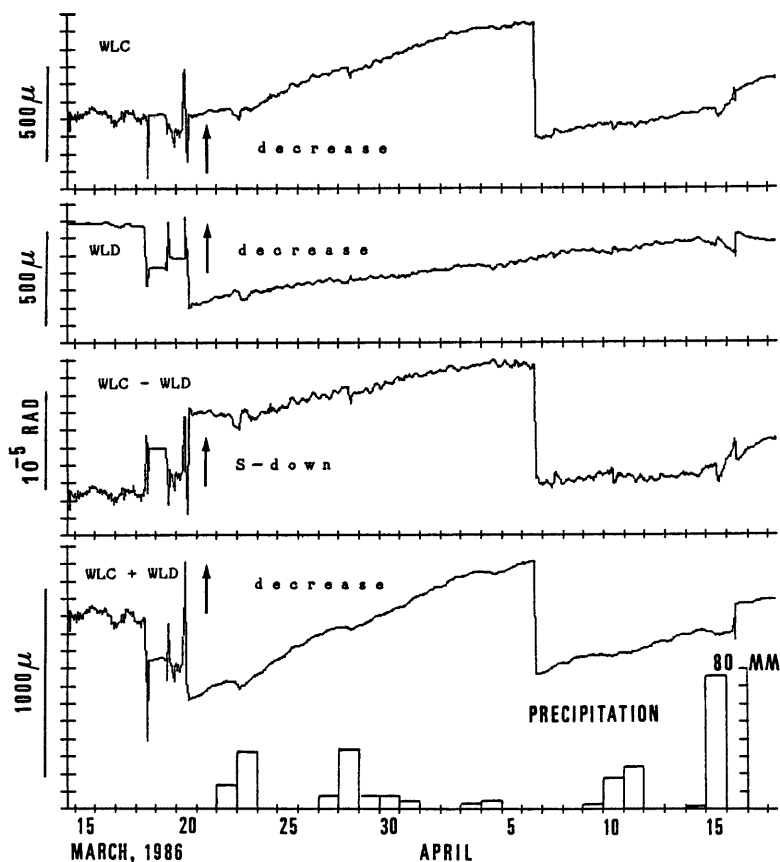


Fig. 8 Water levels WLC and WLD, the difference (expressed in tilt) between WLC and WLD, the sum of WLC and WLD, and precipitations.

4. あとがき

フィリピン海プレートの沈み込みに伴う土地の傾動を連続観測により監視し、地殻内部の応力の蓄積に関する基礎的な資料を得ることを目的として、室戸岬測候所構内において水管傾斜計2成分による連続観測を開始した。

20分以下の短周期変動を除去するフィルターを導入することにより、ようやく潮汐が検出できるところまでこぎつけたというのが現在の段階であり、気象擾乱をいかにして取除き真の地殻傾動を検出できるようにするかが今後に残されている最も重要な課題である。

終りに当り、傾斜計の設置を御許可くださり、数々の便宜を給った気象庁大阪管区気象台ならびに室戸

岬測候所に深甚の謝意を表します。また、日頃から何かと御協力いただいている室戸岬測候所の総務係長川上氏をはじめスタッフの方々、防災研究所テレメータ室に設置されている親局の使用の便宜をはかっていただいている微小地震部門関係の方々、その他、観測が軌道に乗るまでに色々な面で御協力を頂いた三雲 健教授、北村宏之、石田勝久両技官をはじめ関係各位に深く感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 地震予知総合研究振興会(萩原尊礼・浅田 敏・春山 仁・志知龍一・尾池和夫・岡田義光・井野盛夫):切山トンネル地盤変動観測手法検討報告書, 静岡県地震対策課, 1984.
- 2) 加藤正明・平原和朗・田中寅夫・細 善信・津嶋吉男: 地表水管傾斜計の問題点(室戸における地殻傾動観測), 日本測地学会第65回講演会要旨, 1986, pp. 107-108.
- 3) 安藤雅孝・加藤正明・土居 光・津嶋吉男: 2 液体傾斜計の開発(2), 地震学会講演予稿集, No. 1, 1980, pp. 184.
- 4) 志知龍一・奥田 隆・吉岡茂雄: フロート変位型自記水管傾斜計の製作, 測地学会誌, 第26巻, 第1号, 1980, pp. 1-16.
- 5) 加藤正明・津嶋吉男: バネのモーメントを小さくしたフロート型差動トランス水管傾斜計の製作, 日本測地学会第63回講演会要旨, 1985, pp. 108-109.
- 6) Kato, M.: Observations of Crustal Movements by Newly-Designed Horizontal Pendulum and Water-Tube Tiltmeters with Electromagnetic Transducers (1), Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 27, Part 4, 1977, pp. 155-171.
- 7) 加藤正明・田中寅夫・細 善信: 由良における地球潮汐の観測(観測システムと潮汐定数), 京大防災研究所年報, 第28号 B-1, 1985, pp. 65-78.
- 8) 尾池和夫・見野和夫・松尾成光・岸本兆方: 東海地域における地震予知観測の方法について, 京大防災研究所年報, 第24号 B-1, 1981, pp. 41-49.
- 9) 井内 登・加瀬 明・蒲田兎年夫: 御前崎長距離水管傾斜計による傾斜観測, 日本測地学会第56回講演会・地殻変動シンポジウム(第2回)要旨, 1981, pp. 88-90.
- 10) 長谷川 靖・遠山忠昭・植原 毅・里村幹夫・井野盛夫: 静岡県相良町における地殻傾斜観測について, 日本測地学会第65回講演会要旨, 1986, pp. 109-110.