

室戸において観測された地殻傾動 (南北成分: 1990年-1992年)

大村 誠・橋本 佳絵・福嶋真里子
田部井隆雄・平原 和朗
田中 寅夫・細 善信

GROUND TILT OBSERVED AT MUROTO (N-S COMPONENT: 1990-1992)

By *Makoto OMURA, Kae HASHIMOTO, Mariko FUKUSHIMA*
Takao Tabei, Kazuro HIRAHARA
Torao TANAKA and Yoshinobu HOSO

Synopsis

Continuous observation of ground tilt with a water-tube tiltmeter (North-South component, span: 51.60 m) are being performed at the Muroto-misaki (Cape Muroto) meteorological station, JMA.

Data obtained during the period from April, 1990 to August, 1992 (about 28 months) were analyzed. Tidal constants of ground tilt (M_2 and O_1 constituents) were concordant with theoretical ones in which solid earth tide and oceanic tidal loading were included. Disturbances caused by precipitation and temperature change were roughly removed by using simple models. Secular change rate of the tilt in N-S direction was estimated to be $1.5 \pm 0.2 \times 10^{-6}$ rad/yr (South-down).

The continuous observation of ground tilt at Muroto will be effective to monitor the crustal movement associated with subduction of the Philippine Sea plate.

1. はじめに

室戸岬沖の南海トラフでは、フィリピン海プレートがユーラシアプレートに対して北西へ移動し、その下へ沈み込むことに関連して、およそ100年あまりの間隔でマグニチュード8クラスの巨大地震が発生している (Fig. 1)。その際、室戸岬付近は、内陸部に対して、地震前に徐々に沈降し、地震時には急激に隆起するという上下運動を繰り返している⁴⁾。このような室戸岬先端の沈降を反映する地殻傾動を連続観測すれば、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの相互作用および周辺の地殻応力の蓄積過程を研究する上での基礎資料が得られ、さらに、南海トラフで発生する巨大地震の予知につながる重要な情報を得ることも期待される。

そこで、京都大学防災研究所総合移動観測班は、気象庁室戸岬測候所の協力を得て、同構内に水管傾斜計 (南北および東西各1成分) を設置し、1985年9月より観測を開始した⁵⁾。1986年3月から4月にかけて得られた512個の毎時値を用いて周波数解析が行われ、傾斜2成分に地球潮汐変化を見いだすことができたが、解析期間が短かく、観測に対する気象擾乱および地殻傾斜の経年変化に関する議論は行われていなかった⁶⁾。その後、落雷などによるシステムの故障によって何度か観測が中断されたが、1990年4月17日から現システ

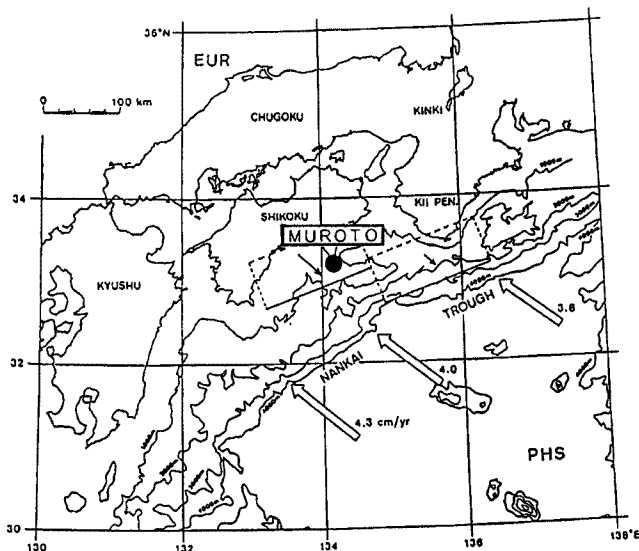


Fig. 1. Location of Muroto. Arrows show the relative velocity vectors of the Philippine Sea plate by Seno¹⁾. Rectangles are horizontal projections of fault planes of the 1946 Nankaido earthquake by Ando²⁾. (Modified from Tabei et al.³⁾)

ムでの観測が行われている。なお、京都大学防災研究所によって始められた観測に、現在、高知女子大学家政学部生活理学科と高知大学理学部物理学科も参加している。

今回は、これまでに観測された傾斜変化のうち、観測期間が2年以上に及ぶ南北成分に限って、観測結果の概要を述べる。なお、東西成分については、水位検出部の一つが1992年2月15日まで故障しており、観測期間が1年に満たないため、今回は言及せず、データの蓄積を待って次の機会に述べることにする。

2. 観測システム

水管傾斜計の設置場所は、室戸岬最南端に位置する気象庁室戸岬測候所(134°10.7'E, 33°14.9'N, H=185 m)の構内である。設置場所および水管傾斜計関係の各種センサの配置を Fig. 2 に示す。観測システムに関しては、加藤ほか⁶⁾により設置時の状況について詳しく述べられており、現在のシステムも設置時とほとんど同じである。変更点は、公衆電話回線を用いたデータ伝送を中止して、現地のポータブルハイブリッドレコーダによるアナログ記録のみを行っていることである。

ここでは、現在のシステムの概要について述べる。室戸岬測候所構内には、Fig. 2 に示されるように4つの水位検出部格納用コンクリート室 A, B, C および D が設置されており、それぞれのコンクリート室内に水管傾斜計の水位検出部 WLA, WLB, WLC および WLD が置かれている。水管傾斜計の基線は直交する2方向にとられ、その長さは、東西成分(WLA-WLB)が47.50 m、また、本論文で述べる南北成分(WLC-WLD)は51.60 mである。この水管傾斜計の水管は、地表面下50~100 cmの浅いところに埋設されている。使用している液体は、蒸留水である。

各コンクリート室は、地下3.2 m (Aのみ4.2 m)まで達する直径40 cmのコンクリート円柱4本からなる基礎にあり、コンクリート室の沈下および傾動が防止されている⁶⁾。水位検出部には差動トランスが用いられ、また、アーム支点を差動トランスの近くに置くことにより、ダイナミックレンジが大きく取られている⁶⁾。コンクリート室内部は、発泡スチロール板をはさんだ2枚の鉄板の蓋により、不完全ながら外気と遮断されている。コンクリート室内の温度センサー IC として μ PC616A を、また、気圧センサーとしてはペローズの変位を差動トランスで検出する方法を採用している^{6),7)}。なお、全解析期間を通じてデータが得ら

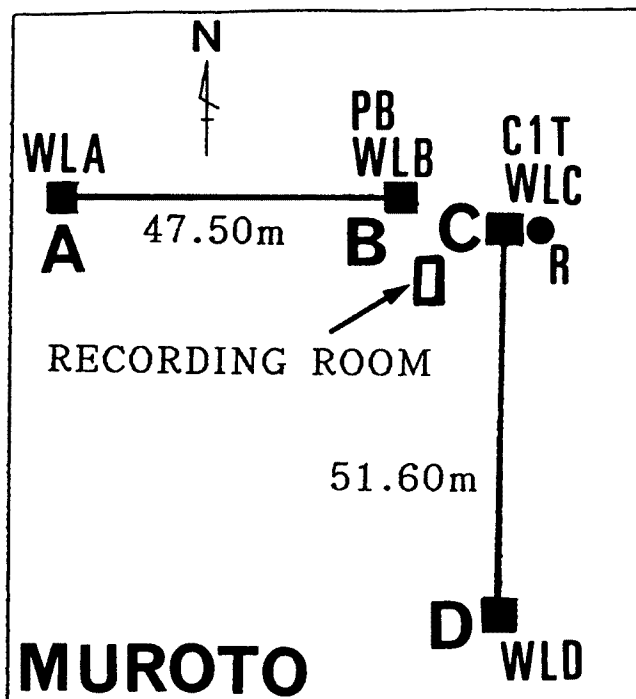


Fig. 2. Installation of instruments. A, B, C and D: Concrete room for setting a detector of water level, a thermometer and a barometer. WLA, WLB, WLC and WLD: Detector of water level. PB: Barometer in concrete room B. C1T: Thermometer in concrete room C. R: Rain gauge.

れたのは、温度センサではコンクリート室 C 内の気温を測定する C1T, 気圧センサはコンクリート室 B 内の気圧を測定する PB であった。さらに転倒升型の雨量計をコンクリート室 C 横の地表に設置している。

各センサからの出力信号は、信号線により記録室(加藤ほか⁶⁾では「送信室」となっている)に送られ、アンプ、自動零点調節回路、ローパスフィルタ(20分以下の変動を 12dB/oct で取り除く)を通して、レコーダ(3087形 ポータブル ハイブリッド レコーダ: 横河北辰電機製)の記録紙上にアナログ記録される。記録紙の送り速度は毎時 10 mm で、約 2 カ月ごとに現地を訪れて記録紙を交換している。

今回解析した期間における、室戸の水管傾斜計関係の各種センサの総合感度をまとめて Table 1 に示す。

3. データの前処理

以下の論文では、観測期間が 2 年以上に及ぶ水管傾斜計南北成分 (WLC-WLD: 51.60 m) によって観測された地殻傾動について述べる。

データの前処理に使用したプログラムは、パーソナルコンピュータ上で動作する簡便なもので、操作者が画面上に表示されるグラフを見ながら半自動的に処理を進めるものである。まず、回収した記録紙上のデータをデジタイザ (DIGITIZER KW4600: グラフテック株式会社製) で読み取り、ファイルに格納する。つぎに、大村ほか⁸⁾の研究に際して開発された地殻変動データ前処理用プログラムを、室戸の水管傾斜計データ処理用に改良して⁹⁾、自動零点調節回路による不連続の接続および欠測データの補間等を行った。なお、本システムの雨量計が欠測となっていた際には、室戸岬 AMeDAS 観測点(同測候所構内)の時間雨量を気象庁高知地方気象台から提供していただき、解析に使用した。

前処理の終了した毎時値の例を Fig. 3 に示す。また、気象(降雨・温度)擾乱および経年変化に関する検討は、これらの毎時値を日ごとに 0 時から 23 時について平均した日平均値を用いた。傾斜南北成分日平均

Table 1. Constants of the sensors in Muroto

Sensor symbol	Sensitivity on recording chart		Remarks	
	Apr. 17, 1990 (0h) to Feb. 14, 1992 (3h)	after Feb.15, 1992 (15h)		
WLA	0.4547 mm/V	0.4209 mm/V	Downward movement of water level (+)	West 47.50 m East
WLB	breakdown	0.4130 mm/V		
WLC	0.4012 mm/V	0.3988 mm/V		
WLD	0.4552 mm/V	0.4366 mm/V		
PB	61.44 hPa/V		Atm. pressure increase (-)	
C1T	25 K/V		Temperature increase (+)	
R	1 mm/mV		Precipitation	

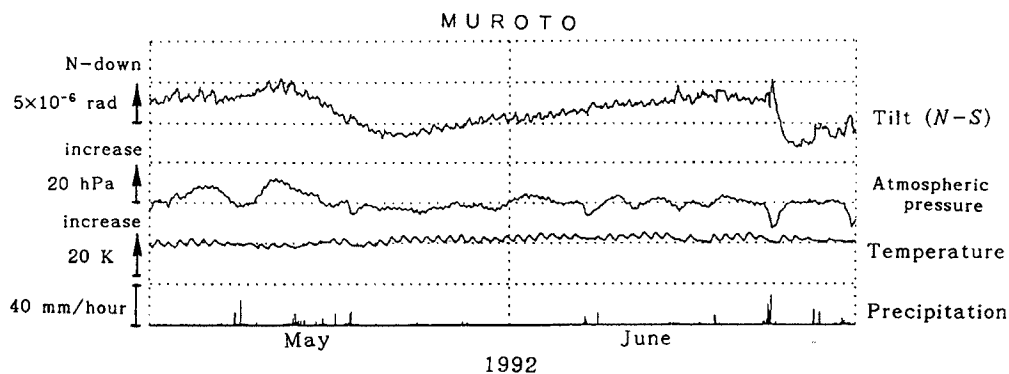


Fig. 3. Hourly data during the period from May 1, 00h00m to June 30, 23h00m, 1992 (JST). Tilt: Water-tube tiltmeter WLC-WLD. Atmospheric pressure: Barometer PB. Temperature: Thermometer C1T. Precipitation: Rain gauge R.

値, コンクリート室 C 内の温度日平均値および日降雨量を Fig. 4 に示す。今回の気象擾乱の議論では, 観測に対してとくに大きな影響を与えていると考えられる, 降雨と温度について議論を行うことにする。

4. 地球潮汐傾斜の解析および理論値との比較

4.1. 地球潮汐傾斜の解析

まず, 水管傾斜計南北成分 (WLC-WLD) の短周期帯での観測状況を確認するため, 地球潮汐傾斜の解析を行った。前処理を行い欠測値を補間した地殻傾斜データ毎時値8192個を用いて, FFT による周波数解析

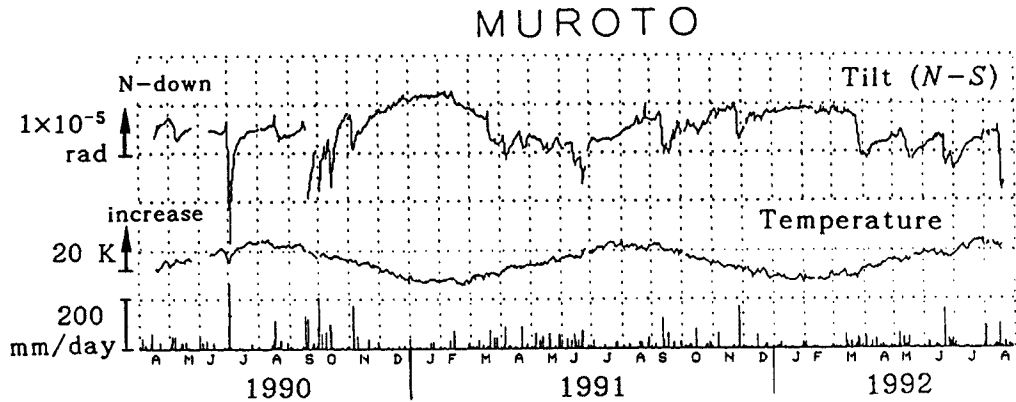


Fig. 4. Daily averaged data during the period from April 17, 1990 to August 22, 1992. Tilt: Water-tube tiltmeter WLC-WLD. Temperature: Thermometer C1T. Daily precipitation (bar chart): Rain gauge R and Muroto-misaki AMeDAS station (JMA).

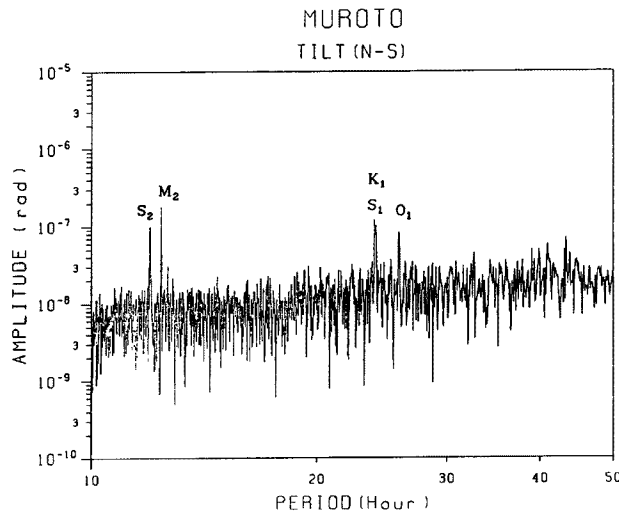


Fig. 5. Spectra of tilt (N-S component: 8192 hourly data)

を行った。その結果のうち、10~50時間の周期帯について **Fig. 5** に示されている。主要な分潮に対応するピークが明瞭に認められ、水管傾斜計南北成分 (WLC-WLD) が地殻の潮汐変形を捉えていることが確認された。そこで、石黒ほか¹⁰⁾ により開発された、地球潮汐解析用プログラム BAYTAP-G による解析を行った。センサの感度がとくに信頼できる期間を選び、1992年2月16日から同年8月22日23時に得られた毎時値4536個 (189日) を用いた。今回は、気象影響を考慮しない潮汐定数を求めた (**Table 2**)。

4.2. 潮汐定数の理論値との比較

つぎに、観測により求められた地殻傾斜の潮汐定数と理論値との比較を行った。理論的に予想される潮汐傾斜は、Sato and Hanada¹¹⁾ により開発された地球潮汐・海洋潮汐荷重計算プログラム GOTIC を用いて、京都大学理学部地球物理学教室で計算された。気象影響を比較的受けにくいと思われる M_2 および O_1 分潮について、観測値および理論値をまとめて **Table 2** に示す。代表的な2つの地球モデル (1066A¹²⁾ モデルおよび Gutenberg-Bullen モデル¹³⁾ に対して計算された理論値は多少異なるが、1066A モデルを使用した場合には、観測値との差は振幅で約20%、位相で約 5° 程度となり、理論値と観測値はほぼ一致している。

Table 2. Tidal constants for ground tilt (N-S component) at Muroto (Feb. 16, 1992-Aug. 22, 1992: 189 days)

	M ₂		O ₁	
	Amplitude	Phase (lag: -)	Amplitude	Phase (lag: -)
	×10 ⁻⁸ rad	deg.	×10 ⁻⁸ rad	deg.
OBSERVED (RMSE)	16.4 (0.6)	0.4 (2.0)	10.2 (2.0)	5.3 (11.5)
EXPECTED				
1066A	19.0	4.9	7.9	8.4
G-B	12.4	3.4	5.7	7.4

Notes:

OBSERVED: by a computer program 'BAYTAP-G¹⁰⁾'EXPECTED: by a computer program 'GOTIC¹¹⁾'1066A: 1066A earth model ¹²⁾G-B: Gutenberg-Bullen earth model ¹³⁾

したがって、室戸の水管傾斜計南北成分は、地球潮汐傾斜をおおむね正確に捉えていると考えられる。

5. 地殻傾斜に対する気象擾乱

一般に、観測される地殻変動には、降雨（地下水位変化）、温度変化および気圧変化により引き起こされる変動が含まれていることが多く（たとえば志知・岡田¹⁴⁾）、その影響量が大きい場合には、目的とする信号の分離が困難となることもある。

さて、本論文では、室戸における傾斜南北成分の日平均値（Fig. 4）には、約2年間の期間内では直線的とみなせる経年変化と、温度変化に起因する複振幅 1×10^{-5} rad 程度の明瞭な年周変化が含まれていると考える。年周変化は、冬に北側（内陸側）へ、また夏に南側（海側）へ傾斜する傾向が認められる。また、降雨にともなう急激な南下がりやゆっくりした回復からなる変動も認められる。変動量は最大 $1 \sim 2.5 \times 10^{-5}$ rad 程度、変動の時間スケールは1カ月程度である。室戸の水管傾斜計は地表近くに埋設されているため気象擾乱が大きい。ここでは、現地で観測された降雨量とコンクリート室 C 内の温度（以後「温度」と略記する）を用いて、気象擾乱について検討する。解析には Fig. 4 に示された傾斜南北成分および温度の日平均値ならびに日降雨量を用いた。

5.1. 降雨影響の概要

観測を行っている室戸岬は、年間降水量 2524 mm（1951～1980年までの平均値¹⁵⁾）という比較的雨の多い場所である。とくに、1990年には、よく台風に見舞われ、時間雨量 50 mm 以上の強い降雨もあった。観測された傾斜変化（Fig. 4）には、明瞭に降雨影響が認められる。たとえば、1990年7月初旬には、7月2日の日降雨量 268 mm という多量の雨を契機に急激な南下がりの傾斜変化が生じている。（最大約 2.5×10^{-5} rad）。また、降雨影響が始まる際には北下がりの小さい傾斜変化がみられることはあるものの、その後の主な降雨影響は常に南下がりの大きな傾斜変化として現われている。

5.2. タンクモデルによる降雨影響のシミュレーション

降雨影響に関してはこれまで多くの研究者により考察されている¹⁴⁾ が、今回は、タンクモデル^{16),17),18)} を用いて降雨影響のシミュレーションを試みた。

使用した傾斜データは、1990年4月17日から1992年8月22日まで（859日間）に得られた傾斜日平均値（Fig. 4）である。タンクモデルの入力としては、日降雨量を用いた。なお、本観測システムの雨量計が欠測

の場合は、室戸測候所敷地内にある室戸岬 AMeDAS 観測点で得られた降雨量を、高知地方気象台よりいただいて使用した。本システムで観測された時間降雨量と AMeDAS により観測されたそれを比較すると、両者の差の平均は約 0.1 mm であった。そこで、今回の解析では、両者を同じデータとして扱う。

解析は次の手順で行われた。

(1) 経年変化と温度影響の暫定的推定

観測された傾斜変化には、時間に関する 1 次式で表わされる経年変化とコンクリート室 C 内の温度に比例する変化が含まれると仮定し、次の式を用いて最小二乗法による近似を行う。

$$D(t) = a + bt + cT(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

t : 近似開始からの日数

$D(t)$: 第 t 日の傾斜日平均値

$T(t)$: 第 t 日のコンクリート室 C 内の温度日平均値

a : 定数

b : 1 日当りの平均傾動速度

c : コンクリート室 C 内の温度に比例する変化に関する係数

である。決定された各係数を(1)式に代入して推定値を求め、対応する日の観測値から減じた。こうして得られた傾斜変化を「温度影響暫定補正済み傾斜日平均値」と呼ぶ。

(2) 短周期変化の分離

傾斜日平均値の変化 (Fig. 4) を検討すると、降雨影響による変動はおおむね 1 カ月程度の時間スケールをもつと考えられる。そこで、降雨影響による変動を、その時間スケールに注目して分離する。そのために、前項の処理で得られた「温度影響暫定補正済み傾斜日平均値」に対して、志知¹⁹⁾ によるデジタルフィルタを適用し、周期 3 カ月以下の変動を分離した。フィルタ操作を行う際の基本型の組合せとして 51 日, 71 日, 91 日の移動平均法を用い、5 回の繰り返しを行った。今回は、こうして分離された短周期成分を降雨影響による傾斜変化であると仮定してシミュレートした。

(3) タンクモデルによる降雨影響のシミュレーションと補正

シミュレーションに使用した地殻傾斜データは、前項の処理により分離された、「温度影響暫定補正済み傾斜日平均値」の短周期成分である。またタンクモデルの入力は現地の日降雨量である。今回は、田中¹⁶⁾ が用いた上下 2 段からなるタンクモデルをそのまま用いた。タンクモデルの各パラメータは、タンクモデルの出力を最小二乗法で傾斜変化の短周期成分に当てはめたとき、近似区間内における残差の絶対値の平均値が最小となるよう試行錯誤により定めた。なお、近似の良否から判断して、出力とするタンクの水位を、期間により次のように変更した。

1990年4月17日～1990年12月5日：出力は上段タンクの水位

1990年12月6日～1992年8月22日： 下段 //

すなわち、前半の期間は 1 段のタンクモデルを使用したことになる。これは、降雨強度の違いまたは地面あるいは地盤の含水状態の差を反映するものであろう。タンクモデルによりシミュレートされた降雨影響を Fig. 6 に示す。

つぎに、タンクモデルを用いてシミュレートされた降雨影響を、元の傾斜日平均値から差し引いた。この傾斜を「降雨影響補正済み傾斜日平均値」と呼ぶ (Fig. 6) が、1990年にスパイク状の大きな変化が生じる部分が認められる。これは降雨影響が急激に始まる部分での近似が不十分なためで、シミュレーションの時間ステップをより細かくするなどの改良が必要であらう。

5.3. 温度影響の補正と経年変化の推定

前節で得られた「降雨影響補正済み傾斜日平均値」には、時間に関する 1 次式で表わされる経年変化とコ

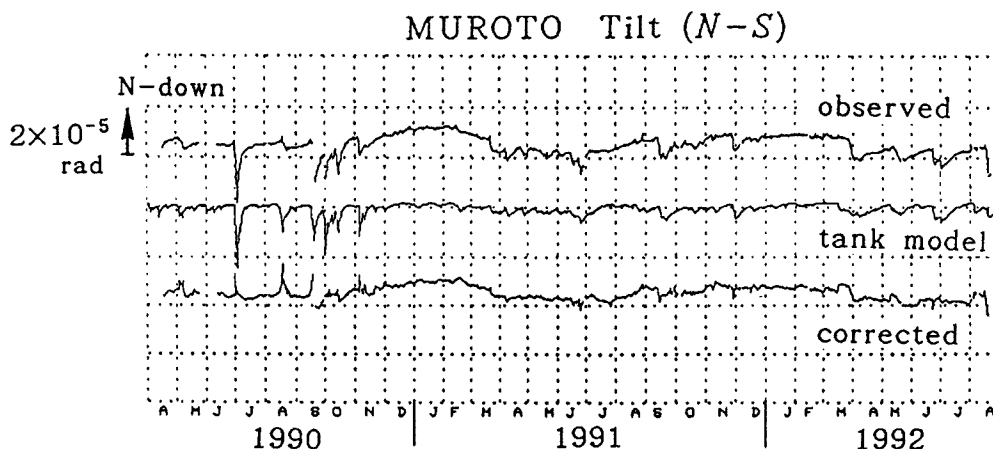


Fig. 6. Correction for disturbances by precipitation.
 observed: Observed daily averaged tilt
 tank model: Out-put of the tank models
 corrected: Corrected daily averaged tilt=observed-tank model

ンクリート室 C 内の温度に比例する変化が含まれると仮定し、次の式を用いて最小二乗法による近似を行う。

$$D(t) = a + bt + cT(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$D(t)$: 第 t 日の「降雨影響補正済み傾斜日平均値」

であり、他の係数の意味は(1)式と同じである。経年傾動速度の推定に際しては、1990年11月8日から1992年8月22日の654日間のデータを用いた。これは、1990年9月の台風による欠測でのデータ接続の不確かさが経年変化の推定に影響を与えることを防ぐためと、降雨影響の補正がとくに不十分な部分を除くためである。近似の状況を Fig. 7 に示す。こうして得られた各係数から、室戸における南北方向での経年傾動速度は、 $1.5 \pm 0.2 \times 10^{-6}$ rad/yr (誤差は標準偏差) の南下がり、また、温度影響は温度上昇 1K あたり $3.7 \pm 0.2 \times 10^{-7}$ rad の南下がりと推定される。この経年傾動速度は、国土地理院による水準測量結果²⁰⁾ から得られた室戸と安芸の間(北西-南東方向: 距離約 40 km)における標高変化から推定される経年傾動速度(約 1×10^{-7} rad/yr の南下がり)とセンスは一致するが、その量は 1 オーダー大きい。これは、基線長が短い計器で観測された変動量が大きくなる傾向が現われているとも考えられるが、この結果の解釈は今後の研究課題である。ただ、傾動のセンスは広域的なものとして一致しており、地表付近で観測される傾斜変化としては、量的にも異常に大きいものとは言えない。現段階では、室戸の水管傾斜計は経年的な地殻の傾動を監視するために活用できると考えられ、連続観測を長期間継続すれば、地球科学的に貴重なデータを取得することができると期待される。

6. ま と め

気象庁室戸岬測候所構内に設置されている水管傾斜計 2 成分のうち南北成分(基線長 51.60 m)のデータを用い、地球潮汐傾斜の解析、および、気象影響の簡単な補正を実施した上での経年変化の推定を行った。主な結果は次のようにまとめられる。

(1) 地球潮汐傾斜南北成分の潮汐定数

傾斜南北成分の毎時値を用いて FFT による周波数解析を行い、地球潮汐変化が記録されていることを確認した。さらに、1992年2月16日から1992年8月22日までの189日間に得られた毎時値を用い、気象影響を

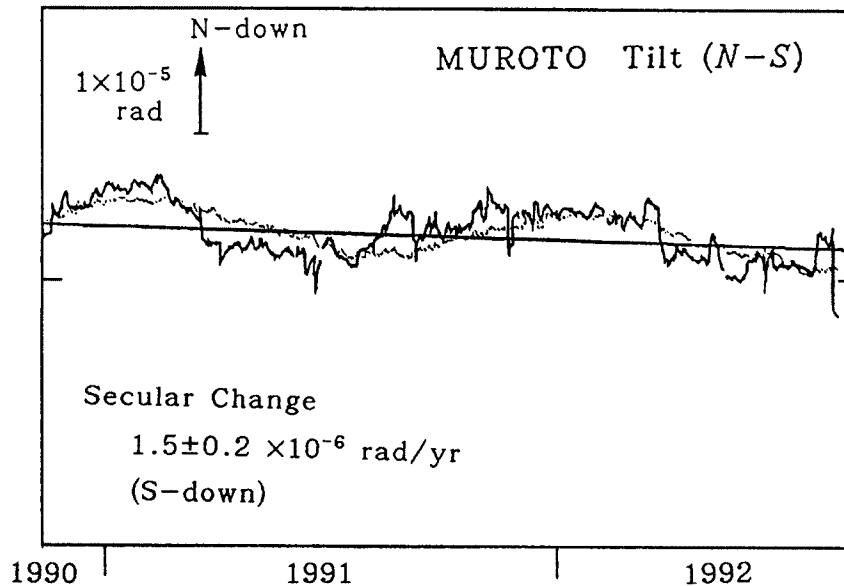


Fig. 7. Estimation of secular change rate of ground tilt (N-S component) at Muroto during the period from November 8, 1990 to August 22, 1992. Thick solid line shows daily averaged tilt corrected for precipitation (“corrected” in Fig. 6). Straight solid line shows estimated secular change of tilt. Broken line shows estimated change including secular tilt change and tilt change which is proportional to daily averaged temperature.

考慮しない潮汐定数を求めた。気象擾乱を受けにくいと思われる M_2 および O_1 分潮においては、固体地球潮汐と海洋潮汐荷重変形の両者を考慮して求められた理論値とおおむね一致した。

(2) 気象 (降雨・温度) 擾乱の特性

1990年4月17日から1992年8月22日までの859日間に得られた傾斜南北成分の日平均値を用いて、降雨およびコンクリート室内温度変化による擾乱に関する検討を行った。降雨影響は大きな南下がりとなって現われ、タンクモデルを用いて補正を試みた。また、温度との単純な比例関係を仮定して、温度に関する補正も行った。しかしながら、補正は不十分で、今後の研究が必要である。

(3) 経年変化の推定

1990年11月8日から1992年8月22日までの654日間の傾斜日平均値はデータの連続性がよく、この期間について経年傾動速度を求めた。その際、降雨およびコンクリート室内温度の影響を補正した。傾斜南北成分の経年傾動速度は $1.5 \pm 0.2 \times 10^{-6}$ rad/yr (南下がり) で、水準測量で得られた広域の変動のセンスとは一致するが、その量は1オーダー大きかった。

以上に述べたように、室戸岬測候所構内に設置された水管傾斜計の南北成分では、地球潮汐および経年変化について、ほぼ良好に観測が行われていると考えられる。今後、長期に渡り観測を続けることにより、プレート間の相互作用や南海トラフで発生する巨大地震に関する研究に活用できる重要なデータが得られると期待される。また、今回は言及しなかった傾斜の東西成分も含め、さらに研究を進めたい。将来的には、室戸における傾動変化と、南海道地域で進行中の変動との関連を明らかにするため、この地域で行われている測地測量 (GPS を含む) および地震観測などの成果を含めて考慮することも試みたい。

謝 辞

水管傾斜計の設置および観測の実施にあたり、ご理解と多大なご協力をいただいている気象庁室戸岬測候

所ならびに気象庁高知地方気象台に深く感謝いたします。また、地球潮汐理論値を計算していただいた、京都大学理学部地球物理学教室大学院生の向井厚志君にお礼申し上げます。さらに、地殻変動データ前処理用プログラム群の基本開発をしていただいた高知女子大学家政学部生活理学科平成2年度卒業生の江口節さん、岩端淳子さん、笠井千晶さんに感謝します。

本研究における計算の一部は、高知女子大学情報処理センターの計算機システムにより行われました。

参 考 文 献

- 1) Seno, T.: The Instantaneous Rotation Vector of the Philippine Sea Plate Relative to the Eurasian Plate, *Tectonophysics*, Vol. 42, 1977, pp. 209-226.
- 2) Ando, M.: A Fault Model of the 1946 Nankaido Earthquake Derived from Tsunami Data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 28, 1982, pp. 320-336.
- 3) Tabei, T., K. Hirahara and T. Tanaka: Tectonics and GPS Observation Project in Shikoku Region, Southwest Japan, *Proc. Japanese Symp. on GPS at Kyodai Kaikan on Dec. 6-8, 1989*, pp. 24-31.
- 4) 宇津徳治: 地震学 (第2版), 共立全書216, 共立出版, 1984, pp. 204-206.
- 5) 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.
- 6) 加藤正明・平原和朗・田中寅夫・細 善信・津嶋吉男: 室戸における地殻傾動の連続観測, 京大防災研年報, 第29号 B-1, 1986, pp. 85-96.
- 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), 京大防災研年報, 第28号 B-1, 1985, pp. 65-78.
- 8) 大村 誠・岩端淳子・江口 節・笠井千晶・大塚成昭・藤森邦夫・田中 豊: 六甲鶴甲断層運動観測室における地球潮汐ひずみ観測, 日本測地学会第76回講演会要旨, 1991, p. 57-58.
- 9) 大村 誠・福嶋真里子・田部井隆雄・平原和朗・田中寅夫・細 善信: 室戸における地殻傾動の連続観測 (1990-1991), 地球惑星科学関連学会1992年合同大会共通セッション・シンポジウム予稿集, 1992, p. 207.
- 10) 石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣: 地球潮汐データ解析—プログラム BAYTAP の紹介—, 統計数理研究所彙報, 第32巻第1号, 1984, pp. 71-85.
- 11) Sato, T. and H. Hanada: A Program for the Computation of Oceanic Tidal Loading Effects 'GOTIC', *Pub. Int. Lat. Obs. MIZUSAWA*, Vol. 18, No. 1, 1984, pp. 29-47.
- 12) Gilbert, F. and A. M. Dziewonski: An Application of Normal Mode Theory to the Retrieval of Structural Parameters and Source Mechanisms from Seismic Spectra, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 278 A, 1975, pp. 187-269.
- 13) Alterman, Z., H. Jarosch and C. L. Pekeris: Propagation of Rayleigh Waves in the Earth, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* Vol. 4, 1961, pp. 219-241.
- 14) 志知龍一・岡田義光: 坑内における歪観測, 測地学会誌, 第25巻第2号, 1979, pp. 101-134.
- 15) 国立天文台編: 月別平年降水量, 理科年表 平成3年, 丸善, 1991, p. 209.
- 16) 田中寅夫: 傾斜計・伸縮計記録に現われる降雨の影響とそのシミュレーション, 測地学会誌, 第25巻第2号, 1979, pp. 91-100.
- 17) 山内常生: 降雨に対する地殻歪レスポンスのシミュレーション, 測地学会誌, 第27巻第1号, 1981, pp. 40-49.
- 18) 日野幹夫・長谷部正彦: 水文流出解析, 森北出版, 1985, pp. 62-64.
- 19) 志知龍一: 長周期地殻変動—長周期成分の分離と長周期地殻変動に関する若干の考察—, 測地学会誌, 第19巻第4号, 1973, pp. 213-224.
- 20) 国土地理院: 第98回地震予知連絡会 (平成3年11月8日) 資料, 国土地理院, 1991, p. 32.