

由良における地球潮汐の観測(観測システムと潮汐定数)

加藤 正明・田中 寅夫・細 善信

OBSERVATIONS OF THE EARTH TIDES AT YURA (OBSERVATION SYSTEM AND TIDAL FACTORS)

By Masaaki KATO, Torao TANAKA and Yoshinobu HOSO

Synopsis

Telemetering system for monitoring crustal deformations has started into operation in October 1982 at the Yura Observation Station, Wakayama Prefecture. Twenty-four signals of crustal strains and tilts observed with strainmeters and tiltmeters, and of other geophysical data are transmitted to the Disaster Prevention Research Institute by a telephone line with the data signalling rate of 50 bits/sec.

In this paper, firstly the structures of observing instruments and their electronic circuits are described. Both the magnetic sensors and differential transformers are adopted as transducers of strainmeters and tiltmeters. Secondly tidal factors obtained by using the data from October 6, 00h00m to December 31, 23h00m, 1984 are shown. It has become clear that the values expressing the ratio of observed to theoretical amplitudes for M_2 constituent distribute in the range of 0.3~2.6.

1. ま え が き

由良地殻変動観測室(137°07'E, 33°57'N)が設置された1951年から1978年までの28年間におよぶ観測結果についてはすでに報告されている¹⁾。その後、第4次地震予知研究5カ年計画の事業の一環として、観測点を数10km間隔で延長100~200kmにわたって線上に配列する「地殻活動総合観測線」が全国重要地域に設定されることになり、京都大学においては、北陸測線と近畿測線の2本の測線が昭和56年度から58年度にかけて設定された。各観測点のデータは、日本電信電話会社(NTT)の専用回線を用いて1分サンプリングで宇治センターへ搬送・収録されている。詳細は京都大学の地殻活動総合観測線に関する総合報告(予定)にゆずる。この計画により由良観測室では1982年10月より地殻変動データの宇治センターへの搬送が開始された。

本論文では、最初にテレメータ化に伴い新しく設置された観測計器ならびに観測システムについて記述する。次に、宇治センターで得られている記録の例を示す。傾斜計ならびに伸縮計で得られたデータについては最小二乗法を用いた解析²⁾により潮汐定数を決定し、理論潮汐を同じ方法で解析した結果と比較する。

2. 観測計器および観測システム

由良観測室から宇治センターへ搬送されたデータはU1400ミニコンピュータ・システムの固定ディスクにデジタル収録されると同時に、24成分中12成分はフルスケールが0~±5Vの時分割打点記録計にアナログ出力(25mm/hour)される。アナログ出力0~±5Vはデジタル出力の0~±1000 digitsに対応している。

観測計器の配置、感度などは Fig.1 および Table 1 に示してある。

2.1 差動トランス伸縮計

テレメータ化以前の1974年よりすでに観測を開始している。ファンクションジェネレータ IC 8038 (イン

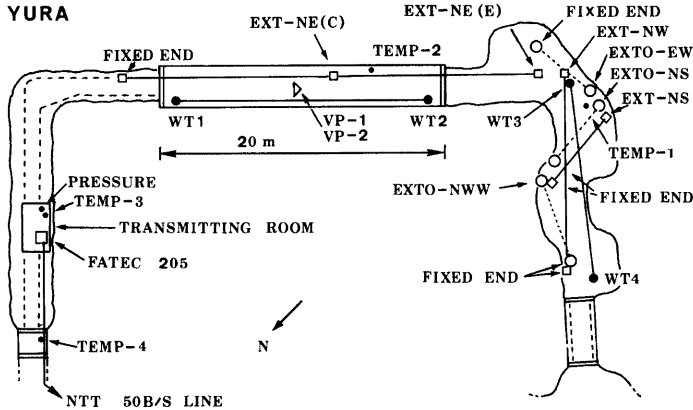


Fig. 1 Observation vault and the installation of instruments. EXTO: Strainmeter with differential transformer. EXT: Strainmeter with magnetic sensor. WT: Water-tube tiltmeter. TEMP: Thermometer. As to the detail of instruments refer to Table 1.

Table 1 Constants of the instruments in Yura

Instrument symbol	Direction	Sign	Span	Input range for FATEC205	Magnification of auto-zero circuit	Sensitivity D: digit S: step
EXT-NS	N 9°W	Extension (-)	624 cm	+ -50mV	5.000	1.621 E-10/D
EXT-NW	N 43°W	Extension (-)	1452 cm	+ -50mV	2.360	1.403 E-10/D
EXT-NE(C)	N 42°E	Extension (+)	1165 cm	+ -50mV	2.360	2.280 E-10/D
EXT-NE(E)	N 42°E	Extension (-)	3102 cm	+ -50mV	1.040	1.214 E-10/D
EXTO-EW	N 85°E	Extension (+)	500 cm	+ -50mV	0.555	0.929 E-09/D
EXTO-NS	N 5°W	Extension (+)	500 cm	+ -50mV	0.560	1.123 E-09/D
EXTO-NWW	N 60°W	Extension (+)	600 cm	+ -50mV	0.551	1.469 E-09/D
WT12	N 42°E	Down (+)	1794 cm	+ -50mV	0.306	0.871 E-09/D
WT34	N 51°W	Down (+)	1396 cm	+ -50mV	0.306	1.119 E-09/D
VP-1	N270°E	Down (+)	25 cm	+ -50mV	5.054	0.719 E-09/D
VP-2	N 0°E	Down (+)	25 cm	+ -50mV	2.402	1.518 E-09/D
TEMP-1		Increase (+)		+ -10mV		0.0001 °C/D
TEMP-2		Increase (+)		+ -50mV		0.0005 °C/D
TEMP-3		Increase (+)		+ -10mV		0.001 °C/D
TEMP-4		Increase (+)		+ -10mV		0.001 °C/D
PRESSURE		Increase (+)		+ -50mV		0.1 mb/D
PRECIP		Increase (+)		+ -10mV		0.5 mm/S

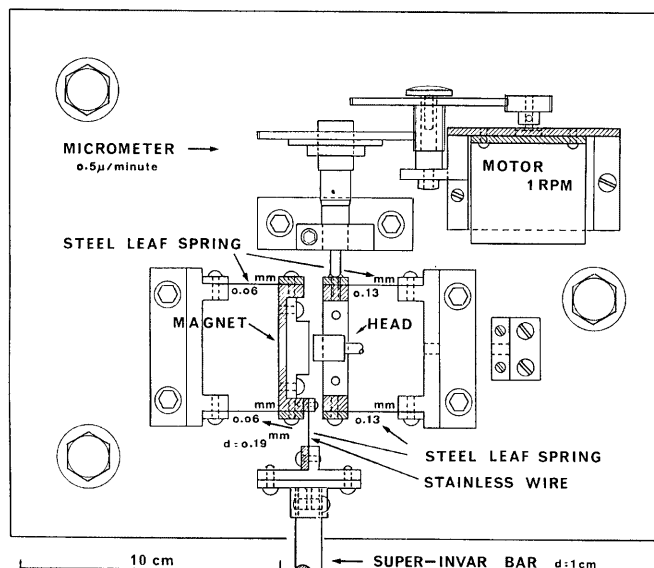


Fig. 2 Detector of strainmeter (magnetic sensor type)

ターシル社製)の正弦波出力で差動トランスの1次側のコイルを励磁している。2次側の2個のコイルの出力はそれぞれオペレーショナル・アンプで増幅・整流した後に加算し、変位に対して linear な直流出力電圧を得ている。この回路を DC-AMP 方式と呼ぶことにする。1983年9月22日、従来からの坑内でのアナログ記録を廃止し、自動零点調整回路を挿入して FATEC 205 送量装置(富士通株式会社製)に接続し、デジタル搬送を開始した。

2.2 マグネセンサ伸縮計

トランスデューサにマグネセンサ・セット B3(ソニーマグネスケール社製)を用いている。Fig. 2 に検出部の設計図(原図は京都大学防災研究所の元技官の津嶋吉男氏作成)を示す。マグネセンサのマグネットは直径0.19 mm のステンレス線によって直径10 mm のスーパー・インバル棒にできるだけ力が加わらないように薄い2枚の鋼板パネ(厚さ60 μ)によって支えられている。一方、ヘッドはやや厚い鋼板パネ(厚さ0.13 mm)によって支えられている。マイクロメータでヘッドに変位を与えることにより感度検定を行なうことができるようにしてある。マグネットとヘッドとの間隔(クリアランス)が変化しない構造になっているため感度が時間的に変動しないことがこの変換部の特徴である。1982年10月15日に搬送を開始した。

2.3 フロート型マグネセンサ水管傾斜計

この傾斜計の検出部は、上宝地殻変動観測所に設置してあるもの³⁾と同じものである。但し、上宝では3つの検出部をL字型に連結しているのに対し、由良では WT1 と WT2 で WT12 成分、WT3 と WT4 で WT34 成分を形成している点が異なっている。坑道内の高低差が大きいためこのような措置を取らざるを得なかった。1983年5月19日に搬送を開始した。

2.4 差動トランス鉛直振子傾斜計

この傾斜計は、振り型傾斜計としては最も単純であり器機的に安定している。が電氣的増幅にすべてを依存しているので変位に対する出力電圧が極めて大きいことが要求される。ここでは、2.1で述べた DC AMP 方式とは別の回路を採用している。2次側の2つのコイルは直列に接続され、AC 増幅された後整流される。このままでは変位に対する出力電圧はV字型となり常に正の値となるので、負の定電圧を加算して変位に対する出力電圧が2カ所で零になるようにしている³⁾。DC、AC のどちらの方式においても超低オフセット電圧のオペレーショナルアンプ OP-07 (PMI 社製) を使用し、時間的ドリフトが生じないように配慮している。1982年10月15日に搬送を開始した。

2.5 気圧計

バロウ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。電子回路には DC-AMP 方式を採用している。

2.6 温度計

使用している温度センサ IC は μ PC 616 A (メタルカン型, NEC 社製) である。10 mV / K の温度に比例した出力が得られ直線性に優れている。

2.7 自動零点調整回路

伸縮・傾斜を高感度で記録する場合、信号が記録可能な電圧範囲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する回路を設けてやることが不可欠である。山良では、防災科学技術センターの岡田義光博士が以前発表された回路⁴⁾を多少変更して使用している。回路図を Fig. 3 に、写真を Photo 1 に示す。この回路の初段は高入力インピーダンスの非反転増幅アンプ (OP-07 使用) であり、各々のセンサからの出力電圧を必要に応じて増幅できるようになっている。最終段アンプの出力電圧は 0 ~ +1 V

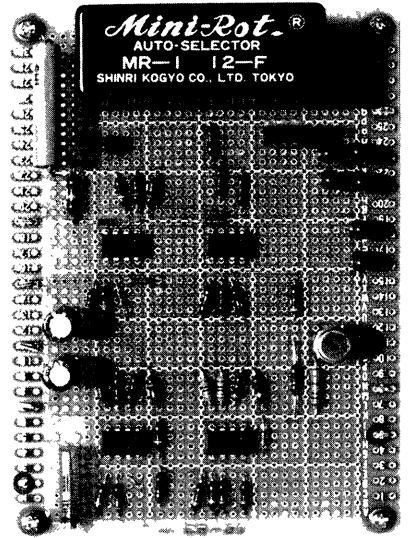


Photo 1 Auto-zero-adjustable circuit

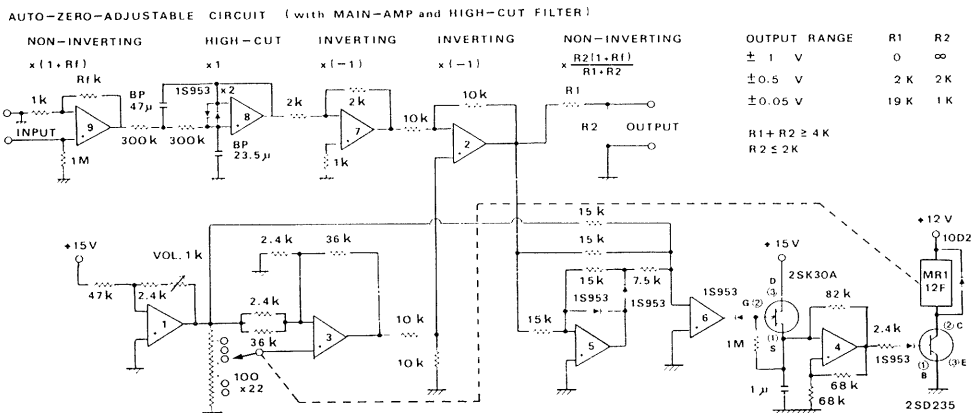


Fig. 3 Diagram of auto-zero-adjustable circuit (with main-amp and high-cut filter)

なので、送量装置 FATEC 205 の入力レンジに合わせて R1, R2 を選択してやる必要がある。ロータリースイッチには接点数24の超小型電磁ロータリースイッチ、ミニロット MR-1, 12 F（信利興業株式会社製）が使われている。駆動電圧は 12 V, 消費電流は 444 mA である。IC (1~8) にはデュアル741型の IC 4 個を使用している。IC 用直流安定化電源の消費電流は +15 V 側が 11.8 mA, -15 V 側が 12.6 mA である。

3. 観測記録の例

Fig. 4(a), (b), (c) ならびに (d) に毎時のデジタルデータを使って得られた観測記録の例（1984年10月6日0時~12月31日23時）を示す。自動零点調整回路が動作したために生じたステップや計器調整などによって生じたステップはすべて補正してある。また、宇治センターの停電などによって生じたパルス状のノイズはできるだけ除去してある。TEMP-3 の短周期変動は送信室の除湿器の ON-OFF によるものである。送信室とは反対側の入口付近に設置してある EXT-NW, WT 34 ならびに EXTO-NWW には雨の影響が顕著に現われている。従来から設置されている EXTO-EW と EXTO-NS の直線的な縮み変化はあるいはスーパー・インバール棒が老朽化したことに基因するものかもしれない。今後の検討課題としたい。

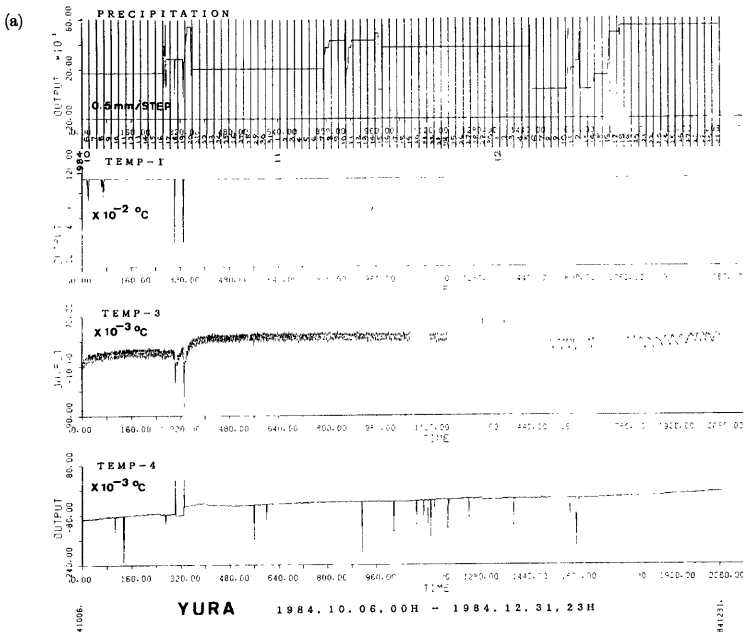


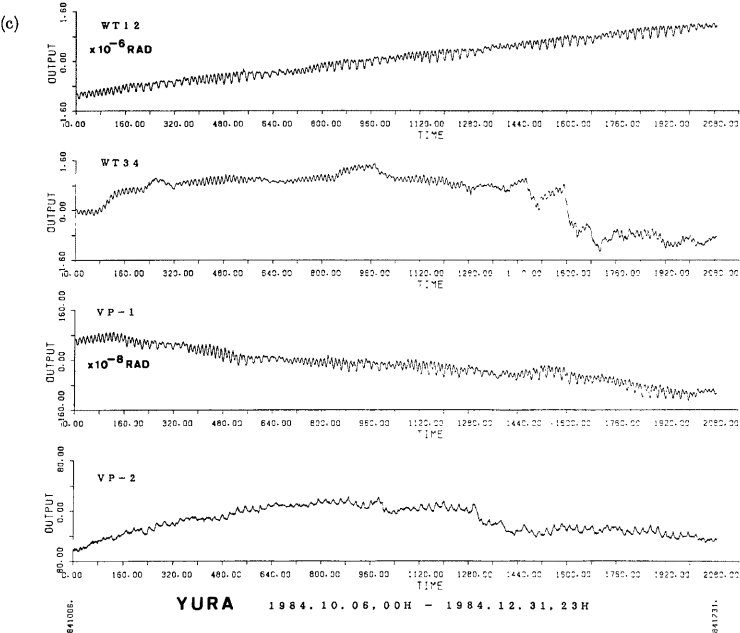
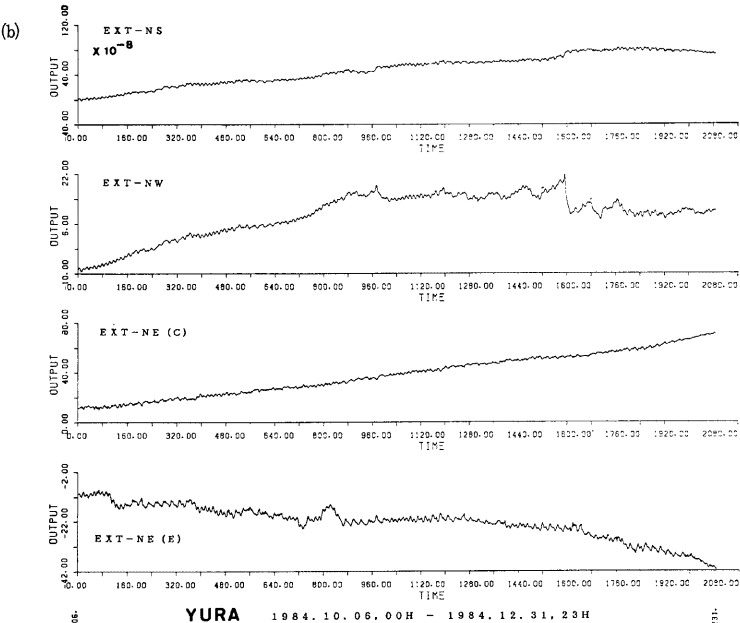
Fig. 4 Secular changes of tilts, strains, atmospheric temperature, atmospheric pressure and precipitation at Yura. All the changes are drawn by using hourly values during the period from Oct. 06, 00h00m to Dec. 31, 23h00h, 1984, (JST).

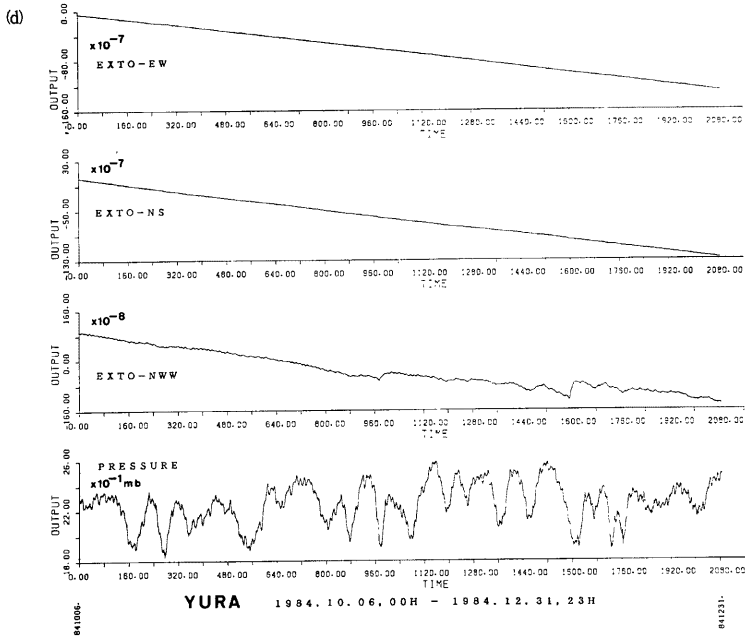
(a): Precipitation and atmospheric temperatures.

(b): Strainmeters with magnetic sensor.

(c): Water-tube and vertical pendulum tiltmeters.

(d): Strainmeters with differential transformer and atmospheric pressure.





4. 地球潮汐解析

Fig. 4 に示されたデータに Pertzev のフィルタを適用し潮汐の周波数帯のみを取り出した結果を Fig. 5 (a), (b) ならびに (c) に示す。Fig. 6 と Fig. 7 には起潮力ポテンシャルから求められる理論固体地球潮汐ひずみおよび傾斜曲線を Harrison のプログラム⁷⁾を用いて描いてある。EXTO-EW の横軸640.00 (時間) 付近にパルス状のノイズが見られる。このようなノイズはある程度は他の成分にも見られる。データのつながりに不備点があったと考えられ、再検討する必要がある。このような問題を含んでいるが、Fig. 4 に示されたデータに Pertzev のフィルタを適用した後に、 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 および気象潮 S_1 を仮定して最小二乗法で振幅と位相を決定した。最小二乗法の解析には京都大学理学部の中川一郎博士のプログラムを利用させて頂いた。理論潮汐についても同様の方法で振幅と位相を決定した。これらの結果を Table 2, 3 および 4 にまとめた。 M_2 分潮に着目すると、傾斜では理論値に対する観測値の比の値が0.5から2.6の範囲に、伸縮では0.3から1.3の範囲に分布していることがわかる。また、傾斜では N-S 方向の潮汐の振幅が際立って小さいこと、伸縮では NE (C) と NE (E) が同じ方向の成分で同じ基準尺を使用しているにもかかわらず、前者(中央部)が後者(端)に比べて約20%小さいことが明らかになった。坑道の中央部(水管傾斜計 WT 12 が設置されている部屋)は厚いコンクリートで巻きたて補強されている。このことによる影響が現われている可能性が強いと思われる。由良観測室は海岸からわずか 300 m の距離に位置しており海洋潮汐の影響もかなり大きいと考えられる。海洋潮汐、地形、坑道さらには地質構造などの影響を明確にしていくことが今後の研究課題として残されている。

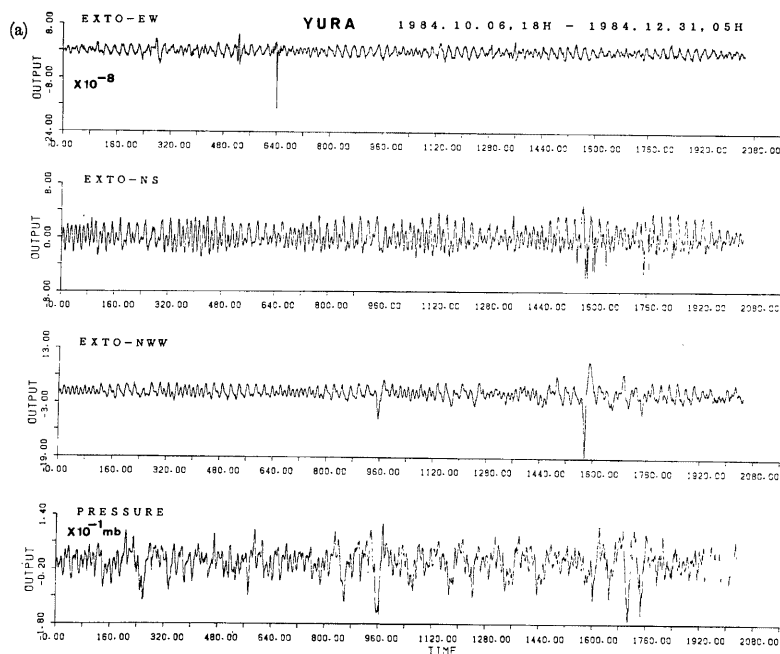


Fig. 5 Records during the period from Oct. 06, 18h00m to Dec. 31, 05h00m, 1984, (JST) after the removal of the drifts by the Pertzev's filter using the data shown in Fig. 4.

(a): Strainmeters with differential transformer and atmospheric pressure.

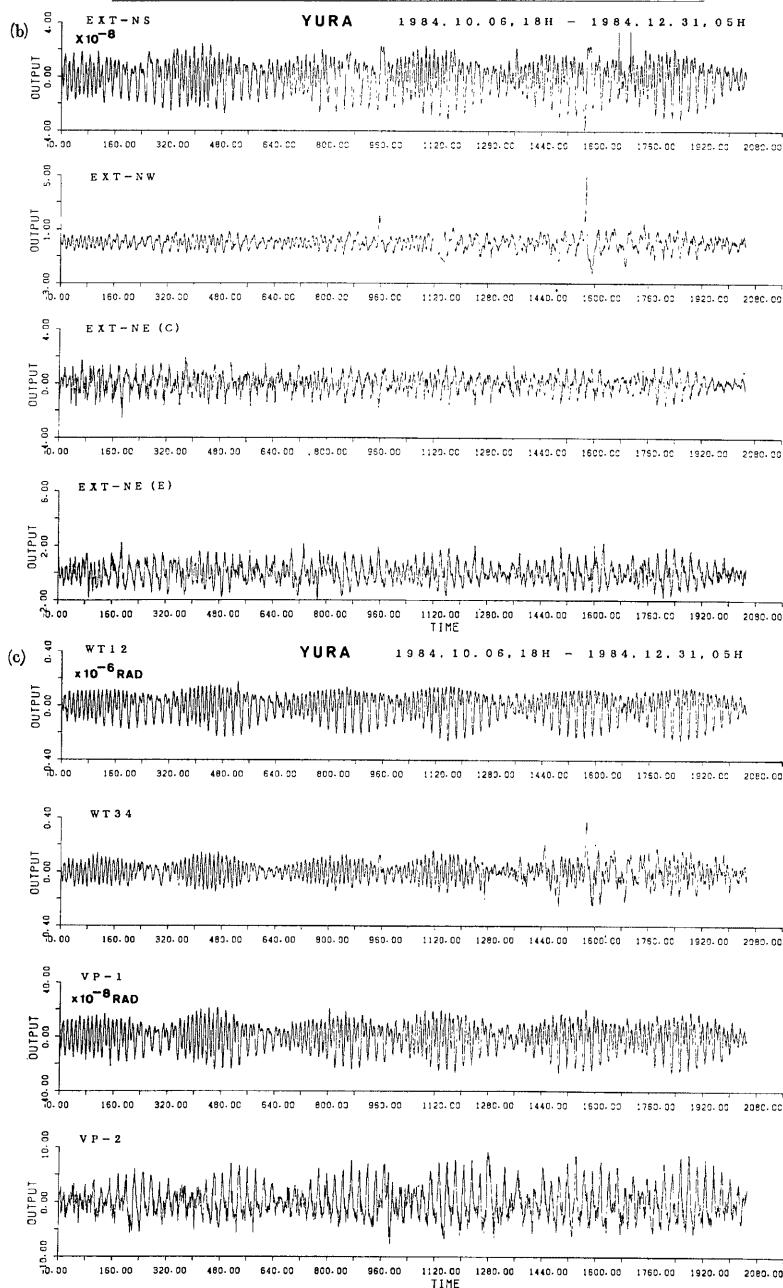
(b): Strainmeters with magnetic sensor.

(c): Water-tube and vertical pendulum tiltmeters.

5. あとがき

第4次地震予知研究5 5 年計画の事業の一環として地殻活動観測線が設置された。この観測線を構成する観測点の1つである由良観測室のテレメータによるデータ搬送が1982年10月より開始された。本報告ではテレメータ化に伴い強化された観測計器ならびに観測システムに関してかなり詳細にわたって紹介した。これらの計器を用いて、高感度で安定した時間精度の高いデータが防災研究所へ搬送・収録されている。全成分が安定した記録されている期間のデータを用いて潮汐解析を行ない、結果を表にしてまとめた。これらの結果は、今後の地球潮汐解析のための貴重な基礎資料となり得るものである。テレメータ・システムを導入するにあたり御協力を頂いた関係各位に深く感謝したい。本報告のための数値計算、図の作成は防災研究所付属防災科学資料センターの電子計算機によったことを付記する。

なお、校正の段階において EXTO-NW の変換部に欠陥が発見された。当時の感度を正確に求めることはもはや不可能である。変換部修理後の約20日間の記録を解析した結果では M_2 と O_1 分潮の振幅が3倍弱大きく求まっている。本論文ではあえて投稿時のままの図と表を掲載してあるので注意して頂きたい。次の機会に訂正する所存である。



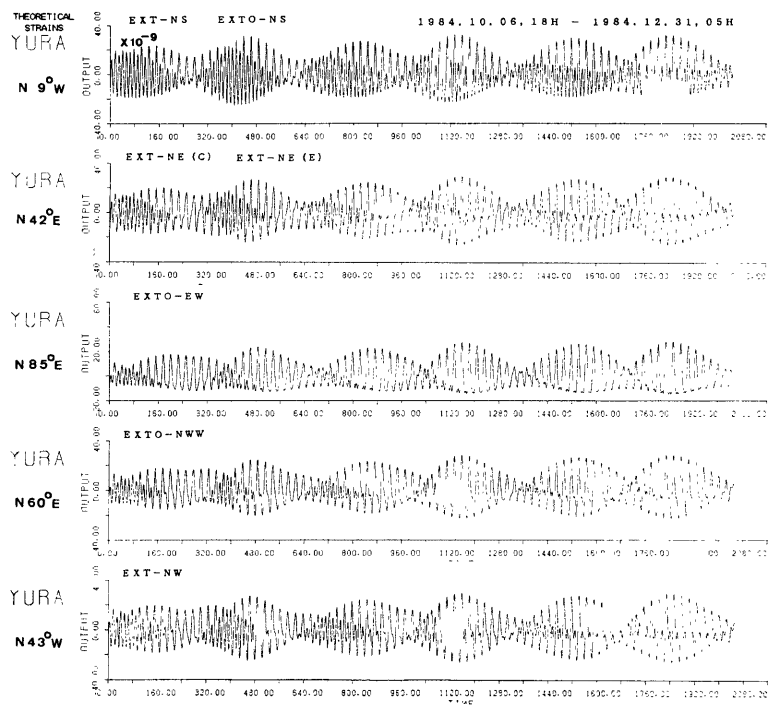


Fig. 6 Theoretical solid tidal strains in five directions during the period from Oct. 06, 18h00m to Dec. 31, 05h00m, 1984, (JST) (computed by Harrison's program)

参 考 文 献

- 1) 加藤正明・小泉 誠・細 善信・田中寅夫・田中 豊・新屋兼次郎：和歌山県由良における地殻変動の連続観測，測地学会誌，第25巻，第1号，1979，pp. 38-48.
- 2) 中川一郎・佐藤泰夫：最小自乗法による重力変化資料の解析，測地学会誌，第12巻，第2号，1966，pp. 71-76.
- 3) Kato, M.: Observations of Crustal Movements by Newly-Designed Horizontal Pendulum and Water-Tube Tiltmeters with Electromagnetic Transducers (I), Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 27, Part 4, 1977, pp. 155-171.
- 4) 加藤正明・津嶋吉男・土居 光：鉛直振子傾斜計について，測地学会第58回講演会要旨，1982，pp. 91-92.
- 5) 山内常生・山田 守：地殻変動連続観測用電子回路の I.C. 化，測地学会誌，第20巻，第3号，1974，pp. 143-145.
- 6) 東京大学地震研究所内部資料（岡田義光）：地殻変動観測所標準観測方式，1977.
- 7) Harrison, J.C.: New Computer Programs for the Calculation of Earth Tides, Publication by CIRES, NOAA/UNIV. Colorado (1971).

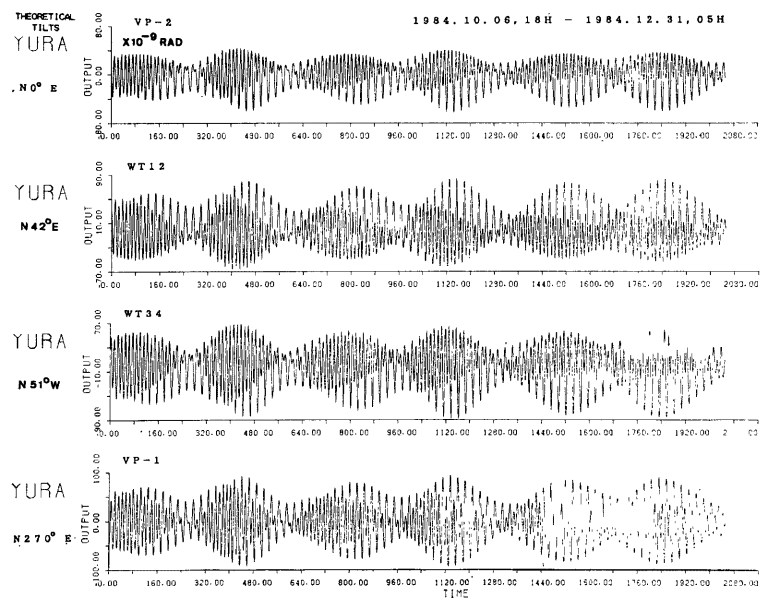


Fig. 7 Theoretical solid tidal tilts in four directions (presented as in Fig. 6)

Table 2 Results from the tidal analyses of observed and theoretical strains (1)

Instrument symbol	Direction	Constituent	Observed		Theoretical		Amplitude ratio (Obs./Theor.)
			Amplitude (strain)	Phase (rad)	Amplitude (strain)	Phase (rad)	
EXT-NS	N 9°W	M2	0.1092E-07	1.993	0.1331E-07	-1.960	0.820
		S2	0.4453E-08	-3.006	0.6633E-08	-0.131	0.671
		K1	0.6535E-08	-0.765	0.6095E-08	1.903	1.072
		O1	0.7848E-08	0.062	0.4690E-08	3.096	1.673
		N2	0.2208E-08	-1.951	0.2477E-08	0.305	0.891
		K2	0.1096E-08	-3.058	0.2009E-08	-0.429	0.546
		S1	0.4244E-08	2.881	0.3615E-08	-0.422	1.174
EXT-NW	N43°W	M2	0.3319E-08	1.590	0.1033E-07	-2.217	0.321
		S2	0.1461E-08	-2.952	0.5145E-08	-0.388	0.284
		K1	0.2113E-08	-0.820	0.8159E-08	2.132	0.259
		O1	0.2415E-08	0.322	0.6277E-08	-2.959	0.385
		N2	0.6572E-09	-2.052	0.1902E-08	0.051	0.346
		K2	0.5550E-09	2.511	0.1561E-08	-0.685	0.256
		S1	0.4381E-09	2.705	0.4847E-08	-0.193	0.904
EXT-NE(C)	N42°E	M2	0.3717E-08	-0.631	0.1048E-07	-1.542	0.355
		S2	0.2208E-08	0.553	0.5224E-08	0.286	0.423
		K1	0.4963E-08	1.486	0.8098E-08	1.339	0.613
		O1	0.4258E-08	2.704	0.6224E-08	2.531	0.684
		N2	0.6389E-09	1.770	0.1978E-08	0.727	0.323
		K2	0.3882E-09	1.234	0.1582E-08	-0.012	0.245
		S1	0.2952E-08	-1.873	0.4805E-08	-0.989	0.614
EXT-NE(E)	N42°E	M2	0.4685E-08	2.464	0.1048E-07	-1.542	0.447
		S2	0.2362E-08	-2.711	0.5224E-08	0.286	0.452
		K1	0.5532E-08	-1.795	0.8098E-08	1.339	0.683
		O1	0.4617E-08	-0.471	0.6224E-08	2.531	0.742
		N2	0.8627E-09	-1.338	0.1978E-08	0.727	0.436
		K2	0.3904E-09	-2.401	0.1582E-08	-0.012	0.247
		S1	0.2427E-08	1.458	0.4805E-08	-0.989	0.505

Notes: Period of analysis; Oct. 06, 00h00m~Dec. 31, 23h00m, 1984, (JST).
The phase is the value of φ in a $\cos(\omega t - \varphi)$, in which the time origin is adopted as Oct. 07, 00h00m, 1984, (JST).

Table 3 Results from the tidal analyses of observed and theoretical strains (2)
(presented as in Table 2)

Instrument symbol	Direction	Constituent	Observed		Theoretical		Amplitude ratio (Obs./Theor.)
			Amplitude (strain)	Phase (rad)	Amplitude (strain)	Phase (rad)	
EXTO- EW	N85°E	M2	0.4842E-08	-1.785	0.5441E-08	-1.758	0.890
		S2	0.2181E-08	-1.647	0.2711E-08	0.072	0.805
		K1	0.7011E-08	1.455	0.9411E-08	1.674	0.818
		O1	0.5819E-08	-3.106	0.7241E-08	2.866	0.804
		N2	0.8417E-09	0.522	1.0204E-09	0.539	0.825
		K2	0.7090E-09	-0.020	0.8231E-09	-0.228	0.861
		S1	0.3382E-08	1.156	0.5586E-08	-0.652	0.605
EXTO- NS	N 5°W	M2	0.1304E-07	-1.066	0.1343E-07	-1.924	0.971
		S2	0.4426E-08	0.418	0.6689E-08	-0.096	0.662
		K1	0.6400E-08	2.383	0.5978E-08	1.834	1.071
		O1	0.9089E-08	3.091	0.4599E-08	3.027	1.976
		N2	0.2607E-08	1.361	0.2501E-08	0.340	1.042
		K2	0.1996E-08	0.158	0.2026E-08	-0.393	0.985
		S1	0.5645E-08	-0.182	0.3543E-08	-0.491	1.593
EXTO- NWW	N60°W	M2	0.1001E-07	-1.655	0.8016E-08	-2.263	1.249
		S2	0.2456E-08	-0.625	0.3990E-08	-0.434	0.616
		K1	0.8644E-08	2.119	0.8959E-08	2.049	0.965
		O1	0.8500E-08	-2.952	0.6892E-08	-3.042	1.233
		N2	0.1667E-08	0.813	0.1468E-08	0.011	1.136
		K2	0.2222E-08	-0.517	0.1211E-08	-0.731	1.835
		S1	0.3269E-08	0.055	0.5323E-08	-0.276	0.641

Table 4 Results from the tidal analyses of observed and theoretical tilts
(presented as in Table 2)

Instrument symbol	Direction	Constituent	Observed		Theoretical		Amplitude ratio (Obs./Theor.)
			Amplitude (rad)	Phase (rad)	Amplitude (rad)	Phase (rad)	
WT12	N42°E	M2	0.8750E-07	1.059	0.3383E-07	2.274	2.586
		S2	0.3484E-07	-2.992	0.1679E-07	-2.181	2.075
		K1	0.5605E-07	-1.399	0.1476E-07	0.832	3.797
		O1	0.4929E-07	-0.407	0.1135E-07	2.021	4.343
		N2	0.1766E-07	-3.074	0.6103E-08	-1.725	2.894
		K2	0.1047E-07	2.939	0.5088E-08	-2.471	2.058
		S1	0.3080E-07	2.635	0.8871E-08	-1.497	3.472
WT34	N51°W	M2	0.6860E-07	1.114	0.3669E-07	-3.021	1.870
		S2	0.3665E-07	-2.898	0.1826E-07	-1.189	2.007
		K1	0.2790E-07	-1.862	0.1575E-07	-0.347	1.771
		O1	0.3001E-07	-0.771	0.1205E-07	0.846	2.490
		N2	0.1432E-07	-2.949	0.7006E-08	-0.726	2.044
		K2	0.1097E-07	2.512	0.5557E-08	-1.484	1.974
		S1	0.1312E-07	0.815	0.9282E-08	-2.686	1.413
VP-1	N270°E	M2	0.1026E-06	1.038	0.4318E-07	-0.306	2.376
		S2	0.4520E-07	-2.893	0.2145E-07	1.524	2.107
		K1	0.5050E-07	-1.515	0.1764E-07	-2.976	2.862
		O1	0.5030E-07	-0.576	0.1354E-07	-1.783	3.714
		N2	0.2178E-07	-3.067	0.8032E-08	1.998	2.711
		K2	0.1531E-07	2.862	0.6525E-08	1.232	2.347
		S1	0.2582E-07	2.298	0.1045E-07	0.978	2.470
VP-2	N 0°E	M2	0.1177E-07	-2.508	0.2401E-07	1.266	0.490
		S2	0.4862E-08	0.911	0.1196E-07	3.093	0.406
		K1	0.1975E-07	2.041	0.1219E-07	1.745	1.620
		O1	0.1536E-07	3.046	0.9325E-08	2.932	1.648
		N2	0.3554E-08	-0.704	0.4490E-08	-2.780	0.791
		K2	0.5338E-09	-0.325	0.3615E-08	2.796	0.147
		S1	0.1872E-07	-0.269	0.7320E-08	-0.602	2.558