

## 天ヶ瀬地殻変動観測室における地球潮汐歪

原田昌武・古澤 保・大谷文夫・森井 亙・山田 勝

### 要 旨

天ヶ瀬地殻変動観測室では 1995 年より、それまでのローラー型スーパー・インヴァール棒伸縮計から検出部は差動トランスに、また支持方式をステンレスのつり糸に変えた伸縮計による観測に移行した。この改良された伸縮計記録による地球潮汐歪の解析を行った結果、地球潮汐歪を十分な精度で解析できるようになった。

キーワード：地球潮汐、歪、天ヶ瀬地殻変動観測室、BAYTAP-G

### 1. はじめに

天ヶ瀬地殻変動観測室は宇治市横島横尾山 (34° 52' 48" N, 135° 50' 09" E, 標高 61.0m) の関西電力株式会社の旧志津川発電所の導水隧道を改修したもので、1967 年 6 月より観測が開始された。同観測室ではこれまで、ローラー型スーパー・インヴァール棒伸縮計を用いて歪観測を行っており、1991 年までの観測結果についてはすでに報告されている (例えば古澤ら, 1990)。この伸縮計は基準尺を中間支持ローラーで支え、相対変位の検出部は両端をピボットで支えられた拡大ローラーを用いることによって光学的に変動を拡大して記録を得るものであった。

しかし、竹本 (1975) はローラー型スーパー・インヴァール棒伸縮計に対してレーザー干渉計を用いて厳密な感度検定を行った結果、基準尺を 1~2 μm 程度で往復運動させた時にローラー型拡大装置で得られる見かけの変位記録は、拡大ローラーの回転の摩擦により、レーザー干渉計で得られる値の 40%前後しかないことを指摘している。また、長期間にわたる地殻歪の観測からもローラー型スーパー・インヴァール棒伸縮計による潮汐歪成分の変化は、レーザー干渉計で得られるものの 40~50%しかないことが報告されている (竹本, 1977)。つまり、潮汐変動

のような 10° オーダーの周期的な変化を検出するためには、従来の方式では中間支持ローラー及びローラー型拡大部の摩擦または抵抗力が無視できず、潮汐歪の解析には不適であった。そこで、1995 年 1 月より検出部は差動トランスに、また支持方式をステンレスのつり糸で吊る方式に変えた伸縮計による観測に移行し、1996 年 10 月からは安定した記録が得られている。

本研究では改良されたスーパー・インヴァール棒伸縮計による地球潮汐歪の解析を行い、特に振幅が大きく他の分潮との分離もよい M2、O1 分潮について、理論潮汐と比較した結果を報告する。

### 2. データ、および解析方法

解析に用いたデータは水平成分の伸縮計によるものである。各成分は、観測隧道に沿う方向 (N72.5° W) で長さが 40.24m である E-1、同一方向で長さ 8.10m である R-6、また、隧道の方向と 45° の角度を有し、互いに直交する長さ 5.54m である R-2 (N62.5° E)、R-3 (N27.5° W) の 4 成分である。なお、観測室の詳細及び観測計器については既に報告されている (例えば高田ら, 1978)。これらのデータはテレメータシステムにより 1 秒サンプリングで防災研究所

地震予知研究センターに送信されており、異常値を除いた前後各60秒で平均した1分値ファイルとして保存されている。さらに1分値ファイルを元に前後各30分で平均することによって毎時0、30分の30分値ファイルも作成している。本研究ではこの30分値ファイルを使用し、毎時0分のみ1時間値にして解析に用いた。

解析期間は1997年1月1日から1999年12月31日までの3年間である。歪変動と気圧変動を Fig. 1 に示す。期間中には最長で90時間に及ぶ4、5回の欠測期間が含まれている。これらのデータを潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Ishiguro et al., 1981; Tamura et al., 1991) によって潮汐解析を行った。一方、海洋潮汐の影響を含む理論潮汐の計算には GOTIC (Sato and Hanada, 1984) の改良版である GOTIC2 (松本ら, 1999) を用いた。

### 3. 結果、および考察

BAYTAP-G は入力されたデータに対しトレンド、潮汐、気圧応答、残差の4つの成分に分解し、その結果を出力する。解析結果の一例として、E-1 によって得られたこれらの成分を Fig. 2 に示す。上から順にトレンド、潮汐成分、気圧に対する応答、残差成

分である。1998年には急激な気圧の応答が見られるが、これは9月22日に観測所近傍を通過した台風7号による影響である(詳しくは、大谷ら, 1999)。また、残差成分にはいくつか大きな値が示されている。BAYTAP-G では、個々の残差が平均的な値の4倍以上になった部分を異常値と判定し、その箇所を欠測扱いまたはデータを補間して再解析することを推奨しているが(田村, 1985)、本解析に用いたデータは1分値ファイルを作成する段階でデータの飛びによる異常値やステップの処理はすでに行われているのでデータを補正することは行わなかった。

このようにして解析された各成分での M2、O1 分潮の結果を Table 1 に理論潮汐の計算結果も含めて示す。また、phasor diagram の形にしたものを Fig. 3 に示す。図中の緑、青、赤の線はそれぞれ固体地球による地球潮汐歪、海洋潮汐の影響を含む潮汐歪(理論潮汐歪)、観測値の振幅・位相を示している。位相に関しては遅れを正に採っている。なお、海洋潮汐による影響は直接図示されていないが、理論潮汐のベクトルから地球潮汐のそれを差し引けばよい。

観測隧道方向の成分の振幅は、理論振幅  $6.22 \times 10^{-9}$  (O1)、 $6.19 \times 10^{-9}$  (M2) に対し E-1 では  $4.00 \times 10^{-9}$  (O1)、 $3.84 \times 10^{-9}$  (M2)、R-6 では  $2.72 \times 10^{-9}$  (O1)、 $2.70 \times 10^{-9}$  (M2) となった。つまり、理論振幅に対して O1、

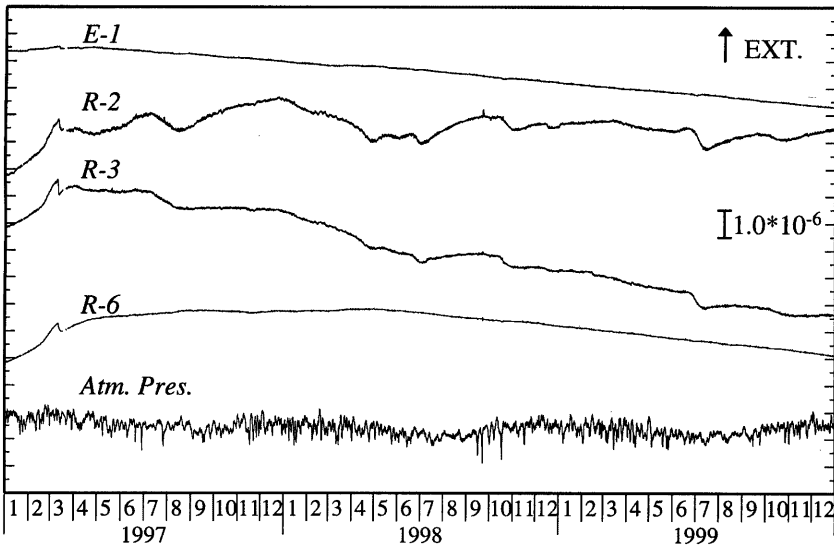


Fig. 1 Ground-strains for 4 components of super-invar-bar extensometers ( E-1, R-2, R-3, R-6 ) and atmospheric pressure from Jan., 1997 to Dec., 1999. Upward direction shows extension. A y-axis of the atmospheric pressure is arbitrary unit.

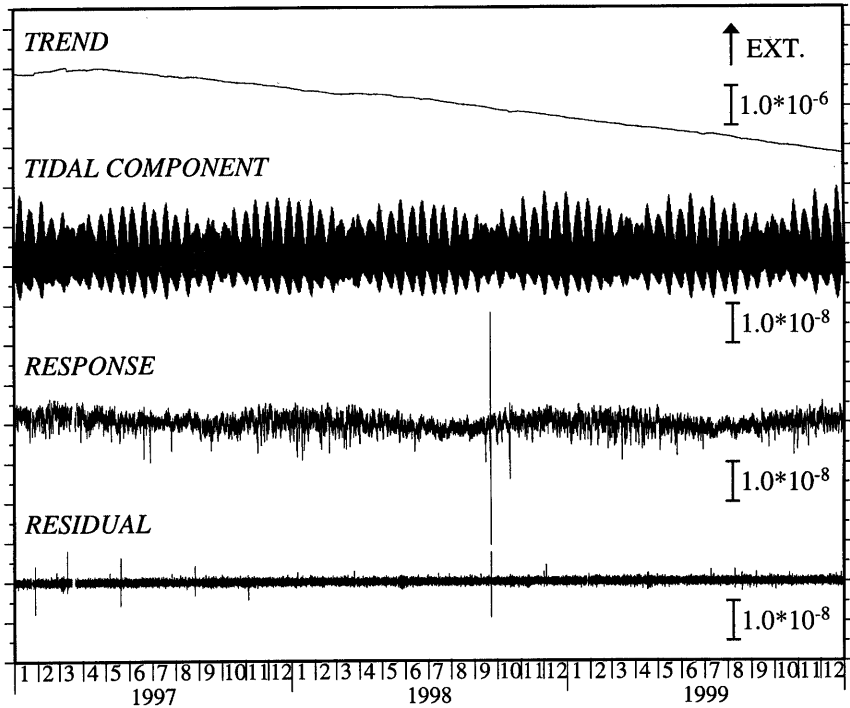


Fig. 2 Example of analyzed data, which include trend, tidal component, response to the atmospheric pressure, and residual for E-1. Upward direction shows extension.

Table 1 The summary of tidal factors

	Theoretical						Observed	
	Solid Earth tide		Oceanic tidal effect		Total		Amplitude (RMSE)	Phase (RMSE)
E-1	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase		
O1	6.387	11.35	0.449	124.52	6.224	15.15	4.001 (0.028)	12.62 (0.40)
M2	5.983	-20.92	1.862	71.62	6.187	-3.42	3.839 (0.007)	-4.06 (0.11)
R-2								
O1	6.219	-16.77	0.759	174.77	5.477	-18.36	9.327 (0.406)	-17.22 (2.50)
M2	7.316	24.64	2.564	-61.87	7.898	5.74	15.604 (0.078)	8.67 (0.29)
R-3								
O1	4.861	21.67	0.568	-16.13	5.321	17.92	7.916 (0.268)	6.24 (1.94)
M2	12.001	-14.73	5.085	140.86	7.664	1.19	13.690 (0.052)	4.04 (0.22)
R-6								
O1	6.387	11.35	0.449	124.52	6.224	15.15	2.723 (0.075)	10.65 (1.57)
M2	5.983	-20.92	1.862	71.62	6.187	-3.42	2.702 (0.016)	-4.79 (0.34)

Amplitude :  $\times 10^{-9}$

Phase : Degree (Lag positive)

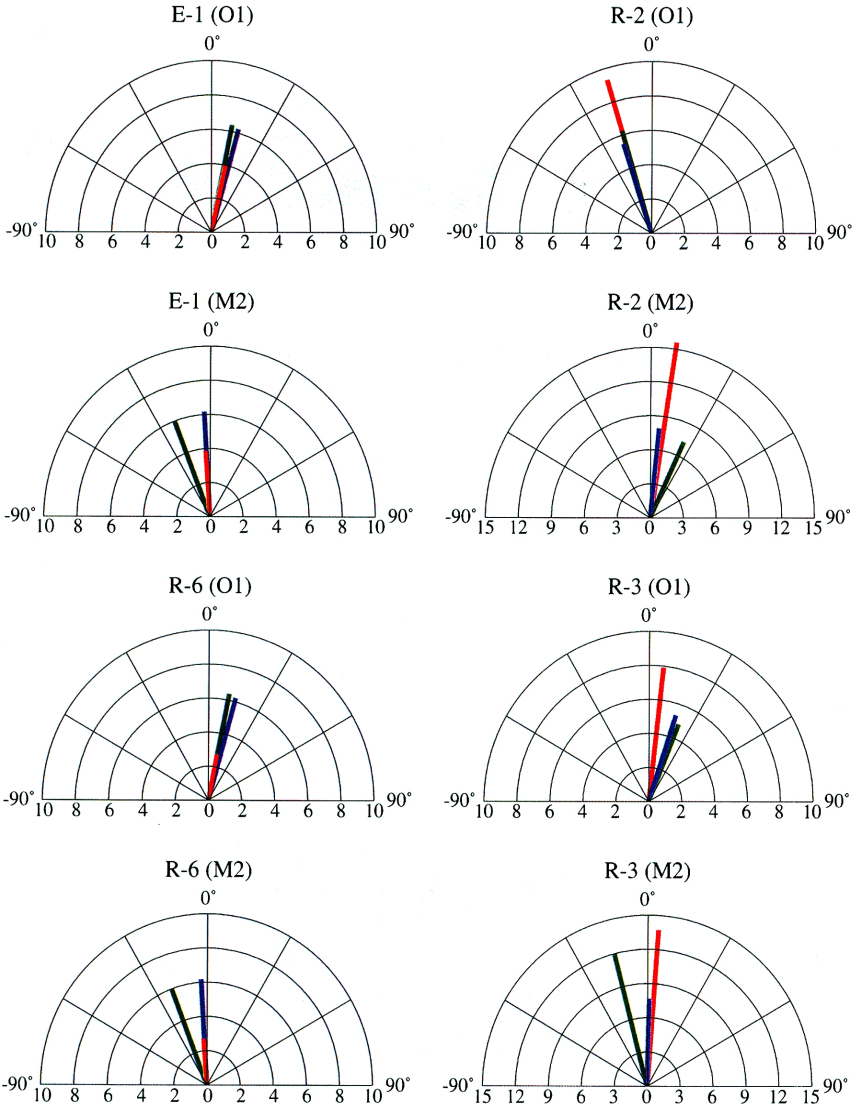


Fig. 3 Phasor diagrams of tidal factor. The center is lag=0°, and right side is phase lag. Green, blue, and red lines are solid earth tide, theoretical tide including ocean loading effect, and observed tide, respectively. The ocean loading effect is not present, but it is apparent that subtracting the solid earth tidal vector from the theoretical tidal one.

M2分潮ともにE-1で63%, R-6で43%である。また、観測値、理論値ともO1分潮の振幅の方がM2分潮のそれよりも大きい値になっている。この結果は隧道方向による方位特性であるかを検証するために、天ヶ瀬観測点における理論潮汐歪を方位角 $10^\circ$ ごとに变化させてO1、M2分潮の振幅を計算し、両者の値を比較した。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)はM2分潮の地球潮汐歪の振幅からO1分潮のそれを引いたものであり、(b)は同様に海洋潮汐の影響を含めた理論潮汐歪の結果である。図中の緑の線はM2分潮の振幅が大きかった場合であり、赤線はその逆の場合である。これらの図から地球潮汐歪に関しては方位角 $70\sim 110^\circ$ の範囲で、理論潮汐歪に関しては方位角 $110^\circ$ でO1分潮の振幅の方がM2分潮のそれよりも大きくなることがわかる。また、Fig. 4(c)には理論潮汐歪に対して同様の計算を $100\sim 125^\circ$ の範囲で $1^\circ$ ごとに計算した結果を示している。これによれば方位角 $106\sim 119^\circ$ の範囲内ではO1分潮の振幅の方がM2分潮のそれよりも大きい値になることが示されている。同観測室の隧道の方位角は $107.5^\circ$ であるからこの範囲内にあり、観測値にもその結果が反映されていることが明らかになった。位相については理論潮汐歪に対して若干進む傾向が見られるが、それらの値は最大でも $5^\circ$ であり非常によく一致していると考えられる。

隧道と $45^\circ$ の方位角を持つR-2、R-3では観測された振幅が理論振幅よりも1.5から2倍大きくなっておりCavity Effectを示していると考えられる。また、いずれの成分もM2分潮に対する増幅率はO1分潮に対するそれに比べて30%程度大きくなることが示されている。位相に関しては、R-3のO1分潮において理論位相と $11.7^\circ$ ずれているものの、その他の成分ではO1、M2分潮ともに理論位相に対して遅くなる結果が得られ、隧道方向の場合と同様に $3^\circ$ 以内で一致している。

#### 4. まとめ

天ヶ瀬観測室においてスーパー・インヴァール棒伸縮計による地球潮汐歪の解析を行い、理論潮汐と比較した結果以下のことが確認された。

隧道方向の成分では観測された潮汐振幅が理論振幅に比べて小さく、位相は進む傾向があることがわかった。また、O1分潮の振幅がM2分潮のそれよりも大きくなる方位であることが観測及び理論計算から明らかになった。なお、どのようなメカニズムによって振幅が減少するのかは今後の課題である。

隧道と $45^\circ$ をなす成分においては振幅が1.5から2

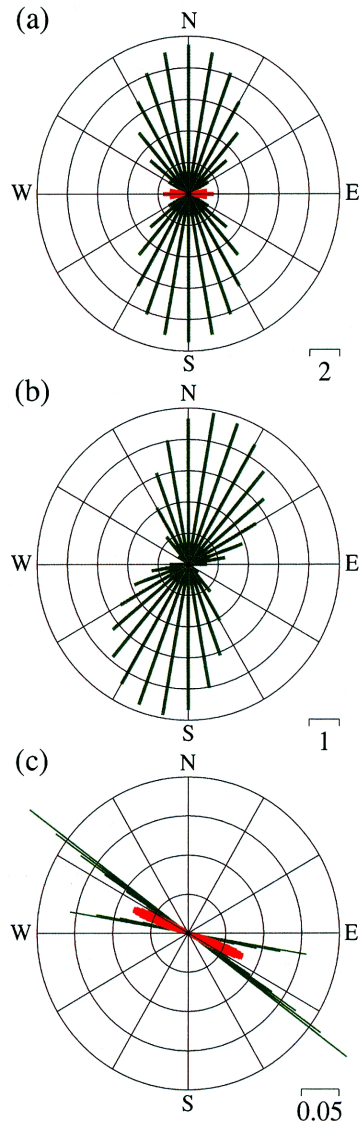


Fig. 4 An azimuthal asymmetry of tidal strain amplitude. Red lines represent that amplitude of O1 constituent is bigger than that of M2 constituent, and green lines are opposite case. (a) is a case of theoretical earth tidal strain amplitude and (b) is case of theoretical tidal strain amplitude including ocean loading effect. (c) is same figure with (b), but estimate is every 1 degree.

倍大きくなり、Cavity Effect によるものと考えられる。また、M2 分潮の方が増幅率が大きくなることが示された。R-3 成分の O1 分潮を除いて、位相は遅くなる傾向があることが明らかになった。

今回、改良された観測方式により地球潮汐歪を充分な精度で解析できるようになった。今後は潮汐定数の時間変化を明らかにし、地殻内流体や地殻内状態の変化との関連を調べていきたい。

#### 参考文献

- 大谷文夫・古澤 保・森井 互・山田 勝 (1999) : 台風通過時の急激な気圧変化による坑道内ひずみ変化について、平成 10 年度京都大学防災研究所発表講演会予稿。
- 高田理夫・古澤 保・竹本修三・山田 勝 (1978) : 天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測 (第 3 報), 京都大学防災研究所年報, 第 21 号 B, 87-95.
- 竹本修三 (1975) : ローラー型伸縮計のレーザーを用いた Calibration について, 測地学会誌, 第 21 巻, 2 号, 81-90.
- 竹本修三 (1977) : レーザー干渉計を用いたスーパ

ー・インヴァール棒伸縮計について, 測地学会誌, 第 23 巻, 4 号, 223-231.

- 田村良明 (1985) : BAYTAP-G 使用手引書。
- 古澤 保・竹本修三・大谷文夫・山田 勝 (1990) : 天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測 (第 5 報), 京都大学防災研究所年報, 第 33 号 B-1, 85-91.
- 松本晃治・高根澤隆・佐藤忠弘・大江昌嗣 (1999) : NAO.99 潮汐予測システム, 1999 年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集。
- Ishiguro, M., H. Akaike, M. Ooe and S. Nakai (1981) : A Bayesian Approach to the Analysis of Earth Tides, Proc. 9th Int. Sympos. Earth Tides, New York, 283-292.
- Sato, T. and H. Hanada (1984) : A Program for the Computation of Oceanic Tidal Loading Effects 'GOTIC', Publ. Int. Lat. Obs. Mizusawa, No. 18, 29-47.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991) : A Procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion, Geophys. J. Int., Vol. 104, 507-516.

## Measurement of Earth Tidal Strain at Amagase Observatory

Masatake HARADA, Tamotsu FURUZAWA, Fumio OHYA, Wataru MORII, Masaru YAMADA

### Synopsis

In Amagase Observatory, the continuous observation of ground strain has been carried out since 1967 by roller type super-invar-bar extensometers. Since 1995, we exchanged a detector from roller type magnifier to differential transformer and supporting the super-invar-bar from roller to stainless wire, because ground strains may be diminished by frictional forces between the super-invar-bar and supporting roller or roller type magnifier in the tidal strain amplitude range. We analyzed earth tidal strain using new extensometers. As a result, we can discuss tidal factors more precise than those obtained by previous type extensometers.

**Keywords:** earth tide; strain; Amagase Observatory; BAYTAP-G