

# 温泉地学研究所傾斜観測網で観測された地球潮汐について

原田昌武\*、棚田俊收\*、伊東 博\*、丹保俊哉\*

Earth tide observed at tiltmeter network of Hot Springs

Research Institute of Kanagawa Prefecture

By

Masatake HARADA\*, Toshikazu TANADA\*, Hiroshi ITO\* and Toshiya TANBO\*

## 1. はじめに

神奈川県温泉地学研究所では、1989(平成元)年から箱根カルデラ内の駒ヶ岳・湖尻・小塚山の3ヶ所において傾斜計による観測を開始し、箱根地域における火山活動のモニタリングを行っている。その後、さらに塔の峰・岩倉・寄・裾野の4観測点を増設し、現在では7観測点による傾斜観測網により箱根火山のみならず、神奈川県西部地域の広域地殻変動をモニタリングしている。傾斜観測網の観測点配置を図1に示す。これらの各観測点では、深度約100mの観測井内にボアホール型傾斜計を設置し、南北方向および東西方向の2成分の傾斜観測を行っている(温泉地学研究所、1999)。傾斜計は $10^{\circ}$ rad程度の変動も検出できる非常に高感度なセンサーであるため、地震活動や火山活動に伴う変動を捉えることができる。例えば、2001(平成13)年6月から発生した箱根群発地震活動の際には、これに伴う傾斜変動が検出され、その変動源の推定も行われている(代田ほか、2002; 代田ほか、2003a)。

このように観測された傾斜変化を用いて定量的に地殻活動を議論するためには、傾斜計の感度検定を行う必要がある。すなわち、観測点近傍における変動が傾斜計によって正確に観測されているかどうかを検証しなければならない。なぜなら、 $10^{\circ}$ rad程度という極めて微小な量の地殻の傾斜を測定する傾斜計の計器感度を通常の観測範囲内で直接求めることは困難であり、ほとんどの場合これよりも大きな変動に対する計器の感度から内挿されたものを通常の観測範囲での計器感度としているためである。これによって得られた変動量の誤差は、伸縮計の場合には $\pm 40\%$ 以上になることもある(竹本、1971)。そこで本報告では、通常の観測時に記録され、なおかつ、既知の周期的な変化をもたらす地球潮汐をシグナルとして利用し、地球潮汐によって引き起こされる傾斜変動の観測値とその理論的に予測される値とを比較することによって各観測点での計器特性を明らかにした。また、観測計器の安定性および箱根群発地震活動が地球潮汐に及ぼす影響を検討するために地球潮汐傾斜の振幅の時間変化を計算したので報告する。

## 2. データおよび解析方法

解析に用いたデータは傾斜観測網の全7観測点の傾斜データである。それぞれの観測点では南北、および、東西方向の2成分観測を行っているため、全部で14成分が対象となる。これらのデータはリアルタイムで温泉地学研究所に送信されており、毎分0秒の値を1分値ファイルとして保存している。地球潮汐の解析には、この1分値ファイルから毎時0分の前後30分間で平均した値を1時間値としてリサンプリングしたものを使用した。解析に用いたデータの期間は1999(平成11)年7月1日から2003(平成15)年7月31日の約4年間のデータである。

通常の傾斜観測のデータに記録される地球潮汐には、2つの潮汐変化の合力が観測されている。1つは、固体地球自体が外部天体の引力の作用によって変形が生じさせられる固体地球潮汐である。つまり、引力が地球の固体部分に直接作用していることを示している。2つ目は、地球の流体部分によって引き起こされる海洋潮汐である。これは、海洋の潮汐変化により海底にかかる海水の荷重が変化し、それによって地殻部分が弾性変形すること(さらに、弾性変形に伴う引力変化や海水自体の引力変化)に起因する潮汐現象である。これら固体地球潮汐と海洋潮汐の影響を理論的に予測するために、地球潮汐・

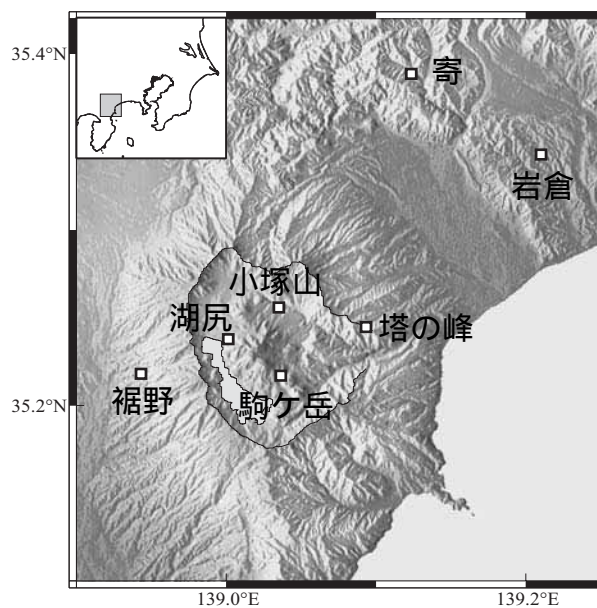


図1 傾斜観測点配置

\* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田586  
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第36巻, 47 - 52, 2004.

海洋潮汐荷重計算プログラム GOTIC (Global Oceanic Tidal Correction ; Sato and Hanada, 1984) の改良版である GOTICX (Matsumoto *et al.*, 2001) を用いた。一方、観測データの潮汐解析には潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Bayesian Tidal Analysis Program - Grouping Model ; Ishiguro *et al.*, 1981 ; Tamura *et al.*, 1991) を用い、地球潮汐によって引き起こされる傾斜変動の振幅と位相を計算した。観測データは固体地球潮汐と海洋潮汐の2つに分離することができないため両者の和である地球潮汐、その中でも特に振幅が大きく他の分潮との分離もよい M2 分潮 (月起源の半日周潮) 、O1 分潮 (月起源の日周潮) について観測値と理論値を比較する。

### 3. 各観測点での潮汐定数

BAYTAP-G は観測データをトレンド、地球潮汐、気圧または温度等による応答、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、駒ヶ岳観測点の南北成分の傾斜計によって得られたこれらの成分を図2に示す。上から順に観測データ(入力)、トレンド、潮汐成分、残差成分である。なお、各観測点では地中温度の観測も行っているが、計測機器の不調による異常値や欠測が多いため、本報告では温度による応答は計算に含めなかった。

このようにして解析された各観測点での M2 分潮、O1 分潮の結果を表1に理論潮汐の計算結果も含めて示す。また、phasor diagramの形にしたものを図3に示す。原点からの距離が振幅の大きさ(単位は  $10^9 \text{ rad}$ ) を示し、また、上方  $0^\circ$  からの角度が位相(遅れを正)に相当する。図中の および はそれぞれ M2 分潮、O1 分潮の理論値を、また、+および×はそれぞれ M2 分潮、O1 分潮の観測値の振幅・位相を示している。

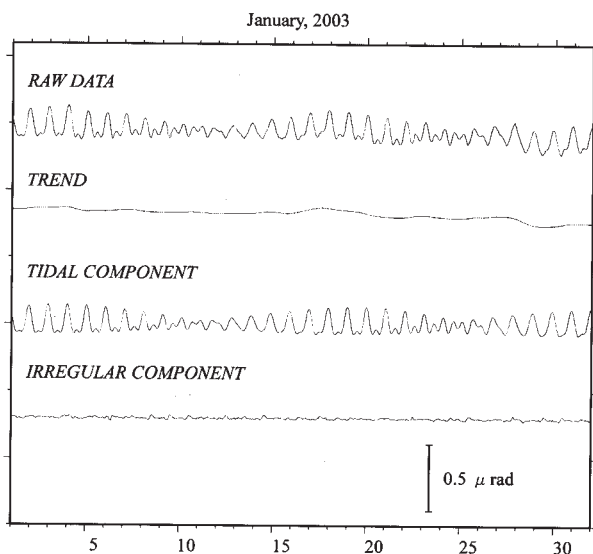


図2 2003 平成 15 年 1 月の駒ヶ岳観測点(南北成分)の観測データを用いた解析結果の例  
上から順に観測データ(入力)、トレンド、潮汐成分、残差成分を示す。

駒ヶ岳観測点では、東西成分の M2 分潮の位相が  $9^\circ$  ずれているが、その他の成分・分潮では  $3^\circ$  以内で非常に良く一致している。振幅については東西成分の O1 分潮を除き 15% 程度大きくなる傾向がある。駒ヶ岳観測点については、傾斜計の観測方位が東西方向・南北方向ともに  $180^\circ$  ずれていると指摘されており(代田ほか, 2003 b)、本解析においても出力極性を反転したデータを用いた結果、観測値と理論値はほとんど調和的な結果が得られた。

湖尻観測点では、東西成分の M2 分潮の位相が  $13^\circ$  程度ずれてはいるが、その他の成分・分潮では  $3^\circ$  以内で非常に良く一致し、また、振幅についてもほとんど理論値と同じ値が観測されていることがわかる。

小塚山観測点は、位相は  $5^\circ$  以内で良く一致しているが、南北成分の M2 分潮と東西成分の O1 分潮において振幅が 18% 程度減少している。

塔の峰観測点は、南北成分の M2 分潮の位相が  $7^\circ$  ずれてはいるものの、その他は良く一致しており、東西成分の位相は若干進む傾向がみられる。また、南北成分の振幅は 15% 程度減少する傾向にあるが、東西成分は逆に 20% 程度増加しており、何らかの系統的な誤差要因があるかもしれない。その可能性として考えられるものは、(1) 観測計器の設置方向の東西・南北方向からのずれ、(2) 観測点近傍の局所的な地質構造(厳密には物性パラメータ)が、今回用いた 1066A 地球モデル(Gilbert and Dziewonski, 1975)とはずれている、(3) 実際の地形との相違に起因するモデル計算からのずれ(例えば、Berger and Beaumont, 1976)がある。しかし、ここではこのような不均一な地殻構造モデルの影響を含めた地球潮汐の解析を行っていないため、結論付けることはできない。

岩倉観測点では、南北方向の M2 分潮の振幅は 10% 減少し、東西成分の M2 分潮の位相は  $7^\circ$  ずれてはいるものの、その他の潮汐定数(振幅および位相)は理論値と非常に調和的である。

寄観測点は、南北成分の M2 分潮の振幅が 40% 増加しているが、その他の成分・分潮ではおおよそ調和的であり、位相については  $2^\circ$  以内で非常に良く一致している。

裾野観測点については、位相のずれが他の観測点に比べて大きくなる傾向がある。また、南北成分の振幅は増加し、東西成分では減少している。しかし、位相には系統的变化がみられないため、塔の峰観測点のような単純な問題では解決できないかもしれない。

図4に駒ヶ岳観測点、湖尻観測点、小塚山観測点における M2 分潮の振幅の時間変化を示す。これは、地球潮汐を解析する時間ウィンドウを 30 日と固定し、1 日ずつウィンドウをずらしながら振幅の時間変化を求めたものである。これらの解析結果から、駒ヶ岳観測点の南北成分には年周期的な変化も見られるが、全成分とも 5 nano radian 程度の変動に収まっており、安定した観測が継続されていると考えられる。一般的に、地球潮汐は観測点

表 1 各観測点での地球潮汐定数

南北成分		M 2						観測値	
	地球潮汐		海洋潮汐		合計 理論値)		観測値		
	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	
駒ヶ岳	0.00	24.99	-171.49	51.10	-163.51	26.64	-162.25	30.58	
湖尻	0.00	25.00	-173.10	48.72	-165.93	24.09	-163.33	24.11	
小塚山	0.00	25.00	-171.87	49.37	-163.69	24.87	-163.13	20.35	
塔の峰	0.00	25.00	-166.99	58.33	-157.58	34.44	-150.63	29.58	
岩倉	0.00	25.03	-163.38	63.33	-153.06	40.00	-150.50	36.01	
寄	0.00	25.04	-171.33	45.35	-160.93	20.94	-161.55	29.16	
裾野	0.00	24.99	-174.40	49.19	-168.68	24.44	-172.78	31.02	

南北成分		O 1						観測値	
	地球潮汐		海洋潮汐		合計 理論値)		観測値		
	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	
駒ヶ岳	0.00	7.23	9.28	23.95	7.13	31.11	9.83	34.76	
湖尻	0.00	7.22	8.62	22.55	6.53	29.70	8.78	29.93	
小塚山	0.00	7.20	9.08	23.16	6.93	30.29	8.36	31.75	
塔の峰	0.00	7.21	11.16	28.22	8.90	35.33	9.64	29.91	
岩倉	0.00	7.14	12.44	31.46	10.15	38.46	11.60	35.72	
寄	0.00	7.11	9.01	21.72	6.79	28.76	7.04	32.76	
裾野	0.00	7.23	8.24	22.30	6.23	29.47	5.66	34.20	

東西成分		M 2						観測値	
	地球潮汐		海洋潮汐		合計 理論値)		観測値		
	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	
駒ヶ岳	0.00	43.13	159.51	36.03	53.37	15.72	62.44	18.50	
湖尻	0.00	43.12	166.32	30.37	27.81	15.39	41.14	15.92	
小塚山	0.00	43.11	162.69	32.38	38.31	15.54	32.86	16.84	
塔の峰	0.00	43.12	149.26	48.77	87.23	24.96	83.17	29.13	
岩倉	0.00	43.07	157.67	35.19	51.81	17.01	44.68	16.96	
寄	0.00	43.04	167.27	27.36	20.23	17.43	22.08	16.69	
裾野	0.00	43.13	172.75	27.60	12.46	16.13	5.96	14.32	

東西成分		O 1						観測値	
	地球潮汐		海洋潮汐		合計 理論値)		観測値		
	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	
駒ヶ岳	0.00	12.70	124.34	22.44	89.89	18.53	88.91	19.69	
湖尻	0.00	12.70	126.83	19.02	85.12	15.28	86.49	15.74	
小塚山	0.00	12.71	125.66	20.37	87.12	16.57	90.71	13.86	
塔の峰	0.00	12.71	120.87	29.68	95.66	25.60	94.19	31.02	
岩倉	0.00	12.74	124.13	22.32	89.34	18.48	87.30	17.59	
寄	0.00	12.75	127.78	17.65	82.10	14.09	82.53	15.71	
裾野	0.00	12.70	128.95	17.01	81.39	13.38	89.90	13.01	

周辺の弾性定数にも影響を受けるため、観測点近傍での地震活動に伴う弾性定数の変化(ダイラタンシーモデル)や火山活動に伴う地殻構造の変化があった場合には、傾斜計が観測する地球潮汐も変化をすることが予想される(観測された事例については例えば、Nishimura, 1950 ; Latynina and Rizaeva, 1976 ; Mikumo *et al.*, 1977 ; Yamauchi, 1989)。しかし、2001(平成13)年6月から箱根火山で始まった、現在のテレメータ観測を開始した1989(平成元)年4月以降で最大の群発地震活動(棚田ほか、2002)に関連するような潮汐定数の変化は観測されていない。これは、群発地震活動そのものが地球潮汐に影響

を及ぼすほどの規模ではなかった可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

傾斜観測網の全観測成分について地球潮汐の解析を行い、理論潮汐と比較した結果以下のことが確認された。

- (1)各観測点における潮汐定数の位相は、湖尻観測点における東西成分のM2分潮を除き、観測値と理論値が非常に良く一致している。
- (2)振幅についても観測値と理論値は調和的であり、当所の傾斜観測網は、地球潮汐の周期帯でみ限り地殻の傾斜変動を非常に良く捉えていることが明らかとなった。



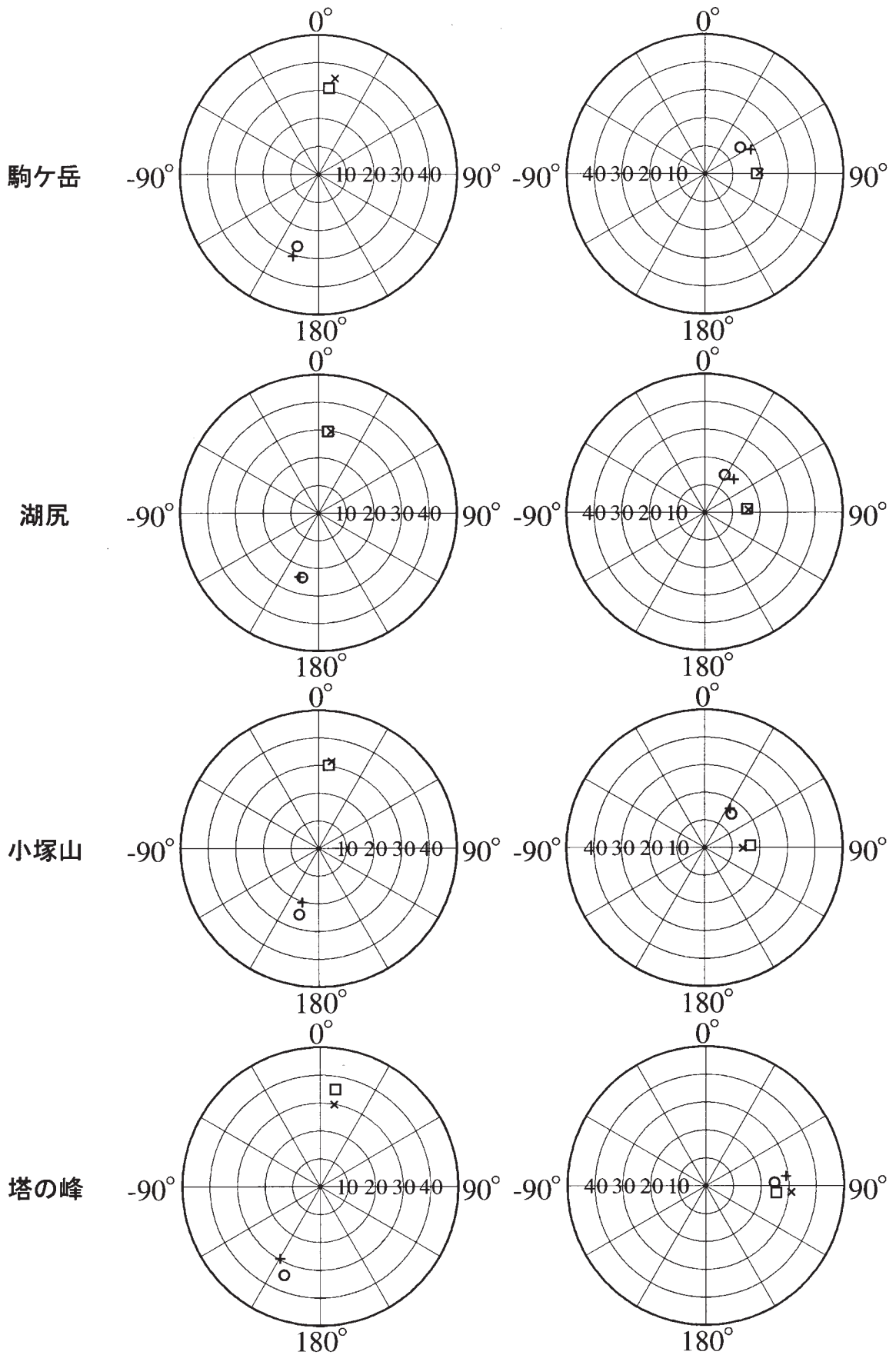


図3 地球潮汐定数( Phasor diagrams )  
 原点からの距離が振幅の大きさ( 単位は  $10^9$  rad)を示し、また、上方  $0^\circ$  からの角度が位相( 遅れを正)に相当する。  
 図中の および はそれぞれ M2 分潮、O1 分潮の理論値を、また、+および×はそれぞれ M2 分潮、O1 分潮の観測値の振幅・位相を示している。

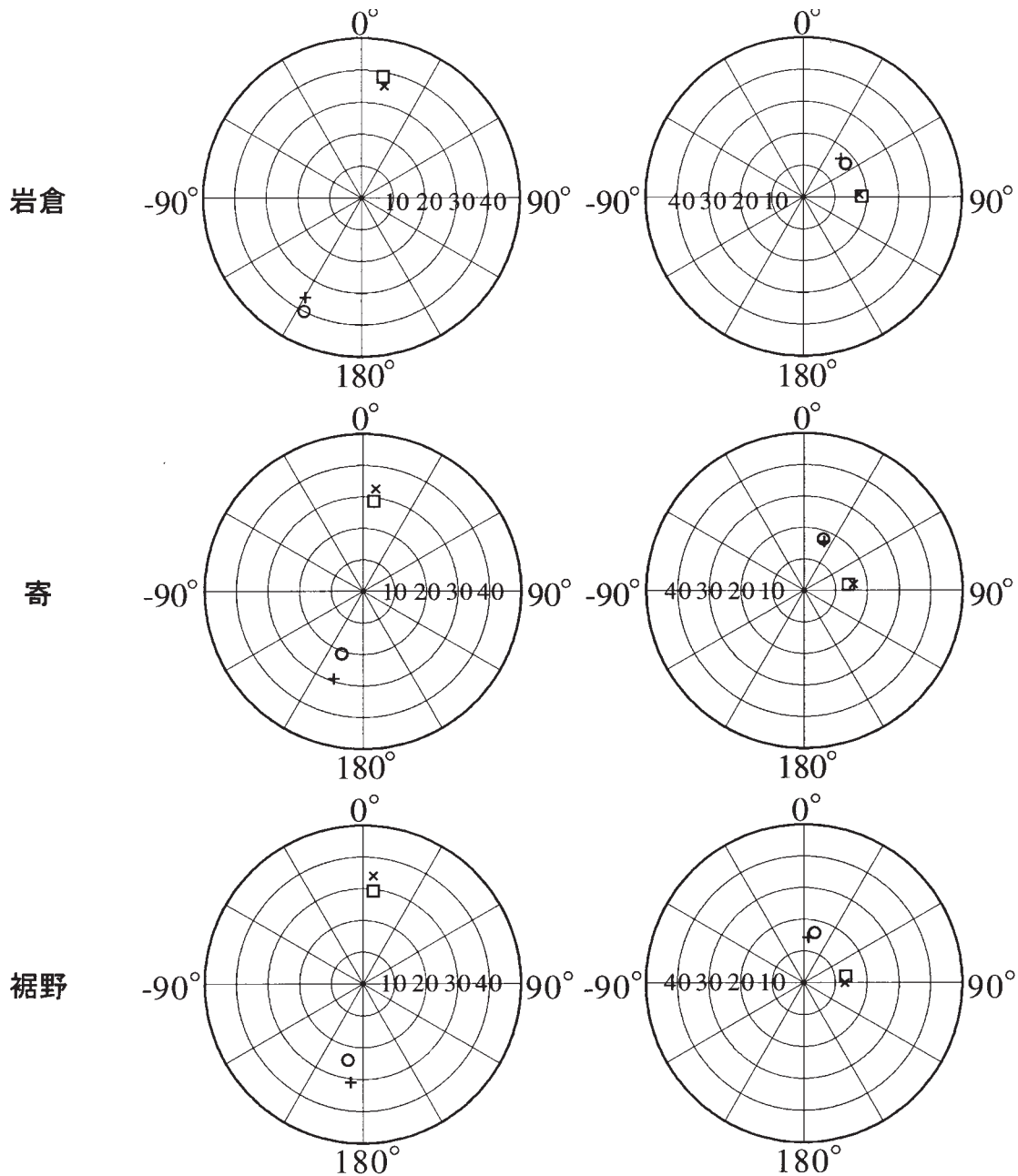


図3 地球潮汐定数(Phasor diagrams)  
 原点からの距離が振幅の大きさ(単位は  $10^{-9}\text{rad}$ )を示し、また、上方  $0^\circ$  からの角度が位相(遅れを正)に相当する。  
 図中の および はそれぞれ M2 分潮、O1 分潮の理論値を、また、+ および x はそれぞれ M2 分潮、O1 分潮の観測値の振幅・位相を示している。

(3)潮汐定数の時間変化は5 nano radian 程度の変動に収まっており、長期間安定した観測が継続している。  
 地震・火山活動に伴う変動を捉えるためには、このような高精度の地殻変動観測を今後も継続させる必要がある。

参考文献

Berger, J. and Beaumont, C. (1976) An Analysis of Tidal Strain Observations from the United States of America II. The Inhomogeneous Tide, Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1821-1846.

代田 寧、棚田俊收、伊東 博 (2002) 2001(平成13)年箱根群発地震活動に関連した地殻傾斜変動, 温地研報告, 34, 35-44.  
 代田 寧、丹保俊哉、棚田俊收、伊東 博 (2003a) 2001年箱根火山で生じた地殻傾斜変動(その2), 日本火山学会2003年度秋季大会講演予稿集, 132.  
 代田 寧、棚田俊收、原田昌武、伊東 博 (2003b) 潮汐変化と遠地地震を用いた温泉地学研究所傾斜計センサー方位の検証, 温地研報告, 35, 33-40.

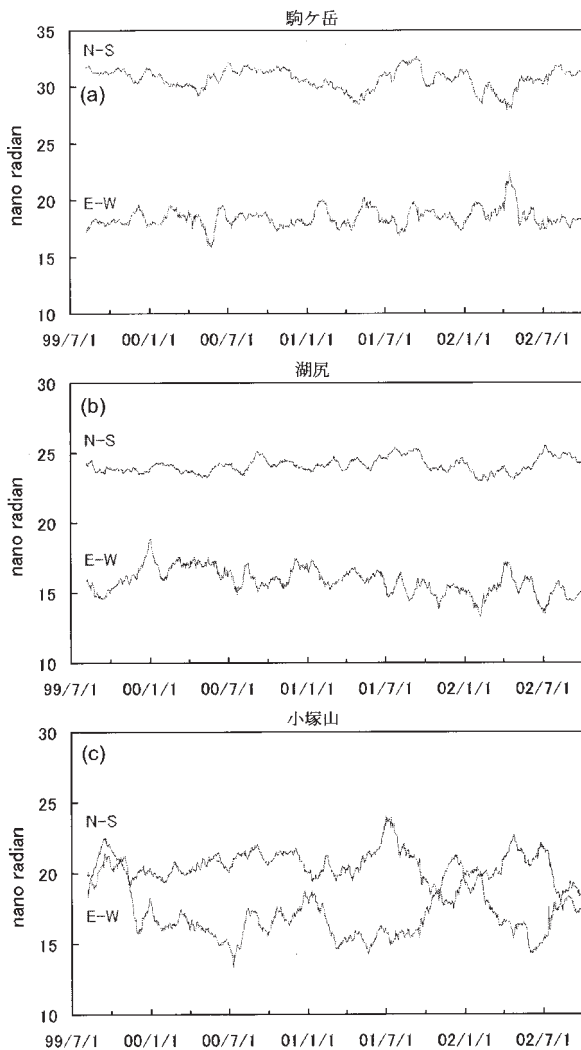


図4 M2分潮の振幅の時間変化  
(a) 駒ヶ岳、(b) 湖尻、(c) 小塚山の解析結果

Gilbert, F. and Dziewonski, A. M. (1975) An Application of Normal Mode Theory to the Retrieval of Structural Parameters and Source Mechanisms from Seismic Spectra, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A278, 187-269.

Ishiguro, M., Akaike, H., Ooe, M. and Nakai, S. (1981) A Bayesian Approach to the Analysis of Earth Tides, *Proc. 9th Int. Sympos. Earth Tides*, New York, 283-292.

Latynina, L. A. and Rizaeva, S. D. (1976) On tidal-strain variations before earthquakes, *Tectonophysics* 31, 121-127.

Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2001) GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc., Japan*, 47, 243-248.

Mikumo, T., Kato, M., Doi, H., Wada, Y., Tanaka, T., Shichi, R. and Yamamoto, A. (1977) Possibility of Temporal Variations in Earth Tidal Strain Amplitudes Associated with Major Earthquakes, *J. Phys. Earth* 25, 123-136.

Nishimura, E. (1950) On earth tides, *Trans. Am. Geophys. Union* 31, 357-376.

温泉地学研究所 (1999) 温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」の取り組み, *温地研報告*, 29, 3-40.

Sato, T. and Hanada, H. (1984) A Program for the Computation of Oceanic Tidal Loading Effects 'GOTIC', *Publ. Int. Lat. Obs. Mizusawa*, 18, 29-47.

竹本修三 (1971) レーザー干渉計による伸縮計・ひずみ地震計の Calibration について, *京大防災研究所年報*, 14A, 7-13.

Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991) A Procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507516.

棚田俊收、代田 寧、伊東 博、袴田和夫 (2002) 2001 (平成 13) 年箱根火山の群発地震活動について, *温地研観測だより*, 52, 1-4.

Yamauchi, T. (1989) Earthquake Occurrence and Temporal Variations in Earth Tidal Strain Amplitudes, *J. Geod. Soc., Japan*, 35, 149-157.