

逢坂山における地球潮汐の観測(第2報)

小 沢 泉 夫

OBSERVATIONS OF THE TIDAL STRAINS AT OSAKAYAMA OBSERVATORY, PART II

By *Izuo OZAWA*

Synopsis

An observation of the tidal extensions has been established with an extensometer at Osakayama in 1947. This observation has been grown up into those by means of ten components of extensometers in the five directions at three points, six components of pendulum type's tiltmeters of the two directions at three points, a water-tube tiltmeter and a rotationmeter in 1966.

We have performed tidal harmonic analyses of about fifty months of these observations and have calculated the values of the earth-tidal numbers h_2 and l_2 , and their radial gradients. We have also discussed the horizontal anisotropy of the earth-crust.

1. 序

地球潮汐の研究は古典物理学の興味ある問題として、恐らく海洋潮汐の理論的研究とほとんど同時に始められたことであろう。また傾斜計による地球潮汐の観測は遠地地震動の観測より以前から始められたともいわれ、これに経緯儀による方法が加わったりして全盛を窮め、それが一時終末に近づいたかに見えたが、地球内部構造解明の研究がその成果をあげ、計算技術の進歩に伴う数値計算法による引力を持った弾性地球の運動方程式から地球潮汐を求める研究の近代化、高感度重力計の出現等によって再び全盛期に入った感がある。しかし地球の潮汐ひずみの観測そのものはおろか、その理論的研究さえも痴人の夢と見做されてか、忘れられていたかのように思われる。土地のひずみを観測する試みは19世紀末に J. Milne¹⁾ により計画され、また何人かの外国人²⁾ が試みていた。しかしこの現実の観測報告となって現われたのは高橋龍太郎³⁾ の伸縮計の試作報告、それにつぐ H. Benioff⁴⁾ の研究である。H. Benioff は優れた伸縮計を作りながらこれを地震動ひずみの観測にのみ用い、地球潮汐の観測に使用しなかったのは理解に苦しむ所である。しかし実際に地震動ひずみの観測をして見ると、その気持が分らないでもない。地球の潮汐ひずみ(狭義)の観測が顧みられなかった原因は恐らく土地の局所的な異方性の影響を余りにも過大に評価して、これに恐れをなしたためであろう。これにいどんだ佐々憲三⁵⁾ の達見は、その一門の協力によって世界で始めて地球の潮汐ひずみ観測の基盤の創設を可能にした。これに類する研究には東京大学地震研究所では萩原尊礼⁶⁾、力武常次、笠原慶一、山田重平等による海浜での潮汐荷重ひずみの諸研究がある。一方京都大学では主力を海洋から遠くはなれた地点で地球潮汐の直接項を求める研究においた。東京大学では定尺に石英管を使用し、ローラーまたはピボットを拡大装置とした比較的低感度の伸縮計を使用した。一方京都大学ではその初期においてはスーパーインヴァールウィヤーを定尺とした水平成分の佐々式伸縮計が用いられた。その後著者(小沢)⁷⁾ はスーパーインヴァールウィヤーを用いた数種類の水平成分および垂直成分伸縮計を考案した。つづいて1959年にはスーパーインヴァール棒または管を定尺とした感度 $10^{-10}/\text{mm}$ の H-59 型水平成分伸縮計⁸⁾、さらに V-59 型垂直成分伸縮計を考案して高い精度の潮汐観測を続けている。またこのほかに高田理夫⁹⁾ の

光電池を使用した遠隔記録式伸縮計，藤原俊郎¹⁰⁾の差動変圧器を用いた伸縮計，田中寅夫¹¹⁾の容量変化型伸縮計等の試作研究がある。

著者（小沢）^{7), 12)}は地球潮汐ひずみの観測公式を求め，逢坂山（滋賀県），紀州鉱山（三重県）栖原（和歌山県）の3点で観測を行ない，その結果として海洋潮汐による荷重ひずみは定性的には J. Boussinesq の式を満足することを明らかにした。しかしその絶対量を求めることは困難であったけれどもそれらのひずみの成分の中の荷重の影響を受けないものを用いて，地球潮汐の直接項を求めた。また著者の得た観測結果では逢坂山のように海から 60km 以上はなれた所では潮汐ひずみの位相の遅れが非常に小さいことから，荷重潮汐の大いさは現在は無視してもよいと考えられる。またチリ津波による荷重ひずみの観測¹³⁾からも荷重潮汐は非常に小さいとの結論を得た。さらにこの潮汐ひずみの研究における当然の副産物である地球の自由振動の観測¹⁴⁾，地震動ひずみの観測等がなされた。

地球潮汐の研究の発展の歴史においては，竹内均¹⁵⁾，I. Longman¹⁶⁾，C. Pekeris¹⁷⁾等の理論的研究，西村英一¹⁸⁾の傾斜潮汐，重力潮汐観測研究への尽力，また P. Melchior¹⁹⁾ の I.G.Y. での情熱的努力を忘れることはできない。地球潮汐の研究の発展は I.G.Y. これに続く。U.M.P. に負う所が極めて大である。

2. 潮汐伸縮の観測

潮汐力のポテンシャルは一般に i 次の体球関数の一次結合で与えられ，近似的には W_2 のみでもほとんど支障はなく，その次に大きい W_3 でも高々 W_2 の 10^{-2} の桁でしかない。いま半径 (r)，余緯度 (θ) 経度 (ϕ) 成分の変位をそれぞれ u_r, u_θ, u_ϕ とすると

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \sum_i \frac{H_i(r)}{g} W_i, \\ u_\theta &= \sum_i \frac{L_i(r)}{g} \frac{\partial W_i}{\partial \theta}, \\ u_\phi &= \sum_i \frac{L_i(x)}{g \sin \theta} \frac{\partial W_i}{\partial \phi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに $H_i(a) = h_i, L_i(a) = l_i$

で与えられる。今地球が地心を中心とする同一球面上では等方性であるならば， $H(r), L(r)$ は r のみの関数である。 g は万有引力常数の代りに置き換えられた常数²⁰⁾で，これには観測点の重力の平均値に近い数値が使われている。著書によってはその場所の重力で r の関数としているのもあるが繁雑にした以外の何物でもない。もし海面の変化による荷重変化の分布が $\sum_i k_i W_i$ で与えられるならば，荷重潮汐変位は(1)の形で与えられる。また(1)のような変位を示すひずみの成分は地球表面では

$$\left. \begin{aligned} e_{rr} &= \sum_i \frac{1}{ag} \left\{ a \frac{dH_i(a)}{dr} + i h_i \right\} W_i, \\ e_{\theta\theta} &= \sum_i \frac{1}{ag} \left\{ l_i \frac{\partial^2 W_i}{\partial \theta^2} + h_i W_i \right\}, \\ e_{\phi\phi} &= \sum_i \frac{1}{ag} \left\{ l_i \left(\cot \theta \frac{\partial W_i}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 W_i}{\partial \phi^2} \right) + h_i W_i \right\}, \\ e_{\theta\phi} &= \sum_i \frac{l_i}{ag} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial \theta} - \cot \theta \right) \frac{1}{\sin \theta} + \frac{\partial}{\sin \theta \partial \theta} \right\} \frac{\partial W_i}{\partial \phi}, \\ e_{r\theta} &= e_{r\phi} = 0, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

面積ひずみ S は

$$S = \sum_i \left\{ 2h_i - i(i+1)l_i \right\} \frac{W_i}{ag},$$

体積ひずみ Δ は

$$\Delta = \sum_i \left\{ (i+2)h_i + a \frac{dH_i(a)}{dr} - i(i+1)l_i \right\} \frac{W_i}{ag},$$

である。このほか地球表面の条件として

$$a \frac{dL_i(a)}{dr} + h_i + (i-1)l_i = 0 \dots\dots\dots (3)$$

また方向余弦 λ, μ, ν 方向の直線ひずみ e は

$$e = e_{\theta\theta}\lambda^2 + e_{\phi\phi}\mu^2 + e_{\nu\nu}\nu^2 + e_{\theta\phi}\lambda\mu \dots\dots\dots (4)$$

である。この直線ひずみの観測は初期には佐々式伸縮計を使って行なった。佐々式伸縮計は定尺として直径 1.6mm のスーパーインヴァールワイヤーを弛み針金として使用し、基線の変化によるその弛みの変化を Schweyder 型の重力計のような型をした 3 本吊で拡大記録する方式のものである。この型の伸縮計は恐らく地球潮汐観測のために作られた最初の伸縮計であろう。この伸縮計はこの目的のために必要な感度を持ち、また軽便な優れた伸縮計である。しかし気圧、温度、湿度変化の影響の大きいこと、地震動に対して弱いことの難点があった。またある程度以上の感度を得るためにはどうしてもワイヤーでなくて太い棒か管を定尺に使わなければならないので著者はスーパーインヴァール棒を定尺とし、これに拡大装置として水平振子を組み合わせ、H-59 型水平成分伸縮計、V-59 型垂直成分伸縮計を考案した。この伸縮計は定尺の先とその近くの土地との相対変位をまず水平振子の廻転軸の傾斜変化に換え、これによって生ずる水平振子の廻転を光学挺子で拡大記録する方式の装置である。この定尺には直径 7~10 mm の丸棒か、外径 30mm 内径 28~24mm のパイプを使用している。この装置の相対変位の倍率は振子の周期を手易く調整することによって 10^4 から 10^5 の範囲で任意に得られ、また倍率 10^8 でも長期間一定に保つことも容易であるので、土地の条件さえよければ記録紙上の 1mm を 10^{-10} にして連続観測することは容易である。恐らくわれわれに残された問題はどの程度まで目的外のノイズの小さい観測地が得られるかということだけであろう。此等の装置は経済的な理由で観測地点で印画紙に記録する方法がとられているが、時代のすう勢からして将来は遠隔、且デジタル記録的なものへと変わってゆかねばならぬであろう。

逢坂山観測所は東経 $135^\circ 51.5'$ 、北緯 $34^\circ 59.6'$ にあって観測室は地表面から 60m ないし 150m の深さにある。付近の地層は古生に属する粘板岩からできている、また海からは 60km 以上離れた地点にある。逢坂山での観測は1947年10月に伸縮計 1 成分の観測が始められ、その後伸縮計、傾斜計等その成分を増し、1960年からは局地的なひずみと地方的なひずみとを見分ける目的で幾つかの成分毎に多点観測を行なっている。現在迄に延約60ヶ月の地球潮汐の解析を行なった。解析方法は記象を 1 時間または 30 分毎に読み取り 25 時間毎の移動平均、または Pertzev の方法²²⁾ で移動平均を求めて読取り曲線から短週期的の変化を先ず抽出する。そうしてこの変化から改正 Darwin 法²¹⁾ または Darwin 法を拡張した 30 分毎法²³⁾ によりその大部分を解析した。なお一部分は Doodson 法²⁴⁾ を用いた。移動平均を求める方法としては Pertzev 法は短週期のすべての潮汐成分に対しては平均して精度はよいが M_2, O_1 等の数個の成分を考えたとき特に精度がよいということはなく、却って選択力は低く、また能率的な方法ではないので最近再び 25 時間毎の移動平均を用いることにしている。また Doodson は推算曲線を作成する必要があるときは能率的であるが、地球潮汐の研究のように数個の成分しか必要としないときはこの方法を用いるのは徒勞である。また Suthon⁵⁾ 法²⁵⁾ についても同じことがいえるので大部分は精度の高い修正 Darwin 法か 30 分毎法を用いた。

Table 1 に観測を解析した値をその観測計器の規格と共に示す。

表中“Sa”は佐々式伸縮計，“H. W. G.”は水平成分で、定尺に弛みスーパーインヴァールワイヤーを使用し、拡大装置として振り線ガルバーを使用した伸縮計，“V. W. B.”は垂直成分で、定尺に弛みスーパーインヴァールワイヤーを、拡大装置に二本吊りを使用したもの，“D. R. R.”は斜上方向の直線ひずみを観測するためのもので、定尺は直径 1cm のスーパーインヴァール棒で、基線長が変わると棒はこれに直角に水平方向にふれる。このふれをピボットローラーで拡大する方式のもの，“D. W. R.”は同じく斜方向成分のもので、定尺はスーパーインヴァールワイヤーで、拡大装置にはピボットローラーを使用したもの，“H-59 型”“V-59 型”で前述の説明のように定尺にスーパーインヴァール棒またはパイプを用いたもので、拡大装置である水平振子の型の相違で A, B, C 等と区別してある。

Table I. The Constants of the Tidal Extensions

Observatory: Osakayama Observatory.
 Location: 34°59.6' N, 135°51.5'E.
 Distance from the nearest sea: 65km.

| Direction | Type | Length | Period of analyses, Epoch | Mos. | Sensitivity | M_2 -tide | | O_1 -tide | | Weight |
|-----------------|----------|--------|---------------------------|------|------------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|--------|
| | | | | | | Amplitude | Phase-lag | Amplitude | Phase-lag | |
| N38°E | Sa | 20 | 47", 10, 24. | 18 | $\times 10^{-8}/\text{mm}$ 0.63 | $\times 10^{-8}$ 0.330 | 43.0° | $\times 10^{-8}$ 0.123 | 358.4° | 23 |
| N29°W | Sa | 4.2 | 53", 2, 19. | 1 | 9.8 | 1.98 | 23 | | | 0.3 |
| N61°E | H. W. G. | 9.6 | 53", 2, 12. | 1 | 3.1 | 0.50 | 9 | | | 0.5 |
| Vertical | V. W. B. | 4.0 | 52", 12, 25. | 1 | 2.24 | 0.44 | 215 | | | 0.7 |
| Vertical | V. W. B. | 4.0 | 53", 2, 12. | 1 | 2.22 | 0.63 | 201 | | | 0.7 |
| Vertical | V. W. B. | 4.0 | 53", 3, 12. | 1 | 2.22 | 0.64 | 193 | | | 0.7 |
| N29°W | Sa | 4.2 | 54", 5, 2. | 1 | 3.0 | 1.38 | 8 | 1.19 | 34 | 0.6 |
| N61°E | H. W. G. | 9.6 | 54", 8, 31. | 1 | 1.82 | 0.56 | 14 | 0.36 | 29 | 0.7 |
| Vertical | V. W. B. | 4.0 | 54", 10, 7. | 1 | 1.85 | 0.74 | 174 | 0.61 | 232 | 0.7 |
| Vertical | V. W. B. | 4.0 | 54", 11, 5. | 1 | 1.85 | 0.84 | 192 | | | 0.7 |
| S52°E 45°Dip | D. R. R. | 5.1 | 55", 1, 7. | 0.5 | 1.34 | 0.12 | 56 | | | 0.4 |
| S52°E 45°Dip | D. R. R. | 5.1 | 55", 11, 5. | 1 | 1.34 | 0.06 | 271 | | | 0.9 |
| S38°E 45°Dip | D. W. R. | 6.4 | 56", 7, 13. | 1 | 2.46 | 0.26 | 331 | | | 0.6 |
| E | H-59-B | 5.3 | 59", 1, 27. | 1 | 1.81 | 0.636 | 4.6 | 0.672 | 22.0 | 0.7 |
| E | H-59-B | 5.3 | 59", 3, 28. | 1 | 0.53 | 0.735 | 359.7 | 0.735 | 16.3 | 1.4 |
| E | H-59-B | 5.3 | 59", 5, 24. | 3 | 0.37 | 0.880 | 357.8 | 0.760 | 3.5 | 4.9 |
| N | H-59-B | 5.3 | 59", 4, 23. | 3 | 0.57 | 1.362 | 10.9 | 0.640 | 20.8 | 4.0 |
| S52°E | H-59-B | 10 | 60", 2, 19. | 1 | 0.064 | 1.630 | 0.9 | 1.001 | 34.3 | 4.0 |
| S38°E | H-59-B | 22 | 60", 8, 25. | 3 | 0.202 | 0.395 | 6.3 | 0.213 | 355.6 | 6.7 |
| S52°E | H-59-B | 10 | 61", 11, 5. | 4.5 | 0.181 | 1.433 | 359.1 | 1.104 | 13.5 | 10.5 |
| Vertical | V-59-D | 6.0 | 64", 8, 12. | 1 | 0.562 | 0.510 | 198.3 | 0.757 | 202.6 | 1.3 |
| Vertical | V-59-D | 6.0 | 64", 9, 16. | 1 | 0.525 | 0.525 | 198.4 | 0.582 | 219.2 | 1.3 |
| S38°W | H-59-B | 12.0 | 65", 8, 3. | 1.5 | 0.207 | 0.385 | 11.0 | 0.244 | 334.4 | 3.3 |
| S38°W | H-59-B | 12.0 | 65", 9, 24. | 2 | 0.201 | 0.420 | 10.5 | 0.235 | 325.4 | 4.4 |

Table I. の値に使用した伸縮計のそれぞれの解析期間中の感度の平方根に反比例し、解析期間の長さ按比例した重み T/\sqrt{S} を付け、式(4)を用いてひずみのエレメントを求めると、次の **Table II** が得られる。

Table II. The observed elements of the tidal strains in Osakayama.

| | |
|---|--|
| for M_2 -tide | for O_1 -tide |
| e_{rr} $0.588 \times 10^{-8} \cos(2t - 196.4^\circ)$, | $0.647 \times 10^{-8} \cos(t - 214.3^\circ)$, |
| $e_{\theta\theta}$ $0.612 \times 10^{-8} \cos(2t - 25.7^\circ)$, | $0.553 \times 10^{-8} \cos(t - 23.6^\circ)$, |
| $e_{\phi\phi}$ $1.109 \times 10^{-8} \cos(2t - 359.0^\circ)$, | $0.698 \times 10^{-8} \cos(t - 5.0^\circ)$, |
| $e_{\theta\phi}$ $1.080 \times 10^{-8} \cos(2t - 172.7^\circ)$, | $0.972 \times 10^{-8} \cos(t - 202.0^\circ)$, |
| Areal strain | $1.235 \times 10^{-8} \cos(t - 13.2^\circ)$, |
| Cubical dilatation | $0.675 \times 10^{-8} \cos(t - 353.3^\circ)$, |
| $h_2 - l_2$ | 0.328, |
| $a \frac{dH_2(a)}{dr} + 4h_2 - 6l_2$ | 0.435, |
| Horizontal mximum strain | in S 57° E, |
| | in S 49° E. |

Table II を用いて潮汐直線ひずみの方位角を求めると **Fig. 1** のようになる。

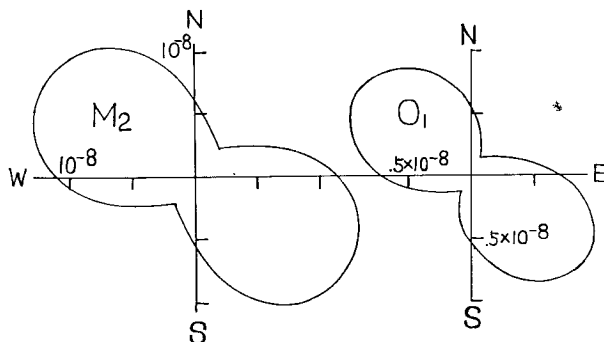


Fig. 1

M_2 潮成分の水平の最大ひずみの方向は $N57^\circ W - S57^\circ E$ 方向で O_1 潮成分では $N49^\circ W - S49^\circ E$ 方向であることが分かる。理論的に期待される水平の最大ひずみの方向は M_2 潮成分は $N - S$ 方向で、 O_1 潮成分は $E - W$ 方向である。この最大ひずみの方向が大きく片寄っている原因について考えて見よう。この原因には観測室周辺の局所的条件も考えられるが長波長の変化（このことは多点観測で確かめられる）であるので大きなスケールについて考え、地殻構造の異方性に原因を求めて見る。

Fig. 2 のように地殻がそれぞれ厚さ d_i 、Young 率 E_i 、Poisson 比 σ_i の何枚かの平行な板状構造から成立っていると考えると板に平行な方向の Young 率 E_a は

$$E_a = \frac{\sum_i d_i E_i}{\sum_i d_i}$$

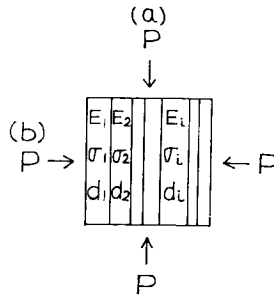


Fig. 2

板に直角な方向の Young 率 E_b は

$$E_b = \frac{\sum_i d_i}{\sum_i \frac{d_i}{E_i}}$$

であって、その大小関係は常に

$$E_a \geq E_b$$

であり、板に直角な方向により伸縮しやすいことが分かる。また Poisson 比は板に垂直に働く力に対しては

$$\sigma_b = \frac{\sum_i d_i \sum_j d_j \sigma_j}{\sum_i \frac{d_i}{E_i} \sum_j d_j E_j}$$

板に平行にく力に対しては

$$\sigma_a = \frac{\sum_i d_i \sigma_i}{\sum_i d_i}$$

となり、常に $\sigma_b \leq \sigma_a$ である。特に Poisson 比は各板で等しくても Young 率が異なるときは

$$\sigma_b \leq \sigma_a = \sigma$$

となり、板の方向の伸長をより小さくすることに拍車を掛ける結果になる。

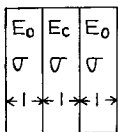


Fig. 3

今、板状の大陸性の構造が両側から2枚の板状の海洋性の構造によって挟まれていると模式的に考える(からずしも両側から挟まれていると考えなくてもよいが)。そうしてそれぞれの板の厚さは等しく、海洋性構造の板の Young 率 E_o は大陸性構造の Young 率 E_c の1.5倍で、それぞれの Poisson 比は等しいとすると、 $E_a = 1.33E_c$ 、 $E_b = 1.29E_c$ 、 $E_o/E_b = 1.04$ 、 $\sigma_b = 0.97\sigma$ 、 $\sigma_a = \sigma$ 、で地殻全体としての比はそれほどでもないが、陸地内での比は1.33で非常に大きい値になる。

今日本列島を例にとってみると、 E_o/E_c は少し小さいが広さの比は海洋性の部分の方がもっと大きいから可成りのひずみの異方性が期待される。日本列島が北東—南西に延びていること、近くでは琵琶湖がこの方向に延びていること等はこの証拠とも見られよう。

特にこのように不連続な構造を考えなくても六方晶形であれば十分に説明できる。例えば亜鉛のような金属でも、ひずみ—ひずみ力の関係は

$$\begin{aligned} e_{xx} &= (8.4X_x + 1.1Y_y - 7.74Z_z) \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{ダイン}, \\ e_{yy} &= (1.1X_x + 8.8Y_y - 7.74Z_z) \times 10^{-13} \quad \text{''} \quad , \\ e_{zz} &= (-7.74X_x - 7.74Y_y + 28.7Z_z) \times 10^{-13} \quad \text{''} \quad , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{yz} &= 26.4 \times 10^{-18} Y_z \text{cm}^2 / \text{ダイソ}, \\ e_{zx} &= 26.4 \times 10^{-18} Z_x \quad \text{〃} \quad , \\ e_{xy} &= 3.7 \times 10^{-18} X_y \quad \text{〃} \quad , \end{aligned}$$

で与えられ随分大きいひずみの異方性があらわれることが分かる。まして地殻の浅い部分に対して異方性を考えることに大きな不合理はないであろう。また等軸晶形でもその軸が鉛直でなければ水平面内でのひずみはやはり異方性を示す。またモホロビッチ不連続面が傾斜していてもこのようなことが考えられる。

さて、地球潮汐の常数を議論するときは、ひずみの主な方向とひずみ力の主な方向との値を比較すべきであると思われるから、 M_2 潮の場合は θ' 軸を $S57^\circ E$ 方向に、 O_1 潮では ϕ' 軸を $S49^\circ E$ の方向にとってこれらの坐標系に関するひずみのエレメントを求めると、

$$\begin{aligned} M_2 \text{ 潮 } \quad e_{\theta'\theta'} &= (1.430\cos 2t - 0.035\sin 2t) \times 10^{-8}, \\ e_{\phi'\phi'} &= (0.234\cos 2t + 0.217\sin 2t) \times 10^{-8}, \\ e_{\theta'\phi'} &= (0.224\cos 2t - 0.261\sin 2t) \times 10^{-8}, \\ O_1 \text{ 潮 } \quad e_{\theta'\theta'} &= (0.167\cos t - 0.050\sin t) \times 10^{-8}, \\ e_{\phi'\phi'} &= (1.034\cos t + 0.392\sin t) \times 10^{-8}, \\ e_{\theta'\phi'} &= (-0.271\cos t + 0.157\sin t) \times 10^{-8}. \end{aligned}$$

を得る。この値を使って地球潮汐の常数を求めると、

$$\begin{aligned} h_2 &= 0.590 \pm 0.047, \quad l_2 = 0.088 \pm 0.012, \\ a \frac{dH_2(a)}{dr} &= -1.475 \pm 0.025, \quad a \frac{dL_2(a)}{dr} = -0.680 \pm 0.049. \end{aligned}$$

を得る。この値は著者が一部の観測値を使って求めた値にくらべると可成り大きい値である。しかし竹内均その他^(15, 16, 17, 27)の値には余程近い値になっている。例えば最近の竹内均⁽²⁸⁾の値は $h_2 = 0.592$, $l_2 = 0.076$ と発表されている。地殻の異方性の著しいときはひずみやすい方向にはより大きく、ひずみにくい方向にはより小さくなるから主ひずみの方向が片寄るだけでなく、振巾も変化するはずで、従って l_2 の値は h_2 に対して比較的により大きく求められるはずであるが未だこれを議論する迄には至らない、しかし異方性の方向の補正ができ、このために、地球モデルからの計算値に接近する迄になったことは大きな収穫であった。

また潮汐変位を地球を原点とする直角坐標に関して

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = F_i(r) \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} W_i + G_i(r) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} W_i$$

の形で与えると、1日潮の東西成分は

$$e_{\phi\phi}(a) = G_2(a)W_2$$

で与えられる。これから $G_2(a)$ を求めると

$$G_2(a) = 0.74 \times 10^{-12}$$

が求められる。

3. 潮汐傾斜の観測

逢坂山では1947年12月からスーパーインヴァール製の水平振子型傾斜計による土地傾斜の観測が行なわれており、1960年からは東西と南北成分の傾斜変化の観測を3点で続けている。また1962年には長さ60mの自記水管傾斜計⁽²⁹⁾が設置され、1964年から連続観測を行なっている。これらの観測の水平振子型傾斜計の観

測の初期の1ヶ年分と、水管傾斜計の2ヶ月間の観測の解析を行なった。

a) 水平振子型傾斜計

使用計器：スーパーインヴァール製水平振子型傾斜計，東西成分及び南北成分。

解析期間：1948年1月15日より1ヶ年間

期間中感度：0.0111~0.0166"/mm,

解析方法：改正 Darwin 法

解析値：

$$M_2\text{—潮} \begin{cases} W\text{—傾斜} & 0.0028''\cos(2t-64.2^\circ), \\ N\text{—傾斜} & 0.0013''\cos(2t-60.9^\circ), \end{cases}$$

$$O_1\text{—潮} \begin{cases} W\text{—傾斜} & 0.0011''\cos(t-65.8^\circ), \\ N\text{—傾斜} & 0.0025''\cos(t-352.6^\circ). \end{cases}$$

此の期間は感度が比較的低くまた、当時は室温の管理があまり良好でなかったため、高い精度の値は期待できないようであるので直接項の解析はもう少し後の機会に行ないたい。

b) 水管傾斜計 此の水管傾斜計は管の両端に内径約4mm長さ約20cmの細管を20数本を束にして作ったダンパーと、浮きの中に水銀のダンパーが取り付けられている。記録は印画紙を使用している。

使用計器：自記水管傾斜計，

観測方向：N38°E，

長さ：60m，

解析期間Ⅰ：1965年8月4日より1ヶ月，

期間感度：0.00173"/mm，

解析値：N38°E 傾斜

$$M_2\text{—潮} \quad 0.00125''\cos(2t-281.7^\circ),$$

$$O_1\text{—潮} \quad 0.00282''\cos(t-353.8^\circ).$$

$$O_1/M_2=2.27.$$

解析期間Ⅱ：1966年1月13日より1ヶ月，

期間感度：0.00346"/mm，

解析値：N38°E 傾斜，

$$M_2\text{—潮} \quad 0.00194''\cos(2t-286.4^\circ),$$

$$O_1\text{—潮} \quad 0.00435''\cos(t-347.8^\circ).$$

$$O_1/M_2=2.24.$$

この水管傾斜計の観測値を西村英一²⁶⁾が上賀茂(135°42'E, 35°02'N)の記録を使って求めた値と比較すると

西村の結果

使用計器：石本式シリカ傾斜計，N45°W成分及びS45°W成分，

解析期間：1939年5月より6ヶ月，

期間感度：0.004"/mm，

解析値：N38°E 傾斜に合成

$$M_2\text{—潮} \quad 0.00233''\cos(2t-299.7^\circ),$$

$$O_1\text{—潮} \quad 0.00409''\cos(t-354.8^\circ).$$

$$O_1/M_2=1.75.$$

此等の値は振巾，位相とも大体一致している。さらに細かく見ると，水管傾斜計で求めた振巾比 O_1/M_2 の方が水平振子で求めたものよりも可成り大きい。観測点はほぼ同一点と見做すことができ，またその観測

方向に一応の検当を加える必要があるが、恐らく水管傾斜計の観測には地球潮汐成分以外の一日周期の変化が重なっているのではないかと思われる節がある。しかし逢坂山で水平振子を使って求めた結果も O_1/M_2 の値が大きいに思われるので土地の傾斜そのものの中にも原因があるのかもしれない。

また志田,²⁷⁾松山が上賀茂について計算した海洋潮汐による荷重傾斜は N38°E 方向では

$$M_2\text{-潮 } 0.00455''\cos(2t-31.0^\circ)$$

であるこの値を水管傾斜計の観測値から引き去ると、天体による直接項として

$$M_2\text{-潮 } 0.00487''\cos(2t-224.8^\circ)$$

を得る。これから Diminishing Factor および位相の遅れとして

$$D=0.54, \quad \Delta\kappa=-18.6^\circ$$

が得られる。この値は地球モデルから数値計算されている値 $D_{theo.}=0.688$ よりは随分小さい値である。しかし海洋項の精度の問題があるので立入った議論はできない。

4. Rotatiometer による観測

今 Fig. 4 のように2枚の板を x 軸に平行におき、その2枚の板の外側の一端を堅く地面に固定して、2本の片持梁を作る。このとき2本の平行な梁の間隔 y_0 は梁の長さ L に比較して充分狭くする。比較的狭い地域では変形は一樣と考えられるから二本の梁は常に平行で、その間隔の変化を $2\Delta y$ 、梁の長さを L とすると $\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\Delta y}{L}$ で与えられる。同様に2本の梁を y 軸に平行に並べると、その間隔の変化から $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\Delta x}{L}$ が求められる。この2つの量を組合せると、ずりのひずみ $e_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ 、廻転 $2\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ が求められる。同様に他の4個の測定量から $e_{yz}, e_{zx}, \omega_y, \omega_x$ が求められる。

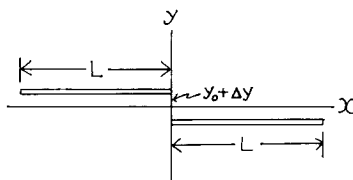


Fig. 4

特に起潮力ポテンシャル W_t によつては

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} &= \sum_i \frac{l_i}{ag \sin \theta} \left(\frac{\partial^2 W_t}{\partial \theta \partial \phi} - \frac{\partial W_t}{\partial \phi} \cot \theta \right), \\ \frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial z} &= \sum_i \left(-\frac{l_i - h_i}{ag \sin \theta} \frac{\partial W_t}{\partial \phi} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial w}{\partial x} &= \sum_i \left(\frac{l_i - h_i}{ag} \frac{\partial W_t}{\partial \theta} \right), \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

これから

$$\left. \begin{aligned} e_{\theta\phi} &= \sum_i \frac{2l_i}{ag \sin \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} - \cot \theta \right) \frac{\partial W_t}{\partial \phi}, \\ e_{r\theta} = e_{r\phi} = \omega_r &= 0, \\ \omega_\theta &= \sum_i \left(-\frac{l_i - h_i}{ag \sin \theta} \frac{\partial W_t}{\partial \phi} \right), \\ \omega_\phi &= \sum_i \left(\frac{l_i - h_i}{ag} \frac{\partial W_t}{\partial \theta} \right). \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

荷重潮汐も一般には(5),(6)と同じ型で与えられるが、点荷重 P による地表のひずみは直角坐標で表わすと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v'}{\partial x} = \frac{\partial u'}{\partial y} &= -\frac{P}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{2xy}{r^4}, \\ \frac{\partial w'}{\partial y} = -\frac{\partial v'}{\partial z} &= -\frac{P(\lambda+2\mu)}{4\pi\mu(\lambda+\mu)} \frac{y}{r^3}, \\ \frac{\partial u'}{\partial z} = -\frac{\partial w'}{\partial x} &= \frac{P(\lambda+2\mu)}{4\pi\mu(\lambda+\mu)} \frac{x}{r^3}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

従って

$$\left. \begin{aligned} \omega'_{xx} &= -\frac{P}{4\pi} \left[\frac{\lambda+2\mu}{\mu(\lambda+\mu)} \right] \frac{y}{r^3}, \\ \omega'_{yy} &= \frac{P}{4\pi} \left[\frac{\lambda+2\mu}{\mu(\lambda+\mu)} \right] \frac{x}{r^3}, \\ e'_{xy} &= \frac{P}{\pi(\lambda+\mu)} \frac{xy}{r^4}, \\ \omega'_{zz} = e'_{yz} = e'_{zx} &= 0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

である。

地球潮汐のローティション成分は 10^{-9} の桁であるので $10^{-9}/\text{mm}$ の感度のローティションメーターを試作して観測を始めた。長さ 2m, 巾 6cm, 厚さ 2mm のスーパーインヴァールの枚を 4 枚ずつつないで長さ 8m の 2 枚の板を作り, それぞれの一端には別に 6m の長さの板を作って, Fig. 5 のように長さ約 20cm の金具で梯子状に取付け板状の方向に曲り難くする。また梯子状でない先端部には直径 1cm のスーパーインヴァールの丸棒を固着 (背負わす) させて板が垂直方向にたわまないようにした。そうしてこの 2 本の腕をそれぞれ Fig. 5 のように長さ約 16m の基線の両側に一本ずつ堅く固定して 2 本の片持梁を作る。

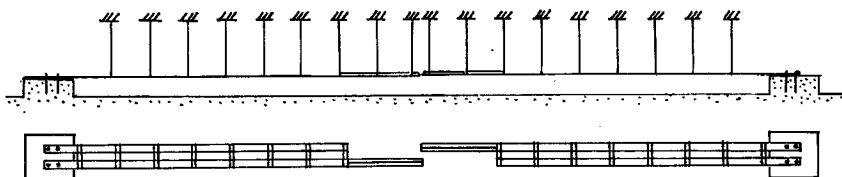


Fig. 5

なおこの平行な片持梁の間隔は約 6cm で先端部は約 8cm 行き違っている。それぞれの梁は間隔約 1.5 m 毎に高さ約 60cm の所から吊下げられている。そうしてそれぞれの梁の自由端にはそれぞれ間隔微調整装置と拡大装置としての水平振子を取り付けられていて, 2 本の梁の間隔を約 30000 倍に拡大記録される。なおこの倍率は振子の周期を調整することによって $5 \times 10^3 \sim 10^5$ の範囲の感度調節が可能である。現在振子の周期約 6 秒, 感度約 $2 \times 10^{-9}/\text{mm}$ で観測を行なっている。此のローティションメーターの観測は 1966 年 2 月設置されてから約 3 ヶ月装置改良のための予備観測を行ない 5 月頃から定常観測が行なわれるようになった。この観測記録には不規則な変化がやや多く, その解析にはなお多少の困難がある。不規則な記象の原因には, 梁の水平方向の基本振動周期は約 1 秒であるが更に短くする必要があるようである。また梁が組立構造になっておりそれ自身応力の状態にあり, それが温度変化の影響を受けること。また観測室の形が複雑な構造をしており, 付近のせん断ひずみが不規則であって, 直線ひずみの場合よりも平均的な変化になるのに, より長いスパンを必要とすること等が考えられる。現在までの観測から最も不規則変化の少いときの記録を Photo. 1 に示す。これは x 軸を $N38^\circ W$ 方向にとってあって記録の上が正の変化を示す。

今志田常数 l_2 の値を 0.05 として計算した $\partial u_n / \partial \xi$ (但し u_n は $N38^\circ E$ 方向の潮汐変位で, ξ は $N38^\circ E$ 方向のベクトル) の値は

$$M_2 = 0.251 \times 10^{-8} \cos(2t - 347.9^\circ),$$

$$O_1 = 0.079 \times 10^{-8} \cos(t - 161.4^\circ).$$

となる。たまたま **Photo. 3** の記録は6月3日の満月の前後の記録であるが、この記録からわかるように6月3日の午前0時頃に半日潮は正の極大を示している。またその振幅も 10^{-9} の桁であるから、その位相振幅ともに計算値とはほぼ一致している。

5. ま と め

1947年から逢坂山観測所で伸縮計、水平振子型傾斜計、水管傾斜計、ローティンションメーターを用いて地球潮汐の観測を行なって、その記録の一部の解析を行ない、次のような結果を得た。

(1) 直線ひずみの観測は H—59型、V—59型高感度伸縮計の考案により常時 $10^{-9}/\text{mm}$ の感度で観測が行なわれるようになった。これらの観測の約50ヶ月の記録を解析して、潮汐ひずみの分値を求めた。この結果は水平の最大ひずみの方向は M_2 潮では S方向から $S57^\circ E$ 方向に片寄り、 O_1 潮では E方向から $S49^\circ E$ 方向に片寄っており、どちらも NW—SE 方向に大きい伸長が起こることがわかった。この現象を地殻の異方体——海陸分布、層構造、地殻の六方晶形的性質で説明を試みてその可能性を明らかにした。またこの異方性を考慮に入れて、地球の潮汐常数（ラブ常数、志田常数）を計算した。この結果は Gutenberg 等の地球模型から数値計算を行なって求められている値に極く接近した値が得られた。

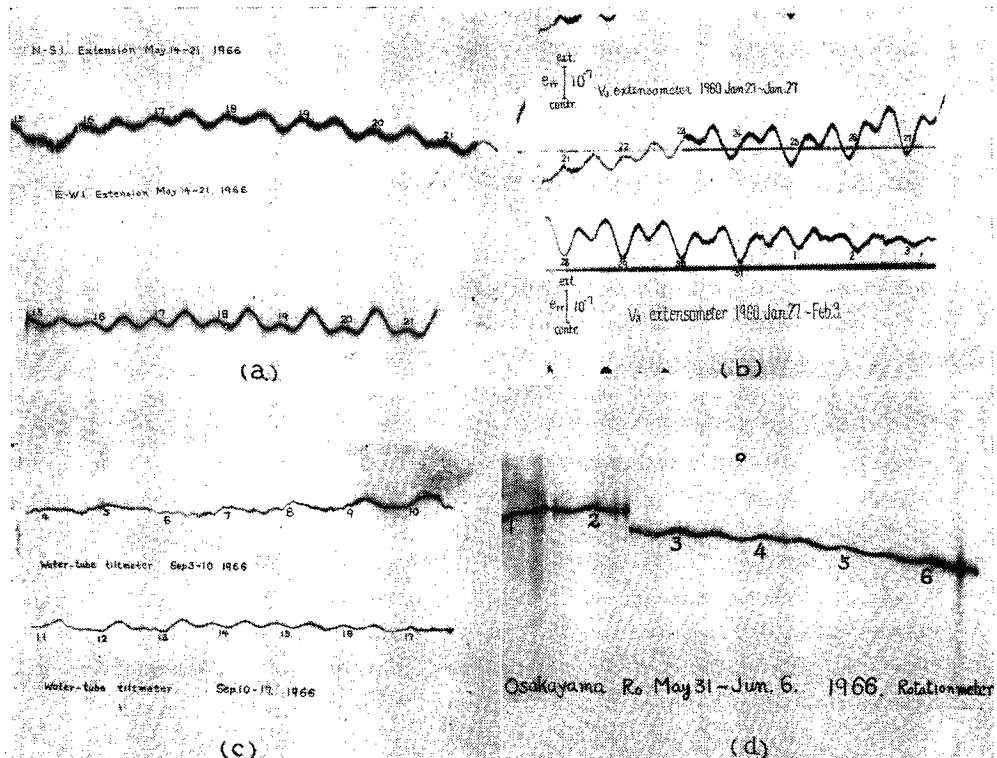


Photo. 1 Observing records of the tidal strains, (a) NS—extensional component and EW—extensional component with H—59—C type's extensometers, (b) vertical extensional component with V—59—B type's extensometer, (c) $N38^\circ E$ —tilt with water-tube tiltmeter, and (d) $\frac{\partial u_\eta}{\partial \xi}$ -component in $N38^\circ E$ direction with rotationmeter.

(2) 水平振子型傾斜計の観測1ヶ年の解析と、水管傾斜計の観測2ヶ月の解析を行なって傾斜潮汐の常数を求めた。水管傾斜計の観測結果は西村英一が上賀茂の観測から求めた値にほぼ近い値が求められた。しかし振幅比 O_1/M_2 は30~50%大きい値を示した。また水管傾斜計の観測による減少係数Dは0.54で非常に小さい値であった。

(3) ローティションメーターを試作して、 $2 \times 10^{-9}/\text{mm}$ の感度で日常観測を行なうことに成功した。これで観測された $\partial u_T / \partial t$ の値は理論値とほぼ一致すること、伸縮計の観測から求められる結果と一致することが確かめられた。

6. 謝 辞

此の研究に関して、計器の製作、設置に協力頂いた森本喜一郎、多中勝美、藤井伸蔵、江頭庸夫の諸氏、また解析計算に助力頂いた小沢圃子、清水美佐子、木村千恵の諸氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Mline, J. "The relative motion of neighbouring points of ground", Transactions of the Seismological Society of Japan, vol. 12 (1888), pp.63-66.
- 2) Oddone, E. "Ricerche strumentali in sismometria con apparati non pendolari", Bollettina della Società de Sismologie Italiana, No.6, (1900), pp.3-21.
- 3) Takahashi, R. "A new extensometer for measuring crustal deformation", Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo University, vol. 11, (1934), pp.760-775.
- 4) Benioff, H. "A linear strain seismograph, Bulletin of Seismological Society of America, vol. 25, (1935), pp.283-309.
- 5) Sassa, K., Ozawa, I. and Yoshikawa, S., "Observation of tidal strain of the earth", Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University Bulletin, No.3, pp.1-3.
- 6) Hagiwara, T., Rikitake, T., Kasahara, K. and Yamada, J., "Observations of the deformation of the earth surface at Aburatsubo, Miura Peninsula, part III.", Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo University, vol. 29, pp.557-561.
- 7) 小沢泉夫, 地球の潮汐ひずみの観測, 測地学会誌, 第2巻 (1955), pp.54-58.
- 8) 小沢泉夫, 傾斜計を拡大装置に使った高感度伸縮計とそれによる土地のひずみの観測, 測地学会誌, 第6巻 (1960), pp.1-5.
- 9) Takada, M., "On the observing instruments and telemetrical devices of extensometer and tiltmeters at Ide Observatory", Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University, Bulletin, No.27, (1959), pp.1-27.
- 10) 藤原俊郎, 体積地震計について, 昭和32年5月15日, 地震学会講演会で発表.
- 11) Tanaka, T., "On the extensometer of variable capacitor type", Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, vol. 15, part 3, No.100, (1959), pp.154-162.
- 12) Ozawa, I., "On the elastic strain of the ground in earth tides", Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University, Bulletin, No.15, (1957), pp.1-36.
- 13) 小沢泉夫, チリ津波による土地のひずみの観測, 京都大学防災研究所年報, 第4号 (1960), pp.36-44.
- 14) Ozawa, I. and Eto, T., "On the observations of the long period's oscillations of the earth by means of the extensometers and the water-tube tiltmeter". Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University, vol. 15, part 2, No.93, (1965), pp.43-58.

- 15) Takeuchi, H., "Theoretical study of the earth tide", Transactions of the American Geophysical Union, vol. 31, pp.357—376.
- 16) Logman, I. M., "A Green's function for determining the deformation of the earth under surface mass loads", Journal of Geophysical Research, vol. 68. pp.485—496.
- 17) Alterman, Z., Jarosch, H. and Pekeris, C.L., "Oscillations of the earth", Proceeding of Royal Society, A, vol. 252, No.1268, (1965), pp.80—95.
- 18) Nihsumura, E., "On the earth tide", Transactions of the American Geophysical Union, vol. 31, pp.357—376.
- 19) Melchior, P., "The earth tides, Pergamon Press, (1965).
- 20) Love, A.E.H., "The yielding of the earth to disturbing forces", Proceeding of the Royal Society of London, vol. 82, (1909), pp.73—88.
Shida, T. and Matsuyama, M., "Change of plumb line referred to the axis of the earth as found from the result of the international latitude observation", Memoir of College of Science and Engineering, Kyoto University, vol. 6, (1912), pp.85—108.
- 21) 例えば
Schweydar, W., "Harmonische Analyse der Lotstörungen durch Sonne und Mond", Veröffentlichung des Königlich Preussischen Geodätischen Institutes, Neue Folge No.59, (1914), pp.1—72.
- 22) Pertzev, B.P., "On the calculation of the drift curve in observations of bodily tides", Bulletin d'Informations marées, Terrstes, No.5, (1957), pp.71—72.
- 23) 小沢泉夫, 読み取り時間を細かくした地球潮汐の解析, 測地学会誌, 第9巻, (1963), pp.14—21.
- 24) Doodson, A.T., "The analysis of tidal observations for 29 days", International Hydrographical Review, (1953).
- 25) Suthons, C.T., "The semi-graphic method of harmonic analysis of tidal observation extending over about one month", Communications de l'Observatoire Royal de Belgique, N°.142, Géophysique, N°47, (1958), pp.140—160.
- 26) 西村英一, 地球潮汐について, 地球物理, 第5巻, (1941) pp.10—32.
- 27) Molodenskiy, M.S., "Elastic tides, free nutation and some questions relating to the earth's structure", Tr. Geofiz. in-ta Akad. Nauk. USSR, Sb. Statey, No.19, (1953).146.
- 28) Takeuchi, K. and Saito, M., and Kobayasi, N., "Statical Deformations and free oscillations of a model earth", Journal of Geophysical Research, vol. 67, (1962), pp.1141—1154.
- 29) 江頭庸夫, 自記水管傾斜計, 京都大学防災研究所年報, 第8号, (1960), pp.59—69.