

紀州鉦山における地球潮汐ひずみの観測

小 沢 泉 夫

OBSERVATIONS OF THE EARTH TIDAL STRAINS AT KISHU MINE

By *Izuo OZAWA*

Synopsis

The observations of the earth tidal strains in five directions have been performed with extensometers at Kishu mine. These tidal components M_2 , O_1 and so on have been analysed, and the tidal strain elements have been calculated.

The regional anisotropy of the crust in Kii Peninsula has been researched by use of weight function method, and it has been compared with the anisotropy of the Japan Island obtained from the tidal observations at Osakayama.

1. 序

紀州鉦山では傾斜計による地殻変動の観測は佐々憲三、西村英一博士らによりかなり以前から大嶮鉦区で行われていた。その後 1952 年の吉野地震の起こる少し前から湯の口鉦区に観測室が移され、吉野地震の後しばらくしてから観測が中休みの状態にあった。著者は 1955 年に湯の口鉦区の傾斜計観測を復活し、また、ワイヤーとつるまきばねを使った伸縮計¹⁾を同所に据えつけて観測を紀州鉦業所に委託した。それからつきつきと観測方向を変えて観測を行ない、現在はスーパーインバールの棒の定尺を使い、振子型の拡大装置を持つ H-59 型伸縮計²⁾で東西と南北方向の観測を委託している。この論文では 1955 年以降著者が委託した伸縮計による地球潮汐ひずみの観測結果について総括し、逢坂山で行なっている結果³⁾と比較して見た。

この論文で論議を試みようとしたことは第一には面積ひずみや体積ひずみは海水の昇降によって生ずる荷重潮汐の影響は海底の勾配のないときは理論通り無視してもよいかどうかということ。第二には地殻は弾性論的に水平方向に等方と考えてよいものかどうかということである。第一の場合、荷重潮汐の面積ひずみあるいは体積ひずみが 0 に等しいという関係が現実に成立つならばその後にはこれらの観測値の位相の遅れの原因説明の問題が控えている⁴⁾。第二の問題の場合、日本本州あるいは紀伊半島の地殻構造の異常性の問題が浮かんでくる。

2. 観測所付近の地勢

紀州鉦山は和歌山、三重、奈良の三県の県境付近、態野川の支流北上川の沿岸瀨峡の近くにある。この付近は紀伊半島の南東の肩の部分に当たる。付近には瀨峡のような峡谷が発達しており、また典型的な段々畑がある。この段々畑の中に下から湧き出したような大きな岩が露出している。付近の地層は古第三系と流紋岩—石英安山岩の地層にまたがっている。観測室は初めの期間は粘板岩の地層に置かれ、現在は砂岩より成る地層の所に置かれている。観測点から最も近い海は態野灘で約 16 km である。参考迄に観測点を取り巻く検潮所の海洋潮汐常数は次表の通り⁵⁾である。

この表によれば海洋潮汐の半日潮、1日潮、ともに位相は 180° に近く海洋潮汐の地殻に及ぼす影響の有無の判断を迷わし易い地方に当たっている。

Table 1 Constants of oceanic tide near Kishu.

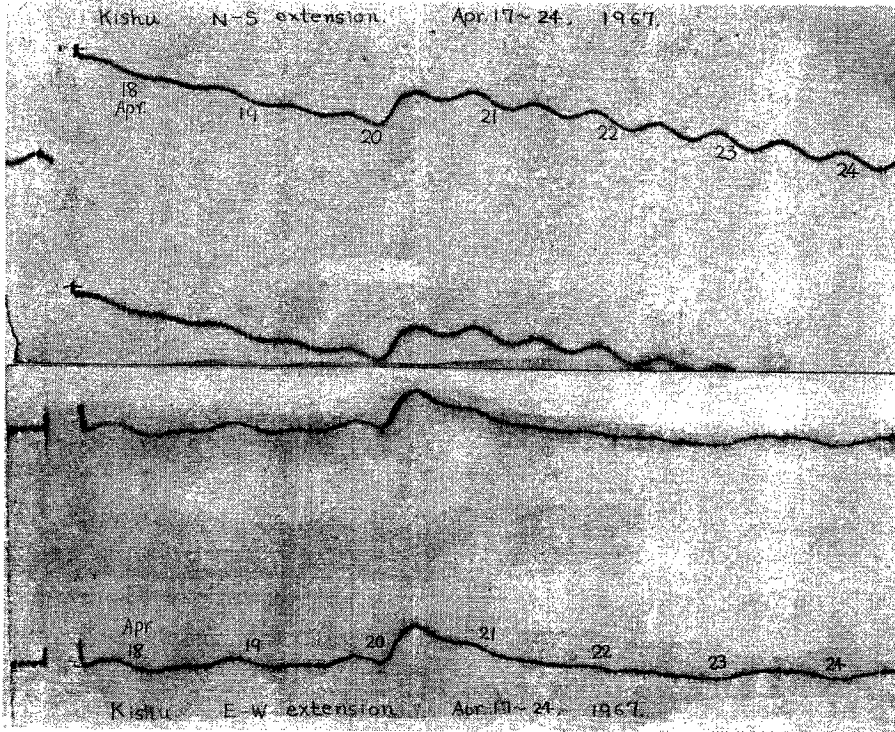
Port	K ₁		K ₂		M ₂		O ₁		P ₁		S ₂	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
Component Tide	cm		cm		cm		cm		cm		cm	
Nagoya	23	182°			66	178°	18	168°			29	205°
Yokkaichi	24	166	8	204°	65	176	17	177	8	166°	29	204
Tsu	24	186			63	179	19	171			29	208
Toba	22.6	189.1	7.0	198.9	53.4	177.8	17.4	167.1	7.9	186.2	24.5	205.1
Matoya	19	172	5	199	43	170	16	170	6	172	20	199
Agowan	21	170	5	194	48	185	16	171	7	170	20	194
Gokasho	20	186			45	166	17	165			21	190
Owase	27	186			45	170	18	165			20	194
Katsuura	23	185			46	170	17	162			18	194
Uragami	21	185			47	171	17	164			20	201
Oshima	23	186			46	173	16	165			21	198
Kushimoto	21.9	187.9	5.7	194.9	45.7	175.3	16.7	166.7	7.5	182.8	20.5	198.4
Susami	26	199			47	176	18	179			23	197
Tanabe	22	190			51	171	16	169			21	198
Gobo	22	188			48	172	18	174			22	195
Wakanoura	23	189	5	225	43	185	17	165	8	189	21	225
Shimotsu	24.2	191.4	5.9	204.5	45.6	185.0	18.2	171.0	7.7	191.1	21.8	208.1
Fukushimaura	23.1	195.2	5.7	205.2	44.2	189.6	17.5	171.8	7.0	190.4	21.0	211.5
Togashima	25.3	201.1	5.7	212.0	38.8	192.5	18.7	181.9	8.4	204.2	19.8	215.4
Yura	22.9	205.7	4.4	211.0	32.9	190.5	17.9	182.3	6.7	201.4	17.0	214.3
Sumoto	27	214			35	199	18	186			16	238
Osaka	26.1	22.7	4.6	221.5	30.7	222.7	19.5	181.1	8.3	197.5	17.9	228.2
Kobe	25.6	204.6	4.5	229.5	30.5	213.0	19.2	181.7	8.0	200.2	17.3	229.2
Akashi	28.7	221.6	2.9	253.8	18.3	250.1	21.3	198.2	9.5	214.2	11.9	245.2

海底の勾配は約 7 km 沖合までは 0.014, 7 km~11 km は 0.130, 11 km~17 km は 0.077, 17 km~25 km は 0.147, それ以遠はほとんど平坦に近い。従って海底の勾配の影響があったとしても荷重潮汐の 10% 以下であろう。

3. 観 測

最初の観測は 1955 年 3 月。地表から約 130 m の粘板岩層中で、スーパーインヴァールの弛り針金とつまきばねと振れ振動子を使った写真記録方式の伸縮計を用いた。基線長は 9 m, 測線方向は N79.5°W, 感度は 1.62×10^{-8} /mm で行なった。1955 年 9 月からは地表からの深さ約 110 m の砂岩層の中でほぼ同じ型の伸縮計を用いた。N60°E 方向と N30°W 方向の 2 成分, それぞれの基線長は 7.53 m と 4.54 m であった。その後 1966 年 3 月より同じ場所で E 方向と N 方向の 2 成分の観測を始め現在に到っている。E 方向の基線長は 11.07 m, 方向は N 4.90 m である。使用した伸縮計はスーパーインヴァール棒を定尺とし, 定足の先と定点との間に現われる相対変位は一たん傾斜変化に変換して, その傾斜変化を水平振子で拡大し, 写真記録する方式のもので, H-59-C 型と呼んでいるものである。感度は広い範囲にわたって調整可能であり, 10^{-10} /mm 程度の感度が得られ, 動作は極めて安定している。

観測点の位置は 135°53.4'E, 33°51.7'N. である。またこれらの日常観測は石原産業株式会社に依頼し,



採鉾課あるいは生産課の探査係の諸の労をわずらわした。Table 2 にこれらの観測記録を解析した結果を示す。また Table 3 は Table 2 の観測値からひずみの分値を求めたものである。なお、strain elements を求める場合解析月数に比例した重みを付して、最小二乗法を用いて計算した。これらの観測値には極く意地の悪い見方をすると、観測計器の感度、計器の設置方法に慎重さを加える余地があるように思う。この観測結果から明らかなのは東西方向の M_2 成分が極めて小さいことである。位相の遅れは南北方向で 350.1° で東西方向に近づくに従って増大し振幅は減少する。しかし面積ひずみを計算すると位相は 355.8° で位相の進退は非常に小さくなっている。一日潮の場合も面積ひずみの位相は 13.2° でやはり位相の進退は比較的小さい。

また、短周期ノイズの出方は南北方向はほとんどなく、東西方向に著しい、一方 2~3 日以上長周期の変動はむしろ逆に東西方向に小さく、南北方向に大きく、ノイズとその周期の出方は多くの木の枝や葉の出方のようにたがいがちが出る傾向がある。

解析に当って、記録の読取り値から潮汐変化を抽出する際に 25 時あるいは Pertsev 法の移動平均法を用いるけれども、1~数日にわたる大きい異常変化の現われたときはその部分だけ潮候曲線を前後の関係から推定して、もっともらしい平均曲線を引いて潮汐変化を抽出する方法を取っている。

4. 考 察

地球表面に海がないと考えたとき、仮りに Love 常数を 0.612、志田常数を $0.083^{(1)}$ としたときの予想される潮汐ひずみは緯度 $33^\circ 51.7' N$ の紀州では

$$e_{\theta\theta} = 1.375 \times 10^{-8} \cos 2t,$$

$$e_{\phi\phi} = 0.542 \times 10^{-8} \cos 2t,$$

Table 2 Analysed values of tidal component.

Direction of Observation	Epoch of Analysis	Analysed Months	Sensitivity /mm $\times 10^{-8}$	M_2		S_2		K_2		O_1		K_1		S_1	
				Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase
N79.5° E	1955. 4. 9.	1	1.62	0.063	32.9°					0.015	11.2°				
N30° W	1956. 2. 2.	1	1.22	1.271	331.1					0.714	19.1				
N60° E	1956. 2. 2.	1	1.27	0.710	44.2					0.687	347.7				
E	1966. 11. 24.	6	0.367 0.298	0.089	133.5	0.109	229.2°	0.027	26.2°	0.277	22.5	0.401	357.2°	0.097	348.2°
N	1961. 3. 11.	3	0.498	0.437	346.7					0.109	5.1				
N	1965. 5. 5.	2.5	1.256	0.600	353.6					0.241	6.9				
N	1967. 4. 15.	3.5	0.848	0.780	349.3	0.165	157.5			0.240	0.7			0.307	204.8

Table 3 Observed values of tidal strain elements.

Strain Element	M_2		O_1	
	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase	Amplitude $\times 10^{-8}$	Phase
$e_{\theta\theta}$	0.647	350.1°	0.214	3.0°
$e_{\phi\phi}$	0.085	124.3	0.281	20.9
$e_{\theta\phi}$	1.146	105.9	0.388	286.2
$e_{\theta\theta} + e_{\phi\phi}$	0.600	355.8	0.488	13.2
Main Strain cos-term	0.650	11.5	0.247	56.7
	-0.051	101.5	-0.178	326.7
Main Strain sin-term	0.501	50.1	-0.136	38.3
	-0.545	140.1	0.247	128.3

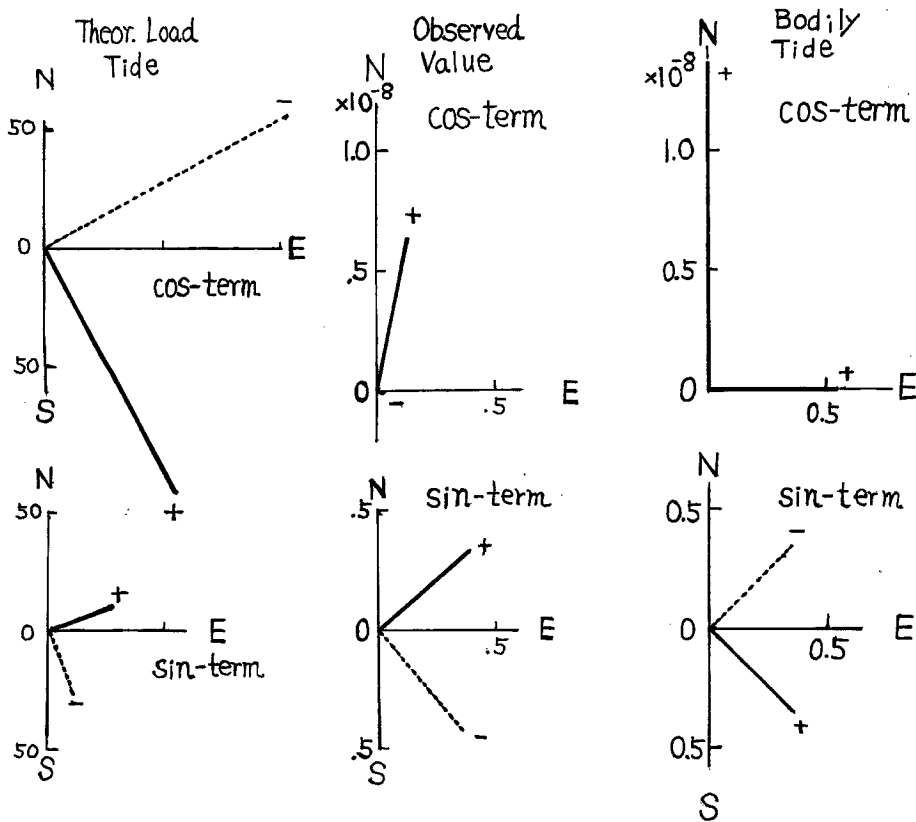
$$e_{\theta\theta} = -0.488 \times 10^{-8} \sin 2t.$$

と求められる。したがって \cos 項に関するひずみ楕円、すなわち正子および正午におけるひずみ楕円の主軸の方向は南北と東西で南北に大きく東西に小さい。また \sin 項に関するひずみ楕円、すなわち午前3時および午後3時におけるひずみ楕円の主軸の方向は $N45^\circ E-S45^\circ W$ と $N45^\circ W$ と $S45^\circ E$ 方向とで前者では収縮、後者では伸びである。この関係を Fig. 1 (a) の右の行に棒ベクトルで示した。同じようなことを観測値について行なったものを Fig. 1 (a) の中央の列に示した。すなわち、 $N11.5^\circ E$ の方向に $+0.650 \times 10^{-8}$ で、 $N101.5^\circ E$ の方向で非常に小さく -0.051×10^{-8} である。同様に左の列に海洋潮汐の影響を示した。海洋潮汐の影響の求め方としては観測値は最も近い海から 16 km 離れており、海底の勾配も大きくないので、また地殻の構造も明瞭ではないので等方質半無限遠弾性体として計算した。また海洋潮汐の計算範囲も目的とするものがひずみ分値間の比のみであるので観測点から 100 km 以内とした。この結果は

$$e_{\theta\theta}' = (32.15 \cos 2t - 11.09 \sin 2t) \frac{g}{4\pi(\lambda + \mu)},$$

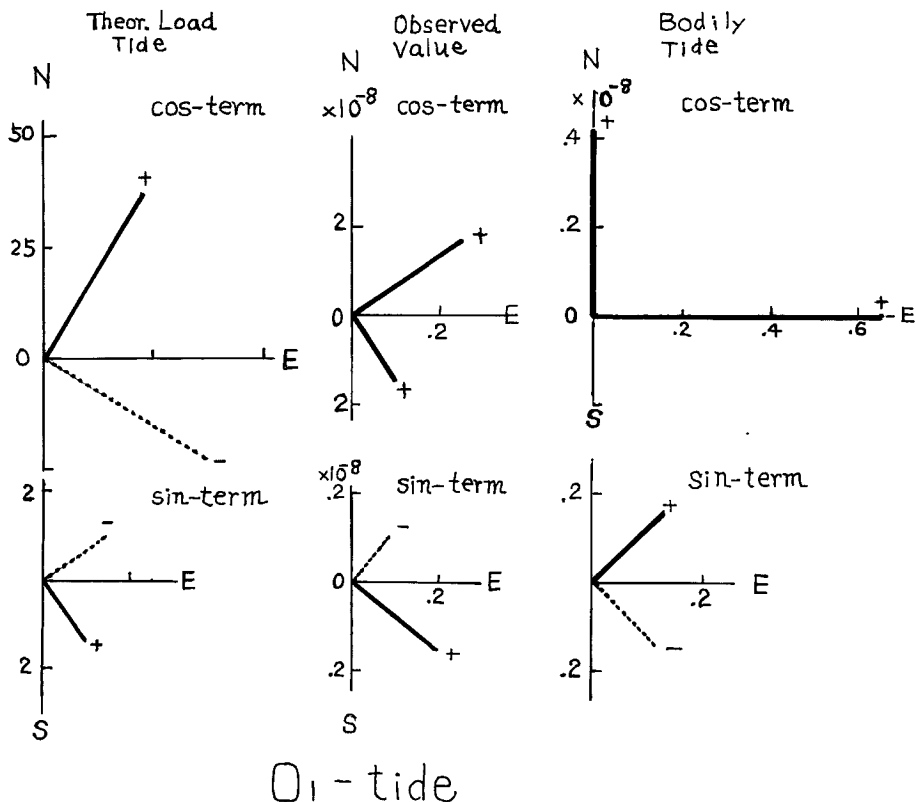
$$e_{\phi\phi}' = (-32.15 \cos 2t + 11.09 \sin 2t) \frac{g}{4\pi(\lambda + \mu)},$$

$$e_{\theta\phi}' = (-97.02 \cos 2t + 18.98 \sin 2t) \frac{g}{4\pi(\lambda + \mu)},$$



M_2 - tide

Fig. 1 (a) Main strains of M_2 -tide.



O_1 -tide

Fig. 1 (b) Main strains of O_1 -tide.

と求められ、主軸の方向は cos 項では $N61.84^\circ$ で $-58.20A$, $N151.84^\circ$ で $58.20A$, sin 項では $N69.75^\circ$ で $14.60A$, $N159.75^\circ$ で $-14.60A$ である。ただし A は $g/4\pi(\lambda+\mu)$ に比例する常数である。

同じ事を O_1 分潮について試みて、これを Fig. 1 (b) に示した。地球表面に海がないと考えたとき、すなわち Bodily Tide は

$$e_{\theta\theta} = 0.412 \times 10^{-8} \cos t,$$

$$e_{\phi\phi} = 0.656 \times 10^{-8} \cos t,$$

$$e_{\theta\phi} = 0.466 \times 10^{-8} \sin t.$$

海洋潮汐の影響、すなわち Load Tide は

$$e_{\theta\theta}' = (27.55 \cos t + 0.16 \sin t) \frac{g}{4\pi(\lambda+\mu)},$$

$$e_{\phi\phi}' = (-27.55 \cos t - 0.16 \sin t) \frac{g}{4\pi(\lambda+\mu)},$$

$$e_{\theta\phi}' = (65.82 \cos t - 3.20 \sin t) \frac{g}{4\pi(\lambda+\mu)}.$$

であって、主軸の方向は cos 項では $N31.30^\circ$ で $43.42A$, $N121.30^\circ$ で $-43.42A$, sin 項では $N54.65^\circ$ で $-1.68A$, $N144.65^\circ$ で $1.68A$ である。このようにして求めた結果を簡単な結論に集約することは困難であるので更に精度の高い資料が求められたときの準備の可能性として、

(i) M_2 分潮の $e_{\theta\theta}$ の観測値は極めて小さい (O_1 分潮では充分大きい)。故に海洋潮汐による影響は

Bodily Tide の分値とほとんど等しく、恐らく約 -0.5×10^{-8} であろう。

(ii) Bodily Tide の $e_{\theta\theta}, e_{\phi\phi}$ 分値には \sin 項はない筈である。これがすべて Load Tide である (異方性の場合は補正が必要)。と考えると M_2 分潮で

$$e_{\theta\theta} \text{ 分値で } -0.114 \times 10^{-8} = -11.09A = -11.09A_{\phi\phi},$$

$$e_{\phi\phi} \text{ 分値で } 0.070 \times 10^{-8} = 11.09A = 11.09A_{\phi\phi},$$

$e_{\theta\phi}$ 分値で、 \cos 項を用いて、 $-0.294 \times 10^{-8} = -97.02A_{\theta\phi}$ の関係が得られ、stress に比例する値と strain との比として、各方向あるいは各分値に対して

$$A_{\theta\theta} = 0.0103, \quad A_{\phi\phi} = 0.0063, \quad A_{\theta\phi} = 0.0030$$

を得る。同様に O_1 分潮に対しては

$$A_{\theta\theta} = 0.0198, \quad A_{\phi\phi} = -0.1998, \quad A_{\theta\phi} = 0.0017$$

が求められ、 O_1 分潮に対する $A_{\phi\phi}$ が何か別の原因として考慮外とすると $A_{\theta\theta}$ は $A_{\phi\phi}$ に対して約 40% すなわち南北方向に東西方向に比して 40% 伸縮し難い。また $A_{\theta\phi}$ が $A_{\theta\theta}, A_{\phi\phi}$ に対して 50~100% 小さいことは非常に上りを起こし易いことを示していると考えてよい。

(iii) 今海洋も含めたものを地殻であると見做し天体から受ける起潮力に対してどんな異方性を示すか一つの方法を試みる。今 Bodily Tide の方位分布を $f(\theta)$ 、観測されたひずみの方位分布を $F(\theta)$ とその両者は重み函数⁷⁾ $\varphi(\tau)$ を介して

$$F(\theta) = \int_0^{2\pi} \varphi(\tau) f(\theta + \tau) d\tau$$

で関係づけられるとすると、 $\varphi(\tau)$ を一種の異方性函数と見てもよいであろう。 $f(\theta), F(\theta)$ は一般につきのような型に書ける。

$$f(\theta) = e_{\theta\theta} \cos^2 \theta + e_{\phi\phi} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} e_{\theta\phi} \sin 2\theta = \frac{1}{2} \{ (e_{\theta\theta} + e_{\phi\phi}) + (e_{\theta\theta} - e_{\phi\phi}) \cos 2\theta + e_{\theta\phi} \sin 2\theta \} \equiv a + b \cos 2\theta + c \sin 2\theta,$$

$$F(\theta) = e_{\theta\theta}' \cos^2 \theta + e_{\phi\phi}' \sin^2 \theta + \frac{1}{2} e_{\theta\phi}' \sin 2\theta \equiv A + B \cos 2\theta + C \sin 2\theta,$$

また重み函数 $\varphi(\tau)$ は

$$\varphi(\tau) = \alpha_0 + \alpha_2 \cos 2\tau + \beta_2 \sin 2\tau = \alpha_0 + \sqrt{\alpha_2^2 + \beta_2^2} \cos \left(2\tau - \tan^{-1} \frac{\beta_2}{\alpha_2} \right)$$

これらの諸式から、この場合は

$$\alpha_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{a}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\pi} \frac{aA + bB}{a^2 + b^2}, \quad \beta_2 = \frac{1}{\pi} \frac{bA - aB}{a^2 + b^2}$$

となる。

いま、紀州の Bodily Tide と観測値とを用いて重み函数 $\varphi(\tau)$ を求めると

$$M_2 \text{ 分潮の } \cos \text{ 項に対して, } \varphi(\tau) = 0.050 + 0.291 \cos(2\tau - 337.3^\circ)$$

$$M_2 \text{ 分潮の } \sin \text{ 項に対して, } \varphi(\tau) = \infty + 0.682 \cos(2\tau - 349.9^\circ)$$

また

$$O_1 \text{ 分潮の } \cos \text{ 項に対して, } \varphi(\tau) = 0.140 + 0.157 \cos(2\tau - 66.6^\circ)$$

$$O_1 \text{ 分潮の } \sin \text{ 項に対して, } \varphi(\tau) = \infty + 0.300 \cos(2\tau - 164.4^\circ)$$

と求められる。ここに τ は等方性の場合の主軸の方向と観測される主軸の方向との間の角度とを見るならば M_2 分潮の場合 $10^\circ \sim 13^\circ$ 時計廻りに進んだ方向に偏った異方性が現われ、 O_1 分潮の場合 \cos 項の結果からは東西に最大ひずみが現われる筈のものがそれよりも 66.6° 進んだ方向すなわち南西方向に近い方向に最大方向が現われることを示しているのかも知れない。紀州と比較に逢坂山の結果について試みた値は

$$M_2 \text{ 分潮, } \cos \text{ 項に対し } \varphi(\tau) = 0.142 + 0.455 \cos(2\tau - 117.5^\circ),$$

$$O_1 \text{ 分潮 } \cos \text{ 項に対し } \varphi(\tau) = 0.159 + 2.291 \cos(2\tau - 101.7^\circ)$$

となり応力方向に対して $101.7^{\circ} \sim 117.5^{\circ}$ あるいは $-78.3^{\circ} \sim -62.5^{\circ}$ の偏りを示すことを示している。逢坂山の場合日本列島に対し直交する方向に伸縮し易い性質によるものでモビルレーヤーの存在あるいは地殻構造の異方性³⁾で説明されるであろう。また紀州の場合南北に伸びた紀伊半島にあるという地域の特徴が日本列島全体の特性の上に重なっている結果と思われる。更らに適確な結論については今後の観測とその研究によりたい。

結 語

終りに当たり、紀州で観測の御協力を頂いている。石原産業株式会社紀州鉱業所および同生産課の諸氏に心から御礼申し上げます。また観測器械の製作整備に当たられた森本喜一郎、多中勝美、藤井伸蔵、小林年夫の諸技官に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 小沢泉夫：伸縮計による地殻潮汐の観測，測地学会誌，2，昭 30，pp. 54-58.
- 2) 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，6，昭 35，pp. 1-5.
- 3) 小沢泉夫：逢坂山における地球潮汐の観測，第 2 報，京都大学防災研究所年報，10A，昭42. 3，pp. 63-75.
- 4) OZAWA, I., Observations of the Effect on the Tidal Strain of Torsional Type Deformation, Special Contributions of the Geophysical Institute, Kyoto University, No. 9, 1969, pp. 91-96.
- 5) Ogura, S., On the Tide of the Japanese Neighbouring Sea, Bulletin of Hydrographic Department Imperial Japanese Navy, Vol. 7, 1938.
- 6) Takeuchi, H. and L.E. Alsop, Comparison of Theoretical and Observational Expression for Elastic Strain of the Earth, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 55, 1965, pp. 153-163.
- 7) Tsuboi, C., On the Weight Functions, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Vol. 19, 1940, pp. 458-475.