

和歌山市大浦および秋葉山で観測された土地の 潮汐傾斜変化と海洋潮汐について

田 中 寅 夫

OCEAN TIDES AND TIDAL TILTINGS OF THE GROUND OBSERVED AT THE OURA AND AKIBASAN STATIONS, WAKAYAMA

By *Torao TANAKA*

Synopsis

Amplitudes and phases of eight principal tidal constituents of ground tilts observed at Oura and Akibasan in Wakayama City have been determined from one year's data. It is shown that the difference of tidal tilting diagrams at the two stations can not be explained by the difference of the loading effect of the ocean tides in the neighbouring sea calculated according to the theory of Boussinesq. Although there are many points which are uncertain, the discrepancy might be attributable to the existence of confined water.

1. ま え が き

傾斜計などで観測される土地の潮汐傾斜変化は、太陰・太陽の起潮力による地球の変形、いわゆる第1次項と、海洋潮汐に原因をもつ第2次項と呼ばれる傾斜変化よりなっている。第2次項は海洋潮汐による土地の撓曲による傾斜、海水の引力によって生じるポテンシャル面の変形および土地の撓曲によって生じる質量分布の変動に起因するポテンシャル面の変形に分けられる。この第2次項の、第1次項に対する大きさは、海洋に近い場所においてはとうてい無視できるものではなく、したがって第2次項を差引いて第1次項のみを求めようとする場合には海洋潮汐に関する正確な資料と、地球内部における弾性常数の分布を知ることが必要である。特に日本のように、四方を海に囲まれた地域においては、第1次項に相当する傾斜変化を第2次項から正確に分離することは、大洋中の潮汐資料の不足あるいは理論的取扱いの困難さからみて、まず絶望的であるといっても過言ではない。このようにわが国における地球潮汐の研究は海洋潮汐の影響を無視しては進めることができず、したがって、海洋潮汐による第2次項を推定するために、まず海洋潮汐の荷重による傾斜変化から地殻の剛性率を決定し、これにより第2次項を求めて、観測された結果からこれを差引いて diminishing factor を決定するということから始められた。志田¹⁾は上賀茂で観測された傾斜変化より地殻の有効剛性率を 5.9×10^{11} c.g.s. と推定し、同時に第1次項を決定して diminishing factor γ の値として 0.79 なる値を得たが、この研究はわが国における地球潮汐研究のさきがけであるのみならず、世界的に高く評価された研究であることは周知の通りである。続いて、高橋²⁾は旅順において、水平振子型傾斜計による観測から海洋潮汐を利用して地殻の剛性率を推定するとともに $\gamma=0.8$ なる値を得ている。

海洋潮汐の影響は海岸から遠くはなれた場所においてもなかなか減少しないことは理論の示す通りであるが、この困難をさけるため、西村³⁾は2点における潮汐傾斜変化の差をとることによって、その影響を近海域に限定できることに注目し、上賀茂と阿蘇における傾斜変化の差をとり、地殻の平均剛性率を求めて 11.7×10^{11} c.g.s. なる値を得た。さらに西村⁴⁾は海洋潮汐の影響をできる限り避けて第1次項を決定するべ

く、中共北東部の Barim において約 3 カ月間の傾斜観測を実施し、海洋潮汐の影響を補正して $\gamma=0.66_1$ なる値を得ている。

この様に、日本においては海洋潮汐の影響を取扱うのに Boussinesq の理論にもとづいた研究が主流をなしていたのに対し、西欧では R.H. Corkan⁵⁾ が各分潮における第 1 次項と第 2 次項の位相差に注目して第 2 次項の影響を見積る方法を発表し、これによって第 2 次項を差引くことを試みて以後、この方法による海洋潮汐の補正が好んで用いられてきたようである。

周知のごとく第 2 次世界大戦後の電子計算機の発達は地球潮汐における海洋潮汐の影響に関する研究にも大きな力となってきており、例えば I. M. Longman⁶⁾ の荷重による地球の変形理論、B. P. Pertsev^{7), 8)} の重力値あるいは地球表面の変形に及ぼす海洋潮汐の影響の研究、弾性球殻の変形理論の近海における海洋潮汐荷重による変形への応用⁹⁾ など、理論あるいは観測の両面から意欲的な研究がなされてきている。

筆者らは 1960 年より現在まで和歌山市大浦において、また同市秋葉山においては 1960 年より 65 年まで、水平振り型傾斜計および double bow-string 型伸縮計をもちいて地殻変動の連続観測を実施してきた¹⁰⁾。大浦および秋葉山観測所から最も近い海岸までの距離は、それぞれ約 500 m および 1 km であり、傾斜計、伸縮計に記録されている潮汐現象は近傍の海域における海洋潮汐の影響を大きく受けていると考えられるが、果してこれが実際に弾性論から導かれる海洋潮汐荷重による変動として矛盾なく説明できるものであるかどうかということは興味ある問題である。また西村¹¹⁾ が示したように、大浦と秋葉山における観測結果の差をとることにより、海洋潮汐荷重から地殻の極く表層の弾性常数を推定できる可能性もあり、この方法を更に発展させることができるならば、日本国内の他の地殻変動観測所における地球潮汐の解析結果との組み合わせをとることにより、地球潮汐の振動数領域における地殻の弾性常数あるいは地殻構造に関する情報が得られるものと考えられる。

本稿においては、まずさしあたって解析をおこなった両観測所の水平振り型傾斜計によって観測された潮汐傾斜変化に関する結果について述べ、海洋潮汐の影響について若干の検討をおこなった結果を報告する。

2. 資料および解析結果

大浦および秋葉山観測所の位置などについては Fig. 1 および Table 1 に、記録などに関する事項は Table 2 にまとめて示した。Fig. 2 には、この解析に使用した両観測所における記録の一部を示した。

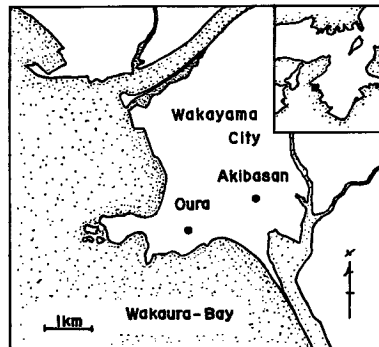


Fig. 1 Geographical situations of the stations, Oura and Akibasan.

Table 2 に見られるように秋葉山においては 4 台の傾斜計を同一コンクリート観測台上に設置して同時観測を実施しており、そのうち Aa, Ba で表わした 2 台の傾斜計と、大浦の 2 台の傾斜計には oil damper を付けている¹²⁾。

解析には、1960 年 8 月 1 日 00 時 00 分（以下日本標準時で表わす）から 1961 年 7 月 31 日 23 時 00 分ま

Table 1 Location and geographical situations.

Station	Oura	Akibasan
Location	34°11'.3 N 135°09'.5 E	34°11'.5 N 135°10'.4 E
Distance from the nearest sea	500 m	1000 m
Height from the sea level	50 m	5 m
Depth	5 m	10 m

Table 2 Description of instruments.

Station	Instrument	Azimuth	Sensitivity	Time mark	Recording speed	Mark
Oura	Tiltmeters (horizontal pendulum)	E 18° S S 18° W	0.007"/mm 0.005"/mm	every hour	30 mm/hour	A _o B _o
Akibasan	Tiltmeters (horizontal pendulum)	E 12° N W 12° S S 12° E N 12° W	0.004"/mm 0.007"/mm 0.004"/mm 0.007"/mm	every hour	30 mm/hour	A _a A' _a B _a B' _a

での1年間の資料をもちい、毎時の読取値を使用した。まず Pertsev の方法で drift を消去したのち、最小自乗法により主要8分潮 $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ および気象潮 S_1 の振幅と位相を決定した。Pertsev filter を適用する関係上、最小自乗法にかける期間は、上記の期間から前後 24 時間を除いた、1960年8月2日00時00分から61年7月30日23時00分までとした。さらに各傾斜成分共、降雨による scale out、停電その他の原因による欠測が含まれているため、12時間以上の欠測がある場合には、その期間を除いて解析をおこなった。この場合においてもやはり、Pertsev filter を適用している関係上、欠測の両端より、さらに20時間分については最小自乗法を適用しないこととした。その結果、最終的に解析をおこなった実日数は Table 3 に示す通りとなっている。Table 4 に得られた結果を示す。振幅としては、Pertsev filter の適用による振幅変化に対して中川¹³⁾ の与えた補正值を用いて補正を加えた結果が示してある。位相は、1960年8月1日00時00分を $t=0$ として分潮を $A \cos(\omega t - \varphi)$ と表わしたときの φ の値を角度で表わしており、大浦については E18°S および S18°W 方向、秋葉山については E12°N および S12°E 方向への傾斜が正となるようにとっている。Fig. 3 より Fig. 20 までには各分潮についての潮汐傾斜変化のベクトル図を示す。図中における数字は1960年8月1日00時からの平均太陽時を示している。また秋葉山観測所において4台の傾斜計は同一のコンクリート台上に並べられているが、そのうち中央に近い2台の傾斜計 A_a および B_a から求めた傾斜ベクトルを実線で、両端に近い傾斜計 A'_a および B'_a から求めたベクトルを破線で示した。本来ならば、両者は一致するべき筈のものであるが欠測などの原因により、分潮の振幅が小さくなるにつれて両者の相違は大きくなっている。最も差の小さい M_2 の場合で、振幅において $0''.0003$ 、位相において 5° のちがいが見られる。逆に S_2, P_1 、および S_1 には特に大きい相違が見られるが、これは気象要素の日周変化が、非常に局所的な変形を生ぜしめるため観測台そのものが変形していることによるものである。 S_2 は周期が12.000時間であるため日周変化の影響を大きく受けることは当然であり、また P_1 は振幅が小さく、かつ欠測もあるために、振幅の大きい K_1 の場合に較べて、24.000時間周期の日変化、すなわち S_1 との contamination が特に大きく現われてきているものと推定される。同様のことは、大浦における S_1 と

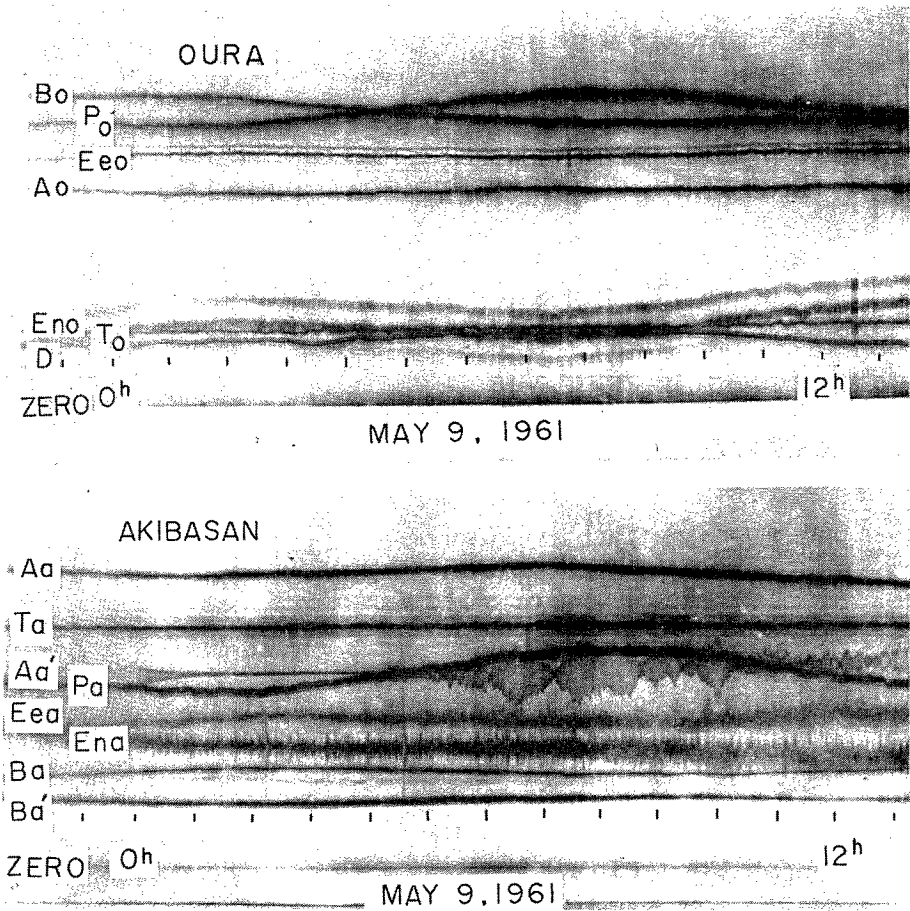


Fig. 2 Examples of the records at Oura and Akibasan.

Table 3 Number of days analyzed.

Mark of tiltmeter	Number of days
A _o	335
B _o	272
.....	
A _a	310
B _a	323
A _a '	248
B _a '	323

Table 4 Observed amplitudes and phases for each tidal constituent.

	A ₀		B ₀		A _a		A _a '		B _a		B _a '	
	+; E 18° S down		+; S 18° W down		+; E 12° N down		+; E 12° N down		+; S 12° E down		+; S 12° E down	
	Amp.	Phase	Amp.	Phase	Amp.	Phase	Amp.	Phase	Amp.	Phase	Amp.	Phase
M ₂	0.01216	188.0	0.00564	345.2	0.01718	189.4	0.01700	186.5	0.00941	20.5	0.00912	25.0
S ₂	0.00580	34.0	0.00863	114.4	0.00588	9.9	0.00669	330.6	0.00391	210.9	0.00477	222.2
N ₂	0.00230	130.4	0.00037	66.9	0.00359	130.4	0.00390	128.8	0.00174	320.5	0.00139	332.8
K ₂	0.00082	130.1	0.00120	7.5	0.00212	106.1	0.00200	99.5	0.00101	319.9	0.00085	359.5
K ₁	0.00628	159.7	0.00105	134.7	0.00702	137.0	0.00797	131.8	0.00596	334.1	0.00541	331.2
O ₁	0.00463	37.2	0.00105	174.3	0.00716	33.8	0.00723	36.4	0.00400	217.5	0.00404	213.9
Q ₁	0.00022	231.6	0.00070	326.5	0.00131	340.3	0.00095	354.6	0.00099	129.2	0.00176	152.9
P ₁	0.00184	223.2	0.00458	46.0	0.00207	224.7	0.00091	141.7	0.00246	41.8	0.00310	41.9
(S ₁)	0.00112	227.5	0.00887	59.3	0.01433	72.1	0.01876	50.3	0.00124	98.8	0.00345	55.1

Notes: Phase is the lag φ of the constituent represented by $A \cos(\omega t - \varphi)$ when the time origin $t=0$ is taken at 00^h 00^m, August 1, 1960 (JST).

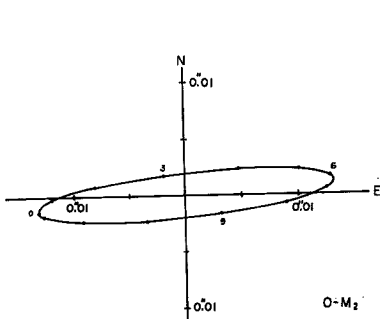


Fig. 3 Tilting diagram of M₂ constituent at Oura. The numerals along the curve show the mean solar time (hour) from the origin time, 00^h 00^m, Aug. 1, 1960 (JST).

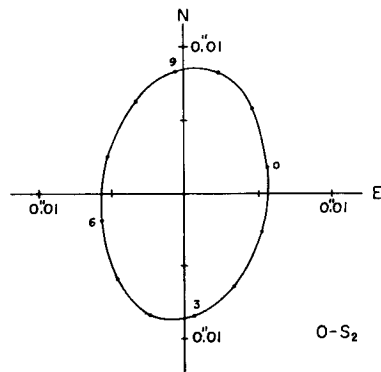


Fig. 4 Tilting diagram of S₂ at Oura.

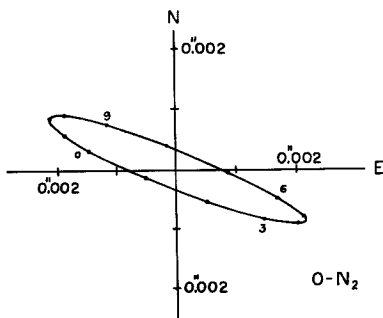


Fig. 5 Tilting diagram of N₂ at Oura.

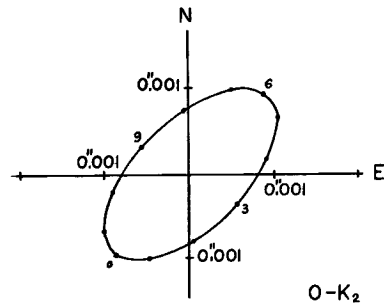


Fig. 6 Tilting diagram of K₂ at Oura.

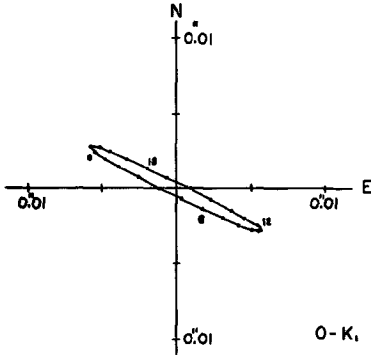


Fig. 7 Tilting diagram of K_1 at Oura.

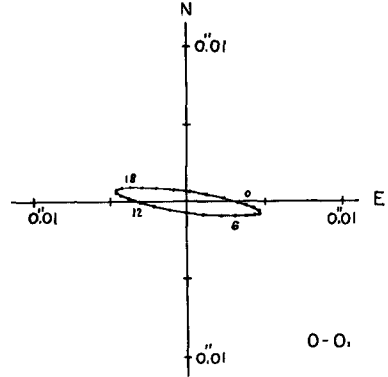


Fig. 8 Tilting diagram of O_1 at Oura.

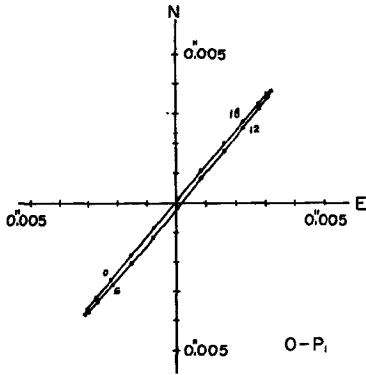


Fig. 9 Tilting diagram of P_1 at Oura.

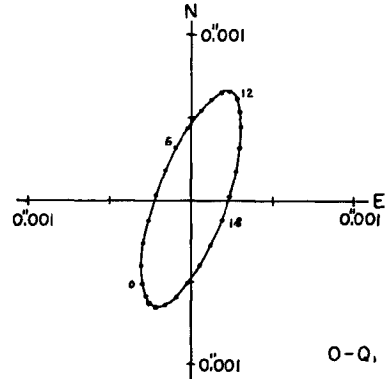


Fig. 10 Tilting diagram of Q_1 at Oura.

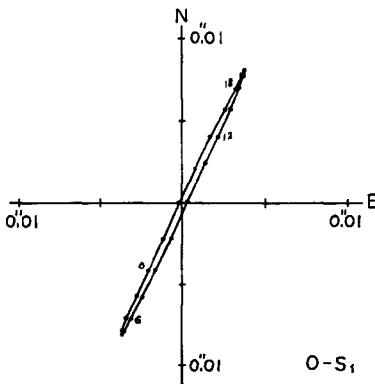


Fig. 11 Tilting diagram of S_1 (meteorological constituent) at Oura.

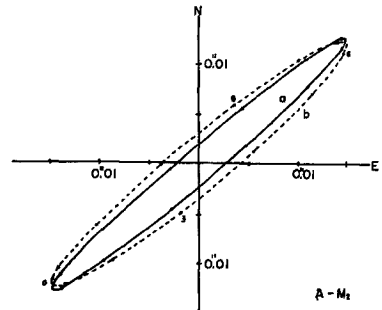


Fig. 12 Tilting diagrams of M_2 at Akibasan. The solid line is the tilting diagram synthesized by tiltgrams A_a and B_a , and dashed line by A_a' and B_a' .

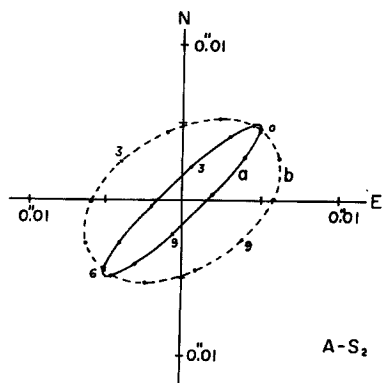


Fig. 13 Tilting diagrams of S_2 at Akibasan.

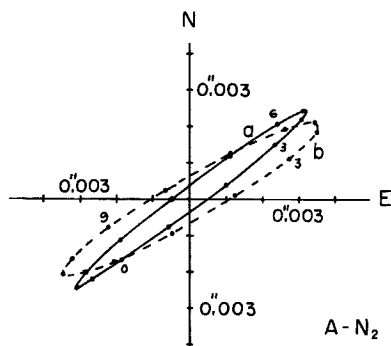


Fig. 14 Tilting diagrams of N_2 at Akibasan.

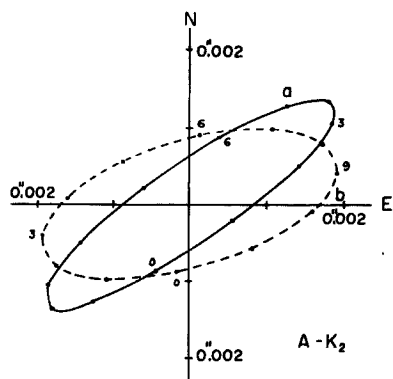


Fig. 15 Tilting diagrams of K_2 at Akibasan.

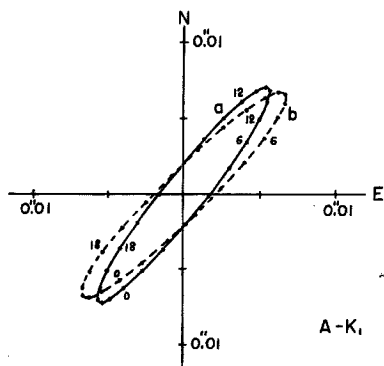


Fig. 16 Tilting diagrams of K_1 at Akibasan.

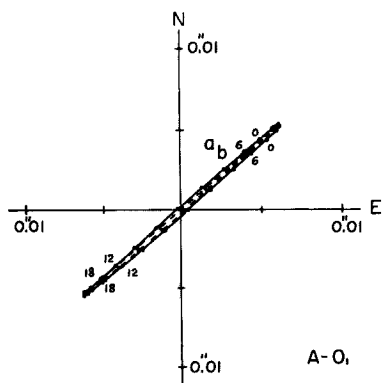


Fig. 17 Tilting diagrams of O_1 at Akibasan.

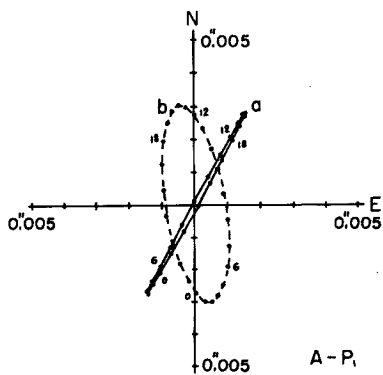
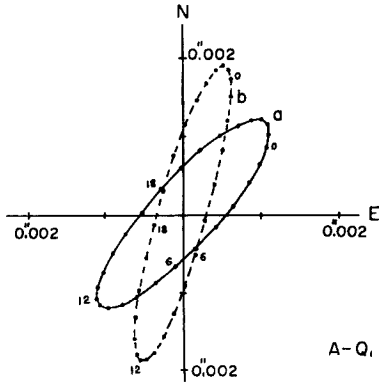
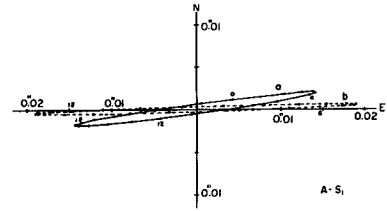


Fig. 18 Tilting diagrams of P_1 at Akibasan.

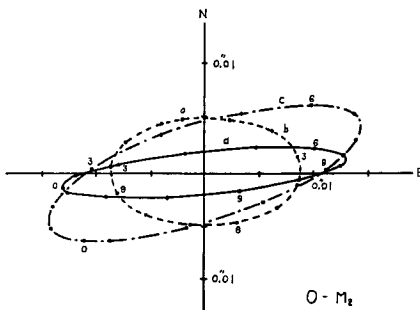
Fig. 19 Tilting diagrams of Q_1 at Akibasan.Fig. 20 Tilting diagrams of S_1 (meteorological constituent) at Akibasan.

P_1 のベクトル図の形の著しい類似性 (Fig. 9 と Fig. 11) にも見られる通りである。また、大浦、秋葉山共に、 S_1 および S_2 のベクトル図は他の分潮とはかなり異なったパターンを示しており、しかも両観測所における気象の日変化は、 S_1 の形を比較してみれば明らかなように、ほぼ逆の傾動を示している。これは恐らく、観測所附近の地形と、そこにおける観測室の位置に大きく依存していることによるものと想像される。

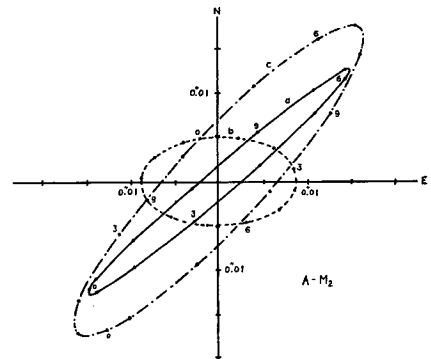
3. 海洋潮汐の影響

前節において、1年間の資料を解析して、主要8分潮の振幅と位相を決定した結果を示したが、分潮の振幅が小さくなるにつれて誤差が大きくなっており、信頼度も悪くなるため、今回はまず、半日周潮としては最も振幅の大きい M_2 分潮と、日周潮では周期が24時間よりかなり離れており、かつ振幅の大きい O_1 分潮のみをとり上げて、海洋潮汐の影響を推定してみることにする。

さて、Table 4 に与えられた、大浦および秋葉山における潮汐傾斜変化は、地球潮汐と海洋潮汐による第2次項の和よりなっている。そこで、まず地球潮汐第1次項を取り去るため、西村¹⁴⁾の求めた diminishing

Fig. 21 Reduction of the direct effect of the earth-tides from the observed M_2 at Oura.

- a: observed tidal tilt of M_2 .
- b: direct effect of M_2 expected by assuming the diminishing factor $\gamma=0.661$.
- c: difference (a-b).

Fig. 22 Reduction of the direct effect of the earth-tides from the observed M_2 at Akibasan.

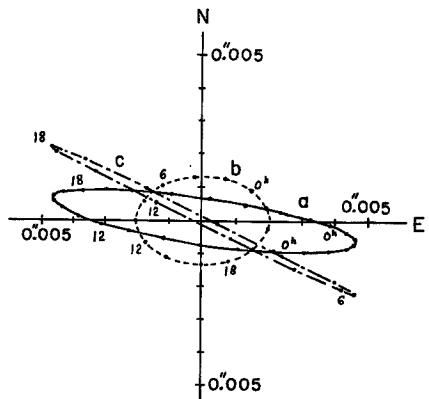


Fig. 23 Reduction of the direct effect of the earth-tides from the observed O_1 at Oura.

- a: observed tidal tilt of O_1 .
- b: direct effect of O_1 expected by assuming the diminishing factor $\gamma=0.661$.
- c: difference (a-b).

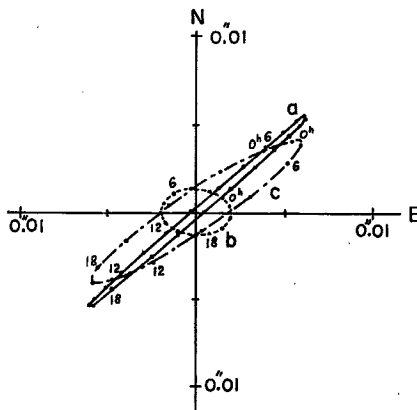


Fig. 24 Reduction of the direct effect of the earth-tides from the observed O_1 at Akibasan.

factor $\gamma=0.661$ なる値をとり理論潮に乘じ、位相の遅れはないものと仮定して、これを観測値から差引く、その結果は、 M_2 については Fig. 21 および 22 に、 O_1 については Fig. 23 および 24 に示す通りであるが、大浦における振幅が秋葉山に較べて小さく、その長軸の方向もやや東西に近くなっている。

次に海洋潮汐の影響についてであるが、今回はまず、Boussinesq の半無限弾性体表面における点荷重による変形理論式を使用して、海水荷重によって生じる傾斜変化を推定してみる。なお海水の質量の増減によって生じるポテンシャルの変化についても同時に考慮するが、地殻の変形によって生じるポテンシャル面の変形は省略する。Boussinesq の理論によれば、半無限弾性体の表面を $z=0$ とし、弾性体の内部へ向って $z>0$ ととり、原点に P なる荷重を加えた場合、重力の影響を無視するならば、 x, y, z 方向の変位は

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{P}{4\pi\mu} \frac{xz}{r^3} - \frac{P}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{x}{r(z+r)}, \\ v &= \frac{P}{4\pi\mu} \frac{yz}{r^3} - \frac{P}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{y}{r(z+r)}, \\ w &= \frac{P}{4\pi\mu} \frac{z^2}{r^3} + \frac{P(\lambda+2\mu)}{4\pi\mu(\lambda+\mu)} \frac{1}{r} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

なる式で与えられる。ここに λ, μ は Lamé の常数である。極座標の原点に観測点を対応させ、 $\theta=0^\circ$ および 90° の方向を東および北にとり、東下りおよび南下りの傾斜を正として、 θ と $\theta+\Delta\theta$ および r と $r+\Delta r$ で囲まれる微小面積 ΔS に海水荷重 M

$$M = \delta \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \cdot h \cos(n t - k)$$

が加わるとする。ここに δ は海水の密度、 h は分潮の半潮差、 n は速度、 k は遅角である。このとき、この海水の荷重による変形および海水の質量の万有引力による鉛直線の傾きの和としての原点における南北および東西方向の傾斜量 φ_s, φ_E は

$$\left. \begin{aligned} \varphi_s &= -\frac{Gm}{gr^3} \sin \theta \cdot \delta \cdot r dr d\theta \cdot h \cos (nt-k), \\ \varphi_E &= \frac{Gm}{gr^3} \cos \theta \cdot \delta \cdot r dr d\theta \cdot h \cos (nt-k), \\ m &= \frac{g^2}{G} \frac{\lambda+2\mu}{4\pi\mu(\lambda+\mu)} + 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ここで g は重力加速度， G は万有引力常数である。(2) 式を積分するため，大浦あるいは秋葉山観測所を極座標の原点におき，海域を下記のような扇形に分割した。

- (a) 観測点を中心として方位角を 5° きざみに分割する
- (b) 観測点より 2 km 以内は 200 m ごとの同心円をとる
- (c) 観測点より 2 km から 5 km までは 500 m ごとの同心円をとる
- (d) 観測点より 5 km から 20 km までは 1 km ごとの同心円をとる
- (e) 観測点より 20 km から 65 km までは 5 km ごとの同心円をとる。

両観測所を中心とする半径 65 km の円により，一応大阪湾全域をおおうことができる。

次に，この海域内における潮高を求めるため，中野猿人著の“潮汐学”¹⁵⁾ の附録から，紀伊水道を中心とする 34 個所の験潮所を選び出し，その M_2 および O_1 の振幅と遅角から等潮差図および同時潮図を描いた。それらは Fig. 25 および 26 に示してある。この等潮差図および同時潮図にしたがって，上記のように分割した扇形の海域内では潮位が一定であると仮定して積分をおこなった。計算の結果，得られた $g\varphi_s/Gm\delta$ および $g\varphi_E/Gm\delta$ より合成した傾斜変化ベクトルを，海域を 2 km 以内，5 km 以内，20 km 以内および 65 km 以内に限定した場合について Fig. 27 から 30 に示した。これらの図には，前と同じく 1960 年 8 月 1 日 00 時 00 分からの平均太陽時が記入してある。 M_2 についての結果 (Figs. 27, 28) を見てみるに，大浦，秋葉山共，傾斜の長軸の方向はほとんど一致しているが，振幅は大浦の方が大きくなっている。また

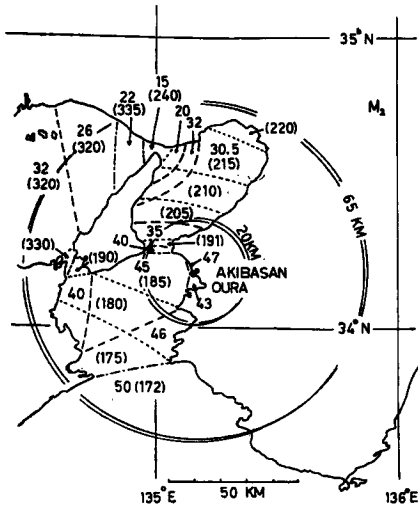


Fig. 25 Co-range and co-tidal chart of M_2 . Numerals without parentheses are the amplitudes in cm and those within parentheses lag angles in degree.

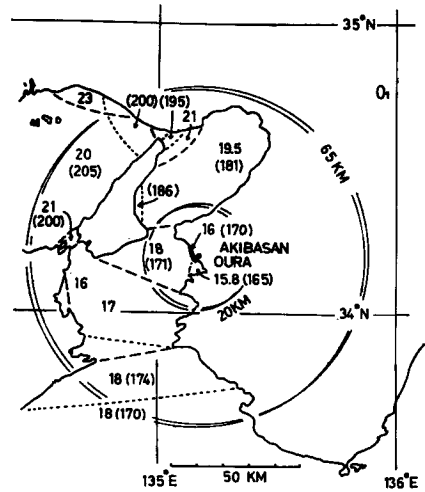


Fig. 26 Co-range and co-tidal chart of O_1 . Numerals without parentheses are the amplitudes in cm and those within parentheses lag angles in degree.

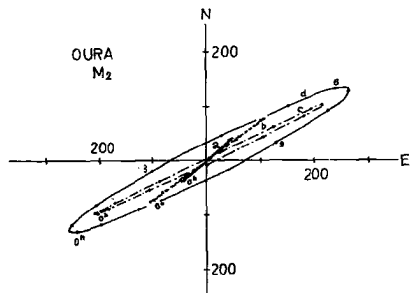


Fig. 27 Tilting diagrams synthesized from $g\varphi_S/\delta mG$ and $g\varphi_E/\delta mG$ for M_2 expected at Oura.
 a: $r \leq 2$ km.
 b: $r \leq 5$ km.
 c: $r \leq 20$ km.
 d: $r \leq 65$ km.

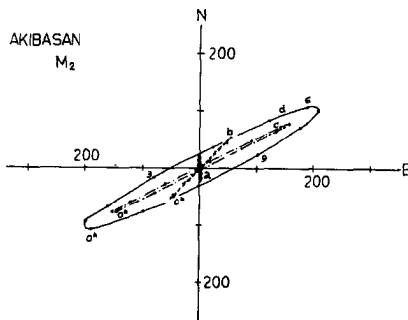


Fig. 28 Tilting diagrams synthesized from $g\varphi_S/\delta mG$ and $g\varphi_E/\delta mG$ for M_2 expected at Akibasan.

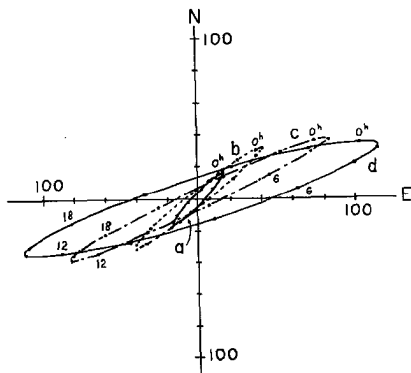


Fig. 29 Tilting diagrams synthesized from $g\varphi_S/\delta mG$ and $g\varphi_E/\delta mG$ for O_1 expected at Oura.
 a: $r \leq 2$ km.
 b: $r \leq 5$ km.
 c: $r \leq 20$ km.
 d: $r \leq 65$ km.

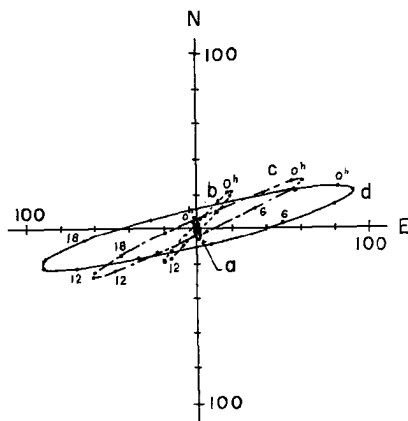


Fig. 30 Tilting diagrams synthesized from $g\varphi_S/\delta mG$ and $g\varphi_E/\delta mG$ for O_1 expected at Akibasan.

O_1 についても振幅はやはり大浦の方が大きい、長軸の方向は秋葉山の場合にやや東西へ寄った形になっている。秋葉山より大浦の方が、より紀伊水道海域に近いことから、大浦の振幅が大となるべきことはほぼ予想される場所である。

他方観測された潮汐傾斜変化は **Figs. 21, 22** などに見られるごとく、逆に大浦より秋葉山の方が大きくなっている。現段階においては、65 km 以内の海域しか考慮していないため、それ以遠の海域の影響が残っていることは勿論であるが、この両観測所間の距離は 1 km 余りであるから、65 km 以遠の海域の影響は、両観測所共ほとんど同じ程度に入り込んでおり、したがって、この両観測所における潮汐傾斜変化の差異は、数 km から十数 km 以内の海域での荷重によって生じているものと考えてさしつかえない筈である。しかるに秋葉山の傾斜変化ベクトルから大浦の変化を差引いた結果を示すと **Fig. 31** および **32** のように

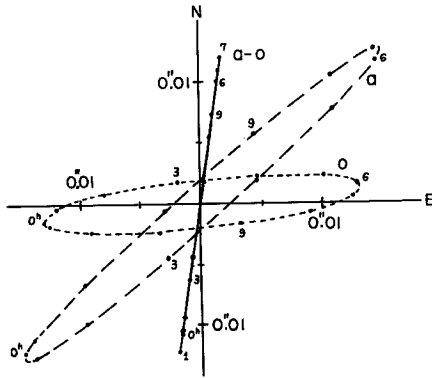


Fig. 31 Difference of tilting diagrams of M_2 at Akibasan and Oura.
 solid line (a-o): difference diagram (Akibasan-Oura)
 dashed line (a): tilting diagram at Akibasan
 dotted line (o): tilting diagram at Oura.

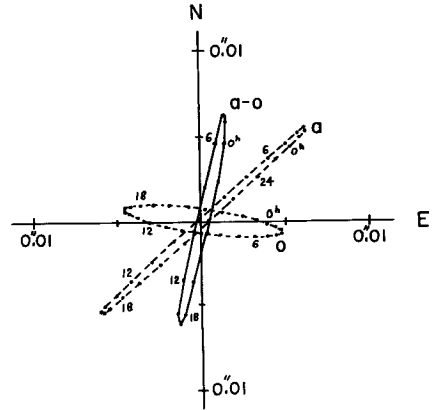


Fig. 32 Difference of tilting diagrams of O_1 at Akibasan and Oura.
 solid line (a-o): difference diagram (Akibasan-Oura)
 dashed line (a): tilting diagram at Akibasan
 dotted line (o): tilting diagram at Oura.

なる。 M_2 、 O_1 の場合共、ほぼ南北方向に、詳しくは M_2 の場合は $N8^\circ E-S8^\circ W$ 、 O_1 の場合は $N13^\circ E-S13^\circ W$ の方向に直線的な傾斜変化を示しており、その位相から明らかなごとく、高潮時に秋葉山に対して大浦が北へ傾斜するという傾向のあることを示している。このことは、大浦と秋葉山における潮汐傾斜変化の差が、両観測所からの距離が 65 km 以内にある海域の潮位変化から期待される傾斜変化の差と全く正反対の傾向にあることを示すものであり、これではまえがきに述べたように、両観測所における傾斜変化の差をとることによって、海洋潮汐から地殻表層部の弾性常数を単純に推定することができないことになる。このように比較的近い場所における潮汐傾斜変化が相対的に異なったパターンを示すことは、西村¹⁶⁾ が別府における観測で見出し、その原因を地殻構造のモザイク的性格によるものであるとし、特に活断層などが存在する場合には、そのパターンが大きく乱されることになると推論している。また R. Tomaschek¹⁷⁾ はヨーロッパにおいて潮汐傾斜変化の異常を見出し、その原因をアルプス山脈に代表される地殻構造上の不均一性の反映であるとしている。若し、地殻がこのようにブロック的性格をもつものであるとするならば、半無限弾性体についての Boussinesq の理論を適用することはできないわけであり、この点にもヨーロッパの研究者達が Boussinesq の式を使用しながらない一つの根拠があるのである。1955 年に吉川¹⁸⁾ は、上述の西村の指摘した別府における異常潮汐傾斜変化は海洋潮汐による被圧地下水の変化によるものであるとの見解を発表して、海岸からの距離にしたがって異常は減少していることを示した。

さて大浦と秋葉山において観測された潮汐傾斜変化と、海洋潮汐の影響によるものとして予想される変化との違いが原因を、以下において少し検討してみる。

まず第一に傾斜変化の観測誤差あるいは解析上の誤差ではないかとの疑問が生じる。いちばん問題になるのは、傾斜計の感度の決定の誤差であるが、秋葉山については 2 組の傾斜計による結果がよく一致していることからまず問題ないと結論できる。大浦については 1 組の傾斜計しか設置していないため疑問を残さざるを得ないが、両観測所共に同じ型の傾斜計を使用しており、単に感度の決定の誤差からこのように大きい差異を生ずるとは考えにくい。解析についても、 M_2 、 O_1 共に特に気象日変化の周期とはかけ離れた周期をもつ分潮であり、かつその振幅も大きいため、現在の程度の期間をとれば、いかに観測室の深さが小さく気象

的擾乱が大きいとは言え、上述の振幅の大小関係が逆になるような誤差の原因になっているとは考えられない。また別の方法で、異なった期間について求めた結果もほぼ同様な値を示しており、この点についてはまず問題はないものと考えられる。

第2点としては、Boussinesqの式の適用についてである。地殻が半無限均質弾性体でないことなど実際にはかなり問題になるところである。また両観測所共広い範囲にわたって荷重のかかっている海域に接近しており、特に大浦の場合は海の中に多少突出したような地点にあるため(1)式の成立するのが荷重Pより充分離れた場所であるという点に関しては、その適用に大いに論議の余地があると考えられる。弾性常数の場所的な違いが原因とならないかという点について、現段階では65 km以遠の海域は考慮していないけれども、かりにFig. 21と27の結果などを比較し、観測された潮汐傾斜変化を65 km以内の海水荷重におしつけ、 $\delta=1.03$, $G=6.67 \times 10^{-8}$ c. g. s, $g=980$ cm/sec²として、 λ と μ を等しいと仮定してこれを試算してみる。 M_2 については

秋葉山の傾斜振幅は	0.024''	$g\varphi/Gm\delta$ は	230
大浦	0.015		290,

O_1 については

秋葉山の傾斜振幅は	0.007''	$g\varphi/Gm\delta$ は	90
大浦	0.005		120

であるから、

秋葉山の場合

$$M_2 \text{ に対して } \lambda = \mu = 2.7 \times 10^{11} \text{ c. g. s}$$

$$O_1 \quad \quad \quad = 3.9 \times 10^{11},$$

大浦の場合

$$M_2 \text{ に対して } \lambda = \mu = 6.6 \times 10^{11}$$

$$O_1 \quad \quad \quad = 9.0 \times 10^{11}$$

となる。即ち λ, μ の値は秋葉山に較べて大浦の方が2倍余り大きいという数字になるが、この比率は65 km以遠の海域を考慮に入れても恐らく余り変らなであろうと想像される。最も単純に考えて、地下深くなるにつれて、弾性常数が増すと仮定するならば、Fig. 27あるいは29を参照して推察できるように、当然大浦の振幅が、より大きくなることは期待できるが、逆の場合は考えにくく、したがって非常に複雑な弾性常数の分布モデルを考える必要がある。

第3には、荷重をかけるためにおこなった積分の領域と、実際に潮汐荷重がかかった場所とにくい違いがあるのではないかという点である。特に、近海での海域のとり方、振幅、位相の与え方に計算結果は大きく依存するため、Fig. 25および26に示した同時潮線、等潮差線の引き方、河川などへの潮流の流れ込み、あるいは運河などの閉塞、埋立てなど、かなり詳細に検討しなければならない点が多いことは勿論である。しかしながら、再びBoussinesqの式を用いて、例えば地表近くの弾性常数の値として、 $\lambda = \mu = 5 \times 10^{10}$ を仮定して、上記の大浦と秋葉山における傾斜変化の差を与えるのに必要な海域を推定してみると、大浦観測所の北側に、秋葉山には影響を与えないような形で、大浦から見て 10° の拡がりをもって、距離100 mのところからであれば巾1500 mにわたって、また1000 mのところからであれば15000 mの距離までの範囲にわたる領域を必要とする計算になる。いかに河川あるいは海岸線の複雑さによって誤差が生ずるとは言え、このように大きい規模で、海域をとり誤まることはまず考えられないので、Boussinesqの式が適用できると仮定する限りにおいては、この点に疑問をさしはさむ余地はないものと結論できよう。

最後に、吉川が指摘したような被圧地下水による影響が、海岸により近い大浦に特に大きく現われているのではないかという点であるが、現在のところこれに対して積極的に否定する材料はない。大浦と秋葉山の M_2 と O_1 のちがいをしてみるに、両観測所における振幅の比は、 M_2, O_1 共ほぼ等しい値を示している。しかるに両者の差の高潮時との関係は M_2 の場合に較べて O_1 の場合には多少の遅れがみられるようである。

また両者の差が Fig. 31 および 32 に示した通り、ほとんど同一方向を向いていることから、 M_2 、 O_1 の場合共、同じような mechanism によって生じているらしいことが推察され、これらの点を見るに、やはり地下水による影響であるとする場合が最も考えやすいように見受けられる。この場合、被圧地下水は和歌浦湾の方から北向きに滲透してくることになるのかも知れない。なお西村の言うように、地殻がモザイク的な構造をもつもので、たとえば、大浦の位置しているブロックと、秋葉山の位置しているブロックが異なり、その間に或る種の不連続が存在するといったモデルも考えられないことはないが、 M_2 と O_1 に関する大浦と秋葉山の差の傾斜ベクトルがほとんど直線的であること、かつ、海洋潮汐荷重から計算した M_2 と O_1 の傾斜の長軸の方向のちがいに比べ、両者の方向が互いによく似ているといったことから、多少受け入れにくいようにも思われる。

その他、大浦観測所が海に近いのに対して海面よりかなり高い山腹に位置しているといった状況のもとで、Boussinesq の理論を適用したことによる誤りなどの可能性も残されている。

4. あとがき

以上、大浦および秋葉山地殻変動観測所で観測された潮汐傾斜変化と海洋潮汐の影響について若干の考察を試みたが、その結果、両観測所で観測された潮汐傾斜変化の差は、半無限弾性体表面上での荷重変形に関する Boussinesq の理論から期待される変形とは異なったものであり、このために当初考えていた、両観測所の結果の差を考えることから、海洋潮汐の荷重を利用して、地殻の表層部の弾性常数を決定するというのもくろみも簡単に進められないことが明らかになった。その原因が何によるものであるかは現在のところ不明であるが、大浦における被圧地下水による影響ではないかという可能性が大きいようである。また、Boussinesq の式の適用性の可否についても大きな疑問が残っている。今後、更に海域を拡げ、また、伸縮計による観測結果も解析して検討を加えていきたい。

終りに当って種々御検討頂いた地震予知計測部門高田理夫教授はじめ研究室の諸兄に深甚の謝意を表する次第である。また有益な御助言を頂いた理学部地球物理学教室田中豊講師に厚く御礼申し上げる。潮汐資料の解析にもちいた最小自乗法による計算プログラムは、理学部地球物理学教室中川一郎助教授よりお借りしたものである。なお数値計算は京都大学大型計算機センター FACOM 230-60 (課題番号 5030 JC046) によった。

参 考 文 献

- 1) Shida, T.: On the Elasticity of the Earth and the Earth's Crust, Memoir of College of Science and Engineering, Kyoto Imp. Univ. 4, 1912, pp. 1-286.
- 2) Takahashi, R.: Tilting Motion of the Earth's Crust Observed at Ryozyun (Port Arthur), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. X, Part 3, 1932, pp. 531-559.
- 3) 西村英一: 地殻潮汐に就いて, 其一, 地球外殻の剛性, 地球物理, 第 5 卷 第 1 号, 1941, pp. 10-32.
- 4) ———: 地殻潮汐に就いて, 其三, 地球の剛性, 地球物理, 第 5 卷 第 2 号, 1941, pp. 87-112.
- 5) Corkan, R. H.: The Analysis of Tilt Records at Bidston, Monthly Notices R. Astr. Soc. Geoph. Suppl. Vol. 4, No. 7, 1939, pp. 481-497.
- 6) Longman, I. M.: A Green's Function for Determining the Deformation of the Earth under Surface Mass Load, 2. Computations and Numerical Results, J. G. R., Vol. 68, No. 2, 1963, pp. 485-496.
- 7) Pertsev, B. P.: On the Effect of Ocean Tides on Tidal Variations of Gravity, Izv. Akad. Nauk., SSSR, (English Translation), 1967, pp. 636-639.
- 8) ———: The Effect of Ocean Tides upon Earth-tide Observations, Comm. Obs. Roy. Belg., Série A, No. 9-, S. Géoph., No. 96, 1970, pp. 113-115.
- 9) Bower, D. R.: Some Numerical Results in the Determination of the Indirect Effect, *ibid.*, pp. 106-112.
- 10) Tanaka, T.: Study on Meteorological and Tidal Influences upon Ground Deformations, Spec.

Contr. Geoph. Inst., Kyoto Univ., 9, 1969, 29-90.

- 11) 西村英一：3) に同じ。
- 12) Tanaka, T.: 10) に同じ。
- 13) Nakagawa, I.: Some Problems on Time Change of Gravity, Part 2. On Analytical Treatments for Data of the Tidal Variation of Gravity, Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Bulletin, No. 53, 1962, pp. 67-105.
- 14) 西村英一：4) に同じ。
- 15) 中野猿人：潮汐学，古今書院。
- 16) 西村英一：3) に同じ。
- 17) Melchior, P.: The Earth Tides, Pergamon Press, 1966, p. 201.
- 18) 吉川恭三：地下水圧の週期的変化に伴う地面の傾動，陸水学雑誌，Vol. 17, No. 3, 1955, pp. 91-99.