

# 地球潮汐への海洋潮汐の影響に関する一考察

田 中 寅 夫

## A COMMENT UPON THE EFFECT OF OCEAN TIDES ON EARTH TIDES

By *Torao* TANAKA

### Synopsis

The Arctic Ocean, Sea of Okhotsk, Yellow Sea, East China Sea and the western half of Seto Naikai do not exert significant influences on the earth tides in Kyoto compared with the Pacific Ocean, judging from their location and size. The effects of ocean tides in seas farther than a distance of 4000 or 1000 km from Kyoto are concluded to be negligible in cases of tilt or strain tide, respectively, while more distant oceans must be taken into consideration in the case of gravity tide in Kyoto. The effect of the  $M_2$  ocean tide on the gravity tide in Kyūshū is larger than that in Hokkaidō due to dominant effects of the northwestern part of the Pacific Ocean and the East China Sea in Kyūshū; the effect of the Sea of Japan is unexpectedly small.

### 1. ま え が き

重力計、傾斜計あるいはひずみ計によって観測される地球潮汐は、月や太陽の起潮力が地球の固体部分を直接変形させる本来の意味での地球潮汐（以下「直接項」と呼ぶ）と、海洋の潮汐が原因となる項からなっている<sup>1)</sup>。この海洋潮汐の影響は、日本のように周囲を海で囲まれている場所では、かなりの大きさに達する。たとえば、重力の場合、 $M_2$  分潮の振幅のうちでも海洋潮汐の影響は数%<sup>2)</sup>、傾斜やひずみの場合は、場所によりあるいはその測定方向などにより一概には言えないが、海岸に近いところでは直接項をしのぐほどの大きさに達することもある<sup>3)</sup>。

地球潮汐の研究は、もとより、地球内部の物理的性質を明らかにすることにあるが、そのためにはこの海洋潮汐の影響を正確に知る必要がある。しかしながら、広い海洋中の潮汐には不明な点が多く、これが大陸の奥深いところでの観測といった場合を除いて、地球潮汐による地球内部の研究に際しての大きなさまたげとなっている。そこで逆に、地震波や地球自由振動などの研究から明らかにされてきている地球の内部構造を用いることにより地球潮汐の観測結果を海洋潮汐の研究に生かすべきだとする考えもでてくる<sup>4)</sup>。

他方、傾斜計やひずみ計は地殻変動の連続観測に用いられるが、これらによって観測される土地の傾斜やひずみは器械の設置されている場所の影響、たとえば横坑内での観測であればその坑道の影響（cavity effect）とか地形あるいは付近の地質構造の影響などを受けている<sup>5)</sup>。したがって、このような局所的なゆがみを受ける前の広域にわたる地殻のひずみ場を知るためには、それらの局所的な影響を一つ一つ定量的に決めていかねばならない。これは原理的には可能であるはずであるが実際には非常にむづかしい<sup>6)</sup>。そこで、もし地球潮汐を既知の入力としてこれを観測と比較すれば、上のべた諸影響量が、全体としてそれぞれの計器で観測されている傾斜なりひずみにどれだけ現われているかが推定できるわけで、このことは地殻変動連続観測の結果の解釈に大いに役立つものであると考えられる<sup>7)</sup>。この目的のためにも地球潮汐への海洋潮汐の影響を研究することは重要な課題であると言える。

本稿においては、重力、傾斜およびひずみ変化への海洋潮汐の影響に関して、二三の簡単な考察を行なったので、その結果について報告する。

## 2. 海洋の分布と地球潮汐への影響

地球潮汐への海洋潮汐の影響について考えるため、一例として、まず、京都を中心としてどのような距離

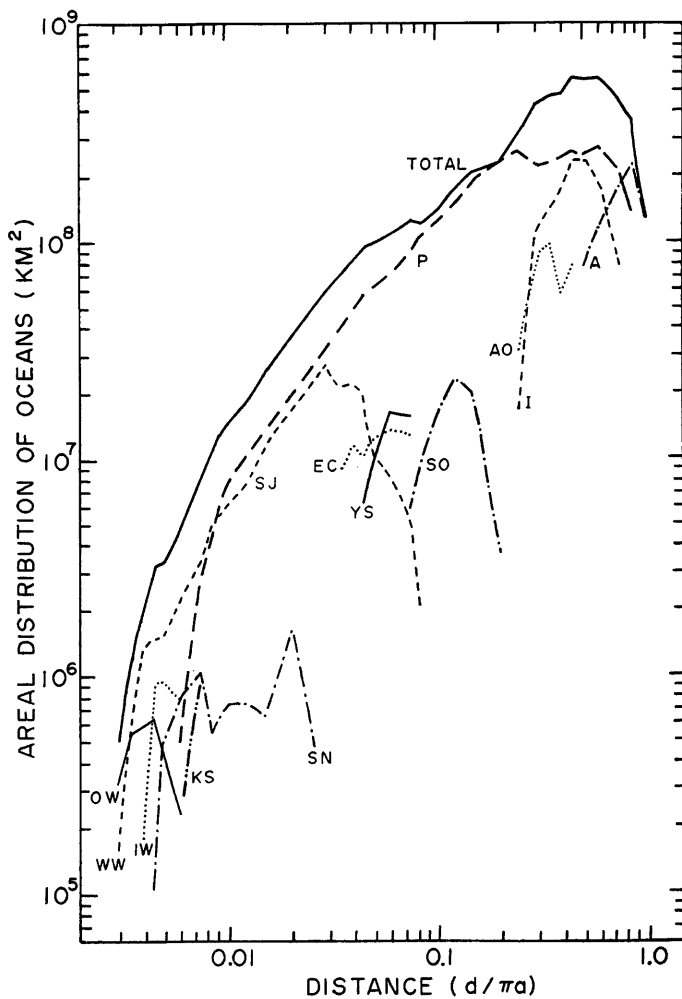


Fig. 1. Areal density distribution of oceans versus the distance  $d$  ( $a$ ; the earth's radius) along the surface from Kyoto.

P: Pacific Ocean, A: Atlantic Ocean, AO: Arctic Ocean, I: Indian Ocean, SJ: Sea of Japan, EC: East China Sea, YS: Yellow Sea, SO: Sea of Okhotsk, OW: Osaka-Wan, KS: Kii-suidō, SN: Seto Naikai, IW: Ise-Wan, WW: Wakasa-Wan, TOTAL: Total of the whole area.

にどのように海洋が分布しているかを調べてみた。その結果を Fig. 1 に示す。図は海洋の分布密度を表わし、積分してその区間の海洋の面積を得ることができる。京都から順次距離を拡げていくと、まず大阪湾が、次に若狭湾が顔を出し、続いて 150km あたりまでは日本海が、以後は太平洋が、11000km 付近で大西洋と入れかわるまで最大面積を占める。600 km あたりまで日本海の内積は太平洋とほぼ同じくらいであるが、周知の通り日本海の潮汐振幅は太平洋にくらべると約 1/5 くらいしかなく<sup>8)</sup>、たとえば、あとで述べる重力における  $M_2$  の場合をみるとその影響は非常に小さい。10000 km あたりになると太平洋とインド洋がほぼ肩を並べ 15000 km 以遠は大西洋のみとなる。さて、図から見て京都では、北極海、オホーツク海、黄海、東支那海、それに瀬戸内海の西部などはそれらの占める面積からみてもその影響は余り大きくないと結論できる。

次に、Fig. 1 の Total の曲線  $S(r)$  をもとにして、京都を中心として地表面に沿って距離  $d$  をのびしてゆき、順次その範囲に含まれてくる海洋の面積によって生じる海洋潮汐の影響  $X(d)$  を、Farrell<sup>9)</sup> によって求められたグリーン関数  $G(r)$  を使って、

$$X(d) = \int_0^d G(r)S(r)dr$$

によって計算する。その結果を Fig. 2 から 5 に示す。海洋全体にわたり高さ 1cm の潮位の増加があり、これに相当する荷重が京都からある一方向のみに直線状に集中して並んだ場合に相当するが、もちろん現実の海洋は只一方向のみではなく京都を取り囲んで四方に分布しており、しかも無潮点があり、振幅、位相もまちまちであるから、これは非常に極端な場合の海洋潮汐の影響とみなすことができる。Fig. 2 は、たとえば、1m の潮位の上昇に対し約 4.5cm の地面の沈降が生ずることを示している。Fig. 3 は重力への影響の計算結果である。荷重による弾性変形項は約 3000km 以遠についてはほとんど増加がみられないことから、この項に関しては 3000km 以遠の海洋の影響は無視できるとみなされるが、海水の引力による項は地球の反対側まで勾配が急であることから、あとでも述べるようにインド洋とか大西洋の影響も無視できないことが分る。Fig. 4 は同様に傾斜についての結果である。弾性変形項はほぼ 1000 km 以内の海洋の影響が大部分を占めることになるが、引力項については多少、より遠方まで考慮する必要があることを示している。しかしながら、傾斜方向は当然、荷重の方位に依存する（たとえば、同心円上に海洋が観測点をとりまけば影響を生じない）から、仮りに単純に全世界の海面が一斉に昇降してもその影響は、海洋が遠距離になるほど京都をと

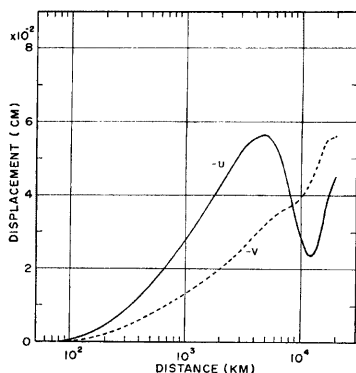


Fig. 2. Cumulative sums of radial and tangential ground displacements, U and V, at Kyoto obtained by integrating the products of the curve "TOTAL" in Fig. 1 and the Green's functions by Farrell (1972).

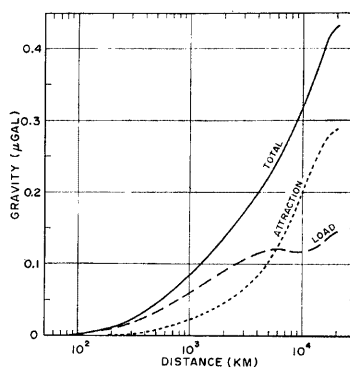


Fig. 3. Cumulative sums of the Newtonian (dotted line), elastic (dashed line) parts and their sum (solid line) of the oceanic effect on gravity at Kyoto obtained by the same procedure in Fig. 2.

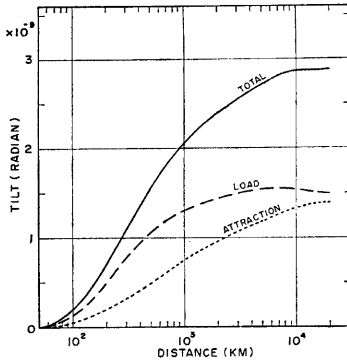


Fig. 4. Cumulative sums of the Newtonian (dotted line), elastic (dashed line) parts and their sum (solid line) of the oceanic effect on tilt at Kyoto obtained by the same procedure in Fig. 2.

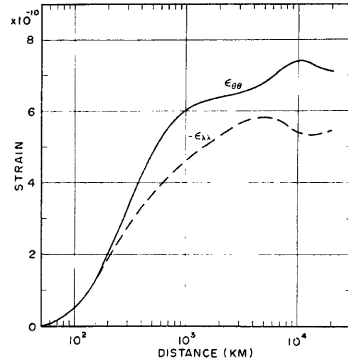


Fig. 5. Cumulative sums of the longitudinal (solid line) and transversal (dashed line) strains at Kyoto due to the oceans obtained by the same procedure in Fig. 2.

り囲むような分布を示してくることからみても、もう少し近い距離で頭打ちの傾向がでてくる筈である。現実には全海洋が同位相で昇降することはないことを考え合わせても、京都ではせいぜい 4~5000 km あたりまでの海洋の影響がほとんど大部分を占めるといえよう。Fig. 5 のひずみについての結果は、 $e_{11}$  はほぼ 1000 km で、 $e_{22}$  は 4000 km で頭打ちになっているが、この場合もやはり海洋分布の相殺により、とくに 1000 km 以内の海洋の影響が重要であるといえよう。また、ほぼ 200 km 以内の海洋潮汐の影響については面積ひずみがゼロになることが分る<sup>10)</sup>。

### 3. 日本国内における海洋潮汐 $M_2$ 分潮の重力への影響の空間分布

筆者<sup>2)</sup> はさきに、日本国内の敷地点における海洋潮汐の影響を  $M_2$  分潮について計算したが、ここでは日本国内における全般的な空間分布をみるため、それらの点を含めて、国土地理院による「日本重力基準網 1975 の設定」<sup>11)</sup> 中に表としてまとめられている JGSN 75 gravity station 95 点について、その緯度、経度、高度を用いて、 $M_2$  分潮への海洋潮汐の影響量を求めてみた。用いた海洋潮汐モデルは小倉<sup>8)</sup>、Hendershott<sup>12)</sup> によるものであるが、計算方法などは前報<sup>2)</sup> と全く同じであるのでここでは省略する。Fig. 6 に海水の引力による影響項を、Fig. 7 に弾性変形による影響項を、そして Fig. 8 にそれらの和としての全影響を示した。図から明らかのように、引力項より弾性変形項の方がやや大きい。全体の影響量としては北海道が最小で 1.5~2  $\mu$  gal、最大は南九州で約 6  $\mu$  gal となる。なお、四国南端の 6  $\mu$  gal のコンターは室戸岬と足摺岬の値に対応しているものであり、室戸岬については海拔高度を 185.8 m、足摺岬については同表に記載がないため、一応 100 m として求めた。位相は、Fig. 8 (b) にみられるように、北海道では進み、九州では遅れとなり、中部地方を縦断してゼロの線がのびている。また、瀬戸内海は、位相おくれとして沿岸での観測に影響を及ぼすであろう。

最後に、北海道から九州までのうちから 9 地点を適当に選んで、それぞれの海洋の影響量を棒グラフにして Fig. 9 に示した。各海洋からの影響量を単純に重ねたものであり、したがって合計は実際の値 (Fig. 8 (a)) より大きくなっている。南日本の方が北日本より海洋潮汐の影響が大きいのは、北西太平洋と東支那海の影響が南日本で大きくなることによるものである。また Fig. 3 からも予想されたように、大西洋、インド洋あるいは南東太平洋といった遠海の影響も見逃せないことが分る。とくに注目されるのは日本海の影響

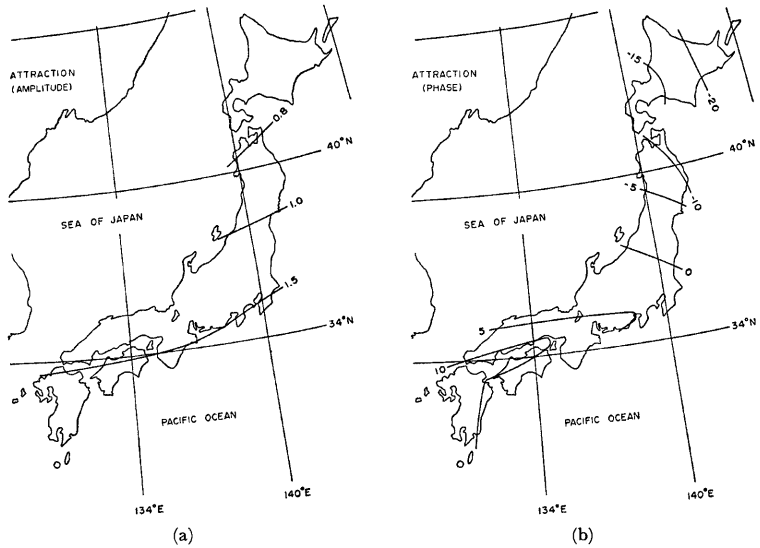


Fig. 6. Spatial distribution of the  $M_2$  amplitude (a) and phase lag (b) of the Newtonian part in the oceanic effect on gravity.

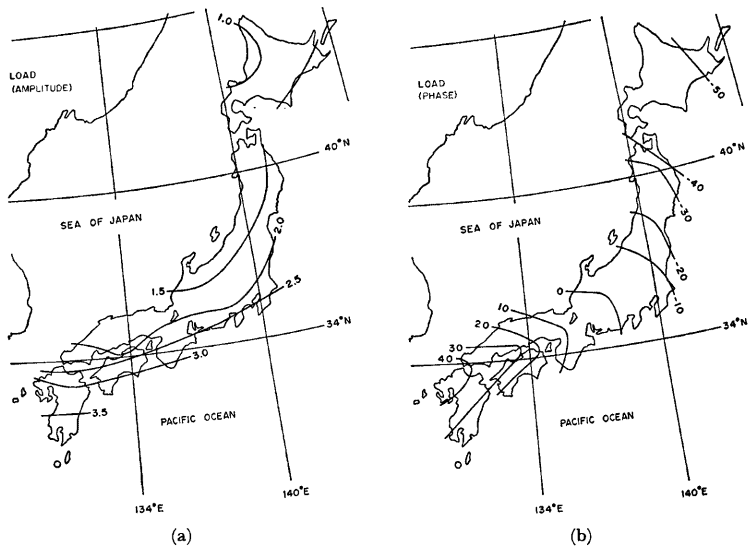


Fig. 7. Spatial distribution of the  $M_2$  amplitude (a) and phase lag (b) of the elastic part in the oceanic effect on gravity.

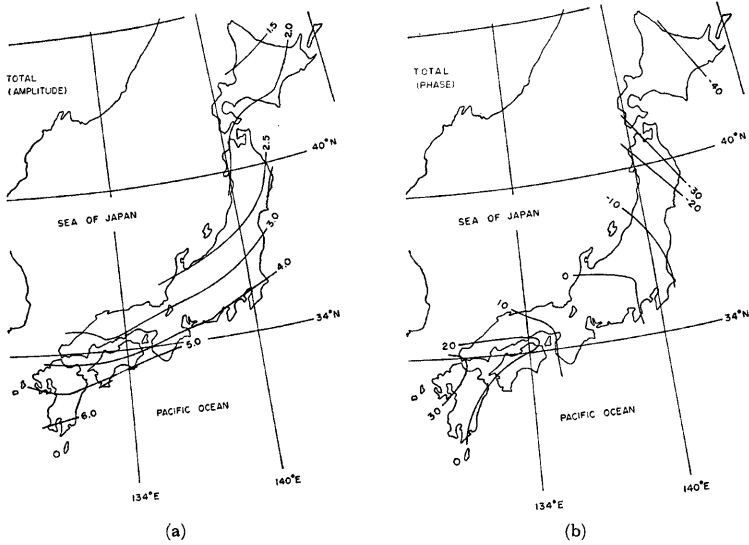


Fig. 8. Spatial distribution of the  $M_2$  amplitude (a) and phase lag (b) of the total oceanic effect on gravity.

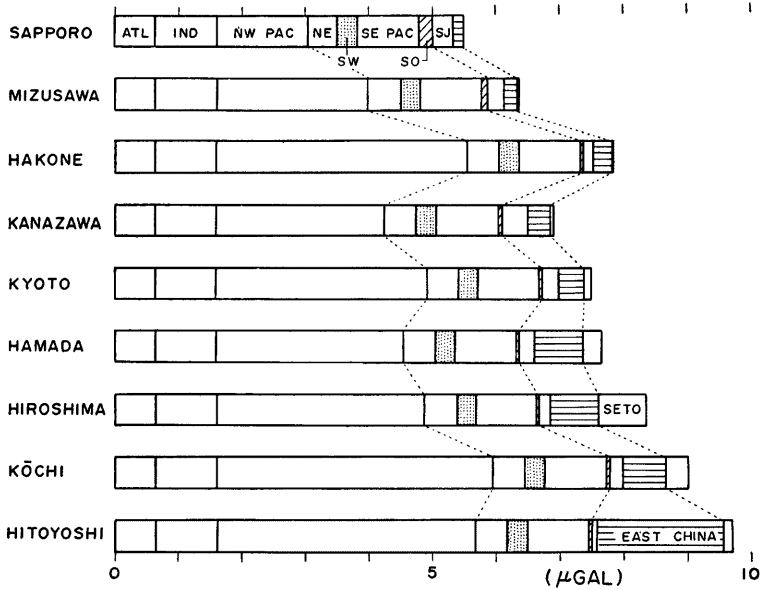


Fig. 9. Diagram showing the  $M_2$  amplitudes of the oceanic effects on gravity tide from each ocean. ATL: Atlantic Ocean, IND: Indian Ocean, NW PAC, NE, SW, SE PAC: NW, NE, SW and SE parts of Pacific Ocean, respectively, SO: Sea of Okhotsk, SJ: Sea of Japan, SETO: Seto Naikai, EAST CHINA: East China Sea.

響の小さいことであり、全体の合計が小さい北海道で多少問題となる程度である。要するに、大西洋、インド洋といった海洋と同程度の精度で日本海における海洋潮汐を知っておればよいと言える。

#### 4. あとがき

地球潮汐に及ぼす海洋潮汐の影響について、重力変化の場合を主にして二三の計算を試みた結果について述べた。前半のグリーン関数と海洋面積とのかけ合わせについては非常にあらい議論であるので、今後はさらに海洋分布の方位なども考慮に入れて地球潮汐と海洋潮汐との関係を調べていくことが必要である。また、重力のみではなく、傾斜、ひずみについても平行して海洋潮汐の影響を検討して、海洋潮汐モデルの不明確さと、これに伴う理論的な地球潮汐の誤差との関係についてさらに考察を進めていきたい。

おわりに臨み、この研究に関して有益な議論を給った防災研究所三雲 健教授および地震予知計測部門の各位に深甚の謝意を表します。また、この内容の一部は、昭和52年8月25・26日に東京大学海洋研究所で開催された「海洋潮汐と地球潮汐に関するシンポジウム」で発表したものであること、数値計算は京都大学大型計算機センターにおいて行なったものであることを付記します。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本測地学会：測地学の概観，1974，pp. 209-240.
- 2) Tanaka, T.: Effect of ocean tides on gravity tides in Japan: the case of  $M_2$  tides, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 50, No. 1, 1977, pp. 141-147.
- 3) 田中寅夫：地球潮汐による傾斜・ひずみと海洋潮汐について（第3報），測地学会誌，第19巻，第2号，1973，pp. 85-92.
- 4) Farrell, W. E.: Earth tides, ocean tides and tidal loading, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 274, 1973, pp. 253-259.
- 5) Harrison, J. C.: Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement, *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, 1976, pp. 319-328.
- 6) Tanaka, T. and P. H. Sydenham: The  $M_2$  earth tides at Cooney Geophysical Observatory in Armidale, Eastern Australia, presented at the Eighth International Symposium on Earth Tides, 1977.
- 7) 田中寅夫：地球潮汐による傾斜・ひずみと海洋潮汐について（第4報），測地学会誌，第20巻，第1-2号，1974，pp. 36-41.
- 8) 小倉伸吉：日本近海の潮汐，水路部報告，第7巻，1933.
- 9) Farrell, W. E.: Deformation of the earth by surface loads, *Rev. Geophys. Space Phys.* Vol. 10, No. 3, 1972, pp. 761-797.
- 10) Ozawa, I.: Study on elastic strain of the ground in earth tides, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 15, 1957, pp. 1-36.
- 11) 国土地理院：日本重力基準網1975の設定，測地学会誌，第22巻，第2号，1976，pp. 65-76.
- 12) Hendershott, M. C.: Ocean tides, EOS, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 54, No. 2, 1973, pp. 76-86.