

極運動と地球潮汐の関係

須 川 力*

1. はじめに

海水が月・太陽の引力を受けて潮汐現象を示すことは古くから一般によく知られているが、固体地球自体も月・太陽の引力のもとに同様な潮汐現象を示していることが、緯度観測から極運動現象が発見された時期と相前後して、ツェルナーによって考案された水平振子による傾斜観測から確認された。いま固体地球という言葉を用いたが、その固さはどんな外力の作用を受けても全然変形しない剛体のような絶対的に固いものではなく、広い意味での弾性体としての固さ、すなわち外力の作用を受けてわずかながらでも変形を示すような固さである。

実は極運動現象の発見、確認にこの地球の固さの認識が一役買ったのである。地球の自転軸が形状軸のまわりに約305日(約10カ月)の周期で変化するはずだというオイラーの理論に反して、実際の天文観測からは約428日(約14カ月)の周期が見出された。この14カ月周期(オイラーの10カ月周期と区別してチャンドラー周期という)が確かにオイラーの予言した極運動の周期に違いないということを確認するには、ニューカム理論の説明がタイミング良く非常に役立った。ニューカムは、オイラーの理論において地球を完全剛体と仮定していたことに着目し、実際の地球を弾性体として取扱い、チャンドラー周期から推定される地球の固さは鋼鉄程度であろうと説明した。この説明によって極運動現象を天文観測から確認することが出来たといっても過言ではない。

地球潮汐も極運動も共に変形し得る弾性体としての地球自体に起こる現象である。弾性の程度を表わすパラメーターとしてラブの定数 h , k , l が通常用いられる。

もともとラブは h , k を設定したが、その後志田順(1912)によって l が追加された。 h は地球表面における静的な海洋潮汐の高さに対する地球潮汐の高さの比を表わし、 k は変形を起こすポテンシャルに対する変形によって生じた付加ポテンシャルの比を示す。最後の l は静的な海洋潮汐と地球潮汐の間の水平変位の比を表わす。

極運動のチャンドラー周期とオイラー周期の比から k の値、極運動を決定する緯度観測および地球物理学的な地球潮汐観測から h , k , l の組合せた値を導くことが

できる。最近人工衛星の観測結果からも k の値を推定することが試みられてきた。極運動と地球潮汐とはこのようにして地球の弾性および内部構造を表わす点で関係が密接である。

最近ベルギー王立天文台のメルキオールは地球潮汐と才差・章動を月・太陽の引力作用のもとに起こる現象という見地から理論的な統一化をこころみた。このことは位置天文学において注目すべき画期的なことである。才差・章動と極運動とは地球の力学的扁率という量からみて非常に密接な関連性をもっている。もちろん才差・章動は地球に固定した自転軸の空間に対する運動であるが、極運動は地球自身に対する自転軸の運動であるが、地球内部の密度分布に依存する力学的扁率に関連している。したがって厳密に言えば才差・章動は地球の内部構造が分らないと理論的には決定し難い。才差・章動、地球潮汐および極運動の3つの地球全体に関する現象は地球の内部構造を推定する手がかりとして密接な相互関係にある。

チャンドラー周期のほかにほぼ1日に近い周期をもつ自由章動現象の存在も経緯度観測から確認された(天文月報第59巻第3号, 1966)。この新しい日周章動項は地球潮汐の観測からも確認され、極運動と地球潮汐の密接な関係を示す新しい展開が期待されている。

2. 経緯度観測におよぼす地球潮汐の影響

経緯度観測は天頂すなわち鉛直線にもとづいて行なわれているから、鉛直線が月・太陽の引力によって変化すれば当然その影響を受ける。いま月または太陽の引力による潮汐ポテンシャルとして2次の球関数までを考慮して W_2 とすれば、鉛直線の地球自転軸に対する変化量は

$$\text{子午線: } (1+k-l) \frac{1}{ag} \frac{\partial W_2}{\partial \varphi},$$

$$\text{卯酉線: } (1+k-l) \frac{1}{ag \cos \varphi} \frac{\partial W_2}{\partial \lambda}$$

で表わされる。ここに a は地球の平均半径、 g は重力の加速度、 φ , λ はそれぞれ観測地点の緯度、経度である。弾性体としての地球潮汐は剛体の $(1+k-l)$ 倍だけ変化を受ける。

まず緯度観測におよぼす月の地球潮汐の影響を考慮してみる。タルコット法による1対の緯度観測値への影響は

$$d\varphi = -P \sin 2z_\alpha \cos a_\alpha$$

で表わされる。ここに z_α は月の天頂距離、 a_α は月の

* 緯度観測所

C. Sugawa: On the Relation between the Polar Motion and Earth Tides

方位である。また

$$P=206265''\left(\frac{3}{2}\right)\mu \sin p$$

である。μ は月と地球の質量比で 1/81.30 を採る。p は月の地平赤道視差で 57'02".45 である。赤道座標系で表わすと

$$d\varphi = -\frac{P}{2} \sin 2\varphi (3 \cos^2 \delta_\alpha - 2) + P \cos 2\varphi \sin 2\delta_\alpha \cos t_\alpha$$

$$-\frac{P}{2} \sin 2\varphi \cos^2 \delta_\alpha \cos 2t_\alpha$$

となる。ここに t_α は月の時角である。右辺の第 1 項は常数項であるが、月の赤緯に依存している。第 2 項は日周項であるが、ある時期の緯度観測星系全体についてしらべた場合に、 $\sin 2\delta_\alpha$ が全体としてゼロに近づくことも予想されるので、日周項の検出には特に注意が必要である。またみかけ上緯度の日周変化の影響も入りこんでいるおそれがある。第 3 項は半日周項すなわち M_2 項であり、 $\cos^2 \delta_\alpha$ を因子として含んでいるので、緯度観測星系全体として検出が敏感であることが予想される。

さて実際の解析手順としては、各星対の観測値の平滑値からの残差を $d\varphi$ とし、各星対の観測時における月の赤緯、時角を対応させて、調和解析または最小自乗法を用いて常数項、日周項、半日周項を求めてゆく。

これまで北緯 39°08' の国際緯度観測のみならずグリニチ、ワシントン、プルコヴォ等他の天文台で行なわれた緯度観測について多くの研究者による解析結果が発表されているが、ここでは水沢についての M_2 項の解析結果を第 1 表に示す。

密度分布の 2 つのモデルにもとづいて、地球潮汐の理論

第 1 表 水沢における M_2 項 (眼視天頂儀)

期 間	振 幅	位 相	$1+k-l$	研 究 者
1900—11	0.0077	+ 28°	1.00	プルチビロ ック
1912—22.7	.0032	-100°	0.42	西村英一
1922.7—30	.0114	- 11°	1.48	川崎俊一 ファン・ヘル ルク
1900—30	.0045		0.58	
1900—34	.0029	- 8°	0.38	西村英一
1900—34	.0050	- 55°	0.64	エフテュシ エンコ
1935—54	.0102	+ 44°	1.32	須川 力
1955—61	.0094	+ 12°	1.22	須川 力
1935—61	.0100	+ 13°	1.30	須川 力

この表を見てまず気づくことは、1935 年を境界として前半期には $(1+k-l)$ の値が全般的に著しく小さく、後半期にはほぼ 1.30 という値を示している点である。(1+k-l) の値について理論的な予想値は 1.20 に近い。竹内均 (1950) は地震波動から導いたプレンの地球内部

的研究を行ない、次の 2 系列の (h, k, l) の組合せを導いた。

$$h=0.587, \quad k=0.290, \quad l=0.068,$$

$$h=0.610, \quad k=0.281, \quad l=0.082.$$

この 2 つの組合せについて

$$1+k-l=1.222$$

$$1+k-l=1.199$$

となる。1.30 という値はこの理論値をすこしオーバーしている。

最近中川一郎、メルキオールは世界中で行なわれた傾斜計、重力計、伸縮計等による地球解析結果の地域特性に着目して、アジア、ヨーロッパ、アメリカ大陸ごとに次のような h, k, l の組合せの特性を見出した。

$$1+k-h=0.68, \quad 1-\frac{3}{2}k+h=1.14, \quad l=0.05, \quad (\text{アジア})$$

$$1+k-h=0.72, \quad 1-\frac{3}{2}k+h=1.19, \quad l=0.07, \quad (\text{ヨーロッパ})$$

$$1+k-h=0.70, \quad 1-\frac{3}{2}k+h=1.18, \quad l=0.04, \quad (\text{アメリカ})$$

これらの特性から h, k, l を解くと

$$h=0.68, \quad k=0.36, \quad l=0.05, \quad (\text{アジア})$$

$$h=0.46, \quad k=0.18, \quad l=0.07, \quad (\text{ヨーロッパ})$$

$$h=0.53, \quad k=0.23, \quad l=0.04, \quad (\text{アメリカ})$$

となる。したがって

$$1+k-l=1.31, \quad (\text{アジア})$$

$$1+k-l=1.11, \quad (\text{ヨーロッパ})$$

$$1+k-l=1.19, \quad (\text{アメリカ})$$

となる。水沢での緯度観測から得られた値 1.30 はアジア地域での 1.31 と良く一致している。しかしこのような地域特性についてはまだ十分に観測所の分布、器械差等を考慮して吟味すべき余地が残されている。

前半期について $(1+k-l)$ の値が著しく小さいことは、3 人の研究者によってことな了解析方法が用いられているにもかかわらずほぼ一致した結果を示している点からみて、ある間接的な擾乱の影響が考えられる。メルキオールは、1922.7 以後観測プログラムが 2 群の中央が夜半の 0^h になるように対称的に組み変えられたことが地球潮汐の検出に有利になったことを指摘している。

水沢において眼視天頂儀 (VZT) と浮遊天頂儀 (FZT) の同時観測から地球潮汐の影響を比較してみた。第 2 表に VZT と FZT による緯度観測から解析された M_2 項および $(1+k-l)$ の比較を示す。

第 2 表に見るように 1943—54 の期間については、VZT と FZT の結果はほぼ一致しているが、次の 1955—61 の期間については FZT の方がかなり小さい値を示し、全期間を通じて FZT の方は VZT に比べて小さい値

第 2 表

期 間	VZT			FZT		
	振 幅	位 相	$1+k-l$	振 幅	位 相	$1+k-l$
1943—54	0 ^o 0103	+15°	1.34	0 ^o 0102	+23°	1.32
1955—61	.0094	+12°	1.22	.0065	- 6°	0.84
1943—61	.0100	+14°	1.30	.0081	+12°	1.05
1956.5—62	(パリー天文台, アストロラープ)			.0068	+33°	0.83

を示すことになった。一方パリー天文台のデバルバはアストロラープによる経緯度観測結果を解析して、FZT とほぼ同様に小さい値を得た。FZT もアストロラープも共に水銀面を人工水準面として用いているので、VZT のような気泡管水準器に対して、ある系統的な擾乱の影響を受けていることも考えられる。この期間の PZT の観測結果も解析してみたい。PZT も水銀面を用いているからである。

次に時刻観測におよぼす月の地球潮汐の影響についてはプルコヴォ天文台のグバノフが 1956—64.3 の期間についてグリニチ天文台、東京天文台、プルコヴォ天文台における時刻観測結果から M_2 成分を解析して、次のような $(1+k-l)$ の値を得た。

グリニチ	東 京	プルコヴォ	パリー
1.51	0.89	1.06	1.68

パリーについてはデバルバの決定値である。期間が比較的短かいために、時刻観測についてはまだ十分なことがいえないと見てよい。パリーとグリニチは良く一致しているが、東京とプルコヴォはそれほど一致していない。東京の PZT による時刻観測については、虎尾正久、飯島重孝の決定値があるが、ほぼグバノフの値に近く、今後期間を少なくとも 10 年以上とって、十分吟味すべき余地が残されているように思われる。

3. 水沢における地球潮汐観測

同じ観測所で経緯度観測のような位置天文観測と傾斜計、重力計、伸縮計等による地球潮汐観測を同時に実施することは、前に述べたように同じ局地条件のもとで h, k, l の体系を求めるためのぞましいことである。国際潮汐観測事業中央局長であるベルギー王立天文台のメルキオールは 1964 年 9 月に水沢の周辺で適地があれば傾斜計を設置して、地球潮汐の観測を開始することをすすめてきた。1961 年のパークレー、1964 年のハムブルグ、1967 年のプラハにおける国際天文学連合 (IAU) 総会で地球物理学的測定の同時実施が繰返し勧告された状況を考慮して、水沢緯度観測所は地球潮汐観測のために適地を選ぶことにふみきった。幸い水沢から東に 20 km ほどの赤金鉱山に黄金沢という廃坑を見つけること

が出来た。ベルギー王立天文台で製作された熔融シリカの水平振り型傾斜計 1 組を坑道内に設置した。

またアスカニア GS 12 型重力計を緯度観測所の実験棟地下室に設置し、赤金鉱山の傾斜計と共に本格的な地球潮汐観測を開始した。1968 年の夏から秋にかけて国内にある 4 台のアスカニア重力計と 2 台のラコステ・ロムベルク重力計を水沢に集めて、同じ基台にのせて同時比較観測を遂行した。その結果、同じ場所でありながら重力計の機種によって、 $(1-3/2 k+h)$ の値について 0.04 程度のバラツキがみられる。この比較結果は重要な意義をもつもので、地球潮汐結果の地域特性を論じる際に十分留意しておくべきことである。

日本列島のように四方が海洋でかこまれている地域については、海洋潮汐の間接的な影響を深く考慮しなければならない。水沢周辺について、いままで暫定的に得られた $(1+k-h)$ および $(1-3/2 k+h)$ の値は、海洋潮汐の影響および他の非常に局地的な影響を十分調査して、今後吟味を重ねた上で位置天文観測からの k および $(1+k-l)$ の値と総合して比較してゆきたい。近く赤金鉱山において伸縮計の観測も準備中である。この観測によって l 自身を導くことが出来るので、位置天文観測との同時比較は非常に興味深い。

水沢のように経緯度観測と地球潮汐観測を同時に実施している例は最近世界的にみても逐次増えつつあり、昔から実施している例としては、ソビエトのポルタバ天文台がある。

4. k の値の決定

前に述べたように k の値は、チャンドラー周期自体から推定することができる。チャンドラー周期は時期によって 1^u.22 から 1^u.13 位まで変化するが、1900—66 年全期間について全体的には 1^u.192 程度である。これから推定された k の値は 0.286 である。したがってチャンドラー周期の変化に応じて k の値もみかけ上は 0.25 から 0.29 まで 0.04 程度変化している。しかしチャンドラー周期の変化をすべて k の変化に帰する点にはまだ問題が残されている。

一方最近ソビエトのピルニク (1968) は、1955—64 の

期間について国際報時局 (BIH) の資料を用いて導かれた地球自転速度の不規則変化から地球潮汐の M_f , M_m 成分を解析して k の値の推定をこころみた。このころみは以前にマルコビッツ (1959) およびストイコ (1964) によって開発されたが、ビルニクは 1 天文台のみからの結果ではローカルな影響をまぬがれないことをおそれて全世界的な観測資料を用いた。 k の値として彼は

$$k = 0.303 \pm 0.010$$

を導いた。

人工衛星の軌道傾斜の摂動からニュートンは 1963.5 について

$$k = 0.327 \pm 0.036$$

を得た。同じころみは古在由秀によってなされ、

$$k = 0.39 \pm 0.05$$

が導かれた。この 2 人の独立した解析をまとめてみると

$$k = 0.33$$

に近いことが推定される。

地球潮汐観測からメルキオールがまとめた結果としては K_1 , P_1 , O_1 , Q_1 各分潮について次のような k の値が導かれた。

K_1	P_1	O_1	Q_1
0.220	0.260	0.328	0.358

以上の結果およびモロデンスキーの理論的考察 (1954) からみて、 k の値は 0.30 よりやや大きいようにも思われる。これはチャンドラー周期にすると 460 日以上になり、ある不一致が指摘される。そこで k のもとの定義に戻ってみると、 k は変形ポテンシャルに対する変形によって生じた付加ポテンシャルの比であるが、静的という条件に留意すべきである。チャンドラー周期からの解と他の位置天文観測、地球潮汐観測、人工衛星観測からの解の不一致はこうした基本的な条件にひき直して検討されなければならない。

5. 章動項の地球潮汐観測からの決定

前に述べたように、国際地球潮汐観測事業中央局のメルキオールは、地球潮汐と才差・章動を月・太陽の引力作用のもとに起こる現象という見地から理論的に対応関係を明らかにすることをこころみた。位置天文学の方では章動特性を角測定で決定するのに対して、地球物理学の方では重力計や水平振子のようなダイナモメーターを用いて直接章動を生じている力を測定している。後者の利点は連続測定が可能であることや O_1 , P_1 波のように微小な成分の検出を可能にしていることである。メルキオールは 18.66 年 (6798 日), 1 年 (365 日), 半年 (183 日), 半月 (13.7 日) のような章動項をほぼ日周的な月・太陽の地球潮汐成分の組合せと対比させ、これら章動項の振幅、位相を決定することをこころみている。若生康

二郎は、木村栄によって発見された年周 z 項は主に半年周期の章動項の採用値の誤差にもとづくことを指摘した (天文月報, 第 63 巻, 第 1 号, 1970)。採用値は地球を剛体として決められたものであり、地球潮汐および地球内部構造理論からもこの指摘の妥当性は強く支持された。

メルキオールは、地球潮汐の日周成分 K_1 , P_1 , O_1 , Q_1 を重力計、傾斜計による観測から解析して、 k および h を導いて、 k と h の関係について次のような重要な比の値を得た。

$$k/h = 0.503.$$

この関係は地球内部構造理論と対比する際に、重要な判定を与えるものである。

1967 年ブラハにおける IAU 総会で、章動項の地球潮汐観測からの決定が勧告されたが、位置天文観測と地球潮汐観測との総合比較は才差・章動の精密決定にとって今後も重要な役割を演じてゆくものと思われる。

一般に章動常数とよばれている 18.66 年周期の章動項の振幅 $9^{\circ}210$ という採用値はニューカムの決定にもとづくものであるが、その後の位置天文観測からは $9^{\circ}206$ のようなやや小さい値が導かれている。このことも地球の流体核とマンツルの相互特性関係の考察に重要な判定を与えつつある。このようにして、極運動と地球潮汐の関係を総合的に究明してゆくことは、位置天文学の根本課題であるのみならず地球内部構造の解明にとっても本格的なコースであることを痛感せざるを得ない。

新刊紹介

Catalog of Emission Lines in Astrophysical Object (Second Edition) A.B. Meinel, A.F. Aveni and M.W. Stockton 著

(Optical Science Center and Steward Observatory, The Univ. of Arizona; 1969, A4 変型, 約 200 頁)

この本の主要部をなす B 表には、太陽以外の天体に現われる 5000 本余の輝線が、1085~10973 Å にわたって波長順に並べられている。さらに輝線をもつ天体を 13 種に分けて (準星, 星雲の核, ……高・中・低温の輝線星), おのおのの種について典型的な輝線強度の値を記載している。結果として非常に空欄の多い表になるが、性質未知の天体の輝線を同定するには便利で、彩層・コロナを対象から除き、逆に暗い天体のスペクトルに混入する可能性をもつ大気光・市街光・極光・稲妻を付け加えてあるのも、同じ趣旨に沿ったものである。他に巻頭の A 表は各種の天体ごとの輝線の波長を与え、巻末には個々の天体ごとの代表的な文献の索引、使用された観測器械の表がある。 (西村史朗)