

地球の章動

笹尾 哲夫*

1. 章動とは？

「章動」と言われても、近頃の天文月報の読者には、あまりピンと来ない人が多いだろう。せいぜい、前世紀天文学のクラシカルなイメージが想い浮かぶ程度ではあるまいか。ところが、地球物理学では、章動は当世流行の研究テーマのひとつになっている。章動による星位置の変化は見かけの現象であって、実際に動いているのは地球自身だからである。大多数の天文学者には、章動とは望遠鏡を目的の天体に正確に向けるための微小な補正量にすぎないが、地球物理学者にとっては、周期的に変わる力を受けた地球がどう振舞うかを教えてくれる貴重な天然の実験材料なのである。地球を回転する固体星のひとつとして見直してみれば、章動は天体物理学にとっても興味あるテーマのひとつとなるはずである。

ところで、章動には、学界で確立した定義というものがない。力学で言う章動と天文学の章動は違うというのはゴールドスタインの「古典力学」にも書いてある通りだが、「天文章動」の用語法にも、種々の混乱が見られる。この5月にキエフで行われた「章動と地球回転」のIAU シンポジウムでも、「用語の問題」という報告があった位である。このあたりが、地球回転のはなしをややくさしく感じさせる原因のひとつであろう。こころみに岩波「理化学辞典」で「章動」を引いてみると、「地球の自転軸の天球に対する方向が、月および太陽の引力を受けて生ずる変化のうち、周期的部分をいう」とある。なるほど上手な定義だが、私はむしろ、「地球や星の自転のゆらぎのひとつで、自転軸の天球に対する方向が1自転周期よりも長いタイム・スケールで周期的に変化するタイプのもの」とでも言いたいと思っている。何故そう思うかの説明も加えながら、以下に地球の章動をスケッチしてみよう。

2. 強制章動の起こるわけ

月と太陽の引力の周期的変化を受けて生ずる地球の章動が、強制章動である。実を言えば、引力そのものよりは、起潮力、つまり潮の満ち干きを起こす力が章動をひき起こすのである。図1のように、外部天体の起潮力が赤道部のふくらみに作用すると、地球を起こそうとする向きの偶力を作り出す。この偶力のモーメントによって、地球の自転角運動量の向きが変わる結果、北極は紙面から手前の方向に、南極はその逆の方向に移動する。このような偶力のモーメントが時間変化するために、地

球が無理矢理揺すぶられることが強制章動なのである。強制章動のうちで比較的大きな振幅を持つ主な周期項の原因を見てみることにしよう。まず、赤道面と黄道面が22度30分傾いているために、太陽が及ぼす偶力は夏至と冬至には最も強く、春分、秋分にはゼロになる。図1

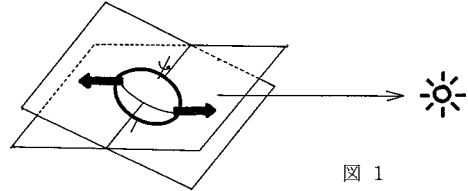


図1

からすぐ分るように、偶力の向きは、夏至も冬至も同じである。そこで、偶力のモーメントの時間変化は、図2のように、半年周期の変化項と、その振幅に等しい定数項の和で表わされる。定数項の働きで生じるのが太陽才差であり、半年周項で地球が振幅0.6秒角ほど揺すぶられる現象が半年周章動である。同様の理由で、月才差と振幅約0.1秒角の半月周章動も起こる。月才差と太陽才差が重なって、25,800年の才差が起きる。しかし、先に述べた偶力のモーメントの「定数項」は、実はまだ本当の定数項ではない。月の軌道面は黄道面に対して約5度傾き、且つ黄道極のまわりを約18.6年でひとまわりという速さでまわっているため、月の軌道面と赤道面の成す角度は、5度から、28.5度の範囲で変わる。このため、18.6年を周期とする偶力の変化が生じ、およそ9秒角という最大振幅を持つ主要章動項を作り出す。これによって、地球の南北極は、宇宙間の中を、約600mほど行ったり来たりしているわけである。さらに、月も地球も公転軌道が楕円であるから、月と太陽の地球からの距離が周期的に変わり、偶力も変わる。そこで、1月周期と1年周期の章動が生じる。実際には、これらの原因の重なりによって、以上の外にも、入り組んだ周期の多くの章動項が出てくる。強制章動は原因がはっきりしているから、その振幅は理論的に計算できる。ただし、地球の内部構造をどう考えるか

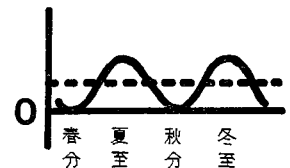


図2 太陽による偶力モーメントの年変化

によって、結果は違ってくる。だから、理論と観測の比較をもとにして、地球内部の状態を議論できるのである。

* 緯度観測所 T. Sasao: Nutation of the Earth

3. 自由コア章動

地震波の伝わり方から、地球内部は3つの大きな層に分かれていると考えられている。地表から3000 kmまでは弾性体の岩石で出来ており、マントルと呼ぶ。3000 kmから5000 kmの間には、鉄とニッケルが融けて出来た地中の海——流体外核がある。中心には、固化した鉄とニッケルから成ると考えられている固体内核がある。これらのうちで、章動に最も大きな影響を与えるのは流体外核である。それは、次のような事情による。

何等かの原因で、マントルと流体外核が図3のようにある角度だけ離れた異なる自転軸のまわりを回りはじめたとしよう。マントルと流体外核の境界面は、赤道部がふくらんだ回転楕円体に近い形だから、マントルと外核が両方とも固体であれば、異なる軸のまわりは回れないはずである。これが出来るのは、もっぱら、外核が変形自由の流体で出来ているからである。

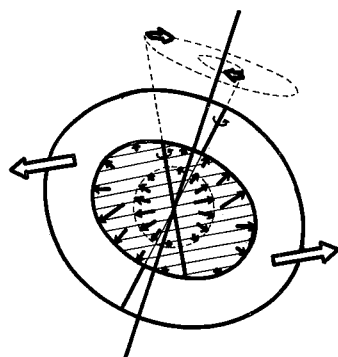


図3 自由コア章動

主に影響するのは、遠心力とつりあおうとする成分、つまり、赤道部で最大、流体外核の自転極でゼロ、となるような圧力分布である。境界面が球であれば、この圧力が境界の単位面積に及ぼす力は、外核の自転軸のまわりに対称に分布し、いかなる偶力も生じない(図3の点線)。しかし、実際の境界面は回転楕円体に近い形であり、しかもその対称軸は、外核の自転軸に対して傾いているから、この圧力が境界面に及ぼす力の分布は図3に示すように非対称になる。結果として、対称軸と自転軸を一致させようとする向きの偶力が生じ、マントルと外核の自転軸がお互いのまわりを自転と逆の向きにゆっくりと回るように仕向ける。つまり、外力の強制なしに続く自由な章動が生じるわけである。あまり定着した呼び名とは言えないが、この運動を「自由コア(核)章動」と呼ぶことにする。この周期は、主に流体外核の扁平率とマントルの弾性的性質によって決まる大事な量であり、およそ460日程度と計算されている。他方、振幅は初期値が与えられないかぎり決まらない。この自由コア章動が実際に見つかると大変面白いのだが、振幅0.01秒角程度のもを検出したという報告はあるもの、ま

だ確定はしていない。100分の1秒角と言えば、東京から400 km離れた水沢に置いた1円玉を見込む角度だから、無理からぬはなしという気がしないでもない。

自由コア章動を仲間外れにしないためには、章動の定義に「月および太陽の引力を受けて……」という文章は入れておかない方が良く思うのである。

4. 流体核共鳴

自由コア章動の存在によって、強制章動は大きな影響を受ける。これは一種の共鳴現象で、強制章動の周期が自由コア章動の周期に近いほど、影響は著しくなる。図4は、ワングの地球モデルにもとづく理論計算の結果を示したものである。横軸は章動の円運動成分の振動数で、自転と同じ向き(順行)の円運動成分をプラス、逆向き(逆行)成分をマイナスとしている。主な強制章動はいずれも楕円運動なので、順行、逆行の2つの円運動成分に分解される。縦軸は、章動振幅を剛体地球の章動振幅で割り算したものである。つまり、実際の地球の章動は地球全体が剛体で出来ているとしたときの章動にくらべて何倍になっているかを示しているわけで、内部構造の影響を見るのに適した表わし方である。比較のために、地球全体が弾性体で出来ているとした場合と、マントルが剛体、流体核が一様非圧縮性流体で出来ているとした場合の曲線も描いてある。現実的な地球モデルにもとづく曲線は、これら2つの曲線の性質を合わせ持っていることが分かる。最近、東京天文台の木下宙氏は、月と地球の公転運動に関する最新の知識にもとづいて剛体地球の章動のくわしい計算を行った。図4には、信頼性出来る観測値の得られている18.6年、1年、半年、半月の各章動成分の観測値を、木下氏の剛体地球理論値で割り算したものが示されている。理論と観測の一致は良好で、流体核共鳴の存在をはっきりと示している。

5. 解かれた α 項の謎

図4の半年周章動項の観測値の中にはWakoというものがあるが、これは有名な木村の年周項の原因を解明した緯度観測所の若生康二郎氏の論文から引用したものである。極運動研究を目指す国際緯度観測事業開始後2年目の1901年、ポツダムの中局は、水沢の観測結果が大変悪いという評価を含む中間報告を発表した。しかも、時の中央局長アルブレヒトが「これはなにか間違いがあるか、もしくは器械に故障があると思われるので、督促を厳しくしてほしい」という手紙を日本の測地学委員長に送って寄せたと言っただけで、緯度観測所初代所長木村栄博士の受けたショックは相当なものだったにちがいない。逆境に立った木村博士が発奮して見つけたのが、各観測所に共通に表われる年周的緯度変化——年周 α 項である。 α 項を考慮して再計算してみると、水沢の観測は悪いどころか、最も優秀なものであることが分

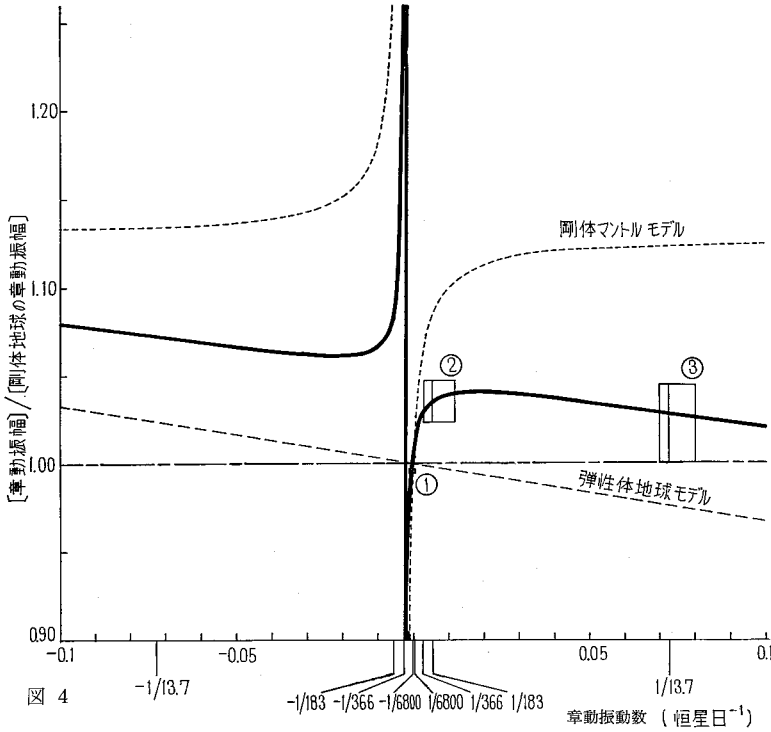


図 4

かった。ところが、この年周 z 項の原因は、気象変化の影響説、地球重心の南北移動説などいろいろな可能性が検討されたが、いずれもオーダーが合わず、約 70 年の間謎とされてきた。 z 項は観測のゴミだと言う事実上の「 z 項=幻」説までであったという。しかし、若生氏は、緯度観測データのくわしい解析によって、遂に、年周 z 項の主な原因が半年周期章動項の補正の不充分さにあることをつきとめた。補正しきれないで残されていた半年周期の章動が、各観測所で毎晩ほぼ同じ地方恒星時に緯度観測が行われ、しかもひと月毎に観測星を変えていくために、見かけ上共通の年周期的緯度変化となって現われていたのであった。そして、補正が不充分だったのは、IAU の採用章動値が剛体地球理論にもとづくもので、流体核共鳴の効果が考慮されていなかったからなのである。図 4 の Wako の値は、若生氏が年周 z 項の大きさから導いたものである。これが理論値と良く合っていることは、若生説の正しさの動かぬ証拠である。

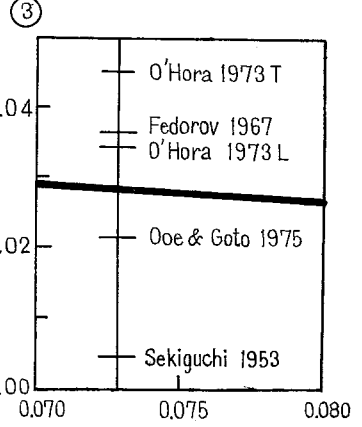
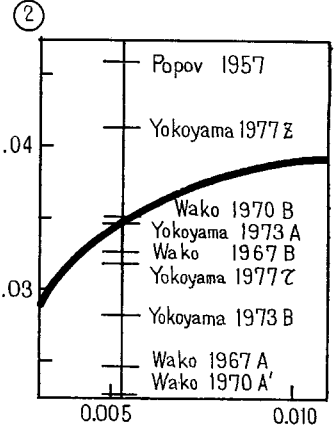
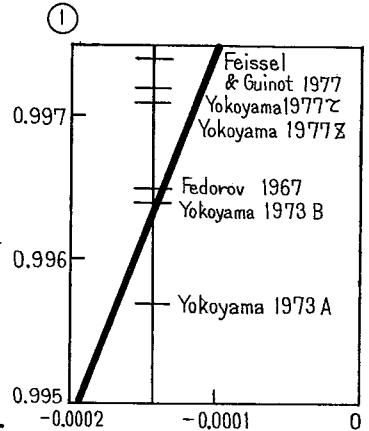
z 項は、今では章動観測の有力な武器となっている。最近、緯度観測所の横山紘一氏は、時刻観測データから、 z 項と似た性質を持つ τ 項を導き出し、 z 項と τ 項を使った章動を 2 次元的に追跡する方法を確立した。水沢に置かれた国際極運動事業中央局では、現在、この方法にもとづいて、さまざまな周期の章動項の解析が、精力的に進められている。

ところで、「極運動における観測章動の補正」を語る

以上、章動は極運動とは別の概念でなければならぬ。しかし、「自転軸の天球に対する方向が周期的に変化する」点では両方とも同じである。そこで、「1 自転周期よりも長いタイム・スケールで」と断わることによって、章動の極運動から区別するのが良いと思う。

6. 流体核の粘性と磁場

図 4 の理論曲線は観測結果と良く合っているが、それは弾性地球モデルや剛体マントルモデルとくらべた場合はなしである。天文観測の目下の精度は、最新の地球モデルの良否を判定するには残念ながら粗すぎる。そういう目的のためなら地震波データの方がはるかに敏感である。図 4 には別の見方がある。それは、外核の鉄とニッケルが単にどろどろに融けているだけでなく外力の作用を受けて流れる文字通りの流体であることを示して

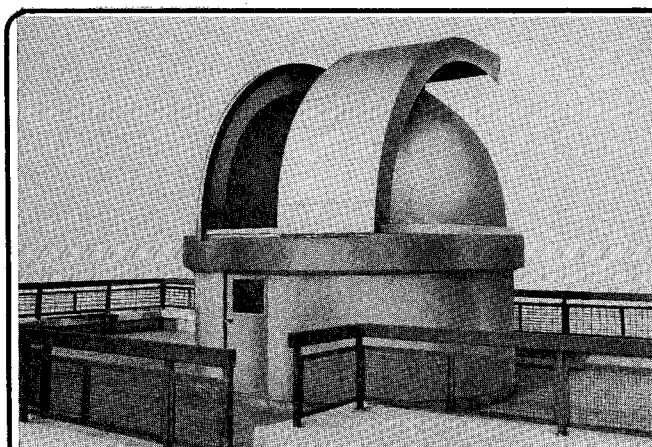


いるということである。外核の粘性や磁場が十分に強く、マントルとの間に摩擦が働けば、振幅の理論曲線の形は弾性地球モデルの曲線に近づくように変形するはずである。また、章動の位相は剛体地球の場合にくらべて進む。摩擦が働くことと位相が進むとは妙に聞こえるが、外核が遅れるので、角運動量のつじつまを合わせるためにその分だけマントルが先に進むというだけのはなしである。摩擦による振幅、位相の変化は、自由コア章動の共鳴周期に近い成分ほど著しい。しかし、章動振幅の観測値は現在の観測精度の範囲内で理論値と良く合っているし、有意な位相のずれも見られない。この事実から、流体外核の粘性と境界面を横切る磁場の強さの上限として、 10^5 ストークス及び 10^2 ガウスという値が得られる。ガウスが物性論的に推定した外核の粘性は 10^{-2} ストークスだから、この上限値よりはるかに小さいが、物性論的推定には不確定要素が多く、何ヶタも違う可能性も否定出来ないとされている。地震波は、こういう問題にはほとんど無力であり、章動から求めた上限は、観測で決めたものとしては今のところ最良のものである。この上限をさらに引き下げるには、共鳴周期に最も近い1年周及び18.6年周章動の逆行成分の振幅と位相をもっとくわしく調べると良い。自由コア章動自体が確実に見つければ、さらに良いデータが得られるだろう。

外核—マントル間摩擦によるエネルギー消散は才差に伴うものが最大だが、先の上限值を考慮すると、 10^{11} ワット以下である。「惑星直列」説ではないが、地磁気ダイナモの維持機構についても才差トルクによるかきまわしを考える説がある。しかし、今述べたエネルギー消散の上限をもうひとヶタ引き下げることが出来れば、この説は不可能になる。才差トルクが供給し得るエネルギーが地磁気ダイナモに伴うオーム消散を下まわってしまうからである。章動観測の責任は重大と言わねばならない。

7. 天体の章動

地球型惑星は、多かれ少なかれ地球に似た層構造をしているらしい。また、中性子星にも超流動流体の核を持つものがあり、X線パルサーのように連星系を成しているものも少なくない。してみれば、これらの天体も地球と同じような章動をしているはずである。水星には自転が遅いのに磁場があるが、ひょっとすると才差ダイナモ説は水星にはあてはまるのではあるまいか、とか、連星パルサーの自転がスローダウンする過程で自由コア章動周期と強制章動の周期がピッタリ一致する完全共鳴の時期があったにちがいない。その時期が起こったか、とか考えてみるのも面白いのではないだろうか。



営業品目

- ★天体望遠鏡ならびに双眼鏡
- ★天体写真撮影用品及び部品
- ★望遠鏡各種アクセサリ
- ★観測室ドームの設計・施工



← L N-10 E 型
25cm反射赤道儀

★総合カタログ
ご希望の方は切
手 300 円同封お
申込みください

ASTRO 光学工業株式会社

ASTRO
Optical Industry Co., Ltd.

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321