

# 地球の自転運動

若生 康二郎\*

## 地球が回ると

地球は太陽のまわりを公転し、太陽系はわが銀河系の外側を2.5億年かかって一周し、さらにわが銀河系は超銀河系に対して動いているらしい。これらの運動は、地球や太陽をそしてわが銀河系を質点と考えた天体力学、恒星力学、宇宙論によって研究されるが、たとえ質点としても厳密な解を求めることは不可能であって、 $n$ 体問題を摂動論や統計力学によってやっと近似的にそれも短い期間の解を求めているにすぎない。地球はさらに一日一回自転している。地球は有限の大きさをもった天体であり、さらにその内部や表面には常に流動を続ける物質をもって自転しているから、もはや剛体ゴマでは近似できない、複雑な運動をしていることが観測される。

地球の自転運動で扱う問題は三つに分けられる。まず空間に対する自転軸の運動で才差・章動とよばれるもの、次に自転軸に対する地球の揺動一極運動一があり、第三は自転速度が一様でない問題である。第一、第二表は、地球の自転運動を分類し、そのよってきたると考えられる原因を与えたもので、ロチェスターの総合報告からとった。彼の報告はムンク・マクドナルドの名教科書“地球の自転”以後を要領よくまとめてある (Trans. Amer. Geophys. Union, 54, 769, 1973)。

才差と自転速度の変動は、ゴマの動きから簡単に理解できるけれども、極運動は剛体の自由回転といわれるもので、回転させながら空中に投げ上げた物体でしか見ることはできないから、模型で教えることは困難である。高校では理科系志望のうち特に地学を選択した生徒の使う教科書のうち、やく半分は極運動にふれていない。

地球自転運動の大きな問題である極運動は、天文学にとって面白くかつ重要な対象であるにも拘らず、月報の読者にとってすらよく理解されていないのは、極運動を模型的に説明できないことや高校地学の後遺症のせいではないかと思われる。

コロンブスの卵という有名な話がある。コロンブスは卵(ゆで卵でなければならぬ!)の気室のほうを、こつんとたたいて立てて見た。ゆで卵を強く回してやると、最初の回しかたがどうあれ、かならずおしまいは長軸のほうを軸にして回るようになる。このことを知っ

ている人は卵をこわさずに立てることができる。ぐらぐらするだけで立たない卵は生ま卵であるし、くわしく観察すると半熟卵との区別もできる。このことを拡張すると、地球の自転軸や自転速度の変化さらに自由回転を精密に観測することによって、地球の内部がどのような構造になっているか、あるいは地球の模型を仮定した理論から予想される運動と観測を比較することによって、理論の当否をチェックできることになる。地震観測から地球の内部構造を知ることが、卵をこわしてみることに近い。ここに天文学と地球物理学の違いがある。

地球の上で観測した天体の位置を、太陽中心や銀河中心の座標で表わすには、まず地球自転の精密な観測と回転理論の確立が必要であり、それがあやふやなものであるならば、座標系の間の変換が不確かになる。最初の少しの誤差は、広大な宇宙の時間と空間のスケールまで延長したとき、大きな狂いとなってしまう。

地球自転の研究は一般の天体の自転と同じであるが、地球の場合は地球物理学による内部構造のくわしい知識と、位置天文学の長い観測事実によって、立ちどころに理論のチェックがされてしまうという厳しさがああり、またそこに楽しさがある。

## 地球自転軸の才差・章動

才差・章動の理論はオッポルツァー(1882年)のものが長い間基準になっていた。しかし恒星視位置の精度に対する要求が高まったので、ウーラーは“質量中心のまわりの地球自転の理論”(1953年)によって計算し直し、これが現在世界各国の恒星位置計算に利用されている。図1は才差運動を幾何学的に表現したもので、ポアンソンの表現とよばれるものである。物体(地球)に固定した錐体が空間錐体の内側を転ってゆくとき自転軸の先が画くのが才差の軌跡である。

月と太陽の影響は複雑であって、才差・章動論は多くの引数をもった三角函数の項とその積和に展開される。理論が厳密であって、その展開の途中で誤りをおかしやすいので、木下宙はオイラーの角の代りにドローネの変数を使い、展開も電算式で行なってウーラーの誤りを見つけている。彼の結果は安心して使える剛体地球の才差・章動の基準を与えてくれるから、今後流体核地球の理論と観測を比較するとき使うと有効である。

流体核地球の理論では、章動項の係数が剛体地球のと

\* 緯度観測所

Y. Wako: Rotation of the Earth

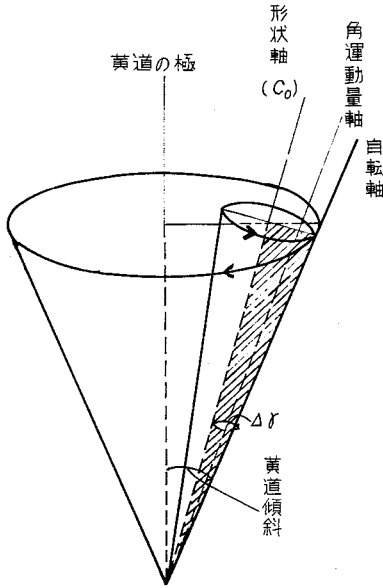


図1 才差運動とオッポルツァー運動  
( $C_0$  と  $\Delta\delta$  は図2参照)

きよりも大きく変る。天体の位置観測は剛体地球による章動項を使うから、流体核をもつ現実地球の上の観測では、当然その差がでてくるはずである。その差が、流体核地球のあるモデルによって計算されたものと同程度ならば理論は正しい。章動項のうち19年、半年、半月、1年の周期項が観測にかかりやすい。特に面白いのは半年章動項で、緯度観測には  $(2\odot - \alpha)$  の形で現われる。 $\odot$  は太陽黄経、 $\alpha$  は観測星の赤経である。キムラの  $\varepsilon$  項は正にこの形をした一年周期の変化であり、その振幅は流体核理論から予想された  $0.02$  であった。緯度変化ばかりでなく、当然時刻観測にも現われるはずであり、それも最近確かめられている。その他の章動項の観測から流体核理論のチェックがされているが、期待される振幅が小さく、また資料の整理が面倒で現在のところ互いに矛盾しない結果は得られていない。

現象としては極運動に分類されるものであるが、才差・章動論と切り離せないのがオッポルツァー項である(図2、第二表B7)。

地球が極運動を始めると、月や太陽の作用でさらに小さな形状軸の運動が加わる。(第2図は形状軸を中心にして画かれている)。この運動は、国際緯度観測事業の始めから認識されていたが、最近アトキンソンは、この運動を才差・章動と共に計算しておくのがよいと提案し、国際天文学連合にも勧告されている。赤道座標系は観念的なものであって、じっさいには基本星表(FK4)の定める極と赤道を使っているのである。星の高度あるいは天頂距離を地球上で観測すると、才差・章動のほか極

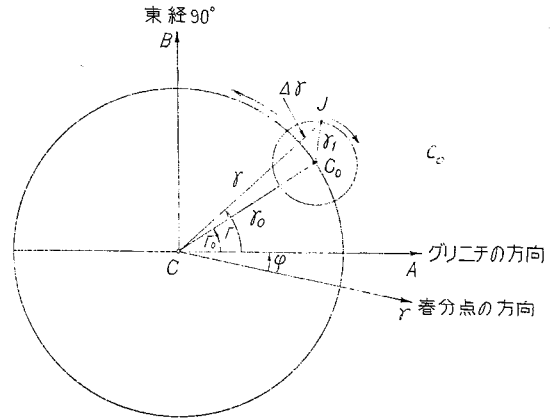


図2 自由章動とオッポルツァー運動

$C$ : 形状軸の極,  $C_0$  は  $C$  のまわりを305日でまわり,  $J$  点は  $C_0$  のまわりを1日でまわる。(SWAY は省略)

運動の影響も観測されてしまう。長周期の極運動は経・緯度観測結果によって補正することができるが、オッポルツァー項は1日周期のため現在のところ補正できない。そうであるならば、これまで行なってきた空間に対する“自転軸”の才差・章動計算をやめて、“形状軸”の才差・章動を計算して、オッポルツァー項を最初から含めておこうというのがその趣旨である。地球を回転楕円体とし、その慣性主軸を座標軸にした、地球に固定した座標系によって才差・章動論を作ることになる。

惑星の運動を地球中心で考えると、複雑な周転円の組み合わせになるが、太陽中心ではたいへんすっきりしたケプラー運動になる。我々は、剛体ゴマではない複雑な構造をもった地球の上で観測している。したがって地球の自転運動は、地球に固定した座標系で考えておけば、観測される量と理論のつき合わせがもっと簡単になる。公転運動は太陽中心、自転運動は地球中心、コペルニクスの逆転回である。

### 極運動

第3図は極運動のポアンソエー表現である。剛体地球ならば、慣性軸は10ヶ月のオイラー運動をするが、地球は弾性体なので14ヶ月に周期がのびる。これを自由章動またはチャンドラー運動という。慣性軸はさらに一年周期の強制運動を行ないまた極の平均位置が永年変化していることがわかっている。これらの運動は年周運動の周期以外、その振幅、位相、周期は時間とともに変化してみえる。理論からわかるのは周期であるが、それを観測から確かめようとすると、極運動の成分を分離する問題にぶつかる。極運動の観測資料をできるだけ長い期間集め、それを統一化する。つぎに振幅や位相が変化していることを考慮し、観測誤差という雑音を除いて成分の

表1 地球回転の変動と周期

A 自転軸の慣性空間に対する変化	B 自転軸の地球に対する変化(極運動)	C 瞬間自転角速度
1. 才差: 振幅 23°5', 周期 ≈ 25700 年 2. 主要章動項: 振幅 9'20" (黄道傾斜角方向), 周期 18.6 年 3. その他の黄道傾斜角や黄経方向の周期章動: 振幅 1" 以下, 9.3 年, 1 年, 半年, 半月周期 4. 黄道傾斜角の永年減少の不一致: 0'1/世紀(?)	1. 平均極の永年変化 ≈ 0'2 (70 年) 2. マルコピッチの秤動: 振幅 0'02 (?), 周期 24~40 年 3. チャンドラー運動: 振幅(変動する) ≈ 0'15, 周期 425~440 日, 減衰時間 10~70 年(?) 4. 季節変化: 年周振幅 0'09, 半年周振幅 0'01 5. 月, 半月周期: 振幅(理論値) 0'001 6. 準日周自由章動: 振幅 < 0.02 (?), 周期は 1 恒星日より数分短い. 7. オッポルツァー項: 振幅 ≈ 0'02, 周期 1 恒星日 (as for nutations) 8* Sway (角運動量軸と瞬間自転軸の差) 0'001/日	1. 永年減速 $\dot{\omega}/\omega \approx -5 \times 10^{-10}/\text{年}$ 2. 不規則変化 (a) 100 年以上 $\dot{\omega}/\omega \leq \pm 5 \times 10^{-10}/\text{年}$ (b) 1~10 年 $\dot{\omega}/\omega \leq \pm 80 \times 10^{-10}/\text{年}$ (c) 数週間 ~ 1 ヶ月(不規則) $\dot{\omega}/\omega \leq \pm 500 \times 10^{-10}/\text{年}$ 3. 短周期変化 (a) 準 2 年 振幅 ≈ 9 ミリ秒 (b) 1 年 振幅 ≈ 20~25 ミリ秒 (c) 半年 振幅 ≈ 9 ミリ秒 (d) 1 ヶ月又は半月 振幅 ≈ 1 ミリ秒

\* B8, ロチェスターの報告にないので追加した。準日周自由章動に附随したものもある(図4)。惑星地球に固有のもので、表2の太陽、月以外の原因に関係する。

表2 地球回転の変動に対応する原因

原因	対応する表1の項目
太陽 重力トルク 太陽風トルク	A, B7, C1, C3c C2(?)
月 重力トルク	A, B7, C1, C3d
地球外套部 弾性率 地震 摩擦 粘性	B1, B3, B4, C1, C2a, C3c, C3d B1, B3 B3(?), C1 C2a
流体核 慣性結合 形状的結合 電磁氣的結合	A2, A3, B2, B6 C2b(?), C2c(?) A4(?), B3, C2
固体内核 慣性結合	B2(?)
海洋 荷重と慣性 摩擦	B1, B3, B5, C2a B3(?), C1
陸水 荷重と慣性	B4
大気 荷重と慣性 風の強度変化 大気潮汐	B4 C2c, C3a, C3b, C3c C1

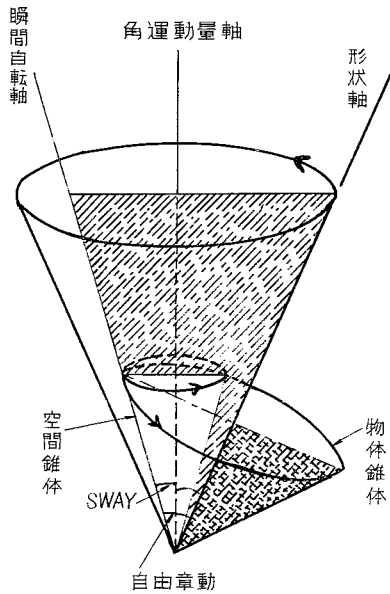
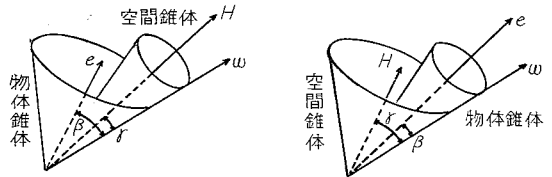


図3 自由章動と SWAY

分離をする。これらは言うは易く行なうは難しいことで、資料の整理や計算法が極運動研究に大きなウェイトを占めている。チャンドラー運動の周期が変化しているとか、いやチャンドラー運動は一つの運動ではなく複数の運動の合成されたものではないかとか、減衰・励起の問題とか、いろいろな考えがある。そうした理論のいずれがもっともらしいかは、観測によって確かめられなければならない。したがって極運動研究には、まず極運動の成分決定と、その分離の方法を確立することであると云っても過言ではない。

流体核理論によれば自由章動の周期は392日となり、さらに海洋の存在によって38日のびるとヴィセンテはいう。年周運動は、大気質量移動によるものであることが、定性的にも定量的にも一応証明されている。しかしもっとくわしいことは、全世界的規模で海洋と気象の資料を集めて再検討することが必要である。もし気象の資料から大気質量の移動が十分よく求められるならば、それによって年周極運動が独立に計算できることになる。極運動の観測値からそれを引けば、残りはチャンドラー運動となるから、前にのべたような極運動を計算によって分解する難かしさを避けることが可能になる。海洋や大気の循環は、極運動と自転速度に強く密着した分野で、天文と地球物理の極めて学際的な領域である。

現象としては知られていたが、天文術語集にないものがswayである。これは角運動量軸に対して瞬間自転軸の動く運動で、地球の場合約0.001程度で無視できる量であった。そのため流体核地球の議論では盲点となり、重大な見落しがあった。流体核地球には、10ヶ月の自由章



自由章動 準日周自由章動

図4 空間錐体と物体錐体の関係  $e$ : 地球の形状軸,  $H$ : 角運動量軸,  $\omega$ : 瞬間自転軸,  $\beta$ : 章動の振幅,  $\gamma$ : SWAY の振幅

動のほか、周期が恒星日より数分短い、準日周自由章動の存在が予想されていた。自由章動のばあいは、物体錐体の中に空間錐体が入っているが、準日周自由章動では逆に空間錐体の中に物体錐体が入るのである(図4)。理論によれば、空間錐体が物体錐体の400倍も大きい。したがって空間錐体のほうが先に発見されなければならない。準日周自由章動の検出は多くの研究者によってなされたが、誰も400倍大きい空間錐体の運動を発見していないから、準日周自由章動は存在しないであろうとトーモアが指摘した(1973年)。この指摘は準日周運動の研究者に(私もその一人であった)、盲点をついた強い衝撃を与えた。空間錐体と物体錐体の関係はトーモアの言うことが正しい。しかし不幸中の幸いともいふべきことは、天文観測から見つけていたのは、じつは空間錐体の運動のほうであったのである。したがって準日周運動は観測から直接見つけることはできないが、空間錐体の運動を観測することによって、間接的に準日周自由章動の存在を求めることができることになる。

### 自転速度の変動

彗星で有名なハリーは、月の平均運動が1世紀に角度の10秒の割合で増加していること、いわゆる月の永年加速を発見した。この加速は、地球の自転速度が減速していることの反映であることを指摘したのはニューカムである。この減速は海洋潮汐の摩擦によって説明できる。R.R. ニュートンは、多くの古代の日月食の記録を収集し、自転速度の減速を精力的に解析したが日本の記録は使われていない。内田正男の“日本暦日原典”(雄山閣, 1975年)は、ニュートンの欠落部分を埋める労作である。ニュートンの結果では、潮汐以外の非潮汐力も自転の減速の一部を占めているらしい。

水晶時計によって周期変化が、そして原子時計によって不規則変化が発見されている。時計の精度が向上するともっと多くの変化が見つかるかもしれない。地球自転速度の変化が明らかになって、時の決定は天文学から物理学に移ってしまったが、地球の公転運動で定義される暦表時と原子時の比較は、座標時と固有時の関係という

相対論の議論が必要である。

周期的な変動は、慣性能率の変化と相対的角運動量の変化によって起るから、極運動の年周運動の場合と同じように、ここでも大気・海洋の循環や、月・太陽による潮汐効果などの議論が行なわれている。特別な周期として26ヶ月の変化が飯島重孝らによって発見されているが、その原因も大気の26ヶ月周期の振動であるという。

地球の流体核が自転軸と離れたまわりを、マントルに対して相対的な運動をしていると、核とマントルの間の摩擦によって、マントルの角運動量変化を引き起し、結局自転速度の変動となって現われる。核とマントルの相互作用としては、電磁流体力学的なものも考えられたが、それほど大きな効果は得られていない。自転速度の大規模な不規則変化は、地球流体核の不規則変化に原因が求められているが、比較的短周期の不規則変化は、大気や海洋の質量分布、速度分布の異常な変動によって起る。近頃終末的な現象として、気候の異常変化がジャーナリズムをにぎわしているが、それが地球の自転速度の突発的な変化とよく対応することが観測される。

1982年には、太陽系の惑星が一直線にならぶ珍しい現象が起る。その時、地球の自転運動に何か変動が起るであろうか。

## これから

中性子星の構造は外殻、マントル、超流体の外核、ハイペロン内核からできているとされている。この構造は地球の半熟卵構造と似ているから、中性子星にも極運動が起っている可能性がある。単純な相似ではないかもしれないが、天体物理の最先端に行く中性子星研究と古典的な位置天文学が、極運動という現象で結びつけられるならば、地球自転の理論にとってたいへん有益である。

流体核地球の理論から導びかれる結果は、チャンドラー周期、準日周自由章動周期、章動項係数と地球潮汐定数である。したがって理論の検証は、これらの観測を総合的に比較しなければならない。天文学の立場から、前三者の観測結果と理論値を徹底的に論じて、流体核地球の模型に結着をつけてみようという気運がでてきた。ソビエト、キエフ天文台のヤッキフはそのような趣旨の国際会議の開催を提案してきた。1977年5月にキエフで開く予定で、新しい章動論の基礎、章動および準日周自由章動の観測による決定、章動におよぼす流体核の効果の議論という内容である。

これまで眼視天頂儀、写真天頂筒、アストロラーベなどの光学機械によって極運動の観測が行なわれてきた。新たにドップラー効果を利用した人工衛星の観測から、

★★★★★★★★★★★★★★★★

一わが国唯一の天体観測雑誌一

# 天文ガイド

毎月5日発売！ 定価240円(〒32)



天文ファンの人たちに毎月の天文現象の案内や、ニュースの紹介をするとともに、望遠鏡の作り方、観測ガイド、天体写真の写し方など実用記事も掲載。  
また、読者の写した天体写真、星座写真等たくさん作品や望遠鏡の自作レポートも網羅。

誠文堂新光社 東京・神田錦町一―五 振替東京六二九四

★★★★★★★★★★★★★★★★

天文に興味を持ちはじめた小学校上級生から中学校1年生ぐらいの子供たちのための天文入門書

# 星空の12ヵ月

古畑正秋著 / A4判 / 定価 900円

12枚の毎月の星図を中心に、星座の話、星の明るさ、金星や火星の動き、流星、月のこと、天の川、変光星のことなど、はじめて星に心をうばわれた少年たちにはわかるようにやさしく説明してあります  
■おもな内容―星座のさがしかた / 星座の歴史 / 星座の表 / 星の明るさ / 日出、日入の薄明 / 1月の空 / 冬のおもな星座 / 2月の空 / 星雲と星団 / 3月の空 / 金星のうごき / 4月の空 / 春のおもな星座 / 5月の空 / 火星の動き / 6月の空 / 7月の星座 / その他

経・緯度観測に匹敵する精度の極運動が求められている。さらに月レーザー測距望遠鏡の実現、超長基線波干渉計 (VLBI) の開発によって、極運動観測は新しい時代を迎えようとしている。これら新三種の測器のうち、VLBI は恒星位置の観測も可能でその精度向上は最も期待されるものである。ロチェスターの報告の中で、地球自転の諸現象の観測機としてつねに VLBI が顔を出しているのも無理はない。

観測精度の向上によって、これまでの器械では測定できなかったような現象がみつければ、また新しい理論を誘発するであろう。いっぽう精度の向上は観測期間の短縮につながる。位置天文学の現象の多くは、一つの結果を出すために数十年の観測を必要とする。もし新三種の測器の精度が光学的な方法に比べて10倍もよくなれば、30年かかったのが3年で済むことになる。

位置天文学が若い研究者にあまり好まれない傾向があるのは、研究目的が古典的であることと、それにもまして自分の観測がすぐ使えず長く単調な観測を続けなければならない点である。これからは、新しい器械の開発や精度の向上が意欲をそそる問題であり、かつ新しい現象の発見とその理論的研究も起ってくる。

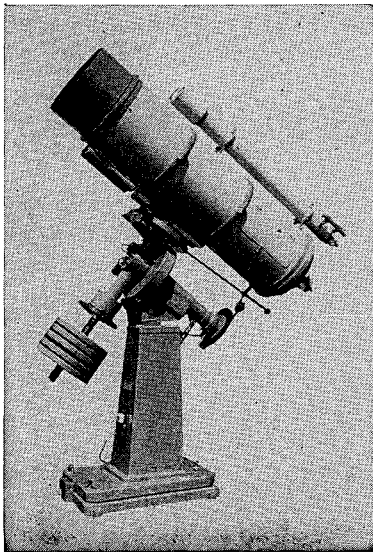
極運動が発見されてすでに90年に近い。極運動観測のような国際的な共同観測事業は、天文学の中で匹敵するものがない。しかしそれで何がわかったかという問に対しては、正直なところ、近似的な解答が得られていると書くことすら後めたい気がする。厳密な答を求めることは原理的に不可能だとしても、せめて過去90年の観測事実の80%を説明できる理論がほしい。90年の謎を解いてみせようという、野心に燃えた研究者の出現を期待したい。

## 学会だより

### 東京天文台の一般公開

東京天文台の一般公開 (本会后援) が11月14日(金)

に行われる予定です。台内諸施設の公開は午後2時から午後4時30分まで、月面観望は午後7時30分まで行われます。天候の都合により観望終了時刻を繰り上げることがあります。なお、雨天の際には中止され、また当日参観を目的の自動車の構内乗入れは禁止されます。



天体望遠鏡  
ドーム、製作

## 西村製の天体望遠鏡

### 40 cm 反射望遠鏡の納入先

- |        |                     |
|--------|---------------------|
| No. 1  | 富山市立天文台             |
| No. 2  | 仙台市立天文台             |
| No. 3  | 東京大学                |
| No. 4  | ハーバート大学 (USA)       |
| No. 5  | ハーバート大学 (USA)       |
| No. 6  | 台北天文台 (TAIWAN)      |
| No. 7  | 北イリノイズ大学 (USA)      |
| No. 8  | サン・ジェゴ大学 (USA)      |
| No. 9  | 聖アンドリウス大学 (ENGLAND) |
| No. 10 | 新潟大学高田分校            |
| No. 11 | ソウル大学 (KOREA)       |
| No. 12 | 愛知教育大学(刈谷)          |

606 京都市左京区吉田二本松町 27

株式会社 西村製作所

TEL. (075) 771-1570  
691-9580