

### 3.14.6.6 地球回転系

高橋幸雄

地球回転系は、電波源方向ベクトルの太陽系慣性（重心）座標系と地球重心座標系間の座標回転変換である。それぞれの電波源方向ベクトルを、 $\mathbf{S}$  と  $\mathbf{s}$  で表し回転行列  $\mathbf{R}$  とすると、 $\mathbf{s} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}$  で表わされる。この回転行列を示すと

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_p \cdot \mathbf{R}_n \cdot \mathbf{R}_d \cdot \mathbf{R}_w$$

となる。ここで、 $p$  は歳差 (precession)、 $n$  は章動 (nutatation)、 $d$  は日周運動 (diurnal rotation)、 $w$  は (長周期) 極運動 (wobble) を示し、それぞれの座標回転行列を示す。それぞれの説明を以下に示す。

#### ① 歳差 (precession)

地球は、自転軸の周りに回転しながら、その自転軸が、太陽系の外から見ると、太陽の引力や月の引力によって、首振り運動をしている。地球の公転軌道面に比べて、自転軸の面（赤道面）は約 23.4 度傾き、月が地球を回る公転軌道面は約 5.1 度傾いている。また、太陽、地球、月の距離も日々変化している。これらの影響で、地球の自転軸が太陽系の外から見ると、約 25800 年と非常に長い周期で、地球の公転面に垂直な方向に対して 23.4 度の角度を保ちながら、ゆっくりと首振りをして 1 周している。これは、独楽を回していると、しばらくすると、その軸がゆっくり首振り現象をするのと似た現象である。この長期のゆっくりした首振りを歳差とよぶ。その座標回転は、非常に長期なため、観測時刻（ある元期からの観測時刻の時間）の一次、二次、三次項で展開された式であらわされ、1977 年の Lieske などにより正確なモデルが提案された。なお、ここで用いられる時刻は、太陽系慣性座標系での時刻であり、観測時刻を太陽系慣性座標系の時刻（力学時；TDB）に変換したものをを用いる。

モデルに対して、観測値の推定が行われ、歳差常数と呼ばれるパラメータの推定を行い、より正確なモデルが提唱されてきている。

#### ② 章動 (nutatation)

歳差と同様に、太陽、月の重力により、地球自転軸の首振り現象であるが、歳差が、非常に大きな非常にゆっくりとした長周期の首振りに対して、章動は、その歳差運動の周りの比較的小さな首振り現象を、章動という。原因やその発生メカニズムは類似しているが、章動については、地球の内部のマントルや核の相互作用による自由振動や共鳴現象などが関係している。いろいろモデル化されているが、1980 年に J.Wahr が 106 周期成分による非常に正確なモデルを提案し、このモデルを使うことで、高い精度が実現できた。

章動の場合、平均黄動傾斜角（地球の公転軌道面と平均赤道面との傾き； $\epsilon_0$ ）と瞬時の黄動傾斜角（ $\epsilon$ ）、春分点の公転軌道面での経度（黄径）の瞬時値と平均値からの変化分  $\Delta$

$\phi$  で表せられる、特に  $\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$ 、 $\Delta \phi$  を章動のパラメータという。

ここで用いられる式においても力学時 TDB を引数にして計算される。また、この計算を行うときに、月や太陽の位置関係を表す天文基本角という 5 つのパラメータを計算する必要がある。この 5 つは、月の平均近点離角 (L)、太陽の平均近点離角 (Ld)、昇交点からの月の平均黄径 (F)、太陽と月の平均離角 (D)、月の平均昇交点黄径 ( $\Omega$ ) で、ここでも TDB の引数とした幕項での計算式となっている。5 つの基本天文角の算式としては、Flandersen の式や 1994 年の Simon 式などがある。

章動の周期で一番長いものは 18.6 年で、一番大きな項でもあり、その半分の 9.3 年が次に大きい。全部で 106 項からなるモデルを用いてきたが、より精密なモデルとして Herring による 263 周期成分のモデルも 1990 年代提案された。

現在では、モデル計算をして章動は実験毎に推定されることが多いので、どのモデルを使ってもほぼ同じ結果となる。

## ② 自転運動 (diurnal rotation)

前の 2 項目の歳差・章動による座標回転を行うことで、座標系は自転軸が動かない座標系に移る。そこで見た場合、地球が約 86400 秒 (1 日) で自転している。この自転軸の周りの座標回転を地球自転運動として次に説明する。

自転軸周りの回転を表す回転角として使われるのがグリニッジ視恒星時 (GAST ; Greenwich Apparent Sidereal Time) で、グリニッジ子午線と平均春分点のなす角 GMST (Greenwich Mean Sidereal Time) に章動の効果  $\Delta \phi \cos(\varepsilon)$  を足したもので表される。この GMST は 0 時 UT1 での GMST に対して、地球回転角速度  $\omega$  と世界時 (地球の自転角に相当する時間) UT1 の積を足すことで求められる。世界時 UT1 は、0 時 UT1 のグリニッジ子午線を通過した天体が、現在どこにあるかをグリニッジ子午線からみた回転角に相当する時刻と考えられる。このうち、GMST(0 時 UT1) 及び地球回転角速度  $\omega$  は数値的に求められ、UT1 が観測値として求める。UT1 は時刻の経過を表しているものであり、日常で使われている国際原子時系 TAI が刻む時刻の経過とほとんど近いので、観測値としてみる場合は、TAI からのずれ  $\Delta UT1 = UT1 - TAI$  を観測値としている。なお、他の観測から求めた  $\Delta UT1$  の数値等を使って各観測時刻毎の  $\Delta UT1$  を内挿補間などで求め各実験内で補正し、それからのずれは各実験内で一定値として  $\Delta UT1$  を推定し、0 時 UT1 のあらかじめ用いた数値を加えて、0 時 UT1 の観測値とすることが多い。1 日の間でも変化するので、 $\Delta UT1$  を 1 日内で複数に分けて詳細に推定し、1 日内的変化を求めることもある。

以前は、この  $\Delta UT1$  は天体の光学観測で測定されていたが、その精度から、現在では VLBI や GPS 等の宇宙測位技術で測定されるようになった。

## ④ (長周期) 極運動 (wobble)

ここまでの座標回転変換で、地球は回転しないほぼ止まっている状況まで来た。しかし

まだ座標系（見ている視点）は自転軸の方向に向いている。この自転軸を、地球の表面で見るとふらふら動いている。この変化のうち平均自転軸（平均形状回転軸）の動きを長周期極運動とし、その地球表面の位置を角度で示し、X,Y 成分で示す。この座標回転をおこなうことで、座標系は平均形状になり、その位置が地球表面の我々の位置座標系に直結するものになる。その時の座標系の方向を定義しておく必要があり、1900-1906 年の平均極位置である慣用国際原点（CIO）を Z 軸とし、ゼロ子午線方向を X 軸とした座標系とする。

長周期極運動であるが、非常にゆっくりとした継続的な傾向（永年的な変化）としては、西経 60 度のグリーンランドの方向に年間 3mas（ミリ秒角）ずつ動いている。これらは、地球内部のマントルの動きとも関係しているかもしれない。次に、顕著な動きとしては、約 430 日のチャンドラー周期成分と年周期成分が重なった形で現れる。チャンドラー周期の成分の原因は、大気説や海洋変化説などがある。

#### ⑤ UT1 や長周期角運動と大気などとの関係

UT1 と長周期極運動の観測値を VLBI 等で高精度に行えるようになり、その変化がより明確になり、1 年以下の細かな変化も観測できるようになった。巨大地震による地殻変動によって質量分布の変化から、わずかではあるが、UT1 や長周期極運動に変化が見られた観測結果もある。

特に、風等の大気循環と固体地球の相互作用により、全地球の大気角運動量と固体地球の角運動量との交換（総角運動量は保存）が行われる。UT1、Wobble は、固体地球の回転や、動きである。大気循環と地球回転は、どちらが原因であるかははっきりしていないが、原因と結果としてみるよりも、相互に関係しあう総合システムとして地球をとらえたほうが正しいと考える。

大気との相関関係で顕著なのは、エルニーニョ、ラニーニョ現象と非常に良い相関がある。また風などから求められる全地球大気角運動量の変化と、UT1 等の地球回転の観測値が非常に良い一致を示している。気象変化に見られる週間変化や季節変動なども、一致している。大局的な変化は、地球内部のマントルや核運動の動きに関係するが、大気循環との関係は明確になっている。

また、UT1 の観測値で、1 日内での変化もみられることが判明したが、それに関しては、他の UT1 の観測値から 1 日内の変化を内挿補間で補正し、1 日で 1 つの推定値として求めることが多い。しかし場合によっては 1 日内をいくつかの区間に分けてそれぞれで UT1 を推定を行うなどで詳細な変化を求めることができる。

#### ⑥ 地球自転・極運動の補間法

モデル計算では、予め地球回転の  $\Delta UT1$  (UT1) や長周期極運動（以下地球回転パラメータと呼ぶ）を用いて地球回転変換の計算を行う必要がある。これらの数値は、他の VLBI 観測などで観測された数値や、過去の観測値を用いた予測計算等の数値を用いる。

地球回転パラメータに関しては、1980年代当初は、天体の光学観測が主流であった IPMS（国際極運動観測事業）と BIH（国際時報局）の予報値、速報値、最終値を用いていた。その後 IERS（国際地球回転事業、international earth rotation service）に統合し、VLBI や GPS 等の宇宙測位技術を用いた 5 日毎の測定値と 1 ヶ月くらい先までの毎日の予報値が報告され、それを用いることになった。測定値も、すぐに観測値を知りたいという要求もあることから速報値と最終値の 2 種類があり、速報値は 1-2 週間遅れで、最終値は 1 ヶ月以上遅れて発表されていた。

VLBI の場合は処理して解析できるまでに、ファイル伝送がない当時は、数週間遅れとなるのが通常で、解析時に速報値が取得できれば、その速報値を用い、もし予報値しかない場合はそれを用いた。最終値が手に入った段階で、それを再入力して DB を作り、再解析を行う。なお、1990 年代以降は、地球回転観測が頻繁にかつ密に行われ、その観測値の間隔が、5 日から 3.5 日になり、さらに内挿計算の精度も上がり、速報値や最終値が毎日の地球回転パラメータが示されるようになってきた。

こうした地球回転パラメータを入手して実際に使う場合、実験が行われる前後 5 個程度のデータを用いて、観測時刻に内挿して用いる。この内挿方法もできるだけスムーズで、かつ近傍のデータ値の変化を反映した方法を用いる。

長周期極運動は、短期の大きな変動はなく、用いる 5 個程度の変化も大きくないので、シンプルな内挿補間でも、誤差はほとんどない。一方、 $\Delta UT1$  は、内挿に使用するデータ間隔の 1 ヶ月にもなるため、大気循環と関係性が大きいこともあって、すべての変化を内挿も埋めることはできないが、できるだけ再現する必要がある。そのため、3 次スプライン補間や 3 次多項式補間を用いた。5 日間のデータでは数日内での変化は補正できないが、毎日の観測値が手に入るようになってきた段階では、内挿補間による短期間の変化をフォローできなるようにはなってきた。

さらに、 $UT1$  においては潮汐による影響が大きく表れるが、この潮汐の影響は、モデル化しやすいので、それをあらかじめ除くことで、内挿の精度が高くなる。そこで、1981 年に Yoder がモデル化した  $UT1$  に対する潮汐補正を用いる。この式は主要な 62 周期成分で計算する。この式に含まれる地球潮汐ラブ定数については VLBI で推定した正確な数値に変更して用いることができるようになった。IERS が公表した  $\Delta UT1$  からこの潮汐成分をモデルで計算し、その後内挿して、再度観測時の潮汐効果を計算して足すことで、正確な観測値の  $\Delta UT1$  を求める。長い周期成分は、内挿間隔の 1 ヶ月程度で見ると、緩やかな変化で内挿で十分補間できるため、実際のデータを用いた内挿の方が精度がいいので 1 ヶ月以上の長い周期の成分は用いない。

IERS でも、こうしたことを配慮し、潮汐成分のうち 35 日以下の成分を除いた数値  $\Delta UT1R$  も合わせて公表している。 $\Delta UT1R$  を用いる場合は、これを単に内挿し、その後潮汐モデルによる 35 日周期以下の成分で計算した補正を加えることで、観測時間の  $\Delta UT1$  を求めることができる。