

# 地球回転運動の観測とデータ解析の新しい波

真 鍋 盛 二\*

## 1. はじめに

地球回転変動は、日常感覚からすると大変小さく、最も大きな現れである閏秒でさえも、1日の長さが厳密に86400秒ではなく、86400.002秒程になっていることを、1年ないし2年積分したものである。回転軸の地球の回りの揺らぎ(極運動)に至っては、角度にして約0.3秒、地表に沿った長さにして約10mでしかない。

しかし、この10年程における、超長基線電波干渉法(VLBI)、人工衛星レーザー測距法(SLR)、月レーザー測距法(LLR)等の、宇宙技術といわれる計測技術の発展により、この様に小さな変動でも、その1%にあたる、角度の3/1000秒以上の精度で観測できるようになってきた。1983年9月から1984年10月にかけて行われた「地球回転監視における観測・解析技術の相互比較(MERIT)」プロジェクトは、まさに、これを証明したといえる。この精度は、地球回転変動が持つ地球物理や天文分野との多様な関わりを検出・確認する可能性をもたらした。例えば、国際緯度観測事業(ILS)の前世紀から80年間にわたるデータを用いてもまだ十分には解明できなかった章動の位相遅れが、VLBIでは僅か3年程のデータから検出されている。計測技術の発展によって、いままで見えなかったものが、急速に見えるようになってきているのである。ここでは、最近の地球回転運動の観測とデータ解析について、宇宙技術に重点を置いて解説しよう。

地球回転は、極運動・UT1変動及び歳差・章動の2つに大きく分けられる。以下では、極運動と、UT1または一日の長さで表した自転速度変動(LOD)を併せて、狭い意味での地球回転パラメーター(ERP: Earth Rotation Parameters)ということにする。

## 2. 宇宙技術による地球回転の観測と解析方法

宇宙技術による地球回転観測法といっても、従来の光学望遠鏡による経緯度観測と根本的に違うわけではない。地球に固定された観測局とQSOや人工衛星等の観測天体の幾何学的位置関係を測ることににおいては同じである。また、地球回転変動が人工衛星の軌道に与える影響から地球回転変動を求める訳ではない。この意味で、QSO、人工衛星や月は、光学位置天文観測における星と

同じく、単なる目標物である。

しかし、観測量は、VLBI, SLR, LLRのいずれにおいても、電磁波の到達時間で測った長さであり、方向観測をする光学位置天文とは異なる。また、光学位置天文観測では鉛直線を基準とするが、宇宙技術にはそのような基準方向はなく、観測局相互の幾何学的配置だけが問題である。

宇宙技術では電磁波が伝播する時間を0.1nsの精度で計測する。この精度では、時間への一般相対論効果が重要である。VLBIでは、互いに遠く隔たった観測地点での原子時(固有時)で測られた時間差が観測量なので、それを共通の時系に引きなおす必要がある。SLRとLLRでは、同じ観測地点での時間差を測るが、観測地点は多数であり、また、人工衛星や月の運動は力学時で表されるので、やはり、時系を揃える必要がある。共通な時系としては、太陽系重心における静止系座標時(TDB, 重心力学時)が用いられる。

地表にある観測地点での固有時 $\tau$ とTDBの変換には、太陽、月、木星および土星重力の効果が現れる。その中で最大のものは、太陽による年周項で1.6msに達する。時系の変換以外には、光路の湾曲及びローレンツ短縮が解析に取り入れられている。

慣性系に準拠した観測地点の位置は、地球回転と地球基準座標系に対する変位の合成として表される。 $x(t)$ と $X(t)$ を、それぞれ時刻 $t$ における地球基準座標系及び慣性座標系で表された観測地点の地心位置ベクトルとする。2つのベクトルは、歳差 $P$ 、章動 $N$ 、日周回転 $S$ 及び極運動 $W$ の順に回転を重ね、 $X(t) = PNSWx(t)$ で結び付けられる。UT1変動は $S$ に含まれる。一方、 $x(t)$ は、短期的には地球潮汐、海洋潮汐や極潮汐等によって、長期的には地殻変動等によって変わる。 $s$ 及び $v$ を慣性系に準拠した天体の位置及び速度ベクトルとすると、観測方程式は、一般に、 $O-C = F(X(t), s(t), v(t))$ と書けるが、実際には、数値計算上の都合もあって、これをERPや局位置等のパラメーター $q$ の修正値 $\Delta q$ で線形化した $O-C = \partial F / \partial q \cdot \Delta q$ が使われる。

線形化が有効であるためには、正確な理論値 $C$ が必要である。 $C$ の計算には、一般相対論(時系変換、重力による伝播路の湾曲、ローレンツ短縮)、地球回転、地球変形(地球潮汐、荷重変形、極潮汐)、伝播媒質(中性大気)、地球重力場等についての最新の理論やモデルが使われている。VLBI及び人工衛星ドップラー観測に

\* 緯度観測所 Seiji Manabe: New Techniques in Earth Rotation Study

おける電離層遅延は、2 周波で観測することで殆ど取り除くことができる。しかしながら、中性大気による遅延については、光学位置天文と同様に、満足すべきモデルや実測がなく、観測誤差の大きな要因となっている。

ここで、地球回転、特に ERP と、観測地点の動きを、なんらかの先験的な条件なしには、同時に求めることはできないことを注意しておく。実際、観測地点の慣性系に対する動きを、個々の観測地点の地球基準座標系に対する水平方向の動きと地球基準座標系の回転に一意に分離することは出来ない。ここに地球基準座標系保持の難しさがある。

以下に、観測方程式及びデータ解析の方法について簡単に紹介する。

2.1 VLBI

測地位置天文用 VLBI の原理と観測システム及び一部の観測結果については、既に幾つか本誌に解説されている(松波・中島 1975, 川尻 1978, 藤下 1983, 高橋・高橋 1985, 川口・杉本 1985)。VLBI の観測量は単純に言えば、基線の両端の観測局に電波が到達する時間の差(遅延時間)及びその変化率(遅延率)である(図 1 参照)。ここでは、簡単のために、遅延時間  $\Delta\tau$  だけを考えることにする。観測される  $\Delta\tau$  は、電波の波面が A 局を通過してから B 局に到達するまでの、地球回転による B 局の動きを考慮して、

$$\Delta\tau(t) = \tau_B(t + \Delta t_g) - \tau_A(t) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $t$  は座標時、 $\tau$  は時計面の読み(固有時)、 $\Delta t_g$  は幾何学的遅延時間と伝播遅延時間  $\Delta t_p$  の和、

$$\Delta t_g = \Delta t_p + s^T(X_A(t) - X_B(t + \Delta t_g))/c \quad (2)$$

である。ただし、 $c$  は光速。この他に、時計のずれなどを考慮しなくてはならない。QSO を観測する場合には、電波源位置ベクトル  $s$  を一定な単位ベクトルとみなせる。観測方程式は、(2) 式を  $\Delta t_g$  について解いて(1) 式に代入し、更に、推定パラメーターについて線形化して得られる。

(2) 式から、VLBI では、2 点の相対位置を測るの

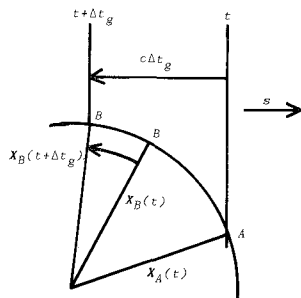


図 1

で、地球座標系の原点を決められないことがわかる。

一度に処理されるデータは、通常 1 日 24 時間分で、4 局からなるネットワークの場合 800~1000 観測である。処理には、現在のところは、単純な重み付最小 2 乗法が使われている。同時に推定されるパラメーターは、通常、ERP、局位置、中性大気パラメーター、及び時計のオフセットと歩度である。

VLBI データ解析には、K3 (KAPRI, KLEAR), MARK III (CALC, SOLVE, SOLV2), JPL の MASTERFIT 等の数万行から 20 万行に及ぶ大きなプログラムが使われている。緯度観測所においてもこれらに匹敵するプログラムの開発が完成に近付いている。

2.2 SLR

SLR では主に測地専用衛星 LAGEOS (長半径 12265 km, 離心率 0.004, 傾斜角 109°8') を観測する。STARLETTE や GEOS-3 といった他の測地衛星は高度が低いので精度が上がらず、あまり使われない。

VLBI と異なり、SLR は、地球重力のもとで運動する人工衛星を観測するので、地球重心に準拠した観測局位置が求められる。これは SLR の持つ大きな利点である。しかし、軌道の昇降点の動きと UT1 がうまく分離できず、VLBI による UT1 とは長期的(約 2 年間)な成分で違いが目立つ。SLR で求められている ERP は、極運動と LOD で議論されることが多い。

SLR の観測量は、地上局から  $t_1$  に発射されたレーザーパルスが、衛星の逆反射器で  $t_2$  に反射され  $t_3$  に戻って来るまでの時間である(図 2 参照)。従って、観測方程式は、

$$c(\tau_3 - \tau_1) = |s(t_2) - X(t_1)| + |s(t_2) - X(t_3)| + \Delta R$$

となる。ここで  $\tau_1$  と  $\tau_3$  は観測局の時計で計ったレーザーパルスの発射と帰還の時刻を示す。 $\Delta R$  は補正項で、対流圏内遅延、衛星の重心と逆反射器の位置のずれ、一般相対論による光路の曲がりや時計のずれ、観測局ごとに固有な定数(レンジバイアス)等が含まれる。

VLBI と SLR のデータ解析上での最大の違いは、SLR では、様々な摂動を考慮して、衛星の軌道と他のパラメーターをいつも同時にデータから推定しなくてはならないことである。摂動としては、地球重力ポテンシャルの

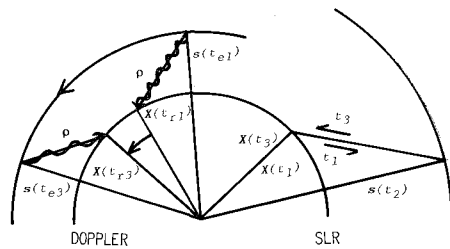


図 2

球対称からのはずれ、月・太陽・惑星による引力、地球潮汐・海洋潮汐による重力場の変動、太陽輻射圧、大気抵抗等がある。これらのうち、重力ポテンシャルについては、LAGEOS用のモデルであるGEM-L2では、球面調和関数 $V_l^m$ による $l=29$ 、 $m=28$ までの展開係数のうち300個の調和成分が与えられている。

運動方程式を解く方法には、大きく分けて、数値積分法と一般摂動論による解析的方法の2つが有るが、GEODYN (NASA)、UTOPIA (テキサス大学) 及びNAL-OD (航空宇宙技術研究所) といった、現在最高精度を持つ軌道解析プログラムには、数値積分法が採用されている。

軌道決定では、場合に応じて2つの方法が使われる。1つは、速報的な推定値を計算するカルマンフィルターによる逐次推定である。他は、最小2乗法で、データを一括処理することからバッチフィルターと呼ばれ、地球回転や観測局位置等の推定に使われている。

摂動力をまとめて $\Psi$ とすると、慣性系で表された運動方程式は、

$$\ddot{\mathbf{s}} = -GM\mathbf{s}/|\mathbf{s}|^3 + \Psi(\mathbf{s}, \mathbf{v}) = \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{q})$$

と書ける。ここで、 $\mathbf{q}$ は推定したいパラメーターのセットである。この運動方程式と観測方程式を連立して、衛星の位置とERPや観測局位置を求めるのだが、観測方程式の係数行列は、衛星の位置と速度を含むので、それらの $\mathbf{q}$ に関する偏微分係数が必要である。数値積分法では、これらの軌道に沿って時間発展していく量については、 $U = \partial \mathbf{s} / \partial \mathbf{q}$ 、 $V = \partial \mathbf{v} / \partial \mathbf{q}$ として、行列微分方程式

$$Y = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{s} U + \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{v} V + (\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{q})_{\mathbf{s}, \mathbf{v} = \text{fixed}}$$

を運動方程式と連立させて解く。

SLRでは、あらかじめ十分な精度では知り得ないパラメーター(例えば、 $\mathbf{s}$ 、 $\mathbf{v}$ の初期値)があり、線形化された観測方程式では精度が不足する。そこで、軌道や残差が収斂するまで、パラメーター修正を繰り返す。つまり、非線形最小2乗問題をガウスニュートン法で解くのである。

観測においてレーザーを1秒間に数発発射することから分かるように、データ量は膨大なので、普通は、数分間のデータをまとめて代表的な位置(ノーマルポイント)に集約してから、解析にかける。

SLRの解析プログラムは、データが多いことと軌道決定が複雑なことから、VLBIよりも大規模である。また、使われている計算機も、VLBIでは殆どミニコンだが、SLRでは汎用超大型計算機やスーパーコンピュータである。

### 2.3 LLR

LLRは多くの点でSLRと共通しているが、逆反射器の月の重心に対する位置を決めなくてはならないこと

と、月の物理移動が、地球の極運動のように、予測できない量として入ってくるのが違う。このほかに、重力による光路の湾曲が重要になる。

$\rho$ を観測局から逆反射器までの距離として、観測方程式の地球回転に関係する部分は

$$\rho = P - r(\cos \phi \cos \delta \cos H - \sin \phi \sin \delta)$$

と書ける。ここで、 $P$ は月と地球の重心の距離、 $r$ は地球の半径、 $\phi$ は観測局の緯度、 $\delta$ と $H$ は観測局からみた逆反射器の赤緯と時角である。ERPは、光学位置天文観測と同様に、緯度及び時角を通じた経度の変化として現れる。

### 2.4 人工衛星ドップラー観測

現在ERPを計算している、TRANETタイプの観測では、観測量は、名前からの予想に反して、衛星電波のドップラーシフトではなく、受信した波を一定数( $2^{14}$ )カウントする時間(約20秒)である。つまり、視線速度を直接測るかわりに、その積分値を観測する。 $N_0$ をドップラーカウント、 $t_{r1}$ 、 $t_{r3}$ をカウント開始と終了の時刻、 $f_r$ 、 $f_s$ を受信機と衛星の周波数とする。本当の観測量は $t_{r3} - t_{r1}$ であるが、それを距離差におおすと、

$$\rho_s - \rho_1 = c / f_s [N_0 - (f_r - f_s)(t_{r3} - t_{r1})]$$

とかける。ここで、距離 $\rho$ は地球の自転による観測点の動きと電波の伝播時間を考慮して、 $\rho = |s(t_e) - X(t_r)|$ と表される。観測方程式は $\rho$ を観測量として立てられ、最小2乗法で解かれる。軌道決定、観測所位置の計算はSLRと同じであるが、受信周波数が400 MHzおよび150 MHzと比較的低いことから、大気の影響の補正が異なる。

### 2.5 光学位置天文観測におけるデータ解析方法の進歩

光学位置天文観測には、全然進歩が無く、寂しい話題ばかりだったわけではなく、MERITに関連してやはり進歩があった。その第一は、従来は5日平均値(BIH)や1月平均値(IPMS)として与えられていたERPが、IPMSにおいて1日ごとの値が計算できるようになり、IPMS月報に発表されていることである。第二は、ERPと観測所に特有な経緯度の局地誤差を同時に推定できるようになったことである。この方法では、観測星の固有運動誤差(永年変化)及び気象(ほぼ年周)に起因するかなり規則的なものばかりでなく、不規則な局地誤差までも考慮されている。

## 3. 最近の地球回転運動観測結果の比較

現在定常的に結果を出している地球回転観測のネットワークのうち、光学位置天文観測、VLBI、SLRによる結果を比較しよう。表1にネットワークの概要を、図3に極運動の $x$ 成分を示す。SLR-VLBIは光学位置天文

表1 地球回転監視ネットワーク

方法	名称/センター	名目内部精度	間隔	局数	分布
光学位置天文	IPMS	0."003	1日	58	全世界
	BIH	0."010	5日	58	全世界
ドップラー	DPMS	0."003	5日	47	全世界
	VLBI	IRIS	0."001	5/1日	4
	DSN (TEMPO)	0."005	7日	3	加州, 西, 豪
SLR	CSR	0."003	5日	28	全世界
LLR	JPL	0."006	不定期	4	米, 仏, ハワイ, 豪

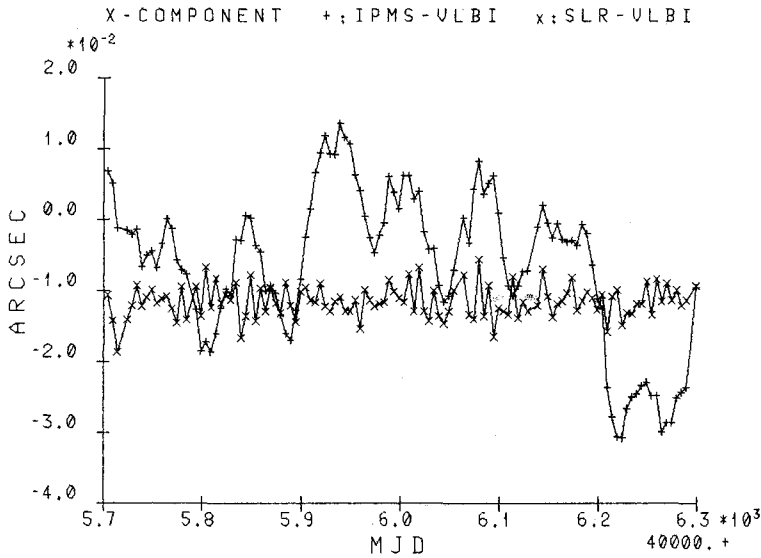


図3

(IPMS)-VLBI より1桁小さい。IPMS-VLBI の年周変化は、 $y$  及び UT1 にも見られるが、3月程度の成分は  $x$  に特有である。光学位置天文観測の問題点は、その不安定さにあるといえる。

4. 日本における地球回転観測とデータ解析

1. で述べたように、地球回転研究は観測精度の向上により大きな転機を迎えている。1988年からは、現在のIPMSとBIHに代わる新しい国際組織(仮称 IERS, International Earth Rotational Service)が発足する予定であり、実質的にVLBI, SLR および LLR だけが寄与することになっている。日本においても、これに速やかに対応しなければならないが、現状では、残念ながら、宇宙技術のなかでも一流の精度を持つ定常観測は、水路部のSLR観測があるだけで、これからの世界をリードする態勢にはなっていない。この状態を突き破るためには、定常的に観測をするVLBIシステムとデータ解析センターの2つを実現することが是非必要であり、また、これらは、世界から期待されている。

定常的にIRISネットワーク参加しているVLBI局は

北米3局とヨーロッパ1局だけであるが、3. でみたように、相当の精度でERPが決められている。しかし、地球力学の興味深い現象を定量的に議論するためには精度不足である。また、地理的偏りから、それが本当に地球を代表しているか、という不安がいつでも残る。SLRがあるとはいえ、4局では地球基準座標系の確立・維持には不足している。この不安を払拭するためには、中国と組んで独立なアジアネットワークで観測しなくてはならない。

日本には、地理的位置のほかにも、電波研究所が独自のVLBIシステムを開発するなど、技術が進んでいるという利点がある。また、地球回

転研究には長い伝統と蓄積もある。

日本のシステムで重要なことは、VLBIは1局だけではいつでも国外の相手と相談しながら運用しなくてはならず、独自の観測計画を持っていない、ということである。国際ネットワークの下の観測だけで十分な研究をすることは難しい。最低限2局、つまり1基線は必要である。また、電波源研究にも使え、小型移動VLBIの相手もできる大きさが必要である。

データ解析センターをもつことの研究上の利点は、いままでIPMS中央局に集まるデータを自由に使えたことを考えると明らかである。IPMS中央局、VLBIではK3の開発、SLRではNAL-ODの開発とMERITでの解析センター担当、等の実績をみれば、今後も日本が担当することは自然であり、その力も有る。アメリカと比べても計算機事情が良いことは、よく知られている。

上に挙げた2つを早期に実現することは、天文学と地球物理学を結ぶ学際分野である地球回転研究を発展させるために、是非必要であり、また、それによって、天文学、地球物理学の発展にも大きく寄与することが期待される。