

IV-5 アプリオリモデル計算ソフトウェア (KAPRI)

高橋 幸雄* 真鍋 盛二**

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

VLBI の相関処理・解析においては、各観測局で受信した広帯域信号を記録した磁気テープを持ち寄り、相関処理により正確な観測遅延時間・遅延率を求める。次にこれらの観測値を用いて、観測局の位置、地球回転パラメータ (UT 1, 長周期極運動)、星の位置、伝搬などの位置天文学や地球物理学等に関する各種物理量を推定する。

アプリオリモデル計算ソフトウェア (KAPRI) は、位置天文学や地球物理学等の最新理論に基づき、各種物理量の推定に必要な遅延時間・遅延率の正確な予測値や各パラメータに関する遅延・遅延率の偏微分係数を計算するソフトウェアである。

この論文では、KAPRI を構成する位置天文学や地球物理学関連モデルについて述べるとともに、VLBI の解析に関与する物理効果、物理定数、星の位置、座標系などについても触れる。

2. K-3 型 VLBI 予測値計算ソフトウェアの概要

2.1 予測値計算の必要性

K-3 型 VLBI では、約 0.1 ns (3 cm) と超高精度の遅延決定誤差で、位置天文学や地球物理学等に関する各種物理量を推定することを目標としている。このような超高度の遅延決定誤差で、観測値との差を最小にする最適パラメータを推定する場合には、その最適パラメータの近傍にいくつかの疑似最適パラメータが存在する。疑似最適パラメータとは、そのパラメータの近傍では観測値を最も再現するが、全体的には最適パラメータではないものを言う。推定の初期値となる理論的予測値が、疑似最適パラメータの近傍でなく、真の最適パラメータの近傍にくるように、位置天文学や地球物理学等の最新の物理モデルを用いて、高精度の予測誤差で各物理効果の理論的予測値計算を行う必要がある。

また、物理モデル化された各パラメータは、完全に独立ではなく互いに相関があるため、パラメータ推定で分

離しにくいものがある。例えば、1 基線における UT 1 と局位置の X, Y 成分とは一次従属しており、どちらか一方の推定しかできない。従って、一度に全パラメータを推定することは不可能で、いくつかのパラメータを選択して推定する必要がある。その場合、推定を行わない物理効果については、推定するパラメータへの影響が小さくなるように、できるだけ正確な理論的予測値計算を行う必要がある。

さらに、現在の計算の中に含まれていない物理効果についての検討や、現在の物理モデルの不十分さを検討するために、統一的な理論体系で予測値を計算する必要がある。このことにより、既知の効果と未知の効果とを分離でき、推定したパラメータの物理的意味も明確にすることができる。

2.2 KAPRI の概要

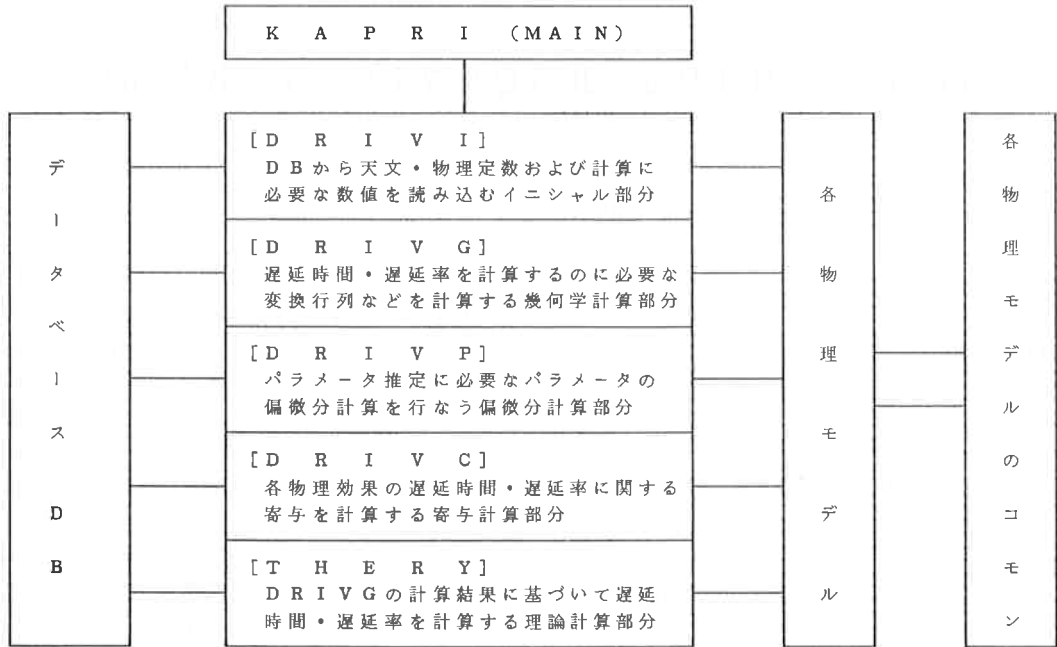
KAPRI は、ケーブル遅延、クロックオフセット、クロックレートを除く理論的予測遅延・遅延率の計算を行う。さらに、パラメータ推定ソフトウェア (KLEAR) で必要な偏微分係数の計算も行う。

第1図に KAPRI の構成を示す。まず、初期値設定部 (DRIVI) で、予測値計算するために必要な物理定数、データ (IPMS または BIH データ、JPL 惑星位置情報、気象データ) をデータベース (以下 DB と略す) から読み取る。次に幾何計算部 (DRIVG) で、DB から読み取られた数値を用いて、地球固定基準系 (グリニッジ子午線方向を X 軸とし CIO を Z 軸する座標系) から J 2000 年系の太陽慣性系 (J 2000.0 の平均春分点と天の極からなる太陽系重心を原点とする座標系) への変換行列や各種の物理効果の補正項を計算する。偏微分計算部 (DRIVP) では、パラメータ推定に必要な各パラメータに関する遅延・遅延率の偏微分係数を計算する。寄与計算部 (DRIBC) では各物理効果の遅延・遅延率に対する補正量 (寄与) を計算する。最後に THERY で、これまでの計算値を用いて理論的予測遅延・遅延率を計算する。

前述の各部はいくつかの物理効果のソフトウェアから成立っている。各物理効果は独立しているので、各物理効果に対する変更、修正は、他の物理効果のソフトウェアに影響を与えることはない。また、各種物理効果のソ

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

** 文部省緯度観測所



第1図 KAPRI の 構成 図

ソフトウェアは、いくつかの物理モデルのソフトウェアから成立っていて、各種の物理モデルの選択も可能である。

KAPRI におけるデータの受渡しは次のようになっている。1つの物理効果の DRIVI, DRIVG, DRIVP, DRIVC 間のデータの受渡しは内部コモンで行う。異なる物理効果のデータの受渡しはサブルーチン引数で行う。さらに、各物理効果で計算した結果はDBに入力される。

KAPRI では、各物理効果は米国の Mark-III の予測値計算ソフトウェア CALC と同じ手順で計算できる。その他に、文部省緯度観測所の協力の下に、地球潮汐、海洋潮汐、UT 1 地球潮汐補正、大気補正、相対論補正、章動、惑星位置、力学時計算については新しい理論が導入され、大きな成果が得られるものと期待される。全体では約45,000行（1行80文字）のソフトウェアである。

3. VLBI での物理効果の概要

3.1 理論的予測遅延時間の計算の概要

K-3 型 VLBI ソフトウェアの理論的予測遅延時間の計算手順は、まず、太陽慣性系での表現で、地球固定基準系のベースラインベクトル \vec{B} と、太陽慣性系での星の方向ベクトル \vec{S}_0 との内積をとる。そこで求められた力学時 (TDB: Barycentric Dynamical Time) での遅延時間を原子時 (TAI: International Atomic Time) での遅延時間に変換する。

次に、理論的予測遅延時間の計算手順について、簡単に触れておく。

地球潮汐による変位を加え、地球固定基準系から太陽慣性系に座標変換を行った同一波面が到着する時点でのベースラインベクトル \vec{b} は次のように表される。

$$\vec{b} = [\vec{X}(t) - \vec{Y}(t + \Delta t)] \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\vec{Y}(t + \Delta t)$, $\vec{X}(t)$ は、同一波面が到着する時点での、地球潮汐による変位も含んだ太陽慣性系での Y 局及び X 局の位置である。t, t + Δt は TDB での時刻、Δt は TDB での遅延時間である。この TDB での遅延時間 Δt は、次のように幾何学的に求められる。

$$\Delta t = (\vec{b} \cdot \vec{S}) / c \quad \dots\dots(2)$$

$$\vec{S} = (\vec{S}_0 + \Delta \vec{S}) / |\vec{S}_0 + \Delta \vec{S}| \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 \vec{S}_0 は太陽慣性系での星の方向ベクトル、 $\Delta \vec{S}$ は相対論的重力効果や太陽コロナによる伝搬路の湾曲による補正である。または c 光速である (以下同様)。

\vec{b} の中に Δt を含んでいるので、(2)式を Δt について解き直す必要がある⁽¹⁾。これは、遅延時間 Δt 内の Y 局の移動による補正項を含めることに相当する。

$$\Delta t = (\vec{B} \cdot \vec{S}) / c \times (1 - (\dot{\vec{Y}} \cdot \vec{S}) / c + (\ddot{\vec{Y}} \cdot \vec{S}) / c^2) - \frac{1}{2} (\ddot{\vec{Y}} \cdot \vec{S}) / c \times ((\vec{B} \cdot \vec{S}) / c)^2 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 \vec{Y} , $\dot{\vec{Y}}$, $\ddot{\vec{Y}}$ は太陽慣性系での Y 局の位置、速度、加速度ベクトルである。また、 $\vec{B} = \vec{X}(t) - \vec{Y}(t)$ は

同時刻でのベースラインベクトルである。

さらに、TDB と TAI の変換を用いると、次式の TAI での遅延時間 τ_0 が求められる⁽¹⁾。

$$\tau_0 = \Delta t \left(1 - \frac{(\vec{a} \cdot \vec{Y})}{c^2} - \frac{(\vec{v} \cdot \dot{\vec{Y}})}{c^2} - \frac{d}{dt} e_P \right) + \frac{(\vec{v} \cdot \vec{B})}{c^2} \quad \dots(5)$$

ここで、 \vec{v} 、 \vec{a} は太陽慣性系に対する地球重心速度、加速度ベクトル、 e_P は TDB の周期項である。

最後に、この τ_0 に、大気補正、電離層補正を加えたものが、実際の理論的予測遅延時間である。

ここで用いた座標・時系変換や、補正に関する物理モデルについては、3.2 以降で述べる。

3.2 座標変換

VLBI の遅延時間を求めるために必要な物理量は、星の方向ベクトルと観測局のベースラインベクトルである。ベースライン(観測局の位置)は、地球固定基準系で表示される。一方、星の方向ベクトルは太陽慣性系での表示が便利である。この2つのベクトルの内積をとり、遅延・遅延率を計算するためには、2つのベクトルを同じ座標系で表示しなければならない。ここでは、相対論などの各物理効果を統一的に取扱える太陽慣性系に変換する。地球固定基準系から太陽慣性系への変換に関して、次の5つの点について述べる。

(I) 地球固定基準系

観測局の座標を与える地球固定基準系は、国際慣用原点(CIO; Conventional international origin)をZ軸方向とし、国際報時局(BIH)または、IPMS(International polar Motion Service)の経度ゼロの子午線(以下ゼロ子午線と略す)で定義される。このゼロ子午線の定義は、汎地球的なものではなく、また時間の推移によっても変わっていく。したがって、便宜上1観測局の経度を定義し、それに対する相対的な位置関係で基準系を定義せざるを得ない。このような基準系として、NWT-10 D や VLBI 座標系などのいくつかの座標系が存在する。

KAPRI で地球回転による座標変換を行う地球固定基準系は、BIH または IPMS の座標原点(CIO)とゼロ子午線で定義される。一方、地球のベースラインベクトルは、VLBI 座標系で定義される。これらの座標系の関係については4.1で詳しく述べる。

地球固定基準系と光学位置天文で測定された緯度経度や重力ポテンシャルとの関係、VLBI 座標系が基準としている地球のジオイドに最も一致する準拠楕円体など多くの問題点がある。

(II) 地球回転

地球回転による座標変換は、歳差(Precession)、章動

(Nutation)、地球日周運動(Durnal Motion)、長周期極運動(Wobble)の4つの物理効果で表される。その他に、瞬間自転軸の方向で天の極を定義した場合には、この軸の地球や空間に対する日周極運動(Durnal Polar Motion)が必要となる。

(III) 時系

地球固定基準系での時系は、地球のジオイド面上の原子時(TAI)または地心での時系(TDT; Terrestrial Dynamical Time)である。KAPRI では座標系を太陽慣性系に統一しているため、最初に太陽慣性系の時系である力学時(TDB; Barycentric Dynamical Time)による理論的予測遅延時間が求められる。一方VLBIにより観測される遅延時間は、地球固定基準系の時系(TAI)による遅延時間である。従って、力学時による遅延時間を、TAI による遅延時間に変換する時系変換が必要となる。

その他に、地球の回転に関する時系である世界時(UT1; Universal Time)と、標準時刻としての協定世界時(UTC; Universal Time Coordinated)が使用される。

UT1 に関しては地球潮汐補正項を考慮しなければならない。角運動量は保存するので、地球潮汐による変形で地球の慣性モーメントが変化すると、角速度が変化する。地球潮汐補正項は、この角速度の変化による補正をUT1に加えることである。

(IV) 特殊相対論

VLBI のように超高精度の予測値が必要となる場合には、特殊相対論的な効果も考慮しなければならない。まず時系においては、TAI (または TDT) と TDB との変換は相対論により求められる。さらに、座標系においても、ベースラインベクトルはローレンツ短縮を受ける。このような時系、座標系の相対論効果は、ローレンツ変換で統一的に扱うことができる。

(V) 光行差

年周光行差とは、太陽慣性系から、太陽慣性系に対して公転運動をしている地心座標系へ座標変換することにより、星のみかけの方向が変化することである。さらに日周光行差とは、地球の自転により観測局が地心に対して相対運動するために星のみかけの方向が変化することである。

KAPRI では太陽慣性系に統一している。そのため星の方向に関する座標変換は行わないので、光行差は直接には現れない。しかし、TDB と TAI の時系の変換や遅延時間内の局の運動が、光行差と同じ効果に相当する。

3.3 地球変形

(I) 地球潮汐

地球は剛体ではなく弾性体であるため月や太陽の引力により変形を起こす。この変形により観測局の位置が変動する。この変位による遅延時間の補正が必要である。

(II) 海洋潮汐荷重

海水は月・太陽の引力により潮の満ち引きを起こし、地球表面の荷重分布を変化させる。この変化により弾性体である地球は変形し局位置が変動する。この変位による遅延時間の補正が必要である。

3.4 星の位置変化

(I) J 2000年系の星の位置

K-3 型 VLBI ソフトウェアは、J 2000年系による理論体系で統一している。

J 2000年系の星の位置カタログとしては、最近のVLBI 観測から求められたものがある。このカタログ以外には、光学・電波位置天文で蓄積されたB 1950年系の星の位置をJ 2000年系へ変換することにより、J 2000年系の星の位置カタログを求めることもできる。

(II) 星の固有運動

星は太陽系に対して動いているため、太陽慣性系からみた星の位置は変化する。この動きを固有運動という。VLBI で観測する準星のように数十億 pc も離れている場合には、星の固有運動は無視できる。

(III) 視差

太陽系重心でみた星の位置と地球重心でみた星の位置とは次の理由により異なる。地球重心系の太陽慣性系に対する相対運動により、星のみかけの方向の位置のずれ(光行差)が生ずる。これ以外に、位置による実質的な差も含まれる。後者を視差という。視差には地球重心と太陽系重心の位置の違いによる年周視差と、地球重心と観測局の位置の違いによる地心視差とがあるが、いずれも準星においては無視しうる微小なものである。

3.5 伝搬路修正

(I) 相対論的重力効果による伝搬路湾曲

太陽などの重力場を電波が伝搬する場合、重力ポテンシャル場により伝搬路が湾曲する。このため地球に到達する電波の方向と実際の星の方向とは異なるので、星の方向ベクトルを補正する必要がある。

(II) 太陽コロナによる伝搬路湾曲

太陽の近傍を通過する電波は、電離した太陽コロナの分散性の変化により伝搬路が湾曲する。このため星の方向ベクトルが変化し遅延時間に影響を及ぼす。しかし、このコロナの効果は太陽の非常に近い所を通過する場合にのみ影響を及ぼす。その場合には、太陽によるアンテナのシステム雑音が大きくなるため観測を避ける。従って、太陽コロナの効果は、特殊な場合を除いてほとんど考えなくてもよい。

(III) 電離層効果

地球表面にある電離層を電波が通過する場合、電離層により、伝搬速度が真空の光速より遅くなり、伝搬路も湾曲する。これによる遅延時間の補正が必要になる。電離層効果は、電波の周波数で異なり、2周波(S band, X band)の観測値の差から求めることができる。

(IV) 乾燥大気・水蒸気による excess path

乾燥大気・水蒸気中を通過する電波は伝搬速度が真空の光速より遅くなり、伝搬路も曲がる。これによる遅延時間の補正が必要になる。

3.6 アンテナ軸オフセット

VLBI の基準点は、アンテナの方向に依存しない静止点で、動軸を含む固定軸に垂直な面と固定軸との交点で定義される。この基準点とアンテナの受信点の差は、一定のオフセット以外にアンテナの方向にも依存する。この基準点とアンテナの受信点のアンテナ方向依存性を表す効果をアンテナ軸オフセットという。

4. 物理効果の説明とそのモデル

4.1 座標変換

(I) 地球固定基準系

KAPRI では、観測局の位置やベースラインベクトルを表示する地球固定基準系としては、VLBI 座標系を使用している。この座標系の基準点としては、力学的に求められた米国の Goldstone 64m の位置が用いられていたが、その後、Mark I時代に VLBI を用いて求められた Haystack の位置に変更された。この Haystack の位置を基準点として、現在の VLBI 座標系が定義されている。VLBI 座標系以外の座標系(たとえば NWT-10 D)ではX軸方向はグリニッジの方向である。一方、VLBI 座標系でのX方向は、Z軸まわりに -0.54 arcsec 回転させた方向である。

KAPRI での理論的予測値計算の手順における地球固定基準系は、地球回転パラメータ(UT1, Wobble)を表示している基準系である。この地球固定基準系は、BIH または IPMS ゼロ子午線をX軸方向とし、慣用国際原点(CIO)をZ軸とする座標系では定義される。BIH または IPMS ゼロ子午線の定義は、明確なものではなく、レーザ測距、VLBI、光学位置天文による観測値(IPMSでは光学位置天文のみ)を、適当に重みづけしたものである。

KAPRI での理論的予測値計算の手順における地球固定基準系と、局座標を表す VLBI 座標系の違いについて考慮する必要がある。この2つの座標系の差が、地球回転パラメータ(UT 1, Wobble)を推定しない場合には、XYZ などの他の推定結果の中に含まれるし、地球

回転パラメータを推定した場合には、地球回転パラメータ推定結果の中に含まれる。

(II) 長周期極運動 (Wobble)

各瞬間、地球はある軸のまわりに自転している。この軸を瞬間自転軸と言い、数日間の平均した瞬間自転軸を長周期自転軸と言う。長周期自転軸と天球の交点である長周期極は、BIH または IPMS のゼロ子午線 (グリニッジの方向) を X 軸、西経 90° 方向を Y 軸、CIO を原点とする極座標で表示される。この CIO は、1900年～1905年の北極の平均位置で決められている。長周期極は、地球固定系に対しては反時計回りに約 430 日のチャンドラ周期と約 12ヶ月周期で運動している。CIO を Z 軸方向とする地球固定基準系から、この長周期極を Z 軸方向とする座標系に変換するのが、長周期極運動の変換行列 RW である。

長周期極運動としては、BIH または IPMS が発表する長周期極運動の XY 成分の値を使用する。この発表値によって決められる長周期自転軸は、地球固定基準系から見て日周運動を含まない軸であるともいえる。

この長周期極運動は、大気圧変動、巨大地震、マンテル対流、マンテルの変形などに影響される。

BIH または IPMS の長周期極運動の値は、直交座標系でみた場合左手系である。K-3 型 VLBI 解析ソフトウェアでは、右手座標系に統一しているので、公表された BIH または IPMS の長周期極運動の値を使用するには、Y 成分の符号を逆にした値を採用しなければならない。IV-3 の KASET で DB に入力される値は右手系での数値であるので、予測値計算でも、右手系として長周期極運動を取扱う。

この長周期極運動の変換行列 RW は次式で表される。

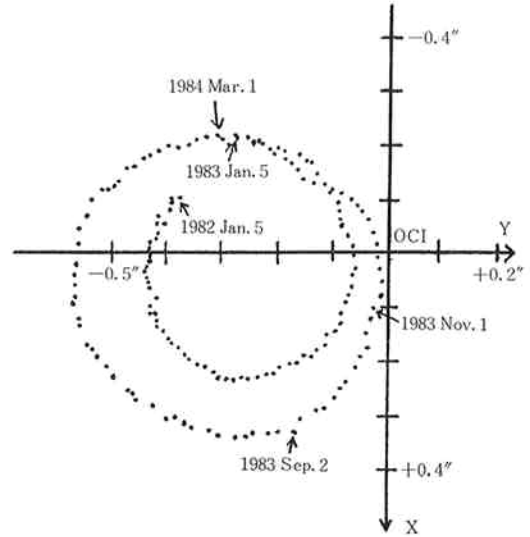
$$RW = R_x(-WOBY) \times R_y(WOBX) \quad \dots(6)$$

ここで $R_x, R_y, R_z(\theta)$ はそれぞれ X, Y, Z 軸まわりの反時計方向への角度 θ の座標回転行列である (以下同様)。また WOBX, WOBY は右手系の長周期極運動の XY 成分である (単位: ラジアン)。

WOBX, WOBY については、IPMS または BIH が 1 日ごとのデータを発表している。KAPRI では、この数値を用いて、各観測の参照時刻 (UTC での時刻) における補間値を、ラグランジュ補間又はスプライン補間で計算する。1982年～1984年2月の IPMS の長周期極運動を第2図に示す。

長周期極運動の遅延時間に対する影響を調べるため、1984年1月23日～24日に行われた第1回日米システムレベル実験における長周期極運動について述べる。

長周期極は、CIO 原点から離れる傾向にあり、X,



X 軸: グリニッジ子午線方向,
Y 軸: 東経度90方向 (右手系)

第2図 長周期極運動 (1982年1月～1984年2月)

Y 成分とも約 0.15 arcsec の大きさである。実験時の長周期極運動の遅延時間への影響は、X 成分を第3図に、Y 成分を第4図に示す。横軸は観測番号で、縦軸は、長周期極運動の X, Y 成分による遅延時間への影響 (単位: ns) である。各星に対しては、ほぼ一定の値を取り、X 成分で最大 5 ns, Y 成分で最大 20 ns である。第1回システムレベル実験での鹿島-モハービ基線のベースラインベクトルは東西方向であるため、Y 成分が大きく、長周期極運動の遅延時間への影響も、X 成分の寄与に比べて Y 成分が約 4 倍大きくなる。一般に長周期極運動の遅延時間への影響は、ベースラインベクトルの選り方、星の選り方で異なるが、数十 ns 程度の大きさである。

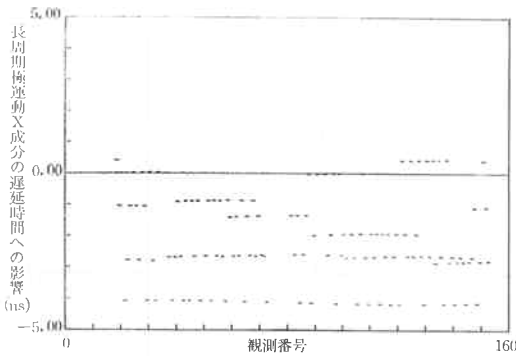
また、遅延時間への寄与は各星に対しては24時間中ではほぼ一定の値を取るため、遅延時間への影響の時間微分である遅延率への影響は、小さく無視できる。

IPMS データと BIH データの相違点については、(VI) で述べる。

(III) 日周運動 (Diurnal Motion)

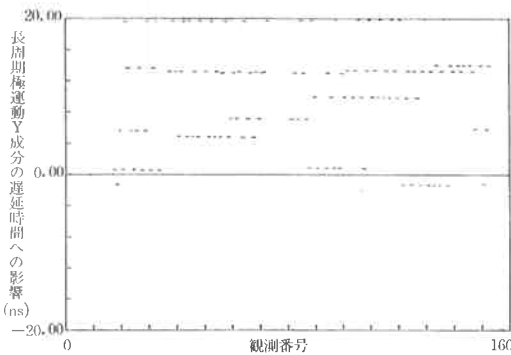
前述した長周期自転軸のまわりに、グリニッジ視恒星時 (GAST; Greenwich Apparent Sidereal Time) だけ回転する座標変換が、日周運動行列 RS である。GAST は、長周期自転軸まわりのグリニッジ子午線 (BIH または IPMS ゼロ子午線) と真の春分点のなす角度で定義される。

日周運動による座標変換行列 RS は、GAST を用い



第1回システムレベル実験 (1984年1月23日, 鹿島一モハービ)

第3図 長周期極運動X成分の遅延時間への寄与 (単位: ns)



第1回システムレベル実験 (1984年1月23日, 鹿島一モハービ)

第4図 長周期極運動Y成分の遅延時間への寄与 (単位: ns)

て次式で表される.

$$RS = R_z(-GAST) \quad \dots\dots(7)$$

GAST は, 平均春分点とグリニッジ子午線のなす角である GMST(Greenwich Mean Sidereal Time) と, 章動による分点差補正の和である.

また, GMST は, 0時 UTC での GMST に, 地球自転による 0時 UTC からの経過時刻に関する時角を加えたものである. 長周期極運動まわりの自転を表すものは UT 1 である. この数値は, 長周期極運動と同様に, BIH または IPMS のデータを用いて求められる.

GAST を式で表すと次のようになる (単位; ラジアン).

$$GAST = GMST + \Delta\phi \times \cos(\epsilon) \quad \dots\dots(8)$$

ここで第2項は章動による補正項であって, $\Delta\phi$ は黄経の章動, ϵ は章動も含めた真の黄道傾斜角 (黄道と天の赤道となす角) である. これらについては, 次の章動のところでは詳細に述べる.

$$GMST = GMST(0h \text{ UTC}) + UT1 \times \omega \quad \dots\dots(9)$$

ここで, GMST (0h UTC) は, 0時 UTC での

GMST であり, 第2項は, 0時 UTC からの経過時刻に関する時角である. それらの値は次式で与えられる⁽²⁾.

$$\begin{aligned} GMST(0h \text{ UTC}) &= 24110.54841 \\ &+ 8640184.812866 T_0 \\ &+ 0.093104 T_0^2 - 6.2 \times 10^{-6} T_0^3 \quad \dots\dots(10) \\ \omega &= 1.002737909350795 + 5.9006 \times 10^{-11} T_0 \\ &- 5.9 \times 10^{-15} T_0^2 \quad \dots\dots(11) \end{aligned}$$

単位は, GMST(0h UTC) が Time sec, ω が Time sec/sec である.

また, T_0 , J2000=2451545.0ユリウス日(以下J2000.0と記す)からの0時 UTC の経過日数をユリウス世紀単位で表したものである.

$$T_0 = (0 \text{ 時 UTC} - J2000) / 36525 \quad \dots\dots(12)$$

次に, UT 1 の値は, IPMS または BIH の発表データを用いる. IPMS または BIH の発表データは UT 1-UTC の値であり, これらのデータに, ラグランジュ補間またはスプライン補間を施した各観測時刻 (UTC での時刻) における補間値を UTC に加えて UT 1 を求める. こうした UT 1 については, 4.2の時系で更に詳しく述べる. また, IPMS データと BIH データの違いについては (VI) で述べる.

(IV) 章動 (nutatation)

月・太陽の引力の作用で, 地球の形状軸が, 空間に対して, 1日より長いタイムスケール (7日~18.6年の周期) でゆっくりと変化する現象を章動という. 地球の形状軸とは, マントルの慣性主軸であり, 空間に対して, 日周成分を含まない軸である. この章動については, J. Wahr が詳細に研究し, 高精度の理論的予測値計算が可能である. 月・太陽の引力は, 章動だけでなく地球潮汐などの現象を引き起こす. しかし, 天の極を地球の形状軸と定義した場合には, 章動と地球潮汐とは簡単に分離ができると考えられている. 詳細は文献(3)に譲り, ここでは簡単に触れるのみとする.

章動による座標変換は, 形状軸をZ軸として真の春分点方向をX軸とする座標系から, 形状軸の空間における平均回転軸 (歳差を除いた回転軸) をZ軸とし, 平均春分点方向をX軸とする座標系への変換である. この平均軸や平均春分点の運動は, 永年のなもので歳差と呼ばれ (V) で述べる.

この座標変換を表す行列 RN は, 次式で表される.

$$RN = R_x(-\epsilon_0) \times R_z(\Delta\phi) \times R_x(\epsilon_0 + \Delta\epsilon) \quad \dots\dots(13)$$

ここで ϵ_0 は平均黄道傾斜角で, $\Delta\epsilon$, $\Delta\phi$ は黄道傾斜角と黄経の章動である. 黄経傾斜角とは, 天の赤道と公転軌道面のなす角であり, 天の赤道の章動による変動を平均化したものが平均黄道傾斜角である.

ϵ_0 は、歳差運動を行う平均形状軸に関する数値であり、Lieske が用いた数値⁽⁴⁾を使用する。

$$\epsilon_0 = 8.4381448 \times 10^{-4} - 46.815 T - 5.9 \times 10^{-4} T^2 + 1.813 \times 10^{-3} T^3 \quad \dots\dots(14)$$

ここでTは観測時刻における TDB (力学時) を J 2000.0 からのユリウス経過世紀で表したものである。

$$T = (TDB - J 2000) / 36525 \quad \dots\dots(15)$$

章動 $\Delta\phi$, $\Delta\epsilon$ は JPL の惑星暦情報から直接に計算された数値を用いることもできるが、主には、J. Wahr の章動 (16式) を用いる⁽³⁾。

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \sum_{i=1}^{\Omega} (A_i + a_i T) \sin(\omega_i(T)) \\ \Delta\epsilon &= \sum_{i=1}^{\Omega} (B_i + b_i T) \cos(\omega_i(T)) \\ \omega_i(T) &= L_i + l_i T + L_i^2 T^2 + L_i^3 T^3 + L_i^4 T^4 + L_i^5 T^5 \end{aligned} \quad \dots\dots(16)$$

ここで i は、外力の各周期に対応し l, l', F, D, Ω は Brown の天文基本指数である。

また、 A_i, a_i, B_i, b_i は章動の各成分の振幅であり、第1表の J. Wahr の係数表を用いる。

J. Wahr は流体核共鳴 (付録参照) も含めたマンツルの形状軸の章動計算を行った⁽³⁾。そして、0.0001arcsec までの106項の振幅 A_i, a_i, B_i, b_i を求めた。J. Wahr のモデルは木下による剛体モデルでの地球の章動計算⁽⁵⁾と流体核を含んだ地球モデル (1066A モデル) を用いたものである⁽⁶⁾。KAPRI では、J. Wahr の係数表を用いて章動の計算を行っている。

(V) 歳差 (precession)

歳差は、地球の形状軸が地球の公転軌道面に対して約 $23^\circ 26'$ の傾きを保ったまま、自転と逆向きに約25800年周期で一定の速度で運動する現象である。月・太陽による起潮力トルクは、時間平均化された一定方向のトルクと、そのまわりの変動成分とに分けられる。後者が章動に対する起潮力トルクであり、前者の一定方向のトルクが歳差に関する起潮力トルクである。この一定方向のトルクが、地球に対して作用したときに生じる平均形状軸の運動が歳差である。

歳差に関する座標変換は、観測時刻における平均形状軸と平均春分点からなる座標系から、元期 (J 2000.0) における平均形状軸と平均春分点からなる座標系への変換である。この変換行列 RP としては IAU 1976 で採択された天文物理定数を用いて計算した Lieske の変換行列を用いる⁽⁴⁾。

$$\begin{aligned} RP &= R_z(-(\pi/2 - \xi)) R_x(-\theta) R_z(\zeta + \pi/2) \\ &= R_z(\xi) R_y(-\theta) R_z(\zeta) \quad \dots\dots(17) \end{aligned}$$

ここで π は円周率である。 θ は観測時刻と元期との平均赤道面 (平均形状軸に垂直な平面) の変化角、 $\pi/2 - \xi$ は元期の平均赤道面と観測時刻の平均赤道面の交線

の元期での平均春分点からの赤経、 $\pi/2 + \zeta$ は元期の平均赤道面と観測時刻の平均赤道面の交線の観測時刻での平均春分点からの赤経である。この ξ, θ, ζ は次式で求められる (単位; arcsec)

$$\begin{aligned} \xi &= 2306.2181 T + 0.30188 T^2 + 0.017998 T^3 \\ \zeta &= 2306.2181 T + 1.09468 T^2 + 0.018203 T^3 \\ \theta &= 2004.3109 T - 0.42665 T^2 - 0.041833 T^3 \end{aligned} \quad \dots\dots(18)$$

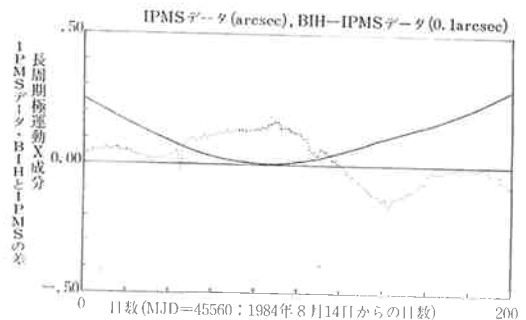
ここでTは各観測時刻に対応する力学時の J 2000.0 からの経過ユリウス世紀である (15式)。

(VI) IPMS データと BIH データ

長周期極運動や UT 1 としては、IPMS または BIH の発表データを使用している。この2つの機関が発表しているデータの差には次の様な差がある。

BIH と IPMS において UT 1-UTC が異なる。IPMS の発表データは、地球潮汐による35日以下の短周期項を除外し時間平均を行っている。一方 BIH の発表データには、UT 1R と UT 1 の2種類のデータがある。UT 1R は、IPMS と同時に、35日以下の地球潮汐短周期項を除いたものであるが、UT 1 は、地球潮汐による短周期項を含んだままの数値である。従って、BIH の UT 1R や IPMS の発表値を使用する場合には、地球潮汐による短周期項を別に導入する必要がある。

第5, 6, 7図に、IPMS データと BIH データの1983年~1984年2月間の比較結果を示す。この2つのデータの差は、長周期極運動で約 10 marcsec, UT 1 で約 2 msec である。この差は、長周期極運動や UT 1 を、局位置と同時推定できない場合には、基線長への影響は小さいが、局位置の推定値には大きな影響を与える。たとえば、第1回システムレベル実験 (鹿島一モハービ1基線の実験) では、IPMS データと BIH データの差の



期間: 1983年8月14日~1984年2月29日; USNO Series 7 のデータより
実線: IPM データ (arcsec), 点線: BIH-IPMS (0.1 arcsec)

第5図 長周期極運動 X 成分の IPMS データと BIH データとの差

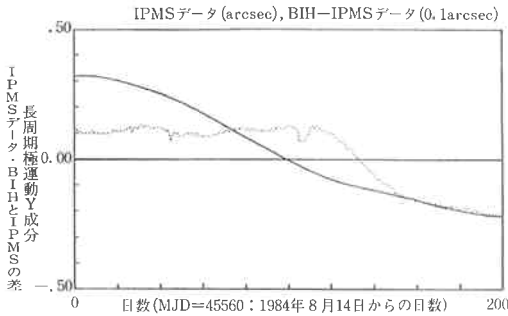
第1表 J. Wahr の J2000 年系の章動係数表 (0.0001 arcsec 以上の振幅)
(J. Wahr. Geopys J.R. Astron. Soc (1981) 64からの引用)

No.	Brown の 天文 基本 角					黄経の章動 ($d\phi$)		黄道傾斜角の章動 ($d\epsilon$)		周 期 Days
	l	l'	F	D	Ω	A	a	B	b	
1					1	-171996	-174.2	92025	8.9	6798.4
2					2	2062	0.2	-895	0.5	3399.2
3	-2		2		1	46		-24		1305.5
4	2		-2			11				1095.2
5	-2		2		2	-3		1		1615.7
6	1	-1		-1		-3				3232.9
7		-2	2	-2	1	-2		1		6786.3
8	2		-2		1	1				943.2
9			2	-2	2	-13187	-1.6	5736	-3.1	182.6
10		1				1426	-3.4	54	-0.1	365.3
11		1	2	-2	2	-517	1.2	224	-0.6	121.7
12		-1	2	-2	2	217	-0.5	-95	0.3	365.2
13			2	-2	1	129	0.1	-70		177.8
14	2			-2		48		1		205.9
15			2	-2		-22				173.3
16		2				17	-0.1			182.6
17		1			1	-15		9		386.0
18		2	2	-2	2	-16	0.1	7		91.3
19		-1			1	-12		6		346.6
20	-2			2	1	-6		3		199.8
21		-1	2	-2	1	-5		3		346.6
22	2			-2	1	4		-2		212.3
23		1	2	-2	1	4		-2		119.6
24	1			-1		-4				411.8
25	2	1		-2		1				131.7
26			-2	2	1	1				169.0
27		1	-2	2		-1				329.8
28		1			2	1				409.2
29	-1			1	1	1				388.3
30		1	2	-2		-1				177.5
31			2		2	-2274	-0.2	977	-0.5	13.7
32	1					712	0.1	-7		27.6
33			2		1	-386	-0.4	200		13.6
34	1		2		2	-301		129	-0.1	9.1
35	1			-2		-158		-1		31.8
36	-1		2		2	123		-53		27.1
37				2		63		-2		14.8
38	1				1	63	0.1	-33		27.7
39	-1				1	-58	-0.1	32		27.4
40	-1		2	2	2	-59		26		9.6
41	1		2		1	-51		27		9.1
42			2	2	2	-38		16		7.1
43	2					29		-1		13.8
44	1		2	-2	2	29		-12		23.9
45	2		2		2	-31		13		6.9
46			2			26		-1		13.6
47	-1		2		1	21		-10		27.0
48	-1			2	1	16		-8		32.0
49	1			-2	1	-13		7		31.7
50	-1		2	2	1	-10		5		9.5
51	1	1		-2		-7				34.8
52		1	2		2	7		-3		13.2
53		-1	2		2	-7		3		14.2

(単位 : 0.0001 arcsec)

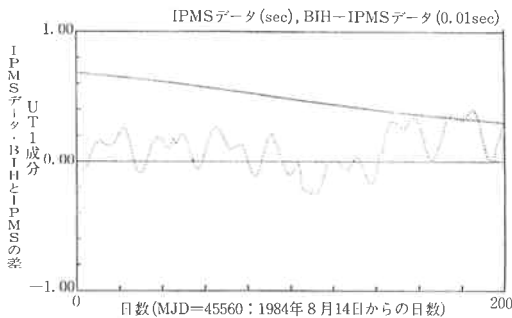
No.	Brown の 天 文 基 本 角					黄経の章動($d\psi$)		黄道傾斜角の章動		周 期
	l	l'	F	D	Ω	A	a	B	b	Days
54	1		2	2	2	-8		3		5.6
55	1			2		6				9.6
56	2		2	-2	2	6		-3		12.8
57				2	1	-6		3		14.8
58			2	2	1	-7		3		7.1
59	1		2	-2	1	6		-3		23.9
60				-2	1	-5		3		14.7
61	1	-1				5				29.8
62	2		2		1	-5		3		6.9
63		1		-2		-4				15.4
64	1		-2			4				26.9
65				1		-4				29.5
66	1	1				-3				25.6
67	1		2			3				9.1
68	1	-1	2		2	-3		1		9.4
69	-1	-1	2	2	2	-3		1		9.8
70	-2			1		-2		1		13.7
71	3		2		2	-3		1		5.5
72		-1	2	2	2	-3		1		7.2
73	1	1	2		2	2		-1		8.9
74	-1		2	-2	1	-2		1		32.6
75	2			1		2		-1		13.8
76	1				2	-2		1		27.8
77	3					2				9.2
78			2	1	2	2		-1		9.3
79	-1				2	1		-1		27.3
80	1			-4		-1				10.1
81	-2		2	2	2	1		-1		14.6
82	-1		2	4	2	-2		1		5.8
83	2			-4		-1				15.9
84	1	1	2	-2	2	1		-1		22.5
85	1		2	2	1	-1		1		5.6
86	-2		2	4	2	-1		1		7.3
87	-1		4		2	1				9.1
88	1	-1		-2		1				29.3
89	2		2	-2	1	1		-1		12.8
90	2		2	2	2	-1				4.7
91	1			2	1	-1				9.6
92			4	-2	2	1				12.7
93	3		2	-2	2	1				8.7
94	1		2	-2		-1				23.8
95		1	2		1	1				13.1
96	-1	-1		2	1	1				35.0
97			-2		1	-1				13.6
98			2	-1	2	-1				25.4
99		1		2		-1				14.2
100	1		-2	-2		-1				9.5
101		-1	2		1	-1				14.2
102	1	1		-2	1	-1				34.7
103	1		-2	2		-1				32.8
104	2			2		1				7.1
105			2	4	2	-1				4.8
106		1		1		1				27.3

(単位 : 0.0001 arcsec)



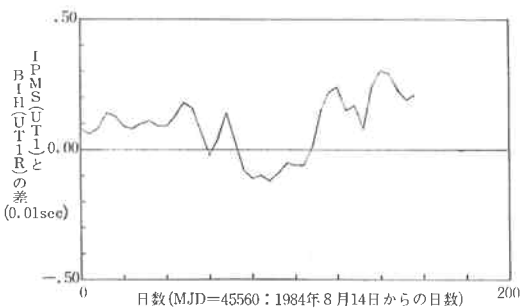
期間：1983年8月14日～1984年2月29日；USNO Series 7のデータより
 実線：IPMSデータ (arcsec)，点線：BIH-IPMS (0.1 arcsec)

第6図 長周期極運動Y成分の IPMS データと BIH データとの差



期間：1983年8月14日～1984年2月29日；USNO Series 7のデータより
 実線：UT1 データ (sec)，点線：BIH-IPMS(0.01 sec)

第7-1図 UT1 の IPMS データと BIH データとの差



期間：1983年8月14日～1984年2月29日；USNO Series 7のデータより
 実線：UTR (BIH)-UT1 (IPMS) (0.01 sec)

第7-2図 UT1 の IPMS データと UT1R の BIH データとの差

影響は、基線長に対しては約2cmと小さいが、基線のX成分で約75cm，Y成分で約18cm，Z成分で約30cmと大きなものであった。

(VII) 天文基本角

章動や潮汐の精密計算においては月・太陽の位置を正確に記述するパラメータが重要である。このため天文基本角 l, l', F, D, Ω が用いられる。各パラメータの定義は、 l ：月の平均近点離角， l' ：太陽の平均近点離角， F ：昇交点から測った月の平均黄経， D ：太陽と月の平均離角， Ω ：月の平均昇交点黄経である。

J2000年系での天文基本角の計算式としては、第1に V. Flandern による次式が利用できる(単位；arcsec)。

$$l = 485866.733 + \text{MOD}(1325T) \times 1296000 + 715922.633T + 31.31T^2 + 0.064T^3$$

$$l' = 1287099.804 + \text{MOD}(99T) \times 1296000 + 1292581.224T - 0.577T^2 - 0.012T^3$$

$$F = 335778.877 + \text{MOD}(1342T) \times 1296000 + 295263.137T - 13.257T^2 + 0.011T^3$$

$$D = 1072261.307 + \text{MOD}(1236T) \times 1296000 + 1105601.328T - 6.891T^2 + 0.019T^3$$

$$\Omega = 450160.280 - \text{MOD}(5T) \times 1296000 - 482890.539T + 7.455T^2 + 0.008T^3$$

.....(19)

ここで、MOD(a) は、a の小数部分を表す。また、T は各観測時刻の力学時の J2000からの経過ユリウス世紀である。

第2に Kaplan による J2000年系での天文基本角の計算式が次式で与えられる⁽⁷⁾。

$$l = 485866.5228 + \text{MOD}(1325T) \times 1296000 + 715923.12699T + 9.1017378T^2 + 0.003878955T^3$$

$$l' = 1287091.5444 + \text{MOD}(99T) \times 1296000 + 1292577.977016T - 0.1564731T^2 - 0.000894132T^3$$

$$F = 335782.1772 + \text{MOD}(1342T) \times 1296000 + 295267.137T - 3.1662792T^2 - 0.000092043T^3$$

$$D = 1072260.9648 + \text{MOD}(1236T) \times 1296000 + 1105600.86837T - 1.4095728T^2 + 0.000512811T^3$$

$$\Omega = 450156.0456 - \text{MOD}(5T) \times 1296000 - 482896.253367T + 2.0538738T^2 + 0.000604854T^3$$

.....(20)

これらの2式は KAPRI において自由に選択することができる。

一方B1950年系での天文基本角としては1959年までは Brown の天文基本角の表が利用されてきたが⁽⁸⁾、1960年以降は、Brown の理論式に基づく直接計算が使用されてきている⁽⁹⁾。ここでは Brown の理論式に基づき、

ESANE (1973) において直接計算によって求められた天文基本角の式を示す (単位; 度).

$$\begin{aligned}
 l &= 296.104608 + \text{MOD}(1325 T_0) \times 360 \\
 &\quad + 198.849108 T_0 + 9.19167 \times 10^{-3} T_0^2 \\
 &\quad + 1.43889 \times 10^{-5} T_0^3 \\
 l' &= 358.475833 + \text{MOD}(99 T_0) \times 360 \\
 &\quad + 359.04975 T_0 - 0.00015 T_0^2 - 3.333 \times 10^{-6} T_0^3 \\
 F &= 11.250889 + \text{MOD}(1342 T_0) \times 360 \\
 &\quad + 82.02515 T_0 - 0.0032 T_0^2 - 3.33 \times 10^{-7} T_0^3 \\
 D &= 350.737486 + \text{MOD}(1236 T_0) \times 360 \\
 &\quad + 307.114217 T_0 - 0.001436 T_0^2 \\
 &\quad + 1.889 \times 10^{-6} T_0^3 \\
 \Omega &= 259.183275 - \text{MOD}(5 T_0) \times 360 \\
 &\quad - 134.142008 T_0 - 0.002078 T_0^2 \\
 &\quad + 2.222 \times 10^{-6} T_0^3 \quad \dots\dots(21)
 \end{aligned}$$

ここで, T_0 は各観測時刻の力学時の B 1900 (241502 0.5 ユリウス日) からの経過世紀である.

この式は B 1950 年系を用いる物理モデルや UT1 の地球潮汐補正項などで使用される.

(VIII) J 2000 年系と B 1950 年系

K-3 型 VLBI 処理・解析ソフトウェアは J 2000 年系に統一されている. 国際的には 1984 年より B 1950 年系から J 2000 年系への変更が進められている.

この 2 つの座標系の主な違いは次の 2 点である.

まず元期の定義方法の変更である. B 1950 年系はベッセル年初を基準としている. ベッセル年初は次式で与えられる平均太陽の赤経 (α_E) が 18 h 40 m になる暦表時 ET で定義される.

$$\begin{aligned}
 \alpha_E &= 18 \text{ h } 38 \text{ m } 45.836 \text{ sec} + (8640184.542(\text{ET})) \text{ sec} \\
 &\quad + (0.0929(\text{ET})^2) \text{ sec} \quad \dots\dots(22)
 \end{aligned}$$

1 年は 365.242198781 ユリウス日であり, ある観測時刻のベッセル年 BE は次式で計算される.

$$\text{BE} = 1900 + (\text{JED} - 2415020.31352) / 365.242198781 \quad \dots\dots(23)$$

ここで, JED は, ユリウス暦表時である.

B 1950 年系の元期は, 1950 年のベッセル年初 (B 1950.0 = 2433282.42345905 ユリウス日) である. B 1950 年系での歳差定数, 座標系, 星の位置などの元期は, この元期 B 1950.0 である.

一方 J 2000 年系は J 2000.0 を基準とするユリウス年が時系の基本である.

$$\text{JE} = 2000 + (\text{JED} - 2451545.0) / 365.25 \quad \dots\dots(24)$$

この座標系の元期は, 2000 年 1 月 1 日 12 時のユリウス日 (J 2000.0 = 2451545.0 ユリウス日) である. J 2000 年系での歳差定数, 座標系, 星の位置などの元期は, これに統一されている.

第 2 の相違点は, 天の極の定義である. B 1950 年系では, 地球の瞬間自転軸により天の極が定義されるが, J 2000 年系ではマンツルの形状軸により天の極が定義される. この形状軸の空間に対する運動は, 太陽・月の引力による起潮力トルクだけで取扱える. 一方瞬間自転軸の空間に対する運動は, 太陽・月の引力による起潮力トルク以外に, 地球内部の大規模変動が複雑に関与する. そのため, 瞬間自転軸で天の極を定義した場合, 概念的にも物理効果の分離という点でも複雑になる.

最近の研究で, 形状軸で天の極の定義をする方が, 地球の構造の影響などを正確に取扱うことができ, 高精度のモデルの作成が可能となることが明らかになってきた. さらに, 地球潮汐, 章動, 極運動などの物理効果の分離が明確になるといわれている.

この天の極の定義の変更で, 現実的な流体核をもつ弾性体としての地球モデルに基づいた理論計算が可能となるだけでなく, 次の (IX) で述べるように日周極運動が不必要になる.

B 1950.0 年系での変換行列の計算アルゴリズムは付録で示す.

(IX) 日周極運動 (Diurnal polar motion)

B 1950 年系では, 日周極運動による座標変換が必要であることは既に述べた. これは, B 1950 年系の Woolard の章動モデルのように, 天の極を, 瞬間自転軸で定義した場合に必要な効果である. 日周極運動の物理的意味は, ポアソン表現を使用すると明らかになる.

空間に対して向きを変えない円錐と地球に固定された円錐を考える. 章動は, 空間円錐に対する物体円錐の運動で表される運動成分である. この運動 (物体円錐が空間円錐内沿いに転がる運動) に対しては, 物体円錐の中心線である物体軸は長周期運動を行う. この時, 物体円錐と空間円錐との接線である瞬間自転軸は物体軸のまわりで日周運動を行う.

つまり, 瞬間自転軸を天の極とした場合は, 極運動, 章動いずれにも日周運動成分が必要となる. 一方物体円錐の中心線である形状軸によって天の極を定義すれば, 地球に対しても空間に対しても日周運動成分は不必要になることが明らかとなってきた.

B 1950 年系での瞬間自転軸の日周運動を表す日周極運動については付録で述べる.

(X) 座標系

座標系変換についてまとめると次のようになる.

J 2000 年系では, まず極を VLBI 座標系の Z 軸である CIO から長周期極すなわち形状軸に変換し, 変換された Z 軸のまわりに回転を行い, X 軸をグリニッジ方向から真の春分点方向に変換する. 次に, 形状軸の空間に対