

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

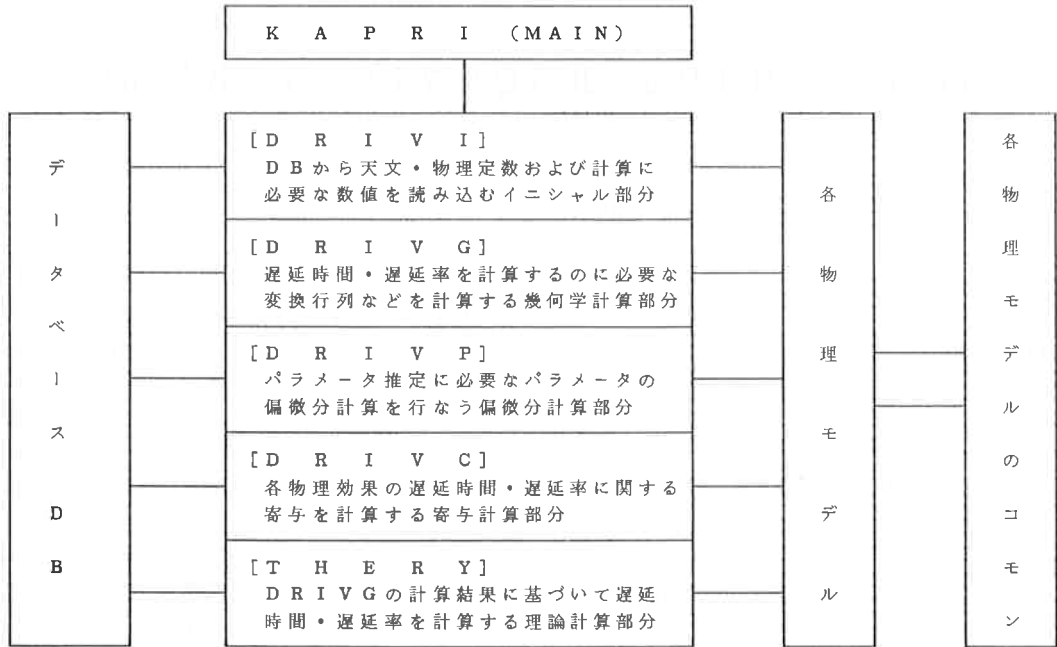
KAPRI は、ケーブル遅延、クロックオフセット、クロックレートを除く理論的予測遅延・遅延率の計算を行う。さらに、パラメータ推定ソフトウェア (KLEAR) で必要な偏微分係数の計算も行う。

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ンモンで行う。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。

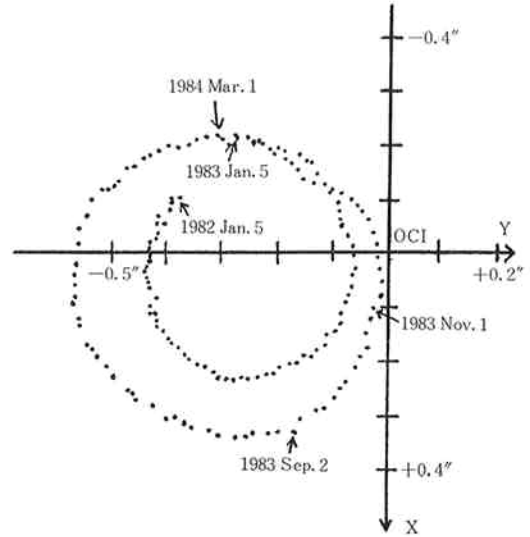
$$RW = R_x(-WOBY) \times R_y(WOBX) \quad \dots(6)$$

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。

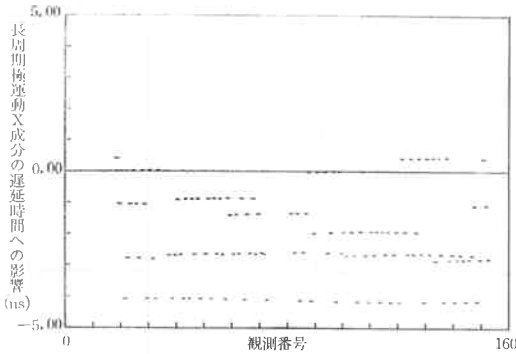
また、遅延時間への寄与は各星に対しては24時間中ではほぼ一定の値を取るため、遅延時間への影響の時間微分である遅延率への影響は、小さく無視できる。

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)

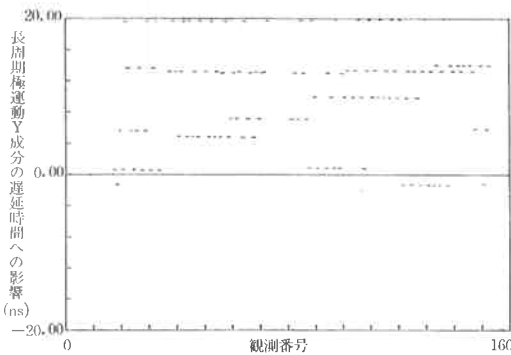
前述した長周期自転軸のまわりに、グリニッジ視恒星時 (GAST; Greenwich Apparent Sidereal Time) だけ回転する座標変換が、日周運動行列 RS である。GAST は、長周期自転軸まわりのグリニッジ子午線 (BIH または IPMS ゼロ子午線) と真の春分点のなす角度で定義される。

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 (nutation)

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⁾。

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

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

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)

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

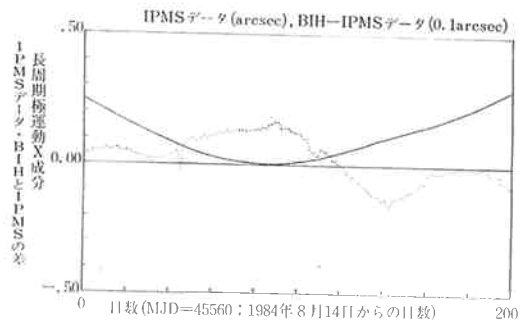
ここでTは各観測時刻に対応する力学時の J 2000.0 からの経過ユリウス世紀である (15式)。

(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 1 R と UT 1 の2種類のデータがある。UT 1 R 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 1 R 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

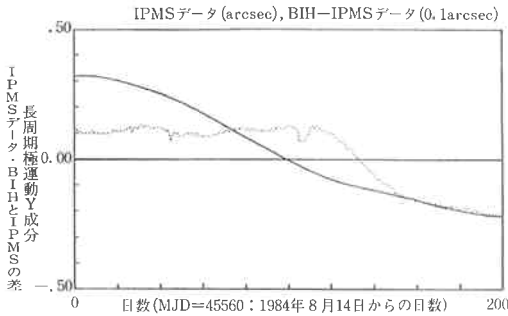
第1表 J. Wahr の J2000 年系の章動係数表 (0.0001 arcsec 以上の振幅)
(J. Wahr. Geopys J.R. Astron. Soc (1981) 64からの引用)

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)

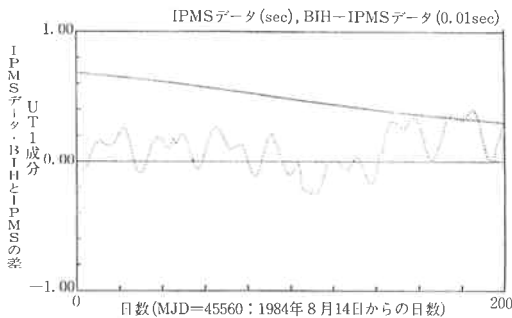
No.	Brown の 天 文 基 本 角					黄経の章動($d\psi$)		黄道傾斜角の章動		周 期
	l	l'	F	D	Ω	A	a	B	b	Days
54	1		2	2	2	-8		3		5.6
55	1			2		6				9.6
56	2		2	-2	2	6		-3		12.8
57				2	1	-6		3		14.8
58			2	2	1	-7		3		7.1
59	1		2	-2	1	6		-3		23.9
60				-2	1	-5		3		14.7
61	1	-1				5				29.8
62	2		2		1	-5		3		6.9
63		1		-2		-4				15.4
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)



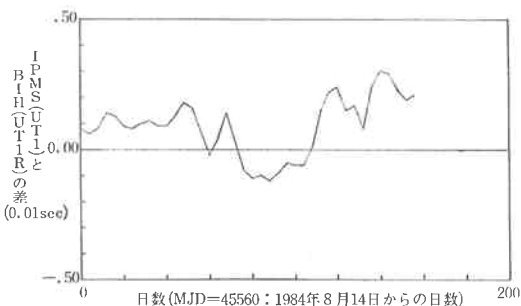
期間：1983年8月14日～1984年2月29日；USNO Series 7のデータより
 実線：IPMSデータ (arcsec)，点線：BIH-IPMS (0.1 arcsec)

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)。

$$\begin{aligned}
 l &= 485866.733 + \text{MOD}(1325T) \times 1296000 \\
 &\quad + 715922.633 T + 31.31 T^2 + 0.064 T^3 \\
 l' &= 1287099.804 + \text{MOD}(99 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 1292581.224 T - 0.577 T^2 - 0.012 T^3 \\
 F &= 335778.877 + \text{MOD}(1342 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 295263.137 T - 13.257 T^2 + 0.011 T^3 \\
 D &= 1072261.307 + \text{MOD}(1236 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 1105601.328 T - 6.891 T^2 + 0.019 T^3 \\
 \Omega &= 450160.280 - \text{MOD}(5 T) \times 1296000 \\
 &\quad - 482890.539 T + 7.455 T^2 + 0.008 T^3
 \end{aligned}$$

.....(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⁾。

$$\begin{aligned}
 l &= 485866.5228 + \text{MOD}(1325 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 715923.12699 T + 9.1017378 T^2 \\
 &\quad + 0.003878955 T^3 \\
 l' &= 1287091.5444 + \text{MOD}(99 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 1292577.977016 T - 0.1564731 T^2 \\
 &\quad - 0.000894132 T^3 \\
 F &= 335782.1772 + \text{MOD}(1342 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 295267.137 T - 3.1662792 T^2 \\
 &\quad - 0.000092043 T^3 \\
 D &= 1072260.9648 + \text{MOD}(1236 T) \times 1296000 \\
 &\quad + 1105600.86837 T - 1.4095728 T^2 \\
 &\quad + 0.000512811 T^3 \\
 \Omega &= 450156.0456 - \text{MOD}(5 T) \times 1296000 \\
 &\quad - 482896.253367 T + 2.0538738 T^2 \\
 &\quad + 0.000604854 T^3
 \end{aligned}$$

.....(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

する運動である章動と歳差による変換を行なってJ 2000.0における平均形状軸方向と平均春分点方向に変換する。

一方B1950年系では、形状軸から瞬間角運動量へ変換し、この角運動量の空間に対する運動である章動と歳差による変換を行ってB1950.0における平均形状軸方向と平均春分点方向に変換する。このように、瞬間角運動量で考えるために、日周極運動が必要になる。

次に、地球の形状に近い楕円体（準拋楕円体）のモデルについて述べる。

準拋楕円体は、重力測量、水準測量による観測局のジオイド上の点になるべく多くのジオイド面が接するような楕円体である。この準拋楕円体モデルは、X, Y, Zから緯度、経度、高さを求めたり、光学位置天文・測地などとの関係を見るためには重要である。また、光学位置天文・測地などで求められた緯度、経度、高さからVLBI座標系での位置を予測する場合にも重要である。

準拋楕円体について、次の3つを挙げておく。

まず、日本におけるジオイドを再現するベッセル楕円体がある。これに対して、衛星観測などの多量のデータから解析し、1974年に採用された汎地球的な準拋楕円体NWT-10 D (WGS-72)がある。パラメータは赤道半径6378135 m, 偏平率1/298.26である。また、ベッセル楕円体と方向は同じく、CIOをZ軸とし、グリニッジ子午線をX軸方向となるように定義される。ベッセル楕円体との違いは原点の平行移動のみで、その量は、 $\Delta X = -140\text{m}$, $\Delta Y = 516\text{m}$, $\Delta Z = 673\text{m}$ である。最後に、KAPRIで使用しているVLBI座標系における準拋楕円体は、赤道半径6378137.081 m, 偏平率1/298.26である。またWGS-72に対する原点の平行移動はZ軸方向のみに4 mである。WGS-72に比べてVLBI座標系は、赤道半径にして2 m大きくなっている。さらにVLBI座標系以外の座標系は、グリニッジ子午線をX軸としていることに対して、VLBI座標系ではZ軸まわりに-0.54 arcsec回転した座標系である。局位置の基準は、このVLBI座標系およびVLBI準拋楕円体である。

4.2 時系

VLBIで使用される時系は次の5つである。

- ① TDB (Barycentric Dynamical Time)
歳差、章動、天文基本角、角速度を計算する場合に使用される太陽慣性系での時系である。
- ② TDT (Terrestrial Dynamical Time)
地心での時系
- ③ TAI (International Atomic Time)
地球のジオイド面での原子時の時系。VLBIの観測遅延時間の時系である。

- ④ UT 1 (Universal Time)
恒星または平均太陽の子午線通過時刻による時系で、観測局に依存しない世界時である。これは、日周運動の計算に使用される。
- ⑤ UTC (Universal Time Coordinated)
UT 1との差が常に1秒以内となるようにTAIに整数秒のオフセットを加えた時系である。タイムスケールはTAIと同じである。各観測の参照時刻の表示時刻である。

(I) TDB と TAI との関係

VLBIで観測される遅延時間は、TAIで記述される数値である。TAIは、地球のジオイド面上でセシウム133の9192631770周期を1秒とし、1958年1月1日0時UT2の瞬間をTAIの1958年1月1日0時として定義される。

一方、太陽慣性系での時系TDBは、天文位置計算の引数に使用される。また、KAPRIでは、太陽慣性系に統一しているので最初に求められる理論的予測遅延時間はTDBでの値である。そのため、TDBによる理論的予測遅延時間を、VLBIの観測遅延時間の時系であるTAIに変換する必要がある。Einsteinの相対論により、TDB(以下t)とTAI(以下τ)の関係は、次式で表される。

$$ds^2/c^2 = d\tau^2 = (1 - 2U/c^2) dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)/c^2 \quad \dots\dots(25)$$

ここでdsは測地線要素、cは光速、Uは原子時のある地点の重力場である。 $\dot{s}^2 = (dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2$ とする。ポテンシャルの時間平均を \bar{U} 、 \dot{s} の時間平均を \bar{s} とすると、ジオイド面は $\bar{U} + \bar{s}^2/2 = 0$ である。従って観測局の原子時dτにジオイド面からのずれを補正したTAIでの原子時dτ*は次式で表される。

$$d\tau^* = d\tau / (1 - (\bar{U} + \bar{s}^2/2)/c^2) \quad \dots\dots(26)$$

この原子時TAIでの時系τ*とTDBでの時系tは次式で関係づけられる。

$$t = \tau^* + (t - \tau^*) - \int_{t_0}^t (U - \bar{U}) dt / c^2 - \frac{1}{2} \int_{t_0}^t (\dot{s}^2 - \bar{s}^2) dt / c^2 \quad \dots\dots(27)$$

Moyer⁽¹⁰⁾はこの積分に関する計算を行い、次の(28)式、(30)式を導出した。KAPRIでは、この2つの式の選択が可能となっている。

まず惑星の位置暦から計算する方法について述べる。
 $TDB = TAI + 32.184 - e_P$ (単位 sec) $\dots\dots(28)$

$$e_P = 2(\vec{r}_B^S \cdot \vec{r}_B^S \cdot \vec{r}_B^S) / c^2 + (\vec{r}_B^C \cdot \vec{r}_B^E) / c^2$$

$$\begin{aligned}
 & + (\vec{r}_E^G \cdot \vec{r}_A^B) / c^2 + \mu_J / (\mu_S + \mu_J) (\vec{r}_J^S \cdot \vec{r}_J^S) / c^2 + \mu_{SA} / (\mu_S + \mu_{SA}) (\vec{r}_{SA}^S \cdot \vec{r}_{SA}^S) / c^2 \\
 & + (\vec{r}_S^C \cdot \vec{r}_B^S) / c^2 \quad \dots\dots(29)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\mu_S, J, SA = G \cdot M_S, J, SA$; G は万有引力、 M_i は天体 i の質量、 \vec{r}_i^j は天体 i の位置 j からの位置ベクトル、 $\dot{\vec{r}}_i^j$ はその速度ベクトルである。また、添字の S は太陽重心、 B は地球一月中心、 E は地球重心、 C は太陽系重心、 J は木星重心、 SA は土星重心、 A は観測局の位置、 M は月重心を表す。(以下同様な定義とする。)

この式を解析的に近似したのが次式である。

$$\begin{aligned}
 e_P &= a_1 \sin(E_B) + a_2 \sin(D_B) \\
 &+ a_3 u \sin(UT1 + \lambda) \\
 &+ a_4 u \sin(UT1 + \lambda - M_B) \\
 &+ a_5 u \sin(UT1 + \lambda - 2M_B) \\
 &+ a_6 u \sin(UT1 + \lambda + 2L_B) \\
 &+ a_7 u \sin(UT1 + \lambda + 2L_B + M_B) \\
 &+ a_8 u \sin(UT1 + \lambda - D_B) + a_9 v \cos(L_B) \\
 &+ a_{10} \sin(E_J) + a_{11} \sin(E_{SA}) \\
 &+ a_{12} \sin(L_B - L_J) + a_{13} \sin(L_B - L_{SA}) \\
 &+ a_{14} u \sin(UT1 + \lambda + L_B - L_J) \\
 &+ a_{15} u \sin(UT1 + \lambda + L_B - L_{SA}) \quad \dots\dots(30)
 \end{aligned}$$

ここで、地球一月、木星、木星の離心近点離角は、次式で示される。

$$\begin{aligned}
 E_B &= M_B + e \sin(M_B) \\
 E_J &\cong M_J \quad ; \quad E_{SA} \cong M_{SA} \quad \dots\dots(31)
 \end{aligned}$$

また、地球一月、木星、土星の平均近点離角は次のように表される。(単位、ラジアン)

$$\begin{aligned}
 M_B &= 6.248291 + 1.99096871 \times 10^{-7} t \\
 M_J &= 5.286877 + 0.16785063 \times 10^{-7} t \\
 M_{SA} &= 1.165341 + 0.06758558 \times 10^{-7} t \quad \dots\dots(32)
 \end{aligned}$$

ここで、 t は B1950.0 からの経過秒数である。

太陽の平均黄経 L_B 、木星、土星、地球一月の太陽からの平均離角 $L_B - L_J, L_B - L_{SA}, D_B$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 L_B &= 4.888339 + 1.99106383 \times 10^{-8} t \\
 L_B - L_J &= 5.652593 + 1.82313637 \times 10^{-7} t \\
 L_B - L_{SA} &= 2.125474 + 1.92339923 \times 10^{-7} t \\
 D_B &= 2.518411 + 2.462600818 \times 10^{-7} t \quad \dots\dots(33)
 \end{aligned}$$

(31), (32)式で表される天文基本角は、Moyer の論文における B1950 年系の表示である⁽¹⁰⁾。ここで地球一月公転軌道の離心率 $e = 0.01672$ である。また、係数は、天体の質量や平均速度から計算されたような数値である

(単位 sec)⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 1.658 \times 10^{-3} \quad ; \quad a_2 = 1.548 \times 10^{-6} \\
 a_3 &= 3.17679 \times 10^{-3} \quad ; \quad a_4 = 5.312 \times 10^{-12} \\
 a_5 &= 1.00 \times 10^{-13} \quad ; \quad a_6 = -1.3677 \times 10^{-11} \\
 a_7 &= -2.29 \times 10^{-13} \quad ; \quad a_8 = 1.33 \times 10^{-13} \\
 a_9 &= -1.3184 \times 10^{-10} \quad ; \quad a_{10} = 5.21 \times 10^{-6} \\
 a_{11} &= 2.45 \times 10^{-6} \quad ; \quad a_{12} = 20.73 \times 10^{-6} \\
 a_{13} &= 4.58 \times 10^{-6} \quad ; \quad a_{14} = 1.33 \times 10^{-13} \\
 a_{15} &= 2.9 \times 10^{-14} \quad \dots\dots(34)
 \end{aligned}$$

また、 u, v は、観測局の地心位置 (X, Y, Z) として、 $u = (X^2 + Y^2)^{1/2}, v = Z$ である。

章動や歳差を計算するのに必要な TDB を TAI から計算するために、(28)~(34)式が用いられる。

TDB で計算された遅延時間を TAI に変換するときには(29)式を用いる。

まず、 e_P を、観測局に依存する項 $(\vec{r}_E^G \cdot \vec{r}_A^B) / c^2$ と依存しない項 $e_P^0(t)$ とに分ける。TDB での遅延時間を t 、TAI での遅延時間を τ_0 、 X 局に電波が到達した TDB での時刻を t, Y 局に電波が到達した TDB での時刻を $t + \Delta t$ とする。また、同じ事象の TAI での時刻を、それぞれ $T_x(t), T_y(t + \Delta t)$ とする。

TAI と TDB との変換により次のように表される。

$$\begin{aligned}
 T_x(t) &= t - 32.184 - (e_P^0(t) + (\vec{r}_E^G(t) \cdot \vec{r}_X^B(t)) / c^2) \\
 T_y(t + \Delta t) &= t + \Delta t - 32.184 - (e_P^0(t + \Delta t) + (\vec{r}_E^G(t + \Delta t) \cdot \vec{r}_Y^B(t + \Delta t)) / c^2) \quad \dots\dots(35)
 \end{aligned}$$

従って遅延時間 $\tau_0 = T_y(t + \Delta t) - T_x(t)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \tau_0 &= \Delta t - \left(\frac{d}{dt} e_P^0(t) + (\dot{\vec{r}}_E^G(t) \cdot \vec{r}_Y^B(t)) / c^2 \right) \Delta t \\
 &+ (\vec{r}_E^G \cdot \vec{B}) / c^2 - (\dot{\vec{r}}_E^G(t) \cdot \vec{r}_Y^B(t)) / c^2 \Delta t \quad \dots\dots(36)
 \end{aligned}$$

ここで $\vec{B} = \vec{r}_X^B - \vec{r}_Y^B$ である。第 2 項は、観測局 Y における周期項 e_P の時間微分である。この (36) 式を用いて、TDB から TAI への遅延時間への変換を行う。この変換は重要であり、最大 $2 \mu \text{sec}$ の寄与があるので精度よく求められなければならない。K-3 型 VLBI ソフトウェアでは、 \vec{r}_i^j は JPL 惑星位置情報 (Jet Propulsion Laboratory Development Ephemeris) を用いる。IV-3 の KASET で述べたように、JPL 惑星位置情報は他の惑星位置情報と 10^{-5} 以下の精度で一致するので惑星位置情報の選択に関する問題はない。

(II) UT 1

観測地点の子午線は、天の極にたいして定義されている。そのため、子午線を恒星が通過する時刻で定義される世界時 UT には、極運動による経度変化の影響が現れる。この経度変化と地球自転速度の変化とを補正したのが UT 1 である。経度変化の補正 $\Delta\lambda$ は次式となる。

$$\Delta\lambda = (-\text{WOBX} \times \sin(\lambda) + \text{WOBY} \times \cos(\lambda)) \text{TAN } \phi \quad \dots\dots(37)$$

WOBX, WOBY は右手系の極表示であり、 λ は西経を負とする観測地点の経度、 ϕ は緯度である。固定された経緯度での世界時を UT 0 とすると $\text{UT 1} = \text{UT 0} + \Delta\lambda$ で求められる。

この UT 1 については、4.1 の日周運動の変換行列計算をする時に使用される。以下に地球潮汐補正項の UT 1 へ及ぼす影響を述べる。

地球潮汐により慣性モーメントが変化する。角運動量保存のため、これにより角速度が変化する。この角速度の変化による UT 1 への補正項を地球潮汐補正項と呼ぶ。IPMS データや BIH の UT 1 R のデータは、35日以下の周期の地球潮汐補正項を除いて平滑化を行っている。こうしたデータを用いるときには35日以下の周期の地球潮汐補正項を理論的に計算し加えなければならない。一方、BIH の UT 1 データは、35日以下の周期の地球潮汐補正項を除かないデータで平滑化を行ったものである。このデータを用いるときは、地球潮汐補正項を加えてはならない。

Yoder のモデルによる地球潮汐補正項は、次式で計算される⁽¹¹⁾。

$$\text{UT 1} = \sum_i A_i \sin(\omega_i) \times h_s \quad \text{--- } h/c = 0.944$$

$$\omega_i = L_i^1 l + L_i^2 l' + L_i^3 F + L_i^4 D + L_i^5 \Omega \quad \dots\dots(38)$$

ここで l, l', F, D, Ω は B1950年系の Brown の天文基本角であり、 ω_i 式で計算される。また h_s は永年重力ラヴ定数で 0.94 である。

ω_i 式の振幅 A_i については、Yoder による第 2 表がある⁽¹¹⁾。IPMS データでは、この Yoder の表の35日以下の周期項41項を用いて地球潮汐の短周期項を除き平滑化を行っている。K-3 型 VLBI ソフトウェアでは Yoder の表の 100×10^{-7} sec 以上の振幅をもつ32項を計算に含めることが可能である。そのうち短周期補正項については35日以下の周期項19項を用いて補正を行う。

ω_i 式以外に、米国の Mark-III で採用された Woolard の計算式がある。これは、Yoder の表の中の35日以下の短周期補正項のうちの主要4項をとり出したものである。但し、振幅は Yoder に比べて 0.29/0.314 倍だけ小さくなっている。これは、重力ラヴ定数 $k=0.29$ を 0.314 にした場合に対応する。その式は次のようなもの

である。

$$\begin{aligned} \Delta\text{UT 1} = & (0.00247 \sin(2(F + \Omega)) + 0.00263 \sin(I) \\ & + 0.00102 \sin(2F + \Omega) \\ & + 0.00058 \sin(2D - I)) \times k \quad \dots\dots(39) \end{aligned}$$

しかしながら、この式では不十分であり、第 1 回システムレベル実験を含む一週間で最大約 0.4mtimesec の差に達する。この差は、VLBI では重要であり、遅延時間で最大 2 ns の差を生じる場合がある。これらのどのモデルを採用すべきかという点は、IPMS または BIH データのいずれを使用するかという問題とともに、考慮に入れなければならないであろう。

(III) UTC と TAI の関係

UTC は、年月日時分秒で次のように求められる。単位はユリウス日である。

$$\begin{aligned} \text{UTC} = & 365 \times (\text{西暦年}) \\ & - [7 \times (\text{年} + [(\text{月} + 9) / 12]) / 4] \\ & + [(275 \times \text{月}) / 9] + \text{日} + 1721013.5 \\ & + (\text{時} + (\text{分} + \text{秒} / 60) / 60) / 24 \quad \dots\dots(40) \end{aligned}$$

ここで [] は、中の数字を超えない最小の整数を表すガウス記号である。この式で求められた UTC に TAI とのオフセット (整秒) を加えることで、TAI の時刻が求められる。この TAI-UTC のオフセットは、長周期極運動や UT1-UTC の値を入力する時に、共に DB に入力される。

4.3 相対論

相対論的取扱が必要となる太陽の重力場による電波の伝搬路の湾曲については後述する。もう一つの相対論的物理解果として、長さに関するローレンツ短縮がある。

KAPRI ではこれを正しく計算している。地球回転行列による座標変換を行うと、地球固定基準系は J 2000 年系に変換されるが、原点は地球重心のままである。地球回転行列による座標変換を行った座標系は、太陽慣性系に対して相対運動を行っている。この相対運動による時系の変換は、TDB と TAI の交換に相当し、既に述べた。直交座標系に関しては、ローレンツ短縮が現れる。

太陽系重心に対する地球重心の相対運動の速度を \vec{v} とし、加速度は無視する。地球重心でのベースラインベクトル \vec{r} と、太陽慣性系でのベースラインベクトル \vec{R} との関係は次式で表される。

$$\vec{R} = \vec{r} + \vec{v} \{ (\vec{r} \cdot \vec{v}) / v^2 [(1 - v^2/c^2)^{-1/2} - 1] \} \quad \dots\dots(41)$$

この第 2 項がローレンツ短縮の物理効果である。

次に、ローレンツ変換と、各物理効果との関係について述べる。

加速度を無視したローレンツ変換について述べる。地

第2表 Yoder の UT 1 への地球潮汐補正項係数表 (振幅の単位: 10^{-7} sec)
 (C.F. Yoder. Journal Geophysical Research Vol. 86 B 2 p.881 からの引用)

No	Brown の天文基本角				周 Days	振 幅 10^{-7} sec	KAPRI の使用	
	l	l'	F	D				Ω
1	1		2	2	2	5.64	25	
2	2		2		1	6.85	43	
3	2		2		2	6.86	103	○
4			2	2	1	7.09	54	
5			2	2	2	7.10	131	○
6	1		2			9.11	41	
7	1		2		1	9.12	437	○
8	1		2		2	9.13	1056	○
9	3					9.18	19	
10	-1		2	2	1	9.54	87	
11	-1		2	2	2	9.56	210	○
12	1			2		9.61	81	
13	2		2	-2	2	12.81	-23	
14		1	2		2	13.17	-27	
15			2			13.61	318	○
16			2		1	13.63	3413	○
17			2		2	13.66	8252	○
18	2				-1	13.75	-23	
19	2					13.78	360	○
20	2				1	13.81	-19	
21		-1	2		2	14.19	26	
22				2	-1	14.73	50	
23				2		14.77	781	○
24				2	1	14.80	56	
25		-1		2		15.39	54	
26	1		2	-2	1	23.86	-53	
27	1		2	-2	2	23.94	-107	○
28	1	1				23.94	-107	
29	-1		2			25.62	-42	
30	-1		2		1	26.88	-50	
31	-1		2		2	26.98	-188	○
32	1				-1	27.09	-463	○
33	1					27.44	-568	○
34	1				1	27.56	8788	○
35				1		27.67	-579	○
36	1	-1				29.53	-50	
37	-1			2	-1	29.80	59	
38	-1			2		31.66	-125	○
39	-1			2	1	31.81	1940	○
40	1		-2	2	-1	31.96	-140	○
41	-1	-1	2	2		32.61	-19	
42		2	2	-2	2	34.85	91	
43		1	2	-2	1	91.31	61	
44		1	2	-2	2	119.61	-35	
45			2	-2		121.75	2005	○
46			2	-2	1	173.31	-267	○
47			2	-2	2	177.84	-1245	○
48		2				182.62	51327	○
49	2			-2	-1	182.63	206	○
50	2			-2		199.84	-52	
51	2			-2	1	205.89	582	○
52		-1	2	-2	1	212.32	-39	
53		1			-1	346.60	48	
54		-1	2	-2	2	346.64	-98	
55		1				365.22	-881	○
56		1			1	365.26	16339	○
57	1			-1		386.00	147	○
58	2		-2			411.78	-37	
59	-2		2		1	1095.17	146	○
60	-1	1		1		1305.47	-449	○
61					2	3232.85	-43	○
62					1	3399.18	-8404	○
						6790.36	1720498	○

球重心座標系（座標系の方向は太陽慣性系と同じ定義であるが座標原点が地球重心である座標系）での局Xの事象 $(\vec{X}(T_x), T_x)$ 、局Yの事象 $(\vec{Y}(T_y), T_y)$ とする。また太陽慣性系での同じ事象を $(\vec{x}(t_x), t_x)$ 、 $(\vec{y}(t_y), t_y)$ とする。同じ事象の異なる座標系（地球重心座標系と太陽慣性系）の関係は、ローレンツ変換で結びつく。

同一波面が局X、局Yに到達する2つの事象を考えてみる。この2つの事象の差である遅延時間 $\Delta T = T_y - T_x$ 、 $\Delta t = t_y - t_x$ がTAIとTDBでの遅延時間であり、次のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta T &= \{(1-v^2/c^2)\Delta t + (\vec{v} \cdot \vec{B})/c\} / (1 - (\vec{v} \cdot \vec{y})/c^2) \\ \Delta t &= (\vec{x}(t_x) - \vec{y}(t_y)) \cdot \vec{S} / c \\ &= \vec{B} \cdot \vec{S} / c + \vec{v} \cdot \vec{S} / c \{(\vec{B} \cdot \vec{v})/v^2 \\ &\quad \times [(1-v^2/c^2)^{-1/2} - 1] - \Delta T(1-v^2/c^2)^{-1/2}\} \\ &\quad - \vec{y} \Delta T \end{aligned} \quad \dots\dots(42)$$

ここで、 $\vec{B} = \vec{X}(T_x) - \vec{Y}(T_y)$ でベースラインベクトルである。 Δt の第2項がローレンツ短縮項であり、第3、第4項が遅延時間内の局Yの移動を示す。また、 ΔT と Δt との関係が時系の変換である。

さらに、 ΔT についての計算式は、もっと簡単に表される。

$$\begin{aligned} \Delta T &= \{(\vec{B} \cdot \vec{S} / c) + (\vec{v} \cdot \vec{S}) / c \{(\vec{B} \cdot \vec{v})/v^2 \\ &\quad \times [(1-v^2/c^2)^{-1/2} - 1] - (1-v^2/c^2)^{-1/2} \\ &\quad (\vec{B} \cdot \vec{v})/c^2\} - (\vec{Y} \cdot \vec{S} / c) (\vec{B} \cdot \vec{v})/c^2\} \\ &\quad / \{1 + (\vec{v} \cdot \vec{S})/c + (\vec{Y} \cdot \vec{S})/c(1-v^2/c^2)^{1/2}\} \end{aligned} \quad \dots\dots(43)$$

この分母が遅延時間の局Yの運動を表す。

(43)式をKAPRIでは使用することができる。

Mark-IIIでの時間変換および遅延時間間の地球運動による寄与((4)式、(5)式)と(43)式とを比較すると、主な違いは、(41)式のローレンツ短縮の項である。

このように、KAPRIで使用している相対論のモデル(TDBとTAIの時系変換、ローレンツ短縮、遅延時間内の地球の運動)は、加速度を含めないローレンツ変換により、統一的に扱うことができる。

4.4 光行差

光行差とは、光の速度が有限であるために、運動している観測者から見た天体の方向が、幾何学的な視線方向からずれる現象をいう。地球の公転運動による光行差を年周光行差、自転運動による光行差を日周光行差という。これは、太陽慣性系と地球重心座標系（太陽慣性系と軸の向きは同じで、原点が地球重心にある座標系）との相対運動による座標変換に関する物理効果である。KAPRIでは、座標変換をベースラインや時系に対して行っているため光行差は直接現れない。光行差は、地球

固定系から見た星の方向に対して座標変換を行った場合に現れる。年周光行差は次式で表される。

$$\vec{S} = \vec{S}_0 + \vec{v} / c \quad \dots\dots(44)$$

ここで、 \vec{S}_0 は太陽慣性系の太陽系重心から見た星の方向で、 \vec{v} は地球重心の公転速度である。この光行差による遅延時間への影響は、 $(\vec{v} \cdot \vec{B})/c^2$ となる。

TDBからTAIへの変換式(5)、(6)、(42)において、この項に対応する項が存在する。つまり年周光行差は、この時系変換に既に含まれている。

この年周光行差による補正を加えた星の方向ベクトルを規格化($|\vec{S}|=1$)する必要がある。この規格化の補正項 $-(\vec{S}_0 \cdot \vec{v})\vec{S}_0/c$ は、遅延時間内の地球の運動を表す式(42)での補正項である。従って、光行差の規格化が、遅延時間内の地球の運動とほぼ同等な物理効果であることがわかる。

遅延時間内の地球の運動やTDBからTDIへの時系変換式(4)、(5)式または(43)式には、地球重心にたいする位置、速度ベクトルである局Yの位置、速度ベクトルが含まれている。従って、日周光行差は、遅延時間内の地球の運動やTDBからTAIへの時系変換の中に含まれていると考えられる。

VLBIでは、地球固定基準系で考慮した場合、星の位置の変換の中に多種の物理効果を含めねばならないので、物理効果を正確に取扱ったり、遅延時間を厳密に定義しうる太陽慣性系での取扱いが便利である。従って、光行差は直接現れない。

4.4 地球変形による物理効果

(I) 地球潮汐

月、太陽の引力が引おこす地球潮汐による変形は、原因を同じくする物理効果との分離が、しばしば困難である。たとえば、B1950年座標系のように瞬間自転軸を天の極とする場合、地球潮汐による位置の変動と章動運動による位置の変動との分離が難しい。J2000年座標系のように、マンツルの形状軸を天の極とする場合は、この分離が容易になり、月、太陽の引力が引おこす地球の弾性体変形だけを考えればよい⁽¹²⁾。ここでは、月、太陽の引力による潮汐ポテンシャルとしてCartwright et al.の論文⁽¹³⁾による484分潮成分の潮汐ポテンシャルを用いて計算する方法と、JPL惑星暦情報⁽¹⁴⁾の地心月、地心太陽の位置情報を用いて直接に計算する方法とについて述べる。

一般に、観測点Aにおける潮汐ポテンシャルは、地心におけるポテンシャルと自転の遠心力を月、太陽の重心ポテンシャルから除いたものである。

$$U_A = \sum_{i=\text{月, 太陽}} G M_i (1/|\vec{r}_i^A - \vec{r}_i^E| - 1/|\vec{r}_i^E|)$$

第3-1表 Cartwright, Taler & Edden の地球潮汐ポテンシャル係数表その1

項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅
1	00000	7.9306	61	10101	.00014	121	33333	-.00015	181	11111	.00006
2	00000	.6556	62	10102	.00047	122	33333	-.00017	182	11111	.00015
3	00000	.0064	63	10103	.00018	123	33333	-.00017	183	11111	.00017
4	00000	.0009	64	10104	.00007	124	33333	-.0142	184	11111	.00197
5	00000	.01156	65	10105	.00005	125	33333	-.00010	185	11111	.01066
6	00000	.0062	66	10106	.00041	126	33333	-.00014	186	11111	.00086
7	00000	.00011	67	10107	.00027	127	33333	-.00078	187	11111	.02964
8	00000	.00005	68	10108	.00011	128	33333	-.00035	188	11111	.00394
9	00000	.00074	69	10109	.00022	129	33333	-.00011	189	11111	.00019
10	00000	.00229	70	10110	.00217	130	33333	-.00005	190	11111	.00018
11	00000	.00180	71	10111	.00014	131	33333	-.00023	191	11111	.00016
12	00000	.00040	72	10112	.00569	132	33333	-.00023	192	11111	.00018
13	00000	.00426	73	10113	.00236	133	33333	-.00061	193	11111	.00017
14	00000	.00007	74	10114	.00021	134	33333	-.00019	194	11111	.00124
15	00000	.00017	75	10115	.00031	135	33333	-.00005	195	11111	.00024
16	00000	.00005	76	10116	.00010	136	33333	-.00028	196	11111	.00004
17	00000	.00067	77	10117	.00017	137	33333	-.00041	197	11111	.00002
18	00000	.00005	78	10118	.00007	138	33333	-.00006	198	11111	.00008
19	00000	.00066	79	10119	.00005	139	33333	-.00006	199	11111	.01028
20	00000	.00006	80	10120	.00005	140	33333	.01360	200	11111	.00014
21	00000	.00015	81	10121	.00054	141	33333	.07217	201	11111	.00197
22	00000	.00113	82	10122	.00009	142	33333	-.00020	202	11111	.17543
23	00000	.001579	83	10123	.00009	143	33333	-.00014	203	11111	.00007
24	00000	.00103	84	10124	.02996	144	33333	-.00007	204	11111	.00026
25	00000	.00051	85	10125	.01241	145	33333	-.00039	205	11111	.00005
26	00000	.00046	86	10126	.00115	146	33333	-.00011	206	11111	.00147
27	00000	.00011	87	10127	.00012	147	33333	-.00066	207	11111	.00416
28	00000	.00007	88	10128	.00005	148	33333	-.00008	208	11111	.00011
29	00000	.00542	89	10129	.00025	149	33333	-.00258	209	11111	.00010
30	00000	.00254	90	10130	.00009	150	33333	.01371	210	11111	.00006
31	00000	.00441	91	10131	.00020	151	33333	-.00079	211	11111	.53011
32	00000	.00180	92	10132	.00015	152	33333	.00024	212	11111	.07186
33	00000	.00049	93	10133	.00006	153	33333	.00012	213	11111	.00155
34	00000	.00043	94	10134	.00033	154	33333	.00063	214	11111	.00422
35	00000	.00113	95	10135	.00013	155	33333	-.00006	215	11111	.00026
36	00000	.00038	96	10136	.00026	156	33333	-.00017	216	11111	.00008
37	00000	.00005	97	10137	.00478	157	33333	-.00016	217	11111	.00010
38	00000	.00005	98	10138	.00198	158	33333	-.00020	218	11111	.00029
39	00000	.00026	99	10139	.00018	159	33333	-.00013	219	11111	.00014
40	00000	.00090	100	10140	.00007	160	33333	-.00130	220	11111	.00024
41	00000	.00096	101	10141	.00007	161	33333	-.00006	221	11111	.00014
42	00000	.00098	102	10142	.03986	162	33333	-.00218	222	11111	.00044
43	00000	.01369	103	10143	.00015	163	33333	.00006	223	11111	.00024
44	00000	.00088	104	10144	.00015	164	33333	.37694	224	11111	.00017
45	00000	.00009	105	10145	.00020	165	33333	-.00007	225	11111	.00018
46	00000	.00008	106	10146	.00107	166	33333	-.00003	226	11111	.00567
47	00000	.00007	107	10147	.00005	167	33333	-.00003	227	11111	.00013
48	00000	.00008	108	10148	.00028	168	33333	-.00102	228	11111	.00018
49	00000	.00015	109	10149	.00278	169	33333	-.00022	229	11111	.00016
50	00000	.00048	110	10150	.00021	170	33333	-.00014	230	11111	.00019
51	00000	.00036	111	10151	.00054	171	33333	-.00014	231	11111	.00015
52	00000	.00676	112	10152	.00054	172	33333	-.00007	232	11111	.00017
53	00000	.00044	113	10153	.00013	173	33333	-.00007	233	11111	.00014
54	00000	.00447	114	10154	.00013	174	33333	-.00007	234	11111	.00014
55	00000	.05483	115	10155	.00006	175	33333	-.00003	235	11111	.00028
56	00000	.00606	116	10156	.00006	176	33333	-.00009	236	11111	.00017
57	00000	.00013	117	10157	.00180	177	33333	-.00013	237	11111	.00015
58	00000	.00007	118	10158	.00016	178	33333	-.00063	238	11111	.00012
59	00000	.00054	119	10159	.00016	179	33333	-.00278	239	11111	.00009
60	00000	.00054	120	10160	.00010	180	33333	-.00278	240	11111	.00009

第3-2表 Cartwright, Taler & Edden の地球潮汐ポテンシャル係数表その2

項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅	項	Doodson 変数	振幅
241	3	-.00009	302	2	-.00067	363	2	.00005	424	1	.00005			
242	3	-.00032	303	1	-.00014	364	2	-.00076	425	1	-.00013			
243	3	-.00006	304	2	-.00009	365	1	-.00005	426	1	-.00005			
244	3	-.00016	305	1	-.00649	366	2	-.00008	427	1	-.00008			
245	3	-.00492	306	1	.17386	367	2	-.00006	428	1	-.00008			
246	3	-.00096	307	1	-.00032	368	2	-.00123	429	1	-.00242			
247	3	-.00010	308	1	-.00005	369	2	-.00054	430	1	-.00098			
248	3	-.00006	309	1	-.00005	370	2	-.00006	431	1	-.00008			
249	3	-.00243	310	1	-.01633	371	2	-.00012	432	1	-.00008			
250	3	-.00048	311	2	-.03302	372	2	-.00280	433	1	-.00016			
251	3	-.01039	312	2	-.00014	373	2	-.00030	434	1	-.00039			
252	3	-.00218	313	2	-.00014	374	2	-.00005	435	1	-.00007			
253	3	-.00014	314	2	-.00006	375	2	-.00007	436	1	-.00009			
254	3	-.00006	315	1	-.00015	376	2	-.00046	437	1	-.00008			
255	4	-.00015	316	2	-.00011	377	2	-.00005	438	1	-.00027			
256	4	-.00078	317	2	-.00039	378	2	-.00005	439	1	-.00005			
257	4	-.00015	318	2	-.00078	379	2	-.00053	440	2	-.00027			
258	4	-.00015	319	2	-.00273	380	2	-.00023	441	2	-.00027			
259	4	-.00038	320	2	-.00014	381	2	-.00169	442	2	-.00156			
260	4	-.00008	321	2	-.00007	382	2	-.00146	443	2	-.00005			
261	4	-.00019	322	1	-.00014	383	2	-.00047	444	2	-.00029			
262	4	-.00311	323	2	-.00047	384	2	-.00007	445	2	-.00005			
263	4	-.00199	324	2	-.00390	385	2	-.00025	446	2	-.00097			
264	4	-.00021	325	2	-.00053	386	2	-.00005	447	2	-.00569			
265	4	-.00071	326	2	-.00019	387	2	-.00024	448	2	-.00014			
266	4	-.00039	327	2	-.00006	388	2	-.00046	449	2	-.00008			
267	4	-.00069	328	2	-.00277	389	2	-.00074	450	2	-.00005			
268	4	-.00010	329	2	-.00052	390	2	-.00006	451	2	-.00005			
269	4	-.00009	330	2	-.00104	391	2	-.00015	452	2	-.00032			
270	4	-.00013	331	2	-.00051	392	2	-.00012	453	2	-.00086			
271	4	-.00259	332	2	-.00017	393	2	-.00012	454	2	-.00017			
272	4	-.00013	333	2	-.00032	394	2	-.00009	455	2	-.00031			
273	4	-.00006	334	2	-.00032	395	2	-.00038	456	2	-.00099			
274	4	-.00025	335	2	-.00070	396	2	-.00023	457	2	-.00005			
275	4	-.00051	336	2	-.00016	397	2	-.00005	458	2	-.00028			
276	4	-.00071	337	2	-.00010	398	2	-.00005	459	2	-.00005			
277	4	-.00005	338	2	-.00016	399	2	-.00005	460	2	-.00005			
278	4	-.00130	339	2	-.00094	400	2	-.00005	461	2	-.00005			
279	4	-.00005	340	2	-.00016	401	2	-.00005	462	2	-.00006			
280	4	-.00015	341	2	-.00094	402	2	-.00012	463	2	-.00006			
281	4	-.00009	342	2	-.02567	403	2	-.00010	464	2	-.00006			
282	4	-.00009	343	2	-.00643	404	2	-.00023	465	2	-.00048			
283	4	-.00031	344	2	-.00283	405	2	-.00023	466	2	-.00031			
284	4	-.00014	345	2	-.00123	406	2	-.00017	467	2	-.00009			
285	4	-.00086	346	2	-.00123	407	2	-.00007	468	2	-.00009			
286	4	-.00301	347	2	-.00039	408	2	-.00083	469	2	-.00009			
287	4	-.00039	348	2	-.00025	409	2	-.00013	470	2	-.00057			
288	4	-.00025	349	2	-.00010	410	2	-.00013	471	2	-.00017			
289	4	-.00036	350	2	-.00010	411	2	-.00012	472	2	-.00036			
290	4	-.00104	351	2	-.02476	412	2	-.00012	473	2	-.00007			
291	4	-.00007	352	2	-.00095	413	2	-.00016	474	2	-.00007			
292	4	-.00007	353	2	-.02248	414	2	-.00108	475	2	-.01188			
293	4	-.00007	354	2	-.00006	415	2	-.00014	476	2	-.00067			
294	4	-.00188	355	2	-.00055	416	2	-.00021	477	2	-.00025			
295	4	-.00085	356	2	-.00090	417	2	-.00098	478	2	-.00067			
296	4	-.00007	357	2	-.00005	418	2	-.00147	479	2	-.00011			
297	4	-.00008	358	2	-.00147	419	2	-.00660	480	2	-.00006			
298	4	-.00015	359	2	-.11498	420	2	-.00086	481	2	-.00011			
299	4	-.00055	360	2	-.03426	421	2	-.00007	482	2	-.00155			
300	4	-.00005	361	2	-.00372	422	2	-.00005	483	2	-.00068			
301	4	-.00147	362	2	-.00091	423	2	-.00036	484	2	-.00007			

$$-(\vec{r}_i^E \cdot \vec{r}_A^E) / |\vec{r}_i^E|^3 \quad \dots\dots(45)$$

ここで、 \vec{r}_i^E は地心からの天体 i の位置ベクトルである。G は万有引力、 M_i は天体 i の質量である。

式(45)のポテンシャルは次式のように分潮成分でも表示できる。

$$U_A = K \sum_{l,m,i} H_l^m(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^m) (\rho/R)^l \times Y_l^m(\lambda, \phi) \quad \dots\dots(46)$$

ここでKは規格化定数 (Doodson 定数)、 $H_l^m(i)$ は i 番目の分潮の振幅である。また、 θ_i は各振幅の時間による位相である。 ρ は観測局の地心半径であり、 R は地球の赤道半径である。また、 ε_l^m は、 $l+m=偶数$ のとき 0 、 $l+m=奇数$ のとき $\pi/2$ である。位相 θ_i は、Doodson 変数 τ, s, h, P, N, P_s を用いて次のように表される。

$$\theta_i = L_i^1 \tau + L_i^2 s + L_i^3 h + L_i^4 P + L_i^5 N + L_i^6 P_s \quad \dots\dots(47)$$

ここで、 $L_i^k (k=1\sim 6)$ は Doodson 係数 (整数) であり、 ϕ, λ は観測局の緯度、経度である。起潮力ポテンシャルの振幅 $H_l^m(i)$ 、Doodson 係数は、Cartwright Tayler & Edden の地球潮汐係数表 (第3表) を用いる⁽¹³⁾。

Doodson 変数は Brown の天文基本角 l, l', F, D, Ω と次のような関係にある。

$$\begin{aligned} s &= F + \Omega \\ h &= F + \Omega - D \\ N &= -\Omega \\ P &= F + \Omega - l \\ P_s &= F + \Omega - D - l' \\ \tau &= t - D \end{aligned} \quad \dots\dots(48)$$

ここで、 t は時刻である。

これらのポテンシャルを用いて地球潮汐による変位が求められる。

まず、JPL の惑星暦情報を用いた(45)式の場合は、周波数に依存しないラヴ定数を用いる。動経成分を ρ 、経度成分を λ 、緯度成分を ϕ とする。(以下同様)

$$\begin{aligned} u_\rho &= H/g_A \times U_A \\ u_\phi &= L/g_A \times \frac{\partial}{\partial \phi} U_A \\ &= L/g_A \times \sum_{i=月,太陽} GM_i \{ (\vec{r}_i^E - \vec{r}_A^E \cdot \vec{n}) / |\vec{r}_i^E - \vec{r}_A^E|^3 - (\vec{r}_i^E \cdot \vec{n}) / |\vec{r}_i^E|^3 \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_\lambda &= L/(g_A \sin \phi) \times \frac{\partial}{\partial \lambda} U_A \\ &= L/(g_A \sin \phi) \sum_{i=月,太陽} GM_i \\ &\times \{ (\vec{r}_i^E - \vec{r}_A^E \cdot \vec{r}_A^E \times \hat{z}) / |\vec{r}_i^E - \vec{r}_A^E|^3 - (\vec{r}_i^E \cdot \vec{r}_A^E \times \vec{z}) / |\vec{r}_i^E|^3 \} \end{aligned} \quad \dots\dots(49)$$

ここで H, L は周波数に依存しないラヴ定数、志田定数である。 $\vec{n} = (-Z \cos(\lambda), -Z \sin(\lambda), r \cos(\phi))$ 、 $\hat{z} = (0, 0, 1)$ 、局 A の Z 成分・半径を Z, r とする。 g は観測局 A の表面重力加速度で、次式で表される。

$$g_A = g \frac{(1 + 0.00193166 \sin^2(\phi))}{(1 - e^2 \sin^2(\phi))^{1/2}} \quad \dots\dots(50)$$

g は赤道面での表面重力加速度、 e は離心率である。この式に地心月・太陽の位置を入力することにより直接変位が計算できる。

次に(46)式の方潮潮汐ポテンシャルによる変位の計算は次のように表される。

$$\begin{aligned} u_\rho &= K \sum_{l \geq 2} [\sum_i h_l^i(\omega_i) H_l^i(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^i)] \left(\frac{\rho}{R}\right)^l \\ &Y_l^i(\lambda, \phi) \\ &+ \sum_{m \neq 1} h_l^m \sum_i H_l^m(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^m) \\ &\left(\frac{\rho}{R}\right)^l Y_l^m(\lambda, \phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_\phi &= K \sum_{l \geq 2} [\sum_i l_l^i(\omega_i) H_l^i(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^i)] \left(\frac{\rho}{R}\right)^l \\ &\frac{\partial}{\partial \phi} Y_l^i(\lambda, \phi) \\ &+ \sum_{m \neq 1} l_l^m \sum_i H_l^m(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^m) \left(\frac{\rho}{R}\right)^l \\ &\frac{\partial}{\partial \phi} Y_l^m(\lambda, \phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_\lambda &= K \sum_{l \geq 2} [\sum_i l_l^i(\omega_i) H_l^i(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^i)] \left(\frac{\rho}{R}\right)^l \\ &\times \frac{1}{\sin(\phi)} \frac{\partial}{\partial \lambda} Y_l^i(\lambda, \phi) + \sum_{m \neq 1} l_l^m \\ &\sum_i H_l^m(i) \cos(\theta_i - \varepsilon_l^m) \\ &\times \left(\frac{\rho}{R}\right)^l \frac{1}{\sin(\phi)} \frac{\partial}{\partial \lambda} Y_l^m(\lambda, \phi) \end{aligned} \quad \dots\dots(51)$$

ここで、 $h_l^i(\omega)$ 、 $l_l^i(\omega)$ は流体核共鳴を含むモード ($m=1$) に対する周波数依存性ラヴ定数である。また、流体核共鳴からずれた周波数の分潮に対しては、ラヴ定数周

波数依存性は小さいので、一定値として典型的な代表値 h_i^m , l_i^m を用いた。これらの周波数依存性ラヴ定数は、J. Wahr による計算方法で求めた⁽¹²⁾。

直接に惑星暦情報から計算する方法と分潮に分けて計算する方法の本質的な違いは、周波数依存性ラヴ定数である。④式で使用したのと同じ周波数依存性のないラヴ定数を用いると、この2つの方法による計算値は、非常によい精度で一致する。また、前者には、惑星暦情報（惑星位置情報）が必要であるが、後者は、時間と局緯度・経度のみから解析的に計算できる。

第1回システムレベル実験では、これら2つの計算方法の違いにより、地球潮汐の変位に、約1.5 cm 振幅の日変化の差が見られた。

また、地球潮汐の遅延時間への影響を調べるために、第1回システムレベル実験における遅延時間への寄与の大きさを第8図に示す。約0.6 ns の振幅で、半日周期の変化がみられる。

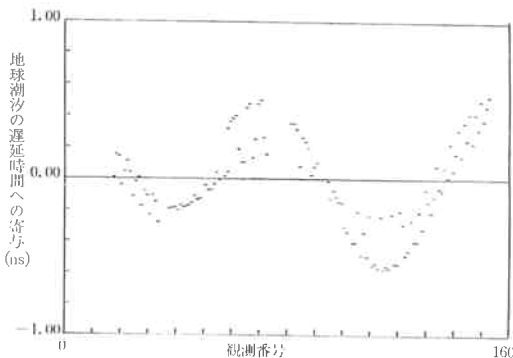
(II) 海洋潮汐荷重

海洋荷重の地球への圧力により、地球は弾性変形を起こす。この海洋潮汐による荷重分布の変動により、局位置の変位が生じる。

海洋潮汐による変位としては、E.W. Schwiderski の理論^{(14), (15)}を採用する。これによる変位成分 u_ρ , u_ϕ , u_λ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_\rho &= \sum_i A_\rho^i \cos(\theta_i - \alpha_\rho^i) \\ u_\phi &= \sum_i A_\phi^i \cos(\theta_i - \alpha_\phi^i) \\ u_\lambda &= \sum_i A_\lambda^i \cos(\theta_i - \alpha_\lambda^i) \end{aligned} \quad \dots\dots(52)$$

ここで、 A_ρ^i , A_ϕ^i , A_λ^i は動径成分、 $N-S$ 成分、 $E-W$ 成分の振幅である。また、 α_ρ^i , α_ϕ^i , α_λ^i はそれらの位相である。



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8図 地球潮汐の遅延時間への影響 (単位: ns)

$$\theta_i = L_i^1 \tau + L_i^2 s + L_i^3 h + L_i^4 P + L_i^5 N + L_i^6 P_s \quad \dots\dots(53)$$

ここで、 τ , s , h , P , N , P_s は、地球潮汐で述べた Doodson 変数であり、 L_i^k ($k=1\sim6$) は、Doodson 係数である。

KAPRI において、海洋潮汐に用いた分潮は、 $M2$, $S2$, $K1$, $O1$, $N2$, $P1$, $K2$, $Q1$, Mf の9分潮である。各 VLBI 局における9分潮の振幅、位相としては、Schwiderski の世界分潮マップから、文部省緯度観測所の佐藤忠弘氏より、動径成分、 $N-S$ 成分、 $E-W$ 成分について計算されたものを使用している。鹿島におけるこれらの数値について第4表に示す。

海洋潮汐による振幅は約2 cm と小さく、遅延時間への影響は、0.1 ns 以下である。

4.5 電波星の位置

(I) J 2000.0年元期の星の位置

J 2000.0年を元期とする星の位置は次の2種類のカタログが利用できる。

第1に、VLBI での観測結果を使って、J 2000年系で解析し推定した星の位置である。その例として、米国の Mark-III グループが79年8月~82年8月までの観測結果（遅延時間・遅延率）を用いて解析した星のカタログがある。この方法で求められた星の位置の中で POLARIS 14 星 (NGS による POLARIS の VLBI 実験に使用された代表的な電波星) について第5表に示す。この他に JPL グループによる VLBI での観測結果を使った J 2000年系の星のカタログ⁽¹⁶⁾ があるが、数 marcsec の違いが見られる。

第2には、B 1950年元期の星の位置から J 2000年元期の星の位置に変換する方法である。

B 1950年元期の星の位置のカタログには、光学位置天文観測によるものと、VLBI で B 1950年系で解析したものがあ。たとえば、VLBI による星の位置のカタログとして、JPL グループによる電波星のカタログ⁽¹⁷⁾ が利用できる。しかし、JPL グループが解析に用いた歳差定数は、B 1950年系で一般に用いられている Newcomb のものではなく、J 2000年系で使用している Lieske の歳差定数に近い数値であった。つまり、この方法により求められた B 1950年元期の星の位置は、Newcomb の歳差定数で定義された B 1950年元期の星の位置とは、座標系の定義が異なる。従って、このカタログを使用して、B 1950年元期の星の位置から B 2000年元期の星の位置へ変換するときに注意が必要である。

B 1950年元期の星の位置から B 2000年元期の星の位置への変換方法には、USNO による変換方法や、Aoki et al による変換方法⁽¹⁸⁾ がある。Aoki et al による

第4表 鹿島における海洋潮汐係数表 (振幅の単位: cm, 位相の単位: 度)
(文部省緯度観測所 佐藤忠弘氏からの私信)

分潮成分	動経 (鉛直) 成分		N-S (南北) 成分		E-W (東西) 成分	
	振幅 (cm)	位相 (度)	振幅 (cm)	位相 (度)	振幅 (cm)	位相 (度)
M 2	0.90126	333.31	0.18259	205.57	0.30591	186.35
S 2	0.46641	355.68	0.06732	220.33	0.14703	226.20
K 1	1.1308	2.20	0.16833	53.89	0.23917	242.11
O 1	0.88148	342.93	0.12134	34.50	0.18962	221.13
N 2	0.14113	346.49	0.03672	191.75	0.03939	178.39
P 1	0.35976	2.09	0.05086	56.79	0.07558	242.12
K 2	0.12831	0.77	0.02176	226.07	0.03928	228.20
Q 1	0.18808	337.10	0.02226	20.66	0.03912	218.93
M f	0.01472	164.61	0.00456	41.42	0.00367	135.85

変換方法は、カタログ作成時に使用したデータの実観測日時 (観測エポックと略す) を入力し、まず、B 1950 年元期の星の位置から各観測エポックでの星の位置に Newcomb の歳差定数で変換する。次に、各観測エポックの星の位置から J 2000 年元期での星の位置に Lieske の歳差定数で変換する。このとき、E 項は B 1950.0 での値を B 1950 年元期の星の位置から除き、J 2000 年元期での星の位置には含ませないものとする。この変換では、観測エポックを導入し、観測エポックでの連続性を重要視しているので、B 1950 年元期で固有運動がゼロであれば、J 2000 年元期での星の固有運動もゼロとなる。変換の精度は数 marcsec 以下である。

E 項は、B 1950 年元期 (B 1950.0 を元期とする座標系) の星表 (FK-4) には含まれているが、J 2000 年元期の星の位置には含まないことが一般的である。

KAPRI では、第 1 の方法による電波星カタログを用いるが、その電波星カタログにない星を観測する場合には第 2 の方法を用いる。

星の位置は、地球固定基準系の定義と関係する。たとえば、地球固定基準系を Z 軸まわりに回転すると、星の赤経にあるオフセットを加えることとはほぼ同一である。従って、座標系の定義と星の位置とは対応させて決める必要がある。このことは、VLBI 用電波星カタログ (3C 273 B の赤経が基準) と光学位置天文での星の位置

カタログとの対応関係を考えるときにも重要になるであろう。

(II) 固有運動

太陽慣性系に対して星が運動して、みかけの星の方向が動く現象、つまり、星の固有運動は次式で表される。

$$\vec{S} = \vec{S}_0(1 - (\vec{V} \cdot \vec{S}_0 / R) \times \Delta t) + (\vec{V} / R) \Delta t \quad \dots\dots 54$$

$$\vec{V} / R = V \vec{S}_0 + \mu_\alpha (-\sin \alpha, \cos \alpha, 0) + \mu_\delta (-\sin \delta \cos \alpha, -\sin \delta \cos \alpha, \cos \delta)$$

ここで、 Δt は星の元期からの経過時間、 \vec{S}_0 は星の元期での方向ベクトル、 α, δ は星の元期での赤経、赤緯、 \vec{V} は星の動径速度、 μ_α, μ_δ は星の固有運動の赤経、赤緯成分である。54 式は、 \vec{V} が含まれているが、 \vec{V} は μ_α, μ_δ で記述できるので、星の方向に関するパラメータは μ_α, μ_δ だけでよい。

ところで、VLBI で主に観測に使用する電波星は準星のような数十億 pc ~ 百億 pc 離れた電波源である。たとえば、太陽系に対して光速で運動していたとしても、百億 pc 離れた電波星の位置は、50 年間で約 0.001 arcsec しかずれない。従って、数十年のような短い期間では固有運動は無視できる。

(III) 視差

視差とは、地球の公転位置の変化による方向のずれである。視差による星の方向のずれ ($d\vec{S}$) は次式で表される。

第5表 J2000年元期ポラリス14電波星のカタログ (E項を含まない)
 電波星の位置: 79年~82年 VLBI 観測解析結果 (Mark-III グループ) からの引用
 電波源強度: 「宇宙技術を利用した地球回転運動の研究」に関するシンポジウム p.143 VLBI シミュレーション用の電波源リスト (藤下, 井上) からの引用

IAU星名	コモン星名	経度			赤緯			強度 (Jy)	
		H	M	Tsec	D	M	arcsec	S band	X band
0106+013		1	8	38.77104	1°	35'	0.3232	2	2
0224+671	4C67.05	2	28	50.05172	67°	21'	3.0310"	0.6	0.6
0235+164		2	38	38.93006	16°	36'	59.2789"	1	2
0355+508	NRAO 150	3	59	29.74733	50°	57'	50.1630"	0.2	0.4
0552+398		5	55	30.80564	39°	48'	49.1654"	3	5
0851+202	OJ 287	8	54	48.87486	20°	6'	30.6390"	0.6	1
0923+392	4C39.25	9	27	3.01375	39°	2'	20.8505"	2	4
1226+023	3C273B	12	29	6.69970	2°	3'	8.5958"	2	1
1404+286	OQ 208	14	7	0.39419	28°	27'	14.6884"	0.6	1
1641+399	3C345	16	42	58.80967	39°	48'	36.9957"	2	2
1642+690		16	42	7.84782	68°	56'	39.7572"	0.5	1
2134+004		21	36	38.58615	0°	41'	54.2195"	1	2
2200+420	VR 422201	22	2	43.29121	42°	16'	39.9837"	1	1
2251+158	3C354.3	22	53	57.74786	16°	8'	53.5655"	3	0.2

$$d\vec{S} = -(\vec{r}_E^C - (\vec{r}_E^C \cdot \vec{S})\vec{S})/R - (\vec{r}_A^E - (\vec{r}_A^E \cdot \vec{S})\vec{S})/R \quad \dots\dots(55)$$

ここでRは太陽系重心から星までの距離、 \vec{r}_i^j はiからjへの位置ベクトル、 \vec{S} は星の方向ベクトルである。また、添字Aは観測局、Cは太陽系重心、Eは地球重心を表す。

55式の第1項の太陽系重心と地球重心の位置による視差を年周視差といい、第2項の地球重心と観測局の位置による視差を日周視差という。距離Rが5000 pc以上ならば遅延時間への影響は、年周視差で0.1 ns以下であるので、準星では無視できる。

4.6 伝搬路による補正

(I) 相対論的重力効果

太陽の重力場によって電磁場の伝搬路が湾曲し、星の位置が変化する。

電波の伝搬路の屈折角 η (伝搬路の地球における接線と星の方向ベクトルとのなす角) を用いて、星の方向ベクトル \vec{S} の変化 $d\vec{S}$ は次式で表される。

$$d\vec{S} = \cos \eta \times \vec{S} + \sin \eta (\vec{S} \times \vec{R}) \times \vec{S} / |(\vec{S} \times \vec{R}) \times \vec{S}| \quad \dots\dots(56)$$

ここで、太陽からの地球の位置ベクトルを \vec{R} とする。また、星の方向と地球の方向とのなす角を θ とすると、この屈折角は、電波の伝搬路の方程式を解いて求められる。Shapiro による屈折角 η は次式で表される⁽⁹⁾。

$$\eta = \alpha/R \times \tan(\theta/2) \quad \dots\dots(57)$$

ここで、R は太陽と地球の距離、 α は太陽重力半径で、相対論パラメータを γ 、万有引力定数をG、太陽質量を M、光速を c とすると、 $(1+\gamma)GM/c$ で表される。この相対論パラメータは、アインシュタイン理論では 1。Brans・Dicke の理論では 7/8 である。

α/R の値は 4.2×10^{-3} arcsec と小さく、遅延時間へ

の寄与は約 0.5 ns 程度である。

(II) 太陽コロナによる伝搬路湾曲

太陽近傍の星を観測する場合には、伝搬路が太陽付近を通過する。この場合、太陽付近のコロナ内の電子により電波が曲げられ、みかけ上の星の方向ベクトルが変化する。

コロナによる伝搬路屈折角を η_c とすると、星の方向ベクトルは、(6)と同じ式で、 η を η_c で置き換えたもので表される。この屈折角 η_c は、太陽コロナの電子密度 $N = a/r^0 + b/r^2$ からアップルトンの公式にあてはめて解くことができる。ここでは簡単に電子密度と同様な式で表した次式で表すことにする。

$$\eta_c = (A/(R \times \sin(\theta))^6 + B/(R \times \sin(\theta))^2) / f^2 \quad \dots\dots(58)$$

この A, B はコロナ定数で、太陽コロナの電子密度の係数 a, b と次のような関係を持つ。

$$\begin{aligned} A &= e^2 / (4\pi^2 m \epsilon_0) \times a = 80.6a \\ B &= e^2 / (4\pi^2 m \epsilon_0) \times b = 80.6b \end{aligned} \quad \dots\dots(59)$$

ここで、 e は電子の電荷、 m は電子の質量、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

コロナの影響が関与するような太陽近傍で星を観測すれば、アンテナのシステム雑音が高くなるので、太陽近傍の星は避けて観測を行うのが一般的であり、コロナの影響は考慮に入れなくてもよい場合が多い。

(III) 電離層による excess path

地球の電離層により、伝搬速度が真空の光速より遅くなったり伝搬路が湾曲して、電離層がないときに比べて伝搬時間が長くなる。この遅延時間を長さに換算したのが excess path ΔP である。

$$\Delta P = f(n-1)ds \quad \dots\dots(60)$$

ここで、 n は屈折率であり、 s は伝搬路に沿った長さを示す。この屈折率 n は、電離層電子密度 $N_e(r)$ 、磁場の大きさ B 、磁場の方向 θ ($\tan(\theta) = B_r/B_L$; B_L は伝搬方向の磁場、 B_r は伝搬路方向に垂直な磁場) を用いて、アップルトンの公式から次のように求められる。

$$\begin{aligned} n-1 &= K1 N_e / f^2 \pm K2 N_e B \cos(\theta) / f^3 + \dots\dots \\ K1 &= e^2 / (8\pi^2 m \epsilon_0) \\ K2 &= e / (2\pi m) K1 \end{aligned} \quad \dots\dots(61)$$

この周波数依存性により、2周波を用いて電離層の寄与を計算できる。S band (周波数を f_s) の観測遅延時間を τ_s 、X band (周波数を f_x) の観測遅延時間を τ_x とすると、S band、X band の電離層補正量 $\Delta\tau_s, \Delta\tau_x$ および電離層効果を除いた遅延時間 τ_0 は次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta\tau_s &= f_x^2 / (f_s^2 - f_x^2) \times (\tau_x - \tau_s) \\ \Delta\tau_x &= f_s^2 / (f_s^2 - f_x^2) \times (\tau_x - \tau_s) \\ \tau_0 &= (f_s^2 \tau_s - f_x^2 \tau_x) / (f_s^2 - f_x^2) \end{aligned} \quad \dots\dots(62)$$

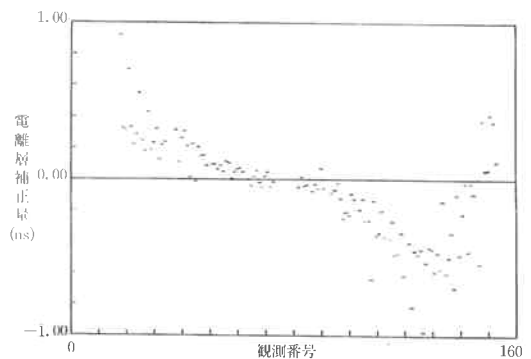
電離層補正量は、KOMB (III-5, バンド幅合成ソフトウェア) による S band, X band の観測遅延時間の計算値から求められ、KAPRI で計算された X band の予測遅延時間に加えられる。注意すべきことは、 τ_s や τ_x としては、観測遅延時間の規則的任意性を除いた数値を用いなければならない。この規則的任意性の発生する理由については、KOMB で詳しく述べられている。規則的任意性を除いた観測遅延時間から電離層補正を計算し、X band の予測値に補正を行うためのプログラムとして IONCR がある。KAPRI を稼動させたあとに、これを稼動させ、電離層補正を行うことができる。

IONCR により求められた第1回システムレベル実験での電離層補正量を第9図に示す。鹿島と MOJAVE では時差のため昼と夜がほぼ逆転しているの、電離層効果は、正から負に24時間周期で変化している。この電離層補正量は鹿島—モハービ基線で、最大約 1 ns であった。

電離層補正については、電波研究所鹿島支所第三宇宙通信研究室の高橋富士信氏による f_0, f_2 の値を用いて理論的に予測する方法が示されている。この理論の採用により、1周波のみの観測も可能になることが期待される。

(IV) 大気補正

地表付近の O_2, N_2, H_2O などの大気により、電波の伝搬路が湾曲したり、屈折率の増加により、伝搬時間が長くなる。この遅延時間の増大の補正を大気補正 (長さに変換したものを excess path) という。この補正量は、乾燥大気によるものと、水蒸気によるものの2つに分けられる。



第1回システムレベル実験 (1984年1月23日, 鹿島—モハービ)

第9図 電離層補正量 (X band) (単位: ns)

電離層補正
1984/1/23

まず、乾燥大気の補正量の計算には、理想気体モデルが適応でき、地表の気温 (T_s)、気圧 (P_s)、湿度 (H_s) で比較的容易に計算できる。この補正量は、天頂方向で約 7 ns (210cm) 程度と大きな excess path を示す。乾燥大気のみをみれば、季節変動は小さくほぼ一定で、地表の T_s , P_s , H_s から天頂方向の excess path (以下 zenith path と呼ぶ) を数 cm の精度で計算できる。しかし、乾燥大気による補正は大きな量でありかつ高層 (数 10 km) まで excess path に関与するため、VLBI などの高精度が要求される場合には、慎重な分析が必要であろう。特に日米基線のような長基線 (10000 km) の場合には、低仰角での観測が多くなるので重要になる。乾燥大気のモデルとしては、天頂方向の遅延量は Moran のモデルを採用し、仰角依存性は Chao のモデルを採用した。

この乾燥大気の zenith path のモデルの詳細は以下のとおりである。

大気屈折率の増分 ($N=(n-1)\times 10^6$) (n は真の大気屈折率) は次式で表される。

$$N=77.6(P-e)/T_A+72e/T_A+3.75\times 10^5 e/T_A^2 \quad \dots\dots(63)$$

P は全気圧 (mb), e は水蒸気圧 (mb), T_A は温度 (K) である。ここで e/T_A の項は小さいので、 e/T_A^2 の項に含めると、一般によく用いられる次の式となる。

$$N=77.6(P-e)/T_A+3.73\times 10^5 e/T_A^2 \quad \dots\dots(64)$$

ここでは 63 式の第 1 項 (水蒸気圧 $e=0$ とした場合の屈折率) を乾燥大気による屈折率とする。

乾燥大気の excess path P_d は 60 式と同様に表され次のようになる。

$$P_d=77.6f(P-e)/T_A ds\times 10^{-6} \quad \dots\dots(65)$$

ここで、大気は理想気体として状態方程式に従うとすると、高さ分布は次の方程式で表される。

$$-dP/dh=Mg(P-e)/(RT_A)+M_wge/(RT_A) \quad \dots\dots(66)$$

ここで、 h は地表からの高さ、 P , e , T_A , g は高さ h での気圧、水蒸気圧、気温、重力加速度である。 R はガス定数 (8.31436N/(deg mol)), M , M_w は乾燥空気と水蒸気の平均分子量である ($M_w=0.01802$ kg/mol, $M=0.028966$ kg/mol)。65 式と 66 式から、乾燥大気の zenith path L_d は次のようになる。

$$L_d=-77.6\times 10^{-6}(R/M)\int_{P_s}^1 1/g dP -M_w/M\int_H e/T_A dh \quad \dots\dots(67)$$

次にマリニによる次の近似を行う。

$$\int 1/g dP=P_s/g \\ \bar{g}=9.784(1-0.026\cos(2\phi))-0.00028\times 10^{-3}H \quad \dots\dots(68)$$

ここで H は地表の高さ (m), ϕ は緯度である。

また、J. Saastamoinen より次式のように近似される。

$$\int_H e/T_A dh=R/(4M\bar{g})\times e_s \quad \dots\dots(69)$$

(67)~(69) 式より乾燥大気の zenith path は次式で表される。(単位 m)

$$L_d=77.6\times 10^{-6}R/(M\bar{g})(P_s-M_w/(4M)e_s) \quad \dots\dots(70)$$

e_s は地表の水蒸気圧であり、次のように表される。

$$e_s=\frac{H_s}{100}\times 6.11\times 10^{7.5t_s/(t_s+237.3)} \quad \dots\dots(71)$$

ここで、 H_s は地表の湿度 (%), $T_s=t_s+273.16$ は地表の気温 (K) である。

この第 2 項の係数は $M_w/(4M)=0.156$ と小さいのは、水蒸気の飽和水蒸気圧が、温度とともに急激に減少するので、飽和水蒸気圧が上層に行くと急激に小さくなるためである。

第 2 項を無視すると、次式の Moran のモデルとなる⁽²¹⁾。

$$L_d=77.6\times 10^{-6}R/(Mg)P_s \quad \dots\dots(72)$$

ただし、Moran のモデルでは g は地表の重力加速度である。KAPRI では、この Moran のモデルを用いることにする。70 式の第 2 項は夏でも 1 cm 程度と小さいが、低仰角 (El) では、無視できないと思われる。

次に、この zenith path を用いて、Chao による仰角依存性から、excess path ΔP は次のように求められる⁽²²⁾。

$$\Delta P=L_d/(\sin(El)+0.00143/(\tan(El)\times 0.0445)) \quad \dots\dots(73)$$

ここで、 El は仰角である。

Moran による乾燥大気の zenith path と Chao による仰角依存性のモデルによる乾燥大気の補正の他に、米国の解析ソフトウェアに用いられている Marini のモデルがある⁽²³⁾。このモデルは乾燥大気と水蒸気の両方を含めた excess path の計算であり次式で表される(単位: m)。

$$\Delta P=\frac{1}{g\sin(El)}+\frac{A+B}{\sin(El)+0.015} \\ A=0.002277[P_s+(1255/T_s+0.05)e_s] \\ B=2.644\times 10^{-3}\exp(-0.14372\times 10^{-3}H) \quad \dots\dots(74)$$

ここで、 ϕ は緯度、 H は観測局の海拔(m)である。

水蒸気圧 e_s は 71 式で、 \bar{g} は 68 式で与えられる。

KAPRI では、Moran・Chao のモデルと Marini のモデルの 2 つの大気モデルを、選択的に使用することができる。

(V) WVR による水蒸気の補正

次に, WVR による水蒸気の補正について簡単に述べる (詳しくは WVR の項を参照). WVR で観測された 20 GHz, 26.5 GHz での輝度温度を用いて, Wu のモデルに基づいて KAPRI で水蒸気 excess path の計算を行う⁽²⁴⁾. この計算式は次のように表される.

$$\Delta P_{WU} = \frac{1}{W} (b_0 + b_1 T'_1 + b_2 T'_2)$$

$$W = T(T - T_c) / \rho_v \times (\alpha_1 / f_1^2 - \alpha_2 / f_2^2)$$

$$T'_i = T_c - (T'_{ei} - T_c) \ln(1 - (T_i - T_c) / (T_{ei} - T_c)) \quad (i=1, 2)$$

$$T'_{e1} = 0.95 T_s \quad (20 \text{ GHz})$$

$$T'_{e2} = 0.94 T_s \quad (26.5 \text{ GHz})$$

$$T_{ei} = (1 + 0.0009 / \sin(El)) T'_{ei} \quad (i=1, 2)$$

.....(75)

ここで, T_c は宇宙背面雑音温度 (2.8K), T_1, T_2 は周波数 20 GHz, 26.5 GHz の輝度温度 (K), f_1, f_2 はその周波数 (GHz) である. ρ_v は地表の水蒸気密度 (g/m), α_v は地表の水蒸気による減衰係数 (km^{-1}) である. また, b_0, b_1, b_2 はパラメータで, ラジオゾンデのデータを次式に代入して計算した結果を再現するように校正を行う.

$$L = 10^{-6} \int \left(77.6 \frac{e}{T_d} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T_d^2} \right) dh$$

.....(76)

こうして求めた Wu のモデルによる水蒸気 excess path の精度はラジオゾンデを用いた観測と長期間比較することで求めることができる. 遅延時間に対するこの大気補正 $\Delta\tau_g$ は excess path ΔP を用いて次のように表される.

$$\Delta\tau_g = \Delta P / c$$

.....(77)

4.6 アンテナ軸オフセット

VLBI で測定されるのは, アンテナの基準点の位置である. このアンテナの基準点とは, アンテナ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の交点である. このアンテナ軸オフセットは, この基準点とアンテナの軸のずれにより生じる仰角依存性による遅延時間への寄与を示す. アンテナ軸オフセット D の遅延時間への寄与 τ_g は次式で表される⁽²⁵⁾.

$$\tau_g = D / c \times \sin(\theta)$$

.....(78)

$$\theta = \arccos(\vec{S} \cdot \vec{F})$$

.....(79)

ここで, \vec{F} は次のような方向ベクトルである.

$$\vec{F} = (\sin(\phi), 0, \cos(\phi)) \quad (\text{経緯儀型})$$

$$= (1, 0, 0) \quad (\text{赤道儀型})$$

$$= (0, 0, 1) \quad (X-Y, Z \text{ 軸北})$$

$$= (0, 1, 0) \quad (X-Y, Z \text{ 軸東})$$

\vec{S} は星の方向ベクトル, ϕ は観測局の緯度である.

5. 遅延時間・遅延率の計算アルゴリズム

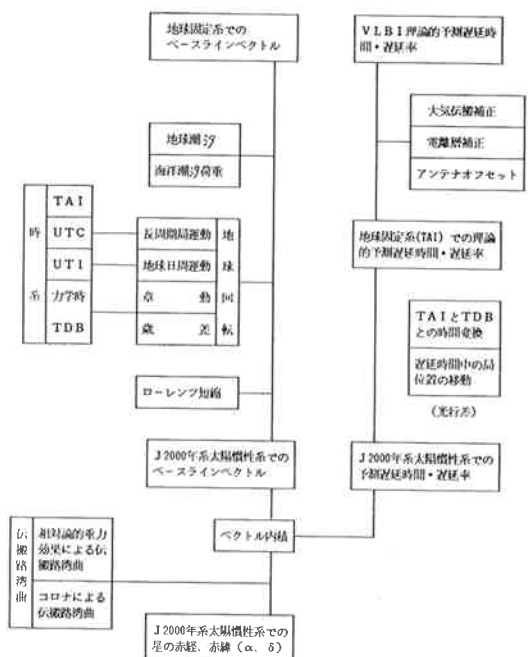
第10図に遅延時間・遅延率の計算アルゴリズムを示す.

まず地球固定系のベースラインベクトル \vec{B} に, 地球潮汐, 海洋潮汐荷重による局位置の変位による補正 $\Delta\vec{B}$ を加える. 補正されたベースラインベクトルに次の座標変換 \tilde{T} を行い, J 2000系の太陽慣性系でのベースラインベクトルに変換する.

$$\tilde{T} = RP \times RN \times RS \times RW$$

.....(81)

ここで, RP, RN, RS, RW 歳差, 章動, 日周運動, 長周期極運動の変換行列である. これらの計算方法は各物理効果で詳しく述べた. また, これらの行列を計算するには時系が必要であった. まず, 長周期極運動の変換行列には, UTC が必要であり, 日周運動の変換行列には, UT1 が必要であった. この UT1 を求めるためには, IPMS または BIH のデータと地球潮汐短周期補正項が必要であった. 歳差, 章動の変換行列の計算には力学時が必要であった.



第10図 KAPRI における遅延時間・遅延率計算アルゴリズム

第6表 KAPRI に使用される天文・物理定数
(Moyer : Moyer の論文からの引用)

光 速 (c)	299792458.0 (m/sec)	IAU 76
万有引力定数 (G)	6.672×10^{-11} (m ³ /s ² kg)	IAU 76
太陽の重力定数 (GM _S)	$1.32712438 \times 10^{20}$ (m ³ /s ²)	IAU 76
月の重力定数 (GM _M)	4.9027975×10^{12} (m ³ /s ²)	IAU 76
地球の重力定数 (GM _E)	3.986005×10^{14} (m ³ /s ²)	IAU 76
木星の重力定数 (GM _J)	1.267120×10^{17} (m ³ /s ²)	Moyer
土星の重力定数 (GM _S A)	3.793410×10^{16} (m ³ /s ²)	Moyer
太陽系の重力定数 (GM _T)	1.328906×10^{20} (m ³ /s ²)	Moyer
ガウス引力定数	0.01720209895	IAU 76
地表面重力加速度	9.7803267715 (m/s)	IAG 80
重力の緯度変化係数	0.001931851353	IAG 80
周波数非依存性重力ポテンシャルラヴ定数	0.29	
周波数非依存性潮汐ラヴ定数	0.6090	
周波数非依存性志田定数	0.0852	
太陽半径	0.696×10^9 (m)	
太陽重力半径	1.4766252×10^3 (m)	
地球一月重心の公転軌道離心率	0.01672	
木星公転軌道離心率	0.048284	Moyer
土星公転軌道離心率	0.056038	Moyer
J2000 平均黄道傾斜角	0.4090927 (ラジアン)	
地球・月質量比	81.30068	IAU 76
光 差	499.004782 (sec)	IAU 76
地球赤道半径	6378137.081 (m)	VLBI
地球扁平率	1/298.26	VLBI
地球平均半径	6371008.7714 (m)	IAG 80
TDB-TAI オフセット	32.184 (sec)	
相対論定数	1	
気体定数	8.31441	
乾燥大気平均分子量	28.966×10^{-3} (kg/mol)	

さらに、ローレンツ短縮による補正 \vec{A}_{BLo} (41式) を行い、太陽慣性系でのベースラインベクトル \vec{B}_{T0} を求める。

$$\vec{B}_{T0} = \vec{T}(\vec{B} + \vec{A}_{B}) + \vec{A}_{BLo} \quad \dots\dots(42)$$

一方、J 2000年系の太陽慣性系での星の方向ベクトル \vec{S}_0 に、相対論的重力効果、コロナによる効果、固有運動、視差の補正 $\vec{A}_{\vec{S}}$ を行う (現在の KAPRI ではコロナによる効果、固有運動、視差の補正は実行していない)。

$$\vec{S} = (\vec{S}_0 + \vec{A}_{\vec{S}}) / |\vec{S}_0 + \vec{A}_{\vec{S}}| \quad \dots\dots(43)$$

この2つのベクトルの内積をとり TDB での遅延時間を求める。これに、遅延時間内の地球の運動による補正 (44式) を行い、さらに、TDB から TAI への時系変換 (45式または46式) により、TAI での遅延時間を求める。

この他に、(41式)のローレンツ短縮、遅延時間内の地球の運動による補正、TDB から TAI への時系変換をすべて含む(47式)により、TAI での遅延時間を求めることができる。

これらの TAI での遅延時間に、大気補正、電離層補正、アンテナ軸オフセットによる補正を加えたものが最終的な予測遅延時間である。

各物理効果の時間微分を用いて同様なアルゴリズムで遅延率も求められる。

6. 天文・物理定数

物理モデル計算には多くの天文・物理定数が使用されている。しかし VLBI のような超高精度のモデル計算の場合には、定数の取扱いも一貫して厳密に行う必要がある。

K-3 型 VLBI システムでは、データベースを使用することで定数の混乱を避けている。第6表に KAPRI に使用する天文・物理定数を示す。

7. 寄与・偏微分

偏微分係数は、線型最小2乗法によりパラメータ推定を行うときの係数行列である。緯度観測所と協力して開発した KAPRI では、米国の Mark-III には無い章動、歳差係数の偏微分係数を計算することもできる。KAPRI で計算された偏微分係数は、データベースに入力され、KLEAR (パラメータ推定ソフトウェア) で使用される。

基線解析において主に必要な偏微分係数は、基線3成分に関する偏微分係数と、UT 1、長周期極運動の XY 成分に関する偏微分係数、それに、Zenith excess path に関する偏微分係数である。

次に、遅延量に対する寄与に関しては、(偏微分)×

(パラメータ値) で求められる。特に大気モデルやアンテナ軸オフセットでは、この方法で計算された値を遅延・遅延率に加えて補正を行う。そして、各物理効果の寄与はデータベースに入力される。電離層補正については、外部の補助プログラム IONCR で、電離層の寄与が計算されデータベースに入力される。

8. 問題点と検討

KAPRI における問題は、主に次の3点である。

(I) KAPRI の高速化

データベースとのアクセス時間が大きいため、1 obs 1 基線で約5分程度、3基線実験では約1日程度の計算時間が必要となる。この計算時間の短縮のためには、データベースとのアクセス回数を減らし、1度にまとめて入出力すればよい。この高速化については検討中である。

(II) KAPRI の物理モデル

KAPRI には、各種の物理モデルが使用されているが、この各物理効果の遅延・遅延率への寄与に関して、必要精度以上の予測精度計算を行っているためデータベースに負担をかけたか、計算速度を遅くしている。たとえば、TDB の計算、惑星位置情報、地球潮汐、海洋潮汐などにこうした面が見られる。これらに関して、必要精度 0.1 ns 以下でいかに簡単なモデルにするか、あるいはデータベースの容量を小さくしデータベースアクセスをいかに減らすかはこれからの検討課題である。

たとえば、地球潮汐では、周波数依存ラヴ定数を用いなければならない。これに関して、主要項は分潮計算で周波数依存ラヴ定数を用い、他は、周波数非依存ラヴ定数を用いて、惑星位置情報から直接計算する方法などが考えられる。この場合、地球潮汐は次のように表される。

$$\begin{aligned} \text{地球変位} = & (l(\omega) - l) \times \text{主要分潮項} \\ & + \text{直接計算による地球変位} \quad \dots\dots(44) \end{aligned}$$

ここで、 $l(\omega)$ は周波数依存ラヴ定数、 l は直接計算に用いられた周波数非依存ラヴ定数である。

また、TDB の周期項 e_P の遅延への寄与は小さいので高精度に計算する必要はない。この計算を簡略化することでデータベースの容量 (惑星位置情報の土星、木星の位置) もデータベースアクセスも減らすことができる。

9. ま と め

クロックオフセット、クロックレート、ケーブル遅延を除いた高精度の理論的予測値計算をするソフトウェア (KAPRI) について述べてきた。このソフトウェアは、

文部省緯度観測所の協力で開発したもので、地球潮汐、UT1 の地球潮汐補正、海洋潮汐荷重、大気モデル、力学時、相対論効果等の米国の Mark-III 解析ソフトウェアと比べて新しいアルゴリズムで、遅延時間・遅延率の理論的予測値計算を行う。さらに、パラメータ推定ソフトウェア (KLEAR) に必要な偏微分係数を計算し、KLEAR に受渡す。KAPRI は、正常に機能し、KLEAR とともに、VLBI の目標であるプレート運動や地球回転パラメータ等を求めるための中心的な役割を果たしている。

また、J2000年系での VLBI における物理効果について総合的に整理を行い問題点を明らかにした。特に座標系・時系の変換と座標系の定義との関係について明確にしてきた。こうしたことは、解析をする場合にも、解析結果を議論する場合にも重要となるであろう。

謝 辞

最後に、KAPRI の開発および季報作成に協力頂きました電波研鹿島支所第三宇宙通信研究室・VLBI 開発センターの皆様方、ならびに文部省緯度観測所の皆様方に感謝いたします。また、KAPRI 作成に協力頂きました日本電子開発㈱の皆様方に感謝いたします。

付 録

1 地球の流体核の章動への影響⁽³⁾

地球は、弾性体の地殻マントルとその内部の流体核および固体核とで構成されている。地球の流体核の章動への影響は、慣性結合トルクと呼ばれる流体核とマントル間の相互作用によるものである。マントルの形状軸（地殻の効果も含めてこう呼ぶ）と流体核の自転軸とがずれている場合、マントルと流体核の境界面の圧力が非対称になり、マントルの形状軸と流体核自転軸とを近づける方向に互いにトルクを及ぼしあう。こうした相互作用により、流体核の運動が、マントル形状軸の運動（章動）に影響を及ぼす。この慣性結合トルクにより、外力がない場合でも、流体核の自転軸とマントルの形状軸のずれにより自由振動に似た章動を生じる。これを自由コア章動と言う。

太陽・月による外力が存在する場合、流体核とマントルには、太陽・月による起潮力トルク以外に慣性結合トルクも作用する。従って、マントルの形状軸の章動は、起潮力トルクによるマントルの運動以外に、慣性結合トルクを通じて流体核の運動からも影響を受ける。特に自由コア章動の周期に近い周期の外力に対しては、流体核は大きく動き、マントルは大きく揺り動かされ章動の振幅は大きくなる。これを流体核共鳴と言う。

KAPRI では、この流体核共鳴の効果を含む J. Wahr

の章動モデルを用いている。

2 B1950年系の地球回転変換行列のアルゴリズム

B1950年系の天文基本角は、W.E. Brown の式を用いる(21)式。

章動は、地球を剛体として、瞬間自転軸の章動について計算した Woolard のモデルが用いられる。このモデルでは、0.0002 arcsec 以上の振幅項が考慮され、 $\Delta\phi$ （黄経の章動）の計算には69項、 $\Delta\epsilon$ （黄道傾斜角の章動）の計算には40項がふくまれている。その章動は(16)式と同様な計算方法で求められる。Woolard の章動テーブルは第7表に示す⁽²⁶⁾。その時の天文基本角は、Brown の式(21)を用いる。Mark-III の B1950年系の解析ソフトウェアでは JPL の章動を使用している⁽²⁷⁾。

次に、歳差は、Newcomb の計算式を用いる⁽²⁸⁾。

また、GMST や角速度は、ESAENA の式を用いる⁽²⁹⁾。

$$\text{GMST} = 23925.836 + 8640184.542 T_0 + 0.0929 T_0^2 \quad \dots\dots(84)$$

$$\omega = 1.002737909265 + 0.589 \times 10^{-10} T_0 \quad \dots\dots(85)$$

ここで T_0 は、B1900.0からの経過世紀（1世紀=36525）である。こうした計算方法で求められた数値を用いて、J2000座標系と同様なアルゴリズムで、B1950座標系の座標変換行列が求められる。

3 日周極運動の変換行列

形状軸に関する J2000年系の章動とは異なり、B1950年系での章動は、長周期時間平均角運動量に関する運動である。従って、長周期極運動で変換された長周期瞬間自転軸と、章動での長周期角運動量方向との差を補う物理効果である日周極運動が B1950年系では必要となる。この日周極運動は、長周期瞬間自転軸に対する瞬間自転軸の日周運動に、瞬間自転軸と角運動量との差による補正や、本来 GAST は瞬間自転軸まわりの時角であるが角運動量まわりの時角で表すことによる補正を加えたものである。角運動量とその長周期角運動量との差は小さいとして無視すると、日周極運動行列 RDNP は次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{RDNP} = & R_z(-\Delta\phi \cos(\epsilon)) R_x(-(H_y/(C\Omega) \\ & - M_y)) \times R_y(H_y/(C\Omega) - M_x) \\ & \times R_x(-M_{yd}) R_y(M_{xd}) \\ = & R_z(-\Delta\phi \cos(\epsilon)) R_x(-(H_{yd} + Y_e)) \\ & \times R_y(H_{xd} + X_e) \quad \dots\dots(86) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta\phi$ は黄経の章動、 ϵ は黄道傾斜角、 M_x , M_y は瞬間自転軸のCIOからの変位である。 M_{xd} , M_{yd} は、瞬間自転軸と長周期自転軸の差を表す。この成分は、前述したように日周運動を表す。

また、 H_x , H_y は長周期極と瞬間自転軸の差を表し、

第7表 Woolard の B1950年系の章動係数表 (0.0002 arcsec 以上の振幅)

No	Brown の 天文 基本 角					黄経の章動 ($\Delta\psi$)		黄道傾斜角の章動 ($\Delta\varepsilon$)		周 期
	<i>l</i>	<i>l'</i>	F	D	Ω	A	a	B	b	Days
1					1	-172327	-173.7	92100	9.1	6798.0
2					2	2088	0.2	-904	0.4	3399.0
3			2		1	45		-24		1305.0
4	-2		-2			10				1095.0
5		-2	2	-2	1	-4		2		6786.0
6	-2		2		2	-3		2		1616.0
7	1	-1		-1		-2				3233.0
8			2	-2	2	-12729	-1.3	5522	-2.9	183.0
9		1				1261	-3.1			365.0
10		1	2	-2	2	-497	1.2	216	-0.6	122.0
11		-1	2	-2	2	214	-0.5	-93	0.3	365.0
12			2	-2	1	124	0.1	-66		178.0
13	2			-2		45				206.0
14			2	-2		-21				173.0
15		2				16	-0.1			183.0
16	1				1	-15		8		386.0
17		2	2	-2	2	-15	0.1	7		91.0
18		-1			1	-10		5		347.0
19	-2			2	1	-5		3		200.0
20		-1	2	-2	1	-5		3		347.0
21	2			-2	1	4		-2		212.0
22		1	2	-2	1	3		-2		120.0
23	1			-1		-3				412.0
24			2		2	-2037	-0.2	884	-0.5	13.7
25	1					675	0.1			27.6
26			2		1	-342	-0.4	183		13.6
27	1		2		2	-261		113	-0.1	9.1
28	1			-2		-149				31.8
29	-1		2		2	114		-50		27.1
30				2		60				14.8
31	1				1	58		-31		27.7
32	-1				1	-57		30		27.4
33	-1		2	2	2	-52		22		9.6
34	1		2		1	-44		23		9.1
35			2	2	2	-32		14		7.1
36	2					28				13.8
37	1		2	-2	2	26		-11		23.9
38	2		2		2	-26		11		6.9
39			2			25				13.6
40	-1		2		1	19		-10		27.0
41	-1			2	1	14		-7		32.0
42	1			-2	1	-13		7		31.7
43	-1		2	2	1	-9		5		9.5
44	1	1		-2		-7				34.8
45		1	2		2	7		-3		13.2
46	1			2		6				9.6
47				2	1	-6		3		14.8
48		-1	2		2	-6		3		14.2
49	1		2	2	2	-6		3		5.6
50	2		2	-2	2	6		-2		12.8
51				-2	1	-5		3		14.7
52			2	2	1	-5		3		7.1
53	1		2	-2	1	5		-3		23.9
54				1		-4				29.5
55		1		-2		-4				15.4
56	1	-1				4				29.8
57	1		-2			4				26.9
58	2		2		1	-4		2		6.9
59	1		2			3				9.1
60	1	1				-3				25.6
61	1	-1	2		2	-3				9.4
62	-2				1	-2				13.7
63	-1		2	-2	1	-2				32.6
64	2				1	2				13.8
65	-1	-1	2	2	2	-2				9.8
66		-1	2	2	2	-2				7.2
67	1				2	-2				27.8
68	1	1	2		2	2				8.9
69	3		2		2	-2				5.5

(単位 : 0.0001 arcsec)

その日周成分を H_{xd} , H_{yd} で示す. 従って, 地球に対しては, 角運動量は, 長周期極より少しずれた点を中心とする日周運動を行う.

C , A は地球の慣性主軸まわりの慣性モーメント (C が Z 軸方向; $C > A$) である. 地球の角速度を Ω , 重力ポテンシャルラヴ定数を k , 永年ラヴ定数を k_s とする.

長周期極運動の X , Y 成分を $WOBX$, $WOBY$ とすると $M_x = WOBX + M_{xd}$, $M_y = WOBY + M_{yd}$ である. これらの変数を用いて X_e , Y_e は次のように表される.

$$\begin{aligned} X_e &= -(1-A/C)(1-k/k_s)WOBX \\ Y_e &= -(1-A/C)(1-k/k_s)WOBY \end{aligned} \quad \dots\dots(87)$$

GAST は瞬間自転軸まわりの時角であるのに対して角運動量まわりの時角で表すことによる補正が(88)式の最初の回転行列である. 第2, 3番目の回転行列が, 瞬間自転軸と角運動量との差による補正である. 第4, 5番目の回転行列は, 長周期瞬間自転軸に対する瞬間自転軸の日周運動を表す.

日周極運動は, 天の極を瞬時自転軸で定義したため, 地球の形状軸から瞬間自転軸への変換という余分な効果を導入したことによる物理効果である.

参 考 文 献

- (1) Robertson. D. S.; "Geodetic and Astrometric measurements with very-long-baseline interferometry", Earth and planetary Sciences, AUG. (1975).
- (2) S. Aoki, *et al*; "The new definition of Universal Time", Astron. Astrophys (1980).
- (3) J. M. Wahr; "The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth", Geophys. J. R. astr. Soc., 64, pp. 705-727 (1981).
- (4) J. H. Lieske; "Expression for the precession quantities based upon the IAU (1976) System of Astromical Constants", Astron. Astrophys, 58, pp. 1-16 (1977).
- (5) Kinoshita H., *et al*; "Note on nutation in ephemerides", Publs int. Latit Obs. Mizusawa, 12, pp. 71-108.
- (6) Gilbert F. & Dziewonski A. M.; "An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra", Phil. Trans. R. Soc., 278 A, pp. 187-269.
- (7) G. H. Kaplan; "The IAU resolutions on astronomical constants, time scales and the fundamental reference frame", United States Naval Observatory CIRCULAR, No. 163, DEC. 10 (1981).
- (8) Brown Ernest W.; "Tables of the motion of the moon", NEW HAVEN YALE UNIVERSITY PRESS, p. 28 (1919).
- (9) "The explanatory supplement to the American Ephemeris and Nautical Almanac", pp. 72-76, (1961).
- (10) T. D. Moyer; "Transformation from proper time on earth to coordinate time in solar system barycentric space-time frame of reference", Celestial Mechanics, 23, pp. 33-68, part 1, 2 (1981).
- (11) C. F. Yorder, *et al*; "Tidal variations of earth rotation", Journal of Geophysical Research, Vol. 86, No. B2, pp. 881-891 (1981).
- (12) J. M. Wahr; "Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth", Geophys. J. R. Astron. Soc., No. 64, pp. 677-703 (1981).
- (13) D. E. Cartwright and R. J. Tayler; "New computations of the tide-generating potential" Geophys. J. R. Astron. Soc., No. 23, pp. 45-74 (1971).
D. E. Cartwright & A. C. Edden; "Corrected Tables of Tidal Harmonics", Geophys. J. R. Astron. Soc., 1973, No. 33, pp. 253-264.
- (14) W. E. Farrell; "Deformation of the earth by surface loads", Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 10, pp. 761-797 (1972).
- (15) E. W. Schwiderski; "On charting global oceanic tides", Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 18, pp. 243-263 (1980).
- (16) J. L. Fanselow, *et al*; "An improved celestial radio refence frame: JPL 1982-4", in Very Long Baseline Interferometry Technique, p. 183 (1983).
- (17) J. L. Fanselow, *et al*; "Development of a radio-astrometric catalog by means of vely long baseline interferometry observations" in Reference Coordinate System for Earth Dynamics, p. 351 (JPL 1980-1 (1981)).
- (18) Aoki, *et al*; "The conversion from the B 1950 FK4-BASED position to the J 2000 position of celestial object", IAU 1984 symposium.
Aoki, *et al*; "Conversion matrix of each B 1950.0 FK 4-BASED positions of stars to each J 2000.0 positions in accordance with the IAU resolutions" Astron. Astrophys., No. 128, p. 263 (1983).
- (19) Shapiro I. I.; "New method for the detection of

- light deflection by solar gravity", *Science*, No. 157, p.806 (1967).
- (20) J. W. Marini, C. W. Murray JR; "Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees", Goddard Space Flight Center, X-591-73-351 (1973).
- (21) J. M. Moran, B. R. Rosen; "Estimation of the propagation delay through the troposphere from microwave radiometer data", *Radio Science* Vol. 16, No. 2, p. 235 (1981).
- (22) C. C. Chao; "A preliminary estimation of tropospheric influence on the range and range rate data during the closest approach of the MM 71 Mars Mission", JPL Tech. Memo, p.391 (1970)
- (23) J. W. Marini private communication.
- (24) S. C. Wu; "Optimum frequencies of a passive microwave radiometer for tropospheric pathlength correction", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. AP-27, No. 2 (1979).
- (25) Chopoma; "Very Long Baseline Interferometry applied to polar motion, relativity and Geodesy", NASA Tech. Memo., 79582 (1978).
- (26) Woolard E. W.; "Astronomical papers prepared for the use of the American Ephemeris and Nautical Almanac", XV, part I (1953).
- (27) Williams J. G.; Jet Propulsion Laboratory engineering memorandum pp.391-592, 21, AUG. (1974).
- (28) Newcomb S.; "A new determination of precession constant", *Astronomical Papers of the American Ephemeris*, VIII, part 1.

|||||