

## 暦象年表の改訂について

片山真人, 松田 浩, 福島登志夫, 渡部潤一

(2008年4月30日受付; 2008年9月3日受理)

### Revising Plan of “Calendar and Ephemeris”

Masato KATAYAMA, Ko MATSUDA, Toshio FUKUSHIMA, and Jun-ichi WATANABE

#### Abstract

Ephemeris Computation Office is responsible for compiling Ephemeris, which is one of the aim of the National Astronomical Observatory of Japan. Our main product “Calendar and Ephemeris” has been almost the same as the Ephemeris Part of the “Chronological Scientific Tables”. Because of the limitation of the latter, it cannot contain daily values nor reflect the high precision of the latest astronomical observations. Our goal is to overcome these deficits and provide the “Calendar and Ephemeris” as a full-scale ephemeris of Japan.

#### 1. はじめに

人類ははるか昔から太陽や月などさまざまな天体を観測して季節を知り, その周期性から暦(れき, こよみ)を作っていた。江戸時代に入り, 貞享暦, 寛政暦, 天保暦といった日本独自の暦法を確立させていった際も天文観測は大きな役割を果たしている。それくらい暦と天文学は密接なかわりを持ち, 今でも「暦書」の編製は国立天文台の設置目的の1つとなっている。

ところで, ここでいう「暦書」とは具体的には暦象年表のことをさす<sup>※1</sup>。暦象年表は非売品のため目にする機会は少ないと思われるが, 理科年表暦部とほぼ同じ内容を持つ小冊子であり, 太陽・月・惑星の視位置をはじめ, 日食・月食・出入り・南中など諸天文現象の予報が掲載されている。市民生活に密着した暦としては十分な内容ではある

が, データが数日おきであったり, 表示桁数が少なかったりして, 近年ますます向上している観測精度を十分に反映できないものであった。暦計算室ではこれらの課題を解消すべく, 暦象年表の改訂に取り組んでいる。

改訂計画の概要は以下の通りである(図1)。平成21年版 暦象年表のトピックス<sup>1)</sup>においてもおおよその改訂内容は紹介しているが, 本稿ではより詳細に解説する。

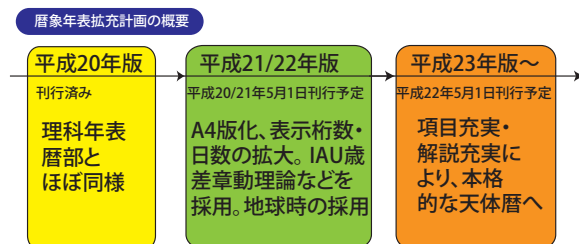


図1. 暦象年表の改訂

※1 第2次世界大戦前は本暦(神宮暦)がこれに該当した。

## 2. 平成21年版における改訂

### 2.1 大判化

現在の暦象年表の表示桁数ではせっかく精度の高い最新の理論を導入してもほとんど違いが現れない。そこで、まずは版をA4サイズとし、理科年表の紙面サイズからくる制約をとりはらった。基本的な内容・構成はほぼこれまでの暦象年表を踏襲するものの、表示桁数や掲載日数を拡大し、いくつか新しい項目も追加、若干レイアウトも変更している。

原稿作成には効率性を重視し、LaTeXを採用することにした。また、プログラミングにあたっては随時SOFA<sup>2)</sup>のサブルーチン群を活用している。

### 2.2 地球時の採用

いうまでもなく太陽が東から昇り、南中し、西に沈む現象は地球の自転によるものであり、1日という時間の概念もここに由来する。したがって、世界時 (Universal Time 1, UT1) は地球の自転を観測することで決定されるべき時刻系である。しかし、地球の自転は一様でなくその変動を正確に予測することはできない。視赤経や視赤緯などの表示桁数を増やした場合、予測の不確定性による誤差が無視できなくなるため、暦象年表では一様な時刻系である地球時 (Terrestrial Time, TT) を採用することとした。

地球時は地球のジオイド面上で歩度がSI秒となるような時刻系であり、以前は地球力学時 (Terrestrial Dynamical Time, TDT) あるいは単に力学時 (Dynamical Time, TD) と呼ばれていた時刻系に相当する。2000年の国際天文学連合 (International Astronomical Union, IAU) 勧告<sup>3)</sup>ではジオイドの決定精度に依存しないよう、地球重心座標時 (Geocentric Coordinate Time, TCG) に対して、

$$\frac{dT_T}{dT_{CG}} = 1 - L_G$$

$$L_G = 6.969290134 \times 10^{-10}$$

となる時刻系として再定義された。

なお、地球重心座標時とは地球重心を原点とした運動を記述する時に用いる時刻系である。一般に天体の運動を精密に扱うには一般相対性理論

(General Theory of Relativity) の効果を考慮する必要がある、したがって空間と時間はセットにして考えなければならない。地球重心のまわりの運動を考える場合には地球重心天文座標系 (Geocentric Celestial Reference System, GCRS)、太陽系諸天体の運動を考える場合には太陽系重心天文座標系 (Barycentric Celestial Reference System, BCRS) を用いる。時刻も座標の1つであり、前者の時刻を地球重心座標時、後者のそれを太陽系重心座標時 (Barycentric Coordinate Time, TCB) と呼ぶ。BCRSの座標軸ははるか遠方の銀河系外の電波天体 (主にクエーサー) によって定義される国際天文基準座標系 (International Celestial Reference System, ICRS) によって定められ、BCRSとGCRSは一般相対性理論的な座標変換により関係付けることができる<sup>3)</sup>。

地球時TTと世界時UT1の差は $\Delta T$ と呼ばれる。平成21年の場合、 $\Delta T$ は66<sup>s</sup>と予測している。

$$\begin{aligned} TT &= TAI + 32^s.184 \\ &= UT1 - (UT1 - UTC) \\ &\quad - (UTC - TAI) + 32^s.184 \\ &= UT1 - \Delta UT1 \\ &\quad - \text{うるう秒による累積オフセット} \\ &\quad + 32^s.184 \\ &= UT1 + \Delta T \end{aligned}$$

これまでどおり世界時0<sup>h</sup>における諸量を求めるには、表値からTT= $\Delta T$ の値を補間すればよい。なお、日の出入り、日月食などの諸天文現象についてはこれまでどおり中央標準時 (Japan Central Standard Time, JCST) を用いている。

### 2.3 太陽系重心力学時の算出

先に述べたように太陽系天体の運動を記述するには太陽系重心座標時が適しているが、国際的に採用されている基準暦DE405ではこれと異なる時刻系 $T_{\text{eph}}$ が採用されている。この時刻系は地球時と周期成分の違いしかない時刻系で、太陽系重心力学時 (Barycentric Dynamical Time, TDB) に相当するものである。

2006年のIAU勧告<sup>4)</sup>ではTDBは、TCBを用いて、

$$\begin{aligned} TDB &= TCB - L_B \times (JD_{TCB} - T_0) \times 86400^s \\ &\quad + TDB_0 \\ T_0 &= 2443144.5003725 \end{aligned}$$

$$L_B = 1.550519768 \times 10^{-8}$$

$$\text{TDB}_0 = -6.55 \times 10^{-5}$$

と再定義されている。  $T_{\text{eph}}$  はこのように定義された TDB と実質的に同じものと考えてよい。なお、  $\text{JD}_{\text{TCB}}$  とは TCB で表したユリウス日 (Julian Day, JD) である。

TDB と TT の関係は以下のとおり<sup>5)</sup>。

$$\begin{aligned} \text{TDB} = \text{TT} &+ 0^{\circ}001657 \sin(628.3076 T + 6.2401) \\ &+ 0^{\circ}000022 \sin(575.3385 T + 4.2970) \\ &+ 0^{\circ}000014 \sin(1256.6152 T + 6.1969) \\ &+ 0^{\circ}000005 \sin(606.9777 T + 4.0212) \\ &+ 0^{\circ}000005 \sin(52.9691 T + 0.4444) \\ &+ 0^{\circ}000002 \sin(21.3299 T + 5.5431) \\ &+ 0^{\circ}000010 T \sin(628.3076 T + 4.2490) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

ここで  $T$  は J2000.0 からの経過時間を 36525 日単位で表したユリウス世紀数で、諸量を表現するのによく使われる。

$$T = \frac{\text{JD} - 2451545}{36525}$$

## 2.4 新歳差章動理論

2006 年 8 月、プラハで開催された IAU の第 26 回総会は惑星の定義で大いに議論が盛り上がったが、暦の基本となる歳差や黄道座標系についても重要な決定がなされている。すなわち IAU2006 歳差章動理論<sup>\*2)</sup> の勧告である<sup>4)</sup>。

VLBI 等の宇宙測地技術の進展により、既に IAU1976 歳差理論<sup>6)</sup> には 100 年で 300mas ほどのずれがあることが知られていたが、IAU2000A 歳差章動理論<sup>3)</sup> も Shirai and Fukushima の章動理論 (SF2001 章動理論)<sup>7)</sup> も補正項による微修正にとどまり、不十分な内容であった。IAU2006 歳差章動理論ではこの点を解決するとともに、以下の点についても変更が加えられている。

- (a) 黄道の極は BCRS における地球-月重心の平均軌道角運動量ベクトルにより定義する。

これまでは明確な定義がなく、平均軌道面によるものと平均軌道角運動量ベクトルによるものの 2 つの流儀が存在し、混乱していた。

- (b) 日月歳差・惑星歳差はそれぞれ、赤道の歳差、黄道の歳差と読みかえる。この精度では地球の赤道の運動に対する惑星の寄与は無視できず、日月歳差という言葉では誤解を招くためである。

この勧告により、ICRS の導入などに始まる一連の改革がようやく完了したといえよう。IAU2006 歳差章動理論は 2009 年 1 月 1 日より採用されることになっている。

### (1) 歳差・章動の変換行列

IAU の勧告では 4 通りの変換方法<sup>8)</sup> が示され、その選択はユーザーにゆだねられているが、これまでの概念との整合性、精度、計算の容易さを考慮し、暦象年表では Fukushima の方法<sup>9)</sup> で変換を実施する (図 2)。

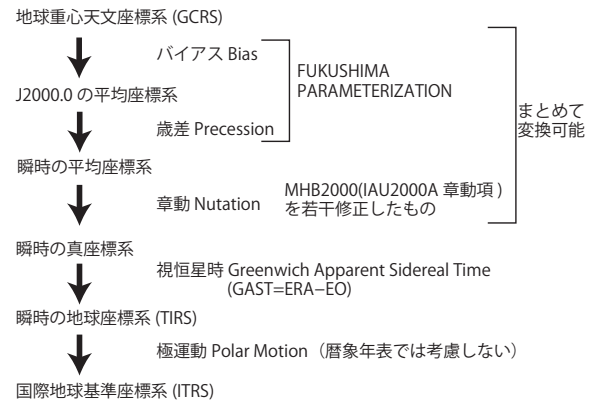


図 2. 歳差章動の変換スキーム

国際地球基準座標系 (International Terrestrial Reference System, ITRS) とは、地球重心を原点とし、地球の形状に対して回転しない座標系のことである。日常用いる経度や緯度 (世界測地系) はこの ITRS が基準になっている。

### (2) 歳差の変換行列 (Fukushima の方法)

歳差の変換行列  $P$  は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} P(\epsilon_A, \bar{\psi}, \bar{\phi}, \bar{\gamma}) &= R_1(-\epsilon_A) R_3(-\bar{\psi}) R_1(\bar{\phi}) R_3(\bar{\gamma}) \\ &= \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

\*2 本稿では P03 歳差理論と修正版 MHB2000 章動理論 (IAU2000A の章動項) をあわせてこう呼ぶこととする。

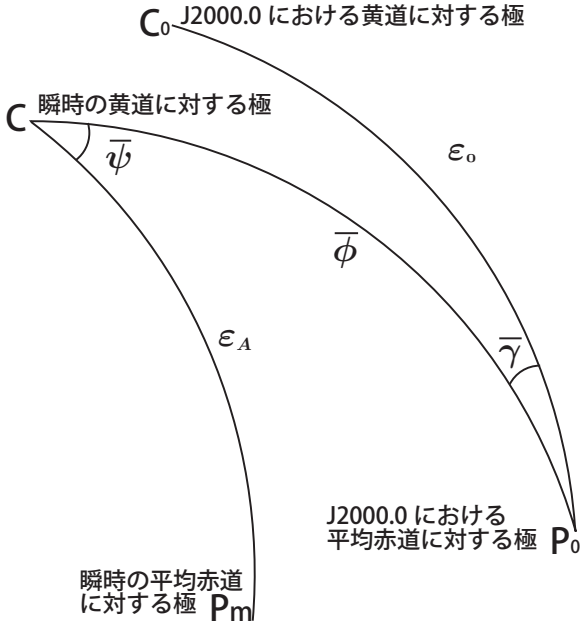


図3. 歳差の変換 (Fukushimaの方法). 瞬時の黄道を経由するのが特徴である.

行列の中身は,

$$\begin{aligned}
 P_{11} &= \cos\bar{\psi} \cos\bar{\gamma} + \sin\bar{\psi} \cos\bar{\phi} \sin\bar{\gamma} \\
 P_{12} &= \cos\bar{\psi} \sin\bar{\gamma} - \sin\bar{\psi} \cos\bar{\phi} \cos\bar{\gamma} \\
 P_{13} &= -\sin\bar{\psi} \sin\bar{\phi} \\
 P_{21} &= \cos\epsilon_A \sin\bar{\psi} \cos\bar{\gamma} \\
 &\quad - (\cos\epsilon_A \cos\bar{\psi} \cos\bar{\phi} + \sin\epsilon_A \sin\bar{\phi}) \sin\bar{\gamma} \\
 P_{22} &= \cos\epsilon_A \sin\bar{\psi} \sin\bar{\gamma} \\
 &\quad + (\cos\epsilon_A \cos\bar{\psi} \cos\bar{\phi} + \sin\epsilon_A \sin\bar{\phi}) \cos\bar{\gamma} \\
 P_{23} &= \cos\epsilon_A \cos\bar{\psi} \sin\bar{\phi} - \sin\epsilon_A \cos\bar{\phi} \\
 P_{31} &= \sin\epsilon_A \sin\bar{\psi} \cos\bar{\gamma} \\
 &\quad - (\sin\epsilon_A \cos\bar{\psi} \cos\bar{\phi} - \cos\epsilon_A \sin\bar{\phi}) \sin\bar{\gamma} \\
 P_{32} &= \sin\epsilon_A \sin\bar{\psi} \sin\bar{\gamma} \\
 &\quad + (\sin\epsilon_A \cos\bar{\psi} \cos\bar{\phi} - \cos\epsilon_A \sin\bar{\phi}) \cos\bar{\gamma} \\
 P_{33} &= \sin\epsilon_A \cos\bar{\psi} \sin\bar{\phi} + \cos\epsilon_A \cos\bar{\phi}
 \end{aligned}$$

各変数は以下の通り (図4).

$$\begin{aligned}
 \cos\bar{\phi} &= \cos\pi_A \cos\epsilon_0 - \sin\pi_A \sin\epsilon_0 \cos\Pi_A \\
 \sin\bar{\gamma} &= \frac{\sin\pi_A \sin\Pi_A}{\sin\bar{\phi}} = \frac{P_A}{\sin\bar{\phi}} \\
 \sin\bar{\psi} &= \frac{\sin\theta_A \cos z_A}{\sin\bar{\phi}}
 \end{aligned}$$

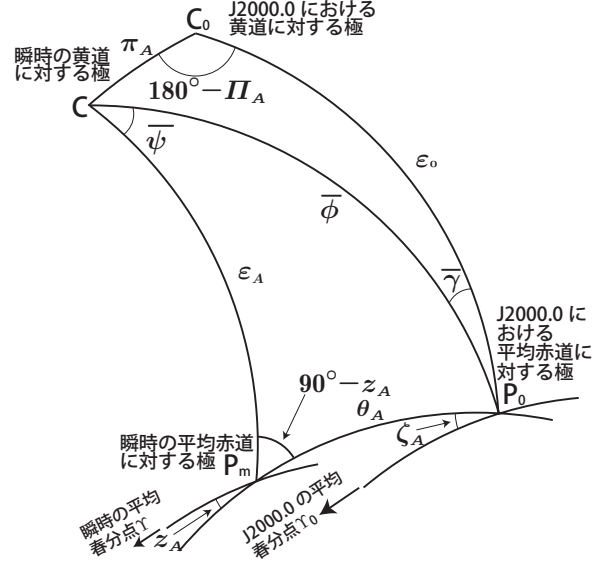


図4. 各変数の関係. IAU1976歳差理論に出てくる諸量もまとめて示す.

実際の値は多項式により算出することができる<sup>8)</sup>. また, J2000.0の平均座標系からだけでなく, GCRSからの変換も係数を変えることにより可能である. J2000.0の平均座標系から変換する場合の係数は,

$$\begin{aligned}
 \bar{\gamma} &= 10''.556403T + 0''.4932044T^2 \\
 &\quad - 0''.00031238T^3 - 0''.000002788T^4 \\
 &\quad + 0''.0000000260T^5 \\
 \bar{\phi} &= 84381''.406000 - 46''.811015T \\
 &\quad + 0''.0511269T^2 + 0''.00053289T^3 \\
 &\quad - 0''.000000440T^4 - 0''.0000000176T^5 \\
 \bar{\psi} &= 5038''.481507T + 1''.5584176T^2 \\
 &\quad - 0''.00018522T^3 - 0''.000026452T^4 \\
 &\quad - 0''.0000000148T^5
 \end{aligned}$$

GCRSから変換する場合の係数は,

$$\begin{aligned}
 \bar{\gamma} &= -0''.052928 + 10''.556378T \\
 &\quad + 0''.4932044T^2 - 0''.00031238T^3 \\
 &\quad - 0''.000002788T^4 + 0''.0000000260T^5 \\
 \bar{\phi} &= 84381''.412819 - 46''.811016T \\
 &\quad + 0''.0511268T^2 + 0''.00053289T^3 \\
 &\quad - 0''.000000440T^4 - 0''.0000000176T^5 \\
 \bar{\psi} &= -0''.041775 + 5038''.481484T \\
 &\quad + 1''.5584175T^2 - 0''.00018522T^3 \\
 &\quad - 0''.000026452T^4 - 0''.0000000148T^5
 \end{aligned}$$

いずれも  $\epsilon_A$  は,

$$\begin{aligned}\varepsilon_A &= 84381''.406000 - 46''.836769T \\ &\quad - 0''.0001831T^2 + 0''.00200340T^3 \\ &\quad - 5''.76 \times 10^{-7}T^4 - 4''.34 \times 10^{-8}T^5\end{aligned}$$

で与えられる。

### (3) 章動の変換行列

章動の変換行列  $N$  の形式は従来と変わらない。

$$\begin{aligned}N(\varepsilon_A, \Delta\varepsilon, \Delta\psi) \\ = R_1(-\varepsilon_A - \Delta\varepsilon) R_3(-\Delta\psi) R_1(\varepsilon_A)\end{aligned}\quad (2)$$

章動項については MHB2000 章動理論を若干修正する必要がある。

$$\begin{aligned}\Delta\psi &= \Delta\psi_{\text{MHB}} + (0.4697 \times 10^{-6} + f) \Delta\psi_{\text{MHB}} \\ \Delta\varepsilon &= \Delta\varepsilon_{\text{MHB}} + f \Delta\varepsilon_{\text{MHB}} \\ f &\equiv (J_2/J_2) T = -2.7774 \times 10^{-6} T\end{aligned}$$

### (4) 歳差・章動の変換行列

式(1), 式(2)より, 歳差・章動の変換行列  $NP$  は

$$\begin{aligned}NP(\varepsilon_A, \Delta\varepsilon, \bar{\psi}, \Delta\psi, \bar{\phi}, \bar{\gamma}) \\ = R_1(-\varepsilon_A - \Delta\varepsilon) R_3(-\bar{\psi} - \Delta\psi) R_1(\bar{\phi}) R_3(\bar{\gamma})\end{aligned}$$

すなわち, 歳差とほとんど同じ形式で変換することができる。黄道経路の変換方式である Fukushima の方法の大きな利点といえよう (図5)。

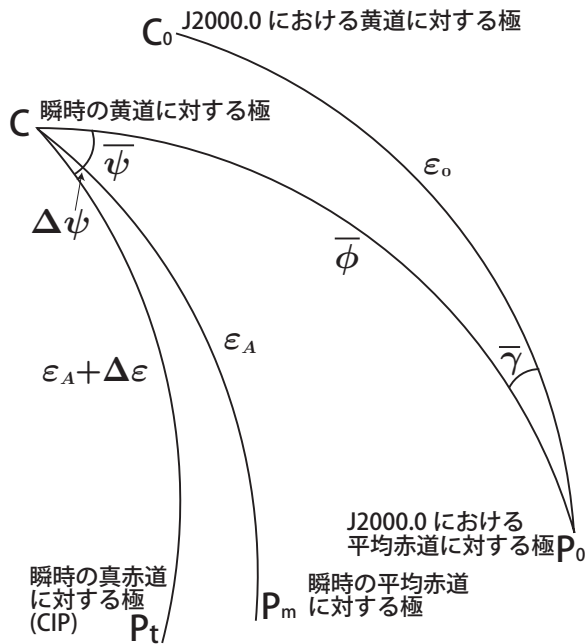


図5. 歳差章動の変換 (Fukushimaの方法)。歳差の変換とほとんど同じ形式で変換できる。

座標系の名称はこれまでどおり, 歳差のみを考慮した場合は瞬時の平均座標系 (mean equator and equinox of date reference system), 歳差・章動を考慮した場合は瞬時の真座標系 (true equator and equinox of date reference system) と呼ぶ。瞬時の真座標系は瞬時の極軸 (Celestial Intermediate Pole, CIP) と真春分点 (true equinox) で定義された座標系ともいえる。

## 2.5 地球回転角と恒星時

歳差章動理論により黄道や春分点に変更が加わると, 当然ながら春分点の回転量である恒星時も影響を受ける。言い方を変えと, 恒星時には地球の本来の回転量に加えて歳差章動による見かけの回転量が含まれているわけである。この見かけの回転量を排除し, 真の回転量だけを取り出したものを地球回転角 (Earth Rotation Angle, ERA) という<sup>※3</sup>。

### (1) 地球回転角

地球回転角は世界時 (UT1) に比例し<sup>※4</sup>,

$$\begin{aligned}\text{ERA} &= 2\pi (0.7790572732640 \\ &\quad + 1.00273781191135448d_u) \\ d_u &= \text{JD}_{\text{UT1}} - 2451545.0\end{aligned}$$

で表される量である<sup>3)</sup>。

天体の視位置と視恒星時によって天球座標と地平座標を結びつけるのと同じことが, 地球回転角を用いても可能である。この場合, 地球回転角の基点となるのはGCRSにおけるCIPの運動に対して瞬時の回転成分を持たない点 (非回転原点) であり, Celestial Intermediate Origin (CIO) と呼ばれる。ITRSにおけるCIPの運動である極運動についても同様に Terrestrial Intermediate Origin (TIO) が定義でき<sup>※5</sup>, CIOとTIOを結ぶ角が地球回転角となる<sup>※6</sup>。

CIPとCIOで定義された座標系はCelestial Intermediate Reference System (CIRS) と呼ば

※3 ERA は stellar angle と呼ばれていたこともある。

※4 逆に言えば世界時は地球の真の回転量で決まることになる。

※5 CIO, TIO は2000年のIAU勧告ではCEO (Celestial Ephemeris Origin), TEO (Terrestrial Ephemeris Origin) と呼ばれていたが2006年の勧告によりこのような名前に変更された。

※6 極運動は微小かつ予測不能な運動であるため, 暦象年表では考慮しない。

れる. GCRSからCIRSへの変換行列 $Q$ は以下の  
ように書ける (図6).

$$\begin{aligned}
& Q(t) \\
&= R_3(-s) R_3(-E) R_2(d) R_3(E) \\
&= R_3(-s) \begin{pmatrix} 1-aX^2 & -aXY & -X \\ -aXY & 1-aY^2 & -Y \\ X & Y & 1-a(X^2+Y^2) \end{pmatrix} \quad (3) \\
&a = \frac{1}{1 + \cos d} = \frac{1}{1 + Z} \\
&X = \sin d \cos E, Y = \sin d \sin E, Z = \cos d
\end{aligned}$$

ここで  $s$  は CIO Locator と呼ばれ,  $X, Y$  による回転の総量を表す. 座標系を極軸のほうにあわせて, 見かけの回転量の分だけ戻す変換と考えればよい.

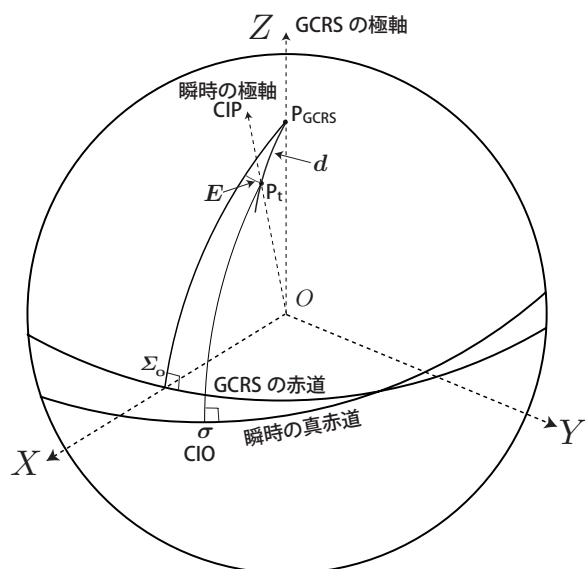


図6. GCRSとCIRSの関係.

## (2) 地球回轉角と視恒星時

真春分点とCIOはともに真赤道上の点であるので、Z軸の周りにCIRSにおける真春分点の赤経、すなわち原点差 (equation of the origins, EO) の分だけ回転させると、行列Qは行列NPに一致する。

$$NP = R_3(\text{EO})Q \quad (4)$$

$X, Y$ は級数により計算することも可能であるが、歳差章動の変換行列が得られていれば、(4)式からわかるように行列の要素 $NP_{31}$ ,  $NP_{32}$ がそれぞれ $X, Y$ であり、別途計算する必要はない。 $s$ は級数により $s+XY/2$ を計算し、そこから $XY/2$ を引

けばよい<sup>10)</sup>.

さらに, 式(3), 式(4)より,

$$R_3(\text{EO-s}) = NP \begin{pmatrix} 1-aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1-aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1-a(X^2+Y^2) \end{pmatrix}$$

ここで、

$$\begin{aligned} A &= \cos(\text{EO}-s) \\ &= NP_{11} \times (1-aX^2) + NP_{12} \times (-aXY) \\ &\quad + NP_{13} \times (-X) \\ B &= -\sin(\text{EO}-s) \\ &= NP_{21} \times (1-aX^2) + NP_{22} \times (-aXY) \\ &\quad + NP_{23} \times (-X) \end{aligned}$$

とすると、原点差EOは、

$$\text{EO} = s + \arctan \frac{-B}{A}$$

より得られる。

地球回転角ERAと原点差EOにより、グリニジ視恒星時 (Greenwich Apparent Sidereal Time, GAST) は、

$$\text{GAST} = \text{ERA} - \text{EO}$$

で求めることができる.

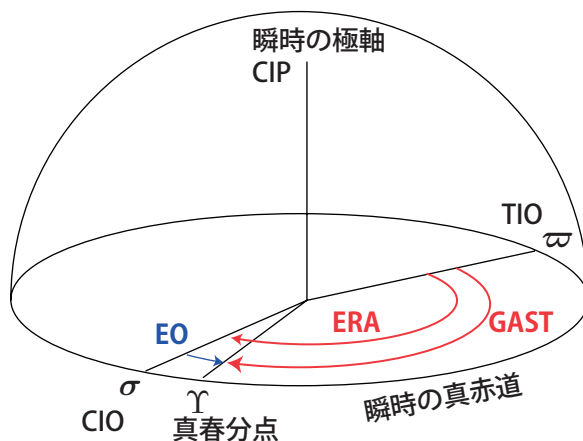


図7. 地球回転角と視恒星時の関係. CIO, TIO, 真春分点 $\Upsilon$ はすべて瞬時の真赤道にある.

### (3) 平均恒星時と分点均差

グリニジ平均恒星時 (Greenwich Mean Sidereal Time, GMST) はグリニジ視恒星時 GAST の永年

項の部分に相当し、具体的には、

$$\begin{aligned} \text{GMST} = & \text{ERA} + 0.014506 + 4612.156534T \\ & + 1.3915817T^2 - 0.00000044T^3 \\ & - 0.000029956T^4 - 0.0000000368T^5 \end{aligned}$$

と書ける<sup>11)</sup>。

分点均差 (Equation of Equinoxes, EE) は、

$$\text{EE} = \text{GAST} - \text{GMST}$$

である。

#### (4) 新旧理論の比較

IAU2006歳差章動理論の導入により、どのような違いが現れるのか、太陽の視赤経・視赤緯について比較したグラフを示す (図8)。

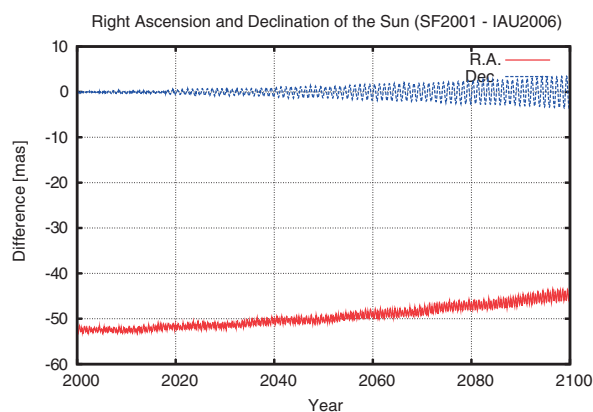


図8. 歳差章動理論の比較. SF2001章動理論による太陽の視赤経 (R.A.)・視赤緯 (Dec.) と IAU2006歳差章動理論による太陽の視赤経・視赤緯の差分をプロットしたもの. 単位 mas.

一見して明らかなように、両者には赤経方向に 50mas 程度のオフセットが存在する。ただし、これは黄道の定義の変更にとまなうものであり、歳差章動理論によって太陽の位置が変わるという意味ではない。実際、図9のように恒星時にも同様のオフセットがかかってキャンセルされ、天体の時角 (恒星時 - 視赤経)、したがって高度や方位はほとんど影響を受けない。朔弦望についても太陽の視黄経と月の視黄経で打ち消しあうので影響はほとんど現れない。従来は赤道と黄道の交点として春分点を定めて天体の位置を示していたが、ICRSの導入によって黄道がなくとも位置を決められるようになり、逆に黄道を後から決定できるようになったわけである。

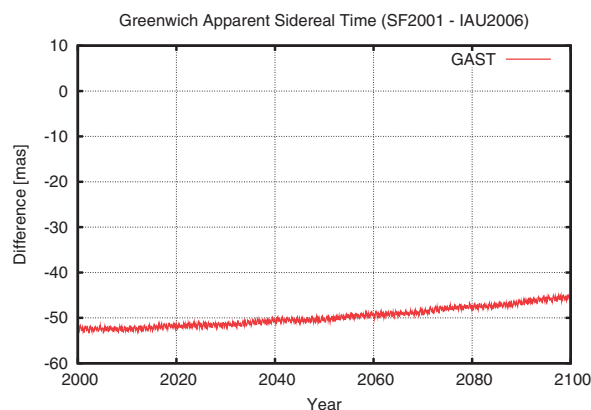


図9. 恒星時の比較. SF2001章動理論による視恒星時 (GAST) と IAU2006歳差章動理論による視恒星時の差分をプロットしたもの. 単位 mas.

なお、このオフセットが実質的な意味を持つ場合も存在する。例えば二十四節気のように視黄経が特定の値をとる瞬間という定義の場合、視黄経に加わったオフセットが打ち消されずにそのまま反映するのである。黄経と赤経の違いはあるものの、オフセットのため新理論による視黄経は旧理論による視黄経よりも常に 50mas 程度大きい。地球は1年で 360°、すなわち1日約 1° 動くから、50mas は  $50\text{mas}/1000/3600 \times 24 \times 3600 = 1.2^\circ$  の差に相当し、各節気が約 1° ずつ早まることを意味する。二十四節気は分の単位までしかないが、新旧の違いが 30° をまたぐような格好になると四捨五入により違いが現れ、実際に平成 21 年の場合は小暑が旧理論で 8:14 から新理論の 8:13 となっている。節気は1年に 24 個あるので、単純に考えてもおおよそ2年に1回程度はこのようなことが起こるだろう。

## 2.6 天体の視位置の算出方法

太陽、月、惑星の地心視位置 (Geocentric Apparent Place) は、以下のように算出する。時刻  $t_1$  に天体 1 ( $r_1$ ) からでた光が、天体 J ( $r_j$ ) の重力場の影響を受けて、時刻  $t_2$  に天体 2 (地球,  $r_2$ ,  $v_2$ ) に到達するものとする。平成 21 年版からは重力場を考慮する天体として太陽のほかに木星、土星、天王星、海王星を追加している。なお、 $r_{ij} = r_i - r_j$ ,  $\hat{d} = d/|d|$  (単位ベクトル) である。

(a) 時刻は地球時 TT とする。

$$\text{TT} = \text{TAI} + 32.184$$

(b) TT から TDB を計算する。

(c)  $t = \text{TDB}$  における地球の位置と速度を求め

る。

- (d) 光差方程式を解いて、天体が光を発した時刻を求める。ただし、太陽、木星、土星、天王星、海王星の重力場による光の曲がりを考慮する。

$$c(t_2 - t_1) = r_{12} + \sum_{j=1,2} \frac{2GM_j}{c^2} \ln \left| \frac{r_{1j} + r_{2j} + r_{12}}{r_{1j} + r_{2j} - r_{12}} \right|$$

- (e) 光の曲がりの量を計算する。

$$\hat{d}_{12} = \hat{r}_{12} + \left( \sum_{j=1,2} \frac{2GM_j}{c^2 r_{2j}} \frac{\hat{r}_{1j} \times \hat{r}_{2j}}{1 + \hat{r}_{1j} \cdot \hat{r}_{2j}} \right) \times \hat{r}_{12}$$

- (f) 光行差を補正 (Lorentz 変換) する。これにより GCRS における座標になる。

$$\hat{d}'_{12} = \frac{f\hat{d}_{12} + \left(1 + \frac{g}{1+f}\right) \mathbf{v}_2}{1+g}$$

$$g = \mathbf{v}_2 \cdot \hat{d}_{12}$$

$$f = \sqrt{1 - v_2^2}$$

- (g) 歳差章動の変換を行う。これにより瞬時の真座標系における座標になる。
- (h) 球面座標に変換する。

重力場の影響を考慮する天体を増やしてはいるが、例えば木星以遠の惑星が木星と合になるような場合を除けばほとんど違いは見られない (図 10)。

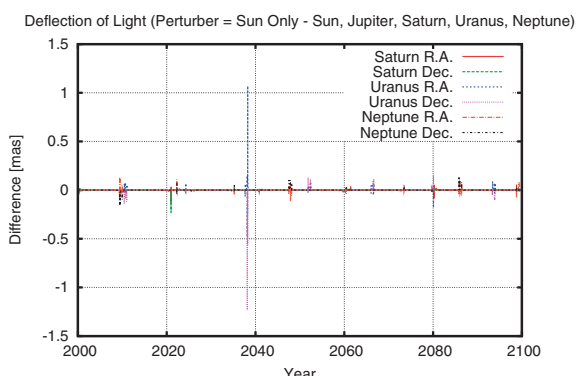


図10. 木星以遠の惑星の視位置の比較。木星と合になる時に重力場の影響が大きくなる。単位 mas。

## 2.7 太陽の自転軸

IAU の作業部会による最新の報告書<sup>12)</sup> に準拠、算出方法を旧版 Supplement<sup>13)</sup> から全面的に改訂した<sup>14)</sup>。具体的には以下のように算出する。

### (1) 太陽の自転軸算出手順

- (a) 太陽の自転軸の諸量は以下の通りである。

$$\alpha_s = 286^\circ 13'$$

$$\delta_s = 63^\circ 87'$$

$$W = 84^\circ 17'6'' + 14^\circ 18'44''000 \times (d - \tau)$$

ただし、 $\alpha_s$ ,  $\delta_s$  は自転軸の向き、 $W$  は J2000.0 における地球の平均赤道に対する太陽の赤道の昇交点から、太陽の赤道に沿って反時計回りに基準子午線 (prime meridian) まで測った角度である。太陽の基準子午線は 1854 年 1 月 1 日グリニジ平均正午において黄道面に対する太陽の赤道面の昇交点を通る日面子午線 (Carrington meridian) である。 $d$  は J2000.0 からの経過時間 (日)、 $\tau$  は地球と太陽の距離を光速で割ったもの、すなわち太陽の光が地球に到達するのにかかる時間である。

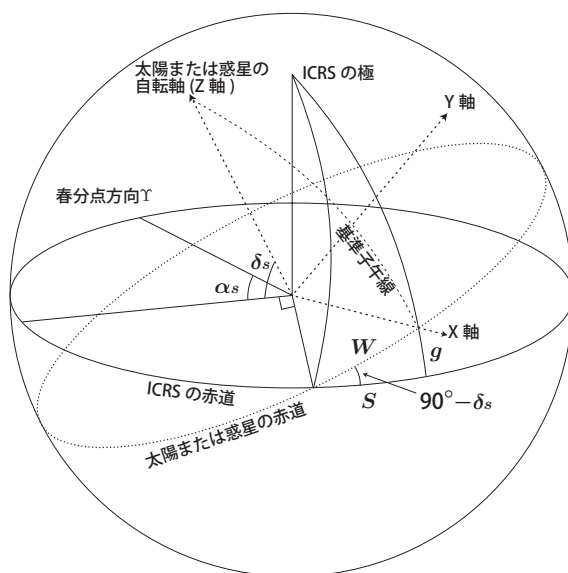


図11. 太陽または惑星を中心とした座標系。

- (b) 太陽の自転軸の向きから太陽中心座標系の Z 軸を求める。

$$\mathbf{z} = (\cos \delta_s \cos \alpha_s, \cos \delta_s \sin \alpha_s, \sin \delta_s)$$

- (c) 太陽中心座標系の X 軸を求める。X 軸は太陽の重心から太陽の基準子午線と太陽の赤道

の交点に向かう方向ベクトルである。  
J2000.0におけるX軸の赤経 $\alpha_x$ 、赤緯 $\delta_x$ は、

$$\begin{aligned}\sin g &= \sin W \cos \delta_s \\ \sin S &= \sin W \sin \delta_s / \cos g \\ \cos S &= \cos W / \cos g\end{aligned}$$

により、 $g, S$ を求めると、

$$\begin{aligned}\alpha_x &= \alpha_s + 90^\circ + S \\ \delta_x &= g\end{aligned}$$

となる。よって、X軸は、

$$\mathbf{x} = (\cos \delta_x \cos \alpha_x, \cos \delta_x \sin \alpha_x, \sin \delta_x)$$

また、Y軸は、

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} \times \mathbf{x}$$

から求まる。

(d) 歳差・章動により、瞬時の真座標系におけるX, Y, Z軸の向きを求める。

(e) 太陽の視位置を $(\alpha, \delta)$ とすると、太陽から見た地球の方向は $(\alpha + \pi, -\delta)$ であるから、この方向ベクトル $\mathbf{e}$ は、

$$\mathbf{e} = (-\cos \delta \cos \alpha, -\cos \delta \sin \alpha, -\sin \delta)$$

(f)  $\mathbf{e}$ の太陽中心座標系での成分を求める。

$$\mathbf{j}_d = (\mathbf{e} \cdot \mathbf{x}, \mathbf{e} \cdot \mathbf{y}, \mathbf{e} \cdot \mathbf{z})$$

(g) 太陽中心座標系における地球の方向を示す日面緯度 $B_0$ 、日面経度 $L_0$ は、

$$\begin{aligned}B_0 &= \arcsin(j_{dz}) \\ L_0 &= \arctan(j_{dy} / j_{dx})\end{aligned}$$

となる。

(h) 地球から見た太陽の軸の方向角 $P$ を求めるためには、 $\mathbf{e}$ をZ軸とし、天の北極方向 $\mathbf{n}$ (瞬時の真座標系で $(0, 0, 1)$ の方向)がX軸と重なるような座標系を考える。この座標系の各軸は、

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_z &= \mathbf{e} \\ \mathbf{u}_y &= \mathbf{e} \times \mathbf{n} / |\mathbf{e} \times \mathbf{n}| \\ \mathbf{u}_x &= \mathbf{u}_y \times \mathbf{e}\end{aligned}$$

となる。この座標系における太陽の軸の成分は、

$$\mathbf{j}_s = (\mathbf{z} \cdot \mathbf{u}_x, \mathbf{z} \cdot \mathbf{u}_y, \mathbf{z} \cdot \mathbf{u}_z)$$

であるから、太陽の軸の方向角 $P$ は、

$$P = \arctan(j_{sy} / j_{sx})$$

となる。

## (2) 新旧方式の比較

$P, B_0$ の差はいずれも0.01程度の違いだが、 $L_0$ は大きく異なる。これはおもに自転速度の定数を $360.0/25.38$ 日から $14.1844000 \text{ 日}^{-1}$ に変更したことが原因で、100年で0.1程度の差になる(図12)。

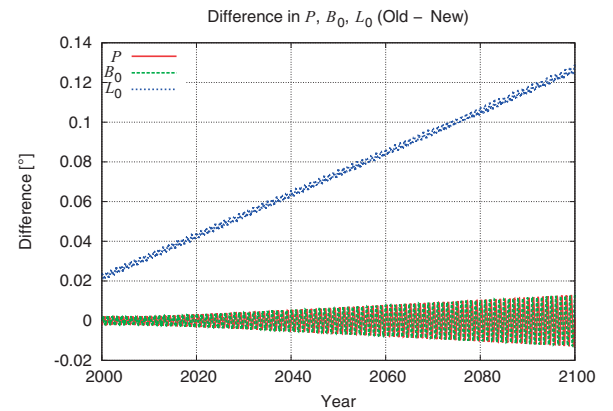


図12. 太陽の自転軸の比較. これまでの算出方法と新しい算出方法の比較. 単位: °

## 2.8 土星の環

土星の等級には土星の環の影響も加味されている。土星の環は土星の自転軸に垂直であるから、土星の自転軸が地球に対してどのような方向を向いているか調べればよい。

(a) 土星の自転軸の諸量は以下の通りである<sup>12)</sup>。

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 40^\circ 589 - 0.036T \\ \delta_s &= 83^\circ 537 - 0.004T \\ W &= 38^\circ 90 + 810.7939024 \times (d - \tau)\end{aligned}$$

- (b) 太陽の自転軸と同様に、土星中心座標系における地球の方向 ( $\sin B$ のみでよい) を求めると、土星の環が等級に与える影響は

$$\delta V = -2.6 |\sin B| + 1.25 \sin^2 B$$

のように書ける.

- (c) なお、2009年には土星の環が見えなくなる現象が起こる. その条件は、  
 (i) 土星の環が太陽に対して横を向く時 (2009年8月11日)  
 (ii) 土星の環に対して地球と太陽が異なる側にあるとき (2009年8月11日から9月4日)  
 (iii) 土星の環が地球に対して横を向く時 (2009年9月4日)  
 である. 土星から見れば地球は内惑星で、太陽から大きく離れることはないから、これらの現象はいつもほぼ同時期 (土星の公転周期の半分ごと) におこる. この間土星の環の影響はなくなるわけだが、同時に  $\sin B$  は十分小さくなり影響は少なくなるため、そのまま算出している.

## 2.9 視半径

惑星の視半径  $s$  は

$$\tan s = \frac{\text{惑星の赤道半径}}{\text{惑星の地心距離}}$$

により算出している. 惑星の赤道半径はIAUの作業部会による最新の報告書<sup>12)</sup> に準拠することとした.

太陽についても同様に算出することも可能であるが、その場合は光浸の影響が無視されることになる. したがって太陽の視半径  $s_s$  は従来どおり以下の式で算出することとした.

$$s_s = 16'01''.18 / \text{地心距離}$$

月の視半径  $s_M$  は、平成21年版においては、月の赤道地平視差  $\pi_M$  を用いて以下のように算出しているが、平成22年版からは惑星の視半径と同様の算出法に変更する予定である.

$$\frac{\sin s_M}{\sin 15'32''.58} = \frac{\sin \pi_M}{\sin 57'02''.605}$$

なお、日月食の予報においては従来どおり、

$$s_s = 15'59''.63 / \text{地心距離}$$

$$\sin s_M = 0.2725076 \sin \pi_M$$

のように算出する.

## 2.10 その他

以下にその他の変更点を列挙する.

- (a) カレンダーを追加.  
 (b) 太陽・月・惑星の暦は各数値の表示桁数を拡大し、毎日の値を掲載した. 掲載内容もある程度統一を図った.  
 (c) グリニジ恒星時・章動は表示桁数を拡大し、毎日の値を掲載している. また、章動は図による説明を追加.  
 (d) 各地の日出、日入の表に南中時を追加.  
 (e) 惑星現象に位置関係の図を追加. 「土星の環の消失」についての説明を追加.  
 (f) 日食の見られる範囲を示した日食図を追加. 2009年7月22日は46年ぶりに日本の陸域で皆既日食が見られるため、通常の6都市に加えて奄美、悪石島、屋久についての予報も追加.  
 (g) 最近年代表を400年まで拡張. 明治改元から140年が過ぎ、160年の表ではさすがに情報量が少なくなってきた. これまで多くの要望がありながら紙面の都合で実現できずにいたが、ようやくこれを400年まで拡大できた.  
 (h) トピックスは「7月22日の皆既日食」、「歳差・章動と地球の向き」、「国民の祝日と休日」、「暦象年表の改訂について」の計4項目5ページにわたって掲載した.

## 2.11 理科年表との関係について

理科年表については平成20年版より新しい太陽系惑星の定義に対応、海王星の暦を拡充、Erisの暦や木星以遠の天体の軌道図を追加したほか、最近年代表を320年まで拡大している. 平成21年版ではこれと同様の内容・スタイルを保ちつつ、数値については新しい歳差章動理論など最新の理論を採用する予定である. 時刻系も世界時および中央標準時のまま変更しない.

### 3. まとめ

本稿では暦象年表の拡充計画，特に平成21年版における改訂内容について詳細に解説した。平成23年版に向けては，天体位置表や *Astronomical Almanac* 並みに掲載項目を充実させ，また適宜図解を含め，詳細な解説を充実させることにより，教科書的な使い方にも，プロフェッショナルユースにも耐えうる本格的な天体暦をめざしたいと考えている。

### 謝辞

本稿査読者には，説明が抜けおちていた部分を多数指摘いただいたほか，月の視半径について有益な情報をいただいた。ここに感謝する。

### 参考文献

- 1) 片山真人: 暦象年表 平成21年版, 126 (2009).
- 2) Standards Of Fundamental Astronomy:  
<http://www.iau-sofa.rsl.ac.uk/>.
- 3) IAU 2000 Resolutions B1-B3:  
[http://syrtel.obspm.fr/IAU\\_resolutions/Resol-UAI.htm](http://syrtel.obspm.fr/IAU_resolutions/Resol-UAI.htm).
- 4) IAU 2006 Resolutions 1-3:  
[http://syrtel.obspm.fr/iauJD16/IAU2006Resol\\_1-3.html](http://syrtel.obspm.fr/iauJD16/IAU2006Resol_1-3.html).
- 5) G. H. Kaplan: USNO Circular 179,  
[http://aa.usno.navy.mil/publications/docs/Circular\\_179.html](http://aa.usno.navy.mil/publications/docs/Circular_179.html).
- 6) J. H. Lieske et al: Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants., *Astr. Ap.*, **58**, 1-16 (1977).
- 7) T. Shirai and T. Fukushima: Construction of a New Forced Nutation Theory of the Nonrigid Earth, *A. J.*, **121**, 3270 (2001).
- 8) J. L. Hilton et al: Report of the International Astronomical Union Division I Working Group on Precession and the Ecliptic, *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, **94**, 351 (2006).
- 9) T. Fukushima: A New Precession Formula, *A. J.*, **126**, 494-534 (2003).
- 10) P. T. Wallace and N. Capitaine: Precession - Nutation Procedures Consistent with IAU 2006 Resolutions, *Astr. Ap.*, **459**, 981-985 (2006).
- 11) N. Capitaine, P. T. Wallace, and J. Chapront: Expressions for IAU 2000 Precession Quantities, *Astr. Ap.*, **412**, 567-586 (2003).
- 12) P. K. Seidelmann et al: Report of the IAU/ IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2006, *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, **98**, 155-180 (2007).
- 13) H. M. Nautical Almanac Office: *Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac* (1961).
- 14) P. K. Seidelmann: *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (1992).