

IAU (1976) 天文定数系について [I]

歴史的 背景

青 木 信 仰*

1. はじめに

1976年8月グルノーブルで開かれたIAU第16回総会は天文定数表と天体暦を作製するのに必要な色々の手順を含んだ勧告を採択した。本号ではまずそこに至るまでの歴史を、次号では具体的問題を述べることにする。

天体暦の国際協力は1884年の万国経度会議(ワシントン)にその端を発する。この時グリニチが経度の原点として国際的に認められたのである。それ以前は各国がその中心的な天文台の経度を0として天体暦を作製しており、相互の比較は容易ではなかった。つづいて1896年パリで基本星の国際会議が開かれ、章動定数(9⁷21)、光行差定数(20⁷47)、太陽視差(8⁷80)が採用された。また同時に、当時まだ最終的な数値は発表されていなかったが、ニューカム(米)の日月および惑星歳差を採用することになった。

実際の天体暦では1900年頃から以上の決定が実行に移され、同時にニューカムの内惑星の表も用いられるようになった。(この移行は厳密に同時ではない。またフランス暦は現在でも太陽表にルベリエ(仏)を用いているという事実もある。)

その後1919年に創立されたIAU(国際天文学連合)の中に第4委員会(天体暦)が設けられ、それまでの国際協力を引継ぐことになり、天体暦の統一に関する議論を行った。

さて惑星や恒星の位置の計算方法を国際的に協定することは、観測と理論を比較する上で便利ではあるが、一方別の問題がある。すなわち出来るだけ up to date の数値を用いるということに関して、必ずしも国際的同意が得られないということである。これは新しい数値が一般の承認を得るのに暇がかかるという問題のほか、次のような問題がある。すなわち、(1) 基準になるものは、(あまり現実と離れては困るが、さりとて) しばしば変更されると、かえって後の計算が面倒になり、かつ混乱がおきる。この例に歳差や地球基準楕円体がある。(2) 直す時には個々バラバラではなく、全体として統一の採れたものとして直さねばならない。すなわち数値の間に矛盾があってはならないのである。

矛盾と簡単に言っただけでも、それは自明のことでは

* 東京天文台

S. Aoki: On the IAU (1976) System of Astronomical Constants.

ない。そこにはある理論が介在している。すなわち、一つの理論的關係が定まらなければ、矛盾しているのかどうか確言は出来ないし、矛盾を解消するために新しい理論が出てきたり、またはその検証になることもある。たとえば上の章動定数は地球標準モデル(流体の性質をどの位入れるか)に関連して、今回でも結着がつかなかったような次第である。

さて天文の観測は物理の実験と異って、色々の現象を各々の要素に分解して測定するわけにゆかない。それは観測が定められた場所からなされなければならないという制約のためである。もっとも最近は大気圏外または惑星間空間に飛び出すことが出来るようになったため、その制約が弛くなったことも事実であるが、原理的に単純化出来ないということもあり得る。また天文現象は時間的変化を求めることが多く、そのための時間的制約もまた存在する。しかしこれらは原理的に天文現象に限られることではなく、物理現象に対しても量子論的“観測可能”という問題もある。問題は個々の量または定数が独立に決められず、いつもそれらが複合した観測から求められなければならないことに由来する。

惑星や恒星の位置を計算した結果は天体暦に纏められるが、それを観測と比較することにより、理論の改良および用いた定数の適否もしくは補正を求めるわけであるが、もしも定数が矛盾していたのでは、どれをどの位直したらいいか、決められないことになる。矛盾した体系からは何でも言えるというのが数学上の命題である。

2. ド・シッター (1938)

ニューカムの太陽表(1895)は不幸にしてパーリー会議とも矛盾していたし、ニューカムの基本星表および歳差定数(1898)——これがその後の歳差の計算のもとになった——とも矛盾していた。しかし当時としてはその差が大きくなかったので、計算はやり直していない。

これらの矛盾を問題にし、出来るだけ少数の定数を基本に選び、これを基本定数(fundamental constants)と呼び、他のものを(当時の)理論からすべて導き出したのはド・シッター(オランダ)であった。しかし彼は全部を完成出来ず、最後の纏めを行ったのはブラウワー(米)であった(その彼も今はもういない!)。主な問題は3つあった: 1) 太陽視差, 2) 歳差定数, 3) 黄道傾角。

1) 太陽視差(その正弦が地球半径/太陽・地球距離となるもの)はパーリー会議では8⁷80、一方太陽表では

8779 であり、後者と矛盾しない太陽質量/地球+月質量 = 329390 が太陽表では用いられている。太陽視差または地球太陽距離と地球+月の質量が関係をもつのは月が地球のまわりを回ると同じ万有引力で地球が太陽のまわりを回っているということに外ならない。一方地球+月の質量は他惑星に摂動を及ぼすので、惑星表を計算する上で基本的なものなのである。

2) 太陽表で用いた歳差定数は

$$\left. \begin{aligned} &5489.78 - 0.00364 T \quad (1900.0) \\ &\text{で一方基本星表では} \\ &5490.66 - 0.00364 T \quad (\quad) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

このため、以後太陽の回帰平均運動は太陽表それ自体の値を用いることにした。その結果対恒星平均運動、したがって地球軌道の長半径は、ニューカムの理論計算そのものとは合わなくなって来ている。〔この問題は後の光時間に関連してくる。(13.3)を参照〕

3) 黄道傾角の長年変化には O-C があるとされていたが、ド・シッターはそれを金星を質量を変更することで辻褄を合わせた。(その後 1962 年、マリナー号が金星の側を通り、金星の質量を決め直したが、それはもとのニューカムの値に近いものであった。現在この O-C は完全には説明されておらず、一時筆者は地軸が実際に傾くという仮説を出したこともある。最近では基準星の観測の系統差によるものとの意見もあるが、筆者は必ずしも納得していない。)

さて、ともかくド・シッターは基本定数として、地球平均半径、平均緯度における重力の加速度、地球の力学的扁率、地球内部構造を決める 2 つのパラメーター、太陽視差、光速度、月の質量/地球の質量、地球および月の回帰平均運動、地球回転角速度黄道傾角、地球軌道の離心率を選んだ。そして他を誘導定数 (derived constants) と呼び、すべて (当時の) 理論から導き出した。

不幸にして彼の目論見は第二次世界大戦の影響で国際的合意の線までは行かなかった。しかしその基本構想は戦後に受継がれ、今日の改定に結びつくものなのである。もっとも戦後の新技術の開発によって、基本定数として採るものは異っているのは後に見る通りである。

ついでながら、戦前の IAU 第 4 委員会の動きを紹介すれば、1938 年ストックホルム総会ではガウスの重力定数として

$$k = 0.01720209895 \quad (2)$$

を採用している。これは逆に言えば天文単位を決めるものである。すなわち、太陽のまわりに質量 0 の天体が k (単位ラジアン/日) の平均運動をする時、その天体の太陽からの平均距離を 1 天文単位とするということである。この意味で今日ではこの定数を定義定数 (defining constant) と呼んでいる。

また同じ IAU で恒星の視位置の計算を統一的にやることが決議され、それが今日の基本星視位置 (西ドイツ、在ハイデルベルグ天文計算研究所発行、以下 ARI と略称) の基礎になっているのである。

3. 暦表時

第 2 次世界大戦終了 (1945) 後国際協力が可能になった時期 1950 年にパリ天文台長ダンジョンの提唱で基本天文定数を再検討するための国際会議がパリに招集された。この時の結論は差当っては定数を変えることはしないが、時系を明確にするために暦表時を導入することであった。これは戦前ド・シッターやスペンサー・ジョーンズ (英) の研究によって、それまで地球の回転を時刻の基礎にした世界時で測っていたのでは天体暦で表わされる位置と符合しないことが明らかになってきたからである。逆にいえば、地球回転の非一様性が認識されたことになる。すなわち、天体暦で表わされた位置から逆に時刻を定義しようということである。この場合月の運動には主として潮汐の反作用として実際に角運動量の増加、したがって平均運動の減少が現われる。この量は経験的に決めなければならない。

1950 年の国際会議以来数回の会議の後 IAU としては 1958 年モスクワでの総会で最終的に暦表時を導入することになった。因みに 1956 年に国際度量衡委員会は総会の委託を受けて秒の定義を暦表時に改めた。暦表時は太陽の平均黄経がニューカムの太陽表で与えられる位置に来よう定義するというのである。しかし実際上は太陽の観測の精度は良くないので、ブラウンの理論式に上記の加速度項および、軌道要素の改良を折込んだスペンサー・ジョーンズの式、

$$\begin{aligned} &\Delta L (\text{月の平均黄経に対する補正}) \\ &= -8.72 - 26.74 T - 11.72 T^2, \quad (3) \end{aligned}$$

を補正したものを改良月行表 (Improved Lunar Ephemeris, 以下 ILE) と呼び、これに基づいて暦表時を算出することになった。(上式で T は 1900.0 からの世紀数)。

地球の回転の非一様性は 1940 年頃に導入された水晶時計により、ことに季節変化の部分は戦後に検出された。さらに 1955 年頃導入された原子時計により、さらに長期のものも検出されて、現在の原子時に継って行く。〔現在の時系は 1967 年国際度量衡総会で採択された原子秒が基準となり、実際には 1955 年までさかのぼることが出来る国際原子時 (TAI) が時間および時刻を与えている。〕

さて暦表時は質点力学に表われる時間引数に符合するように定義されているが、くわしく言うと色々問題がある。実際には太陽の黄経で定義しているので、そこに入ってくる理論の精度や採用した定数に依存している。

そこで筆者の見解によれば、理想的な時間尺度をたとえばニュートン時もしくは力学時と呼び、暦表時はその具体的表現(現在ではニューカムの理論による)として定義されるものと考えたい。この問題は後に見るように今回の会議でも国際的合意には達せず、“暦表時”と言う言葉は決議の中から出来るだけ除いたものになっている。したがって“暦表時”は現在生み殺しの状態にある。

さて、暦表時の定義は太陽の平均黄経でなされているものの、具体的には月の暦で算出されているので、その間に問題があった。1961年パークレーでの総会で、筆者の提案によって、太陽で定義される暦表時(ET)と区別するために、ET0を導入した。これは月に対しては上記のILEを用い、一方比較星としてFK4のシステムを用いた場合決定される時刻である。これは筆者の見解によればスペンサー・ジョーンズの整約中の春分点補正の取扱いに関連して、 $ET-ET0=1^{\circ}34'$ ないしは $1^{\circ}29'$ だけ違うという認識にもとづいている。その後ブラウンの計算の誤りが発見されたのでそれを訂正し、さらに後に述べる天文定数の変更を加えた暦によるものをET1と呼んだ。また、エッカートに(米)よる月の暦の再計算の結果を取り入れてET2と呼んでいる(1967)。

これらの背後にあるものは、理想的なものとは理想的なものとして、一方実際具体化出来るもの(それはその時々異っており、それ)を識別するという意味である。整約はその時々に行っており、後になって再整約をする必要が生じたとしても、前の計算とどこが違うかをはっきりさせておくことが必要なのである。すべて一度に新しいものに取りかえることは出来ないからである。昔をすっかり忘れることは出来ないとも言える。天文学には歴史的要素があるのである。

4. 地球の形と大きさ

1957年のスプートニクに始まる宇宙開発技術は、それまでの天文学的知識に画期的な影響を与えた。天文定数をそのままにしておくことは許されなくなった。ことに人工衛星の観測から与えられる J_2 (Earth's dynamical form-factor, 地球の力学的ふくらみと訳しておく、これは地球外部ポテンシャルの展開中で2次のルジャンドル関数の係数である。) がはっきりと判ってきた。これは地球内の物質分布によって決められるもので、これと赤道における遠心力と重力の比を組み合わせると、地球基準楕円体の扁率がでてくる。後者は以前は測地学的に求められ、1942年 IAG (国際測地学協会) によって採用された値 $f=1/297$ を用いていた。これは赤道半径 ($a_0=6378.388$ km) と合わせて国際基準楕円体と称せられていた。1964年ハンブルグでの IAU 総会はこれに代り、 $J_2=0.0010827$ と $a_0=6378.160$ km を採用し、し

たがって $f=1/298.25$ ということになった。

ここでちょっと誤解を避けるために説明を加えておく。 J_2 から求まる f はどういう意味をもつかということである。これは外部ポテンシャルの問題と言われるもので、地球の物質分布からきまる J_2 と自転角速度を組合せたものは、その表面上で高次のハーモニクスを除いて丁度等ポテンシャルになるような楕円体である。表面もしくはその直下については静水圧的になっているけれども、このことは地球の内部全体で静水圧平衡 (hydrostatic equilibrium) になっているという保証を与えない。逆に言えば J_2 から内部の質量分布は出ないとも言える。一番簡単な例として球殻であっても点質量であっても外部のポテンシャルは同じである。静水圧でないストレスが内部にあるかどうかということは全く別問題なのである。前述のド・シッターは内部でも静水圧的と考え、密度分布を適当に仮定して、 J_2 のみならず力学的扁率 $H=(C-A)/C$ をも計算したが、今日そのままの形では生きていない。しかしこの問題(内部問題)は流体核の問題と関連して章動定数(後述)を理論的に決めることと深い関係にある。

5. 太陽視差, 天文単位

1964年の定数改定のもう一つの主題は天文単位を km で表わすことに関連している。

天文単位はややラフに言えば、太陽—地球の平均距離であるが、正確に言うとうそはなっていない。実際ニューカムの太陽表では

$$a=1+2.3 \times 10^{-7} \quad (4)$$

となっている。なぜそのようなになっているかといえ、すでに述べたように天文単位はガウスの重力定数で定義しているからである。

天体力学上の計算はすべてこの単位で長さを計算する。以前の観測はすべて角度で与えられるから、実長は直接にはきいてこない。厳密にいうと地球中心からみた太陽や惑星の角度観測には長さのスケールはいらないわけである。しかし地表での観測ではいわゆる視差となってくる。この意味で太陽(1天文単位での)の地球赤道での地平視差を簡単に太陽視差と呼んでいるのである。目標の天体が近ければ、視差も大きくなる。したがって逆に、近くに来た天体の位置を地球中心からみた暦と比較することにより、その天体の視差を決めることが出来る。一方その天体までの距離が天文単位で天体力学的にわかっているならば、単位に対する視差すなわち太陽視差が求まることになる。この方法を三角視差という。

近づいた天体に対しては以上のことのみならず、地球・月の引力が大きく影響する。そしてこれは軌道の摂動となって表われる。この場合の摂動の影響の強さは地球

十月の質量/太陽の質量に比例する。一方月の地球のまわりの運動と地球の太陽のまわりの運動を比較するとケプラーの第3法則から

$$\left(\frac{\text{太陽の質量/地球+月の質量}}{\times (\text{月・地球の距離/太陽・地球の距離})^3}\right)$$

がわかることになる。月・地球の距離は地球太陽の距離に較べて精度よくわかっているから、上の摂動の影響と組合わせて結局太陽地球の距離がわかることになる。この方法を力学視差と呼んでいる。

戦後の技術開発は以上の2方法に加えて直接惑星（実際には金星）・地球の距離をレーダーで測定し得るようになった。角度測定ではなく辺長測定である。1964年にはその結果

$$A=149600 \times 10^6 \text{ m}, \pi_{\odot}=8''79405 \quad (5)$$

という値を採用した。この値は太陽の質量/地球+月の質量=328912に対応し、ニューカムの惑星表での値329390とは異っている。[以上は説明のために月の運動を用いたが、328912という数値は人工衛星・惑星から求められた GE (地心重力定数) に由来する。] すなわち1964年の改定は全面的ではなく惑星理論についてはニューカムの値をそのままにしておいたので、このような矛盾を含んでいたことになる。

6. 天体暦の改訂

以上の国際的合意に基づいて、天体暦には変更が加えられた。1960年用暦で暦表時の採用を行った。すなわち、月の暦を ILE にしたわけである。太陽については変更なく1900年(米暦、なお英暦は1901年から)以来一貫してニューカムの表を用いている。月については1923年~1959年はブラウンの表そのものを用いていた。それ以前はハンゼン。

さらに1964年の天文定数改定に伴って、1968~1971年は改訂(ET1による)。1972年以降はエッカートの理論にもとづいて(ET2)いる。(正確に言うと1972年用は完全にはエッカートに移行しておらず、光行差の取扱いが不完全である)。また小惑星について1972年以降改訂を行ったが、水路部の調査によると赤緯が負の場合、いつも最後の桁(0?1の桁)の数字が絶対値で1だけ小さい。これは4捨5入の計算のプログラムミスと思われる。月の暦も細い所では色々と問題が残っている。

いずれにせよ移行はそうスムーズに行ってはおらず、折角精度いいものに替えた筈なのに結果的には具合が悪くなっている。それ故こまかい所を論ずる場合には注意が必要である。

外惑星については、1960年以降直接数値積分を行ったエッカート、ブラウワー、クレメンス(米)の結果を用いている。しかしこれを用いて暦に変換する所では、水

路部の調査によると少し端折っているようである。恒星視位置の計算については2次の項を含む新しい方式が入れられた。また英・米暦では年初 ± 0.5 年の計算を一つの方式でやるために、一冊の本の中で年の前半と後半では公式が違う。その点年央を原点にした天体位置表(日本、水路部)の方が優れているという議論もある。

さて1960年以降、英暦と米暦は緒言、説明の一部で相違があるが、本文は同じものとなった。これは計算のダブリを省くためという理由である。最終的には国際的天体暦を作るという方針であるが、その通り実行されるかどうか現在の所不明である。ともかくこの方針でドイツ暦は1959年を最後に廃刊した。一方ドイツでは基本星の視位置を出版している。仏暦は協定に拘わらず独自の方針で出版をつづけているが、1979年で廃刊するという話である。ソ連暦、日本暦は前半の部分は英・米暦と同じものであるが、後半は別に計算している。

7. 1976年改定

1967年プラハでの総会ではすでに3.で述べたように、月の運動に対してエッカート理論を採用する決議を行った。いわば残務整理である。1964年の改定では据置きになった惑星質量の問題と歳差定数の問題が次の宿題になった。1970年ブライトン総会の前週に開かれたIAUコロッキウム No. 9. でこれらの問題についての自由討論が行われ、残りのものも出来るだけ早い時期に改定しようということになり、3つのワーキング・グループが設けられ、IAU総会での第4委員会の承認が得られた。すなわち(1)時間尺度(座長ウィルキンス、英)(2)歳差定数(フリッケ、独)(3)惑星質量、その他の天体暦作製に必要な諸定数(ダンカム、米)。これらのWGは1973年シドニー総会ではその存続が確認され、次の総会に提出する報告書を作製することが決議された。翌74年10月に、これらのWGのメンバーに殊に時間関係の人も加えて、ワシントンでWMを開いた。

さて手続的なことを先に書くと、ワシントンでの公式記録が一応纏ったのは、翌75年2月であった。次はそれを基にして、必要な註と共に勧告の形に纏めるために、75年10月に上記3人とサイデルマンの計4人がグリニチで会合をもった。そこで結着がつかのかと思っていたが、報告書の原案に対してお互いかなり激しくやりとりし、やっと76年2月になって“原案”が出た。それを関係者に配り意見を求めた所、またまた議論百出で、仲々収拾がつかず、結局もう一度4人がワシントンに6月に集り、最終案を練ることになった。問題は2つあった。一つは歳差定数を変えると言う議論が、デンマークのホェーグから提出されたのと、もう一つは暦表時と原子時に関連する問題であった。