

天文定数と天体暦の改訂

青 木 信 仰*

1. はじめに

1974年9月30日～10月5日にわたって標記の問題に関する国際的作業集会在ワシントンで開催された。筆者は出席する機会に恵まれたので、この会議の様子とその背景について述べたい。

出席者はホスト役の海軍天文台からはダンカム他5名、米国の他の研究機関から計3名、西ドイツはフリッケ他2名、フランスはコワレフスキー他2名、イギリスはウィルキンス他1名、日本は筆者1名、合計18名、他にオブザーバーとして米国内から8名（この中に滞米中の木下君も入っている）という訳で、割合こじんまりとした会議であった。問題は1964年に行われた天文定数の改訂の時に延期になった定数の扱いをきめ、それをもとにして天体暦の改訂をどのようなタイム・スケジュールで行うかを決めることであった。

天文定数の改訂は戦前から色々と議論されたが、実行される段階には至らなかった。しかし戦後の新技術の開発に伴う精度の向上によって、その気運が増した。その最たるものは1天文単位をkmで表わした量で、暦の上では太陽視差となって現われる。レーダーによる金星までの距離の実測が決定的精度の向上をもたらしたのである。それ以前は地球・月のシステムが他の(小)惑星に及ぼす力学的影響から間接的に求めたのであった。もっともレーダーによる値が出た後、エロスの整約を再計算した所によると、以前の計算の不備を正せば、新定数とそれ程違っていないことがわかったが、それは後の祭りであった。

とにかく、戦後のレーダー、人工衛星、人工惑星の観測結果から新しい定数が次々と決められ、それをもとに天体暦の改訂を行うことになり、1964年のハンブルグにおけるIAU総会で、作業グループが提出したリストが公式に採用されることになった。そのうちの主なものは上の天文単位距離(A)、光速度(c)、地球赤道半径(a_0)、地球の力学的ふくらみを表す量(J_2)、地球の重力定数(GE)、質量比月/地球(μ)……であった。しかしこの場合、歳差定数および惑星の質量はニューカムの値から変更されなかった。当然その処置が残されたわけであるが、その取扱いが今回の主たる問題になったわけである(1970年にもハイデルベルグでコロッキウムが開かれて

いる)。

2. 歳差定数

よく知られているように地球赤道帯のふくらみに及ぼす月と太陽による引力のトルクは地球の自転軸のむきをかえる。観測座標系である赤道座標系は(天の)赤道と黄道とで定義されている。(星の)黄道に沿って測った黄経(春分点基準)は自転軸の移動の結果、絶えず増すことになる。その増加の割合を黄経における一般歳差という。黄道自身も他の惑星の摂動のために天球上一定ではないので、上の一般歳差は太陽・月による歳差以外に黄道が動くことによる部分も含まれている。しかしこの方は比較的よくわかっている。さて、トルクを計算するとき、月、太陽の質量、軌道要素の他に、地球の力学的扁率 H (A, C を地球の主慣性能率とすると $H=(C-A)/C$ 、ただし $B=A$)が入ってくるが、これは人工衛星の運動から決る $J_2=(C-A)/Ea^2$ とはちょっと違っている。その比 C/Ea^2 は地球の内部の密度分布がわかれば決まる量ではあるが、これを直接決める方法はなく、現在ではむしろ H と J_2 から逆に決めている状態である。すなわち H は星の(固有)運動から統計的にきめなければならないのである。

星が相互に運動していないとすれば、いわゆる恒星天のみかけの運動は地球の自転の反映であるので、自転軸のむきの運動もふくめて観測的にみかけの運動から地軸の運動もきまることになる。けれども実際はfixed star(恒星)はその名に反して運動している。したがって現在は適当にきめた歳差定数をもとにして計算した座標系の回転(変換)をほどこしてもなおそれから動いている量(視線に垂直な方向)を固有運動と呼んでいる。それが全体としてランダムであると見做し得るならば、仮定した座標系の回転は平均的に実際の地軸の運動とマッチしていたと思うわけである。したがって歳差定数を決めるということは固有運動がどのような系統的運動を示すかを求めることに帰着する。固有運動は大きいものでは100年あたり数百秒(角度)にも達するが、たいていは数秒程度であり、精度よくきめるのには数十年乃至1世紀程度の時間間隔を必要とする。しかも一様な質の観測が要求される。したがって、太陽視差のように精度よい観測でどんびしゃりと決定されるものとは本質的に異った性質もっている。この整約はフリッケによって精力的に行われ、ニューカムの一般歳差($p=5025^{\circ}64/\text{世紀}$)に対する補正 dp は

* 東京天文台

Shinko Aoki: On the Amendment of Astronomical Constants and Ephemerides

$$\Delta p = (1.1 \pm 0.3) / \text{世紀}$$

程度におさまっている。この場合ニューカムの時代(1900年頃)には考えられていなかった銀河の回転速度も同時に解いているのである(オーダーは 0.3/世紀程度)。

歳差定数に対する補正を求めるもう一つの方法としては宇宙銀河を利用することがある。宇宙銀河の視線方向に垂直な運動成分は小さいと考えられるので、宇宙銀河の方向で座標系のむきを定義する。こうすれば宇宙銀河のシステム(これが力学的慣性系を表わすものと仮定する)に対する地球の回転軸の運動がわかる筈であり、歳差定数をきめることになる。この方法は1950年代より実行に移され、リック天文台とブルコワ天文台で独立に測定が行われ結果が出始めている。結果の一致は完全とは言えないが、まあまあという状態である。

3. 春分点の運動と座標系

さて座標系の回転をきめるのは歳差運動(これは黄道の極のまわりの運動と見なされる)だけではない。黄道もまた空間に対して運動しており黄道と赤道の交点(春分点)を星表のシステム内に決めなければならない。逆にいえば基本星のある時期(これを元期という)における赤経・赤緯と、その後における変化の様子を確定しなければならない。すべての対象は基本星を基準にその位置をもとめるのであるからである。さて一つの星表での固有運動の赤経方向成分 Δk は次の式で与えられる。

$$\Delta k = \Delta p \cos \varepsilon - (\Delta l + \Delta e) + \text{銀河回転の成分},$$

ここで ε は黄道傾角、 Δl は惑星の摂動(の補正)による春分点の運動成分、 Δe は恒星の系統的な運動。この Δe は歳差、惑星理論の補正以外にこの星表に準拠した星系が全体として赤道の極のまわりにこれだけの回転をしていることを意味する。空間に対して銀河回転以外の系統的運動はないと仮定すれば、これはとりもなおさず星表によって与えられる座標系が、慣性系に対して回転していることを意味する($\Delta e > 0$ の時は正の方向)。一方、この項のチェックは太陽系内の惑星の運動によって行われ得る。理論的に計算された惑星の運動をこの星表できまる座標系に準拠した観測と比較すれば、黄道面はみかけの運動をしめす筈であり、春分点はその分だけ星表に対して移動しているように見えるからである。このチェックは残念ながら現在迄の所十分満足なものではない。すなわち FK 4 に対して現在 Δe は

$$\Delta e = 1.2 / \text{世紀}$$

程度あるが、これが恒星の慣性系に対する実際の平均的運動なのか、太陽系内の運動の精度が悪いためのものなのか問題なのである。しかもこれに対応する宇宙銀河の値はリックとブルコワでは違っている。リックでは Δk は

$$\Delta k = -0.50 / \text{世紀}$$

($\Delta p = 0.75 / \text{世紀}$) で $\Delta l + \Delta e = 1.21 / \text{世紀}$ となり上の結果

と合うが、ブルコワでは $\Delta k = +0.50 / \text{世紀}$ ($\Delta p = 1.04 / \text{世紀}$) で

$$\Delta l + \Delta e = 0.53 / \text{世紀}$$

となっている。 Δk について符号が異なるのは勘違いとも考えられるが、今度の会議でこの点についてソ連から事前に報告はなく(出席者もいない)、残念であった。一方惑星の再整約を行った結果 $\Delta e = 1.1 / \text{世紀}$ という値が出るという報告(ラウプシャー)もあり会議全体としては春分点の運動を取入れようという空気であったが、その数値を決める所までは到らなかった。筆者は以上のような状態からまだ確定していないと見る。

いずれにしても歳差定数を変えるということは1896年のパリ会議以来の出来事であり、恒星の位置のみならず惑星の位置、恒星時、世界時……とそのおよぶ範囲が広いので、相互に矛盾なく、また混乱のないようにする必要がある。座標系が力学の方程式とマッチしたものでなければならぬのは言うまでもないことなのであるが、まだその数値が確定しているとは言い難い。もしそうなら、座標系はどうせ便宜的なものなのであり、固有運動はそれに準拠してきめても実用的には十分である。混乱をさける意味からもなるべく手をつけない方がよいと筆者は主張してきた。しかしどうやら歳差は少くとも変える方向にむかいつつある。春分点の方はまだ確定しておらず抽象的な決議に留まっており、一方黄道傾角についてはまだ十分な議論が行われていない。とにかくこの三要素が確定して、ある元期での座標と他の時期での座標の間に具体的な関係がきまり、それからの移動が固有運動として確定するのであるが、そこまではまだ行われていないのである。

なお新しい星表および惑星表の基準元期について述べる。新星表は2000年ということになっているがちょっと注意が必要である。今迄はベッセル年初(もとは太陽年から定義)を基準として、たとえば 1950.0 のように表現したが、今度は後に述べるようにニューカムの理論からの離脱によって時間の引数はすべて日およびその整数倍のユリウス世紀となった。新元期は

$$\begin{aligned} & 2000 \text{年} 1 \text{月} 1 \text{日} \text{グリニチ正午 (E T)} \\ & = 2,451,545.0 \text{ JED}. \end{aligned}$$

したがってこの元期での平均赤道と黄道とによって決る(春)分点を

$$\text{分点 } 2000 \text{ (Equinox } 2000)$$

と表示し、今迄のように 1900.0 と書く時はベッセル年初として区別する。

星の位置は惑星の位置と両立するように改訂を行わなければならないが、当初は1980年の暦から新しいシステムを導入する予定であった。しかしこれは後にのべる惑星の運動表の準備の関係で、その時期を決めることは

出来なかった。

4. 天文単位系

物理学の基本単位系はメートル、キログラム、秒で決められている。これを MKS 単位系または SI (Système International d'Unités) という。けれども天文学(ことに天体力学)ではこれをそのまま使うことは出来ない。それは重力定数 G がこの単位系では十分な精度で与えられていないからである。そこで、長さの単位をメートルではなくいわゆる天文単位を用いる。また質量も太陽のそれである。ケプラーの法則によって、太陽と同じ質量のまわりを仮想的にまわる質量無限小の物体が円運動をし、その平均運動(角速度)が k のとき、その物体までの距離を 1 天文単位という、ただし

$$k=0.017,202,098,95 \text{ rad/day}$$

(これはニュートン力学による定義であるが、相対論に対しても妥当する表現方法は目下考慮中であるが、確定した文章は出来ていない)。上の数字をガウスの重力定数ともいい、1 天文単位はほぼ地球-太陽の平均距離に相当するが、1938年の IAU 総会以来むしろこの k を定義定数として、長さの単位をきめている。さてこの天文単位が SI とどのように結びついているかが問題となるがそれを A で表わしている。すなわち 1 天文単位をメートルで表わした量である。現在の値は

$$A=149,600 \times 10^6 \text{ m.}$$

さて SI では m を定義するのに光速一定の法則を用いて光速の値を固定してしまおうとする動きが進行中であり、国際度量衡委員会は 1974 年に

$$c=299,792,458 \text{ m/s}$$

を採用した(総会は 1975 年の予定)。こうなると A のかわりに光時間(light time)を一次(primary)定数に採用することになる。もっともレーダー観測からきまるものは信号の往復時間であり、この方が我々の目的にも合っていることになる。

さて今度の改訂の主目的には前に述べた歳差の外、質量比 太陽(地球+月)の問題がある。現行の惑星理論ではこの比としてニューカムの 329,390 を用いているが、1964年に採用した定数系からは 328,912 となる。それは次の式で与えられる

$$\frac{S}{E+M} = \frac{GS}{GE(1+\mu)} = \frac{k^2 A^3}{GE(1+\mu)}.$$

GS は太陽質量の重力効果で SI で表わせば $k^2 A^3$ となることは上記の定義からすぐわかると思う。 $S/(E+M)$ は惑星の理論に出てくる地球+月系の(逆)質量比であって、これは他の定数と両立するようになっていなければならない。ここを直すついでに、他の惑星の質量をも決めようということになり、広範な議論が行われ、今回でほぼ一致点が見出されたわけである。ただしこまかいこと

を言うと 1964年の GE の値はよくないということからこれももう一度変えようかという動きがあり(A も同様)、具体的には 1975 年の IUGG でもし新しい定数系を採用するならば IAU もこれに従うということになった。

もう一つ重要なことはガウスの重力定数に入ってくる day の問題である。これは現在のシステムでは暦表時とされている。すなわち 1900 年における太陽年(春分から春分までの時間間隔)を $s=31,556,925.9747 \text{ s}$ とした時の s を暦表秒とし、これが単位になっている。この場合太陽の運動(地球の軌道運動のはねかえり)自身から時間の単位を(ここにはあらわれていないが、実際はその元期も)きめて暦表時をきめているのである。このシステムと SI とは原理的にことなっている。SI は原子内の電子の運動にもとづき一方暦表時は重力にもとづいている。これが完全に平行するかどうかは相対論的宇宙論との関係で現在争われているのである。そこでこの間をどのようにシステム化するかが問題となった。筆者は両者の関係はまだ確定していない故に、いますぐニューカム系から SI に移るのは問題があると言う意見であったが、SI の方に変更することにきまってしまった。これに伴い、新しい運動理論に現われる諸定数をきめなおさなければならないという作業が出て来ている。

5. 月・惑星運動表と時間尺度

惑星の質量を変更することはとりも直さず惑星・月の運動表を変更することになる。この場合どういう計算方式を採用するかが次の問題となる。現在の所これという確立した理論がないので数値積分による方法を行うことになるが、この場合問題になるのは現行の暦との関係である。後者は平均要素を用いた一般摂動を用いている(月や内惑星では)。一方数値積分では初期条件が問題になる。いわゆる永年項や長周期項の見積り如何でこの間の関係は微妙で十分注意せねばならぬ。その辺の所あまり具体的な研究はなされておらず、ヴァン・フランデンは解析的と数値積分を平行して行うのだと言っていた。今回の所はそれ故抽象的な表現でしか結論が出ていない。たとえば月を数値積分で計算した場合どの位一つのシステムでもつだろうかというコワレフスキーの間に誰も答えられなかった。数年毎にシステムを変えるのではある意味では現行のブラウン(1919)よりも悪い結果にならぬとも限らない。ブラウンの理論はとかく問題があることは事実である。ことに視差(又は地球からの距離)の精度が悪い。これはその当時は直接距離を測定出来なかったのではしよってあるからである。しかしもとの理論(すくなくとも三体問題の解)はそれほど悪いとも思えないのである。その辺のことを十分考慮に入れないと新しいシステムは幾度も改訂をしなければならないことになるかも知れず、これは基本暦の性格に反する。この辺の具

表 1 天文定数系

	記号	1964	1967 (?)	範囲
太陽年	s	31 556 925.974 7 s (1900.0)		
ガウスの重力定数	k	0.017 202 098 95 rad day ⁻¹	0.017 202 098 95 rad day ⁻¹	
光速度	c	299 792.5 × 10 ⁸ m s ⁻¹	299 792 458 m s ⁻¹	
天文単位距離	A	149 600 × 10 ⁶ m	0.149 597 87 × 10 ¹² m	
光時間	τ_A	499.012 s	499.004 79 s	
地球赤道半径	a_e	6 378 160 m	6 378 140 m	
地球の力学的ふくらみ	J_2	0.001 082 7	0.001 082 64	
地球の重力定数	GE	0.398 603 × 10 ¹⁵ m ³ s ⁻²	0.398 600 8 × 10 ¹⁵ m ³ s ⁻²	
質量比 月/地球	μ	1/81.30	0.012 300 0	
重力定数	G		0.667 20 × 10 ⁻¹⁰ m ³ s ⁻² kg ⁻¹	
黄経における一般歳差	p	5 025 ⁷ 64 (tropical cy) ⁻¹ (1900.0)	(+1 ⁷ 10 (tropical cy) ⁻¹)	
黄道傾角	ϵ	23°27'08 ⁷ 26 (1900.0)		
章動定数	N	9 ⁷ 210 (1900.0)		
月の平均黄経における潮汐加速	\dot{L}_a	-22 ⁷ 44 cy ⁻²	-38 ⁷ cy ⁻²	
恒星に対する月の平均運動	n_a^*	2.661 699 489 × 10 ⁻⁶ rad s ⁻¹ (1900.0)		
質量比 太陽/惑星				
水星		6 000 000	6 023 600	6 020 000~6 027 000
金星		408 000	408 523.5	408 521~ 408 526
地球十月		329 390 (328 912)	328 900.2	
火星		3 093 500	3 098 710	3 098 660~3 098 760
木星		1 047.355	1 047.355	1 047.330~1 047.380
土星		3 501.6	3 498.5	3 497~ 3 500
天王星		22 869	22 869	22 650~ 23 100
海王星		19 314	19 314	19 200~ 19 450
冥王星		360 000	3 000 000	2 000 000~6 000 000

注意: ゴチ体は定義定数, イタリック体は誘導定数, それ以外は一次定数, rad はラジアン, cy は世紀.

体的問題にまでは今回は十分話し合いは行われなかった。

一方月・惑星の理論に相対論を導入しようとする動きがある。惑星の理論は相対論という座標時でまず計算し、それをもとにして地球上の固有時—これが SI に結びつく—に変換する方法が一番よいのである。それは多体問題ではあっても太陽の重力場が一番大きく、その中の各質点の運動をきめるのに共通な座標時ととれるからである。

さて以上のことを実行する場合ちょっとテクニカルな問題がある。現在でも日心座標と地心座標で表わしている部分があるが、そこに現われる時間引数をどうしようかという問題である。原理的には日心は座標時、地心は固有時とすればよいのであるが、実際の結びつきをどうするかが問題となった。一つには相対論といっても色々のものがあり、その一つを取る (たとえばシュワルツシルド) ことに決められないという事情があるようであり、座標時、固有時といってもそれらの間で内容が実際には異なるということを反映しているように見える。ともかく

引数として座標時系の方を TEG (Temps des éphémérides gravitationnelles), 固有時系の方を TET (Temps des éphémérides terrestres) とした。—最近では T という主概念が最初に来るフランス語の省略形を用いる習慣が多くなって来ているが、文字の順序にはこだわらないという但書がつくはず。日本語訳は勿論まだないが重力暦表時、地球暦表時とでもしておこう。—これには次の様な事情がある。現行の暦表時と国際原子時 (TAI) との間に約 32 秒の差があるわけであるが (後者が 1958 年の年初での世界時に同期して出発させたことによる), 双方の側に跳があることは不便だということで TAI とは別に TET を作ろうということである。TET と TEG は一つの相対論を仮定すれば直接につながるのでその間はしばしば理論の変更を行わず固定した関係とする。一方 TET は TAI+32.00 秒の具体化 (realization) になるように月・惑星の暦を作ることにするが、TET 自身はあくまで暦を作る上での時間引数 (time-like argument) とする。TEG は力学の方程式に現われて来る変数で、理想化さ

れた力学的時間の具体化と考える。実際問題としては
 1958年1月1日0時0分0秒 (TAI)
 =1958年1月1日0時0分32.00秒 (TET)
 とする。すなわち始まりだけをきめておく。

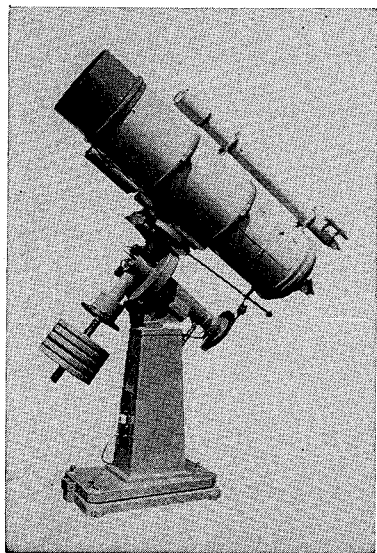
筆者は基本暦に相対論を取り入れるのは時期尚早であり、現行の太陽表の不備を訂正した上で、それから暦表時を定義した方がよいと思っている。というのは基本暦はニュートン力学で計算しておいて必要に応じて相対論的補正を加えればよいと思っているからである。百歩ゆずってもアインシュタイン-シュワルツシルドの相対論を入れるべきであると思っている。いずれにせよこのシステムでの太陽年を決めなければならず、それが上記の s の値から本質的にずれる程観測の精度が上っているとは思えず、結局コンベンショナルな値を用いざるを得ないと思われるからである。

6. 結 び

以上ワシントンでの会議で問題になったことをその背景をふくめて解説した。会議での決議は当初の予定に比べて大部歯切れの悪いものになってしまった。第一に既に述べたように時期の問題である。最初の予定では上記のことをすべて計算し終って、1980年用の暦から新方式を採用することになっていたが、現在まだその具体的な計算方法すら出来ておらず、とても無理だということになった。というのは今迄月・惑星暦の主要部(これを first

part と呼ぶ) は4~5年前までにグリニチで計算され、その前刷が各国にくぼられ、それをもとに各国での必要な計算を加えて出版するという手筈になっている。一方IAUの総会は1976年なので、その時公式に採用された方法で計算したとしてもちょっと間に合わない。したがってそれ以前たとえば1974年か1975年には仕事を始めなければならぬのである。今度の会議で細部まで決ったとすれば、不可能ではないが、細部は以上見るように決まらなかった。

一方手続的なことを述べると、この会議はIAUの第4委員会内のWGである。したがって、親委員会の承認が必要である。ことにソ連から出席者がなかったのもそれは重要なことである。そのためには決議だけでなくそこに到った根拠 (justification) もつけて遅くとも1974年中に第4委員会のメンバーに送る。その後他の委員会にも同意を得るために少くとも委員長には送る。その返事を待って第4委員会の原案を1975年6月頃に発行されるIAUブルチンに載せる。そして反響をみた上で、1975年末の第4委員長(ダンカム)から総幹事 (General Secretary) への報告に載せる。それが1976年の総会への提案 (Draft Report) となるわけである。結構忙しいのである。ことは基準座標系に関係している故多くの分野に関連して来るので、お互いに誤解や混乱はさけなければならぬいからである。



天体望遠鏡
ドーム、製作

西村製の天体望遠鏡

40 cm 反射望遠鏡の納入先

- | | |
|--------|---------------------|
| No. 1 | 富山市立天文台 |
| No. 2 | 仙台市立天文台 |
| No. 3 | 東京大学 |
| No. 4 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 5 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 6 | 台北天文台 (TAIWAN) |
| No. 7 | 北イリノイズ大学 (USA) |
| No. 8 | サン・チェゴ大学 (USA) |
| No. 9 | 聖アンドリウス大学 (ENGLAND) |
| No. 10 | 新潟大学高田分校 |
| No. 11 | ソウル大学 (KOREA) |
| No. 12 | 愛知教育大学(刈谷) |

606 京都市左京区吉田二本松町 27

株式会社 西村製作所

TEL. (075) 771-1570
691-9580