

## 天体暦のための位置推算表その他

森

巧\*

天体位置表、英米暦などの天体暦に掲げる諸数値は、国際天文学連合 (IAU) で採択した運動理論 (運動表) と定数系に基づいて計算する。従って以下、主として天体位置表の根拠となっている運動表その他について述べるが、これは仏暦を除いた他の天体暦とは共通である。

運動表 (位置推算表ともいう) はもともと、運動理論を手計算に便利のように展開・整理した数表である。現在では暦の推算は電子計算機によっているが、ここでは運動表と等価な計算を含めて広義に解釈してほしい。

これらの運動表は主として18～19世紀の観測に基づき、19世紀末から20世紀初頭に作成されたものである。すべての運動表について定数・座標系等が完全に統一されているわけではな

く、また観測と合わせるための非理論項がまぎれ込んでいるけれども、それ以前の観測結果を十分に説明するように作られたこと、また20世紀の大半の観測がこの表による計算値と比較されてきたことのために、その歴史的な役割はきわめて重要である。

## 太陽の表

紀元前2世紀にギリシャの大天文学者ヒッパルコスが太陽表を作成した。これが運動表では最も古いものとされている。英暦は、創刊当初はドイツのゲッチンゲンのトピラス・マイエルによる手書きの表を用いた。その後、ドランプルの表 (1792, 1806)、カルリニの表 (1810, 1832) 等を経て1864年から1900年までルベリエの表 (1858, 表3参照) を用い、1901年からニューカム表 (1895, 表2参照) を採用している。米暦は当初カルリニ

表1 各種天体暦

名称	通称	創刊	刊行機関	備考
Connaissance des Temps	仏 暦	1679	Bureau des Longitude	
Astronomical Ephemeris (旧称 Nautical Almanac)	英 暦	1767	Royal Greenwich Observatory	1960から内容 体裁は米暦と同じ
Berliner Astronomisches Jahrbuch	独 暦	1776	Astronomisches Rechen-Institut	1959廃刊
Efemerides Astronomicas (旧称 Almanaque Nautico)	スペイン 暦	1791	Instituto y Observatorio de Marina	
American Ephemeris and Nautical Almanac	米 暦	1855	U.S. Naval Observatory	1960から内容 体裁は英暦と同じ
Астрономический Ежегодник СССР	ソ連暦	1922	Институт Теоретической Астрономии	
天体位置表 (Japanese Ephemeris)	日本暦	1943	水路部	
Indian Ephemeris	インド暦	1957	Regional Meteorological Centre	
Apparent Places of the Fundamental Stars	APFS	1941	Astronomisches Rechen-Institut	1959まで グリニッジ天文台 刊
Ephemerides of Minor Planets	EMP		Институт Теоретической Астрономии	

表 (1810) を用い、ハンゼンとオルフセンの表 (1853) を経て、1900年からニューカム表を採用している。現在各国の天体暦は、仏暦が依然としてルベリエ表を用いているほかは、すべてニューカム表による値を掲げている。

この太陽表にニューカム自身による「天文定数」

Newcomb, S. (1895): The Elements of the Four Inner Planets and the Fundamental Constants of Astronomy, (Supplement to American Ephemeris 1897).

に基づいて作られた計算表である。天体の位置を推算するためには、天体力学を解くこと他に、積分定数を決定し、また基本的な定数としての太陽視差や惑星の質量等も求めておく必要がある。このために、ニューカムは、1750年から1890年までのグリニッジ、パリ、ワシントン、ケープ等々13天文台の観測 (その数は太陽 40176 個、水星 5421 個、金星 12319 個、火星 4111 個) を整約し、実に 22000 個の観測方程式を解いて、これらの数値を求め

\* 水路部

T. Mori: Tables for ephemeris computations, etc.

表 2 仏暦以外に採用されている運動表または数値積分による座標値

著者	年	標 題	巻 号
Newcomb, S.	1895	Tables of the motion of the Earth on its axis and around the Sun	VI, 1
"	1895	Tables of the heliocentric motion of Mercury	VI, 2
"	1895	Tables of the heliocentric motion of Venus	VI, 3
"	1898	Tables of the heliocentric motion of Mars	VI, 4
Ross, F.E.	1912	New elements of Mars and tables for correcting the heliocentric positions derived from A.P.A.E. vol. VI, part 4.	IX, 2
Eckert, W.J. Brouwer, D. & Clemence, G.M.	1951	Coordinates of the five outer planets, 1653-2600	XII
Clemence, G.M.	1954	Perturbations of the five outer planets by the four inner ones	XIII, 5
Duncomb, R.L.	1969	Heliocentric coordinates of Ceres, Pallas, Juno, Vesta, 1928-2000	XX, 2

巻号はすべて Astronomical Papers prepared for the use of the American Ephemeris and Nautical Almanac (A.P.A.E. と略す) を指す

表 3 仏暦に採用されている運動表

著者	年	標 題	巻 ページ
Le Verrier, U.J.J.	1858	Théorie et Tables du mouvement apparent du Soleil	4 1
"	1859	Théorie et Tables du mouvement de Mercure	5 1
"	1861	Théorie et Tables du mouvement de Venus	6 1
"	1861	Théorie et Tables du mouvement de Mars	6 185
Gaillot, A.	1904	Tables rectifiées du mouvement de Saturne	24 172
"	1910	Tables nouvelles des mouvements d'Uranus et de Neptune	28 A1
"	1913	Tables rectifiées du mouvement de Jupiter	31 105

巻, ページはすべて Annales de l'Observatoire de Paris, Mémoires を指す

た。また、このとき同時に、歳差・章動定数、黄道傾角等を決定しており、この作業は歴史的にとくに重要な研究であり、以上の諸数値は1896年のパリ会議で採択され、現在まで使われている。

太陽表では、まず平均軌道要素として、瞬時の平均春分点に基づく平均黄経 ( $L$ )、同じく近地点の平均黄経 ( $\pi$ )、平均近点離角 ( $g$ )、離心率 ( $e$ )、平均黄道傾角 ( $\epsilon$ ) 等を定義している。例えば、平均黄経は

$$L = 279^{\circ}41'48''.04 + 1.29602768713T + 1.089T^2$$

である。  $T$  は1900年1月0.5日からの時間経過を100年単位で表わす。ここでこの数値を示したのは、この変数  $T$  が、のちに暦表時の定義となったからである。

表の本体は、次の38個の表で構成され、136ページに収められている。摂動計算に必要な諸引数を任意の日時

について求める表: 6表, 摂動計算: 21表, ケプラー運動による位置とその永年項: 4表, 歳差と章動: 6表, 視半径・地平視差・光行差: 1表。このうち最も重要な部分は摂動の計算であり、これは例えば、太陽および惑星それぞれの平均近点離角を引数とした数表として与えられている(図1)。表の最小単位は黄経・黄緯が  $0''.01$ 、動径(天文単位)の対数は小数点の8位である。

月の表

月の位置は、英暦では当初は太陽と同様にマイエルの手書きの表を使った。その後、ラランドの表(1792)、ブルクハルトの表(1812)等を経て1862年からハンゼンの表(1857)を用いた。米暦は初めピアースの表(1853)に基いた。1883年に英暦・米暦ともにハンゼン表にニュ

TABLES OF THE SUN.

TABLE X.—Vert. Arg. IV; Hor. Arg.  $g$ . Action of Jupiter. Const.  $12''.00$ .

Arg.	-8	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	Arg.
120	2061	2182	2282	2357	2406	2426	2420	2391	2339	2269	2185	2092	1995	1898	1805	1720	120
121	2030	2157	2264	2346	2402	2430	2432	2408	2362	2297	2215	2124	2028	1930	1836	1749	121
122	1997	2130	2243	2332	2396	2432	2441	2424	2383	2322	2245	2156	2060	1963	1868	1778	122
123	1962	2101	2220	2316	2388	2431	2447	2437	2402	2346	2273	2187	2093	1995	1899	1808	123

図 1 太陽表の一部(木星の摂動)

EQUATORIAL RECTANGULAR COORDINATES

JUPITER

Date	Julian Day	$x$	$\Delta''$ $M^{\mu}$	$y$	$\Delta''$ $M^{\mu}$	$z$	$\Delta''$ $M^{\mu}$
1975 7 7.0	244 2600.5	+ 4.8726 43720	-189 97468 +85021	+ 0.8536 44621	- 3328980 +13706	+ 0.2471 18773	- 9 63800 + 3809
1975 8 16.0	244 2640.5	+ 4.8059 77467	-187 41958 +83661	+ 1.1374 99419	* 44 36590 +19917	+ 0.3705 22219	- 14 45213 + 6502
1975 9 25.0	244 2680.5	+ 4.7205 69256	-184 02918 +81672	+ 1.4169 17627	- 55 24316 +25964	+ 0.4924 80452	- 19 20136 + 9144
1975 11 4.0	244 2720.5	+ 4.6167 58127	-179 82336 +79042	+ 1.6908 11519	- 65 86124 +31791	+ 0.6125 18549	- 23 85932 +11705
1975 12 14.0	244 2760.5	+ 4.4949 64662	-174 82829 +75861	+ 1.9581 19287	- 76 16200 +37334	+ 0.7301 70714	- 28 40045 +14162
1976 1 23.0	244 2800.5	+ 4.3556 88368	-169 07577 +72103	+ 2.2178 10855	- 86 09013 +42534	+ 0.8449 82834	- 32 80024 +16484
1976 3 3.0	244 2840.5	+ 4.1995 04497	-162 60320 +67880	+ 2.4688 93410	- 95 59374 +47337	+ 0.9565 14930	- 37 03551 +18650

図 2 数値積分による直角座標 (木星)

ーカムの補正 (1878) を加え, 1923年からブラウン表 Brown, E.W. (1919): Tables of the Motion of the Moon, (New Haven). に移り, 1959年まで使った。これは3冊, 557 ページというぼう大なもので, そのうち 417 ページが計算表であり, この表を使うのにもかなりの知識と経験を要した。この表は

Brown, E.W. (1897, 1899, 1900, 1905, 1908): Theory of the Motion of the Moon, (Memoirs of the Royal Astronomical Society, 53, 53, 54, 57, 59.

に発表された 380 ページに及ぶ理論に基いて作られたものである。1960年からはこの理論から直接に計算した値を天体暦に掲げている。1960年は暦表時が採用された年である。

ブラウンの理論は主として, それ以前のグリニジの子午環観測の結果に基いている。理論の構成は, 黄経 832 項, 黄緯 523 項, 視差は 253 項である。(この数は楕円項を含む)。視差項の数が少ないのは, この時代にレーザ観測をする人がいなかったためである。

ここで, ブラウンの理論の精度について, 大体の見当をつけておきたい。理論では, 太陽による摂動項は 0°002

までのものをすべて拾い, 惑星によるものは, 0°003 まででとめている。捨てられた項について, 太陽によるものは, 現在の暦ではエッカートの計算値(1966)を採用しているので心配することはないが, 惑星項については, 気にする必要がある。惑星項のうち 0°003 のものは黄経に 83 項, 黄緯に 23 項あり, また理論の収束の具合からみると, 0°002 の係数をもつ黄経成分は 150 項, 黄緯成分は 40 項, また 0°001 の係数をもつものは, それぞれ, 250, 60 項程度であるとのことである。これらの項は加え合せるときは互いに相殺するので一般には小さくなるが, それでも 100 分の数秒は残ると考える方が常識的である。また, 摂動項のすべての最終桁 (0°001) に四捨五入の影響が残るとすると, 現在の月の暦の精度は, 理論的には 0°1 より良くはないと判断しても間違いではない。観測精度が向上すれば, 問題となるであろう。また, ブラウンの月の理論は, ニューカムの定数を必ずしも採用していないので, 惑星表とは同じ系にあるとは言い難い。

内惑星の表

水星・金星・地球・火星を天体暦では内惑星といっている。地球の運動表とは太陽表にほかならない。

Nr.	T			L'	Z	$\epsilon$	P	Q	log p	log $\Delta L$	log q	$u'_a$	log $f_a$	log $\gamma$	
	Greg. Kalendar	Julian. Tag	Welt-Zeit												
7576	1973	XII 24	2442 041	15 8'1	272'680	-0'09	23'439	4'309	3'840	0'7437	9'7000	8'7066	0'5757	7'6772	9'6173
7577	1974	VI 20	2442 219	4 55'6	38'496	+0'31	23'438	189'567	191'053	0'6957	9'7588	8'7541	0'5340	7'6629	9'9143
7578	1974	XII 13	2442 395	16 25'5	261'287	-1'47	23'438	11'617	9'525	0'7303	9'7175	8'7196	0'5655	7'6768	0'0322
7579	1975	V 11	2442 544	7 5'7	49'980	-0'93	23'437	168'428	170'633	0'7280	9'7222	8'7219	0'5562	7'6657	0'0283
7580	1975	XI 3	2442 720	13 5'1	220'487	-4'10	23'437	348'011	346'369	0'6965	9'7564	8'7536	0'5410	7'6734	0'0120
7581	1976	IV 29	2442 898	10 19'9	39'223	-0'68	23'437	176'456	177'145	0'7436	9'7027	8'7068	0'5679	7'6668	9'5325
7582	1976	X 23	2443 075	5 10'0	209'928	-3'93	23'436	356'115	356'597	0'6899	9'7636	8'7606	0'5363	7'6722	9'5188
7583	1977	IV 18	2443 252	10 36'8	28'282	-0'18	23'435	184'147	182'921	0'7412	9'7059	8'7095	0'5669	7'6681	9'5982
7584	1977	X 12	2443 429	20 30'8	199'398	-3'41	23'435	4'336	6'529	0'7938	9'7489	8'7460	0'5438	7'6709	9'5803
7585	1978	IV 7	2443 606	15 16'3	17'451	+0'54	23'435	192'162	189'765	0'7221	9'7287	8'7279	0'5545	7'6693	0'0436

図 3 オップルツェルの食宝典 (日食表) の一部

英暦では初めはハレーの表 (1749) を用い、ラランドの表 (1792), リンデナウの表 (水星: 1813, 金星: 1810, 火星: 1811) 等を経て, 19 世紀後半にはルベリエの表 (1859, 1861, 1861, 第 3 表参照) を使った。米暦はウィンロック表 (水星: 1864), リンデナウ表等を用いたが, 今世紀初めから英米暦ともにニューカム表 (1895, 1895, 1898, 第 2 表参照) を採用し, 1922 年には火星の暦にロスの経験的改正 (1912, 第 2 表参照) を加えた。天体位置表を初め各国の天体暦もこれに従っているが, 仏暦だけは依然としてルベリエ表を使っている。

ニューカムによる内惑星の運動表は, 太陽表と同様, 「天文定数」に基づいて作成された。内惑星 (太陽も含めて) の理論には, 例えば水星の近日点の運動のような非論理項が, 過去の観測に合わせるための経験項として入っていることは覚えておいた方がよい。表の引数, 表の形式等も太陽表と同様である。表の本体は水星: 82 ページ, 22 表, 金星: 92 ページ, 27 表, 火星: 174 ページ, 39 表からなっている。

### 外惑星の表

外惑星とは木星・土星・天王星・海王星・冥王星をいう。初期の英暦では木星・土星は内惑星と共にハレーの表 (1749), 次にラランドの表 (1792) を使い, 19 世紀中ごろは天王星も併わせてプールの表 (1821) が用いられ, その後, 20 世紀の初めまではルベリエによる次の諸表が使われた。

Le Verrier, U.J.J. (1876): Tables de Jupiter; (1876): Tables de Saturne; (1877): Tables de mouvement d'Uranus; (1877): Tables de mouvement de Neptune, (以上, それぞれ Ann. de l'Obs. Paris, Mém., 12, 1; 12, A1; 14, A1; 14, 1.)

米暦では上記のプールの表 (1821) のほかにニューカムの天王星表, 海王星表 (1865) が使われた。

これに続く木星と土星の表は

Hill, G.W. (1895): Tables of Jupiter, constructed in accordance with the method of Hansen, (A.P.A.E. vol. VII, part 1.)

Hill, G.W. (1895): Tables of Saturn, constructed in accordance with the method of Hansen, (A.P.A.E. vol. VII, part 2.)

であって, 米暦では木星は 1898 年, 土星は 1900 年, 英暦では木星・土星ともに 1901 年から採用し, 他の天体暦もほとんどこれに従った。

天王星と海王星については英米暦ともに, 今世紀初頭から

Newcomb, S. (1898): Tables of the heliocentric motion of Uranus, (A.P.A.E. vol. VII, part 3.)

Newcomb, S. (1898): Tables of the heliocentric motion of Neptune, (A.P.A.E. vol. VII, part 4.) を使い, 各国の暦もおおむねこれに従った。天王星は 1781 年にハーシェルが発見してから 1898 年までの子午線観測の結果をもとに軌道要素が決定されている。また海王星は 1846 年の発見であるので, 50 年間の観測に基づいていることになるが, 発見以前の 1795 年の観測も含まれているとのことである。海王星の観測の整理では, 未発見天体の有無についても検討されているが, 当時, 冥王星はまだなかったから, ニューカムの運動表作りの大事業もこの表で終りとなる。

冥王星は 1930 年の発見であり, 暦に登場するのは 1950 年である。これはパッター (1931) の軌道要素に基いた数値積分である。位置推算表はできていない。

仏暦以外は, 1960 年以後の外惑星の暦はエッカート, ブラウワ, クレメンスの数値積分による日心直角座標 (1951, 第 2 表参照) に, クレメンスの内惑星による摂動 (1954, 第 2 表参照) を補正したものに基いている。この数値積分は 1653~2060 年の日心黄道直角座標を 40 日おきに小数点下 9 けた (天文単位) まで計算したもので (図 2), 積分の初期値はユリウス日 2430000.5 日 (1941 年 1 月 6 日 0 時) について小数点下 12 けたまで採ってある。摂動天体の質量はニューカム, ヒルの値と同じである。

仏暦は冥王星以外についてやはり上述のルベリエ表 (1876, 1876, 1877, 1877) に基づき, ゲヨールの修正した表 (1913, 1904, 1910, 表 3 参照) を使っている。

### 小惑星の暦

小惑星の暦は天体位置表にはない。英暦等の天体暦には主な 4 個の小惑星の測定学的位置を掲げている。これは 1971 年まではハーゲットによる数値積分値を座標変換したものであり, 1972 年からはダンカムの数値積分値 (1969, 表 2 参照) に基いている。最近水路部でこの座標変換計算を行った結果, 1972 年以降の暦に掲げてある赤緯は負 (南) のときにすべて 0°1 誤りのあることが解った。

小惑星を網羅した暦はレニングラードの理論天文学研究所による小惑星位置表 (年刊, 第 1 表参照) である。これは IAU に登録してあるすべての小惑星約 1800 個について, 平均軌道要素およびその年の衝付近における測定学的位置が 10 日間隔で記されている。最小単位は 0°1 および 1' である。軌道要素と暦の計算はすべて数値積分によっている。

### 恒星の暦

恒星の位置については, 各国の天体暦の間に全く統一がとれてない。毎年の平均位置は, 例えば天体位置表で

は FK4 の星全部 (1535 個) を赤経  $0^{\circ}001$ , 赤緯  $0^{\circ}01$  まで, 英米暦では GC の星で明るい 1078 個を赤経  $0^{\circ}1$ , 赤緯  $1''$  まで, ソ連暦は FK4, FK4 Sup, N30, FK3, GC から 777 個を選んで FK4 システムで  $0^{\circ}001$ ,  $0^{\circ}01$  まで掲げている。これらと恒星日数または独立恒星数によって任意の日時における視位置は計算できる。

恒星の視位置は, かつては各天体暦に収められていたが, あまりに大量 (200~300ページ) であるので, これを統合する意味で**恒星視位置表** (APFS と略す) が刊行されるようになった。1941~1959年はグリニッジ天文台から, 1960年以降はハイデルベルグの天文計算局から毎年刊行されている (第1表参照)。これは FK4 の星について, 赤緯が南北  $80^{\circ}$  以内の 1483 個の 10 日ごとの視赤経・視赤緯の値, および  $80^{\circ}$  以上の 52 個の毎日の値を掲げている ( $0^{\circ}001$ ,  $0^{\circ}01$  まで)。しかし, ソ連暦は 723 個, スペイン暦は 209 個, インド暦は 69 個の恒星の視位置を掲げている。

天体位置表は他の天体暦と違って, 日月食と併せて星食の詳しい予報を掲げている。次に, 日月食の推算および, 星食予報に用いる黄道帯星表について簡単に述べる。

### 日月食表

日月食の精密な予報・整約には天体暦を用いるので, 直接には用いないが, 予報の参考にし, 過去の日月食を調査し, また数年先の観測計画の立案に用いられる表として有名な**オッポルトツェルの食宝典** (第3図)

Oppolzer, Th. v. (1887): Canon der Finsternisse, (Denkschriften d. Kaiser. Akademie d. Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe, Bd. 52, Wien.)

がある。日食表・月食表・日食中心線図からなり, 日食表では, 紀元前 1207 年 11 月 10 日の金環食から +2161 年 11 月 17 日の皆既食までの 8000 個について, 日食要素および補助表が推算されている。上記 8000 個は部分食を含んでいる。皆既食だけなら, 1 世紀に 66 回おこることである。月食表は, 同期間のもの 5200 個について, 食甚の時刻・継続時間・そのとき月が天頂にある地点の経緯度等が記されている。また, 日食中心線図は, 南緯  $30^{\circ}$  以北の地図の中に, 食の初めの点・中心点・終りの点を書き入れ, これを小円でつらねたものである。

この日月食の推算はオッポルトツェルによる朔望表

Oppolzer, Th. v. (1881): Syzygientafeln für den Mond, (Pub. Astr. Gessellschaft, 16)

にもとづいている。この朔望表は, ハンゼンの月の要素とルベリエの太陽要素にもとづいているので, 平均運動, 永年加速項等は現在の値とは異り, 従って長い年月の間には幾分の誤差を生ずる。しかし, 天文学では, 理論が

一貫しておればよいということもあるので, 過去の日食の研究にはよく利用されている。

これに対して, ニューカムの太陽表とブラウンの理論を採用し, 電子計算機で処理した未来の日食の表も出版されている。出版の目的は明かにされていないが

Meeus, J., Grosjean, C.C. & Vanderleen, W. (1966):

Canon of Solar Eclipse, (Pergamon Press).

がそれである。1898 年 6 月から 2510 年 3 月までの 612 年間 1449 の日食のベッセル要素の毎時値が計算されている。またこの間に 926 回の中心食があり, これについては, 中心線上の経度・緯度・太陽高度・継続時間・食帯の幅が 12 分おきに推算してある。この表はそのまま補間して使えるので, 日食観測の計画などでは大変に便利である。巻末にはオッポルトツェル表とよく似た図が 58 枚ある。

### 黄道帯星表

太陽系天体の位置を黄道帯の星を基準に測定する場合のために作成されたものが黄道帯星表である。天体位置表で星食の予報に用いているものは,

Robertson, J. (1940): Catalog of 3539 Zodiacal Stars for the Equinox 1950.0, (A.P.A.E. vol. X, part 2).

である。黄道を中心幅  $16^{\circ}$  の内側の明るい星 3539 個を含む。観測の平均元期は 1900~1910 年頃で, システムは FK3 とほぼ同じである。この星表は

Hedrick, H.B. (1905): Catalogue of Zodiacal Stars for the Epochs 1900 and 1920 Reduced to an Absolute System, (A.P.A.E. vol. VIII, part 3)

の拡張的改良として調製されたものであり, 前者が 1940 年以後の, 後者がそれ以前の星食観測の整約に広く用いられてきた。ヘドリックの星表の春分点がニューカムの星表 ( $N_2$ ) に近いのに対し, ロバートソンのそれは FK3 とほぼ一致する故に, 採用春分点の位置に約  $0^{\circ}05$  の差のあることは, 両者の観測結果を比較する場合注意を要する。

## 掲 示 板

### 第 11 回「宇宙技術および科学の国際シンポジウム」

上記のシンポジウムが, 6 月 30 日 (月)~7 月 5 日 (土) に東京都千代田区平河町 日本都市センターにおいて開催されます。詳細は下記にお問い合わせ下さい。

〒100 東京都千代田区大手町 1-7-1  
読売新聞社・日本ロケット協会内  
国際シンポジウム事務局

電話 (03) 242-1111 内線 5327