

日食の計算

横浜こども科学館 遠山 御幸

はじめに

私が初めて日食に参加したのは、1976年10月23日、オーストラリア東南端で見られた皆既日食でした。この時の日食には総勢百数十名を越す日食マニアが参加しましたが、結果的には一部の幸運な人達だけがコロナを見られただけにとどまりました。

当時、私は充分に下準備を行ない観測にのぞんだつもりでしたが、日食が終わってみると、まだまだ準備が不十分であるような気がしてなりません。なかでも特に、日食がどのような状況で見られるのかを良く理解していなくてはならないことを痛感したのでした。

最近ではコンピュータの発達にともなって、めんどろな日食の計算も比較的簡単に処理できるようになり、日食の状況を事前に自分の手で知ることが夢ではなくなりました。そこで、これら、一連の日食計算を、できるだけ数表を用いないで計算する方法について述べてみたいと思います。

なお、1984年からの天文定数系の改訂によって、時刻系が暦表時に代って力学時が導入され、また、海上保安庁水路部の天体位置表では、従来、ニューカムとブラウンの理論からそれぞれ計算されていた太陽と月の座標が数値積分で求められるようになりました。このような理由に起因すると思われませんが、現在、私が使用している日食計算プログラムは、1980年から1983年までの天体位置表に付録として掲載された多項式近似によるベッセルの日食要素からIAU(1964)天文定数系によって計算するものであり、その結果と新しい定数系及び理論から計算された予報を比較すると誤差を生じることがわかりました。

以下に述べる計算はIAU(1964)定数系によるものであり、IAU(1976)定数系を用いた計算とは必ずしも一致しない部分があることをご了承いただきたいと思います。ただし、局地予報計算を多項式近似によるものではなく、天体位置表に掲載されているベッセルの日食要素表から行なう場合は、問題がないと思われます。

なお、私の浅学のため、間違いをしているところや誤りを犯しているところがあるかも知れませんが、その点は最初にお詫びを申し上げる次第です。

1. ベッセルの日食要素

日食は太陽・月・地球がちょうど一直線上に並んだときに起ります。このときの様子を、もし私達が地球の外の方から眺めたとしたら、地球の表面には月の影がうつり、それが西から東の方へ移動していくのがわかるでしょう。私達の観測地点が、この月の影の本影の中に入れば皆既日食か金環日食が見られ、半影の中であれば部分日食が見られることとなります。

日食の計算においては、そのほとんどがベッセルの日食要素を基礎としています。毎年発行

される天体暦には、その年に起る日食に関するベッセルの日食要素が掲載されています。このベッセルの日食要素とは次の量を示し、これが10分毎の暦表時における表になっているわけです。

x, y (月の影の座標)、 $\text{sin}d, \text{cos}d$ (月の影の方向)、 μ (時角)、 l_1, l_2 (影の半径)、 $\text{tan}f_1, \text{tan}f_2$ (半影及び本影の半頂角)、ここで月の影の座標と半径は、地球の赤道半径が単位となっています。なお、最近の天体暦には、これらの量に関する多項式が示される場合があります、マイコンやプログラム電卓での計算は、以前とは比較にならないほど便利になっています。

ベッセルの日食要素は、地球に関した月の影の幾何学的な状態について述べられているものです。図1-1において、太陽と月の赤経が一致したとき、地球の中心を通り月の影の軸と直角をなす幾何学的平面を、ベッセル基準面といいます。基準面の x 軸は赤道と交叉し、東へ直行する方をプラス、 y 軸は北へ直行する方をプラスとします。また z 軸は月の影の軸と平行で、月の方向をプラスとします。

影の軸を天球の方へ延ばしたときの点 z の赤経・赤緯をそれぞれ a, d とし、太陽と月の中心距離を G とすると、それらは次式によって表わすことができます。

$$\begin{aligned} G \cos d \cos a &= R \cos \delta \odot \cos \alpha \odot - r \ll \cos \delta \ll \cos \alpha \ll \\ G \cos d \sin a &= R \cos \delta \odot \sin \alpha \odot - r \ll \cos \delta \ll \sin \alpha \ll \\ G \sin d &= R \sin \delta \odot - r \ll \sin \delta \ll \end{aligned} \quad (1-1)$$

ここで

$$g = G/R, b = r \ll / R = \sin \pi \odot / \sin \pi \ll \quad (1-2)$$

とすると、

$$\begin{aligned} g \cos d \cos a &= \cos \delta \odot \cos \alpha \odot - b \cos \delta \ll \cos \alpha \ll \\ g \cos d \sin a &= \cos \delta \odot \sin \alpha \odot - b \cos \delta \ll \sin \alpha \ll \\ g \sin d &= \sin \delta \odot - b \sin \delta \ll \end{aligned} \quad (1-3)$$

ここで、 $\alpha \odot, \delta \odot, R$ はそれぞれ太陽の視赤経・視赤緯及び動径で、 $\alpha \ll, \delta \ll, r \ll$ は月の視赤経・視赤緯及び地心距離、また $\pi \odot, \pi \ll$ は太陽及び月の赤道地平視差を示しています。なお、 b は次式で計算します。

$$b = \sin \pi \odot / R \sin \pi \ll \quad (1-4)$$

ここで $\pi \odot$ は太陽の平均距離における地平視差で 8.794 となっています。

点 z における a, d は式(1-3)より赤道座標で得ることができます。次に、月の直角座標 x, y, z は地球の赤道半径を単位とした比率で基準面を考慮して計算されます。

$$\begin{aligned} x &= r \ll \{ \cos \delta \ll \sin(\alpha \ll - a) \} \\ y &= r \ll \{ \sin \delta \ll \cos d - \cos \delta \ll \cos d \cos(\alpha \ll - a) \} \\ z &= r \ll \{ \sin \delta \ll \sin d + \cos \delta \ll \cos d \cos(\alpha \ll - a) \} \end{aligned} \quad (1-5)$$

ここで

$$r \ll 1 / \sin \pi \ll$$

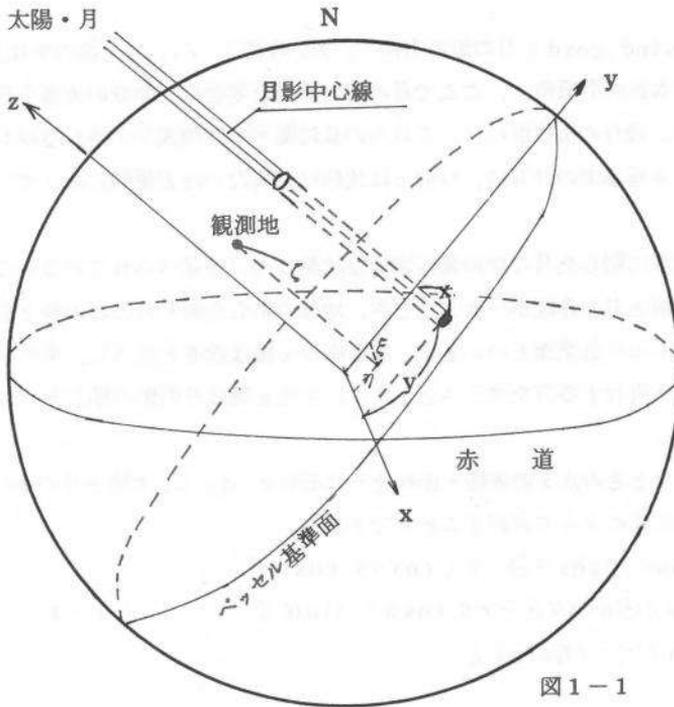


図1-1

(1-6)

x, y 座標はまた、基準面上における影の軸との交点でもあります。

ところで、点zの赤経aは、ベッセルの日食要素においてはaに代って時角μで次式によって与えられます。

$$\mu = \text{暦表恒星時} - a$$

(1-7)

ここで、図1-1におけるベッセル基準面をちょうどま横の方向から見たとすると、太陽・月及び影円錐の半頂角との関係は図1-2のようになります。

この図における半影

半頂角 f_1 及び本影半頂角 f_2 は次式によって表わされています。

$$\sin f_1 = (\sin S_0 + k \sin \pi_0) / gR = 0.004664009 / gR$$

$$\sin f_2 = (\sin S_0 - k \sin \pi_0) / gR = 0.004640792 / gR$$

(1-8)

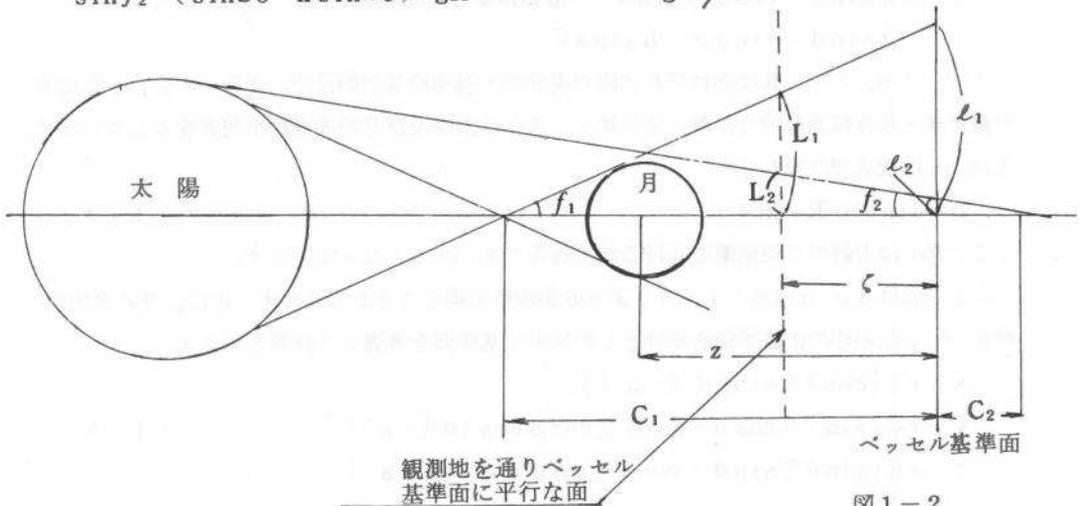


図1-2

ここで S_0, π_0 はそれぞれ太陽の半径及び地平視差で、 k は地球の赤道半径を1とした場合の月の赤道半径で、その値は $k = 0.272281$ となっています。また C_1, C_2 は本影及び半影錐の基準面上から各頂点までの距離で、地球の赤道半径を単位とした比率で表わされます。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= z + k \operatorname{cosec} f_1 \\ C_2 &= z - k \operatorname{cosec} f_2 \end{aligned} \right) \quad (1-9)$$

式(1-8)、(1-9)より、基準面における本影及び半影の比率 ℓ_1, ℓ_2 を次のようにして得ることができます。

$$\ell_1 = C_1 \tan f_1 \quad \ell_2 = C_2 \tan f_2 \quad (1-10)$$

ここで ℓ_2 の符号は皆既日食のときはマイナス、金環日食のときはプラスで ℓ_1 は常にマイナスとなります。

〔計算例1〕 1981年7月31日の皆既日食におけるベッセルの日食要素の計算(太陽の地平視差 π_0 の値は $8.''794$ とする。)

◎ベッセルの日食要素の計算 1981. 7. 31

ET	$\alpha \zeta$	$\delta \zeta$	$\alpha \odot$	$\delta \odot$
2 ^h 00 ^m	8 ^h 37 ^m 08. ^s 170	19°02'00."32	8 ^h 40 ^m 45. ^s 93	18°19'30."43
3 00	8 39 33. 516	18 56 17. 97	8 40 55. 67	18 18 53. 57
4 00	8 41 58. 574	18 50 28. 83	8 41 05. 41	18 18 16. 69

ET	$\pi \zeta$	R	暦表時角
2 ^h 00 ^m	58.15872580	1.01509627	22. ^h 57405083
3 00	58. 5626658	1.01509116	23. 57678861
4 00	58. 5378641	1.01508603	24. 57952667

	2h00mET	3h00mET	4h00mET
$\sin \alpha \zeta$	0.7740165766	0.7672810017	0.7604733073
$\cos \alpha \zeta$	-0.6331653332	-0.6413110512	-0.649369193
$\sin \delta \zeta$	0.3261196433	0.3245501791	0.3229486661
$\cos \delta \zeta$	0.9453285028	0.9458684799	0.9464164829
$\sin \alpha \odot$	0.7638932975	0.7634359207	0.7629782105
$\cos \alpha \odot$	-0.645342568	-0.645883577	-0.6464242032
$\sin \delta \odot$	0.314408648	0.3142390295	0.3140692572
$\cos \delta \odot$	0.9492877341	0.9493438957	0.9494000746
$\sin \pi_0$	0.00004263451511	0.00004263451511	0.00004263451511
$\sin \pi \zeta$	0.01704151757	0.01703436503	0.01702715156
$R \sin \pi \zeta$	0.01729878092	0.01729143335	0.01728402367

b	0.002464596511	0.002465643781	0.002466700805
r	58.68021999	58.70485916	58.72972914
$\cos \delta \odot \cos \alpha \odot$	-0.612615784	-0.6131656311	-0.6137151867
$\cos \delta \odot \sin \alpha \odot$	0.7251545374	0.724763231	0.7243715699
$b \cos \delta \llbracket \cos \alpha \llbracket$	-0.001475182359	-0.00149564943	-0.001515969459
$b \cos \delta \llbracket \sin \alpha \llbracket$	0.001803345098	0.001789433366	0.001775344936
$b \sin \delta \llbracket$	0.000803753335	0.0008002251307	0.0007966177346
$g \cos d \cos a$	-0.61111406016	-0.6116699816	-0.6121992172
$g \cos d \sin a$	0.7233511923	0.7229737976	0.7225962249
$g \sin d$	0.3136048946	0.3134388043	0.3132726394
$\tan a$	-1.183608469 ^(II)	-1.181967105	-1.180328567
a	130°1935971	130°2327983	130°2719954
$\alpha \llbracket -a$	-0°909554	-0°3431474	0°2220632
g^2	0.9950778122	0.9950751623	0.9950729322
g	0.9975358701	0.9975345419	0.9975334241
$\sin d$	0.3143795666	0.3142134844	0.3140472608
$\cos d$	0.9492973649	0.9493523499	0.9494073501
$\sin(\alpha \llbracket -a)$	-0.01587404528	-0.005989016147	0.003875724284
$\cos(\alpha \llbracket -a)$	0.9998739994	0.9999820657	0.9999924894
$\cos \delta \llbracket \sin(\alpha \llbracket -a)$	-0.01500618745	-0.005664821599	0.003668049345
$\sin \delta \llbracket \cos d$	0.309584518	0.3081124751	0.3066098373
$\cos \delta \llbracket \sin d \cos(\alpha \llbracket -a)$	0.2971545186	0.2971993006	0.2972172717
$\sin \delta \llbracket \sin d$	0.1025253521	0.1019780426	0.1014211439
$\cos \delta \llbracket \cos d \cos(\alpha \llbracket -a)$	0.8972847839	0.8979463596	0.8985280165
x	-0.8805663807	-0.3325525541	0.2154235446
y	0.7293950992	0.640656372	0.551622834
z	58.66907872	58.7004212	58.72674339
gR	1.01259494	1.012588495	1.012582243
$\sin f_1$	0.004605996747	0.004606026063	0.004606054502
$\sin f_2$	0.004583068526	0.004583097697	0.004583125995
$k \operatorname{cosec} f_1$	59.11445772	59.11408148	59.11371649
$k \operatorname{cosec} f_2$	59.41019612	59.40981798	59.40945116
C ₁	117.7835364	117.8145026	117.8404598
C ₂	-0.7411174	-0.70939678	-0.68270777
$\tan f_1$	0.004606045606	0.004606074923	0.004606103362

$\tan f_2$	0.004583116659	0.004583145831	0.00458317413
l_1	0.5425163402	0.5426624259	0.542785338
l_2	-0.003396627502	-0.003251268894	-0.003128968589
μ	208° 4171653	223° 4190308	238° 4209046

計算例1では有効数字10桁で示しましたが、これは計算の過程で発生する累積誤差を防ぐため、必ずしも10桁の精度があるわけではありません。最終的に得られるベッセルの日食要素の精度は小数以下6桁程度でしょうか。実際に計算していただくとわかりますが、計算機の桁数や演算精度などによって、必ずしも計算例のような数値にはならないと思われます。

ところで、前述したように天体暦にはこれらの値が10分間隔の暦表時(ET)における表になっているので、実際の日食の計算ではこれらのベッセルの日食要素を計算する必要はありません。ここでは要素が計算されるまでの過程と、日食の計算が基本的には太陽と月の座標から計算されることを理解していただきたいと思います。また計算機の場合には、先に述べた多項式によるベッセル要素を用いるのが便利です。計算例2に多項式による方法を示します。

〔計算例2〕 1981年7月31日の皆既日食、多項式によるベッセルの日食要素

$$x = 0.215423 + 0.5479360(t-t_0) - 4559 \times 10^{-8}(t-t_0)^2 - 806 \times 10^{-8}(t-t_0)^3$$

$$y = 0.551624 - 0.0891732(t-t_0) - 14118 \times 10^{-8}(t-t_0)^2 + 126 \times 10^{-8}(t-t_0)^3$$

$$z = 58.726743 + 0.0238134(t-t_0) - 250765 \times 10^{-8}(t-t_0) + 85 \times 10^{-8}(t-t_0)^3$$

以下 μ 、 d 、 l_1 、 l_2 、 f_1 、 f_2 は省略しますが、計算法は同じです。ここで t_0 は基準時刻でこの場合は4h00mETとなっています。なお $t-t_0$ は時間の単位で表します。任意の時刻 t に2hETを代入して計算すると、

$$x = -0.88056688 \quad y = 0.7293956 \quad z = 58.6690788 \quad \text{となります。}$$

2. 月の位置の補正

天体暦における月の位置とは、月の重心の位置を意味していますが、食現象においては月の形状の中心位置が採用されます。月の形状中心と月の重心とは一致しなくて、その差は月の黄緯において $\Delta\beta = -0.''6$ であるといわれています。

この $\Delta\beta$ を赤経・赤緯の補正量 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\delta$ に変換するには次の公式を用います。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= -\sin \epsilon \cos \lambda \sec^2 \delta \Delta\beta \\ \Delta\delta &= +(\cos \epsilon \cos \lambda \cos \alpha + \sin \lambda \sin \alpha) \Delta\beta \end{aligned} \right\} (2-1)$$

ここで ϵ は黄道傾斜角、 α 、 δ はそれぞれ視赤緯・視黄緯、 λ は視黄経を表わしています。こ

の補正量は食全体にわたって常に扱われます。

〔計算例2〕 月の位置の補正 1979年2月26日の皆既日食

合の時刻、2月26日17h22m09s ET $\Delta\beta = -0^{\circ} 60'$

$\lambda \zeta = 337^{\circ} 52' 13''$ $\alpha \zeta = 22^{\text{h}} 36^{\text{m}} 50^{\text{s}}$ $\delta \zeta = -7^{\circ} 47' 55''$ $\xi = 23^{\circ} 26' 31''$

$\sin \lambda \zeta = -0.376705$ $\sin \alpha \zeta = -0.354990$ $\sec \delta \zeta = 1.009335$ $\sin \xi = 0.397821$

$\cos \lambda \zeta = 0.926333$ $\cos \alpha \zeta = 0.934870$ $\sec^2 \delta \zeta = 1.018758$ $\cos \xi = 0.917463$

$\Delta \alpha \zeta = -0.375427$ $\Delta \beta = 0^{\circ} 225256 = 0^{\circ} 015'$

$\Delta \delta \zeta = (0.794524 + 0.133726) \Delta \beta = -0^{\circ} 56'$

なお、計算例1における月の座標は位置改正量として $\Delta \alpha \zeta = -0^{\circ} 011'$

$\Delta \delta = -0^{\circ} 58'$ をすでに補正してあります。

3. 局地予報計算

私達が日食の観測に出かけようとするとき、どうしても必要となるのが、この局地予報計算によって得られるデータです。この計算を行なうことによって、任意の観測地点における接触時刻、位置角、皆既継続時間、食分などのデータを得ることができ、またこれらのデータをもとに作図をすることによって、日食の状況が一目で理解できるようになります。

1) 観測地点の座標

地球上の任意の観測地点の座標 ξ 、 η 、 ζ は、曆表経度を λ^{\star} 、地心緯度を φ' 、地心距離を ρ とすると、次式によって求めることができます。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \rho \cos \varphi' \sin \theta \\ \eta &= \rho \sin \varphi' \cos d - \rho \cos \varphi' \sin d \cos \theta \\ \zeta &= \rho \sin \varphi' \sin d + \rho \cos \varphi' \cos d \cos \theta \end{aligned} \right) \quad (3-1)$$

ここで、曆表経度 λ^{\star} は観測地点の西経をプラス、東経をマイナスとすると、

$$\lambda^{\star} = \lambda + 1.002738 \Delta T \quad (3-2)$$

ΔT とは世界時を得るため曆表時より減ずる改正量で、

$$\Delta T = \text{ET} - \text{UT} \quad (3-3)$$

の関係があり、毎年の値は天体暦、理科年表などに掲載されます。

また θ は、

$$\theta = \mu - \lambda^{\star} \quad (3-4)$$

で計算することができます。

観測地点の地理緯度を φ 、海拔を $H(m)$ とすると、これに相応する地心座標 $\rho \sin \varphi'$ $\rho \cos \varphi'$ は次式で与えられます。

$$\rho \sin \varphi' = (S+H) \sin \varphi \quad \rho \cos \varphi' = (C+H) \cos \varphi \quad (3-5)$$

ここでHは地球の赤道半径を単位とし、海拔のメートルを掛けて得ることができます。

$$0.1567850 \times 10^{-6} \times H(m) \quad (3-6)$$

地心座標の係数S及びCは、天体暦などの表になっているので、任意の観測地点における値を補間によって求めますが、計算機では次式を用いるのが便利です。

$$\left. \begin{aligned} S &= 0.99497418 - 0.00167082 \cos 2\varphi + 0.00000210 \cos 4\varphi \\ C &= 1.00167997 - 0.00168208 \cos 2\varphi + 0.00000212 \cos 4\varphi \end{aligned} \right) \quad (3-7)$$

もしくは

$$\left. \begin{aligned} S &= (1-e^2) C \\ C &= (1-e^2 \sin^2 \varphi)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right) \quad (3-8)$$

ここでeは地球楕円体の楕円率を表わし、 $e^2 = 0.00669454$ となっています。

2) 影の軸と観測地の距離

観測地を通り、ベッセル基準面に平行な面における半影及び本影の半径 L_1, L_2 は、

$$L_1 = \ell_1 - \zeta \tan f_1 \quad L_2 = \ell_2 - \zeta \tan f_2 \quad (3-9)$$

で求めることができます。また基準面に準拠する観測地と影の中心との距離を Δ 、位置角を Q とし、北から東向き、すなわち y 軸から x 軸方向に測ったものとする、

$$\left. \begin{aligned} x - \xi &= \Delta \sin Q \\ y - \eta &= \Delta \cos Q \\ \Delta^2 &= (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \end{aligned} \right) \quad (3-10)$$

となります。日食において部分食の始めと終りの時刻とは、観測地と影の中心距離 Δ と、半影の半径 L_1 が等しくなる時刻であり、皆既食の始めと終りの時刻は、 Δ と本影の半径 L_2 が等しくなる時刻です。実際の計算では10分間隔の Δ, L_1, L_2 を計算し、それらの値が等しくなる時刻を逆補間法の標準的な技法で求めれば良いわけです。

3) 天頂方向角、食分

天頂からの方向角を V 、極頂対角を C とすると、 V は Q より C を引くことによって得ることができ、 C は次式によって近似的に求めることができます。

$$\left. \begin{aligned} \tan C &= \xi / \eta \\ V &= Q - C \end{aligned} \right) \quad (3-11)$$

(3-11) 式の上の式において、 $\sin C$ の符号は ξ と同じで、 $\cos C$ の符号は η に相応することから C の象限を決定することができます。2) で説明した方法で算出した食の始めと終りの時刻より、手計算の場合は x, y, ξ, η をそれぞれ補間によって求め、各接触時刻における Q, C, V を計算することができます。また計算機による場合は、各接触時刻におけるベッセル要

素を求め、再び計算を行なえば良いでしょう。

次に食分をDとすると、

$$D = (L_1 - d) / (L_1 + L_2) \quad (3-12)$$

で求めることができます。なお、皆既食の始めと終りにおいて、月と太陽の内接点の方向角は、QとVにそれぞれ180°をプラスします。

4) 接触時刻の計算

日食における接触時刻を求めるにはいろいろな方法がありますが、逆補間法を求めるのが一般的なようです。

いま、表4-1のような階差表があったとします。ここで A_{-1}, A_0, A_1, \dots を引数と呼び、それに対応する f_{-1}, f_0, f_1 を関数値といいます。関数値 f_p （この場合 f_p は f_0 と f_1 との間にあるものとする）があらかじめわかっている、それに対応する引数を求める方法が逆補間法です。これを接触時刻の計算にあてはめると、暦表時が引数となり、 d と L_1, L_2 との差、即ち $d_1 = d - L_1, d_2 = d - L_2$ が関数値ということになり、 $d_1 = 0$ に対応する引数が部分食の始めと終り（第1、第4接触）、 $d_2 = 0$ に対応する引数が皆既食の始めと終り（第2、第3接触）となります。

階 差 表		表 4-1		
引 数	関数値	第1階差	第2階差	第3階差
A_{-1}	f_{-1}			
A_0	f_0	$\delta_{-0.5}$	δ_0^2	$\delta_{0.5}^3$
A_1	f_1	$\delta_{0.5}$	δ_1^2	
A_2	f_2	$\delta_{1.5}$		

ところで、求める引数を A_p とすると次のような関係があります。

$$P = \{ f_p - f_0 - B_2 (\delta_0^2 + \delta_1^2) - B_3 \delta_{0.5}^3 - \dots \} / \delta_{0.5} \quad (4-1)$$

$$A_p = (A_1 - A_0) P + A_0 \quad (4-2)$$

ここで、 B_2, B_3 はベッセルの補間係数と呼ばれるもので、天体暦などに表として掲載されていますが、Pとの間に次の関係があります。

$$\left. \begin{aligned} B_2 &= \frac{P(P-1)}{2 \cdot 2!} \\ B_3 &= \frac{P(P-1)(P-0.5)}{3!} \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

実際の計算では、最初Pの値がわからないので、第1近似として B_2 以降の項を少略して

$$P = (f_p - f_0) / \delta_{0.5} \quad (4-4)$$

として B_2, B_3 を求め、次に (4-1) 式を用いてもう一度 P の値を計算します。ここで得た P の値と第1近似の P の値がかなり違っているときには、さらに B_2, B_3 を計算し、改算します。このようにして得た P を (4-2) 式に代入すれば、引数 A_p を求めることができるわけです。

なお、このような逆補間法も含めた補間計算は、手計算で天文計算を行なうときには非常に役立つものです。この方面の参考書をぜひ一読されることをおすすめします。

ところで、前述したように接触時刻の計算では $d = 0$ ですから、(4-4) 式においては、 $f_p = 0$ 従って、

$$P = -\frac{f_0}{\delta_{0.5}} \quad (4-5)$$

となります。

各接触時刻とも同様の方法で計算を行ないますが、算出された接触時刻は暦表時 ET で示されていますので、(3-3) 式を変形して世界時に換算し、さらに観測地での現地時刻に換算します。なお、第2、第3接触では、10分間隔で計算される d_2 の中に、 $d_2 = 0$ が2度入っていることがよくあります。この場合は補間法もしくは多項式を用いて、さらに1分間隔の d_2 を計算し、接触時刻を求めます。

〔計算例3〕 1980年2月16日の皆既日食 インドのANKOLA (東経 $74^\circ 21' 00''$ 、北緯 $14^\circ 38' 30''$ 、海拔 $150m$) における局地予報において、第1接触付近で次の結果を得た。これより第1接触時刻を求める。($\Delta T = 50$ 秒とする)

ET	d_1	第1差	第2差
8h30m	0.11151101		
8 40	0.05155123	-0.05995978	-0.00075424
8 50	-0.00916279	-0.06071402	-0.00082027
9 00	-0.07069708	-0.06153429	

(4-5) 式より $P_1 = 0.84908280$

(4-3) 式より $B_2 = -0.03203530$

(4-1) 式より $P_2 = 0.84991358$

(4-2) 式より $A_p = (8h50m - 8h40m) \times P_2 + 8h40m$
 $= 8h48m4991358ET = 8h48m29.995ET$
 $= 8h47m39.995UT$

食の最大の時刻は d_2 が極小となる時刻、すなわち d_2 の変化量が、0 となる時刻を逆補間法によって求めます。計算例4を参照して下さい。

〔計算例4〕 1980年2月16日の皆既日食、インドANKOLAにおける予報で、最大食付近で次の結果を得た。これより最大食の時刻を求める。

ET	d_2	Δd_2	第1差	第2差
10h09 ^m	0.00373173			
10 10	-0.00318791	-0.00691964	0.00065261	
10 11	-0.00945494	-0.00626703	0.013136	0.01248339
10 12	-0.00258597	0.00686897	0.00011344	-0.01302256
10 13	0.00439644	0.00698241		
$P_1 = 0.47708815$		$B_2 = -0.0624$		
$P_2 = 0.47452822$				
$A_p = (10h11^m5 - 10h10^m5) \times 0.474528 + 10h10^m5$				
$= 10h10^m9.74528ET = 10h10^m58.847ET = 10h10^m08.847UT$				

では、いよいよ局地予報の計算にはいることにしますが、ここでは1979年2月26日に、合衆国北西部、カナダなどで見られた日食を例に、第1接触付近の計算を行なってみたいと思います。この日食には、日本からもカナダのマニトバ州にアマチュアの観測家たちが遠征しており、観測候補地としてあげられていたウィニベックで、どんな状況で見られるか局地予報計算を行なった結果の一部です。

なお、観測候補地であったウィニベックの経度 $\lambda = +97^\circ 08' 3$ 緯度 $\varphi = +49^\circ 53' 9$ 海拔 $H = 0m$ とします。また $\Delta T = 49$ 秒であり、カナダ中部標準時は、UT-6時となっています。

〔計算例5〕 1979年2月26日の皆既日食局地予報

観測地 ウィニベック $\lambda = +97^\circ 08' 3$ $\varphi = 49^\circ 53' 9$ $H = 0m$

ベッセルの日食要素は次のとおり

ET	x	y	sin d	cos d	μ
15h20 ^m	-1.134009	0.604408	-0.152689	0.988274	46°44' 51."9
15 30	-1.041178	0.631489	-0.152645	0.988281	49 14 53. 8
15 40	-0.948344	0.658570	-0.152601	0.988288	51 44 55. 6
15 50	-0.855509	0.685652	-0.152558	0.988295	54 14 57. 5

ET	l_1	l_2	
15h20 ^m	0.537566	-0.008322	$\tan f_1 = 0.0047216$
15 30	0.537580	-0.008309	$\tan f_2 = 0.0046981$
15 40	0.537593	-0.008296	
15 50	0.537605	-0.008284	

(3-6)式より、S=0.995256 C=1.001964

$$\lambda^{\star} = \lambda + 1.002738 \Delta T = 97^{\circ}08'3 + (1.002738 \times 0^{\text{h}}00^{\text{m}}49^{\text{s}}) \times 15 \\ = 97^{\circ}34'3059$$

$$\rho \sin \varphi^1 = 0.761274 \quad \rho \cos \varphi^1 = 0.645411$$

	15h20 ^m	15h30 ^m	15h40 ^m	15h50 ^m
$\theta = \mu - \lambda^{\star}$	-50°59'5309	-48°09'4781	-45°59'4281	-43°09'3753
cos θ	0.634794	0.667900	0.699735	0.730237
sin θ	-0.772682	-0.744251	-0.714403	-0.683194
$\rho \cos \varphi^1 \cos \theta$	0.409703	0.431070	0.451616	0.471303
ξ	-0.498697	-0.480348	-0.461083	-0.440941
η	0.814904	0.818153	0.821275	0.824264
ζ	0.288661	0.309814	0.330156	0.349648
$x - \xi$	-0.635312	-0.560830	-0.487261	-0.414568
$y - \eta$	-0.210496	-0.186664	-0.162705	-0.138612
d	0.669276	0.591079	0.513708	0.437127
L_1	0.536203	0.536117	0.536034	0.535954
d_1	0.133073	0.054962	-0.022326	-0.098827
$\tan Q = (x - \xi) / (y - \eta)$			2.994751	2.990852
Q			251°53'493	251°51'249
tan C			-0.561423	-0.534951
C			330°6'8913	331°8'5539
V			280°8'4580	279°6'5710
D			0.0424	0.1879

※ tan Qの象限は(x-ξ)がsin Qの符号と同じであることから判定する。15h40^mの場合であれば、(x-ξ)はマイナス(y-η)もマイナスであるから、第3象限の角となる。また食分Dの計算においてL₂の値が、まだ知られていないときは、D=(L₁-d)/(2L₁-0.5459)として計算を行なう。

ET	d_1	第1差	第2差
15h20 ^m	0.133073		
15 30	0.054962	-0.078111	0.000823
15 40	-0.022326	-0.077288	0.000787
15 50	-0.098827	-0.076501	
$P_1 = 0.711132$	$B_2 = -0.0514$	$P_2 = 0.710063$	
$A_p = (15h40^m - 15h30^m) \times 0.710063 + 15h30^m = 15h37^m.10063ET$			
$= 15h37^m.06sET = 15h36^m.17sUT$			

このようにして接触時刻を求めたら、この接触時刻における $(x-\xi)$ 、 $(y-\eta)$ などを補間によって求めるか、または多項式を利用してベッセル要素を計算し、接触時刻における Q 、 C 、 V を求めます。なお、他の接触時刻についても計算のやり方はまったく同じですので省略します。

ところで、計算例5のウィニベグにおける局地予報の計算は、当時マイコンが普及しはじめたばかりの頃で、プログラム電卓なども気に入ったものがなく、ごく一般的に使われていた電卓(四則が10桁、関数が8桁のカシオfx-140で、メモリーは1個)を用いて計算を行なったものです。すべての計算を行なうのに約1週間に要しています。

5) 太陽の高度・方位角の計算

日食を実際に観測する場合、太陽の高度・方位角を前もって知っておくと何かと便利です。

ベッセルの日食要素における影の座標を用いて、近似的に太陽の高度・方位角を計算する方法もありますが、ここでは赤道座標から地平座標に変換する基本的な方法について述べてみたいと思います。

太陽の視赤経を α_{\odot} 、視赤緯を δ_{\odot} 、観測地の緯度を φ 、経度を λ とすると、太陽の高度・方位角は次式によって求めることができます。

$$\left. \begin{aligned} \cos h \sin A &= -\cos \delta_{\odot} \sin H \\ \cos h \cos A &= \cos \varphi \sin \delta_{\odot} - \sin \varphi \cos \delta_{\odot} \cos H \\ \sin h &= \sin \varphi \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi \cos \delta_{\odot} \cos H \end{aligned} \right) \quad (5-1)$$

ここで H は太陽の時角を表わし

$$H = \theta - \alpha_{\odot} \quad (5-2)$$

で求められます。また θ は恒星時で、経度 λ の観測地の恒星時は、

$$\theta = \theta_{G0} + 1.002738UT - \lambda \quad (5-3)$$

θ_{G0} は0時UTにおけるグリニッジ恒星時で

$$\theta_{G0} = 24^h \times [0.671262 + 1.00273791(MJD - 40000)] \quad (5-4)$$

で計算できます。MJDは準ユリウス日のことで、ユリウス日JDとの関係は

$$MJD = JD - 2400000.5 \quad (5-5)$$

となっています。なお(5-4)式は〔 〕内の小部分部だけを取り出して24時を掛けます。また(5-3)式はUTで表わされますので(3-3)式よりETをUTに変換します。

ところで、太陽の赤経・赤緯は毎日少しずつ変化しているので、任意の時刻の赤経・赤緯を知りたい場合は、簡単な補間計算を行ないます。

〔計算例6〕 1979年2月26日、15h50^mET.ウィニベックにおける太陽の高度・方位角

	ET	α_{\odot}	δ_{\odot}
2月26日	0h	22h34 ^m 05.s54	-9°01'10."5
27日	0	22 37 52.32	-8 38 46.3

$$\alpha_{\odot} = 22^{\text{h}}34^{\text{m}}06.^{\text{s}}54 + 226.^{\text{s}}78 \times 15^{\text{h}}50^{\text{m}}/24^{\text{h}} = 22^{\text{h}}36^{\text{m}}36.^{\text{s}}$$

$$\delta_{\odot} = -9^{\circ}01'10."5 + 1344."12 \times 15^{\text{h}}50^{\text{m}}/24^{\text{h}} = -8^{\circ}46'24."$$

$$\text{JD} = 2443930.5 = \text{MJD}43930$$

$$\theta_{\text{GO}} = 24^{\text{h}} \times [0.671262 + 3940.759986]$$

$$= 24^{\text{h}} \times 0.431248 = 10^{\text{h}}349952 = 10^{\text{h}}20^{\text{m}}59.^{\text{s}}8$$

$$\theta = 10^{\text{h}}20^{\text{m}}59.^{\text{s}}8 + 1.002738 \times 15^{\text{h}}49^{\text{m}}11.^{\text{s}}\text{UT} - 6^{\text{h}}28^{\text{m}}33.^{\text{s}}2$$

$$= 19^{\text{h}}44^{\text{m}}13.^{\text{s}}53$$

$$\text{H} = 19^{\text{h}}44^{\text{m}}13.^{\text{s}}53 - 22^{\text{h}}36^{\text{m}}36.^{\text{s}}15 = 21^{\text{h}}07^{\text{m}}37.^{\text{s}}38$$

$$\cos h \sin A = 0.675207 \quad \tan A = -1.0383350(\text{II})$$

$$\cos h \cos A = 0.650269 \quad A = 133^{\circ}9$$

$$\sin h = 0.348204 \quad h = 20^{\circ}4$$

なお、方位角Aは北から東まわりに測った値です。

6) 太陽の南中時刻の計算

私達アマチュアが日食観測に出かける場合、観測地において夜間に望遠鏡のセッティングの出来ないことがよくあります。このような場合は、日食の前日もしくは当日に太陽の動きから赤道儀のセッティングを行なわなくてはなりません。こんな時に太陽の南中時刻を知っておくと何かと役に立つものです。

太陽が南中するという事は(5-2)式において、時角Hが0になることですから、

$\theta = \alpha_{\odot}$ ということになります。これを(5-3)式に代入すると、

$$\text{UT} = (\alpha_{\odot} - \theta_{\text{GO}} + \lambda) / 1.002738 \quad (6-1)$$

となります。なお、前述したように太陽の位置は少しずつ変化しているので、第1近似として、南中時刻を仮定し算出された時刻を第2近似として太陽の赤経・赤緯を求め、再び南中時刻を計算します。

なお、ここでは $\text{UT} = \text{ET}$ とみなして計算を行なうことにします。この場合、太陽の赤経にわずかな誤差を生じますが無視します。

〔計算例7〕 1980年2月16日インドのカールワール ($\varphi = 14^\circ 49' 2''$ $\lambda = -74^\circ 08' 0''$)
 における太陽の南中時刻、 $\theta_{GO} = 9^h 40^m 36.^s 3$

	α_{\odot} (暦表時 0^h)	
2月16日	$21^h 54^m 47.^s 2$	
17日	$21^h 58^m 40.^s 6$	$233.^s 4$

第1近似、南中時刻を 6.5UT とする。

$$\alpha_{\odot} = 21^h 54^m 47.^s 2 + 233.^s 4 \times 6.5 / 24 = 21^h 55^m 50.^s 4$$

$$\text{UT} = (21^h 55^m 50.^s 4 - 9^h 40^m 36.^s 3 - 4^h 56^m 32.^s) / 1.002738$$

$$= 7^h 18^m 42.^s 1 / 1.002738 = 7^h 17^m 30.^s 2$$

第2近似、南中時刻を $7^h 17^m 30.^s 2$ とする。

$$\alpha_{\odot} = 21^h 54^m 47.^s 2 + 233.^s 4 \times 7^h 17^m 30.^s 2 / 24^h = 21^h 55^m 58.^s 1$$

$$\text{UT} = (21^h 55^m 58.^s 1 - 9^h 40^m 36.^s 3 - 4^h 56^m 32.^s) / 1.002738$$

$$= 7^h 18^m 49.^s 1 / 1.002738 = 7^h 17^m 37.^s 9$$

従って、南中時刻は $7^h 17^m 38.^s$ となります。

ところで、計算例6及び7において、太陽の赤経・赤緯及びユリウス日などは手計算の場合は、天体暦などから得ますが、計算機を用いる時は、太陽位置の 0.1 の略算式が「天体の位置計算」(長沢工著 地人書館刊)、ユリウス日の算出は「天文計算入門」(長谷川一郎著、恒星社刊)などに詳しいので、ぜひ参考にして下さい。

7.) 日食状況の作図

これまでの計算によって、任意の観測地点における接触時刻、位置角、食分などのデータを得ることができました。これらのデータと太陽の高度・方位角のデータを用いて日食の状況を作図することができます。

なお、観測地から見た太陽及び月の半径には、次の関係があります。

$$\frac{S_{\odot}}{S_{\text{C}}} = \frac{L_1 + L_2}{L_1 - L_2} \quad (7-1)$$

(7-1)式において、月の半径 S_{C} に $k = 0.272281$ の値を用いれば、太陽の半径が求められます。

ところで、ベッセル基準面において、 x 軸は東がプラスとなっているので、図を描くときに x 軸の左側をプラスとして、位置角 Q を反時計回りに測れば天球を内側から見た図を描くことができます。さらに、太陽中心から位置角延長上に d の距離をとって月の円を描けば良いわけです。

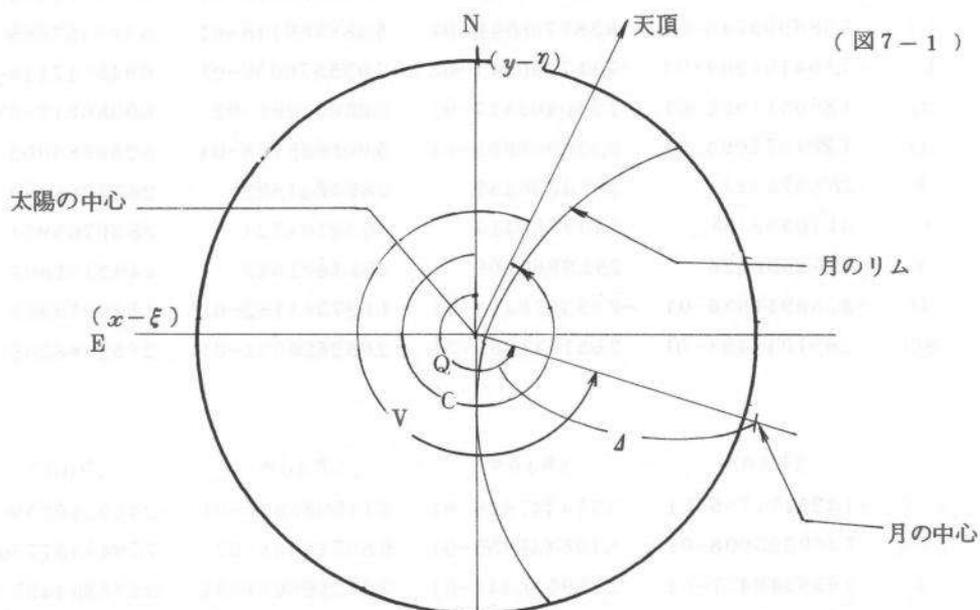
さらに、高度・方位角をそれぞれ縦軸・横軸にとり、先の図の天頂を上に向けて描けば日食

の状況を知ることができます。

〔例1〕 1979年2月26日カナダ・ウイニペックにおける局地予報16^h10^m ETで次の結果を得た。

$x-\xi$	-0.271659	Q	251.°6698	D	0.4750
$y-\eta$	-0.090001	C	334.°3667	S(☾/☉)	1.0383
d	0.286180	V	277.°3032		
L_1	0.535806				
L_2	-0.010074				

太陽の半径を35%とすると、月の半径は36%、 $k=0.272281$ であるから、拡大率は1.33倍、従って $d=38\%$ となる。



(この図は太陽の半径を一定とし、月の半径を変化させる描き方です)

次に1981年7月31日のシベリア、北太平洋における日食の計算例と、日食中の太陽の高度・方位角及びそれらのデータをもとにした作図を掲げます。基礎データは1981年版天体位置表のベッセル要素多項式で、ポケットコンピュータにより10桁の演算を行なったものです。数値の右側に示される-01とか-03は指数を表わし、例えば-6.945434105-01は-0.6945434105を意味します。またS☉は月の半径を0.272281と固定した場

合の太陽の半径を表わしています。

図7-1は北を上、東をx軸の左側にとって描いたもので、図7-2は図7-1をもとに、天頂を上にして描いています。この2枚の図があれば、任意の観測地における日食の様子がひと目で理解できることとなります。

〔例2〕 1981年7月31日シベリア・北太平洋の局地予報 観測地、 $\varphi = 43^{\circ}29'5''$ $\lambda = -161^{\circ}09'8''$ $h = 0$ m (北太平洋上、皆既中心線上) $\Delta T = 51$ 秒

	2h50 ^m ET	3h00 ^m	3h10 ^m	3h20 ^m
$x-\xi$	-6.945434105-01	-6.323703546-01	-5.696275755-01	-5.062608587-01
$y-\eta$	2.173281228-01	1.985807396-01	1.794300076-01	1.598842687-01
d	7.277513737-01	6.628171508-01	5.972191409-01	5.309077474-01
L_1	5.386995745-01	5.387768091-01	5.388589118-01	5.389457685-01
L_2	-7.194104264-03	-7.117260241-03	-7.035570052-03	-6.949147116-03
d_1	1.890517992-01	1.240403417-01	5.83602291-02	-8.0380211-03
d_2	7.205572694-01	6.556998905-01	5.901835708-01	5.239586002-01
P	287.375314	287.4336451	287.4841822	287.5268463
C	31.70563138	34.14558414	36.34101724	38.30765974
V	255.6696826	253.2880609	251.1431649	249.2191865
D	-3.556911636-01	-2.333078414-01	-1.097361182-01	1.510915817-02
S \odot	2.651044453-01	2.651811069-01	2.652626031-01	2.653488205-01

	3h30 ^m	3h40 ^m	3h50 ^m	4h00 ^m
$x-\xi$	-4.422171756-01	-3.774447906-01	-3.118933636-01	-2.455140359-01
$y-\eta$	1.399525998-01	1.196447955-01	9.89713503-02	7.79434377-02
d	4.638348417-01	3.959538444-01	3.272198014-01	2.575894433-01
L_1	0.539037255	5.391332369-01	5.392335702-01	5.393381013-01
L_2	-6.858115084-03	-6.7626076-03	-6.662768051-03	-6.558749294-03
d_1	-7.52024133-02	-1.431793925-01	-2.120137688-01	-0.281748658
d_2	4.569767266-01	3.891912368-01	3.205570333-01	0.251030694
P	287.5615034	287.5878973	287.605499	287.6131023
C	40.06226295	41.62164591	43.00206349	44.21881951
V	247.4992404	245.9662513	244.6034355	243.3942827
D	1.413103364-01	2.689468288-01	3.980949912-01	5.288280353-01
S \odot	2.654396359-01	2.655349161-01	2.656345176-01	2.657382884-01

	4 h 10 m	4 h 20 m	4 h 30 m	4 h 40 m
$x-\xi$	-1.782595325-01	-1.100842518-01	-4.09443463-02	2.92021862-02
$y-\eta$	0.056572889	3.48721714-02	0.012854363	-9.4668706-03
A	1.870212626-01	1.154755854-01	4.291473105-02	3.069836018-02
L_1	5.394466672-01	5.395590963-01	5.396752083-01	5.397948144-01
L_2	-6.450713364-03	-6.33883116-03	-6.223282134-03	-6.10425937-03
d_1	-3.524254046-01	-4.240835109-01	-4.967604772-01	-5.090964542-01
d_2	1.805705492-01	1.091367542-01	3.669144891-02	2.459410624-02
P	287.6074857	287.5770099	287.429535	107.9618452
C	45.28605837	46.21667896	47.02232834	47.7134459
V	242.3214273	241.3603309	240.4072066	60.2483993
D	6.612159099-01	7.953251942-01	9.312188275-01	9.539169173-01
$S\odot$	2.658460662-01	2.659576813-01	2.660729537-01	0.266191697

	4 h 50 m	5 h 00 m	5 h 10 m	5 h 20 m
$x-\xi$	0.100395424	1.726734487-01	0.246072269	3.206257478-01
$y-\eta$	-3.20773039-02	-5.49621777-02	-7.81062273-02	-0.101493712
A	1.053954201-01	1.812097151-01	2.581707658-01	3.363061754-01
L_1	5.399177181-01	5.400437158-01	5.401725961-01	5.403041409-01
L_2	-5.981942059-03	-5.856549476-03	-5.728286245-03	-5.597369105-03
d_1	-0.434522298	-3.588340007-01	-2.820018303-01	-2.039979655-01
d_2	9.941347804-02	1.753531656-01	2.524424795-01	3.307088062-01
P	107.7191812	107.6563388	107.6100494	107.5651234
C	48.29933596	48.78825418	49.18749921	49.50350339
V	59.41984524	58.86808462	58.42255019	58.06162001
D	8.138100451-01	6.717383406-01	5.276542852-01	3.815137123-01
$S\odot$	2.663137159-01	2.664388077-01	2.665667629-01	2.666973654-01

	5 h 30 m	5 h 40 m	5 h 50 m	6 h 00 m
$x-\xi$	0.396365546	4.733210575-01	5.515193477-01	6.309851155-01
$y-\eta$	-1.251084445-01	-1.489338222-01	-1.729528591-01	-0.197148217
A	4.156413945-01	4.961996641-01	5.780019742-01	0.661067043
L_1	5.404381268-01	5.405743232-01	5.407124947-01	5.408524012-01
L_2	-5.464021079-03	-5.328471037-03	-5.190953259-03	-0.005051707
d_1	-1.247967323-01	-4.43746591-02	3.72894795-02	1.202146418-01
d_2	4.101773734-01	0.490871193	5.728110209-01	0.656015336
P	107.5177309	107.4665513	107.4110834	107.3511596
C	49.74191849	49.90769555	50.00515748	50.03806418
V	57.77581241	57.55885575	57.40592592	57.31309542
D	2.332762108-01	8.290519006-02	-6.963208128-02	-2.243644756-01
$S\odot$	2.668303925-01	2.669656161-01	2.671028024-01	2.672417126-01

※ $S\odot$ は $k = 0.272281$ とした時の太陽の半径

皆既日食付近の予報計算

	4h34 ^m E T	4h34 ^m 30 ^s	4h35 ^m	4h35 ^m 30 ^s
$x-\xi$	-1.30088165-02	-9.5054191-03	-5.9994592-03	-2.4909311-03
$y-\eta$	3.9614963-03	2.8465188-03	1.7307983-03	6.143365-04
A	1.35986308-02	9.922482629-03	6.24413112-03	2.565569543-03
L_1	5.397226423-01	5.397286102-01	5.397345865-01	5.397405715-01
L_2	-6.17607758-03	-6.170138479-03	-6.164190894-03	-6.158234852-03
d_1	-5.261240115-01	-5.298061275-01	-5.334904553-01	-5.371750019-01
d_2	7.42255322-03	3.75234415-03	7.9940226-05	-3.592665309-03
P	286.9367487	286.6709987	286.092448	283.8543313
C	47.3119736	47.34692265	47.38159642	47.41599606
V	239.6247751	239.324076	238.7108515	236.4383352
D	9.860882747-01	9.929673233-01	9.998501785-01	1.006733103
S \odot	2.661200454-01	2.661259703-01	2.661319036-01	2.661378453-01

	4h36 ^m	4h36 ^m 30 ^s	4h37 ^m	4h37 ^m 30 ^s
$x-\xi$	1.0201685-03	4.5338464-03	8.0501076-03	1.15689561-02
$y-\eta$	-5.028642-04	-1.6208028-03	-0.002739477	-3.8588846-03
A	1.137372486-03	4.814848376-03	8.503467916-03	1.219556212-02
L_1	5.397465651-01	5.397525667-01	5.397585772-01	5.397645959-01
L_2	-6.152270375-03	-6.14629749-03	-6.140316223-03	-6.134326598-03
d_1	-5.386091926-01	-5.349377183-01	-5.312551092-01	-5.275690337-01
d_2	-5.014897889-03	-1.331449114-03	2.363151693-03	6.061235522-03
P	116.2397336	109.6714401	108.7936013	108.446385
C	47.45012279	47.48397764	47.5175618	47.55087645
V	68.78961081	62.18746246	61.2760395	60.89550855
D	1.009398334	1.00249519	9.955714564-01	9.886415071-01
S \odot	2.661437956-01	2.661497542-01	0.266155721	2.661616964-01

	4h38 ^m	4h38 ^m 30 ^s
$x-\xi$	1.50903969-02	1.86144359-02
$y-\eta$	-4.9790249-03	-6.0998955-03
A	1.589058738-02	1.958841364-02
L_1	5.397706229-01	5.397766583-01
L_2	-6.128328634-03	-6.122322363-03
d_1	-5.238800355-01	-5.201882446-01
d_2	9.762258746-03	1.346609127-02
P	108.2601299	108.1438166
C	47.58392267	47.6167016
V	60.67620723	60.527115
D	9.817063624-01	9.747662664-01
S \odot	2.661676801-01	2.661736719-01

接触時刻

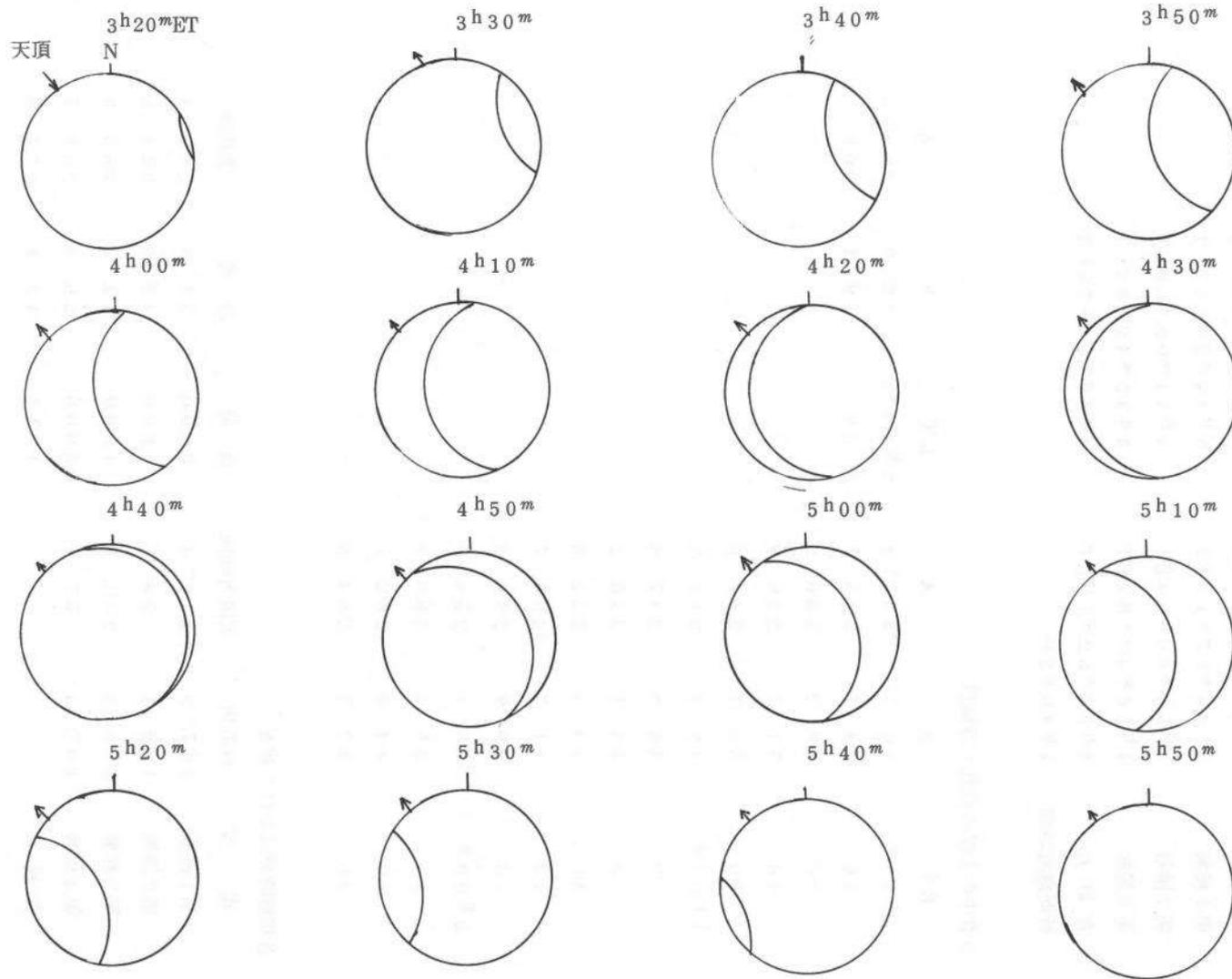
第1接触	3 h 18 ^m 47. ^s 72 ET	3 h 17 ^m 56. ^s 72 UT
第4接触	5 h 45 ^m 27. ^s 17 ET	5 h 44 ^m 36. ^s 17 UT
第2接触	4 h 35 ^m 00. ^s 56 ET	4 h 34 ^m 09. ^s 56 UT
第3接触	4 h 36 ^m 40. ^s 82 ET	4 h 35 ^m 49. ^s 82 UT
食最大	4 h 35 ^m 52. ^s 70 ET	4 h 35 ^m 01. ^s 70 UT
皆既継続時間	1 h 40. ^s 26	

日食中の太陽の高度・方位角

ET	h	A	ET	h	A
3 h 10 ^m	56.° 2	230.° 4	5 h 40 ^m	30.° 9	266.° 3
20	54. 7	233. 7	5 50	29. 1	268. 1
30	53. 2	236. 9			
40	51. 7	239. 8			
50	50. 1	242. 6			
4 h 00 ^m	48. 8	245. 3			
10	46. 8	247. 8			
20	45. 1	250. 2			
30	43. 4	252. 5			
40	41. 7	254. 7			
50	39. 9	256. 8			
5 h 00 ^m	38. 1	258. 8			
10	36. 3	260. 8			
20	34. 5	262. 7			
30	32. 7	264. 5			

各接触時刻における状況

現象	位置角	天頂方向角	食分	高度	方位角
第1接触	287.° 5	249.° 4	0.000	54.° 9	233.° 4
第2接触	106. 1	58. 7	1.000	42. 5	253. 6
第3接触	289. 2	241. 7	1.000	42. 2	253. 9
第4接触	107. 4	57. 4	0.000	29. 9	267. 3
食最大			1.011	42. 4	253. 8



TOTAL SOLAR ECLIPSE OF 31 JULY 1981($\varphi=43^{\circ}29'5''$ $\lambda=-161^{\circ}09'8''$)

(图 7-3)

