日の出･日の入りの私的検討

Rev.1：2017(平成29)年3月02日
(式2.8及び2.11の変更及び
方位角の式(2.12)の追加)

菅原　政治郎

目次

1. 背景
2. 理論
3. 評価結果
4. 考察

1. 背景

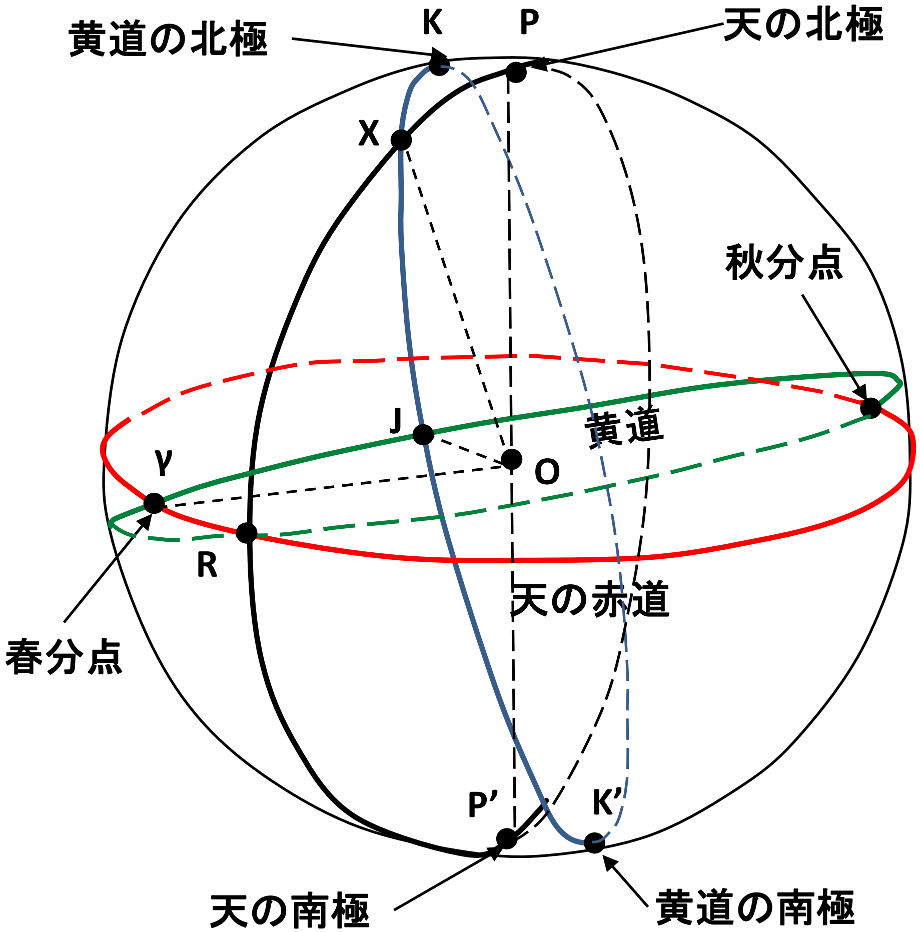
晩秋から初冬の空気の澄んだ日に朝日や夕暮れの風景を眺めていると、その美しさに我を忘れる時が有ります。感動して発した言葉「ああはれ」と言う嘆息の言葉が、素晴らしさを表す「あわれ」になったのは皆様ご存知の事と思います。

万葉の時代から色々の人々に詩歌に読まれたこの光景を前にして、何気なく日の出・日の入りの時間はどの様になっているのかを知りたくて、理論的に検討しました。

理論をプログラミング化し、緯度をパラメータとして、日の出・日の入りの時間と昼間の時間の変化を一年間に亘って計算しました。その結果、極地方で昼間の時間の挙動に面白いものが有ることが分りました。

（尚、以下の天文の基礎知識、理論式は参考文献「日の出・日の入りの計算」(長沢工、地人書館, 1999年12月15日)に基づきました。）

1.1 天文についての基礎知識



日の出・日の入りの時刻等を計算するには、黄道系と赤道系の座標関係を知ることが必要となります。それらの関係を図1.1に示します。

(1)黄道座標系は太陽，月，惑星など，太陽系天体の位置を表わすのに便利です。太陽が移動する天球上の経路として黄道が定義されており、厳密なことを除けば、太陽は何時でも黄緯0度の黄道上にあると考えて良いです。

(2)一方、赤道座標系は恒星の位置を表わすのに都合が良いと言われています。

(3)春分点及び秋分点は黄道と天の赤道の交点です。特に暦の計算では、この春分点 γ を基点として、黄経角度 λs を計算します。

(4)黄道と天の赤道の傾きは、黄道傾角(ε)と言われ、ほぼ23.4度です。(地軸の傾きと同じです)

図1.1　黄道系と赤道系の座標関係

(参考文献の図3.4より転写しました)

(5)黄道を基準にした角度(経度、緯度)をそれぞれ、黄経 λs 、黄緯 β と言います。

図1.1の天球上Xに物体が存在するとした場合、この物体の黄経 λs は、図1.1の∠γOJ です。
又 、黄緯 β は、∠JOX です。 ここに∠は角度の記号で、Oは観測者のいる場所です。

(6)一方、天の赤道を基準にした角度(経度、緯度)をそれぞれ、赤経 α 、赤緯 δ と言います。

赤経 αは、∠γOR です。又 、赤緯 δ は、∠ROXです。

(7) 黄経 λs、黄緯 β、黄道傾角 ε から赤経 α 、赤緯 δ を求める関係式は、以下で与えられます。

Cos[α*cst1]*Cos[δ*cst1] = Cos[β*cst1]*Cos[λs*cst1],
Sin [α*cst1]*Cos[δ*cst1] = -Sin [β*cst1]*Sin[ε*cst1]
+Cos[β*cst1]*Sin[λs*cst1]*Cos[ε*cst1],
Sin [δ*cst1] = Sin [β*cst1]*Cos[ε*cst1]
+ Cos[β*cst1]*Sin[λs*cst1]*Sin[ε*cst1] …(1.1)

ここに、cst1は角度からラジアンに変換する係数で、cst1= π/180 です。
もし計算機が直接度を入力して三角関数を計算できる場合は、cst1= 1となります。

1.2. 日の出・日の入りの定義

天文学では，つぎのような瞬間を「日の出・日の入り」と定義しています。すなわち、

(1)見かけの地平線に対し、
(2)太陽の上縁が接するとき。ただし、
(3)ある一定の大気差を考慮に入れ、
(4)視差の影響も考える　　　　　　　と言うものです。

以下にて各項目に着いて説明します。

(1)見かけの地平線

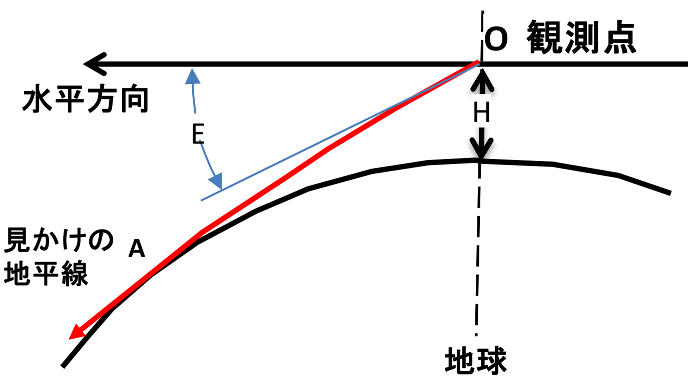


図 1.2　見かけの地平線
(参考文献の図1.6より転写)

観測者Oから見える限界の線が見かけの地平線A(赤色矢印線)です。見かけの地平線Aから観測者Oに達する光は、大気屈折によって左図 1.2 のように曲がります。このような状況のとき，見かけの地平線 A は水平方向より下に見えます。

見かけの地平線の伏角E (単位:°)は，観測者の高さをH(単位:m)とし、大気屈折の効果を含めると以下となります。

$$E = 0.0353333\sqrt{H} \qquad \text{...(1.2)}$$

(2)太陽の上縁が接するとき。

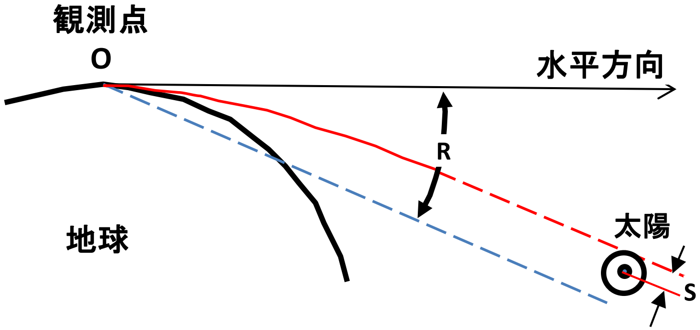


図 1.3 視半径と大気差の影響
(参考文献図1.7 より転写)

暦に書かれている太陽の位置は、太陽の中心の位置です。太陽は見かけの直径が約32‘ですから、太陽の上の縁が見かけの地平線に接した瞬間には，太陽中心は見かけの地平線より約 16’ 下にあります。
従って、日の出の時刻を求めるには、太陽の位置が見かけの地平線より太陽の半径分だけ下に達する瞬間の時刻を計算しなければなりません. (図1.3参照)

(註：32’ は角度の単位で32分を意味し、度に変換すると32/60 = 0.5333°です。又、15°= 1時間に相当します)

地球は太陽の周りを楕円軌道で運動しているので、その距離によって見かけの太陽の大きさが違います。地球-太陽間の距離が1天文単位のとき，太陽の視半径S0は、

$$S_0 = 16'1''.18, \quad \text{...(1.3)}$$

と定義されています。
これから、日の出，日の入りの計算に対し、太陽の距離が r 天文単位のときの視半径Sは以下となります。

$$S = S_0/r = 16'1''.18/r = 0.266994^\circ /r \quad \text{...(1.4)}$$

(3)ある一定の大気差を考慮

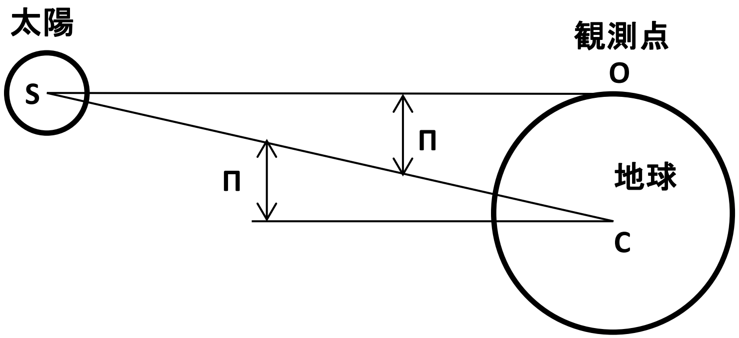


図 1.4　赤道地平視差
(参考文献の図 1.8より転写)

大気層を通過する光は屈折して、上を凸にカーブして進行します。従って、地上で観測する天体は、大気がない場合と比べると、いつも多少高い位置に浮き上がって見えます。この浮き上がりの角度が大気差です。大気差による浮きあがりの量Rは、天体の高度が小さくなり、地平線に近づくにつれて増加します。(図1.3参照)

地平線方向でのRは35’～ 36‘くらいです。大気差があるため、出没する前後の天体は、現実には地平線より多少下にあっても見えます。その結果、大気差によって日の出の時刻は早まり、日の入りの時刻は遅れます。日の出、日の入りの計算では、この大気差による太陽の浮き上がりを考慮に入れなければなりません。計算には、大気差として、

$$R = 35'8'' = 0.585555^\circ \qquad \ldots(1.5)$$

の値をとる習慣になっています。現実には日によって大気状態が変わり、大気差の量も変わりますが、計算ではそれを一切無視します。

(4)視差の影響

暦に書かれている天体の位置は，地球の中心から見た位置です。恒星のように非常に遠い天体なら，地球の中心から見た位置も地球の表面から見た位置も実質的な差はないです。しかし、月、太陽など地球に近い天体では、そこにはっきりした差が生じます。日の出，日の入りは地球表面で見る現象ですから、太陽の位置を地球表面から見た位置に修正して考えなければなりません。

日の出，日の入りのとき，地表で、観測者Oはほぼ水平方向に太陽を見ます。このときの地球と太陽の関係は大略、図1.4の様になります。このとき太陽中心から見て、地球中心Cと観測者0をはさむ角が太陽の視差Π(パイ)です。専門的にはこの角を赤道地平視差と言います。この図から，地表で日の出のときの太陽を地球中心から見れば，地表で見た方向よりもΠだけ高い位置にあることが分ります。日の入りでも同様です。

地球-太陽間の距離 r が1天文単位のとき，太陽の視差Π。は

$$\Pi_o = 8''.794148 \qquad \dots (1.6)$$

と定義されています。従って、太陽までの距離がr天文単位のとき，視差Πは、

$$\Pi = \Pi_o/r = 8''.794148/r = 0.0024428^\circ/r \qquad \dots (1.7)$$

となります。

1.3　暦豆知識

太陽の通い道が黄道であることは、前節にて説明しました。日本の二十四節季は黄経を春分を起点に、15度毎に分割した日です。ちなみに2017年の二十四節季は以下です。(中央標準時は、東経135度(明石市)の位置の時刻です)

名称	太陽黄経	月日	中央標準時	名称	太陽黄経	月日	中央標準時
小寒	285	1月5日	12時56分	小暑	105	7月7日	6時51分
大寒	300	1月20日	6時24分	大暑	120	7月23日	0時15分
立春	315	2月4日	0時34分	立秋	135	8月7日	16時40分
雨水	330	2月18日	20時31分	処暑	150	8月23日	7時20分
啓蟄	345	3月5日	18時33分	白露	165	9月7日	19時39分
春分	0	3月20日	19時29分	秋分	180	9月23日	5時02分
清明	15	4月4日	23時17分	寒露	195	10月8日	11時22分
穀雨	30	4月20日	6時27分	霜降	210	10月23日	14時27分
立夏	45	5月5日	16時31分	立冬	225	11月7日	14時38分
小満	60	5月21日	5時31分	小雪	240	11月22日	12時05分
芒種	75	6月5日	20時37分	大雪	255	12月7日	7時33分
夏至	90	6月21日	13時24分	冬至	270	12月22日	1時28分

2. 理論 (理論式は参考文献「日の出・日の入りの計算」(長沢工、地人書館, 1999年12月15日)に基づきました。)

本章では、前章で検討した理論式等を基に、実際に日の出・日の入り等を求める手順を中心に説明致します。

2.1 太陽−地球間距離 r

太陽−地球間距離 r(以下、「太陽距離」と記載)は、黄経と共に、日の出・日の入りの時刻算出の基本情報ですので、ここに説明します。

太陽距離は、時刻変数Tを使用して以下の略算式により与えられます。ここで時刻変数 Tは、J2000.0(2000年1月1日力学時正午)からの経過日数をK としたとき, T = K/365.25で与えられるものです。
尚、r = 1は、1天文単位を表わし、1.495979×10^8 km です。
太陽距離 r は、参考文献の表3.11では、以下の様に表記されています。

q=(0.007256−0.0000002T)* Sin[(267.54+359.991T)*cst1]
+0.000091* Sin[(265.1+719.98T)*cst1]+0.00003* Sin[90.*cst1]
+0.000013* Sin[(27.8+4452.67T)*cst1]
+0.000007* Sin[(254+450.4T)*cst1]
+0.000007* Sin[(156+329.6T)*cst1]
r= 10^q ・・・(2.1)

日本標準時の観測日をYY年MM月DD日0時0分とした場合、この時の時刻変数 T は以下で与えられます。但し、1月、2月の場合は、(YY−1)年(12+MM)月DD日とします。

Y1= (YY−2000), 但しMM= 1, 2の場合は、Y1= (YY−1−2000)
M1= MM, 但しMM= 1, 2の場合は、M1= 12+MM
KK= 365* Y1 + 30* M1 + DD −33.875 + Int[3*(M1+1)/5] + Int[Y1/4]

$$T=(KK+\Delta T/86400)/365.25 \quad \text{(単位:年)} \qquad \cdots(2.2)$$

ここに、ΔT:地球自転の遅れ; 64秒

Int[x]:ガウス記号、例、Int[−1.5]= −2、Int[0.5]= 0、Int[2.5]= 2

2.2 太陽黄経λs

太陽黄経λs は、時刻変数 T を使用して以下の略算式により与えられます。
単位は度で、春分の該当度をλs = 0 と設定し、秋分の該当度をλs = 180 と設定しています。
$(0 \leqq \lambda s \leqq 360)$
(参考文献の表3.11より引用)

$$
\begin{aligned}
\lambda s =& (280.4603+360.00769T \\
&+(1.9146-0.00005T)*Sin[(357.538+359.991T)*cst1] \\
&+0.02*Sin[(355.05+719.981T)*cst1] \\
&+0.0048*Sin[(234.95+19.341T)*cst1] \\
&+0.002*Sin[(247.1+329.64T)*cst1] +0.0018*Sin[(297.8+4452.67T)*cst1] \\
&+0.0018*Sin[(251.3+0.2T)*cst1] +0.0015*Sin[(343.2+450.37T)*cst1] \\
&+0.0013*Sin[(81.4+225.18T)*cst1] +0.0008*Sin[(132.5+659.29T)*cst1] \\
&+0.0007*Sin[(153.3+90.38T)*cst1] +0.0007*Sin[(206.8+30.35T)*cst1] \\
&+0.0006*Sin[(29.8+337.18T)*cst1] +0.0005*Sin[(207.4+1.5T)*cst1] \\
&+0.0005*Sin[(291.2+22.81T)*cst1] +0.0004*Sin[(234.9+315.56T)*cst1] \\
&+0.0004*Sin[(157.3+299.3T)*cst1] +0.0004*Sin[(21.1+720.02T)*cst1] \\
&+0.0003*Sin[(352.5+1079.9T)*cst1] +0.0003*Sin[(329.7+44.43T)*cst1]
\end{aligned}
$$

$$\cdots(2.3)$$

2.3　日の出・日の入り・南中時間の算出

2.3.1　日の出時間の算出

日の出の時刻については、日の出の高度 k、それに対する時角 tk、及び仮定時刻 d に対する時角 t を求め、tk = t　になるようにd を調整します。この d が日の出の時刻となります。
式(2.2)で与えられる時刻変数 T はYY年MM月DD日の0時0分の値です。日の出時間を d 時間とすると、0時0分からd 時間までの追加部分を T に加えてやり、太陽黄経、太陽距離等を再度計算する必要があります(日の入りの場合も同様です)。このため、繰り返し計算(iteration)が必要となります。繰り返し計算の流れは以下の図2.1となります。 尚、時角 tk は日の出の場合、負の値に設定します。

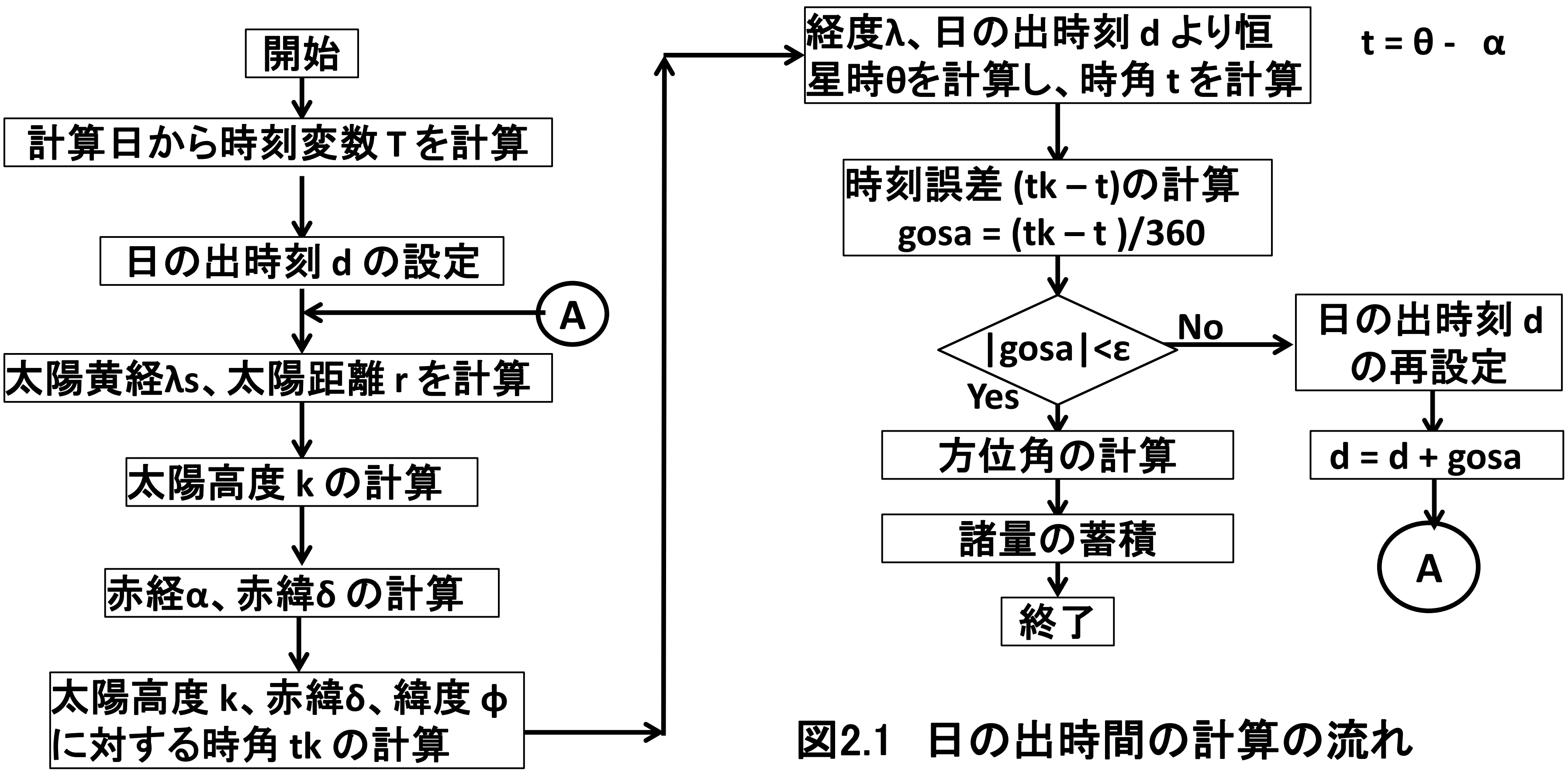


図2.1　日の出時間の計算の流れ

(1) 太陽高度 k の計算

太陽の出没高度 k は以下で与えられます。

$$k = -S - E - R + \Pi \quad (\text{単位:}°) \qquad \cdots(2.4)$$

ここに、

S :太陽の視半径、　E:見かけの地平線の伏角

R : 大気差による太陽の浮きあがりの量、　Π :太陽の視差

上記 S、E、R 及び Π は、1.2節で示した様に、太陽距離 r を用いて以下で与えられます。

$S = 0.266994/r$　、$E = 0$.（式(1.2)で H = 0と設定）

$R = 0.585556$　、$\Pi = 0.00244828/r$　$\cdots(2.5)$

(2) 赤経 α 、赤緯 δ (単位:°) の計算

日の出，日の入りの計算に使用するのは太陽の赤道座標ですので、略算式で算出した黄経λsを、赤経 α 、赤緯 δに換算する必要があります。それらの関係は以下で与えられます。

（尚、式(1.1)も同様の結果を与えます。）

$$\mathrm{Tan}[\alpha * cst1] = \mathrm{Tan}[\lambda s * cst1] * \mathrm{Cos}[\varepsilon * cst1]$$

$$\mathrm{Sin}[\delta * cst1] = \mathrm{Sin}[\lambda s * cst1] * \mathrm{Sin}[\varepsilon * cst1] \qquad ...(2.6)$$

ここに、ε: 黄道傾角　(ほぼ一定値、23°.4)

黄道傾角 εは、以下の式で与えられます。

$$\varepsilon = 23.439291 - 0.000130042T \quad (\text{単位:}°) \qquad ...(2.7)$$

(3) 時角 tk （単位:°）の計算

太陽の出没高度 k、赤緯 δ、観測地点の緯度がφの場合の時角 tk は以下で与えられます。

$$t_k = ArcCos\left[\frac{Sin[k * cst1] - Sin[\delta * cst1] \cdot Sin[\varphi * cst1]}{Cos[\delta * cst1] \cdot Cos[\varphi * cst1]}\right] * \frac{180}{\pi} \quad \text{...(2.8)}$$

(4) 恒星時 θ （単位:°）の計算

恒星時 θは、時刻変数 T 、日の出時刻 d 、世界時(グリニッジ天文台)と日本標準時の時間差 tdef 及び観測地の経度 λ を用い、以下で与えられます。

$$\Theta = 100.4606 + 360.007700536 * T + 3.879 * 10^{-8} * T^2 + 360 * d$$
$$-15 * tdef + \lambda \quad \text{...(2.9)}$$

但し、恒星時 θ の単位は度で、0 ≦ θ ≦ 360 に設定する必要があります。時間差 tdef = 9 です。又、時刻 d は相対値で、d = 1 は、24時を意味します。

恒星時 θ が設定された場合、対応する時角 t は、赤経 α を用いて、以下で与えられます。

$$t = \theta - \alpha \quad \text{...(2.10)}$$

(5) 太陽高度 h（単位:°）の計算

観測者がいる地点の緯度をφとし，太陽の時角を t 、赤緯をδ としたとき、太陽高度 h は以下で与えられます。

$$\mathrm{Sin}[h*cst1] = \mathrm{Sin}[\delta*cst1]*\mathrm{Sin}[\phi*cst1] + \mathrm{Cos}[\delta*cst1]*\mathrm{Cos}[\phi*cst1]*\mathrm{Cos}[t*cst1]$$

$$h = \mathrm{ArcCos}\{\mathrm{Sin}[\delta*cst1]*\mathrm{Sin}[\phi*cst1] + \mathrm{Cos}[\delta*cst1]*\mathrm{Cos}[\phi*cst1]*\mathrm{Cos}[t*cst1]\}*180/\pi \quad \cdots(2.11)$$

式(2.11)の太陽高度 h と、式(2.4)で与えられる出没高度 k が等しくなる時刻 d 、或いは、式(2.8)の時角 tk と式(2.10)の時角 tが等しくなる時刻 d が日の出時刻になります。

(6) 日の出･日の入りの方位角 A（単位:°）の計算

観測者がいる地点の緯度をφとし，日の出･日の入り時の太陽の時角を tk 、赤緯をδ としたとき、日の出･日の入り各時の方位角 A は以下で与えられます。

$$Tan[A \cdot cst1] = \frac{-Cos[\delta \cdot cst1] \cdot Sin[t_k \cdot cst1]}{Sin[\delta \cdot cst1] \cdot Cos[\varphi \cdot cst1] - Cos[\delta \cdot cst1] \cdot Sin[\varphi \cdot cst1] \cdot Cos[t_k \cdot cst1]}$$

$$A = ArcTan\left[\frac{-Cos[\delta \cdot cst1] \cdot Sin[t_k \cdot cst1]}{Sin[\delta \cdot cst1] \cdot Cos[\varphi \cdot cst1] - Cos[\delta \cdot cst1] \cdot Sin[\varphi \cdot cst1] \cdot Cos[t_k \cdot cst1]}\right] \cdot \frac{180}{\pi}$$

･･･(2.12)

2.3.2 南中時間の算出

南中時間の算出手法は、前出の日の出時間の算出法と同様で、太陽黄経、赤経等を用います。流れは以下の図2.2に示すものです。判断基準は「恒星時 θ が赤経 α に等しくなる時間」であると言うことです。
各パラメータの算出方法は、2.3.1項の日の出時間の算出法で説明しましたので、説明は割愛します。

理科年表では、南中時刻に着いては、秒まで記載しています。これは「簡単な測量では，方位角を決めるのに太陽の南中を利用することがある」と言われていることと、空気の屈折影響が少ないためと言われています。(参考文献より)

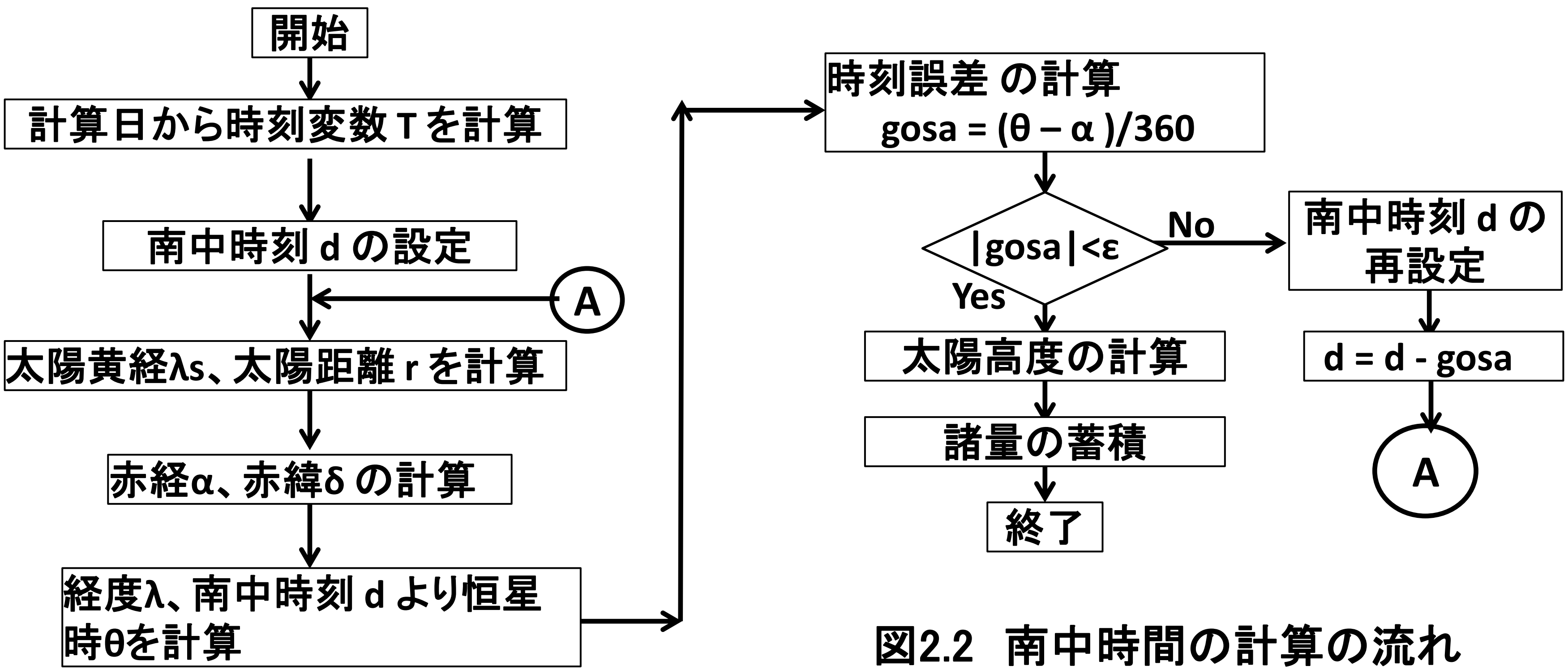


図2.2 南中時間の計算の流れ

2.3.3 日の入り時間の算出

日の入り時刻の算出法は、日の出時刻算出法と同様です。日の入りの高度k、それに対する時角 tk、及び仮定時刻 d に対する時角 t を求め、tk = t になるようにd を調整します。このd が日の入りの時刻となります。流れは以下の図2.3となります。
尚、時角 tk は必ず正の値に取ります。

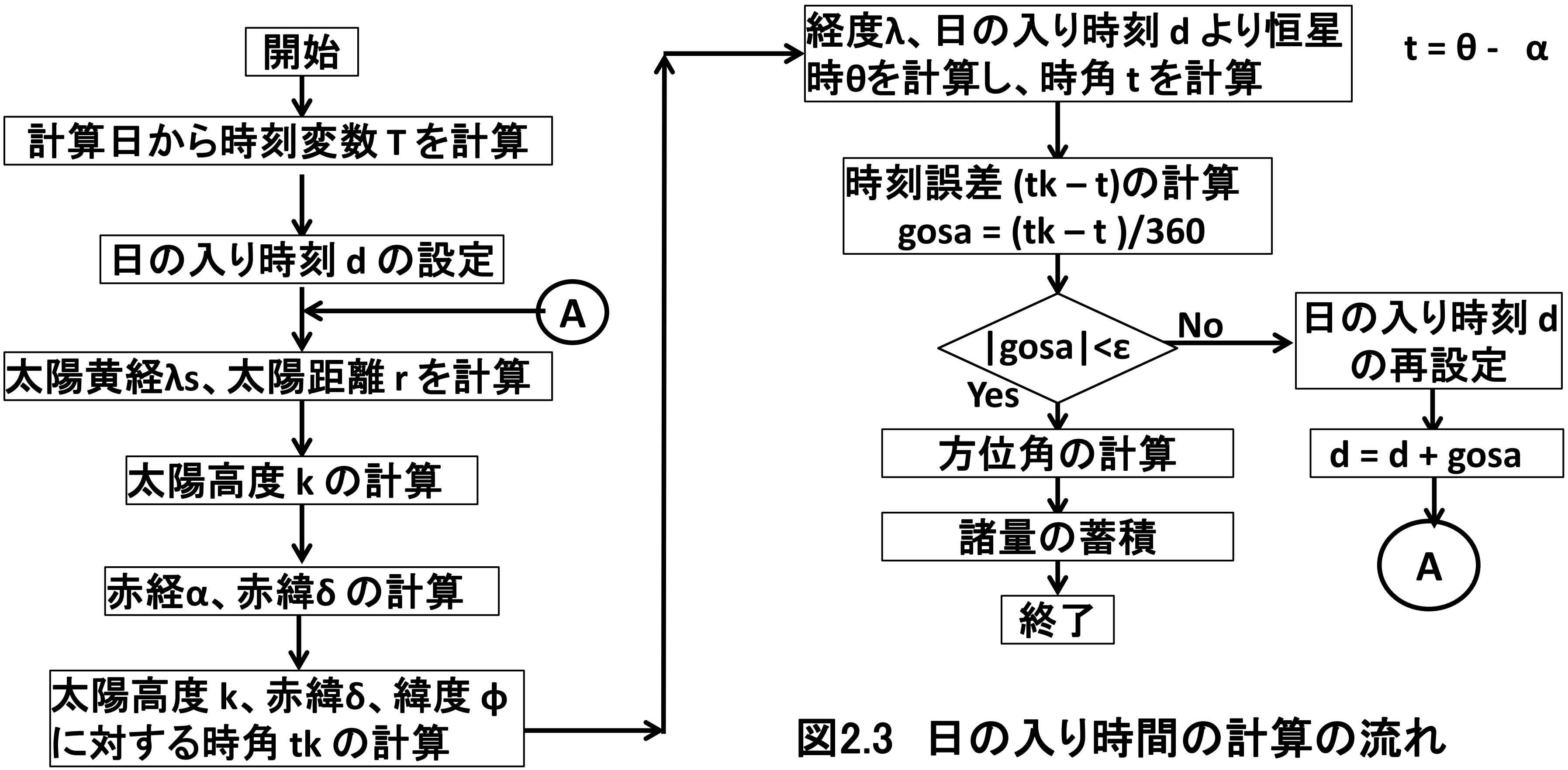
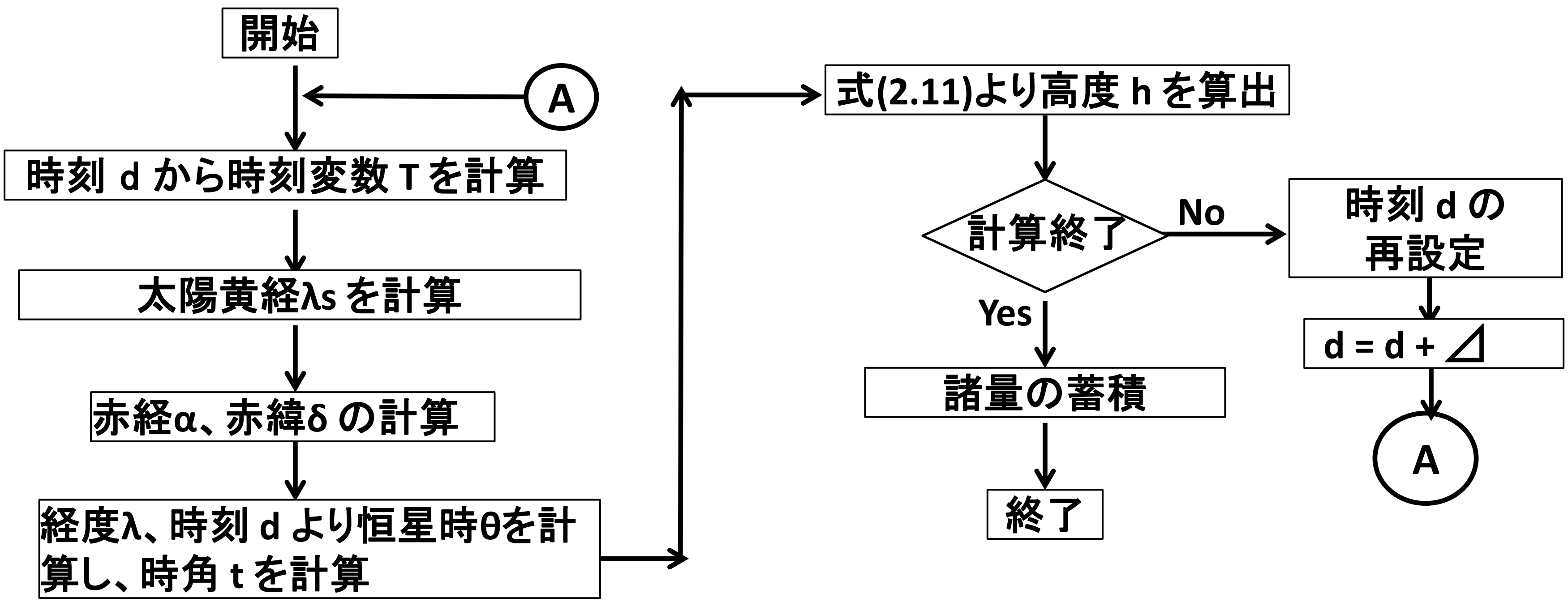


図2.3 日の入り時間の計算の流れ

2.4 太陽高度の算出

計算指定日の日の出から日の入りまでの太陽高度を算出する手順を、図2.4に示します。太陽高度 h は、式(2.11)で与えられますので、時刻 d を変数として、日の出時刻 tsr から日の入り時刻 tss までサーベイすることにより太陽高度の時間変化を求めます。

但し、以下に注意します。
(1)白夜の時、tsr= 0、tss = 1に設定します。（1=24時に対応します。）
(2)極夜の時、:計算は停止します。(極夜とは、一日中、太陽が地平線の下にある状態で、太陽が見えない状態を言います。)



$t = \theta - \alpha$

図2.4 太陽高度の計算の流れ

3. 評価結果

旧東京天文台の在った東経139度を中心に、2017年の日の出、日の入り時刻等の挙動を解析しました。

旧東京天文台は日本経緯度原点の場所で、東京都港区麻布台2丁目18番1に在りました。東経139° 44’ 28”.8869、北緯 35° 39’ 29”.1572 です。

旧東京天文台及び2017年の選定理由は、理科年表と解析結果の対比が容易で、解析の妥当性確認が出来るためです。なお、理科年表の「暦」の部では、旧東京天文台での日の出、日の入り時刻等を重点的に記載されています。

解析内容は以下です。

(1)旧東京天文台における、2017年、1月1日(元旦)、3月20日(春分)、6月21日(夏至)、9月23日(秋分)、12月22日(冬至)の太陽の高度変化、黄経、赤経、赤緯、太陽距離の算出

(2)東経139度44分で、緯度を北緯0度(赤道)、20、60、70、90度(北極点)、南緯35度をパラメータとした場合の、日の出、日の入り時刻、南中時の太陽高度の年間変化、及び太陽距離の年間変化。

3.1 旧東京天文台の評価結果

3.1.1 1月1日(元旦)、3月20日(春分)、6月21日(夏至)、9月23日(秋分)、12月22日(冬至)の結果

日の出入の時刻、黄経、赤経等の結果を表3.1-1に、及び各日の太陽の高度を図3.1.1-1～5に示します。

(1)黄経、赤経、赤緯に着いては、理科年表では世界時、即ち英国グリニッジ天文台での値が記載されています(本資料では緑色記載)。黒字の値は、東京での解析値です。時間的に9時間の差が有りますので、数値に差が出てきますが、解析に用いたフィッティング式の誤差も少し有ります。

(2)日の出入りと南中時間の解析値は、理科年表の値と良く合っています。ちなみに、理科年表では日の出入りの時刻は分までで、秒は記載していません。これは空気の屈折の影響で正確には設定できないためと言われています。

(3)方位角の0度及び360度は北、90度は東、180度は南、270度は西を示します。日の出・入りの方位角について、春分及び秋分では東です。夏至では東から約30度北に寄った方角(寅)から陽が上り、西から約30度北に寄った方角(戌)に陽が沈みます。冬至では東から約30度南に寄った方角(辰)から陽が上り、西から約30度南に寄った方角(申)に陽が沈みます。

(4)太陽高度については、南中高度が高いほど、時間と高度の関係は直線的に推移し、南中高度が低いほど、直線推移から外れます。それは図3.1.1-1と3.1.1-3を比較すれば良く分かります。

(5)昼間の長さについては、後述3.1.2項でも説明しますが、夏至の日が一番長く、冬至の日が一番短くなります。但し、当該日の日の出・日の入りの時刻が一番早い、或いは遅いというわけでは有りません。(表3.1-2を参照ください)

表3.1-1　旧東京天文台における日の出入等の挙動

項目		1月1日（元旦）	3月20日（春分）	6月21日（夏至）	9月23日（秋分）	12月22日（冬至）
通日		1	79	172	266	356
黄経（度）		280.37/278..48	359.19/359.33	89.47/88.63	179.79/180.9	269.94/269.05
赤経（度）		281.28/281.5	359.26/359.5	89.42/89.75	179.81/180.0	269.93/270.25
赤緯（度）		−23.03/−23.00	−0.32/−0.10	23.44/23..43	0.08/−0.05	−23.44/−23.43
太陽距離（天文単位）		0.98372 0.98338	0.99540 0.99581	1.01621 1.01618	1.00362 1.00322	0.98391 0.98381
日の出	時刻	6時50分34秒 6時51分	5時45分02秒 5時45分	4時25分24秒 4時25分	5時29分21秒 5時29分	6時47分03秒 6時47分
	方位角（度）	118.06	89.67	59.99	89.40	118.61
南中	時刻	11時44分31秒 11時44分32秒	11時48分31秒 11時44分33秒	11時42分45秒 11時42分46秒	11時33分26秒 11時33分28秒	11時39分30秒 11時39分31秒
	高度（度）	31.35	54.22	77.78	54.24	30.91
日の入	時刻	16時38分33秒 16時39分	17時52分33秒 17時53分	19時00分04秒 19時00分	17時36分56秒 17時37分	16時31分56秒 16時32分
	方位角（度）	241.98	270.58	300.01	270.36	241.39
昼間の時間		9時間48分	12時間08分	14時間35分	12時間08分	9時間45分

(赤字：理科年表の数値)　　(緑字：理科年表の世界時の数値)

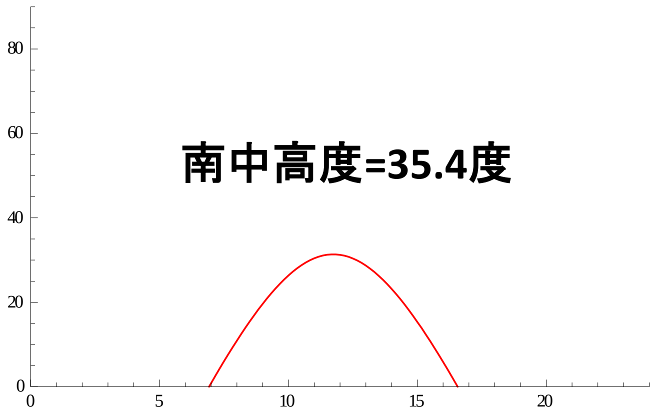


図3.1.1-1　1月1日の高度変化

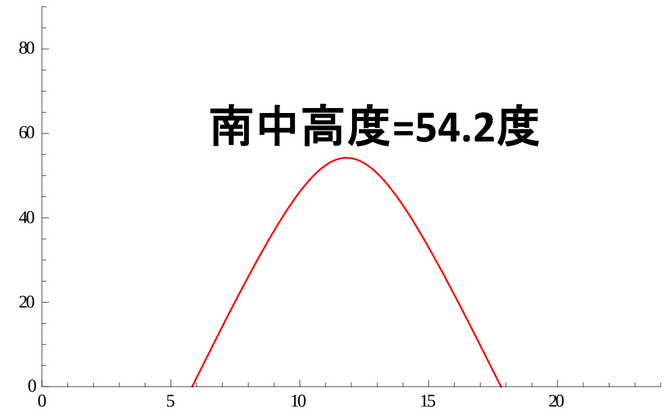


図3.1.1-2　3月20日の高度変化

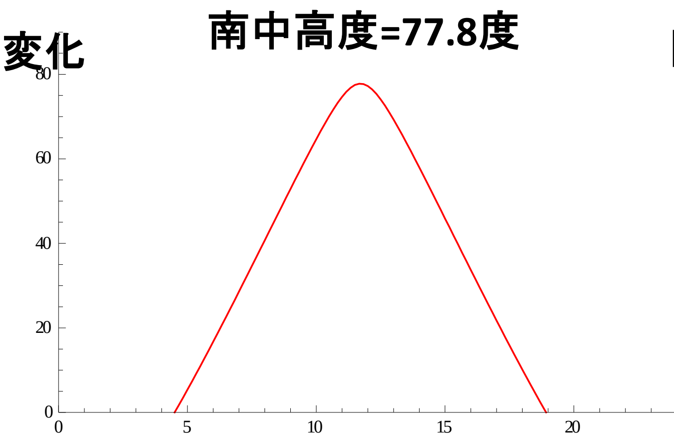


図3.1.1-3　6月21日の高度変化

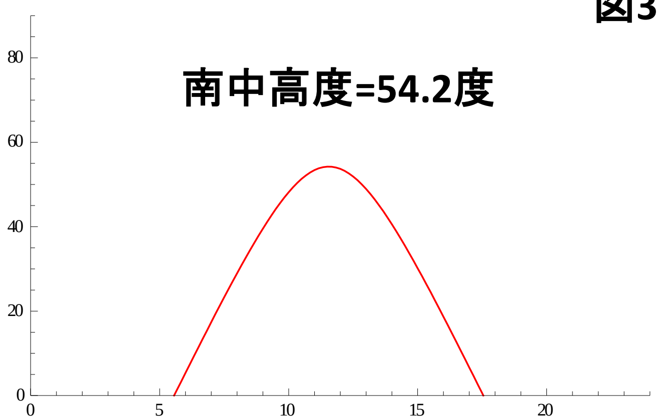


図3.1.1-4　9月23日の高度変化

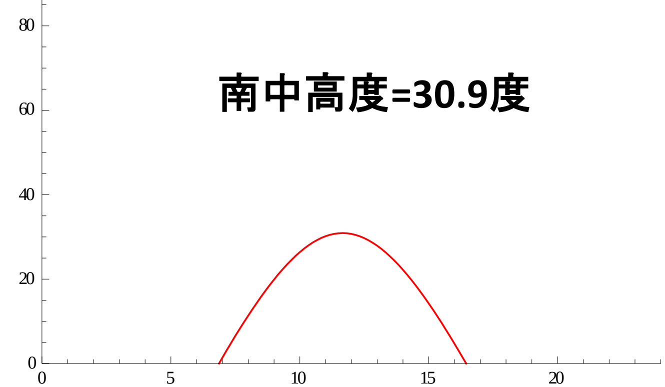


図3.1.1-5　12月22日の高度変化

3.1.2 2017年間の日の出･日の入りと昼間の年間変化

結果を表3.1-2及び図3.1.2-1～3.1.2-5に示します。

(1)図3.1.2-1は、日の出･日の入り時刻と、昼間の長さの変化です。詳細は表3.1-2に示しましたが、図に示す様に、夏至(6月21日)に最も昼間が長く、冬至(12月22日)に最も短いことが解析からも裏付けられました。ちなみに夏至と冬至の昼間の長さの差は、約4時間50分です。

日の出の一番早い日は6月13日で夏至より8日前で、日の入りの一番遅い日は6月29日で夏至より8日後です。又、日の出の一番遅い日は1月7日で冬至の16日後で、日の入りの一番早い日は12月6日で冬至より16日前です。
(ちなみに、夏至の近傍の日の出の時間を理科年表で調べますと、6月5日から6月21日まで日の出時間は4時25分になっています。上記6月13日は丁度真中です。)

この様に、夏至は一番昼間の長さが長いですが、日の出が一番早い日ではありませんし、日の入りが一番遅い日でもありません。

(2)図3.1.2-2は、南中時の太陽高度の年間変化図です。夏至の時が最も高度が高く、冬至の時が最も低い事が分ります。東京(日本)では、緯度の関係から、単峰性の高度変化になっています。即ち、夏に一番陽が高く、冬が一番陽が低くなっていることは、日常実感として分ります。

(3)図3.1.2-3は、太陽距離を天文単位で表したものです。距離の解析最大値は1.0171で7月2日ですが、理科年表による遠日点は7月4日の1.0167です。又、解析最小値は0.9833で1月6日ですが、理科年表による近日点は1月4日の0.9833です。距離算出の式は略算用のフィッティング式ですので、誤差が出たものと思われます。

(4)図3.1.2-4は、日の出の方位角の変化です。冬至に東南(東から南へ約30度の角度)で陽が上り、徐々に北へ移行し、夏至の日に東北(東から北へ約30度の角度)で陽が上ります。夏至を境に、日の出の方位角は徐々に南下し、春分及び秋分の日は、真東から陽が上ります。

(5)図3.1.2-5は、日の入りの方位角の変化です。冬至に西南(西から南へ約30度の角度)で陽が沈み、徐々に北へ移行し、夏至の日に西北(西から北へ約30度の角度)で陽が沈みます。春分及び秋分の日は、真西に陽が沈みます。

表3.1-2　旧東京天文台における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	1月7日 (7)	12月22日 (356)	6月29日 (180)	6月21日 (172)	6月21日 (172)	6月21日 (172)	7月2日 (183)
	6時51分7秒	118.61度	19時0分55秒	300.01度	77.78度	14.577時間	1.0171
最小/最早	6月13日 (164)	6月21日 (172)	12月6日 (340)	12月21日 (355)	12月22日 (356)	12月22日 (356)	1月6日 (6)
	4時24分33秒	59.99度	16時27分34秒	241.39度	30.91度	9.748時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

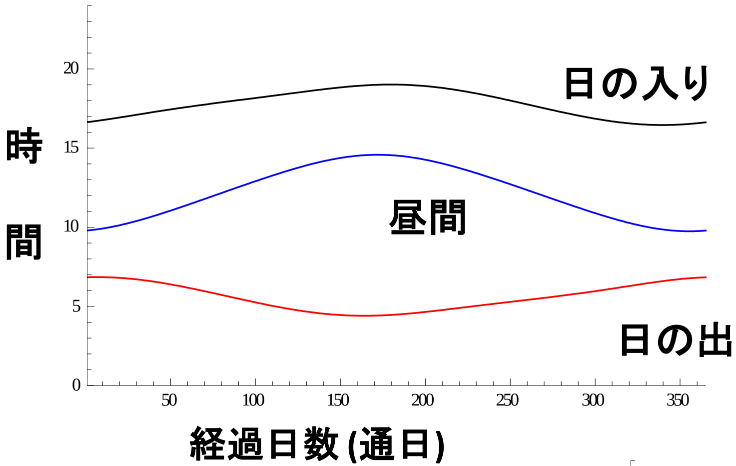


図3.1.2-1　日の出入年間変化

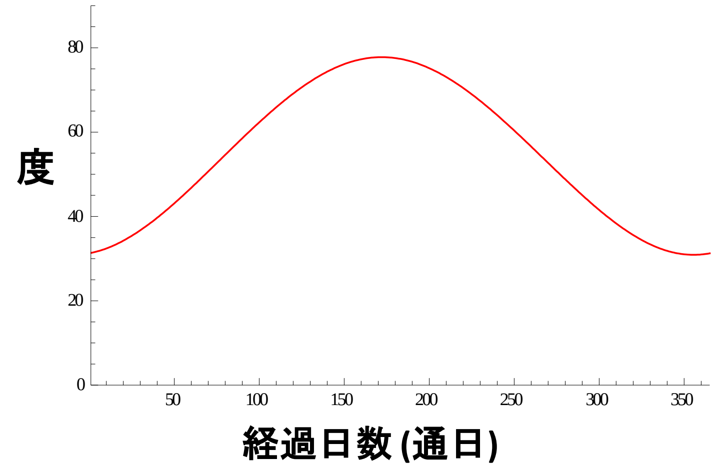


図3.1.2-2　南中高度の年間変化

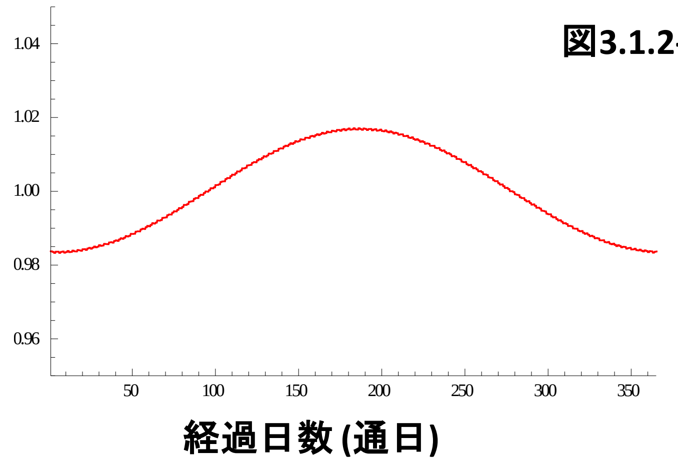


図3.1.2-3　太陽-地球間の距離

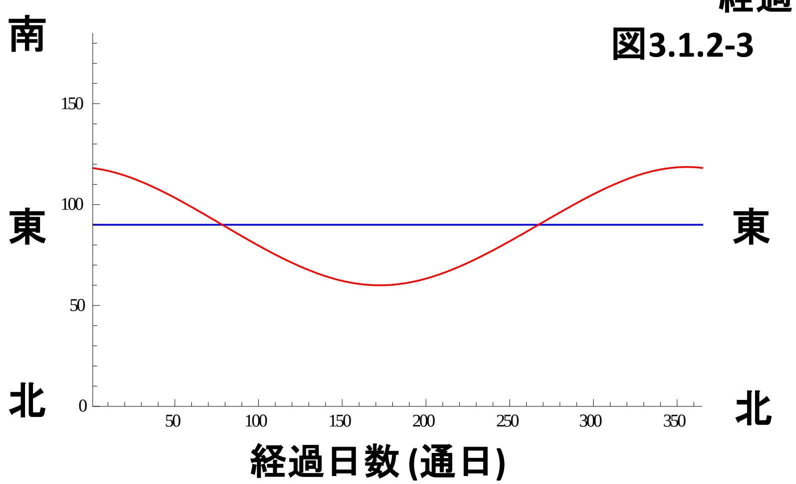


図3.1.2-4　日之出の方位角

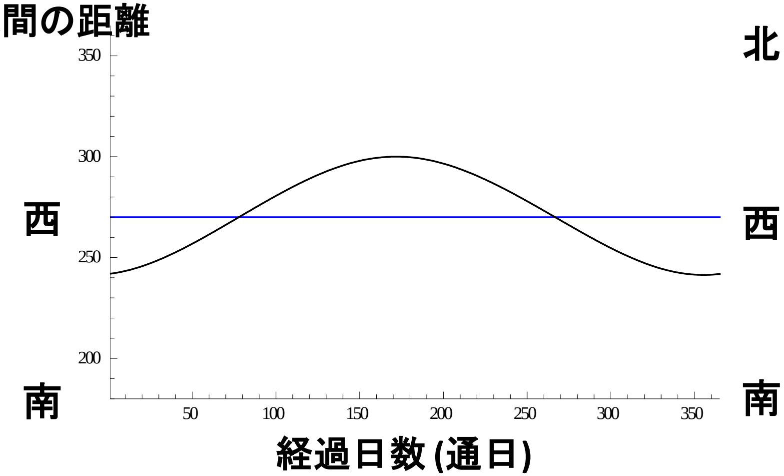


図3.1.2-5　日の入りの方位角

3.2　赤道における年間変化

赤道地点の評価を行いました。 (東経 139°　44’ 28”.8869、北緯 0°　)　です。結果を表3.2及び図3.2-1～3.2-4に示します。

(1)図3.2-1に示す様に、日の出・日の入りの時間がほぼ一定で、年間の差は日の出・日の入り共に30分位です。従って、昼間の長さはほぼ一定で、最大と最小の差は、僅か1分程度です。解析では、最大の日が12月22日(冬至)、最小の日が9月19日となっています。必ずしも夏至が一番にはなっていません。恐らく太陽距離 r の変化の影響と考えられます。一般に黄道傾斜が存在する場合、赤道以外では東京の解析で示した様に、日の出・日の入りの時間は季節で変動します。

(2)図3.2-2は、南中時の太陽高度の年間変化図です。図に示す様に、太陽高度は双峰的に変化し、春分(3/20)及び秋分(9/23)の時が最も高度が高く(90度)、夏至及び冬至の時が最も低い事が分ります。

しかし太陽の高度は、観測者が太陽と向かい合った場合の角度を示しているため、実際に春分から夏至を経過して秋分に至るまでは、終始南を向いて生活をしている人々に取っては、太陽は背中から射している事を示しています。この傾向は、回帰線内の地域で見られますが、特に赤道では顕著に現れます。

図3.2-1より分る様に、昼間の長さは年間を通してほぼ一定なので、陽が長くなった/短くなったと言う実感は無いです。

(3)図3.2-3及び3.2.-4はそれぞれ、日の出・日の入りの方位角の年間変化です。東京の場合と同様の挙動を示しています。

(4) 上記(1)では黄道傾斜が存在する場合、「日の出・日の入りの時間は季節で変動します」と記述しました。では、仮に黄道傾斜が無い場合、日の出入や南中高度の変化はどうなるのでしょうか。それを解析したのが、図3.2-5～3.2-8です。

—図3.2 -5は、日の出・日の入り及び昼間の長さの年間変化です。日の出・日の入りの時間は太陽高度Kにより決まります。この高度は太陽距離 r の年間変化の影響を受けるため、黄道傾斜が無い場合でも、日の出・日の入りの時間が若干変化します。しかしその差は僅かで、日の出の時間差は年間で15分程度で、黄道傾斜がある場合の半分です。

—図3.2 -6は、南中時の太陽高度の年間変化図です。図に示す様に、黄道傾斜が無いため、赤道では年間を通じて高度は90度、即ち、真上から日が射すこととなります。

—図3.2 -7, 8は、日の出・日の入りの方位角の年変化です。黄道傾斜がないため、日の出の方位は年間を通じて真東、日の入りの方位は真西です。

表3. 2　赤道における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	2月12日 (43)	12月22日 (356)	2月10日 (41)	6月21日 (172)	9月23日 (266)	12月22日 (356)	7月2日 (183)
	5時51分42秒	113.44度	17時58分44秒	293.44度	89.89度	12.128時間	1.0171
最小/最早	11月4日 (308)	6月21日 (172)	11月2日 (306)	12月21日 (355)	6月21日 (172)	9月19日 (262)	1月6日 (6)
	5時21分2秒	66.56度	17時28分6秒	246.56度	66.56度	12.110時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

赤道

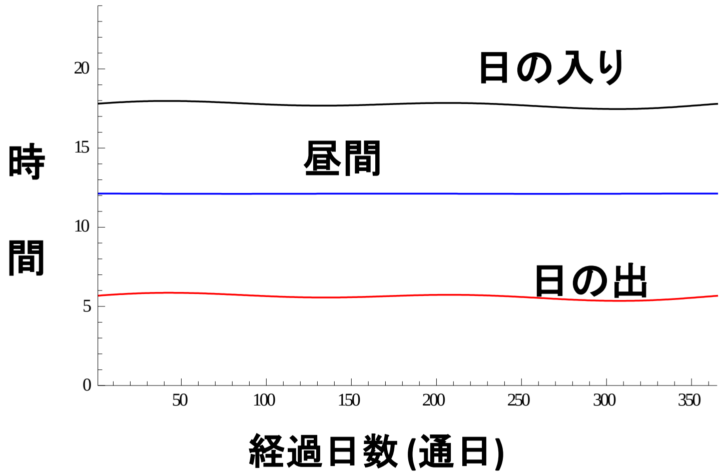


図3.2-1　日の出入年間変化

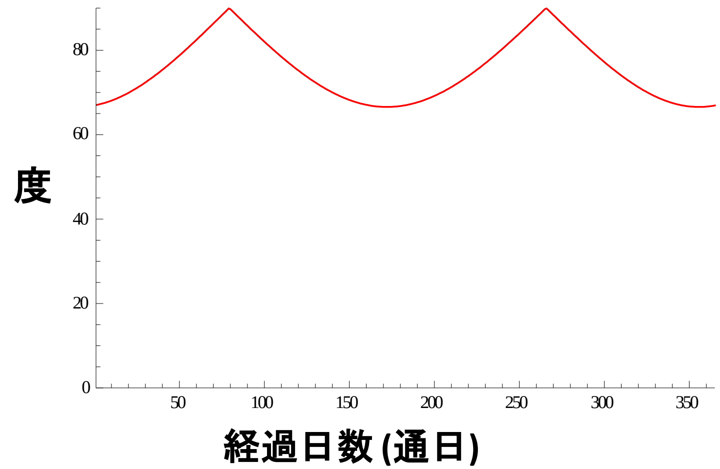


図3.2-2　南中高度の年間変化

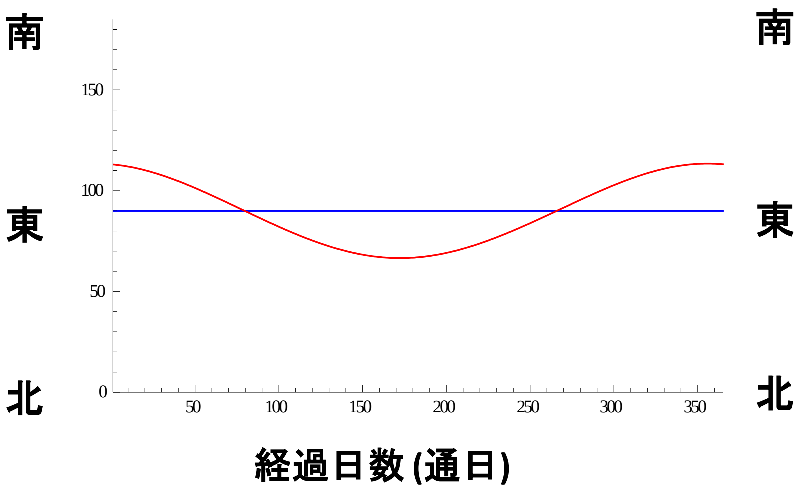


図3.2-3　日之出の方位角

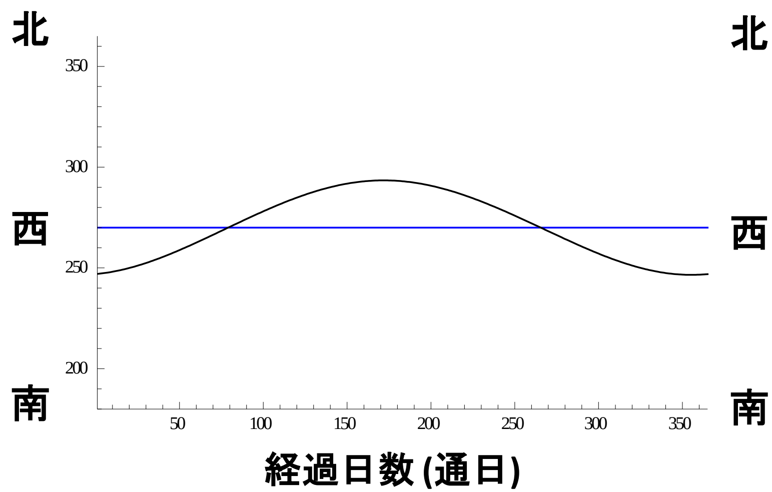


図3.2-4　日の入りの方位角

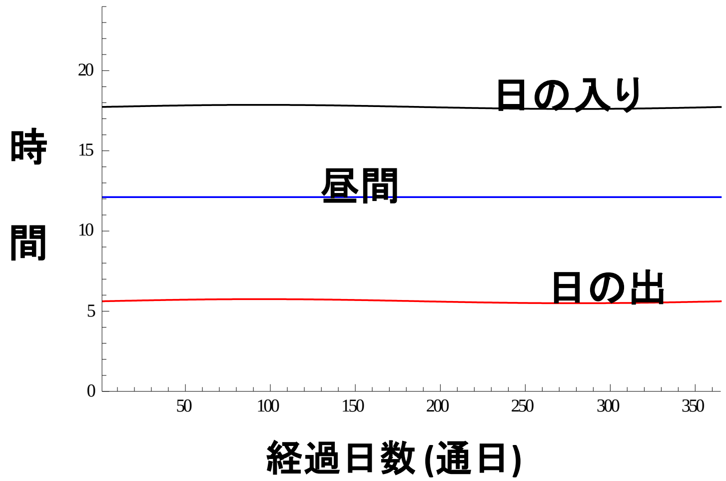


図3.2-5　日の出入年間変化

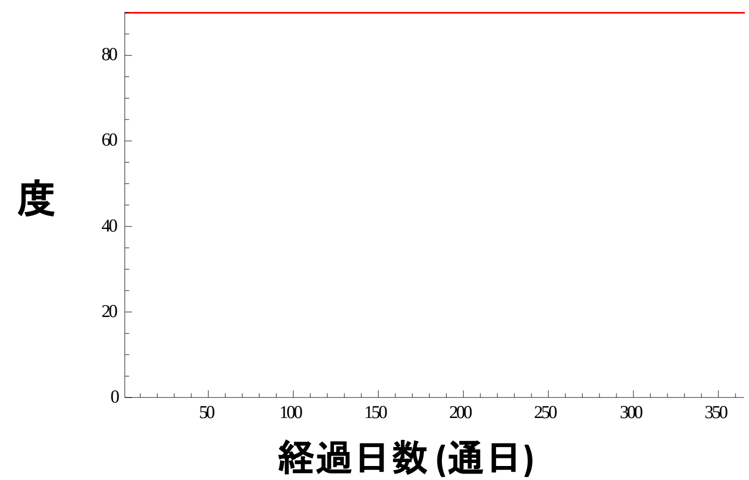


図3.2-6　南中高度の年間変化

赤道 (仮想的に黄道傾斜の無い場合)

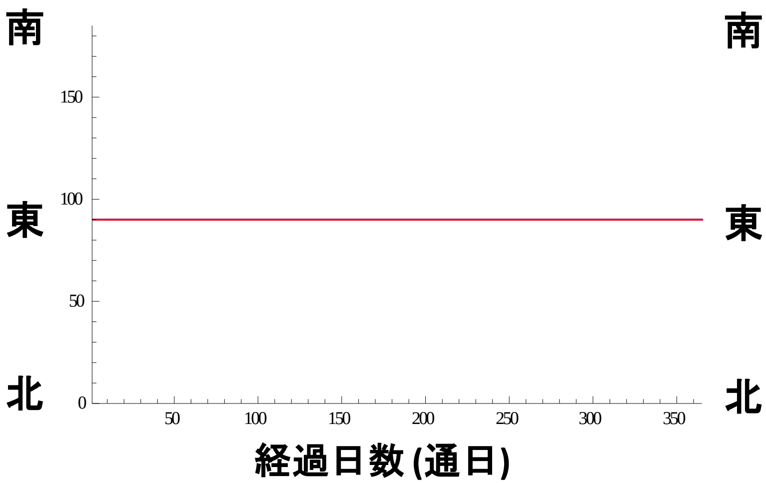


図3.2-7　日之出の方位角

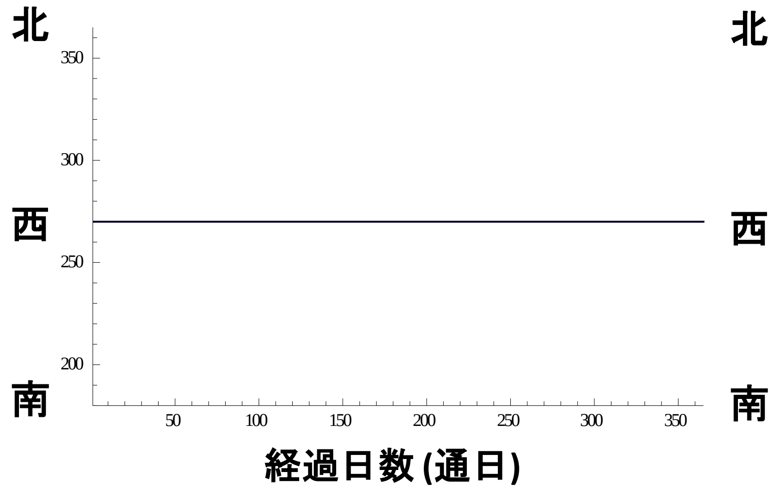


図3.2-8　日の入りの方位角

3.3 北緯20度における日の出・日の入りと昼間の年間変化

北緯20度地点での、評価。 (東経 139° 44’ 28”.8869、北緯 20°) です。ここに島は存在しませんが、マリアナ諸島マウグ島から西に約540km離れた場所です。

結果を表3.3及び図3.3-1～3.3-4に示します。

(1)図3.3-1に示す様に、日の出・日の入り時刻に年変化が現れます。この地点での昼間の長さの差は最大で、約2時間25分です。まだ日が長くなったと言う感じはしないと思います。

(2)図3.3-2に示す様に、南中時の太陽高度の変化は富士山型になってきて、単峰性の変化に近づいてきています。回帰線の内側に存在する地域では、必ず双峰性の太陽高度変化を示します。

(3)図3.3-3及び3.3.-4はそれぞれ、日の出・日の入りの方位角の年間変化ですが、東京の場合と同様の挙動を示しています。

表3. 3 北緯20度における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	1月17日 (17)	12月22日 (356)	7月5日 (186)	6月21日 (172)	5月20日 (140)	6月21日 (172)	7月2日 (183)
	6時18分46秒	114.70度	18時24分41秒	295.38度	89.99度	13.345時間	1.0171
最小/最早	6月6日 (157)	6月21日 (172)	11月26日 (330)	12月21日 (355)	12月22日 (356)	12月22日 (356)	1月6日 (6)
	5時0分44秒	64.62度	17時0分8秒	245.30度	46.56度	10.927時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

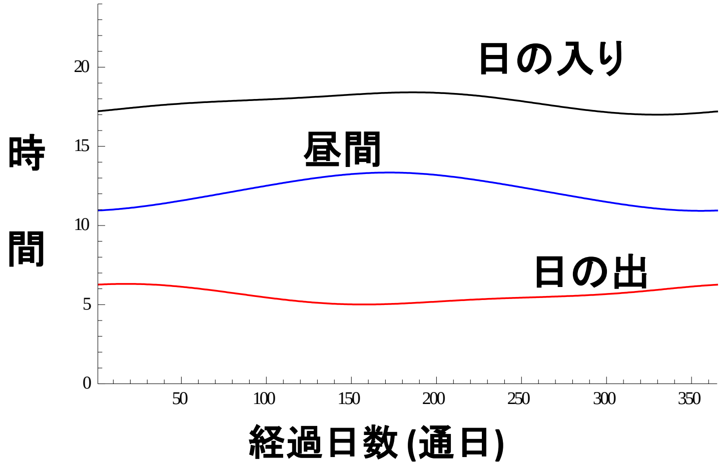


図3.3-1　日の出入年間変化

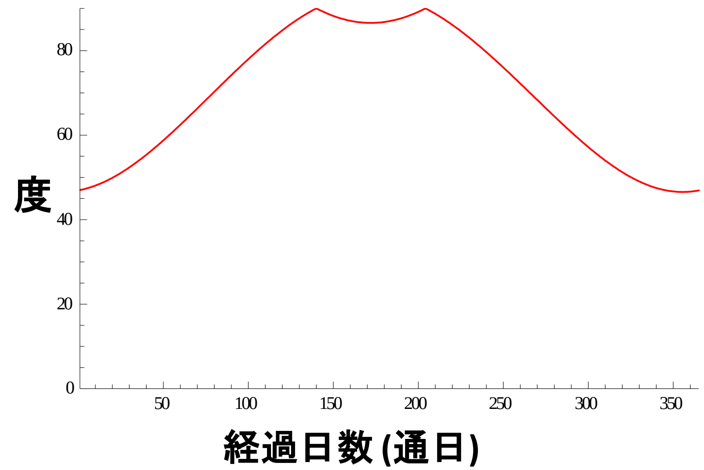


図3.3-2　南中高度の年間変化

北緯20度

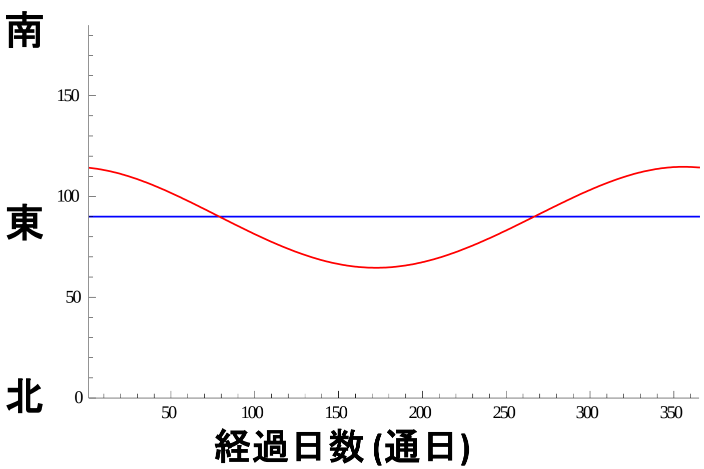


図3.3-3　日之出の方位角

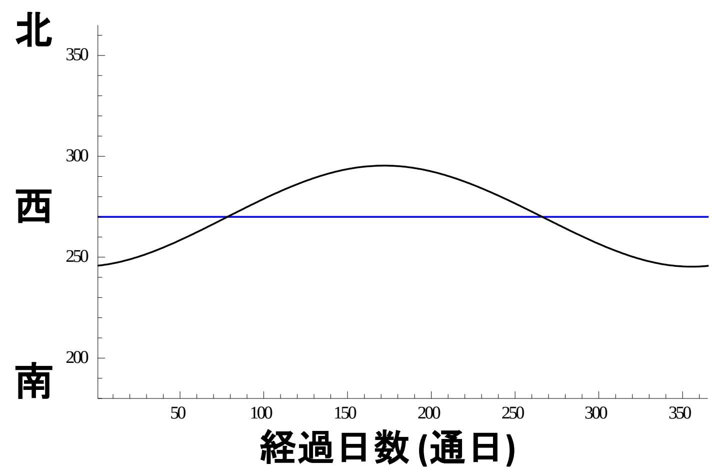


図3.3-4　日の入りの方位角

3.4　北緯60度における日の出・日の入りと昼間の時間変化

北緯60度地点での、評価。 (東経 139°　44’ 28”.8869、北緯 60°　)　です。

結果を表3.4及び図3.4-1～3.4-4に示します。

(1)図3.4-1に示す様に、日の出・日の入り時刻に明確な年変化が現れます。この地点での昼間の長さの差は最大で、約13時間0分です。この様な日の長短であれば、冬場に太陽が恋しいという北欧の人々の太陽称賛の気持ちが分る様な気がします。そう言えば、北欧神話のソール、又はソルは「太陽の女神」でしたですね。

(2)図3.4-2に示す様に、南中時の太陽高度の変化が大きくなってきています。北極圏に近くなっているので、冬場はかなり太陽高度が低いことが分ります。
ー高度の最大値は約53度で、6月21日です。
ー高度の最小値は約7度で、12月22日です。

(3)図3.4-3及び3.4.-4はそれぞれ、日の出・日の入りの方位角の年間変化ですが、東京の場合と比較して大分南北間に移動しています。

ー日の出の最大方位角は約140度(東から南へ50度の角度)で12月22日、最小値は約35度(東から北へ55度の角度)で6月21日です。
ー日の入りの最大方位角は約325度(西から北へ55度の角度)で6月21日、最小値は約35度(西から南へ50度の角度)で12月22日です。

表3. 4　北緯60度における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	12月27日 (361)	12月22日 (356)	6月23日 (174)	6月21日 (172)	6月21日 (172)	6月21日 (172)	7月2日 (183)
	8時44分18秒	140.33度	21時9分10秒	325.20度	53.44度	18.87時間	1.0171
最小/最早	6月19日 (170)	6月21日 (172)	12月16日 (350)	12月21日 (355)	12月22日 (356)	12月22日 (356)	1月6日 (6)
	2時16分20秒	34.80度	14時34分16秒	219.67度	6.56度	5.88時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

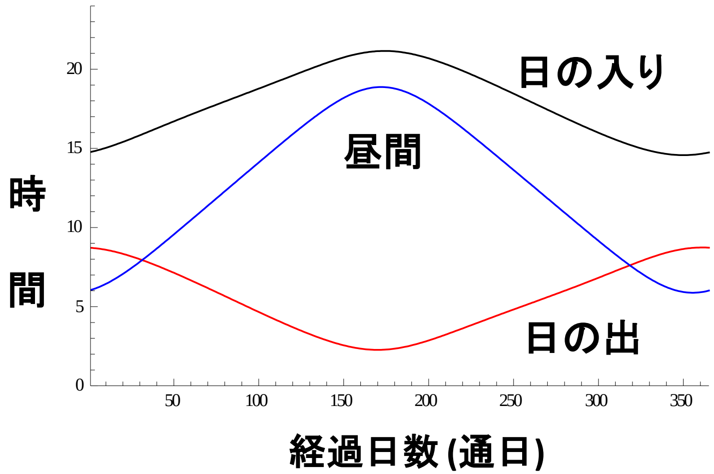


図3.4-1　日の出入年間変化

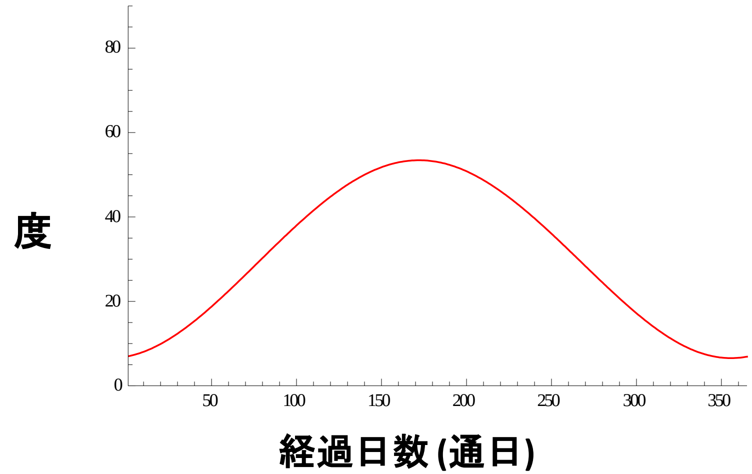


図3.4-2　南中高度の年間変化

北緯60度

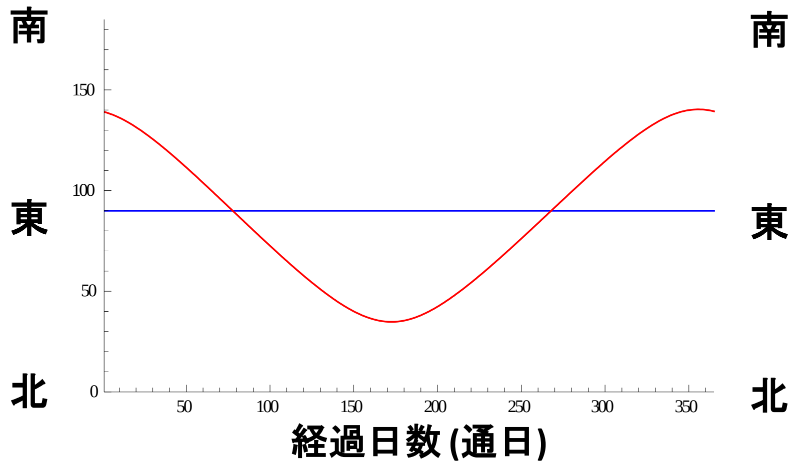


図3.4-3　日之出の方位角

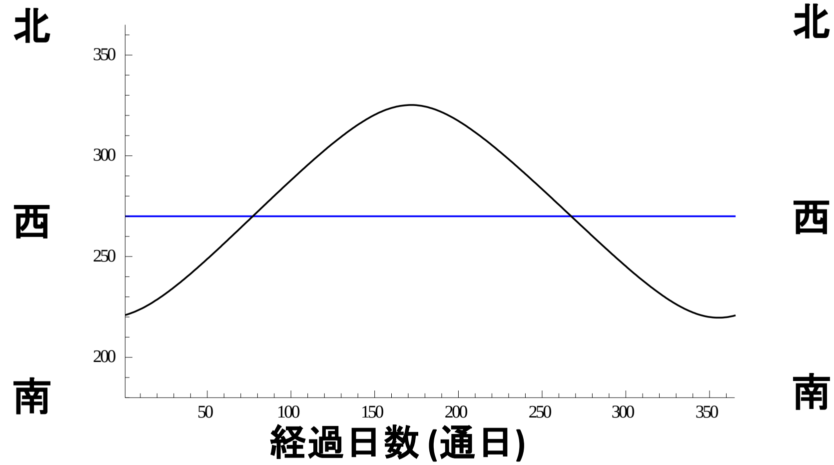


図3.4-4　日の入りの方位角

3.5 北緯70度における日の出・日の入りと昼間の時間変化

北緯70度地点での、評価。 (東経 139° 44’ 28”.8869、北緯 70°) です。

結果を表3.5及び図3.5-1～3.5-5に示します。

(1) 図3.5-1に示す様に、日の出・日の入り時刻に極夜・白夜の影響が現れます。1月1日から1月16日までは極夜(一日中太陽が出ない日)ですが、1月17日から5月16日までは日の出・日の入りが有ります。5月17日から7月27日までは白夜になります。7月28日から11月25日まで再度日没現象が現れ、11月26日から12月31日まで極夜となります。この地点は北極圏ですので、極夜と白夜が存在します。

表3.5の日の入りの最速日が11月25日で11時51分となっており、12時以前に日の入りが発生するのは奇妙に感じますが、同日の東京での南中時間は、11時27分57秒ですので、同経度の北極圏で、12時以前に日の入りが生じても不思議ではありません。

(2) 図3.5-2に示す様に、南中時の太陽高度の変化が大きくなります。
－高度の最大値は約43度で、6月21日です。
－高度の最小値は約-0.8度で、11月25日です。
－高度が負の場合は極夜になっています。

(3) 図3. 5-3及び3.5-4はそれぞれ、日の出・日の入りの方位角の年間変化です。極夜と白夜が共存しますので、方位角は0°から180°まで移動します。
－日の出の最大方位角は180度(真南)で1月1日、最小値は0度(真北)で5月17日です。
－日の入りの最大方位角は360度(真北)で5月17日、最小値は180度(真南)で1月1日です。

(4) 6月21日(夏至)の日の太陽高度の時間変化を図3.5-5に示します。この日は白夜で、太陽高度が一日中正の値を取ることが図から分ります。

表3. 5　北緯70度における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	1月1日 (1)	1月1日 (1)	5月17日 (137)	5月17日 (137)	6月21日 (172)	5月17日 (137)	7月2日 (183)
	12時0分0秒	180度	24時0分0秒	360 度	43.44度	24時間	1.0171
最小/最早	5月17日 (137)	5月17日 (137)	11月25日 (329)	1月1日 (1)	11月25日 (329)	1月1日 (1)	1月6日 (6)
	0時0分0秒	0 度	11時51分1秒	180 度	-0.76度	0 時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

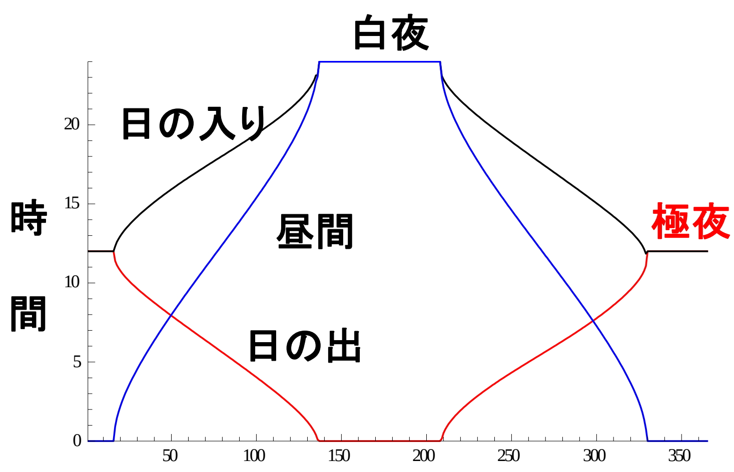


図3.5-1　日の出入年間変化

北緯70度

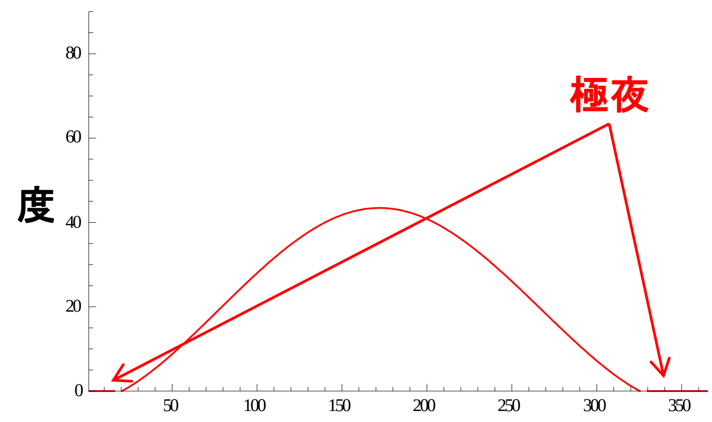


図3.5-2　南中高度の年間変化

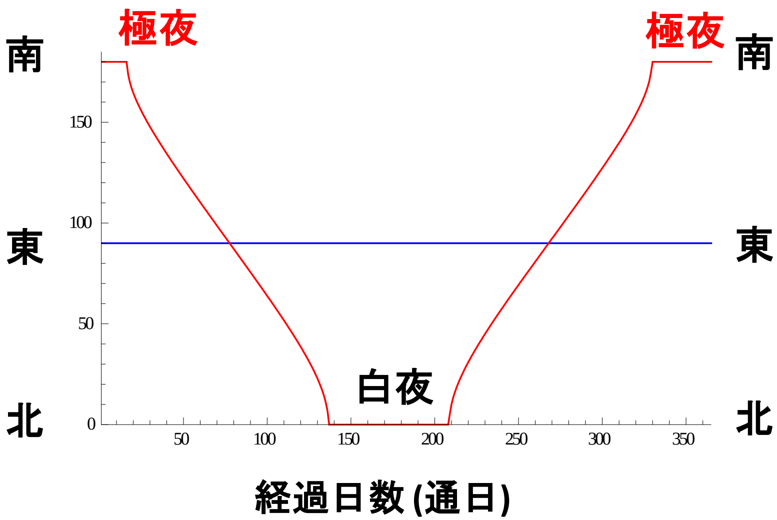


図3.5-3　日之出の方位角

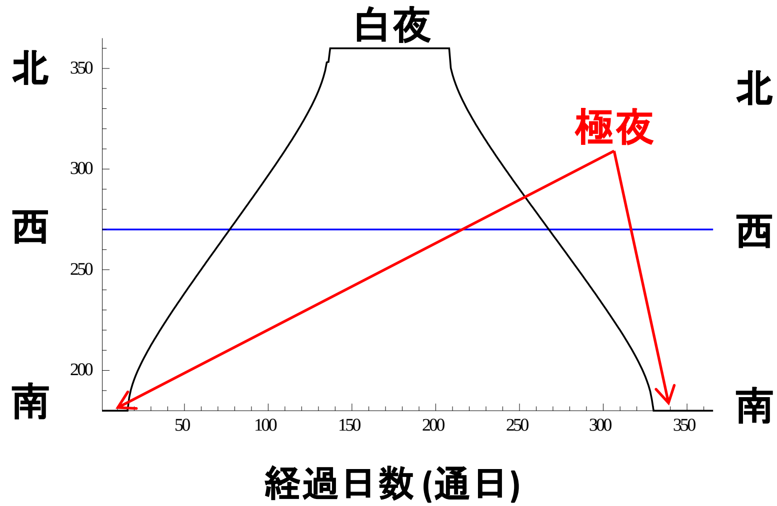


図3.5-4　日の入りの方位角

北緯70度

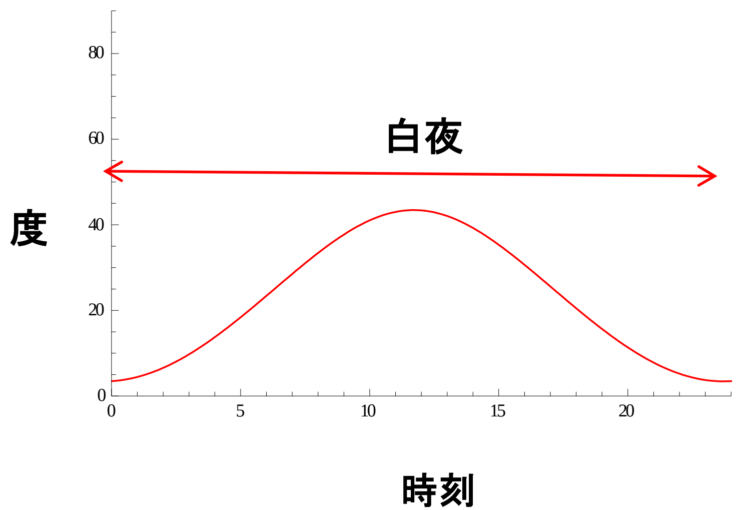


図3.5-5　6月21日の南中高度の変化

3.6 北緯90度(北極点)における日の出・日の入りと昼間の時間変化

結果を表3.6及び図3.6-1～3.6-5に示します。

(1) 図3.6-1に示す様に、日の出・日の入り時刻は、階段状に変化します。即ち、極夜の時は太陽が出ませんので、日の出・日の入り時刻は12時0分に図示し、白夜の時は日の出時刻は0時に、日の入り時刻を24時に図示化しています。この図から、極点では年に1回、日の出と日の入りの現象があると言うことになります。

(2) 図3.6-2に示す様に、南中時の太陽高度の変化が大きくなってきています。
－高度の最大値は約23.4度で、6月21日です。夏至の日に、黄道傾斜角で太陽を望みます。
－高度の最小値は約-0.5度で、3月19日です。(春分、秋分が相当します。)

(3) 図3.6-3及び3.6-4はそれぞれ、日の出・日の入りの方位角の年間変化です。上記(1)で説明しました様に、日の出・日の入り時刻が階段状に変化しますので、対応した方位角も階段状に変化します。

(4) 6月21日(夏至)の日の太陽高度の時間変化を図3.6-5に示します。太陽高度は一日中一定で、黄道傾斜角を取ることが図から分ります。

表3. 6　北極点(北緯90度)における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	1月1日 (1)	1月1日 (1)	3月19日 (78)	3月19日 (78)	6月21日 (172)	3月19日 (78)	7月2日 (183)
	12時0分0秒	180度	24時0分0秒	360 度	23.44度	24時間	1.0171
最小/最早	3月19日 (78)	3月19日 (78)	1月1日 (1)	1月1日 (1)	3月19日 (78)	1月1日 (1)	1月6日 (6)
	0時0分0秒	0 度	12時0分0秒	180 度	-0.52度	0 時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

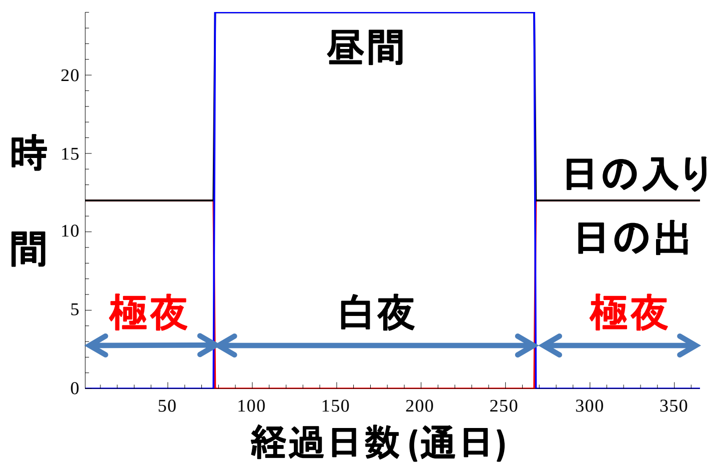


図3.6-1　日の出入年間変化

北緯90度(北極点)

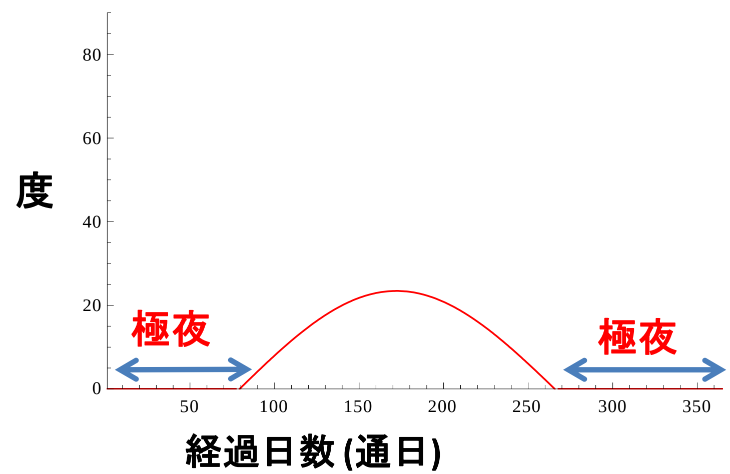


図3.6-2　南中高度の年間変化

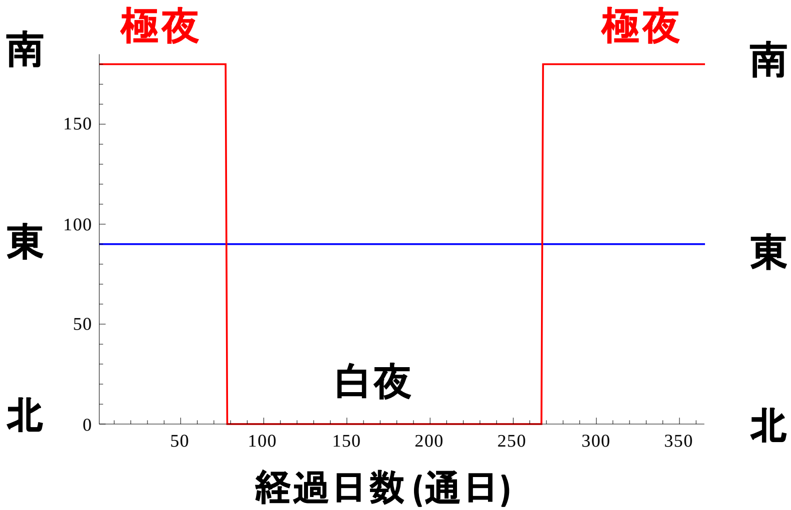


図3.6-3　日之出の方位角

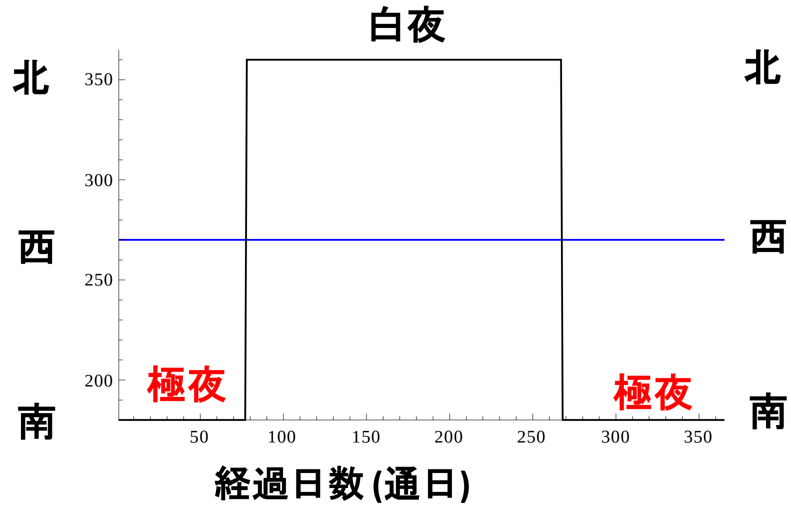


図3.6-4　日の入りの方位角

北緯90度(北極点)

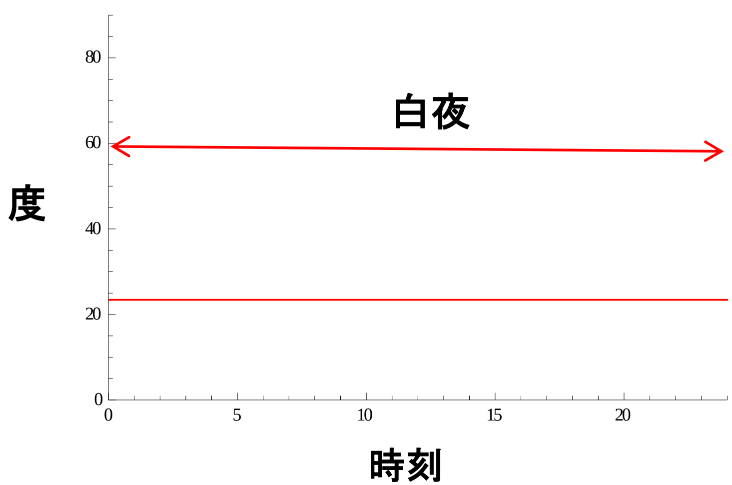


図3.6-5　6月21日の南中高度の変化

3.7 南緯35度における日の出・日の入りと昼間の時間変化

南緯35度地点での、評価。 (東経 139° 44’ 28”.8869、南緯35 °) です。

結果を表3.7及び図3.7-1～3.7-5に示します。

(1)図3.7-1は、日の出・日の入り時刻と、昼間の長さの変化です。南半球の位置ですので東京とは逆に、冬至(12月22日)に最も日が長く、夏至(6月21日)に最も日が短いことが解析から分ります。ちなみに冬至と夏至との昼間の長さの差は、約4時間40分です。

(2)図3.7-2は、南中時の太陽高度の年間変化図です。冬至の時が最も高度が高く、夏至の時が最も低い事が分ります。冬に一番陽が高く、夏が一番陽が低くなっていることは、「夏は暑い」と言う概念を少なくとも南半球では変える必要があります。

(3)図3.7-3及び3.7-4はそれぞれ、日の出・日の入りの方位角の年間変化で、東京の場合と同じ挙動を示します。

表3. 7　南緯35度における2017年の日の出入等の挙動

	日の出		日の入り		南中高度	昼間の長さ	太陽距離
	時刻	方位角	時刻	方位角			
最大/最遅	6月30日 (181)	12月22日 (356)	1月6日 (6)	6月21日 (172)	12月22日 (356)	12月22日 (356)	7月2日 (183)
	6時49分40秒	119.74度	18時58分54秒	298.38 度	78.44度	14.52時間	1.0171
最小/最早	12月6日 (340)	6月21日 (172)	6月12日 (163)	12月21日 (355)	6月21日 (172)	6月21日 (172)	1月6日 (6)
	4時19分47秒	61.62 度	16時35分48秒	240.26 度	31.56度	9.80時間	0.9833

( )内数値は、通日です。

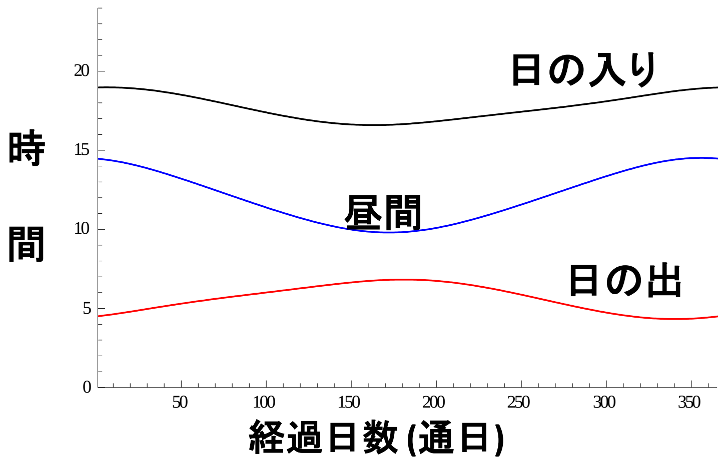


図3.7-1　日の出入年間変化

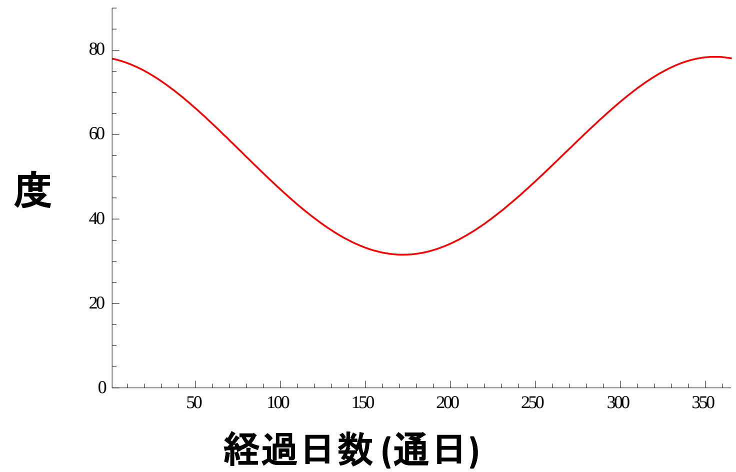


図3.7-2　南中高度の年間変化

南緯35度

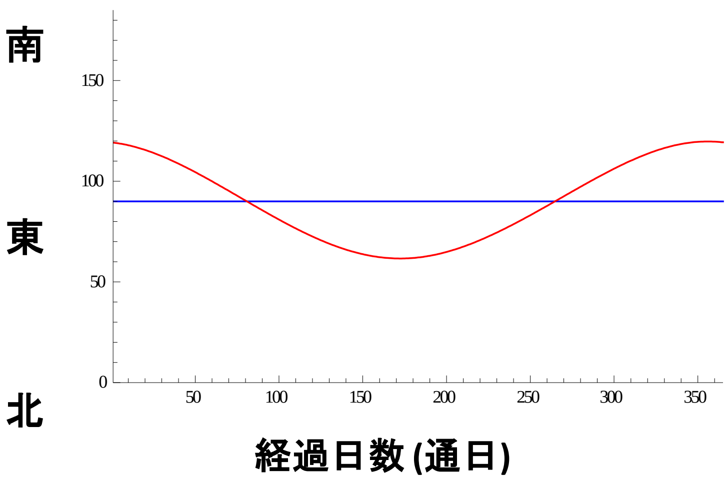


図3.7-3　日の出の方位角

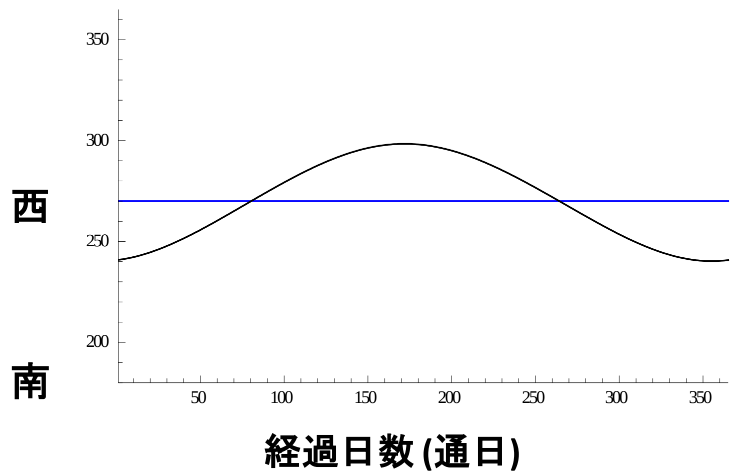


図3.7-4　日の入りの方位角

4　考察

日の出･日の入りについて検討してきました。その結果以下の知見を得ました。

(1) 黄道傾斜があるため、季節により日の出･日の入りの時間が変化します。特に高緯度では顕著に現れます。それに応じて、昼間の長さも変化します。

(2) 黄道傾斜が無い場合でも、日の出･日の入りの時間が若干変化します。これは日の出･日の入り時の太陽の高度が、太陽距離 r の季節変化を受けるためです。

(3) 北半球では、夏至(6月21日)に最も昼間が長く、冬至(12月22日)に最も短いことが分ります。しかし、夏至は一番昼間の長さが長いですが、日の出が一番早い日ではありませんし、日の入りが一番遅い日でもありません。冬至についても同様の事が言えます。

(4) 東京(日本)は中緯度に位置しますので、季節により昼間の長さ、太陽高度、日の出･日の入りの方角等が変化し、この年間変化が、海流･気流の影響と相俟(ま)って古の人々に四季の変化を楽しませ、詩歌の素晴らしさを提供したものと思います。

(5) 北極圏では、極夜と白夜が存在し、昼間の長さの差が大きくなります。この様な日の長短であれば、冬場に太陽が恋しいという北欧の人々の太陽称賛の気持ちが分る様な気がします。

(6) 極点では年に1回、日の出と日の入りの現象があることが分ります。又、太陽高度は一日中一定で、夏至の日は黄道傾斜角を取ることが分ります。

(7) 南半球では、日の出･日の入り時の方位角を除いて、北半球の現象と逆の事が起こります。