

日照時間の計算について

澤見英男

目次

0	はじめに	1
1	基本的な座標変換	1
2	地球と太陽との関係	2
3	夏至の日の昼夜の長さや日照量を求めるための座標計算	2
4	日照時間や日照量の季節変動と地軸の見かけの傾き角度	4
5	地軸の傾きを考慮した日照時間や日照量の季節変動の計算	4
6	地軸の傾きと高緯度地域における白夜の出現	7
7	緯度により異なる年間日照量と地軸の傾き	9
8	日照量の季節変動と緯度	9
9	冬至・秋分・夏至・春分の日における日照量と緯度との関係	10
10	地軸の傾きにより異なる日照量の季節変化と四季	12
11	赤道における日照時間や日照量の季節変化と地軸の傾き	14
12	あとがき	15
	参考文献	16

0 はじめに

十九世紀，ダーウィンによる進化論が世に問われた際，ケルビン卿による有名な反論が行われた．その根拠としたのは，地球誕生時の地熱と太陽からの輻射光だけを熱源とした厳密な理論計算であり，地球の気候が現在のように温暖でありつづけることが出来るのはどんなに長く見積もっても1億年以下であって，数億年以上の時間を必要とする生物の進化を想定するなどといったことは非科学的であると結論した．このことは二十世紀になって核分裂が発見され，新たに加わった熱源，地熱による影響が太陽の二千分の一程度あることを知られるようになってからは影を潜めてしまった．そしてこの科学史上の大事件は，ウィリアム・ヒューウェルによる造語「科学者」が知られるようになって以来，科学というものが最新の知識として認識されている現代においては，大科学者ケルビン卿の偉大なる失敗として語り継がれるようになってきている[1]．

ところで二酸化炭素排出量とからめて地球全体の気候変動の話題になることが日常的に見られる現代，極寒の宇宙に浮かぶ生命の母なるこの地球を暖めていてくれている重要な熱源である，太陽からの日照量について改めて計算してみることにした．先に触れたように，科学の立場に立って見て見落としをすることの無いように注意しながら，日照量などについて理論計算を進めていく．

1 基本的な座標変換

地球の自転，公転，地軸の傾きそして緯度と経度を考慮した計算に基づき日照時間や日照量を求めるためには，以下に示すような座標変換（右手座標系）により，緯度と経度により指定された地球表面上の地点に対する座標変換，そして座標点に関連した法線ベクトルと太陽からの輻射光に関連したベクトルとの内積計算が必要となる．導入部として，基本的な座標変換の解説をする．

3次元座標における点 (X, Y, Z) を x 軸の周りで角度 Φ だけ回転操作して得られる点の座標 (x, y, z) は，行列 R_Φ^x と縦ベクトルにより表すと，次のようになる．

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_\Phi^x \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

同様にして，3次元座標における点 (X, Y, Z) を y 軸の周りで角度 α 回転操作して得られる点の座標 (x, y, z) を，行列 R_α^y を用いて次のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_\alpha^y \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

さらに，3次元座標における点 (X, Y, Z) を z 軸の周りで角度 γ だけ回転させて得られる点の座標 (x, y, z) を，行列 R_γ^z を用いて次のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_\gamma^z \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

これらの結果を用いると、点(X,Y,Z)を最初はx軸の周りで Φ 回転し、次にy軸の周りで α 、最後にz軸の周りで γ 回転操作して得られる点の座標(x, y, z)は次のように表すことができる。勿論、ひとつの行列で表すこともできる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_\gamma^z R_\alpha^y R_\Phi^x \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

2 地球と太陽との関係

地球の中心を3次元座標の原点に置き、太陽はx軸上の十分遠方から地球を照らしていると考え、そしてz軸の正方向に地球の北極そして負方向に南極を配置する。地軸の傾きと日照時間および日照量との関係を定式化するために座標変換を用いる。最初は自転を考慮し、z軸周りを角度 ϕ 回転させ、次に地軸の傾きを考慮して、x-z平面上でy軸周りに角度 α 回転させ、最後に公転を考慮して、x-y平面上で太陽を中心に角度 γ 回転させることにする(図1)。地球表面の座標を縦ベクトルにより表すと、回転操作のみ纏めた行列は $R_\gamma^z R_\alpha^y R_\phi^z$ となるが、陽形式にするべく行列を簡略化し $R_\theta^y R_\Phi^z$ にする非線型処理を施す。

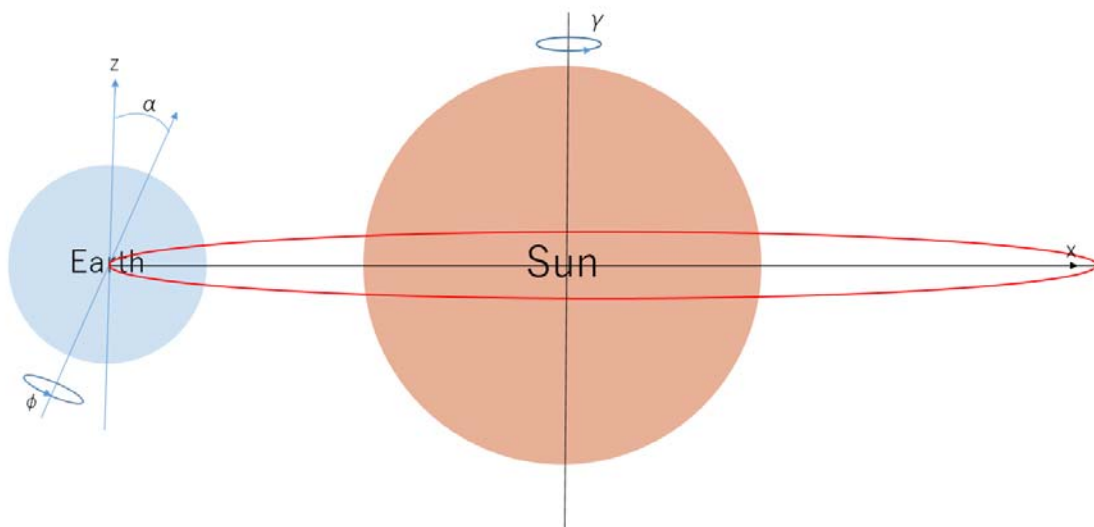


図1 公転軌道と地軸の傾き

3 夏至の日の昼夜の長さや日照量を求めるための座標計算

以下の計算手順に従い、太陽から地球を見た際に表(昼)または裏(夜)のどちら側であるかを、特定地点のx座標値の正負により判定する。

- (1) 赤道(equator)をx-y平面に置き、地軸の傾きに関する座標計算をする前に、自転に関しz軸が南北の両極点を通過するように設定する(図1)。
- (2) 日照時間を求めるため、地球表面を昼夜へと二分割する。北緯 β 度東経零

度を $x-z$ 平面上の点であるとする、地球の半径を 1 とした場合の座標 $(x=\cos \beta, y=0, z=\sin \beta)$ および単位法線ベクトル $(\cos \beta \ 0 \ \sin \beta)^T$ を得ることができる。

(3) この座標データに対し、角度 ϕ 自転させ地軸を角度 α 傾ける。これら回転操作（座標変換）により、北緯 β 経度 ϕ での法線ベクトルが求まる。

$$(\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta \cos \phi \quad \cos \beta \sin \phi \quad -\sin \alpha \cos \beta \cos \phi + \cos \alpha \sin \beta)^T$$

(4) 公転面上の回転角度 γ に対応する太陽光ベクトル $(\cos \gamma \ \sin \gamma \ 0)^T$ と法線ベクトルとの内積を求め、この値の正負から昼夜の判別をする。

$$\cos \gamma (\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta \cos \phi) + \sin \gamma \cos \beta \sin \phi$$

(5) 角度 ϕ を内積の正負により求める際、夏至または冬至の日に注目し便宜上 $\gamma=0$ とすると、内積の式を簡単に評価できる。これは手順 (3) で求めた法線ベクトル \mathbf{x} 座標成分の正負と経度 ϕ との関係式と同じになる。

$$\text{if } |\tan \alpha \tan \beta| < 1 \text{ then } \phi = \arccos(-\tan \alpha \tan \beta)$$

$$\text{else if } \tan \alpha \tan \beta \geq 1 \text{ then } \phi = \pi \text{ (白夜) else } \phi = 0 \text{ (極夜)}$$

(6) 得られた経度 ϕ は日没時刻に相当し、角度 $\phi=0$ は正午を、角度 $\phi=-\pi$ と $\phi=\pi$ は夜 0 時と 24 時とを表しており、 $24 \phi / \pi$ が日照時間になる。

例として赤道、北緯 23.43, 35, 44, 50, 66.57, 80 度および北極における夏至の日の日差しの変化を比較する (図 2)。縦軸は式(4)の計算値で昼の日照の強さ、値零は日の出(左)と日没(右)の時刻、24 時間正は白夜を意味している。

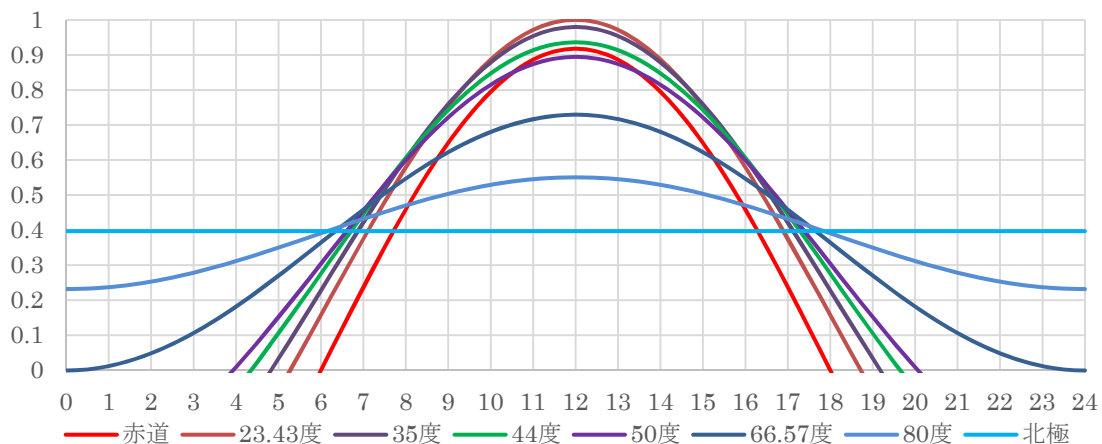


図 2 緯度により異なる夏至の日の日照

横軸は標準時で角度 $\phi=0$ は正午 $\phi=\pi$ は 24 時、 $\alpha=23.43$ 度、緯度= α で日照の最大値は 1

(7) 昼の面積は真上からの太陽の日照時間に相当し、一日当たりの日照量は $24(\sin \alpha \sin \beta \phi + \cos \alpha \cos \beta \sin \phi) / \pi$ になる。太陽定数と併せ単位面積

当たりの一日の最大エネルギーを計算できる。なお極圏を除き 44 度で最大値に、本州だと三内丸山遺跡付近にてほぼ同じ値 8.8 時間になる。

4 日照時間と日照量の季節変動と地軸の見かけの傾き角度

前で行った日照時間の計算は、地球に対応させた球体を x 軸周りで回転させても、 yz 平面から見た地軸の傾きは変化しないことから同じ結果になることに注目する。この球体は角度 α だけ y 軸周りで回転している。そこで公転面に垂直な z 軸周りで球体（単位地軸ベクトルは $(\sin \alpha \ 0 \ \cos \alpha)^T$ ）を公転角度 γ 回転させた場合の、 yz 平面に対する回転軸の傾き角度 θ を求め、この角度 θ を計算式(5)の地軸の傾き角度 α に代入することで、季節変動を計算する。

(a) 角度 γ 回転した単位地軸ベクトル $(\sin \alpha \ \cos \gamma \ \sin \alpha \ \sin \gamma \ \cos \alpha)^T$ と yz 平面を表すベクトルから見かけの地軸の傾き角度 θ を導出する。

$$\theta = \arctan(-\sin \alpha \cos \gamma / \sqrt{(\sin \alpha \sin \gamma)^2 + \cos^2 \alpha})$$

(b) この傾き角度 θ を先に得た昼夜の長さを求める計算式(5)の地軸本来の傾き角度 α に代入し、日照時間の季節変動に対応する角度 ϕ を求める。

$$\text{if } |\tan \theta \tan \beta| < 1 \text{ then } \phi = \arccos(-\tan \theta \tan \beta)$$

$$\text{else if } \tan \theta \tan \beta \geq 1 \text{ then } \phi = \pi \text{ (白夜) else } \phi = 0 \text{ (極夜)}$$

(c) まとめると、緯度 β における日照時間 $24 \phi / \pi$ と一日当たりの日照量（時間換算） $24(\sin \theta \sin \beta \phi + \cos \theta \cos \beta \sin \phi) / \pi$ そして緯度および日時を指定した場合の日照の変化 $\sin \theta \sin \beta + \cos \theta \cos \beta \cos \phi$ が得られた。

角度 θ と公転角度 γ との関係は、例えば角度 $\alpha = 23.43$ 度では次の様になる。なお $\gamma = 0, 360$ は冬至、 $\gamma = 90$ は春分、 $\gamma = 180$ は夏至、 $\gamma = 270$ は秋分になる。

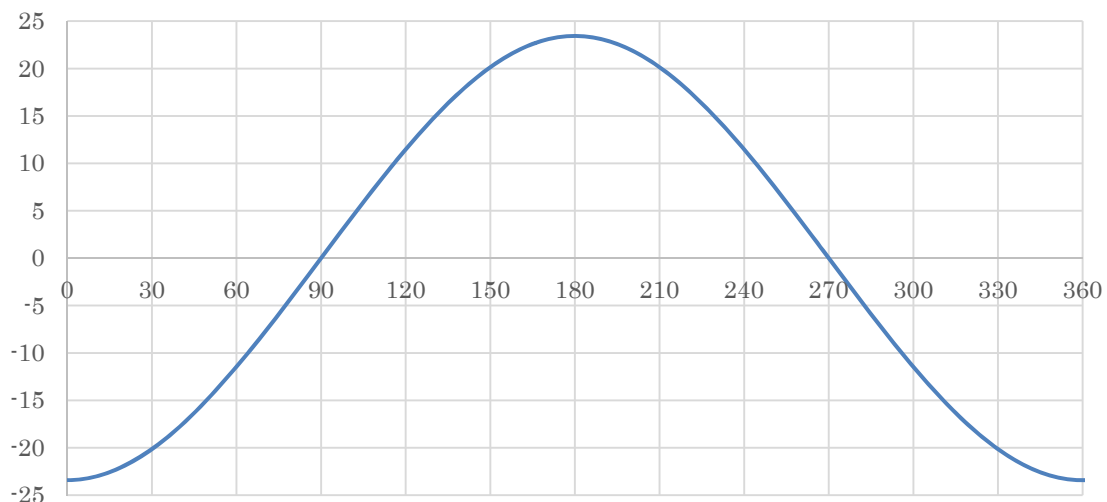


図3 公転角度 γ により変化する見かけの地軸の傾き θ

地軸の傾き α は 23.43 度，横軸は公転角度 γ ，縦軸は見かけの地軸の傾き角度 θ

5 地軸の傾きを考慮した日照時間と日照量の季節変動の計算

北緯 β 度および経度 ϕ の地点における日照の強さを、太陽から見た見かけの地軸の傾き角度 θ に関し、北緯 β 経度 ϕ における法線ベクトルと太陽光の方向を表すベクトル $(\cos \gamma \quad \sin \gamma \quad 0)^T$ との内積を用いて評価することもできる。

年間日照量の計算は、昼になっている期間について、公転に対応する角度 γ に関する積分により計算する。ここでは角度 γ の刻み幅を適切に選び、日照量の年間総量を台形公式に基づく数値積分を用いて計算している。

表計算ソフト「EXCEL」を用いた計算手順を示す (図 4)。A 欄 2 行目に公転軌道を表す角度 γ を与え、C2 セルには対応する地軸の傾き角度 θ を式

$$= \text{ATAN} \left(-(\text{COS}(A2 * \text{PI}() / 180) * \text{SIN}(\$N\$2 * \text{PI}() / 180)) / \text{SQRT} \left(\text{SIN}(A2 * \text{PI}() / 180)^2 * \text{SIN}(\$N\$2 * \text{PI}() / 180)^2 + \text{COS}(\$N\$2 * \text{PI}() / 180)^2 \right) \right),$$

F 欄 2 行目には昼夜の長さの計算から得られる日照時間に関する式を与える。

$$= \text{IF}(\text{ABS}(\text{TAN}(C2) * \text{TAN}(\$O\$2 * \text{PI}() / 180)) < 1, \text{ACOS}(-\text{TAN}(C2) * \text{TAN}(\$O\$2 * \text{PI}() / 180)) / \text{PI}() * 24, \text{IF}(\text{TAN}(C2) * \text{TAN}(\$O\$2 * \text{PI}() / 180) >= 1, 24, 0))$$

そしてセル G 2 には日照量を角度 ϕ に関する定積分に基づいた式

$$= 24 * (\text{COS}(D2 / 180 * \text{PI}()) * \text{COS}(\$O\$2 / 180 * \text{PI}()) * \text{SIN}(F2 / 24 * \text{PI}()) + \text{SIN}(C2) * \text{SIN}(\$O\$2 / 180 * \text{PI}()) * F2 / 24 * \text{PI}()) / \text{PI}()$$

ただし、地軸の傾き α はセル \$M\$2 に、緯度 β はセル \$N\$2 に、年の始まりに関する γ のオフセット角度(この例では 20 度)をセル \$O\$2 に用意しておく。また、角度 γ および月に対応している A および B 欄には、自動計算機能を用い適切な刻み幅 (1 度刻み) になるよう設定して必要な計算環境を準備する。

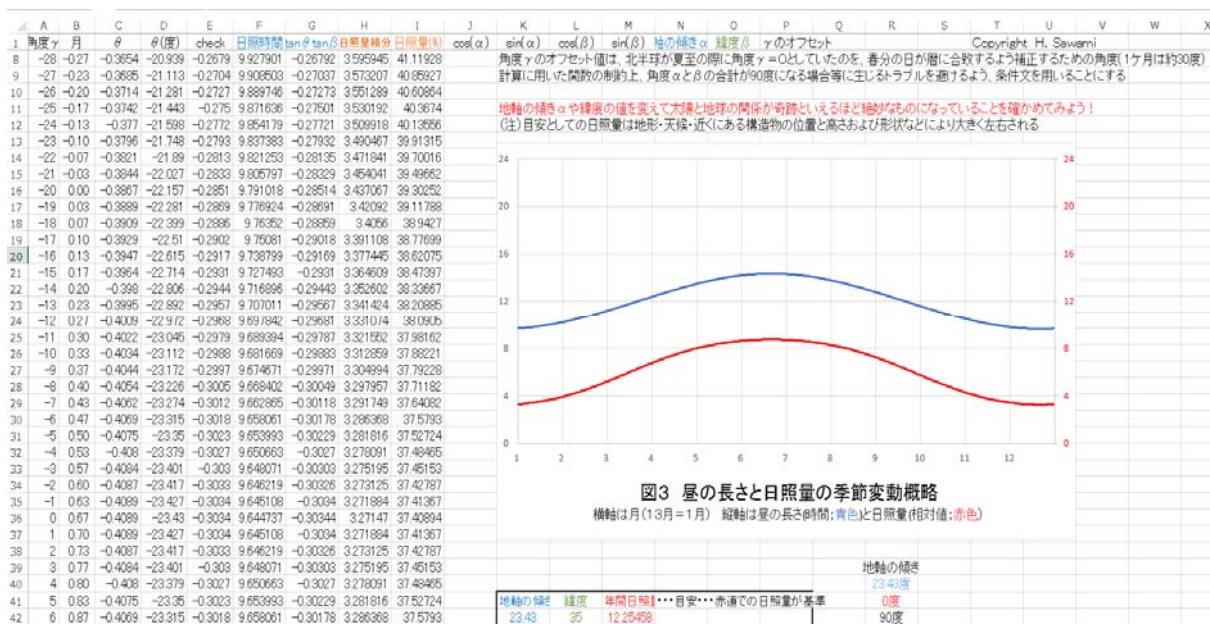


図4 日照時間と日照量の季節変動を計算

日照時間と日照量の季節変動を計算するためのワークシート例

こうして準備のできた2行目のセルを選び、オートフィル機能も用い目的とする範囲で自動計算し作図をすると、日照量等の季節変化を評価できるようになる(図5)。地軸の傾き α は23.43度、緯度 β が35度での日照量は、真上からの日照時間に換算して夏の日差しは9時間近い値になっている(図5)。

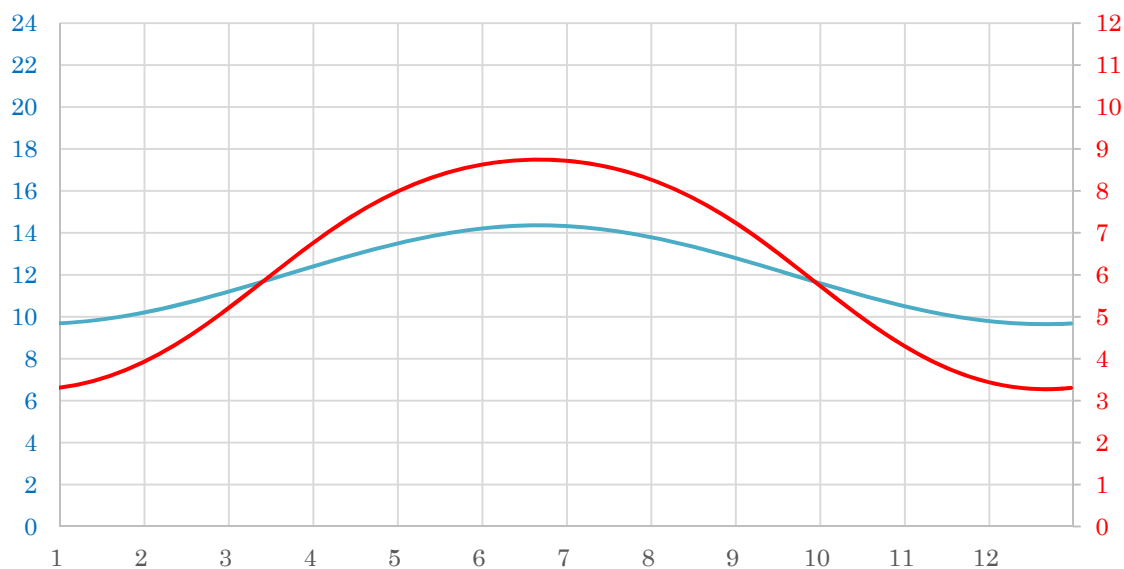


図5 地軸の傾き23.43度における日照時間と日照量の季節変動

緯度は35度、横軸は季節(月)、縦軸は日照時間(青)と時間換算した日照量(赤)

高緯度になるとどのような違いの出てくるのかを観るため、例として、ベルギーの学園都市ルーヴェンを取り上げてみる。地軸の傾き α は23.43度、緯度 β が50.879度での日照時間と日照量を計算すると次のようになる。

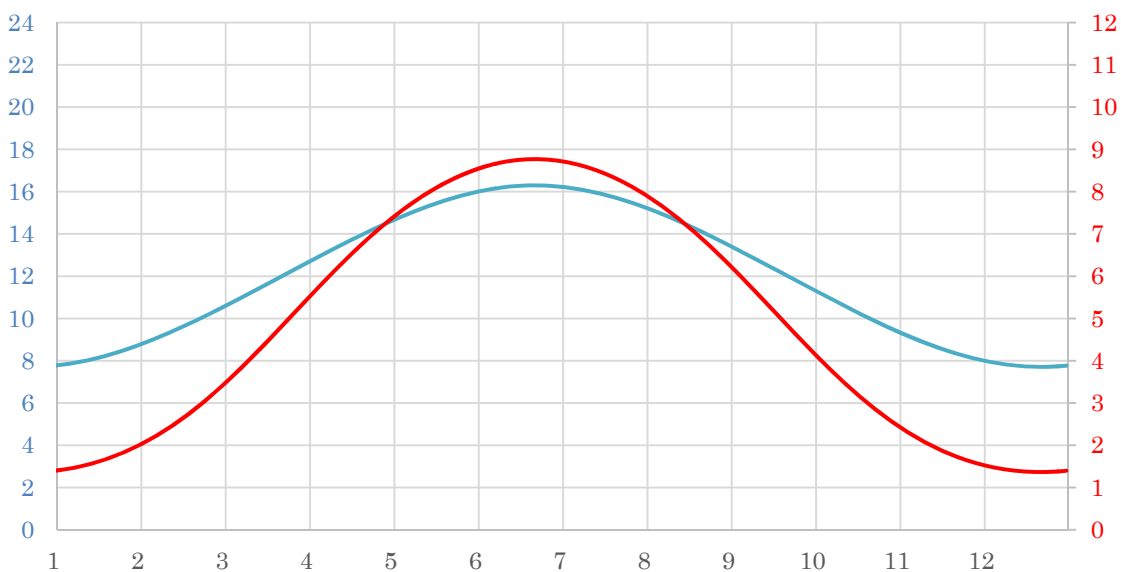


図6 地軸の傾き23.43度における日照時間と日照量の季節変動

緯度は50.879度、横軸は季節(月)、縦軸は日照時間(青)と時間換算した日照量(赤)

高緯度のため、夏の日照時間は16時間以上と日本より2時間程長く、午後8時頃まで城壁に囲まれた市内を散策することもできる。そのため日照量は9時間近く有っても夏は過ごし易く秋の収穫物も多彩である。冬の日照量は日本だと3時間程度であるが(図5)緯度の高いことから10月半ばには同程度に下がってしまい、冬が長く(4か月ほど)なる。そのためかなり寒くなる所為かベルギービールの醸造が盛んであり、近海からの海産物も多く出回っていて、駅の近くでは名物料理「ムール貝のバケツ香菜蒸し」を楽しむこともできる。緯度による日照量の季節変動の計算結果(8章)からも類推できるが、高緯度地域の方が穀物生産/利用をする上で有利になっているような気がしてくる。

6 地軸の傾きと高緯度地域における白夜の出現

白夜が現れるようになるのは緯度が $90 - \alpha$ 度以上からである。緯度が丁度 $90 - \alpha$ 度の場合、日照時間の季節変化が直線的になることと夏至の日のみ白夜になることを計算結果により確認することができる(図7)。緯度が $90 - \alpha$ 度より高くなって来ると本格的な長期にわたる白夜が現れるようになり、日照量は夏至の日に最大となる。例えば、緯度 β が80度の場合、4月中頃から8月末までの長期間に渡る白夜の出現するようになるものの日照量の変化は少なくその裾を曳かない程度となる。そして日照時間の季節変化は特徴的な曲線を描くことから、冬の天候は極端に寒そうだが、夏至の日の日照量は普通にある(図8)。

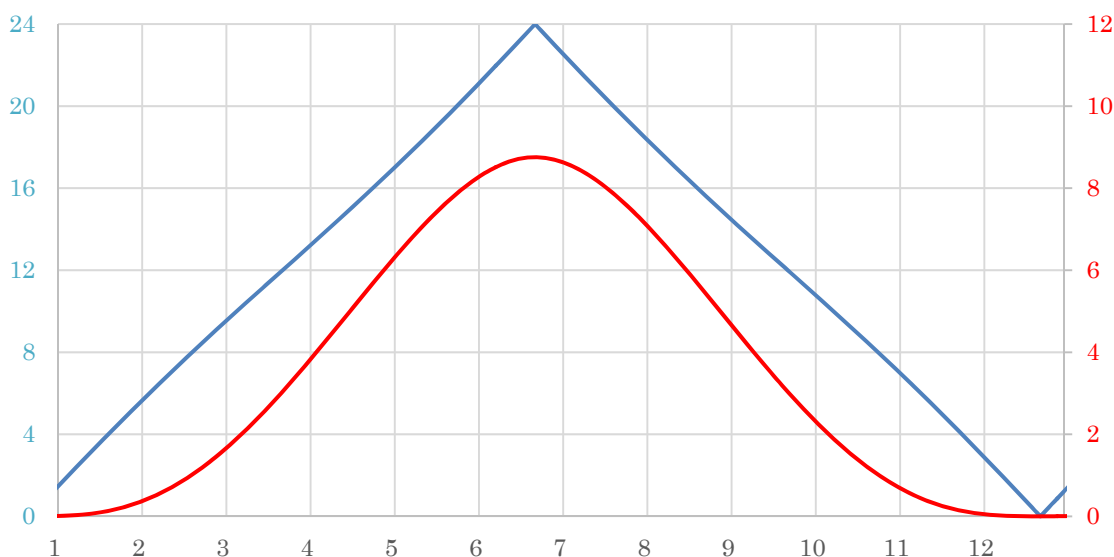


図7 高緯度地域における白夜の出現開始

緯度は66.57度、横軸は季節(月)、縦軸は日照時間(青)と時間換算した日照量(赤)

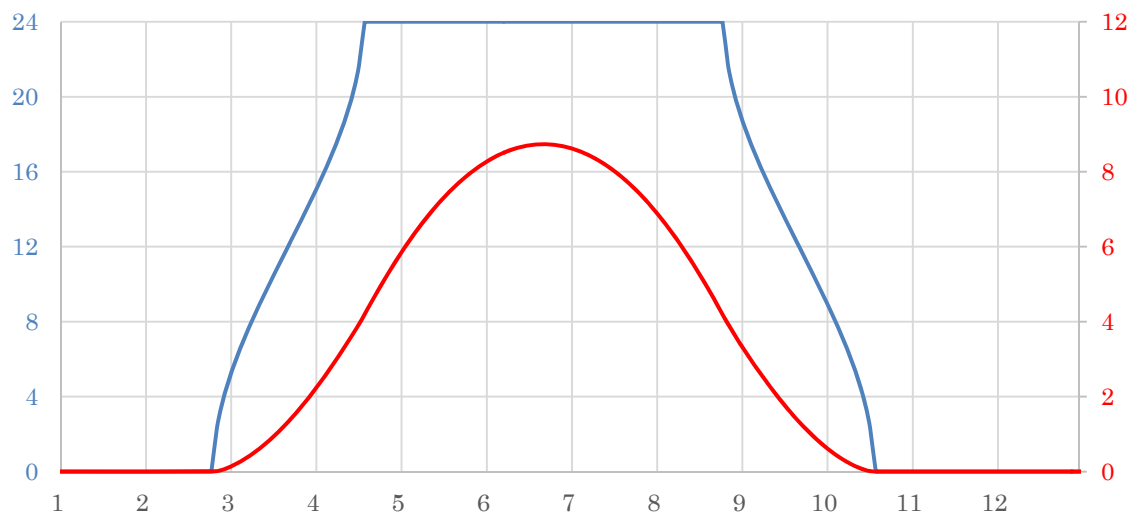


図8 高緯度地域における白夜の出現

緯度は80度，横軸は季節（月），縦軸は日照時間（青）と時間換算した日照量（赤）

白夜の一番長くなるのは緯度が90度の北極である。北極における日照量の季節変化も計算により確かめることができる。北極では3月末から9月末頃までの半年間が白夜になり，全日24時間晴れた場合の夏至の日には日照量が時間換算して9時間半にも達し，日本の春(7時間程)よりも暖かであろう事が予想できる。そして日照量の季節変化は比較的滑らかなのに対し，日照時間の季節変化は急激であり可成り極端なものになっている(図9)。なお南半球での白夜の様相は，半年シフトしている以外は，北半球と同じになることを注記しておく。

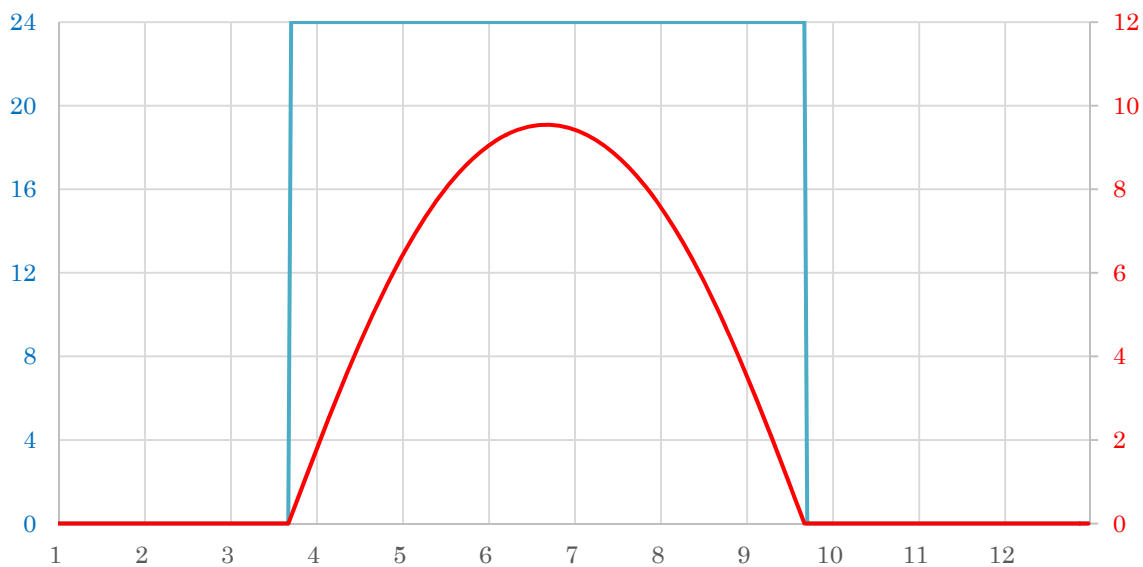


図9 北極地域における白夜の出現

緯度は90度，横軸は季節（月），縦軸は日照時間（青）と時間換算した日照量（赤）

簡単な計算と作図により，高緯度地域では年間を通した日照量は少ないものの，雲の無い場合には暖かい春のような白夜の出現を確認できた。

7 緯度により異なる年間日照量と地軸の傾き

地球が真球であり雲の全く無いという条件のもとで，地軸の傾きに関し，年間日照量の緯度による(一日当りの日照量の)差異を比較することができる。

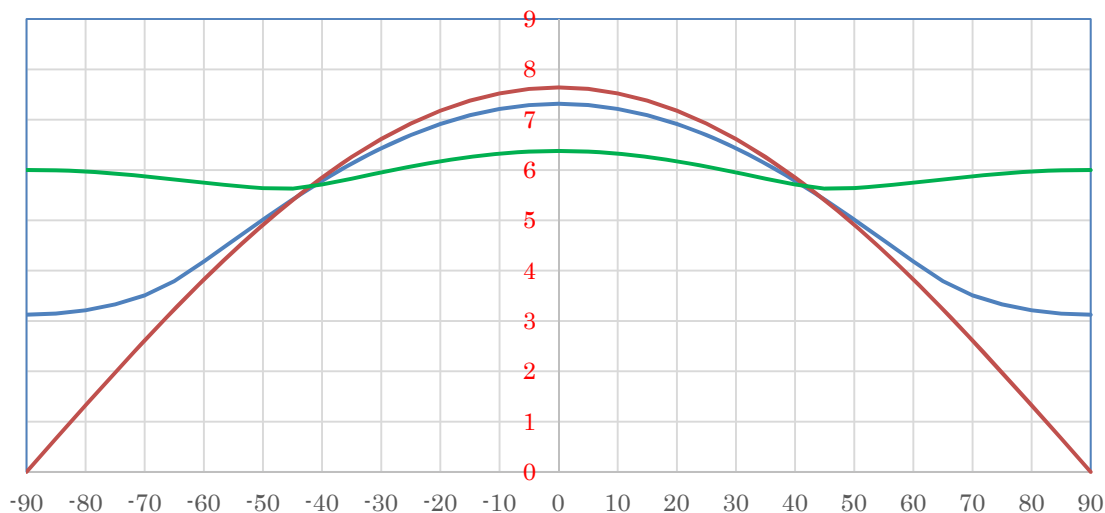


図 10 緯度と年間日照量と地軸の傾き

横軸は緯度 β ，縦軸は日照量の平均時間，地軸の傾き α は零度 (赤)，23.43 度 (青) および 45 度 (緑)

年間日照量は，数値積分を用い求めることにする．例えば，角度 γ を 1 度刻みにして，角度 0 度から 360 度までの範囲で日照量を求め，年間日照量を台形公式により近似し，真上からの日照時間に換算して，これを一日当たりの日照量とみなす．さらに，緯度 β における年間日照量は地軸の傾き α に対しどの程度依存しているのかを比較できるように，地軸の傾き α として 23.43 度と零度および 45 度の三つを選んでいる (図 4 ではセル M42 に計算結果を得ている)．

この結果より，地軸の傾き α が零度では，赤道での年間日照量は最大になるが極地では零という極端な状況になることがわかる．一方，地軸の傾き α が 23.43 度の場合は，緯度による日照量等の差は白夜により緩和されて，南北両極地の年間日照量が赤道の 40 パーセント以上になることもわかる(図 10)．

8 日照量の季節変動と緯度

日照量の季節変動と緯度との関係についても計算により比較することができる．赤道における日照量の季節変動と比較検討できるように，北半球に関し緯度を 10 度刻みで観測した場合の，日照量の差異はどの程度あるのかを調べてみる．なお南半球では夏至と冬至は逆転していることから分かるように，日照量

の季節変動と緯度との関係は、季節（月）がここで求めている北半球のもの(図11)に対して半年分シフトしていることを注記しておく。

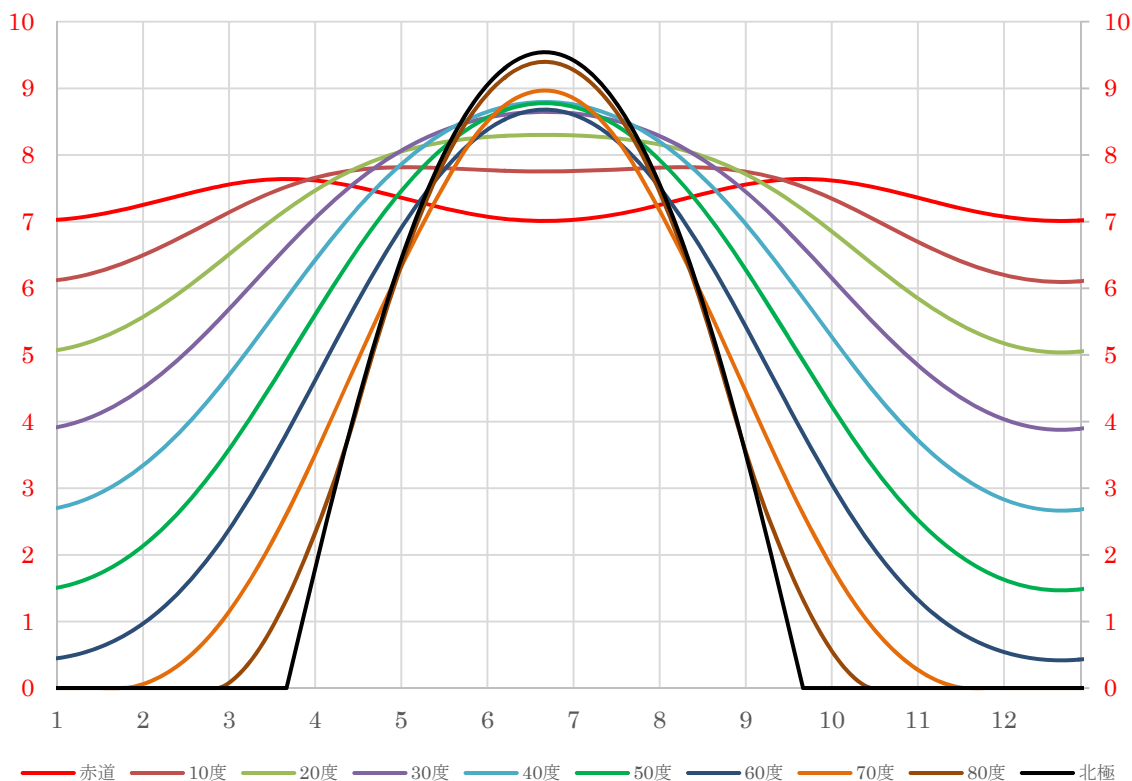


図11 日照量の季節変動と緯度との関係

地軸の傾きは 23.43 度，横軸は季節(単位は月)，縦軸は時間換算した日照量

日照量の季節変動は、日照時間および太陽高度の季節変動に依存する。その結果、緯度の高い地域における夏の日照量は一日当たり 8 時間以上もあり、同時期において 7 時間ほどに減ってしまう赤道での日照量よりも多く、極端な気候の白夜地域を除くと、穀物の栽培種を適切に選べば、秋の農作物の収穫量は赤道におけるよりも増えそうという、意外に感じられるような関係が得られる。そしてこのことは、計算をせずとも容易に推測できる。すなわち、赤道において日照量の最大となるのは春分の日と秋分の日そして日照量が 7 時間程度の最小値になるのは夏至の日と冬至の日という、例えば地球儀を眺めて考えることにより直ぐに理解できる関係だからである。ただしここでの計算結果からは、年間日照量については赤道地域において最大となるといった、馴染の常識とほぼ整合している様な関係も確認できることを注記しておく(図 10 参照)。

9 冬至・秋分・夏至・春分の日における日照量と緯度との関係

日照量と緯度との関係は季節によりどのようになっているのか、南北両半球

に関し，冬至/秋分/夏至/春分の日についても計算し比較する(図 12a,b).

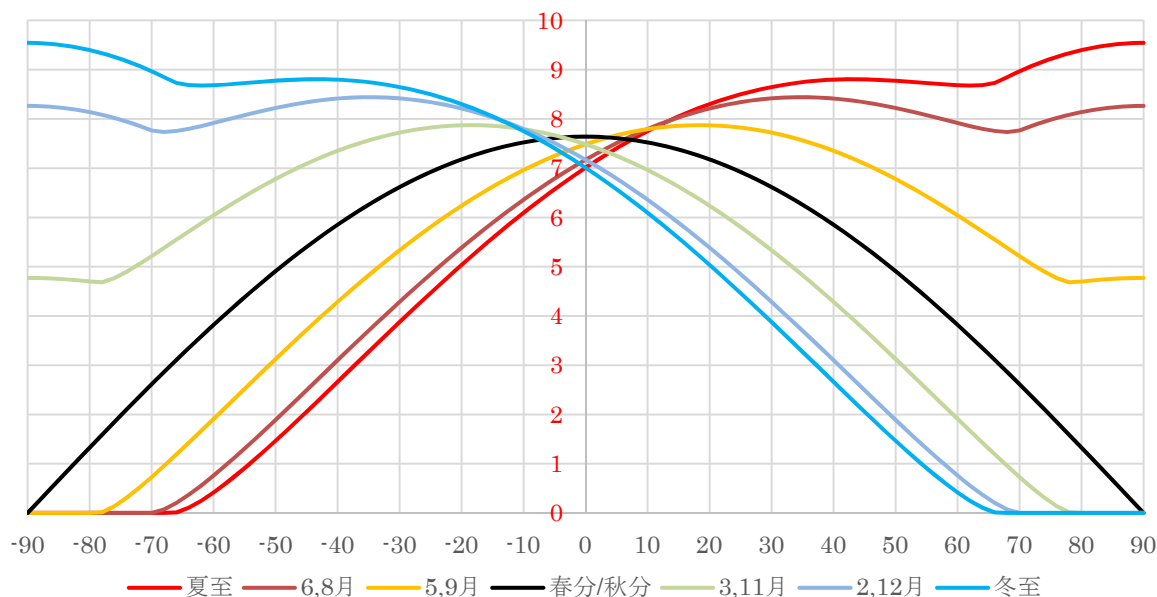


図 1 2 a 季節と緯度により異なる日照量の強さの概略

地軸の傾きは 23.43 度，横軸は緯度 (-90 は南極 90 は北極)，縦軸は時間換算した日照量

図 12a は太陽光発電の評価等用である．図 12b は気候への影響も評価できる様に，高緯度では緯度の余弦に比例し表面積の減る事を考慮し補正している．

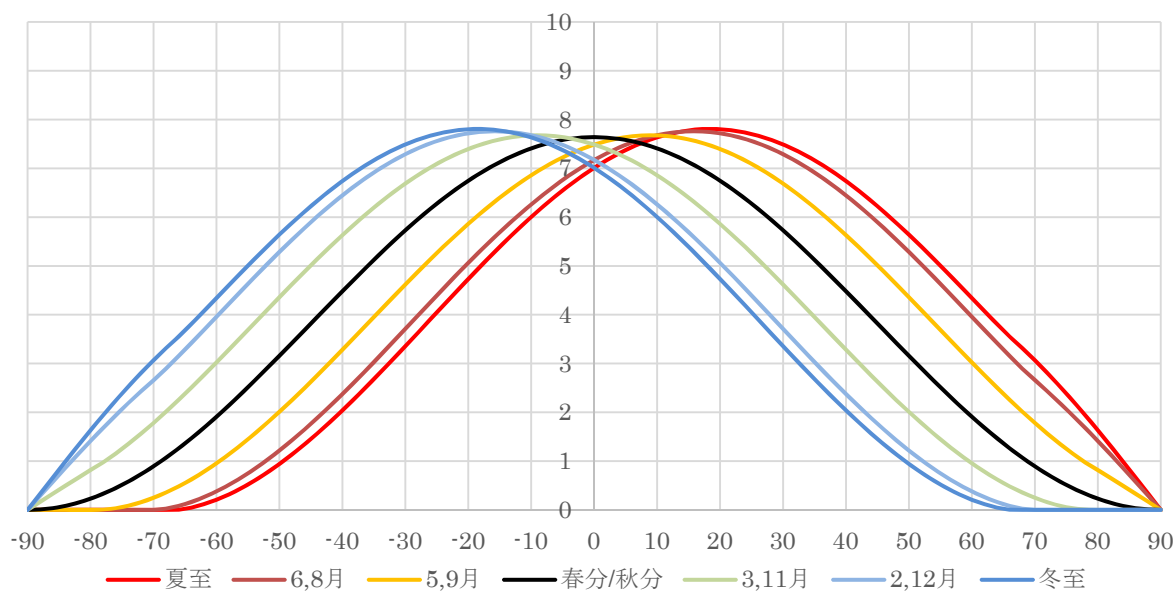


図 1 2 b 季節と緯度により異なる日照量の総量の概略

地軸の傾きは 23.43 度，横軸は緯度 (-90 は南極 90 は北極)，縦軸は時間換算した日照量

これらのことから、現在の大域的な気候の差異に対し、季節と緯度により大きく異なる日射量が影響していることは明らかである。そして、地形や気象条件と組み合わせることで、様相（液相、固相、気相）の変化が容易なことにより、地球表面の温度分布を均すことに関し、ほぼ支配的な影響を与えているのは水（H₂O）であることも理解できる。さらに低温下での水は、氷河とか氷山といった嵩張る上に移動速度も遅い固相になるため、日照量の極端な変化を均せなくて南北の両極地は氷に閉ざされた極寒の世界になったとも考えられる。

10 地軸の傾きにより異なる日照量の季節変化と四季

地軸の傾いていることにより、年間日照量の緯度による差異の大きく緩和されることを確認することができた。また季節の変化により日照量と緯度との関係は大きく異なることを確かめることもできた。ここでは現在の地球を基準にして比較できるように、緯度を同じにして地軸の傾き α だけを変えた場合の日照量の季節変動を比較してみる。計算例として、季節の変化を楽しめる 34.65 度に緯度 β を固定し、地軸の傾き α として 23.43 度を選んだ場合、および何らかの天変地異により、地軸の傾き α が 45 度もしくは 15 度へと激変した場合の日照量の季節変動を求め比較・検討できるようにしてみる。

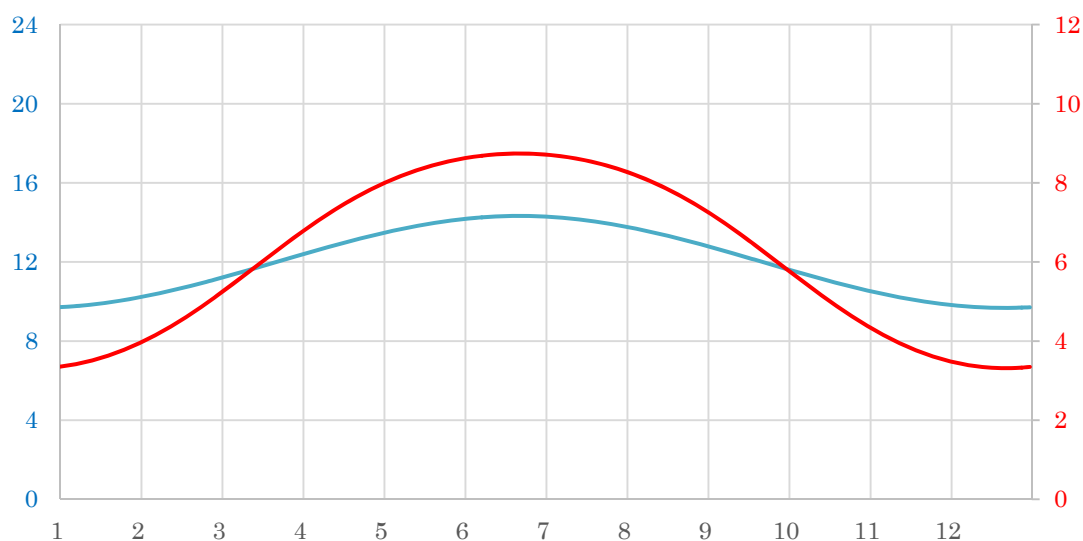


図 13 地軸の傾き 23.43 度における日照時間と日照量の季節変動
緯度は 34.65 度、横軸は季節（月）、縦軸は日照時間（青）と時間換算した日照量（赤）

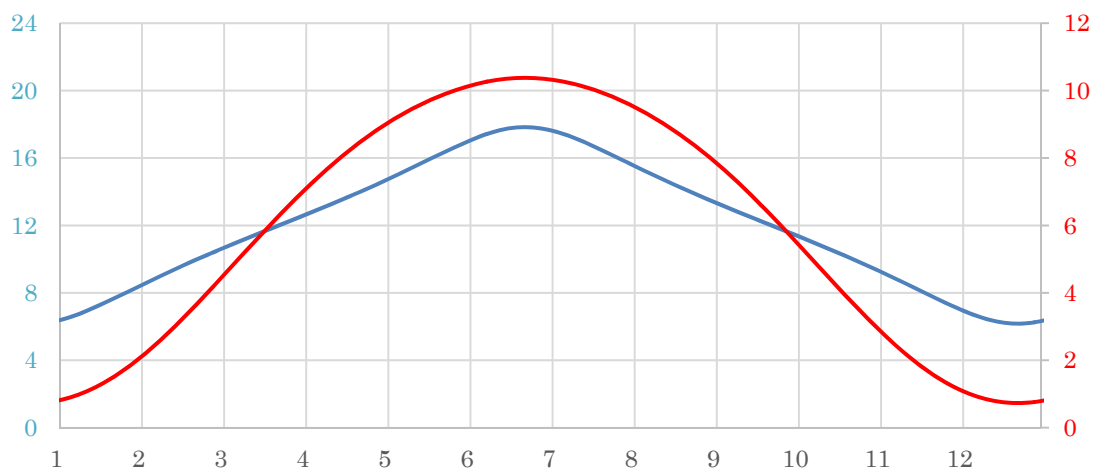


図 1 4 地軸の傾き 45 度における日照時間と日照量の季節変動

緯度は 34.65 度，横軸は季節（月），縦軸は日照時間（青）と時間換算した日照量（赤）

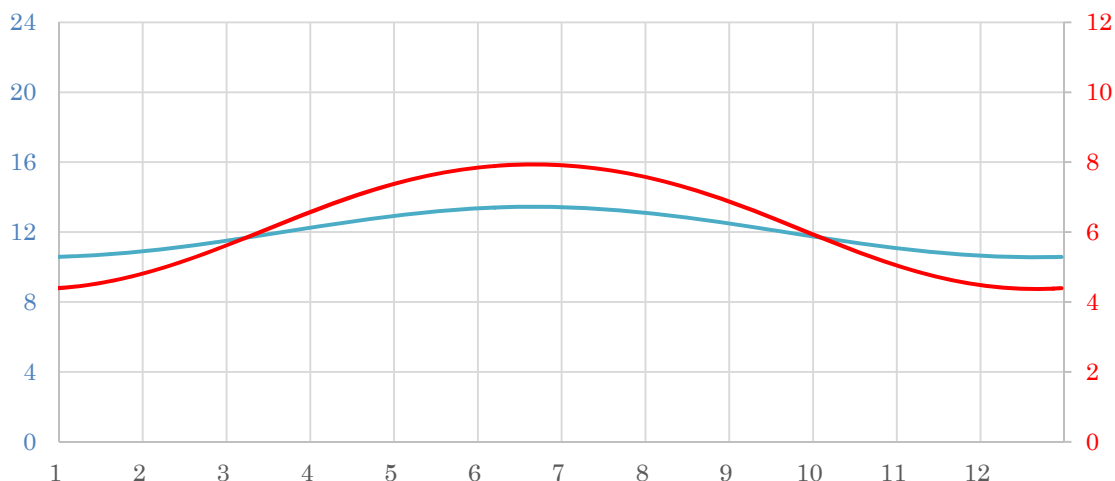


図 1 5 地軸の傾き 15 度における日照時間と日照量の季節変動

緯度は 34.65 度，横軸は季節（月），縦軸は日照時間（青）と時間換算した日照量（赤）

緯度を 34.65 度に固定して日照量の季節変動（最大値と最小値間の変化）を比較すると，地軸の傾き 23.43 度における日照量の変化は四季に区分できそうであり（図 13），夏冬の部分は安定した季節であること，春秋相当の期間は移ろい易い季節といった様相を示している事が分かる．一方，地軸の傾き 45 度（図 14）における季節区分については，春秋相当部分における変化は急峻かつ大きくなることから，季節としては酷暑の夏と寒さの厳しい冬の 2 季だけになるように思える．そして，地軸の傾きが 15 度（図 15）における変化を見ると，寒い冬が無くなり暑い夏と温暖な春と秋の 3 季だけになってしまうようである．

地軸の傾きによる差異の概要を比較するべく，緯度を 35 度にし，角度 0 度から 45 度までを 5 度刻みにして日照量の季節変化を計算してみる（図 16）．

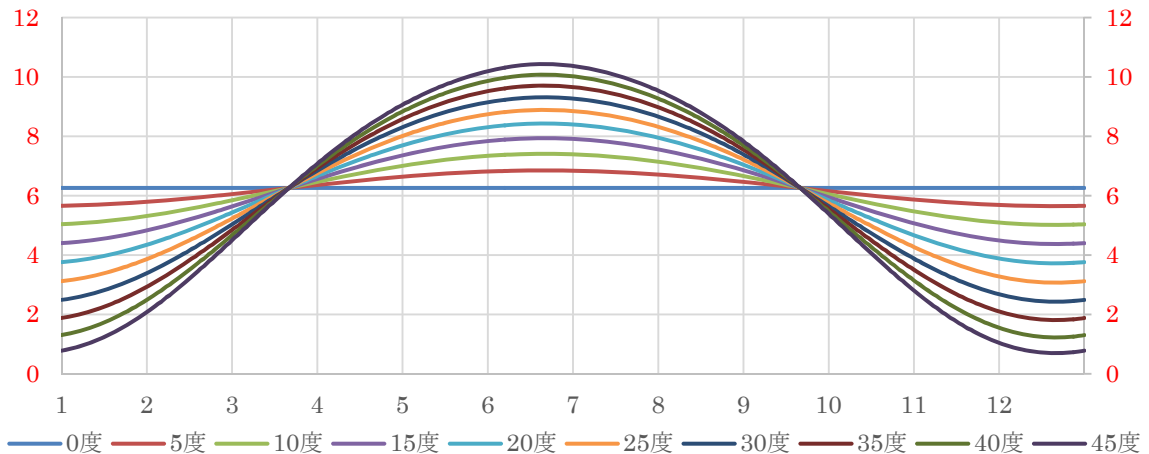


図 1 6 地軸の傾き 0 度から 45 度までの変化に対する日照量の季節変動概略
緯度は 35 度，横軸は季節（月），縦軸は時間換算した日照量

この結果からも，地軸の傾きが大きくなるにつれ，季節の変化が現れてくることは明らかである．地軸の傾きが小さい場合の季節の区別は 1 季しかなく，地軸の傾きが大きくなるにつれて 2 季から冬の無い 3 季に増え，傾きがさらに大きくなると，四季を経て急激な季節変化を伴う暑い夏と寒い冬の 2 季になってくる．なお地軸の傾きが 25 度だと，日照量は最大 8.89 時間から最小 3.07 時間の範囲内で変化することから，この辺りだと春夏秋冬の四季が楽しめそうである．

勿論，現在の地軸の傾き α は 23.43 度であり，極端な天体現象の起きない限りほぼこの角度のままであるが，この角度が大きく変化すると環境は大激変してしまい，現在の様に季節の変化を楽しむ様なことは出来なくなってくる．

1 1 赤道における日照時間と日照量の季節変化と地軸の傾き

地軸の傾き 0 度，23.43 度，45 度および 90 度について，赤道での日照時間と日照量の季節変動との関係にどのような差異があるのかを調べることにする．

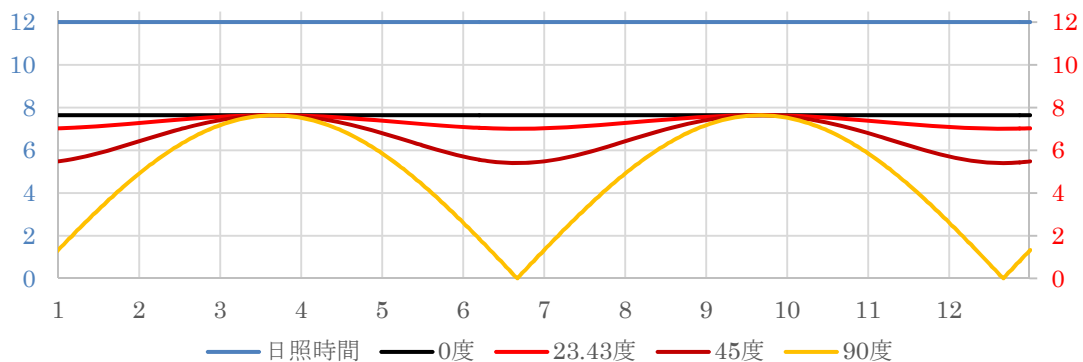


図 1 7 地軸の傾き(0, 23.43, 45, 90 度)に対する赤道の日照時間と日照量
横軸は季節(月)，縦軸は日照時間(青)と地軸の傾きに対応する日照量(各色)

赤道における季節変動の比較によると、地軸の傾き 0 度(黒)では日照量の季節変動は皆無であり、現状の 23.43 度(赤)では僅かな変化が現れる。これに対し、地軸の傾きが 45 度(茶)になると、例えば赤道の冬と北半球の夏とが連動するような日照量の季節変動らしきものが現れて来る(図 17)。

これらの比較から、単なる思い付きだが、地軸の傾き 0 度と 23.43 度では赤道付近は日照量の利用効率が高そうな果樹栽培に適している様に思える一方、地軸の傾きが 45 度へと激変した場合、赤道付近だと穀類の品種によっては二期作が可能になりそうなことから、農業が大発展している様な気もする。そして地軸の傾きが 90 度にもなると天候などの様相は大激変することになる。

12 あとがき

簡単な数理モデルに基づく日照時間と日照量の比較計算ではあったが、良く聞く言葉「奇跡の惑星」の通り、地球は絶妙なバランスを保ちつつ宇宙空間に浮かんでいるということを感じとることができたのではないだろうか。

計算結果から、例えば北緯 50 度を超える高緯度地域には、夏の日照量は日本と同程度なのに対し日照時間が 15 パーセント程長い為、穀倉地帯が多く牧草も豊富で夏の過ごし易いこと等が理解できる(図 2, 図 4, 図 5 参照)。

さらには、出アフリカ以降の人類の移動経路に日照時間と日照量の地域差が大きく影響していたのではないかと思えてくる。特に極東の地である日本が日出国と言うよりも日降り注ぐ地(三内丸山遺跡付近では夏至の日の日照量が最大)でもあると確認できた事には驚いた次第である。また季節変動のため夏の太陽光発電量と比較し冬の発電量は 37%程に下がることそしてその変動幅は高緯度になるほど大きくなることも確認できた(図 10, 図 11, 図 12a 参照)。

ここでは、理論計算に利用できそうな資料が見当たらなかったため、基礎的知識にのみ基づいて計算式を組み立てている。ただし陽的に計算できるよう、季節の変化に対応する公転角度に関連させて、太陽から地球を見た場合の見かけの地軸の傾きを求めるよう工夫した(図 3 参照)。その結果、この見かけの地軸の傾きが変わる毎に、その角度での夏至の日の日照時間を求める様にして、日照量は定積分を用い年間日照量は数値積分により計算することで、季節と緯度により異なる日照の変化の様子を簡単に知ることを出来るようになった[2]。

このような取り組みは、座標変換を次々と重ねて構成する様なやり方だと計算は煩雑になり陽的な計算が困難になることと比較して、単純かつ直感的であることからコロンブスの卵的に目新しく感じてもらえるものと思う。

なおこの資料は個人による自然科学分野の著作物であり、いくつかの仮定に基づいた計算をしている。そして出典さえ明示すれば自由に利用できる。

参考文献

- [1] 偉大なる失敗, マリオ・リヴィオ著, 千葉敏生訳, 早川出版, 2017
- [2] ホームページ「<http://cafe.mis.ous.ac.jp>」にて 2018 年から公開,
現在, 2021 年からはホームページ「sawamixture.jp」にて公開中.

問い合わせ先: sawamixture@gmail.com