太陽の位置、可照時間、大気外水平面日射量

地球上のほとんどすべてのエネルギーの源は，地球から 1.5 億 km も離れた太陽から届く放射である．地球は太陽の周囲を公転しながら，常に太陽放射を受けている．地球が太陽放射を受け続けているにもかかわらず，融けてしまうこともなく現在の状態を保っているのは，地球もまた宇宙空間に放射しているからである．

本講義では，放射の基礎，太陽の位置，太陽エネルギーについて解説する．

１．黒体放射

あらゆる物体は，温度が 0 K でない限り電磁波を放射している．物体の表面の単位面積から単位時間に放射されるエネルギー量は, その物体の絶対温度の 4 乗に比例する. この関係は次式に示す Stefan-Boltsman の法則で表される．

$$I = \varepsilon\sigma T^4 \tag{1}$$

ここに，I は放射強度(W m^{-2})，T は温度(K)，σ はステファンボルツマン定数(5.67·10^{-8} W m^{-2} K^{-4})，ε は射出率である．射出率 ε=1の理想的な物体は黒体と呼ばれ，自らは理論的に最大のエネルギーを放射し，また入射する全ての波長の放射を完全に吸収する．実際の物体の射出率は1より小さく，一般の物体は灰色体と呼ばれる．

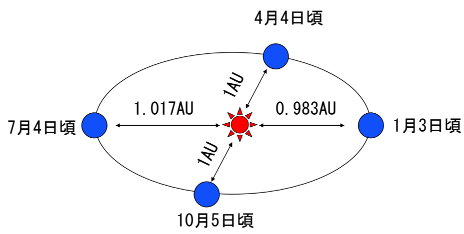
※【Excel】4 乗：^4（eg. =B1*B2*B3^4），5.67×10^{-8}（5.67e-8）

２．太陽放射

ここでは大気や雲の影響は無視して，どれだけの太陽放射エネルギーが地球に入射するか考える．

2.1　地球ー太陽間の距離と太陽放射エネルギー

地球は太陽のまわりを約 365 日の周期で楕円軌道を描いて公転している．地球と太陽の平均距離 d_0 は 1.496×10^8 km で，天文単位では 1（AU）で表される．地球と太陽が平均的な距離にあるのは，4 月 4 日，10 月 5 日頃である．地球が太陽に最も近い距離（1.47×10^8 km）に達する近日点はほぼ 1 月 3 日であり，最も遠い距離（1.52×10^8 km）に達する遠日点がほぼ 7 月 4 日である．



d_o=1AU=1.496×10^{8}km

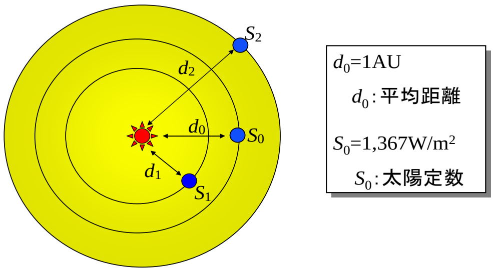
図 1　地球ー太陽間の距離

ある平面の単位面積に単位時間あたり入射する放射エネルギー量を放射強度 S(W m^{-2})という．地球と太陽が平均距離 d_0 にある時に，大気上端で太陽光線に垂直な単位面積が単位時間に受ける太陽放射エネルギーS_{d0} は 1,367W m^{-2} で，太陽定数と呼ばれている．任意日の地球ー太陽間の距離 d における放射強度を S_{d0} とすれば，距離 d_0，d を半径とする球面が受ける放射エネルギーは太陽放射エネルギーに等しい．したがって

$$S_{d0} 4\pi d_0^{\ 2} = S_d 4\pi d^2 \tag{2}$$

である．したがって，

$$S_d = \frac{S_{d0} d_0^{\ 2}}{d^2} = \frac{S_{d0}}{(d/d_0)^2} \tag{3}$$



$S_o \cdot 4\pi d_o^2 = S_1 \cdot 4\pi d_1^2 = S_2 \cdot 4\pi d_2^2$

図 2　地球－太陽の位置と放射強度の関係

である．すなわち放射強度は距離の 2 乗に逆比例する．したがって，地球－太陽間の距離がわかれば，大気上端で太陽光線に垂直な面が受ける太陽放射強度 S_{d0} は(3)式より求めることができる．

地球－太陽間の距離 d は，通日 D を用いて推定できる．通日とは 1 月 1 日から数えた日数で，1 月 1 日なら 1，1 月 31 日なら 31，2 月 1 日なら 32，12 月 31 日なら 365 である．通日 D より地球－太陽間の距離を求める式には各種あるが，ここでは次の簡便式を用いる．

$$d/d_0 = 1 + 0.01676 * \cos(0.01721 * (D - 186)) \tag{4}$$

※【Excel】角度の単位はラジアン（rad）を使用する．rad とは 180° を π（=3.14･･･）とする無次元数．

※【Excel】° からラジアンへの変換は，=radians(B3)．ラジアンから° への変換は，=degrees(B3).

※【Excel】通日は次のようにすれば求まる（B3 に年月日を入れた場合）．=B3-date(year(B3)-1,12,31)

2.2　入射角と太陽放射エネルギー

前節で示したように，地球－太陽間の距離は夏よりも冬の方が近く，地球が受ける太陽放射も夏よりも冬の方が遠い．しかし，我々が生活している北半球では冬よりも夏の方が太陽放射は多い．これは，太陽光線の入射角が季節によって変化することに起因している．

地球は公転面に対して 66.5° の角度をもって自転している．すなわち，地球の赤道面は公転面と 23.5° の角をなしている．したがって，太陽は夏至（6 月 21/22 日）には北緯 23.5° の北回帰線上にあり，冬至（12 月 21/22 日）には南緯 23.5° の南回帰線上にあり，春分（3 月 20/21 日）と秋分（9 月 22/23 日）には赤道上にある．太陽光線が地球赤道面となす角を太陽赤緯 δ という．太陽赤緯 δ は，夏至には 23.5° ，冬至には-23.5°，春分と秋分には 0° である．

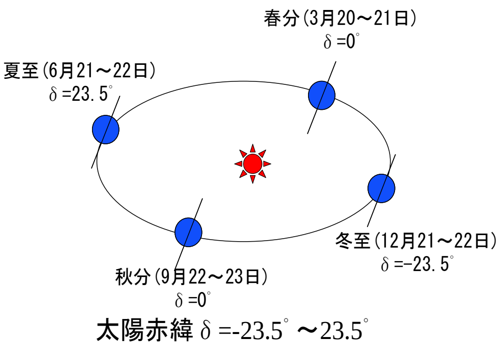


図 3　地球の公転と太陽赤緯の関係

太陽赤緯 δ も通日 D から推定できる．太陽赤緯の推定式は各種提案されているが，ここでは次の簡便式を用いる．

$$\begin{aligned} \delta &= 23.5 * \cos(0.01689 * (D - 173)) && \text{deg} \\ &= 23.5 * \cos(0.01689 * (D - 173)) * (\pi/180) && rad \end{aligned} \tag{5}$$

太陽が水平面となす角度 h を太陽高度，その余角を天頂角という．太陽赤緯 δ がわかれば，緯度 ϕ の地点における南中時の太陽高度 h が次式より算定できる．

$$h = \frac{\pi}{2} - \phi + \delta \tag{6}$$

たとえば福岡市（ϕ ＝33.6^{o}N）では，夏至の南中時の太陽高度 h は 79.9^{o}，冬至の南中時の太陽高度 h は 32.9^{o} である．

任意の日時の太陽高度 h はその地点の緯度ϕ，月日（これが太陽の赤緯を決める），および時角 ω によって決まる．

$$\sin h = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega \tag{7}$$

ここに，時角 ω は時刻を角度で表したものであり，南中時を 0^{o}，1 日を 2π=360^{o} として，午前側を負，午後側を正とした値である．

太陽は 1 時間につき 15^{o}（π/12）回転するから，地方真太陽時（その地の真南を通過する瞬間を正午とする）と時角の間には

ω＝π/12×（地方真太陽時－12 時）　　(8)

という関係がある．南中時には ω＝0 であるから，式（7）は

$\sin h$＝cos（ϕ－δ）＝sin（π/12－ϕ＋δ）

となり，式（6）と同じになる．

日没時には太陽高度 h＝0（sin$h$=0）であるから，その時の時角を ω_oとすると，式（7）より，

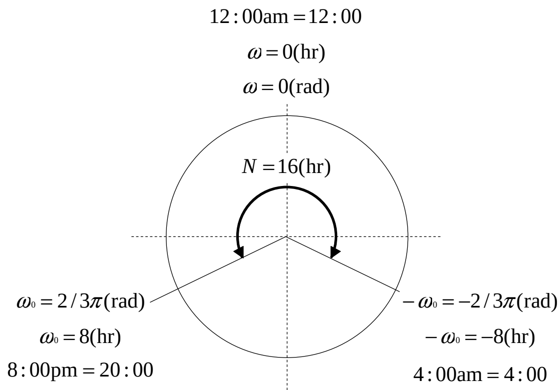


図 4　時角と時刻（地方真太陽時）の関係

$$0 = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega_o$$

$$\cos\omega_o = -\frac{\sin\phi \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta} = -\tan\phi \tan\delta$$

したがって，

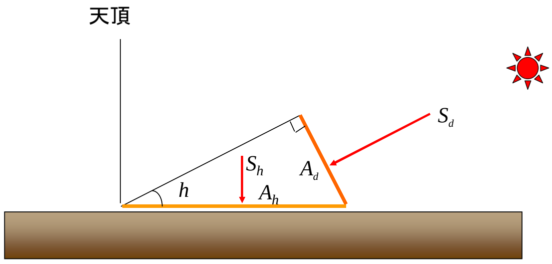
$$\omega_o = \cos^{-1}\left(-\tan\phi \tan\delta\right) \tag{8}$$

※【Excel】sin, cos, tan の逆三角関数は，asin, acos, atan．(eg. =acos(-tan(B1)*tan(B2))

可能最大の日照時間は可照時間N(hr)と呼ばれるが，これは日の出時から日没時までの時角を時間単位に換算すればよいので，次式より推定できる．

$$N = 2\omega_o * \left(\frac{24}{2\pi}\right) \tag{9}$$

太陽と地球は十分に離れているので，太陽光線は全て平行に地球表面に入射しているとみてよい．大気上端の太陽光線に垂直な面積 A_d の平面を考え，その面上の放射強度を S_d とする．この平面が受けとる放射量は S_dA_d である．これだけの放射量が水平面上 A_h という面積に広がるのだから，大気上端の水平面上



$S_h \cdot A_h = S_d \cdot A_d$

$S_h = S_d \cdot (A_d / A_h) = S_d \cdot \sin h$

図 5　太陽高度と日射強度の関係

の放射強度（大気外水面日射強度）を S_h とすれば

$$S_h A_h = S_d A_d \qquad (10)$$

という関係が成り立つ．$A_d = A_h \sin h$ であるから

$$S_h = S_d\,(A_d / A_h) = S_d \sin h \qquad (11)$$

となる．

$S_d = S_{d0}/(d/d_o)^2$ であるから，式(3),(11)から，ある月日，ある時刻における大気外水面日射強度を推定できる．

$$S_h = \frac{S_{d0}}{(d/d_0)^2}\sin h \qquad (12)$$

式(12)を日積算すると，大気外水平面日射量 $S_{h,day}$ を推定できる．

$$S_{h,day} = \frac{86400}{\pi}\frac{S_{d0}}{(d/d_0)^2}(\cos\phi\cos\delta\sin\varpi_o + \varpi_o\sin\phi\sin\delta)\times 10^{-6} \quad \mathrm{MJ\ m^{-2}\ d^{-1}} \qquad (13)$$