

斜面日射量の計算方法について

紙井 泰典¹ · 近森 邦英²

(¹農学部農林環境工学講座 · ²高知大学名誉教授)

A Calculation Method of Solar Radiation Incident upon Slopes

Yasunori KAMII¹ and Kunihide CHIKAMORI²

¹*Chair of Land Environmental Engineering, Faculty of Agriculture*

²*Emeritus Professor, Kochi University*

Abstract: In Japan, it is important to estimate solar radiation incident upon slopes, because there are so many cultivated lands in mountaneous area, and most of them are on slopes. Here, authors present a method to calculate solar radiation incident upon slopes (for simplicity, denoted as "slope radiation" hereafter).

First, authors present how to convert horizontal diffuse and direct radiation to those on slopes. Secondly, the method to separate global radiation into diffuse and direct radiation is shown. Thirdly, how we can consider the effect of surrounding obstacles are mentioned. In this paper, authors divide working area into a number of triangles to simulate the topograh, which, originally, was given by Miura et al. (1980), then develop "360 degree directions'obstacle altitudes". Usig the obstacle altitudes, we can easily calculate direct and diffuse slope radiation. Thirdly, an example of calculated slope radiations at Misato mountaneous area, eastern border of Kochi City on Nankoku City is presented.

Key word: Solar Energy, Solar Radiation, Slope Radiation, Separation of Global Radiation

まえがき

斜面日射量は、傾斜農地の農業生産力や地域の熱収支などを考えるとき必要となる。多種多様な勾配・方向をもつ斜面の全てについて斜面日射量を実測することは実際上困難であるので、斜面日射量は最寄りの気象官署で計測されている水平面全天日射量（以下単に「全天日射量」という）から計算によって求めるのが普通である。ここで全天日射量は、文字通り全天から水平面に達する日射量であり、その中には太陽光球から直接地上に到達する直達日射成分と、大気の中で散乱されて複雑な経路で地上に到達する散乱日射成分とが含まれている。斜面日射量には直達成分・散乱成分のほか、地上面からの反射日射量も含まれている。

$$TS = DS + SS + RS \quad (1)$$

ここに、TS：斜面全天日射量、DS：斜面直達日射量、SS：斜面散乱日射量、RS：斜面反射日射量。斜面直達日射量は、直達日射強度と斜面への入射角の余弦との積として計算される。ここでは日

射量・日射強度の単位は、MJ/(m²・hr) とする。

散乱日射量は、晴天の日には太陽の周囲から指向性の強い散乱光が放射され、天空放射分布は一樣とはいえないが¹⁾、曇天の日の放射分布は雲の分布によって異なり、完全曇天の場合、ほぼ全天一樣となるなど、まだ十分に解明されたとはいえない現状である。また斜面日射量の推定に際しては全天一樣散乱を仮定した方が推定精度が高いという報告²⁾もあることなどから、ここでは全天一樣放射分布を仮定する。このとき、斜面散乱日射量は次式で表される。

$$q_{SS} = q_{SH} \cdot (1 + \cos i) / 2 \quad (2)$$

ここに、 q_{SS} ：斜面散乱日射量、 q_{SH} ：水平面散乱日射量、 i ：斜面勾配 (rad)。

(2) 式は次のように考えることができよう。Fig. 1 において、一樣散乱を仮定し、天球半径を 1、単位面積の天球部分から地上に達する散乱放射強度を dq_{SN} とすると、高度 H の単位天球面から水平面上の観測点 O に到達する放射量は $dq_{SN} \cdot \sin H$ である。 $\sin H$ は単位天球部分の水平面正射影面積に等しいから、全天について積算した水平面散乱日射量は $dq_{SN} \times$ 天球面の水平面正射影面積 (= 短径 $\cos i$ 、長径 1 の半楕円の面積 + 半径 1 の半円の面積 = $\pi \cdot 1^2 \cdot (1 + \cos i) / 2$) となる。斜面が存在しないときの水平面散乱日射量は $q_{SH} = dq_{SN} \cdot \pi$ (π = 半径 1 の円の面積) であるから、(2) 式の左辺を斜面が存在するときの水平面散乱日射量としたときについて (2) 式が成り立つ。

ところで斜面散乱日射量は、Fig. 1 全体を角度 i だけ反時計回りに回転してみると、斜面が存在するときの水平面のそれに等しいことがわかる。よって (2) 式が成り立つ。

斜面 (短波) 反射放射量については、反射強度 \times 反射地物の斜面上への正射影面積として計算される。ただし、単位地上部分からの反射強度は Σ (地物への入射角毎の天空からの短波放射量) \times 入射角毎の地物のアルベド (反射率) となる (この計算において Σ は入射角毎全天を区分して行うものとする)。アルベドは入射角のほか地物の種類によっても異なり、農業土木ハンドブック³⁾にも掲載されているが、樹木などの自然地物であれば季節によっても異なる⁴⁾ので、厳密を期するのであれば実測によるしかないであろう。仮に鉛直壁に対して樹木のアルベドを 0.16 程度と仮定しても、地物の斜面正射影面積は 50% であるから、反射をまるまる無視したときの誤差は 8% 程度ということになる。斜面勾配 60 度とすると 4% 程度であり、日射データそのものが数% の誤差を含むことを考えると、反射をそれほど重要視しなくともよいように思われる。

長波放射は物体の温度の関数であり、黒体放射近似で計算してよさそうである⁵⁾。しかし、ここでは太陽光に直接起因する短波放射に限定して話を進めることとする。

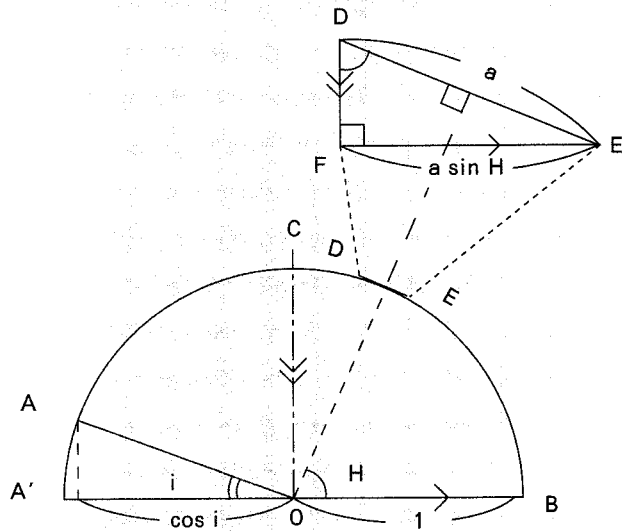


Fig. 1 単位面積の天空からの散乱日射の説明図

以上述べたように、斜面日射量の計算方法は直達日射量と散乱日射量とは異なっているため、少なくとも直達日射量に関しては、太陽高度と方位を算定して斜面入射角を求めるために時間量程度の実測データが必要である。しかし、日射量成分を計測している気象官署は、全国で直達日射量が14官署(札幌・根室・秋田・宮古・輪島・松本・館野・米子・潮岬・福岡・鹿児島・土佐清水・石垣島・那覇)、散乱日射量が1官署(館野)に過ぎない。気象官署の多くで計測されている全天日射量を利用するためには、何らかの方法でこれを直達・散乱成分に分離することを考えざるを得ない。これが日射量の直散分離と呼ばれる問題である。

直散分離の方法はこれまでいくつか提案されている^{6), 7), 8), 9)}。また直散分離ではないが時間日照率から時間直達日射量を推定する式¹⁰⁾、気候学的に直達・散乱日射量を「その地方を代表する地点の12時に観測された月平均透過率」P及び日照率を使用して推定する式¹¹⁾、時間全天日射量がわかっていないとき、日量全天日射量を時間全天日射量に振り分ける式¹²⁾などがあり、これらを組み合わせると時間全天・直達・散乱日射量を推定することが可能である。

ここではいずれかの方法によって、時間直達・散乱日射量が得られたとして、それらを斜面上の値に変換するときの詳細について述べることにする。

直達日射量の斜面日射量への変換

1. 水平面直達日射量の式

太陽光が強度 I_0 で地球大気の外に到達したとする。光は大気中の空気分子や水蒸気、塵埃などによって散乱・吸収されてその残りが地上に到達する。これが直達日射量である。従って直達日射強度は光が大気中を通過する長さが長いほど減少し、一般に次式によって表される。

$$I_{DN} = I_0 \cdot P^M \tag{3}$$

ここに、M: 光学的相対質量 ($M = \sec z_0 = \text{cosec } h$, Fig. 2 参照), h : 太陽高度 (rad), z_0 : 天頂角 (rad), P: 大気の透過率 (無次元)。水平面直達日射量 I_{DH} は、次式によって表される。

$$I_{DH} = I_{DN} \cdot \sin h = I_0 \cdot P^M \cdot \sin h \tag{4}$$

大気の透過率は0と1の間の値であり、理科年表¹³⁾に各地の最大値と平均値が記載されている。参考のために Русин (1979) から内嶋 (1980)¹⁴⁾ が引用した透過率の表を Table 1 に引用する。

(4)式 $\sin h$ は太陽赤緯 δ 、時角 t 、観測点の緯度 ϕ から次式によって求めることができる^{11), 16)}。

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \tag{5}$$

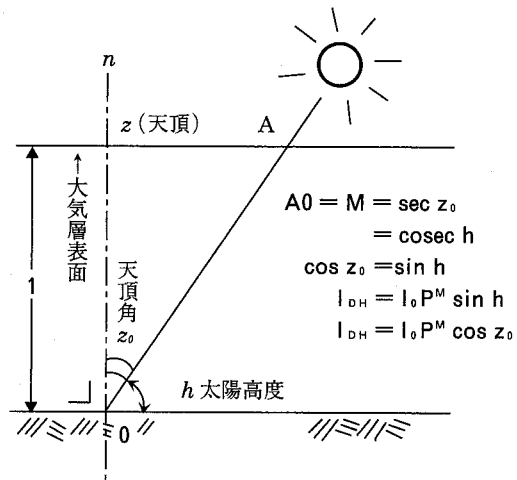


Fig. 2 直達日射の説明図

Table 1 大気の汚れ具合と大気透過率P (Rusin)⁽⁴⁾

大気の汚れ具合	太陽高度 (度)									S _{P, M} cal/cm ² min
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
非常に強く汚れている	0.705	0.642	0.594	0.568	0.554	0.545	0.540	0.537	0.535	< 0.71
強く汚れている	0.750	0.690	0.652	0.632	0.615	0.607	0.602	0.595	0.591	0.71~0.91
やや汚れている	0.785	0.730	0.697	0.673	0.670	0.660	0.655	0.647	0.641	0.91~1.03
普通	0.820	0.775	0.747	0.721	0.710	0.705	0.700	0.696	0.692	1.04~1.15
やや澄んでいる	0.850	0.810	0.786	0.763	0.755	0.750	0.745	0.740	0.737	1.16~1.28
かなり澄んでいる	0.876	0.843	0.826	0.803	0.795	0.790	0.785	0.779	0.778	> 1.28
理想大気	0.930	0.914	0.904	0.896	0.893	0.890	0.888	0.886	0.884	

(注) S_{P, M} は実際大気条件下での直達日射強度

また太陽方位角 α は、太陽高度 h などから次式によって求められる。

$$\sin \alpha = \cos \delta \cdot \sin t / \cos h \tag{6}$$

斜面上の太陽高度 h' は太陽の位置と斜面法線の方位 β とから次式によって求められる⁽¹⁾。

$$\sin h' = \sin h \cdot \cos i + \sin i \cdot \cos h \cdot \cos (\alpha - \beta) \tag{7}$$

(7) 式にそのときの瞬間直達日射強度を掛ければ、瞬間斜面日射量が得られる。

ここに、 δ : 太陽赤緯^{(13), (15), (16), (17)} (rad), ϕ : 観測地点の緯度 (北緯を正にとる, rad), α : 太陽方位角 (南中時を 0, 西回りに正にとる, rad), β : 斜面方位角 (南向きを 0, 西回りに正にとる, rad), t : 時角 (南中時を 0 として、時間の進行方向に時刻を角度表示したもの、24 時間が 2π に当たる、午前中を負、午後を正にとる (rad)。

なお、太陽の天球上の運行と α , h , ϕ , δ との関係を図 3 に示す。

2. 斜面直達日射量の式

岡上⁽¹⁸⁾ によると瞬間斜面直達日射量 I_{DS} , 積算斜面直達日射量 Q_{DS} は次式によって表される。

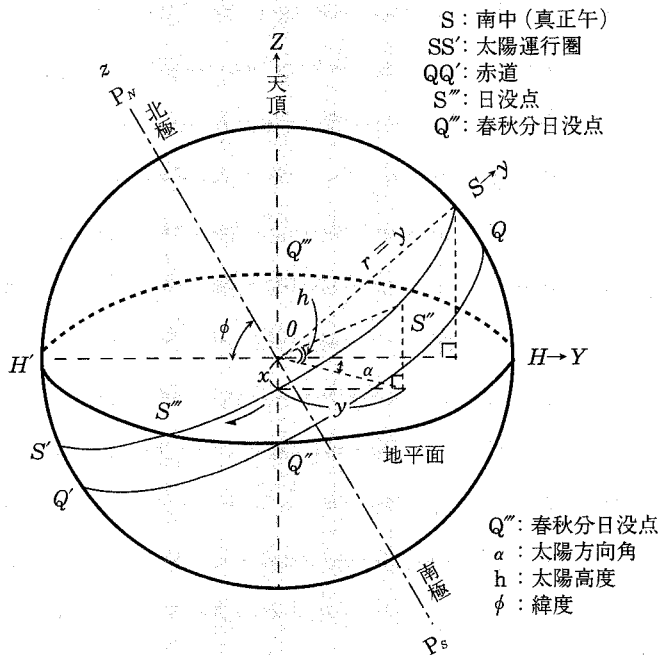


Fig. 3 太陽の運行

$$I_{DS} = I_{DN} \left\{ \sqrt{1 - (\sin i \cdot \cos \beta' \cdot \cos \phi + \cos i \cdot \sin \phi)^2 \cdot \cos \delta \cdot \cos(\omega t + \sigma)} + (\sin i \cdot \cos \beta' \cdot \cos \phi + \cos i \cdot \sin \phi) \cdot \sin \delta \right\} \quad (8)$$

$$Q_{DS} = Q_{DN} \left[1/\omega \cdot \sqrt{1 - (\sin i \cdot \cos \beta' \cdot \cos \phi + \cos i \cdot \sin \phi)^2 \cdot \cos \delta \cdot \sin(\omega t + \sigma)} + (\sin i \cdot \cos \beta' \cdot \cos \phi + \cos i \cdot \sin \phi) \cdot \sin \delta \cdot t \right]_{t_1}^{t_2} \quad (9)$$

$$\sigma = \tan^{-1}(\sin i \cdot \cos \beta') / (\cos i \cdot \cos \phi - \sin i \cdot \cos \beta' \cdot \sin \phi) \quad (10)$$

ここに、 I_{DS} ：瞬間斜面直達日射量、 I_{DN} ：瞬間直達日射強度、 Q_{DS} ：時刻 t_1 から t_2 までの積算直達日射量、 Q_{DN} ：時刻 t_1 から t_2 までの平均直達日射強度。時間直達日射量データがあればそのまま用い、直散分離によって水平面直達日射量 Q_{DH} から求める場合は $Q_{DH} / (\sin h$ の時間平均値) として計算する。 β' ：斜面の方位角 (北を 0 とし、東廻りを正にとる)。 ω ：自転の角速度、 $2\pi / 24$ rad/hr または $2\pi / 1440$ rad/min。 t_1, t_2 ：積算直達日射量の計算開始時刻及び終了時刻 (hr または min)。南中時を 0、午後を正、午前中を負とする。時間積算値を計算するのであれば t_1, t_2 を日の出から日の入りまでの間の日の出時刻 (t_1) とその直後の正時 (t_2)、毎正時 (t_1) と次の正時 (t_2)、日の入り直前の正時 (t_1) と日の入り時刻 (t_2) などとする。1 日中直達日射強度が一定と仮定してよいのであれば、 t_1 を斜面の日の出時刻、 t_2 を日の入り時刻とする。時間積算、日積算いずれにしても日の出・日の入り時刻は必要である。斜面が無限に長いと仮定すれば、(8) 式右辺の $\{ \}$ の中を 0 とおいて t について解けば、理論上斜面の日の出・日の入り時刻が求められるが⁽¹⁸⁾、実際の斜面においては後述の遮蔽高度を考えた日の出・日の入り時刻を用いる。

遮蔽高度と斜面法線の求め方

1. 遮蔽高度

前項で述べたように (9) 式を用いるためには、日の出・日の入り時刻を求める必要がある。太陽の方角に遮蔽地物があるときは、遮蔽地物の仰角よりも太陽高度が高くなければ日は当たらない。この考え方に基づいて、三浦ら⁽¹⁹⁾は、地域を三角形で近似し、観測地点 (三角形の重心) と太陽の方向を結ぶ線上にある地物の仰角を計算し、その中の最大の仰角 (以後「遮蔽高度」という) と太陽高度とを比較し、観測地点に日が当たるか否かを判定することを提案している。1 日で最初に斜面に日が当たり始める時刻をその斜面の日の出時刻、その後日が当たらなくなった時刻をその斜面の日の入り時刻と考える。遮蔽高度と斜面の向きによっては 1 日に 2 回づつ日の出、日の入りが起こることもある。

ここで述べる方法も、基本的にはこの考え方によるが、計算量の軽減を図るために、次のようにする。

地域の斜面を構成する任意の三角形 (以後「当該三角形」という) の重心を起点として、水平面上真東 (x 軸) 方向から北回りに 1 度づつずらして引いた半直線の方向を $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n-1}, \gamma_n$ とする。これらの半直線全てについて、遮蔽高度 $\theta(\gamma_1), \theta(\gamma_2), \dots, \theta(\gamma_{n-1}), \theta(\gamma_n)$ を予め求めておく。水平面上 1 度刻みに 360 本の半直線を出し、上記の計算をしたとすると、360 方位の遮蔽高度が得られる。これら遮蔽高度の内挿によって任意時刻の太陽方位 α ((6) 式) に対応する遮蔽高度 $\theta(\alpha)$ が求まり、 $\theta(\alpha)$ と (5) 式の太陽高度とを比較して、日の当たる当たらないを決定することができる。

2. 斜面法線

斜面の方位・勾配を決定するのは、斜面上に直角に立てた単位法線ベクトルの向きと角度である。前項と同じ座標軸で斜面の法線ベクトルを $N(l_N, m_N, n_N)$, \tan^{-1} の角度を $-\pi/2 \sim \pi/2$ の範囲で考えると、斜面勾配 i 及び斜面方位 β は次式で与えられる。

$$i = \cos^{-1} n_N \quad (11)$$

$$\beta = \tan^{-1}(l_N / m_N) \quad (m_N > 0 \text{ のとき})$$

$$\beta = \tan^{-1}(l_N / m_N) + \pi \quad (m_N < 0 \text{ のとき}) \quad (12)$$

法線ベクトル N の要素 (l_N, m_N, n_N) は次式で与えられる。

$$l_N = x_N / |X|$$

$$m_N = y_N / |X| \quad (13)$$

$$n_N = z_N / |X|$$

$$x_N = (y_1 - y_2)(z_3 - z_2) - (y_3 - y_2)(z_1 - z_2)$$

$$y_N = (z_1 - z_2)(x_3 - x_2) - (z_3 - z_2)(x_1 - x_2) \quad (14)$$

$$z_N = (x_1 - x_2)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_1 - y_2)$$

$$|X| = \sqrt{x_N^2 + y_N^2 + z_N^2} \quad (15)$$

ただし、 x_j, y_j, z_j : 三角形の頂点 j ($j = 1, 2, 3$) の座標、 z を鉛直方向にとる、 $z_N < 0$ のときは、 x_N, y_N, z_N の符号を全て逆にする (つまり各々に -1 を掛ける)。

3. 方向 γ ごとの遮蔽高度の計算方法

[考え方]

当該三角形の重心を出発点として、 x - y 平面上 x 軸 (東) から反時計回りに 1 度刻みで 360 本の半直線を引き、周囲の三角形の辺 (の水平面投影) との交点を求め、(交点の標高 - 当該三角形の重心標高) / (交点と重心との距離) の \arctan によって仰角を計算する。交差三角形中最大の仰角をその方向 γ の遮蔽高度 $\theta(\gamma)$ とする。

[計算の手順]

次にこれをコンピュータプログラムによって計算する場合の手順を示す。

- ① 地域の西南隅を原点とし、真東方向を x 軸、真北方向を y 軸、鉛直上向き方向を z 軸とする。
- ② 地形図において地域を三角形に分割し、三角形と頂点にそれぞれ番号をつける。
- ③ 三角形の頂点の x, y, z 座標を読み込む。
- ④ 当該三角形の重心の座標 (OX, OY, OZ) を求める。
- ⑤ (13) ~ (15) 式により l_N, m_N, n_N を求める。
- ⑥ 当該三角形の重心を出発点とし、 x - y 座標上で x 軸と角度 γ をなす半直線の方程式を次式で表す。

$$y - OY = \tan \gamma (x - OX) \quad (16)$$

(半直線の条件) γ に応じて例えば $0 < \gamma < \pi/2$ ならば半直線の条件を $y > OY$, あるいは $x >$

OX などとする. γ が他の象限にあるときも, OX, OY との位置関係に応じて適宜同様の条件をつける.

最初 $\gamma = 1$ 度とし, ⑥ に戻る度に 1 度刻みで 360 度まで順次増加させる.

⑦ 三角形番号順に比較三角形の辺 (の x-y 平面投影, 2 頂点を結ぶ直線として式化する) と半直線とが交わるか否かをチェックする. 交点が三角形の 2 頂点の間に存在し, かつ, ⑥ の半直線の条件を満足する場合は半直線と三角形の辺 (の x-y 平面投影) が交わるとして ⑧ に進み, そうでないときは三角形は半直線と交わらないので, KOTEN = 0 として次の比較三角形に進む (⑦ の初めにもどる).

⑧ 1) $\gamma \neq \pi/2, \gamma \neq 3\pi/2$ のとき

3 頂点から勾配 $\tan \gamma$ の 3 直線を引き, $x = OX$ との交点の y 座標の最大・中位・最小のものをそれぞれ max, mid, min とする.

2) $\gamma = \pi/2$ または $3\pi/2$ のとき

3 頂点から勾配 $\tan \gamma$ の 3 直線を引き, $y = OY$ との 3 交点の x 座標の最大・中位・最小のものを各々 max, mid, min とする.

3) y または x の最大・中位・最小に対応する三角形の 3 頂点を $a(x_{max}, y_{max}, z_{max}), b(x_{mid}, y_{mid}, z_{mid}), c(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ とする (Fig. 4 参照).

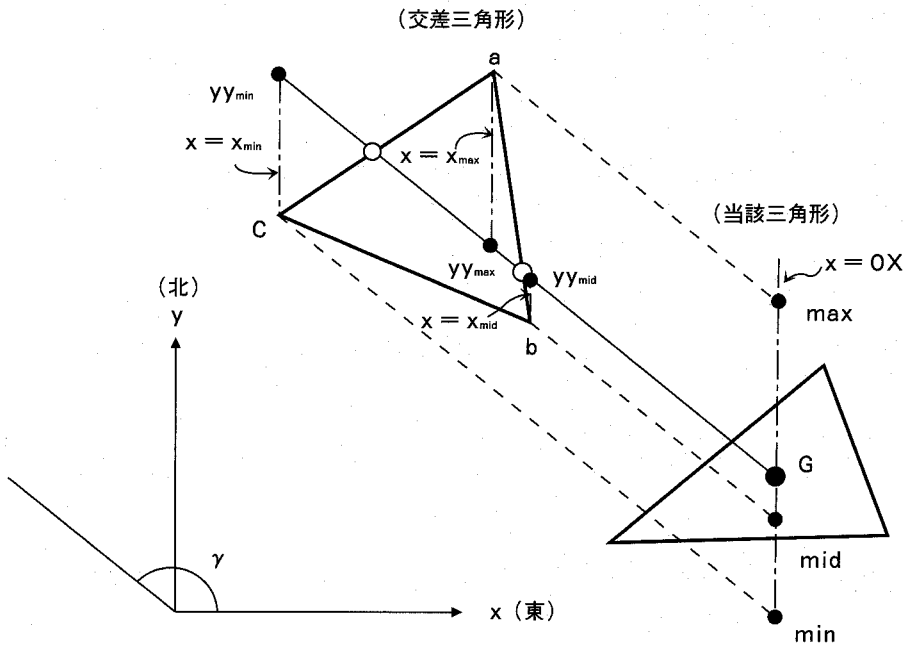


Fig. 4 当該三角形の重心から引いた半直線と交差三角形との交点の図

4) $\gamma \neq \pi/2, \gamma \neq 3\pi/2$ のとき

重心から比較三角形に向かって勾配 $\tan \gamma$ の直線を引き. この直線上 $x = x_{max}, x_{mid}, x_{min}$ との交点の y 座標を各々 $yy_{max}, yy_{mid}, yy_{min}$ (Fig. 4 の黒丸印) とする. $y_{max} \geq yy_{max}, y_{mid} \leq yy_{mid}$ のときは, 辺 ab が半直線と交わり (KOTEN = 1 とする, Fig. 4 の白丸印), $y_{mid} \geq yy_{mid}, y_{min} \leq yy_{min}$ のときは, 辺 bc が半直線と交わる (KOTEN = 2 とする).

KOTEN = 1 または KOTEN = 2 のどちらの場合でも、半直線は辺 ac と交わる。

5) $\gamma = \pi/2$ または $3\pi/2$ のとき

$x_{max} \geq OX$, $x_{mid} \leq OX$ のときは KOTEN = 1, $x_{mid} \geq OX$, $x_{min} \leq OX$ のときは KOTEN = 2 とする。

⑨ 比較三角形の辺 ac と、半直線との交点の座標を (XX, YY) とし、⑩ に進んで仰角を求める。次に KOTEN = 1 のときは辺 ab と半直線との交点を (XX, YY) とし、KOTEN = 2 のときは辺 bc と半直線の交点を (XX, YY) とし、再び⑩ に進み仰角を求める。

⑩ 交点 (XX, YY) と重心との間の距離で、交点と重心の標高差を割り、その arctan を仰角とする。1つの交差三角形との2つの交点のうち、大きい方の仰角をこの交差三角形の仰角とする。

⑪ ⑦ に戻り、次の比較三角形について⑩ までの計算を繰り返す。

⑫ 半直線の全仰角中最大のものを、その方向 γ の遮蔽高度 $\theta(\gamma)$ (以後単に θ と書く) とする。

⑬ ⑥ へ戻り、次の方向 γ について、⑦ ~⑫ の計算を繰り返す。 $\gamma = 360$ 度まで繰り返して1つの当該三角形の360方位の遮蔽高度が計算されたことになる。計算したい全ての当該三角形について、以上の計算を繰り返す。

なお当然のことながら、半直線と当該三角形自身の辺との交点から計算される仰角は、その斜面自身による遮蔽高度である。

散乱日射量の計算

1. 水平面散乱日射量の計算

周辺地物による遮蔽を考えないときの水平面散乱日射量は、I で述べたように $dq_{SN} \cdot \pi$ で与えられる。よって、周辺地物による遮蔽がないとみなし得る時間水平面散乱日射量が実測データまたは直散分離により q_{SH} で与えられているとすると次式が成り立つ。

$$q_{SH} = dq_{SN} \cdot \pi \quad (17)$$

$$\text{遮蔽を考慮した水平面散乱日射量} = q_{SH} / \pi \cdot \text{天空の水平面正射影面積} \quad (18)$$

(18) 式の天空の水平面正射影面積を求めるために前節で直達日射量を求めるのに用いた360方位の遮蔽高度を利用することができる。各遮蔽高度の天球面上の位置を遮蔽高度点ということとすると、遮蔽高度点の (x, y, z) 座標は、 $(\cos \theta \cos \gamma, \cos \theta \sin \gamma, \sin \theta)$ 、その水平面投影座標は $(\cos \theta \cos \gamma, \cos \theta \sin \gamma)$ である。水平面上に垂直投影された相隣る2つの遮蔽高度投影点とO点(観測者の位置、原点)とを結ぶ三角形(遮蔽高度0のときは扇形)の面積を360個求めて集計すれば天空の水平面正射影面積が求められる。

2. 斜面散乱日射量の求め方

遮蔽の影響を考えないときは、(2)式による。遮蔽の影響を考えると、(18)式の天空の水平面正射影面積の代わりに斜面上への正射影面積を用いる。

$$\text{遮蔽を考慮した斜面散乱日射量} = q_{SH} / \pi \cdot \text{天空の斜面正射影面積} \quad (19)$$

天空の斜面正射影面積を求めるに当たっては、360方位の遮蔽高度点 (x, y, z) を斜面上に垂直投

影し、相隣る遮蔽高度投影点 A_0, A_1, \dots と、天頂の斜面垂直投影点 O' とを結ぶ三角形(または変形した扇形)の面積を 360 個集計すればよい (Fig. 5 参照). 斜面自身によって遮蔽される部分の垂直投影点は円周上に連続して並ぶから、斜面上遮蔽高度 0 は大きな 1 個の変形した扇形 $O'A_0A_n$ の面積に等しい. Fig. 5 からその面積は、扇形 $OA_0A_n - \triangle OA_0O' - \triangle OA_nO'$ として求めることができる.

遮蔽高度投影点 (座標 $(\cos \theta \cos \gamma, \cos \theta \sin \gamma, \sin \theta)$), 天頂 (座標 $(0, 0, 1)$) の斜面上への投影点の座標は、斜面を $x''-y''$ 平面, 斜面法線を z'' 軸とするような 3 次元直交座標系で表せば、そのときの (x'', y'') 座標として簡単に求めることができる.

もとの (x, y, z) 座標を回転して、 (x'', y'', z'') 座標に移すには、次のようにする. 最初 $x-y$ 平面を、 z 軸を中心にして角度 $\zeta (= \pi - \beta)$ だけ反時計回りに回転する (Fig. 6 参照). 回転後の座標を (x', y', z') とする. さらに、 $y'-z'$ 平面を x' 軸を中心として反時計回りに角度 $\eta (= i)$ だけ回転し $y''-z''$ とする. 2 度の座標軸の回転の結果、 (x, y, z) は (x'', y'', z'') に移る ((20)~(22)式).

$$\begin{aligned} x'' &= x \cos \zeta + y \sin \zeta \\ y'' &= (y \cos \zeta - x \sin \zeta) \cos \eta \\ &\quad + z \sin \eta \end{aligned} \quad (20)$$

$$z'' = -(y \cos \zeta - x \sin \zeta) \sin \eta + z \cos \eta$$

$$\eta = \cos^{-1} n_N \quad (21)$$

$$\zeta = \tan^{-1} (-l_N / m_N) \quad (22)$$

(但し、 $m_N > 0$ のときには $\zeta = \zeta + \pi$ とする)

ここに、 l_N, m_N, n_N は単位斜面法線の方法余弦.

こうして天空の斜面正射影面積が求められれば、(19)式より、遮蔽を考慮した斜面散乱日射量が求められ、次式によって時間斜面日射量が求められる.

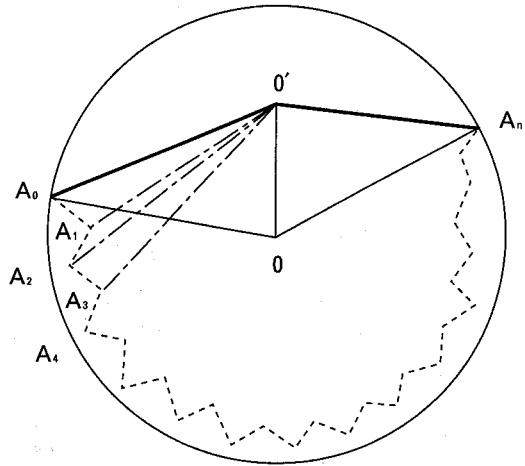


Fig. 5 天頂と遮蔽高度点の斜面への正射影図
(0: 斜面中心(観測点), O': 天頂の正射影点,
A₀, A₁, A_n: 遮蔽高度点の正射影点)

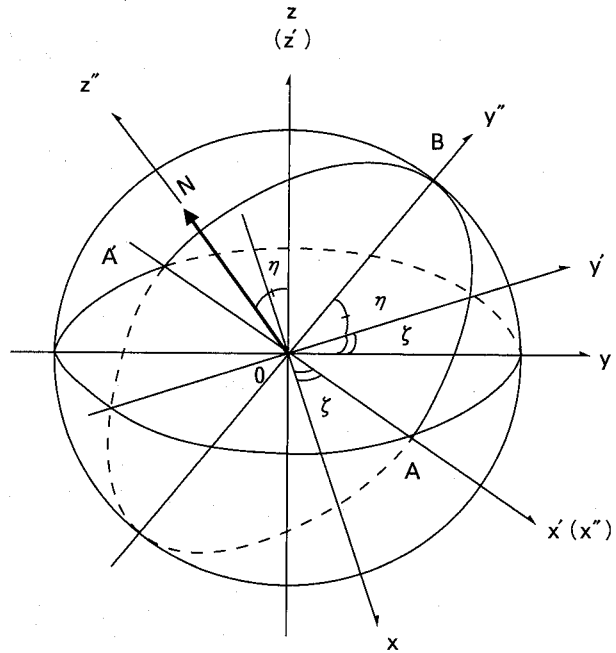


Fig. 6 斜面ABA'と座標軸の回転
(N: 法線ベクトル, $\eta = i$: 斜面勾配)

$$TS = DS + SS$$

(23)

3. 高知市での計算例

高知市三里地区の山地部を対象として、三角形分割と遮蔽を考慮した斜面日射量を1月及び7月について Fig. 7, 8 に示す. Fig. 7 は冬季の斜面の特徴, すなわち南斜面の直達日射量が多いのに比

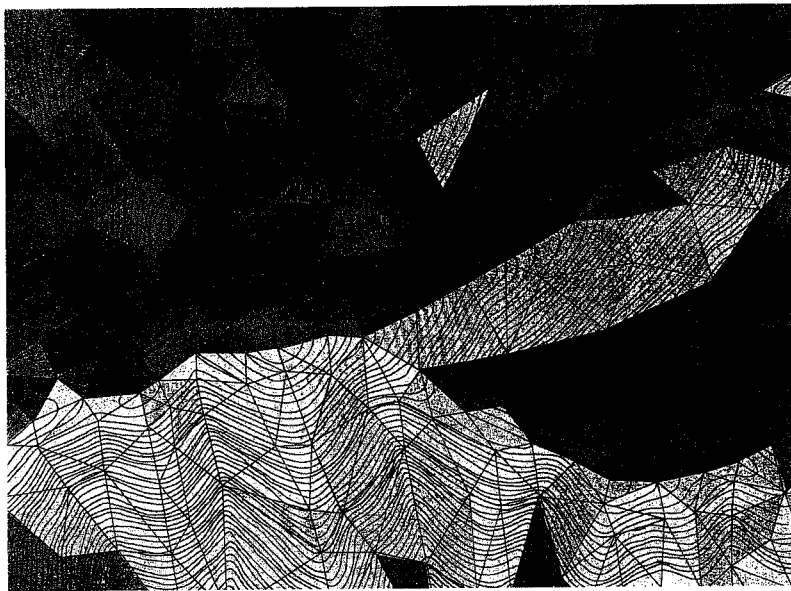


Fig. 7 高知市三里山麓の1990-1994年1月の平均日量日射量

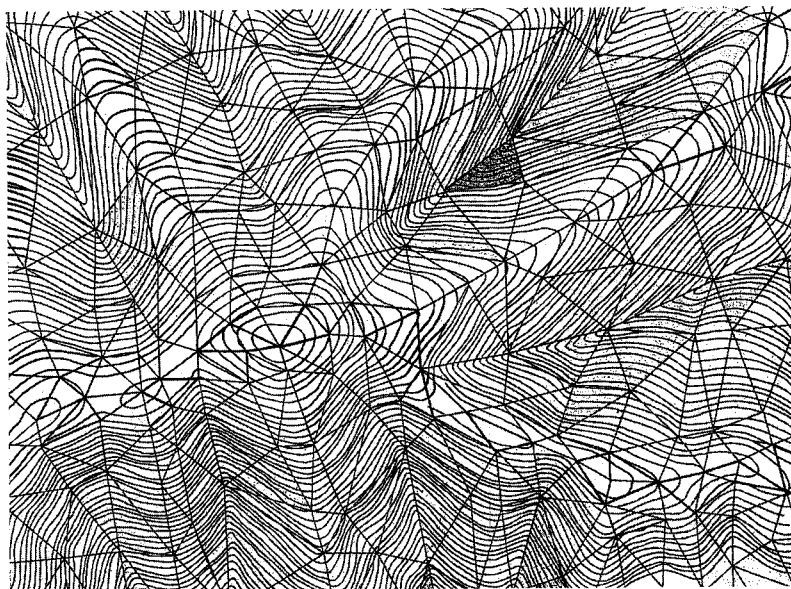
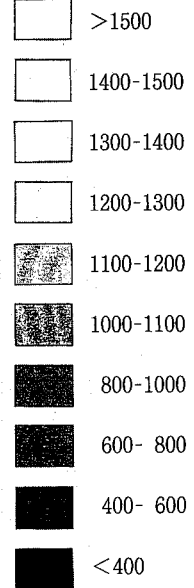
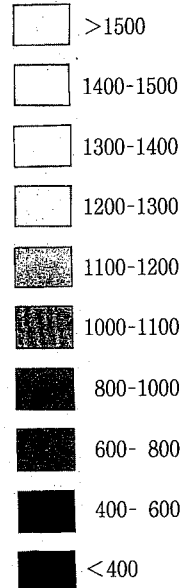
凡例 MJ/(m²·day)

Fig. 8 高知市三里山麓の1990-1994年7月の平均日量日射量

凡例 MJ/(m²·day)

較して北斜面のそれが著しく少ないこと、隣接する高地の陰になって日当たりが悪くなりやすいことを如実に表している。Fig. 8は夏季の直達日射量の特徴、すなわちそれほど勾配のきつくない場合には、東西南北いずれの斜面においても日射量はそれほど大きく変わらないことを表している。

あとがき

斜面上の直達・散乱日射量を求める方法について記述した。斜面直達日射量の瞬間値は(8)式、積算値は(9)、(10)式によって求めることができる。(9)式の Q_{DN} は実測値があればそれを用いるが、ない場合には最寄りの気象観測所の全天日射量などから直散分離によって算出する。時間全天日射量の直散分離には文献7)の渡辺らの式、あるいは文献8)、9)の紙井らの式がある。

(9)、(10)式を実際の地域に適用するに当たっては、斜面上・水平面上及び周辺地物の遮蔽高度を考慮した日の出・日の入り時間を用いる必要がある。

地域を三角形分割⁹⁾して、各三角形の重心点から等角度間隔で半直線を引いて、遮蔽高度を求める方法の詳細について述べた。x-y平面上各三角形の重心から、例えば1度刻みで半直線を引き、360方位の遮蔽高度を求めておくと、斜面直達日射量の計算に便利だけでなく、遮蔽を考慮した斜面散乱日射量を求めるに際しても有用である。

(9)、(10)、(2)式(遮蔽を考慮しない場合)または(17)式(遮蔽を考慮する場合)によって求めた各斜面直達・散乱日射量を合成すれば斜面日射量が求まる。

要 約

傾斜農地において、斜面日射量は作物、蒸発散などに重要である。斜面日射量は時間全天日射量から直散分離によって直達日射量と散乱日射量を求め、個々に斜面上の値に変換して再合成することによって求めることができる。この報文では、そのために必要な斜面日射量計算式をレビューするとともに、三浦らの地域を三角形で分割近似する方法によったときの水平面、斜面からの日の出・日の入り、周辺地物の影響(遮蔽高度)を考えた直達・散乱日射量を求める方法を提示している。

キーワード：太陽エネルギー、日射量、斜面日射量、直散分離

参 考 文 献

- 1) Temps R. C. and Coulson K.L.: Solar Radiation Incident upon Slopes of Different Orientations, Solar Energy, Vol. 19, pp. 179-184 (1977)
- 2) 大槻恭一・田中 登・赤江剛夫・長堀金造: 斜面日射量推定における等方性モデルと非等方性モデルの適用性の検証, 水文・水資源誌, Vol. 8, No. 4, pp. 399-407 (1995)
- 3) 農業土木学会: 農業土木ハンドブック(改訂5版), pp.887-888 (1989)
- 4) 水谷完治・池田武文: 微気象観測によるコジイ林からの蒸発散量の推定(1) - 渦相関法と Penman-Monteith 式を用いた推定結果 -, 水文・水資源誌, Vol. 8, No. 3, pp. 275-284 (1995)
- 5) Cole R.J.: The Longwave Radiation Incident upon Inclined Surfaces, Solar Energy, Vol. 22, pp. 459-462 (1979)
- 6) 例えば宇田川光弘・木村建一: 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 建築論集 267, pp. 83-89 (1978)
- 7) 例えば渡辺俊行・浦野良美・林徹夫: 水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定, 建築論集

- 330, pp. 96-108 (1983)
- 8) 例えば紙井泰典・近森邦英・丸山利輔：時間全日射量からの散乱日射量の推定，農土論集 183, pp. 41-46 (1996)
 - 9) 例えば紙井泰典・近森邦英：斜面日射量の計算方法について，平成8年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集，II-1, pp. 126-127 (1996)
 - 10) 大槻恭一：斜面日射環境を考慮した流域蒸発散量の推定，第45回農土学会中国四国支部講演会講演要旨，pp. 1-3 (1990)
 - 11) 古藤田一雄：直達・散乱成分を考慮した斜面全日射量の簡易推定法，農業気象 Vol. 42, No.3, pp 249-259 (1986)
 - 12) 木村建一・宇田川光弘・吉村正孝：日積算全日射量からの毎時全日射量の推定，建築学会大会学術講演梗概集 pp. 461-462 (1977)
 - 13) 東京天文台：理科年表，丸善 (1979-1984, 1995)
 - 14) 内嶋善兵衛：施設農業への新エネルギー利用，pp. 39-90, 株式会社フジ・テクノシステム (1980)
 - 15) 気象庁：地上気象常用表，日本気象協会，pp. 132 (1973)
 - 16) 武田京一：斜面の日射量について，農業気象，Vol. 19 No. 2, pp. 59-60 (1963)
 - 17) 紙井泰典：水平面日射量から斜面日射量を求める一方法，農土試技報，A 26, pp. 67-95 (1982)
 - 18) 岡上正夫：斜面の受ける日射量を求める簡単な一方法，日林誌，Vol. 39 (11), pp. 435-437 (1957)
 - 19) 三浦健志・三野 徹・丸山利輔・四方田 穆：傾斜地の日射量分布計算法 —傾斜地における温度環境形成機構に関する研究 (I)—，農土論集 88, pp. 1-7 (1980)

平成10(1998)年9月18日受理

平成10(1998)年12月25日発行