

斜面日射量の研究—第5報 わが国225地点における月平均斜面日射量の推定*

Study of Solar Radiation on an Inclined Surface in Japan - 5th Report. Monthly Mean Solar Radiation on Inclined Surfaces at 225 Sites in Japan

吉田作松*¹
Sakumatsu Yoshida

菊地原英和*²
Hidekazu Kikuchihara

Abstract

In this paper the monthly mean daily solar radiation on inclined surfaces with azimuth every 15° from 0° (south) to 90° (east or west) and with inclination every 10° from 0° (horizontal) to 90° (vertical) is estimated for 225 sites in Japan. Mean distance between these sites is 40 km. The estimation models, which were selected and developed by the authors, are as follows: (1) model for estimation of monthly mean daily global solar radiation, (2) model for separation of global solar radiation into direct and diffuse parts, (3) model for estimation of monthly mean hourly global and diffuse sky radiation from their monthly mean daily values, respectively, and (4) model for estimation of solar radiation on an inclined surface. The error is examined of the estimated 30-year average of monthly mean daily solar radiation on an inclined surface: it is found that the error is $\sim 1\%$ for the south-facing surfaces and larger for the surfaces with the other orientation.

Key Words : Solar radiation, Inclined surfaces, Monthly mean, Estimation, Model

1. はじめに

各種の太陽エネルギー利用システムの立地や設計のための基本データのの一つとして、月平均日積算斜面日射量（以下日積算の語を省略する）の長年の平均値、いわゆる平年値が必要である。

しかし実測に基づく斜面日射量のデータがほとんどないので、これまでに、気象データ（全日射量、日照時間、雲量など）から月平均斜面日射量を推定するのに必要ないろいろのモデルが提案され、実際に幾つかの国について月平均斜面日射量が推定された。例えば、ソーラーシステム振興協会は、わが国25地点の月平均斜面日射量（斜面の方位角は南東から南西まで 15° ごと、傾斜角は水平から垂直まで 15° ごと）を推定し⁽⁷⁾、またEC各国は協力してヨーロッパの月平均斜面日射量（斜面は、北、東、西、南東、南西の各方位の垂直面、南向きで傾斜角が 30° 、 60° 及び各地の緯度に等しい斜面、ならびに水平面）を推定し図表を作成した^(2,3)。

太陽エネルギー利用システムの計画や立地に必要な

斜面日射量データは、第一に最適傾斜角（通常、最大の日射量を受ける南向き斜面）とその日射量であるが、実際のシステム設置に際しては、例えば建物の屋根や壁面のように、最適傾斜角以外の方位と傾斜の斜面に対する日射量のことも少なくない。一方、斜面日射量の推定計算はかなり面倒であり、従ってあらかじめ多くの地点について推定しておき、計画地点の値を内挿などによって推定するのが便利である。しかしわが国のように地形が複雑な場合には日射分布も複雑であり⁽¹⁾、データ地点の密度が小さい場合には、内挿などによる任意地点の日射量の推定の誤差が大きい。

以上を考慮して、本研究では、わが国 225地点における

・方位角 0° （南）から 90° （東または西）まで 15° ごと、傾斜角は 0° （水平面）から 90° （鉛直）まで 10° ごと各斜面の月平均日射量

*原稿受付 平成6年8月4日

*元日本気象協会（〒180 東京都武蔵野市2-23-4）

*元日本気象協会（故人）

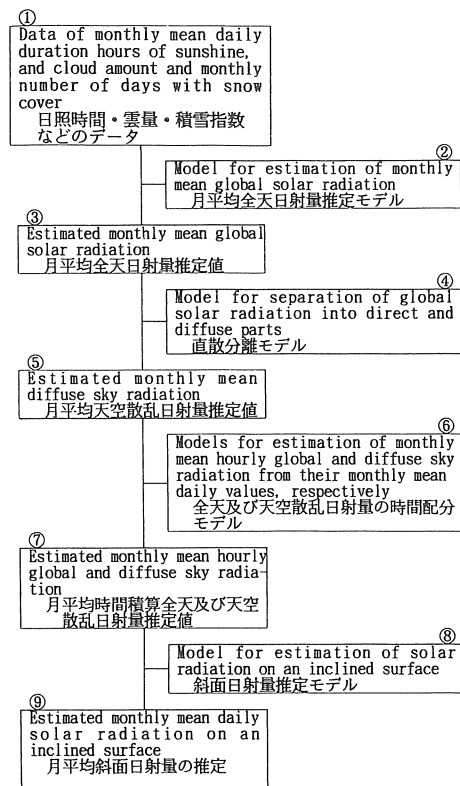


図1 斜面日射量推定計算のフロー

- ・各月の最適傾斜角とその日射量(A),
- ・年間最適傾斜角とその斜面への各月日射量(B),
- ・[A/B] の比,
- ・[A/ 全天日射量] の比

の値を、各月、四季及び年間について推定計算したので、以下にその結果を報告する。

なお、本研究における斜面日射量の推定のフローは図1(説明は後述)のとうりで、4種の推定モデルを用い、4段階の推定計算を行う。従って各推定段階で生ずる誤差が累積して最終的に推定される斜面日射量の誤差となる。本論文ではこの誤差の検討結果についても述べる。

本論文で使用する主な記号

- I : 全天日射量の時間積算値
- I_{H} : 水平面天空散乱日射量の時間積算値
- I_0 : 大気外水平面日射量の時間積算値
- $I_{0\beta}$: 大気外斜面日射量の時間積算値
- I_{β} : 斜面日射量直達成分の時間積算値
- $I_{s\beta}$: 斜面日射量天空散乱成分の時間積算値

- H : 全天日射量の日積算値
- H_0 : 大気外水平面日射量の日積算値
- H_H : 水平面天空散乱日射量の日積算値
- H_{β} : 斜面日射量の日積算値
- $H_{\beta\beta}$: 斜面日射量直達成分の日積算値
- $H_{s\beta}$: 斜面日射量天空散乱成分の日積算値
- $H_{r\beta}$: 斜面に入射する地表面からの反射日射量の日積算値
- C_d : 月平均雲量(0.00~1.00)
- C_i : 月平均うす雲指数 = $C_d + (n_{11} / N) - 1$
- E_1 : 均時差
- G : 積雪指数 = 月間積雪日数と月の総日数の比(0.00 ~ 1.00)
- G_{10} : 積雪10cm以上の場合の積雪指数
- h_{15} : 各月15日の南中時太陽高度角
- h_k : 実際に太陽が出または沈むところの地物(山など)の高度角[度], h_1 は日出, h_2 は日没
- L : 経度
- n_1 : 月間日照時間(ジョルダン日照計による)
- n_1^* : 地形補正を施した n_1
- n_s : 月間日照時間(太陽電池式日照計による)
- n : 元日を1とする年間の日付の通し番号, うるう年の2月29日は3月1日と同じ59
- N : 月間可照時間(太陽の中心が地平線から出てから沈むまでの時間)
- N_1 : 太陽が地物(山など)から出てから真太陽時の12時までの時間(地物を考慮した午前可照時間)
- N_2 : 真太陽時の12時から太陽が地物(山など)に沈むまでの時間(地物を考慮した午後可照時間)
- r_{β} : $= I_{0\beta} / I_0$
- r_t : 全天日射量の時間配分率
- r_d : 天空散乱日射量の時間配分率
- T : 中央標準時
- β : 斜面(コレクター)の傾斜角
- β_{max} : 入射する日射量が最大の最適傾斜角
- γ : 斜面(コレクター)の法線の方角, 南を0°, 西が正
- δ : 太陽赤緯
- θ : 斜面への太陽光入射角
- θ_z : 太陽の天頂距離
- ρ : アルベド(地表面反射率)
- ϕ : 緯度
- ω : 太陽の時角, 南中時に0°, 午後12時に正

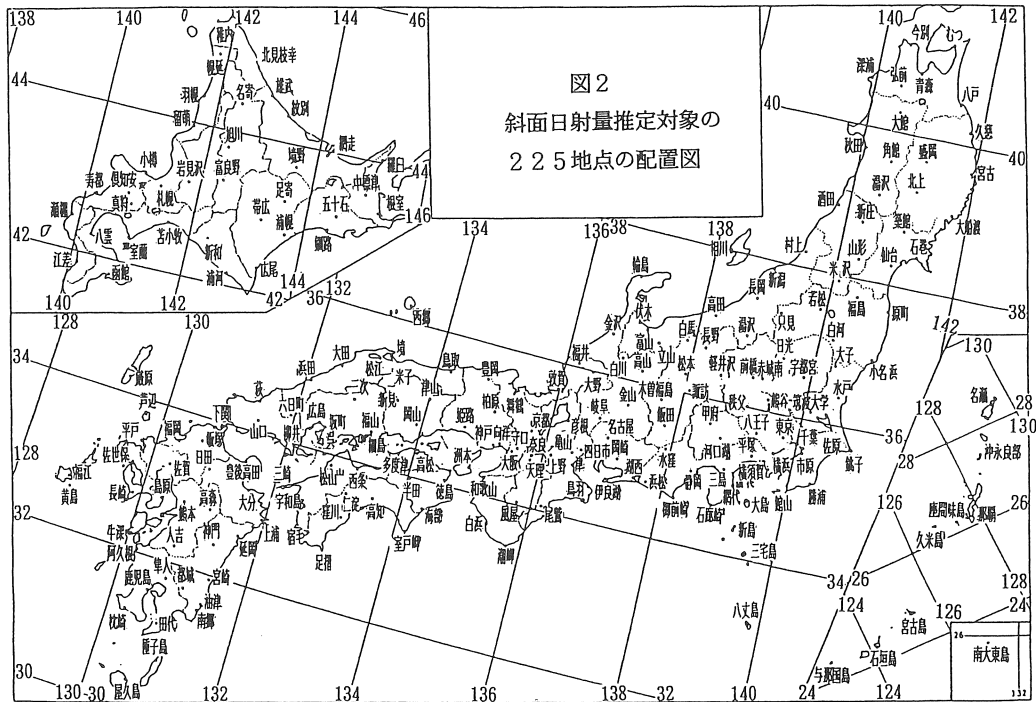


図2
斜面日射量推定対象の
225地点の配置図

ω_s : 地平線に対する日没時の太陽時角
 $\Sigma(\text{day})$: 一日についての積算を表す
 バー : 上の各記号にバーを付して月平均を表す

それぞれのモデルについて概略を述べる (○内の番号は
 図1と同じ)

2. 斜面日射量推定対象地点

今回月平均斜面日射量の推定を行なった地点は図2
 に示す225地点で、その内訳は、気象官署(気象台、
 測候所)148, アメダス(地域気象観測所)55, NEDO
 (新エネルギー・産業技術総合開発機構)の太陽光発
 電システムの実験観測地点20, 及び空白が大きくなる
 地域に補充として選んだ地点2である。225地点は、
 地点間の平均間隔が約40kmであることを意味する。

3. 使用した月平均斜面日射量
 推定のためのモデル

本研究における月平均斜面日射量推定計算のフロー
 は図1の通りである。全天日射量の長年の実測デー
 タがある場合には、図のステップ③から計算を始める
 が、そのような地点は希なので、大部分はステップ②
 から始める。図の各モデルについて、著者らは、わが
 国で用いるのに適当と思われるモデルを開発し、ある
 いは既存のモデルの中から評価選別を行った。次にそ

3.1 月平均全天日射量推定モデル(図1の②)

吉田・篠木⁽¹⁾は次のモデルを開発した(ただし原
 論文作成時の気象庁の日射スケールがIPS-1956であっ
 たのに、1981年からWRR(世界放射基準)に変わった
 ので、原論文の式の係数を1.022倍してある)。

$$\bar{H} = \bar{H}_0 (0.149 + 0.546 n_1 + N/0.037 h_{1.5} + 0.048 G_{1.0}) \quad (1)$$

ここで n_1 はジョルダン日照計による測定値である
 から、上の式をアメダスの日照計(太陽電池式)に適
 用する場合には、太陽電池式日照計の測定値を次の式
 によってジョルダン日照計の値に換算する^{(1)・(9)}

$$n_1 = -1.9 + 0.844 n_s + 0.327 \times 10^{-3} \cdot n_s \quad (2)$$

ただし上の式は1979~1980年のデータを用いて作成
 したものである。1984年以降はアメダスの太陽電池式
 日照計が新型に切り替えられたが、上の式がこの新型
 に適用できるか否かは、別途検討を要する。

3.2 直散分離モデル(図1の④)

全天日射量を直達成分と天空散乱成分に分離する直

散分離モデルとして、吉田・篠木⁽¹¹⁾は次の式を提案した。

$$\bar{H}_d = (\bar{H} - 0.048G_{10} \bar{H}_0) \{0.950 - 1.336(n_d / N) + 0.702(n_d / N)^2 + 0.217C_i\} + 0.048G_{10}H_0 \quad (3)$$

直達成分は $(\bar{H} - \bar{H}_d)$ である。

なお清野⁽⁶⁾が、月平均全天日射量推定モデル及び直散分離モデルの精度について、わが国の11地点のデータを用い、わが国及び外国の数種のモデルを比較した結果では、それぞれ式(1)と式(3)が最良であった。

3.3 全天及び天空散乱日射量の時間配分モデル (図1の⑥)

天空散乱日射量の月平均日積算値を用いるよりも、それらの月平均時間積算値を用いるモデルの方が精度がよい⁽¹³⁾。月平均日積算値から月平均時間積算値を推定するためのモデル、すなわち時間配分モデルとしては、これまで一般に、全天日射量については Collares-PereiraとRablのモデル⁽¹⁸⁾、天空散乱日射量についてはLiuとJordanのモデル⁽²¹⁾が用いられており、著者ら⁽¹⁵⁾も、わが国のデータを用いて他の数種のモデルと比較し、やはり彼等のモデルが最良であることを認めた。本研究で用いたこれらの式は、次の通りである。

LiuとJordanのモデル：

$$\bar{r}_d = (\pi/24)(\cos\omega - \cos\omega_s) / (\sin\omega_s - (\pi/180) \cdot \omega_s \cdot \cos\omega_s) \quad (4)$$

Collares-PereiraとRablのモデル：

$$\bar{r}_d = (a + b\cos\omega) \bar{r}_d \quad (5)$$

$$a = 0.409 + 0.5016\sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767\sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta)$$

3.4 斜面日射量モデル (図1の③)

著者らは、各種の日射量モデルの評価を行うデータを得るために特別に設計して実施した筑波実験観測⁽⁵⁾のデータを用いて、これまでに提案された主な月平均斜面日射量モデルを評価し、つぎのモデルが適当であるとの結論を得た⁽¹³⁾。

a. 斜面日射量の直達成分モデル

傾斜面と水平面における時間積算直達日射量の比が

地表と大気外で等しいと仮定すると、次式が成り立つ。

$$\bar{I}_{s,\beta\gamma} = (\bar{I} - \bar{I}_d) \bar{r}_b \quad (6)$$

$$\bar{H}_{s,\beta\gamma} = \Sigma(\text{day}) \bar{I}_{s,\beta\gamma} \quad (7)$$

ここで

$$\bar{I} = \bar{H} \bar{r}_i \quad \bar{I}_d = \bar{H}_d \bar{r}_d \quad (8)$$

$$\bar{r}_b = \cos\theta / \cos\theta_s \quad (9)$$

$$\cos\theta_s = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega \quad (10)$$

$$\cos\theta = (\sin\phi \cos\beta - \cos\phi \sin\beta \cos\gamma) \sin\delta + (\cos\phi \cos\beta + \sin\phi \sin\beta \cos\gamma) \times \cos\delta \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (11)$$

$$\delta [\text{deg}] = (180/\pi)(0.006918 - 0.399912\cos x + 0.070257\sin x - 0.006758\cos 2x + 0.000908\sin 2x) \quad (12)^{(24)}$$

$$x [\text{deg}] = (n-1)360/365 \quad (13)$$

$$\omega [\text{deg}] = -(12.5 - T - L[\text{hr}] + 9 - E, [\text{hr}])15 \quad (14)$$

$$E, [\text{分}] = 0.0172 + 0.4281\cos x - 7.3515\sin x - 3.3495\cos 2x - 9.3619\sin 2x \quad (15)^{(24)}$$

なお、上の計算を行う各月の平均日 (n) として Klein⁽²⁰⁾の値を用いる(この値は文献17に再録してある)。また、式(14)は、 θ 及び θ_s として、各時間帯(中央標準時)の中央の値を用いることを意味する(上のモデルは文献13で『 r_b モデル』と仮称された)。

b. 斜面日射量の天空散乱成分モデル

このモデルとしてHay⁽¹⁹⁾による次の式を用いる。

$$\bar{I}_{s,\beta\gamma} = \bar{I}_d \{ \{ (\bar{I} - \bar{I}_d) / \bar{I}_0 \} \cos\theta / \cos\theta_s + \{ 1 - (\bar{I} - \bar{I}_d) / \bar{I}_0 \} (1 + \cos\beta) / 2 \} \quad (16)$$

$$\bar{H}_{s,\beta\gamma} = \Sigma(\text{day}) \bar{I}_{s,\beta\gamma} \quad (17)$$

(このモデルは文献13で『Hay(1)モデル』と仮称された)。

c. 斜面日射量の地面反射成分モデル

常用されている次の均一反射モデル(isotropic model)を用いる。

$$\bar{H}_{r,\beta\gamma} = \bar{H} \cdot \rho (1 - \cos\beta) / 2 \quad (18)$$

地面反射率 ρ として、次のLiuとJordan⁽²²⁾のモデルを用いる。この式は、地面反射率として、積雪がないとき0.2、積雪があるとき0.7を想定している。

$$\rho = 0.2(1-G) + 0.7G \quad (19)$$

d. 全斜面日射量のモデル

上の式(7), (17)及び(18)から

$$\bar{H}_{\beta\gamma} = \bar{H}_{n,\beta\gamma} + \bar{H}_{s,\beta\gamma} + \bar{H}_{r,\beta\gamma} \quad (20)$$

4. 使用したデータ

使用したデータは、次のとおりである。

- ・気象官署148地点における30年間(1951~1980年)の各年の月間日照時間(ジョルダン日照計), 雲量及び深さ別積雪日数
- ・アメダス55地点における1979~1980年の月間日照時間(太陽電池式日照計)
- ・太陽光発電実験を行った20地点における1~2年間の全天日射量

なお本研究では、既発表の論文や報告書に基づいて、いろいろのデータ処理が行われているが、その主なものの概略は次のとおりである。

(1) 日照時間に対する地形・地物の影響の補正方法^{(1)・(9)}

日出・日没の方向に地形・地物があれば、それだけ日照時間は少なく観測される。気象庁が公表する日照時間は観測値そのままであり、日照率はそれを天文日照時間で割ったものである。ここでは地形・地物の影響が大きい場合には具合が悪いので、次の式により、地形・地物の影響がない場合の日照時間を推定した。

$$n_{ij} = N / (N_1 / c_1 + N_2 / c_2) \cdot n_{ij} \quad (21)$$

$$c_k = 1.08 h_k^{-0.09} \quad k=1, 2 \quad (22)$$

ただし $h_k \leq 3^\circ$ のとき $C_k = 1$ とする。通常、太陽高度が 3° 以下では日照計は記録しないからである。

上の式はジョルダン日照計の場合であるが、太陽電池式日照計の場合も全く同一である。式(1), (2) 及び(3)の日照時間としてこのようにして補正した値を用いた。

(2) アメダス地点などの月平均うす雲指数の推定方法^{(3)・(12)}

式(3)の C_i (月平均うす雲指数)の計算には、日照時間と雲量が必要であるが、アメダス地点及び太陽光発電実験地点では雲量の観測が行われていない。これらの地点における C_i を次のようにして推定した。

気象官署では、実測データを用いて C_i を求めることができる。この C_i の等値線図を描き、アメダスなどの地点の値を読み取るのが最も普通の方法であるが、これにはかなりの手数が要る。そこで今回は変分法に

よる電算処理により、上の推定を行った。テストの結果、この方法は等値線図を描く方法と大差がなかった。

ただし、北緯 30° 以南の南西諸島では、気象官署の配置が変分法の適用に適さないので、気象官署のデータにより等値線図を描き、必要地点の値を読み取った。

(3) アメダスなどの地点の日射量の30年平均値の推定方法^{(2)・(3)・(11)・(12)}

アメダス地点や太陽光発電実験地点における観測年数が短いので、次の方法により、これらの地点における推定または実測の日射量から30年平均の月別日射量を推定した。

まず、気象官署とアメダス等を含む225の全調査対象地点について、X年(Xは、全天日射量の場合は1979, 1980年の2年, 天空散乱日射量の場合は1979~1981年の3年)平均の月別日射量を計算する。次に、気象官署における30年(1951~1980年)平均月別日射量とX年平均の月別日射量の比を官署ごとに算出する(この比を平年化係数と仮称する)。この平年化係数の等値線図を各月ごとに描き、この図から、アメダス地点と太陽光発電実験地点における平年化係数を読み取り、これをX年平均日射量に乗じて、これらの地点の30年平均値とする。

実際の作業では、全天日射量の場合は平年化係数の等値線図を用い、天空散乱日射量の場合は、前項(2)のうす雲指数の場合と同様、変分法を用いて電算処理を行った。

(4) 積雪指数マップの作成⁽¹⁶⁾

式(1)及び(3)の計算には、 G_{10} (積雪指数)が必要である。本研究ばかりでなく今後の一般の利用を考慮し、わが国の積雪地帯1176地点のデータを用いて、詳細な全国積雪指数マップを作成した。

5. 斜面日射量の推定結果

3節のモデルと4節のデータを用いて、わが国の225地点の斜面日射量の推定計算を行った結果の例を、表1に示す(225地点についての表は文献4に掲載されている)。

なお表1に示した最適傾斜角の推定方法は次のとおりである。日射量の日変化パターンは正午を中心にして対称であると仮定しているので、時間積算斜面日射量の最大は南向き斜面(方位角 0°)に生ずる。方位

表1 月平均斜面日射量の推定結果(熊谷の例)、日射量の単位はkWh/(m² day).

地名 熊谷 (緯度=36° 8.8' 経度=139° 23.0' 標高=30m)

方位角	傾斜角	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年 1-12月	冬 12-2月	春 3-5月	夏 6-8月	秋 9-11月
水平面 (C)		2.75	3.33	4.06	4.42	4.94	4.17	4.17	4.39	3.33	2.94	2.61	2.44	3.63	2.84	4.47	4.24	2.96
0°	10°	3.40	3.83	4.40	4.56	4.97	4.15	4.16	4.47	3.47	3.23	3.10	3.05	3.90	3.42	4.64	4.26	3.27
	20°	3.96	4.24	4.64	4.60	4.90	4.06	4.08	4.45	3.55	3.44	3.52	3.57	4.08	3.92	4.71	4.20	3.50
	30°	4.42	4.54	4.77	4.55	4.72	3.90	3.93	4.35	3.55	3.58	3.85	4.01	4.18	4.32	4.68	4.06	3.66
	40°	4.76	4.73	4.79	4.40	4.46	3.66	3.70	4.16	3.48	3.64	4.08	4.33	4.18	4.61	4.55	3.84	3.73
	50°	4.98	4.80	4.69	4.16	4.11	3.37	3.41	3.88	3.33	3.61	4.21	4.55	4.09	4.78	4.32	3.56	3.72
	60°	5.06	4.75	4.49	3.83	3.69	3.03	3.07	3.53	3.13	3.50	4.23	4.64	3.91	4.82	4.00	3.21	3.62
	70°	5.01	4.58	4.18	3.43	3.20	2.65	2.69	3.13	2.86	3.32	4.15	4.61	3.65	4.73	3.60	2.82	3.44
	80°	4.83	4.29	3.77	2.97	2.68	2.25	2.27	2.67	2.55	3.06	3.96	4.45	3.31	4.53	3.14	2.40	3.19
	90°	4.52	3.90	3.29	2.46	2.14	1.84	1.86	2.26	2.18	2.19	2.73	3.67	4.18	2.91	2.20	1.96	2.86
	15°	10°	3.38	3.81	4.39	4.55	4.97	4.15	4.16	4.48	3.47	3.22	3.08	3.02	3.89	3.40	4.64	4.26
20°		3.92	4.21	4.61	4.60	4.90	4.06	4.08	4.45	3.54	3.42	3.48	3.53	4.07	3.88	4.70	4.20	3.48
30°		4.36	4.49	4.74	4.54	4.73	3.90	3.93	4.34	3.53	3.55	3.80	3.94	4.15	4.26	4.67	4.06	3.63
40°		4.69	4.67	4.75	4.39	4.47	3.67	3.70	4.15	3.46	3.60	4.01	4.25	4.15	4.53	4.54	3.84	3.69
50°		4.89	4.73	4.65	4.15	4.13	3.38	3.42	3.88	3.32	3.57	4.13	4.44	4.06	4.69	4.31	3.56	3.67
60°		4.96	4.67	4.45	3.84	3.71	3.05	3.09	3.55	3.11	3.45	4.14	4.52	3.88	4.72	4.00	3.23	3.57
70°		4.91	4.49	4.14	3.44	3.24	2.67	2.71	3.14	2.85	3.26	4.05	4.48	3.62	4.62	3.61	2.84	3.39
80°		4.72	4.20	3.74	2.99	2.74	2.28	2.31	2.71	2.54	3.00	3.86	4.32	3.28	4.41	3.16	2.43	3.13
90°		4.40	3.81	3.26	2.51	2.22	1.89	1.91	2.24	2.18	2.67	3.56	4.04	2.89	4.08	2.66	2.03	2.81
30°		10°	3.31	3.76	4.35	4.54	4.96	4.15	4.16	4.45	3.45	3.19	3.03	2.96	3.86	3.34	4.62	4.25
	20°	3.79	4.10	4.55	4.57	4.90	4.06	4.08	4.43	3.51	3.36	3.38	3.40	4.01	3.76	4.67	4.19	3.42
	30°	4.17	4.34	4.65	4.50	4.73	3.90	3.93	4.32	3.49	3.46	3.65	3.75	4.08	4.09	4.63	4.05	3.54
	40°	4.45	4.47	4.65	4.36	4.49	3.68	3.72	4.13	3.41	3.49	3.83	4.01	4.06	4.31	4.50	3.84	3.58
	50°	4.60	4.49	4.53	4.12	4.16	3.40	3.44	3.87	3.26	3.44	3.92	4.16	3.95	4.42	4.27	3.57	3.54
	60°	4.64	4.40	4.32	3.82	3.78	3.09	3.13	3.55	3.06	3.32	3.90	4.20	3.77	4.41	3.97	3.26	3.43
	70°	4.56	4.21	4.03	3.45	3.33	2.73	2.77	3.17	2.80	3.12	3.79	4.13	3.51	4.30	3.60	2.89	3.24
	80°	4.35	3.92	3.64	3.02	2.88	2.37	2.40	2.77	2.50	2.86	3.58	3.95	3.19	4.07	3.18	2.51	2.98
	90°	4.03	3.54	3.19	2.58	2.41	2.00	2.03	2.34	2.17	2.55	3.29	3.67	2.82	3.75	2.72	2.12	2.67
	45°	10°	3.21	3.68	4.29	4.51	4.96	4.15	4.15	4.43	3.43	3.14	2.96	2.86	3.81	3.25	4.58	4.24
20°		3.58	3.94	4.45	4.51	4.89	4.06	4.08	4.39	3.46	3.27	3.24	3.20	3.92	3.57	4.62	4.17	3.32
30°		3.88	4.10	4.51	4.44	4.73	3.90	3.93	4.28	3.43	3.34	3.44	3.46	3.95	3.81	4.56	4.04	3.40
40°		4.08	4.19	4.48	4.28	4.50	3.69	3.72	4.09	3.33	3.33	3.56	3.63	3.91	3.97	4.42	3.83	3.41
50°		4.18	4.17	4.36	4.06	4.20	3.43	3.46	3.85	3.18	3.26	3.60	3.72	3.79	4.03	4.21	3.58	3.35
60°		4.17	4.05	4.14	3.76	3.83	3.13	3.16	3.53	2.98	3.13	3.56	3.72	3.60	3.98	3.91	3.27	3.22
70°		4.05	3.85	3.85	3.42	3.44	2.80	2.83	3.19	2.73	2.93	3.43	3.62	3.35	3.84	3.57	2.94	3.03
80°		3.84	3.57	3.50	3.03	3.01	2.46	2.49	2.81	2.45	2.67	3.22	3.43	3.04	3.61	3.18	2.59	2.78
90°		3.54	3.21	3.09	2.63	2.58	2.12	2.14	2.42	2.14	2.39	2.93	3.15	2.69	3.30	2.77	2.23	2.49
60°		10°	3.07	3.57	4.22	4.47	4.94	4.14	4.15	4.41	3.39	3.07	2.86	2.72	3.75	3.12	4.54	4.23
	20°	3.33	3.73	4.31	4.45	4.87	4.05	4.06	4.35	3.39	3.15	3.04	2.94	3.81	3.33	4.54	4.15	3.20
	30°	3.53	3.82	4.32	4.35	4.71	3.90	3.92	4.22	3.34	3.17	3.17	3.11	3.80	3.49	4.46	4.01	3.22
	40°	3.63	3.83	4.25	4.19	4.49	3.69	3.72	4.04	3.23	3.13	3.23	3.20	3.72	3.55	4.31	3.82	3.20
	50°	3.67	3.78	4.11	3.96	4.20	3.44	3.46	3.78	3.07	3.03	3.22	3.21	3.58	3.55	4.09	3.56	3.11
	60°	3.62	3.64	3.90	3.69	3.87	3.16	3.19	3.50	2.87	2.89	3.14	3.17	3.39	3.48	3.82	3.28	2.97
	70°	3.48	3.42	3.62	3.35	3.50	2.85	2.88	3.17	2.63	2.70	3.01	3.05	3.14	3.32	3.49	2.96	2.78
	80°	3.28	3.17	3.30	3.01	3.11	2.52	2.55	2.82	2.37	2.45	2.81	2.86	2.85	3.10	3.14	2.63	2.54
	90°	3.01	2.84	2.93	2.64	2.72	2.21	2.23	2.47	2.08	2.20	2.55	2.61	2.54	2.82	2.76	2.30	2.28
	75°	10°	2.91	3.44	4.13	4.43	4.93	4.14	4.14	4.38	3.35	3.00	2.74	2.57	3.68	2.97	4.49	4.22
20°		3.04	3.49	4.14	4.37	4.83	4.04	4.05	4.29	3.32	3.01	2.82	2.67	3.67	3.07	4.45	4.13	3.05
30°		3.11	3.48	4.09	4.24	4.67	3.89	3.90	4.14	3.23	2.98	2.86	2.71	3.61	3.10	4.33	3.98	3.02
40°		3.14	3.44	3.98	4.06	4.45	3.68	3.70	3.95	3.10	2.89	2.85	2.73	3.50	3.10	4.16	3.78	2.95
50°		3.10	3.32	3.82	3.83	4.17	3.44	3.45	3.70	2.93	2.78	2.80	2.69	3.34	3.04	3.94	3.53	2.84
60°		3.02	3.18	3.60	3.55	3.86	3.16	3.18	3.41	2.73	2.62	2.69	2.59	3.13	2.93	3.67	3.25	2.68
70°		2.88	2.97	3.34	3.25	3.52	2.87	2.89	3.11	2.50	2.43	2.56	2.47	2.90	2.77	3.37	2.95	2.50
80°		2.69	2.73	3.04	2.92	3.14	2.56	2.58	2.78	2.25	2.21	2.37	2.29	2.63	2.57	3.03	2.64	2.28
90°		2.47	2.46	2.72	2.58	2.78	2.25	2.26	2.45	2.00	1.98	2.15	2.08	2.35	2.33	2.69	2.32	2.04
90°		10°	2.75	3.30	4.03	4.38	4.91	4.13	4.13	4.34	3.31	2.92	2.61	2.41	3.60	2.82	4.44	4.20
	20°	2.72	3.24	3.95	4.27	4.79	4.03	4.03	4.23	3.23	2.86	2.58	2.37	3.52	2.77	4.34	4.09	2.89
	30°	2.68	3.14	3.83	4.11	4.61	3.87	3.87	4.05	3.11	2.77	2.52	2.32	3.41	2.71	4.18	3.93	2.80
	40°	2.61	3.00	3.67	3.89	4.38	3.66	3.66	3.84	2.95	2.65	2.46	2.23	3.25	2.62	3.98	3.72	2.68
	50°	2.53	2.87	3.47	3.65	4.10	3.41	3.42	3.58	2.77	2.49	2.36	2.15	3.07	2.52	3.74	3.47	2.54
	60°	2.41	2.68	3.25	3.38	3.78	3.13	3.14	3.30	2.57	2.34	2.24	2.02	2.85	2.37	3.47	3.19	2.38
	70°	2.28	2.50	3.00	3.07	3.46	2.85	2.85	2.99	2.34	2.14	2.09	1.90	2.62	2.23	3.18	2.90	2.19
	80°	2.10	2.26	2.73	2.78	3.11	2.55	2.56	2.69	2.12	1.96	1.94	1.75	2.38	2.04	2.87	2.60	2.00
	90°	1.94	2.06	2.46	2.48	2.76	2.26	2.27	2.38	1.88	1.74	1.75						

表2 本研究における月平均斜面日射量推定値の誤差の大きさ。○の番号は図1のステップ番号と同じ

Origin of errors of estimated solar radiation on an inclined surface	Magnitude of errors
②～③ Model for estimation of monthly mean daily solar radiation (全天日射量推定モデル)	4.5% ⁽⁷⁾
④～⑤ Model for separation of global solar radiation into direct and diffuse parts (直散分離モデル)	～1% from Apr. to Aug., ～3% in Mar. and Sept. and ～4% from Oct. to Feb. ⁽¹¹⁾
⑥～⑦ Model for estimation of monthly mean hourly global and diffuse sky radiation from their monthly mean daily values, respectively, under the assumption of the symmetrical daily variation of monthly mean solar radiation (特別配分モデル)	～2% for a south-faced surface with some inclination angle and ～5% for a east- or west-faced surface with inclination angle larger than 45 for 40% of 225 sites in Japan. For the rest of the sites the error is negligible ⁽¹⁴⁾
⑧～⑨ Model for estimation of solar radiation on an inclined surface (斜面日射量推定モデル)	～1.4% for a surface with smaller inclination than 45° and with azimuth within ±45° from due south and ～5% for a surface with larger inclination than 60° ^{(10)・(22)}
Total error of estimated monthly mean solar radiation on an inclined surface (個々の月平均値の誤差)	～6% for a surface with azimuth from southeast to southwest and with smaller inclination than 45° and ～9% for the surface with the other orientation

角0°で傾斜角10°刻みの斜面日射量のうち最大日射量の斜面及びその前後の斜面(最大日射量を示す傾斜角が0°の場合は、傾斜角が10°と20°の斜面)における日射量は、近似的に次のβの二次式で表される。

$$\bar{H}_\beta = a_0 + a_1 \beta + a_2 \beta^2 \quad (23)$$

これを微分してゼロとおくことにより、入射日射量が最大になる傾斜角(最適傾斜角: β_{max})が得られる。

$$\beta_{max} = -a_1 / 2a_2 \quad (24)$$

このβ_{max}を式(23)のβに代入すれば、そのときの日射量が得られる。

表1の『最適傾斜角』は各月及び各季節で変わるが、『年間最適傾斜角』は固定した斜面の値である。

6. 推定した斜面日射量の誤差

図1に示したように、本研究における月平均斜面日射量の推定は4つのモデルを用いているので、推定された月平均斜面日射量の誤差は、各モデルによる誤差の積み重ねである。表2に、それぞれのモデルによる月平均斜面日射量の誤差、並びに各誤差が独立であると仮定して推定した総合誤差(各誤差の自乗を合計し平方に開く)を示す。

すなわち総合誤差は、斜面の方位が南東から南西にかけての南寄りで、傾斜角が45°以下の場合、6%以下で、それ以外の斜面では9%以下である。

しかし上の総合誤差は、各年各月の誤差であり、今回は各月の斜面日射量の30年平均を計算しているため、この誤差を求めなければならない。簡単に、年々の各月の誤差が『独立』であると仮定すると、30年平均値

の誤差は、個々の月の誤差の(1/30)^{1/2} = 1/5.5になる。つまり30年平均値の月平均斜面日射量の推定誤差はそれぞれ～6%→～1%及び～9%→～2%と小さくなる。

ただし4節で述べたように、アメダス地点などの場合には、日照時間の換算(式(2))や地形地物の補正、並びに短い年数のデータによる日射量の推定値から30年平均値の推定を行なっているため、これらに伴う誤差が加わるはずである。すなわち上に述べた～1%及び～2%の誤差は、実際にはもうすこし大きい可能性がある。

7. まとめ

わが国における太陽エネルギー利用システムの立地や設計に役立てるために、225地点の月平均斜面日射量を推定した。これは地点間の平均距離40kmに相当し、これだけの地点数があれば、その他の任意の地点の月平均斜面日射量を簡単な内挿によって推定しても、大きな誤差はないと思われる。

この推定結果(表1)から、任意の斜面に入射する日射量のもとより、例えば、最大入射量を得るために斜面(コレクター)の傾斜角を年間固定する場合、毎月1回調整する場合、あるいは各季節に1回調整する場合の、それぞれの最適傾斜角とその入射日射量がわかり、その得失を検討することができる。

なお本論文の結果を用いて、月平均斜面日射量の特性を解析した結果については続報する予定である。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構

(NEDO)からの委託により(財)日本気象協会が昭和61年度サンシャイン計画研究⁽⁴⁾の一環として実施したものである。

(注)225地点における表1と同じ内容の表は文献4に掲載されている。この報告書については、NEDOの資料室または(財)日本気象協会普及課に照会されたい。

文 献

- 1) (財)日本気象協会, 太陽エネルギーシステムの研究(気象調査), 昭和56年度サンシャイン計画委託調査研究報告書(1982).
- 2) (財)日本気象協会, 太陽エネルギーシステムの研究(気象調査), 昭和57年度サンシャイン計画委託調査研究報告書(1983).
- 3) (財)日本気象協会, 太陽エネルギーシステムの研究(気象調査), 昭和58年度サンシャイン計画委託調査研究報告書(1984).
- 4) (財)日本気象協会, 太陽光発電システム実用化技術開発(周辺技術の研究開発—発電量基礎調査), サンシャイン計画昭和61年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書(1987).
- 5) 篠木誓一・吉田作松, 斜面日射量の研究—第1報. 筑波における斜面日射量および日射障害の実験観測(高品質データの整備), 太陽エネルギー, 14-1(1988), 24-31.
- 6) 柴田和雄・内嶋善兵衛(編集), 太陽エネルギーの分布と測定, 日本分光学会測定法シリーズ15, 学会出版センター刊(1987).
- 7) ソーラーシステム振興協会, ソーラーシステム標準気象データ及び給水温度, SSS-1001(1984).
- 8) 吉田作松・篠木誓一, 日本における月平均全天日射量およびその年々の変動度のマップの作成, 日本気象学会誌“天気”, 25-5(1978), 375-389.
- 9) 吉田作松・篠木誓一, 日射量の全国マップ—その6. 月間および年間日照時間の平均値とその年々の変動係数, 太陽エネルギー, 8-5(1982), 34-53.
- 10) 吉田作松・篠木誓一, 日本における月平均水平面散乱日射量・同直達日射量の平均値および年々の変動度のマップの作成, 日本気象学会誌“天気”, 30-4(1983), 201-216.
- 11) 吉田作松・篠木誓一, 日射量の全国マップ—その7. アメダス・データを用いて作成した月平均全天日射量の全国細域マップ, 太陽エネルギー, 11-3(1985), 20-36.
- 12) 吉田作松・菊地原英和・篠木誓一, 日射量の全国マップ—その8. アメダス・データを用いて作成した月平均水平面散乱日射量の全国細域マップ, 太陽エネルギー, 12-2(1986), 15-30.
- 13) 吉田作松・篠木誓一・菊地原英和, 斜面日射量の研究—第2報. 筑波実験観測データによる月平均斜面日射量モデルの評価, 太陽エネルギー, 14-2(1988), 21-28.
- 14) 吉田作松・菊地原英和, 斜面日射量の研究—第3報. 全天日射量の直散分離誤差が斜面日射量の推定結果に及ぼす影響, 太陽エネルギー, 14-6(1988), 19-26.
- 15) 吉田作松・篠木誓一, 平均天気日, 快晴日, 曇天日の全天日射量および天空散乱日射量の時間配分モデルの評価, 1989年日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会(川崎)講演論文集, (1989).
- 16) 吉田作松・菊地原英和, 日射量の全国マップ—その11. 日射量推定に必要な積雪指数マップ, 太陽エネルギー, 20-3(1994), 37-44.
- 17) 吉田作松・菊地原英和, 斜面日射量の研究—第4報. 全天日射量の日変化の非対称性とそれが月平均斜面日射量推定結果に及ぼす影響, 太陽エネルギー, 20-4(1994).
- 18) M. Collares-Pereira and A. Rabl, The average distribution of solar radiation—correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, Solar Energy, 22-2(1979), 155-164.
- 19) J. E. Hay, A study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces, Report No. 79-12, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario Canada(1979), 140pp.
- 20) S. A. Klein, Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, Solar Energy, 19-4(1977), 325-329.
- 21) B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, 4-3(1960), 1-19.
- 22) B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat plate solar energy collectors, Solar Energy, 7-2(1963) 53-74.
- 23) W. Paltz (ed.), European solar radiation atlas, Vol. 2. solar irradiation on the vertical and various inclined surfaces, irradiation transmitted through windows, Verlag T. Ü. V. Rheinland, Köln (1984), 327pp.
- 24) J. W. Spencer, Fourier series representation of the position of the sun, Search, 2-5(1971), 172.
- 25) S. Yoahida, S. Shinoki and H. Kikuchi-hara, Study of solar radiation on inclined surfaces in Japan, 2nd report. Evaluation of models for predicting monthly mean insolation on inclined surfaces using the experimental measurements obtained in Tsuba Science City, Int. J. Solar Energy, 8-1(1990), 13-29.