

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

STUDY OF SOLAR RADIATION ON AN INCLINED SURFACE IN JAPAN-4TH REPORT.
AVERAGE DAILY VARIATION PATTERN OF GLOBAL SOLAR RADIATION IN JAPAN
AND THE ERROR OF MONTHLY MEAN SOLAR RADIATION ON AN INCLINED
SURFACE ESTIMATED BY ASSUMING THE SYMMETRICAL DAILY VARIATION
OF GLOBAL SOLAR RADIATION

吉田 作松^{*1}
Sakumatsu Yoshida

菊地原 英和^{*2}
Hidekazu Kikuchiara

Abstract

Solar radiation on an inclined surface is frequently estimated from global solar radiation in solar energy applications. The error of the estimated values may come from each stages of the estimation, for example, estimation of the monthly average hourly global solar radiation from a monthly average daily radiation, separation of the global radiation into direct and diffuse parts, etc. It is very important for solar energy applications and the model improvement to analyze the error of estimated solar radiation on an inclined surface introduced at the above each stage.

In the present paper, first, monthly average daily variation pattern of the global radiation is divided into 4 classes for 14 meteorological stations in Japan; it is shown that the number of the months of nonsymmetrical daily variation around noon amounts to 40%. Next, for typically nonsymmetrical cases the error is analyzed of monthly mean daily solar radiation on an inclined surface estimated by assuming the symmetrical daily variation of global solar radiation; it is found that the error is very small for a south-faced surface but it is rather large for an east- or west-faced, steeply inclined surface.

Key words: Solar radiation, Inclined surface, Daily variation, Nonsymmetrical, Error evaluation

1. はじめに

太陽エネルギー利用システムの立地や設計には、基本データ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、すなわちいわゆる年値が必要である。しかし、実測に基づくこのようなデータはほとんどないので、これまでに、月平均全天日射量から月平均斜面日射量を推定するいろいろのモデルが提案された。しかし各モデルによる推定結果には、推定の各段階で生ずるいろいろの誤差（例えば直散分離モデルの誤差、斜面日射量モデルの誤差など）が含まれる。これらの誤差を分析・評価することは、

推定値の利用上やモデルの改良上重要であるが、このような研究はこれまで見当たらない。

図1は、月平均全天日射量から月平均斜面日射量を推定するためによく用いられる手順の例である。斜面日射量推定値の誤差は、図の手順中の各ステップから生ずる。このうち、斜面日射量モデルの誤差については、本研究の第2報⁽⁷⁾で、また、直散分離の誤差による斜面日射量推定値の誤差については、同じく第3報⁽⁸⁾で述べた。本報では、図1の手順中の「時間配分」のモデルが、日射量の時間分布が午前、午後で対称であると仮定していることによって生ずる斜面日射量推定誤差について検討した。この問題の内容は次のとおりである。

一般に月平均全天日射量から月平均斜面日射量を推定する方法には2種類がある。第一の方法は、月平均日積算値のままで推定計算をすすめる方法で、この場

* 原稿受付 平成6年2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）

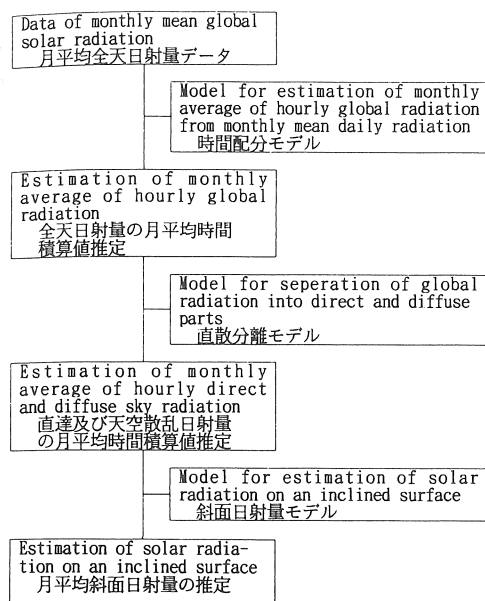


図1 月平均全天日射量から月平均斜面日射量を推定する手順の例

合には図1の「時間配分」のステップは不要である。第2の方法では、月平均時間積算全天日射量及び月平均時間積算天空散乱日射量を用い、斜面日射量の直達成分の推定には直接法⁽¹⁶⁾（文献7の r_0 モデルがこれに相当する）、天空散乱成分の推定には、例えば Hay⁽¹²⁾ や Perez⁽¹⁹⁾ のモデルを用いる方法である。

上の第二の方法は、斜面日射量の直達成分の推定に直接法を用いている点はもちろん、天空散乱成分の推定に、天空における散乱光の不均一（anisotropic）分布を近似的に考慮したモデルを用いることができる点で、第一の方法より優れていると一般に考えられている。このことは、筑波実験観測データによる各種斜面日射量モデルの比較評価でも実証された⁽⁷⁾。

この第二の方法を用いるには、上に述べたように、月平均時間積算全天日射量及び月平均時間積算天空散乱日射量のデータが必要であるが、これらのデータが整備されている地点は少なく、特に天空散乱日射量の測定地点は希である。このため普通、月平均全天日射量及び月平均天空散乱日射量を、例えば Collares-Pereira と Rabl⁽⁹⁾ 及び Liu と Jordan⁽¹⁷⁾ のモデルを用い、時間配分して使用する。

しかし、これら時間配分モデルが仮定している日射量の午前・午後の対称性、つまり日変化の対称性が、実際にどの程度成り立っているのかが問題である。すなわち、内陸では好天の午後に対流雲（積雲）が発生しやすいこと、場所によっては朝または夕方に霧が発

生すること、都会における大気汚染など、日射量の日変化の対称性を乱す気象または人工原因が考えられ、これまでも日射量の日変化が非対称であったとの報告がある。例えば、Iqbal⁽¹³⁾ によれば、カナダの Vancouver では午後の日射量が多く、Simonson⁽²⁰⁾ によれば、英国のロンドン近郊の Kew では春、夏、秋には午後の日射量が多く、冬は午前の日射量が多い。Klein と Theilacker⁽¹⁵⁾ によれば、米国の Madison（ウィスコンシン州）、Albuquerque（ニューメキシコ州）及び Miami（フロリダ州）では冬以外の季節に午前の日射量が多く、また Weaver と Segal⁽²¹⁾ は、衛星写真から、米国のロッキー山地では午後に対流雲が発生しやすいことを解析し、それに伴って午後の日射量が少ないことを示している。

この論文では、わが国における日射量の日変化の対称性はどうか、もし対称からずれているならば、それを対称と仮定することが月平均斜面日射量推定値に及ぼす誤差はどの程度かについて検討した結果を報告する。

2. 全天日射量の日変化型の分類

日射量の日変化の対称性を調べるには、地方真太陽時の12時を折り目にして午前・午後の日射量を重ね合わせてみるのがよいように思われる。しかし、実際の日射量の測定が日本標準時で行われており、これを地方真太陽時による測定値に正しく換算することが難しいので、この方法が適当とはいえない。

本論文では、Collares-Pereira と Rabl⁽⁹⁾ の時間配分モデルが全天日射量の標準の日変化型を与えることを確かめ、これを標準にして、各地の全天日射量の日変化型を判定する。

2.1 実測値による全天日射量時間配分率

気象庁年報に、わが国の15地点における全天日射量の月平均時間積算値が掲載されている。このうちの14地点（表2参照、福岡はデータに異常を認めたので解析から除いた）について、1974～1980年の7年平均の月平均時間積算全天日射量を求め、日積算値を100%として、各時間の配分率を算出した。これが実測による全天日射量時間配分率である。

2.2 モデルによる全天日射量時間配分率の推定

全天日射量時間配分率のモデルとして、木村・宇田

川・吉村⁽⁵⁾のモデル, 知念・古関・最勝寺⁽⁶⁾のモデル, Collares- Pereira と Rabl⁽⁹⁾のモデル, Gueymard⁽¹¹⁾のモデルなどがある。これらのモデルの適合性を, 筑波実験観測データ⁽⁴⁾及び秋田地方気象台のデータを用いて比較検証した結果⁽³⁾では, Collares- Pereira と Rablのモデル及びGueymardのモデルが同じ程度に最良であった。

そこで前述14地点の月平均日積算全天日射量を, 次のCollares- Pereira と Rablのモデルを用いて時間配分した。

$$r_t = (\pi/24)(a+b \cos \omega)(\cos \omega - \cos \omega_s) / (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s) \cdots \cdots (1)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047)$$

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

ここで,

r_t : 時間配分率 (これを100 倍して%で示す)

ω : 太陽の時角 (南を0, 東をマイナス, 西をプラスとする。ラジアン)

ω_s : 日出・日没時の太陽時角 (東をマイナス, 西をプラスとする。ラジアン)

ϕ : 緯度

δ : 太陽赤緯

2.3 日変化型の分類

試験的に各地, 各月における全天日射量の実測の時間配分率とモデルによって推定した時間配分率を比較した結果, 過半数の場合に両者がほぼ一致した。そこで, モデルによって推定した日変化を標準型とみなし,

実測の全天日射量の日変化型を分類した結果は表1の通りで, それぞれの型の例を図2に示す(記号のMはMornig, AはAfternoon, NはNoon, SはStandardの意味)。

これら各日変化型の気象学的解釈は, 次のとおりである。

M型: 高気圧におおわれた好天の日には, 午後に対流性の雲(積雲)がでやすい。

A型: 朝霧が現れやすい地域, 特に海霧が侵入してくる地域では, 霧が消えるのに時間がかかる。

表1 全天日射量の月平均日変化型の分類 (図2 参照)

Code	Name	Characteristics
S	Standard type	Difference# is less than 0.5%(ex. September at Shionomisaki).
M	Morning type	More radiation in the morning. Difference# is more than 0.5% at some times(ex. September at Sapporo).
A	Afternoon type	More radiation in the afternoon. Difference# is more than 0.5% at some times(ex. July at Nemuro).
N	Noon type	More radiation around noon. Difference# is more than 0.5% at some times(ex., August at Matsumoto).

#: "Difference" means the difference between measured monthly mean hourly distribution (%) of global solar radiation and the one (%) estimated by Collares-Pereira and Rabl's model.

表2 各地における全天日射量の月平均日変化型とその出現度数。S: 標準型, M: 午前多照型, A: 午後多照型, N: 正午付近多照型, *: 標準型との差が1.0 %以上ある場合 (*の度数=5/168 (=3%))。

Site	Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Daily variation pattern of solar radiation				Frequency [%]
		S	M	A	N	S	M	A	N	S	M	A	N	S	M	A	N	
Sapporo		N	M*	M	S	S	M	M	M	M*	M	M	N	2	8		2	
Nemuro		S	S	S	S	S	A	A	A	S	S	S	S	9		3		
Akita		M	N	S	S	S	A	A	S	S	S	A		7	1	3	1	
Miyako		M	M	M	S	S	S	S	S	S	S	S	S	9	3			
Wajima		N*	N	N	S	S	A	S	S	S	A	M	M*	5	2	2	3	
Matsumoto		S	S	S	S	N	N	N	N	N	N	S	S	6			6	
Tateno		S	S	S	S	S	A	A	S	A	S	A	N	7		4	1	
Yonago		N	M	S	S	S	N	S	S	S	S	M	S	8	2		2	
Shionomisaki		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	12				
Kagoshima		S	S	S	N	N	N	S	N	M	N	M	S	5	2		5	
Ashizurimisaki		S	S	S	S	S	N	S	S	S	S	S	S	11			1	
Ishigakijima		N	N	S	S	S	S	S	S	M	N	S		7	2		3	
Naha		M	M	S	S	S	S	S	M	M	M	S	S	7	5			
Chichijima		N	S	N	N	M	S	S	S	S	N	N*		6	1		5	
Daily variation pattern of radiation	S	6	7	11	12	11	4	9	9	8	8	7	9	101				60
	M	3	4	2			2	1	2	4	3	4	1	26(3)*				16
	A						4	3	1	1	1	1	1			12		7
	N	5	3	1	2	3	4	1	2	1	2	2	3				29(2)*	17

かり、午後に晴れることが多い。

N型：朝と夕方に霧が発生しやすい地域。

S型：上のM、A及びN型のような気象特性がないか、または弱い地域。

表1の基準により分類した14地点の各月の全天日射量の日変化型を表2に示す。

すなわち、S型（標準型）が60%で過半を占め、M型（午前多照型）が16%、N型（正午付近多照型）が17%で、A型（午後多照型）は7%と非常に少ない。さらに、時間配分率が標準型から1%以上ずれるのは、M型とN型にわずか（全数の3%）見られるだけであ

る。

以上より、わが国では、月平均全天日射量の日変化型の大半はLiuとJordan及びCollares-PereiraとRablのモデルによる推定、つまり標準型とみなされるが、ときどき0.5ないし1%のずれを生ずることがある、と結論される。

3. 全天日射量の日変化型を標準型と仮定することによる斜面日射量の推定誤差

3.1 直散分離モデル

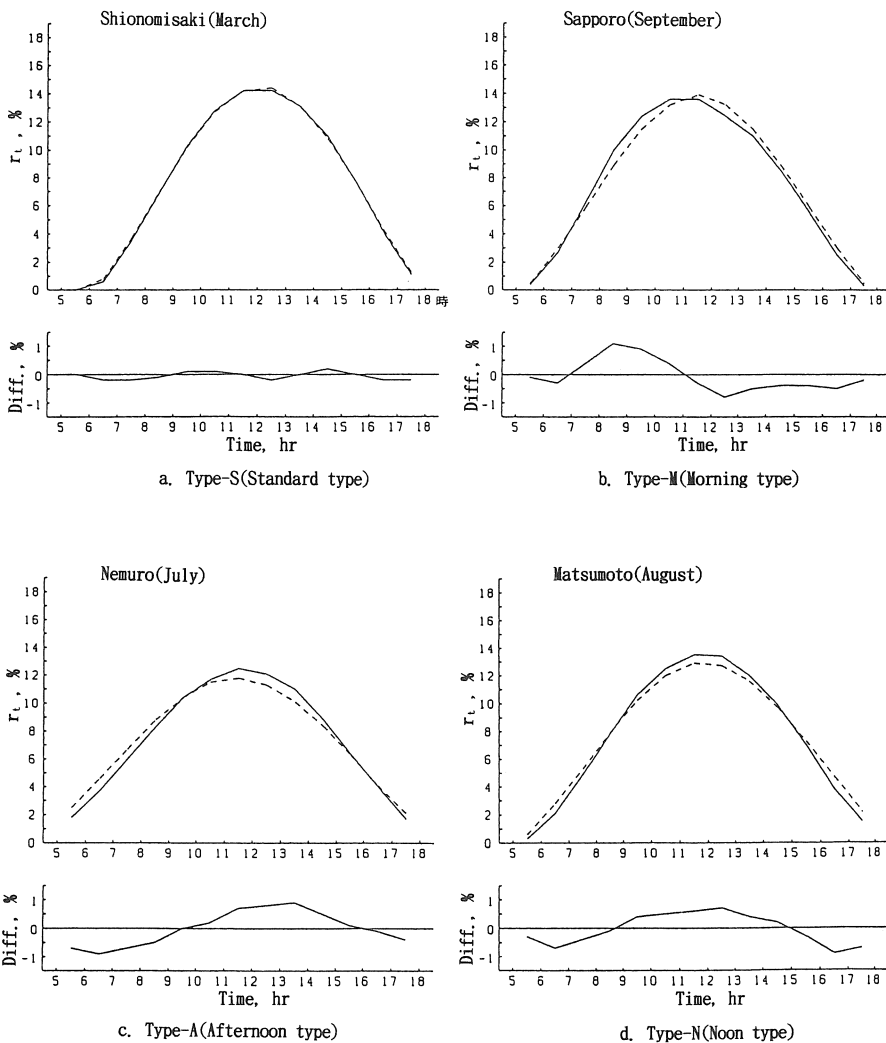


図2 全天日射量の代表的な月平均の日変化型。1974～1980年の7年平均。実線は実測値、破線はモデルによる推定値。 r_t は時間配分率、Diff. = 実測 r_t - 推定 r

斜面日射量の推定のために、まず全天日射量を直達成分と天空散乱成分に分離しなければならない(直散分離)。これには次のErbsら⁽¹⁰⁾の式を用いる。

$I/I_0 \leq 0.22$ のとき

$$I_d/I = 1.0 - 0.09(I/I_0)$$

$0.22 < I/I_0 \leq 0.80$ のとき

$$I_d/I = 0.9511 - 0.1604(I/I_0) + 4.388(I/I_0)^2 - 16.638(I/I_0)^3 + 12.336(I/I_0)^4$$

$I/I_0 > 0.80$ のとき

$$I_d/I = 0.165$$

$$I_b = I - I_d$$

$$I_0 = I_{sc} [1 + 0.033 \cos \{360(n-2)/365\}] \cos \theta_z$$

……………以上(2)

ここで

I : 月平均時間積算全天日射量

I_0 : 月平均時間積算大気外水平面日射量

I_d : 月平均時間積算天空散乱日射量

I_b : 月平均時間積算水平面直達日射量

I_{sc} : 太陽定数 = 1.382 kW/m^2

n : 元日を1とした年間の通し日付けで、うるう年には2月28日、3月1日ともに $n=59$ とする。各月代表の n としては Klein⁽¹⁴⁾ の値を用いる。すなわち各月の n は(カッコ内は実際の日付け)

1月:17(17)	2月:47(16)	3月:75(16)
4月:105(15)	5月:135(15)	6月:162(11)
7月:198(17)	8月:228(16)	9月:258(15)
10月:288(15)	11月:318(14)	12月:344(10)

θ_z : 太陽の天頂角

3.2 斜面日射量モデル

第2報⁽⁷⁾で、月平均日積算斜面日射量を推定する主なモデルを評価し、 $[r_b + \text{Hay}(1)]$ モデル、すなわち直達成分の推定には直接法、天空散乱成分の推定には Hay⁽¹²⁾ のモデル、地面反射成分の推定には均一反射モデル⁽¹⁸⁾を用いる方法が最良であるとの結論を得たので、この研究ではそれらのモデルを用いる。

3.3 全天日射量の日変化型の設定

図2に示したM、N及びAの各型と相似に、標準型との時間配分率の差の最大が0.5%及び1.0%である日変化型を設定し、これをそれぞれM(0.5)型、M(1.0)型、N(0.5)型、N(1.0)型、A(0.5)型及びA(1.0)型とする。ただし、この場合の月平均全天日射量は、

1951～1980の30年間の推定平均値⁽¹⁾、すなわちM型の札幌9月は $3.67 \text{ kWh/m}^2 \text{ d}$ 、A型の根室7月は $3.94 \text{ kWh/m}^2 \text{ d}$ 、N型の松本8月は $5.00 \text{ kWh/m}^2 \text{ d}$ を用いる。

3.4 全天日射量の日変化型を標準型と仮定することによる斜面日射量推定誤差

以上3.1～3.3項に基づき、傾斜角 $0 \sim 90^\circ$ (10° ごと)、方位角 -90° (東) $\sim +90^\circ$ (西)(15° ごと)の日積算斜面日射量を各日変化型について推定し、標準型日変化の場合との差を算出した。M(0.5)、A(0.5)及びN(0.5)の場合の結果を図3に示す。これが、全天日射量の日変化型が標準型でないにもかかわらず、それを標準型と仮定することによる日積算斜面日

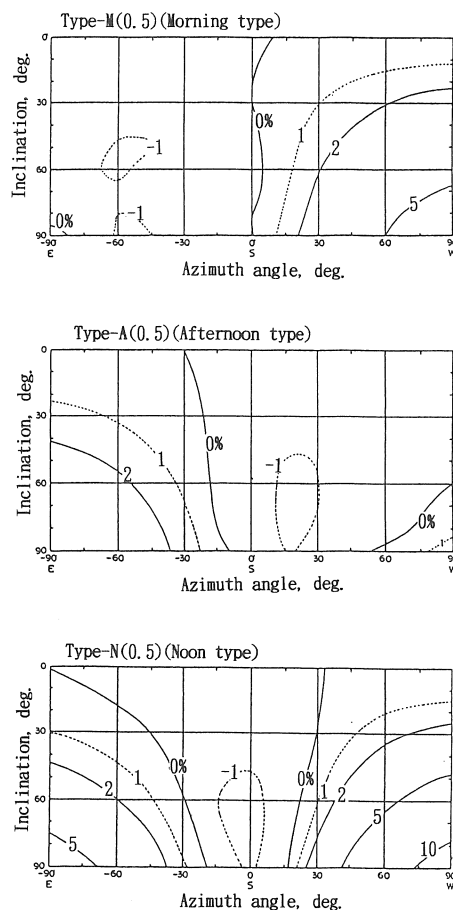


図3 全天日射量の日変化に標準型を仮定することによる斜面日射量の推定誤差、% (プラスは、推定値が大きすぎることを意味する)。標準型との時間配分率の差の最大が0.5%の場合。

射量の推定誤差である。

図3から次の点が指摘される。

- ① M(0.5)型の場合、大部分の斜面では誤差が2%以下であるが、斜面の方位が西向きで傾斜が大きいとき、誤差が+5%を越える。
- ② A(0.5)型の場合、大部分の斜面では誤差が1%以下であるが、斜面の方位が東向きで傾斜が垂直に近いとき、誤差が+3%くらいになる。
- ③ N(0.5)型の場合、斜面の方位が東または西向きで傾斜が垂直に近いとき、誤差が+10%を越えるが、大部分の斜面では誤差が2%以下である。
- ④ 以上により、M(0.5)、A(0.5)、N(0.5)の各型とも、方位角が南から45°以内で傾斜角が60°以下の場合には、誤差は2%以下である。特に南向き斜面では、傾斜角にかかわらず、誤差は1%以下である。
- ⑤ M、A、N型とも、(1.0)型の場合の誤差は、(0.5)型の場合のほぼ2倍である。

表2に*印で示したように、(1.0)型は希にしか現れない。従って、全天日射量の日変化型をすべて標準型と仮定することによる日積算斜面日射量の推定誤差は、特殊の斜面(西または東向きの急斜面)を除いて、5%以下とみなされ、特にほぼ南向きの斜面では、傾斜角にかかわらず、誤差は1%程度にすぎない。

4. まとめ

わが国における月平均全天日射量の日変化の対称性の実態はどうか、もし対称からずれているならば、それを対称と仮定することが月平均日積算斜面日射量の推定値に及ぼす誤差はどの程度か、について検討した結果は、次のとおりである。

- (1) 14地点の各月、すなわち延べ168か月のうち、日射量の日変化型が午前と午後で対称である『標準型』が60%で大半を占めた。ほかに『午前多照型』が16%、『午後多照型』が7%、『正午付近多照型』が17%であり、これらと標準型との時間配分率の差は、最大0.5～1.0%である。

各日変化型が現れる原因として、朝や夕方霧または海霧、内陸における午後の対流雲(積雲)の発生などが考えられる。

- (2) 月平均全天日射量の日変化が標準型でないにもかかわらず、それを標準型と仮定して月平均日積算斜面日射量を推定する場合の誤差は、標準型との時間配分率の差が最大0.5%のとき、南向き斜面では、傾斜角にかかわらず1%以下、方位角が南から

45°以内で傾斜角が60°以下の斜面では2%以下、それ以外の斜面ではやや大きくなる。標準型との時間配分率の差が最大1.0%の場合は、誤差が上のほぼ2倍になる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託により(財)日本気象協会が昭和61年度サンシャイン計画研究⁽²⁾の一環として実施したものである。この論文について有益な意見を頂いた篠木誓一氏(日本気象協会国際事業部国際事業課長)にお礼申し上げる。

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55年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書(1981)、161-200。
- 2) (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一発電量基礎調査)、昭和61年度新エネルギー総合開発機構委託業務成果報告書(1987)。
- 3) (財)日本気象協会、太陽光発電システム実用化技術開発(利用システムに関する調査研究)、昭和63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(1989)、34-37。
- 4) 篠木誓一・吉田作松、斜面日射量の研究一第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。
- 5) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会、太陽エネルギー利用ハンドブック(1985)、日本太陽エネルギー学会発行、21。
- 6) 知念正紀・古閑庄一郎・最勝寺俊夫、光発電システム設置における地形の影響の検討、第12回日本太陽エネルギー学会研究発表会講演論文集(1986)1-4。
- 7) 吉田作松・篠木誓一・菊地原英和、斜面日射量の研究一第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。
- 8) 吉田作松・菊地原英和、斜面日射量の研究一第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。
- 9) M. Collares-Pereira and A. Rabl, The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, Solar Energy, 22(1979), 155-164。
- 10) D. G. Erbs, S. A. Klein and J. A. Duffie, Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, Solar Energy, 28(1982), 293-304。
- 11) C. Gueymard, Mean daily averages of beam radiation received by tilted surfaces as affected by the atmosphere, Solar Energy, 37(1986), 261-267。
- 12) J. E. Hay, A study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces, Report No. 79-12(1979), Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario。
- 13) M. Iqbal, A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - II. Monthly average hourly horizontal radiation, Solar Energy, 22(1979), 87-90。
- 14) S. A. Klein, Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, Solar Energy, 19(1977), 325-329。
- 15) S. A. Klein and J. C. Theilacker, An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces, J. of Solar Energy Engineering, 103(1981), 29-33。
- 16) K. Ya. Kondratyev, Radiation in the atmosphere, Academic Press, New York(1969)。

- 17) B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, 4(1960), 1-19.
- 18) 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(1963), 53-74.
- 19) R. Perez and R. Seals, A new simplified version of the Perez diffusion irradiance model for tilted surfaces, *Solar Energy*, 39 (1987), 221-231.
- 20) J. R. Simonson, The use of weighted R_b factors in calculating monthly average insolation on tilted surfaces, *Solar Energy*, 27(1981), 445-447.
- 21) J. F. Weaver and M. Segal, Some aspects of nonrandom cloudiness in solar energy applications, *Solar Energy*, 41(1988), 49-54.