

直達日射推定モデルの晴天指数および太陽高度を用いた補正

Correction of Direct Irradiance Estimation Model Using Clearness Index and Solar Elevation

桶 真一郎^{*1} 福重直行^{*2} 見目喜重^{*3} 滝川浩史^{*4} 榊原建樹^{*5}
Shinichiro OKE Naoyuki FUKUSHIGE Yoshishige KEMMOKU Hirofumi TAKIKAWA Tateki SAKAKIBARA

Abstract

A very important factor in the assessment of concentrator photovoltaic power generation is the availability of direct irradiance data of high quality. Nevertheless, this quantity is seldom measured and thus must be estimated from measures of global solar irradiance, a quantity that is registered in most radiometric stations. Many different models have been proposed, such as Maxwell, IEA, Louche, Udagawa, and Reindl models. Using those models, we estimated hourly direct irradiance at 14 sites in Japan for 1991 to 2000. In this work, we propose a correction function which is multiplied to the results estimated with those models. The correction function is a linear function of the clearness index and the solar elevation and the correction coefficients are classified every 0.2 of the clearness index. The estimated values are evaluated with a root mean square error (RMSE). The best results are obtained for the IEA model. Before correction, the value of RMSE is 123 to 165 W/m² depending on the site. However, after correction, it significantly decreases to 88 to 95 W/m².

キーワード：直達日射強度，推定モデル，晴天指数，太陽高度，重回帰分析

Key Words: Direct irradiance, Estimation model, Clearness index, Solar elevation, Multiple regression analysis

1 はじめに

集光式太陽光発電 [1-6] は太陽電池使用量が少量ですむため，発電コストの低減が期待されている。集光はコスト低減のみならず，発電効率の増加，単位重量あたりの発電量の増大などの優れた特徴を有し，特に大面積基板が得にくく高価である III-V 族化合物半導体を用いた太陽電池において，極めて有用である。また結晶 Si 太陽電池においても，その原料入手難の解消ばかりでなく，低コスト化にも有効であると考えられている。このような，集光式太陽光発電システムを導入しようとする際には，その発電量を前もって見積もっておくことが必須である。集光式太陽光発電システムは直達日射を利用して発電するため，その発電量の計算には直達日射データが必要となる。しかし，気象庁によりデータベース化されて一般に公開されている直達日射データは，国内 14 地点分しかない（全天日射は国内 67 地点分）。そのため，集光式太陽光発電システムを国内の任意の地点に導入することを想定した場合，その発電量を見積もることができない。

これらのことから，全天日射量や太陽高度などを用いて直達日射量を推定する手法の開発が求められている。しかし，

これまでに開発されてきた直達日射推定モデルはその推定誤差が大きく [7-14]，精度良く発電量を見積もることができない。

本研究では，従来の直達日射推定モデルによる推定値を補正し，最終的な推定値の誤差を大幅に低減することを目的としている。

2 気象データ

2.1 日射および晴天指数

地表が受ける全天日射は直達日射と散乱日射とから成る。直達日射は太陽から地表に直接届く日射成分であり，散乱日射は大気や雲などによって散乱・反射されて地表に届く日射成分である。図 1 に，潮岬における水平面全天日射および法線面直達日射の変化パターン例を示す。晴天日の全天日射は正弦波形であるが，直達日射は釣り鐘型である。曇天日の直達日射は全天日射とは全く異なった形状を呈している。本論文では，このように天候によって大きく左右される直達日射を，全天日射を用いて推定する。

ここで，水平面直達日射強度を I_b ，水平面散乱日射強度を I_d とすると，水平面全天日射強度 I_g は式 (1) のように表せる。

$$I_g = I_b + I_d \quad (1)$$

ここで I_b は法線面直達日射強度 I_n ，太陽高度 h [°] を用いて

$$I_b = I_n \cdot \sin h \quad (2)$$

*1 豊橋技術科学大学工学部教務職員
(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
e-mail: oke@eee.tut.ac.jp

*2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科学生

*3 豊橋創造大学経営情報学部助教授

*4 豊橋技術科学大学工学部助教授

*5 豊橋技術科学大学工学部教授
(原稿受付：2005年3月2日)

と表せる。従って、 I_n は次式で表せる。

$$I_n = \frac{I_g - I_d}{\sin h} \quad (3)$$

ここで太陽高度 $\sin h$ は、次式のように緯度 ϕ [°], 日赤緯 δ [°] および時角 ω [°] によって一意に定まる [15]。

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (4)$$

なお、日赤緯 δ は式 (5) から、時角 ω は式 (6) から求まる。

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360}{365(d_n + 284)} \quad (5)$$

$$\omega = 15(H_s \pm 12) \quad (6)$$

ここで、 d_n は1月1日からの通し日数、 H_s は真太陽時である。真太陽時は、地方標準時、観測点の経度、地方標準時を規定する経度および均時差から求まる。なお、式 (6) 中の符号は、南中前には正、南中後には負となる。

このように $\sin h$ は理論的に算出できるが、 I_g および I_d は気象条件に左右されるため、 I_n を求めることはできない。そのため、様々な気象データを考慮した直達日射推定モデルが提案されてきている。

全天日射強度の季節変動の影響を除去するために、晴天指数がよく用いられている。晴天指数 k_t は、 I_g を大気外水平面全天日射強度 I_e で除した値であり、式 (7) で表される。

$$k_t = \frac{I_g}{I_e} \quad (7)$$

なお、 I_e は次式のように太陽定数 S_0 ($=1.353 \text{ kW/m}^2$)、太陽-地球間の平均距離に対する比 ρ および太陽高度 $\sin h$ によって一意に定まる [16]。

$$I_e = \frac{S_0}{\rho^2} \cdot \sin h \quad (8)$$

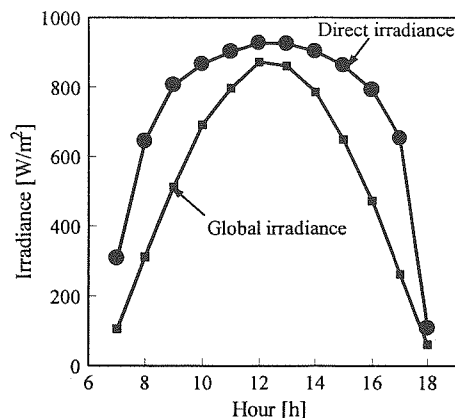
太陽-地球間の平均距離に対する比 ρ は、式 (9) で表される。

$$\rho = 1 - e \cdot \cos \frac{360d_n}{365} \quad (9)$$

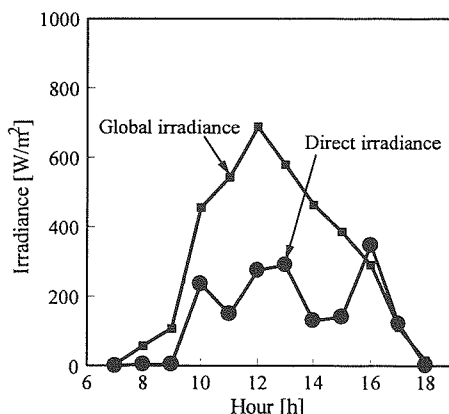
なお、 e は地球の公転移動の離心率 ($=0.0167$) である。

2.2 推定に用いる気象データ

本研究では、1991~2000年の気象官署の地上観測データ (SDP データ) の時別値を用いる。SDP 観測地点 (全 157 地点) のうち、直達日射を観測しているのは図 2 に示す 14 地点 (札幌、根室、秋田、宮古、輪島、松本、館野、米子、潮岬、福岡、鹿児島、清水、石垣島、那覇) である。これらの地点において全天日射から直達日射を推定し、実測値と比較する。なお、本論文では、毎時の時間積算直達日射量を時間で割って算出した直達日射強度の 1 時間平均値 (以下、平均直達日射強度) を取り扱う。また、本論文で取り扱う気象データ等は、特に記述の無い限り、すべて 1 時間平均値である。



(a) Fine weather day in Shionomisaki (2000/9/18).



(b) Cloudy weather day in Shionomisaki (2000/10/1).

Fig. 1 Time series examples of direct irradiance and global irradiance.

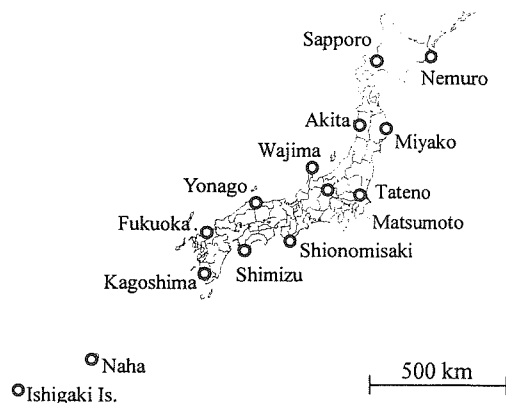


Fig. 2 Measurement sites with direct irradiance in Japan.

3 直達日射推定モデル

直達日射推定モデルは、いくつかの種類に分類することができる。Wong ら [12] は、全天日射を観測せずとも大気の状態などをパラメータとして直接的に直達日射を求めるパラメトリックモデルと、全天日射を観測し晴天指数や散乱係数などを用いて直達日射を求める直散分離モデルとに分類している。また稲沼ら [17] は、大気透過率の関数として直達日射を

求める P 群と、全天日射から計算される晴天指数などを用いて直達日射を求める K 群とに分類している。さらに、P 群および K 群をそれぞれ、直接的に直達日射を求める I_n タイプと、散乱日射を介して求める I_d タイプとに分類している。

本研究は全天日射から直達日射を求めることを目的としているため、直散分離モデルを採り上げる。表 1 に、直散分離モデルに分類される代表的な推定モデルをタイプ別に示す。本論文では、これらの推定モデルの推定誤差を検討する。次節以降に、それらの概要を示す。

Table 1 Classification of direct irradiance estimation models.

	P group	K group
I_n type	Maxwell [7]	IEA [8] Louche [9] Udagawa [10]
I_d type	-	Reindl [11]

3.1 Maxwell モデル

Maxwell モデルは式 (10) で表される。

$$I_n = I_e \cdot \{\psi - A + B \cdot \exp(m_r \cdot C)\} \quad (10)$$

ここで、 m_r はエアマス、 ψ は次式で表されるエアマスの関数である。

$$\psi = 0.000014m_r^4 - 0.000653m_r^3 + 0.0121m_r^2 - 0.122m_r + 0.866 \quad (11)$$

係数 A 、 B および C は、晴天指数 k_t によって場合分けされる。

$k_t \leq 0.6$ の場合

$$\begin{aligned} A &= -2.222k_t^3 + 2.286k_t^2 - 1.56k_t + 0.512 \\ B &= 0.962k_t + 0.37 \\ C &= -2.048k_t^2 + 0.923k_t - 0.28 \end{aligned} \quad (12)$$

$k_t > 0.6$ の場合

$$\begin{aligned} A &= 11.56k_t^3 - 27.49k_t^2 + 21.77k_t - 5.743 \\ B &= 31.9k_t^3 + 66.05k_t^2 - 118.5k_t + 41.4 \\ C &= 73.81k_t^3 - 222k_t^2 + 184.2k_t - 47.01 \end{aligned} \quad (13)$$

なお、Maxwell モデルの適用範囲は、 $\sin h \geq 0.078$ ($h \geq 4.47^\circ$) である場合に限定されている。

Maxwell モデルの特徴は、太陽高度により適用範囲が限られているがエアマスと晴天指数とを用いて直接的に直達日射強度を求めることができる点にある。

3.2 IEA モデル

IEA モデルは次式で表される。

$$I_n = 1,791k_t - 517 \quad (14)$$

ただし、推定の結果 $I_n > 1,000 \text{ W/m}^2$ となる場合には $I_n = 1,000 \text{ W/m}^2$ とし、 $I_n < 0 \text{ W/m}^2$ となる場合には $I_n = 0 \text{ W/m}^2$ とする。

IEA モデルの特徴は、異常とみられる推定値を制限できること、適用範囲が太陽高度によらないこと、全天日射強度から求まる晴天指数のみから直達日射強度を求めることができることにある。

3.3 Louche モデル

Louche モデルでは、次式で定義される直達係数 k_b を用いて直達日射強度を求める。

$$k_b = \frac{I_b}{I_e} \quad (15)$$

k_b は、式 (16) を用いて求められる。

$$k_b = -10.627k_t^5 + 15.307k_t^4 - 5.205k_t^3 + 0.994k_t^2 - 0.059k_t + 0.002 \quad (16)$$

従って、晴天指数 k_t から式 (16)、(15) および (2) を介して、 I_n を求めることができる。

Louche モデルでは、適用範囲が太陽高度 $\sin h$ によらないこと、直達日射強度を求める式は晴天指数のみの関数であることなどの特徴がある。

3.4 Udagawa モデル

このモデルでは、まず次式を用いて太陽高度 $\sin h$ から係数 k_c を求める。

$$k_c = 0.00803 \sin^2 h + 0.333 \sin h + 0.5163 \quad (17)$$

次に、 k_c と晴天指数 k_t とを比較し、両者の大小によって異なる式で直達係数 k_b を求める。

$k_t \geq k_c$ の場合

$$k_b = 1.43k_t - 0.43 \quad (18)$$

$k_t < k_c$ の場合

$$k_b = (0.2396 \sin^2 h - 1.258 \sin h + 2.277) \cdot k_t^3 \quad (19)$$

最後に次式を用いて、直達係数 k_b と I_e とから I_n を求める。

$$I_n = k_b \cdot I_e \quad (20)$$

なお、Udagawa モデルの適用範囲は $\sin h \geq 0.3$ ($h \geq 17^\circ$) である場合に限定されている。

3.5 Reindl モデル

Reindl モデルを用いた直達日射強度推定では、次式で定義される散乱係数 k_d を用いて直達日射強度を推定する。

$$k_d = \frac{I_d}{I_g} \quad (21)$$

散乱係数 k_d は、晴天指数 k_t と太陽高度 $\sin h$ とから求められる。なお、 k_d の導出式は、 k_t の値により場合分けされる。 k_d の算出式を式 (22)~(24) に示す。

$k_t \leq 0.3$ の場合

$$k_d = 1.020 - 0.254k_t + 0.0123 \sin h \quad (22)$$

$0.3 < k_t < 0.78$ の場合

$$k_d = 1.400 - 1.749k_t + 0.177 \sin h \quad (23)$$

$k_t \geq 0.78$ の場合

$$k_d = 0.486k_t - 0.182 \sin h \quad (24)$$

従って、晴天指数 k_t から式 (22)~(24), 式 (21) および式 (3) を介して I_n を求めることができる。

Reindl モデルの適用範囲は $\sin h$ によらないが、北緯 $28 \sim 60^\circ$ の地域に限定されている。

3.6 各モデルの推定誤差

Maxwell, IEA, Louche, Udagawa および Reindl の各モデルを用いて 1991~2000 年の水平面全日射強度の特別値から直達日射強度を推定し、式 (25) を用いてそれらの二乗平均平方根誤差 (RMSE) を計算した。ただし、 I_e は推定直達日射強度、 I_m は実測直達日射強度、 n はデータ数である。

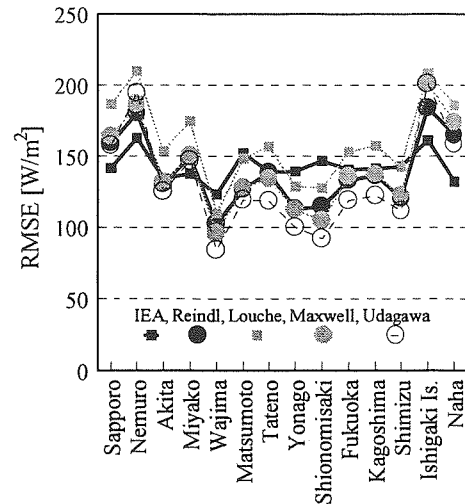
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (I_e - I_m)^2}{n}} \quad [W/m^2] \quad (25)$$

図 3 に推定地点ごとの RMSE を示す。同図 (a) は各推定モデルの適用範囲内で計算した結果の RMSE を示す。どのモデルでも北海道や沖縄地域の RMSE が他地域に比べてやや大きい。また、ほとんどの地点で Udagawa モデルの RMSE が最小となっている。全地点の RMSE の平均値は、Louche モデル: $160 W/m^2$, IEA モデル: $143 W/m^2$, Maxwell モデル: $141 W/m^2$, Reindl モデル: $141 W/m^2$, Udagawa モデル: $132 W/m^2$ である。Udagawa モデルの RMSE が最小となる理由は、適用範囲を $\sin h \geq 0.3$ と限定していることにある。一般に、RMSE が大きくなりやすい時間帯は日の出や日の入りであり、その時間帯では $\sin h$ は 0.3 以下となる。

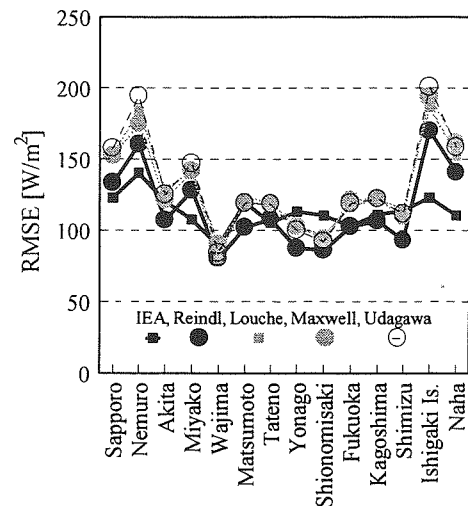
そこで、全モデルを公平に評価するために、 $\sin h \geq 0.3$ となる時間帯について計算し直した。同図 (b) にその結果を示す。Udagawa モデルを除く全モデルの RMSE が同図 (a) に比べて減少している。その中でも IEA モデルと Reindl モデルの RMSE は $114 W/m^2$, $115 W/m^2$ とかなり小さくなる。他のモデルの RMSE はそれぞれ、Udagawa モデル: $132 W/m^2$, Maxwell モデル: $130 W/m^2$, Louche モデル: $130 W/m^2$ である。

4 直達日射推定モデルの補正

前章で述べたように、従来の直達日射推定モデルの RMSE は $140 W/m^2$ 以上 ($\sin h$ で制限しない場合) と十分に小さいとは言えない。本章ではそれらの推定結果を補正し、推定誤差を低減する。本論文では、従来の直達日射推定モデルのうち RMSE が最小であった IEA および Reindl の両モデルを補正対象とする。



(a) Each model as it is.



(b) Each model for $\sin h \geq 0.3$.

Fig. 3 RMSE of direct irradiance estimated with various models at various stations in Japan.

4.1 推定モデルの補正式

推定直達日射強度 I_n に補正関数 $f(x, y)$ を乗じたものを補正推定直達日射強度 I'_n とし、次式のように表すものとする。

$$I'_n = f(x, y) \cdot I_n \quad (26)$$

ここで、 x を晴天指数 k_t , y を太陽高度 $\sin h$ とする。これらを補正関数の変数として選択した理由は、Reindl ら [11] により直達日射強度は晴天指数と太陽高度とが深く関係していることが示されているからである。

ここで $f(k_t, \sin h)$ を次式で定義する。

$$f(k_t, \sin h) = A + B \cdot k_t + C \cdot \sin h \quad (27)$$

補正係数 A , B および C は、直達日射強度を計測している 14 地点における 10 年分のデータを用いた重回帰分析により、推定誤差が最小となるように決定した。表 2 に、それぞれの推定モデルに適用する補正係数 A , B および C を示す。同表か

ら、IEA モデルにおいては太陽高度項の補正係数が大きく、Reindl モデルにおいては定数項の補正係数が大きいことが分かる。

Table 2 Correction factors.

	IEA Model	Reindl Model
A	-24.30×10^{-3}	$1,431 \times 10^{-3}$
B	17.18×10^{-3}	560.2×10^{-3}
C	$1,286 \times 10^{-3}$	-93.32×10^{-3}

4.2 補正後の推定誤差

式 (27) を用いて推定直達日射強度を補正した結果の RMSE を図 4 に示す。同図 (a) は IEA モデル、同図 (b) は Reindl モデルの場合である。IEA モデルでは、補正により RMSE の平均値は 143 W/m^2 から 140 W/m^2 に減少するとともに、RMSE の地域ごとの差が最大 41.5 W/m^2 から同 18.7 W/m^2 に小さくなっている。このことは、補正することにより地域に対する汎用性が高まることを意味している。これに対して

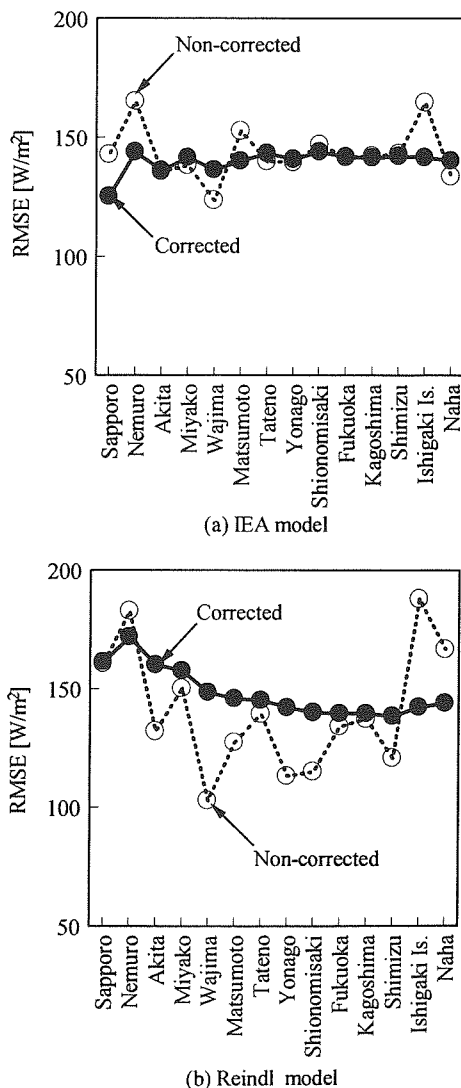


Fig. 4 RMSE of direct irradiance corrected and non-corrected.

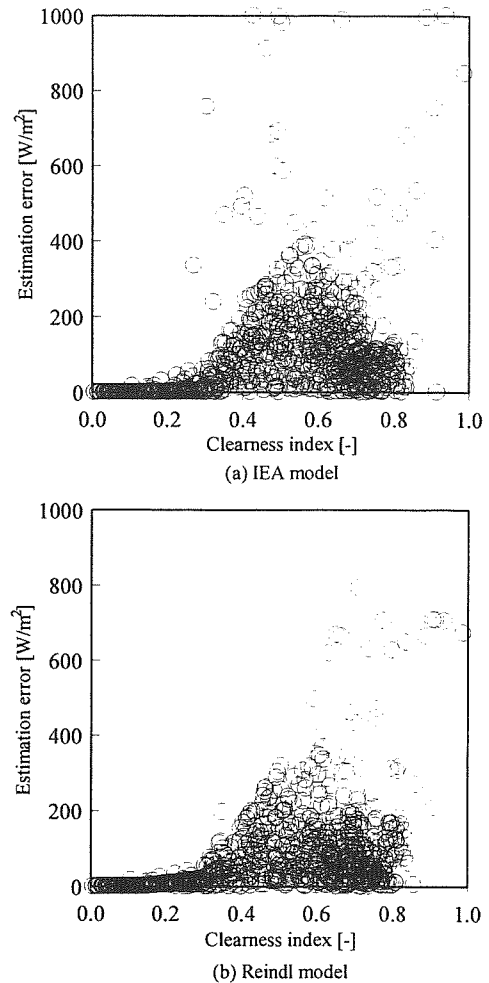


Fig. 5 Scatter diagram of estimation error versus clearness index.

同図 (b) に示す Reindl モデルでは、RMSE の地域ごとの差は最大 85.1 W/m^2 から同 33.4 W/m^2 に大きく減少するが、RMSE の平均値は 141 W/m^2 から 148 W/m^2 に増加している。特に輪島においては、補正前は 100 W/m^2 程度であったのに、補正することにより 140 W/m^2 程度まで増大している。

ここで、補正により RMSE があまり低減できなかった原因を検討する。図 5 に、補正前の推定誤差と晴天指数との散布図を示す。同図 (a) は IEA モデル、同図 (b) は Reindl モデルの場合である。両図から、どちらのモデルでも推定誤差は晴天指数に対して一様に分布せず、分布の仕方は晴天指数の範囲によって異なっていることが分かる。そのため、晴天指数の全範囲にわたって一定の補正係数 A、B および C を決定する補正法では、RMSE を低減できないものと考えられる。

5 晴天指数分類補正法

補正後の RMSE をさらに低減するために、晴天指数を 0.2 ごとに分類し、それぞれの分類ごとに補正係数 A、B および C を決定することにする。これを晴天指数分類補正法（以下、 k_f 分類法と略）と呼ぶこととする。このようにして決定した晴天指数ごとの補正係数を表 3 に示す。同表から、晴天指数

Table 3 Correction factors for every classified clearness indices.

		IEA Model	Reindl Model
$0 < k_t \leq 0.2$	A	-0.650×10^{-3}	317×10^{-3}
	B	722×10^{-3}	$16,300 \times 10^{-3}$
	C	-111×10^{-3}	$-2,740 \times 10^{-3}$
$0.2 < k_t \leq 0.4$	A	-435×10^{-3}	$2,500 \times 10^{-3}$
	B	$3,280 \times 10^{-3}$	$-1,820 \times 10^{-3}$
	C	71.2×10^{-3}	-587×10^{-3}
$0.4 < k_t \leq 0.6$	A	209×10^{-3}	976×10^{-3}
	B	$1,070 \times 10^{-3}$	-619×10^{-3}
	C	-163×10^{-3}	552×10^{-3}
$0.6 < k_t \leq 0.8$	A	78.5×10^{-3}	811×10^{-3}
	B	938×10^{-3}	-583×10^{-3}
	C	223×10^{-3}	804×10^{-3}
$0.8 < k_t \leq 1.0$	A	660×10^{-3}	114×10^{-3}
	B	-45.8×10^{-3}	297×10^{-3}
	C	553×10^{-3}	$1,090 \times 10^{-3}$

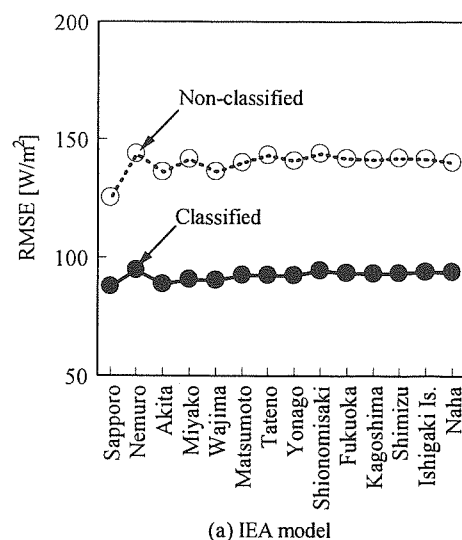
の範囲により係数がかなり異なっていることが分かる。

図 6 に、 k_t 分類法を用いて推定した直達日射強度の RMSE を示す。同図 (a) から、IEA モデルの場合、 k_t 分類法を適用することにより全地点での RMSE が大きく減少することが分かる。全地点の RMSE の平均値は、さらに 48 W/m^2 減少し、 92 W/m^2 となっている。また、RMSE の地域ごとの差はさらに小さく 7 W/m^2 となり、どの地点でもほぼ一定の RMSE で直達日射強度を推定できている。同図 (b) の Reindl モデルの場合でも、同様のことが言える。全地点の RMSE の平均値は k_t 分類法を適用することにより、それを適用しないときに比べて 31 W/m^2 減少し、 117 W/m^2 となっている。

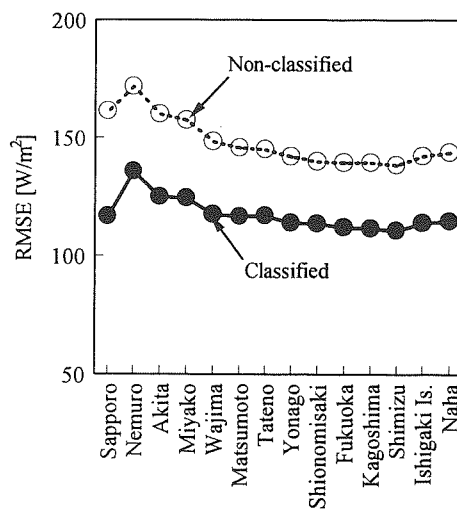
ここで、晴天指数の範囲ごとに見たときに、RMSE に何らかの傾向が現れないかを検討してみた。図 7 に、潮岬における IEA モデルの結果を示す。補正も分類も施さない場合、RMSE は晴天指数と共に単調に増加している。補正のみを施した場合、RMSE は晴天指数が $0.2-0.4$ および $0.4-0.6$ の範囲では補正しない場合に比べて大幅に減少するが、 $0.6-0.8$ の範囲ではその減少幅は少なくなり、 $0.8-1.0$ の範囲では補正しない場合よりも大きくさえている。これに対し、補正および分類を施した場合、RMSE は晴天指数のどの範囲においても補正しない場合に比べて大幅に減少している。

以上のことから、最も RMSE が小さくなる直達日射推定法は、IEA モデルにより推定した直達日射強度を、本論文で提案する晴天指数分類補正法で補正する方法である。

しかしながら、14 地点以外に k_t 分類法を適用したときに直達日射強度の推定誤差が減少することが検証されていない。このような検証は、本来は 14 地点以外で全天日射強度と直達日射強度とが計測されている地点について行うべきであるが、14 地点だけを用いても、例えば、13 地点から決定した補正係数を残りの 1 地点に適用することによって確認することができる。そこで 14 地点のうち、代表的な 3 地点（札幌、潮岬および那覇）について、それぞれを除く 13 地点の気象デー



(a) IEA model



(b) Reindl model

Fig. 6 RMSE of direct irradiance estimated with clearness indices classified and non-classified methods.

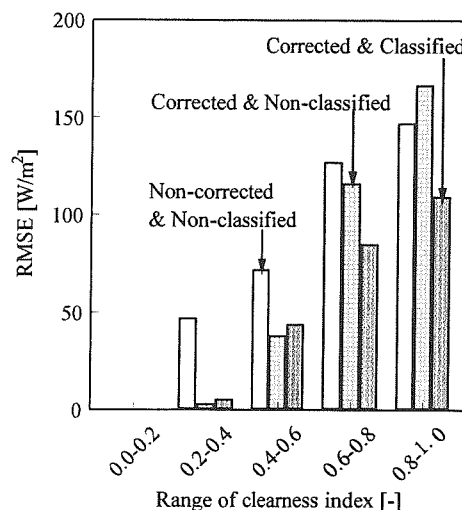


Fig. 7 RMSE versus clearness index in IEA model (Shionomisaki).

タを用いて補正係数を算出し、3地点の直達日射強度を推定し、そのRMSEを求めてみた。その結果、14地点の結果とほとんど差がなく、最大差は 0.6 W/m^2 （札幌、Reindlモデル）であった。したがって、 k_t 分類法を14地点以外に適用しても本論文と同様の結果が得られるものと言えよう。

6 まとめ

全天日射強度の実測値から直達日射強度を推定する際、その推定誤差が小さくなることが望ましい。従来の直達日射強度推定モデルのうち比較的、推定誤差が小さいのはIEAモデルおよびReindlモデルである。本研究では、これら2つのモデルで推定された結果に補正を加えることによって推定誤差をさらに減少させた。補正は、推定結果に補正関数を乗ずることで行った。補正関数は晴天指数と太陽高度に関する一次式とし、定数項Aおよび各項の係数B、Cを重回帰分析を用いて決定した。その際、使用したデータは日本全国14地点の1991～2000年の水平面全天日射強度および法線面直達日射強度の特別値である。推定誤差はRMSEで評価した。補正前のRMSEの平均値は、IEAモデル： 143 W/m^2 、Reindlモデル： 141 W/m^2 であった。両モデルに一定の補正係数を有する補正関数で補正した場合、IEAモデルでは 3 W/m^2 減少したが、Reindlモデルでは 7 W/m^2 増加した。次に、両モデルの補正係数を晴天指数0.2刻みごとに決定し、その補正関数を用いて補正した（晴天指数分類補正法）。その結果、IEAモデルにおいてはRMSEの平均値は補正前より 51 W/m^2 減少し 92 W/m^2 となり、Reindlモデルにおいては補正前より 24 W/m^2 減少し 117 W/m^2 となった。さらに、どちらのモデルにおいてもRMSEの地域ごとの差が非常に小さくなった。

以上の結果から、全天日射強度から従来のモデルを用いて推定した直達日射強度を本論文で提案する晴天指数分類補正法で補正すると、推定誤差が大きく減少し、地域的な汎用性も著しく向上することが明らかになった。特に、IEAモデルによる推定結果を補正すると、これまでに提案されているどの直達日射推定モデルよりも推定誤差が小さくなることが明らかになった。

References

- [1] 見目, 榊原, 江上:「集光式太陽光発電のフィールドテスト」, 太陽エネルギー, Vol.29, No.5, pp.20-25, 2003
- [2] 見目, 榊原, 江上, 荒木:「集光式太陽光発電の変換効率への太陽追尾誤差の影響」, 平成16年 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 52-15 - 52-16, 2004
- [3] 見目, 平松, 宮崎, 江上, 荒木, 榊原:「ドーム型フルネルレンズを用いた500倍集光式太陽光発電システムの屋外試験」, 平成16年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-156, 2004
- [4] 見目, 江上, 宮崎, 平松, 荒木, 榊原:「ドーム型フルネルレンズを用いた500倍集光式太陽光発電システムの夏季の発電実績」, 太陽/風力エネルギー講演論文集2004, pp.173-176, 2004
- [5] K.Araki, M.Yamaguchi, "Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells", Solar Energy Materials & Solar cells, Vol.75, pp. 707-714, 2003
- [6] K. Araki et al., "A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500 X concentrator PV module", Proceedings of 29th IEEE PVSC, pp. 1568-1571, 2002
- [7] Maxwell: "A Quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Report SERITR-215-3087", Solar Energy Research Institute, 1987
- [8] 日本太陽エネルギー学会編:「太陽エネルギーの基礎と応用」, pp.30-31, オーム社, 1978
- [9] Louche, Notton, Poggi, Simonnot: "Correlation for Direct Normal and Global Horizontal Irradiation on a French Mediterranean Site", Solar Energy, Vol. 46, No. 4, pp.261-266, 1991
- [10] 宇田川, 木村:「水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定」, 日本建築学会本文報告集, 第267号, pp. 83-89, 1978
- [11] Reindl, Beckman: "Diffuse Fraction Correlations", Solar Energy, Vol. 45, No.1, pp. 1-7, 1990
- [12] L. T. Wong, W.K. Chow, "Solar radiation modes", Applied Energy, Vol. 69, pp.191-224, 2001
- [13] 曾我, 赤坂, 二宮:「全天日射量から直達日射量と天空日射量を推定する各種モデルの比較と評価」, 日本建築学会計画系論文集, 第519号, pp. 31-38, 1999
- [14] F.J.Batlles et, al., "Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance", Energy, vol. 25, pp. 675-688, 2000
- [15] 新太陽エネルギーハンドブック編集委員会編:「新太陽エネルギー利用ハンドブック」, p.9, 日本太陽エネルギー学会, 2001
- [16] 大河内:「日射量の評価法」, 八代高専紀要, Vol.11, pp.15-22, 1988
- [17] 稲沼, 武田:「長期観測データに基づく建築環境外界気象要素に関する研究その4 日射の直散分離式の検討」, 日本建築学会学術講演梗概集2003（東海）, D-2 分冊, pp.43-44, 2003