

Simple estimation models of global horizontal irradiation using sunshine hours in AMeDAS and solar radiation climatic province

Takumi FURUTANI^{*1‡}Yuzuru UEDA^{*2}

AMeDAS 日照時間と日射気候区を用いた簡易的な日照日射変換モデルによる水平面全天日射量の推定

古谷 拓巳^{*1‡}植田 謙^{*2}

Abstract

In order to maintain the power generation performance of photovoltaic power generation systems, it is common to compare the actual energy yield with the estimated energy yield calculated from the measured solar irradiation in the same location. If there is no on-site measured data of the solar irradiation, it can be estimated from the total global horizontal irradiation measured at 48 JMA sites in Japan. However, in order to use the data which measured at closer points, the sunshine hours measured at 687 AMeDAS sites in addition to JMA sites are also available in Japan. This paper verified the validity of the conversion formula of the hourly integrated sunshine hours into the global horizontal irradiation and updated it with the latest data. Finally, this study propose the model which convert sunshine hours into the global horizontal irradiation: the model can select the optimum coefficient in nationwide and in each solar radiation climatic province which is added in order to maintain simplicity and improve accuracy.

Keywords: Sunshine solar irradiation conversion model, Sunshine hours, Global horizontal irradiation, solar radiation climatic province, photovoltaic

キーワード：日照日射変換モデル，日照時間，水平面全天日射量，日射気候区，太陽光発電

1. はじめに

電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法に基づき 2012 年 7 月 1 日から開始された発電事業用の太陽光発電所 (PV 発電所) に対する固定価格買い取りにより、メガソーラ事業への企業等の本格的な参入が始まった。メガソーラの発電性能の維持管理には、太陽電池アレイ面となる傾斜面全天日射量や気温等を用いて推定した一定期間の発電電力量と同期間の実発電電力量を比較することが一般的であるが、発電電力量の推定において現地の傾斜面全天日射量のデータを計測して

いない場合、全国 48 か所の気象官署で測定されている水平面全天日射量から PV 発電所における傾斜面日射量を推定することが可能である。しかし一般に、気象官署と PV 発電所の距離が離れている場合には推定精度が低下するため、より近い地点のデータを用いるために 48 か所に追加で、687 か所の AMeDAS の四要素観測所で測定されている日照時間から水平面全天日射を推定する場合もある⁽¹⁾。

日照時間から日射量を簡易的に推定する手法には、Angström モデル⁽²⁾や吉田・篠木モデル⁽³⁾などがある。しかし Angström モデル⁽²⁾は日積算での推定、吉田・篠木モデル⁽³⁾は月積算あるいは年積算での推定を行うことに主眼があり時積算での推定は考慮されていない。

*1 Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1, Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan.

‡e-mail: 4319567@ed.tus.ac.jp

*2 Professor, Department of Engineering, Tokyo University of Science
Received: December 24, 2020 Accepted: February 25, 2021

*1 東京理科大学大学院 工学研究科

‡e-mail: 4319567@ed.tus.ac.jp

*2 東京理科大学 工学部電気工学科 教授
(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

(原稿受付：2020 年 12 月 24 日，受理日：2021 年 2 月 25 日)

時積算推定モデルとしては馬淵・佐藤モデル⁽⁴⁾がある。馬淵・佐藤モデル⁽⁴⁾は入力に日照時間のみを用いる簡易かつ汎用性の高い手法であり、筆者らはこれまで全国に適用可能なメガソーラの発電性能評価手法の開発⁽¹⁾において日照日射変換に馬淵・佐藤モデル⁽⁴⁾を用いてきた。しかし、データセットが1986年と古く、また文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾に示されるような近年の大気中のエアロゾルなどの物質の減少による日射量の増加傾向が反映されていない点や、日射気候区⁽⁷⁾に示されるような地域別の日射状況が考慮されていないため推定精度が地域によって異なる点などの課題があった。地域特性の考慮としては、海外の事例として文献⁽⁸⁾などがあり、日照時間に対する日照時間の割合と大気外全天日射量に対する水平面全天日射量の関係が地域によって異なることが示されてきた。

そこで本論文では馬淵・佐藤モデル⁽⁴⁾の変換式の妥当性について検証するとともに、近年の日射量の増加傾向を考慮すべく最新のデータを用いてモデル内の係数を更新した。また、全国のPV発電所の維持管理に用いることを想定し、その簡易性を維持しつつさらなる高精度化を目指して、全国一律および日射気候区⁽⁷⁾のうち大気候区毎や中気候区毎の補正係数を追加し、気象官署毎に最適な係数を選択するモデルを開発した。

2. 時積算別日照日射変換モデルの係数の更新と妥当性の検証

2.1 使用データ

本検討に用いたデータ⁽⁹⁾の地点一覧を表1に示す。41官署の2013年～2018年の6年間のデータであり、水平面全天日射量 H_g [kWh/m²]、日照時間 n [h]の一時間値を使用した。

Table 1 41 JMA sites used observed values.

表1 データの気象官署41地点の一覧

Wakkanai	Asahikawa	Abashiri	Akita	Sapporo
Hakodate	Utsunomiya	Aomori	Sendai	Morioka
Muroran	Fukushima	Yamagata	Tokyo	Niigata
Obihiro	Hiroshima	Maebashi	Choshi	Kofu
Tsukuba	Takamatsu	Toyama	Osaka	Fukui
Shizuoka	Matsuyama	Nagoya	Nara	Matsue
Hikone	Kumamoto	Miyazaki	Oita	Fukuoka
Nagano	Kagoshima	Nagasaki	Kochi	Saga
Naha				

2.2 推定方法

文献⁽⁴⁾より、以下に記す方法を用いて41官署の水平面全天日射量及び日照時間の観測値のデータから、水平面全天日射量の時積算値に関する関係式を導いた。

時刻 t_i における前1時間の積算水平面全天日射量

$H_{g_{ti}}$ [kWh/m²]は、時刻 t_i における日照時間の時別値 n_{ti} [h]の一次関数として式(1)とする。

$$H_{g_{ti}} = I_0 \cos \theta_{Z_{ti-0.5}} (a + b n_{ti}) \quad (1)$$

ここで I_0 は大気上端における法線面日射強度 [kW/m²]、また $\theta_{Z_{ti-0.5}}$ は太陽天頂距離 [rad]で、 φ をその地点の緯度 [rad]、 δ を太陽赤緯 [rad]、 $\tau_{Z_{ti-0.5}}$ を南中時からの時角 [rad]とすると、

$$\cos \theta_{Z_{ti-0.5}} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau_{Z_{ti-0.5}} \quad (2)$$

である。 I_0 [kW/m²]、 δ [rad]及び $\tau_{Z_{ti-0.5}}$ [rad]は、文献⁽¹⁰⁾により求めた。なお、上式において太陽天頂距離及び南中時からの時角の時刻 t_i から0.5を引いているのは、太陽天頂距離の余弦を前1時間の中心時刻で計算するためである。

ここで、その日の $\cos \theta_{Z_{ti-0.5}} > 0$ である時間帯が $t_i = 1, 2, \dots, H$ であるとして、日積算値についての関係式である式(3)を作る。

$$\frac{\sum_{i=1}^H H_{g_{ti}}}{I_0 \sum_{i=1}^H \cos \theta_{Z_{ti-0.5}}} = a + b \frac{\sum_{i=1}^H n_{ti} \cos \theta_{Z_{ti-0.5}}}{\sum_{i=1}^H \cos \theta_{Z_{ti-0.5}}} \quad (3)$$

上式の左辺を日平均晴天指数とよぶ。また右辺の係数 b に掛かる量は、日照時別値を $\cos \theta_{Z_{ti-0.5}}$ で1日分加重平均した量で、同じ日照時別値=1でも太陽天頂距離により1時間当たりの水平面全天日射量が違うはずであることを考慮した量である。これを加重日平均日照時間とよぶ。観測値より加重日平均日照時間と日平均晴天指数を求め、加重日平均日照時間=0でない日について、最小二乗法により式(3)の係数 a 及び b を決定する。係数 a 及び b が求まると式(1)により、日照時間の時別値 n_{ti} [h]より水平面全天日射量 $H_{g_{ti}}$ [kWh/m²]が求まる。日照時間の時別値 n_{ti} [h]が0の時の関係式は、式(1)の右辺のかっこ内を式(4)に示す定数 A で置き換える。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^H H_{g_{ti}}}{I_0 \sum_{i=1}^H \cos \theta_{Z_{ti-0.5}}} \quad (4)$$

観測値より、加重日平均日照時間=0の日の日平均晴天指数を求め、その平均値より A を決める。

2.3 妥当性の検証

係数 a 、 b 及び A の求め方についてその妥当性を検証するために、係数 a 、 b を求める際に生成される加重日平均日照時間と日平均晴天指数の関係を示したグラフを図1に示す。この図1について文献⁽⁴⁾では線形近似(黄線)を行っているが、その他に2次近似(緑線)、対数近似(茶線)の合計3種類について検証を行った。線形近似式は式(5)、2次近似式は式(6)、対数近似式は式(7)のようになった。なお $H_{O_{ti}}$ [kWh/m²]は大気外水平面全天日射量の時別値、 $H_{g_{tie}}$ [kWh/m²]は水平面全天日射量の変換値の時別値である。

$$H_{g_{tie}} = H_{O_{ti}} * (a + b * n_{ti}) \quad (5)$$

$$H_{g_{tie}} = H_{O_{ti}} * (a + b * n_{ti} + c * n_{ti}^2) \quad (6)$$

$$H_{g_{tie}} = H_{O_{ti}} * (a + b * \log_e(c + n_{ti})) \quad (7)$$

また係数 A について文献⁽⁴⁾では平均値としているが、その他に中央値、最頻値の合計3種類について検証を行った。

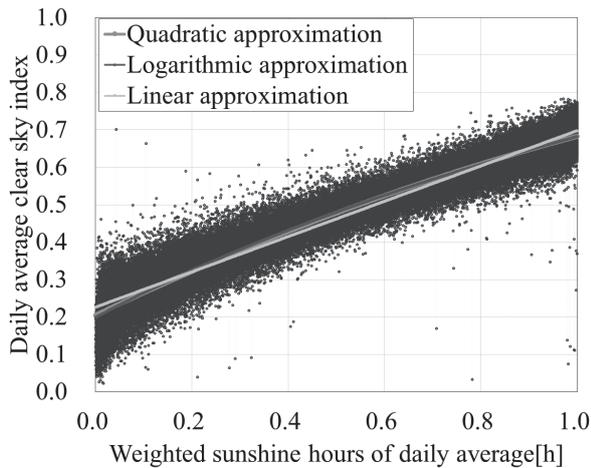


Fig. 1 Relationship and approximate formula.

図1 加重日平均日照時間と日平均晴天指数の関係

2.4 検証結果

式(5)~(7)の各係数を表2に、係数Aの平均値、中央値及び最頻値を表3にそれぞれ示す。なお係数Aの最頻値は、日平均晴天指数の0~1の範囲を0.0005幅の区間に分割し、日平均晴天指数の数が最多の区間の区間幅の中央の値とした。表3の例では数が最多の区間が0.09~0.0905であったため、その区間幅の中央の値0.09025を係数Aの最頻値とした。

Table 2 Results of approximation's coefficients.

表2 近似線の係数の結果

Approximation	Coefficient <i>a</i>	Coefficient <i>b</i>	Coefficient <i>c</i>
(5) : Linear	0.2263	0.4717	
(6) : Quadratic	0.2048	0.6135	-0.1355
(7) : Logarithmic	0.1551	0.7287	1.062

Table 3 Result of coefficient A.

表3 係数Aの結果

Average	Median	Mode
0.1309	0.1215	0.09025

表2及び表3で示された数値を用いた合計9通りについての水平面全天日射量の観測値 Hg_{ti} [kWh/m²]と変換値 Hg_{tie} [kWh/m²]の関係を評価した結果を以下に示す。表4に縦軸を変換値 Hg_{tie} [kWh/m²]、横軸を観測値 Hg_{ti} [kWh/m²]としたときの原点を通る線形近似線の傾きを、表5にRMSE(二乗平均平方根誤差)をそれぞれ示す。なお、文献⁽¹⁾において山梨県北杜市の北杜メガソーラを実証試験場所として用いたことから、本論文においては検証データとして北杜メガソーラに最も近い気象官署である甲府の2013年~2018年の6年間の水平面全天日射量

Hg [kWh/m²]、日照時間 n [h]を用いた。またRMSEの求め方は式(8)に示す。なお k は2013年~2018年の6年間の中で Hg_{tie} [kWh/m²]及び Hg_{ti} [kWh/m²]が共に0kWh/m²より大きかった時間数である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (Hg_{tie} - Hg_{ti})^2} \quad (8)$$

Table 4 Result of the combination at Kofu (slope).

表4 甲府での組み合わせの結果(線形近似線の傾き)

	(5) : Linear	(6) : Quadratic	(7) : Logarithmic
Average	0.9441	0.9315	0.9314
Median	0.9426	0.9301	0.9300
Mode	0.9379	0.9253	0.9252

Table 5 Result of the combination at Kofu (RMSE).

表5 甲府での組み合わせの結果(RMSE)

	(5) : Linear	(6) : Quadratic	(7) : Logarithmic
Average	0.06249	0.06378	0.06371
Median	0.06409	0.06534	0.06527
Mode	0.07054	0.07168	0.07162

表4については傾きが1に近いほど精度が高いことを示すが、最も精度が高い組み合わせは線形近似と平均値の組み合わせである。また表5についてはRMSEが0に近いほど精度が高いことを示すが、最も精度が高い組み合わせは線形近似と平均値の組み合わせである。

以上から最適な組み合わせは文献⁽⁴⁾の手法である線形近似と平均値の組み合わせであることが分かった。よって変換式は以下に示す通り $n_{ti} \neq 0$ のときは式(9)、 $n_{ti} = 0$ のときは式(10)となる。

$$Hg_{tie} = H_{Oti} * (0.2263 + 0.4717 * n_{ti}) \quad (9)$$

$$Hg_{tie} = H_{Oti} * (0.1309) \quad (10)$$

なお文献⁽⁴⁾に記載の係数の場合の変換式は以下に示す通り $n_{ti} \neq 0$ のときは式(11)、 $n_{ti} = 0$ のときは式(12)となる。

$$Hg_{tie} = H_{Oti} * (0.2410 + 0.4280 * n_{ti}) \quad (11)$$

$$Hg_{tie} = H_{Oti} * (0.1410) \quad (12)$$

推定結果の一例として、甲府の2013年~2018年の6年間の分について、線形近似と平均値の組み合わせで求められた変換値 Hg_{tie} [kWh/m²]と観測値 Hg_{ti} [kWh/m²]の関係を示したグラフと全てのプロットに関する原点を通る線形近似式を図2に示す。なお式(11)、式(12)に示した文献⁽⁴⁾の係数での今回のデータセットを用いた場合の線形近似線の傾きは0.9117であり、係数更新により推定精度が向上したことが確認できた。ここで観測値 Hg_{ti} [kWh/m²]に対して、変換値 Hg_{tie} [kWh/m²]のばらつきに幅がみられるが、その原因として以下の3点が考えられる。

- (1) 日照時間は0.12kWh/m²以上の時間として定義される点
- (2) 1時間値を用いる場合に日射量が連続的な値を取り得るのに対し、日照時間は0~1まで0.1刻みの離散値であ

る点

(3) 水平面全天日射量には直達日射量と散乱日射量が含まれるのに対し、日照時間は直達日射量のみを用いている点

なお図2には甲府を一例として示したが、他の地点の分布の特徴も同様であった。

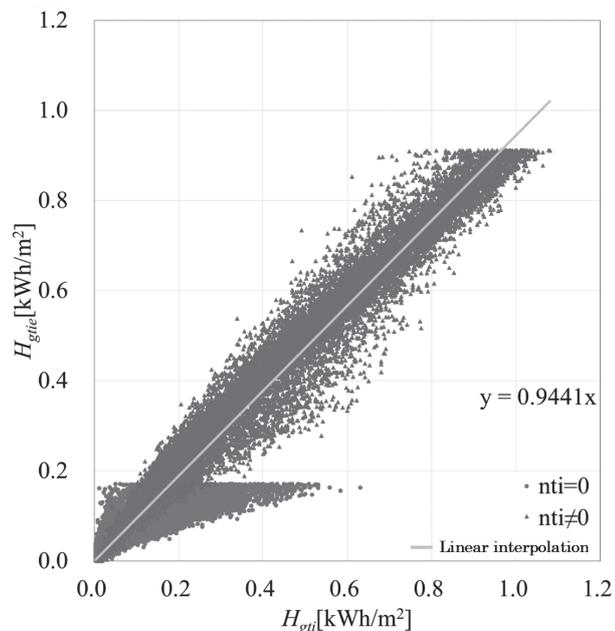


Fig. 2 Example of combination results at Kofu.

図2 甲府での組み合わせの結果の例

3. 補正係数を追加したモデルの開発

3.1 概要

本論文における提案手法は、日本全国の PV 発電所の維持管理に用いることを目的としているため、地域性の違いを考慮するための手法として本章では、式(9)及び式(10)で求めた変換値 H_{gtie} [kWh/m²] を式(13)に示すように補正係数 r で割ることで、最終的な変換値 H_{gtier} [kWh/m²] を求める手法の開発について述べる。

$$H_{gtier} = H_{gtie} \div r \quad (13)$$

r は全国一律の補正係数、文献⁽⁷⁾より日射気候区のなかで大気候区毎及び中気候区毎にそれぞれについての補正係数の合計3種類設定した。

3.2 全国一律の補正係数

全国一律での r は、表1の41官署すべてについて上記で求めた係数 a 、 b 及び c を用いて 2013年～2018年の6年間の変換値 H_{gtie} [kWh/m²] を求め、その結果を図3に示すように横軸を観測値 H_{gti} [kWh/m²]、縦軸を変換値 H_{gtie} [kWh/m²] としたグラフにプロットしたときのプロットに関する原点を通る線形近似線の傾きである。

図3より全国一律での r は $r = 0.9526$ となった。

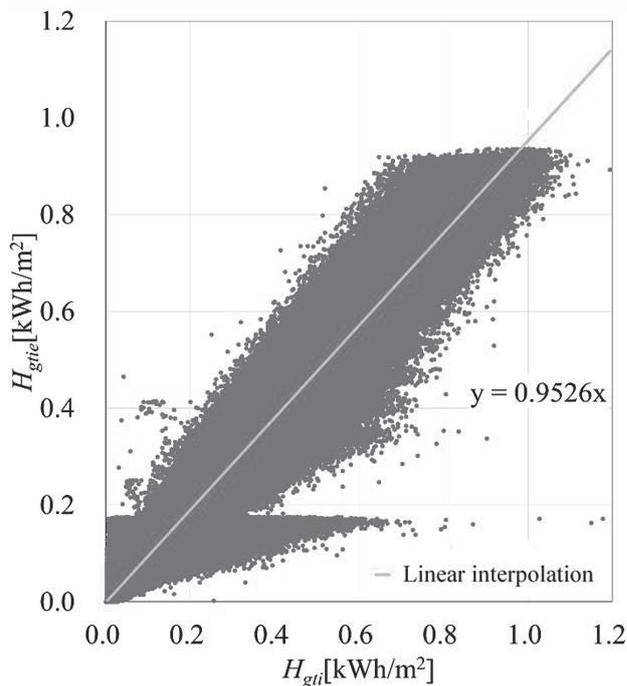


Fig. 3 Correction factor r of nationwide.

図3 全国一律の補正係数 r

3.3 日射気候区の大区分別の補正係数の算出

日射気候区の大区分別の r は全国と同様に変換値 H_{gtie} [kWh/m²] を求め、その結果を大区分毎に横軸を観測値 H_{gti} [kWh/m²]、縦軸を変換値 H_{gtie} [kWh/m²] としたグラフを作成したときの、プロットに関する原点を通る線形近似線の傾きとした。大区分における r の一覧を表6に示す。

Table 6 List of correction factors r in large province.

表6 大区分における補正係数 r の一覧

Province	Site	r
I	Abashiri, Wakkanai, Asahikawa, Fukui, Sapporo, Muroran, Hakodate, Morioka, Yamagata, Akita, Aomori, Niigata, Toyama,	0.9398
II	Matsue, Fukuoka, Hikone, Nara, Nagano	0.9541
III	Obihiro, Sendai, Fukushima Utsunomiya, Tsukuba, Tokyo, Maebashi, Kofu, Shizuoka	0.9503
IV	Choshi, Nagoya, Osaka, Takamatsu, Saga, Matsuyama, Oita, Hiroshima, Kumamoto, Nagasaki, Kagoshima, Kochi, Miyazaki	0.9671
V	Naha	0.9172

3.4 日射気候区の中区分別の補正係数の算出

日射気候区の中区分別の r は全国と同様に変換値 $H_{g_{tie}}$ [kWh/m²]を求め、その結果を中区分毎に横軸を観測値 $H_{g_{ti}}$ [kWh/m²]、縦軸を変換値 $H_{g_{tie}}$ [kWh/m²]としたグラフを作成したときの、プロットに関する原点を通る線形近似線の傾きとした。中区分における r の一覧を表7に示す。

Table 7 List of correction factors r in middle province.

表7 中区分における補正係数 r の一覧

Province	Site	r
I -1	Abashiri, Wakkanai, Asahikawa	0.9192
I -2	Sapporo, Muroran, Hakodate, Morioka, Yamagata	0.9361
I -3	Aomori, Akita, Niigata, Toyama, Fukui	0.9543
II -1	Matsue, Fukuoka	0.9735
II -2	Hikone, Nara, Nagano	0.9421
III -1	Obihiro, Sendai, Fukushima	0.9450
III -2	Utsunomiya, Tsukuba, Tokyo, Maebashi, Kofu, Shizuoka	0.9525
IV -1	Choshi	0.9417
IV -2	Nagoya	0.9442
IV -3	Osaka, Takamatsu, Matsuyama, Saga, Oita, Hiroshima, Kumamoto, Nagasaki, Kagoshima	0.9728
IV -4	Kochi, Miyazaki	0.9676
V -1	Naha	0.9172

3.5 開発した推定手法の精度評価

3.5.1 日照時間別の散布図の特徴

図2より $n_{ti} = 0$ では低日射帯で逆三角形の分布を示し、 $n_{ti} \neq 0$ では低日射帯から高日射帯にかけて線形の関係のような分布となった。 $n_{ti} = 0$ が逆三角形の分布になった理由としては、日照時間の定義は直達日射量が120W/m²以上である時間であり、 $n_{ti} = 0$ は120W/m²以上の時間が0であったことを示しているが、散乱日射を考慮していないことが考えられる。 $n_{ti} = 0$ は薄明るいときも降雪のときのような厚い雲に覆われているときも含まれているが、開発したモデルは簡易的な推定モデルであり $n_{ti} = 0$ における上記の散乱日射を考慮していないため、主として散乱日射により水平面全天日射量が増えた場合にも推定日射量が0.180kWh/m²程度で頭打ちとなっている。

PVは散乱日射のみでも発電をすることから特別に見るとこの影響が現れるが、発電所の評価に用いる場合は、高日射のときの発電電力量の方がエネルギー量が多く、より重要であるため、簡易性の維持を目的として今回はこれ以上の検討は行わなかった。

3.5.2 月積算日射量による評価

PV発電所の維持管理においては、固定価格買取制度における電力買取料金の支払いが概ね月単位で行われるな

ど、月積算の結果も重要となる。そこで図2の結果を月積算にした場合の散布図を図4に示す。図4より時積算では存在していた逆三角形の分布が月積算では解消されていることがわかる。したがって、月積算で見られていた $n_{ti} = 0$ におけるばらつきは、月積算日射量の推定精度においては大きく影響していない事が確認できた。

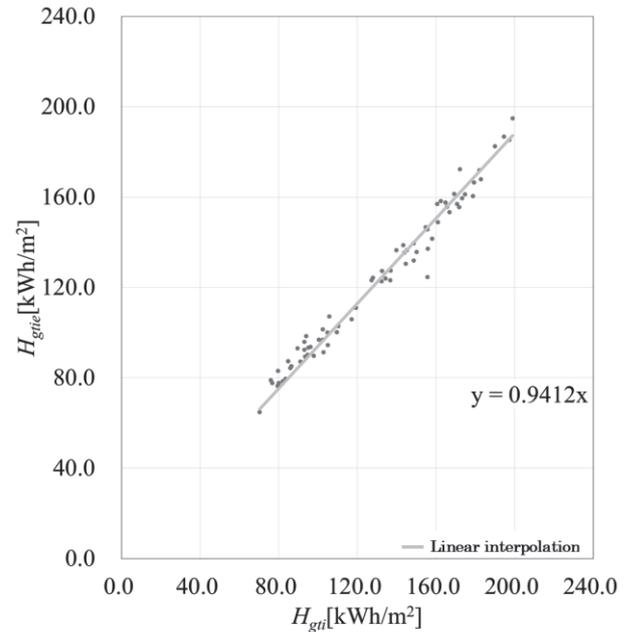


Fig. 4 Scatter plot of monthly integration at Kofu.

図4 甲府における月積算の散布図

ここで甲府以外の地点についての月積算の結果も見ていく。図5に代表的な稚内(WN)、札幌(SR)、東京(TK)、甲府(KF)、大阪(OS)、福岡(FO)、佐賀(SG)及び那覇(NH)の8地点に関する月積算の箱ひげ図を示す。

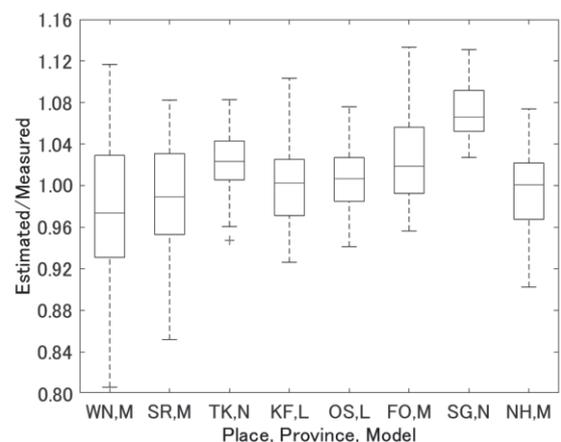


Fig. 5 Monthly boxplot at 8 places.

図5 8地点における月積算の箱ひげ図

図5では、箱の大きさが全データの25%から75%の範囲を意味する。また上のひげは全データの75%に四分位範囲の1.5倍を足した値、下のひげは全データの25%から四分位範囲の1.5倍を引いた値を意味し、四分位範囲は75%の値から25%の値を引いた値である。そして+は前述の四分位範囲の1.5倍以上外れた値を意味する。なお図5の横軸での手法の表記のうち、Mは中区分別、Lは大区分別、Nは全国一律のそれぞれの補正係数を適用した手法の結果であることを示している。図5より中央値は5地点いずれも1に近い値をとっており、精度よく推定できていることがわかる。

3.5.3 補正係数の算出手法別の散布図

図6に甲府の2013年～2018年の6年間のデータを用いて、大区分の補正係数を導入した場合の手法について、変換値 H_{gtier} [kWh/m²]と観測値 H_{gti} [kWh/m²]の関係を示したグラフを示す。なお、グラフ中の黄色い線は原点を通る線形近似線とし、グラフ中の $y = 0.9935x$ はその近似線の結果の式である。

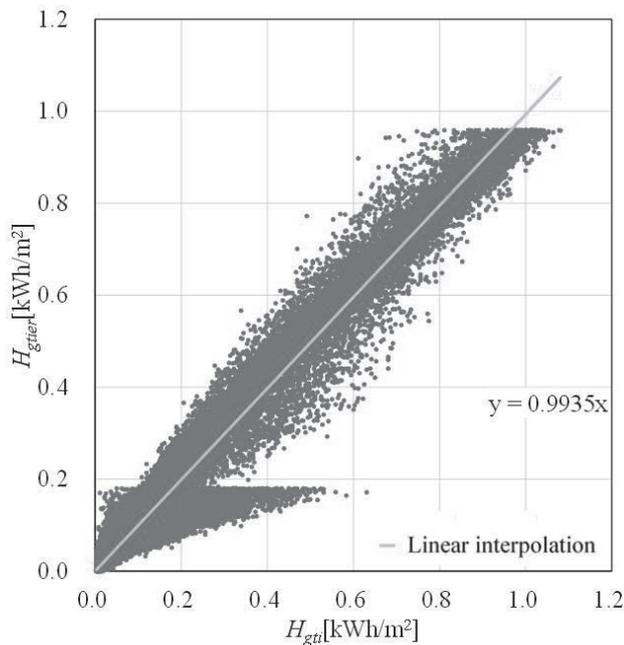


Fig. 6 Scatter plot by applying r of large province at Kofu.

図6 甲府での大区分の r を適用した手法の散布図

ここで表8に補正係数を導入しない場合、および3種類の補正係数を導入した場合の計4つの手法の図6で示した原点を通る線形近似線の傾きの値を示す。

Table 8 Result of slope of linear approximation line at Kofu.

表8 甲府における線形近似線の傾きの結果

Not applying	nationwide	large	middle
0.9441	0.9911	0.9935	0.9912

表8より甲府においては、4つの手法について傾きの結果が最も精度がよかった順に大区分別、中区分別、全国一律、 r なしとなった。なお精度が良いとは傾きがより1に近く、精度が悪いとは傾きがより1から遠いことを意味している。

3.5.4 補正係数の算出手法別の各地点での傾き

図7に今回開発した4つの手法のそれぞれについて、表1で示した41地点での傾きの結果を示す。図中の色の違いが傾きを示しており、各プロットの座標は気象台の緯度経度である。また分かりやすさの観点から海岸線の画像を重ねている。なおデータは2013年～2018年の6年間とした。

図7(a)(b)より全体の傾向として北海道などの北側、特に北海道北部は傾きの値が最小となり、南西側に寄るにつれて値が徐々に大きくなり、九州北部で値が最大になる分布となっている。ただし沖縄は北海道と同程度の小さい値となる。北東ほど過小推定で南西ほど過大推定である原因の1つとして積雪の影響が挙げられる。雪アルベドが散乱日射量を増加させることは過去の文献⁽¹¹⁾⁽¹²⁾でも指摘されており、北東ほど積雪量や積雪日数が多く地表アルベドが大きくなりがちである。提案手法では3.5.1項でも述べた通り日照時間が0において散乱日射量を考慮していないため、この時間帯において過小推定となっていることが考えられる。

図8に8地点における6年間の日照時間別の割合および総積算日射量を示す。結果より特に稚内においては総積算日射量に占める日照時間が0の割合が他の地点より多いことが分かる。一方、那覇においては同割合は東京と同程度であるが、日照時間が1の割合が他の地点より少ない。これは晴天時にも比較的雲が多く日照時間が1とならない特徴を示していると考えられ、この雲の影響により他の地点よりも散乱日射量が多いため、入力に散乱日射量を考慮せず日照時間を用いた提案手法では過小推定となることが考えられる。

補正係数の算出手法別に見ると、 r なしでは傾きの値が最小値はおおよそ0.91で最大値はおおよそ0.99と全国的に傾きの値は小さめとなっている。全国一律の補正係数を適用した場合では傾きの値が最小値はおおよそ0.96で最大値はおおよそ1.05と全国的に傾きの値は大きめとなっている。大区分別補正係数では傾きの値が最小値はおおよそ0.96で最大値はおおよそ1.04と最小値と最大値の差が小さい。中区分別補正係数では傾きの値が最小値はおおよそ0.98で最大値はおおよそ1.03と4つの手法のうち最小値と最大値の差が最も小さい。1付近の値を示している地点が非常に多い。傾きの最小値と最大値の差が全国一律、大区分別、中区分別の順で小さくなるのは、全国一律は41地点が含まれるのに対し、大区分におけるIでは13地点、中区分におけるI-1では3地点、I-2及びI-3では各5地点となるように、中区分を用いることで日射に関する地域ごとの特性をより反映した補正係数になる場合が多い

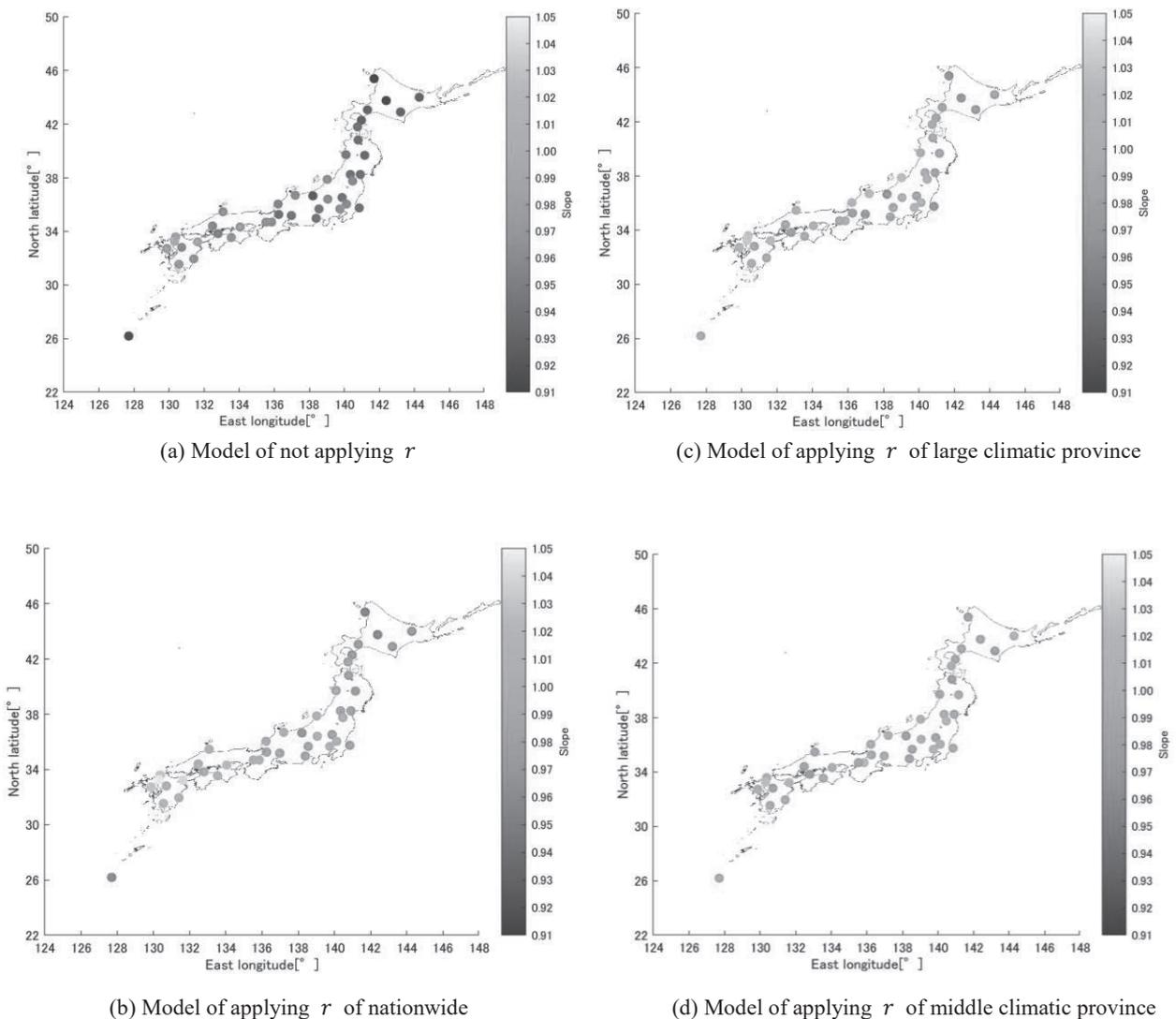


Fig. 7 Slope at each point by four models.

図7 4つ手法での41地点すべての傾き

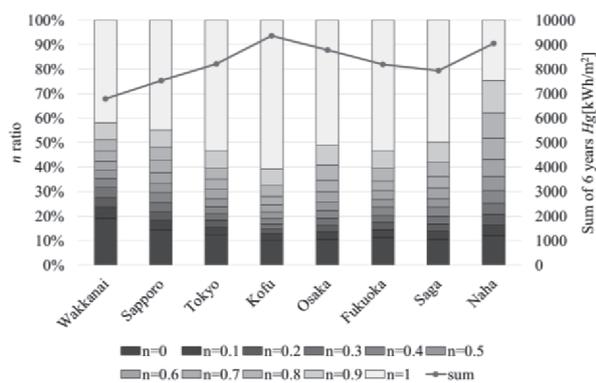


Fig. 8 Percentage by sunshine hours and cumulative irradiation for 6 years at 8 places.

図8 8地点における6年間の日照時間別の割合および総積算日射量

3.5.5 年別の各地点での最適な補正係数

図9に2013年～2018年の年別でのそれぞれの手法が最良となった数の推移を示す。なお良悪の判定は3章5節3項で述べたとおりである。

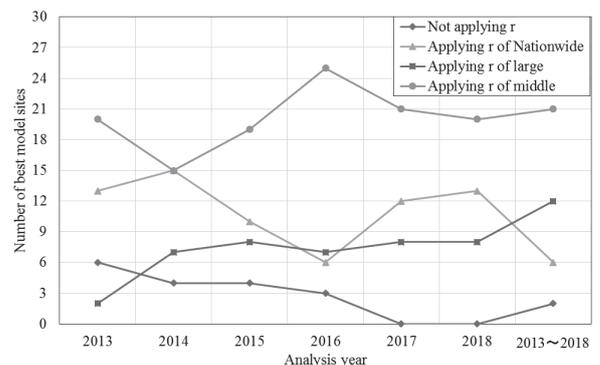


Fig. 9 Changes in the number of best models by year.

図9 年ごとの最良手法の数の推移

からと考えられる。

ある特定の地域において特定の手法が最適であることが多いといったような、地域ごとの特徴は明確には見られなかった。ただし、那覇は大区分(V)及び中区分(V-1)においていずれも那覇の1地点しか含まれないため両補正係数は同じ値となり、6年間ずっと気候区別補正係数が最適であるという結果が出た。

また図9より中区分別補正係数が最も精度がよいとされた地点は41地点の中で最も多いことがわかる。またrを適用しない手法が最も精度がよいとされた地点は少なく、2017年2018年は2年連続で0地点となっている。

3.5.6 気象官署別の最適手法の選択

ここまでの分析の結果から、提案手法においては4つの手法のうちどれか一つを最適と判断することはせず、気象官署毎に最適な手法を選択することとした。最後に表9に41地点各地点における最良の手法および補正係数のまとめを示す。なお最適係数が1の地点は、補正係数を導入しなかった手法が最良であることを意味する。以上により全12中気候区分に対して最適な補正係数が得られた。また表1で示した41地点以外の任意の地点には、当該地点が含まれる中気候区内の、当該地点に最も近い気象官

署における最適手法を適用することとする。

4. まとめ

これまで用いられてきた時積算別日照日射変換モデル⁽⁴⁾を最新のデータを用いて更新した手法や、更新したうえで全国一律の補正係数を追加した手法、日射気候区⁽³⁾のうち大気候区毎や中気候区毎に補正係数を追加した手法の4つの日照日射変換手法の提案を行った。さらに時積算別日照日射変換モデル⁽⁴⁾の変換式の設定方法の妥当性についても検証を行った。

図9より中区分別補正係数の導入が全国的な精度としては最もよい手法となったが、地点毎のばらつきも見られたため、気象官署毎に最適な手法を選択することとした。今後の課題としては、長期的な日射量の変動を加味するためにデータセットをさらに拡張して10年分等に増やすことや、今回用いた日射気候区は1986年に開発されたものなので最近のデータを用いて更新し、その更新した日射気候区をもとに日照日射変換モデルを開発することなどがあげられる。

Table 9 Summary of the best model at each point.

表9 各地点における最良手法のまとめ

Large	Middle	Site	Best model	Best factor	Large	middle	Site	Best model	Best factor	
I	1	Abashiri	Large	0.9398	II	1	Matsue	Middle	0.9735	
		Wakkanai	Middle	0.9192			Fukuoka	Middle	0.9735	
		Asahikawa	Middle	0.9192			Hikone	Middle	0.9421	
	2	Sapporo	Middle	0.9361		2	Nara	Large	0.9541	
		Muroran	Middle	0.9361			Nagano	Middle	0.9421	
		Hakodate	Large	0.9398		1	Choshi	Middle	0.9417	
		Morioka	Middle	0.9361	2		Nagoya	Middle	0.9442	
	Yamagata	Large	0.9398	IV	3	Osaka	Large	0.9671		
	Aomori	Large	0.9398			Takamatsu	Middle	0.9728		
	3	Akita	Nationwide			0.9526	Matsuyama	Nationwide	0.9526	
		Niigata	Middle			0.9543	Hiroshima	Large	0.9671	
		Toyama	Middle			0.9543	Oita	Not apply	1.0000	
		Fukui	Middle			0.9543	Saga	Not apply	1.0000	
	III	1	Obihiro	Middle	0.9450	IV	3	Kumamoto	Large	0.9671
			Sendai	Middle	0.9450			Nagasaki	Middle	0.9728
Fukushima			Nationwide	0.9526	Kagoshima			Middle	0.9728	
2		Utsunomiya	Large	0.9503	4			Kochi	Middle	0.9676
		Tsukuba	Nationwide	0.9526				Miyazaki	Large	0.9671
		Tokyo	Nationwide	0.9526	V			1	Naha	Middle
		Maebashi	Nationwide	0.9526						
		Kofu	Large	0.9503						
		Shizuoka	Large	0.9503						

参考文献

- 1) Y. Ueda, Development of the New Simulation Tools for Estimating System Output Power of a Large-scale PV Plant, Proceedings of the Thirtieth Annual Conference of Power & Energy Society. IEE of Japan (2018) (Sep. 2018), **126**, Tokushima, Tokushima.
- 2) Angström, A., Solar and terrestrial radiation, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **50**, 121-126 (1924).
- 3) 吉田作松, 篠木誓一, 日本における月平均全日射量及びその年々の変動度のマップの作成, 天気, **25** (5), 375-389 (1978).
- 4) 馬淵和雄, 佐藤信夫, 回転式日照計観測値からの1時間積算全日射量の推定, 天気, **38** (1), 57-63 (1991).
- 5) 中村圭三, 三谷雅肆, 全日射量から評価した見かけの大気透過率について—日本における最近50余年のその推移からの考察—, 天気, **61** (5), 373-378 (2014).
- 6) S. Chirifu, Study of Solar Radiation Change (Part 2) Investigation of Elements Concerned, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2009) (Nov. 2009), 255-258, Nagasaki, Nagasaki.
- 7) 日本気象協会, 発電量基礎調査 (サンシャイン計画) 太陽光発電システム実用化技術開発, 昭和60年度新エネルギー総合開発機構委託業務成果報告書, 149-240 (1986).
- 8) Watanabe et al, Estimation of Daily Solar Radiation from Sunshine Duration in Thailand, Journal of the Meteorological Society of Japan, **89A**, 355-364 (2011).
- 9) 気象庁, 過去の気象データ・ダウンロード (accessed May 3rd 2019), <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 10) J.W. Spencer, Fourier series representation of the position of the Sun, Search, **2** (5), 162-172 (1971).
- 11) A. ITAGAKI, H. OKAMURA, H. IIDA, M. YAMADA, R. SASAKI, Estimation Model of Hourly Global Solar

Radiation from Hourly Sunshine Duration, Journal of Japan Solar Energy Society, **32** (5), 61-67 (2006).

- 12) N. Robinson, Solar Radiation, 113-131 (1966), Elsevier Publishing Company, New York.

古谷 拓 巳 (学生員) 2019年3月東京理科大学工学部電気工学科卒業。現在、東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程に在学中。同課程においては、主に太陽光発電システムの評価に関する研究に従事。



植田 譲 (正員) 1995年3月信州大学理学部物理学卒業。同年、アプライド マテリアルズ ジャパン (株) 入社。2003年まで半導体製造プロセスの開発に従事。2004年4月東京農工大学大学院工学府に入学。2007年卒業。同年4月、東京農工大学工学府特任助教。2008年4月、産業技術総合研究所特別研究員、2008年10月、東京工業大学理工学研究科特任助教、2010年8月、東京工業大学大学院理工学研究科 助教。2014年より東京理科大学。現在、教授。主に太陽光発電システムの評価と系統連系に関する研究に従事。博士(工学)。応用物理学会、日本太陽エネルギー学会、IEEEなどの会員。

