

Development of an estimation model for spectral irradiance from meteorological data

地上観測データを用いた日射スペクトル
推定モデルの開発Akihiko Itagaki
板垣 昭彦^{*1 ‡}Jun Sasaki
佐々木 潤^{*2}Kenji Utsunomiya
宇都宮 健志^{*2}

Abstract

Solar spectrum varies with seasons, time and weather depending on solar altitude and atmospheric condition. Because the solar cell efficiency is influenced by its spectral sensitivity, creation of a reliable solar spectrum database is important to accurately estimate the output from photovoltaic systems. To this end, we observed spectral irradiance on horizontal and inclined surfaces at five stations located in each climatic region in Japan on the basis of the solar radiation. The observed data were compiled into a database. This database was released on the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) website in March, 2016. Using observed data, we developed a statistical model by which we can estimate solar spectrum from global irradiance and other meteorological elements.

Keywords: solar spectrum, PV systems

キーワード: 日射スペクトル, PVシステム

1. はじめに

日射スペクトルは、季節、時刻、天候によって太陽の位置や大気状態が異なるために変化する。また、太陽電池の変換効率は個々の太陽電池の分光感度特性に依存する。したがって、太陽電池からの出力推定を、より正確に行うためには日射スペクトルに関するデータベースの整備が必要である。著者らはNEDOの委託研究の一環として、日射状況の異なる5地点で日射スペクトル等の観測を実施している。観測地点の位置図をFig. 1に、「長沼地点」における観測システムの写真をFig. 2に例示する。



Fig. 1 Solar spectral observation stations.



Fig. 2 Photograph of Naganuma station

観測要素をTable 1に示す。計測間隔は、日射スペクトルについては5分毎、その他の気象要素は1分毎である。

Table 1 List of observed meteorological elements.

Global solar irradiance on horizontal surface
Global solar irradiance on inclined surface
Direct normal solar irradiance
Solar spectral irradiance on horizontal surface
Solar spectral irradiance on inclined surface
Air temperature, Relative humidity
Wind direction, Wind velocity

観測データの一部についてはTable 2に示す日射スペクトルデータベース (VER-2) として整備した⁽¹⁾。このデー

*1 一般財団法人日本気象協会北海道支社 事業サービス課
(〒064-8555 札幌市中央区北4条西23丁目1番18号
e-mail itagaki@jwa.or.jp

*2 一般財団法人日本気象協会環境・エネルギー事業部
(原稿受付：2016年7月11日，受理日：2017年2月21日)

データベースは、2016年3月30日にNEDOのホームページで公開されている⁽²⁾。実測データを収録したこのようなデータベースは貴重であると考え、高価な分光放射計を全国展開するのは現実的ではない。全天日射量の観測値から日射スペクトルを推定することができれば、太陽電池からの出力予測等に有用であろう。

日射スペクトルを推定するモデルとしてはBird によるSPECTRAL2や⁽³⁾、Gueymard によるSMARTS2⁽⁴⁾が広く利用されている。しかしながら、いずれも晴天時を対象としており、推定モデルの入力パラメータには、一般には入手が困難な大気混濁度やオゾン量が含まれている。

このような課題を解決する研究として、入力パラメータを簡易化した全天候対象のモデルがいくつか提案されている。

曾我は、鹿児島大学キャンパス内における波長別日射強度の観測を実施し、晴天指数等に関して階級別に求めた波長別係数を用いて日射スペクトルを推定している⁽⁵⁾。

馬場らは、2010年10月にNEDOから公開された全国4地点の傾斜面における日射スペクトルデータベース（VER-1）を用いて、晴天時の標準日射スペクトルを、日照率等に関して階級ごとに用意した波長別係数で補正することで推定を行っている⁽⁶⁾。

また、桶らは、SPCTRAL2と日射スペクトルデータベース（VER-1）を組み合わせることでモデルを作成し、全天日射強度の観測値による補正を行うことで様々な気象条件の違いを表現している⁽⁷⁾。

本研究では、日射スペクトルデータベースの全国整備に向けて、可能な限り高精度な推定モデルの開発を目指す。上述のように、既存のモデルは、気象条件の違いによるスペクトルの変動を全天日射強度の増減や階級ごとの波長別補正で表現しており、細かい変動を反映させるものではなかった。

本研究では、スペクトル変換係数という波長別の補正係数を導入して、その変動を地上観測データから回帰推定することで、観測データの情報を最大限に生かした形で推定を行う。また、スペクトルの観測データから天候の区分を行い、天候別にモデルを作成することで一層の精度向上を目指す。さらに、将来的には衛星データの取り込みも視野に入れたモデルを構築した。

Table 2 Outline of the database of solar spectrum.

Station	Naganuma, Tosu, Tsukuba, Gifu, Okinoerabu
Data	Meteorological data Solar spectrum data on inclined and horizontal planes from 350nm to 1700nm
Data period	From the start date of measurement of solar spectral irradiance on horizontal surface (see below) to Dec.31, 2012. Naganuma, Apr. 16, 2011 Tosu, Jun. 16, 2011 Tsukuba, May 28, 2011 Gifu, Jun. 25, 2011 Okinoerabu, Mar. 6, 2011
Software	Display meteorological and solar spectrum data on inclined and horizontal planes Download displayed dataset
Distribution	On the web

2. 解析用データの整備

2.1 解析年

Table 2 で示した日射スペクトルデータベースには、水平面における 2011 年～2012 年の 10 分間隔の観測データが収録されている。2012 年については、各地点とも 1 年分のデータが収録されているが、2011 年については水平面における日射スペクトルの観測が開始された時期によって収録期間が異なっている（Table 2 参照）。

日射スペクトルは、エアマス（太陽高度）、大気中のエアロゾルや水蒸気量によって変化することが知られている⁽⁸⁾。これらは、季節変化することから、本研究では月別に推定モデルを作成することとした。そこで、1年分のデータが揃っている2012年のデータを解析に用いた。

なお、本研究では5分間隔の観測データを使用した。

2.2 特異データの除去

Table 2 で示した日射スペクトルデータベースでは、停電や、観測器の異常等、明らかに異常と思われる時刻については日射スペクトルデータを欠測としている。しかしながら、この他に、分光放射計の測器特性から太陽高度が低い時や日射強度が低い時には日射スペクトルが正確に計測できない事例が見られた。そこで、太陽高度が 15° 未満及びスペクトル積分値が 100W/m² 未満となる時刻については、解析対象から除外した。スペクトル積分値とは、日射スペクトルを測定波長範囲で積分した値で (1) 式で算出した。

$$S(t) = \int_{350}^{1700} I_{\lambda}(t) d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $S(t)$ は時刻 t におけるスペクトル積分値、 $I_{\lambda}(t)$ は分光放射計で測定された時刻 t 、波長 λ における日射強度である。

さらに、地点別、月別に規格化スペクトル (Normalized Spectrum) に対してクラスター分析を適用することで、スペクトルを形状ごとに分類し、「形状異常」と判定された時刻については解析から除外した。

クラスター分析では、異なる時刻 t_1 と t_2 の規格化スペクトル $\hat{I}_{\lambda}(t_1)$ 及び $\hat{I}_{\lambda}(t_2)$ の非類似度を (2) 式で算出し、群平均法による階層的手法を採用した。

$$\sqrt{\sum_{\lambda=350}^{1700} [\hat{I}_{\lambda}(t_1) - \hat{I}_{\lambda}(t_2)]^2} \quad (2)$$

ここで、時刻 t 、波長 λ における規格化スペクトル $\hat{I}_{\lambda}(t)$ は、スペクトルの形状を評価する変量であり、(3) 式で定義される。

$$\hat{I}_{\lambda}(t) = I_{\lambda}(t)/S(t) \quad (3)$$

クラスター分析で「形状異常」と判断された事例を Fig. 3 に例示する。

図にある「C9」等はクラスターの識別番号、N は「C9」に区分されたサンプル数である。また、縦軸は前述した「Normalized Spectrum (規格化スペクトル)」である。Fig. 3 の上図の例では、本来、大きな値を持つ 500nm 付近に極端な凹みが見られた。Fig. 3 の下図の例では、2 台の分光放射計の測定範囲の境界付近である 900nm 付近に極端なギャップが見られた。

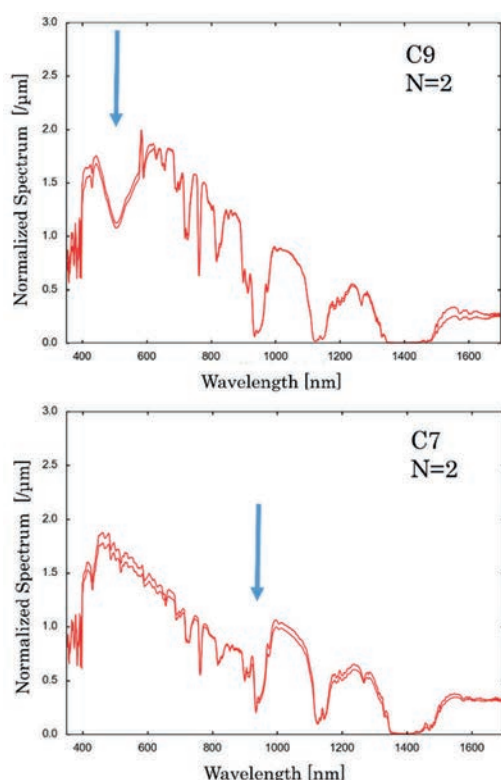


Fig. 3 Examples of abnormal Normalized Spectrum.

2.3 スペクトル変換係数の導入

本研究では、様々な日射条件下での日射スペクトルに関して、(4)式に示すスペクトル変換係数(Conversion Factor)を導入して解析を行った(以下、「変換係数」と略記する)。

$$P_{\lambda}(t) = I_{\lambda}(t)/I(t) \quad (4)$$

ここで、 $I_{\lambda}(t)$ は分光放射計で測定された時刻 t 、波長 λ における日射強度、 $I(t)$ は全天日射計で測定された時刻 t における全天日射強度、 $P_{\lambda}(t)$ は時刻 t 、波長 λ における「変換係数」である。「変換係数」は、波長毎の日射強度を当該時刻の全天日射強度で正規化したもので、日射強度の異なる日射スペクトルの類似度を比較することが可能になる。また、前述の規格化スペクトルとは異なり、スペクトルのスケールを全天日射強度で評価するため、スペクトルを観測していない地点でも利用できるメリットがある。

Fig. 4は2011年6月の代表的な晴天日の12時における各地点の日射スペクトルを比較したものである。図中の凡例に記載した数値は、各地点における水平面日射強度及び絶対湿度の値である。Fig. 4によれば、日射強度の違いや大気中の水蒸気量の多寡等により地点間で日射スペクトルに違いが見られる。

Fig. 5はFig. 4と同じデータを「変換係数」で表したものである。地点毎に異なる日射スペクトルも、「変換係数」を用いることによって類似した形状で表現される。これは全天日射強度により、日射スペクトルの変動をある程度説明できることを意味している。Fig. 5に見られる「変換係数」の違いは、全天日射強度では説明できない変動であり、その他の地上観測データから推定を行うことにする。

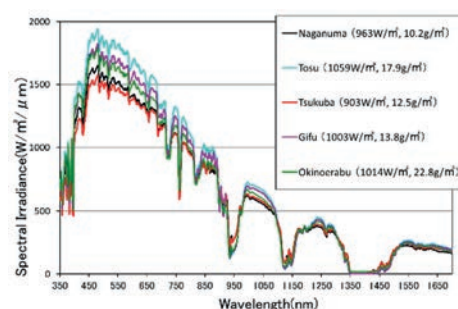


Fig. 4 Spectral irradiance under fine weather at 5 stations in June, 2011.

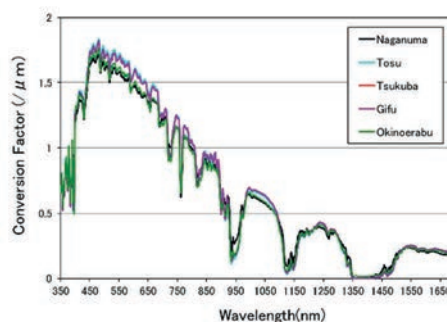


Fig. 5 Conversion Factor on fine weather at 5 stations in June, 2011.

2.4 日射急変時の除外

上記したように、本研究では、様々な日射条件下での日射スペクトルを「変換係数」を用いて推定するモデルを開発することとしたが、同様な日射条件下でも「変換係数」が大きく異なる事例が見られた。

Fig. 6は、2012年7月を対象に、散乱比が0.2未満、エアマスが1.5以下の場合について、長沼と沖永良部の「変換係数」を図示したものである。

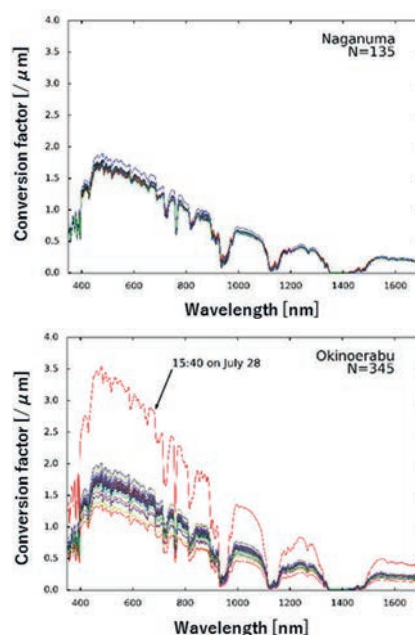


Fig. 6 Conversion Factor on fine weather at Naganuma and Okinierabu in July, 2012.

色別に分類したそれぞれの線は、該当する時刻の波長別の「変換係数」を表す。同じ月で散乱比とエアマスの抽

出条件が等しいにも関わらず、沖永良部の場合は「変換係数」の形状が大きく異なる場合があった。

Fig. 6で「変換係数」の形状が大きく異なっていた沖永良部の7月28日15:40前後の日射変動をFig. 7に示す。当該時刻付近で、日射が大きく変動していることが分かる。

日射強度が大きく変動する場合に「変換係数」のパラツキが大きくなるのは、全天日射計と分光放射計の応答速度の違いによるものと考えられる。そこで、(5)式で定義した2つの計測値の整合性を測る指標 R_{sz} を導入して、 R_{sz} が平均から大きく外れる時刻に関しては解析から除外することにした。

$$R_{sz}(t) = S(t)/I(t) \quad (5)$$

ここで、 $I(t)$ は全天日射計で測定された時刻 t における全天日射強度、 $S(t)$ は時刻 t におけるスペクトル積分値である。

Fig. 8に、2012年8月沖永良部における全天日射強度と R_{sz} の散布図を示した。全天日射強度（天候や時刻）によらず $R_{sz} = 0.9$ 付近にデータが集中する構造となっている。この領域から外れるデータ（図中の赤点）に関しては、2つの計測値に不整合性があると判断して、解析から除外した。除外の判定には、参考文献(9)に記載されているDB-Outlier Detectionを用いた。これは、全天日射強度と R_{sz} のデータ空間内で、各データの周りに一定半径の円を描き、円に含まれるデータが少ない場合は孤立点とみなして除外する方法である。

なお、先に挙げた沖永良部の7月28日15:40では $R_{sz} = 1.77$ であり、平均値から大きく外れている。

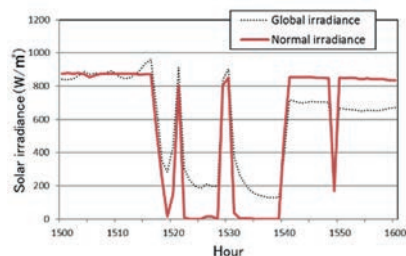


Fig. 7 Solar irradiance at Okinierabu around 15:40 JST on July 28, 2012.

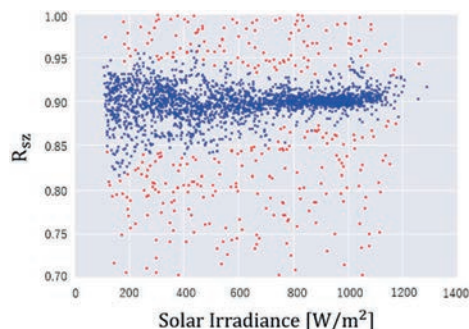


Fig. 8 Scatter plot of solar irradiance versus R_{sz} at Okinierabu on August, 2012.

この解析過程で、特定の天候が選択的に除外されていないかを確認しておく必要がある。特異データを除外後(2.2参照)、日射急変時を除外したデータセットと除外しないデータセットについて、晴天指数のヒストグラムを重ねて表示したものがFig. 9である。晴天指数は[全天日射強度/大気外水平面日射強度]で定義され、全体的な雲量による日射の強弱を反映する指数である。Fig. 9では、

日射急変時の除外前後で概ね分布の形は保存されており、天候に偏りは生じていないことが分かる。

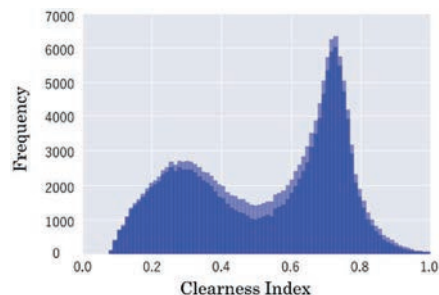


Fig. 9 Distribution of the clearness index for dataset including (lightblue) / not including (blue) rapidly varying phase of solar irradiance in 2012.

上記の手法により、特異データや日射急変時を除外した解析用のデータを整備した。地点別のデータ数（時刻数）はTable 3に示した通りである。40%程度のデータが除外されているが、先に見たとおり、この解析データから構成される推定モデルの適用範囲は、太陽高度が 15° 以上、スペクトル積分値（～全天日射強度）が 100W/m^2 以上の全天候である。

Table 3 Number of data.

Station	Analyzed data	Excluded data	Initial data
Naganuma	28,792	17,893	46,685
Tosu	29,319	19,587	48,906
Tsukuba	28,579	17,569	46,148
Gifu	29,507	18,271	47,778
Okinoerabu	26,273	20,093	46,366
Total	142,470	93,413	235,883

3 天候分離の方法

3.1 天候分離の必要性

著者らは、「変換係数」の形状が天候によって変化することを報告している⁽¹⁰⁾。例えば、Fig. 10は、沖永良部地点について日射状況から判定した晴天時と曇天時（無降雨日）の「変換係数」を比較したものである。降水の有無については近傍のアメダス地点のデータを参照した。

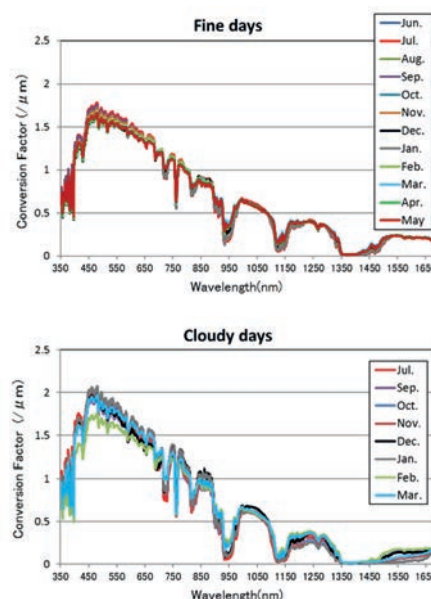


Fig. 10 Conversion Factor under fine and cloudy weather conditions at Okinoerabu.

「変換係数」の最大値 (peak 値) に注目すると、晴天時の peak 値は曇天時よりも小さく、水蒸気の吸収帯では、曇天時の方が落ち込みが激しい傾向が表れている。他の地点についても同様の結果であった。

そこで、「変換係数」を用いて日射スペクトルを推定する場合には、晴天時と曇天時に分けて推定モデルを作成することとした。さらに、積雪のある場合と無い場合では、地表面からの反射光の影響が異なると考えられることから、長沼地点のデータを解析して、積雪の有無による推定モデルも作成することとした。

3.2 天候分離に用いる代表波長の選択

天候による「変換係数」の違いを検討するには、様々な気象条件と「変換係数」の関係を調べる必要がある。しかしながら、「変換係数」は波長毎に異なる値をとることから、1nm 毎の全ての波長 (350nm~1700nm) について、気象条件との比較をするのは困難である。

そこで、天候を判別するために必要最低限の波長 (以後、代表波長と呼ぶ) を選び出し、代表波長における「変換係数」を用いて解析を行うこととした。Fig. 10 で示したように、晴天時と曇天時では、「変換係数」の最大値 (peak 値) に相違が見られることから、天候の判別には水蒸気やガスの吸収帯は不要と考え、吸収帯に属さない以下の 25 波長を代表波長として選択した。

- ・天候分離の解析に用いた代表波長
354, 366, 378, 391, 404, 413, 452, 460, 480, 495, 510,
534, 553, 582, 605, 620, 638, 665, 746, 775, 861, 1012,
1050, 1240, 1560 [nm]

3.3 主成分分析による解析

代表波長を用いることにより、ある時刻 (t) の「変換係数」は (6) 式のように、25 個の波長別の変数で表すことができる。

$$P(t) = [P_{\lambda 354}(t), P_{\lambda 366}(t), P_{\lambda 378}(t), \dots, P_{\lambda 1560}(t)] \quad (6)$$

換言すれば、ある時刻の「変換係数」は 25 次元の変数で表されることになる。解析に用いる時刻数は Table 3 に示したように 5 地点で合計 142, 470 個あるので、25 次元空間内に 142, 470 個の点が散在していることになる。

一方、上記した 25 波長の「変換係数」は独立に変化するわけではなく、互いに相関を持っており、25 次元で表される散布図の中には分散の少ない成分、すなわち、解析上、重要度が低い成分が含まれている可能性がある。

このような分散の少ない成分を削減し、より少ない変数に情報を集約すれば、効率的に解析を行うことができる。そこで、分散の小さい成分を見つける手法として主成分分析 (PCA) を用いた。

Fig. 11 は、2012 年 8 月を例に、25 波長の「変換係数」に対して、主成分分析で得られた各主成分の分散を示している。図中の点線は 1 自由度あたりの分散を表す。

今回は 25 次元のデータを扱っているので、1 自由度あたりの分散は、全体の分散を 25 で割った値 (=0.012) となる。各主成分方向の分散が 1 自由度あたりの分散より十分小さければ、全体の分散への寄与は小さくて無視できる。

Fig. 11 によれば、主成分 4 以降の分散が 1 自由度あたりの分散より小さい。すなわち、主成分 1~3 だけを考えれば全体の分散を説明するのに十分であると言える。

他の月についても、主成分 1~3 まで考えれば全体の分散を説明するのに十分であることが分かった。すなわち、選択された 3 つの主成分を用いれば、日射スペクトルの変化が概観できると言える。

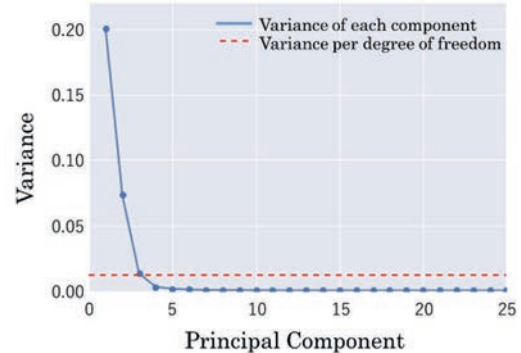


Fig. 11 Variance of each principal component from PCA of Conversion Factor in August, 2012

3.4 主成分を用いた天候分離の指標

上記で選択された 3 つの主成分を用いて晴天時と曇天時を分離する方法を検討した。晴天時と曇天時を分離する指標として、光学的厚さ、散乱比、晴天指数の 3 つのパラメータについて検討を行い、(7) 式で表される光学的厚さ (τ^{eff}) で分離するのが良いことが分かった。

$$I^{\text{dir}}(t) = I^0(t) \exp\{-m(t) \cdot \tau^{\text{eff}}(t)\} \quad (7)$$

ここで、 I^{dir} は地上で観測された直達日射強度 (W/m^2)、 I^0 は大気外日射強度 (W/m^2)、 m はエアマスである。

Fig. 12 は、3 つの主成分座標に投影した「変換係数」の散布図である。各点の色は、 τ^{eff} の大きさを表している。 τ^{eff} の大小により、分散方向の異なる晴天時のモード (主に青点で示される) とそれ以外のモード (黄緑~茶で示される) を分離できていることが分かる。後者のモードをここでは、曇天として扱う。曇天モードには、さらに 2 つの分散方向が見て取れるが、地上観測データからこれらを区分することは難しい (5. 考察を参照)。

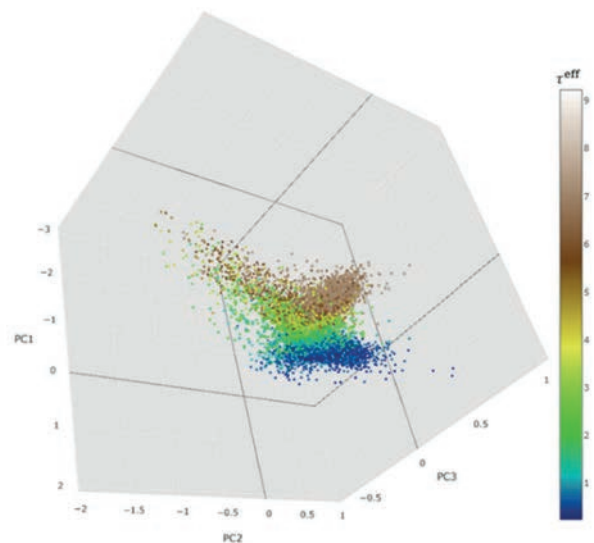


Fig. 12 3D scatter plot of the first three principal components from PCA of Conversion Factor in August, 2012. Each plot is given a color corresponding to estimated optical depth.

前述したように、日射スペクトルは季節変化することが知られているが、(7)式にはエアマス以外の季節変化を示す要素が含まれていない。そこで、天候分離を判別する光学的厚さの閾値を月別に求めた。無積雪の場合の月別の閾値を Table 4 に示す。閾値以下の場合は晴天、閾値より大きい場合は曇天として区分した。

Table 4 Monthly optical depth (No snow coverage).

Month	Optical depth
Jan.	0.95
Feb.	1.0
Mar.	1.1
Apr.	1.2
May	1.2
Jun.	1.2
Jul.	1.2
Aug.	1.2
Sep.	1.2
Oct.	1.1
Nov.	1.0
Dec.	0.9

Fig. 13 に、2012 年 8 月に関して、晴天指数と 400nm における「変換係数」の散布図を示す。青点は晴天時データ ($\tau^{\text{eff}} \leq 1.2$)、赤点は曇天時データ ($\tau^{\text{eff}} > 1.2$) を表す。晴天指数に対して晴天時データと曇天時データが不連続的に分布しており、回帰推定において天候別に扱う方が精度向上が見込めることが示唆される。次節では、天候別に開発したモデルについて述べる。

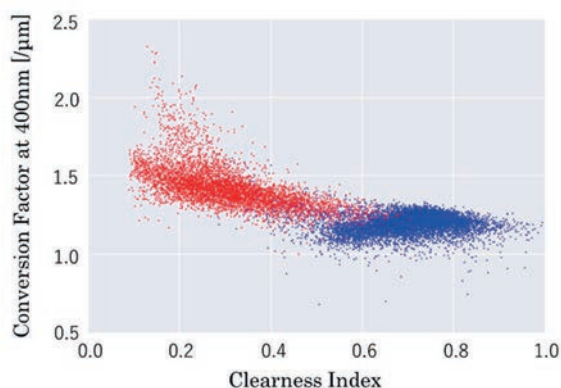


Fig. 13 Scatter plot of clearness index versus conversion factor at 400nm on August, 2012.

最終的に解析に用いた積雪の有無別、天候別のデータ数（時刻数）は Table 5 に示した通りである。Table 3 でも述べたように、観測された日射スペクトルデータのうち、推定モデルに用いたのは約 60%だが、ある天候を選択的に除外してはいない。従って、本研究で開発したモデルでは、太陽高度 $> 15^\circ$ 、全天日射強度 $> 100 \text{ W/m}^2$ であれば、いかなる天候に関しても適用可能である。

これ以降は積雪の無い場合の推定モデルを例に述べる。

Table 5 Number of data.

	Fine	Cloudy	Total
No snow coverage	73,521	59,740	133,261
Snow coverage	4,451	4,758	9,209
All	77,972	64,498	142,470

4 推定モデルの開発

Table 4 に掲載した光学的厚さを閾値として、閾値以下の時刻を「晴天時」、閾値を越える時刻を「曇天時」として、「変換係数」を推定する(8)式、(9)式の重回帰式を月別に作成した。

重回帰式の作成に当たっては、Table 2 に示した日射スペクトルデータベースに収録されている気象要素等より算出可能な 6 つの気象要素 (Table 6 参照) から、相関性の低いものを除外して最終的な説明変数とした⁽¹¹⁾。

「晴天時」のモデル・・・(8)式

$$P_\lambda(t) = a_\lambda m(t) + b_\lambda Pw(t) + c_\lambda K(t) + d_\lambda H(t) + e_\lambda K_T(t) + f_\lambda$$

「曇天時」のモデル・・・(9)式

$$P_\lambda(t) = a_\lambda m(t) + b_\lambda Pw(t) + c_\lambda K_T(t) + d_\lambda H(t) + f_\lambda$$

(8)式及び(9)式で、左辺（目的変数）はある時刻 (t) における波長別の「変換係数」、右辺は当該時刻における説明変数とその係数及び定数項である。波長間隔は 1nm である。

(8)式及び(9)式で算出した「変換係数」と全天日射強度から、波長別の日射強度の推定値は(10)式で求められる。

$$I_\lambda(t) = I(t)P_\lambda(t) \quad (10)$$

I_λ : 波長別日射強度 ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$)

P_λ : 波長別変換係数 ($1/\mu\text{m}$)

m : エアマス

Pw : 可降水量 (cm)

K : 散乱比

H : 相対湿度 (%)

K_T : 晴天指数

f_λ : 定数項

I : 全天日射強度 (W/m^2)

Table 6 Analyzed variables for developing the estimation model.

Variable	Notes
$K = I_d/I$	I_d : Diffuse irradiance, I : Global irradiance
$K_T = I/I_0$	I : Global irradiance, I_0 : Extraterrestrial irradiance
m	Calculated from solar altitude
Pw	Calculated from air temperature and relative humidity using the model of Kondo et al ⁽¹²⁾ .
H	Relative humidity observed at each station
Wind speed	Wind speed observed at each station

夏季 (6 月) と冬季 (12 月) について、晴天時のエアマスに対する波長毎の回帰係数 (Regression Coefficient) を図示すると Fig. 14, Fig. 15 のようになる。なお、12 月については積雪が無い場合を示している。

図中で縦軸の値が正の場合は、エアマスの増加に伴って「変換係数」が増加し、縦軸の値が負の場合は、エアマスの増加に伴って「変換係数」が減少する傾向があることを表している。

Fig. 14 と Fig. 15 を見ると、夏季と冬季でエアマスの変化に対する波長毎の傾向に大きな変化はない。季節によって大きく変動しているのは、水蒸気の吸収帯 (例えば

950nm 付近) であり, 大気中に含まれる水蒸気量の季節変動が反映されていると考えられる。

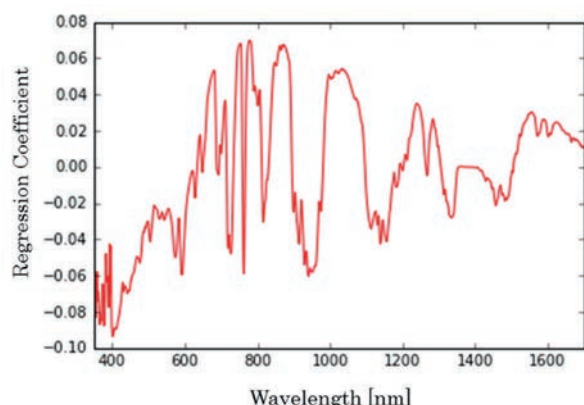


Fig. 14 The wavelength dependency of the regression coefficient corresponding to the airmass term for fine weather in June, 2012.

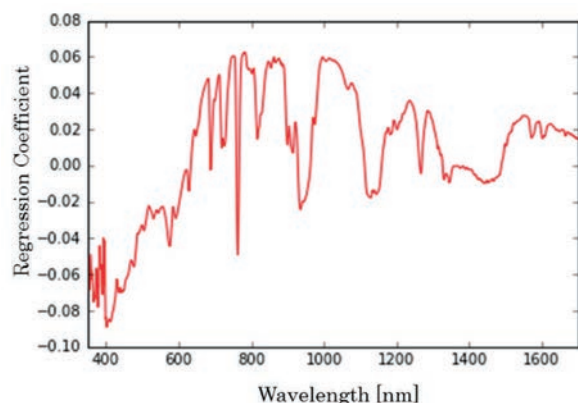


Fig.15 The wavelength dependency of the regression coefficient corresponding to the airmass term for fine weather in December, 2012.

Fig. 16 は 6 月 (青色) と 12 月 (赤色) における可降水量の階級別出現頻度を示したものである. 6 月の方が大気中に含まれる水蒸気量が多く, 回帰係数の変動傾向と整合していることが分かる。

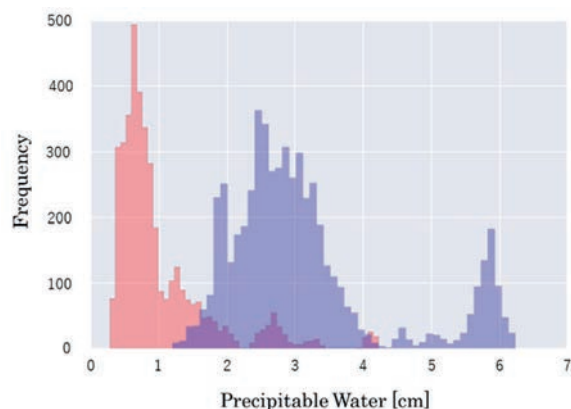


Fig. 16 Distribution of the precipitable water for June (blue) and December (red), 2012.

開発した日射スペクトル推定モデルで求めた推定値と実測値の比較例を Fig. 17 と Fig. 18 に示す. Fig. 17 は推定誤差が少ない例, Fig. 18 は推定誤差が大きい例である。

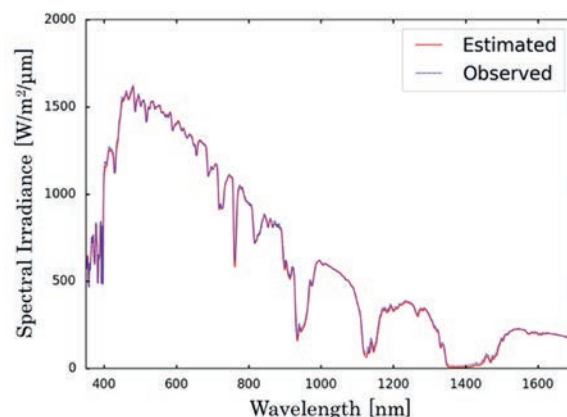


Fig.17 Comparison between observed and estimated spectral irradiance on horizontal plane for Sep 1, 2012,12:15 JST, at Tosu.

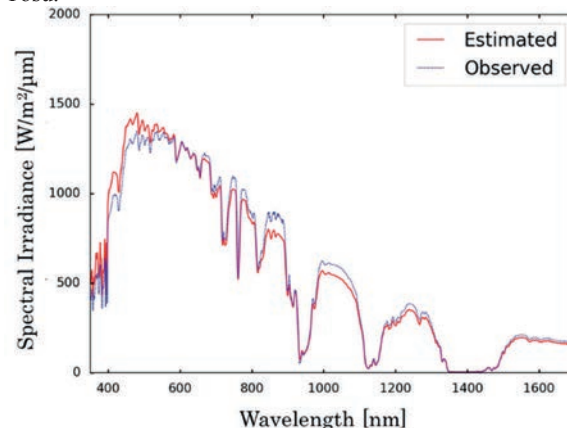


Fig.18 Comparison between observed and estimated spectral irradiance on horizontal plane for Sep 8, 2012,13:10 JST, at Tsukuba.

5. 考察

5.1 推定誤差

作成した推定モデルの精度を評価するために, 波長毎の日射強度の値を用いて (11) 式で示す時刻別の MAPE (Mean Absolute Percentage Error: 絶対平均比率誤差) を算出した。

$$MAPE(t) = \frac{1}{1230} \sum_{\lambda} \left| \frac{I_{\lambda}^{(est)}(t) - I_{\lambda}^{(obs)}(t)}{I_{\lambda}^{(obs)}(t)} \right| \quad (11)$$

ここで, $I_{\lambda}^{(est)}(t)$ は推定値, $I_{\lambda}^{(obs)}(t)$ は実測値, 1230 は誤差評価に用いた波長の数である. 1340~1460nm における日射強度はほぼ 0 [W/m²] になるため誤差計算から除外してある. なお, 精度評価に絶対平均比率誤差を用いたのは, 季節毎の日射量の違いによる影響を除外するためである。

さらに, (11) 式の時刻別の絶対平均比率誤差を地点毎月毎のサンプル数で平均して, 地点別月別の推定誤差を求めた. 推定誤差の計算には, 2012 年の 1 月 1 日~12 月 31 日の 1 年間のデータを用いた. 積雪なしの場合の地点別, 月別の推定誤差を Fig. 19 に示す。

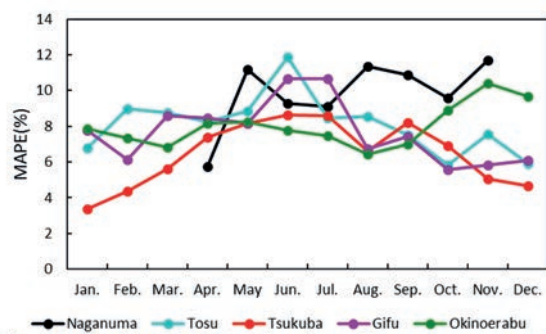


Fig. 19 Monthly MAPE at 5 stations (No snow coverage).

前述した先行研究において、桶らは短波長域における推定値の日積算値に関して、地点・月ごとの平均誤差を2～10%（平均5%程度）と評価している。本モデルで同様の評価を行うと1～4%（平均2.3%）となる。また、馬場らは全波長域の積分値について推定値と観測値の比をとり、月別の平均誤差を0.98～1.15（平均1.1程度）と評価している。本モデルで同様の評価を行うと0.97～1.03（平均1.0）となる。検証に利用したデータに年や傾斜角の違いはあるが、本モデルは高精度で推定できていると思われる。これは、全天日射強度で全波長域の日射強度レベルを説明した上で、「変換係数」に現れるスペクトル形状の細かい変動を観測データから詳細に表現した結果であると考えられる。

しかし、Fig. 19を見ると、少なからず誤差は含まれており、地点や季節により変動することが分かる。この推定誤差の要因や改善点について以下で考察した。

Fig. 20は9月の晴天時について、(12)式で定義した波長別の絶対平均比率誤差を地点毎に示したものである。式中の N はデータ数を表す。

$$MAPE_{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_t \left| \frac{I_{\lambda}^{(est)}(t) - I_{\lambda}^{(obs)}(t)}{I_{\lambda}^{(obs)}(t)} \right| \quad (12)$$

Fig. 20によれば、3つの水蒸気吸収帯で精度が極端に悪くなるが、これを除けば誤差は4%程度で、本モデルが有効に機能していると言える。吸収帯は、日射強度の絶対値が小さいこと、依存性に非線形性があることが原因となり、誤差が大きくなる。非線形性の導入は今後の課題である。

残りの4%程度の誤差原因としては、太陽周辺にかかる雲の影響などが考えられる。Fig. 18に示した例では、衛星画像の判別から、観測点周辺の雲が誤差の要因であることが推測される。ひまわり8号の衛星画像を用いれば観測点周辺の詳細な雲情報が時系列で得られるため、このような推定誤差が改善される可能性がある。

Fig. 21は9月の曇天時について、波長別の絶対平均比率誤差を地点毎に示したものである。晴天時と同様に水蒸気の吸収帯で誤差が大きくなっている。また、700～900nmにおいて、沖永良部の誤差が大きくなっているが（後述）、それらを除けば4～8%程度の誤差であり、本モデルが有効に機能していると言える。

Fig. 22はエアマスが1.1～1.2の時間帯に対して、晴天指数と450nmの「変換係数」の散布図を示したものである。前述したとおり、晴天指数は全体的な雲量を反映した指数である。相関係数は-0.68で雲量の変化に伴う「変換係数」の変動をある程度説明できており、Fig. 21に見られる曇天時の短波長側での精度向上に貢献していることが分かる。

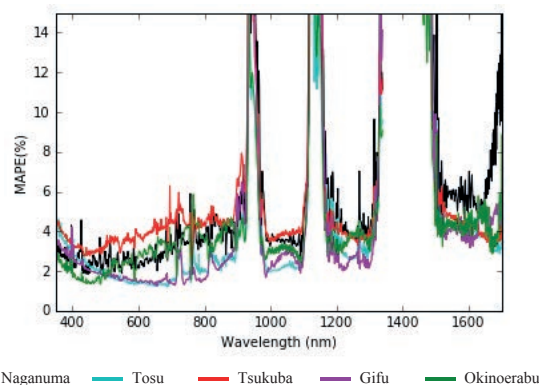


Fig. 20 MAPE on fine weather in September, 2012, estimated at each wavelength and station.

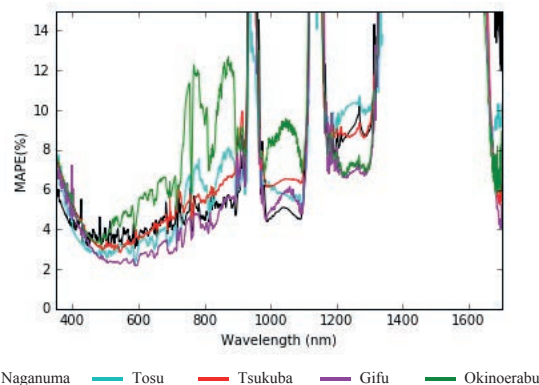


Fig. 21 MAPE on cloudy weather in September, 2012, estimated at each wavelength and station.

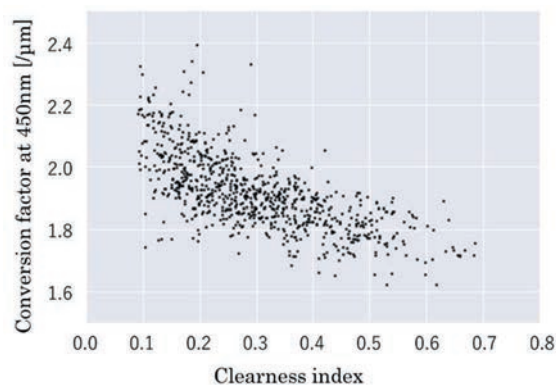


Fig. 22 Scatter plot of clearness index versus conversion factor at 450nm in September, 2012, under cloudy condition at low airmass.

しかし、全体的な誤差は晴天時よりも大きい。これは、曇天時データに2つのモードが混在していることが原因として挙げられる。Fig. 12を見ると、曇天時のデータに図の右上方向に分散が広がるモードと図の左上方向に分散が広がるモードがある。前者は広域的な曇天、後者は直達光を遮る“局所的な曇天”に対応している。Fig. 23とFig. 24にそれぞれの代表的なスペクトル形状を示す。現在の地上観測データからでは、これら2つのモードを分離することは難しいが、晴天時と同様に、ひまわり8号の衛星画像から観測点周辺の詳細な雲情報が取得でき

ば、このようなモードの分離も可能になると考える。

また、Fig. 21 で主に 700~900nm において、沖永良部の誤差が大きくなる傾向が見られた。Paris による物理計算で、植生で覆われた地表面と雲間の多重反射により、700~900nm の強度が相対的に高くなることが示唆されている⁽¹³⁾。これは地表面状態を反映した現象であるが、沖永良部は、他 4 地点に比べて観測点周辺に海の占める割合が大きく、多重反射の影響が異なる形で現れている可能性がある。快晴時のひまわり 8 号の可視バンドを利用して、観測点周辺の地表面の情報を取り込めば、上記の誤差は改善される可能性がある。

この他に、個々の分光放射計の器差が原因と思われる傾向も見られた。観測に用いている分光放射計は、各観測地点で年に 1 度交換作業を行っている。交換作業の前後や異なる年で推定誤差を比較することによって、器差の影響についても言及することができると考える。詳細は割愛するが、解析の結果、Fig. 20 の短波長側に見られる地点間の差異や 1700nm 付近に見られる長沼のデータ、また Fig. 19 の秋から冬に見られる長沼や沖永良部の推定誤差は、器差に由来する可能性が示唆された。

Fig. 19 によると、器差の影響を除けば、推定誤差は夏場に高く冬場に低くなる傾向にあることが推察される。これは、夏季に大気が不安定になり、観測点周辺の雲の影響により「変換係数」の変動が大きくなるためと考えられる。

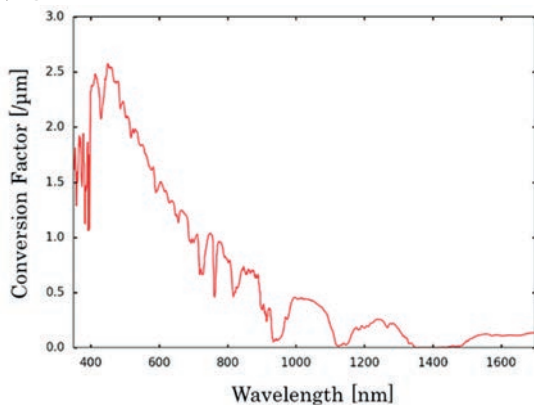


Fig. 23 Conversion factor for Aug 26, 2012,14:05 JST, at Tsukuba; representative sample from “partly cloudy sky”.

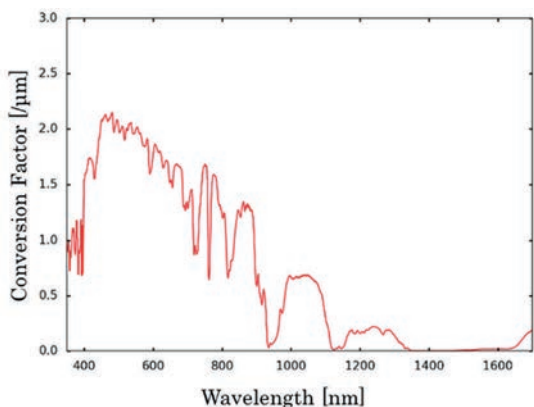


Fig. 24 Conversion factor for Aug 6, 2012,14:05 JST, at Tsukuba; representative sample from “overcast sky”.

5.2 推定モデルの全国展開

本研究の目的は、日射スペクトルの全国的なデータベースを整備することにある。そのため、5 地点の観測データから作成したモデル（4 章参照）を用いて、日射スペクトルが観測されていない地点（以下、非観測点と呼ぶ）の推定を行う必要がある。その際、非観測点における水蒸気量や晴天指数の観測データが作成モデルの学習範囲を大きく逸脱していると、回帰式を外挿して推定することになり、推定精度が悪くなる可能性がある。この点について、全日射量の観測が行われている全国 48 地点の気象官署を対象として調査した。

Fig. 25 は、水蒸気量及び晴天指数の 1 時間値について、2012 年 7 月の出現頻度を規格化して示したものである。気象官署 48 地点（赤色）の分布範囲が日射スペクトル観測の 5 地点（青色）の分布範囲内に収まっていることが分かる。その他の月や変数に関しても、概ね同様の結果を示しており、作成モデルが全国的に適用可能であることが分かった。ただし、南西諸島と小笠原諸島の冬季において、水蒸気量が一部、学習範囲外に分布する場合がある。このような外挿による影響評価は今後の検討課題である。

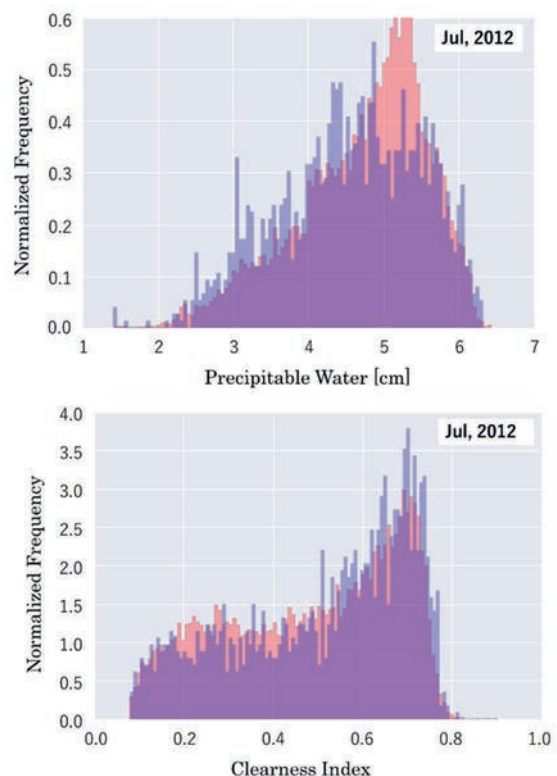


Fig. 25 Normalized distribution of precipitable water and clearness index on July, 2012. Red represent data at 48 meteorological stations of JMA, and blue represent data at 5 stations of this study.

モデルが適用範囲内にあったとしても、日射スペクトルの変動特性に地域差があると、非観測点を推定する際の誤差原因となる。本研究の観測地点は、日射変動の類似性を基に区分した 5 エリアから選定しているため（図 1）、非観測点の推定誤差は上記 5 地点の推定誤差と大きく変わらないと想定される。また、5.1 で見たように地表面状態と器差の影響を除けば、大きな地点差はないことが推察される。しかしながら、本研究では、図 1 に示し

た 5 地点以外のスペクトル観測データを解析しておらず、非観測点における推定精度を直接検証することはできない。そこで、地点ごとの交差検証を行うことで、非観測点の推定精度を間接的に評価することにした。

地点ごとの交差検証とは、日射スペクトル観測地点の中から 1 地点を選択し、他の 4 地点の観測データから作成したモデルで計算される推定値と対象地点の観測値を比較することで、学習データに含まれない地点の推定精度を評価する手法である。長沼と沖永良部は、観測 5 地点の南限と北限に位置しており、交差検証においては、水蒸気量に関して極端な外挿になる可能性があるため検証の対象からは除外した。

鳥栖、つくば、岐阜の 3 地点について、交差検証を行った結果を Fig. 26 に示す。Fig. 19 と比較して、僅かに誤差が増大した程度であり、変動特性の地点差は小さいと考えられる。従って、非観測点の推定誤差は Fig. 19 の誤差範囲から大きく逸脱するものではないと推測される。

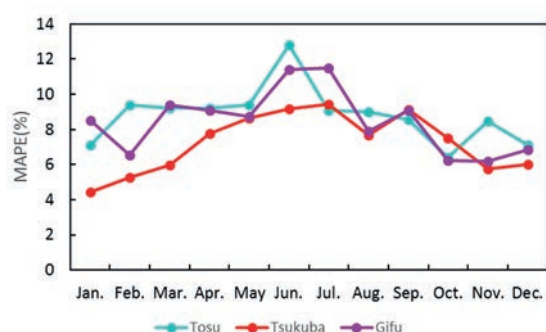


Fig. 26 Monthly MAPE at 3 stations, estimated by cross-validation (No snow coverage).

6. おわりに

本研究では、地上気象観測データを用いた日射スペクトルの推定モデルを開発した。気象庁の地上気象観測データは公表されていることから、このような推定モデルは有用であると考えられる。

開発したモデルは、「変換係数」を導入することで、スペクトルの細かい変動特性の取り込みが可能となり、先行研究と比較して高精度なモデルとなっている。また、雲量によるスペクトル形状の変動も、晴天指数によりある程度説明できており、全天候に対応するモデルとなっている。ひまわり8号のデータから、観測点周辺の雲分布や地表面に関する情報が取得できれば、さらなる精度向上が見込めるであろう。

さらに、開発したモデルは全国展開が可能であり、その際の推定誤差は概ね10%程度だと推測される。ただし、一部離島に関しては、モデルの適用範囲を超える場合があり、今後、影響評価と改良方法を検討する必要がある。

謝辞

本研究は平成27年度から開始されたNEDOの委託研究（高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発／共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）／太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発）の一部として実施したものである。関係機関の各位に深く感謝致します。

参考文献

- (1) K. Utsunomiya and A. Itagaki, New release of NEDO solar spectrum database, JSES/JWEA Joint Conference (2014), 309, Iwaki.
- (2) NEDOのホームページ
<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- (3) R. E. Bird, Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres, J. Climate Applied Meteorology, **5**(1), 88-97 (1986).
- (4) C. A. Gueymard, SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: Algorithms and performance assessment, FSEC-PF-270-95 (1995).
- (5) K. Soga, Simplified estimation method of spectral solar radiation under all weather conditions, JSES/JWEA Joint Conference (2014), 321, Iwaki.
- (6) H. Baba and K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather conditions – The spectral solar radiation simulated by Bird's model-, JSES/JWEA Joint Conference (2015), 217, Miyazaki.
- (7) S. Oke, K. Hoashi and M. Yamamoto, A simple model using global irradiance for estimation of solar spectral irradiance in any place, Journal of Japan Solar Energy Society, **42**(3), 37-43 (2016).
- (8) T. Kobayashi, H. Tamura, A. Hashimoto and H. Hirakuchi, Theoretical studies of the solar spectral irradiance on arbitrary oriented plane for various meteorological conditions, Journal of Japan Solar Energy Society, **41**(5), 53-65 (2015).
- (9) E.M. Knorr, R.T. Ng, Algorithms for mining distancebased outliers in large datasets, Proceedings of the 24th International Conference on Very Large Data Bases, 392-403(1998), New York, NY, USA.
- (10) A. Itagaki, K. Utsunomiya, T. Aoshima, Y. Tobita, Preparation of solar spectrum database in Japan, JSES/JWEA Joint Conference (2013), 483, Naha.
- (11) A. Itagaki, K. Utsunomiya and J. Sasaki, Development of an estimation method for spectral irradiance, JSES/JWEA Joint Conference (2014), 309, Iwaki.
- (12) 近藤純正, 三浦章, 地表面日射量の実験式と日射計をチェックする簡便な方法, 天気, **30**(9), 45-51(1983).
- (13) Paris, M.V., 1985 Model Studies of Solar Spectral Irradiance at the Bottom and Top of a Cloudy Atmosphere, PH.D. Thesis GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, (1985).