

A simple model using global irradiance for estimation of solar spectral irradiance in any place

任意地点の日射スペクトルの推定のための 全天日射強度を用いた簡易モデル

Shinichiro OKE
桶 真一郎^{1 ‡}

Kai HOASHI
帆足 介²

Masahiro YAMAMOTO
山本 真弘²

Abstract

Some conventional models of solar spectral irradiance required several weather parameters to consider influence of aerosol, ozone, and NO₂. We presented 2 models to estimate solar spectral irradiance in any place used a few weather parameters. Although the presented models did not require parameters of aerosol and ozone, global solar irradiance and its coefficient were added to estimate solar spectral irradiance. The global solar irradiance contained influence of aerosol and ozone. One of the presented models calculated by using a few measured spectrum data in a site could estimate solar spectral irradiance less than 10% error in short wavelength range, less than 5% error in middle and long wavelength ranges at points where had not measured spectrum data. Estimation error of another presented model using an approximate curve of the global solar irradiance coefficient was larger 2~3 points than the former presented model.

Keywords: Solar spectrum, estimation, global solar irradiance, aerosol

キーワード：日射スペクトル，推定，全天日射強度，エアロゾル

1. はじめに

異なる分光感度を有する太陽電池を積層した多接合型の太陽電池の出力計算や電流整合を行なう上では、入射する日射スペクトルを把握することが重要である。また、建築系分野においても、建物に対する太陽エネルギー収支を考慮

するためには任意の地点・時刻の日射スペクトルを知ることが重要である。これまでに、NEDOの事業により日射スペクトルデータベースの整備が行われ、2010年に公開された日射スペクトルデータベース VER-1には全国各地の4地点で観測された2年分のデータが収録されている。また、2014年に発表された日射スペクトルデータベース VER-2には全国各地の5地点で観測された1年以上のデータが収録されている⁽¹⁾。このように日射スペクトルの観測網は充実してきているが、あらゆる地点の日射スペクトルを実測のみで網羅することは現実的ではない。

これまでに、実測が困難な日射スペクトルを推定するためにさまざまなモデルが提案されてきた⁽²⁻⁴⁾。とくに広く利

*1 津山工業高等専門学校電子制御工学科准教授

(〒708-8509 岡山県津山市沼624-1)

‡ e-mail: oke@tsuyama-ct.ac.jp

*2 津山工業高等専門学校専攻科

用されているのは Bird による SPCTRAL2⁽⁵⁾や Gueymard による SMARTS2⁽⁶⁾である。これらのモデルは、快晴時には比較的高い精度で推定できるものの、曇天時を適用範囲に含んでいない。また、いずれのモデルも入手が困難な気象パラメータを必要とする。たとえば、SPCTRAL2 は直達日射と散乱日射それぞれにおいて、波長毎の透過率をレイリー散乱、水蒸気、エアロゾル、オゾン、およびその他のガスによる影響を考慮してスペクトルを計算する。それぞれの計算式は比較的単純だが、エアロゾルおよびオゾンの影響を考慮するために必要なオングストローム混濁係数およびオゾン全量の入手は一般に困難である。このような背景から、近年、簡易な日射スペクトルモデルが提案されてきている。国内では曾我らが日本の年間時別気象データに含まれる全天日射量、気温、湿度から日射スペクトルを推定することを目標として、分光日射強度と全天日射強度（日射スペクトルの積分値）との相関関係に注目しそれらの回帰式を用いて日射スペクトルを推定する方法を考案している⁽⁷⁻⁹⁾。筆者らはこれまでに、直達日射スペクトルを簡易に推定するモデル（DISPEC）を考案した⁽¹⁰⁾。また、全国各地の全天日射スペクトルを簡便に求めることを目的として、入手が困難なパラメータの代わりに比較的入手しやすい気象データである日射強度を用いる簡易な日射スペクトル推定法を提案してきた⁽¹¹⁻¹³⁾。

本報では、数少ない地点で限られた期間に観測された全天日射スペクトルのデータに基づき、全国各地の任意の時刻の全天日射スペクトル分布を推定する計算モデルを提案する。そのモデルは、エアロゾルやオゾンなど実測が困難な気象パラメータを用いない代わりに、入手が容易な全天日射強度を用いている。本報においてモデルの提案および検討に用いた全天日射スペクトルは NEDO の日射スペクトルデータベース VER-1 に収録されているもので、そのデータ収録地点は北海道夕張郡長沼町、岐阜県岐阜市、佐賀県鳥栖市、鹿児島県大島郡知名町（沖永良部島）の 4 地点であり、収録期間は 2008 年 1 月 1 日～2009 年 12 月 31 日の 2 年間である。

2. 全天日射スペクトル分布推定モデル

2.1 提案モデルの考え方

Bird や Gueymard のモデルに代表される多くの全天日射スペクトル推定モデルは、直達日射と散乱日射をそれぞれ個別に推定する方法をとっている。このような方法は、さまざまな因子の影響を反映できる反面、計算に必要なパラメータが多く実用性・汎用性が低くなるおそれがある。筆者らは、Bird のモデル（SPCTRAL2）の直達日射スペクトル推定式を元に、用いるパラメータを少なくするとともに散乱日射の影響も織り込んだ全天日射スペクトル推定式を提案した。式（1）にそれを示す。

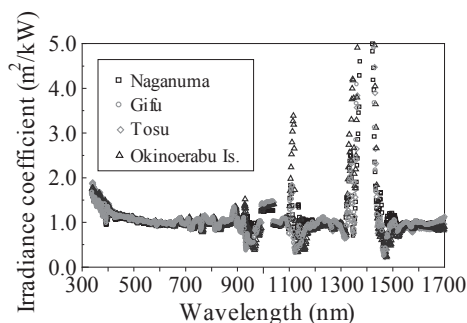


Fig.1 Global irradiance coefficients of 4 sites.

$$i_e(\lambda) = H_o(\lambda) \cdot D \cdot T_r(\lambda) \cdot T_w(\lambda) \cdot T_u(\lambda) \cdot I_g \cdot k_g(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $i_e(\lambda)$ は波長 λ におけるスペクトル強度の推定値、 $H_o(\lambda)$ は大気外スペクトル強度、 D は太陽-地球間距離、 $T_r(\lambda)$ 、 $T_w(\lambda)$ 、および $T_u(\lambda)$ はそれぞれ、レイリー散乱、水蒸気、およびその他ガスの影響を考慮した波長毎の透過率、 I_g は全天日射強度、 $k_g(\lambda)$ は波長毎の全天日射係数である。式（1）は、SPCTRAL2 の直達成分の推定式からエアロゾルおよびオゾンの透過率を削除し簡素化した式に、直達成分と散乱成分の両方を含むうえエアロゾルおよびオゾンの影響を内包する全天日射強度を乗ずることで、それらの影響を反映させようとするものである。全天日射係数は、全天日射の影響を波長毎に反映するための値であり、次の方法で定める。

$$k_g(\lambda) = i_m(\lambda) / (H_o(\lambda) \cdot D \cdot T_r(\lambda) \cdot T_w(\lambda) \cdot T_u(\lambda) \cdot I_g) \quad (2)$$

ここで、 $i_m(\lambda)$ は波長 λ におけるスペクトル強度の実測値である。全天日射係数 $k_g(\lambda)$ と全天日射強度、 I_g との積は無次元数であり、レイリー散乱、水蒸気、およびその他ガスの影響のみを考慮した推定直達日射スペクトル（式（1）のうち $I_g \cdot k_g(\lambda)$ 以外の部分）から推定全天日射スペクトル $i_e(\lambda)$ を得るための補正係数として働く。なお、NEDO の日射スペクトルデータベース VER-1 に収録されている全天日射強度は地点によって異なる傾斜角で計測された傾斜面日射強度である。本研究では簡単のため、日射強度や日射スペクトルに及ぼす傾斜角の影響は考慮していない。また、本論文においてはとくに断らない限り全天日射強度とは傾斜面全天日射強度を指す。

2.2 基本モデル（同地点、異期間の推定）

全天日射スペクトルを測定している地点において、ある一日の実測日射スペクトルを用いて全天日射係数を求め、それを用いて同一地点の他の季節の全天日射スペクトルを推定する方法を基本モデルとする。

図 1 に、全天日射スペクトルを測定している 4 地点（長沼、岐阜、鳥栖、沖永良部島）のそれぞれについて算出した全天日射係数 $k_g(\lambda)$ の例を示す。これらは、2008 年 8 月のある快晴日の 8 時から 16 時までの実測日射スペクトルを用いて計算した全天日射係数の日平均値である。これらは地点固有の値だが、地点ごとの違いはあまり大きくない。なお、

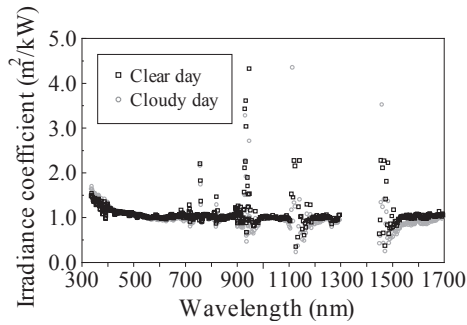


Fig.2 Global irradiance coefficients in a clear day (2008/8/11) and a cloudy day (2008/8/18).

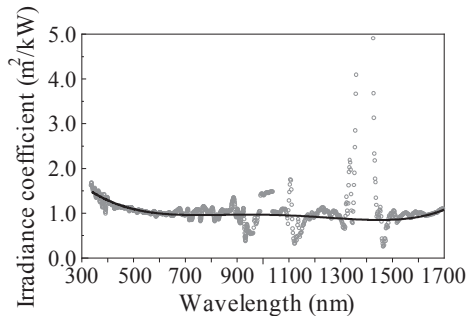


Fig.3 Global irradiance coefficients and its approximate curve in Gifu.

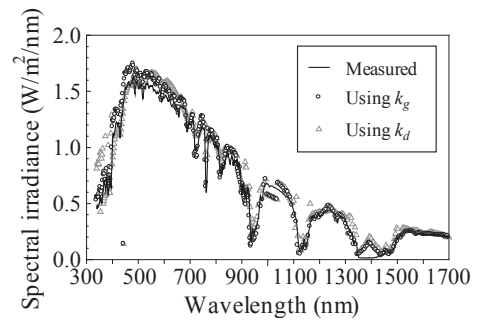
水蒸気の吸収帯にあたり日射スペクトルが極めて小さくなる波長域では全天日射係数の算出方法の都合でその値が極端に大きくなるため、推定値の計算の際にはその付近の波長域は計算対象外とする。図2に、岐阜における快晴日と日射変動が激しかった曇天日の8時から16時までの実測日射スペクトルを用いて計算した全天日射係数 $k_g(\lambda)$ の日平均値を示す。同図から、快晴日においては長波長側の、曇天日においては短波長側の値がやや大きいことがわかる。このことは、エアロゾル、オゾン、および散乱日射の影響を含まない簡易な推定直達日射スペクトルは、実測の全天日射スペクトルに対して短波長側が過小、長波長側が過大に計算されており、 $k_g(\lambda)$ はそれを補正する方向に定まったことを示している。なお、快晴日と曇天日との違いは、図1に示す地点ごとの $k_g(\lambda)$ の違いと同程度かそれ以下である。

2.3 発展モデル (異地点、異期間の推定)

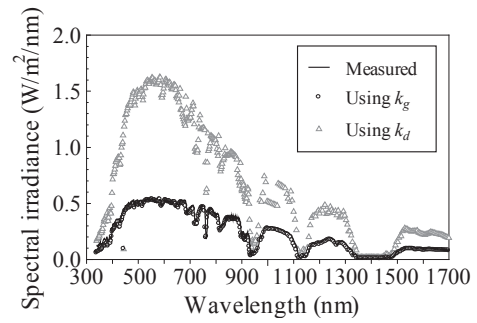
基本モデルは推定対象地点の日射スペクトルの観測データを必要とするため、実用的な推定方法ではない。観測地点以外での全天日射スペクトルを推定することを可能とする2種類の発展モデルについて説明する。

2.3.1 発展モデル1

基本モデルと同様にある地点の日射スペクトルに基づき求めた全天日射係数を用いて、それとは異なる地点の全天日射スペクトルを推定する方法である。本論文では、岐阜で観測されたデータに基づき求めた全天日射係数を用いて、それ以外の地点の全天日射スペクトルを推定することとした。



(a) 12:00



(b) 15:40

Fig.4 Estimation of solar spectrum using global and direct solar irradiance coefficient in Gifu (2008/10/13).

2.3.2 発展モデル2

ある地点の日射スペクトルに基づき求めた全天日射係数の近似曲線を作成し、それを用いて他地点の全天日射スペクトルを推定する方法である。本論文では、図1に示した岐阜の全天日射係数の近似曲線を作成し、それを推定計算に用いることとした。図3に作成した近似曲線を示す。なお、この曲線は波長 λ (nm) の関数で、式(3)で表される。

$$k'_g(\lambda) = 3.20 \times 10^{-12} \lambda^4 - 1.35 \times 10^{-8} \lambda^3 + 2.04 \times 10^{-5} \lambda^2 - 1.33 \times 10^{-2} \lambda + 4.13 \quad (3)$$

3. 推定結果

第2章で説明した基本、発展1、および発展2のそれぞれの推定モデルを用いて全天日射スペクトルを推定し、推定値と実測値とを比較した。なお、元データのうち全天日射スペクトルの積分値と全天日射強度が10%以上異なる場合は異常データとして評価対象から除外した。

3.1 基本モデル

岐阜において2008年8月2日に計測された全天日射スペクトルから求めた全天日射係数 $k_g(\lambda)$ を用いて、岐阜における2008年10月13日12:00の全天日射スペクトルを推定した(図4(a))。また、同じ $k_g(\lambda)$ を用いて同地同日における15:40の全天日射スペクトルを推定した(図4(b))。ここでは、式(2)に全天日射強度ではなく直達日射強度を代入して求めた直達日射係数 $k_d(\lambda)$ を式(1)の $k_g(\lambda)$ の代わりに用い、全天日射強度ではなく法線面直達日射強度で補正

した場合についても併記した。法線面直達日射は太陽から地表に直接到達する日射成分であり、大気中の散乱・吸収物質（エアロゾルやオゾンなど）の影響により減衰しているため、日射スペクトルの推定に利用した例がある⁽¹⁰⁾。

太陽高度が高くエアマスが小さい正午においては、図4(a)に示すように $k_g(\lambda)$ を用いた場合と $k_d(\lambda)$ を用いた場合の推定値に大きな違いはなく、いずれも全体として実測値と近い良好な推定結果が得られた。一方で、太陽高度が低くエアマスがやや大きい時間帯においては、図4(b)に示すように $k_g(\lambda)$ を用いた場合の推定値は実測値とほぼ一致したが $k_d(\lambda)$ を用いた場合の推定値は実測値に比べてかなり大きな値となった。これは、法線面直達日射強度は太陽高度が低い時間帯においても日中に比べてその日射強度が著しく小さくなることのないことに起因している（日の出・日の入り前後を除く）。当然ながら、全天日射スペクトルの推定には法線面直達日射よりも全天日射の方が適していることが明らかになった。

3.2 発展モデル 1

岐阜で2008年8月2日に計測された全天日射スペクトルから求めた全天日射係数 $k_g(\lambda)$ を用いて、全国各地の4地点における全天日射スペクトルを推定した（発展モデル1）。図5に、波長域ごとの推定値の日積算値に含まれる月ごとの平均誤差を示す。短波長域では、長沼の10月および鳥栖の2月を除く全ての場合において推定誤差は10%を下回った。とくに、長沼の2月、鳥栖の7月と10月、沖永良部島の5月、7月、および10月においては、他地点（岐阜）のデータを用いた推定にもかかわらず、その推定誤差は5%以下であった。このことから、他地点の観測データに基づき作成した $k_g(\lambda)$ を用いた場合でも、短波長域では10%以下の推定誤差で日射スペクトルを推定できることがわかった。また、 $k_g(\lambda)$ の作成に用いた季節（本論文では夏）と同じ季節における推定誤差が小さいとは限らないことがわかった。たとえば、長沼では7月より2月の推定誤差の方が小さかった。なお、本論文では岐阜で2008年8月2日（快晴日）に計測された全天日射スペクトルから求めた $k_g(\lambda)$ を用いた場合について示したが、他の地点や日付のデータを用いた場合には、異なる結果が得られる。その場合の推定値の違いは、図1および図2に示した地点および天候による $k_g(\lambda)$ の違いから予想される範囲に留まる。

3.3 発展モデル 2

発展モデル2は、他地点での観測データに基づき作成した全天日射係数 $k_g(\lambda)$ の近似曲線 $k_g'(\lambda)$ を用いて全天日射スペクトルを推定する方法である。ここでは、まず、近似曲線を用いることの影響について検討するために、岐阜で8月に観測されたデータに基づき作成した式(3)の近似曲線を用いて岐阜の全天日射スペクトルを推定した場合について述べる。図6に、2008年10月13日8:00~16:00の全天日射スペクトル（実測値および推定値）の波長ごとの積算値を示す。太陽光発電の発電電力の計算に用いることを想定し、三接合型PVセル（InGaP/InGaAs/Ge）のそれぞれの吸光効率

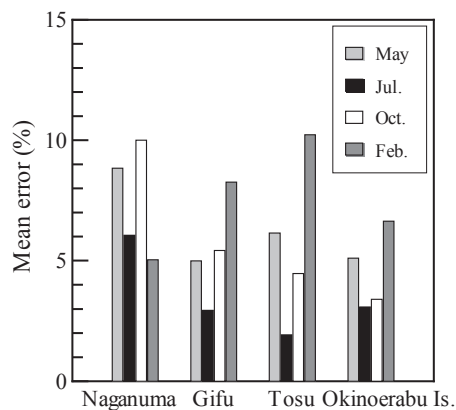


Fig.5 Monthly mean errors of estimation value of the advanced model 1 in short wavelength range in 2008.

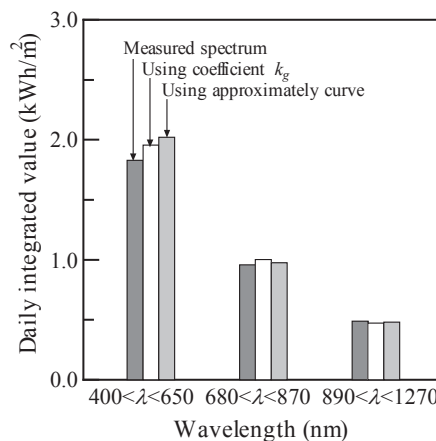


Fig.6 Daily integrated values of measured and estimated solar spectrum using the advanced model 2 in Gifu (2008/10/13).

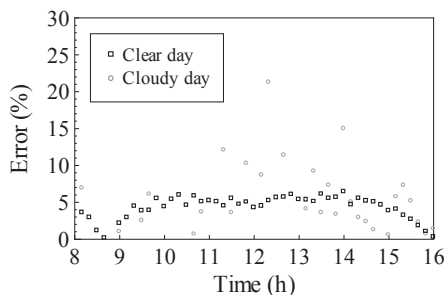


Fig.7 Estimation errors in short wavelength range of the advanced model 2 in a clear day and a cloudy day.

が70%以上となる波長域⁽¹⁴⁾での積算値を計算した。同図から、短波長域では全天日射係数 $k_g(\lambda)$ を用いた場合より近似曲線 $k_g'(\lambda)$ を用いた場合の方が、推定値がやや大きく推定誤差も大きいことがわかる。一方で、中波長域および長波長域においては、いずれの推定値もほぼ同じで、誤差も目立たない。式(3)の近似曲線は、快晴であった2008年8月2日の実測データに基づき作られたものである。これを用いて全天日射スペクトルを推定する場合、天候によって推定誤差がどのように変化するかを調べた。図7に、快晴日（同

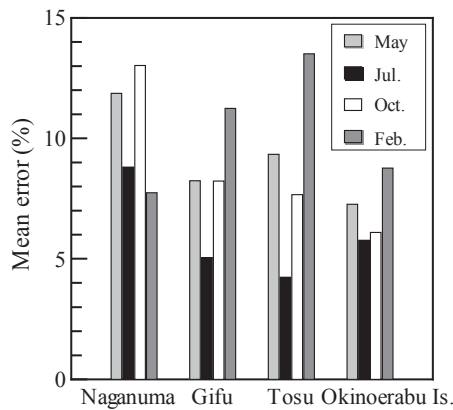
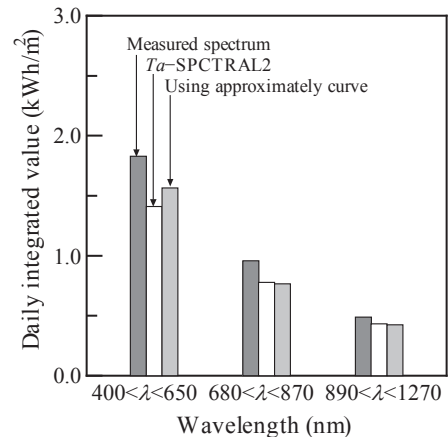


Fig.8 Monthly mean errors in short wavelength range of the advanced model 2 in 2008.

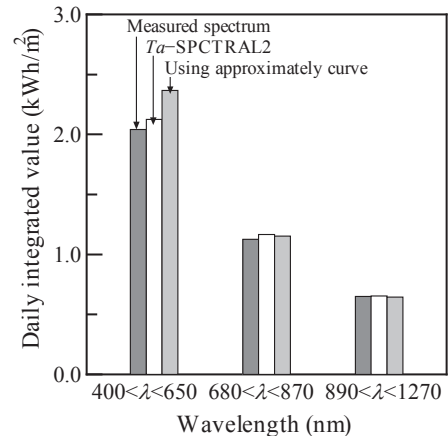
年 8 月 11 日) および日射変動が激しい曇天日(同年 8 月 18 日)において推定した全天日射スペクトルの短波長域の積分値に含まれる誤差の日変化を示す。なお、日射変動が激しい曇天日のプロットは、日射が極めて小さくなった時刻を除いてある。同図から、快晴日の推定誤差は一日を通して 5%程度でありその変動は小さいのに対して、曇天日の推定誤差は変動が激しく、最大で 20%程度になる場合もあることがわかる。曇天日において誤差が大きくなるのは日射が雲によって遮られたときであり、そうでない場合には快晴日と同等の誤差であることが多かった。

同じ近似曲線 $k_g(\lambda)$ を用いて、岐阜、長沼、鳥栖、および沖永良部島の全天日射スペクトルを推定した。短波長域の推定値の日積算値に含まれる月ごとの平均誤差を図 8 に示す。同図から、全天日射係数およびその近似曲線の元となるデータを観測した 8 月と同じ夏(7 月)の推定誤差は、他の季節に比べて小さいことがわかる。それ以外の季節の誤差は地点によって傾向が異なる。長沼では春(5 月)および秋(10 月)の誤差が目立つが冬(2 月)の誤差は 7%程度と夏(7 月)より小さい。また、鳥栖では冬(2 月)の誤差が 10%以上と他の季節に比べてかなり大きい。沖永良部島の誤差は年間を通して小さく、特に夏と秋の推定結果が良好である。

図 5 に示した発展モデル 1 の推定誤差と比較すると、近似曲線 $k_g(\lambda)$ を用いる発展モデル 2 ではどの地点においても 2~3 ポイント程度増加した。それぞれの推定誤差の範囲は、発展モデル 1 は 2~10%程度、発展モデル 2 は 4~13%であった。また、地点ごとおよび月ごとの誤差の大小関係はほぼ同じである。近似曲線を用いる発展モデル 2 は、その誤差はやや大きくなるものの、基本モデルや発展モデル 1 に比べて簡易な推定方法である。また、推定に用いる $k_g(\lambda)$ は式(3)のように数式であらわされているため、推定地点固有の気象条件に合わせて変形するなどの数学的操作が容易であり、全国各地の全天日射スペクトルを簡易に推定する方法として有用である。



(a) 2008/3/3 (yellow sand day)



(b) 2008/3/11 (no yellow sand day)

Fig.9 Difference of daily integrated values between yellow sand day and no yellow sand day.

4. 検討

4.1 エロゾルの影響

基本、発展 1、および発展 2 のいずれの提案モデルにおいても推定にはエロゾルの透過率が用いられていないことから、推定日射スペクトルに誤差が生じる原因のひとつとしてエロゾルの影響が考えられる。本論文では、エロゾルの一種である黄砂に注目し、その影響について検討する。本来は、オングストローム混濁係数およびオングストローム混濁指数の実測値を用いてエロゾルの透過率を計算すべきであるが、今回用いたデータベースにはそれらが収録されていない。本研究では、実測の日射スペクトルからエロゾルの透過率 $T_a(\lambda)$ を逆算して求め、改めて SPCTRAL2 を用いて全天日射スペクトルを推定した(直達成分のみ)。なお、オゾンの透過率 $T_o(\lambda)$ は無視した。これを、簡易エロゾル SPCTRAL2 (簡易 T_a -SPCTRAL2) とよぶ。

岐阜で黄砂の飛来が観測された 2008 年 3 月 3 日と、黄砂の飛来が観測されなかった 2008 年 3 月 11 日における実測および推定日射スペクトルの各波長域の日積算値を図 9(a),

(b) に示す。ここでは、簡易 T_m -SPCTRAL2 および発展モデル 2 を用いて推定した全天日射スペクトルを示す。両図から、黄砂の有無にかかわらず、それらの値にはほとんど違いがないことがわかる。発展モデル 2 を用いた場合の短波長域での推定誤差は、3月3日（黄砂観測）は約 6%，3月11日（黄砂なし）は約 8%であった。また、300~600 nm の波長域での誤差がやや大きいものの、その値は最大で 0.25 W/m²/nm 程度であった。このように、エアロゾルの透過率を考慮した場合と、それを用いずに全天日射強度とその係数の近似曲線を用いた提案モデル（発展 2）を用いた場合の推定結果が、代表的なエアロゾルである黄砂の飛来の有無により大きく異なることがなかった。このことは、全天日射強度にはエアロゾルの影響が織り込まれており、それを用いた提案モデルはエアロゾルの影響の簡易な組み込みに成功していることを示唆している。

4.2 散乱日射の影響

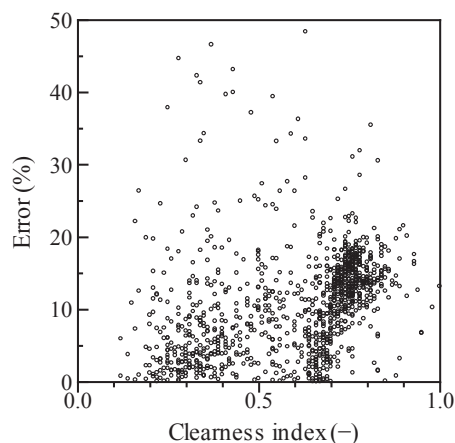
全天日射は直達日射と散乱日射からなる。提案モデルの元となった SPCTRAL2 は、直達日射スペクトルと散乱日射スペクトルを個別に推定しそれを合計する方法で全天日射スペクトルを推定している。一方で、提案モデルは SPCTRAL2 の直達日射スペクトル用の計算式を全天日射強度で補正しているため、散乱日射スペクトルを考慮していない。このことから、散乱日射成分が大きい場合には提案モデルの推定精度が低下する恐れがある。

図 10 に、2008 年 2 月および 7 月の毎日 8 時から 16 時までの間における晴天指数と推定値（波長ごとの積算値、ここでは短波長域）に含まれる誤差率との関係を示す。一般に、晴天指数が大きいと直達日射の、小さいと散乱日射の占める割合が大きくなる。同図から、2 月においては晴天指数と誤差率は正の相関があり、7 月においては晴天指数が 0.5 以下では負の、それ以上では正の相関があることがわかる。すなわち、2 月には晴天指数が大きく天候が良好な場合に誤差が大きくなり、7 月には晴天指数が小さく天候があまりよくない場合と、晴天指数が非常に大きくほぼ快晴といえる場合に誤差が大きくなる傾向がある。季節によってまったく誤差の発生する様子が異なっていることは非常に興味深い。

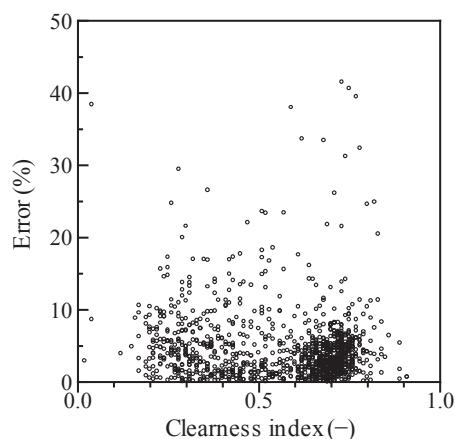
以上のように、直達比および晴天指数と推定誤差との関係を検討した結果、提案モデルにおいて散乱日射を考慮していないことが推定精度に影響している様子はみられなかった。

5. まとめと今後の課題

任意の地点・日時の日射スペクトルを推定するモデルには、観測が容易でない気象パラメータを必要としないことや、曇天時を適用範囲に含むことが求められている。本報で提案する推定モデルは、SPCTRAL2 の直達日射スペクトル計算式からエアロゾルおよびオゾンの透過率を削除し、それらの代わりに全天日射強度および全天日射係数を追加したものである。



(a) Feb. 2008



(b) Jul. 2008

Fig.10 Relationship of error of spectral irradiance estimation and clearness index.

全天日射係数の作成に用いたスペクトルデータを観測した地点の全天日射スペクトルを推定する場合（基本モデル）、基本モデルと同じ全天日射係数を用いて別の地点を推定する場合（発展モデル 1）、他地点の実測データに基づき作成した全天日射係数の近似曲線を用いて全天日射スペクトルを推定する場合（発展モデル 2）のそれぞれについて、推定誤差や推定値の特徴を比較・検討した。また、提案モデルの推定値に及ぼすエアロゾルおよび散乱日射の影響について検討した。得られた主な知見は次の通りである。

- (1) 基本モデルは、用いる日射スペクトルデータの観測期間が短い場合でも、同地点における他の時期の全天日射スペクトルを推定することが可能である。
- (2) 他地点の全天日射係数を用いる発展モデル 1 を用いた場合の短波長域の推定誤差は、いずれの地点および季節においても 10%以下であった。また、全天日射係数の作成に用いたデータを計測した季節と同じ季節における推定誤差が小さいとは限らない。
- (3) 近似曲線を用いる発展モデル 2 の推定誤差は、発展モデル 1 に比べてどの地点においても 2~3 ポイント

程度の増加に留まった。快晴日の推定誤差は一日を通して 5%程度でありその変動は小さいのに対して、曇天日の推定誤差は変動が激しく、最大で 20%程度になる場合もあった。

- (4) 発展モデル 2 の推定結果は、エーロゾルの透過率を考慮した推定方法と大きく異なることはなく、全天日射強度を用いた提案モデルはエーロゾルの影響の簡易な組み込みに成功したといえる。
- (5) 晴天指数と推定誤差との間に、冬季には正の相関があり、夏季には晴天指数が 0.5 以下では負の、それ以上では正の相関がある。また、提案モデルにおいて散乱日射を考慮していないことが推定精度に影響してはいない。

以上のことから、全天日射係数の近似曲線を用いる発展モデル 2 は基本モデルや発展モデル 1 に比べて推定誤差はやや大きいものの、日射スペクトルの簡易な推定が可能な方法であることがわかった。今後は、本論文で対象とした 4 地点以外の地点での推定誤差を検討するとともに、近似曲線を推定地点固有の気象条件に合わせて変形することにより全国各地の任意の地点・任意の日時の全天日射スペクトルをより正確に推定する方法を開発していく。また、現在整備が進められている日射スペクトルデータベース VER-2 に収録されている水平面日射スペクトルを用いた検討を進めていく。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26820106 およびパワーアカデミー研究助成の助成を受けて実施した。

参考文献

- (1) 宇都宮 他：「NEDO 日射スペクトルデータベースの公開について」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2014, pp.309-312 (2014)
- (2) Y. C. Unruh, *et al.*: “Spectral irradiance variations: Comparison between observations and the SATIRE model on solar rotation time scales”, arXiv:0802.4178 [astro-ph] (2008)
- (3) 田中 他：「バンコクにおける傾斜面日射量と分光放射照度推定手法の研究」, 日本建築学会環境系論文集, 75 (648), pp.165-170 (2010)
- (4) 板垣 他：「日射スペクトル推定モデルの開発」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2014, pp.313-316 (2014)
- (5) 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)
- (6) C. A. Gueymard, “SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: Algorithms and performance assessment”, FSEC-PF-270-95 (1995)
- (7) 藤園 他：「波長別日射量の推定法に関する基礎的研究 その 1 水平面全天日射量に基づく波長別日射量の推定方法」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.273-274 (2006)
- (8) 山際 他：「波長別日射量の推定法に関する基礎的研究 その 4 晴天指数・エアマス・可降水量を考慮した波長別日射量の推定報」, 日本建築学会研究報告 九州支部 2, 環境系 (47), pp.165-168 (2008)
- (9) 曾我：「任意天候下の波長別日射量の簡易推定法に関する研究」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2014, pp.321-324 (2014)
- (10) S. Oke et al: “A new simple model of direct spectral irradiance with easily observable atmospheric parameters”, *IEEJ Trans* 2010; No.5, pp.548-552 (2010)
- (11) 山本 他：「全国各地の全天日射スペクトル分布の直達または全天日射強度を用いた推定」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, P4 (2012)
- (12) 山本 他：「他地点の全天日射係数を用いた日射スペクトル分布推定モデル」, 平成 25 年電気学会全国大会講演論文集, 7-065 (2013)
- (13) 桶 他：「全天日射係数の近似曲線を用いた全国各地の日射スペクトル分布の計算」, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, 7-034 (2014)
- (14) 高本：「化合物太陽電池」, シャープ技報, No.100, pp.28-31 (2010)