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,エーロゾル

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

(原稿受付:2015年10月19日,受理日:2016年4月7日)

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年分以上のデータが収 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⁽²⁴⁾。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,エーロゾル,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、エー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 内では曽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,エー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.

$$i_{e}(\lambda) = H_{a}(\lambda) \cdot D \cdot T_{r}(\lambda) \cdot T_{w}(\lambda) \cdot T_{u}(\lambda) \cdot I_{a} \cdot k_{a}(\lambda)$$
(1)

ここで, $i_{\ell}(\lambda)$ 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, $T_{\ell}(\lambda)$, $T_{w}(\lambda)$,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ーロゾルおよびオゾ 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ー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。

$$k_{\sigma}(\lambda) = i_{m}(\lambda) / \left(H_{\sigma}(\lambda) \cdot D \cdot T_{r}(\lambda) \cdot T_{w}(\lambda) \cdot T_{u}(\lambda) \cdot I_{\sigma} \right)$$
(2)

ここで, *im*(λ)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 *kg*(λ)と全天日射強度, *Ig* 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 *Ig*・*kg*(λ)以外の部分)から推定全天日射スペクトル*ie*(λ)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,本論文中にお 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 kg(え)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 kg(λ)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,エーロゾル,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, kg(λ)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間の違いは,図1に 示す地点ごとの kg(λ)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。



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。

$$k_{g}'(\lambda) = 3.20 \times 10^{-12} \lambda^{4} - 1.35 \times 10^{-8} \lambda^{3} + 2.04 \times 10^{-5} \lambda^{2} - 1.33 \times 10^{-2} \lambda + 4.13$$
(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 kg(λ)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 kg(λ)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 ka(λ)を式(1)の kg(λ)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(エー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 kg(λ)を用いた場合と kd(λ)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 kg(λ)を用いた場合の推定値は実測値とほぼ一致したが kd(λ) 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 ることが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 kg(え)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_a(λ)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, kg(λ)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 kg(れ)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 kg(λ)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 kg(λ)の近似曲線 kg'(λ)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 kg(λ)を用いた場合より近似 曲線 kg'(λ)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 kg (え)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kg'(え)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kg'(え)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。





(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 エーロゾルの影響

基本,発展1,および発展2のいずれの提案モデルにおい ても推定にはエー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 してエーロゾルの影響が考えられる。本論文では,エーロゾ 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ー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ー ロゾルの透過率 *T_a*(*λ*)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_a*(*λ*)は無視した。これを,簡易エーロ 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 *Ta*-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,エーロゾルの透 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,代表的なエー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 日射強度にはエー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ー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だ 設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 計算式からエー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。



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 推定値に及ぼすエー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) 曽我:「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)