

# 大気放射モデルSMARTS2と局地気象モデルMM5による全天候型分光日射推定モデルの提案

The spectral distribution of solar radiation in multi weather conditions with SMARTS2 and MM5

橋本 潤<sup>\*1</sup> 宇佐美景子<sup>\*2</sup> 小林智尚<sup>\*3</sup> 吉野 純<sup>\*4</sup> 安田孝志<sup>\*3</sup>  
Jun HASHIMOTO Keiko USAMI Tomonao KOBAYASHI Jun YOSHINO Takashi YASUDA

## Abstract

A spectral radiation forecast model in multi weather conditions is proposed. A Transmittance forecast Model of Cloud Water (TMCW) is developed to predict clouds extinction in any cloudy conditions. The clouds data for TMCW is prepared by using the metrological forecast model (PSU/NCAR MM5) that can forecast vertical distributions of cloud mixing ratio at any arbitrary location. The mixing ratio needs to convert the cloud water size distribution to predict cloud water transmittance by using TMCW. By coupling TMCW with the spectral radiation model called SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine), the spectral distribution of solar radiation can be predicted in any weather condition. Spectral distribution of solar radiation is compared with observation data in Gifu, and the possibility of its predictability is discussed.

Keyword : SMARTS2, MM5, standard spectra, photovoltaic performance, radiation forecast, transmittance  
キーワード： SMARTS2, 局地気象モデル MM5, 基準スペクトル, 太陽光発電, 日射量予測, 大気透過率

## 1. はじめに

各国が地球温暖化への共通認識と危機意識を共有しつつある現在、実行可能かつ具体的な数値目標を含めた対応策が求められている。そのため地球温暖化対策として太陽エネルギーの活用は、その有効性がより正確に評価されるべきステージに来ている。太陽光発電の場合、定格発電量や年間発電量で評価されるが、快晴日における太陽光を指標とした基準スペクトルを基に最大発電量で議論されるため実際の発電量とは異なる。また発電量を評価する際に重要な発電効率は、日射量と発電パネルの分光感度に依存しており、パネルに到達する日射スペクトルが重要となる。そのため大気状態に応じた太陽光のスペクトル特性を把握することが必要とされている。大気放射伝達モデルは、大気を構成する様々な散乱・吸収因子を考慮して地上に降り注ぐ日射量や日射スペクトルを推定する手法として近年著しく精度が向上しており、幾つ

ものタイプが提案されている<sup>(1)-(4)</sup>。しかしながらこれらのモデルの多くが快晴日（cloudless days）を前提として設計されており、雲による影響を考慮することができない。しかし発電効率や年間発電量を見積もる際、雲による太陽光の遮蔽効果は無視できない。そこで本稿では、局地気象モデルMM5 (Fifth-generation Mesoscale Model) を用いて雲を再現し、得られた雲水混合比鉛直分布を基に雲による太陽光の消散過程を考慮した透過率推定モデルを開発した。開発した透過率推定モデルと改良を加えた大気放射モデルSMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine)を結合し、全天候に対応する分光日射量推定モデルを開発・提案する。また岐阜大学上空で観測された分光日射強度とモデル解析値を比較し、全天日射推定モデルの有用性について示す。

また全天候型分光日射推定モデルは、気象モデルを用い雲水量の予測解析を行なうことで分光日射強度の予測も可能とする。この様に得られる日射量あるいはパネル発電量予測値は、電力供給を安定させるために必要な戦略的な供給計画策定にきわめて有効となる。

## 2. 大気放射モデル SMARTS2

本稿で採用した SMARTS2 は、NREL (National Renewable

\*1 岐阜大学 工学研究科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: m3815003@edu.gifu-u.ac.jp

\*2 岐阜大学 工学部

\*3 岐阜大学 大学院 工学研究科 教授

\*4 岐阜大学 工学研究科 助教

(原稿受付：2008年3月7日)

Energy Laboratory)とGueymardらにより開発された大気放射モデルで、NRELホームページで公開されている<sup>(4)</sup>。任意の地点における分光日射強度を求めることができ、IEC(International Electrotechnical Commission)に採用される信頼性の高いモデルで精度および利便性の面から有用であると報告されている<sup>(5)-(6)</sup>。

SMARTS2 は、大気外日射スペクトルを入力値とし、地表面に到達するスペクトルを出力とするモデルである(図1)。入力する大気外スペクトルは、WRC85 および ASTM 標準大気外スペクトル E490-00 を含む全 10 種類が用意されており、任意の大気外日射スペクトルを選択することができる。出力は、全天日射強度・直達日射強度・散乱日射強度をはじめとして、それぞれ任意の角度における傾斜面日射強度が算出できる。これにより傾斜面に設置される太陽光パネルに入射する日射強度について検討することが可能である。また大気中の各消散因子による波長毎の透過率など全 43 種類の出力項目が用意されている。波長帯は 280-4000 nm の範囲内で選択することができ、波長解像度は 0.5-5 nm である。SMARTS2 の初期値には、大気中の種々の消散過程をパラメータ化したデータベースを基にしており、レイリー散乱、オゾン、二酸化炭素、混合ガス、水蒸気およびエアロゾルによる散乱・吸収特性を考慮することが可能である。これらの減衰要因の透過率を大気外スペクトル強度に乘じ、日射スペクトル分布を再現している。

直達成分日射強度(Direct Beam Radiation)について、波長 $\lambda$ におけるスペクトル強度  $E_{bn\lambda}$  [ $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ] を求めるモデル式を次に示す。

$$E_{bn\lambda} = E_{on\lambda} T_{R\lambda} T_{o\lambda} T_{n\lambda} T_{g\lambda} T_{w\lambda} T_{a\lambda} \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $E_{on\lambda}$  [Wm<sup>-2</sup>μm<sup>-1</sup>] は大気外日射スペクトル強度、 $T_{R\lambda}, T_{o\lambda}, T_{n\lambda}, T_{g\lambda}, T_{w\lambda}, T_{a\lambda}$  はそれぞれ波長  $\lambda$  [μm] におけるレゾルバー散乱、オゾン、窒素ガス、混合ガス、水蒸気、エアゾルの透過率である。

次に散乱成分日射強度(Diffuse Radiation)について波長 $\lambda$ におけるスペクトル強度 $E_{d\lambda}$  [ $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ]を求めるモデル式を次に示す。

$$E_{\text{in}^2} \equiv E_p E_{\text{in}^2} \left(1 - T_{\text{in}^2}^{-0.9}\right) \Gamma_{e^2} T_{e^2} T_{\alpha^2} T_{w^2} T_{gg^2} \cos Z \quad \dots \quad (3)$$

$$E_{\perp\perp} \equiv F E_{\perp\perp} (1 - T_{\perp\perp}) \Gamma_{e^2} T_{p^2} T_{n^2} T_{e^2} T_{w^2} T_{gg^2} \cos Z \quad (4)$$

$$E_{db\lambda} = \frac{\rho_{s\lambda}(\rho_{b\lambda} E_{bn\lambda} \cos Z + \rho_{b\lambda} E_{d0\lambda})}{(1 - \rho_{s\lambda} \rho_{b\lambda})} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $E_{dR\lambda}, E_{da\lambda}, E_{db\lambda}$  [Wm<sup>-2</sup>μm<sup>-1</sup>] はそれぞれレイリー項、エアロゾル項、後方散乱項を表し、 $F_R, F_a$  は散乱日射強度の下方成分率、 $T_{aa\lambda}$  はエアロゾルの吸収成分による透過率、 $\Gamma_{a\lambda}$  はオゾンの透過率、 $\rho_{s\lambda}, \rho_{b\lambda}, \rho_{d\lambda}$  はそれぞれ直達成分の反射率、散乱成分の反射率、天空の反射率である。また後方散乱を算

出する際は、参照散乱強度として  $E_{d0\lambda} = E_{dR\lambda} + E_{da\lambda}$  [ $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ] を用いている。

全天日射強度  $E_\lambda [\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}]$  は、入射角  $Z [\text{rad}]$  を用いて次のように表される。

各減衰率の導出アルゴリズムなどの詳細は、フロリダ太陽エネルギーセンターが提供している解説書に記載されている<sup>(4)</sup>。

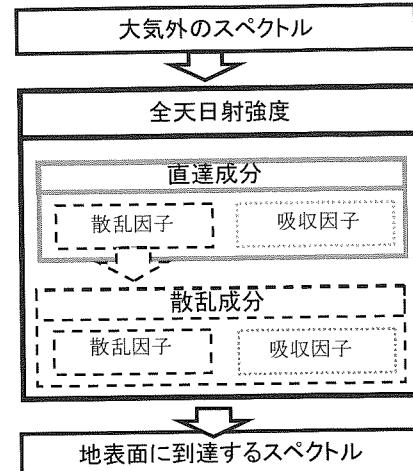


Fig. 1: Outline flowchart of SMARTS2.

図 1 SMARTS2 の概略図

### 3. 局地気象モデル MM5

上空の雲水量推定に用いる MM5 は、ペンシルバニア州立大学(University of Pennsylvania)と NCAR(National Center for Research)より開発されたメソ気象モデルで<sup>(7)</sup>、非静力学・圧縮性の方程式系を用いた数値気象モデルであり、数 km から数千 km 程度のメソスケール現象を再現可能で、大気力学過程に加えて雲微物理過程、積雲過程、放射過程などの物理過程再現スキームが導入されている。また各国で広く普及しており、国の予報モデルとして採用されるなど現業での実績があり、局地予報モデルとして精度が良好とされている。

本稿では、岐阜地域の気象場を水平解像度 2km・鉛直 20 層にて再現した 48 時間予報データより岐阜大学上空における雲水混合比 [kg/kg] の鉛直分布(0-13 km)を入手した。局地気象モデルの計算条件等については吉野ら(2008)を参照されたい。<sup>(8)</sup>

#### 4 金天候型分光日射推定モデル

全天候型分光日射推定モデルは、従来の大気放射モデルが快晴日を想定しているのに対し、雲による遮蔽効果を再現可能な新しいモデルである。図2に、全天候型分光日射モデルの構成を示す。このモデルは、大きく3つのモデルによって構成されている。雲情報を提供する気象モデルMM5(PSU/-

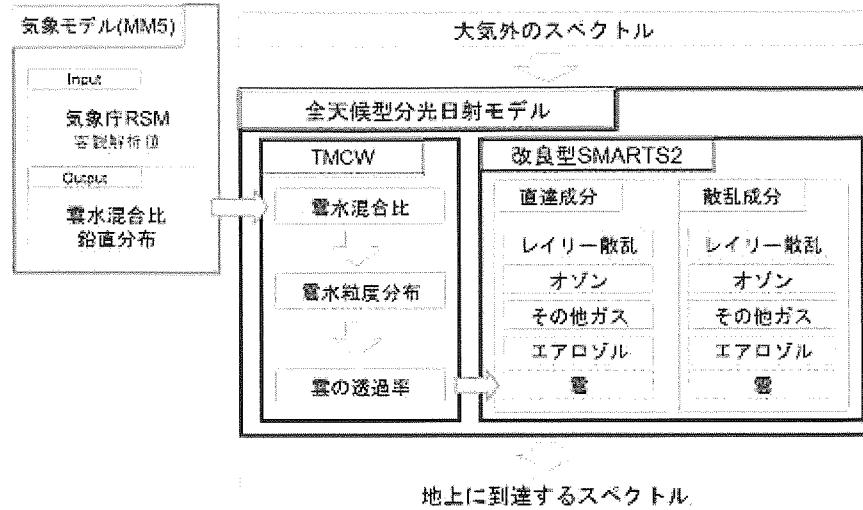


Fig.2: Outline flowchart of spectral radiation forecast model in multi weather conditions.

図2 全天候型分光日射推定モデルの概略図。

-NCER), 雲による消散過程をモデル化した雲透過率推定モデル TMCW (Transmittance forecast Model of Cloud Water), そして改良型 SMARTS2 (NREL) である。対象となる任意の地点上空に存在する雲をメソ気象モデルにより再現し、気象モデルより得られる雲水混合比鉛直分布データを TMCW が取り込むことによって、雲による消散過程を再現することが可能となった。また TMCW で算出された雲による透過率を雲消散因子として取り込めるように SMARTS2 に改良を加えた。これは雲の状態に応じた日射強度を推定できることを意味する。そのため日射の大きな減衰要因である雲について再現性の高いデータが用意できれば、高精度な日射強度を推定することができる。また気象モデルで未来の雲を予測させることで、数日先の分光日射スペクトルを予測することも可能となる。

雲の影響を考慮した直達成分日射強度 (Direct Beam Radiation) は、従来の SMARTS2 の直達成分モデル式に雲の透過率  $T_{c\lambda}$  を乗じて表現することができる。

$$E_{bn\lambda} = E_{on\lambda} T_{R\lambda} T_{o\lambda} T_{n\lambda} T_{g\lambda} T_{w\lambda} T_{a\lambda} T_{c\lambda} \dots \dots \dots \quad (7)$$

散乱成分日射強度 (Diffuse Radiation) については、あらたに雲による散乱光の成分  $E_{dc\lambda}$  [ $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ] を導入し、モデル化を試みた。

$$E_{d\lambda} = E_{dR\lambda} + E_{da\lambda} + E_{dc\lambda} + E_{db\lambda} \dots \dots \dots \quad (8)$$

$$E_{da\lambda} = F_a E_{on\lambda} (1 - T_{as\lambda}) \Gamma_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{n\lambda} T_{g\lambda} T_{w\lambda} T_{a\lambda} T_{c\lambda} \cos Z \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$E_{dR\lambda} = F_R E_{on\lambda} \left(1 - T_{R\lambda}^{0.9}\right) \Gamma_{o\lambda} T_{n\lambda} T_{g\lambda} T_{w\lambda} T_{a\lambda} T_{c\lambda} \cos Z \dots \dots \dots \quad (10)$$

$$E_{dc\lambda} = F_c E_{on\lambda} (1 - T_{cs\lambda}) \Gamma_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{n\lambda} T_{g\lambda} T_{w\lambda} T_{a\lambda} T_{c\lambda} \cos Z \dots \dots \dots \quad (11)$$

ここで用いられる記号は、2章で述べたものと同義である。また、 $F_c$  は散乱における雲透過率の下方成分、 $T_{c\lambda}$  は雲の吸収成分による透過率である。雲散乱項  $E_{dc\lambda}$  は、大気外から入射した直達日射が散乱した成分を入力値とし、散乱成分に各種減衰要因の透過率を乗じて求めている。全天成分の算出は、式(6)と同様に直達成分と散乱成分の重ね合わせで求めている。

## 5. 雲水透過率推定モデル TMCW

地球大気の上端に入射する太陽放射は、大気中を伝播する間に大気成分による吸収と散乱を受ける。雲粒は大気中成分の中でも粒径が大きい因子であり、主にミー散乱 (Mie scattering)を起こす成分として知られている。光路長  $S$  における雲の透過率は、ビアーの法則 (Beer's law) によって次式のように表される。

$$I_\lambda / I_{\lambda 0} = \exp \left[ - \int_0^S \delta_\lambda ds \right] \dots \dots \dots \quad (12)$$

ここで、 $I_{\lambda 0}$  は気柱の上端 ( $S = 0$ ) での放射強度、 $I_\lambda$  は気柱の下端での放射強度、 $I_\lambda / I_{\lambda 0}$  は光路  $S$  [km] における雲の透過率、 $\delta_\lambda$  は波長  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] における消散係数である。また光路  $S$  の光学的厚さ  $\tau$  は

$$\tau_\lambda = \int_0^S \delta_\lambda ds \dots \dots \dots \quad (13)$$

で表され、大気経路  $AM$  (エアマス) を考慮した雲の透過率  $T_{c\lambda}$  は次のように表される。

$$T_{c\lambda} = \exp [- AM \cdot \tau_\lambda] \dots \dots \dots \quad (14)$$

雲の消散係数は、各雲水粒子の消散断面積の総和として求められ、考える領域内に含まれるすべての粒子の単位体積あたりの粒子数と効率因子によって決定付けられる。波長  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] における消散係数  $\delta(\lambda)$  はミー理論を用いて次式で表される。

$$\delta(\lambda) = \int_0^s \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q(x, m) n(r) dr ds \dots \dots \dots \quad (15)$$

ここで、積分限界  $r_1, r_2$  はそれぞれ雲に含まれる粒子の最小半径と最大半径、 $n(r)$  は粒度分布関数 (size distribution function)、 $Q$  は雲水の消散効率因子である。 $m$  は雲水粒子の屈折率で 1.33 から 1.55 程度に設定され、変数  $x$  は、粒子の半径  $r$  [ $\mu\text{m}$ ] と波長  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] の比で  $x = 2\pi r/\lambda$  と与えられサイズパラメータ (size parameter) とよばれる。

したがって、求める光経路上の雲水粒度分布が分かれば雲による透過率  $T_{cl}$  が推定できる。これにより対象とする地点の上空における雲水粒度分布と雲による透過率を関連付けることができる。

### 5.1. 粒度分布関数

雲粒の粒径は、広い範囲にわたって分布しており、雲の散乱特性を評価する場合には、すべての粒子による寄与を考慮する必要がある。そのため対象とする光経路における粒度分布を得る必要がある。まず気象モデル MM5 より雲水混合比 [kg/kg] の鉛直分布を算出し、得られた雲水混合比から粒度分布を推定する必要がある。本稿では雲水混合比と典型的な雲の粒度分布を用い雲水粒度分布を推定した。仮定した典型的な粒度分布（以後、擬似粒度分布）から基準とする雲水量 [kg/m<sup>3</sup>]（単位体積あたりの水粒子（水滴）の量）を求め、ここで得られた基準となる雲水量と気象モデルから得られる雲水量との比を擬似粒度分布に重み付けして粒度分布を推定した。

まず擬似粒度分布  $n_f(r)$  は、ガンマ関数を用いて次のように表される<sup>(10)</sup>.

$$N = \int_0^{\infty} n_f(r) dr = \frac{a}{\gamma} b^{-\frac{\alpha+1}{\gamma}} \Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right) \dots \quad (17)$$

$$b = \frac{\alpha}{r e^r}, \quad r = r_c$$

ここで、 $r$  は雲粒の半径、 $a, b, \alpha$  および  $\gamma$  は正の定数である。定数  $\alpha$  および  $\gamma$  を決定し、単位体積あたりの粒子数  $N$  を指定することで定数  $a$  が求まる。また  $r_t$  は粒子数最大時の半径（以下、粒子数ピーク半径と呼ぶ）である。ここで用いる推定粒度分布は、雲の種類によって数値を選択する必要がある。雲の種類に応じた粒度分布については Carrier の論文<sup>(9)</sup>を参照されたい。

次に擬似粒度分布の雲水量  $q_f$  と対象領域の雲水量  $q_{chv}$  の  
 $n_s(r)$

比を擬似粒度分布に乘じることで、推定粒度分布  $n(r)$  は次のように表される。

$$q_f = \int_{r_1}^{r_2} \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot n_f(r) \cdot \rho_w \cdot dr \dots \dots \dots \quad (18)$$

ここで、 $w_{ch}$  は対象領域の雲水混合比、 $\rho_w = 1.0E + 3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  は乾燥空気の密度、 $\rho_d = 1.293 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  は水の密度である。これにより対象領域の雲水混合比から雲水の粒度分布を推定することができる。

雲水の粒度分布は、対象とする雲の種類や存在する高度によって異なる。また雲粒子を通過する光の透過率は、粒子の断面積が関係している。そのため基準とする擬似粒度分布は、対象領域に存在する雲の種類や規模に応じて検討する必要がある。ここでは1例として地上1kmから1.5kmの500m間に雲水混合比  $3.9 \times 10^{-6}$  [kg/kg] (雲水量は  $5.0 \times 10^{-12}$  [kg/cm<sup>3</sup>]) が存在した場合を想定し、異なる擬似粒度分布による雲水の透過率を比較した。図3に与える3つのケースの擬似粒度分布  $n_f(r)$  を示す。また各推定分布の条件は、表1に示す。

Table.1: Parameter list of Case A and Case B.

表 1 2 つのケースについての各設定値

	N (cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$	$\gamma$	r <sub>c</sub> (μm)
Case A	100	6	1	4
Case B	100	3	1	4
Case C	100	6	1	8

Case A は、粒子数ピーク半径  $r_c=4$ 、粒子数ピーク半径に粒子数が比較的集中している分布。Case B は、粒子数ピーク半径  $r_c=4$ 、Case A と比較すると粒径が広範囲である分布。Case C は、粒子数ピーク半径  $r_c=8$ 、粒子数ピーク半径に粒子数が比較的集中している分布。これらの擬似粒度分布を用いて式(20)によって重み付けされた推定粒度分布を図 4 に示す。またここで得られた推定雲水粒度分布(図4)を用い、各波長の透過率を算出した例を図 5 に示す。Case A と Case C の比較から同じ雲水量の場合、小さい粒子が多いほど透過率が低くなることが示されている。したがって小さい雲粒子により形成された雲は日射遮蔽効果が高いと言える。これは透過率が粒子の表面積に依存していることを表している。同様な理由から Case A と Case B から同じ粒子半径にピークを持つ場合、粒子サイズの小さい粒子が支配的な分布形状のほうが、透過率が低いことが示されている。このように雲水粒度分布は、透過率に影響を与える因子として極めて重要であり、精度の高い粒度分布を用いることで雲が存在する大気を透過する日射

スペクトルを推定することが可能となる。

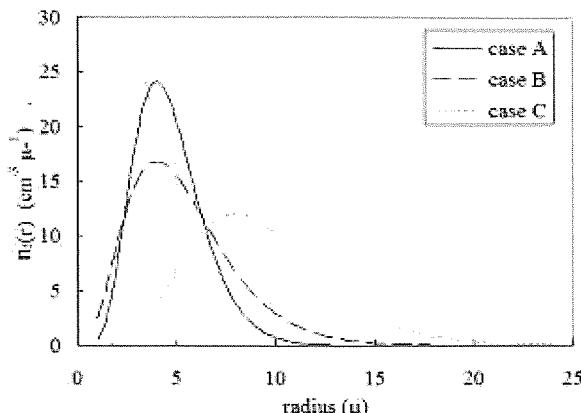


Fig.3: Assumed cloud water size distribution.

図3 疑似粒度分布。

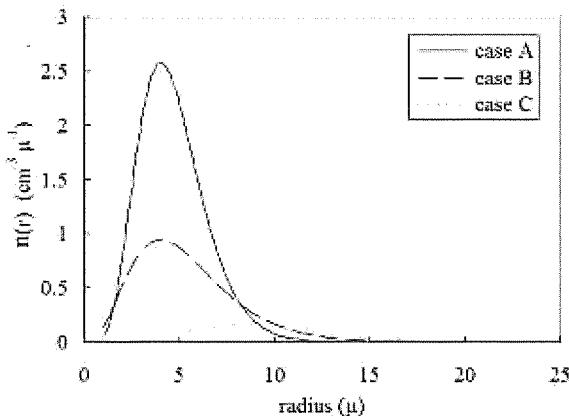


Fig.4: Cloud water Size distribution.

図4 生成された推定雲水粒度分布。

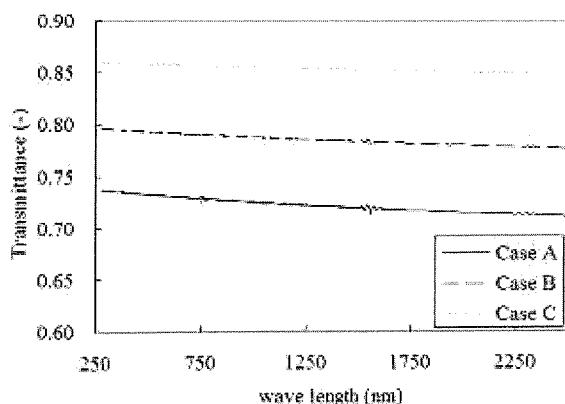


Fig.5: Comparison of transmittance among different cloud water sizes distributions.

図5 雲水粒度分布の違いによる透過率の比較。

## 5.2. 消散効率因子

粒子1個あたりの消散係数すなわち消散面積 $C_{ext}$ と粒子の幾何学的断面積 $\pi r^2$ の比、 $Q_{ext} = C_{ext}/\pi r^2$ は粒子の幾何学断面積に入射するエネルギーの何倍のエネルギーが消散をうけるかを示す量で消散効率因子(extinction efficiency factor)と呼び次のように表される<sup>(11)-(12)</sup>。

$$Q_{ext}(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}\{a_n(x, m) + b_n(x, m)\} \quad \dots \dots \dots (21)$$

ここで、係数 $a_n, b_n$ は

$$a_n(x, m) = \frac{\varphi'_n(mx)\varphi_n(x) - m\varphi_n(mx)\varphi'_n(x)}{\varphi'_n(mx)\zeta_n(x) - m\varphi_n(mx)\zeta'_n(x)} \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$b_n(x, m) = \frac{m\varphi'_n(mx)\varphi_n(x) - \varphi_n(mx)\varphi'_n(x)}{m\varphi'_n(mx)\zeta_n(x) - \varphi_n(mx)\zeta'_n(x)} \quad \dots \dots \dots (23)$$

で与えられる。 $\varphi_n(x), \zeta_n(x)$ はリカチ・ベッセル(Riccati-Bessel)関数で、それぞれ半奇数次の第一種ベッセル関数 $J_{n+1/2}$ および第二種ハンケル関数 $H^{(2)}_{n+1/2}$ を用いて次で表される。

$$\varphi_n(x) = \left(\frac{1}{2}\pi x\right)^{\frac{1}{2}} J_{n+1/2}(x) \quad \dots \dots \dots (24)$$

$$\zeta_n(x) = \left(\frac{1}{2}\pi x\right)^{\frac{1}{2}} H^{(2)}_{n+1/2}(x) \quad \dots \dots \dots (25)$$

また同様に粒子の散乱面積 $C_{sca}$ と幾何学的断面積の比、 $Q_{sca} = C_{sca}/\pi r^2$ は散乱効率因子(scattering efficiency factor)と呼び次のように表される。

$$Q_{ext}(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ |a_n(x, m)|^2 + |b_n(x, m)|^2 \} \quad \dots \dots \dots (26)$$

また吸収効率因子 $Q_{abs}$ (absorption efficiency factor)は、消散効率因子と散乱効率因子の差で表される。

$$Q_{abs}(x, m) = Q_{ext}(x, m) - Q_{sca}(x, m) \quad \dots \dots \dots (27)$$

これにより式(15)を用いれば、対象とする雲水の屈折率 $m$ とサイズパラメータ $x$ から消散係数 $\delta_{ext}$ 、散乱係数 $\delta_{sca}$ および吸収係数 $\delta_{abs}$ が求まる。それらを式(14)に代入することで雲水の散乱による透過率 $T_{cs}$ 、吸収による透過率 $T_{ca}$ および消散透過率 $T_{ce} = T_{cs} + T_{ca}$ を算出することができる。ここで粒子が吸収性を有するか否かは屈折率によって決定される。すなわち屈折率が実数であれば日射スペクトルは、雲水粒子によって散乱はされるが、吸収はされない。また屈折率が複素数(複素屈折率)であれば日射スペクトルは、雲水粒子によって散乱と同時に吸収される。そのため屈折率の虚数部は吸収の強さを表す。

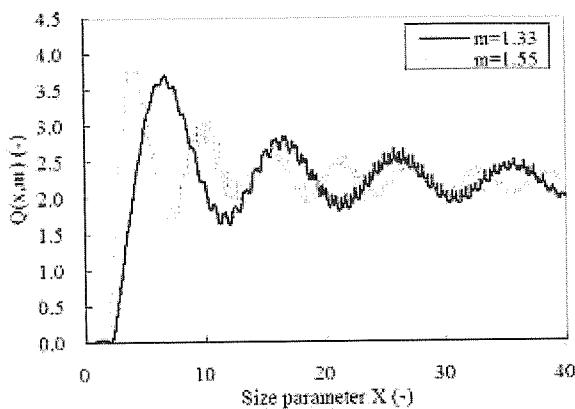


Fig.6: Extinction efficiency factor Q by Mie scattering.  
図 6 雲のミー散乱による消散効率因子  $Q_{ext}$

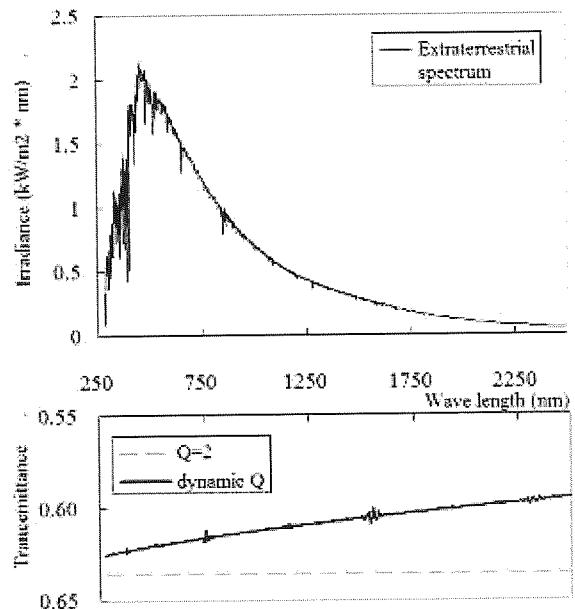


Fig. 7: upper: Extraterrestrial spectrum at 250 to 2500 um.  
 down: Comparison of transmittance at 250 to 2500 um.  
 Full line: Use calculated Q factor with m=1.33,  
 Dashed line: Use constant Q=2.

図7 上段: 大気圏外のスペクトル(250-2500 um)  
 下段: 異なる消散効率因子 Q における透過率の比較.  
 実線: Q を変動させた場合(m=1.33),  
 破線: 定数 O=2 の場合.

図 6 に屈折率  $m = (1.33, 0)$  (実数のみ) における消散効率因子  $Q_{ext}$  の計算結果を示す。 $x$  の増加に伴って、粒子の半径が入射する波長に比べて十分に大きくなるため消散面積は照射表面積  $C_{ext} \cong 4\pi r^2/2$  で近似される。したがって消散効率因子は、振動しながらも 2 に収斂され、定数  $Q_{ext} = 2$  で近似されることがある。ここでは、屈折率  $m = (1.33, 0)$  として消散効率因子  $Q_{ext}$  を変動させた場合と消散効率因子が定数とした

場合について、各波長における雲の透過率への影響について確認した(図 7 下段)。図 7 上段は、各波長帯に対応する大気圏外のスペクトルを示している。消散効率因子を定数とした場合は、透過率が一定であるのに対して、各波長に応じた効率因子を用いた場合は、日射強度の強い可視光域内(380-770 um)で著しい変化はないものの、赤外域(770 um 以上)では可視光域に比べ強く散乱している。したがってレイリー散乱よりも波長依存度が低いミー散乱においても、定数による簡易式よりも厳密に推定する手法の方が特に長波長帯について精度高く雲水の消散過程を再現することが可能である。

## 6. 日射強度の比較検討

本章では、全天候型分光日射モデルによる解析値を(財)日本気象協会が実施している岐阜大学上空( $35^{\circ}28'$ , $136^{\circ}44'$ )の日射観測データと比較し、その有用性について検討した。ただし解析する雲データには48時間天気予報データ<sup>(7)</sup>の予測開始から15時間後の12時値を用いた。これにより解析される日射スペクトルは、15時間後の日射スペクトル予測値を示す。観測データは、追尾型の直達日射計、水平面に設置された全天日射計(分光感度:280~2500 nm)および32度の傾斜面に設置された分光日射計(分光感度:350~1050 nm, 900~1700 nm)を用いた。観測についての詳細は、板垣ら(2007)を参照されたい<sup>(13)</sup>。

太陽高度が高く日射強度の強い夏季の快晴日・薄曇日・曇天日それぞれを含む 2007 年 8 月 4 日から 2007 年 8 月 11 日までの 1 週間にについて 12:00 の直達日射強度および散乱日射強度を観測値と解析値で比較した(図 8). また同期間の晴天指数  $K_t$  と散乱比  $K$  を表 2 に示す. ここで晴天指数  $K_t$  とは、大気外水平面強度  $E_0$  [Wm<sup>-2</sup>] と地表面での水平面全日射強度  $E$  [Wm<sup>-2</sup>]との比で次の式で表される.

また散乱比  $K$  とは、地表面での水平面全天日射強度  $E$  に対する散乱日射強度  $E_d$  [Wm<sup>-2</sup>] の比で次の式で表される。

図8は、斜線部で囲まれた値は直達日射強度、点々で囲まれた値は散乱日射強度を示す。8月5日、6日および8日では直達成分が過大評価され、結果として全天日射強度射が過大評価されている。これは気象モデルMM5が雲を再現できなかつたため、実際の天候よりも雲水量が過小評価された結果と考えられる。晴天指数についても解析結果は、観測値よりも高い数値を示している(表2)。これに対して8月11日では直達成分が過小評価されている。これは8月6日とは逆にMM5が薄曇を再現できず雲水量を過大評価したため直達成分は強く減衰させられ結果的に全天成分が小さく見積もられている。

表 2 の散乱比では、8月 11 日に直達を著しく遮るような曇

天日において、過剰な散乱が見られる。これは散乱成分の評価において、雲水による散乱効率係数との関連性再現が式(10)では統計的に十分再現されていないためであり今後の検討課題である。同様の理由から全体的に散乱成分の精度が直達成分に比べて低い結果となった。直達成分が光の経路について減衰率を求めれば良いのに対して、散乱成分は周辺の状況、つまり雲の水平面分布が重要となる。

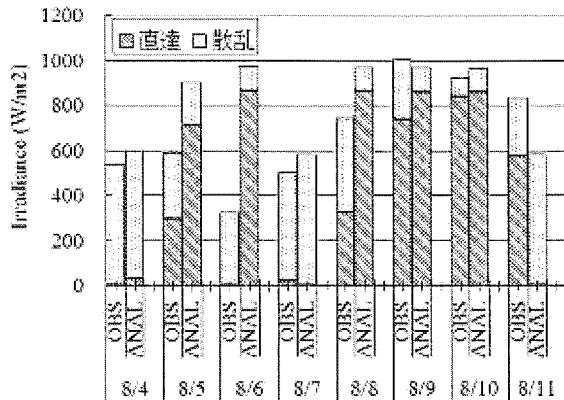


Fig.8: Comparison of irradiance observation and analysis at 12:00 (2007.8.4 to 2007.8.11).

Parts of diagonal line: Direct horizontal irradiance [W/m<sup>2</sup>]

Parts of dot: Diffuse horizontal irradiance [W/m<sup>2</sup>]

図 8 観測値と解析値の日射強度比較(12:00)

(2007 年 8 月 4 日から 2007 年 8 月 11 日).

斜線域: 直達日射強度[W/m<sup>2</sup>]

点領域: 散乱日射強度[W/m<sup>2</sup>]

Table.2: Clearness index and diffuse component ratio.

表 2 晴天指数と散乱比.

	8/4	8/5	8/6	8/7	8/8	8/9	8/10	8/11
Kt (OBS)	0.42	0.46	0.25	0.39	0.58	0.79	0.72	0.65
Kt (Anal)	0.47	0.71	0.76	0.46	0.76	0.76	0.76	0.45
error	0.05	0.24	0.51	0.06	0.18	-0.03	0.04	-0.20
K (OBS)	1.00	0.50	1.00	0.96	0.56	0.26	0.09	0.31
K (Anal)	0.95	0.22	0.11	1.00	0.11	0.11	0.11	1.00
error	0.04	0.28	0.89	-0.04	0.45	0.15	-0.02	-0.69

図 9 に観測値と解析値の全天日射強度について晴天指数 0.42 の日を比較した一例を示し、その相関図を図 10 に示す。観測値の散乱比から直達日射の透過しないような曇天日を示しており、散乱日射強度の観測値との比較を意味している。スペクトル形状からは、短波長域において若干過大評価が見受けられ、1500 nm 以上の波長帯で乖離があるものの全体的によく一致している。前者の過大評価は、雲もしくはオゾンによる散乱効果が過小評価された結果と考えられる。また相関図(図 10)から高い相関係数(0.95)が示されており、本モデルが曇天

日の日射スペクトルを再現できる可能性を示唆した。

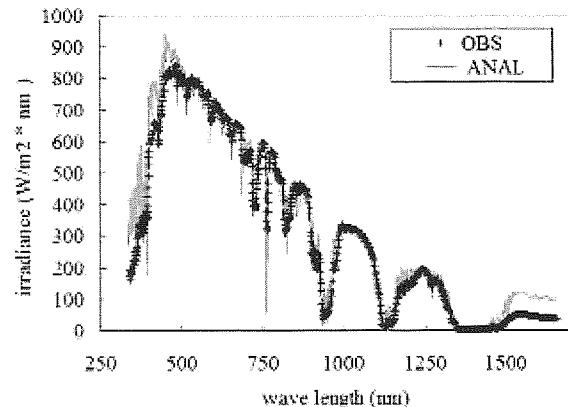


Fig.9: Comparison of spectral radiations observation and analysis at Kt=0.42. 2007.8.4 at Gifu city

図 9 日射スペクトルの解析値と観測値の比較.

2007 年 8 月 4 日 岐阜市内上空

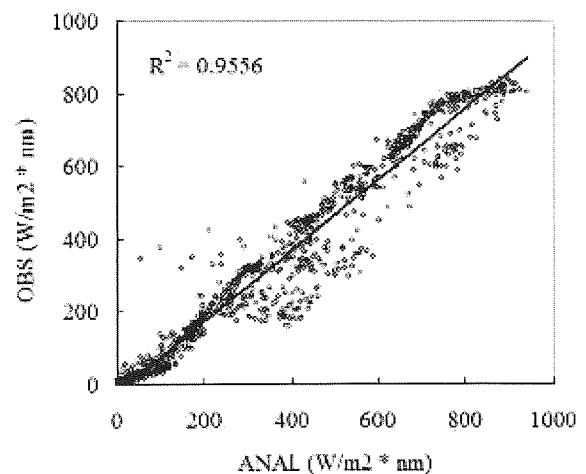


Fig.10: Correlation between analysis and observation irradiance.

図 10 日射強度の観測値と解析値の相関図.

## 7. おわりに

雲水混合比の鉛直分布から雲の透過率を推定するモデル TMCW を開発した。また大気放射モデル SMARTS2 を改良し、TMCW と結合することで、雲による日射の消散過程を再現する全天候型分光日射推定モデルを構築した。本稿では、雲を再現するために気象モデル MM5 を用い、岐阜大学上空の雲水混合比データを作成、そこで得られた雲水混合比を作成した典型的な粒度分布を用いて雲水粒径分布を推定し雲による透過率を求めるモデル TMCW を開発した。雲透過率算出過程では、雲の粒度分布が異なることで透過率が変動するこ

とを確認し、日射強度推定には雲水粒度分布が重要であることを示した。SMARTS2とTMCWの結合モデルである全天候型分光日射推定モデルでは、雲による減衰効果を得られた雲透過率を用いてモデル化する手法を提案し、曇天日を含めた全天候に対応した全天・直達・散乱日射強度を推定することが可能となった。次に全天分光日射推定モデルの特性を把握するために、予測値と観測値の比較を行なった例では、比較結果から対象地点上空に雲が存在する場合においても有用な日射強度スペクトルを得られることが示された。これにより本稿で開発した全天候型分光日射推定モデルは、雲による消散過程を考慮した日射スペクトルを再現するモデルであることが示せた。

**謝辞:**本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(新エネルギー技術開発 太陽光システム共通基盤技術開発 発電量評価技術の研究開発)として行なわれたものの一部である。関係機関の各位に深く感謝致します。また(財)日本気象協会からは貴重な観測データをご提供頂いたことに深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) Bird, R. E., 1984, "A Simple Solar Spectral Model for Direct-normal and Diffuse Horizontal Irradiance." *Sol. Energy*, 32(4), pp.461-471
- 2) Justus, C. G., and Paris, M. V., 1985, "A Model for Spectral Irradiance and Radiance at the Bottom and Top of a Cloudless Atmosphere," *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 24, pp.193-205
- 3) Nann, S., and Riordan, C., 1991, "Solar Spectral Irradiance Under Clear and Cloudy Skies : Measurements and a Semiempirical Model." *J. Appl. Meteorol.*, 30, pp.447-462.
- 4) Gueymard, C., 1995, "SMARTS, Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment." Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL.
- 5) Myers, D. R., Emery, K., Gueymard, C., 2004, "Revising and Validating Spectral Irradiance Reference Standards for Photovoltaic Performance Evaluation.", *Sol. Energy*, 126, pp.567-574
- 6) Utrillas, M. P., Bosca, J. V., et al, 1997, "A Comparative Study of Spectral2 and SMARTS2 Parameterised Model Based on SPCTRAL Irradiance Measurements a Valencia, SPAIN." *Sol. Energy*, 63(3), pp.161-171
- 7) Dudhia, J., 1993, "A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front", *Mon Wea. Rev.*, Vol.121, pp.1493-1513
- 8) 吉野, 片山, 木下, 安田, 2008, "メソ気象モデル MM5 によるビンポイント降水量予測精度について" *水文学論文集*, pp.325-330
- 9) Deirmendjian, D., 1964, "Scattering and Polarization Properties of Water Clouds and Hazes in the Visible and Infrared." *Appl. Optics*, 3(2), pp.187-196
- 10) Carrier, L. W., Cato, G. A., 1967, "The Backscattering and Extinction of Visible and Infrared Radiation by Selected Major Cloud Models." *Appl. Optics*, 6(7), pp.1209-1219
- 11) 岸保, 田中, 時岡, 1982, "大気科学講座4 大気の大循環" 東京大学出版, 第2章
- 12) Liou, K. N., "An Introduction to Atmospheric Radiation, second edition." Academic press, p169-194
- 13) 板垣, 斎藤, 大谷, 青島, 飛田, 2007, "日射気象区別の分光日射データベース の構築" 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.39-42