

分光放射計を用いて観測した太陽光波長別放射照度の活用 — 数値予報モデル等の放射照度の検証 —

居島 修*

Utilization of solar spectral irradiance observed using spectroradiometers - Verification of solar irradiance of numerical forecast model, etc. -

IJIMA Osamu

要旨

高層気象台では、これまで分光放射計の特性を調査するとともに、分光放射計用校正装置を開発し校正方法を確立してきた。現在、これらの成果を基に太陽光波長別放射照度の直達成分及び散乱成分について連続観測を実施している。今回、この観測データを用いて2種類の数値予報モデル(メソモデル、全球モデル)の放射照度及び衛星プロダクトである日射量推定値について、可視域・近赤外域などを区別した検証を実施した。また、最大の誤差要因となりうるエアロゾルの光学的厚さについて、サンフォトメータによる観測結果と、数値予報モデル等で用いられた値を比較するとともに、エアロゾルの放射計算への効果についても調査した。検証等の結果、全球モデルの放射照度の散乱成分は近赤外域では観測値より大きい一方で紫外域・可視域では観測値より小さいなど、波長及び直達・散乱成分の違いにより過大・過小の傾向が異なることや、それらの要因として計算に用いたエアロゾルの光学的厚さが関連することが分かった。

1. はじめに

地表面で観測される太陽光スペクトルは、大気やエアロゾル組成による影響が波長分布として現れる。このため、気象研究所では地球の放射収支変化のメカニズム解明を目的として、「分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究(2016年度～2018年度)」が行われた。この研究において、高層気象台は共同研究者として分光放射計を用いた波長別放射照度(300nm～2500nmの波長範囲における1nmごとの放射照度。以下、SPC放射照度という)の直達成分及び散乱成分の連続観測を実施し、現在も継続して観測している。また、太陽光スペクトルは、太陽電池モジュールのスペクトル依存性の評価(Eke *et al.* : 2017)や生態系の炭素循環の研究(Akitsu *et al.* : 2022)においても欠かすことのできない観測データとなっている。

一方で、放射は重要な大気駆動要素として気象庁・数値予報モデルの中でも放射照度が計算されており、また、生活への影響も大きい要素として衛星プロダクト「日射量推定値」(以下、本稿での用語統一のため、この推定値についても放射照度という)も計算されている。通常、一般向けに提供されるこれらの放射照度は、紫外域から近赤外域までを積算した値であり、検証にはBSRN(基準地上放射観測網: Baseline Surface Radiation Network)のデータ等が使用される。

本稿では、数値予報モデル及び衛星プロダクトにおいて、通常出力されない紫外域・可視域・近赤外域の波長帯ごとの放射照度を提供していただいたことから、観測したSPC放射照度のさらなる活用を目的として、これらの提供された放射照度を検証し、SPC放射照度について検証の基準データとしての有効性を確認することとした。また、放射計算に影響を及ぼすエアロゾルの光学的厚さ(Aerosol Optical Depth: 以下、AODという)について、放射計算に使用された値と観測値を比較し、エアロゾルが放射計算に与えた効果についても調査したので報告する。

*高層気象台 観測第二課

2. 検証に使用したデータ及び検証手順

検証の基準となるデータ(以下、基準データという)は、高層気象台において分光放射計で観測した SPC 放射照度を使用した。検証するデータ(以下、検証対象データ)は、数値予報モデル及び衛星プロダクトで計算した放射照度である。また、検証対象データのうち、数値予報モデルについては、エーロゾルの種類及び光学特性の扱いが異なる 2 種類のモデル(メソモデル及び全球モデル)を使用した。

本調査では、2 種類の数値予報モデルの検証結果を対比させ、エーロゾルの取り扱いの違いによる放射照度の計算結果の違いを確認する。また、衛星プロダクトでは、紫外域、可視域及び近赤外域における細かな波長帯について検証し、波長による計算結果の違いを確認する。

基準データ及び検証対象データは、観測(または計算)する波長範囲及び時間分解能が異なっている。このため、それぞれのデータについて波長範囲及び時間分解能を整合させ、比較に用いる基準データ及び検証対象データを作成した。

本調査の検証については快晴時のデータのみとした。雲の影響があるデータについては、高層気象台において雲量や雲の種類を観測していないこと、数値予報モデルの放射計算では雲は水平方向に様に広がっていると仮定しており、両者の雲の状態が一致するデータを抽出することは困難と判断した。

それぞれの詳細は以下のとおりである。

2. 1 基準データ

(a) 観測種目

SPC 放射照度の観測種目は、全天日射(Global Solar Radiation : GL)及び散乱日射(Diffuse Solar Radiation : DF)である。水平面直達日射(Direct Solar Radiation [Horizontal] : DH)については、GL から DF を差し引き、算出した(DH=GL-DF)。また、直達日射(Direct Solar Radiation : DR)については、DH と太陽高度角から算出した(居島・高野 : 2019)。

なお、毎年 12 月は分光光度計を校正するため、観測を休止していた。

(b) 波長範囲

300nm～2500nm : 1nm ごと

(c) 時間分解能

1 分ごとに観測。

2. 2 検証対象データ

2. 2. 1 数値予報モデルの放射照度

表 1 MM 及び GM 放射照度の 22 バンドの波長範囲

Band	波長範囲 (nm)	Band	波長範囲 (nm)
No. 1～7	685 ～ 4000	No. 15	303 ～ 313
No. 8	599 ～ 685	No. 16	296 ～ 303
No. 9	500 ～ 599	No. 17	290 ～ 296
No. 10	448 ～ 500	No. 18	283 ～ 290
No. 11	407 ～ 448	No. 19	274 ～ 283
No. 12	364 ～ 407	No. 20	250 ～ 274
No. 13	333 ～ 364	No. 21	231 ～ 250
No. 14	313 ～ 333	No. 22	174 ～ 231

(1) 概要

(a) メソモデル

本調査に利用したメソモデルは、気象研究所において 2012 年に太陽光発電予測精度向上のための研究に使用されたモデル(Ohtake *et al.* : 2015)である、計算された放射照度(以下、MM 放射照度という)を気象研究所から提供していただいた。

(b) 全球モデル

本調査に利用した全球モデルは、2018 年に現業で利用されたモデルである。(a)のメソモデルの放射計算との違いとして、2017 年にエーロゾルの種類や光学特性が改良されている(気象庁予報部 : 2019)。計算された放射照度(以下、GM 放射照度という)を本庁情報基盤部数値予報課数値予報開発センターから提供していただいた。

(2) 計算される放射照度の種類

メソモデル・全球モデル共に、直達日射(DR)及び散乱日射(DF)の放射照度を計算し、DR と太陽高度角から水平面直達日射(DH)を算出している。また、全天日射(GL)は DH と DF の合成(GL=DH+DF)により求めている。なお、提供いただいたデータは、GL、DH 及び DF である。

(3) 波長範囲

メソモデル・全球モデル共に、174nm～4000nm の波長範囲を表 1 に示す 22 バンドに分割して放射照度を計算している。なお、バンド No.1～7 は、7 つのバンドの波長範囲について k-分布法(藪ほか : 2005)を用いて計算しているため、No.1～7 を 1 つのバンドとした。

なお、提供いただいた GM 放射照度は、「紫外域・可視域(174nm～685nm : バンド No.8～22)の積算値」及び「近赤外域(685～4000nm : バンド No.1～7)の積算値」の 2 種類の波長帯における積算値である。

(4) 時間分解能

(a) メソモデル

1 分ごとに計算。

(b) 全球モデル

1 時間平均値。

提供いただいた1時間平均値は、400秒ごとに計算された9個のデータを平均した値である。

(5) 水平分解能

(a) メソモデル

高層気象台から一番近い格子点(水平格子間隔:5km)と周囲8個の格子点の合計9個の平均値を利用。

前述のとおり、利用したメソモデルは太陽光発電予測精度向上の研究に使用されており、このメソモデルで出力される計算結果は格子点ごとではなく、9個の格子点の平均値であった。このため、本調査では提供していただいた平均値を使用した。

(b) 全球モデル

高層気象台から一番近い格子点(水平格子間隔:20km)を利用。

(6) 計算に使用されたエアロゾルの取り扱い

(a) メソモデル

平均的な海洋型と大陸型のエアロゾルを仮定し、鉛直プロファイルについてはこの2種類のエアロゾルに対応する光学特性(消散係数・一次散乱アルベド・非対称因子)を使用している(北川:2000)。

エアロゾルの水平分布と季節変化については、衛星観測(MODIS, TOMS)に基づくエアロゾル光学的厚さの鉛直積算値(Aerosol Total Optical Depth(550nm):以下, ATODという)の2次元月別気候値を用いている(村井:2009)。

ATODはAODと同等の値であり、以下、メソモデルに使用されたATODをMM-AODと記述する。

(b) 全球モデル

2017年以降の全球モデルでは、エアロゾルの化学種・粒子サイズを考慮したスキームが導入されている。

エアロゾルの種類は、5種別(砂じん、黒色炭素、有機炭素、硫酸塩、海塩)の合計11種類(砂じんは6種類、海塩は2種類の粒径に分類)を使用している。

エアロゾルの光学特性については、様々な半径の粒子に対するミー散乱計算の結果を積分することによりエアロゾルの粒子系の平均的な値が計算されている。さらに衛星観測データ(MODIS, MISR, OMI)に基づいたAOD(3次元月別気候値, 550nm)を併用して各エアロゾル種の濃度を調整している(関口ほか:2019)。以下、全球モデルに使用されたAODをGM-AODと記述する。

(7) データの選定方法

メソモデル・全球モデル共に、検証に使用するデータは、2018年1月~11月の期間について、雲監視装置(プリード社製 PSV-2000)の画像から快晴(雲量が1/8以下)の時刻のデータを抽出した。さらに、メソモデル、或いは、全球モデルで計算された雲量が快晴と判断される0.1未満(最大

表2 ST放射照度の22バンドの波長範囲

Band	波長範囲 (nm)	Band	波長範囲 (nm)
No. 1	285 ~ 325	No. 12	895 ~ 1025
No. 2	325 ~ 355	No. 13	1025 ~ 1150
No. 3	355 ~ 390	No. 14	1150 ~ 1300
No. 4	390 ~ 430	No. 15	1300 ~ 1500
No. 5	430 ~ 475	No. 16	1500 ~ 1750
No. 6	475 ~ 525	No. 17	1750 ~ 2075
No. 7	525 ~ 575	No. 18	2075 ~ 2425
No. 8	575 ~ 625	No. 19	2425 ~ 2800
No. 9	625 ~ 695	No. 20	2800 ~ 3150
No. 10	695 ~ 790	No. 21	3150 ~ 3550
No. 11	790 ~ 895	No. 22	3550 ~ 4000

値は1)の時刻のデータを選定した。各月において選定した日数は1~5日で、合計31日であった。なお、7月及び9月は選定する晴天日がなかった。また、快晴日であっても分光放射計の観測データが点検等で欠測の場合は、選定から除いている。

2. 2. 2 衛星プロダクトの放射照度

(1) 概要

気象衛星センターでは、太陽光発電における発電量の推定や農業管理支援などを目的に、ひまわり衛星観測データを用いて放射照度(以下、ST放射照度という)が計算されている。

(2) 計算される放射照度の種類

ST放射照度は、全天日射(GL)、直達日射(DR)及び散乱日射(DF)について、気象衛星センターで開発した放射伝達モデルを用いて計算されている。GLについては、DRと太陽高度角からDHを算出し、DHとDFの合成により求めている。なお、提供いただいたデータは、GL、DR及びDFである。

(3) 波長範囲

波長範囲285nm~4000nmについて表2に示す22バンドに分割し、放射照度を計算している。

(4) 時間分解能

気象衛星センターから提供いただいたST放射照度は、10分ごとに計算された値である。

(5) 水平分解能

高層気象台から一番近い格子点(格子点間隔:2km)を利用。

(6) 計算に使用されたエアロゾルの特徴

AODについては衛星データを用いたプロダクト(Uesawa:2016)により算出している。以下、衛星データを用いたプロダクトで算出されたAOD(500nm)をST-AODと記述する。

(7) データの選定方法

比較に使用するデータは、2018年1月～11月について、雲監視装置の画像から快晴の時刻のデータを抽出した。

2. 3 比較に用いた基準データ及び検証対象データの作成手順

基準データ及び各検証対象データは、波長範囲及び時間分解能が異なっており、両者のデータを比較するため、波長範囲では最も範囲の広いデータに整合させ、時間分解能では最も分解能の粗いデータに整合させた。

(1) MM, GM 及び SPC 放射照度の波長範囲及び時間分解能の整合

(a) MM 放射照度及び GM 放射照度

GM 放射照度は、紫外域・可視域(174nm～685nm)と近赤外域(685～4000nm)の 2 種類の積算値である。MM 放射照度の 22 バンドについて、GM 放射照度と同じ波長範囲となるように積算した。

時間分解能については、GM 放射照度、MM 放射照度共に全球モデルに合わせて 1 時間平均値とした。MM 放射照度については、GM 放射照度と同様に前 1 時間、即ち 9 個(400 秒ごとの瞬間値)のデータから 1 時間平均値を算出した。なお、9 個のデータと同時刻の 1 分ごと値が無い場合は前後 1 分ごとの値から内挿した。例えば、

400 秒(6 分 40 秒)の場合、6 分と 7 分の瞬間値を用いて内挿している。

2. 2. 1(7)で述べたデータ選定を行なったデータについて、時間分解能を整合させて得られた 1 時間平均値は 193 個であった。

(b) SPC 放射照度

SPC 放射照度について、2. 3(1)(a)と同様に紫外域・可視域(300nm～685nm)及び近赤外域(685nm～2500nm)の波長範囲で積算し、1 時間平均値を作成した。なお、SPC 放射照度の観測波長範囲は検証対象データと異なるが、両者の全波長を積算した値の差は 1%程度であり、本調査ではその差を議論しない。

(2) ST 放射照度及び SPC 放射照度の波長範囲及び時間分解能の整合

(a) ST 放射照度

ST 放射照度は、提供された値をそのまま使用した。

(b) SPC 放射照度

1nm ごとの SPC 放射照度(1 分ごとの瞬間値)について、10 分ごとの ST 放射照度と同時刻のデータを抽出し、ST 放射照度の 22 バンドと同じ波長範囲(表 2)で積算した。

2. 2. 2(7)で述べたデータ選定を行なったデータについて、時間分解能を整合させて得られた 10 分ごとのデータは 1034 個であった。

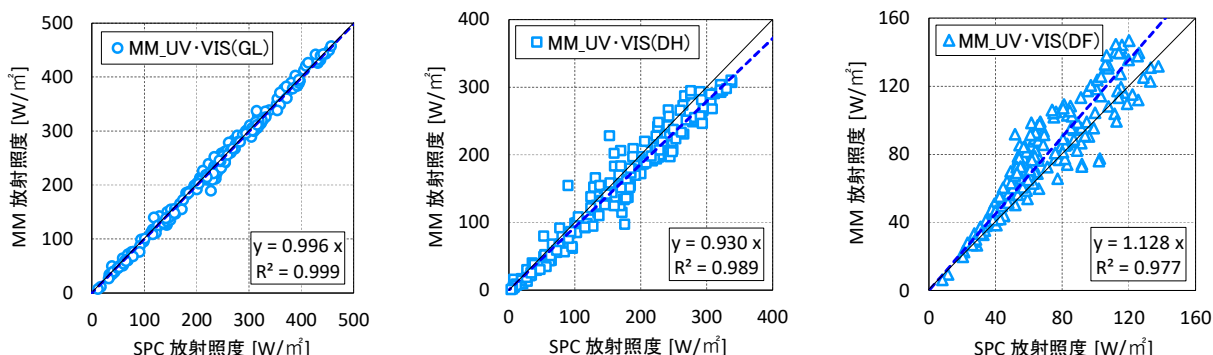


図 1 紫外域・可視域(UV・VIS)における SPC 放射照度と MM 放射照度の比較
左図：全日射(GL) 中央図：水平面直達日射(DH) 右図：散乱日射(DF)

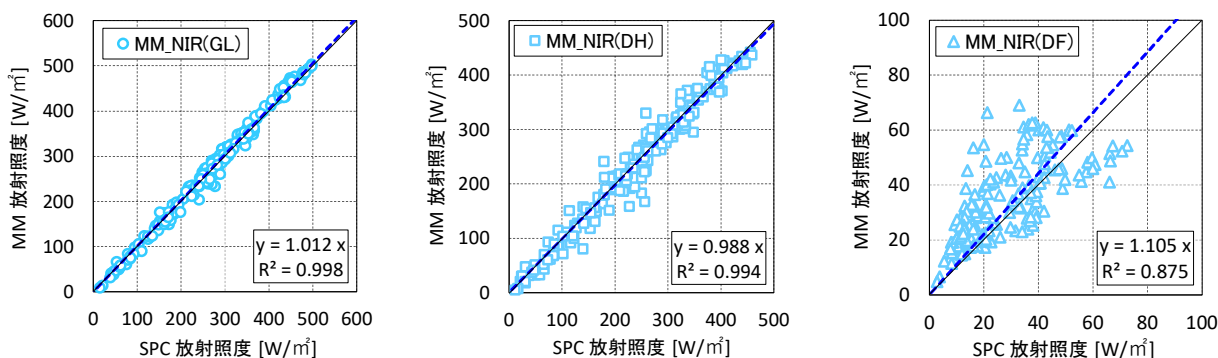


図 2 近赤外域(NIR)における SPC 放射照度と MM 放射照度の比較
左図：全日射(GL) 中央図：水平面直達日射(DH) 右図：散乱日射(DF)

3. 放射照度の比較結果

3.1 数値予報モデルの放射照度の比較

紫外域・可視域における SPC 放射照度と MM 放射照度の比較結果を、GL について図 1(左図)に、DH について図 1(中央図)に、DF について図 1(右図)に示す。同様に近赤外域における比較結果を図 2 に、紫外域・可視域における SPC 放射照度と GM 放射照度の比較結果を図 3 に、同様に近赤外域における比較結果を図 4 に示す。また、図 1～図 4 の原点を通る回帰直線の係数(以下、回帰係数という)を表 3 に取りまとめた。なお、表内の水色の値は、回帰係数が 1 より小さく、モデルの放射照度が SPC 放射照度より小さい(過小に計算)ことを示し、ピンク色の値は 1

より大きく、過大に計算されていることを示している。また、括弧内の数値は、SPC 放射照度を基準とした各放射照度との比の最小値及び最大値である。

GL は、MM 及び GM 放射照度共に、ばらつきが小さく、回帰係数も 1 に近く両者の値はほぼ一致していた。DH の回帰係数は、GM 放射照度の紫外・可視域を除いて 1 より小さく過小に計算される傾向にあった。逆に DF の回帰係数は、GM 放射照度の紫外・可視域を除いて 1 より大きく、過大に計算される傾向にあり、MM 及び GM 放射照度の近赤外域はばらつきが大きかった。

3.2 衛星プロダクトの放射照度の比較

SPC 放射照度の観測波長範囲(300nm～2500nm)に含まれる ST 放射照度のバンド No.1 から No.18 の波長帯について、SPC 放射照度を基準として回帰係数を求めた。その結果を表 4 に示す。また、表中の括弧内の数値は決定係数(相関係数の二乗)である。GL、DR 及び DF における各波長帯の回帰係数は一様ではなく、決定係数は DF の近赤外域において小さくなっており、ばらつきが大きいことを示している。

本調査では、衛星プロダクトで計算された 22 バンドの波長帯のうち、紫外域(No.1～3)では観測値(SPC 放射照度)

表 3 MM 及び GM 放射照度の比較結果

		全天日射 (GL)	水平面直達日射(DH)	散乱日射 (DF)
MM 放射照度	紫外域・可視域	0.996 (0.612 : 1.305)	0.930 (0.235 : 2.176)	1.128 (0.744 : 1.716)
	近赤外域	1.012 (0.612 : 1.252)	0.988 (0.404 : 1.551)	1.105 (0.622 : 3.302)
GM 放射照度	紫外域・可視域	0.983 (0.757 : 1.300)	1.010 (0.147 : 2.419)	0.893 (0.647 : 1.340)
	近赤外域	0.997 (0.722 : 1.220)	0.955 (0.305 : 1.380)	1.267 (0.705 : 3.241)

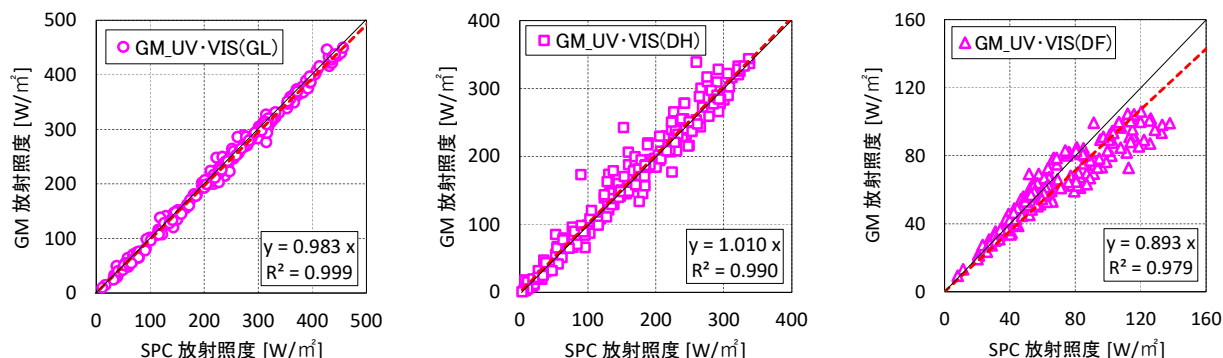


図 3 紫外域・可視域(UV・VIS)における SPC 放射照度と GM 放射照度の比較

左図：全天日射(GL)

中央図：水平面直達日射(DH)

右図：散乱日射(DF)

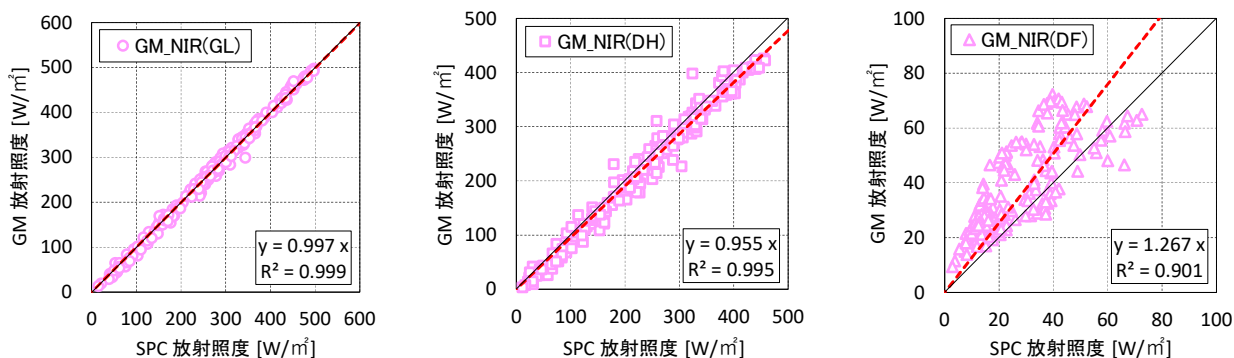


図 4 近赤外域(NIR)における SPC 放射照度と GM 放射照度の比較

左図：全天日射(GL)

中央図：水平面直達日射(DH)

右図：散乱日射(DF)

表 4 衛星プロダクトの放射照度の回帰係数及び決定係数

	全天日射(GL)	直達日射(DR)	散乱日射(DF)		全天日射(GL)	直達日射(DR)	散乱日射(DF)
No.1	0.837 (0.993)	0.202 (0.834)	1.155 (0.984)	No.10	0.955 (0.998)	0.631 (0.957)	1.879 (0.827)
No.2	1.157 (0.995)	0.343 (0.849)	1.651 (0.989)	No.11	0.974 (0.998)	0.711 (0.967)	1.736 (0.798)
No.3	1.001 (0.995)	0.319 (0.856)	1.582 (0.982)	No.12	0.989 (0.998)	0.774 (0.976)	1.664 (0.750)
No.4	0.942 (0.995)	0.340 (0.872)	1.638 (0.969)	No.13	1.026 (0.998)	0.887 (0.982)	1.311 (0.725)
No.5	0.898 (0.996)	0.357 (0.888)	1.698 (0.950)	No.14	1.024 (0.999)	0.922 (0.983)	1.163 (0.712)
No.6	0.929 (0.996)	0.416 (0.905)	1.862 (0.927)	No.15	1.053 (0.989)	1.008 (0.984)	0.963 (0.605)
No.7	0.924 (0.996)	0.460 (0.921)	1.923 (0.902)	No.16	1.010 (0.999)	0.999 (0.988)	0.625 (0.669)
No.8	0.931 (0.997)	0.507 (0.934)	1.969 (0.878)	No.17	1.099 (0.997)	1.117 (0.991)	0.509 (0.606)
No.9	0.940 (0.997)	0.550 (0.944)	2.003 (0.852)	No.18	0.950 (0.999)	0.991 (0.992)	0.257 (0.645)

【注】 No.1 は積算した波長範囲が異なり、また、312nm より短い SPC 放射照度については迷光の影響で過大に観測されているため、実際の回帰係数より小さく計算されており、No.2 の回帰係数と比較しても小さい傾向にある。

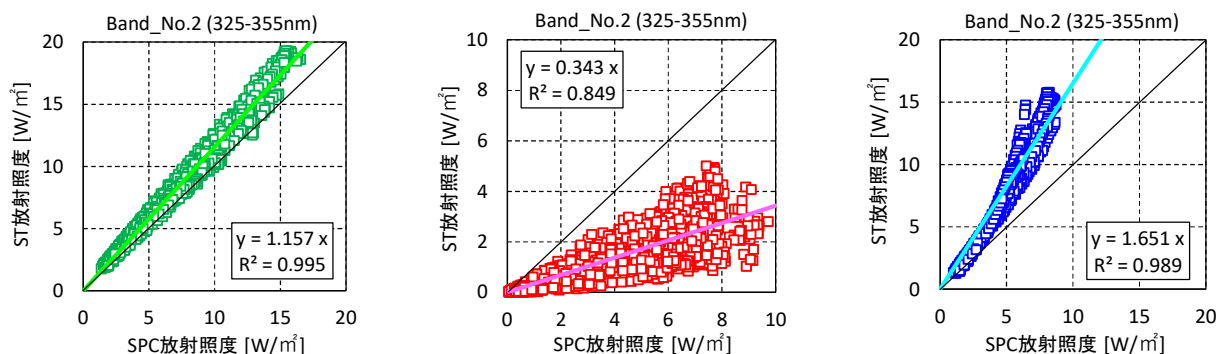


図 5 SPC 放射照度と ST 放射照度の比較：紫外域(Band_No.2：325-355nm)

左図：全天日射(GL) 中央図：直達日射(DR) 右図：散乱日射(DF)

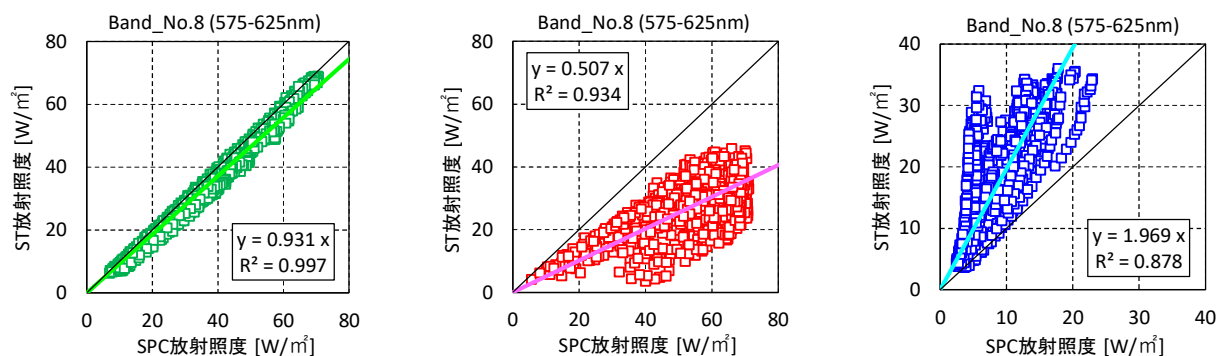


図 6 SPC 放射照度と ST 放射照度の比較：可視域(Band_No.8：575-625nm)

左図：全天日射(GL) 中央図：直達日射(DR) 右図：散乱日射(DF)

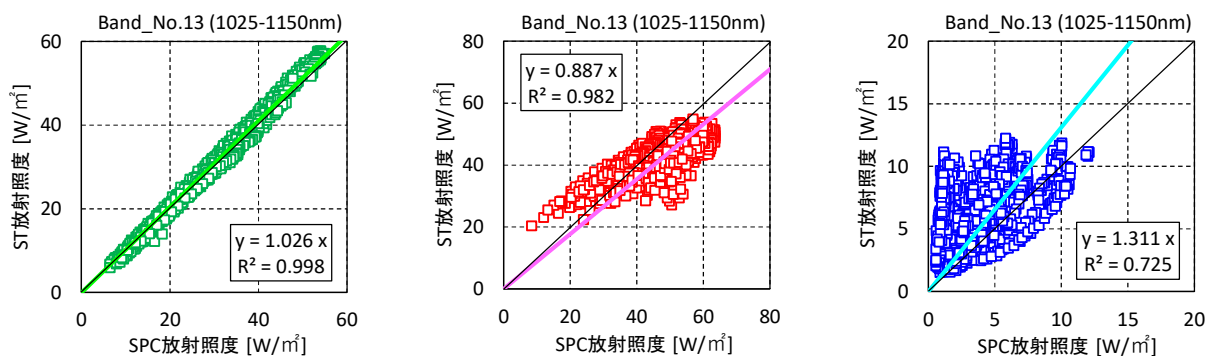


図 7 SPC 放射照度と ST 放射照度の比較：近赤外域(Band_No.13：1025-1150nm)

左図：全天日射(GL) 中央図：直達日射(DR) 右図：散乱日射(DF)

表 5 衛星プロダクトの放射照度の比較結果

	全天日射 (GL)	直達日射 (DR)	散乱日射 (DF)
紫外域: No.2 (325-355nm)	1.157 (0.971 : 1.372)	0.343 (0.011 : 0.729)	1.651 (0.971 : 2.298)
可視域: No.8 (575-625nm)	0.931 (0.650 : 1.022)	0.507 (0.090 : 0.806)	1.969 (0.746 : 6.110)
近赤外域: No.13 (1025-1150nm)	1.026 (0.738 : 1.120)	0.887 (0.536 : 1.921)	1.311 (0.554 : 10.904)

に迷光の影響がなく、短い波長を含む No.2(325~355nm)を選択、可視域(No.4~10)では可視域の中心波長を含む No.8(575~625nm)を選択、近赤外域(No.11~22)では、水蒸気の吸収帯の波長範囲が広く、回帰係数が前後の波長帯と比べて大きく変化している No.13(1025~1150nm)を選択した。この3つの波長帯を詳細に検証することにより、放射計算の波長帯による違いを確認することとした。

紫外域(No.2)の GL を図 5(左図)に、DR を図 5(中央図)に、DF を図 5(右図)に示す。同様に可視域(No.8)を図 6 に、近赤外域(No.13)を図 7 に示す。また、表 3 と同様に図 5~図 7 の回帰係数を表 5 に示す。なお、括弧内の数値は、SPC 放射照度を基準とした ST 放射照度との比の最小値及び最大値である。

GL は、紫外域及び近赤外域では過大に、可視域では過小に計算される傾向にあるが、ばらつきは小さく、回帰係数は 0.9~1.2 の範囲に収まっていた。DR は、3つの波長帯ともに過小に計算される傾向にあり、紫外域及び可視域では、すべてのデータにおいて過小に計算されていた。DF は、3つの波長帯ともに過大に計算される傾向にあり、紫外域及び可視域では、ほとんどのデータが過大に計算されていた。また、長い波長ほどばらつきが大きい傾向にあった。

4. 放射計算に使用した AOD の確認及び考察

3. において、2種類の数値予報モデルの GL は SPC 放射照度とほぼ一致していた。また、衛星プロダクトの GL についても全波長を積算した場合、図 8 に示すように SPC 放射照度とほぼ一致していた。しかし、DR、DF 及び DF は、GL とは異なる傾向で過大または過小に計算されており、DF についてはばらつきが大きい傾向にあった。

数値予報モデル及び衛星プロダクトでは、大気中の気体分子やエアロゾルによる放射の射出・吸収・散乱が計算されており(関口ほか: 2019)、これらの要素の値によって計算結果が変わることとなる。大気中の気体分子(水蒸気を除く)やエアロゾルは気候値を使用しているが、エアロゾルについては大気中の気体分子に比べ、実際の空間分

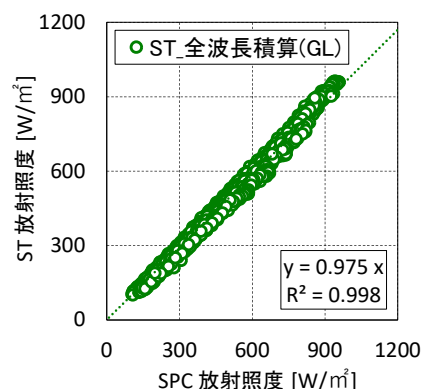


図 8 全天日射(GL)における SPC 放射照度と ST 放射照度との比較：全波長積算

布や大気中に存在する量や組成の変動が大きい。このことからエアロゾルに着目することとした。

エアロゾルの放射計算への効果については、直達日射ではエアロゾルによって散乱または吸収されて減衰し、散乱日射ではエアロゾルの散乱効果によって増加する。この減衰及び増加については、短い波長ほど影響を受け

る。GL に比べて、DR、DH 及び DF が SPC 放射照度と一致しない原因を調べるため、放射計算に使用された AOD を確認するとともに、考察として AOD の放射計算への効果についても調査を行った。

4. 1 放射計算に使用された AOD の確認

数値予報モデル及び衛星プロダクトで使用された MM 及び GM-AOD と ST-AOD の値を確認するため、サンフォトメータによる観測値(以下、OBS-AOD という)との比較を行った。

数値予報モデルの放射計算に使用される MM 及び GM-AOD の波長(550nm)とサンフォトメータの観測波長(500nm)は異なっている。このため、数値予報モデルの放射計算に使用された MM 及び GM-AOD との比較の際は、OBS-AOD についてオングストローム指数を用いて 550nm における値を算出し、これを用いた。なお、オングストローム指数の詳細については居島ほか(2014)を参照いただきたい。

(1) 数値予報モデルの放射計算に使用された MM 及び GM-AOD と観測値の比較

OBS-AOD を基準として、放射計算に使用された MM 及び GM-AOD との比較結果を図 9 に示す。ほとんどのデータにおいて放射計算に使用された AOD は観測値より過大な値であった。

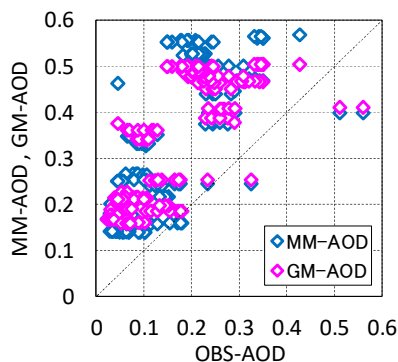


図 9 MM 及び GM-AOD とサンフォトメータで観測した OBS-AOD の比較

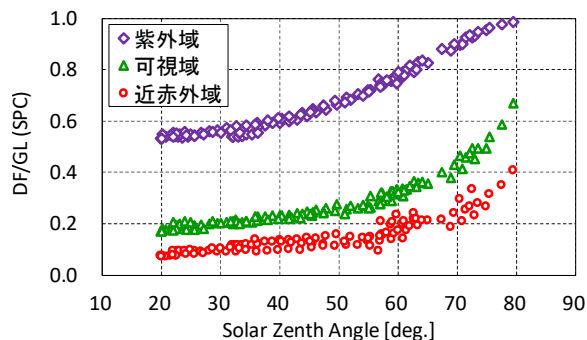


図 11 SPC 放射照度の散乱比と太陽天頂角の関係 (OBS-AOD : 0.25~0.29)

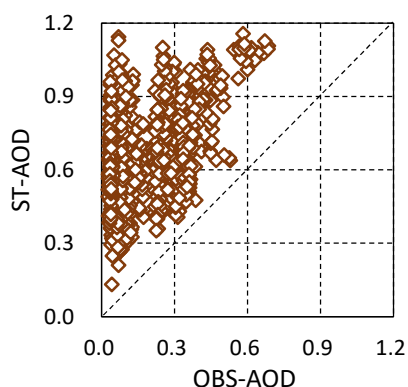


図 10 ST-AOD とサンフォトメータで観測した OBS-AOD の比較

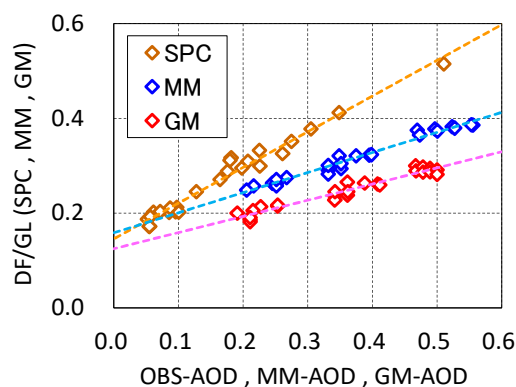


図 12 紫外域・可視域の散乱比(DF/GL)と AOD の関係 (太陽天頂角 : 40° ~50°)

(2) 衛星データを用いた放射計算に使用された ST-AOD と観測値の比較

OBS-AOD(500nm)を基準として、日射量推定値算出に使用された ST-AOD(500nm)との比較結果を図 10 に示す。ST-AOD は、OBS-AOD に比べてすべてのデータについて観測値より過大であった。

4. 2 考察

MM 放射照度, GM 放射照度及び ST 放射照度について、エアロゾルの放射計算への効果を確認するため、全天日射(GL)に占める散乱日射(DF)の割合(DF/GL : 以下、散乱比という)と AOD の関係を調査した。なお、SPC 放射照度の AOD は OBS-AOD であり、MM, GM 及び ST 放射照度については放射計算に使用された AOD(MM-AOD, GM-AOD, ST-AOD)である。

ここで、散乱比(DF/GL)が実際の値より小さい場合、分母(GL=DH+DF)の DH が過大に、または、DF が過小に計算されていることになる。DH のみが過大に計算された場合、GL も過大になるはずだが、3. の放射照度の比較において、GL については実際の値とおおよそ一致していた。

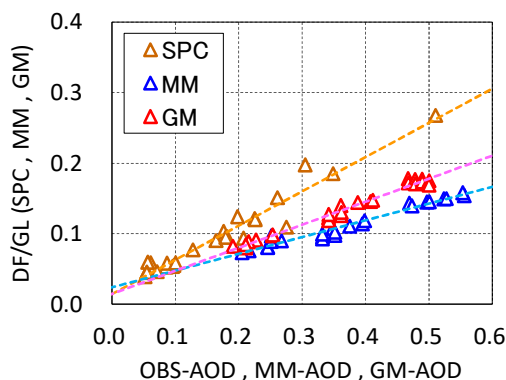


図 13 近赤外域の散乱比(DF/GL)と AOD の関係 (太陽天頂角 : 40° ~50°)

つまり、本調査において、散乱比が観測値に比べて小さい場合、DH は過大に、かつ、DF が過小に計算されていることを意味する。

調査にあたっては、太陽天頂角と散乱比の関係にも注意を払う必要がある。すなわち、1日を通して AOD の値が同じ場合、太陽天頂角が大きくなるほど散乱比は大きくなる。衛星プロダクトのデータを用いて、OBS-AOD のデータ数が多い 0.25~0.29(0.27±0.02)を同一の値とし、太

陽天頂角と SPC の散乱比との関係を図 11 に示す。なお、WMO(世界気象機関：World Meteorological Organization)では、AOD の観測精度を 0.02 としており(WMO：2016)、本調査ではこの基準内(±0.02)のデータを同一の値とした。

太陽天頂角 20° ~ 50° では散乱比は緩やかに増加し、50° 以上では次第に増加傾向が顕著であった。図 11 に示した結果を踏まえ、比較には太陽天頂角の変化に伴う散乱比の変化が小さく、かつ、データ数の多い太陽天頂角 40° ~ 50° のデータを使用した。なお、比較データの個数は、数値予報モデルの散乱比では 25 個、衛星プロダクトの散乱比では 147 個であった。

(1) 数値予報モデルの放射計算におけるエアロゾルの効果

AOD と、SPC、MM 及び GM の各放射照度における散乱比との関係について、紫外域・可視域と近赤外域に分けて比較した。比較結果を、紫外域・可視域については図 12 に、近赤外域については図 13 に示す。全般に MM 及び GM の散乱比は SPC の散乱比に比べて小さい傾向にあり、紫外域・可視域では GM の散乱比が、近赤外域では MM の散乱比がより小さい傾向にあることを確認した。

以上の結果から数値予報モデルにおけるエアロゾルの効果は、DH を過大に、DF を過小に計算する傾向にあることが分かった。散乱比が一致しない原因の一つとして、数値予報モデルで使用されている AOD の光学特性(消散係数、一次散乱アルベド、非対称因子)と、実際に観測された AOD の光学特性が異なっていることが考えられる。

また、3.1 の MM 及び GM 放射照度の比較結果では、放射計算に使用した AOD が実際の AOD より大きいため、本来であれば DH は過小に、DF は過大に計算されるはずだが、GM 放射照度の紫外域・可視域では DH は過大に、DF は過小に計算された(表 3)。この原因は、図 12 に示したとおり、GM 放射照度の散乱比が実際の SPC 放射照度

に比べて小さいため、DH は過大に、DF は過小に計算される傾向にあることから、放射計算に使用したエアロゾルの取り扱いに起因していると考えられる。

(2) 衛星データを用いた放射計算におけるエアロゾルの効果

4.2(1)と同様に、AOD と、SPC 及び ST の各放射照度の散乱比との関係について、紫外域、可視域及び近赤外域に分けて比較した。その結果について、紫外域を図 14(左図)に、可視域を図 14(中央図)に、近赤外域を図 14(右図)に示す。

紫外域における AOD と散乱比の関係では、AOD が一致するデータが少なかったが、SPC 放射照度に比べ、ST 放射照度の散乱比が大きい傾向にあった。

可視域では、観測値のデータが重なる付近(AOD:0.6)において、ST 放射照度と観測値の散乱比が一致しているように見えるものの、AOD が一致するデータが少なく、AOD 全般について一致していることを確認できなかった。

近赤外域では、SPC 放射照度に比べ、ST 放射照度の散乱比が小さい傾向にあった。

5. まとめ

本調査では、分光放射計で観測した波長別放射照度を用いて 2 種類の数値予報モデル(メソモデル、全球モデル)の放射照度及び衛星プロダクトの日射量推定値(放射照度)について、紫外域・可視域・近赤外域を区別し、検証を行った。また、放射計算において最大の誤差要因となりうるエアロゾルの光学的厚さについて、サンフォトメータによる観測結果と、数値予報モデル及び衛星プロダクトで使用された値を比較するとともに、エアロゾルの放射計算への効果についても調査した。

(1) 数値予報で計算された放射照度

(a) 検証結果

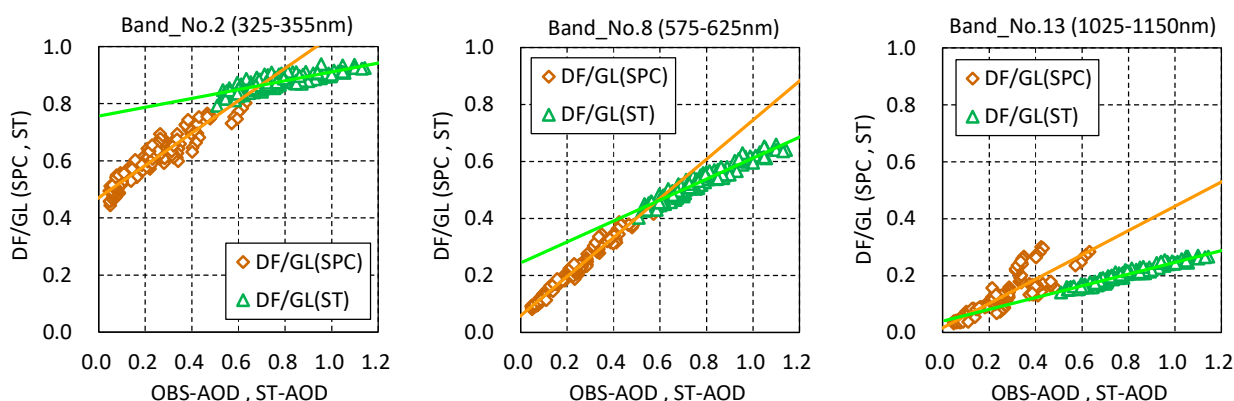


図 14 SPC 放射照度及び ST 放射照度における散乱比(DF/GL)と AOD の関係 (太陽天頂角：40° ~ 50°)

左図：紫外域(Band_No.2)

中央図：可視域(Band_No.8)

右図：近赤外域(Band_No.13)

メソモデル・全球モデル共に、全天日射についてはおおそ一致していた。

メソモデルの紫外域・可視域及び近赤外域、全球モデルの近赤外域では、水平面直達日射(DH)は過小に、散乱日射(DF)は過大に計算される傾向にあった。しかし、全球モデルの紫外域・可視域では過大または過小に計算される傾向が逆であった。

(b) エーロゾルの放射計算への効果

数値予報モデルで計算された放射照度について、全天日射(GL)に占める散乱日射(DF)の割合(散乱比: DF/GL)を算出し、AOD との関係性を調査した。その結果、AOD が同じ場合において、放射計算の散乱比は観測値に比べて小さいことが分かった。すなわち、数値予報モデルの放射計算におけるエーロゾルの効果は、水平面直達日射を過大に、散乱日射を過小に計算する傾向にあった。しかし、放射計算に使用された AOD は観測値より大きいいため、全球モデルの紫外域・可視域を除いて、水平面直達日射は過小に、散乱日射は過大に計算されていた。

(2) 衛星データプロダクトで計算された放射照度

(a) 検証結果

全天日射は、紫外域及び近赤外域では過大に、可視域では過小に計算される傾向にあった。

直達日射は紫外域、可視域及び近赤外域の3つの波長帯で過小に、散乱日射は逆にすべての波長帯で過大に計算される傾向であることが分かった。

(b) エーロゾルの放射計算への効果

紫外域、可視域及び近赤外域に分けて、散乱比と AOD の関係性について調査した。その結果、衛星プロダクトの散乱比は、紫外域では観測値より大きく、近赤外域では逆に小さい傾向にあった。可視域では AOD が同じデータにおいて一致しているものの、AOD が一致するデータが少ないため、AOD については適切な値を用いることが望まれる。

(3) 今後の課題

数値予報モデルの放射照度の検証では、紫外域・可視域と近赤外域の2種類の積算値について検証を行ったが、さらに細かなバンドごとの放射照度を観測値と比較することによって放射計算の詳細な検証が可能となる。また、今回の調査において、数値予報モデル及び衛星プロダクトの放射照度を検証することによって、エーロゾルの種類や光学特性が放射計算に大きく影響を及ぼしていることを確認し、放射計算に使用されるエーロゾルは実際と異なっていることを示唆した。今後放射計算におけるエーロゾルの取り扱いについて精緻化されるなど改良され

た場合には、観測した太陽光波長別放射照度を活用し、検証することが重要と考える。

本調査では、快晴時のデータについて検証を行ったが、全天カメラを用いて雲の状況を把握し、曇天時のデータを検証することにより、数値予報モデルにおける雲や水蒸気等の放射計算への影響についても幅広く活用することが可能になると期待できる。

謝 辞

本調査は、宇宙航空研究開発機構、国立環境研究所及び高層気象台における三者間共同研究契約「陸域生態系の生産量推定に関する共同研究」及び気象研究所の「分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究(地球環境保全試験研究費)」による成果の一部であり、太陽光波長別放射照度観測に使用した分光放射計は気象研究所から借用した。

本稿に使用したデータについて、メソモデルの放射照度は、産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光システムチーム 主任研究員 大竹秀明氏(気象研究所 客員研究員)、防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門 主任研究員 下瀬健一氏(元: 気象研究所 客員研究員)に計算していただき、全球モデルの放射照度は、気象庁 情報基盤部 数値予報課 数値予報開発センター 地球システムモデル技術開発室 関口亮平氏(現: 文部科学省)に提供していただいた。また、衛星プロダクトの放射照度については、気象衛星センター データ処理部 解析課 石田春磨氏(現: 気象研究所 気象観測研究部 第三研究室 主任研究官)に計算していただいた。高層気象台観測第二課の皆様には、高品質な観測データを取得するため、観測機器の日々の保守点検作業にご協力いただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Akitsu, T., Nasahara, K., Ijima, O., Hirose, Y., Ide, R., Takagi, K., Kume, A. (2022): The variability and seasonality in the ratio of photosynthetically active radiation to solar radiation: A simple empirical model of the ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **108**, 102724-102724.
- Eke, R., Betts, T.R., Gottschalg, R. (2017): Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, 429-434.
- 居島 修・鈴木 健司・辰己弘(2014): 気象庁におけるエアロゾルの光学的厚さのトレーサビリティについて。日

- 本エアロゾル学会, エアロゾル研究, Vol.29 No.3, 159-165.
- 居島修・高野松美(2019): 分光放射計の校正手法の開発. 高層気象台彙報, **76**, 29-44.
- 気象庁予報部(2019): 全球モデルの改良と展望. 数値予報課報告・別冊第 **65** 号, 気象庁予報部, pp164.
- 北川裕人(2000): 放射過程. 数値予報課報告・別冊第 **46** 号, 気象庁予報部, 16-31.
- 村井臣哉(2009): 放射. 数値予報課報告・別冊第 **55** 号, 気象庁予報部, 87-90.
- Ohtake, H., Gari da Silva Fonseca Jr., J., Takashima, T., Oozeki, T., Shimose, K., Yamada, Y. (2015): Regional and seasonal characteristics of global horizontal irradiance forecasts obtained from the Japan Meteorological Agency mesoscale model, *Solar Energy*, **116**, 83-99.
- 関口亮平・長澤亮二・中川雅之・藪将吉(2019): 放射. 数値予報課報告・別冊第 **65** 号, 気象庁予報部, 66-80.
- Uesawa, D. (2016): Aerosol Optical Depth product derived from Himawari-8 data for Asian dust monitoring, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, **61**, 59-63.
- 藪将吉・村井臣哉・北川裕人(2005): 晴天放射スキーム. 数値予報課報告・別冊第 **51** 号, 気象庁予報部, 53-64.
- WMO (2016): WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, 2nd edn., WMO-No.1177.