
解 説

エアロゾル観測における新たなデータ処理プログラム(SKYRAD.PACK MRI ver2.2)の導入

福原 幸将*・川田 大樹*・工藤 玲**・佐々木 駿*・佐々木 拓也*・米川 直志*・大竹 潤***

要 旨

気象庁では、スカイラジオメーターによるエアロゾルの観測を国内3地点で実施し、観測結果を気象庁HPで公表しているほか、WMO-GAW(WMO 全球大気監視計画)の世界エアロゾルデータセンター(WDCA)などへ提供しており、これらのデータは気候変動の監視・予測情報や気象衛星のデータ解析などの評価に活用されている。2018年度のスカイラジオメーター運用開始以来、観測データの処理には解析プログラム「SKYRAD.PACK ver5」を用いており、エアロゾルの種類推定に効果的な粒子径別体積濃度などにおいて、地点の特徴を捉えた観測成果が得られている。一方、放射収支計算において重要なエアロゾルパラメータである一次散乱アルベドの値については、気象研究所が2021年に行った研究などにより、解析手法に改善の余地が残されていることが明らかになった。これを受けて、環境・海洋気象課では、気象研究所が開発した新解析プログラム「SKYRAD.PACK MRI ver2.2」を用いて解析の改善に取り組み、従来知見と整合的な一次散乱アルベドの値を算出できるようになったことから、2026年度に同プログラムを観測データ処理に導入する予定である。本稿では、これまでの観測で得られたエアロゾル観測値の特徴と、新解析プログラムにより改善された点について報告する。

1. はじめに

大気エアロゾル粒子(以下、単に「エアロゾル」と記述する)とは、空気中に浮遊する粒子径 $0.001\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ 程度の微粒子を指す。エアロゾルは、太陽放射や赤外放射を散乱・吸収する効果のほか、雲の発生やその光学特性に影響を及ぼすため、特に放射過程を通して気候変動にとって重要な役割を果たしていることが知られている。しかし、エアロゾルが気候変動に及ぼす影響の定量的

な評価はまだ十分とは言えず、気候変動の駆動要因である放射強制力の見積に対して最も大きな不確実性をもたらしている(IPCC, 2021)。

気象庁のエアロゾル観測は、国内3地点(網走、石垣島、南鳥島。網走は2021年に札幌から移転。)において、株式会社プリード製のスカイラジオメーターPOM-02により実施しており(大竹ほか, 2020)、POM-02により得られたデータを解析プログラムで処理した結果を観測値として公表して

* 気象庁大気海洋部環境・海洋気象課 ** 気象研究所 *** 高層気象台
(令和8年5月26日発行)

いる。現在公表している観測要素は、Nakajima *et al.* (1996) によって開発された解析プログラム「SKYRAD.PACK」を Hashimoto *et al.* (2012) が改良したプログラム「SKYRAD.PACK ver5」を使用して算出されたものであり、大気中のある気柱内に存在するエアロゾルの総量を示すエアロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Depth, 以下 AOD), エアロゾル粒径の大小についての特性を示すオングストローム指数 (Ångström Exponent, 以下 AE), 粒径毎のエアロゾルの数を表す粒子径別体積濃度 (以下粒径分布), エアロゾルが放射を吸収しやすいか散乱しやすいかの指標を表す一次散乱アルベド (Single Scattering Albedo, 以下 SSA) の 4 種類である。

2018 年度の POM-02 運用開始から現在に至るまで、数値モデルなどにより示唆されていたエアロゾルの分布及び光学特性の知見を裏付ける結果が得られつつあるほか、地点毎に特徴的な季節変化が存在することなどが捉えられている。これらの観測結果の詳細については本稿内で後述する。

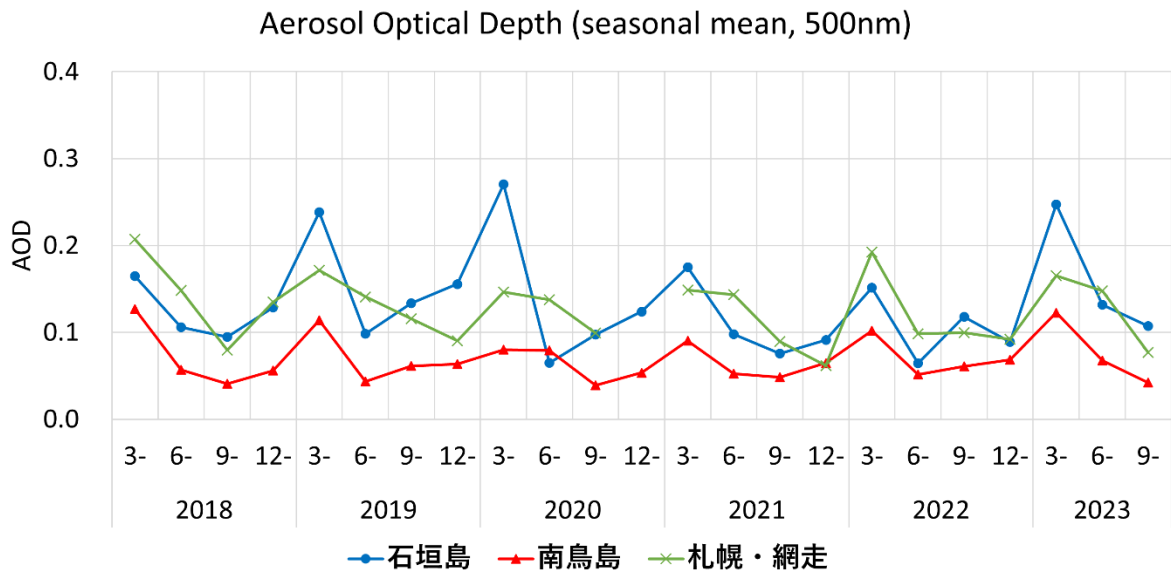
一方で、エアロゾルの一次散乱アルベドについては、現用の解析プログラムでは実際の値より過

大となる場合が多いことが指摘されており (Kudo *et al.*, 2021), 値の算出時に使用する地表面アルベド (地表面の反射率) のパラメータ条件が実際の地表面の状態を反映できていない場合 (特に積雪期) に過大 (または過小) となるなど、改善の余地が残されていることが明らかになってきた。

これを受け、環境・海洋気象課では気象研究所の協力を得て、エアロゾル解析手法の高度化のための技術開発を行い、新解析プログラム「SKYRAD.PACK MRI ver2.2」を用いることにより解析結果が改善できることを確認した。

本稿では、第 2 章においてこれまで得られた観測データの特徴について紹介し、第 3 章では現行の SSA 解析値が抱えている課題とそれを解決するための新解析プログラム導入について述べる。第 4 章では、新プログラムによる SSA 再計算結果の特徴を示し、第 5 章には観測機器の出力補正導入など、新解析プログラムの導入に合わせて算出手順に改修を加える点について述べる。

なお、新解析プログラムについては、2026 年度に導入する予定であり、順次、POM-02 による観測開始時点まで遡って再計算を行い、公開データを更新していく予定である。



第 1 図 SKYRAD.PACK ver5 による、波長 500nm におけるエアロゾル光学的厚さ (AOD) の季節平均値。横軸は平均期間の開始月。観測を開始した 2018 年の春は 4~5 月の 2 か月分。地点は石垣島 (青線●印), 南鳥島 (赤線▲印), 札幌・網走 (緑線×印)。

2. これまでの観測から得られた解析結果の特徴

第1~4図は、2018年4月から2023年11月までの解析結果（現行の解析プログラム SKYRAD.PACK ver5 を用いて計算し、気象庁 HP にて公表している AOD, AE, 粒径分布, SSA）を季節毎に3か月平均（春3~5月, 夏6~8月, 秋9~11月, 冬12~2月）した値を示す。

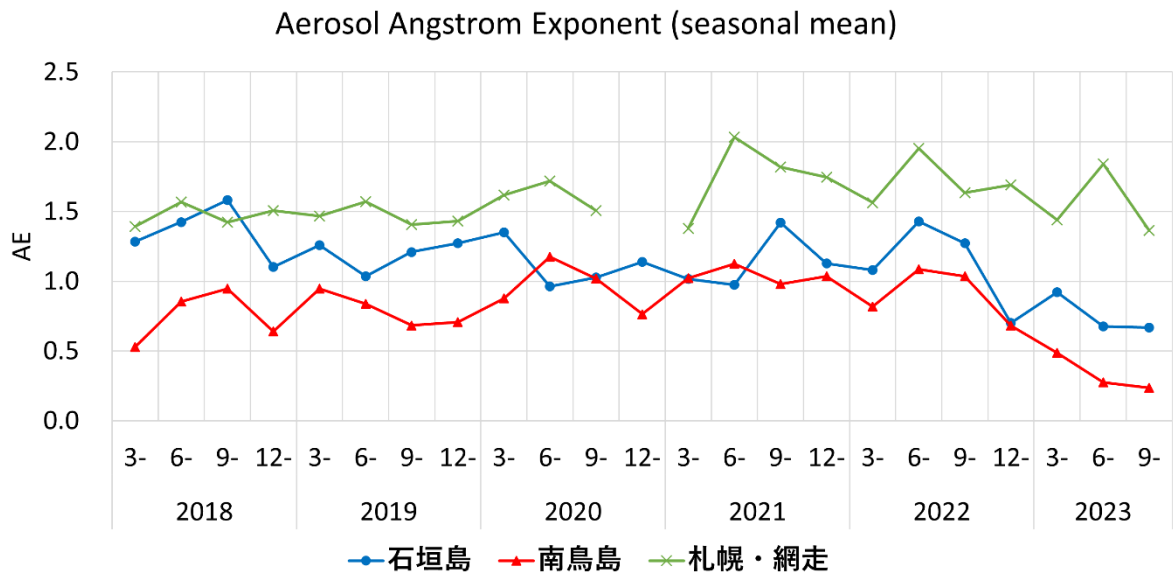
第1図は、AODの観測結果のうち、代表的な波長500nmにおける値を示す。AODはエアロゾルの総量を示しており、各地点で大陸からの移流の影響を受けやすい春に増加傾向があることや、大陸から離れた南鳥島では総じてエアロゾルが少なく、ほぼ同緯度でも大陸に近い石垣島では比較的エアロゾルが多いなど、地域差も捉えている。

第2図のAEは、エアロゾル粒径に反比例する値で大小の特性を示している（AEについての解説は末尾の付録に記す）。札幌・網走では総じてAEが1を超え、南鳥島では概ね1未満となっている。これは札幌・網走では小粒径寄り、南鳥島では大粒径寄りのエアロゾルが卓越しているこ

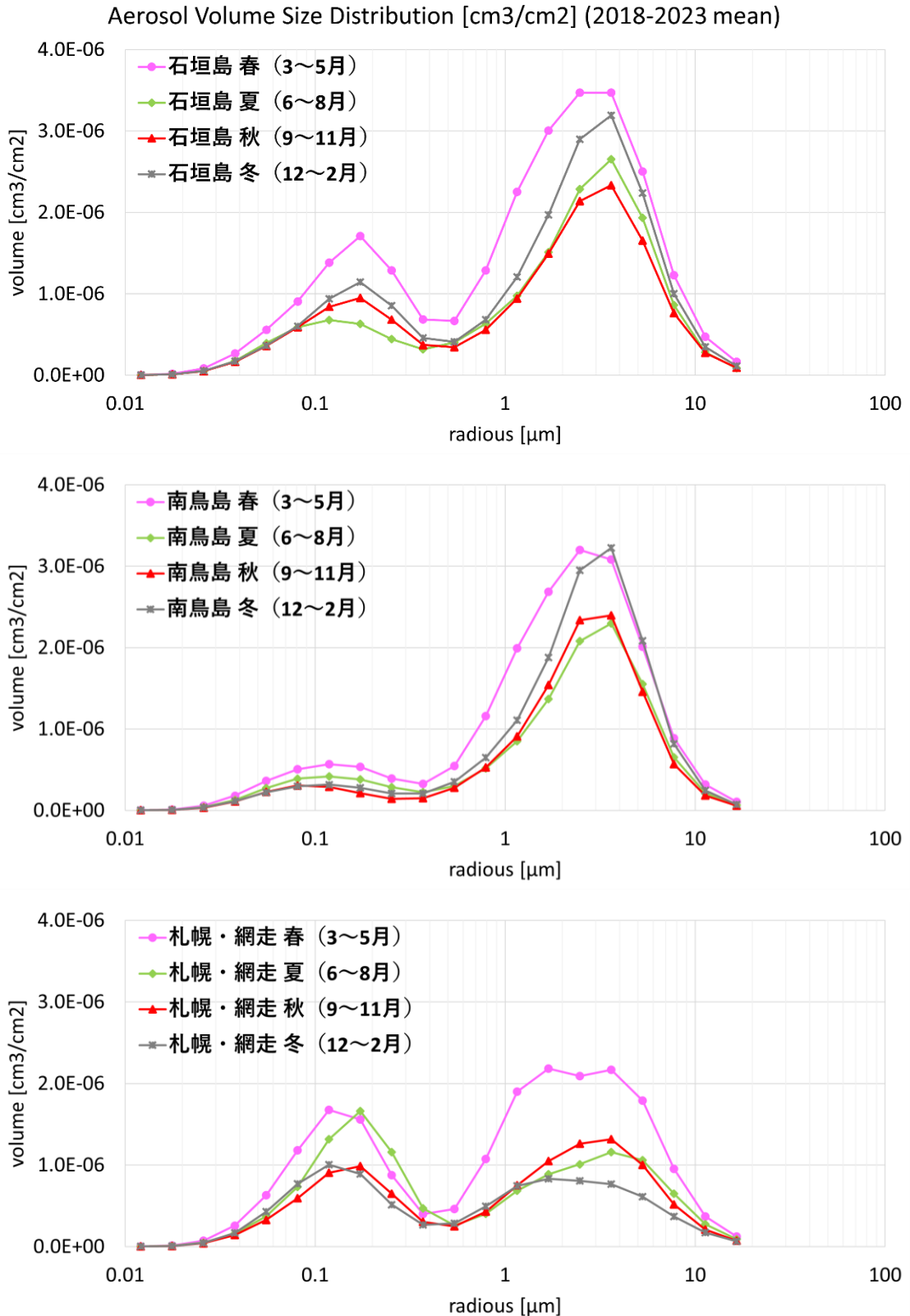
とを示しており、後述する粒径分布との相関がよく表れている結果である。

第3図は、粒径分布について、2018年4月から2023年11月の値を3か月の季節毎に平均した結果で、横軸に粒子径、縦軸に気柱当たりの体積濃度をプロットしている。全ての地点及び季節において大粒径側（数 μm 付近）と小粒径側（0.1 μm 付近）に二つの極大が描かれており、これは過去の研究（Aoki and Fujiyoshi, 2003 など）が示す、国内で観測されるエアロゾルの粒径分布の特徴に一致している。

一般に、大粒径側の極大は、大きな物体が力学的作用によって分裂または分散してできたものであり、風によって巻き上げられる海塩粒子や、黄砂などによってできる。小粒径側の極大は、燃焼によって生じ直接大気中に放出される粒子や、大気中で光化学反応により生成される硫酸塩や有機エアロゾルのような粒子によってできる。このため、人為起源の汚染や森林火災の煙の影響は小粒径側に現れる。



第2図 SKYRAD.PACK ver5 による、オングストローム指数 (AE) の季節平均値。横軸は平均期間の開始月。観測を開始した2018年の春は4~5月の2か月分。地点は石垣島（青線●印）、南鳥島（赤線▲印）、札幌・網走（緑線×印）。



第 3 図 SKYRAD.PACK ver5 による、気柱当たり粒子径別体積濃度の地点別季節平均値。期間は 2018 年 4 月から 2023 年 11 月。春 (桃色●印) を 3~5 月, 夏 (緑色◆印) を 6~8 月, 秋 (赤色▲印) を 9~11 月, 冬 (灰色×印) を 12~2 月として、各期間に入る値を累年平均している。横軸は粒子径, 縦軸は気柱当たり体積濃度。上図: 石垣島, 中図: 南鳥島, 下図: 札幌・網走。

南鳥島では主に海塩粒子の影響で大粒径側が卓越するのに対し、札幌・網走では南鳥島に比べて小粒径側の極大が大きく、人為起源由来の粒子の存在を示している。石垣島は、大粒径側の体積が南鳥島と同等であるが、小粒径側の体積が札幌・網走と同等であり、大陸から飛来する小粒子の影響を受けていることを示唆している。

また、いずれの地点においても、季節変化としては大陸からの影響を受けやすい春に各地点でエアロゾル量が多く、大小粒径とも他季節に比べ濃度が高いことが読み取れる。大小のエアロゾルが混在すると AE のみで黄砂などの飛来を捉えることは難しいが、粒子径別体積濃度では大粒径側の増加として捉えることができる。

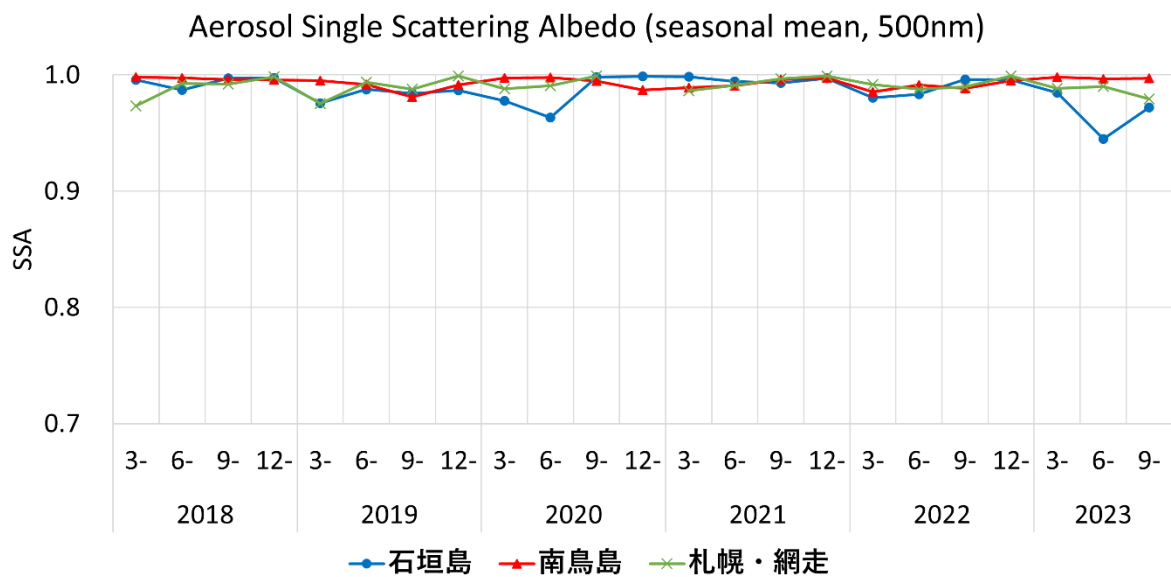
第 4 図は SSA の計算結果のうち、代表的な波長 500nm における値を示す。SSA はエアロゾルによる日射の減衰のうち散乱効果の占める割合を示した比で、値の範囲は 0 から 1 となり、1 に近いほど散乱が卓越して吸収の効果が少ないこと、0 に近いほど吸収が卓越して散乱が少ないことを意味する。一般に海塩粒子や硫酸塩粒子などほぼ透明なエアロゾルではほぼ 1 になる。

SSA は放射収支計算において重要なパラメータであり、日本付近では概ね 0.8~1 の値の間で変動し、特に冬季はアジア大陸から日本へ黒色炭素が流入しやすく SSA の減少が生じる (Kudo *et al.*, 2010) ことがわかっている。解析結果をみると概ね 0.8~1 の値の間で変動している一方、全地点の計算結果が上限の 1 に近づいているのは過大傾向とみられ、解析手法の改善が必要であることを示唆している。

3. 新解析プログラム導入による一次散乱アルベド解析値の改善

第 4 図に示した通り、現行のプログラム SKYRAD.PACK ver5 による解析では各地点で波長 500nm における SSA がほぼ 1 と計算されており、エアロゾルがほぼ透明な粒子で構成されているような特徴になっている。しかし実際には透明でない粒子も含まれていることから、解析値は過大気味になっていると考えられる。

Kudo *et al.* (2021) は、従来のプログラム (SKYRAD.PACK ver4.2 及び ver5) の SSA 過大評価を指摘し、気象研究所で開発した解析プログラム「SKYRAD.PACK MRI ver2」を用いて改善できるとした。



第 4 図 SKYRAD.PACK ver5 による、波長 500nm における一次散乱アルベド (SSA) の季節平均値。横軸は平均期間の開始月。観測を開始した 2018 年の春は 4~5 月の 2 か月分。地点は石垣島 (青線●印)、南鳥島 (赤線▲印)、札幌・網走 (緑線×印)。

Kudo *et al.* (2021) によると、従来プログラムの SSA 解析値は、波長 340, 380, 1020nm と比べ、波長 500, 675, 870nm で 0.05~0.1 程度大きくなる波長特性を示した。しかし、NASA 主導の観測ネットワーク AERONET により様々な地域で観測された SSA の典型例 (Dubovik *et al.*, 2002) では、波長 440~1020nm による変動幅は、多くの場合、約 0.05 以下である。このため、従来プログラムは波長 500nm 付近の SSA を過大に算出しているとみられる。また、SKYRAD.PACK ver4.2 の SSA 解析値については、AERONET に比べ 0.02 から 0.1 の範囲で過大評価していることが指摘されている (Che *et al.*, 2008; Estellés *et al.*, 2012; Khatri *et al.*, 2016)。

一方、SKYRAD.PACK MRI ver2 では、主に屈折率の波長依存性に対する拘束条件を最適化することで、SSA 解析値の大きな波長特性が抑えられた。Kudo *et al.* (2021) 内で同じ観測データを用いた比較において、波長 500nm における SSA は従来プログラムに比べ 0.05 以上小さい値となっている。

以上のことから、解析プログラムを変更することで、より適切な SSA 解析値を得られることが期待できる。これを受け、環境・海洋気象課では、現在気象庁として運用中の観測に新たなプログラムを導入し、解析の改善を目指すこととした。Kudo *et al.* (2021) による解析プログラム SKYRAD.PACK MRI ver2 を各観測地点で実際に適用するにあたり、SSA 関連の追加対応を行った点について第 3.1 章で紹介する。

3.1 解析に用いる地表面アルベドを地点別に改良

従来手法では、地表面アルベドは全地点・全解析期間を通して一定値を使用していたが、積雪期においては地表面アルベドが非常に大きくなるなど、実際の値は一定ではない。一方、地表面アルベドの違いは、散乱光観測からのエアロゾル特性の推定において誤差を与えることが知られている。Hashimoto *et al.* (2012) によると、実際の

地表面アルベドに対して過小 (過大) な値を使って解析すると、SSA が過大 (過小) になる。

解析プログラムの変更にあたり、より適切な地表面アルベド値を使用するため、札幌と網走では衛星観測 (MODIS) による観測波長別の地表面アルベドを導入することとした。石垣島と南鳥島については観測所が海に非常に近いこと、また MODIS には海面アルベドが含まれないことから、Séférian *et al.* (2018) による手法で地上風速などから計算される海面アルベドを使用する。

まず札幌について、観測点の周囲 10km 程度の地表面アルベドを導入する。観測される散乱光は太陽方向 (南側) の地表面アルベドの影響が大きいため、観測点を含む格子とその南東、南、南西の計 4 格子の平均値を使用することとした (第 5 図)。なお、MODIS による地表面アルベドの日別値には欠測が存在する可能性があるため、気候値として 2018 年から 2020 年の 3 年間の月別累年平均値を使用する。



第 5 図 札幌での地表面アルベド算出に使用した MODIS の格子。×印は観測点を示し、赤枠は MODIS の格子のうち算出に使用した格子の位置を示す。地表面アルベド算出にあたっては図中に示す 4 格子の値を平均した。(国土地理院「地理院タイル」全国ランドサットモザイク画像を加工して作成)

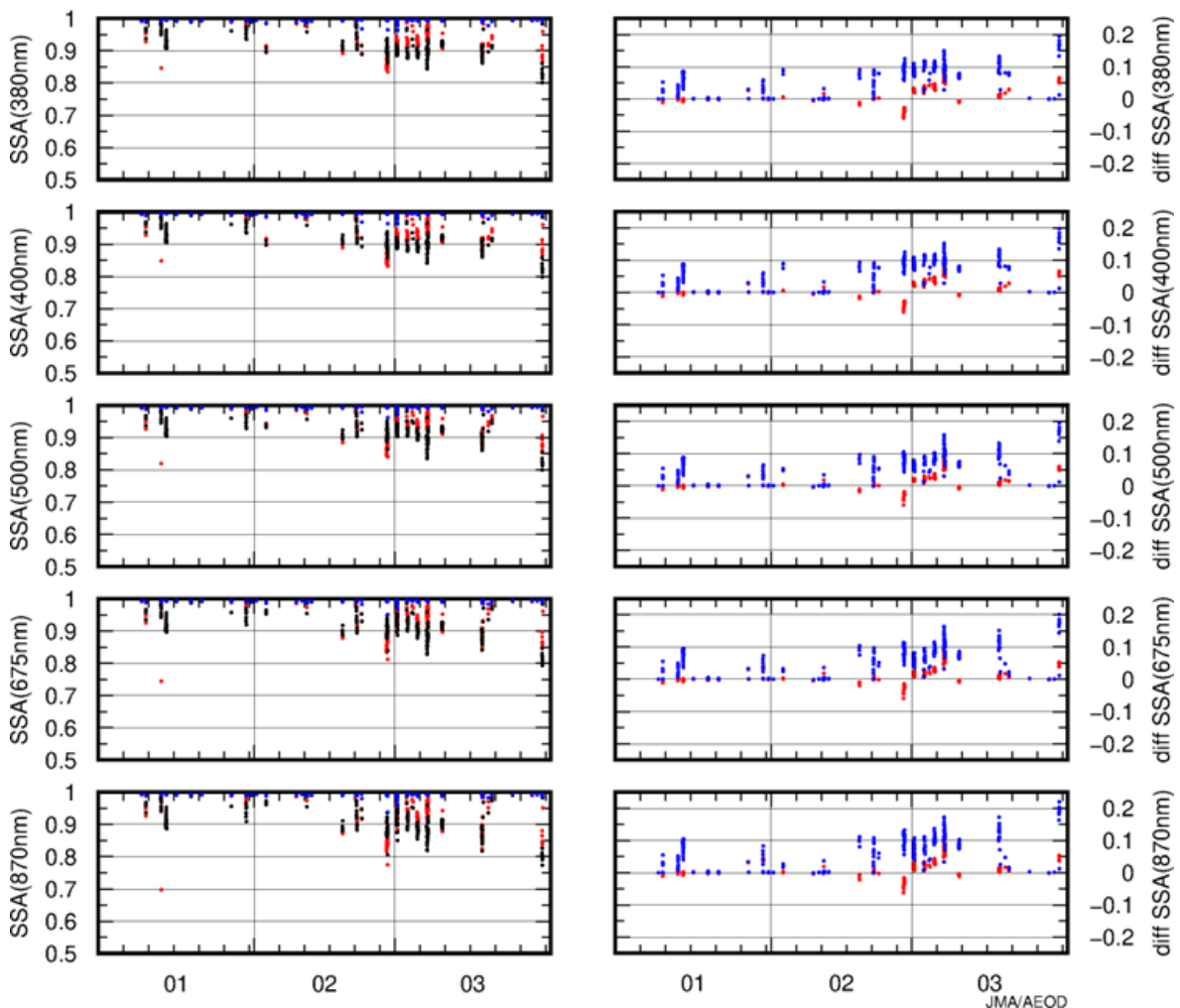
2019 年 1～3 月（積雪期）の札幌において、SKYRAD.PACK MRI ver2 での解析に際し、地表面アルベドを以下の 3 通りとした場合について計算を行った。なお、地表面アルベド以外は全く同じ条件で計算を行った。

- (a) 札幌の 2019 年日別値（実状に最も近い値）
- (b) 札幌の月別累年平均値（適用する気候値）
- (c) つくばの月別累年平均値（積雪反映の効果検証のため、積雪がない場合を模した比較用の値）

第 6 図と第 1 表に比較計算の結果を示す。

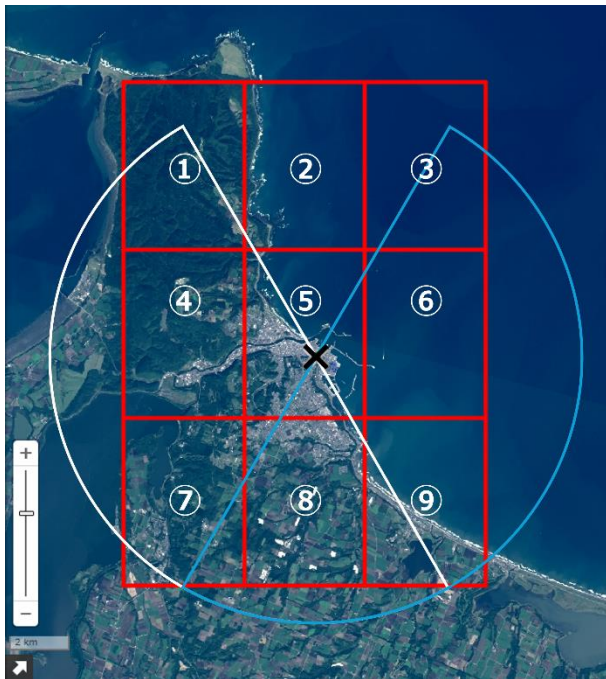
第 1 表 札幌の波長 500nm における一次散乱アルベド月平均値, 3 通りの地表面アルベドを用いた比較.

地表面アルベド	2019 年 1 月	2019 年 2 月	2019 年 3 月
(a) 札幌： 当日の日別値	0.976	0.960	0.934
(b) 札幌： 月別累年平均値	0.977	0.956	0.955
(c) つくば： 月別累年平均値	0.993	0.992	0.993



第 6 図 2019 年札幌における、地表面アルベドの違いによる一次散乱アルベド解析値の比較。左列の図は、地表面アルベドを札幌での日別値（a：黒）、札幌での月別累年平均値（b：赤）、積雪がない場合を模したつくばでの月別累年平均値（c：青）とした場合の、札幌での 2019 年 1～3 月の観測波長毎の一次散乱アルベド解析値。右列の図は、上記 3 通りの一次散乱アルベド解析値の差で、地表面アルベドを札幌での日別値とした場合の解析値（a）を基準に、赤は b-a、青は c-a を示す。いずれもマニュアルでの品質管理済データ（Level 2.0）。横軸は月。

積雪期の SSA 解析値は、積雪を考慮しない(c)では 1 に近い例が多かったのに対し、実際の積雪状況を反映した(a)ではそれよりも小さな値となった。札幌の場合、積雪時の地表面アルベドは、非積雪時と比べて 0.2~0.5 程度大きくなるため、より適切な値が得られたと考えられる。積雪を考慮した気候値として適用する(b)では、(c)よりも(a)に近い値となった。積雪を考慮した地表面アルベドの気候値を導入することで、導入前は過大に出ていた SSA 解析値が改善されることが分かった。



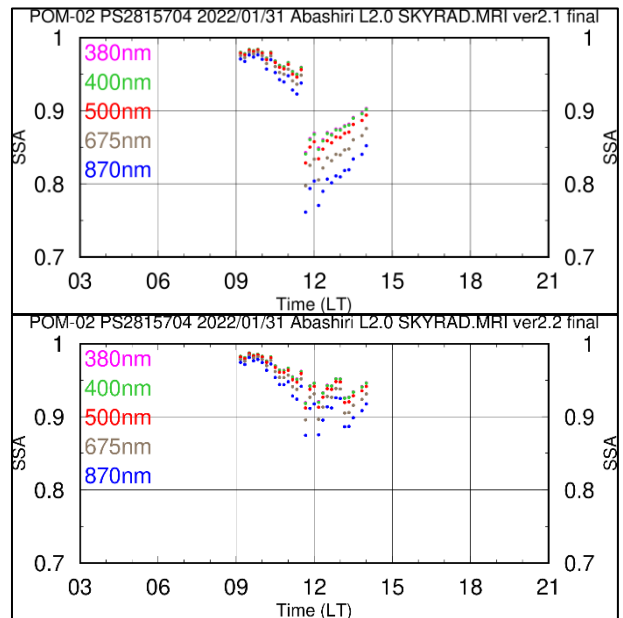
第 7 図 網走での地表面アルベド算出に使用した MODIS の格子

×印は観測点を示し、白と青の半円はそれぞれ南中前と南中後の散乱光観測の向きを示す。図中で赤枠に丸数字を付した MODIS の格子のうち、南中前は①④⑤⑦⑧⑨の 6 格子、南中後は③⑤⑥⑦⑧⑨の 6 格子の値を平均して地表面アルベドを算出する。

(国土地理院「地理院タイル」全国ランドサットモザイク画像を加工して作成)

網走についても札幌同様に南側 4 格子の地表面アルベドを用いて試行した。ところが、観測点の西側は陸、東側は海（冬は流氷の影響あり）と、東西で地表面アルベドが不均質なため、散乱光観測が太陽方位から西へ進行する南中前と、太陽方

位から東へ進行する南中後で、SSA の解析値に不連続が生じてしまった(第 8 図上)。具体的には、海側の観測を行う南中後の観測で実際より明るい陸の積雪域の地表面アルベドを与えた分、SSA が過小になっていた。そこで、解析プログラムに更なる改良を施し(この改良後のプログラムを「SKYRAD.PACK MRI ver2.2」と称する)、南中前は観測点を含む格子とその南東、南、南西、西、北西の計 6 格子、南中後は観測点を含む格子とその南東、南、南西、東、北東の計 6 格子の平均値を使用することとした(第 7 図)。また、海側の格子を含め地表面アルベドの季節変動が大きいいため、2018 年から 2022 年の 5 年間で日別の累年平均値を作成し、さらに前後 4 日(当日を含め計 9 日)の値で中間値フィルターを適用して気候値とした。観測点東西での地表面アルベド不均質に対応した結果、南中前後で生じていた SSA 解析値の不連続が改善した(第 8 図下)。積雪などの状況により改善の程度には大小があったが、冬期間 2 年分の観測データで対策有無の比較を行い、不均質に対応した新解析プログラム SKYRAD.PACK MRI ver2.2 の適用が望ましいとの結論を得た。



第 8 図 2022 年 1 月 31 日網走の、地表面アルベドの不均質対応前後の一次散乱アルベド (SSA) 比較。上図は東西の地表面アルベド不均質対応適用前、下図は適用後。南中(当日は 11 時半ごろ)前後の不連続が、下図では改善傾向にある。横軸は時間。

4. 新解析プログラムによる一次散乱アルベド解析結果

新解析プログラム SKYRAD.PACK MRI ver2.2 を用い、2018 年 4 月から 2023 年 11 月まで、従来手法と同じ観測データに対する再計算を行った。従来プログラムに比べ、観測データを逆解析計算に採用できる条件が広がったこともあり、新手法での採用データ数は概ね増加している。以降の章に示すグラフでは、新旧手法の比較のため、両手法で共に採用された観測時分を抽出している。

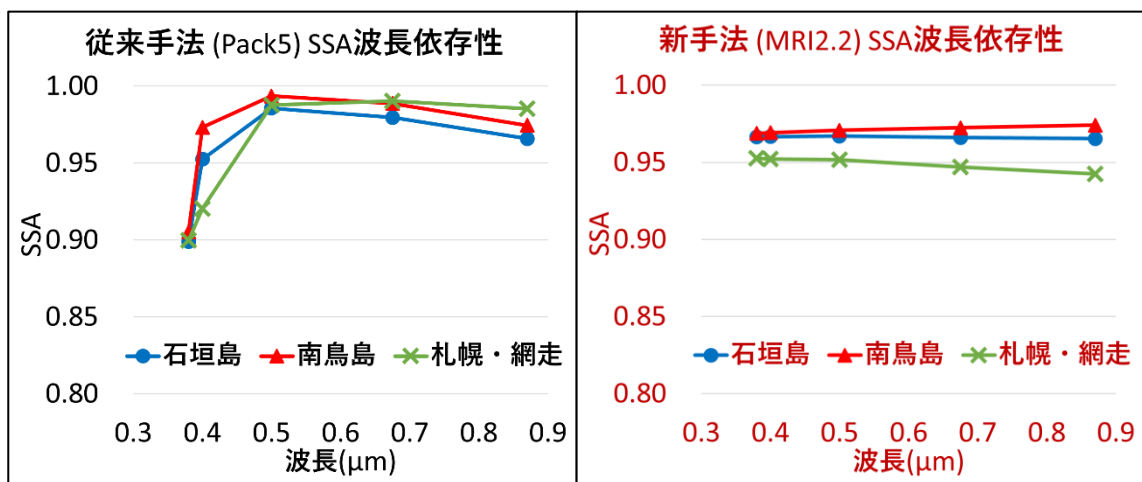
第 9 図は、SSA 解析値の波長依存性について新旧手法で比較している。第 9 図左の従来手法では、Kudo *et al.* (2021) の指摘の通り、波長 380nm における SSA 解析値と比べて波長 500, 675, 870nm における値が大きくなる傾向がみられており、Dubovik *et al.* (2002) が示す先験的な変動幅 0.05 以下に収まらず問題となっていた。一方、第 9 図右の新手法では、波長による変動が抑えられ、5 波長間で SSA 解析値に大きな差がみられない。屈折率の波長依存性に対する拘束条件を最適化した新プログラムによる、SSA 解析値の波長依存性改善が明瞭に確認できる。

第 10~12 図は、各地点の波長別 SSA 解析結果を第 2 章と同様に季節毎に 3 か月平均し、新旧手法で比較している。従来手法では各地点で 500nm

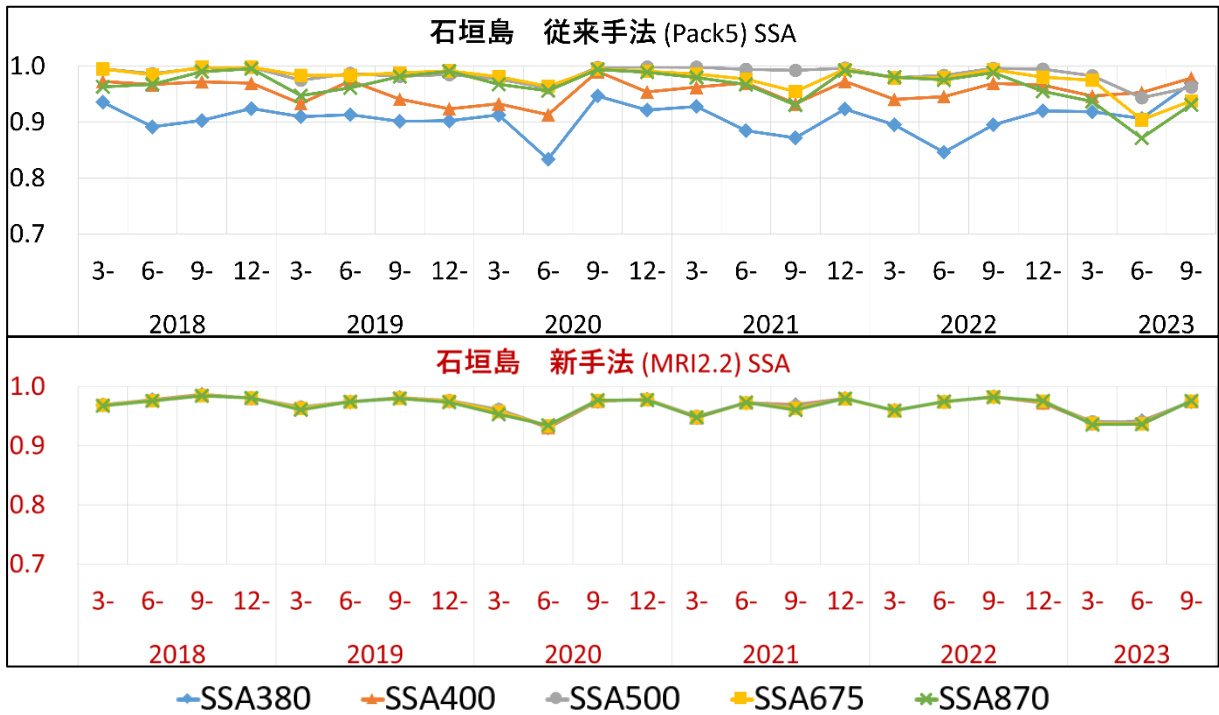
における SSA 解析値がほとんど上限の 1 になっていたが、新手法では地点に応じて 1 から離れた値を取るようになった。南鳥島については SSA が最も 1 に近いままであるが、海塩粒子が卓越しているため、エアロゾルが透明な粒子である場合の値として妥当である。札幌・網走では、特に冬季に SSA が 1 から離れ、低めの値を取るようになった。Kudo *et al.* (2010) によると、東アジアでは SSA が春夏に大きく、冬に小さくなる季節変動が観測されており、これと整合的な観測結果となる。石垣島は大陸の近傍だが海洋の影響も大きく、南鳥島と札幌・網走の間のような値を示している。

札幌・網走については、地表面アルベドをより適切な値に設定した成果が大きい。従来手法では冬季に過大な SSA 解析値になっており、特に短波長側の 380, 400nm については、他波長より小さくなるというプログラム特性を打ち消して冬季のみ値が上限の 1 に揃っていた。一方の新手法では、地表面アルベド冬季に全波長で SSA が下がるという先験的知見と整合的な変動となり、解析値は改善したと考えられる。

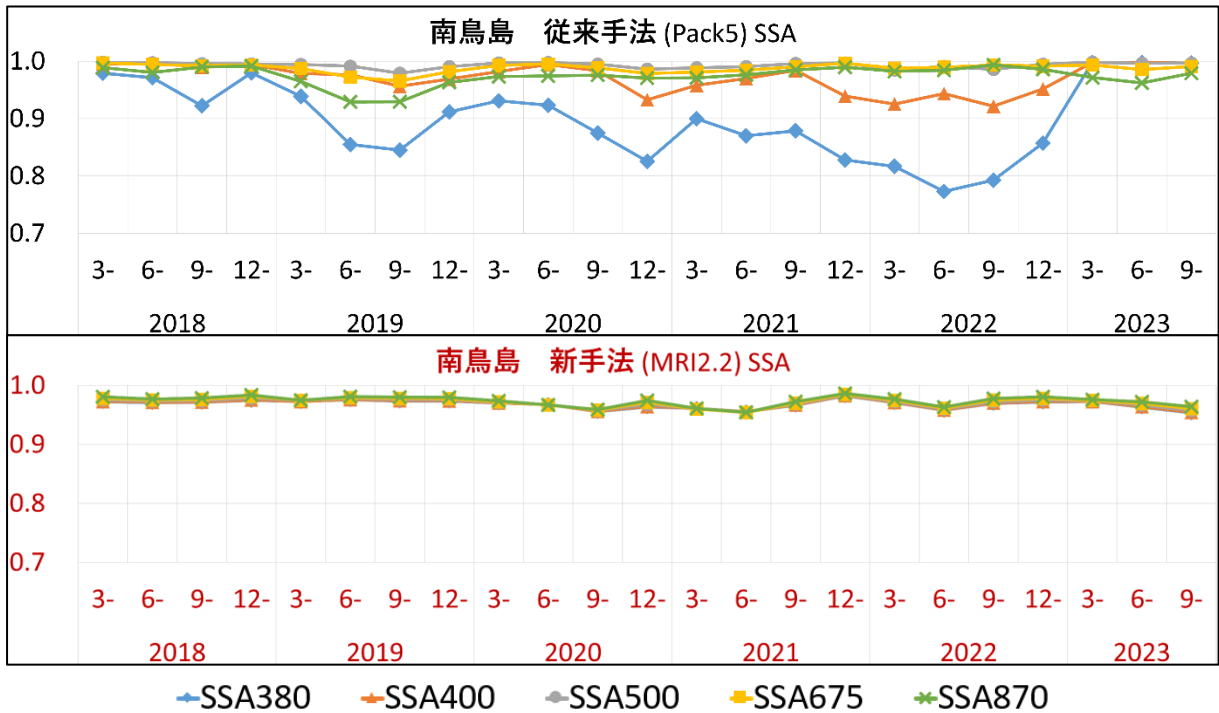
気象庁の観測運用地点のデータを用いた比較において、解析プログラム変更を経た手法更新により、SSA 解析値の波長依存性が改善し、各地点の特徴に見合った大きさの値及び季節変動がみられるようになった。



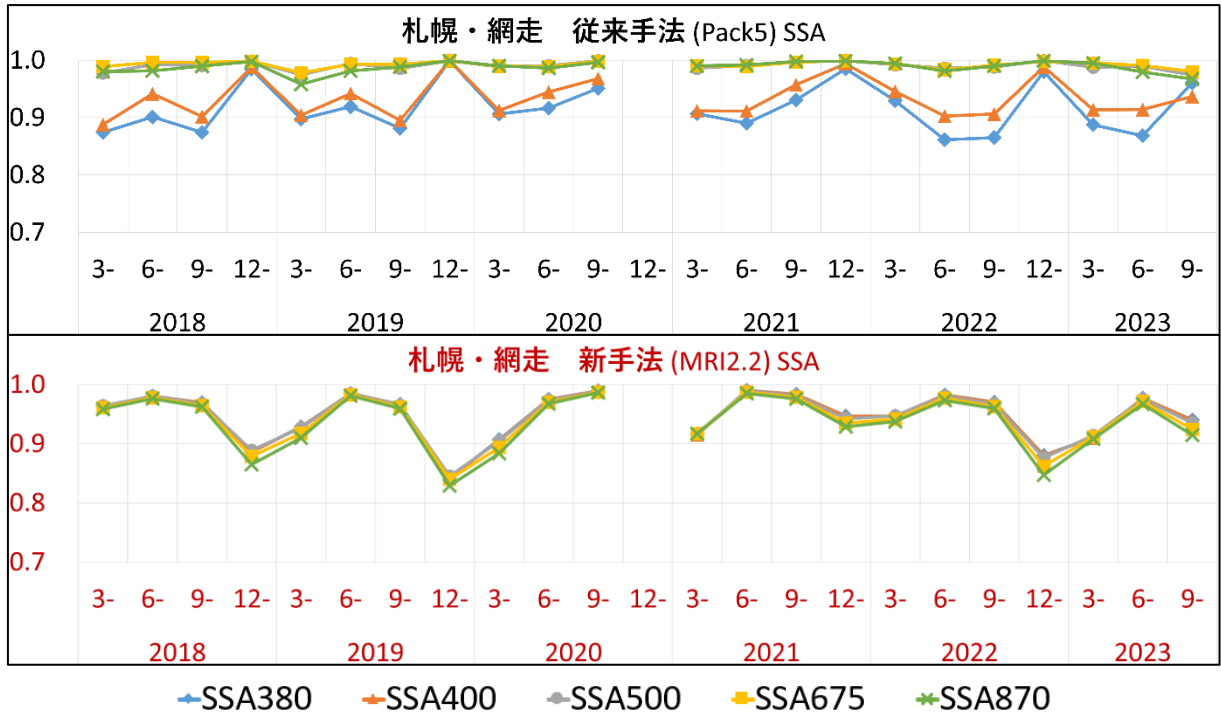
第 9 図 各地点の波長別一次散乱アルベド (SSA) 解析結果について、波長を横軸にとり波長依存性を比較した図。SSA 値は 2018 年 4 月から 2023 年 11 月に従来手法 (SKYRAD.PACK ver5) と新手法 (SKYRAD.PACK MRI ver2.2) の両方で解析された観測時分の値全ての平均。左図は従来手法、右図は新手法。地点は石垣島 (青線●印)、南鳥島 (赤線▲印)、札幌・網走 (緑線×印)。



第 10 図 石垣島の一次散乱アルベド (SSA) 解析結果のうち、従来手法 (SKYRAD.PACK ver5) と新手法 (SKYRAD.PACK MRI ver2.2) の両方で解析された観測時分の値について季節平均したグラフ。上図は従来手法、下図は新手法。横軸は平均期間の開始月。2018 年の春は 4~5 月の 2 か月分。波長は 380nm (青線◆印), 400nm (橙線▲印), 500nm (灰線●印), 675nm (黄線■印), 870nm (緑線×印)。短波長側から順に 5 波長を描画しており、波長による差が少ない新手法では重なって表示されている。



第 11 図 南鳥島の波長別 SSA について、第 10 図と同じグラフ。上図は従来手法、下図は新手法。



第 12 図 札幌・網走の波長別 SSA について、第 10 図と同じグラフ。上図は従来手法、下図は新手法。

5. 新解析プログラム導入に伴う他の変更点及び影響

新解析プログラム SKYRAD.PACK MRI ver2.2 の導入に合わせて解析手法に改修を加える点があるため、本章にて補足する。第 13 図に解析処理の流れの概要と、変更を行う箇所を記す。

なお、解析にあたって測器毎に必要な測器定数については、従来に引き続き高層気象台（茨城県つくば市）にて気象庁基準器との比較観測を行って定める。更に、日々の測器状態の監視のため、改良ラングレー法（Tanaka *et al.*, 1986; Nakajima *et al.*, 1996）を併用する。これにより、波長選択フィルター特性の経年変化など、測器状態を毎月の頻度で測器定数に反映できる。

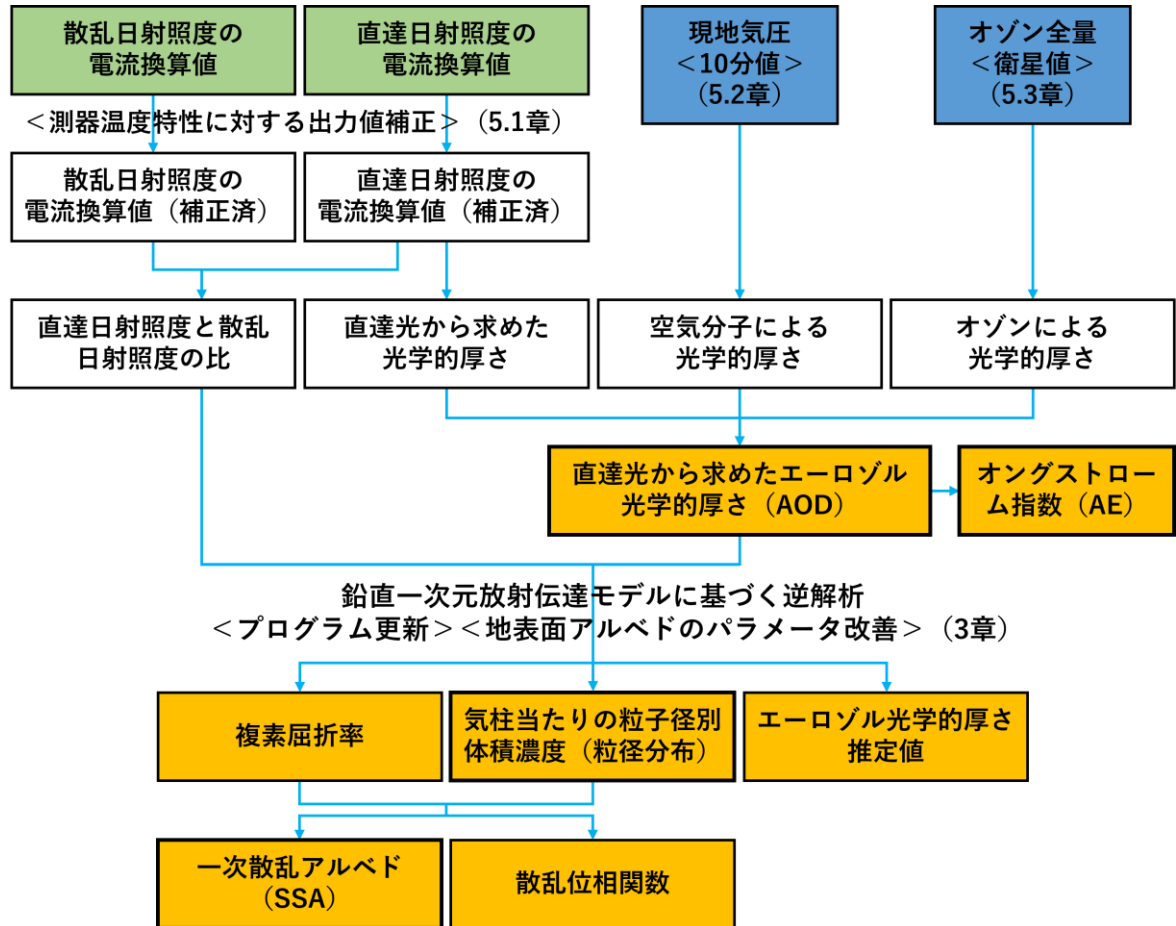
5.1 測器温度特性に対する出力値の補正

Uchiyama *et al.* (2018) は、気象研究所の保有するスカイラジオメーター POM-02 について、出力値に温度依存性があることを指摘した。このように、スカイラジオメーターのような波長選択フィルターを用いた放射計は波長選択フィルターの

透過率に温度依存性があることが知られており、以前使用していた PFR (Precision Filter Radiometer) でも測器温度 - 出力特性の調査を行い測器温度に基づく品質管理が行われていた。そこで個々のスカイラジオメーターにおける測器温度 - 出力特性試験を実施し、検査結果に基づき解析値への出力補正を導入する。

5.2 地上気象観測値を日別値から 10 分値に変更

従来手法では、現地気圧について日別値のみを解析に使用していた。しかし、よりよい解析値を得るためには気圧値に 3hPa 程度の正確さが求められることが指摘されており（Kazadzis *et al.*, 2018）、WMO/GAW では 1 時間以内の時間分解能での観測が必要とされている（WMO, 2016）。このため、より細かい時間分解能であり、かつスカイラジオメーターの散乱光観測と同じ観測時間間隔である 10 分値を使用することとした。また、SKYRAD.PACK MRI ver2.2 での解析には現地気圧に加えて風速及び気温が必要であることから、これらの要素も 10 分値を使用することとした。



第 13 図 スカイラジオメーターのデータ解析の流れ。緑色のセルはスカイラジオメーターの観測によって得られるデータ，青色のセルは外部入力データ，橙色のセルは解析によって求まるエアロゾルの質や量に関する観測値，白色のセルは途中段階で算出される物理量を示す。今回の新解析手法導入に伴い変更が加わり，本稿で解説を付した要素を<>で示している。

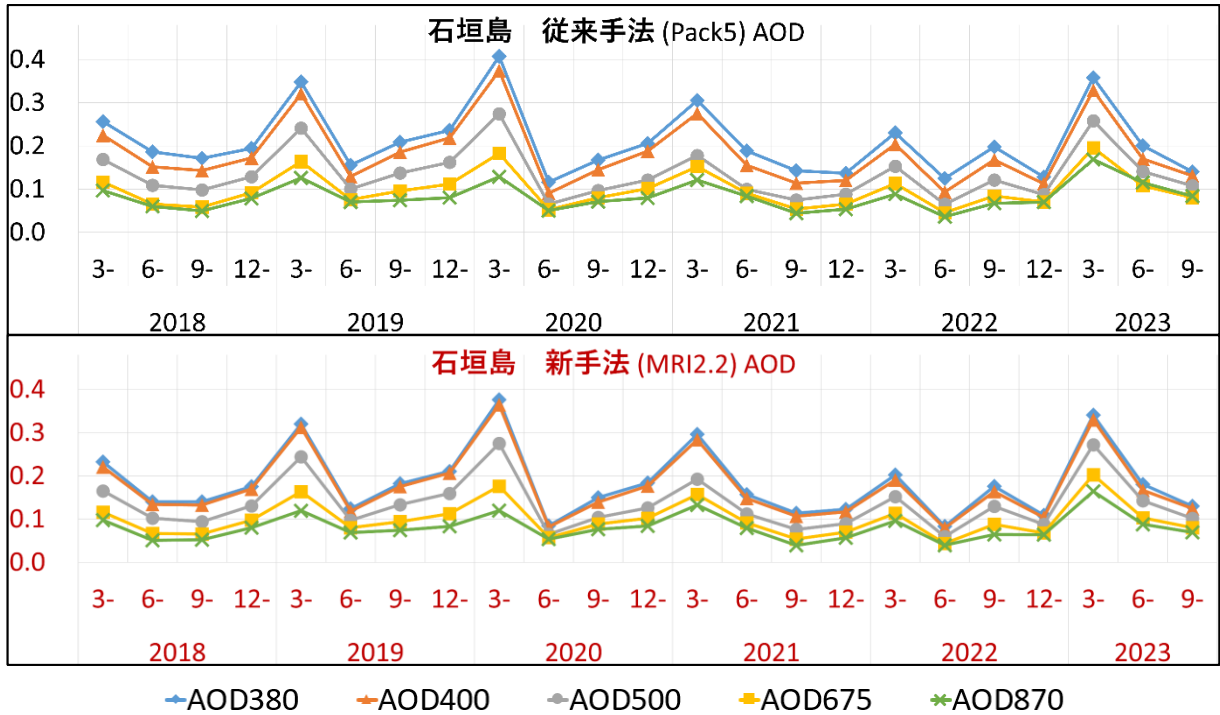
5.3 オゾン全量値を地上観測値から衛星観測値に変更

従来は、札幌と那覇で観測されたオゾン全量値（札幌と網走では札幌の値，石垣島と南鳥島では那覇の値）を解析に使用していたが，2022年1月をもって両地点のオゾン全量観測が終了したことから，以降は衛星観測値を使用する。なお，この変更は2022年以降のSKYRAD.PACK ver5運用でも先行して適用済である。使用する衛星データはNASAによって解析されたOMPS（Ozone Mapping and Profiling Suite）の日別オゾン全量値であり，現在オゾン層解析係により南極オゾンホール解析などに使用しているものと同じデータである。このデータは，気象研究所のNaoe *et al.* (2020)により，地上でのオゾン全量観測と比べ

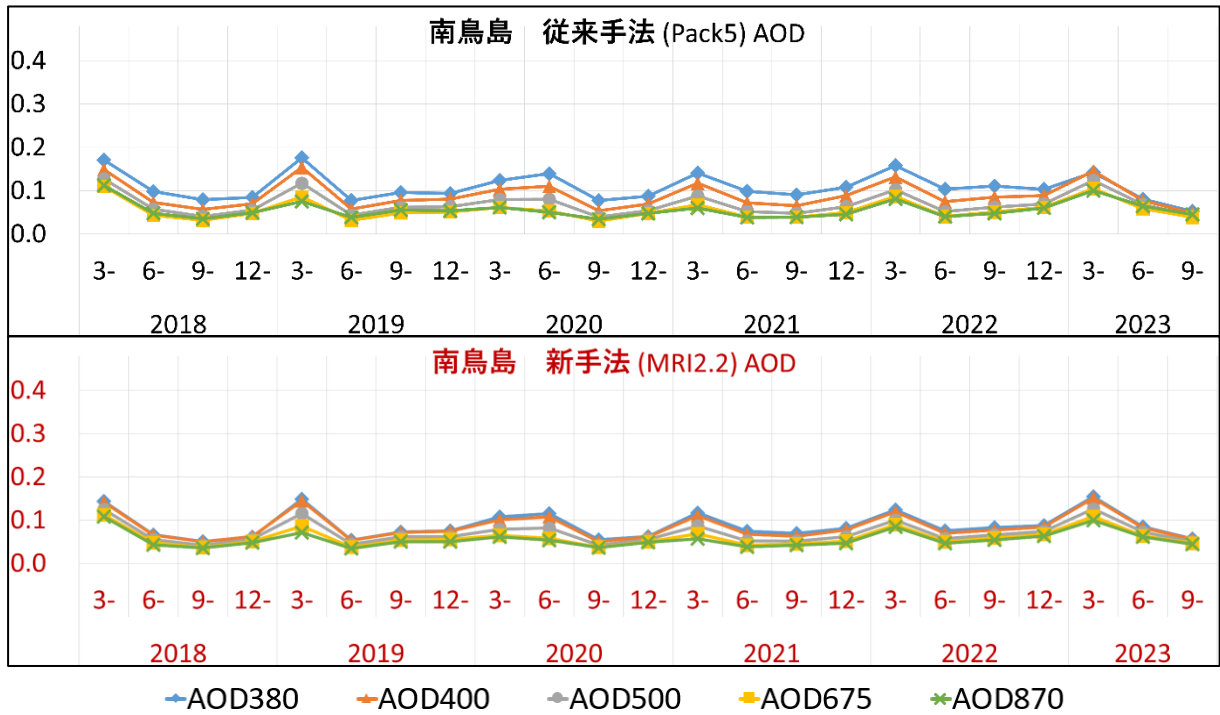
た平均バイアスが -0.2 ± 0.1 DU であることが確認されている。これは，国内で概ね 200~500DU の範囲を取り，解析においては1の位まで有効とする入力値として，代替に十分な精度である。緯度経度それぞれ1度格子のLevel3データセットから，観測点に最も近い格子点の日別オゾン全量値を使用する。欠測の場合は，その前後の日の値を按分した値を使用する。

5.4 新手法によるエアロゾル光学的厚さへの影響

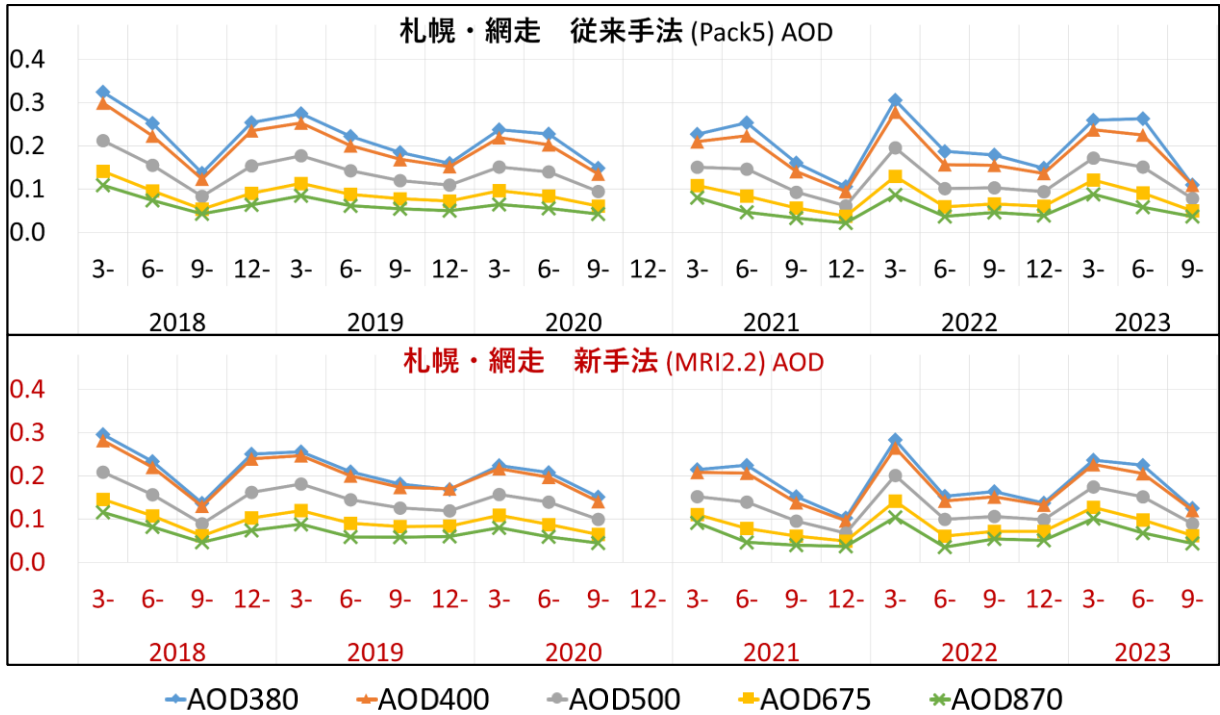
第14~16図に，波長別のAOD解析結果の新旧手法比較を示す。第2章で成果として示したようなAODの季節変動や地点毎の特徴は新手法でも見られ，値の大きさは概ね同程度である。



第 14 図 石垣島のエアロゾル光学的厚さ (AOD) 解析結果のうち、従来手法 (SKYRAD.PACK ver5) と新手法 (SKYRAD.PACK MRI ver2.2) の両方で解析された観測時分の値について季節平均したグラフ。上図は従来手法，下図は新手法。横軸は平均期間の開始月。2018 年の春は 4～5 月の 2 か月分。波長は 380nm (青線◆印)，400nm (橙線▲印)，500nm (灰線●印)，675nm (黄線■印)，870nm (緑線×印)。



第 15 図 南鳥島の波長別 AOD について、第 14 図と同じグラフ。上図は従来手法，下図は新手法。



第 16 図 札幌・網走の波長別 AOD について、第 14 図と同じグラフ。上図は従来手法、下図は新手法。

AOD の算出は、第 13 図に示す通り逆解析を経ないため、値の変化は第 3 章に示した解析プログラムそのものの更新ではなく、第 5 章に示した測器温度に基づく温度補正や、改良ラングレー法に基づく月毎の測器定数更新の影響による。第 5 章の改修により、波長選択フィルターが抱える温度特性や経年変化の状況を波長別に反映した上で、波長による差の特徴も引き続き捉えている。

6. おわりに

気象庁で実施のスカイラジオメーターによるエアロゾル観測について、これまでの累年の解析値を紹介した。地点や季節による変化を捉えた観測成果が表れている一方、一次散乱アルベドの解析値について改良が見込めることが判明したため、新しい解析プログラムを導入し改善を図った。その結果、一次散乱アルベドの解析値について先験的な値と整合的な結果が得られるようになり、併せて気象要素の取得を高頻度にするなどの改良を加え、精度の良い解析ができるようになった。

2026 年度から新手法での解析値公表を目指し、また過去の公表値についても新しい解析値に差し替えを進める方針である。

スカイラジオメーターによって観測されたデータは、気象衛星の観測から作成するエアロゾルプロダクトの検証においても活用されており、また他の機関・国々でのエアロゾル観測結果とともに、エアロゾルの気候への影響について理解を深めるための研究へ貢献することも期待される。

謝辞

スカイラジオメーターの運用にあたり、札幌管区气象台、網走地方气象台、沖縄气象台、石垣島地方气象台、高層气象台及び本庁各関係官に引き続きのご支援を頂いた。気象研究所気象観測研究部第一研究室からは、今回のプログラムの改良及び提供、データ解析方法、本稿の執筆に至るまで、多大なる協力・支援を頂いた。本誌面をお借りして、深く感謝申し上げます。

付録 オングストローム指数の解説（本文の第2章第2図に関連）

各観測波長 λ とそこから得られるエアロゾル光学的厚さ $\tau_{aero}(\lambda)$ には $\tau_{aero}(\lambda) = C \cdot \lambda^{-\alpha}$ の関係があり、 α をオングストローム指数（Ångström Exponent, AE）という。一般に、AEはエアロゾルの粒子径に反比例し、AE値が大きいと相対的に小さな粒子径のエアロゾルが多く、逆にAE値が小さいと相対的に粒子径が大きなエアロゾルが多い。黄砂のような大きな粒子の場合は0.5以下（Tanaka *et al.*, 1989; Uchiyama *et al.*, 2005 など）、森林火災の煙による小さな粒子の場合は1.5~2程度になり（Eck *et al.*, 2003 など）、一次散乱アルベドとともに、エアロゾルの種類を推察するための手がかりとなる。

参考文献

- 大竹 潤, 斎藤 篤思, 佐々木 駿, 丹治 菜摘, 岡嶋 真吾, 佐藤 幸隆 (2020): スカイラジオメーターによるエアロゾル観測について。測候時報, **87**, 83-98.
- 工藤玲 (2014): エアロゾルの光学的特性と直接効果。低温科学, **72**, 113-125.
- 国土地理院ウェブサイト (2025年11月14日閲覧, <https://maps.gsi.go.jp/>) データソース: Landsat8 画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST), Landsat8 画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey), 海底地形 (GEBCO)
- Ångström, A. (1929): On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, **11**, 156-166.
- Ångström, A. (1961): Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, **13**, 214-223.
- Aoki, K. and Y. Fujiyoshi (2003): Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 493-513.
- Che, H., G. Shi, A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Chen, P. Goloub, and X. Zhang (2008): Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 3199-3214.
- Dubovik, O., B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, and L. Slutsker (2002): Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 590-608.
- Eck, T. F., B. N. Holben, J. S. Reid, N. T. O'Neill, J. S. Schafer, O. Dubovik, A. Smirnov, M. A. Yamasoe, and P. Artaxo (2003): High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2035.
- Estellés, V., M. Campanelli, M. P. Utrillas, F. Expósito, and J. A. Martínez-Lozano (2012): Comparison of AERONET and SKYRAD4.2 inversion products retrieved from a Cimel CE318 sunphotometer. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 569-579.
- Hashimoto, M., T. Nakajima, O. Dubovik, M. Campanelli, H. Che, P. Khatri, T. Takamura, and G. Pandithurai (2012): Development of a new data-processing method for SKYNET sky radiometer observations. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 2723-2737.
- IPCC (2021): *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- Kazadzis, S., N. Kouremeti, S. Nyeki, J. Gröbner, and C. Wehrli (2018): The World Optical Depth Research and Calibration Center (WORCC) quality assurance and quality control of GAW-PFR AOD measurements. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, **7**, 39-53.
- Khatri, P., T. Takamura, T. Nakajima, V. Estellés, H. Irie, H. Kuze, M. Campanelli, A. Sinyuk, S.-M.

- Lee, B. J. Sohn, G. Pandithurai, S.-W. Kim, S. C. Yoon, J. A. Martinez-Lozano, M. Hashimoto, P. C. S. Devara, and N. Manago (2016): Factors for inconsistent aerosol single scattering albedo between SKYNET and AERONET. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 1859–1877.
- Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and E. Kobayashi (2010): Seasonal characteristics of aerosol radiative effect estimated from ground-based solar radiation measurements in Tsukuba, Japan. *J. Geophys. Res.*, **115**, D01204.
- Kudo, R., H. Diémoz, V. Estellés, M. Campanelli, M. Momoi, F. Marengo, C. L. Ryder, O. Ijima, A. Uchiyama, K. Nakashima, A. Yamazaki, R. Nagasawa, N. Ohkawara, and H. Ishida (2021): Optimal use of the Prede POM sky radiometer for aerosol, water vapor, and ozone retrievals. *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3395–3426.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben (1996): Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Appl. Optics*, **35**, 2672-2686.
- Naoe, H., T. Matsumoto, K. Ueno, T. Maki, M. Deushi, and A. Takeuchi (2020): Bias Correction of Multi-sensor Total Column Ozone Satellite Data for 1978–2017. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **98** (2), 353-377.
- Séférian, R., S. Baek, O. Boucher, J.-L. Dufresne, B. Decharme, D. Saint-Martin, and R. Roehrig (2018): An interactive ocean surface albedo scheme (OSAv1.0): formulation and evaluation in ARPEGE-Climat (V6.1) and LMDZ (V5A). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 321–338.
- Tanaka, M., T. Nakajima, and M. Shiobara (1986): Calibration of a sunphotometer by simultaneous measurements of direct-solar and circum-solar radiations. *Appl. Opt.*, **25**, 1170-1176.
- Tanaka, M., M. Shiobara, T. Nakajima, M. Yamano, and K. Arai (1989): Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 at Nagasaki-part I observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 267-278.
- Uchiyama, A., A. Yamazaki, H. Togawa, and J. Asano (2005): Characteristics of aeolian dust observed by Sky-Radiometer in the Intensive Observation Period 1 (IOP1). *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 291-305.
- Uchiyama, A., T. Matsunaga, and A. Yamazaki (2018): The instrument constant of sky radiometers (POM-02) – Part 1: Calibration constant. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 5363–5388.
- WMO (2016): WMO/GAW aerosol measurement procedures, guidelines and recommendations 2nd Edition. *GAW report*, **227**, 103 pp.