

---

 解 説
 

---

## ひまわり 8 号・9 号可視・近赤外エアロゾルプロダクトの アルゴリズム更新

北島 俊行<sup>1</sup>・吉田 真由美<sup>2</sup>・村上 浩<sup>3</sup>

### 要 旨

気象庁では、2018 年 12 月 19 日より宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発したエアロゾル光学的厚さ推定アルゴリズムを用いた「ひまわり可視・近赤外エアロゾルプロダクト」の利用を開始した。新アルゴリズムでは、これまでに比べエアロゾルや雲域の推定方法が精緻化されたことにより、高い精度でエアロゾル光学的厚さが推定できるようになった。このプロダクトは、2020 年 1 月 29 日から気象庁の黄砂解析予測モデルに同化利用されている。

### 1. はじめに

気象庁では、主に黄砂の監視を目的として、静止気象衛星ひまわりの可視・近赤外バンドの観測データからエアロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Depth; AOD) を算出してきた (大河原ほか, 2003; 橋本, 2006; Uesawa, 2016)。エアロゾル光学的厚さとは、大気を通過した光が大気中のエアロゾルによってどの程度減衰するかを表す指標で、衛星観測においては通常可視バンドの観測結果から放射伝達計算を用いて推定される。実況監視の用途には速報性が重視されるため、これまでは計算量を削減することを目的に、放射伝達計算に使用するエアロゾルの種類を黄砂 (鈹物粒子) に限定するなどの簡略化が行われてきた。そのため、黄砂とは明らかに形状が異なる種類のエアロゾルに対しては定量的には必ずしも正しい結果を与

えない。

一方、気象庁では黄砂予測モデルを使った黄砂予測を提供している (田中・小木, 2017)。このモデルでは、予測された黄砂の濃度を観測データで修正する手段がないことが課題であったため、衛星データをモデルに同化する研究が進められてきた (Sekiyama *et al.*, 2016; Yumimoto *et al.*, 2016)。しかし、データ同化するためには黄砂以外のエアロゾルに対する AOD についても観測から推定する必要があり、上述の黄砂監視目的のプロダクトをこの目的に利用することは難しかった。

2018 年に気象庁のスーパーコンピュータシステムが更新され (予報部数値予報課, 2018)、衛星データ処理を行うサーバについても計算能力が大幅に向上した。このため、エアロゾルを黄砂に限定しない手法を使用した AOD 推定であっても、

<sup>1</sup> 観測部計画課気象技術開発室 (現 気象衛星センター)

<sup>2</sup> (国研)宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター (現 (一財) リモート・センシング技術センター)

<sup>3</sup> (国研)宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター  
(令和 4 年 2 月 14 日発行)

監視のための速報性を損なうことなくプロダクトを提供できるようになった。これを受け、これまでのアルゴリズムに替えて、モデルへの同化に利用可能な AOD 算出アルゴリズムを導入することとした。

このアルゴリズムは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) において Higurashi and Nakajima (1999) 及び Fukuda *et al.* (2013) をもとに気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) のために開発されたもので、その後ひまわり 8 号 (観測部気象衛星課 2018) の可視・赤外放射計にも適用された (Yoshida *et al.*, 2018; 関山ほか, 2018)。ひまわり 8 号への適用に際しては、その高い時間分解能 (10 分) を活用し、品質の高い 1 時間合成 AOD を算出する手法も開発され (Kikuchi *et al.*, 2018)、モデルへの同化利用に対して高品質なデータを提供可能としている。

気象庁では JAXA との協力のもと、このアルゴリズムを気象庁のスーパーコンピュータシステムへ導入し、2018 年 12 月よりひまわり 8 号・9 号の観測データに適用して AOD 等の「ひまわり可視・近赤外エアロゾルプロダクト」の作成を開始した。2020 年 1 月からは、黄砂解析予測モデルへの同化利用が開始されている。

本稿では、第 2 章で本アルゴリズムの概要、第 3 章では使用するデータ、第 4 章ではプロダクト作成処理の構成、第 5 章では本プロダクトと気象庁のサンフォトメータ観測との比較結果について述べる。

## 2. アルゴリズム

### 2.1 雲の領域の推定

ひまわり可視・近赤外エアロゾルプロダクトは雲のない領域のみで計算を行うため、雲の領域を推定する必要がある。この雲の除去の処理に使用する雲の領域データは雲マスクと呼ばれる。この雲マスクの作成のため、本プロダクトでは気象研究所で開発された CLAUDIA3 (Ishida *et al.*, 2018) アルゴリズムを採用した。これは、機械学習 (サポートベクターマシン) により雲の判別を行うアルゴリズムで、判別結果は雲の有り無しといった

離散的な情報ではなく、晴天の可能性を表す連続した数値 (晴天信頼度と呼ぶ) で出力される。これは特に雲との区別が難しいエアロゾルのプロダクトにおいては、利用者が目的に適したしきい値を選択し、雲マスクを調整できるという点で有利である。

本プロダクトでは、晴天信頼度のしきい値は黄砂予測モデルの予報成績に基づき設定することとした。具体的には、過去の観測データに対して、雲マスクのしきい値を様々に変えた AOD を計算し、それを黄砂予測モデルへ同化する実験を行い、予測のスコアが最良となる値に設定した。

### 2.2 Level2 (L2) プロダクト

ひまわりの可視・近赤外バンドの観測値から AOD 等を推定する処理 (Level2 (L2) プロダクト作成処理) には、JAXA が「しきさい」等の極軌道衛星センサー用に開発してきたアルゴリズム (Yoshida *et al.*, 2018) を使用する。

このアルゴリズムの基本的な原理は、放射伝達計算により求めた大気上端反射率推定値と衛星観測による大気上端反射率を比較し、残差が最小となるようなエアロゾルの光学的特性 (パラメータ) を探索するものである。本アルゴリズムで、このパラメータとして採用されているのは AOD、小粒子比率、複素屈折率の虚部 (エアロゾルによる光の吸収を表すパラメータ) の三つである。以前のアルゴリズムでは、複素屈折率は黄砂を想定した固定値を用いていた (Uesawa, 2016) のに対し、今回採用したアルゴリズムでは複素屈折率を観測値から推定する点が異なっている。

本アルゴリズムのそのほかの主な特徴を以下に挙げる。

- ・エアロゾルモデルは大粒子と小粒子の外部混合を仮定。大粒子のエアロゾルについては更に、海塩粒子と黄砂 (鉍物) 粒子の外部混合と仮定する。陸上と海上では同じモデルを使用し、小粒子、大粒子 (海塩)、大粒子 (黄砂) の外部混合比はひまわりの観測データから決定する。なお、推定パラメータの数を減らすため、大粒子 (海塩) と大粒子 (黄砂) の

外部混合比は、複素屈折率と連動して変化させているので、これらは独立なパラメータではない。

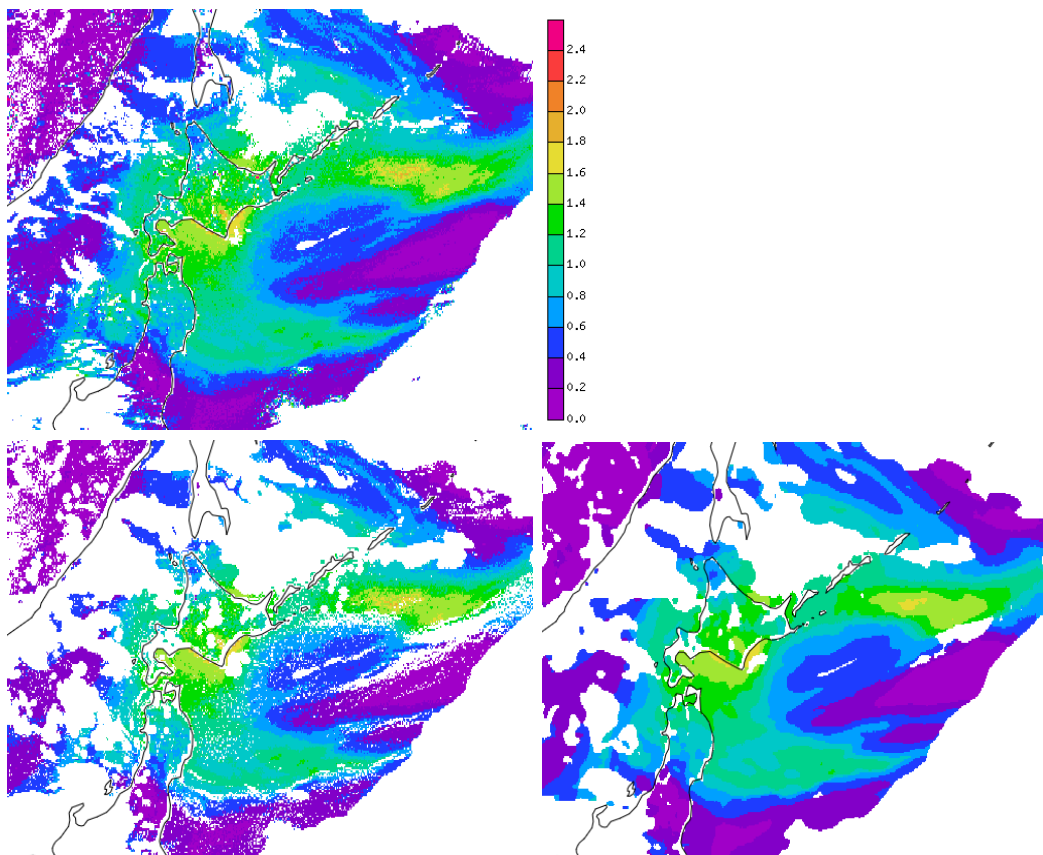
- 地表面反射率の算出には、陸上と海上では表面を構成する物質に大きな違いがあるため別の手法を用いる。陸上においては過去 30 日分の大気分子散乱補正済み地表面反射率のうち、雲の影に影響されていることが多い最小の値は除いて、その次の 2 番目に小さい値を採用した後、エアロゾルの影響を取り除くため、修正 Kaufman 法 (Fukuda *et al.*, 2013) を適用した。これにより地表面反射率の推定精度が向上し、陸上における AOD の精度が向上した。海上においては、数値予報モデル (GSM) の風速データを用いて Cox and Munk (1954) のモデルから計算する。
- プロダクト作成処理の際に使用する、主要な放射伝達過程をあらかじめ計算して格納しておくルックアップテーブルの作成には、放

射伝達モデル STAR シリーズ (Nakajima and Tanaka, 1986 ; Ota *et al.*, 2010 など) を用いている。

### 2.3 Level3 (L3) プロダクト

ひまわり 8 号では 10 分間隔でフルディスク観測を行うことが可能であり、本アルゴリズムではこれを活用した AOD の 1 時間合成手法が取り入れられている (Kikuchi *et al.*, 2018)。合成を行う目的は二つあり、一つは雲によるコンタミネーション (雲マスクにより除去されなかった雲の領域で大きなエアロゾル光学的厚さが算出されること) の軽減、もう一つは欠測領域の最小化である。この処理により作成されるプロダクトを Level3 (L3) プロダクトと呼んでいる。

雲によるコンタミネーションの軽減については、一般にエアロゾルと雲では時空間変動特性に違いがあるため、過去 1 時間分の 10 分ごとの観測データから時空間変動を分析することにより



第 1 図 各プロダクトのエアロゾル光学的厚さ。2016 年 5 月 19 日 03:00UTC。上左 : L2 プロダクト, 下左 : L3\_pure プロダクト, 下右 : L3\_merged プロダクト。

雲とエアロゾルとを判断する(第1図の下左). この処理により出力されるデータを L3\_pure という欠測領域の最小化については, 過去 1 時間分の L3\_pure に対してエアロゾルの時空間変動特性を考慮した最適内挿法を用いて, L3\_pure の欠測領域においても周囲及び過去のデータから AOD を推定する(第1図の下右). この処理による出力を L3\_merge という.

L3 プロダクトは L2 プロダクト作成後に行われるため, L2 に比べて速報性は低くなるものの, 高品質なデータが得られるため, モデルへのデータ同化利用に適している.

### 3. 使用するデータ

本プロダクトで使用するデータは以下のとおりである.

- ・ひまわり標準データ (23:00UTC-09:50UTC. バンド 1-6, 雲マスク処理のみバンド 1-16 を使用)
- ・気象庁全球予報モデル (GSM) データ (風向・風速, 気圧, 水蒸気量, オゾン量)
- ・気象衛星センター共通雲プロダクト (雪氷マスクを使用)

ひまわり標準データは, 観測の空間解像度(第1表参照)から本プロダクトの解像度(等緯度経度格子, 東西・南北方向とも 0.05 度間隔)へ変換して使用する. 変換は, プロダクトの格子点に最も位置の近いひまわりの観測データをその格子点の値としている.

GSM データは, 風向・風速, 気圧及び水蒸気量は 0.5 度, オゾン量は 1 度間隔の等緯度経度格子データを使用する. これらのデータもそれぞれのデータの解像度から, 本プロダクトの解像度にバイリニア補間<sup>4</sup>により変換して利用する.

共通雲プロダクトについては, ひまわりの雪氷マスクデータ (Imai and Yoshida, 2016) を使用している. 雪氷面では地表からの反射が強く, エアロゾルの推定精度が低下するため AOD の計算は行わない.

第 1 表 ひまわり 8 号・9 号の観測波長

	バンド	中心波長 (μm)	空間解像度 (km)
可視	#1	0.47	1
	#2	0.51	
	#3	0.64	0.5
近赤外	#4	0.86	1
	#5	1.6	2
	#6	2.3	
赤外	#7	3.9	2
	#8	6.2	
	#9	6.9	
	#10	7.3	
	#11	8.6	
	#12	9.6	
	#13	10.4	
	#14	11.2	
	#15	12.4	
#16	13.3		

### 4. プロダクト作成処理の構成

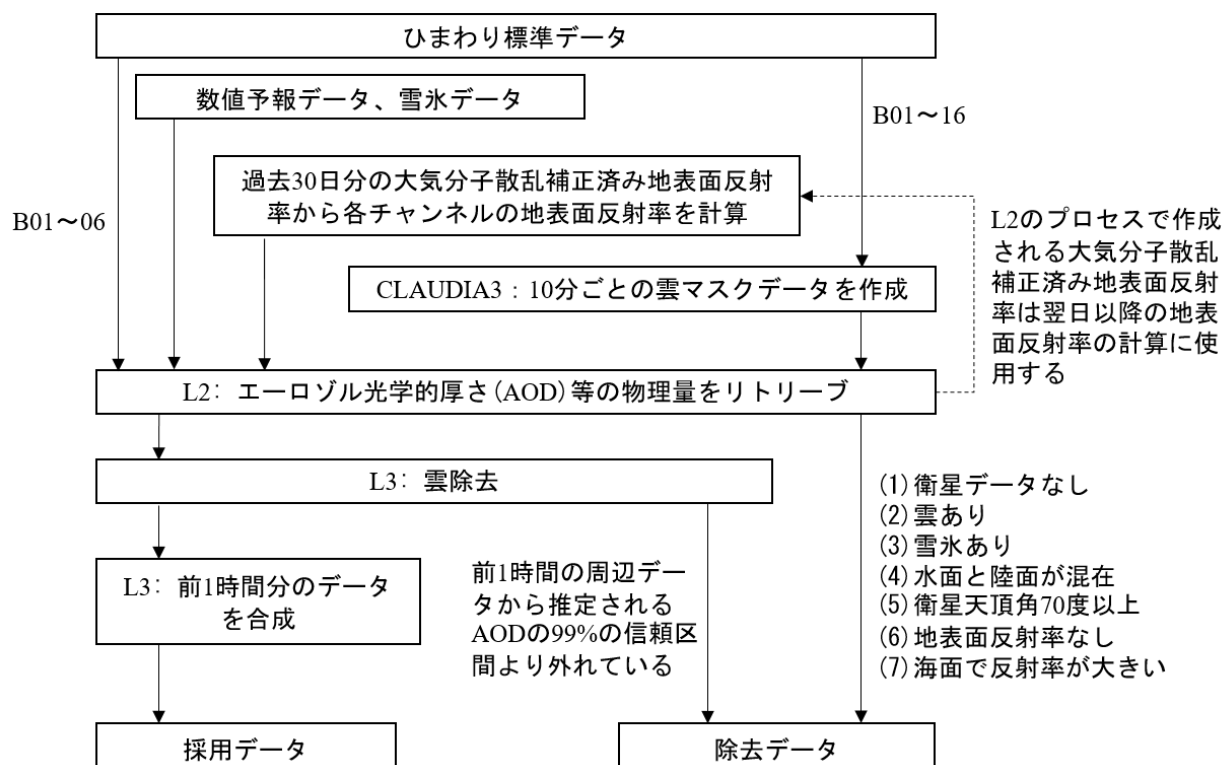
プロダクト作成処理の流れを第2図に示す.

#### 4.1 陸上における地表面反射率の算出

エアロゾルプロダクト作成処理に先立ち, 前 30 日分の大気分子散乱補正済み地表面反射率データから陸上の各格子点の地表面反射率を算出する. 算出アルゴリズムは Yoshida *et al.* (2018) による. 地表面反射率は 1 時間ごとに作成する一方, 衛星観測データは 10 分ごとにあるため, 一つの地表面反射率データを作成するのに 1 時間あたり 6 データ×30 日分=180 データを使用する. 一般に, 衛星観測はメンテナンス等で欠測となる場合があるため, 180 個の全てのデータが揃わなくとも, 一定のしきい値以上のデータ数がある場合には計算を行っている. ここでは半数 (90) 以上のデータが存在する場合には, 地表面反射率データを作成することとした.

地表面反射率の計算は夜間 (12:00UTC) のうちに行い, 翌日の計算で使用する. ソースコードは JAXA から提供されたものを利用している.

<sup>4</sup> 周囲の 4 点から距離に応じた加重平均により値を補間する手法.



第 2 図 ひまわり可視・近赤外エアロゾルプロダクト作成処理の流れ

#### 4.2 雲マスクの算出

次に、CLAUDIA3により雲の晴天信頼度をひまわり標準データから計算し、第 2.1 節で述べたように、黄砂予測モデルのスコアから決定したしきい値により雲マスクデータへ変換する。雲マスクの解像度は緯度・経度方向とも 0.05 度、計算領域は東経 80 度-西経 160 度、北緯 60 度-南緯 60 度の範囲である。

ソースコード及び計算に使用するルックアップテーブルは気象研究所から提供された。

#### 4.3 L2 プロダクト作成処理

以上のデータに加えて、前日 (23UTC 台については当日) 18UTC 初期値の GSM の風向・風速、気圧、水蒸気量、オゾン量、及び同時刻の気象衛星センター共通雲プロダクトの雪氷マスクを取り込み、これらを使用してひまわり標準データから AOD などの物理量を計算する。

L2 プロダクト作成処理ではまず、(1)衛星観測データが欠測、(2)雲が存在する、(3)海氷を含む雪氷が存在する、(4)一つの画素中に水面と陸面

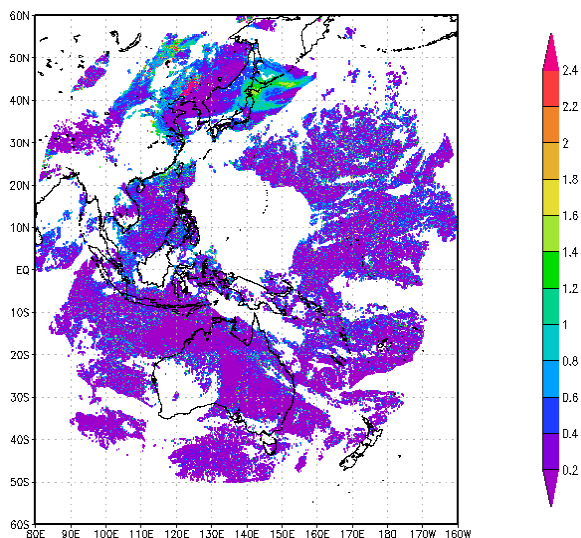
が混在する、(5)衛星天頂角が 70 度以上、(6)陸上では地表面反射率データが存在しない、のいずれかの条件を満たす領域は除去される。さらに、衛星や太陽との位置関係や風速から、海面からの反射が大きい領域 (サンダート領域) と判断された領域についても値なしとなる。

処理は日本時間の日中にあたる 23:00UTC-09:50UTC の間に 10 分ごとに実行される。

ソースコードは JAXA から提供されたものをもとに、できるだけ短時間で作成するため OpenMP によるプログラムの並列化を行っている。ひまわり 8 号フルディスク観測 1 シーン分の計算に要する時間は、時刻によって異なるがおおよそ 5 分程度である。

計算に使用するルックアップテーブルも JAXA から提供されたものを利用している。

作成されたプロダクトの一例を第 3 図に示す。



第 3 図 L2 プロダクト(エアロゾル光学的厚さ).  
2016 年 5 月 19 日 03:00UTC. 白い部分は  
雲, 又は太陽反射や衛星天頂角が大きい  
等の理由により計算ができなかった領  
域.

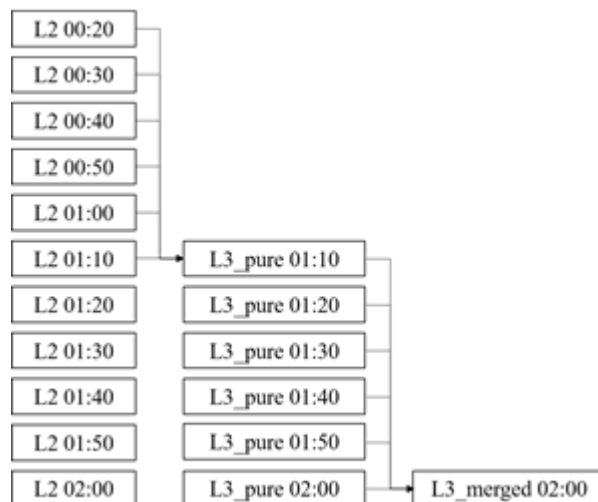
#### 4.4 L3 プロダクト作成処理

L3 プロダクト作成処理では, 前 60 分間 (6 枚分) の L2 プロダクトを入力値とし, 雲のコンタミネーションを取り除いたプロダクト (L3\_pure) を作成し, そこから更に前 60 分間分の L3\_pure データを入力値として時空間的な平均・補完を行ったプロダクト (L3\_merged) を計算する (第 4 図).

雲の除去は, 各格子点について前 1 時間分の周囲のデータからその格子点の AOD の 99% の信頼区間を計算し, その範囲から外れた値は雲とみなすことで行う.

L3\_merged が最終的なプロダクトと言えるが, 目的によっては L3\_pure も有用と考えられるため, これについても出力している.

L3 プロダクト作成処理は 00UTC-10UTC の 1 時間に 1 回, 毎正時の L2 処理の直後に実行され, 前 1 時間分の L3 プロダクトがまとめて出力される. ソースコード及びブックアップテーブルは JAXA から提供されたものをもとに, L2 プロダクト作成処理と同様に並列化を行った. 1 時間分の L3 プロダクトを処理するのにかかる時間は 5 分



第 4 図 L3 処理におけるデータの流れの例.

02:00 の L3\_merged データを作成する際に使用されるデータを例示している. L2 から L3\_pure へのデータの流れは, 01:10 以外は省略している.

程度である.

#### 4.5 庁内利用者への伝送

L2 プロダクトについては, 実況監視のための速報性も重視し, 10 分ごとに観測終了後から約 5 分後に伝送している. L3 プロダクトについては, 1 時間に 1 回, 前 1 時間分のデータをまとめて処理し伝送している. このため, 観測終了後からは最大で 1 時間程度遅れて伝送される. なお現在のところ, 伝送先は気象庁内利用者のみである.

出力データのファイル形式は NetCDF4 である. プロダクトの仕様については第 2 表にまとめた.

### 5. 検証

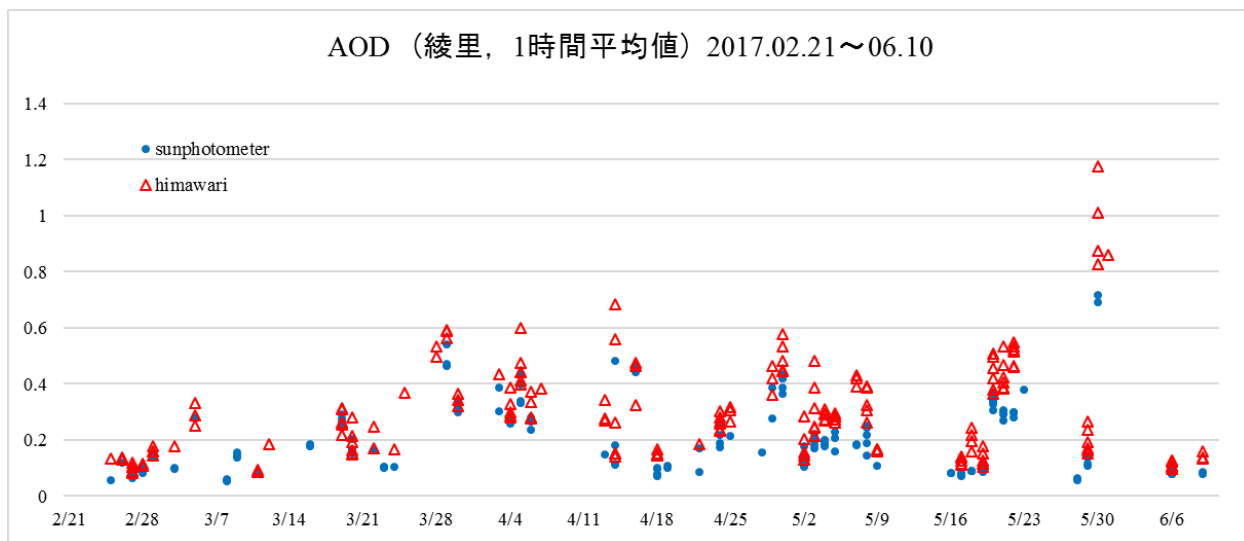
ここでは気象庁のサンフォトメータ又はスカイラジオメータによる地上観測<sup>5</sup> (大竹ほか, 2020) と比較した結果について述べる. エアロゾルプロダクトのアルゴリズムの詳細な検証については Yoshida *et al.* (2018) を参照されたい.

2017 年 2-6 月について, 本アルゴリズムによるひまわりの AOD (L3\_merged) と, 岩手県大船渡

<sup>5</sup> [https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol\\_obs.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol_obs.html) (2020 年 12 月 10 日閲覧)

第 2 表 プロダクトの仕様

処理レベル	L2	L3_pure	L3_merged
ファイル形式	NetCDF Ver.4		
収録要素名	エアロゾル光学的厚さ（波長500 nm）, オングストローム指数, エアロゾル光学的厚さの推定誤差, 微細粒子比率, 単散乱アルベド, 品質フラグ		エアロゾル光学的厚さ（波長500 nm）, オングストローム指数, エアロゾル光学的厚さの推定誤差, 微細粒子比率, 単散乱アルベド, 品質フラグ, エアロゾル光学的厚さの1時間平均値及び標準偏差, オングストローム指数の1時間平均値及び標準偏差
計算領域	南北：60N-60S、東西：80E-160W		
水平格子間隔	東西・南北ともに0.05°		
計算時刻	2300-0950UTC（日本時間：08:00-18:50）		
時間間隔	10分ごと		



第 5 図 本アルゴリズムによるひまわり AOD (L3\_merged, △印) と綾里（北緯 39.033 度, 東経 141.817 度）のサンフォトメータ観測値（●印）との比較（2017 年 2 月 21 日から 6 月 10 日, 01-05UTC）. 両者とも 1 時間平均値（例えば 01UTC は 01:00UTC-01:59UTC の 1 時間平均）.

市綾里におけるサンフォトメータによる地上観測（速報値）と比較した結果が第 5 図である．この期間に飛来したエアロゾルは黄砂が中心と考えられるが，3 月終わりから 4 月初めにかけてのやや AOD が大きい時期については，地上観測によるオングストローム指数<sup>6</sup>が大きい（図略）ため黄砂よりも小さい粒子，すなわち人為期限の硫酸塩等のエアロゾルが卓越していたとみられる．第 5 図によると，そのような時期も含めて全体的にはひまわり AOD と地上観測値はよく一致している．また，データの存在する日付がひまわりと地上観測でよく一致している．地上観測の雲判定は，

プログラムによる自動判別に加えて目視観測も使用しており，正確なものと考えてよい．これは本アルゴリズムにおいて雲の除去が適切に行われていることを示しているといえる．

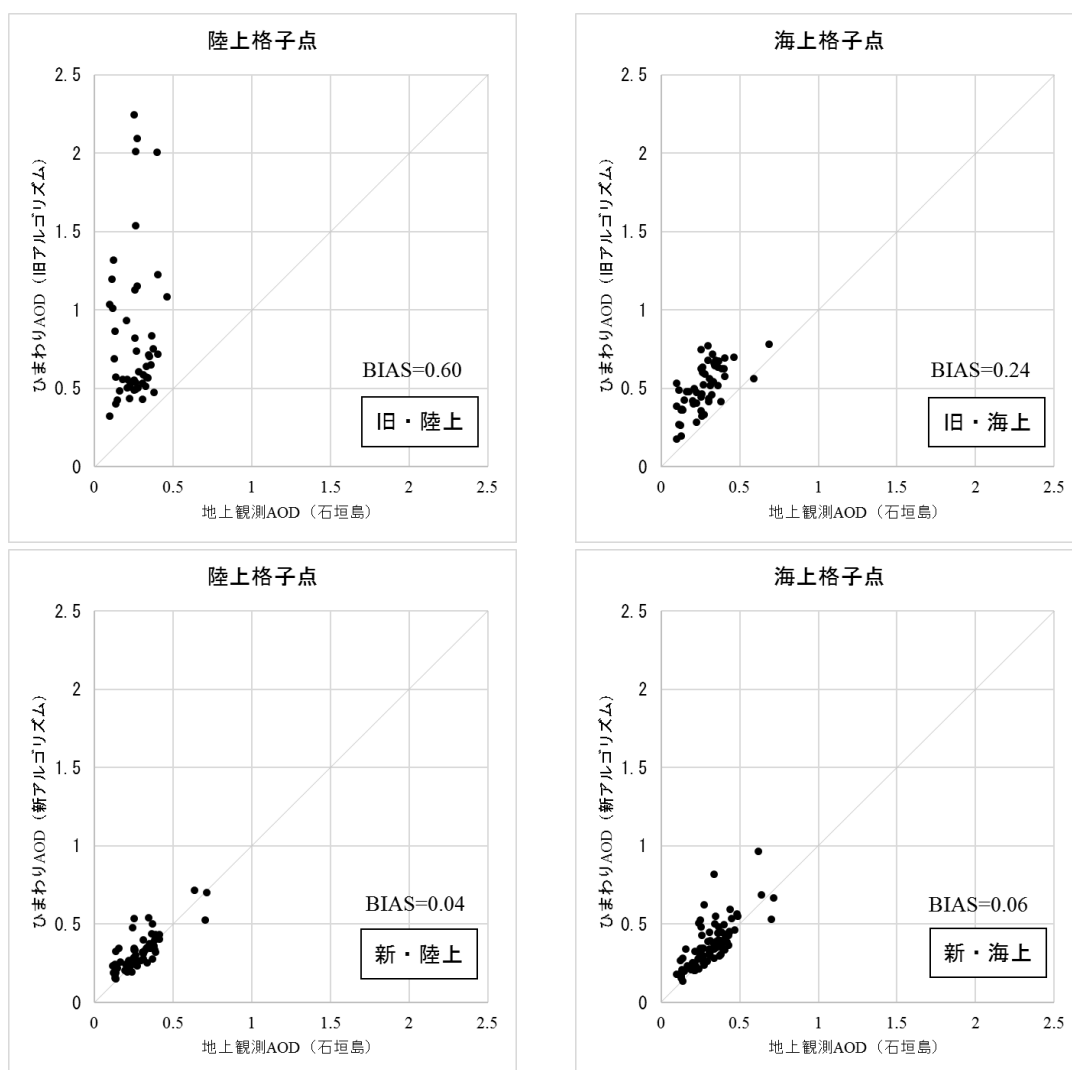
次に，新旧のアルゴリズムの精度を比べるため，石垣島のスカイラジオメーターによる地上観測値（速報値）と新旧のアルゴリズムにより算出したひまわり AOD を比較した（第 6 図）．旧アルゴリズムでは陸上の格子点と海上の格子点におけるアルゴリズムに違いがあるが（Uesawa, 2016），特に陸上の格子点において AOD が地上観測と大きく異なる場合が見られるという課題があった．

<sup>6</sup> 粒径の大きなエアロゾルの量と小さなエアロゾルの量の相対的な関係を示す指標．

このため第 6 図では、陸上と海上の精度について分けて確認できるように、ひまわり AOD については陸上を観測している格子点と海上を観測している格子点のそれぞれについて作図した。なお、格子点は観測所の周辺から任意に選択している。この図によれば、旧アルゴリズムは陸上における AOD が地上観測の AOD に比べて顕著に大きくなっている (バイアス 0.60) が、新アルゴリズムでは差は小さい (バイアス 0.04)。新アルゴリズムでは陸上における AOD の推定精度が向上していることがわかる。また、旧アルゴリズムでは陸上と

海上で地上観測との比較結果が大きく異なるが、新アルゴリズムではあまり違いがない。これは、新アルゴリズムが陸上と海上でエアロゾルのパラメータが整合するように設計されていることによる (関山ほか, 2018)。

気象庁の地上観測との比較については、ひまわり可視・近赤外プロダクトの品質に変化がないか監視するため、アルゴリズム更新後も継続的に実施している。



第 6 図 旧アルゴリズム (上) 及び新アルゴリズム (下) の AOD のスカイラジオメーターによる地上観測 (石垣島) との比較。地上観測地点 (北緯 24.337 度, 東経 124.165 度) の周辺の格子点から、新・旧アルゴリズムのそれぞれ陸上の格子点と海上の格子点を任意に選択し、地上観測と比較した。期間は 2017 年 3 月 1 日から 5 月 31 日。新アルゴリズムは L3\_merged を使用。BIAS は (ひまわり AOD) - (地上観測) の平均値。



## 6. まとめ

気象庁では、JAXA から提供を受けたアルゴリズムを使用したエアロゾルプロダクトの運用を開始した。このプロダクトはエアロゾルの種類によらず、物理的に正しいエアロゾル光学的厚さ (AOD) をひまわり 8 号の観測データから推定することが可能である。気象庁の地上観測との比較によってもその品質が確認できた。本プロダクトは 2020 年 1 月 29 日より、黄砂予測モデルに同化されており、予測の改善に貢献している。

### 謝辞

気象研究所の石田春磨氏には、CLAUDIA3 のソースコード及びルックアップテーブルを提供いただき、本稿作成にあたり、原稿への有益なコメントをいただきました。地球環境・海洋部環境気象管理官付エアロゾル観測係 (現 大気海洋部環境・海洋気象課エアロゾル・輻射観測係) には地上観測のデータを提供いただきました。地球環境・海洋部環境気象管理官付 (現 大気海洋部環境・海洋気象課) の小木昭典氏には黄砂予測モデルに関する助言をいただきました。この場を借りて深く感謝いたします。

### 参考文献

大河原望・吉崎徳人・徳野正己 (2003) : エアロゾルプロダクトの開発—GMS/VISSR および NOAA/AVHRR 画像データを利用して—。気象衛星センター技術報告, **42**, 43-52.

橋本徹 (2006) : MSC システム総合報告 2-5 エアロゾルの光学的厚さ。気象衛星センター技術報告特別号, 121-124.

Uesawa, D. (2016) : Aerosol Optical Depth product derived from Himawari-8 data for Asian dust monitoring. Meteorological Satellite Center Technical Note, **61**, 59-63.

田中泰宙・小木昭典 (2017) : 気象庁全球黄砂予測モデルの更新について。測候時報, **84**, 109-128.

Sekiyama, T. T., K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, T. Nagao, M. Kikuchi, and H. Murakami (2016) : Data

Assimilation of Himawari-8 Aerosol Observations: Asian Dust Forecast in June 2015. *SOLA*, **12**, 86-90, doi: 10.2151/sola.2016-020.

Yumimoto, K., T. M. Nagao, M. Kikuchi, T. T. Sekiyama, H. Murakami, T. Y. Tanaka, A. Ogi, H. Irie, P. Khatri, H. Okumura, K. Arai, I. Morino, O. Uchino, and T. Maki (2016) : Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 5886–5894, doi:10.1002/2016GL069298.

予報部数値予報課 (2018) : 第 10 世代数値解析予報システムと数値予報の基礎知識, 平成 30 年度数値予報研修テキスト。

Higurashi, A. and T. Nakajima (1999) : Development of a Two-Channel Aerosol Retrieval Algorithm on a Global Scale Using NOAA AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924-941.

Fukuda, S., T. Nakajima, H. Takenaka, A. Higurashi, N. Kikuchi, T. Y. Nakajima, and H. Ishida (2013) : New approaches to removing cloud shadows and evaluating the 380 nm surface reflectance for improved aerosol optical thickness retrievals from the GOSAT/TANSO-Cloud and Aerosol Imager. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 13,520-13,531, doi: 10.1002/2013JD020090.

観測部気象衛星課 (2018) : 静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号の概要。測候時報, **85**, 31-74.

Yoshida, M., M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami, T. Nomaki, and A. Higurashi (2018) , Common Retrieval of Aerosol Properties for Imaging Satellite Sensors. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 193-109, doi:10.2151/jmsj.2018-039.

関山剛・吉田真由美・菊池麻紀・弓本桂也 (2018) : 静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号とその利用 第 7 章 エアロゾルプロダクト。気象研究ノート, **238**, 85-97.

Kikuchi, M., H. Murakami, K. Suzuki, T. M. Nagao, and A. Higurashi (2018) , Improved Hourly Estimates of Aerosol Optical Thickness Using

- Spatiotemporal Variability Derived From Himawari-8 Geostationary Satellite. *IEEE TGRS*, doi: 10.1109/TGRS.2018.2800060.
- Ishida, H., Y. Oishi, K. Morita, K. Moriwaki, and T. Y. Nakajima (2018) , Development of a support vector machine based cloud detection method for MODIS with the adjustability to various conditions. *Remote Sens. Environ.*, **205**, 390-407.
- Cox, C. and W. Munk (1954) : Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *J. Mar. Res.*, **13**, 198-227.
- Nakajima, T. and M. Tanaka (1986) : Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **35**, 13-21.
- Ota, Y., A. Higurashi, T. Nakajima, and T. Yokota (2010) , Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **111**, 878-894.
- Imai, T. and R. Yoshida (2016) : Algorithm theoretical basis for Himawari-8 Cloud Mask Product. Meteorological Satellite Center Technical Note, **61**, 1-17.
- 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.