

報 告

気象庁全球黄砂解析予測モデルにおけるエアロゾルデータ同化手法の導入 について

小木 昭典^{1,6}・松本 隆則²・北島 俊行³・
田中 泰宙⁴・弓本 桂也⁵・関山 剛⁶・眞木 貴史⁶

要 旨

気象庁黄砂情報提供業務における黄砂解析予測情報の改善のため、2020年1月に黄砂解析予測モデルにエアロゾルデータ同化手法を導入した。気象庁の全球黄砂解析予測モデルは、大気大循環モデルの気象庁・気象研究所統一全球モデル（MRI-AGCM3）とカップラーによって結合された全球エアロゾルモデル MASINGAR mk-2 を基としたモデルであり、水平約 40 km、鉛直 40 層の解像度で運用している。エアロゾルデータ同化手法には、国立大学法人九州大学及び気象研究所と共同で開発された気象衛星ひまわり 8 号・9 号観測データを用いた二次元変分法（2D-Var）を新たに導入した。観測データとして使用するひまわり 8 号・9 号のエアロゾル光学的厚さ（AOD）の算出には、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター（JAXA/EORC）で開発されたリトリーブ手法を導入している。この更新を行った黄砂解析予測モデルの解析予測結果に対して、国内の気象官署における目視観測による黄砂実況との比較及び Aqua 衛星で観測されたエアロゾル光学的厚さを基にした比較検証を行ったところ、特に解析及び予測期間前半（～2 日先）において、エアロゾルデータ同化無しの場合と比較して精度向上が確認された。

1. はじめに

黄砂は、気象庁地上気象観測指針において「主として大陸の黄土地帯で吹き上げられた多量の砂じんが空中に飛揚し、天空一面を覆い、徐々に

降下する現象」（気象庁, 2011）と定義されるように、日本国内でも春季を中心に目視でも観測され、しばしば視程の低下や交通機関への影響をもたらしている。気象庁では 2004 年 1 月から、視程

¹ 地球環境・海洋部環境気象管理官付（現 大気海洋部環境・海洋気象課大気海洋環境解析センター）

² 地球環境・海洋部環境気象管理官付（現 情報基盤部情報政策課）

³ 観測部計画課気象技術開発室（現 気象衛星センターデータ処理部解析課）

⁴ 気象研究所気候・環境研究部（現 情報基盤部数値予報課地球システムモデル技術開発室）

⁵ 国立大学法人九州大学応用力学研究所

⁶ 気象研究所全球大気海洋研究部

（令和 4 年 9 月 20 日発行）

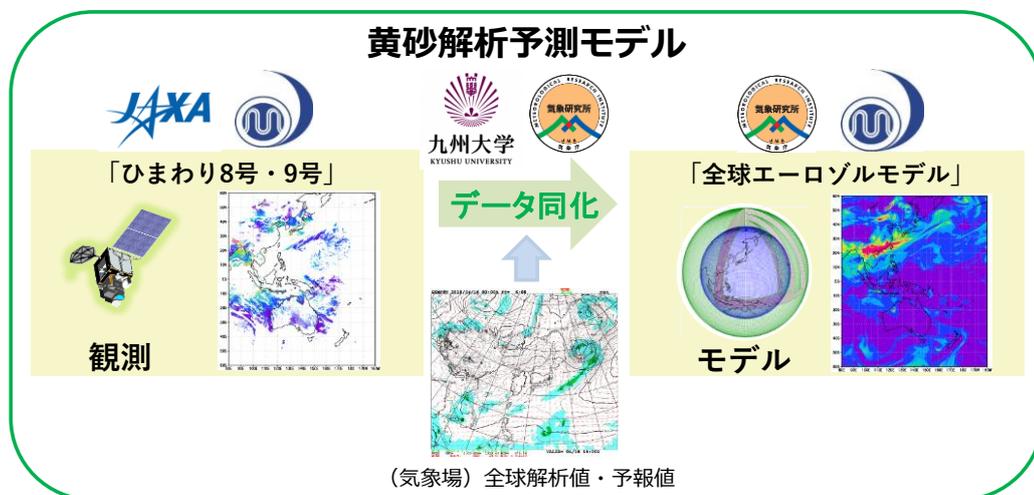
低下による交通への支障や日常生活に広い範囲で影響を及ぼすような黄砂が観測された場合、また数値モデルで広範囲に影響を及ぼすような黄砂が予想された場合に、黄砂に関する気象情報を発表している（気象庁観測部, 2003）。さらに、地上気象観測や気象衛星ひまわり 8 号・9 号による黄砂観測・監視情報（Murata *et al.*, 2018; Shimizu, 2020）と数値モデルによる黄砂予測情報（田中ほか, 2005）を気象庁ホームページで提供してきた。

黄砂予測に用いている数値モデルについて、2004 年 1 月に導入された黄砂予測モデルには、気象研究所で開発された、格子解像度が水平約 110 km・鉛直 20 層の全球エーロゾルモデル MASINGAR（Model of aerosol species in the global atmosphere; Tanaka *et al.*, 2003; Tanaka *et al.*, 2005）が用いられ、それ以来、積雪解析値の導入（石水・眞木, 2005; 気象庁観測部, 2005）や植生データの更新（池上ほか, 2007; 木下・眞木, 2009）等の改良が加えられてきた。2014 年に更新されたモデル以降では、鉛直層を 40 層とし、鉱物ダスト以外のエーロゾル粒子の影響の評価を可能とするため、大気中の主要なエーロゾル成分（鉱物ダスト、海塩粒子、硫酸塩、黒色炭素、有機炭素）を予測変数として導入している（気象庁地球環境・海洋部, 2014; 田中ほか, 2015; 小木ほか, 2015）。2017 年には水平解像度を約 40 km に向上させ、鉱物ダスト放出過程を改良する等の更新を行ってきた（気象

庁地球環境・海洋部, 2016; 小木ほか, 2017）。

一方で、黄砂予測モデルによるシミュレーション結果には、予測について実況と即していない事例もあり、黄砂実況の見逃しや空振りといった課題が認識されてきた。このような解析予測精度改善に資するため、気象モデルで行っているような実際の観測データをモデルに取り込み、シミュレーションの補正を行うデータ同化手法について、エーロゾル要素に関しても衛星観測データ等を利用して積極的に導入しようとする研究が国内外で進められてきた（Benedetti *et al.*, 2009; Sekiyama *et al.*, 2010; Yumimoto and Takemura, 2011; Yumimoto and Takemura, 2013; Yumimoto *et al.*, 2016a; Yumimoto *et al.*, 2017）。

2015 年 7 月に運用を開始した気象衛星ひまわり 8 号及び待機運用中のひまわり 9 号による観測により、広範囲かつ高精度な大気中のエーロゾル観測データが高頻度に得られるようになった（Bessho *et al.*, 2016; 気象庁観測部気象衛星課, 2018）。気象庁/気象研究所、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構及び国立大学法人九州大学は共同で、これらの観測データを同化する手法を開発してきた（Yumimoto *et al.*, 2016b; Sekiyama *et al.*, 2016）。2020 年 1 月からは、新しく開発された気象衛星ひまわり 8 号・9 号観測データを用いた二次元変分法によるエーロゾルデータ同化手法（弓本, 2017; Yumimoto *et al.*, 2018）を現業の気象



第 1 図 黄砂解析予測モデルの概略図.

庁全球黄砂解析予測モデルに導入し、黄砂解析予測の精度向上を達成することができた（気象庁地球環境・海洋部, 2019）（第 1 図）。現業のエーロゾル解析予測モデルで、静止気象衛星によるエーロゾル観測値を用いたデータ同化を行ったのは世界初である。本稿では、このエーロゾルデータ同化手法の概要と検証結果について解説する。

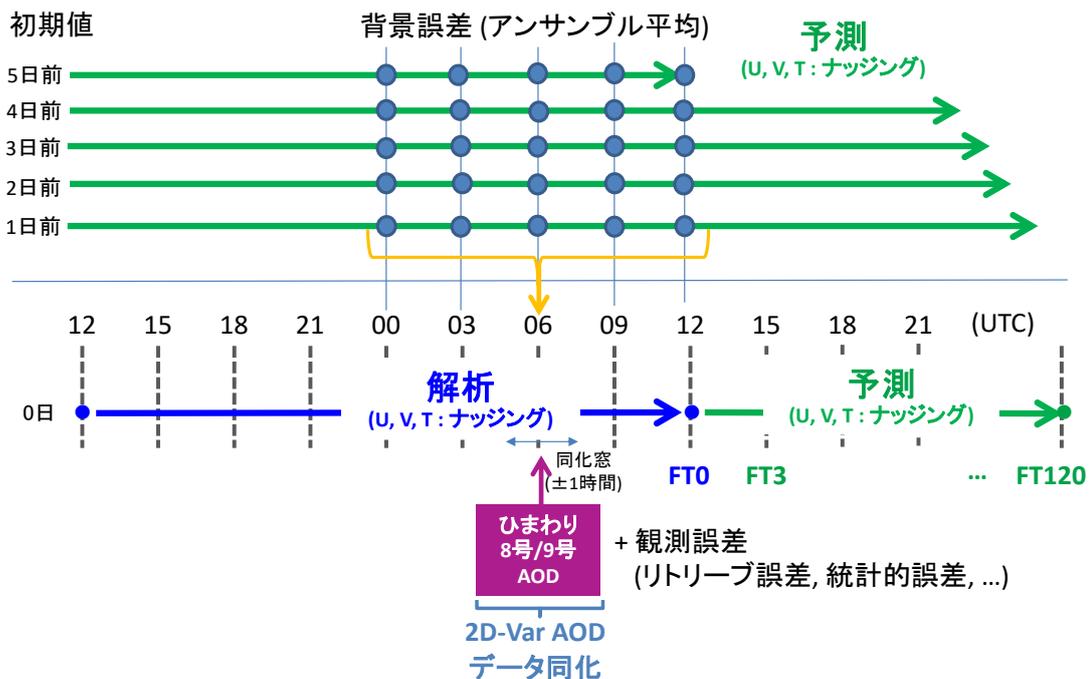
2. 黄砂解析予測モデルの構成

黄砂解析予測モデルは、エーロゾルデータ同化を行う解析部分と、そこから得られた初期値を基にシミュレーションを行う予測部分から構成されている。気象庁の現業システムでは、予測初期時刻 12 時 UTC (21 時 JST) の前 24 時間を解析時間とし、解析時間の 06 時 UTC (15 時 JST) においてエーロゾルデータ同化を行っている。収集された気象衛星ひまわり 8 号・9 号の観測データから、06 時 UTC (15 時 JST) の前後 1 時間の毎正時の特別値データについて、簡便な品質管理に基づいた最適な観測データをエーロゾルデータ同化に利用している。気象衛星ひまわり 8 号・9 号のエーロゾル観測データは 10 分ごとに得られるが、現業システムにおける計算機負荷や情報発表

までの時間的制約及び気象衛星ひまわり 8 号・9 号のエーロゾル観測データ自体の日変化バイアス等の特性も考慮して、1 日 1 回のエーロゾルデータ同化の頻度としている（2.2.2 節も参照）。予測初期時刻の 12 時 UTC (21 時 JST) までの気象衛星ひまわり 8 号・9 号の観測データを同化し、120 時間 (5 日間) 先までの予測を毎日行っている（第 2 図）。

2.1 大気大循環モデル及び全球エーロゾルモデル

予測モデルについては、大気大循環モデル MRI-AGCM3 (Yukimoto *et al.*, 2012) と全球エーロゾルモデル MASINGAR mk-2 をカップラー Scup (Yoshimura and Yukimoto, 2008) を用いて結合させた構成となっている（田中・小木, 2017）。このモデルは気象研究所の地球システムモデル MRI-ESM1 (Adachi *et al.*, 2013) 及び MRI-ESM2.0 (Yukimoto *et al.*, 2019) の一部であり、階層的地球システムモデルを用いたシステムである。モデルの格子解像度は、それぞれ、水平約 40 km, 鉛直は 40 層（地表から 0.4 hPa）である。大気大循環モデルでは、気象庁全球解析値及び全球予報値



第 2 図 エーロゾルデータ同化システムの概略図。

による 6 時間毎の水平風速場成分及び気温場を参照値としてニュートン法的ナッジング手法 (e.g., Stauffer and Seaman, 1990) を用いて気象場を現実大気に近づけている。また, 境界条件として海面表層温度データに気象庁全球海面水温解析値 (栗原ほか, 2006) を用いている。

全球エアロゾルモデルでは, エアロゾルの大気輸送過程, 放出過程, 沈着過程等をシミュレーションしており, 計算されたエアロゾル濃度分布については, 大気大循環モデルの放射伝達及び雲微物理過程に相互作用させている。予測エアロゾル変数としては, 土壌粒子, 海塩粒子, 硫酸塩, 黒色炭素, 有機炭素を取り扱っている。土壌及び海塩粒子は地表面及び海面付近での強風によって大気中に放出されるため, モデル内での気象及び陸面・海面の変数から放出量を計算している。また, 土壌及び海塩粒子は粒径により寿命が異なるため, 粒径 0.2–20 μm 区間を 10 分割している。硫酸塩エアロゾルは, その前駆気体となる二酸化硫黄や硫化ジメチルからの化学反応を含んでいる。硫酸塩, 黒色炭素, 有機炭素の排出源は境界値としてデータベースから与えている。モデル内でのエアロゾル過程の詳細については, 田中・小木 (2017) を参照されたい。エアロゾルの数値シミュレーション結果のうち, 土壌粒子の要素に関して, 診断的に黄砂濃度 (地表面付近及びカラム量) として部外提供を行っている。

2.2 エアロゾルデータ同化手法

エアロゾルデータ同化手法には, これまで四次元変分法 (4D-Var) (Benedetti *et al.*, 2009; Yumimoto and Takemura, 2013) や局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を用いた研究が推進されてきた (Sekiyama *et al.*, 2010; Yumimoto and Takemura, 2011; Yumimoto *et al.*, 2016a; Sekiyama *et al.*, 2016)。四次元変分法や局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いたエアロゾルデータ同化は高い精度を期待できる反面, 計算機負荷が高くなる課題があった。2020 年 1 月に現業導入したエアロゾルデータ同化手法には, 気象庁スーパーコンピュータシステムの計算機負荷の観点も考

慮して, 二次元変分法を導入している (Yumimoto *et al.*, 2017; Yumimoto *et al.*, 2018)。同化に利用するエアロゾルデータには, 気象衛星ひまわり 8 号・9 号の 500 nm 波長帯のエアロゾル光学的厚さ (二次元量) のデータを利用している (Yoshida *et al.*, 2018; Kikuchi *et al.*, 2018)。

2.2.1 二次元変分法の概要

エアロゾルデータ同化の二次元変分法では, エアロゾル光学的厚さ τ を解析変数として以下の評価関数を設定する。

$$J(\tau) = \frac{1}{2}(\tau - \tau^f)^T \mathbf{P}^{-1}(\tau - \tau^f) + \frac{1}{2}(\tau^o - \mathbf{H}\tau)^T \mathbf{R}^{-1}(\tau^o - \mathbf{H}\tau)$$

ここで, τ^f は第一推定値, \mathbf{P} は背景誤差共分散, \mathbf{H} は観測演算子, τ^o は観測値, \mathbf{R} は観測誤差共分散を示す。エアロゾルデータ同化における解析インクリメント $\Delta\tau$ については, $\tau = \tau^a$ の条件下で上式の勾配がゼロ ($\nabla J_\tau = 0$) となるよう変形して次式のとおり求めることができる。

$$\Delta\tau = \tau^a - \tau^f = \mathbf{P}\mathbf{H}^T(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T)^{-1}(\tau^o - \mathbf{H}\tau^f) = \mathbf{K}(\tau^o - \mathbf{H}\tau^f)$$

ここで, $\mathbf{K} = \mathbf{P}\mathbf{H}^T(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T)^{-1}$ はカルマンゲインである。ここでは, 観測データとして使用する気象衛星ひまわり 8 号・9 号のエアロゾル光学的厚さデータを直接用いているため, 観測演算子 \mathbf{H} を単純化して取り扱える利点がある。

背景誤差共分散 \mathbf{P} については, 過去 5 初期値分の予測結果のうち, 解析対象時刻の前後 6 時間の時間窓内の 3 時間毎の計 25 データをアンサンブル計算とみなし, 摂動をとることで作成している (第 2 図)。

$$P^{m,n} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tau_m^f - \tau_{m,i}) C^{m,n} (\tau_n^f - \tau_{n,i})$$

ここで, $P^{m,n}$ はモデル格子 m と n の間の背景誤差共分散, i は個々のアンサンブルデータ, N は総アンサンブルデータ数 (ここでは $N = 25$), τ_m^f 及び

τ_n^f はモデル格子 m と n の第一推定値, $C^{m,n}$ は重み付け関数をそれぞれ示す. 本手法では, Yumimoto *et al.* (2018) 同様に局所化半径については 750 km を設定した上で, モデル格子間の水平方向の距離に応じた誤差相関に関する指数関数 $C^{m,n}$ を設定して重み付けを行っている.

観測誤差 σ_{obs} については, 気象衛星ひまわり 8 号・9 号のリトリバル誤差に加えて, 観測データをモデル格子点に合わせ込む際に生じる統計誤差等の様々な誤差要因を考慮するために, 統計式を用いて補正するように構成している.

$$\sigma_{obs} = \max(\sigma_{H08/09}, \alpha + \beta \tau_{H08/09})$$

ここで, $\sigma_{H08/09}$ は気象衛星ひまわり 8 号・9 号のリトリバル誤差, α 及び β は Aqua 衛星との統計解析から得られた誤差の回帰係数, $\tau_{H08/09}$ は気象衛星ひまわり 8 号・9 号のエロゾル光学的厚さである. なお, Terra 衛星においても同様にエロゾル光学的厚さの観測データが得られるが, 気象衛星ひまわり 8 号データとの比較で特に陸域でバイアス傾向が見られたため, この誤差推定では Aqua 衛星のみのデータを利用している. また, Aqua 衛星の中分解能撮像分光放射計 (MODIS) 観測データのうち, 2016 年 4~6 月及び 2017 年 4 月の陸域・海域のエロゾル光学的厚さ Level 2 データを利用している. このようにして得られた観測誤差 σ_{obs} を用いて, 観測誤差共分散 R の算出を行っている.

この同化によって得られたエロゾル光学的厚さに対する解析インクリメント $\Delta\tau$ については, 最初にそれぞれのエロゾル種 l ごとのエロゾル光学的厚さへの寄与率に基づいて分配される.

$$\Delta\tau_l = \frac{\tau_l^f}{\tau^f} \Delta\tau$$

続いて, 各エロゾル種のエロゾル光学的厚さの解析インクリメント $\Delta\tau_l$ について, 消散係数の解析インクリメント $\Delta\alpha_{l,k}$ を経て, 予測変数である質量混合比の解析インクリメント $\Delta x_{l,k}$ を算出している.

$$\Delta x_{l,k} = \frac{x_{l,k}^f \alpha_{l,k}^f}{\alpha_{l,k}^f \tau_*^f} \Delta\tau_l$$

ここで, l はエロゾル種, k は鉛直層, $\alpha_{l,k}^f$ は消散係数の第一推定値, $x_{l,k}^f$ は質量混合比の第一推定値, τ_*^f は各エロゾル種の 150 hPa 高度層より下のエロゾル光学的厚さの第一推定値を示す. なお, 鉛直方向については, 前述の式で得られた解析インクリメントを各鉛直層に与えているが, ここでは成層圏より上層については同化の対象としていない. 最終的に, 次式により質量混合比の解析値 $x_{l,k}^a$ を得る.

$$x_{l,k}^a = x_{l,k}^f + \Delta x_{l,k}$$

2.2.2 気象衛星ひまわり 8 号・9 号エロゾル光学的厚さ

エロゾルデータ同化に利用する気象衛星ひまわり 8 号・9 号エロゾル光学的厚さについては, 気象衛星センターから提供されているひまわりエロゾルプロダクトを利用している (北島ほか, 2021). このリトリバル手法に用いられているエロゾル光学的厚さ推定アルゴリズムは, 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が開発した可視・近赤外バンドを用いた推定手法 (Yoshida *et al.*, 2018; Kikuchi *et al.*, 2018) である. これを気象衛星ひまわり 8 号・9 号に適用することで, 高い時間・空間分解能での推定が可能となっている (関山ほか, 2018).

プロダクトには Level 2 と Level 3 データが利用可能である. Level 2 のエロゾル光学的厚さデータについては 10 分ごとの瞬間値であり, 北緯 60 度~南緯 60 度及び東経 80 度~西経 160 度の範囲の 0.05 度等緯度経度間隔でデータが入手できる. これに対して Level 3 のエロゾル光学的厚さデータでは, 雲除去の高精度化及び欠測領域を最小にするため, Level 2 データ 1 時間分の観測データの時空間変動を分析して合成する手法が採用されている. プロダクトの設計詳細については, 北島ほか (2021) を参照されたい.

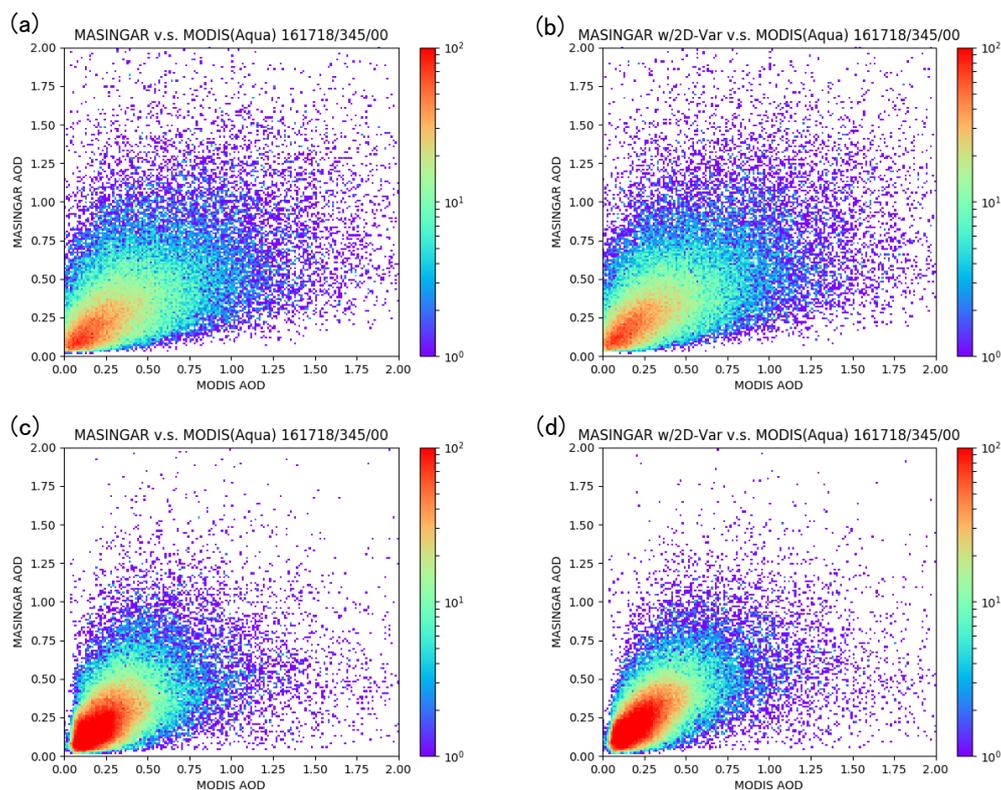
エアロゾルデータ同化においては、Level 2 version 2.1 から合成された Level 3 version 3 のエアロゾル光学的厚さデータを用いている。解析時間の同化時刻の前後 1 時間の毎正時の特別値データを対象として、モデル格子間隔(水平約 40 km)に平滑化した上で利用している。この際、気象衛星ひまわり 8 号・9 号エアロゾル光学的厚さについては観測波長帯が 500 nm であるため、オングストローム指数 (Å) を用いてモデルの予測エアロゾル変数の 550 nm に変換を行っている。また、観測データの品質管理として、オングストローム指数を用いた非現実的な粒径(例えば、オングストローム指数が極めて小さい巨大粒子の場合等)をもつ観測値の除去、沿岸域の海色の影響を避けるためのデータのマスク処理及び日変化バイアスの除去等を行い、観測データの品質管理を実施

している。

3. 黄砂解析予測モデルの精度検証

3.1 エアロゾル光学的厚さの検証結果

エアロゾルデータ同化の有効性を確認するため、本エアロゾルデータ同化に用いていない Aqua 衛星の中分解能撮像分光放射計観測データ(陸域・海域のエアロゾル光学的厚さ Level 3 日別データ)を検証データとして、黄砂解析予測モデルで計算されたエアロゾル光学的厚さ解析値の検証を行った。第 3 図に 2016 年~2018 年までの春季(3 月~5 月)の日本付近(北緯 20 度~50 度, 東経 110 度~150 度)の Aqua 衛星で観測されたエアロゾル光学的厚さに対する黄砂解析予測モデルで計算されたエアロゾル光学的厚さ解析値の散布図を示す。第 1 表には、各統計指標の詳細な数値を



第 3 図 2016 年~2018 年までの春季(3 月~5 月)の日本付近(北緯 20 度~50 度, 東経 110 度~150 度)の Aqua 衛星で観測されたエアロゾル光学的厚さに対する黄砂解析予測モデルで計算されたエアロゾル光学的厚さ解析値との散布図((a) 陸域・エアロゾルデータ同化無し, (b) 陸域・エアロゾルデータ同化有り, (c) 海域・エアロゾルデータ同化無し, (d) 海域・エアロゾルデータ同化有り)。エアロゾル光学的厚さの波長帯は 550 nm である。

第 1 表 2016 年～2018 年までの春季（3 月～5 月）の日本付近（北緯 20 度～50 度，東経 110 度～150 度）の Aqua 衛星で観測されたエロゾル光学的厚さに対する黄砂解析予測モデルで計算されたエロゾル光学的厚さ解析値との統計値（左：陸域，右：海域）. エロゾル光学的厚さの波長帯は 550 nm である.

陸域	データ同化無し	データ同化有り	海域	データ同化無し	データ同化有り
データ数	58259	58259	データ数	91072	91072
バイアス	-0.0322	-0.0230	バイアス	-0.0391	-0.0293
標準偏差	0.3806	0.3708	標準偏差	0.2795	0.2642
相関係数	0.4859	0.5056	相関係数	0.4799	0.5342

示す. 陸域・海域ともに，バイアス，標準偏差，相関係数のいずれの指標においても，エロゾルデータ同化を行うことで数値が改善されており，精度向上が達成できていることが確認できる. これらの検証結果から，導入したひまわり 8 号・9 号観測データを用いたエロゾルデータ同化手法が適切に機能していることが示唆される.

3.2 黄砂解析予測の統計的スコア検証結果

エロゾルデータ同化手法導入に伴う黄砂解析予測モデルの解析予測精度を検証するため，木下・眞木（2009）及び田中・小木（2017）と同様の手法を用いて，統計的スコア検証を行った. 出現頻度の低い黄砂現象を対象とするため，スレット・スコア（Threat Score）を主な指標とし，その他の指標として，捕捉率（Hit Rate），空振り率（False Alarm Ratio）及び適中率（Percent Correct）を用いて精度評価を行った. 観測データとして，国内における気象官署の地上実況気象通報（SYNOP 報）による黄砂現象の有無と，黄砂解析予測モデルから予測される黄砂現象の有無を，第 2 表のように分割表で区分して検証を行った. ここで，地上実況気象通報の中で，現在天気（ww）の番号が 06 - 09, 30 - 35, 98 としてダスト現象を伴った天気を通報している観測点を黄砂有りとして用いる. なお，現在天気は番号の大きい現象を優先して報じる規定があるため，前述の番号以外により黄砂現象の有無が判断できない場合には，統計から除外される（例えば，現在天気の番号が 10 - 29, 36 - 97, 99 で黄砂が観測されている場合等）. また，この統計的スコア検証では，国内

の特殊気象報（黄砂）で報じられるような視程 10 km 以上の薄い黄砂の観測を対象としていない. 黄砂解析予測モデルで扱う物理量のうち，各層毎の鉱物ダスト濃度を用いて，地表から高度約 1000 m までの平均濃度を計算し，この値が $90 \mu\text{g m}^{-3}$ を超えた場合に黄砂現象有りと判断している. この閾値は，黄砂粒子による地表付近の黄砂の濃度と国内の気象官署で観測者が目視で観測した視程との対応を統計的に調査した結果に基づき，おおむね視程約 10 km に相当する濃度と対応しており，気象庁ホームページで公開している黄砂解析予測図表示の閾値とも同値である. 実際に，この閾値を用いた統計的スコア検証結果においても，他の閾値を用いた場合より各種スコア値が最良となる場合が多い.

黄砂現象のスレット・スコア「*TS*」, 捕捉率「*HR*」, 空振り率「*FAR*」及び適中率「*PC*」は次式のようにそれぞれ定義される.

$$TS = \frac{FO}{FO + FX + XO}, \quad HR = \frac{FO}{FO + XO}$$

$$FAR = \frac{FX}{FO + FX}, \quad PC = \frac{FO + XX}{FO + XO + FX + XX}$$

ここで，*FO*, *FX*, *XO*, *XX*は第 2 表に示されるように，実況と予測でそれぞれ黄砂有りと黄砂無しに区分した現象の頻度数である. なお，スレット・スコアは*XX*（実況及び予測ともに黄砂無し）の影響を除いており，1 に近いほど予測の精度が高いことを示す.

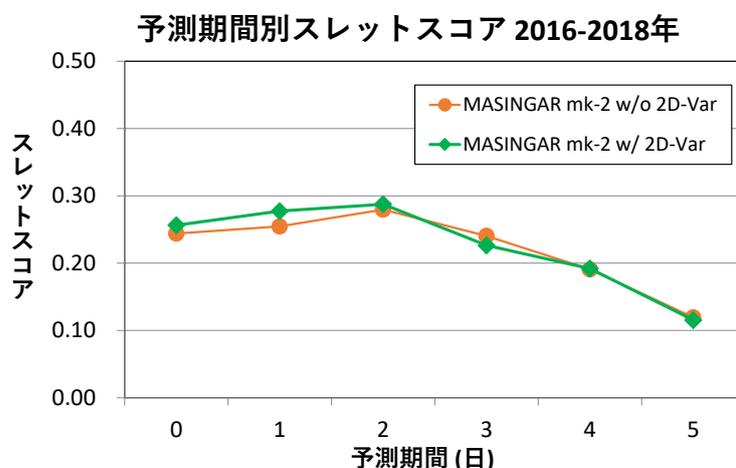
第 4 図に 2016 年～2018 年までのエロゾルデータ同化有り/無しにおける予測期間ごとのスレ

ット・スコアの検証結果を示す。エーロゾルデータ同化無しの場合と比較して、エーロゾルデータ同化有りの場合は解析期間及び予測期間前半（1～2 日先予測）において若干精度が改善できている。予測期間後半（3～5 日先予測）においても、ほぼ同程度の精度を保っていることがわかる。3 日先予測に関しては若干精度が低下しているが、検証期間における国内の黄砂観測事例が少なかったことに加え、後述のとおり、この予測期間を境にエーロゾルデータ同化が黄砂予測に与える

改善効果は急速に減少することが一因として考えられる。同様に、第 3 表に 2016 年～2018 年までのエーロゾルデータ同化有り/無しにおける予測期間ごとの捕捉率、空振り率、適中率の検証結果を示す。これらの各指標で見ても、スレット・スコア同様に、予測期間前半（1～2 日先予測）を中心に精度改善が達成できていることが示されている。黄砂は一般的に大陸の砂漠域で発生してから日本付近に到達するまで数日程度の期間を要するため、解析期間や予測期間前半に、エーロ

第 2 表 黄砂実況と予測の分割表。FO, FX, XO, XXはそれぞれの頻度数であり，FO：出現する予測が適中，FX：空振り，XO：見逃し，XX：出現しない予測が適中を表す。

		黄砂実況	
		有り	無し
黄砂予測	有り	FO	FX
	無し	XO	XX



第 4 図 エーロゾルデータ同化有り/無しによる予測期間別のスレット・スコア比較結果（検証期間：2016～2018 年）。橙色線がエーロゾルデータ同化無し，緑線がエーロゾルデータ同化有りの結果を示す。

第 3 表 エーロゾルデータ同化有り/無しによる予測期間別の捕捉率・空振り率・適中率の比較結果（検証期間：2016～2018 年）。

捕捉率	データ同化無し	データ同化有り	空振り率	データ同化無し	データ同化有り	適中率	データ同化無し	データ同化有り
0日	0.597	0.597	0日	0.708	0.690	0日	0.979	0.981
1日	0.612	0.642	1日	0.696	0.672	1日	0.980	0.981
2日	0.672	0.657	2日	0.676	0.662	2日	0.981	0.982
3日	0.567	0.537	3日	0.705	0.719	3日	0.980	0.980
4日	0.433	0.433	4日	0.746	0.743	4日	0.980	0.980
5日	0.358	0.358	5日	0.848	0.855	5日	0.971	0.969

ゾルデータ同化の精度改善効果が見られていることがわかる。なお、予測期間後半では、その効果は限定的であることが推定される。これらの検証結果から、エアロゾルデータ同化を導入することにより、黄砂の解析予測精度にも改善が見られることが示唆された。

3.3 黄砂事例の検証結果

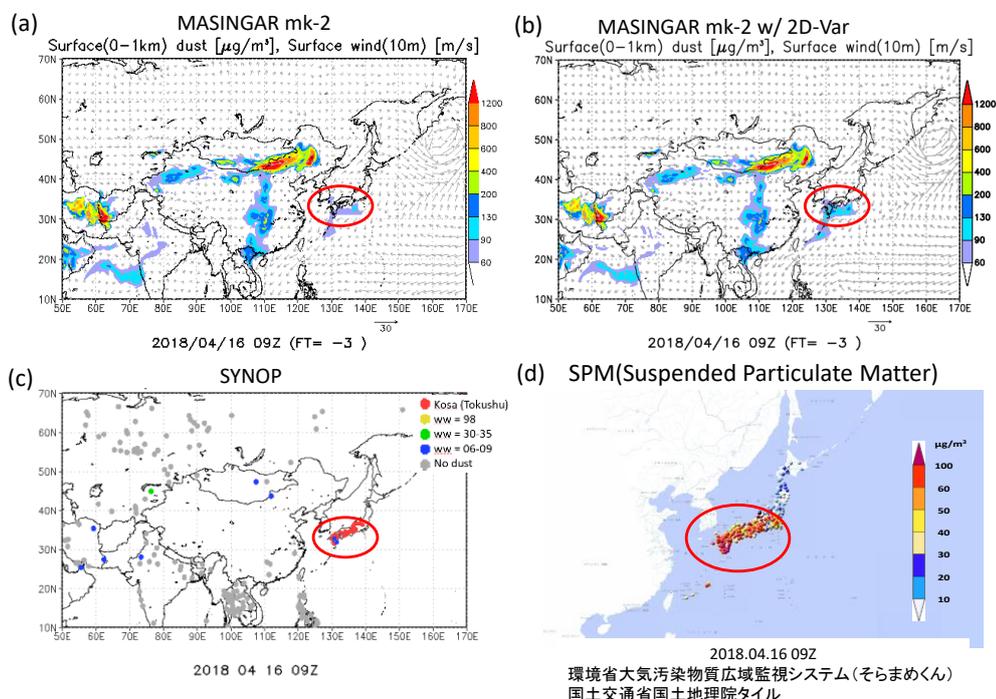
3.3.1 2018年4月16日の黄砂事例

春季に黄砂が観測された2018年4月16日の黄砂事例の解析結果を示す。第5図(a)及び第5図(b)は、それぞれデータ同化無し/有りの場合の2018年4月16日18時(JST)の地表付近の黄砂濃度の解析結果である。第5図(c)は同日同時刻の地上実況気象通報及び特殊気象報(黄砂)による黄砂現象観測地点分布である。この時刻には、熊本と宮崎で視程10km未満の黄砂現象が報告されている。第5図(d)は同時刻の環境省大気汚染物質広域監視システムによる浮遊粒子状物質(SPM)の地

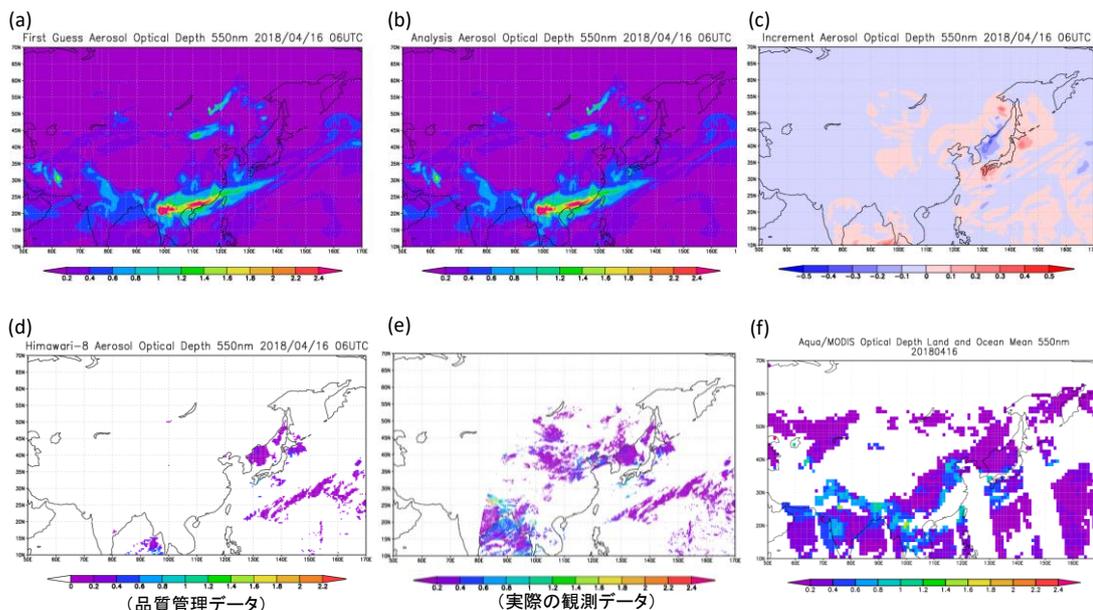
表面濃度分布である。黄砂の地上観測地点と対応するように、東日本から西日本にかけて浮遊粒子状物質の地表面濃度が高く、九州地方を中心に $90 \mu\text{g m}^{-3}$ を超える観測地点も見られていた。

エアロゾルデータ同化無しの場合、四国や九州付近で実況の観測値と比較しても解析濃度が過小であったが、エアロゾルデータ同化有りの場合は濃度の表現が改善され、実況の観測値により近づいていることがわかる。

直近のエアロゾルデータ同化時刻である2018年4月16日15時(JST)において、第6図(a)は黄砂解析予測モデルによるエアロゾル光学的厚さの第一推定値を、第6図(b)はエアロゾルデータ同化によるエアロゾル光学的厚さの解析値を、第6図(c)はエアロゾル光学的厚さの解析インクリメントをそれぞれ示す。第6図(d)及び第6図(e)は、それぞれエアロゾルデータ同化に利用されたひまわり8号の品質管理済み及び実際のエアロゾル光学的厚さ観測データを、第6図(f)には参考とし



第5図 2018年4月16日18時(JST)の(a)エアロゾルデータ同化無しの場合の黄砂解析予測モデルによる地上付近の黄砂濃度の解析結果、(b)エアロゾルデータ同化有りの場合の黄砂解析予測モデルによる地上付近の黄砂濃度の解析結果、(c)地上実況気象通報及び特殊気象報(黄砂)による黄砂観測実況、(d)環境省大気汚染物質広域監視システムによる浮遊粒子状物質濃度。



第 6 図 2018 年 4 月 16 日 15 時 (JST) の (a) 黄砂解析予測モデルによるエアロゾル光学的厚さの第一推定値, (b) エアロゾルデータ同化によるエアロゾル光学的厚さの解析値, (c) エアロゾルデータ同化によるエアロゾル光学的厚さの解析インクリメント, (d) エアロゾルデータ同化に用いたひまわり 8 号のエアロゾル光学的厚さの観測データ (品質管理済み), (e) 実際のひまわり 8 号のエアロゾル光学的厚さ観測データ, (f) Aqua 衛星のエアロゾル光学的厚さ観測値.

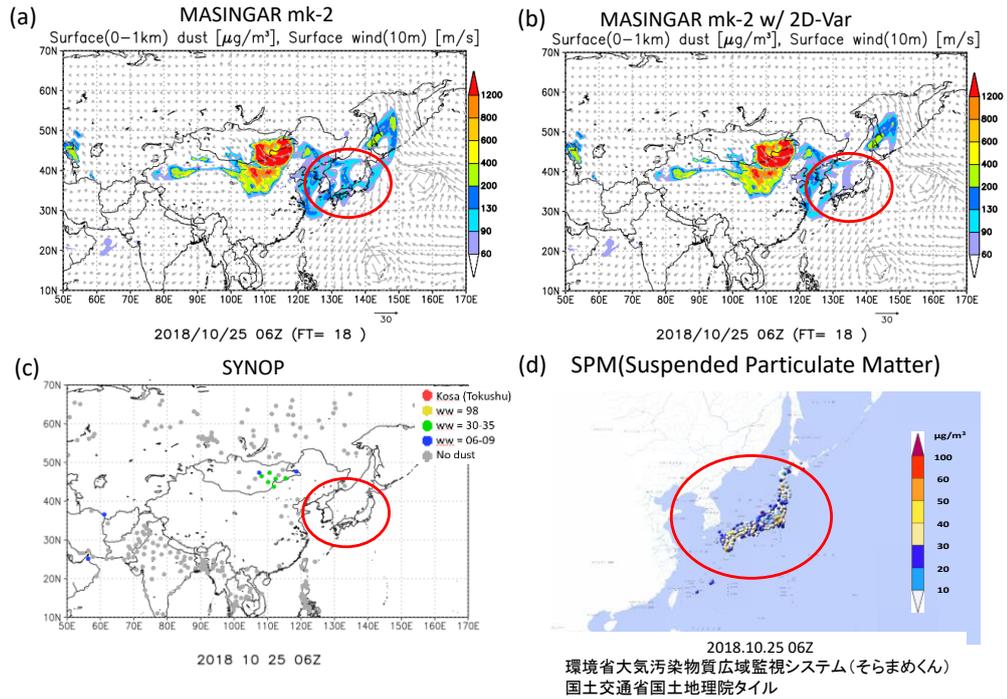
て Aqua 衛星によるエアロゾル光学的厚さ観測値を示す. 日本付近では, エアロゾルデータ同化により日本海の領域ではエアロゾル光学的厚さで負の補正が, 四国や九州地方付近の領域では正の補正が行われ, ひまわり 8 号のエアロゾル観測データが黄砂濃度の解析値に有効に反映されていることが示唆される.

3.3.2 2018 年 10 月 25 日の黄砂事例

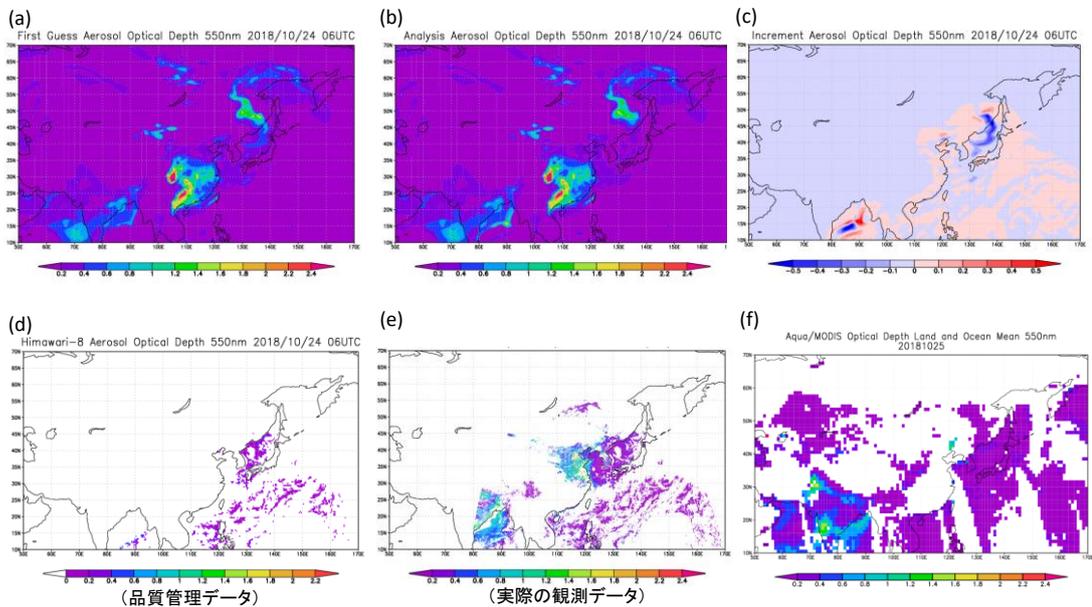
秋季の 2018 年 10 月 25 日の黄砂事例では, 国内の地上観測では黄砂は観測されていなかった. 第 7 図(a)及び第 7 図(b)に, 予測初期時刻 (2018 年 10 月 24 日 21 時 (JST)) から 18 時間先における 2018 年 10 月 25 日 15 時 (JST) のそれぞれデータ同化無し/有りの場合の地表付近の黄砂濃度の予測結果を, 第 7 図(c)に同日同時刻の地上実況気象通報及び特殊気象報 (黄砂) による黄砂現象の観測地点分布を, 第 7 図(d)に環境省大気汚染物質広域監視システムによる浮遊粒子状物質の地表面濃度分布を示す. エアロゾルデータ同化無しの場合

には, 西日本を中心に国内の広い範囲で黄砂が過大に予測され空振り事例となっていたが, エアロゾルデータ同化有りの場合は, 予測濃度の補正の改善効果が見られており, 過大な黄砂予測域が解消され, 地上観測実況とも良く整合していることがわかる.

同様に, 予測対象前日のエアロゾルデータ同化時刻である 2018 年 10 月 24 日 15 時 (JST) において, 第 8 図(a)は黄砂解析予測モデルによるエアロゾル光学的厚さの第一推定値を, 第 8 図(b)はエアロゾルデータ同化によるエアロゾル光学的厚さの解析値を, 第 8 図(c)はエアロゾル光学的厚さの解析インクリメントをそれぞれ示す. 第 8 図(d)及び第 8 図(e)は, それぞれエアロゾルデータ同化に利用されたひまわり 8 号の品質管理済み及び実際のエアロゾル光学的厚さ観測データを, 第 8 図(f)には参考として Aqua 衛星によるエアロゾル光学的厚さ観測値を示す. 予測対象前日のエアロゾルデータ同化時には, 大陸から日本海にかけて広がる黄砂に伴うエアロゾル光学的厚さの過大な



第 7 図 予測初期時刻（2018 年 10 月 24 日 21 時（JST））から 18 時間先における 2018 年 10 月 25 日 15 時（JST）の (a) エアロゾルデータ同化無しの場合の黄砂解析予測モデルによる地上付近の黄砂濃度の予測結果, (b) エアロゾルデータ同化有りの場合の黄砂解析予測モデルによる地上付近の黄砂濃度の予測結果, (c) 地上実況気象通報及び特殊気象報（黄砂）による黄砂観測実況, (d) 環境省大気汚染物質広域監視システムによる浮遊粒子状物質濃度。



第 8 図 2018 年 10 月 24 日 15 時（JST）の (a) 黄砂解析予測モデルによるエアロゾル光学的厚さの第一推定値, (b) エアロゾルデータ同化によるエアロゾル光学的厚さの解析値, (c) エアロゾルデータ同化によるエアロゾル光学的厚さの解析インクリメント, (d) エアロゾルデータ同化に用いたひまわり 8 号のエアロゾル光学的厚さの観測データ（品質管理済み）, (e) 実際のひまわり 8 号のエアロゾル光学的厚さ観測データ, (f) Aqua 衛星のエアロゾル光学的厚さ観測値。

領域に対して負の補正が行われ、結果として黄砂の地表面濃度解析値が低く修正されることで、予測対象日の地表面濃度予測値にも適切な情報として伝達し、黄砂予測が改善されたと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本稿では、2020年1月に導入した、現業の全球黄砂解析予測モデルにおけるエーロゾルデータ同化手法についての解説とその解析/予測精度についての検証結果を示した。統計的検証の結果、エーロゾルデータ同化手法を導入した黄砂解析予測モデルでは、黄砂濃度及びエーロゾル光学的厚さの解析予測値に精度改善が見られた。また、特定の黄砂事例においても、春季及び秋季ともに解析/予測精度が改善されていることを確認できた。

今後は、静止気象衛星であるひまわり8号・9号観測データの利点を活かした高頻度利用や更なるリトリーブ手法の解析精度向上、及び、ひまわり8号・9号では観測できない地球上の領域を観測可能な静止気象衛星(Meteosat, GOES衛星等)や極軌道衛星(気候変動観測衛星「しきさい(GCOM-C)」, Terra・Aqua衛星等)の観測データを用いた全球規模でのエーロゾル観測値のデータ同化への利用による更なるエーロゾル/黄砂解析予測精度の向上が期待される。また、エーロゾルデータ同化手法自体についても、地上/衛星エーロゾルライダー観測データを用いた鉛直方向への拡張(三次元変分法(3D-Var))や更に時間方向まで拡張した四次元変分法、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ手法等の導入による高度化が期待される。また、気象庁全球数値予報モデルでは、全球エーロゾルモデルMASINGARとTerra・Aqua衛星の中分解能撮像分光放射計によるエーロゾル観測値によって計算された三次元エーロゾル分布を放射過程計算に用いていることから(Yabu *et al.*, 2017; 関口ほか, 2019), このエーロゾルデータ同化技術によって得られる解析値は将来的に数値予報モデルの改善につながることも期待できる。

謝辞

ひまわり8号・9号のエーロゾルデータ利用に際して、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究センターの村上浩博士、菊池麻紀博士、一般財団法人リモート・センシング技術センターの吉田真由美博士及び国立大学法人東京大学大気海洋研究所の永尾隆博士の各氏の多大なご協力をいただいた。雲推定アルゴリズムCLAUDIA3については、気象研究所の石田春磨博士に有益なご助言をいただいた。ひまわり8号・9号のエーロゾルデータ作成及び運用においては、観測部計画課気象技術開発室(現 大気海洋部業務課気象技術開発室)及び気象衛星センターのルーチン運用・管理グループに多くのご支援をいただいた。

全球エーロゾルモデル及びエーロゾルデータ同化手法の開発については、大島長博士をはじめとした気象研究所全球大気海洋研究部の地球システムモデル開発グループ及び国立大学法人九州大学応用力学研究所エーロゾルデータ同化開発グループに多大なご協力をいただいた。現業黄砂解析予測モデルにおけるエーロゾルデータ同化システムの導入及び運用においては、予報部数値予報課(現 情報基盤部数値予報課)及び情報通信課(現 情報基盤部情報通信基盤課)のルーチン運用・管理グループに多くのご支援をいただいた。現業導入に関して、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)のモデル/データ同化開発及び衛星データ解析の担当官(藪将吉, 福山幸生, 出牛真, 青柳曉典, 上澤大作の各氏)をはじめとした方々に多くのご助言をいただいた。

これら多くの方々のご尽力に深く感謝するものである。

本報告に関連する現業導入したエーロゾルデータ同化手法の開発においては、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業16H02946「次世代静止気象衛星と数値モデルを融合したエアロゾル統合研究の新展開」、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構第一回地球観測研究公募「静止気象衛星ひまわり8号エアロゾルプロダクトによるデ

ータ同化を用いた準リアルタイムエアロゾル予測システムの構築」, 環境省環境研究総合推進費 5-1502 「多様な環境影響評価に資する風送エアロゾル濃度分布情報提供システムの構築」の助成を受けた。環境省大気汚染物質広域監視システムによる浮遊粒子状物質の観測データは, 国立研究開発法人国立環境研究所の環境数値データベース (<https://www.nies.go.jp/igreen/>) より入手したものである。この浮遊粒子状物質の観測地点図に使用した地図には, 国土交通省国土地理院タイル (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>) を利用した。

参考文献

- Adachi, Y., S. Yukimoto, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, T. Y. Tanaka, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, E. Shindo, H. Tsujino, R. Mizuta, S. Yabu, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh (2013): Basic performance of a new earth system model of the Meteorological Research Institute (MRI-ESM1). *Pap. Meteorol. Geophys.*, **64**, 1-19.
<https://doi.org/10.2467/mripapers.64.1>.
- Benedetti, A., J. J. Morcrette, O. Boucher, A. Dethof, R. J. Engelen, M. Fisher, H. Flentje, N. Huneeus, L. Jones, J. W. Kaiser, S. Kinne, A. Mangold, M. Razinger, A. J. Simmons, and M. Suttie (2009): Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: 2. Data assimilation. *Journal of Geophysical Research*, **114**, D13205.
<https://doi.org/10.1029/2008JD011115>.
- Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M. Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, and R. Yoshida (2016): An introduction to Himawari-8/9 – Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 151-183.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-009>.
- 池上 雅明, 松本 康志, 眞木 貴史, 辰己 弘, 石水 尊久, 安達 正樹, 鈴木 健司, 本田 耕平, 田中 泰宙 (2007): 気象庁黄砂予測モデルの改良. 日本気象学会 2007 年春季大会講演予講集, 284.
- 石水 尊久, 眞木 貴史 (2005): 気象庁黄砂予測モデル(MASINGAR)の陸面テーブルの更新について. 日本気象学会 2005 年春季大会講演予稿集, 431.
- 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 Trans. Geosci. Remote Sens.*, **56** (6), 3442-3455.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2800060>.
- 木下 篤哉, 眞木 貴史 (2009): 気象庁の黄砂情報と黄砂予測モデルについて. *天気*, **56**, 781-786.
- 気象庁 (2011): 地上気象観測指針 (令和 2 年 4 月改正) .
- 気象庁地球環境・海洋部 (2014): 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第 404 号 ~黄砂予測モデルの改良について~.
- 気象庁地球環境・海洋部 (2016): 配信資料に関する技術情報 第 436 号 ~黄砂予測モデルの高解像度化と改良に伴う新形式 GPV の配信について~.
- 気象庁地球環境・海洋部 (2019): 配信資料に関する技術情報 第 523 号 ~黄砂解析予測モデルの改良による黄砂分布の解析予測改善及び新形式 GPV データの配信について~.
- 気象庁観測部 (2003): 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第 151 号 ~ FTP 方式による黄砂予測 GPV の提供について~.
- 気象庁観測部 (2005): 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第 186 号 ~黄砂予測モデルの改良について~.

- 気象庁観測部気象衛星課 (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.
- 北島 俊行, 吉田 真由美, 村上 浩 (2021) : ひまわり 8 号・9 号可視・近赤外エーロゾルプロダクトのアルゴリズム更新. 測候時報, **88**, 19-28.
- 栗原 幸雄, 桜井 敏之, 倉賀野 連 (2006) : 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, s1-s18.
- Murata, H., K. Saitoh, and Y. Sumida (2018) : True color imagery rendering for Himawari-8 with a color reproduction approach based on the CIE XYZ color system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 211-238.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-049>.
- 小木 昭典, 田中 泰宙, 大河原 望, 眞木 貴史, 関山 剛, 弓本 桂也 (2015) : 気象庁黄砂予測モデルの高精度化. 日本気象学会 2015 年秋季大会講演予稿集, D360.
- 小木 昭典, 田中 泰宙, 青柳 暁典, 出牛 真, 弓本 桂也, 関山 剛, 眞木 貴史 (2017) : 気象庁黄砂予測モデルの高解像度化と予測精度検証. 日本気象学会 2017 年秋季大会講演予稿集, B405.
- 関口 亮平, 長澤 亮二, 中川 雅之, 藪 将吉 (2019) : 全球モデルの改良と展望—第 3.3 節 放射. 数値予報課報告・別冊, **65**, 66-80.
- 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 エーロゾルプロダクト. 気象研究ノート, **238**, 85-97.
- Sekiyama, T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi (2010) : Data assimilation of CALIPSO aerosol observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 39-49.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-39-2010>.
- Sekiyama, 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.
<https://doi.org/10.2151/sola.2016-020>.
- Shimizu, A. (2020) : Introduction to Himawari-8 RGB composite imagery. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, **65**.
- Stauffer, D. R. and N. L. Seaman (1990) : Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data. *Monthly Weather Review*, **118**, 1250-1277.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1990\)118<1250:UOFDDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118<1250:UOFDDA>2.0.CO;2).
- 田中 泰宙, 眞木 貴史, 石水 尊久, 海老田 綾貴, 千葉 長 (2005) : 全球鉱物ダスト輸送モデルの開発と黄砂現象予測への応用. エーロゾル研究, **20**, 297-305.
<https://doi.org/10.11203/jar.20.297>.
- 田中 泰宙, 小木 昭典, 大河原 望, 弓本 桂也, 関山 剛, 大島 長, 眞木 貴史 (2015) : 気象庁黄砂予測のための次期全球エーロゾル予測モデルの開発. 日本気象学会 2015 年秋季大会講演予稿集, P362.
- 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.
- Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka (2003) : MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **53**, 119-138.
<https://doi.org/10.2467/mripapers.53.119>.
- Tanaka, T. Y. and M. Chiba (2005) : Global Simulation of Dust Aerosol with a Chemical Transport Model, MASINGAR. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **83A**, 255-278.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.83A.255>.
- Yabu, S., T. Y. Tanaka, and N. Oshima (2017) : Development of a multi-species aerosol-radiation scheme in JMA's global model.

- CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., **47**, 4.15–4.16.
- 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. Meteorol. Soc. Jpn.*, **96B**, 193-209.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-039>.
- Yoshimura, H. and S. Yukimoto (2008) : Development of a Simple Coupler (Scup) for Earth System Modeling. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 19-29.
<https://doi.org/10.2467/mripapers.59.19>.
- Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh (2012) : A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model Description and Basic Performance—. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **90A**, 23-64.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-A02>.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii (2019) : The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931-965.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>.
- 弓本 桂也 (2017) : ひまわり 8 号データを用いたエアロゾル同化予測システムの開発. エアロゾル研究, **32**, 101-107.
<https://doi.org/10.11203/jar.32.101>.
- Yumimoto, K. and T. Takemura (2011) : Direct radiative effect of aerosols estimated using ensemble-based data assimilation in a global aerosol climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21802.
<https://doi.org/10.1029/2011GL049258>.
- Yumimoto, K. and T. Takemura (2013) : The SPRINTARS version 3.80/4D-Var data assimilation system: development and inversion experiments based on the observing system simulation experiment framework. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 2005–2022.
<https://doi.org/10.5194/gmd-6-2005-2013>.
- Yumimoto, K., H. Murakami, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, A. Ogi, and T. Maki (2016a) : Forecasting of Asian dust storm that occurred on May 10–13, 2011, using an ensemble-based data assimilation system. *Particuology*, **28**, 121-130.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.09.001>.
- 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 (2016b) : Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 5886-5894.
<https://doi.org/10.1002/2016GL069298>.
- Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, N. Oshima, and T. Maki (2017) : JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 3225-3253.
<https://doi.org/10.5194/gmd-10-3225-2017>.
- Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami, and T. Maki (2018) : Assimilation and Forecasting Experiment for Heavy Siberian Wildfire Smoke in May 2016 with Himawari-8 Aerosol Optical Thickness. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **96B**, 133-149.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-035>.