
報 告

気象庁全球黄砂予測モデルの更新について田中 泰宙¹・小木 昭典²**要 旨**

気象庁黄砂情報提供業務における黄砂予測情報の改善のため、平成 26 年 11 月と平成 29 年 2 月に黄砂予測モデルの更新を行った。平成 26 年から更新された黄砂予測モデルは、大気大循環モデルを気象庁・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ロゾルモデル (MASINGAR mk-2) を基とし、土壌を起源とする黄砂の定量的な改良を行った。また、今後黄砂予測にエロゾル光学的厚さによるデータ同化を導入するため、鉱物ダストと同様に放射に影響を与え視程を低下させる他の種類のエロゾル粒子として海塩・硫酸塩・黒色炭素・有機炭素も新たに予測変数として導入した。平成 29 年の更新ではモデルの水平解像度を約 1.125 度から約 0.375 度に向きさせた。黄砂予測モデルによる予測結果は気象官署による目視観測とともに、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濃度とも比較検証を行い、更新による予測精度の向上が確認された。

1. はじめに

黄砂は、視程の低下や健康被害 (e.g., Kanatani *et al.*, 2010 ; Goudie, 2014 ; Onishi *et al.*, 2015 ; Kojima *et al.*, 2017) をもたらすなど、国民生活において関心の高い現象である。黄砂は、地上気象観測において「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) と定義されているように、大気中に浮遊する土壌由来の微小な粒子 (鉱物ダスト) によってもたらされる。黄砂現象の原因となる砂塵嵐は、発源地において甚大な被害をもたらす現象であり、人間や家畜の生命や健康、交通、経済活動への脅威

となっている。気象庁では平成 16 年 1 月から、視程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、また数値予測モデルや天気図などから向こう 24 時間先までに影響を及ぼすような黄砂が予想された場合に、気象庁予報部から「黄砂に関する全般気象情報」を発表している。また、各地の気象台や測候所では、担当予報区内における影響等を踏まえ、黄砂に関する地方気象情報、又は府県気象情報を発表している。さらに、地上気象観測による黄砂観測情報と黄砂予測数値モデルによる予測情報を気象庁ホームページで提供している (気象庁観測部, 2003 ; 田中ほか, 2005)。

¹ 地球環境・海洋部環境気象管理官付 (現 気象研究所環境・応用気象研究部)

² 地球環境・海洋部環境気象管理官付
(平成 30 年 1 月 15 日発行)

黄砂現象のような砂塵嵐による鉱物ダストの監視と予測は国際的にも大きな問題となっている。当庁以外にも、欧州中期予報センター (ECMWF) や英国気象局, 米国海洋大気庁, 米国海軍研究所, 米国航空宇宙局, バルセロナ・スーパーコンピューティング・センター (BSC), 中国気象局, 韓国気象庁等では鉱物ダストやそれを含むエアロゾルの数値予測を行っている。世界気象機関 (WMO) では全球大気監視計画 (GAW) と世界気象研究計画 (WWRP) の下で, 砂塵嵐を監視・予測する機能を強化するため砂塵嵐警戒監視システム (SDS-WAS) を 2006 年に立ち上げている。SDS-WAS は北アフリカ・中東・欧州 (NA-ME-E) 地区, アジア地区及び北米地区で活動を行っており, それぞれの地区の鉱物ダストの数値予測の相互比較やアンサンブルプロダクトの提供を行っている。また, WMO では砂塵嵐情報に関する地区特別気象中枢 (Regional Specialized Meteorological Centre with activity specialization on Atmospheric Sand and Dust Forecast; RSMC-ASDF) が設置され, その必須機能として数値予報モデルによる砂塵嵐予測を提供することが掲げられている。SDS-WAS NA-ME-E 地区を運営する BSC は 2013 年に (Nickovic *et al.*, 2015), アジア地区を運営する中国気象局は 2017 年に RSMC-ASDF に指定されている。RSMC-ASDF が設置されることによって, それまで研究的な側面が強かった数値モデルによる砂塵嵐の予測は, より気象業務的な側面が強調されることとなり, その信頼性もより重視されることとなった。砂塵嵐の数値予報にはさらに研究と改良が必要であるため, SDS-WAS では今後も研究的活動が継続される (Nickovic *et al.*, 2015)。当庁は SDS-WAS 計画開始時から活動に参加しており, 砂塵嵐予測のモデル相互比較等に参加が求められている。

黄砂予測モデルでは主に大気中に浮遊する鉱物ダストを予測対象としている。鉱物ダストは他の種類のエアロゾルと混合することによって, 視程や健康, 放射などへの影響が複雑なものとなり得る。鉱物ダストと他のエアロゾルが混合すると視程は鉱物ダスト単独の場合よりも低下するため, 黄砂現象と煙霧との判別が難しくなる。また, 工

業起源等の他のエアロゾル粒子と混合した粒子は重金属等を含み, 人体の健康への影響が大きいことも懸念されている (e.g., Onishi *et al.*, 2012)。さらに, エアロゾルは放射を直接的に散乱・吸収すること, 及び雲の光学的特性を変化させることによる間接的な影響を通じて大気放射に影響を及ぼす。エアロゾルによる放射への影響は気候のように長期的に重要であるだけでなく, 短期の気象予測にも重要であることが指摘されている (Rodwell and Jung, 2008 ; Mulcahy *et al.*, 2014)。一方, 近年では衛星によるエアロゾル光学的厚さ観測を用いたエアロゾルのデータ同化手法が発展しつつある。このデータ同化を黄砂予測モデルに適用する場合, エアロゾル全体の光学的厚さを計算する必要がある。

平成 16 年 1 月に導入された黄砂予測モデル (以後 H16 モデルと称する) には気象研究所で開発された全球エアロゾルモデル MASINGAR (Model of aerosol species in the global atmosphere ; Tanaka *et al.*, 2003) が用いられている。このモデルは大気大循環モデルと結合されており, 鉱物ダストを数値モデル中で計算することによって, 大規模な黄砂現象を数日前から予測することが可能である。黄砂予測モデルは平成 16 年の導入以来, 積雪解析値の導入 (石水・眞木, 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 (気象庁観測部, 2005)。H16 モデルでは土壌起源の鉱物ダストのみを予測対象としていたため, 鉱物ダストと他の種類のエアロゾルとが混合した場合の視程の低下の影響を評価出来ないことや, 人工衛星や地上での放射観測等を用いたデータ同化や直接の定量的比較検証を行うことが難しい等の課題があった。

地球環境・海洋部環境気象管理官では, 平成 26 年 11 月 20 日及び平成 29 年 2 月 22 日に全球黄砂予測モデルの更新を行った (気象庁地球環境・海洋部, 2014, 2016 ; 小木ほか, 2015, 2017)。平成 26 年に更新されたモデル (以後 H26 モデルと称する) では, 鉱物ダスト以外のエアロゾル粒子の影響の評価を可能とするため, 大気中の主要なエアロゾル成分を予測変数として導入している。平成 29 年 2 月に更新されたモデル (以後

H29 モデルと称する)では水平解像度を向上させ、ダスト放出過程を改良する等の更新を行った。本稿ではこれら新しい黄砂予測モデル (H26 モデル及び H29 モデル) について解説する。

2. 黄砂予測モデルについて

2.1 黄砂予測モデルの構成

黄砂予測モデル (H26 モデル及び H29 モデル) は、大気大循環モデル MRI-AGCM3 (Mizuta *et al.*, 2006 ; Yukimoto *et al.*, 2012) と全球エアロゾルモデル MASINGAR mk-2 を結合させた構成となっている。これは気象研究所の気候変動研究に用いられる地球システムモデル MRI-ESM1 (Adachi *et al.*, 2013 ; Yukimoto *et al.*, 2011) のサブモデルである。なお、MRI-ESM1 は、大気大循環モデル MRI-AGCM3, MASINGAR mk-2, 大気化学モデル MRI-CCM2 (Deushi and Shibata, 2011) 及び海洋大循環モデル MRI.COM から構成されている。各構成モデルの結合には気象研究所で開発されたカップラー・ライブラリ Scup (Yoshimura and Yukimoto, 2008) を用いる。Scup によるモデルの結合では、各々が独立した計算モジュールとして動作しつつ、並列計算ライブラリ Message Passing Interface (MPI) を用いてデータ交換を行う。この構成により、MRI-ESM1 は共通フレームワークを用いつつ各構成モデルを効率良く開発・運用することが可能であり、気象庁紫外線情報のための全球化学輸送モデルにも用いられている。MRI-ESM1 は気候モデルとして大気海洋結合モデル比較実験 CMIP5 等を通じて IPCC の気候変動予測や化学気候モデル相互比較実験 CCM1 に貢献している (Morgenstern *et al.*, 2017)。

2.2 大気モデル

大気大循環モデル MRI-AGCM3 は、気象庁・気象研究所統一大気大循環モデルとして、気象庁の全球モデルを気候研究に用いるための変更を加えたものである。H16 モデルに用いられてきた全球大気モデル MRI/JMA 98 AGCM (Shibata *et al.*, 1999) との比較を第 1 表に示す。MRI-AGCM3 は移流過程にセミ・ラグランジュ法を用いており、

スペクトル法を用いる H16 モデルよりも長い時間刻みで安定した計算が可能である。

また、MRI-AGCM3 の放射伝達過程及び雲微物理過程には、エアロゾルモデル MASINGAR mk-2 によって計算される 3 次元のエアロゾル濃度分布を用いて、エアロゾルの直接効果及び間接効果を取り入れることが可能である (Yukimoto *et al.*, 2011)。

黄砂現象の原因となる鉱物ダストの放出を計算するためには、放出源となる陸面過程の扱いが非常に重要となる。MRI-AGCM3 の陸面過程は H16 モデルで用いられている 3 層 SiB (SiBL3) から HAL (Hydrology, Atmosphere and Land) モデルに変更されている (保坂ほか, 2010)。HAL は植生サブモデルとして、SiB とほぼ等価なものを含み、かつ積雪及び土壌の各サブモデルは H16 モデルよりも多層とすることにより日変化等の再現能力が向上している。また、HAL には積雪過程に積雪変態・アルベドプロセスモデル SMAP (Niwano *et al.*, 2012) が組み込まれており、光を吸収する性質をもつ黒色炭素・鉱物ダストが積雪面上に沈着することによって積雪アルベドが低下する影響を表現することが出来る (保坂ほか, 2010)。

黄砂予測では、気象庁全球解析値及び全球予報値による 6 時間ごと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) を用いる。

2.3 全球エアロゾルモデル

H26 モデル及び H29 モデルは、全球エアロゾルモデル MASINGAR (Tanaka *et al.*, 2003) を改良した MASINGAR mk-2 を基にしている。H16 モデルと更新モデルの比較を第 2 表に示す。

H26 モデル以降は、土壌起源の鉱物ダストの発生・輸送・沈着過程は Tanaka and Chiba (2005) による改良モデルに変更している。この変更により、鉱物ダストの発生過程は単純な地上風速の関数から、摩擦速度に基づく半経験的な理論式となり、大気安定度の効果が考慮される他、粒子の粒

第 1 表 黄砂予測モデルの主な変更点 (全球大気大循環モデル部)

	H16 モデル	H26 モデル	H29 モデル
力学フレーム	全球スペクトルモデル	全球スペクトルモデル	←
気象モデル	MRI/JMA98 (MJ98)	MRI-AGCM3 (GSMUV)	MRI-AGCM3 (GSMUV)
空間解像度	T106L30 水平：1.125°×1.125° (約110km) 鉛直：地上～5hPa (約35km), 30 層	TL159L40 水平：1.125°×1.125° (約110km) 鉛直：地上～0.4hPa (約55km), 40 層	TL479L40 水平：0.375°×0.375° (約40km) 鉛直：地上～0.4hPa (約55km), 40 層
時間積分移流スキーム	セミ・インプリシット法 オイラー法	セミ・インプリシット法 鉛直保存セミ・ラグランジュ法	←
積雲対流	Arakawa-Schubert スキーム	Tiedtke-like スキーム (Yoshimura et al., 2015) ^a	←
放射過程	2 方向近似 (Shibata)	2 方向近似 (JMA2004R1)	←
陸面モデル	SiBL3	HAL ^b	←
乱流拡散	Mellor-Yamada (Level2)	Mellor-Yamada (Level2)	←
ナッジング	全球解析・予報値 (水平風 2 成分及び気温)	全球解析・予報値 (水平風 2 成分及び気温)	←
その他変更点		Scup による結合及び MPI 並列計算	←

^aArakawa-Schubert, K-F scheme も選択可能

^bSiBL1, SiBL3 も選択可能

径の効果がより詳細に反映される。また、沈着過程においても粒子と降水粒子の衝突の効率が考慮される。また、H16 モデルで扱っていた鉱物ダストに加えて、他の主な大気エアロゾル成分である海塩粒子、硫酸塩、黒色炭素、有機炭素を扱う。これによって、視程の低下現象の主な原因が、鉱物ダストによるか他のエアロゾルによるかを診断する等、他のエアロゾルの存在を認識しながら黄砂現象を判断することが可能となる。さらに、予

測された各種エアロゾル粒子の質量と大気密度、相対湿度から、エアロゾル全体の光学的厚さを計算する。これによって、気象庁や他機関で観測されているエアロゾル光学的厚さと直接の定量的な比較や検証が可能となった。

エアロゾルは水分を吸着する性質の有無、すなわち吸着する親水性粒子と水分を吸着しない疎水性粒子とに分類される。このモデルでは、硫酸塩と海塩は親水性粒子、鉱物ダストは疎水性粒子と

第 2 表 黄砂予測モデルの主な変更点 (全球エロゾルモデル部)

エーロ ゾルモ デル	H16 モデル (MASINGAR mk-1)	H26 モデル (MASINGAR mk-2 rev.2β)	H29 モデル (MASINGAR mk-2 rev.3)
空間解 像度	水平方向 : 1.125°×1.125° (約 110km) 鉛直方向 : 地上~42hPa (約 23km), 20 層	水平方向 : 1.125°×1.125° (約 110km) 鉛直方向 : 地上~0.4hPa (約 55km), 40 層	水平方向 : 0.375°×0.375° (約 40km) 鉛直 : 地上~0.4hPa (約 55km), 40 層
予測エ ロゾ ル変数	土壌粒子 (0.2 – 20 μm 区間を 10 分割)	土壌粒子, 海塩, 硫酸塩, 黒色炭素, 有機炭素(土壌 及び海塩粒子は 0.2 – 20 μm 区間を 10 分割)	←
土壌粒 子放出 化学計 算	地表 10m 風速の関数(風 速の 3 乗に比例) なし	地表面摩擦風速の関数 (Tanaka and Chiba, 2005) DMS, OCS 及び SO ₂ か ら気相・液相反応を通じ て硫酸塩を生成する	← ←
放出イ ンベン トリ	なし	RCP4.5 シナリオ インベ ントリ (Lamarque et al., 2012)	←
乾性沈 着	抵抗モデル	←	←
湿性沈 着	雲内除去, 降水除去	←	←
移流過 程	鉛直保存セミ・ラグラン ジュ法	鉛直保存セミ・ラグラン ジュ法	←
その他 変更点		Scup による結合及び MPI 並列計算	

仮定する。また、炭素系粒子である黒色炭素と有機炭素は疎水性と親水性の粒子を別個に扱い、疎水性粒子は時間とともに表面に水分を吸収する硫酸塩等の成分が付着することによって親水性粒子に変化すると仮定する。

H26 モデル及び H29 モデルの空間解像度は、H26 モデルでは水平方向は H16 モデルと同じ TL159 (約 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$) であったが、H29 モデルは TL479 (約 $0.375^\circ \times 0.375^\circ$) に高解像度化した。鉛直方向は H16 モデルが地表から約 42 hPa までの 20 層であったのに対して、H26 モデル及び H29 モデルでは地表から 0.4 hPa 高度までの 40 層に高解像度化を行っている。

2.3.1 大気輸送過程

エアロゾルの大気中の輸送過程は、大規模な大気の流れによる輸送 (移流過程) と、渦拡散、積雲対流等サブグリッドの流れによる過程、及びエアロゾル粒子の重力による沈降過程がある。エアロゾルモデルの移流過程の計算は、MRI-CCM2 (Deushi and Shibata, 2011) と同様のセミ・ラグランジュ法計算モジュールを基に、全球領域を緯度方向に沿って東西で分割し MPI ライブラリで並列計算できるように変更した。

水平方向のセミ・ラグランジュ法計算では、格子内挿に 4 次のラグランジュ内挿を用い、質量保存の確保及びエアロゾル濃度が負にならない条件のために低次 (1 次) 内挿補間値によって補正を加える。鉛直方向は、質量を保存するフラックス形式で移流計算し、内挿には piecewise rational 法 (Xiao and Peng, 2004) を用いる。この鉛直輸送の計算では鉛直速度に従って気圧座標が変形される形式をとる (Shibata and Deushi, 2008)。

鉛直方向のサブグリッドの流れによる輸送は、対流渦拡散による混合、積雲対流による輸送を考慮する。対流渦拡散係数及び積雲対流での輸送係数は、大気モデル MRI-AGCM3 によって計算されたそれぞれの値を用いて計算する。エアロゾルの重力による沈降は粒子を球形と仮定し、ストークスの終端速度にカニンガムの補正項を考慮した落下速度を計算することによって輸送を計算する。詳細は Tanaka *et al.* (2003) を参照されたい。

2.3.2 エアロゾルの放出過程

2.3.2.1 鉱物ダスト

黄砂現象の原因となる微小 (約 $20 \mu\text{m}$ 以下) な鉱物ダストの粒子は、乾いた裸地上であるしきい値以上の強い風が吹くときに大気中に放出される。強風による地表面の風の摩擦応力がしきい値に達すると、まず数十～数百 μm 程度の鉱物粒子が跳躍運動 (サルテーション) を始める。この跳躍する粒子が地表面に落下するとき、より細かなダスト粒子を弾き出す。このプロセスは「サルテーション・ボンバードメント」と呼ばれ、大気中に浮遊する鉱物ダストの主な発生要因となっている (Gillette, 1978 ; Shao, 2008)。ここでは、サルテーション・ボンバードメントを Shao *et al.* (1996) の半経験的な理論式に基づいて実装している (Tanaka and Chiba, 2005)。鉱物ダストの粒子は、 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の粒子は機械的な作用によっては生じにくく、また $20 \mu\text{m}$ 以上の粒子は重力沈降によって速やかに大気から除去されると考える。

H16 モデルでは、風による地表面の摩擦応力を地上 10 m 風速で代表させ、鉱物ダストは 6.5 m s^{-1} 以上の風速の時に大気中に放出されると仮定していた。H26 モデル及び H29 モデルでは、地表面の応力に対する大気安定度の効果を考慮するため、裸地上の摩擦速度 (u_{*s}) を用い、そのしきい値を臨界摩擦速度 (u_{*c}) として表している。臨界摩擦速度は、土壌水分や凍結状態等の状態によって変化するため、乾燥土壌における値を Shao and Lu (2000) の式を用いて表し、土壌水分の影響を Fécan *et al.* (1998) のパラメタリゼーションによるファクター (f_w) によって考慮している。すなわち、臨界摩擦速度 u_{*c} は

$$u_{*c}(D) = f_w \sqrt{A_N \left(\frac{\rho_p g D}{\rho_a} + \frac{\Gamma}{\rho_a D} \right)}$$

ここで D は粒径、 g は重力加速度、 ρ_a は大気密度、 ρ_p は粒子の密度であり、 $A_N = 0.0123$ 及び $\Gamma = 3 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-2}$ は実験定数である。土壌水分によるファクター f_w は以下のように計算される。

$$f_w = \begin{cases} 1 & w \leq w_r \\ f_i \sqrt{1 + a[100(w - w_r)]^b} & w > w_r \end{cases} \quad c_s(D_s) = 0.25 + \frac{V_s(D_s)}{3u_{*s}}$$

ここで w は重量土壌水分量, w_r は重量土壌水分量のしきい値, a 及び b は経験定数であり, Shao *et al.* (1996) に従い $a = 1.21, b = 0.68$ とする. また, f_i は土壌凍結によって粒子間結合力が増加する効果 (Kang *et al.*, 2013) を考慮するためのファクターである. 土壌温度が 0°C 以下のときは, 感度実験により H29 モデルでは $f_i = 1.2$ とし (H26 モデルは $f_i = 1.5$), また土壌水分の凍結による体積増加を考慮して w を 10% 増加させている.

粒径区間 $[D_i, D_{i+1}]$ のダストの鉛直方向の放出量フラックスは Shao *et al.* (1996) によって次のように計算される.

$$\tilde{Q}(D_s) = \begin{cases} \frac{c_s(D_s)\rho_a u_{*s}^3}{g} \left(1 - \frac{u_{*t}(D_s)^2}{u_{*s}^2}\right) & u_{*s} > u_{*t} \\ 0 & u_{*s} \leq u_{*t} \end{cases}$$

$$\Delta F_{i0} = CA \frac{2}{3} \frac{\rho_p \gamma}{\rho_a} \int_{D_i}^{D_{i+1}} \frac{\beta_2(D_d)}{u_{*t}(D_d)^2} p(D_d) dD_d \\ \int_0^\infty \beta_1(D_s) \tilde{Q}(D_s) p(D_s) dD_s$$

ここで D_d は放出されるダストの粒径, D_s は跳躍運動する鉱物粒子の粒径, $\tilde{Q}(D_s)$ は跳躍運動する粒子の水平方向のフラックス, $p(D)$ は鉱物粒子の粒径分布, A はモデル格子内でダストを放出する面積の割合, C は全球的な調整係数である. パラメータ β_1, β_2 及び γ は, Shao *et al.* (1996) に従い,

$$\beta_1(D_s) = (0.125 \ln(D_s) + 0.328) \times 10^{-4} \\ \beta_2(D_d) = \exp(-140.7 D_d + 0.37) \\ \gamma = 2.5$$

とする. 跳躍運動粒子のフラックス $\tilde{Q}(D_s)$ は Owen (1964) の式を用いて計算する. $c_s(D_s)$ は次のように計算される.

ここで $V_s(D_s)$ は粒径 D_s の跳躍運動粒子の重力沈降速度である. 鉱物粒子の粒径分布 $p(D)$ は Webb *et al.* (2000) による全球土性分布データベースから与える. 鉱物ダストの粒径分布 $0.2 - 20 \mu\text{m}$ の粒径を対数的に 10 個の区間に分割して表現する.

モデル格子内で鉱物ダストを放出する地表面の割合 A は, モデル格子のうち, 格子面積中の植生被覆率 A_v , 積雪被覆率 A_s , 水面の割合 A_w , 及びダストを放出する土地利用区分の割合 A_l , 土壌の種類別の割合 A_t 及び地理的なダスト放出関数 f から次のように計算される.

$$A = f(1 - A_v)(1 - A_s)(1 - A_w)A_l A_t$$

積雪面の割合 A_s は大気モデルの陸面過程で計算される値を用いる. 植生の割合 A_v は衛星観測による Leaf Area Index から求められた各月ごとの植生の割合を用いる. 土壌の種類別の割合 A_t には Zobler (1986) のデータを用い, 固結岩屑土 (リソゾル) は山岳の岩石状の土壌であるためダストは放出しないと仮定する. また土地利用区分による割合 A_l と水面の割合 A_w はアメリカ地質調査所 (USGS) の土地利用データベースを用い, 都市・湿地・沼地・水田・陸地内水面等を鉱物ダスト放出計算から除外して計算する. f は “preferential source area” と呼ばれ, A_v, A_s, A_w, A_l, A_t のみでは表現できない地理的な因子を表現するために導入する (Ginoux *et al.*, 2001; Tegen *et al.*, 2002; Zender *et al.*, 2003). 微小な鉱物粒子は, 岩石の風化で生成され, 風や河川等で輸送された後に川底や谷, 湖底に集積すると考えられる. 鉱物ダストは凹んだ地形等の特定の点のように見える非常に狭い箇所 (ダストの “hot spot” と呼ばれている) から放出されていることが観測されている (Prospero *et al.*, 2002). preferential source area にはいくつかの方法が提唱されている. 例えば地形のうち窪地 (凹になっている箇所, topographical low) にはダストが集積していると仮定するものや, 河川流域から推定するもの, 地表反射率の高い地域は細かいダストが集積していると仮定

するもの等、様々な研究例がある (e.g., Ginoux *et al.*, 2001 ; Grini, 2005 ; Tegen *et al.*, 2002 ; Zender *et al.*, 2003). H29 モデルでは, Grini (2005) を 基 に, Clouds and the Earth' s Radiant Energy System (CERES) 観測の地表面反射率データを基にしたダスト放出関数を用いる.

2.3.2.2 海塩粒子

海塩粒子は、海面上で強風によって波が生じたときに波によって生じる泡沫が直接大気中に放出される過程 (直接的機構) や、気泡の破裂によって微小な粒子が弾け飛ぶ過程 (間接的機構) によって大気中に放出される. 鉱物ダストの場合と同様に、海塩粒子の場合も $0.2 \mu\text{m}$ 以下の粒子は機械的な作用によっては生じにくく、また $20 \mu\text{m}$ 以上の粒子は重力沈降によって速やかに大気から除去されると考え、扱う直径の区間を $0.2\text{--}20 \mu\text{m}$ とする. さらに、この区間を対数的に 10 個の粒径区分に分割し、それぞれを独立に扱う. 直接的機構によって生じる海塩粒子は一般に粒径が $20 \mu\text{m}$ 以上の粒子であるため、本モデルでは間接的機構による海塩粒子のみを考慮する.

海塩粒子の放出量フラックスは、Gong (2003) による経験的パラメタリゼーションによって粒径毎に計算する. Gong (2003) のパラメタリゼーションは、Monahan *et al.* (1986) のパラメタリゼーションを基にして、主に $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒径の領域を改良したものである. 各粒径区分の放出量フラックスは各粒径区分の粒径の範囲で積分することによって求める. 海洋上に氷が存在する場合は海塩粒子の放出量は格子内の海水以外の面積の割合に比例すると仮定する.

2.3.2.3 硫酸塩エアロゾル及びその前駆物質

硫酸塩エアロゾルは硫黄を含むガスの化学反応によって大気中で生成される. 硫酸塩エアロゾルの前駆物質としては、二酸化硫黄 (SO_2), 硫化ジメチル (DMS) 及び硫化カルボニル (OCS) の化学反応を扱う. また、化学反応の中間生成物質として SO_3 を扱う. 化学反応に必要な酸化剤である OH, H_2O_2 , HO_2 , O_3 , NO_3 , $\text{O}(3P)$ は大気化学モデル MRI-CCM2 (Deushi and Shibata, 2011)

によって計算された月毎の気候値を使用する.

SO_2 の放出量には外部入力データを用いる. 人為起源の SO_2 放出量データには、IPCC の第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) で用いられる RCP4.5 シナリオインベントリ (Lamarque *et al.*, 2010) によって与える. 定常的な火山から排出される SO_2 フラックスには Andres and Kasgnoc (1998) のデータを用いる.

森林や草地、泥炭の火災 (植生火災) によるバイオマス燃焼は、雷等による自然発火や人間の活動によって局所的に発生する. 植生火災からは炭素や SO_2 等の様々な物質が放出され、煙粒子となる. その濃度は非常に高い濃度となりうるため、視程の低下をもたらし、黄砂現象の判定に影響を及ぼす可能性がある. H26 モデルではバイオマス燃焼起源の SO_2 放出量は RCP4.5 シナリオインベントリによる月平均値を用いていたが、植生火災の発生や煙の放出量は変動が大きいため、H29 モデルでは ECMWF によって開発されている GFAS (Kaiser *et al.*, 2012) を導入している. GFAS は衛星観測による火災の放射強度 (fire radiative power) から火災起源の物質放出量を 1 日ごとに推定している.

海洋の植物プランクトンより放出される DMS のフラックスは、海洋表層水中の DMS 濃度に、海水と大気との交換係数を掛けることで求める. 海洋表層水中の DMS は Kettle *et al.* (1999) による観測値を基にした気候値的データを用いる. 海水と大気との交換係数は Liss and Merlivat (1986) による関数を用いる. この方法では、交換係数は地上 10 m 風速の関数として与えられ、風速が強いほど DMS フラックスは大きくなる.

OCS は対流圏では化学反応速度が非常に遅い. 観測によると OCS の混合比は対流圏では約 500 pptv で安定している. OCS は成層圏では光乖離によって分解されて SO_2 となり、成層圏エアロゾルの重要な生成源となる. OCS は最下層において 500 pptv に近づくようにナッジング手法を用い、成層圏での光乖離係数を MRI-CCM2 のデータに基づいた値を用いて化学反応計算し、成層圏エアロゾルの生成源とする.

2.3.2.4 炭素系エアロゾル（黒色炭素及び有機炭素エアロゾル）

燃焼によって生じる炭素系のエアロゾルは、黒色炭素（BC）と有機炭素（OC）とに分類して扱われている。前述のように、炭素系エアロゾルは疎水性粒子と親水性粒子とに分類される。疎水性粒子から親水性粒子への変化の時定数は1.2日と設定している。Cooke *et al.* (1999) に従い、BC 放出量の 80%、OC 放出量の 50% は水分を吸着しないと仮定する。疎水性の BC 及び OC は湿性沈着によって除去されないと仮定する。また、大気中で存在する有機エアロゾル（OA）は有機炭素量（OC）との一定の比率を仮定し、OA/OC = 1.4 としている（Kinne *et al.*, 2006 ; Liu *et al.*, 2012）。

炭素系エアロゾルの主な放出源には、人為起源、バイオマス燃焼起源、及び植物起源の揮発性有機炭素（VOC）がある。人為起源とバイオマス燃焼起源の BC 及び OC の放出量データの既定値は、SO₂ と同様に RCP4.5 シナリオインベントリによって与える。VOC は大気中の酸化過程が非常に複雑であるため、放出量のうちの一定割合が化学反応を通じて粒子化すると仮定する。植物起源の気体の放出量は、GEIA データベースによる月平均テルペン放出量（Guenther *et al.*, 1995）を用い、Chin *et al.* (2002) に従って放出量の 10% が OC として粒子化すると仮定している。バイオマス燃焼起源の BC 及び OC の放出量は、SO₂ と同様に、H26 モデルまでは月平均値のインベントリを用いてきたが、H29 モデルでは GFAS を導入している。

2.3.3 沈着過程

エアロゾル及びその前駆物質の沈着過程では、乾性沈着及び湿性沈着過程を考慮する。乾性沈着過程では乾性沈着速度の計算に抵抗モデル（Seinfeld and Pandis, 2006 ; Wesely and Hicks, 1977）を用いる。湿性沈着過程では Giorgi and Chameides (1986) のパラメタリゼーションを用いて、雲内及び雲底下での降水による除去を扱う。雲底下での降水による除去はエアロゾル粒子と降水粒子との衝突効率が粒径に大きく依存する。このため粒径区分ごとに計算される鉱物ダスト及び

海塩粒子は Tanaka and Chiba (2005) の方法によって雲底下の沈着速度をエアロゾル粒径と降水強度の関数として計算する。水溶性の気体である二酸化硫黄（SO₂）は、雲水の酸性度（pH）を考慮したヘンリー定数から、雲水へ取り込まれる割合を求める。また、気温が 0 °C 以下、-20 °C 以上の場合は気温の低下とともに氷晶が増加すると仮定し、気体が水滴に取り込まれる割合を減少させる。気温が -20 °C 以下の場合は氷晶のみが存在すると仮定して気体の湿性沈着は考慮しない。

2.3.4 エアロゾルの光学的特性の出力

H26 モデル及び H29 モデルでは、Chin *et al.* (2002) の方法に従って各エアロゾルの消散係数及び光学的厚さを計算する。疎水性の粒子は水分の吸収による粒径の変化はないものと仮定する。親水性のエアロゾル粒子は水分を吸収することによって粒径が変化すると考えられるため、それらの光学的厚さを計算するときには相対湿度によるエアロゾル粒径の変化を考慮する。

3. 黄砂現象の予測結果

3.1 モデル更新による精度の変化

3.1.1 統計的スコアによる検証

黄砂予測モデルの更新による予報精度を検証するため、まずモデル予測精度の統計的スコア検証を行った。黄砂現象は発生する確率が小さいため、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・空振り率・適中率と合わせてモデルの評価を行った。

気象庁の黄砂観測は大気現象として目視によって行われ、黄砂の有無が地上気象観測通報（SYNOP 報）に報告されている。黄砂予測のスコア検証では、SYNOP によるダスト現象の有無と、黄砂予測モデルから予測される黄砂現象の有無を、第 3 表のように分割表で表して検証を行う。

黄砂現象のスレット・スコアは以下のように定義される。

$$TS = \frac{FO}{FO + FX + XO}$$

ここで、FO、FX、XO は第 3 表に示されるように、予測と実況でそれぞれ「黄砂あり」と「黄砂なし」

第 3 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	
		あり	なし
黄砂予測	あり	FO	FX
	なし	XO	XX

に場合分けした現象の出現頻度である. スレット・スコアは 1 が完全な予測, 0 がランダムな予測となり, 1 に近いほど高い確率で予測が一致する.

黄砂予測のスコア検証では, SYNOP 報の中で, 現在天気番号が 06 - 09, 30 - 35, 98 としてダスト現象に関係する天気を報告している観測点を黄砂ありとして用いる. SYNOP の現在天気で通報する大気現象には優先順位があり, 黄砂より優先順位が高い雨等の大気現象があった場合には黄砂現象の有無は不明となり, 統計から除外される(木下・眞木, 2009). なお, 気象庁では, 大気中に黄砂が浮遊していて視程が 10 km 未満となった場合や, 視程が 10 km 以上でも明らかに黄砂現象と判断した場合に特殊報として「黄砂」を記録している. しかしながら, このスコア検証ではこの特殊報の「黄砂」の記録を対象としていない.

黄砂予測モデルで扱う物理量から黄砂を判定する方法には, これまでと同じく各層ごとの鉱物ダスト濃度を用いる. 実況に対応する黄砂濃度として, 地表から高度約 1000 m までの平均濃度を計算し, これがあるしきい値を超えた場合に「黄砂現象あり」と判断する. このしきい値は, 予測を可能な限り実況に近づけるため, 黄砂現象が予測される領域が, 黄砂観測実況分布(すなわち, 大気現象として黄砂が目視観測される領域)と一致するように決定される. この検証では, 黄砂予測モデルによる黄砂現象有無のしきい値として, H16 モデルからの気象庁の黄砂情報(予測図)のしきい値である $90 \mu\text{g m}^{-3}$ を用いる.

ここではスコア検証の調査対象として, H16 モ

デルと H26 モデルについては 2010 年から 2014 年にかけての 5 年間の, H26 モデルと H29 モデルについては 2013 年から 2016 年にかけての 4 年間の, また, H16, H26 及び H29 モデルを通じては統一して比較が可能な 2013 年から 2014 年にかけての 2 年間の黄砂頻発期(3 ~ 5 月)における黄砂現象を扱った. 第 1 図に, H16 モデルと H26 モデルによる黄砂予測のスレット・スコアの比較結果を示す. H26 モデルの方が, 予測期間の前半を中心に H16 モデルより精度が改善していることが分かる. 同様に, 第 2 図に, H26 モデルと H29 モデルによる黄砂予測のスレット・スコアの比較結果を示す. この改良においては, 予測期間を通じて精度が改善された. 第 3 図に, H16, H26 及び H29 モデルそれぞれで検証期間を統一して算出した黄砂予測のスレット・スコアの比較結果を示す. 改良ごとに, 予測期間を通じてスレット・スコアが着実に改善していることが分かる.

第 4 ~ 6 表にスレット・スコア以外の指標として, 捕捉率 (Hit Rate), 空振り率 (False Alarm Ratio) 及び適中率 (Percent Correct) の結果をそれぞれ示す. なお, それぞれの指標については, 以下のように定義される.

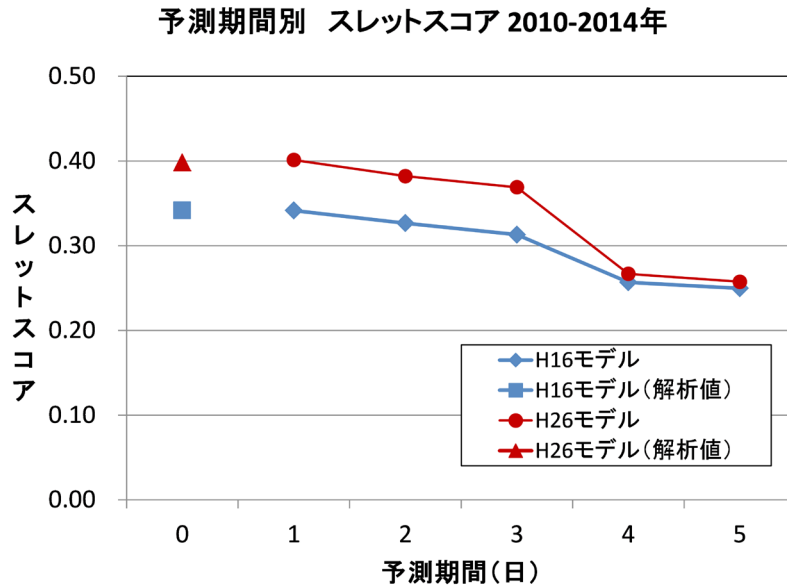
$$HR = \frac{FO}{FO + XO}, \quad FAR = \frac{FX}{FO + FX},$$

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

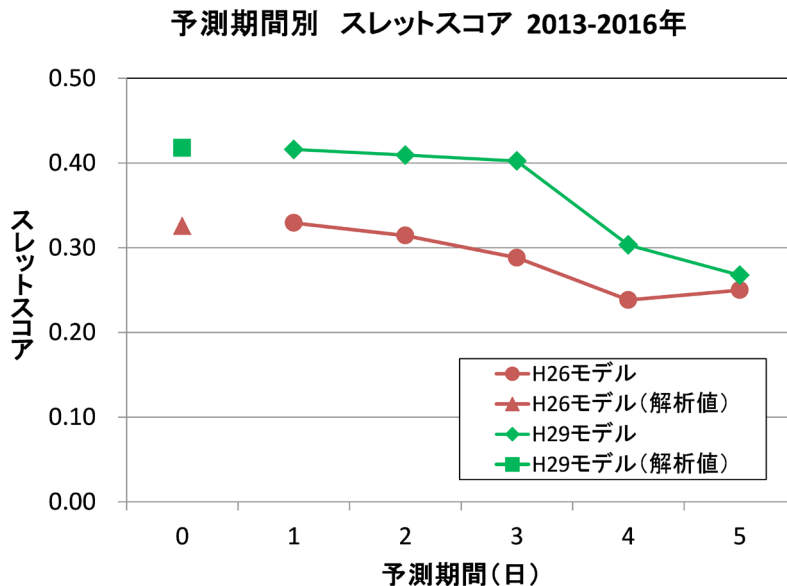
第 4 表の H16 モデルと H26 モデルの比較結果においては, 捕捉率が若干悪くなっているものの, 空振り率及び適中率はいずれも精度改善ができて

いる。第 5 表の H26 モデルと H29 モデルの比較結果においては、予測期間後半の捕捉率は精度が若干悪くなったが、他の指標については精度の改善が確認できた。特に空振り率の改善が顕著である事を考慮すると、主にこれまでの黄砂濃度過大

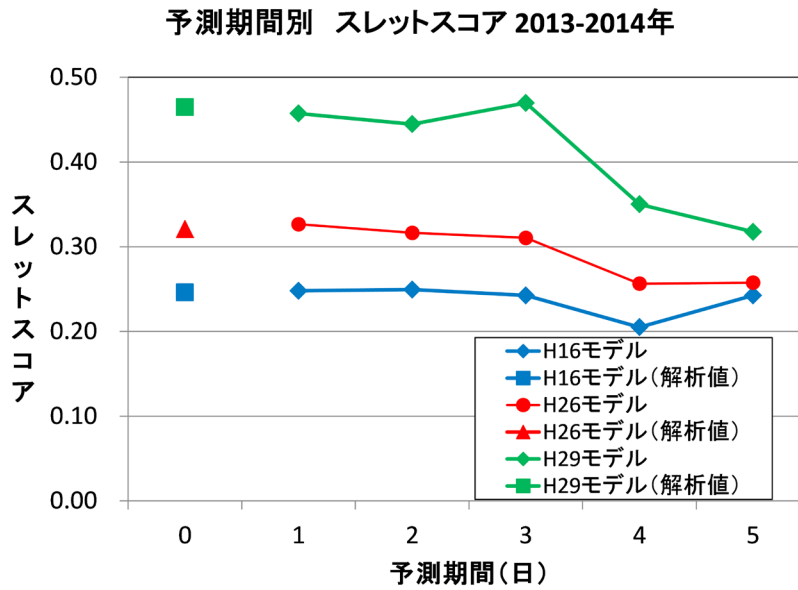
予測の傾向を改善できた事がこれらの特性の要因と考えられる。さらに第 6 表の H16, H26 及び H29 モデルそれぞれで検証期間を統一した比較結果を見ても、捕捉率は予測期間前半を中心に同程度の精度を保ちつつ、空振り率及び適中率の改善



第 1 図 H16 モデルと H26 モデルによる予測期間別のスレット・スコア比較結果
(検証期間：2010～2014年)



第 2 図 H26 モデルと H29 モデルによる予測期間別のスレット・スコア比較結果
(検証期間：2013～2016年)



第 3 図 H16, H26 及び H29 モデルによる予測期間別のスレット・スコア比較結果
(検証期間：2013～2014年)

第 4 表 H16 モデルと H26 モデル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：2010～2014年)

捕捉率	H16モデル	H26モデル	空振り率	H16モデル	H26モデル	適中率	H16モデル	H26モデル
0日	0.885	0.725	0日	0.643	0.531	0日	0.912	0.943
1日	0.879	0.727	1日	0.642	0.528	1日	0.912	0.944
2日	0.831	0.697	2日	0.650	0.542	2日	0.912	0.942
3日	0.795	0.669	3日	0.659	0.548	3日	0.910	0.941
4日	0.648	0.493	4日	0.701	0.633	4日	0.903	0.930
5日	0.610	0.484	5日	0.703	0.645	5日	0.905	0.928

第 5 表 H26 モデルと H29 モデル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：2013～2016年)

捕捉率	H26モデル	H29モデル	空振り率	H26モデル	H29モデル	適中率	H26モデル	H29モデル
0日	0.778	0.771	0日	0.641	0.523	0日	0.955	0.970
1日	0.783	0.784	1日	0.638	0.530	1日	0.955	0.969
2日	0.778	0.792	2日	0.655	0.541	2日	0.952	0.968
3日	0.710	0.706	3日	0.673	0.516	3日	0.951	0.970
4日	0.589	0.524	4日	0.714	0.581	4日	0.947	0.966
5日	0.614	0.494	5日	0.703	0.631	5日	0.948	0.962

第 6 表 H16, H26 及び H29 モデル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：2013～2014年)

捕捉率	H16モデル	H26モデル	H29モデル	空振り率	H16モデル	H26モデル	H29モデル
0日	0.862	0.772	0.800	0日	0.744	0.646	0.474
1日	0.862	0.779	0.812	1日	0.742	0.640	0.489
2日	0.862	0.772	0.806	2日	0.740	0.651	0.502
3日	0.848	0.752	0.752	3日	0.746	0.654	0.444
4日	0.717	0.621	0.545	4日	0.777	0.696	0.505
5日	0.786	0.586	0.491	5日	0.740	0.685	0.526

適中率	H16モデル	H26モデル	H29モデル
0日	0.898	0.937	0.963
1日	0.899	0.938	0.962
2日	0.900	0.936	0.960
3日	0.898	0.936	0.966
4日	0.893	0.931	0.960
5日	0.905	0.935	0.958

が達成できたことが示されている。これらの検証結果より、これまでの黄砂予測を良く改善できたと言える。

3.1.2 黄砂事例の検証：2014年5月29日の黄砂現象

まず、H16モデルとH26モデルによる予測の比較検証例として、日本国内の広い範囲で黄砂が観測された2014年5月29日の黄砂現象の予測結果を示す。第4図(a)は2014年5月29日15時の地上気象観測通報でダストに関係する天気及び黄砂現象が観測された地点を示している。この日は朝鮮半島南部、西日本、東北地方の一部、及び北海道でダスト現象が報告されている。第4図(b)は同時刻の環境省大気汚染物質広域監視システム(そらまめ君)による浮遊粒子状物質濃度(SPM)の分布である。SPMは大気中に浮遊する粒子状物質のうち粒径が10µm以下のものである(PM換算ではおおよそPM7程度に相当する)ことから、黄砂現象が発生したときには濃度が上昇する傾向にある(Sugimoto *et al.*, 2011)。第4図(b)では西日本や東北地方日本海側、北海道で濃度が高く、地上気象観測通報(第4図(a))とよく対応している。

第4図(c)及び第4図(d)に、H16モデルとH26モデルによる2014年5月28日21時を初期値とする18時間黄砂予測結果を示す。H16モデルでは東西南部から東海地方にかけて、SYNOP実況で黄砂現象が観測されていない地域での黄砂濃度が高くなっている。これに対して、H26モデルでは過大領域の予測濃度が改善され、濃度分布がSYNOPによる観測実況に近づいている。これまで、全般的に地表面濃度の予測値は過大傾向にあったが、この改良によって、そのバイアスが改善されている。

3.1.3 黄砂事例の検証：2015年2月23日の黄砂現象

次に、H26モデルとH29モデルによる予測の比較検証として、冬季に黄砂が観測された2015年2月23日の黄砂現象の予測結果を示す。第5図(a)は2015年2月23日0時の地上気象観測通報によるダスト現象観測地点分布である。朝鮮半島・黄海付近の大部分でダスト現象が報告されており、飛来したダストによりこの時刻には福岡で黄砂現象が報告されている。第5図(b)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SPM分布である。地上気象観測通報と対応す

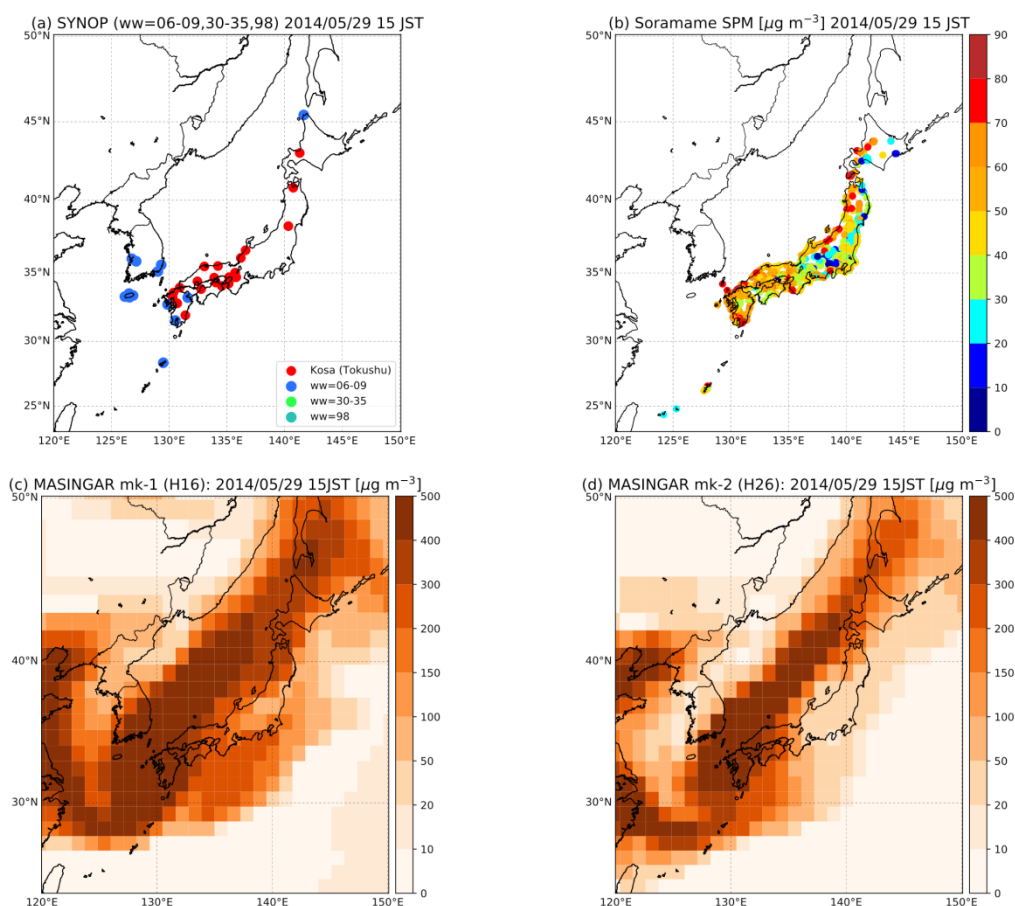
るように、対馬・壱岐・五島列島など九州北部で SPM 濃度が高くなっている。首都圏で SPM 濃度が高いのは、地域的な大気汚染によるものと推定される。

第 5 図 (c) 及び第 5 図 (d) は、H26 モデルと H29 モデルによる 2015 年 2 月 21 日 21 時を初期値とする 27 時間黄砂予測結果 (23 日 0 時相当) である。H26 モデルでは、朝鮮半島から黄海付近にかけて、黄砂が予測されていなかった。これに対して、H29 モデルでは地上気象観測実況に対応してダスト濃度が高くなっており、黄砂予測が観測とよく対応している。H26 モデルでは黄砂発生域において土壌が凍結する条件の場合に、ダストの発生を過剰に抑制する傾向にあった。H29 モデルでは土壌が凍結する条件でのダスト発生を感度

実験によって見直したこと、またモデルの水平解像度向上によって地形・陸面がより詳細に表現されることによって、冬季でも黄砂発生予測が改善する事例を見出せた。

4. まとめと今後の課題

本稿では、平成 26 年 11 月及び平成 29 年 2 月に更新された新しい黄砂予測モデル (H26 モデル及び H29 モデル) についての解説と予測精度についての検証結果を示した。黄砂予測モデルの更新とともに黄砂現象判定のスレット・スコアの向上が確認された。また H26 モデル以降には鉱物ダスト以外の主要なエアロゾル成分も導入されており、エアロゾルの光学観測との比較検証も行うことが可能である。今後さらに、観測研究に基づ



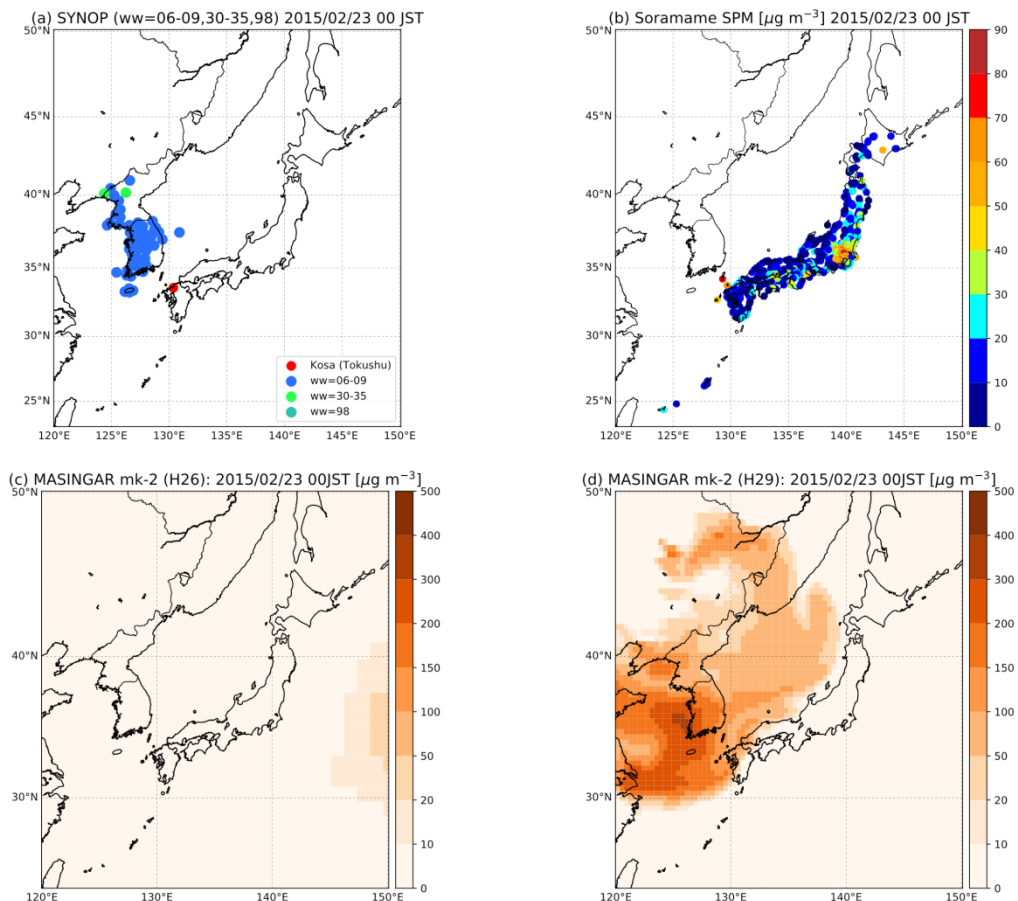
第 4 図 2014 年 5 月 29 日 15 時 (JST) の (a) 地上気象観測通報 (SYNOP 報) の現在天気 (ww) 及び特殊気象報 (黄砂) による黄砂観測実況, (b) 環境省大気汚染物質広域監視システム (そらまめ君) による浮遊粒子状物質 (SPM) 濃度, 及び黄砂予測モデルによる地上付近の黄砂濃度の予測結果 (c) H16 モデル, (d) H26 モデル (単位: $\mu\text{g m}^{-3}$).

く鉱物ダスト放出過程の更なる改良などのモデルの改善とともに、鉱物ダストとそれ以外のエアロゾルを含めた黄砂現象の診断とガイダンスの開発を検討している。

今後の黄砂予測情報の改良としては、衛星観測による植生指数や積雪解析データの準リアルタイム観測データのモデルへの導入、及びデータ同化手法の導入が挙げられる。エアロゾルのデータ同化は、静止気象衛星ひまわり 8 号による光学的厚さ等の観測値を用いたデータ同化手法の研究開発が気象研究所で行われている (Sekiyama *et al.*, 2016 ; Yumimoto *et al.*, 2016)。

謝辞

全球エアロゾルモデル MASINGAR の開発・運用には気象研究所環境・応用気象研究部の眞木貴史室長、関山剛主任研究官、大島長主任研究官、弓本桂也主任研究官 (当時) をはじめとした化学輸送モデル開発担当研究官、気候研究部地球システムモデル開発グループ、地球環境・海洋部環境気象管理官付の担当官、特にこれまでのエアロゾル観測係 (坂下卓也, 石井憲介, 藤原宏章の各氏)、担当調査官 (大河原望, 青柳暁典の両氏) 並びに化学輸送モデル開発推進官 (山田和孝, 直江寛明, 出牛真の各氏) に多くの協力をいただいた。これらの方々の尽力に深く感謝するものである。



第 5 図 2015 年 2 月 23 日 00 時 (JST) の (a) 地上気象観測通報 (SYNOP 報) の現在天気 (ww) 及び特殊気象報 (黄砂) による黄砂観測実況, (b) 環境省大気汚染物質広域監視システム (そらまめ君) による浮遊粒子状物質 (SPM) 濃度, 及び黄砂予測モデルによる地上付近の黄砂濃度の予測結果 (c) H26 モデル, (d) H29 モデル (単位: $\mu\text{g m}^{-3}$).

本報告に関連するエアロゾル予測研究の一部は環境研究総合推進費 5B-1202「PM2.5 規制に影響する汚染混合型黄砂の組成的特徴と飛来量／降下量に関する研究」及び 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。気候モデル MRI-ESM1 の開発は気象庁の気候変動予測研究費「温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測に関する研究（平成 17～21 年）」によって行われた。環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめ君）による浮遊粒子状物質データは国立環境研究所環境数値データベース（<http://www.nies.go.jp/igreen/index.html>）より入手したものである。

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, doi: 10.2467/mripapers.64.1.
- Andres, R. J., and A. D. Kasgnoc (1998): A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions. *J. Geophys. Res.*, **103**, 25251-25261, doi: 10.1029/98JD02091.
- Chin, M., P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B. N. Holben, B. N. Duncan, R. V. Martin, J. A. Logan, A. Higurashi, and T. Nakajima (2002): Tropospheric Aerosol Optical Thickness from the GOCART Model and Comparisons with Satellite and Sun Photometer Measurements. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 461-483, doi: 10.1175/1520-0469(2002)059<0461:TAOTFT>2.0.CO;2.
- Cooke, W. F., C. Lioussé, H. Cachier, and J. Feichter (1999): Construction of a $1^\circ \times 1^\circ$ fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model. *J. Geophys. Res.*, **104**, 22137-22162, doi: 10.1029/1999JD900187.
- Deushi, M., and K. Shibata (2011): Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **62**, 1-46, doi: 10.2467/mripapers.62.1.
- Fécan, F., B. Marticorena, and G. Bergametti (1998): Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. *Ann. Geophys.*, **17**, 149-157, doi: 10.1007/s00585-999-0149-7.
- Gillette, D. (1978): A wind tunnel simulation of the erosion of soil: Effect of soil texture, sandblasting, wind speed, and soil consolidation on dust production. *Atmos. Environ.*, **12**, 1735-1743, doi: 10.1016/0004-6981(78)90322-0.
- Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, and S.-J. Lin (2001): Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J. Geophys. Res.*, **106**, 20255-20273, doi: 10.1029/2000JD000053.
- Giorgi, F., and W. L. Chameides (1986): Rainout lifetimes of highly soluble aerosols and gases as inferred from simulations with a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **91**, 14367-14376, doi: 10.1029/JD091iD13p14367.
- Gong, S. L. (2003): A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and super-micron particles. *Global Biogeochem. Cycles*, **17**, doi: 10.1029/2003GB002079.
- Goudie, A. S. (2014): Desert dust and human health disorders. *Environ. Int.*, **63**, 101-113, doi: 10.1016/j.envint.2013.10.011.
- Grini, A. (2005): Model simulations of dust sources and transport in the global atmosphere: Effects of soil erodibility and wind speed variability. *J. Geophys. Res.*, **110**, doi: 10.1029/2004jd005037.
- Guenther, A., C. N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W. A. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P. Zimmerman (1995): A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.*, **100**, 8873-8892, doi: 10.1029/94JD02950.

- 保坂征宏・青木輝夫・庭野匡思・田中泰宙 (2010) : 陸面モデル HAL への積雪変態・アルベドプロセスモデル SMAP の導入. 日本気象学会大会 2010 年春季大会講演予稿集, 80.
- 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 年春季大会講演予稿集, 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, 日本気象学会, 431.
- Kaiser, J. W., A. Heil, M. O. Andreae, A. Benedetti, N. Chubarova, L. Jones, J. J. Morcrette, M. Razinger, M. G. Schultz, M. Suttie, and G. R. van der Werf (2012): Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosci.*, *9*, 527-554, doi: 10.5194/bg-9-527-2012.
- Kanatani, K. T., I. Ito, W. K. Al-Delaimy, Y. Adachi, W. C. Mathews, J. W. Ramsdell, and Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team (2010): Desert dust exposure is associated with increased risk of asthma hospitalization in children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, *182*, 1475-1481, doi: 10.1164/rccm.201002-0296OC.
- Kang, J.-Y., T. Y. Tanaka, M. Mikami, and S.-C. Yoon (2013): A numerical study of the effect of frozen soil on dust emission during an East Asian dust event in December 2009. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, *49*, 57-65, doi: 10.1007/s13143-013-0007-0.
- Kettle, A. J., M. O. Andreae, D. Amouroux, T. W. Andreae, T. S. Bates, H. Berresheim, H. Bingemer, R. Boniforti, M. A. J. Curran, G. R. DiTullio, G. Helas, G. B. Jones, M. D. Keller, R. P. Kiene, C. Leck, M. Levasseur, G. Malin, M. Maspero, P. Matrai, A. R. McTaggart, N. Mihalopoulos, B. C. Nguyen, A. Novo, J. P. Putaud, S. Rapsomanikis, G. Roberts, G. Schebeske, S. Sharma, R. Simó, R. Staubes, S. Turner, and G. Uher (1999): A global database of sea surface dimethylsulfide (DMS) measurements and a procedure to predict sea surface DMS as a function of latitude, longitude, and month. *Global Biogeochem. Cycles*, *13*, 399-444, doi: 10.1029/1999GB900004.
- Kinne, S., M. Schulz, C. Textor, S. Guibert, Y. Balkanski, S. E. Bauer, T. Berntsen, T. F. Berglen, O. Boucher, M. Chin, W. Collins, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, J. Feichter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, A. Grini, J. Hendricks, M. Herzog, L. Horowitz, I. Isaksen, T. Iversen, A. Kirkevåg, S. Kloster, D. Koch, J. E. Kristjansson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, G. Lesins, X. Liu, U. Lohmann, V. Montanaro, G. Myhre, J. Penner, G. Pitari, S. Reddy, O. Seland, P. Stier, T. Takemura, and X. Tie (2006): An AeroCom initial assessment – optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmos. Chem. Phys.*, *6*, 1815-1834, doi: 10.5194/acp-6-1815-2006.
- 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 (平成 29 年 3 月改正).
- 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~.
- Kojima, S., T. Michikawa, K. Ueda, T. Sakamoto, K. Matsui, T. Kojima, K. Tsujita, H. Ogawa, H. Nitta, and A. Takami (2017): Asian dust exposure triggers acute myocardial infarction. *European Heart Journal*, doi: 10.1093/eurheartj/ehx509.
- 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.
- Lamarque, J.-F., Emmons, L. K., Hess, P. G., Kinnison, D. E., Tilmes, S., Vitt, F., Heald, C. L., Holland, E. A.,

- Lauritzen, P. H., Neu, J., Orlando, J. J., Rasch, P. J., and Tyndall, G. K. (2012): CAM-chem: description and evaluation of interactive atmospheric chemistry in the Community Earth System Model. *Geosci. Model Dev.*, **5**, 369–411, doi:10.5194/gmd-5-369-2012
- Lamarque, J. F., T. C. Bond, V. Eyring, C. Granier, A. Heil, Z. Klimont, D. Lee, C. Liousse, A. Mieville, B. Owen, M. G. Schultz, D. Shindell, S. J. Smith, E. Stehfest, J. Van Aardenne, O. R. Cooper, M. Kainuma, N. Mahowald, J. R. McConnell, V. Naik, K. Riahi, and D. P. van Vuuren (2010): Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7017–7039, doi: 10.5194/acp-10-7017-2010.
- Liss, P. S., and L. Merlivat (1986): Air-sea exchange rates : Introduction and synthesis. *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, P. Buat-Ménard, Ed., D. Reidel Publishing Company, 113 - 127.
- Liu, X., R. C. Easter, S. J. Ghan, R. Zaveri, P. Rasch, X. Shi, J. F. Lamarque, A. Gettelman, H. Morrison, F. Vitt, A. Conley, S. Park, R. Neale, C. Hannay, A. M. L. Ekman, P. Hess, N. Mahowald, W. Collins, M. J. Iacono, C. S. Bretherton, M. G. Flanner, and D. Mitchell (2012): Toward a minimal representation of aerosols in climate models: description and evaluation in the Community Atmosphere Model CAM5. *Geosci. Model Dev.*, **5**, 709–739, doi: 10.5194/gmd-5-709-2012.
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai, and M. Nakagawa (2006): 20-km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model –Mean Climate States–. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **84**, 165–185.
- Monahan, E. C., D. E. Spiel, and K. L. Davidson (1986): A Model of Marine Aerosol Generation Via Whitecaps and Wave Disruption. *Oceanic Whitecaps: And Their Role in Air-Sea Exchange Processes*, E. C. Monahan, and G. M. Niocaill, Eds., Springer Netherlands, 167–174.
- Morgenstern, O., M. I. Hegglin, E. Rozanov, F. M. O'Connor, N. L. Abraham, H. Akiyoshi, A. T. Archibald, S. Bekki, N. Butchart, M. P. Chipperfield, M. Deushi, S. S. Dhomse, R. R. Garcia, S. C. Hardiman, L. W. Horowitz, P. Jöckel, B. Josse, D. Kinnison, M. Lin, E. Mancini, M. E. Manyin, M. Marchand, V. Marécal, M. Michou, L. D. Oman, G. Pitari, D. A. Plummer, L. E. Revell, D. Saint-Martin, R. Schofield, A. Stenke, K. Stone, K. Sudo, T. Y. Tanaka, S. Tilmes, Y. Yamashita, K. Yoshida, and G. Zeng (2017): Review of the global models used within phase 1 of the Chemistry–Climate Model Initiative (CCMI). *Geosci. Model Dev.*, **10**, 639–671, doi: 10.5194/gmd-10-639-2017.
- Mulcahy, J. P., D. N. Walters, N. Bellouin, and S. F. Milton (2014): Impacts of increasing the aerosol complexity in the Met Office global numerical weather prediction model. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 4749–4778, doi: 10.5194/acp-14-4749-2014.
- Nickovic, S., E. Cuevas, J. Baldasano, E. Terradellas, T. Nakazawa, and A. Baklanov (2015): Sand and dust storm warning advisory and assessment system (SDS-WAS) Science and implementation plan 2015–2020. World Meteorological Organization, World Weather Research Programme WWRP 2015-5, 31 pp, URL: https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Final_WWRP_2015_5_SDS_IP.pdf.
- Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, and Y. Kodama (2012): Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.*, **117**, doi: 10.1029/2011JF002239.
- 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, D360.
- 小木昭典・田中泰宙・青柳曉典・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, B405.
- Onishi, K., S. Otani, A. Yoshida, H. Mu, and Y. Kurozawa (2015): Adverse health effects of Asian dust

- particles and heavy metals in Japan. *Asia Pac. J. Pub. Health*, **27**, NP1719-NP1726, doi: 10.1177/1010539511428667.
- Onishi, K., Y. Kurosaki, S. Otani, A. Yoshida, N. Sugimoto, and Y. Kurozawa (2012): Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan. *Atmos. Environ.*, **49**, 94-102, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.12.018.
- Owen, P. R. (1964): Saltation of Uniform Grains in Air. *J. Fluid Mech.*, **20**, 225 - 242, doi: DOI: 10.1017/S0022112064001173.
- Prospero, J. M., P. Ginoux, O. Torres, S. E. Nicholson, and T. E. Gill (2002): Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev. Geophys.*, **40**, 1002, doi: 10.1029/2000RG000095.
- Rodwell, M. J., and T. Jung (2008): Understanding the local and global impacts of model physics changes: an aerosol example. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 1479-1497, doi: 10.1002/qj.298.
- Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis (2006): *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2 ed. Wiley.
- 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.
- Shao, Y. (2008): *Physics and Modelling of Wind Erosion*. 2 ed. Springer, 456 pp.
- Shao, Y., and H. Lu (2000): A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *J. Geophys. Res.*, **105**, 22437-22443, doi: 10.1029/2000JD900304.
- Shao, Y., M. Raupach, and J. Leys (1996): A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Soil Res.*, **34**, 309-342, doi: 10.1071/SR9960309.
- Shibata, K., H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka, and M. Sugi (1999): A Simulation of Troposphere, Stratosphere and Mesosphere With an MRI/JMA98 GCM. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **50**, 15-53, doi: 10.2467/mripapers.50.15.
- Shibata, K., and M. Deushi (2008): Simulation of the stratospheric circulation and ozone during the recent past (1980-2004) with the MRI chemistry-climate model. National Institute for Environmental Studies, Japan, 154pp.
- 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, doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<1250:uofdda>2.0.co;2.
- Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, K. Yumimoto, I. Uno, and M. Nishikawa (2011): Comparison of Surface Observations and a Regional Dust Transport Model Assimilated with Lidar Network Data in Asian Dust Event of March 29 to April 2, 2007. *SOLA*, **7A**, 13-16, doi: 10.2151/sola.7A-004.
- 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. *エアロゾル研究*, **20**, 297-305.
- 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.
- 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, doi: 10.2467/mripapers.53.119.
- Tegen, I., S. P. Harrison, K. Kohfeld, I. C. Prentice, M. Coe, and M. Heimann (2002): Impact of vegetation and preferential source areas on global dust aerosol: Results from a model study. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4576, doi: 10.1029/2001JD000963.
- Webb, R. W., C. E. Rosenzweig, and E. R. Levine (2000): *Global Soil Texture and Derived Water-Holding Capacities* (Webb et al.). O. R. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Tennessee, U.S.A., Ed., doi: doi:10.3334/ORNLDAAC/548.

- Wesely, M. L., and B. B. Hicks (1977): Some Factors that Affect the Deposition Rates of Sulfur Dioxide and Similar Gases on Vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **27**, 1110-1116, doi: 10.1080/00022470.1977.10470534.
- Xiao, F., and X. Peng (2004): A convexity preserving scheme for conservative advection transport. *J. Comput. Phys.*, **198**, 389-402, doi: 10.1016/j.jcp.2004.01.013.
- Yoshimura, H., and S. Yukimoto (2008): Development of a Simple Coupler (Scup) for Earth System Modeling. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 19-29.
- Yoshimura, H., R. Mizuta, and H. Murakami (2015): A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 597-621, doi:10.1175/MWR-D-14-00068.1.
- Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh (2011): Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) - Model Description -. Meteorological Research Institute, doi: 10.11483/mritechrepo.64.
- 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, doi: 10.2151/jmsj.2012-A02.
- 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.
- Zender, C. S., D. Newman, and O. Torres (2003): Spatial heterogeneity in aeolian erodibility: Uniform, topographic, geomorphic, and hydrologic hypotheses. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4543, doi: 10.1029/2002JD003039.
- Zobler, L. (1986): A World Soil File for Global Climate Modelling. NASA Technical Memorandum, NASA Goddard Institute for Space Studies.