

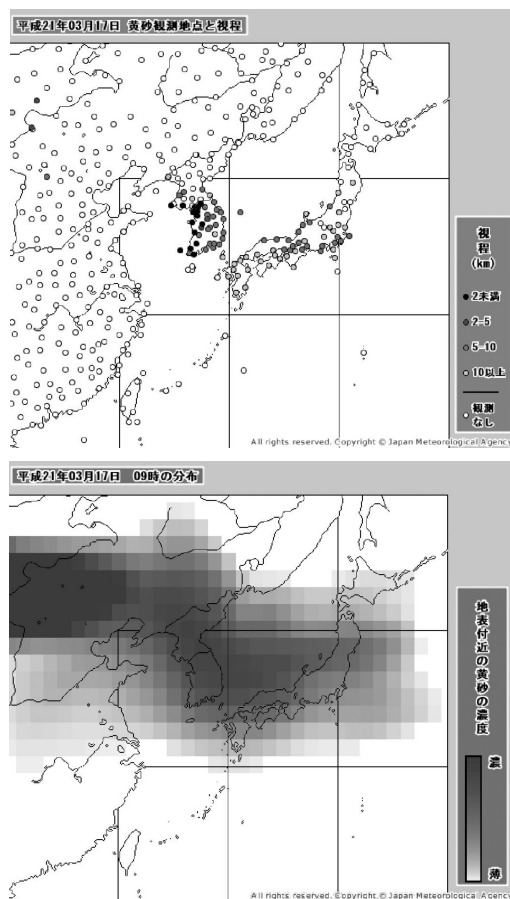
気象庁の黄砂情報と黄砂予測モデルについて

木下 篤哉*・真木 貴史**

1. はじめに

黄砂現象とは、東アジアの砂漠域や黄土地帯などから強風で舞い上がった黄砂粒子が、風に乗って運ばれながら落下する現象であり、アジア大陸を中心に広範な地域で見られる現象である。日本における黄砂による被害としては、粒子状物質による大気汚染、視程の悪化による飛行機の運航障害、自動車や洗濯物への黄砂粒子の付着などが認識されている（黄砂問題検討会2005）。

気象庁では、2000年から2002年にかけて黄砂観測日数が急増したことを受け、2004年1月に気象庁ホームページ内に黄砂情報ページを設け、地上気象観測通報による「黄砂観測実況図」と、気象研究所で開発された黄砂予測モデルを利用した「黄砂予測図」の提供を開始した。本報告では、黄砂情報を作成する際の基礎となっている黄砂予測モデルの概要および2007年に実施した改良点について紹介すると共に、その検証結果や、黄砂予測図の作成方法について述べる。なお、2008年2月からは、これらの改良にもとづき96時間先まで予測期間を延長すると共に、黄砂濃度に対応した濃淡表示を開始している（第1図）。黄砂予測モデルの結果は、気象庁が発表する「黄砂に関する気象情報」の支援資料として活用されると共に、黄砂予測GPVとして気象業務支援センターを通じて広く一般に利用できる形で配信されている。



第1図 黄砂情報ページで公開している「黄砂観測実況図」(上)と「黄砂予測図」(下)。

* 気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付。

a-kinoshita@met.kishou.go.jp

** 気象研究所環境・応用気象研究部。

tmaki@mri-jma.go.jp

© 2009 日本気象学会

2. 黄砂予測モデルの概要

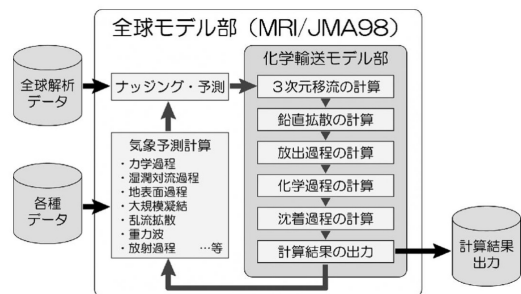
黄砂予測モデル MASINGAR (Tanaka *et al.* 2002, 第2図) は, 気象研究所環境・応用気象研究部により, 日中共同研究 ADEC (Aeolian Dust Experiment on Climate impact) の一環として開発されたもので, 全球大気大循環モデル MRI/JMA98 AGCM (Shibata *et al.* 1999) にエロゾルの放出, 化学変化, 沈降・沈着等の各過程を組み込んだ全球エロゾル輸送モデルである。

気象庁で運用しているモデルは, MASINGAR から黄砂以外のエロゾルを外す等の最適化を行っており, 水平解像度約110 km (T106), 鉛直20層 (地表面~34 hPa) で, 1日1回12 UTCを初期値として120時間先までの計算を行っている。黄砂粒径は0.1 μm ~10 μm の間を10段階に分割して表現している。また, 気象庁全球解析値 (GANAL) および予報値と, 黄砂予測モデルで計算された気象場との差を強制項としてモデルに同化させるナッジングという手法を用いて, 気象場を観測値に近づけている。

黄砂の発生域である砂漠地帯などでは, 地表面の状態と地表付近の風速によって黄砂が舞い上がるか否かや舞い上がりの程度が決まる。したがって, モデルにおいては, 黄砂の地表面からの舞い上がり量 (放出フラックス) を, 地表面の積雪の有無, 植生, 土壌水分量などの地表面状態と地表面風速で決定する。本モデルでは, Tegen and Fung (1994) や Takemura *et al.* (2000) を参考にして, 以下のように放出フラックスを計算している。

$$F_i = \begin{cases} CM_i A \frac{W_t - W_g}{W_t} (U_{10} - U_t) U_{10}^2 & U_{10} \geq U_t \\ 0 & U_{10} < U_t \end{cases} \quad (1)$$

ここで, F_i が i 番目の粒径区分の放出フラックスを表す。 C は次元係数, M_i は i 番目の粒径区分の黄砂粒子 (密度2.65 g/cm³の球状石英と仮定) の質量, A は植生の違いによる比例定数, W_t は土壌水分の閾値 (3 kg/m²), W_g は土壌水分量, U_{10} は地表面 (高度10 m) における風速, U_t は地表面風速の閾値 (6.5 m/s) である。黄砂の舞い上がりは, 地表面が乾燥しており, かつ, 風速が大きい時に限られる ($W_g < W_t$ かつ $U_{10} \geq U_t$)。また, $U_{10} \gg U_t$ の条件では, 黄砂放出フラックスは風速の3乗に比例することになり, 風速の増加で急激に黄砂が舞い上がることが分かる。なお, 土壌水分量は MRI/JMA98 AGCM で計算された



第2図 黄砂予測モデル (MASINGAR) の概要 (気象庁予報部 2004)。

ものを, 地表面の積雪量は AGCM の計算に気象庁の積雪解析をナッジングしたものを用いている (植生の設定については後述)。

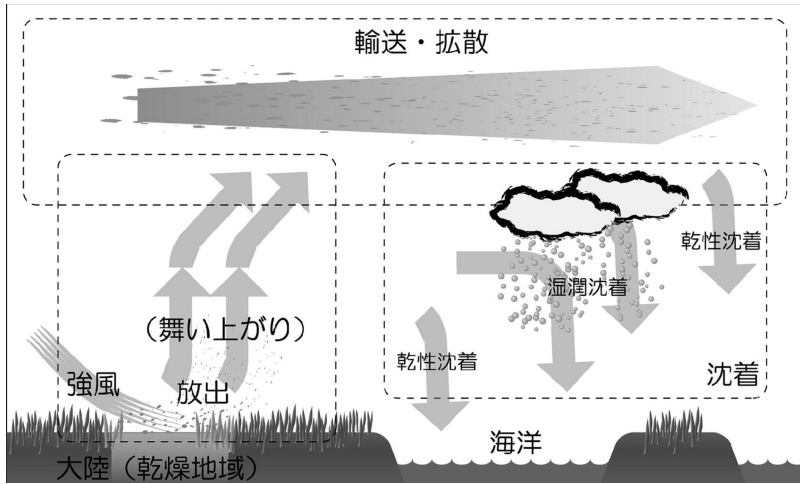
黄砂の輸送・拡散は, MRI/JMA98 AGCM で計算された風を用いて, 3次元セミラグランジュ法で算出される。鉛直拡散に関しては, 乱流拡散と積雲対流拡散をパラメタリゼーションで計算している。

黄砂の沈着過程は, 重力落下による沈着 (乾性沈着) と, 雨滴の生成過程で雲粒に取り込まれたり (レインアウト), 雨滴に衝突して取り込まれたり (ウォッシュアウト) する湿潤沈着があり, 沈着の速度や量は黄砂の粒径によって異なる (第3図)。

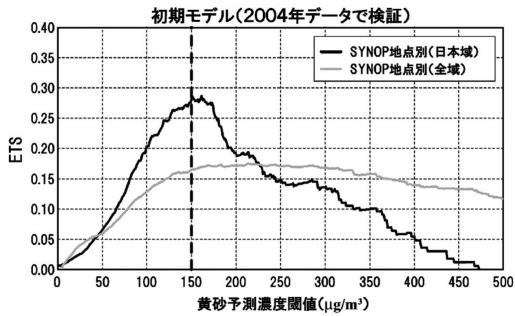
3. 黄砂予測モデルの黄砂濃度閾値の設定

国内外の気象観測地点における黄砂現象 (実況) の有無は, 黄砂が大気現象として目視観測されたかどうかを国際気象通報 (SYNOP) から得て判断している。これに対し, 黄砂予測モデルで扱う物理量は各層毎の黄砂濃度 (単位体積あたりの黄砂の質量) であり, 実況に対応する地表付近の黄砂濃度をモデルの下層4層分 (地表~約1000 m) の平均と仮定し, 閾値を設定して黄砂の有無を判断する。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) と一致するように閾値を決定する。

閾値の決定には ETS (Equitable Threat Score) を用いる。ETS とはスレット・スコア (TS: 現象を予測した時, または実況でその現象が観測されたときの予測的中率) から, 統計的な出現確率からランダムな予測的中する気候学的確率を差し引いたもので, 黄砂現象のように比較的まれにしか発生しない現象の



第3図 黄砂の発生から輸送・拡散，沈着までの模式図。



第4図 黄砂予測モデルでの「黄砂あり」と「黄砂なし」の濃度閾値を変えながら，黄砂観測実況とのETSを算出，極大になる点が最適値となる。

精度評価に適しており，以下のように定義される。

$$ETS = \frac{FO - Sf}{FO + FX + XO - Sf} \quad (2)$$

ただし，

$$Sf = \frac{(FO + XO)(FO + FX)}{FO + FX + XO + XX} \quad (3)$$

ここで， FO ， FX ， XO ， XX は，予測と実況でそれぞれ「黄砂あり」と「黄砂なし」に場合分けした現象の出現回数であり，

FO ：予測あり・実況あり（出現する予測的中）

FX ：予測あり・実況なし（空振り）

XO ：予測なし・実況あり（見逃し）

XX ：予測なし・実況なし（出現しない予測的中）

である。なお， Sf が気候学的確率である。ETS 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。

黄砂実況の「あり／なし」に対応する黄砂予測の「あり／なし」の閾値は，閾値を仮に $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ から $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 刻みに計算し，ETS が極大になる値を採用

することで求める。黄砂情報提供開始時（2004年）での閾値は日本域のSYNOPを用いた検証で， $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，ETS は0.28であった（第4図）。

なお，SYNOP の現在天気で通報する大気現象には優先順位があり，例えば雨と黄砂が同時に観測された場合では，雨のみを通報することとなっている。このため，黄砂より優先順位の低い大気現象が通報された場合は「黄砂なし」と判断できるが，黄砂より優先順位が高い通報があった場合は黄砂の有無が不明であり，統計から除外せざるを得ない。

4. 黄砂濃度と視程の関係

SYNOP による黄砂実況の「あり／なし」は水平視程10 km を閾値としており，これに対応する予測黄砂濃度の閾値は，前述した手法で求めている。一般に黄砂濃度が大きくなるほど視程が低下するが，実際には同じ濃度であっても湿度や黄砂の粒径分布等の変化によって視程は異なる。

黄砂のようなエアロゾルの重量濃度 m [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] および相対湿度 f と視程 V [km] との関係は，Iwakura and Okada (1999) の研究によって，以下の様な関係式が導出されている。

$$V = 3.912 / \{\alpha(m + \beta)(1 - f)^7\} \quad (4)$$

ここで， α は乾燥状態でのエアロゾル重量濃度に対する消散係数の比で， β はその補正項である。 $(1 - f)^7$ は相対湿度 f の変化が消散係数に及ぼす影響を示し

ており、一般に湿度が高いほど消散係数が大きくなるため、指数 γ は負の値をとる。同研究では、冬季から初春の期間における東京国際空港周辺の視程と浮遊粒子状物質 (SPM) 濃度のデータを用いて回帰的に $\alpha=0.003$, $\beta=32$, $\gamma=-0.51$ を求めている。なお、この期間の月平均相対湿度の平均は49%である (第5図)。

北東アジア域の黄砂濃度と視程の関係は Song *et al.* (2007) の研究で示されているが、同一の黄砂濃度に対応する視程は日本国内の研究と比べて長くなっている。これは、国内に比べて黄砂の粒径が大きく、浮遊している濃度あたりの黄砂粒子数が少ないことが原因のひとつと考えられる。

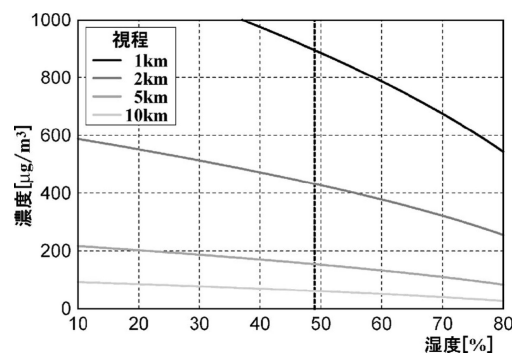
東アジア全域の SYNOP を用いて、前述した黄砂濃度閾値を求めた場合、閾値は200~300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度と高くなるが (第4図)、これは、濃度あたりの黄砂粒子数が少ないことと、乾燥域が多いため水蒸気量が少ないことが原因と考えられる。また、グラフのピークが日本域の検証に比べてなだらかなのは、黄砂発生域周辺の観測では、黄砂飛来時の黄砂濃度の平均値が大きいだけでなく、事例毎の濃度もまちまちで濃度の分散値が大きくなるためである。

5. 黄砂発生域の植生の見直し

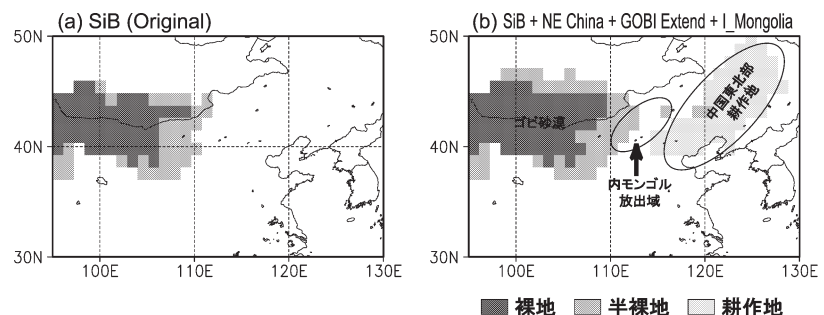
2004年1月の運用開始以降、黄砂予測モデルの結果は、年毎のデータを用いた ETS による精度検証、黄砂イベント時の地上観測やエロゾルライダー、衛星観測との比較など、常に観測実況との比較を行っている。2006年の黄砂発生状況から明らかとなった主要な問題は、実況で観測されている中国東北部周辺における黄砂放出が予測モデルでは表現されておらず、結果的に“見逃し”の事例が増えている点にあった。同様に、ゴビ砂漠北部においても黄砂放出量が予測モデルで過小評価される事例が確認されている。この原因は、黄砂予測モデルで利用している土地被覆分類データが、1980年代の出版物等をまとめて作成されたものであり、必ずしも実測された植生ではなく (Dorman and Sellers 1989)、また、

最新のものではない点が挙げられる。特に中国東北部は、耕作地であるにも関わらず草原になっているなどの齟齬があった。

これらを改善するため、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の地球観測衛星 Terra に搭載された観測装置 (MODIS) の2000年データから得られた植生分布を基に、中国東北部の耕作地とゴビ砂漠の拡大などを反映させた植生分布を新たに作成した。第6図に、黄砂放出域 (砂漠などの裸地、草木のまばらな半裸地および耕作地) における、(a) 従来の植生分布と、(b) 新たに作成した植生分布を示す。各格子点が黄砂放出域であるか否かは、基本的に地球圏国際共同研究計画 (IGBP) の植生タイプに閾値を設けて自動的に判断しているが、内モンゴル付近など、2000年以降の衛星画像等で明らかに黄砂発生源と確認できた地域については、手作業で放出域として登録している。なお、放出域の拡大は、観測技術の発展による土地被覆



第5図 黄砂濃度および湿度と視程の関係図 (Iwakura and Okada (1999) が求めた回帰式から算出)。

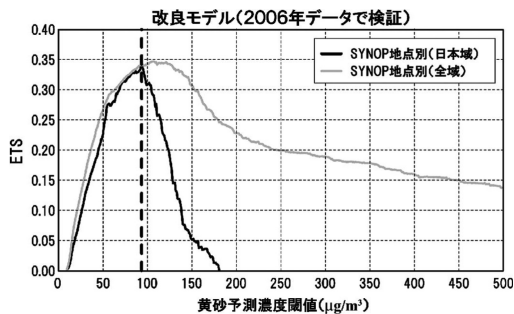


第6図 黄砂発生域となる植生分布の変更。従来の分布 (a) に比べ、変更後の分布 (b) は中国東北部とゴビ砂漠および内モンゴル周辺で拡大している。

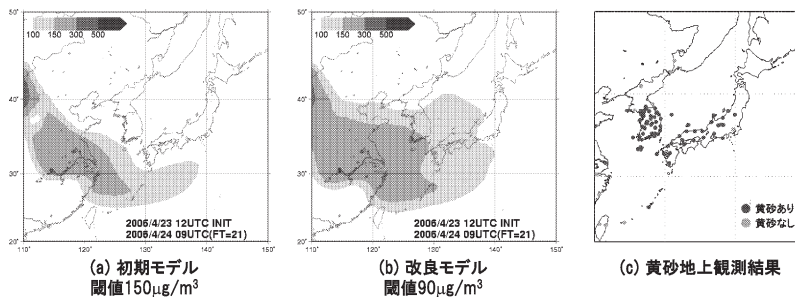
情報の精度向上によるものか、土地利用の経年変化によるものかの情報は持ち合わせていない。

6. 予測モデルの改良

黄砂発生域の見直しのほかにも、ナッジングの改善などを含む黄砂予測モデルの改良を行い、3. で示した精度検証を2006年2月～5月のデータを用いて行った。その結果、ETSは改良前モデルの0.28から、改良後には0.34に増加したことが確認できた（第7図）。なお、初期モデルでは実況に比べて黄砂が高い高度を通過してしまう傾向があったが、ナッジングを改善した結果沈着過程をより適切に表現できるようになり、これに伴って黄砂濃度閾値は $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と減少した。第8図に初期モデルで“見逃し”となっていた事例の比較結果を示す。改良モデルでは黄砂飛来域が拡大し、地上観測と符合したことがわかる。なお、改良モ



第7図 改良後（2007年2月から実用化）の黄砂予測モデルにおける「黄砂あり」と「黄砂なし」の予測と実況のETS。改良前（第4図）と比べETSが上がったほか、グラフの山型が鋭角になっている。



第8図 黄砂飛来時（2006年4月24日）の、初期モデル予測（a）、改良モデル予測（b）、および黄砂地上観測（c）。モデルの改良により、予測と観測の符合が改善された。

デルは2007年2月より実用化している。

その後、2007年春の黄砂シーズンにおいても改善成果が同様に認められ、かつ、96時間先の予測まで精度が落ちないことが確認されたため、2008年2月に、情報として発表する予測期間を初期値から4日先（情報発表時点からは3日先）まで延長した。

2008年2月の黄砂情報の改善では、「黄砂観測実況図」においては視程による、「黄砂予測図」においては黄砂濃度に対応したレベル分けをそれぞれ行っており、黄砂濃度と視程のおおまかな対応関係を解説としてホームページに掲載している。この関係は式（4）で示した手法により相対湿度約50%の状態を仮定して得られた値であるため、湿度によって関係が変化するほか、黄砂粒径などで変化するため、あくまでも目安である。

黄砂情報（実況図）URL：

<http://www.jma.go.jp/jp/kosa/index.html>

黄砂情報（予測図）URL：

<http://www.jma.go.jp/jp/kosafcst/index.html>

7. まとめ

気象庁では、気象研究所が開発した黄砂予測モデルを用いて2004年より黄砂情報の提供を開始した。その後、植生マップの更新などの改良を経て予測精度も向上し、気柱全体の黄砂量の情報も提供してきた。黄砂情報が掲載されているホームページのアクセス数は年々増加しており、一般の方の関心も高まっていることがうかがえる。

黄砂予測モデルの更なる精度向上には、黄砂観測データをモデル計算に直接取り入れることが必要であ

る。現在のモデルは、黄砂の発生を地表面状態と地表面風速のみから予測しており、発生の有無や規模、あるいは輸送途中の黄砂状況を観測データで修正する手法を取り入れていない。最近、衛星やライダーネットワーク等で定量的かつ準リアルタイムで黄砂の観測データ入手が可能となりつつあり、気象庁でも環境省黄砂飛来情報（環境省

2009) で表示されているライダー観測データを予測モデルの検証用として頂いている。今後はこれらの観測データを用いてモデルの検証や改良を行い、予測精度を向上させたい。

参 考 文 献

- Dorman, J. L. and P. J. Sellers, 1989 : A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB). *J. Appl. Meteor.*, **28**, 833-855.
- Iwakura, S. and K. Okada, 1999 : Dependence of prevailing visibility on relative humidity at Tokyo International Airport. *Pap. Meteor. Geophys.*, **50**, 81-90.
- 環境省, 2009 : 環境省黄砂飛来情報 (ライダー黄砂観測データ提供ページ). <http://soramame.taiki.go.jp/dss/kosa/> (2009.5.19閲覧).
- 気象庁予報部, 2004 : 黄砂情報提供業務支援資料. 量的予報技術資料第9号 (平成15年度量的予報研修テキスト), 25-38.
- 黄砂問題検討会, 2005 : 黄砂問題検討会報告書. <http://www.env.go.jp/earth/dss/report/02/index.html> (2009.5.19閲覧).
- Shibata, K., H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka and M. Sugi, 1999 : A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with MRI/JMA98 GCM. *Pap. Meteor. Geophys.*, **50**, 15-53.
- Song, Z., J. Wang and S. Wang, 2007 : Quantitative classification of northeast Asian dust events. *J. Geophys. Res.*, **112**, D04211, doi : 10.1029/2006JD007048.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000 : Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873.
- Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba and H. Tanaka, 2002 : MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM : Model description. *Pap. Meteor. Geophys.*, **53**, 119-138.
- Tegen, I. and I. Fung, 1994 : Modeling of mineral dust in the atmosphere : Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22897-22914.