

3.2. 黄砂輸送モデル

3.2.1. 黄砂問題に対する輸送モデルの位置付け

黄砂の発生・輸送を予測し、黄砂の飛来を予報するためには黄砂輸送モデルによるシミュレーションが必要となる。黄砂問題において、輸送モデルが果たす役割を、以下に示す。

3.2.1.1. 黄砂現象の科学的解明への活用

黄砂現象は、極めて多数の複雑なプロセスの組み合わせから成り立っている。このため、個々のプロセスの研究に加えて、これらのプロセスを統合した総合的な理解が必要である。現時点では、数値モデルを用いたシミュレーションや実験が、プロセスの総理解のための唯一の手法と考えられている。

黄砂現象は自然現象であると同時に、近年では人為的な影響も受けてその発生頻度が増加していると言われている。そのような複合要因を判別するために、黄砂輸送モデルは有益な情報を与えると期待されている。例えば、観測データを取り込むことにより発生源を推定することも可能となる。

数値モデルでは、多くのプロセスを変数化して表示することから、数式の解が現実を反映しない場合もある。この種のあいまいさを取り除くには、数値モデルを改良・改修するための情報を頻繁に観測から得ておく必要がある。

3.2.1.2. 黄砂予測・予報への活用

黄砂輸送モデルを用いることにより、黄砂発生を短期、中長期に予測し、発生した黄砂の飛来を予報することが可能となる。また、過去のデータを取り込んだ再現計算を行うことにより、過去の記録のない地域や時期の様子を復元することも可能である。

3.2.1.3. 効果的な黄砂対策の予測

効果的な黄砂対策を行う地域の特定及び手法の検討に際して黄砂輸送モデルの活用が期待される。また、黄砂対策を実施した場合の将来的な効果を分析・予測することも可能となる。

3.2.1.4. 気候学的スケールの将来予測

長期的な気候変動による、黄砂現象の変化等、気候系と黄砂現象との関連性等の現象解明への活用が期待される。また、黄砂が地球温暖化に(正あるいは負に)どの程度貢献しているかといった推定を行うためにも有効な手法である。

3.2.2. モデリング手法

3.2.2.1. 黄砂輸送モデルの基本的な仕様

黄砂の飛来に関する輸送モデルは、基本的に気象モデルと発生源モデル、移流拡散モデル(場合により沈着モデル)からなっている。また、黄砂の飛来は次のような影響をもたらす可能性が指摘されており、それぞれのモデルの目的に応じた固有の機能が付け加えられている。

- 黄砂が氷晶核を形成し、雲や降水に影響すること。
- 黄砂の飛来が視程悪化による交通障害をもたらすこと。
- 黄砂の飛来・浮遊により地球の大気放射環境に影響し、地球温暖化現象に関連すること。
- 黄砂中の金属イオンが大気中のガス状酸化物と反応し、塩を生成してエアロゾル化を促進すること。

従って、モデルの構築目的によって、その基本的な仕様は大きく異なる。黄砂輸送モデルにより推定・予測できる対象はエアロゾル濃度の他、黄砂発生源の推定、光学的な情報、輸送物質量、沈着量などである。

黄砂のモデリングのニーズは、防災・黄砂対策及び対策の評価に加えて気候システムへの影響の調査等があると考えられる。対策の検討に当たってのニーズは、黄砂の飛来する時間や規模を予測することであり、後者は専ら科学的研究分野という視点から気候と黄砂の関係に着目したものである。

モデルでは過去 50 年くらいの再現が可能と考えられている。ただし、モデルの検証に用いるデータが古い場合、データとモデルによる再現の結果が異なった場合の原因特定が難しい場合が多い。このため、観測実績の蓄積がある気象庁の観測結果や衛星データを併用することで、過去の解析を進めることが重要となる。

3.2.2.2. 黄砂輸送モデルの構成要素

(a) 気象モデル

各地点における過去あるいは現在の気象データの中で、風向・風速、大気安定度、混合層高度等が環境中の濃度予測に用いられる。気象観測によって得られたデータは、シミュレーションに利用できる形式に整理する必要がある。

(b) 発生源モデル

黄砂発生に至る土地・気象条件をシミュレーションに取り入れるためのモデルである。モデルの実行のためには発生源の土壌粒径・土地被覆状況・土壌水分量、風速等のデータが必要となる。

(c) 移流拡散モデル

移流拡散モデルには物理モデルと統計モデルがあるが、発生源と環境中の濃度の関係を明らかにするためには、物理モデルが用いられる。点発生源の移動拡散を扱う場合はブルーム式(ラグランジュ型)が一般的に用いられる。一方、黄砂のように面的に発生する現象に対しては、空間格子内での物質収支として扱うオイラー型のモデルアプローチが広く用いられている。

(d) 沈着モデル

必要に応じて、粒子の沈着・反応・凝集などによる降下・消失を考慮する。

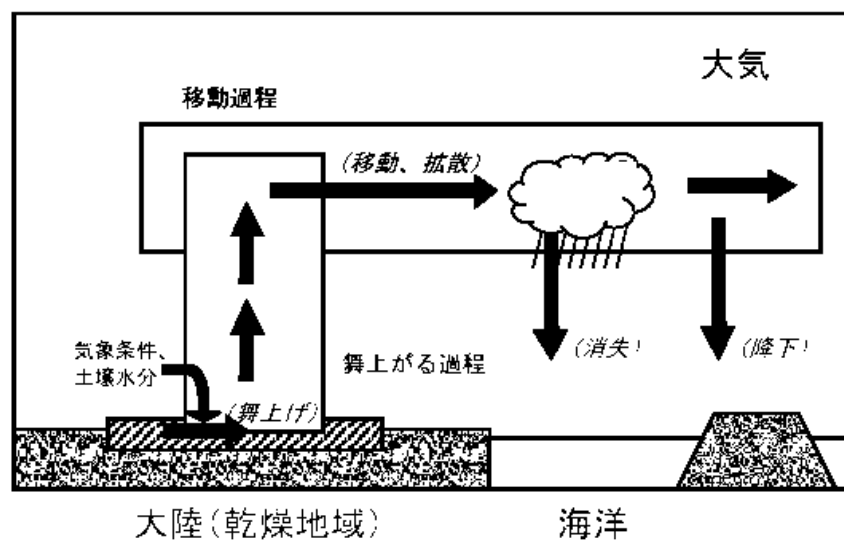


図3 - 1 黄砂予測モデルの概念図 (気象庁 2003c)

(e) 黄砂輸送モデルの計算実施に当たっての初期値設定

モデル計算に必要な初期値・境界条件等には、多くの仮定を含んだ値が用いられている。そのため、モニタリングデータを活用し、よりの確なモデル初期値等の決定が求められる。

3.2.3. 主な黄砂輸送モデル

3.2.3.1. 気象研究所の黄砂輸送モデル(MASINGAR)

気象研究所で構築された黄砂飛来の予測モデルは、MASINGAR (Model of aerosol species in the global atmosphere) を用いている (Tanaka 他 2003)。このモデルは、気象モデルとして気象研究所と気象庁で共同開発された大気大循環モデル(AGCM)である MRI/JMA 98 AGCM を用い、黄砂現象の原因となる土壌ダストをはじめ、硫酸塩、炭素系、海塩の各種のエアロゾルや微量気体を扱うことのできる移流拡散モデル

をオンラインで結合させている。モデルの解像度はシミュレーション対象によって変更可能である。現在の黄砂予測では水平方向が 1.125°、鉛直方向は地表から約 40 hPa までの 20 層で運用されている。黄砂の発生は、Shao のモデル(Shao and Lu 2000) をベースにしており、AGCM に組み込まれた陸面モデル(SiB)の積雪量・土壌水分量・植生量の諸条件と、土壌の粒度分布や種類、地表付近の風速 (または摩擦速度) から計算される。また、黄砂の粒子の粒径は 0.2 ~ 20 μm を 10 階級に分類して取り扱っている。更に、地球温暖化に与える黄砂等の風送ダストの影響を把握するため、放射収支に与える直接効果の影響を定量化する放射モデルと結合しているのが特徴である。ただし、現在のところ黄砂粒子上での反応系は含まれておらず、主に物理的な気象現象の予測に適用されることを目的としたモデルである。

モデルによる予測結果については、地上目視観測による「視程」、気象衛星観測結果の「光学的厚さ」やライダー観測から得られる「観測地点上空の黄砂の高度分布とその時間変化」と比較検証を行っている。検証結果から定性的には黄砂の分布の再現性は確保されている。定量的には、全球の地域毎のダスト放出量や、地形の影響の考慮、近年の砂漠化進行の影響評価などに改良の余地があり、黄砂の発生量推計に改良が必要である。

黄砂予報としては 48 時間先(実験レベルでは 120 時間)までの予報が可能となっており、気象庁の黄砂に関する気象情報提供に利用されている。

3.2.3.2. 九州大学の黄砂輸送モデル

九州大学で構築された黄砂飛来の予測モデルは、気象モデルに地域気象モデル(RAMS: 米国コロラド州立大学)を用いている。そのため、鉛直方向の格子間隔が細かく、大気境界層を詳細に扱うことが可能なため、大気汚染等の予測で広く用いられている。また、九州大学のモデルは移流・拡散過程も含んでいるため、同時に発生源プロセスを組み込むことで、黄砂の発生から移流拡散までを取り扱うことが可能である。移流拡散モデルは RAMS で用いられているオイラー型の拡散モデルであり、黄砂のような面的に発生する現象に対して再現性は十分に確保されていると考えられる。特に化学反応を組み込む場合には、オイラー型のモデルはラグランジュ型に比べて、非常に容易であり、この点で化学物質収支といった環境的な側面から、黄砂を取り扱う場合には非常に有効であると考えられる。発生源情報は、Gillette のモデルによっており、観測された積雪カバーや LEAF2 陸面モデルの土壌水分量も考慮している。モデルの詳細は鵜野他(2003)、原他(2004)、Uno 他(2004) に詳述されている。

このモデル開発により、領域気象及びダスト輸送モデルを組み合わせで大規模な黄砂の再現が可能となった。現状のモデルで大きな黄砂は捉えることができ、黄砂の絶対濃度はファクター 2 程度(真値に対し、1/2 から 2 倍以内)で再現できている。しかし、現状では発生の絶対量を正確に求めることは困難である。そのためには、発生源地域における土地利用・土壌・積雪情報が必要となる。また、最近の砂漠化の進行進展による土地表面状況の悪化に係る情報も必要である。

本モデルを用いて、最近 10 年の黄砂輸送の計算を行ったところ、最近の黄砂の増加

傾向はある程度再現することができた。日本海側で黄砂が多いことはモデル上再現できており、2002年における黄砂の影響もモデル上ジェット気流の変化で説明が可能である。なお、タクラマカン砂漠は、山がちな地形の影響により、黄砂が高く舞い上がる傾向にあると考えられるため、モデルでこれを再現するためにはより細かいスケールでのモデリングが必要となる。

黄砂発生源における発生頻度をみると、ゴビ砂漠は不明であるがタクラマカン砂漠では減少している。それにも関わらず、北京等では大規模な黄砂が発生している。このような疑問について、モデルによって詳細を把握するには現在のところ、例えば、臨界風速、粒径分布等のデータが不足しており今後の課題となっている。

3.2.3.3. SPRINTARS エアロゾルモデル

気候システムに対するエアロゾルの影響及び大気汚染の状況をシミュレートするのを目的として、SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) が開発された (Takemura 他 2005)。SPRINTARS は東京大学気候システム研究センター・国立環境研究所・地球環境フロンティア研究センターが共有している大気大循環モデル (CCSR/NIES/FRCGC AGCM) をベースとした全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルである。現在のモデルの解像度は、水平方向が T106 (約 1.125 度)、鉛直方向が 20 層で、取り扱われているエアロゾル種及び前駆体は、土壌粒子 (黄砂等) を含めた対流圏の主要エアロゾル及びその関連気体である。モデル内では、エアロゾルの発生、移流、拡散、除去 (雨滴との衝突による除去、雲水への取り込みによる除去、乾性沈着、重力落下) といった輸送過程が考慮されている。過去の特定期間のシミュレーションをするために、風・気温・比湿といった気象場は再解析データを使用してナッジングすることが可能である他、大気大循環モデルをベースとしているために予測シミュレーションを行うことも可能である。エアロゾルによる大気放射収支の変化である直接効果は、各エアロゾルで異なる各波長の複素屈折率、粒径分布、吸湿成長を考慮して計算している。また、エアロゾルによる雲反射率や降水の変化のプロセスも導入されており、エアロゾルの間接効果が考慮された計算が可能である。以上のように、SPRINTARS は、エアロゾルによる気候影響を総合的にシミュレートするモデルである。

黄砂に関する地上での濃度観測やライダーによる鉛直方向の観測との比較の結果、SPRINTARS は黄砂の時空間分布を妥当に再現していることが確認されている。また、2001年4月の東アジア域 (北緯 15-52 度・東経 90-152 度) での黄砂による直接効果放射強制力の平均値は、地表で -0.9 W m^{-2} と大気冷却の効果を示している一方、大気上端ではほぼ 0 W m^{-2} と黄砂の大気放射散乱による冷却化と大気放射吸収による温暖化が拮抗していることを示している。また、SPRINTARS を使った長期の黄砂現象のシミュレーションも実施されている (Mukai 他 2004)。

SPRINTARS は全球エアロゾルモデルの相互比較プロジェクトである AEROCOM (Aerosol Model Intercomparison Study) へ日本から唯一参加しており、世界的に通用しているモデルである。今後は短期 (1 週間程度) の黄砂予報が的確に行えるよう検

討を重ねる必要がある。

3.2.3.4. その他のモデル

近年、大気環境に関するモデル研究が進んでいるが、論文や文献にはなっていない場合が多い。米国では、PM10、PM2.5 規制に関わる予測モデル、表土流出を評価する土壌流出モデルなどのモデルが実用化されており、また地域研究ではサハラや南米でのモデルに係る研究が進んでいる。

韓国気象研究所では1980年代よりグローバル循環モデルを用いた Hwangsa (黄砂) Trajectory Model を開発し、黄砂予測を行っている。予測に当たっては、GMS 及び NOAA からの衛星画像、韓国環境部の PM10 測定データなどが用いられる。また、ソウル国立大学の Soon-Ung Park 教授により、ADAM (Asain Dust and Aerosol Model) が開発された。これは韓国気象庁での黄砂常時予測に利用されている。

3.2.4. 適切な黄砂輸送モデル構築のための今後の戦略

黄砂輸送モデルは、黄砂飛来の予報、過去の再現計算、気候学的スケールを含む将来予測に利用される。黄砂対策へ向け、モデリングの有効利用を図るためには、以下に示す方向性が求められる。

3.2.4.1. 更なる精度向上のためのモデル開発・改良

黄砂を予報するためには、発生場所、日時、発生量、飛来軌道及び降下量の予測が可能なモデルとすることが求められる。しかし、モデルの検証のための標準となるデータ(特に発生源データ)が不足しており、その整備が課題となっている。

発生源モデルの精度は、粒径別データの精度に大きく左右されることから、精度向上のためには、様々な土壌タイプの粒径別の詳細なデータベースの構築が望まれる。また、発源地域の植生により砂塵の舞い上がりが大きく異なるので、植被率との関係の把握が求められる。更に、特に東アジアの場合、積雪分布や土壌水分分布の情報も予測には不可欠である。それらを総合して、黄砂発生条件を定式化(例：発生事例から抽出される諸パラメータの多変量解析)することが重要となる。そのためにも、中国における土地利用の分類・変遷と植生に関する最新情報の収集が不可欠である。

また、黄砂現象はしばしば大気汚染粒子の輸送と同時に行われることがあるので、黄砂粒子のみではなく、大気汚染粒子との同時モデリングが必要である。これは、特にエアロゾルの放射エネルギー収支を計算する場合には必須である。

3.2.4.2. 黄砂予測・予報技術の開発・実用化

予測・予報への活用にあたっては、各モデルがその目的によって扱う時間スケール、

空間スケールが異なっていることを踏まえ、それぞれの特性に応じた利用を行うことが重要である。防災のための予測を行う場合は、地域モデルの精度向上やネスティング技術の開発、並びに GIS データや衛星モニタリングデータの取り込み技術開発が必要となる。他方、気候システムへのダストの影響を評価する場合は、ダストの粒径分布の情報をより細かくインプットすることと並んで、放射強制力や粒子反応系のモデルへの導入が必要となる。

3.2.4.3. モニタリングとの連携

人工衛星による広域的なデータ、及び適切な密度で配置されたライダー、質量濃度計、サンプリングによる観測結果を総合的に用いてモデルの検証・評価・改良に役立てることが必要である。将来的には、モニタリングデータを直接モデルに利用するデータ同化のための技術開発(四次元データ同化技術)も求められる。リアルタイムで得られるモニタリングデータを用いて、モデルの予測値を補正していくことにより、シミュレーション精度の向上が期待される。

その他、効果的な対策を選定するために、対策前後における状況を予測することも必要とされる。その際、黄砂モニタリングより得られた情報を効果的に活用し、黄砂対策の効果を予測し、対策手法、地区の選定などに活用することが求められる。

表 3 - 2 主な黄砂輸送モデルの概要

気象研究所の黄砂輸送モデル	
主な仕様	<p>水平方向座標系は全球 320 × 160 のスペクトル法(T106)。 鉛直方向座標系は全 30 層、上限 0.8hPa(約 53,000m)。 初期値と境界値は気象庁客観解析値と気象庁予報値、6 時間毎。 土壌モデルに与える植生分類は全球植生分類を利用。 海面温度は気象庁解析値を利用。 土壌粒子の粒径分布は 0.1μm ~ 10μm を 10 分割した。黄砂粒子の密度は石英を主成分と仮定し、2.65 g cm⁻³ とした。 黄砂発生源域の特定には全球モデル部分(SiB)で予測された植生、土壌水分積雪域を考慮して設定。 黄砂の舞い上がる質量フラックスは計算された摩擦速度が、その地点の土壌特性から設定された臨界摩擦速度を上回った場合に、NDVI による発生源定数、積雪被覆率と土壌水分含水率、摩擦速度、臨界摩擦速度の関数として与えた。臨界摩擦速度は土壌水分を考慮し、Shao and Lu (2000) のモデルを用いて計算する。 除去プロセスについては、乾性沈着、湿性沈着が考慮されている。乾性沈着は準層流的抵抗及び重力沈降速度を考慮し、抵抗モデルによって求めた乾性沈着速度と黄砂の質量混合比と空気力学的抵抗の積より沈着フラックスを決定している。また、湿性沈着は雨滴との衝突による wash out と雲水への取り込み rain out を考慮した。</p>
モデル検証結果	<p>マイアミ大学エアロゾルネットワークによる世界各地での地上の気候学的ダスト濃度の季節変化とシミュレーションによる 1979 - 2003 年の平均的季節変化を比較した。北半球のダスト濃度に関しては、モデルは観測値に対してほぼ良好な一致を示している。しかしながら、南半球ではモデルのダスト濃度は過小評価の傾向が見られる。</p> <p>Dust Indicators and Records from Terrestrial and Marine Palaeoenvironments (DIRTMAP, http://www.bridge.bris.as.uk/projects/DIRTMAP/dirtmap_main.htm 参照)による世界各地でのダスト沈着量の年平均値とシミュレーションによる 1979 - 2003 年の平均沈着量を比較し、ほぼ妥当な一致を示した。</p> <p>ダストストーム発生時の衛星センサー-TOMS による Aerosol Index とモデルによるダストの積算量分布との比較を行った。モデルによるダストの分布は TOMS Aerosol Index と良い一致を示し、1998 年 4 月のダストストームでは黄砂が北米大陸に到達するまでのパターンを良好に再現されることを示した。2002 年 4 月の ADEC 第 1 回集中観測期間 (IOP-1) でのダストストームによる黄砂のシミュレーションを行い、高度分布をライダー観測と比較した。シミュレーションによるダスト分布は日本におけるライダー観測によるダスト濃度の推移を良好に再現していた。中国の発生源に近い地点のライダー観測との比較では高度分布が得られていないが、モデルでは観測されたダストストームの到来と終息は良好に再現していた。</p> <p>静止気象衛星 GMS-5 の観測から導出された 2002 年 4 月のダストストームの光学的厚さをモデルによる光学的厚さと比較した。観測から得られている、大陸から流れ出す光学的厚さの増加のパターンをモデルは良好に再現していた。2002 年 11 月 12 日 ~ 13 日にかけて日本の広い付近で観測された黄砂の同モデルは 5 日前から日本付近への到達を予測していた。</p> <p>2003 年 3 月 26 日の黄砂現象の際には、このモデルは東アジア以外の地域から長距離輸送されたダストが日本に到達することを予測した。このときのタクラマカン砂漠のアクスと日本のつくば、那覇でのライダー観測、及び中国と日本でのスカイラジオメーターによる光学的厚さの観測はモデルと良く一致していた。</p>

表3 - 2 主な黄砂輸送モデルの概要(続き)

九州大学の黄砂輸送モデル	
主な仕様	<p>水平方向座標系は回転ポーラーステレオ座標系、120km 正方格子で、64 × 48 グリッド。 鉛直方向座標系は最下層 110m ~ 1800m までは可変、全 23 層、上限約 20,000m。 初期値と境界値は ECMWF/TOGA Basic Level Consolidated Data Set、12 時間毎。 土壌モデルに与える植生分類は全球植生分類を利用。 海面温度は NCAR による 1998 年 4 月の全球 1 度メッシュのデータを利用。 土壌粒子の粒径分布は 0.1μm ~ 100μm を 15 分割し、粒径分布設定は 10μm まではサハラ砂漠における観測値を、それ以上を中国甘肅省蘭州で観測された分布を参考に設定した。黄砂粒子の密度は 2.52g cm⁻³ とした。 黄砂発生源域の特定には 1998 年 4 月 13 日週平均の正規化差分植生指数 NDVI を利用し、NDVI < 70 の領域を黄砂の発生源とした。 黄砂の舞い上がる質量フラックスは、計算された摩擦速度がその地点の土壌特性から設定された臨界摩擦速度を上回った場合に、NDVI による発生源定数、積雪被覆率と土壌水分含水率、摩擦速度、臨界摩擦速度の関数として与えた。 臨界摩擦速度は土壌の分類から地表面粗度長を、粗度長から臨界摩擦速度を見積もった。土壌分類は ISLSCP の Soil texture 全球データを利用した。 黄砂の初期鉛直分布は、Turbulence Closure Model-level2.5 により決定される混合層高度内で質量混合比を一様になるように設定した。 除去プロセスについては乾性沈着、湿性沈着、自然沈降が考慮されている。乾性沈着は黄砂の質量混合比と第 1 層の風速、バルク係数の積に比例して、沈着フラックスを決定している。また、湿性沈着は雨滴との衝突による wash out のみを考慮した。自然沈降は各粒径分布について終端速度を求めて与えた。なお、再飛散は考慮していない。</p>
モデル検証結果	<p>衛星センサー TOMS の Aerosol Index と比較検証を行った。本モデルによる予測結果は TOMS の Aerosol Index と非常に良い一致を示した。また、黄砂の輸送経路についてはモデル、TOMS とともに 2 つの異なった経路をとることが確認された。 NOAA の熱赤外差画像(AVHRR-4 と 5 の輝度温度差から算出した Aerosol Vapor Index)から黄砂が黄海から西日本に渦状に輸送される様子が示されている。本モデルにおける計算結果もこれに非常に一致した水平分布と渦状の構造を示しているが、NOAA 画像に見られるような黄砂域の濃淡の縞状構造までは十分に再現できなかった。 一方で、ソウル、福岡、沖縄、ハバロフスク、つくばにおけるダスト濃度のモデル計算値を示し、寒冷渦の挙動とダスト濃度の推移について考察している。また、つくばにおけるライダーの消散率とモデルによるダスト濃度との一致を示している。 黄砂のうち PM10 に相当する粒径区分のモデル第 1 層における濃度と地上 SPM 測定濃度との比較を行った。多少のピークの時間的なずれや明瞭・不明瞭の違いはあるが、SPM の観測値の時間変化をモデルが捕らえられていること明らかになった。 粒径別の観測結果との比較では、人為起源と考えられる小粒子の粒子数については、モデル計算値と観測値で、一致性は小さく、大きくなるにつれて一致性が向上している。しかしながら 5μm 以上の粒径で観測では断続的なピークが見られており、これは NOAA 画像の濃淡の縞状構造に対応すると考えられるが、この断続ピークについては、格子サイズの関係から表現することが困難である。また、モデルの水平拡散係数が大きいこともその原因として考えられる。</p>

