

C-5 中国北東地域で発生する黄砂の三次元的輸送機構と環境負荷に関する研究

(3) 黄砂の三次元的輸送モデルの構築と負荷量推定に関する研究 (H13-15)

黄砂モデリングシステムの開発と応用に関する研究 (H16-17)

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域 大気物理研究室 菅田誠治

大気圏環境研究領域 遠隔計測研究室 杉本伸夫

環境研究基盤技術ラボラトリー 環境分析化学研究室 西川雅高

九州大学応用力学研究所 鶴野伊津志

〈研究協力者〉 独立行政法人国立環境研究所 環境研究基盤技術ラボラトリー 森 育子

独立行政法人国立環境研究所 大気圏環境研究領域 清水 厚

独立行政法人国立環境研究所 PM2.5・DEP 研究プロジェクト 早崎将光

平成 13～17 年度合計予算額 36,535 千円

(うち、平成 17 年度予算額 9,071 千円)

〔要旨〕 特性の異なる二つの黄砂の数値モデルを開発した。それぞれの黄砂モデルは、観測データとの比較・検証により、高い現実再現性を有している。

国立環境研究所で開発した黄砂モデルは、黄砂を発生地域によって複数の別変数として計算できる。この機能を用いて、日本に飛来する黄砂の通過地点として重要な北京に飛来する黄砂の起源を知るために、2001 年から 2003 年の 3～5 月について、北京での黄砂地上濃度への、モンゴル、中国西部 3 地域、中国東部、それ以外の六地域の寄与を計算した。その結果、全期間平均で 5 割強はモンゴル起源、約 3 分の 1 は中国東部起源、残りはタクラマカン砂漠を含む中国西部からであることがわかった。北京で 2003 年に他の二年と比較して平均濃度が低い原因は主としてモンゴル起源の寄与が少ないためとわかった。その減少は発生量自体の減少と輸送量の減少の両方であることがわかり、また積雪被覆の効果による発生量の減少は主たる原因でないこともわかった。

九州大学で開発した黄砂モデルでは、1972～2004 年の 33 年の春季(2 月 20 日から 4 月 30 日)を対象に黄砂の発生・輸送シミュレーションを行い、中国・韓国・日本における長期的な砂塵あらしや黄砂観測データとモデル結果の検証を行い、黄砂の長期変動と気象・気候因子との関連性について、解析を行った。中国においては 70 年代から 97 年にかけての黄砂現象(砂塵風、揚砂)の減少傾向が顕著であり、風下域である韓国や日本では近年の黄砂日数の増加傾向が顕著であった。また、発生源域で地上ダスト濃度が 33 年平均値よりも高い年の気象場の特徴として、低温・乾燥傾向が見られた。さらに、様々な気候インデックスとゴビ砂漠域のダスト発生量の相関解析から、3 月は中緯度(50°N)と極域(80°N)の傾圧性を示す APMI とダスト発生量との強い負の相関が示され、4 月はゴビ砂漠を挟む中緯度(30°N-50°N)の傾圧性を示す東西指数とダスト発生量との強い正の相関が示された。

〔キーワード〕 黄砂数値モデル、年々変動、発生地域、気候インデックス、要因解析

1. はじめに

黄砂は、春季にアジア内陸域の砂漠や半砂漠などの乾燥地帯から強風（ダストストーム）によってダストが巻き上げられ長距離輸送される現象であり、日本においても古くから知られている。巻き上げられた黄砂は、太陽放射を散乱・吸収し、雲の凝結核となることから、地球温暖化や気候変動へのインパクトを持つ重要なエアロゾルの一つである。ダストストームおよび風下域での黄砂観測日数は、大きく年々変動する。2000年以降は、2003年を除いて、ここ数十年間の平均から見て多い観測日数を記録している。

黄砂観測の増減をもたらす原因は二つに大別できる。一つは地表面の変化であり、開発等による土地利用変化が黄砂発生量の増加をもたらした可能性である。もう一つは気象の変化であり、近年の気候変動もしくは気候自体の持つ自然な年々変動が黄砂の発生・輸送に影響している可能性である。発生源付近の気象の変化は、地表面付近の風速の増大や土壌水分量の減少によって発生量を増大させることが考えられる。また、全球的な気候パターンとも関係しての発生源付近から風下域にかけての気象の変化は、輸送の強度や経路を変化させ、黄砂の観測量を大きく変動させることが考えられる。これらの要因が実際にそれぞれの程度寄与しているのか、また、黄砂問題への対策として土壌回復等の措置がどの程度有効であるかの見積もりには黄砂数値モデルによる数値シミュレーションの助けが不可欠である。精緻な黄砂数値モデルにより、過去の黄砂イベントの再現や、数日程度の黄砂予報、および土地利用や気象に仮想的条件を与えての効果見積計算等が可能になる。

本サブテーマでは黄砂の数値モデルによるシミュレーション研究を柱として、黄砂の年ごとの変動について解析を進めた。

2. 研究目的

黄砂現象に関する観測・数値モデル研究は数多くなされているが、それらは特定のダストイベントに限られたものが多く、黄砂の長期変動に着目した研究は比較的少ない。吉野ら¹⁾は、中国・韓国・日本における砂塵あらしや黄砂の長期観測結果を、シベリア高気圧からの寒気の侵入と低気圧の発達という観点から説明付けている。このような寒気の侵入や低気圧の発達には、グローバルスケールの気候変動が影響していると考えられるが、黄砂の発生や輸送経路の年々変動と気候因子との関連性を明らかにした研究は未だ十分になされていない。そのため、黄砂の長期変動の将来予測という観点からこれらを明らかにすることは、非常に重要である。また、Zhang et al.²⁾等の研究では黄砂の発生量自体の長期変動に着目し解析しているが、発生量の変化だけによって風下域での黄砂の多少が決まるわけではない。このために発生と輸送の両過程を分けて年々変動を捉える解析も必要である。

本研究は、中国内陸部で発生する黄砂エアロゾルについて、日本を含む領域で計算できる黄砂数値モデルを開発し、シミュレーションの結果を他サブテーマで得られたデータと併せて、発源地別の飛来量の特定、北京に飛来するルートの特明、黄砂の年々変動をもたらす要因の解明を行う。

3. 研究方法

本研究では、特徴の異なる二つの黄砂数値モデルを開発した。黄砂を初めとする大気中の物質の

輸送等を計算するモデルは、観測された気象データに比して時間空間方向にさらに詳細なデータを使用し、また、観測の難しい気中雲水量等のデータを必要とする。よって、数値モデルは、観測気象データそのものを使用して輸送等の計算を行わず、観測気象データを入力データとして計算させた気象モデルのデータを用いて計算を行う。

以下では、国立環境研究所で開発した領域気象モデル RAMS と大気質モデル CMAQ をオフライン（別々に計算を行う）型で用いた黄砂モデル（以下では N モデル）と、九州大学で開発した領域気象モデル RAMS のオンライン（同時に計算を行う）トレーサー機能を用いた黄砂モデル（以下では R モデル）のそれぞれについて、数値モデルの概要・使用データ・研究手法について記述する。

（1）国立環境研究所における研究方法

① N モデルの概要

国立環境研究所では、大気質モデルとして米国 EPA の開発による CMAQ (Community Multiscale Air Quality modeling system) を、また、気象モデルとしてコロラド州立大学の開発による地域気象モデル RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) を用いた。CMAQ は世界最先端の大気質モデルの一つであり、詳細なガス、液相、エアロゾル反応を含み、また、計算モジュールの可換性を高めた汎用的モデリングシステムである。ただし、黄砂、すなわち土壌性エアロゾルに関しては、扱う物質としては導入されているものの、発生量計算等の物理過程がきちんと導入されていなかった。よって、CMAQ に黄砂計算モジュールを組み込むことによって、黄砂モデルを開発した。

N モデルにおいては、黄砂は PM10 成分 1 モードで記述されている。粒径分布の取り込みは今後の課題であるが、入力気象データは、コロラド州立大学の開発による地域気象モデル RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) に ECMWF 客観解析気象データを入力として計算を行うことにより求めている。

CMAQ の長所の一つとして、詳細な気相液相反応が組み込まれていることが挙げられ、次の研究課題である黄砂と随伴物質との反応のモデリングに際して有利であると考えられる。

② 黄砂発生量の推定法および使用データ

黄砂の精緻なシミュレーションに必要なのは、高性能の気象モデルにより得られた正確な気象データと、正確な発生量の見積もりである。後者においては、黄砂発生地域に相当する区域の地表状態、すなわち土地利用や植生・土壌の種類の詳細なデータが必要不可欠である。

本研究では、現実的黄砂発生量計算に最適な地表面データを得るために種々のデータを検討した。地表面の土地利用の分布に関しては米国の気象衛星 NOAA に搭載されている AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) センサーにより得られたデータを解析して求める方法が一般的である。気象モデル RAMS の地表面過程で用いられている土地利用分布データも、米国 USGS (United State Geological Survey) が 1992-1993 年の AVHRR を用いて作成したデータである。本データは水平 1km と高い解像度を持つ。平成 13 年度には、この USGS の土地利用データを使用し検討したが現実的黄砂発生量を得ることができなかった。平成 14 年度には、中国国内に関して中国の国家環境保護総局と国家測絵局の作成による西部地区生態環境現状リモセン調査図集から緯度経度 4 分の 1

度メッシュで砂漠、ゴビ、畑をそれぞれ読みとりデジタル化したもの、中国外に関してマシューの植生データとゾブラーの土壌データの両者により規定される砂漠、ゴビを検討したが、モンゴル起源の黄砂が過小評価されることがわかった。最終的には、ゾブラーの土壌データによる砂漠・ゴビ（半砂漠）を用いて解析を行ったが、地表面データについては今後も検討が必要であると思われる。

本研究期間中、度々北京の日中友好環境保護センターを訪問し、同センターの保持する地表面データについて面談により調査を行なった。同センターでは 2000 年時点での土地利用、植生等のデータを保有している。これらは AVHRR データを基にしている点では前述の USGS データと同じである。残念ながら、この地表面データを取得することは叶わなかった。

上述したデータも含め、地表面データに関しては今後も調査の継続が必要であると考えられる。

各計算格子における黄砂発生量 D は Gillete and Passi³⁾ に基づき、摩擦速度 u^* を用いて次のように与えられるものとした。

$$D = C \times u^*.3 \times (u^* - u_{th})$$

ここで、 u^* は各計算格子における摩擦速度、 u_{th} は黄砂のまき上がる最小摩擦速度、 C は地表面の状態等に応じた比例係数である。 C には積雪被覆の効果も考慮し、積雪被覆が 100% のときは黄砂が発生しないものとした。また、計算最下層における水蒸気量が 40% を越えるときには黄砂が発生しないものとした。黄砂の初期鉛直分布は、地上 500m と大気境界層高度のうち小さい高度までを一様の混合比になるようにした。

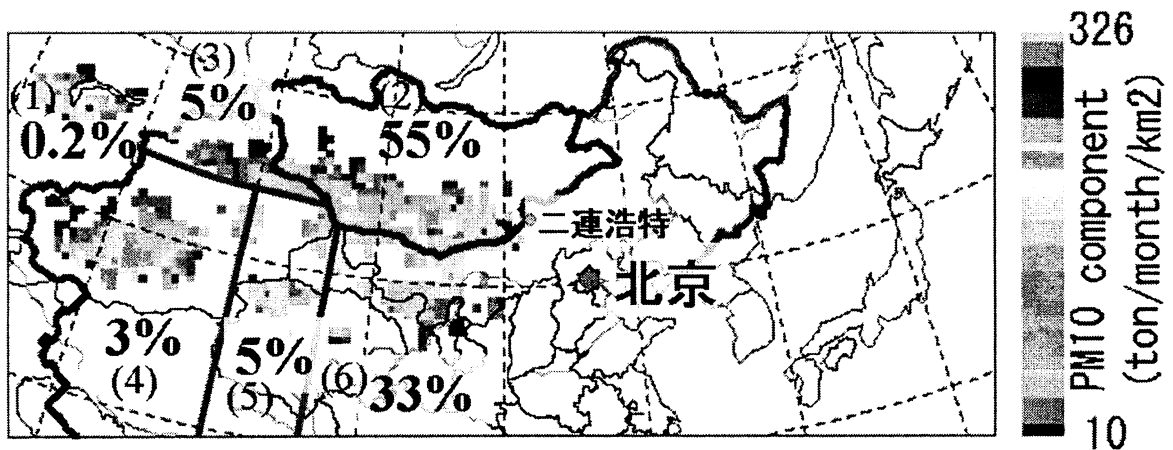


図 1 2001 年から 2003 年の 3 月から 5 月の計 9 ヶ月の平均黄砂発生量を示す図。

太線は発生地域を 6 つに分割する境界を示す。6 つの地域はそれぞれ (1)モンゴル・中国国外 (2)モンゴル共和国 (3)新疆自治区北部 (4)新疆自治区西部 (5)新疆自治区東部 (6)中国東部である。いわゆるゴビ砂漠は主として(2)と(6)に対応し、いわゆるタクラマカン砂漠は主として(4)に対応するパーセント値は北京での黄砂の地上濃度に対する寄与率を表す。東経 100 度北緯 40 度を領域中心、東経 108 度北緯 43 度を変換極とするポーラステレオ座標領域。東西南北とも 50km の水平解像度。計算格子数は東西 122、南北 46。

③ Nモデルを用いた計算・解析手法

平成13年度においては水平分解能125kmで計算を行ったが、輸送過程を正確に表現するためには50km程度まで分解能を上げることが望ましいと考えられた。いくつかの計算技術上の困難を克服して、50kmの水平分解能で図1に示す領域を計算範囲とした。

サブテーマ2の成果の一つとして、日本に到達する黄砂の多くは北京周辺を通ってくるのがわかった。そこで、北京に飛来する黄砂の起源を知るために、Nモデルは黄砂を複数の別変数として計算できる機能を持たせた。これを用いて北京の地上黄砂濃度への発生地域別の寄与を調べた。Nモデル中の黄砂変数を発生地域別に図1で示した6地域に分け、2001年から2003年の3月から5月までの計9ヶ月について計算を行った。6つの地域はそれぞれ(1)モンゴル・中国国外(2)モンゴル共和国(3)新疆自治区北部(4)新疆自治区西部(5)新疆自治区東部(6)中国東部である。

(2) 九州大学における研究方法

① Rモデルの概要

九州大学で開発された黄砂モデル⁴⁾は、RAMSのスカラー輸送オプションにダストの発生・除去(乾性沈着、湿性沈着、重力沈降)過程を組み込んだものであり、黄砂の粒径区分を12区分で表現するようになっている。

本研究で用いたダストの輸送モデルは、米国コロラド州立大学で開発された圧縮性非静力学方程式系からなる領域気象モデルRAMS(Regional Atmospheric Modeling System, RAMS; Pielke et al.⁵⁾)のスカラー輸送オプションにダストの発生・除去(乾性沈着、湿性沈着、重力沈降)過程を組み込んだもので、RAMSとオンラインでダストの発生・輸送計算を行う。代表粒径 r についての質量保存方程式は、

$$\rho_{air} \left(\frac{\partial \Phi_r}{\partial t} + u \frac{\partial \Phi_r}{\partial x} + v \frac{\partial \Phi_r}{\partial y} + w \frac{\partial \Phi_r}{\partial z} \right) = F_{source} + F_{dry} + F_{wet} + F_{grav} + F_{diff} \quad (1)$$

と書ける。ここで Φ_r は粒径 r のダスト粒子の質量混合比($\text{kg}_{dust}/\text{kg}_{air}$)であり、 F_{source} 、 F_{dry} 、 F_{wet} 、 F_{grav} 、 F_{diff} はそれぞれ粒径毎に発生、乾性沈着、湿性沈着、重力沈降、乱流拡散項を示す。ダスト輸送モデルの詳細は鶴野ら⁶⁾に既に報告されている。このモデルはその後、Uno et al.⁴⁾により、より多くのエアロゾル粒子を扱うことが可能な化学天気予報モデル(Chemical Weather Forecast System; CFORS)として拡張された。本論文ではCFORSを用い、12粒径(半径1-20 μm)に分類されたダスト計算結果を利用する。

② 黄砂の長期観測データ

黄砂の長期的な観測データは非常に少ない。最も古くから行われている観測は、目視による観測であり、本研究では中国、韓国、日本における目視黄砂観測データを用いてモデル結果の検証を行った。日本については各気象官署における視程が10km未満となった黄砂日数を、韓国については全ほか⁸⁾による報告データをそのまま利用し黄砂日数と定義した。一方、中国では、黄砂現象をDust storm(DS:砂塵風)、Blowing dust(BD:揚砂)、Floating dust(FD:浮塵)の3種類に分けて観測回数⁹⁾の統計を行っており、これらを解析に用いた。これらの区分の詳細については吉野⁹⁾参照のこと。

③ R モデルを用いた計算・解析手法

R モデルを用いた計算では、黄砂の発生量・輸送経路の年々変動を見るために 1973 年から 2004 年まで 32 年間のそれぞれ 2 月 20 日から 4 月 30 日までを対象に計算を行った。

計算対象領域はポーラーステレオ座標系で 115°E、25°N を中心とした 100×90 格子 ($\Delta x = \Delta y = 80\text{km}$) の鉛直 22 層 (上空 21km まで) であり、図 2 に示す。RAMS の初期化と連続的ナッジングのための境界条件はヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の 6 時間毎、水平解像度緯度経度 2.5 度、40 年再解析 (ERA40) の気象データを用いた。より詳細な記述は原ら⁷⁾を参照されたい。

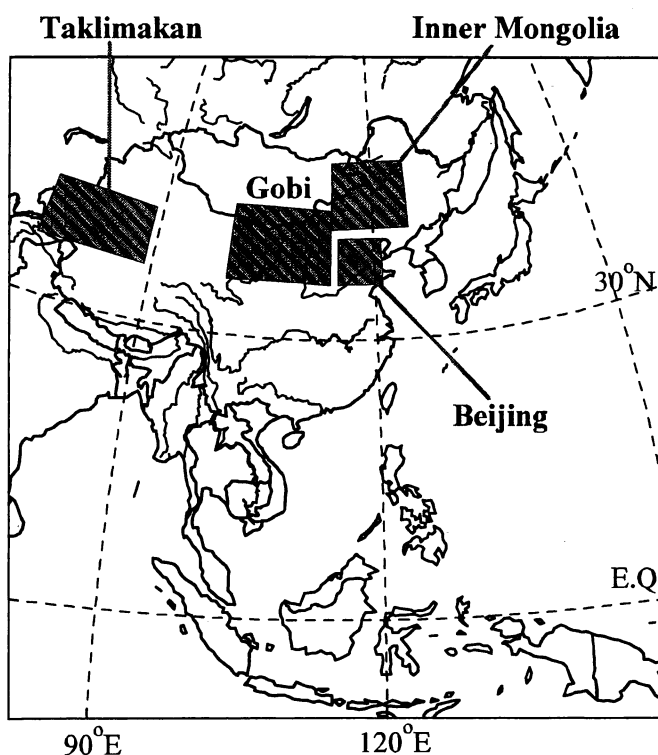


図 2 R モデルの計算領域。灰色部は観測データと比較を行った 4 領域を示す。

4. 結果・考察

(1) N モデルを用いた結果

① 濃度観測データとの比較

図 3 は、北京、二連浩特の 2 カ所における黄砂濃度の計算値の時系列とサブテーマ 2 の成果であるパーティクルカウンターによる観測値を比較したものである。観測値の単位は PM10 重量濃度換算値であるため両者はほぼ等分に比較可能である。二連浩特においては大きな濃度ピークをほぼ再現できている。北京では、サブテーマ 1 でのライダー観測の解析により大気汚染がひどかったと考えられる期間を除くと、エアロゾル濃度の大きなピークをほぼ再現している。これらから、定量的には課題は残るが、黄砂の発生・飛来はおおむね良い精度で再現されていると判断できた。また、北京におけるライダーの結果と比較することにより、鉛直分布も比較的精度良く再現されていることがわかった。

② 発生地域別の寄与

北京に飛来する黄砂の起源を知るために、2001年から2003年の3月から5月までの計9ヶ月について計算し、北京の地上濃度に対する各地域の寄与率を計算期間平均で求め、図1にパーセントで表した。これを見ると、北京の地上濃度に対して最も寄与しているのはモンゴルであり、半分強を占めている。次に大きいのは中国東部の影響で約3分の1、タクラマカン砂漠を含む新疆自治区付近の寄与は1割強であった。

この結果を年と月別に分けた。北京の平均地上濃度の年ごとの大小を決めたのは主としてモンゴル起源の黄砂の多寡であることがわかった。2003年のモンゴル起源の濃度は前二年の約3分の1もしくは4割程度であった。モンゴル地域での2003年の発生量は前二年の6割程度だった(表1, 2)。発生量の少なさだけではモンゴル起源の黄砂の寄与の小ささを説明できないことがわかった。

2003年のモンゴル起源の黄砂の少なさについて、発生量の変化と発生した黄砂が北京まで到達する頻度に分けて解析したところ、2003年の3月は発生量自体が非常に少ないのが原因とわかった。5月は逆に、発生量は前2年に遜色がないが、到達頻度が低いのが原因とわかった(表3)。

2003年に黄砂発生量が少なかった一つの要因が積雪被覆の多さと言われている。そこで積雪被覆が全く無いと仮定して仮想的黄砂発生量を計算したが、2003年の発生量の少なさは、積雪の影響だけでは説明できず、風自体が弱かったと考えるべきであることがわかった。

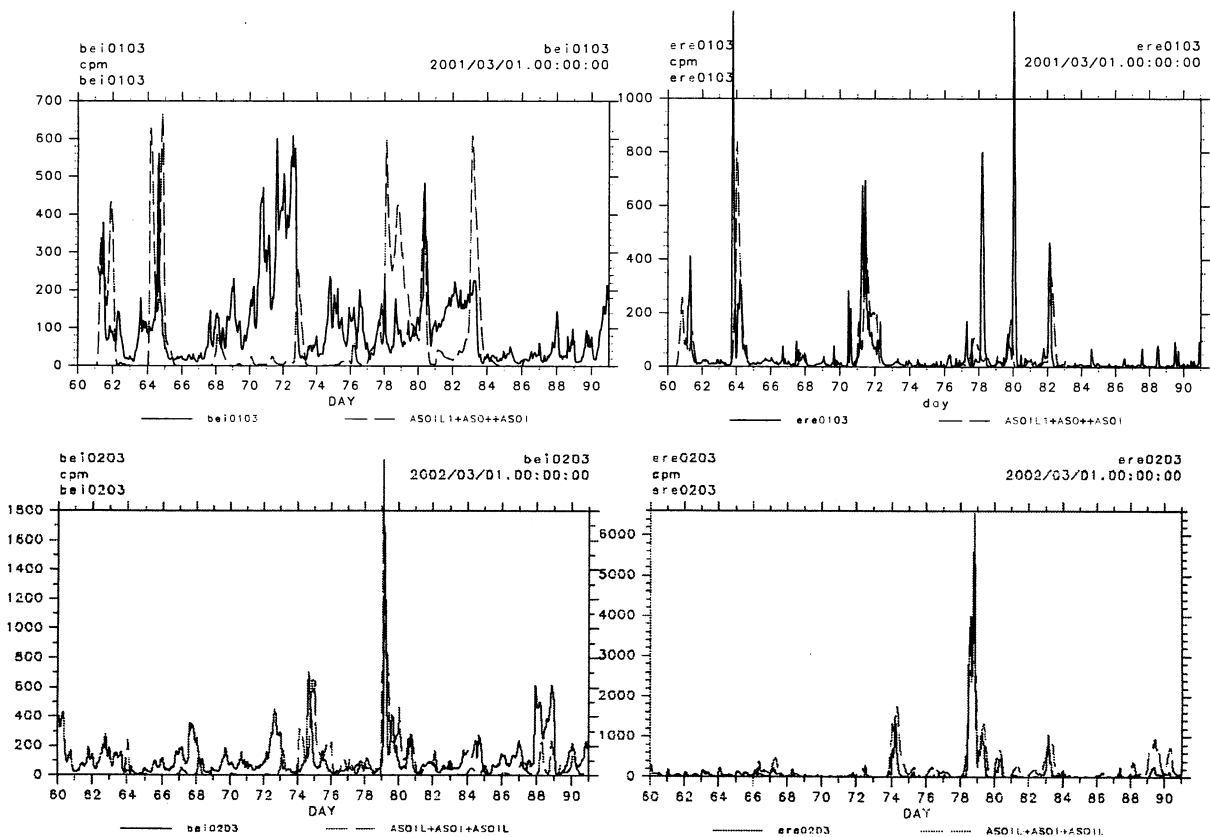


図3 2001年3月(上)と2002年3月(下)の北京(左)と二連浩特(右)における観測エアロゾル濃度(破線)と計算値(実線)。単位は $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 1 各年月平均での各地域起源の黄砂の北京での計算濃度。(1)から(6)は図 1 の地域に対応する。

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | <i>Total</i> |
|---------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 2001 | | | | | | | |
| Mar | 0.1 | 41.1 | 1.3 | 0.6 | 1.7 | 16.5 | 61.3 |
| Apr | 0.2 | 99.1 | 10.2 | 4.1 | 7.3 | 75.4 | 196.5 |
| May | 0.2 | 130.1 | 10.4 | 0.8 | 8.1 | 59.1 | 208.7 |
| 2002 | | | | | | | |
| Mar | 0.7 | 99.6 | 3.4 | 0.7 | 2.7 | 35.6 | 142.7 |
| Apr | 0.2 | 122.4 | 7.5 | 5.4 | 13.5 | 74.7 | 223.7 |
| May | 0.2 | 19.2 | 3.7 | 1.7 | 2.5 | 6.6 | 33.9 |
| 2003 | | | | | | | |
| Mar | 0.0 | 17.7 | 0.4 | 1.8 | 0.9 | 8.3 | 29.1 |
| Apr | 0.2 | 57.8 | 8.3 | 11.2 | 16.1 | 72.9 | 165.5 |
| May | 0.1 | 14.5 | 4.3 | 3.8 | 4.6 | 12.9 | 40.2 |
| average | 0.2 (0.2%) | 66.5 (54.7%) | 5.5 (4.5%) | 3.3 (2.7%) | 6.3 (5.2%) | 39.8 (32.8%) | 121.5 (100%) |

表 2 各年月において各地域起源の黄砂の北京での平均計算濃度をそれぞれの地域の発生量で割った値。他地域や年月との比較による相対値としてのみ意味がある。

| 2001 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|------|------|-------|------|------|------|------|
| 2001 | | | | | | |
| Mar | 0.25 | 11.42 | 3.25 | 0.08 | 1.55 | 5.50 |
| Apr | 0.07 | 5.24 | 2.91 | 0.21 | 1.52 | 6.13 |
| May | 0.07 | 8.13 | 3.71 | 0.10 | 1.93 | 7.99 |
| 2002 | | | | | | |
| Mar | 0.30 | 7.55 | 3.09 | 0.09 | 1.17 | 3.21 |
| Apr | 0.02 | 5.61 | 2.34 | 0.25 | 2.18 | 4.70 |
| May | 0.33 | 3.00 | 1.37 | 0.15 | 0.54 | 2.36 |
| 2003 | | | | | | |
| Mar | 0.00 | 8.43 | 1.33 | 0.16 | 0.64 | 2.96 |
| Apr | 0.06 | 4.74 | 3.32 | 0.50 | 2.78 | 5.03 |
| May | 0.17 | 1.69 | 1.59 | 0.36 | 1.05 | 2.11 |

(2) Rモデルを用いた結果

① 黄砂の長期変動の解析

図4に中国のa)ゴビ、b)タクラマカン、c)内蒙古、d)北京領域における観測とモデルによる3月と4月の積算黄砂日数を示す(解析領域はそれぞれ図2に示す)。観測結果はグレースケールの濃淡を用いて色の濃い方から Dust Storm (DS)のみ、DSと Blowing dust (BS)の合算、DSとBSと Floating dust (FD)との合算の3種類を示している。

図中の丸印付実線はモデル結果を示しており、ダストの消散係数から視程を見積もり、各グリッドの視程が10km以下となった日数を積算した。詳細については、原ら⁷⁾参照のこと。図4から、ゴビ砂漠においては70年代前半を除いて、BDとDSの和とモデルの黄砂日数の経年変動の間に良い一致が見られる。そして、70年末から97年頃にかけて黄砂日数の長期的変動は明らかに減少傾向で、97年から近年にかけては増加傾向にあることがわかる。一方、タクラマカン砂漠領域においては観測されるダスト現象の5割以上がFDであり、FDの長期的変動は減少傾向にあることがわかる。70年代を除き、モデル結果はDSの変動に類似している。モデル結果は各グリッドが視程10km以下となった場合にのみ黄砂日数をカウントしているが、無風或いは風力の比較的弱い状況で砂塵が空中に浮遊しているような現象(FD)を現在のモデルは十分に表現していないので、モデルと観測に差が見られる。また、内蒙古や北京領域では、黄砂日数の経年変動はゴビ砂漠領域の変動に類似しているが、70年代から97年にかけての減少傾向はよりなだらかである。内蒙古では97年から01年にかけての増加傾向が顕著である。モデル結果と目視による観測結果の定量的な比較は困難であるが、観測された黄砂現象の長期的変動の特徴はモデル結果によって比較的良く再現されていることがわかる。

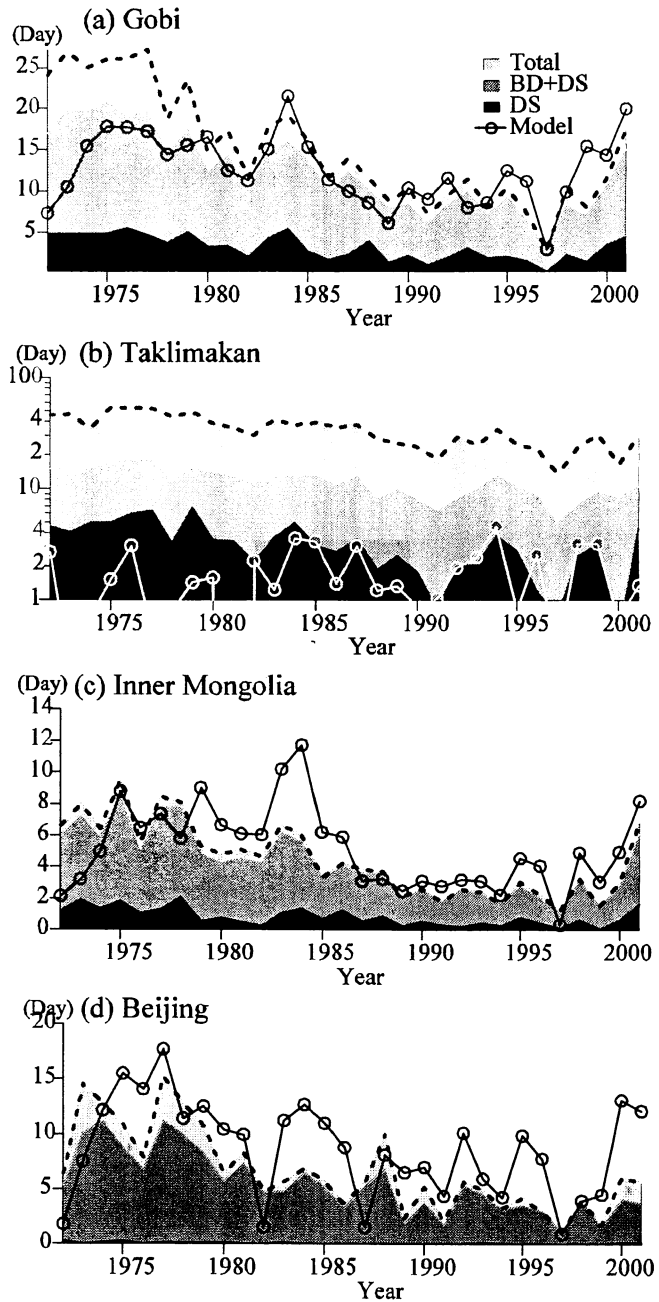


図4 1972年から2004年までのa)ゴビ、b)タクラマカン、c)内蒙古、d)北京領域における観測とモデルによる3月と4月の積算黄砂日数。色の濃い方からDSのみ、DSとBSの合算、DSとBSとFDとの合算を示す。

次に、図5に発生源の風下域である韓国と日本における観測とモデルによる3月と4月の積算黄砂日数を示す。棒が観測結果、丸印付実線がモデルによる結果を示す。これらの比較より、モデル結果は黄砂日数の経年変動を概ね良く再現していることがわかる。また、中国のゴビ砂漠領域で見られた黄砂日数の減少傾向は明瞭でなく、近年の増加が著しい。

以上のことから、中国の発生源域においては、70年代から97年にかけての黄砂現象の減少傾向が顕著であるが、日本や韓国においてはむしろ近年の増加傾向が顕著であることがわかる。風下域では、原ら⁷⁾で示したように、黄砂の輸送高度や経路により、発生源域の長期変動と異なる変動を示すと考えられる。

② 発生地域の気象場の長期変動

(1)で発生源域と風下域の黄砂の長期変動の特徴が明らかになったので、発生源域の黄砂現象と気象場の関係を明らかにする。

図6にゴビ領域のモデル最下層の気温、相対湿度、強風発生頻度の偏差の経年変化を示す。ここで、偏差とは各年の平均値から33年間の平均値の差をとったもの定義する。また、強風発生頻度とは、Kurosaki and Mikami¹⁰⁾により、強風発生頻度＝地上風速が6.5(m/s)を超えた回数/全観測回数で定義される。これらの図から、70年代から97年頃にかけてゴビ砂漠領域の強風発生頻度が減少しており、これが同時期のゴビ砂漠領域の黄砂日数が減少していた主な原因であると考えられる。逆に、相対湿度は強風発生頻度と逆相関の関係にあり、70年代後半から97年にかけて増加傾向が見られる。気温については、強風発生頻度と弱い逆相関関係にあり、90年代後半から温度上昇が見られる。

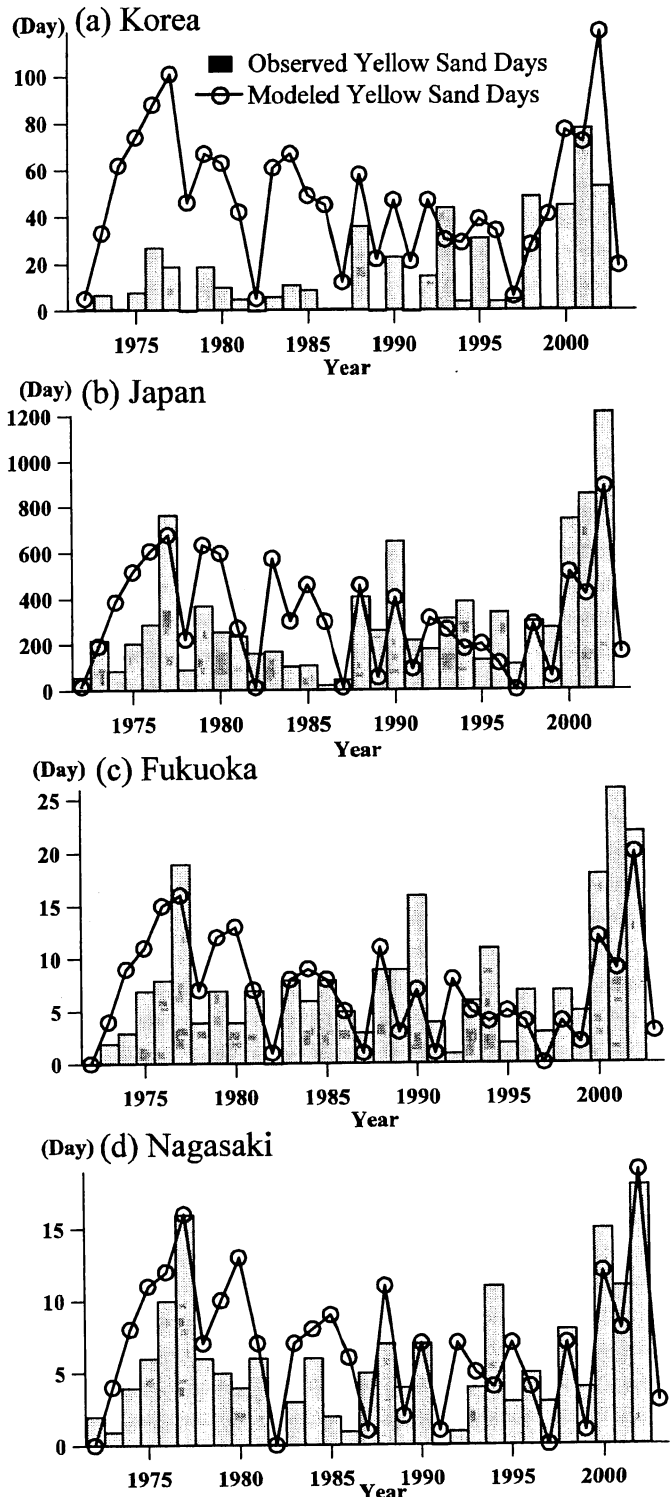


図5 韓国と日本における観測とモデルによる3月と4月の積算黄砂日数。

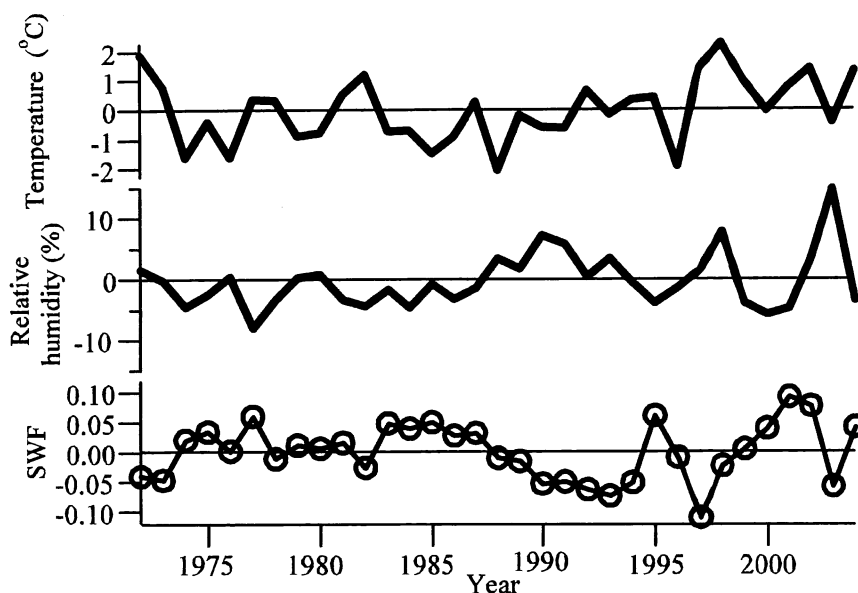


図 6 ゴビ砂漠における 3 月 4 月の気温（上）、相対湿度（中）、強風発生頻度（下）の偏差の時間変化を表す図。

次に、図 7 にゴビ砂漠領域（95°-110°E）を通る子午面におけるモデル最下層の(a)相対湿度、(b)ダスト濃度、(c)気温の偏差を示す。ダスト濃度と共に描かれているベクトルは風速の偏差を示す。これらの図から、高ダスト濃度である年の特徴として、西風の強風が見られると共に、30°-45°N の範囲で相対湿度の低偏差と、40°-55°N の範囲で気温の低偏差が見られる。反対に、低ダスト濃度である年の特徴として、東風の偏差が見られ、相対湿度の高偏差と、気温の高偏差が見られる。相対湿度については 30°-45°N で、気温についてはより高緯度での変動が、ダスト濃度と逆相関関係にあることに注意されたい。一般的に低温で乾燥しているのは大陸性寒帯気団の特徴であり、寒気の影響がより卓越する場合にダストの発生量が高まり、南からの温かい湿った気団の影響が卓越する場合にダストの発生量は少ないという特徴が図 7 から明らかである。

③ 気候インデックスと黄砂の関係

以上で明らかとなった黄砂現象の経年変動とグローバルスケールの気候因子との関連性を明らかにするために、様々な気候インデックスを用いてダストの発生量や地上ダスト濃度と相関解析を行った。用いた気候インデックスは、アジア域を対象として作成されたインデックスとして、アジア極中緯度指数 (Asian Polar Mid-latitude Index; APMI)、極渦指数 (Polar Vortex Index; PVI)、極東ゾナルインデックス (Far Eastern Zonal Index; FEZI)を用いた。ここで、

Asian Polar Mid-latitude Index (APMI) は 90°~130°E の領域における中緯度 (50°N) と極域 (80°N) の 500hPa の気圧偏差の勾配を表している。ここで、偏差とは各年の平均値から 33 年間の平均値の差をとったものと定義する。Polar Vortex Index (PVI) は 90°~170°E の領域における極域の 500hPa の気圧偏差を表している。Far Eastern Zonal Index (FEZI) は 90°~130°E の領域における 2 つの緯度間の 500hPa の気圧偏差の勾配を表している。

一方、広範囲を対象にしたグローバルなインデックスとして、北極振動 (Arctic Oscillation; AO)、南方振動インデックス (Southern Oscillation Index; SOI) である。アジア域のインデックスは ECMWF の ERA40 データのジオポテンシャル高度を用いて作成し、グローバルインデックスはそれぞれ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/> に掲載されているものを利用した。

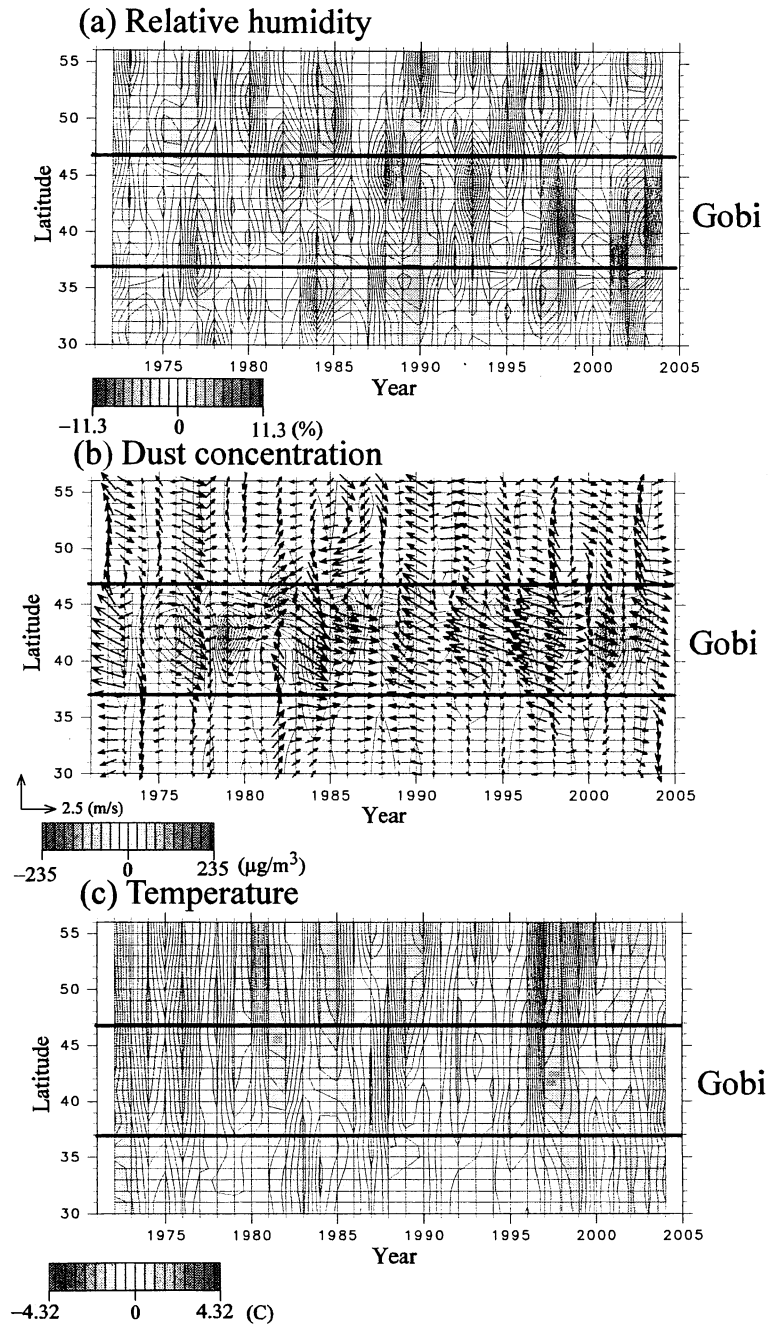


図7 ゴビ砂漠相当の東経95°-110°を東西平均した (a) 相対湿度(%), (b)黄砂濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$), (c)気温($^{\circ}\text{C}$)の偏差の南北・時間断面。

表3に3月と4月のダスト発生量の偏差と同時期の各インデックスの相関係数を示す。全データ数 (n=33) から計算した 95%有意な相関係数は $|R|>0.380$ であり、有意である値にはアスタリスク (*)を使用した。表3から、ダストの発生量と高い相関を示すインデックスは3月と4月では異なることがわかる。3月のゴビ砂漠域のダスト発生量は極渦指数 (PVI)、アジア極中緯度指数 (APMI)、北極振動指数 (AO) と高い相関を示す。図8(a)に、3月において最も相関係数が高かった APMI とダスト発生量の偏差について経年変化を示す。図8(a)右図は、3月の APMI とダスト発生量の散布図を示しており、El Niño と La Niña であった年はそれぞれ、灰色と黒丸で識別している。両者の間には明らかな負の相関が見られる (APMI 負→ダスト増)。APMI は 90°-130°E の中緯度 (50°N) と極域 (80°N) のジオポテンシャル高度偏差の差を示しており、指数が負の場合、中緯度の方が極域よりも偏差が低いパターンを表している。また、極渦指数 (PVI) は極域の寒気の蓄積度を調べるインデックスであり、指数が正であれば極域から寒気が放出されている状態を表している。3月の極渦指数と APMI は-0.813 の高い負の相関があることから、APMI が負指数である場合には、極渦指数は正指数となる傾向があり、極域から中緯度への寒気の吹き出しが強い状態にあることになる。すなわち、3月は極域の寒気の吹き出しに関連する低気圧の発生・発達によって強風発生頻度が高まり、結果的にダストの発生量が高まるというメカニズムが示された。3月の APMI は、70年代から97年にかけて増加しており、中緯度への寒気の流入活動が低下した状態にあったことがわかる。よって、発生源付近の黄砂日数の長期的減少には、3月の寒気の侵入の減少が関連していたことが示唆された。

表3 ゴビ砂漠における黄砂発生量と各気候インデックスとの相関係数。

| | PVI | APMI | FEZI | AO | SOI |
|-----------------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Dust emission (March) | 0.453 | -0.561 | 0.387 | -0.421 | 0.329 |
| Dust emission (April) | -0.033 | -0.218 | 0.624 | -0.252 | 0.156 |

一方、4月のダストの発生量は東西指数 (FEZI) と高い正の相関を示す (図8(b))。一般的に気象庁が定めている東西指数は 40°N と 60°N の 500hPa の高度差であるが、30°N と 50°N の 500hPa 高度差から指数を作成した場合にダストの発生量と指数が最も高い相関を示したため、独自の高度差を採用した。これは、ダストの主な発生源であるゴビ砂漠が 35°-45°N に位置していることと関連しているためである。3月に強い関連を示した極域の寒気の吹き出しに関する指数との相関は低くなり、ゴビ砂漠域を挟む 30°N と 50°N 間の傾圧性が強い場合にダストの発生量が高まることが示された。しかし、図8(b)の散布図に示したように、La Niña の年は東西指数が負指数の場合でもダストの発生量が多くなる傾向が見られた。

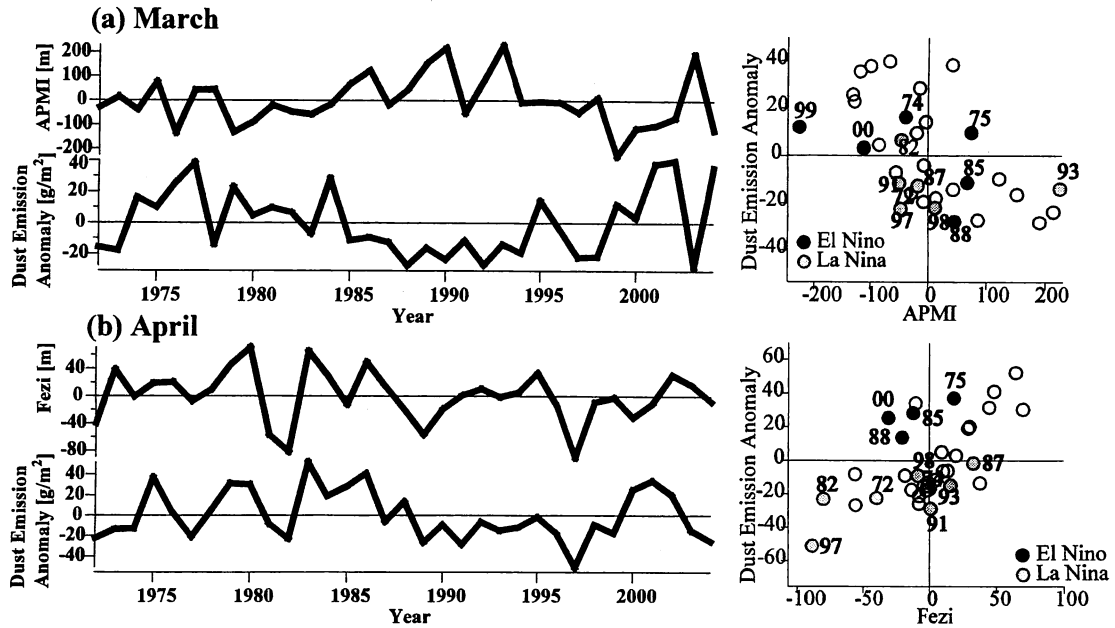


図 8 1972 年から 2004 年までの、ゴビ砂漠における黄砂発生量と(a)APMI および(b)Fezi との相関係数。右図において、エルニーニョ年は黒丸、ラニーニャ年は灰色の丸で描かれている。

3 月から 4 月にかけては、冬季の循環場から夏季の循環場に移行する過渡期である。3 月と 4 月でダスト発生量と高い相関を示すインデックスが異なる理由として、3 月においては冬季の極の寒気と低気圧の発生・発達が強くと関連しているのに対し、4 月においては東西指数が 30°-50°N の低気圧活動の活発さと強く関連しているためであると考えられる。しかし、総観規模の気象学的メカニズムについては今後さらに解析が必要である。

5. 本研究により得られた成果

本研究により得られた成果を以下に列記する。

- (1) 気象モデル RAMS と大気質モデル CMAQ に黄砂の発生、輸送、沈着の過程を取り込み、黄砂の数値モデルを開発した。北京や二連浩特の地上観測データと比較して、よい現実再現性を示した。
- (2) (1) で開発したモデルで黄砂を発生地域によってモンゴル、中国西部 3 区分、中国東部、それ以外(カザフスタン等)の六つにわけて計算できるようにした。2001 年から 2003 年の 3-5 月について、北京での黄砂地上濃度計算値への寄与を求めたところ、全期間平均で 5 割強はモンゴル起源、約 3 分の 1 は中国東部起源、残りはタクラマカン砂漠を含む中国西部からであることがわかった。
- (3) 北京で 2003 年が他の二年と比較して平均濃度が低い原因は主としてモンゴル起源の寄与が激減したためとわかった。その減少の一因は発生量自体の減少であるが、定量的には半分程度しか説明することはできず、残りは輸送の変化であった。

- (4) 領域黄砂輸送モデルを用いて、1972～2004年の33年の春季(2月20日から4月30日)を対象に黄砂の発生・輸送シミュレーションを行った。中国・韓国・日本における長期的な砂塵あらしや黄砂観測データとモデル結果の検証を行った。観測とモデル結果の比較から、モデル結果は黄砂の長期的変動を概ね再現していることが確認された。中国においては70年代から97年にかけての黄砂現象(砂塵風、揚砂)の減少傾向が顕著であり、風下域である韓国や日本では近年の黄砂日数の増加傾向が顕著であった。
- (5) 黄砂発生源域で地上ダスト濃度が33年平均値よりも高い年の気象場の特徴として、低温・乾燥傾向が見られた。
- (6) 様々な気候インデックスとゴビ砂漠域のダスト発生量の相関解析から、3月は中緯度と(50°N)と極域(80°N)の傾圧性を示すAPMIとダスト発生量との強い負の相関が示され、4月はゴビ砂漠を挟む中緯度(30°N-50°N)の傾圧性を示す東西指数とダスト発生量との強い正の相関が示された。近年の温暖化数値実験から、温暖化した場合に北極振動指数(AO)が正のフェーズにシフトしてゆくという数値解析結果が得られており、3月の黄砂現象は将来的に減少してゆく可能性がある。

6. 引用文献

- 1) 吉野正敏：中国の砂塵あらしと日本の黄砂－気象災害の観点から－、災害の研究、第33巻、55-70 (2002)
- 2) Zhang X. Y., S. L. Gong, T. L. Zhao, R. Arimoto, Y. Q. Wang, and Z. J. Zhou: Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission, *Geophys. Res. Lett.*, 30(24), 2272, doi:10.1029/2003GL018206 (2003)
- 3) Gillette, D. A. and Passi, R.: Modeling dust emission caused by wind erosion, *J. Geophys. Res.* 93, 14233-14242 (1988)
- 4) Uno, I., G. R. Carmichael, D. G. Streets, Y. Tang, J. J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J. - H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka and T. Iida: Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8668, doi:10.1029/2002JD002845 (2003)
- 5) Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lyons, L. D. Grasso, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee and J. H. Copeland: A comprehensive meteorological modeling system -RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91, 1992.
- 6) 鶴野伊津志、天野宏欣、木下紀正、荒生公雄、村山利幸、松井一郎：地域気象モデルと結合した黄砂輸送モデルの開発と1998年4月の黄砂シミュレーション、*天気*、50, 17-29 (2003)
- 7) 原由香里、佐竹晋輔、鶴野伊津志、竹村俊彦：領域ダスト輸送モデルを用いた黄砂現象の年々変動シミュレーション、*天気*、51, 9-18 (2004)
- 8) 全映信、金相源、趙慶美、金正淑：最近100年間の韓国における黄砂観測日数、*地球環境*, vol.7, No.2, 225-231, 2002.
- 9) 吉野正敏：近年のダストストーム・黄砂の発生と気候変動、気象環境研究会、農環技研 (2005)

- 10) Kurosaki, Y., M. Mikami: Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 30(14), 1736, doi:10. 1029/2003GL017261 (2003)

7. 国際共同研究等の状況

- (1) 領域気象モデル RAMS と大気質モデル CMAQ を用いて、コロラド州立大学、米国 EPA 国立暴露研究所、Houston 大学等と複数の国際共同研究もしくはモデル共同開発を行っている。
- (2) 黄砂の年々変動に関するデータ解析を中国大気物理研究所の王自発教授と共同で研究を進めている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 原由香里、佐竹晋輔、鵜野伊津志、竹村俊彦：天気、51(10), 719-728 (2004)
「領域ダスト輸送モデルを用いた砂漠現象の年々変動シミュレーション」
- 2) Uno et al.: *J. Agric. Meteorol.*, 60, 513-518 (2005)
“Numerical Analysis of Inter-Annual Variation of Dust Emission and Transport in East Asia”
- 3) Uno, I., Y. Hara, and S. Satake: *Journal of Agricultural Meteorology*, 60(5), 513-518 (2005)
“Numerical analysis of inter-annual variation of dust emission and transport in East Asia”
- 4) Sugata S., Nishikawa M., Sugimoto N., Mori I., and Shimizu A.: *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*, (K. Omasa, I. Nouchi, and L. J. De Kok eds.), Springer-Verlag Tokyo, 271-276 (2005)
“Impact of meteorological fields and surface conditions on Asian dust”
- 5) Uno, I. Z. Wang, M. Chiba, Y.-S. Chun, S. Gong, Y. Hara, E. Jung, S.-S. Lee, M. Liu, M. Mikami, S. Music, S. Nickovic, S. Satake, Y. Shao, Z. Song, N. Sugimoto, T. Tanaka, D. Westphal: *Journal of Geophysical Research*, 111, 2005JD006575 (2006) in press
“Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia – Overview”

<その他誌上発表 (査読なし)>

- 1) Sugata S.: *Air Pollution Modeling and Its Application XV*, Borrego and Schayes eds., 519-520 (2002) “Seasonal simulation of the air quality in East Asia using CMAQ”
- 2) Sugata S.: Borrego and Schayes eds., 519-520 (2002)
“Seasonal simulation of the air quality in East Asia using CMAQ, Air Pollution Modeling and Its Application XV”
- 3) 菅田誠治：国立環境研究所ニュース、22(5), 8-9 (2003)
「環境問題基礎知識「黄砂の多寡をもたらすもの」」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Seiji S.: The 1st PEACE workshop, Tokyo (2001)
“Application of CMAQ to East Asia using RAMS meteorological data”
- 2) Sugata S.: 25th NATO/CCMS international technical meeting on air pollution modelling and its application, Louvain-la-Neuve, Belgium, (2001)
“Seasonal simulation of the air quality in East Asia using CMAQ”
- 3) 菅田誠治：黄砂・砂塵嵐ワークショップ、北京 (2001)
「大気質モデルによる大陸スケールの物質動態の解析について」
- 4) Sugata S.: Awaji (2002)
“Intermittent transboundary transport of sulfate aerosol and the passage of synoptic-scale pressure systems over East Asia in winter”
- 5) Sugata S., Wakamatsu S., Ohara T., and Uno I.: Models-3 Users’ workshop, Research Triangle Park/NC/US (2002)
“Application of CMAQ with RAMS to air quality in the Osaka area in Japan”
- 6) Sugata, S. Wakamatsu, T. Ohara, S. Hasegawa, S. Kobayashi, Y. Itano, T. Moriya: 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, Tsukuba (2003)
“Observation of Spatial Distribution of Air Pollutants in the Osaka Area -Numerical Modeling Study-”
- 7) Sugata S., M. Nishikawa, and N. Sugimoto: 2003 Models-3 Users’ workshop, Research Triangle Park/NC/US (2003)
“Soil-derived aerosols in East Asia simulated by CMAQ”
- 8) M. Hayasaki and S. Sugata: 4th International Workshop on Global Change: Connection to the Arctic 2003 (GCCA4), Toyokawa (2003)
“Interannual variability of cold surges over northeastern Eurasia” :
- 9) Sugata S., M. Nishikawa, N. Sugimoto, I. Mori, and A. Shimizu: The 6th International Symposium Plant Responses to Air Pollution and Global Changes, Tsukuba (2004)
“Impacts of meteorological fields and surface conditions on Asian dust (Invited)”
- 10) 鵜野伊津志：大気電気学会第 69 回研究発表会 (2003)
「化学天気予報 黄砂と越境大気汚染のシミュレーション」
- 11) 原由香里、佐竹晋輔、鵜野伊津志、竹村俊彦：日本気象学会秋季大会 (2003)
「黄砂の発生・輸送過程の年々変動のモデルシミュレーションと気象因子の解析」
- 12) 原由香里、鵜野伊津志：2004 年度日本気象学会九州支部発表会講演要旨集、27-28 (2004)
「黄砂の長期変動のシミュレーションと気候因子との関連」
- 13) Sugata S., Nishikawa M., Sugimoto N., Mori I., Shimizu A., and Hayasaki M.: 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Tokyo (2005)
“Seasonal variation of dust in East Asia in 2001, 2002, and 2003”

- 14) 菅田誠治、西川雅高、杉本伸夫：第46回大気環境学会年会特別集会、名古屋 (2005)
「数値シミュレーションによる黄砂の発生地と輸送経路の推定」
- 15) 鵜野伊津志：大気環境学会年会 (2005)
「黄砂の年々変動のシミュレーション」
- 16) 佐竹晋輔、杉本伸夫、鵜野伊津志、早坂忠裕：日本気象学会秋季大会 (2005)
「2005年4月30日に仙台上空に飛来した大規模黄砂の輸送構造」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特別集会Ⅰ「黄砂に関する調査・研究の取り組みと最近の動向」、第46回大気環境学会、名古屋 (2005)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞 (2005年2月21日 九州版、九大版黄砂モデルの成果について) 研究成果の実例提供。
- 2) NHK デジタル放送茨城「いばらきわいわいスタジオ」 (2005年4月28日、国立環境研版黄砂モデルの成果について1分ほど紹介)

(6) 受賞等

鵜野伊津志：2005年度日本気象学会賞 (2005年5月)

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

ADB-GEF 黄砂対策プロジェクトの専門家会議等に参加し、本研究成果により得られた知見に基づいて意見交換を行い、当該プロジェクトに貢献。