

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

原 由香里*・佐竹 晋輔*・鶴野 伊津志**・竹村 俊彦**

要旨

2000年から2002年にかけて日本における黄砂観測日数は急激な増加傾向を見せたが、2003年は一転して非常に観測日数の少ない年となった。このような黄砂現象の年々変動のメカニズムを明らかにするため、領域ダスト輸送モデルを用い、1993～2003年の11年間の春季（2月20日から4月30日）を対象に黄砂の発生・輸送過程のシミュレーションを行った。黄砂観測日数データや TOMS Aerosol Index を用いた比較から、モデル結果は観測された年々変動を再現していることが確認された。また、シミュレートされた黄砂現象の年々変動から、黄砂多発年と非多発年の間には大気境界層内の輸送経路や輸送量に明らかな違いが見られた。更に、ECMWF 客観解析データを用いた気象場の解析から、モデル結果の発生量と発生源域の強風発生頻度の間には強い相関が見られ、ジオポテンシャル高度のアノマリ－解析から発生源域の強風発生頻度や輸送経路が説明されることが明らかとなった。

1. はじめに

春先、東アジア大陸の砂漠・半乾燥地帯から強風によって巻き上げられた土壌性粒子が、大気を黄色く染める。大陸から飛来する土壌性粒子は日本では‘黄砂’と呼ばれており、古くから知られている。黄砂は発生源の近隣国に深刻な災害や経済損失、視程の低下をもたらすだけでなく、長距離輸送される際に太陽放射の散乱・吸収を行い雲核となるなど、地球放射収支に対しても影響を及ぼす。2000～2002年にかけて日本の黄砂観測日数は急激に増加し、特に2002年は過去最多の黄砂観測日数を記録した。しかし2003年には一転して黄砂観測日数は激減した。

今日まで衛星やライダーを用いた観測 (Murayama *et al.*, 2001; Sugimoto *et al.*, 2003) や、数値モデルを用いたシミュレーション (Kai *et al.*, 1988; 鶴野ほか, 2003) など比較的多くの黄砂研究がなされてきたが、それらはある黄砂エピソードを対象に行われたものが多く、春季東アジア域における黄砂現象の年々変

動のメカニズムを定量的・定性的に解析した研究は十分に行われていない。

本論文では、黄砂現象の年々変動のメカニズムを3次元的に明らかにすることを目的とし、1993～2003年の11年間の春季（2月20日から4月30日）を対象にダスト輸送モデルを用いて黄砂の発生・輸送シミュレーションを行った解析結果と、黄砂現象の年々変動に影響を及ぼす気象因子の ECMWF 客観解析データを用いた結果を示す。

2. ダスト輸送モデルの概要

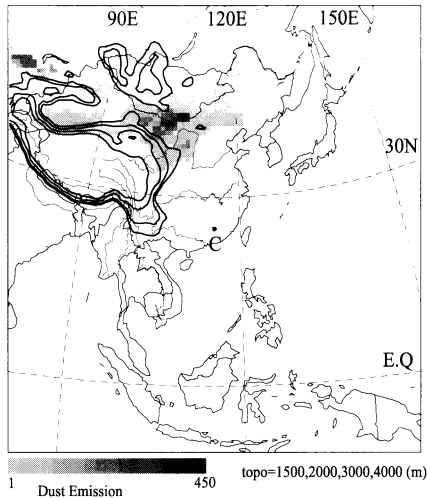
本研究では、米国コロラド州立大学で開発された圧縮性非静力学方程式系からなる領域気象モデル RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, RAMS; Pielke *et al.*, 1992) のスカラー輸送オプションにダストの発生・除去 (乾性沈着, 湿性沈着, 重力沈降) 過程を組み込んだダスト輸送モデルを用い、RAMS とオンラインでダストの発生・輸送計算を行った。代表粒径 r についての質量保存方程式は、ポーラステレオ座標系における (x, y, z) とそれに対応する風速 (u, v, w) によって、

* 九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻。

** 九州大学応用力学研究所。

—2003年12月22日受領—

—2004年8月23日受理—



第1図 モデルの計算領域。グレースケールの濃淡は2002年の3月、4月の積算ダスト発生強度 (g/m^2)。等値線は標高で1500, 2000, 3000, 4000 (m)。

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

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 ($\text{kg}_{\text{dust}}/\text{kg}_{\text{air}}$) 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。開発されたダスト輸送モデルの詳細は鶴野ほか (2003) に既に報告されている。このモデルはその後、Uno *et al.* (2003) 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 $0.1\text{--}20 \mu\text{m}$) に分類されたダスト計算結果を利用する。

計算対象領域はポーラステレオ座標系で東経 115° 北緯 25° を中心とした 100×90 格子 ($\Delta x = \Delta y = 80 \text{ km}$) の鉛直23層 (上空 23 km まで) であり、計算対象領域を第1図に示す。図中のグラデーションバーは2002年3月4月の積算ダスト発生強度 (g/m^2) を、コンターラインは標高 (m) を示す。

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 1.0 度、気圧面レベル (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150,

100, 70, 50, 30, 10 hPa) のジオポテンシャル高度、温度、相対湿度、水平風成分の気象データを用いた。この気象データから計算領域内の6時間毎の境界条件データを作成し、RAMS の計算領域の外側5グリッドを強ナッジング領域とし、その内部を時間スケール $1/T$ を 10^{-5} sec^{-1} でナッジングした。

3. 結果

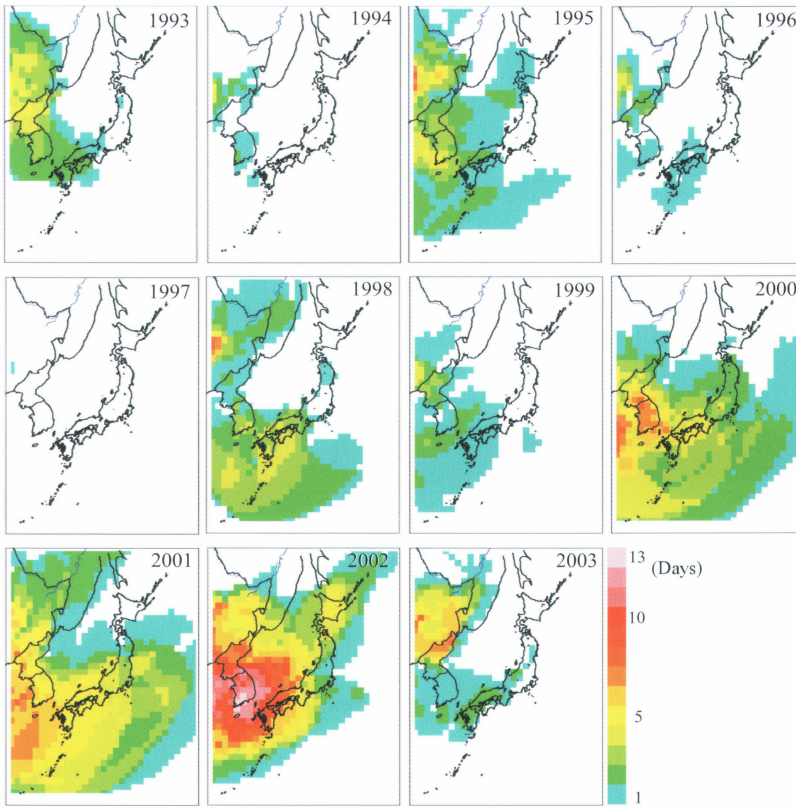
本論文で使用した CFORS の妥当性は既に2001年3月～5月に東アジア域で行われた ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) による航空機、船舶、地上観測網を駆使した集中観測において、Uno *et al.* (2003), Satake *et al.* (2004), Carmichael *et al.* (2003), Seinfeld *et al.* (2004), Sugimoto *et al.* (2002) 等に報告されている。そこで、本論文では黄砂日数の観測データと、TOMS Aerosol Index (AI) を用いたモデル結果の検証例を示し、黄砂の発生量・輸送経路の年々変動解析と、それぞれに影響を及ぼした気象要因についての解析を併せて示す。

3.1 黄砂日数

韓国や日本で行われている黄砂観測の一つに、目視による黄砂観測がある。本論文では、日本については視程が 10 km 未満となった日数を、韓国については全ほか (2002) による報告データの黄砂日数をそのまま利用し黄砂日数と定義した。この黄砂日数の観測データとモデル結果との比較を行う為に、消散係数 σ (km^{-1}) と識別限界値 ϵ (World Meteorological Organization; WMO では 0.05 を採用) と視程 V (km) の関係式 (2) を用いてモデル結果から視程を見積もった。

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \left| \frac{1}{\epsilon} \right| \quad (2)$$

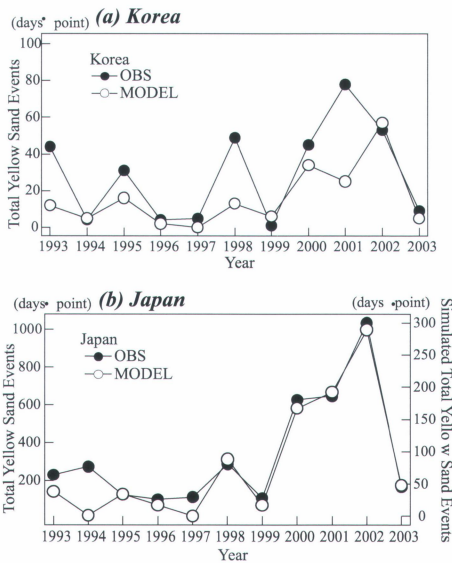
ここで、 σ は地上 330 m 高度までのダストの消散係数を用いた。第2図は、各グリッドにおいて視程 (2) が閾値未満となった3月4月の積算黄砂日数を示している。Satake *et al.* (2004) が2001年春季の東アジア域におけるモデルシミュレーションにおいて、光学的厚さの $35\text{--}80\%$ がダスト以外のエアロゾルによる影響であったことを示していることからわかるように、実際の視程の低下にはダスト以外のエアロゾルの影響も含まれていると考えられる。しかし、本論文ではダストのみの消散係数を用いてモデルの視程の見積もりを



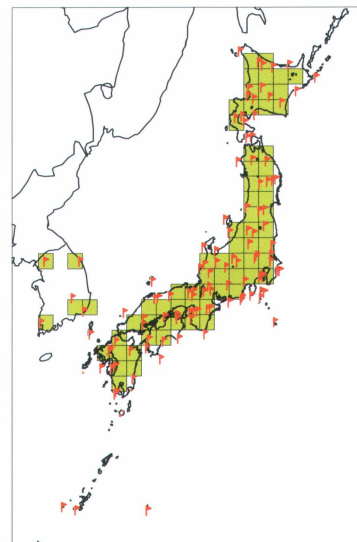
第2図 モデルのダスト消散係数を用いて算出した視程が閾値 (20 km) 未滿となった3月、4月の積算黄砂日数の分布。

行ったため、視程の閾値を20 kmとした。第2図から、黄砂日数の増減の年々変動と、黄砂によって視程が低下した地域の分布が明瞭である。1993年から2003年にかけての年々変動の特徴は、後の観測との比較において併せて述べる。

第3図に、観測とモデル結果による黄砂日数の比較を示す。それぞれ (a) 韓国 (全ほか, 2002), (b) 日本についての比較であり、黒丸が観測結果、白丸がモデル結果を示す。第3図aは韓国の5地点 (Busan, Deagu, Gangneung, Mokpo, Seoul) における3月と4月の積算黄砂日数である。第3図bの観測結果は日本全国113地点の気象台及び測候所における3月4月の積算黄砂日数であ



第3図 (a) 韓国 (白丸), (b) 日本での観測 (黒丸) とモデル結果による黄砂日数の比較。



第4図 日本と韓国における黄砂日数の観測地点 (赤シンボル) とモデル結果で使用したグリッド (緑セル)。

り、一方モデルは日本を覆う各グリッドの積算黄砂日数である。第4図に日本と韓国の観測地点(赤シンボル)とモデル結果で使用したグリッド(緑セル)を示す。観測による黄砂日数には、観測者の主観や各観測地点における視界の差、ダスト以外のエアロゾルによる大気の混濁を黄砂日数として観測してしまうことなど、様々な不確実性が含まれると考えられる。しかし、第3図から、絶対値は異なるものの、モデル結果は1997年の黄砂観測日数の減少や2000~2002年における増加、また2003年における減少などの年々変動の傾向を概ね再現していることがわかる。第2図から、シミュレーションを行った過去11年で北海道において黄砂が観測されるのは稀であり、2002年は沖縄から北海道を含む広範囲で黄砂が観測されていることが見て取れる。また、1995年のように、

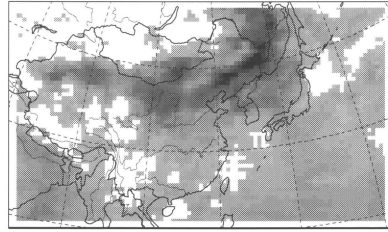
韓国では視程が閾値以下となった日数が多く日本においては少ない年があり、韓国と日本における黄砂日数の年々変動の僅かな違いもモデルで再現されている。

3.2 TOMS Aerosol Index とダスト光学的厚さ

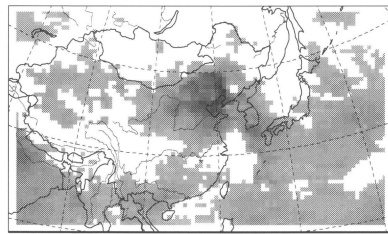
Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Aerosol Index (AI) とは、紫外線を吸収するエアロゾルに感度がある衛星センサから得られるパラメータであり、高い値を示すほど土壌性粒子や黒色炭素エアロゾル濃度が高いことを示す。Ginoux *et al.* (2003) は、吸収性の弱いエアロゾルについて TOMS AI が光学的厚さに線形的に比例し、またダスト層高度の関数で表されることを示している。このことから1997~2003年の TOMS AI のデータを用いてモデル結果の検証を行った。第5図に顕著なダストイベントが起こった1998年、2000年、2001年の TOMS AI とモデルによる

TOMS AI

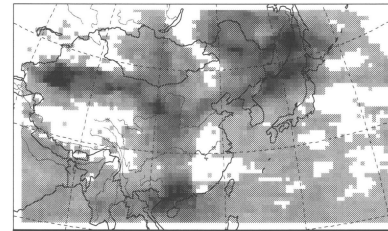
(a) April 20, 1998



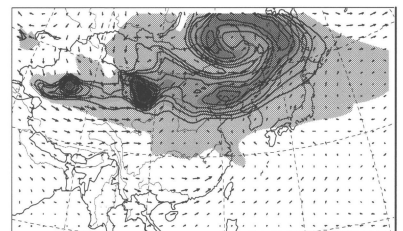
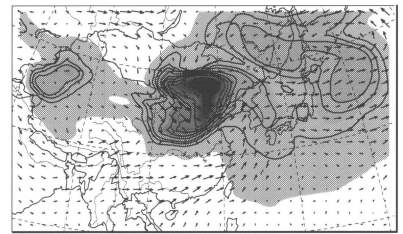
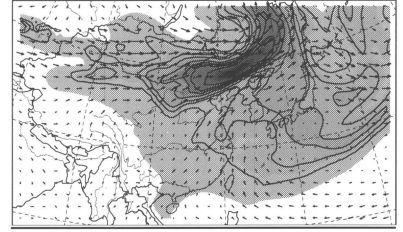
(b) April 25, 2000



(c) April 08, 2001



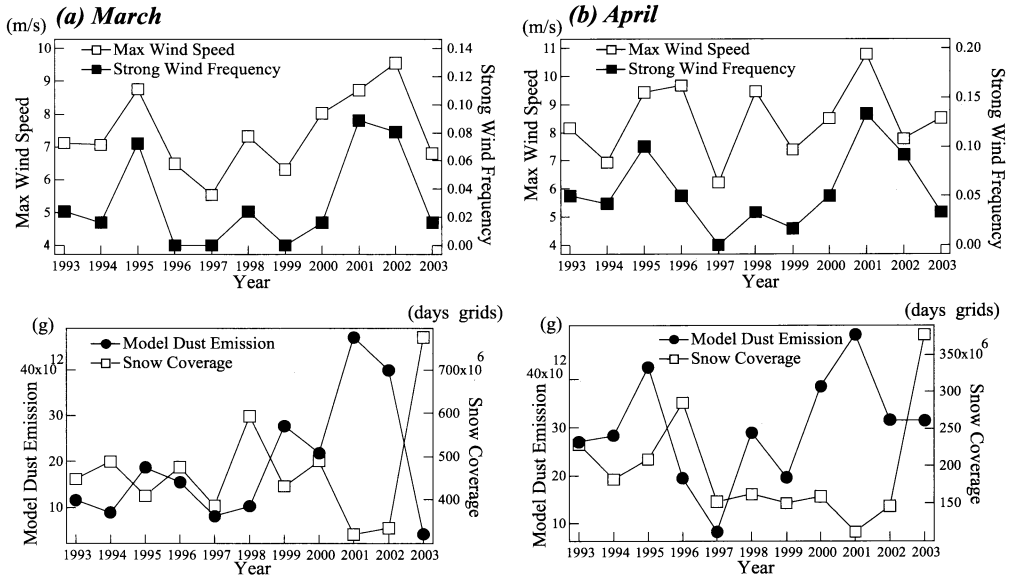
Dust AOD



0.1 6.1 4 (m/s) 0.01 3.5

第5図 (a)1998年、(b)2000年、(c)2001年のダストイベント時における TOMS AI (左) と同時刻のダスト光学的厚さ (右) の比較。ベクトルは850 hPa における風向・風速を示す。

ダスト光学的厚さと850 hPaの風速ベクトルの水平分布図を示す。ここで、光学的厚さとは、大気中の物質による太陽放射の減衰率を表す消散係数を鉛直方向に積分したものである。モデル結果は TOMS AI の測定時刻と同じである地方時の正午のものを使用した。第5図から、1998年の4月20日の比較においてゴビ砂漠付近に見られる濃いダストが発生源から北東方向へ輸送されるパターン、そして2000年4月25日の比較からダストが南東方向へ輸送されるパターン、最後に2001年の4月8日の比較からダストが渦を形成しながら輸送されてゆくパターン的一致がそれぞれ確認でき、モデルの時間・水平分布の再現性が高いことがわかる。TOMS AI と地上2 km 以上のダスト光学的厚さ (Aerosol Optical Depth ; AOD) の線形関係：



第6図 (a) 3月, (b) 4月のゴビ砂漠領域 (38-45°N, 95-115°E) における解析結果であり, 上図が最大風速 (m/s) (白四角), 強風発生頻度 (黒四角), 下図がダスト発生量 (Tg) (黒丸), 積雪被覆率 (モデルの黄砂飛散の閾値以上の日数×グリッド数) (白四角) をそれぞれ示す.

$$TOMS\ AI = \alpha \times AOD \quad (3)$$

(α は比例係数である) を調べた結果, 黄砂イベント時において, 北京領域では $\alpha = 3.2 \sim 12.7$, 相関係数は平均で 0.69, 北海道領域ではほぼ $\alpha = 7.7$, 相関係数は平均で 0.58 の関係が見られた. TOMS AI は高い高度に舞上がったエアロゾルに感度が高く地表付近で感度が低いことから, ダストの舞上がり高度の差や黒色炭素エアロゾルの影響, また衛星センサーの経年変化の影響などによって比例係数に幅が生じると考えられる. 比例係数のばらつきにはこれら様々な影響が含まれるものの, 他の年のダストイベントについても図には示さないが高い再現性が確認された.

4. 発生・輸送過程の年々変動

3.1節で, モデル結果が1993年~2003年の黄砂日数の年々変動を再現していることが明らかとなった. 4節では, 発生過程と輸送過程の観点からこのような年々変動のメカニズムについて要因を評価する.

4.1 ダスト発生量と地表面気象パラメータとの関係

東アジア域の砂塵の主な発生源であるゴビ砂漠 (38-45°N, 95-115°E) におけるモデルのダスト発生量, そしてダストの発生に影響を及ぼしている地表面の気象

パラメータについての解析を示す. 気象パラメータは ECMWF 地表面データの地上高10 m 風速 (m/s) とモデルの黄砂発生に関連する積雪被覆率データを用いた. 第6図 a は3月について, 第6図 b は4月についての解析結果であり, 上図の白四角は各月における最大風速 (m/s), 黒四角は強風発生頻度, 下図の黒丸はモデルによるダストの発生量 (g), 白四角は積雪被覆率がモデルの黄砂飛散の閾値以上であった日数×グリッド数を示す. ここで強風発生頻度とは, Kurosaki and Mikami (2003) により,

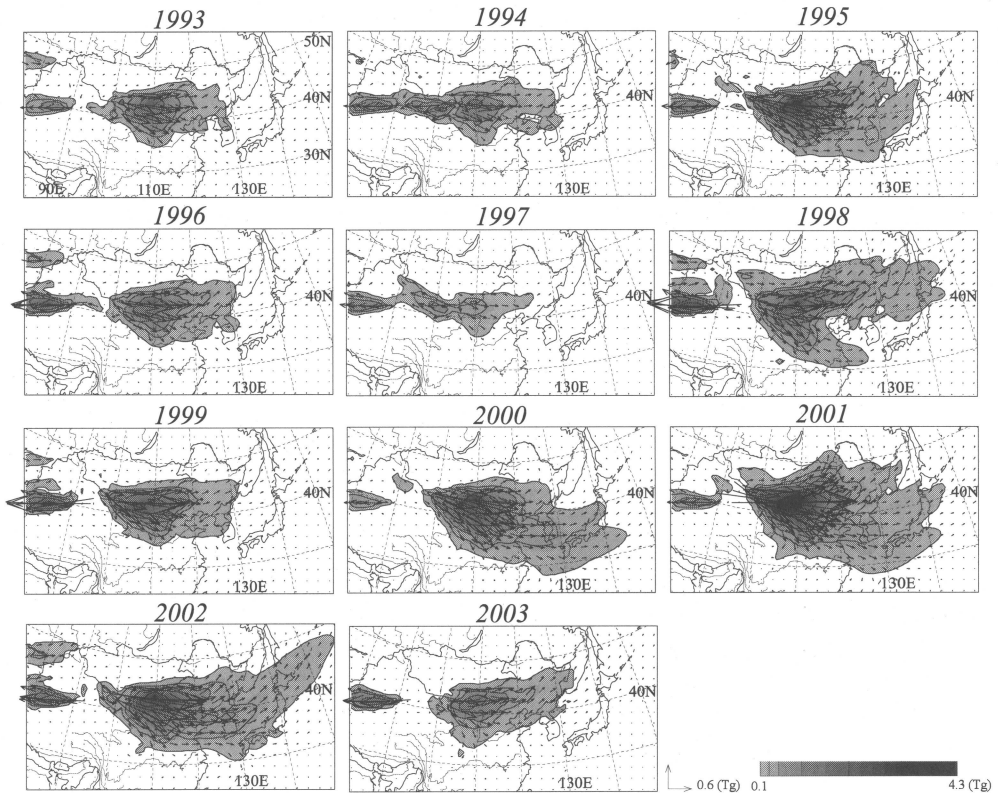
強風発生頻度

$$= \frac{\text{地上風速が } 6.5 \text{ (m/s) を超えた回数}}{\text{全データ数}} \quad (4)$$

で定義される. 第6図の解析結果から, 1995年や2000~2002年の強風発生頻度 (黒四角) と最大風速 (白四角) の増加に対応してダスト発生量も増加を示している. さらに, 積雪被覆率とダスト発生量の変動には逆相関が見られ, 特に2001年, 2002年の3月4月の積雪被覆率は非常に低く, 強風発生頻度の増加と共にダスト発生量の急激な増加を強化した一因であることが示唆された.

4.2 輸送経路の年々変動

続いて輸送量・輸送経路の年々変動について解析を



第7図 シミュレートされた大気境界層内の水平ダスト総輸送量 (Tg) (グレースケールの濃淡). ベクトルは輸送量の大きさと輸送方向を示す.

行い, 黄砂観測日数との関係について考察を行う. 第7図に計算期間を通じて積算した大気境界層内 (1000 m とした) のダスト水平総輸送量 (Tg) を示す. ここで, ダストの水平総輸送量 (Horizontal Transport Mass HTM: (Tg)) とは,

$$\begin{aligned}
 HTM_x &= \iiint_{yzt} u \cdot C_{Dust} dy dz dt \\
 HTM_y &= \iiint_{xzt} v \cdot C_{Dust} dx dz dt \\
 HTM &= \sqrt{(HTM_x)^2 + (HTM_y)^2}
 \end{aligned} \quad (5)$$

で定義される. ここで, C_{Dust} はダスト濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) を示す. 第7図はコンターが濃い程, 境界層内におけるダスト輸送量が多いことを意味し, ベクトルは長さが総量で向きが輸送方向を示している.

日本における黄砂観測日数が少なかった1997年は, 輸送量が他の年に比して非常に少ない. 同じく黄砂観測日数が少なかった2003年は, 総輸送量自体が少ない上に主な発生源が位置する北緯40度付近から北東方向

の輸送方向であったことが判る. 逆に, 観測日数の多かった2000~2002年はゴビ砂漠東域付近において輸送量が多く, 日本における黄砂観測日数の少なかった1995年についても発生源東域で輸送量が多い. 輸送量の多かった年について東経130度以東の輸送経路の変動を見てみると, その輸送方向 (ベクトルの向き) はそれぞれ異なり, 大別して, 北緯40度付近から南東方向への輸送であった2000年, 北東方向への輸送であった1995年と2002年に分けられる. 更に, 1995年と2002年の輸送方向はほぼ同じであるように見えるが, 1995年は輸送量の広がり日本列島まで届かず, 一方2002年は日本列島を北上するような形で日本全域を輸送量が覆っている. 日本で1995年に黄砂観測回数が少なく2002年に過去最多の観測回数を記録したのは, 輸送量の多さだけが原因でなくダストの輸送が日本領域の境界層内で集中的に起こったためである事が示された. 即ち, 大気境界層内におけるダストの輸送量と輸送経路の僅かな違いが, 3.1節で示したような日本における黄砂観測回数の増減を左右し, 日本における黄砂日数

第1表 ゴビ砂漠領域 (38-45°N, 95-115°E) における強風発生頻度 (%), シミュレートされた同領域のダスト発生量 (Tg), 大気境界層内と自由対流圏における東経130度鉛直緯度断面を通過した東向きダスト総輸送量 (Tg), 括弧内の数値は東向き輸送量の発生量に対する割合 (%) を示す。

Year	Strong Wind Frequency in Gobi (%)	Dust Emission (Tg)	East ward Transport Mass within BL at 130°E (Tg) (%)	East ward Transport Mass within FA at 130°E (Tg) (%)
1993	3.7	38.6	2.1 (5.5)	15.9 (41.3)
1994	2.9	37.2	2.3 (6.1)	15.6 (42.0)
1995	8.6	61.3	4.3 (7.0)	26.2 (42.8)
1996	2.5	34.9	2.5 (7.2)	16.0 (46.0)
1997	0	16.3	1.0 (6.2)	7.1 (43.7)
1998	2.9	39.2	2.6 (6.5)	19.1 (48.8)
1999	0.1	47.3	2.6 (5.5)	23.3 (49.2)
2000	3.3	60.4	4.6 (7.6)	17.8 (29.5)
2001	11.1	96.5	5.9 (6.1)	33.0 (34.2)
2002	8.6	71.4	6.0 (8.4)	26.3 (36.9)
2003	2.5	35.5	2.2 (6.1)	13.8 (38.9)

の変動が合理的に説明される。

発生・輸送過程のまとめとして、第1表にシミュレーション期間におけるゴビ砂漠の強風発生頻度 (%), 同領域の総発生量 (Tg), 境界層内と自由大気について東経130度鉛直緯度断面を通過した東向き総輸送量 HTMx (Tg) と発生量に対する割合 (%) (括弧内) を示す。発生量に対する割合はその年の輸送高度の特徴を示すと考えられる。

発生量が最も多かったのは2001年、最も少なかったのは1997年であり、それぞれ強風発生頻度に対応している。更に、東経130度鉛直緯度断面を通過した大気境界層内の輸送量が最も多かったのは2002年で輸送量は6.0 Tg、発生量に対し8.4%の高い割合を占めており、第3図の日本における黄砂観測日数の急激な増加と一致している。東経130度鉛直緯度断面を通過した自由大気における輸送量の発生量に対する割合が高かったのは1999年で49.2%となっており、第3図においても境界層における影響が少なかったことが示され、各年の輸送量・輸送高度の特徴が明らかである。

4.3 黄砂の年々変動と総観気象場

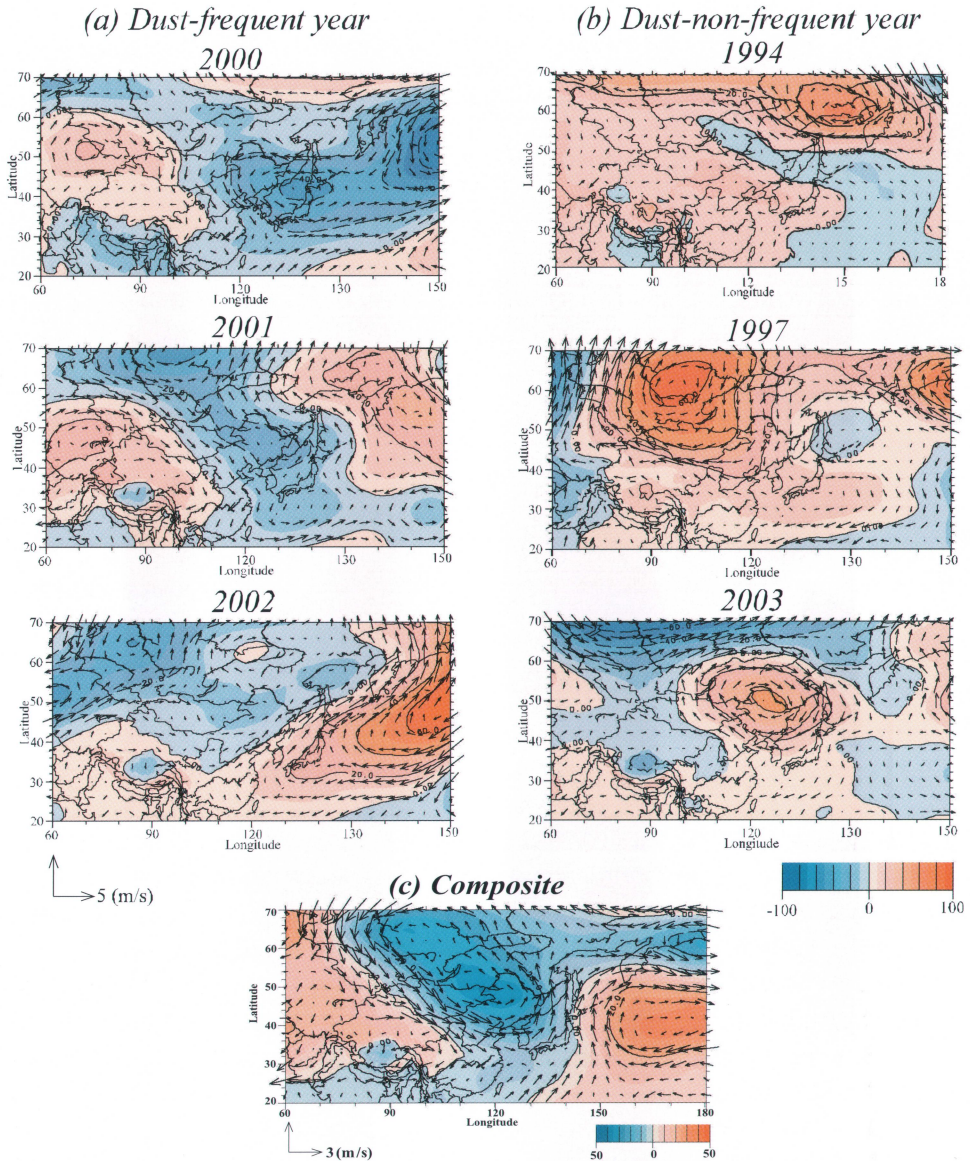
発生源の地表面気象パラメータや輸送経路の年々変動を引き起こす総観規模の気象場について、ECMWF 客観解析データを用いて700 hPa ジオポテンシャル高度のアノマリー解析を行った。アノマリーは、1993~2003年の3月4月のデータから11年平均値を出し、各年の平均値から11年平均値の差をとることによ

り作成した。第8図aはゴビ砂漠の強風発生頻度が高く、日本における黄砂観測日数の多かった2000年、2001年、2002年についてのジオポテンシャル高度の偏差 (m) を、第8図bは強風発生頻度が低く黄砂観測日数の少なかった1994年、1997年、2003年についてのジオポテンシャル高度の偏差 (m) を示す。ベクトルは同高度場における風速の偏差 (m/s) である。オレンジが正偏差、青が負偏差を表している。これらの解析結果から、黄砂多発年の700 hPa 気圧偏差の共通した

特徴として、発生源 (ゴビ砂漠) の北域に低気圧性の負の偏差が見られる。

即ち、黄砂多発年は発生源の北域で低気圧活動が活発であり、その為に強風発生頻度が高まり、ダストの発生量が特に増加したことを意味している。一方、黄砂非多発年においては発生源付近に高気圧性の正偏差が見られ、そのため強風発生頻度が減少し、発生量が抑制されたと考えられる。更に、加えて重要であるのは北西太平洋上の気圧偏差のパターンにより、ダストの輸送経路が変動することである。例えば、2000年の様に日本付近に高気圧性の正偏差が見られない場合は、高緯度から吹き出す低気圧性の寒気が日本列島を超え、風速の平均値とその偏差が指す方向に輸送経路をとる。また、2002年の様に日本列島以東の太平洋上に高気圧性の正偏差が存在する場合、寒気は日本列島を超えることが出来ず、風速の平均値とその偏差が示すように平年よりも北東寄りの進路をとると考えられる。ダストの輸送方向が2002年に類似していた1995年のアノマリーも、日本列島以東の太平洋上にほぼ同様の正偏差パターンが見られた。

第8図cは、第8図aの黄砂多発年 (2000, 2001, 2002) のジオポテンシャル高度の平均値から第8図bの黄砂非多発年 (1994, 1997, 2003) の平均値の差をとったコンポジット (単位: m) である。即ち、黄砂が多く発生し日本に輸送される場合の典型的な気圧偏差のパターンを示しており、低気圧活動に伴う発生源北



第 8 図 (a) 黄砂多発年, (b) 黄砂非多発年の ECMWF 客観解析データを用いた 3 月, 4 月の 700 hPa 高度における水平風速 (m/s) とジオポテンシャル高度 (m) のアノマリー (平年値は 1993~2003 年の 11 年間のデータから作成). (c) (a) 黄砂多発年と (b) 非多発年のコンポジット.

域の負の偏差と日本付近への寒気の南下が明瞭である.

5. まとめ

本論文では, 領域ダスト輸送モデルを用いて, 1993~2003年の11年間の春季(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.

黄砂観測日数や TOMS AI などの観測データとモデル結果の検証を行い, 過去11年間における黄砂現象の発生・輸送過程の年々変動の特徴の解析と, その変動に影響を与えた気象因子について, ECMWF の客観解析データを用いて解析を行った. 以下の点が明らかにされた.

- 1) 日本と韓国の目視による黄砂観測日数をモデル

のダスト消散係数から再評価した。その結果、モデルは概ね観測された黄砂現象の年々変動の特徴を捉えていることが示された。

2) TOMS AI とモデル結果によるダスト光学的厚さの比較から、ダストイベントのモデルの再現性が示された。

3) 黄砂現象の年々変動のメカニズムについて、発生過程と輸送過程の観点から評価を行った。発生過程においては、発生源(ゴビ砂漠)付近の強風発生頻度と、最大風速の大きなイベントの出現によってダストの発生量が増減することが明らかとなった。また、積雪被覆率の減少が2001年2002年のダスト発生量の増加の一因であることが示された。

4) 輸送過程について、モデル結果による大気境界層内のダスト総輸送量の水平分布図から輸送経路の年々変動が明らかとなった。輸送経路は年によって変動が大きい。また、輸送方向が類似していても1995年と2002年のように僅かな経路の変化によって黄砂観測日数に大きな差が生まれ、境界層内の水平輸送量と輸送経路によって日本における黄砂観測日数の増減が説明される。

5) 発生源の地表面気象パラメータや輸送経路の年々変動を引き起こしている総観気象場について、ECMWF 客観解析データを用いた700 hPa ジオポテンシャル高度のアノマリー解析を行った。黄砂多発年は発生源付近で低気圧活動が活発であるために強風発生頻度が高まり、ダストの発生量が増加すること、逆に非多発年は発生源付近で高気圧によって強風発生頻度が減少し発生量が減少したことが説明できた。更に、太平洋上の高気圧性偏差の位置によって輸送経路が変動することが示された。またコンボジット解析により、黄砂多発年の典型的な気圧偏差の特徴が明らかにされた。

今後の課題としては、さらに長期間にわたってシミュレーションを行い、砂漠化の進行の効果やグローバルな気候変動インデックスなどの関係の解析を行うことなどが挙げられる。

謝 辞

この研究は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究の一部として行った。また、研究の遂行には(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金の援助を受けた。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- Carmichael, G. R., Y. Tang, G. Kurata, I. Uno *et al.*, 2003: Regional-scale chemical transport modeling in support of the analysis of observations obtained during the TRACE-P experiment, *J. Geophys. Res.*, 108 (D21), 8823, doi: 10.1029/2002JD/003116.
- 全映信, 金相源, 趙慶美, 金正淑, 2002: 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.
- Ginoux, P. and O. Torres, 2003: Empirical TOMS index for dust aerosol: Applications to model validation and source characterization, *J. Geophys. Res.*, 108 (D17), 4534, doi: 10.1029/2003JD/003470.
- 原 由香里, 佐竹晋輔, 鶴野伊津志, 2002: ダスト輸送モデルを用いた東アジア域の近年の黄砂現象の解析, *地球環境*, Vol. 7, No. 2, 215-224.
- 五十嵐弘道, 王勤学, 大坪国順, 辛晓平, 2003: 中国・日本における黄砂現象の長期変動について, 2003年度春季大会講演予稿集, p246.
- Kai, K., Y. Okada, O. Uchino, I. Tabata, H. Nakamura, T. Takasugi and Y. Nikaidou, 1988: Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986, *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 457-472.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2003: Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (14), 1736, doi: 10.1029/2003GL017261.
- Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B.-J. Sohn, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga and Y. Iwasaka, 2001: Ground-based network obserbation of Asian dust events of April 1998 in east Asia, *J. Geophys. Res.*, 106 (D16), 18345-18360.
- 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, 1992: A comprehensive meteorological modeling system-RAMS, *Meteor. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- Satake, S., I. Uno, T. Takemura, G. R. Carmichael, Y. Tang, D. Streets, N. Sugimoto, A. Shimizu, M. Uematsu, J. -S. Han, S. Ohta, 2004: Characteristics of Asian aerosol transport simulated with a regional scale chemical transport model during the ACE-Asia observation, *J. Geophys. Res.* (in press).
- Seinfeld, J. H., G. R. Carmichael, R. Arimoto, W. C.

- Conant, F. J. Brechtel, T. S. Bates, T. A. Cahill, A. D. Clarke, P. Flatau, B. J. Huebert, J. Kim, S. J. Masonis, P. K. Quinn, L. M. Russell, P. B. Russell, A. Shimizu, Y. Shinozuka, C. Song, Y. Tang, I. Uno, R. J. Weber, J. H. Woo and X. Y. Zhang, 2004 : Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 367-380.
- Sugimoto, N. I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh and T. Nakajima, 2002 : Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai. *Geophysical Res. Lett.*, 29 (19), 1901, doi : 10.1029/2002GL015112.
- Sugimoto, N., I. Uno, M. Nishikawa, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, Y. Chen, and H. Quan, 2003 : Record heavy Asian dust in Beijing in 2002 : Observations and model analysis of recent events, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (12), 1640, doi : 10.101029/2002GL016349.
- 鵜野伊津志, 天野宏欣, 木下紀正, 荒生公雄, 村山利幸, 松井一郎, 杉本伸夫, 2003 : 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.
- 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, 2003 : 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.
- Uno, I., G. R. Carmichael, D. G. Streets, S. Satake, T. Takemura *et al.*, 2003 : Analysis of surface black carbon distributions during ACE-Asia using a regional-scale aerosol model, *J. Geophys. Res.*, 108 (D23), 8636, doi : 10.1029/2002JD00325.

Interannual Variations of 'Kosa' Simulated by a Regional-Scale Dust Transport Model.

Yukari HARA*, Shinsuke SATAKE*, Itsushi UNO**
and Toshihiko TAKEMURA**

* (Corresponding Author) Department of Earth System Science and Technology, Kyushu University,
Kasuga Park 6-1, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan.

** Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

(Received 22 December 2003 ; Accepted 23 August 2004)
