

## 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

鵜野 伊津志\*1・天野 宏 欣\*2・木下 紀 正\*3・荒生 公 雄\*4  
村山 利 幸\*5・松井 一 郎\*6・杉本 伸 夫\*6

## 要 旨

地域気象モデル RAMS と結合した黄砂の輸送モデルを開発した。この輸送モデルでは、黄砂の発生源の特定に、NDVI 植生インデックスと積雪被覆率データを利用し、発生条件には土壌分類に従った臨界摩擦速度マップを利用した。また、粒径別輸送、乾性沈着、湿性除去、重力沈降のプロセスもモデル内に組み込んだ。1998年4月10日～25日にかけての東アジア域の大規模な黄砂エピソードに適用し、その輸送解析を行った。1998年4月14～15日に主にゴビ砂漠～黄土高原で発生した黄砂は、寒冷渦に巻き込まれる形で日本列島を西から東に横断するように輸送されるのがシミュレートされた。寒冷渦の通過に伴い、ダストの鉛直分布は、最初に濃度の濃い層が高い高度に現れ、続いて低い位置へと変化することがモデルの鉛直空間分布から示され、これはライダ―観測の結果を合理的に説明していた。大量の黄砂が寒冷渦の西側の沈降性の逆転層内にトラップされて輸送されたため、観測されたダスト層は2～3 km 以下の比較的低高度であった。

## 1. はじめに

長距離輸送される黄砂粒子は、著しい視程の低下や大気放射バランスに大きな影響を持つ。しかし、身近な現象であるにもかかわらず、黄砂の大気中への舞い上がりや長距離輸送メカニズムと気象条件、発生する黄砂の量と粒径分布、長距離輸送過程における黄砂の粒径分布の変化など、明らかになっていない点が多い。衛星データやライダ―観測等で黄砂の水平・鉛直分布の直接観測が多く行われている（例えば Murayama *et al.*, 2001; Husar *et al.*, 2001）が、その発生・輸送過程の正確な解明には数値モデルを用いた解析が不可欠である。

アジア域の黄砂の輸送モデル解析例は比較的少ない。まず、Kai *et al.* (1988) の3次元の粒子拡散モデル解析があげられ、黄砂の発生源を変えてその輸送過

程を解析し、発生源位置と気象条件により輸送される高度・経路が大きく異なることを示している。Wang *et al.* (2000) は3次元輸送モデルを適用して、地上気象通報データをもとに黄砂の発生条件や粒径分布をモデル化し、1988年の黄砂現象の詳細な解析を行った。しかし、黄砂の発生域は中国内陸部の標高1500～2500 m の砂漠域であり、観測点が少なく、その輸送高度を含む3次元輸送メカニズム、詳細な地上観測との比較による検証は依然として不十分である。

大規模な黄砂が1998年4月14～15日に中国大陸内部で発生し、黄砂現象が九州・沖縄地方で4月17日後半から観測され、通常の曇り空とは異なり、視界が黄みを帯びた天気となった。NASA の海色衛星センサー SeaWiFs はその様子を捕らえており、黄砂の塊が中国の華北平野上空を通過していく様子が鮮明に捕らえられており、その規模の大きさが理解できる<sup>1)</sup>。また、19～20日にかけて発生した黄砂の北米大陸までの輸送も同時に報告されている (Husar *et al.*, 2001; Uno *et al.*, 2001)。

本論文は、この1998年4月中旬～下旬に観測された

<sup>1)</sup> [http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN\\_DOCS/OCDST/asian\\_dust.html](http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/OCDST/asian_dust.html)

\*1 九州大学応用力学研究所。

\*2 九州大学総合理工学研究科 (現 野村総合研究所)。

\*3 鹿児島大学教育学部。 \*4 長崎大学環境科学部。

\*5 東京商船大学。 \*6 独立行政法人国立環境研究所。

—2000年7月26日受領—

—2002年10月25日受理—

大規模黄砂現象を対象に、地域気象モデルと結合した黄砂の輸送モデルを開発・適用し、総観スケールの天気変化と黄砂の発生・長距離輸送との関係を明らかにしたものである。論文の後半では、数値モデルの結果と衛星画像、地上観測値との比較を行い、モデルの妥当性の検証結果も同時に報告する。

## 2. 地域気象モデル RAMS と結合した黄砂輸送モデルの開発

黄砂の発生条件の特定と、大気境界層中での拡散と乾性沈着、自由大気中での輸送、降水による湿性除去過程には、接地層から自由大気の広範囲の気象パラメータが重要である。従来多くの研究は気象庁やヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の全球客観解析データを計算領域について内挿した気象データを用いているが、そもそも客観解析データが指定気圧面レベル、1日2～4回程度、水平方向1～2.5度緯度経度メッシュの比較的粗いものであり、境界層中の大気乱流構造を表現していない。本研究では、大気境界層～自由大気におよぶ広範な気象場の計算のために、地域気象モデリングシステム RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) を使い、RAMS と完全に結合した黄砂の輸送モデルの構築を行った。ここで RAMS は Pielke *et al.* (1992) によって開発された領域気象モデルである。以下に開発した黄砂の輸送モデルの概要を示す。

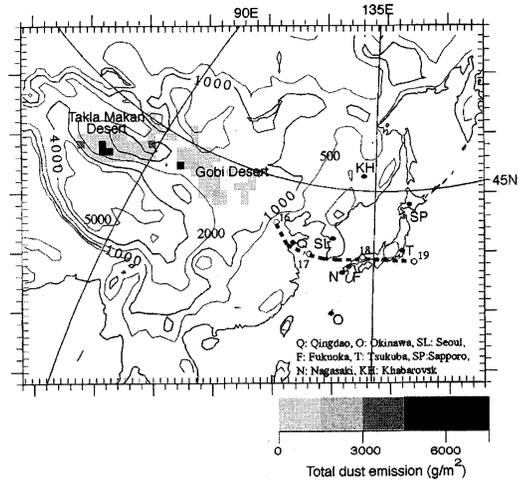
黄砂の輸送は、その発生・輸送・除去プロセスを RAMS のスカラー輸送オプションを用いて組み込み、RAMS と完全に結合して計算される。代表粒径  $r$  の黄砂粒子についての質量保存式は、

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

と書ける。ここに、 $\Phi_r$  は粒径  $r$  の黄砂粒子の質量混合比 ( $g_{dust}/g_{air}$ )、 $F_{source}$ 、 $F_{dry}$ 、 $F_{wet}$ 、 $F_{grav}$  はそれぞれ粒径に依存した発生、乾性沈着、湿性沈着、重力沈着を表し、それぞれの項のモデル化の詳細については 2.2 以降で述べる。一方、 $F_{diff}$  は乱流拡散項であり、RAMS で格子点毎に計算される。

### 2.1 計算領域と境界条件

モデルの計算領域は第1図に示された、地図投影の中心を北緯36度、東経138度に、計算領域の中心を北緯40度、東経110度に定めた回転ポーラステレオ座標系



第1図 モデルの計算領域と計算期間中の総ダスト発生量 ( $g/m^2$ )。等値線は標高を示し 500, 1000, 2000, 4000, 5000 m。図中の太点線は寒冷渦の通過位置を示し (数字は通過日)、図中の●は第4, 5図のダスト濃度の取り出し地点を示す。

で表現された120 km 正方格子64×48グリッドの範囲である。鉛直方向には、最下層グリッドを110 m、上層に上がるにつれ1.2倍の割合で1800 m を上限にグリッド間隔を増加させ23層 (上端を20416.3 m) とした。

モデルの初期値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ECMWF/TOGA Basic Level III Consolidated Data Set を用いた。このデータセットは、1日2回、水平方向2.5度、各気圧レベル (1000, 925, 850, 700, 500, 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・鉛直風速成分のデータであり、これから、計算期間・計算領域内の12時間毎の境界条件データを作成した。RAMS の計算領域の外側5グリッドは側方境界の強ナッジング領域とした。

RAMS の土壌モデルに与える植生分類は Matthews の全球植生分類 (Matthews, 1983) を利用した。また、海水の表面温度 (SST) は National Center for Atmospheric Research (NCAR) が提供している全球1度メッシュの1998年4月のデータを用いた。

RAMS と黄砂の輸送計算は、1998年4月10日0UTC～25日0UTC まで連続で行った。

### 2.2 土壌粒子の粒径分布

黄砂の粒径 (半径) は、0.1  $\mu m$  から100  $\mu m$  の間を

15の区間(ビン)に分割し、それぞれの代表的な大きさの粒子について輸送解析を行った。粒径の分割は、0.10-0.16  $\mu\text{m}$ , 0.16-0.25  $\mu\text{m}$ , 0.25-0.40  $\mu\text{m}$ , 0.40-0.63  $\mu\text{m}$ , 0.63-1.00  $\mu\text{m}$ , 1.00-1.58  $\mu\text{m}$ , 1.58-2.51  $\mu\text{m}$ , 2.51-3.98  $\mu\text{m}$ , 3.98-6.31  $\mu\text{m}$ , 6.31-10.00  $\mu\text{m}$ , 10.00-15.85  $\mu\text{m}$ , 15.85-25.12  $\mu\text{m}$ , 25.12-39.81  $\mu\text{m}$ , 39.81-63.10  $\mu\text{m}$ , 63.10-100.0  $\mu\text{m}$  である。

粒径分布は、粒径10  $\mu\text{m}$  までの粒子はサハラ砂漠における観測値(d'Almeida and Shuntz, 1983)を参考に、それ以上の粒径の粒子は中国の甘肅省蘭州で観測された分布(Quan *et al.*, 1996)を参考として設定した。黄砂粒子の密度は粒径に依らずに一様に2.52 g/cm<sup>3</sup>(Quan *et al.*, 1996)とした。

### 2.3 発生領域の特定と黄砂の発生フラックス

黄砂の発生源域は、植生の被覆率に大きく依存し、その季節変化も重要な因子となる。ここでは、その領域の特定に、正規化差分植生指数 NDVI の1998年4月13日週平均データを利用した。NDVIは、全球の植生を0~255の数値で表したものである。本研究での黄砂の発生源域は、NDVI<70の地域が黄砂の発生に妥当と仮定し、この範囲に限定した。

舞い上がる砂の質量フラックス  $F_{source}$  (g/m<sup>2</sup>/sec) は、Gillette *et al.* (1982), Gillette and Passi (1988) に従い、グリッドの摩擦速度がその地点の土壌特性から決められた臨界摩擦速度(2.4で示す)を上回った場合に、

$$F_{source} = CC_{snow} C_{wet} u_*^4 \left( 1 - \frac{u_{*,th}}{u_*} \right) \quad (2)$$

で与える。ここで、Cは発生源定数(g/m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)でNDVI<70の条件を満たす場合に1、 $C_{snow}$ は積雪被覆率による係数、 $C_{wet}$ は土壌の水分含水率による係数、 $u_*$ は摩擦速度、 $u_{*,th}$ は臨界摩擦速度である。

NDVIは積雪域についても小さな値を取り、シベリアやヒマラヤが黄砂の発生域とされて誤った発生を与える。そのため、1998年4月の全球1度の積雪被覆率データをもとに、その値が0.15以上の場合は $C_{snow}=0$ とし、それ以下の場合は積雪量に応じて $C_{snow}$ が線形に1まで増加すると仮定した。

また、黄砂の発生は土壌の水分量変化に大きく依存する。ここでは、土壌水分量  $W_w$  の初期値  $W_0$  を土壌分類別に与え、 $(W_w - W_0)$  が臨界値  $W_c$  (ここでは0.265 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) を超えた場合は $C_{wet}=0$ とし、それ以下の場合には土壌水分量に応じて黄砂フラックスが線形に増加

すると仮定した。

以上の条件設定により、最終的な黄砂の発生源域としては、タクラマカン砂漠(タリム盆地)、ゴビ砂漠の大部分と黄土高原の一部が含まれることになった。第1図には、計算期間内にモデル上で発生した黄砂の全量の地域分布も示している。

黄砂の初期に舞い上がる高度(混合層高度)は、大気成層状態に応じて決定される手法を用いた。混合層高度は、Mellor-Yamada Level 2.5乱流クロージャーに基づく乱流エネルギー強度の鉛直分布から決定し、その高度以下では、粒子の質量混合比 $\Phi$ を一様になるようにした。これによって、黄砂の舞い上がる領域の混合層の日変化もモデル化されることとなった。

### 2.4 臨界摩擦速度 $u_{*,th}$ の推定

黄砂の発生フラックスでは臨界摩擦速度  $u_{*,th}$  の値の設定が非常に重要である。臨界摩擦速度は地表面粗度で変化するため、土壌の分類から地表面粗度長を見積もり(Gillette *et al.*, 1982)、粗度長から臨界摩擦速度を見積もった(Marticorena *et al.*, 1997)。

計算領域の土壌の分類は、ISLSCP(International Satellite Land Surface Climatology Project)のSoil texture 全球データを利用した。このデータは全球の土壌6種類(Loamy sand, Sandy loam, Loam, Sandy clay loam, Clay loam, Organic)と氷河、海洋に区分している。粗度長は、細かい砂、堅い土粒子、砂利、粘土質の砂になるに従って値が増加する。それぞれの土壌分類の粗度長  $z_0$ 、臨界摩擦速度  $u_{*,th}$  の見積もった値(Gillette *et al.*, 1982)を用い、 $u_{*,th}$  を推定した。

### 2.5 除去プロセスのモデル化

黄砂の消滅プロセスで考えられる乾性沈着、湿性除去、自重による重力沈降について、モデル内のそれぞれの取扱いを以下に示す。

モデルの最下層に存在する黄砂粒子は、乱流混合によって地表面で乾性沈着で除去される。乾性沈着のフラックス  $F_{dry}$  は、第一層の風速  $U$  とバルク係数  $C_D$  を用いて、

$$F_{dry} = -\rho_{air} C_D U \Phi \quad (3)$$

で表せる。ここに、 $\rho_{air}$  は空気密度、 $\Phi$  は黄砂の質量混合比であり、バルク係数  $C_D$  ( $u_*^2 = C_D \cdot U^2$ ) はLouis(1979)によって計算されたものを利用する。

降水による除去過程には、黄砂粒子が雨滴との衝突により取り込まれる wash out と、黄砂粒子が雲核となって雲に取り込まれ、降水として大気から取り除か

れる rain out の 2 種類に分けられる。本研究では wash out のプロセスのみを考慮した。また, wash out の過程では, 一度雨滴に取り込まれた黄砂粒子が, 雨滴が蒸発することによって大気中に再放出されるのが自然であるが, 本研究では, 黄砂粒子が存在していた高度の如何に関わらず, wash out される場合は大気中から除去されると仮定した。

湿性除去のフラックス  $F_{wet}$  は, Westphal *et al.* (1988) に従い,

$$F_{wet} = -\Lambda_{wash} \cdot \Phi \quad (4)$$

で与えた。ここに,  $\Lambda_{wash}$  は洗浄比率 (1/hour) で, 粒子の粒径に独立に, その上限値は

$$\Lambda_{wash} = 1.5 E_{ff} Pr^{0.79} \quad (5)$$

で与えられ (Pruppacher and Klett, 1978), ここでは, この上限値を用いた。  $E_{ff}$  は衝突率で 0.83 である。  $Pr$  は降水量 (mm/hour) で, RAMS で計算された降水 (雨, 雪, あられ, ひょう等の合計) を使用した。

一方, 半径  $r$ , 密度  $\rho_{dust}$  の黄砂粒子の終端速度  $V_{grav}$  ( $r$ ) は Stokes の法則から,

$$V_{grav}(r) = \frac{2\rho_{dust}r^2g}{9\nu} \quad (6)$$

で定められる。ここで  $\nu$  は空気の粘性を表し, 黄砂の密度  $\rho_{dust}$  は全粒径で一定と仮定し, それぞれの粒径に対する終端速度  $V_{grav}(r)$  を計算した。モデルの最下層で地表へ沈降した黄砂粒子の再飛散は考慮しなかった。なお, 式 (1) の重力沈降項  $F_{grav}$  は, Stokes の法則に従う部分を示し, それ以外の,  $w$  による移流, 乱流拡散は, RAMS により格子点毎に計算される。

### 3. 結果と議論

#### 3.1 気象条件と黄砂の発生

黄砂の発生と輸送プロセスは, 総観スケールの気圧変化, 特に, 突風を伴う寒冷前線・低気圧の移動, 降水等の気象条件が深く関わっている。ここでは 1998 年 4 月 10 日～25 日にかけての気象変化と黄砂の輸送過程を中心に示す。以下では, モデルでシミュレートされた土壌性粒子を単にダストと呼ぶことにする。

第 2 図には, 4 月 14～21 日 3UTC にかけての気象庁の地上天気図, モデルで計算された  $z^* = 1500\text{--}3000\text{ m}$  のダスト平均濃度 (等値線),  $z^* = 2000\text{ m}$  の風速ベクトル, 衛星センサー TOMS の Aerosol Index (AI; トー

ン表示) の日変化を示す<sup>12</sup>。ここで, ダスト濃度は各粒径の総和を示し,  $z^*$  は RAMS の地表面に沿った鉛直座標系である。また, AI は高い値を示すほど紫外線を吸収する土壌性粒子や黒色炭素エアロゾル濃度が高いことを意味し,  $1.25 \times 1.0$  度の原データを RAMS の座標系に変換して示している。

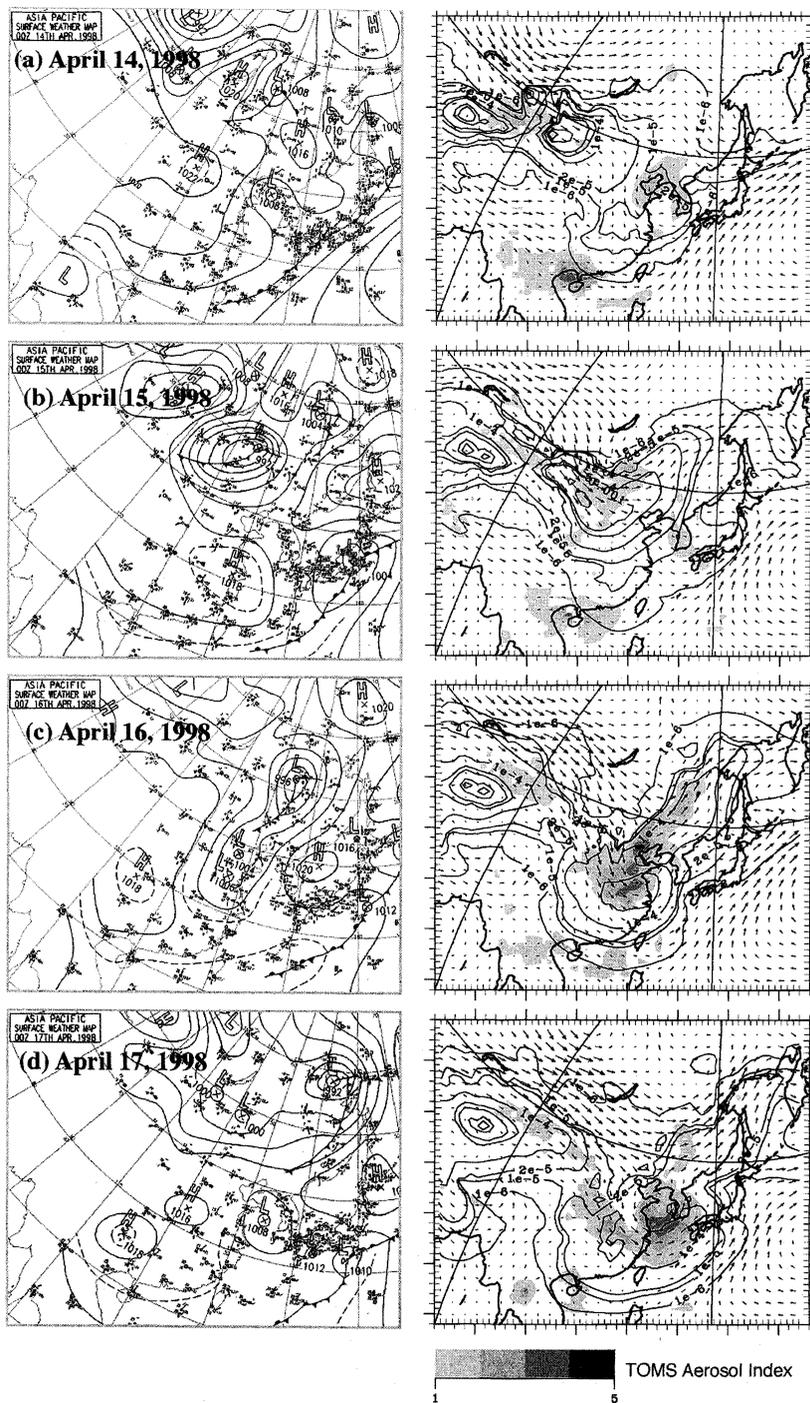
地上気象通報 SYNOP によると, 4 月 14～15 日と 19～20 日にかけてゴビ砂漠とタクラマカン砂漠で大きな砂塵嵐の発生が報告されている。

それに対応する天気図では, まず 14 日にバイカル湖の南に寒冷前線を伴う低気圧が東進し, 16 日 0UTC にはアムール川の上流域 ( $125^\circ\text{E}$ ,  $53^\circ\text{N}$  付近) に達している。RAMS で計算された寒冷前線付近の地上風速は  $15\text{ m/s}$  以上であった。低気圧の中心から南西にのびる寒冷前線は華北平野で寒冷渦 (切離低気圧) を形成し (田中, 1998), 16 日 0UTC にはその中心は北京から山東半島付近に位置し, 南東方向に非常にゆっくりと移動している。この寒冷渦は非常に低温の気塊を伴い,  $500\text{ hPa}$  での気温が  $-24^\circ\text{C}$  に低下していた。第 1 図には寒冷渦の中心の軌跡 (太点線) を示しており, 19 日に関東の東海上に達し減衰するが, その移動速度は非常にゆっくりとしたものであった。即ち, 山東半島～東京までの直線距離約  $2000\text{ km}$  を, おおよそ 3 日かかったことになる。

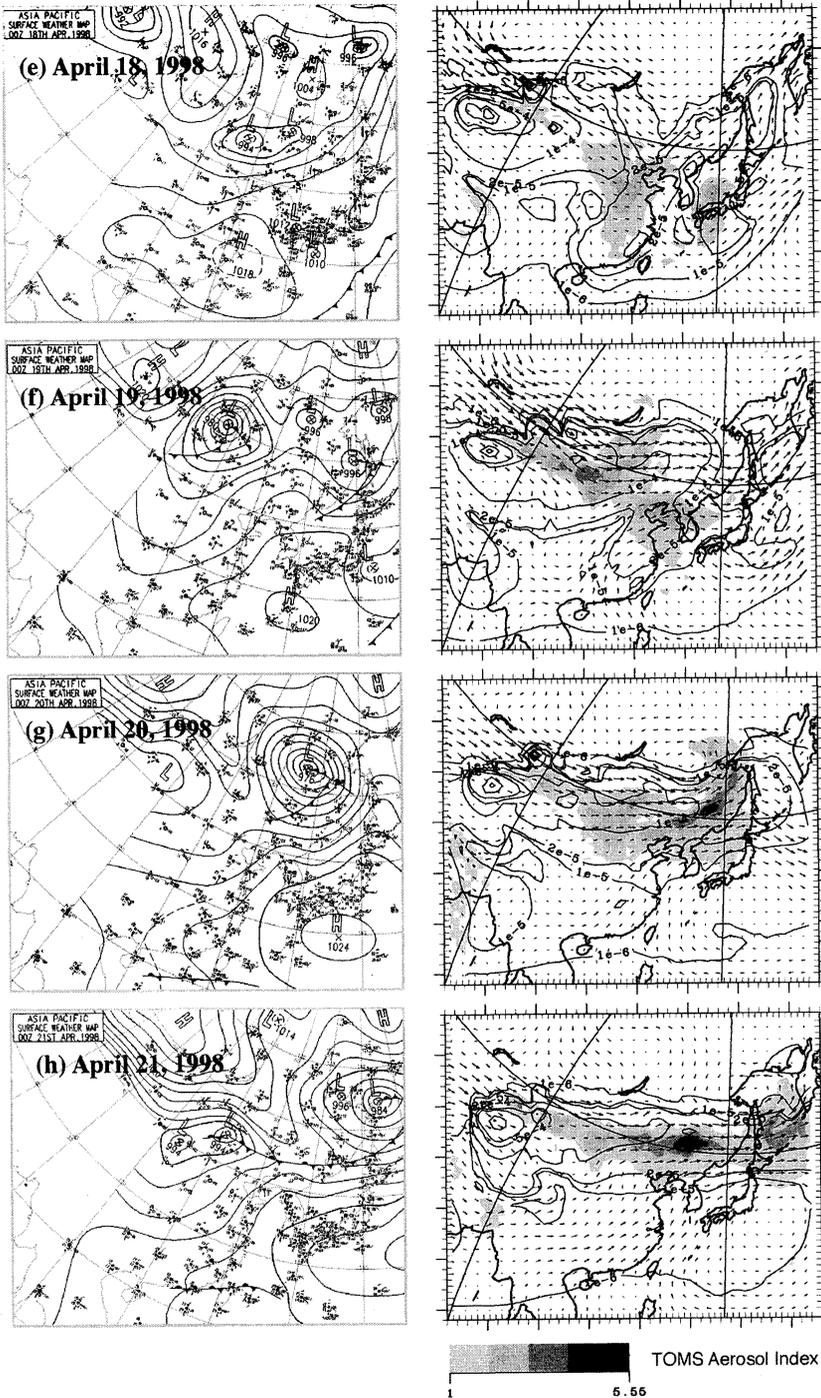
シミュレートされたダストの動きは, TOMS AI と非常によい一致を示し, 15 日にゴビ砂漠上に現れる高濃度のダスト域は, 16 日に華北平野に達し, その後は東進する寒冷渦とともに 17 日に黄海, 18 日には西日本～関西地域, 19 日に関東域に到達し, 日本域は広範囲に長期間にわたって黄砂に覆われたことになる。これは大量の黄砂が動きの非常に遅い寒冷渦の西側に取り込まれ, 寒冷渦とともに移動したためである。この寒冷渦の通過後は日本域は大きな移動性の高気圧におおわれ, 高気圧性の時計回りの気流により日本域を覆っていた黄砂は北東方向 (北日本へ) に輸送されている。

4 月 19 日には, 新たにタクラマカン～ゴビ砂漠上に高濃度のダスト塊が発生している。これは天気図に示されたようにバイカル湖南部に現れた寒冷前線を伴う低気圧が引き金となっている。14～15 日にもほぼ同じ位置に発生した低気圧が日本域への大量の黄砂の輸送の契機となったが, 今回発生した低気圧は先の低気圧と異なり, 比較的早く東進し, 21 日 0UTC にはサハリ

<sup>12</sup> <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>



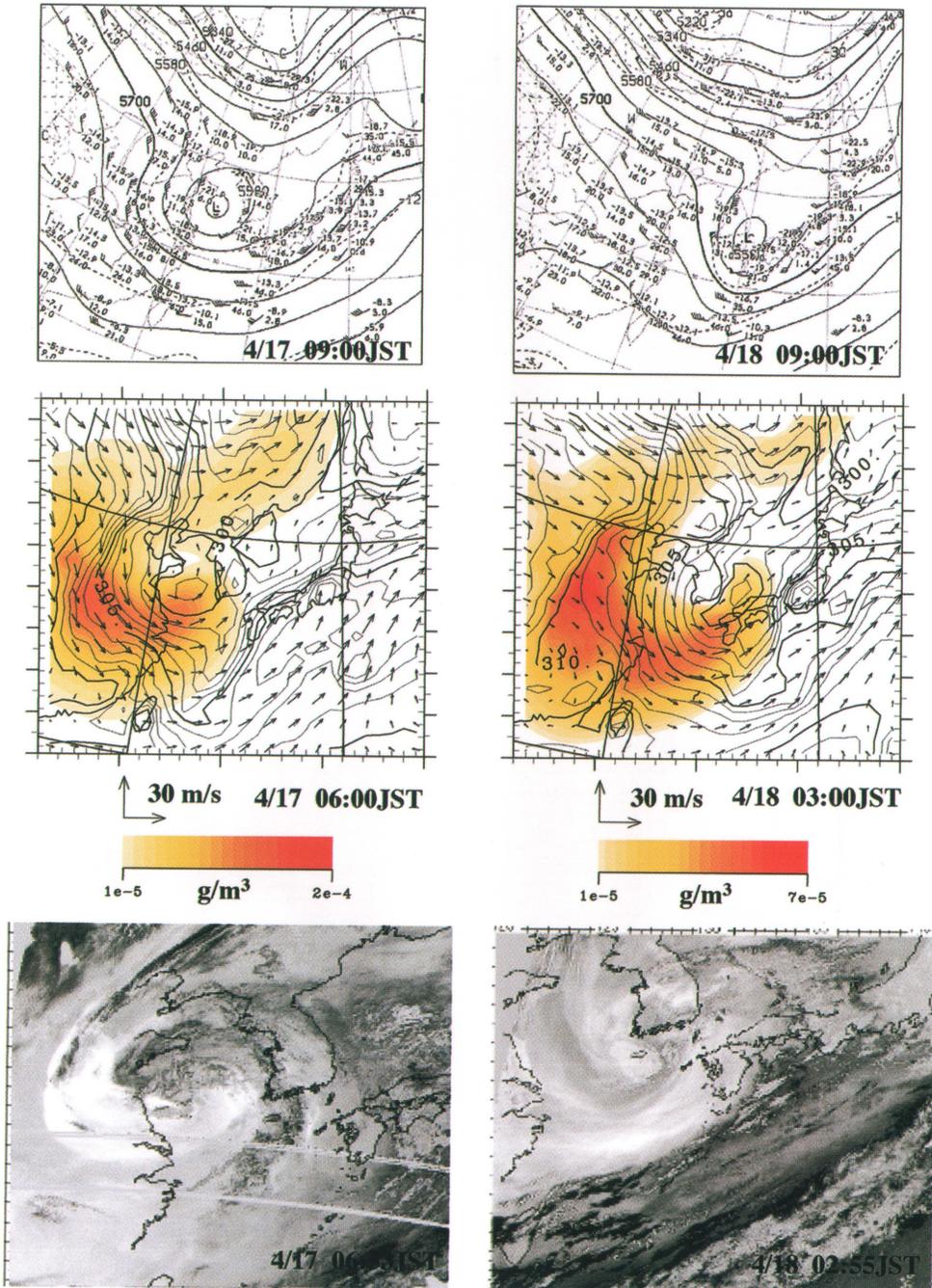
第2図 4月14～21日00UTC にかけての気象庁地上天気図(気象庁提供)(a～h), 同時刻のモデルで計算された  $z^* = 1500-3000$  m のダスト平均濃度(等値線),  $z^* = 2000$  m の風速ベクトル, 衛星センサー-TOMS の Aerosol Index (AI) の日変化(トーン表示). 等値線は,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $2 \times 10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \times 10^{-3}$  ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) について示す.



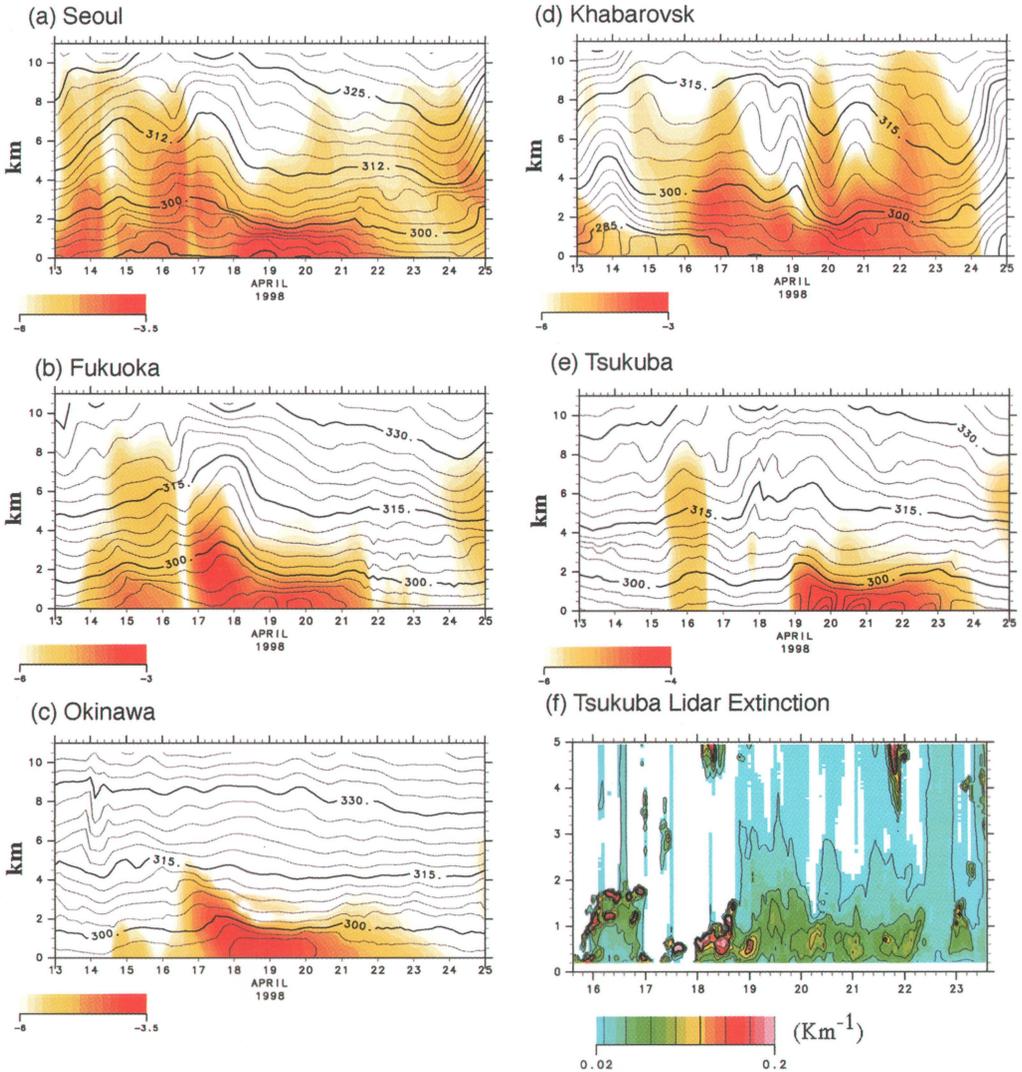
第2図 (つづき).

(a) April 17, 1998

(b) April 18, 1998



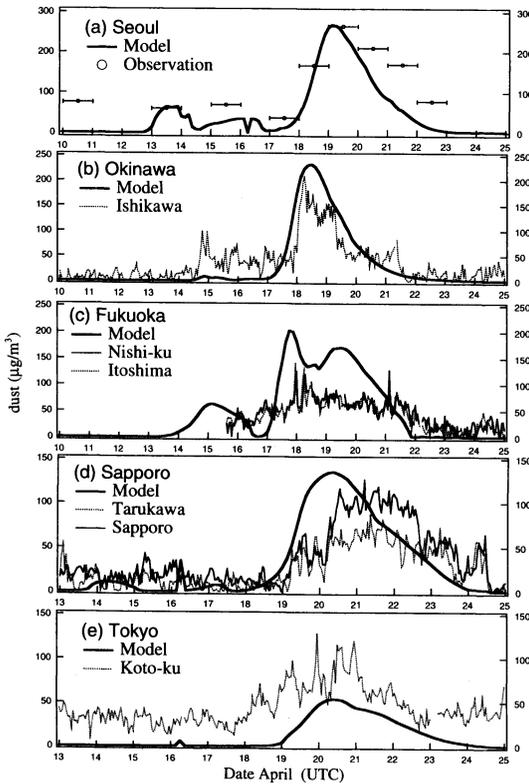
第3図 (a) 4月17日と (b) 18日の NOAA 熱赤外差画像 (下段), 500 hPa の高層天気図 (上段), モデルのダスト鉛直カラム濃度と  $z^*=3000$  m の風速ベクトルと温位コンター (中段).



第4図 (a) ソウル, (b) 福岡, (c) 沖縄, (d) ハバロフスク, (e) つくばでの対数スケール表示されたダスト濃度 (カラー) と温位 (コンター) の時空間変化 (日時は UTC 表示) と, (f) つくばで観測されたライダーの消散係数 ( $\text{km}^{-1}$ ).

ンの北部に到達する。もう1つの大きな違いは、低気圧に伴う寒冷前線が西に長く延びて、一部は閉塞前線を形成しサハリン南部からゴビ砂漠東部にまで達した点である。この低気圧の移動に伴い、寒冷前線の背後には大量の黄砂が巻き上げられ、20～21日にかけて中国東北部を通過し、21～22日に沿海州～サハリン南部・北海道上空を通過し、23日にはオホーツク海上に抜けている。前線の位置が北緯43度以北に位置したため、北海道以南ではこの黄砂の影響は少ない。

以上のモデルの結果と TOMS Aerosol Index の一致から、開発された黄砂の輸送モデルの結果の妥当性が示される。また、黄砂の輸送経路は15～18日にかけてはゴビ砂漠～華北平野～東シナ海上を通過する南寄りコースと、19～23日にかけてはサハリン上を通過する北寄りコースに2つの異なる輸送経路を取ったことが、TOMS のデータとモデルの結果の両者から明らかである。



第5図 (a) ソウル, (b) 沖縄県石川市, (c) 福岡市西区と糸島, (d) 札幌市と樽川, (e) 東京都江東区で観測されたSPM濃度とモデル結果の比較。モデル計算はPM<sub>10</sub>に対応する粒径区分の1~9ビン(有効粒径:直径0.26~10.12 µm)のモデル第一層の合計値を意味する。

### 3.2 寒冷渦にトラップされた黄砂の輸送

前節では、4月15日~19日にかけての黄砂の南寄り輸送経路は、寒冷渦の動きと密接な関係があることを示した。ここでは、輸送経路と切離低気圧(寒冷渦)との関係をNOAA衛星画像とともに示す。

第3図には、4月17日と18日の500 hPaの高層天気図(上段)、モデルの鉛直カラム濃度と $z^*=3000$  mの風速ベクトルと温位コンター(中段)、NOAA熱赤外差画像(下段)を示す。ここで、NOAA熱赤外差画像は木下ほか(1999)の方法により、AVHRR-4、5チャンネルの2つの熱赤外11、12 µmデータの輝度温度差から算出したAVI(Aerosol Vapor Index)であり、濃い黄砂域ほど白く表される(雲の多い部分は黒く表される)。熱赤外の差画像を用いることで夜間の黄砂の解析も可能となっている。モデルの結果はNOAA

の観測時間に一番近い時間の結果を示している。

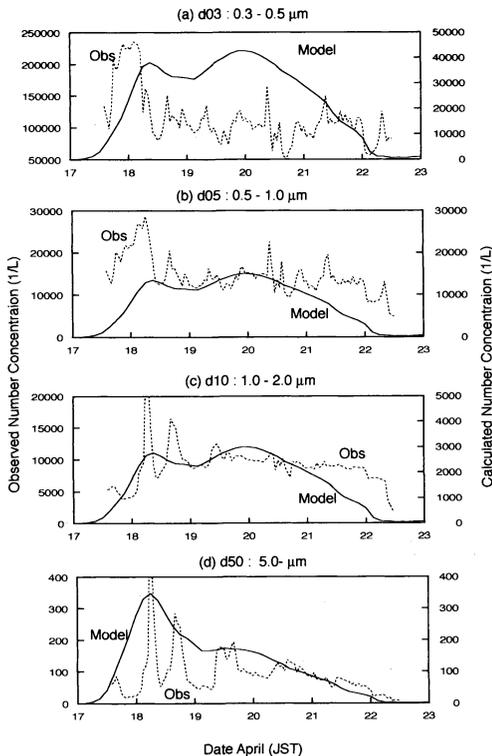
図に示した上空500 hPaの高層天気図からは、非常に発達した切離低気圧が華北平野から黄海~西日本にかけて移動する様子が判る。この寒冷渦に巻き込まれるような形で、黄砂が渦状になって輸送されたことがNOAA差画像に鮮明に示されている。図示してはいないが、16日に華北平野上で渦状をなす濃い黄砂の気塊は、その渦の形を保ったまま17日(第3図a)には、黄海へ出て朝鮮半島にかかり、18日(第3図b)には九州に達する。モデル計算で示された黄砂の水平分布とその渦状の構造は、NOAA差画像と驚くほどの一致を示しているが、NOAA画像に見られるような黄砂域の濃淡の縞状の構造は十分には再現できない。これは、適用したモデルの水平格子が120 kmであり、このような微細な構造を解像するには不十分なためと考えられる。

第3図には、モデルの結果とNOAA差画像ともに、高濃度の黄砂域が寒冷渦の西側に大きく広がっている様子が示されている。また、渦の南には南東気流により黄砂の「腕」状の構造が見えている。通常、寒冷渦の西側には強い沈降性の気流が存在し、強い沈降性の安定成層が形成され、黄砂を初めとした物質の鉛直拡散を制限する(鶴野・菅田, 1998)。さらに、寒冷渦は上空に低温の気塊を伴うため、境界層内部は非常に不安定な成層が発達し、大気の混合が盛んである。従って、この発達した寒冷渦にトラップされた黄砂の3次元的な構造を把握することは、ライダーや地上で観測された黄砂の時間・空間変化を解釈するために非常に重要である。

### 3.3 黄砂の時空間分布

第4図には、第1図に示したソウル、福岡、沖縄、ハバロフスク、つくばでの対数スケールで表示されたダスト濃度(カラー)と温位(コンター)の時空間変化(日時はUTC表示)を示す(-6が $10^{-6}$  g/m<sup>3</sup>を意味する)。これらの地点の内、福岡は寒冷渦のほぼ中心が通過し、沖縄は渦の南端に位置、ソウルは渦の北側に位置している。また、ハバロフスクは寒冷渦の通過の直接的な影響を受けない。

寒冷渦の中心が通過した青島(図省略)と福岡では、ほぼ同じ変化を示す。即ち、両地点ともにまず、温位面上昇とともに、地上から上空4~5 kmに達するダストの高濃度層を最初に観測した後に、温位面が低下し、混合層内部にトラップされた高濃度のダスト層があらわれている。この温位面上昇は寒冷渦の南から



第6図 長崎で観測されたダストの粒径別の観測値(点線)とモデルの比較(実線)。(a) d03: 直径 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ , (b) d05:  $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$ , (c) d10:  $1.0\sim 2.0\ \mu\text{m}$ , (d) d50:  $5.0\ \mu\text{m}$ 以上の個数濃度(1/L)。

東にかけての温暖域の接近に相当し、その後の温位低下は渦の西側の沈降性の温位成層のためと考えられる。両地点とも、温位低下後には、上空2 km付近に強い安定性層が存在している。福岡と青島の、ダスト層の侵入の時間差は概ね1日である。

ソウルでも、福岡と同じようなダストの挙動を示すが、温位の盛り上がりと下降の構造は福岡ほど鮮明ではない。これは、ソウルが寒冷渦のつねに北側に位置しているためである。温位面が低下した18日以降は高濃度のダスト層が2 km以下の高度に存在している。

沖縄は渦の南端に位置していた。そのため温位の時空間変化は単調であり、ダスト層も概ね2 km以下で観測されている。これに対して、寒冷渦の直接的な影響を受けないハバロフスクでは、17日に上空2~3 kmに中心を持つダスト層が観測されるが、福岡やソウルで見られるような混合層内部に高濃度のダスト層は引き続き観測されない。これは寒冷渦の西側のダスト

層がハバロフスクまでは達しないためである。大きな黄砂イベントは20~21日にかけて観測されており、これはタクラマカン~ゴビ砂漠で19日以降に発生したものである。

つくばでのダストの時空間変化は、福岡でのそれとよく似ているが、濃度レベルは福岡の約1/2である。19日には温位面上昇とともに上空3 km程度までダスト層があらわれる。これは福岡と同様に寒冷渦に前面の温暖域の接近のためであり、その後は温位面の低下とともにダストの高濃度域は下降し、高度のやや高かったダスト層の分布が2000 m以下に集中する。つくばと福岡との濃度ピークの出現の時間差は約1.5日である。

モデルの計算結果は、第4図fに消散係数( $\text{km}^{-1}$ )に換算して示した茨城県つくば市の国立環境研究所のコンパクトライダーの結果と良い一致を示す。図には消散係数の $0.02\sim 0.2\ \text{km}^{-1}$ の範囲を示し、等値線の間隔は $0.025\ \text{km}^{-1}$ である。ライダー観測では16~17日と18~23日(UTC)の間に、上空2 km以下の範囲で濃い分布が見られ、これは黄砂による影響と考えられる。寒冷渦の通過前の17~18日は関東地域では降水が観測された。そのためライダーでの観測も、モデルの結果もこの時期には高濃度のダストはほとんど現れていない。

寒冷渦通過後の関東地区は移動性高気圧に覆われ、晴天が続いた。モデルの結果でも19~22日の温位変化から大気境界層の日変化が示されている。この期間は、第2図から見て分かるように、ダストの最も濃い塊の中心はすでに去っているが、観測もモデルもこの時期の地表付近に濃い分布を示している。これは、濃度レベルは減少しているが、関東地域に輸送され滞留したダストの対流混合によるものと考えられる。

### 3.4 地上のSPM濃度との比較

黄砂の飛来時に観測される浮遊粒子状物質SPM濃度は通常に比べて高い値を示す。

第5図に(a)ソウル、(b)沖縄県石川市、(c)福岡市西区と糸島、(d)札幌市とその近郊の樽川、(e)東京都江東区で観測されたSPM濃度とモデル結果の比較を示した。モデル計算はPM<sub>10</sub>に対応する粒径区分の1~9ピン(有効粒径:直径 $0.26\sim 10.12\ \mu\text{m}$ )のモデル第一層の合計値である。

第5図aのソウルの観測データは日平均値を示している。観測された第1のピークは14~15日(UTC, 以下同様)、第2のピークは19~20日に現れる。モデル

の結果では第1のピークははっきり確認することは出来ないが、前後の期間と比べると高い値を示している。第2のピークでは、濃度レベルも増減の勾配もほぼ再現されている。

第5図bに示した沖縄県石川市の観測とモデルの比較でも、15日に観測で見られる最初のピーク時は、モデルではっきりと確認することが出来ないが、18~19日にかけてのピークはモデルと観測が重なるほど一致が見られる。

第5図cでは福岡県内の観測データとモデルの結果を比較した(観測値は16日以降のみ)。観測地点は都市汚染の影響を完全に切り除かれていないが、観測での最初のピークが現れる18日では、モデルもピークを示すが、計算結果の19~20日の2番目のピークは観測では見られない。ただ、17~22日の期間で、観測値もモデルの結果も高い値を示す点では一致している。

第5図dは札幌市近郊の観測値との比較である。観測でのピークとモデルの結果の間に多少ずれが見られるが、値としてはほぼ一致している。

第5図eは東京江東区の観測値との比較を示す。ピークの時期や増減の勾配はほぼ一致するが、他の地点と違って観測値の方がかなり大きい値を示している。これは観測地点周辺の局地的な都市大気汚染に起因するSPMの存在のためと考えられる。

以上、数地点でのSPMの観測値の時間変化の特徴を開発されたモデルは捕らえていることが明らかにされた。

次に、開発されたモデルの特徴である粒径別の時間変化の検証を行う。ダストの粒径別の観測値は荒生・坂口(1999)によって観測されている。観測は、光散乱式粒子測定器(Optical Particle Counter, OPC; RION KC-01)を用いて、大気中の粒子の個数濃度を、直径0.3~0.5  $\mu\text{m}$ 、0.5~1.0  $\mu\text{m}$ 、1.0~2.0  $\mu\text{m}$ 、2.0~5.0  $\mu\text{m}$ 、5.0  $\mu\text{m}$ 以上(それぞれd03, d05, d10, d20, d50のクラス)の5段階に分級して観測したものである。ここでは本モデルの15の粒径区分をこの分級に合わせ(d03, d05, d10, d50に対応したもの)、1998年4月のデータと比較した結果を第6図に示す。

粒径別の観測結果では、まず小粒子域にピークが現れ、次に大粒子側にピークが出現する。同様の観測結果はUematsu *et al.* (2002)も1996年4月の長崎市での観測結果からも報告しており、小粒子側のピークには人為起源の硫酸塩の長距離越境輸送の影響が大きいと化学組成に基づいて報告されている。モデルでのダ

ストの発生は、人為起源の大気汚染物質の排出を考慮に入れていない。そのため図に示したように、小粒子の粒子数に関しては、モデルと観測との一致性は小さい。しかし、粒径サイズが大きくなるにつれて、この時期のOPCで観測した比較的大きな粒子の主な成分は黄砂であると考えられるので、モデル結果との一致性は向上する。粒子数のピークの移り変わりに関しては、d03粒径をのぞいて観測値の時間変化をほぼ説明している。

しかしながら、観測d50では18~20日に観測では数回の断続的なピークが見られるが、モデルの結果はなだらかである。この断続的なピークは、第3図の4月18日のNOAA衛星の差画像からも見られる黄砂塊の濃淡のしま状の構造によるものと考えられる。本研究のモデルのグリッド分解能は120 kmであるため、このしま状の構造を分解するには不十分で、OPCのデータに見られるようなシャープな構造をシミュレートすることは難しい。また、モデルの水平拡散係数が大きいこと、ダストの水平拡散が大きいことも原因として考えられる。以上に述べた水平分解能の向上と拡散係数の感度解析に関しては今後の課題として残る。

#### 4. 結論

地域気象モデルRAMSと結合した黄砂の輸送モデルを開発して、1998年4月10日~25日にかけての東アジア域の黄砂エピソードに適用し、その輸送解析を行った。TOMS Aerosol Index, NOAA衛星差画像、地上SPM濃度、ライダー観測及びOptical Particle Counterのデータと比較を行った結果、観測値との一致が見られ、多くの事象を精度良く再現することが出来た。これをふまえて、以下に結論を述べる。

1. 地域気象モデルRAMSと結合した黄砂の輸送モデルを開発し、ECMWFのデータセットを利用したナッジング計算を行った。黄砂の発生源の特定に、計算期間のNDVI植生インデックスと積雪被覆率データを利用した。発生条件には土壌分類に従った臨界摩擦速度マップを作成し、これを用いた。また、粒径別輸送、乾性沈着、湿性除去、重力沈降のプロセスもモデル内に組み込んだ。

2. 1998年4月14~15日に主にゴビ砂漠~黄土高原で発生した黄砂は、寒冷渦に巻き込まれる形で日本列島を西から東に横断するように輸送される様子がシミュレートされた。寒冷渦の通過に伴い、ダストの鉛直分布は、最初に濃い層が高い位置に現れ、続いて低

い位置へと変化することがモデルの鉛直空間分布から示され、これはライダー観測の結果を合理的に説明していた。大量の黄砂が寒冷渦の西側の沈降性の逆転層内にトラップされて輸送されたため、観測されたダスト層は2~3 km以下の比較的低高度であった

3. 1998年4月18~19日に発生した黄砂の発生源は主にタクラマカン~ゴビ砂漠であり、東進する速度の早い低気圧の寒冷前線の北側を、サハリンから北海道上空を通過することが分かった。

本論文では、砂粒径の分布の地域的变化を考慮していない。中国内陸域での砂の粒径分布は砂漠毎、黄土高原で異なっていると考えられ、今後の発生源情報の収集で改良すべき点と考えられる。また、モデルの妥当性の検討には、中国国内での観測データ(特に、鉛直データ)が限定されている点に問題が多い。しかし、2001年春に行われたNSF/IGBP ACE-Asiaの集中観測や、中国国内に設置されたライダーのデータが稼働し始めており、これらのデータを用いて、今後、モデルのより詳細な検証が可能になると考えられ、黄砂輸送モデルの精度向上が期待できる。

## 謝辞

東京大学気候システム研究センター(現九州大学応用力学研究所)の竹村俊彦氏には、黄砂の輸送モデル構築のための基礎的な情報を頂きました。国立環境研究所の西川雅高主任研究員からは中国の蘭州で測定された黄砂の粒径分布の情報を教えて頂きました。論文で利用した一般環境大気汚染測定局でのSPMのデータは、沖縄県衛生公害研究所、福岡県保健環境研究所、北海道環境科学研究センター、東京都から提供していただきました。ソウルでのSPM観測データは、韓国気象研究所のDr. Young-Shin Chunに便宜をはかってもらいました。

この研究は、科学技術振興事業団の計算科学技術活用型特定研究開発推進事業「東アジア域の地域気象と物質輸送モデリングの総合化(代表 鶴野伊津志)」と文部省科学研究費基盤研究10650550から研究費の補助を受けたことを記して謝意を表します。

## 参考文献

- d'Almeida, G. A. and L.Schutz, 1983 : Number, mass and volume distributions of mineral aerosol and soils of the Sahara, *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 233-243.
- 荒生公雄, 坂口千恵美, 1999 : 光散乱粒子測定器で測定された長崎の黄砂現象: 1996~1998, *長崎大学総合環境研究*, **1**, 175-186.
- Gillette, D., 1978 : A wind tunnel simulation of the erosion of soil : Effect of soil texture, sand-blasting, wind speed, and soil consolidation on the dust production. *Atmos. Environ.*, **12**, 1735-1743.
- Gillette D., J. Adams, D. Muhs and R. Kihl, 1982 : Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air, *J. Geophys. Res.*, **87**, 903-905.
- Gillette D. and R. Passi, 1988 : Modeling dust emission caused by wind erosion, *J. Geophys. Res.*, **93**, 14233-14242.
- Husar, R. B., D. M. Tratt, B. A. Schichtel, S. R. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gasso, T. Gill, N. S. Laulainen, F. Lu, M. C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B. N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G. C. Feldman, C. McClain, R. J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W. E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto and W. C. Malm, 2001 : Asian dust events of April 1998, *J. Geophys. Res.*, **106**, 18317-18330.
- Kai, K., Y. Okada, O. Uchino, I. Tabata, H. Nakamura, T. Takasugi and Y. Nikaidou, 1988 : Lidar observation of a Kosa (Asian dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **66**, 457-472.
- 木下紀正, 西之園雅靖, 矢野利明, 飯野直子, 鶴野伊津志, 1999 : NOAA/AVHRR データによる黄砂の検出と解析, *日本リモートセンシング学会第26回学術講演会論文集*, p. 253-256.
- Louis, J-F., 1979 : A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187-202.
- Martcorena, B., B.Gilles, D. Gillette and J. Belnap, 1997 : Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and areas of the United States, *J. Geophys. Res.*, **102**, 23277-23287.
- Matthews, E., 1983 : Global vegetation and land use : New high-resolution data bases for climate studies, *J. Climate Appl. Meteorol.*, **22**, 474-487.
- 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 observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia, *J. Geophys. Res.*, **106**, 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.
- Pruppacher, H. R. and Klett, J. D., 1978: *Microphysics of Cloud and Precipitation*, Reidel.
- Quan, H., Y. Huang, M. Nishikawa, X. Liu, I. Mori, Y. Iwasaka, Q. Wei and S. Qiao, 1996: Preparation of artificial Kosa aerosol with two original desert sands, *J. Environ. Chem.*, **6**, 225-231.
- 田中武夫, 1998: 寒冷渦と黄砂, *気象*, **42**, (6), 20-21.
- Uematsu, M., A. Yoshikawa, H. Muraki, K. Arai and I. Uno, 2002: Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a Kosa events over East Asia, *J. Geophys. Res.*, **107**, AAC 3.1-3.6.
- 鶴野伊津志, 菅田誠治, 1998: 日本域の春季の対流圏オゾン高濃度のシミュレーション, *天気*, **45**, 425-439.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui and N. Sugimoto, 2001: Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: Numerical simulation, *J. Geophys. Research*, **106**, 18331-18344.
- Wang, Z., H. Ueda and M. Y. Huang, 2000: A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, *J. Geophys. Res.*, **105**, 26947-26959.
- Westphal, D. L., O. B. Toon and T. N. Carlson, 1988: A case study of mobilization and transport of Sahara dust, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2145-2175.

---

**\*Development of Yellow Sand Transport Model Coupled with  
a Regional Meteorological Model and Simulation of  
Yellow Sand Observed in April 1998.**

Itsushi UNO\*<sup>1</sup>, Hiroyasu AMANO\*<sup>2</sup>, Kisei KINOSHITA\*<sup>3</sup>,  
Kimio ARAO\*<sup>4</sup>, Toshiyuki MURAYAMA\*<sup>5</sup>, Ichiro MATSUI\*<sup>6</sup>  
and Nobuo SUGIMOTO\*<sup>6</sup>

- \*1 (*Corresponding Author*), *Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga Park 6-1, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan.*
- \*2 *Interdisciplinary graduate school of engineering sciences, Kyushu University (Present address; Nomura Research Institute).*
- \*3 *Department of Education, Kagoshima University.*
- \*4 *Department of Environmental Science, Nagasaki University.*
- \*5 *Tokyo University of Mercantile Marine.*
- \*6 *National Institute for Environmental Studies.*

(Received 26 July 2000; Accepted 25 October 2002)

---