

C-061 広域モニタリングネットワークによる黄砂の動態把握と予測・評価に関する研究  
(2) 黄砂の発生・輸送モデルへのデータ同化手法の開発と応用

九州大学 応用力学研究所

鵜野伊津志

竹村 俊彦

平成 18～20 年度合計予算額 12,116 千円  
(うち、平成 20 年度予算額 1,700 千円)  
上記の合計予算額には、間接経費 2,798 千円を含む

[要旨] 黄砂の発生輸送モデル(化学予報モデル CFORS を利用)に 4 次元データ同化システムを新たに導入した。このモデルを用いてライダー観測データを利用したデータ同化手法のパフォーマンスを、2005 年 4 月の北日本を中心に観測された高濃度の黄砂現象や、2007 年 3 月末から 4 月初めに中国から日本各地で観測された高濃度の黄砂現象などを適用して調べた。その結果、日本国内の 4 地点のライダー観測データを黄砂発生輸送モデルに同化することで、中国内陸部とモンゴルの黄砂発生地域の発生量の最適化が可能となり、モデルと観測データの一致性の向上が確認された。2007 年の適用結果から、ダスト発生地域における発生量の最適化が可能となり、モデルと観測データの一致性が向上した。データ同化前の発生総量 57.9 Tg に比較して 57.8%(約 21.2 Tg)の発生量の増大補正すべきことがわかった。モデル結果は衛星センサー OMI Aerosol Index (AI) や地上気象通報による観測結果とも良く整合し、ライダーデータの同化は、アジア域のダストの発生・輸送モデルの予測可能性を大きく向上させることが判った。

[キーワード] 黄砂、輸送モデル、データ同化、ライダー観測、地上観測

## 1. はじめに

東アジアにおいて黄砂は春季のエアロゾルの大部分を占め、大気環境に大きな影響を与えている。黄砂の発生・輸送の解明には数値シミュレーションが有効であるが、発生源の評価が難しく、誤差の大きな要因となっている<sup>1)</sup>。これは、黄砂の発生が地表面の状態や地上風など多岐にわたるパラメータに依存しているためである。これに対して、4 次元変分法は、アジョイントモデルを用いることを特徴とし、ライダーや地上観測データと黄砂数値輸送モデルから、黄砂の初期濃度分布や発生源強度・分布を推定することが出来るデータ同化手法であり、既に気象庁の数値気象予報モデルなどに導入されている。しかし、物質輸送モデルへの導入・評価は端緒にすぎたばかりであり、最新のライダーネットワークや衛星データを用いた半リアルタイム黄砂予報モデルの構築が重要である。

## 2. 研究目的

本研究では、黄砂などの化学物質輸送モデル(Chemical Transport Model; CTM)を対象としたデータ同化システムの基礎を確立するとともに、研究課題(1)で得られるライダーネットワーク観測

データを黄砂輸送モデルに同化することで、黄砂の発生源強度・分布の最適化を行うことを目的とするほか、最終的には、ライダーネットワーク観測データを半リアルタイムで同化する黄砂予報モデルの確立を目指す。

### 3. 研究方法

黄砂輸送モデルは RAMS/CFORS<sup>2)</sup>を基礎とし、4次元変分法 (Four Dimensional Data Assimilation; 4DVAR) データ同化システム (以下、RAMS/CTM-4DVAR; RC4) を構築した<sup>3,4)</sup>。以下にその概要を示す。RAMS/CTM-4DVAR は、領域気象モデル RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)<sup>5)</sup> のスカラー輸送オプションを利用して行った。発生過程や化学反応、重力沈降や湿性沈着といった除去過程を新たに組み込んだ。この結果、大気汚染物質の輸送・拡散の計算に RAMS に含まれるスキームとメソ気象モデル RAMS で再現された詳細な気象場を利用できる。

RAMS/CTM の支配方程式 (フォーワードモデル) は以下のように記述される。

$$\mathbf{Q}(t_{i+1}) = \mathbf{M}\mathbf{Q}(t_i) + \mathbf{E}dt = \{\mathbf{I} + (\mathbf{M}_{adv} + \mathbf{M}_{diff} + \mathbf{M}_{reac})dt\}\mathbf{Q}(t_i) + \mathbf{E}dt \quad (1)$$

大気汚染物質 (気体もしくはエアロゾル)  $\mathbf{Q}$  の保存式で表され、 $\mathbf{M}$  はモデルを、 $\mathbf{M}_{adv}$ 、 $\mathbf{M}_{diff}$  と  $\mathbf{M}_{reac}$  はそれぞれ移流、拡散、反応作用を表す。反応作用には化学反応、重力沈降、乾性沈着、湿性沈着が含まれている。 $\mathbf{E}$  は汚染物質の発生源を示す。 $t$  はタイムステップ、 $\mathbf{I}$  は単位行列である。

一方、4次元変分法では最適な初期条件や発生量を最適化するために、観測データと数値モデルの結果の誤差が最小となるように、時間軸を逆に積分する。4次元変分法では最適な初期条件や発生量を得るために次のような評価関数を定義する。

$$J(\mathbf{C}) = \frac{1}{2}(\mathbf{C} - \mathbf{C}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{C} - \mathbf{C}_b) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\mathbf{H}_i \mathbf{C} - \mathbf{y}(t_i))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}_i \mathbf{C} - \mathbf{y}(t_i)) \quad (2)$$

$\mathbf{C}$  は制御変数と呼ばれ、データ同化によって推定される変数である。制御変数には、初期条件や境界条件、発生量やモデル内のパラメータ等を選ぶことが出来る。 $\mathbf{C}_b$  は  $\mathbf{C}$  の初期設定値である。 $\mathbf{y}$  は観測データ、 $\mathbf{R}$  は観測誤差共分散行列で観測値の誤差を表す。 $\mathbf{B}$  は初期設定値の誤差共分散行列 (背景誤差共分散行列) であらかじめ与えておく必要がある。 $\mathbf{H}_i$  は、

$$\mathbf{H}_i = \hat{\mathbf{H}}_i(\mathbf{M}(\mathbf{M}(\cdots \mathbf{M}(\mathbf{Q}_0)\cdots))) \quad (3)$$

と表すことができ、モデルによる時間発展 ( $\mathbf{M}$ ) とモデル空間から観測空間への内挿、モデル変数の物理量から観測値の物理量への変換 ( $\hat{\mathbf{H}}_i$ : 観測演算子) が含まれている。すなわち  $\mathbf{H}_i \mathbf{C}$  はモデルによる予報値を表していることになる。以上のフレームをまとめると右辺第一項は背景誤差に重み付けされた推定値 ( $\mathbf{C}$ ) と初期設定値との間の距離を第二項は観測誤差に重み付けされた観測データと予報値の間の距離であり、これらをまとめたものが評価関数である。4次元変分法では評価関数の値が最小になるように、制御変数の値を最適化する。

図 1 に 4次元変分法によるデータ同化のイメージを示す。4次元変分法ではあらかじめ設定した期間内に得られた観測データを同化することによって、同化期間内の観測データとモデルの時間発展が整合するように制御変数を修正する。また、数値モデルを評価関数内に含んでいるため、同化結果は数値モデルの力学を満たす。

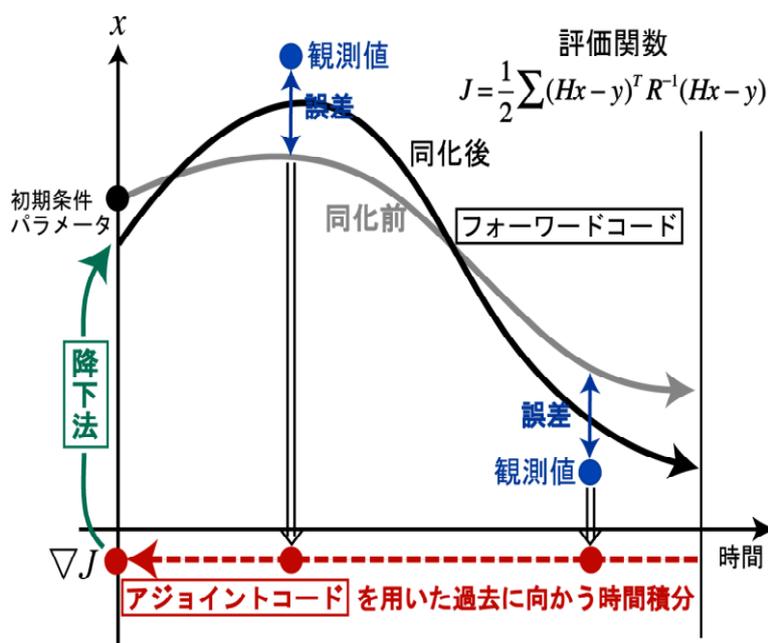


図1 4DVARの概念図。アジョイントモデルは過去に向かって積分するmodelで、観測とモデルの誤差を過去に伝搬させ、発生源を最適化する。

式(2)の評価関数が最小となる制御変数をもとめるには、評価関数の制御変数に対する勾配 $\nabla J$ を求める必要がある。4次元変分法ではこれを求めるために式(1)に対応したアジョイントモデルを使用する。

$$\begin{aligned} \lambda(t_i) &= \mathbf{M}^T \lambda(t_{i+1}) + \partial J / \partial (H_i \mathbf{C}) \\ &= \left\{ \mathbf{I} + (\mathbf{M}_{adv}^T + \mathbf{M}_{diff}^T + \mathbf{M}_{reac}^T) dt \right\} \lambda(t_{i+1}) + \partial J / \partial (H_i \mathbf{C}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\lambda$ はアジョイント変数を表す。 $\mathbf{M}_{adv}^T$ 、 $\mathbf{M}_{diff}^T$ と $\mathbf{M}_{reac}^T$ はそれぞれ $M_{adv}$ 、 $M_{diff}$ 、 $M_{reac}$ のアジョイント演算子を表す。右辺第二項の $\partial J / \partial (H_i \mathbf{C})$ は計算結果と観測値の間の差（データミスフィット）を表し、アジョイントモデルの駆動力となる。アジョイント変数はデータミスフィットの情報を過去に向かって伝搬させる役割を担っており、影響関数（Influence function）とも呼ばれ、感度解析に用いることも出来る。評価関数 $J$ の最小化はQuasi-Newton法を用いたlimited memory BFGSを用いた。

RAMS/CTM-4DVARでは、気象場の計算をoff-lineで行い、前もってRAMSで計算した気象場を読み込んで積分を行う。これは4次元変分法に必要なフォワードモデル、アジョイントモデルの逐次計算によって生じる莫大な計算負荷を減らすためである。そのため、現状のRAMS/CTM-4DVARでは、水蒸気や風速といった気象要素のデータ同化は行わない。

RAMS/CTM-4DVARでは、黄砂の発生と輸送過程の計算は、黄砂を12粒径区分（半径0.1-20 $\mu\text{m}$ ）に分けて計算を行っている。黄砂の発生フラックス $F$ は以下の式で計算している。

$$F_i = C_i u_*^3 (u_* - u_{*,th}) \quad (5)$$

ここで、 $u_*$ は摩擦速度、 $u_{*,th}$ は臨界摩擦速度を表す。 $C$ は地表面情報(土壌水分など)の関数である発生源定数であり、 $i$ は1から12の粒径区分を表す。本研究では、この係数 $C$ を制御変数とし、観測データを同化することによって、各グリッド・各粒径区分ごとに逆推定を行った。また、輸送過程には移流・拡散、乾性・湿性沈着、重力沈降が組み込まれており、アジョイントモデルにも対応するアジョイント演算子を組み込んだ。

図2に4次元変分法によるデータ同化の模式図を示す。4次元変分法ではあらかじめ設定した期間内に得られた観測データ(同時点とは限らない)を同化することによって、同化期間内の観測データとモデルの時間発展が整合するように制御変数を修正する。また、数値モデル自身を評価関数内に含んでいるため、同化結果は数値モデルの力学を満たしている。本研究では、ダストの発生量を制御変数としてしているため、図2の外側のパスを反復することになる。即ち、ダスト排出量に伴うダスト濃度の時間発展を、観測値と比較し、誤差を最小化するようにアジョイントモデルを時間方向に逆向きに積分している。

モデルの計算領域(図3)は中国内陸部から日本を覆う領域で、その計算中心を $37.5^\circ \text{ N}$ 、 $115^\circ \text{ E}$ (ポーラステレオ座標の投影中心は $25^\circ \text{ N}$ 、 $115^\circ \text{ E}$ )、水平解像度を $40\text{ km}$ ( $180 \times 100$ 格子点)とした。鉛直方向は地表面から上空 $23\text{ km}$ までを $40$ 層で分割し、最下層の鉛直層の厚さは $140\text{ m}$ である。RAMSの気象場計算の初期条件・境界条件にはNCEP/NCARの解像度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の全球再解析データ(6時間毎)を用いた。

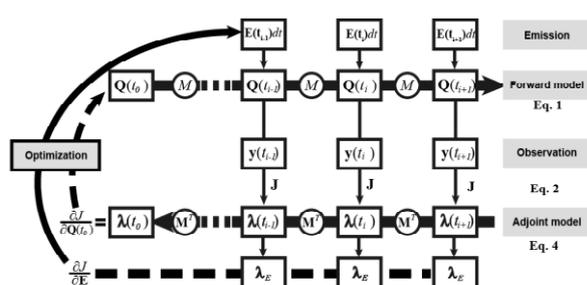


図2 アジョイントシステムの概念図

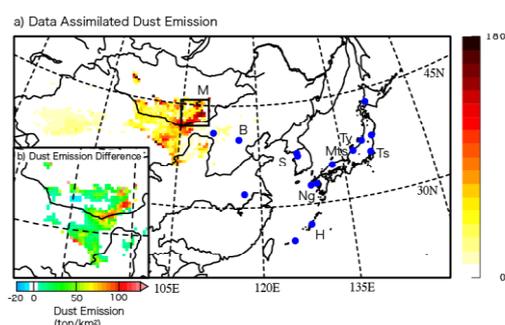


図3 モデル計算領域とライダー観測点。  
図中のトーンはダスト発生量

## 4. 結果・考察

## 1) 2005年4月30日に北日本上空で観測された高濃度ダストの解析

2005年4月30日に主に北日本上空で観測された高濃度ダストを対象とし、4月27日～29日の発生源分布を評価した<sup>6)</sup>。観測データはライダー観測によって得られたダストの消散係数<sup>7)</sup>を用いた。仙台・札幌・富山・筑波の4点の観測データをモデルの鉛直解像度に合わせて1時間平均し、3時間間隔で用いた。計算領域は中国内陸部から日本を覆う領域で、その中心を37.5°N、115°E、水平解像度を40 km(180×100グリッド)とした。鉛直方向は地表面から上空23 kmまでを40層で分割し、最下層の鉛直層の厚さは140 mである。気象場は前もってRAMSを用いて計算したものを off-line で用いており、気象場計算の初期条件・境界条件にはNCEP/NCARの解像度2.5°×2.5°の再解析データを用いた。計算期間は4月26日から5月1日である。

図4に仙台・北京におけるライダー観測とモデルのダストの消散係数の時間-高度断面図を示す。4月30日に仙台において高濃度のダストの飛来が観測(図上段)されている(北京では4月28日の黄砂と一致する)。データ同化を行わない従来モデルの結果はこのダストの飛来時刻・高度を捉えてはいるものの、観測されたような高濃度を再現することは出来なかった(図中段)。図下段には、データ同化を行った結果を示すが、観測データを同化し、発生源強度・分布を逆推定することによって、データ同化前に見られた大幅な過小評価が改善されていることがわかる。北京のライダー観測は同化には用いていないが、観測されたダスト層が再現され、他の地点でも濃度の改善に加え、ダスト層のピークの到来時刻の改善(仙台)、ピークの高度の改善(筑波)が見られた。しかし、観測で見られるようなよりシャープで高濃度の黄砂を再現することが出来なかった。これは、モデルの鉛直解像度がこれらの層を再現するには粗かったためであると考えられる。

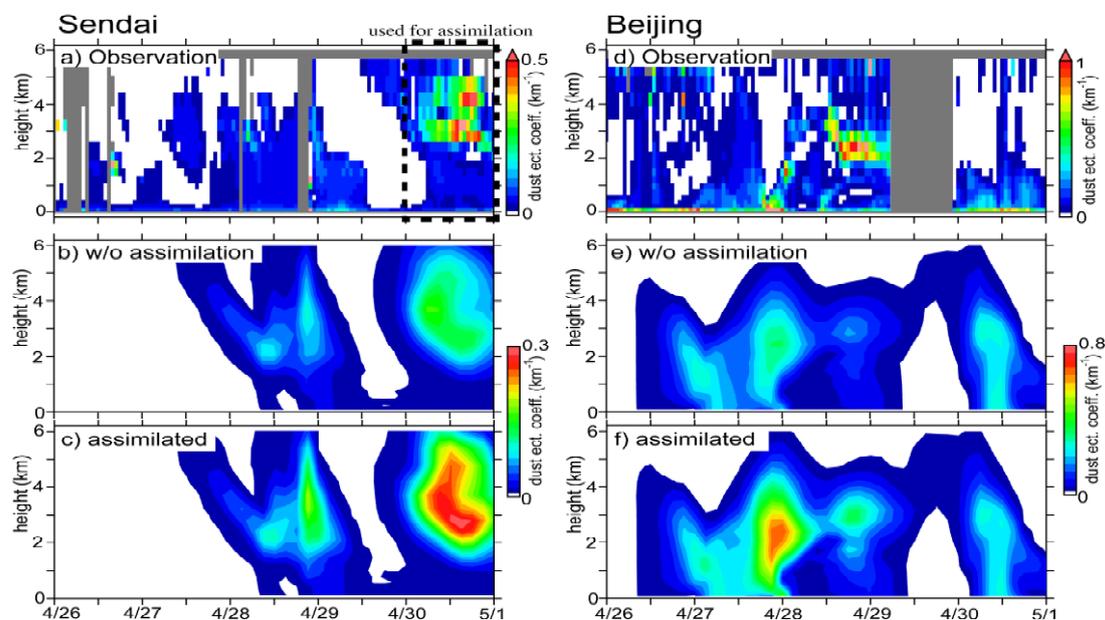


図4 仙台・北京におけるライダー観測とモデルのダスト消散係数の時間-高度断面図の比較。  
上段：ライダー観測、中段：計算結果（データ同化前）、下段：データ同化後。

図 5 に仙台・富山・つくば・北京における鉛直プロファイルの比較を同化の有無が明示出来るように示す。各地点とも、同化によってダストの消散係数とその高度の再現性が向上した。同化の結果、概ね 30~40% ほど消散係数が増加した。北京では同化後も依然として低い値であるが、これは北京が発生地域に非常に近いことが原因として考えられる。しかし、今後は、北京や韓国のライダー観測データを同化することによって大幅な改善が期待できる。

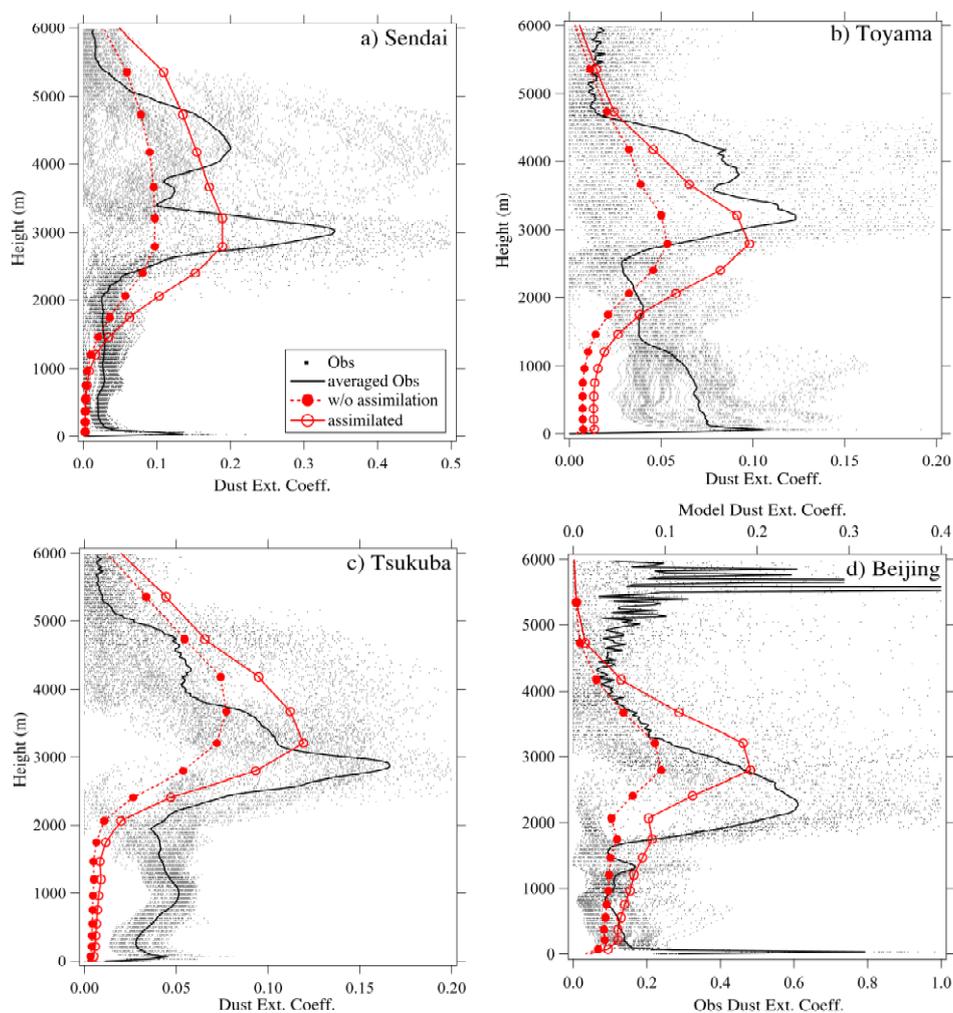


図 5 仙台・富山・つくば・北京におけるライダー観測とモデルのダスト消散係数の鉛直プロファイルの比較。ドットは観測データ、黒の実線はその平均値、実線はそれぞれ同化後・前の計算結果の平均値で、平均値は高濃度黄砂の飛来した日の平均

図 6 にデータ同化によって評価（最適化）されたダストの発生源分布と発生強度を示す。右の図は同化後と前の差である。データ同化によって中国北部とモンゴルにかけての一带で発生量が大幅に増加していることがわかる。特にモンゴルでの発生量の増加が顕著であり、モンゴル・中

国全体でデータ同化によりダストの発生量が 31 % (3.2 Tg) 増加した。この結果は 4 月 30 日に日本で観測された高濃度の黄砂が、この地域を起源としていたことを示唆している。

なお、以上の解析の詳細は、Yumimoto et al.<sup>4)</sup> に発表済みである。

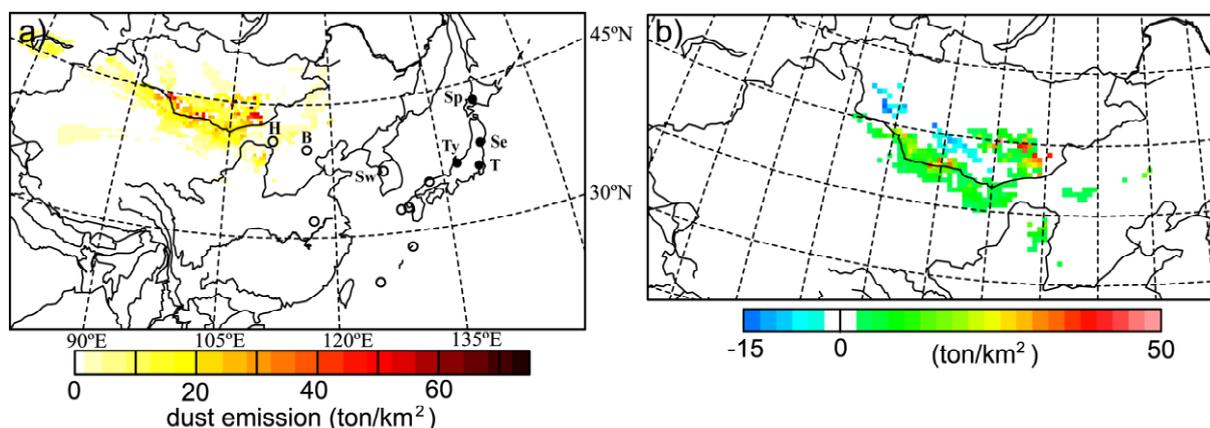


図 6 (a)黄砂発生強度分布(データ同化後、4月27日～29日の積算)。(b)データ同化後と前の差。正の値はデータ同化によって増加、負の値は減少を表す。

## 2) 2007年春季の黄砂エピソードの同化解析

2007年3月31日から4月2日に北海道を除く日本各地で観測されたに黄砂エピソードを対象としたデータ同化計算の解析結果を示す<sup>8)</sup>。

図6にRC4の計算領域、ライダー観測点を示す。RC4のデータ同化計算には、ライダー観測を偏光解消度をもとに非球形粒子成分(ダスト)に分離・インバースしたダスト成分の消散係数を用いた。なお、消散係数の計算には雲などでインバース出来ない期間は除外している。また、ライダーデータは高度方向に30m、時間分解能15分であるが、観測データをモデルの鉛直解像度に合わせて1時間平均し、RC4の入出力である3時間毎に使い、高度4000mまでの観測データを用いた。利用したライダー観測地点としては、沖縄辺戸岬、長崎、松江、富山、つくばの5地点であり、同化計算に用いなかった他の地点の結果は、RC4の結果の検証用とした。

RC4の計算は2007年3月20日から4月4日まで行い、その間の3月29日(Julian Day 88日)から4月4日(同94日)をデータ同化期間とした。

図7に3月30日から4月2日までのRC4で同化されたダストによる光学的厚さAODの地域分布(カラー表示)を示す。図には、NASA Aura衛星に搭載されたOMI(Ozone Monitoring Instrument)のAerosol Index(AI)(緑のコンター;ただし4月1日は欠測)と気象庁の黄砂情報サイト(<http://www.jma.go.jp/jp/kosa/index.html>)に掲載された同日の観測地点(赤丸)も同時に示す。

図7から、3月30日に中国・モンゴル国境の東経102～118度、北緯40～48度付近でダストが発生し、低気圧とともに東進し、3月31日に高濃度域は渤海湾・朝鮮半島北部・中国東北部に達している。その後、4月1日には濃度は減少するが、東北地方から日本海・朝鮮半島南部の広範囲にAODが1を越える領域が見られる。この高濃度域はAODのレベルが更に低下するが、4月2日は中国華北平野部から日本列島の広範囲に広がっている。3月30日から4月2日にかけてのモ

デルの結果は、気象庁の黄砂観測の範囲と良く対応し、OMI AI の日変化とも良く一致している。これは RC4 の結果が、今回対象としたダストの発生から輸送過程を良く再現していることを示している。

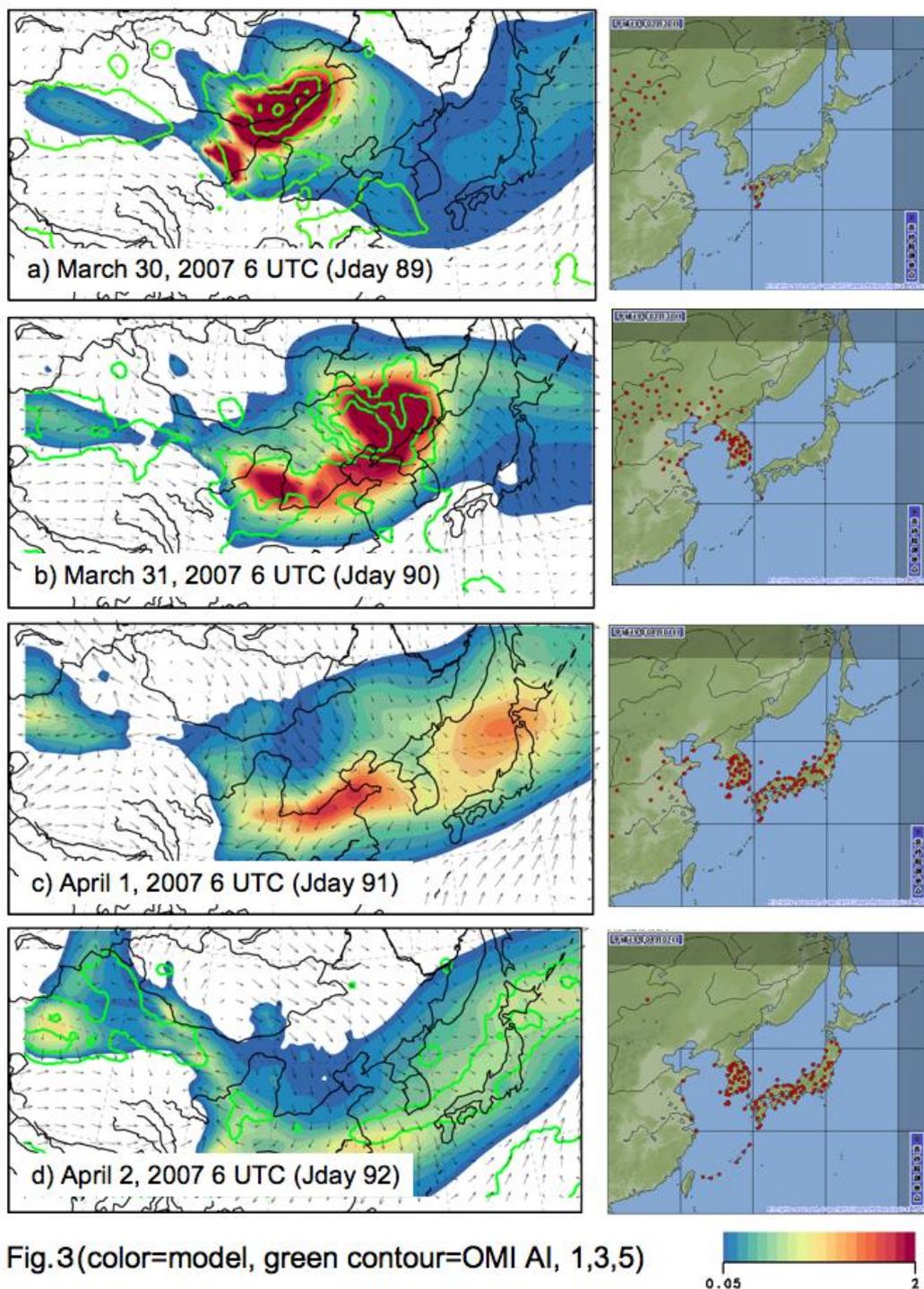


図7 (左) モデルの光学的厚さ (トーン) と OMI Aerosol Index (コンター) の比較。  
(右) 気象庁の黄砂観測点の分布

図 8 に、ライダー観測点でのダストによる消散係数と、RC4 によるデータ同化後のダストの消散係数を示す（図の上段はライダー観測結果で黒は欠測部分、下段は RC4 の結果でコンターは温位を意味）。地点は、北京、ソウル、長崎、松江であり、長崎と松江はデータ同化に利用した地点である。

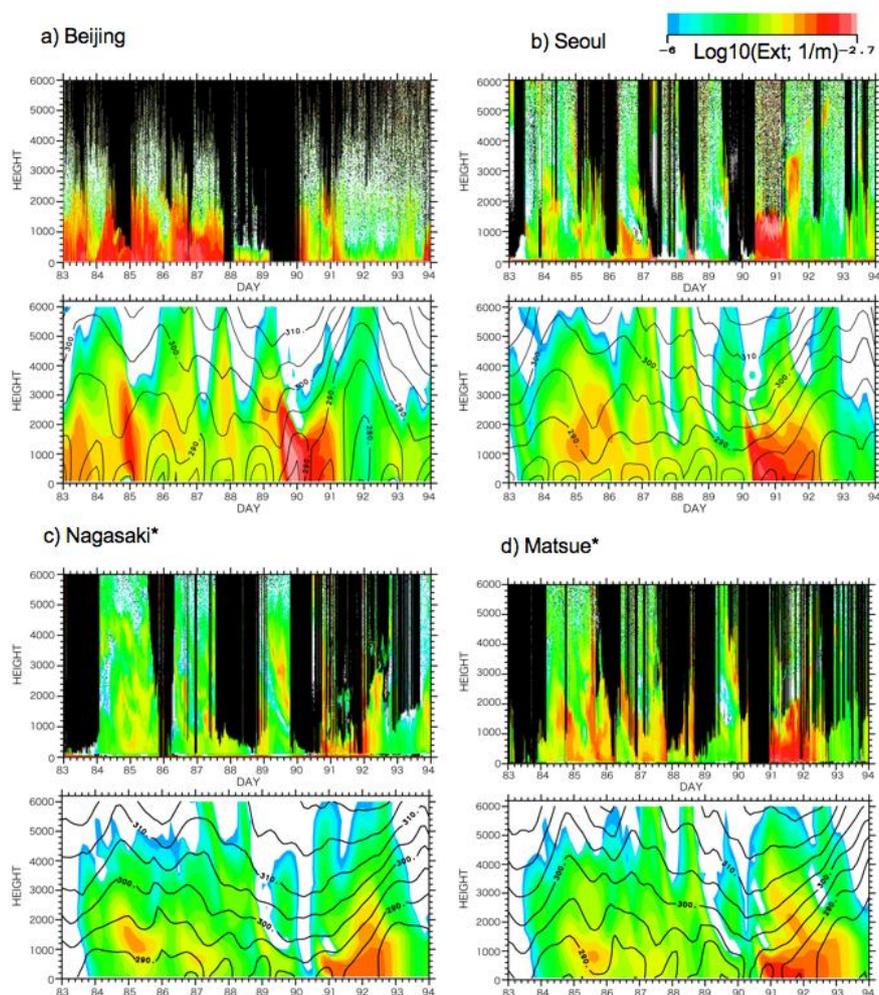


図8 ライダーとモデルによるダストの消散係数の時間空間分布の比較  
（図中のコンターは気象モデルによる温位）

モデル計算の対象とした黄砂現象は、主に、地上から 2 km 以下の高度にみられる。北京で Julian day 89 日、ソウルでは 90 日に高濃度のダストが観測されている。しかし、北京については、Julian Day 89~90 日では、人為起源の大気汚染が非常に激しくライダーによるダストの計測精度が悪くなっている。長崎と松江では、90 日の深夜から 91-92 日にかけて、上空 1000~1500m の高度に及ぶダスト層が現れている。

ダスト層は温位レベル 290~295K にある。また、ここでは示さないがデータ同化の前後でダスト層の高度分布の形状の変化が見られず、消散係数の大きさのみが変化している。この図から、

ライダー観測のデータ同化により、消散係数のレベルがライダーと一致する方向に改善しているが、同化により時間空間分布の形状は大きく変化することはない、ダスト到達時の消散係数のレベルを観測に合うように増大する方向に働いたことが判った。

図9には、高度6 kmまでの消散係数を鉛直積分した光学的厚さ AOD の日変化を主要なライダー観測地点について示す。図中の○はライダー観測値（グレーのバーはデータの最大、最小値の範囲を示す）、データ同化前とデータ同化後の RC4 の結果について、それぞれ、実線は6 km までの単純積算、破線はライダーの欠測点を除いた積算を意味する。

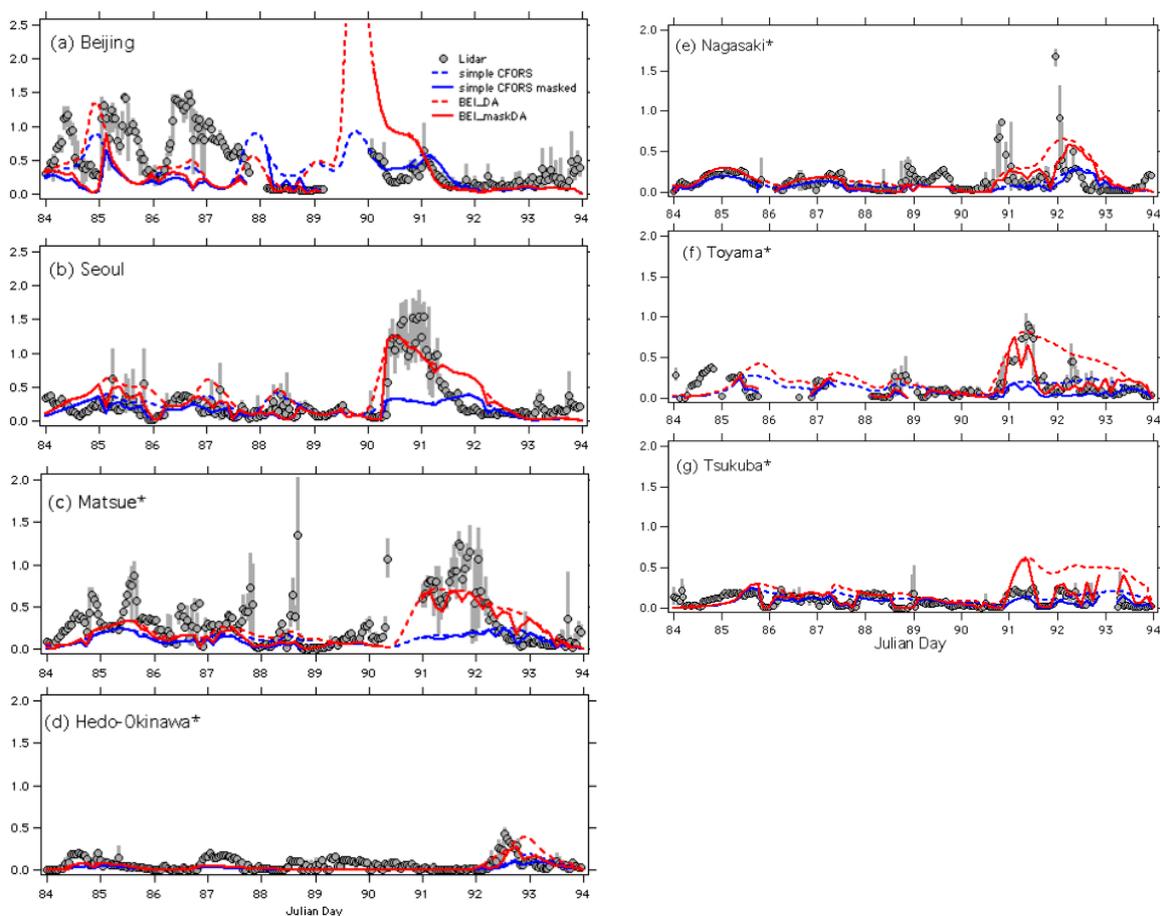


図9 ライダー（○と縦バー表示）とモデルによるダスト起源の光学的厚さの日変化。

まず図9に示したように、ライダー観測データのデータ同化により、Julian Day 90日から91日のAODを大きくする方向に働いているが、その他の日のAODの変動を大きく変化させることは少ない。これはデータ同化が、特定の観測日付近のモデルの再現性を向上する方向に働いたことを意味している。図9に示した松江、沖縄辺戸岬、長崎、富山、つくばは、データ同化に用いた観測点であり、当然の帰結として一致性が向上している。一方、データ同化に用いなかったソウルについても一致性の向上は著しい。

長崎、松江の Julian Day 89 日の elevated dust layer はデータ同化によって再現出来ていない。HYSPLIT を用いた長崎や松江の同高度を出発点としたバックトラジェクトリーからは、ダストの発生域がタクラマカン砂漠域の可能性が示唆されている。40 km 格子の RAMS ではタクラマカン砂漠からのダストの舞い上がりが十分に再現出来ない可能性があり、ダストの発生量の同化に反映されないと考えられる。

北京でのライダーは大気汚染による球形粒子の濃度が強くてダストの本体は 3 月 31 日にならないと観測出来ていない。前述のように今回のデータ同化期間は、88 日から 94 日であり、北京での 85 日や 86~87 日のダストは十分に再現できていない。これは、北京のライダー観測値をデータ同化に取り入れて、同化期間を広げることで改善すると考えられる。

以上までの結論としてデータ同化により、各地点ともダストの消散係数とその高度の再現性が向上した。一方、データ同化に用いていない、北京やソウルの計算結果も、データ同化をすることで濃度が上昇し、観測との一致が高まった。しかし、北京については人為起源大気汚染が激しく、ダストのみについての定量的な議論にはまだ至っていない。

次に、ダストの発生量の変化について示す。

図 10(a)には、計算期間中のデータ同化後のダストの発生量( $\text{ton}/\text{km}^2$ )を示し、図 10(b)には、同化後と同化前の発生量の差を示す。

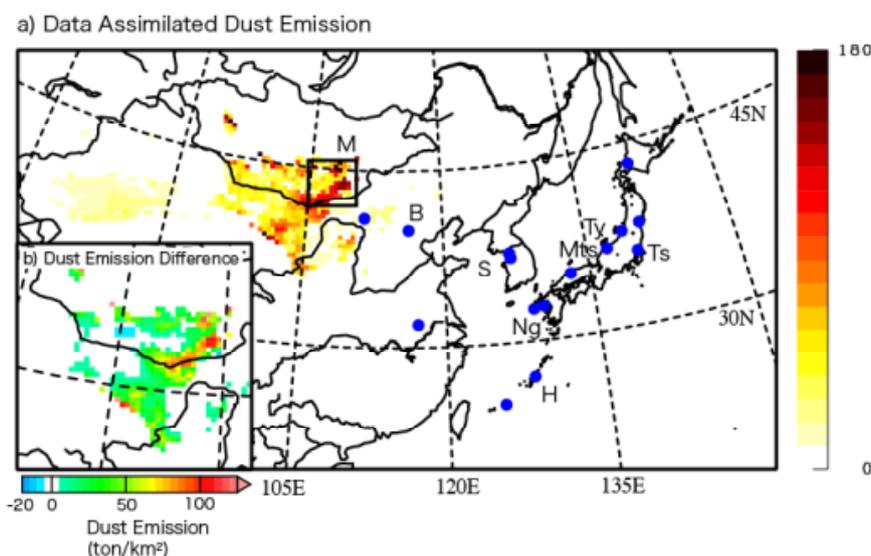


図10 (a)計算期間中のデータ同化後のダストの発生量( $\text{ton}/\text{km}^2$ )、(b)同化後と同化前の発生量の差

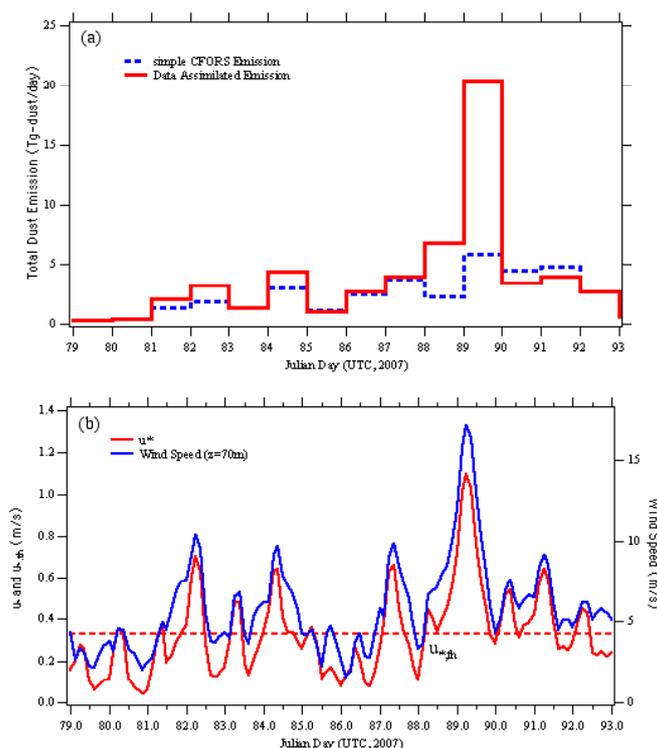


図11 (a)データ同化前後の計算領域内のダスト発生量の総和(Tg-dust/day)の日変化、  
(b)矩形領域Mの領域平均での、 $u_*$ 、 $u_{*,th}$ 、 $z = 70 m$ の風速の変化

図 11(a)には、データ同化前後の計算領域内のダスト発生量の総和(Tg-dust/day)の日変化、(b)には図 10(a)の矩形領域 M の領域平均での、摩擦速度  $u_*$ 、ダスト舞い上がり限界摩擦速度  $u_{*,th}$ 、モデル鉛直第 1 層( $z = 70 m$ )での風速の変化を示す。

ダストの発生量は東経 105 度付近の中国・モンゴル国境付近とモンゴル国内で多いことが判る。図 10(b)から、データ同化によりモンゴル国内の M 領域で同化前に比較して  $100 \text{ ton/km}^2$  以上のダスト発生量の増加がシミュレートされている。Julian Day 89 日には同地域で、図 11(b)に示したように領域平均で風速 17 m/s 程度の強風が発生し、モデルで設定した摩擦速度限界値を超過し、同期間に大量のダストが発生したことが判る。この結果から、ダストの発生量は 89 日に同化前の約 5 Tg-dust/day から約 4 倍の 20 Tg-dust/day になっている。ダスト発生量の増加させる傾向は、その前日の 88 日にも見られる。一方、90 日には減少させる方向に働いている。

このように、89 日を中心にダストの発生量がデータ同化により増加している。現在のデータ同化モデルでは、式(5)に示したようにダストの発生量は、以下の式で与えられおり、

$$F_k = \varepsilon_{ij} A_{ij} f_k u_*^3 (u_* - u_{*,th}) \quad (u_* > u_{*,th})$$

同化の制御変数としては、毎日の  $\varepsilon_{ij}$  を調整し、結果として発生源係数  $\varepsilon_{ij} \times A_{ij}$  を操作している。

ダストの発生は摩擦速度が限界値を越えた時点で生じ、その条件は矩形領域 M (図 11) では、82、74、87、88~89、91 日におこっているが、発生源係数を調整するような大きなダストは 88~89 日に限定され、発生源係数は概ね 2~3 倍に調整された。今回は、毎日の  $\varepsilon_{ij}$  をデータ同化しているが、同化の方法としては、 $u_{*,th}$  を同化する方法と、ダストの発生粒径分布を調整する方法があり得る。 $u_{*,th}$  の同化は、 $u_* > u_{*,th}$  という条件判定を伴い、定式化が非常に非線形になるので困難である。また、粒径分布の同化には粒径毎の測定結果が必要であるが、測定点が限定され、粒径や摩擦速度をデータ同化に用いるのは今後の課題である。

以上示したように、今回の計算では、図 10(b)に示したように、ある程度砂漠域の全域で発生量が増大しているが、特にモンゴルでの発生量の増加が顕著であり、モンゴル・中国全体でデータ同化によりダストの発生量が 57.8% (21.2 Tg)増加した。Yumimoto et al. (2007)<sup>4)</sup>では、ダストの発生域と発生量の最適化が図れたが、今回のシミュレーションでは、発生域の変化は少ないが、特定の日の発生量は増加させる結果が得られた。この結果は 4 月 1~2 日に日本で観測された高濃度の黄砂が、この地域を起源としていたことを示唆している。

### 3) 地上と宇宙ライダーを用いた黄砂の 3 次元輸送の解析

2007 年 5 月上旬の黄砂エピソードを対象に、国立環境研究所の地上ライダーネットワークの観測結果をデータ同化したモデルを用いて黄砂の 3 次元輸送の解析を行った。解析には NASA CALIPSO 衛星に搭載された宇宙ライダー CALIOP の計測結果も用いた。解析の詳細は Uno et al.<sup>9)</sup> に詳しい。

図 12 には、RC4 データ同化ダストモデルで計算された黄砂の光学的厚さの水平分布と、CALIPSO 衛星の軌道を同時に示す。軌道は衛星の通過時間で各日に図の下に書かれている。

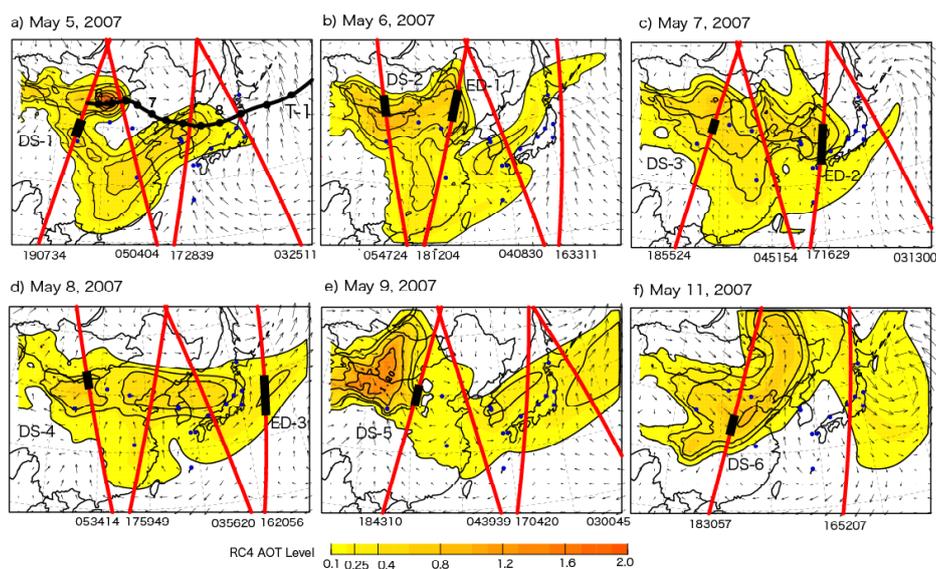


図 12 RC4 データ同化ダストモデルで計算された黄砂の光学的厚さの水平分布と、CALIPSO 衛星の軌道

図 12 中の DS1-6 などは詳細なモデルと CALIPSO の比較を行った位置範囲を示しており、その衛星パスでの黄砂の消散係数の断面分布と、DS1、3、5、6 地点での鉛直プロファイルの比較を図 13 に示す。

図 12、13 の解析から、中国国内の黄砂の発生源近傍での空間スケール、濃度プロファイルの詳細が世界で初めて示され、鉛直方向に 2 km 程度、水平方向の数 100 km の大きさを持つことが判る。また、この比較から、RC4 モデルと CALIOP は非常に整合していることも確認できる。

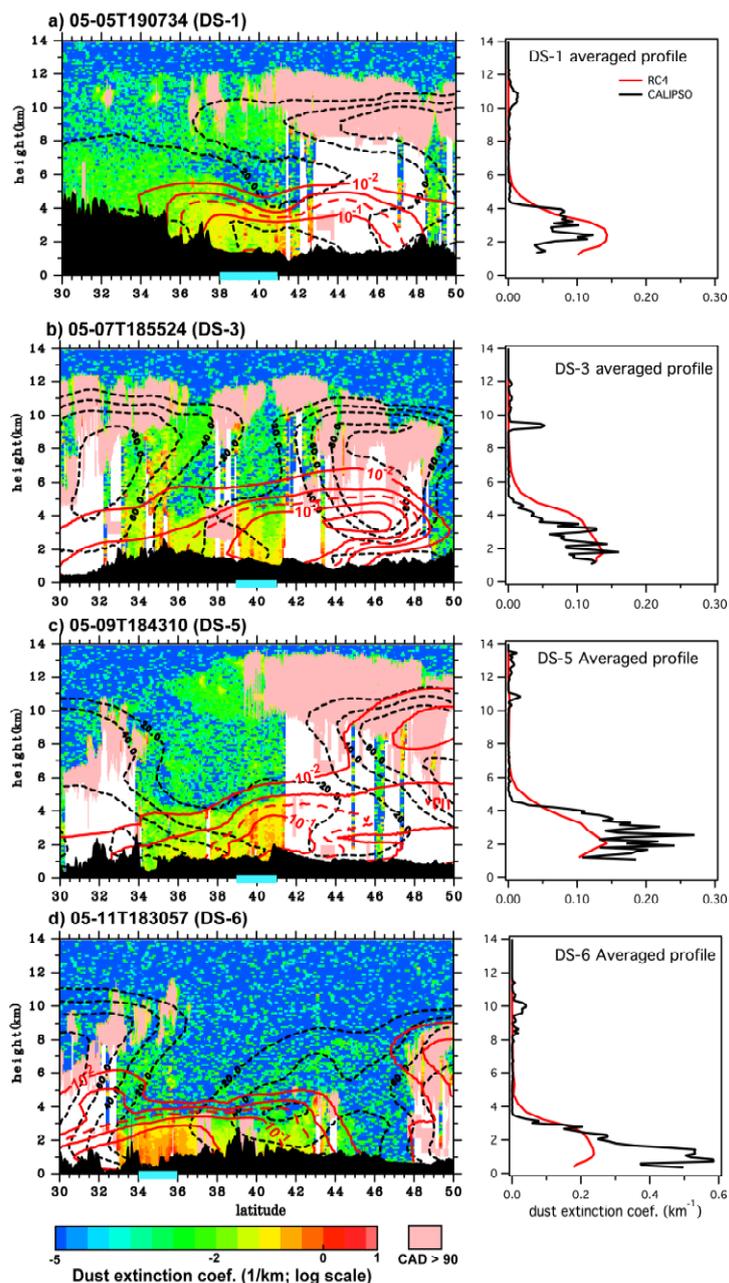


図 13 図 12 に示した DS1、3、5、6 地点での CALIOP と RC4 モデルの鉛直プロファイルと CALIPSO 軌道下の断面分布の比較

次に地上ライダーでの光学的厚さの時間変化モデルによる再現性について検討した。ライダーデータを同化することでどのように改善されるかを図 14 に刷示する。(b)~(g)に示した比較の地点は、シャパトウ、北京、ソウル、松江、富山、仙台であり、グレーの棒グラフはライダー計測、折れ線グラフは同化前・後のモデルの光学的厚さを示す。図中の黒丸は CALIOP での結果を意味する。ライダーデータを同化することで、モデルの濃度レベルが過大評価されたのを低減する方向に修正されている。

図 14(a)には、モデルの発生量の変化も示し、5月9~11日にかけてダストの発生量を低減させる方向の修正が行われたことを明瞭に示しており、データ同化の有効性が確認できる。

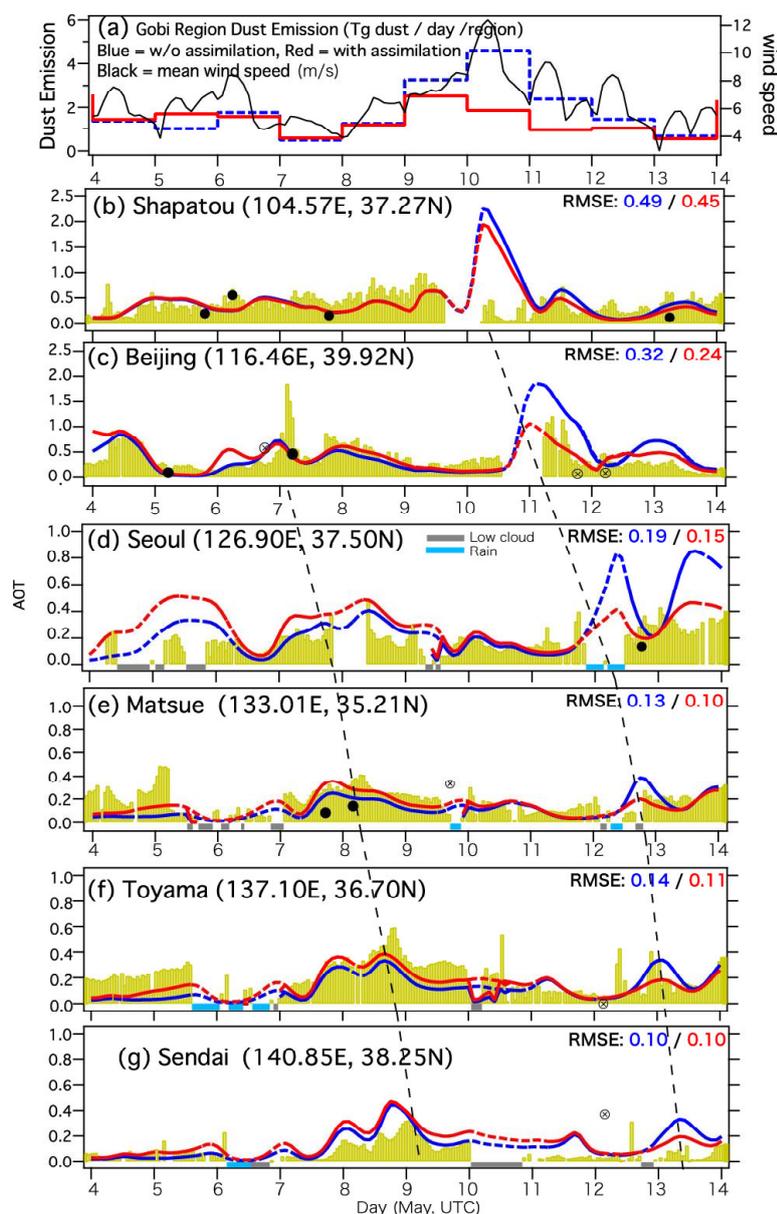


図 14 (a)同化前後のダスト発生量の変化、(b)~(g)地上ライダーと RC4 ダストモデルでの光学的厚さの日変化の比較

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

データ同化手法は、ライダー観測のみならず地上観測データや衛星観測等の同時同化も可能であり、今後の黄砂モデルへの総合的なデータ同化システムの構築の目処を与える成果を得た。また、発生地域における黄砂発生時の粒径分布の最適化スキームの開発を進めることで、更に黄砂の発生・輸送過程のモデル研究の発展につながると考えられる。

今回の研究では試みていないが、データ同化手法を用いて、ダスト発生地域におけるダストの粒径分布の最適化スキームの開発を進めることで、更にダストの発生・輸送過程のモデル研究の発展につながると考えられ、今後ともダスト発生過程の研究も必要である。データ同化には、背景誤差や観測誤差の見積もりが重要であるが、これらを定量的に見積もるには、更なる観測データの蓄積が重要であることも確認された。

最後に、本論文で用いたデータ同化手法は、ライダー観測のみならず地上観測データや衛星観測等の同時同化も可能であり、今後のダストモデルへの総合的なデータ同化システムの構築の目処を与える成果が得られた。今後は、モンゴル・中国、韓国に展開するライダーデータを同化により取り込むことで、リアルタイムのダスト予報モデルの構築を通して環境改善政策につなげる目安となると考えられる。

### (2) 地球環境政策への貢献

RAMS/CFORS 黄砂モデルによる予報結果は、環境省が地方自治体に依頼して実施した「黄砂実態解明調査」の観測日を事前に決めるのに広く活用されてきた。また、黄砂モデル結果の一部は、平成 19 年の 4、5 月には環境省のホームページで公開されるに至っており、アジア域の環境政策に大きく貢献している。今後は、モンゴル・中国内に展開される新設のライダーデータや韓国の既存のライダーデータをデータ同化により取り込むことで、リアルタイムの黄砂予報モデルの構築が可能となり、環境改善政策に繋げることが出来るものと期待される。

## 6. 引用文献

- 1) 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, 2006: Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia - Overview, *Journal of Geophysical Research*, 111, D12213, doi:10.1029/2005JD006575.
- 2) 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. *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8668, doi:10.1029/2002JD002845.
- 3) Yumimoto, K. and I. Uno, 2006: Adjoint inverse modelling of CO emissions over Eastern Asia using four-dimensional variational data assimilation, *Atmos. Environ.*, 40, 6836-6845.
- 4) Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, and S. Satake, 2007: Adjoint inversion modelling of dust emission and transport over East Asia, *Geophys. Res. Lett.* 34, L08806,

doi:10.1029/2006GL028551.

- 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, 1992: A comprehensive meteorological modelling system – RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- 6) 杉本伸夫, 岡本創, 佐竹晋輔, 松井一郎, 清水厚, 鶴野伊津志, 藤吉康志, 鳥山成一, 董旭輝, 2005: ライダーが捉えた 2005 年 4 月 30 日の仙台の黄砂現象, *天気*, 52, 11.
- 7) Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki, 2004: Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia, . *Journal of Geophysical Research*, 109(D19S17), doi:10.1029/2002JD003253.
- 8) 鶴野伊津志、弓本桂也、杉本伸夫、清水厚, 2008: 随伴モデリングを用いた東アジア域のダストの発生・輸送の逆推定, *大気環境学会誌* 43 巻 4 号, 191-197, 2008.
- 9) Uno, I., K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu, and D. M. Winker: 3D structure of Asian Dust Transport revealed by CALIPSO Lidar and a 4DVAR Dust Model, *Geophys. Res. Lett.*, 35 (2008) doi:10.1029/2007GL032329

## 7. 国際共同研究等の状況

「物質輸送モデルへのデータ同化手法の開発」 中国科学院大気物理研究所 王自發教授  
サブテーマ代表者は、中国の科学技術省 MOST の研究プロジェクト STPPC(Synthesized Techniques for Pollution Complex – Multi Air Pollutants- Prevention in City Cluster and Integrated Demonstration) の研究協力者となっており、アンサンブルカルマンフィルターを用いた中国でのデータ同化に関する関連研究結果についての共同解析を行った。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Y. Hara, I. Uno and Z. Wang: *Atmos Environ*, 40, 6730-6740 (2006)  
“Long-term variation of Asian dust and related climate factor”.
- 2) K. Yumimoto and I. Uno: *Atmos Environ*, 40, 6836-6845 (2006)  
“Adjoint inverse modeling of CO emission over the East Asian region using for dimensionoal variational data assimilation”.
- 3) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake: *Geophys. Res. Lett.*, 34, 8, L08806 (2007) doi:10.1029/2006GL028551  
“Adjoint Inverse Modeling of Dust Emission and Transport over East Asia”
- 4) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Liu and D. M. Winker: *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2869-2884 (2008)  
“Numerical Modeling of Asian Dust Emission and Transport by Adjoint Inversion using Lidar Observation Network”

- 5) I. Uno, K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu and D. M. Winker: *Geophys. Res. Lett.*, 35 (2008) doi:10.1029/2007GL032329  
“3D structure of Asian Dust Transport revealed by CALIPSO Lidar and a 4DVAR Dust Model”
- 6) 鵜野伊津志、弓本桂也、杉本伸夫、清水厚：大気環境学会誌、43 (4), 191-197 (2008)  
「随伴モデリングを用いた東アジア域のダストの発生・輸送の逆推定」
- 7) Y. Hara, I. Uno, K. Yumimoto, M. Tanaka, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu: *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23801 (2008) doi:10.1029/2008GL035630  
“Summertime Taklimakan dust structure”
- 8) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto and A. Shimizu: *SOLA*, 4, 89-92 (2008)  
“MODIS AOT Based Inverse Modeling for Asian Dust”
- 9) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu and D. M. Winker: *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1227-1239 (2009)  
“Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model”
- 10) I. Uno, K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara and N. Sugimoto: *Nature Geoscience*, 2( 8), DOI:10.1038/NGEO0583(2009)

<その他誌上発表（査読なし）>

なし

(2) 口頭発表（学会）

- 1) I. Uno, K. Yumimoto, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake: 23rd International Laser Radar Conference, Nara, Japan, 24-28 July (2006)  
“Feasibility Study of Adjoint Inverse Modeling Of Asian Dust Using Lidar Network Observations”
- 2) I. Uno: TEMM8 Side Meeting – International Workshop on Regional Ecology and Its Environmental Effect, Beijing, Dec. 3-5 (2006)  
“Potential Capability of Adjoint Inverse Modeling of Dust Emission and Transport over East Asia for Real-Time Dust Forecasting”
- 3) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake: The 10th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ 2007), 14-16, Hong Kong, China (2007)  
“Adjoint Inverse modeling of dust emission and transport over East Asia”
- 4) 鵜野伊津志、弓本桂也、杉本伸夫、清水 厚、松井一郎：第 48 回大気環境学会年会、岡山市 (2007)  
「随伴モデリングを用いた東アジア域のダストの発生・輸送の逆推定」
- 5) Y. Hara, A. Shimizu, N. Sugimoto, K. Yumimoto, I. Uno: 24th International Laser Radar Conference, Boulder, USA (2008)  
“3D transport structure of Asian dust retrieved by NASA CALIOP and a dust transport model assimilated with the NIES lidar Network data”

- 6) K. Yumimoto, I. Uno, M. Tanaka, Y. Hara, A. Shimizu and N. Sugimoto: 24th International Laser Radar Conference, Boulder, USA (2008)  
“Elevated Large-scale Dust Veil Originated from the Taklimakan Desert”
- 7) 弓本桂也、鵜野伊津志、清水厚、杉本伸夫、原由香里：日本気象学会 2008 年度秋季大会 (2008)  
「ライダー搭載衛星 CALIPSO データと 4 次元変分法を用いた黄砂発生量の逆推定」
- 8) K. Yumimoto, I. Uno, Y. Hara, A. Shimizu, N. Sugimoto: AGU Fall Meeting, (2008)  
“Elevated large-scale dust veil originated from the Taklimakan Desert”

(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)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 読売新聞：黄砂「内陸部の乾燥を防げ」 (2006 年 4 月 14 日朝刊、九州版)
- 2) 日本経済新聞：黄砂飛来量に影響か (2006 年 5 月 22 日朝刊、全国版)
- 3) 朝日新聞：黄砂を予測する新手法 (2007 年 5 月 16 日、夕刊)

(6) その他

なし