

## 日本上空に飛来したダストの起源とその輸送構造についての解析

佐竹, 晋輔  
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

鵜野, 伊津志  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/16721>

---

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 26 (1), pp.27-34, 2004-06. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



# 日本上空に飛来したダストの起源と その輸送構造についての解析

佐竹 晋輔\*1†・鶴野 伊津志\*2

(平成16年4月28日 受理)

## Numerical analysis of dust layers over Japan: their origins and 3-dimensional transport structures

Shinsuke SATAKE and Itsushi UNO

†E-mail of corresponding author: [satake@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:satake@riam.kyushu-u.ac.jp)

This study used a regional scale aerosol transport model (CFORS) to analyze the origin of dust layers over Japan and their 3-dimensional transport structures. CFORS dust fields were compared with NCAR-C130 airborne measurements, and captures many of the important observed features. Back trajectories of observed high dust levels reveal that dense dust layers within the boundary layer are transported mainly from the Gobi Desert and Loess Plateau, whereas those at the upper level (3–6 km) originate in the Taklimakan Desert. Transport altitudes of Gobi and Taklimakan dusts differed markedly. Further examination of dust transport using results of sensitivity simulation with controlled dust emission showed that Taklimakan dust has a higher transport altitude than Gobi dust because it is trapped in a higher potential temperature range when it is uplifted. We found that Gobi dust is transported mainly within the boundary layer between 45°N–50°N, whereas Taklimakan dust tends to be transported at altitudes between 4 km and 6 km centered at 40°N. Finally, we evaluated relative dust concentrations from sensitivity studies of total dust concentration for each research flight. Model results show that Gobi dust has the strongest fraction, which is mainly the contribution within the boundary layer.

**Key words:** *chemical transport model, dust (yellow sand), aerosol transport, airborne observation, ACE-Asia*

### 1. はじめに

古くから、「春がすみ」の原因として知られる春季の黄砂(ダスト、土壌性エアロゾル)は視程の悪化、降水のpHへの影響、人体の健康に影響を与える大気汚染物質である。それらは同時に、短波・長波放射を散乱・吸収する事によって直接的に、雲の凝結核として作用し、その光学的特性を変化させる事によって間接的に、地球大気放射収支に影響を与える気候変動因子の一つとしても注目されている(Miller and Tegen, 1998)<sup>1)</sup>。しかし、その発生プロセスや長距離輸送メカニズム、放射特性は非常に複雑で、発生源分布・強度や輸送構造、大気中での分布等を正確に把握する事は難しい。そのため、現在見積もられているダストによる放射強制力の信頼性は「非常に低い」と評価されている(IPCC, 2001)<sup>2)</sup>。

これまでも衛星観測やライダー観測(例えばHusar *et al.*, 2001<sup>3)</sup>やIwasaka *et al.*, 2003<sup>4)</sup>)によってダストの水平・

鉛直分布が観測され、その輸送過程の解析が行われてきた。しかし、ダストの大気中での振舞いは大気運動による輸送、大気境界層内の鉛直拡散、積雲対流による鉛直輸送、乾性・湿性沈着による除去等の多くの要因によって決定している。そのため、数値モデルを用いた研究が、観測されたダストのソース・リセプター関係を明らかにし、その正確な輸送過程の解明に不可欠である。

2001年春季には、ダストを含む大気エアロゾルの物理・化学・光学的特性をより明瞭に理解する事を目的とした国際共同の集中観測 ACE-Asia(Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment)[Huebert *et al.*, 2003a]<sup>5)</sup>が、東アジア域を対象に、地上観測に加え、船舶、航空機等を駆使して実施され、多くのダストに関する有用なデータが得られた。この大規模な野外実験後、得られたデータをもとに、数値モデルを用いた幾つかのダスト輸送に関する知見が既に報告されている。例えば、Uno *et al.*(2003a)<sup>6)</sup>は中国から西太平洋までの東アジア域を覆う領域を80km解像度で、また、Gong *et al.*(2003)<sup>7)</sup>は中国

\*1 大気海洋環境システム学専攻博士課程

\*2 応用力学研究所、大気海洋環境システム学専攻

からカナダ北西部までを 100km 解像度で、Liu *et al.*(2003)<sup>8)</sup>はカザフスタンから日本までを 27km 解像度でダストの輸送シミュレーションを行っており、ACE-Asia 期間中に起こったダストストームの詳細な構造を報告している。しかしながら、これらの輸送モデルによって報告されている発生源の分布やその強度、濃度分布には依然として大きな不確実性がある。これに対する主な理由の一つはそれぞれ異なるダストの発生・輸送スキームを用いてシミュレーションを行ったためであり、それゆえ、さらなるダストの発生・輸送についての研究が必要とされている。

本研究では化学物質輸送モデル(CFORS: Chemical weather FORecasting System)を用いて2001年春季を対象にダストの輸送シミュレーションを行った。CFORSと衛星観測との比較やCFORSによって得られたダストの平均的な輸送特徴、アジア域での物質収支に関する解析は(Satake *et al.*, 2003)<sup>9)</sup>に、CFORSと地上観測データとの詳細な比較、各イベントにおける詳細なダストの輸送構造の解析は(Uno *et al.*, 2003a)<sup>6)</sup>によって既に報告されている。以下ではNSF (National Science Foundation)/NCAR (National Center for Atmospheric Research)-C130航空機観測によって得られたデータとの比較をもとに、ダストの起源やその3次元的輸送構造について得られた知見を述べる。

## 2. 化学物質輸送モデル(CFORS)の概要

本研究で用いた化学物質輸送モデル(CFORS: Chemical weather FORecasting System)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[Pielke *et al.* (1992)]<sup>10)</sup>とオンラインで結合しており、そのスカラー輸送オプションを利用して物質輸送シミュレーションを行っている。CFORSでは人為起源物質(一酸化炭素、二酸化硫黄、硫酸塩粒子、燃焼による炭素性エアロゾル)と自然起源物質(ダスト、海塩粒子、ラドン、火山ガス)等の約 20 成分の大気中での流れが扱われ、移流、乱流拡散、発生、化学反応、乾性・湿性沈着、重力沈降過程がその輸送過程に含まれている。ダストの発生は土地利用区分、植生、地上摩擦風速、大気安定度、積雪、土壌水分を用いて、半径 0.1-25.12( $\mu\text{m}$ )までを 12 の区間に分割して計算している。ダストを含むエアロゾル・ガスの地上からの発生は、境界層内部に混合比が一定になるように行い、境界層高度はRAMSの温位の鉛直プロファイルから診断している。また、物質濃度だけではなく、波長 500nm のエアロゾル光学的厚さと単散乱アルベドも Takemura *et al.* [2000]<sup>11)</sup>に従って算出している。

初期・境界条件には、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の6時間間隔、緯度経度1.0度分解能の全球再解析データを用いており、濃度の初期値はゼロとし、流出境界条件はゼロ勾配で与えた。CFORS計算領域はFig. 1(a)に示した東西8000km、南北7200km(80km格子)の範

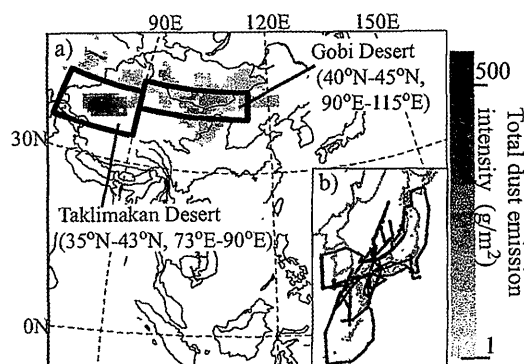


Fig. 1 a) Simulation domain and dust total emission intensity ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) and b) C-130 flight track (black line). This figure shows two desert regions (Gobi and Taklimakan) used for sensitivity simulations (section 3.2).

囲で構成される東アジア域で、鉛直方向には対流圏をすべて含む上空23kmまでを鉛直23層で分割している。より詳細なCFORSの記述に関しては(Uno *et al.*, 2003b)<sup>12)</sup>を参照されたい。

## 3. 結果と議論

### 3.1 航空機観測とCFORS結果との比較

2001年の3月31日から5月4日までにわたって、航空機NCAR-C130は山口県岩国市をベースとし、黄海、韓国、日本上空の中部対流圏までを中心に、全19回の観測フライト(RF: Research Flight)を実施した(Fig. 1(b)参照)(Huebert *et al.*, 2003b)<sup>13)</sup>。その観測項目はカルシウム( $\text{Ca}^{2+}$ )、硫酸塩、粗大粒子等のエアロゾル濃度や二酸化硫黄等の気体の混合比から、光学的厚さや消散係数等の放射パラメータにまで、多岐にわたっている。そのため、本研究ではジョージア工科大学(GT)グループとハワイ大学(UHC)グループの観測から得られたカルシウム( $\text{Ca}^{2+}$ )濃度と粗大粒子濃度を用いて、CFORS結果との比較を行った。ここで、GTグループの $\text{Ca}^{2+}$ 濃度はPILS(Particle-Into-Liquid-Sampler)を用いて、エアロゾルを過飽和状態の水蒸気と混合し、液滴に成長させ、慣性インパクターにより捕集し、イオンクロマトグラフによって分析する事で得られたものである(Weber *et al.*, 2001)<sup>14)</sup>。中国で観測されたダストの中に約6-12%の $\text{Ca}^{2+}$ が含まれ、その内の約50%が溶解性のものであったというZhang *et al.* (2003)<sup>15)</sup>の結果を基に、ここでは、GTの $\text{Ca}^{2+}$ をダストのトレーサーと仮定して比較を行っている。また、UHCグループの粗大粒子濃度は、TOAD(Thermo-Optic Aerosol Discriminator)を用いて、捕集された粗大粒子を300°Cまで熱し、OPC(Optical particle counter)を用いて非溶解性粗大粒子の体積濃度を測定したものである(Clarke *et al.*, 2003)<sup>16)</sup>。そのため、粗大粒子の大気中での密度を $2.1(\text{g}/\text{cm}^3)$ と仮定して、その重量濃度を見積もり、比較を行った。

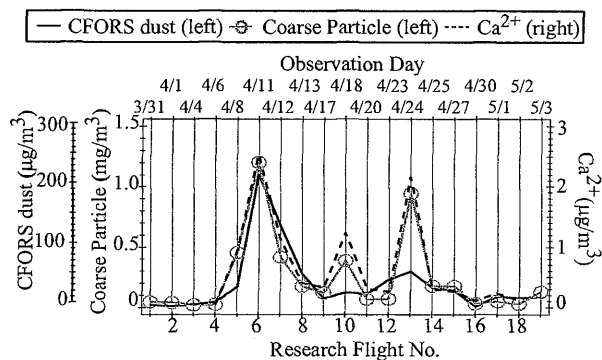


Fig. 2 Mean concentrations of modeled dust ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (line), and observed  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (dotted line) and coarse particle concentrations ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) (circle and line) over each flight period.

Fig. 2 に  $\text{Ca}^{2+}$ 、粗大粒子とモデルによるダストの各フライトにおける濃度の平均値を示した。図中では下段に観測フライトナンバーを、上段に各フライトナンバーに対応した観測実施日を、横軸に各物質の重量濃度を示している。また、Fig. 3 に Fig. 2 中で比較的高濃度であった観測フライトの飛行経路を示した。

Fig. 2 から CFORS によるダスト平均濃度が観測された時間変化の特徴を捉えている事がわかる。例えば、観測が RF05、RF06、RF07、RF10、RF13 において高濃度を示した点や、RF06 での平均濃度レベルが C130 観測期間中において最も高い値を示した点に関して CFORS 結果は正確に表現していた。平均濃度の時間変化に対する観測と CFORS ダストの相関係数はそれぞれ、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度に対して 0.74、粗大粒子に対して 0.76 であった。

比較的高濃度が示された RF05、RF06、RF07、RF10、RF13 における観測領域は、Fig. 3 で示されている様に、日本海上空 (RF05) や西日本から黄海上空まで (RF06、RF07、RF10、RF13) の領域である。そのため、これらのフライトで観測された濃度レベルの上昇は大陸から流出したダストの影響を大きく受けている。そこで、それらの高濃度を観測した各フライトに着目し、ダスト濃度の時間変化に関する詳細な比較を行った。Fig. 4 に (a)RF05、(b)RF06、(c)RF07、(d)RF10、(e)RF13 の観測高度と  $\text{Ca}^{2+}$ 、粗大粒子、CFORS ダスト濃度の時間変化の比較を、また、Fig. 5 に各フライトについての  $\text{Ca}^{2+}$ 、粗大粒子、CFORS ダスト濃度の鉛直プロファイルの比較を示した。

Fig. 4(a)、Fig. 5(a) の RF05 では日本海上空の観測フライトが行われ、航空機 C130 は高度 2.5km まで上昇した時に大きな濃度の増加を観測していた。CFORS の結果は、この C130 の上昇に伴う急激な濃度の増加を捕え、鉛直プロファイルからもそのピークの高度は観測とほぼ一致した。

Fig. 4(b)、Fig. 5(b) の岩国から黄海上空までの観測フライトが行われた RF06 では、C130 の高度約 6.5km から地表近くまでの下降と同時に急激な濃度の増加が見られ、高い濃度レベルが高度 5km から地表付近まで観測されてい

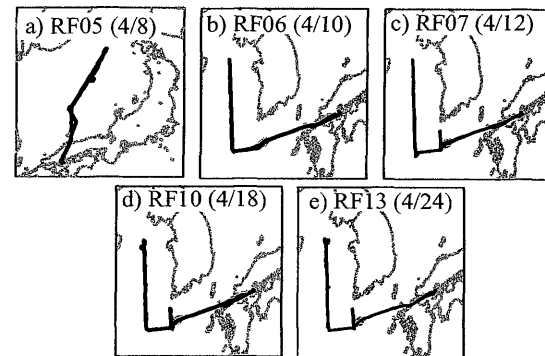


Fig. 3 Flight tracks (black lines) for the RF05, RF06, RF07, RF10, and RF13 of NCAR-C-130 aircraft.

る。CFORS もまた、この下降に伴う濃度の上昇や、高濃度が鉛直方向に広く分布している様子を正確に表現していた。

RF06 と同様に岩国から黄海を中心とした観測フライト RF07 (Fig. 4(c)、Fig. 5(c)) や RF10 (Fig. 4(d)、Fig. 5(d)) では、高度約 2km 以下で高い値が観測されている。この高度 2km におけるダスト層の存在はモデルの結果からも確認でき、この期間に観測された濃度の時間変化の特徴を CFORS は正確に捉えていた。

Fig. 4(e)、Fig. 5(e) では 4月24日に行われた岩国から黄海へのフライト結果を示している。この時の CFORS ダスト濃度の鉛直プロファイルから、地表付近と高度 5km に二つの大きなピークが見られ、モデル結果は境界層内部と高度 5km 付近に濃いダスト層の存在を示していた。このような上層と下層のダスト層は観測結果と一致し、モデルが観測された濃度の鉛直プロファイルや時間変化の特徴を捉えている事を示している。

以上、観測された  $\text{Ca}^{2+}$ 、粗大粒子濃度の時間変化の特徴や鉛直プロファイルモデルが再現している事が確認された。特にモデルによって示されたダスト濃度の増加・減少のタイミングや各高度における高濃度ダストの再現性の高さが明確に示された。

### 3.2. 後方流跡線解析によって得られたダスト輸送とその起源

前節での C130 航空機観測との比較の中で、日本や黄海上空に浮遊する高濃度ダスト層の存在が明瞭に示された。この様なダスト層の輸送は既に述べたように発生源分布とその強度、地形の影響、大気中での輸送プロセスなど多くの複雑な要因によって決定している。そこで、これらのダストの起源と輸送経路を特定するために、高濃度が観測された地点を対象に後方流跡線解析を行った。Fig. 6 に各観測フライトの高濃度が観測された地点からの後方流跡線解析の結果を示す。図中の(a)、(b)はそれぞれ、地表から高度 3km 以上、高度 3km 未満からの後方流跡線であり、また、(c)、(d)はそれぞれ、地表から高度 3km 以上、高

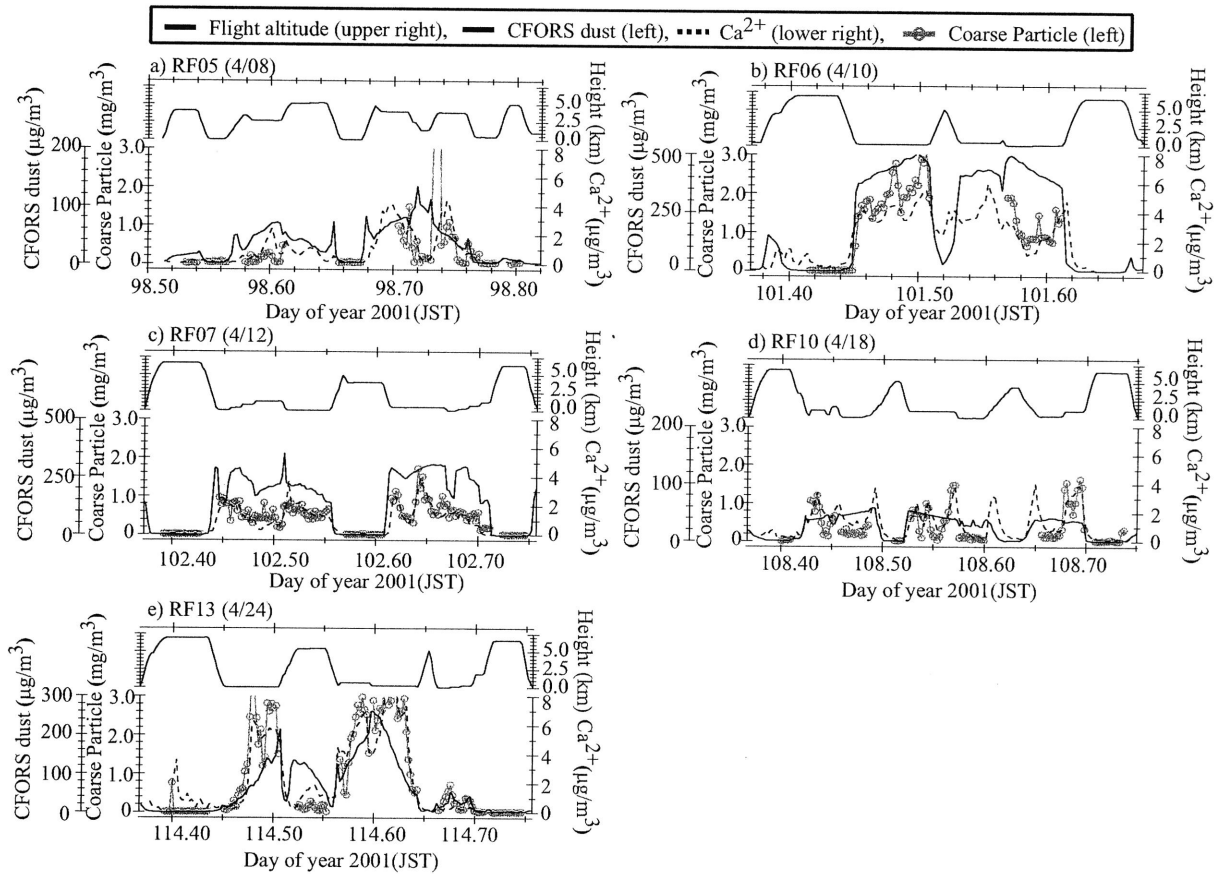


Fig. 4 Time variation of CFORS dust ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (line), observed  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (dotted line), observed coarse particle concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (circle and line), and observational height (km) (line) in a) RF05, b) RF06, c) RF07, d) RF10, and e) RF13.

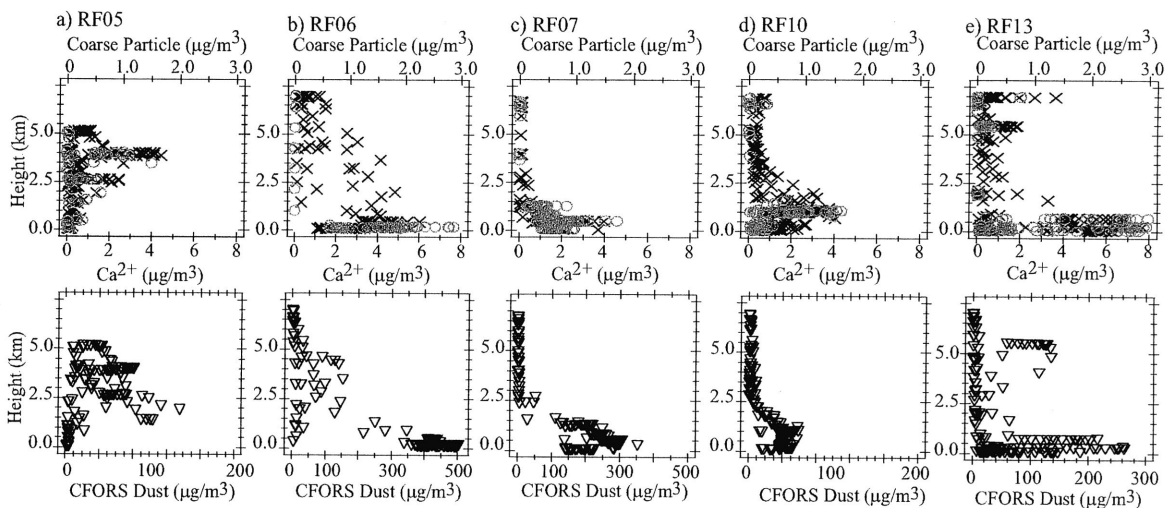


Fig. 5 Vertical profiles of CFORS dust ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (triangle), observed  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (cross), and observed coarse particle ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (circle).

度 3km 未満からの流跡線高度(地表からの高度)の時間変化である。ここで、後方流跡線解析は RAMS によってシミュレートされた 3 次元の気象場を基に、Hybrid Particle Transport Model(HYPACT) (Walko et al. 2001)<sup>17)</sup>を用いて行った。

Fig. 6 から、観測された高濃度ダストの起源を明確に特定できる。例えば、RF05、RF06、RF13 の高度 3km 以上に

おいて観測されたダストは、Fig. 6(a)、(d)の流跡線が高度を大きく変化させながら、タクラマカン砂漠上空を通過し、東に向かい、大陸から流出する経路を示している事から、タクラマカン砂漠起源であった事がわかる。一方、RF06、RF07、RF10、RF13 において境界層内で観測されたダストは、Fig. 6(b)、(d)の流跡線が高度を徐々に減少させながら、ゴビ砂漠や黄土高原上空を通過し、黄海に到達している

事から、中国北部から北東部にかけての砂漠域起源であった事が分かる。重要な特徴は観測されたダストの輸送経路・高度が、起源によって異なり、それぞれが大きな特徴を持つ事である。そこで、それらの輸送構造をより明確にするために、タクラマカン砂漠(北緯 35-43 度、東経:73-90 度(Fig. 1(a)参照))(感度実験:Tak)もしくは、ゴビ砂漠(北緯 40-45 度、東経:90-115 度(Fig. 1(a)参照))(感度実験:Gobi)のみにダストの発生を抑えた、起源別のダスト輸送シミュレーションを行った。

Fig. 7 (a), (b), (c)はそれぞれ、C130 観測期間中、最も大規模なダストストームが観測された4月9日、10日、11

日における全ダスト(全ての発生源を考慮したダスト)の光学的厚さと500hpaにおける温度の水平面分布であり、Fig. 7(d), (e)はそれぞれ、RF06の高度3km以上と3km未満の後方流跡線に沿ったダスト濃度と温位の時空間分布である。ただし、Fig. 7(d)では感度実験 Gobi のダスト濃度を、Fig. 7(e)では感度実験 Tak のダスト濃度をプロットしている。

気象庁天気図は、4月8日から11日にかけて、バイカル湖の南から発達した低気圧が北東に向けてゆっくりと移動していた事を示しており、この低気圧に伴われた寒冷前線がゴビ砂漠上空を通過した事によって、

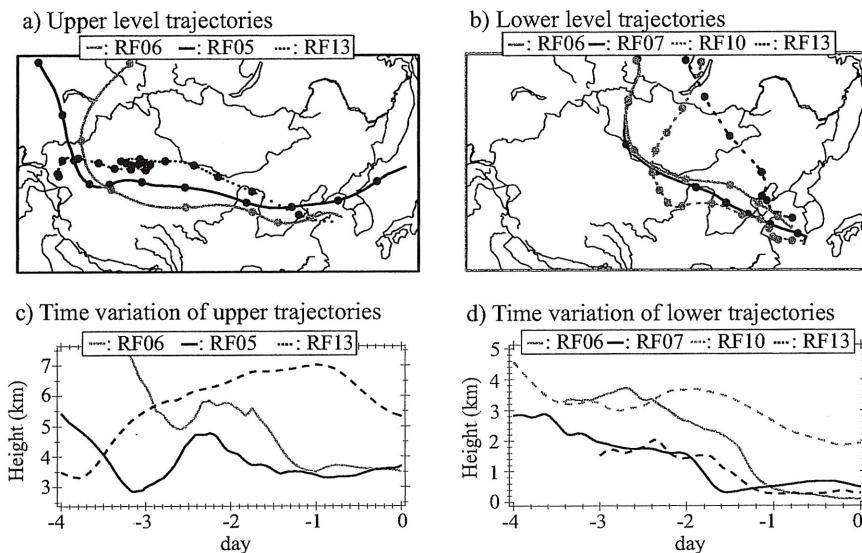


Fig. 6 Back trajectories from observed high concentration points in RF05, RF06, RF07, RF10, and RF13. a) Trajectories for observed dusts at upper levels (3-6 km); b) same as a) but for observed dust at lower levels (0-3 km); c) time variation of altitude of trajectories for observed dust at the upper level; and d) same as c), but for observed dust at lower levels. Shaded circles on the trajectory are inserted at 12-h intervals.

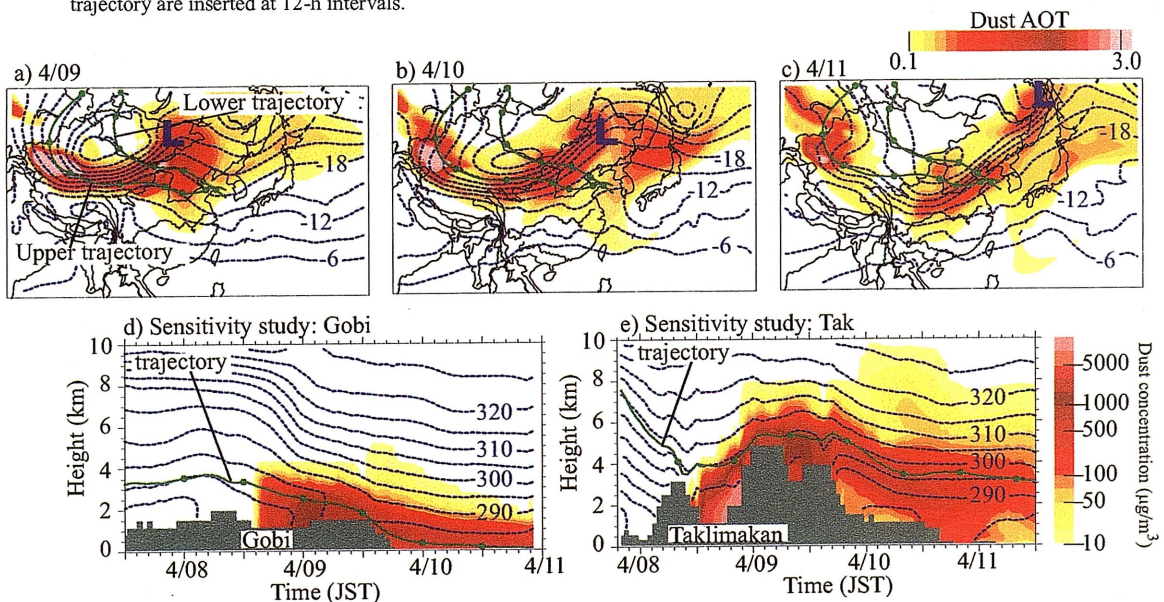
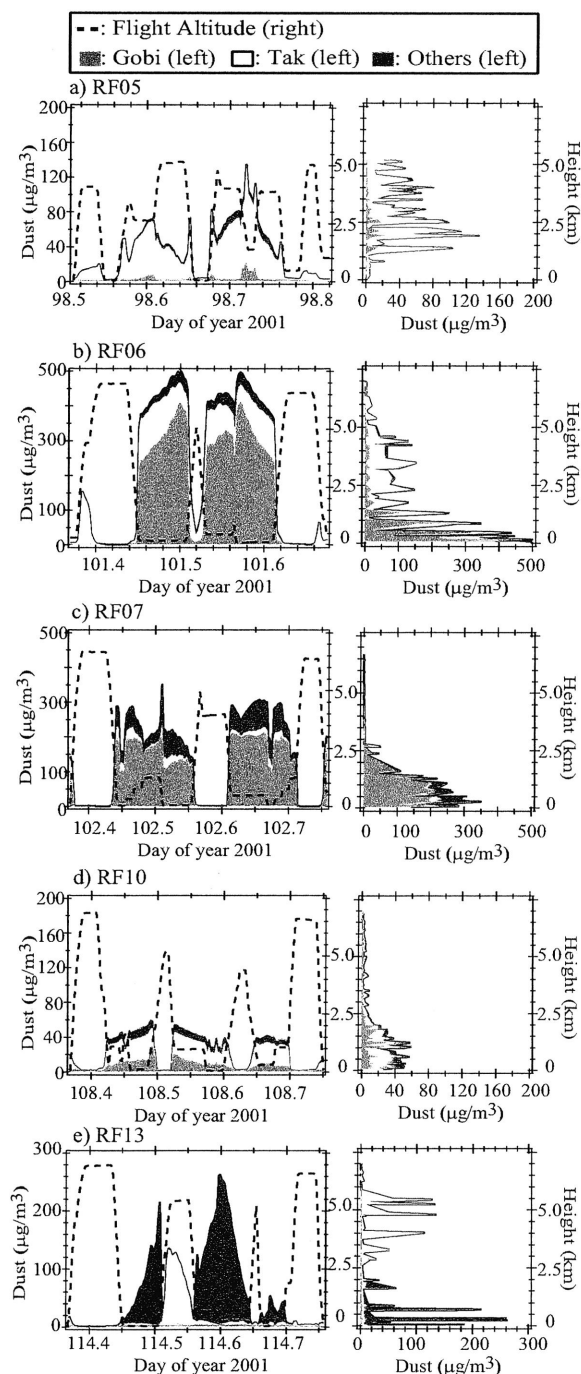
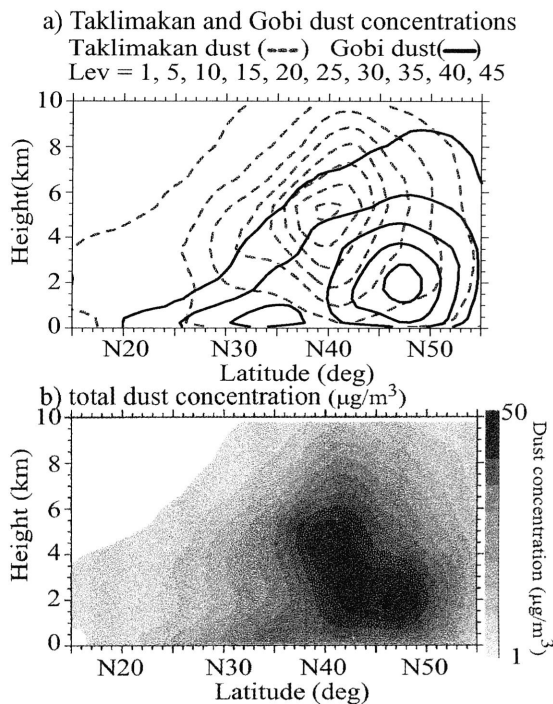


Fig. 7 Horizontal distribution of dust AOT (color) and temperature at 500 hPa level (line) for a) 4/09, b) 4/10, and c) 4/11. Time variation of the vertical profile for dust concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (color) and potential temperature (K) (line) on d) the RF06 lower and e) upper trajectories. In (a), (b), (c), (d), and (e), trajectories are represented with the green line. Green shaded circles on the trajectory are inserted at 12-h intervals. The letter 'L' in the figure shows the low-pressure system. Dust concentrations from sensitivity run Gobi and Tak are used in (d) and (e), respectively.



**Fig. 8** Results of sensitivity run (Gobi, Tak, and Others) in a) RF05, b) RF06, c) RF07, d) RF10, and e) RF13. The left column shows time variations of flight altitudes (dashed line) and dust concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The right column shows vertical profiles of dust concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Shading shows dust fractions from different deserts.

非常に多くのダストが4月9日から10日の間に発生した事が報告されている(例えば、Uno et al. (2003a)<sup>6</sup>)や Gong et al. (2003) 7)). Fig. 7 (d) から、この期間に、ゴビ砂漠でダストが大量に発生し、280–290(K)の範囲の温位面にトラップされる様子が明確に確認できる。ゴビダストは、その後、この温位レベルを維持したまま、中国のハルビン付近に中心を置く低気圧の北西風に押されて10日から11日にかけて大陸から流出し



**Fig. 9** Latitudinal cross section of the April mean dust concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) from (a) the sensitivity run Tak (dotted gray line), and the sensitivity run Gobi (black line) and (b) control run (gray scale). Each dust concentration is averaged zonally from  $125^\circ\text{E}$  to  $145^\circ\text{E}$ .

(Fig. 7(b), (c)), 11日には地表から約2kmの厚さを持ったダスト層を黄海上空に形成した(Fig. 7(c), (d))。一方、黄海上空の中部対流圏で観測された高濃度ダストは4月9日にタクラマカン砂漠で発生し(Fig. 7(e)), 295–305(K)の範囲の温位面にトラップされ、その変動に伴い輸送高度を大きく変化させながら、東へ輸送され、10日には黄土高原上空を通過している(Fig. 7(b), (c))。その後も 295–305(K)の温位レベルを保ったまま、ダストは東進し続け、11日には青島上空を通過し(Fig. 7(c))、やがて黄海上空に到達した。黄海到達時のダスト層の鉛直スケールは、ゴビダストと比較して非常に厚く、地表から高度約8kmまでの大きさであった事が Fig. 7(e)からわかる。

以上、感度解析 Gobi、Tak の結果を用いて、それぞれのダストの発生から観測地点に到達するまでの輸送構造を示した。これから4月8日から11日までに、中国内陸部を通過した低気圧が、RF06 期間中に日本付近に飛来したダストの発生・輸送に対して重要な役割を果たしていた事がわかる。また、ゴビ砂漠から発生したダストは、トラップされた温位面に従い、低い高度で南東に輸送されていた事、一方、タクラマカン砂漠から発生したダストは比較的高い高度で東に向かって輸送されていた事が確認された。さらに、ゴビダストとタクラマカンダスト間の輸送高度の差は、トラップされた温位面レベルの差に依るものである事が Fig. 7 から

**Table1:** Relative contribution of mean dust concentrations from sensitivity studies to the total dust concentration. RFall indicates the average over all research flight.

Sensitivity run Flight No.	RF05(4/08)	RF06(4/10)	RF07(4/12)	RF10(4/18)	RF13(4/24)	RFall
Tak	87%	26%	7%	57%	23%	34%
Gobi	6%	68%	72%	26%	2%	46%
Others	7%	6%	21%	17%	75%	20%

示された。

### 3.3. 起源別のダスト輸送の特徴

Fig. 8 に各観測フライトの感度実験 Tak、Gobi、Others によるダスト濃度と観測高度の時間変化と、各フライトの鉛直プロファイルを示す。ただし、感度実験 Others はタクラマカン砂漠とゴビ砂漠以外の地域からのダストの発生・輸送をシミュレートした結果である。

図から、全てのフライト、特に RF06 や RF07 で、C130 が境界層内から高度 5km 付近にまで上昇した時に、Gobi ダスト濃度が急激に減少し、また地表付近にまで下降した時に、その濃度が急激に増加する傾向が見られた。この観測高度との関係はまた、それらの鉛直プロファイルにおいて、Gobi ダスト濃度の全ダストへの寄与が、主に地表付近で大きい事からも示される。これに対して Tak ダスト濃度は、上層で高濃度のダスト層が観測されているすべてのケースで、大きな寄与が見られた。これらの事から、ゴビダストは地表付近を中心に輸送され、またタクラマカンドダストは他の起源のダストと比較して上空を輸送され易い傾向を持つ事がわかる。この特徴をより明確にするため、Fig. 9 に C130 観測領域を含む東経 125-145 度までを帯状に平均した Tak ダスト、Gobi ダスト、全ダスト濃度の 4 月における平均緯度断面を示す。これから、タクラマカンドダスト濃度が主に北緯 40 度で高度 4-6km 付近に、Gobi ダスト濃度が北緯 45-50 度で境界層内にピークを持つ事がわかり、タクラマカンドダストが比較的上空を、ゴビダストが境界層内を中心に輸送されていた事が確認できる。

Table1 には、各フライトにおける Tak、Gobi、Others ダスト濃度の全ダスト濃度に対する寄与と C130 全 19 観測フライトにおける Tak、Gobi、Others ダスト平均濃度の全ダスト平均濃度に対する寄与を示した。また、Table2 は C130 全観測フライトにおける Tak、Gobi、Others ダスト平均濃度の全ダスト平均濃度に対する各鉛直レベル毎の寄与である。Table1 から、各起源からの影響はフライトによって様々であった事がわかる。日本海上空の中部対流圏を中心として観測が行われた RF05 では、タクラマカンドダストの寄与が全ダストの 87%を占めていた。また、RF06 では、ゴビ砂漠からの寄与が 68%、タクラマカン砂漠からの寄与が 26%を、RF07 では、ゴビ砂漠からの寄与が 72%、タクラマカン砂漠からの寄与が 7%を占めていた。この二つの期間は、ACE-Asia 観測期間中、最も大規模なダストストームが日本付近に到来した期間に一致し、モデル結果はその大部

**Table2:** Relative contribution in each vertical level of mean dust concentrations from sensitivity studies to the total concentration during all research flights.

Observational height Sensitivity run	Tak	Gobi	Others
Surface - 1 km	18%	54%	28%
1km - 2km	41%	45%	14%
2km - 3km	65%	26%	9%
3km - 4km	74%	18%	8%
4km - 5km	86%	8%	6%
5km - 6km	94%	3%	3%
6km above	94%	3%	3%

分がゴビ砂漠からのダストの流出である事を説明している。

C130 観測フライト全体としては、タクラマカン砂漠による寄与が 36%、ゴビ砂漠による寄与が 46%であり、また Table2 においてゴビダストの高度 2km以下での強い寄与が見られる事から、モデルは平均で、ゴビダストの寄与が最も大きく、そしてその大部分が主に境界層内での寄与であった事を示している。

## 4. 結論

本研究では 2001 年春期を対象に化学物質輸送モデル (CFORS)を用いてダスト輸送シミュレーションを行い、NSF/NCAR-C130 航空機観測結果との比較をもとに、日本上空に飛来したダストの起源とその 3 次元輸送構造についての解析を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 航空機 C130 によって得られた各フライト期間におけるカルシウム ( $Ca^{2+}$ )と粗大粒子の平均濃度との比較を行った結果、CFORS は観測が示した高濃度時を適切に表現し、平均濃度の時間変化の特徴を正確に捉えている事がわかった。また、観測、CFORS が捉えた高濃度時のフライトを対象に、濃度の時間変化と鉛直プロファイルに関するより詳細な比較を行った結果、CFORS は C130 の高度変化に伴う濃度の増加・減少のタイミングや C130 が捉えた様々な高度でのダスト層の存在を正確に表現している事がわかった。
- 2) 日本域上空で高濃度ダストを観測した地点を対象に後方流跡線解析を行った結果、境界層内で観測されたダ

ストの起源は、主にゴビ砂漠や黄土高原等の中国内陸部の砂漠域で、中部対流圏で観測されたダストの起源は主にタクラマカン砂漠である事がわかった。また、これらの流跡線から、タクラマカン砂漠起源のダストは高度を大きく変化させながら東へ輸送され、ゴビ砂漠や黄土高原起源のダストは南東に向けて高度を徐々に減少させながら輸送されていた事がわかった。さらに RF06 期間について、ゴビ砂漠起源とタクラマカン起源のダストの輸送構造を解析した結果、それぞれ、トラップされる温度面レベルが異なり、その結果として、それらの輸送高度に大きな差が生じた事がわかった。

- 3) 高濃度が観測された各フライトについて、ゴビやタクラマカンドダストの寄与を解析した結果、ほとんどのケースで、ゴビ砂漠起源のダストは地表付近で、またタクラマカン起源のダストは中部対流圏で高い寄与を示し、さらに東経 125-145 度までにおける各起源のダスト濃度の 4 月の帯状平均から、ゴビダストは北緯 45 度から 50 度の間を比較的低い高度で輸送され、タクラマカンドダストは北緯 40 度の中部対流圏を中心に輸送される傾向を持つ事がわかった。
- 4) タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、それ以外の起源からのダスト濃度の寄与が見積もられ、ACE-Asia 観測期間中、最も大規模なダストストームを観測したフライト期間では、ゴビ砂漠からのダストが全ダスト濃度の大部分を占めていた。一方、C130 観測フライト全体としては、ゴビダストの寄与が最も大きく、また鉛直レベルにおけるダスト濃度の寄与から、その多くが、主に地表面付近での寄与であった事をモデル結果は示していた。

## 謝 辞

論文中で使用した NCAR-C130 航空機観測でのカルシウムデータはジョージア工科大学の Dr. Rodney J. Weber に、粗大粒子データはハワイ大学の Prof. Antony Clarke に提供して頂きました。ここに記して深謝します。

## 参 考 文 献

- 1) Miller, R. L., and I. Tegen, Climate response to soil dust aerosols, *J. Climate*, 11, 3247-3267, 1998.
- 2) IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell, and C. A. Johnson (Eds.), 896pp., Cambridge Univ. Press, New York, 2001.
- 3) Husar, R. B., et al., Asian dust events of April 1998, *J. Geophys. Res.*, 106, 18317-18330, 2001.
- 4) Iwasaka, Y., et al., Large depolarization ratio of free tropospheric aerosols over Taklamakan Desert revealed by lidar measurements: Possible diffusion and transport of dust particles, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8652, doi:10.1029/2002JD003267, 2003.
- 5) Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550, 2003a.
- 6) Uno, I., S. Satake, G. R. Carmichael et al., Numerical Study of Asian Dust Transport during the Springtime of 2001 simulated with the CFORS model, submitted to *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2002JD004222, 2003a
- 7) Gong, S. L.; Zhang, X. Y.; Zhao, T. L.; McKendry, I. G.; Jaffe, D. A.; Lu, N. M., Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. Model simulation and validation, *J. Geophys. Res.*, 108(D9), 10.1029/2002JD002633, 2003.
- 8) Liu, M., D. L. Westphal, S. Wang, A. Shimizu, N. Sugimoto, J. Zhou, and Y. Chen, A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8653, doi:10.1029/2002JD003178, 2003.
- 9) Satake, S., I. Uno, T. Takemura, et al. (2004): Characteristics of Asia aerosols transport simulated with the regional scale chemical transport modeling during the ACE-Asia period, *J. Geophys. Res.*, 2003JD003997 (in press).
- 10) Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, et al. (1992): A comprehensive meteorological modeling system -RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- 11) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, *J. Geophys. Res.*, 105, 17853-17873, 2000.
- 12) Uno, I., et al., 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, 2003b.
- 13) Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael and T. Nakajima, An overview of ACE-Asia: Technical Appendix, submitted to: *J. Geophys. Res.*, 2003b.
- 14) Weber, R. J., D. Orsini, Y. Duan, Y.-N. Lee, P. J. Klotz, and F. Brechtel, A Particle-into-Liquid Collector for Rapid Measurement of Aerosol Bulk Chemical Composition, *Aerosol Science and Technology* 35: 718-727.
- 15) Zhang, X. Y.; Gong, S. L.; Shen, Z. X.; Mei, F. M.; Xi, X. X.; Liu, L. C.; Zhou, Z. J.; Wang, D.; Wang, Y. Q.; Cheng, Y., Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 1. Network observations, *J. Geophys. Res.*, 108(D9), 10.1029/2002JD002632 2003.
- 16) Clarke, A. D., Y. Shinozuka, V. N. Kapustin, S. Howell, B. Huebert, S. Masonis, T. Anderson, D. Covert, R. Weber, J. Anderson, H. Zin, K. G. Moore II, and C. McNaughton, Size-Distributions and Mixtures of Black Carbon and Dust Aerosol in Asian Outflow: Physio-chemistry, Optical Properties, and Implications for CCN, submitted to: *J. Geophys. Res.*, 2003.
- 17) Walko, R. L., C. J. Tremback and M. J. Bell, HYPACT: Hybrid Particle And Concentration Transport Model User's Guide. ASTER Division, Mission Research Corp. 2001.