

3. 風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する日中共同研究 (ADEC)

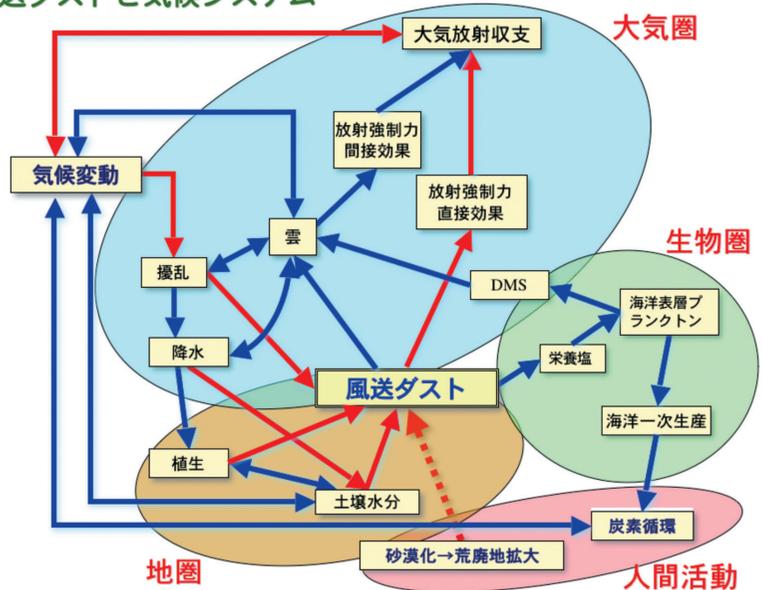
三上正男*

1. はじめに

大陸の乾燥・半乾燥域から強風により舞い上がる風送ダストは発生域の大気環境や社会生活に大きな影響を与えるばかりでなく、気候システムの重要な因子ともなっている (第1図)。大気中に浮遊する風送ダストは日射と赤外放射の吸収・散乱による放射強制力 (直接効果) と共に氷晶核や雲粒核として雲の形成に関わる間接的な放射強制力を持つ。また、海洋に沈着したダスト粒子は、海洋表層のプランクトンの栄養塩 (特に鉄分) として働き、大気-海洋系の炭素循環に関わると共に、プランクトンが放出する DMS (dimethyl sulfide; 硫酸ジメチル) は硫酸エアロゾルとして海洋上の雲核の形成に関わっていると考えられている。

このように、風送ダストは気候システムと密接な関係を持っていることがわかりはじめたが、砂漠におけるダストの発生過程から長距離輸送過程、ダスト粒子特性ならびに光学特性の実態把握に至る風送ダスト-気候系の総合的調査研究はこれまで行われておらず、依然風送ダストの気候システムの中での諸過程に

風送ダストと気候システム



第1図 風送ダストと気候システムのシステムダイアグラム (Mikami *et al.*, 2005b を改編)。

についての理解は不十分であった (IPCC 2001)。

ADEC (Aeolian Dust Experiment on Climate Impact, 風送ダストの気候インパクトに関する観測研究) プロジェクトは、このような背景の元に、日中共同研究として立案実行された (Mikami *et al.*, 2002; Mikami *et al.*, 2005b)。風送ダストの気候システムにかかわる諸過程は第1図に示すように極めて複雑多様であるが、ADECが目指したものは、ダストの放射強制力の定量的評価の内、図中赤い矢印で示した直接効果による放射強制力評価とそれに係わる風送ダストの発生・長距離輸送過程の解明である。

* 気象研究所。

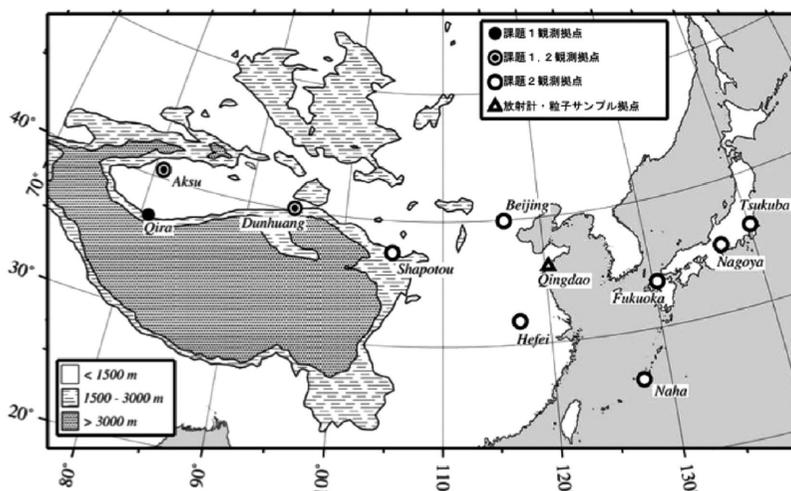
2. 東アジアダスト観測ネットワークの構築とモデル研究

最大のダスト供給源であるサハラ砂漠では地球観測衛星と航空機C130による風送ダストの総合観測SHADE (Saharan Dust Experiment; Tanré *et al.*, 2003) などが実行されてきたが、内陸部に多くの砂漠乾燥地帯を抱える東アジアでは、この種の大規模観測計画はこれまで実行されておらず、ダストの実態把握が遅れていた。

ADECでは、こうした空白を埋めるべく、ダスト発生域のタクラマカン砂漠 (80°E) から沈着域の日本 (140°E) に至る東西6000 km の領域に11か所のネットワーク観測拠点を設定し (第2図), 2001年から2003年の春季に計3回の集中観測を実施し、ダストによる放射強制力直接効果にかかわる全過程の実態把握を目指した。タクラマカン砂漠と敦煌では、新開発のSPC (Sand Particle Counter, 飛砂粒子計数器) と野外用のOPC (Optical Particle Counter, 光学式粒子計数器) 並びにAWS (Automatic Weather Station, 地上気象自動観測装置) を用いたダスト発生 の精密観測を行った。また、発生域のタクラマカン砂漠から日本に至る各観測拠点でライダー、放射計、サンプラーの

三位一体の運用による観測も実施した (第1表)。集中観測期間を通じて観測者の利便性のため全球ダストモデルMASINGAR (Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere) によるダストストームの発生予測実験結果がWebを通じて現地に提供された。

集中観測は、ダストモデルによる大気中ダスト分布とそれによる直接効果の評価で用いられる各プロセスの境界条件、パラメタリゼーション並びに検証用の知見を得ることを目標としており、プロジェクト全体を通して観測・解析・モデルが相互に連携しつつ課題目標を達成することが目指された。



第2図 ADEC ネットワーク観測地点展開図 (in situ はダスト発生モニタリング, network は輸送と粒子特性の観測を示す)。

第1表 ADEC 各観測地点の位置と測定要素一覧 (Mikami *et al.*, 2005b を改編)。

地点名	国	緯度	経度	地上観測			ネットワーク観測				
				飛砂・ダスト 飛散観測	AWS	ライダー	放射計	ハイボリウム サンプラー	アンダーセン サンプラー	乾性 沈着	OPC
Qira	China	37°01'	80°44'	○	○		○	○	○	○	○
Aksu	China	40°37'	80°44'		○	○	○	○	○	○	○
Dunhuang	China	40°08'	94°41'	○	○	○	○	○	○	○	○
Shapotou	China	37°28'	104°60'		○	○	○	○	○	○	○
Beijing	China	39°56'	116°21'				○	○	○	○	
Qingdao	China	36°01'	120°20'				○	○	○	○	
Hefei	China	31°54'	117°10'			○		○	○	○	
Naha	Japan	26°12'	127°41'				○	○	○	○	
Fukuoka	Japan	33°33'	130°22'				○	○	○	○	
Nagoya	Japan	35°09'	136°58'				○	○	○	○	
Tsukuba	Japan	36°04'	140°08'				○	○	○		○

3. ダスト発生プロセスの解明

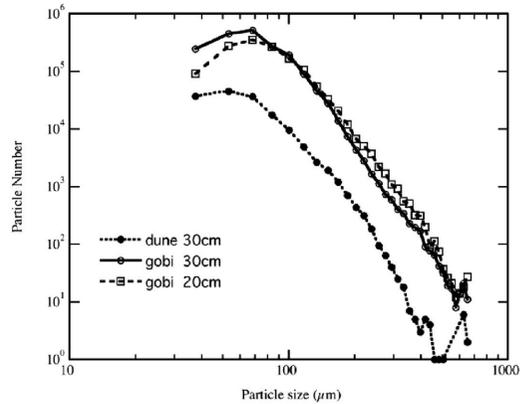
ダストの大気中への供給量のモデル評価において、地表面からのダストフラックスは最も重要な情報である。ダストの発生は、主として、直径およそ数十から数百 μm の砂粒子が強風で舞い上がり（飛砂）、飛砂粒子が地面に落下した時の衝撃で直径数 μm 以下のダスト粒子が空气中に飛び出す Saltation Bombardment 過程による事が知られている。飛砂及びダストの発生に関しては、Bagnold (1941) による体系化以降、理論・モデル双方が精緻化してきたが、本質的には Bagnold 理論を超えてはいない。これは、これまで現実の砂漠で粒径別の飛砂の飛散数やダスト粒子のフラックスを精密に測定する事が出来なかった事が理由の1つである。

ADEC では、飛砂とダスト粒子の粒径と飛散量を精密（多チャンネル、毎秒）に測定する装置の開発を行い、中国タクラマカン砂漠と敦煌で舞い上がり過程を直接観測する事に世界で初めて成功した。その結果、第3図に示すように、飛砂発生量は砂砂漠よりも砂礫砂漠の方が遙かに多く、それが地表面表層の土壤粒径分布の差によるものであることや、粒径別の飛砂フラックスの高度依存性を明らかにすることが出来た (Mikami *et al.*, 2005)。また、飛砂フラックスの土壤水分依存性が臨界風速の差として現れること（第4図）やそれが粒径に依存することを初めて観測で裏付けることが出来た (Ishizuka *et al.*, 2005)。現在、こうした観測事実を説明するための新たな飛散理論の構築が進められつつある (Shao and Mikami, 2005)。

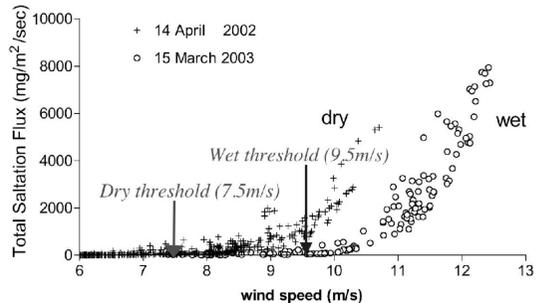
また、敦煌周辺の砂礫砂漠、砂砂漠およびオアシス内休耕地の同時観測により、自然状態の地表面条件に比べ、人為的地表面の休耕地では、より飛砂が舞い上がりやすい事も明らかとなった (Du *et al.*, 2002)。

4. 東アジアにおける風送ダストの実態解明

ライダーは、後方散乱係数と偏光解消度から、大気中のダストの鉛直分布をモニターすることが出来る有力な観測手段である。ADEC では、発生域のタクラマカン砂漠から日本に至るライダー観測網により、ダストの長距離輸送過程のモニタリングを行った。沙坡頭では高いダスト濃度を伴う高さ 6 km に達する深い混合層が安井らにより観測され（第5図）、同様のダストを伴う深い混合層は、第6図に示すように敦煌における大気球を用いたサンプリングでも確認されている (Iwasaka *et al.*, 2003)。一方、発生域の風下のつ



第3図 タクラマカン砂漠の砂礫砂漠 (gobi, 地上20 cm と30 cm) と砂砂漠 (dune, 地上30 cm) における粒径別飛砂飛散数 (Mikami *et al.*, 2005a)。



第4図 タクラマカン砂漠砂礫砂漠上 (20 cm) の乾燥時 (dry, 2002) と湿潤時 (wet, 2003) の飛砂フラックスと風速 (Ishizuka *et al.*, 2005)。

くばでは、ラマンライダーにより 6~9 km の高さに氷晶雲を伴ったダスト層が観測されている (Sakai *et al.*, 2004)。

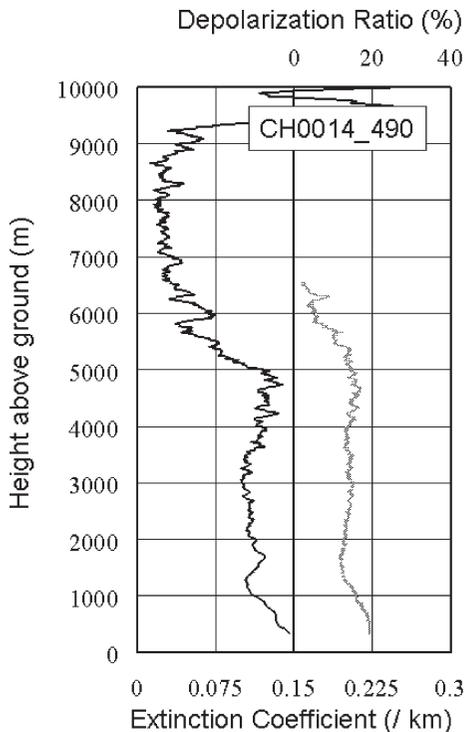
こうした、東アジアのダスト層の鉛直構造について、Uno *et al.* (2004) は領域化学輸送モデル C-FORS (Chemical weather FORecasting System) を用いて2001年4月の“Perfect Dust Storm”の数値実験を行い、タクラマカン砂漠起源のダストが自由大気中~上層を輸送され、黄土高原起源のダストが自由大気下層を輸送される東アジアダストの多層構造を描き出した (第7図)。このように、東アジアのダストは、サハラ砂漠のダストとは異なり、内陸部に広がる発生域は複雑多様な3次元地形と地表面状態を持っており、その発生と長距離輸送の実態は複雑である。

ライダー観測と併せて各ネットワーク地点で2001年3月から2004年4月まで3年間にわたりエアサンプラーによるダスト粒子の直接採取を行った。風送ダスト発生域においては、エアロゾルは主に土壌粒子からなり、 $3.3\sim 7.0\ \mu\text{m}$ 領域にピークを持つ一峰性粒径分布を示すが、土壌粒子の飛散が少ない冬季は、石炭燃焼に伴うと思われる硫酸アンモニウム ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) を主成分とするピークがサブミクロン領域にみられ、二峰性粒径分布を示す (Yabuki *et al.*, 2005)。タクラマカン砂漠では2002年の春季には全浮遊粒子濃度 (TSP: Total Suspended Particulate Matters) が $26\ \text{mgm}^{-3}$ を超える高濃度のダストが観測されたが同時に年々変動も極めて大きい。発生域の土壌粒子は、石英、長石、雲母、緑泥石等のケイ酸塩鉱物の他に、方解石 (CaCO_3)、岩塩 (NaCl)、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 等の塩類鉱物も含まれていた (Yabuki *et al.*, 2002)。

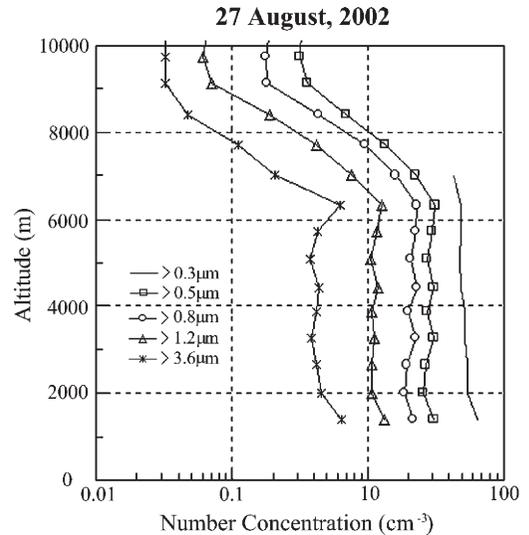
一方、北京からつくばに至る風下域では、黄砂時には $0.5\ \mu\text{m}$ 付近の人為起源物質によるピークとダスト

成分と見られる $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 付近のピークの二峰性の粒径分布を示し、前者はブラックカーボンや NH_4^+ 、 SO_4^{2-} が多く含まれ、後者の粗大粒子の主要水溶性組成としては Na^+ 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- と Cl^- が検出されている (Kanayama *et al.*, 2005)。

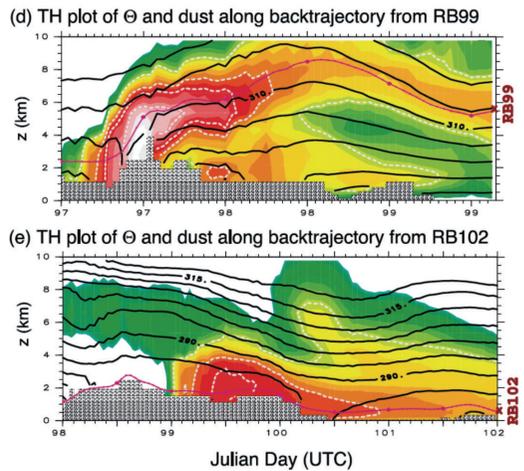
東アジアダストは大陸の沿岸部を経て日本に輸送される過程で、他のエアロゾルとの混合を起こすと考えられるが、ADEC 期間中の観測でも福岡雷山上空の



第5図 中国沙坡頭で観測されたダストを伴う混合層の鉛直プロファイル (2002年4月13日) (情報通信研究機構安井元昭氏提供)。



第6図 敦煌上空のエアロゾル数濃度プロファイル (2002年8月27日, Iwasaka *et al.*, 2003)。



第7図 CFORS でシミュレートされたタリム盆地起源のダスト (上図) 黄土高原起源のダスト (下図) の時空間断面図 (2001年4月, Uno *et al.*, 2004)。

自由大気下層で無人飛行機を使ったサンプリングでも海塩粒子と内部混合したダストが報告されている (Yamashita *et al.*, 2005)。

さて、ダストによる放射強制力の直接効果を定量的に評価するためには、大気中ダストの粒径別三次元分布に加えて、ダスト粒子の光学特性が正しく表現されていないと評価できない。なかでも、吸収特性をあらわす一次散乱アルベドは重要である (Nakajima *et al.*, 2003)。これまで、ダストの一次散乱アルベドは、比較的吸収性の強い値を取ると考えられていたが、今回の ADEC による東アジアダストの結果 (Uchiyama *et al.*, 2005) は、最近のサハラダストの結果 (Kaufman *et al.*, 2001; Haywood *et al.*, 2003) と同様、より吸収性の弱い値を示すことが分かってきた。

また、Aoki *et al.* (2005) の感度実験によれば、大気上端の放射強制力に対する複素屈折率 (エアロゾルの光吸収散乱特性) の感度は地表面アルベドに強く依存しており、ダストの放射強制力直接効果の評価精度のためには、ダスト粒子、地表面それぞれの光学パラメーターが重要であることが分かる。

5. 風送ダストの気候インパクト

ADEC では、全球ダストモデル (MASINGAR; Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere) を開発し (Tanaka and Chiba, 2005)、世界の各砂漠からのダスト供給量と大気中ダスト分布をモデルにより再現すると共に、ADEC で得られたダストの光学特性を考慮したダスト光学モデル (ADEC2) を用いて、大気中のダスト分布からダストによる放射強制力直接効果を評価した (第 8 図)。

ダストは日射に対して弱いながらも吸収特性を示すため大気を加熱するが、同時に日射の散乱により、地表面の日射量を減少させる。ダストがアルベドが高い雪氷面や雲の上空に滞留している時には大気加熱が散乱を凌駕し、大気-地表系を暖める側 (正の放射強制力) に作用し、アルベドの低い植生や海洋上では負の強制力に働く。結果として、全球全体で平均すると、ダストは弱い負の強制力を示す。

これまで全球ダストモデルで広く用いられてきた光学モデル (OPAC3.1; Optical Properties of Aerosols and Clouds) と ADEC ダスト光学モデル (ADEC2) による大気上端の放射強制力 (1998~2002 年の 5 年平均) で比較すると、OPAC モデル (第 8 図 a) では砂漠域に加え極域など広い範囲で弱い正の

強制力を示すのに対し、OPAC モデルよりも弱い吸収特性を与える ADEC2 モデル (第 8 図 b) では、地表面アルベドが高い砂漠域を除く大部分で負の強制力を示しており、とりわけ短波長域ではほぼ全球で負の強制力を示している (図省略)。しかし、ADEC2 モデルは OPAC モデル同様、長波長域の吸収による正の強制力が働き、全波長の強制力は、全球平均値で ADEC2 モデルが -0.22 Wm^{-2} 、OPAC モデルが -0.01 Wm^{-2} と共に小さな値を示す。また、このような全球スケールの影響ばかりではなく、放射強制力が全球年平均では小さくとも、季節的・局所的には大きな値を示すため、モンスーン循環などローカルな循環場に与える影響は無視できないと考えられる。

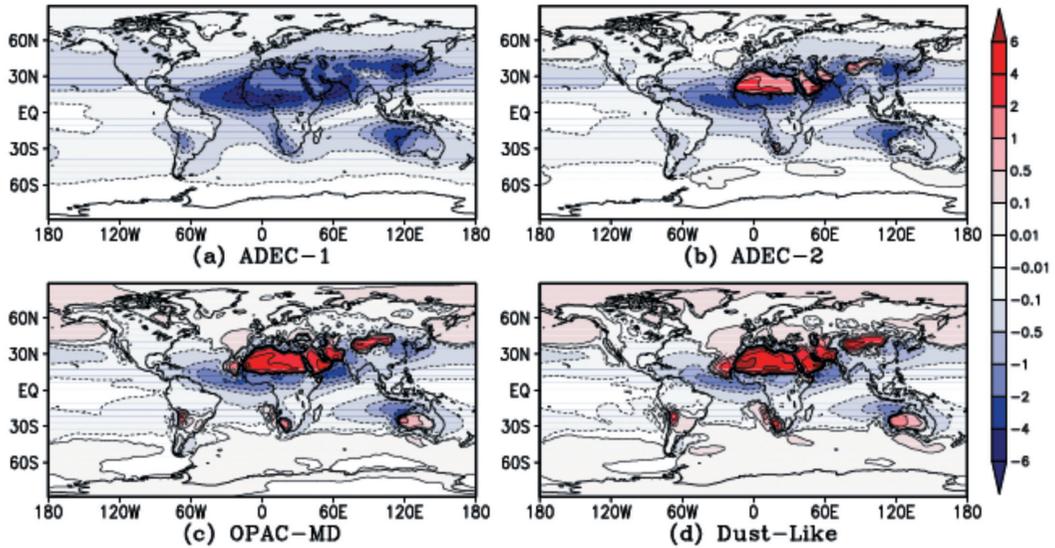
ADEC では、モデルによる放射強制力評価と共に、現在のダストモデルの現状と課題を明らかにするためのダストモデル国際比較実験 (DMIP; Dust Model Intercomparison; Uno *et al.*, 2006) も行い、世界各国から 9 つのモデルが実験に参加した。これによれば、現在のモデルによるダスト分布の再現性は放射強制力の直接効果の定量的評価に十分な精度を有しているとは言えず、各地域のダスト粒子の光学特性の把握と共に直接効果の定量的評価には依然解決すべき課題が残されている。

この他、ダスト粒子が雲核や氷晶核となって雲の生成にかかわる事による間接効果に関しても、ADEC では、いくつかの重要な知見が得られている。先にも述べた、東アジアで観測されるダスト層の多層構造について、Tanaka *et al.* (2005) は、MASINGAR を用いて 2003 年 3 月にアフリカ・中近東で発生した大規模ダストストームの数値実験を行い、第 9 図に示すように、東アジア内陸部のタクラマカン砂漠から日本に至る各地の自由大気中層にアフリカ・中近東起源のダストが輸送されている姿を再現した。このモデル結果は ADEC 集中観測期間中のライダー観測結果とも整合している。

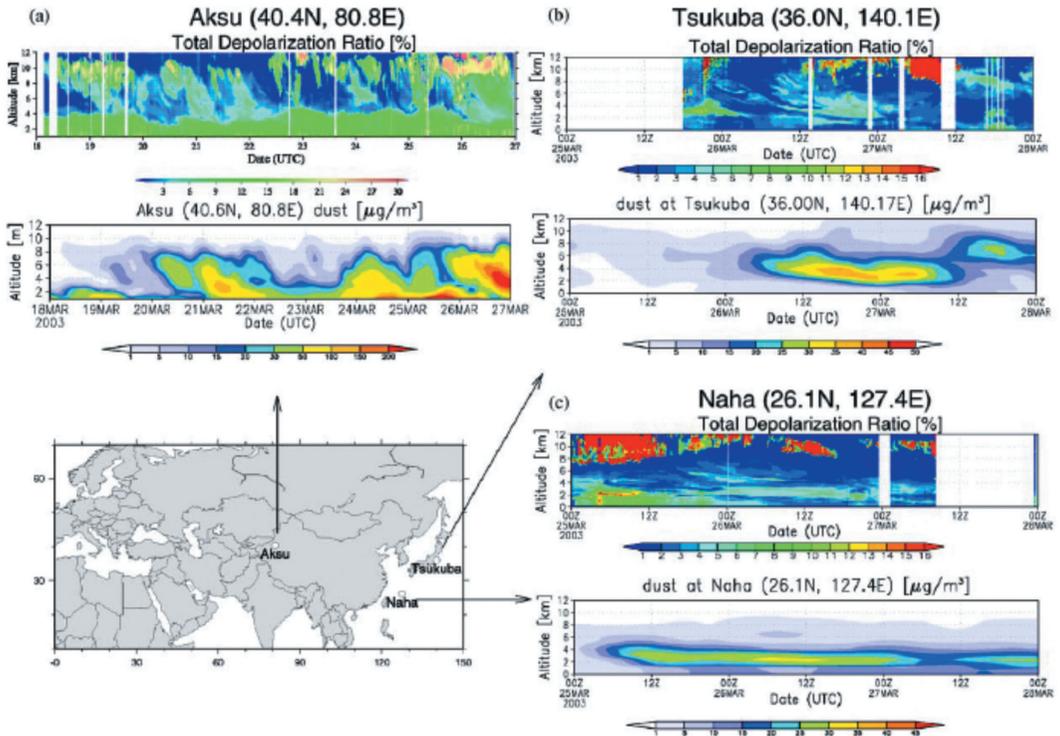
このモデルの評価によれば、同時期日本上空のダスト総量の内、約 50% が北アフリカ起源で 30% が中東起源であった。2003 年の 3 月は、北東アジアの積雪面が例年よりも多く、このため東アジアのダストストームの発生は非常に少なかったものの、この例のように、東アジア起源のダストのみならず、アフリカ起源のダストも日本の自由大気上部を移流している可能性がある。

先に述べた ADEC 期間中つくばのラマンライダー観測の解析から、自由大気上層のダストが氷晶核とし

TOA radiative perturbation



第 8 図 MASINGAR で計算された1998~2002年平均のダストによる放射強制力直接効果（大気上端値）の年平均値。4つの図はそれぞれ (a) ADEC-1 (b) ADEC-2, (c) OPAC3.1, (d) DustLike モデルの結果を示す (Tanaka *et al.*, 2006)。



第 9 図 MASINGAR でシミュレートされたアフリカ・中東起源のダスト（2003年3月）の長距離輸送途上3地点の時空間断面図（上図）とライダー偏光解消度の時空間断面図（下図） (Tanaka *et al.*, 2005)。

て働き、通常よりも高い温度環境で絹雲を生成している事例が報告されている (Sakai *et al.*, 2004). これはダストによる放射強制力の間接効果の1つとして近年注目されはじめているが (Murayama, 2001; Sassen, 2005), 現在までのところ、このような絹雲生成過程がどの程度存在しているか、あるいはそれがどの程度の間接効果を与えるのかなどについて、実態が不明である。また、ダスト粒子そのものは非水溶性であるが、長距離輸送途上の人為起源エアロゾルとの混合過程を通じて水溶性を獲得し、それが凝結核となり雲の生成にかかわる間接効果も東アジアでは近年特に注目されABC計画 (Atmospheric Brown Clouds, 茶色雲に関する研究計画) のトピックスともなっている (<http://www-ABC-ASIA.ucsd.edu/>).

このように、ダストの放射強制力による気候インパクトに関しては、直接効果並びに間接効果による多様な道筋が考えられるが、IPCC2001時点から大きな研究の進展があったものの、現時点では依然としてその評価の不確実性は高い。全過程の解明と定量的評価のためには、基礎的な観測事実の集積と研究の進展が必要である。

6. 大規模観測プロジェクトと気象学

これまで見てきたように、ADECは東アジア初のダストに関する大規模な野外観測研究として、またダストの発生過程から放射強制力に至るダスト-気候系の解明を目指して実施された初めての国際共同研究として多くの成果を挙げることが出来た。しかし、ダスト-気候系の全体像の理解に関しては、研究は未だ端的段階にあると考えられ、今後関連する研究コミュニティと連携・協調しつつ研究を進めてゆく必要があると思われる。

もとより、地球科学の研究対象は、国境を越えたスケールを持つ地球システムの理解であり、その実態把握のために大規模観測プロジェクトを立案・実行する意義はあるはずであるが、とりわけ気象学にとっては、大規模観測プロジェクトには2つの意義がある。

1つは、例えば鉍物質エアロゾルをキーワードとして実施されたADECの様に、プロジェクトを通じて大気境界層や放射などの気象学と鉍物質、生物学など地球科学の多様な学問分野の研究者による共同研究が実施でき、学際的な共同研究による地球システムの理解を進めることが可能となる事である。

さらに、2番目の意義としては、「計算機の中の仮

想空間を通じて世界を見ることは出来るが、確かな事実は何1つ得られない」モデル研究と「事実をつかんではいないが、世界は見る事が出来ない」観測研究が連携する事による研究の進展である。モデル研究は、観測データによる検証を必要とし、個別特殊な観測事実はモデル研究により普遍的な法則性へと昇華される。プロジェクト研究は、この観測-モデル研究による研究のダイナミズムを生み出す土壌たり得る。

気象学をはじめ地球科学の多くの領域は、依然として欧米が主導している現状がある。日本における気象学は、言語や米国企業による研究評価の流通等不利な条件の中で、これからも研究の質とプレゼンスを高め続けなければならない。限られた人的・物的資源の中で、それらを実現するためには、今後どんな研究領域・課題についてブレイクスルーする必要があるのか? という、世界的な基準から見た研究への展望を持つ事と、日本が持ちうる人的・物的そして地理的条件に踏まえ、どの領域のどんな問題について世界的レベルの新しい研究を作り出すのか? という戦略を持つことが必要である。その意味で、アジアを研究対象とした大規模観測プロジェクトを推進することは、アジアへの貢献という意義に加えて、我が国及びアジア諸国の気象学の発展に寄与する意味で重要である。

近年大型プロジェクトについては、東アジアへの貢献といった国際協力だけでなく国内での成果や波及効果を求める傾向にあり、大気科学のように国境を越えた問題については、他の国家的な重点研究分野との競争が激しくなりつつある。しかし、東アジアを主要な調査研究領域とした大規模観測プロジェクトに対する社会的あるいは学問的要請は、今後も増えてゆくものと思われる。我々はアジア諸国の研究コミュニティと連携を図りつつ、アジアでなければ出来ない大規模観測プロジェクトの提案を積極的に進めてゆくべきである。

謝 辞

日中共同プロジェクト ADEC の日本側の研究は、科学技術振興調整費の総合研究「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」(平成12~16年度)として、文部科学省の予算により実施された。

参 考 文 献

Aoki, T., T. Y. Tanaka, A. Uchiyama, M. Chiba, M.

- Mikami, S. Yabuki and J. Key, 2005 : Sensitivity Experiments of Direct Radiative Forcing by Mineral Dust using Spectrally Detailed Radiative Transfer Model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 315-331.
- Bagnold, R. A., 1941 : *The physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London. 320pp.
- Du, M., 2002 : Wind Erosion Processes during Dust Storm in Dunhuang, China, *Proceedings of 12th ISCO Conference*, 624-629.
- Haywood, J., P. Francis, S. Osborne, M. Glew, N. Loeb, E. Highwood, D. Tanré, G. Myhre, P. Formenti and E. Hirst, 2003 : Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE : 1. Solar spectrum, *J. Geophys. Res.*, **108**(D18), 8577, doi : 10.1029/2002JD002687.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001 : *Climate Change 2001. The Scientific Basis*, edited by J. T. Houghton *et al.*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Ishizuka, M., M. Mikami, Y. Yamada, F. Zeng and W. Gao, 2005 : An observational study of soil moisture effects on wind erosion at a gobi site in the Taklimakan Desert, *J. Geophys. Res.*, **110**, D18S03, doi : 10.1029/2004JD004709.
- Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, M. Yamada, A. Matsuki, D. Trochkin, Y. S. Kin, D. Zhang, T. Nagatani, T. Shibata, M. Nagatani, H. Nakata, Z. Shen, G. Li and B. Chen, 2003 : Importance of dust particles in the free troposphere over the Taklimakan Desert : Electron microscopic experiments of particles collected with a balloonborne particle impactor at Dunhuang, China, *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), doi : 10.1029/2002JD003270.
- Kanai, Y., Ohta, A., Kamioka, H., Terashima, S., Imai, N., Kanai, M., Shimizu, H., Takahashi, Y., Kai, K., Hayashi, M., Zhang, R. and Sheng, L. 2005 : Characterization of Aeolian Dust in East China and Japan from 2001 to 2003, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 73-106.
- Kaufman, Y. J., D. Tanre, O. Karnieli and L. A. Remer, 2001 : Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground-based remote sensing, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(8), 1479-1482.
- Mikami, M., O. Abe, M. Du, O. Chiba, K. Fujita, M. Hayashi, Y. Iwasaka, K. Kai, K. Masuda, T. Nagai, T. Oomoto, J. Suzuki, A. Uchiyama, S. Yabuki, Y. Yamada, M. Yasui, G. Shi, X. Zhang, Z. Shen, W. Wei and J. Zhou, 2002 : The impact of aeolian dust on climate : Sino-Japanese cooperative project ADEC, *J. Arid Land Studies*, **11**, 211-222.
- Mikami, M., Y. Yamada, M. Ishizuka, T. Ishimaru, W. Gao and F. Zeng, 2005a : Measurement of saltation process over gobi and sand dunes in the Taklimakan desert, China, with newly developed sand particle counter, *J. Geophys. Res.*, **110**, D18S02, doi : 10.1029/2004JD004688.
- Mikami, M., G.-Y. Shi, I. Uno, S. Yabuki, Y. Iwasaka, M. Yasui, Te. Aoki, T. Y. Tanaka, Y. Kurosaki, K. Masuda, A. Uchiyama, A. Matsuki, T. Sakai, T. Takemi, M. Nakawo, N. Seino, M. Ishizuka, S. Satake, K. Fujita, Y. Hara, K. Kai, S. Kanayama, M. Hayashi, M. Du, Y. Kanai, Y. Yamada, X.-Y. Zhang, Z. Shen, H. Zhou, O. Abe, T. Nagai, Y. Tsutsumi, M. Chiba and J. Suzuki, 2005b : Aeolian Dust Experiment on Climate Impact : An Overview of Japan-China Joint Project ADEC, *Global Planetary Change*, **52**, 142-172, doi : 10.1016/j.gloplacha.2006.03.001.
- Murayama, T., 2001 : Formation of ice cloud from Asian dust particles in the upper troposphere, *Proc. of SPIE*, **4153**, 218-225.
- Nakajima, T., M. Sekiguchi, T. Takemura, I. Uno, A. Higurashi, D. Kim, B. J. Sohn, S. N. Oh, T. Y. Nakajima, S. Ohta, I. Okada, T. Takamura and K. Kawamoto, 2003 : Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region, *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8658, doi : 10.1029/2002JD003261.
- Sakai, T., T. Nagai, M. Nakazato and T. Matsumura, 2004 : Raman lidar measurement of water vapor and ice clouds associated with Asian dust layer over Tsukuba, *Japan Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06128, doi : 10.1029/2003GL019332.
- Sassen, K., 2005 : Dusty ice clouds over Alaska, *Nature*, **434**, 456.
- Shao, Y. and M. Mikami, 2005 : Heterogeneous Saltation : Theory, Observation and Comparison, *Bound-Layer Meteor.*, **115**, 359-379.
- Tanaka, T. Y. and M. Chiba, 2005 : Global Simulation of Dust Aerosol with a Chemical Transport Model, *MASINGAR, J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 255-278.
- Tanaka, T. Y., Y. Kurosaki, M. Chiba, T. Matsumura, T. Nagai, A. Yamazaki, A. Uchiyama, N. Tsunematsu and K. Kai, 2005 : Possible transcontinental dust transport from north Africa and the middle east to east Asia, *Atmos. Environ.*, **39**, 3901-3909.
- Tanaka, T. Y., T. Aoki, H. Takahashi, K. Shibata, A. Uchiyama and M. Mikami, 2006 : Sensitivity Study of the Optical Properties of Mineral Dust on the Direct Aerosol Radiative Perturbation Using a Global Aero-

- sol Transport Model, SOLA, submitted.
- Tanré, D., J. Haywood, J. Pelon, J. F. Léon, Chatenet, P. Formenti, P. Francis, P. Goloub, E. J. Highwood and G. Myhre, 2003 : Measurement and modeling of the Saharan dust radiative impact : Overview of the Saharan Dust Experiment (SHADE), *J. Geophys. Res.*, **108**(D18), 8574, doi : 10.1029/2002JD003273.
- Uchiyama, A., A. Yamazaki, H. Togawa, J. Asano and G. Shi, 2005 : Single Scattering Albedo of Aeolian Dust as Inferred from Sky-radiometer and in situ Ground-based Measurement, *SOLA*, **1**, 209-212.
- Uno, I., S. Satake, G. R. Carmichael, Y. Tang, Z. Wang, T. Takemura, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Murayama, T. A. Cahill, S. Cliff, M. Uematsu, S. Ohta, P. K. Quinn and T. S. Bates, 2004 : Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model, *J. Geophys. Res.*, **109**, D19 S24, doi : 10.1029/2003JD004222.
- Uno, I., Z. Wang, M. Chiba, Y. S. Chun, S. L. 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 and D. L. Westphal, 2005 : Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia-Overview, *J. Geophys. Res.*, **111**, D12213, doi : 10.1029/2005JD006575.
- Yabuki, S., Kanayama, S., Fu, F., Honda, M., Yanagisawa, F., Wei, W., Zeng, F., Liu, M., Shen, Z. and Liu L., 2002 : Physical and Chemical Characteristics of Aeolian Dust Collected over Asian Dust Source Regions in China—Comparison with Atmospheric Aerosols in an Urban Area at Wako, Japan, *J. Arid Land Studies*, **11**(4), 273-289.
- Yabuki, S., M. Mikami, Y. Nakamura, S. Kanayama, F. Fu, M. Liu and H. Zhou, 2005 : The Characteristics of Atmospheric Aerosol at Aksu, an Asian Dust-Source Region of North-West China : A Summary of Observations over Three Years from March 2001 to April 2004, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 45-72.
- Yamashita, K., M. Hayashi, M. Irie, K. Yamamoto, K. Saga, M. Ashida, K. Shiraishi and K. Okabe, 2005 : Amount and State of Mineral Particles in the Upper Mixed Layer and the Lower Free Troposphere over Mt. Raizan, Southwestern Japan : Unmanned Airplane Measurements in the Spring of 2003, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 121-136.
-