

「風送ダストの気候影響に関する日中共同研究」に係る 「第4回 ADEC ワークショップ」報告

山本 哲*¹ 三上 正男*² 安井 元昭*³ 矢吹 貞代*⁴
鵜野 伊津志*⁵ 内山 明博*⁶

1. 概要

「第4回 ADEC ワークショップ」が2005年1月26日から28日まで長崎市の長崎全日空ホテル・グラバービルにおいて、主催：ADEC ワークショップ組織委員会（委員長：藤谷徳之助気象研究所長ほか9名の研究者・専門家で構成）ならびに文部科学省・中国科学院・気象庁気象研究所・中国科学院大気物理研究所、共催：理化学研究所により開催された。

大陸の砂漠乾燥域から強風により舞い上がる鉱物性の微粒子を風送ダスト (aeolian dust) といい、日本に飛来するものは「黄砂」と呼ばれているが、これは放射を吸収・散乱・射出することで、地球上の放射バランスを変化させ、気候に影響を与える要因のひとつとされている (IPCC, 2001)。ADEC (Aeolian Dust Experiment on Climate Impact) は、こうした風送ダストの気候影響評価を目標とした、日中科学技術協力協定に基づく2000年度から5か年計画の国際共同研究プロジェクト (Mikami *et al.*, 2002) である。2001年度以降毎年1回、その時点での研究のまとめを行う

ワークショップを日中両国などで開催してきたが、今回は最終年度にあたり、ADECの到達点を総括し、今後の風送ダスト研究の展望について議論するために開かれた。ワークショップには日本・中国をはじめ韓国・米国・オーストラリア・カナダ・ドイツ・香港から141名の風送ダスト研究者・専門家が参加した (第1図)。気象研究所は、日本側研究取りまとめ機関としてADECの推進を図って来たが、今回のワークショップの日本開催にあたり事務局を担当した。

風送ダストの気候影響に関する研究は、地球温暖化問題に係る重要なテーマとして、世界中で推進されている (Zender *et al.*, 2004) が、ADECのユニークな点は、風送ダスト発生域の中国タクラマカン砂漠から日本に至る領域で、ダストの発生メカニズムや粒子特性から長距離輸送過程までの総合的な観測・測定と領域モデルによる輸送拡散過程の解析を初めて行い、その実態を明らかにするとともに、全球ダストモデルの開発を行い風送ダストが気候に及ぼす影響を定量的に評価した点にあると思われる。

今回のワークショップでは、口頭発表は、ADEC各課題担当者による総括的な報告および招待講演35件に限り、個々の成果などについては60件の発表をポスター形式で行った。以下、当日の口頭発表セッション分けて沿ってワークショップの議論の内容を報告することで、あわせてADECの成果を紹介したい。

なお、ADECの成果については2005年発行の「気象集誌」ADEC特集 (第83A巻) にもまとめて掲載されている。また、ワークショップのプロシーディングスには若干の残部があるので、希望者は筆者まで連絡願いたい。ADECウェブサイト <http://www.aeolian-dust.com/> から全文のダウンロードも可能である。プロシーディングスの書式は英文レター誌「SOLA」に準拠させることで、発表者の便宜を図った。(山本 哲)

* Report on the Fourth ADEC Workshop-Aeolian Dust Experiment on Climate Impact-

*¹ Akira YAMAMOTO, 気象研究所環境・応用気象研究部。(現所属：独立行政法人 国立環境研究所地球環境研究センター)

*² Masao MIKAMI, 気象研究所環境・応用気象研究部。

*³ Motoaki YASUI, 情報通信研究機構電磁波計測部門。

*⁴ Sadayo YABUKI, 理化学研究所ビームアプリケーションチーム。

*⁵ Itsushi UNO, 九州大学応用力学研究所。

*⁶ Akihiro UCHIYAMA, 気象研究所気候研究部。

© 2005 日本気象学会



第1図 会議出席者による集合写真（1日目の昼食会場となった「ちゃんぽん」発祥の店と称される中華料理店の階段にて）。

2. 風送ダストの飛散過程

このセッションでは、風送ダストの発生に関する研究成果が発表された。風送ダストは強風により地表面から飛散するが、この飛散過程には、摩擦速度の他に地表面の粗度、土壤粒径分布、土壤水分、植生等様々なパラメーターが関係しており、そのプロセスも主に数10～数100 μm 前後の飛砂の飛散（サルテーション）と数～数10 μm のダスト粒子の舞い上がり過程に分けられる。

口頭発表では、最初に日本側の課題代表者の三上（気象研究所）より日中共同 ADEC プロジェクトの研究目標、研究課題、成果の概要について報告がなされた後、風送ダストの飛散過程の研究成果が4件発表された。杜（農業環境技術研究所）らは、自然状態の砂礫砂漠及び人為的に改変が加えられた休耕地等、4種類の異なった地表面条件下での風送ダストの飛散に関する観測結果を報告した。その結果、人為的に土壤が破壊された休耕地では自然状態の砂漠に比べより多くのダストが飛散する事が明らかにされ、またその風速や視程との関係についても議論が行われた。沈（CAS 寒区旱区環境と工程研究所）は、MM5を用いた領域モデルにダスト発生式を導入したダスト飛散量の予報モデルを作成し、彼らが中国敦煌で観測した風送ダスト発生量を用いてその検証を行った。Leys（豪州自然資源計画保護局）は、オーストラリアの半乾燥域における気象要素と飛散量（TSP）の経年変化と植生や降水量との関係に関する発表を行った。また Shao（香港城市大学）と三上（気象研究所）は、飛砂飛散過程の相似則理論を新たに提案し、タクラマカン砂漠で得られた飛散過程の詳細観測データを用いて検証を行った。

今回、ADEC のグループは、飛砂の飛散過程を粒径も含めてリアルタイムに測定する事に初めて成功し、現在その成果を用いて Shao らによる理論の再構築が試みられている段階である。セッション最後の Shao と Leys による取りまとめの議論では、観測手法上の課題として、土壤粒径の測定や極乾燥下での土壤水分の測定、鉛直方向のダストフラックスのリアルタイムモニタリング等が残されている事、また未解決の課題として、休耕地等人為起源のダスト発生量の評価や、非線形性が強いダスト発生量のアップスケーリング（サブグリッドクロージャ）について議論が行われた。（三上正男）

3. 風送ダストのモニタリング

モニタリングに関する口頭発表では、ダスト濃度、鉛直分布、沈着過程に関する観測、解析的手法による成果が発表された。ADEC 関係では、増田（気象研究所）が開発した人工衛星（GMS）可視データから海上のダストの光学的厚さを求めるアルゴリズムについて発表した。粒子の非球形性を考慮することにより精度が大きく改善した。このほか、中国内陸部の複数の乾燥地域におけるダスト濃度、粒径分布の地域、季節による違い（矢吹、理化学研究所）、中国内陸部から日本にかけて展開したライダーネットワークによって観測された発生域、および風下域におけるダスト鉛直分布、対流圏上層を輸送される長距離輸送ダストの特徴等（安井、情報通信研究機構）についての報告が行われた。ADEC 以外では、杉本（国立環境研究所）から、中国、韓国、日本の11箇所に設置されたライダーネットワーク観測データからダストとダスト以外のエアロゾルを分離解析した結果が紹介され、荒生（長崎大学）からは、2003年4月13日に観測された顕著な黄砂現象に関する観測、解析結果が報告された。これら、日本のグループからの報告の他に、海外での黄砂研究についての報告もあり、韓国気象研究所（METRI：Meteorological Research Institute）の Chun から、METRI における黄砂モニタリング、黄砂予報に関する研究成果の報告があった。また、Sassen（アラスカ大学）はアラスカに設置した偏光ライダーによるデータを解析し、アジアの乾燥地域を発生源とし、アラスカ上空にまで達した長距離輸送ダストの雲物理過程への効果、特に氷晶核としてはたらく可能性についての分析結果を報告した。このほか、ポスター発表で久慈（奈良女子大学）が、GLI データからダストの光学的厚

さを導出するアルゴリズムにより、陸上のダスト光学的厚さ導出の精度が向上したことを報告した、

セッションの最後には、これらの成果を今後の研究発展につなげるという観点での議論が行われた。重要なポイントとしては、1) サンプリング分析、リモートセンシング、モデルという異種の手法の結果をより有機的に結びつけた研究を進展させること、2) ダストの輸送過程における変質、雲物理過程への効果についてのデータ収集、分析を進めること、3) 境界層内に見られるような非常にスケールの小さい力学的現象に関する計測をどう行うか、4) モデルと観測の連携を進める際に必要な計測の時間、空間分解能について、対象となる現象に応じた戦略を考えること、などが挙げられる。(安井元昭)

4. 風送ダスト粒子の物理・化学・光学特性

このセッションでは、鉱物質エアロゾルの特性、ネットワーク観測によるエアロゾルの光学特性など、8件の口頭発表があった。鉱物質エアロゾルに関しては、風送ダスト発生域である沙坡頭における観測の紹介(Zhou, CAS 寒区旱区環境与工程研究所), Arimoto (ニューメキシコ市立大学)による ACE-Asia の紹介、岩坂(名古屋大学)によるバルーン搭載機器による自由大気圏内のエアロゾルに関する紹介があった。内山(気象研究所)は ADEC のプロジェクトとして東アジア域に展開しているスカイ・ラジオメーター観測ネットワークで得られた観測結果から、鉱物質エアロゾルの光学特性を論じている。早坂(総合地球環境学研究所)は ABC (Atmospheric Brown Cloud) Project の紹介をおこない、東アジア域におけるエアロゾルの光学特性についての解析を行った。高村(千葉大学)による SKYNET の紹介でも、スカイ・ラジオメーターをはじめとする地上観測と衛星データを用いてエアロゾルと雲の放射強制力の検証を行っている。村山(東京海洋大学)は Mie-Raman Lidar を用いて、東京上空におけるアジアダストの観測結果を紹介している。鉱物質エアロゾルと人為起源エアロゾルが複雑に混ざり合っている東アジア域におけるエアロゾルは、両者が混合することによりその光学的性質はもちろんのこと、輸送機構や大気中における滞留時間まで影響を受ける可能性があり、解決しなければならない問題が多々あることを痛感した。

関連する粒子特性に関する発表を、ポスターを含め以下のように分類して紹介する。

(1) エアサンプラーにより採取したエアロゾルの大気中濃度・粒径分布・組成など

ADEC の各観測地点には、エアロゾルを採取してその粒子特性を調べる目的で、ハイボリュームエアサンプラー、アンダーセンサンプラーが設置されている。発生域4地点における TSP (全浮遊粒子)、 $PM_{1.1}$ (直径 $11 \mu m$ 以下の粒子)、 $PM_{2.1}$ (直径 $2.1 \mu m$ 以下の粒子、主として、人為起源エアロゾルからなる) 濃度の変動などについては、矢吹(理化学研究所)が口頭発表を行った他、タリム盆地南縁の策勒における観測結果(Zeng, CAS 新疆生態地理研究所)、沙坡頭における観測結果(Zhou, CAS 寒区旱区環境与工程研究所)が報告された。長距離輸送域である、中国東部及び日本で採取したエアロゾルの粒子特性に関しては、上岡(AIST)が日本のエアロゾルの可溶性成分の分析結果、太田(AIST)が、不溶性成分の元素分析結果を報告し、釜谷(講演・森, 長崎県衛生公害研究所)は、長崎における越境人為起源成分に関する報告を行った。この他、柳澤(山形大学)は中国大同、太原における TSP 中の SO_4^{2-} 、 NH_4^+ およびイオウ同位体 ($\delta^{34}S$) の変動について発表し、赤田(山形大学)は、四川省峨嵋山において高度別に採取した湿性+乾性降下物の可溶性成分の高度による変化を論じている。

(2) 個々のエアロゾル粒子の化学組成、鉱物組成

無人航空機、バルーンにより大気上層部で採取したエアロゾル粒子に関しては、波長分散型 X 線分光器を搭載した電子顕微鏡による観察と元素組成分析により、貴重なデータが蓄積されつつある。本ワークショップにおいても、風送ダスト発生域である敦煌(林, 福岡大学)および長距離輸送域である福岡(山下, 福岡大学)において、無人航空機を用いた上空約 $2 km$ までのエアロゾルの採取とオプティカル・パーティクル・カウンターによる濃度分布観測が行われた。また、バルーンによる上空 $10 km$ までの粒子の採取と個々の粒子の元素分析についての報告がなされた(岩坂, 名古屋大学; 山田, 同)。個々の粒子に関する研究としては、長距離輸送による変質、特に、 SO_2 ガスとの反応(松木, 名古屋大学)、海塩粒子との反応(張, 熊本県立大学)過程について興味深い結果が報告されている。

(3) 発生域における表層土壌

地表面からのダスト飛散量を見積もる上で重要な要素となる表層土壌の粒径分布情報に関しては阿部(防災科学技術研究所)によるタクラマカン沙漠の広範囲な地点におけるさまざまな表層土壌について粒径情報

が報告され、また、大場（上越教育大学）による鉱物組成情報が報告された。

(4) 風送ダストとトレーサー

気象学的には、後方流跡線解析という手法で風送ダストの発生域を推定するのが一般的であるが、エア・マスの移動が即ち物質の移動とは限らないので、実際に長距離輸送された風送ダストの発生域の同定には、発生域の特徴を保持する何らかのトレーサーが必要である。従来用いられてきた、主成分元素組成や濃縮計数のみから風送ダストの発生源を特定するには無理があることから、近年、輸送過程によっても発生域の特徴を保持しつづける同位体をトレーサーとした風送ダストの研究が注目されている。風送ダストの発生源同定は、ADECの直接の目的ではないが、今回のワークショップにおいても Sr, Nd 同位体をトレーサーとする論文が3編（中村, 山形大学; 中野, 総合地球環境学研究所; 金山, 理化学研究所), Re-Os 同位体系を用いた黄土堆積物の研究（本多, 海洋研究開発機構）が1編発表されている。（矢吹貞代）

5. 全球・アジアスケールのダストモデル

このセッションでは全球とアジアスケールのダストモデルの6件の結果が発表された。Park(ソウル大学)は韓国のオイラー型ダストモデル ADAM と CIT 化学輸送モデルを用いてダスト表面の不均質反応の効果をおゾン、硫酸塩などの観測との比較とともに発表した。清野(気象研究所)は気象庁の領域気候モデルと非静力学モデル NHM を用いてタクラマカン砂漠を10 km 格子で解像するネストグリッド計算で2002年4月のダストストーム現象の気象力学的な解析を行うとともに、ラグランジェ粒子モデルを用いたダストの発生・輸送のシミュレーション結果を報告した。Gong(カナダ・気象庁)はダスト発生スキームとして, Marticorena and Bergametti (1995) のエネルギーベースのサルテーション機構と, Shao (2001, 2004) の体積除去ベースのサルテーション機構に基づくダストモデルを用いた場合の差をアジア域のダストシミュレーションに応用した結果をもとに報告し、ダスト巻き上げの臨界摩擦速度の設定、土壌水分量の取り扱いの差異によりダストの発生に大きな違いをもたらすことを示した。鶴野(九州大学)は、領域気象モデル RAMS に結合したダスト輸送モデルで、タリム盆地からアジア域を3重ネストで構成し2001年3、4月の長期計算の結果を報告した。タリム盆地とその周辺の天山山脈、

チベット高原を表現するには10 km メッシュ程度の水平解像度が必要で、タリム盆地で頻繁に発生する東風領域がダストの発生と輸送に重要であることを示した。Westphal (米国, NRL) は、領域気象モデル COAMPS を用いた高分解能のダスト計算結果を衛星画像解析の結果とともに示した。王自発(中国大気物理研究所)は ADEC のプロジェクトの一部として行ったダストモデル相互比較実験の結果のサマリーを報告した。

セッション最後の議論では、ダストの発生に関わる問題として、依然として中国内陸域の詳細な土壌・植生などの GIS データの整備とアクセスが十分でないこと、この20年間で人為的な原因で進行した砂漠化領域の正確な情報がダスト発生域の設定に重要であることについて議論された。また、ADEC Qira (策勒) サイトでの気象とダスト観測データの整備と、タクラマカンから日本に渡る広域のダスト測定結果の整備・公開が今後のダスト発生・輸送モデルの精度の検証と高度化に必要であるとの指摘がされた。（鶴野伊津志）

6. 風送ダストの気候影響

このセッションでは、風送ダストの気候影響とその他の発表がなされた。

風送ダストの気候影響では、如何に正確に風送ダストの放射強制力を見積もるかが重要な課題である。青木(気象研究所)によって、日本付近の海上、中国の砂漠、サハラ砂漠、シベリアでの放射強制力(直接効果)の見積もりが発表され、地表面アルベド、太陽高度、光学定数、粒径分布の影響について示された。粒子の光学特性が場所ごとに違い、その情報が必要であることも指摘された。Shi (CAS 大気物理研究所) は、2001年4月4～15日の“perfect dust storm”と言われているケースについて、ADEC プロジェクトで決定された屈折率(Aoki *et al.*, 2005) を用いて放射強制力(直接効果)を評価し、大気上端で冷却(-0.943 Wm^{-2})となることを示した。千葉(気象研究所)は、1958～2001年の客観解析値(ERA-40)を大気場に使った44年間の積分を行い放射強制力(直接効果)を評価した結果、大気上端で若干の冷却($-0.1 \sim -0.6 \text{ W/m}^2$)となり季節変化があることを示した。千葉は、風送ダストによる放射冷却・加熱をモデルに考慮した場合の降水量変化についても調べ、夏に差が大きく降水が減少することを示した。

放射強制力の評価にとってダストの光学(放射)特

性が重要で、精密な評価には地域毎の組成の違い（特に吸収に關与する鉄の酸化物を含む鉱物の割合）を考慮する必要がある。光学特性の推定には Sokolik（ジョージア工科大学）のような鉱物組成から推定する方法が有力である。地域毎の組成の違いや混合粒子が扱いやすくなるが、反面、輸送モデルの負担が大きくなるのではないと思われる。いずれにせよ、地域ごとの風送ダストの光学特性の実態を把握するために、粒子特性のセッションで発表された高村（千葉大学）、内山（気象研究所）のように地上での太陽放射の解析から光学特性の推定をおこなうことも必要である。また、Tegen（ドイツ・対流圏研究所、前所属 MPI）によって紹介された SAMUM（Saharan Mineral Dust Experiment, 2004～2007年）のような集中観測（2005年夏に発生域のモロッコでダストの放射特性に焦点をあて、地上観測、航空機観測、ライダー、衛星を使ってデータを取り、モデルを使い局地的な影響、全球的な影響を評価する計画）を行って行く必要がある。もちろん、モデルの改良も重要であり（Tegen）、その検証にとって、中尾（総合地球環境学研究所）による水河コアの解析から推定する過去のダスト量の推定も重要である。

ADEC 後の研究計画について、Shi から、SOLAS（Surface Ocean and Lower Atmospheric Study）、BBC（Beijing Brown Clouds）について説明があった。また、Sokolik によっても、Northern Eurasian Earth System Partnership Initiative（NEESPI）という計画（北緯40度以北の気候変化に焦点を置いたもの）が紹介された。（内山明博）

7. ADEC の到達点と今後の風送ダスト研究

ADEC は、東アジアでは初めての総合的な風送ダストに関する研究プロジェクトとして、2000年4月から5年間の計画が進められた。ADEC では、合計3回の集中観測を含む日中共同による大規模な野外観測が行われ、またそれと連係して様々なスケールのダスト数値モデルによる数値実験が実施された。これらは、例えば全球ダストモデルの予報結果を基に現地での観測日程が決められ、現地観測データを逐次モデルの検証に用いてモデルの改良が行われる等、常に観測とモデルが連係しながら進められた。この5年間に ADEC により得られた主要な成果として、(1) 粒径毎・高さ毎の飛砂とダストの発生量の精密観測を行い、ダスト発生過程を明らかにしたこと、(2) 東アジアのダスト発

生域から日本に至る領域でダスト粒子濃度、粒径情報、高度分布等の総合観測に成功したこと、(3) 現地調査に基づき東アジアのダスト粒子の光学特性を明らかにすると共に、ダストによる直接効果の放射強制力評価のためのダスト光学モデルを開発したこと、(4) 全球ダストモデルを用いて過去44年間の全球ダスト発生量とそれに基づくダスト放射強制力評価を行ったことなどが挙げられる。

このように、東アジアでは初めての総合的なダストに関する研究計画として ADEC は数多くの成果を収める事が出来た。一方、依然未解決の課題や新たに生じた課題がいくつか残されている。

(1) ダストの発生メカニズムに関し、今回得られた知見は主に植生や土壌水分の影響が比較的少ない場所で得られており、過放牧や土地が疲弊した場所からの人為起源ダストの発生過程について理論構築やモデルの検証に必要な観測情報は未だ不十分である。

(2) 今回、ダストの発生域周辺では数多くのサンプリングや観測が行われ、ダスト粒子の物理・鉱物学・光学的特徴が調べられたが、東アジアから長距離輸送されたダスト粒子の特徴や対流圏上部のダスト粒子に関する知見は未だに不十分である。

(3) ダストモデルにも依然として改善の余地が残されている。これまでのダストモデルは、供給量の評価とダストストームや黄砂現象の予警報情報の提供という、役割が期待されてきたが、気候影響評価のためには、より小さい粒子の発生・沈着過程をよりよく評価する必要がある。また、モデルによる気候影響評価のためには GCM（大循環モデル）が多用されるが、その場合、サブグリッドスケールのダスト発生をどう再現するかと言った手法上の問題も残されている。これは、人為起源ダストの評価精度向上にも必要な事である。

(4) 近年、東アジア各国間で黄砂モニタリングと予警報のための観測ネットワーク作りが進められつつある。これは必ずしも研究目的で計画されたものではないが、東アジアダストの実態把握やダストのモデルへの同化技術の開発等、我々研究コミュニティーにとってもこれらの情報は有益であると考えられる。今後、このような業務的な観測ネットワークと研究を目的としたネットワークのリンケージについて、研究者側からも積極的な提言と働きかけが必要と考えられる。

ADEC の目標は、全球スケールで風送ダストの供給量を定量的に評価し、得られた情報から大気中の風送ダストによる放射強制力直接効果を評価する事にあつ

た。これは、ADEC 開始時点に於いて、風送ダストの気候への影響が定量的に議論できるレベルに無かったためである。ADEC が終了を迎えるまでの5年間に、世界各地でダストの気候影響に関する研究が進展し、現時点で、ダストの気候影響に関してかなり定量的な議論が行えるようになった。この研究進展に ADEC は何らかの寄与が出来たのではないかと考えている。今後、ダスト-気候系の研究をより一層進展させるためにも、ADEC の成果と課題を充分活用した研究計画を立案。実施する事が望まれる。ADEC の研究者には、成果を論文として発表すると共に、ADEC データの公開を始め様々な研究者との研究交流を加速させ、今後東アジアでどのような研究が必要かを提案し実行する責任が残されている。(三上正男)

謝 辞

本ワークショップは科学技術振興調整費「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(第II期)」(研究代表者・三上正男)の一部として実施された。開催にあたり、環境省、韓国気象庁気象研究所、長崎県、長崎市、長崎大学、(社)日本気象学会、日本沙漠学会のご後援をいただいた。記して深い感謝の意を表する。

略語一覧

ACE-Asia : Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment
 ADAM : Asian Dust Aerosol Model
 AIST : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 産業技術総合研究所
 CAS : Chinese Academy of Sciences 中国科学院
 CIT : California Institute of Technology
 COAMPS : Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (NRL で開発された気象モデル)
 ERA-40 : ECMWF Re-Analysis (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ヨーロッパ中期気象予報センターの再解析値。1957~2001年。)
 GCM : General Circulation Model
 GLI : Global Imager グローバルイメージャ (環境観測技術衛星「みどりII」搭載の光学センサ)
 GMS : Geostationary Meteorological Satellite (日本

の静止気象衛星シリーズ)

MM5 : The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (米国・ペンシルバニア州立大学と NCAR が共同開発したメソモデル)
 MPI : Max-Planck-Institut ドイツ・マックスプランク研究所
 NHM : Nonhydrostatic Model
 NRL : Naval Research Laboratory 米国・海軍研究所
 RAMS : Regional Atmospheric Modeling System (米国コロラド州立大学で開発された気象モデル)
 TSP : total suspended particulates

参 考 文 献

Aoki, Te., T. Tanaka, A. Uchiyama, M. Chiba, M. Mikami, and J. Key, 2005 : Sensitivity tests of direct radiative forcing by mineral dust using spectrally detailed radiative transfer model, *J. Meteorol. Soc. Japan* (accepted).
 Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001 : *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
 Marticorena, B. and G. Bergametti, 1995 : Modeling the atmospheric dust cycle. Part 1 : Design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, **100**, 16415-16430.
 Mikami, M., Abe, O., Du, M., Chiba, M., Fujita, K., Hayashi, M., Iwasaka, Y., Kai, K., Masuda, K. and Nagai, T., 2002 : The impact of aeolian dust on climate : Sino-Japanese cooperative project ADEC, *Journal of Arid Land Studies*, **11** : 211-222.
 Shao, Y., 2001 : A model for mineral dust emission, *J. Geophys. Res.*, **106**, 20,239-20,254.
 Shao, Y., 2004 : Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *J. Geophys. Res.*, **109**, Doi : 10.1029/2003JD004372.
 Zender, C., R. Miller, and I. Tegen, 2004. Quantifying mineral dust mass budgets : Systematic terminology, constraints, & current estimates, *EOS*, **85**, 509-512.