

# 大気エアロゾル予測システムの開発

竹 村 俊 彦\*

## 要 旨

全球3次元エアロゾル気候モデル SPRINTARS を用いて、1週間先までの大気中のエアロゾル分布を予測するシステムを開発した (<http://sprintars.net/>)。1日1回運用され、ホームページ上では、全球およびアジア域のエアロゾル分布予測の動画を閲覧できる他、日本各地のエアロゾル濃度は4段階に分類することにより、一般にも理解しやすい表現を採っている。アジア大陸での急速な経済発展に伴う日本への越境大気汚染の増大が懸念されており、本システムが日々の社会活動にとって有益な情報を作成することが期待される。

## 1. エアロゾル予測システム開発の背景

エアロゾルは、気候変動を引き起こす物質として知られている。筆者らは、これまでに、エアロゾルの地球規模の分布や気候に対する影響をシミュレートするための数値モデル SPRINTARS を開発してきた (Takemura *et al.* 2000, 2002a, 2005, 2009)。SPRINTARS を用いた研究成果は、気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書 (IPCC 2007) に多数引用された。

また、大気中のエアロゾルが高濃度になると、呼吸器系の障害を引き起こしたり、視程悪化を招いたりするなど、社会生活に支障を来す。日本では、光化学オキシダントの環境基準および注意報・警報基準は明確である一方、エアロゾルの環境基準はPM10 (直径10  $\mu\text{m}$  以下の粒子) として設定されているものの、注意報・警報基準はないため、エアロゾルが高濃度であっても報道機関等を通じた周知はなされていないのが現状である。また、エアロゾルの中でも小さい粒子 (例えばPM2.5 (直径2.5  $\mu\text{m}$  以下の粒子) 等) に分類される) は、低質量濃度でも人体や大気環境への影響が大

きいが、環境基準設定の検討がようやく開始された段階である。光化学オキシダント濃度は、紫外線量の多い春から夏にかけて高くなる傾向にあるが、例えば人為起源エアロゾルは、燃料を消費すると発生するため、年間を通して高濃度になる可能性がある。

こうした背景のもと、エアロゾル濃度を予測することは、日々の社会活動に有用であると考えられる。本稿では、SPRINTARS を利用した1週間先までのエアロゾル分布を予測するシステムの開発および予測精度の検証について述べる。

## 2. エアロゾル予測システムの概要

SPRINTARS は、東京大学気候システム研究センター/国立環境研究所/地球環境フロンティア研究センターにより開発されている大気大循環モデル (CCSR/NIES/FRCGC AGCM) (K-1 Model Developers 2004) と結合しており、エアロゾルの輸送過程 (発生・移流・拡散・硫黄化学反応・湿性沈着・乾性沈着・重力落下) や直接効果 (太陽放射・赤外放射の散乱・吸収) ・間接効果 (雲凝結核・氷晶核の機能を通した雲・降水特性の変化) を計算する。取り扱うトレーサは、対流圏主要エアロゾルである黒色炭素・有機炭素・硫酸塩・土壌性・海塩の各粒子と、硫酸塩の前駆物質である二酸化硫黄・硫化ジメチルである。標準的に用いる分解能は、水平方向がT106 (約

\* 九州大学応用力学研究所。

—2008年12月22日受領—

—2009年2月27日受理—

1.1°) もしくは T42 (約2.8°), 鉛直方向が  $\sigma$  座標で L56 (56層) もしくは L20 (20層) であるが, 本研究で開発する予測システムでは, 計算コストと要求される水平分解能を考慮して, 当面 T106 L20 とする. SPRINTARS の詳細な説明は, Takemura *et al.* (2000, 2002 a, 2005, 2009) にある. SPRINTARS は全球モデルであるが, 例えば東アジア域の黄砂輸送や越境大気汚染を適切に表現することが確認されている (Takemura *et al.* 2002 b, 2003).

予測システムは, 毎日08 JST には予測結果がホームページを通して試験提供されるように運用されている. SPRINTARS は大気大循環モデルであり, 風速・気温等が予報変数であるため, 予測精度の向上を求めなければ気象データを必ずしも準備する必要はないが, 本システムの分解能が T106 L20 と高くはないこともあり, 気象データとしてアメリカ海洋大気局 (NOAA) の Global Forecast System (GFS) の風速および気温のデータを取得し, ナッジングを掛けながら計算を行っている. また, 海面温度にも GFS のデータを与える. 計算は, 九州大学応用力学研究所の NEC の他, 予備として AMD Dual Core Opteron  $\times 4$  (8 CPU) を搭載したサーバでも行い, 計算期間は予測を行う前々日の12 UTC から8日間である. 初期値として, 前日に計算を行った際に出力しておいた該当日時のデータを使用する. 計算終了後には, 結果の図化および html 化を行い, ホームページサーバへ転送される. 以上, GFS データの取得およびファイル形式変換・シミュレーション・図および html ファイルの作成は, すべて自動化されている.

予測結果を試験提供する

ホームページ (<http://sprintars.net/>) には, 一般向けの「簡易版」と専門家向けの「詳細版」とを準備している. 簡易版の日本語ページでは, エアロゾルの種類を黒色炭素・有機炭素・硫酸塩エアロゾルの合計である「大気汚染粒子」と, 土壌性エアロゾルである「黄砂」とに大別し, 東アジア域の週間予測動画を掲載している他に, 日本を12地域におおよそ分割して, 当日と翌日は6時間毎, 6日後までは1日毎の大気汚染粒子および黄砂の濃度を, 「少ない」「やや多い」「多い」「非常に多い」の4段階で表示している (第1図参照). 動画と4段階表示は, モデル最下層から  $\sigma=0.9$  (高度約1 km) までの平均質量濃度から作成しており, 4段階表示の分類は第1表に従っている. なお, エアロゾルの高濃度の状態を注意喚起するという観点から, 1日毎の週間予測は, 1日平均値ではな



第1図 予測結果を試験提供する一般向けホームページの例.

く、6時間平均値(00-06 JST, 06-12 JST, 12-18 JST, 18-24 JST)のうち最大値を採用して表示している。また、携帯電話対応のサイトも構築しており、4段階表示の情報を閲覧することができる。注意点として、水平分解能は約1.1°であるため、日本各地全般の高濃度および他の地方・国からの越境汚染はシミュレーションにより表現しているものの、分解能以下の現象(例えば幹線道路沿いの高濃度エアロゾル等)は表現していないことを挙げておく。簡易版の英語ページでは、4段階表示は行っていない一方、全球の大気汚染粒子と土壌性エアロゾルの動画を試験提供している。詳細版は日本語・英語ページにおいて内容は共通であり、エアロゾルの光学特性パラメータ(光学的厚

さ・オンゲストローム指数・1次散乱アルベド)・濃度・沈着量・直接効果放射強制力と雲の微物理特性パラメータの予測動画を、全球および東アジア拡大で閲覧が可能である。

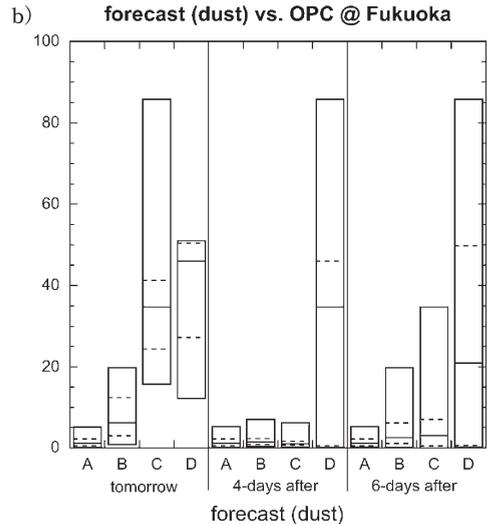
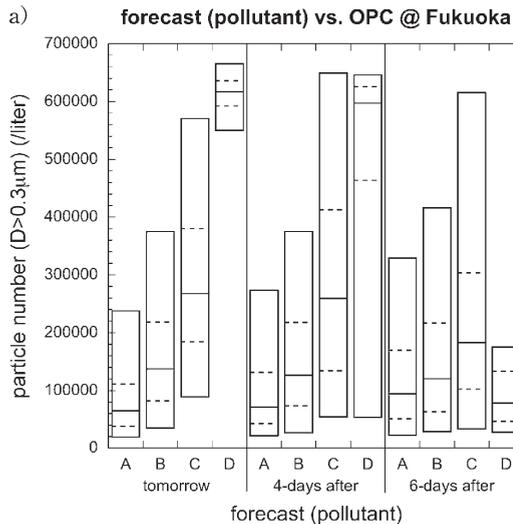
### 3. エアロゾル予測の精度検証

エアロゾルの観測は、アメダスによる気象要素の観測ほど充実していないが、ここでは入手可能な観測データを用いて、多くの方々が参照すると思われる日本域のエアロゾル濃度4段階表示に関して、予測精度の検証を行う。第2図は、2007年9月から2008年8月にかけて九州大学応用力学研究所(福岡県春日市)において気中パーティクルカウンタ(OPC)(リオン社製

により観測されたエアロゾル数濃度と,SPRINTARSによる1日後・4日後・6日後の予測との比較である。OPCは、直径0.3 μm以上・0.5 μm以上・1 μm以上・2 μm以上・5 μm以上に分離して観測を行っているが、人為起源エアロ

第1表 「大気汚染粒子」および「黄砂」の4段階表示の基準。xは該当粒子のモデル最下層からσ=0.9(高度約1 km)までの平均質量濃度(μg/m³)。

	少ない	やや多い	多い	非常に多い
大気汚染粒子 (黒色炭素+有機炭素+硫酸塩)	$x < 5$	$5 \leq x < 15$	$15 \leq x < 30$	$30 \leq x$
黄砂 (土壌粒子)	$x < 40$	$40 \leq x < 100$	$100 \leq x < 200$	$200 \leq x$



第2図 福岡県春日市においてOPCにより観測されたエアロゾル数濃度とSPRINTARSによるa)「大気汚染粒子」b)「黄砂」の1日後・4日後・6日後の予測との比較。「大気汚染粒子」の予測との比較にはOPCの直径0.3 μm以上のデータ、「黄砂」の予測との比較にはOPCの直径5 μm以上のデータを使用。Aは「少ない」、Bは「やや多い」、Cは「多い」、Dは「非常に多い」。各棒の下端・上端はそれぞれ5パーセンタイル値・95パーセンタイル値、下点線・上点線はそれぞれ下四分位(25パーセンタイル値)・上四分位(75パーセンタイル値)、棒中の実線は中央値を示す。

ゾルは小粒子が支配的であり、黄砂は大粒子を含むという特徴をそれぞれ持っていることから、「大気汚染粒子」の予測は $0.3\mu\text{m}$ 以上のデータ、「黄砂」の予測は $5\mu\text{m}$ 以上のデータと比較を行う。

「大気汚染粒子」の1日後の4段階予測と実際に観測されたエアロゾル数との間には正相関が見られる。また、4日後の予測では、「多い」と「非常に多い」の間には5-95パーセントイル値に差は見られないものの、それらと「少ない」「やや多い」との間には明確な差があり、さらに、下四分位-上四分位値と4段階予測との間には正相関が見られる。重要な点は、「少ない」「やや多い」と予測した際には、大気環境や人体に明らかな悪影響を及ぼすような高濃度にはなっていないことである。6日後の予測にもその傾向は見られるが、ばらつきが大きくなっている。また、予測期間が長くなるにつれて、実際には高濃度ではなかったにもかかわらず、「多い」「非常に多い」と予測する頻度が高くなっていくことが分かる。これは、大気汚染粒子の発生源の日々変動は小さいことを考えると、予測期間が長くなるにつれて、使用する気象データの精度が落ちてくるのが主な原因と考えられる。

2008年春季は、平年と比較して日本への黄砂の飛来回数が少なかったが、予測精度を検証すると、1日後は「多い」「非常に多い」と「少ない」「やや多い」との間には明確な差が見られ、その後も予測期間にかかわらず、大規模な黄砂が観測された際には「非常に多い」と予測している。一方、大気汚染粒子予測と同様に、予測期間が長くなると、高濃度は観測されなかったにもかかわらず、「多い」「非常に多い」と予測する頻度が高い。ただし、黄砂予測の精度検証はサンプル数が少ないため、複数年にわたる検証が今後必要であろう。

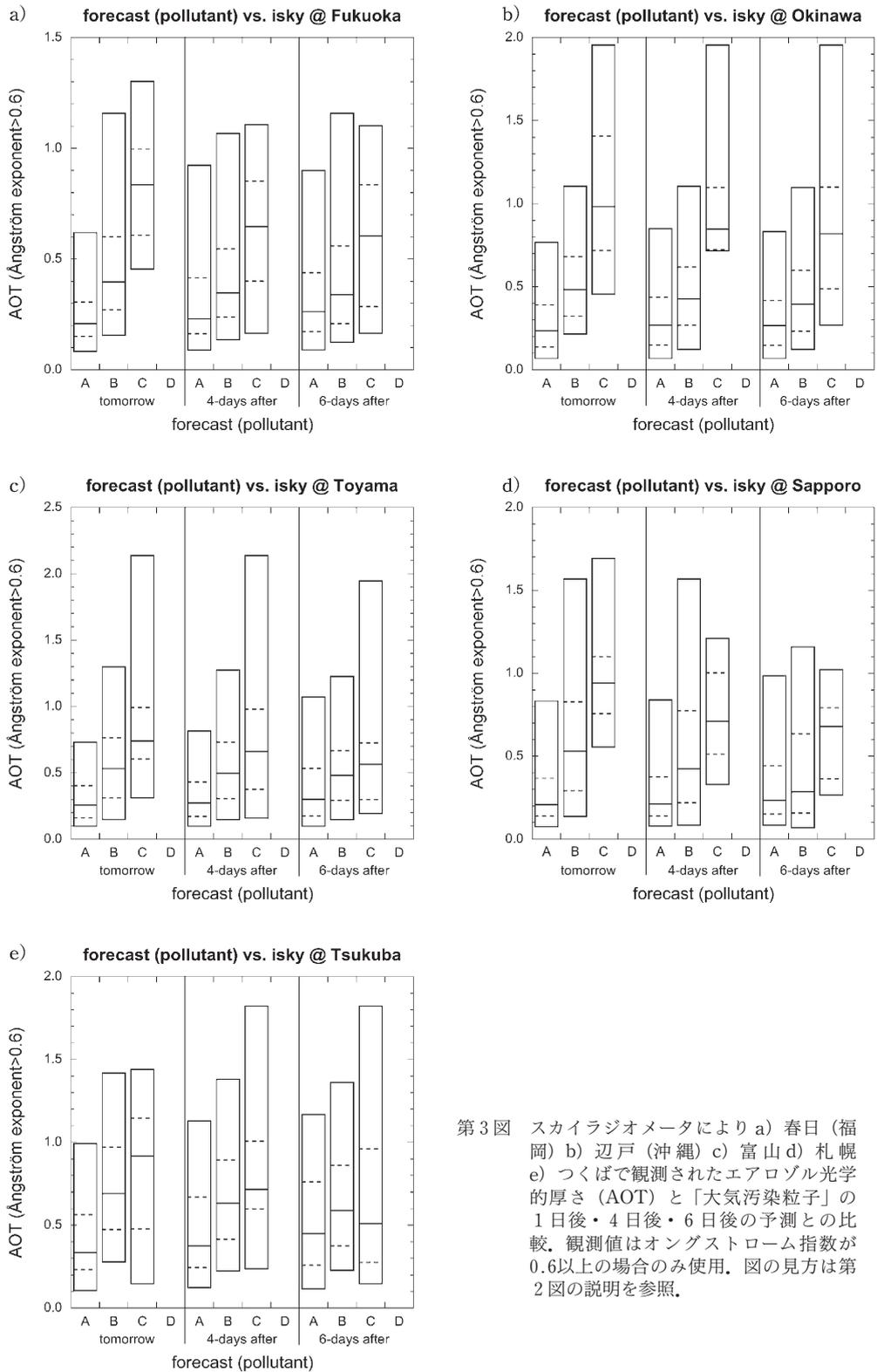
第2表には、OPCによるエアロゾル数濃度の観測値とSPRINTARSによるエアロゾル質量濃度の予測結果との相関係数を示す。「大気汚染粒子」は予測期間5日以降、「黄砂」は6日後に相関係数が急激に小さくなっている。この1日のずれは、黄砂の方が長距離輸送されて日本へ飛来するため、発生源付近の気象場は初期値により近い時間のものを使うことになり、予測期間の短い気象データの方が高精度であることと関係していると考えられ

る。また、主に大陸沿岸域から飛来する大気汚染粒子は黄砂よりも輸送距離が短いため、気象場の再現精度に敏感となる可能性のあることが、相関係数の急激な減少の原因とも考えられる。

日本のその他の地域での予測精度検証のために、SKYNET観測網においてスカイラジオメータPOM-01/POM-02（プリード社製）を用いて春日（福岡）・辺戸（沖縄）・富山・札幌・つくばで観測されているエアロゾル光学的厚さ（Aoki and Fujiyoshi 2003；<http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/>）との比較を行った（第3図）。期間は第2図と同じく2007年9月から2008年8月である。前述の通り、期間中に黄砂の飛来は非常に少なかったため、ここでは「大気汚染粒子」のみ検証を行う。大気汚染粒子が支配的である場合のみのエアロゾル光学的厚さの観測値を使用するために、オングストローム指数（粒径の指標であり値が大きいほど小粒子である）が0.6以下のデータは使用しない。また、スカイラジオメータによるエアロゾル光学観測は晴天時のみ可能であり、その結果として、「非常に多い」にランクされた日時の観測はいずれの地点でも期間中にはなかった。1日後の予測では、福岡・沖縄・富山・札幌で明確な正相関が見られ、さらに下四分位-上四分位値で見ると「少ない」「やや多い」「多い」の間の重なりも小さい。予測期間が長くなるにつれて精度は落ちてくるが、前述と同様、「少ない」と予測された場合には、大気環境や人体に明らかな悪影響を及ぼすような高濃度にはほとんどならないと言える。下四分位-上四分位値で見ると、アジア大陸に近い沖縄・福岡では、予測期間が長くなっても精度は比較的高い状態を保っている。これらの地域は越境汚染が大気環境を支配しているため、大気大循環モデルのグリッドスケールでも物質輸送を適切に表現できることが高精度の理由として挙げられる。一方、つくばの予測精度は、他地点と比較して劣っていると言える。これは、首都圏のローカルな汚染源が支配的であり、グリッドスケールよりも小さい汚染源および気象場に影響されやすいためと考えられ

第2表 OPCによるエアロゾル数濃度の観測値とSPRINTARSによるエアロゾル質量濃度の予測結果との相関係数。6時間平均値を用いて比較。

予測期間（日）	0	1	2	3	4	5	6
大気汚染粒子	0.584	0.578	0.510	0.486	0.497	0.410	0.253
黄砂	0.670	0.652	0.673	0.664	0.635	0.670	0.531



第3図 スカイラジオメータにより a) 春日 (福岡) b) 辺戸 (沖縄) c) 富山 d) 札幌 e) つくばで観測されたエアロゾル光学的厚さ (AOT) と「大気汚染粒子」の1日後・4日後・6日後の予測との比較。観測値はオンストローム指数が0.6以上の場合のみ使用。図の見方は第2図の説明を参照。

る。

#### 4. まとめと今後の課題

本稿では、エアロゾル予測システムの概要と1次的な予測結果の検証について記述した。予測期間が長くなると精度は落ちてくるが、少なくとも「少ない」と判定された場合にはエアロゾルは高濃度にはならない可能性が非常に高いことが示された。予測結果を試験提供するホームページ (<http://sprintars.net/>) は、気象庁・環境省合同ポータルサイトである「光化学オキシダント関連情報提供ホームページ」(<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/oxidant/>) からリンクが張られており、情報が活用されることが期待される。

今後は、より詳細な予測結果の検証および日本域以外の予測精度の検証を行う必要がある他、予測精度を向上させるために、いくつかの課題に取り組む。1つは、初期値アンサンブル予測の導入である。また、可能な限りリアルタイムのエアロゾル観測値を収集し、データ同化手法 (Yumimoto *et al.* 2008) を用いることにより、初期値の精度を高めることも考えられる。また、時空間変動の大きい森林火災の排出量分布に関して、人工衛星搭載センサから得られる準リアルタイムのホットスポットのデータを、エアロゾル排出量に変換して予測システムで用いることにより、森林火災起源のエアロゾル高濃度イベントの予測が可能となるため、現在その開発を進めている。

#### 謝 辞

CCSR/NIES/FRCGC AGCM および SPRINTARS 開発関係者、スカイラジオメータのデータを提供して頂いた富山大学青木一真准教授、硫黄化学反応計算に必要なデータを提供して頂いた名古屋大学須藤健悟准教授に感謝致します。また、気象場のデータとして NOAA/GFS、森林火災のデータとして GFEDv2 を使用させて頂いております。本予測システムの開発は、文部科学省科学研究費補助金若手 A (課題番号18681002) の助成を受けて進められました。

#### 参 考 文 献

Aoki, K. and Y. Fujiyoshi, 2003 : Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 493-513.

IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

K-1 Model Developers, 2004 : K-1 coupled GCM (MIROC) description. H. Hasumi and S. Emori (eds.), K-1 Tech. Rep., 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 34 pp.

Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000 : Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873.

Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben and S. Kinne, 2002 a : Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Climate*, **15**, 333-352.

Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi and I. Sano, 2002 b : Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2158, doi : 10.1029/2002 GL016251.

Takemura, T., T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta and N. Sugimoto, 2003 : Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian-Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *J. Geophys. Res.*, **108**, 8659, doi : 10.1029/2002 JD003210.

Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima and T. Nakajima, 2005 : Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi : 10.1029/2004 JD005029.

Takemura, T., M. Egashira, K. Matsuzawa, H. Ichijo, R. Oishi and A. Abe-Ouchi, 2009 : A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3061-3073.

Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu and D. M. Winker, 2008 : Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2869-2884.

---

Development of Forecasting System for Atmospheric Aerosols

Toshihiko TAKEMURA \*

\* *Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan.*

(Received 22 December 2008 ; Accepted 27 February 2009)

---