

Sky radiometerで観測された富山の黄砂現象

青木 一真

Asian Dust Events Observed by a Sky Radiometer at Toyama, Japan

Kazuma AOKI

E-mail: kazuma@edu.toyama-u.ac.jp

Abstract

We started the monitoring of atmospheric aerosol on 11 April 2002, by using a sky radiometer set on the roof of our university. It is well known that the Asian dust (so called "Kosa" in Japanese) comes from China and the atmospheric turbidity increase in spring seasons. We will show five Asian dust events observed at Toyama. We retrieved the Ångström parameters ($\tau(0.5)$ and α) and the volume size distribution within a vertical column. $\tau(0.5)$ and α are 0.3-1.3 and 0.1-0.6. The columnar volume size distributions of the Asian dust events observed had peak at 2.0-3.0 μm in radius, similar with those observed at Japan.

キーワード: エアロゾル、黄砂現象、光学的特性、富山

Key words: Aerosol, Asian dust event, Optical properties, Toyama.

1. はじめに

大気中に浮遊する微粒子の総称であるエアロゾルの気候影響は、地球温暖化問題の重要な課題 (IPCC, 1996) のひとつである。エアロゾルの気候影響は、直接的効果と間接的効果の二つに分けられる。直接的効果は、エアロゾルの粒子そのものが太陽放射を散乱・吸収することによって放射収支を変動させるような効果である。また、間接的効果は、エアロゾル粒子が雲核となり、エアロゾル粒子の組成や大きさによって、雲の寿命や雲粒の大きさに影響を与える効果である。

地球温暖化問題において、温室効果気体 (二酸化炭素など) の増加による気温の上昇は、よく知られていることであるが、エアロゾルが気候にどのような影響を与えているかについては、多くの不確定性要素が残されている (IPCC, 2001)。これは、エアロゾルが多様な物質で構成され、大気中に存在する時間も短く、かつ時間・空間変動が大きいといった特徴を持ち合わせているため、これらの効果を観測的に実証することは困難であった。近年、リモートセンシングの発達による衛星観測 (e.g., Nakajima *et al.* 1999) や数値モデル (e.g., Takemura *et al.* 2001) の改良によって、エアロゾルのグローバル分布が求められるようになってきたが、アルゴリズムや得られた結果の検証も含め、それらの変動特性を正確に把握するためには、地上観測から得られる精度の良いデータとの比較が必要不可欠となってくる。これらのことを実現するために、太陽の直達光と周辺光の角度分布の放射輝度を精度良く自動測定できるSky radiometerが開発された。

本研究は、2002年4月の富山上空の黄砂現象について、Sky radiometerから得られた観測結果によって、その粒子の光学的特性がどのような特徴を持っているか調べることを目的とした。富山地方気象台の報告によると、2002年4月の富山地方の黄砂現象は、9日間 (2, 3, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 18日) であった。そのうち、本研究で観測された5つのケース (11, 14, 15, 16, 18日) について議論を進めることにする。

先に述べたように、エアロゾル粒子の気候影響については、不確定性が大きく、自然起源や人為起源のエアロゾルがさまざまに存在している。黄砂現象の直接的効果による放射強制力は、正にも負にもなり不確定性が大きいことが報告されており (IPCC, 2001)、定量的な把握がされていないのが現状である。このような観測は、富山では初めてであり、大陸から直接影響を受けやすい日本海側で観測を行うことは、有益であり、重要であると考えられる。また、同様な観測方法から得られた他地点との相違点を調べることもねらいのひとつである。

日本で観測される黄砂現象は、主に3月から5月にかけて、大陸で発生した低気圧に伴う強風の影響により砂塵が舞い上げられ、上空の西風によって運ばれてくる (名古屋大学、1991)。特に、西日本では、春の風物詩として黄砂現象は、よく知られているが、最近では、日本全国、例外なく黄砂現象が確認されている。とりわけ、北海道のような北日本でも、観測されるようになってきた (Aoki and Fujiyoshi, 2002)。このような黄砂は、日本のみならず、広くは太平洋 (Uematsu *et al.* 1983)、北極域 (Kawamura *et al.* 1996) やアメリ

カ大陸 (Husar et al. 2001; Tratt et al. 2001) まで飛んでおり、最近のリモートセンシングの発達によって、その様子が衛星観測など (Husar et al. 2001) によって、確認されるようになってきた。また、黄砂のより詳細な情報を得るため、鉛直分布と粒子の形状が測定できるMie LidarとSky radiometerを組み合わせたアジア域の観測ネットワーク (AD-NET: Murayama et al. 2001) の確立も行われるようになってきた。

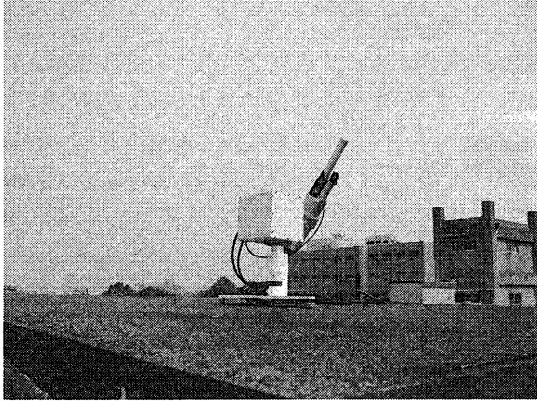


Fig. 1. Sky radiometerの観測風景 (富山大学教育学部屋上)

2. 観測概要

2002年4月11日から、富山大学教育学部屋上 (36.7N, 137.7E) にて、Sky radiometer (Prede. Co., Ltd) による連続観測を行っている。この測定機器は、各波長 (0.315, 0.4, 0.5, 0.675, 0.87, 0.94, 1.02 μm) の太陽直達光と周辺光の角度分布 (2度から最大160度まで) の放射輝度を自動測定するものである。0.315 μm は、オゾンの吸収波長帯、0.94 μm は、水蒸気の吸収波長帯で、それ以外の5波長 (0.4, 0.5, 0.675, 0.87, 1.02 μm) は、エアロゾルの吸収波長帯である。観測間隔は、10分に1回、太陽が東側にある場合は、西方向に、西側にある場合は、東方向に、太陽と等高度にスキャンするように設計されている。太陽追尾方法は、最初に時刻と緯度経度の情報によって計算された太陽の位置に鏡筒が向き、微調整は、鏡筒の下についている4枚のシリコンフォトダイオードからなるサンセンサーによって、正確な太陽の位置に鏡筒が向くように設計されている。また、曇りの場合は、太陽が出るまでである一定の時間待機するようになっている。雨の場合は、鏡筒に水が入らないように、雨センサーにより、鏡筒が下に向くように設計されている。Fig. 1は、Sky radiometerの観測風景である。

3. 解析概要

解析方法は、観測から得られた太陽直達光と角度別 (本解析では、3度から30度までの前方散乱のみを使用) の周辺光の放射輝度の比 (式(1)) をとり、このような規格化した放射輝度を定義して、インバージョン法によって、気柱あたりの

エアロゾルの体積粒径分布を算出し、そこから光学的厚さを求めた (Nakajima et al. 1996)。

$$R(\Theta) \equiv \frac{E(\Theta)}{Fm\Delta\Omega} = \omega\tau P(\Theta) + r(\Theta) \quad (1)$$

ここで $E(\Theta)$ は、角度 Θ の太陽周辺光の放射輝度、 F は、太陽直達光の放射輝度、 m は、大気的光路長、 $\Delta\Omega$ は、測定機器の立体視野角、 ω は、一次散乱アルベド、 τ は、光学的厚さ、 $P(\Theta)$ は、散乱位相関数、 $r(\Theta)$ は、多重散乱の寄与である。本解析では、複素屈折率は、黄砂時は、 $1.55 - 0.01i$ を使い、それ以外は、 $1.50 - 0.01i$ とし、地表面アルベドは、0.1と仮定した。また、太陽高度が低くなると大気的光路長 m が長くなり、計算誤差を生じるため、 $m=5$ までとした。解析に使った粒径半径の幅は、0.02 μm から10.0 μm とした。

4. 富山における黄砂現象

本節では、2002年4月11日から4月30日までに富山でSky radiometerによって観測された5つの黄砂現象のケースについて、エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係と体積粒径分布について考察する。

4.1. エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数

エアロゾルの量と粒子の大小を示すものに、エアロゾルの光学的厚さ $\tau(\lambda)$ とオングストローム指数 α の関係が使われる。この関係は、以下のような式 (Ångström, 1961) で示される。

$$\tau(\lambda) = \tau(0.5) \left(\frac{\lambda}{0.5} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

ここでは、先に述べた5波長のエアロゾルの吸収波長帯から求めたが、エアロゾルの光学的厚さは、波長0.5 μm に限って議論を進める。エアロゾルの光学的厚さは、高くなればなるほど、大気が混濁している状態を示すものである。オングストローム指数は、値が低くなればなるほど、大粒子が寄与し、値が高くなれば、小粒子が寄与していることを意味する。

Fig. 2は、各黄砂時 (2002年4月11日、14日、15日、16日、18日) の0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ ($\tau(0.5)$) とオングストローム指数 (α) の関係について示したものである。4月11日のケースでは、 $\tau(0.5)$ が0.7から1.1と高く、 α が0.1から0.3低い値であり、黄砂である大粒子の寄与がエアロゾルの光学的厚さを高めている事が確認された。4月14日から15日のケースは、 $\tau(0.5)$ が0.5から1.3と高く、 α が0.1から0.5低い値であり、太陽が出ていない夜間の観測データはないものの、2日間同じような状態であったと考えられる。4月16日は、13時42分までの結果では、前日とて

(0.5)は同じ傾向 ($\tau(0.5)=0.6$) にあり、 α が0.6と前日より高いものの大粒子の影響が続いていたものと考えられるが、15時23分以降の結果を見ると、 $\tau(0.5)$ は、ほとんど同じ値であるのに対し、 α が0.6から1.5と急激な変化を示している。これは、大気の混濁状態は変わらないものの、その変動の原因となる粒子が、大粒子から小粒子に変化したことが考えられる。この日は、雲の影響でデータが少なかったものの、黄砂粒子の移流が終わり、小粒子の人為起源エアロゾルの影響が観測されたものと考えられる。4月18日のケースでは、 $\tau(0.5)$ が0.3から0.7と他のケースと比べると低い値であった。 α は、0.2から0.6と低い値であり、同じような大粒子の黄砂が光学的厚さを高めている事が確認された。

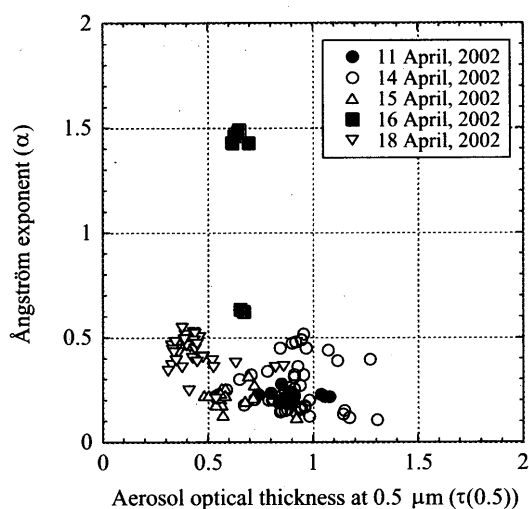


Fig. 2. Sky radiometerによって観測された、富山上空の各黄砂時(2002年4月11日、14日、15日、16日、18日)における0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ($\tau(0.5)$)とオングストローム指数(α)の関係について

Fig. 3は、2002年4月11日から4月30日までのFig. 2の黄砂時の期間中を除いた0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ($\tau(0.5)$)とオングストローム指数(α)の関係について示したものである。 $\tau(0.5)$ は、0.1から1.0に集中しており、 α は、0.2から1.5であった。黄砂時以外の結果を示したものであるが、光学的厚さが高くなるにつれて、オングストローム指数が低くなるような逆相関関係が見られているのが特徴である。 $\tau(0.5)$ が0.1以下より低くならない、比較的光学的に厚い状態が続いていることがわかる。このことから、同様の観測から得られた日本各地の春の結果(Aoki and Fujiyoshi, 2002)とも矛盾しないことが確認された。また、 α が1.5より高くならないのも特徴であり、この時期には、あまり小粒子の影響はなく、大粒子の影響によるものが支配的であることが示された。

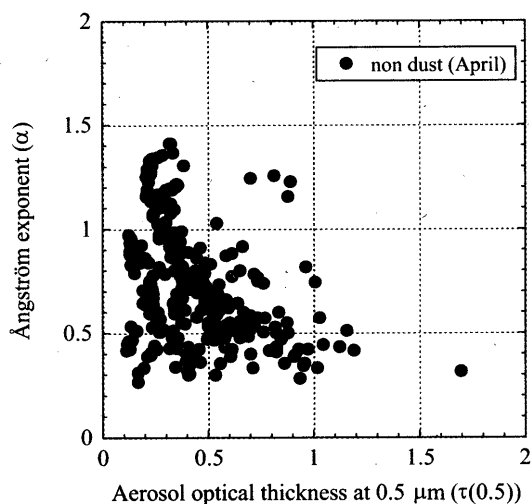


Fig. 3. Sky radiometerによって観測された、富山上空の黄砂時以外の2002年4月の0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ($\tau(0.5)$)とオングストローム指数(α)の関係について

4.2. 体積粒径分布

エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係から黄砂時の特徴を示してきたが、実際にどのような粒径が影響しているかについて体積粒径分布($dV/d\ln r$ (cm^3/cm^3))の結果を調べてみた。

Fig. 4は、各黄砂時(2002年4月11日、14日、15日、18日)の体積粒径分布の結果を示したものである。この期間の体積粒径分布は、どの日も小粒子より大粒子が高く、半径2.0から3.0 μm 付近を中心とした大粒子が顕著な増加を示しており、黄砂粒子の影響が確認された。

Fig. 5は、2002年4月16日の体積粒径分布の結果を示したものである。この日は、Fig. 2で示したとおり、 $\tau(0.5)$ と α の関係が2つに分かれた結果のものである。●は、まだ、黄砂現象が確認されていた13時33分から13時42分で、半径2.0から3.0 μm 付近を中心とした大粒子の増大が確認された。○は、15時23分から16時06分の結果で、大粒子が少なくなり、0.2 μm を中心とした小粒子のピークが確認された。これは、 α が高くなった原因の裏付けとなるが、この数時間の間に、富山上空に運ばれてきた空気塊が急激に変化したことが考えられる。

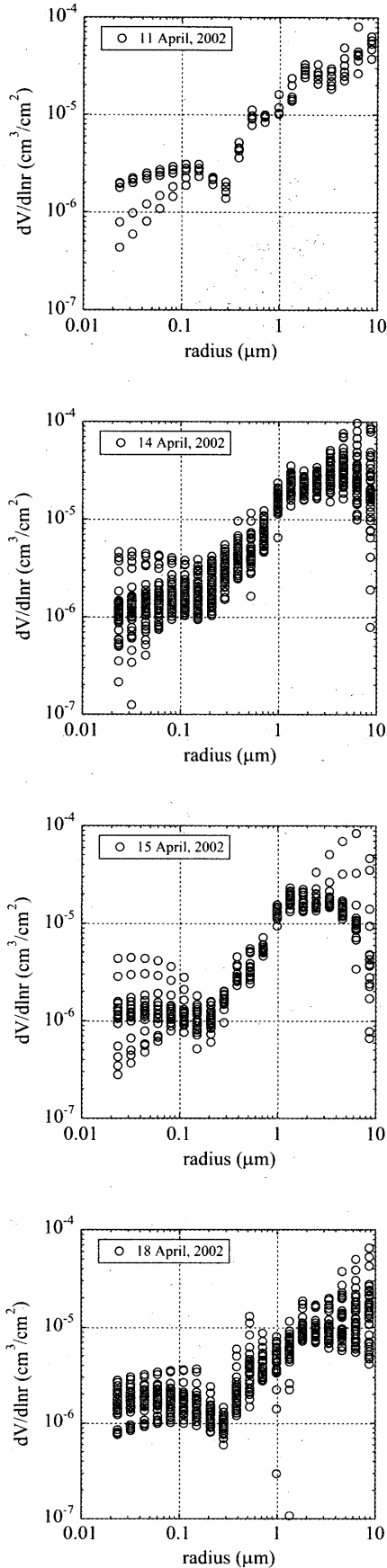


Fig. 4. 各黄砂時 (2002年4月11日、14日、15日、18日) の体積粒径分布の結果

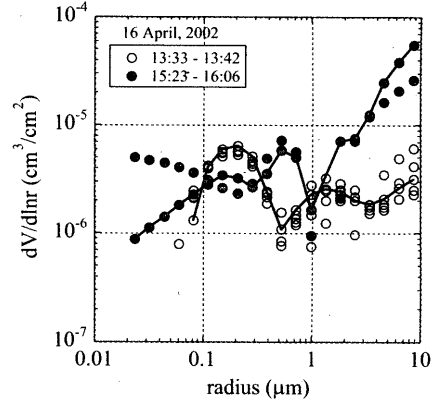


Fig. 5. 各黄砂時 (2002年4月16日) の体積粒径分布の結果。●は、13時33分から13時42分、○は、15時23分から16時06分の結果。

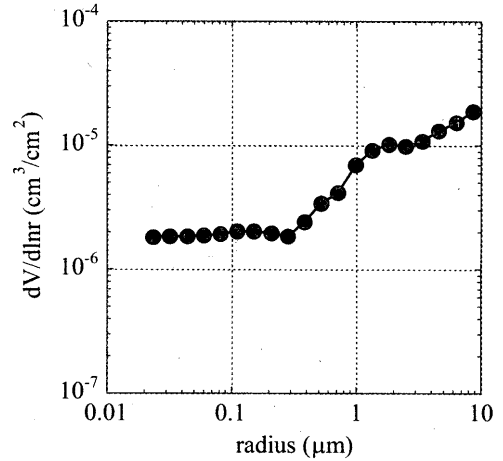


Fig. 6. 2002年4月の観測期間中の体積粒径分布の平均した結果について

Fig. 6は、2002年4月の観測期間中の体積粒径分布の平均した結果である。2.0 μm 付近を中心とした大粒子の増大が確認され、この季節では、黄砂現象の影響による大粒子の増大が、大きく寄与していることが確認された。これは、先にエアロゾルの光学的厚さとオンゲストローム指数の結果同様に、日本各地で同様な観測方法で測定された春の体積粒径分布の傾向と一致する (Murayama *et al.* 2002)。

5. まとめと今後の課題

Sky radiometerを使った富山での観測は、まだ開始したばかりで、十分なデータの蓄積は、これからである。しかしながら、4月の観測結果から、日本各地で報告 (Aoki and Fujiyoshi, 2002) されているのと同様な春のエアロゾルの光学的特性が確認された。

富山地方気象台で報告された黄砂日に観測されたエアロゾルの光学的厚さとオンゲストローム指数の関係は、16日の一

部の例外を除けば、 $\tau(0.5)$ が0.3から1.3で、 α が0.1から0.6の低い値であった。このような $\tau(0.5)$ と α の関係は、1982年の長崎における結果 (Tanaka *et al.* 1989) や最近の同様な観測結果 (Aoki and Fujiyoshi, 2002; Murayama *et al.* 2001) とよく似た傾向にあり、 $\tau(0.5)$ と α の関係が他地点と矛盾しない結果が得られた。また、体積粒径分布の結果も同様な半径2.0から3.0 μm 付近を中心とした大粒子の寄与が大きいことが確認された。

以上の結果では、富山地方気象台から報告された黄砂現象のみを黄砂日として解析を進めているが、実際には、上空だけを通過する黄砂現象もあり、そのような日は、黄砂日と報告されない場合がある。光散乱式粒子測定器による地上付近の観測とSky radiometerの結果は、ある程度一致すると報告されている (荒生、青木、2002)。しかし、Fig. 3のように、4月の黄砂観測日以外の $\tau(0.5)$ と α の関係を示しているが、黄砂時と近い値もあり、そのような日は、黄砂が上空を通過していると考えられる。Sky radiometerでは、鉛直全層を測定しているためそのような黄砂の検知が可能となってくる。しかし、Sky radiometerからだけでは、鉛直分布がわからないという弱点もあり、今後、鉛直分布が測定できるLidarなどと組み合わせて観測をすることによって、地表付近の影響のみならず、高度分布の情報を得ることで、上空を通過する黄砂粒子の特徴を示していくことが、さらなる研究につながってくると考えられる。また、本研究に使用した測定機器は、雲に取り込まれた黄砂に関しては、観測することが出来ないため、これらもあわせて進めていきたいと考えている。

今回は、黄砂の輸送問題にはあまり触れなかったが、中国大陸から大規模輸送される黄砂粒子の光学的特性が、日本の他地点と富山で似た傾向にあることが確認できた。しかし、発生地からどのように輸送されていくのかについて、さらに考察する必要があると考えられる。これは、大陸からの黄砂粒子や大気汚染物質の輸送をシミュレーション (Uno *et al.* 2001; Yamazaki *et al.* 1999) する上で、このような観測結果が必要不可欠となってくるからである。なぜなら、Takemura *et al.* (2001) による数値モデルでは、日本付近では、黒色炭素や硫酸エアロゾルの濃度が、2000年と比較して、2050年では、2倍から3倍になる可能性もあると試算されているからである。そのようなシナリオを検証するためにも、富山のような大陸から直接影響を受けるような場所で、精度の良い長期間観測を行うことが、これから益々重要となっていくと考えられる。

参考文献

Ångström, A., 1961: Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, 13, 214-223.
Aoki, K. and Y. Fujiyoshi, 2002: Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, submitted.

荒生公雄、青木一真: 長崎地方における1999年~2000年春の黄砂現象、2002、長崎大学総合環境研究、第4巻、第1号、1-17.

Husar, R. B., D. M. Tratt, B. A. Schichtel, S. R. Falke, F. L. D. Jaffe, S. Gasso, T. Gill, N. S. Laulainen, F. Lu, M. C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B. N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G. C. Feldman, C. McClain, R. J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W. E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto and W. C. Malm, 2001: Asian dust events of April 1998. *J. Geophys. Res.*, 106, 18, 317-18, 330.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996 *Climate Change 1995: Eds. J. T. Houghton et al.*, Cambridge Univ. Press, 572 pp.

IPCC, 2001: *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.*, Cambridge Univ. Press, 896 pp.

Kawamura, K., A. Yanase, T. Eguchi, T. Mikami and L. A. Barrie, 1996: Enhanced atmospheric transport of soil derived organic matter in spring over the high Arctic. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3735-3738.

Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B. J. Sohn, J. G. Won, S. C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga and Y. Iwasaka, 2001: Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia. *J. Geophys. Res.*, 106, 18, 345-18, 360.

名古屋大学水圏科学研究所 (編)、1991: 大気水圏の科学-黄砂、古今書院 (東京)、pp. 328.

Nakajima, T., A. Higurashi, K. Aoki, T. Endoh, H. Fukushima, M. Toratani, Y. Mitomi, B. G. Mitchell and R. Frouin, 1999: Early phase analysis of OCTS radiance data for aerosol remote sensing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 37, 1575-1585.

Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Appl. Opt.*, 35, 2672-2686.

Takemura, T., T. Nakajima, T. Nozawa and K. Aoki, 2001: Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79, 1139-1155.

Tanaka, M., M. Shiobara, T. Nakajima, M. Yamano and K. Arao, 1989: Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 at Nagasaki - Part I Observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 267-278.

- Tratt, D. M., R. J. Frouin and D. L. Westphal, 2001: April 1998 Asian dust event: A southern California perspective. *J. Geophys. Res.*, 106, 18, 371-18, 379.
- Uematsu, M., R. A. Duce, J. M. Prospero, L. Chen, J. T. Merrill and R. L. McDonald, 1983: Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 88, 5343-5352.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui and N. Sugimoto, 2001: Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation. *J. Geophys. Res.*, 106, 18, 331-18344.
- Yamazaki, K., H. Yanagihara and K. Aoki, 1999: Simulation of generation and transport of Kosa aerosols, Special Reports on the Regional Studies of North-East Eurasia and North Pacific in Hokkaido University, Hokkaido University, 75-83.