

長崎地方における1999～2000年春の黄砂現象

荒生 公雄*・青木 一真**

Yellow Sand Events in Springs 1999—2000 over Nagasaki, Japan

Kimio ARAO* and Kazuma AOKI**

Abstract

Yellow sand events (Kosa in Japanese) at Nagasaki (33° N, 130° E) in Japan in two spring seasons in 1999-2000 were studied on the bases of the measurements of the aerosol optical particle counter (OPC) and the sky radiometer (SR) both at the Nagasaki University.

All of the yellow sand events in these springs which observed at the Nagasaki Marine Observatory of Japan Meteorological Agency are listed in Table 1, in which both the times of yellow sand event and the lowest visibility are shown in the fourth column.

The results obtained by OPC measurements are shown from Figs. 1 to 16, partially accompanied with the simultaneous SR measurements, because the SR was in trouble twice.

The most severe dust episode in these two years at Nagasaki occurred on 22 April 2000, however, which showed the level of one half of the greatest dust storm on 18 April 1998.

1. はじめに

荒生・坂口(1999)の前の報告において、長崎大学環境科学部の光散乱式粒子測定器(Optical Particle Counter; OPC)による測定結果に基づいて黄砂現象の実態を解析した。本稿は、その続報として位置づけられるとともに、新たに観測に利用したスカイラジオメーター(Sky Radiometer; SR)の結果をも利用して、OPCとSRとの関連性を考察することを目的とする。

黄砂現象に伴う混濁大気的光学的特性の変化は地球温暖化の放射強制力の正確な評価に大きな影響を与えるので(IPCC, 2001)、詳細な実態把握が強く要請されるようになった。また、広域的な大気汚染(越境大気汚染)による汚染物質の輸送経路の予測

の必要性から、黄砂現象や大気汚染物質の輸送数値シミュレーションも精度よく行われるようになってきている(たとえば、鶴野ほか, 2001)。さらに、黄砂現象の詳細な観測は数値予報モデルの検証にも有用であると考えられるので、韓国気象庁のグループ(Chun et al, 2001)とのデータ交換や共同研究について十分可能な段階に到達している。これらに加えて、地球温暖化に伴う砂漠化の進行も憂慮されることの一つであり、砂漠化との関連からも黄砂現象の出現回数や砂塵の大気中の濃度の変動などに注意深い監視が必要である。

長崎県地方はアジア大陸に近いので、日本列島の上では黄砂現象を最も頻繁に観測する地域であり、この種の研究や調査を発展させる環境にある。そこで、長崎地方の黄砂現象に注目し、黄砂現象時のエアロゾルの大粒子濃度の変動の実態とエアロゾルの光学的厚さ、オンゲストローム指数などの変化について考察する。

*長崎大学環境科学部

Faculty of Environmental Studies, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan.

**北海道大学低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan.

Table 1 Yellow sand dust events at Nagasaki in 1999-2000

Year	Month Day	Weather* ¹	Times of yellow sand event* ²	Lowest visibility* ³ (time)	Maximum density of 5 μ m-particles* ⁴
1999	January 26	○ ○	0800-1400	10 km (09h)	no observation
	January 28	⊙ ○	1100-1830	20 km (15, 18h)	no observation
	April 06	⊙● ⊙⊙	07-0850/1130-1730	15 km (12, 15h)	50 (10h)
	April 13	⊙⊙ ⊙	1600-2000	15 km (18h)	46 (15h)
	April 27	○ ⊙⊙	1400-2300	7 km (15h)	no observation
	28	⊙ ○	0200-0700	10 km (18h)	no observation
May 05	⊙ ⊙⊙	1230-1700	15 km (15h)	24 (13h)	
2000	March 24	⊙ ⊙	0130-2000	4 km (03h)	139 (11h)
	March 26	⊙ ⊙	0830-2400	10 km (12~21h)	247 (10h)
	27	⊙ ⊙●	0000-1700	8 km (09, 12h)	190 (02h)
	28	● ⊙●	1510-2400	6 km (21h)	142 (15h)
	29	⊙● ⊙⊙	0000-2400	6 km (03, 06h)	249 (10h)
	30	○ ⊙⊙	0000-0400	15 km (03h)	34 (01h)
	April 08	○ ○	0640-2400	10 km (09~21h)	294 (08h)
	09	⊙⊙ ⊙●	0000-1700	10 km (03~15h)	132 (08h)
	10	●⊙ ○	1430-2400	8 km (15h)	no observation
	11	○ ⊙⊙	00-07/1310-2400	10 km (03, 18, 21h)	234 (19h)
	12	⊙⊙ ⊙	0000-2000	10 km (03~09h)	165 (08h)
	13	⊙ ⊙	0830-2400	15 km (09~21h)	67 (14h)
	14	⊙⊙ ⊙●	0000-1100	15 km (03, 09h)	46 (11h)
	April 22	⊙ ⊙⊙	1330-2400	3 km (18h)	317 (20h)
	23	⊙ ⊙	0000-0200	15 km (03, 21h)	71 (01h)
	May 02	⊙ ⊙	0850-2200	8 km (09, 12h)	229 (02h)

*1 the former half shows the weather in daytime and the latter at night observed at Nagasaki Marine Observatory ; ○very fine, ⊙fine, ⊙slightly cloudy, ⊙cloudy, ●rain

*2 according to the careful observation by Nagasaki Marine Observatory

*3 visibility at Nagasaki Marine Observatory observed in an interval of three hours

*4 number density of particles larger than 5 μ m per liter measured at Nagasaki University

Table 2 Number of days of yellow sand events observed at Nagasaki Marine Observatory in January to May. Numbers with a decimal point indicate the annual mean value.

Year	January	February	March	April	May	Total of days
1914～1975	0.27	0.29	1.45	1.87	1.22	5.11
1996	0	0	1	4	4	9
1997	0	0	3	2	0	5
1998	0	0	3	5	0	8
1999	2	0	0	4	1	7
2000	0	0	6	9	1	16
1996～2000	0.4	0.0	2.6	4.8	1.2	9.0

2. 黄砂現象の概況 (1999～2000)

Table 1 は長崎海洋気象台で観測された2年間の黄砂現象の一覧表である。同海洋気象台で観測された黄砂現象はすべて網羅しているので、この表は2年間の1月～5月のあいだに出現した長崎地方の黄砂現象のすべてである。

Table 1 には、日付、天気、黄砂現象の出現時間帯、最小視程(起時)、OPCで観測された最大粒径の粒子数(起時)の順に表示している。なお、最後の欄の“no observation”という記述は長崎大学環境科学部の本研究室でOPC観測を行っていなかったことを意味する。

Table 1 は、1999年と2000年の黄砂現象の回数ばかりでなく、黄砂現象の強弱も強いコントラストを示している。すなわち、海洋気象台における黄砂現象時の最低視程は1999年では7 kmであったが、2000年では、3 kmを皮切りに4 km、6 kmと、7 km未満の最低視程が合計4回観測されている。このことは環境科学部のOPC測定値にも明瞭に反映しており、2000年には大粒子濃度(直径5 μm 以上)が200個/リットルを観測した黄砂現象が6回にも及んだ。この回数は過去5年間で最多であった。

ところで、Table 1 から明らかなように、長崎海洋気象台の観測による2年間の黄砂出現日数は、

1999年：7日(1月:2日、4月:4日、5月:1日)

2000年：16日(3月:6日、4月:9日、5月:1日)

である。黄砂日数の経年的な変化傾向に注目するために、Table 2 に、長崎海洋気象台における黄砂現象の月別の平均的な出現日数と最近5年間の出現日数を示した。最初に示す1914～1975年の欄は62年間の年平均日数であり、それらの日数は荒生ほか

(1979)の報告に基づいている。それに続く1996年から2000年のデータは1年ごとの月別日数であり、1996～1998年は前報(荒生・坂口、1999)の日数を転載している。最後の1996～2000年の欄は、最近5年間の出現日数の年平均値を示す。Table 2 のもっとも顕著な特徴は、最近の5年間においては、62年平均値に比べて、1～5月の5ヵ月間の合計で、出現頻度が約1.80倍(5.11日→9.0日)も増加している。さらに、月別にみると、4月の出現頻度が大幅に増加している(1.87日→4.8日; 2.6倍)。ただし、2000年の合計16日という出現日数は、荒生ほか(1979)の62年間にも1度あっただけの極端に多い日数であるので、その日数が5年平均値を大きく上方に押し上げていることに留意する必要がある。そのことを考慮に入れても、1997年以降においては5月の出現日数がかかなり少ない状況が続いている。この表は、近年において、4月と5月の相対的な頻度分布が4月にシフトしてきた傾向を示しているが、このような傾向が恒常的なものか、一時的なものかの診断には十分慎重であるべきであり、今後の課題の一つとして指摘するだけに止めたい。

3. 光散乱式粒子測定器とスカイラジオメーターの観測上の特性

3-1 光散乱式粒子測定器の特性

本研究に用いたOPCは、<リオンRION KC-01 B>であり、大気中の粒子の大きさを5段階に分別する。すなわち、小さい方から順に、直径0.3～0.5 μm 、0.5～1.0 μm 、1.0～2.0 μm 、2.0～5.0 μm 、5.0 μm 以上、に分級され、測定値はプリンター<RION KP-04A>の感熱紙上に印刷される。本稿

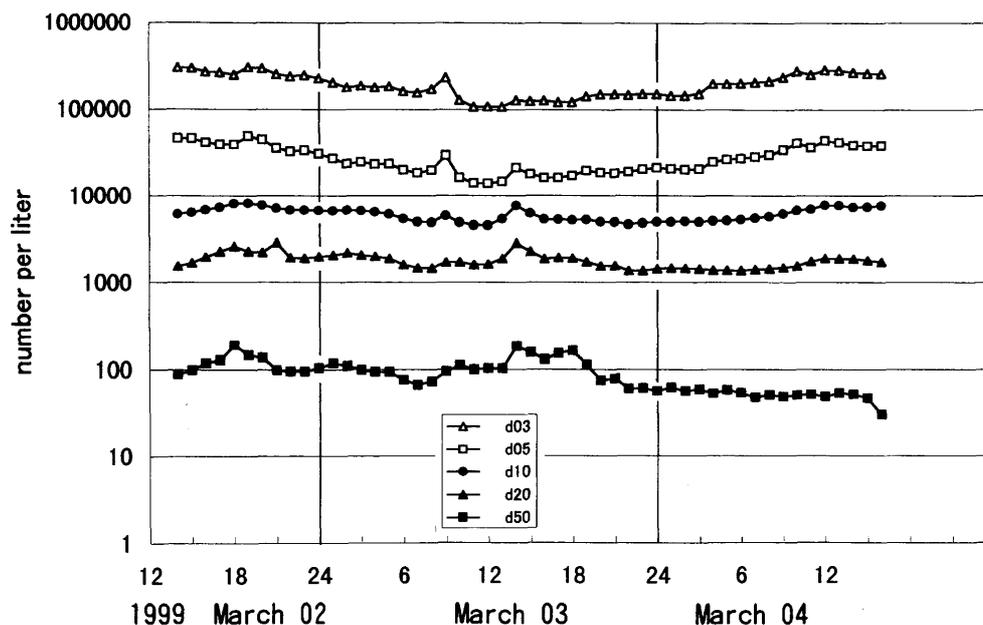


Fig. 1 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 2 to 4 March 1999. Captions d03, d05, d10, d20 and d50 indicate diameters 0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0-2.0, 2.0-5.0 and 5.0 μm in order.

の図では、直径の小さい方から順に、d03、d05、d10、d20、d50という記号を用いている。

本測定器の原理は、センサー部分を通過する空気にハロゲンランプの光を照射し、個々の粒子の散乱光の強度から粒子直径を判別するものである。本測定器の空気流量は毎分0.5リットルであるので、2年間の測定では、サンプリング時間をすべて20分間に設定し、流量10リットル中に含まれる粒子数を測定した。また、時期によっては2分間のスポット測定（流量1リットル）を5～6回繰り返す方法も実施した。本稿のすべての図と表では1リットル中の粒子数に引き直して表示している。外気からセンサーに導くチューブは長さ2 m、内径8 mmである。サンプリングを行った地上高は約6m（環境科学部2階）である。その他のOPCの測定条件については荒生・坂口（1999）を参照されたい。

3-2 スカイラジオメーターの特性

本研究に用いたスカイラジオメーターSRは、プリード社POM-01型であり、同社とNASDA（宇宙開発事業団）の御厚意により一時的に利用させていただいた。6つの波長（315, 400, 500, 870, 940, 1040 nm）で、太陽直達光と天空散乱光を8～10分間に1回の割合で自動的に測定できる。これらの波長のうち、315, 940 nmを除く4波長を用いて、エアロゾルの光学的厚さ、Ångström (1961)の波長指数 α (ALPHA)、エアロゾルの体積粒径分布などが得られる。本報では、最も基礎的な情報で

ある500nmにおけるエアロゾルの光学的厚さ (AOT500) と波長指数 (ALPHA) に着目することにした。

なお、観測に用いたSRは2年間のあいだに2回トラブルが発生したため、黄砂シーズンにおいても測定できなかった時期がある。2年間でSRによる測定ができた時期は以下の通りである。

1999年：4月07日～5月31日

2000年：4月22日～5月31日

なお、スカイラジオメーターに関する理論的バックグラウンドについてはNakajima et al. (1996)の論文を参考にされたい。

4. 黄砂現象時における測定結果

本節では、原則として、黄砂現象に着目し、OPCから得られたエアロゾルの粒径別濃度の時間変化を考察する。さらに、日中の天候に恵まれてSRの測定結果が得られた場合は、その結果も同時に示して総合的な考察を行う。ただし、片方のデータしか得られなかった場合や、長崎海洋気象台が黄砂現象と記載しなかった日についても、興味深い結果が得られた場合には考察の対象とした。

(1) Fig. 1 <1999年3月2～4日>

図の縦軸は1リットル当りの粒子濃度を5段階で表示し、横軸は月日と時刻を表す。横軸のすぐ下の帯状の半影部は長崎海洋気象台で観測された黄砂現象の時間帯を示すものであるが、この3日間には観

長崎地方における1999～2000年春の黄砂現象

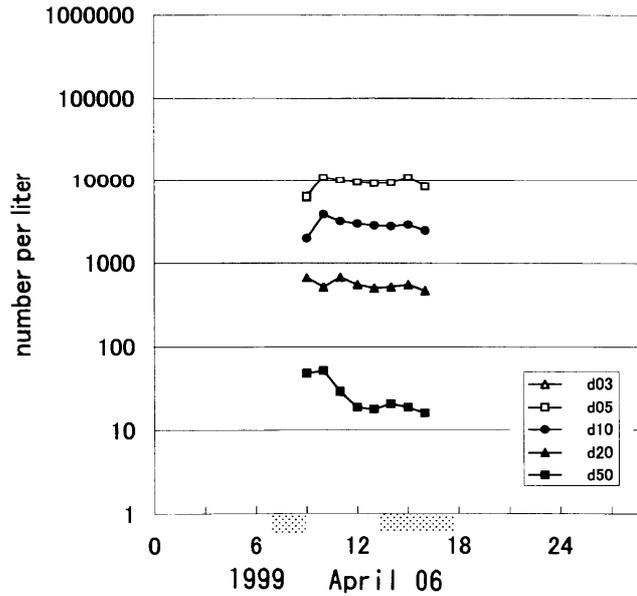


Fig. 2 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 6 April 1999. Captions are same as Fig. 1. The shaded belt under the time axis in these figures shows the yellow sand event observed at the Nagasaki Marine Observatory, Japan Meteorological Agency.

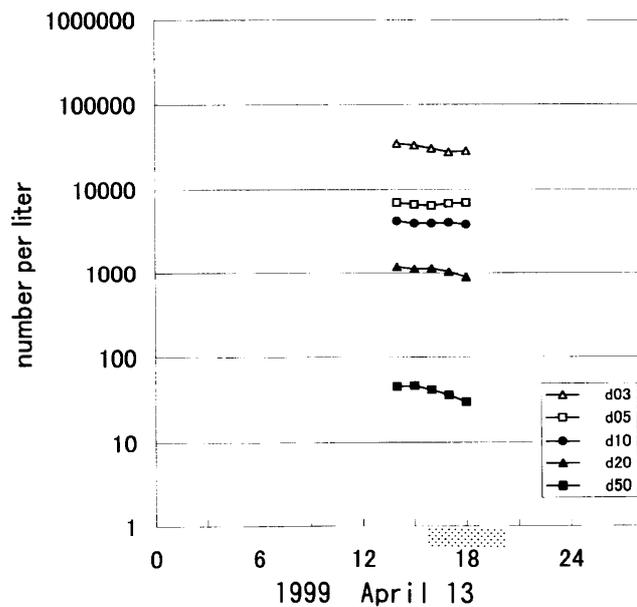


Fig. 3 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 13 April 1999. Captions are same as the former ones.

測されていないために、半影の帯は表示されていない。3月2日午後から4日午前中までのエアロゾルの粒子数はかなり多く、前報（荒生、坂口、1999）の黄砂現象時の粒子数の標準的なレベル：

直径1～2 μm(d10)の濃度:4880個/リットル

直径2～5 μm(d20)の濃度:2220個/リットル

直径5 μm以上(d50)の濃度: 80個/リットル

を全体として超えているので、黄砂粒子が地上付近にかなり存在し、実質的に「弱い黄砂状態」であったものと考えられる。

(2) Fig. 2 <1999年4月6日>

この日は2つの時間帯で黄砂現象が観測された。最も大粒子濃度が高かった時間帯は10時頃であったが、Fig. 1と比較すれば明らかなように、黄砂現象時の粒子数としてはかなり少ない。特に、2～5 μm粒子が少なく（500～600個/リットル）、黄砂現象としては特異な状態であった可能性が考えられる。なお、Fig. 2ではプリンターの制御ミスのために、最小粒子d03（0.3～0.5 μm）の測定が欠落している。

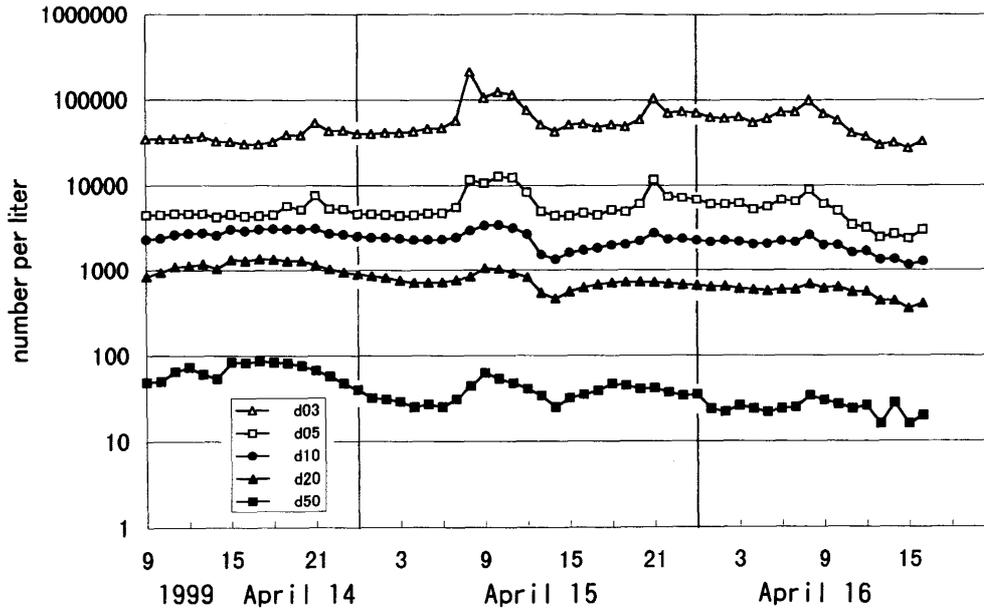


Fig. 4 (a) Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 14 to 16 April 1999. Captions are same as the former ones.

このときの黄砂現象については、気象庁の鈴木ほか (2001) のサンフォトメータの観測に基づく論文にも報告されている。彼らの論文によると、このときの黄砂現象は南西諸島方面 (沖縄県) で顕著であった。同論文に示されているサンフォトメータの観測結果の図を読み取れば、4月6日の沖縄県与那国島の黄砂現象ピーク時においては $\langle \text{ALPHA} = 0.2 \sim 0.3, \text{AOT}500 = 0.63 \rangle$ 程度であったと推定できる。

(3) Fig. 3 <1999年4月13日>

長崎海洋気象台が黄砂現象を観測したのは4月13日16時であった。環境科学部でのOPC測定開始時刻は13時頃で、空はそれほど濁っていないが、実況監視という意識から測定を開始したものであった。しかし、黄砂現象を予見させるような濃度ではなかったため、黄砂現象が継続しているとは知らずに、夕方には測定を停止した。黄砂現象とは言え、海洋気象台の視程は最低でも15kmまでしか低下しなかったこと、Fig. 3のOPCの結果では大粒子側が通常よりやや多かった (2~3倍) という程度に止まっていたことなどを総合すると、比較的軽微な黄砂であったと思われる。この日のスカイラジオメーターは動いていたが、天候不良のため3組のデータが得られたに過ぎなかったため、図には表示しない。同日の15時の2組のデータから得られたエアロゾルの光学的特性は $\langle \text{ALPHA} = 0.36, \text{AOT}500 = 0.36 \rangle$ のレベルであり、地上付近の濃度が比較的小さいので、上空に大粒子が存在していた可能性を示唆する。

(4) Fig. 4 (a)(b) <1999年4月14~16日>

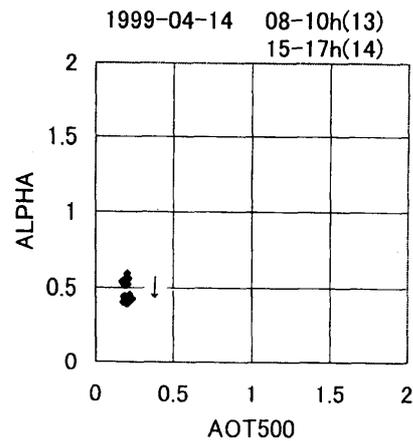


Fig. 4 (b) Relation between the aerosol optical thickness at 500 nm (AOT500) and Ångström's wavelength exponent (ALPHA) at Nagasaki University on 14 April 1999. Allow shows the the temporal change during the times shown in the above. Number in parentheses indicate the observation times.

この日の場合は黄砂現象を予感してOPC測定を開始したが、海洋気象台では黄砂現象とはしなかったようである。大粒子側はいわゆる「黄砂レベル」の十分な高濃度であったが、小粒子側の粒子数は比較的低濃度で、顕著な視程低下とは結びつかなかったものと考えられる。2日半の連続測定において、大粒子が徐々に減少傾向を示したが、15日9時頃に、全粒径にわたって、一時的な粒子数の増加が認められた。このとき、大粒子と小粒子では増加の時刻を比べると、小粒子の増加が約1時間はやく、しかも

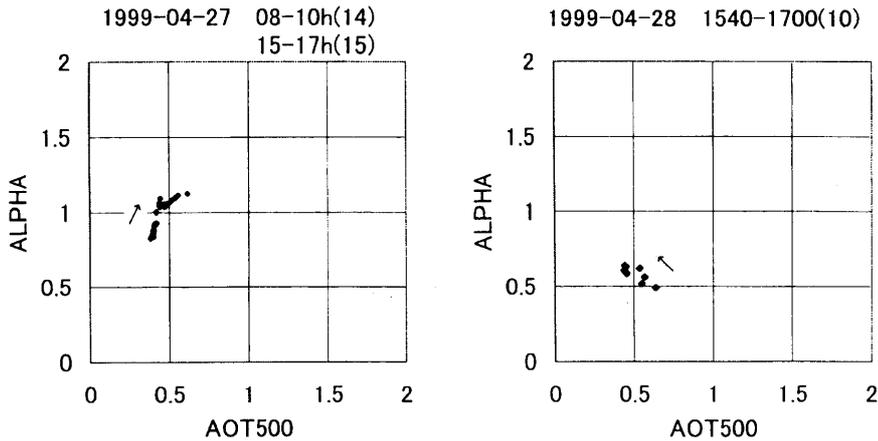


Fig. 5 Relation between AOT500 and ALPHA at Nagasaki University on 27 to 28 April 1999.

小粒子では1時間のあいだに約4倍も急増していた。あとの図でも指摘するように、小粒子の増加が大粒子の増加に1時間～数時間程度先行する場合がある。ただし、全く同時に増加する場合があったり、あるいは、大粒子が増加傾向で、小粒子が減少傾向という場合もあることに留意されたい。

4月14日は晴天に恵まれ、日中のSR測定も順調に行われた。Fig. 4(b)においては、横軸に波長500nmにおけるエアロゾルの光学的厚さ(AOT500)、縦軸にオングストローム指数(ALPHA)を示し、月日、時刻およびそれらの時間帯で得られたデータ数をカッコのなかに示している。以下、この種の図をSR図と略称する。終日にわたって晴天であったが、Fig. 4(b)には、08-10時、15-17時の解析結果しか示していない。その理由は、日中の結果すべてを図中にプロットすれば、表示されるポイント数が多過ぎて、団子状、楕円状、棒状などの塊を形成しやすく、SR図のなかに時刻を記入しにくいためである。本報では、原則として1～2時間程度の短い時間帯(データ数7～15個)に区分し、朝と午後、あるいは昼と夕方など、SR図上での2つ以上の時間帯における変化傾向を矢印で表示することとした。この日の場合、

09時頃(08-10時): ALPHA=0.6, AOT500=0.2

16時頃(15-17時): ALPHA=0.4, AOT500=0.2

となっており、AOT500はほとんど変わらないのに、ALPHAは09時頃よりも16時頃の方が小さくなっていった。ALPHAが小さくなることは大粒子が多くなることを意味し、光学的厚さが変わらないことは、エアロゾル全体の消散の大きさは変化しないので、大粒子が多くなったことを補うように小粒子が少なくなることを意味する。OPC測定Fig. 4(a)の14日09時と16時を見比べると、上述のように、09時で

は、大粒子が少ないが小粒子がやや多い(ALPHA=0.6)、16時ではそれよりも大粒子多、小粒子少(ALPHA=0.4)の状態に変化し、結果として、AOT500はほとんど変わらずに、ALPHAが小さい方に移っていた。この日の場合は、OPCの粒径別粒子濃度とSRのエアロゾルの光学的特性が非常に一致している。このように、地上付近のOPC測定と大気鉛直気柱全体を観測するSRの結果(変化傾向)が一致していることは、大気の上層や中層も地上のエアロゾルの環境とほとんど変わらないか、もしくは地上に比べて非常に澄んでいることを意味する。この日の場合はAOT500(以下、必要に応じてAOTと略記)が比較的小さいので、エアロゾルは大気下層に限定され、上空はかなり清澄であったものと推定できる。ただし、下層のエアロゾルは黄砂をかなり多く含んでいたと考えられる。

(5) Fig. 5 <1999年4月27～28日>

4月27～28日は黄砂現象となったが、OPCの測定は行われていない。しかし、SRは動いていたので、両日のSRの解析結果をFig. 5に示す。27日の海洋気象台の最低視程(7km)は15時頃に観測されているので、同日の朝08-10時と午後15-17時を表示した。朝は<ALPHA小, AOT小>、午後は<ALPHA大, AOT大>の傾向をもっていたので、この時間帯のエアロゾルが<大粒子が相対的に多く、粒子全体の濃度が小さい状態>から<大粒子が減少し、全粒子密度が増加した状態>に変化したことを意味する。このことは、視程の低下傾向とはよく一致する。しかし、黄砂現象の起時が14時であることを考慮すると、Fig. 5の15時の状態に近いので、黄砂はそれほど高密なものではなかった可能性がある。

28日の場合は雲にさえぎられて、午後15時40分-17時にしかまとまったデータがない。海洋気象台の

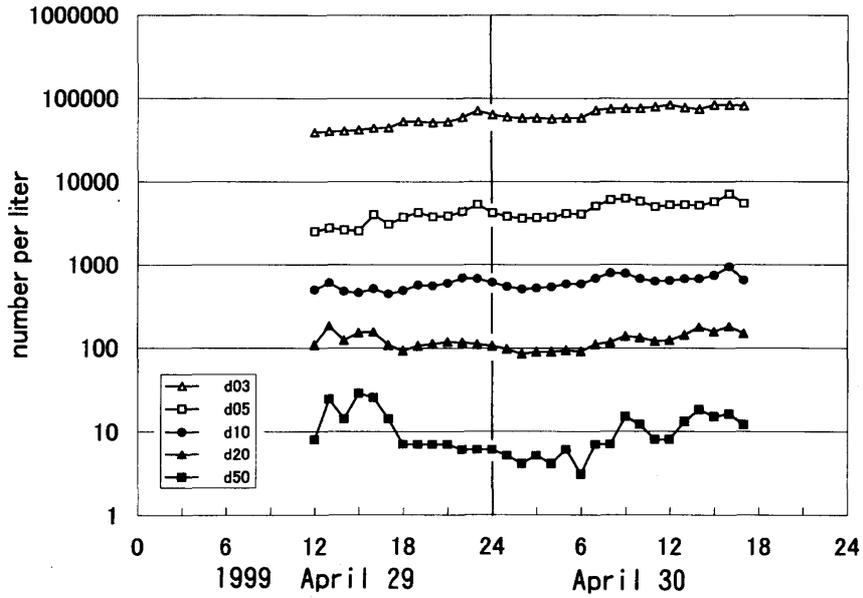


Fig. 6(a) Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 29 to 30 April 1999.

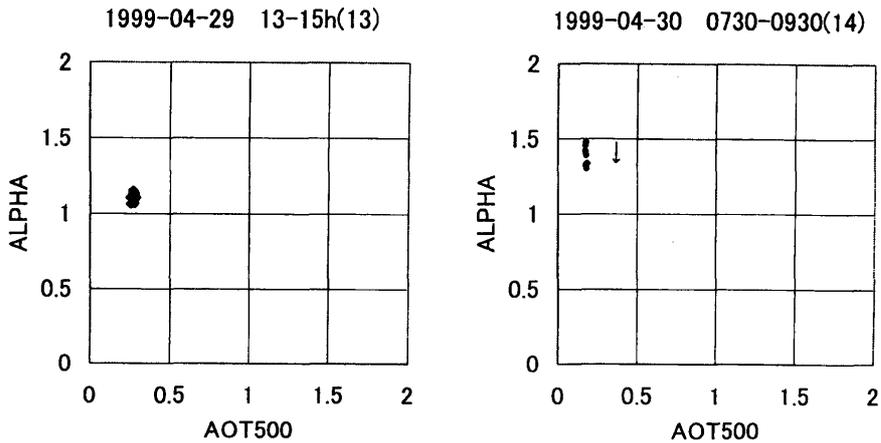


Fig. 6(b) Relation between AOT500 and ALPHA at Nagasaki University on 29 to 30 April 1999.

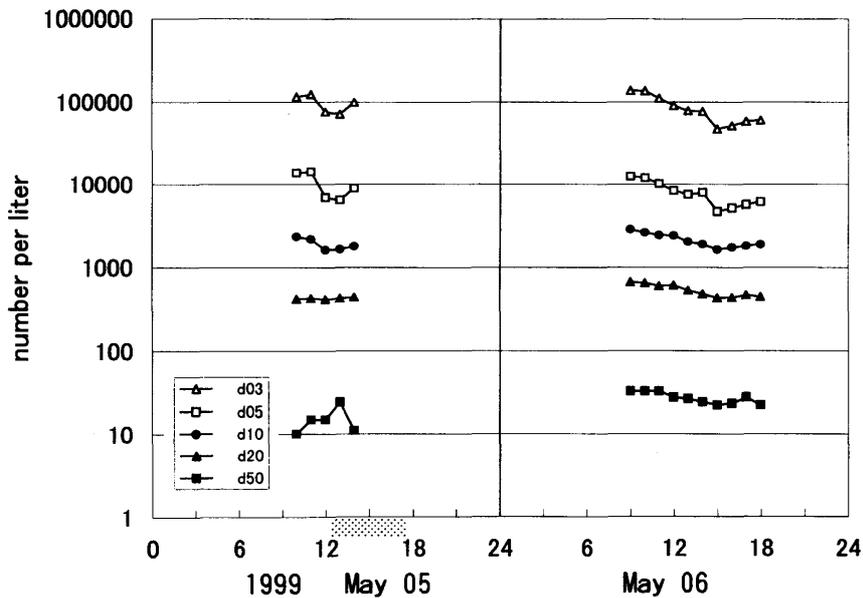


Fig. 7(a) Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 5 to 6 May 1999.

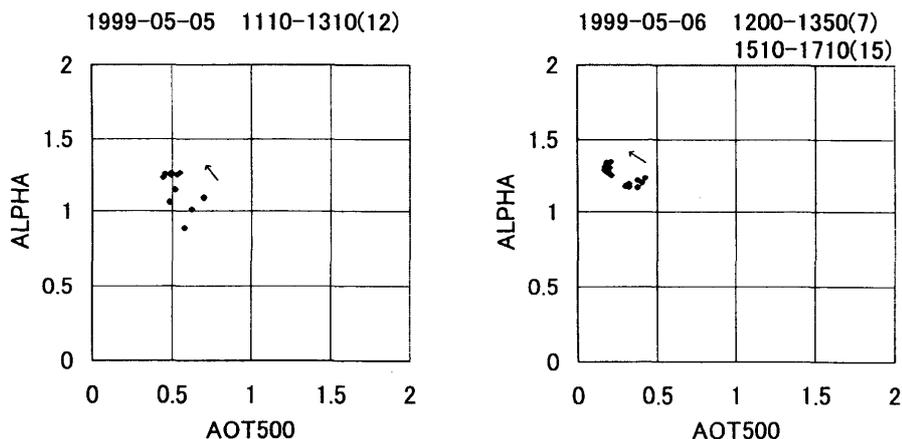


Fig. 7 (b) Relation between AOT500 and ALPHA at Nagasaki University on 5 to 6 May 1999.

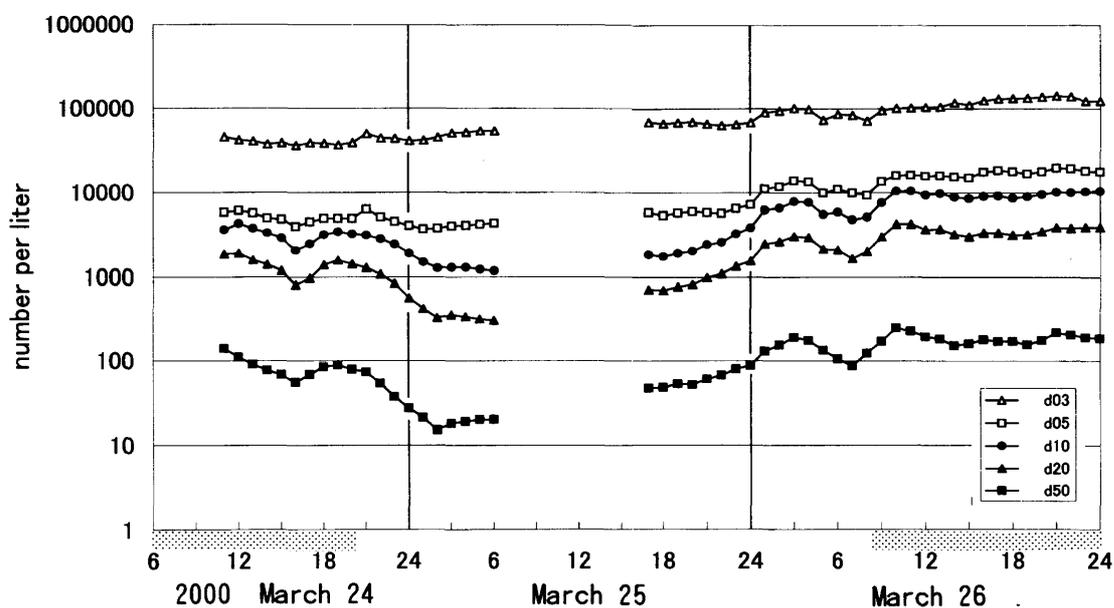


Fig. 8 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 24 to 26 March 2000.

黄砂現象は同日07時に終息したが、SRの午後のデータは十分に<ALPHA小, AOT大>であり、大気中に大粒子が依然として滞留していたことを示唆する。

(6) Fig. 6 (a)(b)<1999年4月29～30日>

この時は明らかに黄砂ではなく、非常に清澄な大気状態であった。OPCとSRのデータセットが得られたので、春の澄んだ大気状態の事例として若干の考察を加えることにしたい。29日の夕方から30日朝にかけて、Fig. 6 (a)の直径5 μm 以上の大粒子の濃度は10個以下(5～8個)、直径2～5 μm の粒子も100個程度であるが、これら2つの大粒子側の粒子濃度がこれほど低濃度の事例は本報のOPC図のなかには他にない。それでも29日の昼過ぎは大粒子側でやや高濃度になっていたもので、Fig. 6 (b)の29日では13～15時に着目した。この時は<ALPHA =

1.2, AOT500=0.3>程度であり、清澄で比較的大粒子が少ない状態であった。30日朝には<ALPHA = 1.3～1.4, AOT500=0.2>となり、ALPHAが増加して、さらに大粒子濃度が低下した兆候を示している。このようなSRから得られた情報はOPCの粒子濃度の変化とよく対応している。ただし、両日のあいだでAOT500を比較すると、30日の方が小さいが、地上のOPCにおいて30日の方が小粒子濃度が大きいことを考慮すれば、30日の上空は29日より澄んでいたと考えられる。

(7) Fig. 7 (a)(b)<1999年5月5～6日>

5月5日には黄砂現象が観測されたが、OPCで見ると大粒子濃度はかなり小さく、黄砂現象のなかった6日のOPCのレベルとほとんど変わらない。一方、SRの解析結果は5日と6日でかなり明白な違

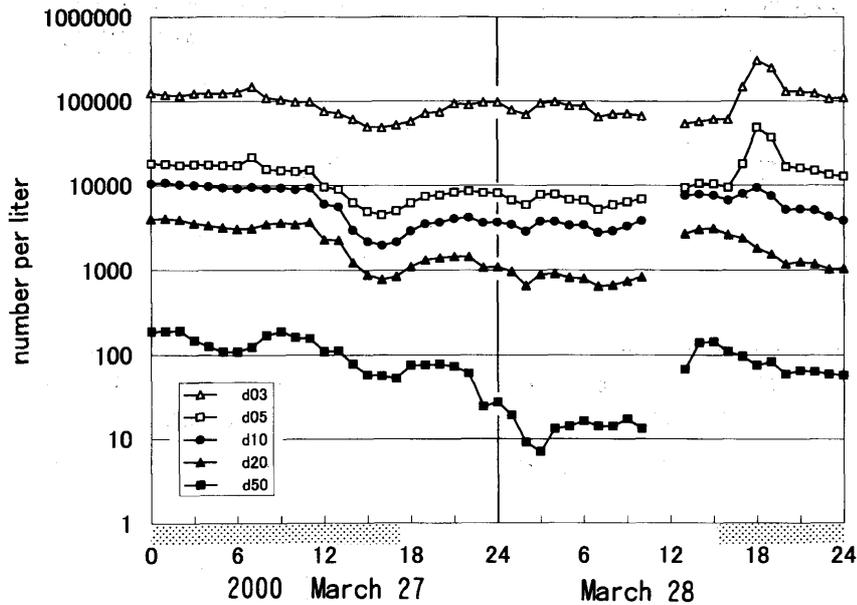


Fig. 9 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 27 to 28 March 2000.

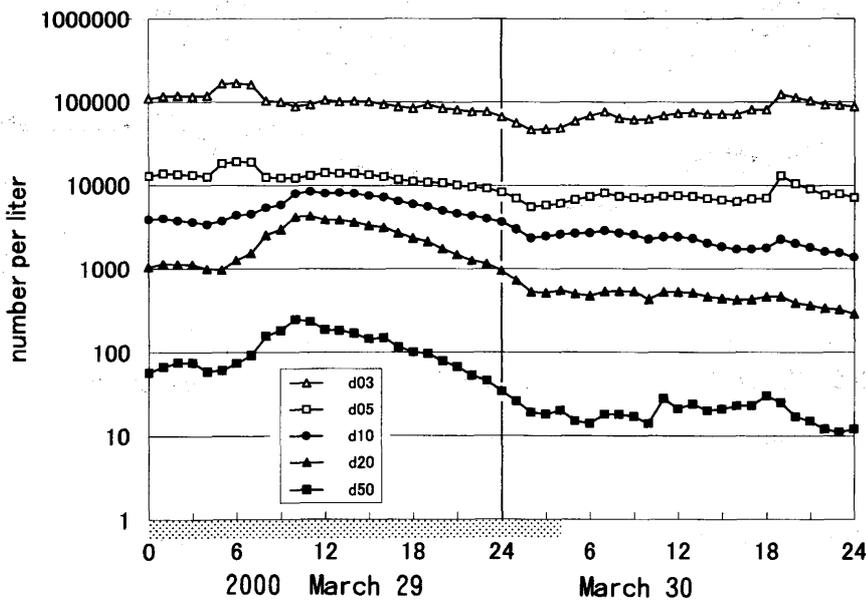


Fig.10 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 29 to 30 March 2000.

いがある。すなわち、5日と6日でALPHAの値(1.2~1.3)はほぼ同じであるが、AOT500は5日に大きく(0.7~0.5)、6日には順調な減少傾向を示す(0.4~0.2)。このことは、OPCの地上データはほぼ同じであるので、5日の上空は濁っていたが、6日の上空は澄んできたことを示す。したがって、5日の黄砂現象は、海洋気象台の観測者が上空に着目して判定した可能性が強く、地上の最低視程(15 km)が大きかったことも符合する。

(8) Fig. 8 <2000年3月24~26日>

2000年3月24日は01時30分から黄砂現象に突入していたが、OPCの観測開始は10時であった。観測開始の時点で大粒子側は高濃度状態になっていた一方で、小粒子側の濃度が小さく、OPCの粒径別濃度は、あとに示す2000年5月1日の状態によく似ている。したがって、もしSR測定が行われていれば<ALPHA小, AOT500大>の典型的な大気状態になっていたであろう。

26日も大規模な黄砂であった。04~07時に一旦濃度が低下したのち、全粒径が一斉に急上昇に転じ、

長崎地方における1999～2000年春の黄砂現象

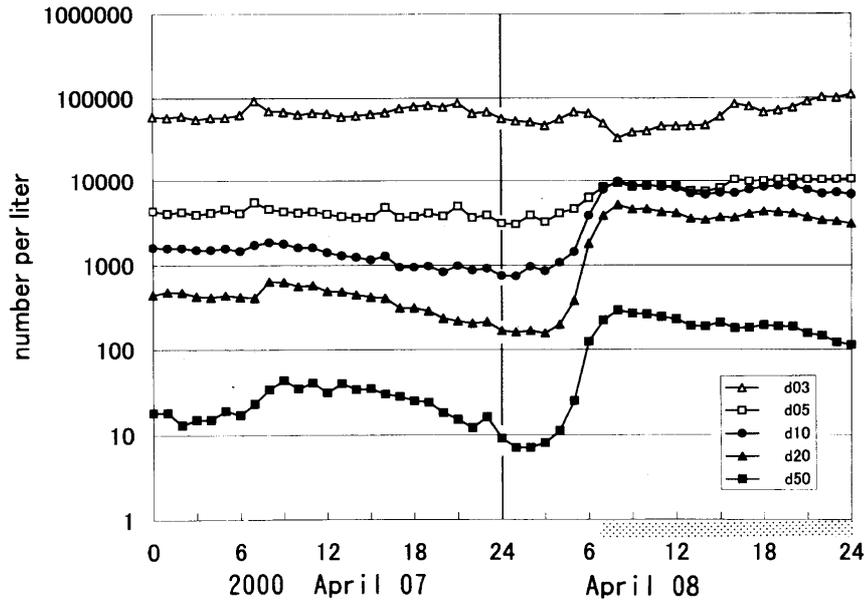


Fig.11 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 7 to 8 April 2000.

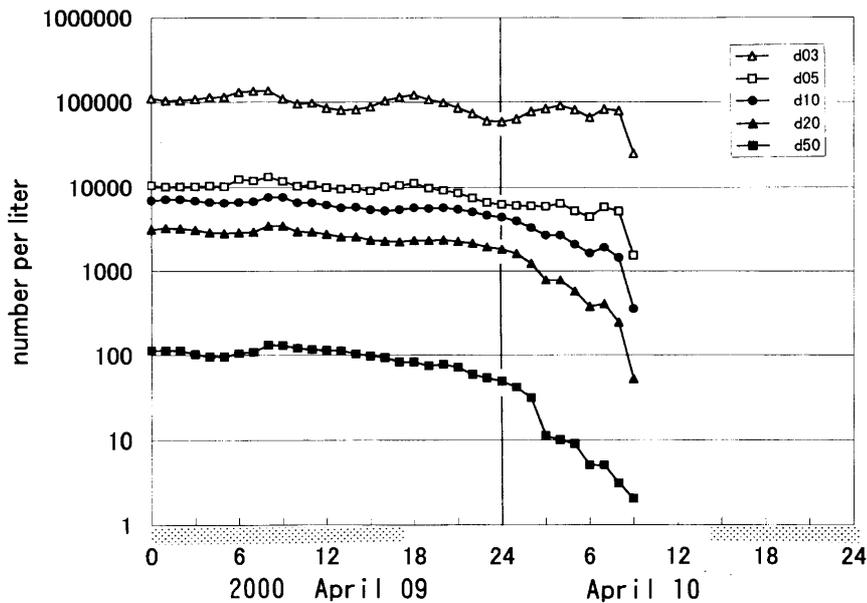


Fig.12 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 9 to 10 April 2000.

その後も粒径間の変化傾向はほとんど変わらない状態で推移した。すなわち、大粒子の増加時刻と小粒子の増加時間に差がなく、みごとに連動している。大小ともに同じ変動傾向を示した事例として貴重であり、原因究明も今後の課題の一つである。

(9) Fig. 9 <2000年3月27～28日>

26日に続いて27日も黄砂状態であったが、26日から27日午前中まで約1日間、直径1～2 μm粒子と2～5 μmが高濃度状態にあったのが特徴的である。27日夕方には黄砂状態を脱したが、28日午後再び黄砂状態となった。このときは大粒子の急増の方が時間的にはやく、小粒子側は約5時間おくらせてい

た。これは通常とは逆センスの時間差である。

(10) Fig.10<2000年3月29～30日>

3月29日は終日黄砂状態であった。午前中にみられた濃度急増時においては、小粒子側が大粒子側と比べて約5～6時間は早い。小粒子側の2階級の時間変化と大粒子側の3階級は時間変化は明らかに違っていて、明瞭に2つのグループに区分できる。

(11) Fig.11<2000年4月7～8日>

4月7日は黄砂現象とはならなかったが、午前中に全粒径にわたって小規模な増加傾向がみられ、そのなかでは小粒子側で2時間ほど増加の立ち上がり時刻がはやい。4月8日の黄砂現象の始まりの時刻

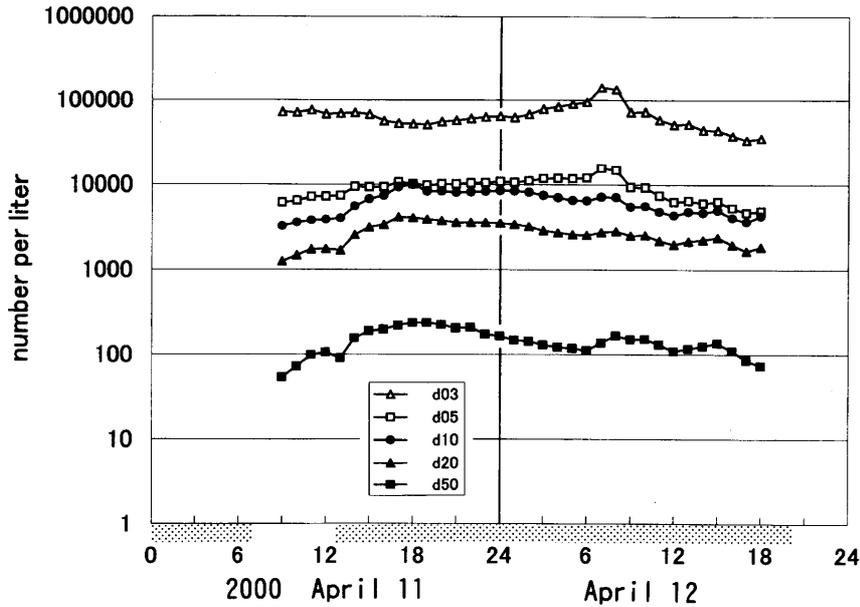


Fig.13 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 11 to 12 April 2000.

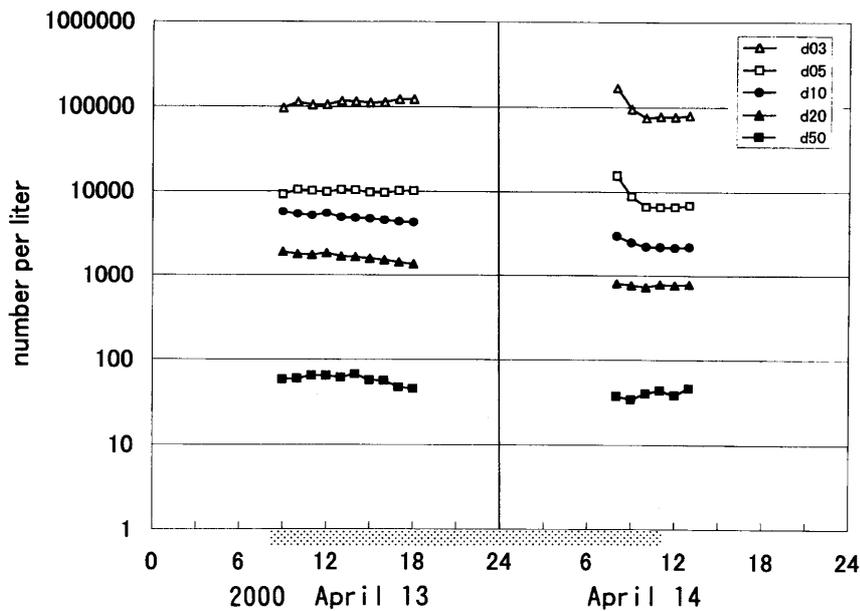


Fig.14 Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 13 to 14 April 2000.

06時40分と、OPC粒子数の急増時刻はよく一致している。また、粒径別の増加の時間帯をみると、最小粒径 ($0.3\sim 0.5\mu\text{m}$) を除く、4階級の粒径は同じような増加傾向を示した。そして、最小粒径の濃度だけは、それらより3時間もはやくピークに達したものの、4粒径がおくれてピークに到達したときには、逆に濃度が顕著な減少傾向を示している。このことがどのような原因で引き起こされたかは不明であり、今後の課題の一つとして興味深い。

(12) Fig.12<2000年4月9~10日>

4月9日の夕方まで黄砂現象は続き、OPCの最大粒径ががほぼ100個を割り込んだ時点で黄砂現象が終了していた。また、10日の午前中に急速に全粒径が低下したので、09時にOPCを停止させたが、14時30分には再び黄砂現象に突入していた。

(13) Fig.13<2000年4月11~12日>

4月10日の黄砂は11日早朝まで続いたが、それに対応するOPC測定はない。同日08時頃からOPC測定を開始し、13時10分の黄砂現象の始りをつかえることができた。このときも最大粒径が約100個のレ

長崎地方における1999～2000年春の黄砂現象

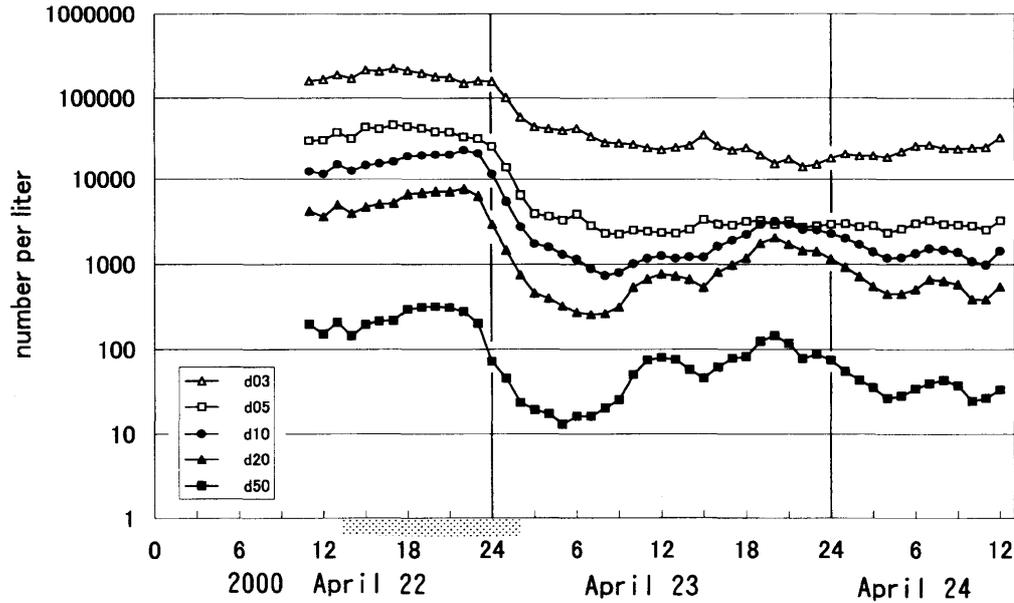


Fig.15(a) Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 22 to 24 April 2000.

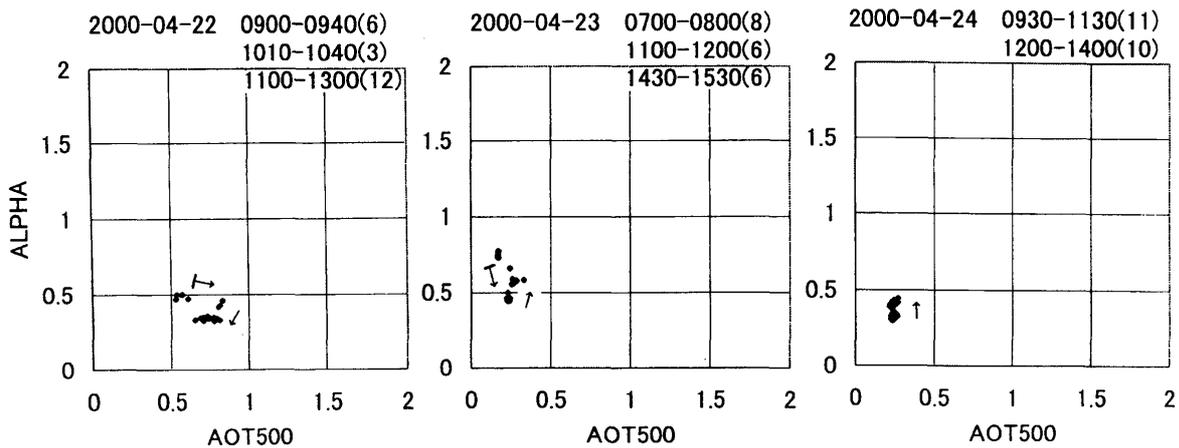


Fig.15(b) Relation between AOT500 and ALPHA at Nagasaki University on 22 to 24 April 2000.

ベルのあいだは黄砂現象が継続していた。さらに、11日午後においては大粒径と中粒径の増加傾向にもかかわらず、最小粒径のみは減少傾向を示していたことも興味深い。一方、12日朝には全粒径にわたって小規模な濃度の増加が同時に起こっていた。

(14) Fig.14<2000年4月13～14日>

4月13日、14日ともに、大粒子の濃度は比較的小さい状態ながら黄砂現象になっていた。とくに、14日の最大粒径の濃度は40～50個のレベルであり、1999年4月6日・13日の黄砂現象時とほぼ同程度であった。

(15) Fig.15(a)(b)<2000年4月22～24日>

4月22日の黄砂現象の起時は13時30分であるが、OPC測定の間隔変化をみると、黄砂粒子は午前中から高濃度であった。同日18時の視程3kmは驚異的

なものであるが、この視程低下の主因は大粒子側の高濃度よりも小粒子側の高濃度にあったと考えられる。あとに示すFigs.17～19で明らかになるように、この時の小粒子側の濃度は1999年3月2日と並んでトップレベルであった。また、22日の最大粒径の濃度317個も2年間の最高値である。

23日夕方に大粒子側がかなり高濃度になっていたが、海洋気象台は黄砂にしていない。最小粒径の濃度が非常に小さいので、視程低下が顕著でなかった可能性がある。

ようやく復帰したスカイラジオメーターが22日朝から活躍した。22日のSR図は3つの時間帯からなるが、夕方がないのは曇天になったためである。それでも、09時00～40分、10時10～40分、11～13時の比較的近接した時間帯においてもSR測定値は明瞭

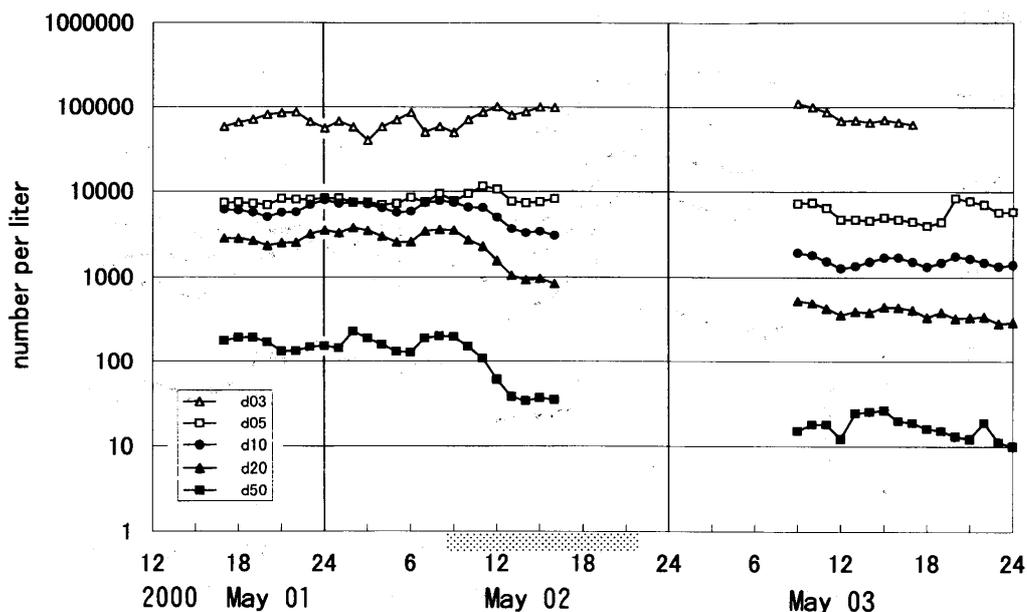


Fig.16(a) Time series of number concentration of aerosols at Nagasaki University on 2 to 3 May 2000.

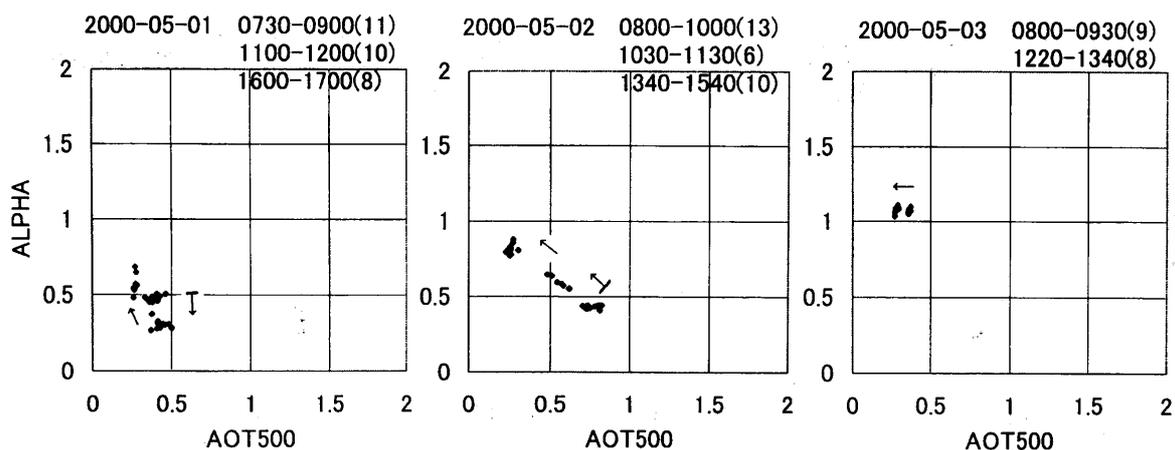


Fig.16(b) Relation between AOT500 and ALPHA at Nagasaki University on 2 to 3 May 2000.

な変化傾向を示した。すなわち、朝から昼に向かって、ALPHAは0.5→0.4→0.3と変化し、AOT500は0.6→0.8→0.75と変化した。徐々に大粒子が増加してきたことを示す変化傾向である。

一方、23日のSR図は早朝にはやや清澄であったが<ALPHA=0.75, AOT=0.2>、時間とともに<ALPHA→小→大, AOT→増→増>と推移した。この傾向はOPCの粒径別粒子濃度の変化とも一致し、地表付近と上空とで粒径間の濃度差はあまりなかったと推定できる。24日のSR図では、ALPHAは小さいもののAOT500は低レベルに属する。午前と午後ALPHAの変化から、午後には大粒子が減少したことを示唆するが、午後のOPC測定値がないので確認はできない。

(16) Fig.16(a)(b)<2000年5月1～3日>

5月1日17時のOPC測定開始時から黄砂状態に匹敵する大粒子の高濃度レベルにあったが、海洋気象台では黄砂とはせず、2日08時50分になった時点で黄砂現象と判定された。判定時の粒子数は前日17時と同レベルであり、実質的に前日から黄砂状態であった。2日07～08時に小規模ながら大粒子側で濃度増加があったが、最小粒径だけはそれよりも2時間はやく増加傾向を示し、大粒子濃度がピークに達したときには逆センス(減少傾向)になっていた。5月1～2日のOPC記録は、夕方から早朝にかけての<薄明～夜間～薄明>時には、黄砂現象の目視観測がやや困難であることを示唆しているようでもある。このこととは逆に、2日午後には地上の大粒子濃度が急速に減少したにもかかわらず、気象台の黄砂現象は夜半まで続いた。3日のOPCのレベル

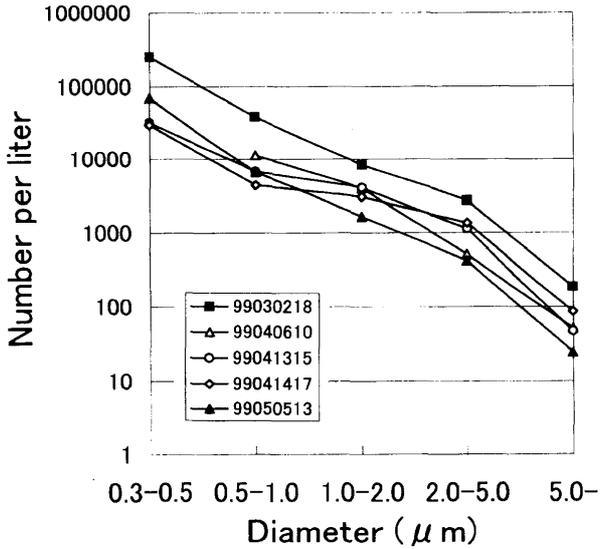


Fig.17 Typical distributions of particle number spectrum in diameter at Nagasaki University in 1999. Captions indicate year, month, day and hour.

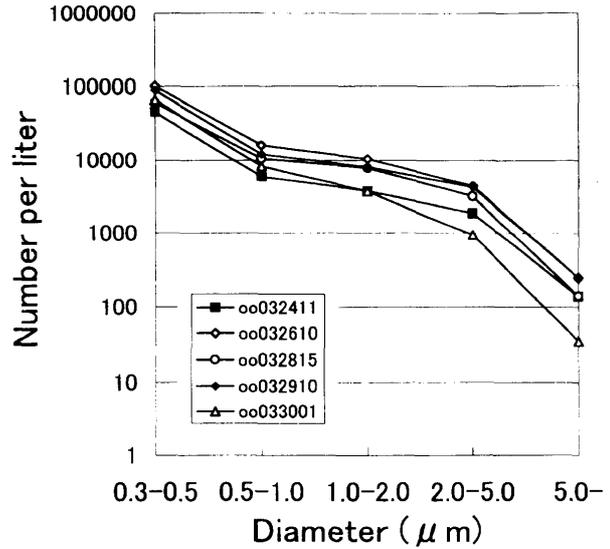


Fig.18 Particle number spectra at Nagasaki University in March and April 2000. Captions are same as Fig. 17.

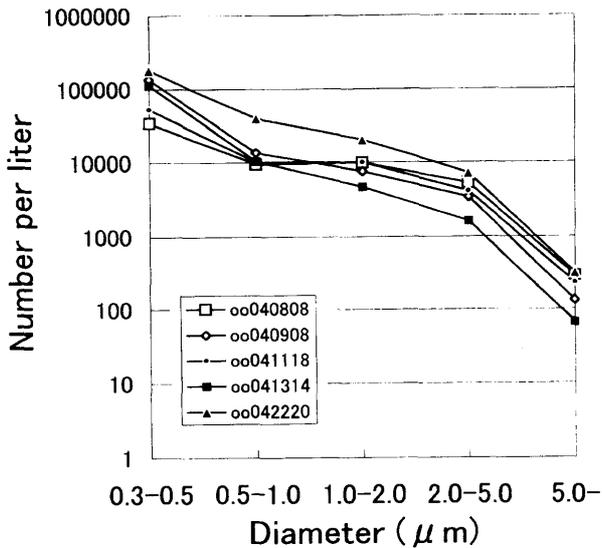


Fig.19 Particle number spectra at Nagasaki University in May 2000. Captions are same as Fig. 17.

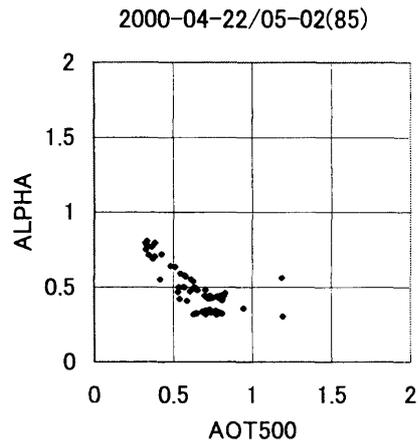


Fig.20 Relation between AOT500 and ALPHA at Nagasaki University at yellow sand episodes both on 22 April and 02 May 2000.

は通常の状態になっていた。

この時のSR図は、2日の早朝から正午にかけては<ALPHA減少(0.5→0.3), AOT一定(0.4)>となっており、大粒子が増加傾向にあった。さらに、夕方には<ALPHA増加, AOT減少>に推移したので、大粒子が減少し、全粒子濃度も低下したことを示す。このことは正午頃の大粒子は夕方よりも高濃度であった可能性を示唆するものである。さらに、2日早朝のSR図は<ALPHA=0.4, AOT=0.8>を示し、1日夕方よりもかなり混濁している。OPCではほぼ同レベルであったので、2日早朝には上

空に大粒子が存在していた可能性がある。3日のSR図は午前中に時間とともに粒子濃度が減少傾向にあったことを示し、そのような傾向はOPCの測定結果とよく一致している。

5. 考察

(1) 粒子濃度に関する考察

Figs.17~19には、前報と同じ様式を用いて、エアロゾルの粒径別濃度分布を示す。原則として、長崎海洋気象台で黄砂現象を観測していた時期で、最大粒径(直径5μm以上)が極大になったときのも

のを選んだ。ただし、Fig. 17のなかには黄砂現象が観測されなかった時のものを含む。

Fig.17は1999年春の特徴的な5つの粒径分布である。この図のうち、3月2日と4月14日は黄砂現象とはならなかった日の分布である。この2つの日の分布は、実は、大粒径側2階級で1位と2位のものである。すなわち、1999年4月6日、4月13日、5月5日の黄砂現象時の大粒子の粒子密度はそれほど大きくはない。これまでは、おもに最大粒径の濃度に着目してきたが、これに次ぐに大粒子である直径2~5 μm (d20)の濃度の変化の様子もほぼ同様の傾向を示していた。Figs.18~19の2000年におけるd20の濃度は、最低で1000個、最大で7000個のレベルである。一方、Fig.17の1999年4月6日と5月5日のこの階級の粒子濃度は400~500個程度であった。さらに、3番目の粒径であるd10も1999年の方が2000年よりも低濃度であった。このように、1999年の3つの黄砂現象は、視程、OPC粒子濃度、粒径分布においてやや特異であったと言える。黄砂粒子が上空に流入していた可能性は強いが、地上付近の大粒子はそれほど高濃度にはなっていないと解釈することができる。

Fig.18は2000年3月の粒径分布である。この図の場合はすべてが黄砂現象を観測した日である。3月3日の場合は大粒子側の2階級で濃度がやや小さく、最低視程が15kmであったことと符合する。その他4つの場合は、大粒子が標準レベル以上の濃度になっている。

Fig.19は2000年4月の粒径分布である。5例とも黄砂現象を観測した日である。なお、この年は5月2日にも顕著な黄砂現象があったが、その粒径別濃度スペクトルは4月11日の場合と同レベルであったので、図中で混乱を回避するために省略した。ただし、Fig.13とFig.16(a)を注意深く見比べればわかるように、5月2日のd10粒子の濃度は4月11日より若干小さい。図のなかで全粒径で高濃度になっていた4月22日は、2年間の黄砂現象のなかで最高のレベルであった。ただし、黄砂を観測しなかった1999年3月2日の最小粒径(0.3~0.5 μm)は、4月22日より高濃度であった。また、図の4月22日の粒径分布は、最近5年間(1996~2000)においては、1998年4月18日に次いで第2位の高濃度であったが、大粒子濃度は4月18日の約2分の1であった。ところで、4月13日の最大粒径は70個程度のやや低濃度である。これまでに示した3枚の図で共通することであるが、大粒子が比較的低濃度であった黄砂

現象では、最低視程が比較的良好であった。このような日の黄砂現象では、砂塵が上空を通過していた可能性があるため、今後の観測上の要点の一つとしたい。

(2) スカイラジオメーターに関する考察

Fig.20は大粒子高濃度状態におけるSR図である。ただし、天候に左右されるために、2000年4月22日と5月2日の晴天時のデータ85組によって構成されている。図から明らかのように、(若干の逸脱データもあるが)、黄砂最盛期においては、ALPHA=0.3, AOT500=0.8程度であるとともに、黄砂現象の解消過程に向かうにつれて、ALPHA大, AOT500小に移行する。このような傾向は、従来のArao and Ishizaka(1986)の理論的考察やTanaka et al.(1989)、鈴木ほか(2001)などの観測と一致する。

今回の研究成果の一つは、すでに述べたように、地上付近のOPCの粒径別濃度とSRの光学的パラメーターの関係がかなり良好であることが確認できたことである。ただし、希薄な黄砂現象下での対応は必ずしも良好とは言えない。上空を黄砂が飛来するような場合の対応関係は悪化するはずであるので、このことに関するさらに詳細な研究も必要になってきたと考えられる。

謝 辞

本研究に関する気象資料の収集に当たっては、長崎海洋気象台に多大の御援助を頂いた。研究対象となった2年間のあいだに、太田幸雄教授(北海道大学)、中島映至教授(東京大学)、植松光夫助教授(東京大学)、村山利幸助教授(東京商船大学)、高村民雄教授(千葉大学)、甲斐憲次教授(名古屋大学)、早坂忠裕教授(文部科学省・総合地球環境学研究所)、鶴野伊津志教授(九州大学)、栗原隆治台長(長崎海洋気象台)、森山雅雄助教授(長崎大学)、石坂丞二教授(長崎大学)からさまざまな御援助と御教示をいただいた。さらに、スカイラジオメーターの利用には宇宙開発事業団(NASDA)とブリード社から格別の御援助を賜った。資料整理とデータ入力には本学環境科学部学生の古謝愛さんと谷川原舞衣さんの御助力をいただいた。上記の機関と各位に深甚なる謝意を表します。

本研究には、日本学術振興会・日中科学協力事業(研究代表者:高村民雄<千葉大>)と文部科学省・科学研究費補助金(基盤研究C;代表者:荒生公雄)から御援助をいただいた。

参 考 文 献 (50音順)

IPCC, 2001 : <http://www.ipcc.ch/>

荒生公雄, 牧野保美, 永木嘉寛, 1979 : 黄砂に関する若干の統計的研究, 長崎大学教育学部自然科学研究報告, No.30, 65-74.

Arao, K. and Y. Ishizaka, 1986 : Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 79-94.

荒生公雄, 坂口千恵美, 1999 : 光散乱式粒子測定器で測定された長崎の黄砂現象 : 1996～1998, 長崎大学総合環境研究, 第1巻, 第1号, 175-186.

鶴野伊津志, 天野宏欣, 木下紀正, 荒生公雄, 村山利幸, 松井一郎, 杉本伸夫, 2001 : 地域気象モデルと結合した黄砂輸送モデルの開発と1998年4月の大規模黄砂現象への応用, 天気, **48** (投稿中)

鈴木健司, 内野修, 吉田雅司, 本田耕平, 青野正道, 渡部文雄, 大友猛, 2001 : サンフォトメーターで観測された1999年4月の黄砂現象, 天気, **48**, 317-322.

Tanaka, M., T. Nakajima, M. Shiomara, 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.

Chun, Y., J. Kim, J. C. Choi, K. O. Boo, S. N. Oh, M. Lee, 2001 : Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea. *Atmospheric Environment*, **35**, 2715-2721.

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

長崎海洋気象台, 1999-2000 : 長崎県気象月報.