

サンフォトメータで観測された1998年4月及び 1999年4月の黄砂現象

鈴木健司*1・内野 修*2・吉田雅司*2・本田耕平*2
青野正道*3・渡部文雄*4・大友 猛*2

1. はじめに

大気中に浮遊する黄砂などのエロゾルは、大気放射を直接散乱/吸収することにより大気の放射収支、ひいては気候に影響を与える。

このため、気象庁では大気環境観測所(岩手県綾里)、南鳥島気象観測所(東京都小笠原村)、与那国島観候所(沖縄県与那国町)の3か所でサンフォトメータを用いて5波長(368, 500, 675, 778, 862 nm)での大気混濁度(エロゾルの光学的厚さ)の観測を行っている。(第1図) これらの観測所は世界気象機関/全球大気監視(WMO/GAW)観測所として位置付けられている。

黄砂は、東アジアで大規模に観察される土壌性のエロゾルとして、これまでにも長距離輸送(Kai *et al.*, 1988)、発生源での直接観測(Zaizen, *et al.*, 1995)、化学的性質(Niimura, *et al.*, 1998)等の研究がなされている。黄砂の光学的性質に関しては、太平洋を横断した黄砂についての観測(Shaw, 1980)や、長崎での黄砂についての総合的な光学観測(Tanaka *et al.*, 1989)等がある。

1998年4月中旬、西日本を中心に広い範囲で黄砂が飛来した。この黄砂現象は規模が大きく、太平洋を横

切りアメリカ大陸に到達した様子がTOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)の観測データから解析されたエロゾルインデックスの分布図として示されている。また、1999年4月上旬にも西日本に黄砂が飛来した。

気象庁の3か所の観測所のサンフォトメータでもこれらの黄砂を捉えることができた。ここでは、黄砂観測日とその前後のエロゾルの光学的厚さの解析から得られた黄砂の光学的特性について報告する。

2. 観測及びデータ解析

2.1 観測装置と観測

エロゾルの光学的厚さは、自動太陽追尾装置を有するサンフォトメータ(英弘精機(株)製、MS-110型)を用いて、波長別に太陽の直達光強度を測定することで求めている。

サンフォトメータの出力電圧をデータロガーで連続収録して、1日3回の定時に直達光が観測されているのが確認できたものを解析に用いた。

2.2 観測データの解析方法

観測データから、次式により大気的光学的厚さ(τ (λ))が求まる。

$$\tau(\lambda) = \frac{1}{m} \ln \left[\frac{J_0(\lambda)}{J(\lambda) \cdot S} \right]$$

ここで J_0 はサンフォトメータの測器定数[mV]、 J はサンフォトメータ出力[mV]、 m は相対大気路程、 S は太陽地球間距離補正係数をあらわす。

エロゾルの光学的厚さ(τ_m)は、この大気的光学的厚さから空気分子の散乱による光学的厚さ(τ_r)と

*1 気象庁観測部環境気象課(現:東京管区気象台総務部業務課)。

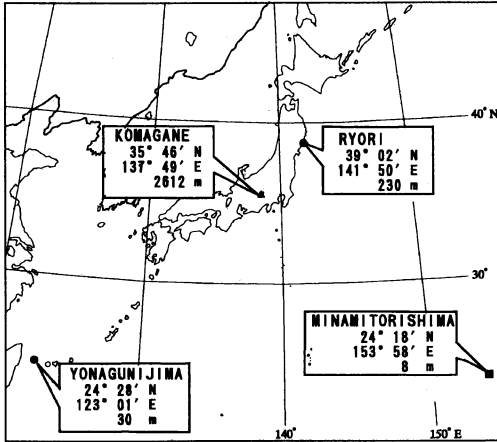
*2 気象庁観測部環境気象課。

*3 気象庁観測部環境気象課(現:観測部観測課)。

*4 気象庁観測部環境気象課(現:気候・海洋気象部気候情報課)。

—2000年4月19日受領—

—2001年3月6日受理—



第1図 気象庁全球大気監視観測所（綾里，南鳥島，与那国島）及びサンフォトメータ測器定数決め観測実施場所（駒ヶ根）。

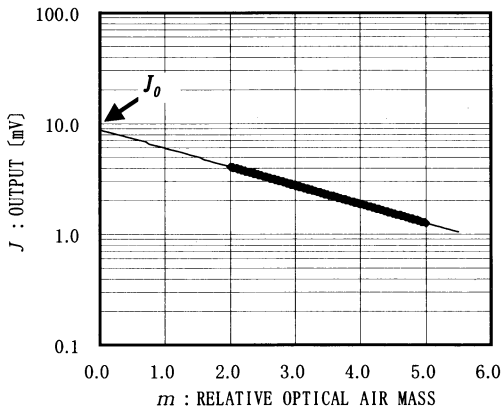
第1表 与那国島で使用しているサンフォトメータの観測波長毎の干渉フィルタの特性，測器定数とその相対誤差の特性， λ_{MAX} ， T_{MAX} ， $\Delta\lambda_{1/2}$ ， J_0 ， $(\Delta J_0/J_0) \times 100$ はそれぞれ干渉フィルタの中心波長，最大透過率，半値幅，測器定数，測器定数の相対誤差を意味する。

Wavelength (nm)	λ_{MAX} (nm)	T_{MAX} (%)	$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	J_0 (mV)	$(\Delta J_0/J_0) \times 100$ (%)
368	367.5	31.5	5.0	8.740	2.1
500	501.5	43.0	4.0	7.577	1.6
675	675.0	45.0	4.5	7.657	1.9
778	779.5	42.0	5.0	8.385	1.4
862	863.5	51.5	5.0	7.764	1.2

2.3 測器定数の決定

解析に用いたサンフォトメータの測器定数 (J_0) は，1997年10月後半の2週間に長野県駒ヶ根市の駒ヶ岳千畳敷カール（標高2612 m）で行った観測のうち，ラングレー法を適用した期間の τ が特に安定していた2日間の結果の平均値である。第2図にラングレー法の例を示す。ここで示した368 nm のラングレープロットの結果は， $J_0 = 8.771$ [mV] であった。

与那国島で観測に使用しているサンフォトメータの観測波長毎の干渉フィルタの特性，測器定数とその相対誤差の特性を第1表に示す。



第2図 ラングレープロットの例。1997年10月19日に長野県駒ヶ根市の駒ヶ岳千畳敷カールでの観測結果から，相対大気路程に対するサンフォトメータの368 nm での出力をプロットしたもの。

3. 1998年4月の黄砂

3.1 地上気象観測による観測結果

地上気象観測指針（気象庁，1993）にもとづき地上気象観測を行っている気象官署では，黄砂を観測した場合は，現象を観測した始終時間を記録する。

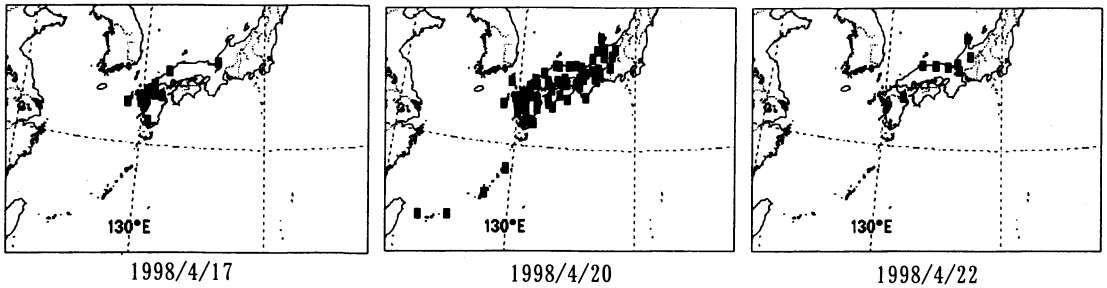
1998年4月の地上気象観測記録によると，4月1日は5か所，14日は1か所で観測されただけの小規模なものであった。17～22日の黄砂は大規模なもので，まず17日に九州北部を中心に飛来した。18日にはその範囲を広げ九州を中心に沖縄地方までの36か所で観測された。その後飛来の範囲は東に移り，19日に60か所，20日に58か所の観測があり，黄砂の飛来はピークを迎えた。20日には黄砂観測の東端は長野県にまで達した。その後，観測は減り，22日に北陸西部から山陰東部を中心に8か所で観測された後は，黄砂観測の報告はなくなった。

第3図に4月17，20，22日の3日分の黄砂観測の分布図を示す。

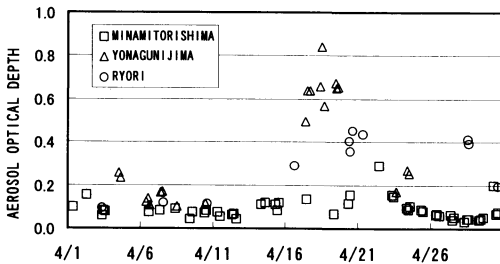
オゾンの吸収による光学的厚さ (τ_{03}) を差し引いて求める。

τ_R は，Fröhlich and Shaw (1980) の経験式に Young (1981) による補正を施した式を用いて求めた。

τ_{03} は，観測所ではオゾン全量を観測していないこと，オゾン全量が10%変化しても τ_{03} の値への影響がほとんどないこと等から，オゾン層観測報告（気象庁，1999）を基に観測所付近の平均的なオゾン全量を用いて見積もった。



第3図 1998年4月17日、20日、22日に黄砂を観測した気象官署。観測した時間に関係なく4月17日、20日、22日に黄砂を観測した気象官署をプロットした。



第4図 1998年4月の500 nmでのエアロゾルの光学的厚さの時系列図。

3.2 サンフォトメータによる観測結果

1998年4月の1か月間に気象庁のGAW観測所で観測された500 nmでのエアロゾルの光学的厚さ(τ_M)の変化を第4図に示す。

月の前半はどの観測所も0.1前後の値を示している。それが与那国島では17日に0.64に、南鳥島では22日に0.29に増加した。綾里では20日に0.45に増加した。与那国島では18日から20日まで地上気象観測で黄砂を観測したが、このときの500 nmでの τ_M は0.65~0.84であった。

第5図に与那国島、綾里そして南鳥島における τ_M の波長分布を示す。黄砂を観測した時の τ_M の波長分布を四角で、黄砂を観測していないバックグラウンド(黄砂飛来時の前後でもっとも値が小さかった時)の τ_M の波長分布を菱形で示した。アスタリスクで示したものは黄砂飛来時の τ_M からバックグラウンドの τ_M を差し引いたもので、黄砂成分による τ_M の波長分布を表わすと考えられる。

与那国島では778 nmの τ_M が、エアロゾルの粒径分布にユンゲ分布を仮定した場合に導かれる τ_M の分布(Junge, 1963)に比べて大きく外れる現象が観測され

たが、バックグラウンドを差し引くことで得た黄砂成分による τ_M の波長分布にこの現象は見られない。

与那国島、綾里そして南鳥島の黄砂成分による τ_M の波長分布はほぼ直線に乗る。このような場合に τ_M の波長分布を次式のように近似できる事が経験的に知られている。

$$\tau_M(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$$

ここで、 β はオンストロームの混濁係数、 α は波長指数と呼ばれる。 λ [μm]は τ_M の観測波長である。

各々の観測所で観測した黄砂成分による $\tau_M(\lambda)$ から最小二乗法により求めた波長指数(α)と、500 nmでの黄砂成分の光学的厚さ(τ_{500})は、与那国島では $\alpha = 0.5$ 、 $\tau_{500} = 0.52$ 、綾里では $\alpha = 0.4$ 、 $\tau_{500} = 0.34$ 、南鳥島では $\alpha = 0.5$ 、 $\tau_{500} = 0.23$ であった。

4. 1999年4月の黄砂

4.1 地上気象観測による観測結果

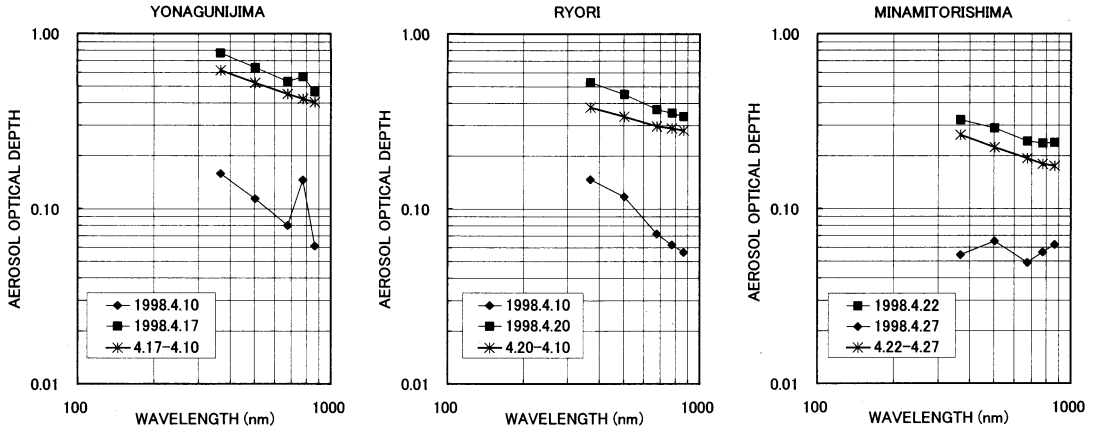
1999年4月の地上気象観測記録によると、4月6~8日の黄砂は南西諸島から中国地方にかけての28か所で、13日は九州の一部と南西諸島を中心とした12か所で、27~28日は山陰から九州北部を中心に12か所で観測された。

6日の黄砂は、まず九州北部を中心に観測され、次第にその範囲を広げ、山陰地方から南西諸島の28か所で観測された。これが飛来のピークで、7日は主に南西諸島で観測され、8日は西表島で観測されただけであった。

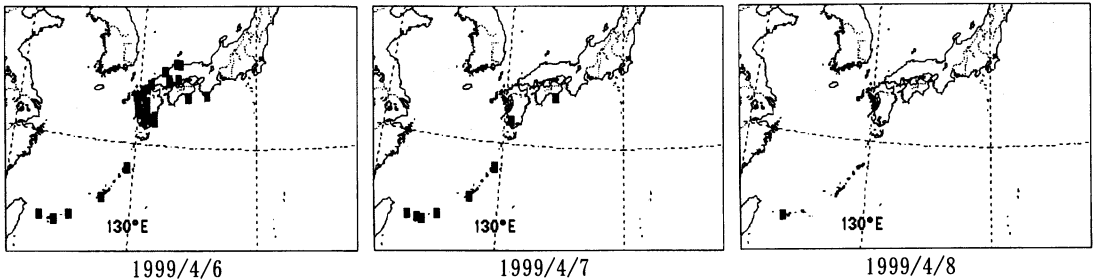
第6図に4月6、7、8日の3日分の黄砂観測の分布図を示す。

4.2 サンフォトメータによる観測結果

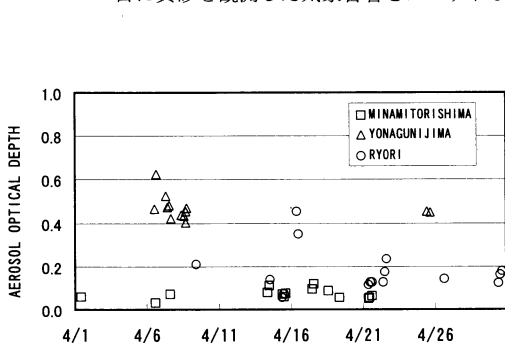
1999年4月の1か月間に気象庁のGAW観測所で



第5図 与那国島, 綾里, 南鳥島におけるエアロゾルの光学的厚さの波長分布. 図中, 四角は黄砂を観測した時のデータを表し, 菱形は黄砂を観測していないバックグラウンド時のデータを表す. また, アスタリスクは, 黄砂飛来時の観測値からバックグラウンドの観測値を差し引いたものである.



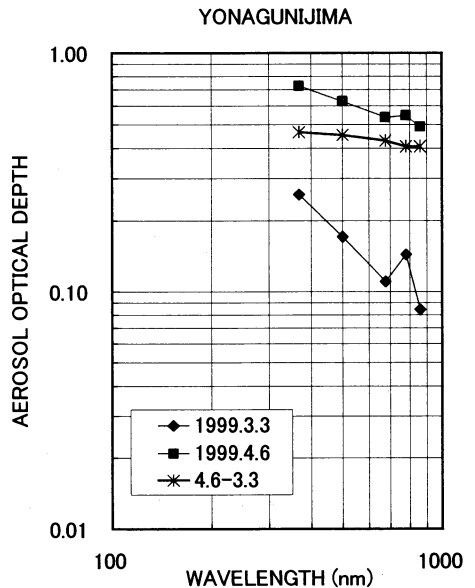
第6図 1999年4月6日, 7日, 8日に黄砂を観測した気象官署. 観測した時間に関係なく4月6日, 7日, 8日に黄砂を観測した気象官署をプロットした.



第7図 1999年4月の500 nmでのエアロゾルの光学的厚さの時系列図.

観測された500 nmでのエアロゾルの光学的厚さ (τ_M) の変化を第7図に示す.

南鳥島では月を通して τ_M は0.05から0.1程度の値を示した. 綾里では τ_M は概ね0.1から0.2程度の値を示したが, 16日に0.4前後に増加した. 与那国島では τ_M は



第8図 与那国島におけるエアロゾルの光学的厚さの波長分布. 図中の記号の意味は第5図と同じ.

0.4から0.5程度の値を示し、6日に最大の0.63を観測した。なお、この時期に与那国島は雲に覆われることが多く、サンフォトメータで観測ができたのは、6日から8日までと25日の4日分に限られた。与那国島では6日から7日にかけて地上気象観測で黄砂を観測した。このときの500 nmでの τ_M は0.42~0.63であった。

第8図に与那国島における1999年4月に黄砂を観測した時とバックグラウンドの τ_M の波長分布を示す。ここでも、778 nmでの τ_M に1998年4月と同様の現象が見られたが、黄砂成分による τ_M の波長分布はほぼ直線上に乗った。

与那国島での黄砂成分による $\tau_M(\lambda)$ から最小二乗法により求めた波長指数(α)と、500 nmでの黄砂成分の光学的厚さ(τ_{500})は、 $\alpha=0.2$ 、 $\tau_{500}=0.46$ であった。

5. まとめ

1998年4月及び1999年4月の黄砂を観測した日を含めた前後のサンフォトメータによるエアロゾルの光学的厚さの解析から、黄砂の光学的特性について以下のことが分かった。

与那国島、綾里と南鳥島の3か所のGAW観測所で捉えた1998年4月中旬の大規模な黄砂は、波長指数が0.4~0.5とほぼ等しくなった。このことは、4月17日から22日の間、ほぼ同じ粒径分布が維持されたことを示唆している。

500 nmでの黄砂成分の光学的厚さは与那国島が0.52と最も大きく、続いて綾里が0.34、南鳥島が0.23と小さな値を示した。このことは、黄砂が発生源から離れて行くに従い、その光学的厚さを薄めていった状況を示唆している。

Tanaka *et al.* (1989)による長崎での観測によると、黄砂現象時のエアロゾル全体による τ_{500} は0.5~1.0、 α は0.1~0.5であったことが報告されている。今回の観測で得られた黄砂現象時のエアロゾル全体による τ_{500} は、南鳥島の観測結果を除くと、0.4~0.8で、Tanaka *et al.* (1989)と同程度であることが分かった。また、今回の観測で得られた黄砂現象時の黄砂成分による α は0.2~0.5で、Tanaka *et al.* (1989)による α は黄砂を含むエアロゾル全体による値であるところが異なるものだが同程度の数値となった。

なお、与那国島における778 nmでのエアロゾルの光学的厚さに表われた特徴は、サンフォトメータに使用

している干渉フィルタの透過特性から、水蒸気による吸収の影響等を反映していることなどが考えられるが、このことについては、今後の検討課題である。

6. 謝辞

長野県駒ヶ岳千畳敷カールでの測器定数決め観測に対し協力頂いた中央アルプス観光株式会社に感謝します。また、千畳敷カールでの観測の実施及びその解析に貢献した平野礼朗、小田切さやか、サンフォトメータによる黄砂観測を行った山田博文、堀川和久、寺島一郎、石井一雄、西賢治の各氏に感謝します。更に、本稿をまとめるに当たり、議論を深め有益な助言を頂いた松原廣司氏に感謝します。

参考文献

- Fröhlich, C. and G. E. Shaw, 1980: New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere, *Appl. Optics*, **19**, 1773-1775.
- Junge, C., 1963: *Air Chemistry and Radioactivity*, Academic Press, 111-208.
- Kai, K., Y. Okada, O. Uchino, I. Tabata, H. Nakamura, T. Takasugi and Y. Nikaidou, 1988: Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the spring of 1986, *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 457-472.
- 気象庁, 1993: 地上気象観測指針, 125-144.
- 気象庁, 1999: オゾン層観測報告: 1998, 51pp.
- Niimura, N., K. Okada, X-B. Fan, K. Kai, K. Arai, G-Y. Shi, S. Takahashi, 1998: Formation of Asian dust-storm particles mixed internally with sea salt in the atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 275-288.
- Shaw, G. E., 1980: Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1254-1259.
- Tanaka, M., M. Shiobara, T. Nakajima, M. Yamano and K. Arai, 1989: Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 at Nagasaki-Part 1 Observations, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 267-278.
- Young, A. T., 1981: On the Rayleigh-scattering optical depth of the atmosphere, *J. Appl. Meteor.*, **20**, 328-330.
- Zaizen, Y., M. Ikegami, K. Okada and Y. Makino, 1995: Aerosol concentration observed at Zhangye in China, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 891-897.

Kosa (Yellow Sand) Events in April, 1998 and 1999
Observed by Sunphotometers.

Kenji Suzuki*¹, Osamu Uchino*², Masashi Yoshida*²,
Kohei Honda*², Masamichi Aono*³,
Fumio Watanabe*⁴ and Takeshi Ootomo*²

*¹ (Corresponding author) Atmospheric Environment Division, Observations Department, Japan Meteorological Agency 1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122, Japan (Present affiliation: Administration Department, Tokyo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency).

*² Atmospheric Environment Division, Observations Department, Japan Meteorological Agency.

*³ Atmospheric Environment Division, Observations Department, Japan Meteorological Agency (Present affiliation: Observations Division, Observations Department).

*⁴ Atmospheric Environment Division, Observations Department, Japan Meteorological Agency (Present affiliation: Climate Prediction Division, Climate and Marine Department).

(Received 19 April 2000; Accepted 6 March 2001)

====支部だより====

北海道支部第19回夏季大学開講のお知らせ
—気象講座「新しい気象」—

日 時：平成13年7月25日(水), 26日(木)
午前10時～午後3時

場 所：札幌市青少年科学館(第1日目)
(JR・地下鉄東西線「新札幌駅」下車)
北海道大学低温科学研究所(第2日目)
(地下鉄南北線「北18条駅」下車)

参加費：1,000円

対象・定員：一般(高校生以上)50人

申し込み方法：往復はがきに講座名「新しい気象(朱書き)」住所・氏名・電話番号・返信宛名を明記し、お申し込みください。但し、申し込み

多数時は抽選とします。

申込先：〒004-0051

札幌市厚別区厚別中央1条5丁目

札幌市青少年科学館「新しい気象」係

TEL：011-892-5001

申込締切：平成13年7月13日(金)

問い合わせ先：〒060-0002

札幌市中央区北2条西18丁目

札幌管区気象台内

日本気象学会北海道支部

TEL：011-611-6121(内線415)