

Sky-radiometer データを用いた エアロゾル光学特性の導出

Atmospheric aerosol properties derived from the measurements with Sky-radiometer

保本正芳¹, 佐野 到², 向井苑生², 早坂忠裕³

¹近畿大学理工学総合研究所, ²近畿大学理工学部, ³総合地球環境学研究所
^{1,2}〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1

³〒602-0878 京都市上京区丸太町通り河原町西入る高島町 335

Masayoshi Yasumoto¹, Itaru Sano², Sonoyo Mukai² and Tadahiro Hayasaka

¹*Research Institute for Science and Technology, Kinki University*

²*Faculty of Science and Technology, Kinki University*

³*Research Institute for Humanity and Nature*

^{1,2}3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, 577-8502 Japan

³335 Takashima-cho, Marutamachi-dori Kawaramachi nishi-iru, Kamigyo-ku,
Kyoto 602-0878 Japan

(Received December 28, 2005)

Abstract

Our sun/sky photopolarimetric measurements of atmospheric light have been undertaken at Fukuejima since 2002, and at Higashi-Osaka since 2003. The cloud-screening algorithm is described first, and then aerosol optical thickness and Ångström exponent are derived from the data after processing of the cloud-screening at Fukuejima and Higashi-Osaka. It is shown that aerosol characteristics are different from each other between Fukuejima and Higashi-Osaka.

Key words: Sky-radiometer, Cloud-screening, Aerosol characteristics

1. はじめに

東アジア地域では、近年の工業化による硫黄酸化物やスス等の多量な人為起源エアロゾルの発生に加え、中国内部の砂漠域か

ら偏西風に乗って飛来する砂塵性エアロゾル、海からの海塩粒子等が相まって複雑なエアロゾル特性を示す。「アジアンドラスト」

とも呼ばれ、地球規模のエアロゾル研究において注目されている。日本南西部の島は、このアジアダストの観測サイトとして有用で、春先には国際協同観測が実施される事が多い。奄美大島や長崎県五島列島の福江島などでは、様々な研究機関がエアロゾルの長期観測を実施している。

日本のエアロゾル地上放射観測は、気象庁が、岩手県綾里と東京都南鳥島、沖縄県与那国島において Sun-Photometer による太陽直達光観測を実施し、エアロゾルの光学的厚さやオンゲストローム指数を導出している[1]。一方、NASA が大気エアロゾル観測ネットワーク AERONET (AErosol RObotic NETwork)を 1993 年から地球規模で展開し、太陽直達光と大気散乱光観測から、光学的厚さやオンゲストローム指数だけでなく、サイズ分布や複素屈折率を導出している[2]。本グループでは、AERONET ステーションとして、Sun/Sky-Radiometer (CE-318-1 : Cimel 社製) を 2000 年から白

2. エアロゾルの放射観測

Sky-Radiometer は、地上から太陽直達光および太陽周辺光を含む大気散乱光の放射輝度を一定間隔(ここでは 15 分)毎に自動観測する。太陽軌道は、制御用 PC 内のソフトウェアで計算を行なうが、晴天時には、サンセンサが正確な位置に合わせを行なう。降雨時は、降雨センサにより、放射計の鏡筒内に水が入るのを回避するために、放射計は下に向く。POM-100P (Figure.1 参照) は、改良版 Sky-Radiometer で、0.34, 0.38, 0.40, 0.44, 0.50, 0.67, 0.87, 0.94, 1.02 μm の波長帯を持ち、太陽直達光観測と共に、大気散乱光を散乱角毎に偏光放射輝度成分を測定する。散乱角は、太陽天頂角 θ_0 、観測天頂角 θ 、太陽方位角 ϕ 、観測方位角 ϕ_0 を用いて式(1)

浜に、2002 年より東大阪において CE-318-2 を設置して、放射偏光観測を実施している。しかし AERONET のアジア域観測サイトは少ない。

日本を中心としてアジア・太平洋域に大気観測ネットワーク SKYNET が構築され、Prede 社製の Sky-Radiometer を設置している[3]。本グループでは、2002 年に福江島、2003 年に東大阪に偏光観測可能な POM-100P (Prede 社製) を設置した。

自動観測は、観測地点上空に雲が覆っている場合にも観測を行なうため、エアロゾルデータが雲による影響を受けている場合がある。本報告では、前処理として Sky-Radiometer データに雲除去アルゴリズムを適用し、エアロゾルデータの精度を上げる。次に、Sky-Radiometer データから導出したエアロゾル特性を、福江島と東大阪で比較照合し両サイトの大気環境をモニターした結果を紹介する。

より定義する。

$$\cos \Theta = \cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\phi - \phi_0), \quad (1)$$

大気散乱光の観測は、放射計の観測高度を太陽高度と同じ高度 ($\theta = \theta_0$) で相対方位角を変化させて観測する(水平スキャン)。

Sky-radiometer などの放射観測機器は、大気による散乱・吸収された放射輝度を地上から観測している為、エアロゾル光学特性を導出する場合、大気への入射光輝度(大気上端での太陽放射輝度)の決定が重要である。特に、放射計の干渉フィルターの劣化等により、機器固有の大気への入射光輝度(校正定数)は経年変化する。直達光観

測データからエアロゾルの光学的厚さを得るには、経年変化補正のための機器校正が欠かせない。AERONETは、GSFC (Goddard Space Flight Center)にて、基準器との比較観測から校正を実施している。GSFCの基準器は、大気の安定しているハワイ島マウナロア山にて、ラングレープロットキャリブレーション法による機械校正を実施している[2]。

SKYNETは、Sky-radiometerで得られた大気散乱光データを専用解析コードSkyrad.packを用いて解析することで、あまり校正定数に依存せずに、エアロゾルの光学特性を導出することが特色である。特に、水平スキャンでは、大気散乱光の放射強度 $E(\Theta)$ と直達放射強度 F を用いて正規化した相対的強度 $R(\Theta)$ を放射伝達の式を用いて次式で表わす[4]。

$$R(\Theta) = \frac{E(\Theta)}{Fm\Delta\Omega} = \omega\tau P(\Theta) + q(\Theta), \quad (2)$$

$\Delta\Omega$ は装置の立体視野角、 ω は単一散乱アルベド、 $P(\Theta)$ は散乱位相関数、 $\omega\tau P(\Theta)$ は単一散乱寄与、 $q(\Theta)$ が多重散乱寄与を示す。 $R(\Theta)$ は、観測データからの相対値の為、機器の経年変化の影響を受けないとしている。Skyrad.packは、式(2)よりIterative Inversion法からエアロゾルの光学的厚さを導出するため、直達光データからの導出より複雑となる。

ここでの光学的厚さの導出は、データ解析が容易である直達光データから行ない、AERONETと同様にマウナロア山でのラングレープロットキャリブレーション法による2002年12月に機械校正を実施した。



Figure 1: Sky-radiometer : POM-100P at Higashi-Osaka.

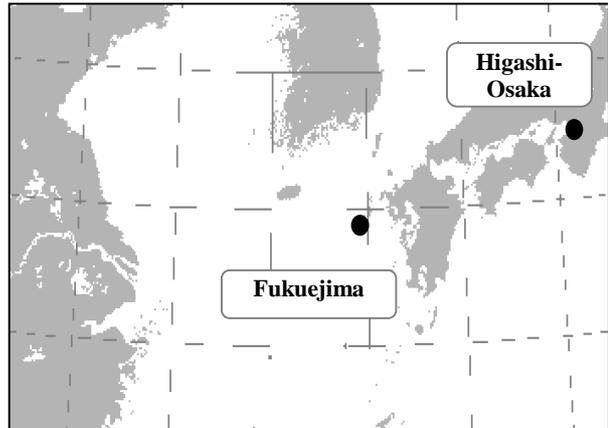


Figure 2: Geographical positions of observational site.

3. 雲除去アルゴリズム

光学的厚さ(AOT: τ_a)は(散乱粒子の大きさを波長で割ったサイズパラメータ単位の)光学的減衰断面積に比例するため、一

般にエアロゾルの粒径が大きいと波長が長くなっても光学的厚さは減少しない。また、小粒子では波長と共に光学的厚さが減少す

る．そのため，オングストローム指数はエアロゾルの大きさに逆比例する．つまり，オングストローム指数の値が大きいと小粒子に，小さいと大粒子に対応する．オングストローム指数(α)は式(1)より算出する． λ は波長を表す．

$$\alpha = -\frac{\ln[\tau_a(\lambda_2)/\tau_a(\lambda_1)]}{\ln[\lambda_2/\lambda_1]} \quad (3)$$

波長 0.87 μm での AOT の値より，大気状態を下記の様に分類できる[5]．

1. 混濁 (Hazy) 大気： AOT>0.2
2. 清澄 (Clear) 大気： AOT<0.1

さらに，黄砂が飛来した場合などは，さらに光学的に厚くなる．しかし 極端に AOT が高い場合は，雲を観測した可能性が高い．自動観測データの解析では，まず，雲データの除去が必要となる．

AERONET では，計測されたデータは，アメリカワシントン近郊にあるゴダード宇宙研究センターへ転送される．例えば，日本からの観測データは，30 分ごとに静止気象衛星「ひまわり」を中継し，一度ハワイにダウンリンクされ，その後，ゴダード宇宙研究センターへ転送される．そこで，データが準リアルタイム処理され、結果が Web 上に公開される．公開されるデータは、3 つのレベルがある．レベル 1.0 は，準リアルタイム解析データであり，雲除去されていない．レベル 1.5 は，自動解析で雲除去を行なっているが，機器校正前の解析結果である．データ公開は，数日後である．レベル 2.0 は，自動解析で雲除去を行なっているが，機器校正後の解析結果であり，データは高品質を保証されている．データ公開は，数ヵ月後となる[2]．

レベル 1.5 以降に，AERONET 雲除去アルゴリズム[5]が適用されている．各項目をテスト順に下記に示す．

1．データ品質基準

エアロゾルの光学的厚さが-0.01 より低い場合，品質が悪いとして，データを採用しない．低い値は，機器校正の問題，導出の際の気圧・オゾン吸収の補正などに起因する可能性がある．データ採用の場合は，条件 2 に移る．

2．3 連続観測による選定基準

Cimel 放射計では，1 分間に 30 秒毎で連続 3 回の直達光観測を行なう．大気が安定していると考えられる場合，3 回の観測内の最大値と最小値の差が全波長において $(\tau_{\max}-\tau_{\min})>0.02$ の場合，雲と判定する．閾値の 0.02 は経験的結果に基づくものである．様々なエアロゾルの状態においても，全波長で $\tau<0.7$ では常に 0.02 未満である．しかし， $\tau>2$ では， $0.03*\tau$ としている．データが範囲内の場合，条件 3 に移る．

3．日変化による選定基準

条件 1, 2 を経て，その日の全データより導出した標準偏差が 0.015 未満となった場合，晴れデータとする．光学的厚さの推定精度は， ± 0.01 であるため，日変化が機器精度と同程度ならば，残りのデータを選定する必要はない．条件 3 を満たさない場合は，条件 4 に移る．

4．データの平滑基準

次式により指数 D を定義する．

$$D = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum \left[\frac{\ln \tau_i - \ln \tau_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} - \frac{\ln \tau_{i+1} - \ln \tau_{i+2}}{t_{i+1} - t_{i+2}} \right]^2} \leq 16 \quad (3)$$

D は、光学的厚さの値の対数を取り、時間の変化で割ったものを二乗の総和後、平方根したものである。もし $D > 16$ ならばその日の最大の値を除去し、再度、条件 3 のテストに戻る。その際、一日のデータ数が 2 以下の場合、その日のデータは採用しない。D の値が 16 以下ならばそのデータを認め、次の基準 5 に移る。

5. 三つの標準偏差基準

この検査では、 $0.5\mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さやオングストローム指数が $\pm 3\sigma$ の範囲よりも大きい場合は除去し $\pm 3\sigma$ の範囲であればそのデータを認める。

本研究では、先ず AERONET 雲除去アルゴリズムを取り入れて、Sky-radiometer デ

ータの雲除去処理を実施した。Figure.3 に $0.5, 0.87\mu\text{m}$ での光学的厚さを示す。(a)は処理前と(b)は処理後の結果(で囲んでいる部分以外)である。(a)の□で囲んでいる部分は明らかに雲と考えられる部分であり、(b)の処理後では除去できている。(b)の で囲んでいる部分は、値は低いが一日の観測結果で突然上昇していることもあり、信頼性が低いと考えられ、条件 3 により除去されている。

本研究では、上記の結果より、条件 1, 2 に更に下記 2 つを採用条件として加える。

1. 光学的厚さが 1.0 以下
2. 15 分間の変化が 0.035 以下

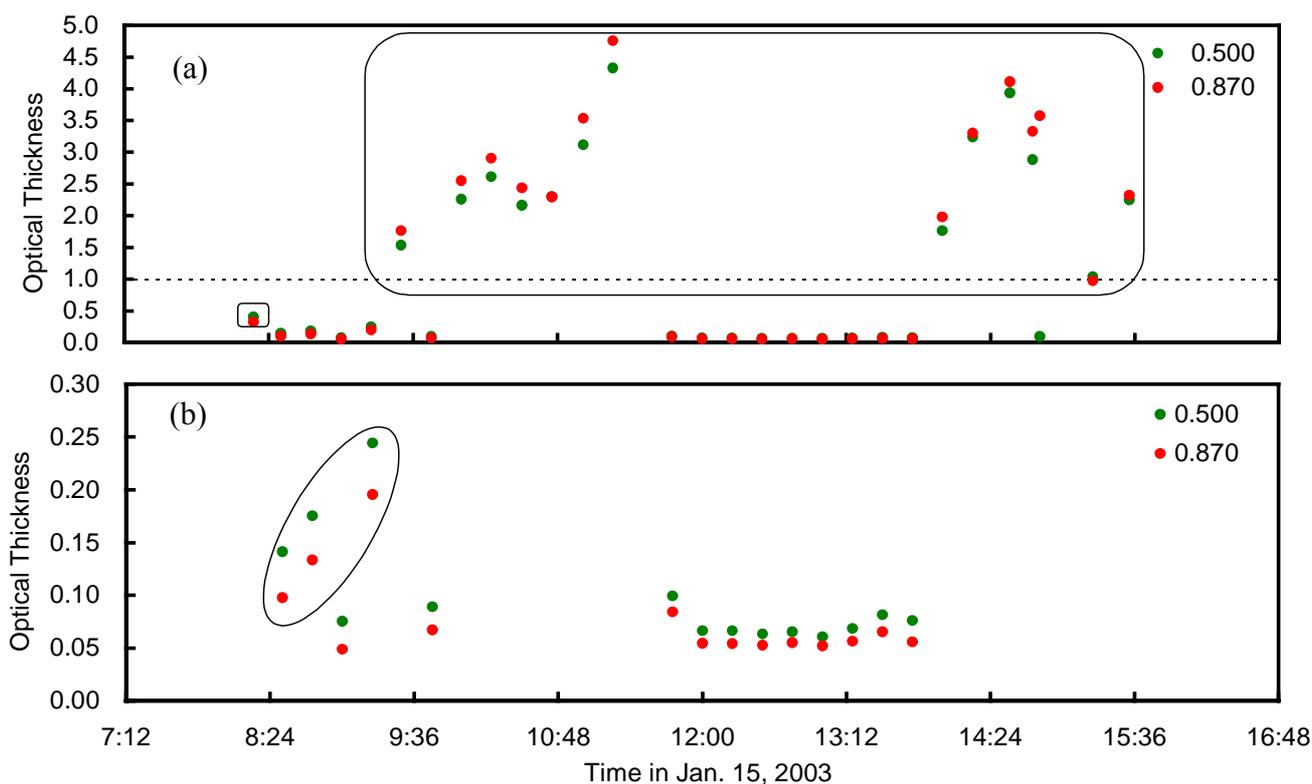


Figure 3: Optical thickness on Jan. 15, 2003 over Fukuejima, before (a) and after (b) cloud screening algorithm has been applied.

4. エアロゾル特性

Figure.4 に、福江島、東大阪にて得られた2003年1月～12月までのAOT($0.87\mu\text{m}$)と α を示す。2003年は、黄砂の飛来が少なかったため、AOTの値より高濃度事象を観測した日が少ない事がわかる。 α は1月～3月中旬まで、福江島は小さく、東大阪は高い値を示している。4月～6月まで α は福江島、東大阪ともに増加傾向を示している。10月以降は、福江島は小さく、東大阪は高い。

□で囲んだ日(3月26日、4月13日、5月23日)に注目する。福江島において、3月26日は比較的AOTが高く、 α が高い。4月13日はAOTが高く α が低く、黄砂が観測された日である。5月23日は、シベリアで発生した大規模な森林火災の煙の影響で、福江島、東大阪ともにAOTが大きく増加している。

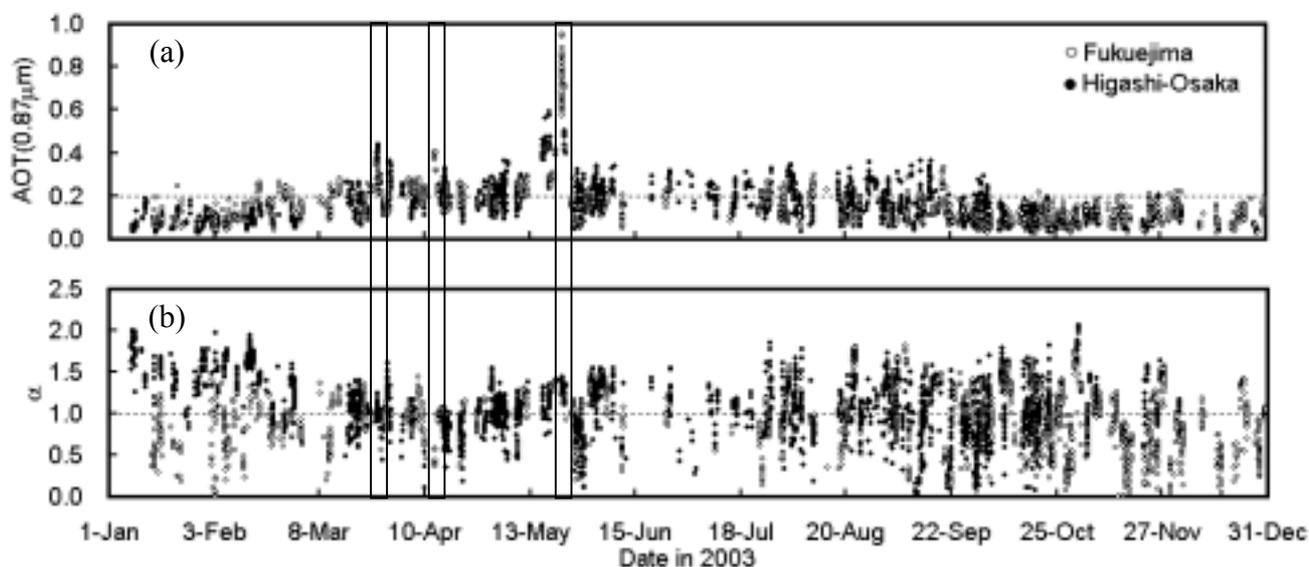


Figure 4: AOT at a wavelength of $0.87\mu\text{m}$ and Ångström exponent α at Fukuejima and Higashi-Osaka in 2003.

大気粒子の輸送経路情報はエアロゾル特性を解析する上で有用である。ここでは、NOAA/HYSPLIT4モデルを用いて粒子の輸送経路を計算する。計算には緯度経度、高度、輸送時間を指定し、その格子点毎に、NCAR/NCEP再解析データから風向、風速などの気象データを入力する必要がある。Figure.5(a)は、2003年3月26日の福江島のHYSPLIT4による輸送経路(高度2km)を示す。図中には、北京と上海の位置を

一日毎の地点を日付で示している。福江島は、中国大陸からの粒子が、朝鮮半島付近を通過して輸送されている事が分かる。中国の産業活動による粒子による物と考えられる。北海道大学グループのフィルターサンプリングの結果より、2003年の福江島でのエアロゾル成分濃度は、3月24日から26日にかけて極端にエアロゾル濃度が上昇している。その中でも硫酸イオン、アンモニウムイオンがかなりの高濃度であった[6]。

Figure.5(b)は2003年4月13日の福江島における HYSPLIT 4 による輸送経路を示す。中国大陆からの砂塵粒子が日本に運ばれたことが確認できる。Figure.5(c)は、2003年5月23日の福江島の HYSPLIT 4 による輸送経路を示す。バイカル湖付近から粒子が朝鮮半島を通過して飛来している。シベリアで起きた大規模な森林火災による粒子である事が分かる。Figure.5(d)は、AOT が低く α が高い日(2005年1月15日)の福江島における輸送経路を示している。(c)と同様にバイカル湖付近から粒子が朝鮮半島を通過して飛来している。2003年はクリアな日が多いが、粒子は北からの内陸部を通り長距離輸

送されていると考えられる。

Table.1 に福江島、東大阪での季節毎の(AOT, α)の平均値を示す。 α は、どの季節でも福江島では1.0以下となり、東大阪では1.0以上である。エアロゾル粒子の大きさが異なる事が明らかである。東大阪は、小粒子が卓越しており、市内から発生する人為起源エアロゾルの影響が大きいと考えられる。一方、AOTは4月から6月は、福江島、東大阪ともに0.2以上で高い。1月から3月までは福江島が東大阪より高い。 α が低いことから、砂塵の飛来回数が東大阪より多いと考えられる。

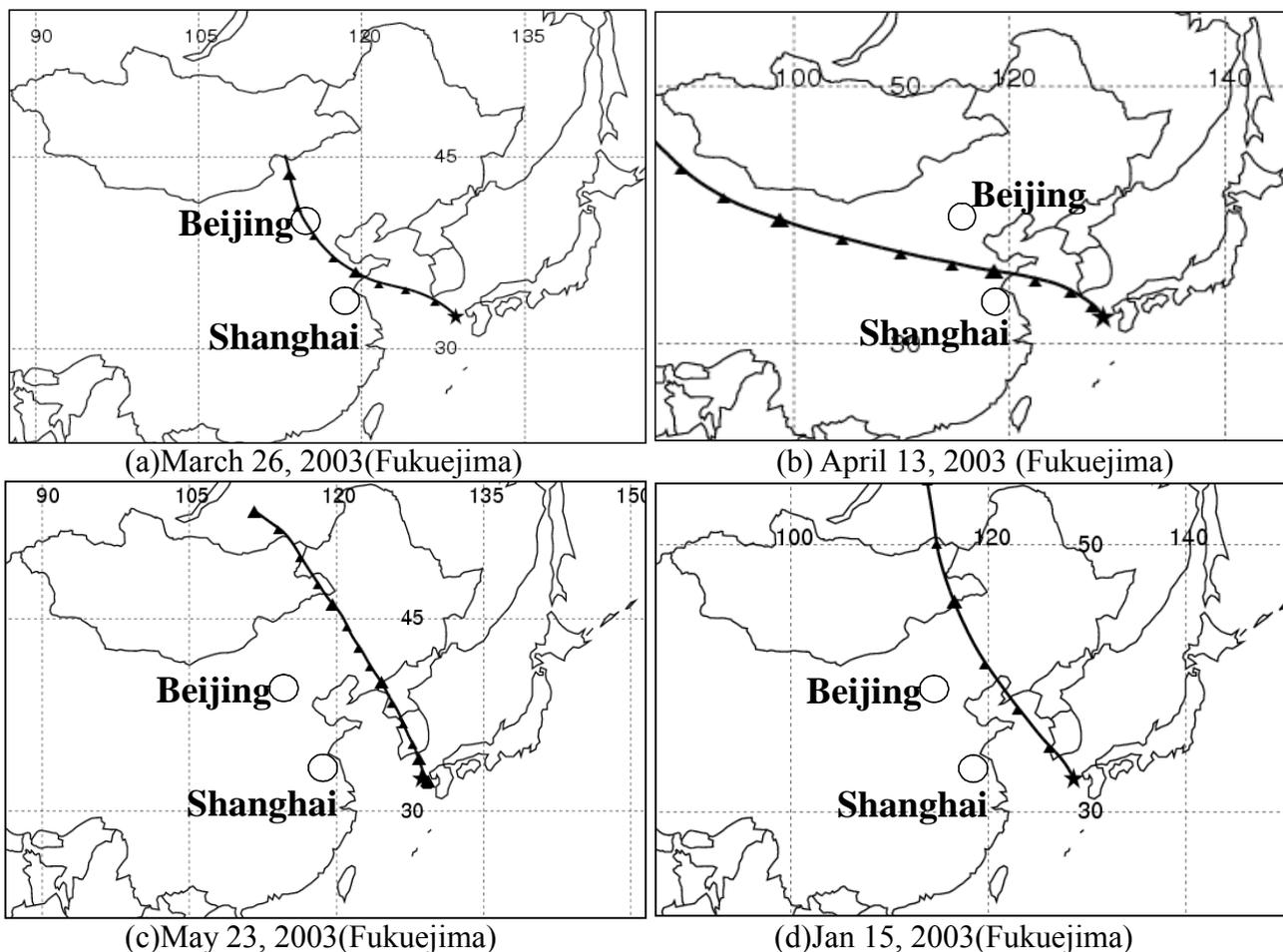


Figure 5: Transportation map of particles calculated with HYSPLIT4 model for Fukuejima

Table 1. Averaged values of AOT and α , over Fukuejima and Higashi-Osaka.

Site	J,F,M		A,M,J		J,A,S		O,N,D	
	AOT	α	AOT	α	AOT	α	AOT	α
Fukuejima	0.15	0.87	0.20	0.99	0.12	0.94	0.08	0.92
Higashi-Osaka	0.13	1.34	0.24	1.02	0.17	0.97	0.13	1.01

5. おわりに

福江島と東大阪に設置した偏光放射計 Sky-radiometer データから得られた大気エアロゾル解析結果をまとめる。

- 1) エアロゾル解析のためには、雲除去アルゴリズムの適用が不可欠である。
- 2) 2003 年の福江島、東大阪のエアロゾル特性を季節に分けて比較した。
- 3) 東大阪は常時微小サイズの人為起源エアロゾルが卓越していることが確認できた。
- 4) 春には東大阪においても比較的大きな

黄砂粒子の飛来が見られる。

- 5) 福江島では春先に黄砂エアロゾルが観測された。
- 6) 福江島上空は1年を通じ、東大阪より清澄であると言える。
- 7) 福江島上空エアロゾルは海塩粒子が優勢でエアロゾルサイズは比較的大きい。

本研究で使用した HYSPLIT4 モデルは、NOAA AirResources Laboratory から提供して頂きました。

参考文献

- [1] Tsutumi, Y., J. Morishita, M. Yoshida, K. Odashima, A. Saito, K. Suzuki, and O. Ijima, 2004: Analysis of Aerosol Events Observed at Four Sun Photometer Sites in Japan during March-April 2002, *J.Meteor.Soc.Japan*, 82, 1161-1172.
- [2] Holben, B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998: AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Rem. Sens. Environ.*, 66, 1-16.
- [3] Aoki, K., and Y. Fujiyoshi, 2003: Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J.Meteor.Soc.Japan*, 81, 493-513.
- [4] Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B.N. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Appl. Opt.*, 35, 2672-2686.
- [5] Smirnov, A., B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, and I. Slutsker, 2000. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base. *Rem. Sens. Environ.* 73, 73337-73349.
- [6] Nokame, K., S. Ohta, N. Murao, and S. Yamagata, 2005: Optical properties estimation from chemical composition analysis of atmospheric aerosol in the East China Sea, *Proc. of the The 13th Symposium on Global Environment* (in Japanese).