

## ニーオルスンでのスカイラジオメータ観測に基づく 2006 年 および 2007 年の春季エアロゾルの光学特性

塩原匡貴<sup>1\*</sup>・矢吹正教<sup>1,2</sup>・山野 牧<sup>3</sup>・青木一真<sup>4</sup>・小林 拓<sup>5</sup>

Column aerosol optical properties based on the sky-radiometer measurement at  
Ny-Ålesund in the Arctic spring of 2006 and 2007

Masataka Shiobara<sup>1\*</sup>, Masanori Yabuki<sup>1,2</sup>, Maki Yamano<sup>3</sup>,  
Kazuma Aoki<sup>4</sup> and Hiroshi Kobayashi<sup>5</sup>

(2010 年 2 月 9 日受付; 2010 年 3 月 3 日受理)

**Abstract:** Sky-radiometer measurements have been performed in Ny-Ålesund with Prede POM-01 since March 2000, and followed by POM-02 since May 2004. Aerosol optical properties, i.e., optical thickness, single scattering albedo and refractive index for selected wavelengths at 400, 500, 675, 870 and 1020 nm, and the volume size distribution, are retrieved from spectral measurements of the direct solar attenuation and the sky radiance distribution by sky-radiometer. These optical properties are compared for normal conditions and a smoke event in spring 2006. The result shows extremely high optical thickness and contamination of light absorbing particles for the smoke event. It is suggested from retrievals of the refractive index and size distribution that aerosol during the smoke event included soot and organics origin particles in addition to sulfate and sea-salt particles that are dominant for normal conditions.

要旨: 北極・ニーオルスンでは 2000 年 3 月より POM-01 型, 2004 年 5 月より POM-02 型のスカイラジオメータを用いた太陽放射の分光観測が行わ

<sup>1</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>2</sup> (現所属 present affiliation): 京都大学生存圏研究所, Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.

<sup>3</sup> エナジシェアリング, Energy Sharing Co., Ltd. (ESCOT), Yamato-cho, Nakano-Ku, Tokyo 165-0034.

<sup>4</sup> 富山大学大学院理工学研究部, Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Toyama, 3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama 930-8555.

<sup>5</sup> 山梨大学大学院医学工学総合研究部, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, 3-11, Takeda 4-chome, Kofu 400-8511.

\* Corresponding author. E-mail: shio@nipr.ac.jp

れている。スカイラジオメータによる波長 400, 500, 675, 870 および 1020 nm での太陽直達光および天空光強度分布の測定データから、気柱エアロゾルの光学的厚さ、単散乱アルベド、複素屈折率等の光学特性を求めた。得られた結果から平常時とスモーク時との光学特性の違いを調べた。2006 年春のスモーク到来時には極度に高い光学的厚さを示し、吸光性粒子の混入を示す結果となった。解析の結果得られたエアロゾルの複素屈折率と粒径分布により、スモーク時には平常時の硫酸性粒子や海塩粒子に加えて、煤や植物燃焼起源のエアロゾル粒子が存在することが示唆された。

## 1. はじめに

大気中のエアロゾルは、その直接的・間接的效果により大気-地表系におけるエネルギー収支に影響を及ぼし、ひいては地球規模の気候変化を引き起こす可能性を持つ。エアロゾルの直接効果はエアロゾルの光学的性質によって異なる大きさを示す。光学的性質を測定する測器の一つとして、プリード社製のスカイラジオメータ (POM シリーズ) は SKYNET プロジェクトにより主にアジア域で展開されてきた。このスカイラジオメータを、国立極地研究所では北極スバルバル・ニーオルスン (78.9N, 11.9E) と南極・昭和基地に設置し、北極での観測は 2000 年 3 月より継続実施中である。当初 4 年間は POM-01 型を使用し、その後 2004 年 5 月に POM-02 型に置き換えて現在に至っている (図 1)。

ニーオルスンでは 2006 年 5 月にエアロゾル光学的厚さが極度に高い現象が観測され、この特異な事例は東ヨーロッパの穀倉地帯でのバイオマス燃焼を起源とするエアロゾルが北上し、スバルバル諸島に到達したことによるものであることが物理的・化学的解析により示された (Myhre *et al.*, 2007; Stohl *et al.*, 2007; Treffeisen *et al.*, 2007)。このイベントについて、Myhre *et al.* (2007) はそのエアロゾル層の放射強制力を見積もり、少なくとも



図 1 ニーオルスン・ラベン観測所屋上に設置されたスカイラジオメータ POM-02

Fig. 1. Sky-radiometer, Prede POM-02, placed on the roof-top of the Rabben Observation Facility in Ny-Ålesund, Svalbard.

-35 W/m<sup>2</sup> に達する大きな負の強制力であったと推定した。また, Treffeisen *et al.* (2007) はこの時のエアロゾル層について, すず(soot)の外部混合を仮定したモデル計算に基づき, 高度 0.5 km での大気加熱率は 0.55 K/day に達した可能性があることを示した。ここでは, その 2006 年の事例を含め, スカイラジオメータ観測から得られたニーオルスンの春季の気柱エアロゾルの光学特性について報告する (Shiobara *et al.*, 2008)。

## 2. 観測と解析の方法

スカイラジオメータは, 直達太陽光の波長別減衰量および太陽周辺光強度の角度分布を測定する分光放射計である (e.g., Shiobara *et al.*, 1991; Aoki and Fujiyoshi, 2003)。この測器は, 基本的には NASA が展開する AERONET (Aerosol Robotic Network) の主要測器である Cimel サンフォトメータと同様の測定を行い, 解析手法の原理は共通する (Nakajima *et al.*, 1996; Holben *et al.*, 1998)。

ブリード社製スカイラジオメータの POM-01 と POM-02 との違いは, その測定波長域にある。POM-01 は可視域を中心とする波長 315 nm-1020 nm 間に標準的な 7 波長(チャンネル)を装備するのに対して, POM-02 は近赤外域のチャンネルを 2200 nm まで延長し, 全部で 11 波長 (315, 340, 380, 400, 500, 675, 870, 940, 1020, 1600, 2200 nm) を装備する。分光素子にはフィルター幅 (FWHM) が 5-10 nm 程度の干渉フィルターを用いる。光検知器にはシリコン・フォトダイオードの他に, 1600, 2200 nm 用にゲルマニウム・フォトダイオードを用い, そのため, POM-02 では 2 個の光検知器に対して別々の光学系を持つ。POM-02 が装備する長波長側の 2 チャンネルは, 雲の光学的性質の測定のために追加されたものである。本研究ではエアロゾルの光学的性質に限るため, ここでの解析に用いる波長は 400, 500, 675, 870, 1020 nm の 5 チャンネルのみである。2006-2007 年の観測期間中, ラベン観測所の屋上に設置されたスカイラジオメータ POM-02 は 10 分おきに太陽周辺光の測定を行い, その前後に太陽直達光の測定を行った。測器視野は全角 1 度 (2.4E-4 sr) で設計され, 前方散乱角 3 度以上での周辺光測定が可能である。

本研究では, Nakajima *et al.* (1996) により開発された SKYRAD. pack 解析プログラム Ver. 4.2 を用いた。SKYRAD 解析スキームはインバージョン法を基本とし, 波長別の太陽直達光と散乱光の測定データから気柱エアロゾルの光学的厚さ, オンゲストローム指数, 単散乱アルベド, 複素屈折率, 体積粒径分布を得ることができる。ここでいう気柱とは, 大気下端から上端までの単位面積あたりの気柱積分量, あるいは気柱全体の平均値の意味で用いる。SKYRAD 解析プログラムは改良ラングレー法 (Tanaka *et al.*, 1986) を採用した検定プログラムを含んでおり, これにより本解析に際して必要となる測器定数を求めることができる。ここでは, ラングレー法に適した晴天日の現地観測データを用いて求めた測器定数(大気外出力機械定数)を使用した。その値は 2006 年と 2007 年とではフィルター

の劣化等により若干異なるため、それぞれ別の値を用いた。その差は波長によっても異なるが、500 nm ではこの 1 年間で約 3% 低下した。単散乱アルベドを含む定量解析には、測器定数のほかに正確な測器視野角データが必要となる。測器視野角の測定は、標準測定プログラムに組み込まれた自動測定により定期的に行われる。測器視野角の変動は小さく、この 1 年間では 2% 程度以内に収まっていた。本解析では、地上気圧 1 atm, オゾン全量 300 DU, 地表面アルベド 0.5 を仮定した。インバージョン法によって得られた解析結果、すなわちエアロゾルの光学的性質をもとに、理論計算に基づいて逆に元の観測値を再現する(求めなおす)ことが可能である。この、再現値と観測値とを比較することは、観測データの良し悪しやインバージョン解析の信頼性を確認する上で重要である。ここでは、再現値と観測値の差の標準偏差が 10% を超えるような場合に、データ不良あるいは解析不良と判断し、観測結果から除外した。観測中に雲がかかってしまったデータの除去 (cloud screening) については、雲データ除去アルゴリズム (e.g., Khatri and Takamura, 2009) の適用などは行っていないが、一般に、上に述べた不良データ除去の過程で雲のデータも除去される場合が多く、さらに最終的には、個々のデータについて目視により異常値を判断し除外した。

### 3. 結果と考察

スカイラジオメータ観測および SKYRAD 解析により得られた、2006 年および 2007 年 4-5 月の観測結果を図 2 に示す。上から、波長 500 nm でのエアロゾルの光学的厚さ (AOT), オングストローム指数 (AE), 単散乱アルベド (SSA), 複素屈折率の実数部 (CR) と虚数部 (CI) の値を、2006 年については丸印で、2007 年については四角印で示している。左軸には、それぞれの光学パラメータの 2 ヶ月間の平均値を矢印 (黒: 2006 年, 灰: 2007 年) で示した。それらの値を表 1 にまとめた。

まず、図 2 で明らかのように、2006 年 5 月 2 日の AOT (波長 500 nm) は 0.4 を超えるような異常に高い値となっている。この時期に出現した特異なイベントについてはさまざまな見地から解析がなされ、この時スバル地域で観測されたヘイズ現象 (スモーク・イベント) は、東ヨーロッパの穀倉地帯での植物燃焼に端を発するものであることがわかった (Myhre *et al.*, 2007; Stohl *et al.*, 2007; Treffeisen *et al.*, 2007)。スバル上空に到達した空気塊の後方流跡線は東ヨーロッパ域まで遡ることができ、MODIS 衛星データから、その一帯ではその時期に盛んに火災が起きている様子が確認された (Stohl *et al.*, 2007)。図 3 は、図 2 において平常時 (normal) として示した 4 月 26 日とスモーク・イベント (smoke) があつた 5 月 2 日の両日について、それぞれ NOAA/ARL の HYSPLIT4 model (HYSPLIT, 1997) を用いて 5 日間の後方流跡線解析を行った結果である。Normal 時の空気塊がシベリアに端を発しているのに対して、smoke 時の空気塊は東ヨーロッパ域からスカンジナビア半島を経由してスバル諸島に到達した様子が見られる。特に、到

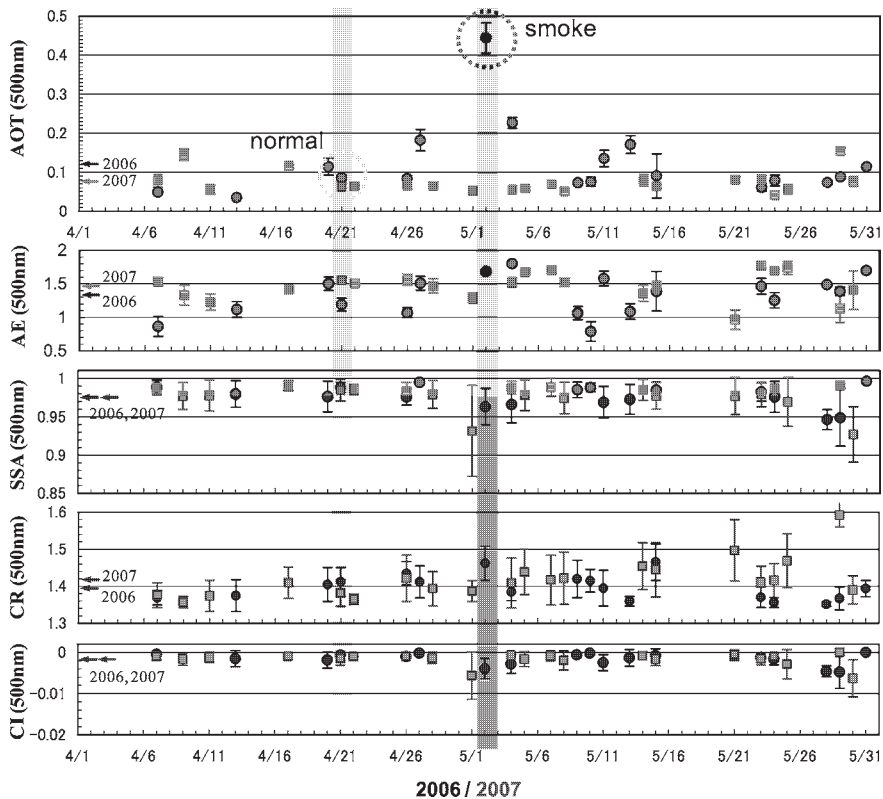


図2 ニーオルスンにおける2006年(○)および2007年(□)4-5月のエアロゾル光学特性の変動。上からエアロゾルの光学的厚さ(AOT)、オングストローム指数(AE)、単散乱アルベド(SSA)、複素屈折率実数部(CR)および虚数部(CI)、波長500nm、いずれも日平均値で、エラーバーはその標準偏差。図中左軸に付した矢印はそれぞれ各年での平均値を示す。  
 Fig. 2. Temporal variations of aerosol optical properties at Ny-Ålesund, Svalbard for April and May of 2006 (circles) and 2007 (squares). Top to bottom: Aerosol optical thickness (AOT), Ångström exponent (AE), single scattering albedo (SSA), and real and imaginary part values of complex refractive index (CR, CI), respectively at the wavelength of 500 nm. Each plot and error bar indicate the daily mean and the standard deviation. Arrows on the left axis indicate the average values for the period of each year.

達地点高度1000mのトラジェクトリは、スバルバル到達の4-5日前には、この期間にEOS衛星搭載MODISにより観測された火災地域(図3の“MODIS detected fire area”, Stohl *et al.*, 2007)の上空を空気塊が通過したことを示している。

表1の平均値を見るかぎり、エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数以外の光学パラメータについては、2006年と2007年とで大きな違いは見られない。Herber *et al.* (2002)の報告によれば、ニーオルスンでのサンフォトメータ観測に基づくAOT(波長532nm)の春季のバックグラウンド値は0.067であるから、2007年の値はその結果とほぼ同等

表 1 2006 年および 2007 年の春季 (4 月および 5 月) のエアロゾルの光学パラメータの平均値 (avr) と標準偏差 (std) AOT: エアロゾルの光学的厚さ, AE: オングストローム指数, SSA: 単散乱アルベド, CR: 複素屈折率実数部, CI: 複素屈折率虚数部.

Table 1. Aerosol optical parameter average (avr) values and standard deviation (std) for spring (April and May) of 2006 and 2007. AOT: Aerosol optical thickness, AE: Angstrom exponent, SSA: Single scattering albedo, CR: Complex refractive index-Real part, CI: Complex refractive index-Imaginary part.

		AOT	AE	SSA	CR	CI
2006	avr	0.121	1.330	0.977	1.397	-0.0017
	std	0.050	0.290	0.014	0.034	0.0015
2007	avr	0.075	1.470	0.977	1.420	-0.0017
	std	0.029	0.205	0.017	0.053	0.0015

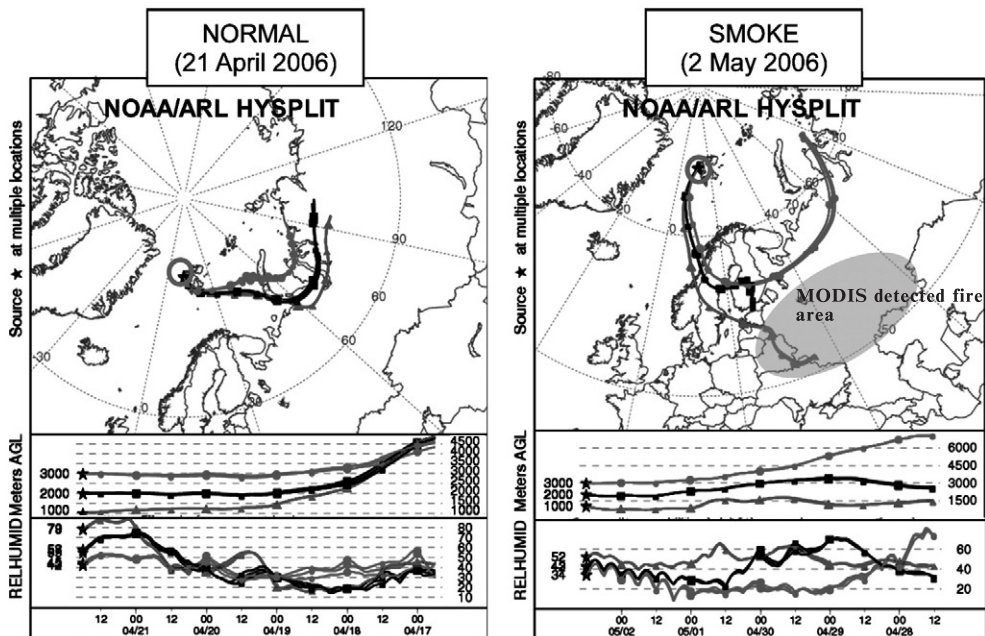


図 3 NOAA HYSPLIT 4 Model による 5 日間の後方流跡線。左: 平常時 (2006 年 4 月 21 日), 右: スモーク時 (2006 年 5 月 2 日)。3 本の流跡線はそれぞれ到達高度 1000 m (▲), 2000 m (■), 3000 m (●) の場合に対応する。

Fig. 3. Five-day backward air trajectories drawn by using NOAA HYSPLIT 4 Model for the normal case (left, 21 April 2006) and the smoke event (right, 2 May 2006) observed at Ny-Ålesund. Three curves with triangles, squares and circles correspond to three altitudes, 1000, 2000 and 3000 m at the destination, respectively.

であるのに対して, 2006 年のそれは倍近い大きな値となっている。図 2 の AOT の時系列を 2006 年と 2007 年とで詳細に比較すると, 2006 年 5 月 2 日とその前後の数日間に AOT の大きな日があり, それらが 2006 年の平均値を引き上げているが, それ以外の日については 2006 年, 2007 年ともに同様の, いわゆるバックグラウンド値を示している。そこで, この

表2 2006年の光学パラメータの平常時 (normal) とスモーク・イベント時 (smoke) との比較.  
Table 2. Comparison of optical parameters for normal state and smoke event in 2006.

		AOT	AE	SSA	CR	CI
normal	avr	0.086	1.190	0.988	1.412	-0.0007
(4/21)	std	0.008	0.097	0.006	0.039	0.0005
smoke	avr	0.444	1.683	0.963	1.462	-0.0040
(5/2)	std	0.039	0.138	0.023	0.046	0.0024

スモーク時とバックグラウンドとの比較を明瞭にするために、2006年4月21日を平常時 (normal) の例、5月2日をスモーク時 (smoke) の例として、光学パラメータの平均値とその分散をまとめたのが表2である。

表2を見ると、スモーク時と平常時では AOT (エアロゾルの光学的厚さ) が違うばかりでなく、AE (オングストローム指数) も大きく異なっていたことがわかる。すなわち、スモーク時には AE が大きく、相対的に小粒子が卓越していたことを示している。一般に、硫黄化合物に代表される人為起源エアロゾルの増加は小粒子側で起こり、AOT と AE は正の相関を示す。春季のニーオルスンでもそのような例が多く (青木ほか, 2010)、いわゆるニーオルスンで観測される北極ヘイズも、硫酸性の人為起源エアロゾルの増加によってもたらされている事実を示唆するものである。しかし、これら水溶性の硫酸性エアロゾルは光学的には透明度が高く、光吸収性は小さい。表2の結果では、平常時に比べてスモーク時には SSA (単散乱アルベド) の値はやや小さく、エアロゾルの光吸収性をもたらす複素屈折率の虚数部 (CI) の絶対値もやや大きい値を示している。また、やや大きめの実数部 (CR) の値は有機炭素の特徴を示していると考えられる。すなわち、これらの光学的性質から、5月2日の例は、人為起源の硫酸性エアロゾルの他に、植物燃焼に伴うすす等の燃焼性エアロゾルを含んでいたことが推定される。事実、Stohl *et al.* (2007) はツェッペリン観測所 (ノルウェー極地研究所) でのサンプリングに基づき、エアロゾル中の無機炭素や有機炭素がこの時期に急激に増加したことを報告している。

#### 4. ま と め

2006年および2007年に実施したニーオルスンでのスカイラジオメータ観測に基づき、春季の北極エアロゾルの光学特性を調べた。データ解析には SKYRAD. pack Ver. 4.2 を用い、太陽直達光・散乱光データからエアロゾルの光学的厚さ (AOT)、オングストローム指数 (AE)、粒径分布、単散乱アルベド (SSA)、複素屈折率 (CR, CI) を求めた。その結果、日平均の AOT (波長 500 nm) が 0.4 以上という異常に大きな値を示した 2006年5月のイベント時には平常時に比べて AE も大きく、また、やや小さめの SSA とやや大きめの CR, CI の結果から、この時のエアロゾルは、春季の北極ヘイズ時によく観測される硫酸性

エアロゾルの他に, 植物燃焼に伴うすす等の燃焼性エアロゾルを含んでいたことが推定された。

## 謝 辞

本研究は平成 16-19 年度科学研究費補助金 (No. 16253001, 研究代表者: 山内 恭・国立極地研究所教授) の助成により実施された。ラベン観測所は国立極地研究所北極観測センターにより管理運営されている。ラベン観測所でのスカイラジオメータ観測は, ノルウェー極地研究所の現地技術者のサポートにより維持されている。また, ラベン観測所を含むニーオルスンの施設維持管理は, キングスベイ社により行われている。ここに記して, 各関係機関の協力に感謝します。

## 文 献

- Aoki, K. and Fujiyoshi, Y. (2003): Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **81**, 493-513.
- 青木一真・矢吹正教・塩原匡貴 (2010): スカイラジオメーターを使ったニーオルスンにおけるエアロゾルの光学的特性の長期観測. *南極資料*, **54**, 882-889.
- Herber, A., Thomason, L.W., Gernandt, H., Leiterer, U., Nagel, D., Schulz, K.-H., Kaptur, J., Albrecht, T. and Notholt, J. (2002): Continuous day and night aerosol optical depth observations in the Arctic between 1991 and 1999. *J. Geophys. Res.*, **107** (D10), 4097, doi:10.1029/2001JD000536.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I. and Smirnov, A. (1998): AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16.
- HYSPLIT (1997): HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. <[http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php)>
- Khatri, P. and Takamura, T. (2009): An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analyses. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **87**, 189-204, doi:10.2151/jmsj.87.189.
- Myhre, C.L., Toledano, C., Myhre, G., Stebel, K., Yttri, K.E., Aaltonen, V., Johnsrud, M., Frioud, M., Cachorro, V., de Frutos, A., Lihavainen, H., Campbell, J.R., Chaikovsky, A.P., Shiobara, M., Welton, E.J. and Tørseth, K. (2007): Regional aerosol optical properties and radiative impact of the extreme smoke event in the European Arctic in spring 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 5899-5915.
- Nakajima, T., Tonna, G., Rao, R., Boi, P., Kaufman, Y. and Holben, B. (1996): Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Appl. Optics*, **35**, 2672-2686.
- Shiobara, M., Hayasaka, T., Nakajima, T. and Tanaka, M. (1991): Aerosol monitoring using a scanning spectral radiometer in Sendai, Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **69**, 57-70.
- Shiobara, M., Yamano, M., Kobayashi, H., Aoki, K. and Yabuki, M. (2008): Sky-radiometer measurement for monitoring column aerosol optical properties in Ny-Ålesund: recent results from the spring 2006-2007 measurements. 8th Ny-Ålesund Seminar. Cambridge, UK, 16-17 Oct. 2007. *Polarnet Tech. Rep. PTR-1/2008*, 32-35.
- Stohl, A., Berg, T., Burkhardt, J.F., Fjæraa, A. M., Forster, C., Herber, A., Hov, Ø., Lunder, C., McMillan, W.W., Oltmans, S., Shiobara, M., Simpson, D., Solberg, S., Stebel, K., Ström, J., Tørseth, K., Treffeisen, R., Virkkunen, K. and Yttri, K.E. (2007): Arctic smoke: record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring



2006. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 511–534.

Tanaka, M., Nakajima, T. and Shiobara, M. (1986): Calibration of a sunphotometer by simultaneous measurements of direct-solar and circumsolar radiations. *Appl. Optics*, **25**, 1170–1176.

Treffeisen, R., Tunved, P., Ström, J., Herber, A., Bareiss, J., Helbig, A., Stone, R.S., Hoyningen-Huene, W., Krejci, R., Stohl, A. and Neuber, R. (2007): Arctic smoke: aerosol characteristics during a record smoke event in the European Arctic and its radiative impact. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3035–3053.