

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青木一真^{1*}・矢吹正教^{2,3}・塩原匡貴³Long-term monitoring of aerosol optical characteristics
by using sky radiometer at Ny-Ålesund, SvalbardKazuma Aoki^{1*}, Masanori Yabuki^{2,3} and Masataka Shiobara³

(2010年2月15日受付; 2010年3月24日受理)

Abstract: Sky radiometer measurement has been continued at Ny-Ålesund, Svalbard (78.93N, 11.86E, Alt. 30 m) in the Arctic region, since March 2000. In this study, we present the temporal variation and the relationship of Ångström parameters (i.e., aerosol optical thickness and Ångström exponent) at Ny-Ålesund. The results of long-term measurements show clear seasonal trends of the aerosol optical thickness at 0.5 μm with maximum in spring and minimum at the end of summer, and of the Ångström exponent with temporal increase in spring to summer.

要旨: 北極に位置するニーオルスンでは、2000年3月より現在までスカイラジオメーター観測を行っている。本研究は、ニーオルスンのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の時間変化を示す。長期観測の結果によると、0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さは、春に最大で夏の終わりに最小となり、オングストローム指数は春から夏にかけて増加するような季節変化が示された。

1. はじめに

大気中に浮遊するエアロゾル粒子による直接的効果や間接的効果による気候影響は、地球温暖化問題に関連しても重要な課題である (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate

¹ 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.

² (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.

³ 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.

* Corresponding author. E-mail: kazuma@sci.u-toyama.ac.jp



図1 ニーオルスンにおけるスカイラジオメーター観測風景
Fig. 1. Sky radiometer measurements at Ny-Ålesund, Svalbard.

Change, 2007). 特に、極域の影響を評価することは、気候予測をする上でも重要である。極域における雲やエアロゾルの変動が、どのような気候影響を与えるのかについて理解するためには、地上観測から精度の良い結果を長期間にわたって蓄積することが必要不可欠である。そこで我々は、2000年より現在まで、北極域のエアロゾルの光学的特性を把握するため、太陽光を利用した大気放射の連続観測を北極域であるニーオルスンにおいて行ってきた。このような観測は、SKYNET/SKY (<http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/>)や、AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)等により行われており、各地のエアロゾルの光学的特性の時間的・空間的変動 (Aoki and Fujiyoshi, 2003) の把握や人工衛星、数値モデルの検証にも使われてきた。本研究では、SKYNET (<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>)で利用されているスカイラジオメーター (図1: POM-01, POM-02, プリード社製) を使用した。この観測期間中には、様々な観測プロジェクト (e.g., ASTAR: Arctic Study of Tropospheric Aerosol, Clouds and Radiation; IPY: International Polar Year) が行われているが、本報告では長期的な観測結果の紹介にとどめ、短期的な変動は塩原ほか (2010) を参照されたい。

2. 観測及び解析概要

太陽の直達光と角度別(0, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160度:ただし、太陽高度によって最大測定角度が違う)の周辺光の放射輝度を波長別に自動測定できるスカイラジオメーターを用いて、ニー

オルスン観測基地 (図 1: 78.93N, 11.86E, Alt. 30 m) で連続観測を行っている。観測波長は、POM-01 が 7 波長 (0.315, 0.4, 0.5, 0.675, 0.87, 0.94, 1.02 μm)、POM-02 が 11 波長 ((POM-01)+0.34, 0.38, 1.6, 2.2 μm) である。2000 年 3 月~2004 年 5 月までは POM-01 を使用し、2004 年 5 月から現在まで POM-02 を使用して観測を行っている。本報告では、2000 年 3 月~2008 年 8 月までの解析結果を示す。式(1)のように、太陽の直達光 ($F(\lambda)$) と角度別 (θ) の周辺光の放射輝度 ($E(\theta, \lambda)$) の波長別の比より規格化した放射輝度 ($R(\theta, \lambda)$) を定義することにより、インバージョン法を用いた SKYRAD. pack version 4.2 (Nakajima *et al.*, 1996) を使用して解析を行った。

$$R(\theta, \lambda) = \frac{E(\theta, \lambda)}{F(\lambda)m\Delta\Omega(\lambda)} = \omega(\lambda)\tau(\lambda)P(\theta, \lambda) + q(\theta, \lambda) = \beta(\theta, \lambda) + q(\theta, \lambda), \quad (1)$$

ただし、 m は大気路程、 $\Delta\Omega(\lambda)$ は測器の立体視野角、 $\omega(\lambda)$ は各波長の一次散乱アルベド、 $\tau(\lambda)$ は各波長の光学的厚さ、 $P(\theta, \lambda)$ は規格化された位相関数、 $q(\theta, \lambda)$ は多重散乱の寄与を表す。本解析では、スカイラジオメーター観測から得られたエアロゾルの吸収波長帯の 5 波長 (0.4, 0.5, 0.675, 0.87, 1.02 μm) を使用して、各波長のエアロゾルの光学的厚さ (τ_A) や一次散乱アルベド、体積粒径分布などを算出した。また、式(2)を利用して、粒径の指標として使われるオングストローム指数 (α) も求めた。

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

太陽放射観測は日中の晴天時に測定を行っているが、北極域では太陽高度が低いこと、白夜や極夜があるため、中低緯度と違って太陽光を利用した通年観測はできない。月光や星の明かりによる極夜中のエアロゾルの光学的特性の導出 (Herber *et al.*, 2002) があるが、本研究の観測期間は、より詳細な物理量や多くの情報の導出を試みるため、太陽光を用いた観測ができる主に 3-10 月までとした。また、このような極域特有の条件もあるため、観測地域の積雪による地表面アルベドの季節変化も考慮した。解析で使用した地表面アルベドは、3 月は 0.8、4-5 月は 0.5、6 月以降は 0.2 とした。観測周辺の環境が、一方は山岳、一方が海洋であるためスカイラジオメーターの空間代表性が広いことから、今回は月ごとに地表面アルベドを使用した。

3. 結果と考察

北極域のエアロゾルの光学的特性の時間変動を示すため、2000 年よりニーオルスンにおいて、スカイラジオメーター観測を行った。図 2 は、2000-2008 年の 9 年間における 0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ (左) とオングストローム指数 (右) の時系列の結果を示したものである。極域という過酷な環境下に加え、リモート観測を行っているため、欠測など

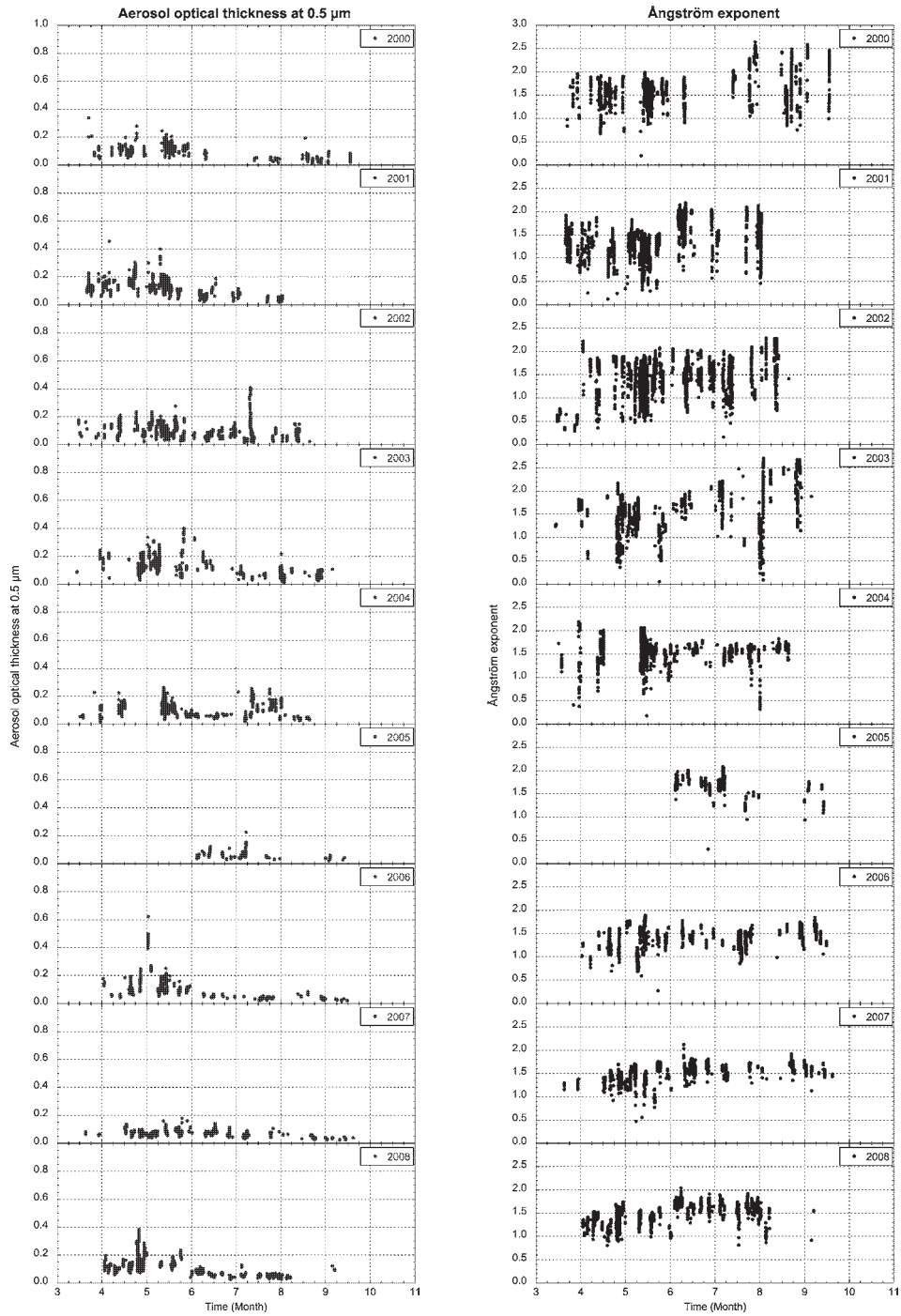


図2 ニーオルスンにおける2000-2008年の $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さ(左)とオングストローム指数(右)の時系列の結果

Fig. 2. Temporal variation of aerosol optical thickness at $0.5\ \mu\text{m}$ (left panel) and Ångström exponent (right panel) for the period from 2000 to 2008 in Ny-Ålesund, Svalbard.

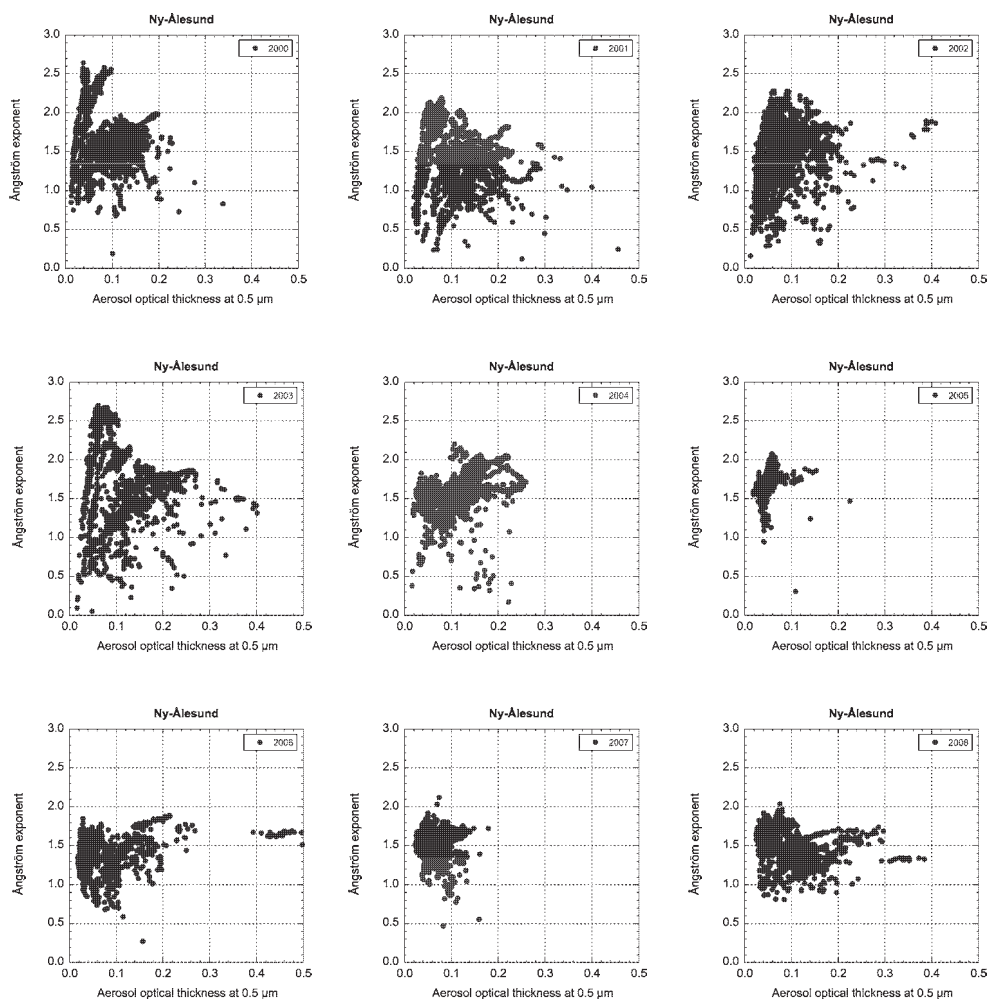


図3 ニーオルスンにおける2000-2008年の $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係

Fig. 3. The relation between aerosol optical thickness at $0.5\ \mu\text{m}$ and Ångström exponent for the period from 2000 to 2008 in Ny-Ålesund, Svalbard.

があるものの、多くの測定結果を得ることができた。 $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さは、ほとんどが0.2以下であったが、時々、ヨーロッパ等から輸送されたエアロゾルによる急激な光学的特性の変動が報告されている (Shiobara *et al.*, 2008; 塩原ほか, 2010)。また、オングストローム指数は2.0を超えるような微小粒子卓越が確認された。この結果は、他地点の観測例 (Aoki and Fujiyoshi, 2003; Aoki, 2008) と比較しても高い値を示している。このような特徴を、 $0.5\ \mu\text{m}$ の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見てみる。図3は、2000-2008年の9年間における $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さとオン

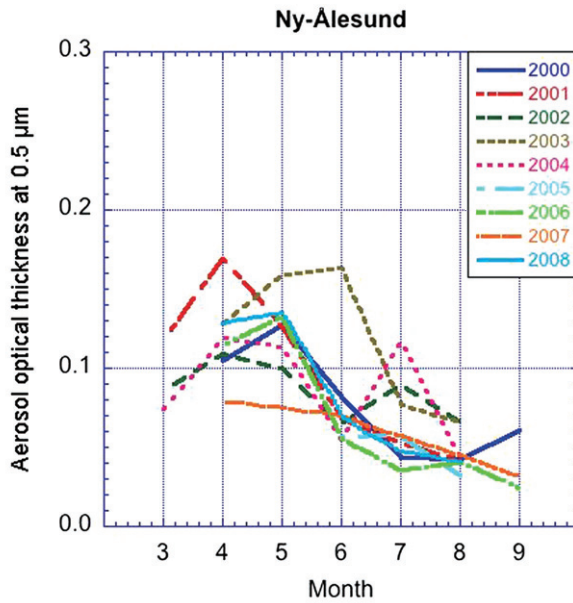


図4 ニーオルスンにおける2000-2008年の0.5 μmのエアロゾルの光学的厚さの月平均値
 Fig. 4. Monthly mean of aerosol optical thickness at 0.5 μm during 2000 to 2008 in Ny-Ålesund, Svalbard.

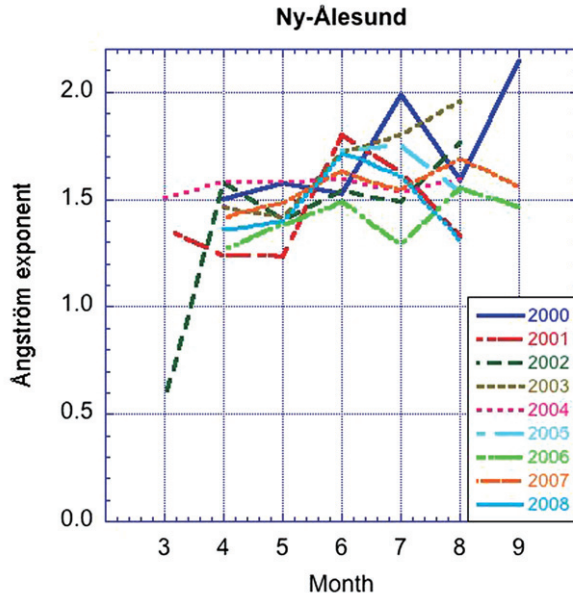


図5 ニーオルスンにおける2000-2008年のÅngström指数の月平均値
 Fig. 5. Monthly mean of Ångström exponent during 2000 to 2008 in Ny-Ålesund, Svalbard.

グストローム指数の、各年ごとの分布図を示したものである。おおむね、オングストローム指数が2.0を越えるような場合は、 $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さが0.1以下であることから、大気が清浄な時には相対的に大粒子が少なく、このような結果になったと考えられる。ただし、オングストローム指数が高くなると、光学的厚さが低くなる傾向にあるため、中緯度地域からの人為起源エアロゾル粒子の流入による影響が考えられるが、詳細は今後の課題としたい。

次に、各年の $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さと、オングストローム指数の月平均値を比較した。図4に、2000-2008年までのニーオルスンにおける、各年の $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さの月平均値を示した。エアロゾルの光学的厚さは、おおむねどの年も春から夏にかけて減少傾向にあった。図5に、2000-2008年までのニーオルスンにおける各年のオングストローム指数の月平均値を示した。オングストローム指数は、春から夏にかけて上昇傾向にあり、ほとんどの年で同じような傾向が示された。

4. ま と め

北極域ニーオルスンにおけるエアロゾルの光学的特性のデータが、長期間蓄積された。ヨーロッパ等から移流する人為起源と思われる微小粒子の影響で、急激に光学的に厚くなることもあるが、長期観測の結果からは $0.5\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さが、春に最大で夏の終わりに最小となり、オングストローム指数が、春に最小で夏の終わりに最大となるような季節変化が示された。今後は短期的な変動も含め、中緯度から輸送されてきたエアロゾルの光学特性や他の測器との比較観測結果から、北極域のエアロゾルの光学的特性を示していきたい。

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.
- Aoki, K. (2008): Aerosol and cloud optical properties by ground-based sky radiometer measurements. *Proc. SPIE*, **7027**, 70270U-70270U-6, doi:10.1117/12.822504.
- 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.
- IPCC (2007): Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by S. Solomon, *et al.* Cambridge, Cambridge University Press, 996 p.
- 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., 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.

塩原匡貴・矢吹正教・山野 牧・青木一真・小林 拓 (2010): 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. 南極資料, **54**, 890-898.