



Title	エアロゾルの光学的特性の推定と雲の影響
Author(s)	青木, 一真
Description	III. 雲・エアロゾルの光学的特性とその応用
Citation	低温科学, 72, 127-132
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55024
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_014.pdf



エアロゾルの光学的特性の推定と雲の影響

青木 一真

スカイラジオメーターによる長期観測から、エアロゾルの光学的特性の研究を行った。本研究は、エアロゾルの光学的特性の時間・空間変動や地球観測衛星と数値モデルの検証をするために行っている。本報告では、札幌におけるエアロゾルの光学的特性の時間変動と解析領域に雲がない場合での雲の影響について示した。

Effect of cloud contamination on estimation of aerosol optical properties

Kazuma Aoki

Aerosol optical properties were investigated using the long-term measurements from ground-based sky radiometer. In this study we examined aerosol optical properties in terms of its temporal and spatial variability and applied to validation of earth observation satellite retrievals and numerical model simulations of aerosol. We present the temporal variation of aerosols optical properties and these instruments can retrieve the aerosols under cloudy conditions if there are no clouds around the observation area at Sapporo.

1. はじめに

地球の気候が温暖化していることは疑う余地がないと報告され (IPCC 2013), その中でも大気中に浮遊する微粒子 (エアロゾル) や雲の気候影響が最も不確実性をもつことが指摘された。大気中に浮遊するエアロゾル粒子は、様々な場所から排出され、多種多様な物質で構成されているため、時間的にも空間的にも変動が大きいという特徴を持っている。このようにエアロゾル粒子そのものが気候に与える影響を直接効果 (direct effect) という。また、エアロゾル粒子が雲核となり雲を形成するが、それらが気候に与える影響を間接効果 (indirect effect) といい、間接効果はさらに細分化されている。エアロゾル粒子の起源は、大きく2つに分けられる。ひとつは、黄砂粒子や海塩粒子などに代表される自然起源のエアロゾル、もうひとつは、工場や自動車からの煙などの私たちの生活から排出される人為起源のエアロゾルである。これらは、個々の粒子として影響を及ぼすこともあるが、付着したり、混合したり、化学反応をおこしたりしながら、様々な場所へと輸送されることにより、地球の気候に影響を与えている。Fig. 1 は、1750 年を

基準とした排出及び駆動物質の放射強制力 (IPCC 2013) の結果である。1750 年を基準とした全人為起源の放射強制力は 1950 年では $0.57[0.29\sim0.85]\text{Wm}^{-2}$ であったのに対し、2011 年では $2.29[1.13\sim3.33]\text{Wm}^{-2}$ と増加しており、前回の報告 (IPCC 2007) の値よりも大きかった。原因として、温室効果ガスの濃度が継続的に増加したことと、今までの見積りよりもエアロゾルの放射強制力の正味の冷却効果が弱いことによるものとされた。ただし、未だに不確定要素が大きい雲やエアロゾルの放射効果を正しく評価することが必要不可欠であることがポイントである。ここでは、実際の太陽放射観測から大気エアロゾルの光学的特性を推定する際の、雲と雲周辺の影響について、札幌における観測結果を中心に示していく。

2. 雲とエアロゾルの特性

2.1 日射量と雲量の変化

地球の気候に欠かせないものとして太陽光と雲がある。Fig. 2 (Wild (2012) を改編) は、世界各地の地上日射量の変化を示したものである。それによると、多くの地域で 1980 年代半ば頃までは減少傾向 (Global dimming) であったのに対し、それ以降は増加傾向 (Global brightening) が見られ、日本でも同様な傾向が示されている (Wild 2009, 2012)。ここでは、日本の 4 地点 (札幌、東京、富山、那覇) の日射量と雲量について示していく。Fig. 3 は、気象庁で観測された札幌、

連絡先
青木 一真
富山大学大学院理工学研究部
University of Toyama
e-mail: kazuma@sci.u-toyama.ac.jp

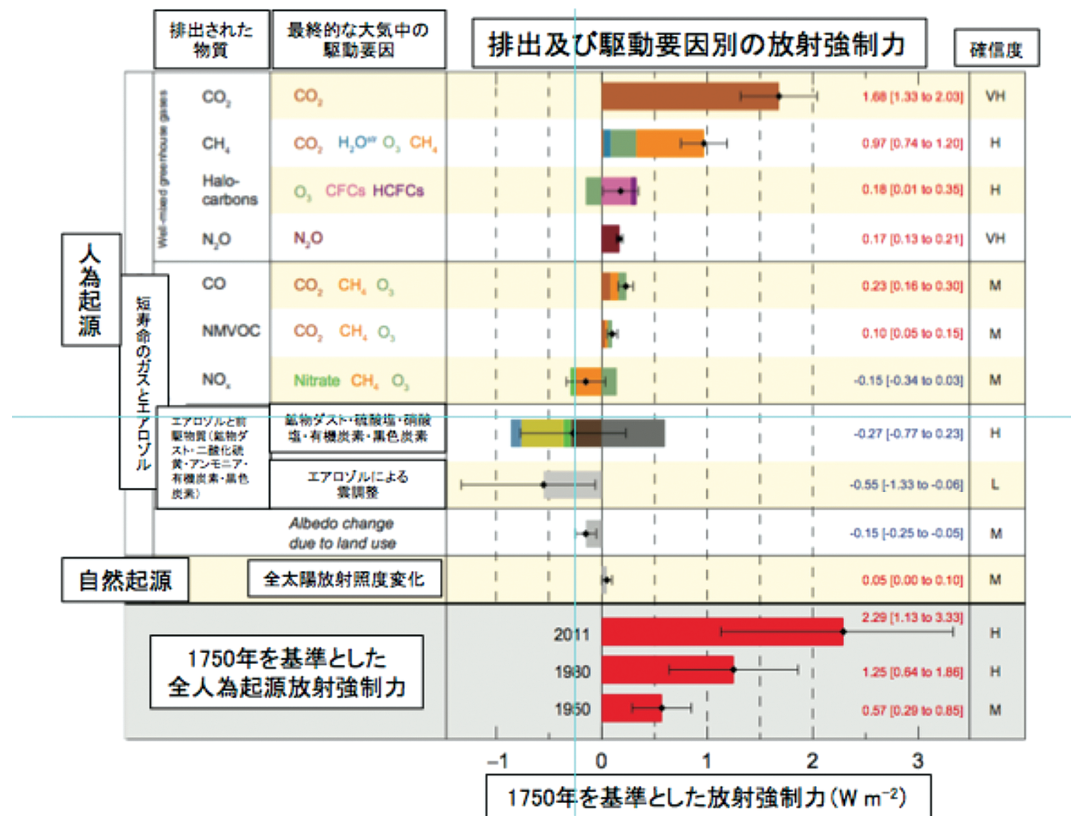


Fig. 1 : Radiative forcing by emissions and drivers (IPCC 2013, AR5 を改編)

Observed tendencies in surface solar radiation

	1950s-1980s	1980s-2000	after 2000
アメリカ	-6	5	8
ヨーロッパ	-3	2	3
中国/モンゴル	-7	3	-4
日本	-5	8	0
インド	-3	-8	-10

Fig. 2 : Changes in surface solar radiation observed in regions with good station coverage during three periods. (Wild 2012 を改編)

東京、富山、那覇の1961年から2013年までの全日射量の月平均値と年平均値の変化を示した。Wild (2012)の報告の通りであるが、札幌のような高緯度地域では、他に比べると明瞭な変化を見ることが出来ない。また、同様に Fig. 4 では、気象庁で観測された札幌、東京、富山、那覇の1961年から2013年までの雲量の月平均値と年平均値の変化を示した。東京は、それ以外の4地点と比べて、季節変動幅が大きい特徴を持っているが、どの地点でも年平均値は、だいたい雲量6から8の間を示している。ここで問題となってくるのは、雲量が多くなったからといって、日射量が減る場合もあるし、そうでない場合もある点である。これは、雲の特徴もあるが、それ以外のエアロゾルの変動に起因することもあり、これらの変動を複雑化させている。

2.2 太陽光を利用したエアロゾルの光学的特性の観測

2.1 節で日射量と雲量の関係について少し述べたが、本節と次節では雲やエアロゾルの変動が気候に与える影響について、観測的研究の立場から現状や問題点などを示していく。太陽光の各波長の輝度を測定し、大気中に浮遊するエアロゾル粒子の光学的厚さを求める方法は、サンフォトメーター (Sun Photometer: Shaw 1983) に代表されるような大気外の太陽光の放射強度と観測点の太陽の放射強度の減衰を測定することによって得られることはよく知られている。それらの応用例として、太陽直達光と周辺光の各波長の輝度を測定し、エアロゾルの光学的特性や体積粒径分布などを求めるには、スカイラジオメーター (Sky Radiometer: Aoki and Fujiyoshi 2003) などを利用する方法がある。雲のみならず、エアロゾルの変動によって、日射量は変化するため、このような観測が適している。これらの方法を利用した世界的な観測網は、1990年代から整備され、AERONET (Holben et al., 1998; <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) や SKYNET (Aoki et al. 2008, 2013; <http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp>) などがあり、現在では、世界数100カ所において連続観測が行われている。Fig. 5 は、2012年に日本や東アジア域において行われた DRAGON2012/AERONET プロジェクトのつくばにおける観測風景である。左が AERONET で右が SKYNET の測器で、エアロゾルの観測並びに相互比較観測も行った。このような集中観測も含め、長期変動を観測するために、様々

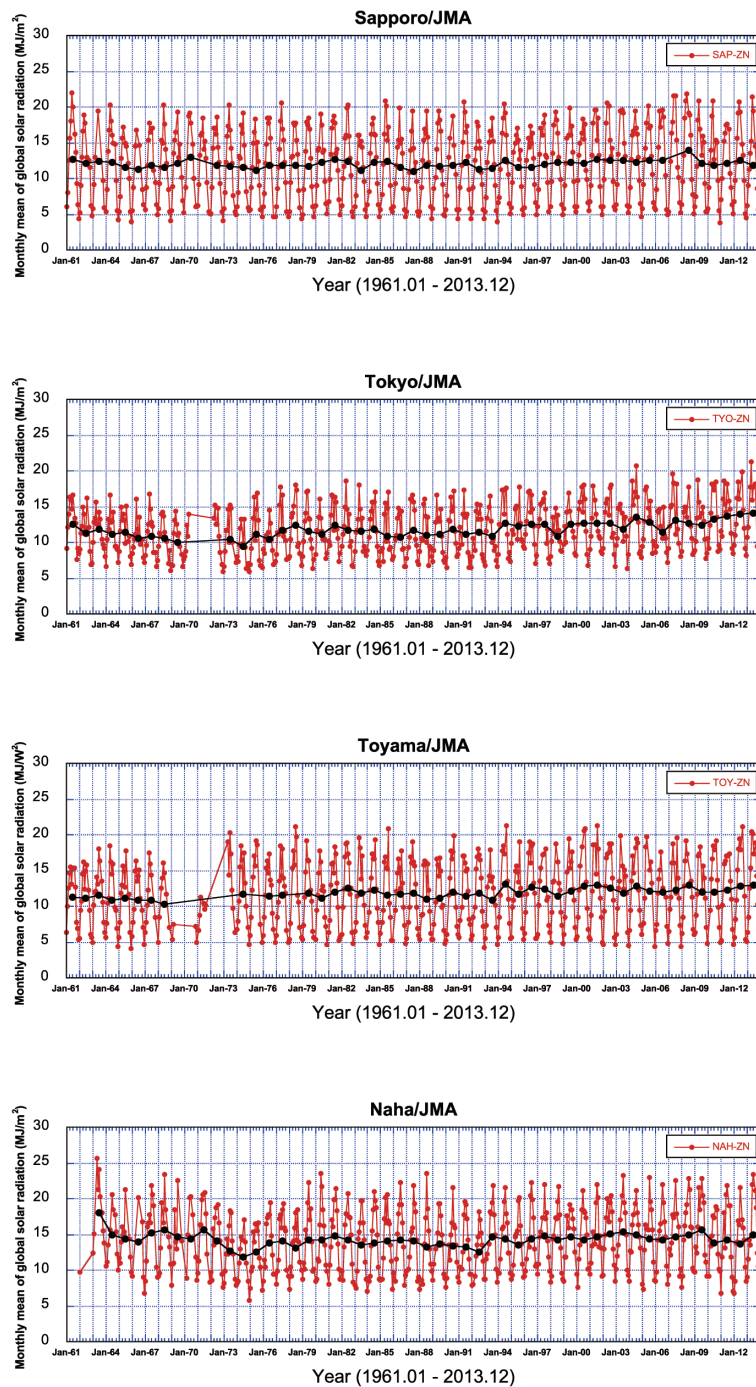


Fig.3 : Monthly and yearly mean of global solar radiation (MJ/m^2) at Sapporo, Tokyo, Toyama, Naha, Japan during Jan 1961 to Jan 2013.

な場所で観測を行っている。ここでは、SKYNETの代表的な測器、スカイラジオメーター及びその観測結果について簡単に説明する。前述の通り、エアロゾル粒子の直接・間接効果による気候影響は、時間・空間変動が大きいという特徴から評価することが難しい。地球観測衛星 (e.g. MODIS, GLI 等) や数値モデル (e.g. SPRINTARS 等) など、全球規模での気候影響の評価は進んで来ているが、大気下層に多いエアロゾルを評価する場合、大気化学的な現場観測や太陽放射観測等の地上リモートセンシングによる地上検証は必要不可欠である。私たちは、アジア域を中心に、地球観測衛星や数値

モデルによるエアロゾルプロダクトの検証も含め、雲やエアロゾルの光学的特性の時間・空間変動を調べるために、1990年代から太陽直達光と周辺光の角度別、波長別 (7 or 11 波長) の放射輝度を自動測定できる地上観測型と船舶観測型のスカイラジオメーター (POM-01, 02: PREDE Co. Ltd., Japan) によって、様々な地域・場所において観測的研究を行ってきた (Aoki and Fujiyoshi 2003; Aoki et al. 2008, 2013; <http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/>)。観測は、日中晴天時に直達光を 1 分おきに、周辺光を 10 分おきに観測を行い、SKYRAD.PACK ver.4.2 (Nakajima et al. 1996) により、気体吸

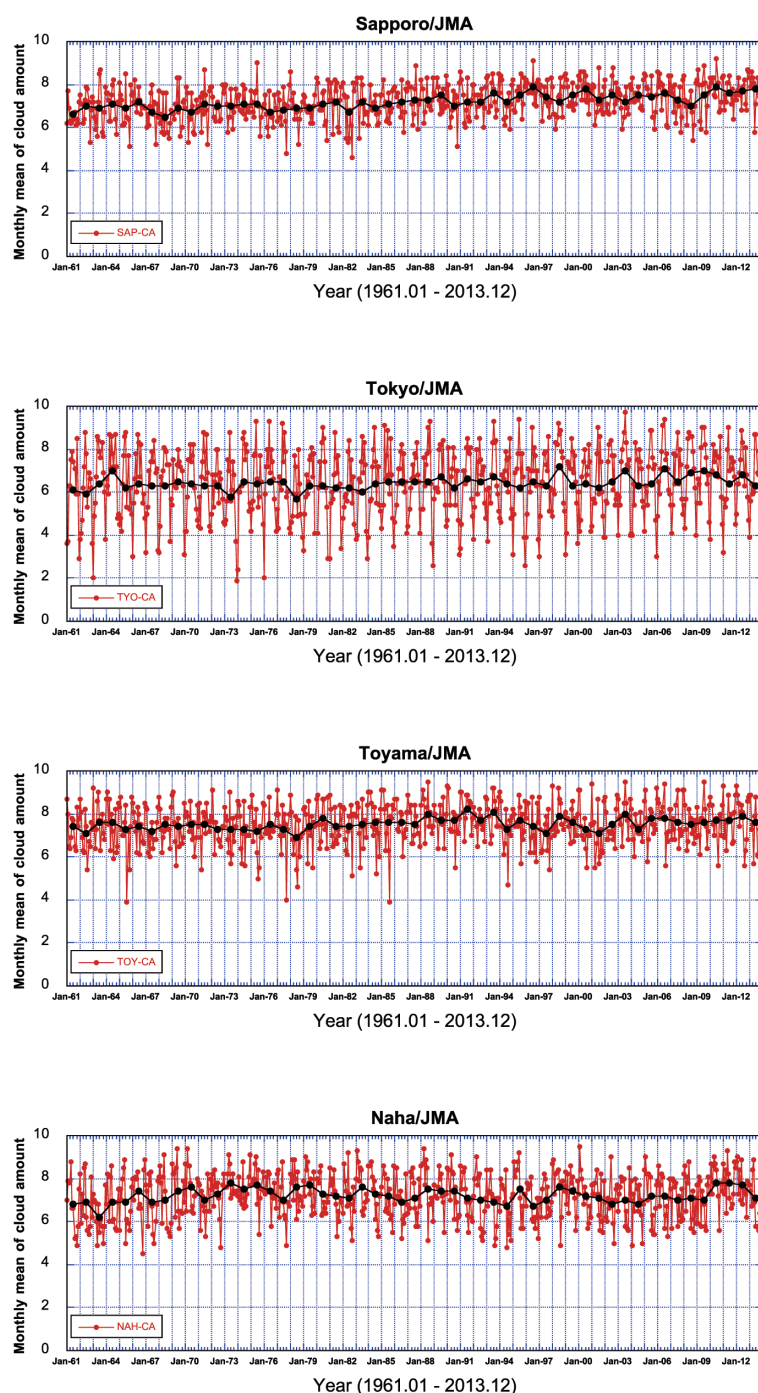


Fig.4 : Monthly and yearly mean of cloud amount at Sapporo, Tokyo, Toyama, Japan during Jan 1961 to Jan 2013.

収のほとんどないエアロゾルの観測波長帯である5波長(0.4, 0.5, 0.675, 0.87, 1.02 μm)を使ってエアロゾルの光学的特性などを導出している。それ以外の物理量の導出に、0.315 μm を使ったオゾン全量, 0.94 μm を使った可降水量, 1.6 μm 等をつかった雲の光学特性(Kikuchi et al. 2006)などがある。Fig. 6は, 2012年1月から12月までの札幌(43.08 N, 141.34 E: 北海道大学低温科学研究所屋上)でスカイラジオメーターによって観測された0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ(AOT500)とオングストローム指数(Alpha)の月平均値を示したものである。それぞれ赤色で示したものは,

SKYRAD.PACK version 4.2解析レベル0(V42L0)と青色で示したのがレベル2A(V42L2A)である。V42L0は, 準リアルタイム解析で, 周辺光30度までを使用して解析を行ったものである。V42L2Aは, 測定最大散乱角まで使用して, 雲除去などのクオリティコントロール済みの結果である。雲除去方法に関しては, いろいろな方法(e.g. Smirnov et al. 2000)があるが, ここでは, スカイラジオメーターのみのデータで算出したいため, 大粒子側である閾値を超えたものを除去して使っている。オングストローム指数は, 上記の5波長を使って計算を行っている。エアロゾルの光学的



Fig. 5 : DRAGON2012: AERONET and SKYNET instruments at Tsukuba/NIES, Japan.

厚さの季節変化は、過去の日本の結果 (e.g. Aoki and Fujiyoshi 2003; Aoki et al. 2008, 2013) と同様に、春に最大となり、秋にかけて最小となる傾向が示されている。また、オングストローム指数の季節変化は、夏と冬に最大で、春と秋に最小となる傾向を示した。冬の最大と秋の最小となる傾向は、普段の傾向とは異なる結果となっているので、今後の課題としたい。光学的厚さが最大でオングストローム指数が最小となる春の主要因は、主に大陸から来る黄砂粒子の飛来によるものが大きいとされており、その特徴を捉えている。

2.3 エアロゾルの光学的特性推定時の雲の影響

太陽光を利用したエアロゾルの光学的特性の観測は、しばしば、雲の影響を受ける (Aoki and Fujiyoshi 2003)。2.1 節で示した日射量と雲量の相関関係が崩れる場合の要因は、エアロゾルなのか、雲なのか、雲周辺域の散乱などの影響なのかははっきりしない。これらを明確にするには、太陽光とその周辺光を観測するスカイラジオメーター観測、ライダー観測 (Shimizu et al. 2004)、全天カメラ観測などは有効であると考えられる。Fig. 6 でクオリティーコントロール前 (V42L0) と後 (V42L2A) での結果を示したが、エアロゾルの光学的厚さは、ほとんどの月でコントロール後の方が、0 ~ 0.2 程度低く、オングストローム指数は、0 ~ 0.3 程度高い傾向が見られた。両者とも同じような季節変化を示しながら、光学的に厚く、大粒子の影響によるものであった。オングストローム指数は、冬から春にかけて差が大きく見られたが、札幌という地域性もあるが、降雪粒子や黄砂粒子の影響を受けたのではないかと考える。また、V42L0 の結果もある程度の雲は除去されているが、V42L2A はさらに各月で約 1 ~ 6 割程度の結果を除去している。ここでは月平均値を示したが、これらの瞬時値の同期間の札幌における $0.5 \mu\text{m}$ 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図を、Fig. 7

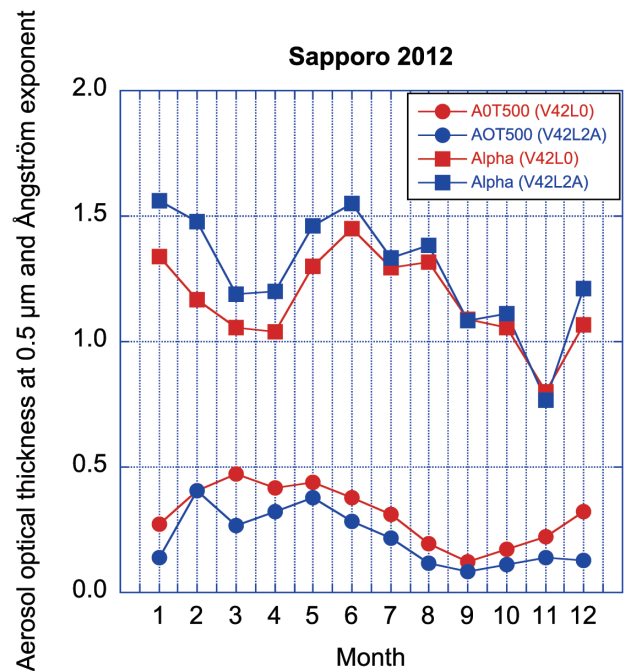


Fig. 6 : Monthly mean of the aerosol optical thickness at $0.5 \mu\text{m}$ (AOT500) and Ångström exponent (Alpha) during Jan to Dec, 2012 at Sapporo, Japan.

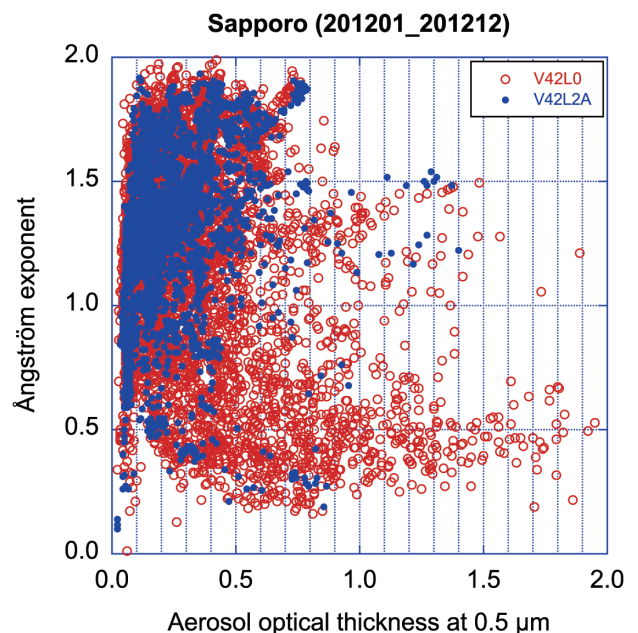


Fig. 7 : Relationship between the aerosol optical thickness at $0.5 \mu\text{m}$ (AOT500) and Ångström exponent (Alpha) during Jan to Dec, 2012 at Sapporo, Japan.

に示した。光学的厚さが 0.4 以上で、オングストローム指数が 1.0 以下の領域内で多くのデータが除去されていることがわかり、Fig. 6 の結果と整合性がとれる結果である。しかしながら、それ以外の領域でも除去されている部分もあったり、光学的に薄くても除去されていたりする場合もある。また、その領域内であっても、雲ばかりの影響ではなく、例えば、大規模黄砂現象のように光学的に厚いエアロゾルの影響などもあるため、他の観測機器と相互比較などをしながら、様々な角度から検討し

ていく必要があると考える。

3. まとめ

雲やエアロゾルの気候への影響の解明が急がれている中、長期的な観測データの蓄積やデータのクオリティを保つことが重要である。札幌の太陽光を利用したエアロゾルの光学的特性の観測結果を示しながら、雲と雲周辺がエアロゾルの光学的特性に及ぼす影響について示してきた。エアロゾルの光学的厚さやオングストローム指数の季節変化は、過去の結果と同様な結果が得られていることが確認された。しかしながら、クオリティコントロール前後の光学的厚さは、各月で0~0.2程度低く、オングストローム指数は、各月で0~0.3程度高い値が示されており、気候影響を検証する場合に大きく影響するので、雲の影響も含め、さらに研究を進めていく必要がある。今後、ライダーを含めた他の測器との相互観測や時間・空間変動の代表性も含め、精度のよい結果を示して行ければと思う。

参考文献

- Aoki, K. and Y. Fujiyoshi (2003) Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 493–513.
- Aoki, K., T. Nakajima, and T. Takamura (2008) Aerosol and cloud optical properties by ground-based sky radiometer measurements. *Proceedings of SPIE*, **7027**, doi: 10.1117/12.82250.
- Aoki, K., T. Takamura, K. Kawamoto, and T. Hayasaka (2013) Aerosol climatology over Japan site measured by ground-based sky radiometer. *AIP Conf. Proc.* **1531**, 284; doi: 10.1063/1.4804762.
- Holben B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007 (2007) The Scientific Basis, edited by S. D. Solomon et al., 996 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2013 (2013) The Scientific Basis, edited by T. F. Stocker et al., 1535 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 2013.
- Kikuchi, N., T. Nakajima, H. Kumagai, H. Kuroiwa, A. Kamei, R. Nakamura, and T. Y. Nakajima (2006) Cloud optical thickness and effective particle radius derived from transmitted solar radiation measurements: Comparison with cloud radar observations. *J. Geophys. Res.*, **111**, D07205, doi: 10.1029/2005JD006363.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman and B. Holben (1996) Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Appl. Opt.*, **35**, 2672–2686.
- Shaw, G. E. (1983) Sun photometry. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **64**, 4–10.
- Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arai, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki (2004) Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S17.
- Smirnov A., B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, and I. Slutsker (2000) Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Rem. Sens. Environ.*, **73**, 337–349.
- Wild, M. (2009) Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D16, 10.1029/2008JD011470.
- Wild, M. (2012) Enlightening Global Dimming and Brightening. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 27–37