

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02702

研究課題名(和文)北極域の雲生成高度におけるライダーとレーダー観測によるエアロゾルと雲の特性解明

研究課題名(英文)Studies on the characteristics of aerosols and clouds at the cloud formation altitudes over Arctic by using Lidar and Radar

研究代表者

柴田 隆 (Shibata, Takashi)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：70167443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,600,000円

研究成果の概要(和文)：高緯度北極(78.9°N, 11.9°E)ニーオルスンにおいてNd:YAGレーザーの二波長(1064nmと532nm)を用い、自由対流圏におけるエアロゾルの後方散乱係数、および532nmの偏光解消度をライダーにより連続観測した。月平均後方散乱係数と月平均粒子偏光解消度は高度2~10kmで明確な1年周期の変化を示し、それぞれ、夏季と春季に極大を示している。また偏光解消度では2017年9月から2018年1月にかけて上記の季節変化の周期とは明らかにずれた極大が見られる。これはカナダ、ブリティッシュコロンビアで発生した大規模な山火事により増加したバイオマス燃焼期限のエアロゾルによることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の観測結果と先行研究の結果から、対流圏全高度域で、エアロゾル濃度は春から夏にかけて極大をとり、太陽光をより強く散乱することや、冬から春にかけて太陽光を吸収するブラックカーボンの割合が大きくなることなどを明らかとした。すなわち観測結果は季節によってエアロゾルによる太陽光エネルギーの散乱や吸収の状況が大きく変化することを、観測的な知見として提供している。一方、観測されたようなエアロゾルの季節変化は既存の数値科学輸送モデルでは再現されておらず、このため、北極域の気候変動モデルにも反映されていない。このため本研究は北極温暖化の原因を明らかにする際に鍵となる結果を提供している。

研究成果の概要(英文)：Free tropospheric aerosols over the high Arctic were observed by lidar for about 5 years from March 2014 at Ny-Alesund (78.9°N, 11.9°E). Vertical profiles of aerosol backscattering coefficients at two wavelengths, 532 and 1,064 nm, and depolarization ratio at one wavelength, 532 nm, are derived from these observations. The aerosol backscattering coefficients was highest from late spring to summer and lowest from late summer to fall. The depolarization ratio was less than a few percent in the troposphere during the four observed years. The depolarization ratio was greatest from winter to spring and smallest from summer to fall. The small particle depolarization ratio of less than a few percent is consistent with previous findings that Arctic free tropospheric aerosol particles in spring are composed of a mixture of liquid phase sulfate and soot particles.

研究分野：環境動態解析

キーワード：北極エアロゾル 氷雲 氷晶核 ライダー 雲レーダー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 北極海氷の著しい後退は温暖化に伴う気候変動の顕著な例として注目されている。海氷後退のメカニズムはいまだ解明されていないが、北極の気候を左右する重要な要因として、エアロゾルや雲が、放射や降水過程により、海氷・雲・エアロゾル・大気間の複雑なフィードバックを通して、気候に決定的な影響を与えていることが知られている。しかし、特に北極域エアロゾルの気候学的な特徴の把握やエアロゾル・雲の間の相互作用の理解が不十分であることが指摘されており（引用文献①）、エアロゾル粒子による放射への直接的な影響（直接効果）と、雲粒子の生成を通しての間接的な影響（間接効果）が上記フィードバックに大きな影響を与える可能性が示唆されている（②）。

(2) 北極域のエアロゾルに関し、北極域内のローカルな大気汚染源はほとんど存在しないが、北極域を取り囲む、汚染物質の主要排出地域であるヨーロッパ、北米、および東アジアなどから北極域への長距離輸送が盛んとなる春季に、北極域特有の大気汚染として「北極ヘイズ」が発生することが知られている（②）。北極域の地表付近のエアロゾルは種々の手法により複数の地点で、10年以上の長期にわたって測定されており、北極域の気候への影響が検討されている（③、④、⑤）。これら先行研究によると、地表付近の北極エアロゾル濃度の春季極大（北極ヘイズ）と夏季・秋季極小が極めて規則正しい周期で明確・顕著に現れている。

(3) ところが、上空、自由対流圏のエアロゾルの季節変化に関しては観測されたことがほとんど無く、詳細は不明である。一方、雲は大部分、大気境界層（地面に接する大気層、高度数百メートル以下）上端か、それより上空の自由対流圏に現れる。従って、エアロゾルと雲の相互作用は数百メートル以上の高度域で生じる現象である。前述のように、先行研究は地表面での観測が中心であったため、境界層上端から自由対流圏領域の上空の雲発生高度における季節変化、年々変化、およびエアロゾルと雲の間の相互作用に関する連続・長期間の測定はこれまで皆無であった。

2. 研究の目的

(1) 著しい北極圏温暖化の一因として、大気中のエアロゾル粒子が直接的、もしくは雲核として働き、雲の生成を通して間接的に放射や降水に与える影響が大きいと考えられており、北極域で種々のエアロゾル・雲の研究が実施されている。が、極域における観測遂行上の種々の制限により、「1. 研究開始当初の背景」でも述べたように、特に北極エアロゾルの季節変動や長期的な変化は限られた地点で実施される地表での測定に限られてきた。しかし、エアロゾルの直接的・間接的な気候への影響を評価するには地表のみならず上空の測定結果を得ることが必須である。

(2) 本研究の目的は、ライダーとレーダーを用いて自由対流圏（高度数 100m 以上、雲が生成する高度）のエアロゾルと雲の連続的な観測を実施し、これまで長期間連続の測定が皆無であった高度領域のエアロゾルと雲の特性、その高度分布と季節変化の特徴を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) 本研究はノルウェーのスバルバル諸島スピッツベルゲン島北西部に位置するニューオルスンに整備された国立極地研究所の北極基地を利用し、基地に設置したミー散乱ライダーを用いて実施する。観測は天候や昼夜を問わずライダーを通年連続で最終年度前半まで動作させ、大気エアロゾルおよび雲のデータを連続的に取得する。ミー散乱ライダーの観測結果から、後方散乱係数、偏光解消度、波長比の高度分布を連続的に取得する。また同じく同基地に設置され、連続動作している 95GHz 雲レーダーとミー散乱ライダーの同時観測によって得られたデータを連立解析し（レーダー・ライダー法、Radar-Lidar 法）氷雲粒子の個数濃度、粒子径などの微物理量を求める。

(2) ライダー観測に関して具体的には、Nd:YAG レーザの二波長(1064nm と 532 nm)を用い、それぞれの波長の後方散乱係数、および 532nm の偏光解消度を測定している。エアロゾルの季節変化の解析には晴天時だけの信号を用いる。エアロゾルの光学的な濃度が低くかつ変化の程度が小さい成層圏高度において、ニューオスンで実施されているラジオゾンデ気象観測のデータから計算されたレーリー後方散乱係数を用いて信号を校正した。偏光解消度については、先行研究に基づき境界層内での球形粒子の存在を仮定して信号の較正を行った。

4. 研究成果

(1) 1.、2. で述べたように、北極域のエアロゾルおよび雲の高度分布とその時間変化の測定は、極域という制約から、地上設置の装置による通年連続観測の例はごく限られている。我々は本研究に先立つ基盤研究の前課題「北極ヘイズが氷雲粒子濃度に与える影響に関するライダーとレーダーによる観測研究」にて、スバルバル、ニューオルスン国立極地研究所北極基地に、二波長ミー散乱偏光ライダーを設置し、2014年3月より対流圏・下部成層圏のライダー連続観測

を開始して、2年間超のデータを取得した。本研究ではさらに3年間の連続観測を実施し、前研究課題と本研究で、観測開始から約5年の期間、測定を継続した。この結果をもとに自由対流圏エアロゾルの季節変化を明らかにし、観測結果と考察を科学雑誌掲載論文として発表した(⑥)。

(2) 上記のような解析が可能であるような晴天時間を含む観測日の数は、観測を開始した2014年3月から2019年3月までで約700日であった。月平均後方散乱係数と月平均粒子偏光解消度は高度2~10kmで明確な1年周期の変化を示し、それぞれ、夏季と春季に極大を示して、異なった季節変化を示している。また偏光解消度では2017年9月から2018年1月にかけて上記の季節変化の周期とは明らかにずれた極大が見られる。これはカナダ、ブリティッシュコロンビアで発生した大規模な山火事により増加したバイオマス燃焼期限のエアロゾルによることが示唆された(図1)。

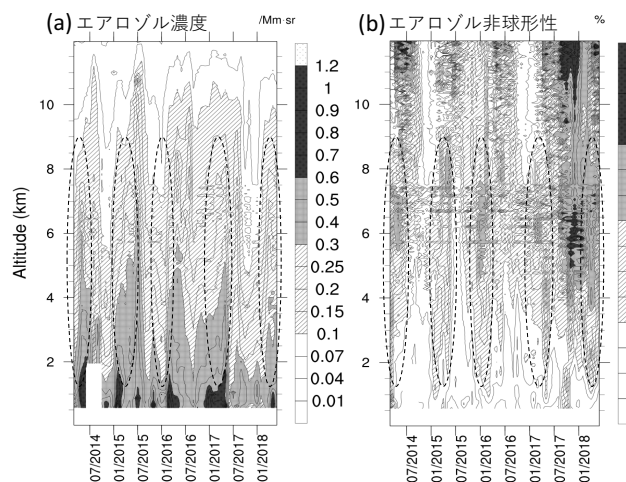


図1 ライダー観測によって得られたエアロゾル濃度(後方散乱係数、左(a))とエアロゾルの非球形性(変更解像度、右(b))。点線で示した楕円は各年にそれぞれの値が極大をとる期間と高度を概略的に示している(⑥で発表した結果に約1年分のデータを延長追加)。

(3) 本研究のライダーによる対流圏エアロゾルの連続観測と先行研究の結果より(⑦)、対流圏全高度域で、エアロゾル濃度は春から夏にかけて極大をとり、主成分は液相の硫酸塩や有機物で、太陽光をより強く散乱することや、冬から春にかけて太陽光を吸収するブラックカーボンの割合が大きくなることが明らかとなった。これは、季節によってエアロゾルによる太陽光エネルギーの散乱や吸収の状況が大きく変化することを示し、観測的な知見として提供している。ただし、温暖化進行の時間スケールに比較すると短期間の測定であり、年々の変化の特徴や傾向を明瞭にするには至っていない。

(4) ところで、極域では、太陽が常に出ている白夜のシーズンに、仮に、エアロゾルが大きく増加もしくは減少した場合には、太陽光エネルギーの散乱や吸収への影響は大きいであろう。しかし、逆に太陽が出ていない極夜のシーズンでは、太陽光がないため、エアロゾルの太陽光散乱や吸収への影響はない。このように極域は太陽放射の季節変化が特異的に大きいため、エアロゾルの季節性はその放射影響を評価する際の極めて重要な要素と考えられる。しかし、観測されたようなエアロゾルの季節変化は既存のモデルでは再現されていない。このため本研究は北極温暖化の原因を明らかにする際に鍵となる結果を提供していると考えている。

(5) 本研究のもう一つの柱である雲レーダーによる雲の観測、およびこれとライダーによる雲観測を同時に用いたレーダー・ライダー法による雲の微物理の導出に関しては：レーダー観測は順調に実施され、雲レーダーについても予定通り観測結果が得られている(データ公開①)。しかしながら、ライダー観測結果と組み合わせた解析には多くのマンパワーを必要とするため、ライダー観測結果と合わせて観測された期間全体の解析に着手するには至っていない。当初計画されたレーダー・ライダー法による雲の微物理の季節変化については今後結果を求めていくべき課題として残されている。

<引用文献>

- ① IPCC, (2007), *Climate Change 2007: Synthesis report*, Geneva, Switzerland.
- ② Quinn et al., (2009), Arctic haze: current trends and knowledge gaps, *Tellus*, 59B, 99–114
- ③ Herber et al., (2002), Continuous day and night aerosol optical depth observations in the Arctic between 1991 and 1999, *J. Geophys. Res.*, 107, 4097, doi: 10.1029/2001JD000536.
- ④ Jackson et al. (2012), The dependence of ice microphysics on aerosol concentration in arctic mixed-phase stratus clouds during ISDAC and M-PACE, *J. Geophys. Res.*, 117, D15207, doi:10.1029/2012JD017668.
- ⑤ Tesche et al., (2014), Reconciling aerosol light extinction measurements from spaceborne lidar observations and in situ measurements in the Arctic, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 7869–7882.

- ⑥ *Shibata et al.*, (2018), Seasonal variations in high Arctic free tropospheric aerosols over NyÅlesund, Svalbard, observed by ground-based lidar, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JD028973).
- ⑦ *Hara et al.*, (2003), Mixing states of individual aerosol particles in spring Arctic troposphere during ASTAR 2000 campaign, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2002JD002513.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① Markowicz, K.M., P. Pakszys, C. Ritter, T. Zielinski, R. Udisti, D. Cappelletti, M. Mazzola, M. Shiobara, P. Lynch, O. Zawadzka, J. Lisok, T. Petelski, P. Makuch, G. Karasiski, Impact of North American intense fires on aerosol optical properties measured over the European Arctic in July 2015, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 121, 2016, 14487-14512, DOI: 10.1002/2016JD025310 (査読有り)
- ② Shibata T., Shiraishi K., Shiobara M., Iwasaki S., Takano T., Seasonal Variations in High Arctic Free Tropospheric Aerosols Over Ny-Alesund, Svalbard, Observed by Ground - Based Lidar, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 123, 2018, 12353-12367, DOI: 10.1029/2018JD028973 (査読有り)
- ③ S. Iwasaki, T. Seguchi, H. Okamoto, K. Sato, S. Katagiri, M. Fujiwara, T. Shibata, K. Tsuboki, T. Ono, T. Sugidachi, Large-and-Sparse-particle Clouds (LSC): clouds which are subvisible for space-borne lidar and observable for space-borne cloud radar, *Polar Science*, accepted on May 9th 2019 (査読有り)

〔学会発表〕 (計 19 件)

- ① 柴田隆, 須藤健悟, 白石浩一, 岩崎杉紀, 塩原匡貴, 鷹野敏明, スバルバル, ニーオルスンにおける 北極大気のミーライダー連続観測、第 3 4 回レーザセンシングシンポジウム、2016
- ② TAKANO T., KAWAMURA Y., NAKATA H., NAKANISHI Y., TAKAMURA T., SHIOBARA M., Clouds Observations in Arctic Station with High Resolution Doppler Radar FALCON-A, International Conference on Engineering and Applied Sciences, 2016
- ③ TAKANO T., YANAGA K., KAWAMURA Y., NAKATA H., NAKANISHI Y., TAKAMURA T., SHIOBARA M., Clouds observations with newly developed high resolution FMCW cloud profiling radar FALCON-A in arctic station, International Conference on Engineering and Applied Sciences, 2016
- ④ Shiobara, M., M. Yabuki, T. Takano, H. Okamoto, M. Kuji, H. Kobayashi, A. Uchiyama, Challenging new remote-sensing of aerosols and clouds from surface at the polar sites, 22nd International Symposium on Polar Sciences, 2016
- ⑤ Iwasaki, S., T. Shibata, H. Kubota, H. Okamoto, Large size and low number concentration cloud in mid and high latitudes, 17th International Conference on Clouds and Precipitation, 2016
- ⑥ 柴田隆, 白石浩一, 須藤健悟, 岩崎杉紀, 塩原匡貴, 鷹野敏明, ニーオルスンライダー及び CALIOP による 高緯度北極対流圏エアロゾルの季節変化、日本気象学会 2017 年度秋季大会、2017
- ⑦ Shibata, T., K. Shiraishi, K. Sudo, S. Iwasaki, M. Shiobara and T. Takano, Lidar Observed Seasonal Variation of Free Tropospheric Aerosols over Ny Aalesund, Fifth International Symposium on Arctic Research, 2018
- ⑧ 柴田隆, 白石浩一, 須藤健悟, 岩崎杉紀, 塩原匡貴, 鷹野敏明, スバルバル上空のエアロゾル高度分布連続観測、第 34 回エアロゾル科学・技術研究討論会、2017
- ⑨ Iwasaki, S., H. Okamoto, K. Sato, S. Katagiri, M. Fujiwara, T. Shibata, K. Tsuboki, T. Ono, and T. Sugidachi, Clouds with low lidar returns and high cloud radar echoes, ISAR-5 / Fifth International Symposium on Arctic Research, 2018
- ⑩ 岩崎杉紀, 藤原正智, 柴田隆, 坪木和久, 小野貴司, 杉立卓治, CPS 雲粒子ゾンデによって観測された mixed-phase cloud の特徴、日本気象学会 2017 年春季大会、2017
- ⑪ Shiobara, M., H. Kobayashi, K. Hishida, A. Uchiyama, Nocturnal Aerosol Optical Thickness Measured with a Moon Photometer Developed by Improving the Prede Sky-Radiometer, EGU General Assembly, 2017
- ⑫ 白石浩一, 柴田隆, 塩原匡貴, スバルバル上空でライダーにより観測された上部対流圏・成層圏エアロゾルの季節変動、気象学会 2017 年秋季大会
- ⑬ K. Shiraishi, T. Shibata and M. Shiobara, Seasonal variation of lower stratospheric aerosols observed by lidar above Svalbard, Norway, ISAR5, 2018
- ⑭ TAKANO T., KAWAMURA Y., MORIKAWA K., SUZUKI Y., KOIKE K., MIZUTA A., NAKATA H., American Meteorological Society, 38th Conference on Radar Meteorology, Microphysics

Studies with Radars, 2017

- ⑮ NAKAMORI K., SUZUKI Y., OHYA H., TAKANO T., KAWAMURA Y., NAKATA H., and YAMASHITA K., Correlation between Atmospheric Electric Fields and Cloud Cover using a Field Mill and Cloud Observation Data, EGU (European Geophysical Union) General Assembly, 2017
- ⑯ 柴田隆、白石浩一、岩崎杉紀、塩原匡貴、鷹野敏明、ニーオルスライダーによる高緯度北極対流圏エアロゾルの季節変化、日本気象学会 2018 年秋季大会、2018
- ⑰ 岩崎杉紀、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、藤原正智、柴田隆、坪木和久、小野貴司、杉立卓治、可視では判別できないほど薄い雲が他の雲に与える影響、日本気象学会 2018 年秋季大会、2018
- ⑱ 岩崎杉紀、藤原正智、柴田隆、内野修、森野勇、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、坪木和久、小野貴司、杉立卓治、Large-Sparse Cloud (粒径大きく個数密度少ない雲) の CPSゾンデとライダーの同時観測結果、日本気象学会 2018 年秋季大会、2018
- ⑲ 白石浩一、柴田隆、塩原匡貴、スバルバル上空でライダーにより観測された成層圏エアロゾルの季節変動、第 36 回レーザセンシングシンポジウム、2018

データ公開

- ① 雲ライダー、95GHz FM-CW Cloud Radar FALCON-A Realtime View: <http://katla.nd.chiba-u.jp/FALCON/rtview.htm>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：白石 浩一

ローマ字氏名：Koichi Shiraiishi

所属研究機関名：福岡大学

部局名：理学部

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：80299536

研究分担者氏名：岩崎 杉紀

ローマ字氏名：Suginori Iwasaki

所属研究機関名：防衛大学校

部局名：応用科学群

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：30535274

研究分担者氏名：塩原 匡貴

ローマ字氏名：Masataka Shiobara

所属研究機関名：国立極地研究所

部局名：国際北極環境研究センター

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：60291887

研究分担者氏名：鷹野 敏明

ローマ字氏名：Toshiaki Takano

所属研究機関名：千葉大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：40183058

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。