

特集 ライダー観測 I

成層圏エアロゾルとライダー観測

柴田 隆

Stratospheric aerosols and lidar observations

Takashi Shibata

(Received November 22, 2021; revised February 9, 2022; accepted February 14, 2022)

In this technical review, stratospheric aerosols are briefly described in terms of background condition and disturbed conditions due to volcanic eruptions and low temperature from polar vortex, focusing mainly on their components and lidar observations. The purpose of this review is to provide a quick overview of stratospheric aerosols for readers who are familiar with the term “stratospheric aerosols” but don't know more.

キーワード：成層圏エアロゾル，ライダー，火山雲，極成層圏雲

Key Words: Stratospheric aerosols, Lidar, Volcanic clouds, PSC

1. はじめに

成層圏大気の研究には、差分吸収法を用いたオゾンの測定^{1,2)}やレイリー散乱を使う大気密度・温度の測定^{3,4)}など、ライダーがさまざまな観測に活用されている。とりわけ、ミー散乱を測定する成層圏エアロゾルの観測は、おそらく最も頻繁に行われている成層圏観測へのライダーの利用であろう^{5-33, 45, 46, 48, 53-55, 60-62, 70-73)}。ちなみに、対流圏観測への利用でも、エアロゾル観測がおそらく最も盛んに行われていて、エアロゾル用のライダーシステムの仕様は成層圏測定用のものと基本的には同じであるが、成層圏と対流圏では、若干様相が異なる点がいくつかあり、思いつくままに強いてあげてみると。

- イ. 散乱物質の密度が小さく、加えて地上からの測定では装置からより遠距離にある成層圏からの微弱な受信信号を検出するには、多くの装置でフォトンカウンティングモードの利用を要する。
- ロ. 成層圏観測では鉛直上方のみを測定することがほとんどであるが、対流圏用装置では測定する仰角・方位角の走査機能を有するものも多い。
- ハ. 成層圏観測の信号強度のキャリブレーションは、エアロゾルがほとんど存在しない高度域（36 km 以上の高度）のレイリー散乱を利用して信号を校正（ノーマライズ）する³³⁾ことが多いが、対流圏のみの観測では校正のために別途工夫を要する。
- ニ. 対流圏エアロゾルの成分には時間や場所によって、鉱物粒子（ダスト）、海塩、人為起源物質、種々の有機物、もしくはこれらの混合物など、さまざまな物質が存在する。一方、成層圏では、バックグラウンド状態、および火山噴火物質で擾乱を受けた状態のいずれの場合も、主成分は硫酸水溶液である。このことは成層圏ライダー観測データの解釈に重要である。

などである。とはいえ、実際のところ、使用する機器の差はやはり小さく、成層圏用と対流圏用で同じ装置が頻繁に兼用されている。

本解説では、ライダーが開発された当初より観測が行われている成層圏エアロゾルに関して、まず静穏時の成層圏バックグラウンドエアロゾル、続いて火山噴火起源のエアロゾル、および冬季極域の極渦内の気温低下に伴って出現する極成層圏雲について、主に成分に着目しながら概略を説明する。本解説は、研究分野

が異なり、「成層圏エアロゾル」という言葉は聞いたことがあるがそれ以上はよく知らない、というような読者を対象に考えており、成層圏エアロゾルがどんなものか、及びどこでライダーが活躍したかを、概略をつかむことができるよう内容を絞って解説する。なお、より詳細な情報へのアクセスが容易となるよう、引用文献には doi などの URL を付記し、また筆者が関与した研究に関する文献を文献番号 1-29, 39, 45, 72 に引用している。

2. 静穏時の成層圏バックグラウンドエアロゾル

前節で述べたように、成層圏エアロゾル粒子の主成分は硫酸水溶液であり、下部成層圏（低緯度で約 20-35 km, 高緯度で約 10-30 km の高度）に Junge 層と呼ばれるエアロゾルの層³⁴⁾を形成している。成層圏エアロゾルの主成分である硫酸は、海洋や人間活動などから発生する硫化カルボニル (COS)³⁵⁾が、対流圏内では分解や除去されずに下部成層圏に輸送され、成層圏のより強い光化学反応で酸化されることによって生成される^{10, 36, 37)}。成層圏は高度とともに気温が上昇していて、対流圏に比べて力学的に極めて安定である。対流圏から成層圏への物質の輸送は、大循環のような大規模なスケールの運動³⁸⁾に伴う輸送と、強い積乱雲のような深い対流に伴う比較的小規模なスケールの運動³⁹⁾に伴う輸送の二つの経路が示唆されている。硫酸は飽和蒸気圧が低く、他の微量成分に比べて多量の水分子が存在し、低温環境の下部成層圏では、硫酸水溶液が最も安定な形態となる。このため生成された硫酸は、下部成層圏では水分子とともに硫酸水溶液エアロゾル粒子（硫酸液滴と省略することもある）を形成する。

成層圏エアロゾル粒子は、硫酸水溶液粒子の中に硫酸アンモニウムなどの固体成分を含む、という成層圏での直接サンプリングによる結果があり、これをもとに硫酸水溶液エアロゾル粒子はこのような固体粒子を核にして生成したという説がある^{36, 37)}。しかし、成層圏におけるエアロゾルのサンプリングでは避けられない、試料を地表高度に持ち帰った際の試料状態の変化や採集した試料の汚染の問題⁴⁰⁾、および硫酸水溶液エアロゾル粒子が気体の硫酸から直接生成する可能性を示唆するような結果⁴¹⁻⁴³⁾もあり、固体成分の有無や粒子の生成過程については現在でも決着がついていない。しかしながら、試料採集の問題を最小限に抑えるよう注意深く行われたサンプリングでは固体粒子が見つからなかったこと⁴⁴⁾や、偏光ライダー観測によると、成層圏エアロゾルの偏光消度が非常に小さいこと⁷²⁾などから、実質的に成層圏エアロゾル粒子はほぼ固体成分を含まないような水溶液として扱うことが多い。

エアロゾル層の上端については、高度とともに気温が上昇する上部成層圏（高度約 35-50 km）では、高度（気温）とともに硫酸の飽和蒸気圧も上昇し、硫酸水溶液として存在できなくなってエアロゾル粒子は蒸発する、これが成層圏エアロゾルの上端を決めている^{10, 36)}。一方下端については、対流圏では雲の生成や降水によって、エアロゾル粒子は成層圏に比べて短い時定数で消滅するので、エアロゾル層の下端はほぼ対流圏界面と一致する。このため、成層圏エアロゾルの高度分布は対流圏界面の高度変化に沿った季節変化を示すことがライダーによって捉えられている^{30, 31, 45)}。

3. 成層圏火山エアロゾル

火山の大噴火が発生すると、噴火のエネルギーにより大気の流れとは無関係に大量の噴火物質が直接成層圏に注入される。成層圏エアロゾルに影響を与える主な噴火物質は、鉍物性物質（火山灰）と二酸化硫黄 (SO₂) である。火山灰は重力落下速度が大きく、噴火後数ヶ月で成層圏から対流圏に除去される^{46, 47)}。一方 SO₂ は、成層圏注入後、大気中の光化学反応で徐々に硫酸に酸化され、硫酸水溶液のエアロゾル粒子が生成される。従って、起源は異なるが、バックグラウンド及び火山噴火の影響を受けた状態ともに、エアロゾル粒子の成分は硫酸水溶液となる。

火山噴火によって成層圏エアロゾルがどの程度増加するかは噴火の規模によって大きく異なる。年に一度程度の頻度で噴火する比較的小規模の噴火では、成層圏エアロゾルはバックグラウンドに比べて、火山噴火の影響が最も大きい高度で、数倍から 10 倍程度の濃度に増加する。1982 年、メキシコ、ユカタン半島のエルチチョン噴火や 1991 年、フィリピン、ルソン島のピナツポ噴火のような数十年に一度程度の頻度で発生するような大噴火の場合は 100 倍以上の濃度に達する^{5-16, 26, 27, 29-32)}。火山大噴火による成層圏エアロゾル増加の様子の一例として、Fig. 1 にエルチチョン噴火直後の福岡における成層圏エアロゾルのライダー観測の結果¹⁰⁾を示す。(Fig. 1 に示されている Backscattering ratio (後方散乱比, Fig. 1 の横軸では scattering ratio と略

されている)をRとおくと、R-1はエアロゾル混合比にほぼ比例する。異なる波長の間で、R-1は波長の比の約3乗に比例する。)火山噴火で増加したエアロゾルは約1年程度の時定数で指数的に減少する⁴⁸⁾。成層圏火山噴火雲の高度分布や時間変化の詳細はライダー観測によって初めて明らかとなった。ピナツボ噴火後1年間程度、約1℃程度地表面の平均気温が低下したことが報告されている^{49,50)}。これは噴火で増加した成層圏エアロゾルが、地球表面に届くはずであった太陽光エネルギーを宇宙空間に散乱し、地球に届くエネルギーを減じたことによる。

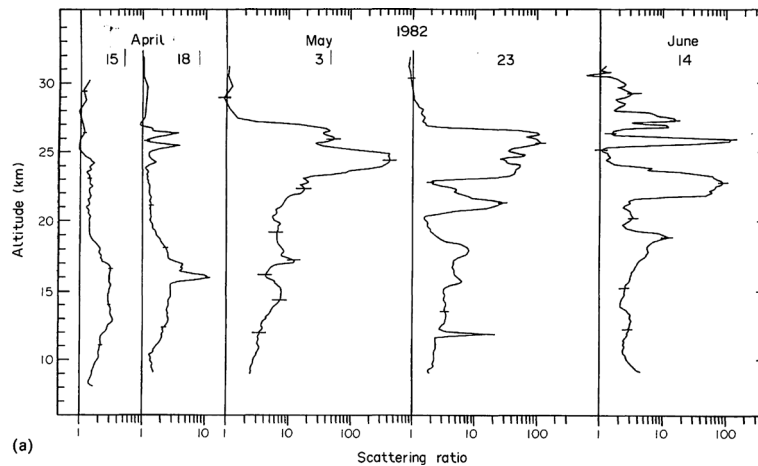


Fig. 1 Fig. 1 (a) of the reference 10. The backscattering ratio profiles at 1064 nm from 15 April to 14 June 1982 at Fukuoka, Japan. The profile on 15 April shows the typical vertical profile of the background stratospheric aerosols without disturbance of volcanic clouds. The increase in scattering ratio caused by the eruption of El Chichon was clear at altitudes higher than 15 km in the following days. (Please note that the scale of the abscissa is logarithmic.)

4. 極成層圏雲

成層圏エアロゾル粒子はバックグラウンド状態および火山噴火による擾乱時も、主成分はこれまで述べてきたように硫酸水溶液である。しかし、成層圏の気温が極端に低下するような状況では、温度低下に伴う硫酸水溶液エアロゾル粒子と大気中の微量成分(水や硝酸)の間の物理化学的な特性に従って、通常の成層圏では見られないような成分や質量濃度の変化、その結果として後方散乱係数や偏光解消度の変化が見られる。

冬季の南極成層圏では、南極大陸を覆う程度の、規模の大きい渦(極渦)が発達し、極渦内外の物質や熱の輸送がほとんど無くなる。これに冬季極夜の放射冷却が加わって、南極極渦内の気温は180 K付近まで低下する。通常成層圏は非常に乾燥していて、氷に対する飽和蒸気圧が100%となる気温は約188 K(-85℃)程度と低温である。氷の雲は、対氷飽和蒸気圧が100%となる温度を数度下回ったところで、水溶液粒子の中で生成する⁵¹⁾ので、通常の中低緯度の成層圏で雲が発生することはない。しかし、この成層圏における氷雲の発生温度を気温が下回る南極極渦内では、しばしば氷雲の存在が確認される。

南極冬季成層圏の特殊な低温環境で生じる氷雲は1950年代から報告⁵²⁾があるが、高度分布や時間的な変化は1983年にライダーによって初めて観測された^{53,54)}。冬季の極域に現れる雲は極成層圏雲(Polar Stratospheric Clouds, PSC)と名付けられた⁵⁵⁾。ライダー観測の結果は1985年に発表された⁵³⁾が、同年オゾンホール発見に関する報告⁵⁶⁾が発表された。その後PSC粒子の表面反応がオゾンホールを形成するオゾン破壊に決定的な役割を果たしている^{57,58)}ことが明らかになって、極域におけるライダー観測をはじめとした多くの観測が実施され、PSCの特徴が明らかとなった^{17-25,28)}。

一方、北極の成層圏では氷雲が生成する程度まで気温が低下することはまれである。南半球は北半球に比べて海洋の面積が広く、さらに南極大陸は海に囲まれている。これに対し、北半球は大陸が占める割合が大

きいため、山岳などの地形起源の波動がより強く発達し、その結果として規模の大きい極渦が発達しにくい。このため低緯度からの熱輸送がより盛んで⁵⁹⁾、北極成層圏気温は南極ほど低温に達しにくい。この違いは生成されるPSCの主成分に大きな違いをもたらす。極渦中、南極では氷雲が発生する180 K付近まで気温が低下するのに対し、北極では、ほとんどの場合190 Kを数度下回る程度の気温低下にとどまる^{60, 61)}。従って、北極成層圏で氷の雲が発生することはまれである。

しかしながら、気温が約195 K以下まで低下すると固体の硝酸・三水和物 (Nitric Acid Trihydrate, NAT) 粒子が、また約190 K以下では液相の硫酸/硝酸/水による三成分液滴粒子が熱力学的に安定となり⁶³⁻⁶⁸⁾、それぞれの成分の変化に対応する後方散乱係数や偏光解消度の増加として、エアロゾル粒子の変化がライダーで観測されていて^{17-25, 28, 60-62)}、このような氷ではない粒子もPSCと呼ばれている。北緯79度の北極域、ニーオルスンでしばしばライダー観測された、液滴粒子層の上下を固体粒子層が挟むサンドイッチ構造の例をFig. 2に示す。なお、PSC粒子表面におけるオゾン破壊の化学反応は水以外のPSC成分でも進行する。従って、北極の極渦の中でもオゾンが減少する(オゾンホールが発生する)。しかし、極渦の規模が小さいため、北極のオゾンホールは南極に比べて規模が小さく、オゾン破壊の程度も小さい⁵⁸⁾。

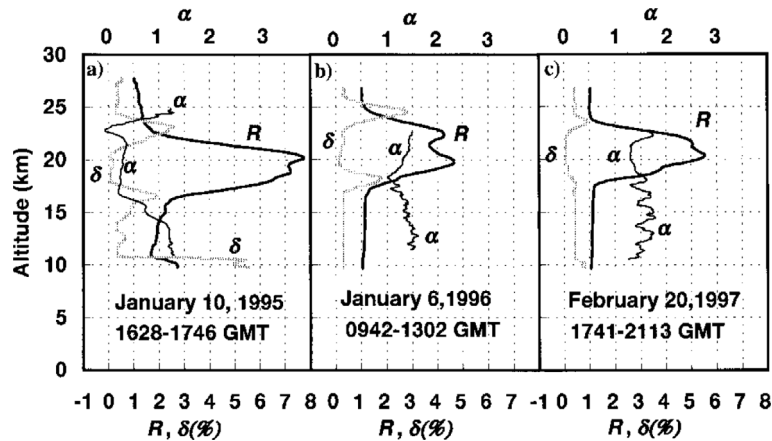


Fig. 2 Fig. 1 of the reference 22. A typical sandwich structure frequently observed over Ny-Ålesund, Svalbard (79°N, 12°E) on (a) January 10, 1995, (b) January 6, 1996, and (c) February 20, 1997. The backscattering ratio R at 532 nm, particle depolarization ratio δ at 532 nm, and Angstrom exponent α from 532 and 1064 nm are shown as the labeled bold line, bold faint line, and thin line, respectively.

5. おわりに

近年は、成層圏エアロゾルのネットワーク観測が実施されたり⁷⁰⁾、衛星搭載ライダー CALIOP が運用されたりと、筆者が成層圏エアロゾルの研究を始めた当時に比べて密度の高い成層圏エアロゾルのモニタリングが継続中である。このような観測網によって、規模の小さい火山噴火についても、全球的な拡がりの様子が克明に捉えられるようになってきた²⁹⁾。同様に、これまで成層圏への影響が明らかでなかった森林火災の煙の影響も捉えられている⁶⁹⁻⁷³⁾ (Fig. 3)。これらのライダー観測をもとに、成層圏エアロゾルに関する多くの新たな知見が蓄積されつつある。

最後に、今世紀に入った頃から、気候温暖化の解決策として、硫黄を含む気体を成層圏に放出して成層圏エアロゾルを増加させ、その冷却効果によって人工的に地表面温度を下げる(いわば人工的な大噴火火山エアロゾル)という方法が、他のいくつかの温暖化対策とともに研究されており、気候工学 (geo-engineering) と総称されている⁷⁴⁻⁸¹⁾。今のところ、人工的な成層圏エアロゾル増加が実際に試みられることはなさそうであるが、万一実現された場合、ライダーは重要なモニタリング装置となるであろう。

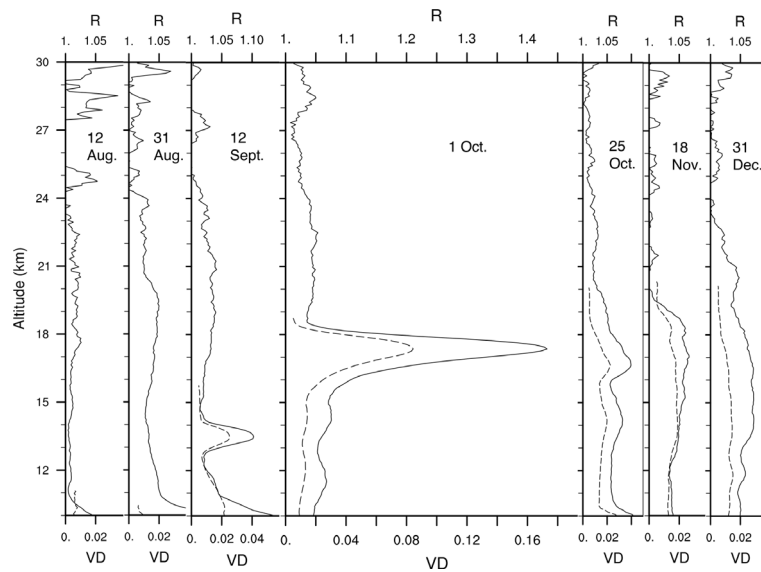


Fig. 3 Fig. 3 of the reference 72. The profiles of backscattering ratio R (solid) and volume depolarization ratio VD (broken) at 532 nm from August to December 2017 at Ny-Ålesund, Svalbard. The profiles of VD are plotted for heights where VD is larger than 0.005. The profiles from August show background stratospheric aerosols. The profiles from September to December show increases in R and VD. These increases were caused by smoke from Canadian forest fires.

引用文献

- 1) O. Uchino, M. Maeda, J. Khono, T. Shibata, C. Nagasawa, and M. Hirono: Observation of stratospheric ozone layer by a XeCl laser radar, *Applied Physics Letters*, **33**, 807–809, 1978. <https://doi.org/10.1063/1.90535>
- 2) O. Uchino, M. Maeda, T. Shibata, M. Hirono, and M. Fujiwara: Measurement of stratospheric vertical ozone distribution with a Xe-Cl lidar; estimated influence of aerosols, *Applied Optics*, **19**, 4175–4179, 1980. <https://doi.org/10.1364/AO.19.004175>
- 3) T. Shibata, M. Kobuchi, and M. Maeda: Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar, *Applied Optics*, **25**, 685–688, 1986. <https://doi.org/10.1364/AO.25.000685>
- 4) T. Shibata, T. Fukuda, and M. Maeda: Density fluctuations in the middle atmosphere over Fukuoka observed by an XeF Rayleigh lidar, *Geophysical Research letters*, **13**, 1121–1124, 1986. <https://doi.org/10.1029/GL013i011p01121>
- 5) M. Hirono, M. Fujiwara, and T. Shibata: Lidar observation of sudden increases of aerosols in the stratosphere caused by volcanic injections. I. Soufriere 1979 event, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **43**, 1127–1131, 1981. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90028-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90028-3)
- 6) M. Hirono, M. Fujiwara, T. Shibata, and N. Kugumiya: Lidar observation of volcanic Cloud in the stratosphere over Fukuoka, caused by Eruption of Mt. St. Helens in May 1980, *Geophysical Research Letters*, **8**, 1019–1022, 1981. <https://doi.org/10.1029/GL008i009p01019>
- 7) M. Fujiwara, T. Shibata, and M. Hirono: Lidar observation of sudden increase of aerosols in the stratosphere caused by volcanic injections. II. Sierra Negra event, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **44**, 811–818, 1982. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90010-1)
- 8) M. Hirono and T. Shibata: Enormous increase of stratospheric aerosols over Fukuoka due to volcanic eruption of El Chichon in 1982, *Geophysical Research letters*, **10**, 152–154, 1983. <https://doi.org/10.1029/GL010i002p00152>
- 9) M. Hirono, T. Shibata, M. Fujiwara, and N. Fujiwara: Enormous increase of volcanic clouds in the stratosphere over Fukuoka after April 1982, *Geophysica International*, **23**, 259–276, 1984. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1984.23.2.841>
- 10) T. Shibata, M. Fujiwara, and M. Hirono: The El Chichon volcanic cloud in the stratosphere: lidar observation at Fukuoka and numerical simulation, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **46**, 1121–1146, 1984. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(84\)90104-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(84)90104-1)
- 11) M. Hirono, M. Fujiwara, T. Shibata, and N. Kugumiya: Lidar observations of atmospheric aerosols following the 1980 eruption of Mt. St. Helens Part I., *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **46**, 1147–1157, 1984. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(84\)90105-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(84)90105-3)

- 12) O. Uchino, T. Nagai, T. Fujimoto, M. Fujiwara, H. Akiyoshi, S. Yasumatsu, S. Hayashida, Y. Sasano, H. Nakane, Y. Iwasaka, M. Nagatani, T. Shibata, T. Itabe, K. Asai, A. Nomura, Y. Saito, T. Kano, Y. Sai, K. Tamaki, R. Nomura, T. Sunagawa, C. Nagasawa, M. Abo, Y. Idesako, and K. Kai: Observation of the Pinatubo volcanic cloud by lidar network in Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **71**, 285–295, 1993. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.71.2_285
- 13) T. Shibata, T. Itabe, K. Mizutani, and K. Asai: Pinatubo volcanic aerosols observed by lidar at Wakkanai, Japan, *Geophysical Research letters*, **21**, 197–200, 1994. <https://doi.org/10.1029/93GL03288>
- 14) Y. Iwasaka, M. Hayashi, T. Shibata, K. Matsunaga, M. Nagatani, H. Nakada, I. Mori, T. Ojio, M. Fujiwara, E. Akiyoshi, K. Yamazaki, K. Kondoh, and H. Nakane: Transport of Pinatubo aerosols to the Arctic region: lidar measurements in Alaska, winter 1991/1992, *Proceedings of the NIPR symposium on polar meteorology and Glaciology*, **8**, 27–33, 1994. <https://nipr.repo.nii.ac.jp>
- 15) Y. Iwasaka, T. Shibata, M. Hayashi, M. Nagatani, T. Ojio, H. Adachi, K. Matsunaga, K. Osada, I. Mori, M. Fujiwara, E. Akiyoshi, K. Shiraishi, K. Yamazaki, K. Kondoh, and H. Nakane: Lidar measurements at Alaska, 1991–1994 -Pinatubo volcanic effect on stratospheric aerosol layer, *レーザー研究*, **23**, 166–170, 1995. <https://doi.org/10.2184/ljsj.23.166>
- 16) M. Yasui, M. Fujiwara, T. Shibata, H. Akiyoshi, S. Ikawa, K. Shiraishi, and H. Nonaka: Variations of volcanic aerosols observed in Fukuoka -a comparison of Mt. Elchicnon and Mt. Pintubo events-, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **48**, 403–413, 1996. <https://doi.org/10.5636/jgg.48.403>
- 17) T. Shibata, Y. Iwasaka, M. Fujiwara, M. Hayashi, K. Shiraishi, H. Adachi, T. Sakai, K. Susumu, Y. Nakura, and M. Watanabe: Lidar observed polar stratospheric clouds over Svalbard in mid-December 1994, *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue*, **51**, 217–223, 1996. <https://nipr.repo.nii.ac.jp>
- 18) T. Shibata, Y. Iwasaka, M. Fujiwara, M. Hayashi, M. Nagatani, K. Shiraishi, H. Adachi, T. Sakai, K. Susumu, and Y. Nakura: Polar stratospheric clouds observed by lidar over Spitsbergen in the winter of 1994/1995: Liquid particles and vertical “sandwich” structure, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 10829–10840, 1997. <https://doi.org/10.1029/97JD00418>
- 19) K. Shiraishi, M. Fujiwara, Y. Iwasaka, T. Shibata, M. Nagatani, H. Adachi, T. Sakai, and K. Fujino: Lidar observations above Ny-alesund, Svalbard, Norway during winter 1995/96, *Proceedings of the NIPR symposium on polar meteorology and Glaciology*, **11**, 117–126, 1997. <https://nipr.repo.nii.ac.jp>
- 20) T. Nagai, O. Uchino, T. Itabe, T. Shibata, K. Mizutani, and T. Fujimoto: Polar stratospheric clouds observed at Eureka (80°N, 86°W) in the Canadian Arctic during the 1994/1995 winter, *Geophysical Research letters*, **24**, 2243–2246, 1997. <https://doi.org/10.1029/97GL02094>
- 21) D. P. Donovan, A. I. Carswell, T. Shibata, J. C. Bird, T. J. Duck, T. Itabe, T. Nagai, S. R. Pal, O. Uchino, and J. A. Whiteway: Multiwavelength lidar aerosol measurements made at Eureka (80N, 86W) during early 1995, *Geophysical Research Letters*, **25**, 3139–3142, 1998. <https://doi.org/10.1029/98GL52328>
- 22) T. Shibata, K. Shiraishi, H. Adachi, Y. Iwasaka, and M. Fujiwara: On the lidar observed sandwich structure of polar stratospheric clouds, I, implications for the mixing state of the PSC particles, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 21603–21611, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999JD900333>
- 23) T. Shibata: On the lidar observed sandwich structure of polar stratospheric clouds, II, numerical simulations of externally mixed PSC particles, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 21613–21619, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999JD900331>
- 24) T. Shibata, K. Sato, H. Kobayashi, M. Yabuki, and M. Shiobara: The Antarctic polar stratospheric clouds under the temperature perturbation by non-orographic inertia gravity waves observed by micro pulse lidar at Syowa Station, *J. Geophys. Res.*, **108** (D3), 4105, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JD002713>
- 25) K. Shiraishi, M. Fujiwara, T. Shibata, and Y. Iwasaka: Lidar Observations of Polar Stratospheric Clouds over Ny-Aalesund in the Winters of 1994/95–1996/97: Impact of the temperature and the temperature history on the PSC structure, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81** (6), 1457–1470, 2003. <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.1457>
- 26) A. Kamei, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and T. Shibata: Volcanic aerosol layer observed by shipboard lidar over the tropical western Pacific, *SOLA*, **2**, 1–4, 2006. <https://doi.org/10.2151/sola.2006-001>
- 27) O. Uchino, T. Sakai, T. Nagai, T. Sakashita, K. Suzuki, T. Shibata, I. Morino, and T. Yokota: Lidar observation of stratospheric aerosols increased from the 2009 mount Sarychev volcanic eruption, *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, **30**, 149–156, 2010. <https://doi.org/10.11440/rssj.30.149>
- 28) K. Shiraishi, M. Hayashi, M. Fujiwara, T. Shibata, M. Watanabe, Y. Iwasaka, R. Neuber, and T. Yamanouchi: Comparative analysis of measurements of stratospheric aerosol by lidar and aerosol sonde above Ny-Alesund in the winter of 1995 [Comparative analysis of lidar and OPC observations], *Polar Science*, **5**, 399–410, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2011.08.003>
- 29) T. Shibata, and T. Kinoshita: Volcanic aerosol layer formed in the tropical upper troposphere by the eruption of Mt. Merapi, Java, in November 2010 observed by the spaceborne lidar CALIOP, *Atmospheric Research*, **168**, 49–56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.002>
- 30) T. Sakai, O. Uchino, T. Nagai, B. Liley, I. Morino, and T. Fujimoto: Long-term variation of stratospheric aerosols observed

- with lidars over Tsukuba, Japan, from 1982 and Lauder, New Zealand, from 1992 to 2015, *J. Geophys. Res.*, **121**, 10283–10293, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JD025132>
- 31) S. M. Khaykin, S. Godin-Beekmann, P. Keckhut, A. Hauchecorne, J. Jumelet, J.-P. Vernier, A. Bourassa, D. A. Degenstein, L. A. Rieger, C. Bingen, F. Vanhellemont, C. Robert, M. DeLand, and P. K. Bhartia: Variability and evolution of the midlatitude stratospheric aerosol budget from 22 years of ground-based lidar and satellite observations, *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 1829–1845, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-1829-2017>
 - 32) V. V. Zuev, V. D. Burlakov, A. V. Nevzorov, V. L. Pravdin¹, E. S. Savelieva¹, and V. V. Gerasimov: 30-year lidar observations of the stratospheric aerosol layer state over Tomsk (Western Siberia, Russia), *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 3067–3081, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3067-2017>
 - 33) J. P. Vernier, J. P. Pommereau, A. Garnier, J. Pelon, N. Larsen, J. Nielsen, T. Christensen, F. Cairo, L. W. Thomason, T. Leblanc, and I. S. McDermid: Tropical stratospheric aerosol layer from CALIPSO lidar observations, *J. Geophys. Res.*, **114**, D00H10, 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JD011946>
 - 34) C. E. Junge, C. W. Chagnon, and J. E. Manson: Stratospheric aerosols, *J. Meteorol.*, **18**, 81–108, 1961. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1961\)018<0081:SA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1961)018<0081:SA>2.0.CO;2)
 - 35) S. Hattori, K. Kamezaki, and N. Yoshida: Constraining the atmospheric OCS budget from sulfur isotopes, *PNAS*, **117** (34), 20447–20452, 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007260117>
 - 36) P. Hamill and O. B. Toon: Microphysical processes affecting stratospheric aerosol particles, *J. Atmos. Science*, **34**, 1104–1119, 1977. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1104:MPASAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1104:MPASAP>2.0.CO;2)
 - 37) R. P. Turco, R. C. Whitten, and O. B. Toon: Stratospheric aerosols' observation and theory, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20** (2), 233–279, 1982. <https://doi.org/10.1029/RG020i002p00233>
 - 38) H. Hatsushika, and K. Yamazaki: Stratospheric drain over Indonesia and dehydration within the tropical tropopause layer diagnosed by air parcel trajectories, *J. Geophys. Res.*, **108** (D19), 4610, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JD002986>
 - 39) S. Iwasaki, T. Shibata, J. Nakamoto, H. Okamoto, H. Ishimoto, and H. Kubota: Characteristics of deep convection measured by using the A-Train constellation, *J. Geophys. Res.*, **115**, D06207, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JD013000>
 - 40) 岩坂泰信：火山噴火と気候，*天気*，**60** (10)，803–809, 2013. https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2013/2013_10_0023.pdf
 - 41) J. M. Rosen, and D. J. Hofmann: Balloonborne measurements of condensation nuclei, *J. Appl. Met.*, **16** (1), 56–62, 1977. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0056:BMOCN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0056:BMOCN>2.0.CO;2)
 - 42) A. D. Clarke, and V. N. Kapustin: A pacific aerosol survey. part I: a decade of data on particle production, transport, evolution, and mixing in the troposphere, *J. Atmos. Sci.*, **59** (3), 363–382, 2002. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0363:APASPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0363:APASPI>2.0.CO;2)
 - 43) P. Campbell, M. Mills, and T. Deshler: The global extent of the mid stratospheric CN layer: A three-dimensional modeling study, *J. Geophys. Res.*, **119** (2), 1015–1030, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JD020503>
 - 44) D. Hayes, K. Snetsinger, G. Ferry, V. Oberbeck, and N. Farlow: Reactivity of stratospheric aerosols to small amounts of ammonia in the laboratory environment, *Geophysical Research Letters*, **7** (11), 974–976, 1980. <https://doi.org/10.1029/GL007i011p00974>
 - 45) T. Nagai, B. Liley, T. Sakai, T. Shibata, and O. Uchino: Post-Pinatubo evolution and subsequent trend of the stratospheric aerosol layer observed by mid-latitude lidars in both hemispheres, *SOLA*, **6**, 69–72, 2010. <https://doi.org/10.2151/sola.2010-018>
 - 46) S. Hayashida, A. Kobayashi, and Y. Iwasaka: Lidar measurements of stratospheric aerosol content and depolarization ratio after the eruption of volcano El Chichon: Measurements at Nagoya, Japan, *Geophysica International*, **23**, 277–288, 1984. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1984.23.2.842>
 - 47) G. Stenichkov, Ukhov, A., Osipov, S., Ahmadov, R., Grell, G., Cady-Pereira, K., E. Mlawer, and M. Iacono: How does a Pinatubo-size volcanic cloud reach the middle stratosphere?, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **126**, e2020JD033829, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JD033829>
 - 48) M. P. McCormick, T. J. Swissler, W. P. Chu, and W. H. Fuller Jr. : Post-volcanic stratospheric aerosol decay as measured by lidar, *J. Atmos. Sci.*, **35** (7), 1296–1303, 1978. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<1296:PVSADA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<1296:PVSADA>2.0.CO;2)
 - 49) R. W. Reynolds: Impact of Mount Pinatubo Aerosols on Satellite-derived Sea Surface Temperatures, *J. Climate*, **6** (4), 768–774, 1993. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0768:IOMPAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0768:IOMPAO>2.0.CO;2)
 - 50) V. Aquila, C. Baldwin, N. Mukherjee, E. Hackert, F. Li, J. Marshak, A. Molod, and S. Pawson: Impacts of the eruption of Mount Pinatubo on surface temperatures and precipitation forecasts with the NASA GEOS subseasonal-to-seasonal system, *J. Geophys. Res.*, **126** (16), e2021JD034830, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JD034830>
 - 51) T. Koop, B. Luo, A. Tsias, and T. Peter: Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions, *Nature*, **406**, 611–614, 2000. <https://doi.org/10.1038/35020537>
 - 52) J. L. Stanford: On the nature of persistent stratospheric clouds in the Antarctic, *Tellus*, **29** (6), 530–534, 1977. [https://doi.org/10.1002/1522-0166\(197706\)29:6<530::AID-TELL530>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1002/1522-0166(197706)29:6<530::AID-TELL530>2.0.CO;2)

- org/10.3402/tellusa.v29i6.11387
- 53) Y. Iwasaka: Lidar Measurement of the Stratospheric Aerosol Layer at Syowa Station (69.00°S, 39.35°E), Antarctica), *J. Met. S. Jpn.*, **63** (2), 283–287, 1985. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.63.2_283
 - 54) Y. Iwasaka, T. Hirasawa, and H. Fukunishi: Lidar measurement of the Antarctic stratospheric aerosol layer I, Winter enhancement, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37** (12), 99–109, 1986. <https://doi.org/10.5636/jgg.37.1087>
 - 55) M. P. McCormick, Patrick Hamill, and U. O. Farrukh: Characteristics of polar stratospheric clouds as observed by SAM II, SAGE, and lidar, *J. Met. S. Jpn.*, **63** (2), 267–272, 1985. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.63.2_267
 - 56) J. D. Farman, B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin: Large losses of total ozone in Antarctica: reveal seasonal CLOx/NOx interaction, *Nature*, **315**, 207–210, 1985. <https://doi.org/10.1038/315207a0>
 - 57) S. Solomon, R. R. Garcia, F. S. Rowland, and D. J. Wuebbles: On the depletion of Antarctic ozone, *Nature*, **321**, 755–758, 1986. <https://doi.org/10.1038/321755a0>
 - 58) S. Solomon: Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history, *Rev. Geophys.*, **37** (3), 275–316, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999RG900008>
 - 59) J. R. Holton: Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, **33** (4), 403–439, 1995. <https://doi.org/10.1029/95RG02097>
 - 60) 白石浩一：極成層圏雲の物理化学と環境変動, *Eazozoru Kenkyu*, **25** (3), 219–225, 2010. <https://doi.org/10.11203/jar.25.219>
 - 61) M. Maturilli, R. Neuber, P. Massoli, F. Cairo, A. Adriani, M. L. Moriconi, and G. Di Donfrancesco: Differences in Arctic and Antarctic PSC occurrence as observed by lidar in Ny-Ålesund (79°N, 12°E) and McMurdo (78°S, 167°E), *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2081–2090, 2005. <https://doi.org/10.5194/acp-5-2081-2005>
 - 62) E. V. Browell, C. F. Butler, S. Ismail, P. A. Robinette, A. F. Carter, N. S. Higdon, O. B. Toon, M. R. Schoeberl, and A. F. Tuck: Airborne lidar observations in the wintertime Arctic stratosphere: Polar stratospheric clouds, *Geophys. Res. Lett.*, **17** (4), 385–388, 1990. <https://doi.org/10.1029/GL017i004p00385>
 - 63) A. Tabazadeh, O. B. Toon, and P. Hamill: Freezing behavior of stratospheric sulfate aerosols inferred from trajectory studies, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1725–1728, 1995. <https://doi.org/10.1029/95GL01335>
 - 64) A. Tabazadeh, R. P. Turco, K. Drdla, M. Z. Jacobson, and O. B. Toon: A study of type I polar stratospheric cloud formation, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1619–1622, 1994. <https://doi.org/10.1029/94GL01368>
 - 65) J. E. Dye, D. Baumgardner, B. W. Gandrud, S. R. Kawa, K. K. Kelly, M. Loewenstein, G. V. Ferry, K. R. Chan, and B. L. Gray: Particle size distributions in Arctic polar stratospheric clouds, growth and freezing of sulfuric acid droplets and implications for cloud formation, *J. Geophys. Res.*, **97**, 8015–8034, 1992. <https://doi.org/10.1029/91JD02740>
 - 66) K. Drdla, A. Tabazadeh, R. P. Turco, M. Z. Jacobson, J. E. Dye, C. Twohy, and D. Baumgardner: Analysis of the physical state of one Arctic polar stratospheric cloud based on observations, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2475–2478, 1994. <https://doi.org/10.1029/94GL02405>
 - 67) K. S. Carslaw, B. P. Luo, S. L. Clegg, T. Peter, P. Brimblecombe, and P. J. Crutzen: Stratospheric aerosol growth and HNO₃ gas phase depletion from coupled HNO₃ and water uptake by liquid particles, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2479–2482, 1994. <https://doi.org/10.1029/94GL02799>
 - 68) K. S. Carslaw, B. Luo, and T. Peter: An analytic expression for the composition of aqueous HNO₃-H₂SO₄ stratospheric aerosols including gas phase removal of HNO₃, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1877–1880, 1995. <https://doi.org/10.1029/95GL01668>
 - 69) M. D. Fromm, and R. Servranckx: Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (10), 1542, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GL016820>
 - 70) H. Baars, A. Ansmann, K. Ohneiser, M. Haarig, R. Engelmann, D. Althausen, I. Hanssen, M. Gausa, A. Pietruczuk, A. Szkop, I. S. Stachlewska, D. Wang, J. Reichardt, A. Skupin, I. Mattis, T. Trickl, H. Vogelmann, F. Navas-Guzmán, A. Haefele, K. Acheson, A. A. Ruth, B. Tatarov, D. Müller, Q. Hu, T. Podvin, P. Goloub, I. Veselovskii, C. Pietras, M. Haeffelin, P. Fréville, M. Sicard, A. Comerón, A. J. F. García, F. M. Menéndez, C. Córdoba-Jabonero, J. L. Guerrero-Rascado, L. Alados-Arboledas, D. Bortoli, M. J. Costa, D. Dionisi, G. L. Liberti, X. Wang, A. Sannino, N. Papagiannopoulos, A. Boselli, L. Mona, G. D'Amico, S. Romano, M. R. Perrone, L. Belegante, D. Nicolae, I. Grigorov, A. Gialitaki, V. Amiridis, O. Soupiona, A. Papayannis, R.-E. Mamouri, A. Nisantzi, B. Heese, J. Hofer, Y. Y. Schechner, U. Wandinger, and G. Pappalardo: The unprecedented 2017–2018 stratospheric smoke event: Decay phase and aerosol properties observed with the EARLINET, *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 15183–15198, 2019. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15183-2019>
 - 71) S. M. Khaykin, S. Godin-Beekmann, A. Hauchecorne, J. Pelon, F. Ravetta, and P. Keckhut: Stratospheric smoke with unprecedentedly high backscatter observed by lidars above southern France, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1639–1646, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017GL076763>
 - 72) K. Shiraishi and T. Shibata: Seasonal variation in high arctic stratospheric aerosols observed by lidar at Ny Ålesund, Svalbard between March 2014 and February 2018, *SOLA*, **17**, 30–34, 2021. <https://doi.org/10.2151/sola.2021-005>
 - 73) A. Ansmann, K. Ohneiser R.-E. Mamouri, D. A. Knopf, I. Veselovskii, H. Baars, R. Engelmann, A. Foth, C. Jimenez, P. Seifert, and B. Barja: Tropospheric and stratospheric wildfire smoke profiling with lidar: mass, surface area, CCN, and INP

- retrieval, *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 9779–9807, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-9779-2021>
- 74) P. J. Crutzen: Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?, *Clim. Change*, **77**, 211–219, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9101-y>
- 75) T. M. Lenton, and N. E. Vaughan: The radiative forcing potential of different climate geoengineering options, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 5539–5561, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5539-2009>
- 76) The Royal Society: *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, London, ISBN 978-0-85403-773-5, RS1636, 2009. <https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2009/geoengineering-climate/>
- 77) R. Muthyala, G. Bala, and A. Nalam: Regional scale analysis of climate extremes in an SRM geoengineering simulation, Part 2: temperature extremes, *Current Science*, **114** (5), 1036–1045, 2018. <https://doi.org/10.18520/cs/v114/i05/1036-1045>
- 78) A. Lockley: Distributed governance of Solar Radiation Management geoengineering: A possible solution to SRM's “free-driver” problem?, *Front. Eng. Manag.*, **6** (4) : 551–556, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0055-y>
- 79) J. L. Reynolds: Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals, *Proc. R. Soc. A* **475**: 20190255., 2019. <http://doi.org/10.1098/rspa.2019.0255>
- 80) 杉山昌広, 西岡 純, 藤原正智: 気候工学 (ジオエンジニアリング), *天気*, **58**, 577–598, 2011. https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2011/2011_07_0003.pdf
- 81) E. Kintisch: *Hack the planet: science's best hope - or worst nightmare - for Averting Climate Catastrophe*. Wiley, 2010, ISBN-13:978-0470524268.

柴田 隆

九州大学にて、成層圏エアロゾルの研究で学位取得、その後エキシマレーザのライダーへの応用などを研究。通信総合研究所にて、コヒーレントドップラーライダーなどを研究。名古屋大学にて、大気エアロゾルや熱帯巻雲などを研究し定年退職。名古屋大学名誉教授。