

高スペクトル分解ライダーによる雲・エアロゾル粒子タイプ識別研究

岳 広涵¹, 岡本 創², 佐藤 可織², 神 慶孝³, 西澤 智明³

¹九州大学総合理工学府 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6 丁目 1 番地)

²九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6 丁目 1 番地)

³国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Study of cloud and aerosol particle type identification using 355-nm high-spectral-resolution lidar

Guanghan YUE¹, Hajime OKAMOTO², Kaori SATO², Yoshitaka JIN³, and Tomoaki NISHIZAWA³

¹IGSES, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580

²RIAM, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580

³NIES., 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053

Abstract: High Spectral Resolution Lidar (HSRL) with polarization provides extinction and backscattering coefficients (α_p, β_p) without assuming particle lidar ratio (S_p). It is expected that discrimination of aerosol and ice particle type might be possible from the HSRL measurements by using S_p and depolarization ratio (δ_p) when sufficiently high signal to noise is achieved. There are regions where the extinction retrieval is not possible to be performed and the volume depolarization ratio (δ_v) and attenuated backscattering (β_{att}) were only obtained. In such cases, the particle discrimination was forced to be conducted by using the limited available observables. In this article, we analyzed ground-based HSRL operated at NICT in Koganei to identify cloud and aerosol particle types by analyzing $\beta_p, \delta_p, \alpha_p, \beta_{att}, \delta_v$, volume lidar ratio (S_p). We also showed possible implication of the study to the first space borne HSRL, ATLID, onboard EarthCARE satellite.

Key Words: cloud, aerosol, lidar, extinction, depolarization

1. はじめに

高スペクトル分解ライダー(HSRL)は、ミー散乱ライダーとは異なり、大気粒子による後方散乱光(Mie 信号)と大気分子による後方散乱光(Rayleigh 信号)を分離して測定し、その2つの信号利用し、雲やエアロゾル粒子の粒子消散係数(α_p)と粒子後方散乱係数(β_p)の高度分布を独立に抽出できる。国立環境研究所と九州大学で共同開発した HSRL は、スキャン型マイケルソン干渉計を利用することで、安定して 24 時間連続観測が可能で特徴を持ち、夜間のみ観測可能なラマンライダーと比較して、その SN 比も 1 桁高い等その優位性が示されている¹⁾。

衛星観測の状況としては、2024 年度に打ち上げが予定されている、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と欧州宇宙機関(ESA)が共同開発した EarthCARE 衛星は、ドップラー雲レーダ(CPR)と共に、HSRL(ATLID)、多波長イメージャー(MSI)、広帯域放射計(BBR)を搭載し、雲、エアロゾル、放射過程に関する観測を実施する²⁾。EarthCARE によって、従来より格段に雲粒子とエアロゾル粒子に関する知見が得られ、気候変動予測の高精度化に寄与すると期待されている²⁾。散乱理論を用いた計算から、ATLID の観測パラメータである β_p, α_p そして雲やエアロゾル粒子の粒子偏光解消度(δ_p)を組み合わせると、エアロゾルタイプだけでなく、氷粒子タイプの情報が得られると期待される³⁾。本研究の目的は、ATLID と同等のパラメータが得られる地上の高スペクトル分解ライダーを用いて、雲とエアロゾルの情報を抽出する手段を確立することである。HSRL の解析の中心となるのは、 $\beta_p, \delta_p, \alpha_p$ と S_p であるが、大気分子の補正等の誤差が大きい場合やノイズが大きい場合にこれらの観測量が得られない場合があり、 $\beta_p, \delta_p, \alpha_p$ と S_p に加えて校正前の高度補正済みの信号強度、体積偏光解消度 (δ_v)、体積ライダー比(S_v)を併用し粒子タイプ識別が可能となる領域を拡張する手法を開発することを目指した。

第 2 章では用いたデータおよび解析手法の紹介を行い、第 3 章では、高度補正済みの信号強度、 $\delta_v, S_v, \beta_p, \delta_p$ そして S_p の解析を行った。さらに、下層の水雲、異なる性質を持つ氷雲と考えられる2つの領域を選定し、それらの特徴を議論した。さらに $\beta_p, \alpha_p, \delta_p$ と S_p の頻度分布解析を行った。これらから、エアロゾルと雲タイプの分類について言及した。第 4 章で本研究のまとめと今後の計画について記述した。

2. データ・解析手法

小金井市の情報通信研究機構に設置された 355nm の波長の HSRL を用いて、2021 年 9 月 12 日取得されたデータに着目し解析を行った。HSRL の解析の中心となるのは、 β_p 、 δ_p 、 α_p と S_p である。ノイズが大きい場合や大気分子の補正等の誤差が大きい場合に、これらの観測量が得られない場合がある。そのような場合でも、ミーライダの観測量は得られる場合がある。時間分解能は 5 分で鉛直分解能は 30m であるが、 α_p と S_p に関しては、10 分間でさらに 660m で移動平均を計算したものをを用いている。

3. 結果と考察

3.1 高度-時間断面の解析

波長 355nm における 2021 年 9 月 12 日の高度補正済みの信号強度、 δ_v 、 β_p 、 α_p 、 δ_p を Fig.1 に、そして S_v と S_p の時間高度断面を Fig. 2 にそれぞれ示す。まず、地表面から近い高度のエアロゾルの特徴を調べるため、高度 0.6~1km、時間 2.4~3hour の領域(part1)を選んだ。次に氷雲で異なる粒子タイプを示すと考えられる、高度 3.2~4km、時間 3.2~4.2hour の領域(part2)と高度 7.8~8.8km、時間 15~18.4hour 領域(part3) を選び、それらの特徴を解析した。Part1 と 2 では β_p 、 α_p 、 δ_p が得られていたが、part3 ではこれらの量が求められておらず、高度補正済みの後方散乱強度と δ_v のみが得られていた。

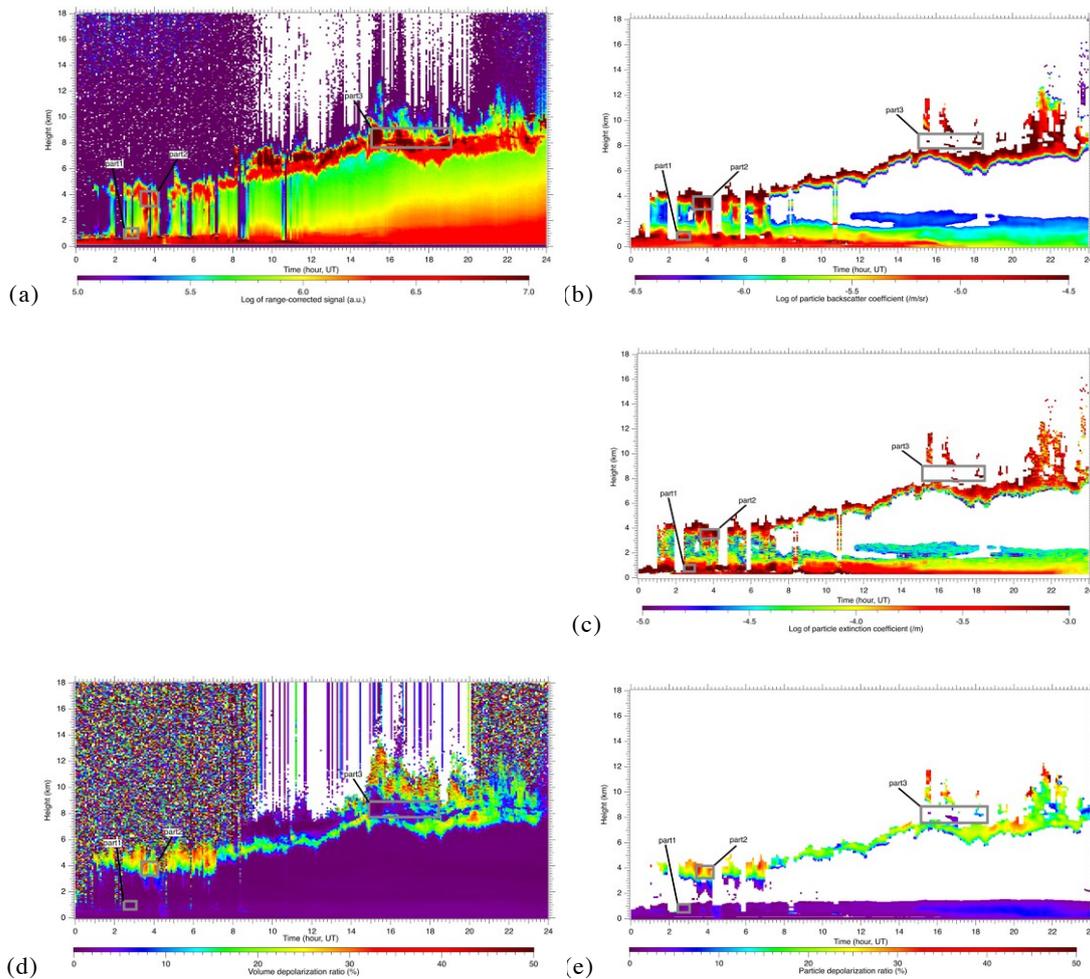


Fig.1 (a) Time-height cross section of range corrected attenuated backscattering signals obtained on 12 September 2021. (b) Same as (a) but for particle backscatter coefficient. (c) Same as (a) but for particle extinction coefficient. (d) Same as (a) but for volume depolarization ratio. (e) Same as (a) but for particle depolarization ratio.

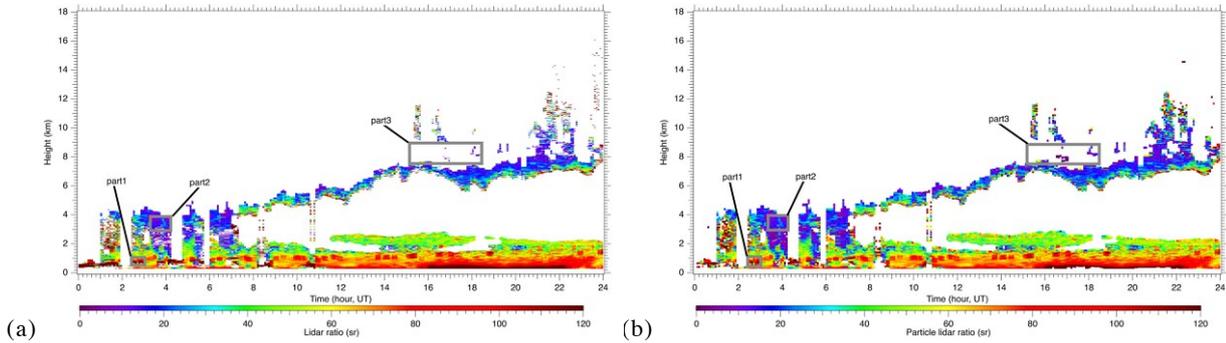


Fig.2 (a) Time-height cross section of volume lidar ratio on 2021/09/12 at 355nm.
 (b) Same as (a) but for particle lidar ratio.

3.2 粒子頻度分布の考察

次に、 β_p 、 α_p 、 δ_p 、そして S_p の頻度分布の解析を行った(Fig.3)。 β_p は約 $10^{-6.2}$ から $10^{-3.9}$ [/m/sr]の範囲の値を取るが、 $10^{-6.2}$ と $10^{-5.8}$ [/m/sr]に極大値が存在した。 α_p は約 $10^{-4.5}$ から 10^{-3} [/m]の間に分布していたが、特に頻度の大きかったのは $10^{-4.5}$ から $10^{-4.1}$ の間であった。 δ_p は3%と2%の値で極大を示しており、異なる集合の存在を示していた。また、 S_p は約18srと70srで極大を示していた。

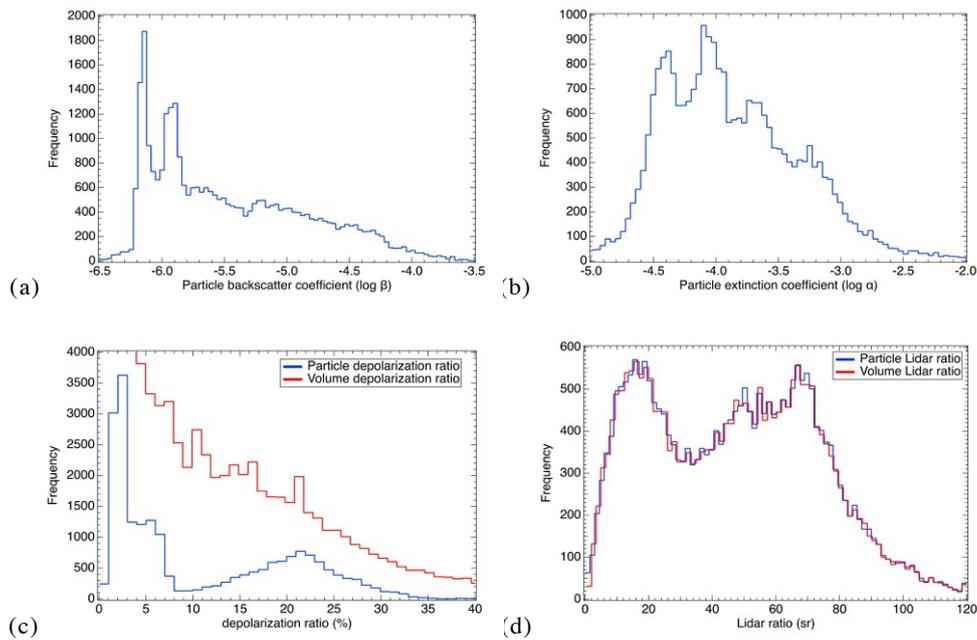


Fig.3 (a) Frequency distribution of particle extinction coefficient on the same day as in Fig.1. (b) Same as (a) but for particle backscatter coefficient. (c) Same as (a) but for particle depolarization ratio. (d) Same as (a) but for particle Lidar ratio.

3.3 ライダ比-粒子偏光解消度の同時解析による粒子タイプ識別

3つの領域 part1、part2、part3 について、偏光解消度とライダ比のそれぞれの領域の平均値と分散を見積もった。ライダ比-偏光解消度の図を Fig.4 を示す。

Part1 の領域では、 β_p 、 α_p 、 δ_p の3つのパラメータが観測から得られていた。この層より上層では完全減衰は起きず、周囲よりはやや消散係数が大きく(Fig.1)、また δ_p は3%程度の小さい値を示し、 S_p は50程度であり、大気汚染物質であると考えられる²⁾。

次に、Part2 の領域では、 δ_p と S_p の平均値はそれぞれ26.5%、11.5srであった。なおこの一部の領域に対応した δ_v と S_v は22.5%と12.5srであった。理論計算との比較から、 δ_p と S_p からこの領域の氷粒子は3次元ランダムな配向の column か Bullet であると推定された³⁻⁴⁾。

Part3 では、多くの領域で δ_p と S_p が得られていなかった。一部で取得可能だった δ_p と S_p は、それぞれ 6.5% と 1.5sr であった。なお、 δ_v と S_v はそれぞれ 6% と 10.5sr であった。これから、2次元に配向した板状氷粒子(2D-plate)と2次元に配向した六角柱形状の氷粒子(2D-column)の混合が示唆される。それ以外の大多数の領域では信号強度が大きく、また δ_p が非常に小さいため、2D-plate の存在が強く示唆された³⁻⁴⁾。

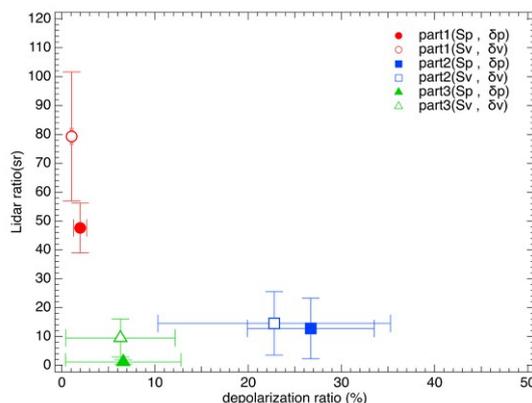


Fig.4 Relation between lidar ratio and depolarization ratio at 355nm on September 12, 2021.

5. まとめ

本研究では、ライダ比と粒子偏光解消度の関係を中心に粒子タイプの識別が可能であることが示唆された。また、ノイズ等の影響で、十分な精度が確保できなかった領域に関しては、ライダ比を使うことなく後方散乱強度や偏光解消度から氷粒子タイプ識別を行い、その結果は、その領域で一部ライダ比と粒子偏光解消度が得られていた領域の氷粒子識別結果と整合的であった。このことから、得られる観測量を利用することで、粒子識別が可能となる領域を拡張できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Y, Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato and H. Okamoto: Development of a 355-nm high-spectral resolution lidar using a scanning Michelson interferometer for aerosol profile measurement, 28, 16, 2020 Opt. Express
- 2) A. J. Illingworth, et al., The EarthCARE satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation, Bull. Am. Meteorol. Soc. 96(8), 1311-1332, 2015.3)
- 3) H. Okamoto., K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova: Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using space-borne high-spectral-resolution polarization lidar, Opt. Express 27(25), 36587-36600, 2019.
- 4) H. Okamoto., K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova: Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications: Opt. Express 28(20), 29178-29191, 2020