

高スペクトル分解ライダーによる

エアロゾル・雲のライダー比と偏光解消度の解析

北原 拓¹, 岡本 創¹, 片桐 秀一郎¹, 佐藤 可織¹,
杉本 伸夫², 西澤 智明², 神 慶考², 工藤 玲³

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

²国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

³気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

Analysis of lidar ratio and depolarization ratio for aerosols and cloud using High Spectral Resolution Lidar

Taku KITAHARA¹, Hajime OKAMOTO¹, Shuichiro KATAGIRI¹, Kaori SATO¹
Nobuo SUGIMOTO², Tomoaki NISHIZAWA², Yoshitaka JIN², and Rei KUDO³

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

²NIES, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

³MRI, JMA, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

Abstract: We analyzed the lidar ratio and depolarization ratio at 532nm and 355nm wavelength by using High Spectral Resolution Lidar (HSRL) and Raman lidar, respectively. Relationship between lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds were examined at 532nm. Lidar ratio of ice at 532nm ranged from 10 to 20 and the corresponding depolarization ratio were about 50%. Color ratio of attenuated of backscattering coefficient defined as $\beta_{att}(532nm)/\beta_{att}(355)$ and that of depolarization ratio defined as $dep.(532nm)/dep.(355nm)$ were also examined. Both ratios showed the strong wavelength dependence, i.e., the former ratios exceeded about 2 and the latter were populated in 1.4 to 1.6. Wavelength dependence of lidar ratio and depolarization ratio of aerosols and water clouds were also found.

Key Words: lidar, aerosol, lidar ratio, depolarization ratio, HSRL

1. はじめに

高スペクトル分解ライダー (HSRL) やラマンライダーは、仮定なしに後方散乱係数と消散係数の直接抽出が可能であり、雲やエアロゾルの物理特性を解析する上で大きな期待が寄せられている。国立環境研究所では、高スペクトル分解ライダーや¹⁾、また多波長のラマンライダーを開発し、国内数ヶ所で観測を実施し、エアロゾルの成分ごとの物理特性抽出を行っている²⁾。エアロゾルに対するこれらの解析事例と比較すると氷粒子のライダー比と偏光解消度の関係や、それらの波長依存性について解析した例は少ない。

2018年度には日欧共同衛星計画 EarthCARE の打ち上げが予定されており、そこでは初めてとなる波長 355nm の高スペクトル分解ライダー観測が行われる。これらの衛星解析を実施する上で、地上において、波長 355nm の高スペクトル分解ライ

ダーの観測量と粒子特性の関係や波長 532nm と波長 355nm の違いについて知見を得る事は重要である。本研究では波長 532nm を用いる高スペクトル分解能ライダーと、波長 355nm のラマンライダーを組み合わせた観測を行い、氷雲、水雲そしてエアロゾルごとに分類した解析を実施した。

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章ではまず波長 532nm における氷粒子のライダー比と偏光解消度の解析結果を示す。また氷雲の二波長の減衰後方散乱係数と偏光解消度の波長依存性についても解析を行った。次にエアロゾルと水雲に関しては二波長でライダー比と偏光解消度の波長依存性について調べた結果について記述した。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

つくば市における環境研の高スペクトル分解

能ライダー(532nm)とラマンライダー(355nm)を用いた観測データを本研究では使用した。このデータは後方散乱係数[/m/sr], 消散係数[/m], 偏光解消度[%]を含んでおり, これらの値から氷雲ではライダー比と偏光解消度の関係および後方散乱係数の Color Ratio と偏光解消度の Color Ratio の関係を, エアロゾルと水雲では偏光解消度の関係および後方散乱係数の関係を推定した。氷雲は 2016 年 9 月 1 日と 15 日のデータを, エアロゾルでは 9 月 1 日, 2 日と 16 日のデータを, 水雲の解析では 9 月 3 日のデータを使用した。

エアロゾルと雲域の識別には, 衛星ライダー CALIPSO 用に開発された Ku-mask を改良して適用した³⁾。水雲と氷の識別には偏光解消度と温度の情報を利用した。

3. 結果とグラフ

3-1 氷粒子解析

波長 532nm における氷雲の後方散乱係数, 消散係数, そして偏光解消度の解析を行った(Fig.1)。高度 10km 付近に存在する氷雲の消散係数は 0.001[/m]程度で, 偏光解消度は 50-60%と大きい値を示していた。これから消散係数と後方散乱係数の比で定義されるライダー比と偏光解消度の関係を解析した(Fig.2)。ライダー比は約 10 から 40[sr]までの値を取るが, 10 から 20 の範囲内にほとんどのものが集まっていた。偏光解消度の値は 40%から 60%の値であった。ライダー比と偏光解消度の間に明確な関係は見いだせなかった。

次に氷雲に対して, 波長 532nm と 355nm の間の減衰後方散乱係数と偏光解消度の関係を解析した。ここで減衰後方散乱係数 β_{att} のカラー比 $\chi(B)$ と偏光解消度の波長依存性 $\chi(\delta)$ を, 以下の式(1)で定義した。

$$\begin{aligned} \chi(B) &= \beta_{att}(532nm)/\beta_{att}(355nm), \\ \chi(\delta) &= \delta(532nm)/\delta(355nm). \end{aligned} \quad (1)$$

氷雲の $\chi(B)$ は 2 から 3 の間の値で, $\chi(\delta)$ は 1.2~2.0 の値をとることがわかった。消散係数が波長にほぼ依存しないとすると氷雲の後方散乱係数は波長が長い方が大きく, 偏光解消度も同様の傾向がある事を示していることになる (Fig.3)。

氷雲の偏光解消度の高度-時間断面の解析から雲域全域で 532nm の値が 355nm の値より大きい値である事がわかる。さらに $\chi(B)$ と $\chi(\delta)$ の間にも関係が見て取れる(Fig.2(b), Fig.4)。 $\chi(\delta)$ が大きくなると $\chi(B)$ が大きくなる傾向があった。これらの関係は氷粒子の形状, 配向やサイズ等の微物理特性を反映していると考えられ, 放射特性がこれらの粒子特性に強く依存数事を考えると重要な指標になり得る。今回は波長 355nm においてラマンチャンネルにノイズが大きくライダー比の波長依存性の解析ができなかったが, 今後これらの値が観測から得られればさらに氷粒子の微物理特性に言及できると考え

る。

3-2 エアロゾル解析

二波長におけるエアロゾルの後方散乱係数, 偏光解消度, ライダー比の解析を行った(Fig.5)。二波長でのエアロゾルのライダー比と偏光解消度との関係を Fig.6 に示した。エアロゾルではライダー比は 40 から 60 の値であり, 偏光解消度は 10%以下であった。

3-3 水雲解析

二波長での水雲の後方散乱係数, 偏光解消度, ライダー比の高度時間断面を Fig.7 に示した。ライダー比は 10 から 20 程度の値で, 波長による違いは明確には見られなかった。偏光解消度は波長 355nm の方がやや小さい傾向を示していた。

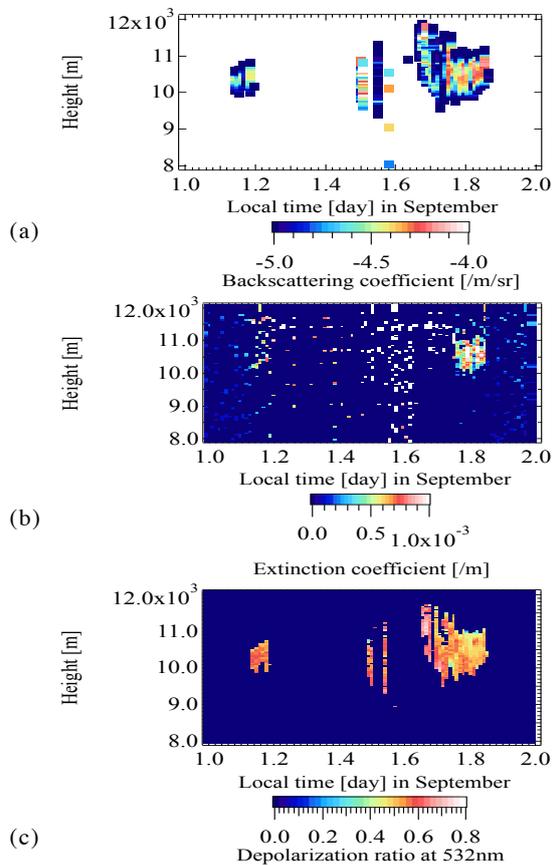


Fig.1 (a) Time-height cross section of backscattering coefficient of ice clouds at 532nm by HSRL. (b) Same as (a) but for extinction coefficient. (c) Same as (a) but for depolarization ratio.

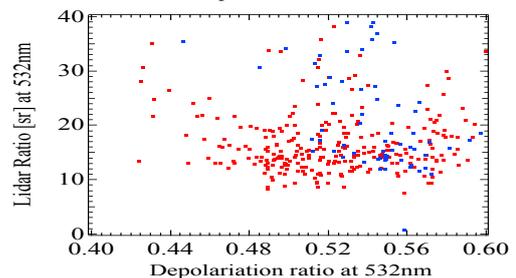


Fig.2 Relationship of lidar Ratio and depolarization ratio of ice clouds at 532nm. Red color denotes data on 1 September, 2016 and blue denotes 15 September 15, 2016.

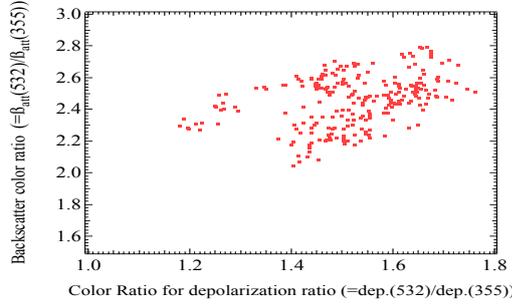


Fig.3 Relationship of backscatter color ratio χ (β) and color ratio of depolarization ratio χ (δ) of ice clouds at 532nm.

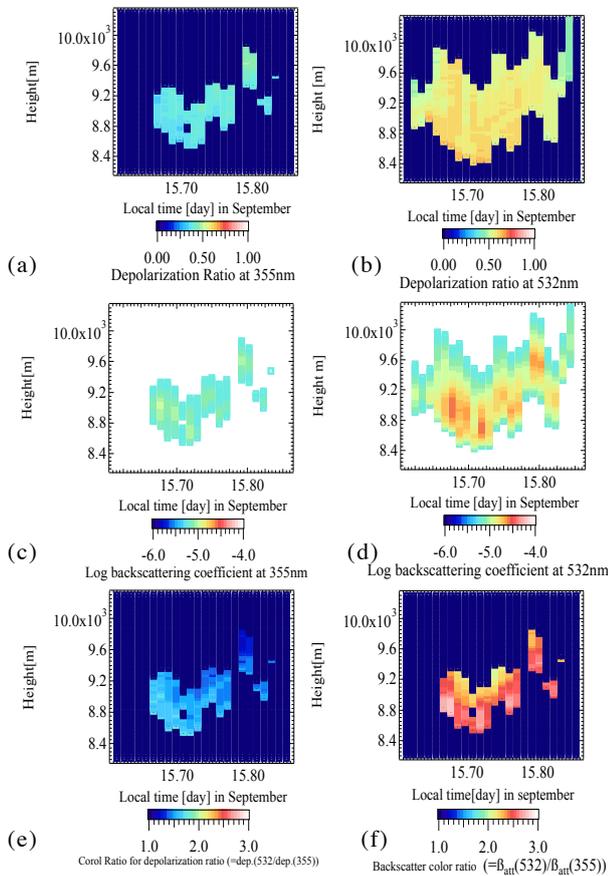


Fig.4 (a) Time-height cross section of depolarization of ice clouds at 355nm.(b) Same as (a) but for 532nm. (c) Time-height cross section of backscattering coefficient at 355nm. (d) Same as (c) but for 532nm. (e) Time-height cross section of ratio of depolarization ratio χ (δ). (f) same as (d) but for backscattering color ratio χ (β).

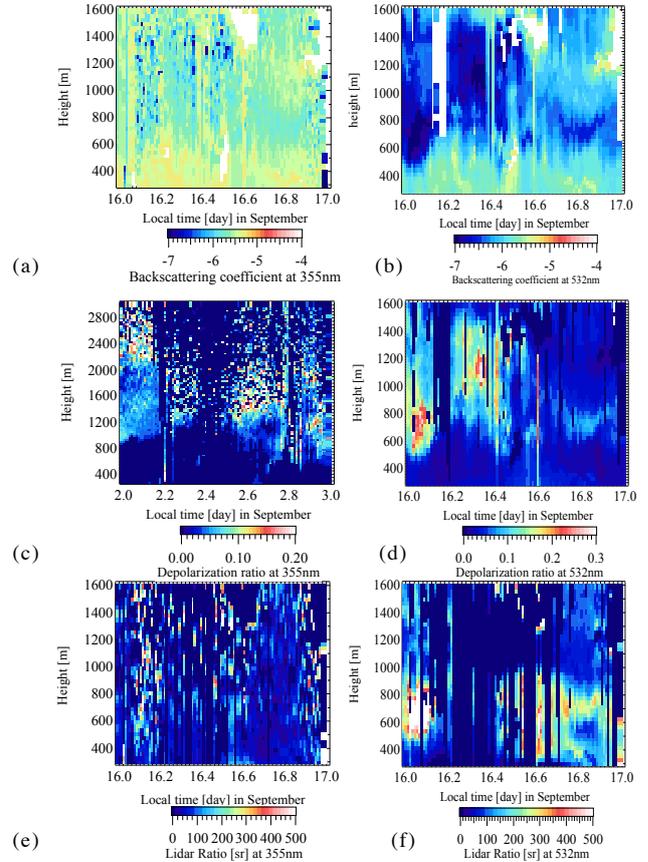


Fig.5 (a) Time-height cross section of backscattering coefficient of aerosols at 355nm. (b) Same as (a) but for 532nm. (c) Time-height cross section of depolarization ratio of aerosols at 355nm. (d) Same as (c) but for 532nm. (e) Time-height cross section of lidar ratio of aerosols at 355nm. (f) same as (e) but for 532nm.

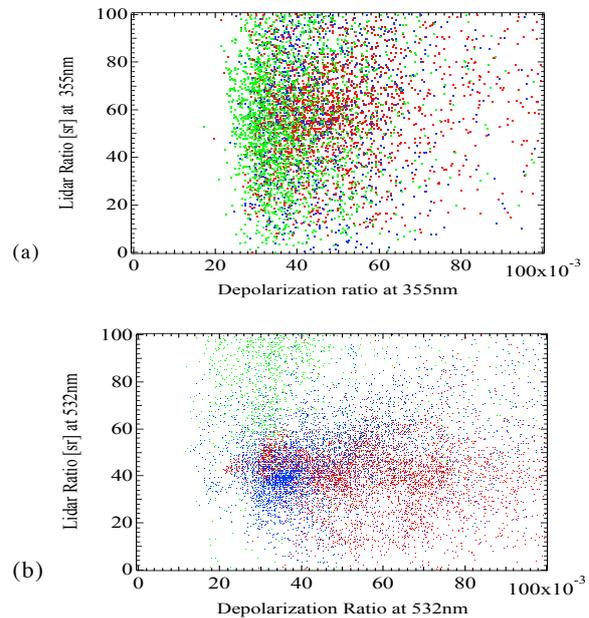


Fig.6 (a) Relationship of lidar Ratio and depolarization ratio of aerosols at 355nm. Red, blue and green colors denote 1, 2 and 16 September, 2016, respectively. (b) Same as (a) but for 532nm.

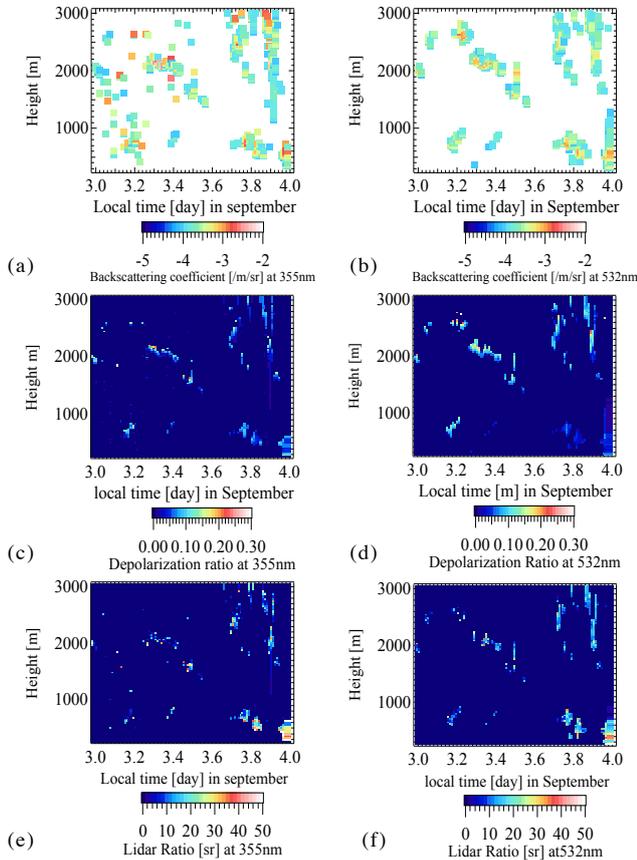


Fig.7 (a) Time-height cross section of backscattering coefficient of water clouds at 355nm. (b) Same as (a) but for 532nm. (c) Time-height cross section of depolarization ratio of water clouds at 355nm. (d) Same as (c) but for 532nm. (e) time-height cross section of lidar ratio of water clouds at 355nm. (f) same as (e) but for 532nm.

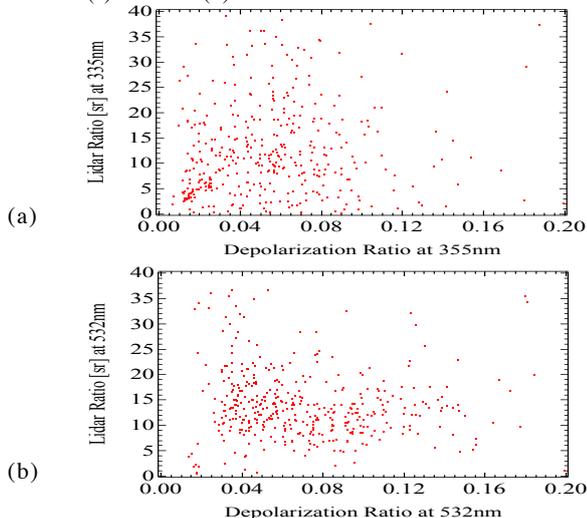


Fig.8 (a) Relationship of lidar Ratio and depolarization ratio of water clouds at 355nm on 1 September 2016. (b) Same as (a) but for 532nm.

4. まとめと今後の展望

波長 532nm の高スペクトル分解ライダーと波長 355nm のラマンライダーを組み合わせた解析を実施した。氷粒子のライダー比と偏光解消度の関係を導いた。また氷粒子の減衰後方散乱特性と偏光解消度には明確な波長依存性があることが示された。この事はこれらの観測が氷粒子形状や配向等についての重要な情報を与える事となりうる。エアロゾルのライダー比や偏光解消度の波長依存性も明確に示すことができた。

水雲に関しては偏光解消度のみに波長依存性が見られたが、ライダー比の波長依存性は明確ではなかった。

EarthCARE 衛星には 355nm の波長を持つ高スペクトル分解ライダーが搭載予定であり、本研究の知見はアルゴリズム開発やデータの解釈に有効であると期待される。今後は同様の解析を、期間を拡張して実施し、また理論的解析との比較から粒子の微物理特性解析も実施する予定である。

5. 参考文献

- 1) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov, and H. Okamoto, Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar measurements, *IEEE Trans. Geosci. Rem Sens* 46, 4094-103 (2008).
- 2) T. Nishizawa et al: Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components, *J. Quant Spectroscop Radiat Transf* 188 79-93, (2017).
- 3) Y. Hagihara, H. Okamoto, and R. Yoshida (2010), Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.

謝辞

本研究は科研費 JP17H06139,JP15K7762 の助成を受けたものです。