

パーティクル偏光ライダーによる降水粒子の分類と粒径計測

柴田 泰邦, 佐藤 諒典
東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Classification and size distribution measurement of precipitation particles by particle polarization lidar

Yasukuni SHIBATA, Ryosuke SATO
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We proposed a particle polarization lidar that classifies raindrops and snowflakes based on polarization information of individual precipitation particles. Individual precipitation particles are detected with a lidar signal with a single pulse and are classified into raindrops and snowflakes using the depolarization ratio of each particle. In this paper, we propose an estimation algorithm for particle size distribution. Particle polarization lidar measurements were performed at Tokyo Metropolitan University on 10 February 2022. We report the relationship between depolarization ratio and particle size and the vertical distribution of raindrops and snowflakes.

Key Words: Lidar measurement, Snow, Snowfall, Size distribution

1. はじめに

降雪の測定は気象学や降水物理学, 防災や減災において重要なテーマで, 主に雲中の降水粒子を識別するための X バンド (波長約 3 cm) や K バンド (波長約 1 cm) を利用する二重偏波ライダーが提案されている¹⁾. これらのライダーは水平偏波と垂直偏波電波を同時に放射し, 水平成分と垂直成分の反射係数の比率によって降水粒子の形状とサイズを推定する. また水平成分と垂直成分の位相差から時間降雨 (降雪) 量を推定する. しかし, 様々な種類 (雨滴, 雪片, 霰など) の降水粒子がビーム体積内に混在すると, レーダパラメータから降水粒子の種類, サイズ, 降水 (降雪) 量を推定することが困難になる.

そこで, 個々の降水粒子の偏光情報から雨滴と雪片を分類する新しい粒子偏光ライダー (Particle polarization lidar: PPL) を開発した^{2,3)}. 球状粒子は偏光状態を維持し, 非球状粒子は偏光解消を引き起こす. これまでの研究では, 偏光解消度 δ は降雨域では 0.1 以下, 降雪域では 0.4~0.5 程度, 融雪域では~0.7 であることが示されている⁴⁻⁶⁾. したがって, PPL は雲底下の個々の降水粒子の δ を測定することで, 粒子高度とその種類を推定することができる. PPL は個々の降水粒子を計測するので, 二重偏波ライダーとは異なり, 雨滴と雪片が混在していても分類が可能である.

今回, 降水粒子からのライダーエコー強度が粒径に依存することを利用して, 粒径を推定するアルゴリズムを新たに開発した. 2022 年 2 月 10 日の降雪時に東京都立大学で測定した粒子種別 (雨滴, 乾いた雪片, 湿った雪片) ごとの垂直分布, δ と粒子サイズの関係, 粒径分布について報告する.

2. 粒子偏光ライダー (PPL)

Fig. 1 に PPL のシステムブロック図を, Table 1 にシステムパラメータを示す. LD 励起 Nd:YAG レーザー (CNI, DPS-1064, 1064 nm, 10 mJ) のビーム拡がり角を 0.1 mrad に調整し, 直径 10 mm のパルスビームを大気に放出する. パルス幅は 10 ns で, 距離分解能 1.5 m に相当する. 降水粒子がレーザービームを横切るよう, PPL は仰角 42° に傾け, 降水粒子の落下速度を考慮してパルス繰り返しは 2 Hz に設定した. ライダーエコーは, 直径 50.8 mm の屈折望遠鏡によって集光され, 偏光プリズム (PBS) によって水平偏光と垂直偏光に分離される. 各偏光信号は, アバランシェフォトダイオード (APD; Hamamatsu S11519) によって受光され, 14 ビット AD コンバーターによって 1 ショットごとに記録される.

3. 粒径の推定

降水粒子からのエコーを含むライダー信号 $P_{PP}(r)$ は次式で表される.

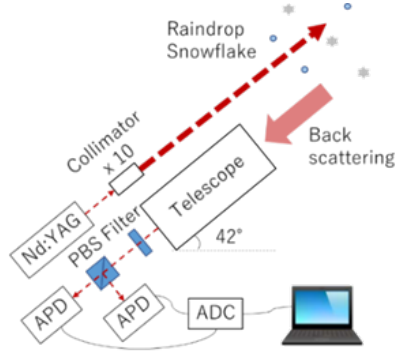


Fig. 1. Block diagram of the PPL.

Table 1. System parameters of the PPL.

Laser wavelength	1064 nm
Pulse width	10 ns
Range resolution Δr	1.5 m
Elevation angle θ_E	42 deg.
Particle reflectance ρ_s	0.05 (Snowflake) 0.02 (Raindrop)
Laser beam diameter d_0	ϕ 10.0 mm
Beam divergence θ	0.1 mrad
Telescope diameter	ϕ 75.0 mm
Field of View	5.0 mrad

$$P_{PP}(r) = P_0 C \frac{A}{r^2} \left[\beta_{air}(r) + \frac{\rho_{PP}(r)}{\pi} \right] \Delta r O(r) \exp \left[-2 \left\{ \int_0^r \alpha(r') dr' + \frac{1}{\Delta r} \sum_{k=0}^r \rho_{PP}(R) \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 r は距離、 P_0 はパルス出力、 C はシステム係数、 A は望遠鏡面積、 β_{air} は大気後方散乱係数、 ρ_{PP} はレーザービーム体積 $V_L(r)$ 中の降水粒子数 k の反射率、 Δr は距離分解能、 $O(r)$ はオーバーラップ関数である。 $V_L(r)$ はビームスポット面積 $A_L(r)$ を用いて $\Delta r A_L(r)$ となる。 ρ_{PP} は以下の式で表せる。

$$\rho_{PP}(r) = \sum_{i=1}^k \Delta r \rho_{s,i} \frac{Q_{ext} \pi D_{PP,i}^2}{4V_L(r)} \quad (2)$$

ここで、 ρ_s は単一降水粒子の反射率、 Q_{ext} は消光率、 D_{PP} は粒子サイズである。

降水粒子が無い位置からのライダー信号 $P(r)$ は、式(1)の $\rho_{PP}(r)$ が 0 となる。 $V_L(r)$ 内に単一の降水粒子しか存在しない場合、 $P_{PP}(r)$ と $P(r)$ の比は次式で表せる。

$$\frac{P_{PP}(r)}{P(r)} = 1 + \frac{1}{\beta_{air}(r)} \frac{\rho_{PP}(r)}{\pi} = 1 + \frac{\rho_s Q_{ext} D_{PP}^2}{4\beta_{air}(r) A_L(r)} \quad (3)$$

よって、 D_{PP} は粒子エコーのあるライダー信号と、その直前(直後)のパルスの粒子エコーのないライダー信号との比 $P_{PP}(r)/P(r)$ から求めることができる。

4. PPL 観測結果

2022年2月10日の11:20から11:44まで、東京都立大学日野キャンパスでPPL観測を行った。観測期間中の外気温は1.4°Cで、雪主体ながら数分おきに曇り変わった。雲底高度は約300mであり、PPLでは地上と雲底間の降水粒子が観測された。Fig. 2に δ と D_{PP} の相関を示す。雪片と雨滴の反射率 ρ_s は、粒子サイズに関係なくそれぞれ0.05と0.02とした^{7,8)}。雨滴や雪片はレーザー波長1064nmよりも十分に大きい粒子であり、Mie理論によって $Q_{ext}=2$ となる。また、バックグラウンドのエアロゾルは、降水によって洗い流されるので、大気散乱はレイリー散乱のみと仮定した。 δ が0.2以下の粒子(雨滴)の D_{PP} は1mm程度だった。また、 δ が0.6以上の粒子の場合、 D_{PP} は数mmから数十mmまで変化した。一般に、-5°C以上になると雪の結晶は接触することで巨大な雪片に変化する⁵⁾。これらは「湿った雪片」として分類される。一方、 δ が0.3~0.6程度の D_{PP} は数mm程度だった。この雪片は液体含有量が少ないため、単結晶の「乾いた雪片」に分類される。Table 1より、ビーム拡がり角が0.1mrad、仰角が42°であるため、ビーム径は高度100m(距離135m)で23mm、高度200m(距離270m)で37mmとなる。ほとんどの検出粒子の D_{PP} はビーム径よりも小さいが、湿った雪片の一部は、ビームの直径よりも大きくなった。理由として、これらの雪片の反射率 ρ_s が0.05より大きい可能性がある。

Fig. 3に降水粒子の粒径分布を示す。前述のように、雨滴は主に2mm未満の粒径(平均粒径0.8mm)、乾いた雪片の粒径は主に数mm(平均粒径2.5mm)で、湿った雪片の直径は数mmから20mmであった。湿った雪片は形状が複雑なため、レーザービームが粒子の長軸方向か短軸方向のどこに当たるかによって、推定粒径に幅が出たと考えられる。

Fig. 4に、雨滴、乾いた雪片、湿った雪片の高さ分布を示す。湿った雪片が多く検出され、時々雨滴が混ざっていた。これは実際の降水状況とよく一致した。また、雨滴が時間とともに降下している様子が観測され、平均落下速度は約3.8m/sと算出された。雨滴の平均粒径は0.8mmで、理論上の落下速度4.2m/sとよく一致した。

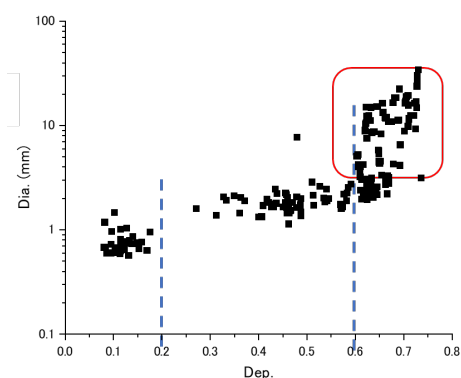


Fig. 2. Correlation between δ and D_{PP} .

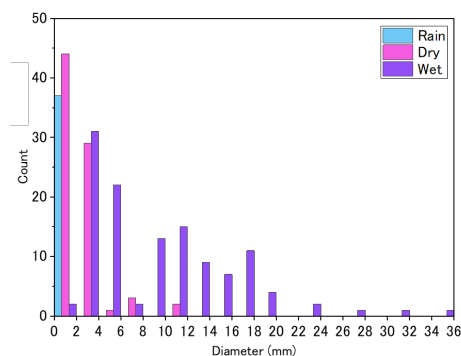


Fig. 3. Variation of the size distribution

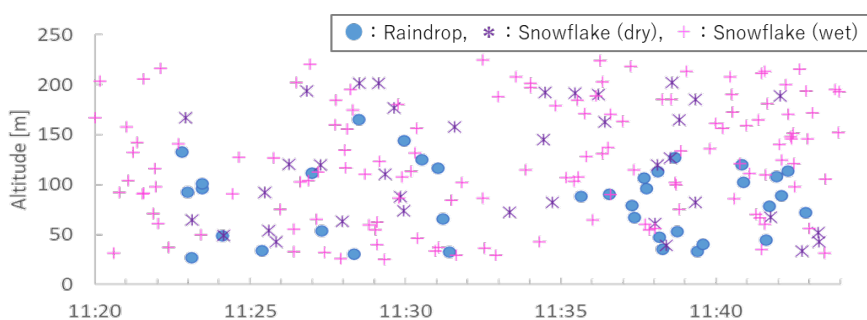


Fig. 4. Classification distribution of raindrops and snowflakes.

5. まとめ

個々の降水粒子を雨滴または雪片に分類する粒子偏光ライダー (PPL) が開発された。粒子エコー信号強度が粒子サイズに依存することを利用して、粒径を計測する手法を新たに提案した。2022年2月10日の降雪時に24分間のPPL観測を実施し、偏光解消度 δ と粒子サイズ分布から、雨滴、乾いた雪片、湿った雪片(溶融雪片を含む)に分類できることを明らかにした。雨滴と乾いた雪片の平均粒径は0.8 mmと2.5 mmでばらつきは小さいが、湿った雪片は形状が複雑なため、粒径が数 mm から 20mm 程度まで幅があることが示された。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 JP19K22030 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) S. Allabakash, et. al.: J. Atmos. Ocean. Technol., **36** (2019) 1217-1235.
- 2) 柴田泰邦：第39回レーザセンシングシンポジウム(2021) 34-35.
- 3) Y. Shibata: Appl. Opt., **61** (2022) 1856-1862.
- 4) S. R. Pal, et. al.: J. Appl. Meteorol. Climatol., **16** (1977) 70-80.
- 5) N. Saito, et. al.: Appl. Phys., **54** (1985) 952-958 (in Japanese).
- 6) K. Sassen: Nature, **255** (1975) 316-318.
- 7) A. Macke, et. al.: J. Quant. Spectrosc. Radiat., **60** (1998) 355-363.
- 8) G. Roy, et. al.: Appl. Opt., **59** (2020) 7660-7669.