

パーティクル偏光ライダーによる降水・降雪観測

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)

Observation of Precipitation and Snowfall Using Particle Polarization Lidar

Yasukuni SHIBATA, Ryosuke SATO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We developed a Particle Polarization Lidar (PPL) to identify raindrops and snowflakes based on their individual polarization information. Existing dual-polarization radars can estimate particle size and discriminate precipitation types, but difficulties arise in accurately estimating the $Z-R$ relationship during snowfall and when multiple particle types coexist. PPL measures scattering intensity and polarization from individual particles, enabling classification and size measurements even in mixed precipitation. During PPL observations on February 10, 2023, at Tokyo Metropolitan University, dry snowflakes dominated until 3 PM, then transitioned to "sleet" and eventually raindrops. The observations matched well with temperature changes, indicating a melting layer at 250-300 m altitude. PPL's targeted particle approach excels in classifying mixed precipitation regions and precisely identifying the melting layer height.

Key Words: Polarization lidar, snowflake, raindrop, melting layer

1. はじめに

我々は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^{1,2)}。現在、Fig.1(a)に示す X バンド (波長約 3 cm) や K バンド (波長約 1 cm) の電波を利用する二重偏波レーダーによって、降水粒子判別とサイズの推定がなされている³⁾。レーダー反射率 (Z) と降雨率 (R) の関係は $Z = aR^b$ で関係づけられ、係数 a, b は過去の観測データから統計解析によって決定される。しかし、観測値や気象条件に合わせたパラメータ調整が必要であるだけでなく、降雪時は粒子の密度やサイズのばらつきが雨滴に比べて大きいため、 $Z-R$ 関係を正確に推定することが難しい。さらに、レーダーサンプリングボリューム内に複数の種類の降水粒子が共存する場合、 $Z-R$ 関係の推定が困難となる問題がある。一方、Fig.1(b)に示すように、PPL は個々の降水粒子からの散乱光強度と偏光情報を計測するので、雨滴と雪片が混在していても分類と粒径計測が可能である。

今回は 2023 年 2 月 10 日の降雪時に、東京都立大日野キャンパスにおいて PPL 観測を行った。当日は 15 時頃まで降雪していたが、その後、雨に変わった。降水粒子タイプ別の時間-高度断面とともに、降雨時に観測された融解層について報告する。

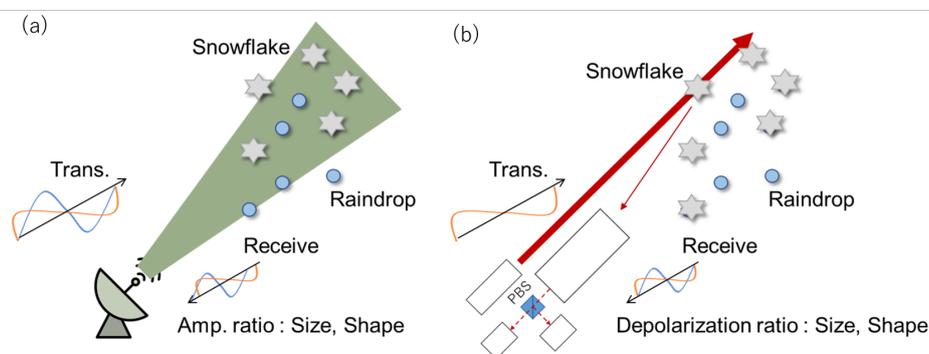


Fig.1 (a) Schematic diagram of the dual-polarized radar. (b) Schematic diagram of the particle polarization lidar.

2. 粒子偏光ライダー (PPL) 観測結果

PPLは、LD励起 Nd:YAG レーザー (CNI, DPS-1064, 1064 nm, 30 mJ, 2 Hz)を光源とし、散乱光を直径 50.8 mm の屈折望遠鏡によって集光し、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た後、アバランシェフォトダイオード (APD; Hamamatsu S11519)で受光する。送信光はビーム拡がり角を 0.1 mrad に調整し、直径 10 mm で大気に放出される。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° に傾けている。各偏光信号は 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。降水粒子判別は、偏光解消度 δ が0.2以下を雨滴、0.2~0.6を乾いた雪片、0.6以上を湿った雪片 (いわゆるボタン雪や融雪粒子) とした。なお、粒径 10 μ m 前後の雪片については、実験的に偏光解消度を計測することで、降水粒子判別指標の尤もらしさを確認している。詳細は本予稿集の佐藤、柴田の予稿を参照されたい⁴⁾。

PPL観測は、東京都立大学日野キャンパス (海拔高度 113 m) において降雪があった 2023 年 2 月 10 日の日中に行われた。Fig.2 に地上に設置した気温計による気温分布を示す。Fig.3(a) に距離二乗補正信号の時間-高度断面図を、(b) に降水粒子タイプ別の時間-高度断面図をそれぞれ示す。PPL の解析対象高度範囲は、降水粒子エコーが飽和しない高度 143 m (地上高 30m) 以上としている。高度 220 m (地上高 107 m) 前後に雲があり、その下の領域で降水粒子エコーが観測されている。Fig.2 から地上気温は 12 時頃まで氷点下であったが、その後 0.2 度前後で推移している。Fig.3(b) から、15 時前まで降水のほとんどが乾いた雪片であったが、湿った雪片が徐々に混ざり始め、16 時前から雨と雪が混在するみぞれに変わり、17 時前からは雨に変わっている様子が示されている。また、17 時頃から高度 220 m 付近の雲が取れ、高度 400 m 付近まで降水粒子が観測されている。高度 300 m 以上は雪片、高度 250~300m は雨滴と雪片が混在、高度 250 m 以下は雨滴であることから、PPL によって高度 250~300m に融解層があることが示唆された。

これを裏付けるため、気象庁メソ数値予報モデル(MSM)から指定気圧面の気温を入手した。Fig.4 に関東南部における MSM の 12JST、15JST、18JST における 1000 hPa と 975 hPa の気温を示す。各図において都立大の位置を赤点で示し、都立大上空におけるジオポテンシャル高度 (gpm) を記した。今回のライダー観測領域において、ジオポテンシャル高度と海拔高度は同じとみなせる。12JST では 1000 hPa (200 gpm)、975 hPa (400 gpm) とも都立大上空で-1.5°C以下と、乾いた雪片が降雪する条件となっており PPL 観測結果と一致する。15JST になると気温が上昇し、1000 hPa (165 gpm) では都立大上空でほぼ 0°Cとなり、地上気温との差はほとんどなくなっていた。18JST では 1000 hPa (140 gpm) では 0.5°Cと雨になる条件だったが、975 hPa (340 gpm) では-0.5°C以下で、雪の状態を維持できる気温となっており、1000~975 hPa の気圧高度範囲に融解層がある可能性が高いことを示す。これは PPL 観測によって得られた融解層高度 (250~300 m) に一致している。以上のことから、PPL 観測によって正しく降水粒子判別ができているとともに、融解層の厚さと高度範囲を正確に特定することに成功した。

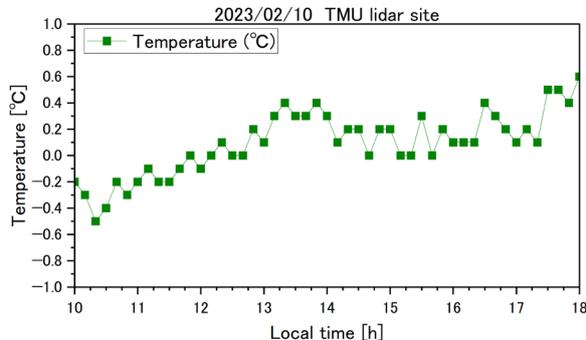


Fig.2 Air temperature at TMU lidar site.

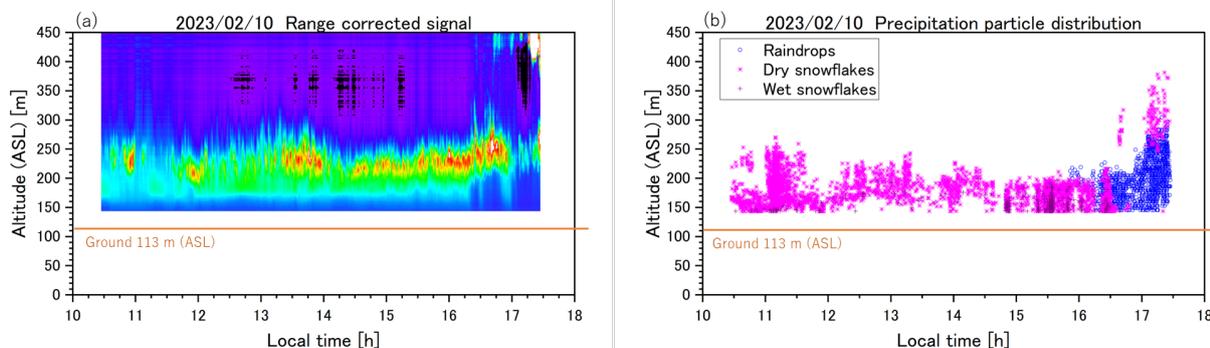


Fig.3 (a) Time-height cross-section of the range-corrected signal. (b) Distribution of raindrops and snowflakes at Hino Campus of Tokyo Metropolitan University from 10:27 to 17:28 on 10 February, 2023.

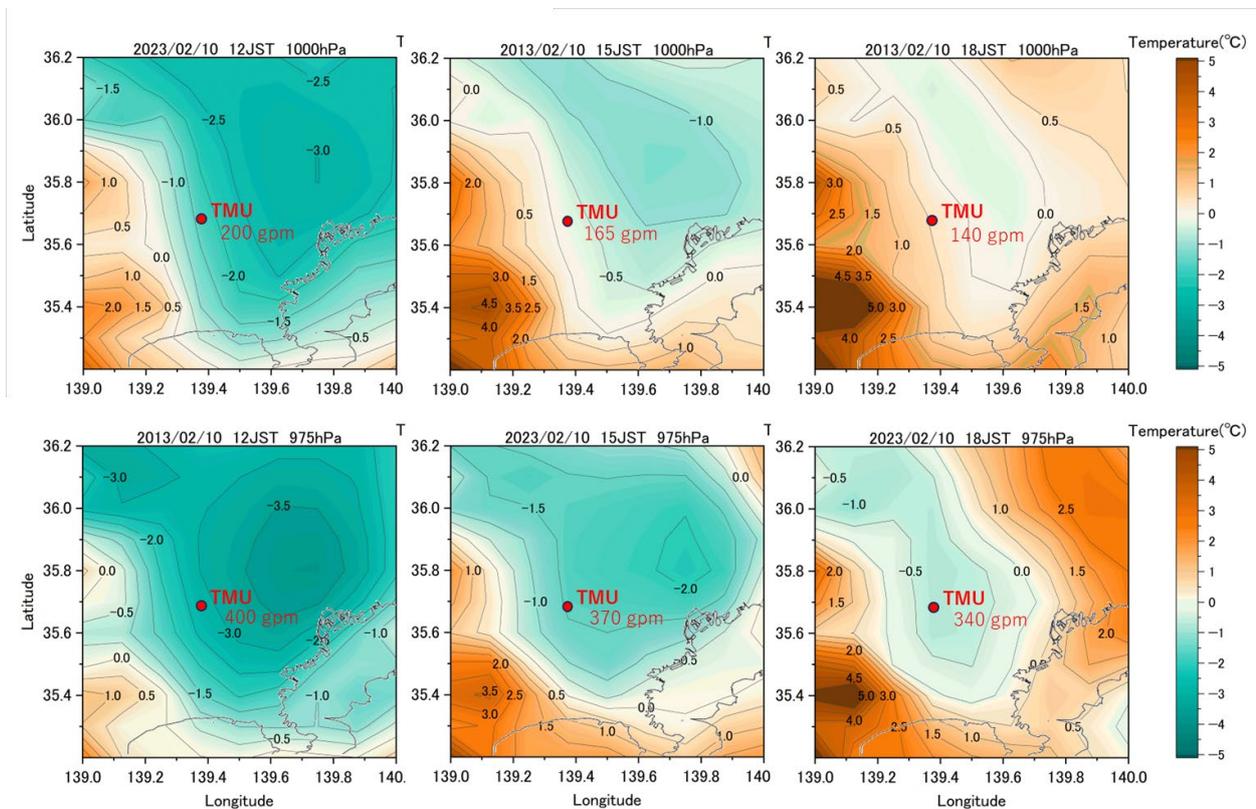


Fig.4 Temperature maps at 1000 hPa and 975 hPa pressure heights on 10 February, 2023. Geopotential heights at the Tokyo Metropolitan University (TMU) are shown in each figure.

3. まとめ

個々の降水粒子を雨滴、乾いた雪片、占めた雪片に分類する粒子偏光ライダー（PPL）により、2023年2月10日の降雪時にPPL観測を実施した。15時頃までは乾いた雪片が卓越する降雪観測され、その後、雨滴と雪片が混在する”みぞれ”から、最終的に雨に変化した。15時までは地上気温が0℃前後、1000 hPaおよび975 hPa気圧高度で氷点下だったことと良い一致を示す。15時を過ぎると上空の気温が上昇し、高度300 m付近まで降雨領域が広がった。一方、高度250 m以上では雪片も観測されており、この観測結果から高度250～300mに融解層があることが確認された。このように、PPLは個々の降水粒子をターゲットとすることで、従来の二重偏波レーダーでは困難な雨滴と雪片が混在する領域での降水粒子判別が可能であり。また、融解層高度を明瞭に把握することが可能であることを明らかにした。

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) Y. Shibata: Appl. Opt., **61** (2022) 1856-1862.
- 2) 柴田泰邦：第40回レーザセンシングシンポジウム(2022) 84-86.
- 3) S. Allabakash, et. al.: J. Atmos. Ocean. Technol., **36** (2019) 1217-1235.
- 4) 佐藤諒典、柴田泰邦：第41回レーザセンシングシンポジウム予稿集(2023).