

人工雪結晶による散乱光の偏光解消計測

佐藤 諒典, 柴田 泰邦

東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Depolarization measurement of laser light backscattered by a single artificial snowflake.

Ryosuke SATO, Yasukuni SHIBATA

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

Abstract: A particle polarization lidar (PPL) has been developed to identify the type of individual precipitation particles. The depolarization ratio δ of individual precipitation particles is necessary for identification, but the depolarization ratio of non-spherical snowflakes has not yet been theoretically or experimentally researched. It is difficult to calculate δ theoretically because the shapes and sizes of snowflakes are various. Therefore, we have developed a device that measures δ of snowflakes two-dimensionally using two CMOS cameras. Using this device, we measured the polarization information of artificial snowflakes with a size of 4 to 10 mm, and depolarization ratios were 0.6 or higher for all cases. This result good agrees with the PPL measurement and confirms the effectiveness of this device.

Key Words: Polarization lidar, polarization ratio, snowflakes, precipitation particle identification

1. はじめに

降雪による交通インフラの停止や交通事故の増加など、首都圏における降雪被害は問題となっており、効果的な雪害対策が必要である。そこで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し、その粒径を計測する新しい粒子偏光ライダー (Particle polarization lidar: PPL) を開発し、雲下の降水・降雪分布を把握することに成功した^{1,2)}。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。また、降水粒子からの散乱光強度が粒径に依存する。この原理を利用して PPL は個々の降水粒子の偏光解消度 δ と粒径を測定することで、粒子の種類 (雨滴、乾いた雪片、湿った雪片) を推定できる。これまで一般的な偏光ライダーによって、雲や降水領域の δ が計測されており、降雨域で 0.1 以下、降雪域で 0.4~0.5 程度、融雪域で~0.7 であることが示されている^{3,4)}。しかし、これらの値は観測領域の平均値であり、個々の降水粒子の δ を直接表してはいない。針状結晶や六角平板結晶をモデル化した偏光の数値解析が行われてきたが⁵⁾、実際に降雪する個々の雪片は形状や大きさが千差万別であり、理論的に偏光解消度を導出できていないのが現状である。

個々の降水粒子を対象とした計測手法として、ディストロメータがある。シート状のレーザ光を射出し、落下中の降水粒子がこのレーザ光を遮ることによる光強度の変化を検出することで、降水粒子の粒径と落下速度を測定することができるが偏光情報は取得していない。また、エアロゾル粒子が氷の核を生成する効率を測定するために、チャンパー内で水滴と氷の結晶を区別する Ice Optical DEpolarization detector (IOED) が開発された⁶⁾。407 nm レーザビームがチャンパー内に照射され、粒子から散乱光の垂直偏光と水平偏光がそれぞれ光電子増倍管 (PMT) で受光される。氷結晶ごとの偏光解消度の平均値は 0.24 ~ 0.37 の範囲であった。しかし、個々の雪片の偏光情報を直接計測した例は報告されていない。そこで、我々は雪片の判別精度と粒径計測精度を向上させるため、IOED の計測手法を応用し、人工的に生成した雪片の偏光解消度を CMOS カメラで 2 次元的に計測する装置を開発した。本講演では、開発した装置によって計測された人工雪片の偏光解消度 δ について報告する。

2. PPL による降水粒子判別と粒径計測

東京都立大学日野キャンパスで降雪があった 2022 年 2 月 10 日の 11:20 から 11:44 まで PPL 観測を行った²⁾。その結果、個々の降水粒子から得られた δ と粒径の相関図を Fig.1 に示す。

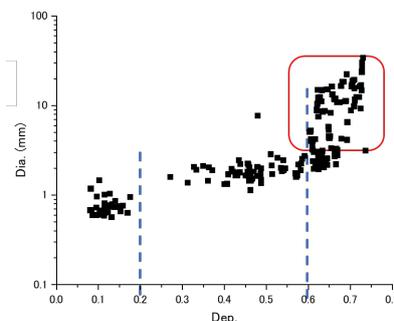


Fig.1 Correlation between δ and particle diameter.

この相関図と先行研究の降雪粒子分類評価^{3,4)}を基に、 $\delta < 0.2$ で粒径 1 mm 程度の粒子を雨滴、 $0.2 < \delta < 0.6$ で粒径数 mm 程度の粒子を乾いた雪片(単結晶)、 $\delta > 0.6$ で粒径数 mm から数十 mm の粒子を湿った雪片(いわゆるボタン雪)と判別した。一般に、 -5°C 以上になると雪の結晶は表面に水分が出て、接触することで巨大で複雑な形状の雪片に変化することが知られており⁴⁾、多様な粒径を示す要因となる。しかし、降水領域の平均的な δ は先行研究で示されているが、特に個々の雪片に関する δ の情報は少なく、粒子判別を理論的に評価するすべが現状ない。そこで実験的に個々の雪片の δ を評価できれば、判別方法精度の向上に繋がると考え、実験的に δ を測定する装置を開発した。

3. 人工雪片の偏光解消度測定

ランダムに降雪する雪片の偏光解消度を直接計測することは困難であり、時期が冬季に限定されるため、実験室で計測できるように Fig.2 に示す平松式ペットボトル人工雪発生装置を用いて人工雪片を生成した⁷⁾。水蒸気を入れたペットボトル内に釣り糸を張り、ゴム栓をして水蒸気が漏れないように密封する。発泡スチロール箱に詰めたドライアイスでペットボトルを冷やすことで、釣り糸上に氷粒が生成、それが核となり、周囲の水蒸気によって人工的に雪の結晶が生成する。Fig.3 に釣り糸上に生成した雪結晶の例を示す。画像の縦方向に釣り糸があり、その上に小さな氷結晶が無数に見える。この氷結晶を核として長さ数 mm から 1 cm 程度の放射状結晶が生成していた。ただし生成された結晶は大きく成長した単結晶であり、上空から降ってくる雪の結晶(針状や六角形の単結晶、ボタン雪など)とは若干形状が異なる。しかし、樹状に成長した結晶構造はほぼ同じであることから、この人工雪片を実際の雪片と同等と見なす。偏光計測時は発泡スチロールとペットボトルが障害とならないよう、レーザ照射兼撮影用の窓を発泡スチロールとペットボトルに開けた。また、ペットボトルを通過するレーザ光を逃がすため、反対側にも窓を開けた。なお、結晶生成時はこれらの窓に蓋をし、撮影時はこの窓から流入する暖気の影響を抑えるため、ペットボトル上部にドライアイスを置くことで人工雪片の溶解を防いだ。

続いて、雪片の偏光解消度計測装置の概略を Fig.4 に示す。ビーム径 16 mm のパルス Nd:YAG レーザ(1064nm、10Hz、0.7mJ)を 1.8 m 先に設置した人工雪片に照射する。散乱光を偏光ビームスプリッターで水平偏光成分と垂直偏光成分に分解し、2 台の CMOS カメラ (Alvium 1800 U 500C, 2592×1944 pixel, 256 階調)で撮影した。実験室内の限られた空間での計測になるが、光学系配置を調整して散乱角がなるべく 180° に近づくようにした。露光時間を 0.1s としたのでレーザパルス 1 発分の画像となり、レーザパルスご

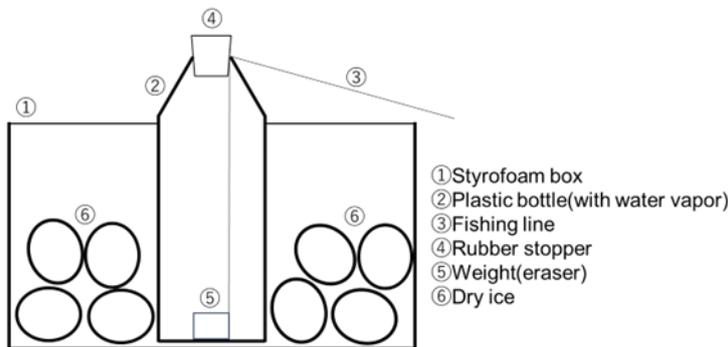


Fig.2 A schematic of the snow crystals growth chamber.

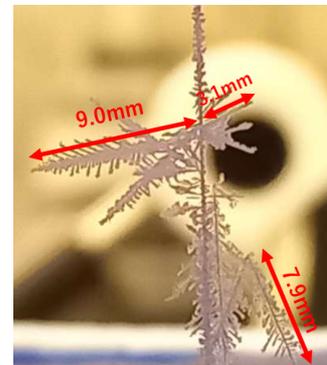


Fig.3 Snow crystals grown on the fishing line in the bottle.

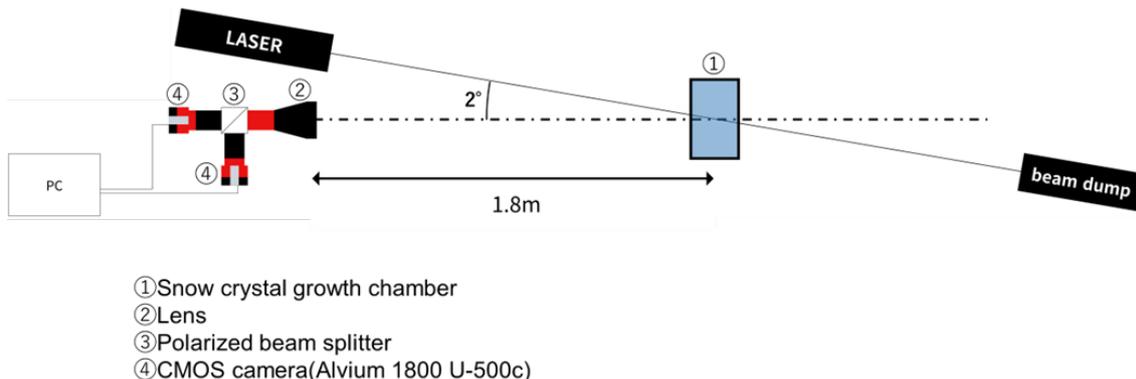


Fig.4 Experimental setup for measuring the depolarization ratio δ of artificial snows.

とにライダー信号を取得する PPL での観測と同条件である。IODE は散乱光強度のみ測定するため PMT を用いているが、我々は CMOS カメラを用いることで、人工雪片の面的な δ の評価が可能となる。したがって、Fig.3 で示した人工雪片から δ を解析する領域を自由に設定することができる。

Fig.3 の人工雪片を偏光撮影した結果を Fig.5 に示す。レーザービームの直径は 16mm で、人工雪片全体にレーザー光が照射しており、人工雪片の形状が偏光画像からも見て取れる。この画像データから偏光解消度を計算するにあたり、人工雪片からの散乱光のみを抽出するため輝度値に閾値（今回は 20）を設定した。撮影した画像から δ を計測したい領域をトリミングし、閾値を超える水平偏光成分と垂直偏光成分の画素の平均輝度値 $B_{//}$ と B_{\perp} を用い、次式から偏光解消度 δ を求めた。

$$\delta = B_{\perp} / B_{//} \quad (1)$$

Fig.5 の画像には釣り糸からの散乱光も含まれているため、Fig.6 の赤枠で示した釣り糸を含まない①～③の3ヶ所をトリミングし偏光解消度の測定を行った。それぞれの領域サイズは①：4.3mm×6.1mm (280×400 pixel)、②：2.6mm×3.8mm (170×250 pixel)、③：2.9mm×7.0mm (190×460 pixel) である。

Fig.6 の①に対応する偏光画像を Fig.7 に示す。画像には CMOS センサ自身が発する、ノイズの大きい画素が含まれていたが、ノイズの位置はランダムではなく決まった位置に現れるため画像処理で消し（画像中の黒い点）、平均輝度値の計算からは除外した。これより①における偏光解消度を求めると $\delta = 0.85$ となった。

同様に、②、③に対応する偏光画像をそれぞれ Fig.8, Fig.9 に示す。それぞれの δ の解析結果は②が 0.66、③が 0.74 であった。①～③の雪片はいずれも 3mm より大きく、Fig.2 で示した PPL 観測の結果から粒径が 3 mm を超えると δ は 0.6 以上となっており、今回の実験結果と PPL の観測結果は良い一致を示した。以上のことから、開発した人工雪片の偏光解消度計測装置は、実際の雪片の偏光解消度評価方法に代わる装置として、十分な性能を有していることが分かった。今後は、サンプル

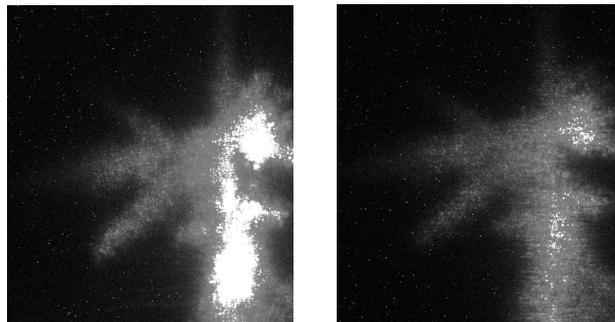


Fig.5 Polarization images of Fig.3 snow crystals (left: parallel, right: perpendicular).

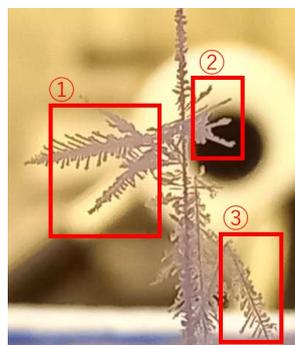


Fig.6 Polarization analysis areas (within the red frame).

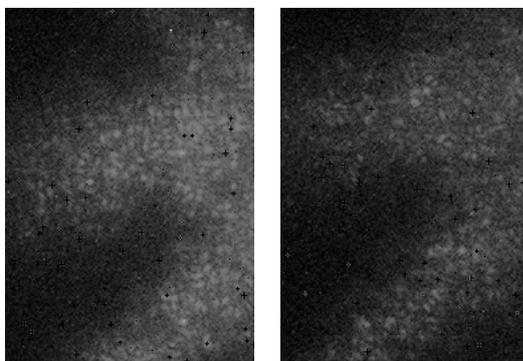


Fig.7 Polarization images of the area ① (left: parallel, right: perpendicular).

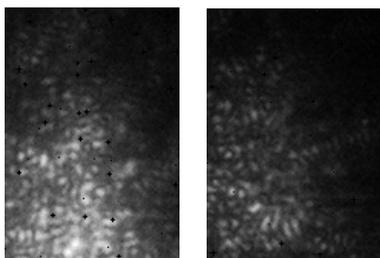


Fig.8 Polarization images of the area ② (left: parallel, right: perpendicular)

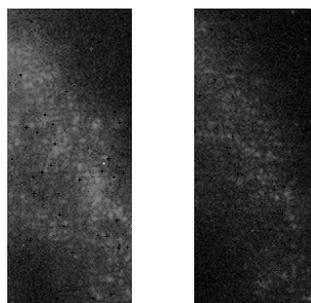


Fig.9 Polarization images of the area ③ (left: parallel, right: perpendicular).

を増やすとともに、人工雪片に対して様々な向きから δ を計測することで、個々の雪片の δ と粒径の詳細な関係を実験的に見出していく。

4. まとめ

個々の降水粒子の種類を判別する粒子偏光ライダー (PPL) は一般的な偏光ライダーが測定した時間的・空間的に平均的な偏光解消度 δ のデータを基に判別を行っている。現状、理論的に個々の雪片の δ を導出できていないため、個々の粒子からの偏光情報を得ることで判別精度の向上に繋がると考えた。2台のCMOSカメラを用いて個々の粒子の水平偏光と垂直偏光の2次元画像から δ を測定する装置を開発した。実験室で偏光撮影実験を行うため、人工的に生成した雪片を用いて δ の測定を行った。画像として偏光情報を取得するため、雪片の位置に応じた部分的な δ の測定が可能である。実際に複数の人工雪片が撮影された1つの画像データから粒径3 mmを超える3ヶ所の樹状雪片をトリミングして解析を行い、いずれの雪片に対しても $\delta > 0.6$ が得られた。これはPPLでの観測結果とも一致し、装置の有効性が示された。

参考文献

- 1) Y. Shibata: Appl. Opt., 61(8), (2022) 1856-1862.
- 2) 柴田、佐藤: 第40回リモートセンシングシンポジウム, (2022) 84-86.
- 3) K. Sassen: Nature, 255(5506), (1975) 316-318.
- 4) 齊藤他: 応用物理, 54, (1985) 952-958.
- 5) P. Yang: et al., J. Atmos. Sci., 70(1), (2013) 330-347.
- 6) M. Nicolet: et al., Atmos. Chem. Phys., 10(2), (2010) 313-325.
- 7) K. Hiramatsu: et al., Phys. Teacher, 43(6), (2005) 346-348.