

光学式固体降水観測器の人工降雪実験における降雪粒子捕捉特性について

長岡技術科学大学・水文気象研究室 ○小田桐遼哉
長岡技術科学大学 熊倉俊郎
長岡技術科学大学・水文気象研究室 橘弥志
工房雪測 山崎正喜
(株)スノーテック新潟 山倉祐也 齋藤隆幸
国立研究開発法人防災科学技術研究所 中井専人 富樫数馬
森林総合研究所 竹内由香里 勝島隆史 勝山祐太

1. はじめに

固体降水量の観測は、水資源管理や雪氷災害の予測に重要である。しかし、従来の降水量計には風による捕捉損失や融雪に伴う観測の遅れがあり、降水種別の把握も課題となっている。これらに対し、近赤外線反射光から粒径と落下速度を推定する光学式反射型固体降水観測器（以下、PDS）が開発し、低コストでの多地点観測を目指している。一方、Laser Precipitation Monitor（以下、LPM）はレーザー光により粒径と落下速度を測定する。先行研究では、PDSはLPMと比較して雨滴の検出や粒径・落下速度の推定に制約があり、欠測も生じやすいことが報告されている。しかし、降雪粒子の特性がPDSの検出状況や降水種別判別に及ぼす影響は十分に明らかでない。そこで本研究では、粒子特性の異なる2種類の屋内人工降雪条件でPDSとLPMの観測結果を比較し、屋外自然降雪の結果も参照して、PDSの観測特性と課題を検討した。

2. 観測・解析方法

屋内人工降雪実験は、2026年8月31日から9月3日にかけて、新庄雪氷環境実験所で実施した。PDSとLPMを近接して配置し、2種類の人工降雪条件下で粒径と落下速度を観測した。解析対象は、8月31日17時から9月2日17時までの降雪A、9月3日9時から16時までの降雪Bとした。

降雪Aは、樹枝状結晶（径0.5～5 mm）の霜を降らせる装置（動作温度-10～-20℃）を用いた。結晶が凝集した粒子は、自然降雪における比較的ふわふわとした雪片に相当する。LPMで観測された代表的な粒径は約6 mm、落下速度は約1 m/sであり、粒径が大きくなるほど粒子数が減少する特徴を持つ。一方、降雪Bは、微小な氷球（径約0.025 mm）が凝集した粒子を降らせる装置（動作温度-2～-10℃）を用いた。濃密雲粒付雪片からあ

られ状の粒子に相当し、代表的な粒径は約5 mm、落下速度は約2 m/sで、降雪Aより落下速度が大きく、粒子数も多い特徴を持つ。これらの粒子特性の違いに着目し、降雪条件によるPDSの観測特性を比較した。

なお、LPMでは粒径約0.3 mm以下の粒子は計測限界により過少検出となり、約8.7 mm以上の粒子は粒径が丸められた値として記録される。また、屋外自然降雪の参考データとして、2023年1月25日から31日に森林総合研究所十日町試験地で取得されたPDSおよびLPMの観測データを使用した。本研究では、石坂ら（2013）が提案した質量フラックスを用いる降水種別判別手法を適用した。降雪粒子は種別によって粒径と落下速度の関係が異なるため、既往研究に基づく各降水種別の粒径-落下速度関係式を用いた。まず、各粒子の粒径と落下速度を粒径-落下速度座標上に配置し、その粒子を挟む2本の関係曲線上の最近点を求めた。最近点の算出にはNewton法を用い、各点までの距離と曲線上の質量フラックスから、次式によって粒子の質量フラックスを補間した。

$$f_p = \frac{(d_b f_a + d_a f_b)}{(d_a + d_b)} \quad (2.1)$$

ここで、 (f_p) は対象粒子の質量フラックス、 $(f_a), (f_b)$ は2本の曲線上の最近点における質量フラックス、 $(d_a), (d_b)$ はそれぞれの最近点までの距離である。

次に、5分間に観測された粒子について、質量フラックスで重み付けした粒径および落下速度の代表値であるCenter of Mass Flux Distribution（以下、CMF）を算出した。

$$D_{CMF} = \frac{\sum_i f_i D_i}{\sum_i f_i} \quad (2.2)$$

$$V_{CMF} = \frac{\sum_i f_i V_i}{\sum_i f_i} \quad (2.3)$$

ここで、 (D_i) 、 (V_i) 、 (f_i) はそれぞれ粒子 (i) の粒径、落下速度、質量フラックスである。CMF は質量フラックスの大きい粒子の寄与を強く反映する。算出した CMF から各降水種別の関係曲線までの最短距離を求め、最も近い曲線に対応する降水種別をその 5 分間の代表種別とした。なお、粒径 1.5 mm 以下かつ落下速度 1.7 m/s 以下の小粒子は、質量フラックス算出時の関係曲線が近接・交差する領域に含まれることなどから、CMF の算出対象から除外した。ただし、粒径-落下速度分布図では、除外対象の小粒子も含めて表示した。PDS と LPM の判別結果を 5 分単位で対応させ、種別構成割合と同時刻の判別結果を集計した。屋内では PDS の実観測時間帯のみを対象とし、その時間帯に判別結果がない場合を欠測とした。

3. 結果および考察

図 1～図 4 に、降雪 A および降雪 B における LPM と PDS の粒径-落下速度分布を示す。降雪 A では、両機器とも落下速度約 1 m/s の領域に粒子が集中し、雪片状の粒子が主体であった。一方、降雪 B では落下速度の大きいあられ状の粒子が増加し、両条件で異なる粒子特性が確認された。両条件とも LPM の観測粒子数は PDS より多く、特に小粒径側で差が顕著であった。ただし、両機器は測定領域や観測時間が異なるため、粒子数の単純比較から捕捉率を評価することはできない。また、LPM にも微小粒子の計測限界があり、観測粒子分布の違いには両機器の検出特性が反映されていると考えられる。

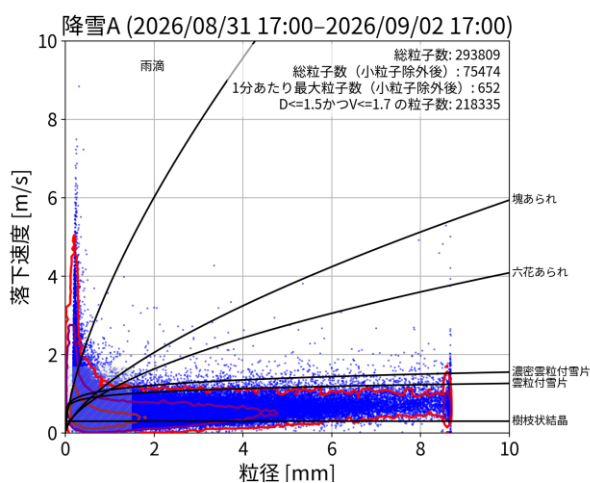


図 1,LPM 粒径-落下速度分布(降雪 A)

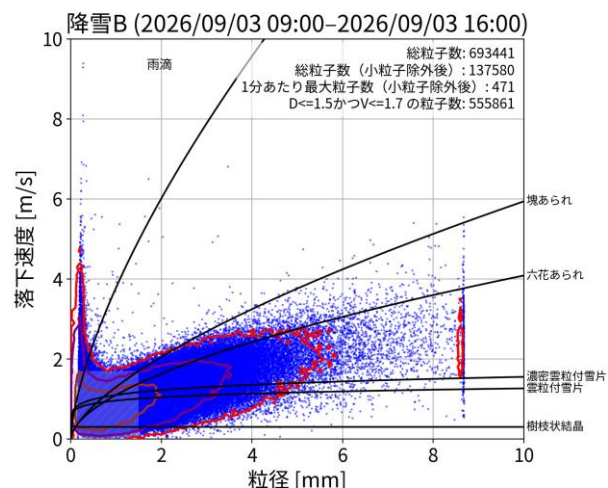


図 2,LPM 粒径-落下速度分布(降雪 B)

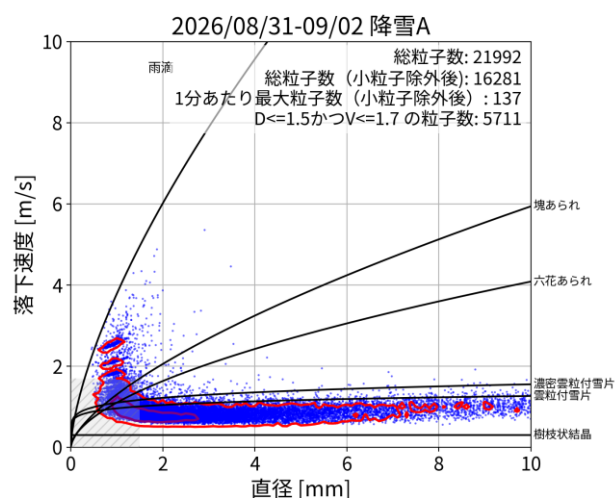


図 3,PDS 粒径-落下速度分布(降雪 A)

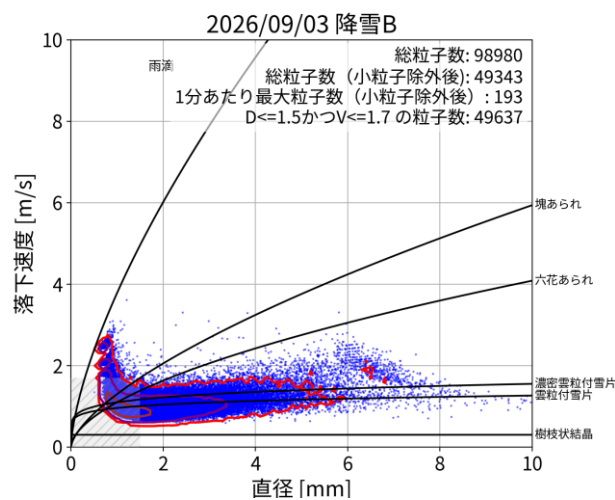


図 4,PDS 粒径-落下速度分布(降雪 B)

図 5 に降雪 A における PDS と LPM の降水種別構成割合、図 6 に PDS の判別種別に対する LPM の降水種別構成割合を示す。LPM では雪粒付雪片が 93.7%，PDS では 75.1% を占め、両機器とも雪粒付雪片が卓越した。一方、PDS の欠測割合は 21.9% で

あった。PDS が雲粒付雪片と判別した時間帯では、LPM も 95.5%を雲粒付雪片と判別しており、両機器の判別結果は高い割合で対応した。しかし、PDS が六花あられや濃密雲粒付雪片と判別した時間帯では、LPM は雲粒付雪片と判別していた。すなわち、雪片状の粒子が主体となる降雪 A では、主要な降水種別については両機器の判別結果がよく対応したものの、PDS では一部の時間帯で LPM よりもあられ寄りに判別する傾向が見られた。これは、両機器で検出される粒子の粒径・落下速度分布が異なり、CMF の位置に差が生じた可能性を示している。

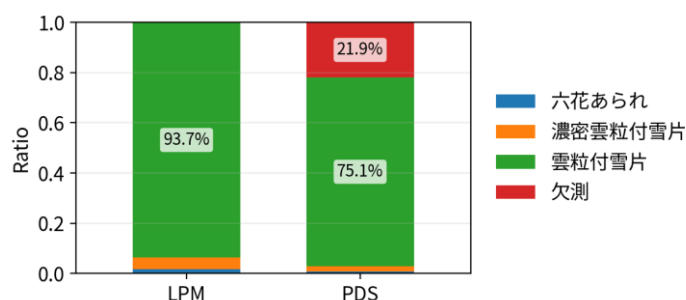


図 5, PDS と LPM の降水種別構成割合(降雪 A)

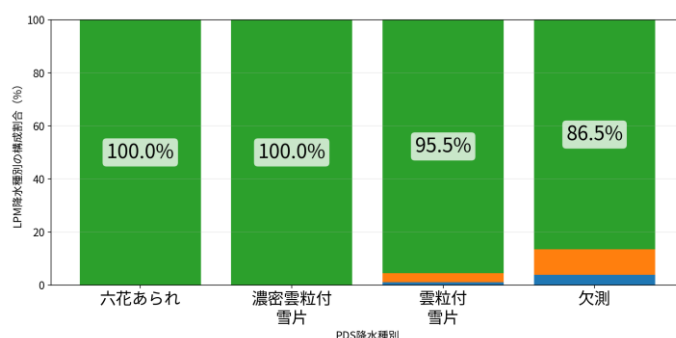


図 6, PDS の判別種別に対する LPM の降水種別構成割合(降雪 A)

図 7 に降雪 B における PDS と LPM の降水種別構成割合、図 8 に PDS の判別種別に対する LPM の降水種別構成割合を示す。LPM では濃密雲粒付雪片が 66.2%、六花あられが 31.1%であったのに対し、PDS では濃密雲粒付雪片が 90.5%を占めた。また、PDS の欠測割合は約 9.5%であり、降雪 A の 21.9%より低かった。降雪 B は降雪 A より落下速度が大きく、あられ状の粒子が多い条件である。この条件で PDS の欠測割合が減少したことから、PDS の検出状況は降雪粒子の特性によって変化する可能性が示された。ただし、降雪 B では粒子数も多いため、欠測割合の減少を粒子形状や落下速度の違いだけに帰することはできない。

また、PDS が濃密雲粒付雪片と判別した時間帯では、LPM は濃密雲粒付雪片を 67.2%、六花あられを 32.8%と判別した。このことから、降雪 B では PDS の判別結果が濃密雲粒付雪片に集中する一方、LPM では濃密雲粒付雪片と六花あられの両方が判別されるという違いが見られた。六花あられは同じ粒径の濃密雲粒付雪片より落下速度が大きいため、PDS では LPM と比較して CMF が相対的に落下速度の小さい領域に位置していた可能性がある。この要因として、両機器で検出される粒子の粒径・落下速度分布が異なり、質量フラックスで重み付けした代表値にも差が生じたことが考えられる。

以上より、新庄の人工降雪実験では、降雪 A と降雪 B で PDS の欠測割合と LPM との降水種別判別結果の対応関係が異なることが明らかとなった。雪片状の粒子が主体となる降雪 A では、雲粒付雪片の判別結果が高い割合で対応した一方、PDS の欠測が比較的多かった。これに対し、あられ状の粒子を多く含む降雪 B では、PDS の欠測が減少したものの、LPM が六花あられと判別した時間帯を PDS が濃密雲粒付雪片と判別する場合が見られた。このことは、PDS の観測特性を評価するうえで、粒子を検出できるかどうかだけでなく、検出された粒子の分布が降水種別判別に及ぼす影響も考慮する必要があることを示している。

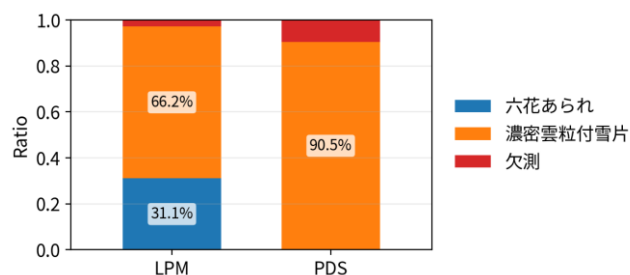


図 7, PDS と LPM の降水種別構成割合(降雪 B)

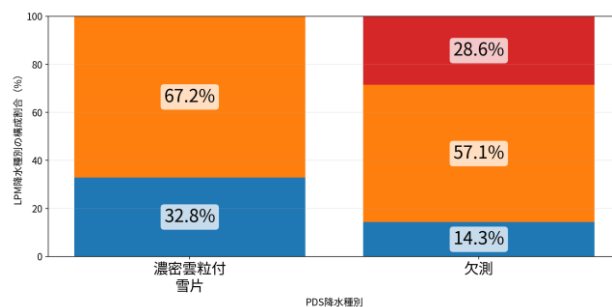


図 8, PDS の判別種別に対する LPM の降水種別構成割合(降雪 B)

さらに、屋外自然降雪における観測状況を確認するため、十日町試験地の結果を図 9 および図 10 に示す。十日町では、LPM の欠測割合が 24.9%、PDS が 41.4% となり、新庄の人工降雪実験より欠測割合が高かった。また、PDS が雲粒付雪片と判別した時間帯では LPM との一致割合が 75.4% であったのに対し、濃密雲粒付雪片では 31.3% となり、降水種別によって対応関係が異なった。この結果は、屋外自然降雪でも PDS の観測結果が降雪条件に応じて変化することを示している。ただし、屋外では風などの環境条件も異なるため、新庄との違いを粒子特性のみによるものと判断することはできない。

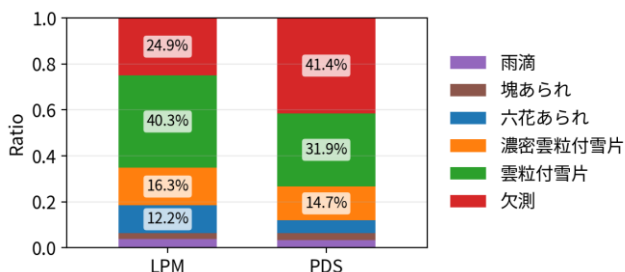


図 9, 十日町試験地における PDS と LPM の降水種別構成割合(屋外)

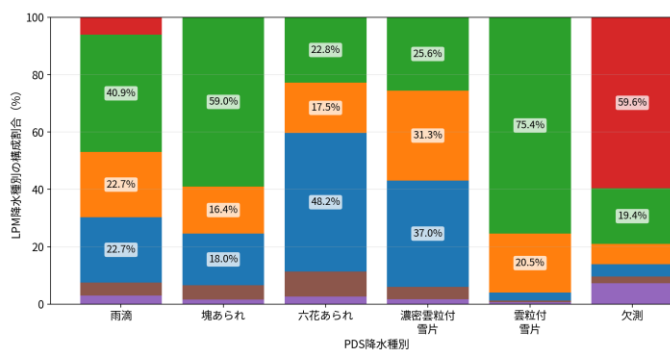


図 10, 十日町試験地における PDS の判別種別に対する LPM の降水種別構成割合(屋外)

4. まとめ

本研究では、新庄雪氷環境実験所における粒子特性の異なる 2 種類の人工降雪条件で、PDS と LPM の観測結果を比較した。その結果、雪片状の粒子が主体となる降雪 A では PDS の欠測割合が 21.9% であったのに対し、あられ状の粒子を多く含む降雪 B では約 9.5% に減少した。また、降雪 A では雲粒付雪片の判別結果が両機器で高い割合で対

応した一方、降雪 B では LPM が六花あられと判別した時間帯を PDS が濃密雲粒付雪片と判別する傾向が見られた。

これらの結果から、PDS の検出状況および降水種別判別結果は降雪条件によって異なり、検出される粒子の粒径・落下速度分布の違いが判別結果に影響する可能性が示唆された。今後は粒径・落下速度別の検出特性や CMF への寄与を定量的に検証するとともに、屋外自然降雪での観測を通じて、風速や降雪強度などの影響も評価する必要がある。

5. 参考文献

- 1) Ishizaka et al : A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, JMSJ, vol. 91 pp. 747-762, 2013
- 2) Nakai, S., K. Yamashita, H. Motoyoshi, T. Kumakura, S. Murakami and T. Katsushima, 2022: Relationships between radar reflectivity factor and liquid-equivalent snowfall rate derived by direct comparison of X-band radar and disdrometer observations in Niigata Prefecture, Japan., J. Meteor. Soc. Japan, 100, 45-56, doi://10.2151/jmsj.2022-002.
- 3) 守田佳弘, 光学式降水粒子観測器による粒子の直径・落下速度データを用いた降水量推定方法の研究, 長岡技術科学大学大学院修士論文, 2025