

光学式反射型降水粒子測定器を用いた降水量推定への風の影響評価

長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻

橘 弥志

長岡技術科学大学

熊倉俊郎

工房 雪測

山崎正喜

東京発電株式会社

小柳颯輝

長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻

石橋宗磨

防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

中井専人・富樫数馬

(株) スノーテック新潟

山倉祐也・齋藤隆幸

1 はじめに

降水量の正確な計測は気象学や水文学における重要な課題であるが、従来の転倒ます型雨量計をはじめとする筐体を持つ降水量計は、風の影響を受けやすく、強風下では観測値が過小評価されることが知られている。

本研究の主な対象である光学式反射型固体降水種別・降水強度計（PDS）を図1に示す。PDSは、降水粒子が光学センサーを横切る際の散乱光を捉える方式であり、筐体が小さいため風の影響を受けにくいと期待される。また、比較的安価で設置も容易なことから、多地点観測に適しているという利点を持つ。



図1 PDSの外観

しかし、粒子の入射天頂角や落下速度は風に依存するため、PDSの観測値も必ずしも安定するとは限らない。過去2年、屋内実験環境でPDSに対する風の影響を評価する試みが行われてきた。特に小柳（2024）の研究¹⁾では、PDSの信号の変化と粒子の入射天頂角の関係を明らかにし、近似式を求めた。

本研究では、人工降雪機と送風機を組み合わせた屋内実験環境を構築し、風速約 4～4.5 m/s

の強風条件下で 様々な風向を再現して観測を行った。これにより、PDS の観測波形に及ぼす風の影響を実験的に評価し、将来的な風補正手法の確立に向けた基礎的知見を得ることを目的とする。

2 PDS の概要

本研究の主な対象である PDS は、発光素子と受光素子をそれぞれ備えており、発光素子から近赤外線を照射し、照射領域内を通過する固体降水粒子の反射光を受光素子で電圧信号として検知することで、観測領域内を通過した固体降水粒子の反射強度を観測する。検知された反射強度とその継続時間から、粒子径や落下速度に比例するパラメータを算出し、固体降水粒子種別の判別や降水量の推定を行う。

外装には野外観測で実績のある筐体を採用し、内部には発光素子の劣化を抑制するための温度センサーを内蔵しており、設定温度以下でのみ動作する機能を持つ。

発光素子のピークは 940[nm]で半値角 7.5[deg]、受光素子のピークは 960[nm]で半値角 12[deg]である。波長は雨滴に感度が低く、固体降水粒子に感度が高い波長としている。発光素子と受光素子の光軸は水平であり、それぞれ並行に同じ向きに発光素子と受光素子それぞれ4つが図2のように配置される。複数個の発光素子と受光素子を配置することで、風の影響を受けやすい固体降水粒子を線的ではなく面的にとらえることができる。図2のように配置された発光素子の照射領域と、受光素子の受光対象領域が重なった領域内を、PDSの観測領域として

扱う。観測領域は水滴が他のような左右非対称の形状をとる。図3に横から見た観測領域の概要を示す。この観測領域内を通過する固体降水粒子の反射光を受光素子で検知することで、4.で後述するように観測領域内を固体降水粒子が通過した時間幅 t_d [sec]と反射強度 V [V]を観測する。観測された値はAD変換され、外部に出力される。

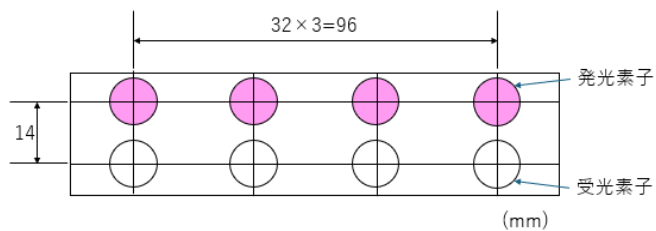


図2 素子の配置

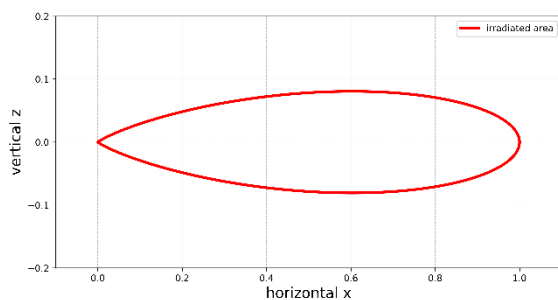


図3 観測領域

3 実験概要

実験は新庄市にある新庄雪氷環境実験所内において、図4のような人工降雪機と送風機を組み合わせた環境を構築し行った。観測日は2025年8月4日から8月7日に実施し、風速条件を「無風、約1 m/s、約2 m/s、約4 m/s、約4.2 m/s」の5段階とした。これにより、降雪観測における弱～強風条件を模擬した。風向の再現としてPDSを図5の回転台で回転させた。

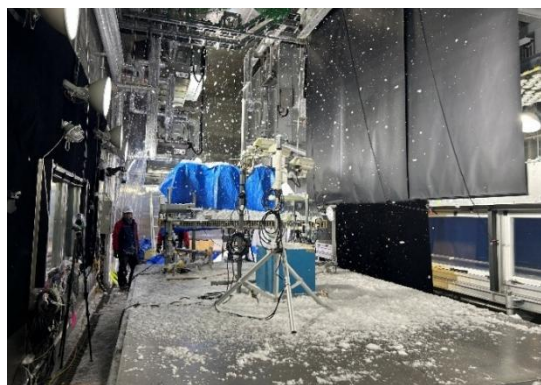


図4 実験環境



図5 回転台

4 解析手法

本研究では、新庄に設置した人工降雪機および送風機を用い、風環境がPDSによる降雪粒子観測に与える影響を定量的に評価した。以下に、データ処理および解析手順を示す。

4.1 測器内処理

受光素子で計測された直後の電圧 V は、RC回路（抵抗値： $R=20[\text{k}\Omega]$ ，容量値： $C=0.1[\mu\text{F}]$ ）で平滑化される。平滑化された電圧 V は12bitでAD変換が行われ、0[V]から2.5[V]の電圧信号に対して200から4095の電圧カウント値 C_V として出力間隔 $t_{AD}=2\times 10^{-4}[\text{sec}] (=200[\mu\text{sec}])$ ごとに出力される。AD変換は12bitで、AD値への変換を行う。出力される波形の概略図を図6に、実際の波形を図7に示す。

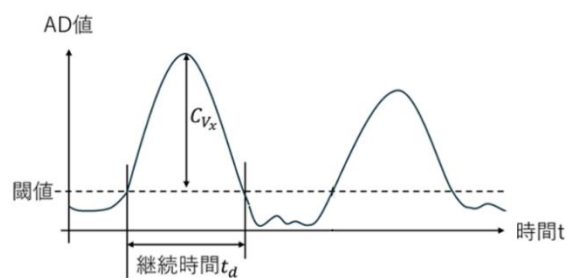


図6 観測される波形の概略図

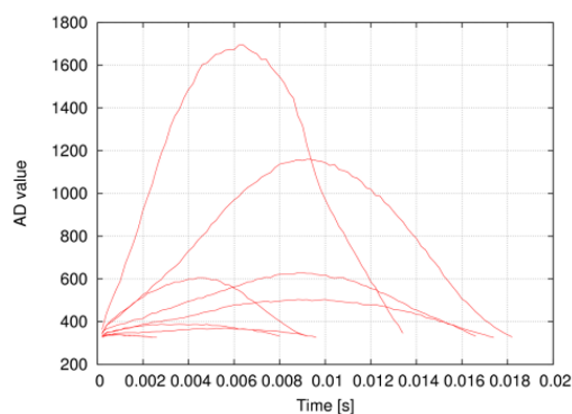


図7 観測される実際の波形

4.2 観測データ収集と時間区間化

超音波風速計により風速および風向を1秒間隔で取得し、観測区間の前後に10分間測定した。なお、風速が0 m/sと記録された場合には、装置感度0.5 m/sに基づき0.25 m/sとした。

PDSは観測領域を通過する降雪粒子を逐次検出し、粒子ごとの通過時間および反射波形を記録した。得られた連続データは、送風方向および風速条件ごとに20分間を区間として観測を行い粒子情報を風速観測に基づき10分間ごとに平均化して代表値を算出した。これにより、短時間の乱流成分を平滑化し、各条件下における代表的な粒子特性を抽出した。

4.3 粒子の落下経路処理

PDSの観測領域に風の影響を受けた固体降水粒子が入射した場合（有風状態）と、風の影響を受けていない固体降水粒子が入射した場合（無風状態）の違いについてまず考える。無風状態の固体降水粒子は図8のように水平成分 U_h を持たず落下速度 W_v に応じて落下角度 $\theta = 0$ [deg]方向（真下方向）に落下する。しかし、有風状態の固体降水粒子は水平成分 U_h を持つため、照射領域の鉛直平面上の風速 U_{PDS} と W_v の合成ベクトルの角度 θ [deg]に従い落下する。光軸に平行な方向を相対入射方向とする。

そのため、無風状態と有風状態では、PDSの照射領域を通過する際の経路の角度が変わることになる。よって、天頂方向（鉛直方向）を0[deg]として、PDSの観測領域の中心を通る固体降水粒子の経路の角度を入射天頂角 θ [deg]とすると、図9のように θ は表せる。ここで、相対入射方向で考えた時のPDSに向かって入射する経路を正、PDSから離れながら入射する経路を負とする。

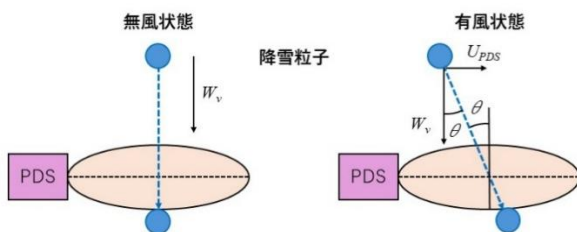


図8 無風状態と有風状態における降雪粒子の落下経路

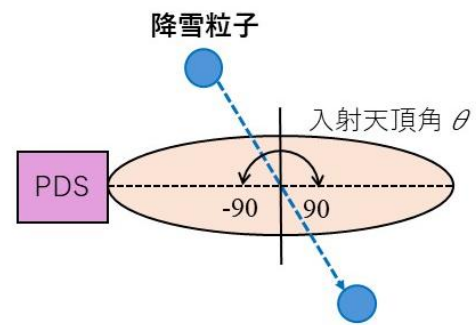


図9 入射経路と入射天頂角 θ の関係

4.4 ピークシフトに対する風の影響

PDSが図10のような反射強度継続時間 t_d の波形を観測した場合について考える。ここで、最大電圧 V_x をとる時間を t_{Vx} 、固体降水粒子を検知した時間を t_0 、粒子検知終了時間を t_e とする。また、観測領域の中心を固体降水粒子が通過した瞬間というのは、最大電圧 V_x をとる瞬間だと言える。 V_x について考えると、無風状態において $(t_{Vx} - t_0)/t_d = t_d/2$ で V_x をとるのに対して、有風状態では、風の影響によって t_{Vx} が前後する。無風状態の $(t_{Vx} - t_0)/t_d = (t_e - t_{Vx})/t_d$ となり、 $t_d = 1$ とすると0.5になる。また、有風状態における $(t_{Vx} - t_0)/t_d$ は0.5を中心に前後することになる。 $(t_{Vx} - t_0)/t_d$ をピークシフト量 P_s として、風の影響に関連するパラメータとする。

このピークシフト量 P_s は、入射天頂角 θ に関係するパラメータである。そのため、観測領域の鉛直平面上の P_s - θ 関係を明らかにすることができれば、 P_s から θ を推定できる。

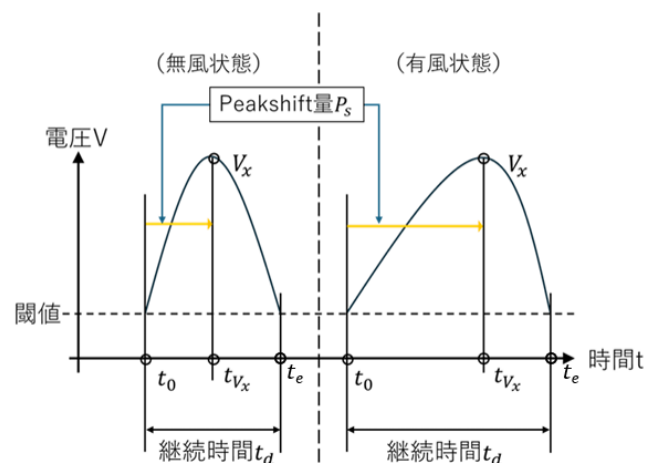


図10 無風状態と有風状態において観測される波形の違い

4.5 入射天頂角推定

風による粒子軌跡の偏向を評価するため、PDS 観測面に対する降雪粒子の実効的入射天頂角を風速成分から推定した。回転台を回したときに風による横流が粒子の相対入射方向に影響を与えると仮定し、光軸に平行な方向に対する入射天頂角 θ を以下の式 (5) で求めた。

$$\theta = -\arctan(U \cdot \cos(\alpha)/W_v) \quad (5)$$

ここで、 U は風速条件の風速 [m/s]、 α は PDS に対する送風角度 [rad]、 W_v は落下速度[m/s]である。今回の解析では今までの実験結果より、落下速度を $W_v=1$ [m/s]とした。入射天頂角が正の値が手前から奥方向への粒子流入、負の値が奥から手前方向への流入を表している。

5 結果と考察

過去 2 年間の $P_s - \theta$ 関係を図 11 に、今回の実験・解析により作成した各風速条件における $P_s - \theta$ 関係を図 12 に示す。

図 11、図 12 はともに横軸に入射天頂角 θ 、縦軸にピークシフト量 P_s が描かれている。各マークから上下に伸びる線はそれぞれの P_s の標準偏差である。図 11、図 12 より、全体的に P_s が 0.5 より小さい傾向が見られる。この要因としては、図 2 に示すように発光素子と受光素子の位置ずれが影響している可能性が考えられる。

黒線は小柳 (2024) によって導出された近似式 (1) の曲線である。

$$P_s = 0.479 - 0.002(\sinh(0.058\theta)) \quad (1)$$

また、図 11 は黒色のマークが 2023 年の結果、赤色のマークが 2024 年の結果を表している。

図 11 より、天頂入射角 θ が 0° の場合ピークシフト量 P_s が 0.4~0.5 になっており、 θ が負の時に P_s が約 0.5、 θ が正の時に P_s が 0.4 付近の値を示した。

また、 θ が負の領域で P_s が近似曲線よりも低い値を示した。この原因として、降下粒子が PDS の後方から進入するため、 θ が負の場合検知領域内において PDS が風上側にあることで風速が低下したことで P_s が低い値を示したと推察する。

6 まとめ

本研究では、光学式反射型固体降水種別・降水強度計 (PDS) の観測値に対する風の影響を評価するため、人工降雪機と送風機を用いた屋内実験を実施した。

その結果、今回の実験では、全体的にピークシフト量 P_s が 0.5 より小さい値を示した。これは発光素子と受光素子の位置ずれによる影響と考えられる。また、 θ が負の条件では、降下粒子が PDS 後方から進入するため、装置本体の影響で P_s が小さくなった可能性がある。

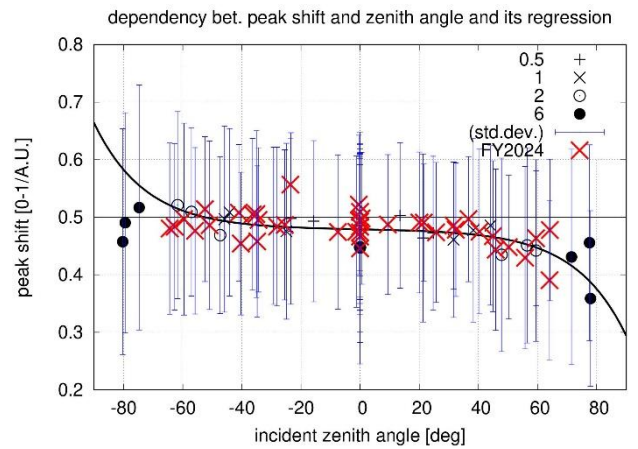


図 11 過去 2 年の $P_s - \theta$ 関係

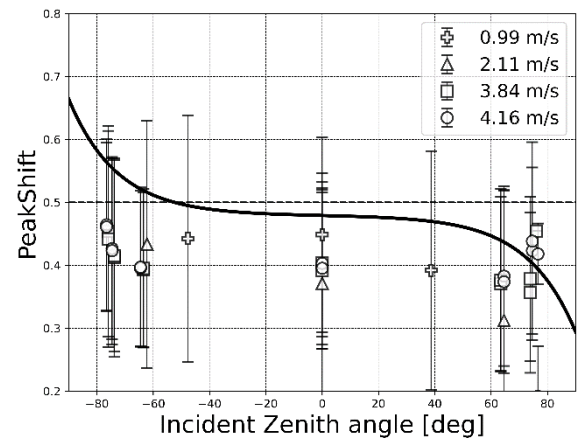


図 12 各風速条件における $P_s - \theta$ 関係

7 参考文献

- 1) 小柳颯輝, 光学式反射型固体降水種別・降水強度計の降水量算定手法の改良に関する研究, 長岡技術科学大学大学院修士論文, 2024