

光学式反射型降水粒子観測器単体での風速推定手法の高度化のための 自然降雪の測定と降水粒子流入ベクトルの直接測定

長岡技術科学大学
長岡技術科学大学
工房雪測
東京発電株式会社
国立研究開発法人防災科学技術研究所
(株)スノーテック新潟
長岡技術科学大学

非会員
正会員
非会員
非会員
非会員
非会員
非会員

○橘弥志
熊倉俊郎
山崎正喜
小柳颯輝
中井専入・富樫数馬
山倉祐也・齋藤隆幸
小田桐遼哉

1 はじめに

降水量の正確な計測は気象学や水文学の重要な課題だが、転倒ます型雨量計のように筐体をもつ降水量計は、筐体が周囲の風を乱すため、強風下では捕捉率が下がって観測値が過小になる^{1), 2)}。光学式反射型固体降水種別・降水強度計（以下、PDS）は筐体が小さく、この影響を受けにくいと期待される。比較的安価で設置も容易なので、多地点での観測にも向く。ただ、粒子の入射天頂角や落下速度は風によって変わるため、PDSの観測値も風の影響を受ける。

小柳（2024）³⁾は、波形のピークシフト量 P_s が粒子の入射天頂角 θ と対応することに着目し、 P_s からPDSの観測領域の風速成分を推定する方法を示した。昨年の実験では、人工降雪機と送風機を組み合わせることで風速約4~4.5 m/sまでの強風を再現し、風が P_s に与える影響を調べた。しかし、 P_s のばらつきが大きく、風速の予測幅を十分に狭められなかった。

そこで本研究では、風速推定手法を高度化するために、次の二つを行った。 P_s から風速を推定するには、まず P_s と入射天頂角 θ の関係が自然降雪でも成り立つ必要がある。そこで一つ目に、長岡で観測した降雪から、雪が降り、風速計が凍結せず、PDSに着雪していない区間を選んだ。ただし θ は、風速と仮定した落下速度から計算した値で、粒子が実際にどの向きで観測領域に入るかは測られていない。そこで二つ目に、新庄の人工降雪実験で、レーザーシートに照らされた粒子の光跡を撮影してその角度を測り、風速計から計算した角度と比べた。

2 PDSの概要と入射天頂角

PDSは、近赤外LEDの発光素子と受光素子を4つずつ、光軸を水平かつ平行に並べた機器である。発光素子はピーク波長940 nm・半値角7.5°、受光素子はピーク感度波長960 nm・半値角12°であり、この波長は、雨滴より固体降水粒子に感度が高いとされる³⁾。発光の照射領域と受光の対象領域が重なる範囲を観測領域とし、その中を通る粒子の表面で反射した近赤外線を、受光素子が電圧として検知する（図1）。観測領域は、図1cのように横から見るとPDSに近い側が細く、遠い側が丸く広がる左右非対称の形で、反射強度はPDSから離れるほど弱まる³⁾。

観測領域内を粒子が通過すると、その反射光が受光素子に届いて電圧が上昇し、粒子が出ていくと下降する。電圧は、抵抗20 k Ω ・容量0.1 μ FのRC回路で平滑化され、0~2.5 Vを200~

4095の整数値に対応させる12 bitのAD変換を経て、200 μ sごとに出力される。粒子を検知していないときの電圧から閾値を決め、電圧が閾値を超えた時刻を検知の開始時刻 t_0 、下回った時刻を終了時刻 t_e とする。その間の継続時間を通過時間 $t_d = t_e - t_0$ 、最大のAD値を C_{V_x} とする（図2a）。実際の波形は粒子によって大きさも幅も違う（図2b）。反射強度とその継続時間からは、粒径や落下速度に対応するパラメータが求まり、降水種別の判別や降水量の推定に使われる。

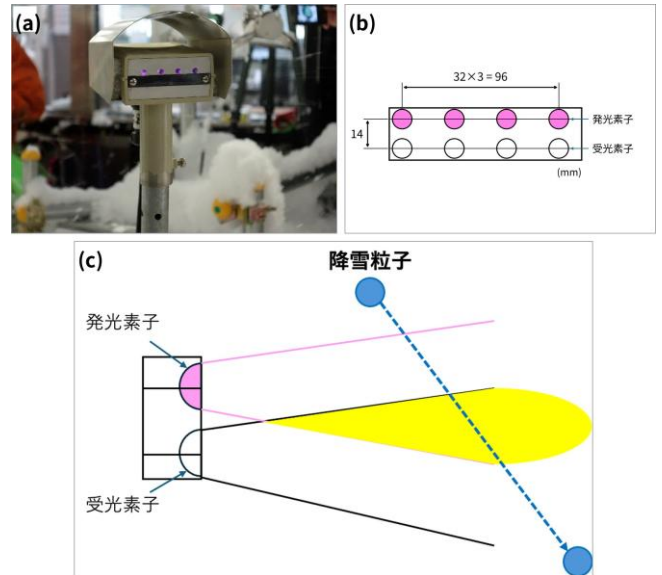


図1 PDSの外観 (a)，素子の配置 (b)，観測領域を横から見た模式図 (c)

粒子の経路が傾くと、波形のピークが通過時間の中央からずれる（図3）。ピークの時刻を t_{V_x} として、ピークシフト量 P_s を式(1)で定義する。

$$P_s = \frac{t_{V_x} - t_0}{t_d} \quad (1)$$

無風するとき P_s は理想的には0.5になる。入射天頂角 θ は粒子の経路が鉛直となす角で、PDSの前面から外向きの光軸方向を正とし、PDSから遠ざかる向きに傾く場合を $\theta > 0$ とする。粒子が風に完全に追従するとして、風速を U 、落下速度を V_f 、風向と観測軸のなす角を α とすると、 θ は式(2)、(3)で表される（図4）。 $\alpha = 0^\circ$ は向かい風で $\theta < 0$ 、真横からの風では $\theta = 0^\circ$ である。

$$U_{PDS} = -U \cos \alpha \quad (2)$$

$$\theta = \arctan(U_{PDS}/V_f) \quad (3)$$

小柳（2024）は、樹枝状結晶が凝集した雪片に近い人工降雪を使った室内実験から、 P_s と θ の

関係を式(4)で表した．この降雪は種別 A と呼ばれ，落下速度は約 1 m/s である⁴⁾．式(4)の決定係数 R^2 は 0.58 で， P_s は $|\theta| \leq 45^\circ$ で 0.465～0.493， $|\theta| = 60^\circ$ でも 0.447～0.511 にとどまる．

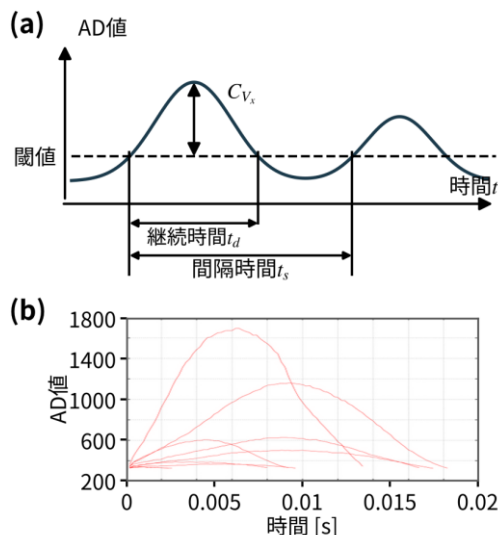
$$P_s = 0.479 - 0.002 \sinh(0.058\theta) \quad (4)$$


図 2 観測される波形の概略図 (a) と実際の波形 (b)

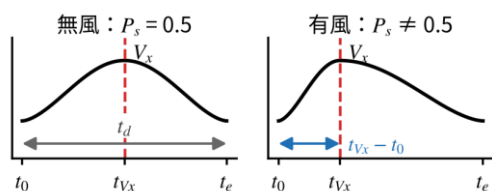


図 3 反射強度の波形とピークシフト量 P_s の概念図

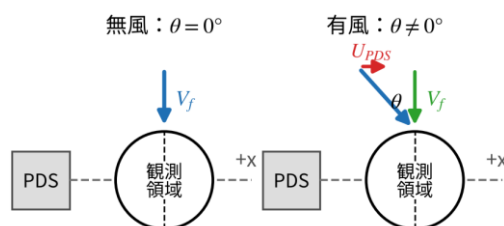


図 4 無風・有風での降雪粒子の落下経路 (+x は光軸方向)

3 観測・実験の概要

3.1 自然降雪の観測

長岡市にある防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの露場で，2024/25 年冬に PDS 2 台を高さ約 1.5 m に隣接して設置した (図 5)．光軸の方位は，北西の NW が 315° で上段，南西の SW が 225° で下段である．解析には 2025 年 1 月 3 日～3 月 20 日のデータを使った．降雪と風の把握には，同じ露場に設置された自動気象観測装置 (AWS) の気温・降水強度・積雪深・風速を，1 分ごとの値で使った．風速は，露場の風速計の値である．

3.2 人工降雪実験 (新庄 2026)

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所で， 3×5 m の降雪テーブル上の 2×1.5 m の範囲に人工降雪を降らせた．送風には送風機のみを用い，これを横風発生装置の

上に載せて送風した (図 6)．昨年の実験は風速約 1～4.2 m/s の 5 段階で行ったのに対し，今年は風速約 1 m/s と約 2 m/s の 2 段階とした．PDS は回転台に載せて回し，風向と光軸のなす角 α を $0 \sim 180^\circ$ の 30° ごと，7 通りに変えた．風速と α の各条件で，風速計と PDS の観測をそれぞれ 14 分ずつ行った．降雪は，樹枝状結晶が凝集した雪片に近い種別 A を実験 1 と実験 2 に，凍結した微小水滴が凝集した粒子の種別 B を実験 3 に降らせ，想定する落下速度は約 1 m/s と約 2 m/s である⁴⁾．風速は PDS の位置の超音波風速計で測った． $\alpha = 0^\circ$ にした区間の平均風速は，実験 1 が 1.05，実験 2 が 1.91，実験 3 が 1.85 m/s である．



図 5 長岡の露場に設置した PDS (2 台)

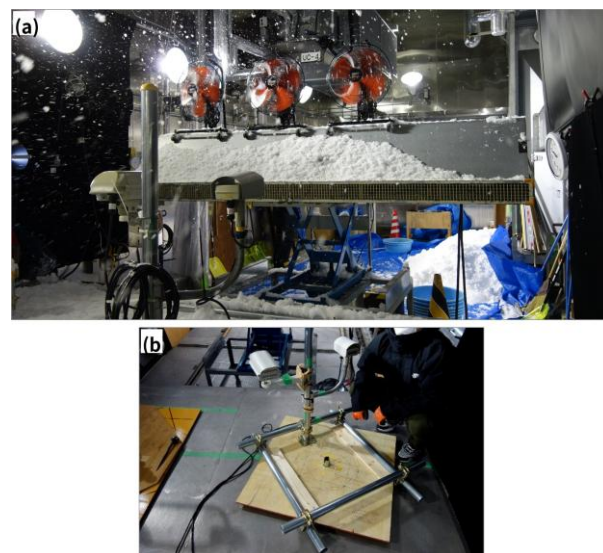


図 6 新庄雪氷環境実験所の実験環境．降雪中の送風 (a)，PDS を載せる回転台 (b)

粒子の入射の向きを直接測るために，波長 532 nm，シート厚 2～3 mm の可搬式レーザーの光シートを通る粒子を，露光 1/15 s の $\alpha 7R II$ で撮影した (図 7)．光シートは，1 マス 5 cm の赤い糸の格子を貼ったパネルの前に置いた．実験 1～3 で撮った 7952×5304 px の写真は 1,280 枚である．

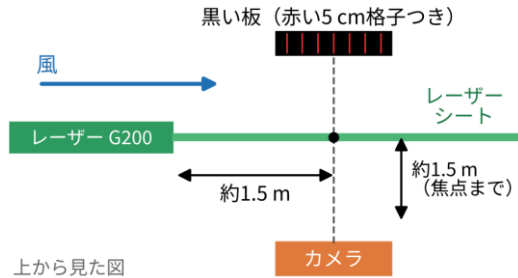


図7 人工降雪の測定系の概略（上から見た図）

4 解析方法

4.1 降雪区間の選び方

降雪区間は、AWSの1分値から次のように決めた。まず、気温が 1°C 以下、降水計が降水を検出している（降水強度が0より大きい）、風速計が凍結していない、の三つをすべて満たす分を降雪の分とした。風速計の凍結は、風速が0のまま3分以上続く分とした。雪が長く続いた時間にAWSの風速がほぼ全部0だった例では、同じ時刻の気象庁長岡で $1.7\sim 2.6\text{ m/s}$ 吹いており、無風ではなく凍結と判断した。

次に、降雪の分が途切れても、途切れが10分以内なら続いているとみなし、続いた時間が30分以上のものを降雪区間とした。間に凍結の分があるときは続いているとみなさない。さらに、区間の始めと終わりの10分間の積雪深の中央値を比べ、1 cm以上増えた区間だけを残した。

4.2 PDSの着雪の判定

PDSの生データを時系列で描いた図（クイックルック）を目視で確かめ、着雪の見え方を三つの型に分けて自動で判定した。この図では、生データの指数移動平均（時定数約2秒）を基準線とし、基準線に5を加えた値を超える区間を信号として、その通過時間 t_d とピークシフト量 P_s を点で示す（図8）。一つ目は、基準線が普段の値から50以上離れた状態が60秒以上続く型で、図8のSWの5:49~5:56がこれにあたる。二つ目は、基準線は少ししか上がらず、 $t_d \leq 2$ カウントの短い信号が1秒に5個以上ある秒が、間60秒以内でつなぐと合計200個以上になる型で、SWの6:01~6:10がこれにあたる。三つ目は、 t_d が約30カウント、 P_s が約0.35の信号が1秒に約50個、帯のように並ぶ型である。どれかに当てはまれば着雪とし、前後に10分を足して降雪区間との重なりを調べた。

4.3 光跡の抽出

実験1~3の写真から緑色の光跡を拾い、光跡の両端のうち最も離れた2点を始点と終点とした（図9）。始点と終点の距離を光跡の長さ、その向きを光跡の角度 φ とし、鉛直を 0° 、右下がり为正とする。図7のとおり写真では風は左から右へ吹くので、正は風下への傾きである。パネルの範囲内にまっすぐ写った光跡だけを使い、長いものから順に1本ずつ加えて、実験ごとに角度の平均を求めた。1本加えたときの平均の変化が 0.1° 未満になったところで集計を終えた。ただし最低30本は使い、30本に満たない場合は全部使った。比べる計算値は、風

が光シートの面に沿って吹くとして、 $\alpha = 0^{\circ}$ の区間の平均風速から $\varphi = \arctan(U/V_f)$ で求めた。

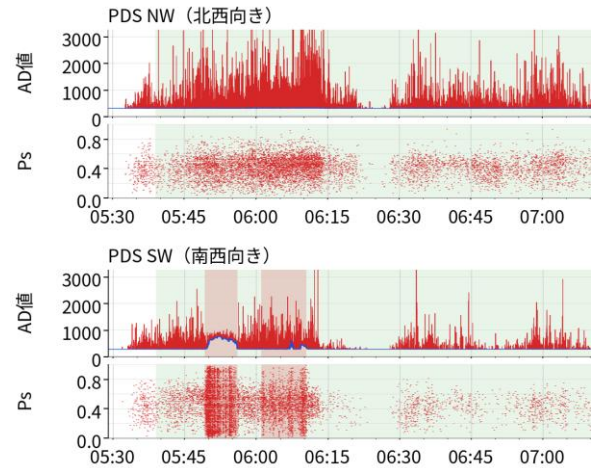


図8 PDSのクイックルックの例（2025年2月20日の降雪）。各PDSの上段は生データ[AD値]（赤、縦軸は3,300まで）と基準線（青）、下段はピークシフト量 P_s 。緑：降雪区間，赤い帯：着雪の自動判定

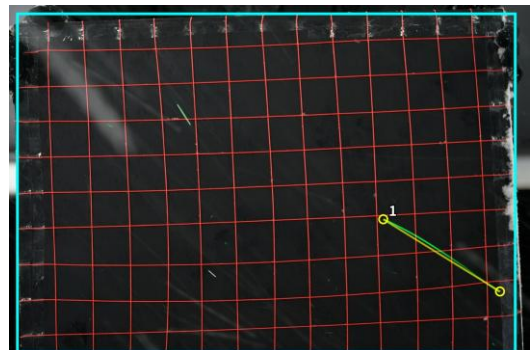


図9 光跡の抽出例（黄線と丸：始点・終点，水色の枠：パネルの範囲）

5 結果と考察

5.1で自然降雪の降雪区間とPDSの着雪の状況を整理し、5.2で人工降雪の光跡の角度を風速計から計算した角度と比べる。

5.1 自然降雪の降雪区間と着雪

降雪区間は、2025年1月4日~3月7日に87区間、合計10,143分得られた。PDSに着雪が検出された区間は39で、NWが11、SWが39だった。NWで着雪した区間はすべてSWでも着雪しており、下段のSWのほうが着雪しやすかった。NWとSWの両方に着雪のない区間は48区間、合計3,659分で、降雪の分の36%にあたる。長さは30~227分、積雪深の増加は1~8 cmだった。

着雪なしの区間の平均風速は中央値 0.82 m/s 、区間内の1分値の最大は 5.1 m/s で、着雪ありの区間の中央値 1.64 m/s の約半分だった

（Mann-Whitney検定、 $p < 0.001$ ）。風の強い降雪ほど着雪しやすく、着雪を除くと風の強い区間が残りにくい。昨年の新庄の屋内実験は約 4 m/s まで風を再現しており、着雪のない区間の風はこれより弱い側に偏っている。

着雪の自動判定は、目視で全部を確かめたわけではない。また、降雪区間は気温と降水強度、積雪深だけで決めたので、雪片かあられかは区別しておらず、あられが降った時間も含まれる。

5.2 人工降雪の光跡の角度

光跡の角度を表2と図10に示す。集計を終えたときの本数は、実験1が39本、実験2が30本、実験3が44本で、角度は実験1が $45.6^\circ \pm 3.6^\circ$ 、実験2が $64.1^\circ \pm 2.6^\circ$ 、実験3が $46.6^\circ \pm 2.5^\circ$ だった。風速計から計算した角度は、実験1が 46.4° ($U = 1.05 \text{ m/s}$, $V_f = 1 \text{ m/s}$)、実験2が 62.4° ($U = 1.91 \text{ m/s}$, $V_f = 1 \text{ m/s}$)、実験3が 42.8° ($U = 1.85 \text{ m/s}$, $V_f = 2 \text{ m/s}$)で、測った角度との差は実験1が -0.8° 、実験2が 1.7° 、実験3が 3.7° だった。実験2と実験3では測った角度が計算値より $2 \sim 4^\circ$ 大きく、この差は、落下速度が仮定より1割前後遅い、つまり実験2で 0.93 m/s 、実験3で 1.75 m/s とすれば説明できる。実験1は落下速度を 1.03 m/s とすれば一致する。 $\alpha = 0^\circ$ の区間内の風速の変動による計算値の幅は、実験1が $43.8 \sim 48.8^\circ$ 、実験2が $60.9 \sim 63.8^\circ$ 、実験3が $35.1 \sim 45.8^\circ$ で、これとも重なる。長い光跡はシートに垂直な速度が小さい粒子に偏る可能性があるが、光跡の長さや角度にはっきりした関係はなく、パネル内のまっすぐな光跡すべてで平均した角度も、実験1が62本で 45.8° 、実験2が695本で 64.9° 、実験3が1,848本で 48.3° と、差は 2° 以内だった。粒子が風に追従しきれていなければ角度は計算値より小さくなるはずだが、実験2と実験3では測った角度は大きいので、追従の遅れは主原因とは考えにくく、落下速度が仮定より遅いか、光シートの位置の風が風速計の位置より少し強いためと思われる。

実験	本数	測った ϕ [°]	計算 [°]	差 [°]	仮定 V_f [m/s]	合う V_f [m/s]
1	39	45.6 ± 3.6	46.4	-0.8	1	1.03
2	30	64.1 ± 2.6	62.4	+1.7	1	0.93
3	44	46.6 ± 2.5	42.8	+3.7	2	1.75

表2 光跡の角度 ϕ と、風速計から計算した角度。±は標準誤差。計算値は $\alpha = 0^\circ$ の区間の平均風速と、仮定した V_f による。

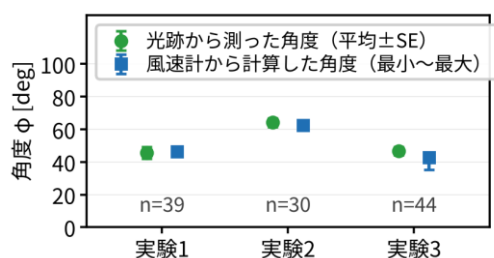


図10 光跡から測った角度と風速計から計算した角度（縦棒：測った角度は平均±SE、計算値は1分平均風速の最小～最大）

6 まとめと今後の課題

自然降雪では、AWSの1分値から、雪が降り、風速計が凍結せず、積雪深が増えた降雪区

間を選び、PDSの着雪を三つの型で判定して、着雪のない48区間(3,659分)を得た。着雪を除くと残る風は、着雪のある区間より弱く、屋内実験より弱い側に偏る。人工降雪の光跡の角度は、風から計算した角度と 4° 以内で合い、風速と落下速度から入射天頂角 θ を計算する手法は、実験条件では妥当だった。

昨年の屋内実験では P_s のばらつきが大きく、風速の予測幅を狭められなかったが、今年の光跡の結果から、ばらつきの主な原因は θ の計算ではなく、粒子の違いなどにあると考えられる。今後は、この θ の計算手法を基に、選んだ区間から、粒径と落下速度を測るParsivel²の天気コードで雪片だけを抽出し、屋外の P_s と、AWSの風から計算した θ の関係を、式(4)や屋内実験と比べる。予備的に調べた結果では、全部の時間をまとめた10分値で θ との順位相関はNWが -0.02 、SWが -0.20 で、関係はほとんど見えなかった。使った分の風は中央値 0.9 m/s と弱く、 P_s がはっきり変わる $|\theta| > 50^\circ$ の分はNWで7%、SWで24%にとどまり、降雪ごとの P_s の平均の違い(標準偏差約 0.03)が θ の効果(0.02 ほど)と同じ程度であることも、関係が見えない原因と考えられる。一方、同じ降水の中で見ると、 θ が 10° 増えたときの P_s の変化はNWが -0.0027 、SWが -0.0025 で、向かい風ほど大きいという向きは式(4)と同じだった。この解析は、関係が見えなかった後に加えたものである。

今後は、次の四つを進める。一つ目に、 P_s と θ の関係の傾きと水準を屋外と屋内で比べる。二つ目に、Parsivel²から降雪の種類と落下速度を求め、 V_f の仮定を実測に置き換えて、種類や大きさごとに関係を分け、水準の違いを減らす。三つ目に、着雪の少ない条件の観測を増やして、屋内実験に近い強風側のデータを集める。四つ目に、光跡の測定を種別Bなど落下速度の大きい降雪にも広げ、 θ を直接測る。これにより風速を推定できる条件を明らかにし、さらに、捕捉率の評価と降水種別分類のCMF⁵⁾を組み合わせ、風によるアンダーキャッチを補正した降水量推定手法を構築する。

参考文献

- 1) Goodison, B.E. et al.: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison, Final Report, WMO/TD-No.872, 1998.
- 2) 横山宏太郎ら：冬期における降水量計の捕捉特性、雪氷、65(3), pp.303-316, 2003.
- 3) 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、長岡技術科学大学修士論文, 2024.
- 4) 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター：雪氷防災実験棟で利用できる降雪粒子、https://www.bosai.go.jp/seppyo/facilities/CES/jikkentou_fallingsnow.html (2026年10月12日閲覧)
- 5) Ishizaka, M. et al.: A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship, J. Meteor. Soc. Japan, 91(6), pp.747-762, 2013.