

光学式固体降水種別・降水強度計の降水量算定手法の改良に関する研究

水文・気象研究室 20325083 小柳颯輝

1. はじめに

降雪観測で現状用いられている主流な観測器には、降水量算定における風による補足損失や、降水種別判別に用いる光学式観測器は高価である等の課題がある。そこで、熊倉ら¹⁾が安価かつ補足損失の少ない降水種別判別・降水強度計として図1のような光学式固体降水種別判別・降水強度計 (PDS) を提案した。

PDSは、近赤外線を用いて反射領域内を通る降水粒子の反射強度継続時間 t_d と最大電圧を得る。そこから、実際の降水粒子の直径・落下速度に比例すると考えられる疑似平均直径 \hat{D} (A.U.)と疑似平均落下速度 \hat{W} (A.U.)に加え粒子の個数 \hat{N} を推定し、次の式(1)を用いて推定降水量 \hat{P}_r を決定する。ここで、 K_{pr} は経験的に求める適当な定数である。

$$\hat{P}_r = K_{pr} \cdot \hat{D} \cdot \hat{W} \cdot \hat{N} \quad (1)$$

PDSの風向風速による \hat{P}_r への影響の検証が遠藤ら²⁾によって行われた。防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの露場内に風向風速計とともにPDSを設置し、同露場に設置されたDFIR内のGEONORの観測値を補正したものを真の降水量とした。 \hat{P}_r を真の降水量で除したものを補足率CRとし、9つの風向パターンごとに風が \hat{P}_r に与える影響を検証した。PDS側面方向からの降雪粒子入射時にはCRはおおよそ1、前面方向では $CR > 1$ 、背面方向では $CR < 1$ となり風向への依存性(背面のみ風速依存性も有)が確認された。この関係から、遠藤らは \hat{P}_r への風向風速の影響を補正する式を前面・背面方向ごとに示した。この補正式を用いるためには風向風速計をPDSと同時に設置する必要がある、現場への実装を考えるとコストの上昇



図1 PDS

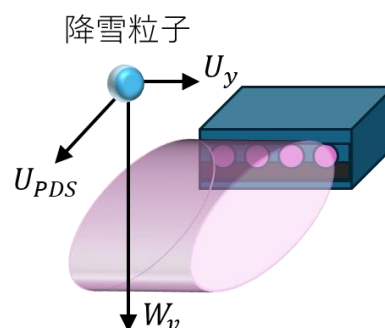


図2 降水粒子が受ける風ベクトル

や位置関係等の課題が残るため、PDS単独で風向風速の影響を補正することが望ましい。本研究では、PDSの観測パラメータから照射方向の風速成分を推定する手法を提案し、風向風速を設定した人工降雪実験装置を用いた室内実験を行い、その観測結果から同手法の検討を行う。また、降水種別の変化が \hat{P}_r に与える影響が明らかにされていないことから、人工降雪実験装置で設定可能な2種類の降水種別を変化させた室内実験を行い、影響を検証した。

2. 風向風速成分を推定する手法

遠藤らが示した風向ごとの補足率の関係から、補足率に大きく寄与するのは図2のようなPDSの照射方向の風速成分 U_{PDS} と落下速度 W_v であり、 U_{PDS} と直交する成分 U_y の影響は小さいと考えられる。 U_{PDS} と W_v から、図3のよう

に降水粒子の入射天頂角 θ が決定される． θ の変化に入射経路の変化をモデルによって考えると図4のようになる．ここで，半値角は9.0 deg，発光パターンは角度に対するガウス分布，粒子はx軸方向の検知領域の中心を通ると仮定した．図4から， θ によって経路長の変化と，xによる照度が変化していることがわかる．同モデルを用いて， θ ごとの照度と時間の関係を考えて図5のようになる．ここで，粒子の直径，落下速度は一定と仮定した．図5から θ によって， t_d と最大照度をとる時間 t_{max} が変化していることがわかる． $t_d = 1$ としたときの t_{max} をPeakshift量 P_s とすると， $\theta = 0$ で $P_s = 0.5$ を中心に变化する θ に関するパラメータとなる． $P_s - \theta$ 関係を明らかにし， $\hat{W} - W_v$ 関係から W_v を与えれば，PDS単体で U_{PDS} を求めることが可能となる．

$P_s - \theta$ 関係を明らかにするためには， U_{PDS} と W_v の観測データが必要となるが，自然環境下でこれを安定させることは困難である．そのため，室内実験の観測データから $P_s - \theta$ 関係を明らかにするべきだと考えられる．しかし，室内実験を実施したとしても，降水粒子の形状を完全に揃えることはできないため，形状の違いや乱流によって落下経路はばらつき，それに伴って観測データもばらつくことが予想される．このような観測データのみから $P_s - \theta$ 関係の関数系を判断することは難しい．そこで，事前に経路モデルから図6のような $P_s - \theta$ 関係のモデルを作成し，そこからモデル関数を決定する．これを室内実験の観測データにフィッティングさせることで， P_s から θ を推定する近似式を決定する．ここで，図6から $P_s - \theta$ 関係は $\theta = 0$ で $P_s = 0.5$ を点対称とし，指数関数のようにふるまっていることから，双曲線正弦関数のような性質をもつと考え，次の式(2)をモデル関数とした．

$$P_s = c - a \sinh(b\theta) \quad (2)$$

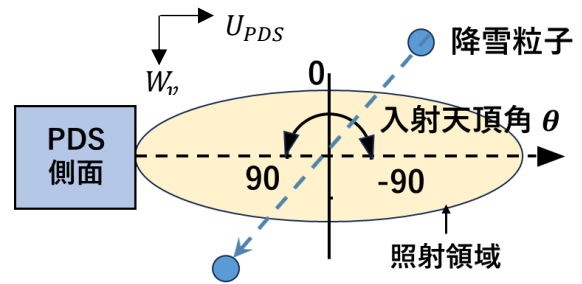


図3 入射経路と入射天頂角の変化

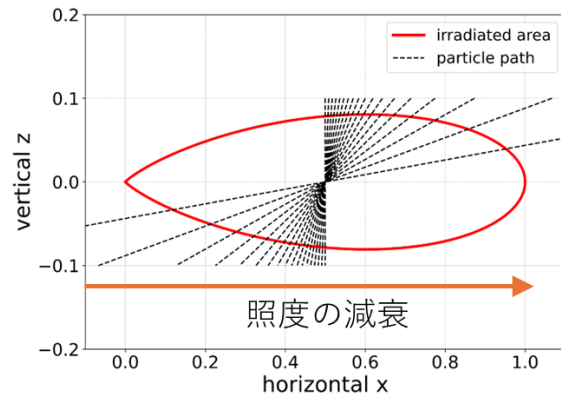


図4 θ を変化させた経路モデル

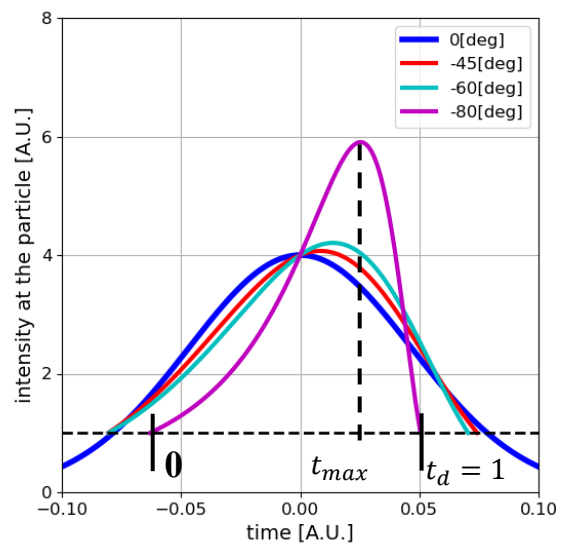


図5 θ による照度と時間の変化

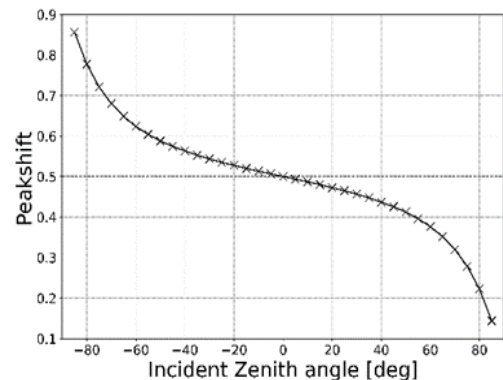


図6 モデルから作成した $P_s - \theta$ 関係

3. 室内実験

本研究では、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の人工降雪実験装置を用いて、降水種別が \hat{P}_r をはじめとする観測パラメータに与える影響を検証する実験 1、 $P_s - \theta$ 関係を明らかにするための実験 2 の 2 種類の室内実験を行った。

実験 1 では、降雪種別による影響を検証するため、図 7 に示すような雪片に近い降雪 A、霰に近い降雪 B と降雪種別を変化させながら観測を行った。光学式ディストロメーターである LPM を用いて、実際の降水粒子の直径、落下速度を測定した。降水量 p_r を測定するために、0.1g 単位で計測が可能な電子天秤を用いた。それぞれの観測器は十分な降雪が起こる降雪エリア内に設置した。実験 1 の様子を図 8 に示す。

実験 2 では、 $P_s - \theta$ 関係を明らかにするため任意の風向風速下での観測実験を行う必要がある。自作した回転台を用いて入射方位角 φ [deg]を設定し、実験室に備え付けの横風発生装置を用いて横風の風速を設定することで、図 9 のように風向風速を変化させた。PDS 近傍の風速 U_h を測定するため超音波風速計を用いた。横風発生装置から生まれる横風は距離に応じて減衰が起こるとともに扇状に分散するため、この影響をできるだけ軽減するよう可能な限り PDS を横風発生装置に近づけて設置した。観測パターンは表 1 のように設定し、各パターンで 15 分間の計測を行った。ここで、各観測パターンの U_{PDS} 、 θ は次のように計算される。

$$U_{PDS} = -U_h \cos \varphi \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{U_{PDS}}{W_v} \right) \quad (4)$$

実験 2 の 6m/s 時において横風の影響で降雪粒子が分裂する現象や、横風発生装置上部の積雪が巻き上げられて観測領域に入射する状況

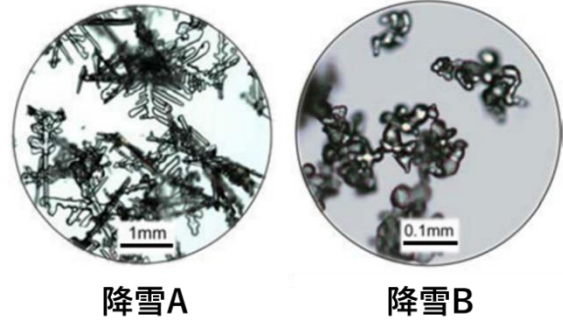


図 7 人工降雪実験装置から生成される降雪

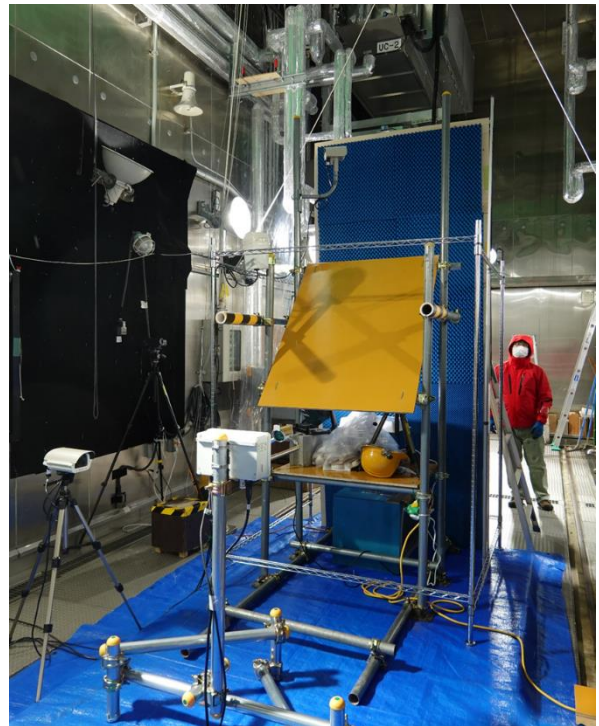


図 8 実験 1 の様子

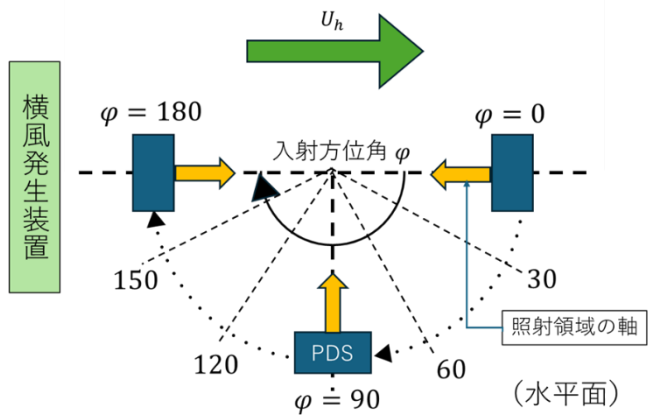


図 9 入射方位角のパターン

が確認されたため、6m/s 時のデータはフィッティングに適さないと考え、用いないこととした。実験 2 の様子を図 10 に示す。

4. 結果と考察

4.1. 室内実験 1

降雪 A・B における \hat{p}_r [mm/min] と p_r [mm/min] の推移をそれぞれ図 11 と図 12 に示した。降雪 A では \hat{p}_r は p_r の波形を概ね再現できていることが確認できる。 \hat{p}_r - p_r 関係の 0 を通る回帰直線の傾きにおいても 1.05 を示したため、降雪 A では p_r を 5% 程の過少評価で推定できていたと考えられる。降雪 B においては常に \hat{p}_r が p_r を過大評価しており、 \hat{p}_r - p_r 関係における回帰直線の傾きも 0.48 となったため、降雪 B では p_r のおよそ 2 倍の \hat{p}_r が推定されていると考えられる。

\hat{p}_r を推定するパラメータである \hat{D} と \hat{W} に対応する LPM の粒子直径と落下速度から 5 分毎に得た CMF (D, W)³⁾ の挙動を確認するため、降雪 A・B における、 $\hat{D} - D$ 関係と $\hat{W} - W$ 関係を図 13 と図 14 (5 分平均値) に示した。図 12 の $\hat{D} - D$ 関係から降雪 A の点群と降雪 B の点群はほぼ一直線上にあり、原点を通る回帰直線の傾きも降雪 A では 6.06、降雪 B では 6.24 とほとんど一致しており、降雪種別が変わり D が変化したとしても \hat{D} と D は常に 6 倍程度の比例関係にあると考えられる。図 13 の $\hat{W} - W$ 関係から降雪 A の点群と降雪 B で上下に分かれていることが確認でき、回帰直線の傾きも降雪 A で 0.0066、降雪 B では 0.0105 と乖離している。よって、 \hat{W} と W の比例関係は降雪種別によって変化すると考えられる。 \hat{p}_r の計算において \hat{W} と W は常に一定の比例関係をもつと仮定し常に一定の K_{pr} を与えている。降雪 B において \hat{W} と W の比例関係が変化したことによって、一般的な雪片に近い降雪の多いフィールドから得た K_{pr} が霰に近い降雪 B に適さなくなり、 \hat{p}_r

表 1 実験 2 の観測パターン

U_h [m/s]	6.0, 2.0, 1.0, 0.5 (目安)
ϕ [deg]	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
降雪種別	一般的な雪片に近い降雪A, 強度は3



図 10 実験 2 の様子

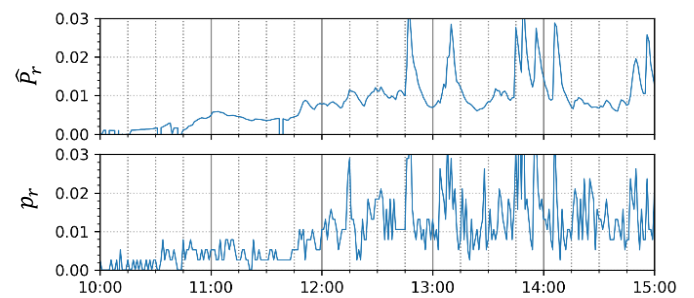


図 11 降雪 A における \hat{p}_r と p_r の推移

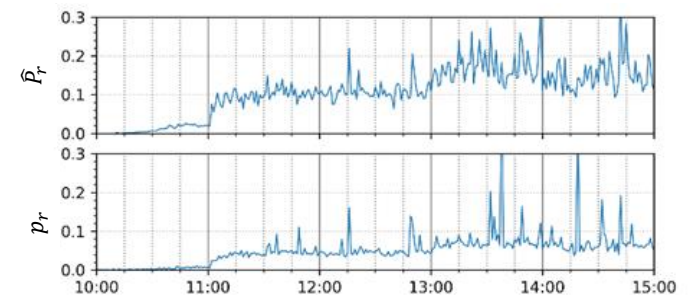


図 12 降雪 B における \hat{p}_r と p_r の推移

の誤評価に繋がったと考えられる。

自然環境下での計測を想定した場合、降水種別に応じて適切な K_{pr} が変化する可能性に加え、 \hat{W} の算定手法に課題がある点が今回の実験結果によって示された。

4.2. 実験 2

実験 2 によって得られた観測データから得られる各観測パターン θ ごとの P_s の平均値とその標準偏差を図 14 に示す。 $\theta = -30 \sim 30$ においてはほとんど P_s の平均値に変化が見られないがこれはモデルと同様の結果である。加えて、 P_s の平均値が θ の上昇とともに系統的に低下している様子が確認できる。このようにモデルと同様の関係が実験結果にも見られたため、Peakshift 量 P_s から入射天頂角 θ を推定することは可能であると考えられる。実験 2 の観測データをモデル式 (2) に python3 環境の scipy モジュールの `curve_fit` 関数 (非線形最小二乗法) を用いてフィッティングさせ P_s から θ を推定する近似式 (5) を得た。

$$P_s = 0.479 - 0.002(\sinh(0.058\theta)) \quad (5)$$

近似式 (5) の曲線を図 14 中に示す。 $\theta = 0$ で $P_s = 0.5$ をとると考えられていたが、近似式では $P_s = 0.479$ をとった。そこで、実験 1 における降雪 A、強度 3 の無風状態での P_s の平均値を計算したところ $P_s = 0.476$ となった。よって、 $\theta = 0$ で $P_s = 0.48$ 付近をとるのは PDS の器械的特性であると考えられる。この特性が個体差によって変化するものなのかは、 P_s から θ を推定する上で重要であるため、今後検証していく必要がある。

近似式 (5) を用いて推定した θ と、 \hat{W} から推定した落下速度 W を用いて U_{PDS} を推定することが可能であるが、実験 1 から \hat{W} の評価手法に課題があることが示されており、実験 2 でも風速の上昇に伴って落下速度が上昇するとい

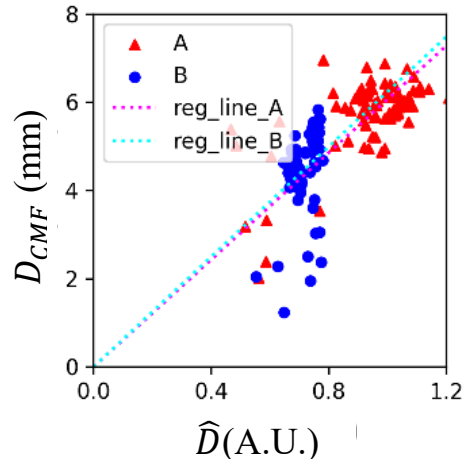


図 13 $\hat{D} - D$ 関係

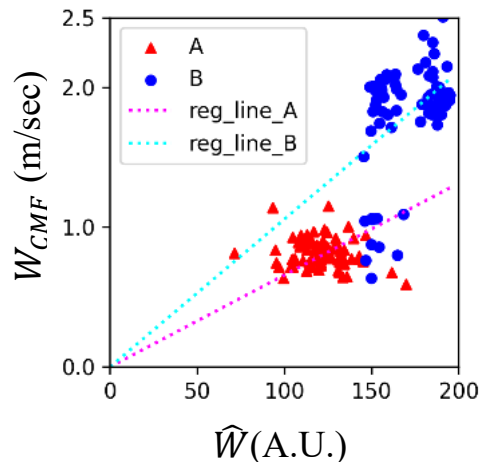


図 14 $\hat{W} - W$ 関係

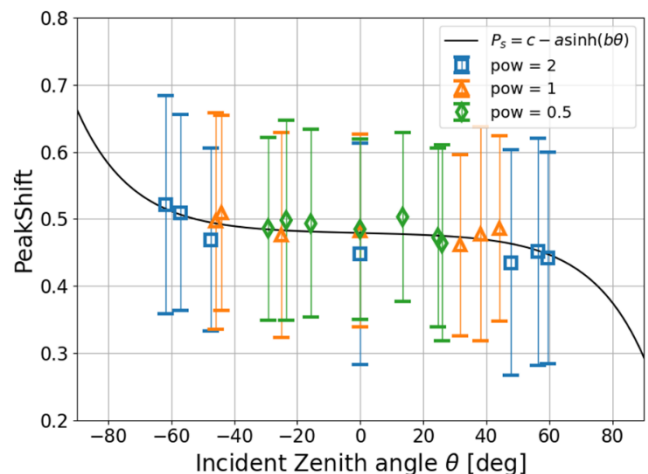


図 14 θ ごとの P_s の平均値とその標準偏差

った現象が確認された。そこで、LPM から得られる落下速度の平均値 $W = 0.589[m/s]$ を用いて U_{PDS} の推定を行った。その結果を図 15 に示す。低風速域 (0.5, 1.0 m/s) では、概ね各風速の推定ができていたものの、2 m/s 時に乖離が目立つ結果となった。これは、2 m/s 時に降雪粒子が風の影響を強く受け、落下速度が変化してしまったことに起因すると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 熊倉, 他: 光学反射を利用した個体降水測定機器の開発と出力の物理量化について, 雪氷研究大会, 2018
- 2) 遠藤優斗: 光学反射型個体降水観測機器の降水量に対する風向風速依存性に関する研究, 長岡技術科学大学修士論文, 2020
- 3) 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

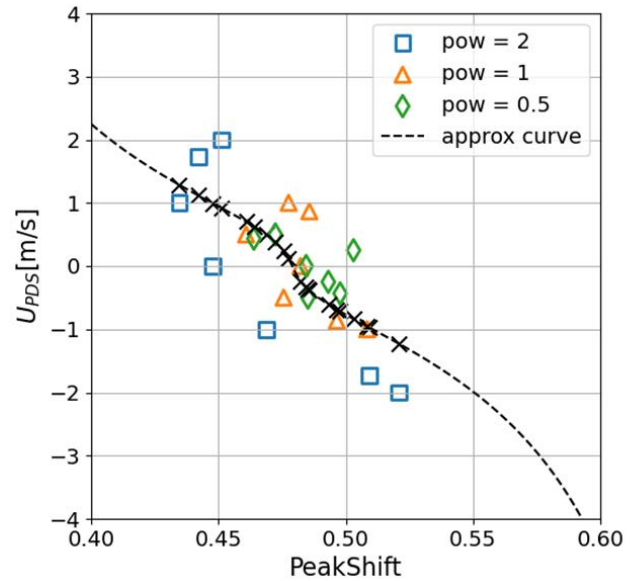


図 15 近似式を用いた U_{PDS} の推定