

光学式反射型固体降水観測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 地球環境工学研究室 遠藤 優斗
指導教員 熊倉 俊郎

1 はじめに

冬季における降雪・積雪による交通障害・災害などの問題に対して防災効果を高めるためには、正確な降水量および災害によっては降水種の情報が必要となる。一般に地上降水量の測定には円筒型の雨量計を用いた手法が主流である。しかし、固体粒子観測においては風の影響を受けやすく、捕捉率の低下に伴う降水量誤差が発生することが知られる。また、降水種別判別に関しても气象台など一部の観測に限られており、現場で使用できる機器が求められる。本研究で対象としている光学センサーを用いた固体降水観測器は上記の問題を解決するために開発されている。しかし、円筒状とは異なるものの、降水粒子が風向風速の影響を受け、観測領域への入り方によって無風時と計測値が異なる可能性が考えられる。そこで本研究では、光学式反射型固体降水観測器の測定結果に対する風の影響を検証するとともに、降水量推定式に対する補正方法を提案することを目的とする。

2 観測と方法

2.1 光学式反射型固体降水観測器について

本研究の対象とする光学式反射型固体降水観測器（以下：本測器）を、図1に示す。本測器は、固体粒子に対する近赤外線の反射強度（電圧値）を測定し、アナログ信号をAD変換して0.2ms間隔でデータを出力する仕様である。この観測値から内部マイコン処理で降水種別と降水量を算出している。なお、この算出は無風状態を前提としている。

2.2 観測

2.2.1 設置地点の風向風速の解析

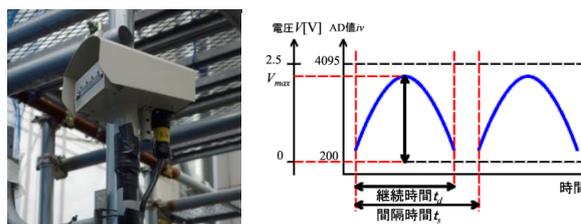


図1 光学式反射型固体降水観測器と出力概略図

観測地点を防災科学技術研究所雪氷防災研究センターとし、2018年1月の風向風速データ、DFIR内のGEONOR降水量、気温データを用いて、降雪期間の風向風速の統計を取った。降雪期間はGEONOR降水量を10分間降水量に変換した後、1°C以下の気温で、0.5mm/10min以上のある期間とした。この降雪期間時の風向風速を解析し、設置地点の主風向を南西と定めた。これを図2に示す。この解析結果を元に設置と観測を行った。

2.2.2 2018年12月～2019年3月の降雪観測

2018年12月～2019年3月の降雪観測を行う前に、観測に使用する本測器の校正を行った。観測地点は項2.2.1と同じ地点とし、図2から設置地点の主風向を南西とし、①主風向に対して正面。②主風向に対して直角（北西向き）で設置を行い、防風ネット内にも本測器を1台設置した。設置状況を図3に示す。

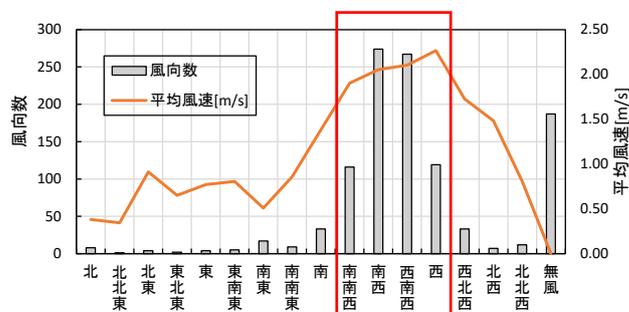


図2 2018年1月の風向頻度分布

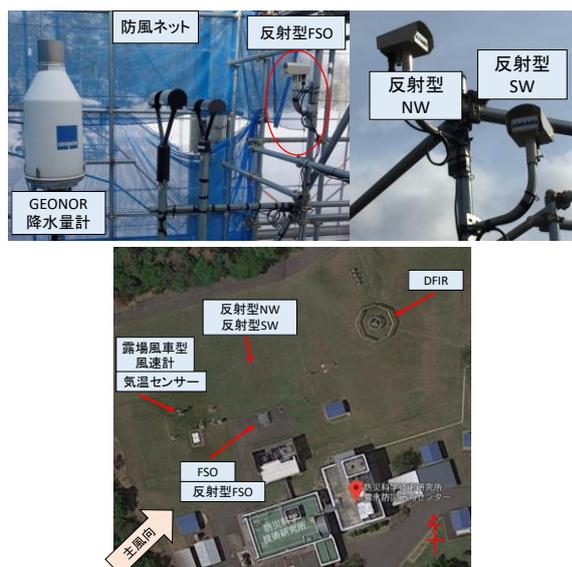


図 3 本測器の設置状況

2.3 観測データ

2.3.1 降水量データ

降水量の観測データは DFIR 及び、FSO 内に設置された重量式降水量計 GEONOR を用いた。GEONOR 降水量は観測値が積算値であるため、現時刻の積算値から 1 分前の積算値を減算して 1 分間降水量としたのち、3 つの重量式センサーの平均値としている。なお、DFIR の GEONOR は重量式センサーのうち 1 つのノイズが大きかったため、2 つの平均とした。

2.3.2 光学式反射型固体降水観測器の観測データ

本測器の観測期間は 2018 年 12 月 31 日～2019 年 3 月 26 日で、その内 2019 年 1 月 1 日～10 日及び、1 月 21～22 日、1 月 29 日～2 月 7 日の間は欠測期間である。

2.3.3 風向風速気温データ

風向・風速・気温データはそれぞれ、ネット外に設置した本測器の西側に設置してある観測器を使用した。それぞれ、1 分データを用いている。

2.4 解析方法

2.4.1 解析の手順

本測器の捕捉率補正手法の参考として、「冬期における降水量計の補正特性」(横山ら, 2003) ²⁾を参考として、以下の手順で解析を行うこととした。

1. 対象とする降水量計の観測
2. WMO の推奨方法により、比較対象とする DFIR の真の降水量の推定
3. 風向の 16 方位ごとにデータを分類
4. 測器正面に対する入射角度ごとにデータを再分類
5. 補足率を(測定値/真値)で表し、風速との依存関係を入射角度ごとに検証
6. 吉田 (1959) の式 ³⁾で回帰させ補正式を求める。

2.4.2 解析に用いた降雪期間

観測データを元に、0°以下の気温で、降水が見られる期間のうち、すべての観測データが揃っている期間を表 1 に示す。

表 1 観測データが得られた降雪期間

	開始	終了	総データ数	無風	風あり
期間1	2019/1/16 7:48	2019/1/16 22:32	245	215	30
期間2	2019/1/18 3:39	2019/1/18 4:23	11	0	11
期間3	2019/1/23 22:22	2019/1/28 20:55	787	78	709
期間4	2019/2/8 1:10	2019/2/10 22:57	756	617	139
期間5	2019/2/12 12:18	2019/2/10 22:57	409	280	129

表 1 より、風のあるデータ数がもっとも多く得られた 2019 年 1 月 23 日 0 時 0 分から 1 月 29 日 0 時 0 分までの期間である降雪期間 5 を解析対象とした。

3 解析および結果

3.1 DFIR の補正

DFIR の降水は以下に示した Goodison (1998) の補正式 ¹⁾を用いて補正を行い、真の降水量として扱う。なお、 P_{BUSH} は真の降水量、 P_{DFIR} は DFIR の降水量、 W_s は風速である。

$$P_{BUSH}/P_{DFIR}=100+0.439W_s+0.22W_s^2 \quad (1)$$

3.2 降水量推定

無風条件下において、疑似平均個数 N 、粒形の直径に相当する値 \bar{D} 、落下速度に相当する値 \hat{W} より、本測器の推定降水量 Ph は以下の式(2)で求めることができる。

$$Ph=KN\bar{D}^3\hat{W}^2 \quad (2)$$

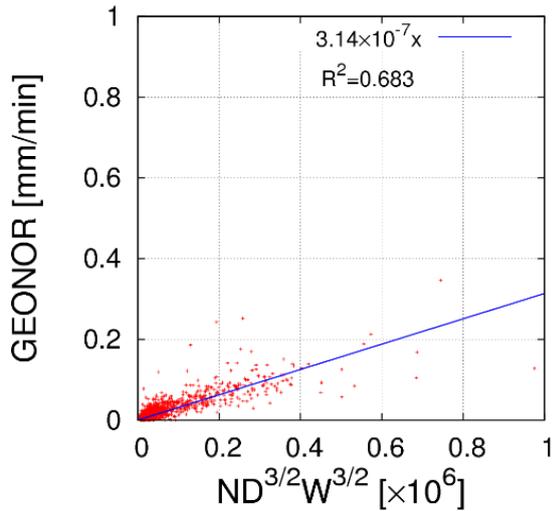


図 4 反射型 FSO の $KN\hat{D}_z^3\hat{W}_z^3$ と GEONOR 降水量の回帰図

表 2 16 方位ごとに反射型 NW と SW のデータ数

	反射型NW データ数	反射型SW データ数
北	28	27
北北東	38	43
北東	41	43
東北東	17	18
東北東	3	3
東南東	3	3
南東	4	4
南南東	4	4
南	7	7
南南西	13	13
南西	22	24
西南西	21	21
西	8	8
西北西	11	10
北西	12	12
北北西	21	23
無風	288	305

係数 K は図 4 に示した、 $ND_z^3\hat{W}_z^3$ と FSO の GEONOR 降水量から回帰分析により定める。定めた式を式 (3) に示す。

$$Ph = 3.14 \times 10^{-7} ND_z^3 \hat{W}_z^3 \quad (3)$$

式 (3) より、ネット外の降水量推定値を算出する。

3.3 16 方位ごとにデータを分類

それぞれ風向を 16 方位に分割を行った。こ

の時、DFIR において $0.1[\text{mm}/\text{min}]$ 程度のノイズがあり、降水が少ない場合において、捕捉率に異常値が多く見られたことから、 $0.2[\text{mm}/\text{min}]$ 以下の降水を外すこととした。また、反射型の降水が見られないデータも除いている。その後、16 方位ごとに分割したデータ数を反射型 NW と反射型 SW それぞれについて表 2 に示す。

3.4 入射角度ごとのデータの再分類

捕捉率特性を知るためにはデータ数が多いことが望ましい。そこで、反射型 NW と SW それぞれに対する入射方向を 9 つの方向に分けて、データの再分類を行うこととした。入射角度ごとの区分を図 5 に示す。また、9 つの入射角度に対する反射型 NW と SW の風向の区分を再分類について表 3 に示す。

3.5 入射角度ごとの風速に対する捕捉率特性

ネット外の降水量を DFIR の真の降水量で除したものを捕捉率とし、本測器に粒子が入り込む入射角度ごとに、捕捉率と風速の特性を検証し、補正値を導出した。

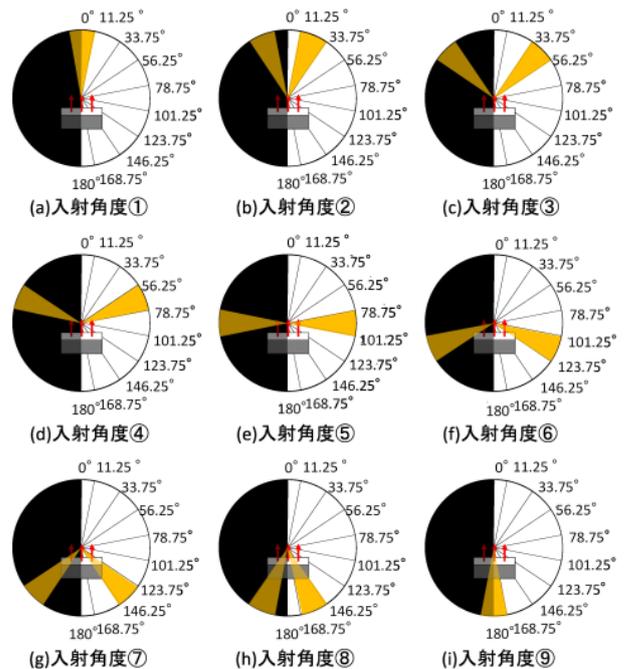


図 5 入射角度の区分

表3 各風向に対する入射角度の振り分け

入射角度区分	反射型NW	反射型SW
入射角度① (0 - 11.25[deg])	南西	北西
入射角度② (11.25 - 33.75[deg])	西南西・南南西	西北西・北北西
入射角度③ (33.75 - 56.25[deg])	西・南	西・北
入射角度④ (56.25 - 78.75[deg])	北西・南西	西南西・北北東
入射角度⑤ (78.75 - 101.25[deg])	西北西・南南西	南西・北東
入射角度⑥ (101.25 - 123.75[deg])	北西・南西	南南西・東北東
入射角度⑦ (123.75 - 146.25[deg])	北北西・東南東	南・東
入射角度⑧ (146.25 - 168.75[deg])	北北東・東北東	南南東・東南東
入射角度⑨ (168.75 - 180[deg])	北東	南東

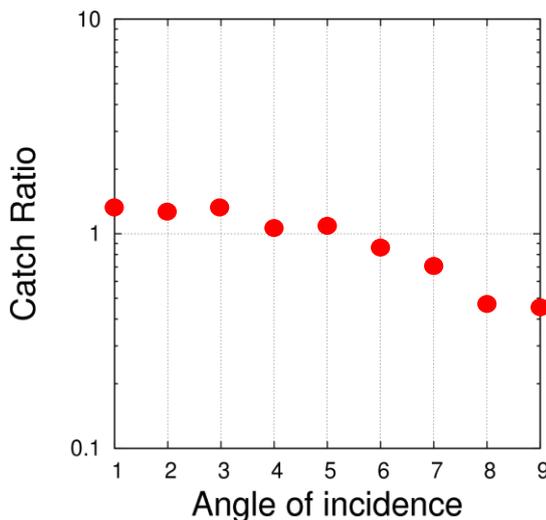


図6 入射角度ごとの平均捕捉率

4 結果と考察

図5に示した入射角度の区分ごとに、捕捉率の平均を求めたものを図6に示す。入射角度1,2,3を正面方向、入射角度4,5,6を側面方向、入射角度7,8,9を背面方向と定義する。式(2)で示した降水量推定式に加える補正係数として、正面・側面・背面ごとに捕捉率を定め、その逆数を乗することとした。図6より、正面方向の平均捕捉率はそれぞれ1を超えていることから、平均値を用いるこ

ととした。正面方向における捕捉率 CR_{front} を式(4)に示す。

$$CR_{front}=1.325 \quad (4)$$

図6より、側面方向における平均捕捉率は約1であるため、捕捉率 CR_{side} は1とした。これを式(5)に示す。

$$CR_{side}=1 \quad (5)$$

図6より、背面方向における平均捕捉率は1よりも小さくなっている。また、最背面である入射角度9に近づくほど、捕捉率が下がっていることがわかる。そこで、吉田(1959)の式³⁾を参考に入射角度7,8,9のそれぞれで線形回帰を行い、捕捉率を求めた。入射角度7の線形回帰を図7に示す。これにより求め式を式(6)に示す。 W_s は風速である。

$$CR_{back7}=1-0.315W_s \quad (6)$$

入射角度8の線形回帰を図8に示す。これにより求め式を式(7)に示す。

$$CR_{back8}=1-0.412W_s \quad (7)$$

入射角度9の線形回帰を図9に示す。これにより求め式を式(8)に示す。

$$CR_{back9}=1-0.466W_s \quad (8)$$

次に、入射角度7,8,9は最背面である9に近づくほど、捕捉率が下がる傾向が見られたことから、角度を含む式が作成できると考えた。そこで、式(9)を基に角度依存性を含む式を作成した。これを式(9)に示す。なお、 θ は入射角度の平均角度(例として $30^\circ \sim 40^\circ$ なら 35°)である。

$$CR_{back}=1+0.466W_s \cos \theta \quad (9)$$

式(9)の妥当性を評価するために、入射角度7,8,9のそれぞれで線形回帰により求めた式と比較を行った。入射角度7における式(6)と式(9)の比較を図10に示す。入射角度8における式(7)と式(9)の比較を図11に示す。入射角度9における式(8)と式(9)の比較を図12に示す。

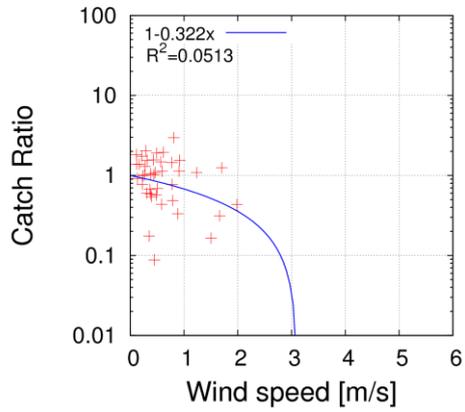


図 7 入射角度 7 の線形回帰

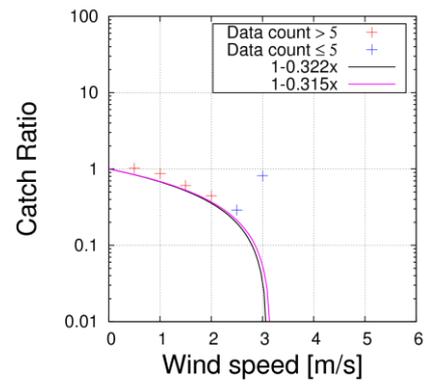


図 10 回帰式と角度を含む関数の比較 (角度 7) 黒線 : 式 (6), 赤線 : 式 (9)

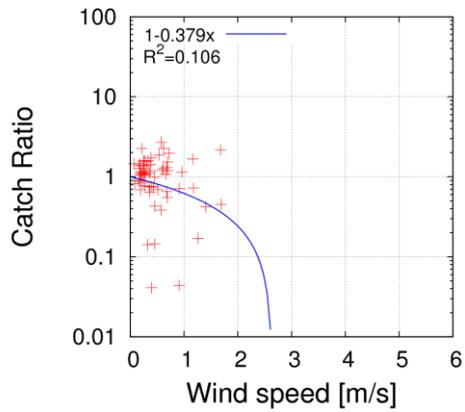


図 8 入射角度 8 の線形回帰

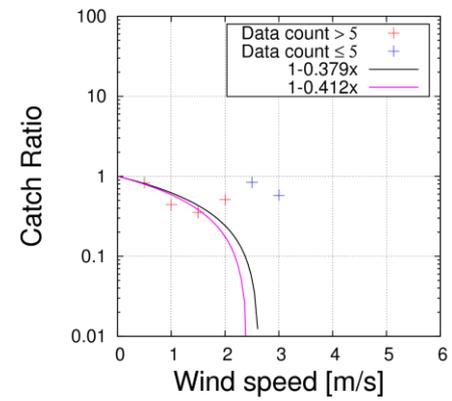


図 11 回帰式と角度を含む関数の比較 (角度 8) 黒線 : 式 (7), 赤線 : 式 (9)

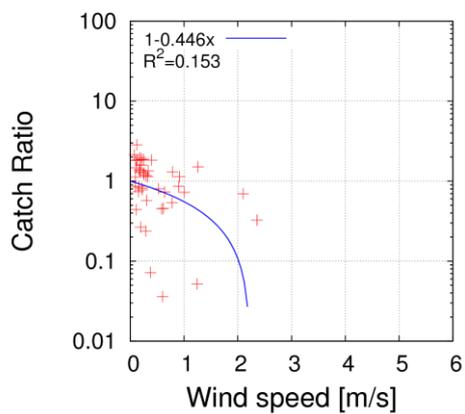


図 9 入射角度 9 の線形回帰

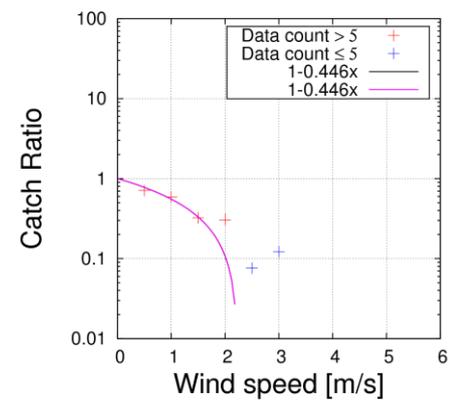


図 12 回帰式と角度を含む関数の比較 (角度 9) 黒線 : 式 (8), 赤線 : 式 (9)

入射角度 7 における式 (6) と式 (9) の比較を図 10 に示す。入射角度 8 における式 (7) と式 (9) の比較を図 11 に示す。入射角度 9 における式 (8) と式 (9) の比較を図 12 に示す。

図 10 より、入射角度 7 における式 (6) と式 (9) の比較では、式 (9) を用いた方が平均捕捉率に近い捕捉率を示すことが分かる。図 11 より、入射角度 8 における式 (7) と式 (9) の比較では、式 (9) の方が風速 0~1.5m/s に対して平均捕捉率に近い値を示している。図 12 は入射角度 9 における式 (8) と式 (9) の比較である。式 (9) における θ は最背面の平均角度を 180° として、式 (8) と同じ係数となる。よって、同一の近似曲線となる。以上の比較から式 (9) を背面方向の捕捉率として用いることとした。

5 まとめ

入射角度ごとの平均捕捉率の傾向から、正面方向および側面方向の補正係数を定めた式を以下に示す。正面方向の補正降水量 P_{front} が式 (10)、側面方向の補正降水量 P_{side} が式 (11)、背面方向の補正降水量 P_{back} が式 (12) である。なお、本研究における背面方向の式 (12) は線形近似により係数を定めたが、風速の高い場合はこの式では、マイナスの値を示してしまう。観測による高い風速域のデータ数も少なかったことから、今回定めた式は、低風速域（風速 2m/s 以下）程度で有効な式であると考えられる。

$$P_{front} = 0.755 \times 3.14 \times 10^{-7} N \hat{D}^3 \hat{W}^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

$$P_{side} = 3.14 \times 10^{-7} N \hat{D}^3 \hat{W}^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

$$P_{back} = \frac{3.14}{1 + 0.446 W_s \cos \theta} \times 10^{-7} N \hat{D}^3 \hat{W}^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

参考文献

- 1) Goodison B.E, Louie P. Y.T. and Yang D (1998) "WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report", WMO : 14
- 2) 横山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上聡・川方俊和. 冬期における降水量計の捕捉特性. 日本雪氷学会誌雪氷 65 巻 3 号 2003 年 5 月 PP.303-316
- 3) 吉田作松. 積算雪量計の研究 (第二報) 主として型別の捕集率ならびに積算雪量計実用化のための吟味. 研究時報 11 1959 年 PP.507-524