

## 1 研究背景

降水量は水循環を構成する最も基本的な要素の一つであり、河川流出解析、洪水予測、水資源管理、雪氷水文学など、多くの分野において重要な観測量である。降水は時間的・空間的変動が大きく、その実態を把握するためには高精度かつ連続的な観測が求められる。しかしながら、降水量を高精度に観測することは容易ではなく、特に冬季における固体降水では観測誤差が顕在化しやすい。現在広く用いられている転倒ます型雨量計は、構造が簡単で多点観測に適している一方、一定量の降水が蓄積されて初めて観測値が更新されるため、短時間変動を捉えにくいという課題がある。また冬季には降雪が内部に堆積することや融雪処理の影響により、観測値に遅れが生じる場合がある。これらの課題に対して、降水粒子の物理量を直接観測する粒子観測型の降水観測装置が研究されてきた。その一つとして、光学式反射型固体降水観測器（PDS）が開発されている。PDSは降水粒子による反射光を利用して粒子を検出し、粒子直径および落下速度を推定することにより降水量を算出する観測装置である。PDSは固体降水の観測に特化した装置であり、転倒ます型雨量計のような融雪遅れが生じないという特徴を有する。一方で、粒子観測に基づく降水量推定では、観測粒子数のばらつきや欠測の影響を受けやすく、解析条件によって推定結果の性質が変化する可能性がある。

## 2 研究目的

本研究では、PDSによる降水量推定において時間積算間隔の違いが推定特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。従来の研究では、PDSによる降水量推定は主として5分間隔のデータを用いて評価されてきた。しかし、粒子観測に基づく降水量推定では、時間積算スケールを変更することで推定精度や誤差特性が変化する可能性がある。そこで本研究では、時間積算間隔を5分、10分、15分、20分、30分、45分、60分の7種類に設定し、各時間間隔においてPDS推定降水量と基準降水量との対応関係を比較することで、時間スケール依存性を体系的に整理する。本研究の目的は以下の3点である。

1. PDSによる降水量推定の時間積算間隔依存性の整理
2. 時間積算間隔による誤差構造の変化の評価
3. 観測目的に応じた時間間隔選択の指針の提示

## 3 観測概要

本研究では、新潟県十日町に設置された観測装置を用いて降水観測データを取得した。観測には以下の装置を使用した。

- 光学式反射型固体降水観測器（PDS）
- Laser Precipitation Monitor（LPM）
- 田村式降水強度計

PDS は近赤外線反射信号を利用して降水粒子を検出する装置であり、粒子直径および落下速度を推定することができる。LPM はレーザービームを用いて粒子直径および落下速度を観測するディストロメーターであり、本研究では粒子特性の参考データとして用いた。田村式降水強度計は微小降水量の検出が可能な降水量計であり、本研究では降水量推定の基準値として用いた。



図 3.1 光学式反射型固体降水観測器(PDS)



図 3.2 Laser Precipitation Monitor (LPM)

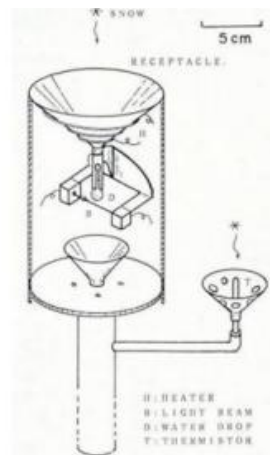


図 3.3 本研究で用いる田村式降水量計と仕組み

#### 4 解析方法

PDS による降水量推定は、降水粒子の直径および落下速度の情報を用いて粒子質量を算出し、質量フラックスに基づいて降水量を推定する方法により行った。まず、PDS 観測データから粒子直径および落下速度を取得した。次に既往研究で示された粒径-落下速度関係式および粒径-質量関係式を用いて粒子質量を算出した。粒子質量と落下速度の積により定義される質量フラックスを用いることで降水量を推定し、各時間積算間隔ごとに降水量を再集計した。時間積算間隔は 5 分、10 分、15 分、20 分、30 分、45 分、60 分の 7 種類とし、各時間間隔において PDS 推定降水量と田村式降水量の対応関係を比較し、相関係数、RMSE、MAE などの誤差指標を算出した。

## 5 解析結果

### 5.1 解析期間の気象条件

本研究では、解析対象期間を2023年1月25日から1月31日に設定した。この期間における気温および降水粒子数の時系列を図5.1、図5.2に示す。期間を通して気温は概ね0°C以下で推移しており、降水の多くが固体降水として観測されたことが確認できる。

また、降水粒子数は期間中に複数回増加しており、降水イベントが断続的に発生していることが分かる。このように、本研究の解析対象期間は低温条件下で固体降水が継続的に観測された期間であり、PDSによる固体降水観測特性を評価する上で適した条件であった。

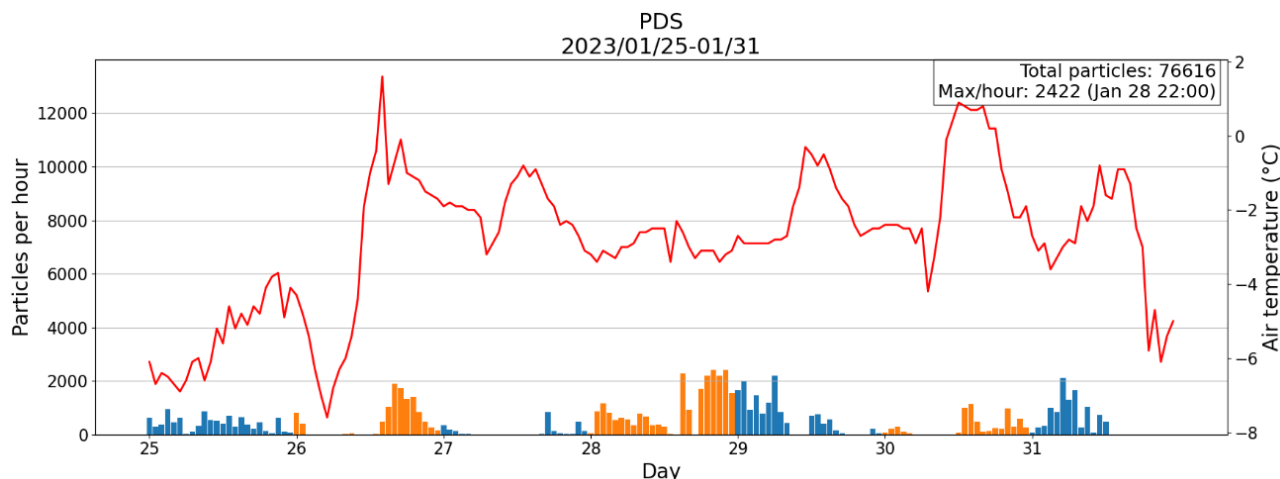


図 5.1 PDS における時間別粒子数と気温の時系列 (2023/1/25-31)

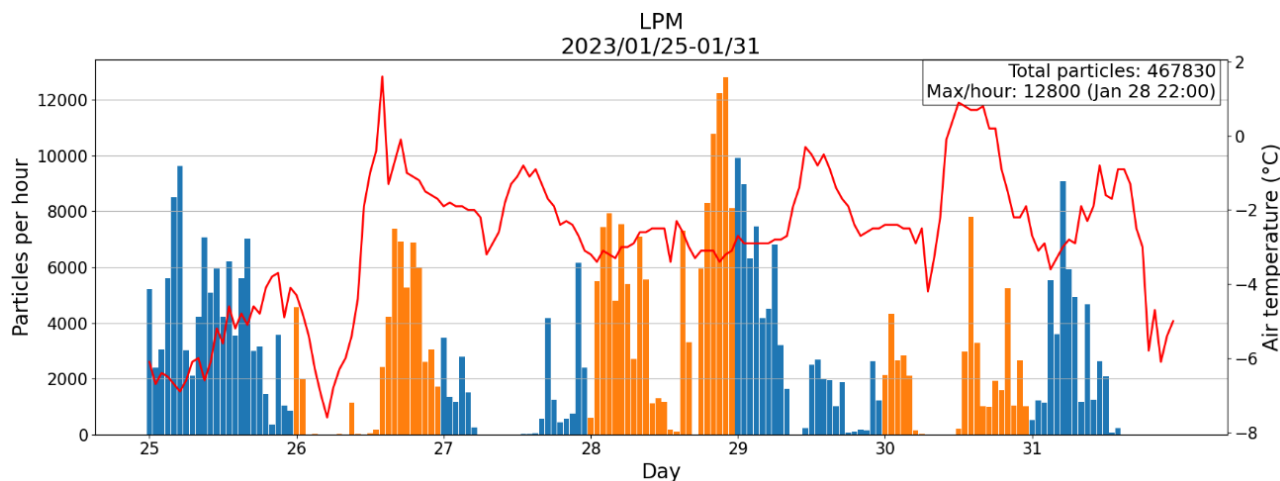


図 5.2 LPM における時間別粒子数と気温の時系列 (2023/1/25-31)

### 5.2 時間積算間隔による降水種割合の変化

時間積算間隔ごとの降水種割合を比較した結果、積算間隔の違いによって降水種の構成比が変化することが確認された。短い時間間隔（5分および10分）では、降水種の割合は時間ごとに大きく変動し、降水イベント中に複数の降水種が混在する様子が確認された。一方で、時間積算間隔を長くするにつれて降水種割合の変動は小さくなり、降水種構成はより安定した値を示すようになった。

これは、短時間の観測では粒子数が少ない時間帯が存在し、降水種判別の結果が統計的ばらつきの影響を受けやすいためと考えられる。時間積算間隔を長くすることで観測粒子数が増加し、粒子群の平均的な特性が反映されるため、降水種判別結果の安定性が向上したと考えられる。また、降水種別の内訳を LPM 観測結果と比較すると、PDS による降水種判別は全体として LPM の結果と概ね対応していることが確認された。ただし、一部の降水種では PDS と LPM の分類結果に差が見られ、特に微弱降水時には PDS で欠測が増加する傾向が確認された。

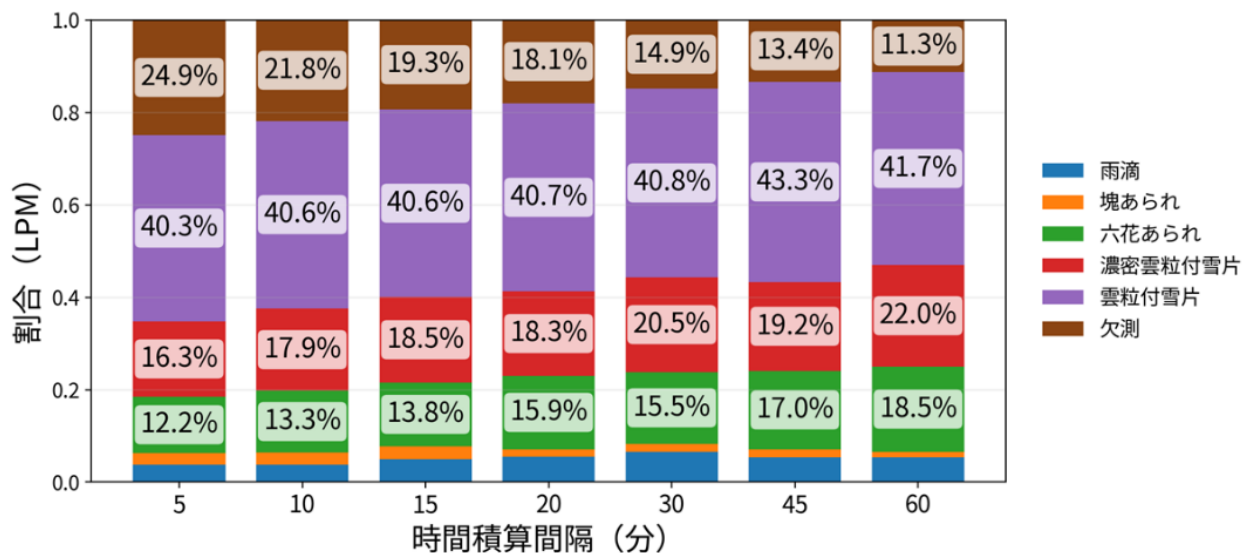


図 5.3 LPM の降水種別構成比

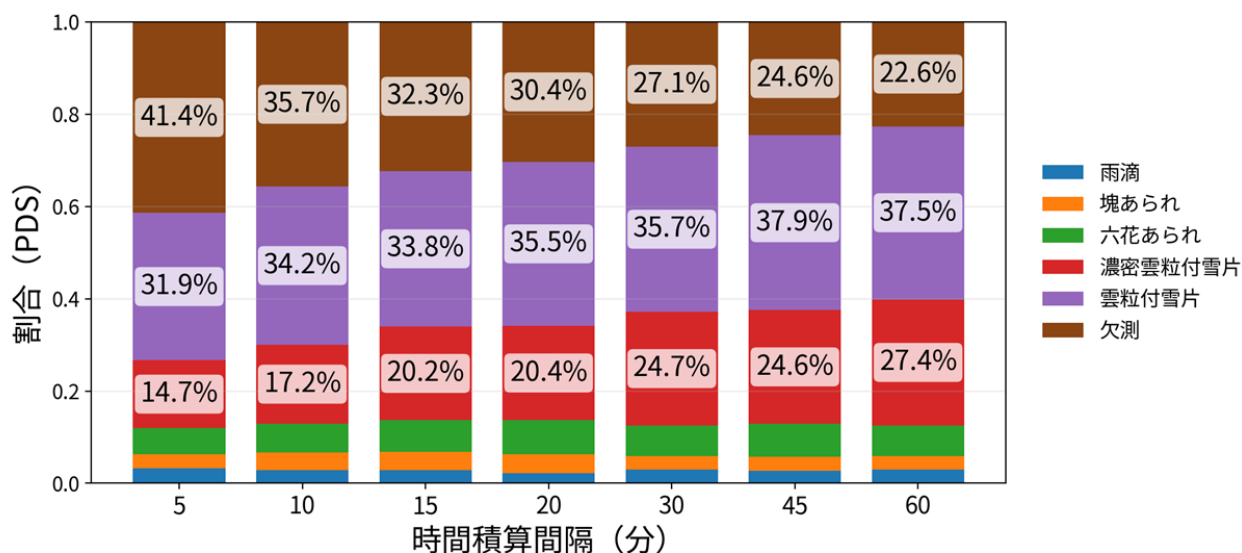


図 5.4 PDS の降水種別構成比

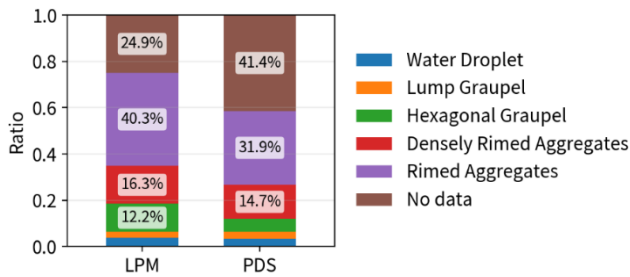


図 5.5 (5分)LPM、PDS の降水種別構成比

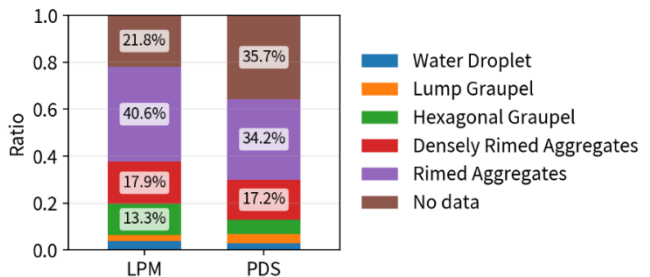


図 5.5 (10分)LPM、PDS の降水種別構成比

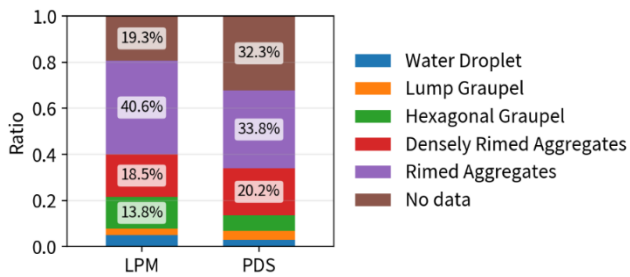


図 5.5 (15分)LPM、PDS の降水種別構成比

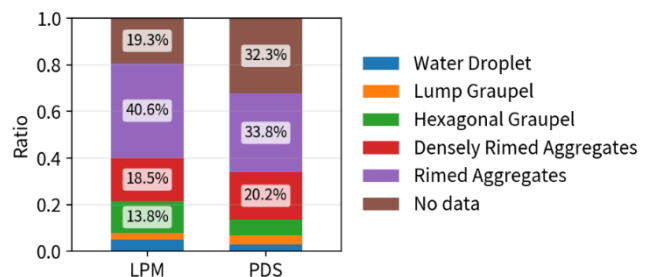


図 5.5 (20分)LPM、PDS の降水種別構成比

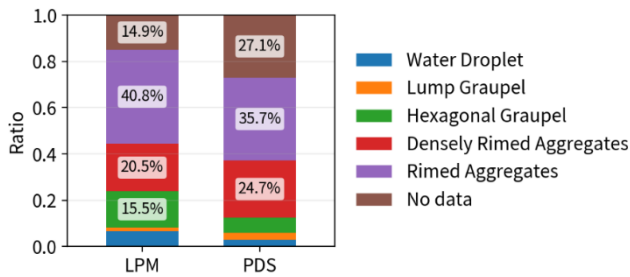


図 5.5 (30分)LPM、PDS の降水種別構成比

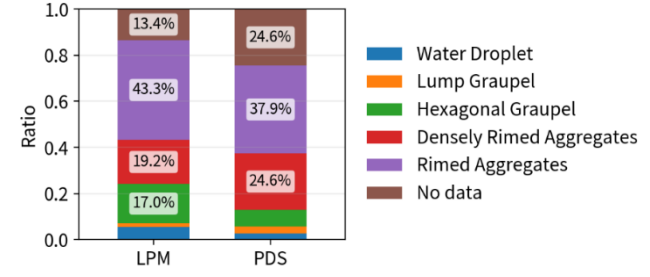


図 5.5 (45分)LPM、PDS の降水種別構成比

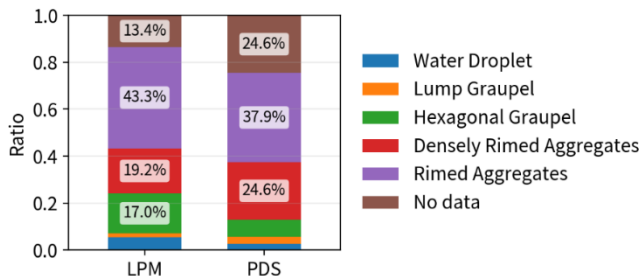


図 5.5 (60分)LPM、PDS の降水種別構成比

### 5.3 時間積算間隔と降水量推定の対応関係

PDS 推定降水量と田村式降水量の対応関係を散布図により比較した結果、時間積算間隔を長くするにつれて両者の対応関係が改善する傾向が確認された。

また、5分積算では散布図のばらつきが大きく、特に微量降水域において PDS 推定降水量が過小評価される傾向が見られた。また、PDS で降水が検出されない時間帯において田村式降水量が観測される場合もあり、短時間データでは欠測の影響が大きいことが確認された。

一方、20分以上の積算間隔では散布図のばらつきが小さくなり、PDS 推定降水量と田村式降水量の対応関係が改善した。特に30分以上の積算では散布点が 1:1 直線付近に分布する傾向が強くなり、降水

量推定の安定性が向上していることが確認された。

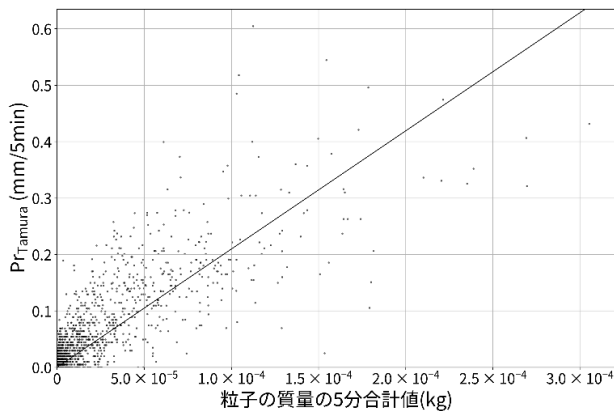


図 5.6(5分) 散布図と回帰直線

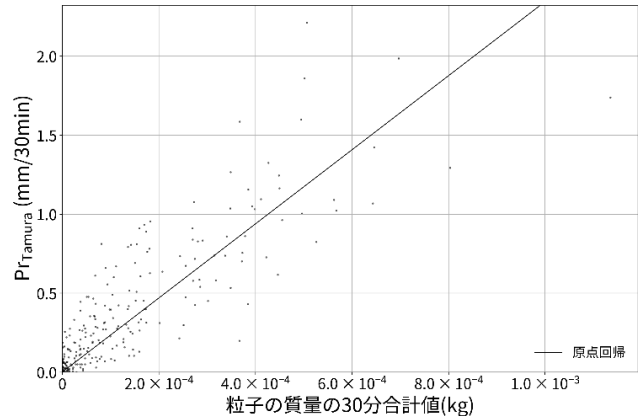


図 5.6(30分) 散布図と回帰直線

#### 5.4 時間積算間隔の違いが誤差構造に与える影響

時間積算間隔の違いが降水量推定の誤差構造に与える影響を評価するため、各時間積算間隔における誤差指標および欠測特性を比較した。図 5.7、図 5.8 に時間積算間隔と誤差指標の関係を示す。図 5.7、図 5.8 より、時間積算間隔を長くするにつれて RMSE および MAE は減少する傾向が確認された。特に 5 分積算では誤差指標が大きく、推定降水量のばらつきが大きいことが分かる。一方で 30 分以上の積算では誤差指標の変化は小さくなり、降水量推定が比較的安定していることが確認された。この結果は、短時間積算では観測粒子数が少ない時間帯が存在し、粒子分布のばらつきや欠測の影響を受けやすいことが原因であると考えられる。PDS は粒子観測に基づく降水量推定を行うため、粒子数が少ない時間窓では推定結果の不確実性が増加する。時間積算間隔を長くすることで観測粒子数が増加し、粒子群の平均的特性が反映されるため、統計的なばらつきが小さくなると考えられる。また、欠測窓率の時間積算間隔依存性を図 5.9 に示す。図 5.9 より、時間積算間隔を長くするにつれて欠測窓率は減少する傾向が確認された。特に 5 分積算では欠測が比較的多く発生しているが、20 分以上の積算では欠測率は大きく低下した。PDS 観測では微量降水条件や粒子数が少ない時間帯において降水量算出が成立しない場合があり、その結果として欠測が発生する。時間積算間隔を長くすることで観測粒子数が増加し、降水量算出条件が満たされやすくなるため、欠測の発生頻度が低下したと考えられる。以上の結果から、時間積算間隔は降水量推定の誤差構造および欠測特性に大きな影響を与えることが確認された。

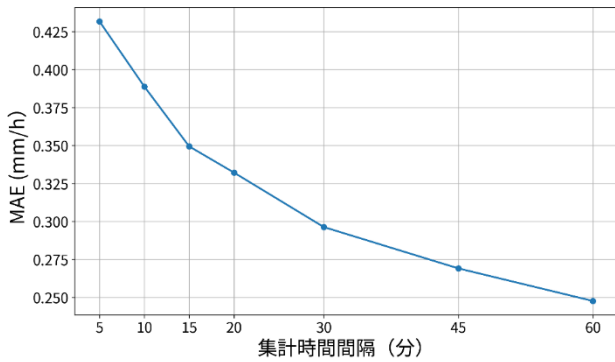


図 5.7 時間積算間隔による MAE の変化

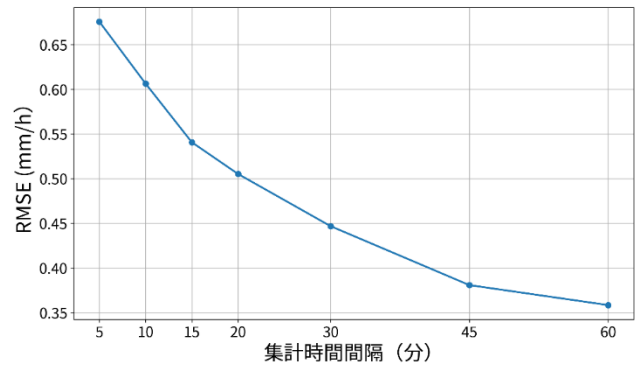


図 5.8 時間積算間隔による RMSE の変化

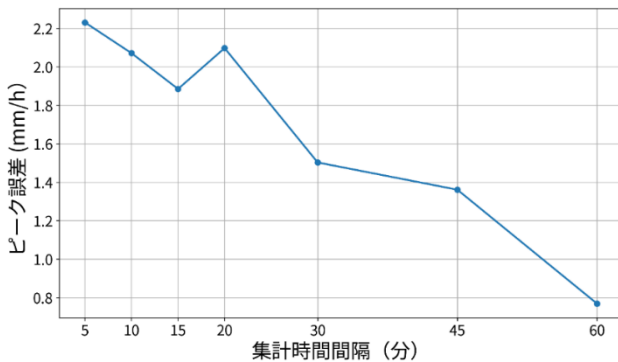


図 5.9 時間積算間隔によるピーク誤差の変化

## 5.6 時間積算間隔が降水量推定および回帰特性に及ぼす影響

時間積算間隔の違いが降水量推定および回帰特性に与える影響を評価するため、各時間積算間隔において PDS 推定降水量と田村式降水量の対応関係を比較した。各時間積算間隔における回帰係数および相関係数を表 5.1 に示す。表 5.1 より、時間積算間隔を長くするにつれて相関係数は増加する傾向が確認された。これは、短時間積算では粒子観測のばらつきや欠測の影響が大きいのに対し、時間積算を長くすることで粒子観測の統計的ばらつきが平均化されるためと考えられる。しかしながら、時間積算間隔を長くするにつれて降水の短時間変動は平滑化される傾向が確認された。特に 30 分以上の積算では降水ピークが平均化されるため、降水イベントの短時間構造を把握することが難しくなる可能性がある。以上の結果から、降水量推定精度の向上と降水の時間分解能の保持との間にはトレードオフ関係が存在することが明らかとなった。

表 5.1 (5分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.754
Adj. $R^2$	0.754
$\beta$	$2.095 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	34.812
N	1181
r	0.794

表 5.1 (10分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.763
Adj. $R^2$	0.763
$\beta$	$2.191 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	49.709
N	603
r	0.799

表 5.1 (15分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.799
Adj. $R^2$	0.798
$\beta$	$2.234 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	52.667
N	455
r	0.832

表 5.1 (20分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.811
Adj. $R^2$	0.811
$\beta$	$2.305 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	59.459
N	351
r	0.838

表 5.1 (30分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.833
Adj. $R^2$	0.832
$\beta$	$2.345 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	67.199
N	245
r	0.854

表 5.1 (45分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.864
Adj. $R^2$	0.863
$\beta$	$2.414 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	73.848
N	169
r	0.877

表 5.1 (60分)回帰分析結果

パラメータ	値
$R^2$	0.869
Adj. $R^2$	0.869
$\beta$	$2.426 \times 10^3$
SE( $\beta$ )	83.067
N	130
r	0.878

## 6 考察

本研究の結果から、PDSによる降水量推定では時間積算間隔が推定特性に大きく影響することが確認された。まず、時間積算間隔を長くすることで降水量推定の安定性が向上することが明らかとなった。短時間積算では粒子観測数が少ない時間帯が存在し、粒子分布のばらつきや欠測の影響を受けやすい。そのため、5分積算では推定降水量のばらつきが大きくなる。一方で時間積算間隔を長くすることで観測粒子数が増加し、粒子群の平均的特性が反映されるため、降水量推定の統計的安定性が向上すると考えられる。また、欠測窓率の時間積算間隔依存性から、短時間積算では欠測の影響が推定結果に大きく影響することが確認された。微量降水条件ではPDSの観測信号が小さく、粒子観測が成立しない場合があるためである。時間積算間隔を長くすることで観測粒子数が増加し、欠測の影響が相対的に小さくなると考えられる。一方で、時間積算間隔を長くすると降水の短時間変動が平滑化されるというトレードオフが存在する。降水イベントのピーク強度や降水開始・終了時刻などの短時間変動は、長時間積算では平均化されてしまう。このため、降水量推定精度の向上と降水の時間分解能の保持の間にはバランスが必要であると考えられる。以上の結果から、PDSによる降水量推定では解析目的に応じて時間積算間隔を選択することが重要である。

## 7 結論

本研究では、光学式反射型固体降水観測器 PDS による降水量推定について、時間積算間隔の違いが推定特性に与える影響を解析した。

その結果、以下の知見が得られた。

1. 時間積算間隔を長くすることで降水量推定の安定性は向上する
2. 短時間変動の再現性は時間積算間隔の増加により低下する
3. PDS 観測では微量降水条件において欠測が発生しやすい
4. 時間積算間隔の選択は降水量推定結果の性質に大きく影響する

以上より、PDS による降水量推定は単一の時間間隔で評価するのではなく、解析目的に応じて適切な時間積算間隔を選択することが重要である。

具体的には、

- 短時間降水の解析 → 5~10 分
- 一般的な降水イベント解析 → 10~20 分
- 総降水量評価 → 30 分以上

の時間積算間隔が適していると考えられる。

本研究は、粒子観測型降水量推定において時間積算スケールが推定特性を規定する重要な要因であることを示した点に意義がある。今後は降水強度や降水種別との関係をさらに詳細に解析することで、PDS 観測の応用可能性を拡張することが期待される。