

固体降水粒子ごとの落下速度を用いた後方流跡線解析と気象レーダーデータによる 地上降水量推定の有効性に関する統計的検討

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 非会員 ○石橋宗磨
長岡技術科学大学 正会員 熊倉俊郎
八千代エンジニアリング (株) 非会員 猪狩吉弘
防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 非会員 本吉弘岐・中井専入
古野電気株式会社 非会員 中島大岳・早野真理子

1. 背景と目的

新潟県をはじめとする豪雪地帯では、豪雪による人的被害が度々発生しているため、冬季の降雪を正確に把握することは重要である。降水・降雪を把握する代表的な技術である気象レーダーによる観測では、レーダーから電波を送信し、降水粒子からの反射波を受信・解析することで、降水に関する情報を取得することができる。気象レーダーは、他の観測機器と比較して水平・時間分解能が高く、広範囲を観測できるため、降水の位置や時間、降水強度等を面的に把握することが可能である。一方、気象レーダーによる観測では、数 km 上空で観測された降水粒子が地表面に到達するまでの空間的・時間的誤差を考慮する必要がある。上空で観測された降水粒子は、落下する過程で風による移流の影響を受け、水平方向に移動しながら地表面に到達する。そのため、レーダー観測で得られた降水情報を地表面に垂直投影して地上の降水に適用することは適切ではない。

この問題に対し、後方流跡線解析を用いることで、降水粒子の移流経路を逆算し、流跡線とレーダー観測面の交差点の降水強度を得ることで、地上の降水強度を推定することができる。ここで、後方流跡線解析に用いる降水粒子の落下速度は、降水粒子種別によって異なることに着目した。落下速度の小さい雪片は風の影響を受けやすく、水平方向への移流量が大きくなる一方、落下速度が比較的大きい霰等では移流量が小さくなると考えられる。したがって、降水粒子の種別や落下速度を考慮することが、地上降水量の推定精度に影響すると考えられる。本研究では、雪片の代表的落下速度を用いた場合と、地上で観測された粒径-

落下速度分布から算出した実落下速度を用いた場合の後方流跡線解析による地上降水量推定を行い、両手法の精度を比較した。これにより、固体降水粒子に応じて適切な落下速度を用いることが、地上降水強度の推定精度の向上に寄与するかを統計的に検証することを目的とした。昨年度では2事例を対象に個別に解析を行ったが、本研究では一冬分のデータを集計し、より多くの事例に基づいて統計的に評価することで、評価の信頼性向上を図った。さらに、実落下速度のレンジごとに両手法の推定精度を比較し、実落下速度の大きさによって、固体降水粒子ごとの落下速度を用いる有効性が異なるかを検証した。

2. 使用データ及び観測機器

2.1. マルチパラメータレーダー

本研究で用いたマルチパラメータレーダーは、古野電気製の X バンド偏波ドップラーレーダーである。設置場所は長岡技術科学大学の環境棟屋上（緯度：37.42318°，経度：138.77819°，標高 88.9m）である。観測仰角は 3°，6°，9.5°，14.3°，21° の 5 仰角で、各仰角を 2 分ごとにスキャンしている。

2.2. Parsivel

OTT 社製の Parsivel は降水粒子の粒径と落下速度をレーザー光により測定する地上観測機器であり、1 分ごとに降水粒子の粒径を 32 クラス、落下速度を 32 クラスの計 1024 クラスで分類したデータを取得する。また、降水粒子の粒径と落下速度の他、降水粒子種別や降雨量、レーダー反射率等を推定可能である。本研究では、雪氷防災研究センターに設置されている Parsivel の測定データを用いて事例選定及び後方流跡線解析に用いる落下速度の計算を行った。

2.3. 二重柵基準降水量計

本研究で使用する地上観測降水量のデータは、雪氷防災研究センターに設置された二重柵基準降水量計（以下、DFIR）の測定値を基に算出した値である。DFIR（Double Fence Intercomparison Reference）はサイズの異なる二重の防風柵を用いることにより、風の影響による降水量計の捕捉率の低下を抑制することができる。中央に設置された降水量計はGEONOR降水量計で、重量式雨雪量計である。中心のバケツ内部を不凍液で満たし、バケツ内に入り込む降水を3つの振動ワイヤーを使って重量を測定している。本研究では、測定値として得られた1分ごとの積算重量を基に算出した降水量の3本分の平均値を用いた。また、時刻 $t-2$ 分～時刻 $t+2$ 分の4分降水量を15倍した値を時刻 t 分の地上観測降水強度とし、4分ごとの地上観測降水強度を算出して推定地上降水強度との比較に用いた。

2.4. NHM

本研究ではNHM（気象研究所非静力学メソスケールモデル）のデータを用いて後方流跡線解析を行った。使用するNHMのデータは、気象庁のGPV（Grid Point Value：格子点値）を初期値・境界値とし、雪氷防災研究センターで計算されたものである。1層あたり 320×240 の1.5km四方の格子が設定されており、標高10mから14900mまでの全50層で計算されている。各格子には1時間ごとの瞬間の東西風速ベクトルおよび南北風速ベクトルが水平方向は等間隔に、鉛直方向は非等間隔に記録されており、これらの風速場のデータを用いて解析を行った。NHMデータは1日に2回、36時間の予報値が算出されるが、計算開始初期においてモデル内の気象場がGPVの境界値になじむまでの時間を考慮し、最初の3時間を除外したデータを12時間ごとに連続的に結合したものを用いた。

3. 研究手法

3.1. 解析対象

2021年12月18日～2022年1月31日の一冬を対象に統計解析を行った。固体降水粒子ごとの落下速度を用いる有効性を評価するため、雪片よりも落下速度が大きい霰の事例を解析対象とした。また、地上観測降水強度が1mm/h以上の十分な降水が観測されたデータを対象とした。霰事例の抽出には、Parsivelの観測から得られた粒径-落下速度分布を用いて推定した

降水種別データを利用した。降水種別の推定には、守田の先行研究¹⁾を参照し、質量フラックスを用いて算出したCMF（Center of Mass Flux）から降水種別を判別する手法を用いた。質量フラックスは、各粒子における質量と落下速度の積から求められる。CMFは、粒子直径と落下速度で構成される空間において、各粒子の位置を質量フラックスで重みづけして平均することで求められる代表点である。CMFを算出することで、観測された降水粒子群を代表する粒径および落下速度の位置を求めた。その後、CMFと各降水種別における粒子直径-落下速度関係式との距離を比較し、CMFに最も近い関係式を持つ降水種別を、その時間帯における降水種別として判別した。降水種別の判別は4分ごとに行い、霰と判別された事例を解析対象とした。

3.2. 落下速度の設定手法

後方流跡線解析に用いる落下速度を、以下の2手法により設定した。

(1) 1.1 m/s を用いる手法

落下速度を固定する手法として、雪片の代表的な落下速度1.1 m/sを一律に用いた。

(2) 体積重みづけ平均落下速度を用いる手法

猪狩の先行研究²⁾の手法を参照し、Parsivelの観測から得られた粒径-落下速度分布を用いて、体積重みづけ平均落下速度を算出した。ここでは、粒子の密度を一定と仮定し、粒子体積が粒径の3乗に比例することから、粒径の3乗を重みとして落下速度を平均した。このように粒径による重みづけを行うのは、粒子の質量が降水量に寄与することを考慮するためである。時刻 t 分に開始する後方流跡線解析に用いる落下速度を時刻 $t-2$ 分～時刻 $t+2$ 分の4分間の粒径-落下速度分布から計算した。

3.3. 後方流跡線解析

後方流跡線解析により降水粒子の落下挙動を解析した。上空から地表面に向けて降水粒子の落下挙動を解析する場合、レーダーで観測された粒子について流跡線を一齐に解析した後、その中から地上の対象地点に到達する流跡線を特定する必要がある。解析が非効率となる。一方、地上から上空に向かって後方流跡線

解析を行う場合、対象とする地上の1地点を解析開始地点として設定できるため、効率的な解析が可能となる。本研究では解析開始地点を雪氷防災研究センターの位置（緯度：37.426243°，経度：138.886588°）に設定し、3.2節に示した2手法により設定した落下速度を用いて4分ごとに後方流跡線解析を開始した。

図1に、代表事例（2021年12月27日00:20～01:20）における地上観測降水強度と、2手法の落下速度設定による後方流跡線解析から得られた推定地上降水強度の時系列推移を示す。両手法の解析値を地上観測値と比較することで、落下速度の設定手法による推定結果の違いを確認した。

3.4. 落下速度による分類

手法（2）で算出した体積重みづけ平均落下速度を複数のレンジに分類し、落下速度レンジごとに統計解析を行って2手法の解析精度を比較した。落下速度の分類範囲および各レンジに含まれるデータ数を表1、表2に示す。落下速度のレンジ幅は0.5 m/sとし、さらに詳細な比較を行うため、レンジ幅を0.2 m/sとした場合についても解析を行った。いずれの場合も、解析対象データの最小値である1.0 m/sから最大値である5.3 m/sまでを分類した。レンジ幅を0.5 m/sとした場合は、各レンジに含まれるデータ数を比較的多く確保することで、統計解析結果の信頼性を高めることを目的とした。一方、レンジ幅を0.2 m/sとした場合は、落下速度の違いによる解析精度の変化をより詳細に評価することを目的とした。なお、レンジ幅0.5 m/sの場合の区分5、ならびにレンジ幅0.2 m/sの場合の区分1および区分10については、十分なデータ数を確保するため、落下速度レンジを統合した。

3.5. 統計解析手法

地上観測による降水強度を基準とし、後方流跡線解析による降水強度の相対誤差 E_i を算出した。さらに、落下速度レンジごとに相対誤差を平均し、平均相対誤差 $\bar{E}$ を求めることで、2手法の落下速度設定による解析精度を比較した。また、2手法の平均相対誤差の差 ΔE を算出し、その値から両手法の解析精度の差を評価した。 ΔE が正の場合は体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差が1.1 m/sを用いた

手法より小さく、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の方が高い精度を示すことを意味する。一方、 ΔE が負の場合は1.1 m/sを用いた手法の方が高い精度を示すことを意味する。各算定式を以下に示す。

$$E_i = \frac{|P_i - P_{Gi}|}{P_{Gi}} \quad (1)$$

ここで、 E_i は相対誤差、 P_i は後方流跡線解析による推定地上降水強度、 P_{Gi} は地上観測降水強度を示す。添え字 i は各データを識別する番号を示す。

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (2)$$

ここで、 $\bar{E}$ は平均相対誤差、 N はデータ数を示す。

$$\Delta E = \bar{E}_{1.1} - \bar{E}_w \quad (3)$$

ここで、 ΔE は平均相対誤差の差、 $\bar{E}_{1.1}$ は1.1 m/sを用いた手法の平均相対誤差、 $\bar{E}_w$ は体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差を示す。

4. 結果と考察

落下速度による平均相対誤差の推移について、レンジ幅0.5 m/sの場合を図2、レンジ幅0.2 m/sの場合を図3に示す。各レンジの平均相対誤差を、対応する落下速度レンジの中央値にプロットした。

レンジ幅0.5 m/sの場合、1.0 m/s以上2.0 m/s未満の範囲では、2手法の平均相対誤差に大きな差はみられなかった。一方、2.0 m/s以上3.0 m/s未満の範囲では、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差が、1.1 m/sを用いた手法と比較してそれぞれ5.9%、6.4%小さくなった。これに対し、3.0 m/s以上5.3 m/s未満では、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差は63.3%となり、1.1 m/sを用いた手法より20.4%大きくなった。次に、レンジ幅0.2 m/sの場合、1.0 m/s以上1.8 m/s未満の範囲では、2手法の平均相対誤差に大きな差はみられなかった。一方、1.8 m/s以上2.8 m/s未満の範囲では、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差が小さくなり、特に区分8では、1.1 m/sを用いた手法より11.2%小さくなった。これに対し、2.8 m/s以上5.3 m/s未満の範囲では、1.1 m/sを用いた手法がそれぞれ2.5%、20.4%小さくなった。以上の結果から、落下速

度が 2.0～3.0 m/s 程度の範囲では、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差が小さくなる傾向がみられたため、固体降水粒子ごとに適切な落下速度を用いることで解析精度が向上する可能性が示唆された。一方、3.0 m/s 以上では、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の平均相対誤差が大きくなった。今後は、高落下速度域で誤差が大きくなった要因を詳細に分析し、体積重みづけ平均落下速度の算出方法や統計解析手法等の見直しを検討する必要がある。

5. まとめ

1.1m/s を用いた場合と、体積重みづけ平均落下速度を用いた場合の後方流跡線解析による地上降水量の推定精度を比較し、固体降水粒子ごとに適切な落下速度を用いる有効性を統計的に評価した。その結果、2.0～3.0 m/s 程度の範囲では体積重みづけ平均落下速度を用いた手法が良好な結果を示し、適切に落下速度を見積もることによる推定精度の向上が確認された。一方、3.0 m/s 以上では、体積重みづけ平均落下速度を用いた手法の誤差が大きくなった。今後は、この要因について詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 守田佳弘：光学式降水粒子観測器による粒子の直径・落下速度データを用いた降水量推定方法の研究，長岡技術科学大学修士論文，2025
- 2) 猪狩吉弘：固体降水粒子種別ごとの落下速度を考慮した後方流跡線解析による地上降水量推定手法の改良，長岡技術科学大学修士論文，2023

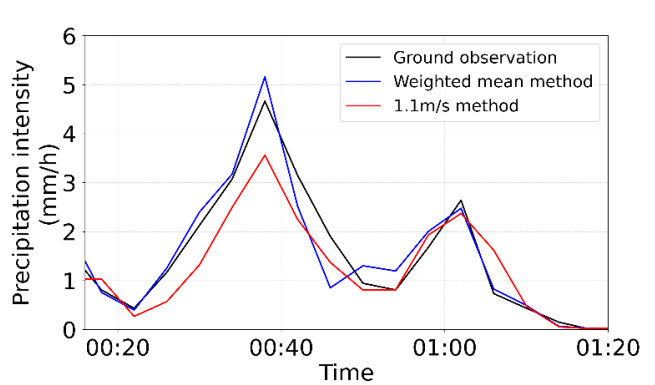


図 1 代表事例（2021 年 12 月 27 日 00:20～01:20）における地上観測降水強度と、2 手法の落下速度設定による後方流跡線解析の推定地上降水強度の推移

表 1 落下速度レンジとデータ数
(レンジ幅 0.5m/s の場合)

区分	落下速度レンジ (m/s)	データ数
1	$1.0 \leq w < 1.5$	101
2	$1.5 \leq w < 2.0$	465
3	$2.0 \leq w < 2.5$	261
4	$2.5 \leq w < 3.0$	126
5	$3.0 \leq w \leq 5.3$	61

表 2 落下速度レンジとデータ数
(レンジ幅 0.2m/s の場合)

区分	落下速度レンジ (m/s)	データ数
1	$1.0 \leq w < 1.4$	39
2	$1.4 \leq w < 1.6$	142
3	$1.6 \leq w < 1.8$	214
4	$1.8 \leq w < 2.0$	171
5	$2.0 \leq w < 2.2$	142
6	$2.2 \leq w < 2.4$	84
7	$2.4 \leq w < 2.6$	77
8	$2.6 \leq w < 2.8$	45
9	$2.8 \leq w < 3.0$	39
10	$3.0 \leq w \leq 5.3$	61

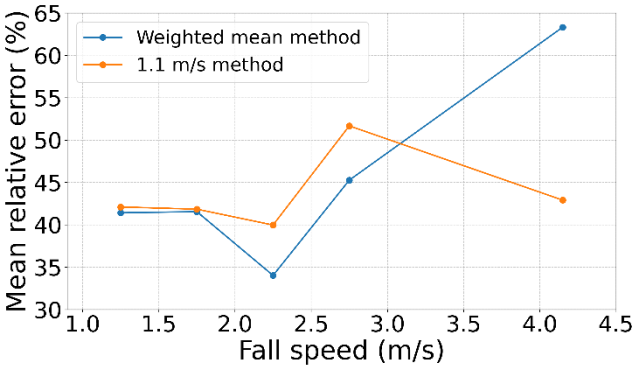


図 2 落下速度レンジごとの平均相対誤差の推移
(レンジ幅 0.5m/s の場合)

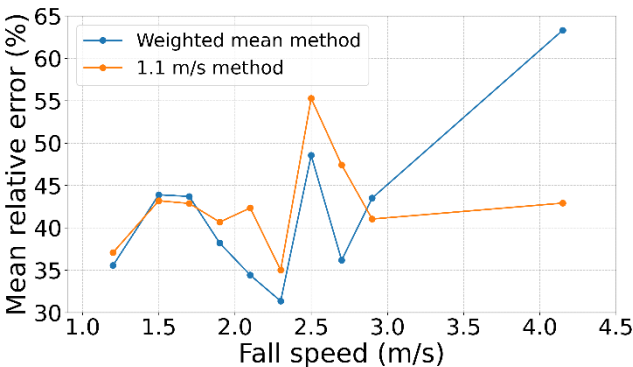


図 3 落下速度レンジごとの平均相対誤差の推移
(レンジ幅 0.2m/s の場合)