

後方流跡線解析による地上降水量の推定に用いる固体降水粒子の落下速度の検討

○石橋宗磨

熊倉俊郎

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・中井専人

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、降水粒子に当たって反射した電波を受信して解析することで、降水に関する情報を得ることができる。気象レーダーによる観測は、他の観測機器と比較して水平分解能・時間分解能が高く、観測範囲が広範囲であることが特徴である。そのため、降水の位置・時間や降水強度等の詳細な情報を広範囲で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には問題点も存在する。気象レーダーの観測位置は数 km 上空であり、地表面に到達するまでの空間的・時間的誤差を考慮していない。上空で観測された降水粒子は、風による移流の影響で水平方向に移動しながら地表面へ落下するためレーダー観測で得られた情報を垂直投影して地上でも適用することは好ましくない。また、降水粒子の種別によって風の影響を受ける度合いが異なる。落下速度が小さい雪片は風の影響を受けやすく、移流が大きくなることが考えられる。一方で落下速度が比較的大きい雨滴や雹等は移流が小さくなることが考えられる。

後方流跡線解析では降水粒子の移流経路を逆算し、解析した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。この後方流跡線解析を行う際には、降水粒子の落下速度を設定する必要がある。本研究では、地上で観測された粒径-落下速度分布から固体降水粒子種別ごとに適した後方流跡線解析時の落下速度の設定手

法を検討し、後方流跡線解析による地上降水量の推定精度向上を試みた。

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

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 OTT 社製の 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 $t-1$ 分～時刻 $t+1$ 分の2分降水量を30倍した値を時刻 t 分の地上降水強度とし、2分ごとの地上降水強度を算出して解析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を用いた。

3. 研究手法

3.1. 対象期間

本研究では雪氷災害の原因となる霰と雪片に着目して解析を行った。2021年12月27日の00:30～01:00（霰の事例）と、2022年12月31日の00:50～01:10（雪片の事例）を対象の期間とし、解析降水強度と地上降水強度の比較を行った。図1、図2にParsivelの観測で得られた各対象期間の粒径-落下速度分布を示した。図1は霰事例、図2は雪片事例の観測結果である。図中に示した5つの曲線は、雨滴、塊あられ、六花あられ、濃密雲粒付雪片、雲粒付雪片の各種別の粒径と落下速度の関係曲線である。これらの曲線は石坂らの研究⁹⁾で用いられた経験的な関係曲線である。各種別の曲線が交差しているために種別の判別に適さない領域（粒径<約2mmかつ落下速度<約2m/s）を除くと、図1では塊あられ、六花あられの曲線上に、図2では濃密雲粒付雪片、雲粒付雪片

の曲線上に粒子が分布している。これらの観測結果から、霰事例と雪片事例の対象期間を選定した。

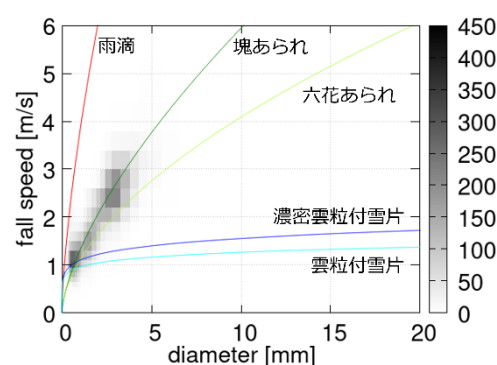


図1 2021年12月27日 00:30～01:00の
粒径-落下速度分布

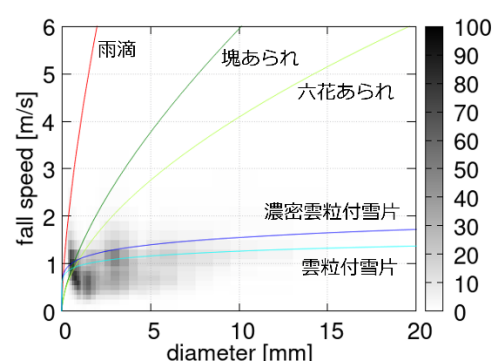


図2 2021年12月31日 00:50～01:10の
粒径-落下速度分布

3.2. 落下速度の設定手法

本研究では後方流跡線解析に用いる落下速度を以下の3つの手法により設定した。

(1) 1.1m/s を用いる手法

雪片の代表的な落下速度として1.1m/sを用いた。

(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の観測で得られた粒径-落下速度分布から、粒子の密度を一定と仮定して粒径の3乗で重みを与えた体積重みづけ平均落下速度を用いた。本手法で重みを与えた理由は粒子ごとの質量が降水量に影響を与えるものとして考えられるためである。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 $t-1$ 分～時刻 $t+1$ 分の2分間の粒径-落下速度分布から計算した。

(3) 複数の落下速度を用いる手法

前述した2つの手法では、落下速度を1つに決めているが、実際には異なる落下速度の粒子が異なる上

空の位置から地表面へ落下している．そのため，Parsivel で観測された全ての落下速度を用いて複数回の後方流跡線解析を行い，レーダー観測面との交差点でのそれぞれの降水強度から設定した落下速度の粒子が分布している割合が解析開始地点へ寄与していると考えるのが理想的である．この手法では計算時間を考慮し，0.05～0.95m/s，1.1～1.3m/s，1.5～1.7m/s，1.9～2.2m/s，2.6～3.0m/s，3.4～3.8m/s，4.4～20.8m/s に落下速度を分類し，それぞれの範囲で体積重みづけ平均落下速度を算出することで複数の落下速度を設定した．この分類は，基本的に Parsivel の落下速度の 32 クラスを 2 クラスごとに分類しているが，観測される粒子数が比較的少ない 0.05～0.95m/s，4.4～20.8m/s は細かく分けずに計算した．また，(2) の手法と同様に解析開始時刻をまたぐ 2 分間の粒径-落下速度分布から計算した．解析降水強度は，各落下速度の後方流跡線解析により得られた降水強度が地上に寄与している割合を求めることで算出した．地上観測点とレーダー観測点で解析に用いた落下速度領域の体積の確率分布が同じと仮定し，地上観測結果の確率分布からレーダー観測の降水強度が地上に寄与している割合を算出した．以下に解析降水強度の算定式を示す．

$$P = \frac{\sum_{i=1}^7 D_i Pw_i}{\sum_{i=1}^7 D_i} \quad (1)$$

ここで，

P : 解析降水強度

D_i : 各落下速度領域における粒径の 3 乗の総和

Pw_i : 各落下速度を用いた後方流跡線解析の降水強度

3.3. 後方流跡線解析

本研究では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手法をとる場合，レーダー観測された粒子の落下挙動を全て一斉に解析し，さらにその中から地上の対象地点に到達した流跡線を探さなければならないため非効率である．しかし地上から上空に向かって後方流跡線解析を行う場合，対象となる地上の 1 点から解析を開始するため，効率的な解析が可能である．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 に示した 3 つの手法により設定した落下速度を用いて 2 分ごとに解析を開始した．

4. 結果と考察

2021 年 12 月 27 日 00:30～01:00（霰事例）及び 2021 年 12 月 31 日 00:50～01:10（雪片事例）の各解析降水強度と地上降水強度の推移と，体積重みづけ平均落下速度の推移をそれぞれ図 3，図 4，図 5，図 6 に示した．また，霰事例の解析開始時刻 00：38 の後方流跡線の経度方向及び緯度方向鉛直断面図をそれぞれ図 7，図 8 に示した．図 3 より，霰事例では 1.1m/s を用いた場合と比較して体積重みづけ平均落下速度を用いた場合では時刻 00:32，00:38 における降水強度の絶対量と 00：30～00：40 における時間的推移の推定精度が向上した．図 4 より，霰事例での体積重みづけ平均落下速度は 2.0～3.0m/s 程度であり，図 7，図 8 に示した流跡線パスは各手法でレーダー観測面との交差点が異なったため，霰の落下挙動をより正確に解析できたと考えられる．また，霰事例及び雪片事例ともに複数の落下速度を用いた場合では，1 つの体積重みづけ平均落下速度を用いた場合と大きな変化は見られなかった．雪片事例では体積重みづけ平均落下速度は 1.0～1.5m/s 程度であり，各解析降水強度に大きな変化は見られなかった．手法 (1)，(2)，(3) の RMSE は霰事例ではそれぞれ 0.836，0.811，0.818 を示し，雪片事例では 1.124，1.075，1.123 を示した．霰事例では手法 (2) の RMSE が最小であり，体積重みづけ平均落下速度の適用が精度向上に寄与した．雪片事例では，霰事例と比較して全手法で誤差が大きくなったが，霰事例と同様に体積重みづけ平均落下速度の適用が最も正確な推移を示した．

5. まとめ

後方流跡線解析時の落下速度の設定手法を検討した結果，体積重みづけ平均落下速度を用いた手法が霰事例での降水強度の推定精度向上に寄与した．雪片事例では各手法で大きな変化は見られなかったが，霰事例と同様に体積重みづけ平均落下速度の適用が最も正確な推移を示した．

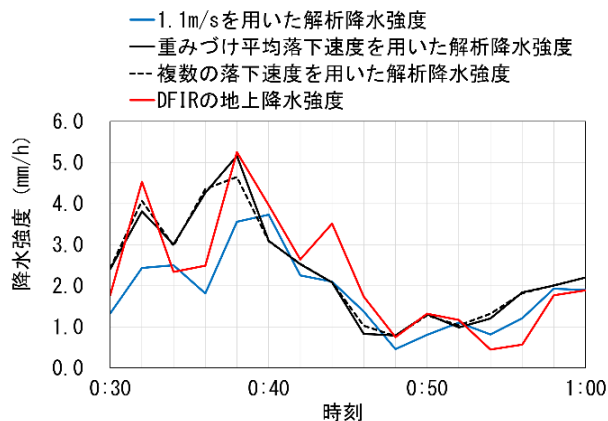


図 3 2021 年 12 月 27 日 00 : 30~01 : 00 の
各解析降水強度と地上降水強度の推移

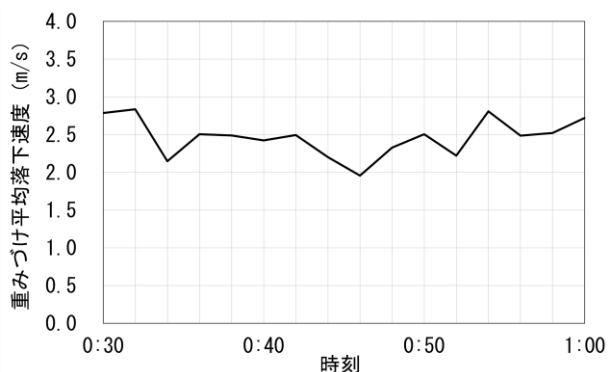


図 4 体積重みづけ平均落下速度の推移（霰事例）

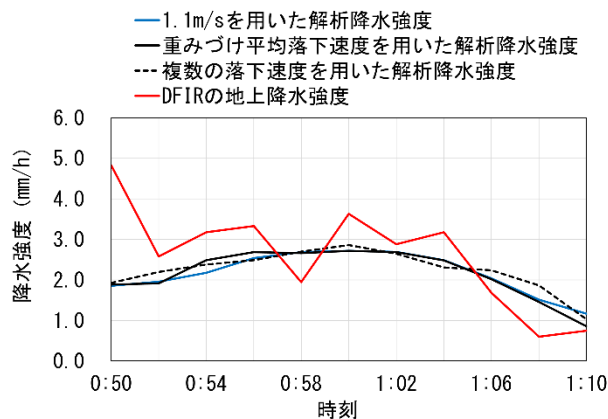


図 5 2021 年 12 月 31 日 00 : 50~01 : 10 の
各解析降水強度と地上降水強度の推移

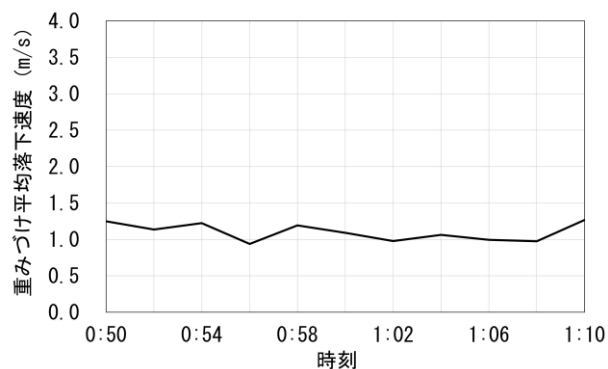


図 6 体積重みづけ平均落下速度の推移（雪片事例）

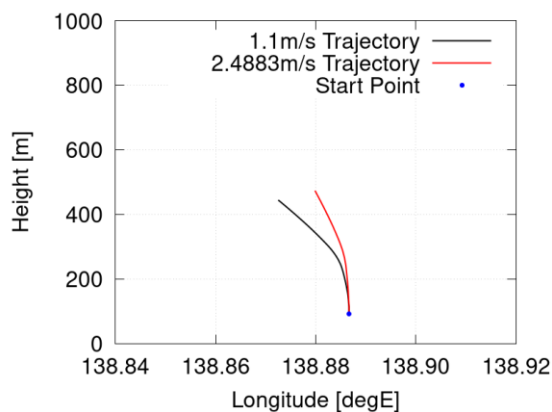


図 7 霰事例の 00 : 38 に開始した
後方流跡線パス（経度方向鉛直断面図）

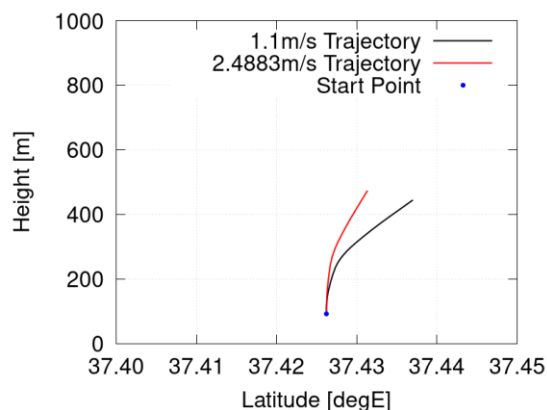


図 8 霰事例の 00 : 38 に開始した
後方流跡線パス（緯度方向鉛直断面図）

参考文献

- 1) Masaaki Ishizaka, Hiroki Motoyoshi, Sento Nakai, Toru Shina, Toshiro Kumakura, Ken-ichiro Muramoto : A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, J.Meteorol.Soc.Jpn., 91, pp.747-762, doi:10.2151/jmsj.2013-602, 2013
- 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