

気象レーダで測定した降水量及び粒子種別判別の鉛直断面図と 後方流跡線解析を組み合わせた雪雲流入の監視について

長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻 非会員 ○今村優之介

長岡技術科学大学 正会員 熊倉俊郎

古野電気株式会社 非会員 中島大岳・早野真理子

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

1. はじめに

新潟県をはじめとする豪雪地帯では、豪雪による交通障害や人的被害などが発生しており、冬季の降雪を正確に把握することは重要である。特に短時間の大量降雪は、道路の通行止めや鉄道の運休など、社会生活に大きな影響を及ぼす。そのため、降雪の発生時刻や場所、降雪量を事前に予測し、適切な災害対策を行うことが求められる。しかし、現在の気象予測では、大雪の具体的な時間や場所を把握することは困難であり、対象地域に流入する雪雲の把握が重要となる。

雪雲の移動経路を把握する手法の一つに、後方流跡線解析がある。後方流跡線解析は、ある地点に到達した空気塊の過去の移動経路を推定する手法であり、対象地点に流入する空気塊の移動経路や高度変化を把握できる。しかし、実際の降雪は雪粒子の種類や粒径分布、乱流状態などの影響を受けるため、空気塊の移動経路だけでは降雪状況を正確に把握することは困難である。また、雪粒子そのものを追跡する手法ではないため、雪雲の鉛直構造や降雪粒子の分布を直接把握することはできない。

一方、気象レーダは広範囲の降水粒子を観測でき、降水域の空間分布や時間変化の把握に用いられている。また、複数の仰角で観測されたデータから鉛直断面図を作成することで、雪雲の高度やレーダ反射強度の分布を把握できる。そのため、後方流跡線解析と気象レーダの観測結果を組み合わせることで、雪雲の流入状況をより詳細に把握できると考えられる。

そこで本研究では、後方流跡線解析と気象レーダの観測結果から作成した鉛直断面図を併用し、対象地域に流入する雪雲の移動状況や鉛直構造を把握することを目的とする。さらに、後方流跡線に沿ったレーダ反射強度の分布を調べ、降雪予測や災害対応への活用可能性について検討する。

2. 使用データ及び観測機器

2. 1. 気象レーダ

本研究で用いた気象レーダは、古野電気製の X バンド偏波ドップラーレーダである。偏波レーダは水平と垂直の 2 種類の偏波を送信することで、様々な偏波パラメータを取得することができる。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. NHM

本研究では、後方流跡線解析に用いる風速場として、気象研究所非静力学メソスケールモデル(NHM)の計算結果を使用した。このデータは、気象庁が提供する GPV (Grid Point Value: 格子点値)を初期値および境界値として、雪氷防災研究センターにより計算されたものである。NHM による予報計算は 1 日 2 回実施され、それぞれ 36 時間先までの予報データが出力される。本研究では、計算開始直後の気象場が初期値や境界条件に適応するまでの影響を考慮し、予報開始から 3 時間分のデータを使用しなかった。そのうえで、12 時間ごとに予報データを接続し、連続した風速場を作成して後方流跡線解析に使用した。

3. 研究手法

3. 1. 対象期間

2022 年 12 月 18 日から 19 日にかけて、冬型の気圧配置が強まり、上空に強い寒気が流入したことで、新潟県の下越地方および中越地方を中心に記録的な大雪が発生した。この大雪の影響により、国道 8 号や国道 17 号などでは車両の立ち往生や交通渋滞が発生したほか、関越自動車道を含む県内の高速道路では通行止めが実施された。さらに、公共交通機関の運休も相次ぎ、地

域住民の生活や経済活動に大きな影響を与えた。本研究では、12月18日～12月19日の中で最も10分間降水量が多かった12月19日の9:00を起点に、後方流跡線解析を行った。

3. 2. 後方流跡線解析

本研究では、後方流跡線解析を用いて雪雲の流入経路を推定し、後方流跡線に沿って気象レーダで測定した降水量や粒子判別結果の鉛直断面図を作成した。後方流跡線解析により推定された降水強度との比較などを行うことを考慮し、後方流跡線解析の開始地点を長岡 AMeDAS (緯度: 37.45000°, 経度: 138.8223°, 標高: 23 m) に設定した。後方流跡線解析は9時から10秒ごとに解析を行った。図-1 にレーダの観測間隔に合わせた2分間隔の観測点の後方流跡線を示す。図-1 は、国土交通省の国土数値情報(行政区域データ)¹⁾を用いて作成した。P1 が始点で P17 が終点である。また後方流跡線解析を用いて降水量を推定するために、小野ら²⁾の手法を採用し後方流跡線とレーダの観測面との交差判定を行った。レーダの観測面の高度 z_r は、次式で表される。

$$z_r = d \times \tan \theta + z_0 \quad (1)$$

ここで、 d はレーダから流跡線座標までの水平距離、 θ はレーダの観測仰角、 z_0 はレーダの設置標高である。本研究では、仰角 3° の観測面を対象とした。交差判定では、連続する2つの流跡線座標がレーダの観測面を挟んで上下に位置する場合に、交差していると判定した。具体的には、次式を満たす場合に交差が生じたと判断した。

$$(z_s - d_s \tan \theta - z_0)(z_{s+1} - d_{s+1} \tan \theta - z_0) \leq 0 \quad (2)$$

ここで、 z_s , z_{s+1} は連続する2つの流跡線座標の高度、 d_s , d_{s+1} はそれぞれのレーダからの水平距離である。次に、交差点の座標および時刻を求めるために、交差する2点間で線形補間を行った。補間係数 α は、交差点のレーダからの水平距離を d_c とすると、次式で表される。

$$\alpha = \frac{d_c - d_s}{d_{s+1} - d_s} \quad (3)$$

この補間係数を用いて、交差時刻 t_c 、経度 λ_c 、緯度 ϕ_c をそれぞれ次式により算出した。

$$t_c = t_s + \alpha(t_{s+1} - t_s) \quad (4)$$

$$\lambda_c = \lambda_s + \alpha(\lambda_{s+1} - \lambda_s) \quad (5)$$

$$\phi_c = \phi_s + \alpha(\phi_{s+1} - \phi_s) \quad (6)$$

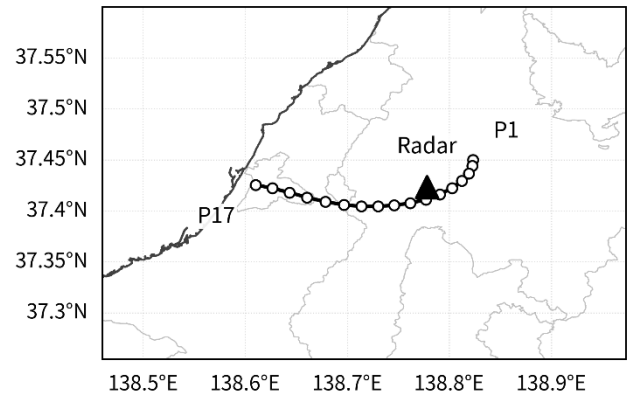


図-1 後方流跡線

さらに、算出した交差点におけるレーダの降水強度を取得し、交差時刻を挟む前後のレーダ観測値を時間的に線形補間することで、交差時刻における降水強度 R_c を求めた。

$$R_c = R_1 + \frac{t_c - t_1}{t_2 - t_1} (R_2 - R_1) \quad (7)$$

ここで、 R_1 , R_2 はそれぞれ交差時刻の前後におけるレーダの降水強度、 t_1 , t_2 はその観測時刻である。

3. 3. 粒子判別手法

本研究では、気象レーダの観測によって得られた4つの偏波パラメータ (Zh: レーダ反射強度, Zdr: レーダ反射因子差, Kdp: 偏波間位相差変化率, phv: 偏波間相関係数) と温度と相対湿度のデータを用いて粒子判別を行った。粒子判別手法には猪狩ら³⁾の先行研究に基づき、額額ら⁴⁾の研究で用いられたファジー理論による粒子判別手法を採用した。この手法では Liu ら⁵⁾が用いたベータ関数を基に種別判別に使用するメンバーシップ関数を作成し、各降水粒子型の可能性を評価している。メンバーシップ関数とは、可能性の大小を 0~1 で表現する関数で、8種類の降水粒子、霧雨(DZ)、雨(RN)、湿雪(WS)、乾雪(DS)、氷晶(IC)、乾霰(DG)、湿霰(WG)、雨と雹の混合物(RH)に対して偏波パラメータ(Zh, Zdr, Kdp, phv)と気温のメンバーシップ関数がある。各パラメータにメンバーシップ関数を適用し、式(8)に示す評価式にて降水粒子を判別する。

$$R_{sj} = \prod_i \mu_{i,j} \quad (8)$$

ここで、 i : 偏波パラメータ、 j : 粒子種別、 μ : メンバーシップ関数のスコア値である。 R_s の値が最も大きい粒子種別が判別結果として採用される。スコア値は式(9)に示す

ベータ関数で示される.

$$\beta(x, a, b, m) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x + m}{a} \right)^2 \right]^b} \quad (9)$$

ここで, x は入力変数, a は半値幅, b は傾き, m は中点である. ベータ関数の曲率は b の値に依存するため, レーダーパラメータのメンバーシップ関数には経験的に調整された値を用いた. 本研究では, RN の Z_{dr} ($b=27.9$) および K_{dp} ($b=58.6$) を除き, $b=12.6$ とした. また瀬瀬らの気温に関するメンバーシップ関数には松尾ら⁶⁾の降水粒子の融解開始温度と融解終了温度の考えを用いている. 融解開始温度 T_1 を式(10)に融解終了温度 T_2 を式(11)示す.

$$T_1 = 0.07(100 - R_h) \quad (10)$$

$$T_2 = 6.2 - \left(\frac{R_h}{46} \right)^2 \quad (11)$$

ここで, R_h は相対湿度[%]である. メンバーシップ関数では DS, IC, DG の上限閾値($m+a$)と WS, DZ の下限閾値($m-a$)に T_1 を, WS の上限閾値と RN の下限閾値に T_2 を用いた.

3. 4. 鉛直断面図

図-1 に示す後方流跡線に沿って, 気象レーダの観測結果を用いた鉛直断面図を作成した. 鉛直断面図の横軸は後方流跡線に沿った累積距離, 縦軸は高度とし, 水平方向の格子間隔を 0.25 km, 鉛直方向の格子間隔を 0.05 km, 表示高度を 0~5 km とした. 鉛直断面図の作成には, 各観測点の時刻に対応するレーダデータを使用した. 具体的には, P1-P2 間では P1 の時刻, P2-P3 間では P2 の時刻のレーダデータを使用し, 各区間に対応する観測結果を鉛直断面図に反映した. また, 各距離格子において, レーダの各観測仰角から後方流跡線に最も近い観測点を選択した. このとき, 流跡線からの水平距離が 0.5 km 以内にある観測点を対象とした.

各仰角間の偏波パラメータおよび降水強度については, 鉛直方向に線形補間を行った. ただし, 補間による過度なデータの補完を避けるため, 観測点間の鉛直距離が 1.5 km 以下の場合にのみ補間を実施した. なお, 水平方向の線形補間を行わず, 観測値が存在しない領域は欠損として扱った.

レーダ反射因子(Z_h)は dBZ による対数表現であるた

め, 補間前に真数である Z に変換した. その後, Z の値を用いて鉛直方向に線形補間を行い, 補間後の値を再び dBZ に変換した. 一方, Z_{dr} , K_{dp} , ρ_{hv} および降水強度については, それぞれの値を直接線形補間した.

粒子判別結果の鉛直断面図については, 補間後の偏波パラメータに加え, NHM から得られた気温および相対湿度を用いて粒子判別を実施し, その結果を基に作成した. また鉛直断面図を作成した箇所において, K_{dp} の欠損が多かったため, K_{dp} の欠損時は残りの変数で粒子の判別を行った.

4. 結果・考察

表-1 に 8 時 52 分から 9 時までの後方流跡線解析による AMeDAS 地点の降水強度の推定値と, 気象庁の長岡 AMeDAS の降水強度を示す. AMeDAS の降水強度は, 10 分間降水量を 6 倍にすることで算出した. 図-2 に粒子判別結果の鉛直断面図, 図-3 に降水強度の鉛直断面図, 図-4 に偏波間位相差変化率の鉛直断面図を示す. 表-1 より, 後方流跡線解析により推定した地上降水強度は, AMeDAS の観測値の半分以下であることがわかる. また, 図-3 に示す降水強度の鉛直断面図から, 降水強度の高い雪雲を流跡線の途中までしか捉えられていないことが確認できる. このことが, 地上降水強度を過小評価した要因の一つであると考えられる. 後方流跡線解析では, 降水粒子の種類による落下速度の違いを考慮していないため, 実際の降水粒子の移動経路と解析による流跡線にずれが生じた可能性が考えられる. 本研究で使用したレーダデータでは, K_{dp} の欠損箇所が多く, K_{dp} を除いた 4 変数による粒子判別が 2785 格子と, 分類できた格子の約 81.9% を占めた. また, K_{dp} が存在する 617 格子において, 5 変数による判別結果と K_{dp} を除いた 4 変数による判別結果を比較したところ, 一致率は 28.2% と低い値を示した. 特に, 5 変数では乾霰(DG)や湿霰(WG)と判別された格子の多くが, 4 変数では乾雪(DS)と判別された. このことから, K_{dp} の欠損は粒子判別結果に大きく影響し, K_{dp} 欠損時には粒子判別の信頼性が低下する可能性があると考えられる.

5. まとめ

本研究では, 後方流跡線解析と気象レーダの鉛直断面図を組み合わせ, 雪雲の流入状況の把握を試みた.

その結果、地上降水強度は AMeDAS の観測値よりも過小評価され、後方流跡線が強い降水域を十分に捉えられていないことが要因の一つと考えられた。また、Kdp の欠損が多く、粒子判別結果の信頼性に課題が残った。今後は、粒子判別手法の改善と粒子種別に応じた落下速度の導入により、降水強度の推定精度向上を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省, 国土数値情報(行政区画データ), 国土数値情報ダウンロードサイト, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 2) 小野大樹, 後方流跡線の移動距離による広域地上降水量推定の評価, 長岡技術科学大学修士論文, 2025 年.
- 3) 猪狩吉弘, 広域にわたる MP レーダーを用いた固体降水種別解析について, 第 40 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2022 年.
- 4) Kouketsu,T.,etal.,“A Hydrometeor Classification Method for X-Band Polarimetric Radar:Construction and Validation Focusing on Solid Hydrometeors under Moist Environments,”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology , Volume32, 2015, p2052-2074.
- 5) Hongping Liu and V. Chandrasekar ,“Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements:Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Volume17, 2000, p140-164.
- 6) Matsuo, “Melting of snowflakes below freezing level in the atmosphere,”, Journal of the Meteorological Society of Japan, Volume59, 1981, p10-25.

表-1 降水強度の比較

	時刻	降水強度(mm/h)
後方流跡線解析	8:52	2.57
	8:54	3.74
	8:56	3.88
	8:58	4.18
	9:00	5.52
	average	3.98
AMeDAS	8:50~9:00	12.00

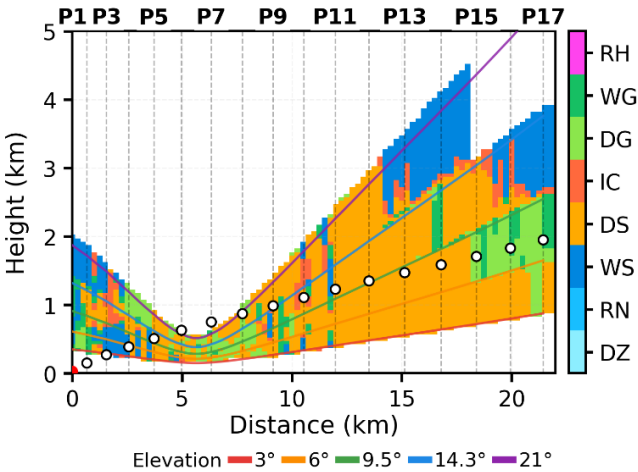


図-2 粒子判別結果の鉛直断面図

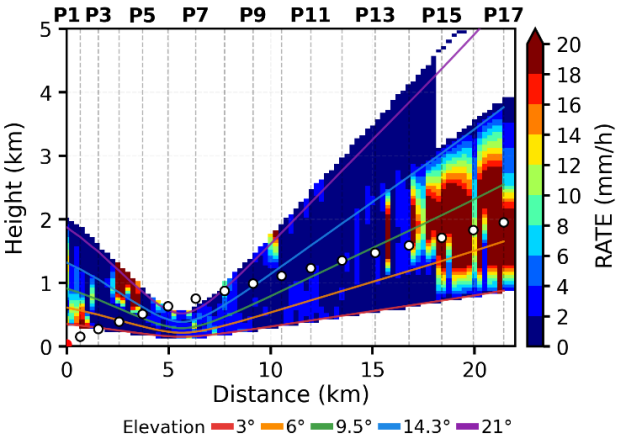


図-3 降水強度の鉛直断面図

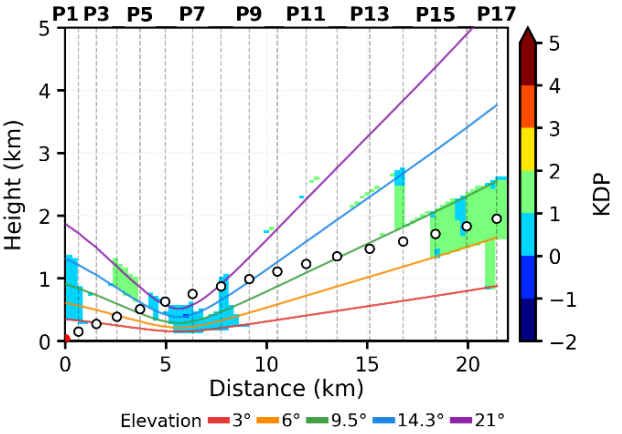


図-4 KDP の鉛直断面図