

前方流跡線解析と後方流跡線解析を用いた 気象レーダーからの地上降水量推定の比較について

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 非会員 ○久保柊人
長岡技術科学大学 正会員 熊倉俊郎
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、短時間に集中する降雪が交通障害や雪害を引き起こすため、地上降水量の細かな把握が重要である。気象レーダーは降水を面的に観測できるが、観測しているのは上空の降水であり、降雪時は落下速度が $1\sim 2\text{ m/s}$ と小さいため、高度 $1,000\text{ m}$ の粒子が地上に達するまでに十数分を要し、風速 10 m/s では 10 km 程度移流する。このため、レーダーから地上降水量を推定するには、降水粒子の落下経路（流跡線）の考慮が不可欠である。著者らはこれまで、数値予報モデルの風速場を用いて、地上の推定地点から粒子の経路を遡る後方流跡線解析により地上降水量を推定してきた¹⁾²⁾。この手法は効率よく計算できる一方、推定値が1本の流跡線に依存し、手法自体に起因する誤差を地上観測のみで切り分けることは難しかった。一方、レーダー観測面上の観測点から粒子を落下させる前方流跡線解析は、実際の落下過程に沿い、上空の降水の着地点を直接求められる。風速場と落下速度が同一であれば前方・後方の流跡線は互いに逆の経路となるため、前方流跡線の着地点から後方流跡線を計算してもとの起点に戻るかを調べれば、手法に起因する誤差を地上観測に頼らず評価できる。そこで本研究では、従来の後方流跡線解析による地上降水量推定を前方流跡線解析と比較し、各手法の有効性と課題を客観的に評価・検証することを目的とする。具体的には、前方流跡線の着地点を起点とした後方流跡線の結果ともとの起点とを比較する。

2. 使用データおよび観測機器

2.1. マルチパラメータレーダー

長岡技術科学大学環境システム棟屋上（北緯 37.42318° 、東経 138.77819° 、標高 88.9 m ）に設置された古野電気製Xバンド二重偏波ドップラー気象レーダー（以下、技大レーダー）の降水強度を用いた。観測

仰角は 3.0° 、 6.0° 、 9.5° 、 14.3° 、 21.0° の5仰角で、各仰角を2分間隔で観測している。方位角分解能は 0.5° であり、本研究では最も地上に近い仰角 3° の観測データを用いた。

2.2. NHM

流跡線の計算には、気象庁GPVを初期値・境界値として防災科学技術研究所雪氷防災研究センターで計算された非静力学モデル（NHM）の風速場を用いた。水平格子間隔は 1.5 km (320×240 格子)、鉛直方向は非等間隔の50層であり、1時間ごとの東西・南北風速が格納されている。1日2回の計算値について、スピニングの影響を避けるため初期3時間を除いて12時間ごとに結合し、時間的に連続なデータとした。

3. 研究手法

3.1. 対象事例

2022年12月18日20時~21時（JST）の降雪事例を対象とした。両手法の差を手法そのものに起因するものとして評価するため、風速場、落下速度およびレーダーデータは両手法で共通とした。

3.2. 流跡線の計算方法（両手法共通）

NHMの東西風速 u と南北風速 v を経度・緯度・高度・時刻について線形内挿し、時間刻み $\Delta t = 10\text{ s}$ で粒子を移動させた。前方流跡線の計算式を次に示す。

$$\begin{aligned}x_{s+1} &= x_s + u\Delta t, & y_{s+1} &= y_s + v\Delta t \\z_{s+1} &= z_s - w_f\Delta t\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 x 、 y 、 z は粒子の東西・南北位置と高度、 s は計算ステップ、 w_f は落下速度である。後方流跡線では Δt の符号を反転して時間を遡る。鉛直流および粒子の成長・昇華・融解は考慮せず、NHMの地表面付近の未定義領域では風速を 0 m/s とした。

落下速度 w_f は、既往研究¹⁾²⁾と同様に、全期間・全粒子で一定の 1.0 m/s とした。雪片の落下速度は粒径によらずおおむね $1\sim 2\text{ m/s}$ であることが知られている³⁾。

落下速度を一定とすることで、前方・後方で落下速度の与え方に差が生じず、両手法の差を流跡線の計算方向と集計方法の違いに限定して評価できる。

3.3. 後方流跡線解析

長岡アメダスおよび推定格子の各格子点を起点として、2分ごとに後方流跡線を計算し、レーダーからの水平距離 d における仰角 θ の観測面の高度

$$z_{\theta} = d \tan \theta + z_r \quad (2)$$

a (z_r :レーダー設置標高)を流跡線分の両端点が挟む場合に交差と判定し、線形内挿で交差時刻 t_c と交差座標を求めた。 t_c を挟む2時刻のレーダーデータを時間内挿し、交差座標から半径750m以内の観測値を次式の重み W で平均して、解析降水強度 P_b とした¹⁾。本研究では仰角 3° の観測面との交点を用いる。

$$W = 1 / (1 + br^2) \quad (3)$$

ここで、 r は交差座標からの距離(m)，

$b = 3.0 \times 10^{-6} m^{-2}$ である。

3.4. 前方流跡線解析

後方流跡線解析のプログラムを前方向に計算するよう改変した。起点は、仰角 3° の観測面上の観測格子とし、レーダーを中心に真北から時計回りに方位角 0.5° 間隔の720方向、各方向についてレーダーから250m間隔の30格子(7.5km先まで)の、計21,600格子の中心を用いた。各格子の観測時刻(4分間隔で計算)にその格子の降水強度 R を保持した粒子を配置して、式(1)により地上まで計算した。粒子高度がNHMの地表面標高を下回った時点を着地とし、着地時刻と着地座標を記録した。両手法の概念を図1に、前方流跡線の計算例を図2に示す。図1は、後方流跡線解析と前方流跡線解析の違いを模式的に示した概念図である。横軸はレーダーからの水平距離、縦軸は標高を表し、灰色の放射状の直線はレーダーの各仰角のビーム、三角印はレーダー(標高88.9m)の位置である。

赤の破線は後方流跡線解析を表す。この手法では、降水量を推定したい地上の格子点(星印)を始点として、風によって時間を遡りながら上空へ流跡線をたどる。そのため、線は地上から出発して上空まで続き、図の右端付近の高度まで伸びる。そして、この流跡線が観測面と交わる点(be)でのレーダー観測値を、推定に用いる。

青の実線は前方流跡線解析を表す。この手法では、レーダーの仰角 3° 上の点を始点として、降水粒子を一定の速さで落下させながら、風に流される経路を時間の順方向に計算し、地上の着地点を求める。前方流跡線の始点は観測面上に限られるため、後方流跡線のように上空まで伸びることはなく、各線は観測面から地上までの短い区間だけを結ぶ。図では、観測面上の複数の始点から、風下側の地上にそれぞれ着地する様子を示している。

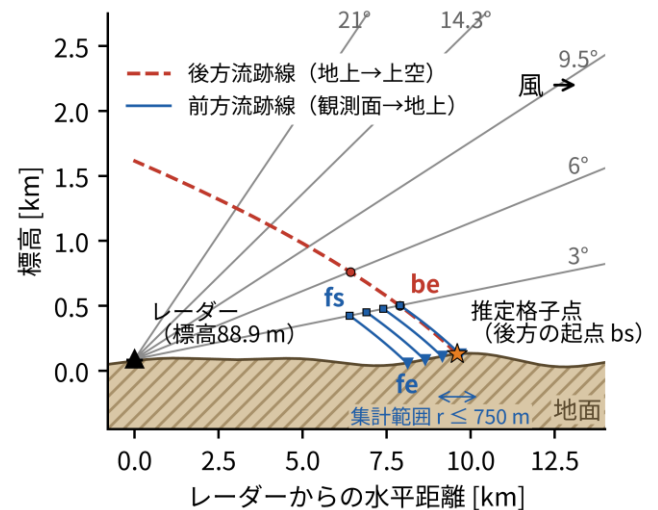


図1 後方流跡線解析と前方流跡線解析の概念

図2は、2022年12月18日20:00(JST)に、レーダーのまわりの起点から計算した前方流跡線の平面図である。起点は、仰角 3° の観測面上の、レーダーから距離2.5km, 5km, 7.5km, 方位角 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ (真北から時計回りに 10° 間隔)の位置に置いた。いずれの起点から、粒子は西風に流されて東～北東側に着地した。距離が遠い起点ほど観測面が高く、落下に時間がかかるため、水平移動距離も大きい傾向が見られ、2.5kmの起点では約2～3km, 7.5kmの起点では約4～6km移動した。また、2.5kmの起点からの着地点は市街地付近の狭い範囲に集まり、7.5kmの起点からの着地点は広く分散した。

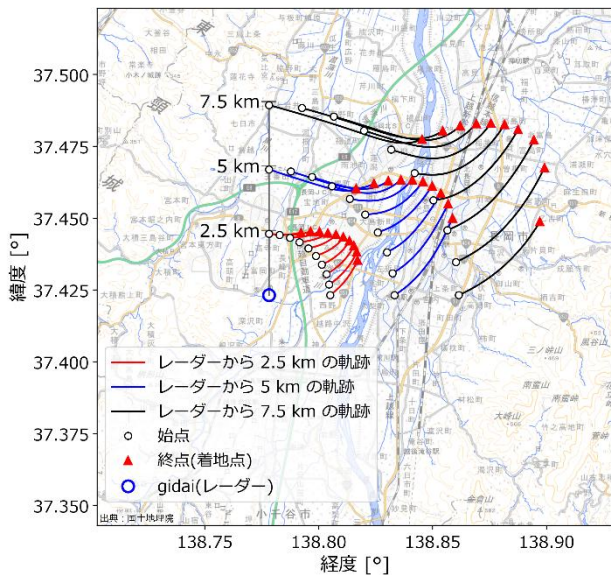


図2 2022年12月18日20:00(JST)の
前方流跡線解析結果

(レーダーから2.5km, 5.0km, 7.5kmの0~90° まで)

3.5. 評価方法

2022年12月18日20:00:00(JST)に、仰角 3° の観測面上の2つの起点から前方流跡線を計算し、地上の着地点の緯度経度を得る。前方流跡線の起点を f_s 、終点(着地点)を f_e 、後方流跡線の起点を b_s 、終点を b_e とする。後方流跡線は前方流跡線の着地点から計算するので、 b_s は f_e と同じ位置である。 b_e は後方流跡線が仰角 3° の観測面と交わる点であり、後方流跡線が前方流跡線を正しく遡れば、 b_e は f_s に戻る。両流跡線を重ね合わせて経路を確認するとともに、次の2指標で評価する。評価する際に使用した 前方流跡線解析の開始点を以下の表1に示す。また、概念図を図3に示す。

表1 前方流跡線解析の開始点

始点 f_s	レーダーの 方位角($^\circ$)	レーダーからの 距離(m)
A	47.5	3,250
B	50	3,250

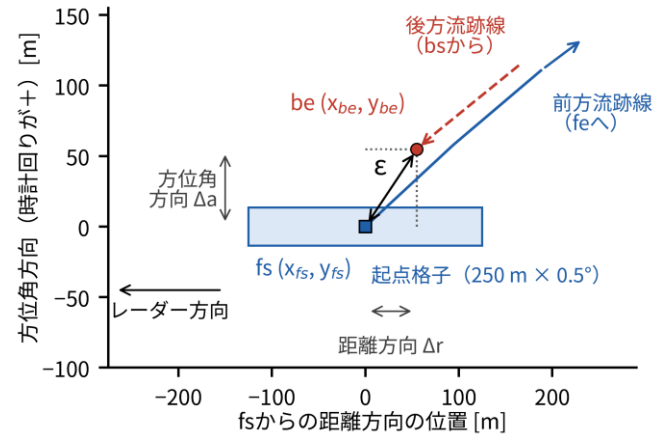


図3 往復誤差計算時の概念図

(1) 往復誤差 ε

後方流跡線が戻ってきた位置 b_e が、出発した位置 f_s からどれだけずれたかを検証する。算出式を式丸に示す。

$$\varepsilon = \sqrt{\{(x_{be} - x_{fs})^2 + (y_{be} - y_{fs})^2\}} \quad (4)$$

この式で得られた結果を、レーダーに近づく・遠ざかる向き(距離方向)と横にずれる向き(方位角方向)に分け、格子1つの大きさ(250m, 0.5°)の何個分かで示す。

(2) 降水強度

出発した格子の降水強度 R と、後方流跡線で推定した降水強度 P_b の差を示す。式(5)に示す。

$$\Delta R = P_b - R \quad (5)$$

4. 結果と考察

図4に、Aの開始点で行った、前方流跡線と後方流跡線の図を示す。Aは、仰角 3° の観測面上の格子とし、レーダーを中心に真北から時計回りに方位角 47.5° の、レーダーから3,250mの位置から粒子を落とした際の結果である。レーダーがある位置を20:00:00(JST)を起点とした前方流跡線(赤)と、その着地点から計算した後方流跡線(青)を示す。後方流跡線は前方流跡線とほぼ重なり、起点格子の近傍に戻った。

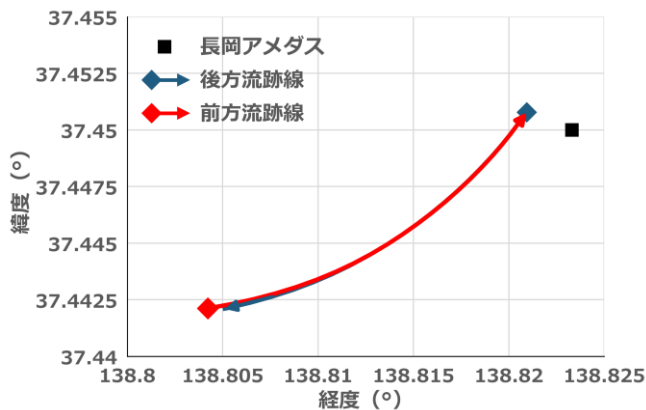


図 4 前方流石跡解析と後方流跡線の重ね合わせ
(開始点 A)

図 5 に、B の条件で行った、前方流跡線後方流跡線の図を示す。B は、仰角 3° の観測面上の格子とし、レーダーを中心に真北から時計回りに方位角 50.0° の、レーダーから 3,250 m の位置から粒子を落とした際の結果である。20:00:00 (JST) を起点とした前方流跡線 (赤) と、その着地点から計算した後方流跡線 (青) を示す。後方流跡線は前方流跡線とほぼ重なり、起点格子の近傍に戻った。

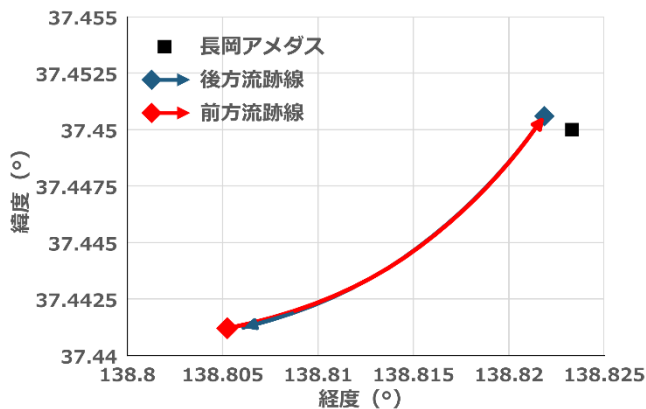


図 5 前方流石跡解析と後方流跡線の重ね合わせ
(開始点 B)

表 2 に各指標を示す。

表 2 往復比較の評価指標

始点 fs	ε (m)	R (mm/hr)	R_b (mm/hr)	ΔR (mm/hr)
A	75.2	2.35	2.52	0.17
B	77.6	3.49	2.48	-1.01

往復誤差 ε は起点 A, B でそれぞれ 75.2m, 77.6m であり、起点から着地点までの水平移動距離の 4%程度であった。距離方向の誤差は 0.2 格子 (約 55~60 m) にとどまり、方位角方向は約 2 格子 (45~54m) であるが、どちらも 750m の重み半径より十分小さい。

原理的には、前方流跡線の着地点を後方流跡線の起点にすれば、往復で同じ位置に戻るはずである。それにもかかわらず約 75~78m のずれが残ったことから、このずれは主に時間刻み 10s の数値誤差によると考えられる。後方流跡線解析では、風の変化が大きい事例で検討し、他の誤差要因との兼ね合いから 10s 程度で十分と判断してきた。しかし、往復比較では数値誤差がずれとして直接現れるため、1s 程度に縮める方が妥当と考えられる。

降水強度は、起点 A では P_b がをわずかに上回り (差+0.17)、ほぼ一致した。起点 B では P_b が R を下回った (差-1.01)。 P_b は 750m 以内の重み付き平均、R は単一格子の値であるため、局所的に強い降水では平滑化により P_b が小さくなる可能性がある。

5. まとめ

往復誤差は約 75~78m で移動距離の約 4%であり、重み半径 750m より十分小さく、両手法の流跡線は類似していた。降水強度は起点 A ではほぼ一致し、起点 B では 1.01mm/hr の差があった。往復誤差の主因は時間刻み 10s の数値誤差と考えられ、1s 程度が妥当かもしれない。ただし比較したデータ数が少なく、現時点では両手法が似ているにとどまる。今後は、時間刻みを 1s 程度にして再計算し、データ数を増やして検証するとともに、前方流跡線解析による地上降水量にも後方と同様の重み付けを行って比較する。

参考文献

- 1) 武田大和：多種の気象レーダーデータを用いた降雪時における地上降水量推定に関する研究，長岡技術科学大学大学院修士論文，2025。
- 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，長岡技術科学大学大学院修士論文，2025。
- 3) Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T. and Muramoto, K.: A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.91, pp.747-762, 2013.