

上空で測定されたレーダー降水量と3次元風速場を用いた地上到達固体降水量の推定と検証

環境社会基盤工学専攻 古橋知季

指導教員 熊倉俊郎

1. はじめに

狭領域内で集中的な降雪があった地域では、交通障害や農地被害、生活への影響などといった重大な雪氷災害に発展する恐れがある。このような災害に備え、国土交通省が運用する XRAIN 等に代表されるマルチパラメータレーダーをはじめとして、全国各地でレーダー観測網の整備が進められているのであるが、レーダーによる降雪の観測は降雨の観測に比べてまだ学術的な諸問題を抱えている。例として、仮に高度 2000 m から $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の速度で落下してくる粒子が、常にある方角から平均 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の横風を受け続けた時、落下してくる粒子は落下開始地点を地表面に垂直投影した地点から単純計算で 20 km 以上も離れた地点に落下することとなる。つまり雪片などに代表される固体降水粒子は一般的な降雨や雹、あられ等に比べて質量が小さいことを踏まえると、これらの粒子は上空の風などによって流され、遠方の地表面へ到達する可能性が高い。そのため、今日においてインターネットなどで日常的に提供されているレーダー観測による降水量の情報を、そのまま地上の降水量として地上へ垂直投影することができないという問題点がある。

これらの気象レーダーにおける固体降水の観測に関する学術的な問題を解決するには、レーダーで観測された固体降水粒子が風の影響を受け、どのような挙動で地上へ落下していくかを解析する必要がある。ここでは新潟県長岡市の長岡技術科学大学(以下、技大)に設置したマルチパラメータレーダー(以下、技大レーダー)で観測されたレーダーデータおよび、気象庁の非静力学モデル(以下、NHM)を用いた固体降水の後方流跡線解析による降水量の推定を行い、アメダスでの実測降水量と結果の比較を行った。

2. 使用機器・データ

2. 1. 技大レーダー

本研究で用いた気象レーダーは技大の環境システム棟屋上(経度:138.77819°, 緯度:37.42318°, 標高:88.9m)に設置した古野電気株式会社製の Xバンド偏波ドップラーレーダーである。サイト周辺の空間的な情報を集めるため、仰角は、3°, 6°, 9.5°, 14.3°, 21°, 31°, 44°, 58°, 73°となっており、各仰角を2分ごとにスキャンしている。これらのレーダーデータ内の任意座標における降水強度 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ を参照できる環境を python3 にて構築した。

2. 2. NHM

固体降水粒子はレーダーで観測されてから地上へ落下するまでの間に、風などによって粒子が流される現象(以下、移流)が生じると考えられるが、これらの現象を確認するためにはレーダーで観測された固体降水粒子が地上へ到達するまでに、上空の風の影響をどれほど受け、その結果どのような落下挙動をとって地表面へ到達したのかを確認する必要がある。そのため、本研究では NHM で計算された東西および南北風速の予報結果を用いて後方流跡線解析を行い、これらの固体降水粒子が上空から地表面に落下するまでの落下挙動解析を行う。

NHM は気象庁が気象研究所とともに開発したメソ数値予報モデルである。本研究では気象庁の GPV を境界条件として NHM に組み込み、雪氷防災研究センターにて計算された結果を使用した。計算範囲は図-1に示す新潟県中越地方を中心とした北陸地方一帯である。本データは1グリッド 1.5 km 四方とし、 320×240 のグリッドで図-1の計算範囲を設定し、標高 10 m から 14100 m までを 50 層に分け、1 時間毎の瞬間の東西風速および南北風速データが記録されている。なお、この NHM データは1日に2回かつ、1回で 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境界値になじむまでの時間があることを考慮し、最初の 3 時間を除外したデータを連続的に結合して解析を行った。

2. 3. アメダス

技大レーダーで測定されたアメダス直上の降水量と NHM の 3 次元風速場を用いた雪片の推定地上到達降水量を比較する必要がある。技大レーダーのビームについては最低仰角の 3° でもおおよそ半径 70 km ほどの観測可能距離があるため、図-2 に示したレーダービームの範囲内に点在している新潟県中越地方および下越地方の全 6 箇所の気象庁アメダス観測点で取得された降水量および地上気温の 1 時間値、降雪深の 1 時間値(積雪深の差分値)を参照した。

3. 観測・手法

3. 1. 降水の雨雪判別

標準大気の対流圏における気温減率を 100 m あたり 0.65°C とした場合、アメダスとレーダービーム間の垂直高度が最も低い長岡アメダスであっても、地上気温が 2°C であれば、長岡アメダスの上空 300 m(仰角 3° レーダービーム付近)では気温が 0°C 以下であると考えられる。また長谷美(1991)は日本各地で冬季の地上気温と固体降水種別の観測を行っており、この結果から北陸地方ではおおよそ地上気温が 2°C 以下となったときに地上で固体降水が観測されていることを示した。このことから、本研究ではアメダス観測点での地上気温が 2°C 以下かつ降雪深が $1\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ の場合にレーダーで観測された降水をすべて雪片が観測された事例とし、かつ地表面に到達するまで雪片の形状を維持しているものと仮定して解析を行った。そのため、アメダスにおける地上気温の実測値が 2°C 以上の時または降雪深が $1\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ を下回った場合は観測された降水量は雪片ではないと判断し、解析対象から除外した。

3. 2. 後方流跡線解析

降雪が移流の影響を受けると考えた場合、その固体降水粒子は風によってどのような落下挙動を

たどりながら地上に到達するのかを解析する必要がある。しかしながら、実際に固体降水の落下挙動を上空から地表面に向けて解析する方法を採る場合、レーダー観測された降水の落下挙動をすべて一斉に解析し、さらにその中から地上の観測施設に到達した流跡線を探さなければならないため非常に効率が悪い。ここでは NHM データに記録されている東西風速と南北風速データおよび、高度と時刻のデータをそれぞれ線形補間して後方流跡線解析を行った鈴木(2018)の手法を用い、石坂ら(2013)が算出した雪片の平均的な落下速度 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で落下する粒子の挙動を 1 分ごとに地上から上空に向かって解析することとした。この方法を用いて県内 6 地点のアメダスより後方流跡線を描画し、

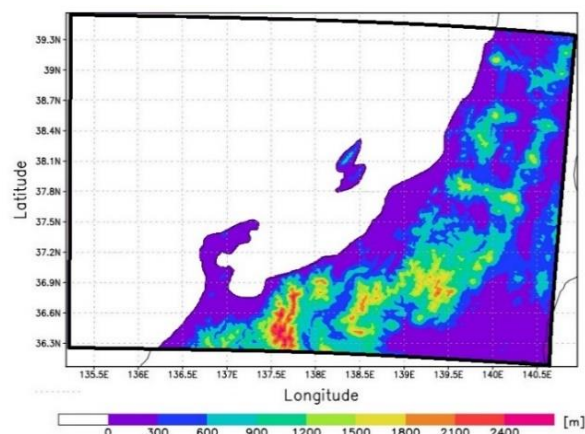


図-1 NHM 計算領域全景図 (標高)

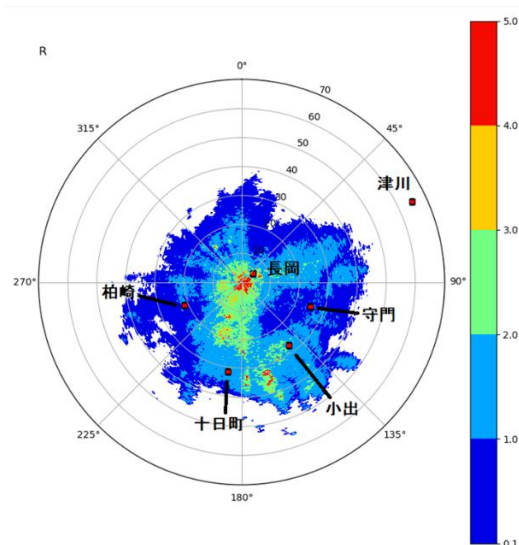


図-2 2月8日午前5時2分のレーダー実況図

この後方流跡線がレーダービームと交差した時刻および座標に対応するレーダー観測降水量を、移流の影響を受けながらアメダス観測点に落下した固体降水量 R_{bt} とした。さらにこれを後方流跡線解析の開始時刻におけるアメダス直上の降水量 R_{vr} とアメダスの実測降水量 R_{am} を相互に比較し、それぞれ検証を行った。後方流跡線解析の概略図を図-3に示す。

3.3. アメダス実測降水量との比較

以上のような手法を用いて求めた後方流跡線解析による推定固体降水量を各アメダスの実測降水量と比較する。なお、技大レーダーについては図-2のように降水強度 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ として取得されているため、後方流跡線解析によって算出された地表面の推定降水強度およびアメダス直上のレーダー降水強度を2分ごとに、それぞれ1時間あたりの推定固体降水量 R_{bt} およびアメダス直上のレーダー降水量 R_{vr} に換算し、さらにこれを1時間ごとのアメダスの実測降水量 R_{am} とそれぞれ比較し検証した。

4. 結果と考察

図-4は守門アメダス地点における2月5日～8日の期間全体における後方流跡線による推定降水量とアメダス直上のレーダー降水量を比較したものである。赤実線が推定固体降水量、黒実線がアメダス直上のレーダー降水量、黒破線がアメダス実測降水量、水色の実線が積雪深、緑の実線が地上気温である。このなかで図中の水色でハッチした範囲は固体降水の事例であると仮定した気温が 2°C 以下かつ降雪深が $1\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ を記録した期間であり、この範囲内で観測された推定固体降水量を R_{bt} 、アメダス直上のレーダー降水量を R_{vr} 、アメダスの実測降水量を R_{am} とした。その時の R_{bt} と R_{am} のRMSEが 0.62 mm/h 、 R_{vr} と R_{am} のRMSEが $1.17\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ となった。図-4は2月6日12時14分に守門アメダスから後方流跡線解析を行った事例についてのレーダー水平面図である。図-5(右)の2020年2月6日12時14分に守門アメダスを出発した後方流跡線は約14分かけて高度1046mまで上昇し、12時00分に図-5(左)の赤バツ印(×)の位置に到達した。12時00分の×印の周辺に赤円で示した雲域Fは、12時14分にかけて水平面図の東側へと移動していることがわかるが、図-5(右)の12時

14分のレーダー画像では東進してきた雲域Fがすでにアメダス直上を通過していることがわかり、レーダーは風に流されてきた雪雲を捉えていない可能性があることがわかった。このような事例は特に北陸地方の山間部で雪を降らせる山雪型の気圧配置において多く見られた。その反面、南岸低気圧によって県内の平野部で降雪が多くなった2月8日の解析については、レーダー上にほぼ同じ降水量を持った雲域が広く存在し、この期間におけるレーダーの降水強度は県全域でほぼ一様となった。その結果、後方流跡線解析による推定降水量 R_{bt} およびアメダス直上のレーダー降水量 R_{vr} の両方が期間全体を通してほぼ同じようなふるまいとなった。

5. おわりに

本研究ではNHMの3次元風速場および技大レーダーを用い、NHMの各層の水平方向風速場の線形補間を連続して行うことで、 $1\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ で落下する固体降水粒子の後方流跡線により落下挙動を解析するモデルを構築した。また、本モデルを実際に技大レーダーにて観測されたデータと組み合わせることで、ある一定の降水を持った雲域が解析範囲

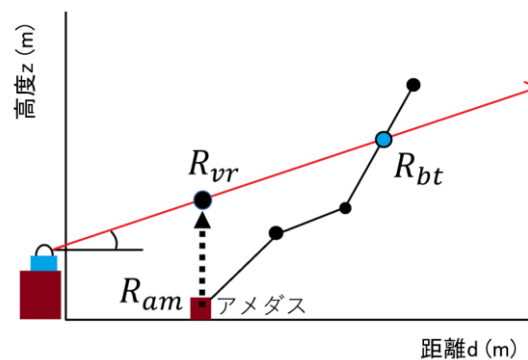


図-3 後方流跡線解析の概略図

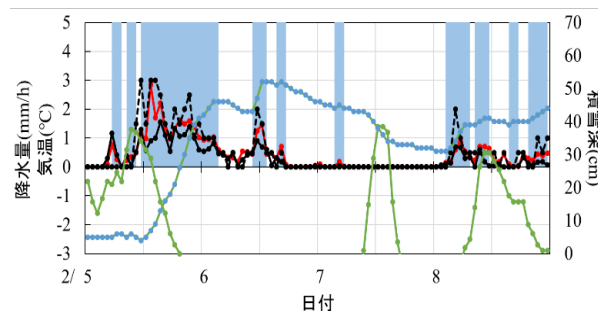


図-4 2月5日～8日の守門アメダスにおける推定固体降水量とアメダス実測値との比較

内に点在している場合、後方流跡線がアメダス直上で観測されたものとは別の雲域を参照している場合があることがわかった。特に県内全域で強風となった2020年2月5日～6日の事例では、後方流跡線による推定降水量とアメダス直上の降水量で差が見られる事例が多くみられた。このため冬季において風が強くなる山雪型の事例の場合は、レーダーで観測された降水量を、そのまま地表面に投影したものを地上の固体降水量とするのではなく、固体降水が地表面に落下するまでの間に上空風

速による移流の影響をある程度考慮したうえで、地上の固体降水量を推定する必要があるということがわかった。その一方で南岸低気圧となった2020年2月8日では、解析範囲全域で一様な降水が見られたため、推定降水量およびアメダス直上のレーダー降水量の両方で同じようなふるまいをする結果となったが、これについても後方流跡線は上空の風の影響を受けて遠方へ流されていることが確認できたため、同じように上空の風の影響を考慮する必要があるのではないかという結果になった。

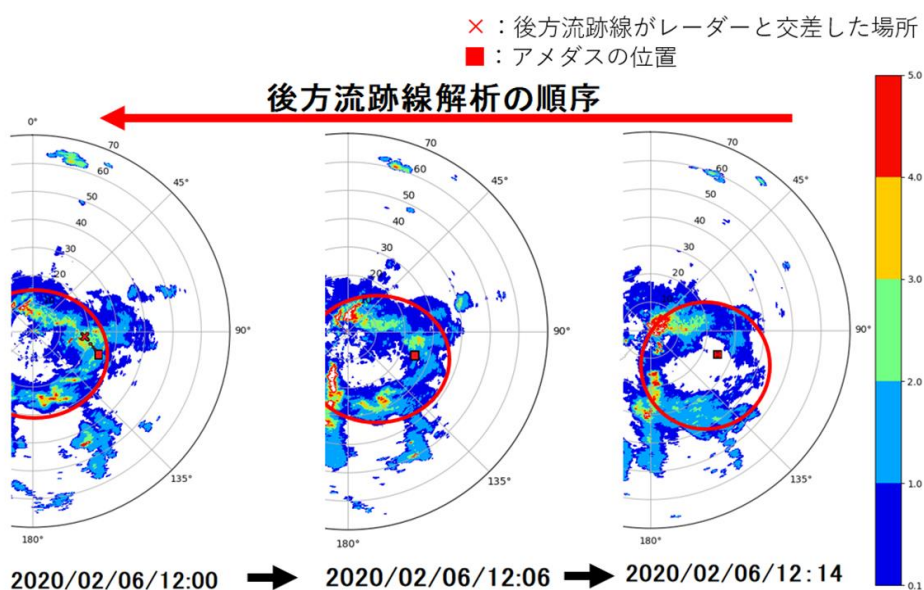


図-5 2020年2月6日12時14分の後方流跡線解析におけるレーダー画像の時間的遷移

参考文献

- 1) 鈴木貴博: 地上観測結果を用いた偏波レーダーによる降水粒子判別の検証, 長岡技術科学大学修士論文, 2018.
- 2) M Ishizaka, H Motoyoshi, S Nakai : A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size Fall Speed Relationship, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.91, No.6, pp.747-762, 2013
- 3) 長谷美達雄: 冬季降水における降雪の発生割合と地上気温の関係, 日本雪氷学会誌‘雪氷’53 巻 1号 33-43 頁, 1991

謝辞

本研究を遂行するにあたり、NHM のデータや資料提供および助言を頂きました防災科学研究所雪氷防災研究センターの中井専人様および本吉弘岐様、そして技大レーダーのデータおよび資料の提供をして頂きました古野電気株式会社の早野真理子様および中島大岳様に感謝の意を表します。