

災害対策を念頭に置いた気象レーダーと3次元風速分布を用いた地上積雪深推定とその代表的スケール

長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻 非会員 ○平岩柊太

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

清水建設株式会社 小野大樹

1.はじめに

新潟県等の積雪地域における道路インフラの維持管理には、正確な降雪状況の把握が不可欠である。現在、広域的な降水観測は主に気象レーダーが担うが、冬季の固体降水粒子は風の移流により地上到達位置にズレが生じる。先行研究では、後方流跡線解析によりこの影響を補正し、高解像度な地上降水量の空間分布を推定できることが示された。

しかし、このデータを実務に適用するための最適な時空間解像度は自明ではない。特に50mという高解像度で道路上の降水を抽出すると、後方流跡線計算に用いる3次元風速データのわずかな揺らぎ（風の微小変動）によって、参照するレーダーのメッシュや高度が切り替わり、極端な降水量変動（システム誤差）が生じる。一方でシステム誤差を回避するために空間メッシュを粗くすれば、除雪対応の鍵となる局地的な強い降水シグナルを見落とす危険性がある。

そこで本研究では、長岡市内の国道8号を対象に、車両のスタック発生リスクと整合する「20分移動平均」による時間的平滑化を導入する。本稿では、まず降水強度の分布特性を示した上で、空間解像度の変動に対する安定性評価を行い、危険なピークを保持しつつシステム誤差を抑制する「代表的スケール」を決定する。さらに、雪の物理モデルを用いた面的積雪深マップとの融合を通じて、道路インフラ防災の高度化への寄与を展望する。

2.方法

2-1 対象期間の概要

2022年12月18日から19日にかけて強烈な寒気が流れ込み、新潟県下越中越地方を中心に記録的な大雪となった。この影響で国道8号をはじめ各地で車両の立ち往生や交通網の麻痺が発生し、社会経済活動に多大な影響を及ぼした。

本研究では、積雪が開始した2022年12月18日11時00分から、風速に欠測のない12月19日04時00分までの期間を解析対象とする。

2-2 気象レーダー

¹⁾本研究で使用するレーダーデータは長岡技術科学大学環境システム棟の屋上に設置された（経度138.77819, 緯度37.42318, 標高88.9m）古野電気株式会社製のMP(Multi Parameter)レーダーが観測したデータを用いる。レーダーは2分おきに降水強度 $R[\text{mm/h}]$ を観測している。必要に応じてアメダスが観測している1時間降水量のデータと比較するため、レーダーが観測した降水強度をアメダスの観測期間に合わせて平均した値を使用する。

2-3 NHM データ

固体降水粒子の風による移流を考慮するため、気象研究所非静力学モデル(NHM)の風速場を用いた後方流跡線解析を行った。データは防災科学技術研究所より提供されたものであり、モデル計算初期の不安定な期間（3時間）を除外して12時間ごとに結合した連続データを使用した。

2-4 後方流跡線解析と解析降水量

降水粒子の移流経路を特定する際、上空から網羅的に解析を行うのは計算コストの観点から非効率である。そのため本研究では、特定の地上地点から時間を遡って軌跡を計算する後方流跡線解析を採用したデータを用いた。

具体的には、¹⁾先行研究において長岡アメダス地点を起点に算出された推定降水量である。このデータは、風速と粒子の落下速度を考慮して仮想粒子を地上からレーダー観測高度まで逆追跡し、観測面との交点における降水強度を同定したものである。

解析対象地点は、長岡市内の国道8号（本線区間）とし、空間解像度を50m間隔とした計235地点を対象と

した。(図2.1)



図2.1 後方流跡線解析の対象地点

2.5 多層式積雪モデルの作成

本研究で用いる積雪モデルは、積雪を複数の層で表現する多層式積雪モデルである。³⁾各時間ステップにおいて、積雪はそれぞれ異なる厚さと密度を持つ層の集合体として扱われる。新規降雪があると積雪の最上部に新しい層が追加され、既存の各層は物理過程に基づいてその物性値(厚さ、密度)が更新される。本モデルでは、主要な物理過程として新規降雪過程と圧密過程を考慮する。

新規積雪層の密度(新雪密度) $\rho_{fall}[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ は、³⁾平成21年度数値予報研修テキストによるロジスティック回帰分析に基づき、雪水比(SWR)を求め、密度に換算した。

$$\rho_{fall} = \frac{1}{SWR} \quad SWR = \frac{a}{1 + \exp\{(T - b/c)\}} \cdots (1)$$

なお地上気温と風速はアメダス観測点で10分毎に観測されているデータに対して線形補完を行い、2分値の内挿データを作成した。表2.1にロジスティック関数に用いる回帰係数を示す。

新規積雪層の厚さ $d[\text{m}]$ は、単位時間あたりの降水量 $P[\text{mm}]$ と、上記で計算した新雪密度 ρ_{fall} から、水の密度を 1000kg/m^3 として以下の関係式(2)を用いて算出する。

$$d = \frac{P}{\rho_{fall}} \cdots (2)$$

既存の積雪層は、その上に乗る雪の上乗荷重 $\sigma[\text{Pa}]$ によって圧縮され、時間と共に密度が増加する。この圧密による層の厚さ h の時間変化は、圧縮粘性係数 $\eta[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ を用いて、以下の式(3)で表される。

$$h_i = h_{i0} e^{-\frac{\sigma_i}{\eta_i} t} \cdots (3)$$

ここでは i を層の番号として、 h_{i0} を直前ステップの層の厚さとする。

圧縮粘性係数 $\eta[\text{Pa}]$ は、⁴⁾Shinojima(1967)に基づき、雪の密度 $\rho[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、雪温 $T[\text{K}]$ とし η_0 は $3.44 \times 10^6[\text{Pa}]$ の定数としたとき、以下の式(4)で表される。

$$\eta = \eta_0 e^{0.0253\rho - 0.0958T} \cdots (4)$$

なお本研究では雪温を 0°C と仮定した。

層が圧縮されて厚さが減少する際、その層の質量は保存されるため、密度は厚さの減少率に応じて式(5)のように増加する。

$$\rho_t = \rho_{t-1} \cdot \frac{h_{t-1}}{h_t} \cdots (5)$$

本モデルの数値計算は、入力データを1ステップ(2分)ずつ読み込むことで行われる。

このようにして構築した多層式積雪モデルに、前述の後方流跡線解析によって得られた高解像度な降水量データを入力することで、長岡アメダスを中心(10km四方、500mメッシュ)として面的・時系列な積雪深の変化を解析したものを図2.1に示す。

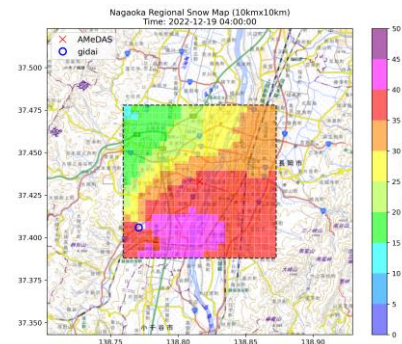


図2.1 長岡アメダスを中心とした面的積雪深マップ(500mメッシュ, 21 x 21, 441 地点)

表2.1 ロジスティック関数に用いる回帰係数

3時間 降水量 (mm)	回帰係数 a	回帰係数 b	回帰係数 c
0.0-1.0	2.250	0.413	0.814
1.0-3.0	2.042	0.413	0.814
3.0-6.0	1.571	0.413	0.814
6.0-9.0	1.396	0.242	0.603
9.0-12.0	1.319	0.191	0.571
12.0-15.0	1.178	0.157	0.730
15.0+	1.126	0.127	0.495

2.6 評価方法

本研究で推定した高解像度降水量データを実務(道路インフラ防災)へ適用するためには、適切な時空間スケールの設定が不可欠である。そこで本節では、後方流跡線解析で得られた推定降水量に対し、道路防災における最適な「時間スケール」および「空間スケール」を決定するための評価手法について述べる。

2.6-1 道路防災に最適なスケールの検討

後方流跡線解析で得られた2分間隔の生データには、風の微小変動に伴う参照レーダーのメッシュや高度の急激な切り替わりに起因する、本システム特有の推定誤差が含まれる。一方で、降雪の降り方自体は時間的に必ずしも滑らかなものではなく、時間的平滑化の期間を長く設定しすぎると、実際の強降雪のピークまで過剰に均されてしまう。

道路防災の観点において、車両の立ち往生は、数分間の瞬間的な豪雪ではなく、一定の強度を持った降雪が数十分間継続し、路面積雪が急増することで発生する。したがって本研究では、生データに含まれる微小時間スケールのシステム誤差を積分効果により吸収しつつ、スタック要因となる「持続的な強降雪セル」の物理的な通過時間スケールと合致する平滑化窓幅を決定するため、10分、20分、30分の移動平均を用いた感度解析を行う。

2-6-2 空間解像度の変動に対する安定性評価

前項の感度解析によって決定した最適な時間スケール（20分移動平均）を適用したデータが、高解像度抽出に伴うシステム誤差を実用上問題ないレベルまで抑制できているかを検証するため、ルート全体における空間的安定性の評価を行う。対象ルートの全ポイント（基準解像度 50m）の20分平均降水量データに対し、メッシュ幅を50mから2000mまで段階的に広げた仮想的な抽出を行う。そして、各メッシュ幅における「隣接するポイント間の最大降水量差（最大ギャップ）」と、「隣接ポイント間の相関係数」の推移を評価指標とする。一般に、空間スケール（観測点間の距離）が離れるほど降水量の差は大きくなり、相関は低下するのが物理的に妥当な挙動である。本評価では、高解像度（50m）時に人工的なノイズによる不自然なギャップの増大や相関の崩壊が発生していないかを確認し、局所的な豪雪リスクを見落とさない「50mメッシュ」が空間スケールとして妥当であるかを検証する。なお、解析対象時刻は20分平均降水量がルート全体で最大となったワースト時刻とした。

3. 結果・考察

3-1 時間的平滑化に対する感度解析と代表時間スケールの決定

本節では、路線上で最も降水量が多かったワースト地点を対象に行った、時間的平滑化の感度解析結果について述べる。図3.1に、異なる時間スケールにおける降

水強度の比較を示す。

図3.1より、2分間隔の生データ（灰色線）には、後方流跡線解析における参照レーダー面の切り替わり等に伴うシステム誤差に起因する、短時間の極端な変動が多数確認できる。これに対し、10分平均（青破線）では時間積分が不十分であり、システム誤差による鋭いピークが残留している。一方、30分平均（緑一点鎖線）では誤差は相殺されているものの、18日21時台や19日1時台に見られるような持続的な強降雪セルのピーク（6～9mm/h程度）まで過剰に平滑化され、ピーク強度が大きく鈍化していることがわかる。

これらに対し、20分平均（赤実線）は、微小時間スケールのシステム誤差を効果的に吸収しつつ、防災上真に警戒すべき「持続的な雪雲の通過」に伴う降水ピークを十分に保持できている。20分移動平均の適用により、短時間の集中的な降水ピークが平滑化によって低下する側面はある。しかし、道路防災における車両のスタック等の深刻な雪害は、数分間の瞬間的な降雪ではなく、数十分間継続する強降雪の総体によって引き起こされる。

したがって、システム誤差の相殺と、現象の物理的スケールに即した危険なピークの保持を両立できる「20分移動平均」が、道路防災の初動判断における代表的時間スケールとして最適であると結論づけた。

3-2 空間解像度に対する安定性評価と代表空間スケールの決定

次に、前項で決定した「20分移動平均」を適用したデータに対し、空間解像度（メッシュ幅）の変動が降水量の空間分布に与える影響を評価した。図3.2に、20分移動平均データにおけるメッシュ幅と最大降水量ギャップおよび相関係数の推移を示す。

一般に、後方流跡線モデルを用いて高解像度（50m）で降水量を抽出した場合、風の微小変動による参照レーダー面の切り替わりに伴って、微小時間スケールでは隣接点間にシステム誤差による極端なギャップが生じる特性がある。しかし事前の検証において、時間的平滑化を行わない生データ（2分間隔）であっても、隣接相関係数は極めて高く保たれることが確認されていた。これは、50mメッシュという高解像度抽出自体が、雪雲の空間的な連続性を物理的に正しく捉えられていることを示している。一方で、生データにおける唯一の課題は、微小時間スケールにおいて局所的に過大となる最大降水量

ギャップ（システム誤差）の存在であった。

図 3.2 より、20分移動平均を適用した場合、隣接メッシュ間の最大降水量ギャップはメッシュ幅（距離）が広がるにつれて単調増加する物理的に妥当な挙動を示した。特に、基準解像度である 50m メッシュ時においては最大ギャップが極めて小さな値に抑制され、かつ隣接相関係数はほぼ 1.0 という極めて高い空間的連続性が確認された。これは、「20分移動平均」という時間的平滑化処理が、生データが元来持っていた空間的連続性（高い相関）を一切損なうことなく、局所的なシステム誤差を効果的に相殺・吸収したことを明確に示している。

システム誤差の影響を回避するため、空間メッシュを 500m や 1000m 等へ粗く設定するアプローチも考えられる。しかし、空間解像度を低下させた場合、国道上のトンネル坑口やカーブ、谷間といった除雪対応の鍵となる局所的な豪雪リスクのシグナルを見落とす危険性がある。本検証により、20分移動平均を行えば 50m という高解像度のままでも空間的安定性が担保されることが確認された。50m 未満のより微細なスケールにおける挙動検証は今後の課題として残るものの、対象を道路上の線的ネットワークに限定している本計算システムにおいては、50m 間隔での積雪モデル実行に必要な計算コストは実用上十分に低く抑えられる。したがって、本研究では道路インフラ防災を念頭に置いた局所的な積雪深推定の代表的スケールには、「20分移動平均・50m メッシュ」が最適であると位置づけた。

4. まとめ

本研究では、道路インフラ防災に向けた局所的な豪雪リスク把握を目的とし、後方流跡線モデルを用いた高解像度な降水量推定の最適な時空間スケールを検討した。国道 8 号（50m 間隔・235 地点）を対象に解析し、以下の結論を得た。

まず時間スケールは、微小スケールのシステム誤差を吸収しつつ、車両の立ち往生を招く持続的な強降雪ピークを保持できる「20分移動平均」が最適であることを示した。さらに空間スケールは、同処理により生データの空間的連続性を損なわず、局所的な最大ギャップを抑制できることを確認した。これにより、トンネル坑口等のハザードを見落とさず誤差を相殺した「20分移動平均・50m メッシュ」の妥当性を示した。

本手法は、路線上の詳細なリスク評価と面的な雪氷リスク把握に応用可能である。50m 未満の微細スケール

の検証は今後の課題とするが、実用的なインフラ防災への展開を見据え、広域を捉える 500m と局所リスクを評価する 50m メッシュの統合を目指す。

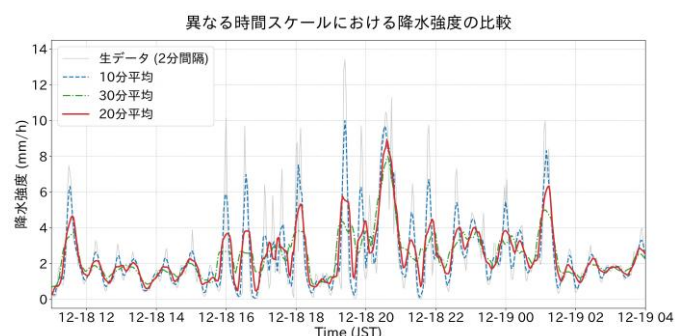


図 3-1 異なる時間スケールにおける降水強度の比較

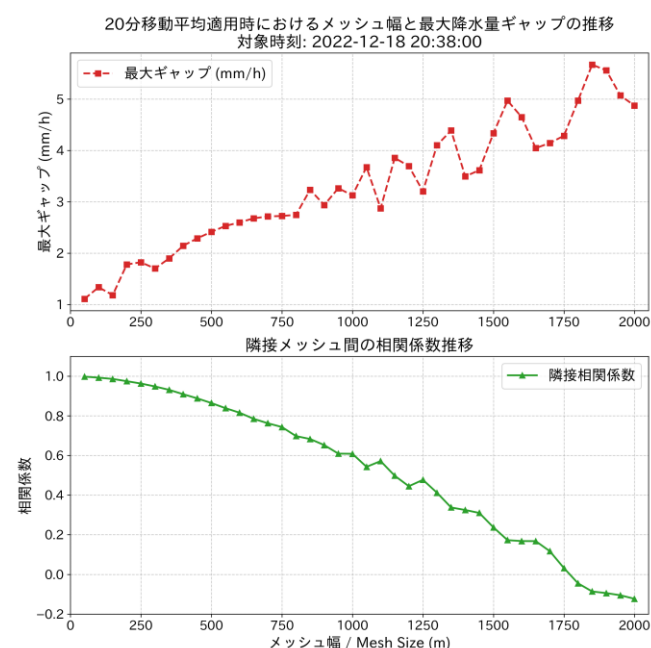


図 3.2 20分平均データにおけるメッシュ幅と空間ノイズの推移

参考文献

- 1) 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
- 2) 熊倉俊郎, 積雪の多層圧密モデルを用いた北陸地方の降積雪現象の解析, 日本雪氷学会誌第 66 巻 1 号, 2004 年 1 月
- 3) 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 数値予報解説資料(42),数値予報課
- 4) Shinojima,K.,1967:Study on visco-elastic deformation of deposited snow. Physics of Snow and Ice, Vol.1,Part 2.Sapporo,Hokkaido University, Institute of Low Temperature Science,875-907.