

気象レーダーと3次元風速を用いた高解像地上推定降水量と積雪深分布

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

古野電機株式会社 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

新潟県の冬季における降雪は、市民生活や経済活動に多大な影響を及ぼす。そのため、効率的な除雪作業の判断や社会基盤の維持管理のためには、正確な降水量および積雪深を把握することが重要となる。現在、広域的な降水情報は主に気象レーダーによって提供されているが、レーダーは上空の降水粒子を観測し、それをそのまま地上へ投影した情報であり、降水量を推定している。特に冬季の固体降水粒子は、上空で観測されてから地上に到達するまでの落下時間が長く、その間に風の影響を受けて大きく移流する。このため、レーダーが観測した座標の直下で必ずしも同量の雪が観測されとは限らないという問題がある。

このレーダー観測位置と地上降雪位置の空間的なズレは、降水量だけでなく積雪深の分布予測においても大きな誤差要因となる。したがって、より正確な地上降雪分布を推定するためには、上空の気象情報が地上のどの地点の降雪に寄与するのか、その対応関係を明らかにすることが重要となる。¹⁾先行研究では、気象レーダーの観測値に対し後方流跡線解析を行うことで、長岡アメダス地点を含む高解像度の地上降水量分布が推定されている。しかし、この推定降水量から積雪深を計算する多層式積雪モデルは、多くの物理パラメータを含んでおり、どのパラメータが結果に重要なのかは自明ではない。

そこで本研究では、まず先行研究で推定された441地点のうち、長岡アメダス観測点に対応する1点の推定降水量を用いて積雪モデルを構築する。次に、そのモデルの主要パラメータに対する感度分析を行い、モデルの基本的な挙動特性を明らかにする。本研究で得られる知見は、将来的に高解像度の全推定降水量データを用いた面的積雪深分布モデルを構築するための基礎となるものである。

2.方法

1) 対象期間の概要

2022年12月18日から19日にかけて冬型の気圧配置となり、上空に強い寒気が流れ込んだため、新潟県の下越と中越を中心に記録的な大雪となった。この大雪により国道8号や17号など各地で立ち往生や渋滞が発生、また関越自動車道をはじめとした新潟県内の高速道路が通行止め、公共交通機関が運休となり生活や経済活動に多大な影響を及ぼした。本研究では積雪が始まった2022年12月18日11時00分から風速に欠測が見られなかった12月19日4時00分までの期間を解析対象期間とする。

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。

3) NHM データ

固体降水粒子は風の影響を受け上空から地上に落下してくる間に流される。粒子の落下挙動を調べるために気象研究所非静力学メソスケールモデル(NHM)で計算された東西および南北風速ベクトルの予報値を用いて後方流跡線解析を行った。本研究では防災科学技術研究所雪氷防災研究センターより提供を受けた、新潟県中越地方を中心として計算されたNHMデータを使用した。このNHMデータは1日に2回、1回で36時間の予報値が算出される。計算開始初期はモデル内の気象場が境界値

になじむまでの時間があるため、NHMの予報された最初の3時間を除いた12時間ごとに連続的に結合したものを使用した。

4) 後方流跡線解析と解析降水量

¹⁾固体降水粒子が上空から地上に向かって落下する際に風によって流されると考えた場合、その固体降水粒子は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。上空から地表面に向けて固体降水粒子の落下挙動を解析する方法を採る場合、レーダー観測された粒子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。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点の座標さえわかれば解析を行うことができるため計算量が少なくなる。そのため本研究では、¹⁾先行研究において後方流跡線解析を用いて推定された、高解像度の地上降水量データを使用した。(図2.1)これは2分毎に地上観測点から、雪片の落下速度を考慮しつつ風のデータを用いて仮想粒子を上空へ、過去へとさかのぼって追跡した。そしてその粒子がレーダー観測面と交差した点を地上降水量と推定し、解析降水量とした。解析対象地点はアメダスを中心として1辺10kmの範囲を500m間隔の441地点とした。(図2.2)

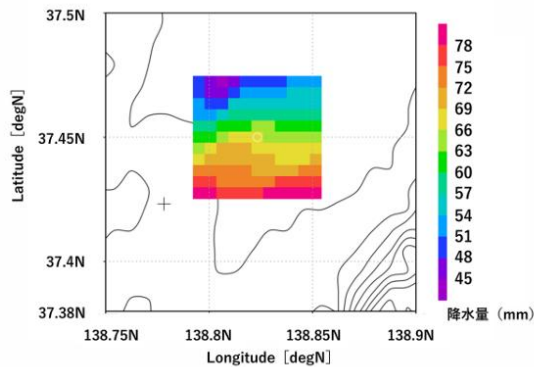


図2.1 対象期間の積算解析降水量
(アメダス中心1辺5km範囲,500m間隔の121地点対象)

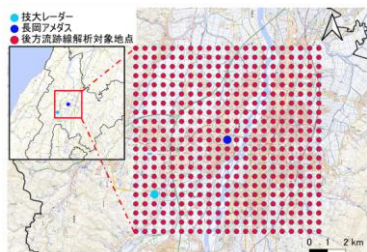


図2.2 後方流跡線解析の対象地点

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。²⁾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⁾大泉ら(2000)による経験式に基づき、地上気温 $T[^\circ\text{C}]$ と風速 $w_s[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ として以下の式(1)で算出する。

$$\rho_{fall} = 3.6w_s - 0.2T + 62 \cdots (1)$$

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。

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載荷重 $\sigma[\text{Pa}]$ 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。

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

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。

6評価方法

本研究では、作成した多層式積雪モデルの再現精度を定量的に評価するため、統計指標として二乗平均平方根誤差（RMSE）を用いる。各指標は、モデルによる推定積雪深と、アメダスが観測した実測積雪深との間で算出する。

RMSEは、モデルによる予測値と実測値の差を評価するための代表的な統計指標である。各時刻における誤差（実測値と計算値の差）を二乗して平均し、その平方根を取ることで算出される。誤差の二乗を平均するため、モデルの予測が大きく外れた場合の影響を強く反映する特徴がある。RMSEは以下の式(6)で定義される。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{model,i} - y_{real,i})^2} \quad \cdots (6)$$

ここで、 n はデータ数、 $y_{model,i}$ は i 番目のモデル計算値、 $y_{real,i}$ は i 番目の実測値をそれぞれ示す。RMSEの値が0に近いほどモデルの計算結果が実測値と全体的に良く一致していることを意味し、モデルの再現精度が高いと評価できる。

3.結果・考察

本研究で積雪モデルの入力として用いた後方流跡線解析を用いて推定された地上降水量データと比較対象であるアメダス実測降水量の時系列を図3.1に、⁹⁾アメダス観測点での気温の時間変化を図3.2に示す。本研究で作成した積雪モデルの基本性能を評価するため、2分毎の解析降水量を用いてパラメータ調整を行わない基準計算を実施した。基準計算では、新雪密度および圧縮粘性係数をそれぞれ式(1)と式(4)に基づき算出した。その結果を図3.3に示す。図3.3より基準計算では、実測値とおおまかな増加傾向は一致しているものの、積雪深の絶対量が過大に評価されていることがわかる。

次にモデルの内部計算の妥当性を検証するため、計算過程における物理量の関係を分析した。図3.4に新規降雪時の新雪密度の時間変化を示す。図3.4より、算出された新雪密度は概ね 60kg/m^3 から 90kg/m^3 の範囲で変動した。この値は、⁵⁾防災科学技術研究所の資料などに示される一般的な新雪の密度（概ね $50\sim 150\text{kg/m}^3$ ）の範囲内に収まっており、本モデルが物理的に妥当な値を算出していることが確認できる。

また、算出された圧縮粘性係数 η の値は $10^6\sim 10^8\text{Pa}\cdot\text{s}$ の間にあり、これは一般的な雪の圧縮粘性係数の値の範

囲とも整合する。

基準計算の課題を分析するため、新雪密度と圧密過程に関するパラメータの感度分析を行った。図3.5に新雪密度を、図3.6に圧縮粘性係数をそれぞれ変化させた際の結果を示す。図3.5から新雪密度の値を $100\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ と一定の値に設定した場合、推定積雪深のグラフ全体が系統的に下降する傾向が見られる。表3.1からはRMSEが5.3へと大幅に改善したことがわかる。これは、新規積雪層の厚さが降水量を密度で除すことで計算されるため、新雪密度が積雪全体のスケールを決定する重要なパラメータであることを示している。図3.6から、圧縮粘性係数の絶対値を小さくする（圧密を強くする）と積雪期間の後半におけるグラフの傾きが緩やかになる効果が確認できた。RMSEも基準計算の13.4から11.4へと改善したことから、圧密過程が積雪深の時間変化のパターンを現実近づける上で有効であることが示された。しかし、その影響は新雪密度の変更ほど大きくはなかった。

4. まとめ

本研究では、多層式積雪モデルの主要パラメータである新雪密度と圧密過程が積雪深の推定結果に与える影響を定量的に評価した。新雪密度を 100kg/m^3 と一定化したときと圧縮粘性係数を半分にしたときの2パターンの感度分析の結果、新雪密度の設定はRMSEを5.3に圧縮粘性係数の設定はRMSEを11.4に改善された。このことから新雪密度は積雪深の絶対量を決定する大きな要因であり、圧密過程は積雪深の時間変化のパターンを調整する役割を担っていることが明らかになった。今後の展望としてこの結果を活かしながら観測点を増やしていくことで積雪深マップを作成することを目指す。

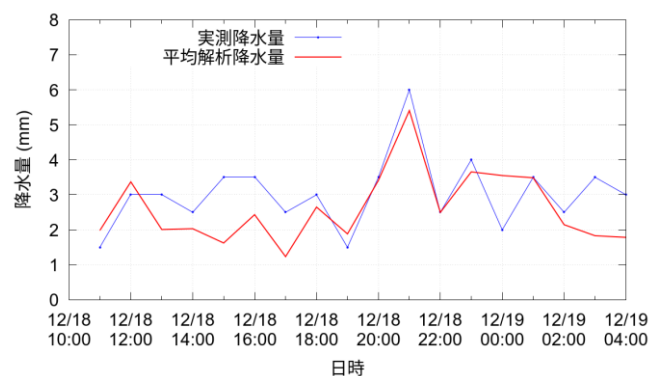


図3.1 実測降水量と平均解析降水量

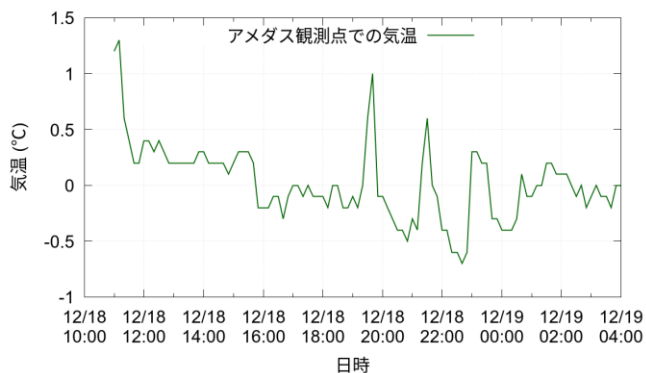


図 3.2 気温の時間変化

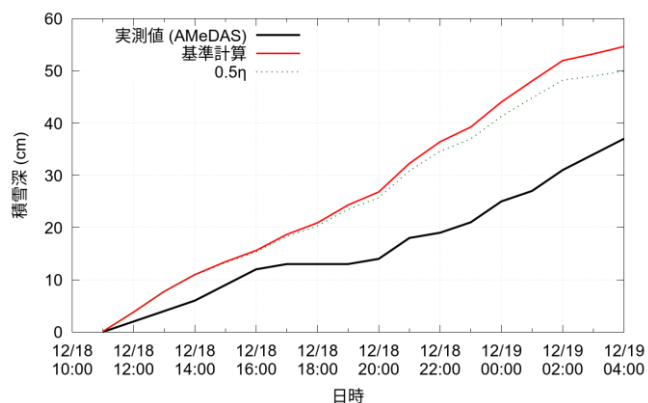


図 3.6 積雪深モデルの感度分析 (圧縮粘性係数)

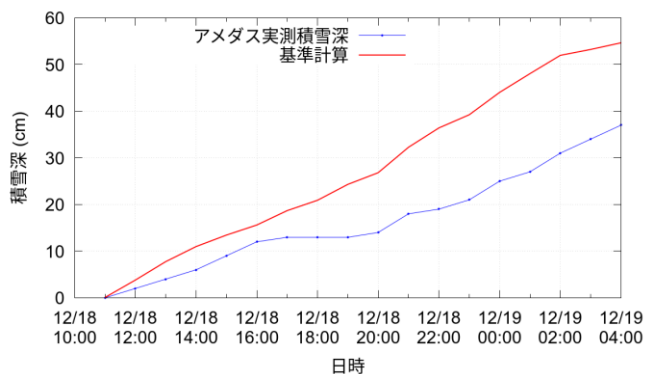


図 3.3 アメダス実測積雪深と推定積雪深

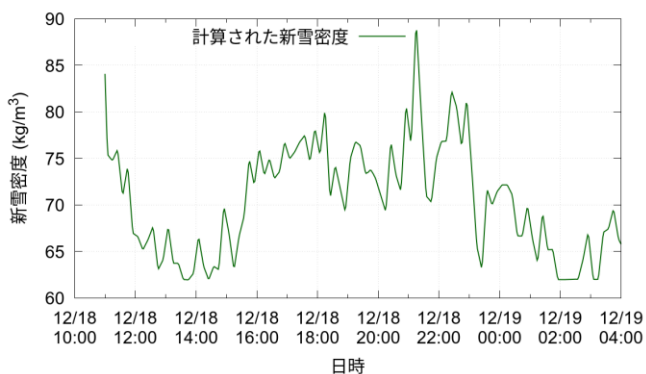


図 3.4 新雪密度の時間変化

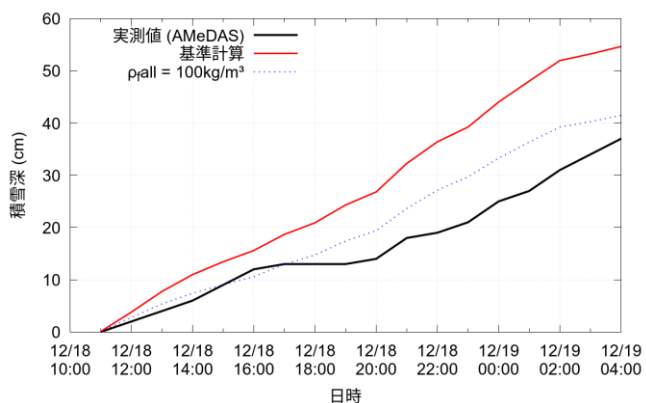


図 3.5 積雪深モデルの感度分析 (新雪密度)

表 3.1 感度分析における RMSE の変化

	RMSE
パラメータ基準値	13.4
$\rho_{\text{fall}}=100$	5.3
0.5η	11.4

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, 2023 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) 大泉三津夫・保坂征宏, 2000: 第 4 章 陸面過程, 全球モデル開発の現状と展望, 数値予報課報告・別冊第 46 号, 気象庁予報部, 87pp.
- 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.
- 5) 山田穰, 日本海沿岸 22 都市における新積雪密度の度数分布と平均値について, 防災科学技術研究所研究報告 第 52 号 1993 年 12 月
- 6) 気象庁 過去の気象データ・ダウンロード
https://www.data.jma.go.jp/stats/etm/view/hourly_a1.php?prec_no=54&block_no=0529&year=2022&month=12&day=18&view=pl