

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

水文・気象研究室 小野 大樹

1. はじめに

気象レーダーによる降雪の観測は、上空から地上に落下する間に風の影響を受けるため観測した座標の直下の降水量と一致するとは限らない。風の影響を考慮した降水量を取得するための解析手法として後方流跡線解析がある。後方流跡線解析は座標を任意に設定でき、その座標における風の影響を考慮した降水量を取得することができる。例えば道路沿いや河川沿いの座標、広域にわたって密な座標を対象に後方流跡線解析を行えばどこで積雪が多くなるのかがわかり、道路の除雪等をどこから実施するのがよいかわかるため雪害対策になる。本研究では、長岡アメダスを中心として1辺10kmの範囲を500mメッシュ間隔に区切った時の441地点を対象として2分間隔に後方流跡線解析を行い高解像度の降水量分布の推定を行った。また、推定した降水量分布がどの程度の信頼度を持っているのか評価するため、アメダスが観測した地上降水量と後方流跡線解析を用いて推定した降水量（以下、解析降水量）の差が小さい期間を対象に、流跡線の移動距離ごとに地上の降水量の推定誤差を算出し統計的に信頼度を評価することを目的とした。

2. 手法

2.1 MP レーダーの概要

長岡技大環境システム棟の屋上に設置された古野電気株式会社製のMP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。最大観測距離は70kmで観測仰角は 3° 、 6° 、 9.5° 、 14.3° 、 21° である。

2.2 上空の風速ベクトルデータ

新潟県中越地方を中心とした気象庁非静力学モデル(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。空間解像度は1.5kmで格子数は 320×240 、鉛直層数は50(不当間隔標高10-14900m)となっている。解析対象範囲は図1に示す。

2.3 地上観測データ

地上の気象データは気象庁の長岡アメダスで観測された降水量(mm)を参照した。

2.4 後方流跡線解析

後方流跡線解析を行った期間は、記録的な大雪となった2022年12月18日11時0分から12月19日18時0分を解析対象期間とした。図2に解析対象地点を示す。対象地点は技大レーダーに最も近い長岡アメダス(経度： 138.8233 、緯度： 37.4500 、標高： 23.0)を中心とした、 $10\text{km} \times 10\text{km}$ の範囲を東西南北に500m間隔で区切った441地点とした(21×21 、1メッシュ= $500\text{m} \times 500\text{m}$)。

後方流跡線解析はNHMデータから内挿した南北・東西ベクトルの風速および、高度と時刻のデータを線形補間し、粒子の落下速度を 1.0m/s とし、2分ごとに解析し、時間的に後方に地上から上空に向かいレーダー面と後方流跡線が交差するまで10秒ごとに座標の計算を行った。各仰角のレーダー面と後方流跡線が交差した座標の降水量を Pr_θ ($\theta=3, 6, 9.5, 14.2, 21$)とし、移動した距離を l_θ とした。

2.5 地上推定降水量の評価手法

解析降水量と地上降水量との差が小さい期間においては、アメダス地点以外の対象地点の解析降水量も、その地点における地上降水量を表せていると仮定し、 3° 仰角の解析降水量を地上推定降水量 Pr_3' と仮定する。差の閾値として地上降水量と解析降水量を1時間降水量に直したときに、それぞれの増減傾向が一致しており降水量の差が

0.5mm/h 以下の時に地上推定降水量 Pr_3' と仮定する。3°仰角を地上と仮定しているため、移動距離を地上からレーダー面ではなく、3°仰角のレーダー面から各仰角 ($\theta=6, 9.5, 14.2, 21$) のレーダー面までの距離とした

(図3).

$$\ell_{\theta-3} = \ell_{\theta} - \ell_3 \quad (1)$$

Pr_{θ} を取得するまでに移動した距離 $\ell_{\theta-3}$ を0~1000 m, 1000~2000 mのように1000 mごとに階級分けし、各範囲で誤差の標準偏差を算出した。誤差を求めるにあたり、単純に地上降水量と解析降水量の差を取るだけでは、降水量が大きい場合と小さい場合において同じ差が発生した際の精度を評価できない。そこで、降水量の大小に依存しない形で誤差を評価できる手法として対数誤差を用いた。

$$\varepsilon_{log} = \log_{10}\left(\frac{Pr_{\theta}}{Pr_3}\right) \quad (2)$$

Pr_{θ} は3°仰角を除いた解析降水量を表す。

降水強度が1mm/h未満では積雪に大きな影響はないと考えられるため対数誤差を算出するにあたり1mm/h未満のデータは取り除くこととした。対数誤差から標準偏差を求め精度評価を行うため母集団が正規分布に従うかの正規性の検証を行う必要がある。本研究ではコルモゴロフ・スミルノフ検定を行い正規性の確認を行った。

平均及び標準偏差は

$$\overline{\varepsilon_{log}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\log_{10}\left(\frac{Pr_{\theta}}{Pr_3}\right) \right) \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (\varepsilon_{log} - \overline{\varepsilon_{log}})^2} \quad (4)$$

として求めた。また、 σ のままではデータの中心的なばらつきを示すため σ に0.674を乗じて50%信頼区間を求めた。また、対数誤差のままでは降水量との比較を直接行うことができないので、指数変換をして降水量と同じスケールの値に直す。

$$CI50_{high} = 10^{\overline{\varepsilon_{log}} + 0.674\sigma} \quad (5)$$

$$CI50_{low} = 10^{\overline{\varepsilon_{log}} - 0.674\sigma} \quad (6)$$

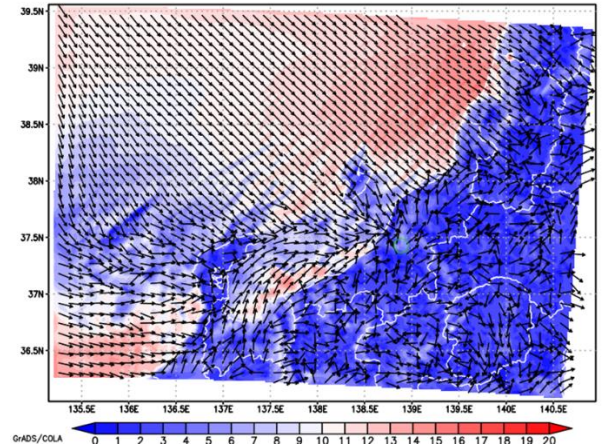


図1 NHMの計算領域図

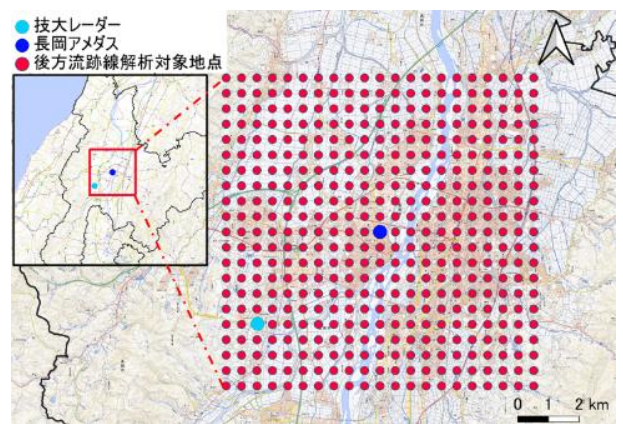


図2 後方流跡線解析の対象地点

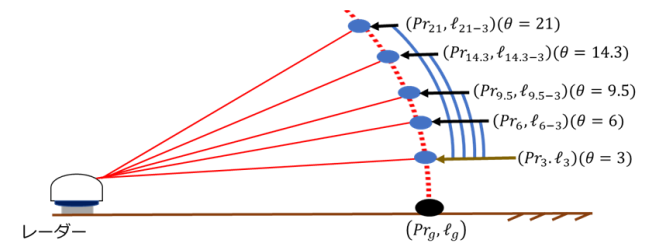


図3 後方流跡線とレーダー面が交差した座標における降水量と距離

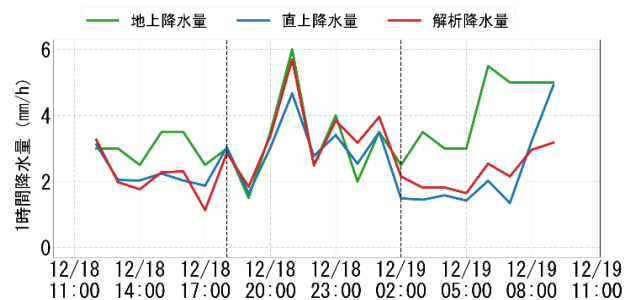


図4 地上降水量とレーダー降水量の時間推移

$CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ は移動距離ごとに算出され、 Pr_3 を乗じることで地上の降水量が推定される50%信頼区間の幅を取得することができる。 $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の値が1に近く幅が狭いほどその事例における降水量の信頼度が高く、幅が広いほど誤差の範囲が広いということであり信頼度が低い。降水量分布は2分ごとに作成され、その分布における各対象地点の $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ をそれぞれ空間平均した値の幅を算出し、幅が大きい期間を対象に時間平均した値を閾値とし、この閾値より大きい場合信頼性が低い、閾値より小さければ信頼性が高いと判定する。

3. 結果・考察

3.1 信頼評価をする期間の選定

図2に地上降水量と解析降水量の時間推移を示す。縦軸に1時間降水量、横軸に時間を示す。地上降水量と解析降水量の差が0.5mm/h以下となり差が小さい期間は2022年12月18日18時0分から19日2時0分であるため、この期間を対象に地上推定降水量の評価を行う。

3.2 正規性の確認

表2に2022年12月18日18時0分から19日

表1 コルモゴロフ・スミルノフ検定の結果

移動距離範囲	$p \geq 0.05$	事例数	割合 (%)
$0 \leq l_{\theta-3} < 1000$	207	240	86.2
$1000 \leq l_{\theta-3} < 2000$	196	240	81.6
$2000 \leq l_{\theta-3} < 3000$	185	240	77.0
$3000 \leq l_{\theta-3} < 4000$	205	240	85.4
$4000 \leq l_{\theta-3} < 5000$	208	240	86.6
$5000 \leq l_{\theta-3} < 6000$	230	240	95.8
$6000 \leq l_{\theta-3}$	233	240	97.0

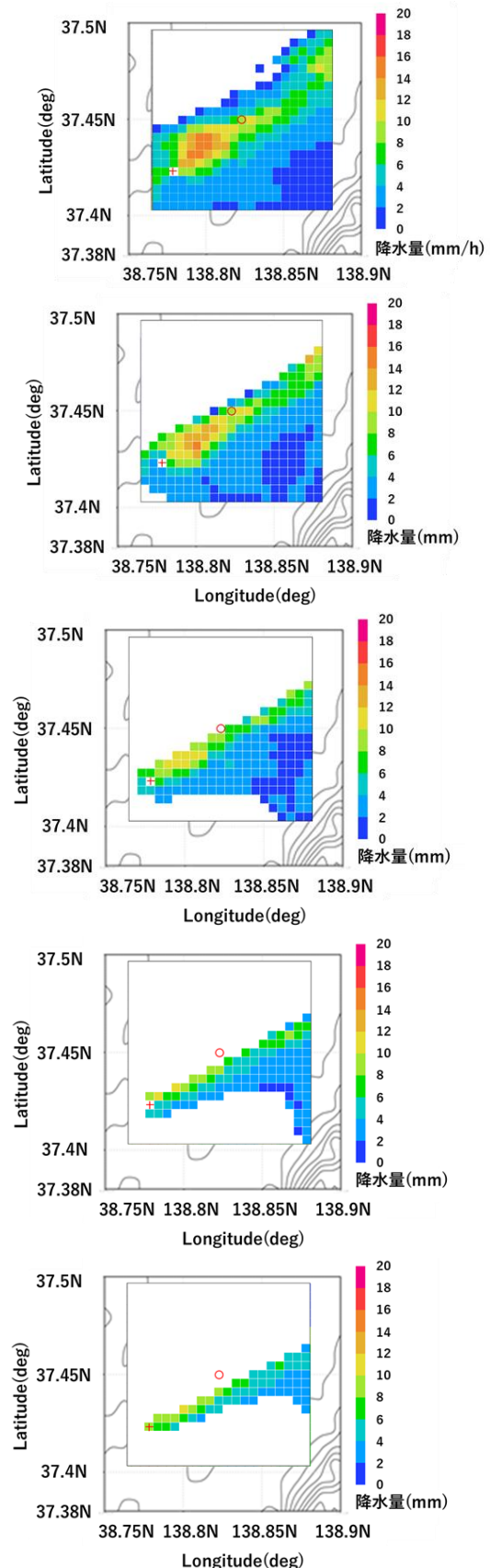


図5 12月18日20時24分の各仰角の降水量分布（上から3°、6°、9.5°、14.3°、21°）

2時0分までの各距離範囲のコルモゴロフ・スミルノフ検定の結果を示す。 $l_{\theta-3}$ が6000m以上において1000m間隔で範囲を区切るとサンプルサイズが小さくなるため、6000m以上はまとめて正規性の確認を行った。最も正規性がある事例数が少ない距離範囲は $2000 \leq l_{\theta-3} < 3000$ で、正規性が確認された事例数は240のうち185の事例で、割合は77.0%となった。他の距離範囲は80%以上の割合で正規性が確認されており、どの距離範囲も半数以上の事例で正規性があると判定されているため本研究では、すべての事例において正規分布に従うものとして扱う。

3.3 後方流跡線解析を用いた降水量分布の作成

図5、図6に12月18日20時24分と12月19日1時0分の各仰角の降水量分布を示す。図中の赤い十字の印の地点は技大レーダーを、赤丸は長岡アメダスの地点を表す。図5は12月18日20時24分の5仰角分の降水量分布であり、各仰角で降水量分布に大きな差がなかった事例である。3°と6°の分布では技大レーダーとから長岡アメダスの地点にかけて10mm/h前後の強い降水を観測している。9.5°以降の仰角の分布では後方流跡線とレーダー面が交差する地点が少ないため欠損値が多いが同じ地点において同様の降水を観測できている。図6は12月19日1時0分の各仰角の降水量分布であり、各仰角で降水量分布にずれが発生した事例である。仰角3°ではアメダス地点を中心に10mm/h以上の強い降水を観測されている。しかし、仰角6°、9.5°と仰角が上がるごとにこの降水量分布が西にずれていることが確認できる。

3.4 各距離の対数誤差の50%信頼区間の算出結果

2つの事例の距離範囲ごとに対数誤差から算出した $\overline{\varepsilon}_{log}$ と 0.674σ 、 $CI50_{high}$ 、 $CI50_{low}$ の結果を表2、3に示す。12月18日20時24分の実例では0mから6000mまでの $\overline{\varepsilon}_{log}$ は0に近い値となっている。しかし、6000m以上の $\overline{\varepsilon}_{log}$ は0.151と正のバイアスがかかっている。0.674 σ はどの距離範囲も0.06前後となっており、指数変化して算

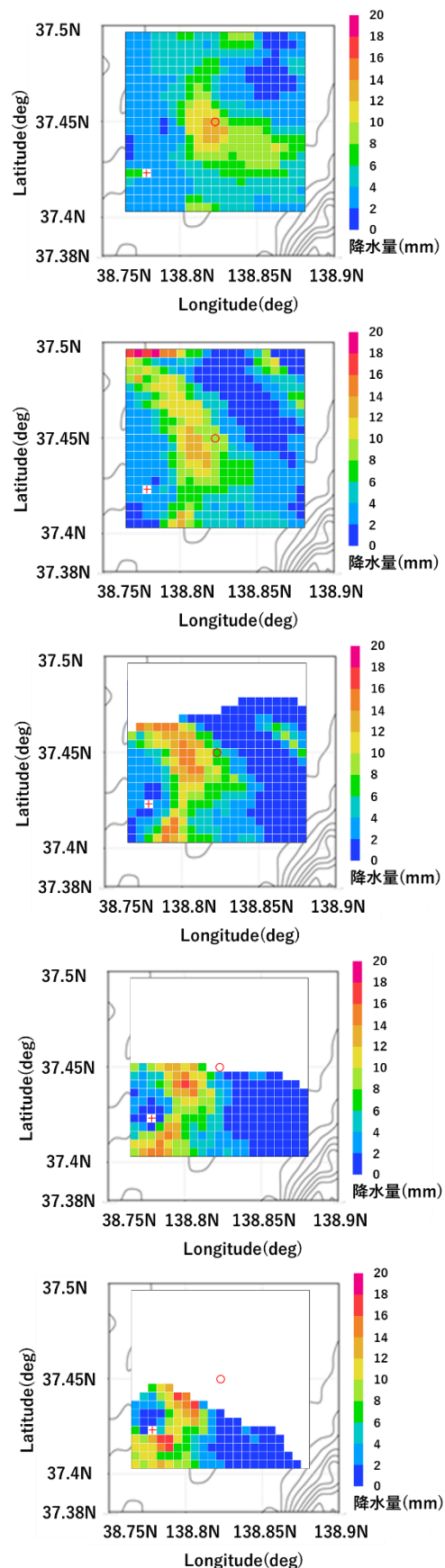


図6 12月19日1時0分の各仰角の降水量分布 (上から3°、6°、9.5°、14.3°、21°)

出した $CI50_{high}$ 、 $CI50_{low}$ は 0.3 前後となっている。12月19日1時0分の事例は $\overline{\varepsilon_{log}}$ は2000m以上の各距離範囲で-0.4前後となっており、負のバイアスがかかっている。0.674 σ は0.2から0.4程度となっており、12月18日20時24分の事例に比べ3から7倍となっており誤差の幅が大きいことがわかる。

3.5 後方流跡線の距離に基づいた降水量分布の信頼性の評価

図7、8は上から2事例における、各対象地点の移動距離 l_3 を分布にしたものである。その下に、この l_3 に基づいて決まった $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の値を分布したものを示す。12月18日20時24分の事例の l_3 の分布図は技大レーダー周辺では0mから1000m、アメダス地点では1000mから2000mとなっており北西の地点ほど地上から3°仰角のレーダー面までに移動した距離が長くなっている。一方で12月19日1時0分の事例では風速が落ち着いたため北西の一部地点を除きほぼすべての地点で l_3 が0mから1000mとなっている。12月18日20時24分の事例の $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の分布図より、この事例では技大レーダーから北西に行くほど後方流跡線の

距離は長くなるが表2に示したようにどの距離範囲も0.674 σ の値は小さいため、多くの地点で $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ は1に近い値をとっている。12月19日1時0分の事例では多くの地点が0mから1000mとなっており、この距離範囲における0.674 σ は0.201であり、 $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の幅は1.001と大きくなっている。それぞれの事例の対象地点の $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ を空間平均すると12月18日20時24分の事例では、 $CI50_{high}$ は1.028で $CI50_{low}$ は0.737であり、その幅は0.275である。12月19日1時0分の事例では $CI50_{high}$ は1.662で $CI50_{low}$ は0.642であり幅は1.020である。これを2分ごとの各事例から算出し、x軸に時刻、y軸に2分ごとに求めた空間平均した $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の幅をとったものを図9に示す。12月18日23時0分以降から風が徐々に弱まり、その影響のためか各仰角の降水量分布のずれが大きくなった。また、18日23時0分以降の地上降水量と3°仰角の解析降水量の1時間降水量の差が19日0時0分では1.172mm/h、1時0分では0.456mm/h、2時0分では0.346mm/hとなっており、18日23時以前の降水量の差に比べ値が大き

表2 12月18日20時24分の移動距離ごとの $\overline{\varepsilon_{log}}$ と0.674 σ と $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の算出結果

移動距離範囲	$\overline{\varepsilon_{log}}$	0.674 σ	$CI50_{high}$	$CI50_{low}$
$0 \leq l_{\theta-3} < 1000$	-0.060	0.071	1.025	0.737
$1000 \leq l_{\theta-3} < 2000$	-0.098	0.057	0.909	0.698
$2000 \leq l_{\theta-3} < 3000$	-0.045	0.073	1.067	0.759
$3000 \leq l_{\theta-3} < 4000$	-0.043	0.062	1.045	0.783
$4000 \leq l_{\theta-3} < 5000$	0.040	0.057	1.252	0.962
$5000 \leq l_{\theta-3} < 6000$	0.024	0.065	1.230	0.9105
$6000 \leq l_{\theta-3}$	0.151	0.066	1.653	1.215

表3 12月19日1時0分の移動距離ごとの $\overline{\varepsilon_{log}}$ と0.674 σ と $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の算出結果

移動距離範囲	$\overline{\varepsilon_{log}}$	0.674 σ	$CI50_{high}$	$CI50_{low}$
$0 \leq l_{\theta-3} < 1000$	0.016	0.201	1.653	0.652
$1000 \leq l_{\theta-3} < 2000$	-0.060	0.342	1.913	0.395
$2000 \leq l_{\theta-3} < 3000$	-0.416	0.409	0.982	0.149
$3000 \leq l_{\theta-3} < 4000$	-0.627	0.495	0.7381	0.075
$4000 \leq l_{\theta-3} < 5000$	-0.358	0.415	1.1395	0.168
$5000 \leq l_{\theta-3} < 6000$	-0.430	0.236	0.640	0.215
$6000 \leq l_{\theta-3}$	-0.630	0.164	0.341	0.1603

い。12月18日23時0分以降の期間における $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ を時間平均しその幅を閾値として使用し、この幅以下となった時を信頼性があるとし、この幅以上となった時は信頼性がないとする。時間平均した幅は 0.93 となり、信頼性があると判定された事例数は全事例数 240 のうち

167 事例となった。全体の 69.58% で信頼性があると判定され、過半数の事例で信頼性があることがわかった。信頼度を評価するために設定した対象期間は全体の評価としては信頼度があるといえる。

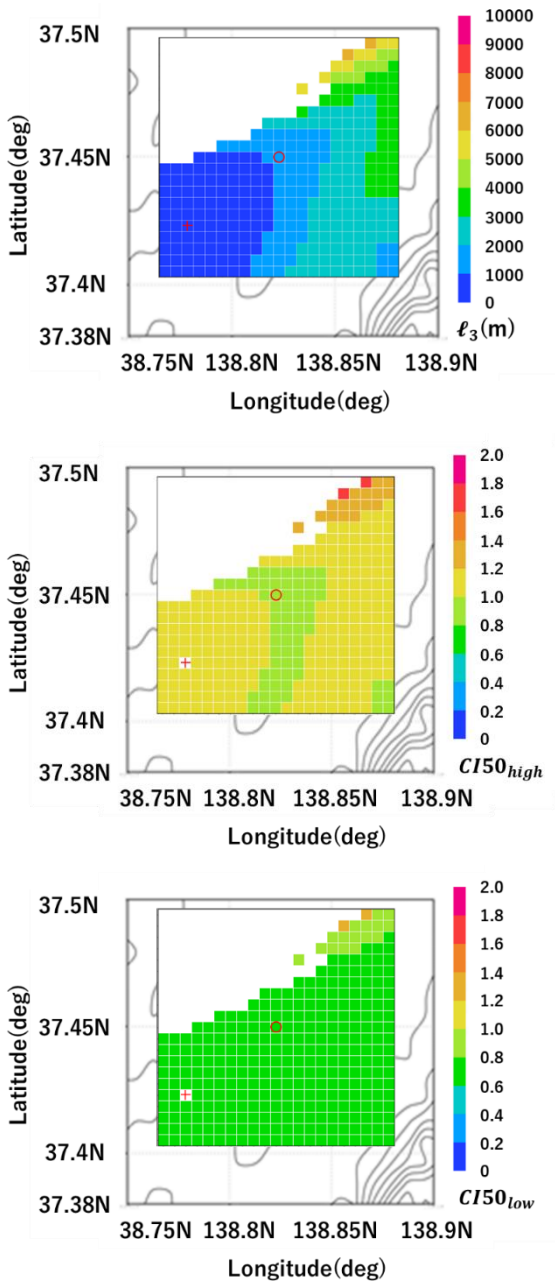


図7 12月18日20時24分の l_3 と l_3 に基づいた $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の分布
(上: l_3 の分布 中: $CI50_{high}$ の分布
下: $CI50_{low}$ の分布)

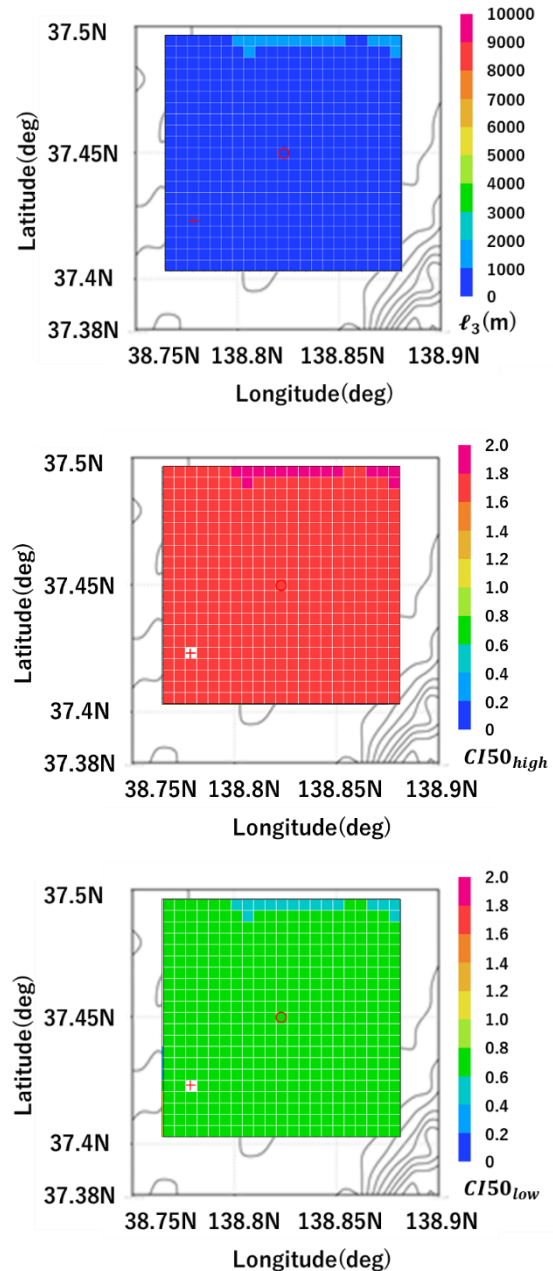


図8 12月19日1時0分の l_3 と l_3 に基づいた $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ の分布
(上: l_3 の分布 中: $CI50_{high}$ の分布
下: $CI50_{low}$ の分布)

4. まとめ

本研究では、NHM の 3 次元風速場と技大レーダーを用いて、長岡アメダス周辺の 10km×10km 範囲を 500m メッシュで後方流跡線解析を実施し、高解像度の降水量分布を作成した。さらに、地上降水量と 3°仰角の解析降水量の対応が良好だった 2022 年 12 月 18 日 18 時 0 分から 12 月 19 日 2 時 0 分の期間において、3°仰角の解析降水量を地上推定降水量とし、他の仰角との対数誤差を 2 分間隔で算出した。これを基に移動距離範囲ごとの対数誤差の標準偏差を求め、各事例における解析降水量と積算降水量から地上降水量の 50%信頼区間を算出した。これにより、解析降水量と積算降水量の信頼性を評価し、以下の結論を得た。

アメダス地点で解析降水量と地上降水量の対応が良好な期間では、各事例の距離範囲ごとの対数誤差のデータは、多くの事例で正規性があると確認されたため、信頼性を評価するために標準偏差を使えることがわかった。多くの事例で移動距離が長くなるほど地上降水量の推定値の 50%信頼区間の幅が広がり、信頼度が低くなることが分かった。2022 年 12 月 18 日 20 時 24 分の事例のように、移動距離に関係なく地上降水量の推定値の幅が小さいケースでは多くの地点で $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ が 1 に近い値をとる事例があることが確認された。2022 年 12 月 19 日 1 時 0 分の事例のように、すべての仰角で同等の降水量が観測されるものの時空間的なずれが生じ誤差のばらつきが大きくなり、 $CI50_{high}$ が 1.662、 $CI50_{low}$ は 0.642 となりその幅は 1.020 となった。12 月 18 日 23 時 0 分以降から風が徐々に弱まり、その影響のためか各仰角の降水量分布のずれが大きくなった。また、18 日 23 時 0 分以降の地上降水量と 3° 仰角の解析降水量の 1 時間降水量の差が 19 日 0 時 0 分では 1.172mm/h、1 時 0 分では 0.456mm/h、2 時 0 分では 0.346mm/h となっており、18 日 23 時以前の降水量の差に比べ値が大きい。12 月 18 日 23 時 0 分以降の期間における $CI50_{high}$ と $CI50_{low}$ を時間平均しその幅

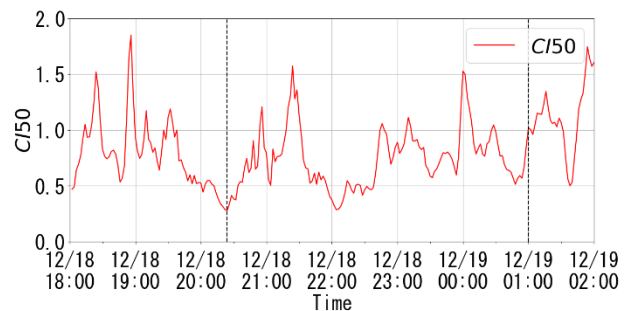


図 9 空間平均した 50%信頼区間の時間推移

を閾値として使用し、この幅以下となった時を信頼性があるとし、信頼性があると判定された事例数は全事例数 240 のうち 167 事例となった。全体の 69.58%で信頼性があると判定され、過半数の事例で信頼性があることがわかった。信頼度を評価するために設定した対象期間は全体の評価としては信頼度があるといえる。

参考文献

- 1)古橋知季, : 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, 長岡技術科学大学修士論文, 2022.
- 2)覺道由郎, レーダー降水量を用いた後方流跡線解析による短時間間隔降雪水量の推定, 長岡技術科学大学大学院修士論文, 2023