

Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定 —複数仰角PPIデータを用いた改善効果について—

高堀 章* 前坂 剛** 三隅良平**

Quantitative Precipitation Estimation by X-Band Multi-Parameter Radar —Improvement Impact Using Multi-Elevation PPI Data—

Akira TAKAHORI*, Takeshi MAESAKA**, and Ryohei MISUMI**

**Tokyo Fire Department*

takahori@bosai.go.jp

***Storm, Flood and Landslide Research Division*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

maesaka@bosai.go.jp, misumi@bosai.go.jp

Abstract

Accuracies of two methods (called Lapsus and 2p-rain), which interpolate rainfall intensity data estimated by X-band multi-parameter radar to geographical grid points, were validated by comparing with Japan Meteorological Agency's AMeDAS rain gauge data. The former processed single elevation (2.7°) PPI data, and had been used operationally in NIED until 2005, while the latter processes multi-elevation (0.7° - 4.7°) PPI data, and has been used since 2006. The comparison indicated that the 2p-rain correlation to the rain gauge data was better than that of Lapsus product at almost all AMeDAS sites. The 2p-rain increase trend of normalized error with the distance from the radar was better suppressed than the Lapsus trend.

Key words : QPE, X-band radar, Rainfall, Polarimetric radar

1. はじめに

局所的な豪雨への対策の重要性は叫ばれて久しいが、防災科学技術研究所(以下、防災科研と呼ぶ)では2000年から、Xバンドのマルチパラメータレーダ(MP-Xレーダ)を用いた気象擾乱の観測を続けている。Xバンド波長のレーダは、SバンドやCバンドのレーダに比べると観測範囲こそ限られるものの、小型化できるために設置が容易で低価格である。また、Xバンド波長は降雨減衰の影響を強く受けることから定量的な降雨観測には不向きとされてきたが、MP-Xレーダの開発により、このような欠点も克服された。MP-Xレーダは、水平偏波と垂直偏波の二種類の電波を同時に発射し、雨滴による散乱により戻ってきたこれらの電波の位相差の距離微分(K_{DP})を用いて降雨強度を推定することができる。 K_{DP}

は降雨減衰によって電波の受信電力が下がってもその影響を受けない。¹⁾

また、防災科研では、MP-Xレーダの観測により得られたデータから降雨強度を推定する計算アルゴリズムも改良を続けている。従来手法では土砂災害の発生危険予測に資するため、約2.7°および4.7°の2仰角でのPPI(Plan Position Indicator)観測を行っていた。(従来手法による推定降雨強度を、以下「Lapsus(Landslide disaster prediction support system)プロダクト」と呼ぶ。)Lapsusプロダクトは、レーダサイトから約30kmの範囲では高い精度を保つことが既に確認されているが、30kmを超えると誤差が大きくなり精度に問題が生じる。²⁾この理由としては、ビーム高度の影響が考えられる。レーダの仰角を約2.7°で運用した場合、距離40kmでビームの

*東京消防庁

**独立行政法人 防災科学技術研究所 水 土砂防災研究部

高さは約 2,000 m, 距離 80km では高さ約 4,000 m に達する。雨滴は雲内で雲粒を併合して成長したり, 地表付近で蒸発していたりするため, 高度によって降雨強度に差がある。地上での降雨強度により近づけるためには, より低い高度(仰角)のデータを取得する必要があるが, 建物や山岳等による遮蔽域が多い地域では低い高度(仰角)のデータの取得は難しい。

一方, 2006 年からはドップラーレーダを所有する首都圏の大学 研究機関と共同で大気圏下層の風向 風速のリアルタイム導出を目指した同期観測を行っている。³⁾ 防災科研の MP-X レーダは 5 分サイクルで 0.7° から 12.9° までの 13 仰角の PPI 観測を行い, 複数仰角データを平面地理座標に内挿することにより降雨強度プロダクトを作成している。(新たな手法による推定降雨強度を, 以下「2p-rain プロダクト」と呼ぶ。)このプロダクトは Lapsus プロダクトよりも低い仰角の PPI 観測を含むため, 降雨強度推定精度の向上が期待される。

本稿では, 2007 年夏期に, 神奈川県海老名市に設置した MP-X レーダ観測データより作成された Lapsus プロダクトと 2p-rain プロダクトを地上雨量計の降雨量と比較することにより, 2p-rain プロダクトの降雨量推定精度改善効果を検証する。

2. MP-X レーダによる格子点値化手法

2.1 Lapsus プロダクト

Lapsus プロダクトでは, レーダの仰角を基本的に 2.7° で運用し, 地形の起伏等により後方が死角となる場合に限り, 4.7° の仰角を使用する。方位角 仰角 レーダからの距離の極座標で表される降雨強度データは, レーダを中心とする 160 km × 160 km, 距離分解能 500 m の格子点に Cressman 内挿される。Cressman 内挿とは, 内挿点からある大きさの影響円を定義し, その円内に不規則に分布するデータを, 内挿点からデータ点までの距離に関する重みを付けて平均化する手法である。

Lapsus プロダクトの場合, 影響円の半径(R_h)はレーダからの距離(r)が 20 km 未満の場合 250 m とし, それ以上では 20 km 遠ざかるにつれ 250 m ずつ大きくなる。距離に関する重み(W)は,

$$W = \exp\left(\frac{d^2}{R_h^2}\right), \quad (1)$$

(d は格子点とデータ点の間の距離) で与えられ, 格子点値は,

$$V = \frac{\sum_i W_i v_i}{\sum_i W_i}, \quad (2)$$

(v はデータ点における降雨強度, i は影響円内のデータ点に関する添え字) となる。

なお, 2005 年までは 2 仰角の PPI 観測を 1 分サイクルで行い, 1 分ごとに Lapsus プロダクトを作成していたが,

2006 年以降は 5 分毎の観測サイクルとなり, 仰角 2.7° 及び 4.7° のデータを必要とする Lapsus プロダクトは 5 分毎にしか作成できなくなった。そのため, 5 分毎のプロダクトから降雨域の移動を考慮した時間内挿を行い, 1 分毎の降雨強度データを作成している。

2.2 2p-rain プロダクト

従来, レーダデータから地上降雨強度を推定するときには, ある仰角の PPI, または, ある高度(例えば 2km)における CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) が用いられてきた。特に, ボリュームスキャンが行われている場合は CAPPI がよく用いられているが, 在来型のレーダでは, 地形等によるビームブロッキングの影響を受けるので, 低い高度の CAPPI による降雨強度推定は難しい。K_{DP} を用いた降雨強度推定はビームブロッキングの影響を受けにくいので, 適切な品質管理が行われている限り, 低い高度のデータも使用可能である。

2p-rain プロダクトでは 13 仰角の PPI 観測のうち 5° 以下の仰角 (0.7°, 1.2°, 1.7°, 2.2°, 2.7°, 3.3°, 3.9°, 4.7°) のデータを, 約 500 m の距離分解能を持つ等緯度 経度間隔の格子点に Cressman 内挿する。2p-rain プロダクトでは, 水平方向の影響円の半径(R_h)をレーダからの距離(r)の一次関数とし,

$$R_h = ar + b, \quad (3)$$

(R_h の単位は m, レーダのレンジ端でも内挿抜けが生じず, かつ, なるべく影響円の半径が小さくなるような値として $a = 0.01$, $b = 200$ を採用している) と定義する。距離に関する重み(W)は, 水平方向の重み (W_h) と高度に関する重み (W_v) の積とし,

$$W_h = \left(1 + 10 \frac{d^2}{R_h^2}\right)^{-1}, \quad (4)$$

$$W_v = \left(1 + 20 \frac{h^2}{H^2}\right)^{-1}, \quad (5)$$

とおく。ただし, h はデータ点の高度, H は平均化に用いるデータ点の最大高度 (6,000 m) とし, 低い高度のデータほど大きな重みとなる。

また, 2p-rain プロダクトでは降雨のみを対象としているので, 融解層 (気温 0 °C から 1 km 下の間の層) よりも低い高度のデータのみを内挿する。気温 0 °C の高度は気象庁メソ数値予報モデル (MSM) の予報値より算出している。

なお, 強雨等の影響で電波が消散しデータの欠損が生じた場合, Lapsus プロダクトでは便宜上全て無降水として扱っているが, 2p-rain プロダクトではデータの欠損が無降水かの判定を行っている。⁴⁾

3. 検証

3.1 使用データ及び計算方法

レーダによる推計雨量の精度を検証するには地上雨量

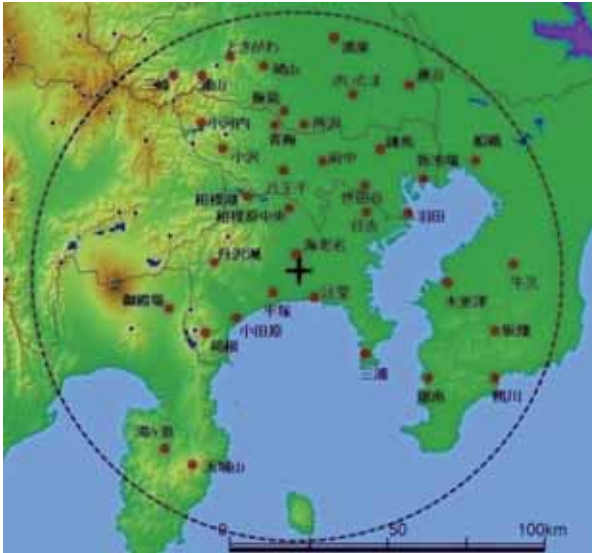


図1 MP-Xレーダの観測範囲(破線 半径80km)と検証に用いたアメダス雨量観測地点.

Fig. 1 Observation range of MP-X radar at Ebina. Red points indicate AMeDAS observation sites in the range.

計の値を用いるのが最適と考え、比較対象としてMP-Xレーダの観測範囲内にある気象庁アメダス雨量計のデータを用いた(図1)。期間は、関東に顕著な降雨が観測された2007年7月14日、7月15日、9月5日、9月6日、9月7日、9月12日のもので、少なくともアメダス雨量計またはMP-Xレーダのどちらか一方若しくは両方で降雨が記録されている時刻(10分単位)のみを対象とした。アメダス雨量計データは「地点」データであり、レーダデータは空間的な広がりを持っているため厳密な比較は難しいが、レーダによる推定降雨強度の格子点データをアメダス観測点に空間内挿(バイリニア補間)して用いた。

すべての地点について、相関係数、2乗平均平方根誤差、および雨量推定誤差を算出した。雨量推定誤差は下記の式のように規格化している。

$$NE(\%) = 100 \times \left(\sum_{i=1}^N |R_i(r) - R_i(g)| \right) / \sum_{i=1}^N R_i(g) \quad (6)$$

ここで、 $R_i(r)$ はレーダによる10分雨量推定値、 $R_i(g)$ はアメダス雨量計による10分雨量の測定値、 N はデータのサンプル数である。

3.2 対象期間の気象概況(2007年7月14~15日)

2007年7月は、2日から17日にかけて梅雨前線の活動が活発であった。特に13日から16日には台風第4号の影響も加わり、沖縄地方から東北地方にかけての広い範囲で記録的な大雨となった(図2)。

台風第4号は、7月9日9時(以後、時間は日本標準時)にカロリン諸島近海で発生し、14日には大型で強い勢力となり鹿児島県に上陸した。上陸時の中心気圧は7月に上陸した台風としては観測史上最も低い945hPaで

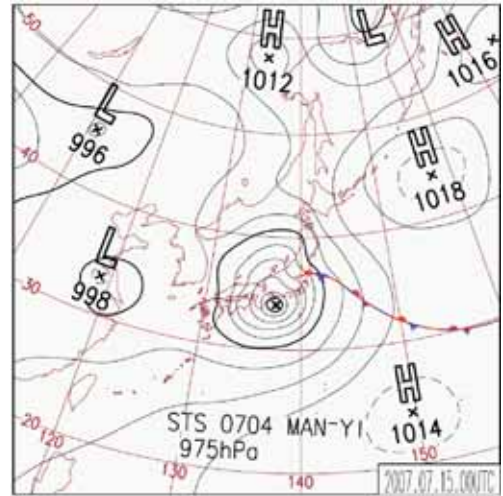


図2 2007年7月15日09時(日本標準時)の地上天気図.

Fig. 2 Surface weather map analyzed by Japan Meteorological Agency (JMA) at 09 JST on 15 July 2007.



図3 2007年9月7日09時(日本標準時)の地上天気図.

Fig. 3 Surface weather map analyzed by Japan Meteorological Agency (JMA) at 09 JST on 7 September 2007.

あった。その後台風は15日にかけて四国、本州の南海上を東に進み、16日9時に日本の東海上で温帯低気圧に変わった。台風が接近した関東地方や東北地方ではところにより1時間に30mm~50mmの激しい雨が降った。⁵⁾

3.3 対象期間の気象概況(2007年9月5~7日)

2007年8月29日に南鳥島近海で発生した台風第9号は、発達しながら、9月4日には父島の北の海上を西に進んだ。その後進路を北寄りに変え、伊豆諸島の西海上を北上し、7日00時前に静岡県伊豆半島南部に上陸した。台風第9号は、最盛期の中心気圧が965hPaだったが、最盛期に近い勢力での上陸だった(図3)。

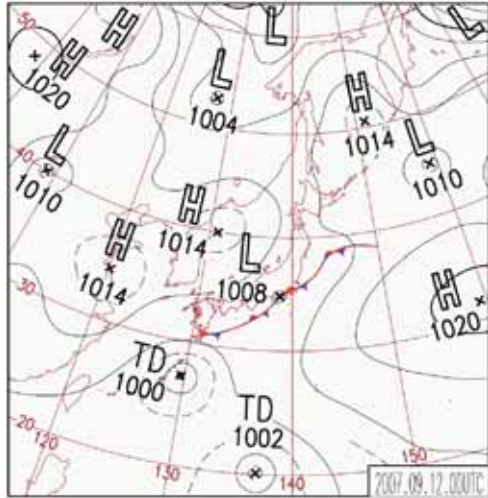


図4 2007年9月12日09時(日本標準時)の地上天気図.
 Fig. 4 Surface weather map analyzed by Japan Meteorological Agency (JMA) at 09 JST on 12 September 2007.

台風の接近に伴い、同年9月4日から7日にかけて、東京都小川内で694 mm、静岡県湯ヶ島で692 mmの雨量を観測した。72時間雨量としては、観測史上1位の記録となった。⁶⁾

3.4 対象期間の気象概況 (2007年9月12日)

日本列島南岸の前線に発生した低気圧の影響で、九州南部、近畿～北日本にかけての広い範囲で雨が降った。(図4)千葉県木更津市では、1時間に50.5 mmの雨を観測した。⁷⁾

4. 検証結果

4.1 アメダス海老名観測点における比較結果

図5は、レーダサイトから約3.5 km離れた位置にあるアメダス海老名観測点について、アメダス10分値とMP-Xレーダ推定雨量の相関関係を2p-rainプロダクトとLapsusプロダクトで比較したものである。2p-rainプロダクトとアメダス雨量との相関係数は0.91で良く一致している。Lapsusプロダクトの相関係数は0.88であることから、精度の向上が確認できる。

4.2 アメダス箱根観測点における比較結果

アメダス箱根は、レーダサイトから約37.5 kmの距離にある。2p-rainプロダクト、Lapsusプロダクト共に相関係数は同程度であるが、雨量が大きくなるほど、推定雨量を過小評価する傾向が見て取れる(図6)。

4.3 アメダス三峰観測点における比較結果

アメダス三峰観測点はレーダサイトからの距離が約71.9 kmである。レーダ推定雨量の計算にあたり、強雨域の外側のように降雨減衰の影響で観測データが欠損している場合は無降水としており、また、レーダからの距離が遠くなるほど、観測データは欠損しやすくなる。(ただし、2p-rainプロダクトの場合、2.2節で述べた方法に

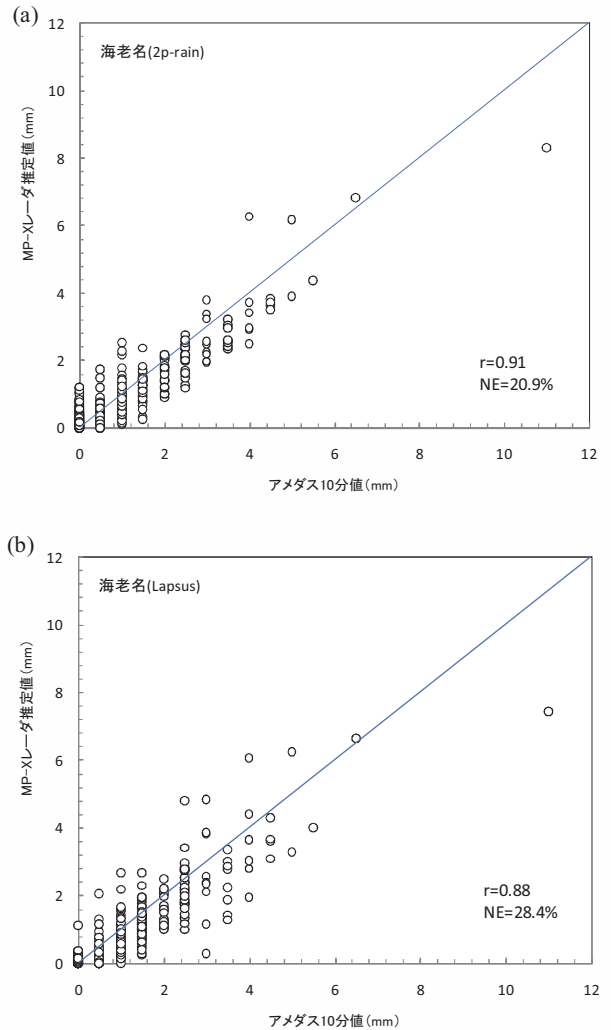


図5 アメダス海老名観測点における、アメダス10分雨量とMP-Xレーダによる雨量推定値の散布図。(a)が2p-rainプロダクト、(b)がLapsusプロダクト。
 Fig.5 Scatter plots of 10 minutes rainfall between rain gauge observation and radar estimation at AMeDAS Ebina site. a) Product 2p-rain. b) Product Lapsus.

よりデータの欠損と認められる場合については、検証対象外としている。) そのため、MP-Xレーダの観測範囲の端に位置するこの観測点ではレーダ推定雨量は過小評価する傾向がある。そのような理由で2p-rainプロダクト、Lapsusプロダクト共に、相関係数が他の観測点にくらべ悪くなっているが、ある程度の改善効果は確認できる(図7)。

4.4 誤差の検証結果

図8は、計算された推定誤差(NE)をレーダサイトからの距離別にプロットしたものである。2p-rainプロダクト、Lapsusプロダクト共に、距離が遠くなるとNEも増大する傾向がある。しかし、Lapsusプロダクトはレーダサイトからの距離が30kmを超えると誤差が大きくなる

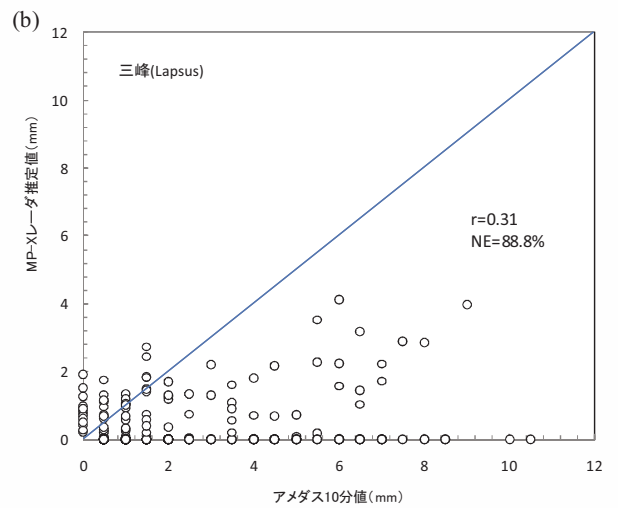
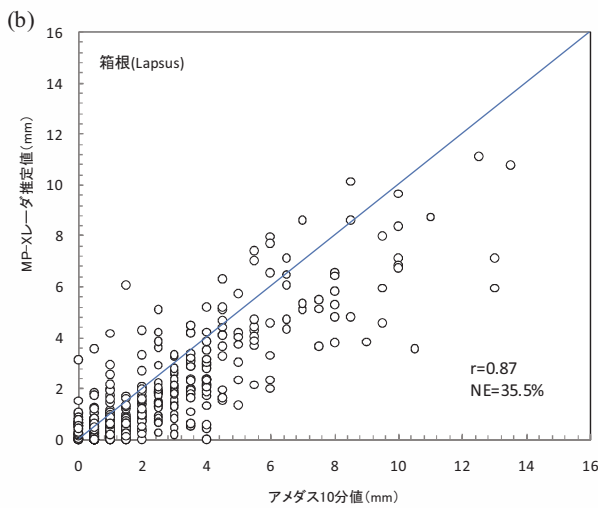
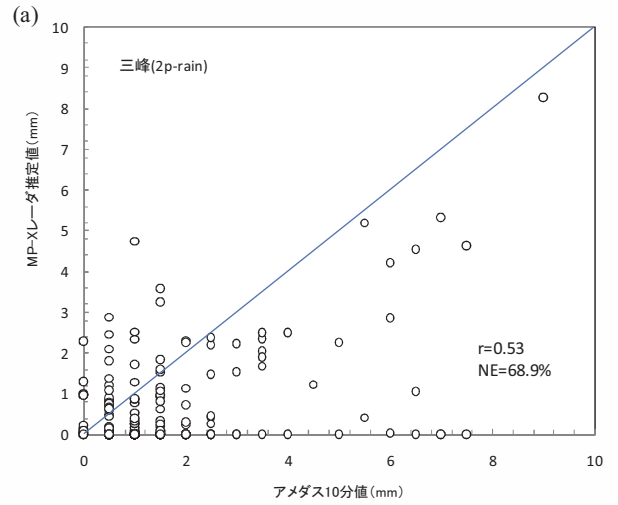
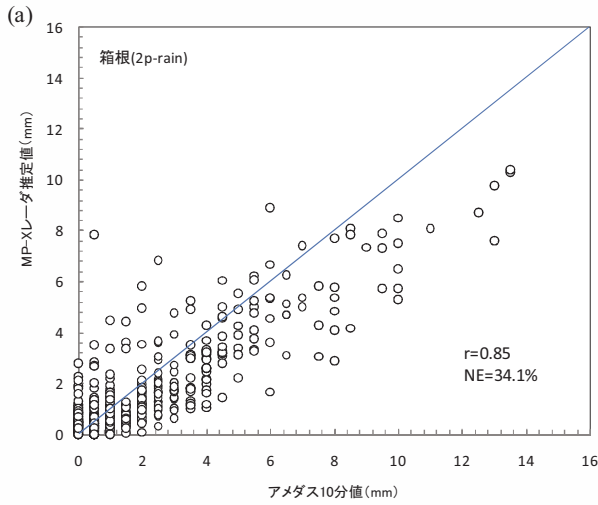


図6 アメダス箱根観測点における、アメダス10分雨量とMP-Xレーダによる雨量推定値の散布図。(a)が2p-rainプロダクト、(b)がLapsusプロダクト。

Fig.6 Scatter plots of 10 minutes rainfall between rain gauge observation and radar estimation at AMEDAS Hakone site. a) Product 2p-rain. b) Product Lapsus.

図7 アメダス三峰観測点における、アメダス10分雨量とMP-Xレーダによる雨量推定値の散布図。(a)が2p-rainプロダクト、(b)がLapsusプロダクト。

Fig.7 Scatter plots of 10 minutes rainfall between rain gauge observation and radar estimation at AMEDAS Mitsumine site. a) Product 2p-rain. b) Product Lapsus.

のに対し、2p-rainプロダクトは60km程度まで比較的精度を保っていることがわかる。参考までに、気象庁が配信している「全国合成レーダGPV」について、同様にアメダスデータに対するNEを算出し、平均した値(46%)を破線で示している。LapsusプロダクトのNEはレーダからの距離が50kmよりも遠くなると全国合成レーダGPVの平均NEよりも大きくなるが、2p-rainプロダクトのNEは観測レンジ端付近でも全国合成レーダの平均NEと同程度の値となっている。

5. 考察

上述のように、多仰角データを使用したことにより、降雨量推定精度の向上がみられる。今回の手法では地表面に近いデータほど重みを付けて平均化しているの

で、低い仰角のデータが精度向上に寄与したと考えられる。

通常、低い仰角のスキャンは、グラウンドクラッターやビームブロッキングの影響を受けるため、地上の降雨量推定に用いられないが、低仰角スキャンのうちデータが取れている地点については、これを捨てることなく計算に活用することによって、精度を向上させることができた。この手法は、多仰角スキャンを行っている他のレーダにも適用可能であろう。

6. まとめ

MP-Xレーダによる降雨強度推定において、2005年まで防災科研で用いられてきた単一仰角PPI観測データを用いる格子点値化手法(Lapsusプロダクト)と、2006年に導入された仰角5°以下の複数PPI観測データを用い

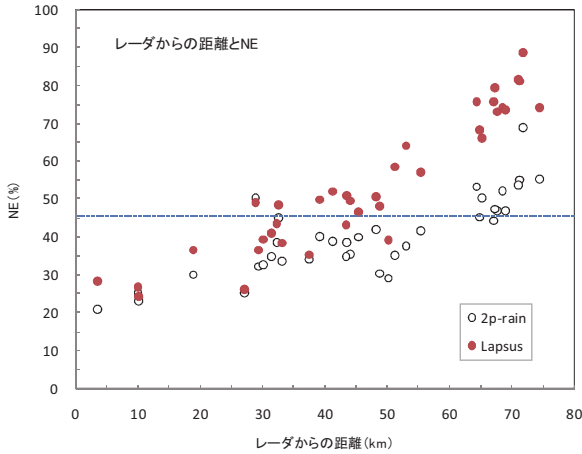


図 8 レーダサイトからの距離と MP-X レーダによる 10 分間推定雨量の正規化誤差 (NE) の散布図。破線 (NE=46%) は気象庁全国合成レーダ GPV から計算された値。

Fig.8 Scatter plots between a distance from the MP-X radar and the normalized error of the estimated 10 minutes rainfall. Dashed line indicates the normalized error (46%) of the rainfall estimation by JMA's composite radar data.

る格子点値化手法 (2p-rain プロダクト) の精度検証を、気象庁アメダス雨量計の 10 分間降雨量データを用いて行った。2007 年の三つの降雨事例について双方のプロダクトを作成し、レーダから近距離 (3.5 km) 中距離 (37.5 km) 長距離 (71.9km) のアメダス雨量計との比較を行ったところ、2p-rain プロダクトの相関係数は Lapsus プロダクトのものと同程度以上であることが確認された。

また、レーダからの距離と正規化誤差の関係を調べたところ、2p-rain プロダクトの方が Lapsus プロダクトに比べて正規化誤差の増大が抑えられており、観測レンジ

端付近でも気象庁全国合成レーダの平均的な正規化誤差と同程度の値であった。

気象庁全国合成レーダではビームブロッキングの影響を受けないように、上空約 2km のデータから雨量を推定しているが、より地表に近い部分のデータを使用することの有効性が確認できた。

参考文献

- 1) Bringi, V. N. and V. Chandrasekar (2001): Polarimetric Doppler weather radar. Cambridge Univ. Press, pp. 636.
- 2) 三隅良平 真木雅之 岩波越 前坂剛 圓山憲一 (2006): マルチパラメータレーダを用いた降雨観測に基づく表層崩壊危険域の推定. 降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム発表論文集, 平成 18 年 11 月, 19-24. 地盤工学会.
- 3) 真木雅之 前坂剛 岩波越 三隅良平 清水慎吾 加藤敦 鈴木真一 木枝香織 (2007): 都市型災害の監視 究明のための新しい取り組み -Xバンド気象レーダネットワーク X-NET-. 日本電気学会平成 19 年基礎 材料 共通部門大会論文集, CD-ROM.
- 4) 岩波越 前坂剛 木枝香織 真木雅之 三隅良平 清水慎吾 (2007): X バンド偏波レーダによる降雨観測における簡易減衰補正. 日本気象学会講演予稿集, B463.
- 5) 気象庁 (2008): 気象業務はいま 2008, 37.
- 6) 内閣府: 平成 19 年台風第 9 号による被害状況等について (第 4 報). (<http://www.bousai.go.jp/kinkyu/071012taifu9/071012taifu9.pdf>, 2008.8.1)
- 7) 気象庁予報部予報課: 日々の天気図 No.68 (2007 年 9 月). (<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/2007/0709.pdf>, 2008.8.1)

(原稿受理: 2008 年 11 月 14 日)

要 旨

MP-X レーダによる降雨強度推定の精度検証を、気象庁アメダス雨量計の10分間降雨量データを用いて行った。2005年まで防災科研で用いられてきた単一仰角PPI観測データを用いる格子点値化手法(Lapsusプロダクト)と、2006年に導入された仰角 5° 以下の複数仰角PPI観測データを用いる格子点値化手法(2p-rainプロダクト)を、2007年の降雨事例について双方作成し、アメダス雨量計との比較を行ったところ、ほぼ全ての地点において、2p-rainプロダクトの相関係数はLapsusプロダクトのものと同程度以上であることが確認された。また、レーダからの距離と正規化誤差の関係においても、2p-rainプロダクトの方がLapsusプロダクトに比べて誤差の増大が抑えられている。

キーワード：降雨強度推定，MP-Xレーダ，複数仰角PPI観測データ