

MP-PAWRの観測データを利用した豪雨検知システム

Quantitative Precipitation Forecasting System Using MP-PAWR Data

末澤 卓 SUEZAWA Taku 水谷 文彦 MIZUTANI Fumihiko 和田 卓久 WADA Takahisa

マルチパラメーター フェーズドアレイ気象レーダー (MP-PAWR) は、半径 80 km の範囲内の雨雲の 3 次元構造を 60 秒間隔で観測できる。この観測データの活用により、上空で発生・発達する積乱雲がもたらす突発的な豪雨を、より高精度に予測できると期待されている。

東芝インフラシステムズ(株)は、内閣府が主導する「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」に参画し、豪雨検知情報を配信する実証実験を実施した。また、豪雨検知システムの実用化に向け、最適高度雨量を導入して地上雨量の推定精度を向上させるとともに、算出した鉛直積算雨量(VIL)から降水量を予測するVILナウキャストの高度化によって雨量予測精度を向上させた。

In recent years, attention has been increasingly focused on the application of multiparameter phased array weather radar (MP-PAWR) data to weather forecasting in order to predict sudden heavy rainfall caused by the growth of cumulonimbus clouds. MP-PAWR is capable of observing the three-dimensional (3D) raincloud distribution within a radius of 80 km at 60-second intervals, providing higher accuracy compared with conventional systems.

Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation has been participating in the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), a national program led by the Cabinet Office, and has conducted demonstration experiments under this program on the provision of information on heavy-rainfall detection. With the aim of realizing the practical use of a quantitative precipitation forecasting system using MP-PAWR data, we have been actively enhancing the accuracy of quantitative precipitation estimation at the ground level by optimizing the precipitation observation altitude as well as by improving VIL Nowcast, a precipitation prediction system that employs the vertically integrated liquid (VIL) water content method.

1. まえがき

従来の気象災害対策では、台風のように全国的に数日間の規模で影響を与える気象現象が注目され、気象衛星の観測画像や全球・全国規模の気象予測結果が活用されてきた。しかし近年、局地的な豪雨による被害が顕著となっており、豪雨が発生する場所と時間を正確に予測することが重要になってきた。2008年の都賀川水難事故は、積乱雲による局地的な豪雨災害に関心が集まる契機となった。積乱雲によってもたらされる豪雨は1時間程度で突発的・局地的に発生するため、雨の位置や強度を正確に予測することが難しく、“ゲリラ豪雨”と呼ばれることもある。また近年では、積乱雲が同じ場所で発生し続けることにより、特定の地域で長時間強雨が降り続く線状降水帯も、注目されている。

ゲリラ豪雨や線状降水帯のような局地的な大雨は、路面がコンクリートで舗装された都市域において、特に被害を引き起こしやすい。これは、雨が地面に浸透せず排水用の水路や下水道に流れ込みやすいためである。更に排水用設備の容量を超えると、路面や住宅への浸水を引き起こすことも

ある。このような氾濫は、主要河川の堤防決壊などによって引き起こされる外水氾濫と対比して、内水氾濫と呼ばれる⁽¹⁾。東京都における内水氾濫による被害額は、過去10年間で約429億円であり、水害に関する総被害額の71%を占めている⁽²⁾。

局地的な大雨に対する防災を目的として、国土交通省はパラボラ型二重偏波気象レーダーを用いたXバンド(8~12 GHzの電波の周波数帯域)のマルチパラメーターレーダー雨量計を全国で39機配備している。観測データはホームページなどを通じて公開されており、国土交通省によるダムや一級河川の管理のほか、自治体の中小河川管理にも活用されている。また、東京都下水道局は独自に2機のパラボラ型二重偏波気象レーダーを配備し、下水処理場のポンプ操作の判断などに活用している。

パラボラ型気象レーダーは仰角方向の観測幅が狭く、雨雲全体を観測するには、機械的に仰角を変えながら観測を行う必要がある。この観測方式では、時間を掛けて仰角方向に密な観測を行うか、仰角方向の観測密度を犠牲にして短時間で観測を行うかを選択する必要がある。一方、東

芝インフラシステムズ(株)を含む研究グループが開発したMP-PAWRは、実用型として世界初^(注1)の二重偏波観測機能を持ったフェーズドアレイ型気象レーダーである。

当社はこのMP-PAWRによる観測データを防災に役立てるため、豪雨検知情報を通知するシステムを開発しており、その実証実験を行ってきた。ここでは、MP-PAWR及び豪雨検知実証実験システムの概要と、豪雨検知システムの実用化に向けた更なる取り組みについて述べる。

2. MP-PAWRの概要

従来のパラボラ型気象レーダーと比較した、フェーズドアレイ型気象レーダーの観測データのイメージを、鉛直断面表示で図1に示した。図1(a)は、パラボラ型気象レーダーが5分間で12仰角を観測するときのイメージを示しているが、仰角方向に観測の抜けが生じてしまうことが分かる。一方、フェーズドアレイ型気象レーダーであるMP-PAWRは、図1(b)に示すように、仰角方向に電子走査を行うことで仰角方向に対して抜けのない観測を60秒ごとの高頻度で行える。

MP-PAWRは、二重偏波観測機能を備えたフェーズドアレイ型気象レーダーである。二重偏波観測機能とは水平と垂直の電波を用いて観測を行う機能である。粒径の小さな雨粒は真球に近い形をとるが、大きな雨粒は落下時の空気抵抗によってへん平な形をとる。水平の電波だけを用いる単偏波気象レーダーでは、小さな雨粒と大きな雨粒の見分けが付かないために、強雨の観測精度が悪い特徴があった。二重偏波観測では大きくへん平な雨粒に水平と垂直の電波を当てたときに、水平の方が垂直よりも強い電波が返ってくる特徴を利用して、小さな雨粒と大きな雨粒を見分け、弱雨から強雨まで精度良く観測できる。

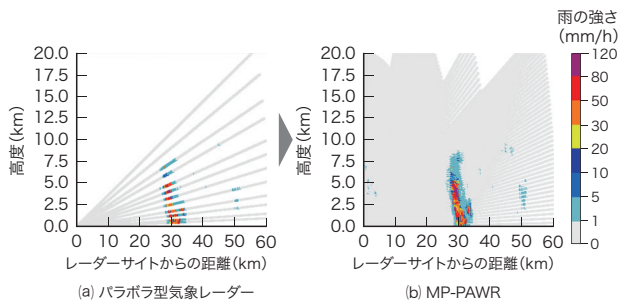


図1. パラボラ型気象レーダーとMP-PAWRの観測データの違い

パラボラ型気象レーダーでは仰角方向に観測データの抜けが生じる。MP-PAWRは仰角方向に密な観測を行うため、雨雲の3次元的な構造を把握できる。

Differences in data observed by conventional radar and MP-PAWR

(注1) 2017年11月時点、当社調べ。

このようにMP-PAWRは、上空の雨量を高密度・高頻度・高精度に観測できるため、発生初期段階の積乱雲を早期に検知できる。またMP-PAWRの高密な観測データを用いると、地上から上空までの雨量を積算した値であるVILを、パラボラ型気象レーダーより高精度に算出できる。高精度なVILの算出は雨量の推定に有効であり、MP-PAWRはゲリラ豪雨や線状降水帯の検知や雨量の予測に有効であるといえる。

MP-PAWRは2017年に観測を開始して以来、スーパーコンピュータを用いたゲリラ豪雨予報の実証実験やスマートフォンのアプリケーションでの観測データ公開⁽³⁾など、幅広い領域で活用されている。

3. 豪雨検知実証実験システムの概要

MP-PAWRの観測データを防災に役立てるため、豪雨検知情報を通知する実証実験システムを開発した。実証実験システムには、大きく分けて三つの機能がある。

- ① 現在の雨量、及び雨雪の判別情報を表示する。
- ② 予測雨量を表示する。
- ③ 豪雨を検知して通知する。

実証実験システムで表示される画面の一例を、図2に示す。雨量は従来の2次元(2D)表示に加えて3次元(3D)で表示でき、積乱雲の高さなどから、その発達度合いを直感的に認識できる。

豪雨検知アラームの対象領域は、地図中の枠線で表示される。これから豪雨が発生する可能性のある領域はだいたい色の注意アラーム、現在豪雨が発生している領域は赤色の警戒アラームが表示される。注意アラームや警戒アラームが発報されるときは、併設されるパトランプが鳴動するとともに、担当者へ電子メールを配信することにより状況の確認を促す。

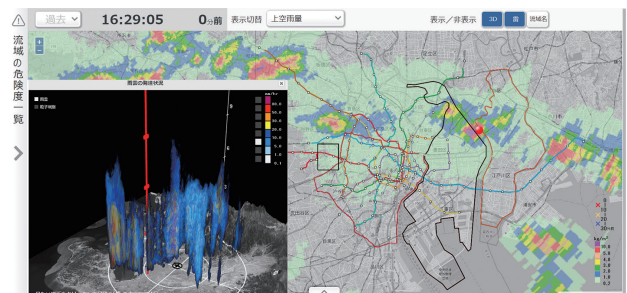


図2. 実証実験システム 情報表示画面例

実証実験システムでは観測データの履歴を動画再生で表示できるため、雨雲の接近・離隔、発達・衰退といった変化を分かりやすく伝えられる。

Example of information display of demonstration experiment system

2021年度の実証実験における東京都内の豪雨検知アラームの評価結果は、的中率は55.6%，空振り率は42.6%，見逃し率は1.8%となった。見逃し率が低い一方で、空振り率すなわち、豪雨注意アラームを発報したにもかかわらず豪雨が発生しなかった割合が高いことが分かった。2022年度の実証実験ではアラームの発報・解除条件を見直すことで、空振り率を約20%以上改善し、的中率76.2%を達成した。

4. 豪雨検知システム実用化に向けた取り組み

豪雨検知システムの実用化に向けて、地上雨量推定精度と雨量予測精度の向上を目指して研究開発を続けている。以下において、これらの内容について述べる。

4.1 最適高度雨量の適用による地上雨量推定精度の向上

図3に、横線で気象レーダーが観測する高度と雨の強さを示す。線の色は、黒、青、黄、赤の順でレーダーが観測した雨の強さの値が大きくなっていくことを示している。河川管理はもちろん、日々の生活においても地上に届く雨量の把握が重要である。しかし、地上付近には高層ビルや山岳など、レーダーの見通しを妨げる物が多く存在する。パラボラ型気象レーダーは、図3(a)に示すように、地上雨量の推定に適した条件である、①地上に近いこと、及び②観測範囲が広いことがトレードオフの関係にあることを考慮して観測仰角を選択する必要がある。例えば、図3(a)中の高度(A)では、地上に近いところを観測できるが、遮蔽により観測可能な範囲が狭い。一方、高度(C)では、観測可能な範囲が広いが、地上雨量との相関が悪い。このため、中庸な高度(B)に向けた観測仰角を選択している。

これに対してMP-PAWRは、地上付近から上空まで抜けなく雨量を観測する。この高密度な観測データの中から図3(b)に示すように、遮蔽物の少ない範囲は低仰角、遮蔽物の多

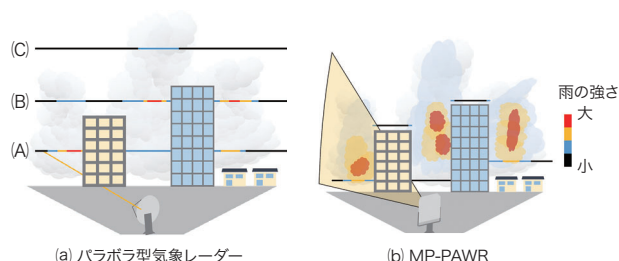


図3. 最適高度雨量の概念図

パラボラ型気象レーダーでは、地上に近いことと観測可能な範囲が広いことといった、地上雨量の推定に適した2条件がトレードオフの関係にあることを考慮して、観測仰角を選択する必要がある。一方、MP-PAWRでは方位・距離ごとに最適高度で観測した雨量を配信できる。

Conceptual diagram of optimization of precipitation observation altitude

い範囲は高仰角の観測データをそれぞれ選択して配信することで、各地点において最も地上雨量に近い雨量を配信できる。最適高度の雨量データを配信・表示できることから、この雨量データを最適高度雨量と呼んでいる。

東京都府中市に設置された地上雨量計で観測された雨量と、MP-PAWRが各仰角で観測した雨量の誤差の算出結果の一例を図4に示す。横軸にMP-PAWRの観測仰角、縦軸に地上雨量計とMP-PAWR雨量との平方根平均二乗誤差(RMSE)をとっている。図4から、府中では仰角3°でRMSEが最も小さくなっており、この仰角での観測値が最適高度雨量となる。最適高度雨量を配信することで、河川や下水道に流入する雨量をより高精度に見積もることが可能になり、河川・下水道管理の高度化に貢献できる。

4.2 VILナウキャストを活用した雨量予測精度の向上

実証実験システムの豪雨注意アラームはMP-PAWRの予測雨量に基づいて発報される。実証実験システムでは、最新の観測データから算出された雨量分布を移流ベクトルに沿って移流させる手法を採用した。この手法はMP-PAWRの3次元観測データを用いて雨量分布を3次元的に移流させることで、積乱雲が上空で発生した時点から予測を行えるため、地上雨量だけを移流させる従来のパラボラ型気象レーダーを用いた手法よりも早い段階で豪雨を予測できる。しかし、この手法は最新時刻の観測データを単純に移流させているため、積乱雲の発達や衰退を予測することはできない。

そこで予測精度の改善に向けて、国立研究開発法人防災科学技術研究所(以下、防災科学技術研究所と略記)が考案した予測手法であるVILナウキャスト⁽⁴⁾の活用を検討した。MP-PAWRの高密度な観測データは、従来のパラボラ

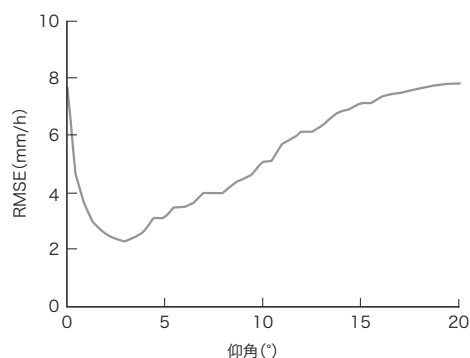


図4. 地上雨量計で観測された雨量とMP-PAWRが各仰角で観測した雨量の誤差

この例では、仰角3°で最も誤差が小さくなり、この仰角に対応した高度で観測された雨量が最適高度雨量となる。

Root mean square error (RMSE) of rain rates observed by ground-based rain gauge and MP-PAWR at each elevation angle

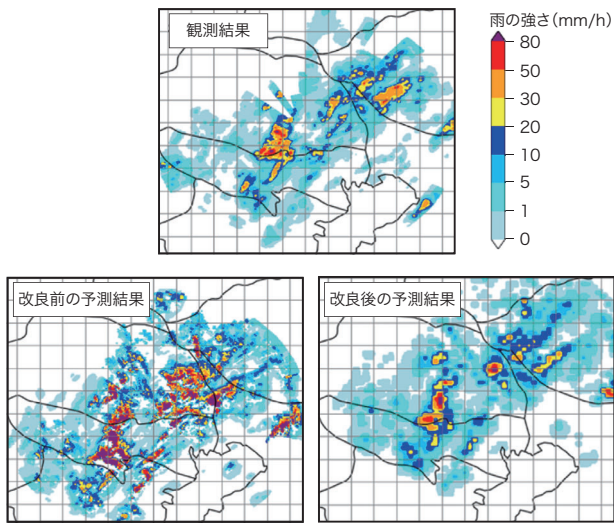


図5. 観測データと予測結果の比較

改良前の予測結果では雨量を過剰に推定している。VILナウキャストの改良により、雨域の形や強度をより高精度に予測できるようになった。

Comparison of data observed by MP-PAWR and predicted by VIL Nowcast system before and after improvement

型気象レーダーよりも高精度にVILを算出できる。VILナウキャストでは、VILが下記の三つの要因によって変化することを利用して、将来の雨量を予測する。

- (A) 雨域の移流によって変わる。
- (B) 地上に雨を降らすことで減少する。
- (C) 雨粒などが生成されることで増加する。

初期試作結果では、(A)に関わる移流ベクトル推定誤差と、(C)に関わる雨粒の生成率の推定誤差に起因する予測誤差が大きくなっていた。そこで移流ベクトルを高精度に推定できるFFT（高速フーリエ変換）相互相関法による移流ベクトル推定誤差の低減と、マルチスケール予測手法の導入による生成率推定精度改善に取り組んだ⁵⁾。

図5は、MP-PAWRの観測データを用いたVILナウキャストの予測について、FFT相互相関法とマルチスケール予測手法を用いて改良した場合の、改良前後の予測結果を比較して示している。改良前の予測結果は観測と異なる雨域の形をしている上に、雨量を過剰に予測している。一方、改良後の予測結果は強雨の場所や強度をよく予測できている。2018～2019年のMP-PAWR観測データを用いた雨量評価の結果、改良前のRMSEの平均値は1.21 mmであったのに対し、改良後は0.65 mmとなり、予測精度が46%改善した。

5. あとがき

最適高度雨量やVILナウキャストを活用した雨量予測の

研究開発を通して、MP-PAWRの高密度・高頻度・高精度な観測データが、現在の雨量と将来の予測雨量の正確な把握に有効であることを確認できた。

特定国立研究開発法人 理化学研究所はMP-PAWRを複数台設置することにより、豪雨の強度と場所をより高精度に予測できるというシミュレーション結果を公表した⁶⁾。当社としてもMP-PAWRの観測データを活用した、線状降水帯の早期検知に取り組んでいる。当社は今後もMP-PAWRの導入を積極的に提案し、強じんなインフラの構築に貢献する。

この研究にあたり、VILナウキャストのアルゴリズムについては、防災科学技術研究所の成果を活用させていただいた。また、この研究の一部は内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントの防災・減災機能の強化」(管理法人：JST)によって実施した。

文献

- (1) 防災科学技術研究所. “内水氾濫”. 自然災害情報室. <https://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza_kiso/11naisui.html>, (参照 2023-08-05).
- (2) 国土交通省. “近年の降雨及び内水被害の状況, 下水道整備の現状について”. <<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001320996.pdf>>, (参照 2023-08-03).
- (3) 理化学研究所. “「富岳」を使ったゲリラ豪雨予報”. 広報活動. <https://www.riken.jp/pr/news/2021/20210713_1/>, (参照 2023-08-05).
- (4) Hirano, K.; MAKI, M. Imminent Nowcasting for Severe Rainfall Using Vertically Integrated Liquid Water Content Derived from X-Band Polarimetric Radar. Journal of the Meteorological Society of Japan. 2018, **96A**, p.201-220.
- (5) 和田 卓久, ほか. “MP-PAWRの観測データを利用した短時間予測の技術開発”. 第59回下水道研究発表会. 東京, 2022-08, 日本下水道協会. 2022, S-5-1-5.
- (6) 理化学研究所. “シミュレーションで線状降水帯の豪雨予測精度を改善”. 研究成果(プレスリリース). <https://www.riken.jp/press/2022/20220307_1/index.html>, (参照 2023-08-05).



末澤 卓 SUEZAWA Taku
東芝インフラシステムズ(株)
小向事業所 電波応用技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



水谷 文彦 MIZUTANI Fumihiko
東芝インフラシステムズ(株)
小向事業所 電波応用技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



和田 卓久 WADA Takahisa
東芝インフラシステムズ(株)
インフラシステム技術開発センター
システム制御・ネットワーク開発部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.