

2-2 フェーズドアレイ気象レーダーのリアルタイム観測データの利用

2-2 Utilization of Real-time Observation Data of Phased Array Weather Radar

佐藤晋介 花土 弘

Shinsuke SATOH and Hiroshi HANADO

吹田、神戸、沖縄に設置して定常運用しているフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) の観測データを NICT 本部にリアルタイム転送するデータ利用システムを開発した。Web ページでは 30 秒ごとの観測データによる高度 2 km の降雨水平分布を観測終了後 1 分以内に公開しているほか、過去データの検索を行うことができる。リアルタイム観測データの利用例として、理研天気予報研究による 3 次元降水ナウキャストとスマホアプリ「3D 雨雲ウォッチ」を紹介する。PAWR データ利用に当たって重要なデータ品質管理を、ビッグデータ同化実験や降水ナウキャストで観測データをリアルタイム利用するため、10 秒以内で処理する高速データ品質管理手法を開発した。

The phased array weather radar (PAWR) installed at Suita, Kobe, and Okinawa are operated steadily. The observation data are transferred to NICT headquarters in real-time using the developed PAWR data utilization system. In the web page, horizontal rainfall distribution every 30 seconds using the PAWR observation data are published within 1 minute, and the past observation data can be searched. As an application example of real-time PAWR observation data, we introduce three-dimensional precipitation nowcast of RIKEN and smartphone application "3D rain cloud watch". The data quality control is important for using PAWR data. We developed a high-speed data quality control method to calculate within 10 seconds to use PAWR data in real-time for big data assimilation and precipitation nowcast.

1 まえがき

NICT では、リモートセンシング技術の研究開発及びそれを活用した突発的大気現象の予測技術向上に必要な研究開発を推進している。東芝、大阪大学、NICT の産学官連携チームで開発したフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) を、2012 年 5 月に吹田 (大阪大学吹田キャンパス：大阪府吹田市) に設置して、局地的大雨や竜巻・突風の早期探知と予測を目標として観測実験を開始した [1]。その後 2014 年 3 月に同型の PAWR を、神戸 (NICT 未来 ICT 研究所：兵庫県神戸市) と沖縄 (NICT 沖縄電磁波技術センター：沖縄県国頭郡恩納村) に設置した。神戸と沖縄では PAWR を設置した 20 m 鉄塔にドップラーライダーや多波長マイクロ波放射計、スカイラジオメータなどのリモートセンシング測器を備え付け、地上気象観測装置や雲監視カメラなどを含む「フェーズドアレイ気象レーダー・ドップラーライダーネットワーク融合システム (PANDA)」として整備した。PANDA の全ての観測データは NICT 本部 (小金井市) にリアルタイム

転送され、複数の測器による融合データ解析ができるようになっている。現在では、データ転送に関する改善やネットワーク構成の変更などを経て、吹田 PAWR を含めたデータシステムを「PANDA データ利用システム」と名付けて、計画停電や不具合発生時などを除いて原則として 24 時間 365 日の常時運用を行っている。

本研究では、吹田、神戸、沖縄の 3 台の PAWR のリアルタイム観測データの利用について述べる。PAWR は 100 m 距離分解能、100 仰角の高密度な 3 次元観測を 30 秒で行うことで、従来型気象レーダーの 100 倍のデータレートで観測ビッグデータを生成する。その観測データを利用してゲリラ豪雨の予測実証を行うためには、ビッグデータのリアルタイムデータ処理技術や高速なデータ品質管理手法の開発が必要である。本研究では、PAWR のデータ品質管理処理を 10 秒以内で行い、定常的にリアルタイム運用できる処理システムを開発する。

2 PANDA データ利用システム

2.1 PAWR 観測データのリアルタイム転送

2012年に設置された吹田PAWRの観測データを利用するためのデータ処理システムは、当時のJGN-X回線を用いてNICTサイエンスクラウドを利用することで開発した[1]。2014年に運用を開始した神戸及び沖縄PAWRについては、導入当初からPANDAの仕様として小金井に観測データが転送されていた。しかしながら、遠距離の実効転送速度に問題があり、リアルタイム観測データの利用やクイックルック(QL)画像の作成を行うために、吹田PAWRデータと同じネットワークでデータを扱う改修を行った。また、2018年度まではNICTサイエンスクラウドのネットワークやWebサーバを利用していたが、その廃止に伴いNICTクラウドのネットワークにデータ利用システム全体を移行した。2019年4月現在のPANDAデータ利用システムのネットワークを図1に示す。吹田PAWRを含むvlanA系統が本研究で開発したネットワークで、神戸・沖縄PAWRを含むvlanBは導入時のPANDAネットワークで、レーダシステムの制御サーバなどを含むため外部からのアクセスは最小限に制限している。

PAWR観測データの容量は、通常の30秒観測シーケンスで生成される13種類の全種別データを合わせると493MBとなり、データレートは131Mbpsとなる。利用するJGN回線はほとんどが10Gbps以上の高速回線であるが、通常のTCP通信では遅延や長距離に

よるパケットロスの影響で、時々30秒以内に全データを転送できない状況が発生していた。そこでNICTで開発されたHpFPファイル転送ツールhpcopy(<http://hpfp.nict.go.jp>)を使うことで、全データのリアルタイム転送が安定して実現できるようになった。

3台のPAWR観測データのアーカイブは、種別ごとのデータを1時間ごとにまとめて圧縮(tar.gz)し、主としてけいはんな(京都府精華町)のM2Mストレージの2.4PBボリュームに保存してきたが2019年6月で容量が一杯となる。M2Mに保存していない観測データは融合データ蓄積装置やデータ解析サーバ等に分散して保存している。また、非圧縮の最新数か月分の神戸・沖縄PAWRデータは融合データ蓄積装置に、吹田PAWRデータはデータ解析サーバ(pawr-dp04)にもデータ保存しており、顕著な現象が発生した時などには直ちにデータ解析できるようになっている。また、後述するリアルタイムのデータ品質管理及びリアルタイムデータ利用ユーザへの配信には、データ解析サーバを使用している。

2.2 データ公開Webページ

吹田、神戸、沖縄の3台のPAWRの稼働状況を常時モニターするとともに、過去データの検索を行うための公開Webページ(<https://pawr.nict.go.jp>)を制作した。トップページでは3台のPAWRのQL画像(高度2kmの反射強度の水平分布)を公開しており、30秒ごとの自動ページ更新により3台のPAWRの最新の観測結果が観測終了後1分以内に確認できるように

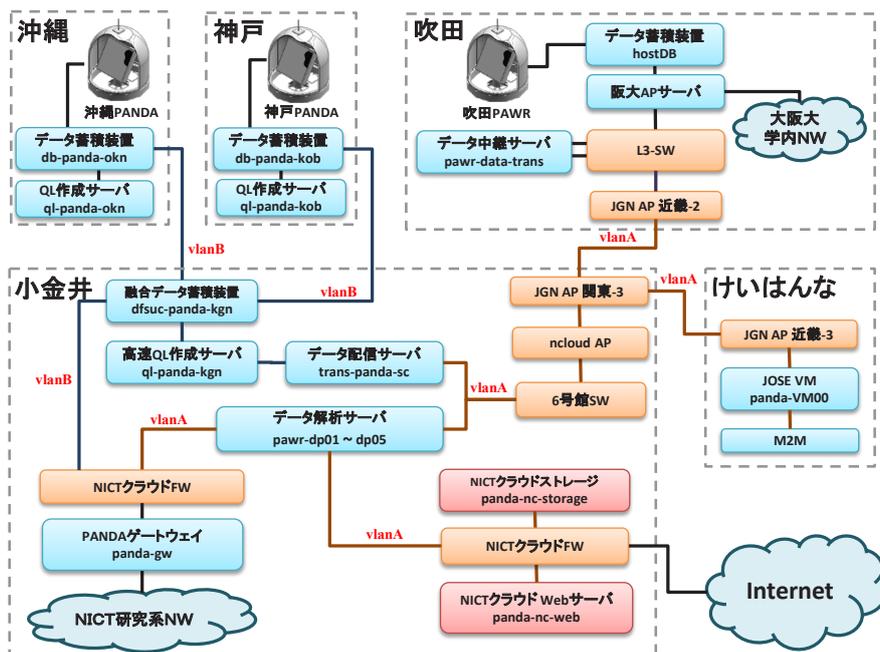


図1 PANDAデータ利用システムで用いている主要な計算機サーバ・ストレージ(青と赤)、ファイアウォール(FW)・スイッチ(SW)・アクセスポイント(AP)(橙)及びネットワークを示す模式図。

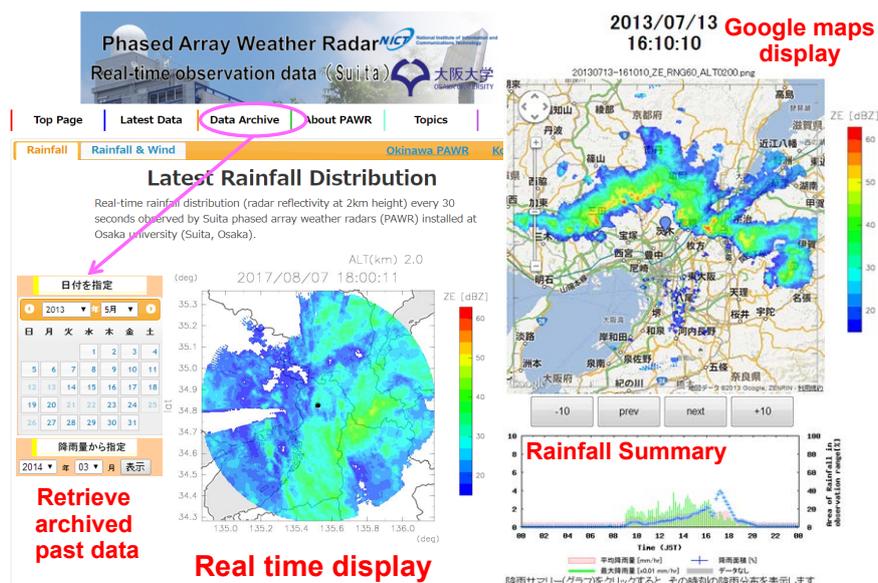


図2 PAWRリアルタイム観測データの公開Webページ (<https://pawr.nict.go.jp>) から過去のデータ
の選択カレンダー(左)、最新の降雨分布(中)、Google Maps表示(右上)、降雨サマリー(右下)。
いずれも英語ページの例を示す。

なっている。このQL画像はできる限り遅延が最小となるように、図1に示すように各レーダーサイトにQL作成サーバを設置して(吹田はデータ中継サーバでQL作成)、そこでファイル容量の小さなQL画像を作成し、直ちに小金井に転送している。こうすることで、ネットワーク遅延などで観測データがリアルタイム転送できない場合でも、QL画像でレーダー運用状況を確認できる可能性が大きくなる。

図2は公開Webページで表示される画面の例で、中央の白地図にレーダー反射強度を重ねているQL画像がトップページのリアルタイム表示に使われている。右側の地図上に反射強度を重ねた画面はGoogle Mapsを利用しているが、リアルタイム表示に用いているQL画像と同じファイル(透過png)を利用している。降雨サマリーのグラフは1日(24時間)の30秒ごとの平均降雨量(赤の棒グラフ)、最大降雨量(緑の棒グラフ、0.01倍)、降雨面積(青の折れ線)を示す。当日の降雨サマリーは1時間ごとに更新しているので、レーダー観測範囲内の大まかな降雨状況が一目で分かるようになっている。過去データの検索は、図2(左)のカレンダーの日付あるいは月を指定することで、当該日のQL画像及び降雨サマリーにジャンプしたり1か月(4週分)の降雨サマリー画面にジャンプしたりすることができ、容易に降雨状況を把握することができる。Webページの降雨サマリーグラフは所望の時間あるいは日をクリックすることで、該当のQL画像にジャンプする機能も併せ持っている。また、ここでは図示しないが、「雨と風の情報」というタグに切り替えると高度2kmの反射強度とドップラー速度分布のQL画

像が表示され、レーダー上空の東西鉛直断面における反射強度とドップラー速度分布も表示される。

3 リアルタイムのデータ品質管理

PAWRの観測データには様々な原因のノイズや降雨以外の不要エコー(クラッタエコー)が含まれる。降雨分布を示す程度であれば普通はそれほど大きな影響はないが、定量的な降雨量を算出したりゲリラ豪雨予測をしたりしようとする、それらのノイズデータが大きな問題となる。従来のパラボラアンテナ型レーダーでも同様のクラッタエコーなどの問題はありますが、PAWRはアンテナパターンを合成して形成するために[2]、地表面クラッタエコーが混入しやすいという弱点がある。また、送信モジュールの高集積化の影響でレンジサイドローブによる疑似エコーが生じやすいなどデータ品質に多くの問題を抱えている。

2013年に科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究課題「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証(研究代表者:三好建正)が採択され、100m分解能、30秒ごとのPAWR観測によるビッグデータを、京コンピュータを用いて同化して30分先までの予測を行うという研究開発が始まった[3]。CREST研究で実施した最初のビッグデータ同化実験では[4]、PAWRのデータ品質管理はRuiz et al.(2015)の手法を用いていた[5]。この品質管理は実験に用いる観測事例でチューニングを行い、不要データを完全に除いたもので、30秒観測のデータを品質管理するために40秒の計算時

2 地上レーダーによる気象現象の観測

間を要していた。しかしながら、リアルタイムデータ利用を想定すると、実際の様々な観測データの品質管理を10秒以内に処理する必要がある。実際、地表面クラッタの除去では外部データを用いて計算処理に時間をかけることで精度は向上するが、計算時間と精度のトレードオフとなる。

また実観測データには、予測できないノイズ等の混入や様々なタイプの降雨エコーが観測されるため、データ品質管理の精度を保つことは容易ではない。本研究で開発したPAWRの品質管理情報は、汎用的な目的で利用できるように1-byte (8-bit) の品質管理(QC) フラグとして提供される。QC フラグは、(0) Valid data, (1) Shadow, (2) Clutter possible, (3) Clutter certain, (4) noise, (5) Rain Attn, (6) Range SL, (7) Reserve, とした。(0) は反射強度 (Z_e) とドップラー速度 (V_r) とともに有効データであれば真、(1) の地形によるシャドーは、国土地理院の標高データと $4/3 R$ の等価地球半径を仮定したビーム高度の比較で判定する。(2) は統計クラッタマップの出現頻度の情報で、その範囲で V_r の絶対値と Z_e の Texture 情報を用いて、(3) のクラッタを判断している。(4) のノイズは現状では電波干渉等によりレンジ方向に混入する不要エコーの除去のみを対象としている。(5) の降雨減衰は代表的な $K-Z$ 関係を仮定した経路積分減衰量 (PIA) で、大きな減衰領域の判別を行っている。

図3は仰角 2.0° の PPI で Z_e 分布と QC フラグ出力結果を示す。対流性及び層状性降雨が地表面クラッタと重なる場所に観測された例では、いずれも降雨エコーと思われる領域での QC フラグは Clutter possible (黄色) となっており、統計的にはクラッタ発生領域であるがこの事例では降水という正しい判断となっている。電波干渉が発生した時の事例(晴天時)ではノイズが適切に判別されており、ほぼ全ての Clutter possible 領域で Clutter certain (橙色) と判別されている。いずれの事例でも、地形による Shadow (緑色) は西北西～北方向に広がっており、西側のシャドーは大阪大学内の建物によるシャドーである。図4は強エコーの前後にしばしば現れるレンジサイドローブ (RSL) による疑似エコーの例である。パルス圧縮された長パルス領域では、強エコーの前後 ± 10.8 km (低仰角の場合) の範囲に対称的な RSL を生じることがある。この RSL は、通常は送信パルス波形を整形することで低減できるが現状の送信ユニットでは修正が困難であり、50 dBZ を超えるような孤立した強いエコーの前後には実エコーより $20 \sim 30$ dB 弱い疑似エコーが現れることが多い。

この疑似エコーを除去するため、レンジ方向と方位角方向に別々に計算した Z_e のテクスチャを利用した。

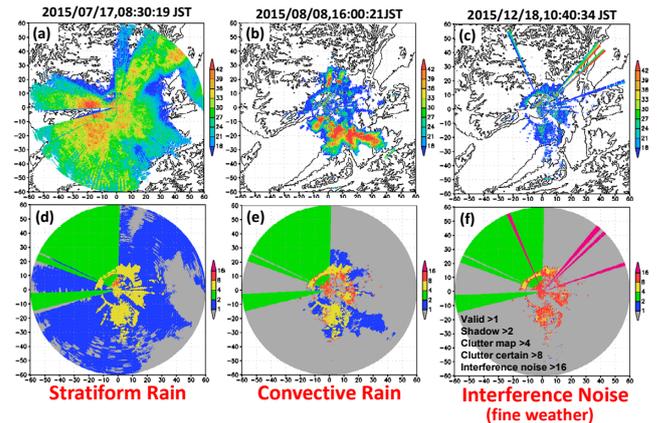


図3 仰角 2.0° の PPI における反射強度分布 (上段) と QC フラグ (下段) の出力例。(a), (d) 対流性降雨時、(b), (e) 層状性降雨時、(c), (f) 晴天時の電波干渉発生時の例を示す。QC フラグは、青が Valid (≥ 1)、緑が Shadow (≥ 2)、黄と橙が Clutter Possible 及び Certain (≥ 4 , ≥ 8)、赤が Interference Noise (≥ 16)、紫が Range Sidelobe (≥ 32) を示す。

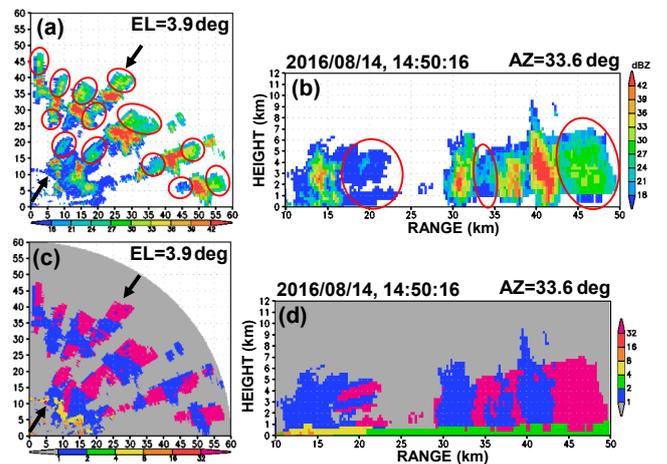


図4 レンジサイドローブ疑似エコーの例。(a) 仰角 3.9° の PPI 及び (b) 方位角 33.6° の RHI の反射強度 (図 a の矢印間の鉛直断面)。赤丸で囲まれたエコーがレンジサイドローブと考えられる。(c) (d) PPI 及び RHI に対応する QC フラグ。

判別方法は、まずレンジ方向 ± 10.8 km の範囲における Z_e 最大値を求め、それがしきい値 (45 dBZ) を超えた場合にその範囲でレンジ方向テクスチャと方位角方向テクスチャの値がしきい値 (1.5, 0.8) 以下であることを確認する。最後に Z_e 最大値との差が一定値 (20 dBZ) より小さければ RSL エコーと判別する。判定結果を図4下段に示すが、おおむね正しく疑似エコーを判別できていると考えられる。ただし、一部で仰角によって判定が異なり不完全な判別結果となっている場所や RSL 領域の中に正常データが含まれる場合がある。この QC フラグ作成プログラムは、最終的にシングルコアによる計算では10秒を超えてしまったが、8コアを用いた並列計算を行うことで実行時間を10秒未満に押さえることができている。定期的リアルタイム処理を行うことで後述する3次元降水ナウキャスト

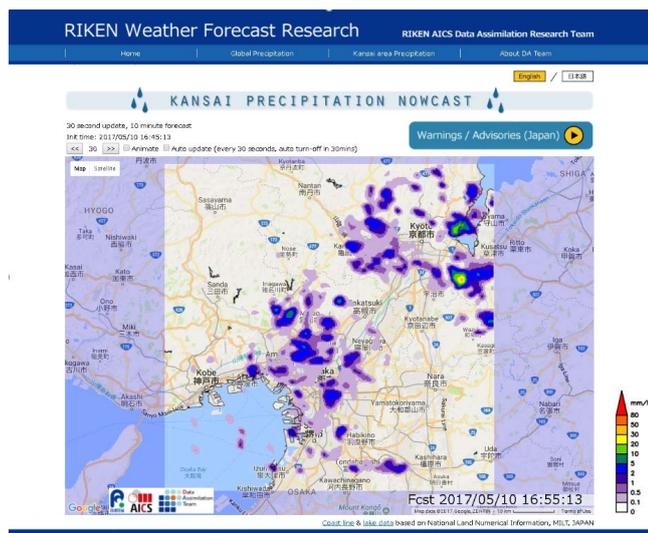


図5 理研天気予報研究、関西の降水予報のWebページ (<https://weather.riken.jp>)。吹田または神戸PAWRの観測データをNICT本部(小金井)から神戸の理研にリアルタイム転送して、3Dナウキャストによる30秒更新、10分予報を行っている。(理研提供)

トでも利用されている。データQCの精度は最終的な予測精度を左右するが、限られた計算処理時間内で様々な観測データに対応できるQC処理は容易ではなく、多くの事例を用いて検証を行うとともにリアルタイム運用の結果も評価しながら課題を解決していくことが重要となる。

4 リアルタイム観測データの利用

4.1 理研天気予報研究

2018年時点では、CRESTのビッグデータ同化実験では100m分解能、30秒更新、30分先までの予測を30秒以内に実現することはできなかった。250m分解能にすれば30秒以内で計算可能であるが、京コンピュータの多くのノードを占有する必要がある、常時運用することは実質的に不可能である。そこで、30秒ごとのPAWR観測データを有効利用した短時間の天気予報を目指して、Otsuka et al.(2016)が3次元降水ナウキャストの手法を開発した[6]。この手法はスーパーコンピュータを使わなくても一般的なマルチプロセッシング計算機でリアルタイム運用できるものであり、従来の2次元水平分布データを用いたナウキャストに比べると積乱雲内の降水コアの成長や落下など[7]を追跡できるため、予測精度が良くなっている。図5は、Webページで公開されている理研天気予報研究のページである(<https://weather.riken.jp>)。ここでは、吹田あるいは神戸PAWRのデータを用いて250mメッシュで10分先までの降水予報を行い、理研が気象予報業務許可を取得して、気象予報士が常駐する平日10時から17時の間のみ予報結果を表示し



図6 スマホアプリ「3D雨雲ウォッチ」によるフェーズドアレイ気象レーダーの観測データ表示。(左)真上から視点による水平降雨分布、(中)3次元降雨分布、(右)PUSH通知の例(エムティーアイ提供)。

ている。

4.2 スマホアプリ「3D雨雲ウォッチ」

吹田PAWRの試験観測中(2012年7月26日)に発生した京田辺市付近のゲリラ豪雨の事例を3次元可視化して30秒ごとのアニメーションとして表示した結果は[1][8]、専門家のみならずマスコミを通じて一般の人からも大きな反響を呼んだ。その3次元アニメーションを展示会で紹介したことがきっかけとなり、株式会社エムティーアイとNICTの共同研究契約「フェーズドアレイ気象レーダーによる豪雨予報に関するモバイルコンテンツ開発」が始まった。PAWRの30秒ごとのリアルタイム観測データを利用した無料のスマホアプリ「3D雨雲ウォッチ」は、わずか3か月程度の短期間で開発を行い2015年7月21日から実証実験を開始した[9]。その後、ユーザの声を聞きながら毎年改修を行い、2018年には20万ダウンロードを超えた。2018年までに吹田、神戸のPAWRに加えて、日本無線株式会社の千葉PAWRデータも加えるとともに、気象庁Cバンドレーダーデータ(10分更新)を用いることで利用エリアを全国に拡大した。また、関西域では前述の理研による3次元降水ナウキャストの結果も取り入れて、10分先予報の結果も配信している。図6は2018年版の「3D雨雲ウォッチ」の観測データ表示画面である。図6(右)のプッシュ通知は豪雨の可能性をユーザに通知するものであり、基本的には鉛直積算雨量(VIL)を用いたロジックを基にして豪雨の可能性を判定している。

5 まとめ

吹田、神戸、沖縄のPAWR観測データを小金井にリアルタイム転送するデータ利用システムを開発した。131Mbpsで生成されるビッグデータを遅延なく転送

するために hpcopy ツールを用いて常時リアルタイム転送を実現し、リアルタイム観測データ利用ユーザに配信するとともにデータアーカイブを行っている。Web ページでは 30 秒ごとの観測データから高度 2 km 水平断面の降雨分布を観測終了後 1 分以内に公開しているほか、過去データを効率よく検索することができる。PAWR 観測データには地表面クラッタやレンジサイドローブなどの不要エコーが含まれており、それを除去するためのデータ品質管理が重要である。ビッグデータ同化実験や 3 次元降水ナウキャストで用いるため 10 秒以内で処理できる高速データ品質管理手法を開発し、定常的なリアルタイム運用を行っている。PAWR 観測データのリアルタイム利用として、理研で運用されている 3 次元降水ナウキャストとスマホアプリ「3D 雨雲ウォッチ」を紹介した。

観測ビッグデータをリアルタイムで利用することは容易ではないが、ネットワークや計算機の発展に伴い大抵のことが実現できるようになってきた。2～30 年前の気象レーダーでは PAWR の 100 分の 1 のデータ量を保存することがまず大仕事であり、数年前の過去データをネットワークからすぐ利用できるというのは夢物語であった。現在はペタバイトクラスのストレージも価格が大幅に下がり手軽に使えるようになった。最近では AI 技術の応用でビッグデータを用いる機会も増えてきたが、本データ利用システムは十分にそれを可能としている。今後は、埼玉大学に設置された新しい MP-PAWR の観測データが PANDA データ利用システムに加わる予定であり、リアルタイム観測データの利用も増えていくと考えられる。システムやネットワークの安定運用に加えてデータ QC は大きな問題であり、AI 技術の応用も含めて更なる QC の精度向上が必要と考えている。

謝辞

PANDA データ利用システムの開発及び保守運用は株式会社セックにお世話になっており、同社の村永和哉氏の長年の貢献に対して深く感謝の意を表したい。リアルタイムの PAWR データ品質管理は、CREST の研究課題の研究成果であり、研究代表者である理化学研究所の三好建正氏には大変お世話になった。また、理研天気予報の PAWR リアルタイム観測データ利用は、理化学研究所の大塚成徳氏及び石川裕氏の尽力によるものである。スマホアプリ「3D 雨雲ウォッチ」の開発に関しては、株式会社エムティーアイの小池佳奈氏に心から感謝する。本文中にも記したとおり、本研究は JST CREST 研究課題「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ

豪雨予測の実証」及びエムティーアイとの共同研究「フェーズドアレイ気象レーダーによる豪雨予報に関するモバイルコンテンツ開発」の研究成果によるところが大きい。

【参考文献】

- 1 佐藤晋介, 牛尾知雄, 水谷文彦, “フェーズドアレイ気象レーダーの研究開発,” NICT News 2013 年 1 月号 no.424, pp.3-5, 2013.
- 2 F. Mizutani, T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, “Fast-scanning phased-array weather radar with angular imaging technique,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 56, pp.2664-2673, 2018. doi: 10.1109/TGRS.2017.2780847.
- 3 T. Miyoshi, G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Tomita, S. Nishizawa, R. Yoshida, S. A. Adachi, J. Liao, B. Gerofi, Y. Ishikawa, M. Kunii, J. J. Ruiz, Y. Maejima, S. Otsuka, M. Otsuka, K. Okamoto, and H. Seko, ““Big Data Assimilation” toward post-peta-scale severe weather prediction: An overview and progress,” Proc. of IEEE, vol.104, pp.1-25, 2016. doi: 10.1109/JPROC.2016.2602560.
- 4 T. Miyoshi, M. Kunii, J. J. Ruiz, G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Seko, H. Tomita, and Y. Ishikawa, ““Big Data Assimilation” revolutionizing severe weather prediction,” Bull. Amer. Meteor. Soc., vol.97, pp.1347-1354, 2016. doi: 10.1175/BAMS-15-00144.1.
- 5 J. J. Ruiz, T. Miyoshi, S. Satoh, and T. Ushio, “A quality control algorithm for the osaka Phased Array Weather Radar,” SOLA, 11, pp.48-52, 2015. doi:10.2151/sola.2015-011.
- 6 S. Otsuka, G. Tuerhong, R. Kikuchi, Y. Kitano, Y. Taniguchi, J. J. Ruiz, S. Satoh, T. Ushio, and T. Miyoshi, “Precipitation nowcasting with three-dimensional space-time extrapolation of dense and frequent phased array weather radar observations,” Wea. Forecasting, 31, pp.329-340, 2016. doi: 10.1175/WAF-D-15-0063.1.
- 7 F. Isoda, S. Satoh, and T. Ushio, “Temporal and spatial characteristics of localized rainfall on 26 July 2012 observed by phased array weather radar,” SOLA, 2018, 14, pp.64-67, 2018. doi:10.2151/sola.2018-011.
- 8 磯田総子, 佐藤晋介, 花土弘, 高橋暢宏, 水谷文彦, 牛尾知雄, “フェーズドアレイ気象レーダーによる豪雨の 3 次元観測,” 可視化情報学会誌, vol.34, no.135, pp.148-153, 2014.
- 9 小池佳奈, ほか 10 名, “フェーズドアレイ気象レーダーの 3 次元データ配信スマホアプリによる実証実験,” 気象学会 2015 年度秋季大会予稿集, B355, 2015.



佐藤晋介 (さとう しんすけ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
博士(理学)
レーダー気象学



花土弘 (はなだ ひろし)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
理学修士
マイクロ波リモートセンシング