

シンポジウム「フェーズドアレイレーダー」の報告

—現在の利活用状況から将来展望まで—

楠 研 一^{*1}・足 立 透^{*2}・諸 富 和 臣^{*3}・佐 藤 晋 介^{*4}
 菊 池 博 史^{*5}・吉 田 翔^{*6}・清 水 慎 吾^{*7}・小 池 佳 奈^{*8}
 牛 尾 知 雄^{*9}・水 谷 文 彦^{*10}・高 橋 暢 宏^{*11}

近年、急速に発生・発達する積乱雲により短時間でもたらされる竜巻等の突風・局地的大雨など激しい大気現象による災害が報告されている。これらの災害の軽減を目指した防災気象情報の高度化は重要な課題である。極めて高いスキャン性能をもつ気象観測用のフェーズドアレイレーダーは2012年に登場し、これまで全国で5台が運用され、これらの現象のメカニズム解明という、気象学の基礎研究の分野でいくつかの成果が出ており、防災への応用も盛んに研究されるようになった。さらに二重偏波機能を搭載した新しいタイプの開発が進み、観測実験を始める計画も始まろうとしている。このシンポジウムは、フェーズドアレイレーダーに関する最新の観測成果、さらに開発や運用について情報交換を行うことを目的に企画され、2017

年5月19日に気象庁 気象研究所で開催された。このシンポジウムは今回が第2回で(第1回は2016年1月19日に開催された(楠ほか 2016)),参加者は96名(うち報道関係者3名)と、前回の65名(うち報道関係者1名)からさらに盛況となり、フェーズドアレイレーダーの関心の高さを示すものとなった。フェーズドアレイレーダーの研究開発の現状や、今後どのような役割が期待されるのかについて、気象・工学・メーカー・防災・移動体通信等の専門家が一堂に会するこのシンポジウムで議論できた。ここでは、当日発表された11件の講演についてそのタイトルおよび概要を紹介する。

1. 気象研究所におけるXバンドフェーズドアレイレーダーを用いた研究—大気現象の新しい理解—

竜巻等突風や局地的大雨等の発生を受けて国を挙げた防災・減災の施策が進められる中、気象研究所では、重要課題の一つとして位置づけられるXバンドのフェーズドアレイレーダー(以降、PAR)を用いた研究開発を進めている。講演では、これまでに観測されたダウンバースト・マイソサイクロン・スーパーセルといった積乱雲スケールの現象に関する最新の知見を紹介するとともに、2016年台風第9号について、中心部の立体的な構造変化や境界層の微細な気流構造等の解析結果を示し、PARが多様な時空間スケールを持つ現象の理解に有用であることを述べた。また、平成27~28年度に気象研究所と近畿地区の気象官署が実施した共同研究の成果を紹介し、PARが現象の学術的理解にとどまらず、現業における注意報・警報等の改善にも高い効果を有する可能性を示した。最後

^{*1} (連絡責任著者) Kenichi KUSUNOKI, 気象研究所.
 kkusunok@mri-jma.go.jp

^{*2} Toru ADACHI, 気象研究所.

^{*3} Kazuomi MOROTOMI, 日本無線株式会社.

^{*4} Shinsuke SATOH, 情報通信研究機構.

^{*5} Hiroshi KIKUCHI, 首都大学東京システムデザイン学部.

^{*6} Syo YOSHIDA, 株式会社気象工学研究所.

^{*7} Shingo SHIMIZU, 防災科学技術研究所.

^{*8} Kana KOIKE, 株式会社エムティーアイ.

^{*9} Tomoo USHIO, 首都大学東京システムデザイン研究科.

^{*10} Fumihiko MIZUTANI, 芝インフラシステムズ株式会社.

^{*11} Nobuhiro TAKAHASHI, 名古屋大学宇宙地球環境研究所.

に、将来の現業利用に向けて解決すべき課題（例えば、PARが取得する膨大なデータから危険域を自動抽出する技術の開発など）をまとめ、今後、PARを用いた大気現象の理解深化と防災・減災への実用化に向けて、基礎科学研究から応用技術開発に至る密な連携に基づく取り組みが重要であることを指摘した。

（足立 透）

2. 千葉に設置したフェーズドアレイ気象レーダーで観測された2016年8月4日のガストフロント

フェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) は、積乱雲を短い時間間隔で3次元的に観測することで、局地的大雨や突風等の極端気象の前兆現象を捉えられる可能性がある。日本無線株式会社では、独自に開発したXバンドPAWRを千葉市に設置し、30秒毎に半径80 km、高度15 kmの範囲を観測している。

2016年8月4日に、市原市付近で急速に発生・発達した積乱雲により、ガストフロントが発生した。横須賀から撮影したこの積乱雲の外縁とPAWRで観測したエコーの外縁（5 dBZ以上の領域）は良く一致しており、そのエコー頂高度は13 km以上の高さにまで発達していた。

PAWRで観測されたガストフロントは、低高度で観測されエコー頂高度は600 m、移動速度は5 m/s、反射強度は5～15 dBZと非常に弱い弓状のエコーであった。さらにガストフロント通過直後には新たな積乱雲が発生・発達する様子も観測された。

このガストフロント発生前、積乱雲内で急激な降水コアの落下が観測された。この降水コア落下により下降流が形成されガストフロント発生に至ったと考えられる。このようにPAWRで極端気象の前兆現象を捉える事に成功した。

（諸富和臣）

3. フェーズドアレイ気象レーダーのリアルタイムデータ品質管理

局地的大雨の早期探知と予測を目指して開発したフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) は、詳細な3次元データ（100 m分解能、100仰角）を30秒で観測でき、データ同化やナウキャスト、スマホアプリなどの実利用が始まっている。それらの精度向上のためには、観測データに含まれる地表面クラッタや電波干渉ノイズなどの不要エコーの除去などのデータ品質管理 (QC) が重要で、それをリアルタイムで行う必

要がある。本研究ではPAWR観測データのQC情報を汎用的に利用できるように、極座標の生データと同じフォーマットで8-bitのQCフラグファイルを10秒以内に作成することを目的とする。QCフラグには、地形やビルによる遮蔽、晴天時の観測データから求めたクラッタマップ、ドップラー速度と反射強度のテキストチャ情報などから判別する地表面クラッタ、電波干渉ノイズ判別などの情報が含まれる。今回開発したQCアルゴリズムの計算時間は降雨面積に依存するが概ね5～8秒であり、リアルタイム処理が実現できる目処がついた。また、対流性および層状性降雨の観測データに対して簡単な検証を行った結果、それらの降雨エコーと地表面クラッタは概ね良く識別出来ていたが、今後多くの事例で検証とチューニングを行う必要がある。

（佐藤晋介）

4. フェーズドアレイ気象レーダーに対する適応型信号処理手法の検討

フェーズドアレイ気象レーダーは既存のレーダーに比して以下の利点がある。既存のレーダーは全天観測に5～10分程度の観測時間かつ仰角方向の観測数は10程度であるのに対し、フェーズドアレイ気象レーダーは時間分解能30秒（最短10秒）で、仰角方向に100以上の観測数を得ることが出来る。これらは複数のアンテナ素子を用いて仰角方向に電子走査を行う技術（デジタルビームフォーミングと呼ばれる）によって実現されている。

フェーズドアレイ気象レーダーは送信波として比較的広いビーム幅（5度程度）を持つファンビームを用いている。ファンビームは高速スキャンに非常に有用である一方、グランドクラッタの影響を受けやすいといった問題点がある。この問題点に対して適応型信号処理手法である最小二乗法を用いたクラッタの低減に関する検討を行った。その結果、各アンテナ素子間の観測誤差を補正することで、最小二乗法は既存の手法に比べて格段にクラッタの影響を低減できることがわかった。更に現在、レンジサイドローブの低減を目的とした適応型信号処理手法のパルス圧縮手法への応用を検討している。

（菊池博史）

5. フェーズドアレイ気象レーダの逐次的ZR式推定手法の検討

大阪大学と気象工学研究所は、大阪大学に設置されたフェーズドアレイ気象レーダ（以降、PAWR）により局地的な豪雨をいち早く捕え、短時間に発生する浸水被害等に対する防災・減災対策支援に必要な情報発信を行う社会実験を大阪市福島区役所の協力の下に実施した。本社会実験ではPAWRのデータを活かした3次元移動予測による地上雨量予測を行った。予測誤差の主要因の1つにZR式の雨量強度推定誤差が挙げられるが、ZR式は降雨状況によって変化し得る為、逐次的にZR式の推定を行う事が望ましい。しかし、逐次的にZR式を得るためには真値となる雨量値が一定量必要となり、PAWR観測範囲内の地上雨量計のみでは十分なデータ数が得られない場合が想定される。

そこで本検討では国土交通省XバンドMPレーダネットワークの1分毎の合成レーダ雨量値を参照した逐次的なPAWRのZR式推定を考案した。逐次的にZR式を推定する事で、PAWR観測範囲内の降水域の時間変化に応じたZR式の変動が確認された。また、一般的なZR式を用いた場合と比べて雨量強度の推定精度が向上する事も確認された。

（吉田 翔）

6. 高速スキャンデータを用いた個々の積乱雲の発達予測手法の開発ー積乱雲内の浮力推定および予測への利用法ー

積乱雲内の浮力は上昇流を駆動する最も重要な変数である。しかし、直接観測することは不可能である。観測可能変数の時間変化からナビエ・ストークス方程式を介して熱力学場を推定する手法が古くから開発されている。これまでは、積乱雲の三次元観測の時間分解能が5分程度と粗いことで、熱力学場の推定精度は高くなかった。本研究では、2台のXバンドMPレーダによる方位角幅50度のセクターボリュームスキャンを実施し、時間分解能1分で気流場の時間変化を捉えることで、高精度の浮力場推定を可能とした。得られた浮力場をデータ同化手法により数値予測に取り込むことで、降水の短時間予測精度を向上させた。ナウキャスト法の精度が悪化する20分前から50分先までの予測において、ナウキャストを上回るスコアを示した。時間分解能を2分および5分へと悪化させた場合、スコアの劣化が見られた。特に5分の場合は、ナ

ウキャストの精度を上回らなかった。今後、フェーズドアレイレーダの予測への利用法の一つとして提案していく予定である。

（清水慎吾）

7. 3D雨雲ウォッチ実証実験2年間を振り返る

気象情報の精度が年々向上する一方で、その情報が正確に利用者に伝わり、豪雨の回避行動につながっている割合はまだ低い。その解決策として、「3D雨雲ウォッチ〜フェーズドアレイレーダ〜」アプリを開発し、利用者に危機感をもって回避行動をとって頂くための情報配信に挑戦している。今回は、2016年で実証実験2年目が終了した為、その実験結果と今後の展望を紹介した。

2年目は、吹田に加えて神戸にも実験エリアを拡大した。豪雨の可能性を伝えるPUSH通知（利用者がスマートフォンアプリを起動していなくても、端末に通知を送る仕組みのこと）は、80%以上の高い中率（PAWRの高度2km面で30mm/h以上の降水強度の雨をゲリラ豪雨と定義し、その発生を30分以内に予測できた場合を的中とした）を維持し、通知の多くはゲリラ豪雨が実際に起こる3.5分前には送信出来た。このため、利用者のハズレ感も19%（前年は24%）に抑える事に成功した。

また、3次元雨雲レーダの見せ方を改良し、既存の2次元雨雲レーダより、64%（前年56%）の人が雨雲の発達をリアルに感じる事ができた。2017年は、さらにエリア拡大を進め、3Dグラフィックの一新、PUSH通知のリードタイム延長を今後の展望として報告した。

（小池佳奈）

8. フェーズドアレイ気象レーダの概要と今後

2008年に開始したフェーズドアレイ気象レーダの研究開発プロジェクトは、2012年の大阪大学への実機設置とそれによる観測を経て、翌2013年に終了した。そのわずか1年間で、半径60km圏内、100仰角にわたる測定をわずか30秒間で実行できるという、それまでの気象レーダとは一線を画す性能を多くの観測事例を通じて実証することが出来た。

その後、ネットワーク化と気象研究所への設置を通じ、基礎科学的な知見が数多く得られつつある。さらに、理化学研究所との共同研究によって、データ同化に対するインパクトの大きさなども次第に明らかにな

りつつある。また、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）のもと、大阪府との社会実験が行われ、新たに偏波フェーズドアレイ気象レーダーが2017年度に完成する予定である。このレーダーを用いた首都圏での実証実験や東京オリンピックでの利活用などが予定されている。一方、Cバンドの大型偏波フェーズドアレイレーダーは、未だ研究開発が行われておらず、幾つかの技術的課題が依然存在する。この課題を検討する科研費のプロジェクトが開始することになり、既に、アンテナ配置や信号処理アルゴリズムの適用によって、成立性の検討が行われつつある。

（牛尾知雄）

9. フェーズドアレイ気象レーダーの開発

大阪大学にて運用を継続している単偏波のXバンドフェーズドアレイ気象レーダーの観測データを解析し、通知する情報が水防活動に活かせるかを評価するために、関西域にて実証実験を実施した。2016年9月に発生した雷を伴う短時間の局地的大雨に対して、大雨警報の発表より早いタイミングでアラームを公園管理者に通知し、公園管理者が即座に注意喚起放送を実施することで、公園利用者のスムーズな避難活動につながった。アラーム通知精度については現在のところ空振り率が高いことから、アルゴリズム改善の上で平成29年度も関西域での実証実験を継続している。また、開発中のXバンドの二重偏波フェーズドアレイ気象レーダーについては、平成29年度秋の埼玉大学における観測開始に向けて各種試験を実施中である。観測したデータは防災科学技術研究所ヘリアルタイムに送信し、気象予測等の各種解析を行い、各研究機関で計画されている実証実験にて活用される予定である。

（水谷文彦）

10. SIP 豪雨竜巻における MP-PAWR の利用について

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）のテーマの1つに「レジリエントな防災・減災機能の強化」があり、その中の課題の1つとして「豪雨・竜巻予測技術の研究開発」がある。本研究開発では、フェーズドアレイ気象レーダーを二重偏波化したマルチパラメータのフェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）の開発を行っている。SIPの特徴は、府省連携・産学連携による基

礎研究から実用化・事業化までを見据えて一貫通貫で研究開発を推進することであり、本課題では、いわゆるゲリラ豪雨や竜巻といった局所的・突発的な現象をフェーズドアレイ気象レーダーの特徴である高速3次元スキャンの機能を活かしつつ、二重偏波化による降水推定の定量性を高める。MP-PAWR等を用いた予測技術の開発により、豪雨や竜巻の早期探知を実現し、自治体や一般市民といったユーザの利用（社会実装）を目指すものである。MP-PAWRは今秋には開発を完了させ首都圏において運用を開始する計画である。

（高橋暢宏）

11. Cバンド二重偏波フェーズドアレイレーダー—将来の気象庁レーダーに向けた課題—

集中豪雨、局地的大雨、竜巻等に対する防災気象情報の改善には、気象レーダーによる実況情報の充実・迅速化が重要な要素である。そのカギとなる性能である「降水粒子を正確に把握する二重偏波機能」と「高速3次元観測可能なフェーズドアレイ機能」をもち、さらに集中豪雨・台風などスケールの大きな現象を含めて、広い範囲で網羅的な監視を行うことが可能なCバンド二重偏波フェーズドアレイレーダーの必要性を提案した。

このレーダーの将来的な現業化により、解析雨量・各種ナウキャストの改善や、局地的大雨・竜巻・ダウンバーストの超短時間予測の実現が期待される。一方その目標のためには、レーダー基本性能の実現に加えて、低コスト・アンテナ軽量化、従来型のレーダーに比べて極めて大きなデータ（100倍以上）のリアルタイム処理、レーダーエコーから、災害をもたらすと考えられる領域や強さを抽出し、それを追跡して進路上に自動的にアラートを出すような機能（レーダーシステムの知能化）などについて、多くの研究ステップを踏む必要があることを述べた。

（楠 研一）

12. 総合討論

総合討論では、このシンポジウムでフェーズドアレイレーダー研究の重要性がますますクローズアップされたこと、成果は今後も広く関係者で共有した上で、メーカー・企業・研究機関・行政など各セクターの特性を生かしながら、最適な研究開発や現業への実現方法を議論していくべきこと等が話し合われた。さらにアクションプラン（1）第3回シンポジウムの開催、

(2) 将来の気象業務のあり方に着目したフェーズドアレイレーダー研究コミュニティの形成，の2つが主催者から提案された。

(楠 研一)

(注) 本報告では、「フェーズドアレイレーダー」の他に「フェーズドアレイ気象レーダ」，「気象用フェーズドアレイレーダ」など，用語の不統一表記があります。これ

は気象観測用のフェーズドアレイレーダーが登場して日が浅く，学術用語としての議論が十分になされていないためです。本報告ではあえて用語を統一せず，各報告者にその記述を任せました。

参 考 文 献

楠 研一ほか，2016：シンポジウム「フェーズドアレイレーダー」の報告—研究開発の現状と将来展望—。天気，63，587-590。