

気象災害委員会・第52回メソ気象研究会合同研究会の報告

コンビーナ: 足立 透 (気象研究所)*・坪木和久 (名古屋大学)

1. はじめに

局地的大雨や竜巻等突風といった激しい大気現象は甚大な災害を引き起こすため、現象の理解を深めるとともに、精度よく観測・予測するための技術開発が重要である。このためには、急速に発生・発達する大気現象を極めて高い時空間分解能で観測する技術が欠かせない。近年に登場した気象用のフェーズドアレイレーダーは、最短で10秒という短い時間で全天をスキャンするため、気象災害をもたらす大気現象を素早く的確に捉えることを可能とし、高度な防災気象情報につながる事が期待される。

そこで日本気象学会2019年度秋季大会の開催に先立つ10月27日に、フェーズドアレイレーダーに関する研究開発をテーマとして採り上げ、気象災害委員会およびメソ気象研究会による合同研究会を開催した。当日は、九州大学西新プラザ大会議室 ABに100名を超える参加者が集まり、サイエンスとエンジニアリングの両面から、また、現象のメカニズム解明から社会応用に至るまで、さまざまな角度からの講演と活発な議論がなされた。

最初の講演では大阪大学の牛尾知雄氏より、我が国におけるフェーズドアレイレーダーに関する研究開発の動向について、俯瞰的な観点から講演いただいた。あいにく当日は牛尾氏が急な事情で欠席となったため、当該レーダー開発の最前線とともに活躍された宇宙航空研究開発機構の吉川栄一氏に代読いただいた。2012年に大阪大学に設置された初号機以降、現在までに国内5か所においてXバンドの単偏波フェーズド

アレイレーダーが研究運用に用いられているほか、2017年には、埼玉大学にマルチパラメータフェーズドアレイレーダー (MP-PAWR) が設置されている。そこで最新型のMP-PAWRについて、名古屋大学の高橋暢宏氏に開発の経緯と最新の研究成果をお話いただいた上で、防災科学技術研究所の岩波 越氏に同レーダーを用いた社会応用として、東京オリンピック・パラリンピック等における利活用に関する取り組みを紹介いただいた。両氏の講演により、高速スキャンおよび二重偏波観測の両機能を兼ね備えたMP-PAWRが拓く、研究開発の新展開が示された。

これらの講演に続いて短時間の休憩を挟んだのちに、さらに3件の講演を設けた。後半最初の講演では、足立が気象研究所フェーズドアレイレーダーを用いた研究開発について、これまでに得られた新しい学術的な知見と、それに基づく次世代の監視・予測技術の向上に関する取り組みを紹介した。続いて三菱電機株式会社の松田知也氏より、Cバンド二重偏波フェーズドアレイレーダーを見据えた新しい技術開発について講演いただき、Cバンドのレーダー開発に関して課題となる、低コスト・低質量に資する新しい技術開発が示された。さらにこれらを受けて、東京大学の新野 宏氏より、最新の数値シミュレーションや観測研究を踏まえながら、気象学における未解決問題に着目し、当該レーダーを用いた観測による将来への期待に関して講演いただいた。

最後に、情報通信研究機構の中川勝広氏を座長として総合討論がなされた。中川氏からの研究開発の現状と将来展望を踏まえた話題提供によって論点が整理された後、会場からの質問等を受け付ける形で進行了。当該レーダーの研究開発とともに、将来の業務利用を見据えた観点も含め、さまざまな角度から議論が

* (連絡責任著者) Toru ADACHI, 気象研究所.

tadachi@mri-jma.go.jp

© 2020 日本気象学会

交わされた。

全体を通して、気象学会の研究会としてこの次世代気象観測技術に関する議論の機会を持ったことは、大変有意義であった。本研究会により、当該レーダーに関する研究開発がより一層深められるとともに、その周辺学術領域も含めて、広く災害気象に関する科学技術の発展へとつながることを期待したい。

2. フェーズドアレイ気象レーダーの開発概要

牛尾知雄 (大阪大学)

2012年5月のつくば市における竜巻被害や毎年繰り返されるゲリラ豪雨被害など、近年の社会の高度化に伴って、こうした大気現象による悲劇的な災害は後を絶たない。このようなゲリラ豪雨や竜巻などを引き起こす積乱雲等の気象現象を、最短10秒で観測することが可能なXバンドフェーズドアレイ気象レーダーは、最初、株式会社東芝、独立行政法人情報通信研究機構、国立大学法人大阪大学の3者による産官学連携プロジェクトによって研究開発された。このレーダーでは、従来のような機械的な走査を行う方式に比して、電子走査方式を用いることによって、観測に要する時間を従来に比して飛躍的に向上させ、世界最高の性能を実現した。2012年より、大阪大学吹田キャンパス電気系建屋の屋上に設置され、継続的な観測により、その高い性能と有用性が観測的に示されてきた。この高分解能観測の可能性から、SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)の課題として取り上げられ、その結果、偏波観測機能を有する二重偏波フェーズドアレイ気象レーダーが開発された。そして、その社会実装実験が現在、進行中である。また一方、降雨減衰の小さい周波数帯 (主にCバンド以下) を用いた大型フェーズドアレイ気象レーダーに対する要望も大きい。この要望に対しては、現在、アンテナ開発が行われ、今後のシステム開発が待たれているところである。

3. 実用型マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー (MP-PAWR) の開発

高橋暢宏・川口航平・瀬瀬文晴
(名古屋大学宇宙地球環境研究所)

実用型MP-PAWRは、総合科学技術・イノベーション会議 (内閣府) のSIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」(2014年度から2018年度)において開発されたものである。MP-PAWRは仰角方向に電子走査 (仰角0度から90度までのRHIスキャン) し、方位角

方向を機械走査させることにより、およそ30秒で半径60kmの範囲を高度15kmまで、隙間なく観測することが可能な二重偏波レーダーである。

MP-PAWRは、その高速3次元走査と二重偏波を用いた高精度降水強度推定により、いわゆるゲリラ豪雨と言われる、積乱雲によりもたらされる豪雨の早期探知・予測に適していると考えられる。さらに、二重偏波観測を用いた降水粒子タイプの判別、2台のフェーズドアレイ気象レーダーの組み合わせによる風速場の推定 (デュアルドップラー解析)、鉛直方向 (仰角90度) の観測による鉛直運動の直接的な観測、および解析半径を固定したVAD法による風速・発散・変形の鉛直プロファイルの推定等による、降水現象に対する新たな解析が可能となった。例えば、対流雲の基本単位であるシングルセルの積乱雲のライフサイクルは、ファーストエコーから衰退まで30分程度であると考えられており、従来型のレーダーによる立体観測では5分ごとの十数仰角の観測であるため発達の様子を詳細に捉えられなかったが、MP-PAWRでは30秒ごとにエコーの立体構造と3次元の風速場 (デュアルドップラー解析) や降水粒子タイプを併せて示すことも可能であり、降水雲の発達に伴う雲物理プロセスと風速場の関係を整合的に説明できるようになると考えられる。今後、MP-PAWRには、降水システムの総合的な理解に大きく貢献することが期待される。

4. 東京オリンピック・パラリンピック等におけるMP-PAWRによる観測・予測情報の利活用に向けて

岩波 越 (防災科学技術研究所)

SIPの一環として、雨雲の立体構造をすき間なく高頻度で観測可能なMP-PAWRの特長を活かした大雨直前予測情報による実証実験を実施している。2020年オリンピック・パラリンピック東京大会 (以下、東京2020と記す) におけるショーケース化とその後の社会での実用化が大きな目標であり、2018、2019年にはイベント運営支援の実証実験を行った。

東京2020のほとんどの競技会場は、埼玉大学屋上に設置したMP-PAWRの観測範囲 (半径60または80km) に含まれる。観測データはSINET5を經由して防災科研に送られ、ストリーミングデータ処理 (Maesaka *et al.* 2019) によって即時処理し、予測情報を1分間隔で配信可能にした。

予測手法として用いたVILナウキャスト (Hirano

and Maki 2018) は、地面付近のレーダ雨量分布の代わりに、鉛直積算雨量 (VIL: Vertically Integrated Liquid Water Content) 分布を入力として用い、より早く上空の雨を検知することで、降雨の始まりや急発達時に予測が遅れるという従来のナウキャスト手法の課題解決を図ったものである。両年の暖候期に30秒でボリュームスキャンが可能なMP-PAWRのデータを入力として、1分間隔、250m格子、30分先までの10分間雨量予測を行い、日本気象協会と協力して実証実験を行った。市民、自治体以外に、2018年は日韓交流おまつりをつくばマラソン、2019年はラグビーワールドカップ2019組織委員会、東京2020関係機関にEメールと専用ウェブサイトを通して情報提供を行った。2018年の44降雨事例に対する予測精度(スレットスコア)は、10分先、20分先予測値について、Eメールの配信基準として選択可能にした10分間雨量0.2, 1, 5, 10, 15mmのどの強度でも気象庁高解像度降水ナウキャストより高かった。

日韓交流おまつりでは、弱い降雨の降り始め、降り止みの予測情報がステージ上の音響機器の保護等イベント運営に活用された。ラグビーワールドカップ組織委員会からは、ウェブサイトの表示について要望を受けて改善し、自動更新機能の有用性等のコメントをいただいた。

予測情報の伝達・表示方法としては利用者の使い方、ニーズに応じることが重要であり、技術的には移動ベクトル導出方法の高度化が課題である。

5. 気象研究所フェーズドアレイレーダを用いた最新の研究成果とその応用

足立 透・楠 研一 (気象研究所)

気象研究所では2019年度より新しい中期研究計画がスタートした。このうち気象災害に対する社会的な課題を解決するための取り組みの一環として、フェーズドアレイレーダを用いた研究開発を推進している。そこで本講演では、気象研究所フェーズドアレイレーダを用いたさまざまな大気現象の観測例を紹介した。

まず、スケールの大きな現象として台風を取り上げた。これまでの観測により、上陸後に中心部の循環風および壁雲の構造が大きく変化する様子や地表面付近に強風をもたらす境界層ストリークの微細構造を捉えることに成功するなど、現象の物理過程の理解が進みつつある。また、2019年度の相次ぐ台風災害については、気象研究所・緊急研究課題として重点的な研究を

推進しており、学術的理解の更なる発展が期待される。一方でスケールの小さな現象として、竜巻などの突風を取り上げた。気象研究所および日本無線株式会社保有する2台のフェーズドアレイレーダを用いたデュアル解析では、ミニチュアスーパーセル型の積乱雲において、降水コアの落下をきっかけとしてメソスケールの渦が形成され、上方へと引き伸ばされながら強化される様子が明らかになった。

講演ではさらに、局地的な大雨をもたらす降水コアの3次元移動ベクトルの算出技術や、深層学習を用いた竜巻渦の3次元探知・追跡技術について述べ、これらを用いた顕著事例への適用実験の結果を紹介した。現在、これらの実利用の観点から、内閣府・官民研究開発投資拡大プログラム(PRISM)におけるプロジェクトを推進中であり、気象レーダから得られるデータを公共交通の安全・安心につなげるための研究に取り組んでいる。このように気象研究所では、現象の学術的理解から監視・予測技術の開発、その利活用までを見据えた一貫通貫の視点から、気象防災技術の高度化に向けた研究開発を進めている。

6. Cバンド二重偏波フェーズドアレイレーダを見据えた新しい技術展開

松田知也 (三菱電機株式会社)

近年、主に米国・日本が開発したフェーズドアレイ気象レーダが注目され、国内ではXバンド二重偏波フェーズドアレイレーダにより局地的な事象の予測精度向上に大きな期待が寄せられている。一方、広域観測を特徴とするCバンドフェーズドアレイレーダは、使用する周波数帯域の制限等の制約もあり、国内での開発はまだ行われていない。全国的な防災・減災を加速させるためにはXバンドのみならずCバンドのフェーズドアレイ化が必要不可欠であるが、アンテナサイズおよび送信デバイスの物理的な相違があるため、Xバンドとは個別に開発が必要である。

当社では、Cバンドフェーズドアレイレーダ開発にあたり、性能・技術・コストに課題のあるアンテナの実現性を見極めが最も重要であると考え、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究開発最適展開プログラム・シーズ育成タイプ(A-STEP)で開発予算の支援を、また広島工業大学から技術支援を得ることで新型の導波管アンテナの開発を実施し、導波管内の構造を工夫する技術を開発した。

金属導波管アンテナは高性能を得やすい反面、コス

ト・加工性・重量に課題がある。そのため、金属に代わり加工性の高い樹脂材料を用いることで低コスト・軽量化を実現させるべく、アンテナを試作し評価を行った。雨量算出の精度を左右するアンテナ性能のうち、特に高い性能が必要とされるサイドローブ特性(−30dB以下)および交差偏波特性(−35dB以下)を実測により確認することができた。耐用年数も15年に相当する環境試験を実施した後でも性能に劣化がないことを確認した。

また、フェーズドアレイを用いた将来技術のひとつとして、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術の応用例を紹介した。MIMOは通信分野において技術発展した経緯があるが、レーダに応用する場合、受信信号処理により仮想的に開口面を拡大することができるため、角度分解能が向上することが知られている。フェーズドアレイ気象レーダは、観測周期の短縮のみならず、様々な性能向上を実現させる可能性を持っている。このためCバンドにおいてもレーダを試作し、様々なフィールド評価を行う段階に移行することが望まれる。

7. フェーズドアレイレーダーを用いた研究開発への期待

新野 宏 (東京大学大気海洋研究所)

フェーズドアレイレーダー (以下、PAWR) は、高い時間・鉛直解像度の観測により、またマルチパラメータ (MP) 機能 (例えば Takahashi *et al.* 2019) やデュアル機能の付加による観測精度の向上・観測要素の増加を通して、時間・空間スケールの小さい局地的大雨、竜巻、ダウンバースト、台風の微細構造などの現象のメカニズム解明、ノウキャスト、予測、パラメタリゼーションの改良への貢献が期待される。

メカニズムの理解・数値モデルの改良においては、竜巻では、デュアル観測によるスーパーセルや準線状の対流系に伴う地表付近の渦管の時間発展 (例えば Markowski *et al.* 2008)、ダウンバーストや雷ではMP機能による粒子判別を用いた多様な降水粒子の時間発展、台風の微細構造では境界層の水平ロール (Wurman and Winslow 1998) や壁雲の竜巻状渦の鉛直構造の把握 (Wurman and Kosiba 2018)、そしてこれらに基づく雲物理や境界層のパラメタリゼーションの改良が期待される。PAWRはクラッターやサイドローブの問題により、地表面付近の観測が難しいという課題もあるため、観測と数値モデルを有効に結びつけるデー

タ同化を用いた解析が有用と思われる。

ノウキャストにおいては、局地的大雨に対する鉛直積分した水物質 (VIL)、竜巻に対する下層のメソサイクロン、飛散物を表す信号 (TDS: Tornado debris signature; Ryzhkov *et al.* 2002)、ダウンバーストでは降水コア (特に雹) の落下、これに伴う中層の収束、環境場の乾燥空気の取り込みによる反射強度の切れ込み (reflectivity notch) などの前兆現象 (Roberts and Wilson 1989) の利用が期待され、深層学習による自動検出の導入も期待される。

PAWRの高頻度の観測データを同化して初期値を作り、数値モデルで局地的大雨や竜巻・ダウンバーストなどを現業で予報することは現在の計算機環境では難しいと思われるが、研究レベルではその有効性が示されている (例えば Miyoshi *et al.* 2016; Maejima *et al.* 2019)。晴天エコーを利用した対流の initiation の予測などには、現時点でも利用可能かも知れない。

今後、CバンドのMP-PAWRや可搬型・航空機搭載型PAWRが開発され、観測対象が拡大することにも期待したい。

8. 総合討論

中川勝広 (情報通信研究機構)

総合討論では、まず座長から、XバンドPAWRに関する研究開発の全体像と、今後開発が期待されるCバンドPAWRを含めた将来展望に関する話題を提供し、会場からの質疑を受け付けながら議論を進行した。

最初の論点はXバンドおよびCバンドPAWRの特長に関するものであった。XバンドはCバンドに比べて観測範囲が狭いものの、レーダの設置台数を増やすことでCバンドと同等の全国カバーが可能になるかとの質問に対し、両レーダは観測範囲のみならず、全天のボリュームスキャンにかかる時間や電波消散の影響において本質的な違いを有すること、また設置台数の議論においては、電波資源の有効利用の検討が課題となるとのコメントがあった。これらを受け、両レーダの特色を十分に考慮しながら、実用化に向けた研究開発が必要との指摘がなされた。

次に座長より、MP-PAWRの高頻度・二重偏波観測による高精度雨量推定について、議論を投げかけた。会場からは、MP-PAWRを用いた実証実験により、高精度な雨量情報の提供が可能になることが確認されつつあること、その一方で、取得される豊富なデータをユーザーにとって分かりやすい情報へと加工する工夫

が課題であるとの指摘があった。

また、現業利用の観点から、鉛直に幅広いファンビームを送信する我が国のPAWRについて、二重偏波観測データの品質に関する質問が出された。この点については今後、総括的な調査が必要であること、また費用対効果を考慮しながら、現業が必要とする諸元に最適な送信ビーム方式を検討することが望まれるとのコメントがあった。

全体を通して、新しい気象観測技術であるPAWRに対する注目が極めて高く、実用化に対する期待が大きいことを実感する機会となった。まだ議論は尽きない中、時間が限られていたために惜しみつつ終了することとなったが、より一層の総括的な議論と精神的な研究開発が期待される総合討論であった。

謝 辞

今回の合同研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた九州大学の川野哲也氏および同研究室の方々、ならびに気象学会員の有志ご一同ここに記して感謝いたします。

(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」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ほか、理学・工学分野における表記方法の慣習が異なるためです。本報告ではあえて用語を統一せず、学際連携等の様子を表現しました。

参 考 文 献

Hirano, K. and M. Maki, 2018: Imminent nowcasting for severe rainfall using vertically integrated liquid water content derived from X-band polarimetric radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96A**, 201–220.

Maejima, Y., T. Miyoshi, M. Kunii, H. Seko and K. Sato, 2019: Impact of dense and frequent surface observa-

tions on 1-minute-update severe rainstorm prediction: A simulation study. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 253–273.

Maesaka, T., K. Kieda, K. Iwanami, N. Takahashi, H. Hanado, K. Nakagawa, F. Mizutani, T. Ushio and M. Osada, 2019: Streaming data processing for multi-parameter phased array weather radar (MP-PAWR) data. 39th Int. Conf. Radar Meteor. <https://cscenter.co.jp/icrm2019/program/data/abstracts/Session15A-05.pdf> (2019.11.14閲覧)

Markowski, P., E. Rasmussen, J. Straka, R. Davies-Jones, Y. Richardson and R. J. Trapp, 2008: Vortex lines within low-level mesocyclones obtained from pseudo-dual-Doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3513–3535.

Miyoshi, T., M. Kunii, J. Ruiz, G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Seko, H. Tomita and Y. Ishikawa, 2016: “Big data assimilation” revolutionizing severe weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 1347–1354.

Roberts, R. D. and J. W. Wilson, 1989: A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, **28**, 285–303.

Ryzhkov, A. V., D. Burgess, D. Zrnic, T. Smith and S. Giangrande, 2002: Polarimetric analysis of a 3 May 1999 tornado. Prepr. 21st Conf. Severe Local Storms. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/47348.pdf> (2020.2.19閲覧)

Takahashi, N., T. Ushio, K. Nakagawa, F. Mizutani, K. Iwanami, A. Yamaji, T. Kawagoe, M. Osada, T. Ohta and M. Kawasaki, 2019: Development of multi-parameter phased array weather radar (MP-PAWR) and early detection of torrential rainfall and tornado risk. *J. Disaster Res.*, **14**, 235–247.

Wurman, J. and K. Kosiba, 2018: The role of small-scale vortices in enhancing surface winds and damage in Hurricane Harvey (2017). *Mon. Wea. Rev.* **146**, 713–722.

Wurman, J. and J. Winslow, 1998: Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran. *Science*, **280**, 555–557.