

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—

楠 研一^{*1}・牛尾知雄^{*2}・菊池博史^{*3}・水谷文彦^{*4}
 柏柳太郎^{*5}・佐藤晋介^{*6}・足立透^{*7}・吉田翔^{*8}
 小池佳奈^{*9}・岩波越^{*10}

近年、急速に発生・発達する積乱雲に伴う激しい大気現象（竜巻等の突風・局地的大雨など）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。最近登場した、極めて高いスキャン性能をもつフェーズドアレイレーダーは、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大きな可能性を生み出しつつある。さらにこの高速スキャンを生かし、これらの現象を予測する技術の登場が期待されている。本シンポジウムは、気象研究所のフェーズドアレイレーダーが開局した2015年度、フェーズドアレイレーダーに関する最新研究について情報交換を行うことを目的として、2016年1月19日に気象研究所で開催された。気象・工学・情報通信・メーカー関係者が一堂に会することでフェーズドアレイレーダーの研究開発の現状、今後どのような役割が期待されるのかが活発に議論できた。ここでは、当日発表された10件の講演についてその概要を紹介する。

1. フェーズドアレイ気象レーダーの概要と今後

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、こうした極端な大気現象による災害は増加傾向にある。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を、東芝、情報通信研究機構、大阪大学の3者が研究開発した。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し、継続的に観測を行っている。このレーダーでは、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の機械的走査を行う方式に比して飛躍的に短縮させ、世界最高の性能を実現している。本レーダーによって捉えられた積乱雲等の観測データは、これまでにない分解能で3次元の可視化を行うことに成功しており、戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP）などのプログラムによって、大阪府や大阪市などと実証実験が進行中である。さらに、偏波機能を有するフェーズドアレイレーダーの開発が進められている。（牛尾知雄）

2. 気象用二重偏波フェーズドアレイレーダーのビーム形成手法の提案と実用化に向けた検討

今後数年間で気象用フェーズドアレイレーダーの二重偏波（水平、垂直）化を行う計画が進んでいる。気象用フェーズドアレイレーダーの二重偏波化には以下の利点がある。（1）高速スキャンング（全方位数十秒以内）、（2）高密度観測（仰角方向に約100仰角）、（3）降雨強度推定精度の向上（レーダー反射因子差、偏波間位相差を利用）、（4）粒子判別やクラッターの検出（偏波間相関係数を利用）。一方で、フェーズドアレイ

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

*2 Tomoo USHIO, 大阪大学大学院工学研究科。

*3 Hiroshi KIKUCHI, 大阪大学大学院工学研究科。

*4 Fumihiko MIZUTANI, 株式会社東芝。

*5 Taro KASHIWAYANAGI, 日本無線株式会社。

*6 Shinsuke SATOH, 情報通信研究機構。

*7 Toru ADACHI, 気象研究所。

*8 Syo YOSHIDA, 株式会社気象工学研究所。

*9 Kana KOIKE, 株式会社エムティーアイ。

*10 Koyuru IWANAMI, 防災科学技術研究所。

© 2016 日本気象学会

レーダはビーム形成にデジタルビームフォーミング (Digital Beam Forming, DBF) を用いる。DBF は方向依存性を持ち、サイドローブの低減が難しいという問題点がある。本発表では、サイドローブの低減手法として、最小二乗平均誤差法 (Minimum Mean Square Error, MMSE) を提案する。数値シミュレーションを行うことにより MMSE 法は DBF が持つ方向依存性に対して、サイドローブ低減を適応的に実現することにより、観測精度の向上と次期レーダにおける実用性を期待できる結果を示した。

(菊池博史)

3. フェーズドアレイ気象レーダの開発 ～開発、利用、そして次世代機へ～

近年、突発的に局地的大雨が発生し大きな被害をもたらす気象の増加が社会問題になっている。局地的大雨は急速に発達する積乱雲によって引き起こされるが、従来の気象レーダでは事前に検知することが困難であった。2008年度から5年間の NICT (情報通信研究機構) 委託研究にて大阪大学と東芝にて開発した単偏波フェーズドアレイ気象レーダは、30秒という高速で半径60 km、高度14 km の3次元の降水状況を高密度に観測できることを示した。

現在、SIP にて実施している関西実証実験において、水防活動に従事するユーザに対して本レーダを用いて局地的大雨を検知しこれを通知する実験をしている。この実験の中で8月の積乱雲による局地的大雨の際に、検知した情報をタイムリーにユーザへ通知することに成功した。

最後に、SIP にて開発している二重偏波フェーズドアレイ気象レーダの開発方針について紹介した。

(水谷文彦)

4. 千葉に設置したフェーズドアレイ気象レーダーの概要と観測結果

本発表では、日本無線で独自に開発したフェーズドアレイ気象レーダーの概要および観測事例を紹介した。

このレーダーは、最大1600Wの電力を送信でき、更に反射強度等のデータ出力間隔は50 m である。これらの仕様により、非常に細かい現象を高感度で捉えることができる特徴を持つ。現在、千葉市内に設置しており、2015年の夏季から試験観測を開始している。

今回は9月に捉えた観測事例を2例紹介した。1つ

めは、層状性降雨の例で、風速場が変化する様子を高度3 km の水平断面図で、明瞭なブライトバンドの存在とそこから降水粒子が落下する様子を垂直断面図で、それぞれ動画で示した。2つめは、雷を伴った対流性降雨の例で、エコートップが急激に上昇する様子を3次元動画で示した。

現在、本レーダーの性能を詳細に評価している。今後は、大学、研究機関等に観測データを提供することも検討している。

(柏柳太郎)

5. 2台のフェーズドアレイ気象レーダで30秒毎に観測された降水の成長過程

局地的・突発的な気象災害の予測と軽減を目指して開発したフェーズドアレイ気象レーダ (Phased Array Weather Radar, PAWR) は、30秒で100 m 距離分解能、100仰角という詳細な3次元観測を実現できる。2015年8月7日に吹田 PAWR で観測された孤立積乱雲による局地的大雨について、3次元可視化アニメーションを用いて、ファーストエコー発生後の降水成長やその30分後に新しい降水コアが再発達する様子を示した。この時間発展を定量的に示すため、相互相関による3次元エコー追跡 (Tracking Radar Echoes by Correlation, 3D-TREC) 解析を行いエコーの3次元移動ベクトルを求めた。降水の成長を調べるためにはエコー強度の変化 (盛衰ベクトル) も重要なパラメータと思われる。2014年9月11日の組織化した対流雲の事例では、神戸と吹田 PAWR による30秒毎のデュアルドップラー観測で得られた3次元風速分布から、少なくとも数分間は対流循環の様相・外観の変化は小さく、上昇流域で降水の成長が顕著であることが分かった。最後に30秒毎、3次元のビッグデータをリアルタイム処理して利用することによる局地的大雨の予測に関する取り組みを紹介した。

(佐藤晋介)

6. 気象研究所フェーズドアレイレーダーで観測された顕著現象

2015年に気象研究所に整備されたフェーズドアレイレーダーについて、これまでの運用状況とそれによって得られた初期観測結果のうち2事例を示した。2015年7月24日の雷雨事例では、背景風の影響を受けつつ落下する降水コアの3次元動的な動態と、その結果としてつくば市にもたらされた急激な強雨の様子を示し、降水域の高速立体追跡による局地的大雨の短時間予測

の可能性を指摘した。2015年8月12日のメソサイクロンの事例では、親雲の発達と低気圧性回転の発達から消滅に至る様子を示すとともに、その下部に現れた雲底の垂れ下がり構造である Wall Cloud との関係論を論じ、親雲の連続的かつ立体的な観測が竜巻等突風の監視・予測手法に役立つことを示した。これらの結果は、時空間にスケールの小さい顕著現象の理解にフェーズドアレイレーダーによる高速・立体観測が有用であることを示唆する。(足立 透)

7. フェーズドアレイ気象レーダを用いた3次元移流予測

局地的な豪雨の予測には短時間の降水予測(ナウキャスト)が重要であり、ナウキャストは地上の雨域の分布を移流させる手法が一般的である。このような豪雨をもたらす積乱雲は上空(3~5 km程度)で発生・発達することが、フェーズドアレイ気象レーダ(以降 PAWR)の観測データによる解析から明らかとなっている。そこで本研究では PAWR の3次元高分解能データを活かした3次元移流予測モデルを開発し、従来の水平移流のみのモデルに対する優位性について検証を行った。

今回開発した予測モデルは、PAWRで観測された3次元データから降水セルを検出し、個々のセルに対して移動ベクトルを3次元的に推定する事で、上空の降水セルの3次元的な移流を考慮した予測が可能である。鉛直方向の移流を加味する事で、従来の水平移流のみの場合では予測が困難であった局所的な豪雨を予測する事に成功した。但し、移流予測中における降水セルの盛衰については考慮されていないため、今後の課題である。(吉田 翔)

8. フェーズドアレイレーダーのための竜巻渦3次元探知・追跡アルゴリズムの提案

竜巻による災害の軽減は重要な研究テーマだが、急速に発生・発達する積乱雲により短時間(~10分)でもたらされるため、従来の気象レーダーで捉えることには限界がある。そのため高いスキャン性能をもつフェーズドアレイレーダーを用いた探知システムの実用化が求められている。ただし得られる情報は従来のレーダーよりはるかに膨大で複雑なため、そこで出てくる情報をいかに迅速に意味のある気象情報に落とし込むかがカギとなってくる。そのためにはレーダーのシステムに知性を持たせ(スマート化)、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などの機能を持たせなければならない。気象研究所では今回、これら研究の中でも重要なコア技術である、竜巻渦3次元探知・追跡アルゴリズムの提案をした。フェーズドアレイレーダーで捉えられた竜巻の観測データはないため、可搬型ドップラーレーダーの高頻度観測により捉えられた日本海冬季の渦で、アルゴリズムの基本動作実験を示した。(楠 研一)

9. フェーズドアレイ気象レーダを活用したアプリによる、実証実験の結果について

利用者がその情報を信頼し、自分への危機感に落とし込める情報になっていない限り、本当に役立つ価値のある気象情報にはならない。そこで、30秒ごとに3次元で雨雲を観測できる「フェーズドアレイ気象レーダ」を有効活用できれば、利用者がこれまで以上にリアルに豪雨への危機感を持つことが出来ると考え、スマートフォンアプリ「3D雨雲ウォッチ〜フェーズドアレイレーダ〜」を開発し、実証実験を2015年7月から開始した。今回は、その概要と結果を紹介した。

結果、豪雨の可能性をお伝えする 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)の的中率は80.1%となり、利用者のハズレ感も24%に抑えることが出来た。一方で、豪雨の PUSH 通知が届いてから、実際に豪雨となるまでの時間は2.5分が最も多くなった為、この時間を延長することが課題である。

また、今回初めて試みた3D雨雲レーダ画像の配信については、「雨雲がどんどん背が伸びていく様子が分かり、豪雨の危険が自分にもある事が想像しやすく、対策しやすかった」等の利用者の意見を頂き、既存の2次元画像と比較しても、約6割が3D雨雲レーダ画像の方に満足する結果となった事も紹介した。

最後に、2016年はアプリの品質改善や、神戸・沖縄にもエリアを拡大していくことを今後の展望として報告した。(小池佳奈)

10. フェーズドアレイレーダーの利用方法について

SIPにおいて開発されるXバンドMPフェーズドアレイ気象レーダー(以下、MP-PAWRと記す)のデータを活用する立場から、「高速で、高精度の仰角方向に隙間のない3次元情報」の利用方法として効果を期待している3つの方法を示した。

第一は鉛直積算雨量 (Vertically Integrated Liquid Water Content, VIL) を用いた10~20分先の大雨のノウキャストである。2015年暖候期に実施した「10分先の大雨情報」社会実験を紹介した。

第二にスーパーセルあるいは竜巻の警戒指標の候補となるストームレラティブヘリシティ (SReH) について、2015年9月6日千葉市で発生した突風事例の予測実験を紹介した。積乱雲の移動ベクトルの評価にMP-PAWRのデータが役立つと考えている。

さらに将来MP-PAWRによるデュアルドップラー観測が実現されれば、熱力学リトリーバルによって求

めた温位偏差の同化による積乱雲の発達・衰弱の予測精度向上が期待できる。高時間分解能の3次元風速場と比偏波間位相差 (K_{DP}) による正確な雨水混合比の推定が重要である。(岩波 越)

(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。