

気象災害予測のための最新のレーダー技術

あ だ ち と お る
足 立 透[†]

近年の相次ぐ甚大な気象災害の発生を受けて、防災・減災のための取り組みが進められている。気象災害に強い安全・安心な社会づくりには、より迅速かつ正確な気象予測情報が必要であり、このためには、基盤となる観測技術の高度化が欠かせない。近年、これまでにない高い頻度で全天の3次元空間を観測する、気象用フェーズドアレイレーダーが登場した。極めて高い時空間分解能を持つこの最新レーダーは、突発的に発生する気象災害の予測を高度化するための革新的技術と考えられ、現在、防災利用のための研究開発が進められている。本稿では、フェーズドアレイレーダーに関する研究開発の動向と、気象災害予測への活用に向けた今後の展望をまとめる。

キーワード：フェーズドアレイレーダー、局地的大雨、集中豪雨、竜巻等突風

1. 気象災害とその予測

1.1 局 地 的 大 雨

発達した積乱雲は、短時間に激しい雨をもたらす、河川の急激な増水や低地の冠水などによって、しばしば深刻な災害をもたらす。平成20年には、7月8日に東京都大田区の呑川で河道内作業中の作業員が流されたほか、群馬県みなかみ町の湯檜曾川（7月27日）、兵庫県神戸市の都賀川（7月28日）、東京都豊島区の雑司ヶ谷幹線下水道（8月5日）において、急激な増水による水難事故が相次いで発生した。その後も、沖縄県那覇市（平成21年8月19日）や神奈川県山北町（平成26年8月1日）などにおいて、急激な水位上昇によって尊い命が奪われる事故が後を絶たない。

気象庁では、数10分という短い時間に狭い範囲で数10ミリ程度の雨量をもたらす雨を局地的大雨と呼び、注意を呼び掛けている。局地的大雨は、発生から発達に至る時間が短いこと、また空間スケールが小さいことから、その監視と予測には高い時空間分解能を有する観測が求められる。現行の気象レーダーは、パラボラアンテナの仰角を変えながら水平に繰り返し回転させて観測を行うため（図1）、立体観測に5～10分の時間を要し、目まぐるしく変容する積乱雲を精細に捉えることができない。このため、局地的大雨の予測の向上には、1分以内の短時間に立体観測する技術が求められる。

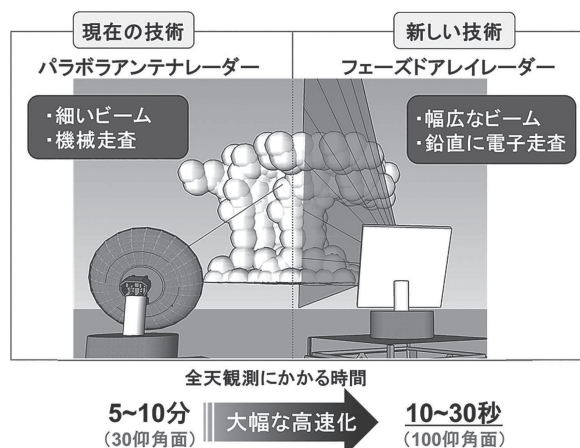


図1 現行の気象レーダーと最新技術であるフェーズドアレイレーダー

1.2 集 中 豪 雨

集中豪雨は、複数の積乱雲が同じ場所で次々と発生・発達を繰り返すことによって生じる現象であり、100ミリから数100ミリといった大量の雨をもたらす¹⁾。その時空間スケールは大きく、豪雨発生時にしばしば見られる線状の降水域（線状降水帯）では、幅が20～50 km、長さが50～200 kmに及び、数時間に渡ってほぼ同じ場所にとどまる。集中豪雨はしばしば重大な土砂災害や家屋浸水等の災害を引き起こす。平成26年8月15日から20日にかけて、西日本から東日本の広い範囲で大雨が発生し、広島市においては死者数77名（関連死を含む）の土砂災害をもたらした。また平成29年7月九州北部豪雨では、福岡県や大分県を中心とする地域で、集中豪雨による多大な人的・物的被害が生じた。

[†] 気象研究所気象衛星・観測システム研究部：〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
E-mail: tadachi@mri-jma.go.jp

現在、大雨の年間発生回数は増加傾向にあると考えられており、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）による第5次評価報告書では、今世紀末までに極端な降水の頻度が上昇する可能性が高いとされている。このため、集中豪雨に対する防災気象情報の高度化は重要な課題であり、線状降水帯を高性能レーダーで立体的かつ精密に実況監視する技術の高度化が望まれる。

1.3 竜巻等突風

竜巻やダウンバーストなどの突風は局地的に発生し、甚大な被害を引き起こす。気象庁の統計によれば、突風災害の発生は北海道から沖縄にかけて広く確認されており、日本のいずれの場所でも発生する可能性がある。平成24年5月6日には茨城県、栃木県および福島県において、複数の竜巻による甚大な被害が発生した。このうち茨城県つくば市・常総市を通過した竜巻は、毎秒70～92 mと推定される突風によって住家を基礎ごと転倒させるなどの被害をもたらした。また平成25年にも竜巻による突風被害が各地で発生し、その傷跡は極めて大きなものとなった。

竜巻等の突風は時空間スケールが小さな現象であるため、その正確な予測は難しく、より一層高度な研究開発が求められている。気象庁では、数値モデルや気象レーダーの観測結果などを活用して突風発生危険性を表現する、竜巻発生確度ナウキャストを運用している。補足率や適中率の更なる向上には現象の学術的な理解を深める必要があり、このためには、高い時空間分解能を有する新しい観測技術が欠かせない。

2. 国を挙げた防災・減災の取り組み

2.1 交通政策審議会気象分科会

局地的大雨や集中豪雨、竜巻等突風による気象災害の相次ぐ発生を受け、国を挙げた取り組みが進められている。国土交通省では、雨の降り方が局地化・集中化・激甚化している状況を「新たなステージ」と捉えて、平成27年に防災・減災のための施策を取りまとめた。これを受けて交通政策審議会気象分科会では、短期的な防災気象情報の改善と中長期的な観測・予測技術向上の観点から、同年に気象庁への提言を取りまとめた²⁾。

提言では、「新たなステージ」として捉えるべき現象として、竜巻等突風や局地的大雨、集中豪雨、そして台風を挙げている。竜巻等突風や局地的大雨は、単一の積乱雲あるいはそれ以下の時空間スケールを有するため、高い時空間分解能を有する観測技術が必要となる。また、集中豪雨についてはその形成・停滞のメカニズムの解明、台風においては急発達などの強度変動の理解と予測が課題と考えられる。これらの点を克

服するため、概ね10年程度先を見据えて開発すべき技術として、二重偏波レーダーやフェーズドアレイレーダーといった新しい気象レーダーが挙げられている。特にフェーズドアレイレーダーは、研究利用が開始されたばかりの最新の観測技術であり、研究開発の更なる発展が望まれる。

2.2 竜巻等突風対策局長級会議

平成24年5月に茨城県や栃木県、福島県において相次いで発生した竜巻による被害を受け、内閣府副大臣を座長とし、関係府省庁により構成される、竜巻等突風対策局長級会議が設置された。同会議は、同年8月に府省横断的な対策のための報告を取りまとめたほか、翌年に日本各地で立て続けて発生した竜巻等突風による被害を受けて、平成24年の報告をフォローアップの上で施策を抜本的に見直し、平成25年12月に改めて報告を取りまとめた³⁾。

平成25年の報告では、竜巻等突風の予測情報の改善を重要施策の一つと位置付け、実用化フェーズの課題と研究フェーズの課題をまとめた。特に研究フェーズの課題の一つとして、フェーズドアレイレーダーの開発を進め、防災気象情報の高度化につなげる取り組みが必要とされている。フェーズドアレイレーダーは、仰角方向を電子的に走査することにより、立体観測に要する時間を現行レーダーの5～10分から10～30秒へと大幅に短縮することが可能である。このため、時空間スケールの極めて小さな竜巻の監視・予測に有効と考えられる。

3. フェーズドアレイレーダーに関する研究の動向

国を挙げた防災・減災のための取り組みの中で、重要課題の一つとされる気象用のフェーズドアレイレーダーは、現在のところ米国と日本が有する技術であり、実機を用いた研究開発が進められている。

3.1 レーダー実機の開発

米国では、現業気象レーダーの次世代機種として、2003年より気象・航空・軍事用途を兼ねたSバンド（波長約9 cm）の多目的フェーズドアレイレーダー（MPAR）の開発が始まり、現在、オクラホマ州ノーマンにおいて試作機を用いた研究が進められている。この試作機は、パネル状のアンテナ面に2次元配列された4352の小型アンテナによって幅の細いビームを形成し、各々のアンテナから放射される電磁波の位相を制御しながら、仰角・方位角の両方向に素早くビームを走査する⁴⁾。広大な国土をカバーするため、観測範囲の広いSバンドのMPARが次世代現業機種の主流とされる一方、Xバンド（波長約3 cm）やCバンド（波長約6 cm）を含む研究用の多様なフェーズド

アレイレダーも開発されている。特に X バンドのレーダーはアンテナのサイズが小さいため、自動車への搭載が容易であり、機動的な観測に活用されている。また 2016 年からは、オクラホマ大学によって C バンドのフェーズドアレイレダーの開発が始まり、現在、アンテナの試作が進められている。

一方で我が国では、主に X バンドのフェーズドアレイレダーが開発されてきた。気象研究所（茨城県つくば市）のフェーズドアレイレダーの諸元を表 1 に示す。パネル状のアンテナ面には 128 の小型アンテナが鉛直 1 次元に配列され、水平に 1.2 度、鉛直に約 5 度の幅広い扇形ビームを形成する（図 1 右）。雨粒等からの反射波の受信時には、デジタルビームフォーミング技術を用いて、複数の細い受信ビームを形成し、受信波の到来仰角を約 1 度の分解能で決定する。このように、幅広い送信ビームを放射しつつ受信時に解像度を上げる技術によって、スキャン時間を大幅に短縮することが可能となった。現在、大阪府吹田市（大阪大学）、兵庫県神戸市（情報通信研究機構）、沖縄県恩納村（同左）、茨城県つくば市（気象研究所）の 4 か所で株式会社東芝製のレーダーが運用されているほか、千葉県千葉市（日清紡ホールディングス中央研究所）では日本無線株式会社製のレーダーが運用されている。なお、これらは単偏波レーダーであるため、二重偏波情報を用いた雨量推定や降雨粒子の判別を行うことはできない。そこで現在、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）によって、二重偏波機能を付加した X バンドフェーズドアレイレダーの開発が進められている⁵⁾。

表 1 気象研究所フェーズドアレイレダーの諸元

周波数	X バンド (9.39 GHz)
送信パワー	143 ～ 430 W
アンテナ素子数	24 (送信時) 128 (受信時)
アンテナ面傾斜角	仰角 30°
水平走査	機械走査式、2 ～ 6 回転毎分
鉛直走査	電子走査式、100 ms 毎に 0 ～ 90° の仰角範囲
距離範囲	60 km (2 回転毎分モード) 25 km (6 回転毎分モード)
距離分解能	100 m
方位角分解能	1.2°
仰角分解能	約 1.0°

3.2 現象の解明と気象予測への応用

気象用のフェーズドアレイレダーを有する日米の研究者を中心に、様々な大気現象のメカニズム解明と気象予測に関する研究が進められている。

米国では、MPAR の試作機や X バンドの車載型フェーズドアレイレダーを用いて、降雹や竜巻、ダウンバースト、雷放電の発生メカニズムに関する研究が実施されてきた^{6),7)}。また日本では、積乱雲スケールの大気現象の研究^{8),9)}のみならず、集中豪雨をもたらす線状降水帯や台風など¹⁰⁾、スケールの大きな現象に関する研究も進められている。従来にない高い時間分解能を有する観測によって、線状降水帯の内部に埋め込まれた個々の対流の発達や、台風中心部の細かな挙動が明らかになりつつある¹⁰⁾。さらには京コンピュータを利用して、フェーズドアレイレダーによって得られる大規模データを同化に活用し、30 分先の降雨予測を行う研究も進められている¹¹⁾。

このように基礎研究が精力的に行われる一方、気象業務への活用に関する取組みも進められている。米国における「フェーズドアレイレダー革新的センシング実験 (PARISE)」は、アメリカ大気海洋庁 (NOAA) およびオクラホマ大学による共同プロジェクトであり、警報業務におけるフェーズドアレイレダーの効果の検証を目的とする。気象官署の予報官が参加し、現行レーダーによる 5 分毎のデータと、MPAR の試作機による 1 分毎の高頻度データを用いて実験したところ、警報の精度やリードタイムの改善における高頻度データの優位性が示された¹²⁾。これに対して我が国では、気象研究所および近畿地区気象官署の共同プロジェクトとして、平成 27 ～ 28 年度地方共同研究「フェーズドアレイレダーを用いた顕著現象発生メカニズムに関する研究」が実施された。線状降水帯や局地的大雨、突風事例を対象とした調査によって、フェーズドアレイレダーが注意報・警報作業の改善に有用な観測装置であることが示唆された。一方で、気象官署の現業では数値モデルや観測で得られた様々なデータを総合的に活用して、迅速かつ的確な判断を行うため、フェーズドアレイレダーによる膨大なデータを、余すところなく人の目で監視しつづけることは必ずしも効率的ではない。このため、同レーダーの実利用にあっては、危険域を自動的に判断するシステムの確立が重要であることが明らかになった。

3.3 顕著な現象の観測例

3.3.1 ダウンバースト

フェーズドアレイレダーによって捉えられた現象の実例を示す。図 2 は、2014 年 9 月 10 日に大阪空港周辺で発生したダウンバーストの事例である。ダウンバーストは積乱雲内に発生する強い下降気流であり、地上付近で水平方向に発散して風向風速の空間的な急変（低層ウィンドシア）をもたらすため、航空機の安全な離着陸に支障を与える。気象庁では、空港気象

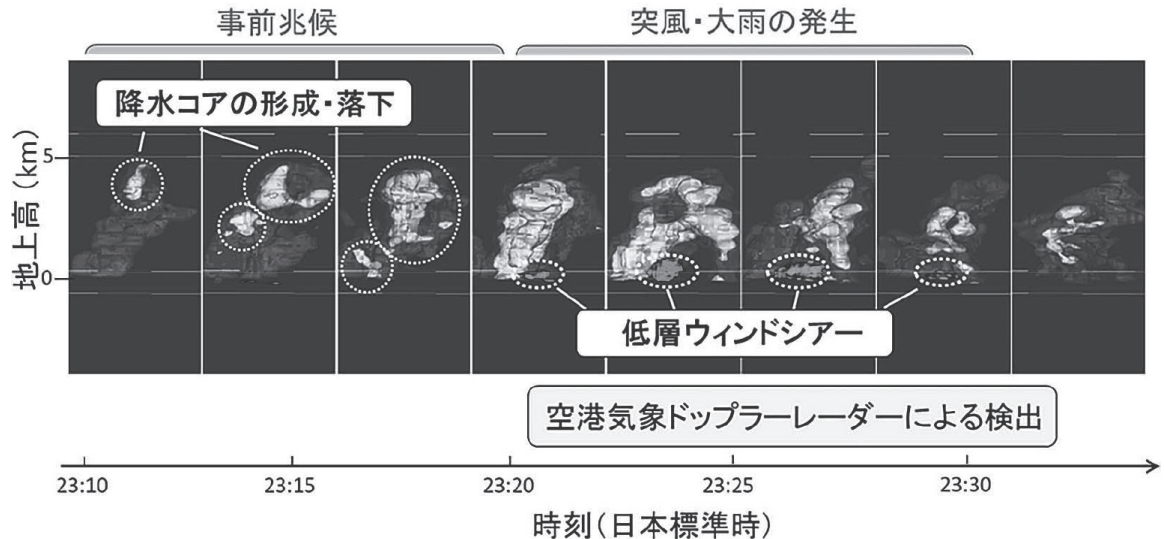


図2 ダウンバーストの観測例（出典元¹³⁾を一部改編）

ドップラーレーダーを用いて低層ウィンドシアーを探知し、危険空域の情報を管制官や航空会社の運航担当者に速やかに提供している。しかしながら、現行のレーダーは5分ごとに立体観測を行うため、5～10分という短時間に発生するダウンバーストの発生プロセスを立体的に細かく時間分解して捉えることは難しい。そこで、空港気象ドップラーレーダーによって検出された低層ウィンドシアーについて、同時刻に取得されたフェーズドアレイレーダーのデータを解析したところ、孤立的な積乱雲が次々にダウンバーストを引き起こす様子の全容が捉えられた⁸⁾。ダウンバーストをもたらした積乱雲内では、強い降水域（降水コア）

が高度4～5 kmに形成されて次第に落下し、地上で大雨が降るとともに低層ウィンドシアーが形成された（図2）。降水コアは低層ウィンドシアーが発生する約10分前に形成されていたことから、この情報を活用することによって、大雨や突風を直前に予測する技術の確立が期待される。

3.3.2 台風

図3は、気象研究所フェーズドアレイレーダーによって観測された平成28年台風第9号の中心部における降水領域の3次元構造である。台風は数100 kmから1 000 kmもの空間スケールを持ち、数日から10日以上に渡って持続する現象であり、激しい風雨を

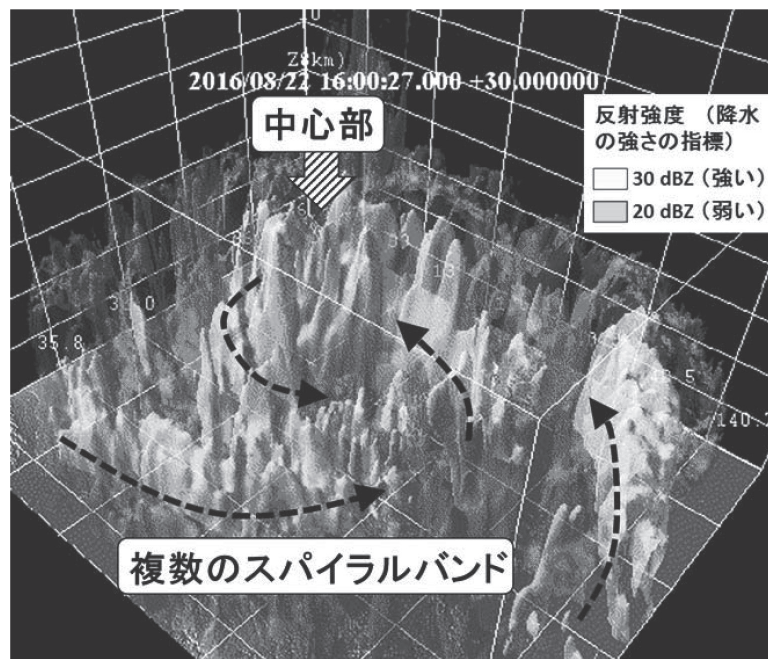


図3 台風中心部の観測例（出典元¹⁴⁾を一部改編）

伴って甚大な被害を引き起こす。台風は長く研究が進められているものの、現在でもなお、事前の予測に反して急発達・急減衰することがあるなど、未解明部分が多い。特に台風中心部における振る舞いを高い時間空間分解能で捉えることは、重要な課題の一つと考えられる。米国においてもフェーズドアレイレーダーを用いたハリケーンの観測が計画される中、気象研究所では逸早くその試みに成功し、世界初となる貴重な観測データの取得に至った¹⁰⁾。フェーズドアレイレーダーで観測された台風の中心部には、複数のらせん状の降水帯（スパイラルバンド）が中心部を取り巻くように存在することが分かる（図3）。レーダーによって観測された降水領域および気流構造を解析したところ、回転する強い気流が台風の中心に向かって収縮しながら近づいていくと同時に、中心に最も近いスパイラルバンドでは、対流活動が急速に発達する様子が明らかになった。この結果は、台風中心部における微細な振る舞いをフェーズドアレイレーダーによって精密に捉えたものであり、今後の詳細な解析を通して、台風の構造維持・盛衰メカニズムの理解進展につながると思われる。

4. 今後の課題と展望

「高い性能を有するフェーズドアレイレーダーの研究開発が急速に進められる中、気象災害予測への応用が期待される。ここでは、将来の実利用化を見据えた課題と展望をまとめる。」

4.1 高品質な広域監視能力の実現

我が国で開発された気象用フェーズドアレイレーダーは、鉛直に幅広いビームを形成することにより、全天の3次元スキャン速度の大幅な向上を実現したものである。しかしながら、ビーム幅が広いため、低い仰角では送信波の一部が地形や建築物などに当たって強い反射を受け、グラウンドクラッタと呼ばれる強いノイズが混入しやすい。この欠点を補うため、グラウンドクラッタ等の配置に応じて、それらの影響を最小限に抑えるようにビームパターンを形成する、アダプティブ・センシング技術¹⁵⁾の開発が望まれる。また、後段のデータ処理において品質管理を実施し、グラウンドクラッタ等を精度よく識別・除去する技術¹⁶⁾の開発も必要である。このように、多面的にフェーズドアレイレーダーの品質向上を図ることにより、高精度な高速3次元観測が可能となり、正確かつ迅速な予測情報の確立につながると考えられる。

また、この新しい技術を用いて我が国の国土を隙間なく監視するためには、観測範囲の広いCバンドのフェーズドアレイレーダーの開発が重要な課題の一つ

である。我が国で開発されているXバンドのフェーズドアレイレーダーは、レーダーからの最大観測距離が60～80 kmに限られている。これに対してCバンドのレーダーは数100 kmの距離まで観測可能であるため、1台あたりの観測範囲は、Xバンドのレーダーに比べて面積比で数10倍に相当する。また、Xバンドのレーダーは降水粒子による減衰・反射を受けやすく、強い降水領域が存在する場合には、その奥側の領域が著しい減衰（降雨減衰）を受けて観測される。Cバンドのレーダーは、Xバンドに比べて降雨減衰の影響が小さいため、より精度の高い降水域の観測が可能である。交通政策審議会気象分科会においてもCバンドの二重偏波フェーズドアレイレーダーの開発が望まれる中²⁾、今後の実機開発の推進が期待される。

4.2 大規模データの即時処理の実現

4.2.1 危険域の自動検出技術

フェーズドアレイレーダーは現行の気象レーダーに比べて出力するデータ量が極めて大きいため、実利用にあたっては、取得されたデータの中から大雨や突風の発生やそれらの事前兆候を自動抽出する技術の開発が重要である。

（1）降水コアの検出・追跡

局地的大雨は短時間に激しい雨をもたらすため、可能な限り早い段階で、その兆候を捉える必要がある。フェーズドアレイレーダーは、上空で形成される降水コアを、地上へ落下する前から詳細に観測することが可能である（図2）。このようなコアを検出し、追跡することができれば、例えば10分先に特定の範囲で強い雨が降るといった予測情報を提供することが可能と考えられる。特に都市域の中小河川などでは、雨の降り始めから水位の急上昇までのリードタイムが短いため、予測情報の迅速性や正確性が極めて重要である。今後、フェーズドアレイレーダーの立体的な観測データから降水コアを抽出し、その盛衰情報と3次元移動ベクトルを即時的に算出する技術の開発が望まれる。

また、集中豪雨については、その原因となる線状降水帯の発生を正確に予測することが難しいため、フェーズドアレイレーダーを用いて、現象の立体的な形成・発達の様子をリアルタイムに監視する技術が有用と考えられる。線状降水帯には、バックビルディング型、バックアンドサイドビルディング型、スコールライン型などの種類があり¹⁾、立体構造や停滞性など、時空間的な性質は大きく異なる。フェーズドアレイレーダーは線状降水帯の構成要素である個々の積乱雲を分離して観測することが可能であり、その到達高度や雲内の降水コアの動きから、現象の形成過程の特

徴を捉えることが可能である。このような観測情報を活用して現象の発生メカニズムを捉え、地上にもたらされる雨の実況監視と、今後の推移に関する予測技術の高度化につなげる取り組みが期待される。

(2) 突風の検出・追跡

竜巻やダウンバーストなどの突風は、極めて短い時間に発生・発達するため、その予測には、親雲である積乱雲の変化を詳細に監視する技術が欠かせない。

平成24年5月6日に茨城県つくば市で発生した突風災害など、我が国における強い竜巻はしばしばスーパーセルに伴うことが知られている。スーパーセルは、その上昇流域にメソサイクロンと呼ばれる低気圧性の渦を伴うため、気象庁では、この渦を気象レーダーによって自動的に探知し、竜巻発生確度ナウキャストや竜巻注意情報に役立てている。またメソサイクロンのみならず、より小さなスケールの渦を含めて、その探知および追跡を行う研究も進められている¹⁷⁾。現行の気象レーダーと比べて、フェーズドアレイレーダーは渦構造を高頻度で立体的に捉えることが可能であるため⁹⁾、このような技術を応用することによって、より精度の高い渦の探知・追跡システムの実現が可能と考えられる。

一方で航空気象の分野では、空港気象ドップラーレーダーを用いてダウンバーストの実況監視を行い、航空機の安全運航に役立てている。しかしながら、より一層の安全の確保のためには、実況監視のみならず、直前予測の実現が望ましい。フェーズドアレイレーダーは積乱雲内におけるダウンバーストの事前兆候をとらえることが可能であるため(図2)、それらの情報を活用した予測技術の開発が重要な課題の一つである。

4.2.2 人工知能の活用

フェーズドアレイレーダーが出力する大規模データから危険域を素早く正確に検出するためには、人工知能などを活用した自律的な判断システムの開発も望まれる。

気象学の分野では、機械学習を用いた研究が進められてきた。例えば、数値モデルや観測によって得られるデータから気象要素を予測するガイダンスでは、ロジスティック回帰や線形重回帰といった係数固定型の機械学習のみならず、カルマンフィルタや人工ニューラルネットワーク(ANN)などの逐次学習型の手法が用いられている。また、ANNやサポートベクターマシン(SVM)などの機械学習は、レーダー観測データの品質管理や降水種別判断、雲の分類、降雹や竜巻等突風の検出・予測など、様々な側面での活用が試みられている^{18),19)}。これらの手法はしばしば高精

度な予測値を出力すると考えられているが、判断に至った過程を人間が追跡することは難しく、そこに存在する物理メカニズムの理解につなげることは容易ではない。そこで、より可読性が高い決定木をベースとするランダムフォレスト等を用いた研究も進められている²⁰⁾。

フェーズドアレイレーダーのデータ処理においては、例えばグラントクラッタ等の識別・除去のほか、渦や収束発散などの気流構造の抽出、降水コアの検出・追跡などに人工知能技術の活用が考えられる。これらは、レーダー画像を用いたパターン認識の問題とみなすことができるため、例えば畳み込みニューラルネットワークなどのディープラーニングは、このような課題に対して有効な手段であると期待される。また、比較的に可読性の高いランダムフォレスト等の手法を用いて、フェーズドアレイレーダーを含む様々な気象観測や数値モデルによるデータから、大雨や突風が発生する確率を予測し、判断に至る過程を理解する取り組みも考えられる。人工知能の活用においては、筋の良い学習データを十分に準備することが不可欠であるため、この点も踏まえて、適切な課題設定と手法の選定を行うことが重要である。

4.3 密接な連携体制の構築

フェーズドアレイレーダーは近年に登場した最新の観測技術であり、現在、防災利用のための研究開発が精力的に進められている。最先端の技術であることから、ハード・ソフトの両面で専門的な技術や知見を有する研究者や技術者、また機関が連携して開発することが望ましい。

米国では、NOAA、連邦航空局、国防総省、オクラホマ大学、BCI社、ロッキード・マーティン社による産学官の連携に基づいて、次世代の現業機種とされるMPARの研究開発が進められている⁴⁾。また、人工知能を活用した気象研究においては、民間企業との連携が原動力の一つとなっている¹⁸⁾。

我が国においても、今後、産学官あるいは諸外国との協力関係をより一層強化し、フェーズドアレイレーダーの実機開発や現象の学術的理解の向上、また災害をもたらす大気現象の監視・予測技術の高度化に向けた取り組みが期待される。

5. ま と め

近年、局地的大雨や集中豪雨、竜巻等突風による甚大な災害が相次いで発生し、国を挙げた対策が進められている。この中で重要課題の一つとして挙げられているのが、最新の観測技術である気象用フェーズドアレイレーダーである。フェーズドアレイレーダーは日

米で開発され、現在、防災利用に向けた研究が進められている。この新しい観測装置を実用技術へと押し上げるためには、ハード・ソフトの更なる開発と科学的知見の獲得、またそれらに基づく気象予測情報の高度化のための取り組みが欠かせない。今後は、より一層密接な連携体制の下で科学者・技術者が一丸となって研究開発を進め、気象災害に強い安全・安心な社会づくりのための基盤技術を確立することが期待される。

参 考 文 献

- 1) 津口裕茂, 線状降水帯, 天気, 63-9, pp.727-729 (2016)
- 2) 交通政策審議会気象分科会, 「新たなステージ」に対応した防災気象情報と観測・予測技術の在り方(提言), http://www.jma.go.jp/jma/press/1507/29a/bunkakai150729_teigen.pdf.
- 3) 竜巻等突風対策局長級会議, 「竜巻等突風局長級会議」報告, <http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokuchou/pdf/h25-t/houkoku.pdf>.
- 4) Zrnić, D. S., J. F. Kimpel, D. E. Forsyth et al., Agile-beam phased array radar for weather observations, Bull. Amer. Meteor. Soc., 88-11, pp.1753-1766 (2007)
- 5) 牛尾知雄, 佐藤晋介, 高橋暢宏, 井口俊夫, フェーズドアレー気象レーダの開発, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, 10-1, pp.35-39 (2016)
- 6) Bluestein, H. B., R. M. Rauber, D. W. Burgess et al., Radar in Atmospheric Sciences and Related Research : Current Systems, Emerging Technology, and Future Needs, Bull. Amer. Meteor. Soc., 95-12, pp.1850-1861 (2014)
- 7) Kurdzo, J. M., F. Nai, D. J. Bodine et al., Observations of Severe Local Storms and Tornadoes with the Atmospheric Imaging Radar, Bull. Amer. Meteor. Soc., 98-5, 915-935 (2017)
- 8) Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida et al., High-Speed Volumetric Observation of a Wet Microburst Using X-Band Phased Array Weather Radar in Japan, Mon. Wea. Rev., 144, 3749-3765 (2016)
- 9) Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida et al., Rapid volumetric growth of mesocyclone and vault-like structure in horizontal shear observed by phased array weather radar, SOLA, 12, 314-319 (2016)
- 10) Adachi, T., K. Kusunoki, U. Shimada et al., Three-Dimensional Structure of Typhoon Mindulle (2016) and Near-Surface Streaks Observed by Phased Array Radar, Preprints, 38th Conf. on Radar Meteorology, Chicago, USA, 12B.2 (2017)
- 11) Miyoshi, T., M. Kunii, J. Ruiz et al., "Big Data Assimilation" Revolutionizing Severe Weather Prediction, Bull. Amer. Meteor. Soc., 97-8, 1347-1354 (2016)
- 12) Bowden, K. A., and P. L. Heinselman, A Qualitative Analysis of NWS Forecasters' Use of Phased-Array Radar Data during Severe Hail and Wind Events, Wea. Forecasting, 31, 43-55 (2016)
- 13) Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida et al., High-speed volumetric observation of downburst using X-band phased-array radar, 37th Conf. on Radar Meteorology, Norman, USA, 8B.3 (2015)
- 14) 気象庁, 気象業務はいま 2017, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2017/HN2017.pdf>.
- 15) Yoshikawa, E., T. Ushio, Z.-I. Kawasaki et al., MMSE Beam Forming on Fast-Scanning Phased Array Weather Radar, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51, 3077-3088 (2013)
- 16) Ruiz, J. J., T. Miyoshi, S. Satoh et al., A Quality Control Algorithm for the Osaka Phased Array Weather Radar, SOLA, 11, 48-52 (2015)
- 17) Kusunoki, K., T. Imai, H. Suzuki et al., An overview of the Shonai area railroad weather project and early outcomes. Preprints, 5th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology, Helsinki, Finland, 12.1, (2008)
- 18) Lakshmanan, V., C. Karstens, J. Krause et al., Quality Control of Weather Radar Data Using Polarimetric Variables. J. Atmos. Ocea. Tech., 31, 1234-1249 (2014)
- 19) Manzato, A., Hail in Northeast Italy : A Neural Network Ensemble Forecast Using Sounding-Derived Indices, Wea. Forecasting, 28, 3-28 (2013)
- 20) McGovern, A., K. L. Elmore, D. J. Gagne II et al., Using Artificial Intelligence to Improve Real-Time Decision Making for High-Impact Weather, Bull. Amer. Meteor. Soc. doi : 10.1175/BAMS-D-16-0123.1, in press (2017)