



進化を続ける気象レーダ技術

東芝インフラシステムズ株式会社 電波システム事業部 技術主幹

和田 まさかず
将一



1. はじめに

近年、台風や線状降水帯、局地的豪雨による気象災害が増加しており、社会問題の一つとなっている。このような降雨を観測する装置としては、広域の降雨を空間的にも時間的にも細かい間隔で定量的に観測できる気象レーダが有効である。気象レーダは、気象庁、国土交通省水管理・国土保全局、地方自治体など様々な機関で運用され、河川や下水道などの社会インフラの管理、気象予測のための入力情報、市民への情報提供など様々な用途で活用されている。

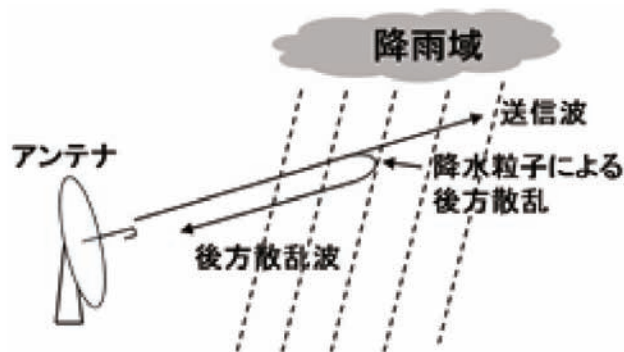
我が国の気象レーダ技術は世界最先端であり、送信機の固体化、電子走査による観測の高速化などを世界に先駆けて実現してきた。ここでは、気象レーダの概要を説明するとともに、気象レーダの技術の進展について紹介する。

2. 気象レーダによる降水観測

降雨を把握するための装置としては、古くから雨量計と呼ばれる測器が用いられており、気象庁が運用しているAMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) では、転倒ます型雨量計により全国約840か所、約21km間隔で降水量の測定が行われている。転倒ます型雨量計は地上に降る雨を集めて直接測定するため、量としての信頼性が高いが、①設置位置の降水量しか測定できない、②1分間降水量など瞬時値の測定精度が悪い、③横風を受けると降水量を過小評価する、といった問題を有している。

これに対し、気象レーダによる観測は、①半径数十km～数百kmといった広域観測が行え、②1分ごとといった降水量の瞬時値推定が可能で、③地上付近だけでなく上空の観測も可能、といった利点がある。従来は、降水量推定の精度や装置の保守性などで必ずしも十分とはいえない面もあったが、二重偏波観測や固体化送信機などの新技術によって、これらの欠点は解消されつつある。

気象レーダは、図1に示すようにアンテナから空間に向かって電波を送信し、空中に浮遊する様々な降水粒子（雨、雪、アラレなど）に電波が当たった際に発生する後方散乱を再びアンテナで受信することにより、空間の降水粒子の状態

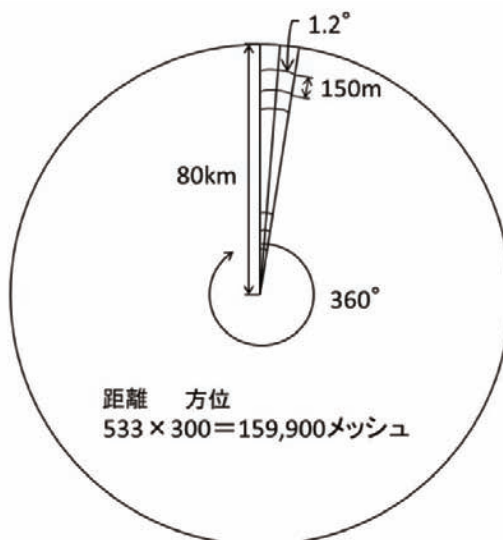


■図1. 気象レーダの観測原理

（量、移動、粒子の種類等）を推定する装置である。

ここで気象レーダの特徴である広域観測における観測メッシュ数について図2を用いて説明する。X帯の気象レーダの典型的な観測範囲は半径80km程度であり、距離方向の分解能は150mで運用されることが多いため、距離方向には533に分割されたデータを得ることができる。方位については、1回転360°を1.2°ごとに300分割する。

したがって、典型的なX帯気象レーダは、約16万地点の観測値をリアルタイムに得ることができる。データの特徴は異なるが、単純に言えば16万地点に地上雨量計を配備したのと同じ効果が1台の気象レーダで得られることになる。



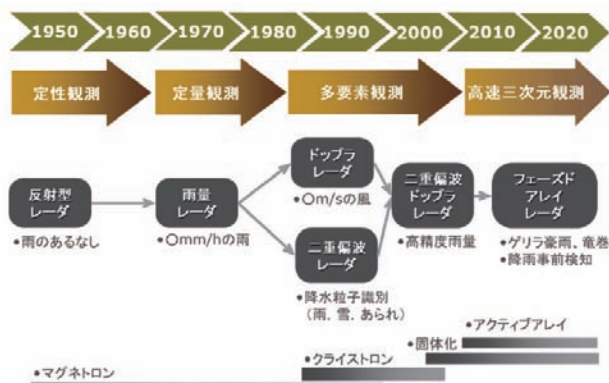
■図2. X帯気象レーダの典型的な観測メッシュ



3. 気象レーダ技術の発展

3.1 気象レーダ技術の歴史

気象レーダは導入当初から多くの情報を定量的に観測できた訳ではない。そこには、図3に示すような気象レーダ技術の発展の歴史がある。



■図3. 気象レーダ技術の歴史

初期の気象レーダは、送信機にマグネトロンと呼ばれる自励発信型の電子管が用いられ、受信機の出信号は白黒の残光型ディスプレイに映し出され、雨域の強弱を輝度から判別し暗室でスケッチするアナログタイプの装置であった。その後デジタル技術が発達したことにより、システムの安定化と高度な処理が可能となり、定量的雨量観測ができる雨量レーダへと発展してきた。

1990年代に入ると、降雨強度に加え、大気の流れ（反射電波の位相情報から風を推定）を観測できるドップラーレーダへと発展してきた。位相情報を安定的に扱うために、この頃から送信機として増幅型のクライストロンが主流となった。

ここまでのレーダタイプでは単一の偏波（一般的には水平偏波）のみを用いた電波の送受信であったが、ドップラーレーダとほぼ同時期に2つの偏波、つまり水平偏波と垂直偏波を用いた二重偏波レーダが実用化されてきた。これにより、降水粒子の情報をより多く得ることできるようになった。ドップラーや二重偏波による観測を多要素（マルチパラメータ）観測と呼ぶ。2000年代に入ると、ドップラーレーダと二重偏波レーダを統合した二重偏波ドップラーレーダ、いわゆる本格的なマルチパラメータ（MP）レーダが実用化された。

この頃から我が国の気象レーダ技術は世界をリードすることになる。その一つが、送信機の固体化である。これは高出力マイクロ波半導体を多段で合成し、気象レーダに必要

な送信出力を得るもので、従来のマグネトロンやクライストロンといった電子管からの移行に成功した（図4）。2012年には複数方向を同時に観測することで高速3次元観測を可能とするフェーズドアレイ気象レーダ（水平偏波観測タイプ）が開発され、2017年には二重偏波機能を搭載したマルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダが開発された。



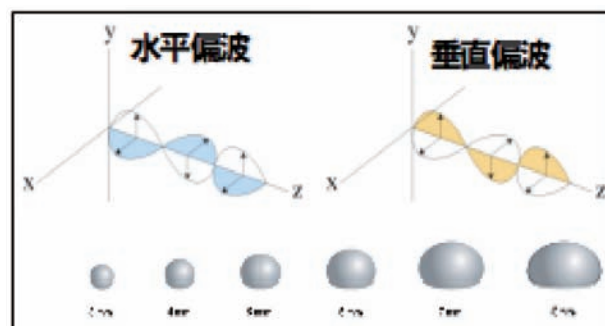
■図4. C帯固体化マルチパラメータ気象レーダ

3.2 マルチパラメータ観測

マルチパラメータ観測の機能を搭載した気象レーダは、水平偏波と垂直偏波の2つの直線偏波を送受信する（図5）。また、雨滴は粒径が大きくなるほど、空気抵抗で水平方向に扁平する（図5）。従来のマルチパラメータでない気象レーダは、水平偏波の受信強度のみから雨量を推定するので、量としては同じ雨でも、大粒の雨の時は雨量を大きめに、霧雨のように小粒の雨の時は雨量を小さめに推定してしまうという問題を有していた。

これに対し、マルチパラメータレーダは水平偏波と垂直偏波のそれぞれの強度、位相を測定できるため、これらの組み合わせにより、様々なパラメータを算出することができる。

特に、「比偏波間位相差」（以下、 K_{DP} ）というパラメー



■図5. 二重偏波レーダによる観測の仕組み



タは、雨の定量観測の精度を高める技術として、広く用いられるようになってきている。電波は空気中を通過するときに比べて水中を進むときの方が伝搬速度は遅い。雨滴は粒が大きいほど水平に扁平するため、雨の中を電波が伝搬するとき、水平偏波は垂直偏波に比べて位相の遅れが生じる。この位相遅れが、雨滴の大きさによらずに、雨の量だけに比例するというのが K_{DP} による雨量推定の原理である。

このほかにも偏波間相互相関係数 (ρ_{HV})、差分レーダ反射因子 (Z_{DR}) といった偏波パラメータや、通常のドップラー気象レーダと同様にレーダ反射因子 (Z_h)、ドップラー速度 (V)、ドップラー速度幅 (W) といった様々なパラメータも同時に算出される。これらのパラメータは、雨量精度を高める目的だけでなく、降水粒子識別 (降水粒子の雨、雪、アラレなどの分類)、雲のタイプ判定 (層状性、対流性) など様々な解析に用いられる。

4. マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ

高密度、高精度、高速観測を実現する装置として、内閣府が主導するSIP^{*1}においてマルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ (以下、MP-PAWR^{*2}) が開発された (図6)。このレーダは埼玉大学に設置され、実運用に向けた実証実験が行われている。

ここでは、MP-PAWRと従来型パラボラレーダの差異に触れながら、MP-PAWRの特長について説明する。従来レーダは、3次元観測を実現するため、レーダの観測仰角を少しずつ変えながら観測するPPIスキャンを実施しており、5分~10分程度の時間を要していた。また、連続する

スキャンの間は空間的に観測できない領域も存在した。一方で、MP-PAWRは、アンテナ回転方向のスキャンは従来レーダと同様に機械駆動にて行うのに対して、垂直 (高度) 方向のスキャンを電子走査で行うため、高度15km程度までの3次元空間を抜けなく密に観測することができ、その所要時間は約30秒から1分程度である (図7)。



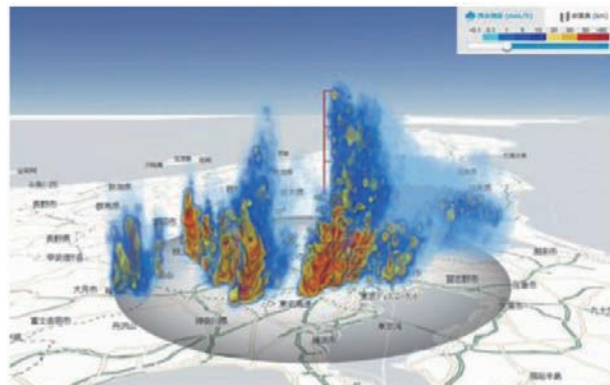
■ 図7. 従来レーダとMP-PAWRのアンテナ走査方式の比較

図8に、半径60km、上空15kmまでを30秒間隔で観測した際のある時刻の3次元観測結果を示す。MP-PAWRでは、このような3次元的な降水分布を30秒~1分ごとに観測できる。

図9は、豪雨時に河川水位が急上昇するという事象を、「雨雲発生」「雨雲急成長」「降雨」「水位上昇」の各ステージに区分した上で概念的に表現し、MP-PAWRの特長がどのように活用できるのかを示したものである。上空雨量



■ 図6. マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダの外観 (左) と観測領域 (右)



■ 図8. MP-PAWRによる雨の観測結果 (2018年8月27日)

*1 SIP: Cross-ministerial strategic innovation promotion program

*2 MP-PAWR: Multi-Parameter Phased-Array Weather Radar

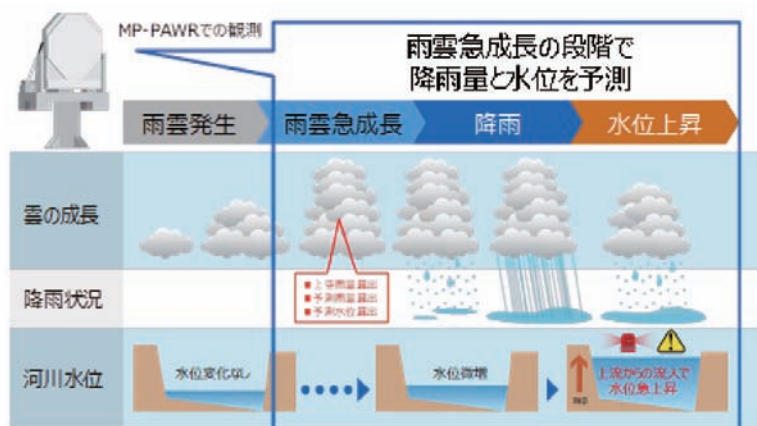


図9. MP-PAWRによる降雨・水位の予測



図10. MP-PAWRによる緊急豪雨速報の活用イメージ

を高速に観測できるMP-PAWRでは、地上付近に降雨が到達する前、即ち「雨雲急成長」ステージで、地上に到達する前の降雨を高密度に検知することが可能である。このステージで検知したMP-PAWRの観測情報に基づいて、上空雨量を算出し、それを入力として予測雨量を算出、更に予測水位を算出することで、原理的に従来よりも早期に情報提供が可能となる。

この考え方は、緊急地震速報と対比させて考えることができる。緊急地震速報は、震源地で「既に発生した」地震を検知し、地震の揺れの到達が予測される地域に、揺れの数秒前に情報配信をしている。この情報は、携帯電話へのプッシュ通知をはじめ、新幹線の脱線防止のための自動減速、エレベータの閉じ込め防止のための最寄り階での自動停止といった形で様々なインフラの自動制御に活用されている。

MP-PAWRによる「緊急豪雨速報」も考え方は同じであり、上空で「既に発生した」豪雨を検知することにより、

地上に到達する数十分前に情報を伝えることが可能となる。具体的な活用イメージとしては図10に示すように、下水道雨水ポンプの自動起動、道路アンダーパスの通行止めといった防災目的だけでなく、カーナビ渋滞予測といった利便性の向上にも役立てることができると考える。

5. おわりに

我が国は、地震、火山、豪雨、突風など様々な災害が発生する自然災害多発国であり、中でも豪雨被害は社会問題の一つとなっている。これまで全国に配備された気象レーダによる実況把握が豪雨被害を低減するために役立てられてきた。

今後は、地上に到達する前の雨を3次的に観測できるMP-PAWRとAIやIoTを駆使したインフラの自動制御を組み合わせることで、安心で安全な社会の実現にますます貢献できるものと期待される。