

広範囲の降雨を精細に観測する気象レーダ技術

Technologies for Weather Radars to Achieve Highly Precise Wide-Area Observation of Precipitation

和田 将一 武藤 隆一

■ WADA Masakazu ■ MUTO Ryuichi

近年、局地的大雨や突風などによる災害が多発しており、気象現象の観測がますます重要になってきている。

東芝は、このようなニーズに応えるため、早くから広範囲の降雨をきめ細かく観測できる気象レーダ技術の開発に取り組み、その技術を発展させてきた。特に近年では、ドップラーレーダと二重偏波レーダを統合したマルチパラメータ (MP) レーダの実用化やその固体化送信技術による高精度化により、更には高速3次元観測を可能にするフェーズドアレイ気象レーダの開発により、安心で安全な社会の実現に貢献し続けている。

The recent increase in disasters caused by anomalous weather events including localized torrential rainfall and wind gusts has become a social issue. Demand has therefore been increasing for the development of weather observation technologies to facilitate the provision of disaster reduction information.

Toshiba has been developing cutting-edge weather radars offering superior performance in observing rainfall conditions over a wide area utilizing its industry-leading radar technologies; namely, solid-state transmitter technologies for multiparameter (MP) observations and phased-array radar technologies for three-dimensional weather observations. We have been making continuous efforts to realize the safe and secure operation of social infrastructure systems through the introduction of such evolving technologies for weather radars.

1 まえがき

近年、いわゆる“ゲリラ豪雨”と呼ばれる突発的な局地的大雨や突風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。このような局地的大雨や突風は、いつ、どこで発生するかをあらかじめ特定することが難しいため、早い段階でその発生を検知すること、更には事前の兆候を捉えることが強く求められるようになってきた。

このようなニーズに応える装置としては、広範囲の降雨を空間的にも時間的にも細かい間隔で観測できる気象レーダがある。気象レーダは、気象庁や、国土交通省河川局、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、及び市民への情報提供など様々な用途で活用されている。

東芝は、気象レーダの開発及び製造に早くから取り組んでおり、送信機の固体化や電子走査による観測の高速化などの新たな技術開発を進めてきた。ここでは、気象レーダの概要と、当社が開発してきた気象レーダ技術及びその特長について述べる。

2 気象レーダによる降雨観測

降雨を把握するための装置として、古くから雨量計と呼ばれる観測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 か所で、約 21km 間隔の雨量測定を行っている。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、量としての信頼性は高いが、次に示すような問題がある。

- (1) 設置位置の雨量しか測定できない
- (2) 1 分間雨量など瞬時値の測定精度が十分ではない
- (3) 横風を受けると雨量を過小評価する

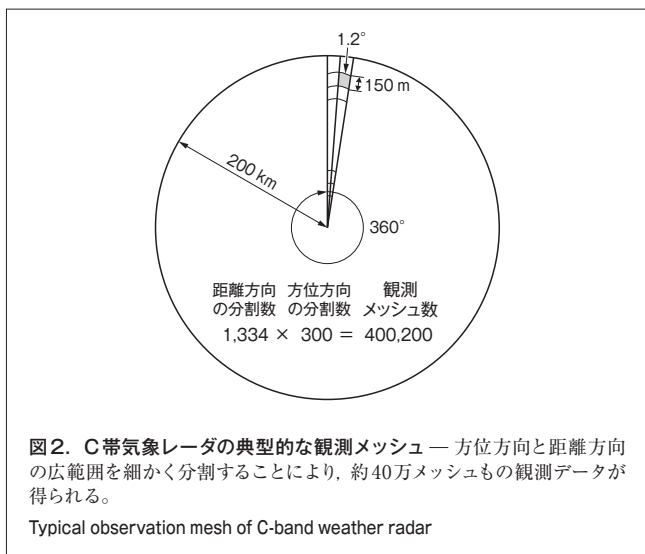
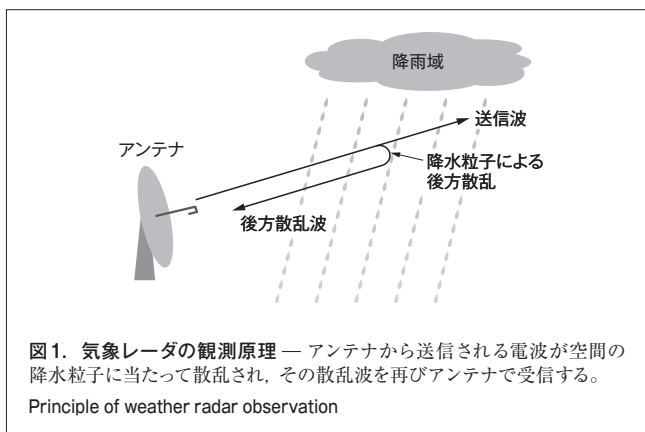
これに対し、気象レーダによる観測は次に示すような利点がある。

- (1) 半径数十 km ~ 数百 km といった広域観測が可能
- (2) 1 分ごとといった雨量の瞬時値推定が可能
- (3) 気象条件によらずに均質なデータ測定が可能

従来は、雨量精度や保守性などで必ずしも十分とは言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、あられなど) に電波が反射した際に発生する後方散乱波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 (量、移動速度、粒子の種類など) 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。後述の C 帯 (5 GHz 帯) 気象レーダの観測範囲は、半径 200 km 程度である。距



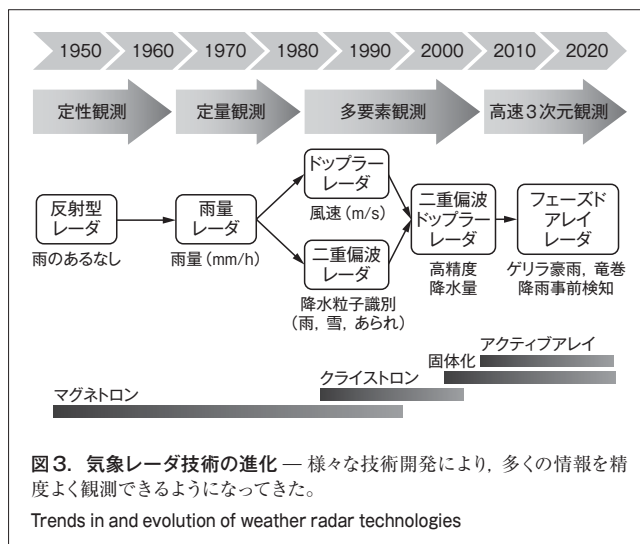
離方向の分解能は150 mで運用されることが多いため、距離方向には1,334分割された観測データを得ることができる。また方位方向は、1回転360°を1.2°ごとに300分割して観測データを取得する。

したがって、典型的なC帯気象レーダは、約40万メッシュの観測値がリアルタイムに得られる。取得するデータは異なるが、単純に言えば約40万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。

3 気象レーダ技術の発展

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のではなく、**図3**に示すような気象レーダ技術の発展の歴史がある。

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振型の電子管が用いられ、受信機の出力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



処理が可能になり、定量的な降雨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、雨量に加え、大気の流れを観測（反射電波の位相情報から風速を推定）できるドップラーレーダへと発展してきた。反射電波の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。

ここまでのレーダでは単一の偏波（一般的には水平偏波）だけ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二つの偏波、すなわち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がより正確に得られるようになった。このような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。

これ以降も当社は様々な新技術を開発し、業界をリードしている。その一つが、送信機の固体化である。これは当社が得意とする高出力マイクロ波半導体製品を多段で合成し、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を実現した。固体化の利点については4章で述べる。

更には、2012年に複数方向を同時に観測することで高速3次元観測を実現する、世界初^(注1)のフェーズドアレイ気象レーダの開発にも成功した。これまでの気象レーダはパラボラアンテナと呼ばれる椀（わん）の形をしたアンテナにより、一度に一つの方向だけを観測していた。したがって、上空まで含めた立体的な観測を行うためには、アンテナの仰角（高さ方向

(注1) 2012年8月時点、10方向以上を同時に観測するDBFのリアルタイム処理機能を搭載した気象観測専用のフェーズドアレイレーダとして、当社調べ。

の角度)を少しずつ変えながら、水平方向に何度もアンテナを回転させなければならず、立体的な観測に5～10分の時間を要していた。これに対し、当社が開発したフェーズドアレイ気象レーダは平面状のアンテナを採用し、仰角方向を電子的に走査し、DBF(デジタルビームフォーミング)技術により複数方向を同時処理することで、アンテナを1回転させるだけで、仰角方向も1°刻みで0～90°のデータを取得することができる。そのため3次元観測に必要な時間は、わずかに10～30秒となった(詳細は、この特集のp.15-18参照)。

4 固体化MP気象レーダ

4.1 MP観測

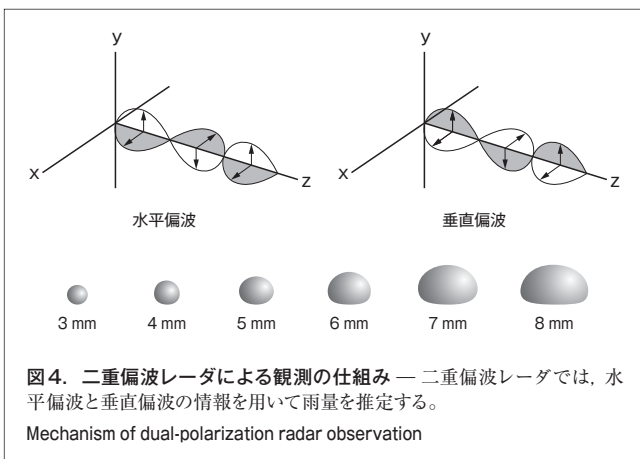
ここでは、実運用装置としてわが国で普及が進む固体化MP気象レーダについて述べる。

従来の気象レーダは、水平偏波だけで降雨を観測しているが、MPレーダは水平偏波と垂直偏波のそれぞれの強度と位相を測定できる。更に、これらの組合せにより、様々なパラメータを使って雨滴の状態を詳細に観測することができるようになった。特に、比偏波間位相差(K_{DP})というパラメータは、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。

雨滴は粒径が大きくなるほど、空気抵抗を受けて水平方向に扁平(へんぺい)になる性質がある(図4)。電波は空気中よりも水中のほうが伝搬速度は遅いため、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が遅れる。この位相遅れを単位距離当たりで表したパラメータが K_{DP} である。

雨滴の粒径が大きくなれば体積が増えるため、雨量は多くなり、それに伴い反射強度も K_{DP} も大きくなる。この中で反射強度の変化は雨量の変化に比べて著しく大きいため、従来の気象レーダでは大粒の雨は雨量を多めに、小粒の雨は雨量を少なめに推定してしまうという問題があった。

これに対し K_{DP} は、粒径が変化したときに雨量と同程度の



比率で変化するため、 K_{DP} による雨量推定は粒径の影響を受けにくく、高精度に雨量を観測できるという特長がある。

この他にもMPレーダでは、偏波間相互相関係数(ρ_{HV})、差分レーダ反射因子(Z_{DR})といった偏波に依存するパラメータや、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)、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できる。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(雨、雪、あられなどの分類)、雲のタイプ判定(層状性、対流性)など様々な解析に用いることができる。

4.2 固体化送信技術

MP観測では、水平偏波と垂直偏波のわずかな強度差や位相差などを検出する必要がある。そのため、レーダシステムの送受信システムには、高い直線性と安定性が求められる。これを実現するのが固体化送信機である。

固体化送信機を構成する固体化電力モジュールを図5に示す。この固体化電力モジュール内でマイクロ波半導体の出力を合成したうえで、更に固体化送信モジュール出力を合成することにより、従来のマグネトロンやクライストロンに匹敵する送信電力の送信機を実現している。

固体化送信機を用いた固体化気象レーダは、マグネトロンやクライストロン送信機を用いたものに比べ、高精度や、長寿命、低運用コスト、小型軽量、低電波干渉など多くの利点があるため、わが国で運用される気象レーダは全て固体化タイプに移行しつつある。今後、この傾向は海外にも広まっていくと思われる。

固体化MP気象レーダには、用途に合わせていくつかのタイプがあるが、C帯固体化MP気象レーダを図6に示す。アンテナの直径は4m程度が一般的であり、半径200km程度の広範囲を観測することができる。建物などで電波が遮られないように、比較的高い山の山頂に設置されることが多い。

これに対し、図7に示すX帯(9GHz帯)レーダは、アンテナの直径は2m程度が一般的である。市街地のビルや鉄塔の上に設置されることが多く、半径80km程度を観測対象とす

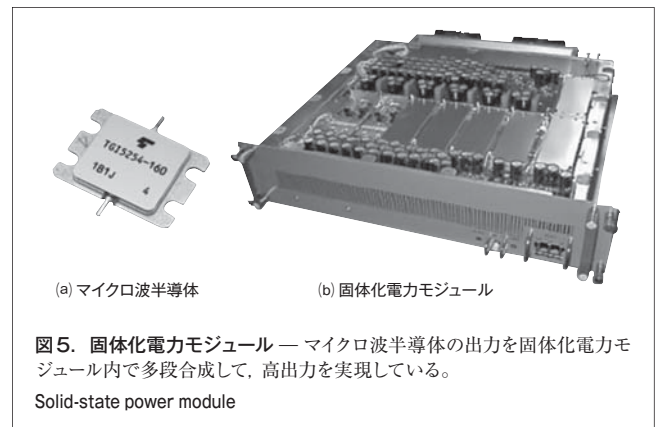




図6. C帯固体化MP気象レーダー—半径200 km程度の広範囲を観測でき、比較的高い山の山頂に設置されることが多い。
C-band solid-state MP weather radar



図7. X帯固体化MP気象レーダ(固定型)—送信機や、受信機、信号処理装置などを小型化することで、これらをレドーム内に設置している。
Fixed type X-band solid-state MP weather radar



図8. 可搬型X帯固体化MP気象レーダー—アンテナ部とシェルター部を分割することができ、トラックなどで容易に移設できる。
Portable X-band solid-state MP weather radar

る。C帯では送信機などが格納される機器ラックはアンテナとは別の機器室に設置されるが、X帯ではアンテナといっしょにレドームと呼ばれるアンテナを保護するための電波透過性のあるドーム内に設置することが可能である。X帯は装置が比較的コンパクトなため、図8に示すような可搬型も用意されており、主に研究目的などで利用されている。

その他、国内では運用されていないが、海外にはS帯(3 GHz帯)を用いた気象レーダなどもあり、C帯よりも更に広範囲の観測を行っている。

5 あとがき

わが国は、地震や、火山、豪雨、突風などに起因した様々な災害が発生する自然災害の多発国である。それと同時に、高度に発達した下水道設備など社会インフラの効果的な活用により、これらの被害を低減してきた防災先進国でもある。実際に、東南アジア諸国連合(ASEAN)諸国をはじめとするいくつかの国で、わが国の防災対策を参考にしようとする動きも見られるようになってきた。

豪雨災害は発生地域に偏りがある地震災害などとは異なり、世界のいたるところで発生する可能性がある。今後は様々な進化を遂げた当社の気象レーダを供給することで、豪雨被害軽減の一助となることを願っている。更には、センサの提供にとどまらず、これを活用する気象防災ソリューションへも踏み込んで、安心で安全な社会の実現に貢献していく。

文 献

- (1) 吉田 孝監修. 改定レーダ技術. 電子情報通信学会, 1996, 307p.
- (2) Bringi, V.N.; Chandrasekar, V. 2001: POLARIMETRIC DOPPLER WEATHER RADAR. Cambridge University Press, 2001, 636p.
- (3) 和田将一 他. 電波資源を有効に利用する5 GHz帯固体化気象レーダ. 東芝レビュー. 63, 7, 2008, p.48-51.
- (4) 水谷文彦 他. 局地的豪雨や突風を監視する9 GHz帯固体化MPレーダ. 東芝レビュー. 64, 10, 2009, p.62-65.



和田 将一 WADA Masakazu, Ph.D.

社会インフラシステム社 電波システム事業部 電波応用推進部 参事, 博士(工学)。気象防災システムの商品企画及びエンジニアリング業務に従事。

Defense & Electronic Systems Div.



武藤 隆一 MUTO Ryuichi

社会インフラシステム社 小向事業所 電波応用技術部グループ 長。気象防災システムの設計・開発に従事。

Komukai Complex