

## 日本における気象レーダーの発展\*

佐藤 晋介\*\*

### 1. はじめに

気象レーダーは電波で雨や雪の分布と強さを測るリモートセンシング装置であり、メソ気象学、雲物理学などの研究にとっては最も重要な観測装置であると同時に、天気予報や豪雨災害対策にも無くてはならないものとなっている。気象庁の「レーダー・アメダス解析雨量」<sup>1)</sup>、「降水短時間予報」に代表されるリアルタイムの降水情報<sup>2)</sup>は、テレビやインターネットを通して一般の家庭でも馴染み深い情報になってきている。

雨や雪を測るレーダーのことを一般には気象レーダーと呼ぶが、広い意味で気象学に用いられるレーダーとしては、上空の風を測るウィンドプロファイラや雨粒より小さな雲粒を観測できる雲レーダーもある。また、研究目的では小型の可搬型レーダーが多く使われており、航空機や衛星に搭載されるレーダーもある。さらに機能別に見ると、雨粒の動きから風速を観測するドップラーレーダーや、電波の偏波情報から降水粒子の種類や大きさ等を推定したり降雨減衰量を補正したりできる偏波レーダーもある。本稿では筆者が過去20年余りの間に研究開発や集中観測等で関わってきた気象レーダーを中心に紹介し、最後に日本の気象レーダーの今後の展開についての私見を述べてみたい。なお、紙面の制限から、ウィンドプロファイラに関しては最近の気象研究ノート<sup>3)</sup>があるので本稿では取り扱わないこととし、参考文献も教科書や総合的な解説のみを引用することをご了承ください。

### 2. 日本のレーダー開発の歴史

レーダー技術は戦争とともに発展し、気象学への応

用は米国では1940年頃から、日本では戦後の開発制限が解除された1954年から始まっている<sup>3)</sup>。その意味で、日本における気象レーダー技術と研究は欧米より10年以上遅れているとも言われてきたが、日本で最初のXバンド(10 GHz帯)気象レーダーの完成から10年後の1964年に設置された最大観測レンジ800 kmというSバンド(3 GHz帯)の富士山レーダーは、引退後の2000年に米国電気電子学会(IEEE)のマイルストーンを受賞したことからも分かるように世界に誇る気象レーダーであったことは間違い無い。近年でも、1997年に打ち上げられた世界初の衛星搭載降雨レーダー(TRMM/PR)は<sup>4)</sup>、打ち上げ後10年近くたった現在でも1つの部品も故障することなく常に1 dB以内に校正されながら運用を継続しており、世界に誇る日本のレーダー技術の成果であろう。

日本の現業用気象レーダーは、1971年までにCバンド(5 GHz帯)を中心とする20台のレーダーが気象庁により展開され現在でも運用されている。1982年に開始されたデジタル化が1988年にほぼ終了したことで<sup>5)</sup>、レーダー解析雨量がリアルタイムで使われるようになった。現業用レーダーのドップラー化は2006年から開始され、2007年度中には20台中11台がドップラー化されることになっている。1997年までに158台のWSR-88D型ドップラーレーダー(NEXRAD)が全国配備された米国と比べると日本の現業レーダーのドップラー化は遅れていた感があるが、米国では竜巻による突風被害が多いのに対し、日本では台風や集中豪雨による雨災害が多いので定量的な解析雨量や短時間降水予報の現業化が優先されてきた<sup>1)</sup>。しかし、日本においても2006年に竜巻等突風災害の被害が集中し、ドップラー速度データの同化技術も発達してきたことから、現業ドップラーレーダーの数値天気予報に対する活用が期待されている。一方、1995年から整備

\* Development of weather radar in Japan.

\*\* Shinsuke SATOH, 情報通信研究機構.

© 2007 日本気象学会

が始まり現在 8 台が導入された空港ドップラーレーダー<sup>6)</sup>は、直径 7 m の大型パラボラアンテナでダウンバーストやシアーラインを高い時間空間分解能で検出できる優れた性能を有し、米国の空港ドップラーレーダー (TDWR) と同等以上の技術レベルにあると思われる。

日本における研究用気象レーダーは可搬型の X バンドレーダーを中心に開発されてきた。その目的は各地における特有の降水システムの研究を行うことであるが、米国のようにトラックに載せたレーダーアンテナをぐるぐる回しながら竜巻を追っかけるといった芸当ができるような地理的条件・道路状況は日本では皆無なので、まずは適切な観測地点を探すという地道な下準備が必要である。各研究機関や大学で開発されてきたドップラー気象レーダーの一覧は気象研究ノート<sup>6)</sup>に詳しいので、ここでは歴史的にみて重要と思われるレーダーのみを紹介する。1982年に日本で初めてデュアルドップラー観測を行った気象研究所の X バンドと C バンドのドップラーレーダー<sup>7)</sup>は、その後の気象レーダー開発のモデルとなった点でも重要であろう。1985年に北海道大学低温科学研究所が導入した高速 3 次元ドップラーレーダーは、最大アンテナ回転速度 30 rpm という高速スキャンを実現した点でユニークなレーダーである。また、このレーダーは 1991年に二重偏波機能を付加した北海道大学理学部レーダーとともに、パプアニューギニア (TOGA-COARE) で日本国外における初めてのデュアルドップラー観測を行い、その後、名古屋大学の 2 台のドップラーレーダーによる中国観測 (GAME-HUBEX) を初めとして、カナダ、チベット、インドネシアといった海外での日本レーダーの活躍につながっている。日本で初めて二重偏波ドップラーレーダー (C バンド) を導入したのは土木研究所で 1987年のことである。防災科学研究所では、それまでに整備した 2 台の X バンドレーダーの経験を踏まえて、2000年に 3 周波 (X バンド、Ka バンド (35 GHz)、W バンド (95 GHz) : X と W バンドは二重偏波) のマルチパラメータレーダーシステムを完成させ、多周波観測への道を拓いた。マルチパラメータレーダーとは、降雨量のみを測定する通常レーダーに対して、ドップラー・多重偏波・多周波などの観測機能を持つレーダーの総称である。その他、最近では京都大学による車載型ミリ波ドップラーレーダー (Ka バンド) や千葉大学の W バンド FM-CW レーダー (FALCON) といった可搬型レーダー

も活躍している。固定型の研究用レーダーとしては、2001年に通信総合研究所 : CRL (元電波研究所、現在の情報通信研究機構 : NICT) が開発した C バンドの沖縄偏波降雨レーダー (COBRA) が世界的にも類をみない多くの機能を有している<sup>8)</sup>。COBRA は 2 台の送信機による 6 種類の偏波送信と水平・垂直偏波同時受信によりあらゆる偏波パラメータが取得可能であり、2 か所の受信局によるバイスタティックドップラー観測機能を持つ。さらに 2004年には、10 kW の進行波送信管 (TWT) で 250 kW のクライストロンと同等以上の感度を実現するパルス圧縮機能が付加された。

最後に船舶、航空機、衛星といった移動体に搭載される気象レーダーについて紹介する。海洋観測船「みらい」に 1997年に搭載された C バンドドップラーレーダーは、船体の動揺を瞬時に検出しアンテナ自動制御を行う機能を持ち、世界中の海で様々な降水システムの観測を行っている。航空機搭載レーダーは、歴史的には 1980年に電波研究所が航空機搭載の X バンドと Ka バンド二周波降雨レーダーという世界の水準を抜いたレーダーを開発しており<sup>9)</sup>、これが前述の TRMM/PR 開発につながった。その後、CRL では 1990~1995年には二重偏波および擬似デュアルドップラー観測を行うことができる Ku バンドの航空機搭載降雨レーダー (CAMPR) を開発し<sup>8)</sup>、TRMM 検証実験 (IMCET)、梅雨観測実験 (TRES, X-BAIU99)、冬季日本海メソ対流系観測 (WMO-01) などの観測を行った。また、1998年には W バンドの航空機搭載雲レーダー (SPIDER) を開発し<sup>8)</sup>、ライダーや放射計との同期観測や WMO-01/02観測を行った。CAMPR, SPIDER とともに航空機搭載時以外には地上で観測を行うことが可能で、SPIDER は観測船「みらい」での長期船上観測を行っている。これらの航空機搭載レーダー開発で培われてきた技術は、現在、NICT と JAXA が共同開発している 2 つの衛星搭載レーダー、TRMM/PR の後継機にあたる GPM 主衛星搭載の二周波降水レーダー (DPR)、および EarthCARE 搭載のドップラー雲レーダー (CPR) に引き継がれている。

### 3. マルチパラメータレーダーの利用

前章では、日本で開発されてきた気象レーダーを羅列的に紹介してきたが、気象学的な目的を達成するにはどのようなレーダーや手法が必要であるかという

視点も重要であろう。初めに、気象レーダーの原点である正確な降雨量はどのようにすれば測れるかという問題から述べたい。気象レーダーは、雨滴から散乱される電波の反射強度（レーダー反射因子は雨滴直径の6乗に比例する）から降雨量を推定するため、雨滴粒径分布（DSD）という未知のパラメータを仮定しなければならない。一般には、レーダー反射因子と降雨強度の関係式（Z-R関係）を用いて反射強度を降雨量に変換するが、その係数はDSDに依存し、DSDは降水システムの種類、例えば対流性・層状性降雨によって大きく異なり時間的にも空間的にも変化する。もう1つの大きな問題は降雨減衰であり、周波数が高くなるほどその影響は大きい。Sバンドレーダーは降雨減衰の影響は小さいので、遠距離の台風を捉える目的で富士山レーダーと室戸岬レーダー1号機に採用されたが、その後日本では現業気象レーダーへのSバンドの周波数割当は行われていない。現在の現業気象レーダーで使われているCバンドでは、強い雨の場合は減衰補正を行わないと正確な反射強度を求めることができず、その減衰補正係数もDSDに依存する。なお、降雨減衰が補正できれば、最大観測レンジは周波数には依存せずパルス繰り返し周波数のみで決まるので、Cバンドレーダーでも数100 kmの遠距離観測は可能である。一方、研究用レーダーとして広く使われているXバンドレーダーでは数10 mm/hrの雨が降っていけばそれより遠方はほとんど見えなくなってしまう、KaバンドやWバンドでは強い雨の後方は全く観測することができなくなるので、たとえDSDが分かっても減衰補正による反射強度を求めることはできない。Cバンドの気象庁レーダーによる解析雨量では、地上雨量計（アメダス）による値で換算式の補正を逐次行うという方法で推定精度を上げているが<sup>9)</sup>、雨量計がない海上などでは補正を行うことができないし局所的な降水現象に対しても誤差が大きくなる。そこで、DSDを推定することができると期待されている偏波レーダーの研究が進められているが、代表的な偏波パラメータである水平・垂直反射因子の差（ZDR）からDSDを精度良く推定するのは容易ではなく、むしろ、ZDRや交差偏波比（LDR）または偏波間相関（ $\rho_{HV}$ ）による降水粒子の種別判別（雨・雪・霰・融解層のみぞれなど）や偏波間位相差の空間微分（KDP）を用いた減衰補正に偏波レーダーの威力が発揮されている。偏波レーダーの原理や応用例はBringi and Chandrasekarの教科書<sup>9)</sup>が詳しい。

次に早くから実用化されているドップラーレーダーについて述べる。ドップラーレーダーは降水粒子の動きから風速が計測できるので、降水システム内部の気流構造の研究には非常に有効な観測手段である。しかし、ドップラーレーダーは視線方向の速度成分しか計測できないので、3次元の風速ベクトルを求めるためには2台のレーダーによるデュアルドップラー観測が必須となる。通常は、2台のレーダーの観測時刻を合わせてポリウムスキャンを行うことで、数分間の時間定常性を仮定した上で風速の3成分を計算する。特に、水平発散を鉛直積分して求められる鉛直風速分布は、境界条件の設定などに工夫が必要であるが、降水システムの発達過程や雲物理過程の研究には非常に有力な情報となる。なお、時間定常性の仮定が不要で1台の送信局（レーダー）だけでデュアルドップラー観測が可能となるバイスタティック・ドップラーネットワークは、アンテナサイドローブによる不要エコーの混入の問題やバイスタティック受信アンテナの感度の問題があり、広く普及するには至っていない。日本では、研究用の可搬型レーダーが数多く導入されたことで、多様な地域・季節においてデュアルドップラー観測が行われ、様々な降水システムに関する理解が進んできた。CバンドやXバンドレーダーでは降水粒子がない場所の観測は困難であるが、大気乱流をターゲットとするウィンドプロファイラやエアロゾル等をターゲットとするドップラーライダー、雲粒子をターゲットとするWバンドレーダーなどを組み合わせることで総合的な観測が可能となる。また、リモートセンシングでは観測が困難な物理量やレーダーの校正や検証のためにも、環境場を測るラジオゾンデ観測、地上気象観測、降水粒子の直接観測やDSD観測などが重要であることは忘れてはならない。

航空機搭載レーダーに関しては、地上設置型レーダーでは電波が届かない場所の降水システムを観測でき、最近注目を浴びている数値予報精度向上のための機動的観測（THORPEX）への応用も期待できるが、専用観測機を持たない日本においては運用費用が高額になることもあり、安易に使うことはできないのが現状である。一方、衛星搭載レーダーのTRMM/PRは、サンプリング頻度は少ないがグローバルな降水分布を海陸や地域を問わずほぼ同じ精度で観測することで、気象レーダー観測を気候分野などの研究にまで応用する道を拓いた点で高い評価を受けており、PRの後継機となるGPM/DPRも世界中で多くの分野から

期待されている。

#### 4. 気象レーダーの今後の展開

これまで述べてきたように、気象レーダーは科学的要求と技術開発の両方が組み合わされることで発展してきた。すなわち、気象観測の目的の明確化が新しい技術を生む一方、技術的な発展が新しい気象観測の可能性を生むという関係である。そのため、気象レーダーで科学研究を行う人も観測の限界や問題点を知るためにレーダー技術の基礎知識は不可欠であるし、技術開発の立場から気象レーダーの研究を行う人もその使用目的や応用研究の要求を理解する必要がある。気象レーダーを学ぶためには、数年前までは気象研究ノートの気象レーダー特集(1967, 1972, 1980, 2001<sup>6)</sup>)以外に適当な日本語の総合解説がなかったために英語の教科書<sup>10,11,12)</sup>を使うしかなかったが、最近、レーダー技術と気象観測が詳細に記された日本語の教科書<sup>13)</sup>が刊行されたことは大きな助けとなるだろう。

現在、気象観測の立場から可搬型の研究用レーダーに求められていることは、まずは小型軽量化と安価な普及型レーダー開発であり、技術開発の立場からは、固体化送信機とパルス圧縮技術でそれに応えようとしている<sup>14)</sup>。日本の得意技術である固体化送信機の採用はメンテナンスの手間と時間を軽減するとともに、消耗品である従来のマグネトロンやクライストロン送信管の費用が削減できると期待されている。また、近年気象レーダーに割り当てられる周波数が非常に厳しい状況になってきているが、固体化とパルス圧縮技術は送信電力低減とスプリアス削減により周波数資源の有効利用にも非常に有効である。可搬型 X バンドレーダーの周波数割当てについては、関係者が話し合っただけで周波数をシェアするような努力も必要と思われる。次に重要な観測要求は、竜巻やダウンバーストなどの激しい気象現象や急激に発達する積乱雲などの観測のために、高い時間空間分解能を持つ気象レーダーの実現であろう。現在の気象レーダーは10数仰角のボリュームスキャンを行うために5～10分の時間を要するが、激しい現象を観測するためには1分以内での3次元観測が期待される。電子的にアンテナ走査を行うフェーズドアレイアンテナはその有力候補であるが、現状の仕様では衛星搭載などの目的以外では高価すぎるため何らかのブレイクスルーが必要であろう。

空間分解能の向上は、数 m の距離分解能を実現したブロードバンドレーダー技術<sup>14)</sup>が有望であると思われるが、ビーム幅はアンテナの大きさに決まってしまうので、遠距離ではどうしてもレーダービームが広がってしまう。これを避けるためには、小型で安価なレーダーを数多く配置することが解決策になると考えられる。現業の C バンド気象レーダー観測網でも、遠距離ではビームが広がるだけでなく地球が丸いため下層の観測データが得られないため、現業レーダー観測範囲を補充するような小型ドップラーレーダー・ネットワークの実現が望まれる。現在、関東域において防災科学研究所が中心となって計画している既存の研究用 X バンドレーダーのネットワーク (X-net)<sup>14)</sup>は最初の試みとなるであろう。このようなレーダーネットワークでは、定常的なデュアルドップラー観測も実現でき、竜巻などの突風災害の軽減対策にも非常に有効であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 牧原康隆, 2007: 天気, **54**, 21-33.
- 2) 小林隆久, 2004: 気象研究ノート, (205), 202pp.
- 3) Atlas, D., (Ed.), 1990: Radar in meteorology, Amer. Meteor. Soc., 806pp.
- 4) 岡本謙一, 1994: 天気, **41**, 361-378.
- 5) 迫田優一, 1990: 天気, **37**, 659-670.
- 6) 石原正仁, 2001: 気象研究ノート, (200), 216pp.
- 7) 気象研究所, 1986: ドップラーレーダーによる気象・海象の研究, 気象研究所技術報告, (19), 243pp.
- 8) 熊谷 博 (編), 2002: 地球環境計測特集, 通信総合研究所季報, **48**(2), 248pp.  
<http://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou.htm>
- 9) Bringi, V. N. and V. Chandrasekar, 2001: Polarimetric doppler weather radar, Cambridge Univ. Press, 636pp.
- 10) Battan, L. B., 1973: Radar observation of the atmosphere, Univ. of Chicago Press, 806pp.
- 11) Sauvageot, H., 1992: Radar meteorology, Artech House, 384pp.
- 12) Doviak, R. J. and D. S. Zrnice, 1993: Doppler radar and weather observation (2nd Ed.), Academic Press, 562pp.
- 13) 深尾昌一郎, 浜津享助, 2005: 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 491pp.
- 14) 楠 研一ほか, 2007: 気象学会2007年度春季大会予稿集, (91), B101-B159.