

# 古くて新しい観測装置気象レーダーの話

鈴木 修（気象研究所 気象衛星・観測システム研究部）

はじめに

21世紀に入り、日本でもドップラー機能や二重偏波機能を備えた気象レーダーが実用的に利用されるようになってきています。気象レーダーは1940～50年まで遡る歴史を持ち、ドップラーレーダーによる気象観測もすでに1953年にまでさかのぼれ、古い観測装置です。

ここでは、気象レーダーの歴史、観測原理、利用のされかたなどについて、概要を紹介します。

## 1. 古くて、新しい、その歴史

レーダー(RADAR: Radio Detection And Rangingの略)は、電波を利用した装置です。レーダー装置のアンテナから、マイクロ波を放射し、物体等から反射された電波から、目標物の位置やその他の情報を知ることができます。

最初の実用的なレーダーシステムは、第二次世界大戦中の1940年にイギリスのワトソン・ワットにより発明されました。発明されたばかりのレーダーは、航空機や船の探知などの軍事目的に使われましたが、遅くとも1941年には、強い降水域からの反射信号がノイズとなっていることが実際の運用の中で知られ、気象へのレーダー利用のきっかけとなりました。そして、早くも1953年には鉛直に向けたドップラーレーダーによる、大気鉛直流の測定もなされています。

電磁波がイギリスのマックスウェルによって1864年に予言され、ドイツのヘルツがその存在を実証したのが1888年であることを考えると、発見から約半世紀でレーダーの実用化まで到達したことになります。

米国では第二次世界大戦中から戦後にかけて、気象レーダーの展開が進み、シビアウェザーやハリケーンなどに対する重要な気象観測手段として利用されました。

日本でも、気象庁が1954年には現業用の気象レーダーの導入を始め、1972年に至って全国をカバーするネットワークが完成しています。気象庁以外にも、河川管理などを目的とした国土交通省のレーダー雨量計ネットワークをはじめ、下水道や防災のために自治体が運営するレーダー、降水ばかりでなく発雷予測に重点を置いた電力会社のレーダーなど、かなりの数にのぼっています。

歴史的には、降水強度の観測を行うタイプの気象レーダーが最初に実用的に使われましたが、ドップラー効果を用いて、風の情報を推定が可能なドップラーレーダーの展開も進んでいます。米国では、既に1960年代には研究用に使われました。そして、ドップラーレーダーがシビアウェザー監視に有効であることなどから、1980年前後には現業的なドップラーレーダー網の計画(NEXRAD計画)が

スタート、1996年には全国規模の展開がほぼ終了しています。また、ほぼ同じ頃、藤田博士のダウンバースト現象の発見(1970年代半ば)を契機として、空港付近にダウンバーストなどの低層ウィンドシア現象の探知機能を有する空港気象ドップラーレーダー(TDWR: Terminal Doppler Weather Radar)が、1980年代後半～1990年代前半にかけて、展開されました。

日本においてもドップラーレーダーの利用は、米国同様、当初は研究用でしたが、気象庁が空港気象ドップラーレーダーとして主要空港に1995年から展開を開始したのが現業用としては最初でした。その後、ドップラーレーダーのデータを数値予報モデルで利用(四次元同化など)すると精度が向上すること、スーパーセルという積乱雲内にあるメソサイクロン(数km～10km程度の小低気圧)の検出が竜巻等のシビアウェザーの監視に日本でも有効であることが判ったことから、2005年からは気象庁の一般レーダーもドップラー化が進んでいます。

## 2. レーダー観測の原理

### (1)レーダーとは

図1に典型的なレーダー観測の簡単な模式図を示します。通常気象レーダーは、パラボラアンテナを使って細いビーム状にマイクロ波を絞り、マイクロ波のパルスを毎秒数100～数1000回も送信します。この電波の径路上に雨雲などがあると内部の降水粒子は電波を反射・散乱します。反射された電波の一部は、送信したのと同じパラボラアンテナで受信され、受信器で検波・増幅などの処理がなされ、コンピューター処理などを経て、降水粒子に関する情報がたとえば画像表示されるようになっています。降水などからの反射波はレーダーエコー(エコーは「山びこ」の意味)と呼ばれます。

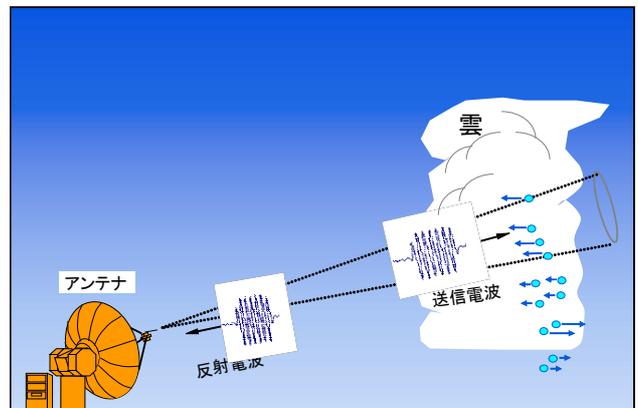


図1 気象レーダーの模式図。アンテナから放射された細いパルス上の電波は、降水粒子等により反射され、受信される。

## コラム: エコー(Echo)

レーダーの分野では、反射波あるいは反射波をディスプレイ上に可視化したものはエコー(echo)と呼ばれます。エコーは、日本語では山彦や木霊のことで、山などで、声や手をたたいて出た音が、山岳などで反射された帰って来て聞こえる現象です。この場合は、音波の反射ですが、メカニズム的には同じです。

ちなみに、エコーは、ギリシャ神話に出てくるニンフ(森の妖精)のことで、自分の言葉がしゃべれないという罰を受け、人の言葉を繰り返すことしかできなくなってしまいました。古代の神話に起源を持つ言葉が最新のテクノロジーに使われているというのも面白いところでは。

### (2)位置(方位と距離)

大気中を伝わる電波は、毎秒約30万kmの速さで、ほぼ直線状に進みます。対象までの距離を測るには、このことを利用します。まず、発射したパルス波が降水に反射されて戻ってくるまでの時間を測ります。これに電波の速度を掛けることで、電波が往復した距離つまり、反射体までの距離の2倍が計算できるのです。もちろん、アンテナの向いている方向が、反射体のある方向となります。これで、反射体の位置が判ることになります。

### (3)レーダー反射強度

気象レーダーでは、受信される電波の強さを表すのに、等価レーダー反射因子 $Z_e$ を用いることがあります。

ここで、 $D$ は球形を仮定したときの雨粒の直径

$$Z_e = \sum D^6$$

(mm)、 $\Sigma$ は和で、単位体積中のすべての雨粒について足し合わせることを意味します。現実の大気中にあるのは球形の水滴ばかりではありませんが、よく使われています。

この $Z_e$ は、単位体積の空間中の反射体(ターゲットと呼びます)からレーダーに届く電波の強さを $\eta$ とすると、レーダー固有の定数( $C$ )と、レーダーからの距離 $r$ を用いて、理論的には次のように書くことができます。

$$\eta = C \left( \frac{Z_e}{r^2} \right)$$

分母を見ても判るとおり、遠距離ほど反射波は距離の二乗に反比例して弱くなります。

また、降水強度 $R$ (mm/h)は、単位時間・単位面積あたりの「降ってくる水の量」であることから、落下速度 $v_t$ を用いると、

$$R = \sum \left( \frac{4\pi D^3 v_t}{12} \right)$$

となります。なお、この式にある $(4\pi D^3/12)$ は直径 $D$ の球形粒子の体積です。

ここで、この $R$ の式と前述の $Z_e$ の式を用い、降水粒子の直径の分布(粒径分布と呼ぶ)と降水粒子の落下速度(上昇流はないものとして、終端速度とする)に関する統計的な経験式を用いることで、両者の関係が次のような簡単な形に整理できます。

$$Z_e = BR^\beta$$

これは、逆向きに解くことで、降水強度 $R$ をレーダー観測から算出できることとなります。これが、いわゆる「 $B\beta$ 法」として知られる手法で、たとえば気象庁では $B=200$ 、 $\beta=1.6$ を使っています。

この $B\beta$ 法では、主留意点が3点ほどあります。

まず、粒径分布に経験的な式が使われていますが、必ずしも現実の降水ではこの経験式が成立してはいません。また、反射強度の値が正確に求められることが前提となつていますが、山岳などの遮蔽物や強い降水による途中の電波減衰などの影響、レーダーの空間分解能などにより、誤差が生じ得ます。さらに、降水粒子が必ずしも球形かつ水滴であるとは限りません。その結果、推定される降水強度の精度には限界があるのです。そのため、応用上は、アメダス雨量を用いた補正や後述の偏波情報を用いて推定する手法の採用などが、必要となります。

### (4)降水のドップラー速度とスペクトラム幅

大気中の降水粒子は、重力により落下しながら、風で流されるなど、複雑な運動をしています。ドップラーレーダーでは、降水粒子の動きによって生じる電波のドップラー効果を利用して、ドップラー速度を測定します。ドップラー速度は風ベクトルのレーダービームに沿った方向の成分で、動径速度ともいわれます。大気中にはたくさんの降水粒子が存在するため、得られたドップラー速度は平均値として得られます。

なお、平均値の回りの散らばりの程度として計算される標準偏差は、スペクトラム幅と呼ばれます。降水粒子のドップラー速度の散らばりであるスペクトラム幅は、風の鉛直・水平シア、鉛直速度が降水粒子毎に異なること、大気乱流の存在の効果と、測定に関わるノイズの影響を反映しています。

### (5)偏波情報

電波は電磁波とも言われる様に、電界と磁界中を伝わる波です。一般に電波の電界中の振動面は、進行方向と直行しています。この振動面の向きによって分類して、水平な水平偏波、垂直な垂直偏波、あるいは、面が回転している円偏波などに分類できます。この情報を使うことで、反射体の形状に関する情報が得られ、降水粒子の種類に関する定性的な推定や、降水量の測定精度を向上させることが原理的には可能です。

たとえば、完全な球形の粒子を観測した場合に、水平偏波でも垂直偏波でも強度は同じ値になりま

すが、扁平な降水粒子の場合には一般には異なります。そこで、水平・垂直の偏波による観測値の比を取ることで粒子の扁平度の情報が得られるわけです。この情報からは降水粒子の種類や、粒子の大きさ(大きな粒子ほど扁平になりやすい)などが求められるというわけです。

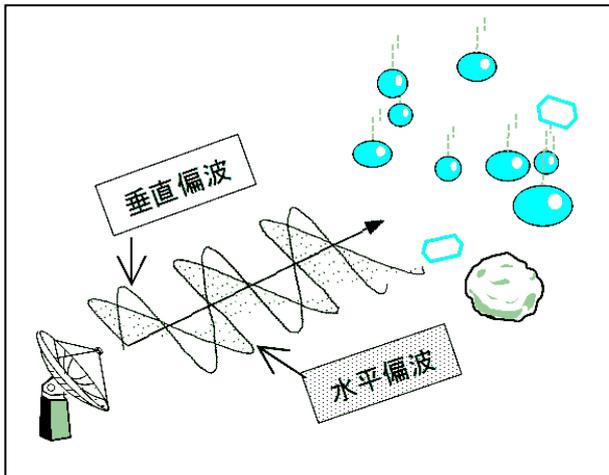


図2 水平・垂直の偏波を用いたレーダー観測の模式図。降水粒子の形状や種類に応じた情報が観測により得られる。

また、降水中を通過する際には、降水量に応じて電波の位相がずれていきます。この量は、途中の降水による電波の減衰や、降水の粒径分布などの影響を受けにくいいため、この情報を使うことで降水強度測定精度が上がると言われています。特に、途中の降水の影響を受けやすい小さな波長の電波には特に有効と考えられています。

#### (5) アンテナの走査方式について

アンテナの動かし方(アンテナ走査法)は大別して2通りあります。

最も一般的なのはPPI(Plan Position Indicator)走査と呼ばれ、アンテナを水平方向に回転させることで、全方位のデータを得ます。通常、複数のアンテナ仰角でPPI走査することで(CAPPI: Constant Altitude PPIとも呼ぶ)、3次元的なデータを取得します。

もうひとつは、方位を一定にしてアンテナを垂直に動かすRHI(Range Height Indicator)走査です。降水雲の断面を見ることができ、鉛直構造を詳細に調べる場合によく使われます。

注: アンテナ仰角とは、アンテナの上下方向の向きを水平面から測ったもの。

### 3. レーダーによる観測の実際

#### 3.1 降水強度分布の観測

##### (1) 単独のレーダーによる観測

複数PPI走査などにより得られた反射強度データは、降水強度へと変換され、単一仰角面あるいは等高度面データとして利用されます。降水強度はカラーあるいは等値線表示により表現され、一目で降水の分布が理解できます。この場合、レーダーは、精度は落ちるものの、地上に密に置かれた

雨量計の役割を果たしています。

なお、偏波情報が得られる二重偏波レーダーあるいはマルチパラメータレーダーでは、降水強度の推定には、単一偏波で観測できる $Z_e$ に加え、垂直・水平偏波観測による反射強度の比(またはデシベル表示では差)である $Z_{dr}$ 、や位相差の変化率である $K_{dp}$ を用いて、より精度の高い降水強度が判ります。

3次元的な降水分布が判ることから、エコーの高さ(エコー頂)を求めることができます。積乱雲の発達程度とその背の高さには相関があることから、エコー頂を用いて雨雲の発達程度を判断したり、強度データや気温の鉛直プロファイルと同時に使用して発雷予測を行うなどの利用法もあります。

##### (2) 複数のレーダーによるエコー合成図

単独のレーダーでも、降水強度分布などは得ることができます。しかし、単独のレーダーでは、たとえば、山などの裏側ではデータが得られない、遠距離では分解能の劣化で精度が落ちる、地球が丸いことにより遠方では地表付近の観測ができない、途中の強い降水により観測精度が落ちる、などで

こういった問題は、異なるレーダーのデータを使って、適切に合成図を作成することで軽減できます。そのため、現業的な気象レーダーの多くはレーダーネットワークに組み込まれ、同期した観測を行っています。

##### (3) 地上の雨量計で補正したレーダーデータ

レーダーから求まる降水強度は、原理的に誤差は避けられません。誤差の原因としては、前項で挙げた理由以外にも、上空を見ているレーダーと地上で測る降水量とが必ずしも一致しない、といったものなど様々な原因があります。

そこで、地上に展開されている雨量計(AMeDASなど)による降水量データを使って補正することで、レーダーの持つ特徴(利点: 高水平分解能で面的分布が判る、欠点: 精度が不十分)と地上の雨量計の持つ特徴(利点: 高精度、欠点: 地点毎の値しか測定できない)について、双方の利点を持ち、欠点がカバーされるようにすることが可能です。たとえば、気象庁による解析雨量は、AMeDASとレーダーにより得られた積算降水量データを用いて作成されています。このデータを用いた降水ナウキャストにも利用されています。

#### 3.2 ドップラー速度分布の観測

ドップラーレーダーで観測されたドップラー速度データは、(ア)複数レーダーを用いることでベクトルの3次元分布を求める、(イ)ドップラー速度場のパターン認識から渦や発散、不連続線の情報を得る、(ウ)数値予報モデルで同化することによる予報精度向上、などの利用法があり、研究や実際の応用も進んでいます。このうち、(ア)は降水現象の3次元構造をほぼ連続的に捉えることが可能なためレーダー反射強度などのデータと組み合わせると気象学的な研究に極めて有効であり主として研究上の

利用が、また(イ)は竜巻等の激しい現象をもたらすスーパーセル(内部に小低気圧の渦を有する)の監視や空港周辺におけるダウンバーストなどのウィンドシア現象の監視に用いられています。(ウ)については、従来は利用しにくかった1台のレーダーによるドップラー速度データについて、数値予報モデルを用いた4次元同化技術が急速に進んでおり、メソスケールの数値予報モデルの精度向上につながると期待されています。

#### (1) 複数レーダーを用いた観測

1台のドップラーレーダーは風の1成分の測定ができるので、3次元ベクトルである風は、3台のドップラーレーダーで測定可能です。ただし、大気の連続性を数式で記述した連続方程式を使うことで、この条件は、2台のドップラーレーダーと緩めることができます。レーダーの配置や性能にもよりますが、1km程度の分解能で特定高度の風を求めることができます。計算の中で使われる連続方程式とは、空気がある場所で消えたり、生まれたりはしない、という当たり前のことを定式化したもので、この場合は風の3つの成分間に成り立つひとつの関係式となります。

2台以上のレーダーを利用することで、風と降水の空間的な情報が得られるため非常にすぐれた手法です。ただし、ドップラーレーダーを複数必要なこと、3次元的な風を算出できる領域は限定されていることなどから、まだ、研究上での利用が主となっています。

#### (2) 1台のレーダーを用いた観測

1台のドップラーレーダーでは、風の1成分であるドップラー速度が観測できます。ただし、あくまでも速度の1成分であり、原理的にはこれからは大気中の風向と風速の分布を決定することはできません。しかしながら、使い方を工夫することによって、極めて有効であることが知られています。

離着陸時の航空機にとって危険な現象として、ダウンバースト現象があります。これは積乱雲や積雲からの強い下降気流で、米国でいくつもの航空機事故を引き起こしたことで知られています。この現象は、空間スケールが数km程度と小さく、数分程度のオーダーのライフタイムを持つ局地現象です。雲からの下降気流は、地表にぶつかりますと水平に広がり、強い発散風をもたらします。発散風の直径により4km以下のマイクロバーストと、4kmより大きなマクロバーストに細分されます。この局地的な発散風は、ドップラー速度場中に、レーダービームの方向に並んだ2つ目玉のような特異なパターンとして認識できます。ダウンバーストの中心のレーダー側に近づく風のピークが、反対側に遠ざかる風のピークがあるため、このように見えるのです。

この現象が発生しているか否か、発散風の強さがどれくらいであるかが問題であるときには、領域内の各点での風向と風速の全てを知る必要は無く、局地的な発散の探知とその強さの算出をすれば目的が達成できます。実際、降水を伴うダウンバースト

現象では、このようなパターンを手がかりに検出ができることから、日本でも関西空港や成田、羽田の3空港にはこの原理を利用した空港気象ドップラーレーダーが設置され、ダウンバーストやガストフロント現象の自動探知・通報などに利用されています。

同様にして、竜巻現象と関連の深い、積乱雲内の小低気圧(メソサイクロン)の検出や、局地的なシアラインの探知などに利用できます。我が国でも、2006年に発生した、宮崎県延岡市や北海道佐呂間町での甚大な竜巻被害などを契機として、現業レーダーをドップラー化し、メソサイクロンの自動検出を行い、数値予報モデルから計算される大気安定度等の各種の指数とを組み合わせて、誤判定を減らすなどの工夫を行った竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストに利用されています。

これらのアプローチに基づいたプロダクトは、気象防災へと直接につながることから、ドップラーレーダーの現業への導入の世界的な流れの動機のひとつでもあります。

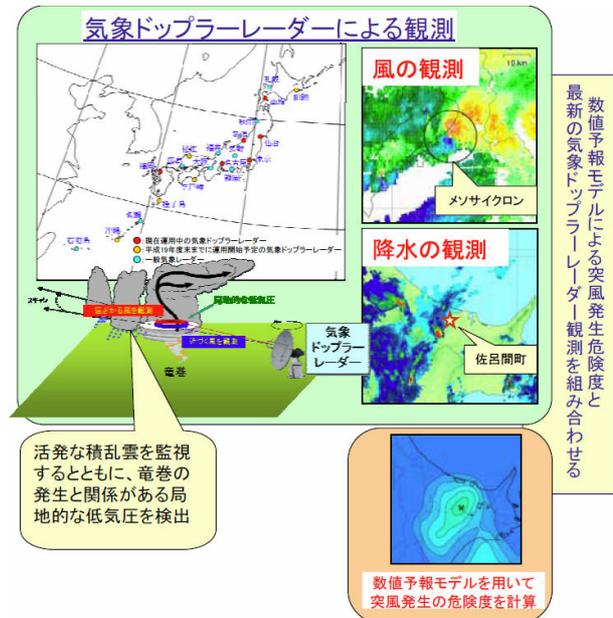


図3 気象ドップラーレーダーと数値予報モデルによる大気環境パラメータを組み合わせた竜巻等突風の監視技術(気象庁による)。

#### (3) ウィンドプロファイラー

ウィンドプロファイラーも、ドップラーレーダーの一種です。いわゆる気象レーダーが主として降水粒子を電波の反射体(ターゲット)としていたのに対し、より長い波長を使うことで大気中の電波屈折率のゆらぎに起因する反射波も検出対象としています。このことにより、晴雨にかかわらず高層風の連続観測ができます。

#### (4) 数値予報モデルを用いたレーダーデータ同化

(1)~(3)では、レーダーデータをそのまま利用することがメインとなっています。一方、それらとは異なるアプローチとして、数値予報モデルに、レーダーデータを同化し、初期値を改善することによ

て予報の精度を上げる手法があります。この手法では、直接観測可能な物理量はもちろん、直接には観測できない3次元的な風ベクトルや水蒸気などの物理量も改善する効果があり、将来の数値予報の精度向上に繋がる技術のひとつとして、開発が進められています。

#### 4. 降水以外からのエコー(非降水エコー)

気象レーダーは、主として降水粒子をターゲットとして観測を行いますが、電波を反射するのは降水粒子だけではなくありません。大別して、地物、海面、あるいは、降水粒子の無い大気からのエコーについて簡単に紹介します。

##### (1) 地面や建物による反射

山や建物なども、電波を強く反射する性質を持っています。その反射波はグラウンドクラッターと呼ばれ、降水域と重なると正確な測定を妨げます。現在の気象レーダーでは、この影響を取り除くために、静止した物体からの反射波を除くフィルター(MTIフィルター)を備えているのが普通です。TV等で見るレーダー画像に、グラウンドクラッターなどによる影響が無いのはこのためです。

ただし、すべてのグラウンドクラッターが除去できる訳ではありません。強すぎる場合や、車や航空機、風力発電の風車など、動きのある物体からの反射波は取り除ききれず、降水の観測を妨げることがあります。

##### (2) 海面からの反射波

海上の波やしぶきも、やはり電波を反射します。これらは、シークラッターと呼ばれます。海に近いレーダーなどで、風が強いときにレーダーを中心とするドーナツ状に見られることがよくあります。これらはほとんど移動しないので、降水エコーと区別できることも多いです。

##### (3) 晴天エコー(エンジェルエコー)

降水がないのに大気中からのエコーが観測される場合があります。この理由としては、①大気の電波屈折率の揺らぎによるもの、②昆虫や鳥などの空中を飛翔・浮遊する生物(主として暖候期)、③空中のその他の小物体(火事の際の飛散物、人工的に撒くチャフなど)があります。ウインドプロファイラーは①を利用しています。

##### (4) 非降水エコーの利用

降水と紛らわしい場合もあり、通常は迷惑な存在といえますが、シークラッターや晴天エコーは、風の情報を得るために積極的に利用できる場合があります。前章で触れたウインドプロファイラーもそのような利用法のひとつです。

また、近年、地物からのエコーを利用して、地表付近の水蒸気を推定する試みもなされています。電波の屈折率は水蒸気量に依存することが知られています。また、屈折率は電波の速度に反比例します。そのため、電波がレーダーと固定点(地物)とを往復する時間を精密に測定することで、屈折率が推定でき、それから水蒸気量が推定できることとなります。その原理はGPS気象学と同様です。

#### 5. 終わりに

現代のレーダーは、降水現象などの観測することで、防災や天気予報など現実の社会生活に欠くことのできない存在となっています。主として反射強度のみであった利用も、解析技術の進化もあって、ドップラーデータや偏波情報の利用も可能となりました。

レーダーデータを使ってダウンバーストやメソサイクロンなどの激しい現象を監視などに加え、数値予報モデルを用いた4次元同化など、利用技術の高度化は今も続いています。

##### 主な参考文献

石原正仁(編):ドップラー気象レーダー、気象研究ノート 第200号、日本気象学会, pp.216, 2001.