

## レーダー解析について\*

立 平 良 三\*\*

## 1. ま え が き

筆者はここ数年来、気象レーダー観測に従事するかたわら、色々の気象現象のレーダー解析と称するものを手掛けてきた。このレーダー解析とは一体どういうものか、またもっと広範囲な学問であるレーダー気象学の中でどういう位置を占めるものであるか、などについて私見を述べてみたい。

筆者の立場はどうしても現業レーダーによる観測資料の利用という面に偏りがちであるので、その点お許し願いたい。特に最近めざましい発展を見せているドップラー・レーダーに関連するもの、および降水粒子以外の気象目標からのエコーについては全くふれなかった。

また、エコーパターンの代表的な類型である線状エコーについて、幾つかの解析の経験から、その生成機構についてどのような考えを持つようになったかということについてもふれてみたい。

## 2. レーダー気象学の諸分野

レーダー気象学の範囲については、人によって多少の差違はあろうが、大まかに言えばレーダーによる気象現象の観測に関連する学問と考えてよからう。ところでレーダーによる観測は、従来の気象観測とは異った幾つかの特殊性を持っている。ここでは、レーダー気象学の諸分野をレーダー観測の持つ特殊性に関連づけて考えてみたい。

レーダー観測の第一の特殊性は、間接測定ということである。通常の気象測器（例えば、雨量計、風速計など）は測定しようとする場所に測器を設置しなければならないが、レーダーは電波を媒体にして遠隔測定ができるのである。遠隔測定といえ、高層観測や、いわゆる

テレメータもこれに該当するが、これらはあくまで感部だけは測定しようとする場所に置かねばならない。レーダーの場合測定点に感部すら置く必要がないので、その結果非常に広い空間内の任意の点の観測を一つのレーダーで担当することができる。また時間的には、電波を連続的に発射し、適当な方式で空間を走査することにより実質上連続的な観測が出来る。

上で述べた特長は、レーダーの気象測器としての優秀性を示すものであるが、もう一つの特殊性として挙げられるものは、気象測器として工合の悪いものである。レーダーは確かに降水粒子の分布を観測するものではあるが、定量的に測定できるものは降水粒子群の電波を反射する能力（レーダー断面積）である。このレーダー断面積なるものは、含水量や降水強度その他の気象量のように直接気象学的に重要な量ではない。

この二つの特殊性のため、以下に列記するような分野がレーダー観測に関連して発生してくることになる。

## 2.1 電波の伝搬に関連するもの

測定の媒介として使用する電波の伝搬径路、およびその径路における電波の減衰（大気、雲、降水などによる）をはつきりさせておく必要がある。

## 2.2 降水粒子のレーダー断面積

レーダーで測定するものは、一つ一つの降水粒子のレーダー断面積ではなくて、その集合の単位体積当たりについてなのであるが、その結びつきを考える上の基礎として、一つ一つの降水粒子のレーダー断面積を知っておく必要がある。そこで、いろいろの形、いろいろの性質を持った降水粒子のレーダー断面積が理論的に導かれてきた。形としては、球形、楕円型など、性質としては、水、氷、水を含んだ氷などが取上げられている。

雨粒はかなりよい近似で水球と考えることができ、また直径が一般にレーダーの波長に比べ充分小さいので、

\* Radar Study of Weather System

\*\* R. Tatehira, 東京管区気象台

—1967年1月10日受理—

そのレーダー断面積は比較的簡単な形で表わされ、直径の6乗に比例するようになる。それで単位体積（通常  $1\text{m}^3$ ）中の雨粒について直径（通常 mm 単位）の6乗を加え合せたものを反射係数と定義している。単位は通常  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  を用いている。

このように反射係数を定義すると、目標が本当に雨粒の場合は、レーダーはその反射係数を測定する測器であるということができる。目標が雨粒であるかどうかははっきりしない場合でも一応形式的に単位体積当りのレーダー断面積から反射係数を算出して、等価反射係数と呼ぶことがある。これはレーダー断面積よりも色々の面で扱いやすいので、レーダー気象学では主としてこの量が使われている。

雲の近似としては水を含んだ氷球（スポンジ状氷球）が研究され、同じ大きさの氷球の約10倍のレーダー断面積を持つことが確かめられている（直径がレーダー波長の半分の場合）。

### 2.3 降水粒子群の諸性質と等価反射係数

降水粒子群の等価反射係数から、その降水粒子群の諸性質（大きさ、密度、種類など）を推定することは重要な問題であるが、降水粒子の種類、粒度分布の多様性のためにせいぜい統計的な段階に止っている。

降水粒子群の一つの属性である降雨強度との関係も、やはり本質的に統計的ではあるが、雨滴の粒度分布にかなりの規則性があるため、雨量強度測定の手段として実用になる所まで進んでいる。ただしこの場合のレーダーの測定可能範囲は、いわゆるレーダーの可視範囲よりは小さく、半径 100km 程度と考えておくべきである。

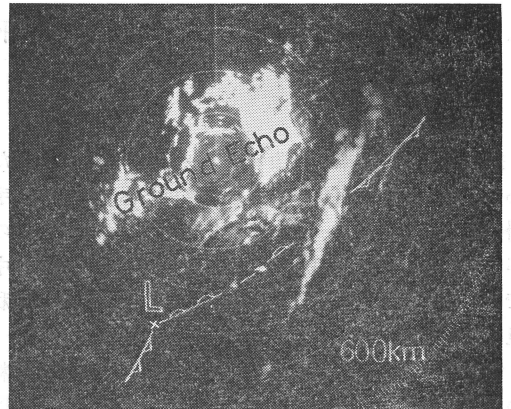
### 2.4 エコー・パターンと気象現象

レーダーは広範囲な空間内の等価反射係数分布（エコー・パターン）を描き出すことができるので、単に各点における等価反射係数をその点の何らかの気象量と関連づけるだけでなく、エコー・パターンと天気系の結びつきを確立することも重要な課題となってくる。場合によってはエコー・パターンの時間的変化が重要な天気系の存在を示すこともある。

今迄によく調べられている天気系としては、雷雨、台風、乱流、突風などがある。特に雷雨に伴うエコー・パターンは、定量的な詳細な調査が進んでおり、エコー・パターンの諸性質より、雷雨の烈しさの程度をかなりの精度で推定できる所まで来ている。

レーダーの可視範囲（通常半径 200~300km）から見て、主としてメソ・スケールの天気系が取上げられてきた

が、富士山レーダーのような可視範囲の大きいもの（第1図）の設置やレーダー合成図の作成によってシノプチック系（低気圧、前線など）との結びつきも除々に調査されつつある。しかし第1図に見られるように、従来の既成概念に合わない例も多く、体系的なモデルの確立までには程遠いようである。また、否定的な結論しか出ないかも知れないが、それはそれなりの意義があろう。



第1図 富士山レーダーによる帯状エコー（1966年10月3日9時）。仰角は $-1.7$ 度で、これが最も遠方まで見える角度である。

### 2.5 測定精度に関連して、

レーダーはもともと飛行機や船舶などの実質上点目標と考えてよいものを探知する目的で作られたものなので、これを降水粒子群のような分布した目標のレーダー断面積の測定に使う場合には、レーダー本来の測定精度の他に、分布目標に起因する気象レーダー特有の測定精度の問題が生じてくる。

レーダーで直接測定するのは降水粒子群からの反射電力であって、これをレーダー断面積（または等価反射係数）に換算するのにレーダー方程式が使われる。レーダーから発射された電波は細いビーム状と考えられているが、実際はビームの中心軸からかなり離れた角度でも僅かながら電波が放射されている。従って目標が広く分散した降水粒子群の場合は、色々の方向にある降水粒子からの反射が、その方向のアンテナ利得に比例して寄与してくる。それ故、気象用レーダー方程式の形は点目標の場合と異なり、著しく複雑になるので、なんらかの適当な近似を考えて、使い易い形にすることが一つの問題となる。

しかし充分精度の高い近似のレーダー方程式を使って

も、目標である雨雲内の降水粒子の分布が場所によって異なっており（特に鉛直方向で）等価反射係数が一様でないときは、やはり誤差がでてくる。つまりレーダーは、雨雲の中のかかなり大きい部分毎の加重平均的な等価反射係数を測定することになるので、レーダーで測定された等価反射係数の分布から、実際の等価反射係数分布を推定することが必要になってくる。この問題については現在の所、雷雲の鉛直分布に色々の型を仮想しておいて、鉛直分布の測定値より実際の分布を推定することが試みられている。

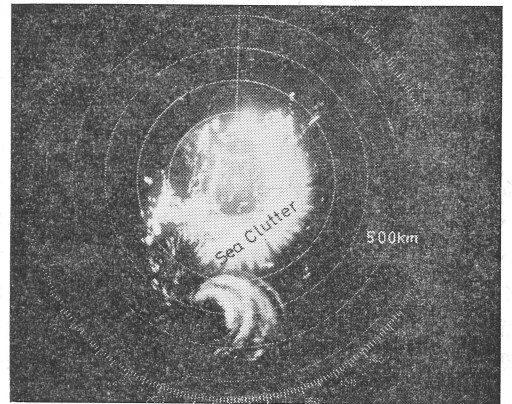
気象レーダーは多数の降水粒子からの反射を同時に受信するために、受信電力の瞬時値は著しく変動する。これは各粒子からの反射電波の間波数が、その粒子の速度によってドップラー偏移を起しており、粒子相互の速度差に応じてビートを作っているからである。レーダー方程式によって、等価反射係数と結びつけられているものは、この変動する瞬時値ではなくて、その平均値である。そこで瞬時値より平均を求める方法、そのときの誤差などが追求されることになる。

## 2.6 データ処理および表示方式

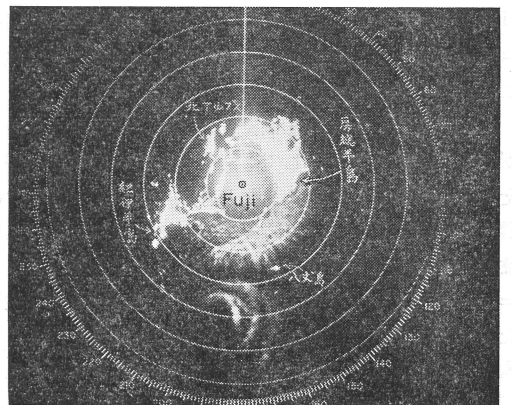
エコー・パターンの諸性質と天気系あるいは気象量の分布との関連が或程度確立されても、広範囲なレーダ可視範囲内の必要なエコーの特性を抽出することはかなり時間と労力の要する仕事である。例えば発雷はエコー頂の高さとよい相関があるが、ブラウン管面に現われている多数の対流性エコーについて一つ一つ高さを測定するのは大変である。そこで、このエコー頂高度のような必要とされるエコー特性を、短時間に抽出し利用しやすい形に表示する装置が必要になる。

レーダーは本来三次元のエコー・パターンを観測できるものであるが、通常のレーダー指示機は二次元 (PPI, RHI スコープなど) 或いは一次元 (THI, A スコープなど) の断面を表示しているだけである。また通常等価反射係数ではなくて、反射電力そのものの定性的な表示である。さらにレーダーは時間的に連続に観測できるものであるから、時間的な変化もうまく表現することが望まれるわけである。このような時間も含めれば四次元にもなる分布を完全な形で定量的に表現することは望めない。それで、それぞれの目的に応じて色々のエコー表示方式、データ処理装置が考案されることになる。等エコー装置、Stepped Grey Scale 表示、CAPI, STRADAP, 積分装置（時間的、空間的）などが今迄開発された主要なものである。

我国で一番普及しているのは、等エコー装置で、これは任意の大きさの等価反射係数以上のエコー域だけを表示する一種のアナログ計算機である。しかし従来の等エコー装置は、受信電力を高倍率で増巾してから計算にかけていたので、現業に使うには安定度、精度に問題があった。最近、応答の早いマイクロ波用可変減衰器を用いて、受信電力をそのまま演算して、等エコー表示をさせる方式が考えられ、富士山レーダーで試用されている。第2図 a, b は台風 6626 号の時の使用例である。この例では、等価反射係数が  $3 \times 10^4 \text{mm}^6/\text{m}^3$  および  $1 \times 10^3 \text{mm}^6/\text{m}^3$  以上のエコー域を示しているが、そのエコー域の中でもエコーの強弱が濃淡によって定性的に識別できるようになっている。



(a)



(b)

第2図 富士山レーダによる台風6626号のエコー (1966年9月24日19時)。マイクロ波減衰器を利用した等エコー表示であつて、(a) は  $3 \times 10^4 \text{mm}^6/\text{m}^3$  以上、(b) は  $1 \times 10^3 \text{mm}^6/\text{m}^3$  以上のエコーを示している。

### 3. レーダー解析

一般にレーダー解析と呼ばれるものは、前節で述べた諸分野のどれに該当するものであろうか。筆者はレーダー解析とは、次の二つの内容を指すものと考えている（もっとも一般的には両者が相互に組合わされているような解析が多いが）。

- (i) 2.4 で述べた、天気系とエコー・パターンの結びつきをめざすもの。つまり色々の特性を持ったエコー・パターンに関連してどのような気象現象、気象量の分布があるかを追求して行くもの。
- (ii) 2.3, 2.4で確立された関係を利用して、レーダーを他の気象学の分野の研究手段とすること。レーダーが利用できる分野としては、雲物理、メソ気象、水気象などが挙げられる。例えばメソ気象解析、雲物理解析の結果降水粒子の生成が期待されるような系がでてきたら、それはレーダー資料によってチェックされなければならない。

人間の生活に関係の深い天気現象が直接結びついてるのは主としてメソスケールの擾乱であるが、現在の粗い気象観測通報網では、うまく把握することがむづかしい。しかしメソスケール現象に適合した観測通報網を布くことは大変なことである。レーダーは、1台で半径数百 km 内の状況を即時に把握でき、メソスケール現象の観測手段として経済的にも充分採算の合うものと云える。ただしこれはあくまでエコー・パターンと天気系の結びつきが確立されておればのことで、従って上記の(i)で述べた意味でのレーダー解析の積重ねによってエコー・パターンに伴う天気系のモデルを作り上げておくことが非常に重要なことになってくる。

しかし今後、エコーと気象量または天気系の結びつきが更に明確化されたとしても何等かのあいまいさは残りそうに思われる。そのようなとき、エコー・パターンに伴う天気系を実況により時々チェックすれば、そのあいまいさをかなりきけることが出来よう。また同じようなエコー・パターンでも、そのエコー・パターンが発生した基本場の構造によって違った性質の天気系を伴うことも考えられるので、常にシノプチック・スケールの場の状況を把握しておかねばならない。要するにレーダー情報は、色々の意味で、他の気象資料と併用することが不可欠なのである。

昔から天気予測の一つの方法として、観天望気が行われ、雲の様相がその主要な要素になっていた。しかし地上の一地点から見える雲の範囲は限られており、また雲

の形態の識別に客観性を持たせることが難しかった。レーダーは肉眼に代り電波の目で、もっと広範囲の状況を観察するわけであるが、エコー・パターンは、ブラウン管に現われた外見が示すように、色々の面で雲の分布に似た性質を持っている。エコー・パターンの状況を記述するのは、雲の記述と同様に、どうしても定性的な部分が残るが、レーダー情報の利用はこの定性的な部分に依存している面がかなりあるように思われる。台風眼に伴うエコー・パターン、トルネードに伴うフック・エコー、持続性のある烈しい雷雨に伴うエコーの特徴などはその単純な数例である。

### 4. 線状エコーの機構

前節で述べたように、色々のエコー・パターンに伴う天気系を追求してゆくことは学問的にも防災業務上でも非常に重要な意味をもっている。レーダーでは色々の型のエコー・パターンが現れるが、比較的単純な類型の一つとして、線状または帯状のエコー・パターンがある。一般に気象現象には線状の構造が多く、例えば、雲列、不安定線、前線などが挙げられる。エコー・パターンにもやはりこの線状構造は頻繁に現れ、しかも集中豪雨、雷雨や雹のような烈しい気象現象を伴うことが多い。それで、このような線状エコー・パターンに伴う系の構造、機構をはっきりさせることは興味ある問題である。

筆者は色々な場（台風、寒冷前線、梅雨前線、季節風の吹出し、など）に現れた線状エコーについて、その性質を調査してみた。レーダーで観測される線状エコーは、通常その巾が十 km～百 km、長さ数十 km～数百 km 程度のもので、その構造を調べるには、高層資料は勿論のこと、地上観測網すら充分とは云えない。しかし幸いなことに線状エコーの場合は、その走向の方向には気象要素の変化はゆるやかであると仮定することによってかなり資料不足を補うことが出来る。

資料の時間変化を空間変化に置き換えることも、資料不足を克服する一つの方法である。この場合でも、レーダーで見て、線状エコーがその形状、性質を保持しながら持続していることが確かめられれば、この時空変換の妥当性を裏付ける大きな証拠となる。つまりエコー・パターンはそれに伴う気流場、水蒸気分布の産物であるから、エコー・パターンの持続性はこれらの場の持続性を示しているものと考えることが出来るわけである。

資料の不足を補う直接的な方法は、勿論、細かい特別観測網を布くことである。しかしこのような観測網は、限られた区域に、限られた期間だけしか設置できないの

で、解析の対象として適切なものがうまく引掛かるとは限らない。一方、ルーチンの観測網は確かに粗いが、解析目的に丁度適合した対象が、観測網の都合のよい場所に位置している時期を任意に撰べるので、それなりの利点を持っている。

線状エコーの生成機構については、まだ確立されたものはないと云えるが、線状エコーの風上端で次々に新しいエコーの発生があり、この部分に新しいエコーを生産する持続性のある擾乱の存在を想定させるような場合がしばしば観測される。このような持続性のある擾乱から次々に放出されたエコーが風下に流された場合、風下の場がエコーの自励的持続に好適なものであれば線状エコーが形成される可能性がある。この場合、エコー生成源である擾乱の動きは、生成されたエコーの移動と異なるものでなければならない。

対流性雲の持続については、鉛直シャワーの効果によってその可能性があることは以前から指摘されている。また地雨性エコーについても、そのエコーに伴う鉛直循環が自励的に行われていることを推定させるような構造を示した例があった。この地雨性エコーの場合でも、鉛直シャワーはやはり必要で、また降水粒子の存在が循環の自励的持続に大きな役割を果していることを示していた。降水粒子が雲粒と異なる点は、大きな落下速度のために、元の飽和気層から離脱し不飽和層中に侵入し、蒸発によってその気層を冷却する可能性を持っているということにある。

このような降水粒子の作用のため、レーダー・エコー（降水粒子群）の線状構造と、降水を伴わない雲の列とは、その生成機構が異なることも予想される。一般に降水粒子の有無がその系の機構に相違をもたらすとすれば、この点からもレーダーは、衛星による雲観測が充実された後でも、やはり独自の気象測器としての有用性を保つてある。

一旦発生したエコーの持続機構は色々考えられてきているが、次々にエコーを吐き出す擾乱の機構についてはまだ殆んど解っておらず、ただ表面的な二・三の性質が明らかにされているに過ぎない。この機構を明らかにすることは、線状エコー生成機構解明のための一つの大き

な鍵と考えられる。しかしこれは、いわば線に対する点の解析であって、線状エコーの解析の場合より更に深刻な資料不足に当面することになる。

今迄述べてきたような考え方は、線状エコー（メソスケール）が発生する可能性を持つ大規模な基本場はシノプチック系により提供されるが、実際どの部分に線状エコーが発生するかはどこに持続的な降水粒子生成源ができるかによって決まるという立場に立つものである。例えば、シノプチック・スケールの対流不安定の場合と与えられた場合、その不安定を顕在化する機構として通常大規模のゆるやかな上昇運動による気層の飽和が考えられているが、降水粒子が移流してくることによっても、蒸発による飽和でその部分が不安定化し鉛直循環が起りうるわけである。

## 5. あとがき

本文で述べたことはすべて通常の気象レーダーに関してであったが、最近になって、気象用ドップラー・レーダーの開発により、レーダー気象学の新しい一分野が開けてきている。ドップラー・レーダーは、雨滴の落下速度の測定によって雨の粒度分布、上昇気流、乱流などを推定できる可能性があり、また降水粒子の水平速度の測定によって、風速を推定することが出来る。ドップラー・レーダーによる水平風速の測定は、「降水粒子の水平運動は風速に一致する」という充分精度の高い仮定に基づいているわけであるから、通常のレーダーで測定した等価反射係数を気象量に結びつけようとするときのようなあいまいさはない。

メソ系内の風速の立体構造の解析に対し、従来の上層風観測網は殆んど無力であったが、ドップラー・レーダーによる実質上連続的な上層風観測は有力な手段となり得よう。風速場（特に鉛直成分）と降水粒子の分布とは雲物理学的過程を介して相互に関係し合っているので、ドップラー・レーダーと通常のレーダーの密接な協同観測は、メソスケール擾乱の解明に大きく寄与しよう。

また本文では降水粒子以外のものからのエコーにはふれなかったが、大気の屈折率の不連続層からの反射を扱う分野も、最近晴天乱流に関連して注目されてきている。