

レーダーエコーのデジタル化**

立 平 良 三**

レーダー気象の分野における最近の大きな流れの一つは、レーダーエコーのデジタル化およびデジタルエコーのコンピュータ処理である (Kessler 他:1971).

米国の気象局では、D/RADEX と呼ばれるプロジェクトによりエコーのデジタル化およびその利用技術の開発を推進し、現業化を目指している (McGrew:1972).

最近の Radar Meteorology Conference (第15回, 第16回) には、D/RADEX の成果が続々発表されている。また、自動的なデジタル化システムが完成するまでのつなぎとして、48個所のレーダーエコーを手作業によって粗いメッシュ (75km) でデジタル化し、合成図作成、短時間予報などに利用している (Smith:1974).

英国には現在まだ現業用の気象レーダー観測網が展開されていないが、レーダーエコーのデジタル化により観測、伝送、処理などの作業を自動化した観測網のシステム開発に取り組んでいる (Taylor 他:1974).

我国の気象庁でも、世界有数のレーダー観測網を高度に利用するため、エコーのデジタル化を検討しようという気運が出てきているので、その目的や方法などについて概観してみたい。

1. デジタル化の目的

レーダー観測の主な特長として次の3点があげられる。

(1) パターンの観測

レーダーは広範囲の三次元空間内の降水粒子分布をパターンとして観測できる。

(2) 即時性

レーダー観測の結果は即時に指示機上に表示される。

(3) 気象情報への変換の必要性

レーダーで測定できるものは降水粒子のレーダー反射因子の分布であって、これから気象学あるいは気象業務に利用できる情報に変換する作業が必要である。この場合、他の気象データを併用することが非常に有効である。

このような特長を持つレーダー観測が十分に利用されるためには、レーダー観測結果を圧縮された無駄のない情報に変換し、迅速に末端利用者 (社会) へ伝達できるようになっていなければならない。レーダー観測の大きな情報量の処理にはコンピュータの利用が不可欠で、コンピュータによる迅速な情報圧縮がなければ利用者への伝送に時間がかかり、せっかくのレーダーの即時性も生かされない。

レーダー情報の変換には、他の気象データ (各種の観測データ、数値予報アウトプットなど) と組合せることが必要であるが、この処理もコンピュータなしでは十分なことはできない。

レーダーエコーのデジタル化は、このようなコンピュータ処理のための大前提である。コンピュータの助力によって、レーダー観測者は人間本来の能力を活かした作業に集中できるわけである。

レーダー観測のコストはかなり大きなもので、観測結果を高度に利用しなければそのコストをカバーできないだろう。レーダーエコーのコンピュータ処理化は、小さなコストの追加によって大幅に利用度を高められるものであると期待されている。

2. デジタル化の方法

(1) デジタル化のメッシュ

レーダーはパルス巾とビーム巾で区切られる目標体積内の平均のレーダー反射因子を測定するもので、これがレーダーの空間的分解能に相当する。気象庁の標準レーダーではパルス幅約300m, ビーム幅は約1.5°である。

* Digitization of Radar Echo

** R. Tatchira 気象庁 電子計算室

しかし実用上はこれ程の分解能は必要なく、また目標体積の大きさが距離によって変わるという不都合があるので、2~10kmのX-Y座標メッシュに変換してデジタル化されるのが普通である。5kmメッシュの場合、最大レンジ300kmのPPI画面は約 10^4 メッシュで構成される。

1つのメッシュは幾つかの目標体積を含むので、この変換の過程で幾つかの目標体積が積算され平均されるわけであるが、レーダーエコーのデジタル化の場合、この平均化は必ず行わねばならない処理である。というのは、降水雲のような多数の粒子からなる目標の場合は、粒子の相互運動のためにエコー強度は烈しく変化し、その平均値をとらねばレーダー反射因子を求めることができないからである。1dB以内の精度で平均エコー強度を求めるためには、なんらかの方法で約30個の(独立な)標本を平均しなければならない。気象レーダーは1秒に約300回の割合でパルスを発射しエコーを受信しているが、1つのメッシュから30個の標本を得るためにはレーダーアンテナの回転速度を落す必要がある。

レーダーエコーのようなアナログ量をデジタルに変換するいわゆるA/D変換器は低コストのものが実用になっており、これで目標体積ごとのデジタル化が行われれば、そのあとの平均化やX-Y座標メッシュへの変換などの処理はミニコンで簡単に行われる。昭和50年度末に完成予定の函館山レーダーでは、平均化処理までされたデジタルエコーを函館海洋気象台の予報課へ伝送する計画になっている。

レーダー観測は三次元的なものであるから、エコーのデジタル化も三次元的に行うのが理想的である。しかし情報量の問題やアンテナ仰角制御の問題があるので、当面特定の仰角(最も遠くまで観測できるような)のPPI画面のデジタル化から着手されるのが普通である(Kessler他:1971)。

(2) 地形エコーの除去

レーダー電波の反射は、降水粒子からだけではなく、地形や海面によっても生ずる。人手によるレーダー観測の場合は、アンテナ仰角操作や地形エコーの記憶にもとづいて、降水エコーのみを取出しスケッチしている。

しかし、デジタル化されたエコーをコンピュータで処理して、自動的に降水エコーのみを取出すのはかなり難しい技術である。具体的には次のような方法があり、それぞれ問題点を含んでいるが、適当に利用すれば人手による識別作業を肩代りさせられる見込みは十分ある。

(a) 地形エコー強度の差引

各メッシュの地形エコーの強度をコンピュータに記憶させておき、それを引算する方法である。これはすぐに思いつく方法ではあるが、気象レーダーのように対数増幅器を使っている場合は、エコー強度測定に非常な精度が要求される。

例えば、地形エコーに重なって、それと同じ強さ以上の降水エコーが存在しているかどうかを識別するだけでも、 ± 1.7 dBの測定精度が要求される。増幅器の精度としてはこの程度のもは何とかかなるとしても、地形エコーの強度が地面状態や電波伝搬経路の変動で数dBは変化することや、アンテナ仰角の停止精度による影響も数dBあることを考えると実用化は困難であろう。

(b) エコー強度の時間変動スペクトラムの利用

前述のように、降水エコーの強度は時間的に烈しく変動している。地形エコーの場合、変動の周波数は数Hz程度で降水エコーの場合の1/10以下である。従って、適当なハイパスフィルターを通せば地形エコーを除くことができる(ただし同時に降水エコーの直流成分も除かれる)。

エコーがデジタル化されておれば、ハイパスフィルターはコンピュータ処理で容易に行える。しかし対数増幅器の場合、エコー強度の変動分は直流分(平均エコー強度)に無関係に一定なので、このようにして取出した降水エコーからは、平均エコー強度(従ってレーダー反射因子)を知ることはできない。

結局この方法を実用化する場合、直線増幅にするか、地形エコーが重なっている部分だけをハイパスフィルターに通すような回路にし、その他の部分では平均エコー強度が求められるような設計にしなければならない。

もともと強い地形エコーの現れる領域では、いわゆる地形性降雨が卓越し、エコー強度から推定される降雨強度の信頼度が低いことはよく知られている。だから地形エコーの重なった部分のエコー強度の情報がハイパスフィルターを通すことによって失われても、あまり問題にならない。ただし降水エコーが地形エコーに重なって存在しているかどうかは、その領域の地形性降雨の強さに大きな影響を与えるので(立平:1976)、地形に重なる降水エコーの有無は重要な情報である。

簡単なテストの結果によると、この方法では、地形エコーより20dB小さい降水エコーの重畳でも十分識別できるようである。また受信機の精度や電波伝搬状態、アンテナ停止精度に厳しい条件を考える必要もない。しか

し送信機の安定性には十分配慮しなければならない。

海面からのエコー（シーエコー）の変動の周波数も降水エコーに比べかなり小さいので、この方法によってある程度除去できる見込みがある。

(c) 合成エコー図および短時間予測エコーの利用

レーダーエコーがデジタル化されれば、各レーダーサイトから集信して合成エコー図を作成したり、補外による短時間の予測をしたりする作業はコンピュータで容易に行える。第3節で述べるように、このような処理をすることがエコーデジタル化の大きな目的の一つなのである。

各レーダーの探知範囲はかなりオーバーラップしているので、一つのレーダーで地形エコーに妨げられる地域でも、他のレーダーでは問題ない場合がしばしばある。従って合成図を作成すれば、地形エコーが邪魔になる領域はかなり減少するものと思われる。

また1時間前の降水エコーパターンを初期値とした1時間予測のエコーパターンを使って、地形エコーのある領域の穴埋めができる場合もあろう。

3. デジタル化されたエコーの利用

レーダーエコーがデジタル化されたとして、これをコンピュータ処理することによってどのような利用ができるかを概観してみよう。

(1) 全国の合成エコー図の作成

デジタルエコーの伝達は生のレーダー画面やスケッチ図に比べてかなり狭帯域の回線でも行える。もし全国のデジタルエコーが中央に集信されれば、合成図の作成はコンピュータによりほとんど即時的に行える。立平他(1974b)は全国のレーダースケッチ図を10kmメッシュでデジタル化し、コンピュータ処理で合成図作成やフーリエ解析をした例を示している。

合成エコー図は空域予報からの要望が強く、また大規模現象と中小規模現象の相互作用を考える上に重要な情報を与える。後述の短時間予報の場合も、個々のレーダーのエコーパターンを初期値にするのでは不十分で、この合成エコー図を初期値にする必要がある(第4節参照)。

(2) 他の気象資料との合成

この作業も人手だけでは十分なことは期待できないものである。当面 AMeDAS などの雨量データとの合成が最も要望されるものである。

レーダーにより推定される雨量は、その絶対値の精度は悪いが、時間的空間的な相対的変動は細かい分解能で表現されるという特長がある。雨量計によるデータはこ

れと逆の性質があり、両者を組合せて始めて精度の高いきめの細かい雨量分布が把握できる(Wilson: 1970)。この細かい雨量分布から、特定流域の積算雨量など、洪水予報に必要な資料は容易に計算できる。

(3) エコーパターンの移動・発達傾向の客観的測定、およびそれにもとづく短時間予報

この問題はデジタルエコーの利用の眼目となるもので、次節でややくわしく説明する。

(4) エコーの細部構造の診断による Severe Storm の検出

三次元エコー分布のデジタル化が行われた場合、コンピュータで自動的に危険な積乱雲を診断する技術も考えられている(Elvander: 1974)。つまりレントゲン写真による病巣の発見をコンピュータにやらせるようなものである。

(5) オフライン処理

以上はオンライン処理として考えられるものであるが、オフラインではレーダーエコーについての各種統計などがある。

4. デジタルエコーを利用した短時間予報

レーダーは実況の即時把握に大いに利用されているが、一般社会の利用者に伝達された時点ではすでに過去の状況である。一般にこの種の情報は、実況と同時に目先の予想も併せて伝達されなければ有効に利用できないという意見が多い。

目先数時間のきめの細かい予想については、中小規模現象が関係するので、大規模現象の数値予報のような力学的方法は当分期待できない。しかし当面の要望に答えるため、幾つかの実用的な方法がテストされている。

(1) 過去の移動の補外

米国における気象レーダーの第一の任務は、Severe Storm (トルネード、雹など)の監視であって、短時間予報も Severe Storm に焦点が当てられている。

Severe Storm は強い対流性エコー群に伴っているので、その過去の移動を補外して短時間予報をする方法が試みられている。対流性エコー群の過去の移動としては、その重心(PPI画面上の)の移動で代表させるのが最も簡単である。また前の観測時刻のエコーパターンとの間の相関(Crosscorrelation)を計算し、最高の相関が得られる位置から求める方法もあるが、計算量がかなり大きくなる。

いずれの方法についても、エコー域がレーダーの探知限界の近くに位置するときは、移動の決定が不正確にな

第1表 エコーパターンの4時間予測結果の成績

Forecasting Technique Mesh Size Initial Time and Data	Persistence	Simple Translation	Translation Modified with Development Tendency		
			10km × 10km	20km × 20km	40km × 40km
09 JST 7 Sep. 1971 (Mt. Fuji radar)	0.28	0.30	0.35	0.43	0.55
15 JST 15 Jul. 1972 (Tokyo radar)	0.13	0.29	0.53	0.67	0.70
21 JST 15 Jul. 1972 (Tokyo radar)	-0.06	0.34	0.31	0.55	0.75
15 JST 23 Jul. 1972 (Tokyo radar)	0.19	0.04	0.28	0.37	0.61
AVERAGE	0.13	0.24	0.37	0.51	0.65

るので、合成エコー図を利用することが望ましい。

米国で行われたテストによると、1時間後の予想位置の誤差(14例の平均)は、実際の1時間の移動距離の20%程度のものであった(Austin 他:1974)。

我国ではレーダー観測の重点は大雨の監視に置かれており、米国のように特定の対流性エコー群のみの予想ではなく、一応探知範囲内の全エコー域を予測対象にしなければならない。

大雨のエコーパターンは時には非常に複雑で、どのようにグループ分けして補外したらよいか判断できない場合もある(特にコンピュータにやらせるのは、パターン認識が不得意なので困難である)。そこで我国では、次のような方法がテストされている。

(2) 対流圏中層の風による移流

小さなエコー域の移動が対流圏中層の風とよい相関のあることはよく知られている。大きなエコー域の移動についても、第一近似として対流圏中層の風による移流を採用すれば、探知範囲内全域のエコーパターンの短時間予測が容易に行える。

さらに精度を高めるために、1時間前のエコーパターンとの比較から、発達衰弱の傾向を見積り、この傾向で修正を加えながら移流させるという方法もテストされている(立平他:1974a)。

第1表は、台風時の4例について4時間予報をした場合の成績を示したものである(立平他:1976)。表中の数字は、4時間予想のエコーパターンと、その時刻の実際のパターンとをメッシュごとに比較して計算した相関係数である。メッシュの数は1000個以上あるので、かなり大きい標本数で計算した相関係数と考えてよい。

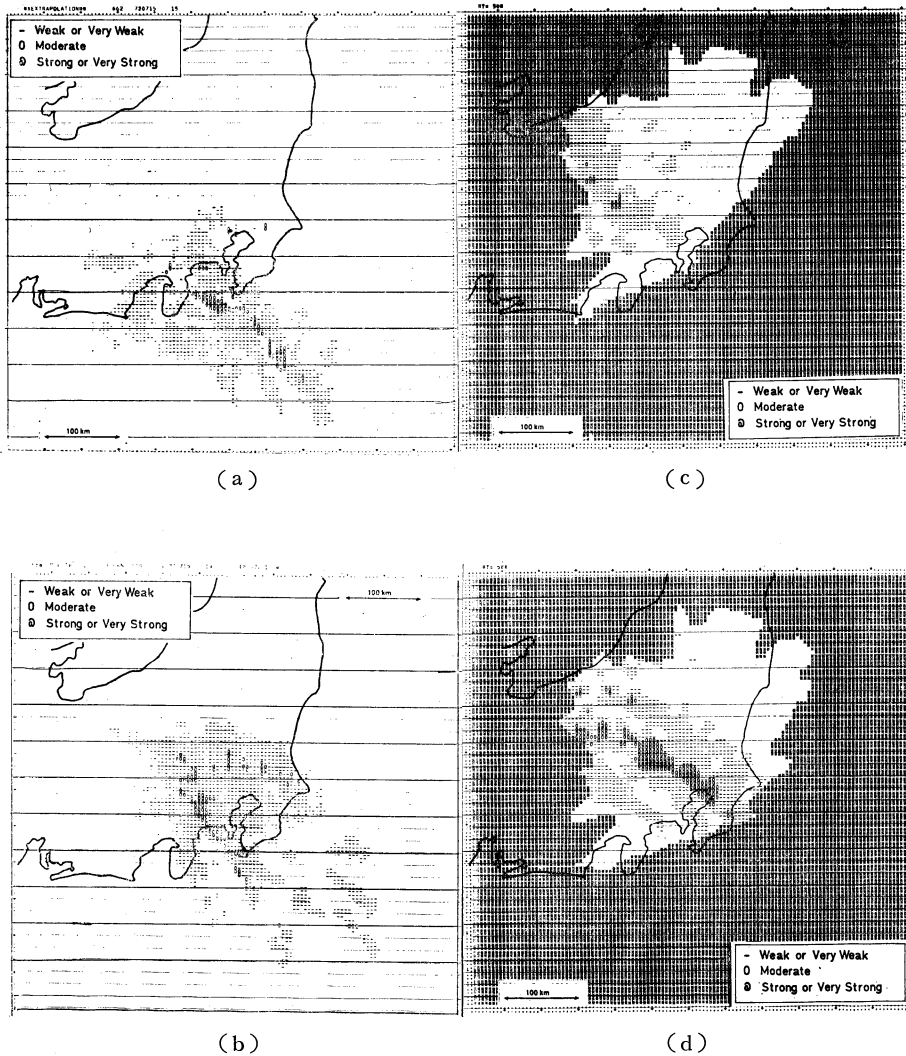
表中 Persistence というのは、イニシャルのエコーパターンがそのまま4時間持続すると予想した場合の成績である。当然のことながら、Persistence→移流(Simple Translation)→発達傾向を補正した移流へと、次第に相関係数が向上している。また、比較のためのメッシュを10km→20km→40kmと拡大すると、相関係数がよくなる。

この表の結果から見ると、4時間予想の結果は、20~40km メッシュぐらいでなら実用になりそうである。20~40km メッシュで予想結果を出せばいいのならば、イニシャルのエコーパターンのデジタル化もそれほど細かいものは必要なく、5~10km メッシュで十分であろう。第1図は5km メッシュのデジタルエコーの予測例であるが、地形エコーを除くためスケッチ図をデジタル化したものを資料としている。

エコーパターンの予測が終れば、それを積算して雨量に換算しなければならない。100km 以内ぐらいなら、適当な Z-R 関係を使って換算することも可能であるが、気象庁のレーダー観測網は少くとも200km までの範囲を受持っており、Z-R 関係によるよりもっと大きな誤差の要因(たとえばレーダービームの拡がりや高度の増加)がある。

幸い最近、密な雨量観測網(AMeDAS)が展開されたので、この実測値でエコー強度を較正して雨量分布に換算するのが最も实际的である。具体的にどのようにして予測エコーと雨実況を組合せ、予測雨量分布図を作るといことは、今後の短時間雨量予測技術の大きな課題である。

米国でのデジタルエコー利用の技術開発は、前述のように烈しい対流雲群の位置の予想と並んで、雨量測定に



第1図 エコーパターンの4時間予報の例（東京レーダー、1972年7月15日15時イニシャル）

- (a) イニシャルのエコーパターン。
 - (b) 4時間後の実際のエコーパターン。
 - (c) 700mb 風で移流して得られた4時間予想のエコーパターン。
 - (d) 発達傾向により修正しながら700mb 風で移流して得られた、4時間予想のエコーパターン。
- (c)(d)の周辺部の影の部分は、レーダーの探知範囲の制限による予測不能域である。4時間程度の予報の場合は、合成エコー図をイニシャルにしなければならないことがわかる。

かなり重点が置かれている。これは米国内の雨量観測網が粗いためと考えられ、我国のように密な雨量観測網を持っている所では雨量予想が最も重要なテーマであると

考えている。

密な雨量観測網があるのなら、そのデータだけをイニシャルとして補外的な短時間予想をすることも考えられ

るが、海上からの雨域接近が予想できないこと、また雨量計のデータは局地性が非常に強いことなどのため、レーダーエコーと組合せねば十分な精度は期待できないだろう。

5. あとがき

レーダーエコーのデジタル化およびデジタルエコーのコンピュータ処理は、レーダーの高度利用のための基礎といえる。レーダー観測の長所である即時性、広範囲性もコンピュータ処理と結びついて始めてその威力を発揮できるものと考えられる。

現在の気象庁におけるレーダー観測作業の中には、コンピュータに処理させるとかなり複雑なシステムになるものも含まれているので、当面は適当な Man-Machine Mix 的な処理システムでスタートするのが実際的であろう。

たとえばエコー頂高度の測定などは、コンピュータで処理しようとすれば三次元エコーパターンのデジタル化が必要となり、アンテナ操作やコンピュータ容量の増加に大きなコストがかかる。またエコー域の移動速度の測定、台風中心の決定などもコンピュータには苦手な作業で、適当に人手を Mix するのが合理的であろう。

参考文献

Austin, G.L. and A. Bellon, 1974: The use of digital wather radar records for short-term pre-

cipitation forecasting. Quart. J.R. Met Soc., 100, 658-664.

Elvander, R.C., 1974: The relationship between digital weather radar data and reported severe weather occurrences. Preprints 16th Radar Met. Conf., 333-336.

Kessler, E. and W. Wilson, 1971: Radar in an automated national weather system. Bulletin Amer. Met. Soc., 52, 1062-1069.

McGrew, R.G., 1972: Project D/Radex (Digitized Radar Experiments). Preprints 15 th Radar Meteorology Conf. 101-106.

Smith, D.L., 1974: The application of manually digitized radar data to short-range precipitation forecasting. Preprints 16th Radar Met. Conf., 347-352.

立平・牧野, 1974 a : デジタル化されたエコーパターンの予報への利用. 研究時報, 26, 187-199.

立平・牧野, 1974 b : デジタル合成エコー図から見た梅雨前線の降雨域. 天気, 21, 399-403.

立平, 1976 : 雨滴成長を考慮した地形性降雨の計算. 天気, 23, 2. 95~100.

立平・佐藤・牧野, 1976 : エコーパターンの短時間予報. 研究時報, 28, 61-70.

Taylor, B.C. and K.A. Browning, 1974: Towards an automated weather radar network. Weather, 29, 202-216.

Wilson, J.W., 1970: Integration of radar and raingage data for improved rainfall measurement. J. Appl. Met., 9, 489-497.