

レーダ雨量計について

元 田 雄四郎

1. 流域管理からみた気象用レーダ

降水量は、流域水収支の供給源として以後の水文過程の入力となっている。降水量は流量と共に水文サイクルの中で定量的に測定できる重要な部分であり、従来雨量観測に大きい関心をもたれたのもこの理由による。

流域における水に関する問題は多岐に亘っているが、大きく分ければ水資源に関する分野と災害に関する分野とに分けられる。これらの分野を取扱う上で基本的条件となるのが降水量に関する知識や情報である。すなわち、水資源の有効利用や適切な災害対策を行うためには、どうしても降水量に関する長期、短期的予測や正確な統計的特徴の記述が必要となる。

降水量に関する流域管理の中で、気象用レーダがどのような役割を果し、その機能をどう位置づけるかは、管理技術の面からも重要なことである。

水資源の有効利用については、利水設備（例えば大容量ダム）の性格上長期の雨量予測にまつ部分が多く、気象用レーダによる予測限界をはるかに超えるものであるため、この分野でのレーダ利用の効能は少ない。

従って、気象用レーダが最も有効に機能するのは、大雨時における流域災害や河川災害の予知予測であり、短期のダム運用の分野である。

筆者が、気象用レーダを大雨時の流域災害や短期間の河川予報へ利用する提案を行ってからすでに20年になる。当時は、レーダで雨量を測定することについて悲観的な情勢にあったが、たまたま、雨量測定を目的に設計したレーダを使用する機会があり、数年に亘り観測を行った結果、十分実用できる見通しを得ることができた。レーダ雨量計とは、このとき名づけた気象用レーダの呼称である。最近にいたり、この種の雨量測定可能なレーダが建設省や電力会社等で河川運用等に実用化されるようになり、今昔の感をもつものである。

気象用レーダを現業的に河川運用や災害予知に利用するためには、なお、多くの研究課題が存在するが、多くの調査研究も進んでおり、雨情報のセンサーとして定着する時期も遠くないものと期待するものである。

2. レーダによる雨量測定の原理

雨または雲などの水滴の量と電波の反射量との関係についてはRyde (1946) が理論的な論文を発表し、その後多くの研究や実験によりその関係がつまびらかにされている。

一般にレーダ波が、降雨や雲などの反射目標から反射して返ってくる平均受信電力 $\bar{P}_r$ は、次式で表わされる。

$$\bar{P}_r = \frac{P_t A_e h}{8 \pi r^2} \Sigma \sigma \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで P_t ：送信電力 h ：送信パルス幅 r ：反射目標までの距離 A_e ：アンテナの有効開口面積
 $\Sigma \sigma$ ：反射目標の後方散乱断面積

さて、(1)式において反射目標が雨滴の場合 $\Sigma \sigma$ は

$$\Sigma \sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \Sigma N D^6 \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ここで、 λ ：波長 D ＝雨滴の直径 N ：単位体積中の雨滴の個数 K ：誘電率に関する項

また、雨滴の反射係数 $\Sigma N D^6$ と降雨強度との間には一定の関係が成り立つことが実測されており、MarshallとPalmerは次の実験式を得ている。

$$\Sigma N D^6 = B R^\beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

R ：降雨強度 B, β ：雨の種類により定まる定数

したがって(1)(2)(3)式から、距離 r 地点の降雨による反射波の平均受信電力 $\bar{P}_r$ は、レーダ定数 C (C はレーダ装置の諸元によって定まる定数)を導入して

$$\bar{P}_r = \frac{C F B R^\beta}{r^2} \cdot 10^{-0.2 k \int_0^r R^\alpha dr} \quad \dots\dots\dots (4)$$

k, α ：電波の雨滴による減衰係数 (db/km) F ：レーダ補正係数

ここで距離 r はレーダのパルス送信時よりの時間 t で与えられるから、降雨強度信号は送信パルスに同期した時間関数となる。(4)式の両辺の対数を取り、減衰項を $10^{-0.2 k r}$ と単純化すれば

$$\log \bar{P}_r = \log C F B - 2 \log r + \beta \log R - 0.2 k r \quad \dots\dots\dots (5)$$

これを $\log R$ について解く。

$$\log R = \frac{1}{\beta} \{ \log \bar{P}_r + 2 \log r - \log C F B + 0.2 k r \} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで演算機の回路構成を簡単にするには、信号を方向性信号とする必要があり $R_o \cdot P_{r_o} \cdot r_o$ を導入し、上式を変形する。

$$\log \frac{R}{R_o} = \frac{1}{\beta} \left\{ \log \frac{\bar{P}_r}{P_{r_o}} + 2 \log \frac{r}{r_o} + \log \frac{P_{r_o} \cdot r_o^2}{R_o^2 C F B} + 0.2 k r \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって(7)式右辺第1項の $\log \frac{\bar{P}_r}{P_{r_o}}$ は、受信電力信号の対数出力の P_{r_o} 以下のレベルをスライスした信号波形である(図1 a)。

右辺第2項 $2 \log \frac{r}{r_o}$ は、距離 r をレーダパルス送信時よりの時間 t におきかえることにより、時間軸を基準とした対数波形で示すことができる(図1 b)。

右辺第3項はレーダ定数のほか、降雨定数 B, β に関係する定数であり B, β を設定することにより定

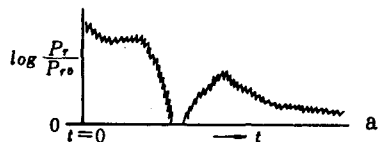
まる振巾のゲート信号として
与える (図1 c)。これら各項
の信号と第4項の降雨による
減衰の補正項の信号を加えれ
ば、降雨強度 R の対数信号
 $\log \frac{R}{R_0}$ が得られる (図1 d)。

以上のようにして、雨滴の
粒度分布に関する係数 B , β
および減衰の係数 k がわか
れば(7)式により雨量強度 R
を求めることができる。

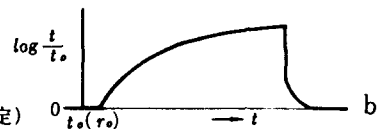
3. 雨量測定の方法及び結果

筆者らが行ったレーダによ
る雨量測定の実験を紹介しよ
う。まず、レーダサイトから
約20km離れた所に比較試験地

$\log \frac{\bar{P}_r}{P_{r0}}$: 受信電力信号波形
(零レベルは P_{r0} の
信号に相当する。)



$2 \log \frac{r}{r_0} = 2 \log \frac{t}{t_0}$: 対数波形
($t < t_0$ 以下は零レベルに固定)



$\log \frac{P_{r0} r_0^4}{R_0 C F B}$: $B\beta$ ゲート信号 $\log \frac{P_{r0} r_0^4}{R C F B}$



$\log \frac{R}{R_0}$: 上記3信号および第4項の
補正項の信号を加えたもの

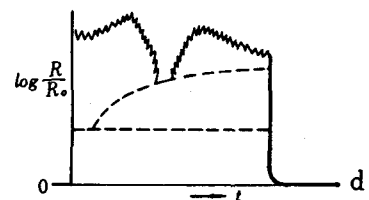


図1 雨量演算過程における信号波形

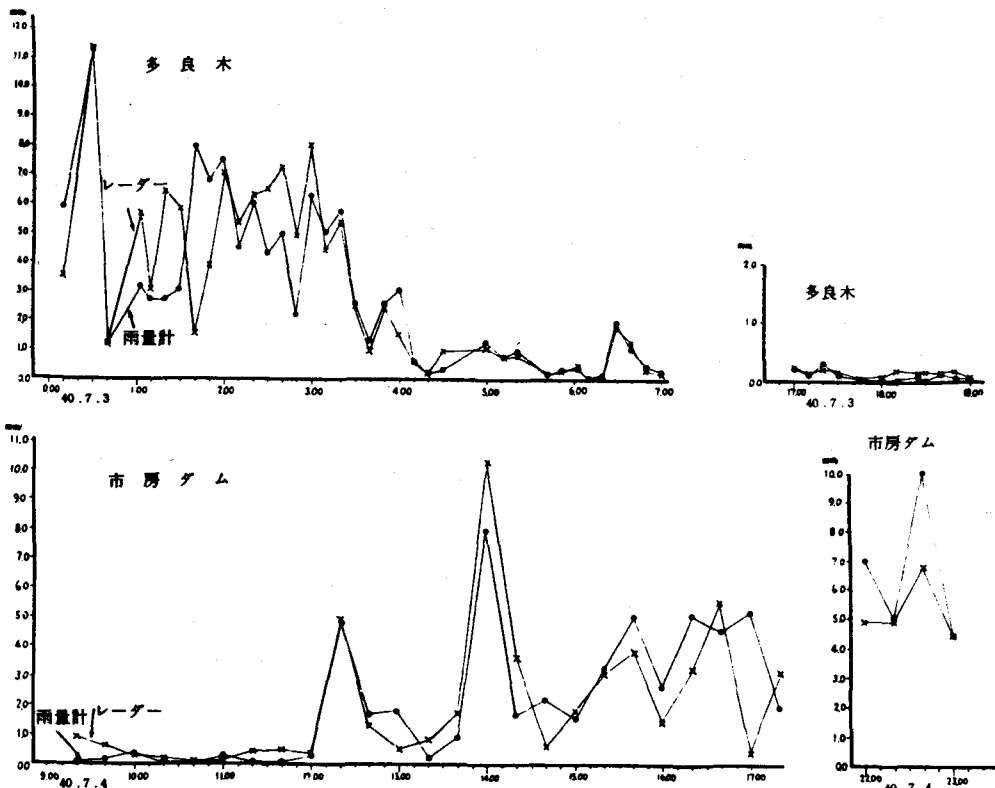


図2 レーダと雨量計による面積雨量測定値の比較 (B , β を固定)

(約100km²)を設け、この地域内に15台の早廻しの自記雨量計をおいてレーダとの同時測定を行った。

レーダによる測定方法は、降雨定数 B 、 β を固定して面積雨量を観測する方法と対象地内の雨量強度計の雨量強度とレーダの点雨量が等しくなるように B 、 β を補正し、この B 、 β を使って面積雨量を測定する方法とで行った。

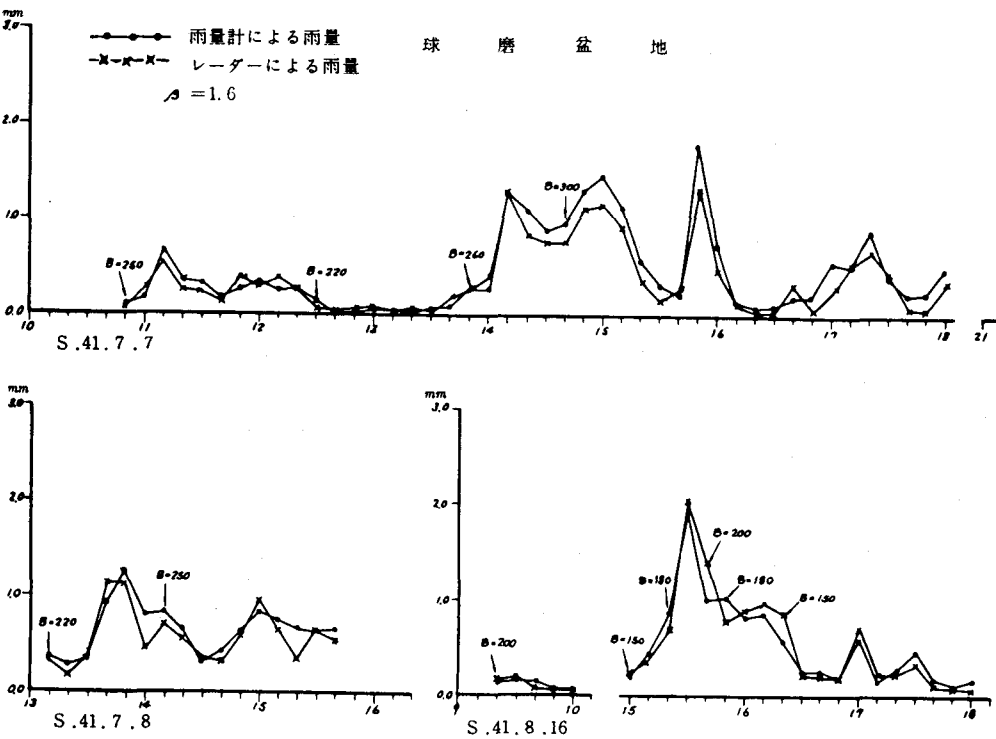


図3 レーダと雨量計による面積雨量測定値の比較
(地上雨量計より $B \cdot \beta$ を補正)

表1 雨量計とレーダによる面積雨量の比較 (1966. 単位mm)

日 時 測定法	7月7日 11～18時	7月7日 21～22時	7日8日 13～16時	8月16日 15～18時	9月9日 8～12時	9月18日 8～16時
雨 量 計	18.4	10.2	10.3	10.1	12.1	17.9
レ ー ダ	14.8	9.5	9.4	10.4	12.8	17.5

B 、 β を固定して測定したレーダ雨量と雨量計雨量の比較は、図2に示すようにあまりよい対応ではなかったが、地上の雨量強度により逐次 B 、 β （主に B ）を補正しながら測定した値は、図3に示すようにかなり良い対応を示している。合計雨量も表1に示すような良い結果が得られた。

このように良く設計されたレーダにより、地上雨量計の雨量強度から補正係数（ B 又は F ）を求めて、面積雨量を測定する手法は気象学的な意味づけは別として、実用的には十分な精度が得られることを示している。

4. レーダによる雨量測定上の問題点

レーダによる雨量の測定には、多くの誤差要因が存在する。大別して装置側に起因する誤差と気象面から生じる誤差に分けることができる。ここでは主に気象面すなわち降水現象にもとづく誤差について検討を行う。

レーダによる雨量の測定は、雨滴の集合体（この雨滴は時間的空間的に変動する）を拡がりをもったビームで統計量として捕捉し定量化を行っている。従って、この測定の原理から云って雨の絶対量を直接に測定しているわけではない。

この降雨現象にもとづく誤差としては、一般に B , β の設定誤りによるもの、雨滴の吹き流され現象、上昇下降気流による落下速度の変化、蒸発の影響、ブライトバンドの存在や降雨断面の強度の変化、途中降雨による減衰、地上雨量の測定に関するもの等が考えられる。

4.1 B , β の設定誤り

レーダで雨量を測定する際、 B , β はその雨に最適な値をとる必要がある。しかし、 B , β の値は様々な降雨のタイプにより、かなり広い範囲で変化する。筆者らの測定結果によれば B は 90~400, β は 1.2~1.7 の間にばらついた（図 5）。ただこれらの値は雨の種類によって大体の中央値が求められており、表 2 にその例を示す。

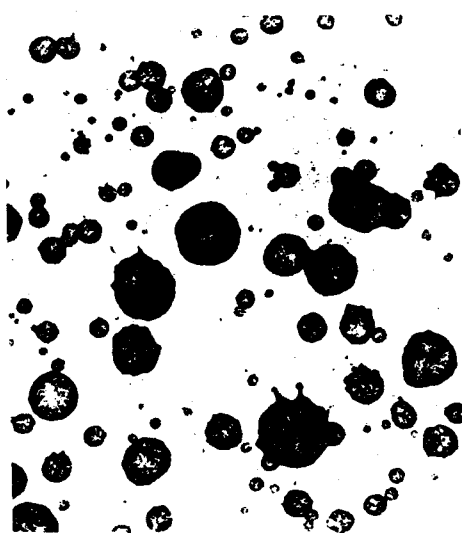


図 4 ウォーターブルー紙による雨滴痕

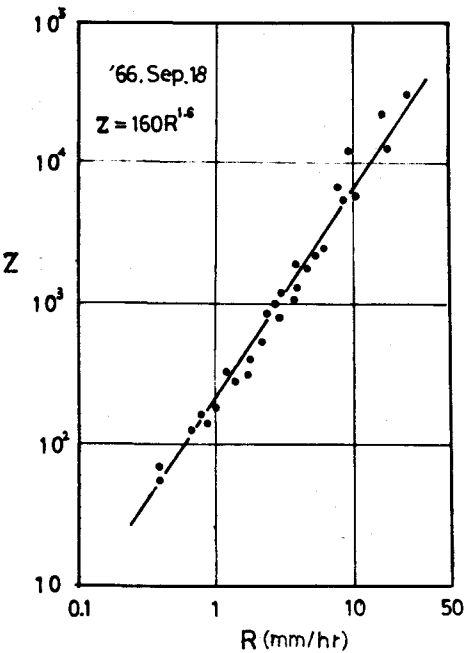


図 5 $Z \cdot R$ 関係の観測例

また、反射因子 Z には β よりも B の方が大きくきいてくるため、 B の値を注意深く選んだ方が良い。現在、 B 、 β をリアルタイムで計測する技術は十分でなく、実用的には地上で測定した雨量強度から B 値又は F 値を求めて補正した方が簡単で精度が良い。

表2 雨の種類別の B 、 β

雷雨	$B = 450$	$\beta = 1.46$
しゅう雨	$B = 300$	$\beta = 1.37$
地雨	$B = 205$	$\beta = 1.48$

4.2 雨量測定高度の違いによるもの

(1)雨滴の吹き流され

雨滴の落下線は、その粒径に見合う落下速度と風とのベクトルを描いている。たとえば、直径1mmの雨滴が高さ2000mから落下する際10m/sの風があった場合、地上まで8分の時間がかかり、流される距離は5kmにも及ぶ。

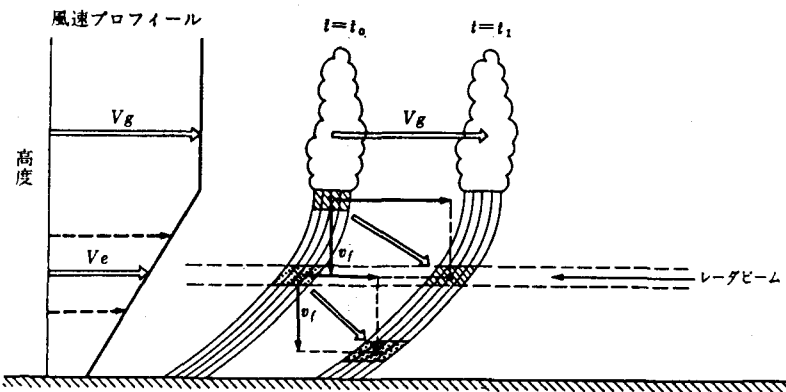


図6 上層風速と雨滴の吹き流され (立平)

レーダでこの雨を測定する場合かりに点源であったとしたら測定地点の風下5kmの雨量計と対応させる必要がある。実際には降水現象はかなり広い面積要素をもつため、この傾向は極端に出ないが、降雨域の構造は強雨セルや局地的なスコールラインより構成されていることが多く、地上雨量との対比には注意する必要がある。

(2)雨滴の粒度分布の違い

一般に雨は、小さい粒径から大きい粒径の雨滴により構成されており、それぞれの落下速度は大きく違う。このため途中の風により吹き分けの現象が生じる。

このような吹き分け現象は雨量測定上2つの意味をもつ。つまり、レーダで測定する上層と雨量計で測定する地上とで雨滴の粒度分布が異なること、及び地上においては雨域が広がることである。

雨滴分布の変化は、地上で求める B 、 β とレーダで測定する層の B 、 β が違ってくる可能性がある。また、地上における雨域の拡がり雨量計に入る雨量強度をうすめる作用をする。

同質の雨域が広い場合はこの現象は打消されるが、セル状や局地性の雨の場合は影響が大きい。

(3)上昇気流による落下速度の影響

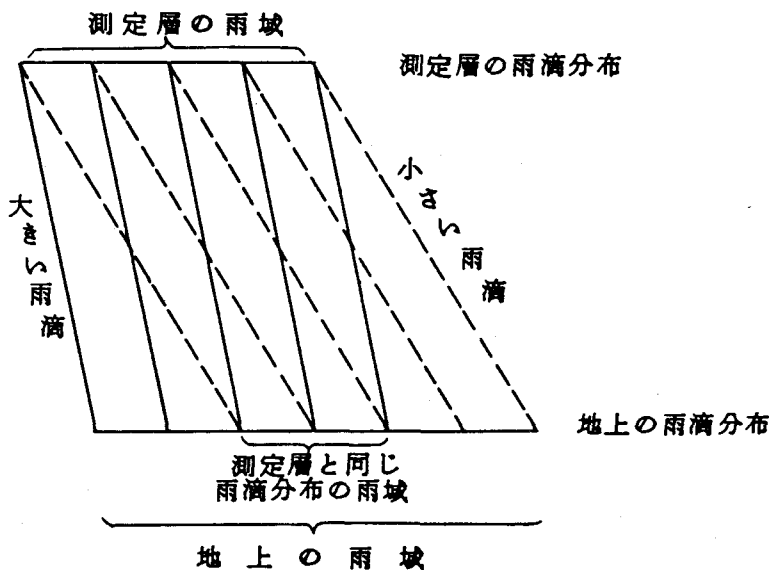


図7 雨滴吹き分けの影響

レーダ方程式における受信電力 $\bar{P}_r$ に寄与する $\Sigma\sigma$ は静止空気中における雨滴の自由落下を前提にしている。しかしながら、実際の降雨の場合は雲中雲下において上昇気流や下降気流が生じており、同じ直径の雨滴でも落下速度に加速、減速が起っている。

例えば、上昇気流として 1m/s を与えて Z を計算した場合、雨滴の自由落下の場合より 1db 大きくなり、雨量比として数%の誤差を与えることになる。

(4)雨滴の蒸発の影響

雲下において湿度が 100% 以下である場合は雨滴は蒸発によりその質量を減ずる。この減少の仕方は雨滴が小さい程著しいものである。雨量に貢献する大粒子の蒸発による損失は少ない

し、降雨中は湿度が殆んど 100% に近いため無視できる程度であるが、雲下が乾いている場合は、かなり強い雨(数 mm/hr)でも雲下で消滅する場合がある。

(5)ブライトバンドの影響

ブライトバンドは、雨量測定上非常にやっかいな問題である。寒候期はその現われる高さも一般に低い。

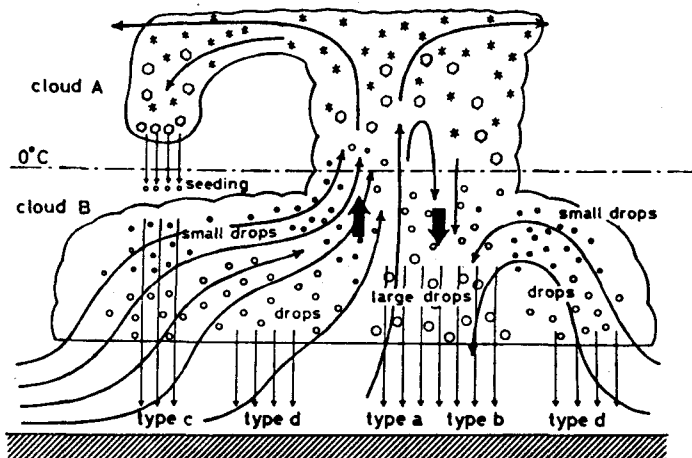


図8 積雲と層状雲の相互作用にもとづく降水モデル(武田)

九州の場合平均的に3～5月は3000～4000m, 6～8月は4000～5000m, 9～11月は2000～4000m, 12～2月は1000m前後となっている。

ブライトバンドは、雪が0°C層を通過するとき解けて表面に水膜が生じ、反射強度が急速に増加するもので雨滴の10倍以上に及ぶこともある。

(6) 途中降雨による減衰

目標地点の途中に降雨がある場合その降雨によって電波の減衰を生じる。減衰は波長によって異なり、表3の値をとる。

波長が5.6cm, 10cmの場合は降雨による減衰はあまり起らないが、きわめて強い雨が広範囲に降っている場合は無視できない。

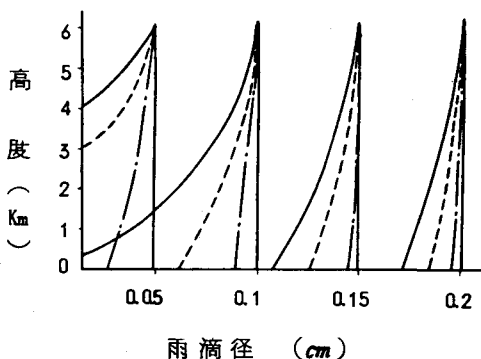
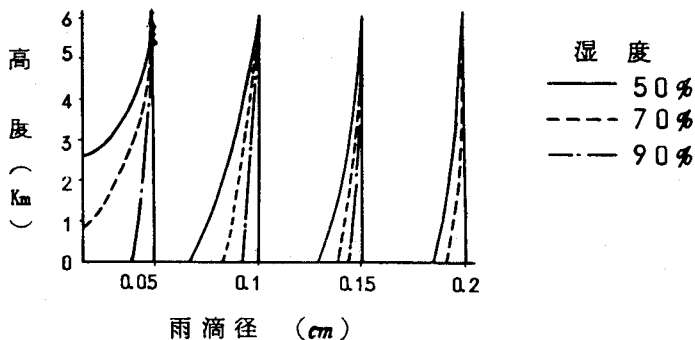


図9 落下中の雨滴の蒸発。(上) 標準大気。(下) 夏季大気

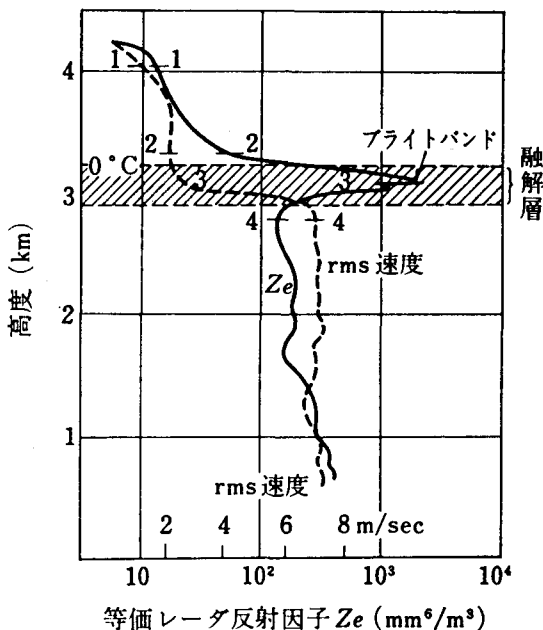


図10 Zeの高度分布

表3 波長別減衰量

λ (cm)	雨量(mm/hr)			
	1	10	50	100
3.2	0.0055	0.110	1.01	1.98
5.6	0.0013	0.017	0.12	0.35
10.0	0.0002	0.003	0.014	0.021

$$(B=200, \beta=1.6, db/km)$$

5.6cmの波長で50mm/hrの雨が途中30kmの間降っている場合、3.6dbとなり往復7.2dbの減衰をうける。

(7)地上雨量測定の問題

レーダにより測定した雨量と対応させるための地上雨量の測り方も検討する必要がある。先に述べた雨滴の吹き流されや吹き分け、落下時間のずれ、面積雨量換算の正確さ、風を伴った場合の雨量計の雨滴捕捉率等を十分考慮する必要がある、地上雨量測定誤差をレーダ雨量測定誤差へ転嫁させないようにしなければならない。

5. レーダによる実用的雨量測定法

レーダによる雨量測定は、以上述べたように測定原理からもまた関係する影響要因の複雑さからみても、雨の絶対量の測定を期待することは難しい。

また、レーダによる雨量測定の誤差要因のうち補正可能なものと不可能なものが含まれている。 B 、 β の最適選択や降雨による減衰等は補正可能であるが、降雨の測定高度差に基づく誤差などは補正は難しい。

流域管理の面から、われわれがレーダに期待するのは降雨の相対的強度の分布であり、この正確な分布がわかれば、これを定量化する方法を考えることにより流域の量的降雨状況を知ることができる。

レーダにより面積雨量を正確に測定するという目的を達するためにはつぎの様な注意を守る必要がある。

1) ビーム高度をつとめて下げる。

雨滴の吹き流れ、蒸発、上昇・下降気流、鉛直断面の Z の変化などによる誤差は殆んどがレーダ測定層と地上との測定高度差に基づいて生じている。

これらの誤差要因が除かれない限り、レーダで測定する雨と地上に到達する雨はそれぞれ別の雨である可能性がある。

2) 雨量テレメーターの実測雨量から $F \cdot B$ 値を補正する。

雨の粒度分布に関する B 、 β の設定誤差は、気象面における誤差のかなりの部分と考えられている。 B 、 β の値をリアルタイムで求めることは現在のところ難しいため、ある地点の雨量テレメーターの雨量強度とレーダ受信電力より逆に B 、 β を求め、この B 、 β 値を使って流域の雨量を定量化する方法が現実的である。

また、レーダ雨量と地上雨量との補正係数である F 値（これは個々のレーダによって違った定数でもあ

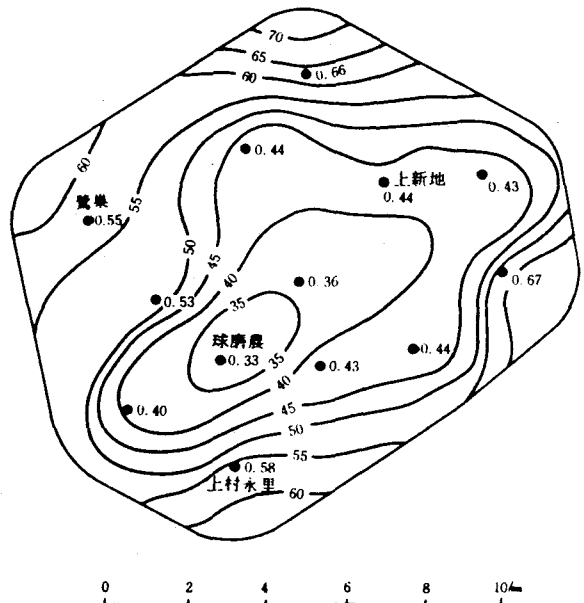


図11 雨量 (P_i/P) の標準偏差の分布

る) もレーダの安定性からいって、かなり乱雑ではあるが B に含ませて補正する。

ただ、補正用の雨量計は、短時間の雨量強度が測定されテレメーターでできることが望ましく、 B 、 β の地域分布や降雨の局地性からみて複数が必要な場合もある。

雨量強度の比較は、レーダ、雨量強度計とも連続的な時間平均処理をして自動的に行うことができよう。

3章であげたレーダによる雨量測定結果が地上雨量とよい対応を示したのは、以上の点に十分留意して実験を行ったためと考えられる。

6. レーダによる雨の短時間予測

6.1 レーダによる雨量予測法

気象用レーダは、雨量の相対的強さの測定と共に降雨の平面的又は立体的強度分布やパターンを表示してくれる。広域の降雨状況の詳細な平面分布を経時的にリアルタイムで監視できることは、気象用レーダのすぐれた機能である。

このようなレーダ映像が雨の予測に利用できないかと云う期待は誰もがもつものであり、現在も定性的な予測の情報として使われている。

レーダで観測された降雨状況から以後の降雨の予測を行うためには、雨域の移動及び発達・衰弱に関する

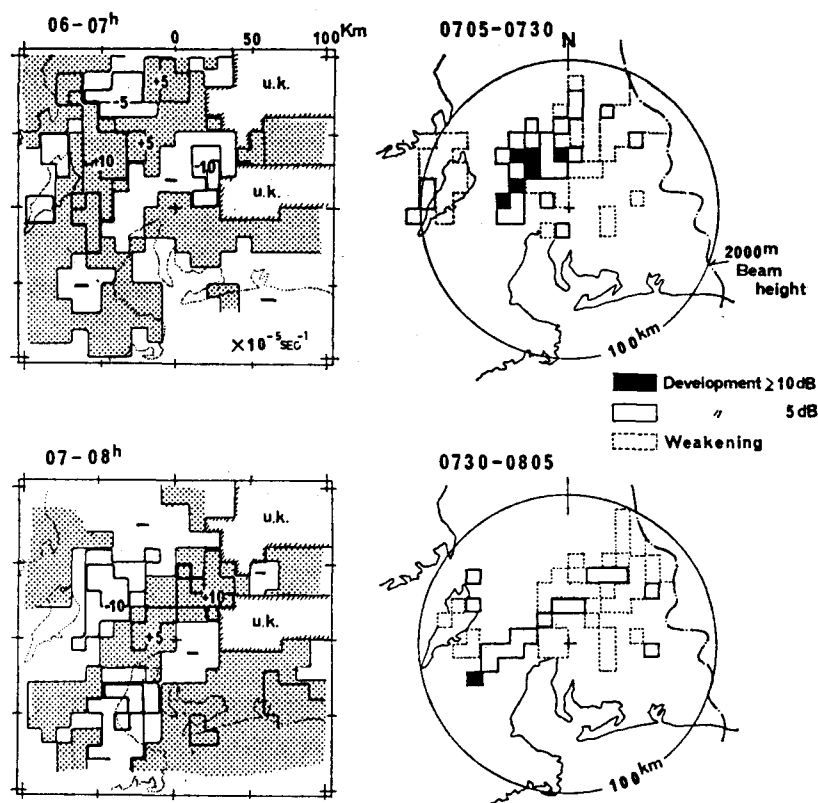


図12 うず度の1時間変化量とエコーの発達・衰弱分布 (入田)

る運動学的取扱いと気象学的現象としての理解が必要である。すなわち、降雨の動きや強度の変化傾向を運動学的に外挿する方法と降雨エコーの変化を気象学的外部条件と関連づけて予測する方法が考えられる。デジタル化されたレーダエコーを使って現在検討されている客観的な定量予測手法を例示してみよう。

(1)運動学的方法

観測されたレーダエコーを過去10分前後の移動速度、移動方向から外挿する。また、降雨の面積、強さの予測には時間的な変化傾向を外挿するかエコーの統計的特徴をある函数形で表現し外挿する。

(2)気象学的外部条件を考慮する方法

(1)の運動学的方法の中で、雨域の移動については700mbの風を用い、強度変化にはうず度、発散収束場、安定度等による変化ポテンシャルや地形の影響度等を発達衰弱項として加える (図12)。

(3)エコーパターンの特徴を利用する方法

降雨エコーの特徴、例えばエコー強度の周波数分布、エコー内の強度分布、パターン認識による形態の特徴等から以後の雨域及び雨量強度を推定する。

(4)変形テンソルを用いる方法

時間ラグをもったエコーパターンを使い対応する地点を指定し、計算機により変形テンソルを計算し、初期エコーを移動変形させる。

(5)雨域の重心の移動に注目する方法

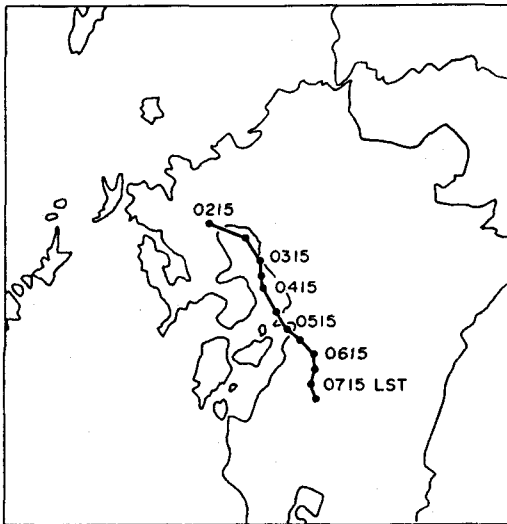


図13 雨域の重心とその経路 (二宮)

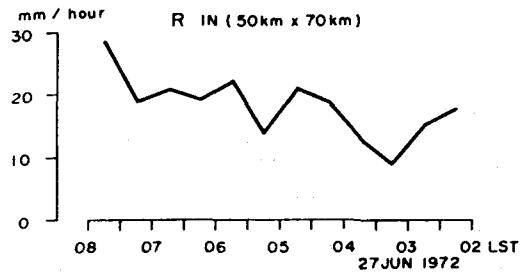


図14 重心を中心とした領域の面積雨量の時間変化 (二宮)

個々のエコーの追跡でなく、周辺エコーの重心を求め、重心の移動ベクトルから外挿によりエコー発現域を予想する。これは、じょう乱域の保存性をも利用した方法であり、図13にその例を示す。

(6)相互相関関係を用いる方法

2枚のエコー図を各方向へずらして相互相関関数を求め、それが最大値になる移動量を予測に使うベクトルとする。

(7)雨域追跡法

エコー形状の保存性に着目し、移動後の相似点からベクトルを決定する。図15に予測結果と実際の雨量分布の比較例を示す。

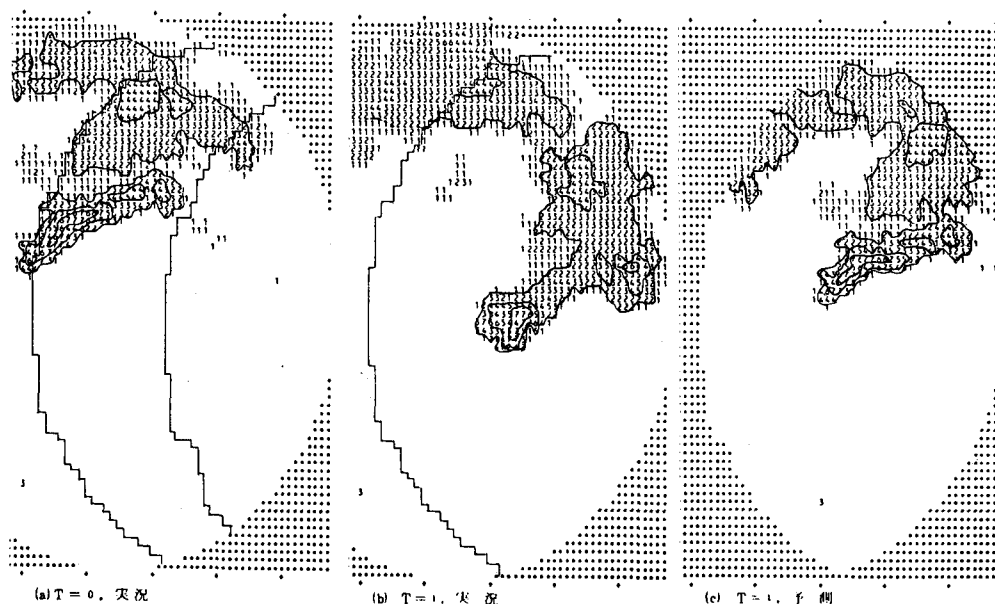


図15 雨域追跡法による予測と実況の比較（気象協会）

6.2 レーダによる雨量予測の問題点

レーダ画面の降雨情報から得られる時間的予測の限界は、エコー追跡手法が十分開発されたとしても2～3時間であろう。しかしながら高い精度の予測であれば、たとえ短時間予測でも災害防止や洪水調節等の面から非常に価値ある情報となり得ることは、最近の豪雨災害の状況からも明白なことである。

雨の短時間予測が、レーダ情報だけから可能であるのか、云いかえれば、レーダエコーが以後の降雨現象の予測因子となる情報を十分含んでいるのか、あるいは、他の外部的気象条件を与えることにより、予報則が見出せるのかについては今後さらに検討を続ける必要がある。とくに、現在のレーダは殆んど完全にデジタル化されたエコーデータの取得が可能になっており、今後予報則の開発には種々なアプローチがなされ現業に利用できる予測手法が見出されるものと期待される。

参 考 文 献

- (1) 元田雄四郎, 1964: レーダによる雨量観測. 電力気象連絡会彙報, 15

- (2) 武田京一, 元田雄四郎, 1965: 台風降雨帯の地形による影響. 天気, 12
- (3) Y. Motoda, 1967: Areal Rainfall Measurement by Radar. General Assembly of I. U. G. G
- (4) 元田雄四郎, 1967: 降雨と流出に関する研究. 単行本 (学位論文)
- (5) 立平良三, 1972: 気象レーダの利用. 気象研究ノート, 第112号
- (6) 二宮洸三, 秋山孝子, 1979: 豪雨監視のためのレーダおよび雨量観測網に基づく雨量分布と雨域移動の客観解析. 天気, 26
- (7) 入田央, 1980: アメダスの風から求めたうず度とレーダエコーの発達衰弱について. 天気, 27