

レーダ定数 (B, β) の同定手法の提案

STUDY ON THE IDENTIFICATION METHOD OF RADAR CONSTANTS B AND β

上林好之*・山口高志**・山本晃一***

By Yoshiyuki KANBAYASHI, Takayuki YAMAGUCHI and Koichi YAMAMOTO

Nearly 10 years have passed since the Ministry of Construction installed radar rain gauge on Mt. Akagi and put it into operation in 1976. Radar rain gauges have since attested to their effects (realtime operability, large coverage area, comprehensiveness and the detection of local heavy rains) and 14 radars are in operation.

But only recently all the 14 became in operation and various methods are still being tested to identify radar constants (B, β , etc.) to convert received power reflected from rain into an amount of rainfall.

Foundation of River/Basin Integrated Communications (FRICS), has since its inception in October 1985 handled the work of studying to improve radar accuracy at the request of Regional Construction Bureaus as FRICS publishes radar data, etc. As a by-product of this work, the authors have been able to prepare a method to identify radar constants. They hereby propose it and solicit readers' comments.

Keywords : radar raingage, radar constants, rainfall intensity

1. はじめに

建設省が1976年に赤城山にレーダ雨量計を設置し、運用を開始して以来ほぼ10年が経過したが、その間その効用（リアルタイム性、広域性、総合性、局地豪雨の発見等）が認められ、現在14基のレーダが稼働中であり、あと8基が計画あるいは、建設中である¹⁾。これでほぼ日本全土がおおわれる予定になっている。

しかし14基になったのはつい最近のこと、レーダの定数、すなわち雨から反射してきた受信電力を降雨量に変換するレーダ定数 (B, β 等) の同定法についても、種々の方法^{2)~8)}が試みられているのが現状である。

著者らが属する（財）河川情報センターでは、1985年10月に発足以来、レーダデータ等を公表する関係上、各地方建設局からも依頼を受けて、レーダ精度向上に関する研究を進めてきたが、そのバイプロダクトとして、精度の高いレーダ定数の同定法を作成することができた。ここに提案して、ご批判を仰ぐこととした。

2. レーダ方程式と誤差要因

(1) レーダ雨量計の概念とレーダ方程式

レーダ (RADAR) は、その語源 (Radio Detection And Ranging) からも明らかなように、電波の直進性、等速性、散乱性を利用して空中線 (アンテナ) を回転しながら電波を繰り返し発射し、目標で散乱されて戻ってくる電波を同一アンテナで受信することにより

① アンテナの向きと電波の往復に要する時間から目標の位置を

② 反射波の強さから目標の性質や大きさ等を測定するものである。

レーダ雨量計は雨滴に対する電波の反射強度と減衰の特性から、波長として降雨観測に適したマイクロ波（一般に5.7 cmのCバンド）を選定したものであり、レーダから発射されたパルス状の電波に対する雨滴からの反射エコー強度（受信電力）と雨量強度の間にある関係式が成立することを利用して間接的に雨量を測定することができる。

すなわち回転に伴う全方向からの反射エコーを方向別、距離別に時間的、空間的平均化を行った後、雨量強度に変換することにより広範囲の平面的な雨量を、瞬間にしかも連続的に観測できる。

* 正会員 (財) 河川情報センター企画調整部長
(〒102 千代田区麹町1-3 麹町平岡ビル)

** 正会員 工博 (財) 河川情報センター研究部長 (同上)
*** 正会員 工博 (財) 河川情報センター主任研究員 (同上)

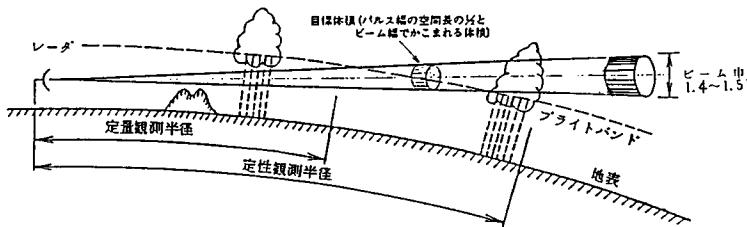


図-1 レーダによる降雨観測概念図

図-1にレーダによる降雨観測の概念図を示す。

返ってきた受信波の電力の大きさは、送信電力、目標までの距離、波長、空中線の大きさ、途中の電波の減衰などにより決まるが、これらの関係を表わしたものを作成方程式といい、式(1)に示される。

$$P_r = \frac{C \cdot F \cdot B \cdot R^{\beta}}{r^2} \times 10^{-0.2} \int_0^r (K_a + K_r \cdot R^{\alpha}(r)) dr \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 P_r ：雨滴からの受信電力強度、 R ：雨量強度、 r ：目標降雨までの距離、 C ：レーダのハード定数（レーダの性能諸元、たとえば送信電力等から決まる定数）、 K_a ：大気ガスによる減衰定数、 $K_r \cdot R^{\alpha}$ ：レーダから目標体積までの間の途中雨滴による減衰項、 F ：システム補正係数である。

なお Z は R と次の関係にあることが経験的に知られている。

$$Z = BR^{\beta} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで Z は反射因子とよばれ、 B 、 β はレーダ定数といわれる定数である。

上述のレーダ方程式には次の仮定が用いられる⁹⁾。

- ① 雨滴の直径 D は波長 λ に比べて十分小さく、レーリー近似が成立立つ。
- ② 雨滴は完全な球形である。
- ③ 雨滴は目標体積中に全くでたらめに配列している。

また地上雨量 R_g との比較には次の仮定が用いられている。

- ④ Z の垂直分布は地上からレーダビームまで一様である。
- ⑤ 雨滴の落下速度は一様であり、上昇気流の効果は考慮していない。

これらの仮定は多様な変動を示す降水現象すべてに成立するものとはいえない、レーダ雨量計による降雨観測値には誤差が生じる。

なおグランドクラッターが存在する場合には地上からの反射電力 P_g を差し引く必要がある（減算方式の場合）。具体的には、晴天時の地上からの反射電力値である。

$$P'_r = P_r - P_g \quad \dots \dots \dots (3)$$

後出する図-8は、あるレーダ雨量計の $Z-R_g$ の散布図であるが、相当のばらつきが認められる。これは多くの誤差要因によるものであるが、これについては次節以降で触れる。

(2) レーダ雨量計の精度にかかる要因

レーダ雨量計の精度にかかる要因としてはレーダ機器等のハード的なものと気象現象等に対する種々の仮定、データ処理方法等のソフト的なものに分けられ、列举すると次のようになる。

① レーダを構成する装置関連

送信器出力、パルス幅、空中線利得、波長、ビーム幅、給電線系損失、対数特性受信器による平均化

② レーダビームの伝播特性関連

ビーム高度幅と充満率、サイドロープ、異常伝播、降雨減衰、グランドクラッター、ライトバンド

③ レーダ方程式の成立条件と実際の気象条件との差異

雨滴の径とレーリー近似、雨滴の配列、雨滴の形状、上昇気流、雨滴の鉛直分布

④ レーダ雨量計と地上雨量計の対比

雨滴の蒸発、変形、移流、空間・時間スケール、地上雨量計の誤差

⑤ レーダ定数関連

雨量換算定数 B 、 β の設定、降雨減衰定数 K 、 α 紙幅の関係から、ここでの個々の説明は割愛し、必要に応じて後章で触れたい。

3. 既往 B 、 β 同定法とその問題点

(1) 各種同定方法とその特徴

前章で、レーダ方程式およびこれに関連する誤差要因について記述した。本章では、このような状況のもとで、これまでのレーダ定数 B 、 β の同定法を紹介しその問題点について触れる。

B 、 β の同定法には雨滴粒径を直接または間接的に観測して反射因子 Z を求め、雨量強度 R と比較して B 、 β を求める気象学的な方法と、レーダ受信電力により Z を算定し、地上雨量 R_g と比較して B 、 β を求める回帰分析法、そして B 、 β を仮定してレーダ受信電力から

レーダ雨量 R_r を求め R_g との差を最小にするような B , β を求める感度分析法とがある。後 2 者は気象学的な方法と対比する意味で統計的な方法とよばれる。

a) 气象学的方法

レーダ反射因子 Z (mm^6/m^3) と雨量強度 R (mm/h) は次式で表わされる.

$$R = 3.6 \times 10^4 \frac{\pi}{6} \int N(D) \cdot V(D) \cdot D^3 dD \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで、 D ：雨滴粒径 (mm), $N(D)$ ：単位体積中の雨滴粒径分布 ($1/m^3$), $V(D)$ ：直径 D の雨滴の落下速度 (m/s) である。

また Z と R の関係は $N(D)$ に依存するので一般的に表わすことはできないが、おおむね前出式(2)で近似できることが経験的に知られている。

式(2), (4)および(5)からわかるように Z と R との関係は雨滴の粒径(D), 雨滴の空間における粒径分布 $N(D)$ と落下速度 $V(D)$ により決まる。気象学的同定方法は、 D については、沪紙法、マイクロフォン法等により実際の雨を測定し¹⁰⁾、 $V(D)$ に関して $V(D) = 4.4 \times 10^2 \cdot D^{1/2}$ (m/s) の近似値を、 $N(D)$ に関しては $N(D) = N(D) \cdot e^{-\lambda D}$ の指數関数分布を用いて B , β を同定するものである。

Marshall ら¹¹は実測の粒度分布を整理し、標準的な値として $B=200$, $\beta=1.6$ を得ている。

B , β の値はこの標準値のまわりにかなりばらつく。藤原¹²⁾によれば雨の種類により図上で分類表示されるとし、これを雨の種類ごとに大別して表-1のように提示している。

一方、スイスで行われた観測の結果に¹³⁾よれば

雷雨……… $Z = 830 R^{1.5}$

地雨……… $Z=200 R^{1.56}$

$$\text{霧雨} \cdots \cdots Z = 190 R^{1.5}$$

全降雨…… $Z = 300 R^{1.6}$

と報告されている。

図-2は前橋における6月～9月の実際の雨滴を涙紙によって測定したZ～R関係をプロットしたもの¹⁰⁾で、全体の平均としては $B=150$, $\beta=1.5$ であるが個々の雨について B にして 100～300 の間で変化しており、気象学的にアクセスしても 3 倍程度の差があることがわかる。

表-1 隆雨原因別 R , β (図の中心値)

降雨原因	B	β
雷雨	450	1.46
しゅう雨	300	1.37
地雨	205	1.48

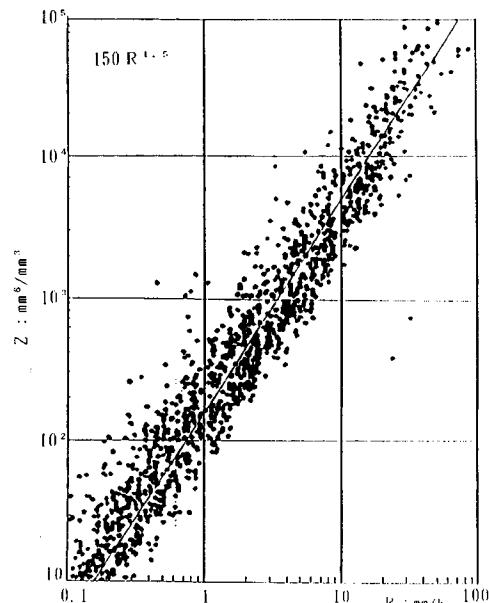


図-2 Z~R 関係の観測例

三

気象学的方法論により B , β が得られ、これを用いてレーダ雨量換算を行おうとする場合、一般にレーダ雨量と地上雨量との関係が最も良好となるよう統計的な方法により F を決定している。すなわち気象学的に B , β を求めたとしてもレーダ観測に基づく統計的な処理はどうしても必要となる。

b) 定数 B , β の統計的決定方法

地上雨量観測から R_g を求め、レーダ雨量計の受信電力 P_r と比較して B, β を求める方法は、赤城山で実用研究されて以来、建設省のレーダ雨量計では B, β を決定する方法として、広く実施されている手法である^{2)~8)}。実際には、地上雨量 R_g とレーダ受信電力 P_r を直接比較するのではなく、レーダ受信電力 P_r をレーダ方程式を通して、レーダ反射因子 Z に変換し、 Z と R_g との関係が調べられる。 Z と R_g の関係より B, β を求める方法としては、以下に述べる回帰分析と感度分析がある。

1) 回帰分析法

$Z \sim R_g$ 関係式 $Z = B \cdot R_g^\beta$ において両辺の対数をとる
と

二二六

$$Y = \log Z, \quad X = \log R_a, \quad a = \beta, \quad b = \log B$$

とおくと $Y = aX + b$ の形になる.

レーダ受信電力 P_r から得られる Z と地上雨量 R_g の観測値に基づいて、回帰係数 a, b を求めることにより B, β が得られる。たとえば X 回帰は反射因子 Z を独

立変数、地上雨量 R_g を従属変数として、 $\Sigma(\log R_g - \log R_r)^2$ を最小にするような直線を求める方法である。回帰係数 a, b は XY 回帰、 X 回帰、 Y 回帰の 3 種類の方法により異なった値が得られ、 XY 回帰、 X 回帰では Z が小さいとき R を過大評価し、 Z が大きいところでは R を過少評価する傾向があることより、既往の検討では、 Y 回帰が採用されている。

既往のレーダ定数の検討では多くの場合 $Z \sim R$ 関係が一価の直線では表わせないために、地上雨量 R_g でサンプル母集団を分割し、分割されたサンプルを用いて回帰分析が行われてきた。この場合得られる複数の回帰直線が分割した R_g のところで不連続となる問題がある。

この問題を避けるために折線で回帰する方法（折線回帰法）がある⁶⁾。

ロ) 感度分析法

B, β として種々の値を設定し、受信電力 P_r からレーダ雨量 R_r を求め、これと R_g とを比較して評価指標を最小（最適）とするような B, β の組を見出す方法である。評価指標としては二乗平均誤差や相対誤差、相関係数、総雨量比などの指標が考えられるが、二乗平均誤差を用いる場合が多い。この場合は $\Sigma(R_g - R_r)^2$ を最小にする方法となり、前記の X 回帰と考え方が似ているが真数值を使用するため、図-3 上では関係式が R_g の大きい側へ折れる。

シ) 既往 B, β 同定方法の問題点

以上 3 つの方法を簡単に説明したが、2, 3 論評すれば、まず気象学的方法は、方法論的には理想的といえるが、手作業的でありデータの収集（および処理）に長期間を要する欠点があり、あまり実用に供されていない。

次に、回帰分析法は、対数値を用いて求まることが特徴であるが、これまで Y 回帰がよく用いられてきた。しかし、レーダが Z （ Y 軸）より R （ X 軸）を求める点からいうと、問題といえよう。

もう一点、回帰式一本で表現しようとすると強雨データが、相対的に少ないため弱雨データにひきずられる傾向が出ることは避けられない。これは感度分析法についても相対的に影響は小さいが同様のことがいえる。

これを避けるため、2 ないし 3 本の回帰式で表わす方

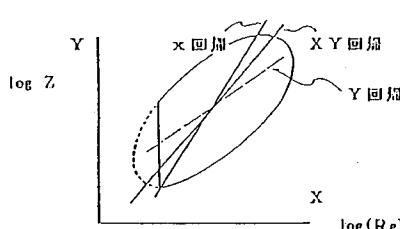


図-3 $Z \sim R$ 回帰

法も試みられているが、この場合にはそれらの接続に苦労しているようである。これは感度分析法でも同じである。

最後に感度分析法であるが、 X 回帰的であり、最近よく用いられてきているが、計算量が多いことと上述の点に問題がある。なお 2 本の回帰式にする場合に、 R_g で 2 群に分けている例が多い。

(2) 解析に用いるデータおよびその棄却

後述するように、レーダデータは距離方向に強い特性をもっているが、既往の定数解析では、この点での留意があまりなされていない。

また検証対象とする地上雨量計についても、「レーダ雨量計が面的データであるのに対して、地上雨量計は、点雨量だから、解析に用いるべきでない」という意見がある。これは、確かに考慮が払われなければなるまい。

この対応策として、地上雨量計を狭い地域に高密度に配置して、地面上雨量データを観測して（以下精密観測と略称する）、検証対象データとしているレーダも 2, 3 ある。

解析に用いるデータとその棄却は、 B, β 同定には重要な課題であり、これについては 4. で触れていきたい。

4. B, β 同定法の提案

以上、レーダの降雨量測定の原理、および誤差要因について触れ、次いでこれまで行われてきた B, β 同定法の問題点を指摘した。

以下、まずデータ・ソース、次いでデータの棄却のための大きな要因として、レーダの距離方向特性および降雨特性による差異を選び、検討し、最後にこれまでの結果を利用して、データの棄却を含めた新しい B, β 同定法を提案する。

(1) 用いたレーダおよび地上雨量計データ

現在、建設省のレーダ雨量計は、14 基が稼働中であり（1987 年 10 月現在）、仕様的には、大きな差はないが、

$B \setminus \beta$	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
80.0	16.00	9.84	6.36	4.53	3.80	3.70	3.57	4.12
90.0	14.27	8.78	5.74	4.24	3.73	3.74	3.95	4.21
100.0	12.85	7.93	5.27	4.04	3.70	3.80	4.04	4.30
110.0	11.58	7.24	4.90	3.90	3.71	3.85	4.12	4.38
120.0	10.69	6.66	4.61	3.62	3.73	3.93	4.19	4.45
130.0	9.85	6.18	4.33	3.27	3.77	3.99	4.26	4.52
140.0	9.13	5.78	4.21	3.74	3.81	4.06	4.33	4.58
150.0	8.31	5.44	4.09	3.73	3.86	4.12	4.39	4.63
160.0	7.96	5.16	3.98	3.74	3.90	4.17	4.44	4.68
170.0	7.48	4.92	3.90	3.76	3.95	4.23	4.50	4.73
180.0	7.06	4.71	3.85	3.76	4.00	4.28	4.54	4.77
190.0	6.68	4.54	3.81	3.81	4.05	4.33	4.59	4.81
200.0	6.35	4.40	3.78	3.81	4.09	4.38	4.63	4.85
210.0	6.06	4.28	3.79	3.81	4.14	4.42	4.67	4.88
220.0	5.80	4.18	3.77	3.90	4.18	4.46	4.71	4.92

図-4 感度分析の例（二乗誤差）

昭和60年頃を境にして、性能アップが試みられている。

今回解析対象レーダは赤城を始めとする6レーダ(以下A, B, …Fレーダと略称)であり、グランドクラッター(以下G.C.と略称)の処理方式は、これらのレーダでは、すべて減算方式であった。G.C.の値が、雨量に換算して4~5 mm/h以上のメッシュでのデータは、周辺データで置換しているのが一般的である。

なお、解析に用いた地上雨量計データは、建設省のテレメータ雨量計および気象庁のアメダス雨量計のデータ

(いずれも1時間雨量)である。平均して、1レーダ当たり100~200基の地上雨量計データが数年にわたって収集された。

(2) 距離方向特性

レーダ雨量計は、後述するような種々の原因のために、距離方向に強い特性をもっている。本節では、それをデータの整理結果からまず図示していく。図-5, 6に、横軸に距離およびビーム中心高度を、縦軸に地上雨量計観測値(R_g)とその直上メッシュのレーダ雨量計観測値(R_r)

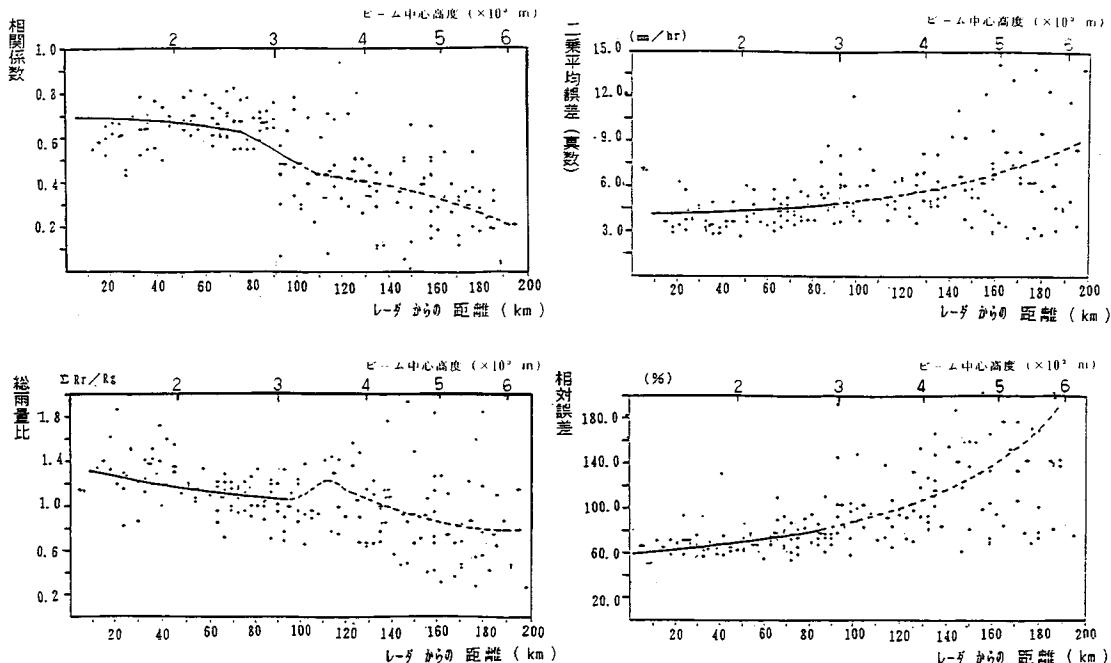


図-5 距離による精度評価 (○レーダ, 雷雨性を除く, $R_r \geq 1 \text{ mm/h}$)

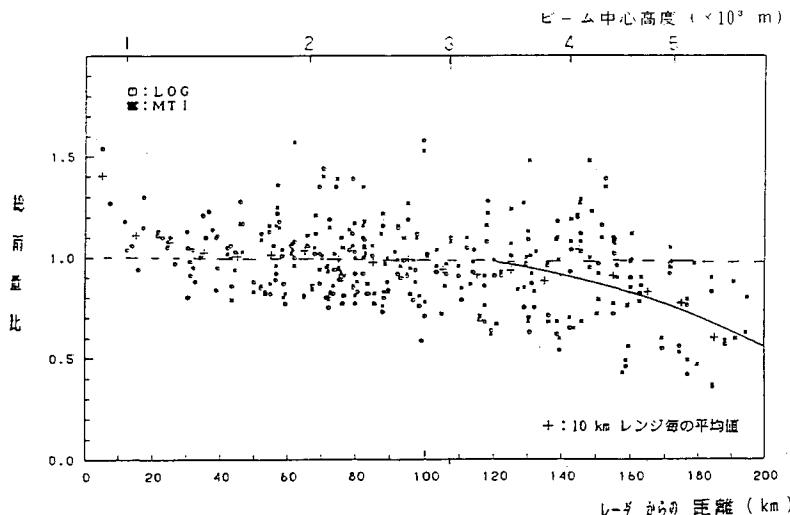


図-6 $\Sigma R_r / R_g$ の距離特性 (○レーダ)

との総雨量比 ($\sum R_r / \sum R_g$)、相関係数、二乗平均誤差

$$M_e = \left\{ \frac{1}{n} \sum (R_r - R_g)^2 \right\}^{1/2} (\text{mm/h})$$

相対誤差 (%)などをとて示す。 R_r 、 R_g はともに時間雨量で、図中の・印の1点は、地上雨量計1基のそれぞれの値であり、×印は10 kmごとの平均値を示している。

図より、レーダからの距離が大きくなるほど、 R_r が相対に小さく出ること、 R_r と R_g の相関が悪くなっていること、誤差も大きくなっていることがわかる。

このようになる大きな要因の1つは、図-1にもみられるようにレーダビームは \oplus の仰角をもっているためと、地球が丸いこともあるって、ビーム高度が距離とともに大きくなることとビーム幅が距離とともに大きくなることの2つである。

レーダデータは、いわば距離方向に徐々に大きくなる円錐台内の雨滴の量を測っているわけであるが、高度が高くなっている円錐台の下層にしか雨滴がなくとも、台内一様にあるものとして評価してしまう（ビーム内雨滴充満率の減少）、極端な場合、ビームは雲の上にとび出し、雨をキャッチし得ないこともあるわけである。

2つ目は、降雨減衰項によるもので、図-1にも示してあるが、レーダより遠方にある降雨は手前の降雨によってレーダビームが往復2回の減衰の影響を受けるのである。

もう1つ単純な理由であるが、高度が高いほど、風などによる移流のために雨滴が真下に落ちる確率が小さくなることがある。

4つ目の影響因子として、鉛直方向の気温分布がある。雨滴の鉛直分布を考えた場合、 0°C を境にして、下は水、上は氷となるが、 0°C 付近では氷片の表面が、とけた状態になる。レーダの反射率は、この区間で非常に大きくなる。これをライトバンドとよんでいる。

たとえば地上気温が 18°C のとき、 $-0.6^\circ\text{C}/100\text{ m} \times 3000\text{ m} = -18^\circ\text{C}$ すなわち 3000 m のところで 0°C となる。もしその周辺に雨滴が存在すると、この部分のレーダ雨量の値が地上では少しあり降っていないにもかかわらずかなり大きく表示されることになる。

以上、主たる要因4つを挙げたが、前3者はいずれもレーダ雨量が相対的に距離の増加とともに、減少する要因であり、4つ目の要因は、距離方向にある部分のみ増大する要因である。

図-5、6にみるように、全体として距離とともに降雨を少なめに評価することおよび距離とともに誤差が大きくなることがわかる。

以上の結果から、レーダデータは距離方向に相当異質なデータで構成されており、より本質的に正しい B 、 β

を求めるには、遠距離のデータは棄却すべきこと、遠距離のデータに対しては、なんらかの手段で距離による補正を行うべきこと、ライトバンドの影響を除去するには、たとえばビーム高が 3000 m より大きいところのデータは棄却すべきこと、などが推論される。

(3) 降雨特性による差異

Dレーダについて降雨成因別にプロットし本論で提案する方法に従って直線を引いたものが図-7である。これによると前線性、低気圧性降雨に差異はなく、雷雨の場合には B が大きくなる結果を得た。これよりたとえば表-2のような B 、 β 値を提案することができる。しかしレーダを実際に運用する際には、降雨種別の判断が、自動的にできるシステムが、これに加わらないと、上述のような区別をしても活用できない。

(4) B 、 β 同定法の提案

これまでの検討結果を踏まえて、現状で可能な限り、降雨量推定精度の高い、 B 、 β 同定法を提案してみる。ここでは、まずデータの棄却を議論し、次いで実際にデータ

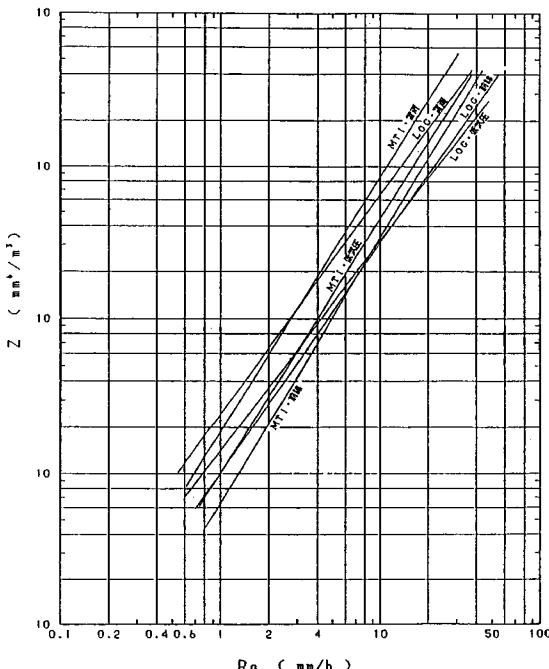


図-7 降雨種別の最適 B 、 β (Dレーダ)

表-2 B 、 β 運用提案値 (Dレーダ)

	降雨原因	B	β	LSB換算
LP	低気圧 ($Z > 5000$)	50	1.8	80~255
	前線性降雨 ($Z < 5000$)	120	1.4	0~79
MTI	雷雨	240	1.4	0~255
	低気圧+前線性降雨	80	1.7	
	雷雨	190	1.7	0~255

タを用いて、 B, β を求める数学的技法について述べる。

a) データの棄却

イ) データの棄却の原則

本調査に利用したデータは、反射因子 Z と地上雨量 R_g であるが、そのデータの採用について、これまでの検討結果も参考にして、基本的な立場を始めに明確にする。

① 基本的には存在するデータはなるべく同定用資料として用い、そこから平均的な特性を求めるという立場を取る。

これは地上雨量データのあるものはすべて利用するということで、精密観測を否定するものではないが、そのデータの量的不足に起因している。

② ただし、同定用のデータはなるべく同質のものを用い、異質データは棄却するという立場を取る。

これはレーダデータの距離方向特性の考慮、高G.C.地点の排除、および地上雨量データのチェックなどを指している。

③ 同定用データのサンプリングは空間的に偏らない方がよいという立場を取る。

これは、レーダによって地域特性が認められたこと、局地的な精密観測によって、同定した B, β を用いたレーダ雨量値が、全域の地上雨量と必ずしも一致しないことなどの事実に基づいている。

④ データを大きな空間スケールあるいは時間スケールで平均して、レーダ雨量 R_r と地上雨量 R_g の差を小さくすることはしないという立場を取る。

降雨の特性からいって、時間および空間スケールを大きくとれば、レーダ雨量計および地上雨量計とも精度がよくなることは、知られているが、そのようにすると、降雨強度の大きいデータが失われることからこのようなルールを設定した。

ロ) データの棄却ルール

以上の基本的なルールを設定した結果、具体的には、以下のようにデータ棄却ルールを決めた。

① レーダ定数 B, β の同定のために用いる地上雨量のサンプリング対象空間は、ビーム中心高度が標高3 000 m以下の領域に限る。なお、この範囲内であっても、山影部分、G.C.が雨量換算5 mm/h以上のメッシュ、ライトバンドの発生高度にビームがかかる地点より遠方のデータ、および検討対象降雨に対して地点地上雨量 R_g と直上レーダ雨量 R_r の相関係数が0.6以下のメッシュについては除外する。

なお、 R_r は、便宜的に現在運用中のレーダ定数により求める。

② レーダ定数 B, β の同定に際して、レーダ雨量の空間スケールはレーダ雨量計の極座標の単位メッ

シュとする。一方、地上雨量は雨量観測所の地点雨量とし、それと直上レーダメッシュ雨量を比較する。

③ 時間平均化スケールは、地上ならびにレーダ雨量ともに1時間値とする。

④ レーダ定数 B, β の同定にあたっては、対象空間内の降雨を台風性降雨、低気圧性降雨、前線性降雨、雷雨の4種類に分類し、それらの成因別に、代表的と考えられる降雨を5例以上選定し、対象降雨とする。なお、対象降雨は、レーダ雨量計の特性変化を考慮してなるべく新しいデータを使う。

高度3 000 m以下とした理由は、図-5, 6などから判断してほぼ高度3 000 mに相当する距離から各種評価指標が悪くなること、ライトバンドの影響の除去である。したがって、高い山に設置されたレーダは同定空間が狭くなる。

G.C.は、気温、湿度等によって時間的に変動することが知られている。そのためG.C.が大きいところでは、その変動のために雨滴からの受信電力が正確に求められなくなる。ここでは、最小感知降雨強度(R_{min})をテレメータと同じく1 mm/hになるようにG.C.レベルの上限を設定した。

通常のG.C.減算方式では、G.C.の雨量換算値を R_{gc} とすると、 $B, \beta=200, 1.6$ の場合、 $R_{gc}/R_{min}=5.1$ の関係があるので、これよりG.C.が降雨換算で5 mm/h以上の地点は、 B, β 同定計算から除外した。詳しくは文献15)を参照されたい。

ハ) その他の

2つの点について、データ処理上の工夫を行った。

1つは、レーダの反射因子 Z が5分ごとにとられていることから、 Z_s から Z_{60} を求める方法として、式(2)を変形した $R=(Z/B)^{1/\beta}$ を考慮して、 Z_s を単純平均せず、式(7)のように Z_{60} を求めた。

$$Z_{60} = \left[\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Z_{5i}^{1/\beta} \right]^{\beta} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

もう1つは、地上雨量計がすべて転倒マス型であるため、降雨があっても、0.5あるいは1 mmに達しないと地上雨量が0ということが起こる。

この際に、地上雨量0は、ほんとに0か、降雨があっての0か不明ということで棄却し、地上雨量計が記録したものだけのデータをとると、データに偏りが生じる。

本手法では、降雨期間中は地上雨量0でも反射因子 Z があるものは、データとして採用した。詳しくは文献15)を参照されたい。

b) B, β 同定方法としての層別平均値法

前章で述べた既往の B, β の同定手法の問題点を踏まえて、現時点で最適と思われるレーダ定数の同定法を提案する。この方法の基本的な考え方は次のとおりである。

- ① レーダ反射因子から地上雨量を推定する立場を取る。レーダ雨量計は、式(11)で示される雨滴からの受信電力強度より、降雨強度 R を推定する機器である。すなわち B , β の同定にあたっては、 P_r の値すなわち Z を独立変数とし、 R を従属変数とする。
- ② B , β の同定法としては、層別平均値法を採用する。 B , β は降雨ごと、降雨成因別、全降雨（ただし雷雨を除く）に対しておのの求めるものとする。
- ③ レーダ雨量計の運用定数の設定にあたっては当該レーダ雨量計の運用体制、機能特性を把握して設定する。運用定数を1つの値に設定する場合は、台風性降雨、低気圧性降雨、前線性降雨の全データを用いた B , β の値を運用定数とする。

イ) 層別平均値法の考え方

レーダ雨量計は本来情報として得た Z よりおよそ $3 \times 3 \text{ km}^2$ の面積雨量（上空 $2\sim3 \text{ km}$ ）を推定する道具である。

ある。つまり Z の値より R_r をよりよく推定する方法を取るべきである。 R_r としては地上雨量 R_g が近似しているものと考える。

すなわち、レーダ観測されたある範囲の $Z \left[Z - \frac{\Delta Z}{2} \sim Z + \frac{\Delta Z}{2} \right]$ に対して、 $Z \sim R_g$ 図上のその範囲 ΔZ 内に含まれる R_{gji} の真数値の平均値 \overline{R}_{gi} を求める。この \overline{R}_{gi} は $\sum_{i=1}^n (R_{gji} - \overline{R}_{gi})^2$ を最小にする。なお ΔZ の値は $1\sim2 \text{ dB}$ 程度とする。

このようにして求めた \overline{R}_{gi} を結ぶ線から B , β を求める方法を層別平均値法とよぶことにする。求め方は \overline{R}_{gi} の点を用いて X 回帰により求めるも一法であるが、ブライタバンド等の影響を考慮しながら、目視で引くのが実際的と考えている。層別平均値法の例を図-8に示す。

なお図-8では、地上雨量 R_g がテレメータ値であるため、 1 mm/h 単位でしかなく、それをそのままプロットすると、縦の線上に並び、データの趨勢が読み取れないことから、以下に示す工夫をして R_g をプロットして

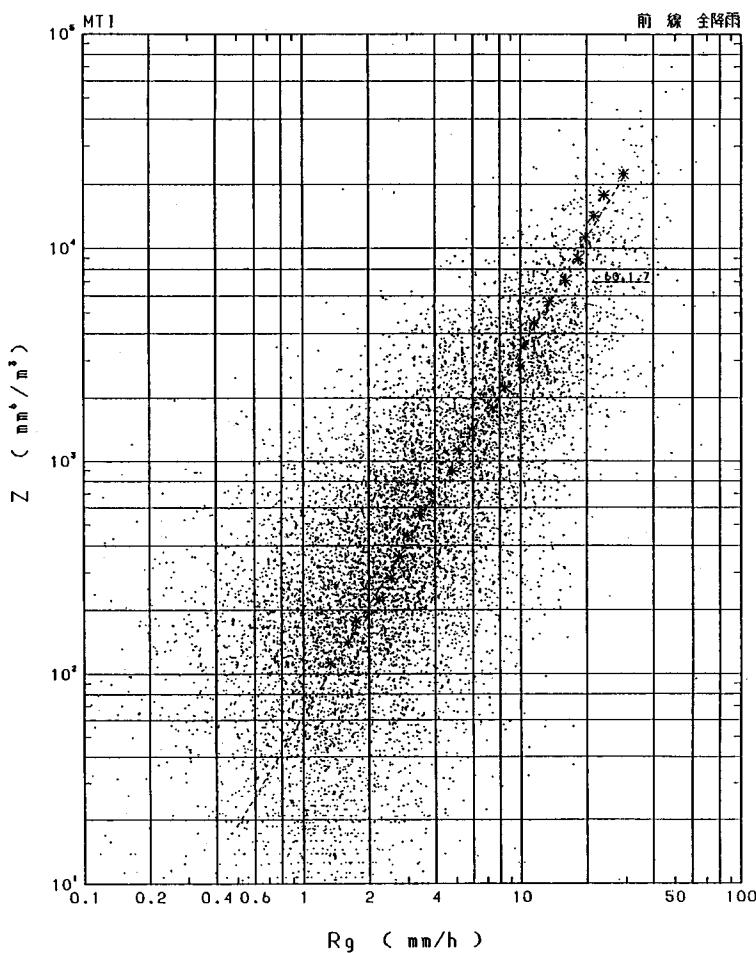


図-8 $Z-R_g$ 関係図

いる。すなわちテレメータ地上雨量 $R_g = N$ ($N = 1, 2, 3, 4, \dots$) は実際には

$$N-1 < R_g < N+1$$

の値であるはずであるから、この誤差の分布を適当に仮定して、擬似乱数を用いて、上述の範囲にばらつかせている。これは前述した $R_g=0$ のデータについても同様である(文献15)参照)。

層別平均値法の特徴は以下のとくである。

- データ数の偏りに影響を受けない。
- 最小二乗誤差と対応している。
- 降雨強度によって B , β の値が異なっている場合その見極めが容易。
- 降雨ごとの特性の比較が容易。
- 手続きが比較的簡単。
- 本方法を用いて推定したレーダ雨量はおむね、最尤推定値となっている。
- 异常値を発見しやすい。

始めに挙げた“データ数の偏りに影響を受けない”は、本法の大きな特徴の1つで、データ数の多い、たとえば1~2 mm/hのデータに推定式がひきずられないことになる。

以上、データの棄却法と、層別平均値法の両者をあわせて、全体をFRICS方式と名付ける。

(5) その他

このほか、降雨減衰項を考慮した場合の定数決定についても検討した。

降雨減衰項は式(1)中の $K_r \cdot R^{\alpha}(r)$ で表わされる。これまでGunn-East¹⁶⁾、小平¹⁷⁾、今井¹⁸⁾らが、実験式を提案している。また建設省土木研究所でも昭和57年の長崎豪雨を対象として、降雨減衰項の検討がなされ、減

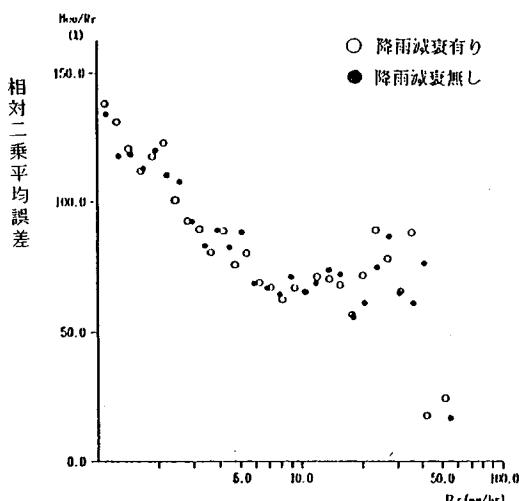


図-9 降雨減衰有無による精度評価の比較(全降雨, C レーダ)

衰項を考慮した方が精度が向上するという結果を得ている¹⁹⁾。

降雨成因別および全降雨に対して降雨減衰項を導入した場合の B , β を求め、精度評価を行ってみた。一例(C レーダー)を紹介すると、まず減衰項導入によって Z が大きく評価されるために、 β が0.1程度大きくなつた。また精度は、あまり変化しなかつた(図-10)。これは減衰項が有効に働くような豪雨が少なかつたためと思われる。また減衰項を導入した場合、 B , β が適切に与えられているかどうかが、精度に大きく影響することが知られている¹³⁾が、これもこの一因と考えられる。このため減衰項の導入にあたっては、適切な B , β のオンライン修正システム等の工夫が必要になろう。

5. あとがき

以上レーダ定数 B , β の同定法について述べた。現在ここで提案された FRICS 方式に基づいてレーダ定数の同定が建設省のレーダ雨量計に対してなされ実運用されつつある。さらに本方式に基づいた B , β を用いてレーダ雨量と地上雨量の差異の原因分析、レーダ雨量の空間補正法の検討、および G.C. 対策としての、MTI の導入もなされ仰角の減少が計られつつある。

今後、レーダ雨量計設置後の期間が短く、十分にデータのない場合のレーダ定数の設定法、雪に対するレーダ定数の同定法およびオンラインキャリブレーション等についても検討を行っていきたい。

最後に本検討にあたり、科学技術庁防災科学技術センター木下武雄第一研究部長、建設省土木研究所吉野文雄水文研究室長には、種々の面からご指導いただいた。また、各地方建設局河川管理課およびレーダ雨量計を管理している工事事務所、ダム統合管理事務所からは多大のご援助をいただいた。また、本研究の実行にあたって、当時当センターに在籍した斎藤暁樹(現・水資源開発公団)、堀田哲夫(現・建設技術研究所)の両氏に負うところが多い。併せて感謝する。

参考文献

- 1) Kanbayashi, Y., Yamaguchi, T., Nakao, Y.: River & Basin Integrated Communications, system (FRICS System), FRICS, R.I. Report, No.1, 1987.
- 2) 建設省利根川ダム統合管理事務所:レーダ雨量計特性解析業務報告書, pp. 9~54, 1983.
- 3) 建設省利根川ダム統合管理事務所:レーダ雨量計精度向上検討業務報告書, 1985.
- 4) 建設省利根川ダム統合管理事務所:レーダ雨量計精度向上検討業務報告書, 1986.
- 5) 建設省九州地方建設局:雨量レーダ精度検討調査報告書, 1980.
- 6) 建設省淀川ダム統合管理事務所:深山レーダ雨量計定数

- 等解析業務報告書, 1982.
- 7) 建設省淀川ダム統合管理事務所：レーダ定数の標準化に関する調査検討業務報告書, 1987.
 - 8) 建設省中部地方建設局：レーダ定数設定に関する調査検討業務報告書, 1987.
 - 9) 気象庁：レーダ基礎, 気象研究ノート, 第22号, pp. 227~287, 1978.
 - 10) 小平信彦：気象レーダの基礎, 気象研究ノート, 第122号, pp. 227~282, 1972.
 - 11) Marshall, J. S. and Palmer, W. M. : The distribution of raindrops with size, Jour. of Meteor., 5., p. 165, 1948.
 - 12) Fujiwara, M. : Raindrop size distribution from individual storms, J. Atmos. Science, 22, p. 585, 1965.
 - 13) スイスで観測された降雨成因別 B, β .
 - 14) Awaka, J., Nakamura, K., Kozu, T. and Inomata, H. : Influence of bright band on the precipitation scatter at 14.3 GHz. Proc. of 21st Radar Meteor. Conf., pp. 232~237, 1983.
 - 15) 上林好之・山口高志・山本晃一：レーダ定数の同定手法に関する研究, 河川情報研究所報告第1号, 河川情報センター, 1987.
 - 16) Gunn, K. L. S. and East, T. W. R. : The microwave properties of precipitation particles, Quart. Jour. Royal Meteor. Soc. 80, 1954.
 - 17) Kodaira, N. : The radar wave attenuation caused by precipitation particles, Papers in Meteor. and Geophy. 14, 1963.
 - 18) Imai, I. : Attenuation of microwave through rain for various dropsize distribution, Jour. Meteor. Soc. of Japan, 75th Ann. Vol. 1957.
 - 19) 吉野・俞・河間：レーダ雨量における降雨減衰の評価, 第30回水理講演会論文集, 1986.

(1988.1.7・受付)