

レーダ雨量計における降雨減衰の評価

Estimation of the Radar Wave Attenuation Caused
by Rainfall in Radar Rain-Gauge System

建設省土木研究所 正員 吉野文雄
" " 兪 朝夫
" " 河関大祐

1. はじめに

従来、洪水時の降雨観測は主にテレメータ雨量計が用いられてきたが、近年レーダ雨量計の実用化が図られ洪水時に有用な降雨情報が提供されるようになった。レーダ雨量計は1台設置することにより、広範囲の降雨状況を瞬時に捉えることができるうえ、雨域の移動を視覚的に感知できるなど、従来の地上雨量計に比べ多くの利点を有している。この点を考慮し建設省ではレーダ雨量計を全国に展開中である。

このようにレーダ雨量計は将来、降雨観測の中心的役割を果たすと考えられるが、実用面では精度向上を図るため幾つかの課題を克服する必要がある。これら課題の主なものとして ①降雨によるレーダ波の減衰の評価方法 ②グランドクラッターの除去方法 ③降雨換算定数 B 、 β の設定方法 ④地上雨量計によるキャリブレーションの方法(キャリブレーションの必要性を含めて)が挙げられる。これらはすべてレーダの受信電力を降雨強度に変換する過程での課題であるが、①～③と④は本質的に性格の異なった課題である。すなわち①～③はレーダの捉えている降雨強度をいかに正確に評価するかであり、④はレーダの捉えている上空の降雨強度と地上での降雨強度の差をいかに縮小するかの問題である。本論文は上記の各課題のうち①の降雨によるレーダ波の減衰を建設省釈迦岳レーダのデータを用いて評価したものである。本論文で示されるように、レーダ方程式において降雨減衰項の有する意味は非常に大きい。しかしその取扱いの難しさもあり、現状のシステムでは降雨減衰を十分に表現していないのが実状である。本研究はそのような実状に鑑み将来レーダ雨量計システムにおいて、降雨減衰が正しく評価されることを目的として実施したものである。なお上記①～③の各課題は相互に強い関連を有しており、降雨減衰を精度良く評価できれば他の2課題においても大きな前進が期待でき、全体としてレーダ雨量計の実用性を大いに高めるものと考えられる。

本研究では、昭和55年以降の4降雨を対象降雨として選定し解析に供したが、ここではこのうち最も減衰現象が顕著であった昭和57年7月の長崎豪雨を中心に報告する。

2. レーダ方程式

レーダ方程式は次のように記述される。

$$P_r = \frac{C \cdot F \cdot Z}{r^2} 10^{-0.2 \int K dr} \tag{1}$$

ここに、 P_r : 受信電力 (mW)、 C : レーダ定数 (レーダ装置の諸元によって定まる)

F : 補正定数、 Z : 反射因子 (mm^6/m^3)

r : レーダ波から降水粒子までの距離 (Km)

K : 減衰定数 (dB/Km)

レーダ波の減衰は主に①大気ガス ②雨滴

③雲 によって生じるが、雲による減衰は小さく無視し得る程度である。よって大気ガスと雨滴による減衰のみを考慮すればよい。大気ガスによる減衰は気温、気圧によって若干異なるが、実用的にはほぼ一定値として取扱って問題はな

表 - 1¹⁾ 途中降雨による減衰定数 K_R (dB/Km)

波長 (cm)	小 平	今 井	Gunn-East
3.2	0.005R ^{1.1} ~ 0.013R ^{1.3}	0.007R ^{1.3}	0.0074R ^{1.31}
5.6	0.0013R ~ 0.0015R ^{1.3}	0.0013R ^{1.1}	0.0022R ^{1.17}
10.0	0.0003R ~ 0.0005R	0.0003R	0.0003R

い。雨滴による減衰は経験的に $K_r = kR^\beta$ で近似されるとし、表-1に示すような式が提案されている。また反射因子 Z と降雨強度 R との間にも経験的に $Z = BR^\alpha$ なる関係が成立する。これらの関係を用いて(1)式を変形すると次式が得られる。

$$P_r = \frac{C \cdot F \cdot B \cdot R^\beta}{r^2} 10^{-0.2 \int (K_a + kR^\alpha) dr} \quad (2)$$

ここに、 B 、 β ：降雨換算定数、 K_a ：大気減衰定数 (dB/Km)

k 、 α ：表-1に示す定数

(2)式を本論文におけるレーダ方程式として採用した。降雨減衰を考慮しない場合は(2)式において kR^α の項を省略した式となる。

3. 降雨減衰定数各式の感度分析

(2)式に示したレーダ方程式において、降雨減衰項がどのような重みを持つか、また表-1に示した各式にはどの程度の相違があるのかを簡単な感度分析で示すことにする。今レーダ波の伝播途中経路に一樣な降雨 R_0 (mm/h)が存在するとすれば、レーダサイトから L kmの地点で、降雨減衰を考慮した場合の雨量値を R' 、考慮しない場合を R とすると R'/R は(3)式のようになる。ただし(3)式では途中の降雨強度を全て正確に捉えているという仮定に基づいている。

$$R'/R = (10^{0.2 k R_0^\alpha \cdot L})^{1/\beta} \quad (3)$$

(3)式を用い R'/R を表-1の各式により求めた結果の1例を図-1に示す。ただし β は1.6を用いた。これより降雨減衰を考慮するか否か、また降雨減衰を考慮してもいずれの式を用いるかでレーダ雨量値は大きく異なることがわかる。

4. 長崎豪雨による降雨減衰の評価

4.1 評価の方法

降雨減衰を考慮する場合、しない場合それぞれについて地上雨量との対比で最適 B 、 β を求め、この最適 B 、 β を用いて変換したレーダ雨量値を種々比較することにより、降雨減衰の評価を行う。解析の対象とした地上雨量観測所は図-2に示すような53観測所²⁾であり、それら地上雨量と対比するレーダ雨量は、地上観測所の直上極座標メッシュ値とした。また計算対象期間は特に降雨の激しかった7月23日17時~24日9時の16時間とし、10分間雨量を用いて解析を行った。なお本研究ではグランドクラッターの除去方法としてグランドクラッターマップ差し引き方式を用いたが、降雨減衰を考慮する場合にはグランドクラッター自体の降雨による減衰を考慮する、より厳密な計算法を用いている。

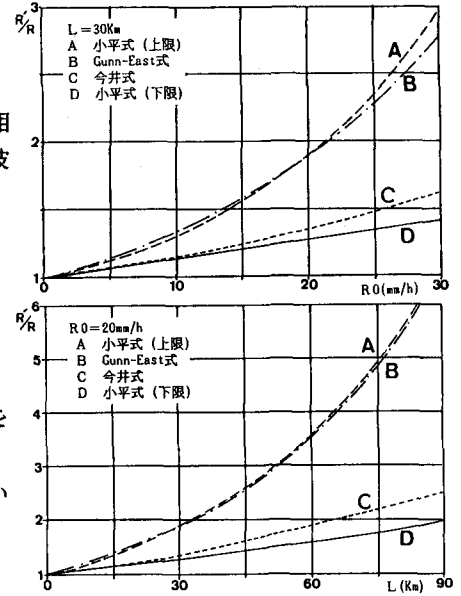


図-1 降雨減衰定数各式の感度分析結果

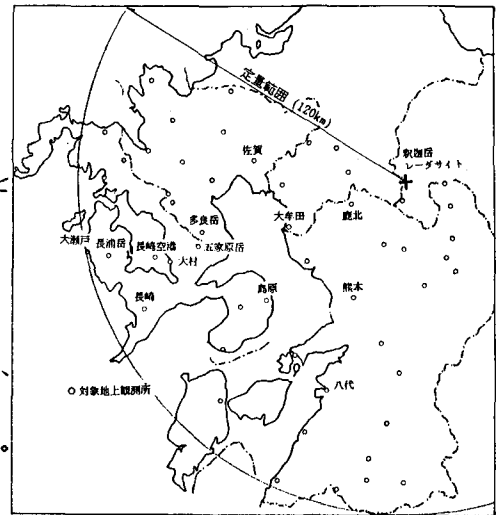


図-2 釈迦岳レーダサイトと地上観測所位置

4.2 最適B、βの検討

上述したように地上雨量との対比で最適B、βを検討する。その判定指標としては次式で定義される自乗誤差を用いた。

自乗誤差 $E = \sqrt{\sum_i \sum_j (RG_{ij} - RR_{ij})^2 / N \cdot K}$ (4)

ここに、RG：地上雨量(mm)、RR：レーダ雨量(mm)

i、j：時間、観測所に関する添字、

N：対象単位時間数、K：対象観測所数

最適B、βはB、βをそれぞれ10、0.1ずつ変化させて、(4)式により自乗誤差を求め、これを図-3、4に示すようにマップ化することにより決定した。図-3、4より明らかなように最適B、βを一意的に決定することは難しく、ある範囲(図の影部分)として捉えることができよう。ここでは通常言われる標準的B、βとあまり遠ざからないよう配慮し、最適B、βをそれぞれ降雨減衰無の場合(150、1.6)、降雨減衰有の場合(160、1.9)とした。なおこの結果は降雨減衰定数として今井式を用いたものである。ここで最も注意を要するのは、降雨減衰を考慮した場合は、考慮しない場合に比してB、βの変動にともない自乗誤差も大きく変動すること、すなわち適切でないB、βを用いた場合大きな誤差を誘起する可能性があるということである。

4.3 降雨減衰項の有無による比較

4.2で求めた最適B、βによる自乗誤差、相対誤差、相関係数を表-2に比較して示した。また地上雨量とレーダ雨量の相関関係を図示したのが図-5である。これらより明らかに降雨減衰を考慮した方が、レーダ雨量の精度の上昇することがわかる。

B\β	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	3.87	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	11.68	7.24	4.90	3.90	3.71	3.85	4.12	4.38
120.0	10.69	6.66	4.61	3.82	3.73	3.93	4.19	4.45
130.0	9.85	6.18	4.39	3.77	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	8.51	5.44	4.08	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	3.78	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	3.79	3.84	4.09	4.38	4.63	4.85
210.0	6.06	4.28	3.78	3.87	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-3 自乗誤差一覧(降雨減衰無)

B\β	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50
50.0				22.48	3.03	3.21	3.72	4.13
60.0			39.57	8.51	2.97	3.51	3.98	4.33
70.0			27.58	3.15	3.20	3.76	4.18	4.49
80.0			17.21	2.92	3.44	3.95	4.33	
90.0				7.77	3.05	3.85	4.12	
100.0		31.45	3.26	3.24	3.83	4.25		
110.0		23.44	2.92	3.43	3.97			
120.0		16.27	2.98	3.69	4.10			
130.0		9.15	3.10	3.74	4.21			
140.0			4.09	3.25	3.87	4.31		
150.0	30.96	3.05	3.39	3.98				
160.0	25.13	2.92	3.53	4.09				
170.0	19.77	2.97	3.65	4.18				
180.0	15.00	3.07	3.76	4.26				
190.0	9.68	3.16	3.86	4.33				

図-4 自乗誤差一覧(降雨減衰有)

表-2 降雨減衰項の有無による比較

	降雨減衰無	降雨減衰有
最適 B	B = 150	B = 160
最適 β	β = 1.6	β = 1.9
自乗誤差	3.73 mm	2.92 mm
相対誤差	53.4%	43.5%
相関係数	0.419	0.671

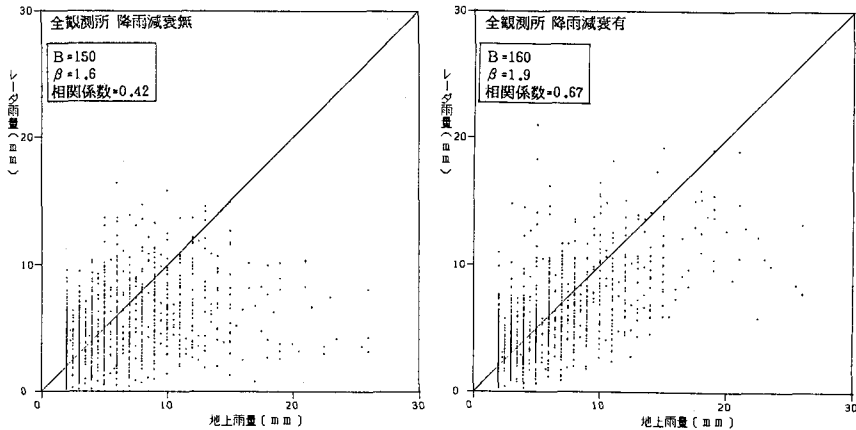


図-5 レーダ雨量と地上雨量の相関関係

表-2、図-5は全体の適合性について議論したものであるが、個々の地上雨量観測所毎に比較してもやはり降雨減衰を考慮した方が精度的に優れていることを示そう。図-6は表-2の最適 β 、 β を用いた場合の各地地上雨量観測所雨量とレーダ雨量の自乗誤差を降雨減衰の有無で比較したものであるが、1つを除きすべての観測所で降雨減衰を考慮した方が精度の優れていることがわかる。さらに両者の差を視覚的に認識するために長崎観測所での時系列的な比較結果と長崎付近での空間分布の比較結果を図-7、8に示した。

降雨減衰を考慮しない場合、降雨減衰効果が大きければ当然、レーダサイトから遠ざかるにつれてレーダ雨量の精度の低下することが予想される。図-9はレーダ雨量と地上雨量の相関係数をレーダサイトからの距離と対比して描いたものである。これより明らかに降雨減衰を考慮しない場合は、距離の増大に対応し精度の低下が見られる。一方降雨減衰を考慮した場合は距離が増大しても相関係数の顕著な低下は見られない。このことは間接的に降雨減衰が重要であることを示唆している。

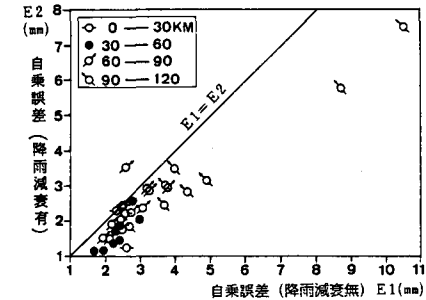


図-6 各地上観測所における自乗誤差の比較

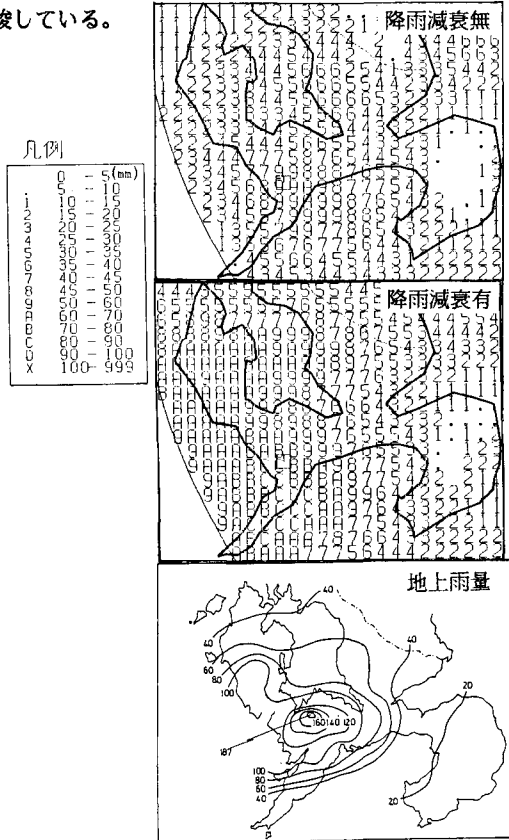


図-8 降雨分布図 (7月23日19時~20時)

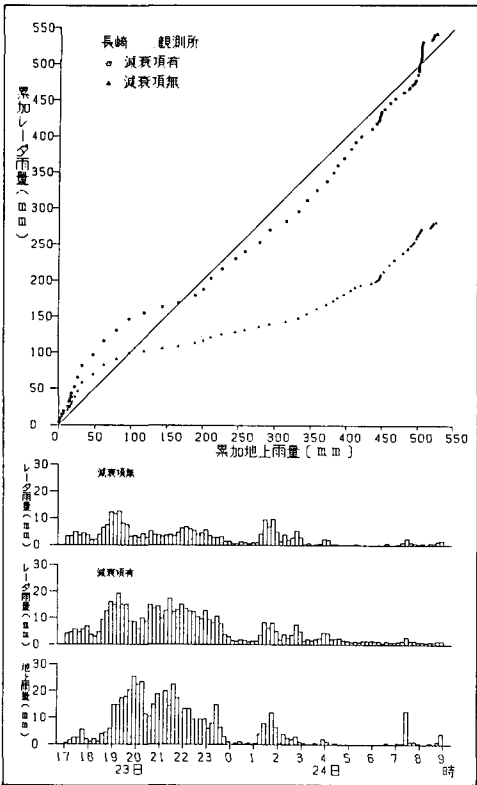


図-7 地上雨量とレーダ雨量の比較 (長崎観測所)

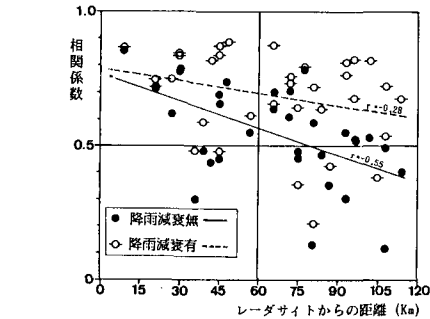


図-9 相関係数とレーダサイトからの距離の関係

4. 4 降雨減衰定数各式の評価

以上の解析結果は全て降雨減衰定数として今井式を採用したものである。本研究では今井式に加えて表-1に示したGunn-East式と小平の下限式の適用を試みたが、Gunn-East式では計算過程での発散(降雨強度が増大しすぎる)が見られた。これは降雨減衰量を過大に見積もり、誤差の累積を招いたためと思われる。Gunn-East式が降雨減衰量を過大に算出する傾向は筆者らの他の解析でも見られる。図-10はこのことを明らかにするため今井式による降雨強度 R_0 (mm/h)とGunn-East式による降雨強度 R (mm/h)の比 R/R_0 をレーダサイトからの距離 L (km)と降雨強度 R_0 (mm/h)に対比して描いたものである。これよりGunn-East式を用いた場合、計算の発散する可能性が非常に強く、その適用は実用上大いに問題があると言えよう。

一方、小平の下限式により同様の計算を行ったところ表-3のような結果が得られた。これは表-2と比較すれば明らかのように精度的には今井式を用いて減衰を考慮した場合と減衰を考慮しない場合の中間に位置していることがわかる。

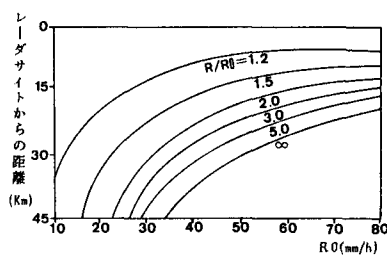


図-10 GUNN-EAST式と今井式による降雨強度の比較

表-3 小平の下限式による算定結果

最適B、β	B = 160、β = 1.8
自乗誤差	3.01m
相対誤差	47.7%
相関係数	0.642

5. 他降雨による降雨減衰の評価

前節の長崎豪雨と同様に、降雨減衰の評価を他の三降雨について行った。この際最適B、βはある範囲内で得られるという前節の結果を踏まえ、計算時間の短縮を図るためβは1.6に固定した。また計算対象期間は各降雨とも24時間とし、1時間雨量を用いて解析を行った。この結果を表-4に示す。表中には比較のため長崎豪雨の算定結果も記してある。表-4よりいずれの降雨でも降雨減衰を考慮した方が精度的に優れていることがわかる。

表-4 最適B、自乗誤差など算定結果

降 雨 名	S.55.9.10 台 風 13 号		S.56.10.8 低 気 圧		S.57.7.23 梅 雨 前 線		S.58.7.5 梅 雨 前 線	
降 雨 原 因	48.0mm		50.0mm		150.0mm		66.0mm	
最大時間雨量								
最 適 B	210	310	360	600	150	480	160	320
自乗誤差(mm)	4.02	3.80	5.66	5.50	3.73	3.06	5.46	5.24
相対誤差(%)	53.3	52.7	50.0	48.5	53.4	40.3	61.5	48.8
相関係数	0.60	0.66	0.67	0.69	0.42	0.67	0.77	0.80

・各洪水とも左欄が降雨減衰無、右欄が降雨減衰有。降雨減衰定数は今井式を使用。

6. まとめ

以上長崎豪雨及び他の3降雨を対象にレーダ雨量計における降雨減衰の評価を行ったが、本研究で得られた知見を整理して列挙すれば以下のとおりである。

- ①降雨減衰はレーダ方程式中重要なウェイトを占める。従って降雨減衰を考慮した方が、レーダ雨量の精度は上昇する。これは降雨減衰を考慮した場合としない場合を比較することにより明らかである。また降雨減衰を考慮した場合には、レーダサイトから遠ざかるにつれて精度が低下する顕著な現象はなく距離方向にはほぼ一様な精度が得られている。

- ②降雨減衰を考慮した場合には、しない場合に比して各地上観測所地点でも精度の優れていることがわかる。すなわち空間的にいずれの場所でも降雨減衰を考慮した方が精度的に優れている。
- ③降雨減衰定数として従来から今井式、Gunn-East式、小平式（上限、下限）と種々の式が提案されているが、これら各式の間には降雨減衰量の評価に関して大きな差がある。このうちGunn-East式は減衰量を過大に見積もり、誤差を累積させる傾向のあることがわかった。よって今後降雨減衰定数式としてGunn-East式を用いるべきではないと言えよう。なおGunn-East式とほぼ同程度の減衰量を与える小平の上限式についても同様である。
- ④降雨減衰を考慮した場合は、降雨減衰を考慮しない場合に比して B 、 β の変動にともなう精度の変動は大きい。すなわち B 、 β の値に敏感に反応する。このことは、実際にレーダ雨量計システムを運用するとき、大きな問題となる。なぜなら観測降雨について最適 B 、 β を推定できない時には、降雨減衰を考慮した方が大きな誤差をもたらす危険性のある事を示唆しているからである。

7. おわりに

本研究では降雨減衰を考慮することが、レーダ雨量の精度向上に結びつくことを明らかにした。また一方降雨減衰を導入することによる危険性も指摘した。今後降雨減衰を実用的にどのように取扱うかを検討していく必要がある。最後に貴重な観測値を提供していただいた九州地建の関係者の方々、度々有益な助言を頂いた水野雅光研究員、また図表の作成に力を注いで頂いた松本典子嬢と潮田雄一君に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 小平信彦他：気象研究ノート 第139号 気象学会 1980年
- 2) 気象庁技術報告 第105号 昭和57年7月豪雨調査報告 昭和59年3月