



土木研究所資料

レーダ雨量計の特性に関する調査

昭和56年2月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

レーダ雨量計は昭和41年に初めて赤城山においてレーダによる降雨の定量観測の実用化を目指して開発が始まった。以来、15年を経過した今日、建設省においては既に3基の実用型レーダ雨量計が稼働しており河川及び道路管理におけるルーチンワークの中で利用されている。

地上雨量計に比較してレーダ雨量計が降雨観測における利点としては、①精度の高い面積雨量の観測、②極地性降雨による災害の予知、③降雨予測への利用があげられる。

レーダ雨量計は今後、全国的規模で配置される計画であり、この観測精度の現状把握及びシステム導入時の手続を明確にする必要がある。

本調査は昭和53年から土木研究所における特別研究である「レーダ雨量計を用いた流出予測シュミレータの開発」によって行なわれた。ここでは研究成果の中で①レーダ定数 B 、 β の最適化手法、②MTI方式によるグラウンドクラッタ処理方法、③レーダによる降雨観測の実用例についてまとめたものである。

本調査は主に赤城山レーダ雨量計のデータを用いて行なった。関東地建・利根川ダム統合管理事務所及び気象研究所衛星研究部第2研究室の青柳二郎室長に大きな協力を頂いた。記して感謝の意を表する次第です。

昭和56年 2月

水文研究室

室 長 石 崎 勝 義

研究員 中 尾 宏 臣

目 次

1. レーダ雨量計の概要	1
1.1 理 論	1
1.2 レーダ雨量計の問題点	3
1.3 グラウンドクラッタ除去方式	5
2. レーダ雨量計の特性	6
2.1 精密雨量観測ネットワークによる定数の検討	6
2.2 既存テレメータ雨量計ネットワークによる定数の検討	13
2.3 レーダ定数の地域特性	15
2.4 レーダ雨量観測の空間特性	22
2.5 レーダ雨量計による面積雨量観測	25
3. MTI方式によるグラウンドクラッタの除去	29
3.1 MTIグラウンドクラッタ除去方式の原理	29
3.1.1 信号の統計特性の実証例	29
3.1.2 降雨の確立密度関係(レイリー分布)	31
3.1.3 降雨エコーとグラウンドクラッタが重畳したときの確率密度関数(レイリー・ガウス分布)	32
3.1.4 MTIグラウンドクラッタ除去装置	35
3.2 MTI方式による降雨観測精度	37
3.3 グラウンドクラッタの消去比特性	38
3.4 MTIレーダ雨量と地上雨量の対応例	40
4. レーダによる降雨観測の精度向上方法	42
4.1 較正用雨量計の利用	42
4.2 RAINPADの利用	42
4.3 三次元レーダデータの利用	47
4.4 レーダ雨量計システムの等価雨量計密度(GDE)	49
5. レーダによる降雨観測の実用例	54
5.1 日 本	54
5.2 英 国	56
5.3 西 ド イ ツ	60
5.4 米 国	61

1. レーダ雨量計の概要

近年気象観測において気象レーダは気象現象を空間的に把握しうることから、気象予報、気象通報に利用されている。レーダによる気象観測の特徴は、広範囲にわたる気象状況を空間的・時間的に連続して観測でき、しかも即時性が高いということである。また、レーダ受信電力の降雨量への変換方式を適切なものとするにより、降雨の定量的把握も上記の定性的長所を保ちつつ可能となる。

このような定量的把握を、地上の雨量観測ネットワークにより得ることは、経済的に困難であろう。

さらに、接近する台風、前線の雨雲を事前にキャッチし予測することは、地上観測では不可能なものである。またきわめて局地的な地形性しゅう雨を見逃すことがない。このような点から、レーダは日本のような気象変化の激しい地域にとって、今後の雨量観測の中心をなすものと期待できる。

1.1 理 論

レーダによる雨量観測の概要を、図 1.1 に示す。その降雨測定は、図 1.2 に示されるように、ビーム巾とパルス長の $1/2$ で決められる空間（目標体積）に存在する雨滴の落下速度との関係から降雨強度を求めようとするものである。

アンテナから送信された電波は、雨雲、雨、大気により吸収減衰また散乱されるが、とくに後方へ散乱される電波の強さは、その雨量強度と密接な関係がある。

この後方に散乱された電波の強さのある時間内の平均値と降雨強度の関係を与えるのがレーダ方程式である。

平均受信電力 P_r をあらわす方程式はつぎのとおりである。

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_e}{8 \pi r^2} \sum \sigma \quad (1.1)$$

P_t : 送信電力

h : パルス長

r : レーダから目標体積までの距離

A_e : アンテナの有効開口面積

$\sum \sigma$: 単位体積中にある雨滴の後方散乱断面積の総和

雨滴の直径 D が波長 λ に比較して小さいとき、すなわち $D \ll \lambda$ の時 Rayleigh 近似が成立して

$$\sum \sigma \div \frac{\pi^5}{\lambda^4} K^2 \sum D^6 \quad (1.2)$$

なる関係がある。これを考慮して (1.1) 式を書きあらためると次式のようになる。

$$P_r = \frac{\pi^4 \cdot P_t \cdot A_e h}{8 r^2 \lambda^4} \sum D^6 \cdot |K|^2 = \frac{C \cdot Z}{r^2} \quad (1.3)$$

ここに $Z = \sum D^6$ である。（ Z : レーダ反射因子）

Zと降雨強度Rとの関係は次のような指数関数で表現されることが、経験的に知られている。

$$Z = B \cdot R^{\beta} \quad (1.4)$$

したがって、(1.3)式は次のように表現される。

$$Pr = \frac{C \cdot B \cdot R^{\beta}}{r^2} \quad (1.5)$$

C：レーダ装置で定まる定数

(1.5)式は、雨量強度Rを測定するための基礎となるが、このRは地上の降雨強度とは異なり、減衰項も考慮されていない。これらを考慮に入れ次式を得る。

$$Pr = F \cdot C \cdot \frac{B \cdot R^{\beta}}{r^2} \cdot 10^{-0.2 \cdot \int_0^r (K \cdot R^{\alpha} + K_c + K_g) \cdot dr} \quad (1.6)$$

降雨による
雲による
大気による
減衰項
減衰項
減衰項

F：正確に校正したレーダで実測した降雨と実測降雨との比。

(1.6)式によれば、各距離における受信電力Prがわかれば、任意距離rにおける地点雨量を求めることができる。

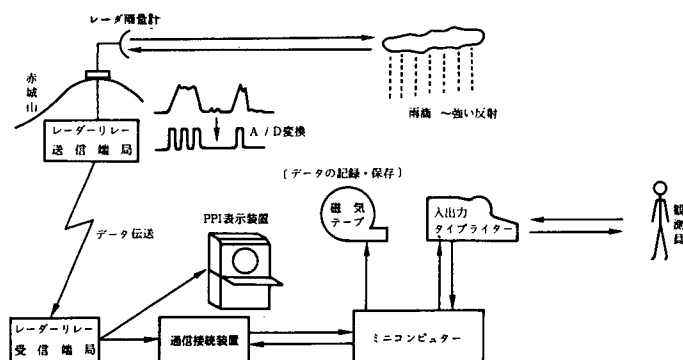


図1.1 建設省赤城山レーダ雨量計システム概要図

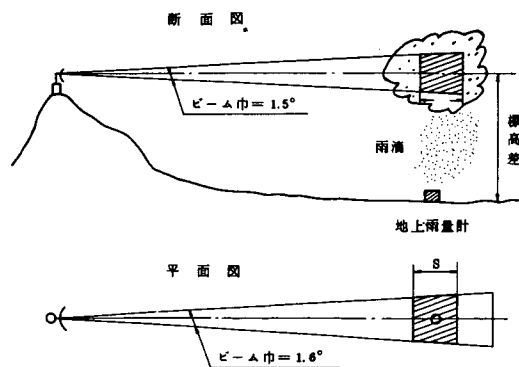


図1.2 レーダによる降雨測定

$S = \text{送信パルス幅の} \frac{1}{2}$

1.2 レーダ雨量計の問題点

レーダ雨量計において、レーダ方程式から導き出される雨量強度は理論値であり、実際の降雨との間には、通常何らかの差がある。この差を生じる要因をつぎにのべる。

(1) レーダ定数の不適合性

これは受信電力をレーダ方程式により雨量強度に変換する場合用いるパラメータ B 、 β の不適合によるものである。 B 、 β の値は、雨滴の粒度分布ならびに落下速度により異なり、図 1.3 に示すように降雨の種類により大きく変化する。

標準的な B 、 β の値としては、Marshall が提唱した値がとられることが多い。「標準 B 、 β 」と呼ばれ、 $B = 200$ 、 $\beta = 1.6$ である。

また、レーダ方程式 (1.6) でわかるように係数 F も、受信電力を降雨強度に変換する時重要な役割を演ずる。レーダー方程式において、 C 値はレーダ装置により定まった定数である。 F 値の内容を考察すれば、ハードウェアに起因する F_h と降雨観測値とレーダ雨量の残差補正をソフトウェア的に行なう。 F_s に分けることができる。

F_h は空中線系の損失、レドームの損失等であり損失の原因となる個々の要素を直接計測し、あるいは設計規格からその値を求めることができる。したがって、不確定な要素は F_s であり、 B 、 β 、 F_s を適切に定めることにより観測の誤差を減少させることができる。

本来、 B 、 β の値は降雨粒子の大きさにより変化するものであり、降雨原因・気象の変化等の要因に関連する。これを、地上観測値との間でフィードバックして補正する方法が考えられるが、これも現実には、困難な問題を含むものであり今後の検討が待たれる。

赤城山レーダにおいては、これらの処理は図 1.4 に示すように雨量強度により B 、 β の切り換えを行なうことにより対処している。

定数としては、Clutter Subtraction 方式では標準 B 、 β ($B = 200$ 、 $\beta = 1.6$) を基準として $R = 6 \text{ mm}$ 以下で $B = 33$ 、 $\beta = 2.7$ としている。Po 方式では $R = 25 \text{ mm}$ までは $B = 100$ 、 $\beta = 1.1$ 、 25 mm 以上では $B = 6$ 、 $\beta = 2.0$ を用いている。

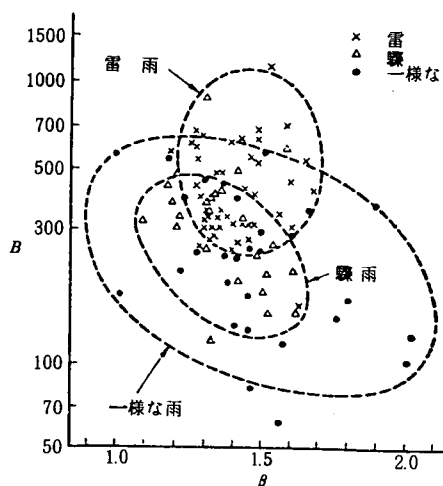


図 1.3 $B \sim \beta$ 測定値

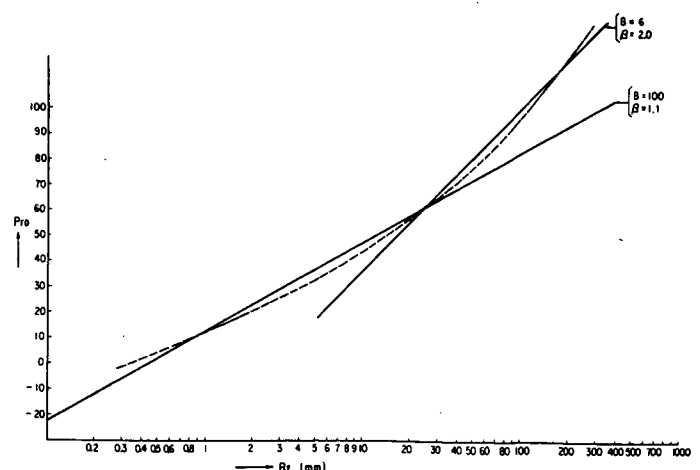


図 1.4 受信電力 (Pro) - 雨量強度 (R_r) の関係

レーダ雨量計においては、 B 、 β 、 F_s の値はきわめて重要であり、本調査においても2章において詳細に検討を行なう。

(2) 雑音電力の分離能力

レーダの受信電力がすべて観測目標である降雨からのものであれば受信電力そのままをレーダ方程式による変換が可能であるが、実際のレーダサイトの位置、標高の条件はこれらの条件に対して必ずしも満足できるものではなく、受信電力の中には当然雨からのもの以外の山岳、建物等からのもの（Ground Clutter）も含まれる。したがって受信電力から雨量強度への変換には、これらの分離が不可欠である。このGround Clutter の分離方式はレーダ雨量計の基本をなすものでありもっとも重要なものである。

この方式について代表的なものを以下にあげる。

- ① Ground Clutter Subtraction 方式
- ② Po 方式
- ③ MTI 方式
- ④ 仰角制御方式
- ⑤ 偏波面方式

このうち、①②はソフトウェアにより Clutter を除くものであり、③④⑤はハードウェアによるものである。赤城山レーダにおいては①②を採用している。①においては晴天時エコーを、②においてはそれに相当する P_o 値を定め受信電力から除くものである。

(3) 電波伝播路における減衰

電波の伝播路における損失には送信波の大気・雲による減衰と降雨域通過時による減衰の3つがある。

(1.6) 式において、 $10^{-0.2 \int_0^r (KR^\alpha + Kc + Kg) \cdot dr}$ の項がこれに相当する。

KR^α : 降雨による減衰 ($K = 0.0013$, $\alpha = 1.1$)

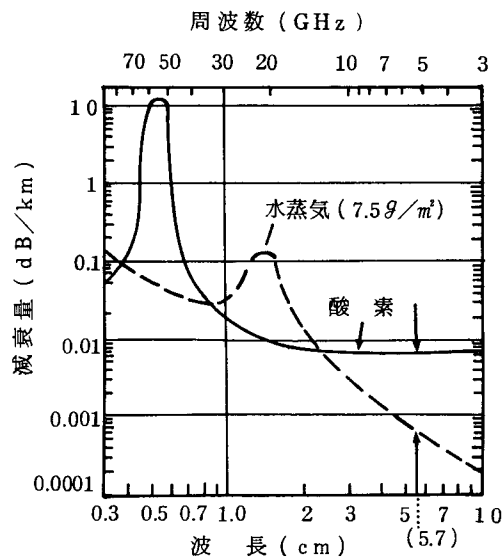


図 1.5 酸素と水蒸気による電波の減衰（片道）、気圧は1気圧。水蒸気は含水量 7.5 g/m^3 の場合

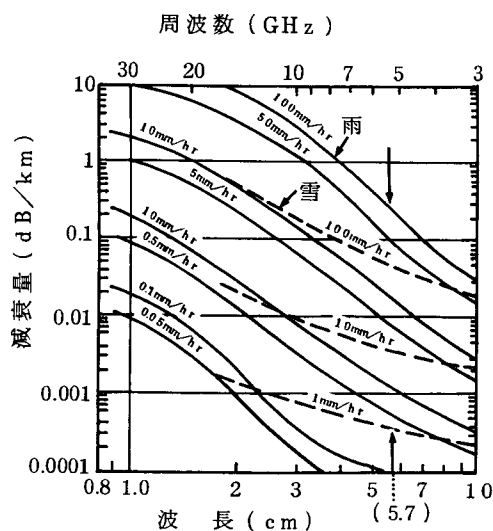


図 1.6 降水による電波の減衰（片道）。

Kc : 雲による減衰

Kg : 大気による減衰 (0.01 dB/km)

このうち、雲による減衰は 5.7 cm 波では少なく無視しうる。また、大気・降雨による減衰は図 1.5 図 1.6 に示すように送信波の波長 λ によって異なる。

これらの減衰項の考察についても本調査において行なった。

(4) そ の 他

高高度における降雨観測の問題点として、風によりレーダでとらえた降雨が移流し他の場所に落下することも考えうる要因である。

この点についても次章以下で検討している。

1.3 グラウンドクラッタ除去方式の概略

前節(2) 雑音電力の分離能力 の項でのべたグラウンドクラッタ分離方式の主なものについて、概略をのべる。

(1) Ground Clutter Subtraction 方式

この方式は、Clutter としてレーダの観測領域すべてで晴天の日を選び実際に観測を行なった値を CPU に登録しておくもので、利点としては各メッシュの "Clutter Level 規模" を容易に決定できるとともに、その変更も非常に容易であることである。欠点として、登録された Clutter Level は降雨観測時において常に降雨時の直前のものに等しいとは限らないことである。Clutter Level の時間、日、または季節変化の特性および晴天時・雨天時の Clutter Level の違いと変化の様子は、現段階では十分に確認されていない。したがって、この変化の誤差への影響は未知である。

また、Clutter level の高い場所においては、小雨における観測精度は、分解能から見て 1.1 3 dB 以下のものについては不明であり問題が残る。

(2) Po 方式

Clutter 除去の方法は(1)と同じであるが、この方式においては、CPU に登録する値が異なる。この値を Po 値と呼ぶ。これは、実際に地上雨量観測が可能な地点で得られた地上雨量～レーダ雨量の相関をもとに、両者の差が統計的に最小となるような補正值として定められたものである。したがって当然地上雨量計のないメッシュについてはこのような作業が不可能であるので、このようなメッシュの Po は、較正可能なメッシュ(地上雨量計のあるメッシュ)の中で条件の近いものを基準にして定める方法である。したがって、地上雨量計のあるメッシュについては、誤差は統計量の範囲に入り精度の向上は容易である。しかし赤城山レーダの例でも 4 3 5 2 メッシュに対して、地上雨量計の数はあまりにも少なく全体的な精度の向上は難しい。

(3) MTI (Moving Target Indication) 方式

MTI 方式は、その名のとおり動いている目標だけを表示するものである。したがって受信電力から固定目標の Clutter を電氣的に除去する方式である。

すなわち、雨滴から反射してくる電波と、地表からのものでは、受信電力のふらつきの周波数特性が異なるという性質を用いて High pass filter を通すことにより降雨エコーを抽出するものである。3 章において詳細に検討する。

2. レーダ雨量計の特性

赤城山レーダ雨量計の受信電力と栗橋地区精密雨量観測ネットワークにより得られた流域平均時間雨量データを用いて、レーダ定数 $B \sim \beta$ の解析を行なった。精密雨量観測ネットワークは、赤城山レーダ観測放射状ネットワークの一つと対応する地区に展開されている。

さらに、その地区のレーダ雨量と栗橋地域の雨量との相互関係を調査し、風による移流の影響を検討してレーダ雨量と地上雨量との対応の空間特性の調査を行なった。

また、このようにして求めた $B \sim \beta$ 値を、栗橋地区以外の流域（平野部として前橋周辺地区、山岳部として相模流域）に適用し、レーダ雨量と地上雨量の対応性の検討を行ない $B \sim \beta$ 値の地域特性の調査を実施した。栗橋地区は、グラウンドクラッタの比較的少ない地区であり、平野部に属し受信電力としては良好な資料が得られている。

2.1 精密雨量観測ネットワークによるレーダ定数 ($B \sim \beta$) の検討

レーダ雨量計の精度に大きく影響を与える要因は、レーダ定数 $B \sim \beta$ 、補正係数 F_s 、グラウンドクラッタの影響、電波伝播路途中における種々の減衰である。ここでは、グラウンドクラッタ除去方式は、今までの研究により、良いとされている Ground Clutter Subtraction方式を採用し、 $B \sim \beta$ 、 F_s 、減衰について検討した。

グラウンドクラッタの基準日は、赤城山レーダ雨量計の観測領域全域で晴天であった1977年8月10日10時00分の値を用いた。

(1) 理 論

レーダ方程式 (1.6) において R (雨量強度 mm/hr) を左辺に移項する。(指数部の R はそのまま)

$$R = \left[\frac{Pr \cdot r^2}{F \cdot C \cdot B} 10^{0.2 \int_0^r (K \cdot R^\alpha + K_c + K_g) \cdot dr} \right]^{1/\beta} \quad (2.1)$$

(2.1) 式を離散化し両辺の対数をとる。

$$\log_{10} R = \frac{1}{\beta} \cdot \left[\log_{10} Pr + \log r^2 + 0.2 \cdot K \cdot \Delta r \sum_{i=1}^{n-1} R_i^\alpha + 0.2 \cdot K_c \cdot n \cdot \Delta r + 0.2 \cdot K_g \cdot n \cdot \Delta r - \log_{10} (F \cdot C \cdot B) \right] \quad (2.2)$$

ここに $\Delta r = r/n$ でありここでは放射状メッシュの一目盛 3 km である。

(2.2) 式において [] 内第 4 項は雲による減衰であるがこれは微少であり無視する。

第 3 項のパラメータ K 、 α は表 2.1 に示される値が今までの研究により求められている。

ここでは、 $K = 0.0013$ 、 $\alpha = 1.1$ を採用した。

また第 5 項の大気による減衰項のパラメータは $K_g = 0.01 \text{ dB/Km}$ である。

表 2.1 減衰定数 db/km

λ	K の 範 囲	K Gunn-East	K Imaj
0.86	0.15 R ~ 0.25 R	0.22 R	—
3.2	0.005 R ^{1.1} ~ 0.013 R ^{1.3}	0.0074 R ^{1.31}	0.007 R ^{1.3}
5.6	0.0013 R ~ 0.0015 R ^{1.3}	0.0022 R ^{1.1}	0.0013 R ^{1.1}
10	0.0003 R ~ 0.00035 R	0.0003 R	0.0003 R

Fs については、(2.1)式において

$$F = F_h \times F_s \quad (2.3)$$

(Fh : ハードから決まる値)

(Fs : ソフトウェアによる補正值)

と考え

$$B' = B \cdot F_s \quad (2.4)$$

として $B' \sim \beta$ の最適値 (地上雨量とレーダ雨量の偏差を最少にするという意味で) を (2.2) 式にしたがって求める。

このようにして求めた $B' \sim \beta$ は、降雨粒子の直径との関係から定義される本来の $B' \sim \beta$ とは異なる。

$B' \sim \beta$ は、レーダ受信電力を地上雨量に変換する換算係数と考えられる。

(2) $B' \sim \beta$ の最適値と減衰項の検討

$B' \sim \beta$ の最適値と減衰項 (とくに (2.2) 式〔 〕内第3項の降雨による減衰項) の検討を行なった。

検討の方法は、(2.2)式の降雨による減衰項を考慮した場合と、しない場合について、 $B' \sim \beta$ のさまざまな組み合わせにより栗橋地区上空からの受信電力を雨量に換算した値 (レーダ雨量) と、その上空メッシュ (3 km × 3 km) に対応する精密観測ネットワーク (雨量計24台/15 km²) から得られる雨量との平均偏差量を最小にする $B' \sim \beta$ を求めるものである。雨量の時間単位は1時間である。各々の場合について、平均偏差量が最小となる $B' \sim \beta$ とその平均偏差量を比較し検討した。ここで Fh, C としては次の値をとった。

$$F_h = 0.13803 (-8 \text{ dB})$$

$$C = 2.9796656 \times 10^{-10} (\text{dB})$$

また、解析対象降雨として表 2.2 に示す一連続降雨をとった。その基準は、日雨量 10 mm 以上である。

図 2.1 は、降雨による減衰を考慮した場合、図 2.2 は降雨による減衰を考慮しない場合である。

降雨による減衰を考慮した場合の $B' \sim \beta$ の最適値は $B' = 2.0$, $\beta = 1.9$ であり、その時の平均偏差量は、1.92 mm/hr であった。

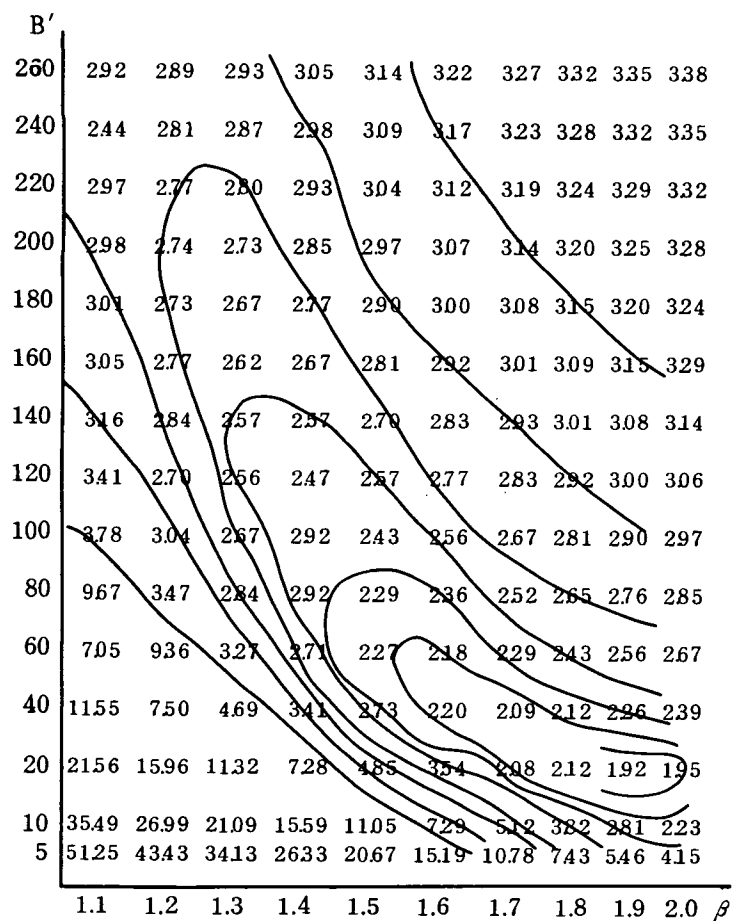


図2.1 $B' \sim \beta$ の推定 (降雨による減衰を考慮した場合)

$$\sqrt{\frac{\sum (R_{G_1} - R_{r_1})^2}{n}}$$

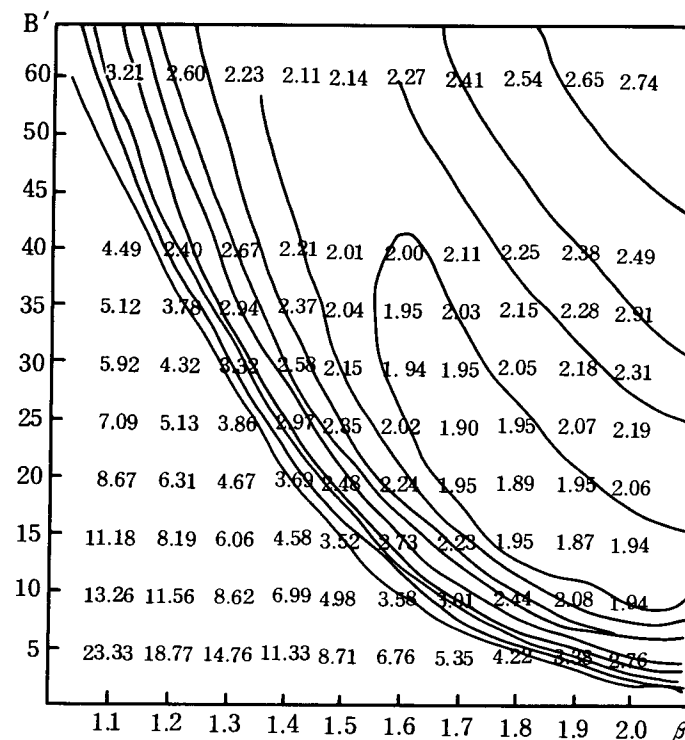


図2.2 $B' \sim \beta$ の推定 (降雨による減衰を考慮しない場合)

$$\sqrt{\frac{\sum (R_{G_1} - R_{r_1})^2}{n}}$$

(R_{G_1} 地上雨量計の観測値による流域平均時間雨量
 R_{r_1} レーダ雨量計 ")

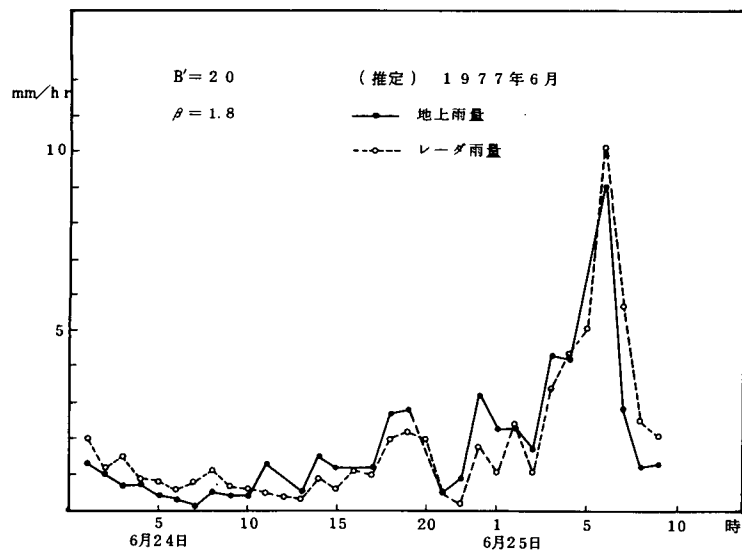


図 2.3(1) 地上雨量とレーダ雨量

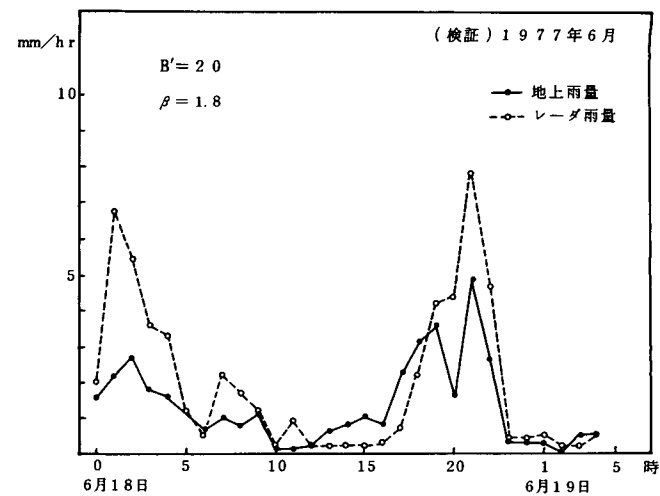


図 2.3(3) 地上雨量とレーダ雨量

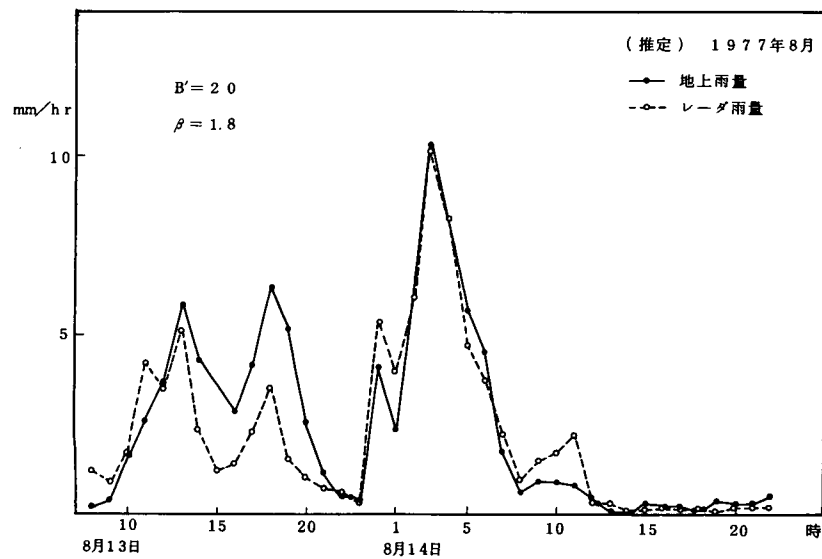


図 2.3(2) 地上雨量とレーダ雨量

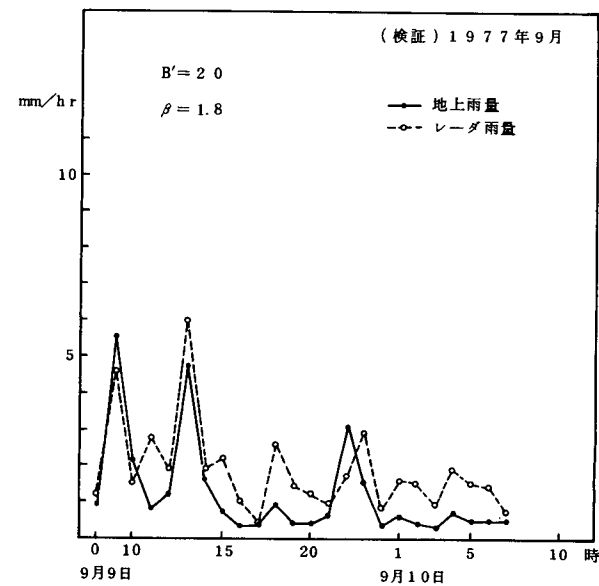


図 2.3(4) 地上雨量とレーダ雨量

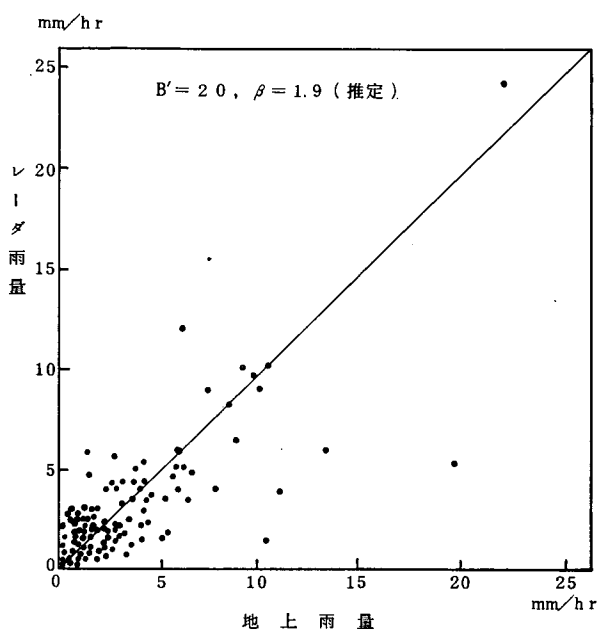


図 2.4 (1) 地上雨量とレーダ雨量の相関
(降雨による減衰を考慮した場合)

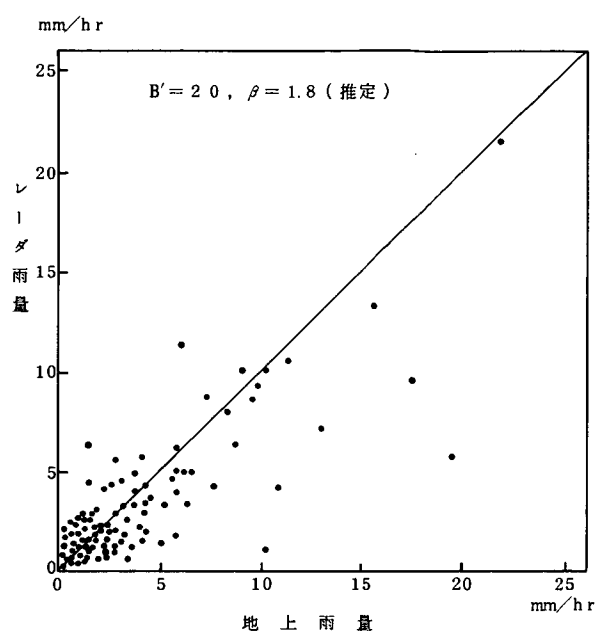


図 2.4 (2) 地上雨量とレーダ雨量の相関
(降雨による減衰を考慮しない場合)

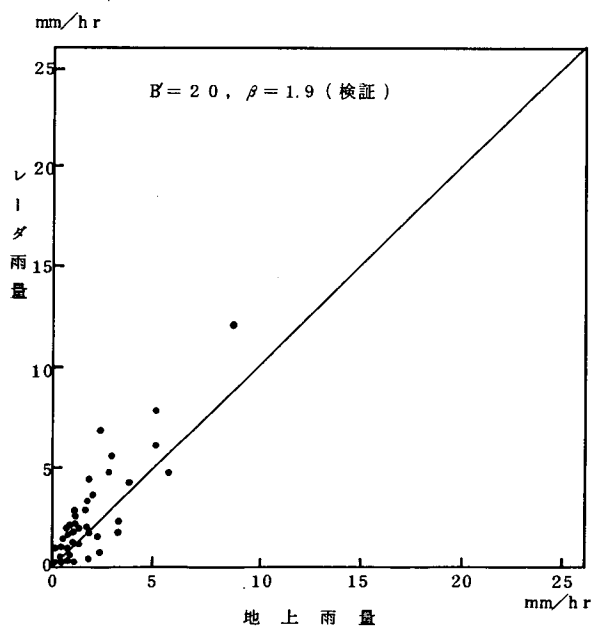


図 2.5 (1) 地上雨量とレーダ雨量の相関
(降雨による減衰を考慮した場合)

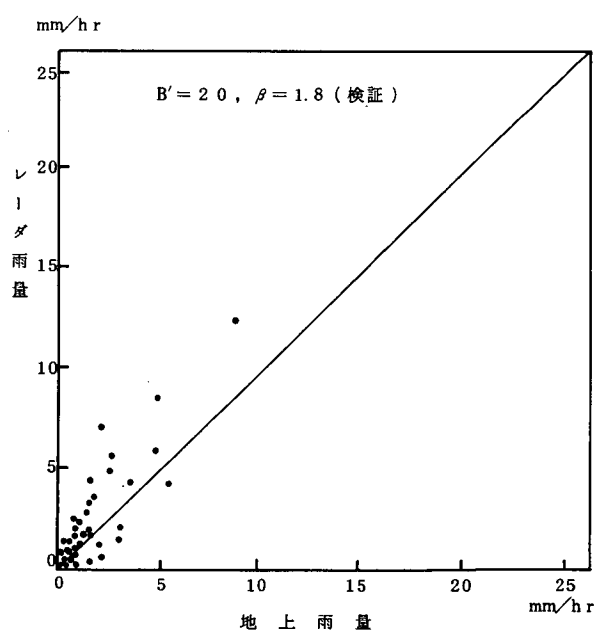


図 2.5 (2) 地上雨量とレーダ雨量の相関
(降雨による減衰を考慮しない場合)

降雨による減衰を考慮しない場合の $B' \sim \beta$ の最適値は、

$B' = 20$, $\beta = 1.8$ であり、その時の平均偏差量は 1.89 mm/hr である。

したがって、これらの解析例においては両者の有意な差は認められなかった。

そこで、各々の場合の $B' \sim \beta$ の値を検証用降雨について適用し、相関係数および残差の標準偏差を求めた。表 2.2 に解析、検証時のこれらの値をまとめている。

これによっても、両者に有意な差を認めることはできなかった。

各降雨例のうち主なものについて、レーダ雨量対地上雨量の関係を図 2.3 に示す。

また、解析用降雨すべてをプロットしたレーダ雨量と地上雨量の相関図を各々の場合について求めたのが、図 2.4、図 2.5 である。

表 2.2 $B' \sim \beta$ の推定と相関係数・標準偏差（実測雨量とレーダ雨量の誤差）

	降 雨 期 間	継続時間	減衰考慮 $B=20, \beta=1.9$		減衰考慮なし $B=20, \beta=1.8$		降雨原因
			相関係数	標準偏差	相関係数	標準偏差	
推 定	52年6月24日～25日	33	0.75	0.5	0.74	0.5	梅雨前線
	" 7月16日～17日	12	0.66	0.9	0.65	0.9	雷 雨
	" 8月11日	5	0.49	1.3	0.46	1.3	前 線
	" 8月13日～14日	39	0.87	0.6	0.86	0.6	前 線
	" 8月16日～18日	63	0.83	0.8	0.83	0.8	停滞前線
	" 9月 8日～ 9日	11	0.86	0.9	0.86	0.9	"
	" 10月 9日	8	0.84	0.8	0.84	0.6	低 気 圧
検 証	" 6月17日～19日	29	0.71	0.8	0.71	0.8	梅雨前線
	" 7月 3日	5	0.78	1.3	0.78	1.2	雷 雨
	" 8月 9日～10日	22	0.77	0.7	0.76	0.7	停滞前線

(3) ま と め

降雨による減衰を考慮する場合と、考慮しない場合により $B' \sim \beta$ の値は、少し変わるがそれ程大きなものではない。同時に平均偏差量も有意な差は認められなかった。降雨による減衰は、レーダ雨量を求めようとしているメッシュとレーダサイトの間に、かなり強い雨が連続してある場合には影響を与えられと考える。5.7 cm波においては、 10 mm/hr の雨が伝播経路に沿って 100 km にわたって続いている時、約 -3 dB になる。しかし、実際には、電波の伝播方向に広い範囲にわたって強い雨がある場合は少ない。また、(2.1)式からわかるようにこの項を考慮した場合には、その計算は複雑になる。このような点から本調査においては、降雨による減衰は考慮しないで、 $B' \sim \beta$ の値としては、 $B' = 20$, $\beta = 1.8$ を採用し、以後の検討を進める。また、図 2.6 に示した時間雨量のヒストグラムによれば、解析に用いた時間雨量の大半が 3 mm/hr 以下の雨であり、 $B' = 20$, $\beta = 1.8$ の値もこのような雨に対するものと考えうる。この点で、より強い降雨についての精密観測結果からの検討も今後の課題となろう。

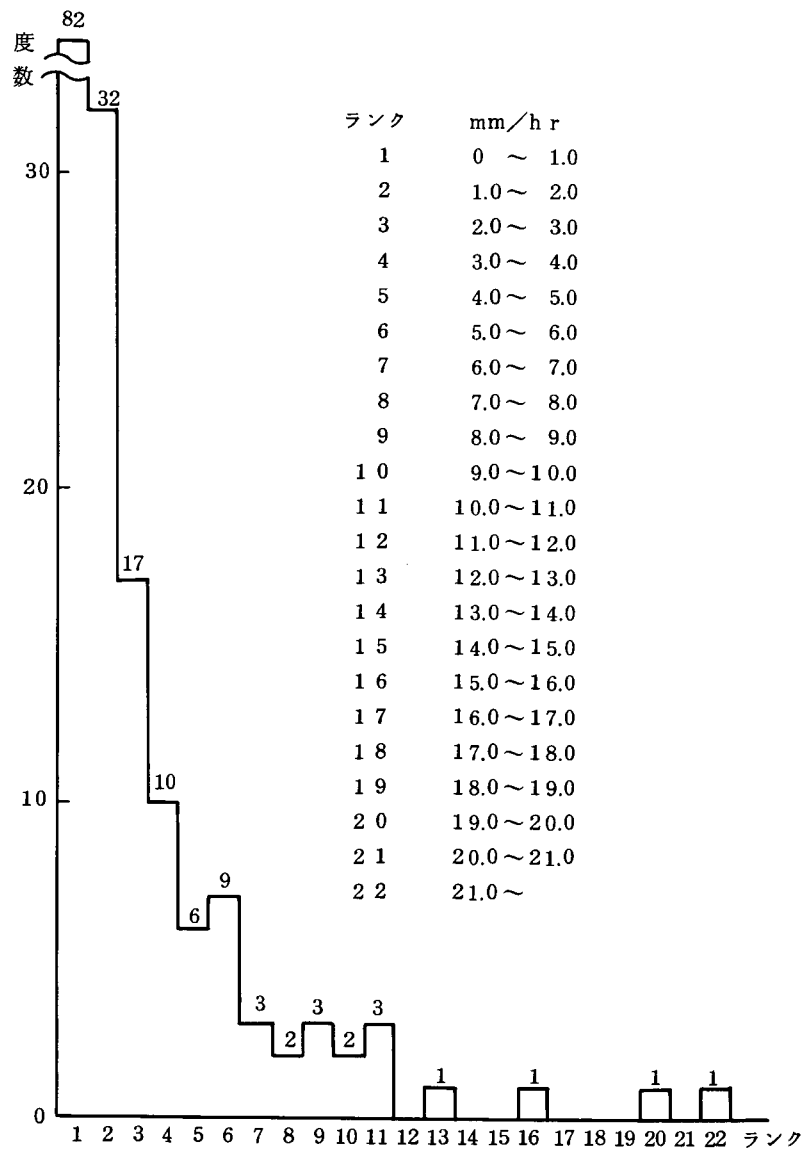


図 2.6 ヒストグラム (解析降雨)

2.2 既存テレメータ雨量計ネットワークによる定数の検討

レーダ雨量計の観測値と地上雨量計の観測値の対応をとることは、実用上きわめて重要な項目である。

レーダ反射因子 Z と降雨強度の間には、次のような関係がある。

$$Z = B R^{\beta} \quad (2.5)$$

したがって B, β の値が地上観測値とレーダ受信電力とを結びつけるパラメータとなる。

これを較正する方法としては、昭和53年度行なった調査「レーダ雨量計の特性に関する調査」において、栗橋地区における精密地上観測資料をもとに最適値の探索を行なった結果、 $B' = 20, \beta = 1.8$ という値を得ている。（本調査では B は F_s を含む値として B' として表わす）

また、通常の地上雨量計（テレメータ）を用いてこの定数を推定することもできる。

2.2.1 精密雨量観測にもとづく定数（ $B' = 20, \beta = 1.8$ ）による面積雨量の推定精度

本項においては、栗橋地区（平野部）で定めた $B' = 20, \beta = 1.8$ なる定数を利根川流域の他の地区（山岳部）に適用した場合の精度について検討する。（表2.3）

対象流域は、矢木沢・藤原ダム流域である。ここには、6地点の地上雨量観測点（テレター）が存在する。

これら地上観測点による流域平均雨量と、先にのべた定数を用いて求めたレーダ雨量計による流域平均雨量を比較したものが、表2.3である。（参考までに、前橋、渋川のポイントをも示す。）これによれば非常に良い一致を示しており、総雨量に対する誤差も10%以内におさまっている。

表2.3 $B' = 20, \beta = 1.8$ （精密観測網による較正）による誤差*

項 目 降雨時期	矢木沢・藤原流域		前橋ポイント		渋川ポイント	
	総雨量 mm	誤 差 mm	総雨量 mm	誤 差 mm	総雨量 mm	誤 差 mm
1977.8.13 5時～16時	22.8	2.1	15.0	0.9	9.0	3.9
1977.9.19 8時～19時	45.7	4.5	59.0	3.2	49.0	6.0

* 誤差はレーダ・地上雨量各々の総雨量の差の絶対値

2.2.2 地上雨量計（テレメータ）を用いた場合の定数（ B', β ）の推定について

前項におけるレーダ定数は、精密地上雨量観測網（栗橋地区）によって求められた雨量値を用いて定めたものである。

本項においては、地上資料として流域内のテレメータの雨量観測値を用いた場合の定数推定の可能性について検討する。

対象流域は、利根川源流の矢木沢ダム、藤原ダムを含む流域（ 401 km^2 ）である。この流域には6台のテレメータがあるが、本調査においては、資料の関係から5台のテレメータ観測資料を用いた。レーダ雨量と地上雨量との比較は、レーダについては、流域上の全メッシュ平均値、地上雨量値については、算術平均値を用いた。

調査の方法は、 $B' \sim \beta$ の336の組について誤差（流域平均総雨量についての誤差の和）を最小にする B', β を求めた。同時にその感度分析も行なっている。

その結果を図2.7に示す。図中影についている部分は、おおよそ誤差の最小値 $+1.0 \text{ mm}$ 以内の領域

CHIJOY URYOKEI 1 SAITEKICI U = 6.0 BETA = 3.0 GOSA = 0.9 MM
KEISAN MANI B = 5.25 BETA=15.30(1/10) N = GT1000MM

25	11.6	11.2	10.9	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	10.2	10.4	10.5	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	25	6.6	6.9	7.1	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.1	10.3	10.4
24	11.6	11.2	10.9	10.6	10.4	10.3	10.1	10.0	10.1	10.2	10.4	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	24	6.7	6.9	7.1	7.4	7.9	8.3	8.7	9.0	9.2	9.5	9.7	9.9	10.0	10.2	10.3
23	11.6	11.2	10.9	10.6	10.4	10.2	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.6	10.7	10.8	10.9	23	6.9	6.9	6.7	7.2	7.7	8.1	8.5	8.8	9.1	9.3	9.5	9.7	9.9	10.0	10.2
22	11.6	11.2	10.8	10.6	10.4	10.2	10.1	10.0	10.1	10.0	10.1	10.3	10.5	10.6	10.7	10.8	22	7.1	6.9	6.7	7.0	7.5	7.9	8.3	8.6	8.9	9.2	9.4	9.6	9.8	9.9	10.1
21	11.7	11.2	10.8	10.5	10.3	10.2	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	21	7.3	6.9	6.7	6.8	7.3	7.7	8.1	8.4	8.7	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	9.9
20	11.9	11.2	10.8	10.6	10.3	10.1	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	20	7.5	6.9	6.7	6.6	7.1	7.5	7.9	8.2	8.5	8.8	9.1	9.3	9.5	9.7	9.8
19	12.1	11.3	10.9	10.6	10.3	10.1	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	19	7.7	6.7	6.7	6.9	7.3	7.7	8.0	8.3	8.6	8.9	9.1	9.3	9.5	9.7	9.7
18	12.3	11.3	10.9	10.6	10.3	10.1	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	18	8.0	7.0	6.7	6.7	7.1	7.5	7.8	8.1	8.4	8.7	8.9	9.2	9.3	9.5	9.7
17	12.6	11.7	11.0	10.6	10.4	10.1	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	17	8.8	7.2	6.9	6.9	7.3	7.6	7.9	8.2	8.5	8.7	9.0	9.2	9.4	9.6	9.7
16	12.9	11.9	11.2	10.6	10.4	10.2	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	16	9.4	7.5	6.8	6.7	7.1	7.4	7.7	8.0	8.3	8.5	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6
15	13.4	12.1	11.4	10.8	10.4	10.2	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	15	10.4	7.9	6.8	6.7	7.1	7.4	7.7	8.0	8.3	8.5	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6
14	13.9	12.5	11.6	10.9	10.4	10.2	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	14	11.5	8.0	7.1	6.7	7.1	7.4	7.7	8.0	8.3	8.5	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6
13	14.5	13.6	11.8	11.2	10.6	10.2	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	13	12.8	9.9	7.7	6.6	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.8	9.0	9.2
12	15.2	13.5	12.3	11.4	10.6	10.3	10.0	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	12	14.3	11.1	8.7	7.1	6.7	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.8	9.0	9.2
11	16.0	14.2	12.6	11.7	11.0	10.5	10.1	10.0	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	11	16.0	12.5	9.7	7.8	6.6	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.8	9.0
10	17.2	15.0	13.4	12.2	11.3	10.7	10.3	10.1	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	10	18.0	14.2	11.2	8.9	7.3	6.8	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.8	9.0
9	18.6	16.1	14.2	12.9	11.8	11.0	10.5	10.1	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.7	9	20.3	16.1	12.8	10.3	8.2	7.0	6.7	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.8
8	20.3	17.5	15.4	13.9	12.5	11.5	10.8	10.4	10.1	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	8	23.1	18.4	14.8	11.9	9.7	7.8	6.8	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.8
7	22.4	19.2	16.8	14.9	13.4	12.2	11.4	10.7	10.2	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	7	26.5	21.2	17.1	13.9	11.4	9.3	7.6	6.7	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6
6	24.2	21.4	18.6	16.5	14.7	13.4	12.2	11.3	10.6	10.1	10.0	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	6	31.0	24.7	20.1	16.4	13.5	11.2	9.2	7.6	6.7	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3
5	31.6	24.9	20.9	18.4	16.4	14.6	13.5	12.4	11.5	10.7	10.2	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	5	37.9	29.9	24.1	19.8	16.3	13.6	11.3	9.5	7.9	7.0	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3

BETA 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0 BETA 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0

CHIJOY URYOKEI 2 SAITEKICI B = 20.0 BETA = 1.7 GOSA = 7.5 MM
KEISAN MANI B = 5.25 BETA=15.30(1/10) N = GT1000MM

25	8.0	7.7	7.4	7.1	6.8	6.5	6.2	5.9	5.6	5.3	5.0	4.7	4.4	4.1	3.8	3.5	25	6.4	6.7	7.4	8.0	8.5	8.9	9.2	9.5	9.8	10.1	10.3	10.5	10.6	10.8	10.9	11.0
24	8.3	7.9	7.6	7.3	7.0	6.7	6.4	6.1	5.8	5.5	5.2	4.9	4.6	4.3	4.0	3.7	24	6.6	6.9	7.2	7.8	8.3	8.7	9.1	9.4	9.6	9.9	10.1	10.2	10.4	10.5	10.6	10.8
23	8.5	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	5.4	5.1	4.8	4.5	4.2	3.9	23	6.8	6.9	6.9	7.5	8.1	8.5	8.9	9.2	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.4	10.5	10.7
22	8.8	8.3	8.0	7.7	7.4	7.1	6.8	6.5	6.2	5.9	5.6	5.3	5.0	4.7	4.4	4.1	22	7.0	6.9	6.6	7.3	7.8	8.3	8.7	9.0	9.3	9.6	9.8	10.0	10.2	10.3	10.4	10.7
21	9.1	8.6	8.3	8.0	7.7	7.4	7.1	6.8	6.5	6.2	5.9	5.6	5.3	5.0	4.7	4.4	21	7.2	6.9	6.7	7.0	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.5
20	9.3	8.8	8.5	8.2	7.9	7.6	7.3	7.0	6.7	6.4	6.1	5.8	5.5	5.2	4.9	4.6	20	7.4	6.9	6.7	7.3	7.8	8.3	8.7	9.0	9.3	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.4	10.5
19	9.9	9.4	9.1	8.8	8.5	8.2	7.9	7.6	7.3	7.0	6.7	6.4	6.1	5.8	5.5	5.2	19	7.6	6.6	6.7	7.0	7.6	8.0	8.4	8.7	9.0	9.3	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.4
18	10.3	9.6	9.3	9.0	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	5.4	18	8.0	6.9	6.7	7.3	7.8	8.3	8.7	9.0	9.3	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.4	10.5
17	10.8	9.9	9.6	9.3	9.0	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	17	8.5	7.1	6.7	7.0	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.5
16	11.3	9.9	9.6	9.3	9.0	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	16	9.0	7.4	6.7	7.3	7.8	8.3	8.7	9.0	9.3	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.4	10.5
15	11.9	10.4	9.9	9.6	9.3	9.0	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	15	9.8	7.9	6.7	7.0	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.5
14	12.6	10.9	9.6	9.3	9.0	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	14	10.8	8.4	6.7	7.3	7.8	8.3	8.7	9.0	9.3	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.4	10.5
13	13.3	11.5	10.1	9.0	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	5.4	13	12.0	9.1	7.6	7.0	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.5
12	14.1	12.2	10.7	9.5	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	5.4	12	13.3	10.2	8.1	6.9	7.0	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4
11	15.1	13.0	11.4	10.1	9.1	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	11	14.8	11.5	8.9	7.4	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.5
10	16.2	13.9	12.2	10.8	9.7	8.8	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	10	16.8	13.0	10.1	8.0	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.5
9	17.5	15.0	13.1	11.5	10.3	9.3	8.8	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	9	19.1	14.9	11.6	9.1	7.5	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4
8	19.7	16.3	14.1	12.5	11.1	10.0	9.1	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	8	21.9	17.2	13.6	10.7	8.5	7.1	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2
7	23.3	18.0	15.5	13.6	12.1	10.8	9.8	9.0	8.3	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	7	25.3	20.0	15.9	12.7	10.2	8.1	6.9	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8	10.0
6	27.9	21.7	17.3	15.0	13.3	11.9	10.8	9.8	9.0	8.3	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	6.6	6	30.2	23.5	18.9	15.2	12.3	10.0	8.0	6.9	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6	9.8
5	33.9	26.6	21.0	17.1	14.8	13.2	11.9	10.8	9.9	9.2	8.5	8.1	7.8	7.5	7.2	6.9	5	37.1	29.1	23.1	18.6	15.1	12.4	10.1	8.3	7.1	7.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.4	9.6

BETA 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0 BETA 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0

CHIJOY URYOKEI 3 SAITEKICI B = 12.0 BETA = 2.0 GOSA = 6.1 MM
KEISAN MANI B = 5.25 BETA=15.30(1/10) N = GT1000MM

25	8.0	7.7
----	-----	-----

を示している。また、テレメータの台数を1, 2, 3, 4, 5台と変化させている。

この校正用テレメータの台数が増加するにつれ、誤差は減少する傾向にあり、 $B' \sim \beta$ の最適値を含む領域も小さくなる。

本例は、一雨の例についてのケーススタディではあるが、 $B' \sim \beta$ の推定方法についての一つの指針をあたえる。

すなわち、

校正用地上雨量計の台数が多い程誤差も少なくなり安定した定数が得られる傾向がうかがえる。

さらに、ケーススタディを積むことにより雨量計の台数と精度等についての一般的な傾向が得られることが期待される。しかし、地上雨量との比較検討については常にグラウンドクラッタの除去の良否がつきまとう。したがってより精密な定数推定方法および定数は、グラウンドクラッタ除去方式の改良とともに改善される。

また、ケーススタディを積むにあたって降雨原因、降雨強度別分類などを行なうことも考慮すべきである。

現段階では、精密雨量観測資料によって求める B , β の推定値は比較的安定しており良好な結果を得ている。

2.3 レーダ定数の地域特性

栗橋地区において求められた $B' \sim \beta$ 値を他の流域に適用し、その地上雨量との対応特性を検討する。さらに、現在赤城山レーダで採用されているGround Clutter Subtraction方式での $B \sim \beta$ 値、 P_0 方式での $B \sim \beta$ 値でも同様の検討を行ない相互に比較調査する。

また対象流域は前橋・高崎、藤岡、八斗島、伊勢崎を結ぶグラウンドクラッター影響の比較少ない地区と、グラウンドクラッターの高い地区である相俣流域の2流域である。

(1) 解 析

前橋周辺地区には、建設省の雨量観測点が3ヶ所と、気象庁の地域気象観測点が2ヶ所ある。また相俣流域には、7ヶ所の雨量観点がある。これらの観測点上空メッシュのレーダ雨量を、Grand Clutter Subtraction方式、と P_0 方式により求め地上雨量と比較する。この内Ground Clutter Subtraction方式は、 B , β 値の違いにより2種について検討を実施した。これらの3種の計算にかかわる定数の一覧表を表2.4に示す。

また、これらの地区・流域ごとに地上雨量の単純平均値と、レーダ雨量の単純平均すなわち算術平均値を比較することにより、観測誤差の影響をさけることにした。

これらの比較の指標は、一連続降雨ごとの時間平均雨量の相関係数と差の絶対値の平均である。

すなわち、時系列としての地上雨量とレーダ雨量の対応性を相関係数値により比較し、量的な比較を差の絶対値で検討する。

これらの検討に用いた降雨は、3例である。

表 2.4 グラウンドクラッタ除去方式と定数値

方式 定数	Clutter 方式(A)	Clutter 方式(B)	P ₀ 方式
B(B')	20 (B')	200	100 6 (25mm/hr 以上)
β	1.8	1.6	1.1 2.0 (25mm/hr 以上)
C	2.98×10^{-10} (dB)	0.47×10^{-7} (dB)	2.98×10^{-10} dB
F(Fh)	0.138 (-8 dB)	0.167 (-7.78 dB)	0.05 (-13.0 dB)

(2) 結果とその検討

(1)でのべた方法により得た結果を表 2.5 にまとめた。この結果から、グラウンドクラッタの除去方式は、晴天時のクラッタを除去する方式 (Ground Clutter Subtraction 方式) が、P₀方式より明らかにすぐれていることがわかる。

そこで、Ground Clutter Subtraction 方式の内、栗橋地区で求めた $B' = 20$ 、 $\beta = 1.8$ を定数とする(A)方式と、 $B = 200$ 、 $\beta = 1.6$ を用いる(B)方式を検討する。

地区別に見れば、グラウンドクラッタの大きい相俣地区においては、両者の内(B)方式の方がわずかに良いようであるが、両者ほとんど差はないと言える。前橋周辺地区においては、(A)方式の方がわずかに良好な値を示しているが、あまり明確な差異は認められない。これらのことから、強いて理由づけを行なえば、栗橋地区のグラウンドクラッタ条件とほぼ似かよった前橋地区において、(A)方式が比較的良好の結果を示し、栗橋地区とグラウンドクラッタの条件が、かなり異なる相俣地区においては、両者とも差異がないと言える。またこれら(A)、(B)方式の結果を地区別に地上雨量との相関図としてまとめたものが図 2.8 (1)~(4)である。相俣・前橋両地区においても(B)方式の方が小さな雨量値を与える傾向にあることがわかる。

図 2.8 は、平均雨量ではなく地点とその上空メッシュのレーダ雨量を時間的にプロットしたものである。これによれば、(A)方式の結果の方がわずかではあるが、量的に地上雨量に近いことが読みとれる。しかし、地点雨量をメッシュに対応する流域平均雨量とした場合の誤差を考えれば明確に差があるとは言えない。(A)、(B)方式は、両者とも想像以上に良い結果を示している。

今後さらに、数多くの降雨例について検討する必要があると考える。

表 2.5 レーダ雨量推定方式の比較 (1977年)

相俣流域 (山岳部)

観測所数: 6ヶ所

降雨 項目 期間 (一連統降雨)	一雨平均 時間雨量 mm/hr	レーダ雨量(A) $B' = 20$ $\beta = 1.8$			レーダ雨量(B) $B = 200$ $\beta = 1.6$			レーダ雨量 P ₀ 方式		
		相関係数	$\sum \frac{ \epsilon }{N}$ mm/hr	相対誤差 %	相関係数	$\sum \frac{ \epsilon }{N}$ mm/hr	相対誤差 %	相関係数	$\sum \frac{ \epsilon }{N}$ mm/hr	相対誤差 %
6.17.03~ 6.18.06	1.0	0.84	0.5	5.0	0.84	0.4	4.1	0.59	0.9	8.7
7.26.15~ 7.27.00	1.7	0.97	0.9	5.5	0.95	0.8	4.9	0.58	4.2	25.5
8.16.16~ 8.18.15	2.7	0.79	1.2	4.5	0.77	1.4	5.3	0.73	0.7	2.4

但し、Nは降雨継続時間

項目 降雨 期間 (一連続降雨)	一雨平均 時間雨量 mm/hr	レーダ雨量(A) $B'=20$ $\beta=1.8$			レーダ雨量(B) $B=200$ $\beta=1.6$			レーダ雨量 P_0 方式		
		相関係数	$\Sigma \frac{ \epsilon }{N}$ mm/hr	相対誤差 %	相関係数	$\Sigma \frac{ \epsilon }{N}$ mm/hr	相対誤差 %	相関係数	$\Sigma \frac{ \epsilon }{N}$ mm/hr	相対誤差 %
6.17.03～ 6.18.06	1.1	0.66	0.4	37	0.68	0.5	45	0.26	0.6	55
7.26.15～ 7.27.00	2.1	0.98	0.6	31	0.98	0.6	29	0.86	0.2	10
8.16.16～ 8.18.15	2.2	0.80	0.8	38	0.80	0.9	39	0.28	1.4	62

レーダ雨量(A), (B)のクラッタ除去方式は、晴天時のエコーを除去するGround Clutter Subtraction方式
 ϵ = レーダ時間雨量－地上時間雨量

(3) ま と め

グラウンドクラッタの除去方式としては、Ground Clutter Subtraction方式が P_0 方式よりも明らかにすぐれている。

$B \sim \beta$ の値としては、(A), (B)どちらの方式がよいということは、この結果だけでは言えない。

しかし、グラウンドクラッタの大きい地区で、地上の精密観測を実施しその地区での最適な $B' \sim \beta$ 値を求めグラウンドクラッタの小さい地区での $B' \sim \beta$ 値とを組み合わせ、グラウンドクラッタレベルにより使いわけ方式の検討も今後実施する意義があると思われる。

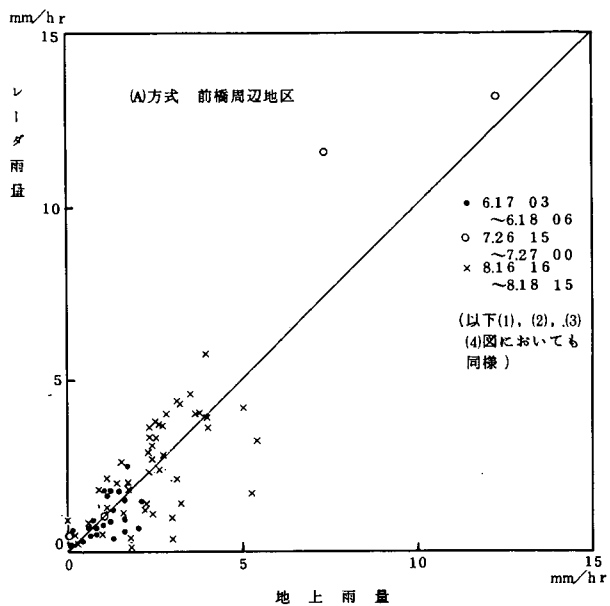


図 2.8 (1) 地上雨量とレーダ雨量

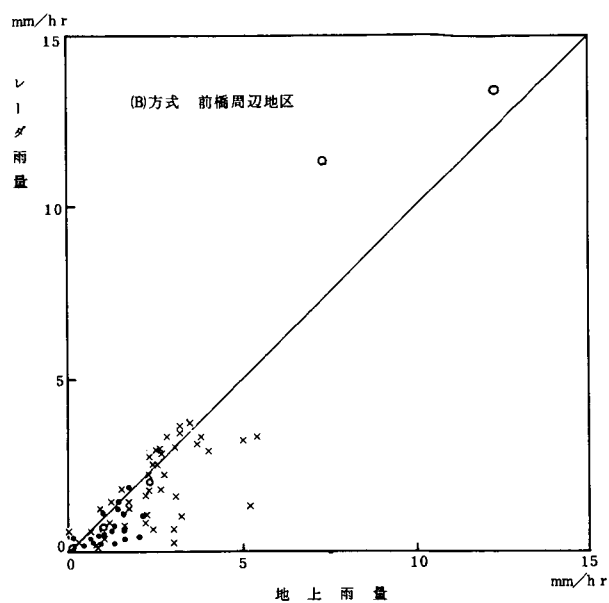


図 2.8 (3) 地上雨量とレーダ雨量

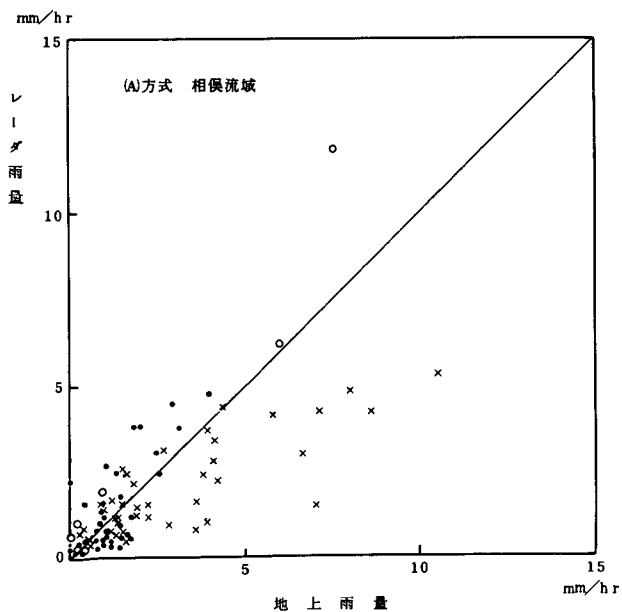


図 2.8 (2) 地上雨量とレーダ雨量

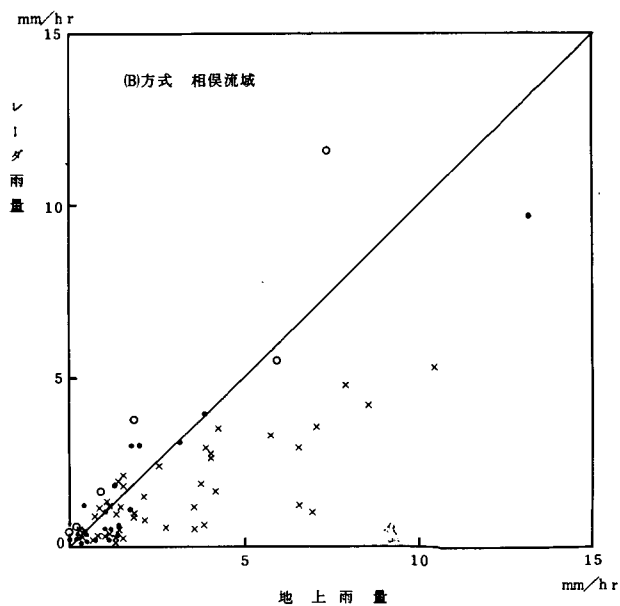


図 2.8 (4) 地上雨量とレーダ雨量

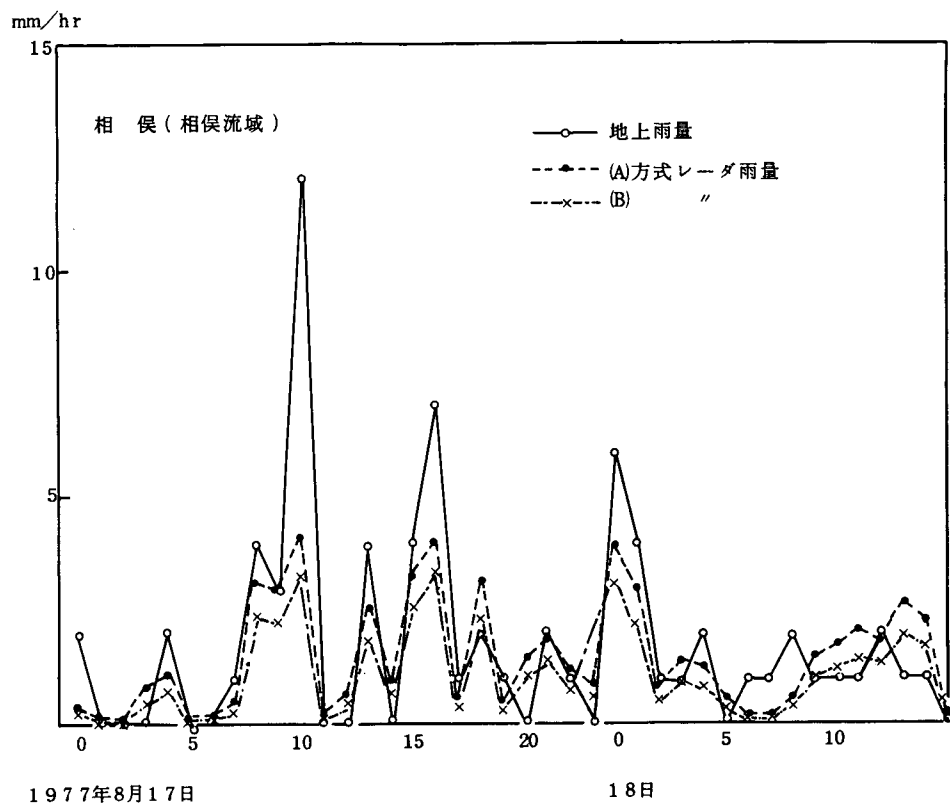


図 2.8(5) 地点雨量と1メッシュレーダ雨量 (山地)

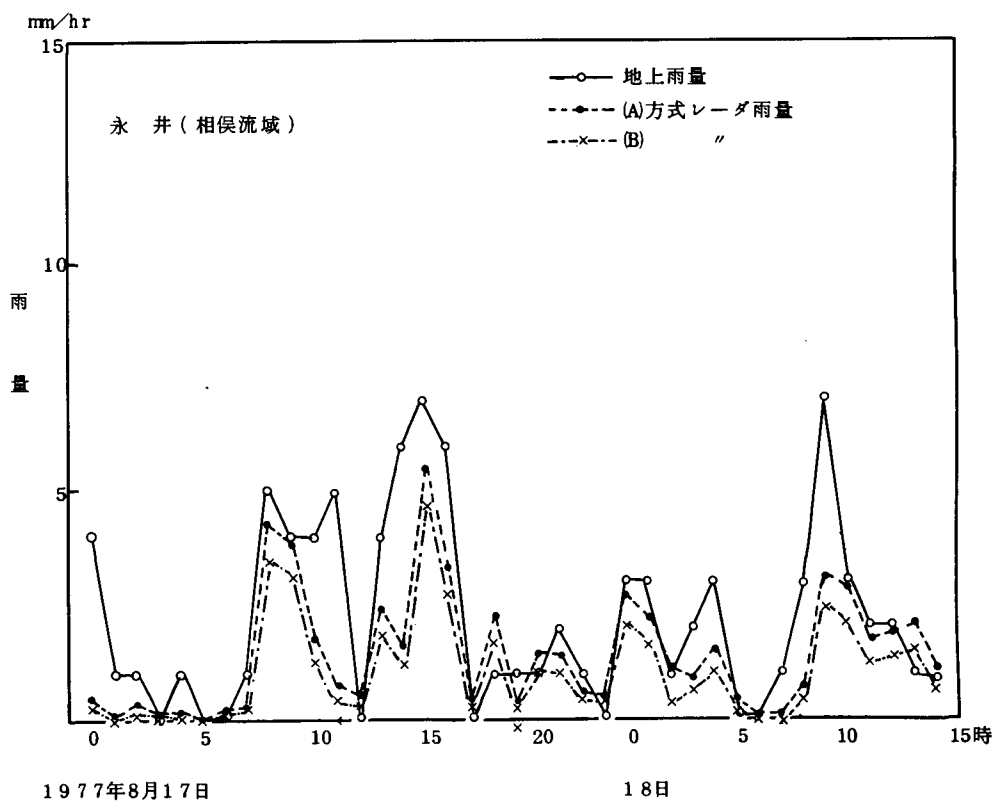


図 2.8(6) 地点雨量と1メッシュレーダ雨量 (山地)

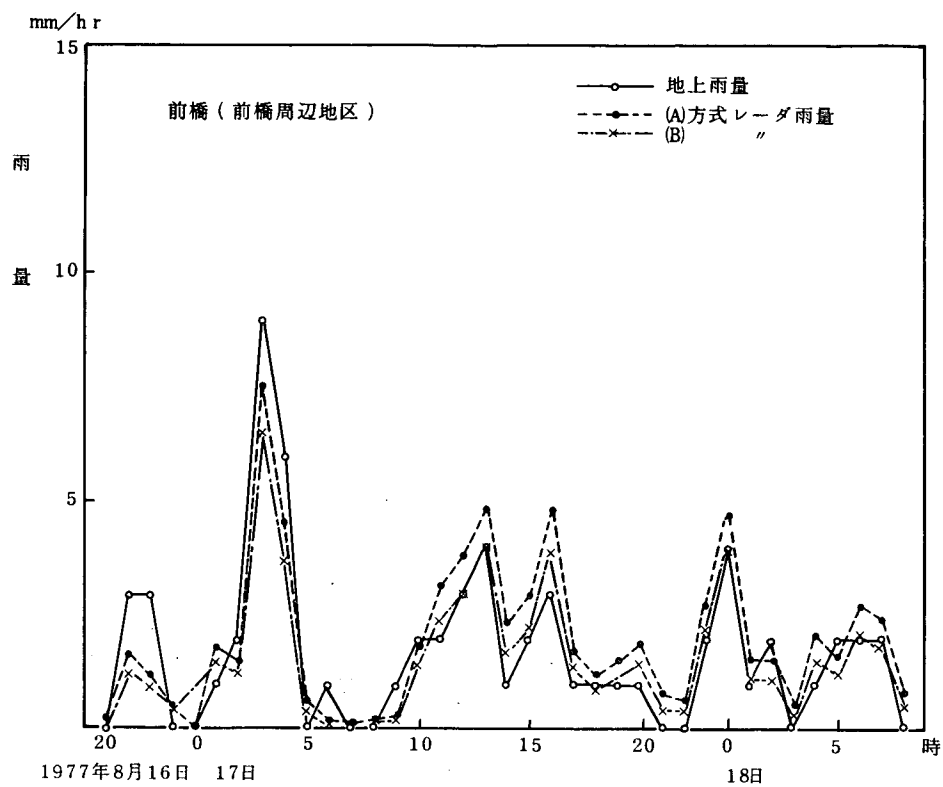


図 2.8(7) 地点雨量と 1 メッシュレーダ雨量 (平野)

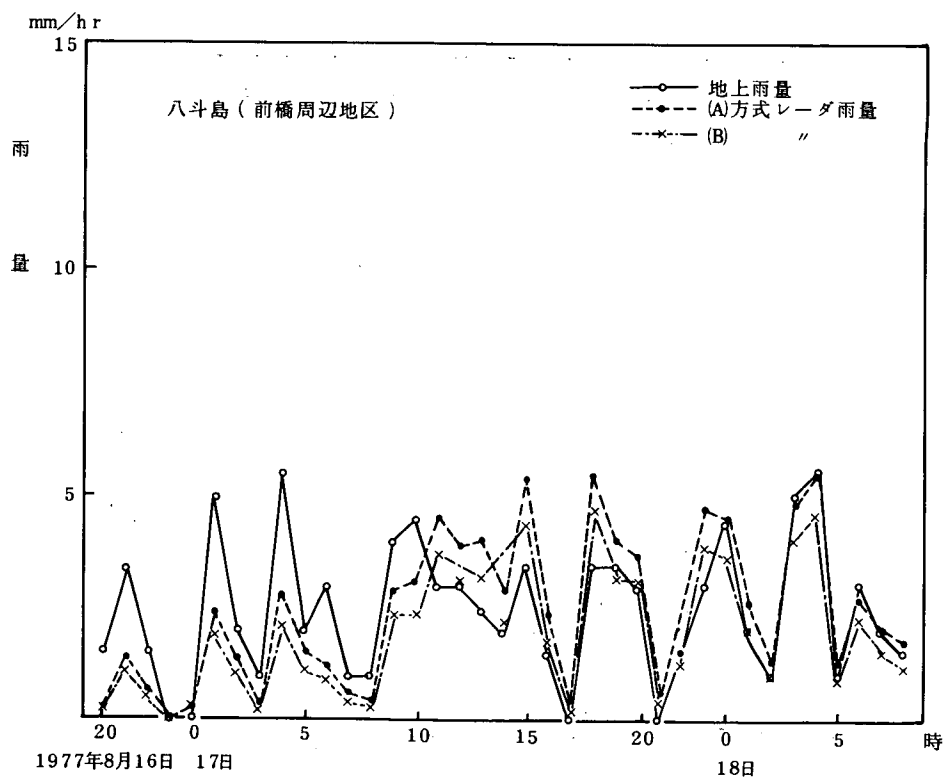


図 2.8(8) 地点雨量と 1 メッシュレーダ雨量 (平野)

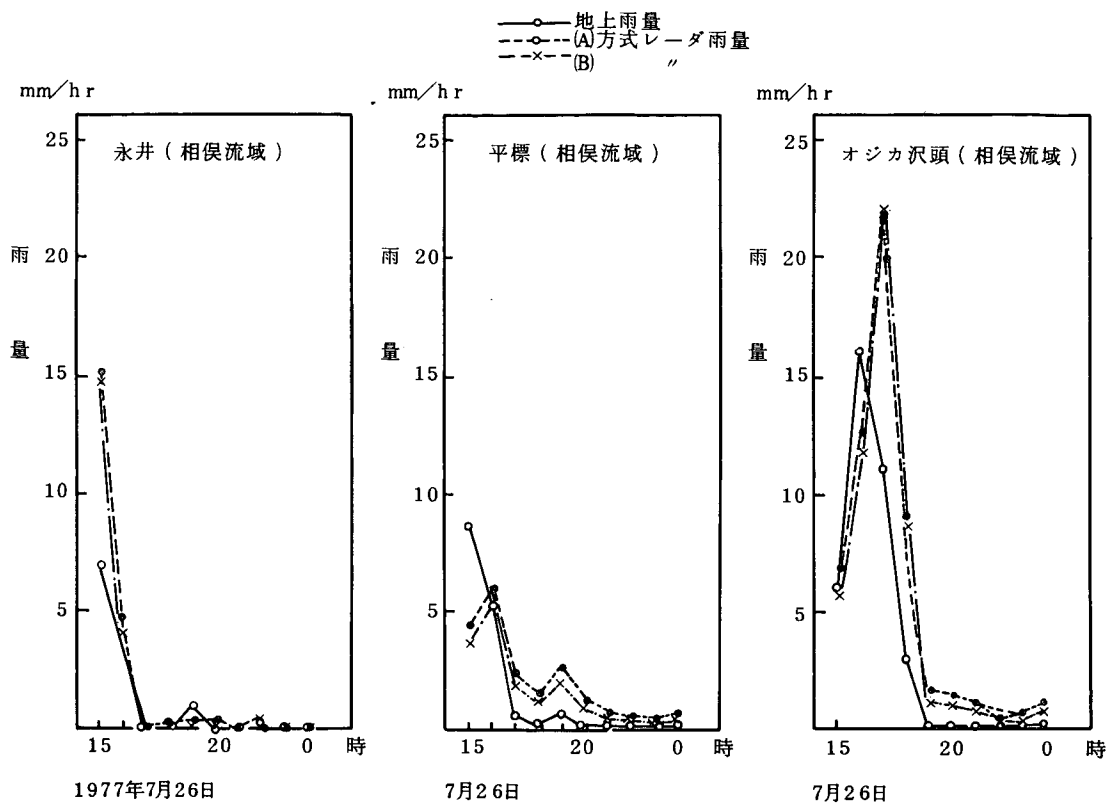


図 2.8 (9) 地点雨量と 1 メッシュレーダ雨量 (山地)

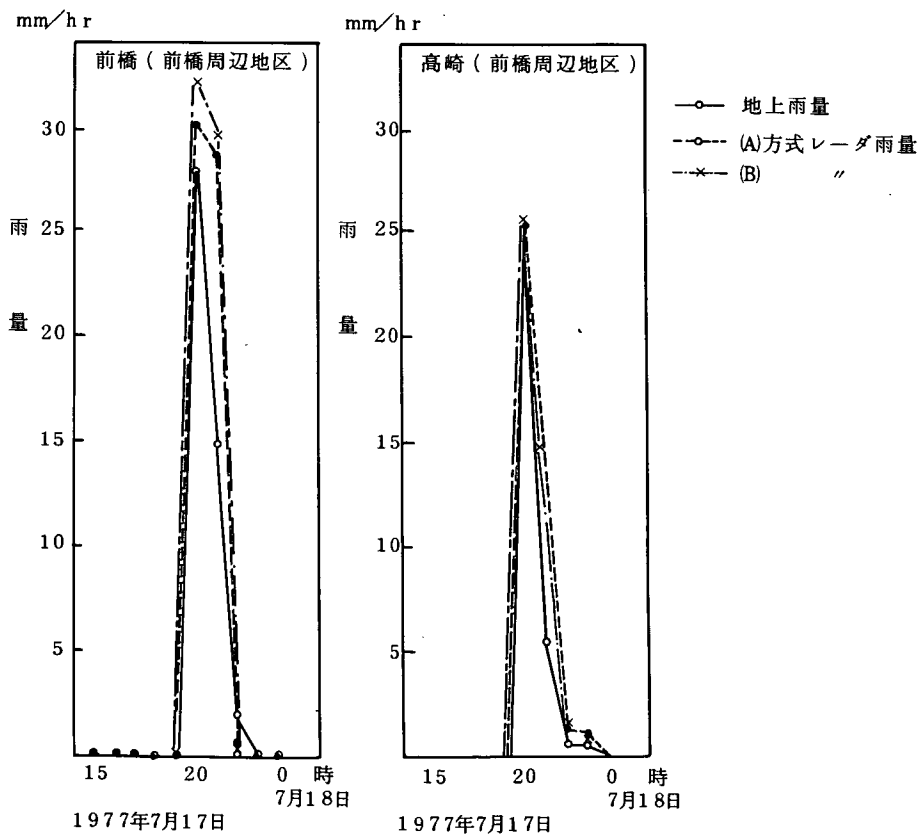


図 2.8 (10) 地点雨量と 1 メッシュレーダ雨量 (平野)

2.4 レーダ雨量の空間特性（風による雨滴の移流）

栗橋地区の流域平均雨量とその上空のレーダ雨量とを結びつける換算係数として $B' = 2.0$, $\beta = 1.8$ （降雨による減衰を考慮しない場合）を前節において定めた。この係数を、その近傍のメッシュにおいてもレーダ雨量を地上雨量に換算する係数と仮定し、栗橋地区の上空メッシュのまわりのメッシュの受信電力を地上雨量に換算した。まわりのメッシュと栗橋地区との関係は、図 2.9 に示す。これら周囲の 8 つのメッシュのレーダ雨量と、栗橋地区の地上雨量との相関および偏差とその時の風向・風速を検討することにより、風によって雨滴が流される現象が、レーダ雨量と地上雨量の対応に与える影響を検討した。

風向・風速は高度によって異なるが、ここでは栗橋上空でのビームの高さが約 $3,000\text{ m}$ であることを考慮し、地上とビーム高度の中間の 850 mb 面の風向・風速を代表風向・風速と考え採用した。

この結果を図 2.10, 2.11 に示す。

一連続降雨ごとに 6 例を示す。

一連続降雨中においても、風向・風速は気象じょう乱の動きにより変化する。7 月 16 日の例は、雷雨であり降雨時間が短かく、風向・風速もあまり変化していない。この時 0.860 の相関を示す地区と風向から類推される対応とは一致する。

10 月 9 日の例でも同様である。表 4.3 に示すように降雨の種類による雨滴の落下速度は、 $0.5\text{ m/sec} \sim 8\text{ m/sec}$ 程度である。

したがって、雨滴が 5 m/sec の速度で $3,000\text{ m}$ 落下するのに要する時間は、 600 であり、 4 m/sec （7 月の例）の風速が一様に吹いていたと仮定すれば、 2.4 km の移流が予想される。また 6 m/sec （10 月の例）であれば、 3.6 km の移流が予想される。各メッシュは、 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ であるから、これらの移流は、おおよそ一メッシュに相当

し 7 月、10 月の例の説明はつく。しかし、他の例については、風向・風速が一様でないが、風速が大きすぎこれらの対応を検討することはできない。これらの例については、その相関特性、偏差特性も顕著には、あらわれていない。したがってここでは、レーダ雨量と地上雨量の対応に風があたえる影響はなしとはいえない。しかし、より精密な風の観測と多数の精密雨量観測ネットワークによる検討が必要であり今後の研究課題である。

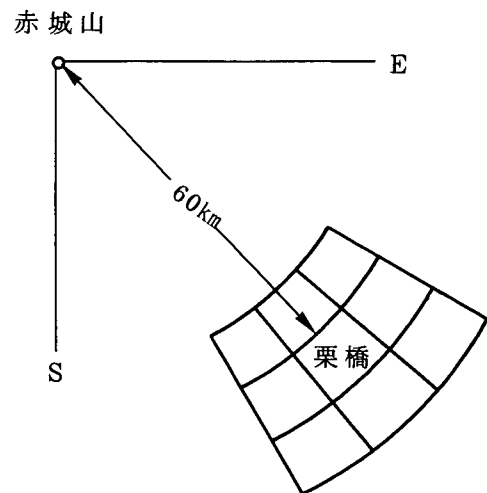


図 2.9 栗橋地区とその周辺メッシュ

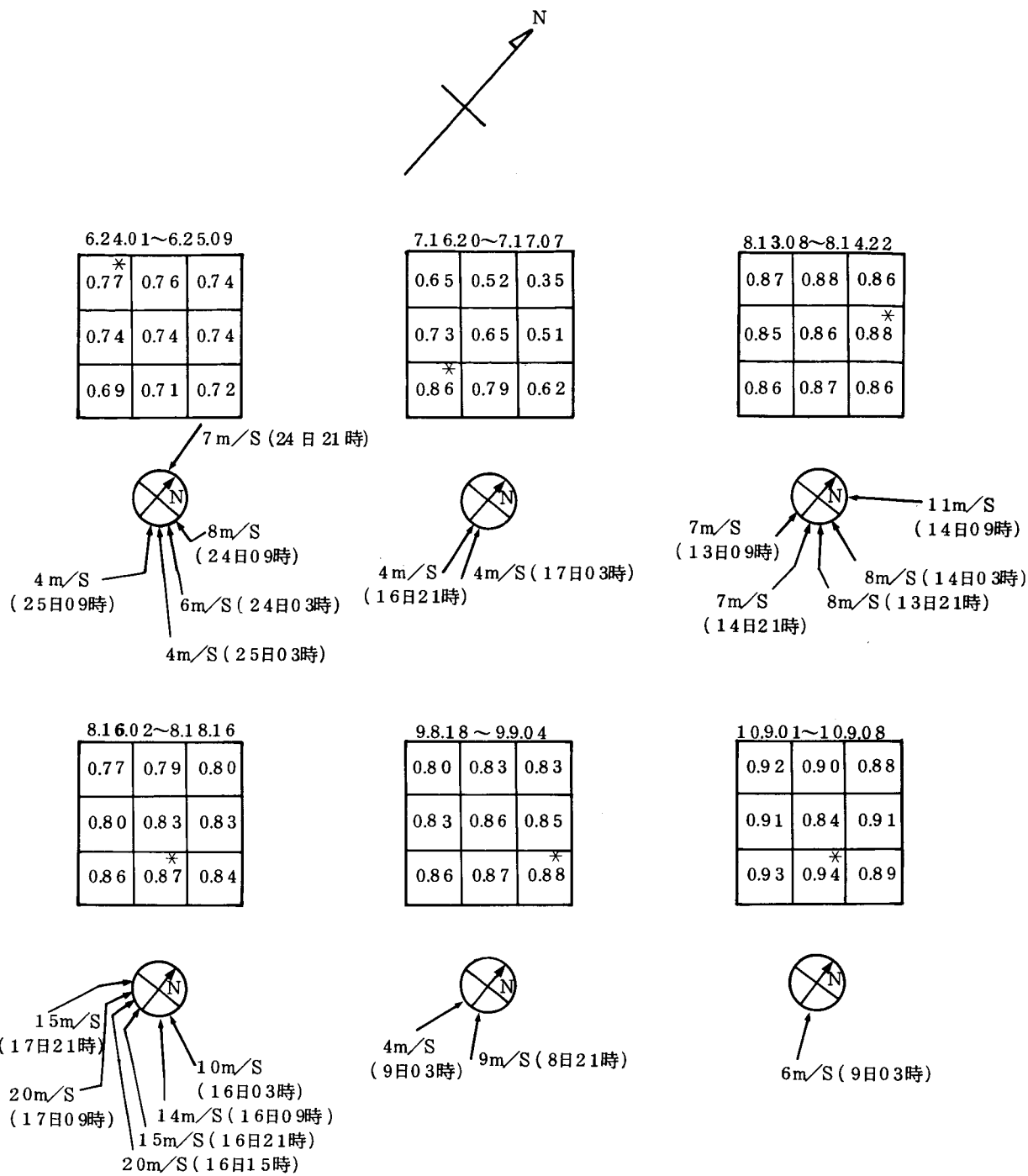
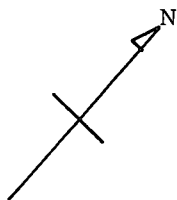
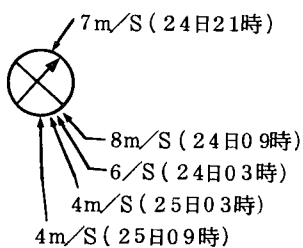


図 2.10 風向・風速 (850 mb 面) と対応地区別相関係数
 (中央が栗橋地区)
 (* 最大値)



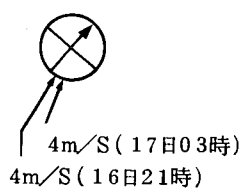
6.24.01~6.25.09

0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5
0.6	0.6	0.5



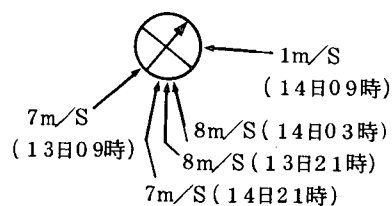
7.16.20~7.17.07

0.9	1.1	1.3
0.8	0.9	1.1
0.6	0.7	0.9



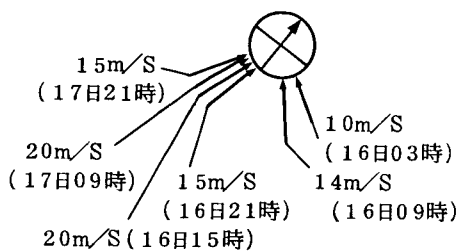
8.13.08~8.14.22

0.6	0.6	0.8
0.6	0.6	0.5*
0.6	0.6	0.6



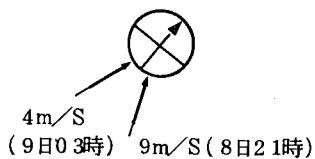
8.16.02~8.18.16

0.9	0.8	0.8
0.8	0.8	0.8
0.8	0.8	0.8



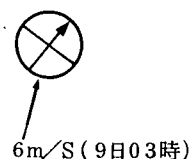
9.8.18~9.9.04

0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9



10.9.01~10.9.08

0.5	0.5	0.6
0.6	0.6	0.5
0.5	0.5*	0.6



* 風向・風速データは AEROLOGICAL DATA
OF JAPAN (気象庁)
による。(館野の高層データ 850mb)

図 2.11 風向・風速 (850 mb 面) と平均偏差 (誤差の)
(中央が栗橋地区)
(* 最小値)

2.5 レーダ雨量計による面積雨量観測

2.5.1 レーダによる間引面積雨量推定法の精度検討

間引法は地上雨量計を流域内に高密度に配置して雨量観測を行ない、その観測値を真値として段階的に観測所を減らせて行き、その真値との誤差と観測所との関係を求めるものである。

このように、間引法は従来地上雨量計に対して実施されてきたものである。

本節では、放射状メッシュで圧倒的に高密度な観測を行なっているレーダ雨量計の資料を用いて、間引法による面積雨量の推定精度の検討を行なった。

地上雨量計による間引法との本質的な違いは、地上雨量観測は点の観測であるが、レーダによるものは、1メッシュ内の平均値すなわち面積平均値の観測であるという点である。

また、地上雨量計によって求められた流域面積と台数と推定誤差の関係を、レーダによるそれを比較し、間接的ではあるが、地上雨量計による観測とレーダ雨量計による観測との関係について考察するものである。

(1) 資料及び間引の方法

対象降雨は次のものである。いずれも1977年の資料である。

- ① 6月16日15時～6月20日 2時
- ② 6月20日 4時～6月25日17時
- ③ 7月 2日 2時～7月 3日12時
- ④ 7月11日 6時～7月12日 5時
- ⑤ 7月26日12時～7月27日 0時
- ⑥ 8月13日 0時～8月15日15時
- ⑦ 8月15日17時～8月19日20時
- ⑧ 9月 3日13時～9月 4日23時

の時間雨量についてである。総時間数は481時間である。

また、対象流域は赤城山レーダを中心とした山地部と平野部に設定し、各々900km²となるように定めた。

その位置を図2.12に示す。

また、各々のメッシュ番号を次にあげる。

山岳部	放射状方向	79～79
(下久保周辺)	距離方向	16～25
平野部	放射状方向	46～55
(栗橋周辺)	距離方向	16～25

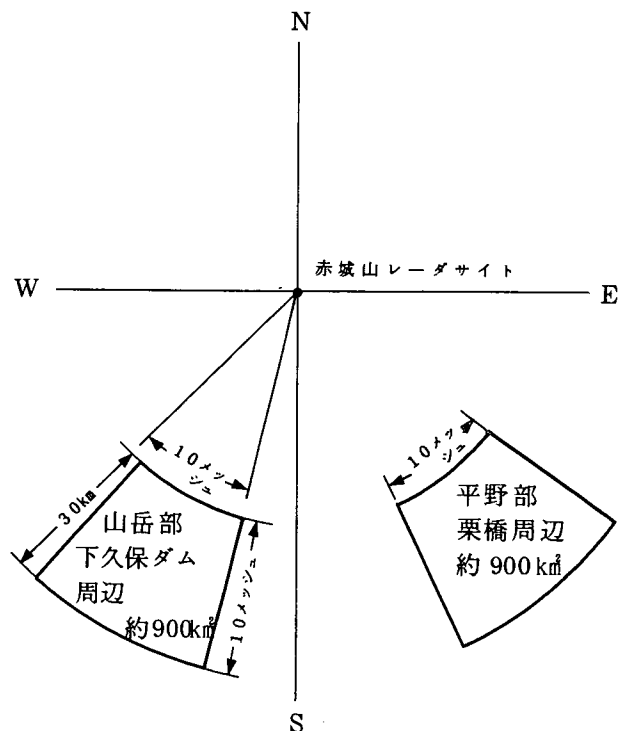


図2.12 間引法による精度検討対象地区

すなわち、距離方向は両者等距離に設定し、かつその中心が60km地点、すなわち9km²のメッシュが存在するようにとった。メッシュの数は100個である。

間引きは、100メッシュ、50メッシュ、25メッシュ、5メッシュ、1メッシュと行なった。また、①～⑧の降雨ごとにそれぞれ間引きし時間雨量について検討した。真値は100メッシュの算術平均値とした。

(2) 結果の検討

このようにして得られた①～⑧についての各々の降雨に関する間引きに対して各時間の誤差を、危険率をパラメータとしてあらわしたものが図 2.1 3, 図 2.1 4 である。(ただし、誤差の分布を正規分布と仮定している。)これによれば、平野部の方が山岳部より誤差が小さくなっている。

これは、山岳部における地形の影響によって生ずる降雨のバラツキが表われているとも考えられる。

図に示している曲線は、降雨原因別の分類をせず全解析対象降雨によるものである。

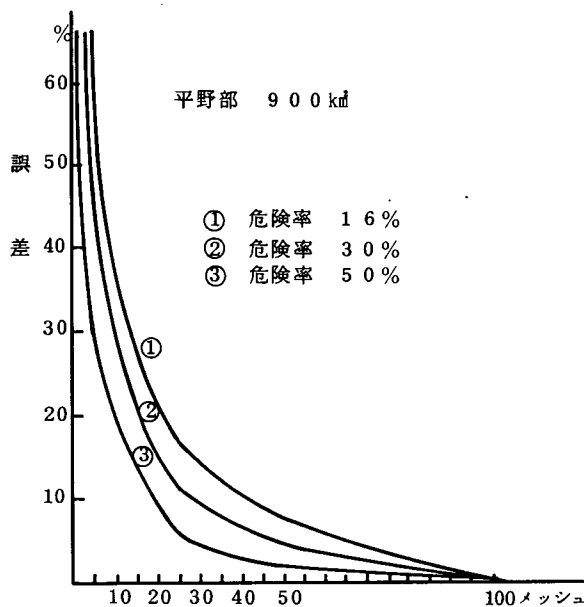


図 2.1 3 レーダ雨量計による流域平均雨量の間引法によるメッシュ数変化と誤差の関係

* 危険率：誤差が各曲線を越える確率(ただし、誤差の分布を正規分布と仮定している)

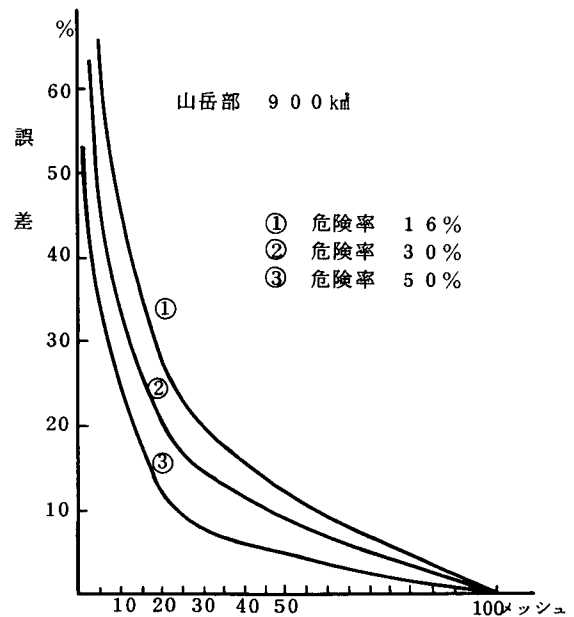


図 2.1 4 レーダ雨量計による流域平均雨量の間引法によるメッシュ数変化と誤差の関係

(3) 地上雨量計観測との比較

土木研究所が中川流域において実施した精密雨量観測資料を整理した結果、3, 6, 9時間雨量について、面積と変動係数の関係が求められている。橋本は上記の調査を実施したが、その結果を外挿することにより1時間雨量に対する変動係数 C_v と面積 (km^2) の関係を求め次式を得ている。

(土木技術資料 21-6 (1979) 9頁~14頁)

$$C_v = 0.24 A^{0.22} \quad (2.6)$$

ここで雨量計台数 N と推定誤差 ϵ の関係を次のように表わしている。

$$N = \left\{ Z_\alpha \cdot \frac{C_v}{\epsilon} \right\}^2 = \left\{ Z_\alpha \cdot \frac{0.24 A^{0.22}}{\epsilon} \right\}^2 \quad (2.7)$$

(2.7) 式において

Z_α : 許容危険率に対応する正規変量

ϵ : 許容推定誤差

ここで Z_α と ϵ のいくつかの組み合わせによって求めた地上雨量計の台数を示す(表 2.6) 同時にレーダ雨量計のメッシュ数をも示している。

この結果、次のような点が指摘できよう。

レーダ1メッシュと雨量計1台を対応させて考えれば、表 2.6 によるとレーダ雨量計は雨のパラツキに左右されにくいことがある。例えば、危険率 30% で 10% 内許容誤差でおさえるために必要なメッシュ数は、レーダ雨量計の山岳部で 44 メッシュ、平野部で 28 メッシュである。一方地上雨量計であれば、山岳部の 44 メッシュに対応する時には、危険率 30% で許容誤差約 17%、平野部の 28 メッシュに対応するものとしては、危険率 30% で 22% の許容誤差になる。

この差は、許容誤差が小さい場合さらに大きくなる。

このことは、レーダ雨量計による面積雨量の推定精度の良好さを示すものにほかならない。また、図 2.15 に示す如くレーダ雨量計による面積降雨の観測は同じ許容誤差において地上雨量計と比較して明らかに優位であることがわかった。しかし、ここでも平野部と山岳部で降雨観測精度が異なり、山岳クラッタの影響が顕著に表われており、グランドクラッタの効果的な除去方法の開発が望まれる。

表 2.6 許容誤差に対する地上雨量計の台数とレーダメッシュ数

危険率 許容誤差	地 上 雨 量 計				レーダ雨量計	
	5 0 %	3 0 %	2 0 %	1 0 %	山岳部	平野部
	メッシュ数	メッシュ数	メッシュ数	メッシュ数	3 0 %	3 0 %
5 %	2 1 0	4 9 4	7 5 5	1 2 4 3	メッシュ 6 8	メッシュ 5 0
1 0 %	5 3	1 2 4	1 8 9	3 1 1	4 4	2 8
1 5 %	2 4	5 5	8 4	1 3 9	3 2	2 0
2 0 %	1 4	3 1	4 8	7 8	2 1	1 6
2 5 %	9	2 0	3 1	5 0	1 5	1 2
3 0 %	6	1 4	2 1	3 5	1 2	1 0
4 0 %	5	1 0	1 2	2 0	—	—
5 0 %	3	5	8	1 3	—	—
6 0 %	—	—	—	—	—	—

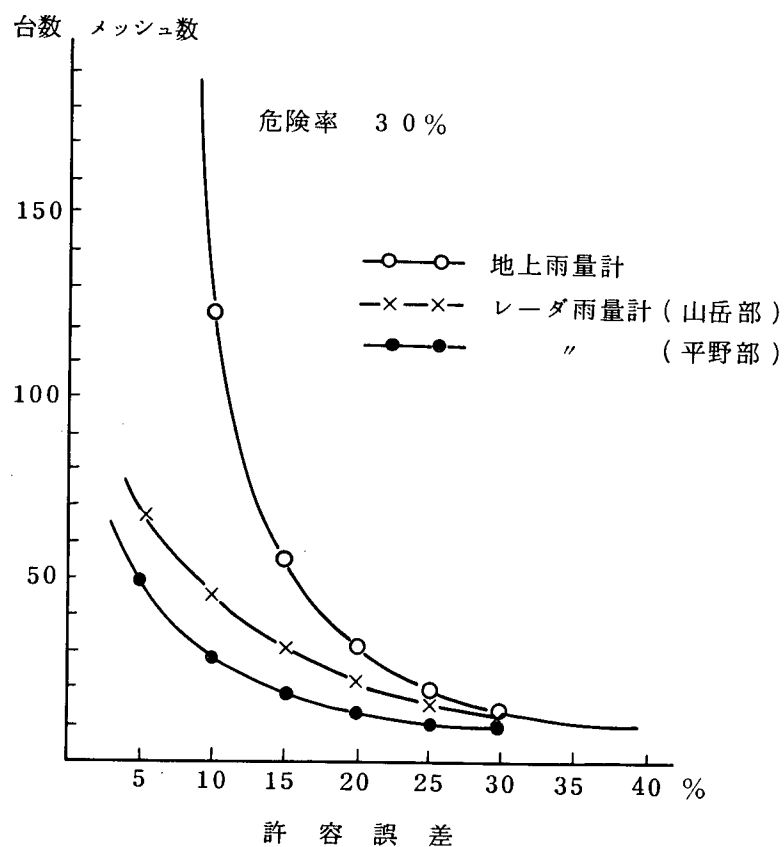


図 2.15 危険率を定めた場合の地上雨量計の台数とレーダ雨量計のメッシュ数

3. M T I 方式によるレーダ雨量計

レーダ雨量計による観測エコーの中には気象エコーのほか、多量の雑音やクラッタからの反射波が混在する。このようないわゆる気象エコーに対する妨害波の除去は、レーダー雨量計において最も重要な事項である。いいかえれば、このクラッタ（妨害波）の有効的な除去方法の開発が精度向上に大きく貢献することとが予想される。

この問題に対する従来の方法は、次の3種類に要約することができる。

- (1) 最も一般的な方法は、レーダ観測者が高度の熟練によって気象のエコーとクラッタを識別して、気象エコーのみのスケッチ図を作成する。
- (2) 自動的に行なう方法として、晴天時のクラッタの強度分布を記憶装置に入れておき、雨天時の信号から減算して降雨エコーを求める。
- (3) クラッタの存在する領域については、気象エコーの有無にかかわらずレーダー情報を除去することで対処する。

従来のレーダ雨量計においては、このうち(2)の方法がとられており、ある程度成果をあげている。しかし、晴天時のクラッタの値と降雨時のクラッタの値では厳密には当然同一ではない。従って今後、物理的に降雨時のクラッタの強度に近いものをリアルタイムに減算するような方法を考えてゆく必要がある。

本研究では、この方法としてMTI方式(Moving Target Indication)を提案し、そのクラッタ除去能力及び降雨観測精度について検討評価する。

3.1. MTI グランドクラッタ除去方式の原理

雨は不規則に分布して運動している多数の雨滴で構成されている。したがって、レーダーから送信された電波が雨から反射してくる反射信号（降雨エコー）の振幅は、短時間（0.01秒程度）内に激しく不規則に変動している。したがって、レーダ方程式は降雨エコーの平均電力から雨量強度を求める関係式になっている。降雨エコーの不規則な変動の幅は、弱い雨に対しては小さく、強い雨の場合は大きくなり、降雨エコーの変動電力（交流電力）はその平均電力と比例関係を有する。また、0.01秒程度の短時間内では、グランドクラッタの振幅はほとんど一定である。

したがって、降雨エコーとグランドクラッタが重畳しているレーダの受信波を特殊な高域通過濾波器（MTI フィルタ）によって、短時間内に交流電力を検出すれば、それと比例関係のある降雨エコーの平均電力を推定することができる。その後レーダ方程式によって、雨量強度を求めることが出来る。また、これによって短時間内で振幅がほぼ一定のグランドクラッタはMTI フィルタによってほとんど除去することが出来る。

3.1.1 信号の統計特性の実測例

MTI 方式によってグランドクラッタを除去するための基本条件となる信号の特性について具体的に説明する。

表 - 3.1 は降雨エコーおよびグランドクラッタの特性の実測例を示す。直線検波した信号について各特性を解析して、その平均値を示した。降雨エコーのデータは47例、グランドクラッタは15例で、各データの観測時間は約90秒である。アンテナは11標方向に停止させてデータを収録した。

表 3.1 信号の統計的特性の実測例（日本無線K.Kによる観測例）

	降雨エコー	グラントクラッタ
〔平均電力／交流電力〕比	433(6.37dB)	522.5(27.2dB)
電力比変動幅	22%(0.86dB)	
1.送信周期間の相関係数 ρ (3.85 ms)	0.19	0.75
2.送信周期間の相関係数 ρ (7.00 ms)	0.0013	0.32
帯域幅 fb	89H ₂	37H ₂
データ数	47	15

(1) 〔平均電力／交流電力〕比

信号 $x(t)$ の次元が電圧のとき、その平均値、自乗平均値、分散は、信号の直流電圧、平均電力、交流電力と、それぞれ次のように対応できる。

◎平均値 $\overline{X(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$: 直流電圧 (3.1)

◎自乗平均値 $\overline{\{X(t)\}^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \{X(t)\}^2 dt$: 平均電力 (3.2)

◎分散 $\overline{\{X(t) - \overline{X(t)}\}^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \{X(t) - \overline{X(t)}\}^2 dt$: 交流電力 (3.3)

さらに、式(3.1)、(3.2)、(3.3)より次の関係がある。

◎平均電力 = (直流電圧)² + 交流電力 = 直流電力 + 交流電力 (3.4)

従って平均電力は信号の全電力を意味する。

表 - 3.1 に示すように、降雨エコーの〔平均電力／交流電力〕比は 4.33 (6.37 dB) であった。その電力比の変化は各種の条件下において 22% (0.86 dB) 以下であった。従って降雨エコーの〔平均電力／交流電力〕比はほぼ一定である。この性質は M T I グラントクラッタ除去方式にとって必要な条件である。式(3.4)より降雨エコーの場合は全電力の 77% が直流電力であり、その振幅変動の幅は全振幅の 48% 程度である。

降雨エコーと比較して、グラントクラッタの〔平均電力／交流電力〕比は 522.5 (27.2 dB) であるからその全電力の 99.81% は直流電力であり、振幅変動の幅は全振幅の 4% 程度である。従ってグラントクラッタの振幅は短時間内 (数 ms) にはほとんど一定といえる。

(2) 相 関 係 数

信号の時刻 t における振幅 $X(t)$ とそれから τ 時間経過後の振幅 $X(t + \tau)$ を二つの変数と考えると、

$$\rho(\tau) = \frac{\overline{\{X(t) - \overline{X(t)}\} \cdot \{X(t + \tau) - \overline{X(t)}\}}}{\overline{\{X(t) - \overline{X(t)}\}^2}} \quad \dots\dots (3.5)$$

ここに、 $\overline{\{\quad\}}$ は時間平均を意味する。たとえば $\overline{X(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$ (T は観測時間)
式(7)で、 $X(t)$ と $X(t + \tau)$ の変動が互いに独立のときは分子 = 0 で、 $\rho(t) = 0$ になり、 τ 時間経

過しても信号の振幅が変化しないときは、 $X(t) = X(t + \tau)$ なので分母=分子となり、従って $\rho(\tau) = 1$ となる。分母は信号の分散(交流電力)で、 $\rho(\tau)$ の大きさを正規化したものである。

表 - 3.1 には時間差 τ を 1 送信周期 (3.8 5 ms) および 2 送信周期としたときの相関係数を示した。表より降雨エコーの 1 送信周期間の相関係数は 0.1 9 であるから、その不規則変動の振幅がある時間に 1 だった場合は、次の送信によるエコーの平均振幅は 0.1 9 になる。それに対してグラウンドクラッタの場合は、振幅 1 が 1 送信周期後に 0.7 5 に変化する。従って振幅の不規則変動の速さは、降雨エコーと比較してグラウンドクラッタの方が遅い事を示している。

(3) 帯域幅

相関係数 $\rho(\tau)$ は信号の時間領域における特性をあらわしている。そして、周波数領域の特性は $\rho(\tau)$ をフーリエ変換して求められるパワースペクトルの代表値として示した。

表より、降雨エコーの場合の平均帯域幅は 8 9 Hz , グラウンドクラッタの場合の平均帯域幅は 37 Hz であった。これは相関係数による前項の説明を周波数領域で換言えたものである。

3.1.2 降雨エコーの確率密度関数(レイリー分布)

アンテナから放射された電波によって照射される降雨の目標体積内には、多数の独立に運動する雨滴が存在する。降雨エコーはそれぞれの雨滴からの反射波の合成波である。従ってその振幅は、マイクロ波パルスを送受信するごとに不規則に変動する。そのような受信波を〔周波数変換 - 中間周波数増幅 - 直線検波〕したときの出力信号の確率密度関数は次のように表わされる。

中間周波数帯における降雨エコーの瞬時波形 $X(t)$ を直交関数係で表現すると次式のようにになる。

$$X(t) = X_c(t) \cos \omega_c t - X_s(t) \sin \omega_c t \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここに、 $\omega_c : 2\pi \times$ 中間周波数

$X_c(t), X_s(t)$: 互いに統計的に独立な平均値 = 0 , 分散 = σ^2 のガウス性不規則信号

そして、式(8)の $X(t)$ を一つの余弦波の形にまとめると、

$$x(t) = X(t) \cos \{ \omega_c t + \theta(t) \} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\text{ここに、} X(t) = \sqrt{ \{ X_c(t) \}^2 + \{ X_s(t) \}^2 }$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \{ X_s(t) / X_c(t) \}$$

直線検波器の出力波形は式(3.7)の包絡線 $X(t)$ で、式(3.6)から明らかなように、 $X(t)$ は直交座標軸上でガウス分布する点 $X_c(t), X_s(t)$ を二つの成分とするベクトルの大きさである。この関係を図 3.1 に示す。

このような場合に $X(t)$ の確率密度関数はレイリー分布していて、次の(3.8)式で与えられます。レイリー確率密度関数を図 3.2 に示す。

$$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma^2} \right) & \dots\dots x > 0 \\ 0 & \dots\dots x < 0 \end{cases} \quad \dots\dots (3.8)$$

次に、降雨エコーの平均電力 $\overline{\{ X(t) \}^2}$ と交流電力 σ^2 は、式(3.2), (3.3), (3.8) および X の時間平均はその集合平均に等しいことから、

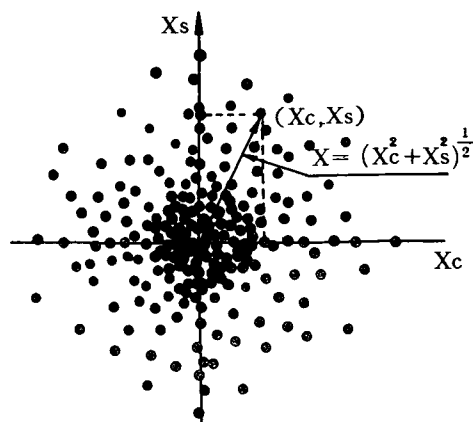


図 3.1 二次元ガウス分布とレイリー分布の関係

$$\overline{\{X(t)\}^2} = E[X^2] = \int_0^\infty X^2 p(x) dX = 2\sigma^2 \dots (3.9)$$

$$\sigma^2 = E(\{X - E[X]\}^2) = 2(1 - \pi/4)\sigma^2 \dots (3.10)$$

ここに、 $E[\quad]$ ：集合平均

従って、式(11)，(12)より次の関係が成立する。

これより、

降雨エコーの〔平均電力／交流電力〕比

$$= \frac{\overline{\{X(t)\}^2}}{\sigma_X^2} = 4.66 (6.68 \text{ dB}) \dots (3.11)$$

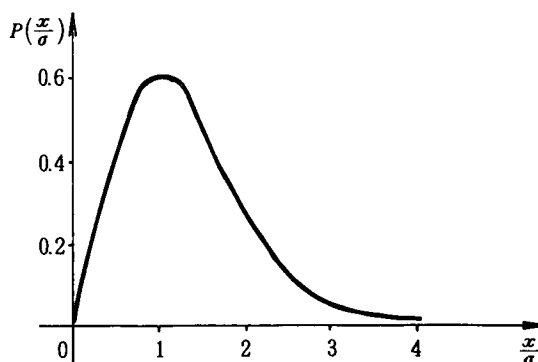


図 - 3.2 レイリー確率密度関数

式(3.11)は、レイリー分布する降雨エコーの〔平均電力／交流電力〕比が一定になることを示している。表 - 3.1 および 3.1.1(1) で述べたように、その実測値は 4.33 (6.37 dB) であった。これは式(3.11)の理論値にきわめて近い値である。

従って降雨エコーの交流電力を求めれば、それと比例関係にある平均電力を求めることができる。しかし、式(3.11)は降雨エコーが単独で存在するときの関係であって、グラントクラッタが重量しているときには少し様子がちがってくる。

3.1.3. 降雨エコーとクラッタが重量したときの確率密度関数 (レイリー・ガウス分布)

(1) レイリー・ガウス分布の基本的性質

降雨エコーとグラントクラッタが重量した受信波を〔周波数変換－中間周波数増幅－直線検波〕したときの出力信号の確率密度関数を求める。

表 - 3.1 および 3.1.1.(2) で説明したように、短時間(数 ms) 内ではグラントクラッタの振幅 G は一定とみなすことができる。従ってその波形 $g(t)$ は、中間周波数領域では次式で表わされる。

$$g(t) = G \cos(\omega c t \pm \phi) \dots (3.12)$$

ϕ ：伝搬による位相遅れ

式(3.7)で示した降雨エコーの波形 $x(t)$ とグラントクラッタ $g(t)$ の合成波 $y(t)$ は次式となる。

$$Y(t) = G \cos(\omega c t + \phi) + x(t) \dots (3.13)$$

合成波 $y(t) = Y(t)$ を一つの余弦波の形にまとめると、

$$y(t) = Y(t) \cos\{\omega c t + \theta(t)\} \dots (3.14)$$

直線検波出力の波形は式(3.14)の $Y(t)$ である。 $Y(t)$ の確率密度関数 $p(Y)$ は次式で与えられる。

$$p(Y) = \begin{cases} \frac{Y}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + G^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{Y \cdot G}{\sigma^2}\right) & Y \geq 0 \\ 0 & Y < 0 \end{cases} \dots (3.15)$$

ここに、 $I_0(u)$ ：変形ベッセル関数、 u が十分に大きいときは、

$$I_0(u) \doteq \frac{e^u}{\sqrt{2\pi u}} \left(1 + \frac{1}{8u} + \frac{9}{128u^2} + \dots\right)$$

ここでは式(3.15)の確率密度関数の便宜上レイリー・ガウス分布と名付ける。以下、式(3.15)の持つ意味について説明する。

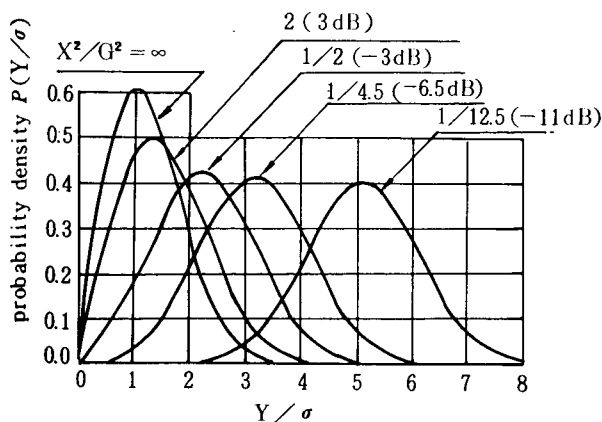


図 - 3.3 レイリー・ガウス分布

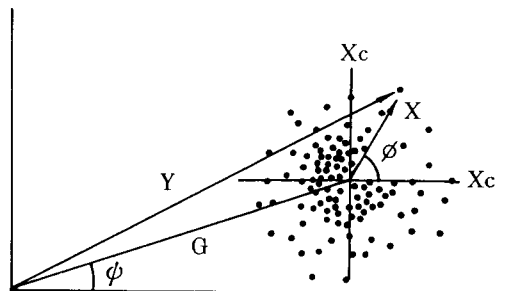


図 - 3.4 レイリー・ガウス分布のベクトル図

式(3.15)で、グラントクラッタが存在しないとき($G = 0$)は、降雨エコーが単独で存在する場合の式(3.8)と一致してレイリー分布となる。逆に、降雨エコーの平均電力と比較してグラントクラッタの電力が十分に大きいとき($G^2 \gg \bar{X}^2 = 2\sigma^2$, $Y \doteq G$)は、次式で表わされる。

$$p(Y) = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Y-G)^2}{2\sigma^2} \right], \quad Y > 0 \quad (3.16)$$

従ってこの場合は、分散(交流電力)が σ^2 で、グラントクラッタの振幅 G を平均値(直流電圧)とするガウス分布になる。

レイリー分布からガウス分布への変化を明確にするために式(3.15)の関数形を図-3.3に示す。図では降雨エコーの平均電力 $\bar{X}^2$ とグラントクラッタの電力 G^2 の比をパラメータにした。降雨エコーに対して、グラントクラッタの重畳量が増加したとき($\bar{X}^2/G^2$ が小さくなったとき)に、直線検波出力の確率密度関数が、ガウス分布に変化する理由は図-3.4により説明される。同図は、降雨エコー $x(t)$ 、グラントクラッタ $g(t)$ 、および直線検波出力 $y(t)$ の関数を示す。 $\bar{X}^2/G^2$ が小さいときは $X \ll G$ であるから図-3.4より次のように近似できる。

$$Y \doteq G + X \cos(\phi - \varphi) \quad (3.17)$$

式(3.17)の右辺の第2項は、振幅 X がレイリー分布するベクトル $x(t)$ の、グラントクラッタ $g(t)$ 方向の成分である。3.1.2および図-3.1で説明したように、直交座標軸上のガウス分布する点を2成分とするベクトルの大きさがレイリー分布である。それがグラントクラッタベクトル方向の一成分に分解されることによって、グラントクラッタの大きさ G を平均値とするガウス分布に帰ったわけである。……式(3.16)参照。

(2) レイリーガウス分布の〔平均電力/交流電力〕比

〔降雨エコーの平均電力 $\overline{\{X(t)\}^2}$ /グラントクラッタの電力 G^2 〕比に対する、〔降雨エコーの平均電力 $\overline{\{X(t)\}^2}$ /直線検波出力の交流電力 σ_Y^2 〕比の変化を図-3.5に示す。

$\overline{\{X(t)\}^2}/\sigma_Y^2$ は降雨エコー単独の場合のように一定値(6.68 dB)にはならず、グラントクラッタの重畳量によって変化する。

$\overline{\{X(t)\}^2} / \sigma_Y^2$ は、横軸の $\overline{\{X(t)\}^2} / G^2$ が小
グランドクラッタが強い) のときは、式(3.16)
のガウス分布の値 (3.0 1dB) に漸近する。

従って、直線検波出力の交流電力 σ_Y^2 から、
降雨エコーの平均電力 $\{X(t)\}^2$ を 密に求める
ためには $\overline{\{X(t)\}^2} / G^2$ の値を知る必要がある。

しかし $\overline{\{X(t)\}^2} / G^2$ の値を全く知らなかった
としても、 $\overline{\{X(t)\}^2} / \sigma_Y^2$ の値として図 - 3. 5
の中間の値 (4. 8 5 dB) を用いれば、 σ_Y^2 か
ら $\{X(t)\}^2$ を推定する誤差は 1. 8 dB 以内におさまると考えられる。

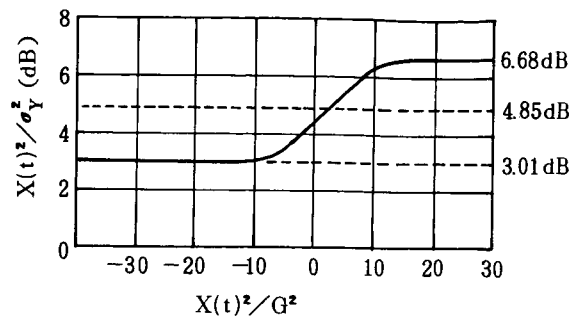


図 - 3. 5 レイリー・ガウス

(平均電力 / 交流電力) 比

従来から、強いグランドクラッタの現われる地域では、降雨エコーの強度から推定される雨量強
度の信頼性が低いことはよく知られている。しかし、グランドクラッタと重畳している降雨エコー
の存在を発見することは重要な情報である。また、従来のレーダのエコー強度測定精度は ± 3 dB
程度であり、グランドクラッタの存在する地域では一般に降雨エコーの発見が困難であり、エコー
を発見できたとしても、その強度の測定誤差は大幅に増加する。

従って、実用的な立場で考えた場合に、

$$\frac{\text{降雨エコーの平均電力 } \{X(t)\}^2}{\text{直線検波出力の交流電力 } \sigma_Y^2} \div 3.05 (4.85 \text{ dB}) = \alpha \dots\dots\dots (3.18)$$

なる一定値としてもさしつかえないことと考えられる。

(3) 降雨エコーの平均電力の測定

MTI グランドクラッタ除去方式を実現するための基本的な構成を図 - 3. 6 に示す。

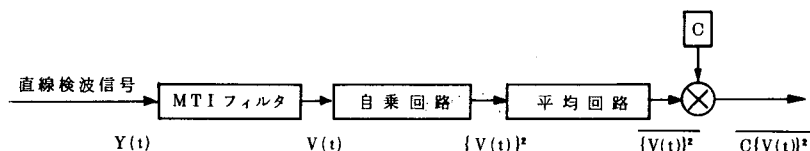


図 - 3. 6 MTI グランドクラッタ除去方式の基本的構成

パルスレーダの検波出力から交流成分を検出するフィルタは、くし形の周波数応答特性を有する
高域通過フィルタである。これは、周知のコヒレントレーダ用 MTI (Moving Target Indication)
フィルタと同様のはたらきをするので以後、MTI フィルタと呼ぶことにする。MTI フィルタの
出力を自乗した後の平均化回路は、降雨エコーが一樣な特性を持つ距離および方位角の範囲 (例え
ば、約 $1 \text{ km} \times 1.4^\circ$) 内でおこなう。

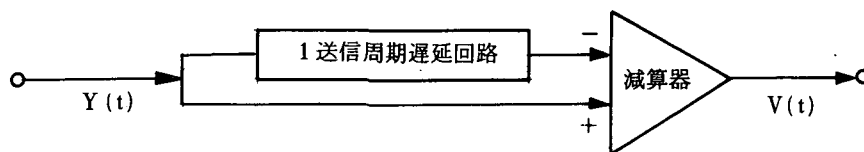


図 - 3. 7 MTI フィルタの例 (単 1 消去形)

MTI フィルタの最も簡単な構成例 (単 1 消去フィルタ) を図 - 3. 7 に示す。1 送信周期の遅延
時間を有する遅延回路と減算器で構成される。単 1 消去フィルタの入力を $Y(t)$ 、 $Y(t)$ の交流電力

(分散)を σ_Y^2 , $Y(t)$ の送信周期 P 間の相関係数を ρ_Y とする。そして、フィルタの出力を $V(t)$, $V(t)$ の交流電力を σ_v^2 とすると,

$$V(t) = Y(t) - Y(t-P) = \overline{Y(t)} - \overline{Y(t-P)} = 0 \quad (3.19)$$

すなわち、単一消去フィルタによって入力 $Y(t)$ の直流電力が除去される。従って,

$$\sigma_v^2 = \overline{\{V(t)\}^2} - \{\overline{V(t)}\}^2 = \overline{\{V(t)\}^2} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \overline{\{V(t)\}^2} &= \overline{\{Y(t) - Y(t-P)\}^2} = \overline{\{Y(t)\}^2} - 2\overline{Y(t)Y(t-P)} + \overline{\{Y(t-P)\}^2} \\ &= 2\overline{\{Y(t)\}^2} - 2\{\overline{Y(t)}\}^2 - 2\sigma_Y^2\rho_Y = 2\sigma_Y^2(1-\rho_Y) \end{aligned} \quad (3.21)$$

式(3.21)より、検波出力の交流電力 σ_Y^2 は次のような関係を有する。

$$\sigma_Y^2 = \overline{\{V(t)\}^2} / \{2(1-\rho_Y)\} \quad (3.22)$$

従って式(3.18)より

$$\text{降雨エコーの平均電力 } \overline{\{X(t)\}^2} = \frac{\alpha}{2(1-\rho_Y)} \overline{\{V(t)\}^2} \quad (3.23)$$

次に、式(3.23)に 3.1.1.および表-3.1で説明した信号の特性の実測例を代入して、簡単な検討をおこなってみる。

(a) 降雨エコーの平均電力の測定

降雨エコーの直線検波出力の1送信周期間の相関係数 ρ_Y は、表3.1より

$$\rho_Y = \rho(3.85 \text{ ms}) = 0.19$$

さらに、式(3.18), (3.23)より

$$\text{降雨エコーの平均電力 } \overline{\{X(t)\}^2} = 1.88 \overline{\{V(t)\}^2} \quad (3.24)$$

従って単一消去フィルタを使用した場合は、その出力の自乗平均値を1.88倍(+2.74 dB)とすれば降雨エコーの平均電力が求められる。この例では降雨エコーの相関係数 ρ_Y を前もって正確に知る必要があるが、この問題をさけるためにはフィルタの遅回路の遅延時間を ρ_Y がほぼ0になる時間長(2~3送信周期)とする。

(b) グラウンドクラッタの除去

表3.1より、グラウンドクラッタの平均電力を1とした場合に、その交流電力は1/522, 送信周期間の相関係数 $\rho(3.85 \text{ ms}) = 0.75$ であった。従って式(3.21)および(3.24)より,

$$\text{グラウンドクラッタ除去率} = 1.88 \times 2 \times \sigma_Y^2(1-\rho_Y) = 55.9(27.5 \text{ dB}) \quad (3.25)$$

となる。すなわち、図-3.6の基本的系統図の出力において、グラウンドクラッタの電力は

1/55.9になる。グラウンドクラッタを十分に抑圧しないと降雨エコーの平均電力測定の正の誤差要因となるので、実際には、さらに効果的なMTIフィルタを設計してグラウンドクラッタを除去する必要がある。

3.1.4. MTIグラウンドクラッタ除去装置

MTI方式グラウンドクラッタ除去装置の系統図を図-3.8について説明します。ダイナミックレンジが広く(60~80 dB), 安定に動作する対数受信機の出力はデジタル量に変換される。次にレーダ電波の距離および大気ガスによる減衰の補正を行こない、その後信号の振幅は逆対数変換されて直線比例信号となる。次のMTIフィルタによってグラウンドクラッタが除去されて降雨エコー

一の交流成分が検出される。MTIフィルタの出力を自乗演算してから平均化処理をする。最後に強度補正をおこなってから降雨エコーの平均電力が出力される。

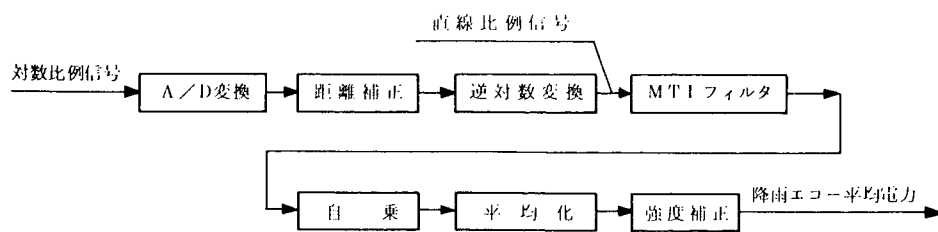


図 - 3.8 MTI グランドクラッタ除去装置の系統図

3.2 MTI方式による降雨強度観測精度

降雨強度とそのレーダ方程式によって関係づけられており、これがレーダによる降雨強度測定の基本となっている。

したがってMTI方式による降雨観測を行うためには、レーダ受信強度 $\overline{A^2}$ を基準としてMTI方式による信号処理から求められる信号振幅の平均値 $\bar{a}$ の測定精度を明らかにしておく必要がある。

$\bar{a}$ と $\overline{A^2}$ との関係は次式によってあたえられる。

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot G_0 \left(\frac{4-\pi}{4} \right) \overline{A^2} (1-\rho(T))} \dots\dots\dots (3.26)$$

ここで G_0 : MTI 濾波器利得。

$\left(\frac{4-\pi}{4} \right)$: 降水エコー信号振幅がRayleigh分布に従う場合の $\sigma^2/\overline{A^2}$ (σ^2 : 分散)

$\rho(T)$: パルス繰返し周期T間における降水エコー信号の相関係数

またRayleigh分布では平均値 $\bar{A}$ と $\overline{A^2}$ の間には $\bar{A} = \sqrt{\frac{\pi}{4} \overline{A^2}}$ の関係があるので(3.26)式は、次の様に変形することが出来る。

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi} G_0 \left(\frac{4-\pi}{\pi} \right) \overline{A^2} (1-\rho(T))} \dots\dots\dots (3.26)$$

MTI信号aの精度に寄与するものは降水エコー信号振幅の確率分がRayleigh分布からずれた場合、即ち(3.26)式で $\left(\frac{4-\pi}{4} \right)$ 、(3.27)式で $\left(\frac{4-\pi}{\pi} \right)$ の仮定から偏移する場合、及び相関係数 $\rho(T) = 0$ が実用上成立しなくなる場合である。

表-3.2は対流性雲について8.4 mm/hrから61.1 mm/hrにいたる8例の降雨エコー測定精度を示している。(2)項はdB表示で(平均値)¹/実効値に対する比からRayleigh分布における比($10 \log \frac{A^2}{\bar{A}^2} = 10 \log \frac{\pi}{4} = -1.05$)を差し引いたものであり、(3)項は、分散/実効値についてRayleigh分布における比($10 \log \frac{\sigma^2}{\bar{A}^2} = 10 \log \frac{4-\pi}{4} = -6.68$)を差し引いたものである。したがってもし実測している降雨エコー信号がRayleigh分布を満していれば、例(7)の様にその偏移量は何れも0dBとなる。

$\overline{A^2}$ を基準としている(3.26)式の場合には(3)項が誤差の対象となるが、例(1)を除いて正誤差であり、その大きさは最大0.64 dBであって雨量誤差にして+10%程度に及ぶ。

表-3.2 MTI方式による降雨の観測精度(名古屋レーダの例)

No	(1) 雨量強度 R (mm/hr)	(2) Rayleigh 分布からの偏移 dB		(4) 相 関 係 数 $\rho(T)$	(5) 相関項の誤差(dB) $\Delta_3 = 10 \log(1-\rho(T))$	(6) 誤 差 (dB) (3)+(5) $\Delta = \Delta_2 + \Delta_3$	(7) 雨 量 誤 差 %
		平 均 値 $\Delta_1 = 10 \log \frac{A^2}{\bar{A}^2} + 1.05$	分 散 $\Delta_2 = 10 \log \frac{\sigma^2}{\bar{A}^2} + 6.68$				
1	61.1	+0.06	-0.21	0.006	-0.024	-0.234	-3.3
2	22.6	-0.07	+0.25	0.423	-2.39	-2.14	-26.5
3	29.9	-0.05	+0.18	0.483	-2.87	-2.69	-32.1
4	9.4	-0.04	+0.14	0.118	-0.54	-0.4	-5.6
5	8.4	-0.19	+0.64	0.092	-0.421	+0.02	+3.3
6	8.5	-0.20	+0.6	0.09	-0.411	0.26	+3.8
7	46.8	0.0	0.0	-0.02	+0.097	0.097	+1.4
8	42.6	-0.02	+0.07	-0.01	+0.049	0.12	+1.7

また通常の信号処理系では入出力関係は直線特性なので(3.27)式が用いられるが、 $\bar{A}$ と $\bar{A}^2$ 間におけるRayleigh分布からの偏移によって生ずる誤差はMTI式のみならずNormal方式(Non-MTI方式)にも生ずる共通の誤差である。

表-3.2(2)項によればその最大偏移は-0.2 dBであり約3%の負の雨量測定誤差を生じ、(3)項の正誤差にくらべると約1/3程度である。

結局MTI方式において(3.27)式にもとずいた直線特性回路では、Rayleigh分布からの偏移によって生ずる誤差は(3)項-(2)項の差として現われるため $\bar{a}$ と $\bar{A}$ 間の見かけ上の測定最大誤差は約12%となる。

(4)項には隣接パルス間(3.8m秒)の相関係数値を示してあるが実用的に無相関と見なし得る値-0.01から最大0.48(第3例)に迄及んでいる。したがって雨量誤差は単独で-33.8%にも及び、降水エコー振幅の確率分布がRayleigh分布から偏移した場合において期待される最大誤差の約3倍弱となりMTI方式における雨量測定精度の主要因となっている。

第7項には(3.26)式にもとずいてRayleigh分布からの偏移による誤差(3)項と相関係数による誤差(5)項の和を示しているが、前者が主に正誤差であり後者は負誤差なのでわずかに相補性を生ずるとは云え相関係数項が卓越する場合には総合的な測定精度の劣化(32.1%)は免がれない。

この(7)項の誤差は $\bar{A}^2$ に対して求めたものなので(3.27)式における $\bar{a}$ と $\sqrt{\bar{A}}$ との関係では上述の誤差値より最大で3%程度正方向へ移行する傾向にある。

図-3.9はMTI方式による降雨観測の信頼性を検定するために、Normal方式とMTI方式による観測を一連続降雨の間に何回か切替えて、各々の場合の観測結果の連続性を検討した。降雨エコーは一般に時間と共に変化するので、Normal、MTIを繰返して測定することにより雨量強度の変化傾向に両方式(特にMTI方式)が追従するか検討した。

図左(6月28日)ではパルスヒット間の相関係数が0.088以下であり、実用上無相関と見なされる場合にはレイリー分布からの偏移による正誤差は、ほとんど無くNormal方式と同じ精度で測定できることがわかる。

また、図右(7月13日)では相関係数が0.178以上にありMTI方式の降雨エコー強度は明らかにNormal方式に比べて減少している。

3.3 大地クラッタの消去比特性

大地クラッタのMTI平均信号 $\bar{a}$ は次式によって表わすことが出来る。

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot G_0 \cdot \bar{A}^2 (1-K(T))}$$

..... (3.28)

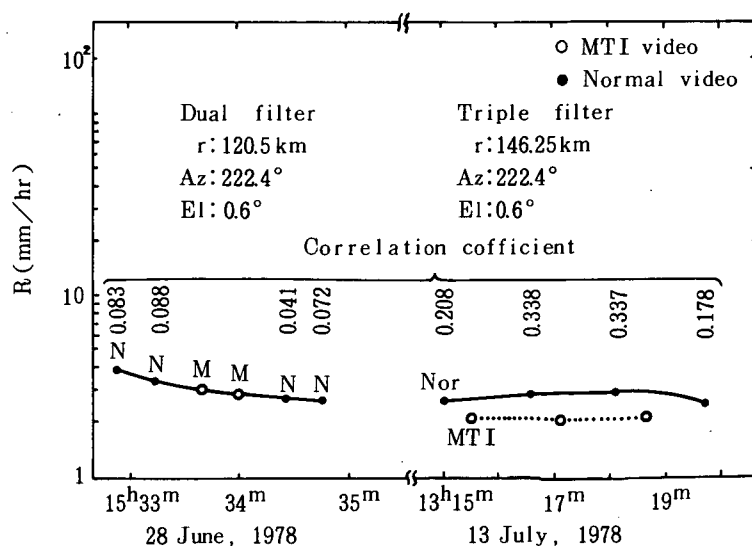


図-3.9 ノーマルとMTI方式による降雨観測
(名古屋レーダにおける観測例)

ここで

$$K(T) = \frac{\sum A(t) \cdot A(t-T)}{\sum A^2(t)} \dots\dots\dots (3.29)$$

で表わされる正規化された自己相関関数である。

この式を基にMTI方式における大地クラッタの消去比CR(Cancellation Ratio)は次式によってあたえられる。

$$CR = 20 \log \frac{\bar{a}}{\bar{A}} = 5.63 - 10 \log \frac{\bar{A}^2}{\bar{a}^2} + 10 \log (1 - K(T)) \dots\dots\dots (3.30)$$

ここで右辺第1項の定数5.63はNormal方式とMTI方式において、降雨エコー信号の振幅が同一になる様に補正した回路パラメータである。

表-3.3に8例の大地クラッタ消去比を示した。ここでは、CRとして小さいのは第1例の-7.7 dBから最大第8例の-22.8 dBの消去比が得られている。

表-3.3 大地クラッタ消去比(名古屋レーダの例)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
No.	$\bar{A}$	$10 \log \frac{\bar{A}^2}{\bar{a}^2}$	$10 \log \frac{\bar{A}^2}{\bar{a}^2} + 6.68$	K(T)	$10 \log (1 - K(T))$	CR (dB)
1	12.7	-0.32	-4.81	0.957	-13.64	-7.7
2	35.6	-0.75	-1.33	0.991	-20.22	-13.8
3	41.2	-0.64	-1.96	0.993	-21.74	-15.5
4	70.9	-0.39	-3.96	0.996	-24.09	-18.1
5	81.7	-0.01	-18.0	0.997	-25.69	-20.0
6	97.4	-0.25	-5.86	0.997	-24.69	-18.8
7	109.5	-0.04	-13.42	0.991	-20.41	-14.7
8	136.8	-0.45	-3.37	0.999	-28.86	-22.8

大地クラッタ消去比特性を決定する要因として、レーダ装置自身の発生する雑音、レーダ電波伝搬路上における大気ゆらぎ及び大地表面の樹木の風によるゆらぎ等、大地目標物自身の変化が考えられる。表に示したのは少数例といえ、測定の結果によると消去比は主旨-23 dBを超えて改善されることはなかった。この数値はレーダ装置で用いるマグネトロン発振管の発生雑音値と良く対応している。

大地クラッタ域と降雨エコー域とが独立に存在している場合のMTI効果を調べるため、5 Km距離分解能のレーダエコー分布を図-3.10に示す。ここで、図中の数1, 2, 3, 4, 5及び6は夫々1, 2, 4, 8, 16及び32 mm/hrに相当する。

図-3.10(a)はNormal方式によるエコー図であるが、点線で囲んだ範囲が対流雲(最大4 Km/hrレベル)であって、それ以外の区域は大地クラッタ域(最大32 mm/hr)を示す。

図-3.10(b)は(a)図の3分35秒後にMTI方式で得られたレーダエコー図であるが、点線枠外の大地クラッタ域は完全に除去されず、最大2 mm/hrレベルの消え残りが見られる。

図-3.10(c)は改良型MTI方式によるもので、これは図-3.10の(a)と(b)において、MTIを通した結果がある程度以上の減少を供うエコーは大規模なクラッタと判別して(MTIのCR能力を

超えていることになる)強制的に棄去したものである。

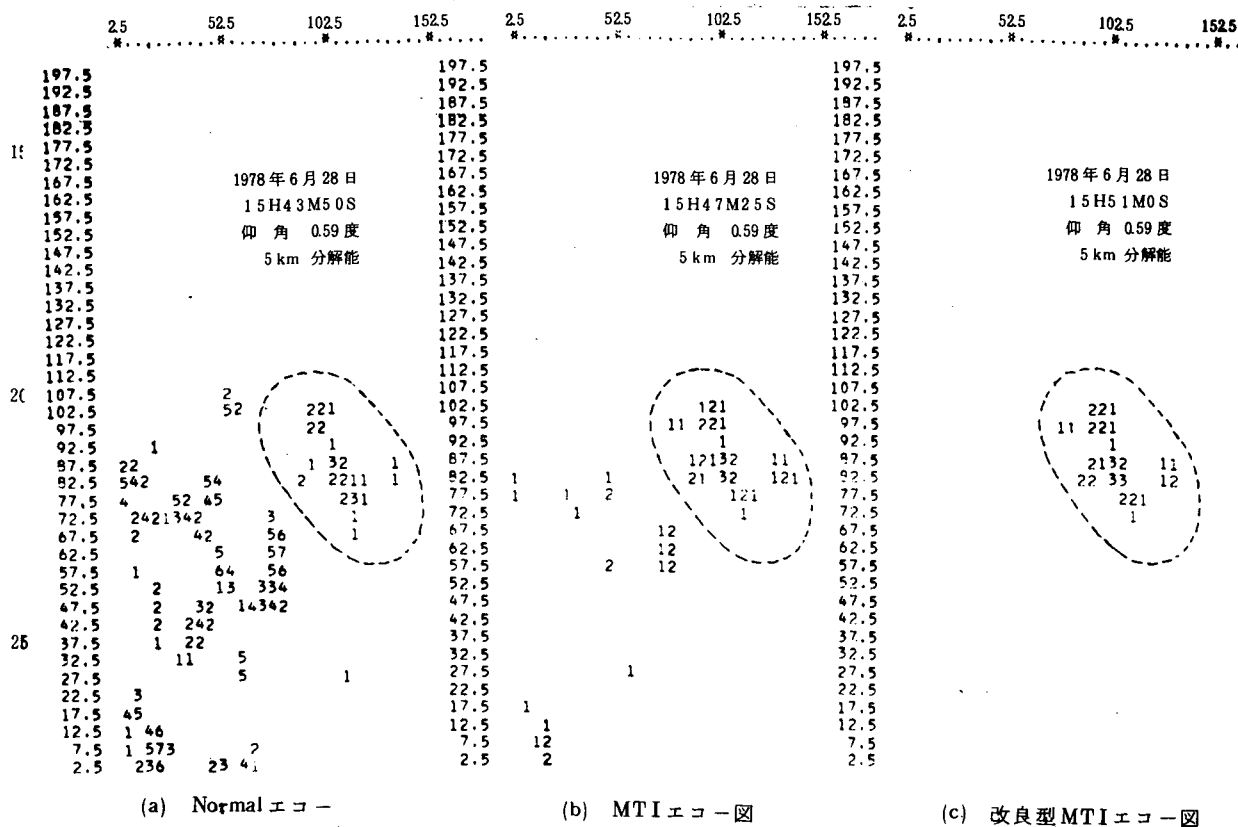


図-3.10 PPI観測エコー(名古屋レーダの例)

3.4 MTIレーダ雨量と地上雨量の対応例

MTIレーダ(気象庁名古屋レーダ)によるレーダ雨量と地上雨量の対応関係を調べて、MTI方式の降雨の定量観測精度を検討してみた。

ビーム角度と地形の関係から、比較的良好な資料が得られる矢作川、豊川流域についてレーダと地上雨量の対応を検討した。名古屋レーダで得られたデータは、1回のscan/10 secを4回くり返した平均値、即ち40秒間のレーダエコーの平均値が1時間に4~6回観測されたものであり、その平均をレーダの時間雨量とした。また、ビーム角度は、 0.5° であり矢作川、豊川流域の300~800 m上空の降雨を観測したものである。

地上雨量値としては、矢作川流域では14ヶ所豊川流域でも14ヶ所の地上雨量観測点があり、夫々の平均値を流域の地上平均雨量として使用した。

ここでは1978年9月15日の観測例を図-3.11に示す。この観測例では、比較的良好なレーダ雨量と地上雨量との対応は良好であり、MTI方式の降雨の定量観測への適用も十分可能であることが明らかになった。

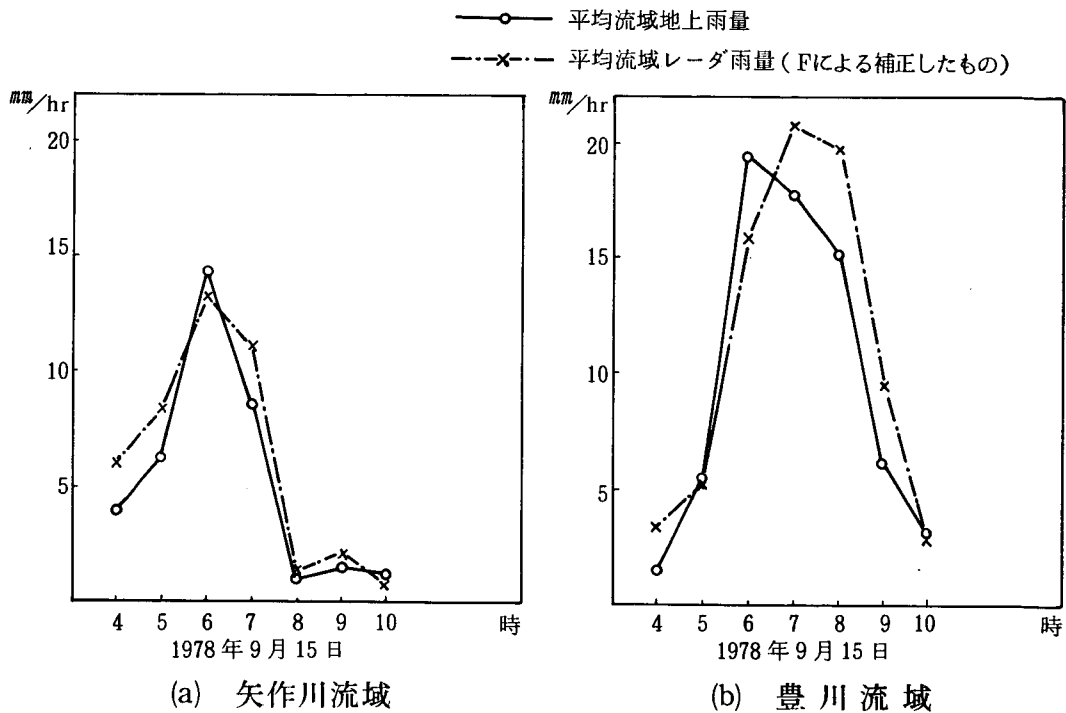


図-3.11 平均流域地上雨量と平均流域レーダ雨量

まとめ

レーダ反射エコー電力に含まれる山岳や建造物からの妨害成分であるクラッタを効果的に除去することは重要な課題である。現在、実用化している方法は晴天時の地上エコーを予め登録しておき、降雨エコーより差し引く、いわゆるクラッタ減算方式によっている。この方法により、ある程度成果をあげているが、晴天時クラッタの値と降雨時のクラッタの値では厳密には当然同一ではない。従って、今後物理的にも降雨時のクラッタに近いクラッタエコーを、夫々の観測時にリアルタイムに差し引く事が理想である。

この目的においてMTI方式は最適なものであり、今後のレーダ雨量計への実用的な利用に期待されている。今後必要なこととして、MTI方式による雨量観測精度の評価及びMTI方式に起因して新たに生ずる観測誤差の把握とその改良方法について検討が必要となろう。

4. レーダによる降雨観測の精度向上方法

4.1 校正用雨量計の利用

ディー気象レーダ計画(英国)により、レーダにより測られた雨量の精度は、同時に校正用雨量計を用いることによって向上できることがはっきりした。ディー計画の場合、 β は1.6という値の定数とみなされた。したがって、レーダ方式は

$$R = C \frac{P_r^{-\frac{1}{1.6}}}{r^2}$$

として表わされる。

校正用サイト上部の反射電力をもとに、ある時間 t における $\sum_t P_r^{-\frac{1}{1.6}}$ が算定され、これと校正用サイトで地上雨量計により同じ時間帯で測定された雨量 $\sum_t R$ を比較することにより、 C の値が求められた。このような C の値の定め方は“適応的”であるといえる。

この方法を適用することにより、誤差は約20%まで縮小された報告がある。

ディー川流域のような山地性の地域においては、有効な校正が可能な範囲は、校正用サイトから約10 kmである。校正用地上雨量計を幾何学的に配置すると仮定すれば、一台の地上雨量計によって校正することができる最大の面積は200 km²(正方形配置)ないし260 km²(三角形配置)となろう。

4.2 'RAINPAD' の利用

Atolas と Ulbrich (1974) は、降雨に関する6つのパラメータ(降雨パラメータ)に関し包括的な研究を実施した。6つのパラメータとは、①降雨強度 R 、②液相水分量 M 、③中央体積直径 D_0 、④マイクロ波減衰 A 、⑤レーダ反射因子 Z および⑥光学的減衰 σ である。彼らは、 $Q_t(D) = CD^n$ の形式の“有効”指数則により、減衰断面積 Q_t を雨滴径 D の関数で表わすことを提案した。さらに、Marshall - Palmer の雨滴分布 $N(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$ を仮定することにより、5つの降雨パラメータは次のように表わされる。ただし $\lambda = 3.67/D_0$ である。

$$R = 0.6\pi \int_0^\infty \nu(D) D^3 N(D) dD = 0.6\pi N_0 F(D) \quad (4.1)$$

$$\text{ここで } F(D_0) = \int_0^\infty \nu(D) D^3 \exp(-3.67 D/D_0) dD$$

$\nu(D) :=$ 雨滴の最終落下速度

$$M = (\pi/6) N_0 \int_0^\infty D^3 \exp(-\lambda D) dD = \pi N_0 D_0^4 / (3.67)^4 \quad (4.2)$$

$$A = 0.4343 N_0 C \int_0^\infty D^n \exp(-D) dD = 0.4343 \Gamma(n+1) C N_0 D_0^{n+1} / (3.67)^{n+1} \quad (4.3)$$

$$Z = 10^6 \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD = 7.2 \times 10^8 N_0 N_0^7 / (3.67)^7 \quad (4.4)$$

$$\sigma = (\pi/20) \int_0^{\infty} D^2 N(D) dD = N_0 D_0^3 / [10 \times (3.67)^3] \quad (4.5)$$

$Q_t = CD^n$ における C および n の値は、マイクロ波の波長と気温とに依存し、図 4.1 のように与えられる。

Marshall - Palmer の雨滴スペクトルを用いることにより、 N_0 と D_0 の値さえ与えてやれば、上記の 5 つのパラメータの値が定まる。すなわち、5 つの遠隔測定可能なパラメータのうち、いずれか 2 つを測定すれば、 N_0 と D_0 を含む残りのパラメータの値を定めてやる事が出来る。この観点から、彼らは降雨パラメータ図すなわち "RAINPAD" を作成した。この図においては、2 つのパラメータが選ばれ x 軸および y 軸に取られ、残りのパラメータの等値線が同じ座標に抽かれる。図 4.2 は、 Z および A を座標軸に取った例で、波長 3.22 cm で気温 10 °C に対するものである。

種々の研究者による経験式を同様だが単純化された "RAINPAD" にプロットしたものが図 4.3 である。これにより、これらの公式が基礎を置いている雨滴スペクトルの差異を見てとることができる。

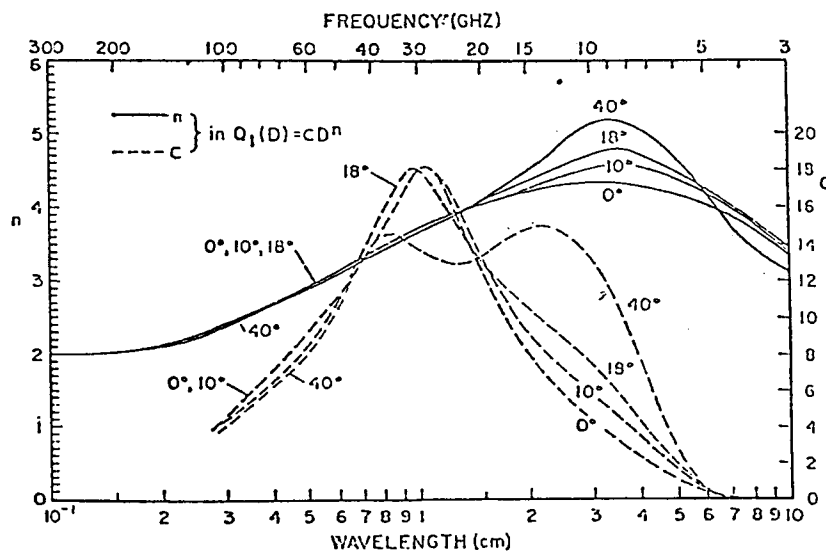


Fig. 4.1 Curves of 'effective' C and n in $Q_t = CD^n$
Versus Wavelength and Temperature

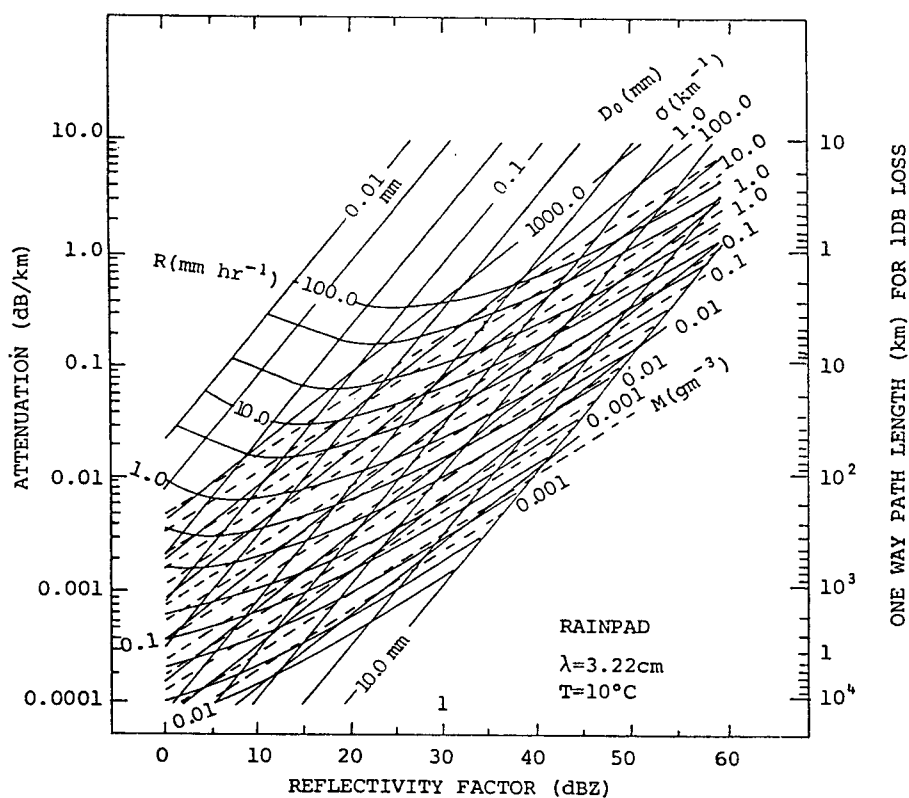


Fig. 4.2 Rain Parameter diagram or RAINPAD for $\lambda = 3.22 \text{ cm}$ at 10°C calculated for an M-P drop spectrum but applicable to all reasonable drop spectra with small errors. The abscissa is $10 \log Z$ in decibels above $Z = 1 \text{ mm}^2 \text{ m}^{-3} (\text{dBZ})$. Measurement of any two of the six parameters shown provide all six. Similar RAINPADS are easily developed for all wavelengths.

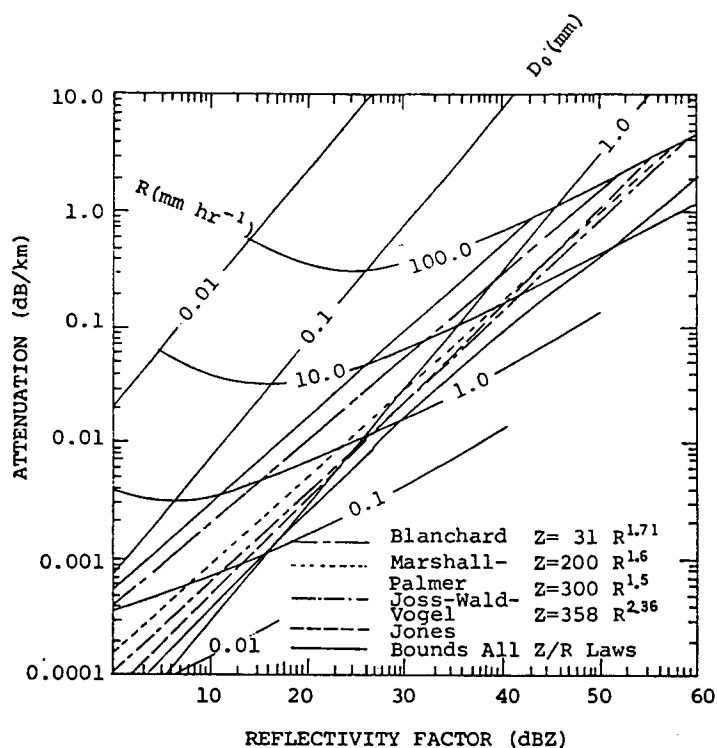


Fig. 4.3 Four commonly referenced empirical regression equations of reflectivity factor Z versus R for different rainfall types according to authors shown in legend all plotted on Rainpad. The solid curves correspond to the bounds of the 69 Z - R relations plotted in Figure 8. Each Z - R relation implies a different set of 119 regression equations between the six rainfall parameters. The bounding curves provide an estimate of the possible errors to be incurred in deducing any of the parameters from a prior Z - R or A - R law.

図 4.4 (a) は、 Joss - Waldvogel の経験式により計算された降雨強度とその実測値の比較である。
 図 4.4 (b) は、 N_0 および D_0 を変数とし、式 (4.1) により計算した結果である。精度が (a) より向上している。

ここに提示された手法は、降雨の遠隔測定分野において、多種の応用の方法を示唆するものである。

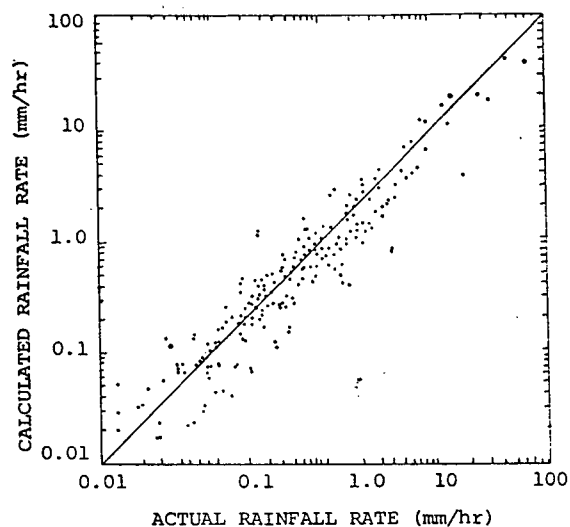


Fig. 4.4 (a) Comparison of rainfall rates calculated from the empirical Joss-Haldvogel relation to the actual rainfall rates

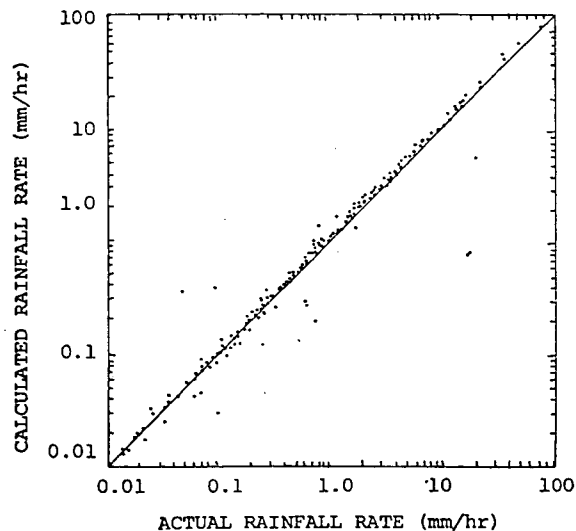


Fig.4.4 (b) Comparison of rainfall rates calculated by the present method the actual rainfall rates

4.3 三次元レーダデータの利用

今や、三次元レーダデータを即時的に供することが可能となった。地表から人工衛星を結ぶ経路上における降雨強度分布に関する研究において、Fugono 他 (1977) は、定高度 PPI (constant altitude plan position indicator; CAPPI; キャピー) の開発を行った。スキャンの手順は図 4.5 に図示されている。このシステムにおいて、レーダのレンジは 50 km であり、最高高度 (すなわちステップ 40) は 1 km から 10 km まで 1 km キザミで雲頂高度に応じて変えられるようになっている。スキャンに要する時間は 7 分である。合衆国の National Severe Storm Laboratory では、同様のシステムを開発しているが、この場合のスキャンに要する時間は 3 分である。

3 次元レーダを地上雨量の評価に直接利用する方法は、今のところ目ぼしい成果をあげていない。しかしながら、リアルタイムの 3 次元レーダは、雲の 3 次元的な構造に関する多量の情報を与えることを可能ならしめ、それにより我々は、降雨がそれより生起してくところの状況に関し、監視することが可能になる。Greene 他 (1971) により提案された VIL (virtically-integrated liquid water, 鉛直水分量) は、ある種のポテンシャル予報に適しているようである。

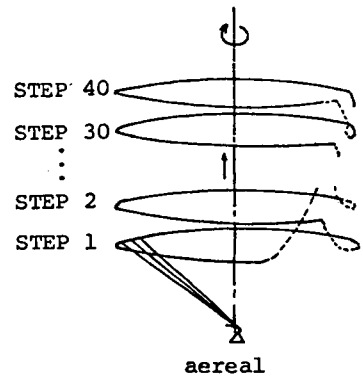


Fig. 4.5 CAPPI scan

VIL は次式で定義される。

$$VIL = \int_{h_{base}}^{h_{top}} M dh = C \int_{h_{base}}^{h_{top}} Z^p dh \quad (4.6)$$

ここに C および p は、 $M = CZ^p$ とした定数である。(Marshall - Palmer 雨滴スペクトルを仮定すれば、 $M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{4/3}$)

VIL の例を図 4.6 (a) に示す。また、図 4.6 (b) は地上雨量計ネットワークによって観測された 5 分降雨強度で (a) に対応するものである。

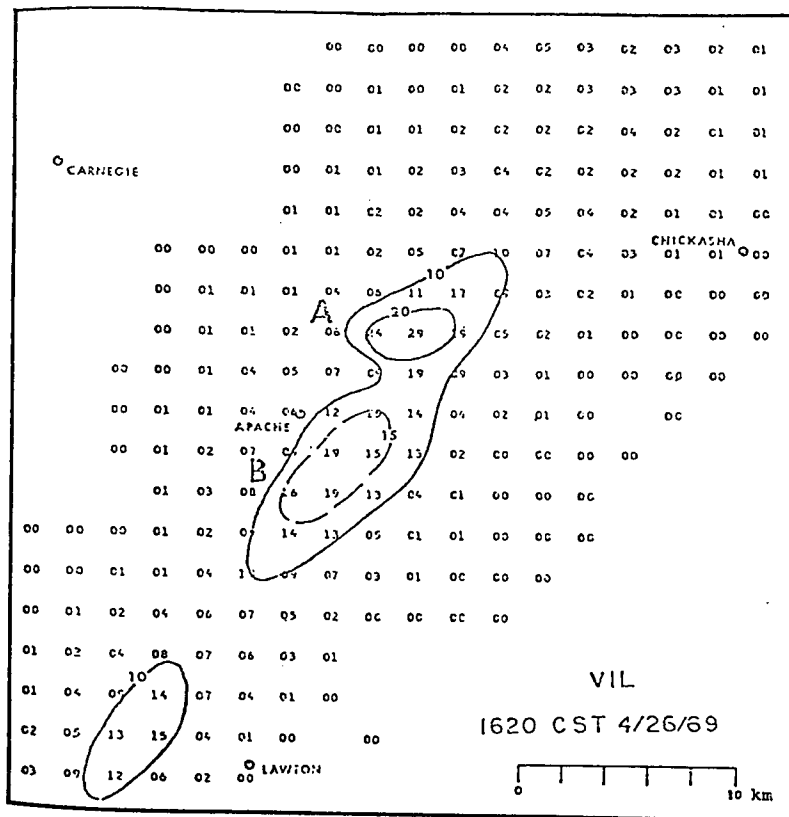


Fig. 4.6(a) VIL map for 1620 CST, 26 April 1969.
Isopleths are VIL in kg/m^2

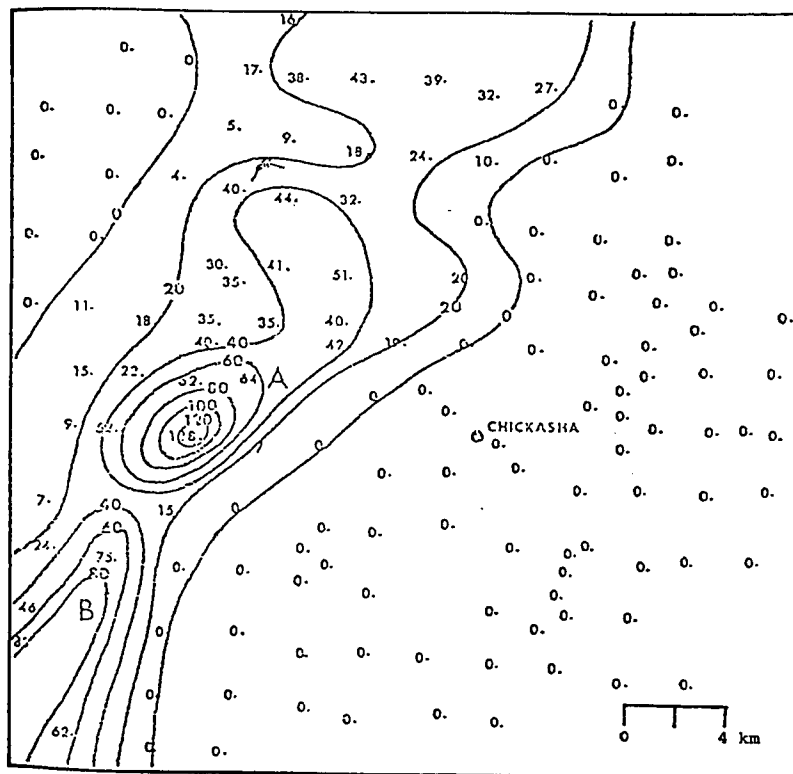


Fig. 4.6(b) Five-minutes Rainfall Rates (mm/hr)
over Hydrologic Analysis Region,
1620 CST, 26 April 1969

4.4 レーダ雨量観測システムの等価雨量計密度 (GDE)

Harrold 他 (1974) は、継続時間および流域面積の関数として、レーダ雨量の精度の変化を求めた (表 4.1)。表中の数字は、ディー気象レーダ計画において収集されたデータに基づいており、最適雨量とレーダ雨量と差の絶対パーセンテージの平均をあらわしている。最適雨量というのは地上雨量ネットワークを基本に、雨量計の間をレーダのパターンで補間したもので、恐らく誤差は数パーセントであろう。レーダ雨量は、一つの校正用地上雨量計を用いて評価されたものである。

次の議論のため、表 4.1 の値を標準誤差に換算しておく (表 4.2)。そのためには 0.674 の逆数を掛けてやればよい。すなわち

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m / 0.674 \quad (4.7)$$

ただし、 ε_s は標準誤差、 ε_m は平均絶対偏差である。

レーダ雨量観測システムの等価雨量計密度 (GDE) δ を次のように定義する。

$$\delta = N / A \quad (4.8)$$

ただし、 N は地上雨量計の数、また A は懸案の地域の面積で、そこに N 台の地上雨量計が分布しているものとする。本節の目的は、この GDE の特性を実際のデータに即して検討し明らかにすることにある。又、面積平均雨量の相対精度を雨量計の台数と観測の変動係数 C_v で表わすと

$$\varepsilon = \frac{C_v}{\sqrt{N}} \quad (4.9)$$

となる。

($\varepsilon = \frac{C_v}{\sqrt{N}}$)、GDE の値として δ を持つシステムによって測定されたレーダ雨量の標準誤差は、

$$\varepsilon_s = C_v / \sqrt{\delta A} \quad (4.10)$$

表 4.1 Absolute Percentage Differences

(a) Variation of accuracy over sub-catchments with periods of integration.										
Period	1 hour		2 hours		3 hours		6 hours			
Accuracy (%)	26		20		18		13			
(b) Variation of accuracy with area. Hourly measurements.										
Area (km)	0	60	100	175	220	300	430	500	525	680
Accuracy (%)	37	22	20	19	18	15	13	14	12	15

表 4.2 Stand Errors Converted from Table 2.5.1

(a) Variation of accuracy over sub-catchments with period of integration.										
P Period	1 hour		2 hours		3 hours		4 hours			
Accuracy (%)	39		30		27		19			
(b) Variation of accuracy with area. Hourly measurements.										
Area (km)	0	60	100	175	220	300	430	500	525	680
Accuracy (%)	55	33	30	28	27	22	19	21	18	22

表 4.2 に与えられる ϵ_s と A の関係は 1 時間に関するものであるから、ここで式 (4.9) と同様な関係を、1 時間についてとられた C_v と A との間に導いてやる必要がある。両対数紙上における C_v の勾配を種々の継続時間について示したものが図 4.7 である。1 時間に関するデータはないが、Zawadzki の値 0.22 か橋本の値 0.25 を用いるのが良いようである (比較的短時間には、Zawadzki の値 0.22 が良いようである)。

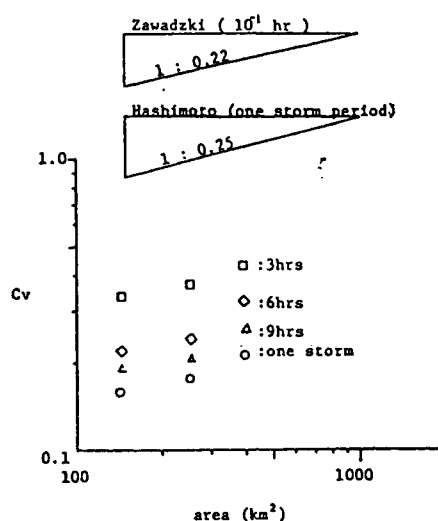


Fig. 4.7 Areal C_v v.s. Area A for Different period of integration

$$C_v = \alpha A^\mu \quad (4.11)$$

ただし α および μ は定数で $\mu \doteq 0.22$ である。すると、式 (4.10) は次のようになる。

$$\epsilon_s = \frac{\alpha A^\mu}{\sqrt{\delta A}} = \frac{\alpha}{\sqrt{\delta}} A^\nu \quad (4.12)$$

ただし $\nu = \mu - 1/2 \doteq 0.28$

表 4.2 の値を両対数紙上にプロットしたものに直線をあてはめたものが図 4.8 であり、勾配 -0.28

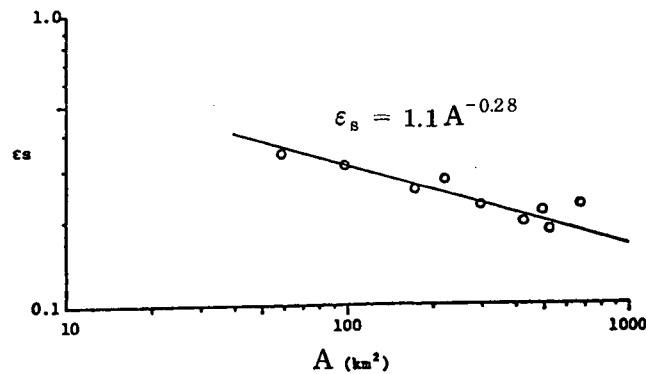


Fig. 4.8 Application of a Straight Line on a Log-log Scale with Grad. -0.28 for the Dee Data

のものが良く適合する。すなわち、

$$\varepsilon_s = 1.1 A^{-0.28} \quad (4.13)$$

この事実は、 $\alpha/\sqrt{\delta}$ が懸案地域の面積によらない定数で、システム（この場合ディーのシステム）によって定まることを示唆する。

次いでGDEの値を評価する。式(4.11)における α の1時間に関する値を評価してやる必要がある。図4.7のような得られている値を外挿し、両対数上で0.22の直線をあてはめることにより、式(4.11)は概ね次のようになる。

$$C_V = 0.24 A^{0.22} \quad (1 \text{ 時間}) \quad (4.14)$$

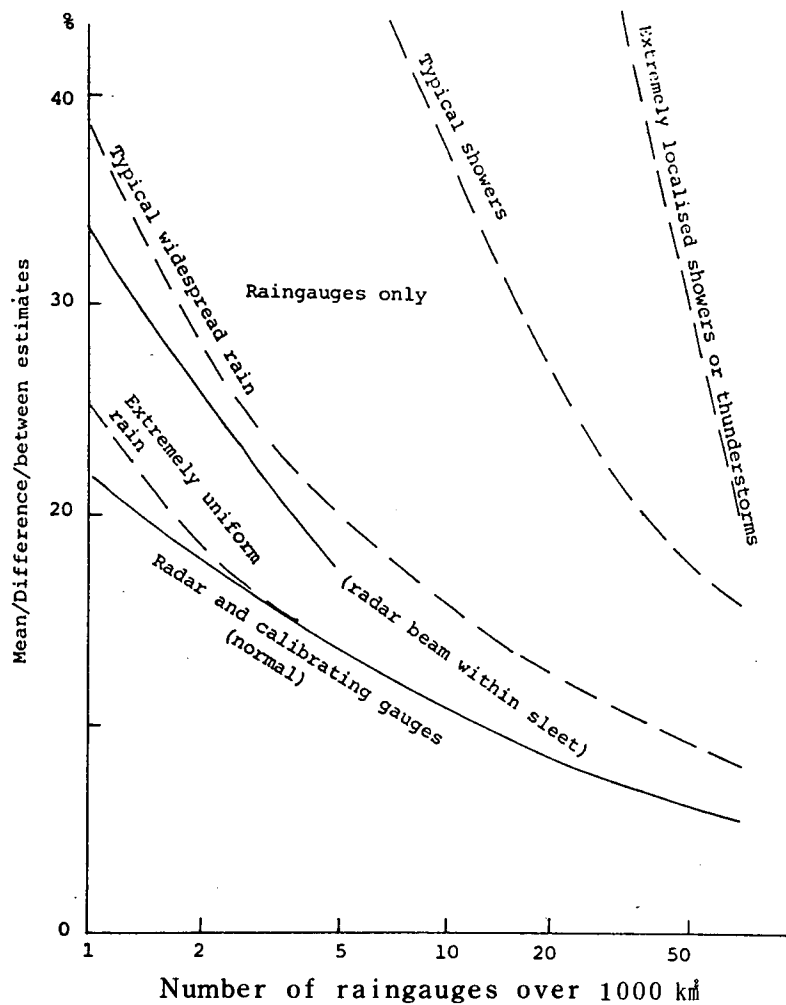
式(4.13)および式(4.14)を式(4.11)に代入することにより、ディーのレーダ雨量観測システムのGDEの値は次のようになる。

$$\delta = \left(\frac{\alpha}{\varepsilon_s} A^\nu \right)^2 = \left(\frac{0.24}{1.1} \right)^2 = 0.048 \text{ (台/km)} \quad (4.15)$$

この結果は、このレーダを基本としたシステムは、各地上雨量計が20km(≐1/0.048)を支配する地上雨量計ネットワークと等価だということを意味する。

詳細に検討しよう。図4.9はCollier(1975)によって与えられたもので、種々のタイプの降雨に対するレーダ雨量および地上雨量計雨量についての ε_m を表わす。レーダ雨量の誤差は降雨のタイプによらないことがうかがわれる。すなわち、式(4.13)の係数は、種々のタイプの降雨に対して一定とみなせる。

図4.9の〔 〕の値は、式(4.11)において μ および A の値をそれぞれ0.22および1,000km²として α を求めたものである。したがって、ディーのシステムのGDEは種々の降雨に対し、次の値をとる。



- Mean percentage difference between optimum estimates of hourly rainfall and radar estimates calibrated using various numbers of calibration sites.
- - - - - Mean percentage difference between optimum estimates of hourly rainfall and estimates using various numbers of rain gauges without a radar.

The figure can be used, for example, to derive the number of raingauges required to measure rainfall with the same accuracy as a radar system calibrated with a specified number of rain gauge sites. For instance, in typical showers, a radar system calibrated using two raingauge sites gives the same accuracy as a raingauge network of about 50 gauges over 1000 km²

Fig. 4.9 Differences between Estimates of Hourly Subcatchment Rainfall Related to Raingauge Density

〔極めて局地的なにわか雨もしくは雷雨〕

$$0.45 \left(1 / \delta = 2.2 \text{ km}^2 / \text{台} \right)$$

〔典型的なにわか雨〕

$$0.13 \left(1 / \delta = 7.5 \text{ km}^2 / \text{台} \right)$$

〔典型的に広域的な雨〕

$$0.024 \left(1 / \delta = 41.9 \text{ km}^2 / \text{台} \right)$$

〔極めて一様な雨〕

$$0.012 \left(1 / \delta = 84.0 \text{ km}^2 / \text{台} \right)$$

当然ながら、降雨がより一様になるほど等価なネットワークの地上雨量計密度はより低くてよい。

5. レーダによる降雨観測の実用例

5.1 日 本

赤城山レーダ雨量計システム (建設省)

建設省は利根川流域のダム群の統合管理のために科学技術庁、気象庁、土木研究所の協力の下に赤城山にレーダを設置し、1966年より降雨観測の実用化研究を進めてきた。当初はX-bandを使用したが、1967年からはC-bandの波長を使用している。1971年からはレーダ装置より得られた雨量情報をデジタル信号に変換し、大量のデータを磁気テープに記録するシステムに改められたが、これ以後受信電力と地上雨量の比較検討が可能となり、両者を結びつける定数 B 、 β の値の検討が進んだ。また、前述のようなGround Clutter除去の方式も確立し、レーダによる降雨観測の手法について実用化の見通しが得られた。このため1975年を初年度とする3ヶ年計画でレーダー雨量計システムが完成された。

このシステムの概念図は図5.1に示される。レーダー本体は赤城山に設置し、情報はレーダーリレー装置で前橋市の利根川ダム統合管理事務所に送られる。伝送されたデータはデータ収集処理装置に送られるとともに、併行してPPI表示される。

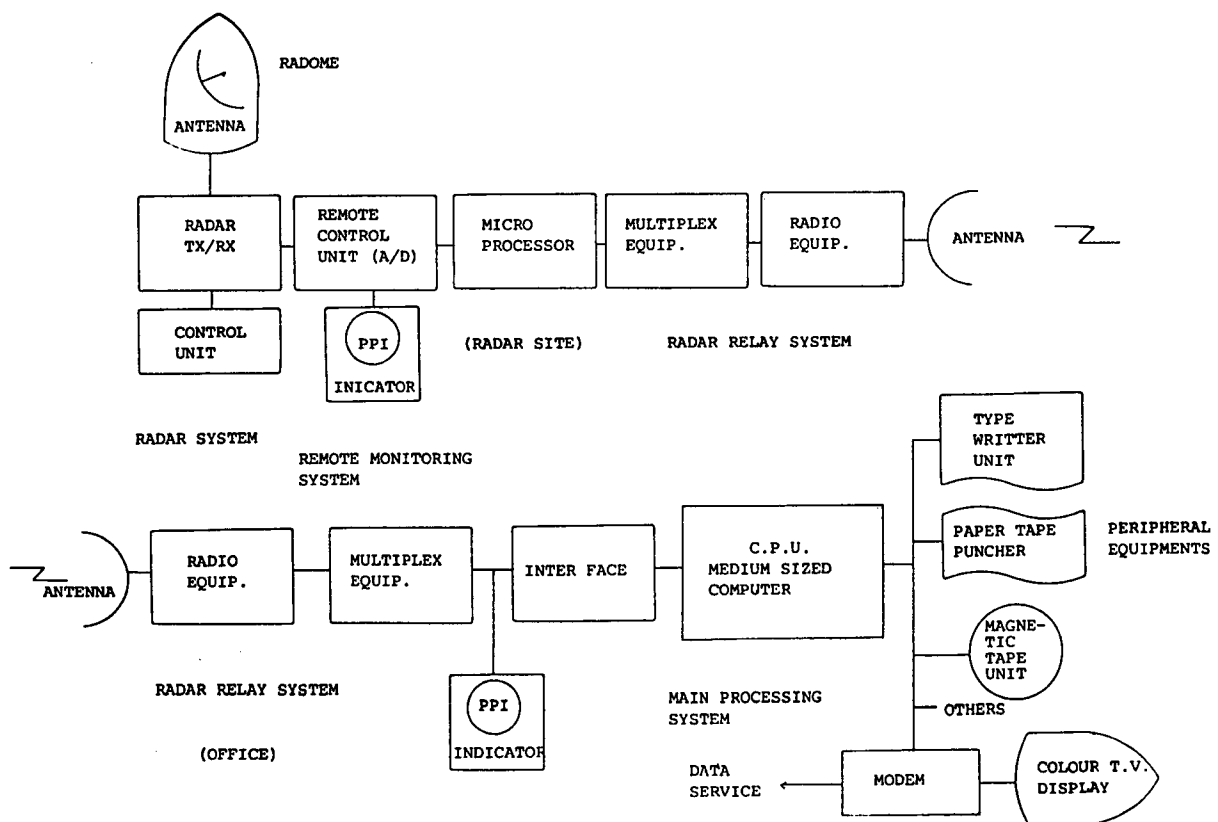


Fig. 5.1 Configuration of the Radar Rainfall Measurement System Developed by the Ministry of Construction

データ収集処理装置においては、演算しようとする全面積をレーダーサイトから128本(102km以遠では256本)の放射線で約 2.8° (102km以遠では 1.4°)に等分割し、さらに中心から半径方向に3kmごとの同心円で切ったおのおのの面積(メッシュ)について、5分間分のデータを対象に演算を行う。このようにして得られたデータを基にして次のような演算処理を行なっている。

- ① 全メッシュの1時間雨量
- ② 指定された流域の5分間および1時間雨量
- ③ 指定された流域の連続積算雨量および連続降雨時間
- ④ 指定されたメッシュの連続降雨量が指定降雨量を超えた場合の警報処理

なお、処理されたデータは建設省の専用通信回線によって栗橋、佐原、野田、東京等へ伝送されディスプレイ表示が行われるようになっている。

レーダーによる雨量観測値を地上雨量計観測値と比較すると図5.2のようである。図5.3は両者の差が20%以内であった時間の割合を示している。

このシステムの目的は利根川流域内外で降雨域の移動を監視し、地上雨量計による情報と併せて地域ごとの雨量分布、面積雨量等の測定を行い、最終的には貯水池の適切なゲート誤作を通じて利根川水系の水管理を適切に行うことにある。

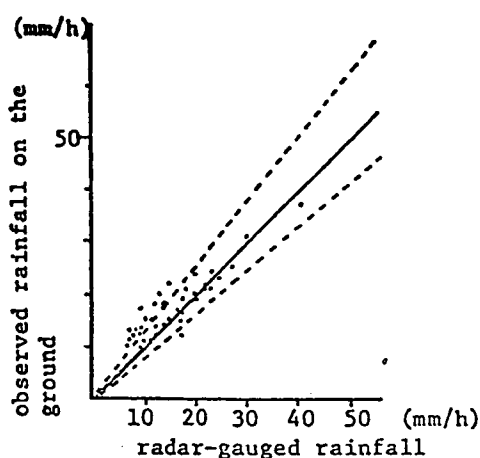


Fig. 5.2 Relationship between Radar-gauged Rainfall and Observed Rainfall on the Ground

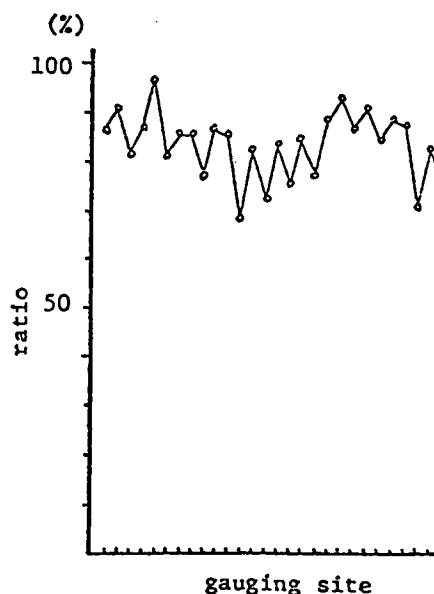


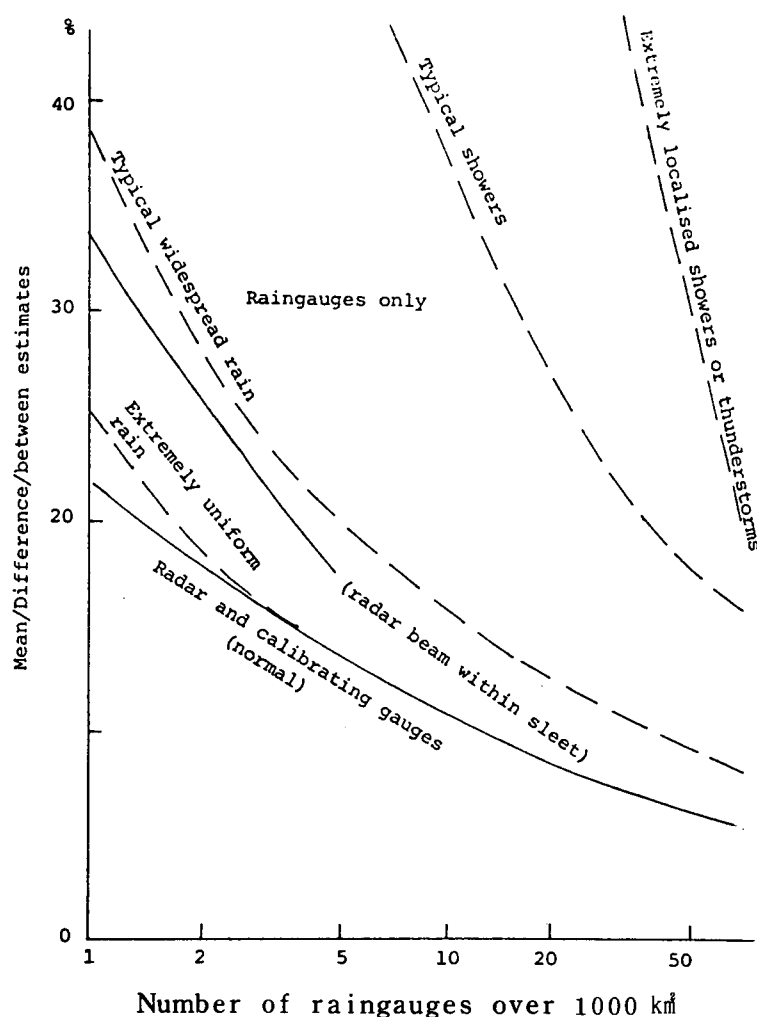
Fig. 5.3 Agreement Ratio of Observed Rainfall between by Radar and by Raingauge Station

5.2 英 国

Dee Weather Radar Project, (英国North Walesの例)

Dee川はウェールズ最北端に位置する東西約80km, 南北30km足らずの長方形の流域を形成しており, 海拔300~600m内外の丘陵地帯を流れている。この地域の水管理の目的で1966年以来レーダーを含む降雨観測システムの検討がはじめられ1970年にはS-bandのレーダーが設置された。その後1972年にはC-bandに変更され, 同時にテレメーターによる雨量計網も整備されるようになった。降雨追跡・流出予測までの一貫システムとしては1975年11月に完成した。それまでに要した主たる固定費は60万ポンド程度(75年換算)であったがこのうち約1/4の費用にあたるS-RadarはPlessy Radar Ltdより無償供与されたということから, レーダー会社のこのプロジェクトを成功例として得点としたい意欲がうかがえる。

「これまでの成果としては図5.4に示されるような雨量計としてのcalibration精度の確認のほか, テレメーター付雨量計網との組み合わせによる流出予測ならびに雨域の移動予測を含めた流出予測があげられる」。前者に対しては基本的には貯溜関数法と河道の洪水追跡法の組み合わせを用いており, 後者の降雨域の移動はまだ研究段階にある。



- Mean percentage difference between optimum estimates of hourly rainfall and radar estimates calibrated using various numbers of calibration sites.
- — — — Mean percentage difference between optimum estimates of hourly rainfall and estimates using various numbers of rain gauges without a radar.

The figure can be used, for example, to derive the number of raingauges required to measure rainfall with the same accuracy as a radar system calibrated with a specified number of rain gauge sites. For instance, in typical showers, a radar system calibrated using two raingauge sites gives the same accuracy as a raingauge network of about 50 gauges over 1000 km².

Fig. 5.4(a) Differences between Estimates of Hourly Subcatchment Rainfall Related to Raingauge Density

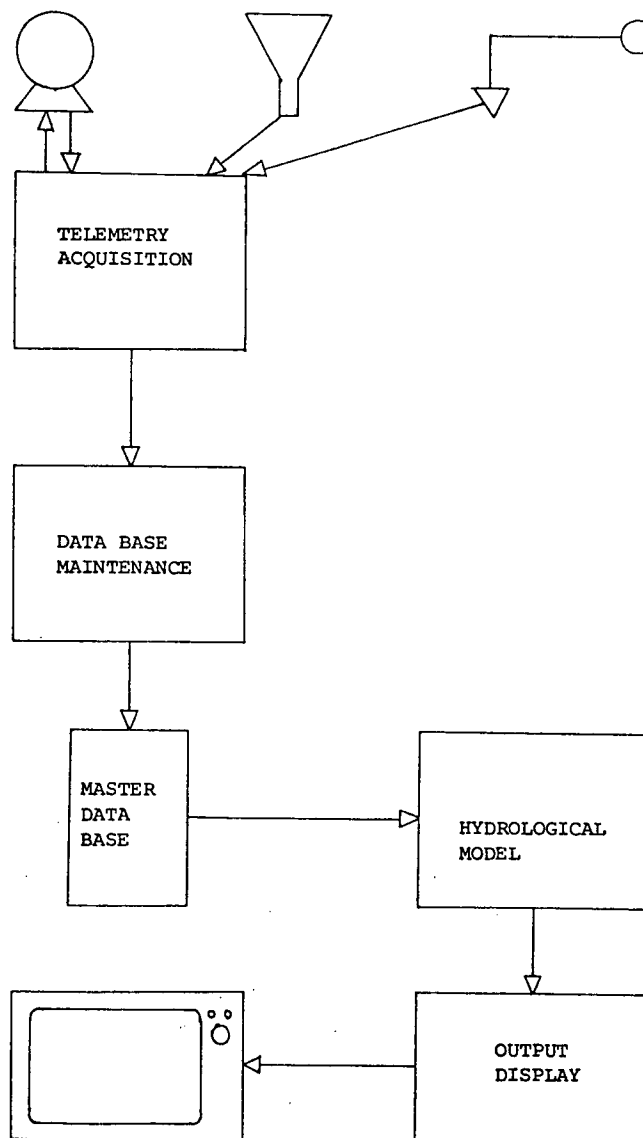


Fig. 5.4 (b) The 'Dee-flow' System Structure

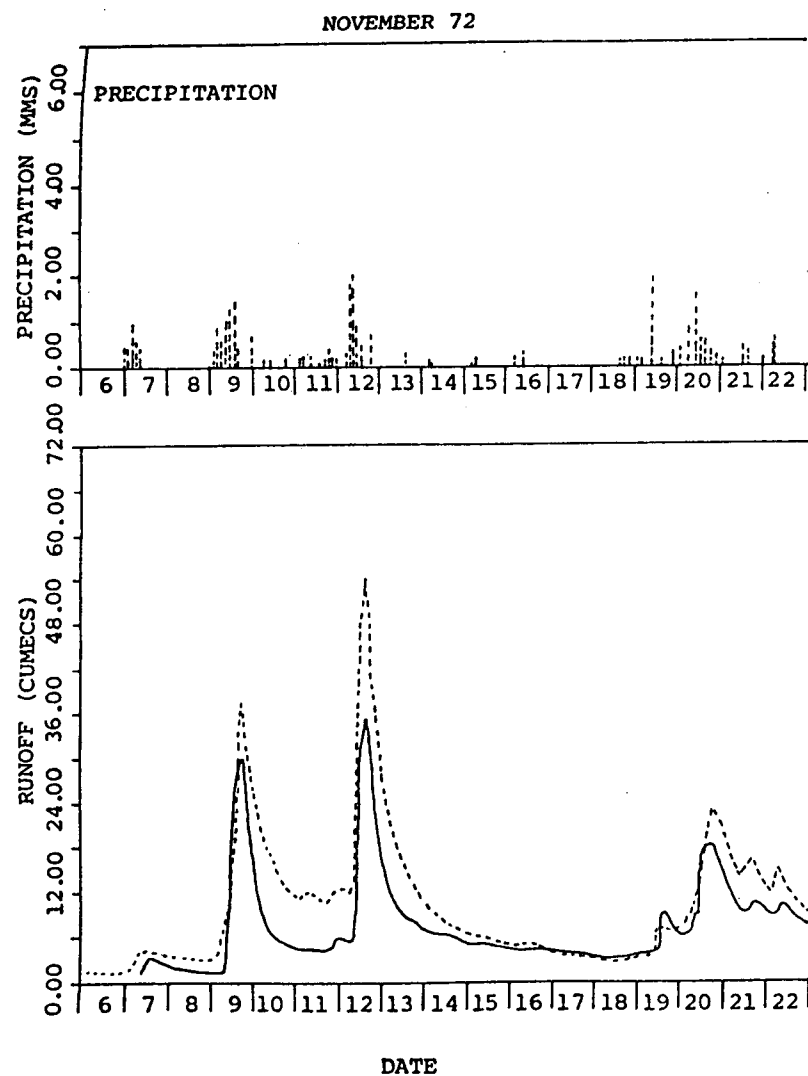


Fig. 5.4(c) Observed and Reproduced Hydrographs, Alwen at Druid

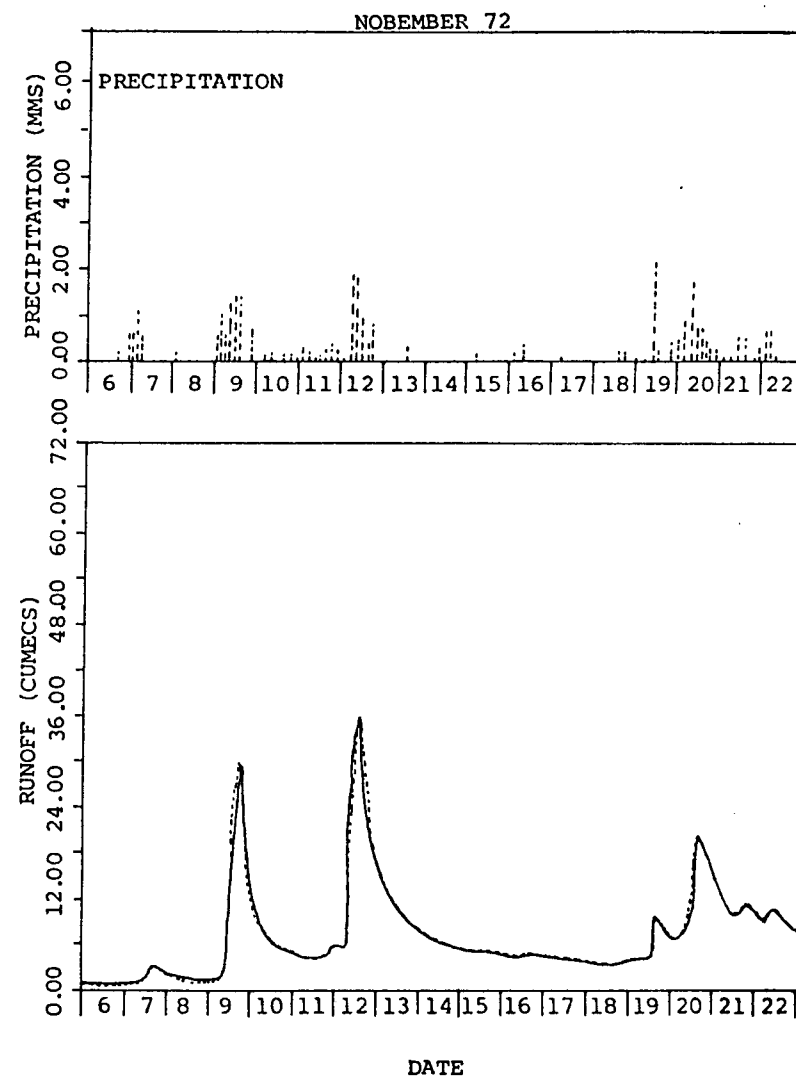


Fig. 5.4(d) Observed and Real Time Forecast Hydrographs, Alwen at Druid

5.3 西ドイツ

西ドイツ国気象庁 (G.W.S) は貯水池への流入量予測についてレーダ観測雨量と地上観測雨量によるものの比較精度の検討を行なっている。

更には地上雨量計、気象レーダ及び電子計算を結ぶオンラインシステムによる貯水池の最適管理に関する研究も行なわれている。(図 5.5)

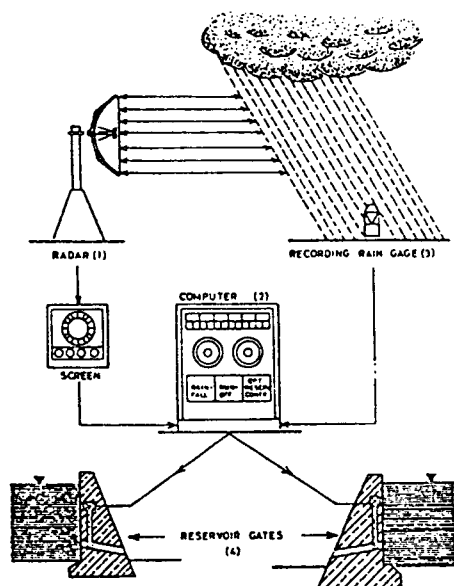


Fig. 5.5(a) Hardware Required for Reservoir Operation

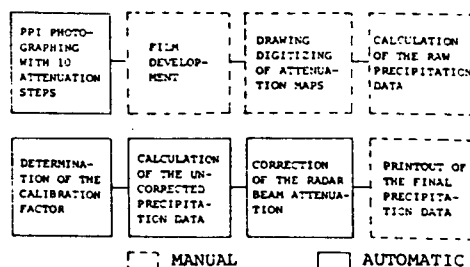


Fig. 5.5(b) Flow Diagram of Semiautomatic Radar Precipitation Measurement Using x-band Radar

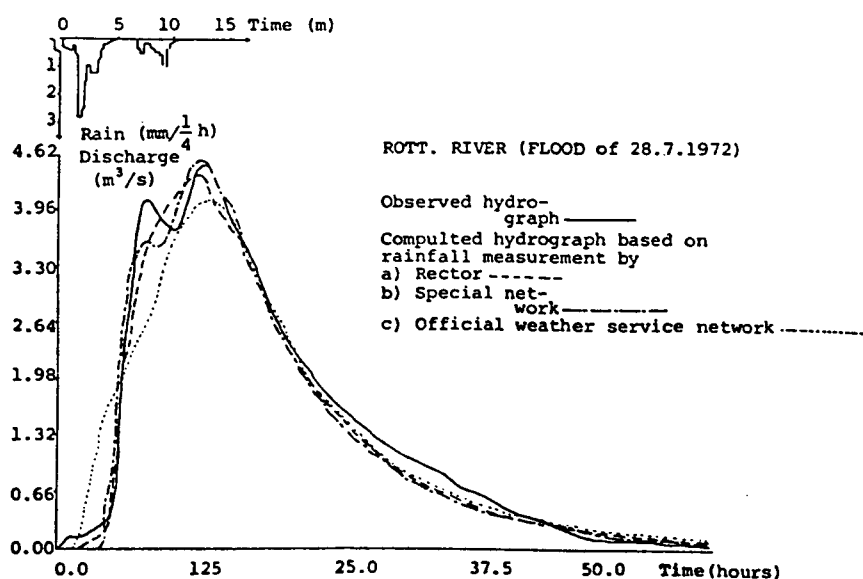


Fig. 5.5(c) Comparison of Observed and Computed Hydrographs for the Rott River Flood of July 28, 1972.

5.4 アメリカ合衆国

EML, NOAAのプロジェクトの例がある。

フロリダ州Coral GableにあるNOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration)の一組織であるEML (Experimental Meteorology Laboratory)では、同じNOAA内のNHC (National Hurricane Center)のもつS-band レーダとマイアミ大学の同波長レーダを用いて研究を行なっている。マイアミ大学のものは1967年、NHCのものは1972年にそれぞれ設置され、1973年になってNHCのレーダはデジタル化されており、以後EMLではこれを主に用いている。

ここではレーダを用いて地上雨量計の設置密度と面積雨量の精度の関係を推定するために利用されている。また、レーダで測定した代表雨量の地上雨量との精度を比較検討も行なっている。

レーダ雨量計の特性に関する調査報告

土研資料第 1634 号
昭 56 年 2 月(1981)

土木研究所河川部水文研究室

キーワード：レーダ雨量計

要 旨

レーダ雨量計の観測精度について検討し、併せて精度向上に必要な手法と
世界におけるレーダによる降雨観測の現状を調査した。

郵便はがき

3 0 5 - □ □

三十円切手
をはって下
さい

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
河川部水文研究室 御中

No. _____

土研資料 第 1634 号

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第1634号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印