

レーダ雨量計から見た降雨の時空間特性について

Characteristics of Spacial and Temporal Variation of Rainfall Observed by Radar

建設省土木研究所 吉野文雄 F.Yoshino

建設省土木研究所 水野雅光 M.Mizuno

建設省土木研究所 井川貴史 T.Ikawa

1. はじめに

河川計画・河川管理等において、雨量に関連した問題が重要な位置を占めている。特に、流出解析などでは面積雨量の評価が必要であり、また、洪水予報では、降雨予測などの面で空間的な降雨の特性を把握する必要がある。これらの問題は、地上雨量計を用いた点観測のデータにより解析が行われてきたが、降雨の空間分布を把握するには難しい面が多い。

そこで、本研究では、現在多数稼働しているレーダ雨量計による面的な降雨観測結果を用いることにより、降雨の空間特性・時間特性の解析及び面積雨量の評価を行った。

2. 解析方法

(1) 解析対象データ

本解析に使用するレーダデータは、赤城山レーダの記録データの中から選定した。

レーダの観測範囲は、半径120Km円内とかなり広範囲に及ぶため対象領域を一部に限定した。グランドクラッター等の影響の少ない鬼怒川流域周辺を選び、図-1に示す60Km×45Km(2700Km²)の矩形領域を対象領域とした。

対象降雨は、1979年～1983年の記録データの中から降雨原因ごとに分類し、台風9降雨(全384時間)、前線7降雨(全291時間)、低気圧11降雨(全461時間)、雷雨27降雨(全224時間)を選んだ。

また、本解析で取り扱うレーダ雨量値については、解析上の簡便さから全て3Km×3Kmの直交メッシュに直した雨量値を用いた。雨量換算定数B、 β については、現行システムで用いられている値を用いて雨量強度に換算した。

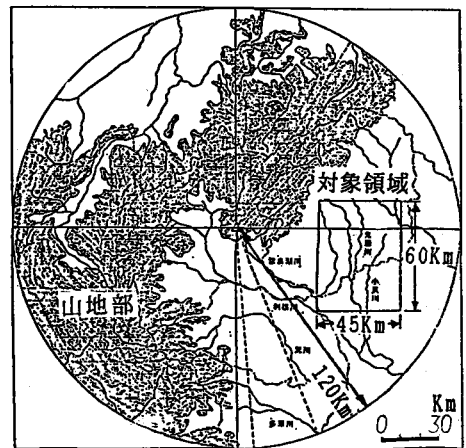


図-1 対象領域

(2) 解析方法

解析内容及び解析方法は、以下による。

- ①空間特性．．．10分間雨量、1時間雨量、6時間雨量を用いて個々のレーダメッシュの雨量値について、メッシュ間の距離ごとに相関係数との関係を調べた。
- ②時間特性．．．5分間雨量を用いて、各メッシュごとに時系列方向に10分間隔で3時間先までの自己相関をとり、時間との関係を調べた。
- ③面積雨量の精度の検討．．．対象領域を1つの流域と考え、その領域内のメッシュから4,8,16,32,64個の任意のメッシュ(代表地点)を選び、ティーセン法によりそれぞれの平均雨量を求めた。代表地点数ごとの平均支配面積は、675.0,337.5,168.8,84.4,42.2Km²である。真の面積雨量は、対象領域内の全メッシュを平均した雨量値とし、代表地点数ごとに相対誤差を計算した。また、同時に、標本計画法による比較も行った。
- ④面積雨量の評価．．．①、③の結果及び対象領域周辺のDAD解析を行うことにより地上雨量観測における雨量計配置の妥当性の検証を行った。

3. 降雨特性解析

(1) 空間特性

空間特性においては、各雨量値間の相関をとる方法として次の2つのケースが考えられる。

ケース1：任意の2つのメッシュ間ごとに時系列方向に相関をとる。

ケース2：各時刻ごとにメッシュ間距離が同じ組み合わせ同士で相関をとる。

ケース1については、既往の研究で行われてきた方法である。ケース2については、レーダ雨量のように密に雨量値がある場合のみ可能となる方法であるが、サンプリングの関係から本対象領域では、相関をとる距離は30Kmが限度となる。

これらの2ケースについて、対象降雨の中からいくつかの降雨を選んで計算を行い、その違いを比較してみた。その代表的な例(台風)を図-2に示す。ケース2では、降雨状態によりかなり変動が生じるため、ケース1より相関が悪くなり、ばらつきも大きい。たとえば、相関係数の平均値を $\bar{\rho}$ 、相関係数の標準偏差を σ とすると、右図において距離18Kmでは、ケース1： $\bar{\rho}=0.88$ ($\sigma=0.07$) に対し、ケース2： $\bar{\rho}=0.09$ ($\sigma=0.50$) となる。

以下の特性解析では、従来の地上雨量による結果との対応もあり、ケース1の方法を用いて行うこととする。

次に、降雨原因ごとに全データを用いて、相関係数を調べてみると図-3のようになる。相関係数は、降雨原因ごとに明らかに異なり、相関係数が1/2になる距離で言うと、台風の48Kmに対し雷雨では13Kmまで落ちる。個々の降雨で相関を見ると、台風24~60Km、前線28~60Km、低気圧10~60Km、雷雨6~57Kmという値となり、降雨ごとにはかなりばらつきがある。また、図-3は、方向性を考慮せずに求めたものであるが、これを4方向(N-S, E-W, NW-SE, NE-SW)について調べてみると、全ての降雨原因についてNE-SW方向に相関が良いことがわかった。これは、対象領域の地域特性ではないかと思われる。

雨量値の単位時間による違いについては、10分間・1時間・6時間雨量について計算し、台風による降雨の場合の結果が図-4に示すとおりである。単位時間が短くなるほど相関が悪くなっており、これは、他の降雨原因の場合も全く同じ傾向を示す。

以上の結果から距離～相関係数関係は顕著な低減を示し、降雨原因・方向・単位時間ごとに異なることがわかる。この距離～相関係数関係を次式により1時間雨量値を用いてモデル化を行った。

$$\rho = \exp(-a \cdot d^b) \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 ρ ：相関係数、 d ：メッシュ間距離、 a 、 b ：定数、である。

(1)式を用いて、 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\rho} + \sigma$ 、 $\bar{\rho} - \sigma$ 3ケースについて各降雨ごとに各方向(4方向)別に a 、 b の定数を求めた。結果的には、 $\bar{\rho}$ と $\bar{\rho} - \sigma$ は、 b の値が1.0程度になり、 $\bar{\rho}$

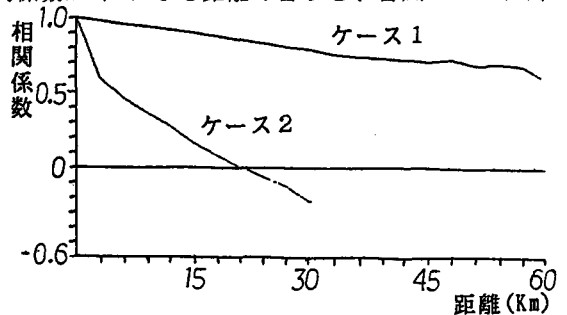


図-2 距離～相関係数(ケース別)

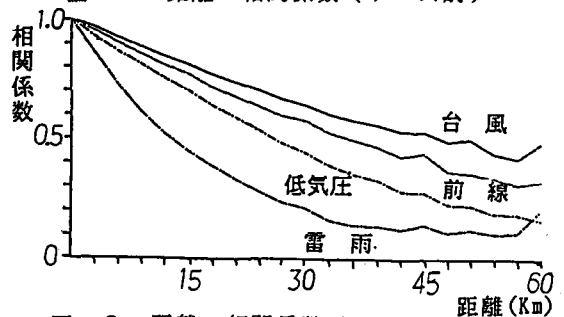


図-3 距離～相関係数(降雨原因別)

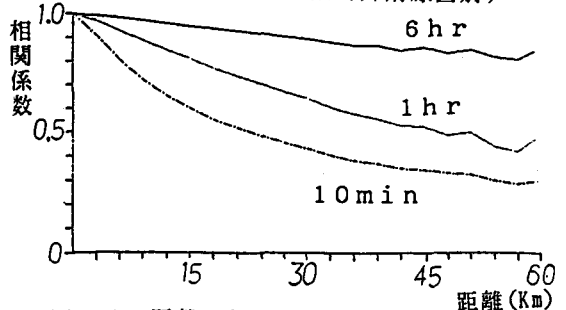


図-4 距離～相関係数(単位時間別)

+σでは、1.5程度になることがわかった。

そこで、これらの値を用いて低減式を求めると、降雨ごとのaの値はかなり変動する。その分布状態を台風を例にとり $\bar{p}$ について見てみると図-5のようになる。0.005~0.035の範囲でaの値が集中していることがわかる。また、降雨ごとのaの

値を降雨原因別に平均すると、表-1のとおりとなる。aの値は、台風・前線・低気圧については、同程度の値であるが、雷雨については、それらの倍程度になる。

(2)時間特性

時間特性は、個々の降雨についてそれぞれ自己相関の計算を行った。降雨原因ごとに平均してまとめたものが図-6である。空間特性と異なり、降雨原因ごとによる違いはあまりなく、雷雨のみが若干劣る程度である。自己相関が1/2になる時間は、20分程度であり3時間先では相関はほとんどなくなる。

4. 面積雨量の精度の検討

相対誤差の計算は、各代表地点数ごとに、100ケースずつ行った。100ケースの選び方については、それぞれの代表地点数ごとに代表地点の位置やその支配面積に偏りが生じないように考慮して、ランダムに代表地点を選定した。各ケースについて相対誤差を計算し、代表地点数ごとにそのばらつきを見た。

全データについて計算した結果、降雨原因ごとによる大きな違いはなかった。相対誤差は、地点数16以上(A=168.7Km²以上)では、ほとんど20%以内に納まった。

また、各降雨ごとに見てみると、時空間特性における相関が良い降雨と悪い降雨では、相対誤差のばらつきが明らかに異なっている。図-7にその一例を示す。相関の悪い場合は、地点数64では、相対誤差が、20%以内に2/3程度は納まるが、その他では、相対誤差の良いものから悪いものまで広く分布している。

各時間ごとでは、降雨の面的な状態により異なり、全体に降雨がある場合と部分的な場合とでは、図-8のような違いがある。部分的な降雨では、地点数64では、ほとんど20%以内に納まるが、それ以下では、かなりばらつくことがわかる。

表-1 aの値(4方向平均)

	$\bar{p}$	$\bar{p} + \sigma$	$\bar{p} - \sigma$
台 風	0.020	0.002	0.035
前 線	0.021	0.003	0.034
低気圧	0.023	0.002	0.036
雷 雨	0.041	0.003	0.085

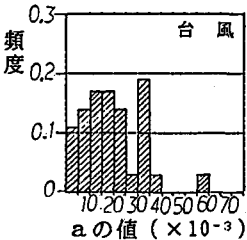


図-5 aの頻度分布

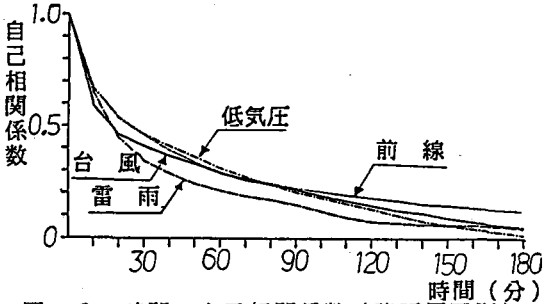
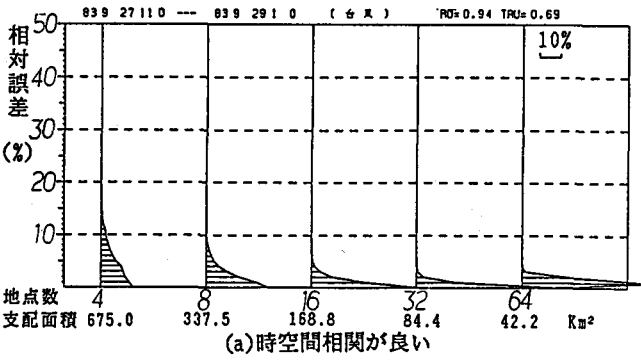
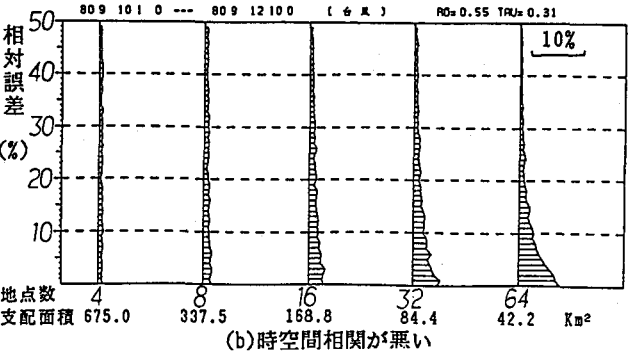


図-6 時間～自己相関係数(降雨原因別)



(a)時空間相関が良い



(b)時空間相関が悪い

図-7 相対誤差の頻度分布(降雨ごと)

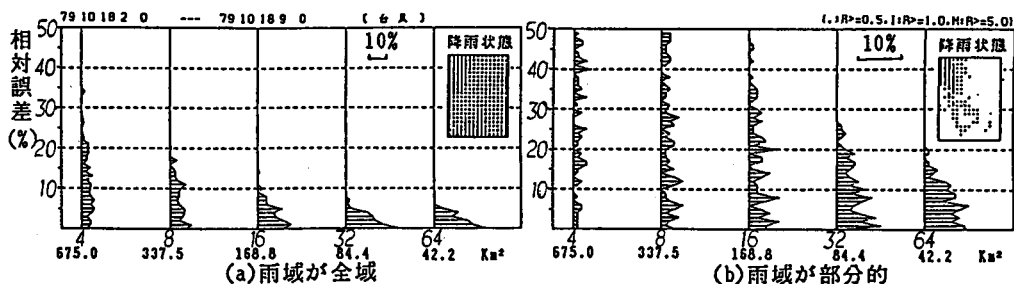


図-8 相対誤差の頻度分布(時間ごと)

以上の結果から、相対誤差は、支配面積の他に降雨状態にも大きく関係してくることがわかる。そこで、いくつかの降雨について次式にあてはめモデル化を行ってみた。

$$E = K \cdot A^a \cdot R^b \quad (2)$$

ここに、E：相対誤差(%)、A：支配面積(Km²)、R：真の面積雨量(mm)、a、b：定数
計算結果は、表-2のとおりである。Kは0.2~0.4、aは0.3~0.7、bは、-0.1~-0.8程度となり、相対誤差は、面積が大きくなるに従い、また雨量が小さくなるに従い大きくなることからわかる。回帰係数にあてはめた場合の相関係数は、表にも示すように、0.4~0.6程度が多い。これは、データのばらつきが大きいので、相対誤差ではなく自乗平均誤差で回帰計算を行うと相関係数は、0.8~0.9程度にまで上がる。

また、ここまでの結果は、間引き法によるものであるが、標本計画法で行うと以下のような。すなわち、標本計画法では、変動係数Cvとして、

$$Cv = \sqrt{\int_A (x - \mu)^2 dA / A} / \mu \quad (3)$$

ここに、x：地点雨量、 $\mu = \int_A x dA / A$ 、 $A = \int_A dA$
とするならば、相対誤差は、 $E = Cv / \sqrt{n}$ 、ここに、n：観測所数、で与えられる。ただし、この場合、降雨の面的なばらつきの程度が一樣であるという条件を満たさなければならない。したがって、対象降雨の中からばらつきが比較的一様な降雨(雷雨を除く)6降雨を選んで、各降雨ごとにCvを求めた。その結果、Cvの値は、降雨ごとに変動し0.2~0.6程度の幅があり、平均的には0.39となった。また、これらのCvの値について、降雨ごとに降雨強度による違いを見てみるとCvは一定(図-9)又は、降雨強度が大きくなるに従い小さくなる傾向があった。この違いは降雨状態に関連しており、全時間を通じて一様な降雨がある場合は、Cv一定となるが、一部の時間で雨域が偏っている場合は、一定とならない。

次に相対誤差を計算し、間引き法による結果と比較してみた。その代表的な結果は図-10に示すとおりであるが、標本計画法による相対誤差は、間引き法による結果の平均値プラス標準偏差の値程度になることがわかる。

ここで、以上の結果と既往の地上雨量計を用いた研究結果との比較を行ってみた。

表-2 回帰定数と相関係数

	K	a	b	ρ
台風 NO. 3	0.424	0.641	-0.418	0.705
NO. 9	0.288	0.337	-0.134	0.235
前線 NO. 3	0.137	0.681	-0.638	0.768
NO. 6	0.182	0.450	-0.162	0.357
低気圧 NO. 2	0.204	0.602	-0.604	0.816
NO. 4	0.156	0.573	-0.511	0.488
雷雨 NO. 1	0.275	0.730	-0.482	0.606
NO. 6	0.480	0.610	-0.799	0.471

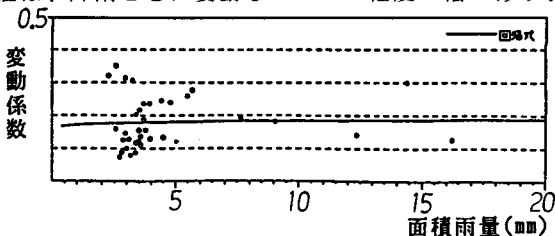


図-9 Cv特性

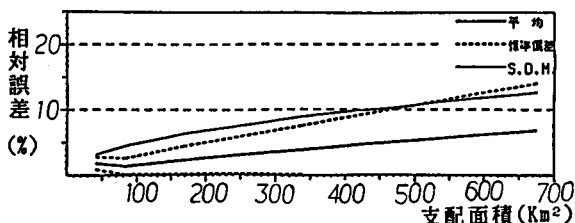


図-10 相対誤差の比較

間引き法による相対誤差の結果との比較は、図-11のとおりで、図中のレーダによる計算結果は、各降雨原因別に全データを用いて計算したものを全て平均した値である。これによると、既往の結果と大きな違いはなく、支配面積100km²で相対誤差10%程度である。

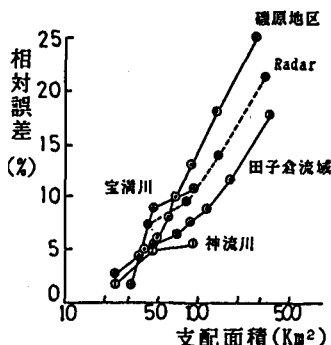


図-11 相対誤差の比較

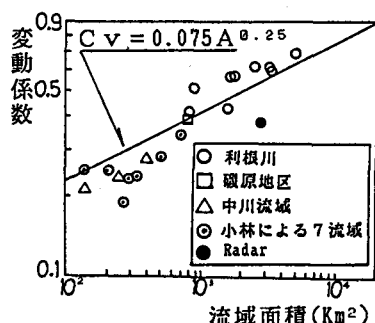


図-12 流域面積とC_vの関係

また、標本計画法におけるC_v値については、橋本の研究²⁾により、流域面積に比例して大きくなることが知られている。これを本研究による結果と比較してみると図-12のとおりとなる。レーダによる計算値0.39に対し、図中の傾向線から求めた値は0.54となり、レーダによるC_v値の方がかなり小さい。これは、レーダメッシュと地上雨量観測の観測密度の差によるものと考えられる。

5. 面積雨量の評価

降雨の空間特性解析の結果から雨域の大きさを推定すると以下ようになる。

すなわち、相関係数が1/2になる距離を一つの指標として平均的な雨域の大きさを判断すると、1時間雨量値で、台風では48Km、前線では36Km、低気圧では27Km、雷雨では13Kmとなる。現在の地上雨量計の配置状態から考えると、特に問題となるのは雷雨であるということがわかる。ここで、雷雨の13Kmという値は、あくまで平均で相関係数が1/2になるという距離であるため、個々の降雨ごとのばらつきを考え標準偏差分の幅を持たせると、8Km~19Kmという距離になる。これと現在の地上雨量計の配置密度と照らし合わせてみると、かなり密に配置しないと雷雨性降雨をとらえることができないことがわかる。たとえば、アメダスの雨量計でさえ約17Kmの観測網であるため、比較的雨域の大きい雷雨がとらえることができる程度であると言える。

また、面積雨量の精度については、平均的には既往の結果と変わらない。しかし、時間ごとに種々の降雨状態で見てみると、相対誤差はかなり変動する。それは、前述の降雨の空間特性と関連して、降雨に部分的な偏りがあり空間相関が悪い場合は、相対誤差が15%~20%程度、場合によっては、40%近くまでになることがある。また、相対誤差の各計算値のばらつきから判断すると、ほとんどのケースにおいて相対誤差が10%以内となるのは、代表地点数64個 (A=42.2Km²) となる。したがって、支配面積が50Km²以下であるなら、ある程度の降雨状態に対して、面積雨量をほぼ正確に表現しうると言える。

そこで、これらの結果と対比を行うためレーダ雨量を用いたDAD解析を行うことにより、対象領域周辺の継続時間-雨域面積-降水量関係を調べた。

対象降雨の中から降雨強度の強い3降雨を選んで降雨原因別に最大DAD曲線を求めた。継続時間1時間について求めた結果を図-13に示す。

前述の空間特性の結果から推定される雨域の大きさを単純に円として考え、それを面積にすると、たとえば台風では7200Km²、雷雨では、530Km²程度となる。これより、1時間の最大DAD曲線からその平均雨量を求めると、台風10mmに対し雷雨40mm程度となる。つまり、雷雨は、強雨域のみしか空間相関が良くなく、地上雨量計では非常に捉えにくいことがわかる。また、図-13は、1時間雨量値を用いたも

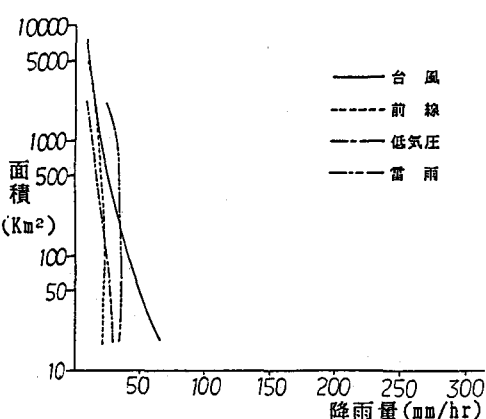


図-13 最大DAD曲線図 (1時間雨量)

のであるが、10分間雨量値を用い継続時間10分におけるDAD曲線図で見るとそれがより顕著にわかり、図-14に示すとおりとなる。雷雨は、他の降雨原因による結果と比べて面積の小さい部分においてかなり強い降雨となる。

また、同一降雨原因による降雨で、空間相関の良い降雨と悪い降雨で最大DAD曲線の違いを見ても、台風による結果に顕著な違いが出た。図-15に示すように空間相関の悪い降雨は、空間相関の良い降雨に比べて面積の違いによる雨量値の差が大きく、特に、継続時間6時間以上になるとかなり差が出てくる。これは、相関の悪い降雨は、雨域がかなり偏っているため面積による差が大きく生じ、継続時間が長くなるとその影響が増大するためと考えられる。

一方、面積雨量精度の検討結果から、支配面積 50Km^2 以下でほぼ正確に面積雨量が把握できることから、この値から最大DAD曲線による面積～雨量関係に照らし合わせてみると、どの降雨原因においても降雨の上限値までほぼカバーしうる値である。たとえば、雷雨であるなら、面積 50Km^2 に対し雨量値は 40mm 程度となり、それより面積が小さくなくても雨量値はほとんど変わらない。このことから考えても、支配面積 50Km^2 という値は妥当な値であると思われる。

6. おわりに

本研究では、従来、地上雨量計で行われてきたものをレーダ雨量計による観測から得られた雨量のデータを用いて、降雨の時空間特性及び面積雨量の精度評価をより詳細に行った。本研究により得られた結論をまとめると以下のとおりとなる。

- ①降雨の空間特性は、降雨原因ごとに異なり、特に問題となるのは雷雨性降雨である。現在の地上雨量計による観測網よりもその雨域の大きさは小さく、レーダによる補足を必要とする。
- ②時間特性から見た降雨の持続性は20分程度で、降雨予測等で降雨の移動状態を調べるには20分以下の時間ピッチで求める必要があると考えられる。また、3時間先で、相関がほとんどなくなることから、降雨のライフサイクルに関連していると思われる。
- ③点観測により面積雨量を表現するには、その支配面積を 50Km^2 以下にまでする必要がある。これらの解析結果からより面的な降雨の特性や地上の点観測における面雨量推定の問題点等がよりの確に把握できたと思われる。

今後もレーダ雨量を用いた各種の降雨解析を行うことにより地上雨量観測による解析の弱点を補うことが期待される。

最後に、本研究の中でティーセン分割を行う際、(株)建設技術研究所所有のティーセン分割プログラムを使用した。ここに記して謝意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 今井等；降雨の統計的性質と電波の減衰、研究時報、16巻3号
- 2) 橋本健；標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価に関する研究、土木研究所報告第148号の3、昭和52年
- 3) 吉野、河関；赤城山レーダを用いたDAD解析、39回年次講演会、昭和59年

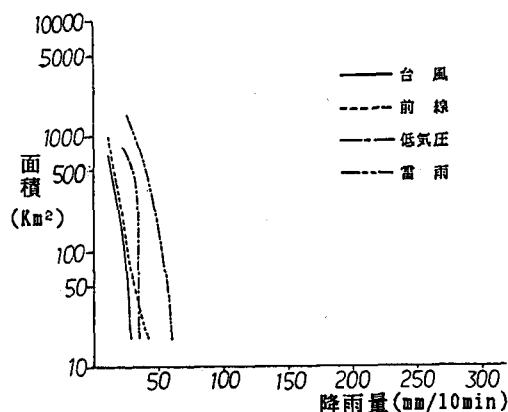


図-14 最大DAD曲線図(10分間雨量)

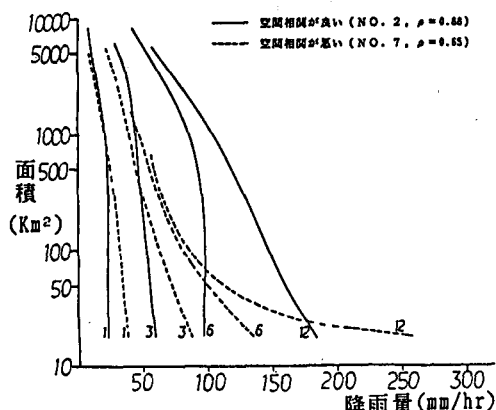


図-15 最大DAD曲線図(台風)