

降雨減衰確率推定法の  
精度及び適用性の向上に関する研究

小野健一  
二〇〇九年

降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の  
向上に関する研究

小 野 健 一

電気通信大学  
2009年3月

# 降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の 向上に関する研究

小 野 健 一

電気通信大学大学院電気通信学研究科  
博士（工学）の学位申請論文

2009 年 3 月

# 降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の 向上に関する研究

## 博士論文審査委員会

委員 唐沢好男 教授（電気通信大学）

委員 早川正士 教授（電気通信大学）

委員 桐本哲郎 教授（電気通信大学）

委員 中嶋信生 教授（電気通信大学）

委員 細矢良雄 教授（北見工業大学）

著作権所有者

小野 健一

2009

# Study on improvement of accuracy and applicability of rain attenuation probability prediction method

Kenichi Ono

## Abstract

At the frequencies above almost 10GHz, rain attenuation is dominant factor which affects the circuit quality of the radio communication systems, and the rain attenuation probability prediction method is used to predict the circuit availability of them. The existing rain attenuation probability prediction method for the terrestrial radio communication systems was established almost 38 years ago, and so far it has been used with several improvements, however, it should be re-evaluated from the view point of accuracy and applicability for the following reasons; (a) the application of the radio communication systems at the frequencies above almost 10GHz becomes diversified, (b) the rainfall statistical nature could be changed in recent years by climatic changes such as the Global Warming phenomenon and Heat Island phenomenon. This paper summarizes the study aimed at the establishment of the accurate and flexibly applicable new rain attenuation probability prediction method.

In chapter-2, background information is prepared to be helpful for understanding about rain attenuation probability prediction. To establish the new rain attenuation probability prediction method, rainfall data at sufficient numbers of locations in the whole country are needed and only AMeDAS rainfall data provided by Japan Meteorological Agency (JMA) could be available for this purpose. It is considered that cumulative distribution function (CDF) of rainfall rate for shorter interval is required to predict rain attenuation probability accurately, however it is known that time-averaged value of rainfall rate for every 1-minute (1-minute rainfall rate) is sufficient because rain attenuation on a radio link is an integration of point rain attenuations along a radio path.

In chapter-3, equipments and configurations of rainfall and rain attenuation measurements for the study are shown.

In chapter-4, it is discussed about the method to obtain 1-minute rainfall rate CDFs accurately from the AMeDAS low resolution (0.5mm) 1-minute rainfall data measured by tipping bucket rain

gauge. The study was done using the data measured by high resolution (0.0083mm) drop counting rain gauge (DCRG) and the artificial 1-minute rainfall data (same as AMeDAS data) made from the DCRG data (summing up 0.0083mm and counting at each 0.5mm). As a result of the study, the second-base distribution process with random positioning of 0.5mm count pulse within each pulse counted minute is proposed as the effective method.

In chapter-5, it is discussed about the suitable distribution model for the rain attenuation probability prediction method applicable in a wide range of probability. As a result of the study about the capability of approximation to 1-minute rainfall rate CDFs obtained from the AMeDAS 1-minute rainfall data at 136 locations, it is shown that M-distribution has superior capability to Gamma distribution, Log-normal distribution and Conditional Log-normal distribution.

In chapter-6, it is shown that the spatial correlation characteristics can be approximated well by  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  for longer distance part and by  $\exp(-\beta d)$  for shorter distance part (“d” is distance / border is located between 2 and 3km) as a result of the analysis of rainfall data measured at 11 locations around Otemachi in Tokyo. Also, considering that the rain attenuation coefficient (rain attenuation per kilometer) is proportional to n-th power of rainfall rate (“n” = 0.63 ~ 1.7 / ITU-R Rec. P.838-3), it is shown that the spatial correlation characteristics vary remarkably depending on the value of “n”, and the equations to approximate the relation between “n” and the coefficient of the spatial correlation characteristics “  $\alpha$  ” and “  $\beta$  ” are given. Furthermore, the method to integrate a CDF of n-th power of point 1-minute rainfall rate along a radio path using the spatial correlation characteristics of n-th power of 1-minute rainfall rate is given.

In chapter-7, it is discussed about the method to obtain a 1-minute rainfall rate CDF accurately from different integration time rainfall data such as AMeDAS 10 and 60 minutes rainfall data. As a result of the study using AMeDAS rainfall data at 136 locations, the effective conversion method based on M-distribution using a mean value and a standard deviation of a real probability distribution of 10 and 60 minutes rainfall data is proposed.

In chapter-8, on the basis of results of the studies in chapter-5 and -6, the new M-distribution based rain attenuation probability prediction method is proposed. The proposed method utilizes the two types of spatial correlation characteristics and the integration process of 1-minute rainfall rate CDF along a radio path shown in chapter-6. The comparison of the rain attenuation CDFs obtained from the measured rain attenuation data and obtained by the proposed and existing prediction methods shows that the proposed prediction method gives superior accuracy to the existing prediction method.

In chapter-9, the 0.01% and 0.0001% values of 1-minute rainfall rate CDFs for long years

(1976 to 2002 as longest) at 1150 locations in Japan obtained applying above methods (chapter-4 and -7) to AMeDAS rainfall data are shown as the parameters for the proposed prediction method. The prepared parameters include not only the mean value but also the standard deviation and unique two additional factors related to the concept of safety factor so that the proposed prediction method makes it possible to predict rain attenuation probability corresponding to expected MTBF (Mean Time Between Failure / in this case Failure means occurrence of unsatisfactory condition).



# 降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の向上に関する研究

小野 健一

## 概要

本論文は、10GHz 帯程度以上の降雨減衰の影響が無視できない周波数帯を用いた無線通信システムの回線設計において必要となる降雨減衰確率推定法について、既存のものは1970年代にとりまとめられたものに若干の改善が加えられながら使用されてきており、近年の多様化する無線通信システムへの適用を考えた場合に適合性が十分とは言えない状況にありうること、また最近のヒートアイランド現象に代表される気象条件の変化によって雨の降り方が変わってきている可能性があることなど考慮し、近年の気象庁降水量データを利用し、より精度良く、扱い易い新たな降雨減衰確率推定法の確立を目指した研究についてとりまとめたものである。以下に要旨を示す。

日本各地において降雨減衰確率の精度良い推定を可能にするには、それぞれの地域における降雨強度の累積分布 (CDF) の精度良い推定が必要となる。降雨減衰確率の推定には、可能な限り瞬時に近い降雨強度の CDF を知る必要があるが、無線回線において観測される降雨減衰は伝搬路上の各地点の降雨減衰の積分値であるため、実用上は平均化時間1分間の降雨強度の平均値 (1分間降雨強度) で十分であることが知られている。近年、全国において活用できる降雨データとして、気象庁が1976年から全国千数百箇所において構築している AMeDAS の観測データがある。AMeDAS は、当初1時間降水量のみの観測からスタートし、1994年からは10分間降水量が加えられた。また、1995年からは、うち全国百数十箇所において1分間降水量も加えられている。降雨減衰確率推定法用パラメータのとりまとめには、全国千数百箇所を得られる10分間及び1時間降水量データの活用が必須であるが、1分間降水量データから1分間降雨強度 CDF を精度良く得られれば、10分間及び1時間降水量データから同 CDF を精度良く得るための異積分時間確率分布変換手法への検討に資すると考えられた。

新たな降雨減衰確率推定法の確立、気象庁データに基づく同推定法用パラメータのとりまとめに関する検討を行うには、気象庁データの活用を可能とするための検討、推定法に用いる分布モデルに関する検討、空間相関特性に関する検討などを行う必要があり、また新たな推定法が考案されたならば推定精度の評価を行う必要もあるため、東京大手町の

周辺に、雨量計及び対向させた無線送受信機を設置し降雨量及び降雨減衰量の実測を行った。[ 第 2～3 章 ]

まず最初に行った研究は、1 分間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得る手法についてであった。気象庁の降水量観測では 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計が用いられており、その分解能は 0.5mm と粗く、1 分間降水量データからそのまま確率分布を求め単純単位変換したのでは 1 分間降雨強度の確率分布とは大きく異なるものとなり、同確率分布を精度良く得ることは最初の難題であった。検討には、1 分間降雨強度を正しく表すデータがリファレンスとして必要であり、その目的のために、分解能が 0.0083mm と格段に小さく、得られたデータがそのまま 1 分間降雨強度とみなせる水滴計数型降雨強度計による実測データを用いた。また、得られたデータを積算し 0.5mm の整数倍となるたびにカウントすることによって擬似的に 1 分間降水量に相当するデータを作成し、これに何らかの処理を施すことによって、降雨強度計実測データから直接得られる CDF を再現することを目指した。その結果、0.5mm の雨が降るのに要した時間に対して均し分配を行って 1 分間降雨強度を得る、均し分配処理が有効と考え、また、均しの効果を最大限に得られるよう検討を行い、均しを秒単位で行い、各 0.5mm のスタート分内の秒位置については一様乱数を用いて与える、乱数補正秒単位均し分配処理を提案した。[ 第 4 章 ]

無線通信システムは多様化が進展しており、回線品質に対する要求も多様化し、回線品質要求が厳しい場合もあれば、経済性が優先される場合もある。多様化した品質要求に対応できる降雨減衰確率推定法には、広い確率範囲で精度良い推定が行えることが要求されると考え、そのような推定法に適した分布モデルが何であるか研究を行った。具体的には、ガンマ分布、対数正規分布、条件付対数正規分布、M 分布の 4 種類の分布モデルについて、前述の処理を施して AMeDAS の 1 分間降水量データから得た全国 104 地点の 1 分間降雨強度 CDF を用いて、同 CDF に対する近似精度の比較を行い、M 分布が広い確率範囲で近似に優れていることを明らかにした。[ 第 5 章 ]

用いる分布モデルが決まれば、これを用い、一地点の 1 分間降雨強度 CDF から無線リンク全体の同 CDF を求める区間積分を行う手法が必要となるが、続いて、この場合に必要となる空間相関特性を、さまざまな周波数、距離の伝搬路において精度良く得る方法について研究を行った。東京大手町周辺 11 箇所に設置した 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計による測定データに対し均し分配処理を施したのから空間相関特性を求め、解析を行った。この結果、2～3km を境に、近距離部分については距離の指数関数が、遠距離部分については距離の平方根の指数関数が良い近似を示すことを、また、降雨減衰係数が 1 分間降雨強度の  $n$  乗に比例するため、区間積分を行う場合に、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いる必要性があることを明らかにするとともに、地点における 1 分間降雨強度の  $n$

乗の確率分布から区間における同  $n$  乗の確率分布を求める区間積分手法を示した。[ 第 6 章 ]

前述のように、全国で使用可能な降雨減衰確率推定法の実現には、全国千数百箇所で得られる AMeDAS の 10 分間及び 1 時間降水量の活用が不可欠であることから、乱数補正秒単位均し分配処理を施して AMeDAS の 1 分間降水量データから得た全国 136 地点の 1 分間降雨強度 CDF、及び同地点、同期間における 10 分間及び 1 時間降水量データを用いて、異積分時間降雨強度確率分布変換手法に関する研究を行った。同変換手法としては、まず、細矢及び秋元他が提案した変換手法が候補として考えられたが、十分な精度が得られないことが確認された。細矢法及び秋元他法が、10 分間及び 1 時間降水量データから得られた確率分布に M 分布近似を施し、M 分布（近似）のパラメータから求めた平均値及び標準偏差を用いて変換を行っていることから、誤差要因として M 分布近似が影響している可能性が考えられた。そこで、M 分布近似を用いない、10 分間及び 1 時間降水量データから得た実確率分布の平均値及び標準偏差を用いて 1 分間降雨強度 CDF (M 分布) を精度良く得る、全く新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法を提案した。新変換手法は細矢法及び秋元他法に対し、特に 1 時間降水量データからの変換精度が大きく向上したものとなっている。[ 第 7 章 ]

先の分布モデル及び空間相関特性に関する研究結果を踏まえ、M 分布を用い、分布を決定する 2 つのパラメータとして、各地点ごとに 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与え、空間相関特性を近距離部分と遠距離部分に対して適した近似特性で与え、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用い 1 分間降雨強度の  $n$  乗の区間積分を行う、新たな降雨減衰確率推定法を提案した。東京大手町周辺で得た実測データを用い、既存推定法との比較を行った結果として、新推定法の推定精度がかなり優れていることを確認した。[ 第 8 章 ]

最後に、前述の乱数補正秒単位均し分配処理、及び新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法を用い、最長 1976 年からの AMeDAS データから 1 分間降雨強度 CDF を求め、1150 地点における新たな降雨減衰確率推定法で用いるパラメータをとりまとめている。なお、このパラメータは、安全係数の概念を適用し、推定法により得られた降雨減衰確率が平均何年間継続して満たされるかを条件として与えることができるものとなっている。[ 第 9 章 ]

# 目次

第1章 序章	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の概要	4
第2章 降雨減衰確率推定の概要と関連する留意事項	10
2.1 降雨減衰の影響を受ける無線通信システムの回線設計と降雨減衰確率	10
2.2 降雨減衰確率推定について	13
2.2.1 降雨減衰量と降雨強度との関係	13
2.2.2 1分間降雨強度の確率分布のモデル化	15
2.2.3 降雨減衰確率推定用パラメータ	17
2.2.4 一地点の1分間降雨強度確率分布から区間の同分布を得る積分	17
2.2.5 降雨減衰確率推定の流れ	19
2.3 降雨量を扱う場合の留意事項	21
2.3.1 N分(時)間降雨強度、N分(時)間降雨量及びN分(時)間降水量の定義	21
2.3.2 降雨量の測定に関する留意事項	22
2.4 既存降雨減衰確率推定法に関する留意事項	23
2.4.1 既存降雨減衰確率推定法用パラメータ	24
2.4.2 降雨減衰確率推定法用パラメータにおける年変動の考慮	25
2.4.3 強雨期3ヶ月の累積確率から年間の累積確率への換算	26
第3章 本研究における降雨量及び降雨減衰量測定	28
3.1 測定に用いた機材	28
3.1.1 降雨量測定	28
3.1.2 降雨減衰量測定	28
3.2 測定構成	28
3.2.1 降雨量測定器の配置	29
3.2.2 降雨減衰量測定用無線送受信機の配置	30
第4章 気象庁降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得る手法	
- 1分間降水量データから -	31
4.1 検討における留意点	31
4.1.1 1分間降水量と1分間降雨強度との関係	31
4.1.2 1分間降水量データから1分間降雨強度CDFを得る場合の誤差	32

4.2	1 分間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得る手法	33
4.2.1	分単位均し分配処理	33
4.2.1.1	均し分配処理の考え方及び分単位均し分配処理	33
4.2.1.2	最大均し時間	34
4.2.1.3	分単位均し分配処理の限界	36
4.2.2	秒単位均し分配処理	37
4.2.2.1	1 分間内のパルスの分布が均等であるとした場合	37
4.3.2.2	1 分間内のパルスの分布がランダムであるとした場合	39
4.3	1 分間降水量データから自己相関特性を得る場合の均し分配処理の有効性	45
第 5 章	降雨減衰確率推定に最適な分布モデルに関する考察	47
5.1	検討に用いたデータ	47
5.2	1 分間降水量データから求めた 1 分間降雨強度 CDF	47
5.2.1	年間の 1 分間降雨強度 CDF	47
5.2.2	強雨期 3 ヶ月(7~9 月)の 1 分間降雨強度 CDF 及び 0.0075% 値	49
5.3	分布モデルの近似精度比較	52
5.3.1	各分布モデルにおける近似手法	52
5.3.2	種々な近似条件での近似精度比較	54
5.3.2.1	1mm/h 以上の全サンプル点情報を用いた近似	54
5.3.2.2	必要最小限のサンプル点情報を与えて近似を行う場合の比較	56
5.3.2.2.1	2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与える場合 (除くガンマ分布)	56
5.3.2.2.2	ガンマ分布を含めた 2 パラメータでの比較	58
5.3.3	広い累積確率範囲で最も良い近似を与える分布モデル及び近似方法	60
第 6 章	空間相関特性及び同特性を用いた区間積分	62
6.1	空間相関特性	62
6.1.1	転倒柵型雨量計測定データから得られる空間相関特性の誤差	62
6.1.2	転倒柵型雨量計測定データから空間相関特性を得る場合の均し分配 処理の有効性	63
6.2	M 分布を用いる場合の区間の 1 分間降雨強度の確率分布表現	68
6.2.1	空間相関特性の適用条件	68
6.2.2	一地点の 1 分間降雨強度の確率分布から区間の同分布を得る積分	68
6.3	M 分布を用いる場合の降雨減衰量の確率分布表現	70
6.3.1	1 分間降雨強度の $n$ 乗( $n$ は降雨減衰係数のパラメータ)の空間相関特性	70
6.3.2	1 分間降雨強度の $n$ 乗の確率分布を M 分布で扱うことについての検証	74

6.3.3	1 分間降雨強度の $n$ 乗の確率分布の簡便かつ有効な M 分布表現	76
6.3.4	地点 $n$ 乗 1 分間降雨強度確率分布から区間積分 $n$ 乗 1 分間降雨強度確率分布を求める手順	78
6.3.5	1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性を用いる場合の誤差	78
第 7 章 気象庁降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得る手法		
- 10 分間&1 時間降水量データから - [異積分時間降雨強度確率分布変換手法]81		
7.1	検討に用いたデータ	81
7.2	既存の異積分時間降雨強度確率分布変換手法の変換精度	82
7.2.1	既存の変換手法	82
7.2.1.1	細矢法	82
7.2.1.2	秋元他法	83
7.2.2	既存の変換手法の変換精度	83
7.2.2.1	細矢法	83
7.2.2.2	秋元他法	86
7.2.2.3	2 つの変換手法の変換精度に関する考察	87
7.2.2.3.1	平均値、標準偏差の誤差と変換精度との関係	87
7.2.2.3.2	自己相関特性の係数 と変換精度の関係	91
7.2.2.3.3	冬季のデータを除いた場合の変換精度	94
7.3	新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法の提案	96
7.3.1	実確率分布の平均値及び標準偏差を用いる目的	96
7.3.2	10 分間及び 1 時間降水量実確率分布パラメータと 1 分間降雨強度 CDF の M 分布パラメータとの関係	98
7.3.3	10 分間及び 1 時間降水量実確率分布パラメータと表 7-2 及び 7-3 の一次式を用いた推定精度	101
7.3.4	新たな変換手法の変換手順	102
第 8 章 M 分布を用いた新降雨減衰確率推定法の提案		
8.1	M 分布に基づく 1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性を考慮した新たな降雨減衰確率推定法	104
8.1.1	M 分布を用いた降雨減衰確率推定法に適用するパラメータ	104
8.1.2	1 分間降雨強度の $n$ 乗の CDF の M 分布近似	106
8.1.3	1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性を考慮した区間積分	106
8.1.4	降雨減衰確率の推定	107
8.2	新降雨減衰確率推定法の推定精度評価	108
8.2.1	実測降雨量及び降雨減衰量データを用いた評価	108

8.2.2	レドーム上の水膜による減衰量に関する補正量	115
8.2.3	新推定法と既存推定法のみが多様な条件での比較	121
8.2.4	新推定法の精度評価のまとめ	124
付録 8-1	M 分布において $P_1[\%]$ 値と $P_2[\%]$ 値を与えてカーブを決定する簡易式	127
付録 8-2	レドーム上への降水による減衰量の実測結果	128
第 9 章	新降雨減衰確率推定法に用いる年変動を考慮したパラメータ	130
9.1	安全係数の概念	130
9.2	新降雨減衰確率推定法用パラメータ	131
付録 9 - 1	新降雨減衰確率推定法に用いる全国 1150 地点におけるパラメータ	138
第 10 章	結論	157
付録 10 - 1	新降雨減衰確率推定法による推定手順の詳細	170
謝辞		176
参考文献		177

# 目次

1-1	“ 降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の向上に関する研究 ” の構成	8
2-1	降雨減衰係数のパラメータ $k$ 及び $n$ と周波数の関係(ITU-R 勧告 Rec.P.838-3)	14
2-2	地点 1 分間降雨強度 $R_i$ と区間積分 1 分間降雨強度 $R_L$ の関係	18
2-3	降雨減衰確率推定における主な処理フロー例	20
2-4	1 年間及び強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度 CDF の例	27
3-1	降雨量測定器及び降雨減衰量測定用無線送受信機の配置	29
4-1	転倒柵型雨量計測定データ(1 分間降水量相当)と降雨強度計測定データの比較	31
4-2	降雨強度計 CDF(1 分間降雨強度 CDF に相当)と 1 分間降水量相当 CDF(1 分間降水量データを単に単位変換して得た CDF に相当)の比較	33
4-3	擬似 1 分間降水量データの分単位均し分配処理後の CDF と降雨強度計 CDF の比較	35
4-4	秒単位(パルス均等分布)・分単位均し分配処理後の CDF と降雨強度計 CDF との比較	38
4-5	分単位 0.5mm 検出と秒単位 0.5mm 検出の比較	38
4-6	乱数補正を用いた秒単位均し分配処理のイメージ図	40
4-7	秒単位均し分配処理(10 及び 100 個の乱数使用)後 CDF の平均値カーブと標準偏差	42
4-8	秒単位均し分配処理(10 個の乱数使用)後 CDF の平均値カーブと降雨強度計 CDF	43
4-9	秒単位均し分配処理(10 個の乱数使用)後 CDF の平均値カーブと降雨強度計 CDF (最悪月データ)	44
4-10	各種均し分配処理を行った場合の自己相関特性	45
4-11	各種均し分配処理を行った場合の自己相関特性(最悪月データ)	46
5-1	既存推定法で用いられる強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の 0.0075%値と今回得られた同 0.0075%値との比較	51
5-2	全サンプル点近似における累積確率の対数値の RMSE 比較	54
5-3	累積確率の対数値の RMSE の大きさをわかりやすく示した例	55
5-4	全サンプル点近似の近似度比較 [ 東京(1997~2002 年)の例 ]	56
5-5	0.3%値と 0.003%値を与え近似した場合の累積確率の対数値の RMSE 比較(除くガンマ分布)	57
5-6	0.3%値と 0.003%値を与えた場合の近似度比較 [ 東京(1997~2002 年)の例 ]	58
5-7	強雨期 3 ヶ月データを用いた近似における累積確率の対数値の RMSE 比較(ガンマ分布は 0.0075%値と分布のパラメータ、他の分布は 0.75%値と 0.0075%値を与えた)	59



5-8	強雨期 3 ヶ月データをを用いた近似における近似度比較 [ 東京(1997~2002 年)の例 ] (ガンマ分布は 0.0075%値と分布のパラメータ、他の分布は 0.75%値と 0.0075%値を与えた) . . . . .	60
6-1	11 箇所に設置した転倒柵型雨量計測定データより直接得た空間相関特性 . . . . .	63
6-2	転倒柵型雨量計データから空間相関特性を求める場合における秒単位均し分配処理の有効性確認 . . . . .	64
6-3	図 6-2 の相関 B と相関 C の比較 . . . . .	65
6-4	11 箇所に設置した転倒柵型雨量計測定データに秒単位均し分配処理を施して得た空間相関特性 . . . . .	66
6-5	全期間データと強雨時のみデータの空間相関特性の比較(強雨時データについては降雨強度 $R < 90\text{mm/h}$ が観測された降雨をピックアップ) . . . . .	67
6-6	1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性( $n=0.63、0.8、1、1.3$ 及び $1.7$ ) . . . . .	71
6-7	図 6-6 の近似カーブと文献[26]の付録の式(A・6)で得られる関係との比較(1分間降雨強度そのものの空間相関係数と 1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関係数) . . . . .	72
6-8	指数関数近似におけるパラメータ $\lambda$ 及び $n$ との関係 . . . . .	73
6-9	M 分布に従う 1 分間降雨強度の $n$ 乗の CDF とその M 分布近似(全点近似) . . . . .	75
6-10	1 分間降雨強度の $n$ 乗の CDF とその M 分布近似(全点及び 2 点)の RMSE (累積確率が 0.1%以下の範囲について RMSE を算出) . . . . .	77
6-11	M 分布に従う 1 分間降雨強度の $n$ 乗の CDF とその M 分布近似(2 点近似)(2 点は 0.01%及び 0.0001%) . . . . .	77
6-12	1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性の使用有無による区間積分における誤差	79
7-1	10 分間・1 時間降水量データから細矢法を用いて得られた 1 分間降雨強度 CDF と 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似の関係 [ 名古屋 (1997~2002 年)の例 ] . . . . .	84
7-2	1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データから細矢法を用いて得られた同 CDF の誤差(全国 136 地点 617 サンプル / 0.01 ~ 0.0001%における累積確率の対数値の RMSE) . . . . .	85
7-3	累積確率の対数値の RMSE の大きさをわかりやすく示した例 . . . . .	85
7-4	10 分間・1 時間降水量データから秋元他法を用いて得られた 1 分間降雨強度 CDF と 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似との関係 [ 名古屋(1997~2002 年)の例 ] . . . . .	86
7-5	1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データから秋元他法を用いて得られた同 CDF の誤差(図 7-2 と同様条件) . . . . .	87
7-6	1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求められた平均値と 10 分間・1 時間降水量データから細矢法により 1 分間降雨強度 CDF への変換において得られた平均値との関係 . . . . .	88
7-7	1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求められた標準偏差と 10 分間・1 時間降水量データから細矢法及び秋元他法により 1 分間降雨強度 CDF への変換において得られた標準偏差との	

関係	89
7-8 細矢法、秋元他法において得られる と 1 分間降水量データから得た 1 分間降雨強度時系列データより得られる自己相関特性から得た (全国 136 地点 / 617 サンプル)	91
7-9 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データから種々な を用いて得られた同 CDF の誤差 (種々な = 0.1~0.35 間の 0.05 ステップの (但し、0.25 は 0.247(細矢法相当)とする)、 自己相関係数から得た 、 秋元他法による / その他条件は図 7-2 と同様)	93
7-10 図 7-9 と同様 / 豪雪地域の冬季(11~3 月)のデータを除外及び の条件を変更 ( の条件変更: 0.1~0.35 間の 0.05 ステップの 0.2 及び 0.247)	95
7-11 1 時間降水量データの実確率分布の平均値 $\mu_{R60m}$ 及び標準偏差 $\sigma_{R60m}$ に対する 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求められた平均値 $\mu_{M1m}$ 及び標準偏差 $\sigma_{M1m}$ との関係	97
7-12 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差に表 7-2 及び 7-3 の換算式を適用し求めた 1 分間降雨強度 CDF の誤差(条件は図 7-2 と同様)	101
7-13 10 分間・1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差に表 7-2 及び 7-3 の換算式を適用し求めた 1 分間降雨強度 CDF と 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似の関係 [名古屋(1997~2002 年)の例]	102
8-1 種々な距離における比較(22GHz 帯)	109
8-2 種々な距離における比較(38GHz 帯)	111
8-3 異なる偏波における比較(22GHz 帯)	112
8-4 異なる偏波における比較(38GHz 帯)	112
8-5 式(8-14)により与えられる減衰量	116
8-6 種々な距離における比較(レドーム上の水膜の損失を推定に加算) (22GHz 帯)	117
8-7 種々な距離における比較(レドーム上の水膜の損失を推定に加算) (38GHz 帯)	118
8-8 異なる偏波における比較(レドーム上の水膜の損失を推定に加算) (22GHz 帯)	119
8-9 異なる偏波における比較(レドーム上の水膜の損失を推定に加算) (38GHz 帯)	120
8-10 推定法のみでの比較(22GHz 帯)	122
8-11 推定法のみでの比較(38GHz 帯)	123
8-12 既存推定法において 1 分間降雨強度の n 乗の区間積分を行うのを除き図 8-10(a)と同様(22GHz 帯 / 垂直偏波)	126
8-13 既存推定法において 1 分間降雨強度の n 乗の区間積分を行うのを除き図 8-11(b)と同様(38GHz 帯 / 水平偏波)	126
9-1 安全係数算出例(最長 1976~2002 年 / 0.01% 値)	132
9-2 全国 1150 地点における式(9-2)の係数 $C_1$ 及び $C_2$ の度数分布	135
10-1 1 分間降水量 CDF、同降水量の均し分配処理後 CDF、1 分間降雨強度 CDF 比	

較	158
10-2 分布モデル4種類による全サンプル点近似における累積確率の対数値のRMSE比較	160
10-3 転倒枡型雨量計データに均し分配処理を施す場合と施さない場合の空間相関特性	161
10-4 1分間降雨強度のn乗の空間相関特性	162
10-5 1分間降雨強度のn乗の空間相関特性の使用有無による区間積分における誤差	163
10-6 1分間降水量データから得られた1分間降雨強度CDF(M分布近似後)に対する1時間降水量データから細矢法及び秋元他法、並びに新たに提案した手法を用いて得られた同CDFの誤差(豪雪地域の冬季(11~3月)のデータを除外)	165
10-7 22GHz帯の種々な距離の無線リンク	167
10-8 38GHz帯の種々な距離の無線リンク	167

# 表目次

2-1	リンクパラメータから降雨減衰マージンを求めた例	11
3-1	雨量計設置点間距離	30
3-2	無線リンク設定条件	30
5-1	全国 104 地点における CDF	48
5-2	全国 99 地点の強雨期 3 ヶ月(7~9月)における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値	50
5-3	図 5-1 における地域分割	51
5-4	ガンマ分布近似で用いる強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の CDF のパラメータ	59
7-1	地域分割	98
7-2	1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求められた平均値 $\mu_{M1m}$ に対する 10 分間・1 時間降水量データの実確率分布の平均値 $\mu_{R10m}$ ・ $\mu_{R60m}$ の関係(直線近似表現)	99
7-3	表 7-2 と同様条件における標準偏差の関係( $\mu_{M1m}$ に対する $\mu_{R10m}$ ・ $\mu_{R60m}$ の関係)	100
A8-2-1	レドーム上の水膜による減衰量の実測例	128
9-1	全国 135 地点における 0.01% 値、0.0001% 値の平均値、標準偏差、係数 $C_1$ ・ $C_2$ 及び最大 MTBF	133
9-2	全国 1150 地点のパラメータから求めた 0.01% 値、0.0001% 値の標準偏差、係数 $C_1$ ・ $C_2$ の平均値	136

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

10GHz 程度以上の高い周波数を用いる無線通信システムの高信頼かつ経済的な回線設計のためには、当該地域における降雨減衰確率の精度良い推定が必要である。日本各地において、これを可能にするには、それぞれの地域における降雨強度の累積分布（以下、CDF：Cumulative Distribution Function という）の精度良い推定が必要となる。降雨減衰確率の推定においては、可能な限り瞬時に近い降雨強度の CDF を知ることが望ましいが、無線回線において観測される降雨減衰は伝搬路上の各地点の降雨減衰の積分値であるため、実用上は平均化時間 1 分間の降雨強度の平均値（正に各 1 分間に降った雨の量を単位 mm/h で表したものであり、以下、1 分間降雨強度という）で十分であることが知られている<sup>[1]</sup>。

このような研究は、これまで多く行われてきているが、これには、全国的な規模で得られ、かつ信頼できる長期間の降雨データが必要である。国内においては、旧日本電信電話公社（現日本電信電話（株））が、全国の気象台で 1940～1950 年代に自記記録紙に記録された降雨データから強雨期 3 ヶ月（7～9 月）等における 10 分間ごとの降雨量、総降雨量を読み取り、それらを解析処理した成果として、1970 年に、地上の地点間を結ぶ無線通信システム（以下、地上回線用無線通信システムという）に対する降雨減衰確率推定法及び同推定法で用いる推定用パラメータをとりまとめている<sup>[2]</sup>。パラメータとして与えられたのは、全国 1,642 地点の強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の累積確率の 0.0075% 値（以下、単に 0.0075% 値という / また、異なる値を用いる場合も同様とする）である。そして、これが今日まで、国内における地上回線用無線通信システムに対する、主たる降雨減衰確率推定法として、いくつかの修正が取り入れられつつ<sup>[3]～[5]</sup>用いられてきている。

無線通信システムは、近年の通信環境の変化、特にユビキタスに象徴される、利用者が場所、時を意識しない通信環境の実現に向け、ますます多様化が予想される<sup>[6]～[11]</sup>。長い間中継系回線用としての使用が主であった準ミリ波・ミリ波帯においても、既に加齢者系回線用としての利用がなされており、さらに当初は企業向け用のみであったものがコンシューマー向け用も現れてきている。加齢者系回線用として用いられるケースにおいては、無線区間が利用者宅に直接引き込まれるため、回線品質と伝搬路状態との関係が利用者にはわかりやすく、企業系利用者からは、降雨による回線断が比較的長時間になった場合などに、特に強いクレームが電気通信事業者に寄せられる（例えば、設備障害のように全く予測できない偶発的なものでなく、しかも自然界で必ず発生するものが原因ならば、もっと影響を受けないようにすべき）など、降雨減衰確率推定法の精度に対する要求が従来以上に高

まっている。これに対し、これまでの降雨減衰確率推定法で用いる推定用パラメータは長期間の降雨の平均化された確率分布から求められたものであり、これを基に得られる降雨減衰確率は平均値的な条件におけるものとなる。しかし、これでは、降雨減衰確率推定法により求められた、ある品質目標とする累積確率における降雨減衰量に対し、平均すると2年に1回は、これを超える減衰量が発生しうることとなる。このため、電気通信事業者の中には、得られた条件に対し、適量と考えられるマージンを付加することによって、目標とした回線品質が満たされない年が頻繁に発生しないよう、独自に配慮を行いつつ運用するケースもあった。一方、コンシューマー向け用無線通信システムにおいては、回線品質を多少犠牲にしても経済性を優先することが求められることとなり、回線品質目標は緩和されたものとなる。このように既に品質要求は多様なものとなってきているが、今後はさらなる用途の拡大も考えられ、さらに品質要求の多様化が進むことも考えられる。そのような要求に柔軟に対応でき、かつ精度の向上した降雨減衰確率推定法が求められている。

さらには、近年、地球的規模での二酸化炭素の増大による温暖化現象、大都市圏及びその周辺における都市熱等によるヒートアイランド現象などに代表されるような、雨の降り方、頻度等に直接影響を与えるような気象環境の変化が見られるようになり、そのような観点からも、数十年前の降雨データに基づく降雨減衰確率推定法では、十分な精度が確保できない可能性が懸念されるようになった。

こうした状況の中、気象庁が1976年より AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) を全国千数百箇所で順次構築し、これにより利用し易い数値化したデータが得られるようになった。当初は1時間降水量のみであったが、1994年からは10分間降水量も追加され、更に、1995年からは、全国百数十箇所の気象官署(气象台や測候所)において1分間降水量も得られるようになった。そして、このように充実してきた気象庁データが、近年の長期間の降雨データに基づく降雨減衰確率推定用パラメータのとりまとめにとって有効であることが着目されている<sup>[12]-[14]</sup>。なお、降水量というのは、降雪、降雹といった水が成分となる降雨以外の地上に降ってくるものも含んで観測しているということで、このような呼称がつけられている。また、本論文におけるN分(時)間降雨強度、N分(時)間降雨量、N分(時)間降水量の定義については、2.3.1節で詳述する。

全国的規模で十分な数の地点における降雨減衰確率推定用パラメータのとりまとめを行うには、AMeDASデータの中でも、全国千数百箇所で観測が行われている10分間及び1時間降水量データの活用が不可欠であり、これらから1分間降雨強度の確率分布を得る必要がある。このためには、10分間及び1時間降水量データの確率分布から1分間降雨強度の確率分布を精度良く求める変換手法、即ち異積分時間降雨強度確率分布変換手法(第7章で詳述)が必要である。同変換手法については、細矢が1988年に、まさに AMeDAS

により得られる 1 時間降水量データを利用することの有効性を考え、N 分(時)間降雨強度の確率分布から 1 分間降雨強度の確率分布への変換手法として、自己相関特性を用い、前者の平均値及び標準偏差から後者の平均値及び標準偏差を求める手法を提案している<sup>[12]</sup>。また、2002 年には秋元他が、細矢が提案した手法を応用して、同手法の高精度化を目的とした変換手法を提案している<sup>[14]</sup>。しかしながら、本研究以前においては、これらの変換精度に関する全国的規模のデータを用いた検証は行われておらず、いずれの手法を用いることが最適か判断できない状況にあった。これに関し、全国百数十箇所で観測されるようになった 1 分間降水量データの活用が考えられた。1 分間降水量データからは 1 分間降雨強度の確率分布が精度良く得られる可能性が考えられ、そして、1 分間降雨強度の確率分布が精度良く得られるならば、同一地点で得られる 10 分間及び 1 時間降水量データの確率分布との比較などにより、異積分時間降雨強度確率分布変換手法に関する検討が可能と考えられた。これにより、まず、細矢法または秋元他法の変換精度の検証を行い、いずれが最適かを判断すること、その結果、いずれによっても十分な変換精度が期待できない場合は、変換精度がこれらより優れた新たな変換手法を考案すること、などを行う必要があると考えられた。

用いる異積分時間降雨強度確率分布変換手法が決まれば、これを用いて AMeDAS により得られる 10 分間及び 1 時間降水量データの確率分布から長期間の 1 分間降雨強度の確率分布を得ることができ、降雨減衰確率推定用パラメータのとりまとめに供することができる。この場合、求められた 1 分間降雨強度の確率分布が、単に長期間の平均化された確率分布であるとするれば、これらを基に用意されたパラメータを用いて得られる降雨減衰確率は平均値的な条件となり、得られた条件を満たさない年が頻繁に生じることとなる。これについては、唐沢・松戸が 1988 年に、問題提起を行うとともに、その対処案として MTBF の考え方に基づく安全係数の概念を提案している<sup>[15]</sup>。これは得られた推定結果が平均何年間継続して満たされるかを条件として含めた形でパラメータを扱うようにするという考え方であり、例えば、回線品質に対する要求が厳しく、かつ回線品質目標を厳しく守ることが要求されるケースにおいては、目標値を厳しく設定するとともに、目標が満足される平均継続年数を大きい値にし、一方、経済性を優先し回線品質に対する要求がさほど厳しくないケースにおいては、目標値を緩和されたものとするとともに、目標が満足される平均継続年数を小さい値にする、というようなことが考えられる。このように、安全係数の概念は、多様な品質要求に対応するために有効であるが、何よりも、無線通信システムを運用する者にとって、設定した回線品質条件が平均的に何年間満足するかをあらかじめ知った上で運用できるという点で非常に有効である。本研究以前において、この概念を用いて全国的にパラメータをとりまとめたものは存在しておらず、本研究においてこれを用意

することができれば、極めて有益なものとなると考えられた。

降雨減衰確率推定法の核となる 1 分間降雨強度の確率分布を近似する分布モデルについて、細矢が 1988 年に、3 パラメータを用いる Moupfouma 分布(1982 年に提案された)を扱い易くしたものとして、2 パラメータを用いる M 分布を提案した<sup>[12]</sup>。従来、降雨減衰確率推定法用分布モデルとしては、国内外において、ガンマ分布及び対数正規分布(条件付を含む)がよく用いられてきているが、これらには近似精度の偏りがあり、前者が比較的小さい確率の範囲で、後者が比較的大きい確率の範囲で近似精度が優れる<sup>[16(第7章)], [17]</sup>というものであるのに対し、M 分布は偏りなく広い範囲で優れた近似が得られるというものであった。この特徴から、M 分布を用いれば、広い確率範囲の品質要求に精度良く対応できる降雨減衰確率推定法を確立できる可能性が考えられた。AMeDAS データのうち、全国百数十箇所で得られる 1 分間降水量データから 1 分間降雨強度の確率分布が精度良く得られるならば、これを用いて、ガンマ分布、対数正規分布(条件付を含む)及び M 分布について、広い確率範囲における近似精度を比較評価し、新たな降雨減衰確率推定法に最適な分布モデルがまさに M 分布であるのか、それとも他の分布であるのかを確認し、その上で最適であることが確認された分布モデルを用いた推定法を確立することが必要であると考えられた。

## 1.2 本研究の概要

本研究は、筆者が、実際に準ミリ波・ミリ波帯の中継系回線用無線通信システムや加入者系回線用無線通信システムの開発、建設及び運用に携わり、回線設計、回線設定や保守、さらには回線利用者の対応などを行った経験に基づき、現場での課題を克服したいと考えて研究を行ったものであり、成果が実用に供せるものとなることを特に重視した。精度的に優れていることはもちろんであるが、研究成果が全国で適用できること、また、利用する者が状況に応じた応用ができるよう、使い易く柔軟性のあるものとなることを目指した。

前節で示したように、無線通信システムが適用されるケースが多様化し、回線品質に対する要求も多様化し、降雨減衰が回線品質に影響を与える周波数帯における無線通信システムの回線設計に用いる降雨減衰確率推定法も柔軟な回線品質要求に対応できるものであることが求められるようになってきている。また、大気中の二酸化炭素の増大による温暖化現象等、近年の気象環境が変化している可能性が考えられる中、降雨減衰確率推定法に用いるパラメータも、既存推定法において用いられている 1940～1950 年代のデータに基づくものでは、十分な推定精度が確保できない可能性が懸念されるようになってきている。このため、多様な回線品質に対応できる降雨減衰確率推定法を確立するとともに、気象庁が、



近年、1976年より構築した AMeDAS により得られる数値化したデータを利用して降雨減衰確率推定法に用いるパラメータを求めることを目指して行ったものが本研究である。

本研究における主な研究内容は、

本研究のために実施した降雨の実測データに基づく、AMeDAS の 1 分間降水量データから 1 分間降雨強度の確率分布を精度よく求める手法に関する研究、

AMeDAS の 1 分間降水量データから求めた 1 分間降雨強度の確率分布を用いて行う、多様な回線品質目標に適用する新たな降雨減衰確率推定法に最適な分布モデルに関する研究、

本研究のために実施した降雨の実測データに基づく、一地点の 1 分間降雨強度の確率分布から区間の同確率分布を求める区間積分において必要となる降雨の空間相関特性の与え方、及び の分布モデルを用いる場合の区間積分方法等に関する研究、

AMeDAS の 1 分間降水量データから求めた 1 分間降雨強度の確率分布、並びに同一地点で得られた同 10 分間及び 1 時間降水量データの確率分布を用いて行う、10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度の確率分布を精度良く求めるために必要となる異積分時間降雨強度確率分布変換手法に関する研究、

及び の研究成果に基づく新たな降雨減衰確率推定法に関する研究

AMeDAS の 1 分間降水量データから の手法により、また、同 10 分間及び 1 時間降水量データから の手法により、それぞれ得られた 1 分間降雨強度の確率分布を用いた、安全係数の概念を導入した降雨減衰確率推定用パラメータのとりまとめに関する研究、

等である。以下、次章以降の内容について概要を示す。なお、本研究の成果として示しているのは第 4 章以降であり、第 2 章は本研究内容を理解し易くするよう関連情報を整理し示したものの、第 3 章は本研究で実施した実測条件に関する情報を示したものである。

第 2 章では、第 4 章以降に示す新たな降雨減衰確率推定法の確立及び同推定法に用いるパラメータのとりまとめを目指した各種研究を行うに当たって必要となる、降雨減衰確率推定に関わる基本的情報、降雨量を扱う場合の留意点、既存降雨減衰確率推定法に関する留意点等について示している。

第 3 章では、本研究で実施した降雨量及び降雨減衰量の実測のための測定機材・構成等について示している。この実測によって得られたデータは、第 4 章、第 6 章及び第 8 章で示した研究において用いられる。

第 4 章では、全国百数十箇所の AMeDAS により得られる 1 分間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得るために行った研究内容について示している。具体的に

は、気象庁が統一的に降水量測定に用いているものと同型の 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計（分解能 0.5mm）と、分解能が 0.0083mm と極めて小さい降雨強度計を同一地点に設置し、これらから得られた測定データを用い、1 分間降水量データから精度良く 1 分間降雨強度の CDF を得るには、どのような処理を施せばよいのかを研究し、乱数補正秒単位均し分配処理と名付けた新たな処理方法を提案している。また、付加的な成果として、均し分配処理が転倒桁型雨量計測定データから自己相関特性を精度良く得るために有効であることも示している。

第 5 章では、全国百数十箇所の AMeDAS により得られる 1 分間降水量データから上述の乱数補正秒単位均し分配処理を適用して 1 分間降雨強度 CDF を求め、幅広い用途において精度良い推定を可能とする降雨減衰確率推定法に適した分布モデル選定を目的として行った研究内容について示している。具体的には、前述の細矢が提案した M 分布<sup>[12]</sup>と、従来国内外において降雨減衰確率推定に適しているとされているガンマ分布、対数正規分布及び条件付対数正規分布について近似精度の比較を行い、M 分布が広い確率範囲で近似に優れていることを示している。

第 6 章では、東京大手町周辺の 11 箇所に設置した 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計、及びうち 1 箇所に併設した降雨強度計から得られた実測データを基に行った、空間相関特性に関する研究内容について示している。具体的には、先に示したように、第 4 章に示す研究で、均し分配処理が転倒桁型雨量計測定データから自己相関特性を精度良く求めるのに有効であることが確認されたことから、空間相関特性を精度良く求めることにも有効である可能性があると考え、まず、1 箇所の降雨強度計測定データと 11 箇所の転倒桁型雨量計測定データを用いて、これを明らかにした。続いて、11 箇所の転倒桁型雨量計測定データを用い、空間相関特性を近似する特性に関する検討、及び降雨減衰係数（単位 km 当りの降雨減衰量）が 1 分間降雨強度の  $n$  乗に比例する（ $n$  は降雨減衰係数のパラメータで周波数に依存 / ITU-R 勧告 P.838-3<sup>[18]</sup> / 2.2.1 節で詳述）ことから、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いることの必要性に関する検討を行った。国内において地上回線用無線通信システムに対し主として用いられている既存の降雨減衰確率推定法<sup>[2]~[5]</sup>は、前者については距離の平方根の指数関数  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  のみを用い、後者については 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いている。これに対し、本研究では、前者については、距離( $d$ )の指数関数  $\exp(-\beta \cdot d)$  が近距離部分を、距離の平方根の指数関数  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  が遠距離部分を、それぞれ良く近似し、また、後者については、1 分間降雨強度の空間相関特性と 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性との違いは大きく、これらを用いた区間積分の違いも無視できない程度であることから、降雨減衰確率推定において 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いる必要がある、という結果が得られたことを示している。

第7章では、全国千数百箇所の AMeDAS により得られる 10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度の確率分布を精度よく得るための、異積分時間降雨強度確率分布変換手法に関する研究内容について示している。具体的には、細矢が M 分布を提案する際に示した変換手法<sup>[12]</sup>、及びこの応用として秋元他が提案した変換手法<sup>[14]</sup>の有効性について検討を行うとともに、全く新たな変換手法の可能性についても検討を行い、その結果として、10 分間及び 1 時間降雨強度の実確率分布の平均値及び標準偏差から 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得ることができる新たな変換手法を提案している。

第8章では、第5章及び第6章の研究をまとめる形で、M 分布に基づき、また、空間相関特性については、近距離と遠距離でそれぞれに適した近似特性を与えると同時に、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いて区間積分を行う、新たな降雨減衰確率推定法を提案し、降雨量及び降雨減衰量の実測データを用いて既存の降雨減衰確率推定法との推定精度の比較を行い、新たに提案した推定法が優れていることを示している。また、付随して得られた成果として、無視できない量のレドーム上の水膜による減衰の影響が発生することを示すと同時に、推定法により求めた降雨減衰量 CDF に対するレドーム上の水膜による減衰量の補正量を求めることができる式を示している。

第9章では、第4章で示した乱数補正秒単位均し分配処理、及び第7章で示した新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法を用い、全国千数百箇所の AMeDAS により得られる最長 1976 年からの 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を求め、新たに提案した降雨減衰確率推定法で用いるパラメータをとりまとめている。また、新降雨減衰確率推定法で用いるパラメータは、唐沢・松戸が提案した MTBF の考え方をういた安全係数の概念<sup>[15]</sup>を、若干の修正を加えて、適用することにより、降雨の年変動を考慮できるものとなっている。具体的には、新推定法を用いて得られる降雨減衰確率が平均何年間継続して満たされるかを条件として与えてパラメータを求め、これを新推定法に適用し、推定を行う。

第10章には、結論として、本研究の成果を要約して示すと同時に、新たに提案した降雨減衰確率推定法により推定を行う詳細手順を示している。

図 1-1 は、本論文の構成をまとめたものである。

## 第1章：序論（新降雨減衰確率推定法に関する研究のトリガ）

### 課題

- 既存降雨減衰確率推定法は 1940～1950 年代取得データに基づく
- 近年の温暖化現象・ヒートアイランド現象等地球規模の気象環境変化
- 近年の無線通信システムの多様化 高精度で多様な回線品質条件が求められる

### 考慮すべき事項

- 1976 年より気象庁が AMeDAS を構築し数値化した降雨量データが得易くなった
  - 1988 年に唐沢・松戸が MTBF の考え方に基づく安全係数の概念を提案
  - 1988 年に細矢が広い確率範囲で降雨強度確率分布への近似精度が優れた M 分布を提案
- 近年のデータを用い高精度で多様な回線品質条件に対応できる降雨減衰確率推定法が構築可

## 第2章：降雨減衰確率推定に関わる基本的情報、留意点等

以降の章に必要な降雨減衰確率推定、降雨量測定等に関する基本的情報、留意点等

- 降雨減衰の影響を受ける無線通信システムの回線設計と降雨減衰確率について
- 降雨減衰確率推定について
- 降雨量を扱う場合の留意点
- 既存降雨減衰確率推定法に関する留意点等

## 第3章：本研究における降雨量及び降雨減衰量測定

4章、6章及び8章で用いる降雨量及び降雨減衰量実測データを得るための測定機材・構成等

## 第4章：気象庁降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得る手法

- 1分間降水量データから -

気象庁降水量観測 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計使用 分解能 0.5mm

単なる単位変換では1分間降雨強度CDFと呼べるものとはならない

転倒桁型雨量計と降雨強度計(分解能 0.0083mm)の測定データを比較し、違いを確認

0.5mm 桁に溜まるに要する時間分、均し分配する方法が有効と判断

より精度良くCDFを得る均し分配方法を追求し、乱数補正秒単位均し分配処理を提案

均し分配処理が自己相関特性を精度良く得るにも有効を確認

## 第5章：降雨減衰確率推定に最適な近似分布モデルに関する考察

全国の1分間降水量データから得た1分間降雨強度CDFを用い4分布モデルの近似精度比較

- ガンマ分布、対数正規分布、条件付対数正規分布、M分布 -

広い適用性を考慮し、広い累積確率範囲の近似精度に着目し、M分布が良いことを確認

図 1-1 “降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の向上に関する研究”の構成(1/2)

## 第 6 章：空間相関特性及び同特性を用いた区間積分

大手町周辺 11 箇所で転倒柵型雨量計で測定した 1 分間降雨量データを用い検討

4 章の均し分配処理が空間相関特性にも有効を確認し、11 箇所における同特性を作成  
2~3km 程度を境に、遠くは  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  が、近くは  $\exp(-\beta\cdot d)$  が近似良く表すことを確認

上記空間相関特性、M 分布の場合における地点 1 分間降雨強度の区間積分を与える式を導出

ITU-R 勧告 Rec.P.838-3：降雨減衰係数(単位距離当りの減衰量)が降雨強度の n 乗に比例

1 分間降雨強度の空間相関特性と同 n 乗の特性とは違いが無視できないことを確認

1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性の、 を与える近似式を導出

## 第 7 章：気象庁降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得る手法

- 10 分間&1 時間降水量データから - [ 異積分時間降雨強度確率分布変換

全国の 1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理で得た 1 分間降雨強度 CDF 使用  
同地点で得られた 10 分間&1 時間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF への変換精度評価

既存手法の中で有効と考えられた細矢法等は比較的大きい誤差有り

- 細矢法等：N 分間降雨強度 CDF を M 分布(近似)で表し、平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  を使用 -  
M 分布近似には近似誤差が避けられない 実分布の  $\mu$  &  $\sigma$  ならば近似処理含まれず

10 分・1 時間降水量の実分布の  $\mu$  &  $\sigma$  と 1 分間降雨強度の M 分布近似の  $\mu$  &  $\sigma$  を比較検討  
比較的良い相関を確認 / 豪雪地域は冬季を除く 4~10 月のデータのみの場合の相関が良い  
実分布の  $\mu$  &  $\sigma$  を用いた誤差の小さい異積分時間降雨強度確率分布変換手法を提案

## 第 8 章：M 分布を用いた新降雨減衰確率推定法の提案

以上を総合し、M 分布を用いた新降雨減衰確率推定法を提案

特徴：推定用パラメータとして 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を使用

距離に応じ 2 種類の空間相関特性使用 / 1 分間降雨強度の n 乗の同特性を使用

実測データによる既存推定法と新推定法の推定精度比較を行い、新推定法の優位を確認

ドーム表面の水膜による減衰の発生を確認 同減衰について行った実測データに基づき考察

## 第 9 章：新降雨減衰確率推定法に用いる年変動を考慮したパラメータ

これまでの推定法で用いるパラメータは平均値的値を使用 平均 2 年に 1 回は推定を超える

目指すは平均 x 年(目標 / 任意)は推定を超えない 唐沢・松戸の安全係数の概念が有効

全国気象庁データを用い、安全係数の概念を導入した 1150 地点におけるパラメータを作成

## 第 10 章：結論

以上の内容を総括

図 1-1 “ 降雨減衰確率推定法の精度及び適用性の向上に関する研究 ” の構成(2/2)

## 第2章 降雨減衰確率推定の概要と関連する留意事項

### 2.1 降雨減衰の影響を受ける無線通信システムの回線設計と降雨減衰確率

10GHz 程度以上の高い周波数を用いる無線通信システムにおいては、降雨減衰が回線品質(回線不稼働率など)を決定する主要因となる。無線通信システムの構築に当っては、結びたい地点間の距離、環境条件等を考慮し、所要の回線品質を得られるよう当該無線リンクのリンクパラメータ(使用するアンテナ、送信出力、高さ、給電線損失等)を決定する必要がある、このために回線設計という作業を行う。

所要の回線品質を得られるよう各種リンクパラメータを決定するとは、降雨減衰が回線品質を決定する主要因となる無線通信システムにおいては、受信信号の降雨による減衰がある量以下であれば所要の回線品質を維持できるよう、余裕を設ける、即ち、平常時受信レベルが、回線が使えない状態(不稼働状態)となる限界受信レベルより、減衰に対する余裕分以上高いレベルになるよう、各種リンクパラメータを決定することを意味する。これは、雨が強いほど大きい降雨減衰が生じ、また、強い雨ほど発生する確率は小さくなることから、大きい減衰余裕を設けるほど、それ以上の減衰を発生させるような強い雨が降る確率は小さくなり、良好な回線品質が得られることによる。この減衰に対する余裕は“降雨減衰マージン”と呼ばれる。そして、降雨減衰マージンの大きさはリンクパラメータに依存し、また、“降雨減衰確率推定”により、降雨減衰マージンから降雨減衰確率を、または、降雨減衰確率から必要となる降雨減衰マージンを、推定することができる。

表 2-1 に回線設計においてリンクパラメータから降雨減衰マージンを求めた例を示す。なお、ここでは、わかり易さのため、雑音要因として熱雑音のみを示しているが、実際の回線においては各種干渉雑音等も考慮する必要がある、これより複雑な処理が必要となるので、注意願いたい。

表 2-1 においては、 $(F)$ の降雨減衰マージンに相当する減衰量までの降雨減衰であれば、所要の回線品質が確保されるが、これを超える減衰量になると、回線は使えない状態、即ち不稼働状態となる。したがって、 $(F)$ の降雨減衰マージンを超えるような減衰量を生じる降雨の発生確率を知れば、それが回線不稼働率となる。

表 2-1 リンクパラメータから降雨減衰マージンを求めた例

	パラメータ	条件 / 値 <sup>*2-1</sup>	備考
入力部分	周波数[GHz]	<u>22.0</u>	晴天時受信電力算出用
	区間距離[km]	<u>2.0</u>	
	送信電力[dBm]	<u>20.0</u>	
	送信側給電系損失[dB]	<u>0.0</u>	
	送信アンテナ利得[dBi]	<u>40.0</u>	
	受信アンテナ利得[dBi]	<u>40.0</u>	
	受信側給電系損失[dB]	<u>0.0</u>	
	送信側降雨時付加損失[dB] (レドーム表面水膜による減衰等)	<u>4.0</u>	この要素については第 8 章参照
	受信側降雨時付加損失[dB] (レドーム表面水膜による減衰等)	<u>4.0</u>	
	受信帯域幅[MHz]	<u>10.0</u>	熱雑音電力算出用
雑音指数(NF)[dB]	<u>8.0</u>		
	スリット C/N[dB]	<u>13.0</u>	降雨減衰マージン算出用
計算部分	自由空間伝搬損失[dB]	125.3	$=20\log((4\pi \cdot 10^3)/(3 \cdot 10^8/(10^9)))$ 通常、遮蔽等による損失は無いよう設計
	晴天時受信電力[dBm]	-25.3	$= \text{送信電力} + \text{送信アンテナ利得} - \text{受信アンテナ利得} - \text{送信側給電系損失} - \text{受信側給電系損失} - \text{自由空間伝搬損失}$
	晴天時受信電力 - 降雨時付加損失 [dBm] (降雨減衰は含まず)	-33.3	$= \text{晴天時受信電力} - \text{送信側降雨時付加損失} - \text{受信側降雨時付加損失}$
	熱雑音電力(kTBF)[dBm]	-95.8	$=10\log(1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10^6) + 10\log(\text{帯域幅})$
	降雨減衰分除く C/N[dB]	62.5	$= \text{スリット C/N} - \text{自由空間伝搬損失}$
	降雨減衰マージン[dB]	49.5	$= \text{降雨減衰分除く C/N} - \text{熱雑音電力}$

\*2-1: 「条件 / 値」欄、下線付の値はサブ値

\*2-2: 実際のケースでは、熱雑音電力以外に干渉雑音電力等も考慮して降雨減衰マージンを求める。即ち、実際のケースでは、(E)において、干渉雑音電力に起因する C/N 等も加えた総合 C/N を求める。

この、表 2-1 で示されるような、ある与えられた条件の下で求められた降雨減衰マージンを超えるような減衰量を生じる降雨の発生確率を推定する、もしくは、逆に発生確率が条件として与えられて、これに対する降雨減衰量を求める、というようなことを行うのが降雨減衰確率推定である。したがって、ここで扱われる確率値は、ある値を超える値が発生する確率であり、累積確率値である。そして、

無線リンクを設定したい地点、区間距離、周波数が与えられ、また、用いる無線システムのリンクパラメータが与えられている場合に、これらにより決まる降雨減衰マージン (F) を超える降雨減衰量が発生する降雨減衰確率 (= 回線不稼働率) を降雨減衰確率

推定により求め、これが所要回線不稼働率以下となるか判定する、無線リンクを設定したい地点、区間距離、周波数が与えられ、また、所要不稼働率が品質条件として与えられている場合に、同不稼働率に相当する降雨減衰確率が得られる降雨減衰量(=所要降雨減衰マージン)を降雨減衰確率推定により求め、降雨減衰マージン(Ⓕ)がその値以上になるよう、用いる無線通信システムのリンクパラメータを決定する、

などが可能となる。

理解を容易にするために、回線不稼働率規定または目標に関する国内での参考事例を示すと、以下のような例がある。

Ⓐ 11GHz 帯の中継系無線通信システムの回線品質規定例

11GHz 帯の 1 無線回線当り 156Mbps の容量を有する中継系無線通信システムの回線品質を「符号誤り率が  $10^{-4}$  を超える降雨断の時間率(これを回線不稼働率と定義)が年間 0.033%/280km 以下であること」というように定めた例がある。11GHz 帯のシステムは、最大で 30km 程度、通常は 10~20km 程度もしくはそれ以下の伝搬路長で用いられると考えられ、例えば、15km の伝搬路長の無線回線であれば、年間の不稼働率が 0.001768%、時間にして約 9.3 分以下になるよう回線設計が行われなければならないこととなる。

Ⓑ 22GHz 帯の移動体通信基地局用アクセス回線に用いる無線通信システムの回線品質規定例

22GHz 帯を使用する移動体通信基地局用アクセス回線に用いる無線通信システムの回線品質を、「符号誤り率が  $10^{-4}$  を超える降雨断の時間率が 1 区間当り年間 0.004% 以下であること」というように定めた例がある。年間 0.004% は、時間にして約 21 分である。

Ⓒ 22、26 及び 38GHz 帯の加入者系無線通信システムの回線品質目標例

22、26 及び 38GHz 帯を利用する加入者系無線通信システムの回線品質については、求められる品質が適用条件に依存するとして(例えば、企業向け用の場合は高品質が求められ、コンシューマ向けベストエフォートの用途では品質もさながら経済性が重視される)品質規定のような形では定めず、システムに関する検討における議論の中で、参考条件として回線品質目標とともに回線設計例が示された例がある。その場合に示された条件は「符号誤り率が  $10^{-4}$  を超える降雨断の時間率が 1 区間当り年間 0.004% 以下または同 0.0004% 以下」というものである。年間 0.004% は時間にして約 21 分、年間 0.0004% は時間にして約 2.1 分である。



## 2.2 降雨減衰確率推定について

降雨減衰確率推定は、上述のように、「ある条件の下で与えられた任意の降雨減衰量を超えるような減衰量を生じる降雨の発生確率を推定する」ことであって、「ある値を超える値が発生する確率を示す累積確率値」を推定するものである。したがって、求めるものは累積分布（CDF）である。

全国において降雨減衰量の確率分布推定を行うことを考える場合には、まずデータとして何が使用できるかということを考えなくてはならない。考えられる可能性としては、直接降雨減衰量の統計データが得られるか、それとも減衰を発生させるのは降雨であるから降雨の統計データが得られるか、のいずれかであるが、前者については関連する情報は全く開示されておらず、筆者の経験から言えば、無線通信システムを所有する事業者は受信レベルまたは減衰量のデータを全国レベルで保存するようなことは行っておらず、この種のデータを利用することは極めて考え難い。では残るは、降雨データとなるが、これについては、気象庁が、先にも示したように、古くは自記記録紙による記録であったが、近年では AMeDAS を全国に配備して降水量を観測しデジタルデータで記録しており、これを利用する可能性が考えられる（既存の降雨減衰確率推定法で用いるパラメータも、気象庁において自記記録紙に記録されていたデータがベースとなっている）。しかしながら、気象庁の降水量データは降雨減衰確率推定用データを得ることを想定して測定が行われているわけではないため、入手可能なデータから目的とする情報（1分間降雨強度の確率分布）を精度良く求めることができるかがポイントとなる。また、気象庁の降水量データから1分間降雨強度の確率分布が精度良く得られるとしても、それは一地点の1分間降雨強度の確率分布であるのに対し、無線リンクにおける降雨減衰量は伝搬路上の各地点における降雨減衰量の積分値であるので、これを求めるには、伝搬路上の各地点における1分間降雨強度の確率分布の区間積分により、無線リンクを通しての1分間降雨強度の確率分布を求めることが必要となる。

さらには、降雨データを用いるとするならば、1分間降雨強度の確率分布から降雨減衰量の確率分布への変換を行う必要があり、このためには1分間降雨強度と降雨減衰量との関係を知る必要がある。

以上に示したのは主な要素であるが、関連する細かい要素を含めて、これらを利用できる形にまとめあげたものが降雨減衰確率推定法である。これら各要素について、詳細を以降に示す。

### 2.2.1 降雨減衰量と降雨強度との関係

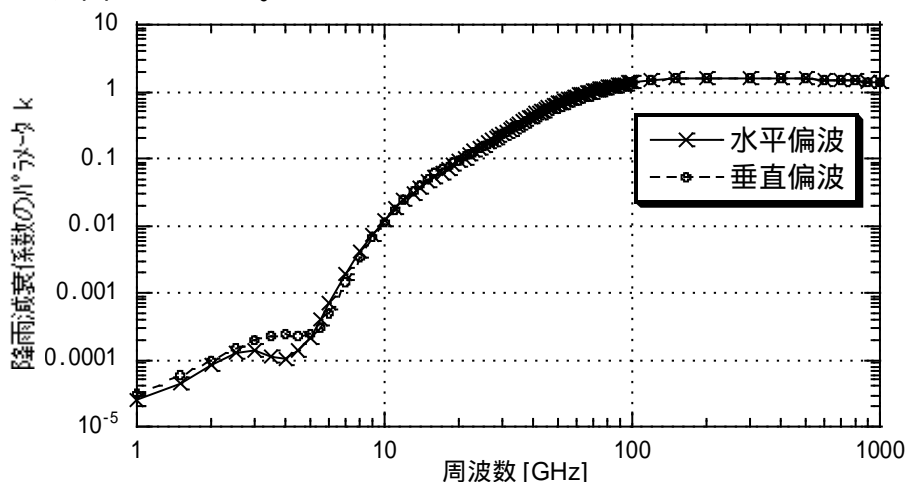
降雨による電波の減衰は、雨滴の吸収・散乱によることから、雨滴の形状・大きさに

関する研究がなされたが、米国の Laws と Parsons 及びカナダの Marshall と Parmer の雨滴の大きさの分布に関する測定結果から、Marshall と Parmer が、雨滴粒形分布の密度関数を与える式を提案し（文献[16]の式(6.1)）、この式や Laws と Parsons の測定結果が降雨減衰係数を求めるのによく用いられた<sup>[16]</sup>。

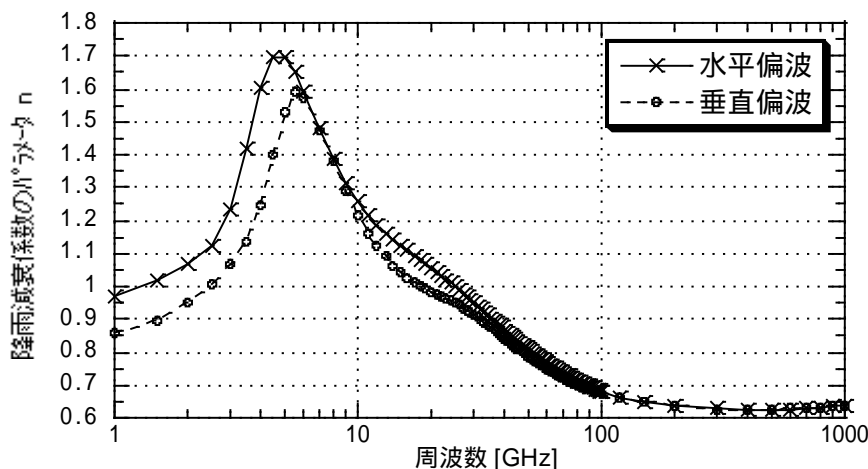
400GHz 以下の周波数においては、多重散乱の影響を考慮しなくとも誤差は大きくないとされ、降雨減衰係数は伝搬路上の各地点の雨滴による単一散乱特性の和として計算できるとし、降雨減衰係数と雨滴粒形分布の密度関数との関係が与えられた（文献[16]の式(6.2)）。また、地表面近くの降雨強度と雨滴粒形分布の密度関数との関係が地表面近くの降雨の落下速度を用いて与えられ（文献[16]の式(6.3)）、これらから降雨減衰係数  $\gamma_R$  [dB/km]と降雨強度  $R$  [mm/h]の関係が求められた<sup>[16]</sup>。このようにして得られた関係式が ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>に示されており、次式により与えられる。

$$\gamma_R = k \cdot R^n \quad [\text{dB/km}] \quad (2-1)$$

ただし、 $k$  及び  $n$  は周波数に依存して決まるパラメータであり、 $k$  及び  $n$  と周波数の関係を示したものが図 2-1 である。



(a)  $k$  と周波数の関係



(b)  $n$  と周波数の関係

図 2-1 降雨減衰係数のパラメータ  $k$  及び  $n$  と周波数の関係 (ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>)

降雨減衰確率推定において扱われる降雨強度は、可能な限り瞬時に近い降雨強度であることが望ましいが、無線リンクにおいて観測される降雨減衰は伝搬路上の各地点の降雨減衰の積分値であるため、実用上は1分間降雨強度で十分であることが知られている<sup>[1]</sup>。

### 2.2.2 1分間降雨強度の確率分布のモデル化

降雨減衰確率推定は、さまざまな無線通信システム、さまざまな用途、さまざまな無線リンク長に対して行われるため、特定の累積確率または減衰量に対して適用できればよいというものではない。したがって、降雨減衰確率推定には、全国の任意の地点において、さまざまな無線リンク長における1分間降雨強度のCDFを得ることが求められる。そして、これを行えるようにするには、全国におけるAMeDASの降水量データから1分間降雨強度の実確率分布のCDFを得ることができるだけでは十分ではない。なぜなら、自然界の事象であるから実確率分布にはイレギュラーな振る舞いをする部分が避けられない、実確率分布を保存して使えるようにするには扱うデータ量的に無理がある、実確率分布ではさまざまな処理を行う上で制限が生じる、など不都合な点があるためである。特にこの要素に関係するものでは、先に示した“一地点における1分間降雨強度の確率分布に対し区間積分を行うことにより、無線リンクを通しての1分間降雨強度の確率分布を求める”という処理が必要となり、また、空間分布が一様でないことを考慮する(空間相関特性を用いる)必要もあり、これだけ考えても実確率分布のまま扱うことは極めて難しい。加えて、後述する既存降雨減衰確率推定法では考慮されていない要素として、年変動を考慮できる推定法を目指すとするれば、さらに難度は高くなる。

このため降雨減衰確率推定においては、1分間降雨強度の実確率分布を精度良く近似できる分布モデルを選定し、その分布モデルを用いて各地域で得られた1分間降雨強度の実確率分布を近似し、これを用いるということを行う。実確率分布を精度良く近似することができる分布モデルとしては、既存の降雨減衰確率推定法での実績及びこれまでに発表されている関連する研究成果等から、一般的な分布モデルの中からガンマ分布<sup>[2]~[5]</sup>、対数正規分布<sup>[17],[19]</sup>が、また、この目的のために考えだされた分布モデルである条件付対数正規分布<sup>[20],[21]</sup>、M分布<sup>[12]</sup>が候補として考えられる。なお、この他、留意すべき分布モデルとしてMoupfouma分布<sup>[12],[22]</sup>が考えられるが、同分布は3パラメータを有する分布であるがゆえに、2パラメータを有する他の分布に比較し、近似精度の面では有利となるが、一方では、扱いを難しくすることとなり、降雨減衰確率推定法としての実用性を考慮すると最適とは言えないと考えられた。この問題は細矢によって検討され、Moupfouma分布の3つのパラメータのうち、最も鈍感なパラメータを“1”に固定としても良い近似が行えることが確認され、そして提案されたものがM分布である<sup>[12]</sup>。なお、文献[16(第7章)]、[17]

によれば、対数正規分布は大きい累積時間率領域で、またガンマ分布は小さな累積時間率領域で、それぞれ近似精度が良いとされている。

以下に4つの分布モデルについて示す。

### (1) ガンマ分布

ガンマ変数  $R$  の確率密度関数  $f(R)$  及び  $R_i$  から無限大までの累積確率  $F(R_i)$  は、以下の式で与えられる。

$$f(R) = \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} R^{\nu-1} \exp(-\beta R) \quad (2-2)$$

$$F(R_i) = \int_{R_i}^{\infty} \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} R^{\nu-1} \exp(-\beta R) dR \quad (2-3)$$

ただし、 $R$ 、 $R_i$  : 1分間降雨強度[mm/h]

( ) : ガンマ関数

、 : ガンマ分布のパラメータ

また、この場合の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  は、 を使って次のように表される。

$$\mu = \nu / \beta, \quad \sigma^2 = \nu / \beta^2 \quad (2-4)$$

### (2) 対数正規分布

対数正規変数  $R$  の確率密度関数  $f(R)$  及び  $R_i$  から無限大までの累積確率  $F(R_i)$  は、以下の式で与えられる。

$$f(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} R \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln R - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-5)$$

$$F(R_i) = \int_{R_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} R \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln R - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dR \quad (2-6)$$

### (3) 条件付対数正規分布

条件付対数正規分布は、用いる確率密度関数  $f(R)$  及び  $R_i$  から無限大までの累積確率  $F(R_i)$  は、対数正規分布と同様、式(2-5)及び式(2-6)で与えられるが、全時間から降雨の無い時間を除いた時間(条件付時間/厳密に知ることは困難であるので、通常、全時間の10%を適用<sup>[20],[21]</sup>)における分布を求めるというものである。このため、全時間に対する分布は、求められた分布に対し降雨の無い時間分の補正を行うことによって得られる。

### (4) M分布

M変数  $R$  の確率密度関数  $f(R)$  及び  $R_i$  から無限大までの累積確率  $F(R_i)$  は、以下の式で与えられる<sup>[12]</sup>。

$$f(R) = \frac{p}{R} \exp(-uR) \left(\frac{1}{R} + u\right) \quad (2-7)$$

$$F(R_i) = \int_{R_i}^{\infty} \frac{p}{R} \exp(-uR) \left( \frac{1}{R} + u \right) dR = \frac{p}{R_i} \exp(-uR_i) \quad [R^* \leq R_i < \infty] \quad (2-8)$$

ただし、 $p$ 、 $u$  : M 分布のパラメータ

$R^*$  :  $R$  がとりえる下限値。  $F(R^*)=1$

パラメータ  $p$ 、 $u$  が与えられている時、平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  は次のように表される。

$$\mu = p[\exp(-uR^*) + E_1(uR^*)] \quad (2-9)$$

$$\sigma = \sqrt{p \left( R^* + \frac{2}{u} \right) \exp(-uR^*) - \mu^2} \quad (2-10)$$

ただし、 $E_1(x)$  : 積分指数関数

また、平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  が与えられている時、パラメータ  $p$ 、 $u$  は次のように表される。

$$u = \frac{2R^*}{\sigma + \mu^2 - R^{*2}} \quad (2-11)$$

$$p = R^* \exp(u \cdot R^*) \quad (2-12)$$

### 2.2.3 降雨減衰確率推定用パラメータ

前節で示した 4 つの分布モデルは 2 つのパラメータを与えれば分布を示すことができる。雨の降り方は地域ごとに異なるので、各地域ごとに得られた実確率分布を基にパラメータを用意しておけば、分布を知りたい地域のパラメータを分布モデルに適用し、分布を再現することができる。なお、パラメータの与え方は分布モデルにより異なる。

気象庁は、1976 年より AMeDAS を全国千数百箇所で順次構築し、これにより利用し易い数値化したデータが得られるようになっている。当初は 1 時間降水量のみであったが、1994 年からは 10 分間降水量も追加されている。更に、1995 年からは全国百数十箇所において 1 分間降水量データも得られるようになっている。したがって、これら AMeDAS データをうまく利用できれば、近年の長期間の降雨データに基づく降雨減衰確率推定用パラメータをとりまとめることが可能と考えられる<sup>[12]~[14]</sup>。

先に述べたように、得たいのは 1 分間降雨強度の累積分布 (CDF) である。気象庁における降水量測定は、全て 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計を用いて行われており、同雨量計を用いて測定された 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから、この 1 分間降雨強度の CDF を精度良く得られるかが重要なポイントとなる。

### 2.2.4 一地点の 1 分間降雨強度の確率分布から区間の同分布を得る積分

先に示したように、無線リンクにおける降雨減衰量の確率分布を求めるには、伝搬路

上の各地点における1分間降雨強度の確率分布の区間積分により、無線リンクを通しての1分間降雨強度の確率分布を求めることが必要となる。しかしながら、ここで注意すべきは雨域内での雨の降り方である。特に回線品質に影響を与えるような降雨減衰を生じる強雨においては、雨域内での雨の降り方は一様とはならず、その傾向は雨が強くなるほど顕著になる。このため、一地点（微小区間）の1分間降雨強度の確率分布が与えられたとした場合に、通常、それを単に無線リンクの全区間距離倍して区間の1分間降雨強度の確率分布を得るといような乱暴な計算が行えるわけではない。降雨の空間分布を示すパラメータを与えて区間積分を行うか、または、着目する累積確率における1分間降雨強度で降っていると考えられる実効的な距離（等価通路長）を与えて当該距離倍するといようなことが行われる。地上系の無線通信システムでは、通常前者がよく用いられ、空間分布を示すパラメータとしては空間相関特性と呼ばれるものが用いられる。本研究においても、この方法を用いることが適当と考えられた。以下に、空間相関特性を用いる場合の区間積分の考え方を示す。

図2-2に示すような、距離 $d_L$ の無線リンクにおいて、一地点（微小区間） $i$ における1分間降雨強度（以下、地点1分間降雨強度という） $R_i$ の確率分布が与えられている時、その積分値となる無線リンク全体の1分間降雨強度（以下、区間積分1分間降雨強度という） $R_L$ の平均値 $E(R_L)$ 、分散 $Var(R_L)$ は、一般的に、次のように与えられる<sup>[3]</sup>。

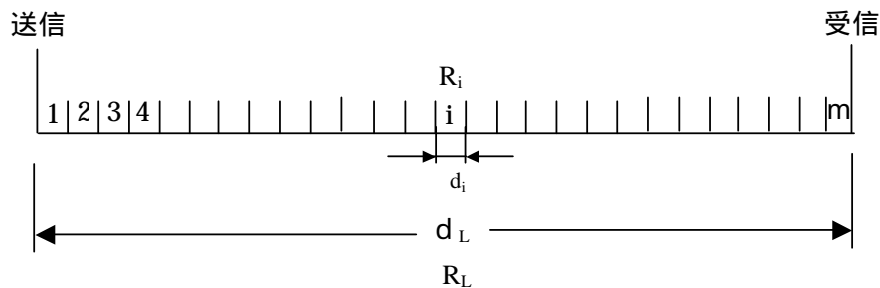


図2-2 地点1分間降雨強度 $R_i$ と区間積分1分間降雨強度 $R_L$ の関係

$$\begin{aligned}
 E(R_L) &= \sum_{i=1}^m \mu \cdot \Delta d_i \\
 &= \mu \cdot d \\
 Var(R_L) &= \frac{\left[ \sum_{i=1}^m (R_i - \mu) \Delta d_i \right]^2}{m} \\
 &= \frac{d^2}{m^2} \left\{ \left[ \frac{\sum_{i=1}^m R_i^2}{m} - \mu^2 \right] + \left[ \frac{2 \sum_{i>j} R_i \cdot R_j}{2 \sum_{i=1}^{m-1} i} - \mu^2 \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{2-13}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{d^2}{m^2} \left[ \sum_{i=1}^m \text{Var}(R_i) + 2 \sum_{i>j} \text{Cov}(R_i, R_j) \right] \\
&= \left( 2d \int_0^d (x) dx - 2 \int_0^d x \cdot (x) dx \right) \sigma^2 \tag{2-14}
\end{aligned}$$

ただし、 $\mu$  : 地点 1 分間降雨強度  $R_i$  の平均値

$\sigma^2$ 、 $\text{Var}(R_i)$  : 地点 1 分間降雨強度  $R_i$  の分散

$\text{Cov}(R_i, R_j)$  : 距離  $d_L$  の無線リンク内の任意の 2 つの地点 1 分間降雨強度  $R_i$ 、 $R_j$  の共分散

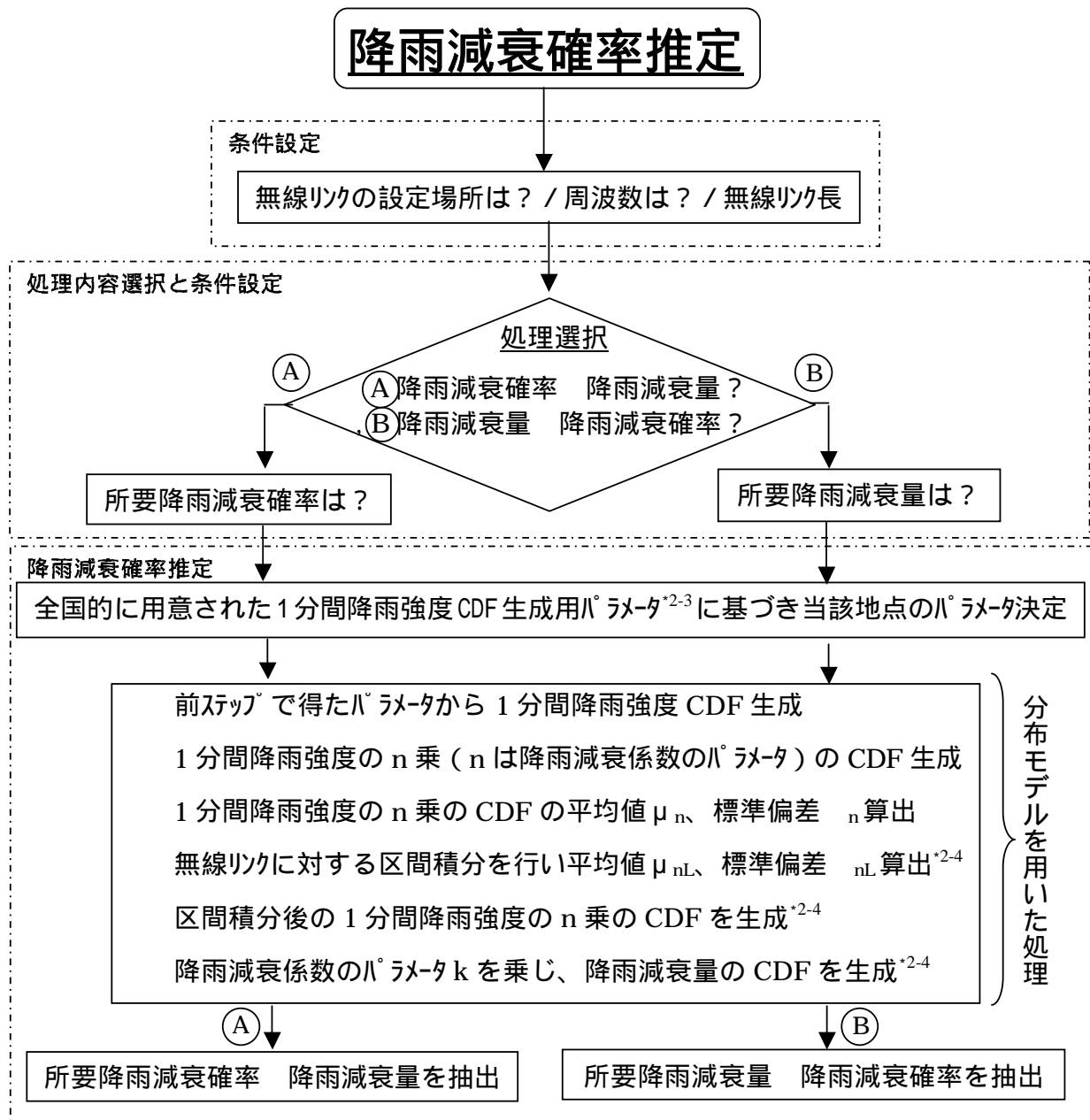
(x) : 当該無線リンクが存在する地域の空間相関特性

したがって、この計算を行うためには、地点 1 分間降雨強度  $R_i$  の確率分布のパラメータとして平均値と分散を与えるとともに、降雨の空間相関特性を与える必要がある。

式(2-1)で示されたように、降雨減衰係数が 1 分間降雨強度の  $n$  乗に比例するため、実際に上記積分を行う場合には、同降雨強度の  $n$  乗に対する積分を、同降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いて行い、最後に  $k$  を乗じることにより降雨減衰量を得るという方法が考えられる。なお、既存降雨減衰確率推定法では、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性ではなく、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いればよいとしており<sup>[2]</sup>、この必要性を含めて検討を行う必要がある。

### 2.2.5 降雨減衰確率推定の流れ

以上に主たる降雨減衰確率推定の要素について記述した。これらの関係を処理の流れがわかるような形で図示した例を図 2-3 に示す。



\*2-3 : 例えば、1分間降雨強度の特定の累積確率値等

\*2-4 : 実処理においては、ステップを降雨減衰係数のパラメータ k を含んで行い、で降雨減衰量の CDF を生成することも可能

図 2-3 降雨減衰確率推定における主な処理フロー例



## 2.3 降雨量を扱う場合の留意事項

### 2.3.1 N分(時)間降雨強度、N分(時)間降雨量及びN分(時)間降水量の定義

本論文においては、単位時間に対する降雨量を示す場合の表現として、N分(時)間降雨強度、N分(時)間降雨量及びN分(時)間降水量の3種類を用いている。これらについては、論文、書籍等で必ずしも常に同じ定義が適用されているとは限らないが、本論文においては、以下のような定義で示している。

N分(時)間降雨強度：

正に瞬時瞬時の着目する時間長当りの降雨量、即ち降雨の強さを表したい場合に、この表現が用いられており、単位は時間長に限らず mm/h で表す。そして、前述したように、降雨減衰確率推定においては、可能な限り瞬時に近い降雨強度を使用することが望ましいが、実用上は平均化時間1分間の降雨強度の平均値、即ち1分間降雨強度で十分であることが知られている<sup>[1]</sup>。

したがって、本研究で用いるのは1分間降雨強度であるが、現実には、後述する、主として用いられる転倒枡型雨量計によって測定される降雨量または降水量は、同雨量計の分解能が粗く、そのままでは1分間降雨強度を精度良く表すことはできない。

N分(時)間降雨量：

降雨量測定器の単位時間内におけるカウントをそのまま用いる場合に、この表現が用いられる。

具体的には、降雨量測定器が、着目する1分間、10分間または1時間の単位時間内に、分解能に相当する量、即ち測定可能最小雨量をカウントした回数に同雨量を乗じた量を当該単位時間内に観測された量として表しており、単位は各単位時間当りの量 mm/min、mm/10min または mm/h で表す。

N分(時)間降雨量については注意を要する点がある。それは、後述する気象庁が統一的に用いている0.5mm枡の転倒枡型雨量計を用いて測った1分間降雨量について考える場合、同雨量計の分解能に相当する量、即ち測定可能最小雨量は0.5mmであるが、この0.5mmは降雨量としては小さい値ではなく、多くの場合、複数分をまたがって降った雨量に相当するため、ある1分間に1回のカウントが発生すれば1分間降雨量としては0.5mm/minとなるが、これは当該1分間に降った雨量を正しく示しているとは言えない、という点である。

なお、N分(時)間を付けず、単に降雨量と示す場合があるが、この場合は本定義によるものではないので注意願いたい。

N分(時)間降水量：

基本的に、N分(時)間降雨量と同様の考え方であるが、前述したように、この場合

には、降雪、降雹といった水が成分となる降雨以外の地上に降ってくるものも含んで観測している（ヒーターを装備し、雪や雹は溶けた水の量で観測）。

なお、N分(時)間降水量に対してN分(時)間降雨強度があるように、N分(時)間降水量があればN分(時)間降水強度があると考えるのが自然な考え方であるが、本研究は降雨による電波の減衰に関する研究であり、知りたいのは1分間降雨強度の確率分布であることから気象庁のN分(時)間降水量データが基となって求めた強度であっても、1分間降雨強度という表現を用いている。さらに言えば、第7章に詳細は示されているが、N分(時)間降水量データから1分間降雨強度のCDFを得る手法においては、豪雪地域のデータを扱う場合には、降雪の影響が入らないよう、冬季(11~3月)のデータは全て0として扱うこととしている。

### 2.3.2 降雨量の測定に関する留意事項

気象庁は、先にも示したように、全国千数百箇所に構築したAMeDASを用いて、1976年より1時間降水量の観測を、1994年より10分間降水量の観測を行っており、また、1995年より全国百数十箇所において1分間降水量の観測も行っている。これら降水量測定に用いているのは全て0.5mm 桁を用いた転倒桁型雨量計である。同雨量計は、2個のシーソー状に配置した桁が、雨を溜める 満杯 転倒 水を放出 雨を溜める、を交互に繰り返し、転倒ごとにパルス出力し、それをカウントするというものであり、分解能は桁の容量、即ち0.5mmとなる。また、転倒桁型雨量計は0.5mm 桁が転倒するタイミングを秒単位で記録することが可能であるが、気象庁から提供されるのは、1分間、10分間または1時間ごとの転倒桁の転倒回数から得られる0.5mmの整数倍で与えられる、各単位時間当たりの降水量のみである。

実際に測定を行って感じたことであるが、転倒桁型雨量計は、桁の大きさが異なるものも標準メニューとして用意されているが、実際に発生する最大級の降雨にも比較的小さい誤差で測定可能でありながら桁の容量が最も小さい(即ち、分解能が小さい)ものが0.5mm 桁の転倒桁型雨量計であり、このために気象庁が統一的にこれを採用していると考えられる。

得たいのは1分間降雨強度の確率分布であるのに対し、10分間及び1時間降水量は、もともと積分時間が異なるので、これらから1分間降雨強度の確率分布を精度良く得ることが簡単ではないことは当然のことと考えられたが、1995年から観測されるようになった1分間降水量からは、直接的に精度良く1分間降雨強度の確率分布が得られるのでは、との期待があった。しかしながら、前節にも示したように、また詳しくは第4章で示すが、測定器の分解能の粗さから、1分間降水量は、1分間ごとに降る雨量、即ち1分間降雨強

度を正しく表すものとなっておらず、違いも大きいため、精度良く 1 分間降雨強度の確率分布を得ることは簡単なことではなかった。

1 分間降水量データから 1 分間降雨強度の確率分布を精度良く得ることについては、後述するようにデータ処理で対処することになるが、そのための検討を行うに当たって、正確な 1 分間降雨強度測定が行えなくては正しいリファレンスが得られない。このために有効と考えられた測定器が水滴計数型降雨強度計（以下、単に降雨強度計という）である。これは、受雨部で集められた雨が光電管と受光部で挟まれた油槽中を一定の大きさの水玉状となって落下するのを検出し、パルス出力としてカウントするというものであり、分解能は公称 0.0083mm と、0.5mm 桁の転倒桁型雨量計（分解能は 0.5mm）に比べ格段に小さく、その名が示すとおり、1 分間降雨強度を精度良く得ることができるものである。しかしながら、このような利点がある一方、降雨強度計は、1 分間降雨強度が 100mm/h 程度を超えるような強雨において、油槽中を通過する水が水玉を形成できなくなるとともに、連なった水の流れが揺らぐなどにより、全くでたらめにカウントを行うこととなり、大きな誤差を生じてしまう、という欠点を有する。

以上のような点を考慮した上で、AMeDAS により得られる 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度の確率分布を精度良く得る方法について検討を行う必要があった。また、この検討や空間相関特性に関する検討に資するために行う降雨量の実測においては、転倒桁型雨量計、降雨強度計の特徴を考慮した上で、有効なデータが得られるよう測定を行う必要があった。

#### 2.4 既存降雨減衰確率推定法に関する留意事項

国内における既存の降雨減衰確率推定法としては、旧日本電信電話公社（現日本電信電話（株））が、全国の気象台で 1940～1950 年代に自記記録紙に記録された降雨量データから強雨期 3 ヶ月（7～9 月）等における 10 分間降雨量及び / または総降雨量を読み取り、それらを解析処理した成果として、1970 年に、地上回線用無線通信システムに対する降雨減衰確率推定法及び同推定法で用いるパラメータをとりまとめている<sup>[2]</sup>。パラメータとして与えられたのは、全国 1,642 地点の強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値である。そして、これが今日まで、国内における主たる降雨減衰確率推定法として、いくつかの修正が取り入れられつつ、用いられてきている<sup>[3]～[5]</sup>。

既存降雨減衰確率推定法の特徴を以下に示す。

分布モデルとしてガンマ分布を使用している<sup>[2]～[5]</sup>。

推定用パラメータとして、全国 1,642 地点の強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値と全国を 10 地域に分けて強雨期 3 ヶ月における降雨強度分布（ガンマ分布）

の形状パラメータ が与えられている<sup>[2]-[5]</sup>。

強雨期 3 ヶ月におけるパラメータを基に推定を行うので、得られた結果（強雨の強雨期 3 ヶ月における累積確率）から通年の累積確率に変換するための換算方法が用意されている（等価月数と換算式<sup>[3],[5]</sup>または直接換算式<sup>[12]</sup>）。

空間相関特性を用いた区間積分を行う。ただし、先にも述べたように、用いているのは 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性であって、1 分間降雨強度の  $n$  乗（ $n$  は降雨減衰係数のパラメータ）の空間相関特性ではない<sup>[2]-[5]</sup>。

の分布モデル、 のパラメータの与え方、及び の空間相関特性の与え方については、一概に優劣を論じることはできず、関係する内容を以降の章で詳細に論じる部分があるので、本章におけるこれ以上の記述は省くこととしたいが、 のパラメータ及び の換算方法について留意すべき点等を以降に示す。

#### 2.4.1 既存降雨減衰確率推定法用パラメータ

先に示したように、旧日本電信電話公社（現日本電信電話（株））は、1940～1950 年代に気象庁の観測システムにおいて自記記録紙に記録された降雨量データから、強雨期 3 ヶ月（7～9 月）等における 10 分間降雨量及び / または総降雨量などを読み取るとともに、総降雨量と 10 分間降雨量の 0.0075% 値との関係を求め、また、10 分間降雨量と 1 分間降雨強度の自己相関に関する研究結果に基づき 10 分間降雨量の 0.0075% 値と 1 分間降雨強度の同% 値との関係を求めるなどし、とりまとめた結果として、全国 1,642 地点の強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値を示した<sup>[2]</sup>。このうち 10 分間降雨量データに基づくのは 128 地点であり、残り 1,514 地点は総降雨量に基づくものである。（10 分間降雨量、総降雨量は測定データから直接得たものを扱っていると考えられたため降雨量と記述し、1 分間降雨強度については、原文では 1 分雨量と記しているが、降雨減衰確率推定に用いるパラメータを求めていることから 1 分間降雨強度を求めているものと考え、そのように記すのが適当と考えた。）

この旧日本電信電話公社（現日本電信電話（株））による研究において、強雨期 3 ヶ月の 10 分間降雨量の 0.0075% 値から同 1 分間降雨強度の同% 値への変換については、1 分間降雨強度の自己相関特性が時間の指数関数で表されるとして検討を進めた上で、強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の 0.0075% 値  $R_{HR3M1m0.0075\%}$  [mm/min] は同 10 分間降雨量の同% 値  $R_{HR3M10m0.0075\%}$  [mm/10min] から、

$$R_{HR3M1m0.0075\%} = 0.113 \cdot R_{HR3M10m0.0075\%} \quad [\text{mm/min}] \quad (2-15)$$

という関係で求められるとしている<sup>[2]</sup>。なお、近年の細矢の研究では 1 分間降雨強度の自己相関特性は時間の平方根の指数関数で精度良く表されるとしている<sup>[12]</sup>。また、強雨期 3

ヶ月の総降雨量  $R_{HR3MT}$  [mm] から同 1 分間降雨強度の 0.0075% 値  $R_{HR3M1m0.0075\%}$  [mm/min] への変換については、強雨期 3 ヶ月の総降雨量  $R_{HR3MT}$  [mm] と同 10 分間降雨量の 0.0075% 値  $R_{HR3M10m0.0075\%}$  [mm/10min] との関係をもとに最小二乗法を用いて求め、

$$R_{HR3M10m0.0075\%} = 0.37 \cdot R_{HR3MT}^{0.55} \quad [\text{mm/10min}] \quad (2-16)$$

で表せるとし、さらに先の強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の 0.0075% 値  $R_{HR3M1m0.0075\%}$  [mm/min] は同 10 分間降雨量の同 % 値  $R_{HR3M10m0.0075\%}$  [mm/10min] の 0.113 倍となるという関係をあわせて、強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の 0.0075% 値  $R_{HR3M1m0.0075\%}$  [mm/min] が同総降雨量  $R_{HR3MT}$  [mm] から、

$$R_{HR3M1m0.0075\%} = 0.0418 \cdot R_{HR3MT}^{0.55} \quad [\text{mm/min}] \quad (2-17)$$

という関係で求められるとしている<sup>[2]</sup>。

公表されている情報の範囲では深く論じるに限界があるが、一般的には積分時間の違いが大きいほど変換誤差が大きくなると考えられ、特に総降雨量が基となっているケースの誤差が懸念される場所である。

さらには、近年、地球的規模での二酸化炭素の増大による温暖化現象、大都市圏及びその周辺における都市熱等によるヒートアイランド現象などに代表されるような、雨の降り方、頻度等に直接影響を与えるような気象環境の変化が見られるようになり、1940～1950 年代の観測データに基づくものでは、このような観点からも十分な精度が確保できない可能性が懸念される。

#### 2.4.2 降雨減衰確率推定法用パラメータにおける年変動の考慮

既存降雨減衰確率推定法用パラメータとして与えられている強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の 0.0075% 値は、長期間の降雨の平均化された確率分布から求められたものであり、これを基に得られる降雨減衰確率は平均値的な条件のみである（筆者の知る限り、諸外国を含めて、これまでの全ての推定法に共通して言える点である）。この場合、平均 2 年に 1 回は得られた条件を満足しない事象が発生しうると考えられる。近年、特に準ミリ波・ミリ波帯が加入者系回線用としても用いられるようになってくると、回線品質と伝搬路の状態との関係が利用者にわかり易く、企業系利用者からは、降雨による回線断が比較的長時間になった場合などに、特に強いクレームが電気通信事業者に寄せられる（例えば、設備障害のように全く予測できない偶発的なものでなく、しかも自然界で必ず発生するものが原因ならば、もっと影響を受けないようにすべき）など、降雨減衰確率推定法の精度に対する要求が従来以上に高まっている。このため、降雨減衰確率推定法を用いた回線設計により得られる稼働率目標値が頻繁に満たされないということにならないよう、何らかの形でマージンのようなものを見込むようなことも行われている。しかし、例えそのようなこと

を行ったとしても、これまでの降雨減衰確率推定法では、マージン的なものを定量的に根拠ある形で見込めるような条件は用意されておらず、算出した稼働率目標が満たされない頻度などを予測する、というようなことはできなかった。この課題は、このような無線通信システムを運用する者として、是非とも解決したい課題であった。

これを改善するための有効な手段であると考えられるものに、年変動を考慮できるパラメータを用意するという考え方がある。それは、文献[15]で唐沢・松戸が安全係数の概念として提案しているものである。信頼性の評価尺度として用いられる MTBF (Mean Time Between Failure)<sup>\*2-5</sup> の考え方を適用し、着目する特定の累積確率における 1 分間降雨強度に対し、それを上回ることになるのは平均的に何年に 1 回となるかなど推定できるような条件を与えようというものである。

\*2-5： MTBF  $y$  年とは、平均  $y$  年連続して所要の品質（回線稼働率等）を満たす状態、または、平均  $y+1$  年に 1 回所要の品質を満たさない状態を意味する。

#### 2.4.3 強雨期 3 ヶ月の累積確率から年間の累積確率への換算

強雨期 3 ヶ月の累積確率から年間の累積確率に換算するための等価月数というパラメータについて、文献[3]の図 4（7 月～9 月の強雨と同じ強雨の年間における等価的月数）に、全国 150 箇所における値が示されている。強雨期 3 ヶ月（7 月～9 月）の累積確率  $P_{HR3M}[\%]$ 、等価月数  $M_e$  が与えられている場合、年間における累積確率  $P_Y[\%]$  が、

$$P_Y = P_{HR3M} \cdot \frac{M_e}{12} \quad [\%] \quad (2-18)$$

というように求められるとしている<sup>[5]</sup>。詳しくは後述するが、今回の研究で東京大手町周辺で降雨量の実測を行っており、ここで得られたデータから 1 年間の 1 分間降雨強度 CDF と強雨期 3 ヶ月の同 CDF の関係を求め、示したものが図 2-4 である。同図よりわかるように、年間通しての 1 分間降雨強度 CDF と強雨期 3 ヶ月の同 CDF との関係は、一定値で表せるものではない。このことは細矢が文献[12]でも示しており、札幌、仙台、東京、金沢、名古屋、大阪、広島、福岡の 8 都市での測定結果から得たものとして、1 分間降雨量の年間における累積確率  $P_Y[\%]$  と 1 分間降雨量の強雨期 3 ヶ月における累積確率  $P_{HR3M}[\%]$  との関係が  $P_{HR3M} = 1.648 \cdot P_Y^{0.908}$  によって与えられることを示している。この関係については、全国で確認されているわけではないため、今後も強雨期 3 ヶ月の累積確率から年間の累積確率の変換を必要とするならば、さらなる確認が必要と考える。特に、沖縄地域のように年間を通して多雨な地域においての確認は必要であろう。

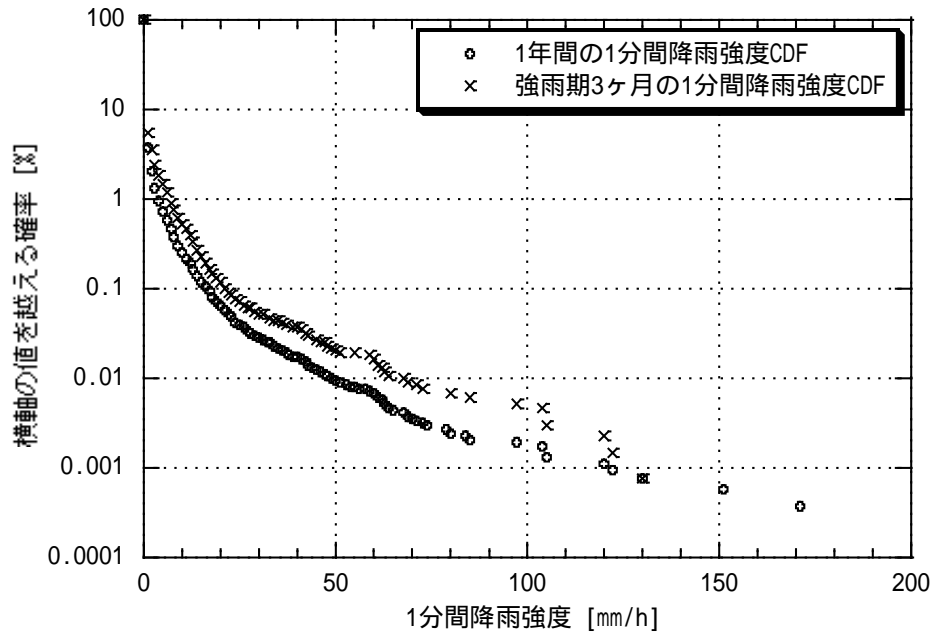


図 2-4 1 年間及び強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度 CDF の例  
 (1 年間は 2002/10/01 ~ 2003/09/30、強雨期 3 ヶ月は 2003/07/01 ~ 2003/09/30)

## 第3章 本研究における降雨量及び降雨減衰量測定

本研究では、気象庁の AMeDAS により得られる 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データが大きな役割を果たすが、これらのデータだけでは十分ではない。以降の章で示す、1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度の CDF を高精度に得るための手法の検討、空間相関特性の検討、及び降雨減衰確率推定法の推定精度評価等に用いるため、降雨量及び降雨減衰量の実測を東京大手町の周辺で行った。本章では、これら測定の構成、条件等について示す。

### 3.1 測定に用いた機材

#### 3.1.1 降雨量測定

2.3 節に示したように、気象庁が降水量測定に用いているのは全て 0.5mm 桁を用いた転倒桁型雨量計である。これは、分解能が 0.5mm (1 分間降雨強度で 30mm/h) と、分解能が公称 0.0083mm (1 分間降雨強度で 0.498mm/h) の降雨強度計と比較すると、かなり粗いが、測定誤差 (カウント誤差) が許容できる程度と考えられる点、気象庁が統一的に用いている点等を考慮し、降雨量測定は、これを主に用いて行うこととした。

また、0.5mm 桁の転倒桁型雨量計の分解能が粗いことを考慮し、降雨強度計も一部で用いることとした。

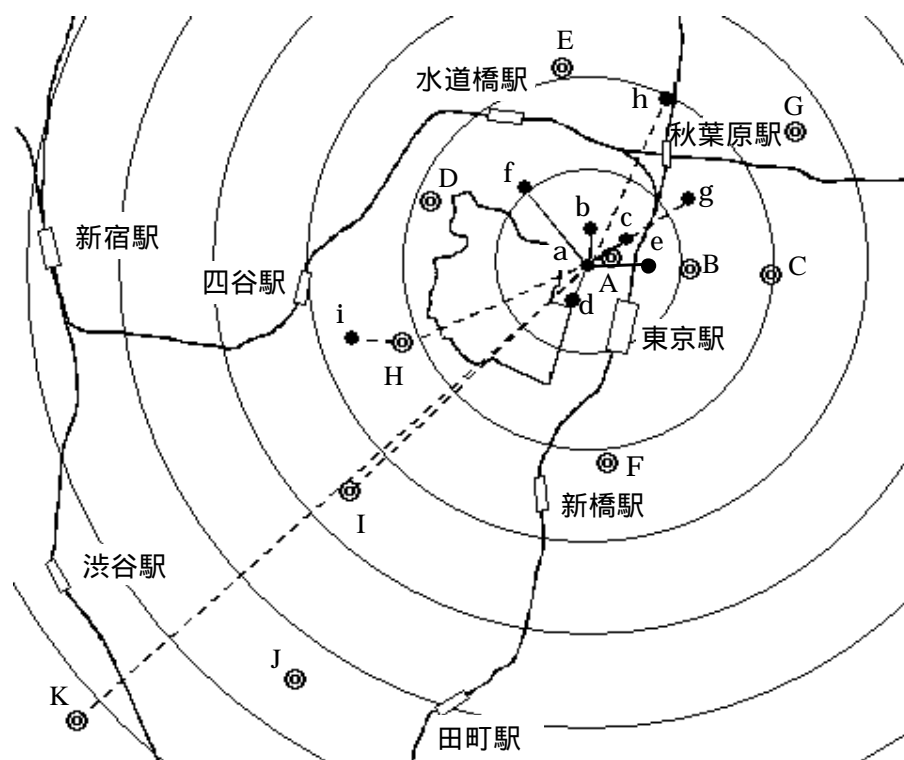
#### 3.1.2 降雨減衰量測定

降雨減衰確率推定法の推定精度評価を行うには、さまざまな距離、異なる周波数、異なる偏波で比較検討を行えることが望ましいと考えられた。このため、22GHz 帯と 38GHz 帯の無線通信システムを用い、さまざまな距離の伝搬路で、異なる偏波での設定も行い、測定を行った。

### 3.2 測定構成

本研究で用いた降雨量測定器並びに降雨減衰量測定用無線送受信機の配置を示したものが、図 3-1 である。測定は 2002 年 8 月 ~ 翌 2003 年 9 月を含む 1 年間強実施した。





：降雨量測定器単独設置及び無線送受信機との併設置位置（A～K）  
 （---及び— 終端地点が無線送受信機併設）

：無線送受信機のみ設置位置（a～i）

---：22GHz 帯無線リンク

—：38GHz 帯無線リンク

図 3-1 降雨量測定器及び降雨減衰量測定用無線送受信機の配置

### 3.2.1 降雨量測定器の配置

降雨量測定の目的の一つに、降雨減衰確率推定の重要な要素の一つである空間相関特性の検討がある。このため、短距離から中・長距離までの、さまざまな距離における空間相関係数を求め解析を行うために、図 3-1 に示すように、東京大手町の周辺、11 地点に気象庁検定済みの 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計を設置し、降雨量測定を行った。また、このうちの B 点には降雨強度計も設置した。正しい空間相関を知るためには 11 の降雨量観測点の時刻同期が重要であることから、同観測点からのデータを 1ヶ所で収集するデータ収集部に電波時計を接続し、正確な時刻情報に基づき動作させるとともに、毎日 1 回データ収集のタイミングで、データ収集部からの制御により、11 の降雨量観測点の時刻をデータ収集部の時刻に合わせる、という制御を行った。

図 3-1 に示す同心円は、距離の目安を与えるために、東京大手町の無線リンクが最も集中する地点 a を中心に 1、2、3・・・7km の距離の点を結んだものである。表 3-1 に、雨量計設置点の全ての 2 点の組合せにおける距離を示している。

表 3-1 雨量計設置点間距離 (単位: km)

設置点	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	0.85	1.67	2.00	2.08	2.19	2.32	2.41	3.75	5.66	7.49
B		0.83	2.85	2.60	2.21	1.88	3.14	4.25	6.05	8.02
C			3.66	3.15	2.64	1.62	3.94	4.93	6.63	8.68
D				1.95	3.31	3.86	1.57	3.36	5.34	6.67
E					4.22	2.51	3.38	5.13	7.12	8.59
F						4.08	2.45	2.54	4.02	6.17
G							3.14	6.05	7.90	9.80
H								1.80	3.78	5.25
I									2.00	3.76
J										2.30

### 3.2.2 降雨減衰量測定用無線送受信機の配置

降雨減衰量測定は、図 3-1 の破線 (22GHz 帯) 及び実線 (38GHz 帯) で結んだ位置に 11 対向の無線リンクを設定し、秒単位で受信レベルを測定した。無線リンクの設定条件を表 3-2 に示す。得られた秒単位の受信レベルから平常時受信レベル (無線機の送信レベル、受信利得等の変動による平常時受信レベルの変動を考慮) との差分として減衰量を求めた。

表 3-2 無線リンク設定条件

区間	周波数帯	周波数[GHz]	偏波	区間距離[km]
a-K	22GHz 帯	22.2975	垂直偏波	7.28
a-I		22.2825	垂直偏波	3.49
a-H		22.3	垂直偏波	2.2
a-h		22.2775	水平偏波	1.93
a-g		22.2925	水平偏波	1.32
H-i		22.89	水平偏波	0.57
a-f		38GHz 帯	38.1925	垂直偏波
a-e	38.19		垂直偏波	0.65
a-d	38.185		垂直偏波	0.44
a-c	38.1975		垂直偏波	0.43
a-b	38.2025		水平偏波	0.4

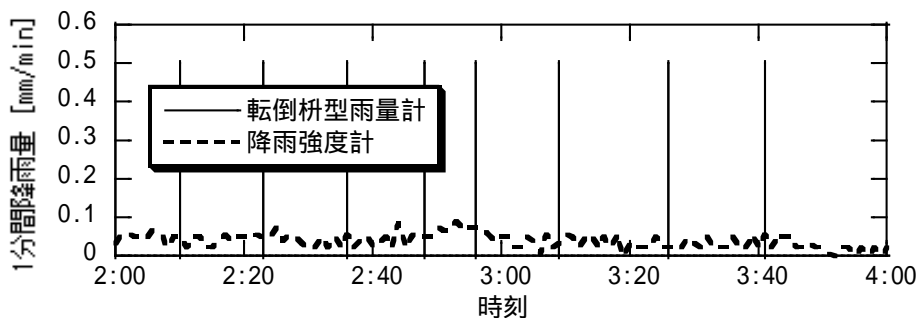
## 第4章 気象庁降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得る手法 - 1分間降水量データから -

1分間降雨強度の確率分布の精度良い推定のためには、より短い周期で記録される降雨量データが有効であり、その意味で全国百数十箇所で入手可能な AMeDAS の1分間降水量データが効果的に利用できることが重要である。また、1分間降水量データから1分間降雨強度の確率分布が精度良く得られれば、同一地点、同一期間における10分間及び1時間降水量データも得られるため、10分間及び1時間降水量データから1分間降雨強度CDFを得るために必要となる異積分時間降雨強度確率分布変換手法(第7章参照)の検討につなげることも可能となる。本章は、以上のような点を考慮して行った、1分間降水量データから精度良く1分間降雨強度CDFを得るための手法に関する検討結果について示す。

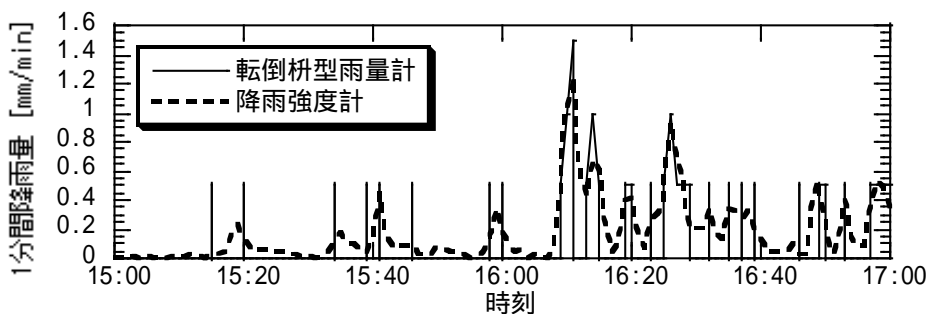
### 4.1 検討における留意点

#### 4.1.1 1分間降水量と1分間降雨強度との関係

図4-1(a)及び(b)は、図3-1のB点に設置した0.5mm 桁の転倒桁型雨量計を用い1分間降水量と同様な条件で得た1分間降雨量と、同一地点に設置した降雨強度計を用いて得た1分間降雨量とを、時系列で比較する形で示したものである。



(a)弱雨時の例



(b)強雨時の例

図4-1 転倒桁型雨量計測定データ(1分間降水量相当)と降雨強度計測定データの比較

図 4-1 において、分解能が 0.0083mm の降雨強度計測定データは、ほぼ実降雨を忠実に表していると考えられるが、転倒柵型雨量計測定データは、特に(a)の、1 分間ごとの降雨量が 0.5mm とならない弱雨時において顕著なように、分解能が 0.5mm であることにより、雨が降っていても降雨量がカウントされない 1 分もあれば、わずかな降雨量 (0.5mm の数分の一または数十分の一) にもかかわらず 0.5mm がカウントされる 1 分があるというように、2.3.1 節でも述べたように、1 分間ごとに降った雨量を正しく表していないことが明らかである。

#### 4.1.2 1 分間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を得る場合の誤差

前節の内容から明らかなように、0.5mm 柵の転倒柵型雨量計を用いて測定される 1 分間降水量は 1 分間ごとに降った雨量を正しく表すものとはなっていない。1 分間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を得る場合の誤差等について検討するためには、正しいと見なせる参照データが必要である。前節では、同一地点に設置した転倒柵型雨量計と降雨強度計により得られた 1 分間降雨量を比較したが、降雨強度計には、2.3.2 節に示したように、1 分間降雨強度が 100mm/h 程度以上の強雨時において大きい測定誤差を生じる、という問題があり、全てのレンジでこれらを比較に用いることはできない。このため、元データを同一のものとするにより比較を可能とすることを考えた。具体的には、降雨強度計を用いて実測した 2002 年 9 月 21 日 ~ 2003 年 9 月 20 日の 1 年間のデータを用い、同データから得られた 1 分間降雨量 (降雨強度計は 0.0083mm で 1 カウントであるので、1 分間ごとのカウント数に 0.0083mm を乗じて得たもの [mm/min]) を mm/h に単位変換して得た、ほぼ 1 分間降雨強度を正しく表していると考えられる CDF (以下、降雨強度計 CDF という) と、擬似的に 1 分間降水量相当データを作成し (降雨強度計 1 カウントごとに 0.0083mm を積算し、0.5mm の整数倍となるたびに 0.5mm カウント発生とし、これを 1 分ごとにまとめ 0.5mm を乗じて得たもの [mm/min])、これを mm/h に単位変換して得た、中身は 1 分間降雨強度とは言えず、単位のみ 1 分間降雨強度と同様にした CDF (以下、1 分間降水量相当 CDF という) とを比較する形で検討を行った。これらを示したものが図 4-2 である。同図より、2 つの CDF は全く異なるものとなることがわかる。これは、1 分間降雨強度は、降雨強度計 CDF が示すように、さまざまな値をとるが、1 分間降水量相当 CDF は、分解能 0.5mm に対応する 30mm/h の倍数、即ち 30、60、90・・・mm/h の離散値となり、かつ離散値以外の値がこれら離散値に集約されて現れるためである。離散値以外の値がとりえる数は 1 分間降雨強度の値が小さいほど多いため、離散値の中で最も値が小さい 30mm/h の点において、両者の差が最も大きい。

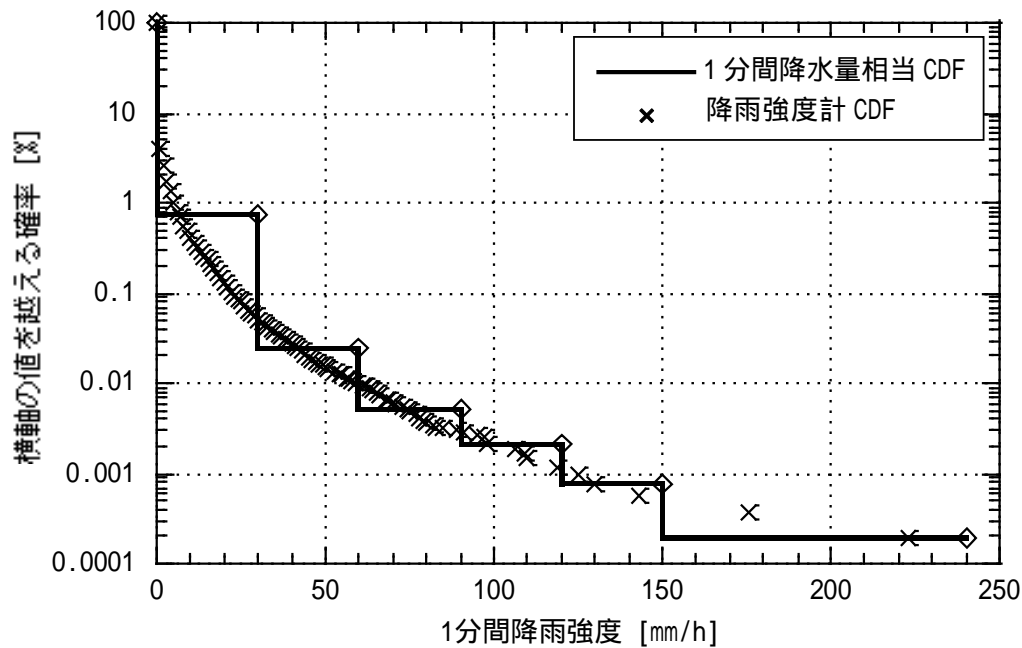


図 4-2 降雨強度計 CDF (1 分間降雨強度 CDF に相当) と 1 分間降水量相当 CDF (1 分間降水量データを単に単位変換して得た CDF に相当) の比較

以上で明らかのように、1 分間降水量は 1 分間ごとの降雨量を正しく表してはいないために、単純な単位変換では 1 分間降雨強度 CDF と呼べるものとはならない。言い換えれば、1 分間降雨強度 CDF を得ることは、正に 1 分間ごとに降った雨量を得ることに帰着する。このために考案した手法について以降に示す。

## 4.2 1 分間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を精度良く得る手法

### 4.2.1 分単位均し分配処理

#### 4.2.1.1 均し分配処理の考え方及び分単位均し分配処理

1 分間降水量データから精度良く 1 分間降雨強度 CDF を得るための処理に関する重要な示唆が図 4-1 の例などから得られる。

数分から数十分かけて 0.5mm の量となるような弱い雨が、実降雨においては、大きな割合を占めると考えられるが、このような弱雨の場合、図 4-1(a)の降雨強度計実測値に見られるように、1 分間ごとに降る雨量の変化はあまり大きくない。0.5mm 桁の転倒桁型雨量計により得られる 1 分間降雨量は、4.1.1 節に示したように、分解能が 0.5mm であるために、誤差が大きく、0.5mm カウントが、数分から数十分に 1 回、散発的に現れるというように、1 分間ごとに降る雨量を正しく表せていないが、0.5mm カウントパルス(以下、単に 0.5mm パルスまたはパルスという)の発生は、先行するパルス発生以降の降雨量の累積が 0.5mm となったことを示していることから、0.5mm をパルス発生間隔で均すこと

によって 1 分間ごとに降る雨量を概ね正しく表すことができると考えられる。また一方、図 4-1(b)のような比較的強い雨の場合は、1 分間ごとに降る雨量は、弱雨時に比し変動が大きいと考えられるが、0.5mm パルスの発生間隔が短いということを考慮すれば、この場合も、0.5mm をパルス発生間隔で均した量によって 1 分間ごとに降る雨量を概ね正しく表すことができると考えられる。

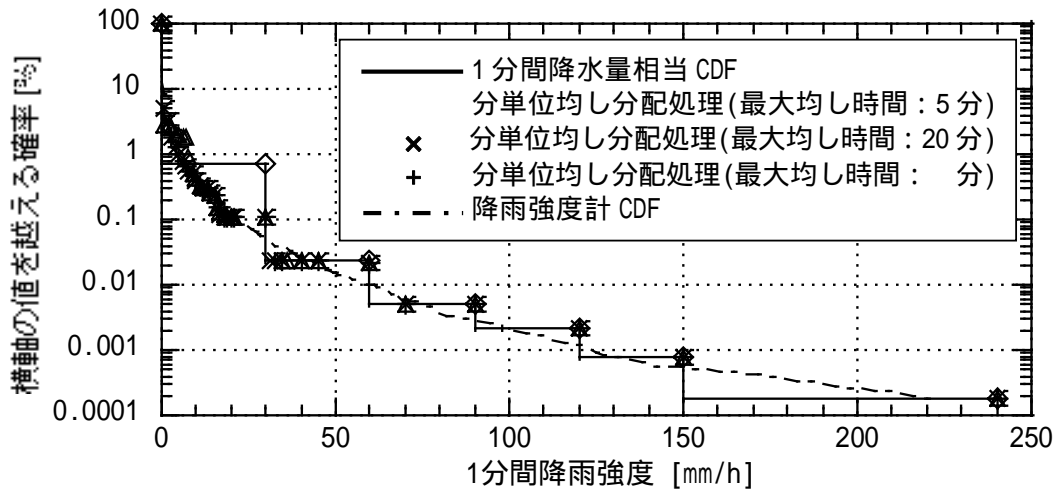
このように、時間の長短に関わらず、継続して雨が降っている場合には、0.5mm をパルス発生間隔で均すことによって、1 分間ごとに降る雨量、即ち 1 分間降雨強度を概ね正しく得ることができると考えられる。これは、転倒枱型雨量計の分解能 0.5mm を、その溜まるに要する時間に均し分配すること(枱により量子化された降雨量の増分を分単位で線形補間することに相当する)を意味し、以下、これを均し分配処理と呼ぶ。また、単に分単位で均し分配を行う場合を分単位均し分配処理と呼ぶ。

#### 4.2.1.2 最大均し時間

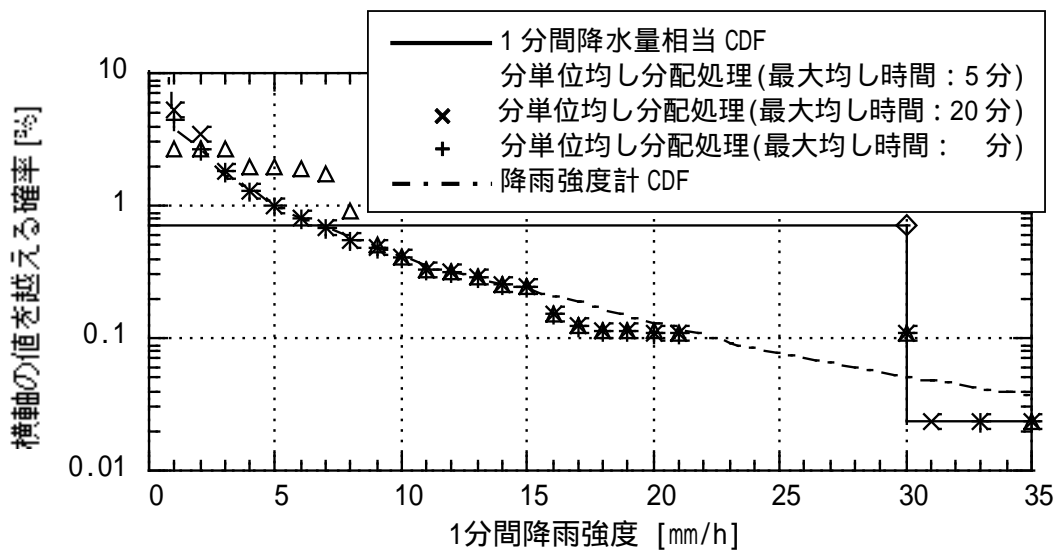
分単位均し分配処理を考える場合、原理的には雨が降っている時間分だけ均すことが理想的である。しかしながら、1 分間降水量データには、それを知るための十分な情報は含まれていない。

一般的に雨の降り方を考えた場合、0.5mm パルスの間隔が長いほど途中で雨が中断している可能性が高くなる。例えば、パルス間隔が日単位の長さであるようなケースを考えた場合、その間ずっと雨が継続していたと考えるよりは、そのうちの数十分から数時間程度の間雨が降っていたと考えるのが自然である。そして、このようなケースにおいても、パルス間隔全体に対して均し分配を行うと、弱雨時の 1 分間降雨強度を実際より小さく見積もってしまう可能性が考えられた。そこで、0.5mm パルスの間隔が長い場合において、均し分配を行う時間に上限を設けることが考えられた。以下、これを最大均し時間(単位を分とする)と呼ぶ。具体的には、

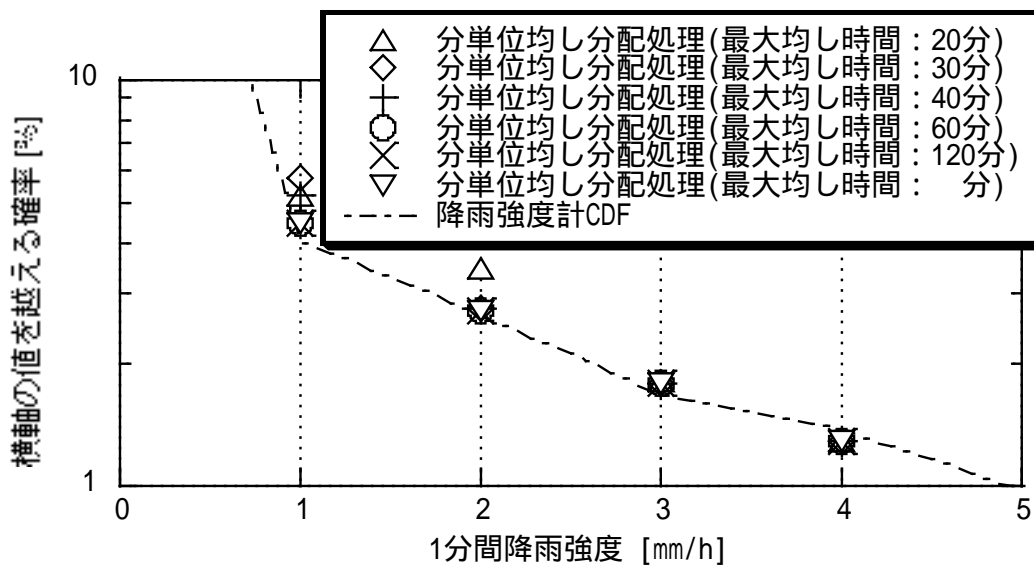
- 時系列データ上で、0.5mm パルスの発生間隔が最大均し時間以下であれば全パルス間隔で均し分配を行う、
  - パルス間隔が最大均し時間を超える場合(先行パルスが無い場合を含む)は、後続パルスから最大均し時間分遡った時点までの間のみ均し分配を行い、それより前、先行パルス(先行パルスが無い場合は開始点)までの間については分配を行わない、
- というように処理を行う。降雨強度計実測データから作成した擬似 1 分間降水量データに対し、種々な最大均し時間を設定し、分単位均し分配処理を行った後、単位を mm/h に変換し CDF を求めたものを、降雨強度計 CDF と比較する形で、図 4-3(a)~(c)に示す。



(a) 全横軸範囲



(b) 35mm/h 以下の弱雨の範囲に着目



(c) 5mm/h 以下のさらに弱い雨の範囲に着目

図 4-3 擬似 1 分間降水量  $T_p$  の分単位均し分配処理後の CDF と降雨強度計 CDF の比較

図 4-3(a)及び(b)より、分単位均し分配処理により 30mm/h の倍数の離散値に集約されていた成分が分離され、連続的な CDF になろうとするようすがわかる。図 4-3(a)～(c)は、図の見やすさのために、検討した全ての最大均し時間条件を示してはいないが、無限大の場合を含む種々な最大均し時間における検討の結果、

図 4-3(b)において、降雨強度計 CDF に対し最も良い一致を示している最大均し時間が無限大のケースからわかるように、分単位均し分配処理により降雨強度計 CDF に対し良い一致が得られるのは、15mm/h 以下の部分に限られる、

(以下、 $\Delta t$  は 15mm/h 以下の領域に関して)

最大均し時間が短すぎる場合は、図 4-3(b)の 5 分のケースに見られるように、十分な均し効果が得られず、降雨強度計 CDF に対し誤差が大きくなる、

最大均し時間を長くする方向では、図 4-3(b)のスケールでは、最大均し時間 20 分及び無限大において、降雨強度計 CDF に対し概ね良い一致を示すが、さらにスケールを拡大し、最大均し時間を 20 分以上で細かく示した図 4-3(c)で比較すると(20 分、30 分、40 分、60 分、120 分及び無限大)、最大均し時間が長くなるほど降雨強度計 CDF に対し良い一致を示し、60 分以上で違いがほぼ目立たなくなる、

ことが判明した。

擬似 1 分間降水量データに分単位均し分配処理を施して得た CDF が降雨強度計 CDF に対し良い一致を示すのが 15mm/h 以下に限られるのは、同均し分配処理の効果が生じるのは 0.5mm パルス発生が分単位で断続的になる場合であり、この条件が必ず満たされるのが 15mm/h 以下の部分となるためと考えられる。

また、最大均し時間は、大きくするほど降雨強度計 CDF に対し良い一致が得られるが、60 分以上では、ほとんど差が無くなり、最適値というものを見いだすことはできなかった。このため、以降の解析では、演算量を抑えつつも高精度を確保できるという観点から、60 分を採用することが適当であると考えた。

#### 4.2.1.3 分単位均し分配処理の限界

前節において、擬似 1 分間降水量データに対し分単位均し分配処理を行うことにより降雨強度計 CDF に対し良い一致が得られるのは、15mm/h 以下の領域に限られることがわかった。これは、擬似 1 分間降水量データが分単位の情報しか有していないがために、毎分連続してパルスが発生している場合には、分単位の均しでは均しの効果が得られないためである。分単位均し分配処理の限界を克服するには、0.5mm パルスが発生している 1 分間内でのパルスの秒位置を考慮した均し分配処理が必要であると考えられた。次の節では、この観点で考えられた秒単位均し分配処理について示す。



#### 4.2.2 秒単位均し分配処理

分単位均し分配処理の限界を克服するため、0.5mm パルスの秒単位での位置を与え、各パルス間隔の秒単位の時間で 0.5mm を均した後に 1 分間ごとにまとめ、1 分間降雨強度を求める、という処理方法について検討を行った。以下、これを秒単位均し分配処理と呼ぶ。

##### 4.2.2.1 1 分間内のパルスの分布が均等であるとした場合

0.5mm パルスの秒位置を与える最も簡便な考え方として、任意の 1 分間内のパルス間隔を一定とする方法がある。具体的には、パルスが 1 個の場合は当該 1 分の中央に、m 個の場合は当該 1 分を m 等分した各区間の中央に 1 個ずつあるとするものであり、以下、均等分布と呼ぶ。

具体的な処理は、計算を容易にするため、次のような考え方で行った。

- 0.5mm パルスが m 個の場合は当該 1 分を m 等分した区間の中央にそれぞれパルスを配置する。
- 各パルス点での累積降雨量を秒単位で補間した後、各時刻（分刻み）の差分をとって 1 分間降雨強度を求める。なお、パルス間隔が最大均し時間以上ある部分については、後続パルスから最大均し時間分遡った時点と先行するパルスとの間は、累積降雨量は変化させない。

降雨強度計実測データから擬似 1 分間降水量データを作成し、1 分間内のパルスの分布を均等分布とし、また、最大均し時間を 60 分として、秒単位均し分配処理を行った後に単位を mm/h に変換して CDF を求めたものを、同一最大均し時間条件の分単位均し分配処理後 CDF 及び降雨強度計 CDF と比較する形で示したものが図 4-4 である。

図 4-4 によれば、秒単位均し分配処理後の CDF は、分単位均し分配処理の場合に比し、全体的に降雨強度計 CDF に対する近似度が良くなっているが、まだ、部分部分では、降雨強度計 CDF が示す一定の傾向から外れるような部分が存在し、均しの不十分さを感じさせる。これは、均等分布ではパルスの位置が各 1 分間のパルス数によって決まり、秒単位均し分配処理によって得られる 1 分間降雨強度の各 1 分間ごとの値は当該 1 分間と前後の 1 分間のパルス数の関係によって決定されるが、実際の降雨では、瞬時瞬時の降雨強度は常に変化しており、パルス数の関係で表されるよりもっと多様な変化をするものが、表しきれていないことによる、と考えられる。

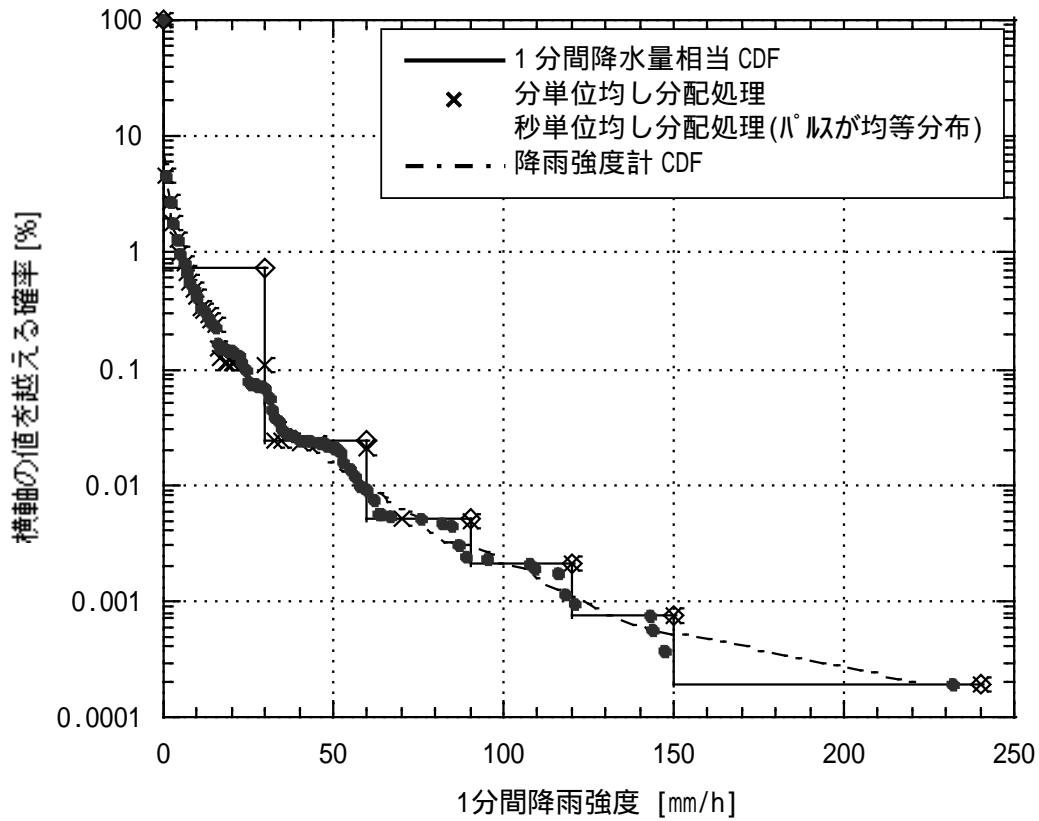


図 4-4 秒単位(パルス均等分布)・分単位均し分配処理後の CDF と降雨強度計 CDF との比較

図 4-5 は、1 分間内のパルスの分布が均等分布であるとした秒単位均し分配処理による均し効果が得られない例の一つとして、2002 年 10 月 1 日に観測されたケースを示したものである。

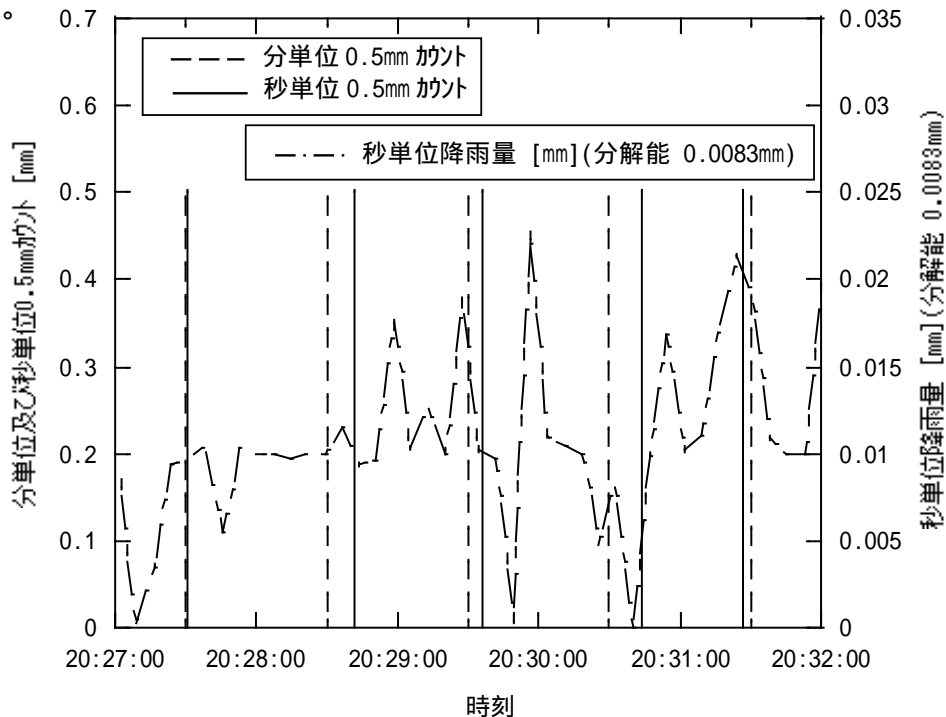


図 4-5 分単位 0.5mm 検出と秒単位 0.5mm 検出の比較

具体的には、毎分 1 パルスが発生した場合の例であり、時々刻々の秒単位の降雨量の変化（0.0083mm の 1 秒間ごとのカウント数に 0.0083mm を乗じたものを 3 次元スプライン補間して示した）とともに、分単位で 0.5mm を求め、均等分布でパルスを配置（この例の場合は、各 1 分の中央にパルスを配置）した場合と、秒単位で 0.5mm を求めパルスを配置した場合を、比較する形で示している。この例の場合、分単位で 0.5mm を求め、均等分布でパルスを配置したものは、パルス間隔は全て同じであるのに対し、秒単位で求められた 0.5mm パルスの時間間隔はそれぞれ異なる。このため、後者の場合は、秒単位で均した後に 1 分間ごとにまとめた降雨量はそれぞれ異なった値を示すのに対し、前者の場合のそれは、全て同一値を示すこととなり、この例のような場合、前者では均し効果は得られない。

このように、秒単位均し分配処理を用いるとしても、0.5mm パルスの秒位置を均等分布として与えるという方法では、1 分間降雨強度 CDF を精度良く得るには、まだ十分ではないことがわかった。これを改善するには、上述の隣接する時刻（分刻み）間のパルスの位置関係が特定の条件に絞られることを避けることが必要であり、そのためには、より実際の降雨に近い形でパルスの秒位置を与えることが必要であると考えられた。次の節では、この観点で考えられたパルス位置を一様乱数を用いて与える秒単位均し分配処理について示す。

#### 4.2.2.2 1 分間内のパルスの分布がランダムであるとした場合

前節に示した課題を克服するために、パルスが発生した任意の 1 分間におけるパルス位置を一様乱数を用いて与えるという方法が、時々刻々変化する降雨に対して、1 分間スケールでの降雨強度の揺らぎを統計的に扱う一つの候補として考えられた。自然界の現象である各降雨イベントにおいて、いつ降り始めて、どのような強弱の変動で、どの程度継続するかなどは、それぞれ独立な事象であり、任意の 1 分間内における 0.5mm をカウントするパルスの発生タイミングはランダムとなる、と仮定したのである。

具体的には、0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）ごとにパルス発生位置を秒単位でランダムに与え、複数分をまたがって溜まった 0.5mm について、各時刻（分刻み）ごとの経過した秒数の割合に応じて 0.5mm を分配するということになるが、実際の処理では計算を容易にするため、一様乱数を用いて先行するパルスが発生した時刻（分刻み）への降雨量の分配量を直接決定した後に補間する、という方法を用いた。図 4-6 は処理のイメージを示したものである。

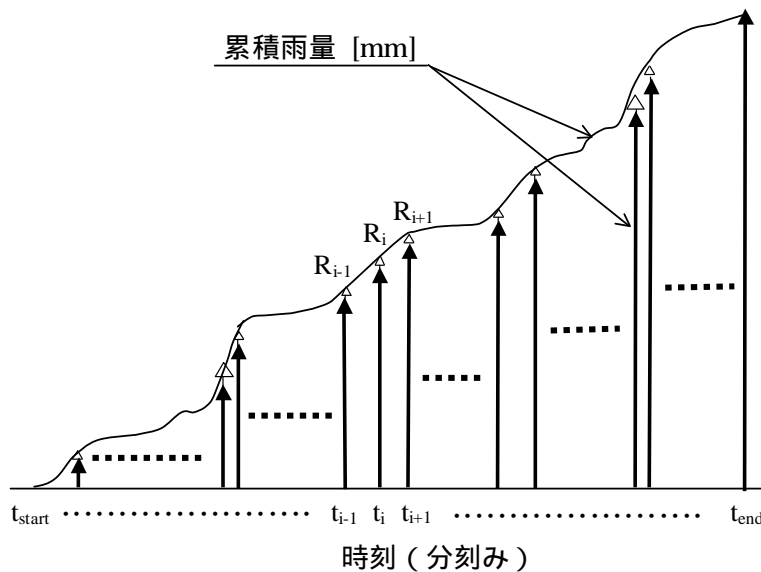


図 4-6 乱数補正を用いた秒単位均し分配処理のイメージ図

以下に、図 4-6 に示した秒単位均し分配処理の考え方を簡単に示す。

- 図 4-6 は均し分配処理の開始時点、即ち降雨量 0 の時点から終了時点までを示している。太線矢印は、瞬間瞬間の累積降雨量を示し、0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）のみに置かれている。  
太線矢印の上にある細線白抜き矢印は、後続する太線矢印がある時刻（分刻み）、即ち 0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）からの分配された降雨量を示し、後続が存在しない最後の太線矢印には分配が無いいため、細線白抜き矢印も無い。  
なお、太線矢印の前後にある太い破線は、その部分に太線矢印、即ち 0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）があることを略記している。
- 太線矢印は、0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）において、その直前までの累積降雨量に当該時刻（分刻み）においてカウントされた降雨量を加算した累積降雨量を示している。当該時刻(分刻み)でカウントされた降雨量のうち最初の 1 パルス分 0.5mm が、先行する 0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）内の最後のパルス発生時点（秒刻み）以降、複数分をまたがって溜まった降雨量であるため、0.5mm の一部を、先行する 0.5mm パルスが発生した時刻（分刻み）に分配する。具体的には、0.5mm をパルス間隔（パルス間隔が最大均し時間を越える場合は最大均し時間を用いる）で除した値が先行する時刻（分刻み）でとりえる最大値とし、これに一樣乱数を係数として乗じて加算することとし、次式のように与える。

$$R'_{i-1} = R_{i-1} + \frac{0.5}{\Delta t} * \text{Rand.} \quad (4-1)$$

$$\text{ただし、 } t = \begin{cases} t_i - t_{i-1} & (t_i - t_{i-1} \leq t_{d-max} \text{ の場合}) \\ t_{d-max} & (t_i - t_{i-1} > t_{d-max} \text{ の場合}) \end{cases}$$

$t_{i-1}$ 、 $t_i$  : 0.5mm パルスが発生した  $i-1$  番目及び  $i$  番目の時刻(分刻み)

$t_{d-max}$  : 最大均し時間[分]

$R_{i-1}$  :  $i-1$  番目の 0.5mm パルスが発生した時刻(分刻み)の均し分配される前の累積降雨量[mm]

$R'_{i-1}$  :  $i-1$  番目の 0.5mm パルスが発生した時刻(分刻み)の均し分配された後の累積降雨量[mm]

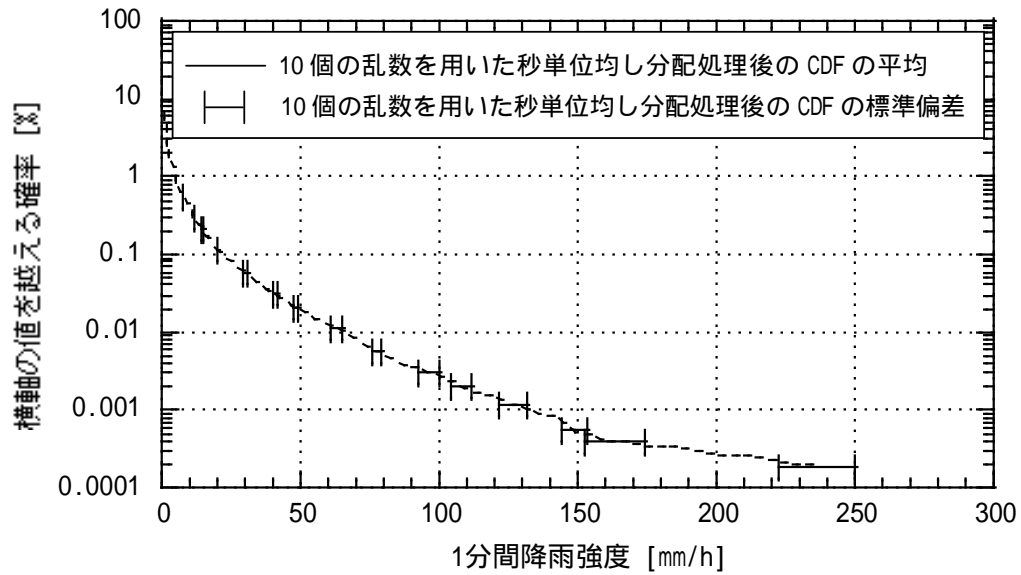
Rand. : 0 ~ 1 の一様乱数

- このようにして修正した各パルス点での累積降雨量を秒単位で補間した後、各時刻(分刻み)の差分をとって 1 分間降雨強度を求める。なお、パルス間隔が最大均し時間以上ある部分については、後続パルスから最大均し時間分遡った時点と先行するパルスとの間は、累積降雨量は変化させない。

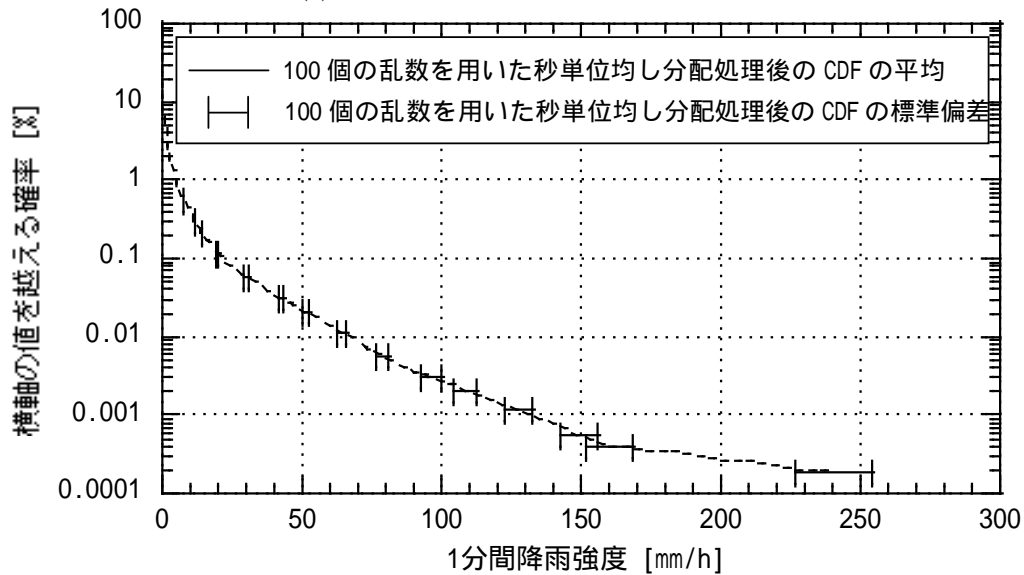
均し分配処理により、最後の 0.5mm パルスが発生した時刻(分刻み)より前の時刻(分刻み)においては、累積降雨量に正のバイアスが生じるように理解されることが想定される。しかしながら、そのような場合であっても、考察の対象としている 1 分間降雨強度は累積降雨量の差分であり、均し分配が一様分布に基づくものである限り、同降雨強度に影響を及ぼすこととはならない。

これは、一様乱数を用いた補正を行ってパルスの秒位置を与え、パルス間隔が長すぎる場合に雨の仮定の降り始めを最大均し時間という条件で与え、その上で先に野本他が示した、単調増加保証補間による降雨強度算出法<sup>[23]</sup>を適用したものと考えることができる。各パルス間の補間には、累積降雨の単調増加性を維持しつつ滑らかな補間を行えるよう、区分的 3 次 Hermite 多項式補間(以下、PCHIP: Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial という)を用いている<sup>[23]</sup>。なお、先には説明を略したが、同一条件での比較となるよう、図 4-3 及び図 4-4 に示した処理においても PCHIP を用いた補間を行っている。

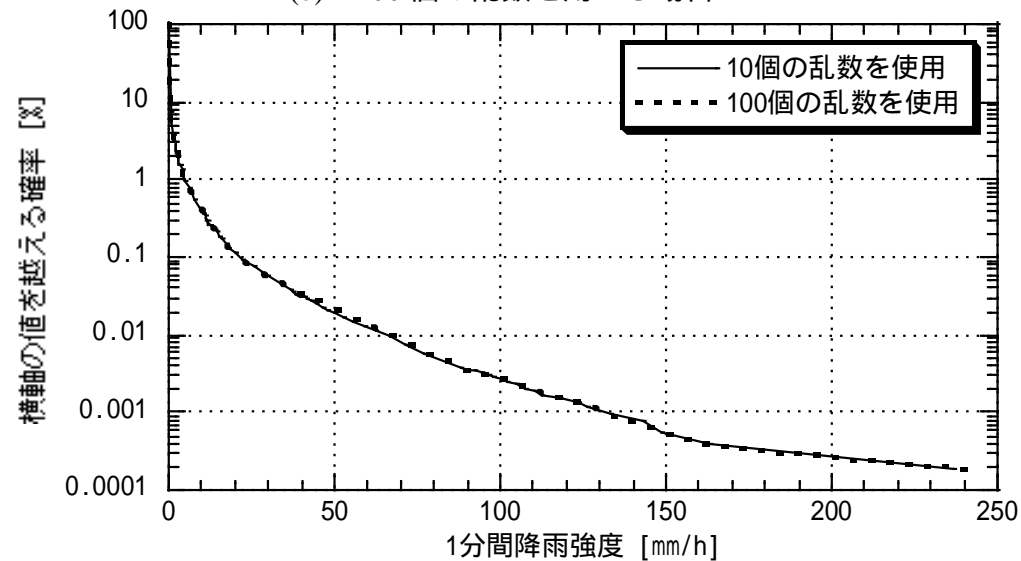
1 分間降水量の各パルス位置を秒単位で与えるような乱数パターンは無数と言ってよいほどのパターンが得られるが、無作為に選んだ 1 つのパターンを用いて実際の 1 分間降雨強度の変化を忠実に再現できるというものではないことは容易に想像できる。そこで複数の乱数パターンを用いて秒単位均し分配処理を行ったものの平均をとることが考えられた。降雨強度計実測データから擬似 1 分間降水量データを作成し、最大均し時間を 60 分として、10 個と 100 個の乱数パターンを用いて秒単位均し分配処理を行い、単位を mm/h に変換して CDF を求め、さらにその平均値カーブを求めたもの(同一累積確率値における 1 分間降雨強度の平均をとったもの)を、図 4-7(a) ~ (c) に示す。



(a) 10個の乱数を用いる場合



(b) 100個の乱数を用いる場合



(c) 10及び100個の乱数使用の場合の平均値カーブの比較

図 4-7 秒単位均し分配処理(10及び100個の乱数使用)後 CDFの平均値カーブと標準偏差

図 4-7(a)及び(b)には、10 個と 100 個の乱数パターンを用いて秒単位均し分配処理を行い求めた CDF の平均値カーブに対し、各 CDF のバラツキ度合いがわかるよう、適当な間隔で平均値カーブを挟んで降雨強度方向で求めた標準偏差の幅(  $\pm 1$  )を示している。特定の乱数パターンを用いた秒単位均し分配処理によって得られる 1 分間降雨強度 CDF が、偶然、降雨強度計 CDF に近いものとなることも考えられるが、反対に起こりえるバラツキの範囲の中で、降雨強度計 CDF とは平均値カーブを挟んで大きく離れて位置するような関係になるケースも考えられる。これに対し、平均値カーブであればバラツキの中央に位置するため、降雨強度計 CDF との誤差が大きくなりすぎるのを抑えることができる。したがって、乱数パターンによる偏りを避けるという意味で、平均値カーブを用いることが望ましいと考えられる。

図 4-7(c)には、10 個の乱数パターンを用いる場合と 100 個の乱数パターンを用いる場合について、平均値カーブの比較を示しているが、両者は極めて良い一致を示している。したがって、乱数パターンの数については、演算量を抑えるという点を考慮すると、10 個の乱数パターンを用いることでよいと考えられる。

図 4-8 に、図 4-7(a)で示した、擬似 1 分間降水量データに対し 10 個の乱数パターンを用いて秒単位均し分配処理を行った後に CDF の平均値カーブを求めたものと、降雨強度計 CDF とを、比較する形で示す。

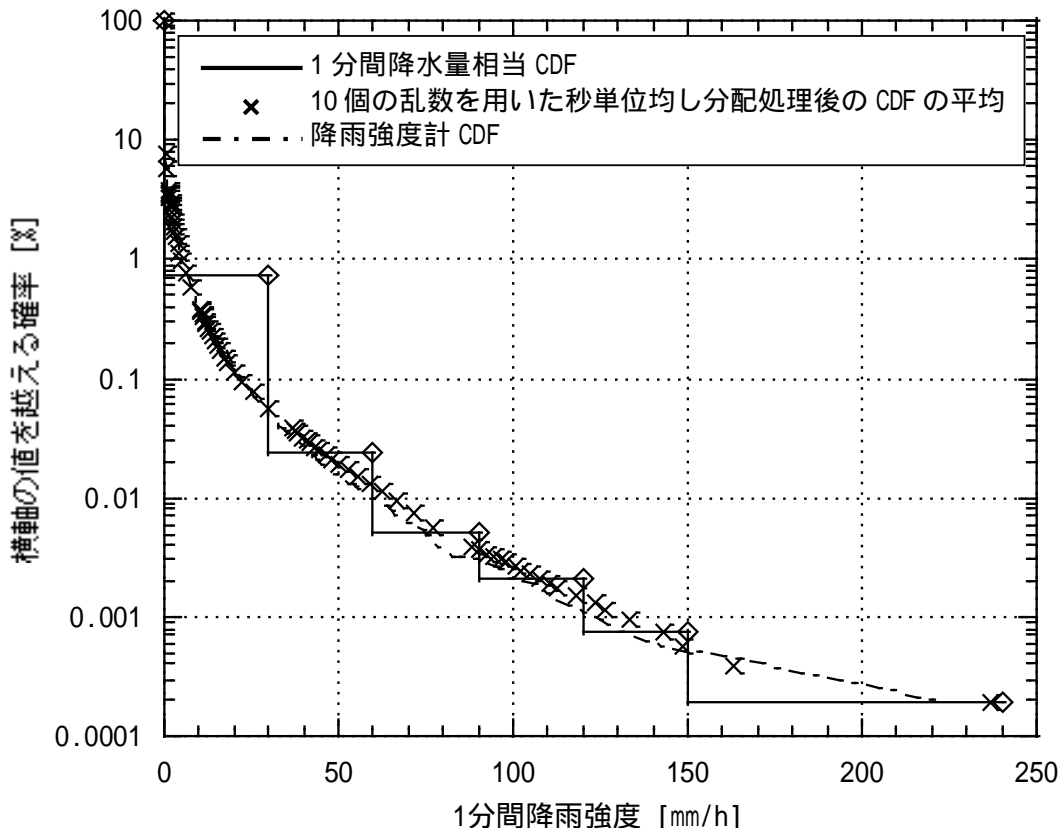


図 4-8 秒単位均し分配処理(10 個の乱数使用)後 CDF の平均値カーブと降雨強度計 CDF

図 4-8 において、擬似 1 分間降水量データに対し 10 個の乱数パターンを用いた秒単位均し分配処理を行った後に CDF の平均値カーブを求めたものと、降雨強度計 CDF とは、広い範囲で良い一致が見られており、手法は適正なものであると考えられる。

図 4-9 は、最悪月データとして 2002 年 9 月 21 日～同年 10 月 20 日の 1 ヶ月間の降雨強度計実測データから擬似 1 分間降水量データを作成したのに対し、先と同様に、10 個の乱数パターンを用いた秒単位均し分配処理を行った後に CDF の平均値カーブを求めたものと、降雨強度計 CDF とを比較する形で示したものである。

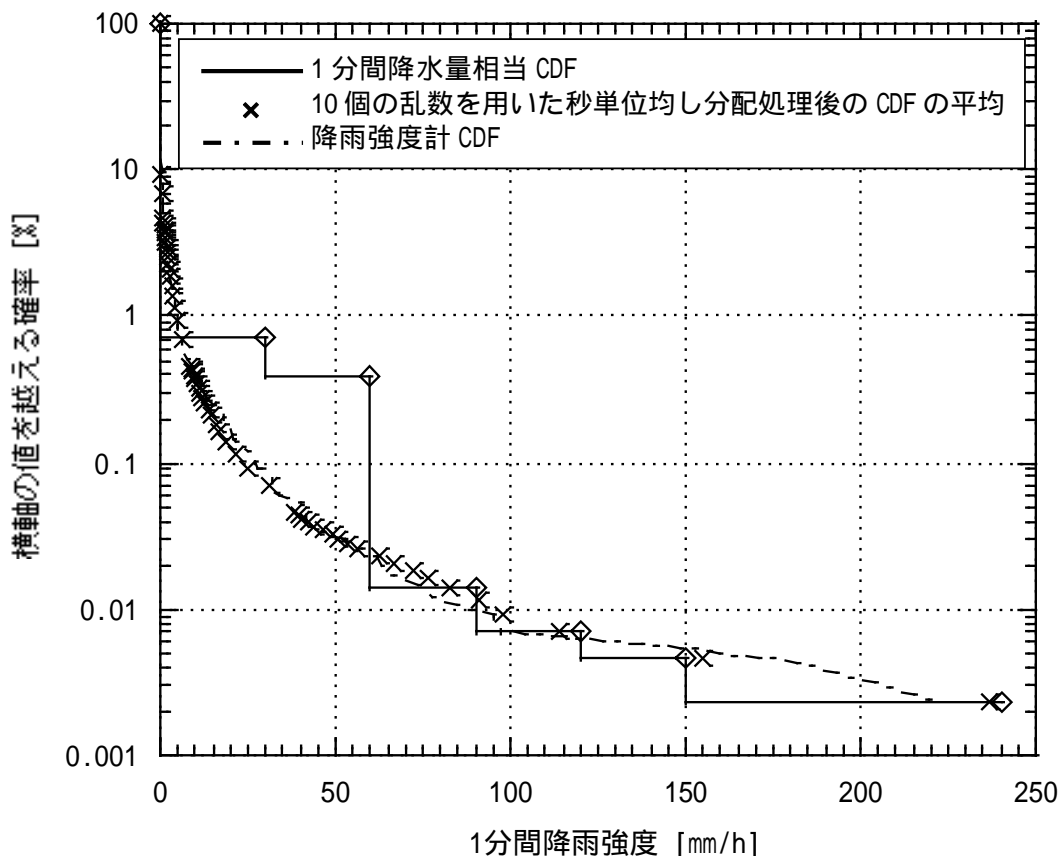


図 4-9 秒単位均し分配処理(10 個の乱数使用)後 CDF の平均値カーブと降雨強度計 CDF (最悪月データ)

図 4-9 より、1 ヶ月間のデータを用いた場合でも、10 個の乱数パターンを用いた秒単位均し分配処理後の CDF の平均値カーブを求めることにより、1 分間降雨強度 CDF を精度良く再現できることがわかる。

以降では、特に断らない限り、10 個の乱数パターンを用いた秒単位均し分配処理後の CDF の平均値カーブを求める処理を乱数補正秒単位均し分配処理という。



### 4.3 1 分間降水量データから自己相関特性を得る場合の均し分配処理の有効性

2.4.1 節に示したように、旧日本電信電話公社（現日本電信電話（株））が既存の地上回線用無線通信システムに対する降雨減衰確率推定法をとりまとめた際に、推定に用いるパラメータを求める場合に、10 分間降雨量の 0.0075% 値等からの変換により得た 1 分間降雨強度の 0.0075% 値を用いているが、この変換において自己相関特性が重要な役割を果たしている。また、第 7 章に詳述しているが、細矢が提案した、M 分布を用いた異なる積分時間の降雨強度データから 1 分間降雨強度 CDF を得る変換手法（異積分時間降雨強度確率分布変換手法）<sup>[12]</sup>においても自己相関特性が重要な役割を果たしている。このような点を踏まえ、自己相関特性を得る場合の均し分配処理の有効性について検討を行った。

降雨強度計実測データから擬似 1 分間降水量データを作成し、最大均し時間を 60 分として、4.2 節で示した 3 種類の均し分配処理（分単位均し分配処理[点線]、 $\Gamma$  均等分布秒単位均し分配処理[破線]及び乱数補正秒単位均し分配処理[一点鎖線]）を行った後に自己相関特性を求めたものを、降雨強度計実測データ[実線]及び擬似 1 分間降水量データ[菱形マーク]から直接求めた自己相関特性と比較する形で、図 4-10 に示した。乱数補正秒単位均し分配処理については、10 個の乱数パターンに対して求めたものの、バラツキが小さく、違いがほとんど識別できないため、平均値カーブのみを示している。

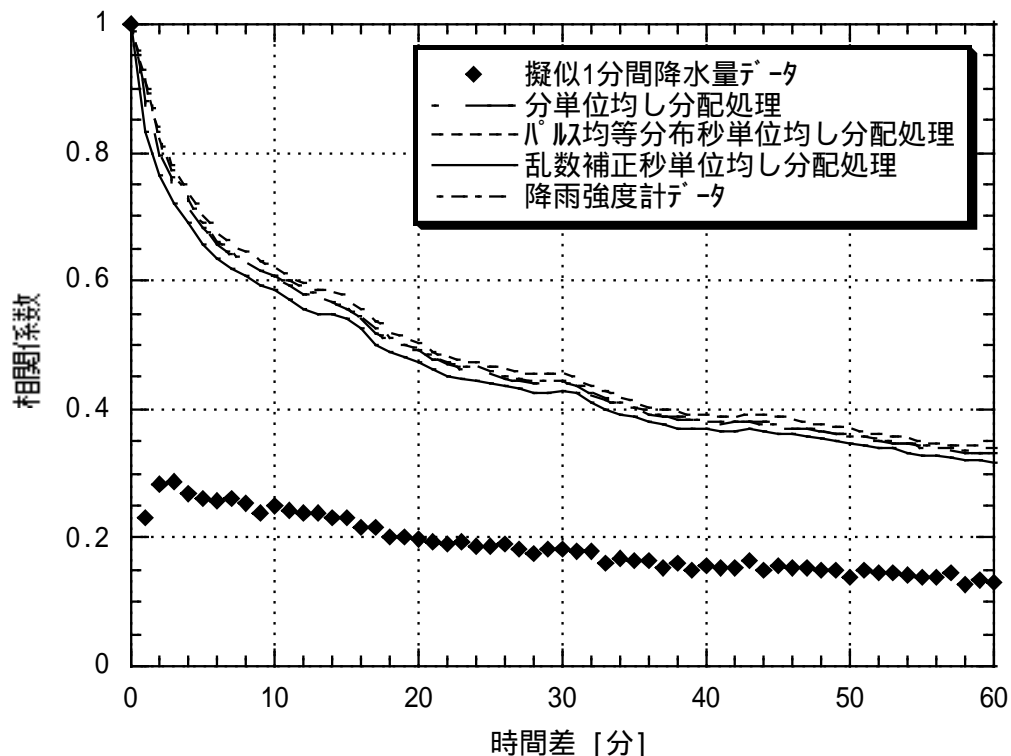


図 4-10 各種均し分配処理を行った場合の自己相関特性

図 4-10 より、擬似 1 分間降水量データから直接自己相関特性を求めたものは、実降雨をほぼ忠実に再現していると考えられる降雨強度計データから求めた自己相関特性に対して大きく異なったものとなり、自己相関特性を正しく表せるものとはなっていないことがわかる。これに対し、擬似 1 分間降水量データに対し均し分配処理を行ったものは、1 分間降雨強度 CDF の推定には全く使えなかった分単位均し分配処理を含めて、先に示した全ての均し分配処理が、降雨強度計データから求めた自己相関特性に非常に良い近似を与える結果となっており、いずれの均し分配処理も 1 分間降水量データから自己相関特性を精度良く得るために極めて有効であることがわかる。

図 4-10 は 1 年間のデータを用いた場合であるが、図 4-9 と同様、最悪月データとして 2002 年 9 月 21 日～同年 10 月 20 日の 1 ヶ月間のデータを用いて同様に示したものが図 4-11 である。

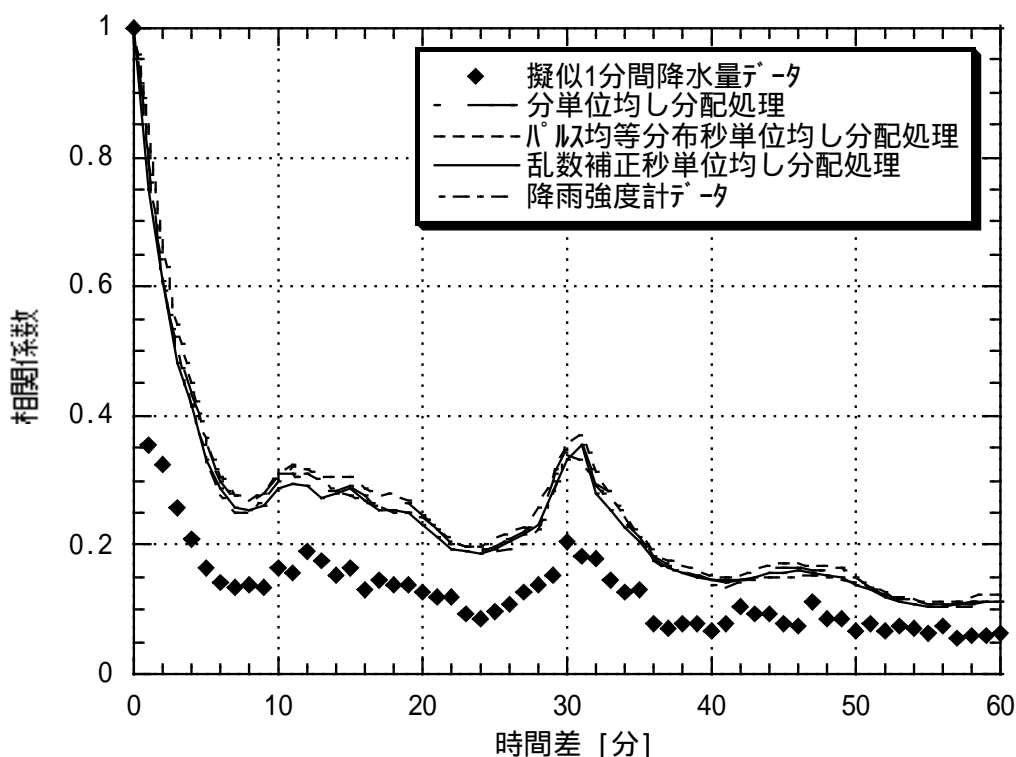


図 4-11 各種均し分配処理を行った場合の自己相関特性（最悪月データ）

図 4-11 から、1 ヶ月という短期間のデータにおいても、3 種類の均し分配処理のいずれもが極めて有効であることがわかる。

## 第5章 降雨減衰確率推定に最適な分布モデルに関する考察

2.1 節に示したように、降雨減衰確率推定は、任意の地点において、例えば回線不稼働率等、回線設計における目標値に相当する累積確率における降雨減衰量を推定する、というようなケースなどで用いられる。また、2.2 節において詳述しているが、任意の累積確率における降雨減衰量を推定するには、当該累積確率における1分間降雨強度を知ることが必要となる。そのためには、1分間降雨強度 CDF を精度良く近似できる分布モデルを用い、推定用パラメータとして与えられる特定の累積確率における1分間降雨強度等から1分間降雨強度 CDF を求め、その CDF を用いて求めたい累積確率における1分間降雨強度を得る、というような処理が必要となる。本章では、広範囲の品質目標に適用でき、かつ精度良い降雨減衰確率推定法に適用可能な、1分間降雨強度 CDF を広い累積確率の範囲で精度良く近似できる分布モデルに関する検討結果について示す。

### 5.1 検討に用いたデータ

全国 148 地点の AMeDAS により得られた最長 1996 年から 2002 年までの 1 分間降水量データを入手し、うち 1 年以上の期間に対して解析可能なデータが得られた 136 地点分のデータを解析に用いた。

AMeDAS の 1 分間降水量観測は 1995 年から導入され、1996 年からデータの取得が開始されたが、観測の早い地点においても 1996 年の年初数ヶ月は異常データが多量に存在し、1 年間通してのデータを用いた解析を行う場合については 1996 年からのデータが使用できるケースはなく、解析可能なデータが得られた年数の最長は 6 年 (1997 年～2002 年) であった。一方、本章には強雨期 3 ヶ月 (7～9 月) のデータを用いた解析も含まれているが、1996 年においても 7 月以降であればデータが正常である地点があったため、この場合の解析可能なデータが得られた年数の最長は 7 年 (1996 年～2002 年) であった。

### 5.2 1 分間降水量データから求めた 1 分間降雨強度 CDF

#### 5.2.1 年間の 1 分間降雨強度 CDF

1 年以上の期間に対して解析可能なデータが得られた全国 136 地点の 1 分間降水量データに対して、前章に示した乱数補正秒単位均し分配処理を用い、1 分間降雨強度 CDF を求めた。

1 年間を通して解析可能なデータが得られた年数は、1 年から最長 6 年までで、地点ごとに異なるため、以下の解析では、統計的に安定した複数年分のデータが得られた地点のデータのみ用いることとした。具体的には、解析に用いることができる地点数がある程度

確保するという点も考慮し、3年以上で解析可能なデータが得られた地点を対象とすることとした。該当する104の地点について、得られたCDFの主な累積確率における1分間降雨強度を示したものが表5-1である。また、表5-1に示したものは、解析可能なデータが得られた年数[表5-1の\*5-1の列(右端)に示す]を通して求めたCDFから得た値である。

表5-1 全国104地点におけるCDF

都道府県名	地点名	各累積確率における1分間降雨強度 [mm/h]								*5-1
		0.3%	0.1%	0.05%	0.03%	0.01%	0.005%	0.003%	0.001%	
北海道	稚内	5.2	9.4	13.2	17.1	36.2	54.6	66.9	92.4	5
	旭川	5.4	9.3	13.1	17.0	34.3	51.8	65.6	106.8	5
	羽幌	6.4	11.0	15.2	19.3	35.3	51.4	63.6	88.6	3
	留萌	5.4	9.8	14.0	18.4	38.7	56.1	68.0	88.3	5
	札幌	6.0	9.9	13.5	16.8	29.8	43.0	54.6	77.4	5
	岩見沢	6.0	10.1	13.7	17.0	31.0	43.2	53.3	69.3	5
	小樽	6.2	9.8	12.7	15.5	25.6	36.3	46.1	63.8	3
	倶知安	6.1	10.4	14.3	17.8	33.1	46.7	56.9	76.2	5
	寿都	6.2	10.9	15.2	19.6	38.2	53.0	62.7	85.0	5
	紋別	4.7	7.9	10.2	12.2	18.1	24.2	31.1	51.7	4
	網走	4.9	7.9	10.2	12.3	18.4	26.3	34.5	52.7	5
	根室	5.8	10.0	13.6	17.0	29.8	41.2	51.2	71.0	4
	釧路	6.2	10.1	13.0	15.9	26.2	36.3	45.0	62.5	4
	帯広	5.8	9.4	12.1	14.9	23.6	32.9	41.4	64.2	4
	広尾	10.3	17.0	23.2	30.2	46.2	56.2	63.3	75.1	3
	苫小牧	7.6	13.1	18.2	24.1	41.8	55.6	66.7	91.2	3
	室蘭	7.9	13.8	18.6	24.0	41.4	54.4	63.5	83.3	5
浦河	6.9	12.1	16.5	20.9	39.5	53.6	63.2	82.5	5	
函館	6.6	11.3	15.8	20.8	41.6	57.3	67.1	86.3	4	
江差	6.4	12.1	18.4	27.1	53.1	67.5	76.7	100.0	4	
青森県	むつ	6.7	11.6	16.2	20.8	41.0	56.3	66.4	86.5	4
	青森	6.8	12.7	18.7	26.5	52.1	70.0	82.3	110.5	5
	深浦	6.9	13.1	19.4	27.7	55.1	71.7	83.5	109.6	3
	八戸	6.7	12.0	16.8	21.7	40.6	54.3	62.9	78.5	4
秋田県	秋田	7.7	14.9	24.5	36.2	64.7	80.0	92.8	126.8	4
岩手県	盛岡	7.0	12.9	18.7	26.0	48.1	63.0	72.1	91.5	4
	宮古	8.4	15.9	25.5	36.1	59.9	71.6	78.7	97.1	4
	大船渡	9.6	17.7	27.3	37.6	61.5	73.2	80.9	99.9	4
宮城県	仙台	7.3	13.8	19.9	27.7	49.6	62.7	71.1	91.5	5
山形県	酒田	8.4	16.2	27.2	40.2	67.6	82.4	94.9	123.7	4
	新庄	7.0	12.0	17.6	24.7	49.4	65.6	77.2	102.7	4
	山形	6.4	12.3	18.3	26.6	51.2	65.8	75.2	98.5	5
福島県	福島	7.4	13.7	19.5	26.8	48.9	64.1	74.7	99.7	5
	若松	6.1	11.5	18.4	29.9	60.5	76.1	86.0	109.9	4
	白河	8.9	21.0	39.0	55.3	84.2	98.8	107.6	128.1	4
	小名浜	8.3	16.7	27.5	39.2	65.9	79.1	89.1	104.9	4
茨城県	水戸	7.8	15.2	24.1	35.7	65.6	82.4	95.2	118.1	5
	筑波	7.1	13.6	20.2	29.6	58.9	77.0	89.8	122.2	4
栃木県	日光	13.7	31.7	50.2	61.9	82.6	95.7	105.1	122.9	5
	宇都宮	9.3	20.2	36.3	52.3	82.7	102.6	116.0	146.6	6
群馬県	前橋	7.6	16.3	32.4	51.4	84.6	107.1	124.0	159.3	6
埼玉県	熊谷	7.8	17.3	32.8	49.5	82.4	101.4	114.4	143.6	6
	秩父	9.3	19.7	33.6	45.7	68.8	80.3	87.8	105.7	4
東京都	東京	8.3	16.6	29.1	43.3	73.0	89.8	103.1	139.8	6
	大島	14.5	31.7	49.7	61.5	83.3	98.2	108.3	132.4	5
	八丈島	18.6	43.7	62.2	74.2	101.9	119.1	132.9	164.4	5
	父島	10.3	24.4	40.7	53.7	75.4	87.4	97.1	113.0	4
千葉県	銚子	8.7	17.1	28.3	41.3	71.6	90.1	103.1	129.2	6
	千葉	8.1	16.5	27.7	40.6	68.6	84.3	97.1	123.2	4
	館山	9.8	19.4	32.7	45.7	72.0	88.0	101.0	133.9	6
神奈川県	横浜	9.2	18.2	30.1	43.1	70.8	87.6	102.5	144.2	5
長野県	長野	5.5	9.8	14.3	19.1	43.2	59.6	70.5	93.9	6
	松本	6.6	10.5	14.2	18.2	37.5	53.2	63.5	81.0	5
	諏訪	7.4	12.0	16.6	21.5	41.9	57.2	67.0	85.5	5
	飯田	8.2	14.8	22.5	32.1	57.1	69.5	76.7	94.1	5
山梨県	甲府	7.4	13.4	20.0	28.7	50.8	64.2	72.9	93.8	6
静岡県	静岡	14.3	31.4	48.6	60.6	82.2	97.5	107.4	127.0	6
	浜松	10.3	21.7	36.6	51.1	79.5	98.5	111.2	136.0	4
	御前崎	12.1	27.2	45.6	59.7	85.1	99.7	109.1	130.4	5
愛知県	名古屋	9.0	18.2	33.1	49.4	78.1	96.2	109.2	132.8	6
	伊良湖	9.9	20.6	35.4	49.6	75.9	93.2	105.8	132.9	5

表 5-1(続き)

都道府県名	地点名	各累積確率における1分間降雨強度 [mm/h]								*5-1
		0.3%	0.1%	0.05%	0.03%	0.01%	0.005%	0.003%	0.001%	
岐阜県	高山	7.7	14.8	23.7	34.2	59.2	70.9	78.1	101.0	4
	岐阜	9.7	18.6	30.9	43.9	72.1	90.9	105.8	134.6	5
三重県	四日市	9.7	18.9	30.6	42.4	67.2	80.3	91.6	113.3	5
	上野	7.8	15.1	24.7	37.0	65.5	82.2	96.6	129.5	5
	津	9.4	17.9	29.3	41.2	68.6	85.4	102.8	140.9	6
	尾鷲	24.1	58.2	77.1	90.6	116.4	132.1	142.0	166.3	4
新潟県	相川	8.1	15.5	24.6	35.1	62.7	77.6	89.1	117.1	5
	新潟	8.9	17.1	28.7	41.7	72.9	91.7	105.6	128.0	5
	高田	10.3	17.1	26.0	35.5	57.9	69.8	77.8	93.3	4
富山県	伏木	9.1	16.1	25.5	37.7	67.3	83.7	95.7	119.2	4
	富山	9.6	17.1	28.6	41.5	67.6	81.7	94.1	124.1	6
石川県	輪島	10.4	19.0	30.8	42.8	68.0	82.0	93.5	117.3	6
	金沢	11.3	22.2	36.2	48.8	72.3	85.5	96.3	117.2	6
福井県	福井	9.8	18.9	31.3	44.0	68.0	80.1	89.6	110.9	5
	敦賀	9.7	16.8	25.8	36.0	62.2	76.5	87.6	110.7	4
滋賀県	彦根	7.3	13.0	20.0	31.1	61.8	80.9	98.4	136.0	3
大阪府	大阪	6.7	12.5	18.7	26.8	51.9	68.9	80.8	105.2	3
兵庫県	神戸	5.9	10.7	15.8	21.6	43.0	58.0	67.4	85.1	3
和歌山県	潮岬	14.9	37.3	57.6	70.3	96.5	110.6	121.0	146.8	3
岡山県	岡山	6.2	11.0	15.9	21.6	44.6	60.7	70.8	91.4	3
島根県	西郷	8.3	14.6	21.6	31.9	57.4	70.5	78.6	101.2	3
	松江	8.5	15.8	24.8	35.3	60.7	72.9	82.3	107.5	3
	浜田	8.4	16.5	28.0	39.7	62.7	73.1	80.1	97.5	3
鳥取県	米子	8.4	14.8	21.8	31.0	56.8	71.1	80.5	101.1	3
	鳥取	8.7	15.1	22.0	31.7	59.3	73.8	83.6	101.3	3
山口県	山口	9.1	17.2	30.2	44.5	72.3	87.6	98.7	119.0	3
	下関	8.7	16.9	28.8	41.2	67.8	80.9	91.9	112.6	3
香川県	高松	5.8	10.5	14.8	19.0	38.1	53.7	64.5	83.6	3
愛媛県	松山	7.3	14.6	22.8	33.9	63.0	77.9	88.6	106.4	3
高知県	高知	13.5	34.1	55.6	69.3	96.7	113.1	124.1	143.2	3
	清水	18.1	48.9	69.4	83.0	111.7	130.9	144.6	178.2	3
福岡県	福岡	9.4	20.4	36.8	50.3	72.2	83.3	91.3	105.0	3
大分県	大分	8.8	16.1	26.0	36.3	62.1	76.5	89.0	117.0	3
長崎県	厳原	10.3	21.6	38.3	53.2	80.4	97.0	109.1	135.0	3
	長崎	9.7	20.4	36.4	51.0	78.3	97.5	112.8	141.5	3
	福江	14.4	34.7	55.9	70.2	98.1	113.3	124.6	144.4	3
佐賀県	佐賀	10.5	24.3	44.5	61.0	92.7	113.8	127.8	157.7	3
熊本県	熊本	10.6	23.2	40.7	55.0	79.4	93.6	103.0	127.7	3
宮崎県	宮崎	13.4	30.5	48.6	60.5	81.9	95.7	104.3	119.9	3
鹿児島県	鹿児島	13.7	33.7	54.2	66.3	88.8	103.0	112.4	131.8	3
	種子島	13.4	37.4	58.7	72.3	103.6	125.7	141.0	168.2	3
	名瀬	15.4	35.0	53.0	64.8	89.3	105.1	115.3	134.8	3
沖縄県	那覇	18.0	49.0	67.6	79.0	105.7	120.5	130.1	149.4	3

\*5-1：年間通して1分間降水量データが得られた年数

### 5.2.2 強雨期3ヶ月(7~9月)の1分間降雨強度CDF及び0.0075%値

2.4節に示したように、国内において地上回線用無線通信システムに対し主として用いられている既存の降雨減衰確率推定法には推定用パラメータとして強雨期3ヶ月(7~9月)の1分間降雨強度の0.0075%値が与えられている。これは1940~1950年代に気象庁の観測システムにおいて自記記録紙に記録された降雨量データから、強雨期3ヶ月等における10分間降雨量及び/または総降雨量を読み取るとともに、総降雨量と10分間降雨量の0.0075%値との関係を求め、また、10分間降雨量と1分間降雨強度の自己相関に関する研究結果に基づき10分間降雨量の0.0075%値と1分間降雨強度の同%値との関係を求めるなどし、とりまとめた結果として、全国1,642地点に対して示したものである。また、このうち10分間降雨量データに基づくのは128地点であり、残り1,514地点は総降雨量に基づくものである。今回、近年のデータを用いるとともに、直接1分間降水量データから、強雨期3ヶ月における1分間降雨強度CDFを精度良く求めることができたため、0.0075%値を求め、前者と比較する形で示したものが表5-2である。

表 5-2 全国 99 地点の強雨期 3 ヶ月 (7~9 月) における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値

地点名	得られた 0.0075% 値	*5-2	既存推定法 0.0075% 値	地点名	得られた 0.0075% 値	*5-2	既存推定法 0.0075% 値
稚内	58.5	5	62.4	名古屋	113.1	7	97.2
旭川	76.0	5	62.4	高山	87.0	5	85.2
羽幌	82.8	4	57.6	岐阜	109.9	6	88.2
留萌	74.5	5	70.8	上野	103.1	6	89.4
札幌	63.1	5	57.0	津	111.0	7	88.2
岩見沢	58.1	5	55.8	相川	92.7	6	74.4
小樽	44.4	4	52.8	新潟	112.8	6	78.6
倶知安	62.0	5	55.8	高田	87.5	5	68.4
寿都	66.5	5	64.2	伏木	92.8	5	77.4
網走	38.6	5	53.4	富山	102.6	7	82.2
根室	58.6	5	57.6	金沢	100.4	7	104.4
釧路	41.4	4	55.8	福井	98.2	6	88.2
帯広	46.5	5	55.8	敦賀	92.3	5	75.0
苫小牧	73.5	3	87.6	彦根	111.8	4	81.6
室蘭	70.4	5	84.6	舞鶴	82.7	3	90.6
浦河	67.2	5	55.2	京都	79.8	3	94.8
函館	61.6	5	76.2	大阪	81.5	4	86.4
江差	76.1	5	57.0	豊岡	88.2	3	68.4
むつ	69.7	5	58.2	神戸	61.7	3	82.8
青森	88.4	6	64.8	和歌山	96.2	3	80.4
深浦	88.6	3	86.4	潮岬	120.3	4	120.6
八戸	63.2	5	84.6	岡山	68.2	4	107.4
秋田	89.8	5	84.0	広島	77.2	3	82.8
盛岡	78.3	4	75.0	松江	85.6	3	108.0
宮古	79.1	5	68.4	浜田	80.9	3	64.8
仙台	76.0	6	95.4	米子	85.4	3	91.8
酒田	97.1	5	89.4	鳥取	85.7	4	90.6
新庄	85.5	5	68.4	下関	96.4	4	81.6
山形	80.6	6	82.2	徳島	115.8	3	75.0
福島	81.2	6	70.8	高松	72.3	4	100.2
若松	94.7	5	64.8	松山	76.9	4	74.4
白河	115.6	5	102.6	宇和島	75.1	3	86.4
小名浜	90.1	5	69.0	高知	131.3	3	114.6
水戸	92.6	6	96.0	清水	144.1	4	91.8
筑波	94.7	5	86.4	福岡	88.5	4	97.8
宇都宮	121.3	7	121.8	大分	95.3	4	88.2
前橋	131.4	7	97.2	平戸	110.4	3	113.4
熊谷	118.4	7	109.2	長崎	115.3	4	109.8
秩父	94.8	5	102.0	佐賀	131.1	4	119.4
東京	107.4	7	99.6	熊本	107.6	4	94.8
大島	108.2	6	98.4	人吉	107.0	3	106.2
八丈島	124.1	6	89.4	宮崎	115.4	4	105.0
銚子	89.1	7	61.8	都城	124.2	3	111.0
横浜	111.7	6	75.0	阿久根	122.8	3	126.0
長野	77.3	7	80.4	鹿児島	105.9	4	119.4
松本	65.2	6	79.8	種子島	147.6	4	107.4
飯田	78.5	5	61.8	屋久島	138.9	3	98.4
甲府	80.9	7	78.0	名瀬	112.4	4	111.6
静岡	109.9	7	83.4				
浜松	109.3	5	78.0				
御前崎	101.2	6	94.8				

\*5-2 : 7~9 月の 3 ヶ月通して 1 分間降水量データが得られた年数

表 5-2 は、表 5-1 の場合と同様、統計的に安定なデータを解析に用いるという主旨から 3 年以上で解析可能なデータが得られた地点を対象とすることとし、かつ、既存降雨減衰確率推定法用パラメータとして与えられている強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値のうち、10 分間降雨量読取り値からの換算により得られた値が存在する地点を対象とすることとし、該当する 99 の地点について示している。また、表 5-1 と同様、解析可能なデータが得られた年数 [ 表 5-2 の \*5-2 の列 ( 中ほど 2 列 ) に示す ] を通して求めた CDF から得た値を示している。

表 5-2 で示した地点について、各地点ごとに、横軸に今回得られた強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の 0.0075% 値を与え、縦軸に既存降雨減衰確率推定法用パラメータとして与えられている同 0.0075% 値を与え、グラフ化したものが図 5-1 である。同図では、マクロな地域的傾向も見る事ができるよう、各地点を、雨の降り方を考慮し、表 5-3 に示す 8

つの地域にグループ化し、示している。

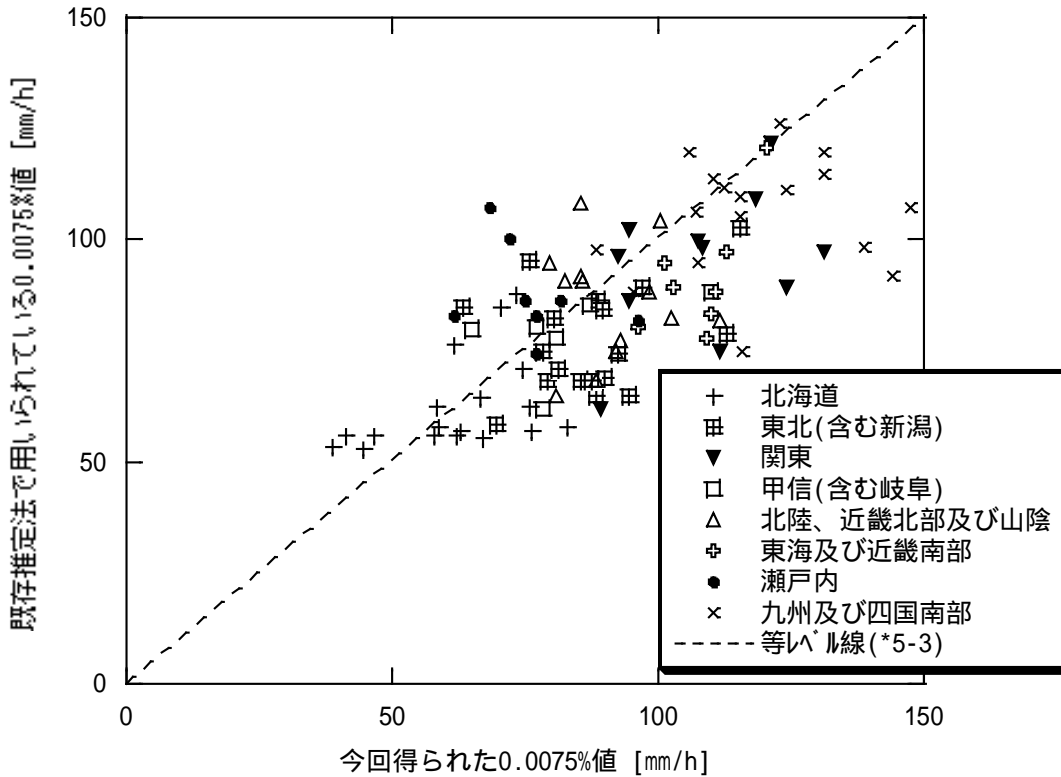


図 5-1 既存推定法で用いられる強雨期 3 ヶ月における 1 分間降雨強度の 0.0075% 値と今回得られた同 0.0075% 値との比較

\*5-3 : 既存推定法で用いられている値と今回得られた値が等しい場合はこの線上となる。

表 5-3 図 5-1 における地域分割

地域名	都道府県名
北海道	北海道
東北(新潟県含む)	青森県, 秋田県, 岩手県, 宮城県, 山形県, 福島県, 新潟県
関東	茨城県, 栃木県, 群馬県, 埼玉県, 東京都, 千葉県, 神奈川県
北陸、近畿北部及び山陰	富山県, 石川県, 福井県, 滋賀県, 京都府, 鳥取県, 島根県, 兵庫県北部, 山口県北部
甲信(岐阜県含む)	長野県, 山梨県, 岐阜県
東海及び近畿南部	静岡県, 愛知県, 三重県, 奈良県, 和歌山県
瀬戸内(近畿瀬戸内側、山陽及び四国北部)	大阪府, 兵庫県南部, 岡山県, 広島県, 山口県南部, 香川県, 愛媛県
九州及び四国南部	福岡県, 大分県, 長崎県, 佐賀県, 宮崎県, 鹿児島県, 沖縄県, 高知県, 徳島県

図 5-1 では、全体的に見ると、中央の破線より下側に多くのマークが存在しており、今回得られた値の方が既存降雨減衰確率推定法用パラメータとして与えられている値より若干高めとなっていると考えられる。地域ごとに見ても、関東地域、東海及び近畿南部地

域、東北及び新潟地域、並びに九州及び四国南部地域においては、この傾向がかなり明確に見られる。ただし、唯一、瀬戸内地域では、逆の傾向が見られる。前者については、近年における温暖化現象などにより、1940～1950年代と比較し多雨となっている可能性が考えられるが、測定条件、解析条件もかなり異なっており、この結果だけで気象条件の変化の有無を論じることは適当ではないと考える。

### 5.3 分布モデルの近似精度比較

検討対象となる分布モデルとしては、詳細は 2.2.2 節に示しているが、ガンマ分布、対数正規分布、条件付対数正規分布、M 分布の 4 つの分布モデルが考えられ、これらに対して実分布に対する近似精度比較を行った。

#### 5.3.1 各分布モデルにおける近似手法

4 つの分布モデルを用いて実分布に対する近似を行う場合の手法について以下に示す。

##### (1) ガンマ分布

関数近似には最小二乗法が有効であるが、ガンマ分布には、この適用が困難であるため、全サンプル点近似は二乗誤差が最小となる条件を追い込み法で、また、必要最小限のサンプル点(2点)での近似は、既存降雨減衰確率推定法に準じた方法を用いて求めることとした。前者については、累積確率を与えて1分間降雨強度の二乗誤差を最小とする方法と、1分間降雨強度を与えて累積確率の対数値の二乗誤差を最小とする方法の2つが考えられたが、近似比較の結果、より良好な近似が得られた後者を用いることとした。

##### (2) 対数正規分布

対数正規分布に対しては最小二乗法が有効である。式(2-5)及び式(2-6)において、 $z = (\ln R - \mu) / \sigma$  とおくと、 $dz = [1 / (R\sigma)] dR$  であるから、1分間降雨強度  $R_i$  における累積確率  $F(R_i)$  は次式で与えられる。

$$F(R_i) = \int_{z_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (5-1)$$

これは、平均 0、分散 1 の標準正規分布の、 $z_i = (\ln R_i - \mu) / \sigma$  から無限大までの積分である。したがって、複数点(m点)における標準正規分布の累積確率が  $F(R_i)$  となるような  $z_i$  と  $a_i = \ln R_i$  が与えられれば( $i=1 \sim m$ )、 $a_i = \ln R_i = \sigma z_i + \mu$  の関係から、最小二乗法により下記の関係が与えられ、対数正規分布の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  が得られる。



$$\sigma = \frac{m \sum_{i=1}^m z_i a_i - \sum_{i=1}^m z_i \sum_{i=1}^m a_i}{m \sum_{i=1}^m z_i^2 - \left( \sum_{i=1}^m z_i \right)^2} \quad (5-2)$$

$$\mu = \left( \sum_{i=1}^m a_i - \sigma \sum_{i=1}^m z_i \right) / m \quad (5-3)$$

$\mu$  と  $\sigma$  が得られれば、式(2-6)により、 $R_i$  に対する累積確率を得ることができる。

なお、上述の、標準正規分布の累積確率(式(5-1))が  $F(R_i)$  となるような  $z_i$  を得るには、汎用計算ソフトである Excel の `normsinv` または Matlab の `norminv` と呼ばれる関数を用いることが有効であるが(なお、これらを用いる場合、厳密には式(5-1)とは異なり、いずれも  $\int_{-\infty}^{z_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz$  の積分になっていることに注意が必要である) 次の近似式の利用も可能である<sup>[24]</sup>。

$$z_i = r - \frac{2.515517 + 0.802853 \cdot r + 0.010328 \cdot r^2}{1 + 1.432788 \cdot r + 0.189269 \cdot r^2 + 0.001308 \cdot r^3} \quad (5-4)$$

$$\text{ただし、 } r = \sqrt{\ln \frac{1}{F(R_i)^2}} \quad (5-5)$$

$F(R_i)$  はパーセント値でなく真数値であること

### (3) 条件付対数正規分布

条件付対数正規分布における分布近似は、基本的には、前項と同様の手法を用いることとなるが、先に示したように、降雨時のみのサンプルを用いた分布、実際には、全時間の 10% を総降雨時間とみなして求めた分布に対して分布近似を行う。具体的には、全サンプルから得られた分布に対し、母数が実際の総数の 10% であるかのように確率値のみを 10 倍し、分布近似を求める。求められた分布近似に対して確率値のみを 1/10 倍するという補正を行えば、全サンプルから得られた分布に対する分布近似が求められることとなる。

### (4) M 分布

M 分布に対しても最小二乗法が有効である。式(2-8)の両辺の対数をとると、

$$\ln F(R_i) = \ln p - \ln R_i - u R_i \quad (5-6)$$

$$\ln F(R_i) + \ln R_i = \ln p - u R_i \quad (5-7)$$

ここで、複数点 ( $m$  点) における  $x_i = R_i$ 、 $y_i = \ln F(R_i) + \ln R_i$  が与えられれば ( $i=1 \sim m$ )、 $y_i = \ln p - u x_i$  の関係から、最小二乗法により下記の関係が与えられ、M 分布のパラメータ  $p$  と  $u$  が得られる。

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i - m \sum_{i=1}^m x_i y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^m x_i \right)^2} \quad (5-8)$$

$$p = F(R_i) \cdot R_i \cdot \exp(u \cdot R_i) \quad (5-9)$$

p と u が得られれば、式(2-8)により、任意の  $R_i$  に対する累積確率を得ることができる。

### 5.3.2 種々な近似条件での近似精度比較

#### 5.3.2.1 1mm/h 以上の全サンプル点情報を用いた近似

5.2.1 節に示した AMeDAS の 1 分間降水量データから得られた表 5-1 に示した 104 地点における 1 分間降雨強度の複数年を通しての CDF を用い、前節に示した各手法に基づき、1mm/h 以上の全サンプル点において二乗誤差が最小となるよう近似を行った場合（以下、単に全サンプル点近似という）について、各分布ごとの累積確率の対数値の二乗平均平方誤差（以下 RMSE : Root Mean Square Error という）を度数分布比較する形で示したものが図 5-2 である。1mm/h 以上としたのは、M 分布が式(2-8)に示す下限値 ( $R^*$ ) 以上で成立する分布であるためである。また、度数分布は横軸の各 0.05 幅に含まれる頻度（厳密には、各 0.05 幅の小さい側の値以上、大きい側の値未満に含まれる頻度）を示している。

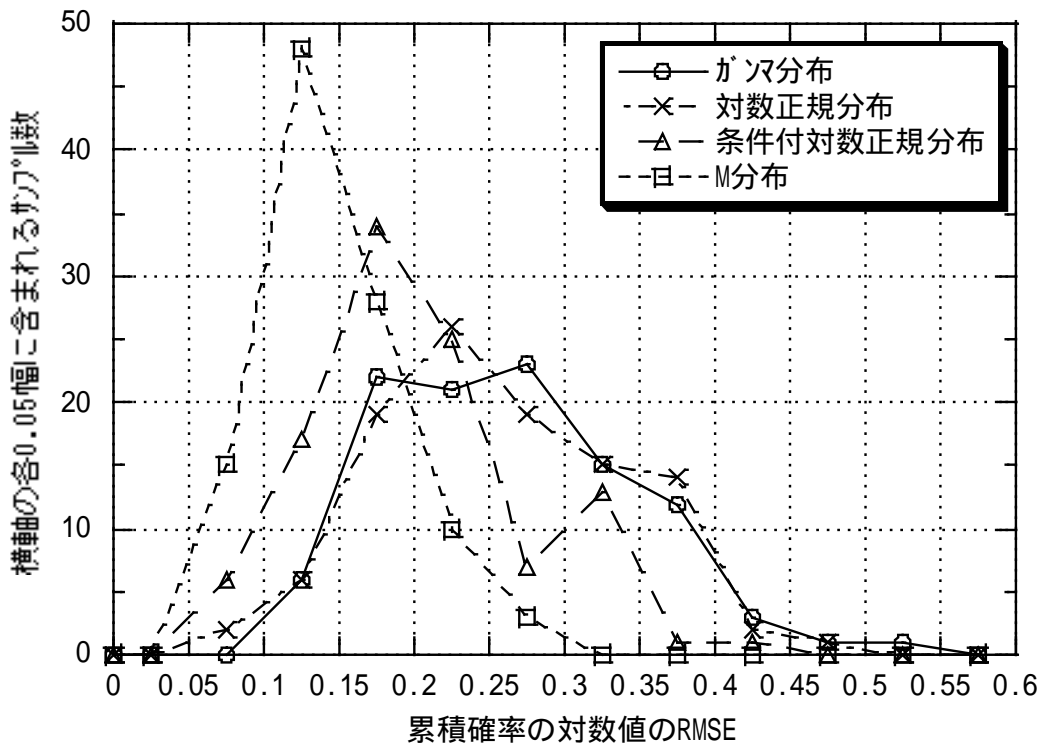


図 5-2 全サンプル点近似における累積確率の対数値の RMSE 比較

図 5-2 において、M 分布が、RMSE が小さいところに高いピークがたっており、また、広がりも狭く、他の 3 つの分布に比し、かなり近似精度が優れていることがわかる。残る 3 つの分布の中では条件付対数正規分布の精度が幾分良い。なお、同図の横軸は、累積確率の対数値の RMSE を示しているが、誤差の大きさが直感的にわかりにくいいため、この値が累積確率を対数目盛で表した場合にどのようなになるかを図 5-3 に示した。

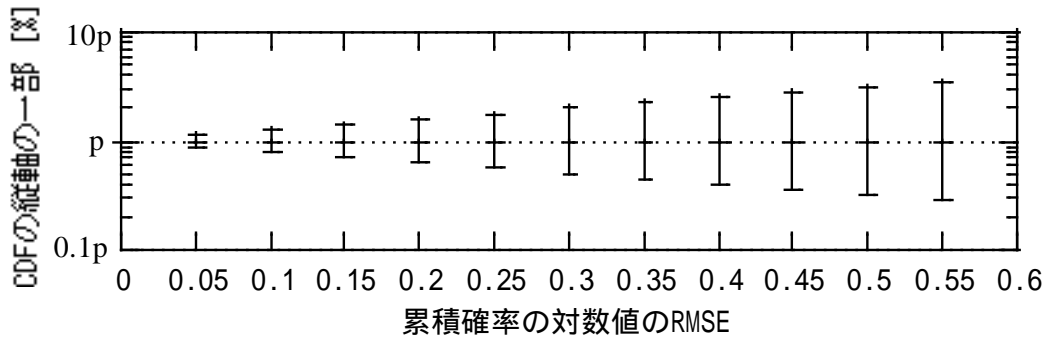


図 5-3 累積確率の対数値の RMSE の大きさをわかりやすく示した例

図 5-3 は、累積確率  $p\%$  ( $=10, 1, 0.1, \dots, 0.0001\%$ ) を基準とした場合に、図 5-2 に示した RMSE の値が対数軸 (累積確率) 上で占める幅を示している。 $p\%$  より大きい側の垂直方向線分、小さい側の同線分それぞれが RMSE に相当する幅を示しており、対数目盛の間隔が図 5-3 と同じグラフに対しては、図 5-3 の各 RMSE ごとの線分の大きさを RMSE の大きさと考えればよい。対数目盛の間隔が異なる場合は比例換算すればよい。

実際に CDF 上での近似はどのようなになっているか、標準的なケースとして東京 (1997 ~ 2002 年) の場合について、実測値と近似曲線の関係を示したものが図 5-4 である。M 分布が非常に良い近似を示している。ちなみに図 5-4 の場合の累積確率の対数値の RMSE は、M 分布 0.059、ガンマ分布 0.282、対数正規分布 0.236、条件付対数正規分布 0.171 である。

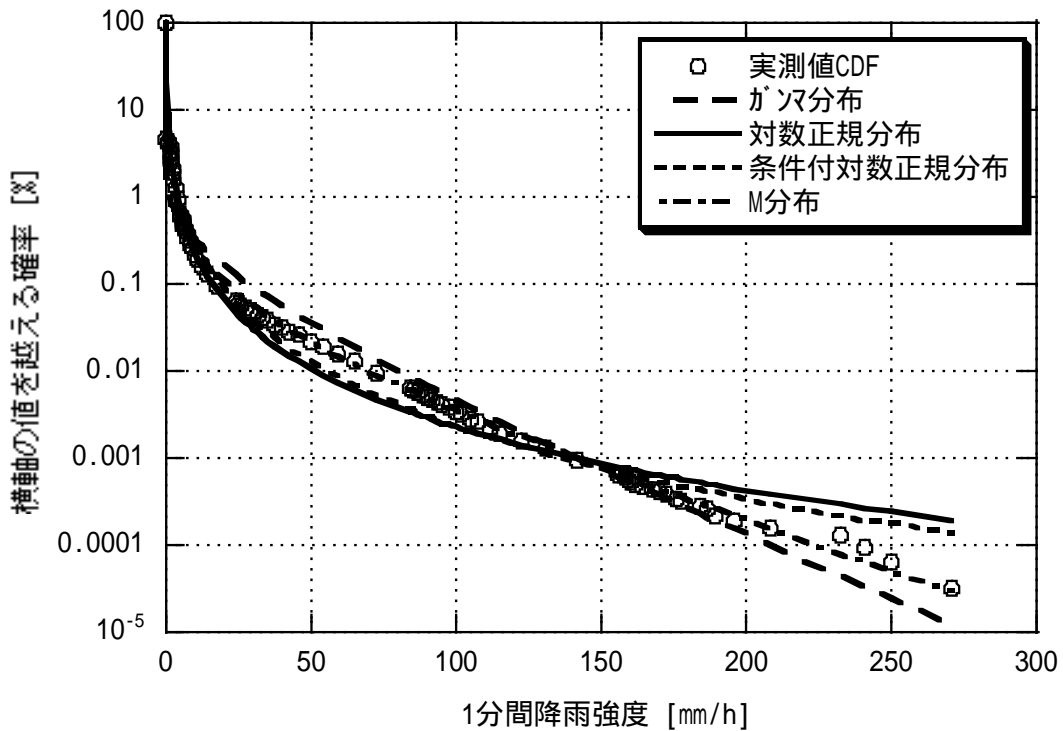


図 5-4 全サンプル点近似の近似度比較 [ 東京(1997～2002 年)の例 ]

### 5.3.2.2 必要最小限のサンプル点情報を与えて近似を行う場合の比較

検討対象とした 4 つの分布モデルは 5.3.1 節に示した式からわかるように、2 つのパラメータでカーブが決定される分布であり、CDF 上の異なる 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与えて分布を求める方法、及び 1 点の累積確率における 1 分間降雨強度と分布モデルの特性パラメータの 1 つを与えて分布を求める方法が考えられる。M 分布、対数正規分布及び条件付対数正規分布については、最小二乗法により、前者、即ち 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与えて、その 2 点を通する唯一のカーブを決定する式を得ることができる。しかしながら、ガンマ分布については、これが適用できず、既存の降雨減衰確率推定法において、後者、即ち 1 点の累積確率における 1 分間降雨強度と分布モデルの特性パラメータの 1 つを用いて分布を求める式が与えられているため、これを用いることとした。以下では、まずガンマ分布を除く 3 つの分布モデル、即ち、M 分布、対数正規分布及び条件付対数正規分布について、前者を用いて近似評価を行った結果を、次いでガンマ分布については後者を、ガンマ分布以外の 3 つの分布モデルについては前者を、それぞれ用いて近似評価を行った結果を示す。

#### 5.3.2.2.1 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与える場合 ( 除くガンマ分布 )

図 5-2 の場合と同様、AMeDAS の 1 分間降水量データから得られた表 5-1 に示した 104 地点における 1 分間降雨強度の複数年を通しての CDF を用い、2 点の累積確率における

1 分間降雨強度を与えて近似を行うことができる M 分布、対数正規分布及び条件付対数正規分布の 3 つの分布について、0.3% 値と 0.003% 値を与えて分布カーブを求め、近似精度について比較評価を行った。各分布ごとの累積確率の対数値の RMSE を度数分布比較したものを図 5-5 に示す。なお、0.3% 値、0.003% 値を用いたのは次の理由による。0.003% については、1 分間降雨強度の 1 年間の最小確率値が 0.00019% であり、統計的に安定な値が得られる下限の値として、0.00019% より 1 桁程度大きい値を用いることが適当と考え、また、0.3% は、広範囲で良好な近似精度を得たいという目的を考慮しつつも、要求される回線品質目標を考えた場合 1% 以上の確率値を用いることは考えにくいため、これより小さく、0.003% より 2 桁程度離れた点を用いることが適当と考えた。

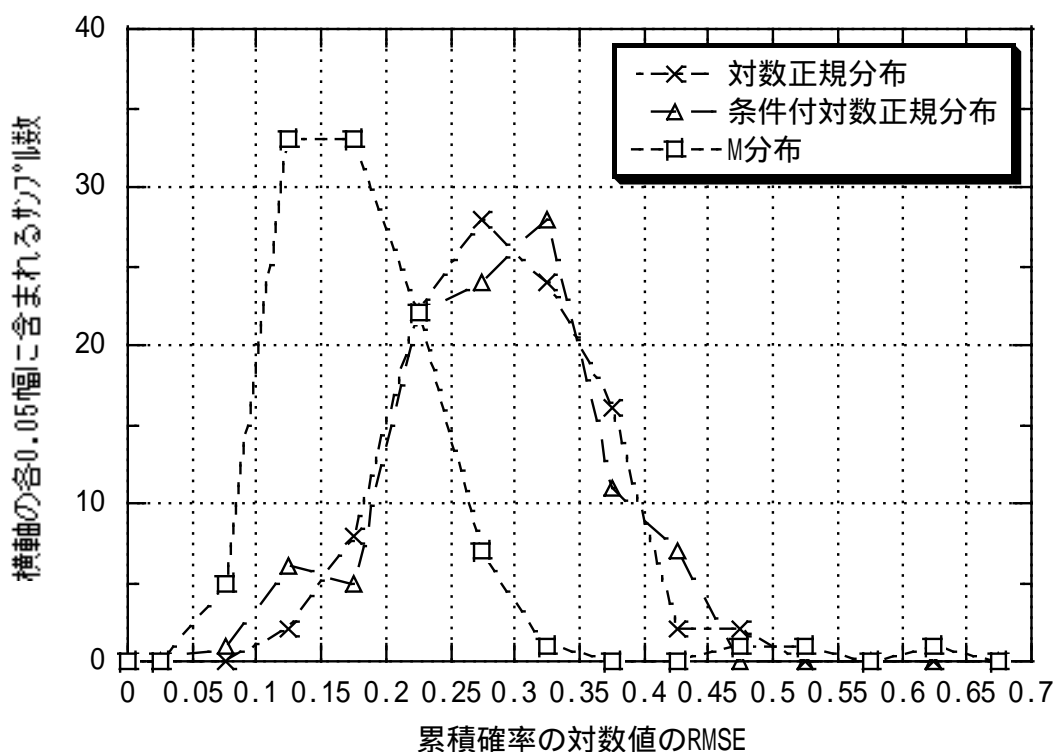


図 5-5 0.3% 値と 0.003% 値を与え近似した場合の累積確率の対数値の RMSE 比較 ( 除くガンマ分布 )

図 5-5 において、M 分布は、図 5-2 では累積確率の対数値の RMSE が 0.1 ~ 0.15 のところに高いピークを生じていたものが、このピークが下がって 0.15 ~ 0.2 にも分散されたような形状となっており、それ自身の近似精度は悪くなっているが、他の 2 つに比較しては、依然かなり良いと言える。

図 5-4 の場合と同様、標準例として東京 ( 1997 ~ 2002 年 ) の場合について、実測値と近似曲線の関係を示したものが図 5-6 である。図 5-6 においても、M 分布については、図 5-4 と傾向はほとんど変わらず、非常に良い近似を示している。対数正規分布、条件付対

数正規分布についても、全体的な傾向は似ているが、図 5-4 の場合より累積確率が小さい部分での開きが大きくなっている。

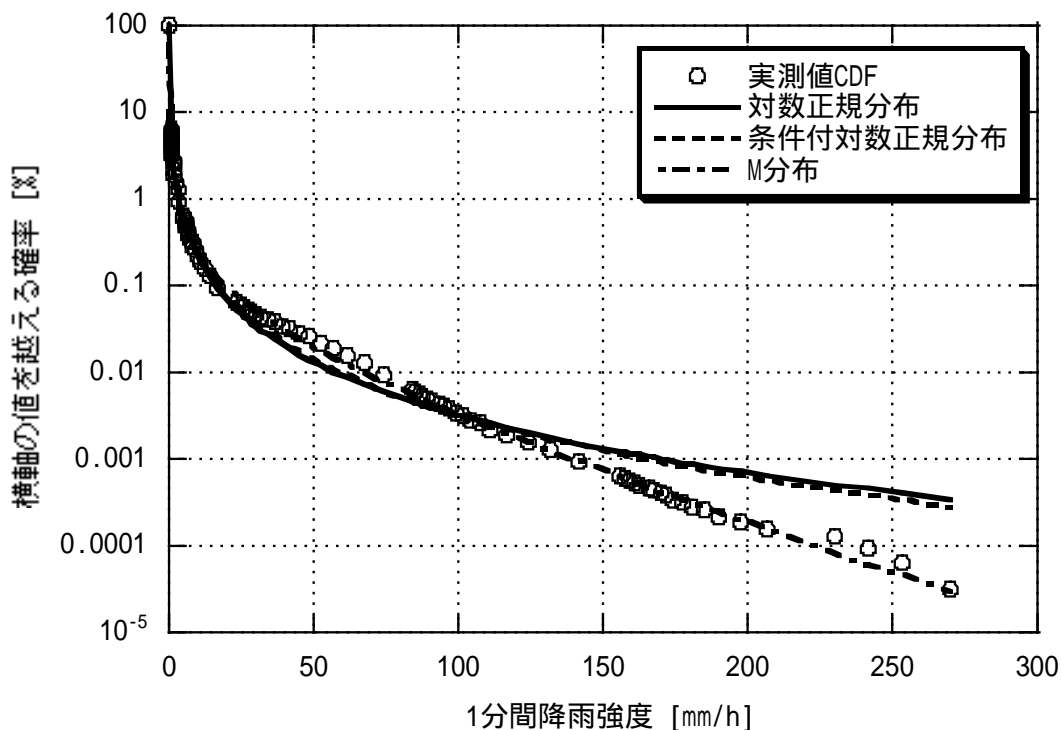


図 5-6 0.3%値と 0.003%値を与えた場合の近似度比較 [東京(1997～2002年)の例]

### 5.3.2.2.2 ガンマ分布を含めた 2 パラメータでの比較

ガンマ分布は、2つの特性パラメータ、 $\alpha$ 、 $\beta$ のうち、 $\alpha$ が形状パラメータであり、これと特定の累積確率における 1 分間降雨強度を与えて確率分布推定を行うことが可能であり、既存の降雨減衰確率推定法において採用されている。パラメータ  $\beta$ については、全国における解析に適用できる値として、強雨期 3 ヶ月の値がいくつかの文献<sup>[2],[3],[5]</sup>に示されているが、年間の値について示されているものは見あたらない。このため、強雨期 3 ヶ月の CDF を用いて比較評価を行うこととした。

図 5-2 及び 5-5 と同様、AMeDAS の 1 分間降水量データから得られた表 5-2 に示した 99 地点における 1 分間降雨強度の複数年を通しての CDF を用い、近似比較を行った。ガンマ分布に対しては、パラメータ  $\alpha$ については、文献[5]に基づき、表 5-4 に示す値を用い、特定の累積確率における 1 分間降雨強度としては 0.0075%値を与え、また、同文献の式(2)を用いて、もう一方のパラメータ  $\beta$ を得ることにより分布カーブを決定している。ガンマ分布以外については、前節と同様の手法に基づいているが、0.75%値及び 0.0075%値を与えた場合について示している。ガンマ分布に対して 0.0075%値を与えたのは、既存の降雨減衰確率推定法で採用されている点を考慮したものである。また、ガンマ分布以外に対し

て、0.75%値及び 0.0075%値を与えたのは、ガンマ分布に 0.0075%値を与えたので、比較のために、一方をこれに合せ、他方を2桁離れたものである。

表 5-4 ガンマ分布近似で用いる強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨強度の CDF のパラメータ

地域名	
九州	0.01
中国, 近畿, 北陸, 東海, 関東, 信越, 北海道	0.005
四国, 東北	0.0075

各分布ごとの累積確率の対数値の RMSE を度数分布比較したものを図 5-7 に示す。

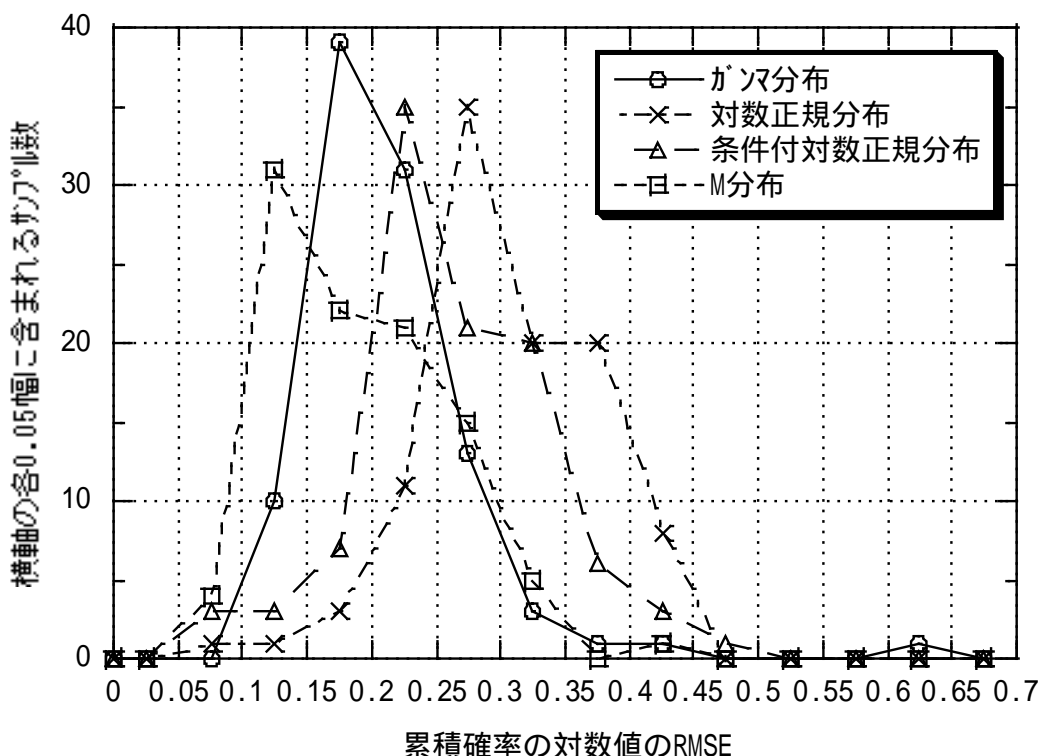


図 5-7 強雨期 3 ヶ月データを用いた近似における累積確率の対数値の RMSE 比較 (ガンマ分布は 0.0075%値と分布のパラメータ、他の分布は 0.75%値と 0.0075%値を与えた)

図 5-2 及び図 5-5 に引き続き、図 5-7 においても、ピークの位置、分布の広がりから判断して、近似精度が最も優れているのは M 分布であり、ガンマ分布がこれに次いでいる。なお、M 分布は、図 5-2 よりも図 5-5 が、図 5-5 よりも図 5-7 が、近似精度が悪くなっているのに対し、ガンマ分布は、図 5-2 よりも図 5-7 の方が良くなっており、図 5-7 においては、両分布の差は小さくなっている。対数正規分布及び条件付対数正規分布は、図 5-2、図 5-5 及び図 5-7 で、かなり形状が異なっており、これらの図の間での両分布の近似精度

を一概に論じることはできないが、いずれの場合においても、M分布に対しては近似精度は明らかに劣っている。

図 5-4、図 5-6 の場合と同様、標準例として東京（1997～2002 年）の場合の実測値と近似曲線の関係を示したものが図 5-8 である。

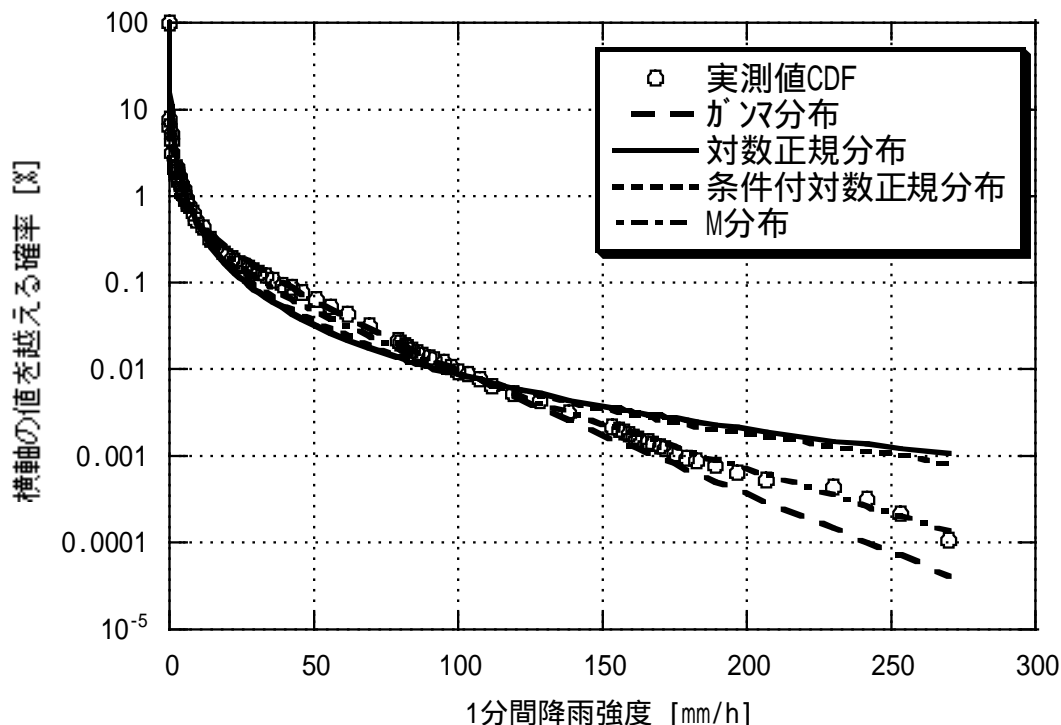


図 5-8 強雨期 3 ヶ月データを用いた近似における近似度比較 [東京(1997～2002 年)の例] (ガンマ分布は 0.0075% 値と分布のパラメータ、他の分布は 0.75% 値と 0.0075% 値を与えた)

図 5-8 において、M 分布については、図 5-4、図 5-6 と傾向はほとんど変わらず、非常に良い近似を示している。ガンマ分布は、図 5-4 の場合に比べ累積確率が大きい領域での近似が良くなっている。対数正規分布、条件付対数正規分布は、図 5-4、図 5-6 の場合と同様、累積確率が小さい部分での開きが目立つ。

### 5.3.3 広い累積確率範囲で最も良い近似を与える分布モデル及び近似方法

前節では広い累積確率範囲において近似比較を行ったが、図 5-2、図 5-5 及び図 5-7 より、近似方法に関わらず、M 分布が最も近似に優れていることが確認された。また、これらの中でも、同分布が最も良い近似を示すのは、全サンプル点近似であり、以降のデータ処理においては、全サンプル点近似を用いることが適当と考えられる。

M 分布は、近似精度の面で優れているのに加え、分布カーブを描く場合において、最小二乗法の応用により、2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与え、その 2 点を通過



するカーブを描く、という簡便な方法が利用できる。特に、この方法が使えないガンマ分布に対しては、以下のような点において有利と考えられる。

数学的処理を含め、手法が簡便であり、扱う者にとって理解し易い、  
近似精度の面で有利である（地点ごとに 2 つのパラメータとも最適な条件を与えられる）

ヒートアイランド現象のように、局所的に気象環境の変化があったような場合にも適応し易い（地点ごとに 2 つのパラメータとも固有の条件を与えられる）。

## 第6章 空間相関特性及び同特性を用いた区間積分

2.2.4 節に示しているように、無線リンクにおける降雨減衰確率を求めるには、一地点（微小区間）における1分間降雨強度の確率分布が与えられている時、空間相関特性を用いて区間積分を行い、無線リンク全体の1分間降雨強度の確率分布を求め、これに降雨減衰係数を乗じる、というようなことを概ね行う（厳密には、降雨減衰係数のパラメータを用いた区間積分を行うなど、若干異なる）。本章では、空間相関特性をより高精度に表し、また、より高精度に区間積分を行う方法について検討した結果を示す。

### 6.1 空間相関特性

空間相関特性については、図3-1に示している11地点に設置した転倒柵型雨量計、及びうち1地点（B点）に併設した降雨強度計により得られた降雨量データを用い検討を行った。

#### 6.1.1 転倒柵型雨量計測定データから得られる空間相関特性の誤差

図4-1(a)及び(b)は、図3-1のB点に設置した転倒柵型雨量計と降雨強度計による1分間降雨量の測定例を、時系列で比較する形で示したものであるが、同図において、分解能の小さい降雨強度計により得られた1分間降雨量の方は、実際の降雨を、ほぼ忠実に再現していると考えられるが、これと比較して、転倒柵型雨量計により得られる1分間降雨量は、分解能が0.5mmであるために、特に弱雨での振舞いが大きく異なり、降雨強度計の方が連続的に観測されている場合でも、0.5mmカウントが、数分から数十分に1回、散発的に現れている。これは、転倒柵型雨量計により得られた1分間降雨量が1分間ごとに降った雨量を正しく表していないためであり、図4-10及び4-11で示した自己相関特性で見られたと同様に、同1分間降雨量から直接空間相関特性を求めたのでは大きな誤差を生じてしまうことが予想された。図3-1の11地点に設置した転倒柵型雨量計により得られた1分間降雨量から直接空間相関を求めたものが、図6-1である。距離が最も小さい、1km程度の場合の空間相関係数は、正しく得られている場合には1に近い値になるべきものが、ここでは0.3程度と小さい値となっており、正しい特性が得られていないことが明らかである。

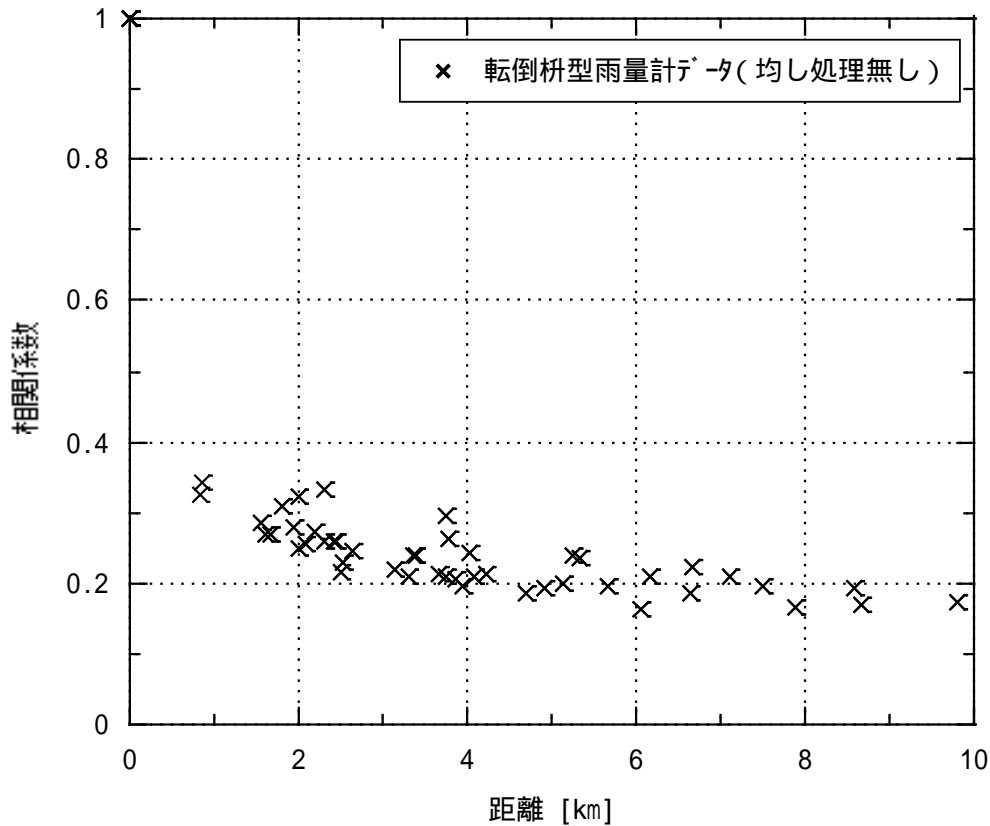


図 6-1 11 箇所に設置した転倒柵型雨量計測定データより直接得た空間相関特性

### 6.1.2 転倒柵型雨量計測定データから空間相関特性を得る場合の均し分配処理の有効性

第 4 章において、気象庁 1 分間降水量データから 1 分間降雨強度の累積分布を精度良く求めることができる乱数補正秒単位均し分配処理について示したが、併せて 4.3 節では、均し分配処理が 1 分間降水量データから自己相関係数を精度良く求めることにも有効であることを示した。時間差に対する相関である自己相関特性において有効であるものは、距離差に対する相関である空間相関特性においても有効であることが予想された。

これを確認するために、図 6-2 に示すような検討を行った。

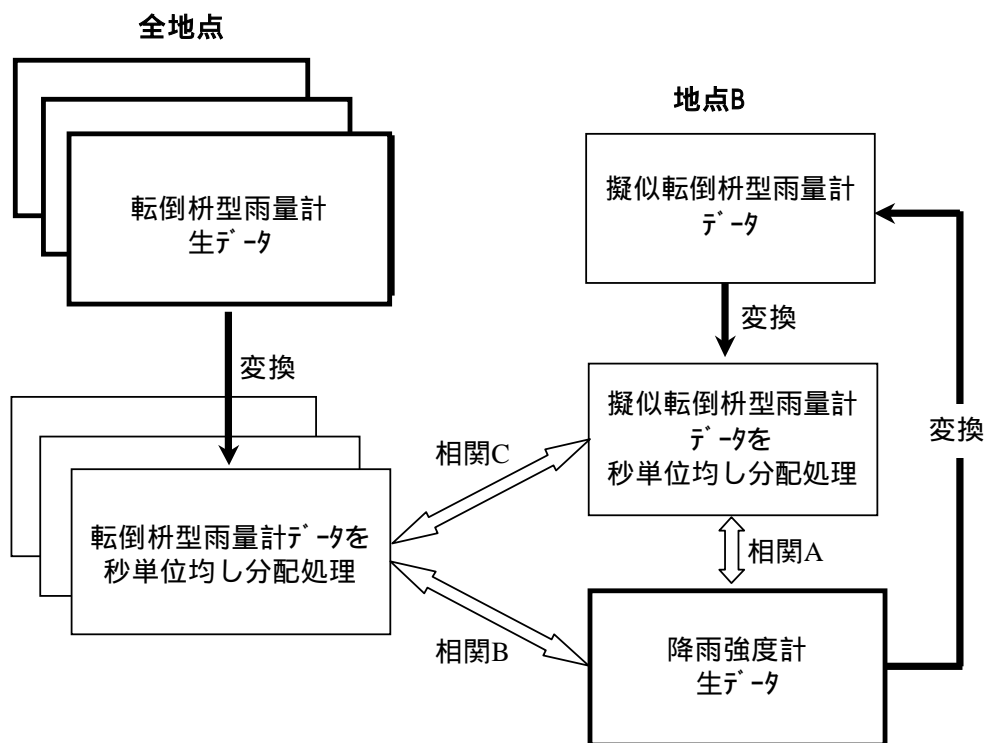


図 6-2 転倒柵型雨量計データから空間相関特性をを求める場合における秒単位均し分配処理の有効性確認

図 3-1 の B 点で得られた、降雨強度計測定データを用い、擬似的に転倒柵型雨量計測定データに相当するデータを作成し（降雨強度計データの 1 カウントごとに 0.0083mm を積算し、0.5mm の整数倍となるたびに 0.5mm カウント発生として秒刻みでカウントするもので、以下、擬似転倒柵型雨量計データという）、さらに、得られた擬似転倒柵型雨量計データに対し秒単位均し分配処理を施す。また、図 3-1 の 11 地点で得られた転倒柵型雨量計測定データに対し秒単位均し分配処理を施す。前者は、元の降雨強度計測定データとの相関（図 6-2 の相関 A）を求めた場合に、これが 1 に近ければ、同データがよく再現されたものとなっていると言えるが、実際に得られた相関は 0.98 であり、十分良い再現が得られていると考えられた。なお、第 4 章は、気象庁データのように、分刻みのデータしか得られない場合に有効な均し分配処理について示したものであり、秒単位均し分配処理において乱数補正が加えられたが、今回用いたデータは、秒刻みでカウントされたものであるため、直接秒刻みのパルス間隔で 0.5mm 雨量を均した後に 1 分ごとにまとめ 1 分間降雨強度を得る、というシンプルな秒単位均し分配処理を行った。また、最大均し時間は、第 4 章の結果に基づき、60 分とした。

11 地点に設置した転倒柵型雨量計測定データに秒単位均し分配処理を施したものと、降雨強度計測定データそのものとの相関（図 6-2 の相関 B）、及び降雨強度計測定データが

ら作られた擬似転倒柵型雨量計データに秒単位均し分配処理を施したものととの相関（図 6-2 の相関 C）を比較したものが図 6-3 である。

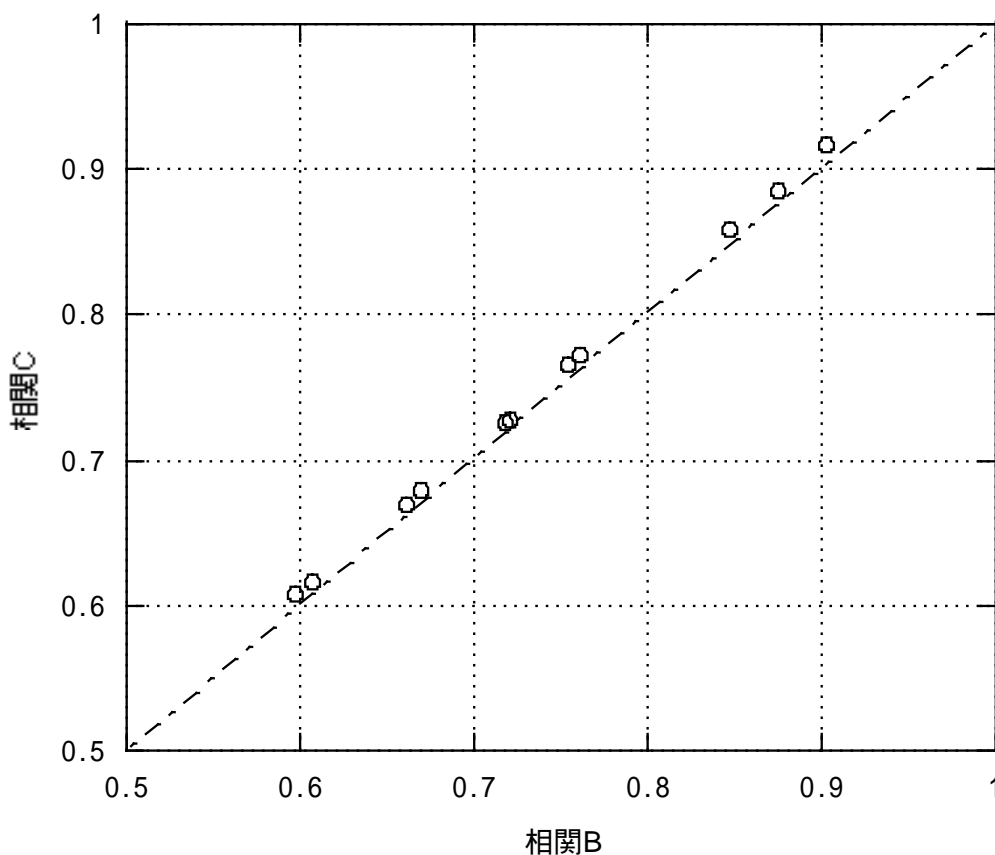


図 6-3 図 6-2 の相関 B と相関 C の比較

図 6-3 より、図 6-2 における相関 B と相関 C は良い一致を示すことがわかる。このことは、転倒柵型雨量計測定データに秒単位均し分配処理を施したものをを用いることにより、降雨強度計測定データ（ほぼ 1 分間降雨強度を正しく表しているとみなせる）を用いて得られるに近い空間相関特性を得ることができることを示していると考えられる。図 3-1 の 11 地点に設置した転倒柵型雨量計測定データに対し秒単位均し分配処理を施して得たデータを用いて、空間相関特性を求めたものが図 6-4 の 印で示したものである。

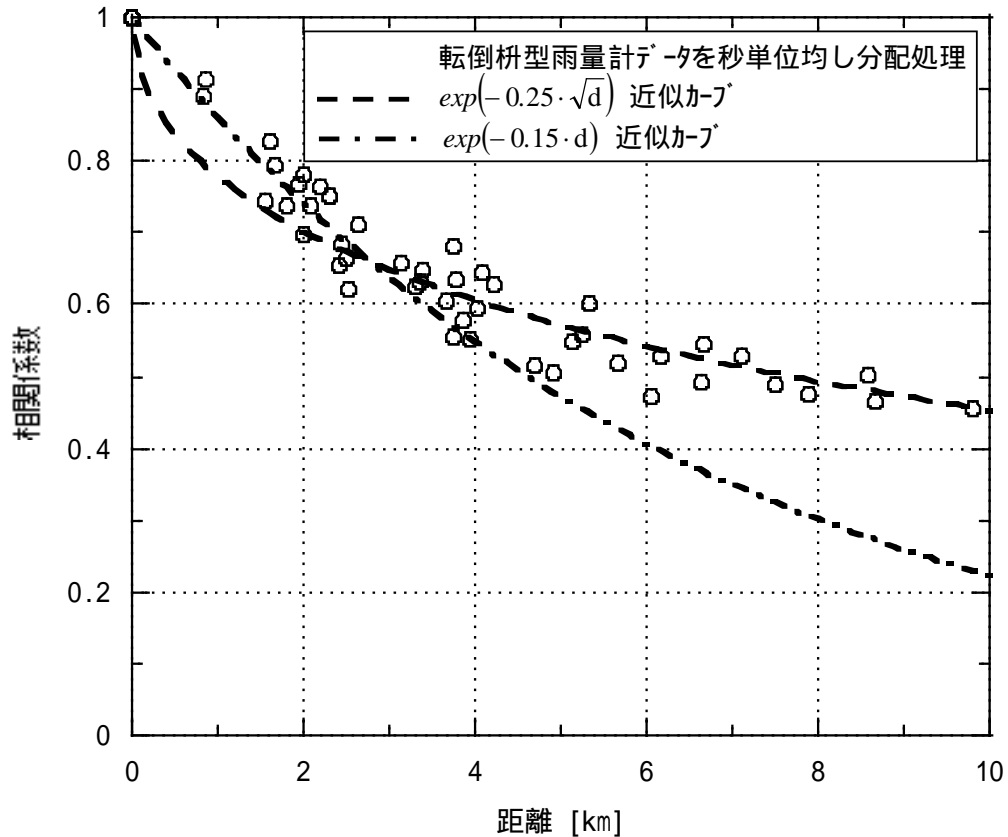


図 6-4 11 箇所に設置した転倒柵型雨量計測定データに秒単位均し分配処理を施して得た空間相関特性

なお、降雨の空間相関特性を求める場合の平均値の考え方について留意すべき点があると考えられるため、以下に示す。

一般的に、各  $m$  個の変数  $x_i$ 、 $y_i$  の相関係数  $\eta_{xy}$  は、次式で表される。

$$\eta_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \mu_x)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \mu_y)^2}} \quad (6-1)$$

ただし、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  : 変数  $x_i$ 、 $y_i$  の標準偏差

$\sigma_{xy}$  :  $x_i$ 、 $y_i$  の共分散

$\mu_x$ 、 $\mu_y$  :  $x_i$ 、 $y_i$  の平均値

降雨減衰確率推定は、回線断を発生させるような降雨減衰量が発生する確率を推定するなどの目的で用いられることが一般的であり、推定対象となるのは、比較的小さい発生確率の強雨となると考えられる。このため、強雨時の空間相関特性が重要となるが、通常、降雨減衰確率は 1 年間の単位とした確率で考えられる。1 年間の 1 分間降雨強度の平均値

は極めて小さい値となり、空間相関を求める場合には、しばしば式(6-1)において平均値を 0 として計算するということが行われ、強雨時に着目する場合にも、これは有効と考えられる。図 6-5 に、期間内の全データを用いた空間相関特性（図 6-4 の 印で示したものと同様条件）と比較する形で、強雨時に着目する場合の例として、同期間内において、1 か所でも 90mm/h 以上の 1 分間降雨強度が観測された時点のデータ（降り始めから降り止むまで）のみを集めて空間相関特性を求めたものを示す。強雨時のみデータから求めた空間相関特性については、平均値を 0 とした場合に加え、比較のために強雨時のみデータから得た平均値を用いた場合についても示しており、後者が期間内の全データを用いた場合との差異がかなり大きいのに対し、前者の差異は小さいことがわかる。

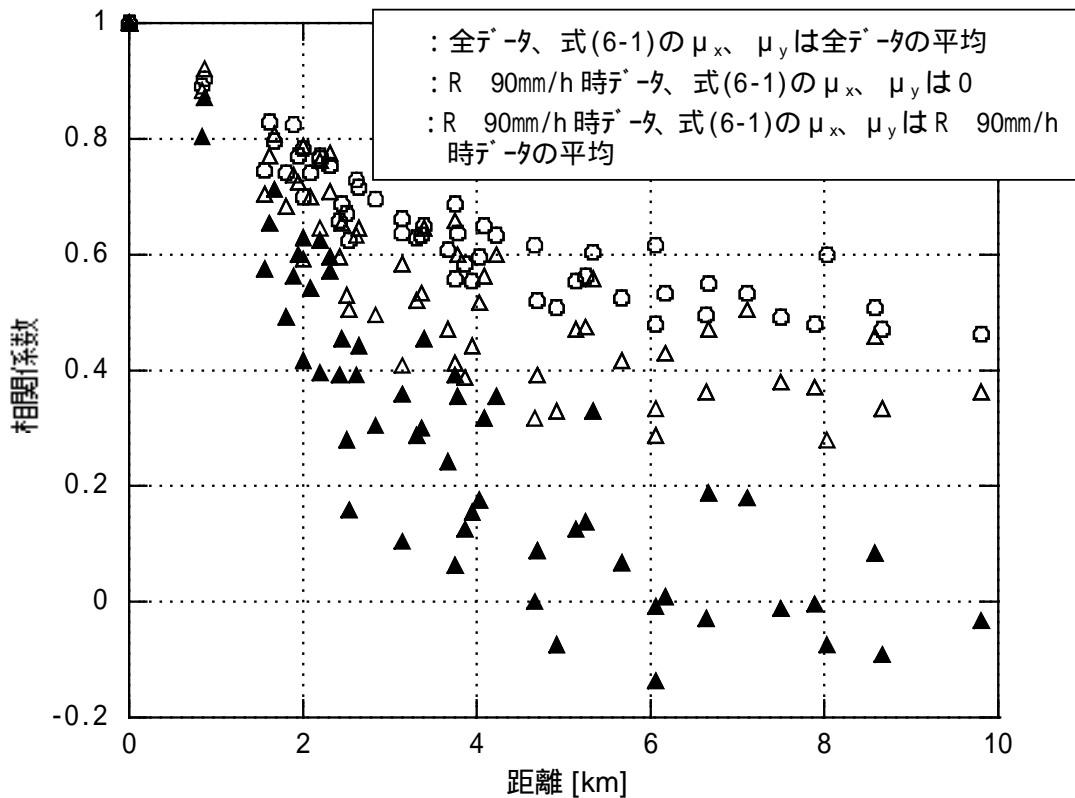


図 6-5 全期間データと強雨時のみデータの空間相関特性の比較  
 （強雨時データについては降雨強度 R 90mm/h が観測された降雨をピックアップ）

広範囲の確率範囲に適用できる降雨減衰確率推定法への適用を考えた場合、対象となる確率または 1 分間降雨強度ごとに異なる空間相関特性を用いることは現実的ではない。これまでの研究<sup>[2]~[5]</sup>においても、確立されているのは、全期間のデータを用いて求めた空間相関特性を降雨減衰確率推定に適用するという手法であり、本研究においても、これに準拠することとした。

## 6.2 M分布を用いる場合の区間の1分間降雨強度の確率分布表現

### 6.2.1 空間相関特性の適用条件

図 6-4 上に、空間相関特性  $\rho(d)$  を近似した場合の例として、 $\rho(d) = \exp(-0.25 \cdot \sqrt{d})$  及び  $\rho(d) = \exp(-0.15 \cdot d)$  のカーブを示している。2~3km 程度の距離を境に、以遠では前者が、近距離では後者が良い近似を示していることがわかる。従来より、国内では、降雨の空間相関特性を表すために、 $\rho(d) = \exp(-\alpha\sqrt{d})$  がよく用いられ、 $\alpha$  としては 0.25~0.3 が適当とされており<sup>[3],[5],[21]</sup>、図 6-4 の 印で示された特性は、これに符合するものとなっている。なお、ヨーロッパにおいては、 $\rho(d) = \exp(-\beta \cdot d)$  を用い、 $\beta$  としては 0.4 前後とすることが適当、との報告が見られる<sup>[25]</sup>。近年、準ミリ波帯やミリ波帯を用いた FWA 等、比較的短距離に適用されるシステムが現れ、また、将来的にも、ますますアクセス系での短距離の利用が増すと考えられることから、距離によって適した特性が異なるのであれば、両特性とも用いることが有効であると考えられる。

一方、先に第 5 章において、降雨減衰確率推定法に用いる最適な分布モデルを評価するために、ガンマ分布、対数正規分布、条件付き対数正規分布、M 分布の 4 つの分布モデルに対し、全国の気象庁 1 分間降水量データから求めた 1 分間降雨強度 CDF に対する近似評価を行った結果として、文献[12]の結論と同様、M 分布が広い累積確率の範囲で最も近似に優れていることを示した。

これらを踏まえ、次節では、分布モデルとして M 分布を用い、空間相関特性を、2~3km 程度を境に、以遠では  $\rho(d) = \exp(-\alpha\sqrt{d})$  を、近距離では  $\rho(d) = \exp(-\beta \cdot d)$  を、それぞれ用いて近似するとした場合に、一地点(微小区間)の降雨強度の確率分布から無線リンク全体の降雨強度の確率分布を求める方法について考察している。

### 6.2.2 一地点の1分間降雨強度の確率分布から区間の同分布を得る積分

2.2.4 節に、一地点(微小区間)の1分間降雨強度の確率分布から無線リンク全体の同分布を得る積分について示している。具体的には、図 2-2 に示すような、距離  $d_L$  の無線リンクにおいて、一地点(微小区間)  $i$  における地点 1 分間降雨強度  $R_i$  の確率分布が与えられている時、その積分値となる無線リンク全体の区間積分 1 分間降雨強度  $R_L$  の平均値  $E(R_L)$ 、分散  $Var(R_L)$  は式(2-13)及び(2-14)で与えられることを示している<sup>[3]</sup>。

確率分布が M 分布に従う場合、平均値  $\mu$  及び標準偏差  $\sigma$  と M 分布のパラメータ  $p$  及び  $u$  との関係は式(2-9)及び(2-10)、並びに式(2-11)及び(2-12)で与えられる。式(2-13)及び(2-14)において、地点 1 分間降雨強度  $R_i$  を M 分布(近似) で表し、そのパラメータ  $p$  及び  $u$  が与えられれば、同分布の  $\mu$  及び  $\sigma$  は式(2-9)及び(2-10)を用いて得ることができる。また、式(2-13)及び(2-14)によって、地点 1 分間降雨強度  $R_i$  の  $\mu$  及び  $\sigma$  から、区間積分 1 分間降雨



強度  $R_L$  の  $E(R_L)$ 、 $Var(R_L)$  が得られれば、M 分布のパラメータ  $p_L$  及び  $u_L$  は、式(2-11)及び(2-12)の関係より、次式のように与えられる<sup>[12]</sup>。

$$u_L = \frac{2R_L^*}{Var(R_L) + E(R_L)^2 - R_L^{*2}} \quad (6-2)$$

$$p_L = R_L^* \exp(u_L \cdot R_L^*) \quad (6-3)$$

ここで、 $R_L^*$  は、次のように与えられる。

$$R_L^* = g\sqrt{Var(R_L)} \quad (6-4)$$

また、 $g$  は次の条件を満たすものとして与えられる。

$$g \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2g^2}{1 + E(R_L)^2 / Var(R_L) - g^2} \right] \times E_L \left[ \frac{2g^2}{1 + E(R_L)^2 / Var(R_L) - g^2} \right] \right\} - \frac{E(R_L)}{\sqrt{Var(R_L)}} = 0 \quad (6-5)$$

以上より、式(6-4)を式(6-2)及び(6-3)に代入することにより、 $u_L$ 、 $p_L$  は、次のように与えられる。

$$u_L = \frac{2g\sqrt{Var(R_L)}}{Var(R_L) + E(R_L)^2 - g^2 Var(R_L)} \quad (6-6)$$

$$p_L = g\sqrt{Var(R_L)} \exp(u_L \cdot g\sqrt{Var(R_L)}) \quad (6-7)$$

ここで、先に示した条件から、 $Var(R_L)$  について与える式(2-14)における空間相関特性の  $\rho(x)$  を、2 種類の特性、 $\rho_1(x) = \exp(-\beta \cdot x)$ 、 $\rho_2(x) = \exp(-\alpha\sqrt{x})$  で表すこととし、距離  $d_L$  の無線リンク区間に対し、0 から 2 種類の特性の交差点となる  $d_{x0}$  までは  $\rho_1(x) = \exp(-\beta \cdot x)$ 、 $d_{x0}$  から  $d_L$  までは  $\rho_2(x) = \exp(-\alpha\sqrt{x})$  で表されるとすれば、 $Var(R_L)$  は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} Var(R_L) &= \left( 2d_L \int_0^{d_L} \rho(x) dx - 2 \int_0^{d_L} x \cdot \rho(x) dx \right) \sigma^2 \\ &= \left\{ 2d_L \left( \int_0^{d_{x0}} \rho_1(x) dx + \int_{d_{x0}}^{d_L} \rho_2(x) dx \right) - 2 \left( \int_0^{d_{x0}} x \cdot \rho_1(x) dx + \int_{d_{x0}}^{d_L} x \cdot \rho_2(x) dx \right) \right\} \sigma^2 \\ &= Var_1 + Var_2 \end{aligned} \quad (6-8)$$

$$\begin{aligned} Var_1 &= \left( 2d_L \int_0^{d_{x0}} \rho_1(x) dx - 2 \int_0^{d_{x0}} x \cdot \rho_1(x) dx \right) \sigma^2 \\ &= \left\{ 2d_L \left[ -\frac{e^{-\beta \cdot x}}{\beta} \right]_0^{d_{x0}} - 2 \left[ -\frac{(1 + \beta \cdot x) e^{-\beta \cdot x}}{\beta^2} \right]_0^{d_{x0}} \right\} \sigma^2 \\ &= \frac{2\sigma^2}{\beta} \left[ d_{x0} e^{-\beta \cdot d_{x0}} + \frac{(1 - \beta \cdot d_L) \cdot (e^{-\beta \cdot d_{x0}} - 1)}{\beta} \right] \end{aligned} \quad (6-9)$$

$$\begin{aligned} Var_2 &= \left( 2d_L \int_{d_{x0}}^{d_L} \rho_2(x) dx - 2 \int_{d_{x0}}^{d_L} x \cdot \rho_2(x) dx \right) \sigma^2 \\ &= \left\{ 2d_L \left[ -\frac{(2 + 2\alpha\sqrt{x}) e^{-\alpha\sqrt{x}}}{\alpha^2} \right]_{d_{x0}}^{d_L} - 2 \left[ -\frac{(12 + 12\alpha\sqrt{x} + 6\alpha^2 x + 2\alpha^3 x^{3/2}) e^{-\alpha\sqrt{x}}}{\alpha^4} \right]_{d_{x0}}^{d_L} \right\} \sigma^2 \\ &= \frac{4\sigma^2}{\alpha^4} \left\{ (6 + 6\alpha\sqrt{d_L} + 2\alpha^2 d_L) e^{-\alpha\sqrt{d_L}} - [6 + 6\alpha\sqrt{d_{x0}} + 2\alpha^2 d_{x0} - \alpha^2 (1 + \alpha\sqrt{d_{x0}}) \cdot (d_L - d_{x0})] e^{-\alpha\sqrt{d_{x0}}} \right\} \end{aligned} \quad (6-10)$$

空間相関特性の近似特性  $\rho_1(x) = \exp(-\beta \cdot x)$ 、 $\rho_2(x) = \exp(-\alpha\sqrt{x})$  の、 $\beta$ 、 $\alpha$  が与えられる時、

これらの交差点  $d_{x0}$  は、

$$d_{x0} = \frac{\alpha^2}{\beta^2} \quad (6-11)$$

で与えられる。なお、 $\alpha=0.25$ 、 $\beta=0.15$  の場合には  $d_{x0}=2.78[\text{km}]$  となる。ただし、 $d_{x0} < d_L$  の場合には  $d_{x0}=d_L$  とする。

以上により区間積分 1 分間降雨強度  $R_L$  の M 分布のパラメータ  $u_L$ 、 $p_L$  が得ることができれば、式(2-8)により累積確率  $F(R_i)$  を得ることができる。

### 6.3 M 分布を用いる場合の降雨減衰量の確率分布表現

#### 6.3.1 1 分間降雨強度の $n$ 乗 ( $n$ は降雨減衰係数のパラメータ) の空間相関特性

無線リンク全体の降雨減衰量は、リンク内の各微小区間の降雨減衰量の積分値として得られる。また、微小区間の降雨減衰量は、周波数と 1 分間降雨強度に依存して決まる降雨減衰係数に微小区間長を乗じたものとして得られる。ここで、1 分間降雨強度と降雨減衰係数の関係は、2.2.1 節に示しているように、ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup> によって、式(2-1) のように与えられる。

式(2-1)に基づく微小区間当りの降雨減衰量の無線リンク全体に対する積分は、地点 1 分間降雨強度の  $n$  乗を無線リンク全体に対して積分したものに  $k$  を乗ずることによって得ることができる。6.2 節に示したと同様にして、地点 1 分間降雨強度の  $n$  乗 (以下、地点  $n$  乗 1 分間降雨強度という) の分布の平均値、分散から、これを区間積分したもの (以下、区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度という) の平均値、分散を得るには、その空間相関特性を知る必要がある。この点について、既存の降雨減衰確率推定法においては、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性はほとんど違いがないとして、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いた積分が行われているが<sup>[2]</sup>、井原他は、文献[26]において、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性がかなり異なることを示している。井原らは、1 分間降雨強度の確率分布が対数正規分布に従うとした場合の、2 種類の空間相関特性の関係を推定するとともに、実験結果と良い一致が得られていることを示しているが、本研究では、第 5 章に示すように、M 分布が広い累積確率の範囲で最も近似に優れていることが確認されたことから、M 分布を用いることが適当であるとしているため、用いる分布モデルが異なる。このような点も考慮し、以降では、分布モデルに依存しない形で、2 種類の空間相関特性の関係について解析した結果を示している。

図 3-1 の 11 地点に設置した転倒柵型雨量計測定データに秒単位均し分配処理を施すことにより得られた 1 分間降雨強度に対し、各 1 分ごとの値を  $n$  乗し、その空間相関特性を

求めたものを図 6-6 に示す。なお、 $n$  の値としては、見易さを考慮し、1 を含む 5 点について示した（具体的には 1 の他に、最小値 0.63、最大値 1.7 及び 1 とそれらの間の各 1 点として 0.8、1.3 を選んだ）。また、図 6-6 上には、各  $n$  における空間相関特性を、2 種類の特性、 $\rho(d)=\exp(-\alpha\sqrt{d})$ 、 $\rho(d)=\exp(-\beta\cdot d)$  で、両特性の交差点  $d_{x0}$  を境として、最小二乗法により近似した場合のカーブも示している。

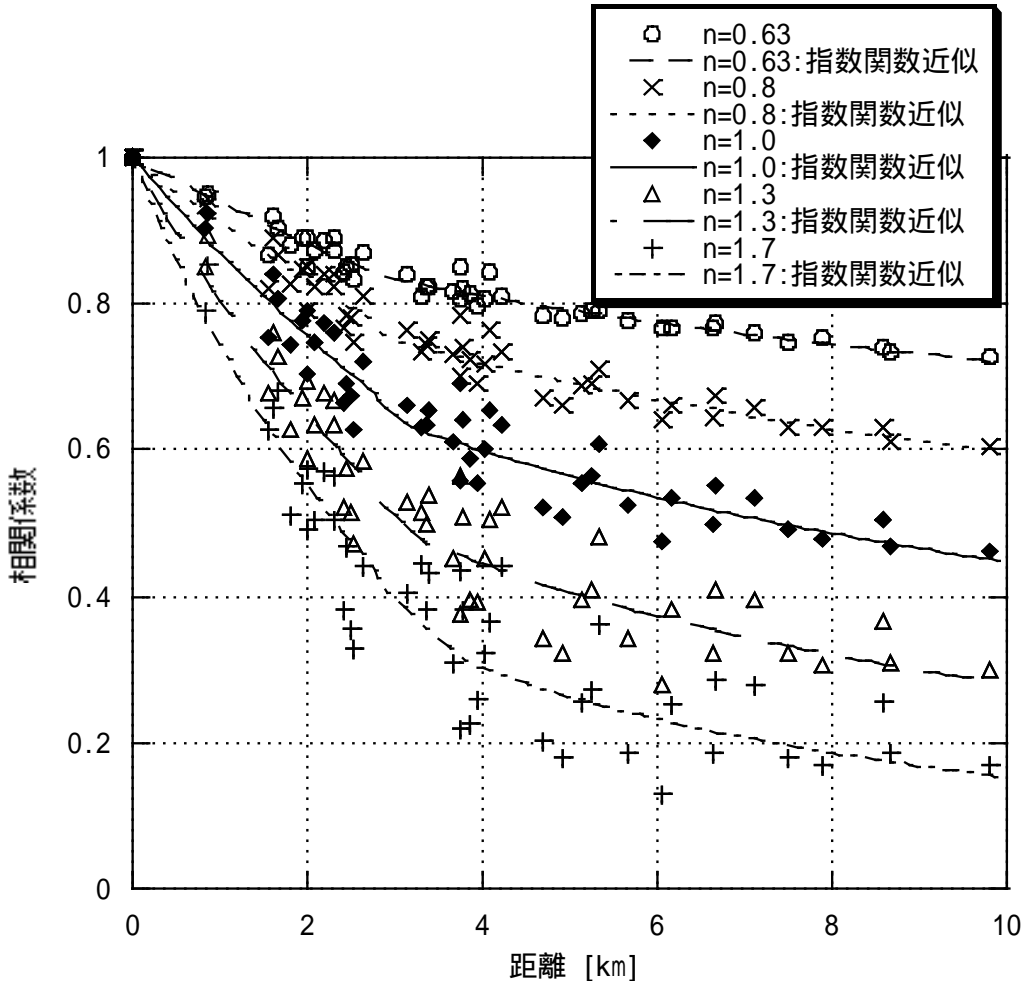


図 6-6 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性 ( $n=0.63$ 、 $0.8$ 、 $1$ 、 $1.3$  及び  $1.7$ )

図 6-6 より、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性は、1 分間降雨強度そのもの、即ち  $n=1$  の場合の空間相関特性の傾向を維持しつつも、 $n$  の値によって大きく異なることがわかる。 $n$  が小さいほど空間相関係数は大きくなり、 $n$  が大きいほど空間相関係数は小さくなっている。これは井原他が文献[26]に示したものと類似した結果となっている。一方、既存の降雨減衰確率推定法の元となっている森田他が示した文献[2]においては、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関係数は 1 分間降雨強度そのものの空間相関係数よりわずかに小さい（1 分間降雨強度そのものの空間相関係数が 0.2 から 0.8 において、1 分間降雨強度の

0.8 乗の空間相関係数は 0.0015 ~ 0.009 小く、同 1.3 乗の空間相関係数は 0.0077 ~ 0.0123 小さい) だけであり、同等として扱ってよいとしているのに対し、図 6-6 では (近似カーブにおいて) 例えば、1 分間降雨強度そのものの空間相関係数が 0.5 の場合に、1 分間降雨強度の 0.8 乗値の空間相関係数は 0.14 大きく、同 1.3 乗値の空間相関係数は 0.16 小さい、というように違いが大きく、同文献とは異なる結果となっている。

井原他が文献[26]に示したものの関係をも、もう少し掘り下げてみるために、図 6-7 に、1 分間降雨強度そのものの空間相関係数と 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関係数の関係を、図 6-6 の近似カーブで与えられた値と文献[26]の付録に示された式(A・6)を用いて得られた値とを比較する形で、同文献の図 1 と同様な表示形式で示す。

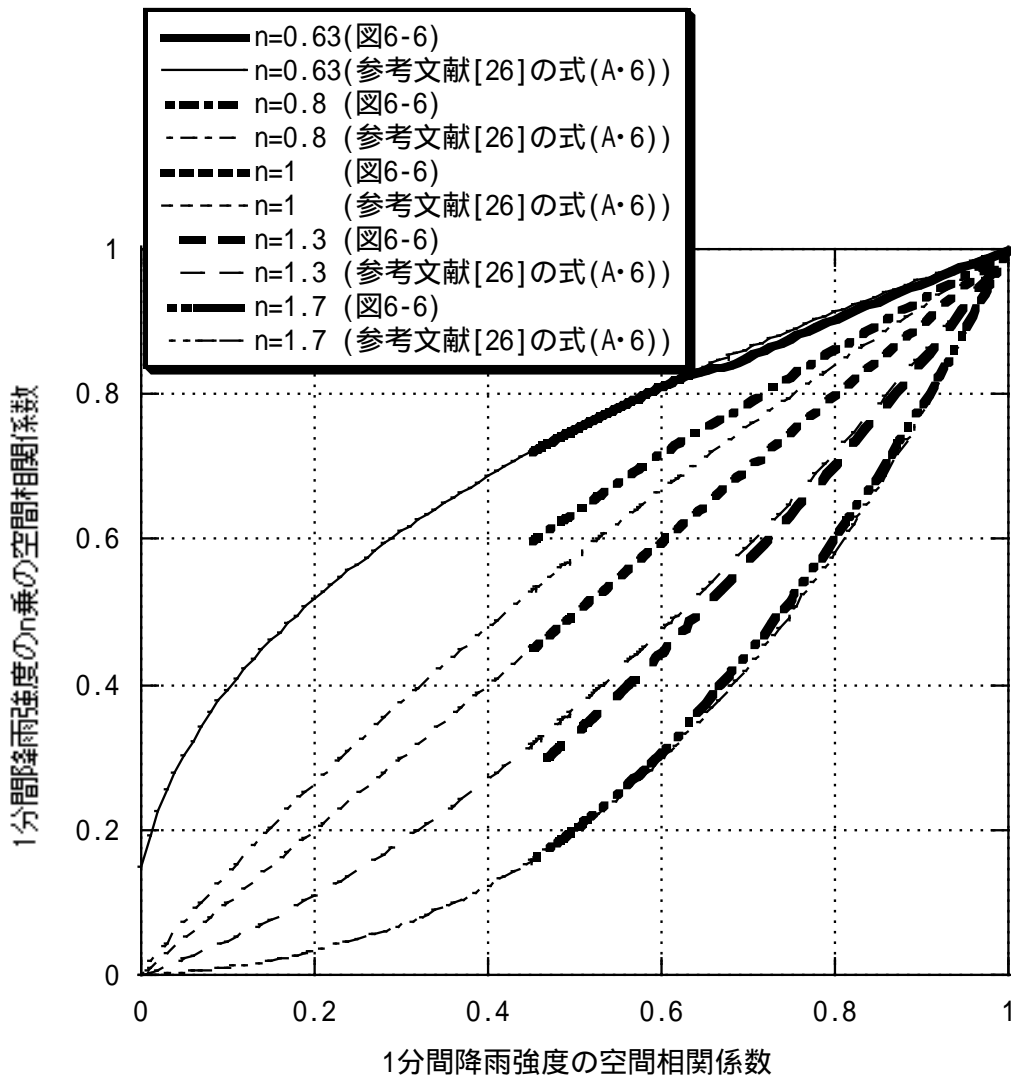


図 6-7 図 6-6 の近似カーブと文献[26]の付録の式(A・6)で得られる関係との比較 (1 分間降雨強度そのものの空間相関係数と 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関係数)

図 6-7 から、文献[26]に示されたものと、今回得られた結果とは、細部では多少の違いはあるものの、全体的には概ね良い一致を示していることがわかる。

1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の  $n$  乗 ( $n > 1$ ) の空間相関特性とは無視できない程度の違いが有り、したがって、地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の平均値、分散から、区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の平均値、分散を得るための積分計算においては、 $n$  が 1 に近い場合を除けば、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いることが必要であると考えられる。この点については 6.3.5 節で再度検証する。

図 6-6 上には、各  $n$  における空間相関特性を、2 種類の特性、 $\rho(d)=\exp(-\alpha\sqrt{d})$ 、 $\rho(d)=\exp(-\beta \cdot d)$  で、両特性の交差点  $d_{xo}$  を境として、最小二乗法により近似した場合のカーブも示している。この場合の近似は、具体的には、 $\alpha=0.25$ 、 $\beta=0.15$  とした場合の、両特性の交差点  $d_{xo}=2.78[\text{km}]$  を境に、近距離側を  $\rho(d)=\exp(-\beta \cdot d)$  で、また遠距離側を  $\rho(d)=\exp(-\alpha\sqrt{d})$  で、それぞれ最小二乗法により近似し、得られた各  $n$  における  $\alpha$ 、 $\beta$  から再度  $d_{xo}$  を求め、再び、得られた  $d_{xo}$  を境に、近距離側を  $\rho(d)=\exp(-\beta \cdot d)$  で、遠距離側を  $\rho(d)=\exp(-\alpha\sqrt{d})$  で、近似する、という方法を用いている。

上記の近似を、より細かい刻みで行い、 $n$  と  $\alpha$ 、 $n$  と  $\beta$  の関係を求め、示したものが図 6-8 である。

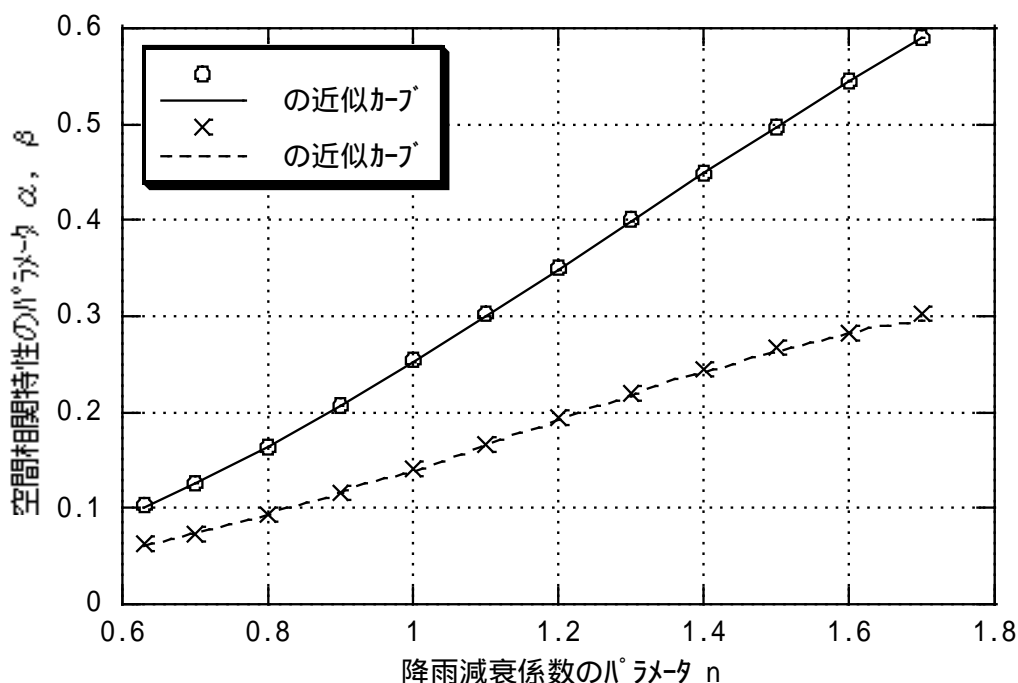


図 6-8 指数関数近似におけるパラメータ  $\alpha$  及び  $\beta$  と  $n$  との関係

図 6-8 において  $n=1$  における  $\alpha$  は 0.25 である。先にも示したとおり、この値は、国内で標準的な値として、これまでも示されてきた値であり<sup>[3],[5],[21]</sup>、空間相関特性としては、

国内における概ね標準的な特性が得られていると考えられる。図 6-8 に示した  $\alpha$  及び  $\beta$  と  $n$  の関係を、扱い易くするために多項式近似で示したものが次式であり、同図には、これらを用いた近似カーブも示した。

$$\alpha = 0.018703 - 0.12013n + 0.47627n^2 - 0.12219n^3 \quad (6-12)$$

$$\beta = 0.099327 - 0.3268n + 0.51996n^2 - 0.1529n^3 \quad (6-13)$$

なお、これらの近似式の RMSE は、 $\alpha$  が 0.0016、 $\beta$  が 0.0032 である。

図 6-8 において、範囲を狭めて  $n=1.5$  (7GHz 弱) ~  $0.8$  (50GHz 前後) の範囲について見てみると、変化はほぼ線形であることから、この範囲に絞って線形近似を行い示したものが次式である。

$$\alpha = -0.22322 + 0.47858n \quad (6-14)$$

$$\beta = -0.10993 + 0.2508n \quad (6-15)$$

また、この場合の RMSE は、 $\alpha$  が 0.0018、 $\beta$  が 0.0025 である。

### 6.3.2 1 分間降雨強度の $n$ 乗の確率分布を M 分布で扱うことについての検証

1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布について検討するに当たって、まず、1 分間降雨強度の確率分布が M 分布に従うとした場合に、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布も M 分布に従うとして扱うことができるか、という点について検討を行う必要があった。

サンプルとして図 3-1 の A 点における転倒柵型雨量計測定データに秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF を用い、まず、これに対し M 分布近似を行い、M 分布に従う 1 分間降雨強度 CDF を得た。続いて、得られた CDF の各累積確率における 1 分間降雨強度を  $n$  乗し、その後に再度 M 分布近似を行い、M 分布近似前後の比較を行った。これらを、違いがよりわかり易いよう、 $n$  が両極端の最小値 0.63 及び最大値 1.7 の場合について、 $n=1$  の場合と比較する形で示したものが図 6-9 である。なお、ここでは 100% 点を除く全点で近似を行っている。また、これらをそのまま 1 つのグラフ上に示すと、降雨強度の最大値は 208mm/h であり、これは  $n=0.63$  の場合は 29、 $n=1.7$  の場合は 8724 となり、 $n=1.7$  以外のカーブが識別しにくい状態となってしまうと考えられたことから、横軸、即ち 1 分間降雨強度の  $n$  乗については、 $n=1$  の場合はほぼ中間点の 100 で、 $n=0.63$  の場合は  $100^{0.63}$  で、 $n=1.7$  の場合は  $100^{1.7}$  で、それぞれ正規化した値で示している。

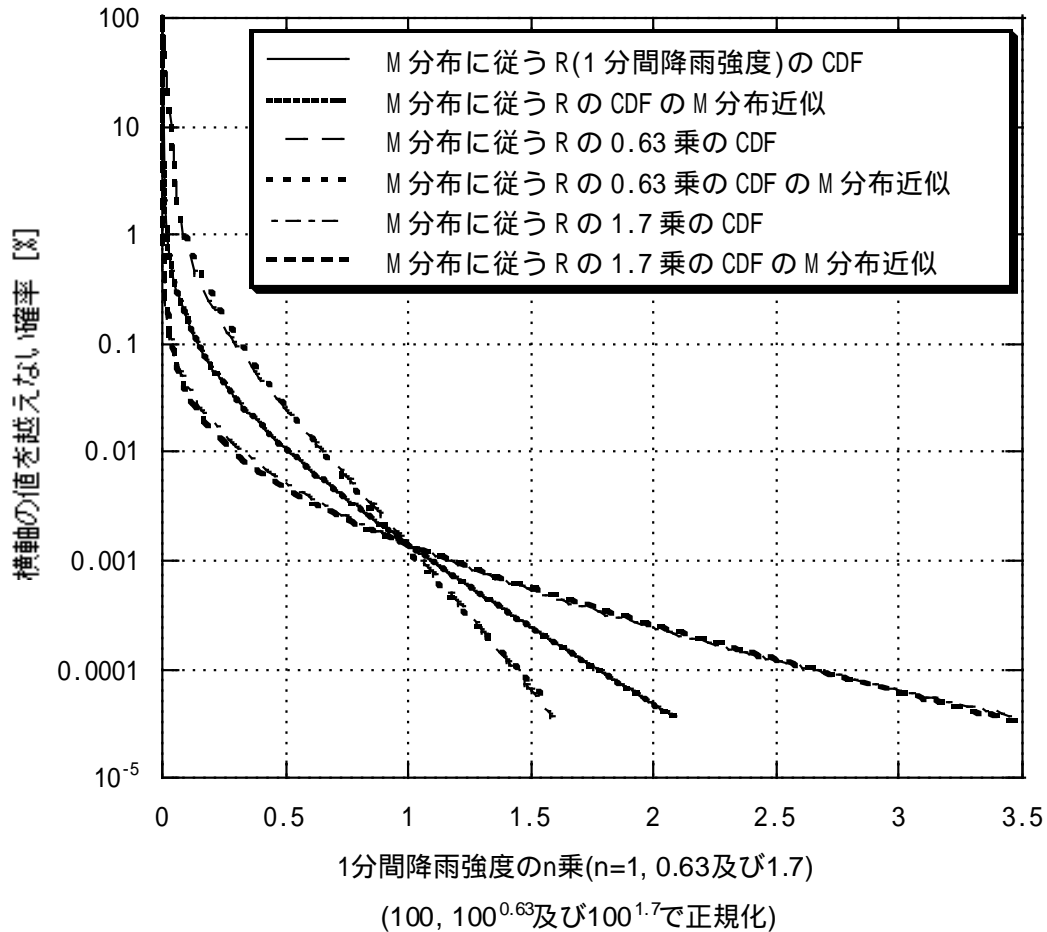


図 6-9 M 分布に従う 1 分間降雨強度の  $n$  乗の CDF とその M 分布近似(全点近似)

図 6-9 において、 $n=1$  の場合、即ち M 分布に従う 1 分間降雨強度そのものの CDF とその M 分布近似は、当然ながら、完全に一致しているが、 $n=0.63$  及び  $1.7$  の場合においては、1 分間降雨強度の  $0.63$  乗または  $1.7$  乗の CDF とその M 分布近似の間には、わずかではあるが、違いが見られる。このことは、1 分間降雨強度の確率分布が M 分布に従うとした場合において、その  $n$  乗 ( $n \neq 1$ ) の CDF は厳密には M 分布に従わないことを意味していると考えられる。しかしながら、降雨減衰確率推定において、1 分間降雨強度の確率分布を M 分布として扱うことは、分布形状の近似に基づくものであり、また、その近似精度 (第 5 章参照) に比較すれば、上記の違いはわずかであり、1 分間降雨強度の  $n$  乗 ( $n \neq 1$ ) の確率分布を M 分布として扱うとしても推定精度に大きく影響を与えるものではないと考えられる。

### 6.3.3 1 分間降雨強度の $n$ 乗の確率分布の簡便かつ有効な M 分布表現

前節に示したように、1 分間降雨強度の確率分布が M 分布に従うとした場合において、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布についても M 分布で扱うことが可能と考えられる。しかしながら、この場合に、1 分間降雨強度の  $n$  乗( $n-1$ )の CDF は厳密には M 分布に従わないことから、前者の M 分布のパラメータから、後者を M 分布で扱うとした場合のパラメータを理論的に求めることは困難である。したがって、後者の M 分布のパラメータについても M 分布近似により求めることが、簡便で、かつ有効であると考えられる、

具体的には、実効的かつ簡便な方法として、前節に示した方法により 1 分間降雨強度の  $n$  乗の CDF を得、その中から少数の点、例えば、2 点、特定の累積確率における 1 分間降雨強度の  $n$  乗を抽出し、それらの点を通過する M 分布を求め、その M 分布のパラメータ  $u$ 、 $p$  を得る、という方法が考えられる。前節と同一の条件 (図 6-9) において、1 分間降雨強度の  $n$  乗の CDF の 2 点を抽出し、これらを通過する M 分布を求め、0.1%以下の点について、元となる 1 分間降雨強度の  $n$  乗の CDF に対する誤差を求め、RMSE を全点近似の場合と比較する形で示したものが図 6-10 である。なお、第 5 章では、2 点として 0.3%及び 0.003%を用いているのに対し、ここでは 0.1%及び 0.001%、0.1%及び 0.0001%、

0.01%及び 0.0001%を用いている。その理由は次のようである。第 5 章の場合は、生データからの近似も想定し、小さい側の累積確率 (0.003%) における 1 分間降雨強度についても統計的に安定な値が得られるということを考慮し選定しているのに対し、ここでは、1 分間降雨強度の生データから得た CDF を一旦 M 分布(近似)で表した後、その各累積確率における 1 分間降雨強度を  $n$  乗したものが元となることから、分布としては分布パラメータを用いて与え直したものが元となっており、そのような制限がない。实用無線通信システムの回線品質目標としては 0.1%以下の範囲を想定しておけば十分であろうと考えられることから、0.1%以下の点で選択することが適当と考えられた。また、2 点の選択のし方が誤差の大きさにかなり影響を与えることから、複数の条件での確認が必要と考えられた。

図 6-10 より、0.01%及び 0.0001%の 2 点で近似した場合が、全点近似とほぼ同等で、2 点近似の中では最も良い近似精度が得られていることがわかる。降雨減衰確率推定法への適用を考えた場合には、この条件を用いることが適当であると考えられる。

図 6-11 に、図 6-9 と同様な条件で、0.01%及び 0.0001%の 2 点で近似した場合について示す。細かく見ると、わずかな違いはあるものの、図 6-10 の結果からも予想されるとおり、図 6-11 は図 6-9 と比較し、ほとんど劣らない近似が得られている。



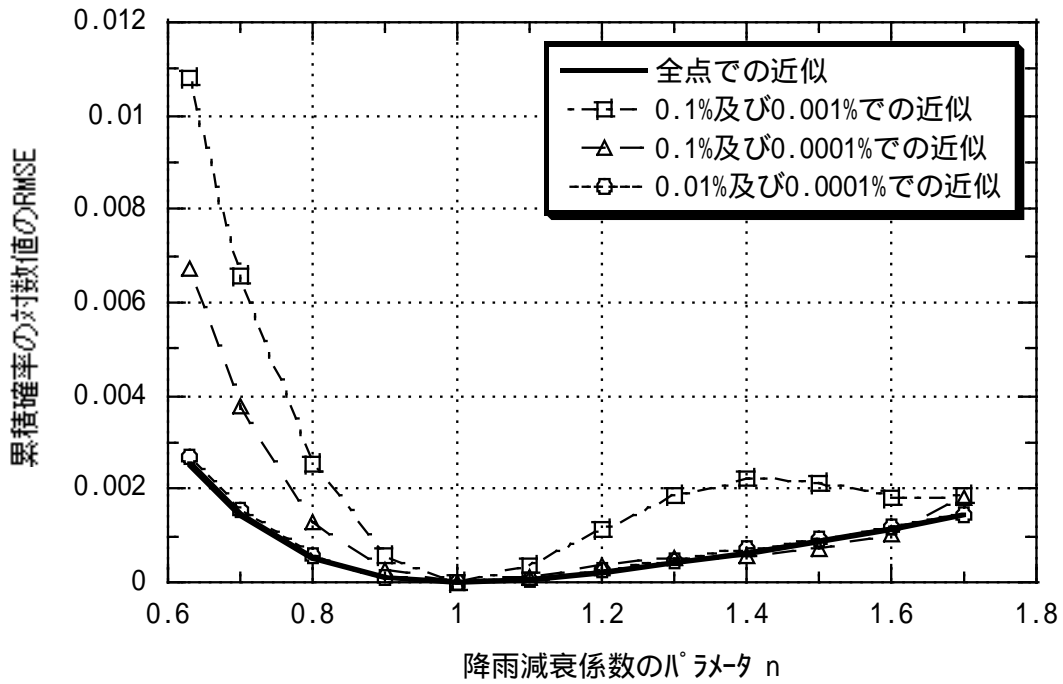


図 6-10 1 分間降雨強度の  $n$  乗の CDF とその M 分布近似 (全点及び 2 点) の RMSE (累積確率が 0.1% 以下の範囲について RMSE を算出)

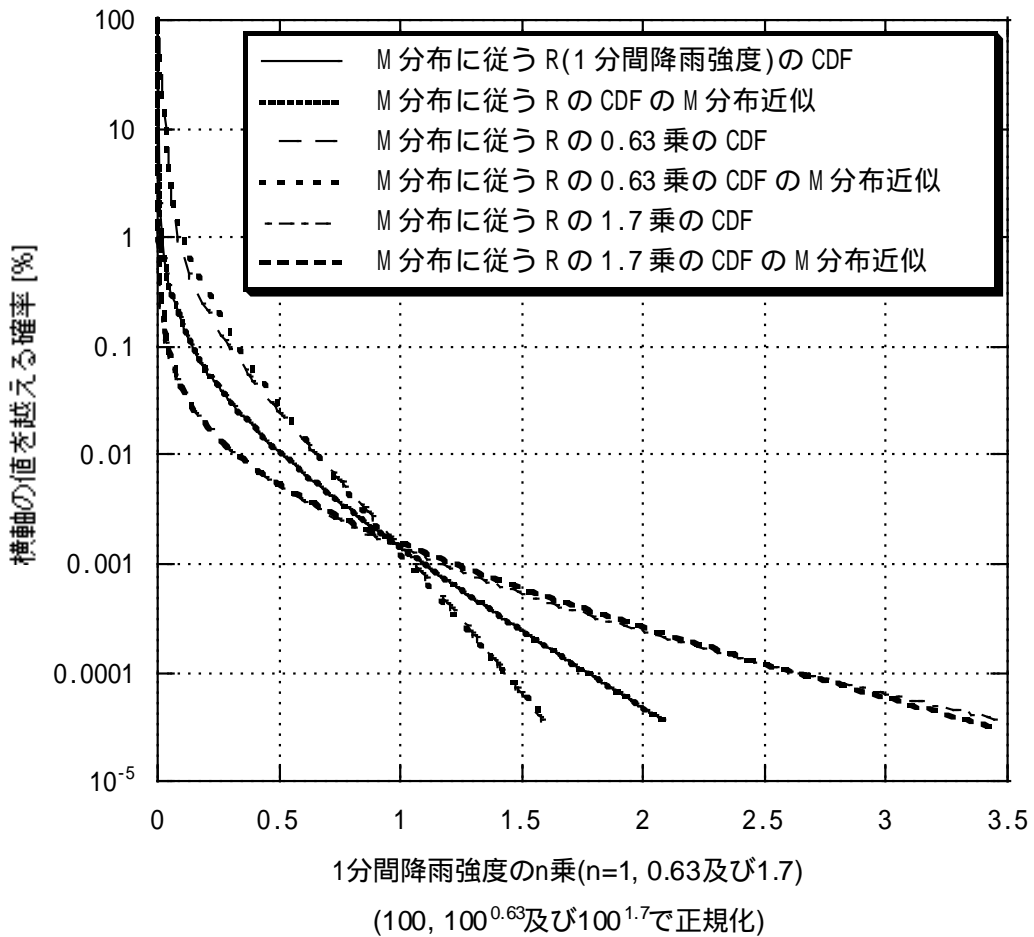


図 6-11 M 分布に従う 1 分間降雨強度の  $n$  乗の CDF とその M 分布近似 (2 点近似) (2 点は 0.01% 及び 0.0001%)

### 6.3.4 地点 $n$ 乗 1 分間降雨強度確率分布から区間積分 $n$ 乗 1 分間降雨強度確率分布を求める手順

6.3.2 及び 6.3.3 節より、地点 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) から地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) のパラメータ  $u$ 、 $p$  が、また、6.3.1 節の式(6-12)及び(6-13) (7GHz 程度 ~ 50GHz 程度に限定するのであれば式(6-14)及び(6-15)も使用可) により  $u_L$ 、 $p_L$  が、それぞれ得られれば、式(2-7) ~ (2-12)、式(2-13) ~ (2-14)及び式(6-2) ~ (6-11)を用いて、6.2.2 節に示した手法により、区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) のパラメータ  $u_L$ 、 $p_L$  を得ることができる。

### 6.3.5 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性を用いる場合の誤差

6.3.1 節において、1 分間降雨強度の  $n$  乗 ( $n > 1$ ) の空間相関特性が、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性とは、かなり異なること、及び  $n$  と空間相関特性の関係を示す近似式を示し、また、6.3.2 ~ 6.3.4 節において、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いて、地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布から区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布を得る方法を示した。

地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布から区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布を得る場合において、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いることの必要性を確認するために、図 6-6 の場合と同様、 $n=0.63$ 、 $0.8$ 、 $1.3$  及び  $1.7$  の場合について、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を使用する場合と、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を使用する場合の、区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の累積確率値の差異がどの程度となるかを、前者に対する後者の誤差率の形で示したものが図 6-12 である。

具体的には、6.3.2 節で用いたサンプル、即ち、図 3-1 の A 点における転倒桁型雨量計測定データを用い、次のような処理を行った。まず、測定データに秒単位均し分配処理を施して 1 分間降雨強度 CDF を作成し、この M 分布近似を行う。続いて、M 分布近似後の CDF の各累積確率における 1 分間降雨強度を  $n$  乗 ( $n=0.63$ 、 $0.8$ 、 $1.3$  及び  $1.7$ ) した後、再度 M 分布近似を行い、得られた分布のパラメータ  $p$ 、 $u$  を求める。得られた  $p$ 、 $u$  より、式(2-9)及び(2-10)を用いて、平均値  $\mu$ 、分散  $\sigma^2$  を求め、式(6-12)及び(6-13) (7GHz 程度 ~ 50GHz 程度に限定するのであれば式(6-14)及び(6-15)も使用可) により得られる各  $n$  における  $u_L$ 、 $p_L$  を用いて、距離が 1 ~ 10km の場合について、式(2-13) ~ (2-14)及び式(6-2) ~ (6-11) により区間積分を行い、M 分布のパラメータ  $p_L$ 、 $u_L$  を求め、また、 $n=1$  における  $u_L$ 、 $p_L$  を用いて、同様に、距離が 1 ~ 10km の場合について、区間積分を行い、M 分布のパラメータ  $p_L$ 、 $u_L$  を求める。各  $n$  における  $u_L$ 、 $p_L$  を用いた場合の  $p_L$ 、 $u_L$ 、及び  $n=1$

における、 $p_L$ 、 $u_L$ を用いた場合の $p_L$ 、 $u_L$ を用いて、それぞれにおける累積確率 0.01%、0.001%及び 0.0001%における 1 分間降雨強度を求め、前者の 1 分間降雨強度から後者の 1 分間降雨強度を差し引いた結果を、前者の 1 分間降雨強度で除した値を、誤差率として求め、図 6-12 に示している。符号は、前者より後者が大きい場合を正、逆を負としている。

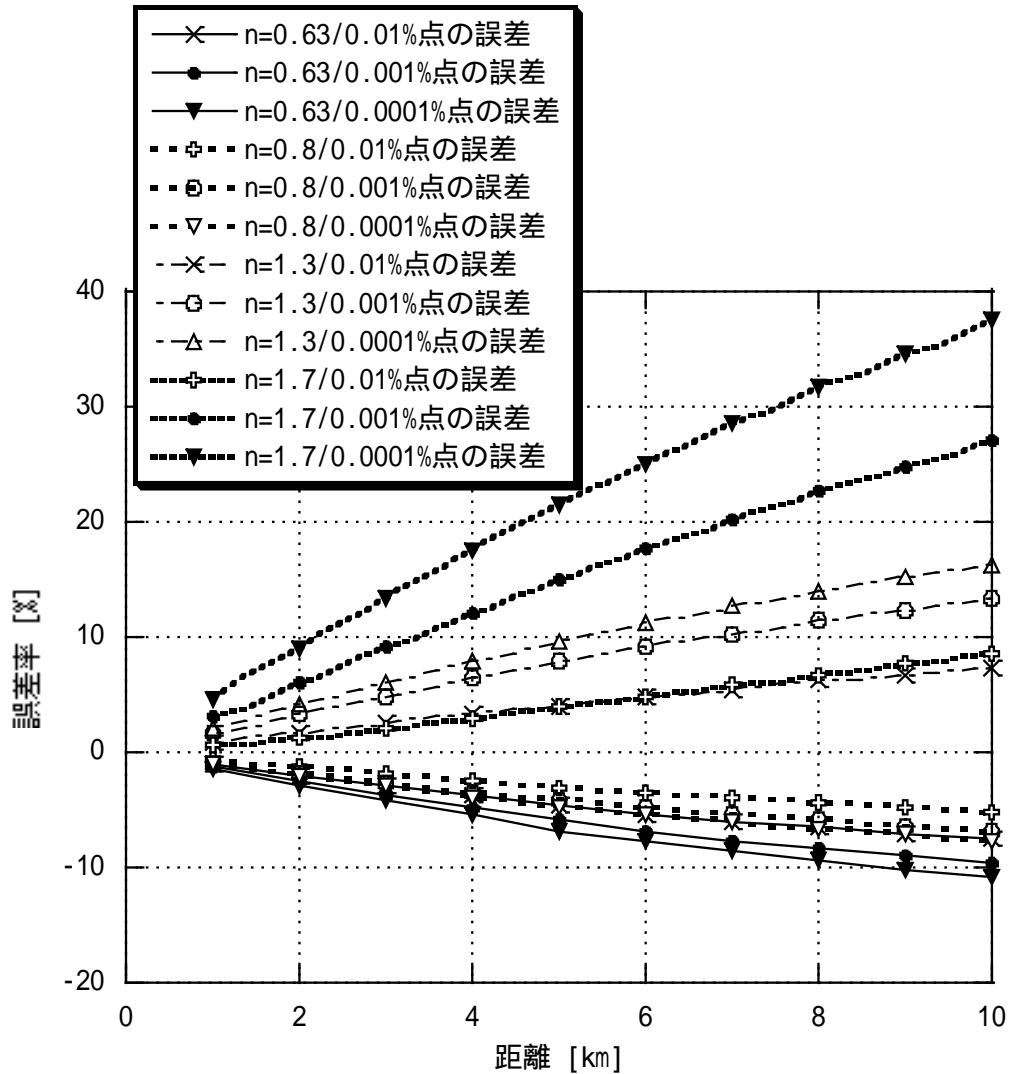


図 6-12 1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性の使用有無による区間積分における誤差

地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布から区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布を得る場合において、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性を用いる場合の区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度 CDF に対する 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いる場合の区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度 CDF の誤差率 =  $\frac{\text{前者} - \text{後}}{\text{前者}} \times 100[\%]$

図 6-12 より、特に  $n$  が 1 より大きい側、即ち周波数が低い側の方が誤差が大きくなることがわかる。また、誤差の大きさは、 $n$  の値、即ち周波数及び偏波、並びに距離及び着目する累積確率に依存する。

ここで、図 2-1 と見比べながら考えると、 $n=1.7$  は 5GHz 前後、 $n=1.3$  は 9GHz 前後、 $n=0.8$  は 50 GHz 前後、 $n=0.63$  は 500GHz 前後における値である。現有の無線通信システムにおいて、降雨減衰の影響を考慮しなくてはならない無線システムとしては、低い周波数帯のものでは 7GHz 程度の周波数を使用する地上マイクロ波通信システム等から、高い周波数帯では 50GHz 帯を使用する固定アクセス通信システム等まで、種々なシステムが存在するが、将来的にはさらに適用周波数帯が広がる可能性も予想される。

以上のことから、周波数に依存せず、汎用性の高い、高精度の降雨減衰確率推定法の確立に当っては、地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布から区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布を得る場合において、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性の使用が不可欠と考えられる。

## 第7章 気象庁降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く 得る手法 - 10分間&1時間降水量データから - [ 異積分時間降雨強度確率分布変換手法 ]

AMeDASは、先に示したように、1時間降水量データが最長1976年から、また10分間降水量データが最長1994年から取得されており、より長期間のデータに基づく降雨減衰確率に関する検討を可能とするには、1時間降水量データを用いた1分間降雨強度の確率分布の精度良い推定を可能とすることが必須である。また、10分間降水量データが得られている地点においては、精度的には、より積分時間の短い10分間降水量データを用いることが有効であると考えられる。本章では、10分間及び1時間降水量データから精度良く1分間降雨強度CDFを得るための異積分時間降雨強度確率分布変換について検討した結果を示す。

### 7.1 検討に用いたデータ

全国148地点のAMeDASにより得られた最長1996年から2002年までの1分間、10分間及び1時間降水量データを入手し、うち1年以上の期間に対して解析可能なデータが得られた136地点分のデータを解析に用いた。

AMeDASの1分間降水量観測は1995年から導入され、早いものは1996年からデータが得られているが、5.1節に示したように、1年間通してのデータを用いて解析する場合には1996年からのデータが使用できるケースはなく、解析可能なデータが得られた年数の最長は6年(1997年~2002年)であった。一方、本章では、豪雪地域においては豪雪期間を除く7ヶ月(4~10月)のデータを用いた解析も行われているが、1996年においても4月以降であればデータが正常である地点があったため、この場合の解析可能なデータが得られた年数の最長は7年(1996年~2002年)であった。

これらのデータを用い、1分間降水量データに対しては、第4章に示した乱数補正秒単位均し分配処理を施し1分間降雨強度CDFを求めたものと、10分間及び1時間降水量データからそのままCDFを求めたものを、以降に示す検討に用いた。なお、1分間降水量データから1分間降雨強度CDFを得る際に用いた乱数補正秒単位均し分配処理は、最大均し時間を、第4章に示した内容に基づき、60分とするとともに、10個の乱数パターン(初期値を変えた)を用いた秒単位均し分配処理によりCDFを求め、その平均値カーブを求める、という処理を行っている。

## 7.2 既存の異積分時間降雨強度確率分布変換手法の変換精度

### 7.2.1 既存の変換手法

2.4.1 節に示したように、既存降雨減衰推定法に用いているパラメータである強雨期 3 ヶ月の 1 分間降雨量の 0.0075% 値は、旧日本電信電話公社（現日本電信電話（株））が、1940～1950 年代に気象庁の観測システムにおいて自記記録紙に記録された降雨量データから、強雨期 3 ヶ月（7～9 月）等における 10 分間降雨量及び / または総降雨量などを読み取るとともに、総降雨量と 10 分間降雨量の 0.0075% 値との関係を求め、また、10 分間降雨量と 1 分間降雨強度の自己相関に関する研究結果に基づき 10 分間降雨量の 0.0075% 値と 1 分間降雨強度の同% 値との関係を求めるなどし、とりまとめたものであるが<sup>[2]</sup>、この研究では 1 時間降雨量から 1 分間降雨強度 CDF を求める手法は示していない。

10 分間及び 1 時間降水量データのいずれからでも 1 分間降雨強度 CDF を得ることができる異積分時間降雨強度確率分布変換手法で、既に提案されているものとしては、以下に示す細矢が提案した M 分布を用いる手法<sup>[12]</sup>（以下、細矢法という）及びその応用である秋元他が提案した手法<sup>[14]</sup>（以下、秋元他法という）をあげることができ、これらについて検討した結果を以下に示す。

#### 7.2.1.1 細矢法<sup>[12]</sup>

1 分間降雨強度及び N 分間降雨強度の確率分布が M 分布に従うものとする。M 変量 R の確率密度関数  $f(R)$  及び  $R_i$  から無限大までの累積確率  $F(R_i)$  は、式(2-7)及び(2-8)で与えられる。

M 分布に従う 1 分間降雨強度の確率分布の平均値  $\mu_{M1m}$ 、標準偏差  $\sigma_{M1m}$  と、同 N 分間降雨強度の確率分布の平均値  $\mu_{MNm}$ 、標準偏差  $\sigma_{MNm}$  の関係が次式で与えられ、N 分間降雨強度の確率分布が与えられれば、1 分間降雨強度の確率分布を得ることができる。

$$\mu_{M1m} = \frac{\mu_{MNm}}{N} \quad (7-1)$$

$$\sigma_{M1m}^2 = \frac{\sigma_{MNm}^2}{\left[ N + 2 \sum_{t=1}^{N-1} (N-t)\rho(t) \right]} \quad (7-2)$$

ただし、 $\mu_{M1m}$ 、 $\sigma_{M1m}$  及び  $\mu_{MNm}$ 、 $\sigma_{MNm}$  は 1 分間及び N 分間降雨量の単位で表したものであり、それぞれ [mm/min] 及び [mm/N min] であり、降雨強度 [mm/h] で扱う場合には単位換算が必要であることに注意を要する。また、 $\rho(t)$  は 1 分間降雨強度の自己相関特性であり、

$$\rho(t) = e^{-\eta\sqrt{t}} \quad (7-3)$$

の関係を満たすものとし、 $\eta$  については、国内の代表的な 8 地点における検証に基づく実

効的な値として 0.247 を用いることが適当としている。

#### 7.2.1.2 秋元他法<sup>[14]</sup>

基本的な手法としては細矢法と同様であるが、細矢法が自己相関特性  $(t)$  を表す指数関数の係数  $\alpha$  として固定値 0.247 を用いることとしているのに対し、M 分布に従う 2 種類の積分時間降雨強度（例えば、10 分間及び 1 時間降雨強度）の確率分布の標準偏差が得られれば、式(7-2)及び(7-3)を用い、いずれの積分時間降雨強度からも同一値の  $M_{1m}$  が得られ、また、その場合の  $\alpha$  は等しいものとして、地点ごとの  $\alpha$  を求めることができ、得られた  $\alpha$  を用いて、M 分布に従う 1 分間降雨強度の確率分布の標準偏差を、地点ごとに得ることを提案している。

#### 7.2.2 既存の変換手法の変換精度

細矢法は、先に示したように、自己相関特性  $(t)$  を表す指数関数の係数  $\alpha$  として固定値 0.247 を用いることとしているが、雨の降り方は地域によって異なり、自己相関特性も一様ではないと考えられ、これが変換精度に影響を与える可能性が考えられる。また、細矢法、秋元他法に共通するものとして、確率分布を M 分布で表す場合の近似精度についても、変換精度に影響を与える可能性が考えられる。7.1 節に示した、1 年以上の期間に対して解析可能な AMeDAS の 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データが得られた全国 136 地点における最長 6 年分のデータを用い、単年及び複数年、計 617 のサンプルに対して、上記、細矢法、秋元他法を適用し、変換精度について検討を行った。

##### 7.2.2.1 細矢法

まず、全国 136 地点における 10 分間及び 1 時間降水量データから CDF を求めたもの、各 617 サンプルに対し、M 分布近似を行い、M 分布パラメータ  $u$ 、 $p$  を求め、さらに、 $u$ 、 $p$  から平均値、標準偏差を求めた（式(2-9)及び(2-10)）。得られた平均値、標準偏差から、細矢法に基づき、1 分間降雨強度の平均値、標準偏差を求め（式(7-1)～(7-3)）、続いて、これらから M 分布パラメータを求め（式(2-11)及び(2-12)）、M 分布により与えられる 1 分間降雨強度 CDF を得た。また、同地点、同年の 1 分間降水量データに対し乱数補正秒単位均し分配処理を施して得た 1 分間降雨強度 CDF、617 サンプルに対し、M 分布近似を行い、M 分布で表される 1 分間降雨強度 CDF を得た。

図 7-1 に、標準的ケースとして、名古屋の複数年（1997～2002 年）のケースについて、1 分間降水量データから求めた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似により得られた CDF と、10 分間及び 1 時間降水量データから細矢法に基づき得られた 1 分間降雨強度 CDF

を比較したものを示す。

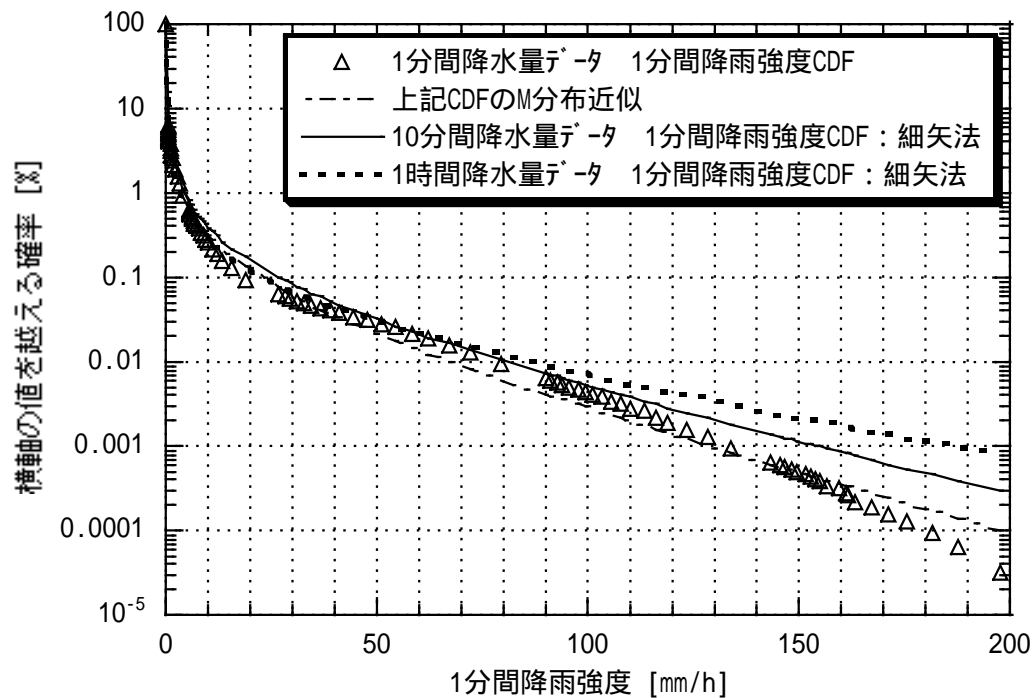


図 7-1 10 分間・1 時間降水量データから細矢法を用いて得られた 1 分間降雨強度 CDF と 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似の関係 [名古屋 (1997 ~ 2002 年)の例]

また、図 7-2 に、全国の 617 サンプルについて、1 分間降水量データから得られた M 分布近似後の 1 分間降雨強度 CDF に対する、10 分間及び 1 時間降水量データから細矢法に基づき得られた 1 分間降雨強度 CDF の誤差を、前者の累積確率 0.01 ~ 0.0001% の範囲において、累積確率の対数値の RMSE の形で求め、度数分布として示した。累積確率 0.01 ~ 0.0001% の範囲としたのは、回線設計等における品質目標設定などで対象となる可能性の高い範囲を想定したものである。なお、度数分布は横軸の各 0.1 幅に含まれる頻度（厳密には、各 0.1 幅の小さい側の値以上、大きい側の値未満 に含まれる頻度）を示している。ちなみに、図 7-1 の名古屋の例の場合の RMSE は、10 分間降水量データからの変換の場合は 0.341、1 時間降水量データからの変換の場合は 0.592 である。



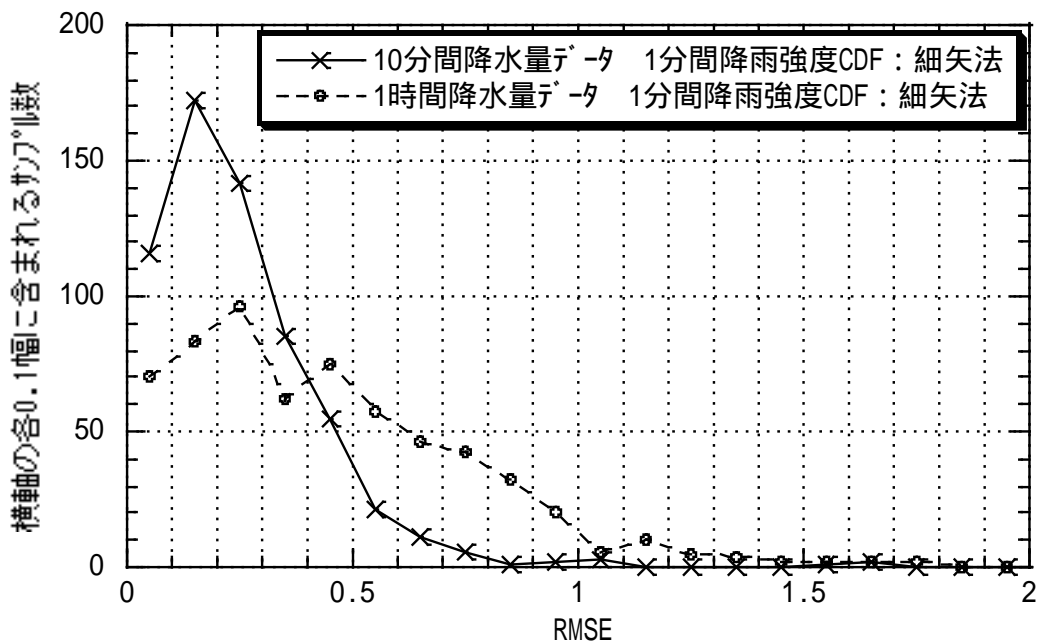


図 7-2 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データから細矢法を用いて得られた同 CDF の誤差 (全国 136 地点 617 サンプル / 0.01 ~ 0.0001% における累積確率の対数値の RMSE)

図 7-2 の横軸は、累積確率の対数値の RMSE を示しているが、誤差の大きさが直感的にわかりにくいいため、この値が累積確率を対数目盛で表した場合にどのようになるかを、図 5-3 と同様な考え方で、示したものが図 7-3 である。

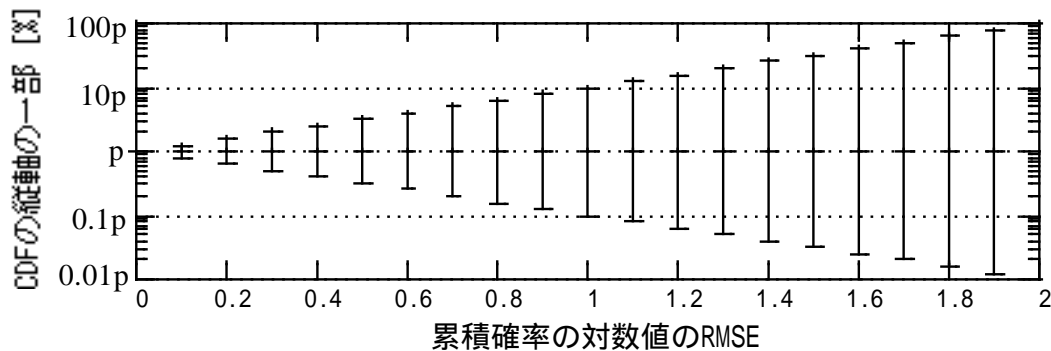


図 7-3 累積確率の対数値の RMSE の大きさをわかりやすく示した例

より長期間のデータに基づく降雨減衰確率に関する検討を可能とするには、1 時間降水量データを用いた 1 分間降雨強度の確率分布の精度良い推定を可能とすることが必須である。しかしながら、図 7-3 を参照しつつ図 7-2 を見た場合、1 時間降水量データからの変換における RMSE には大きい値が多数含まれ、改善が必要と考えられた。自然の振る舞いである降雨の確率分布の近似が処理のベースとなっており、近似誤差に伴う変換誤差は避けられないと考えられたが、誤差をどこまで追い込めるかを予見することは困難であ

った。一方、同様に近似誤差がある中で、10 分間降水量データからの変換における RMSE は比較的良好な分布となっており、実現可能な目標として、これと同等程度にまで改善することを目指すことが適当であると考えられた。具体的には、10 分間降水量データからの変換の場合の RMSE の多くは 0.5 以下(92.4%)であり、また 0.5 は切りが良い値でもあることから、1 時間降水量データからの変換の場合における改善の目安として適当と考えられ、これを越える部分に存在する多数のサンプルを極力少なくすることを目指すこととした。

### 7.2.2.2 秋元他法

7.2.2.1 節と同様に、全国の 10 分間及び 1 時間降水量データから秋元他法に基づき得られた 1 分間降雨強度の CDF、と同地点、同年の 1 分間降水量データに対し乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた M 分布近似後の 1 分間降雨強度 CDF、との比較を行った。

名古屋の複数年(1997~2002 年)のケースについて図 7-1 と同様の関係を求めたものを図 7-4 に、また、全国のデータについて図 7-2 と同様の関係を求めたものを図 7-5 に示す。ちなみに、図 7-4 の名古屋の例の場合の RMSE は、10 分間降水量データからの変換の場合には 0.369、1 時間降水量データからの変換の場合には 0.634 である。

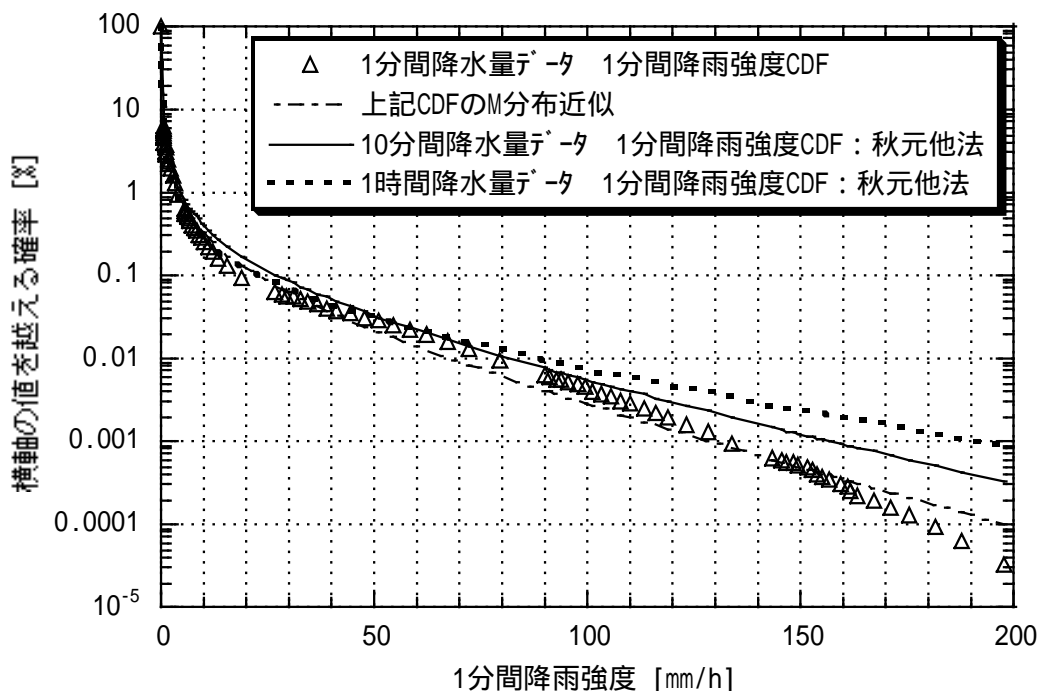


図 7-4 10 分間・1 時間降水量データから秋元他法を用いて得られた 1 分間降雨強度 CDF と 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似との関係 [名古屋(1997~2002 年)の例]

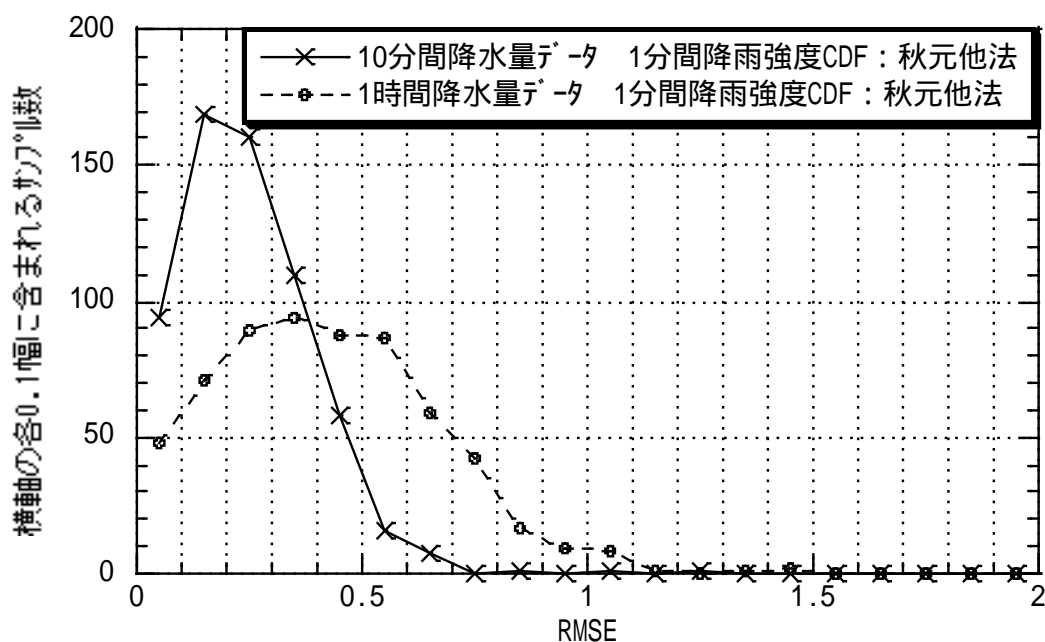


図 7-5 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データから秋元他法を用いて得られた同 CDF の誤差 (図 7-2 と同様条件)

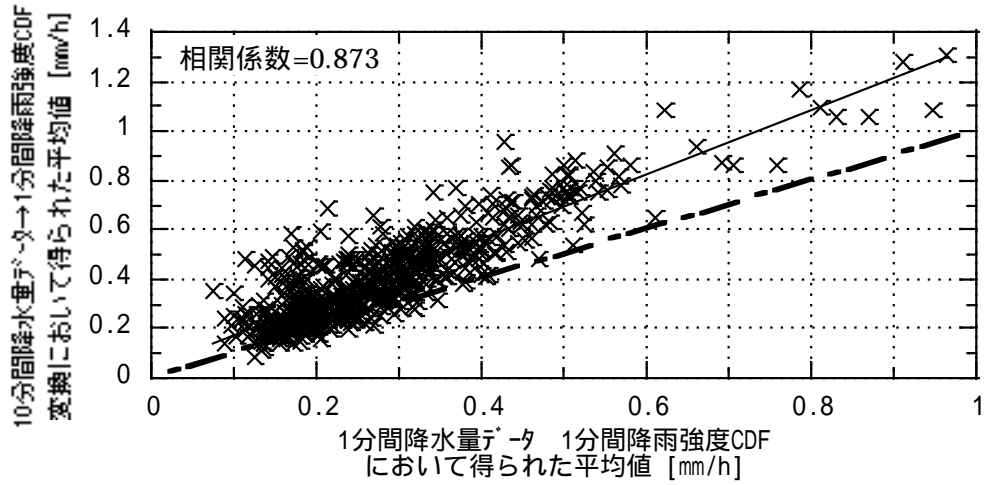
図 7-5 は、図 7-2 との比較という点で見た場合、10 分間降水量データからの変換においては、特段の優位性は見られないが、1 時間降水量データからの変換においては、若干精度が良くなっていると考えられる。しかしながら、後者の場合において、依然として、RMSE が 0.5 を越える部分にも多数のサンプルが存在している。

### 7.2.2.3 2つの変換手法の変換精度に関する考察

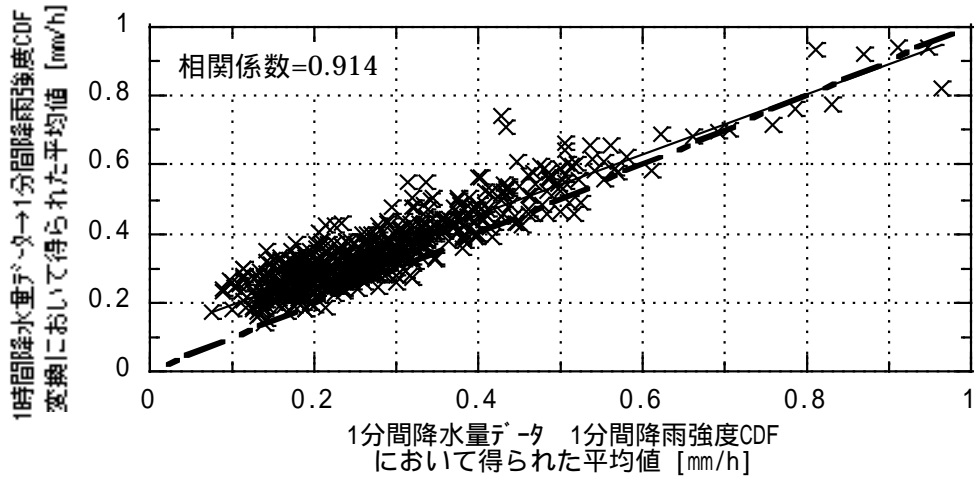
7.2.2.1 節、7.2.2.2 節の結果を踏まえ、細矢法、秋元他法ともに、特に 1 時間降水量データからの変換において RMSE が 0.5 を越える部分にも多数のサンプルが存在している点について着目し、精度向上の可能性について検討を行った。

#### 7.2.2.3.1 平均値、標準偏差の誤差と変換精度との関係

まず、全国の 1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた平均値、標準偏差 (式(2-9)及び(2-10)) と、同地点、同年の 10 分間及び 1 時間降水量データから得た CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた平均値、標準偏差 (式(2-9)及び(2-10)) から細矢法、秋元他法に基づき 1 分間降雨強度 CDF (M 分布) を得るための平均値及び標準偏差を求めた (式(7-1)~(7-3)) ものとの比較を行った。平均値について示したものが図 7-6、標準偏差について示したものが図 7-7 である。

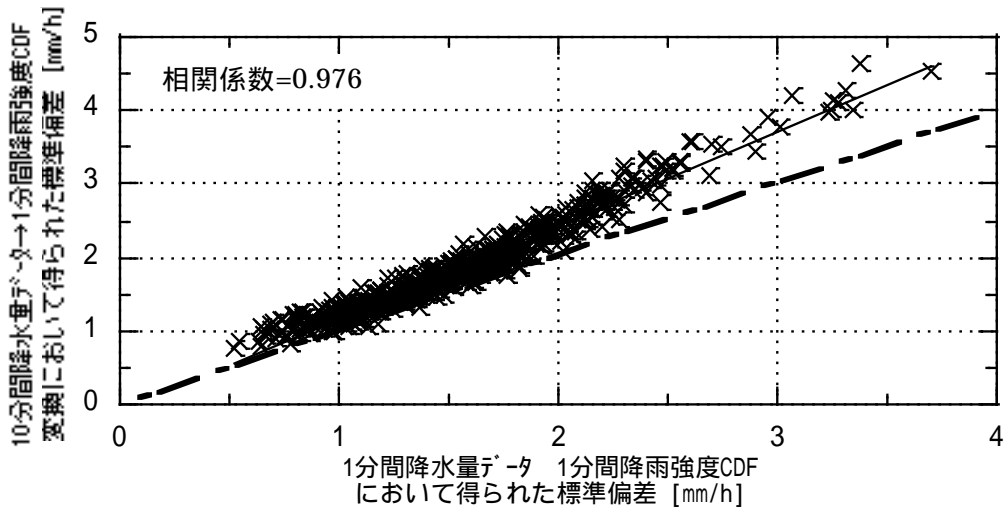


( ) 10分間降水量データからの変換における平均値との関係

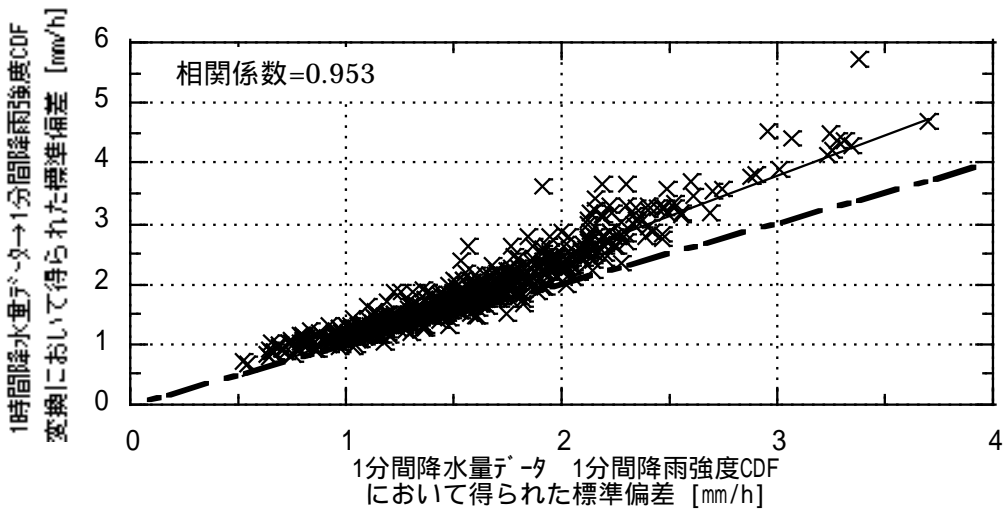


( ) 1時間降水量データからの変換における平均値との関係

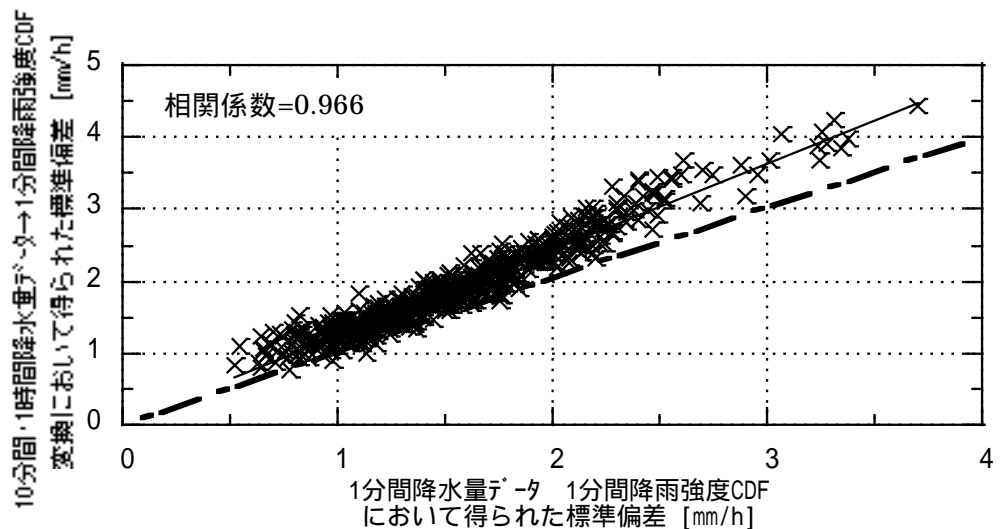
図 7-6 1分間降水量データから得られた1分間降雨強度CDFのM分布(近似)パラメータから求められた平均値と10分間・1時間降水量データから細矢法により1分間降雨強度CDFへの変換において得られた平均値との関係



(a - ) 細矢法を用いた10分間降水量データからの変換における標準偏差との関係



(a - ) 細矢法を用いた1時間降水量データからの変換における標準偏差との関係



(b) 秋元他法を用いた10分間・1時間降水量データからの変換における標準偏差との関係

図 7-7 1分間降水量データから得られた1分間降雨強度CDFのM分布(近似)パラメータから求められた標準偏差と10分間・1時間降水量データから細矢法及び秋元他法により1分間降雨強度CDFへの変換において得られた標準偏差との関係

図 7-6 の平均値については、細矢法と秋元他法で違いがないため、分けて示すことはしていないが、図 7-7 の標準偏差については、(a)が細矢法を用いた場合について、(b)が秋元他法を用いた場合について、それぞれ示している。また、図 7-6 及び 7-7(a)は、10 分間降水量データからの変換の場合と 1 時間降水量データからの変換の場合で分けて示しているが、図 7-7(b)の秋元他法の場合は、式(7-2)及び(7-3)において、10 分間及び 1 時間降水量データから得られる標準偏差  $M_{10m}$  及び  $M_{60m}$  に対し、式(7-2)の左辺の、得られるべき 1 分間降雨強度の標準偏差  $M_{1m}$  が同一値であるとして、また、式(7-3)の  $M_{10m}$  も同一値であるとして求め、最終的に、得られた  $M_{10m}$  を用いて、 $M_{1m}$  を求めることから、 $M_{10m}$ 、 $M_{60m}$  のいずれに対しても  $M_{1m}$  の値は一致することになるため、区別せずに示している。図 7-6 及び 7-7 において、一点鎖線は、縦軸と横軸の値が一致するとした場合の関係を示す。また、実線は全サンプルに対する回帰直線であり、相関係数は回帰直線に対する相関を示す。直感的には、各サンプルの一点鎖線からの離隔の度合いが、図 7-2 及び 7-5 に見られる RMSE の大きさ、即ち変換精度に関係していると考えられた。そのような観点で図 7-7 を見ると、標準偏差においては、10 分間降水量データからの変換の場合と 1 時間降水量データからの変換の場合で顕著な差は見られないのに対し、図 7-6 の平均値は、10 分間降水量データからの変換の場合の方が 1 時間降水量データからの変換の場合よりも、一点鎖線からの離隔の度合いが明らかに大きくなっている。これは、図 7-2 及び 7-5 に示されている結果、即ち、1時間降水量データからの変換の場合の方が RMSE が大きい、という事象とは逆の傾向を示しているように見える。

このように、平均値及び標準偏差がどのように変換精度に影響を与えるかは単純ではないことが明らかとなった。これをさらに分析するために、図 7-6 及び 7-7 の平均値及び標準偏差の一点鎖線からの離隔（以下、単に平均値及び / または標準偏差の離隔という）と図 7-2 及び 7-5 に示した RMSE との関係について詳細な検討を行った。この結果、10 分間降水量データからの変換の場合と 1 時間降水量データからの変換の場合で特徴的な違いが見られた。前者は、平均値の離隔が大きいサンプルは標準偏差の離隔も大きく、それが RMSE が大きくなるのを抑える、即ち互いに打ち消しあっているように見える傾向があるのに対し、後者は、そのような傾向が顕著には見られず、結果として後者の方が前者より RMSE が大きいサンプルが多くなっているように考えられた。

これについては次のようなことが考えられる。10 分間降雨強度の方が 1 時間降雨強度に比べ積分時間が短いため、その確率分布特性は、1 分間降雨強度の確率分布特性の情報をより多く有していることから、平均値と標準偏差、個々には大きい誤差が生じても、確率分布特性として似た特性が得られるように振舞い、結果として RMSE はあまり大きくはならない、ということである。しかしながら、この振舞いは  $M_{1m}$  の選び方にも関係し、ま

た、細矢法で用いる  $\rho$  と秋元他法における  $\rho$  とでは異なっている可能性があると考えられたため、 $\rho$  との関係について確認が必要と考えられた。このため、 $\rho$  と変換精度の関係、 $\rho$  の最適値などについて検討を行った。その結果を次節に示す。

### 7.2.2.3.2 自己相関特性の係数 $\rho$ と変換精度の関係

全国各 617 サンプルの 10 分間及び 1 時間降水量データから得られた CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた標準偏差  $M_{10m}$ 、 $M_{60m}$  と、同地点及び同年の 1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた標準偏差  $M_{1m}$  を用い、細矢法に基づき式(7-2)及び(7-3)の逆算により  $\rho$  を求め、また秋元他法により  $\rho$  を求めた。これを度数分布で示したものが図 7-8 である。

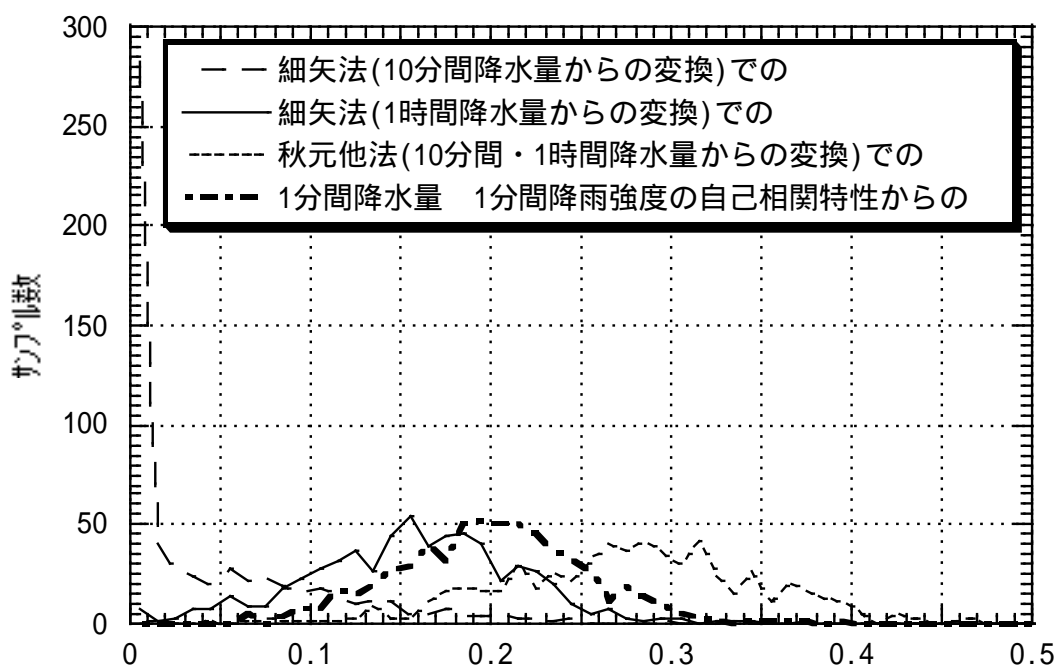


図 7-8 細矢法、秋元他法において得られる  $\rho$  と 1 分間降水量データから得た 1 分間降雨強度時系列データより得られる自己相関特性から得た  $\rho$  (全国 136 地点 / 617 サンプル)

図 7-8 において、

細矢法に基づき  $M_{60m}$  と  $M_{1m}$  を用い式(7-2)及び(7-3)の逆算により得られる  $\rho$  の分布は 0.15 程度が中心となっている。

細矢法に基づき  $M_{10m}$  と  $M_{1m}$  を用い式(7-2)及び(7-3)の逆算により得られる  $\rho$  の分布は 0~0.01 に高いピークが存在するようなものとなっている。しかも、0~0.01 の範囲には、 $\rho = 0$  において式(7-2)及び(7-3)の関係が成立しないが、降雨の自己相関特性において  $\rho$  が負の値となるような特性はありえないため  $\rho = 0$  としているものも多く含まれ

ている。

秋元他法により得られた  $\rho$  は、0.3 弱程度を中心に分布している。

さらに、これらの関係を詳細に見ると、 $\rho$ 、 $\rho_{10m}$  及び  $\rho_{1m}$  で得られる  $\rho$  の間には一定の関係があることがわかる。その関係は、単純には得られないが、概略、

$$(\rho_{10m}) = (\rho_{1m}) \times 2 - (\rho) \quad (7-4)$$

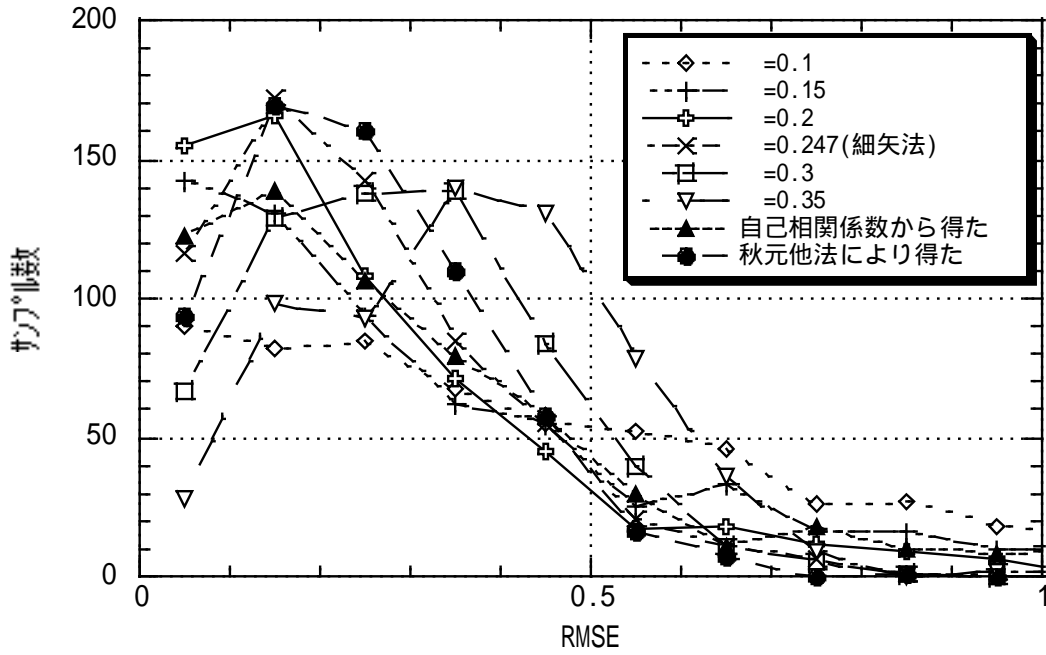
という関係で与えられる。したがって、図 7-8 では、 $\rho$  の分布の中心が 0.15 強であり、

$\rho_{10m}$  の分布が 0~0.01 に高いピークがたっていることから、 $\rho_{1m}$  の分布の中心 0.15 程度を 2 倍した 0.3 程度のところが、秋元他法における  $\rho$  の中心となっている。このことからわかるのは、秋元他法における  $\rho$  は、“ $\rho_{10m}$  の ” 及び “ $\rho_{1m}$  の ” が正しく得られるような関係にある場合には正しい値が得られる(この場合いずれの  $\rho$  も等しくなる)が、そうでない場合には、必ずしも正しい値が得られることにはならないということである。

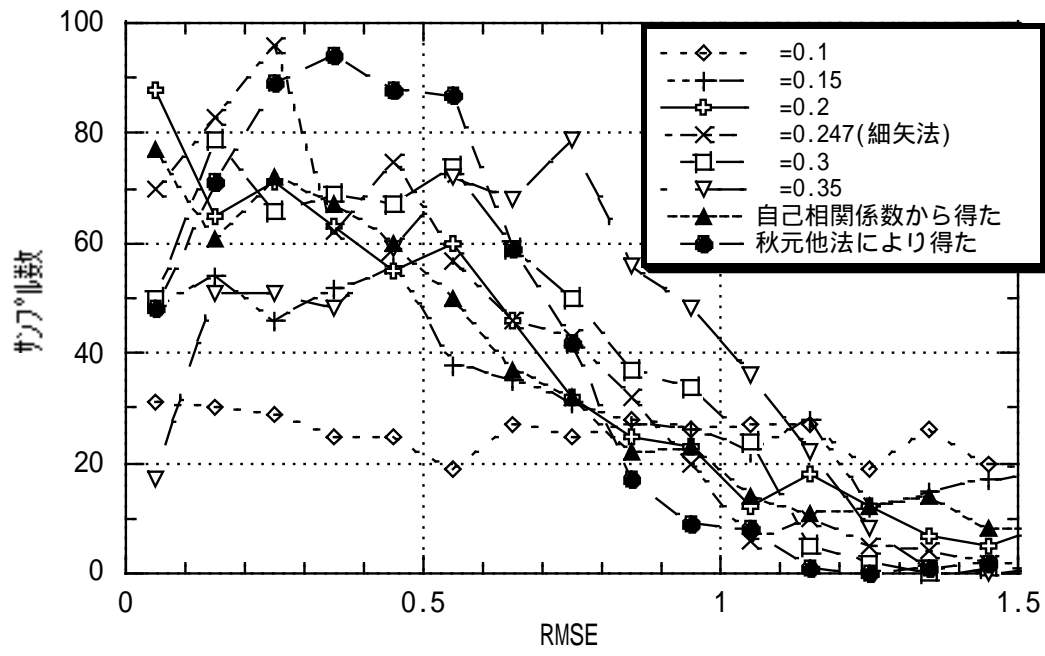
図 7-8 には、1 分間降水量データから秒単位均し分配処理を施して得た 1 分間降雨強度の時系列データから自己相関特性を求め、 $\rho$  を得た結果も示している。これは 0.2 程度を中心とした分布となっている。

として適正な条件はいずれか、判断する必要があったが、まず、 $\rho_{10m}$  と  $\rho_{1m}$  から式(7-2)及び(7-3)を用いて逆算により得られた  $\rho$  が 0~0.01 に高いピークが存在することに留意し、 $\rho = 0$  が適正な条件として考えられるのか検討を行った。細矢法をベースに  $\rho = 0$  として 10 分間降水量データからの変換を行い、図 7-2 と同様の関係を求めたところ、図 7-2 及び 7-5 の場合よりも大きな RMSE となるサンプルが多数現れ、 $\rho = 0$  は適正な条件と言えないことが明白と考えられた。次に、 $\rho = 0$  を除き、 $\rho$  の適正值を探るために、細矢法をベースに、0.1~0.35 の 0.05 ステップの  $\rho$  固定値 ( $\rho = 0.25$  に相当する点では細矢法で適当とされた  $\rho = 0.247$  とした) 及び 1 分間降水量データから秒単位均し分配処理を施して得た 1 分間降雨強度の時系列データの自己相関特性から求めた  $\rho$  を用いる場合、並びに秋元他法を用いる場合について、10 分間及び 1 時間降水量データからの変換を行い、図 7-2 と同様の関係を求めた。これを示したものが図 7-9 である。





(a) 10 分間降水量データを用いた変換の場合



(b) 1 時間降水量データを用いた変換の場合

図 7-9 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データから種々な を用いて得られた同 CDF の誤差  
 (種々な = 0.1 ~ 0.35 間の 0.05 ステップの (但し、0.25 は 0.247(細矢法相当)とする)、  
 自己相関係数から得た、秋元他法による / その他条件は図 7-2 と同様)

図 7-9(a)において、RMSE が小さい、0.5 程度以下の範囲で最も良い結果を与えているのは  $\alpha=0.2$  固定の場合である。一方、RMSE が大きい、0.5 程度以上の範囲で最も良いのは秋元他法において得られた  $\alpha$  の場合である。図 7-9(b)においても、RMSE が 0.8 程度までの範囲では  $\alpha=0.2$  固定の場合が最も良く、0.8 程度以上の範囲では秋元他法において得られた  $\alpha$  の場合が最も良い結果を示している。また、両図において、1 分間降水量データから得た 1 分間降雨強度の自己相関係数から求めた  $\alpha$  を用いた場合については、最良ではないが、概ね良い結果を与えている。理想的には、これが最も良い近似を与えるのでは、と期待されたが、近似誤差等要因が影響している可能性が考えられる。

なお、7.2.2.3.1 節における内容及び 7.2.2.3.2 節におけるこれまでの内容から、

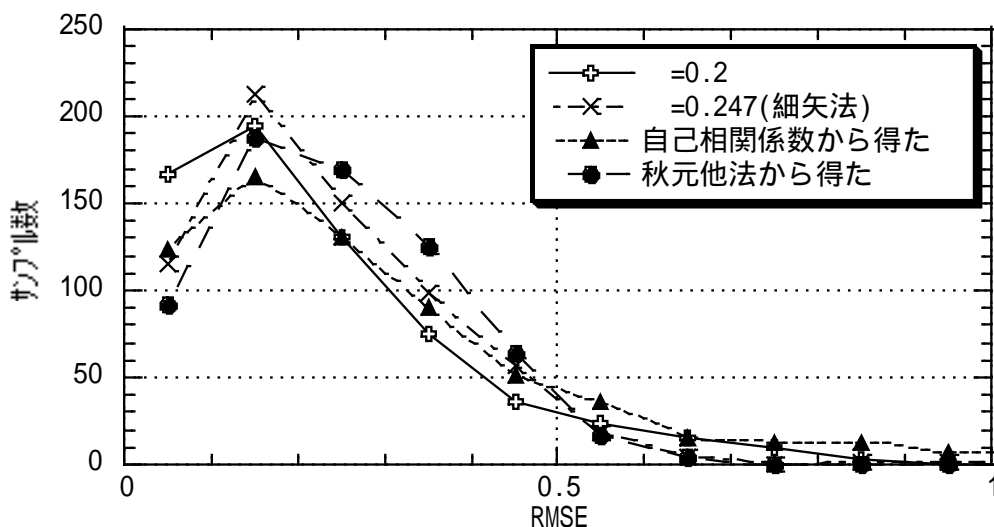
- 図 7-6 では、10 分間降水量データから得た CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた平均値に対し式(7-1)を用いて 1 分間降雨強度 CDF (M 分布) の平均値を求めたもののバラツキが、1 時間降水量データから同様にして求めたものより大きく、1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた平均値と値が等しくなる線 (図 7-6 の一点鎖線) からの離隔が大きくなっている点、また、
- 同様にして求めた標準偏差についても、図 7-8 に示した、式(7-2)及び(7-3)を用いて逆算で求めた自己相関特性の係数  $\alpha$  が、10 分間降水量データから求めたもの場合は、 $\alpha > 0$  とならない、有りえない値を含み、 $0 \sim 0.01$  に高いピークが存在するようなものとなっている点、

に着目すると、“平均値及び標準偏差を個々に見ると”であるが、10 分間降水量データから得た CDF の M 分布(近似)パラメータ  $u$ 、 $p$  から求めた平均値及び標準偏差の方が、式(7-1)～(7-3)を適用するに当たって、1 時間降水量データから同様にして得られるものより、多くの誤差を含んでいるように見受けられる。これは、気象庁の降水量測定が 0.5mm 桁の転倒桁型雨量計を统一的に用いており、この分解能が大きいために、1 分間降水量がそうであったように (4.1 節参照) 10 分間降水量も、厳密には、10 分間降雨強度とはみなせない、即ち 10 分ごとに降った雨量を正しく表していないことが原因している可能性が考えられる。

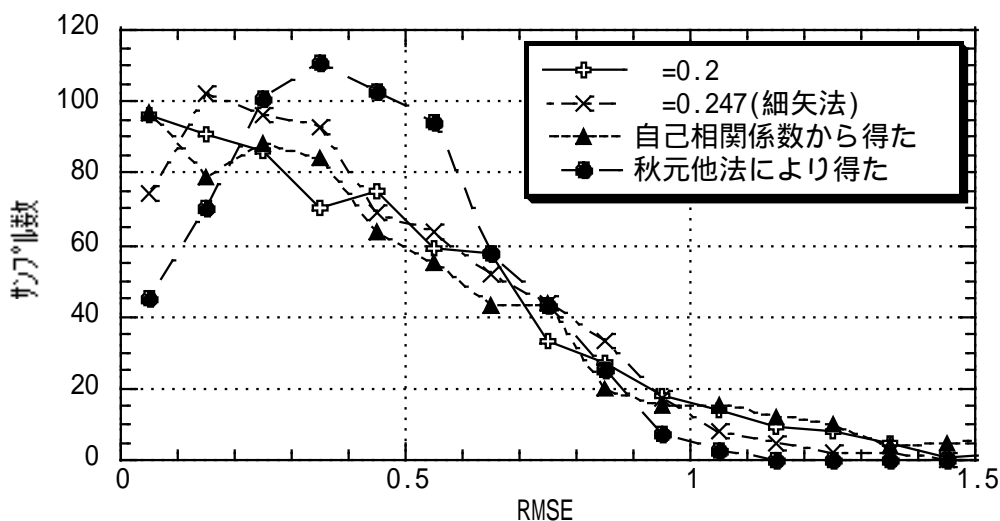
### 7.2.2.3.3 冬季のデータを除いた場合の変換精度

各地域ごとの検討を進める中で、豪雪地域において、冬季の積雪による確率分布への影響が大きいことがわかった。このようなことは唐沢・松戸が文献[27]で指摘しており、冬季の豪雪により降雨強度の小さい領域の時間率が大きくなり(降雪が大きい割合を占める)降雨だけの分布の場合に比べ、特に平均値が大きく影響を受けることが確認された。

そこで、豪雪地域においては、冬季（11月～3月）のデータを除いた降水量データを用いて、図7-9と同様な関係を求めた。これを図7-10に示す。なお、年間の確率分布についての検討であることを考慮し、冬季のデータを除いたところには0を挿入して、年間を通したデータとして算出を行っている。また、 $\rho$ の固定値については、見易さを考慮し、図7-9で良い結果が得られた0.2及び0.247のみについて示した。



(a) 10分間降水量データを用いた変換の場合



(b) 1時間降水量データを用いた変換の場合

図7-10 図7-9と同様 / 豪雪地域の冬季(11～3月)のデータを除外及び  $\rho$  の条件を変更 (  $\rho$  の条件変更: 0.1～0.35間の0.05ステップの  $\rho$  0.2及び0.247 )

図7-10は、図7-9に比較し、RMSEが小さい側のサンプル数が増加しており、豪雪地域において冬季のデータを除くことによる効果が確認できる。  $\rho$  としては、図7-10にお

いても、図 7-9 の場合と同様、RMSE が小さい範囲では  $\alpha=0.2$  固定の場合が、RMSE が大きい範囲では秋元他法において得られた  $\alpha$  の場合が、それぞれ最も良い結果を示している。

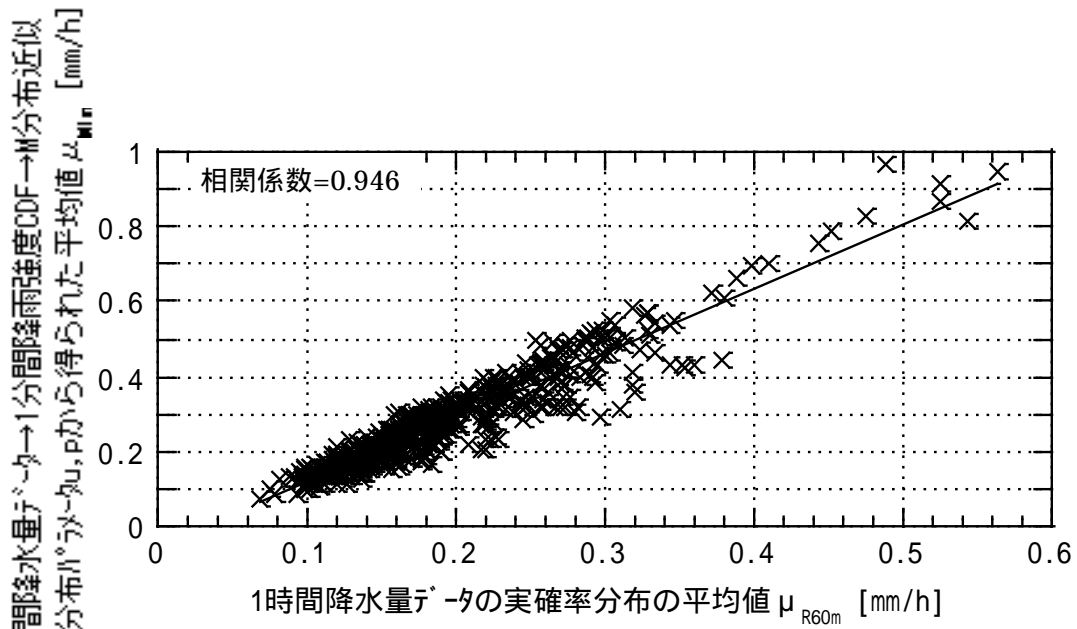
図 7-10(b)より、1 時間降水量データからの変換の場合は、最も良いケースに注目したとしても、依然、RMSE が 0.5 を越える部分に多数のサンプルが存在する状態が残っており、精度向上の必要性があると考えられた。

### 7.3 新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法の提案

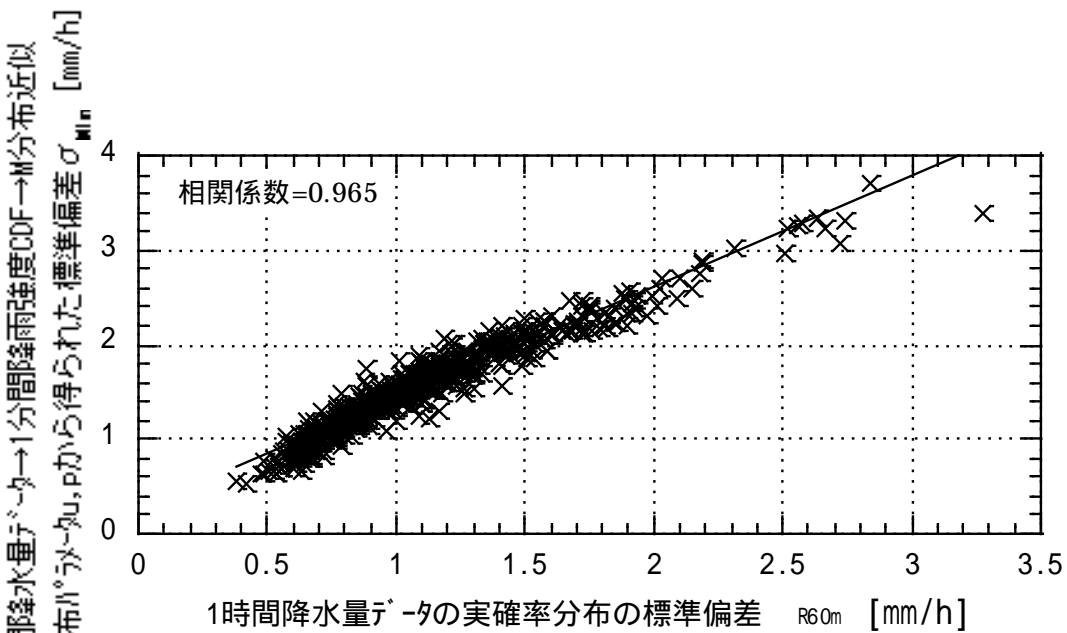
#### 7.3.1 実確率分布の平均値及び標準偏差を用いる目的

前節で扱った変換手法は、10 分間または 1 時間降水量データから得た CDF に対し M 分布近似を行い、得られた M 分布パラメータから平均値  $\mu_{M10m}$ (10 分間)または  $\mu_{M60m}$ (1 時間)並びに標準偏差  $\sigma_{M10m}$ (10 分間)または  $\sigma_{M60m}$ (1 時間)を求め、これらを基に変換を行うものであったが、変換精度は、十分とは言い難いものであった。原因の一つとして、M 分布近似における近似誤差による変換精度への影響が考えられた。そこで、分布の形に影響を受けない、より安定した平均値及び標準偏差として、10 分間及び 1 時間降水量データの実確率分布の平均値  $\mu_{R10m}$ (10 分間)及び  $\mu_{R60m}$ (1 時間)並びに標準偏差  $\sigma_{R10m}$ (10 分間)及び  $\sigma_{R60m}$ (1 時間)を用いることを考え、これらと 1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度の CDF の M 分布パラメータから得た平均値  $\mu_{M1m}$  及び標準偏差  $\sigma_{M1m}$  との比較を行った。

7.1 節に示した、1 年以上の期間に対して解析可能な AMeDAS の 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データが得られた全国 136 地点における最長 6 年分のデータ、単年及び複数年、計 617 のサンプルに対して、10 分間及び 1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差と、1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求めた平均値及び標準偏差との関係について調べた。ここでは、より変換精度向上が望まれる 1 時間降水量の場合について、実確率分布の平均値及び標準偏差との関係を図 7-11 に示す。



(a) 平均値における比較



(b) 標準偏差における比較

図 7-11 1 時間降水量データの実確率分布の平均値  $\mu_{R60m}$  及び標準偏差  $\sigma_{R60m}$  に対する 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求められた平均値  $\mu_{M1m}$  及び標準偏差  $\sigma_{M1m}$  との関係

図 7-11 において、実線は全サンプルに対する回帰直線であり、相関係数は同直線に対する相関を示す。同図より、平均値、標準偏差とも、バラツキは小さく、これらの関係を一次式で精度良く与えることができれば、10 分間及び 1 時間降水量データの実確率分布

の平均値及び標準偏差から、1 分間降雨強度 CDF をM分布で与えるとした場合の平均値及び標準偏差を精度良く推定することが可能と考えられた。

### 7.3.2 10 分間及び 1 時間降水量実確率分布パラメータと 1 分間降雨強度 CDF の M 分布パラメータとの関係

詳細な検討の結果、雨の降り方に関係すると考えられるが、10 分間及び 1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差と、1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布(近似)パラメータから求めた平均値及び標準偏差との関係は、地域によって異なることが確認された。そこで、表 7-1 に示す 10 の地域に分けて、この関係を求めることとした。なお、10 分割としたのは、次のような理由による。分割を多くすれば、1 つの地域の中でのサンプル数が少なくなり、傾向を求めるに当って、特定のサンプルのバラツキにより、エリアの傾向とは異なる偏りが現れ易くなると考えられる。一方、分割を少なくしすぎると、異なる傾向を持つ地域のサンプルが混ざることにより全体の相関が悪くなってしまいう可能性が考えられる。県単位を基本として、雨の降り方が似通っていると思われる近隣都府県を組み合わせ地域を構成した(兵庫、京都のように明らかに北部と南部で傾向が異なると考えられる府県は南北で分けた)。地域分割数をできるだけ少なくしつつも、より相関が高く得られる組み合わせを探した結果が 10 分割となったものである。

表 7-1 地域分割

地域名	都道府県
北海道	北海道
東北	青森県、秋田県、岩手県、宮城県、山形県、福島県
関東北部	栃木県、群馬県
関東南部	茨城県、埼玉県、東京都、千葉県、神奈川県
甲信	長野県、山梨県
東海及び近畿中南部	静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、奈良県、京都府南部
北陸、近畿北部(岐阜県含む)	新潟県、石川県、福井県、京都府北部、滋賀県、岐阜県
山陰(兵庫県北部及び山口県北部含む)	鳥取県、島根県、兵庫県北部、山口県北部
瀬戸内(近畿瀬戸内側、山陽及び四国北部)	大阪府、岡山県、広島県、徳島県、香川県、愛媛県、兵庫県南部、山口県南部
四国南部及び九州	高知県、福岡県、大分県、長崎県、佐賀県、熊本県、宮崎県、鹿児島県、沖縄県

また、各地域ごとの検討を進める中で、7.2.2.3.3 節でも示したように、豪雪地域で、冬季の積雪による確率分布への影響が大きいことがわかった。特に平均値において影響が顕著であるが、バラツキが大きくなる傾向があることがわかった。そこで、豪雪地域においては、冬季（11月～3月）の降水量を除いた実確率分布の平均値及び標準偏差との関係についても評価した。なお、この場合も先と同様、冬季のデータを除いたところには0を挿入して、年間を通したデータとして算出を行っている。

以上の点を考慮し、10分間及び1時間降水量データの実確率分布の平均値  $\mu_{R10m}$  (10分間)及び  $\mu_{R60m}$  (1時間)並びに標準偏差  $\sigma_{R10m}$  (10分間)及び  $\sigma_{R60m}$  (1時間)と1分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた1分間降雨強度CDFのM分布(近似)パラメータ  $u, p$  から得た平均値  $\mu_{M1m}$  及び標準偏差  $\sigma_{M1m}$  との関係を一変式で求めた結果を相関係数とともに表7-2及び7-3に示す。

表7-2 1分間降水量データから得られた1分間降雨強度CDFのM分布(近似)パラメータから求められた平均値  $\mu_{M1m}$  に対する10分間・1時間降水量データの実確率分布の平均値  $\mu_{R10m}$ ・ $\mu_{R60m}$  の関係（直線近似表現）

地域名		$\mu_{M1m}$ の直線近似表現	相関係数
北海道	通年	$-0.023674+1.3851 \times \mu_{R10m/60m}$	0.818
	4～10月	$-0.02977+1.8296 \times \mu_{R10m/60m}$	0.941
東北	通年	$0.029721+1.1761 \times \mu_{R10m/60m}$	0.754
	4～10月	$-0.019052+1.7691 \times \mu_{R10m/60m}$	0.973
関東北部		$-0.033823+1.7631 \times \mu_{R10m/60m}$	0.984
関東南部		$-0.024162+1.6819 \times \mu_{R10m/60m}$	0.972
甲信	通年	$-0.039092+1.6715 \times \mu_{R10m/60m}$	0.908
	4～10月	$-0.031401+1.8368 \times \mu_{R10m/60m}$	0.947
東海及び近畿中南部		$-0.063448+1.9299 \times \mu_{R10m/60m}$	0.991
北陸、近畿北部 (岐阜県含む)	通年	$0.021801+1.2085 \times \mu_{R10m/60m}$	0.897
	4～10月	$-0.013938+1.7199 \times \mu_{R10m/60m}$	0.974
山陰(兵庫県北部及び 山口県北部含む)	通年	$0.078355+0.96875 \times \mu_{R10m/60m}$	0.844
	4～10月	$-0.013145+1.8176 \times \mu_{R10m/60m}$	0.959
瀬戸内		$-0.030362+1.71 \times \mu_{R10m/60m}$	0.974
四国南部及び九州		$-0.011077+1.6835 \times \mu_{R10m/60m}$	0.975

表 7-3 表 7-2 と同様条件における標準偏差の関係 (  $M_{1m}$  に対する  $R_{10m}$ ・ $R_{60m}$  の関係 )

(a) 10 分間降水量データの実確率分布の標準偏差  $R_{10m}$  との関係

地域名		$M_{1m}$ の直線近似表現	相関係数
北海道	通年	$-0.18087+1.255\times\sigma_{R10m}$	0.959
	4～10月	$-0.061466+1.1337\times\sigma_{R10m}$	0.964
東北	通年	$0.065879+1.0563\times\sigma_{R10m}$	0.958
	4～10月	$0.12934+0.97744\times\sigma_{R10m}$	0.972
関東北部		$0.34471+0.88869\times\sigma_{R10m}$	0.976
関東南部		$0.16709+0.99943\times\sigma_{R10m}$	0.986
甲信	通年	$0.0069798+1.0948\times\sigma_{R10m}$	0.972
	4～10月	$-0.012675+1.12\times\sigma_{R10m}$	0.977
東海及び近畿中南部		$0.27789+0.91991\times\sigma_{R10m}$	0.993
北陸、近畿北部 (岐阜県含む)	通年	$0.059264+1.0845\times\sigma_{R10m}$	0.979
	4～10月	$0.14002+0.99367\times\sigma_{R10m}$	0.980
山陰(兵庫県北部及び 山口県北部含む)	通年	$0.0062329+1.1151\times\sigma_{R10m}$	0.972
	4～10月	$0.11574+0.99773\times\sigma_{R10m}$	0.977
瀬戸内		$0.090661+1.0388\times\sigma_{R10m}$	0.987
四国南部及び九州		$0.32286+0.88518\times\sigma_{R10m}$	0.984

(b) 1 時間降水量データの実確率分布の標準偏差  $R_{60m}$  との関係

地域		$M_{1m}$ の直線近似表現	相関係数
北海道	通年	$0.14419+1.1973\times\sigma_{R60m}$	0.822
	4～10月	$0.13685+1.1473\times\sigma_{R60m}$	0.844
東北	通年	$0.38157+1.0423\times\sigma_{R60m}$	0.830
	4～10月	$0.33309+1.0438\times\sigma_{R60m}$	0.901
関東北部		$0.89216+0.7478\times\sigma_{R60m}$	0.911
関東南部		$0.34247+1.1425\times\sigma_{R60m}$	0.959
甲信	通年	$0.25967+1.1064\times\sigma_{R60m}$	0.884
	4～10月	$0.24501+1.1012\times\sigma_{R60m}$	0.896
東海及び近畿中南部		$0.5058+0.98842\times\sigma_{R60m}$	0.978
北陸、近畿北部 (岐阜県含む)	通年	$0.24419+1.2892\times\sigma_{R60m}$	0.931
	4～10月	$0.28606+1.1714\times\sigma_{R60m}$	0.930
山陰(兵庫県北部及び 山口県北部含む)	通年	$0.24969+1.2394\times\sigma_{R60m}$	0.890
	4～10月	$0.33257+1.065\times\sigma_{R60m}$	0.910
瀬戸内		$0.23383+1.2099\times\sigma_{R60m}$	0.967
四国南部及び九州		$0.47704+1.0443\times\sigma_{R60m}$	0.970



表 7-2 及び 7-3 において、実確率分布の平均値については、10 分間降水量データの場合と 1 時間降水量データの場合で差は生じないため 1 つの表で示しているが、標準偏差については、違いが生じるため、分けて示している。また、表 7-2 における  $\mu_{R10m/60m}$  は、10 分間降水量データの場合と 1 時間降水量データの場合に対して共通な表記としたものであり、前者の場合には  $\mu_{R10m}$  として、後者の場合には  $\mu_{R60m}$  として扱う。各表からわかるように、豪雪地域については、平均値、標準偏差ともに、全てのケースにおいて、冬季のデータを除いた場合の方が良い相関が得られるという結果となっている。特に平均値において、改善が顕著に現れている。

### 7.3.3 10 分間及び 1 時間降水量実確率分布パラメータと表 7-2 及び 7-3 の一次式を用いた推定精度

表 7-2 及び 7-3 に示された式を用いて、617 サンプルについて、10 分間及び 1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差から 1 分間降雨強度 CDF を得るための平均値及び標準偏差、ひいては同 CDF を求め、1 分間降水量データから乱数補正秒単位均し分配処理を施して得られた 1 分間降雨強度 CDF の M 分布近似を行ったものとを比較し、図 7-2 と同様の関係を求めた。これを示したものが図 7-12 である。なお、前節の結果を踏まえ、豪雪地域においては冬季を除いたデータ及び該当する表 7-2 及び 7-3 の式を用いている。

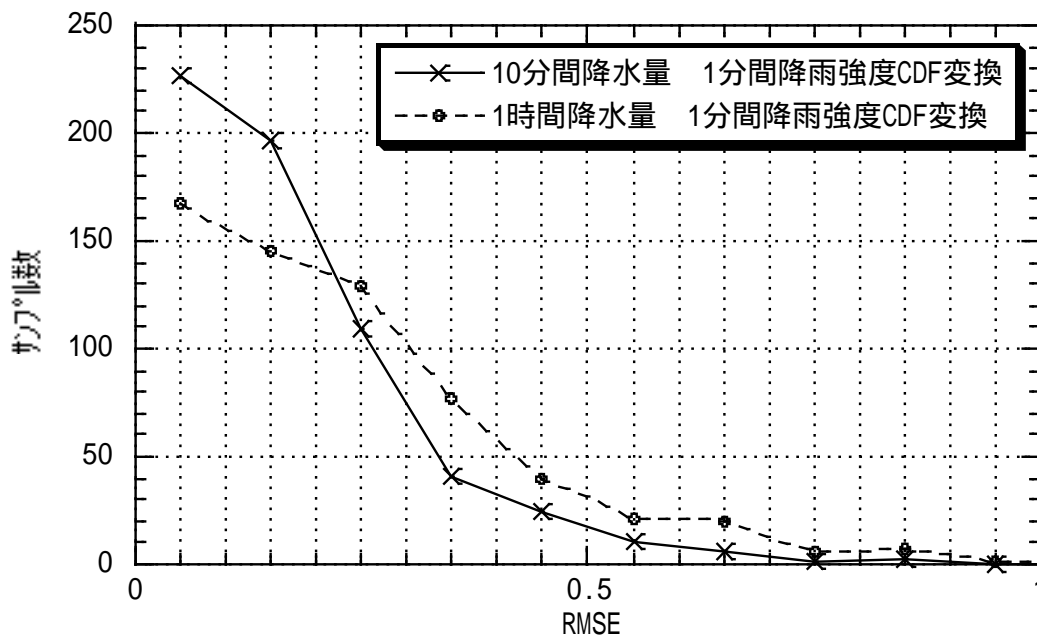


図 7-12 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 10 分間・1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差に表 7-2 及び 7-3 の換算式を適用し求めた 1 分間降雨強度 CDF の誤差 (条件は図 7-2 と同様)

図 7-12 は、図 7-10(a)及び(b)それぞれの最も精度が良い条件と比較しても、精度が向上したものとなっている。特に、図 7-10(b)に対する、即ち 1 時間降水量データからの変換における精度向上は著しく、この異積分時間降雨強度確率分布変換が有効なものであることを示している。

標準的ケースとして、名古屋の複数年 (1997 ~ 2002 年) のケースについて、図 7-1 と同様の関係を求めたものを図 7-13 に示す。図 7-12 の結果から予想されるとおり、図 7-13 は図 7-1 及び 7-4 に比較し、近似精度がかなり改善されたものとなっている。ちなみに、図 7-13 の名古屋の例の場合の RMSE は、10 分間降水量データから求めた場合は 0.0998、1 時間降水量データから求めた場合は 0.145 である。

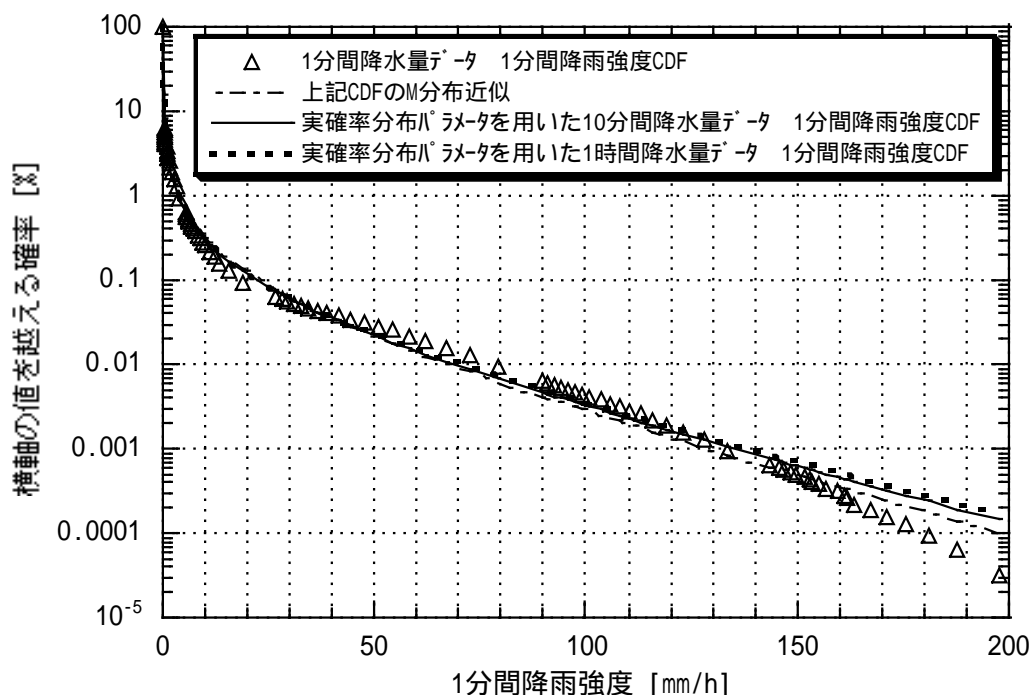


図 7-13 10 分間・1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差に表 7-2 及び 7-3 の換算式を適用し求めた 1 分間降雨強度 CDF と 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF 及びその M 分布近似の関係 [名古屋(1997 ~ 2002 年)の例]

#### 7.3.4 新たな変換手法の変換手順

全国 136 地点の AMeDAS により得られた最長 1996 年から 2002 年までの 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データに基づく検討の結果、10 分間及び 1 時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差から、M 分布を用いて、1 分間降雨強度 CDF を精度良く得ることができる、表 7-2 及び 7-3 に示す一次式を得ることができ、有効な変換手法となりうることを確認された。

新たな変換手法の変換手順は以下のとおりである。

Step1 : 10 分間または 1 時間降水量データの実確率分布を求め、さらにその平均値及び

標準偏差を求める。但し、表 7-2 及び 7-3 に「通年」と「4～10月」の2つの条件で示しているエリアについては、4月～10月間のデータのみを用いて求める。

Step2 : Step1 で得られた平均値及び標準偏差に対して、表 7-2 及び 7-3 の一次式を適用し、1 分間降雨強度 CDF を得るための平均値及び標準偏差を求める。但し、表 7-2 及び 7-3 に「通年」と「4～10月」の2つの条件で示しているエリアについては、「4～10月」の欄の式を用いる。

Step3 : Step2 で得られた平均値及び標準偏差に対して、式(2-11)及び(2-12)を適用し、M 分布パラメータ  $u$ 、 $p$  を求める。

Step4 : Step3 で得られた M 分布パラメータ  $u$ 、 $p$  に対して式(2-8)を適用し、累積確率  $F(R_i)$  を求め、1 分間降雨強度 CDF を得る。

## 第 8 章 M 分布を用いた新降雨減衰確率推定法の提案

2.4 節に示しているように、国内において地上回線用無線通信システムに対し主として用いられている既存の降雨減衰確率推定法がガンマ分布を用いているのに対し、第 5 章に示した 1 分間降雨強度 CDF を広い累積確率の範囲で精度良く近似できる分布モデルに関する研究において、M 分布<sup>[12]</sup>が適していることを明らかにした。

第 6 章に示した空間相関特性に関する研究において、既存降雨減衰確率推定法が距離の平方根の指数関数  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  のみを用いているのに対し、距離(d)の指数関数  $\exp(-\beta \cdot d)$  が近距離部分を良く近似し、距離の平方根の指数関数  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  が遠距離部分を良く近似することを明らかにした。また、降雨減衰係数が 1 分間降雨強度の n 乗に比例する(式(2-1) / ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>)にもかかわらず、既存降雨減衰確率推定法が 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いて区間積分を行うものとなっている点に対し、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いて区間積分を行うことの必要性について検討を行い、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性との違いは無視できず、降雨減衰確率推定においては 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いる必要があることを明らかにした。

以上より、分布モデルについては M 分布を用い、空間相関特性については近距離と遠距離でそれぞれに適した特性を与え、かつ 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いた区間積分を行う、精度及び適用性の向上した新たな降雨減衰確率推定法の確立が可能と考えられた。本章では、これらを踏まえた新たな降雨減衰確率推定法の考え方について示すとともに、第 3 章に示した測定系を用いて得られた降雨量及び降雨減衰量の実測データを用い、新降雨減衰確率推定法の推定精度について、既存降雨減衰確率推定法と比較しつつ、評価した結果を示す。

### 8.1 M 分布に基づく 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を考慮した新降雨減衰確率推定法

#### 8.1.1 M 分布に基づく降雨減衰確率推定法に適用するパラメータ

降雨減衰確率推定におけるパラメータの与え方は、用いる分布モデルに依存する。M 変数 R の確率密度関数  $f(R)$  及び  $R_i$  から無限大までの累積確率  $F(R_i)$  は、2.2.2 節に示しているように、2 変数を含む分布であり、パラメータを 2 つ与えれば、分布が決定できる。2 つのパラメータの与え方としては、複数の方法が考えられるが、5.3.3 節でも示したように、次のような理由から、異なる 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を与えるという方法が適当であると考えられる。

- 数学的処理を含め、手法が簡便であり、扱う者にとって理解しやすい、
- 近似精度の面で有利である（地点ごとに 2 つのパラメータとも最適な条件を与えられる）
- ヒートアイランド現象のように、局所的に気象環境の変化があったような場合にも適応しやすい（地点ごとに 2 つのパラメータとも固有の条件を与えられる）。

2 点をどのように選ぶかは、どのように 2 点を抽出するかにも依存する。1 分間降雨強度 CDF は、10 分間及び 1 時間降水量データから得ようとするものは、M 分布に基づく異積分時間降雨強度確率分布変換手法(第 7 章参照)により与えられ、M 分布で表されるが、1 分間降水量データから得るものは、まず、乱数補正秒単位均し分配処理により、実分布のままの CDF が得られ、その後 M 分布近似を行うこととなる。したがって、後者については、M 分布近似の前、即ち実分布の CDF から抽出する方法と M 分布近似後で抽出する方法が考えられるが、第 5 章において、2 点近似より全サンプル点での近似の方が近似精度が優れていることが確認されており、10 分間及び 1 時間降水量データから得られるものとの整合性という点においても、全サンプル点での M 分布近似後に 2 点を抽出する方法が適当と考えられる。

このように、いずれも M 分布に従う CDF から抽出されるものとする、付随的に得られるメリットとして、2 点を選べる範囲が広がるということがある。実分布の CDF から抽出するとした場合、1 年間のデータに基づく 1 分間降雨強度 CDF であれば、0.0002% 程度が下限となり、それ以下の値は選ぶことができない。加えて、実データにおいては、下限に近づくほどバラツキが大きくなるので、実下限値より 1 桁程度大きい点を下限とすることが必要となる。しかしながら、M 分布近似後であれば、分布のパラメータを基に新たにカーブを引き直すので、そのような制限を受けることがない。また、特定の累積確率における 1 分間降雨強度 2 点が、もともと M 分布に従う CDF から抽出されるのであれば、2 点をどのように選んでも正しく元の M 分布が再現され、精度に影響を与えることとはならない。

一方、前節に示したように、降雨減衰確率推定においては、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布を扱うことが必要となるが、第 6 章において、M 分布に従う CDF を  $n$  乗したものは厳密には M 分布とはならないものの、簡便かつ実効的な方法として 2 点近似を用いて M 分布に従う CDF を得ることが有効であること、2 点の選択について、0.01% 値及び 0.0001% 値を用いた場合が近似精度が優れていることを示している。

以上のように、パラメータとしての 2 点を選ぶ範囲の制限が無く、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布を扱うために 0.01% 値及び 0.0001% 値を用いることが望ましいのであれば、パラメータとしての 2 点の選択においても、これらを選択することが、計算ステップが不

必要に増えることを避けるためにも望ましい。したがって、降雨減衰確率推定用パラメータとして 0.01% 値及び 0.0001% 値を用いることが適当と考えられる。

### 8.1.2 1 分間降雨強度の n 乗の CDF の M 分布近似

先に示したように、降雨減衰確率推定における区間積分には、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を使用することが必要である。

詳細は第 6 章に示しているが、無線リンクで発生する降雨減衰量の確率分布は、一地点（微小区間）における 1 分間降雨強度の n 乗の確率分布に対し無線リンク全体の確率分布を求める区間積分を行った後に降雨減衰係数のもう一方のパラメータである k (式(2-1)) を乗じることにより得ることができる。このため、1 分間降雨強度の n 乗の確率分布を扱う必要があり、M 分布に従う同 n 乗の確率分布のパラメータを得ることが必要となる。先に示したように、これについては、第 6 章において、1 分間降雨強度の 0.01% 値及び 0.0001% 値を n 乗して得た 2 点を通する M 分布を求めるという方法が適していることを示している。具体的には、M 分布に従う 1 分間降雨強度の n 乗の確率分布を与えるパラメータ  $u_n$  及び  $p_n$  は、最小二乗法に基づき得られた下に示す式(8-1)及び(8-2)によって得ることができる（任意の  $P_1[\%]$  及び  $P_2[\%]$  に対する式を付録 8-1 に示す）。なお、M 分布のパラメータ  $u_n$  及び  $p_n$  は、これらにより得られる確率値がパーセントではなく真数で表されるものとなっていることに注意を要する。また、1 分間降雨強度の 0.01% 値： $R_{0.01\%,y}$  及び同 0.0001% 値： $R_{0.0001\%,y}$  の添字に含まれる y は第 9 章で示す MTBF[年]を表すものである。

$$u_n = \frac{1}{R_{0.0001\%,y}^n - R_{0.01\%,y}^n} \log_e \frac{100 \cdot R_{0.01\%,y}^n}{R_{0.0001\%,y}^n} \quad (8-1)$$

$$p_n = 0.0001 \cdot R_{0.01\%,y}^n \exp(u_n \cdot R_{0.01\%,y}^n) \quad (8-2)$$

### 8.1.3 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を考慮した区間積分

第 6 章に示しているように、M 分布に従う確率分布の区間積分は、平均値及び標準偏差を用いて行うことから、式(8-1)及び(8-2)で得られた 1 分間降雨強度の n 乗の M 分布のパラメータ  $u_n$  及び  $p_n$  から平均値  $\mu_n$  及び標準偏差  $\sigma_n$  への変換が必要となる。この変換は式(2-9)及び(2-10)に基づき、次式を用いて行うことができる。

$$\mu_n = p_n \left[ \exp(-u_n \cdot R^{n*}) + E_1(u_n \cdot R^{n*}) \right] \quad (8-3)$$

$$\sigma_n = \sqrt{p_n \left( R^{n*} + \frac{2}{u_n} \right) \exp(-u_n \cdot R^{n*}) - \mu_n^2} \quad (8-4)$$

1 分間降雨強度の区間積分については 6.2.2 節において詳述しているが、式(8-3)及び(8-4)により、一地点（微小区間）における 1 分間降雨強度の n 乗の確率分布（M 分布）の

平均値  $\mu_n$  及び標準偏差  $\sigma_n$  が与えられれば、無線リンクに対する区間積分（区間距離： $d_L$ ）によって得られる確率分布（M 分布）の平均値  $\mu_{nL}$ （第 6 章の表記で示すと  $E(R_L^n)$ ）及び標準偏差  $\sigma_{nL}$ （第 6 章の表記で示すと  $\sqrt{\text{Var}(R_L^n)}$ ）は、式(2-13)～(2-14)及び式(6-8)～(6-10)に基づき、次式により与えられる。

$$\mu_{nL} = \mu_n \cdot d_L \quad (8-5)$$

$$\sigma_{nL} = \sqrt{\text{Var}_1 + \text{Var}_2} \quad (8-6)$$

$$\text{Var}_1 = \frac{2\sigma_n^2}{\beta} \left[ d_{xo} e^{-\beta \cdot d_{xo}} + \frac{(1 - \beta \cdot d_L) \cdot (e^{-\beta \cdot d_{xo}} - 1)}{\beta} \right] \quad (8-7)$$

$$\text{Var}_2 = \frac{4\sigma_n^2}{\alpha^4} \left\{ (6 + 6\alpha\sqrt{d_L} + 2\alpha^2 d_L) e^{-\alpha\sqrt{d_L}} - [6 + 6\alpha\sqrt{d_{xo}} + 2\alpha^2 d_{xo} - \alpha^2(1 + \alpha\sqrt{d_{xo}}) \cdot (d_L - d_{xo})] e^{-\alpha\sqrt{d_{xo}}} \right\} \quad (8-8)$$

ただし、 $\beta$ 、 $\alpha$  は、空間相関特性について、近距離部分を  $\exp(-\beta \cdot d)$  で表し、遠距離部分を  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  で表すとした場合の係数であり、1 分間降雨強度の  $n$  乗の空間相関特性に対する  $\beta$ 、 $\alpha$  が、式(6-12)及び(6-13)または式(6-14)及び(6-15)で与えられている。また、 $d_{xo}$  は、両特性が交差する点であり、式(6-11)で与えられている。

区間積分後の確率分布（M 分布）の平均値  $\mu_{nL}$  及び標準偏差  $\sigma_{nL}$  が得られたならば、M 分布パラメータ  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  が、式(6-6)～(6-7)に基づき、次式により与えられる<sup>[12]</sup>。

$$u_{nL} = \frac{2 \cdot g \cdot \sigma_{nL}}{\sigma_{nL}^2 + \mu_{nL}^2 - g^2 \cdot \sigma_{nL}^2} \quad (8-9)$$

$$p_{nL} = g \cdot \sigma_{nL} \cdot \exp(u_{nL} \cdot g \cdot \sigma_{nL}) \quad (8-10)$$

$g$  は、式(6-5)に基づき、次式の関係で表される。

$$g \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2g^2}{1 + \mu_{nL}^2 / \sigma_{nL}^2 - g^2} \right] \times E_1 \left[ \frac{2g^2}{1 + \mu_{nL}^2 / \sigma_{nL}^2 - g^2} \right] \right\} - \frac{\mu_{nL}}{\sigma_{nL}} = 0 \quad (8-11)$$

（ $g$  を簡易に求める近似式については文献[28]の付録参照（式(A・4)～(A・7) / 式(A・4)の  $x$  が求める  $g$ ））

#### 8.1.4 降雨減衰確率の推定

着目する無線リンクにおける降雨減衰量を  $A$  とすると、これを降雨減衰係数のパラメータ  $k$  で除したものは、1 分間降雨強度の  $n$  乗の区間積分後の量に対応するものとなる。したがって、降雨減衰量  $A$  以上が発生する確率は、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布の区間積分によって得られた M 分布のパラメータ  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  を式(2-8)にあてはめることにより、次式により与えられる。

$$F(A/k) = \frac{p_{nL}}{A/k} \exp(-u_{nL} \cdot A/k) \quad (8-12)$$

なお、降雨減衰確率を与え、降雨減衰量を求めたい場合には、式(8-12)を変形して得られる超越方程式を解く必要があるが、これについては文献[28]の付録の式(A・8)～(A・10)で簡易な計算手法が提案されているので参照されたい。

## 8.2 新降雨減衰確率推定法の推定精度評価

### 8.2.1 実測降雨量及び降雨減衰量データを用いた評価

本節では、前節で示した新降雨減衰確率推定法（以下、本章では新推定法という）について、第3章に示している測定系を用いて得られた降雨量及び降雨減衰量の実測データを用い、推定精度の評価を行う。また、併せて、既存降雨減衰確率推定法（以下、本章では既存推定法という）として、文献[2]～[4]に示された森田・樋口がとりまとめた手法を発展させたものとして、文献[5]に示された細矢・森田他がとりまとめた手法の推定精度との比較も行う。

新推定法では、年間の0.01%値及び0.0001%値をパラメータとして用いるが、既存推定法では、強雨期3ヶ月(7～9月)の0.0075%値をパラメータとして用いる。前者については2002年10月1日～2003年9月30日のデータを、後者については2003年7月1日～同年9月30日のデータを用いた。また、どの地点の雨量データを使用するか、という点については、雨量データが伝搬路上での雨の降り方を代表的に表しているものである必要があることから、測定地点数及び伝搬路と測定地点との位置関係等を考慮し、2km以下の短距離伝搬路の場合は、伝搬路近傍の1地点における雨量データに基づくこととし、それ以上の比較的距離の長い伝搬路においては、伝搬路近傍にある複数地点の雨量データに基づく(複数地点の平均値を用いる)こととした。先に図2-4で示したものが、地点Aにおいて測定された雨量データから得られた、年間及び強雨期3ヶ月(7～9月)の1分間降雨強度CDFの一例である。

図3-1で示した降雨減衰量測定を行った各伝搬路について、前述した伝搬路近傍での雨量測定データから得られた降雨減衰確率推定のためのパラメータを用い、新推定法及び既存推定法により降雨減衰量CDFの推定を行い、実測の降雨減衰量CDFとの比較を示したものが図8-1～8-4である。なお、既存推定法による推定については、以下のように考えた。文献[5]の式(1)、(2)及び(4)に基づくとともに、同文献の表1に示された強雨期3ヶ月の1分間降雨強度分布のパラメータを用い、また、空間相関特性のパラメータは、同文献に従い、0.3とした。降雨減衰係数については、ITU-R勧告Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>では、式(2-1)のように、1分間降雨強度のn乗に比例するものとして与えられるが、文献[3]及び[5]では、

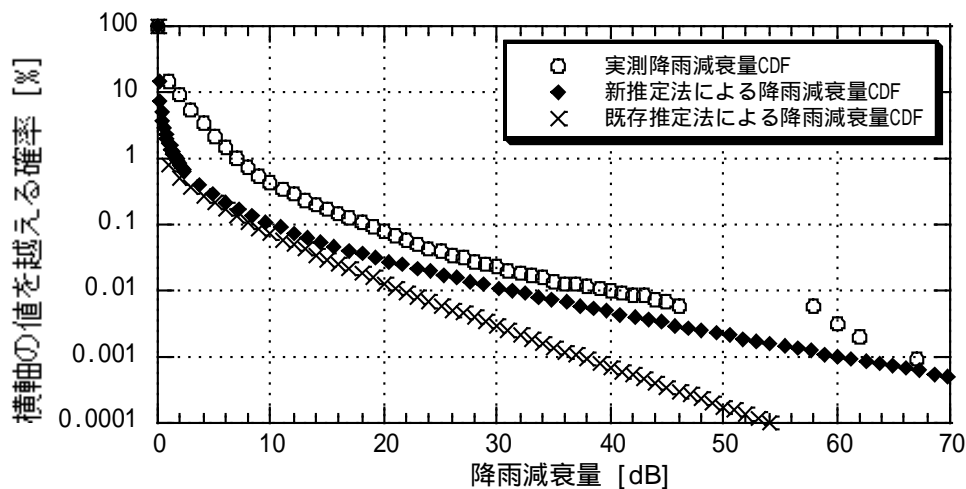


扱いを容易にするため、降雨減衰係数を近似的に1分間降雨強度に比例するものとして扱い、単に1分間降雨強度の区間積分を行ったものに降雨減衰係数を乗ずることで降雨減衰量を求めている。この場合の比例定数を $k'$ とすると、降雨減衰係数 $\alpha_R$ 、1分間降雨強度 $R$ との関係は $\alpha_R = k' \cdot R$ で表される。この $k'$ について、 $R=100\text{mm/h}$ において理論値(例えば、ITU-R 勧告 Rec.P.838-3 で与えられるものに相当するが、文献[3]及び[5]では、異なる条件が用いられている)と一致するように $k'$ を求めたものが文献[3]の表2である(文献[3]の表2では $k'$ と表記)。本評価においては、同様な考え方で、ITU-R 勧告 Rec.P.838-3 に基づき得られた $k'$ を用いることとした。強雨期3ヶ月の0.0075%値及び1分間降雨強度確率分布のパラメータを用いて推定された確率分布から年間の確率分布を得るには、当初、文献[5]の式(3)の換算が用いられていた。これは文献[3]の図4に示された地域ごとに固定的に与えられた等価月数という値を用いるものであるが、図2-4からもわかるように、また、文献[12]の図9及び式(17)にも示されているように、強雨期3ヶ月の確率分布と年間の確率分布の関係は確率値によって異なることから固定値を用いた換算は適当ではないと考えられ、文献[12]の式(17)を変形して得た次式を用いた換算を行うこととした。

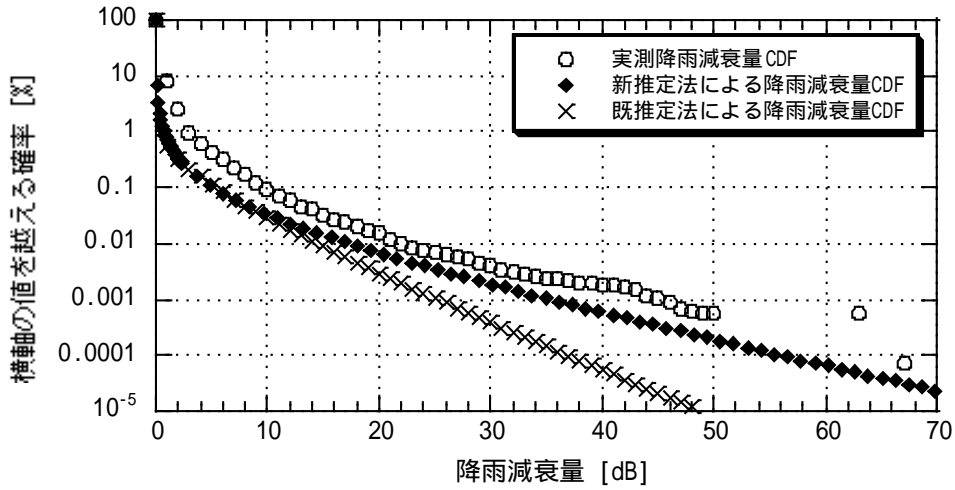
$$P_Y = \left( \frac{P_{HR3M}}{1.648} \right)^{\frac{1}{0.908}} \quad (8-13)$$

ただし、 $P_Y$  : 1分間降雨強度の年間における累積確率[%]

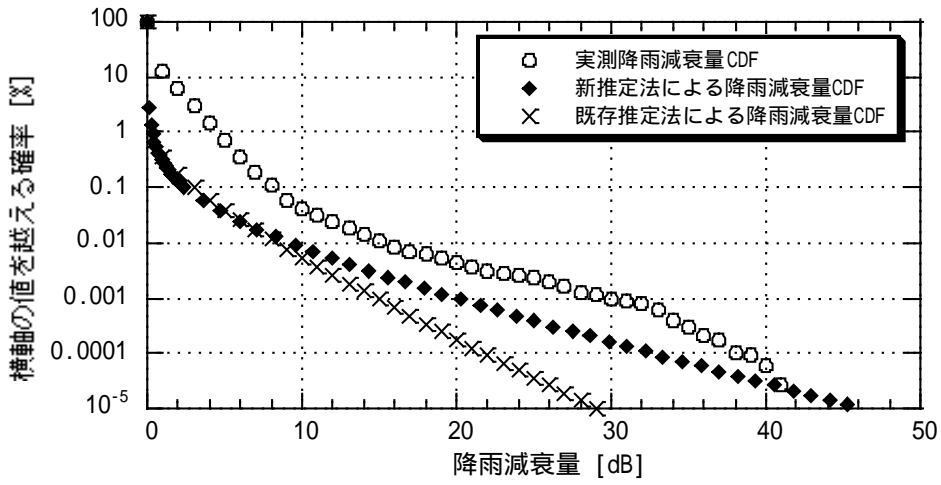
$P_{HR3M}$  : 1分間降雨強度の強雨期3ヶ月における累積確率[%]



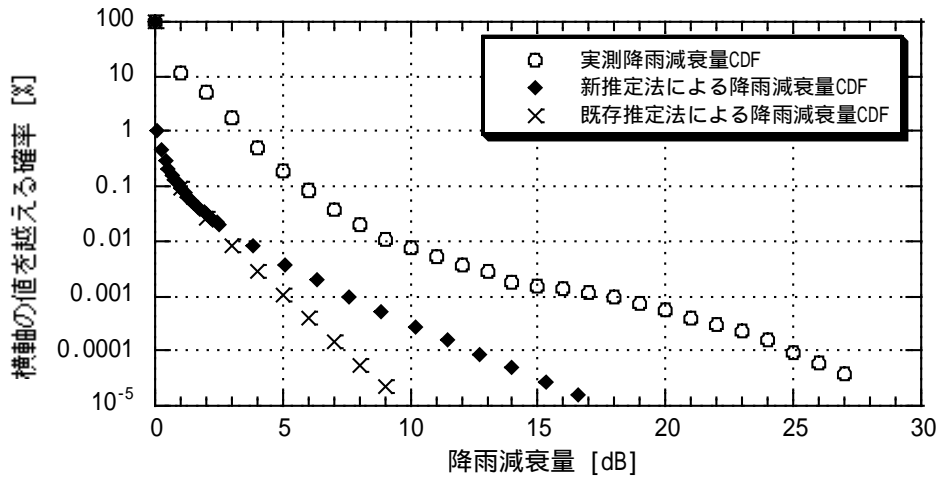
(a) 22.2975GHz、7.28km、垂直偏波



(b) 22.2825GHz、3.49km、垂直偏波

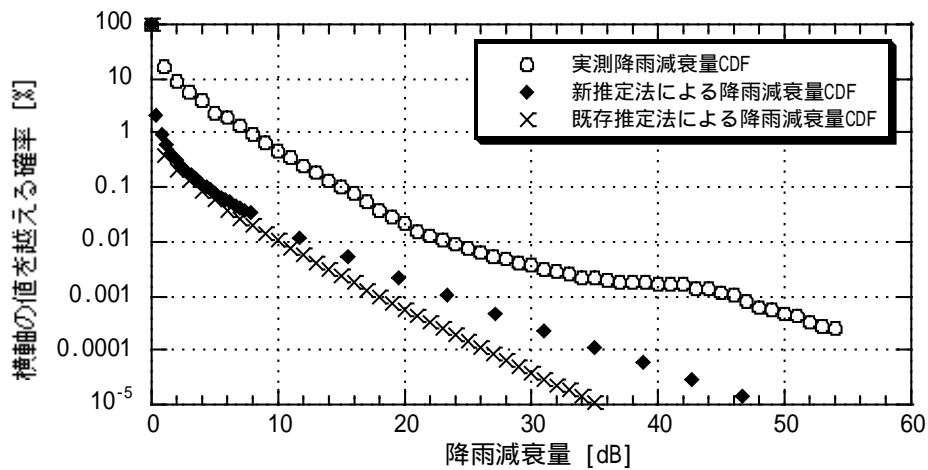


(c) 22.2925GHz、1.32km、水平偏波

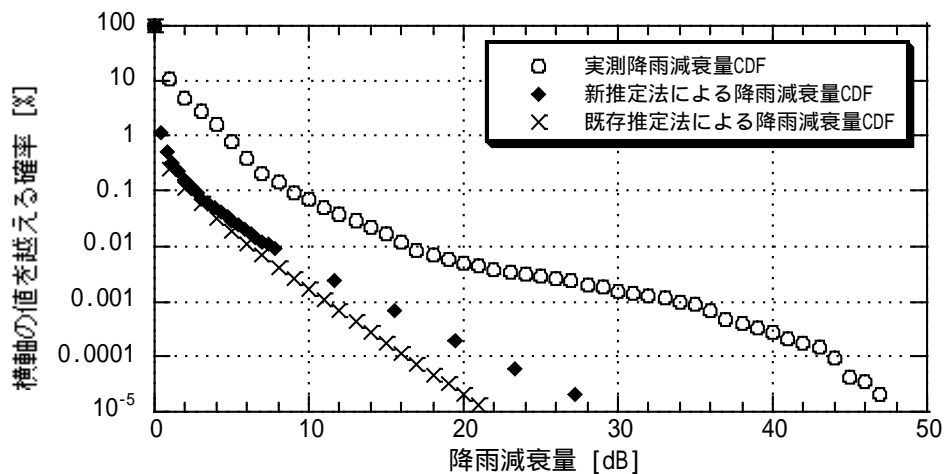


(d) 22.89GHz、0.57km、水平偏波

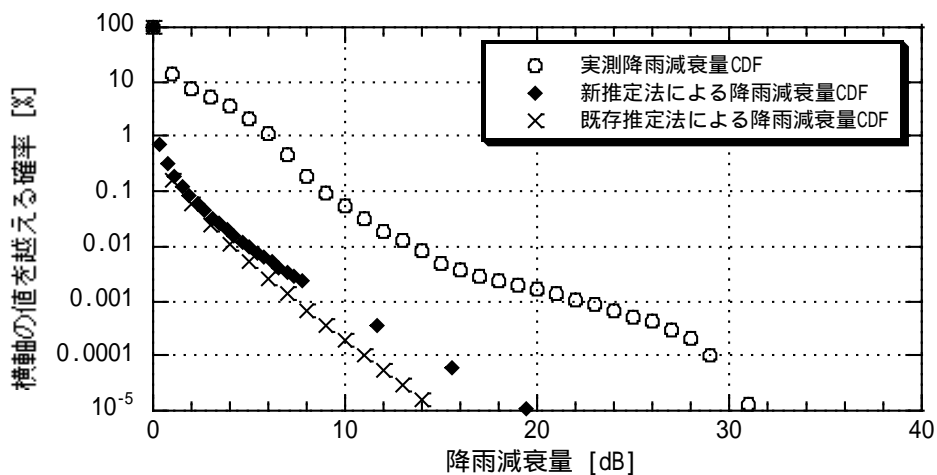
図 8-1 種々な距離における比較 (22GHz 帯)



(a) 38.1925GHz、1.09km、垂直偏波

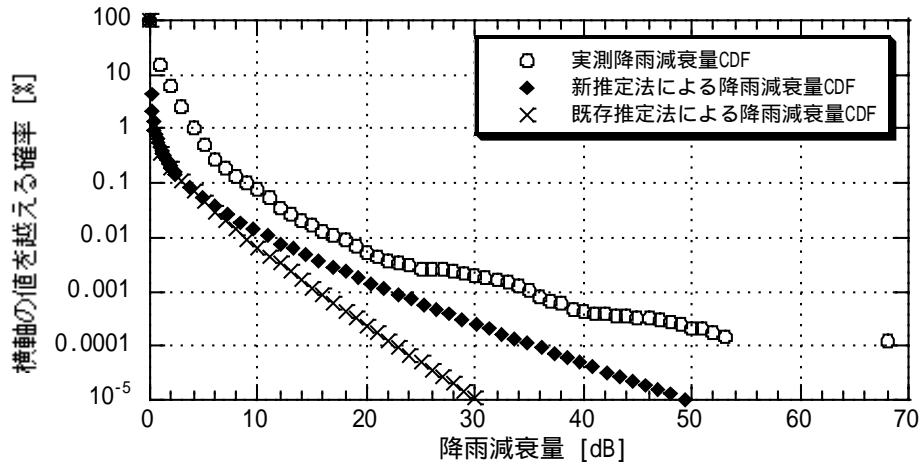


(b) 38.19GHz、0.65km、垂直偏波

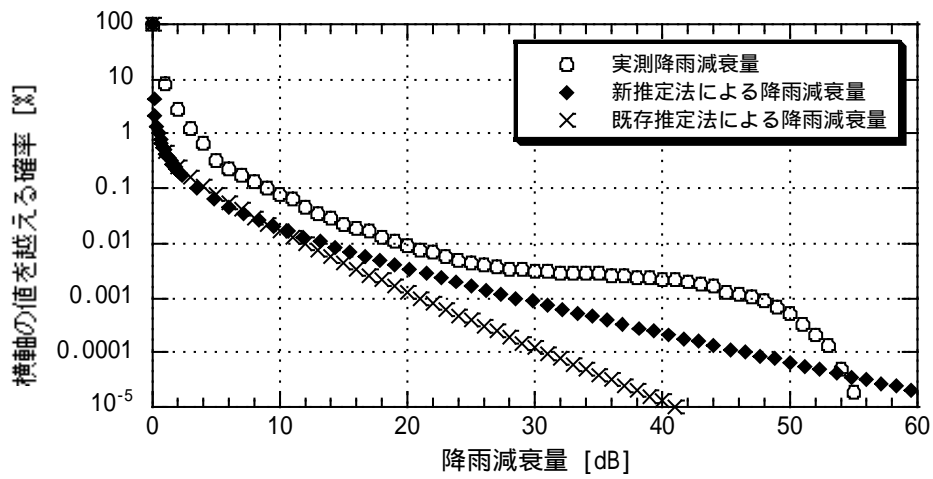


(c) 38.1975GHz、0.43km、垂直偏波

図 8-2 種々な距離における比較 (38GHz 帯)

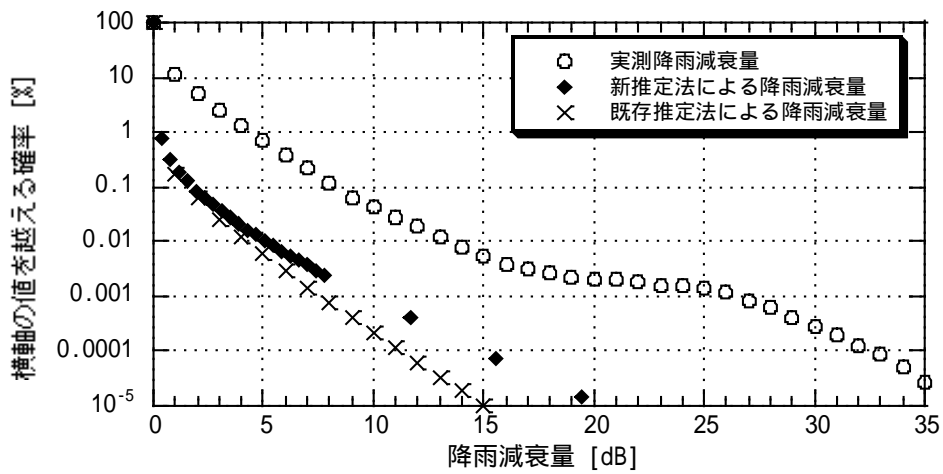


(a) 22.3GHz、2.2km、垂直偏波

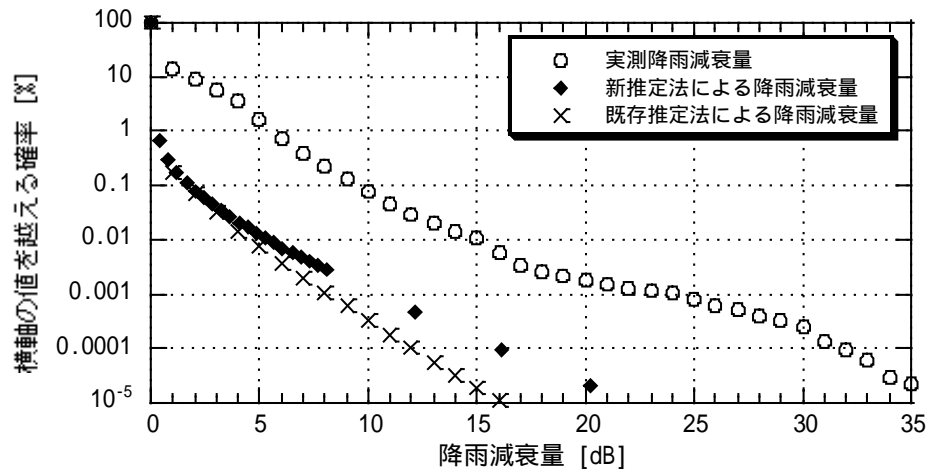


(b) 22.2775GHz、1.93km、水平偏波

図 8-3 異なる偏波における比較 (22GHz 帯)



(a) 38.185GHz、0.44km、垂直偏波



(b) 38.2025GHz、0.4km、水平偏波

図 8-4 異なる偏波における比較 (38GHz 帯)

図 8-1 ~ 8-4 には、実測降雨減衰量 CDF ( / 以下、実測 CDF という) と新推定法及び既存推定法による推定降雨減衰量 CDF ( 及び × / 以下、推定 CDF という) を示しているが、図 8-1 及び 8-2 は同一周波数帯において距離が異なる場合の推定精度を比較したもので、図 8-3 及び 8-4 は、偏波の違いに着目して比較するために、周波数帯が同一、距離が同程度で、偏波が異なる場合の推定精度を比較したものである。また、図 8-1 及び 8-3 は 22GHz 帯について、図 8-2 及び 8-4 は 38GHz 帯について、それぞれ示している。

新及び既存、両推定法による推定 CDF と実測 CDF との関係は、距離、周波数、偏波に関わらず、同様の傾向を示しており、全てのサンプルの全累積確率範囲において、大きな差が確認された。また、特徴的な点として、

伝搬路長が 1km 程度以下の短いケースがわかり易いが、累積確率が 10% 程度から 1% 程度までの部分において、新及び既存、両推定法による推定 CDF にほとんど減衰が発生していないような場合においても、実測 CDF に目立つ減衰が見られる点、また、伝搬路長が短いケースで特異な変化が現れている部分を除けば、逆に言えば、図 8-1(a) ~ (c) の比較的伝搬路長が長いケースがわかり易いが、0.01% 程度より小さい累積確率の部分において、実測 CDF と新推定法による推定 CDF との間はほぼ一定量の差となっているのに対し、実測 CDF と既存推定法による推定 CDF との間は累積確率が小さくなるほど差が大きく広がっていくという点、  
が確認された。

については、これまでの研究から、全降雨時間は全時間の 10% 程度と考えればよいことがわかっており<sup>[20],[21]</sup>、即ち、累積確率 10% 程度の部分というのは、最も弱い雨に相当する部分であり、即ち、伝搬路上の降雨散乱・吸収によって目立った減衰は発生しない

程度の弱雨であり、そのような部分で目立った減衰が発生しているということが、伝搬路上の降雨による減衰ではないものが影響していることを明白なものとしている、と考えられた。可能性がある唯一の要因としてレドーム上の水膜による減衰の影響が考えられたため、付録 8-2 に示す実測調査を行った。この結果、さほど水量が多くなるとも、レドーム全面に水膜ができる程度に水がかかれば、片側アンテナで、22GHz 帯の場合は 4dB 程度、38GHz 帯の場合は 5dB 程度の減衰量を生じること、また、これがほぼ最大値で、それより水量が増えても減衰量はほとんど増加しないことが確認できた。

の部分を含む累積確率が 100%程度から 0.1%程度までの部分では、両推定法による推定 CDF に違いはほとんど無く、顕著な違いが見えるのは累積確率が 0.01%より小さい部分である。上述のように、の部分、即ち累積確率が 0.01%より小さい部分では、実測 CDF と新推定法による推定 CDF との間の、レドーム上の水膜による減衰の影響と考えられる、差がほぼ一定量となっているが、図 4-8 より、0.01%は、今回の実測条件においては 1 分間降雨強度 70mm/h 程度に相当している。一方、付録 8-2 に示したレドーム上の水膜による減衰量の実測において、水量（1 分間降雨強度相当）が 80mm /h 程度以上で減衰量がほぼ一定量となっていることが確認されているが、測定時間の制約もあり、ほぼ一定量の減衰量となる水量（1 分間降雨強度相当）の下限值を正に示しているわけではなく、また、降雨を厳密に模擬できているわけでもないため、傾向として、ある程度の水量（80mm/h $\pm$  数十 mm/h の範囲と考えるのは適当であろう）以上においては、ほぼ一定量の減衰が生じることが判明した、と考えるべきであろう。以上を総合すると、累積確率が 0.01%より小さい部分で、実測 CDF と新推定法による推定 CDF との間の差がほぼ一定量となっていることは、新推定法による推定 CDF が、実測 CDF の変化の傾向を概ね正しく表していることを裏付けていると考えてよいであろう。逆に、実測 CDF と既存推定法による推定 CDF との間の差が累積確率が小さくなるほど大きく広がっていくということは、既存推定法による推定 CDF の変化の傾向が、実測 CDF のそれに対し、大きく異なるものとなっていると考えてよいであろう。

さらに詳しく見れば、この部分の新推定法による推定 CDF と実測 CDF との差は、22GHz 帯の場合が付録 8-2 の実測結果が示す 4dB 程度の 2 倍となる 8dB 程度に、38GHz 帯の場合が同実測結果が示す 5dB 程度の 2 倍となる 10dB 程度に近い値となっている。無線リンクにおいて、レドーム上の水膜による減衰量が最大となるのは、送受両端のアンテナともが、雨域内に入り、かつレドーム全面に水膜ができる状態となり、両アンテナにおける減衰が最大となっている場合と考えられ、付録 8-2 の実測結果の 2 倍程度で一定となっているということは、量的にも新推定法が精度良い推定を行えることを示すものとなっていると考えられる。

累積確率が 100%程度から 0.1%程度までの部分では、新推定法による推定 CDF と既存推定法による推定 CDF との間の違いは無視できる程度であり、顕著な違いが見えるのは累積確率が 0.01%より小さい部分である。そして、上述のように、累積確率が 0.01%より小さい部分では、レドーム上の水膜による減衰による影響を考慮すると、実測 CDF に対して、新推定法による推定 CDF は、変化の傾向だけでなく量的にも、精度良い推定を行っていると考えられるのに対し、既存推定法による推定 CDF は、変化の傾向において、既に大きく異なるものとなっており、新推定法の既存推定法に対する精度面の優位性が大きいことが確認できた。

なお、図 8-1(d)、図 8-2～8-4 の累積確率 0.01～0.001%程度以下の部分において、レドーム上の水膜による減衰の影響を考慮しても、実測 CDF が新推定法による推定 CDF から減衰量が大きくなる側に外れる傾向が顕著に見られるが、これは、実測データの取得期間である 1 年という期間は、降雨強度の確率分布について考えた場合、十分安定した分布が得られる期間とは言えず、特に確率の小さい部分において、バラツキが生じやすくなるためと考えられる。この傾向は、降雨減衰量の確率分布においては、伝搬路上における雨の降り方が、相関が大きく、揃い易い、短距離伝搬路において現れ易くなると考えられる。図 8-1(d)、図 8-2～8-4 は、いずれも 2km 程度以下の短距離伝搬路について示したものである。これに対し、比較的距離が長い伝搬路である図 8-1 (a)、(b)では、このような傾向が見えにくくなっており、伝搬路上の互いに距離が離れている地点間において雨の降り方の相関が小さくなり、積分効果により、バラツキが打ち消されるためと考えられる。

### 8.2.2 レドーム上の水膜による減衰量に関する補正量

図 8-1～8-4 に示した実測 CDF にレドーム上の水膜による減衰の影響がどの程度含まれているかを知りたい場合、まず、レドーム上の水膜による減衰量と降雨減衰量との識別がし易い部分に着目する必要がある。そのような観点で見た場合に、該当するのが、図 8-1(c)及び(d)、図 8-2～8-4 に示す伝搬路長が 2km 程度以下の短い伝搬路における累積確率が 100%から 1%程度までの部分である。この部分は、新及び既存、両推定法による推定 CDF が示すように、伝搬路途中の降雨による減衰は極めてわずかであり、ほぼレドーム上の水膜による減衰量が現れていると考えられる。この部分の実測 CDF は、累積確率（縦軸）を対数で表したグラフにおいて、累積確率が 100%から 10%程度までの部分では、10%に近づいてわずかに減衰量の発生が見られ、10%程度から 1%程度まで直線的に 3～7dB 程度まで立ち上がっている。先にも示したように、年間の総降雨時間は全時間の 10%程度ということが知られており<sup>[20],[21]</sup>、レドーム上の水膜による減衰量は、極めてわずかな降雨量の段階から発生しているということがわかる。もう一箇所、レドーム上の水膜による減衰

量と降雨減衰量との識別がし易い部分は、先にも述べた、累積確率が 0.01% 程度より小さい部分、即ちレドーム上の水膜による減衰量がほぼ最大値で一定量となる部分である。

以上のような点を考慮した場合に、このような傾向を表す関数として、累積確率（べき乗を含む）の指数関数が良い近似を与えてくれることが期待された。そこで、付録 8-2 の実測結果を考慮し、レドーム上の水膜による減衰量の最大値を、同時に送受端の両アンテナで最大減衰量が発生した場合として、実測結果の 2 倍である、22GHz 帯の場合は 8dB、38GHz 帯の場合は 10dB とし、累積確率の変化に依存する部分を累積確率（べき乗を含む）の指数関数で表し、これを新推定法による推定 CDF の降雨減衰量に加算したものと実測 CDF とを比較し、良い近似が得られれば、レドーム上の水膜による減衰量を概ね表すものとなると考えた。この考え方に基づき、図 8-1～8-4 に示した CDF を用いて、試行錯誤的に求めたものが次式である。

$$A_{RD} = A_{RD-max} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{P}{2}}\right) \quad (8-14)$$

ただし、 $A_{RD-max}$  は、上述のレドーム上の水膜による減衰量の最大値で、22GHz 帯では 8dB、38GHz 帯では 10dB とする。上式の関係を図 8-5 に示す。

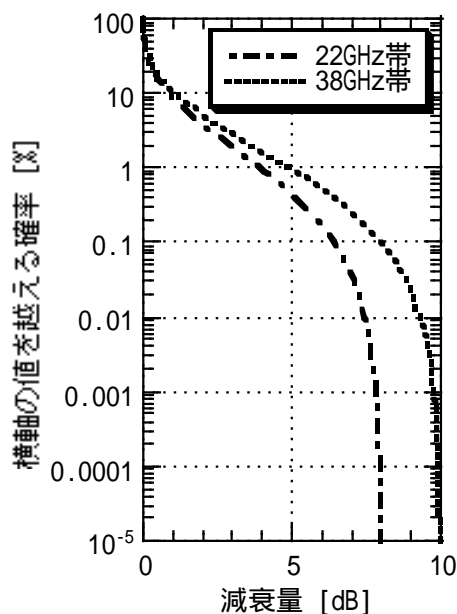
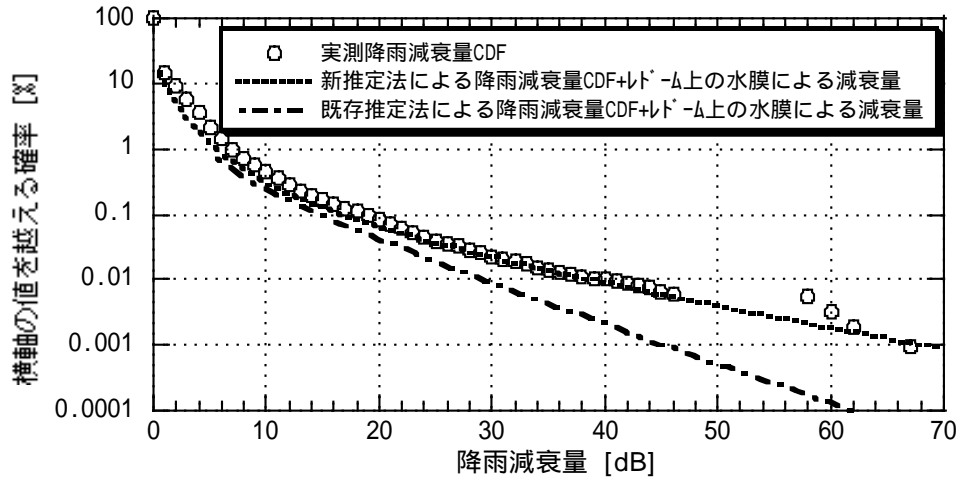


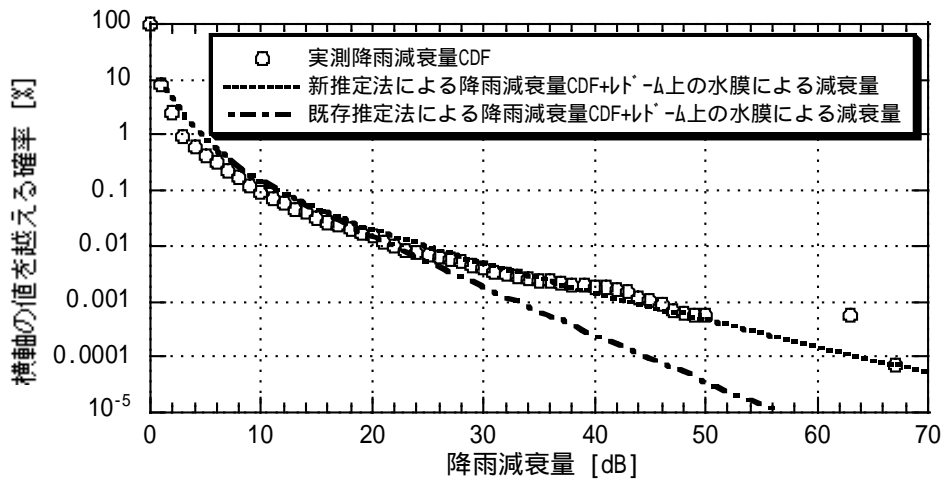
図 8-5 式(8-14)により与えられる減衰量

図 8-1～8-4 の新推定法及び既存推定法による推定 CDF の降雨減衰量に式(8-14)で与えられる減衰量を加算し、実測 CDF との比較を示したものが、図 8-6～8-9 である。

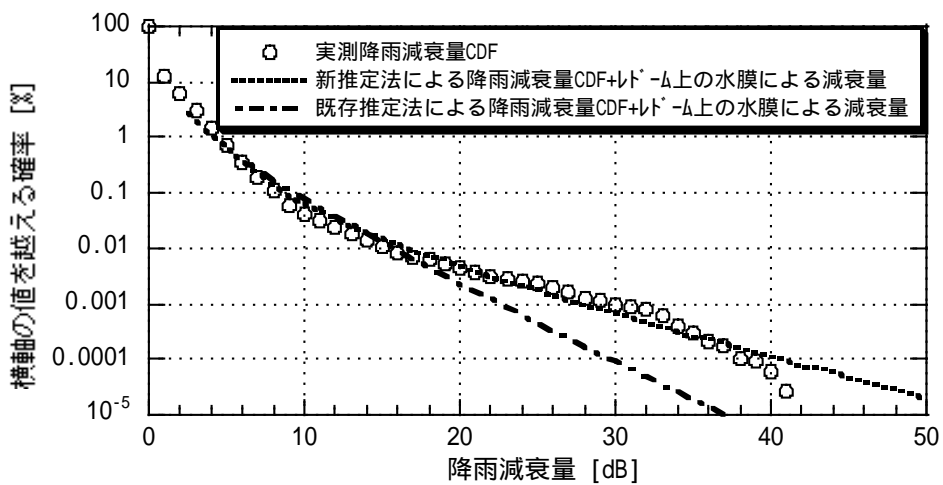




(a) 22.2975GHz、7.28km、垂直偏波



(b) 22.2825GHz、3.49km、垂直偏波



(c) 22.2925GHz、1.32km、水平偏波

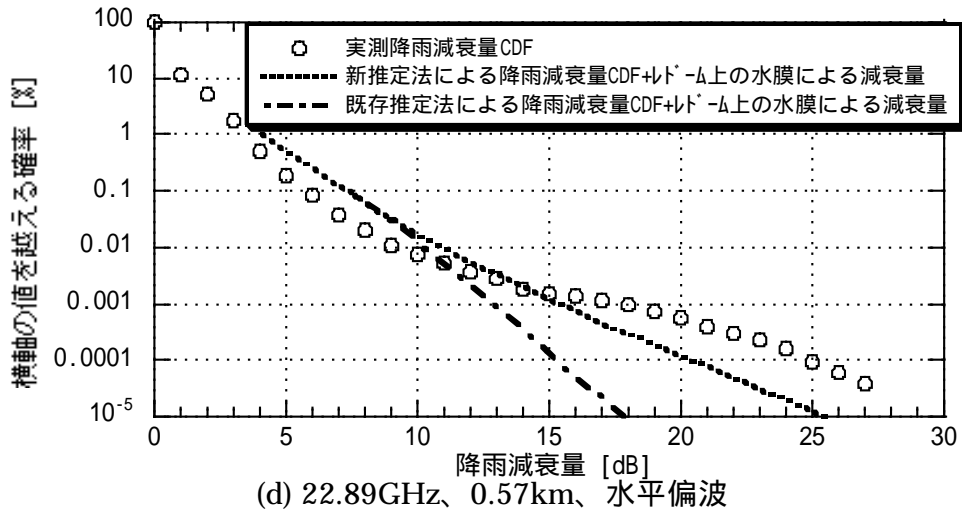
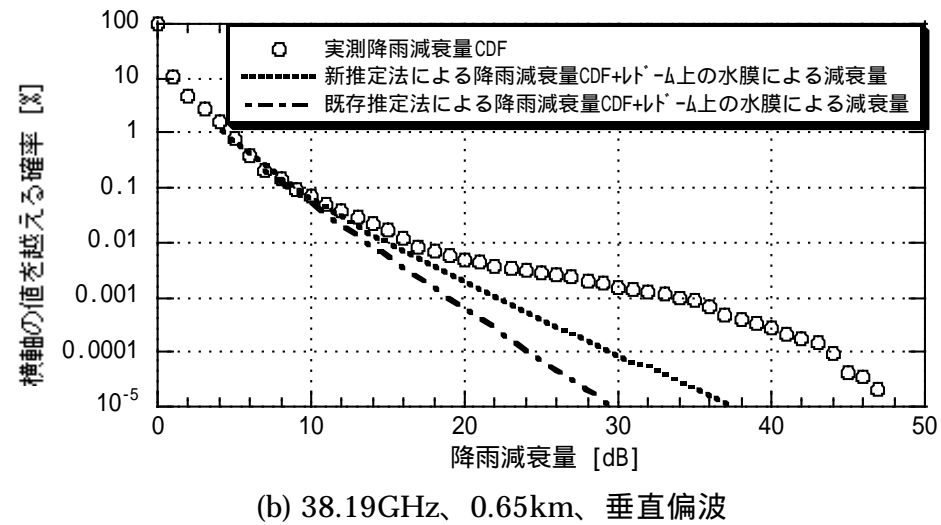
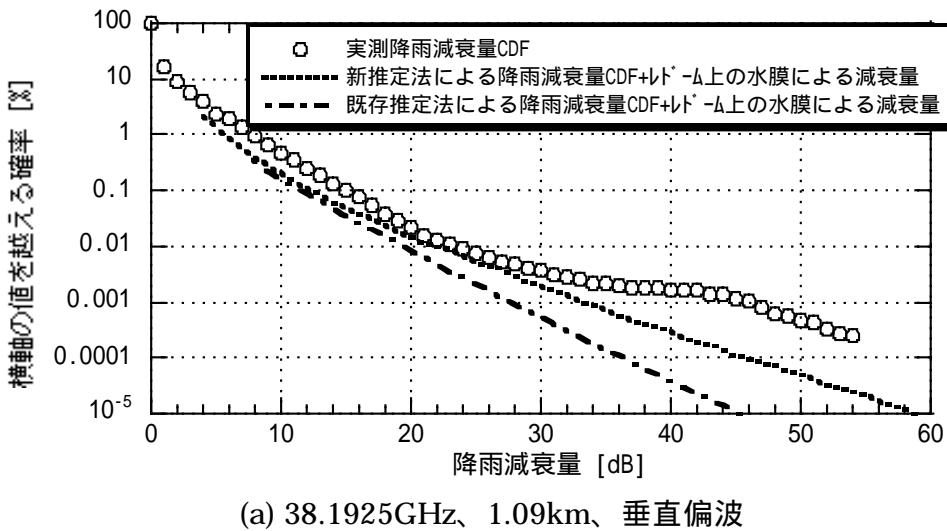
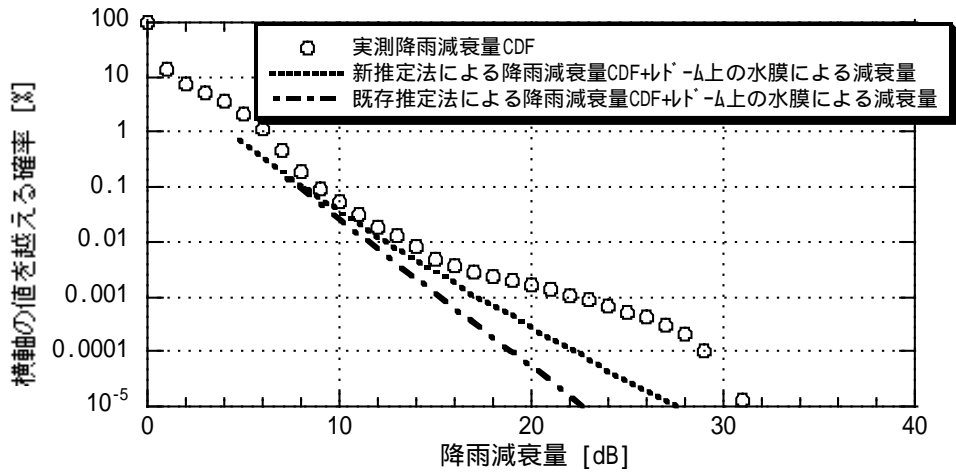


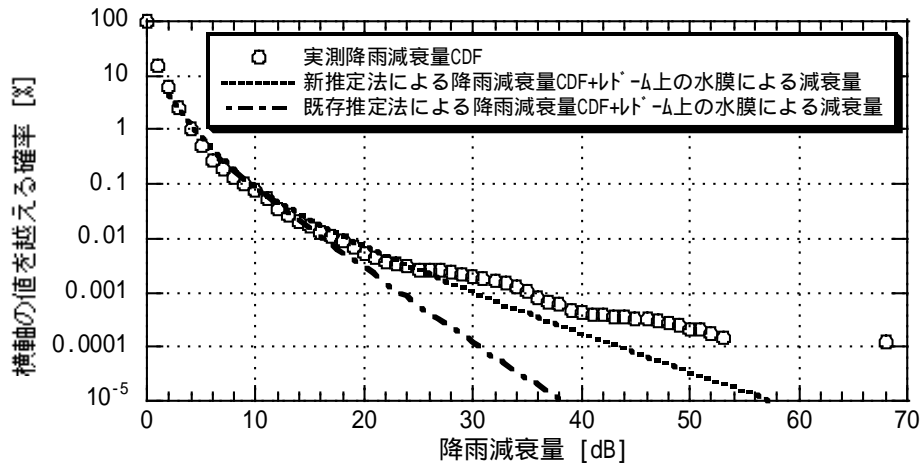
図 8-6 種々な距離における比較 (レ<sup>\*</sup>-μ上の水膜の損失を推定に加算) (22GHz 帯)



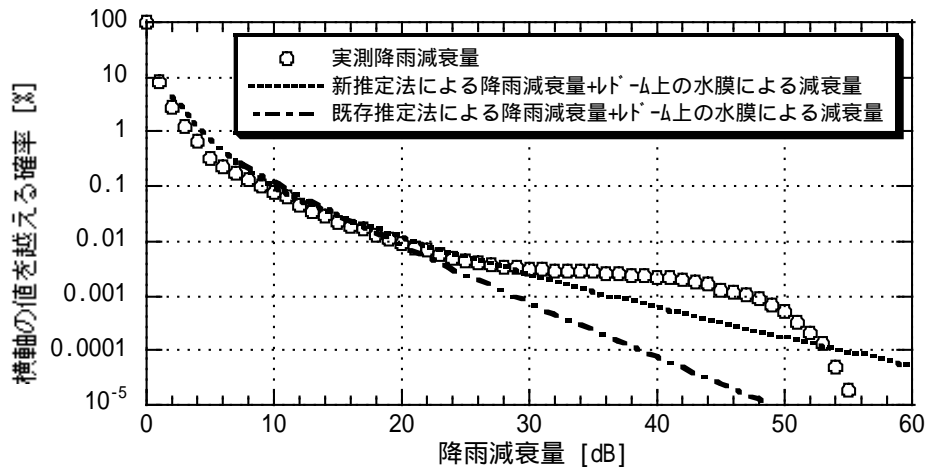


(c) 38.1975GHz、0.43km、垂直偏波

図 8-7 種々な距離における比較 (レド-ム上の水膜の損失を推定に加算) (38GHz 帯)

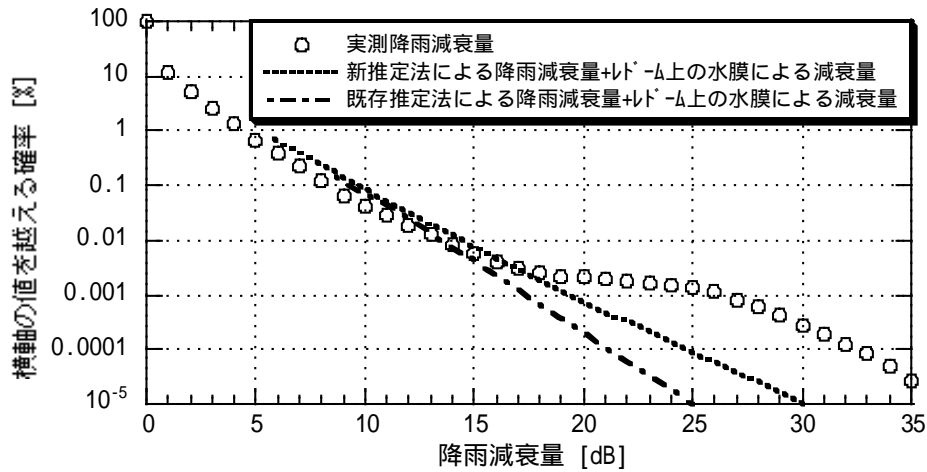


(a) 22.3GHz、2.2km、垂直偏波

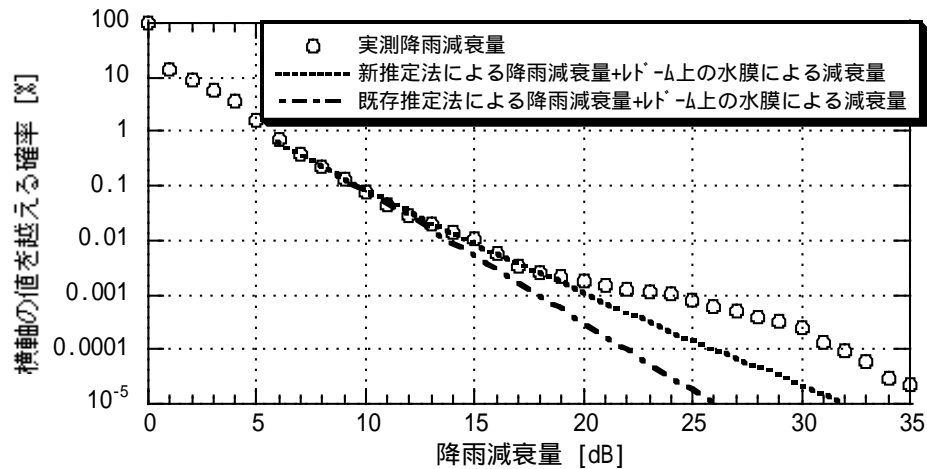


(b) 22.2775GHz、1.93km、水平偏波

図 8-8 異なる偏波における比較 (レド-ム上の水膜の損失を推定に加算) (22GHz 帯)



(a) 38.185GHz、0.44km、垂直偏波



(b) 38.2025GHz、0.4km、水平偏波

図 8-9 異なる偏波における比較 (レドーム上の水膜の損失を推定に加算) (38GHz 帯)

図 8-6~8-9 において、破線が新推定法による推定降雨減衰量+レドーム上の水膜による減衰量の CDF (以下、推定+レドーム上水膜減衰 CDF という) を示しており、一点鎖線が既存推定法による推定+レドーム上水膜減衰 CDF を示している。

新推定法による推定+レドーム上水膜減衰 CDF と実測 CDF とは良い一致を示している。加えて、前節でも述べたように、累積確率が 100%程度から 0.1%程度までの部分では、新及び既存、両推定法による推定 CDF の違いは無視できる程度であり、違いが顕著な累積確率が 0.01%より小さい部分では、新推定法は、傾向的にも量的にも精度良い推定を行っていると考えられる。これらを総合すると、式(8-14)で与えたレドーム上の水膜による減衰の補正量は、実際と同減衰による減衰量の増分を概ね正しく表しているものと考えられる。なお、式(8-14)には、無線リンクで発生しうるレドーム上の水膜による減衰量の最大値をパラメータとして与える必要があり、本研究においては、付録 8-2 に示す実測で得

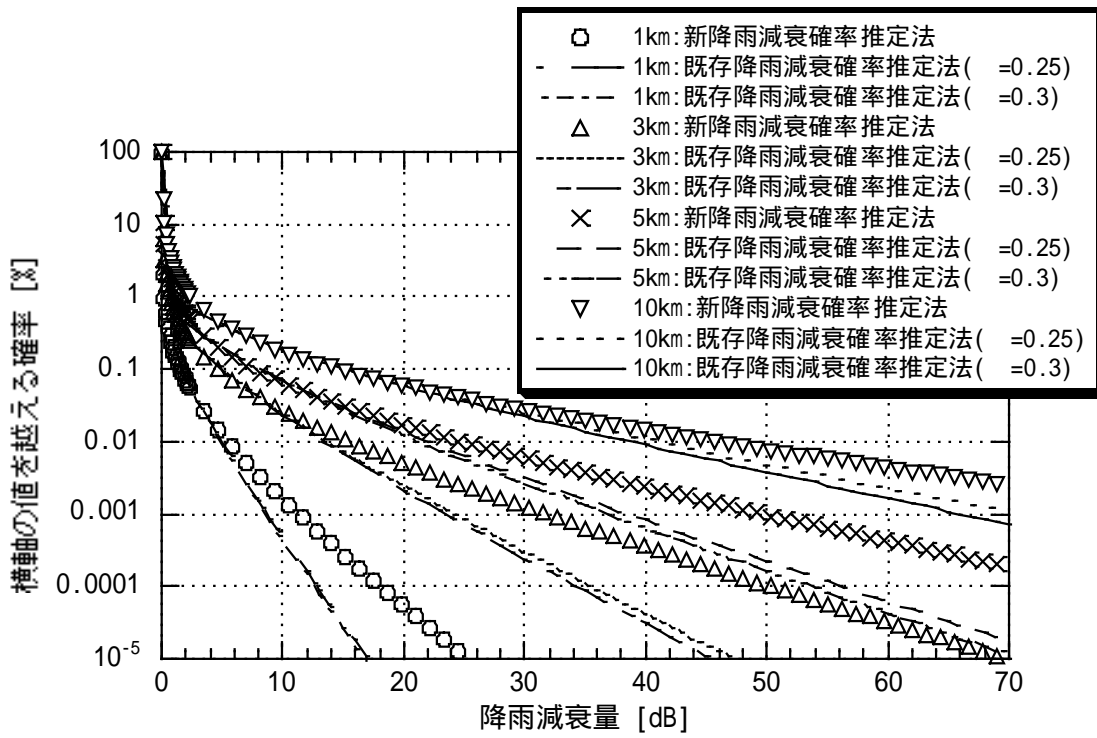
られた片側のアンテナにおける最大減衰量（レドーム全面に水膜ができた場合に発生）22GHz 帯で 4dB 程度、38GHz 帯で 5dB 程度、の 2 倍を用いているが、この減衰量は、水膜の厚さ（レドームの材質・表面処理の状況等に依存）、レドームの材質・厚さ等に依存する<sup>[29]</sup>ため、周波数に対して一定の条件で表すことはできないことに注意を要する。

### 8.2.3 新推定法と既存推定法のみが多様な条件での比較

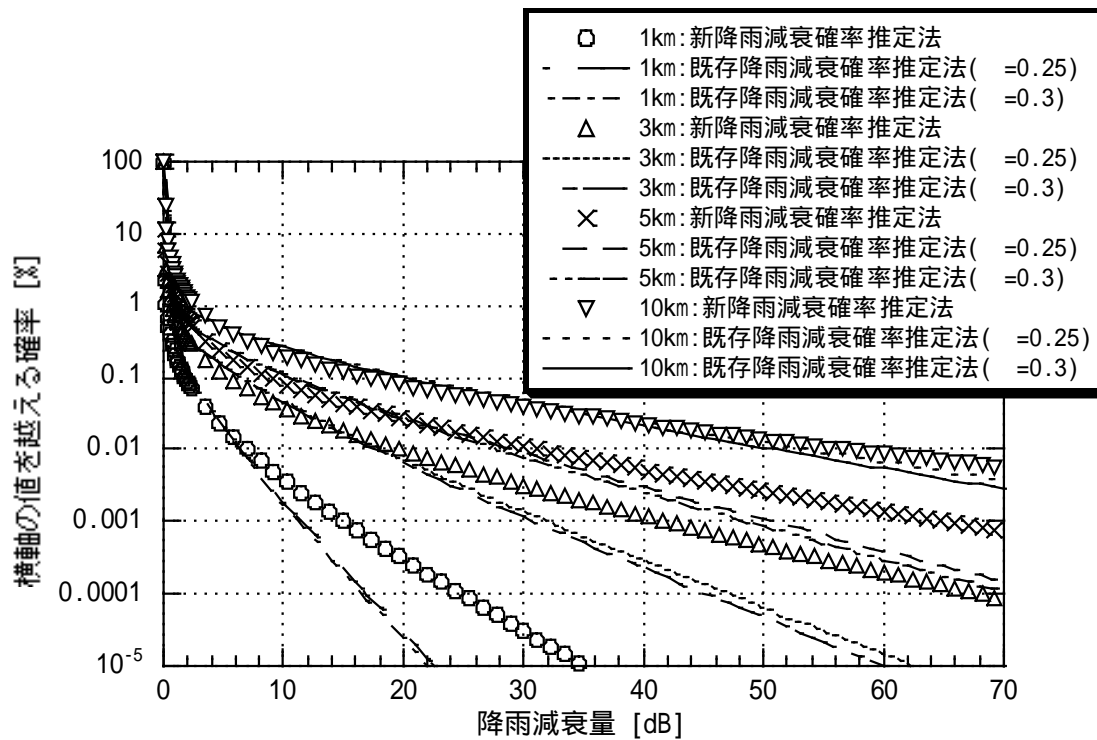
降雨減衰量の実測を行った距離、周波数、偏波条件よりも多様で細かい条件について、図 3-1 の A 点における降雨量データを基に、新推定法と既存推定法の推定結果のみの比較を行い、示したものが、図 8-10 及び 8-11 である。

図 8-10 及び 8-11 は、それぞれ 22GHz 及び 38GHz において、各偏波ごとに 1km、3km、5km 及び 10km の場合について、新推定法による推定結果と既存推定法による推定結果を比較したものである。また、前節においては、既存推定法による推定については、文献[5]に基づき、空間相関特性のパラメータとして 0.3 のみを用いたが、図 8-10 及び 8-11 では、 $\alpha$  が 0.25 の場合についても示している。これは、文献[5]では検討する際に対象となったシステムの条件を考慮して 0.3 が適当としているが、同文献にも示されているように、0.25 が用いられている場合もあり<sup>[3],[5],[21]</sup>、また、新推定法における  $\alpha$  においても式(6-12)で  $n=1$  とした場合の値が 0.25 であることから、考慮しておく必要があると考えたためである。

図 8-1 ~ 8-4 において、新推定法と既存推定法では、特に累積確率 0.01% 程度以下の高減衰域において、推定結果が大きく異なるが、この傾向は図 8-10 及び 8-11 においても確認できる。推定結果の差異については、周波数、偏波の違いによる特段の傾向の違いは見えないが、距離が長くなるほど、同一累積確率における減衰量の差異が大きくなる傾向が見られる。これは、前節の結果から、新推定法が実降雨減衰量 CDF を概ね正しく表していると考え、既存推定法の推定誤差が距離が長くなるほど大きくなるということと同義と言える。また、図 8-10 及び 8-11 より、既存推定法における、空間相関特性のパラメータ  $\alpha$  を 0.3 とした場合と 0.25 とした場合の差異は小さいことがわかる。

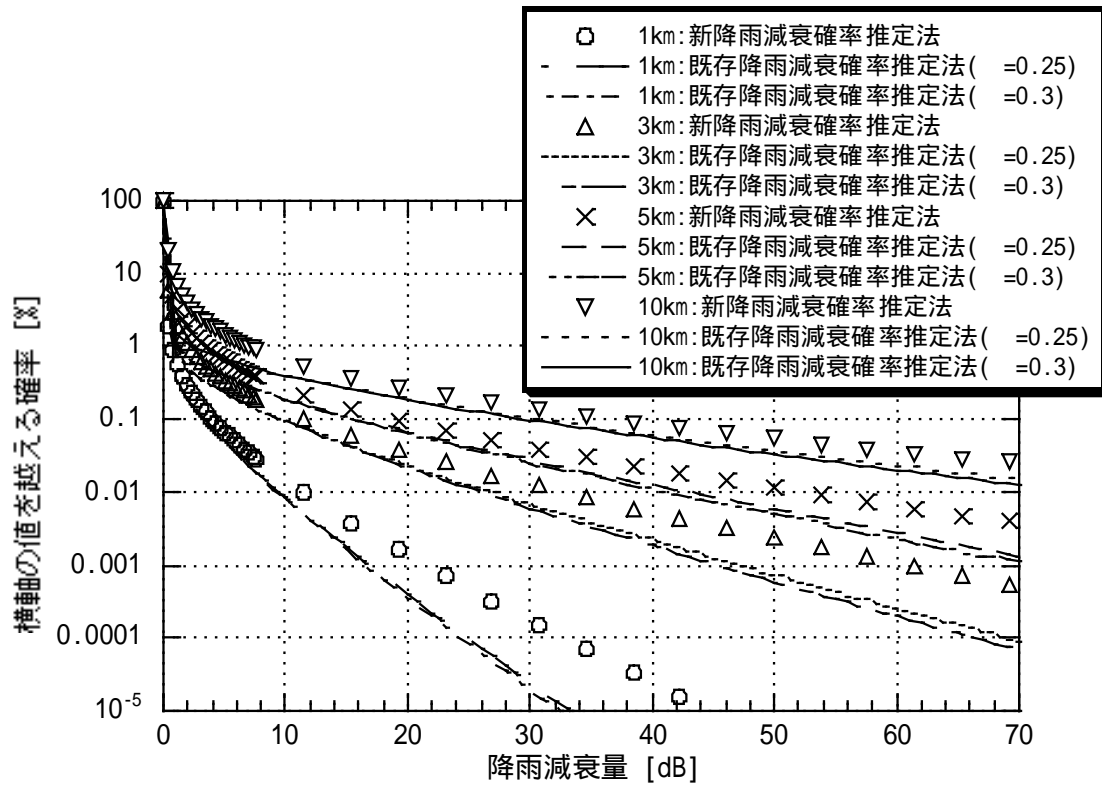


(a) 垂直偏波

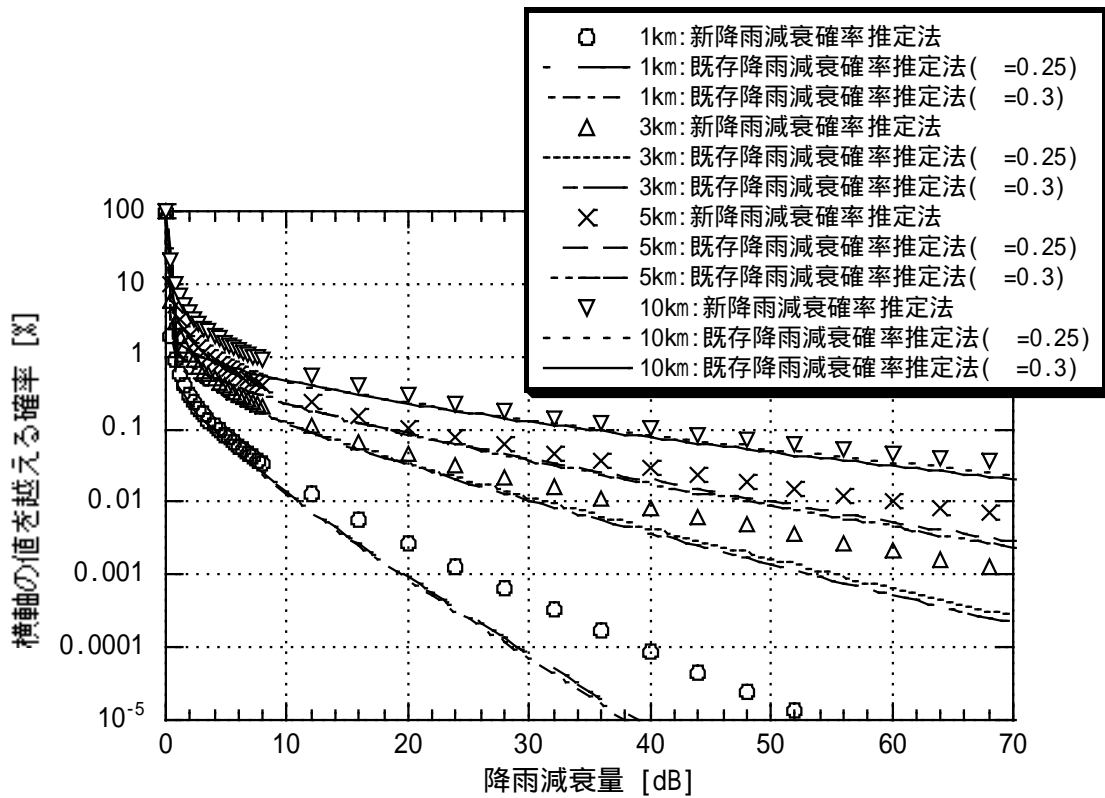


(b) 水平偏波

図 8-10 推定法のための比較 (22GHz 帯)



(a) 垂直偏波



(b) 水平偏波

図 8-11 推定法のみ比較 (38GHz 帯)

## 8.2.4 新推定法の精度評価のまとめ

8.3.1 節及び 8.3.2 節の結果をまとめると、実測データを用いた精度評価の結果は次のようになる；

- 距離、周波数、偏波に関わらず、新推定法の方が既存推定法より、特に累積確率 0.01% 程度以下の高減衰域における推定精度が優れている。
- 周波数、偏波による傾向の違いは目立たないが、距離が長いほど、既存推定法の推定誤差（同一累積確率における減衰量に着目した誤差）は大きい。
- 空間相関特性のパラメータ を 0.3 とした場合と 0.25 とした場合の既存推定法の推定結果の差異は小さい。

新推定法と既存推定法では、特に高減衰域において推定結果が大きく異なり、既存推定法による推定 CDF は大きな誤差を含んだ結果となっているが、この要因については次のように考えられる。

新推定法は第 5 章において広い確率範囲における近似精度が優れていることが確認されている M 分布を用い、既存推定法はガンマ分布を用いている。ただし、ガンマ分布が M 分布より推定精度が劣るとしても、推定のための条件が正しく与えられていれば、図 8-1 ~ 8-4 で見られるような大きな誤差を生じることにはならないと考えられる。

推定に必要となるパラメータとして、新推定法は年間のデータから得られたものを用いるのに対し、既存推定法は、強雨期 3 ヶ月のデータから得られたものを用いており、強雨期 3 ヶ月の降雨減衰量の累積確率から年間の累積確率への換算が必要となる。換算に用いる関係式、式(8-13)は、文献[12]において、8 都市で得られたデータに基づくものとして示されたものであり、全国において適用できるか確認が必要と考えられる。特に、沖縄地域のように強い雨が降る期間が長い地域では、条件が異なる可能性が考えられる。ただし、今回比較検討に用いた実測データは東京大手町周辺、即ち代表的地点の 1 つで測定されたものあり、式(8-13)は適用可能な範囲と考えられ、図 8-1 ~ 8-4 で見られるような大きな誤差を生じる要因とはならないであろうと考えられる。

推定に必要となる 2 つのパラメータとして、新推定法は、当該地点で得られる年間の 0.01% 値及び 0.0001% 値を用いているのに対し、既存推定法は、当該地点で得られる強雨期 3 ヶ月の 0.0075% 値、及び全国を 10 の地域に分け示されたガンマ分布のパラメータ を用いている。即ち、既存推定法のパラメータの 1 つは各地点ごとの特性から得られているものではない。パラメータの与え方の精度は直接推定精度に影響を与えることとなるため、これが、図 8-1 ~ 8-4 において、大きな誤差を生じる要因となっている可能性は高いと考えられる。



新推定法は、空間相関特性を、近距離部分と遠距離部分において、より精度よく表せるよう、2つの異なる特性、 $\exp(-\alpha\sqrt{d})$ 及び $\exp(-\beta \cdot d)$ を用いているのに対し、既存推定法は $\exp(-\alpha\sqrt{d})$ のみを用いている。ただし、距離が短い場合でも既存推定法の誤差がかなり大きい点を考えると、大きい誤差を生じることへの空間相関特性の寄与は 項の要素ほど大きくないと考えられる。

降雨減衰係数が式(2-1)で与えられるのを考慮し、新推定法は1分間降雨強度のn乗の空間相関特性を考慮した区間積分を行うが、既存推定法では1分間降雨強度そのものの空間相関特性を考慮した区間積分を行っている。文献[2]では1分間降雨強度そのものの空間相関特性と1分間降雨強度のn乗の空間相関特性の違いが無視できる程度とされていたが、第6章において無視できない違いがあることが確認されている。ただし、 項に示したと同様な理由から、大きい誤差を生じることへの空間相関特性の寄与は 項の要素ほど大きくないと考えられる。

降雨減衰係数が式(2-1)で与えられるのを考慮し、新推定法は1分間降雨強度のn乗の区間積分を行った後にkを乗じるという処理を行うが、既存推定法では、取扱いを容易にするため、8.3.1節に示したように、降雨減衰係数を $R=k' \cdot R$ で近似的に与え、1分間降雨強度そのものの区間積分を行った後にk'を乗じることにより降雨減衰量を得るという処理を行う(実際には、ガンマ分布のパラメータの1つである をk'で除したものをを用いて区間積分を行うことで、等価的にこれを行っている)。これがどの程度誤差に影響を与えているかは考察が難しいため、文献[4]の式(5)~(8)に基づき、ガンマ分布を用いる場合について、図8-10及び8-11と同様な条件で、1分間降雨強度のn乗の区間積分を行った場合の結果を図8-12及び8-13に示す。

図8-12及び8-13は、周波数が異なる場合と偏波が異なる場合を効率的に比較するため、22GHz帯においては図8-10(a)に対応する垂直偏波分を、38GHz帯においては図8-11(b)に対応する水平偏波分を示した。したがって、図8-10(a)と図8-12、図8-11(b)と図8-13との比較を行うこととなるが、それぞれの間ほとんど違いはみられず、この要素は大きな誤差を生じる要因とはなっていないと考えられる。

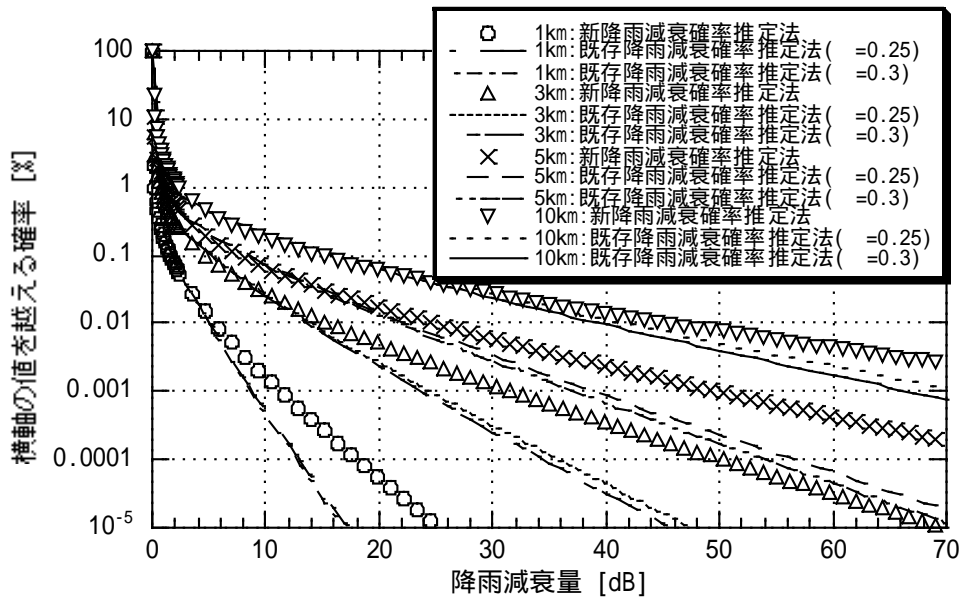


図 8-12 既存推定法において 1 分間降雨強度の  $n$  乗の区間積分を行うのを除き図 8-10(a)と同様 (22GHz 帯 / 垂直偏波)

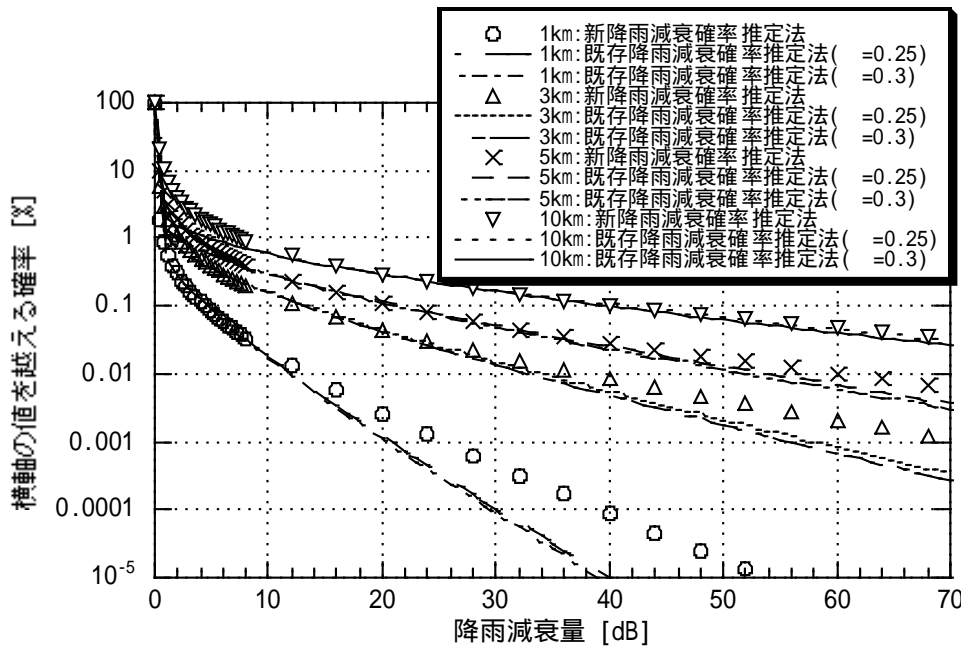


図 8-13 既存推定法において 1 分間降雨強度の  $n$  乗の区間積分を行うのを除き図 8-11(b)と同様 (38GHz 帯 / 水平偏波)

以上のように、新推定法は既存推定法に比較し、精度を向上させる複数の改善が図られたものとなっているが、その中でも特に改善効果が大いなのは、分布モデルとして  $M$  分布を採用し、推定に必要な 2 つのパラメータを各地域ごとの CDF から抽出された値を用いている点 ( 項 ) と考えられる。

## 付録 8 - 1 M 分布において $P_1[\%]$ 値と $P_2[\%]$ 値を与えてカーブを決定する簡易式

M 分布において、 $P_1[\%]$  と  $P_2[\%]$  の 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度が与えられる場合、式(5-8)における  $y_i = \ln F(R_i) + \ln R_i$  の  $F(R_i)$  に  $P_1/100$  及び  $P_2/100$  を入力し、 $\ln R_i$  の  $R_i$  及び  $x_i = R_i$  に  $P_1[\%]$  及び  $P_2[\%]$  における 1 分間降雨強度  $R_{P1\%}$  及び  $R_{P2\%}$  を入力し、両式を変形することにより、M 分布のパラメータ  $u$  を次式のように得ることができる。

$$u = \frac{1}{R_{P2\%} - R_{P1\%}} \ln \frac{\frac{P_1}{P_2} R_{P1\%}}{R_{P2\%}} \quad (\text{A8-1-1})$$

また、もう一方のパラメータ  $p$  は、式(5-9)より、次式により与えられる。

$$p = \frac{P_1}{100} R_{P1\%} \exp(u \cdot R_{P1\%}) \quad (\text{A8-1-2})$$

そして、得られた  $u$ 、 $p$  を用いて、任意の 1 分間降雨強度  $R_a$  に対する累積確率  $F(R_a)$  は、次式により与えられる。

$$F(R_a) = \frac{p}{R_a} \exp(-u \cdot R_a) \quad (\text{A8-1-3})$$

なお、ここでは、 $F(R_a)$  は、パーセントではなく、真数で与えられることに注意を要する。

## 付録 8 - 2 レドーム上への降水による減衰量の実測結果

8.3.1 節に示した、実測 CDF と推定 CDF の比較を行う図（図 8-1～8-4）において、特に伝搬路長の短い図 8-1(c)及び(d)、図 8-2～8-4 に着目すると、累積確率 10%～1%の部分では、新及び既存、両推定法による推定 CDF からわかるように、伝搬路上の降雨の吸収・散乱による減衰がほとんど発生しないと考えられるにもかかわらず、実測 CDF では無視できない程度の減衰が確認された。これは降雨時にレドーム上に雨滴が付着して形成された水膜による減衰と考えられたため、これを検証する測定を行った。具体的には、第 3 章に示した東京大手町周辺での実測に用いたものと同タイプの 22GHz 帯及び 38GHz 帯の送受信機を晴天時に 60m 程度離して対向させ、片側のアンテナに向けてシャワーヘッドから散水し（シャワーヘッドをやや上部に向け、散水した水が、自然落下し、アンテナにかかるとした）減衰量を測定した。散水時にアンテナ近くの下部に転倒柵型雨量計を設置し、落下している水量の測定も行った。その結果は、表 A8-2-1 のような結果となった。

表 A8-2-1 レドーム上の水膜による減衰量の実測例

22GHz 帯		38GHz 帯	
水量 (1 分間降雨強度相当) [mm/h]	減衰量 [dB]	水量 (1 分間降雨強度相当) [mm/h]	減衰量 [dB]
80	4	100	5
110	4	300	6
140	4		
150	4		
180	4		
300	5		

測定時間の関係で、水量を細かく設定して測定が行えたのは 22GHz 帯のみであったが、同周波数帯においては、80mm/h 以上では、ほとんど減衰量に違いが生じないような結果が得られた。38GHz 帯においても、100mm/h と 300mm/h で大きな差はないため、同様であると考えられる。この、ほぼ一定量の減衰量が生じるのは、水量が少ないほど散水を開始してからその状態になるまでの時間が長いこと、視認によるタイミング確認などから、レドーム表面全体に一様に水膜が形成されるような状態になった時点からであると考えられた。上表で示された水量より少ない水量での測定については、減衰量が安定的に得ら

れず、水量との関係が一概に示しきれないことからデータとしては示していない。

本測定では、時間的制約もあり、水量を徐々に変えながら、減衰量を測るたびに転倒  
桁型雨量計で水量を測って関係を求めたため（22GHz 帯側の測定結果において水量の測  
定間隔が規則的でないことは、このためである） ほぼ一定量の減衰量となる水量の下限  
を正確に測れたとは言えない。また、シャワーヘッドによる散水は、実際の降雨とは、水  
滴形状、密度なども異なると考えられるため、これで雨による影響を定量的に十分模擬で  
きているとは言えないと考えられる。したがって、本実測の結果から判明したことは、傾  
向として、ある程度の水量（80mm/h ± 数十 mm/h の範囲と考えるのは適当であろう）以上、  
即ち、安定的にレドーム表面全体に一様に水膜が形成されるほどの水量以上においては、  
水量の多少に依存せず、ほぼ一定量の減衰が生じるという点であると考えられる。

なお、参考的な測定として、レドーム表面に撥水性塗料を塗布し同様の測定を行った  
ところ、レドーム上の水はレドーム面に付着せずに水玉となって落ちるため、水膜が形成  
されず、減衰も発生しないことが確認された。

## 第9章 新降雨減衰確率推定法に用いる年変動を考慮したパラメータ

第4章に示した乱数補正秒単位均し分配処理、及び第7章に示した異積分時間降雨強度確率分布変換手法により、全国千数百箇所に配置された AMeDAS により最長 1976 年から得られている 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから、1 分間降雨強度 CDF を精度良く得ることが可能となり、得られた同 CDF を用いて近年のデータに基づく新たな降雨減衰確率推定法に用いるパラメータをとりまとめることが可能と考えられた。

一方、パラメータの作成に当たって留意すべき点として、2.4.2 節に示したように、これまでの降雨減衰確率推定法に用いられているパラメータは、平均値的な値であり、この場合、これを基に得られる降雨減衰確率は、平均値的な条件となり、平均 2 年に 1 回は得られた条件を満足しない事象が発生するという問題があった。無線通信システムを扱う者にとって、降雨減衰確率推定法を用いて回線設計を行い、その結果に基づき設定した無線リンクが稼働率目標を頻繁に満たさないことは避けたいことであった。

本章では、以上を踏まえ、第4章及び第7章に示した手法により AMeDAS データから得られた 1 分間降雨強度 CDF を用いて、MTBF の考え方を適用し、降雨減衰確率推定により得られる降雨減衰確率が平均何年間継続して満たされるかを条件として与えることができるパラメータのとりまとめを行った結果について示す。

### 9.1 安全係数の概念

2.4.2 節でも示したように、唐沢・松戸は、文献[15]において、MTBF の考え方を適用し、着目する特定の累積確率における 1 分間降雨強度に対し、それを上回ることになるのは平均的に何年に 1 回となるかなど推定できるような条件を与える、という考え方を提案した。具体的には、任意の着目する累積確率  $p$  における 1 分間降雨強度  $R_p$  について、平均値  $R_p$  に対する、平均して  $y$  年間は上回る降雨が発生せず  $y+1$  年間に 1 回上回る降雨が発生するような値  $R_{p,y}$  の比を、MTBF  $y$  年に対応する安全係数  $\eta_{R_p,y}$  と定義し、次式で与えられることを示した。

$$\eta_{R_p,y} = \frac{R_{p,y}}{\langle R_p \rangle} = \frac{\langle R_{p,y+1\max} + R_{p,y+1\max 2} \rangle}{2\langle R_p \rangle} \quad (9-1)$$

ただし、 $R_{p,y+1\max}$  :  $y+1$  年間の  $R_p$  の最大値

$R_{p,y+1\max 2}$  :  $y+1$  年間の  $R_p$  の 2 番目に大きい値

: 平均値

## 9.2 新降雨減衰確率推定法用パラメータ

8.2.1 節で示したように、M 分布に基づく降雨減衰確率推定法において用いるパラメータについては、0.01%値及び0.0001%値を用いることが適当と考えられた。

第4章に示した乱数補正秒単位均し分配処理、及び第7章に示した異積分時間降雨強度確率分布変換手法を用いて、全国千数百箇所に配置された AMeDAS により最長 1976 年から得られている 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから、1150 箇所における MTBF 10 年以上分（最長 27 年間分）の 1 分間降雨強度 CDF を求めることができ、それらから 0.01%値及び 0.0001%値を抽出し、各地点それぞれに対する平均値  $R_p$  及び安全係数  $R_{p,y}$  を求めた。なお、最長 27 年間分の 1 分間降雨強度 CDF には、より短い積分時間の降水量データから得られるものを優先して用いることとした。即ち、1 分間降水量データが利用できる箇所（全国 135 箇所）及び年（最長 1996 年から）においては、1 分間降水量データから得られる 1 分間降雨強度 CDF を用い、これは利用できないが 10 分間降水量データが利用できる箇所（全国 1150 箇所）及び年（最長 1995 年から）においては、10 分間降水量データから得られる 1 分間降雨強度 CDF を用い、そして両者とも利用できない場合においてのみ 1 時間降水量データから得られる 1 分間降雨強度 CDF を用いている。

式(9-1)において、有効なデータが得られた全年数  $Y_{Tot}$  分のデータから求めた平均値を用い、MTBF  $y=1 \sim Y_{Tot}-1$  年に対して安全係数を求めた。式(9-1)の分子は  $y+1$  年ごとに区切って得られる  $R_{p,y+1max}+R_{p,y+1max2}$  の平均値を求めることになるが、全年数  $Y_{Tot}$  が  $y+1$  年で割り切れない場合には、 $y+1$  年ごとに区切り、最後に残った  $y+1$  年未満分のデータは計算から除外することとなる。しかしながら、たまたま除外しようとした年に際立って強い雨が記録されていたりする場合があると、MTBF[年]によって計算に含まれたり含まれなかったりすることにより MTBF[年]対安全係数の関係が一定の傾向を示さないという場合があった。このため、異なる方向において（データが存在する期間の最も新しい年から古い年に向かって、及び最も古い年から新しい年に向かって）上記計算を行い、両者の平均をとったものを用いることとした。

図 9-1 に北から南までの主な都市、札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡、那覇における最長 1976～2002 年のデータに基づく 0.01%値に対する安全係数の算出結果を示す。図 9-1 には近似カーブも示している。これは文献[15]の式(5)をベースに、得られた結果が上方に反り返るような傾向を持つものが無視できない程度に見られたため、曲率を与えるようパラメータを付加したもので、MTBF  $y$  年に対する安全係数  $R_{p,y}$  を次式により与えている。

$$\eta_{R_{p,y}} = 1 + C_1 \frac{\sigma_{R_p}}{\langle R_p \rangle} (\log(y))^{C_2} \quad (9-2)$$

ただし、 $R_p$  : 累積確率  $p$ [%]における 1 分間降雨強度  $R_p$ [mm/h]の標準偏差  
 $R_p$  : 累積確率  $p$ [%]における 1 分間降雨強度  $R_p$ [mm/h]の平均値  
 $C_1, C_2$  : 最小二乗法により求めた近似係数

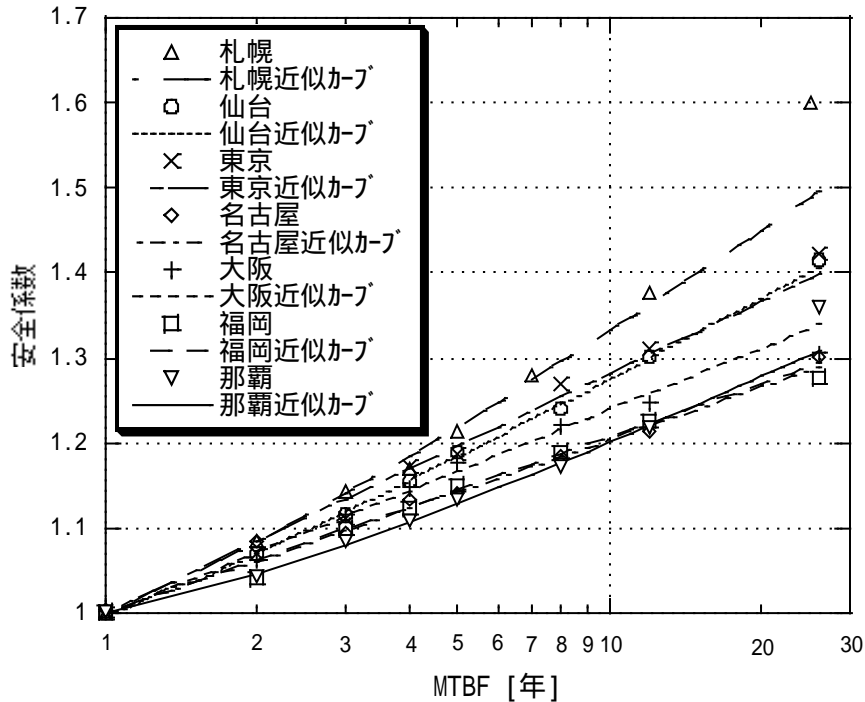


図 9-1 安全係数算出例 (最長 1976~2002 年 / 0.01% 値)

なお、図 9-1 では、札幌のケースにおいて、最大 MTBF[年]において、それより短い MTBF[年]の点を結んだ線の延長上から安全係数の値が大きくなる側に大きく乖離するような結果となっている。これは、最大 MTBF[年]においては、式(9-1)の分子において、 $y+1$  年間の  $R_p$  の最大値と 2 番目に大きい値との和が 1 つしか得られず、平均値の意味をなさずにデータのバラツキがそのまま現れ、当該 MTBF[年]内にこれを大きく越える MTBF[年]に相当する雨量が 1 回でも降った場合に、大きい乖離を生ずることとなるためと考えられる。このように、最大 MTBF[年]では、大きい乖離が生じ易いと考えられたことから、近似係数  $C_1, C_2$  については、最大 MTBF[年]における安全係数を含めずに求めることとした。

表 9-1 は、0.01% 値及び 0.0001% 値の平均値  $R_p$ 、標準偏差  $R_p$ 、近似係数  $C_1, C_2$ 、並びに最大 MTBF[年] (算出の元となるデータの年数に依存) を、1 分間降水量データが観測されている地点で、かつ MTBF 10 年以上分のデータが得られた 135 箇所分について示したものである。



表 9-1 全国 135 地点における 0.01% 値、0.0001% 値の平均値、標準偏差、係数  $C_1 \cdot C_2$  及び最大 MTBF [1/2]

	0.01% 値				0.0001% 値				最大 MTBF 年数
	平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]	標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]	標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	
稚内	33.9	8.7	1.20	0.90	123.4	32.9	1.29	1.00	20
旭川	33.3	10.0	1.31	1.26	120.1	50.8	1.25	1.24	21
羽幌	37.3	6.5	1.36	1.24	125.7	27.9	1.31	1.21	20
留萌	35.4	6.3	1.51	1.26	126.2	26.1	1.68	1.22	20
札幌	32.9	7.2	1.53	1.15	118.8	25.2	1.39	1.03	25
岩見沢	33.7	7.7	1.41	1.02	119.0	32.4	1.56	1.16	21
小樽	29.8	5.3	1.63	0.99	103.7	21.1	1.64	1.01	21
倶知安	32.8	5.9	1.64	1.13	110.1	23.6	1.78	1.10	21
寿都	34.5	6.8	1.58	1.20	120.1	26.8	1.73	1.35	20
紋別	28.7	4.8	1.45	1.06	99.5	19.6	1.05	0.98	20
網走	26.5	4.1	1.34	0.92	98.1	23.5	1.25	1.17	20
根室	35.5	5.7	1.47	1.06	116.7	23.0	1.37	1.09	20
釧路	34.6	6.3	1.51	1.29	111.8	29.8	1.47	1.31	21
帯広	29.8	3.1	1.31	0.76	97.8	19.0	1.58	1.24	21
広尾	44.8	8.9	1.66	1.42	125.8	30.1	1.79	1.38	20
苫小牧	41.6	6.1	1.48	0.99	131.8	30.9	1.30	1.02	20
室蘭	38.3	5.0	1.43	1.12	116.7	18.2	1.37	0.95	21
浦河	37.2	4.8	1.15	0.97	119.5	17.4	1.44	1.13	22
函館	37.7	6.1	1.60	1.07	124.2	22.2	1.71	1.12	20
江差	42.9	8.1	1.24	1.03	152.6	28.7	1.34	0.90	21
むつ	42.6	5.0	1.60	1.11	141.1	21.7	1.39	1.05	26
青森	38.9	6.3	1.20	1.33	142.2	36.0	1.21	1.65	26
深浦	47.3	6.5	1.20	0.84	155.3	25.9	1.26	1.10	26
八戸	39.8	5.7	1.20	0.83	134.5	26.8	1.23	1.11	26
秋田	49.3	8.8	1.36	0.93	155.6	36.6	1.35	1.09	26
盛岡	43.5	6.6	1.39	1.17	139.1	25.1	1.32	1.19	26
宮古	46.3	8.9	1.47	1.08	147.9	33.0	1.60	1.33	26
大船渡	52.7	6.3	1.33	0.80	158.4	20.1	1.30	0.85	26
仙台	46.5	8.5	1.51	1.13	146.5	33.2	1.57	1.26	26
酒田	49.8	7.2	1.31	1.19	156.7	30.2	1.28	1.07	26
新庄	43.8	4.8	1.35	1.16	135.4	24.9	1.26	1.27	26
山形	43.0	6.8	1.29	1.09	149.1	28.2	1.37	1.32	26
福島	44.1	7.6	1.36	0.98	147.1	28.2	1.40	0.94	26
若松	43.8	7.4	1.29	1.15	156.3	31.7	1.19	1.07	26
白河	52.9	10.7	1.04	1.14	164.6	34.3	1.02	1.18	26
小名浜	50.2	7.8	1.46	0.98	159.3	27.8	1.43	0.89	26
水戸	58.0	8.8	1.36	0.85	180.7	33.2	1.57	1.04	26
筑波	56.6	8.7	1.53	1.15	180.4	30.3	1.29	0.93	11
日光	67.6	9.6	1.53	1.17	182.7	27.8	1.41	1.06	26
宇都宮	69.4	7.9	1.26	1.09	223.6	36.0	1.33	1.01	26
前橋	67.5	8.6	1.35	0.99	241.0	43.3	1.49	1.05	26
熊谷	63.4	11.1	1.26	0.97	211.5	45.6	1.33	1.07	26
秩父	59.2	10.5	1.39	0.87	187.0	33.8	1.53	1.01	26
東京	60.3	11.2	1.58	1.19	183.4	44.0	1.54	1.31	26
大島	80.0	9.6	1.44	1.06	208.4	28.8	1.48	1.07	26
八丈島	83.8	11.3	1.55	1.19	214.7	35.7	1.48	1.28	26
父島	68.6	12.7	1.60	1.20	229.4	42.3	1.52	1.27	15
銚子	61.0	7.8	1.15	0.74	178.9	25.6	0.97	0.70	26
千葉	55.9	6.9	1.26	0.97	172.6	25.2	1.36	1.01	26
館山	66.0	7.7	1.33	1.00	190.3	25.2	1.30	1.15	26
横浜	63.8	9.7	1.25	0.93	190.1	40.2	1.31	1.17	26
長野	39.5	6.8	1.12	0.73	171.6	31.0	1.74	1.23	26
軽井沢	45.9	8.8	1.49	1.44	158.4	34.9	1.39	1.12	26
松本	38.6	7.3	1.29	1.00	147.8	34.6	1.52	1.14	26
諏訪	46.1	7.7	1.37	1.06	159.0	29.2	1.47	1.19	26
飯田	47.7	5.9	1.54	0.98	151.4	25.1	1.53	1.13	26
甲府	44.5	7.0	1.42	1.01	170.0	33.2	1.62	1.09	26
三島	63.6	8.3	1.66	1.26	177.4	22.4	1.45	1.06	26
静岡	72.5	8.6	1.47	1.03	193.4	24.7	1.47	1.15	26
浜松	69.9	7.3	1.41	1.01	202.9	33.2	1.31	1.08	26
御前崎	70.3	6.2	1.30	0.92	194.5	20.2	1.39	1.19	26
名古屋	63.1	9.4	1.35	0.93	192.4	38.7	1.52	1.10	26
伊良湖	66.2	8.0	1.40	1.16	200.8	27.7	1.51	1.15	26
高山	51.8	6.1	1.66	1.13	158.3	19.5	1.49	0.94	25
岐阜	63.3	10.6	1.32	1.13	195.2	38.6	1.49	1.20	26
四日市	60.7	6.3	1.43	1.03	174.0	23.7	1.60	1.19	26
上野	58.4	5.3	1.03	1.03	184.6	29.9	1.26	1.45	26
津	61.1	9.6	1.53	1.13	179.7	38.7	1.44	1.22	25
尾鷲	90.0	13.6	1.51	1.30	217.0	36.4	1.42	1.19	26
相川	48.3	9.3	1.43	1.07	165.6	34.0	1.43	1.13	26
新潟	50.6	8.4	1.23	1.08	169.5	38.0	1.31	1.28	26
高田	51.5	8.2	1.49	1.04	160.2	27.2	1.49	1.04	26
伏木	55.8	7.8	1.24	0.77	177.8	27.8	1.48	1.12	26
富山	55.4	9.3	1.56	1.06	174.2	33.2	1.57	1.19	26
輪島	58.5	7.6	1.41	0.85	192.5	30.4	1.44	0.98	26
金沢	57.3	8.3	1.17	0.71	175.0	24.7	1.15	0.76	26
福井	53.2	7.9	1.45	1.03	166.5	25.5	1.43	1.03	26
敦賀	53.3	6.0	1.33	0.84	171.3	25.7	1.54	1.13	26
彦根	55.0	7.4	1.30	0.88	182.4	36.0	1.21	1.09	26
舞鶴	57.7	7.8	1.46	1.12	192.5	32.6	1.36	1.10	26
京都	61.9	7.3	1.49	1.10	187.6	22.7	1.51	1.13	26
大阪	56.7	9.0	1.55	1.07	180.0	35.7	1.61	1.20	26

表 9-1 ( 続き ) [ 2 / 2 ]

	0.01% 値				0.0001% 値				最大 MTBF 年数
	平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]	標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]	標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	
豊岡	50.3	6.3	1.28	0.93	155.1	24.3	1.28	0.95	26
姫路	50.9	7.1	1.48	1.02	158.8	23.8	1.63	1.18	26
神戸	52.2	9.1	1.34	0.87	164.5	29.3	1.30	0.80	25
洲本	59.1	9.9	1.41	1.15	182.2	32.3	1.42	1.19	26
奈良	58.3	5.5	1.42	1.04	188.0	25.5	1.26	1.08	26
和歌山	62.4	9.7	1.44	1.05	206.9	33.2	1.48	1.05	26
潮岬	76.1	8.3	1.37	1.10	201.4	26.3	1.42	1.21	26
岡山	49.9	5.7	1.59	1.02	160.8	29.6	1.47	1.16	26
広島	57.3	7.0	1.30	0.90	168.0	18.8	1.35	0.90	26
西郷	55.0	8.5	1.45	1.21	175.4	32.2	1.44	1.16	26
松江	52.7	7.1	1.59	1.03	160.2	21.7	1.51	0.94	26
浜田	56.3	12.3	1.61	1.27	176.3	46.6	1.44	1.21	26
米子	52.7	6.5	1.21	0.61	160.7	22.6	1.28	0.77	26
鳥取	51.2	6.8	1.53	1.09	158.1	23.2	1.42	1.02	26
徳島	68.3	16.0	1.40	0.91	215.3	47.1	1.33	0.83	26
高松	50.6	8.1	1.44	1.05	165.8	27.1	1.45	1.08	26
多度津	48.0	6.3	1.36	0.92	154.2	23.6	1.56	1.26	26
松山	53.6	8.1	1.43	0.90	163.3	25.0	1.44	0.88	26
宇和島	60.8	11.4	1.59	1.03	176.7	34.5	1.71	1.17	26
高知	85.7	16.8	1.48	1.19	233.0	47.1	1.46	1.17	26
室戸岬	81.1	11.4	1.64	1.19	224.4	31.9	1.62	1.18	26
宿毛	69.3	8.6	1.34	1.12	195.0	23.6	1.27	1.00	25
清水	81.7	13.0	1.43	1.22	221.5	32.2	1.41	1.28	26
秋	58.1	11.9	1.58	1.16	181.1	40.5	1.53	1.17	26
山口	65.6	8.9	1.36	0.83	185.6	27.1	1.35	0.97	26
下関	62.8	8.3	1.61	1.23	182.8	23.3	1.54	1.20	26
飯塚	67.0	8.6	1.53	0.93	190.4	22.9	1.52	1.00	26
福岡	66.4	9.1	1.64	1.28	194.0	23.9	1.45	1.21	26
日田	67.3	7.9	1.49	0.93	189.9	23.3	1.55	0.97	26
大分	63.3	11.1	1.37	1.11	181.5	30.2	1.39	1.12	26
藤原	75.6	10.4	1.55	1.11	213.2	29.3	1.59	1.08	26
平戸	81.0	13.1	1.57	0.97	230.8	38.3	1.67	1.04	26
佐世保	79.9	11.2	1.30	0.87	235.3	38.9	1.43	1.14	26
長崎	78.5	16.0	1.56	1.29	232.8	54.3	1.52	1.31	26
福江	83.9	10.0	1.47	1.11	234.0	31.8	1.43	1.04	26
佐賀	73.8	8.7	1.21	0.74	214.5	28.7	1.29	1.12	26
熊本	75.4	9.1	1.54	0.98	217.4	26.1	1.51	1.05	26
阿蘇山	76.8	10.5	1.60	0.97	190.4	22.5	1.47	0.83	26
大吉	74.1	9.4	1.43	0.89	198.6	23.8	1.30	0.84	26
延岡	71.7	9.4	1.29	0.81	190.7	26.0	1.32	0.96	26
宮崎	76.5	12.8	1.58	0.96	203.5	36.9	1.59	1.09	26
都城	76.9	8.2	1.34	1.02	206.1	21.0	1.16	0.98	26
阿久根	80.4	11.1	1.26	0.96	231.3	32.0	1.36	1.06	26
鹿児島	79.3	10.1	1.39	1.01	219.3	29.5	1.38	1.05	26
種子島	80.4	11.2	1.25	1.06	221.1	31.7	1.21	1.15	26
屋久島	95.7	14.9	1.48	1.04	228.6	39.0	1.46	1.06	26
名瀬	82.1	11.1	1.32	0.89	212.7	28.7	1.23	0.83	26
沖永良部	81.6	12.2	1.38	0.96	242.6	35.6	1.34	0.92	26
那覇	86.2	12.7	1.37	1.23	257.8	37.4	1.46	1.27	26
南大東島	77.9	9.4	1.06	0.74	243.7	29.9	1.26	1.01	22
宮古島	86.3	10.2	1.27	0.80	253.9	33.0	1.42	0.92	24
与那国島	89.0	12.4	1.52	1.13	252.9	30.3	1.36	0.93	23
石垣島	91.1	10.7	1.42	0.88	272.8	32.1	1.45	1.10	24

表 9-1 のパラメータを用い、当該地点における、最大 MTBF[年]の範囲内の任意の MTBF[年]に対する 0.01%値及び 0.0001%値 R<sub>p,y</sub> ( p : 0.01%または 0.0001%、 y : MTBF[年] ) を次式により算出することができる。

$$R_{p,y} = \langle R_p \rangle \cdot \eta_{R_{p,y}} = \langle R_p \rangle \left[ 1 + C_1 \frac{\sigma_{R_p}}{\langle R_p \rangle} (\log(y))^{C_2} \right] \quad (9-3)$$

表 9-1 には、代表値として全国 135 地点のパラメータのみを示したが、これら以外を含む MTBF 10 年以上分のデータが得られた全国 1150 地点のパラメータについて付録 9-1 に示す。

C<sub>1</sub> 及び C<sub>2</sub> がとりうる値の分布を確認するために、全国 1150 地点のパラメータを用い、度数分布を求めたものを図 9-2 に示す。C<sub>1</sub> は 1 ~ 1.9 の間に概ね分布し 1.4 ~ 1.5 付近にピークがあり、C<sub>2</sub> は 0.6 ~ 1.6 の間に概ね分布し、1 ~ 1.2 付近にピークがある。C<sub>1</sub> について

は0.01%値と0.0001%値の場合で大きな違いは見られないが、 $C_2$ については、形は概ね相似形であるが、ピークの位置が0.1程度ずれている。0.01%値と0.0001%値のように、2桁の確率の違いがあると、降雨強度の平均値、分散がかなり異なるが（表9-1参照）年変動の傾向についても違いが現れる可能性が考えられる。但し、 $C_2$ に見られる0.01%値と0.0001%値の差異の理由が、これによるものかは明確ではない。

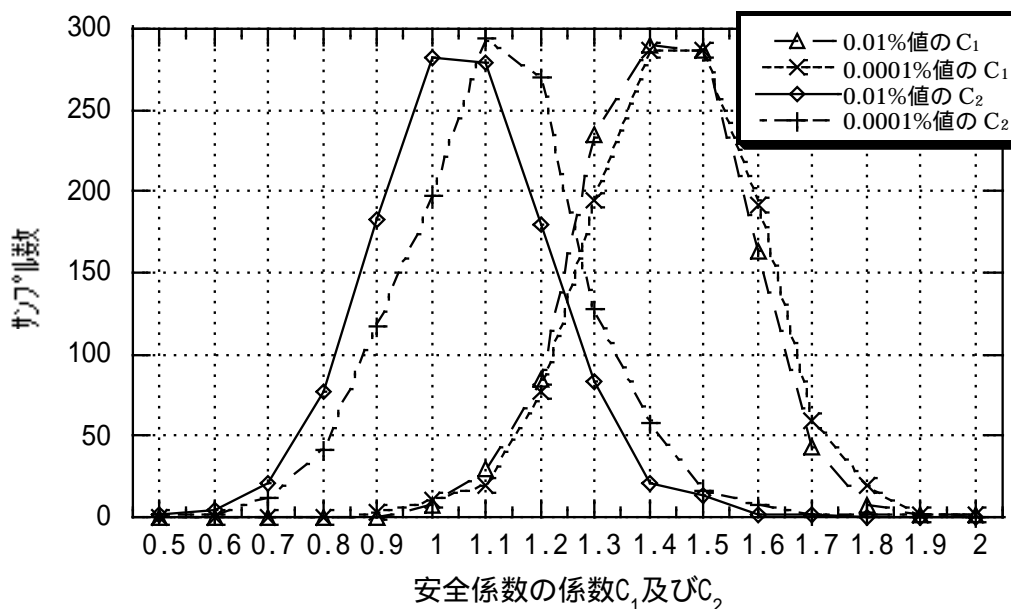


図9-2 全国1150地点における式(9-2)の係数 $C_1$ 及び $C_2$ の度数分布

表9-1に示したパラメータのうち、近似係数 $C_1$ 、 $C_2$ は本研究固有のパラメータであり、標準偏差 $R_p$ についても一般的に扱われるものではないため、本研究で与えていない地点について、これらのパラメータを得ることは困難であると考えられるが、0.01%値及び0.0001%値の平均値だけは得られるケースが考えられる（長期間の平均値であることが望ましい/もし異なる累積確率における1分間降雨強度であっても、2点与えられているならば、M分布近似を行い、0.01%値及び0.0001%値を得ることが可能）。そのような場合に、標準偏差 $R_p$ 及び近似係数 $C_1$ 、 $C_2$ の代表的な値を設けておけば、式(9-3)を用い、 $R_{p,y}$ を求めることが可能となる。そこで、0.01%値及び0.0001%値の標準偏差 $R_p$ 及び近似係数 $C_1$ 、 $C_2$ について、全国1150地点のパラメータを用い、全国の平均値及び地域ごとの平均値を求めてみた。その結果を示したものが表9-2である。地域分割については、雨の降り方を考慮した表7-1に示された分割に従った。

表 9-2 全国 1150 地点のパラメータから求めた 0.01%値、0.0001%値の標準偏差、係数  $C_1 \cdot C_2$  の平均値

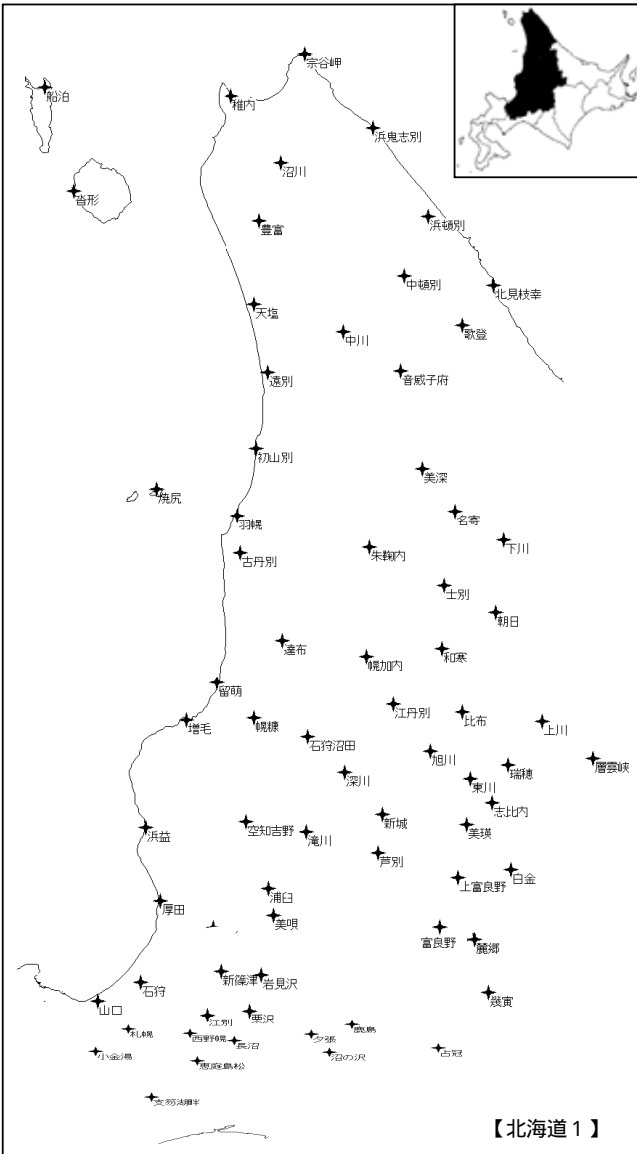
地域名	0.01% 値			0.0001% 値		
	標準偏差 $R_p$ [mm/h]	$C_1$	$C_2$	標準偏差 $R_p$ [mm/h]	$C_1$	$C_2$
北海道	6.5	1.43	1.08	25.3	1.44	1.12
東北	6.9	1.40	1.07	27.4	1.38	1.17
関東北部	7.3	1.32	1.06	32.4	1.43	1.12
関東南部	9.2	1.41	1.01	31.2	1.44	1.08
甲信	8.0	1.42	1.06	32.2	1.50	1.17
東海及び近畿中南部	8.5	1.44	1.09	28.7	1.49	1.17
北陸、近畿北部（岐阜県含む）	8.2	1.43	1.07	29.5	1.46	1.12
山陰（兵庫県北部及び山口県北部含む）	9.2	1.41	1.02	29.4	1.45	1.08
瀬戸内	8.2	1.45	1.05	28.7	1.45	1.14
四国南部及び九州	10.7	1.45	1.04	29.4	1.45	1.07
日本全国	8.3	1.42	1.06	28.6	1.44	1.12

表 9-2 によれば、 $C_1$ 、 $C_2$  については、全国平均と各地域ごとの平均はほぼ一致しており、0.01%値に対しては  $C_1=1.42$ 、 $C_2=1.06$ 、0.0001%値に対しては  $C_1=1.44$ 、 $C_2=1.12$  を代表値としてよいと考えられる。

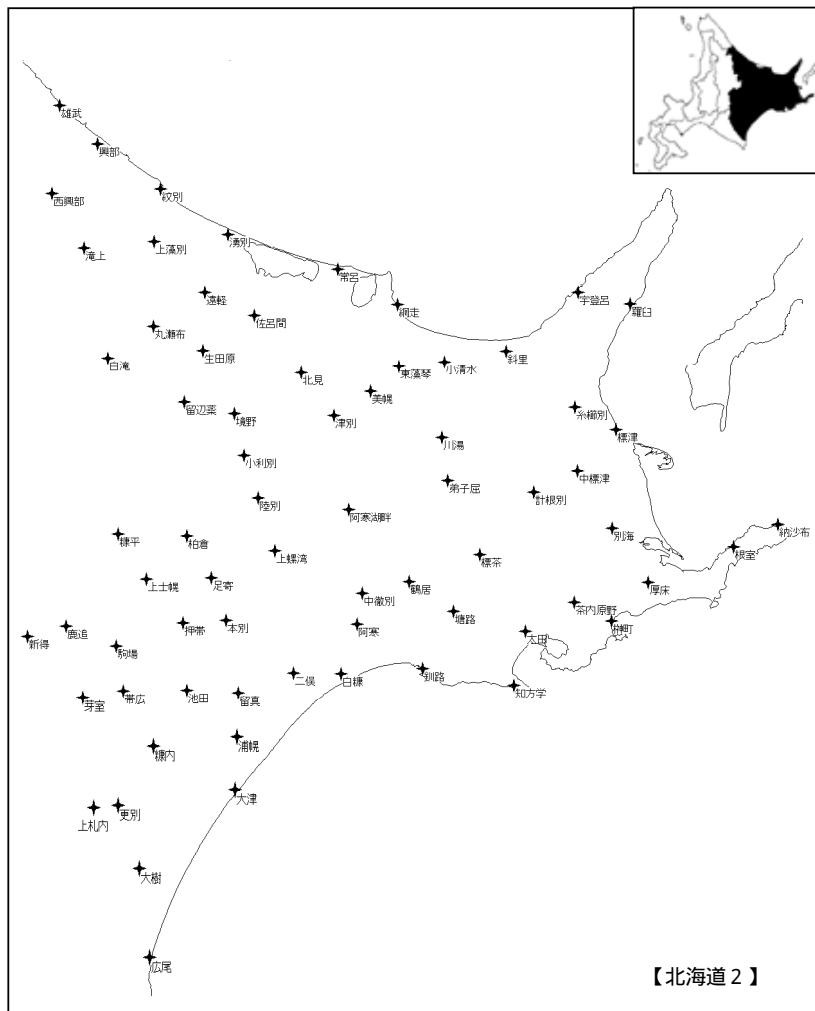
標準偏差については、0.01%値に対しては、雨の少ない地域（日本海側、関東北部以北、瀬戸内地域等）の方が値が小さく、雨の多い地域（南部太平洋岸地域等）の方が値が大きくなる傾向があるように見えるが、0.0001%値に対しては、バラツキが見られるものの、特段偏った傾向があるようには見えない。これは、次のように考えられる。累積確率の大きい部分では、少雨な地域においては、強い雨が降ることが少なく、年間における 1 分間降雨強度のバラツキも生じにくいと考えられるのに対し、多雨な地域では、累積確率が大きい部分でも比較的強い降雨が含まれることとなり、1 分間降雨強度のバラツキが生じやすいと考えられる。一方、累積確率の小さい部分では、少雨な地域であろうが、多雨な地域であろうが、その地域に応じたレベルでの強い降雨が含まれる部分であり、年による 1 分間降雨強度のバラツキが生じ易くなることから、偏った傾向が見えにくくなると考えられる。代表値については、0.01%値の標準偏差には、偏りが見られ、各地域間の差も率で考えた場合小さくはないが、0.01%値そのものの値が小さく、地域ごとに異なる標準偏差値を用いる場合と全国平均 8.3 を用いる場合の式(9-3)により得られる  $R_{p,y}$  の差は小さいと考えられることから、全国平均 8.3 を用いることでよいと考えられる。0.0001%値の標準偏

差には、バラツキはあるものの、明確な偏りが見られず、各地域間の差も率で考えれば小さいため、これについても全国平均 28.6 を用いることでよいと考えられる。

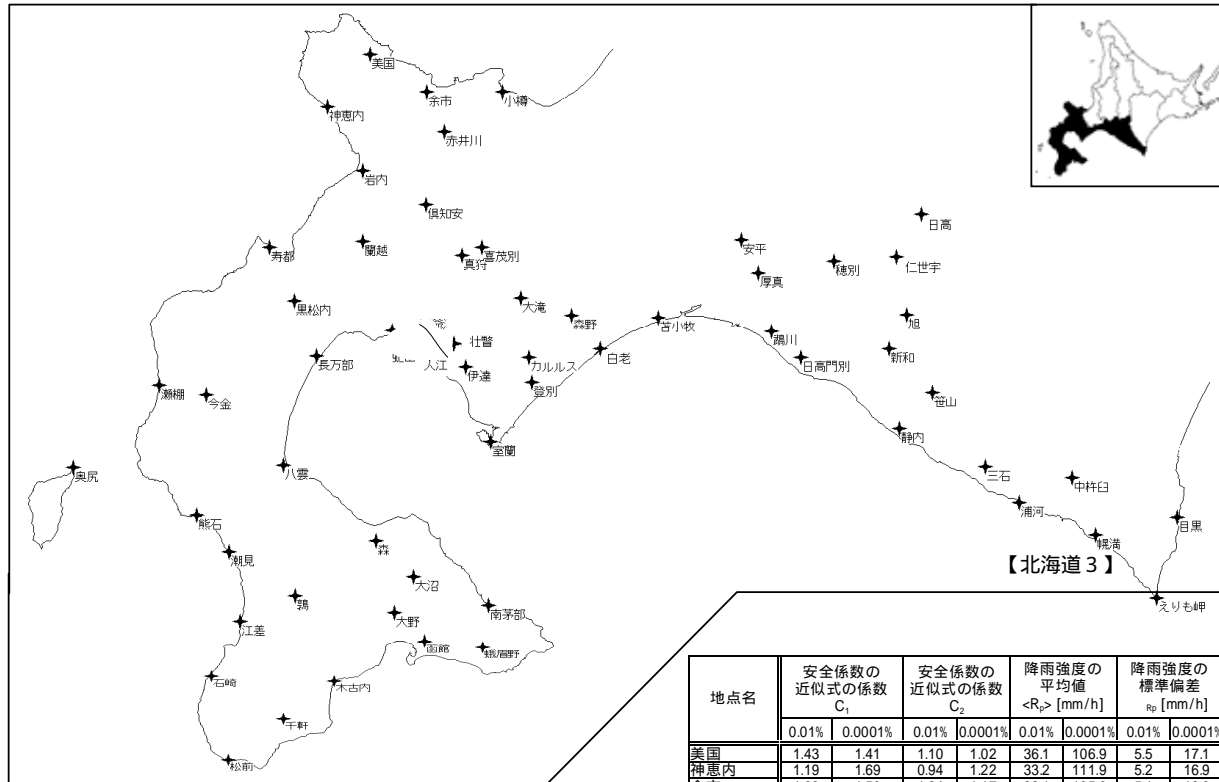
付録 9 - 1 新降雨減衰確率推定法に用いる  
全国 1150 地点におけるパラメータ



地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	宗谷岬	1.35	1.48	1.01	1.17	31.8	117.0	7.6	
船泊	1.34	1.58	0.84	1.16	31.6	120.4	7.1	33.0	24
稚内	1.20	1.29	0.90	1.00	33.9	123.4	8.7	32.9	20
浜鬼志別	1.35	1.30	1.02	0.87	29.3	101.1	5.0	14.7	23
沼川	1.27	1.35	1.01	1.03	31.0	103.8	6.1	19.0	24
沓形	1.36	1.45	0.94	1.10	32.7	124.2	6.9	25.5	24
豊富	1.50	1.58	1.26	1.26	34.0	119.2	7.7	29.8	24
浜頓別	1.60	1.53	1.34	1.22	31.5	101.8	6.5	21.3	24
中頓別	1.35	1.31	1.47	1.32	32.6	103.1	5.4	16.4	24
北見枝幸	1.20	1.37	0.72	1.00	32.3	102.0	3.4	11.6	20
歌登	1.29	1.49	1.13	1.20	33.9	107.0	5.6	20.3	24
中川	1.18	1.18	0.89	0.92	33.3	108.3	5.0	17.5	24
音威子府	1.39	1.50	1.41	1.43	33.6	106.8	6.6	24.2	22
美深	1.52	1.56	1.18	1.13	31.2	103.7	4.0	14.1	24
名寄	1.40	1.67	1.00	1.23	31.9	111.2	5.8	24.6	24
下川	1.55	1.40	1.08	1.01	31.0	104.6	4.4	16.0	24
土別	1.56	1.45	1.23	1.28	31.3	104.7	7.3	24.6	24
朝日	1.60	1.68	1.12	1.20	32.5	108.7	6.1	20.5	24
和寒	1.41	1.49	0.99	1.10	32.3	110.3	5.4	23.5	24
江丹別	1.31	1.33	1.01	1.03	32.8	104.1	5.0	18.1	24
比布	1.42	1.46	1.21	1.21	32.1	110.1	7.7	24.3	24
上川	1.52	1.56	1.14	1.09	33.7	104.8	6.5	22.8	24
旭川	1.31	1.25	1.26	1.24	33.3	120.1	10.0	50.8	21
東川	1.50	1.64	1.10	1.15	31.1	109.4	6.2	22.9	24
瑞穂	1.10	1.32	0.54	0.72	35.1	106.0	5.5	19.8	17
層雲峡	1.34	1.30	1.19	1.06	33.0	96.9	5.8	19.0	22
志比内	1.48	1.60	1.15	1.20	33.8	111.0	6.5	29.0	22
美瑛	1.34	1.58	0.91	1.03	30.9	108.9	5.2	20.7	24
上富良野	1.46	1.43	1.07	1.21	30.7	110.9	6.1	23.3	24
白金	1.31	1.56	0.85	1.04	34.6	101.6	6.0	21.9	17
富良野	1.45	1.30	1.11	1.05	32.1	112.4	7.3	28.0	24
麓郷	1.47	1.32	0.94	1.01	30.7	106.3	5.8	24.6	23
幾寅	1.33	1.37	0.90	1.10	32.5	105.9	6.1	24.0	24
占冠	1.18	1.18	0.82	0.76	37.7	117.3	6.9	22.3	24
天塩	1.35	1.30	1.19	1.05	33.1	120.3	6.0	21.8	24
遠別	1.16	1.43	0.89	0.97	34.3	117.0	6.0	23.9	24
初山別	1.21	1.39	1.08	1.09	36.3	122.9	6.7	26.8	24
焼尻	1.53	1.53	1.23	1.35	33.5	127.5	7.8	43.0	24
羽幌	1.36	1.31	1.24	1.21	37.3	125.7	6.5	27.9	20
古丹別	1.33	1.43	1.09	1.11	36.9	121.6	7.3	28.5	21
達布	1.55	1.52	1.13	1.23	36.8	113.3	7.5	27.9	24
留萌	1.51	1.68	1.26	1.22	35.4	126.2	6.3	26.1	20
増毛	1.39	1.45	0.85	0.96	33.6	115.4	6.0	23.0	23
幌糠	1.53	1.40	1.37	1.46	34.7	114.2	8.7	42.5	24
浜益	1.24	1.37	0.89	0.93	33.2	113.3	5.2	17.9	24
厚田	1.50	1.51	1.13	0.93	31.8	106.6	4.8	14.4	24
新穂津	1.28	1.22	0.95	1.00	32.9	115.6	6.7	27.7	23
山口	1.59	1.58	1.29	1.31	29.4	109.8	6.4	22.5	24
石狩	1.51	1.38	1.11	1.04	30.1	113.7	6.5	21.5	24
札幌	1.53	1.39	1.15	1.03	32.9	118.8	7.2	25.2	25
西野幌	1.40	1.50	1.06	1.04	34.2	121.5	7.5	24.5	20
小金湯	1.44	1.54	1.50	1.37	34.7	115.4	6.6	24.4	22
恵庭島松	1.58	1.48	1.40	1.30	37.3	128.8	10.7	41.2	23
支笏湖畔	1.46	1.44	1.12	1.01	46.0	130.1	9.5	28.6	24
朱鞠内	1.35	1.43	1.08	1.06	35.3	105.1	5.6	16.9	23
幌加内	1.57	1.59	1.10	1.11	33.8	104.7	6.8	23.6	24
石狩沼田	1.45	1.29	1.33	1.33	33.5	114.1	9.9	46.3	24
深川	1.54	1.45	1.16	1.01	34.2	117.6	8.4	29.6	24
新城	1.77	1.76	1.18	1.20	34.0	108.8	7.6	33.7	17
空知吉野	1.44	1.41	1.30	1.21	35.3	111.0	7.1	25.3	23
滝川	1.34	1.47	1.28	1.23	34.9	116.0	7.1	20.6	22
芦別	1.45	1.59	1.03	1.02	32.8	113.5	7.8	25.5	23
浦臼	1.44	1.53	0.99	1.13	35.9	112.4	5.8	20.9	18
月形	1.53	1.63	1.05	1.07	34.9	112.4	7.2	25.6	24
美瑛	1.51	1.56	1.11	1.24	34.4	117.7	7.8	35.3	23
岩見沢	1.41	1.56	1.02	1.16	33.7	119.0	7.7	32.4	21
栗沢	1.18	1.17	1.17	0.94	32.7	115.7	7.6	23.4	22
長沼	1.44	1.46	1.02	0.96	35.6	125.8	8.0	27.2	23
夕張	1.52	1.55	1.06	1.06	37.5	120.0	7.4	26.1	24
鹿島	1.19	1.65	0.71	0.95	36.7	108.9	6.0	19.6	18
沼の沢	1.38	1.56	0.96	0.95	36.5	118.0	5.6	19.3	18

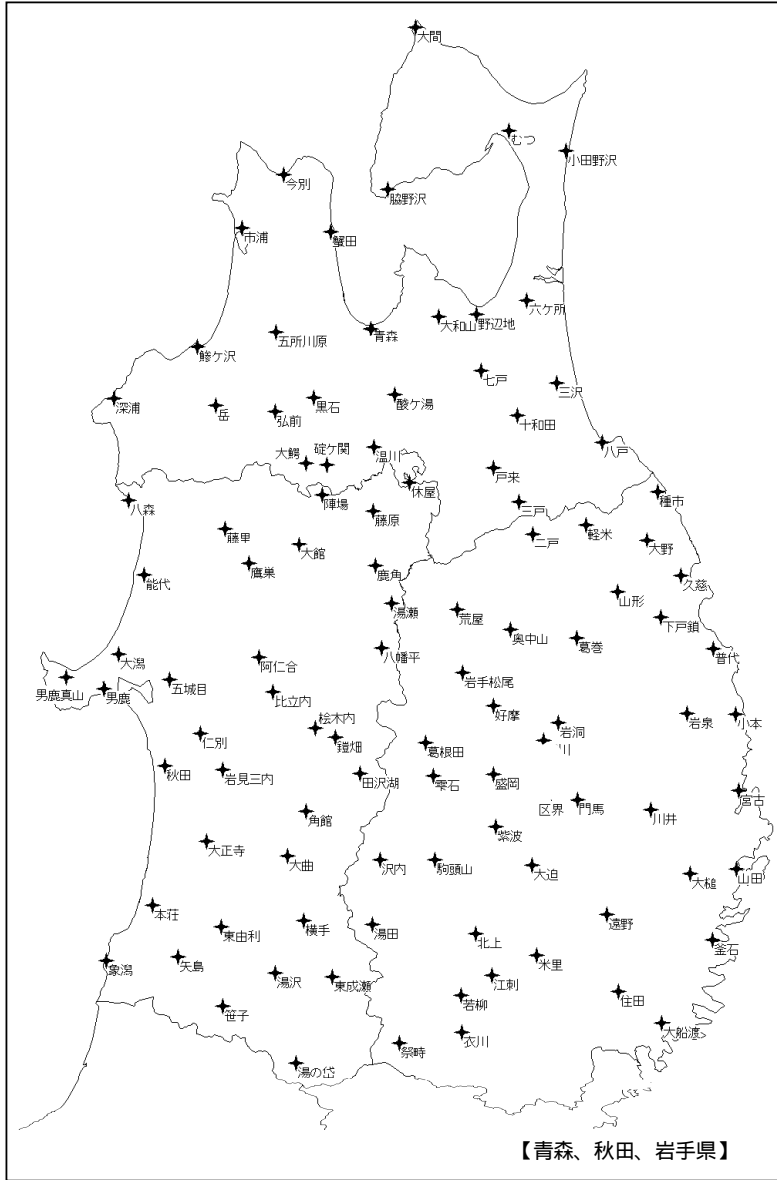


地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>σ</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	雄武	1.22	1.37	0.78	0.82	30.0	101.4	4.1	
興部	1.28	1.26	0.80	0.85	29.5	103.0	4.8	15.2	22
西興部	1.40	1.34	0.83	0.80	30.7	99.9	3.9	11.5	23
紋別	1.45	1.05	1.06	0.98	28.7	99.5	4.8	19.6	20
湧別	1.45	1.26	0.96	1.18	26.3	97.7	4.8	20.3	24
滝上	1.40	1.49	0.90	1.10	29.2	101.8	5.1	19.3	24
上藻別	1.56	1.36	1.12	1.04	28.4	95.6	6.1	20.9	22
常呂	1.09	0.99	1.35	1.52	26.8	101.8	5.9	32.1	24
遠軽	1.30	1.41	1.02	1.03	29.2	112.1	6.0	23.8	24
佐呂間	1.44	1.26	0.94	1.14	29.1	107.6	5.4	30.2	24
網走	1.34	1.25	0.92	1.17	26.5	98.1	4.1	23.5	20
宇登呂	1.45	1.43	1.20	1.25	33.0	110.3	10.2	35.7	23
丸瀬布	1.47	1.34	1.41	1.50	29.3	101.3	9.1	39.4	17
白滝	1.58	1.47	1.24	1.28	29.2	106.6	4.4	20.1	24
生田原	1.27	1.28	0.85	1.17	29.8	117.4	4.9	35.2	24
北見	1.58	1.30	1.01	1.23	29.5	117.3	4.9	40.2	24
東藻琴	1.66	1.34	1.15	1.24	27.5	102.6	4.9	23.5	23
小清水	1.29	1.31	0.83	1.13	26.1	100.7	5.6	21.0	23
斜里	1.34	1.26	0.94	1.23	26.5	99.3	4.4	15.1	24
留辺蘂	1.40	1.59	1.00	1.31	29.1	117.2	5.4	29.3	23
境野	1.35	1.34	0.81	0.89	28.5	111.7	5.3	24.2	24
美幌	1.61	1.23	1.09	1.07	27.6	111.0	4.5	37.0	24
津別	1.62	1.37	1.11	1.11	27.8	106.0	5.0	26.6	24
羅臼	1.34	1.49	0.88	1.04	39.3	112.6	6.6	24.8	24
糸柳別	1.33	1.43	0.83	0.95	38.5	113.0	7.4	27.9	23
標津	1.26	1.21	0.91	0.88	36.3	113.8	6.1	24.4	24
中標津	1.46	1.52	0.97	1.06	36.5	112.7	6.2	23.8	24
計根別	1.47	1.40	0.96	1.08	38.1	123.3	7.9	39.8	24
別海	1.41	1.44	0.90	0.91	36.6	114.9	5.9	20.7	24
根室	1.47	1.37	1.06	1.09	35.5	116.7	5.7	23.0	20
納沙布	1.54	1.54	1.01	1.08	31.2	110.0	6.6	24.8	24
厚床	1.56	1.48	1.03	1.12	37.6	118.9	6.4	24.5	24
川湯	1.22	1.27	0.73	0.84	30.3	111.7	4.2	19.2	24
弟子屈	1.60	1.54	1.07	1.07	35.1	116.6	6.4	23.0	24
阿寒湖畔	1.33	1.19	0.86	0.68	35.6	111.8	6.6	22.4	24
標茶	1.59	1.52	1.13	1.20	34.4	111.1	4.9	21.2	24
鶴居	1.59	1.53	1.04	1.13	36.3	115.6	5.6	23.2	24
中標別	1.46	1.52	1.09	1.12	38.4	118.8	5.9	25.0	24
塘路	1.27	1.39	1.07	1.18	32.2	104.9	4.3	20.4	18
茶内原野	1.66	1.66	1.12	1.25	38.5	119.3	7.7	32.7	17
樺町	1.56	1.47	1.06	1.15	35.9	118.4	5.9	23.9	24
阿寒	1.39	1.42	1.06	1.14	38.4	117.1	5.7	23.8	18
太田	1.42	1.32	0.99	0.98	37.7	117.6	5.1	19.9	24
二俣	1.29	1.43	0.94	1.03	40.2	121.2	6.3	24.6	21
白糠	1.43	1.49	1.10	1.01	38.3	123.9	5.9	26.3	24
釧路	1.51	1.47	1.29	1.31	34.6	111.8	6.3	29.8	21
知方学	1.33	1.51	1.11	1.43	36.8	117.9	5.4	24.8	23
小利別	1.34	1.18	0.71	1.01	31.0	106.2	5.8	26.3	18
陸別	1.40	1.57	1.06	1.13	33.0	124.2	5.9	26.8	24
糠平	1.46	1.51	1.25	1.19	37.2	107.9	6.8	22.7	22
柏倉	1.34	1.42	0.85	0.98	33.2	103.2	6.1	23.8	18
上糠湾	1.50	1.16	1.06	0.98	29.1	102.4	5.2	20.8	18
上士幌	1.30	1.52	0.96	0.98	32.1	103.8	4.9	20.1	24
足寄	1.32	1.43	1.05	1.20	30.8	105.1	4.8	24.3	24
押帯	1.64	1.34	1.17	1.19	30.5	97.7	4.8	19.8	18
本別	1.19	1.09	0.81	0.91	29.4	104.5	5.4	21.5	22
新得	1.56	1.49	1.18	1.12	32.8	97.3	4.9	19.7	24
鹿追	1.62	1.32	1.32	1.16	31.0	98.1	4.4	20.4	23
駒場	1.46	1.44	1.01	1.12	29.8	96.9	3.4	17.6	24
芽室	1.44	1.35	1.07	1.04	31.6	100.5	4.3	18.9	24
帯広	1.31	1.58	0.76	1.24	29.8	97.8	3.1	19.0	21
池田	1.30	1.18	0.97	0.91	29.4	97.3	3.3	16.2	24
留真	1.24	1.19	0.93	0.96	32.6	107.0	5.1	25.4	17
浦幌	1.29	1.46	0.95	1.08	33.2	110.5	5.0	22.1	24
糠内	1.49	1.38	1.13	1.04	34.1	109.9	4.6	23.5	23
上礼内	1.65	1.61	1.29	1.27	35.9	106.1	6.5	25.0	24
更別	1.68	1.58	1.26	1.16	35.5	108.7	5.9	22.8	24
大津	1.31	1.25	1.00	1.15	36.7	117.8	6.2	31.7	24
大樹	1.30	1.44	1.07	1.09	38.2	116.6	6.1	21.9	24
広尾	1.66	1.79	1.42	1.38	44.8	125.8	8.9	30.1	20

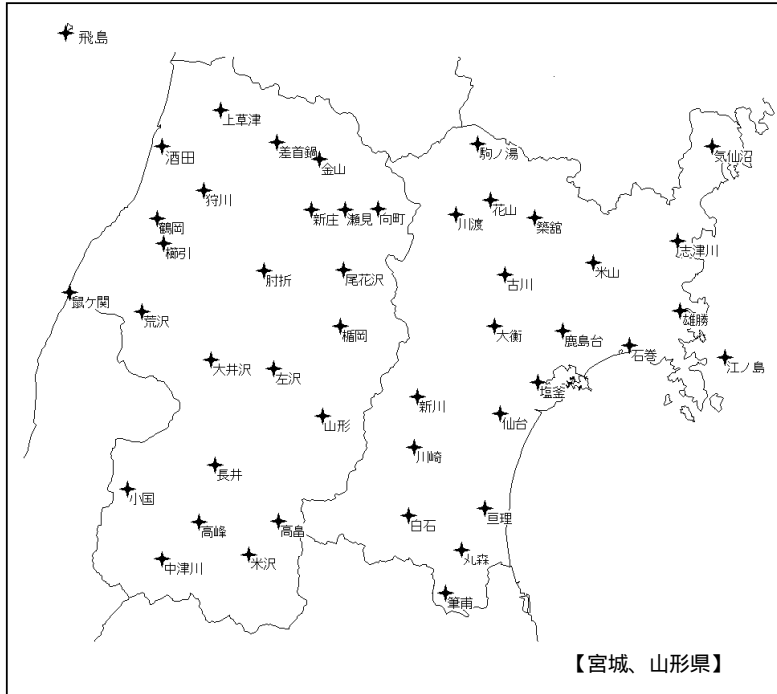


地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
美国	1.43	1.41	1.10	1.02	36.1	106.9	5.5	17.1	24
神恵内	1.19	1.69	0.94	1.22	33.2	111.9	5.2	16.9	24
余市	1.63	1.50	1.24	1.17	32.1	105.0	5.1	16.6	24
小樽	1.63	1.64	0.99	1.01	29.8	103.7	5.3	21.1	21
赤井川	1.48	1.43	1.19	1.13	32.2	105.9	5.3	24.0	22
岩内	1.66	1.53	1.21	1.01	30.1	110.3	5.1	15.6	24
倶知安	1.60	1.69	1.07	1.15	32.9	111.6	5.9	24.2	24
但知安	1.64	1.78	1.13	1.10	32.8	110.1	5.9	23.6	21
寿都	1.58	1.73	1.20	1.35	34.5	120.1	6.8	26.8	20
真狩	1.42	1.56	0.94	1.05	33.6	108.1	5.5	17.5	23
喜茂別	1.47	1.32	0.95	0.92	33.2	108.6	6.2	22.3	23
黒松内	1.66	1.65	1.30	1.41	37.5	117.3	8.4	32.1	24
安平	1.61	1.63	1.16	1.01	37.3	123.3	8.3	26.3	22
厚真	1.41	1.43	0.85	0.87	36.8	122.8	6.6	20.9	24
穂別	1.35	1.28	0.89	0.78	38.8	123.0	8.9	27.4	24
大滝	1.52	1.48	1.27	1.22	39.1	120.0	7.8	28.3	24
森野	1.35	1.41	1.32	1.29	54.5	145.8	10.4	31.6	23
吉小牧	1.48	1.30	0.99	1.02	41.6	131.8	6.1	30.9	20
大岸	1.59	1.73	1.05	1.17	38.8	130.5	6.2	25.0	24
洞爺湖温泉	1.36	1.41	1.15	1.13	35.2	122.7	5.8	20.3	22
カルルス	1.50	1.56	1.14	1.24	54.7	143.3	9.0	27.5	16
白老	1.57	1.71	0.99	1.18	50.5	150.2	12.1	47.2	24
鶴川	1.62	1.34	1.13	1.03	36.4	120.1	5.9	20.7	23
伊達	1.69	1.61	1.20	1.24	34.3	121.2	6.0	21.6	24
登別	1.27	1.27	1.17	1.20	54.2	153.4	17.1	59.4	24
室蘭	1.43	1.37	1.12	0.95	38.3	116.7	5.0	18.2	21
日高	1.43	1.33	0.95	0.82	37.7	113.7	6.3	15.9	24
仁世宇	1.56	1.52	1.01	0.96	39.2	114.4	6.6	18.1	16
旭	1.50	1.56	1.21	1.15	36.1	113.6	3.4	13.4	16
日高門別	1.29	1.39	1.53	1.21	37.5	126.7	8.8	28.1	22
新和	1.40	1.46	1.03	1.20	39.8	125.5	7.2	27.7	24
笹山	1.87	1.88	1.61	1.46	40.6	121.8	6.0	20.3	14
静内	1.41	1.21	1.26	1.15	38.8	129.0	7.7	29.3	24
三石	1.60	1.50	1.10	0.99	39.9	120.8	5.9	16.6	24
中札白	1.57	1.55	1.23	1.22	47.5	137.7	8.0	20.8	23
浦河	1.15	1.44	0.97	1.13	37.2	119.5	4.8	17.4	22
目黒	1.58	1.76	1.02	1.23	54.9	153.7	9.5	35.9	22
幌満	1.50	1.58	1.22	1.13	38.8	124.0	6.3	20.9	23
えりも岬	1.03	1.34	0.74	1.07	35.5	120.7	5.6	24.6	22
長万部	1.47	1.37	1.22	1.36	39.5	127.4	9.7	43.2	24
八雲	1.37	1.50	0.98	1.07	38.4	125.6	8.3	24.5	24
森	1.55	1.47	1.28	1.47	37.3	130.3	7.4	32.7	20
大沼	1.23	1.22	0.81	0.71	35.3	116.7	5.8	18.3	22
南茅部	1.41	1.39	1.12	1.09	44.1	136.9	10.3	33.2	24
大野	1.39	1.16	1.22	1.33	38.3	128.6	7.3	37.8	24
函館	1.60	1.71	1.07	1.12	37.7	124.2	6.1	22.2	20
磯部野	1.33	1.30	1.16	1.15	46.0	140.7	7.6	27.3	17
木古内	1.61	1.49	1.33	1.22	39.4	127.5	6.3	21.5	24
手取	1.49	1.45	1.46	1.37	50.8	146.8	10.9	39.9	23
松前	1.36	1.29	1.04	1.15	40.8	138.4	7.7	26.9	22
瀬棚	1.17	1.35	1.16	1.35	39.2	140.2	8.3	33.3	24
今金	1.31	1.48	1.07	1.30	38.8	127.4	8.7	31.4	24
奥尻	1.49	1.50	1.14	1.14	43.8	152.6	9.7	37.9	24
熊石	1.22	1.20	1.01	0.94	43.2	139.8	8.9	28.6	24
潮見	1.35	1.43	1.37	1.61	42.4	145.7	8.8	42.1	19
鶺鴒	1.41	1.43	1.07	1.11	41.6	134.9	8.5	31.0	24
江差	1.24	1.34	1.03	0.90	42.9	152.6	8.1	28.7	21
石崎	1.20	1.32	0.98	1.20	40.2	142.6	9.2	44.1	24

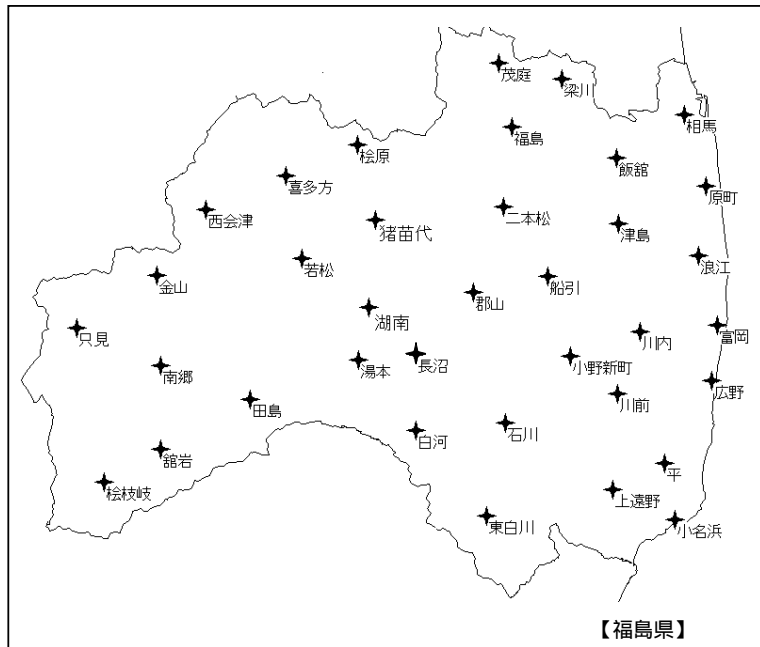




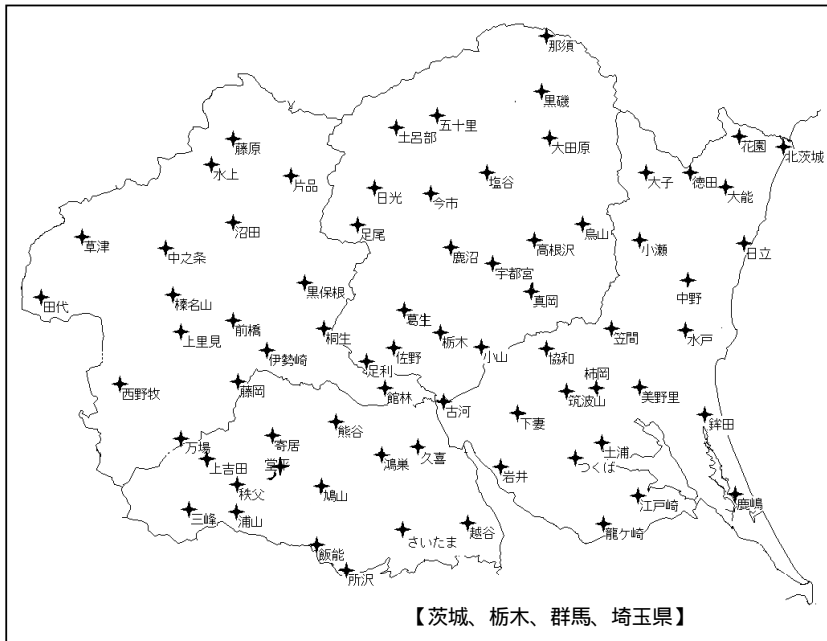
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>R</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
大間	1.52	1.43	0.89	1.07	42.1	143.0	6.2	25.3	25
むつ	1.60	1.39	1.11	1.05	42.6	141.1	5.0	21.7	26
小田野沢	1.46	1.32	1.13	1.08	41.6	133.8	6.5	30.8	25
今別	1.44	1.36	1.03	1.30	44.4	143.7	5.6	23.1	25
脇野沢	1.48	1.27	1.01	1.06	42.4	140.4	5.0	21.7	25
市浦	1.50	1.46	1.06	1.30	44.2	156.7	6.6	40.4	24
豊田	1.37	1.25	0.95	1.16	43.6	142.3	6.0	25.9	25
五所川原	1.25	1.15	0.93	1.26	38.0	135.9	4.4	23.6	25
青森	1.20	1.21	1.33	1.65	38.9	142.2	6.3	36.0	26
大和山	1.42	1.44	0.98	1.10	39.5	121.7	5.1	21.0	22
野辺地	1.27	1.22	0.97	1.09	39.7	125.7	5.6	26.0	26
六ヶ所	1.29	1.18	1.19	1.40	40.2	129.4	7.0	30.2	25
鯉ヶ沢	1.10	1.04	1.32	1.46	42.8	151.2	5.3	28.3	25
七戸	1.33	1.26	1.01	1.16	39.8	123.7	6.6	26.4	24
深浦	1.20	1.26	0.84	1.10	47.3	155.3	6.5	25.9	26
岳	1.00	0.92	0.77	0.71	39.3	121.5	5.4	20.0	22
弘前	1.04	1.14	0.93	1.29	38.1	142.1	7.4	40.2	26
黒石	1.01	0.95	1.50	1.77	37.0	140.4	7.7	45.1	25
鯉ヶ湯	1.58	1.38	1.18	1.40	40.1	111.8	5.5	20.6	14
三沢	1.55	1.34	1.32	1.40	38.4	129.5	5.9	30.9	25
塩川	1.52	1.49	1.33	1.35	40.0	118.4	5.0	20.0	18
十和田	1.47	1.33	1.23	1.24	39.5	136.1	6.8	31.7	25
八戸	1.20	1.23	0.83	1.11	39.8	134.5	5.7	26.8	26
大鱈	1.34	1.29	1.12	1.13	43.2	134.7	6.3	27.7	26
鯉ヶ関	1.31	1.29	1.20	1.24	43.2	136.3	5.4	21.2	25
休屋	1.31	1.18	1.04	1.32	43.9	131.5	5.2	23.9	25
戸栗	1.39	1.32	1.03	1.05	39.8	122.0	5.0	20.3	22
三戸	1.38	1.32	0.98	1.21	41.3	141.6	6.1	30.8	25
八森	1.42	1.28	1.33	1.46	47.4	155.0	6.5	28.8	24
藤里	1.48	1.48	1.09	1.11	48.1	135.5	7.4	20.8	23
陣場	1.26	1.35	1.08	1.12	48.0	135.8	6.3	22.6	22
藤原	1.55	1.40	1.17	1.28	42.7	126.0	5.0	19.8	18
能代	1.39	1.40	0.87	1.17	43.9	144.3	6.4	27.7	26
鷹巣	1.28	1.38	0.83	1.01	45.5	138.5	6.5	25.4	26
大館	1.48	1.35	1.23	1.53	45.9	140.6	8.5	37.3	25
鹿角	1.21	1.15	1.04	1.20	39.8	125.9	5.7	23.5	25
湯瀬	1.43	1.11	0.95	1.22	41.2	131.6	4.8	20.6	25
八幡平	1.32	1.19	0.81	0.95	43.2	122.3	4.9	16.4	23
男鹿真山	1.57	1.44	1.06	1.22	44.3	138.1	6.8	26.0	16
男鹿	1.12	1.00	0.83	1.02	45.0	145.9	7.9	27.7	25
大湯	1.28	1.27	0.86	1.24	43.6	147.3	8.1	31.2	25
五城目	1.49	1.42	1.02	1.04	43.8	137.9	6.6	21.9	26
阿仁合	1.35	1.38	1.25	1.61	46.8	134.6	6.8	22.5	25
比立内	1.53	1.57	1.06	1.27	45.8	126.4	5.1	16.1	21
松木内	1.47	1.56	1.22	1.40	49.3	134.4	6.5	20.4	22
秋田	1.36	1.35	0.93	1.09	49.3	155.6	8.8	36.6	26
若見三内	1.72	1.65	1.18	1.24	49.0	140.6	8.0	28.5	25
仁別	1.44	1.45	1.03	1.16	50.4	142.4	7.5	26.8	16
鍾畑	1.72	1.71	1.18	1.36	47.8	130.3	7.0	24.3	21
角館	1.61	1.75	1.17	1.36	48.9	141.0	7.2	23.9	25
田沢湖	1.46	1.37	1.12	1.27	48.2	134.2	5.5	16.8	25
大正寺	1.34	1.43	0.97	1.18	47.1	139.5	5.6	21.1	25
大曲	1.47	1.43	0.97	0.97	46.4	143.0	7.0	24.0	25
本荘	1.37	1.22	0.97	1.09	49.8	155.8	7.5	29.4	25
東由利	1.55	1.59	1.31	1.44	44.8	133.3	6.7	25.3	25
横手	1.29	1.49	1.04	1.18	45.1	147.6	6.8	28.8	26
象潟	1.51	1.48	1.07	1.12	46.3	150.2	6.6	26.1	26
安曇	1.49	1.46	1.01	1.06	46.3	138.2	5.5	19.8	25
笹子	1.48	1.35	0.98	1.02	43.3	129.0	6.5	23.9	18
湯沢	1.50	1.38	1.19	1.14	42.5	140.0	5.4	27.0	25
東成瀬	1.45	1.49	1.16	1.24	41.7	128.6	6.2	26.4	22
湯の岱	1.43	1.46	1.19	1.20	45.1	130.9	6.6	27.3	25
種市	1.45	1.24	1.03	1.05	40.3	128.6	5.5	24.1	25
軽米	1.31	1.29	0.93	1.04	41.0	143.1	4.3	24.8	25
二戸	1.27	1.27	0.85	1.20	40.8	142.2	5.5	31.8	25
大野	1.34	1.40	1.27	1.26	41.7	131.6	7.3	32.3	22
山形	1.39	1.33	1.04	0.93	40.1	134.9	7.1	29.7	24
久慈	1.57	1.46	1.23	1.20	43.8	145.4	9.7	46.7	25
荒屋	1.50	1.23	1.16	1.17	41.9	140.5	6.6	27.0	25
奥中山	1.42	1.28	1.12	1.12	40.8	132.9	5.0	22.0	24
葛巻	1.42	1.29	1.17	1.17	39.8	139.9	6.3	27.1	25
下戸舘	1.60	1.58	1.05	1.05	44.7	140.8	8.1	29.4	23
菅代	1.54	1.58	1.04	1.17	46.6	146.7	11.4	41.5	25
岩手松尾	1.33	1.14	1.02	1.06	40.8	141.3	6.2	27.1	24
好摩	1.50	1.34	1.19	1.15	42.8	142.5	7.4	30.4	26
岩洞	1.39	1.31	1.13	1.23	40.0	127.2	6.2	24.8	18
岩泉	1.41	1.29	0.92	0.99	41.3	140.7	8.0	31.5	24
小本	1.36	1.43	1.04	1.25	49.1	152.7	10.9	41.1	24
葛根田	1.57	1.53	1.00	1.17	46.3	126.8	6.0	22.0	22
藪川	1.18	1.26	0.87	1.08	42.2	132.3	6.6	29.1	25
雫石	1.50	1.50	1.04	1.30	43.2	126.5	5.4	19.4	25
盛岡	1.39	1.32	1.17	1.19	43.5	139.1	6.6	25.1	26
門馬	1.32	1.56	0.94	1.14	41.7	129.6	3.8	14.7	17
宮古	1.47	1.60	1.08	1.33	46.3	147.9	8.9	33.0	26
紫波	1.32	1.44	0.98	1.19	42.2	136.2	6.5	28.0	25
川井	1.60	1.66	1.22	1.35	41.5	134.3	7.8	29.4	24
沢内	1.38	1.35	0.92	1.19	45.3	122.2	6.0	21.3	25
駒頭山	1.39	1.34	1.15	1.25	42.8	116.8	6.8	23.5	18
大迫	1.15	1.25	1.02	1.25	41.3	132.9	5.7	24.6	25
山田	1.25	1.23	0.95	1.12	49.3	150.5	10.0	33.4	25
湯田	1.47	1.48	1.10	1.24	43.6	125.7	6.8	24.7	24
遠野	1.49	1.34	0.98	1.10	42.2	136.3	6.8	23.4	25
北上	1.55	1.43	1.31	1.24	42.9	136.7	7.8	34.4	24
米里	1.17	1.11	1.03	0.97	39.8	128.5	3.7	18.5	21
釜石	1.33	1.31	1.06	1.11	54.5	159.6	11.9	36.1	25
岩柳	1.32	1.25	1.19	1.35	42.9	133.7	5.5	25.4	25
江刺	1.29	1.27	1.36	1.45	41.5	134.0	5.7	24.4	25
住田	1.40	1.31	0.99	1.03	45.4	138.2	7.3	24.6	24
祭時	1.39	1.47	1.21	1.33	48.3	133.7	9.7	34.5	21
衣川	1.23	1.32	1.28	1.30	42.7	130.5	6.6	25.1	22
大船渡	1.33	1.30	0.80	0.85	52.7	158.4	6.3	20.1	26



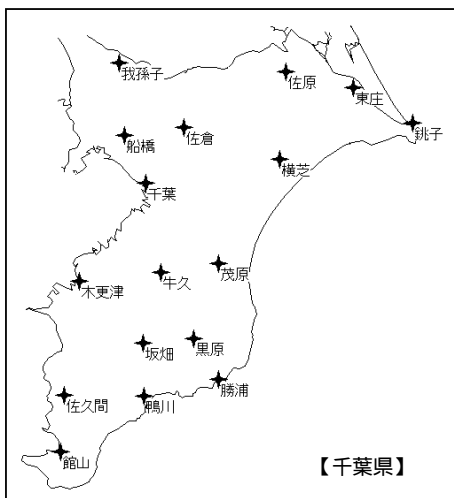
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	駒ノ湯	1.50	1.54	1.14	1.22	48.2	130.4	8.3	
気仙沼	1.28	1.18	0.94	1.15	46.7	143.9	6.3	26.3	25
川渡	1.30	1.36	1.03	1.06	45.1	131.5	8.6	30.5	26
花山	1.39	1.41	1.22	1.26	43.7	126.1	8.2	29.2	21
築館	1.50	1.54	1.18	1.29	43.5	136.9	7.8	31.5	26
米山	1.39	1.15	1.07	1.16	42.3	140.5	5.3	22.2	25
志津川	1.35	1.19	1.01	1.11	43.5	136.8	7.6	28.3	25
古川	1.44	1.47	1.03	1.10	42.2	134.1	6.1	25.4	25
雄勝	1.31	1.37	1.03	1.20	50.0	150.3	7.5	27.8	26
大衡	1.33	1.33	0.97	1.05	43.5	134.3	6.6	24.1	25
鹿島台	1.59	1.65	1.05	1.25	44.5	146.4	7.2	33.2	25
石巻	1.72	1.41	1.34	1.15	39.6	125.8	6.0	18.3	12
新川	1.49	1.56	1.06	1.18	45.7	135.4	8.7	31.9	25
塩釜	1.58	1.54	1.28	1.45	44.3	141.8	8.6	37.1	25
江ノ島	1.24	1.26	0.97	1.10	43.0	139.1	6.3	26.3	23
仙台	1.51	1.57	1.13	1.26	46.5	146.5	8.5	33.2	26
川崎	1.53	1.45	1.04	0.91	44.5	130.6	8.1	25.8	25
白石	1.29	1.24	0.86	0.88	43.6	133.3	7.2	25.2	25
亶理	1.61	1.50	1.20	1.18	44.0	137.8	9.7	36.9	25
丸森	1.36	1.30	0.91	0.96	43.3	134.9	7.6	29.0	24
筆甫	1.36	1.37	0.96	0.93	47.2	141.9	9.8	32.8	22
飛鳥	1.36	1.56	1.17	1.21	46.6	160.0	7.9	31.3	22
酒田	1.31	1.28	1.19	1.07	49.8	156.7	7.2	30.2	26
上草津	1.60	1.60	1.32	1.28	53.0	143.7	6.6	21.9	24
差首鍋	1.42	1.47	1.10	1.05	49.0	132.1	6.8	21.8	24
金山	1.53	1.63	1.12	1.27	45.2	133.2	6.1	22.0	25
鶴岡	1.56	1.63	1.24	1.26	47.8	144.8	6.4	25.6	26
狩川	1.59	1.55	1.28	1.45	47.2	142.9	7.8	30.0	25
新庄	1.35	1.26	1.16	1.27	43.8	135.4	4.8	24.9	26
瀬見	1.32	1.40	0.86	0.94	41.7	119.8	3.8	14.6	22
向町	1.36	1.33	0.92	1.09	41.9	124.1	4.5	18.0	25
柳引	1.66	1.68	1.34	1.23	44.6	131.1	5.1	18.4	21
肘折	1.43	1.44	0.92	1.08	44.6	127.1	4.8	20.0	25
尾花沢	1.12	1.15	0.90	1.16	40.5	135.3	4.6	21.3	26
鼠ヶ関	1.54	1.55	1.15	1.16	50.4	153.8	8.2	30.9	25
荒沢	1.62	1.60	1.04	1.05	46.6	125.9	5.7	20.0	22
榎岡	1.31	1.52	1.05	1.23	39.3	133.1	4.3	22.1	23
大井沢	1.34	1.42	1.25	1.38	44.1	124.6	9.0	35.6	23
左沢	1.49	1.54	1.04	1.16	39.4	129.8	4.9	25.3	23
山形	1.29	1.37	1.09	1.32	43.0	149.1	6.8	28.2	26
長井	1.51	1.68	1.06	1.38	43.0	130.5	5.7	29.5	25
小国	1.70	1.67	1.47	1.47	48.1	132.3	6.9	24.5	25
高島	1.35	1.38	1.05	0.97	41.9	143.7	6.3	26.2	24
中津川	1.53	1.44	1.20	1.23	44.8	135.2	6.8	28.4	20
高峰	1.13	1.39	0.86	1.09	42.9	134.2	5.6	25.8	25
米沢	1.43	1.51	0.95	1.10	41.2	142.4	4.3	24.8	26



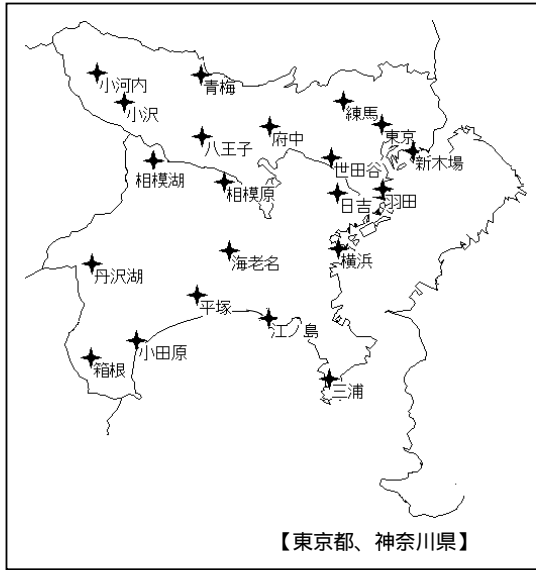
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	茂庭	1.13	0.94	1.04	0.78	42.3	132.2	6.4	
梁川	1.45	1.44	1.25	1.27	41.6	136.6	9.5	36.7	25
桧原	1.41	1.55	1.24	1.36	45.6	135.8	7.2	25.7	22
福島	1.36	1.40	0.98	0.94	44.1	147.1	7.6	28.2	26
相馬	1.57	1.57	1.07	0.98	45.6	140.5	9.7	36.2	26
喜多方	1.38	1.41	1.04	1.17	41.7	137.1	5.6	25.6	25
飯館	1.51	1.45	1.15	1.11	45.2	141.8	9.7	36.7	25
原町	1.59	1.47	1.04	0.90	46.1	144.8	6.9	26.5	26
西会津	1.23	1.45	0.87	0.93	41.4	130.3	5.0	20.8	24
猪苗代	1.53	1.19	1.08	0.95	40.8	130.4	5.6	20.7	25
二本松	1.24	1.40	0.91	1.15	43.5	143.0	8.6	36.0	25
津島	1.39	1.29	1.05	0.94	44.9	139.2	7.3	26.0	23
金山	1.10	1.42	0.98	1.30	43.8	138.0	6.7	28.3	25
若松	1.29	1.19	1.15	1.07	43.8	156.3	7.4	31.7	26
船引	1.32	1.49	1.03	1.13	43.6	142.4	6.6	25.1	25
浪江	1.34	1.34	0.80	0.79	49.7	152.5	9.0	30.3	25
只見	1.43	1.54	0.88	1.06	43.8	130.8	6.8	28.5	24
湖南	1.40	1.40	1.20	1.20	44.4	142.0	8.2	27.5	19
郡山	1.50	1.49	1.11	1.14	45.2	147.8	7.7	33.3	26
川内	1.35	1.31	0.93	0.91	49.3	152.9	10.5	35.6	25
富岡	1.45	1.40	0.95	0.86	51.4	157.3	8.3	27.9	26
南郷	1.49	1.69	1.16	1.29	43.1	144.8	6.7	36.0	25
湯本	1.32	1.36	0.95	1.01	48.9	149.1	10.9	34.2	23
長沼	1.53	1.64	1.53	1.39	48.9	152.0	9.4	31.6	22
小野新町	1.45	1.55	0.97	1.05	48.6	160.8	9.1	41.9	25
川前	1.60	1.49	1.23	1.09	51.8	160.7	12.0	38.8	22
広野	1.39	1.40	1.01	0.93	50.5	153.2	8.3	29.4	25
田島	1.30	1.50	1.03	1.31	47.2	160.1	9.1	34.4	25
白河	1.04	1.02	1.14	1.18	52.9	164.6	10.7	34.3	26
石川	1.61	1.49	1.12	1.11	47.1	150.8	6.7	26.3	25
桧枝岐	1.38	1.30	1.16	1.13	39.7	121.3	7.1	26.5	23
鏡岩	1.15	1.09	1.43	1.27	42.4	143.4	9.4	37.0	22
上遠野	1.24	1.21	0.74	0.74	51.9	162.2	9.6	30.1	25
平	1.55	1.72	1.07	1.15	49.4	156.3	8.7	30.7	22
東白川	1.21	1.28	0.91	0.95	51.6	160.1	8.8	25.1	25
小名浜	1.46	1.43	0.98	0.89	50.2	159.3	7.8	27.8	26



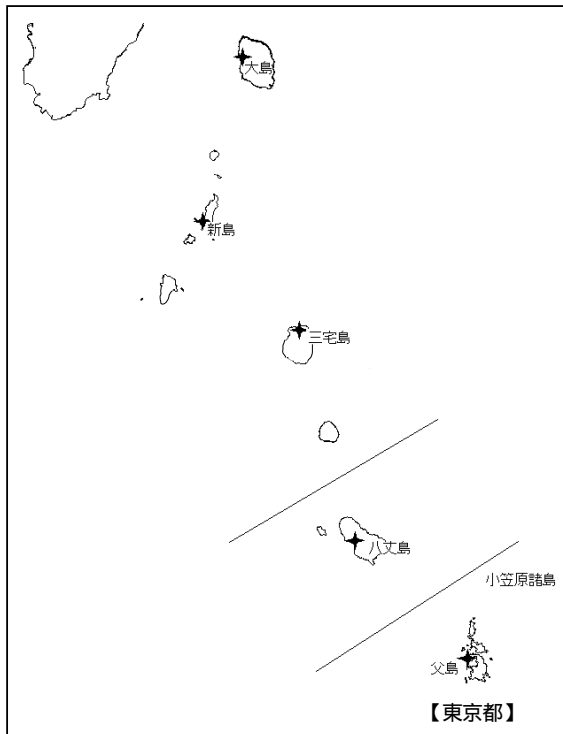
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
花園	1.51	1.54	0.94	0.98	69.4	193.6	14.1	41.4	26
北茨城	1.52	1.59	1.02	1.20	58.9	176.3	10.0	35.3	26
大子	1.35	1.42	0.91	0.86	62.5	196.5	8.2	30.7	24
徳田	1.38	1.26	0.87	0.69	59.0	178.7	8.8	26.6	24
大能	1.42	1.44	0.99	1.09	66.9	190.3	9.5	28.3	16
小瀬	1.59	1.63	1.08	1.07	60.1	188.5	11.9	40.3	23
中野	1.54	1.49	0.92	0.93	55.1	173.6	8.2	28.9	24
日立	1.57	1.63	1.22	1.35	58.9	177.5	9.1	31.4	26
協和	1.43	1.60	0.87	1.03	55.2	179.9	8.2	33.1	19
笠間	1.56	1.53	0.97	1.00	55.7	172.0	7.7	28.9	26
水戸	1.36	1.57	0.85	1.04	58.0	180.7	8.8	33.2	26
古河	1.25	1.24	1.07	1.00	56.1	182.1	8.6	30.3	25
桐岡	1.44	1.29	0.99	1.00	55.1	167.5	6.6	22.5	25
筑波山	1.43	1.17	1.07	1.23	46.0	144.5	6.0	29.4	23
美野里	1.57	1.60	1.02	1.08	53.3	163.3	6.5	26.3	21
下妻	1.48	1.57	1.00	1.14	55.5	179.0	8.6	32.9	26
銚子	1.38	1.47	0.97	1.00	53.7	162.1	6.6	23.8	24
若井	1.63	1.52	1.30	1.26	54.7	175.2	7.1	26.0	25
つくば	1.53	1.29	1.15	0.93	56.6	180.4	8.7	30.3	11
土浦	1.37	1.41	0.85	0.86	51.0	162.4	7.2	23.5	25
江戸崎	1.51	1.59	1.07	1.19	53.9	164.8	7.5	28.3	25
鹿嶋	1.50	1.45	1.13	1.31	55.1	161.3	10.2	40.3	26
龍ヶ崎	1.40	1.34	1.09	1.02	53.9	165.1	6.6	22.0	23
那須	1.30	1.47	1.27	1.20	65.7	182.4	10.7	32.1	26
五十里	1.21	1.44	0.91	1.12	63.3	188.3	7.4	24.5	26
宇都宮	0.98	1.32	1.02	1.07	68.5	218.1	7.9	29.9	24
土呂部	1.29	1.17	0.82	0.78	63.4	187.6	9.2	28.5	24
大田原	1.47	1.52	1.26	1.08	67.8	217.4	7.0	28.7	26
日光	1.53	1.41	1.17	1.06	67.6	182.7	9.6	27.8	26
今市	1.47	1.62	1.23	1.17	68.2	194.3	6.4	20.3	23
塩谷	1.41	1.64	1.10	1.30	68.1	207.5	6.7	29.5	23
足尾	1.31	1.41	1.28	1.28	66.9	192.7	7.0	23.4	22
高根沢	1.13	1.16	0.86	1.10	67.3	217.8	7.0	34.0	22
鹿山	1.26	1.31	0.85	0.90	63.4	207.5	5.6	27.6	24
鹿沼	1.53	1.53	0.88	1.19	67.6	207.9	4.6	27.7	24
宇都宮	1.26	1.33	1.09	1.01	69.4	223.6	7.9	36.0	26
喜生	1.28	1.50	0.96	1.14	68.8	220.7	7.6	35.9	26
真岡	1.30	1.45	0.86	0.95	65.0	221.2	5.9	33.8	24
足利	1.50	1.51	1.25	1.34	65.2	231.5	7.1	34.8	21
佐野	1.49	1.58	1.09	1.11	63.1	216.8	6.2	30.6	24
栃木	1.31	1.59	1.06	1.31	67.3	218.7	9.0	40.6	21
小山	1.28	1.51	0.93	1.27	63.8	218.8	6.4	31.9	24
藤原	1.37	1.34	1.15	1.03	53.0	196.6	7.0	22.1	24
水上	1.31	1.36	0.99	0.89	57.4	158.8	7.2	24.5	24
片品	1.16	1.16	1.09	1.08	56.5	190.5	4.9	29.5	24
津津	1.28	1.43	1.07	1.05	60.6	175.8	6.1	27.3	24
沼田	1.27	1.32	0.86	0.93	60.3	219.1	5.5	36.3	24
中之条	1.28	1.30	0.98	1.11	63.0	212.6	8.4	44.5	25
田代	1.12	1.44	1.03	1.14	58.0	174.1	4.8	30.6	24
榛名山	1.32	1.53	1.21	1.34	73.8	207.2	12.5	38.1	23
前橋	1.35	1.49	0.99	1.05	67.5	241.0	8.6	43.3	26
黒保根	1.52	1.63	1.15	1.18	67.6	217.9	6.1	25.8	23
桐生	1.26	1.41	1.06	1.09	66.3	236.9	5.5	30.0	26
上里見	1.44	1.35	1.20	1.11	67.6	229.5	10.6	39.1	24
伊勢崎	1.35	1.44	1.04	1.11	64.9	241.1	7.6	37.6	24
西野牧	1.30	1.56	1.15	1.25	61.5	217.7	8.1	41.9	24
藤岡	1.30	1.42	1.10	1.19	65.6	248.5	6.4	37.8	26
館林	1.36	1.66	1.01	1.22	64.6	229.9	7.4	41.2	23
万場	1.37	1.22	1.02	1.19	63.1	222.1	7.7	37.9	24
壽屋	1.39	1.57	1.26	1.11	60.6	198.3	8.6	29.6	25
熊谷	1.26	1.33	0.97	1.07	63.4	211.5	11.1	45.6	26
上吉田	1.19	1.21	1.00	1.10	55.8	182.1	10.8	37.5	24
鴻巣	1.54	1.69	0.92	1.16	57.3	187.5	8.6	37.0	25
久喜	1.42	1.69	0.97	1.20	58.5	186.9	7.9	27.7	25
三峰	1.44	1.57	1.04	1.18	58.9	171.4	11.6	39.3	26
秩父	1.39	1.53	0.87	1.01	59.2	187.0	10.5	33.8	26
浦山	1.52	1.55	1.00	1.05	68.1	206.2	13.3	45.3	24
堂平	1.32	1.82	1.32	1.74	58.8	170.0	9.6	26.2	13
鳩山	1.61	1.62	1.30	1.37	59.4	185.4	10.7	37.0	24
敷能	1.48	1.62	0.98	1.10	61.4	188.0	9.8	29.3	25
さいたま	1.34	1.25	0.81	0.82	58.5	183.9	8.9	28.3	25
越谷	1.45	1.42	1.02	0.99	54.8	170.1	8.6	30.4	25
所沢	1.14	1.30	0.95	1.14	59.2	179.7	8.5	24.6	25



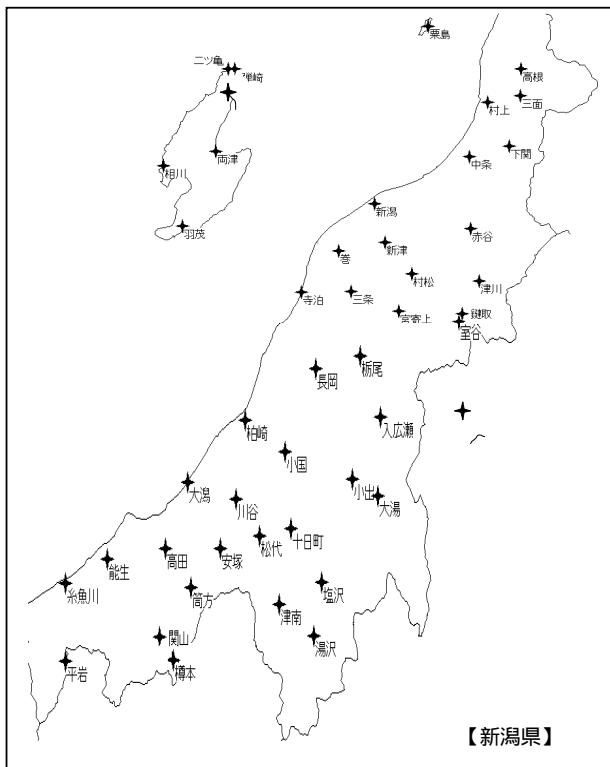
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
我孫子	1.44	1.44	1.02	1.07	56.9	176.5	7.8	28.5	26
佐原	1.39	1.37	1.21	1.19	54.4	165.1	9.1	28.5	25
東庄	1.16	1.16	0.67	0.85	56.2	168.4	6.4	25.3	23
船橋	1.50	1.35	1.12	1.00	54.5	169.3	7.8	29.4	24
佐倉	1.54	1.51	1.17	1.15	53.8	163.6	7.5	23.5	25
銚子	1.15	0.97	0.74	0.70	61.0	178.9	7.8	25.6	26
横芝	1.30	1.40	0.85	0.99	55.5	170.7	7.9	29.1	26
千葉	1.26	1.36	0.97	1.01	55.9	172.6	6.9	25.2	26
茂原	1.28	1.28	0.84	0.96	60.4	176.5	8.7	28.9	26
木更津	1.43	1.55	0.88	1.03	57.4	171.1	7.0	25.0	26
牛久	1.39	1.25	1.13	0.96	58.6	170.4	6.2	18.5	24
坂畑	1.46	1.54	1.04	1.15	63.2	173.1	8.5	23.7	24
黒原	1.11	1.16	0.95	1.14	68.6	184.4	8.1	24.1	26
佐久間	1.52	1.57	1.07	1.05	65.6	191.8	9.2	27.6	26
鴨川	1.31	1.26	1.14	1.14	66.0	190.1	9.8	31.2	26
勝浦	1.41	1.44	0.88	0.94	70.0	200.8	9.0	32.2	26
館山	1.33	1.30	1.00	1.15	66.0	190.3	7.7	25.2	26



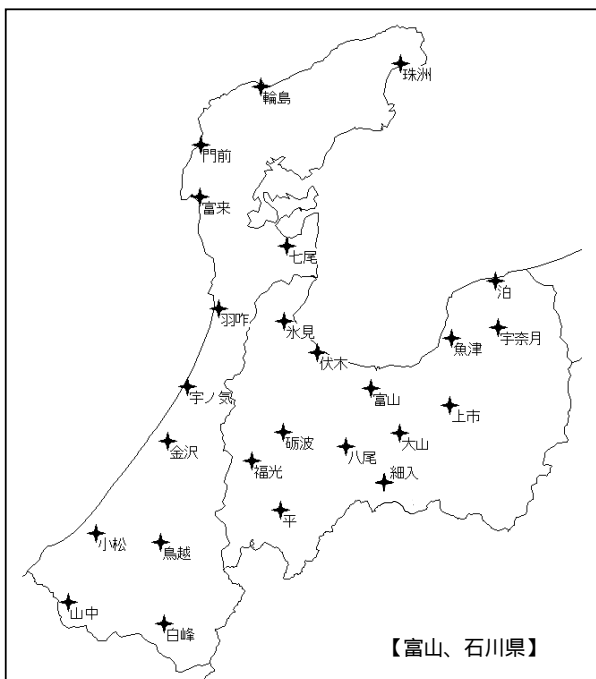
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	小河内	1.38	1.37	0.90	0.93	61.1	180.8	11.9	
小沢	1.44	1.47	1.05	1.15	63.9	190.5	12.8	39.1	24
青梅	1.53	1.64	0.99	1.10	61.1	186.2	11.9	41.2	26
練馬	1.59	1.58	1.25	1.20	61.5	187.7	10.8	43.8	26
八王子	1.24	1.29	0.93	1.05	61.9	183.8	10.6	32.6	26
府中	1.19	1.33	0.84	0.94	60.8	183.8	7.1	26.0	25
世田谷	1.26	1.39	0.76	0.88	62.5	186.7	9.2	31.9	26
東京	1.58	1.54	1.19	1.31	60.3	183.4	11.2	44.0	26
新木場	1.50	1.59	1.11	1.26	57.5	178.1	9.4	35.3	26
羽田	1.35	1.39	1.12	1.31	58.8	181.3	7.6	29.5	26
相模湖	1.39	1.44	0.97	1.39	63.2	185.9	12.1	36.0	26
相模原	1.37	1.30	0.85	1.37	64.8	188.7	8.4	33.9	26
日吉	1.43	1.49	1.10	1.43	61.6	183.5	8.9	29.2	26
丹沢湖	1.51	1.50	1.00	1.51	68.8	187.7	11.2	31.5	25
海老名	1.15	1.24	0.82	1.15	63.1	181.6	7.8	24.3	26
横浜	1.25	1.31	0.93	1.25	63.8	190.1	9.7	40.2	26
平塚	1.30	1.57	0.99	1.30	60.4	177.3	8.1	29.9	26
箱根	1.41	1.43	1.24	1.41	83.2	206.3	19.1	51.7	26
小田原	1.28	1.36	0.83	1.28	63.5	173.1	7.7	20.4	26
江ノ島	1.34	1.33	0.92	1.34	60.8	179.0	7.6	22.4	15
三浦	1.45	1.53	1.08	1.45	64.0	194.4	9.5	35.0	26



地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	大島	1.44	1.48	1.06	1.07	80.0	208.4	9.6	
新島	1.51	1.44	0.92	0.88	77.6	217.5	10.0	30.2	25
三宅島	1.42	1.48	1.10	1.17	82.5	214.5	9.7	27.0	24
八丈島	1.55	1.48	1.19	1.28	83.8	214.7	11.3	35.7	26
父島	1.60	1.52	1.20	1.27	68.6	229.4	12.7	42.3	15



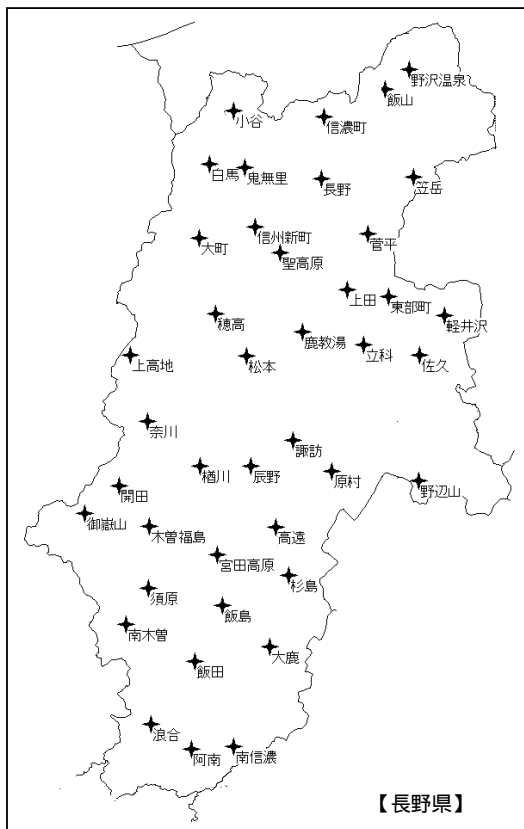
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
粟島	1.49	1.40	1.12	1.23	48.2	164.5	6.6	25.4	23
二ツ亀	1.66	1.84	1.44	1.60	49.1	169.0	9.2	32.4	17
高根	1.56	1.65	1.16	1.13	55.8	158.4	8.5	27.8	23
村上	1.44	1.47	1.02	1.04	54.1	169.8	7.1	25.7	23
三面	1.37	1.53	0.94	0.99	55.8	166.4	8.9	31.4	20
相川	1.43	1.43	1.07	1.13	48.3	165.6	9.3	34.0	26
両津	1.49	1.57	1.10	1.06	50.0	164.0	7.2	21.1	23
中条	1.22	1.23	0.95	0.98	53.8	170.3	9.1	32.8	22
下関	1.32	1.31	1.08	1.14	54.2	163.1	7.2	25.9	26
新潟	1.23	1.31	1.08	1.28	50.6	169.5	8.4	38.0	26
羽茂	1.44	1.54	1.22	1.18	52.0	177.8	8.6	37.4	23
新津	1.30	1.47	1.13	1.18	48.0	155.8	6.8	24.2	23
赤谷	1.48	1.37	1.32	1.24	57.0	163.2	7.1	22.6	25
巻	1.30	1.51	0.90	1.23	47.7	158.3	5.5	23.7	23
寺泊	1.66	1.50	1.17	1.48	52.5	176.8	7.2	43.2	23
三条	1.50	1.44	1.13	1.24	50.2	161.7	7.4	26.4	22
村松	1.18	1.27	1.04	1.18	53.1	171.2	7.8	30.5	25
津川	1.54	1.33	1.19	0.92	50.6	154.5	7.3	22.7	23
宮寄上	1.53	1.71	1.19	1.42	54.2	159.5	7.3	27.0	18
鍵取	1.71	1.68	1.15	1.11	47.5	135.3	3.3	15.9	12
長岡	1.38	1.55	1.00	1.38	49.2	152.8	7.2	21.4	26
栃尾	1.42	1.44	1.00	1.06	49.9	148.9	6.2	18.9	26
柏崎	1.48	1.55	1.08	1.19	51.4	160.8	7.0	30.3	23
入広瀬	1.53	1.52	0.91	0.86	51.7	151.5	6.2	23.2	22
大湯	1.29	1.48	0.86	1.16	51.1	165.6	6.5	27.1	23
小国	1.35	1.37	1.01	1.23	52.0	160.5	8.6	36.2	24
小出	1.43	1.51	1.08	1.17	50.3	153.5	7.0	27.6	25
大湯	1.58	1.49	1.06	0.94	54.9	160.9	6.2	24.4	20
高田	1.49	1.49	1.04	1.04	51.5	160.2	8.2	27.2	26
安塚	1.48	1.69	1.05	1.37	50.8	159.1	8.0	33.9	25
川谷	1.14	1.24	0.70	0.84	54.2	161.7	7.6	25.9	16
松代	1.20	1.38	0.89	0.96	49.4	149.3	6.1	20.3	24
十日町	1.47	1.56	1.10	1.25	47.5	150.4	5.2	24.4	23
糸魚川	1.45	1.37	1.08	1.13	58.4	176.0	10.5	31.1	26
能生	1.56	1.52	1.08	1.13	59.6	177.5	9.3	34.9	23
簡方	1.48	1.36	1.36	1.11	50.5	160.7	6.1	20.0	16
湯沢	1.48	1.46	1.24	1.31	49.0	162.9	10.3	38.8	18
関山	1.13	1.40	0.97	1.00	47.3	156.3	5.2	20.9	23
津南	1.42	1.52	1.15	1.20	48.4	158.0	6.1	21.8	23
湯沢	1.44	1.57	1.25	1.42	50.8	161.5	9.3	33.2	26
平岩	1.26	1.27	1.07	0.88	48.6	143.5	6.5	21.0	22
樽本	1.17	1.39	0.93	1.35	46.3	158.9	6.1	38.9	16



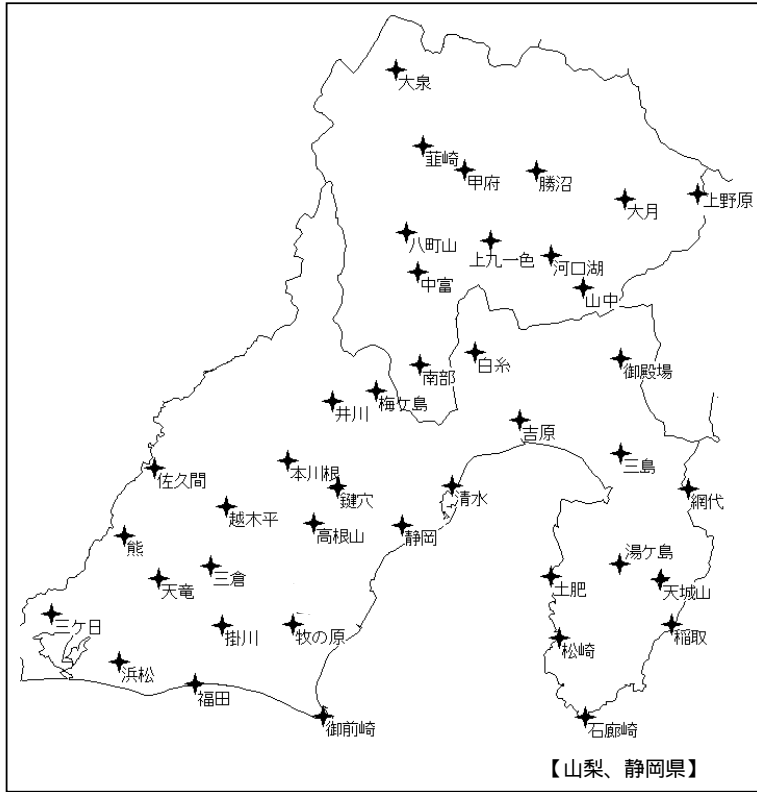
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
泊	1.39	1.33	1.05	1.04	58.2	173.6	8.4	29.1	26
氷見	1.63	1.51	1.18	1.03	53.9	172.4	7.9	25.8	23
魚津	1.60	1.68	1.18	1.35	57.2	170.1	8.3	31.1	23
宇奈月	1.76	1.65	1.31	1.22	63.1	173.4	10.1	26.4	19
伏木	1.24	1.48	0.77	1.12	55.8	177.8	7.8	27.8	26
富山	1.56	1.57	1.06	1.19	55.4	174.2	9.3	33.2	26
砺波	1.50	1.40	1.13	0.96	56.4	178.6	9.5	31.5	26
大山	1.16	1.50	0.73	1.10	55.5	167.9	7.7	24.2	17
上市	1.38	1.49	1.15	1.17	61.5	172.2	9.6	28.4	23
福光	1.37	1.62	1.12	1.30	55.2	168.5	9.1	28.7	23
八尾	1.36	1.60	0.96	1.11	57.4	177.6	11.0	41.5	25
平	1.40	1.34	0.95	0.89	53.3	160.2	7.7	24.1	17
細入	1.69	1.58	1.00	1.07	58.3	177.6	11.4	45.0	10
珠洲	1.68	1.59	1.40	1.07	53.1	173.4	7.4	26.9	23
輪島	1.41	1.44	0.85	0.98	58.5	192.5	7.6	30.4	26
門前	1.32	1.47	0.82	1.06	56.0	190.4	7.7	31.6	26
富来	1.32	1.44	1.03	1.02	57.0	192.9	8.4	29.4	23
七尾	1.47	1.51	0.97	1.05	55.3	174.8	9.1	27.9	23
羽咋	1.56	1.50	1.09	0.99	55.0	174.9	8.9	23.9	23
宇ノ気	1.28	1.35	0.79	0.96	57.5	185.2	8.1	26.7	26
金沢	1.17	1.15	0.71	0.76	57.3	175.0	8.3	24.7	26
小松	1.29	1.41	0.91	1.08	54.7	174.1	7.8	26.5	23
鳥越	1.34	1.50	0.96	1.06	59.2	173.6	7.9	26.2	23
山中	1.56	1.57	1.16	1.25	64.1	187.4	10.2	32.8	23
白峰	1.44	1.49	0.92	1.02	57.7	162.8	6.2	17.1	21



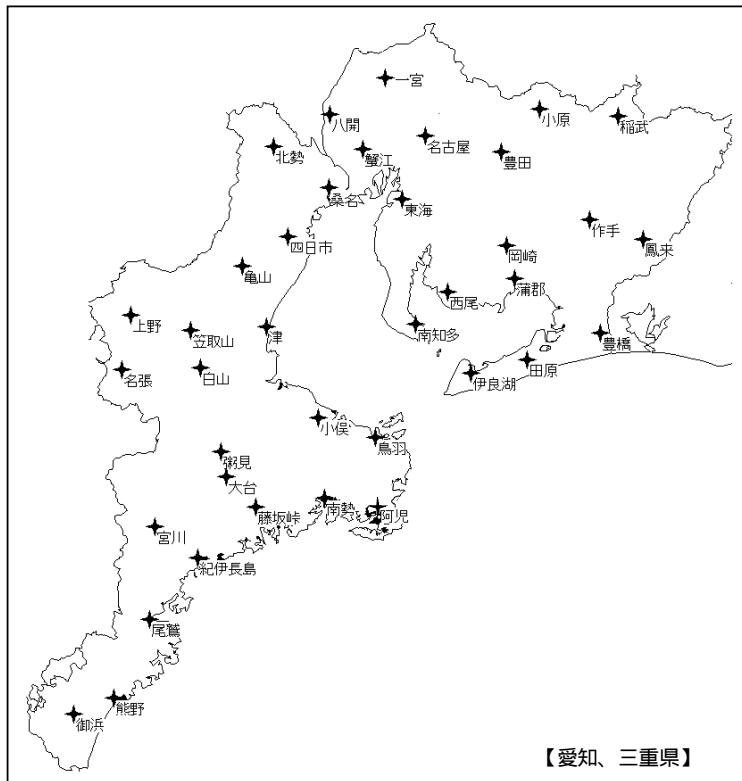
地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	三国	1.35	1.10	1.15	1.08	56.4	182.7	7.1	
越前	1.65	1.50	1.29	1.15	58.0	185.9	7.6	28.5	23
福井	1.45	1.43	1.03	1.03	53.2	166.5	7.9	25.5	26
美山	1.59	1.55	1.12	1.29	56.5	179.1	8.2	26.6	26
勝山	1.46	1.47	0.94	1.11	55.8	167.5	7.1	20.1	24
大野	1.54	1.50	1.11	1.28	54.8	167.3	7.6	23.1	25
九頭竜	1.53	1.38	1.30	1.25	58.7	165.1	10.4	31.8	19
今庄	1.55	1.68	1.28	1.35	58.6	181.7	8.2	30.8	23
敦賀	1.33	1.54	0.84	1.13	53.3	171.3	6.0	25.7	26
美浜	1.50	1.54	1.19	1.26	57.1	188.8	9.7	43.9	23
川上	1.47	1.61	1.05	1.20	61.4	194.7	9.3	37.6	19
小浜	1.49	1.50	1.06	1.05	58.5	191.7	8.4	32.2	23
河合	1.52	1.57	1.12	1.17	50.4	150.3	7.5	23.4	23
神岡	1.59	1.39	1.20	0.87	51.3	154.6	7.4	22.6	23
白川	1.57	1.46	1.11	0.95	51.5	151.7	8.2	23.4	22
坂尾	1.42	1.61	1.04	1.15	53.3	153.0	6.0	19.5	23
御母衣	1.55	1.46	1.07	0.95	59.1	157.8	8.3	24.9	19
清見	1.09	0.95	0.97	0.76	52.9	151.3	7.6	24.6	11
高山	1.66	1.49	1.13	0.94	51.8	158.3	6.1	19.5	25
丹生川	1.64	1.15	1.68	0.87	53.1	159.3	6.6	19.6	11
蛭ヶ野	1.37	1.42	1.04	0.93	67.9	179.0	12.1	32.2	11
六蔵	1.27	1.42	1.05	1.09	59.3	164.2	7.5	23.3	23
船山	1.56	1.51	1.21	0.98	58.8	162.4	7.0	19.9	11
宮之前	1.50	1.37	1.12	1.15	54.9	158.6	7.5	20.0	23
長滝	1.35	1.47	1.06	1.10	64.3	169.3	10.7	31.0	23
萩原	1.22	1.21	1.03	0.90	69.0	194.7	9.2	29.1	26
八幡	1.73	1.70	1.34	1.36	72.1	202.6	15.3	49.9	23
宮地	1.39	1.27	1.26	1.17	70.2	202.6	8.6	32.4	23
樽見	1.62	1.65	1.23	1.31	76.4	207.0	14.9	50.0	23
金山	1.48	1.47	1.08	1.27	69.1	204.5	9.7	37.1	26
付知	1.37	1.22	0.92	0.92	64.6	187.2	6.4	19.8	19
美濃	1.36	1.20	1.08	0.99	71.2	213.8	12.3	46.0	26
伽藍	1.32	1.55	1.01	1.40	61.1	191.0	9.8	38.9	11
黒川	1.48	1.31	1.06	1.09	64.3	192.1	7.7	26.9	23
播磨川	1.50	1.51	1.01	1.14	67.4	189.9	10.1	34.8	23
美濃加茂	1.15	1.21	0.92	1.09	65.4	212.7	10.7	54.5	23
恵那	1.50	1.58	1.01	1.16	62.4	195.6	9.8	35.4	26
中津川	1.34	1.46	1.03	1.15	62.8	195.3	9.2	32.0	26
関ヶ原	1.58	1.69	1.20	1.35	63.6	191.9	12.0	52.7	23
大垣	1.34	1.38	1.00	1.15	60.3	180.9	7.5	24.6	26
岐阜	1.32	1.49	1.13	1.20	63.3	195.2	10.6	38.6	26
多治見	1.50	1.56	1.07	1.07	64.5	211.8	10.8	42.3	23
上石津	1.33	1.36	1.09	1.26	61.3	189.0	11.0	53.7	25



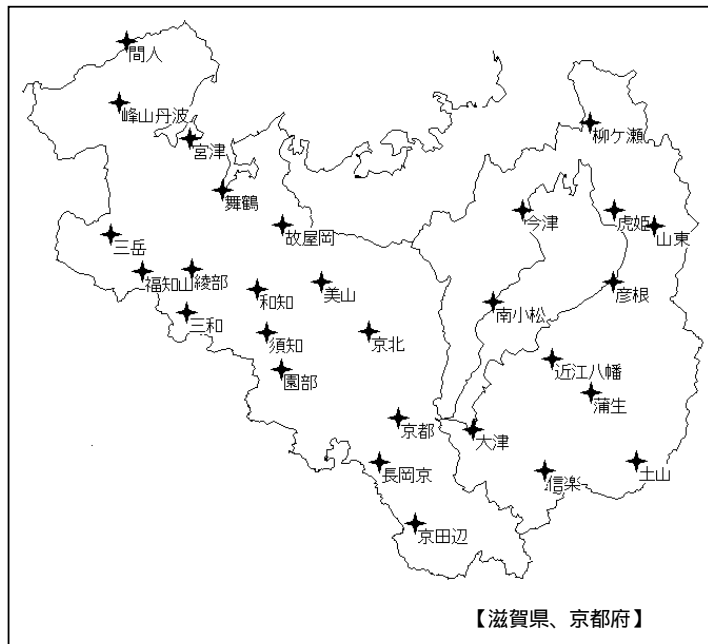
地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	野沢温泉	1.25	1.39	0.85	0.93	43.6	161.1	5.4	
信濃町	1.58	1.57	1.04	1.18	41.7	167.9	5.3	29.4	25
飯山	1.24	1.51	0.92	1.01	41.2	173.7	6.8	31.7	26
小谷	1.52	1.50	1.17	1.24	44.5	148.2	6.7	30.4	18
白馬	1.41	1.72	1.05	1.27	47.2	148.9	5.9	33.1	23
鬼無里	1.49	1.65	1.11	1.32	44.8	154.7	6.1	45.7	24
長野	1.12	1.74	0.73	1.23	39.5	171.6	6.8	31.0	26
笠岳	1.45	1.41	1.10	1.17	47.9	172.7	9.4	36.5	18
大町	1.50	1.43	1.06	0.79	41.1	140.0	5.0	22.5	23
信州新町	1.64	1.61	1.17	1.19	43.3	176.5	7.0	43.6	23
菅平	1.66	1.57	1.14	1.01	44.6	179.1	8.0	42.3	26
聖高原	1.33	1.34	1.01	1.11	41.6	159.2	6.5	31.2	18
上田	1.42	1.61	1.01	1.22	37.9	171.1	6.2	36.0	25
穂高	1.32	1.57	0.97	0.99	37.6	146.4	5.5	28.5	23
東部町	1.23	1.76	1.15	1.34	40.7	167.3	7.3	43.8	23
軽井沢	1.49	1.39	1.44	1.12	45.9	158.4	8.8	34.9	26
上高地	1.33	1.47	0.99	1.18	48.6	128.6	4.5	11.9	21
松本	1.29	1.52	1.00	1.14	38.6	147.8	7.3	34.6	26
鹿教湯	1.29	1.46	1.25	1.29	45.3	164.4	7.3	35.3	26
立科	1.26	1.52	0.97	1.04	41.9	163.2	6.5	23.7	23
佐久	1.31	1.47	1.14	1.21	41.8	177.3	8.1	43.3	23
奈川	1.60	1.53	1.15	1.11	45.3	128.9	5.9	18.1	23
諏訪	1.37	1.47	1.06	1.19	46.1	159.0	7.7	29.2	26
開田	1.70	1.52	1.33	1.18	49.9	142.4	7.3	20.4	23
穂川	1.36	1.63	1.20	1.29	50.5	152.5	6.4	27.7	23
辰野	1.53	1.53	1.27	1.21	47.9	163.5	7.1	34.8	23
原村	1.52	1.66	1.06	1.32	42.8	148.7	4.5	26.4	23
野辺山	1.38	1.58	1.06	1.36	47.5	157.0	6.3	35.9	26
御嶽山	1.56	1.94	1.29	1.71	69.7	180.1	10.3	24.0	11
木曾福島	1.44	1.29	1.25	1.42	51.7	157.0	6.6	25.2	25
高遠	1.43	1.66	0.84	1.23	44.7	159.9	5.4	33.6	16
宮田高原	1.52	1.63	1.04	1.21	51.4	143.6	7.3	19.5	11
杉島	1.39	1.09	0.93	0.72	47.7	162.0	6.3	21.1	18
須原	1.39	1.44	0.88	1.10	56.8	166.6	6.8	21.2	26
南木曾	1.33	1.26	1.21	1.57	62.9	184.3	9.8	33.6	26
飯島	1.51	1.52	1.15	1.22	51.5	153.5	8.4	28.3	23
大鹿	1.40	1.38	0.89	1.37	50.2	161.2	6.3	20.9	18
飯田	1.54	1.53	0.98	1.13	47.7	151.4	5.9	25.1	26
浪合	1.37	1.33	0.95	1.03	61.4	172.8	9.0	28.2	23
阿南	1.53	1.45	1.10	1.16	54.5	169.4	7.7	24.9	23
南信濃	1.33	1.37	1.05	1.21	55.7	177.5	7.4	28.4	23



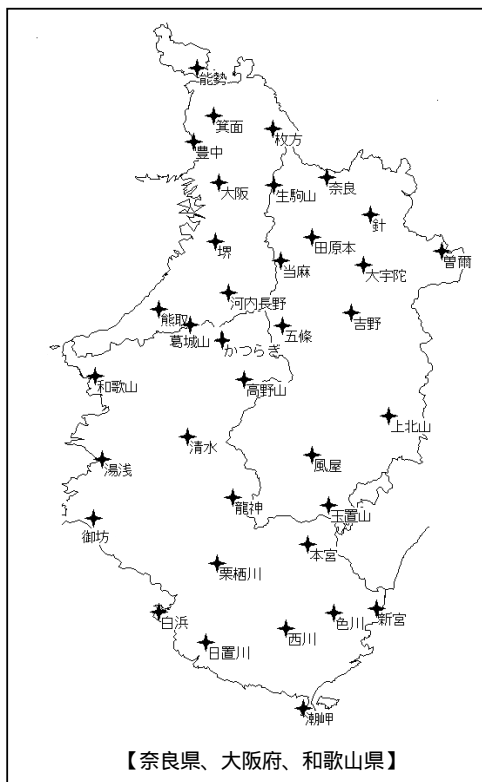
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	大泉	1.24	1.41	0.95	1.08	41.3	147.8	6.1	
荊崎	1.35	1.54	0.95	1.31	44.9	168.9	8.8	38.5	26
甲府	1.42	1.62	1.01	1.09	44.5	170.0	7.0	33.2	26
勝沼	1.42	1.44	1.01	1.15	44.1	179.3	9.9	31.0	24
大月	1.43	1.25	1.05	1.04	53.7	191.8	11.8	36.8	24
上野原	1.45	1.61	1.05	1.27	56.0	199.5	13.5	47.2	24
八町山	1.31	1.71	1.15	1.54	54.2	173.9	12.1	45.4	11
上九一色	1.56	1.34	1.11	1.01	60.0	202.6	14.8	43.6	24
中富	1.36	1.25	1.00	0.91	55.3	188.4	13.5	44.8	24
河口湖	1.52	1.49	1.07	1.07	57.0	194.6	12.2	44.5	26
山中	1.54	1.47	0.94	0.94	66.4	202.0	16.3	47.5	24
南部	1.44	1.38	1.00	1.11	73.0	223.0	16.4	49.1	26
白糸	1.64	1.62	1.20	1.19	69.7	186.6	10.0	31.2	26
井川	1.55	1.59	1.09	1.19	70.9	171.3	9.5	24.1	23
梅ヶ島	1.48	1.48	1.09	1.19	71.9	176.4	10.5	25.8	25
御殿場	1.50	1.46	1.15	1.14	69.1	170.5	9.8	27.4	26
吉原	1.55	1.52	1.23	1.20	68.9	187.2	7.6	18.7	26
三島	1.66	1.45	1.26	1.06	63.6	177.4	8.3	22.4	26
佐久間	1.52	1.61	1.06	1.22	68.7	183.2	8.7	28.9	26
越木平	1.36	1.50	0.84	1.07	70.9	179.6	9.9	28.3	19
本川根	1.44	1.44	1.11	1.30	72.5	178.0	9.7	26.2	26
鍵穴	1.08	1.52	0.62	0.88	72.9	185.2	9.6	27.3	10
清水	1.45	1.39	1.03	1.03	72.2	193.6	8.5	25.3	24
網代	1.19	1.51	0.87	1.17	61.4	166.8	6.1	19.1	26
熊	1.55	1.67	1.16	1.44	72.9	190.6	10.7	34.9	25
高根山	1.17	1.30	0.90	1.10	73.5	184.7	6.9	19.5	16
静岡	1.47	1.47	1.03	1.15	72.5	193.4	8.6	24.7	26
三ヶ日	1.33	1.43	0.81	1.02	66.8	193.5	7.4	24.8	26
天竜	1.46	1.61	1.14	1.32	69.9	191.8	8.2	31.8	26
三倉	1.72	1.58	1.49	1.41	72.7	194.6	11.0	36.1	19
土肥	1.32	1.34	0.92	0.98	66.9	194.9	7.1	23.8	26
湯ヶ島	1.39	1.46	1.25	1.35	69.5	172.4	9.2	23.3	26
天城山	1.40	1.47	1.14	1.13	82.1	187.6	8.8	20.1	19
浜松	1.41	1.31	1.01	1.08	69.9	202.9	7.3	33.2	26
掛川	1.47	1.43	1.07	1.05	67.2	190.5	7.6	22.7	26
牧の原	1.51	1.27	1.05	0.81	72.4	197.6	10.3	27.6	23
松崎	1.68	1.46	1.44	1.42	69.0	195.1	8.0	26.2	26
稲取	1.47	1.55	1.26	1.15	71.2	190.3	8.4	24.2	26
福田	1.64	1.62	1.13	1.18	65.8	196.9	7.2	26.1	24
御前崎	1.30	1.39	0.92	1.19	70.3	194.5	6.2	20.2	26
石廊崎	1.28	1.20	0.85	0.76	68.1	195.9	7.9	24.1	26



地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	一宮	1.33	1.35	1.07	1.10	60.2	171.2	7.4	
八開	1.69	1.59	1.33	1.41	59.9	169.6	7.9	30.8	23
小原	1.46	1.56	0.94	1.09	60.6	178.1	7.0	27.2	24
稲武	1.49	1.53	1.27	1.30	62.5	168.9	9.3	31.1	23
蟹江	1.31	1.47	0.95	1.10	61.7	185.7	8.8	38.7	26
名古屋	1.35	1.52	0.93	1.10	63.1	192.4	9.4	38.7	26
豊田	1.60	1.63	1.26	1.32	60.3	188.3	8.6	35.5	23
東海	1.42	1.60	1.13	1.32	63.0	196.0	11.5	49.6	26
岡崎	1.43	1.47	1.13	1.29	60.6	186.9	6.4	29.2	26
作手	1.55	1.55	1.08	1.15	68.2	176.9	7.8	22.8	26
鳳来	1.49	1.48	0.95	1.20	66.4	179.8	8.1	29.9	23
西尾	1.26	1.46	0.95	1.25	60.0	187.5	5.3	28.4	26
蒲郡	1.51	1.55	1.05	1.35	65.5	194.3	8.1	28.8	23
南知多	1.34	1.47	1.12	1.27	62.7	191.0	10.8	41.3	26
豊橋	1.51	1.63	1.17	1.24	66.8	197.8	9.8	34.7	26
伊良湖	1.40	1.51	1.16	1.15	66.2	200.8	8.0	27.7	26
田原	1.41	1.45	1.06	1.23	66.0	197.1	7.7	33.7	26
北勢	1.49	1.53	1.24	1.21	62.6	164.6	8.3	28.6	26
桑名	1.54	1.67	1.15	1.20	63.3	189.2	9.4	36.0	26
四日市	1.43	1.60	1.03	1.19	60.7	174.0	6.3	23.7	26
龜山	1.36	1.62	0.81	1.15	61.2	169.2	7.1	27.6	26
上野	1.03	1.26	1.03	1.45	58.4	184.6	5.3	29.9	26
笠取山	1.30	1.28	0.86	0.96	58.3	149.2	5.7	22.3	11
津	1.53	1.44	1.13	1.22	61.1	179.7	9.6	38.7	25
名張	1.58	1.56	1.17	1.24	56.4	175.8	6.1	30.4	26
白山	1.57	1.60	1.20	1.06	60.1	171.6	9.0	29.9	22
小俣	1.47	1.42	1.14	1.09	64.9	183.0	9.6	30.7	26
粥見	1.57	1.70	1.04	1.14	65.6	178.7	10.3	29.9	26
鳥羽	1.40	1.51	1.05	1.14	77.0	208.6	9.0	26.0	24
藤坂峠	1.20	1.04	1.37	1.04	69.7	178.7	12.5	36.2	11
南勢	1.41	1.43	1.21	1.13	74.6	201.3	10.0	27.9	23
阿児	1.46	1.39	1.19	0.88	70.4	203.5	9.1	32.9	19
宮川	1.40	1.44	0.94	0.90	81.0	200.8	16.3	42.8	23
紀伊長島	1.47	1.43	1.20	1.24	78.6	205.2	13.1	39.2	23
尾鷲	1.51	1.42	1.30	1.19	90.0	217.0	13.6	36.4	26
御浜	1.32	1.35	1.18	1.15	80.3	199.4	12.0	33.1	16
熊野	1.61	1.54	1.20	1.17	70.6	187.6	9.3	29.0	25

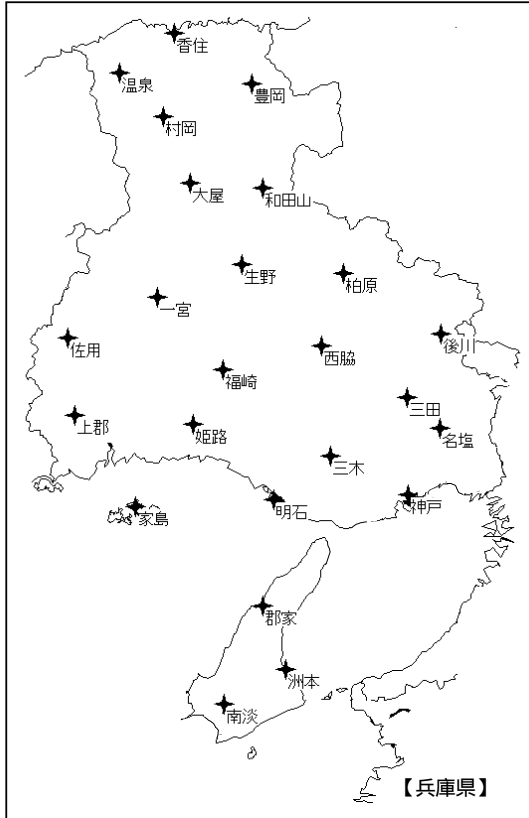


地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	柳ヶ瀬	1.53	1.46	1.04	1.09	58.4	173.7	6.0	
今津	1.47	1.53	1.02	1.09	51.8	164.0	7.3	27.5	26
虎姫	1.37	1.38	0.95	1.15	50.0	165.6	5.3	18.9	26
山東	1.43	1.41	1.08	1.33	56.6	181.8	7.5	39.6	26
南小松	1.39	1.59	1.07	1.12	58.0	178.8	7.5	23.7	23
彦根	1.30	1.21	0.88	1.09	55.0	182.4	7.4	36.0	26
近江八幡	1.51	1.59	1.05	1.13	56.4	166.6	5.7	24.0	25
蒲生	1.34	1.62	0.90	1.08	58.0	178.1	6.3	30.1	26
大津	1.47	1.54	0.94	1.21	61.4	184.4	5.7	21.0	24
信楽	1.53	1.59	1.16	1.10	57.0	168.1	5.1	20.2	23
土山	1.40	1.52	1.03	1.34	59.9	172.3	5.8	27.5	23
間人	1.21	1.43	0.79	1.00	51.3	173.7	5.3	16.2	23
峰山丹波	1.44	1.33	1.01	0.82	52.7	177.5	6.4	23.0	26
宮津	1.58	1.68	1.21	1.21	57.6	194.8	8.7	36.1	22
舞鶴	1.46	1.36	1.12	1.10	57.7	192.5	7.8	32.6	26
三岳	1.54	1.43	1.19	1.24	56.6	188.5	6.7	28.4	19
故屋岡	1.50	1.56	1.01	1.09	58.2	189.6	8.9	33.0	24
福知山	1.43	1.32	1.13	1.20	59.4	204.0	8.6	34.7	26
綾部	1.56	1.40	0.99	1.16	59.5	205.4	8.1	21.5	19
三和	1.40	1.47	1.09	1.23	63.8	219.6	9.7	37.4	18
和知	1.37	1.26	1.12	1.02	58.5	199.7	9.2	35.2	26
美山	1.39	1.37	1.14	1.04	58.5	190.4	7.7	28.3	23
須知	1.26	1.33	0.92	0.97	57.5	195.1	6.0	28.9	19
園部	1.53	1.68	1.04	1.17	60.6	200.7	9.1	36.5	23
京北	1.41	1.42	0.95	1.15	57.5	194.4	6.7	28.9	24
京都	1.49	1.51	1.10	1.13	61.9	187.6	7.3	22.7	26
長岡京	1.56	1.62	1.12	1.30	64.4	196.0	9.4	32.4	26
京田辺	1.45	1.57	0.91	0.97	59.5	189.1	6.7	27.3	25

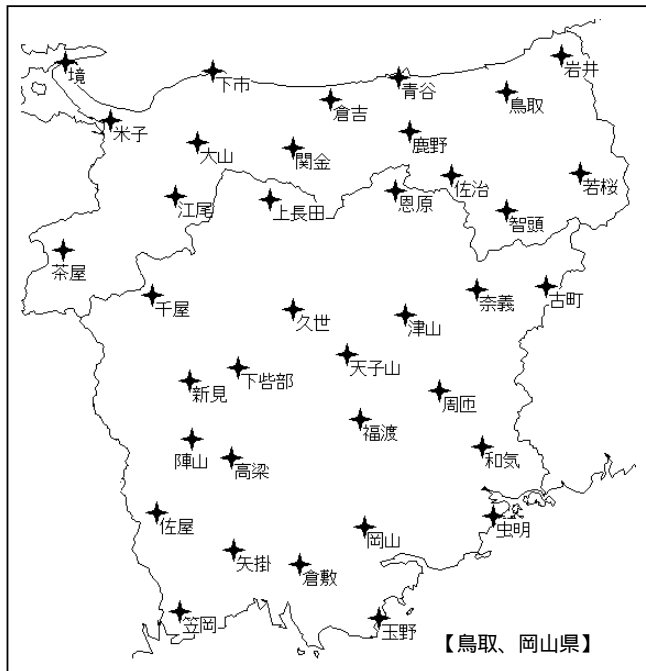


地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	奈良	1.42	1.26	1.04	1.08	58.3	188.0	5.5	
針	1.48	1.29	1.27	0.90	57.1	169.0	6.1	25.5	22
田原本	1.39	1.27	1.20	0.97	56.9	188.6	7.4	25.6	26
曾爾	1.51	1.56	0.95	1.35	61.7	178.6	7.1	35.4	25
当麻	1.37	1.73	0.98	1.28	57.2	185.1	7.0	36.6	11
大宇陀	1.45	1.49	0.88	1.03	57.1	170.9	4.6	21.9	23
五條	1.54	1.52	1.18	1.26	57.6	182.6	6.6	27.7	26
吉野	1.97	1.84	1.50	1.55	58.8	177.9	7.0	32.6	11
上北山	1.50	1.61	1.18	1.23	71.5	180.3	12.9	36.3	23
風屋	1.26	1.45	1.02	1.21	66.9	175.3	8.9	27.7	24
玉置山	1.31	1.75	1.54	1.89	69.5	168.7	9.7	26.5	11
能勢	1.29	1.35	0.91	1.00	58.9	182.8	8.2	28.8	25
箕面	1.47	1.26	1.24	1.16	61.8	192.4	12.2	46.5	26
枚方	1.48	1.61	1.08	1.27	57.9	179.5	9.0	31.3	26
豊中	1.57	1.46	1.30	1.37	58.5	192.7	10.4	64.5	26
大阪	1.55	1.61	1.07	1.20	56.7	180.0	9.0	35.7	26
生駒山	1.29	1.36	1.13	1.17	56.9	170.1	9.8	34.9	26
堺	1.59	1.76	1.03	1.20	53.0	170.0	9.8	35.2	25
河内長野	1.51	1.51	1.04	1.11	55.0	170.0	8.7	31.1	26
熊取	1.50	1.57	1.11	1.23	56.3	178.7	9.0	29.0	26
葛城山	1.82	2.03	1.31	1.46	57.4	181.7	7.6	35.2	11
かつらぎ	1.39	1.69	0.99	1.39	58.7	184.9	8.1	27.6	23
和歌山	1.44	1.48	1.05	1.05	62.4	206.9	9.7	33.2	26
高野山	1.46	1.31	1.04	0.88	63.0	176.6	7.4	25.4	26
湯浅	1.24	1.35	0.82	0.92	67.2	208.2	9.0	31.3	26
清水	1.34	1.63	1.05	1.19	66.5	185.4	7.9	25.7	26
龍神	1.27	1.35	1.11	1.14	71.3	179.5	7.9	25.1	25
御坊	1.42	1.51	0.93	0.93	65.6	205.5	8.1	21.0	21
本宮	1.39	1.33	1.23	1.19	70.3	175.7	8.3	24.9	26
栗栖川	1.25	1.32	0.91	1.20	74.0	198.2	9.6	35.1	26
新宮	1.43	1.41	1.34	1.21	78.0	192.9	8.8	25.4	26
白浜	1.57	1.56	1.12	1.03	69.0	206.9	9.6	31.9	26
西川	1.39	1.40	1.16	1.20	79.3	192.8	9.1	25.6	23
色川	1.34	1.44	1.14	1.24	80.2	191.7	8.8	23.5	23
白置川	1.49	1.44	1.22	1.23	74.7	206.8	8.1	21.7	26
潮岬	1.37	1.42	1.10	1.21	76.1	201.4	8.3	26.3	26

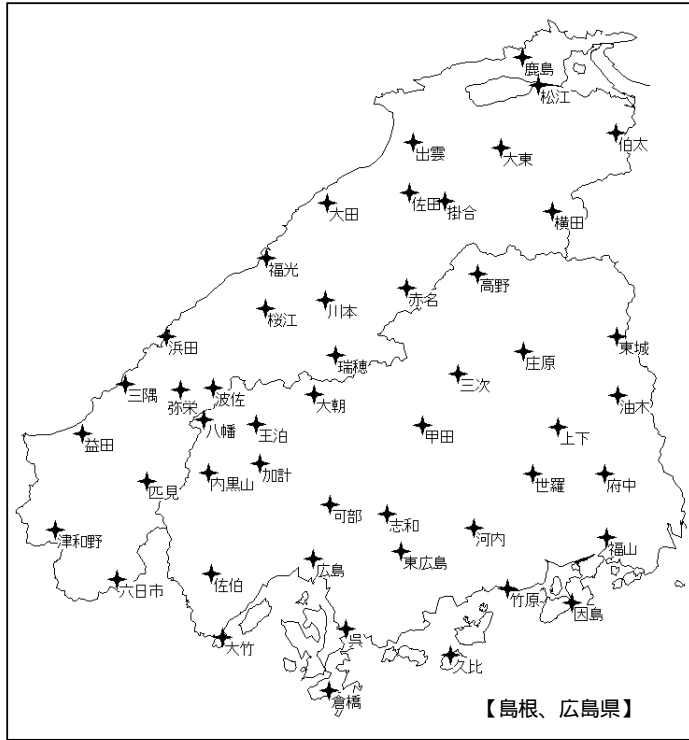




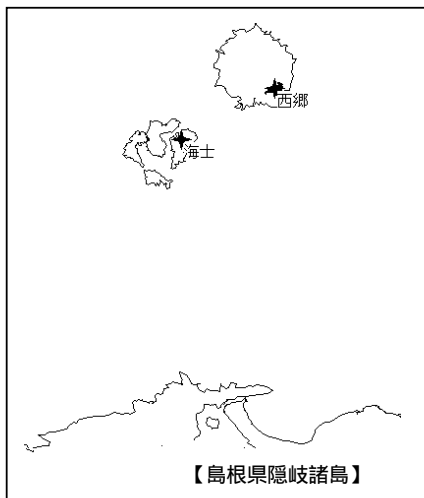
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
香住	1.68	1.62	1.22	1.26	51.1	160.7	8.5	34.7	26
温泉	1.27	1.25	0.98	0.84	51.1	152.2	7.2	22.6	26
豊岡	1.28	1.28	0.93	0.95	50.3	155.1	6.3	24.3	26
村岡	1.33	1.38	0.93	1.00	50.6	154.9	7.1	25.2	26
大屋	1.53	1.43	0.91	1.04	54.5	170.9	7.4	27.4	22
和田山	1.60	1.73	1.15	1.31	52.3	169.1	7.5	29.6	26
生野	1.43	1.35	1.06	1.03	64.4	176.2	6.6	23.1	22
柏原	1.21	1.32	1.13	1.18	61.7	187.4	8.5	34.2	23
佐用	1.32	1.36	0.88	1.07	55.2	169.2	6.7	23.2	19
一宮	1.38	1.50	0.96	1.13	62.3	178.0	8.5	32.9	26
福崎	1.31	1.51	0.98	1.24	54.4	162.4	5.8	18.4	24
西脇	1.31	1.40	0.88	1.10	59.3	184.4	8.3	39.7	22
後川	1.28	1.34	1.08	1.13	60.3	177.6	9.2	32.7	21
上郡	1.36	1.52	0.98	1.11	51.5	158.4	6.9	23.3	23
姫路	1.48	1.63	1.02	1.18	50.9	158.8	7.1	23.8	26
三田	1.60	1.52	1.24	1.17	54.3	172.7	6.2	27.0	26
名塩	1.29	1.21	0.96	1.04	61.5	189.4	9.3	33.6	24
三木	1.57	1.55	1.18	1.24	50.6	160.7	8.1	33.0	24
家島	1.20	1.34	1.33	1.47	51.4	173.5	15.9	69.2	26
明石	1.27	1.57	0.77	1.07	47.5	154.5	6.2	24.7	21
神戸	1.34	1.30	0.87	0.80	52.2	164.5	9.1	29.3	25
郡家	1.40	1.28	1.25	1.30	52.5	176.9	11.7	47.8	26
洲本	1.41	1.42	1.15	1.19	59.1	182.2	9.9	32.3	26
南淡	1.59	1.59	1.15	1.24	60.2	202.5	16.6	61.6	23



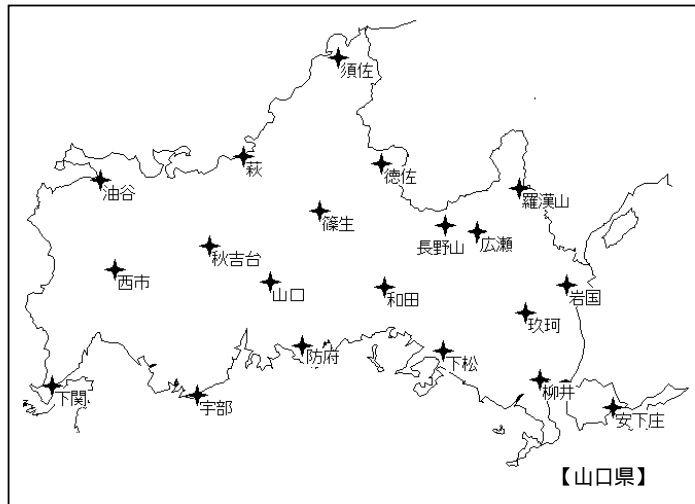
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
境	1.23	1.49	0.88	1.14	52.6	161.0	6.5	26.6	26
下市	1.52	1.53	1.01	1.08	52.6	162.8	6.4	25.1	24
青谷	1.57	1.41	1.36	1.20	52.9	163.2	7.1	29.7	23
岩井	1.47	1.61	1.20	1.23	52.6	158.8	7.7	26.9	26
米子	1.21	1.28	0.61	0.77	52.7	160.7	6.5	22.6	26
倉吉	1.58	1.63	1.14	1.28	53.4	168.2	8.5	36.6	26
鹿野	1.59	1.54	1.24	1.25	62.5	176.6	13.5	37.0	19
鳥取	1.53	1.42	1.09	1.02	51.2	158.1	6.8	23.2	26
大山	1.31	1.36	0.82	0.73	62.6	170.9	7.8	26.4	19
関金	1.59	1.58	1.11	1.19	54.5	163.5	8.0	27.3	24
佐治	1.40	1.30	1.04	1.11	56.1	164.0	7.0	20.3	19
若桜	1.35	1.61	0.93	1.18	53.2	162.6	6.4	25.3	24
江尾	1.20	1.42	0.78	1.08	52.6	166.2	7.8	24.3	19
智頭	1.26	1.42	0.89	1.17	53.3	160.3	6.4	26.8	26
茶屋	1.25	1.30	0.90	1.05	54.3	161.7	6.4	25.7	23
上長田	1.58	1.63	1.33	1.43	54.3	139.4	10.0	30.8	23
恩原	1.28	1.25	1.04	1.08	56.8	141.7	9.6	27.4	20
千屋	1.31	1.37	1.10	1.08	54.0	147.1	7.0	21.7	23
奈義	1.44	1.37	1.19	1.31	57.7	170.4	6.0	25.2	24
古町	1.24	1.42	0.89	1.16	58.6	167.8	7.5	29.3	26
久世	1.32	1.38	1.11	1.25	54.4	160.8	6.8	26.6	26
津山	1.39	1.42	1.19	1.28	58.0	174.8	10.0	35.9	26
新見	1.43	1.51	0.96	1.13	53.0	156.1	6.8	19.6	25
下皆部	1.06	1.25	1.00	1.39	53.4	163.3	8.6	32.3	25
天子山	1.11	1.36	0.70	0.91	52.8	166.4	11.3	40.4	11
周匝	1.19	1.32	0.80	0.91	52.1	162.6	7.3	22.8	23
陣山	1.45	1.77	1.03	1.21	49.1	150.7	5.8	15.8	11
福渡	1.49	1.58	1.07	1.14	53.6	166.0	7.9	29.0	23
和気	1.56	1.52	1.23	1.26	50.6	157.8	7.2	22.8	23
高梁	1.45	1.42	0.95	0.95	51.7	160.7	7.8	26.3	23
佐屋	1.30	1.51	0.85	1.19	53.2	163.7	7.8	32.6	25
天掛	1.39	1.48	0.87	0.91	50.2	158.3	7.0	24.2	23
岡山	1.59	1.47	1.02	1.16	49.9	160.8	5.7	29.6	26
虫明	1.48	1.66	1.43	1.39	50.7	163.9	10.9	40.4	25
倉敷	1.57	1.32	1.01	0.87	48.0	154.6	6.3	21.4	24
笠岡	1.33	1.31	1.02	1.00	47.3	151.6	5.5	13.6	25
玉野	1.43	1.52	0.90	1.08	46.2	150.2	6.8	21.0	26



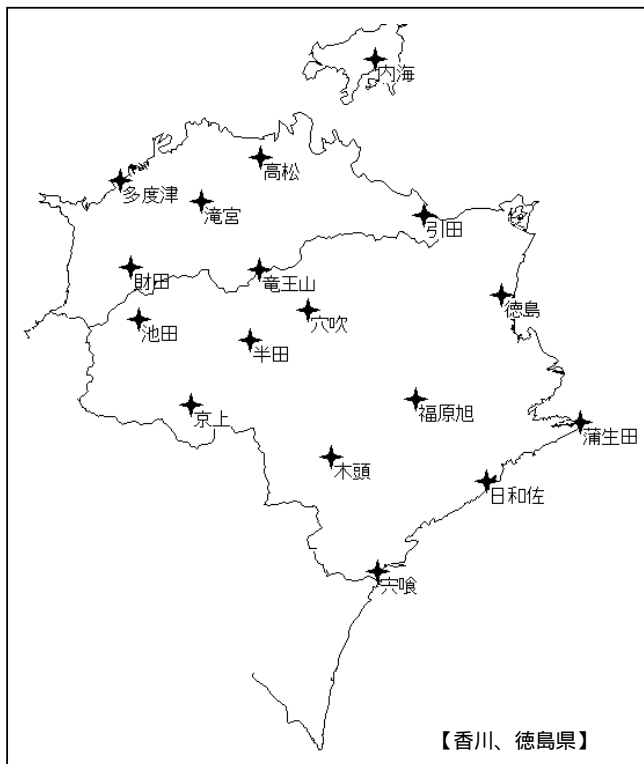
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	鹿島	1.70	1.58	1.31	1.34	54.4	172.1	10.1	
松江	1.59	1.51	1.03	0.94	52.7	160.2	7.1	21.7	26
出雲	1.55	1.53	1.09	1.22	54.8	169.5	8.8	29.2	23
大東	1.28	1.24	1.00	1.09	53.9	167.0	6.0	23.8	24
伯太	1.52	1.48	0.98	1.21	51.7	157.1	6.2	22.2	25
佐田	1.52	1.39	1.04	1.18	55.6	166.4	7.1	22.5	25
大田	1.54	1.45	1.13	1.13	54.1	167.4	7.4	27.9	26
掛合	1.18	1.15	0.76	0.86	54.7	162.6	7.0	21.9	23
横田	1.51	1.47	1.30	1.52	52.6	163.9	8.2	28.8	25
福光	1.35	1.39	0.81	0.88	53.9	168.8	6.9	24.5	23
赤名	1.21	1.18	0.90	0.98	55.7	164.5	7.7	23.8	23
接江	1.43	1.37	1.07	1.14	54.6	161.5	8.2	24.1	23
川本	1.50	1.47	1.07	1.15	55.8	172.2	7.1	28.8	26
浜田	1.61	1.44	1.27	1.21	56.3	176.3	12.3	46.6	26
瑞穂	1.34	1.46	1.09	1.35	55.9	169.2	7.3	24.8	23
三隅	1.70	1.62	1.19	1.34	58.4	182.9	14.7	55.6	22
弥栄	1.54	1.71	1.12	1.31	61.1	179.5	11.2	35.9	23
波佐	1.54	1.65	1.11	1.30	61.9	182.3	10.9	37.3	24
益田	1.43	1.47	1.09	1.23	56.1	176.3	11.2	37.7	23
匹見	1.31	1.30	0.85	1.29	56.6	170.4	7.0	22.9	24
津和野	1.55	1.49	1.06	1.07	56.9	171.4	8.1	24.4	26
六日市	1.52	1.40	1.10	0.86	60.2	169.6	7.3	23.2	23
高野	1.57	1.49	1.19	1.15	53.7	141.7	7.6	22.4	26
三次	1.18	1.13	0.76	0.84	56.5	164.6	8.8	25.9	23
庄原	1.24	1.25	0.97	1.09	53.7	156.7	7.6	27.2	26
東城	1.18	1.33	1.01	1.48	55.1	160.6	8.4	32.0	25
八幡	1.48	1.51	1.00	1.17	59.6	151.0	8.2	22.6	23
大朝	1.66	1.60	1.17	1.15	55.2	150.2	8.5	27.3	26
油木	1.15	1.38	0.89	1.09	54.4	161.0	7.3	23.7	23
玉泊	1.53	1.61	1.13	1.20	56.9	151.2	9.2	26.5	23
加計	1.29	1.57	0.79	1.03	60.8	167.6	8.2	27.9	26
甲田	1.36	1.35	0.84	0.90	57.8	168.9	8.8	25.7	21
上下	1.43	1.56	1.00	1.19	55.6	167.4	9.1	28.6	25
内黒山	1.51	1.54	1.13	1.09	54.0	135.7	9.0	25.5	11
可部	1.39	1.37	1.04	1.11	61.3	172.9	7.8	21.8	21
世羅	1.41	1.11	0.94	0.97	54.0	164.9	6.1	19.0	24
府中	1.11	1.34	0.68	1.07	52.8	161.9	7.1	28.2	23
志和	1.45	1.63	1.01	1.22	57.2	165.5	7.2	20.2	24
東広島	1.48	1.58	0.96	1.07	57.2	170.4	7.7	24.3	26
河内	1.50	1.40	1.15	1.07	55.6	166.6	7.5	19.1	20
福山	1.34	1.32	0.92	0.86	49.0	154.1	6.9	17.0	26
佐伯	1.44	1.49	1.18	1.20	63.7	174.6	10.5	34.2	22
広島	1.30	1.35	0.90	0.90	57.3	168.0	7.0	18.8	26
竹原	1.32	1.37	0.88	0.85	51.3	160.0	6.4	16.5	24
因島	1.31	1.47	0.99	0.99	46.3	147.1	7.5	17.9	26
大竹	1.65	1.71	1.21	1.23	61.2	176.9	7.4	23.1	26
呉	1.20	1.34	0.79	0.85	56.3	169.6	8.1	26.3	25
倉橋	1.52	1.32	1.06	0.81	54.3	164.0	6.8	17.2	26
久比	1.58	1.44	1.01	0.91	53.4	162.5	7.9	23.2	25



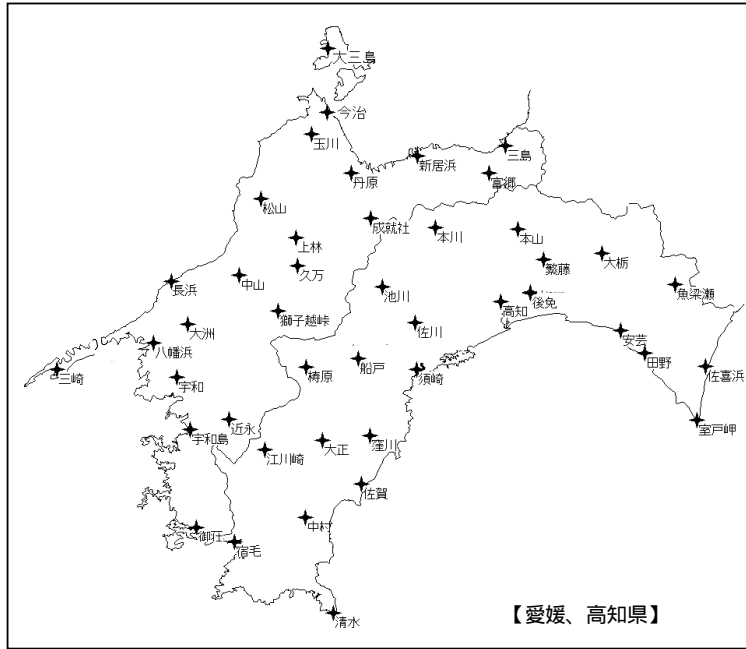
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R> [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	西郷	1.45	1.44	1.21	1.16	55.0	175.4	8.5	
海士	1.52	1.44	1.45	1.30	54.4	174.7	8.9	28.6	23



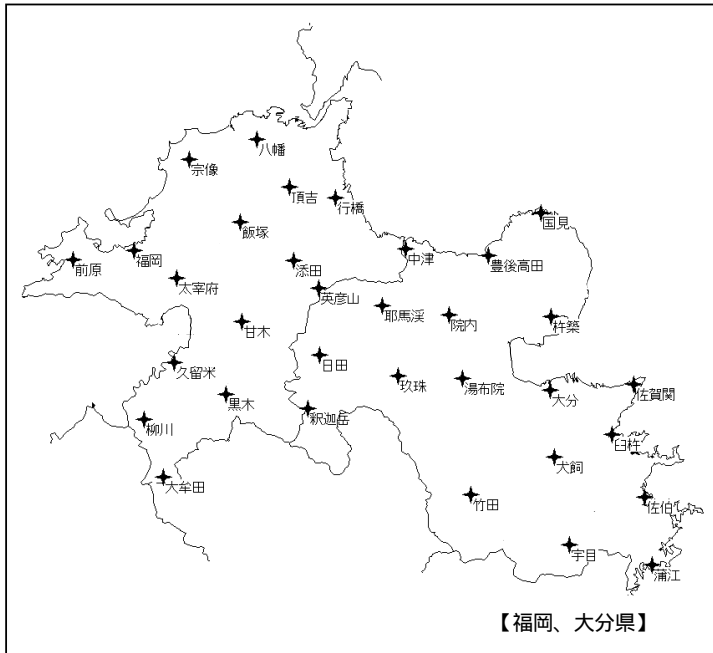
地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	須佐	1.47	1.44	1.04	1.32	57.7	179.2	8.0	
秋	1.58	1.53	1.16	1.17	58.1	181.1	11.9	40.5	26
油谷	1.55	1.59	1.15	1.21	60.1	183.3	10.2	32.6	26
篠生	1.52	1.52	1.02	1.14	66.4	179.5	10.6	32.9	21
徳佐	1.52	1.35	1.03	0.93	60.4	163.4	8.6	24.1	26
羅漢山	1.19	1.17	0.82	1.08	66.5	175.8	9.2	29.1	18
秋吉台	1.53	1.49	0.97	0.98	66.3	183.6	9.0	27.1	26
長野山	1.31	1.42	0.91	1.12	63.0	161.5	7.2	16.0	17
広瀬	1.33	1.49	0.82	0.89	66.4	178.4	7.2	23.8	26
西市	1.44	1.63	0.94	1.16	65.6	183.7	9.8	29.3	26
山口	1.36	1.35	0.83	0.97	65.6	185.6	8.9	27.1	26
和田	1.57	1.53	1.31	1.19	68.8	188.6	7.9	22.6	23
岩国	1.47	1.55	0.92	1.14	59.7	166.8	5.9	17.6	25
防府	1.52	1.38	1.01	0.92	63.0	185.5	9.1	23.6	26
下松	1.67	1.59	1.29	1.17	63.8	180.5	8.8	23.3	26
玖珂	1.49	1.45	1.04	1.03	62.8	173.7	7.9	20.0	24
下関	1.61	1.54	1.23	1.20	62.8	182.8	8.3	23.3	26
宇部	1.68	1.57	1.23	1.28	60.8	181.2	9.9	29.6	26
柳井	1.64	1.40	1.23	1.08	61.3	175.7	8.8	23.3	26
安下庄	1.63	1.54	1.04	0.88	59.6	168.8	8.2	21.7	25



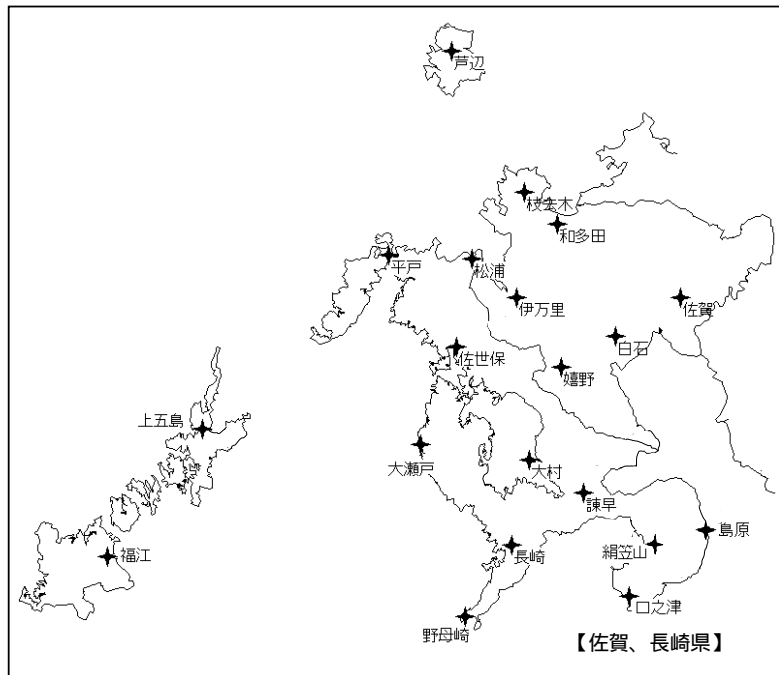
地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	内海	1.17	1.18	1.46	1.39	51.9	169.2	17.5	
高松	1.44	1.45	1.05	1.08	50.6	165.8	8.1	27.1	26
多度津	1.36	1.56	0.92	1.26	48.0	154.2	6.3	23.6	26
滝宮	1.49	1.54	1.05	1.06	50.1	161.9	9.5	31.5	24
引田	1.33	1.27	1.07	0.98	59.2	195.7	15.7	51.4	26
財田	1.50	1.35	1.13	1.02	50.6	161.5	8.3	28.9	23
竜王山	1.44	1.49	1.09	0.96	53.5	165.5	10.1	29.1	19
池田	1.41	1.62	0.88	1.12	55.6	169.2	10.0	33.5	26
穴吹	1.37	1.38	1.07	0.96	58.3	188.6	13.9	44.1	26
徳島	1.40	1.33	0.91	0.83	68.3	215.3	16.0	47.1	26
半田	1.37	1.41	1.00	1.03	58.7	176.6	12.0	39.1	23
京上	1.34	1.35	0.85	0.90	74.0	204.0	13.7	38.6	23
福原旭	1.52	1.54	1.04	1.06	90.7	244.9	18.2	49.7	25
蒲生田	1.40	1.25	1.08	0.99	78.8	237.0	14.0	44.8	24
木頭	1.42	1.48	0.94	0.95	82.2	210.8	15.4	39.6	23
日和佐	1.58	1.57	1.19	1.17	94.5	269.2	16.7	51.3	26
六喰	1.51	1.40	1.14	0.96	97.2	259.8	13.2	35.8	26



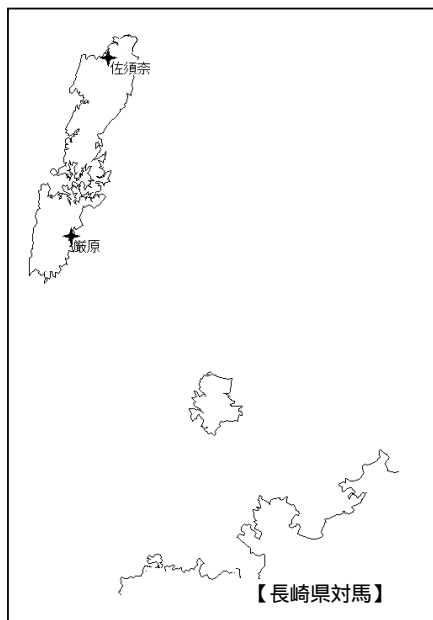
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
大三島	1.46	1.55	1.05	1.03	47.0	146.4	6.4	16.7	26
玉川	1.36	1.24	0.83	0.89	54.8	161.0	8.6	25.0	25
今治	1.43	1.33	0.97	0.83	50.1	154.8	6.4	15.9	25
丹原	1.65	1.55	1.11	1.11	54.4	162.3	9.2	25.9	25
新居浜	1.53	1.54	1.17	1.13	54.3	167.3	12.3	35.3	26
三島	1.50	1.64	1.00	1.13	54.3	168.5	9.5	26.8	23
富郷	1.49	1.57	1.00	1.01	67.8	193.3	12.9	38.6	23
松山	1.43	1.44	0.90	0.88	53.6	163.3	8.1	25.0	26
上林	1.12	0.96	0.64	0.50	59.4	170.2	9.3	23.5	11
成就社	1.62	1.60	1.27	1.24	69.9	179.5	15.8	39.5	21
長浜	1.44	1.55	0.95	0.98	57.5	175.7	9.9	31.8	25
中山	1.16	1.27	0.75	0.90	57.4	161.8	8.1	23.0	25
久万	1.34	1.37	0.95	0.90	57.8	154.8	8.0	20.2	26
大洲	1.33	1.56	0.79	1.10	58.0	164.5	6.5	18.6	25
獅子越峠	1.07	1.34	0.66	1.00	66.7	178.7	9.9	28.7	11
八幡浜	1.29	1.37	0.76	0.82	57.1	165.9	7.8	20.2	25
三崎	1.48	1.60	0.99	1.18	61.0	184.5	15.8	52.9	19
宇和	1.45	1.51	0.83	0.89	65.1	184.0	9.9	29.6	25
宇和島	1.59	1.71	1.03	1.17	60.8	176.7	11.4	34.5	26
近永	1.63	1.68	1.17	1.17	64.2	174.9	10.2	26.7	22
御荘	1.41	1.43	1.13	1.26	66.2	188.2	10.7	29.5	26
本川	1.41	1.42	0.99	0.97	76.5	189.8	11.5	28.9	22
本山	1.31	1.37	0.70	0.74	80.7	214.9	14.2	39.1	25
池川	1.47	1.44	1.04	1.09	74.3	188.8	11.9	31.1	24
繁藤	1.48	1.39	1.04	0.97	91.8	241.4	16.8	40.6	21
大板	1.41	1.40	1.08	1.13	79.5	207.8	9.0	21.2	24
魚梁瀬	1.07	1.07	0.57	0.60	91.1	221.4	12.4	33.3	21
佐川	1.41	1.37	0.95	0.93	78.6	202.3	10.1	24.2	26
高知	1.48	1.46	1.19	1.17	85.7	233.0	16.8	47.1	26
後免	1.44	1.42	1.36	1.29	80.0	222.6	15.4	43.6	23
船戸	1.43	1.40	0.96	0.95	77.0	188.2	15.3	36.5	25
安芸	1.36	1.28	0.99	0.92	74.5	212.9	10.2	30.9	26
田野	1.40	1.35	1.11	1.00	74.1	216.3	9.5	25.3	26
橋原	1.47	1.47	1.01	1.01	69.0	176.9	10.5	27.8	24
須崎	1.57	1.66	1.03	1.06	80.4	213.2	12.0	30.8	26
佐喜浜	1.61	1.60	1.06	1.04	95.0	244.1	12.2	31.4	26
窪川	1.38	1.41	0.81	0.84	82.8	210.7	12.1	29.4	24
室戸岬	1.64	1.62	1.19	1.18	81.1	224.4	11.4	31.9	26
江川崎	1.40	1.37	1.00	0.98	68.1	180.9	10.0	24.2	24
大正	1.29	1.40	1.12	1.19	72.8	185.8	11.8	31.7	21
佐賀	1.55	1.44	1.08	0.96	80.6	211.8	11.3	26.2	24
宿毛	1.34	1.27	1.12	1.00	69.3	195.0	8.6	23.6	25
中村	1.29	1.39	0.92	0.94	77.0	201.0	10.2	28.4	26
清水	1.43	1.41	1.22	1.28	81.7	221.5	13.0	32.2	26



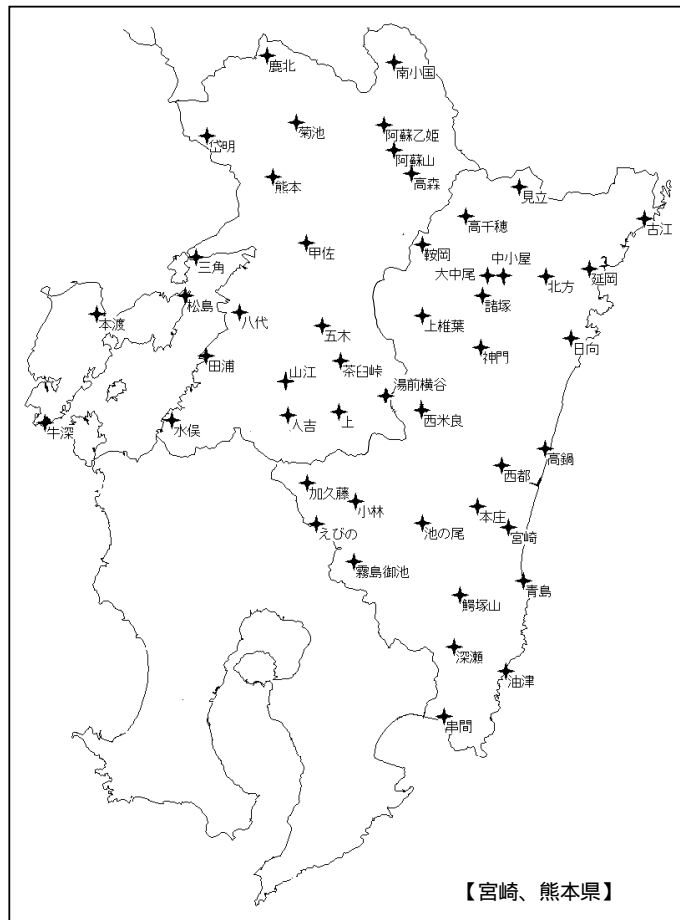
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
宗像	1.55	1.48	1.29	1.39	63.6	182.8	8.4	24.2	26
八幡	1.57	1.50	1.13	1.10	66.5	191.3	7.6	23.6	26
頂吉	1.58	1.57	1.02	1.10	69.4	185.1	8.6	25.2	25
行橋	1.60	1.64	1.08	1.20	63.3	178.1	8.7	23.3	26
飯塚	1.53	1.52	0.93	1.00	67.0	190.4	8.6	22.9	26
前原	1.57	1.42	1.33	1.31	68.4	198.9	15.4	44.9	26
福岡	1.64	1.45	1.28	1.21	66.4	194.0	9.1	23.9	26
太宰府	1.42	1.44	0.97	1.14	69.5	203.2	9.3	25.4	24
添田	1.51	1.57	1.06	1.14	68.5	192.0	10.2	32.6	26
甘木	1.46	1.58	0.93	1.04	70.0	199.1	8.3	22.3	26
英彦山	1.48	1.24	0.86	0.64	67.1	174.8	6.1	13.5	15
久留米	1.45	1.30	0.95	0.83	71.1	203.7	8.8	24.5	26
黒木	1.51	1.50	0.98	1.07	74.0	208.8	10.0	30.3	26
柳川	1.51	1.58	1.08	1.21	71.8	213.6	9.7	28.6	26
大牟田	1.32	1.47	0.87	0.99	76.2	222.3	11.3	36.2	26
国見	1.45	1.49	0.93	1.00	60.3	174.9	8.7	23.3	24
中津	1.42	1.36	1.25	1.24	60.2	174.4	7.8	20.6	26
豊後高田	1.53	1.29	1.18	1.00	58.4	172.5	7.5	21.5	26
耶馬溪	1.27	1.27	0.96	0.94	64.0	175.2	6.8	15.7	26
院内	1.37	1.33	0.87	0.85	60.5	171.4	7.8	19.7	25
杵築	1.36	1.47	0.83	1.05	58.5	170.8	7.9	18.5	24
日田	1.49	1.55	0.93	0.97	67.3	189.9	7.9	23.3	26
玖珠	1.54	1.49	0.95	1.04	64.7	181.7	7.5	21.7	26
湯布院	1.45	1.27	0.97	0.76	66.0	182.6	9.1	25.6	26
大分	1.37	1.39	1.11	1.12	63.3	181.5	11.1	30.2	26
佐賀関	1.74	1.82	1.19	1.30	62.2	181.2	10.7	30.1	26
釈迦岳	1.67	1.77	1.60	1.53	82.5	205.0	10.1	27.5	10
臼杵	1.73	1.76	1.28	1.28	63.5	179.9	11.0	27.3	26
犬飼	1.38	1.30	1.07	1.23	63.1	178.4	10.6	31.5	26
竹田	1.42	1.38	0.95	0.95	62.7	173.7	7.9	18.3	26
宇目	1.49	1.40	1.09	1.18	68.2	188.3	10.5	29.2	26
宇目	1.56	1.53	1.15	1.09	68.4	182.1	11.0	26.9	24
蒲江	1.42	1.40	1.08	1.02	76.4	207.9	12.0	33.3	26



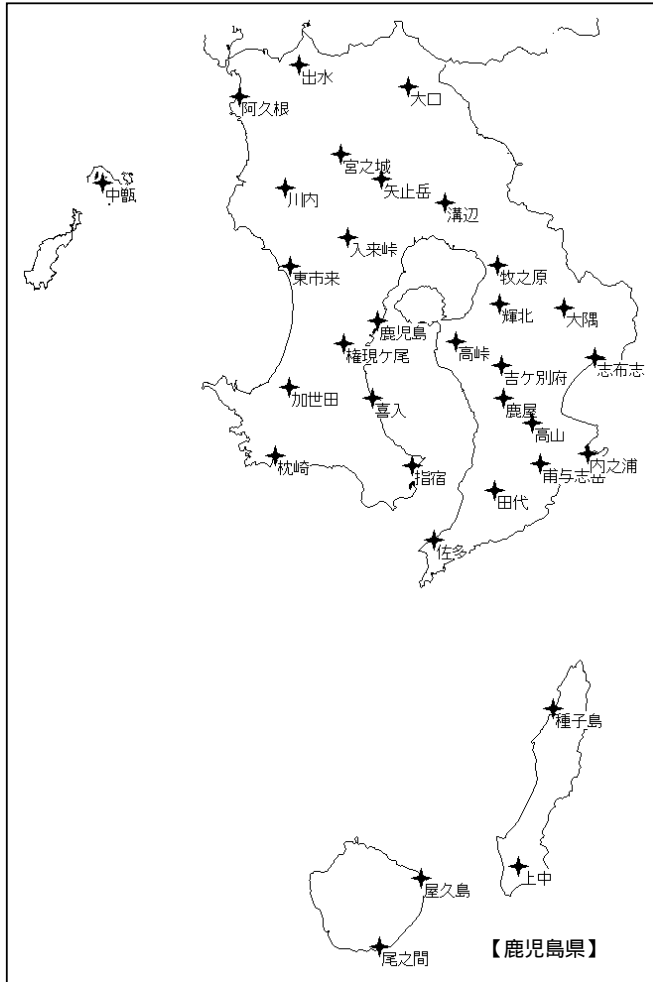
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
枝去木	1.59	1.65	1.06	1.21	71.8	206.2	9.3	25.3	26
和多田	1.58	1.50	1.24	1.12	77.1	222.7	10.8	31.2	26
伊万里	1.43	1.43	0.83	0.91	78.6	221.1	8.9	23.7	26
佐賀	1.21	1.29	0.74	1.12	73.8	214.5	8.7	28.7	26
嬭野	1.44	1.47	0.87	0.92	80.6	223.4	9.7	27.1	26
白石	1.56	1.59	1.03	1.09	71.0	204.4	8.3	22.1	26
芦辺	1.58	1.62	1.08	1.12	74.1	216.4	13.4	39.3	24
平戸	1.57	1.67	0.97	1.04	81.0	230.8	13.1	38.3	26
松浦	1.39	1.43	1.04	1.15	80.7	235.1	13.2	37.0	26
佐世保	1.30	1.43	0.87	1.14	79.9	235.3	11.2	38.9	26
上五島	1.36	1.46	1.01	1.13	80.5	232.1	12.1	36.0	21
大瀬戸	1.57	1.54	0.99	1.11	73.6	224.5	11.6	35.3	26
大村	1.66	1.69	1.01	1.14	75.0	223.4	12.0	36.8	25
諫早	1.85	1.80	1.46	1.40	83.3	237.7	15.9	50.2	26
長崎	1.56	1.52	1.29	1.31	78.5	232.8	16.0	54.3	26
網笠山	1.35	1.44	1.03	1.08	81.5	215.6	9.6	24.8	24
島原	1.53	1.48	1.37	1.42	77.5	218.9	14.7	48.1	26
福江	1.47	1.43	1.11	1.04	83.9	234.0	10.0	31.8	26
口之津	1.50	1.54	0.98	1.15	73.3	219.2	10.8	32.8	26
野母崎	1.22	1.38	0.84	0.89	69.8	212.5	11.0	33.1	10



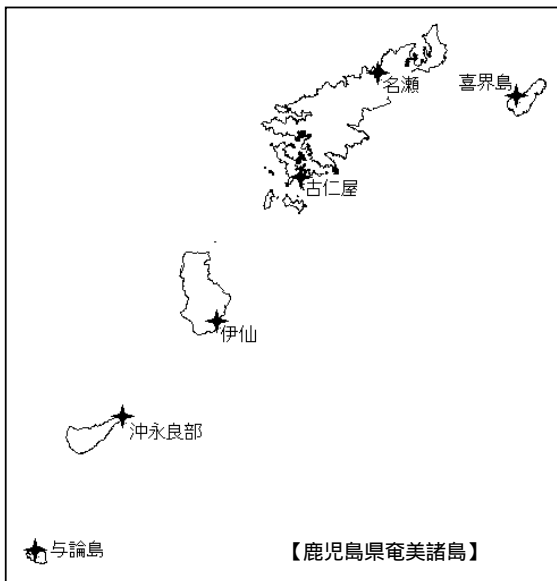
地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 σ <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
佐須奈	1.54	1.63	1.16	1.30	71.9	209.3	10.8	30.8	18
敏原	1.55	1.59	1.11	1.08	75.6	213.2	10.4	29.3	26



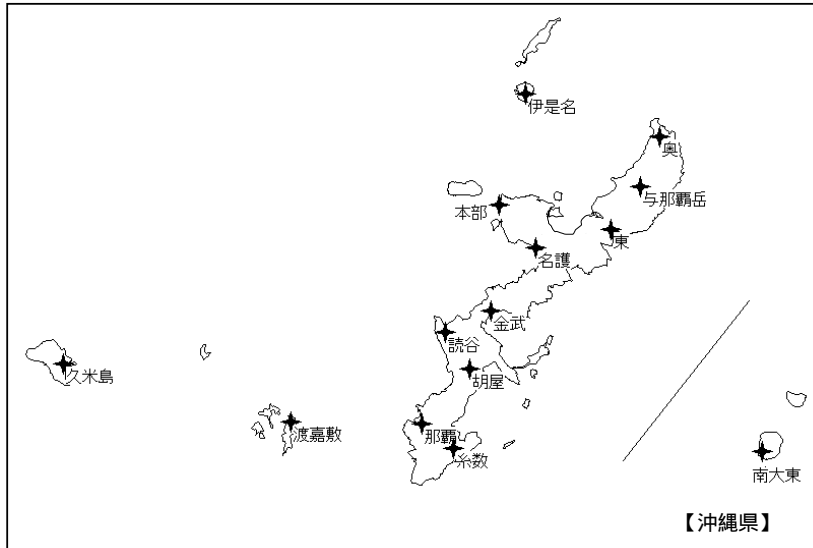
地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	高千穂	1.66	1.79	1.16	1.21	69.4	184.2	9.9	
見立	1.63	1.64	1.32	1.35	74.9	191.5	17.6	43.4	23
古江	1.52	1.49	0.97	0.87	74.9	201.9	11.1	29.1	24
鞍岡	1.48	1.49	1.00	0.97	68.9	180.6	6.2	19.9	23
中小屋	1.64	1.48	1.13	0.97	71.4	177.2	10.4	25.5	22
諸塚	1.80	1.75	1.27	1.22	72.4	186.0	13.0	33.4	22
北方	2.21	2.05	1.73	1.60	73.2	192.2	8.7	17.8	14
延岡	1.29	1.32	0.81	0.96	71.7	190.7	9.4	26.0	26
上椎葉	1.29	1.08	1.05	1.04	69.8	173.9	8.8	18.5	14
日向	1.42	1.40	0.91	0.89	73.7	194.6	8.4	21.6	26
神門	1.68	1.66	1.21	1.22	76.5	191.8	11.6	29.1	22
西米良	1.61	1.58	1.11	1.23	73.0	184.2	11.3	28.6	23
高鍋	1.63	1.57	1.15	1.14	72.0	192.3	10.2	27.7	25
加久藤	1.59	1.59	1.20	1.18	76.7	202.5	9.5	22.8	26
西都	1.79	1.78	1.20	1.27	71.8	187.5	10.4	25.8	26
えびの	1.56	1.62	1.08	1.14	94.9	226.4	15.1	33.5	26
小林	1.50	1.56	1.13	1.01	72.2	186.8	8.7	19.9	26
池の尾	1.74	1.81	1.26	1.23	68.8	179.3	10.6	23.1	20
本庄	1.56	1.58	1.12	1.19	72.8	191.9	11.2	28.5	26
宮崎	1.58	1.59	0.96	1.09	76.5	203.5	12.8	36.9	26
霧島御池	1.40	1.41	1.08	1.04	72.7	187.7	9.3	23.1	17
青島	1.54	1.52	1.28	1.29	80.5	208.4	12.1	34.0	26
都城	1.34	1.16	1.02	0.98	76.9	206.1	8.2	21.0	26
鱈塚山	1.33	1.36	0.67	0.73	74.3	187.3	9.3	21.8	20
深瀬	1.43	1.28	0.99	1.01	83.7	208.0	9.8	22.6	22
油津	1.66	1.69	1.17	1.21	78.7	207.8	9.3	24.4	26
串間	1.56	1.53	1.12	1.08	73.3	198.3	8.0	21.4	26
鹿北	1.25	1.41	0.74	0.86	78.0	217.4	11.2	30.6	26
南小国	1.35	1.51	0.92	1.08	71.0	187.9	8.8	23.9	26
岱明	1.77	1.64	1.23	1.07	73.3	216.6	10.6	27.5	26
菊池	1.43	1.57	0.88	1.08	75.0	217.5	9.5	28.2	26
阿蘇乙姫	1.35	1.44	0.90	1.00	77.6	200.7	11.4	26.4	24
熊本	1.54	1.51	0.98	1.05	75.4	217.4	9.1	26.1	26
阿蘇山	1.60	1.47	0.97	0.83	76.8	190.4	10.5	22.5	26
高森	1.38	1.39	0.97	0.85	70.2	184.0	9.1	24.1	26
三角	1.64	1.70	1.13	1.23	71.0	207.6	10.6	31.5	26
甲佐	1.28	1.37	0.87	0.90	72.8	204.5	9.9	28.9	26
松島	1.48	1.67	0.95	1.04	72.2	205.4	9.3	26.3	26
本渡	1.42	1.47	1.02	1.04	73.2	203.4	9.2	24.0	26
八代	1.34	1.31	0.80	0.78	74.4	213.5	8.7	25.1	26
五木	1.50	1.46	1.13	1.24	73.8	187.1	7.4	19.5	20
田浦	1.43	1.39	1.04	1.03	78.3	223.0	11.1	28.5	26
山江	0.96	1.22	0.60	0.88	75.3	197.0	10.8	25.6	11
水俣	1.51	1.30	0.96	0.85	77.7	220.7	10.0	27.1	26
人吉	1.43	1.30	0.89	0.84	74.1	198.6	9.4	23.8	26
上	1.34	1.50	0.83	1.00	76.0	205.1	9.6	24.2	24
湯前横谷	1.23	1.36	0.82	0.92	76.5	193.3	7.9	17.7	15
牛深	1.29	1.36	0.92	1.10	77.9	225.1	8.2	24.9	26



地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
阿久根	1.26	1.36	0.96	1.06	80.4	231.3	11.1	32.0	26
出水	1.48	1.51	1.06	1.08	76.3	222.8	12.0	32.0	26
大口	1.54	1.50	0.91	0.93	80.1	214.8	9.4	26.8	26
宮之城	1.37	1.41	0.97	0.99	83.5	225.8	8.9	24.0	26
中甌	1.53	1.48	1.10	1.05	83.2	232.8	9.9	27.8	26
川内	1.45	1.47	1.09	1.18	81.0	223.9	11.1	32.8	25
矢止岳	1.50	1.38	1.04	0.91	78.5	206.9	9.2	24.0	20
溝辺	1.37	1.29	1.03	0.90	80.4	216.4	11.4	28.6	24
入来峠	1.31	1.45	1.06	1.11	71.9	198.6	11.8	32.6	18
東市来	1.28	1.28	0.83	0.84	81.1	229.8	9.2	29.8	26
牧之原	1.55	1.49	1.08	1.03	80.2	212.5	8.9	22.5	26
権現ヶ尾	1.39	1.26	0.93	0.93	80.6	213.0	9.8	23.9	21
鹿兒島	1.39	1.38	1.01	1.05	79.3	219.3	10.1	29.5	26
高峯	1.29	1.24	0.82	0.83	83.1	221.4	10.5	26.6	21
輝北	1.47	1.55	0.95	1.07	78.0	201.6	7.1	20.3	24
大隅	1.27	1.17	0.80	0.84	73.2	194.3	8.7	19.9	24
加世田	1.45	1.27	1.08	0.90	80.1	222.7	10.9	27.9	26
吉ヶ別府	1.71	1.60	1.08	0.98	84.2	219.5	10.7	29.8	24
志布志	1.44	1.42	1.08	1.15	73.3	197.9	8.6	21.6	26
喜入	1.53	1.42	0.98	0.96	78.9	211.4	9.3	23.7	25
鹿屋	1.56	1.40	1.24	1.08	80.5	221.6	10.6	24.2	24
高山	1.51	1.63	0.89	1.03	77.8	208.8	8.4	23.8	26
枕崎	1.48	1.40	1.16	1.12	81.4	232.0	11.2	32.0	26
指宿	1.61	1.58	1.19	1.18	80.9	223.0	10.1	29.3	26
南与志岳	1.41	1.34	1.07	1.05	82.9	204.0	7.8	21.2	21
内之浦	1.46	1.54	0.98	1.03	83.0	213.0	11.2	30.4	26
田代	1.45	1.45	0.94	1.01	79.9	211.0	9.9	28.0	24
佐多	1.37	1.35	0.94	0.94	83.5	237.0	10.0	25.8	24
種子島	1.25	1.21	1.06	1.15	80.4	221.1	11.2	31.7	26
上中	1.11	1.10	0.69	0.74	88.8	233.5	12.5	33.9	26
屋久島	1.48	1.46	1.04	1.06	95.7	228.6	14.9	39.0	26
尾之間	1.50	1.43	1.21	1.35	88.9	227.4	12.2	35.0	26

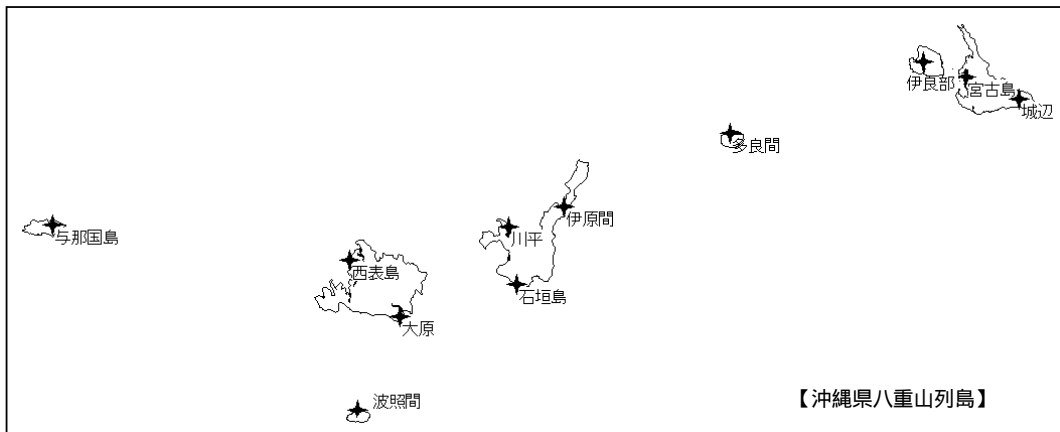


地点名	安全係数の近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
名瀬	1.32	1.23	0.89	0.83	82.1	212.7	11.1	28.7	26
喜界島	1.69	1.69	1.30	1.26	78.3	230.5	13.0	33.5	23
古仁屋	1.20	1.00	1.45	1.49	86.1	245.9	25.8	91.6	26
伊仙	1.59	1.50	1.09	1.00	77.6	225.2	10.4	26.9	24
沖永良部	1.38	1.34	0.96	0.92	81.6	242.6	12.2	35.6	26
与論島	1.50	1.42	1.16	1.18	78.8	241.9	13.3	37.7	23



【沖縄県】

地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	伊是名	1.38	1.59	0.95	1.15	80.1	241.1	12.0	
奥	1.33	1.17	1.19	1.06	80.3	217.3	10.6	27.1	26
与那覇岳	1.65	1.67	1.34	1.40	86.4	222.4	14.8	40.1	26
本部	1.42	1.49	0.99	1.08	85.4	250.9	11.5	31.9	20
東	1.37	1.36	1.29	1.16	81.1	232.4	10.6	28.5	20
名護	1.34	1.26	1.16	1.16	79.0	225.1	11.4	31.0	26
読谷	1.22	1.15	1.13	1.03	79.1	238.1	7.8	23.7	26
金武	1.44	1.48	1.36	1.29	80.4	238.5	8.9	27.5	26
久米島	1.32	1.42	0.93	0.98	88.4	257.9	12.4	34.9	24
胡屋	1.27	1.21	1.04	0.99	87.1	257.8	10.0	29.7	26
波嘉敷	1.08	1.13	0.91	1.22	86.4	250.2	11.1	30.9	23
那覇	1.37	1.46	1.23	1.27	86.2	257.8	12.7	37.4	26
糸数	1.32	1.42	1.03	1.13	79.8	235.7	11.3	30.2	26
南大東	1.06	1.26	0.74	1.01	77.9	243.7	9.4	29.9	22



【沖縄県八重山列島】

地点名	安全係数の 近似式の係数 C <sub>1</sub>		安全係数の 近似式の係数 C <sub>2</sub>		降雨強度の 平均値 <R <sub>p</sub> > [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 R <sub>p</sub> [mm/h]		最大 MTBF y [年]
	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	0.01%	0.0001%	
	伊良部	1.39	1.49	1.00	1.16	82.3	252.1	9.7	
宮古島	1.27	1.42	0.80	0.92	86.3	253.9	10.2	33.0	24
城辺	1.38	1.57	0.93	1.05	88.0	265.4	10.3	34.7	23
多良間	1.40	1.52	1.38	1.41	94.1	291.0	16.8	62.3	23
伊原間	1.29	1.39	0.97	1.08	91.2	266.5	11.5	33.3	24
与那国島	1.52	1.36	1.13	0.93	89.0	252.9	12.4	30.3	23
川平	1.33	1.19	0.96	0.87	91.9	266.4	12.5	36.0	23
西表島	1.29	1.37	0.86	0.97	87.5	246.6	11.3	30.5	23
石垣島	1.42	1.45	0.88	1.10	91.1	272.8	10.7	32.1	24
大原	1.22	1.39	0.83	1.01	89.6	262.0	12.8	42.5	23
波照間	1.33	1.53	0.91	1.16	86.9	274.2	16.1	49.3	22



## 第10章 結論

本論文は、10GHz 帯程度以上の降雨減衰の影響が無視できない周波数帯を用いた無線通信システムの回線設計において必要となる降雨減衰確率推定法について、既存のものは1970年代に取りまとめられたものに若干の改善が加えられながら使用されてきており、近年の多様化する無線通信システムへの適用を考えた場合に適合性が十分とは言えない状況にありうること、また最近の地球温暖化現象等に代表される気象条件の変化によって雨の降り方が変わってきている可能性があることなど考慮し、近年の気象庁降水量データを利用し、より精度良く、扱い易い新たな降雨減衰確率推定法の確立を目指した研究についてとりまとめたものである。

得られた主な成果を以下に示す。

### (1) 気象庁1分間降水量データから高精度の1分間降雨強度CDFを得る処理手法の考案

気象庁は、全国千数百箇所に AMeDAS を構築し、1時間降水量については最長1976年から、10分間降水量については最長1994年から、観測、記録を行っており、また、うち全国百数十箇所においては1分間降水量についても、最長1995年から観測、記録を行っている。1分間降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得ることができれば、同地点の10分間及び1時間降水量データとの比較検討等により、10分間及び1時間降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得る方法につなげることができ、これが得られれば全国千数百箇所の10分間及び1時間降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得ることができるようになる。

このような考えから、まず最初に検討を行ったのが、1分間降水量データから1分間降雨強度CDFを精度良く得る処理方法についてである。具体的には、気象庁が降水量測定に用いている0.5mm 桁の転倒桁型雨量計(分解能0.5mm)を用い1分間降水量データ相当の条件で測定したデータと同一地点に設置した降雨強度計(分解能0.0083mm/1分間降雨強度100mm/h程度以上で大きな測定誤差を生じるという欠点有り)測定データを比較し、これらが大きく異なることを確認した後、降雨強度計測定データから擬似的に1分間降水量データに相当するデータを作成し(0.5mm単位で丸め、分単位でカウント)、この擬似1分間降水量データから降雨強度計測定データから直接求めたCDF(1分間降雨強度CDFとみなせる)を精度良く再現することを目指し、1分間降水量データに施す処理方法に関する検討を行った。

検討の結果、各0.5mmについては一様に雨が降ったとみなし、降るのに要したと想定

される時間に対して均し分配を行って各1分間ごとの推定降雨量を求め、1分間降雨強度CDFを得る均し分配処理が有効と考えられた。そして均しの効果を最大限に得られるよう検討を行った結果、均しを秒単位で行い、各0.5mmが溜まり始める分内の秒位置(これは即ち0.5mmカウントパルスの発生位置を意味するが、AMeDASデータには、この情報は含まれていないため、秒単位で均すには、条件として与える必要がある)については、数種類の限られた条件に固定されないよう、一様乱数を用いて与える、乱数補正秒単位均し分配処理と名付けた新たな手法を考案した。さらに詳しく言えば、単一の乱数パターンを用いただけでは得られた1分間降雨強度CDFに偏りがでてくるため、10個のパターンを用いて求めた1分間降雨強度CDFの平均(同一累積確率値における1分間降雨強度の平均をとったもの)を用いることとしている。また、0.5mmパルスの間隔が長すぎる場合には、雨が中断している時間があると考え、雨の仮想の降り始めを最大均し時間という条件で与えることとし、検討の結果60分とすることが適当であることを示した。

降雨強度計データに基づき、同データから直接求めた降雨強度計CDF=1分間降雨強度CDF、同データから擬似1分間降水量データを作成し求めたCDF=1分間降水量(相当)CDF、並びに擬似1分間降水量データに乱数補正秒単位均し分配処理を施して求めたCDFとを比較したものが図10-1(図4-8の再掲)である。

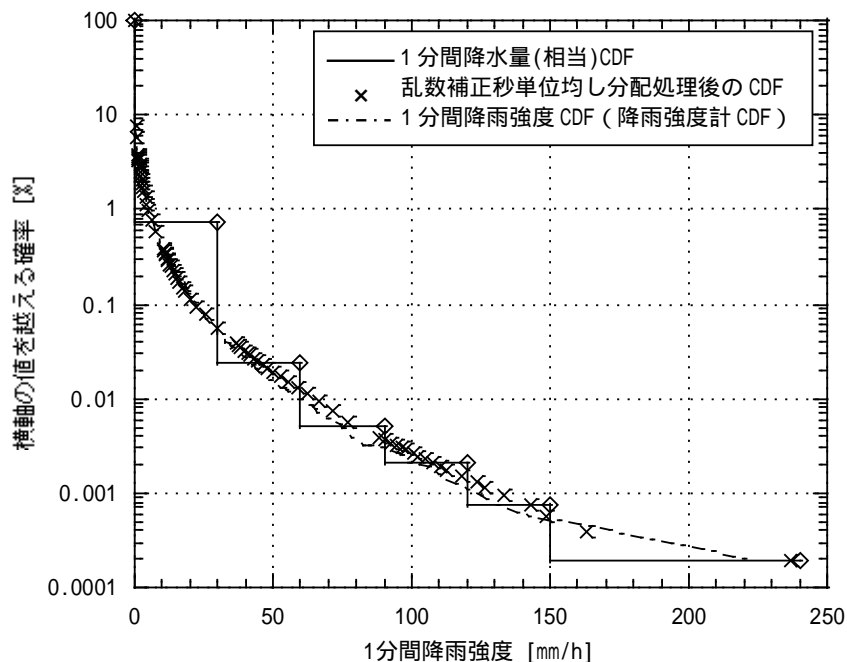


図10-1 1分間降水量CDF、同降水量の均し分配処理後CDF、1分間降雨強度CDF比較

図10-1は、1分間降水量データを提案した手法により処理して得たCDFが、1分間降雨強度CDFに対し、広い範囲で良い一致が見られることを示しており、本手法が有効であることを示している。

なお、付随する成果として、転倒杓型雨量計測定データから直接得た自己相関特性は誤差が大きく使用に耐えないが、均し分配処理を施して得た1分間降雨強度を用いれば極めて精度良く自己相関特性を得られることを示した。

気象庁が1分間降水量データを観測し始めたのは1995年からであり、まだ最近であることもあり、筆者が知る限り、これまで同データから1分間降雨強度CDFを精度良く得る手法について提案されたものはなく、同データの降雨減衰関連研究での活用はあまり進んでいなかったと考えられる。また、転倒杓型雨量計を用いて独自に1分間降雨強度を測定するとした場合でも、0.5mm 杓より分解能を小さくしたいとすれば豪雨時の測定誤差が大きくなってしまう可能性があるなど、同雨量計を用いて1分間降雨強度を精度良く得ることは容易ではなかったと考えられる。今回考案した手法は、これまでにない新しいものであり、これらの問題をクリアする極めて有効な手法である。特に今後の気象庁データの活用に大いに寄与できるものと考えられる。

## (2) 多様な品質要求に対応できる降雨減衰確率推定法に用いる分布モデルの選定

無線通信システムは多様化が進展しており、長い間中継系回線用としての使用が主であった準ミリ波・ミリ波帯においても、既に加算者系回線用としての利用がなされており、さらには、当初企業向け加算者系回線用のみであったものがコンシューマ向け加算者系回線用も現れてきている。このような中では、回線品質に対する要求も多様化し、例えば、企業向け加算者系回線においては、回線品質要求が非常に厳しいのに対し、コンシューマ向け加算者系回線においては、ある程度の回線品質が求められるが、それ以上に経済性が優先される。このような多様化した品質要求に対応できる降雨減衰確率推定法には、広い確率範囲で精度良い推定が行えることが要求されると考え、そのような推定法に適した分布モデルが何であるか検討を行った。

検討を行った分布モデルは、従来国内外において降雨減衰確率推定に適しているとされているガンマ分布<sup>[2]-[5]</sup>、対数正規分布<sup>[17],[19]</sup>、条件付対数正規分布<sup>[20],[21]</sup>に、細矢が1988年に提案したM分布<sup>[12]</sup>を加えた4種類であり、AMeDASデータのうち、全国百数十箇所で得られる1分間降水量データに対して前項に示した乱数補正秒単位均し分配処理を施して得た、3年以上で解析可能なデータが得られた、104地点分の1分間降雨強度CDFを用いて、同CDFに対する近似精度の比較を行った。具体的には、全サンプル点を用いた近似(厳密にはM分布が成立する1mm/h以上のサンプルを使用)並びに必要最小限のサンプル点として対数正規分布、条件付対数正規分布及びM分布は2サンプル点、ガンマ分布は1サンプル点と既存降雨減衰確率推定法で与えられている分布のパラメータを用いた近似で誤差比較を行い、M分布が、また全サンプル点近似の場合が、最も優れた近

似を与えることを示した。図 10-2 ( 図 5-2 の再掲 ) に全サンプル点近似の場合の累積確率の対数値の RMSE 比較を示す。

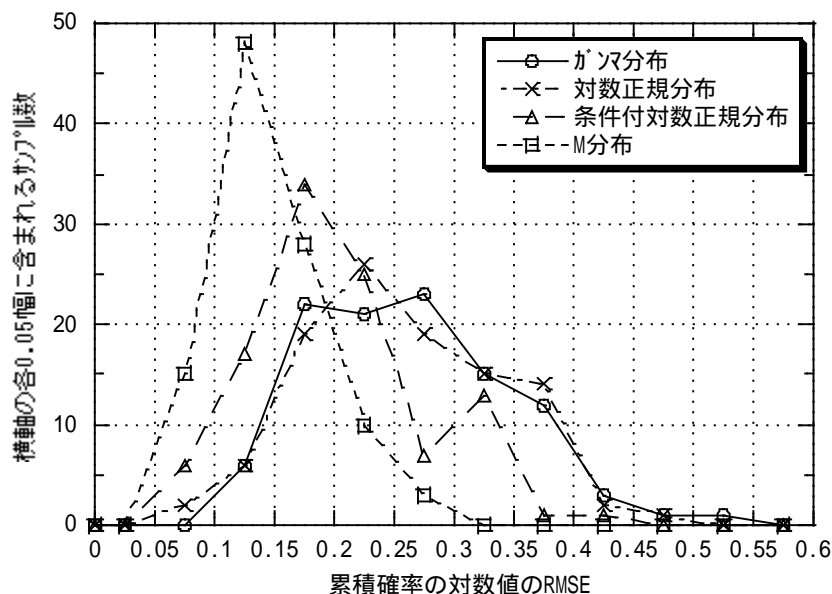


図 10-2 分布の種類による全サンプル点近似における累積確率の対数値の RMSE 比較

( 3 ) 多様な回線条件に対応できる降雨減衰確率推定法に適した空間相関特性及び同特性を用いた区間積分手法について提案

前項でも述べたように、無線通信システムは多様化が進展している。このような状況において、降雨減衰確率推定法には、さまざまな伝搬路長の回線に対して精度良い推定が行えることが求められる。一地点（微小区間）の 1 分間降雨強度 CDF から無線リンクの伝搬路全体の 1 分間降雨強度 CDF を得るには空間相関特性を用いた区間積分を行う必要があることから、空間相関特性を短距離の伝搬路から長距離の伝搬路まで精度よく与えることが必要となる。

検討は、0.5mm 桁の転倒枡型雨量計を東京大手町の周辺に 11 箇所設置し、うち 1 箇所には降雨強度計を併設し、得られた 1 年間のデータを用いて行った。転倒枡型雨量計測定データを用いて精度良い空間相関特性を得ることが不可欠であり、( 1 ) 項で示したように自己相関特性において均し分配処理が極めて有効であることが確認されていたため、空間相関特性においても同処理が有効であると考えられ、検討の前段階として、まず、この点について確認を行った。降雨強度計測定データ、同データから 0.5mm 単位で丸め秒単位でカウントすることにより作成した擬似転倒枡型雨量計データ、及び 11 箇所の転倒枡型雨量計測定データを用い ( 図 6-2 に示した確認方法により ) 確認した結果として、空間相関特性に対しても均し分配処理が極めて有効であることを明らかにした。図 10-3 ( 図 6-1 及び 6-4 をマージし再掲 ) は、転倒枡型雨量計データに秒単位均し処理を施した場合

(○)と施さない場合(×)の空間相関特性を示しており、前者(○)は全体的に標準的な空間相関特性をとして予想される特性が得られているが、後者(×)は 1km 程度の短距離でも相関係数が 0.3 程度と小さく通常では有りえない特性となっており、この図からも均し分配処理の有効性を知ることができる。

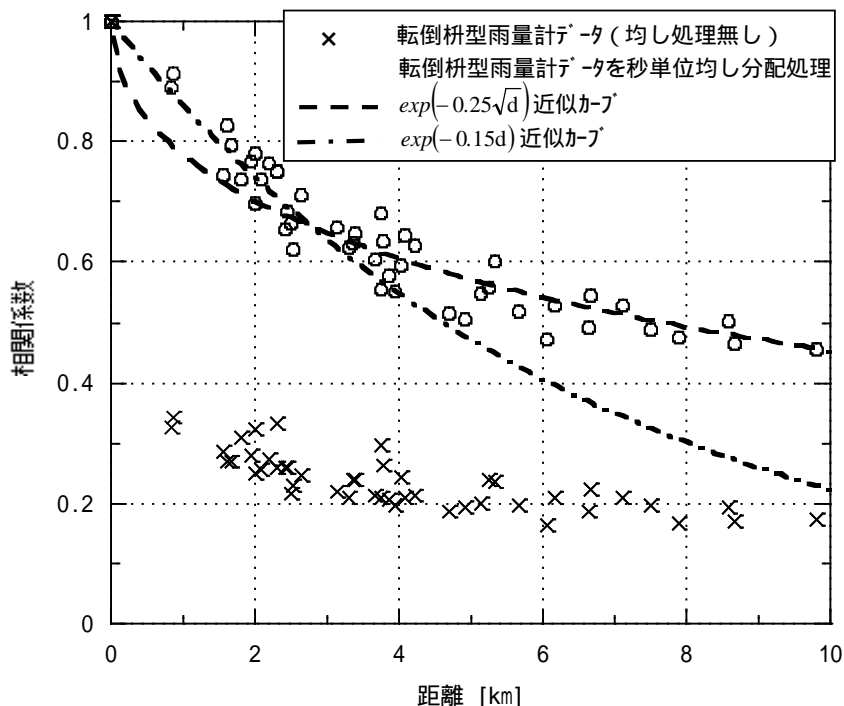


図 10-3 転倒桁型雨量計データに均し分配処理を施す場合と施さない場合の空間相関特性

図 10-3 には、転倒桁型雨量計データに均し分配処理を施した場合の空間相関特性に対する近似カーブも示しており、これにより、近距離部分については距離(d)の指数関数  $\exp(-\beta \cdot d)$  が良い近似を示し、遠距離部分については距離の平方根の指数関数  $\exp(-\alpha\sqrt{d})$  が良い近似を示すことを明らかにするとともに、これらの近似式を用いて空間相関特性を表す場合の区間積分を行う式を示した(式(6-2)~(6-11)/付録 10-1 の中でも示しているので省略)。

また、降雨減衰係数が 1 分間降雨強度の n 乗に比例する(式(2-1)/ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>)ため、一地点(微小区間)の 1 分間降雨強度 CDF から伝搬路全体の 1 分間降雨強度 CDF を得るための区間積分を行う場合に、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いる必要性が考えられたが、既存の降雨減衰確率推定法においては、違いは小さいとして、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いている<sup>[2]</sup>ことから、n 乗の空間相関特性を用いる必要性について検討を行った。図 10-4(図 6-6 の再掲)に、転倒桁型雨量計データに秒単位均し分配処理を施して得た時系列データの各分ごとの値を n 乗した後に CDF を求めたものを示しており、これにより 1 分間降雨強度そのものの空間相関特

性と1分間降雨強度のn乗(n=1)の空間相関特性とは違いが大きいことを明らかにした。

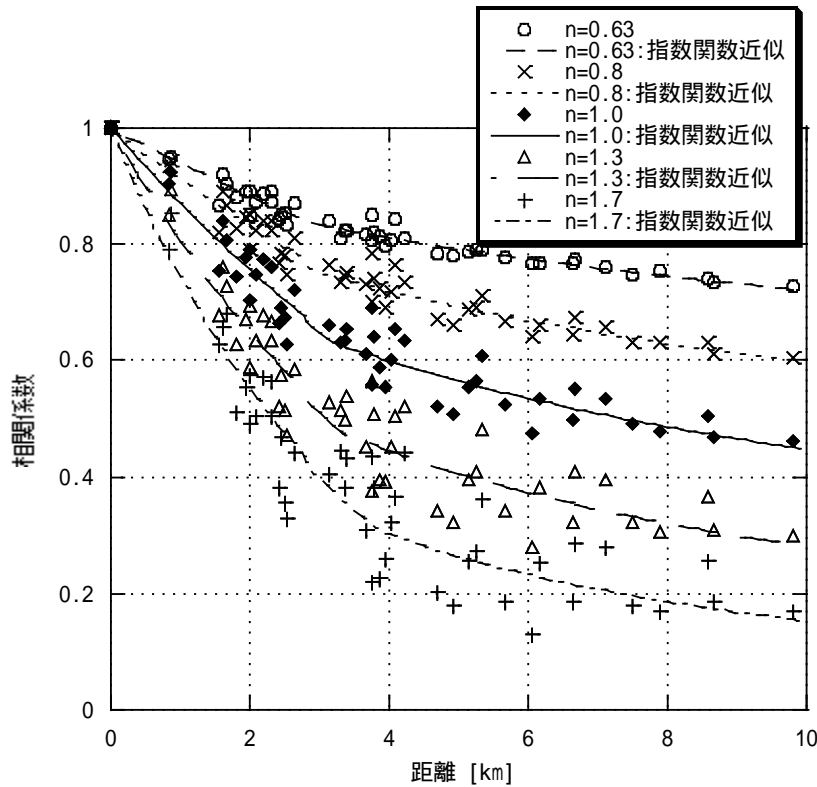


図 10-4 1分間降雨強度のn乗の空間相関特性

図 10-5 (図 6-12 の再掲) に、地点 n 乗 1 分間降雨強度の確率分布から区間積分 n 乗 1 分間降雨強度の確率分布を得る場合に、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いる場合と 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いる場合の、得られた区間積分 n 乗 1 分間降雨強度 CDF の誤差 ( $\frac{\text{誤差}}{\text{真値}} \times 100[\%]$ ) を求めたものを示す。

図 10-5 は、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いた区間積分と 1 分間降雨強度そのものの空間相関特性を用いた区間積分との違いが無視できない程度であることを示しており、即ち、将来的に無線通信システムへの適用周波数帯がますます広がることは疑いないことであり、周波数に依存せず、汎用性の高い、高精度の降雨減衰確率推定法の確立に当っては、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性を用いる必要があることを示している。また、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性に対し、近距離部分において良い近似を与える  $\exp(-\beta \cdot d)$  の係数  $\alpha$ 、及び遠距離部分において良い近似を与える  $\exp(-\alpha \sqrt{d})$  の係数  $\beta$  と、降雨減衰係数の係数 n との関係を表す近似式を求め示している(式(6-12)~(6-15))。以下に再掲する。

$$\alpha = 0.018703 - 0.12013n + 0.47627n^2 - 0.12219n^3 \quad (10-1)$$

$$\beta = 0.099327 - 0.3268n + 0.51996n^2 - 0.1529n^3 \quad (10-2)$$

n=1.5 (7GHz 弱) ~ 0.8 (50GHz 前後) の範囲に限れば、次式が使用可能である。

$$\alpha = -0.22322 + 0.47858n \quad (10-3)$$

$$\beta = -0.10993 + 0.2508n \quad (10-4)$$

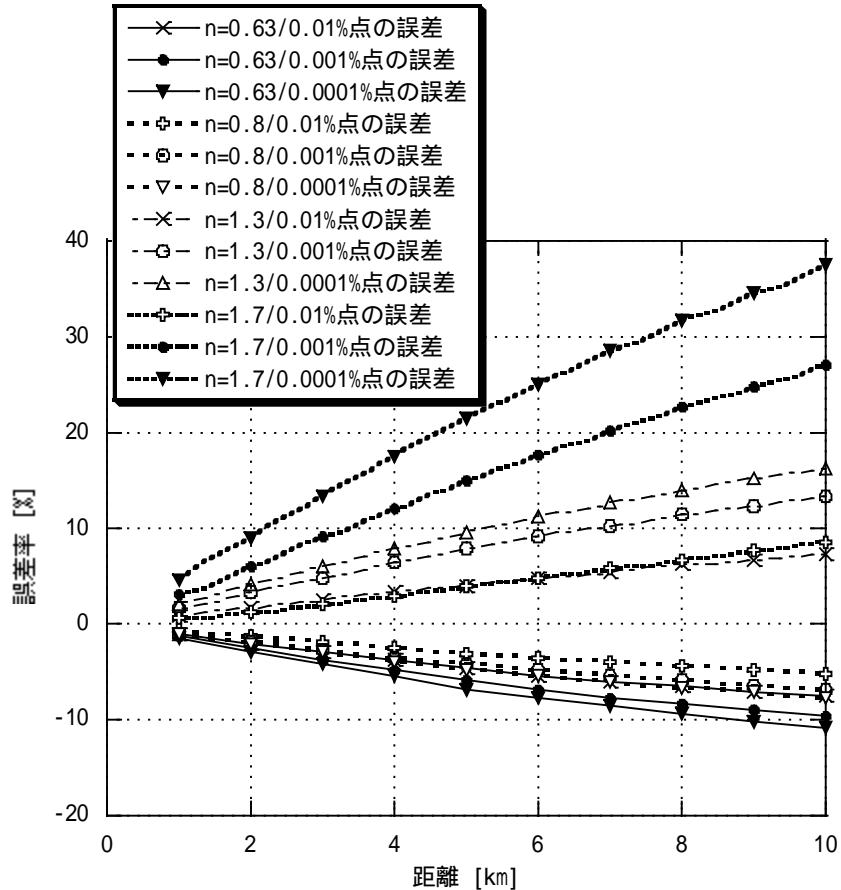


図 10-5 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性の使用有無による区間積分における誤差

#### (4) 新たな高精度異積分時間降雨強度確率分布変換手法の考案

全国で用いることができる降雨減衰確率推定法の実現においては、全国千数百箇所の AMeDAS により得られる 10 分間及び 1 時間降水量データの活用が必須であり、これらから 1 分間降雨強度 CDF を精度よく得るための、異積分時間降雨強度確率分布変換手法が必要であった。10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を得る手法としては、細矢が M 分布を提案する際に示した変換手法（細矢法）<sup>[12]</sup>、及びこの応用として秋元他が提案した変換手法（秋元他法）<sup>[14]</sup>が候補として考えられたが、検討の結果、特に 1 時間降水量データからの変換については精度が十分得られなかったため、全く新たな変換手法の可能性についても検討を行った。精度を向上するには、誤差要因を減らすことが有効と考え、細矢法等が 10 分間及び 1 時間降水量データに対して M 分布近似を行い変換

のためのパラメータを得ていたものを、近似を行わない方法、即ち、10分間及び1時間降水量データの実確率分布の平均値及び標準偏差を用いて変換を行う手法について検討を行った。

この結果、AMeDASの観測地点の中でも、1分間降水量データが得られる観測地点のデータを用い、1年以上の期間に対して解析可能なデータが得られた136地点における、10分間及び1時間降水量データから求めた実確率分布の平均値及び標準偏差、並びに1分間降水量データに対し(1)項に示した乱数補正秒単位均し分配処理を施して求めた1分間降雨強度CDFのM分布近似後の平均値及び標準偏差、各617サンプルを用いて、これらの関係を示す式を求め(表7-2及び7-3)、この関係式を用いて変換を行う新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法を考案した。なお、本検討を進める中で、豪雪地域において、冬季の積雪による確率分布への影響が大きいことが確認され、検証の結果、豪雪地域においては11~3月の冬季の値を全て0として扱うことにより精度が向上することが判明したため、前述の関係式導出も、この考えに基づいて行っている。

細矢法等で十分な変換精度が得られなかった1時間降水量データの場合について、上述の617サンプルに対し、今回考案した変換手法を適用し、1分間降雨強度CDFを求めたもの、並びに細矢法( $\alpha=0.245$ の他に、同変換手法の中では概ね良い結果が得られた $\alpha=0.2$ 及び秒単位均し分配処理後の時系列データから得た自己相関特性から求めた $\alpha$ についても示す)及び秋元他法を適用し、1分間降雨強度CDFを求めたものとを比較したものが図10-6(図7-10(b)及び7-12をマージし再掲)である。

図10-6は、今回考案した変換手法( )が、特に細矢法等で十分な変換精度が得られなかった1時間降水量データからの変換精度を大幅に向上させるものであり、新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法として有効であることを示している。ちなみに、10分間降水量データからの変換については、細矢法等においても概ね十分な変換精度が得られ、改善効果が小さかったため、省略したが(図7-10(a)及び図7-12参照)1時間降水量データからの変換より幾分良い変換精度が得られている。



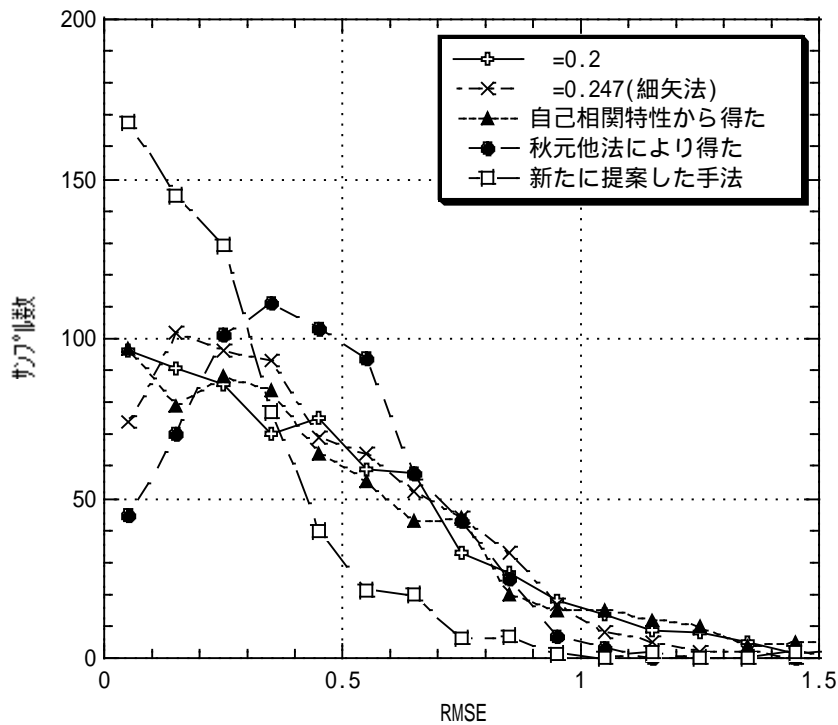


図 10-6 1 分間降水量データから得られた 1 分間降雨強度 CDF(M 分布近似後)に対する 1 時間降水量データから細矢法及び秋元他法、並びに新たに提案した手法を用いて得られた同 CDF の誤差 (豪雪地域の冬季(11 ~ 3 月)のデータを除外)

(5) M 分布を用いた新たな降雨減衰確率推定法の提案

(2) 項及び(3) 項に示した結果を踏まえ、

- 広い累積確率範囲において近似精度が優れた分布モデルであることが確認された M 分布を用い、
- 分布を決定するために必要な 2 つのパラメータとして、各地点ごとに通年の CDF から得られる 2 点の累積確率における 1 分間降雨強度 (0.01% 値及び 0.0001% 値) を用い、
- 空間相関特性を近距離部分と遠距離部分でそれぞれに適した近似特性  $\rho(d) = \exp(-\beta d)$  及び  $\rho(d) = \exp(-\alpha \sqrt{d})$  で与え、また、
- 降雨減衰係数が 1 分間降雨強度の n 乗に比例し、1 分間降雨強度そのものの空間相関特性と 1 分間降雨強度の n 乗の空間相関特性の違いが大きく、これらを用いた区間積分の違いも無視できない程度であることから、1 分間降雨強度の n 乗の空間相関を用い、1 分間降雨強度の n 乗の区間積分を行う、

新たな降雨減衰確率推定法を提案した。

2 点の累積確率における 1 分間降雨強度を用いることとしたのは、

- 数学的処理を含め、手法が簡便であり、扱う者にとって理解し易い、
- 近似精度の面で有利である (地点ごとに 2 つのパラメータとも最適な条件を与えられ

る)

- ヒートアイランド現象のように、局所的に気象環境の変化があったような場合にも適応し易い(地点ごとに2つのパラメータとも固有の条件を与えられる)。

という点を考慮したものである。

また、空間相関特性を近距離部分と遠距離部分でそれぞれに適した近似特性を与えることとしたのは、準ミリ波帯、ミリ波帯においても、適用領域が中継系無線通信システムから加入者系無線通信システム等へと拡がり、将来的にはさらに拡がっていくと考えられることから、極めて短距離から中・長距離の適用まで精度良い回線設計を行える必要がある、という点を考慮したものである。

東京大手町の周辺において、11箇所に設置した転倒柵型雨量計及び11対向の無線リンクを用いて実測した降雨量及び降雨減衰量データを用いて、新推定法及び既存推定法により推定した降雨減衰量CDF(以下、推定CDFという)と実測降雨減衰量CDF(以下、実測CDFという)との比較を行った結果を図10-7及び10-8(図8-1及び8-2の再掲)に示す。

図10-7及び10-8に示したのは一部の再掲であるが、これらより、新及び既存、両推定法による推定CDFと実測CDFとの関係は、距離、周波数、偏波に関わらず、同様の傾向を示しており、全てのサンプルの実測CDFと推定CDFとの間に、全累積確率範囲において、大きな差が確認された。また、特徴的な点として、

累積確率が10%程度から1%程度までの部分において、両推定法による推定CDFともほとんど減衰が発生していないような場合においても、実測CDFには目立った減衰が見られる点、また、

図10-7(a)~(c)の比較的伝搬路長が長いケースがわかり易いが、0.01%程度より小さい累積確率の部分において、実測CDFと新推定法による推定CDFとの間はほぼ一定量の差となっているのに対し、実測CDFと既存推定法による推定CDFとの間は累積確率が小さくなるほど差が大きくなっていくという点、  
が確認された。

実測CDFと推定CDFとの間の全累積確率範囲に存在する大きな差の要因は、レドーム上の水膜による減衰によるものであることが考えられたため、どの程度の減衰量が発生するかを知るために付録8-2に示した実測を行った。その結果、さほど水量が多くなるとも、レドーム全面に水膜ができる程度に水がかかれば、片側アンテナで、22GHz帯の場合は4dB程度、38GHz帯の場合は5dB程度の減衰を生じること、また、これがほぼ最大値で、それより水量が増えても減衰量はほとんど増加しないことが確認できた。

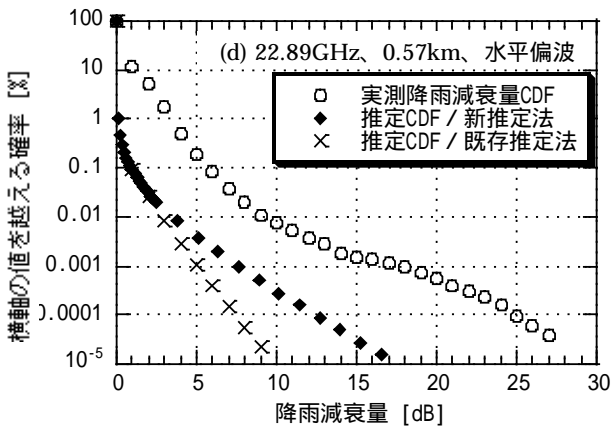
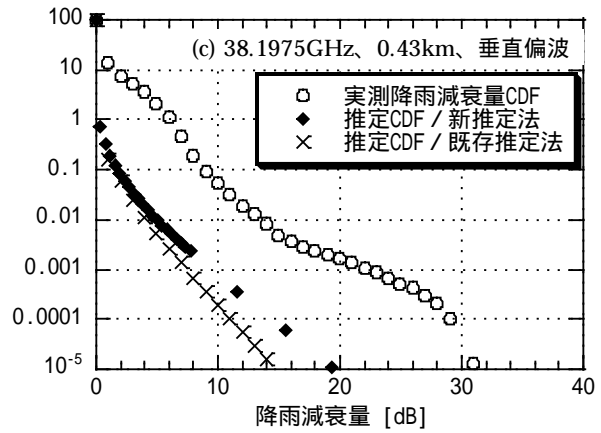
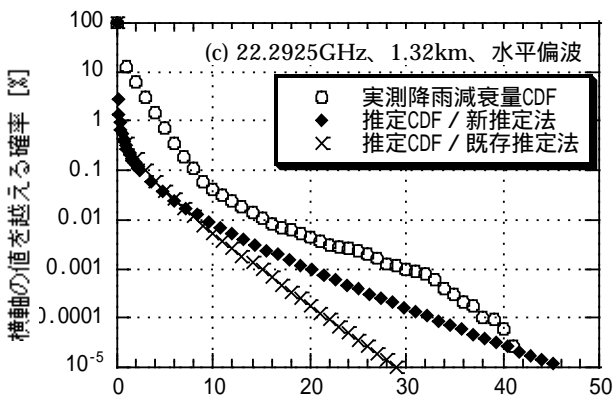
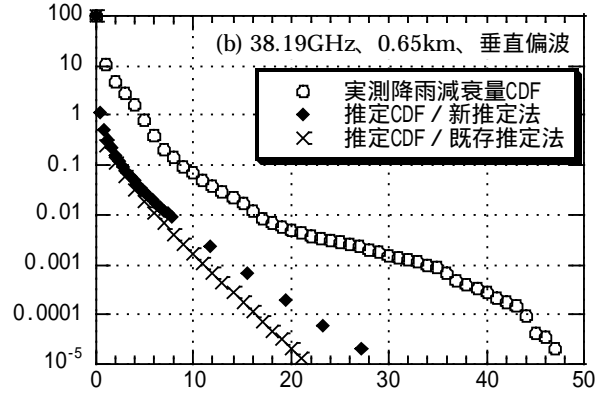
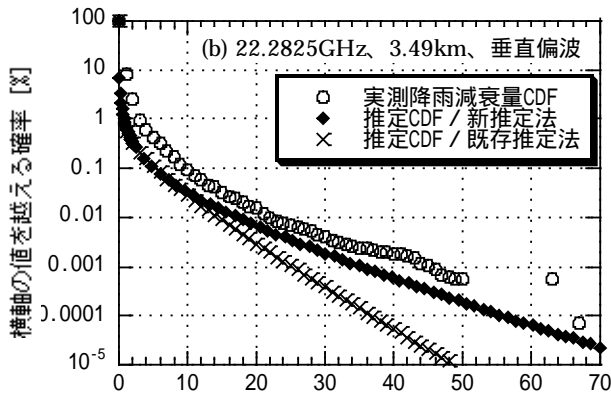
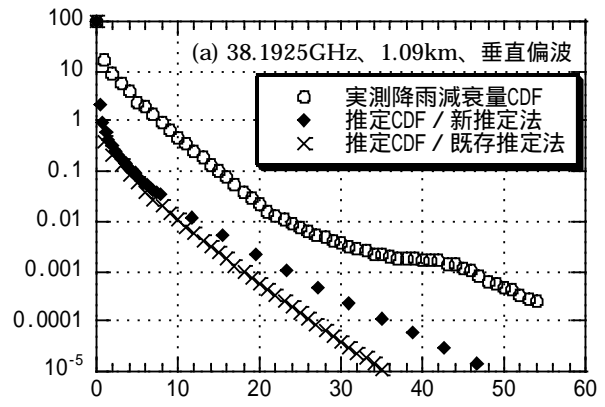
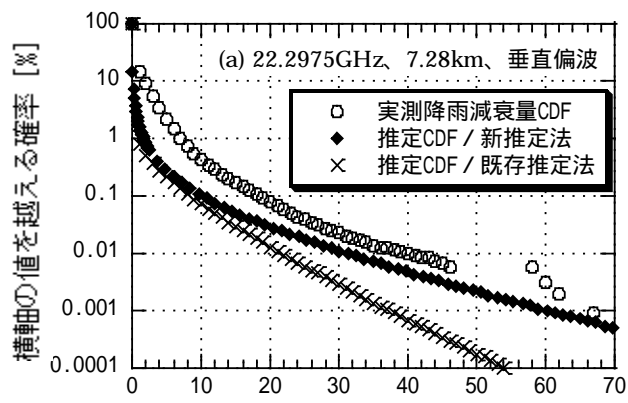


図 10-8 38GHz 帯の種々な距離の無線リンク

図 10-7 22GHz 帯の種々な距離の無線リンク

の部分を含む累積確率が 100%程度から 0.1%程度までの部分では、両推定法による推定 CDF に違いはほとんど無く、顕著な違いが見えるのは累積確率が 0.01%より小さい部分である。付録 8-2 の実測結果は、この部分、即ち、0.01%程度より小さい累積確率の部分において、実測 CDF と推定 CDF との間がほぼ一定量の差となっている側、即ち、新推定法による推定 CDF の方が正しい傾向を示していることを裏付けるものと考えられた。そして、さらに詳しくみれば、この部分の新推定法による推定 CDF と実測 CDF との差は、22GHz 帯の場合が 8dB 程度に、38GHz 帯の場合が 10dB 程度に近い値となっており、付録 8-2 の実測結果の 2 倍程度、即ち、レドーム上の水膜による最大減衰量が送受両端のアンテナで発生する場合に相当する量となっており、これは量的にも新推定法が精度良い推定を行えていることを示すものと考えられ、精度面における新推定法の既存推定法に対する優位性が大きいことが確認できた。

新推定法は既存推定法に比較し、精度を向上させる複数の改善が図られたものとなっているが、その中でも特に優位性を大きくさせているのは、分布モデルとして M 分布を採用し、推定に必要な 2 つのパラメータを各地域ごとの CDF から抽出された値を用いている点と考えられる。

これまで、レドーム上の水膜に関する研究例は少なく、特に降雨減衰確率への影響について示したものは、ほとんど見られない。レドーム上の水膜による減衰量は、無線リンクにおける降雨減衰に対して許容される（回線が稼働状態から不稼働状態になるまでの）マージンの一部を消費する要素となるものであり、かつ、8.2.1～8.2.2 項に示されているように、降雨減衰量に比して無視できない程度の量であり、無線通信システムの回線品質に大きな影響を与えるものとなりうる。したがって、無線通信システムを扱うものにとっては注意を要する要素であり、今回明らかとなった事実は有益な情報となるであろう。研究の成果として、8.2.2 項には、推定 CDF に対してレドーム上の水膜による減衰量の補正を概ね正しく行うことができる式として式(8-14)を示している。同式には、無線リンクで発生しうるレドーム上の水膜による減衰量の最大値をパラメータとして与える必要があり、本研究の場合には、付録 8-2 に示す実測で得られた片側のアンテナにおける最大減衰量（レドーム全面に水膜ができた場合に発生）、22GHz 帯で 4dB 程度、38GHz 帯で 5dB 程度、の 2 倍を用いているが、この減衰量は、水膜の厚さ（レドームの材質・表面処理の状況等に依存）、レドームの材質・厚さ等に依存する<sup>[29]</sup>ため、周波数に対して一定の条件で表すことはできないことに注意を要する。

( 6 ) 安全係数の概念を適用した新たな降雨減衰確率推定法に用いるパラメータを作成

( 1 ) 項に示した乱数補正秒単位均し分配処理、及び( 4 ) 項に示した新たな異積分時間降雨強度確率分布変換手法を用い、最長 1976 年からの AMeDAS の 1 分間、10 分間及び 1 時間降水量データから 1 分間降雨強度 CDF を求め、1150 地点における新たな降雨減衰確率推定法で用いるパラメータをとりまとめた( 付録 9-1 参照)。なお、このパラメータは、唐沢・松戸が 1988 年に提案した安全係数の概念<sup>[15]</sup>を、若干の修正を加えて適用し求めたもので、新降雨減衰確率推定法により得られることになる降雨減衰確率が平均何年間連続して満たされるかを条件として与えることができるものとなっている。

( 7 ) 新降雨減衰確率推定法による推定手順

以下に、新降雨減衰確率推定法を用いた推定手順を示す。

Step-1 : 全国規模で与えられたパラメータ表から着目している地点の近傍のパラメータを選び出す。( 付録 9-1 の全国 1150 地点のデータを使用 )

Step-2 : 求めた降雨減衰確率が条件を満たすであろう平均年数である MTBF を何年とするか決め、得られたパラメータから式(9-3)を用いて、0.01%値及び 0.0001%値を算出する。パラメータが与えられている地点から着目する地点の 0.01%値及び 0.0001%値を得るには、最も近い地点のパラメータをそのまま用いるか、または近隣の複数の地点のパラメータを元に距離比例配分等により求めることなどが考えられる。

Step-3 : 0.01%値及び 0.0001%値を  $n$  乗したものに式(8-1)及び(8-2)を適用し、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布の M 分布パラメータ  $u_n$  及び  $p_n$  を得る。

Step-4 :  $u_n$  及び  $p_n$  に式(8-3)及び(8-4)を適用し、1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布 ( M 分布 ) の平均値  $\mu_n$  及び標準偏差  $\sigma_n$  を得る。

Step-5 :  $\mu_n$  及び  $\sigma_n$  に式(8-5) ~ (8-8)を適用し、微小区間 ( 一地点 ) の 1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布から無線リンク全体の確率分布を求める区間積分を行い、平均値  $\mu_{nL}$  及び標準偏差  $\sigma_{nL}$  を得る。

Step-6 :  $\mu_{nL}$  及び  $\sigma_{nL}$  に式(8-9) ~ (8-11)を適用し、区間積分後の 1 分間降雨強度の  $n$  乗の確率分布の M 分布パラメータ  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  を得る。

Step-7 :  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  及び式(8-12)を用いて、任意の降雨減衰量に対する降雨減衰確率を算出する。

降雨減衰確率から任意の降雨減衰量を求めるには、文献[28]の付録の式(A・8) ~ (A・10)が有効である。

## 付録 10 - 1 新降雨減衰確率推定法による推定手順の詳細

本研究で提案した新降雨減衰確率推定法を用いて、任意の地点において、所要降雨減衰量  $A_R$  が与えられた場合に降雨減衰確率  $P_{A_R}$  を、また、所要降雨減衰確率  $P_R$  が与えられた場合に降雨減衰量  $A_{P_R}$  を、それぞれ求める、詳細な計算手順について、以下に示す。

Step.1 : 付録 9-1 から当該地点に対する下記パラメータを求める。

1 分間降雨強度の 0.01% 値の平均値	: $\langle R_{0.01\%} \rangle$
1 分間降雨強度の 0.0001% 値の平均値	: $\langle R_{0.0001\%} \rangle$
1 分間降雨強度の 0.01% 値の標準偏差	: $R_{0.01\%}$
1 分間降雨強度の 0.0001% 値の標準偏差	: $R_{0.0001\%}$
1 分間降雨強度の 0.01% 値の安全係数の近似式の係数	: $C_{1(0.01\%)}$
1 分間降雨強度の 0.0001% 値の安全係数の近似式の係数	: $C_{1(0.0001\%)}$
1 分間降雨強度の 0.01% 値の安全係数の近似式の係数	: $C_{2(0.01\%)}$
1 分間降雨強度の 0.0001% 値の安全係数の近似式の係数	: $C_{2(0.0001\%)}$
MTBF (付録 9-1 の最大 MTBF 以下の値を用いる)	: $y$

その他に以下のパラメータが与えられる必要がある。

周波数	: $f$ [GHz]
伝搬路距離	: $d_L$ [km]
偏波	: 水平又は垂直

Step.2 : 式(9-3)により、当該地点における MTBF が  $y$  [年] の 1 分間降雨強度の 0.01% 値  $R_{0.01\%,y}$  [mm/h] 及び 0.0001% 値  $R_{0.0001\%,y}$  [mm/h] を求める。

$$R_{0.01\%,y} = \langle R_{0.01\%} \rangle \cdot \left( 1 + C_{1(0.01\%)} \frac{\sigma_{R_{0.01\%}}}{\langle R_{0.01\%} \rangle} (\log_{10}(y))^{C_{2(0.01\%)}} \right) \quad (A10-1-1)$$

$$R_{0.0001\%,y} = \langle R_{0.0001\%} \rangle \cdot \left( 1 + C_{1(0.0001\%)} \frac{\sigma_{R_{0.0001\%}}}{\langle R_{0.0001\%} \rangle} (\log_{10}(y))^{C_{2(0.0001\%)}} \right) \quad (A10-1-2)$$

なお、当該地点に対して得る値としては、この step において、付録 9-1 に示されている地点の中から、当該地点の近傍の一地点のみのパラメータから求めた値を用いるか、近傍の複数の地点のパラメータから得られた複数の値から距離比例配分等を行って求めた値を用いることなどが考えられる。

Step.3 : 与えられた周波数  $f$  [GHz]、偏波に対し、ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>に基づき、降雨減衰係数のパラメータ  $n$  を求める。

$$n = \sum_{j=1}^5 a_{nj} \cdot \exp\left[-\frac{(\log_{10}(f) - b_{nj})^2}{c_{nj}}\right] + M_n \cdot \log_{10}(f) + C_n \quad (\text{A10-1-3})$$

但し、上式の各パラメータは次表による。

偏波=水平偏波の場合

j	$a_{nj}$	$b_{nj}$	$c_{nj}$	$M_n$	$C_n$
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.3761	-0.9623	1.47828		
5	16.1721	-3.2998	3.4399		

偏波=垂直偏波の場合

j	$a_{nj}$	$b_{nj}$	$c_{nj}$	$M_n$	$C_n$
1	-0.07771	2.3384	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.1452	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Step.4 : 区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) のパラメータ  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  を求める。

式(8-1)及び(8-2)により、地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) のパラメータ  $u_n$  及び  $p_n$  を求める。

$$u_n = \frac{1}{R_{0.0001\%y}^n - R_{0.01\%y}^n} \log_e \frac{100 \cdot R_{0.01\%y}^n}{R_{0.0001\%y}^n} \quad (\text{A10-1-4})$$

$$p_n = 0.0001 \cdot R_{0.01\%y}^n \exp(u_n \cdot R_{0.01\%y}^n) \quad (\text{A10-1-5})$$

地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) の平均値  $\mu_n$  及び標準偏差  $\sigma_n$  を求める。

$u_n$  及び  $p_n$  が与えられたならば、文献[28]の付録の式(A・1)～(A・3)より、地点  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) の下限値  $R^{n*}$  が次式により与えられる。

$$R^{n*} = \frac{x}{u_n} \quad (\text{A10-1-6})$$

$$t = u_n \cdot p_n$$

但し、 $x$ 、 $t$  は、M 分布において、分布のパラメータ ( $u_n$  及び  $p_n$ ) から分布の下

限値 ( $R^{n*}$ ) を得るための超越方程式のパラメータで、次の多項式近似が同方程式の解を十分な精度で表すものとして与えられている。

$$x = P_{x0} + P_{x1} \cdot t + P_{x2} \cdot t^2 + P_{x3} \cdot t^3 + P_{x4} \cdot t^4 + P_{x5} \cdot t^5 + P_{x6} \cdot t^6 + P_{x7} \cdot t^7 + P_{x8} \cdot t^8 \quad (\text{A10-1-7})$$

	(0 < t < 0.3)の場合	(0.3 < t < 1)の場合
$P_{x0}$	1.6002712E-09	0.00052531675
$P_{x1}$	0.99999914	0.9902759
$P_{x2}$	-0.99992534	-0.91821921
$P_{x3}$	1.4973994	1.0795638
$P_{x4}$	-2.6195517	-1.1493067
$P_{x5}$	4.7062006	0.94837821
$P_{x6}$	-7.4251652	-0.54273098
$P_{x7}$	8.2933625	0.18816833
$P_{x8}$	-4.5640878	-0.029511417

$u_n$  及び  $R^{n*}$  が与えられたので、積分指数関数  $E_I(u_n \cdot R^{n*})$  を求める。

$$E_I(u_n \cdot R^{n*}) = -\left[0.5772 + \log_e(u_n \cdot R^{n*}) - \frac{u_n \cdot R^{n*} + (u_n \cdot R^{n*})^2/4 + (u_n \cdot R^{n*})^3/18}{u_n \cdot R^{n*}}\right] \quad (\text{A10-1-8})$$

これらを用いて  $\mu_n$  及び  $\sigma_n$  は、式(8-3)及び(8-4)により、次式のように与えられる。

$$\mu_n = p_n \left( \exp(-u_n \cdot R^{n*}) + E_I(u_n \cdot R^{n*}) \right) \quad (\text{A10-1-9})$$

$$\sigma_n = \sqrt{p_n \cdot \left( R^{n*} + \frac{2}{u_n} \right) \cdot \exp(-u_n \cdot R^{n*}) - \mu_n^2} \quad (\text{A10-1-10})$$

区間積分  $n$  乗 1 分間降雨強度の確率分布(M 分布)の平均値  $\mu_{nL}$  及び標準偏差  $\sigma_{nL}$  を求める。

降雨減衰係数のパラメータ  $n$  に対する空間相関特性を指数関数近似で与える場合のパラメータ  $\alpha$  及び  $\beta$  を、式(6-12)及び(6-13)により求める。

$$\alpha = 0.018703 - 0.12013 \cdot n + 0.47627 \cdot n^2 - 0.12219 \cdot n^3 \quad (\text{A10-1-11})$$

$$\beta = 0.099327 - 0.3268 \cdot n + 0.51996 \cdot n^2 - 0.1529 \cdot n^3 \quad (\text{A10-1-12})$$

$\alpha$ 、 $\beta$  が決まると、当該伝搬路の区間距離が  $d_L$ [km]の場合の、空間相関特性の  $\alpha$  で示される特性と  $\beta$  で示される特性が交わる点  $d_{x0}$  [km]が、式(6-11)により、次式のように与えられる。

$$d_{x0} = \frac{\alpha^2}{\beta^2} \left( \frac{\alpha^2}{\beta^2} < d_L \right) \text{の場合} \quad (\text{A10-1-13a})$$

$$= d_L \left( \frac{\alpha^2}{\beta^2} \geq d_L \right) \text{の場合} \quad (\text{A10-1-13b})$$

以上で与えられたパラメータを用いて、 $\mu_{nL}$  及び  $\sigma_{nL}$  は、式(8-5)～(8-8)により、次式のように与えられる。



$$Var_1 = \frac{2\sigma_n^2}{\beta} \left[ d_{xo} e^{-\beta \cdot d_{xo}} + \frac{(1 - \beta \cdot d_L) \cdot (e^{-\beta \cdot d_{xo}} - 1)}{\beta} \right] \quad (A10-1-14)$$

$$Var_2 = \frac{4\sigma_n^2}{\alpha^4} \left\{ (6 + 6\alpha\sqrt{d_L} + 2\alpha^2 d_L) e^{-\alpha\sqrt{d_L}} - \left[ 6 + 6\alpha\sqrt{d_{xo}} + 2\alpha^2 d_{xo} - \alpha^2 (1 + \alpha\sqrt{d_{xo}}) \cdot (d_L - d_{xo}) \right] e^{-\alpha\sqrt{d_{xo}}} \right\} \quad (A10-1-15)$$

$$\sigma_{nL} = \sqrt{Var_1 + Var_2} \quad (A10-1-16)$$

$$\mu_{nL} = \mu_n \cdot d_L \quad (A10-1-17)$$

区間積分 n 乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) のパラメータ  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  を求める。

$\mu_{nL}$  及び  $\sigma_{nL}$  が与えられたならば、文献[28]の付録の式(A・4)～(A・7)より、区間積分 n 乗 1 分間降雨強度の確率分布 (M 分布) の下限値  $R_L^{n*}$  が次式により与えられる。

$$h = \frac{\mu_{nL}}{\sigma_{nL}} \quad (A10-1-18)$$

$$R_L^{n*} = g \cdot \sigma_{nL} \quad (A10-1-19)$$

但し、 $g$  は、M 分布において、平均値及び標準偏差 ( $\mu_{nL}$  及び  $\sigma_{nL}$ ) から分布の下限値 ( $R_L^{n*}$ ) を得るための超越方程式のパラメータで、次の多項式近似が同方程式の解を十分な精度で表すものとして与えられている。

$$g = \exp \left[ P_{g0} + P_{g1} \cdot \log_e(h) + P_{g2} \cdot (\log_e(h))^2 + P_{g3} \cdot (\log_e(h))^3 + P_{g4} \cdot (\log_e(h))^4 + P_{g5} \cdot (\log_e(h))^5 + P_{g6} \cdot (\log_e(h))^6 + P_{g7} \cdot (\log_e(h))^7 + P_{g8} \cdot (\log_e(h))^8 \right] \quad (0.01 \leq h < 0.2) \text{ の場合} \quad (A10-1-20)$$

$$g = P_{g0} + P_{g1} \cdot h + P_{g2} \cdot h^2 + P_{g3} \cdot h^3 + P_{g4} \cdot h^4 + P_{g5} \cdot h^5 + P_{g6} \cdot h^6 + P_{g7} \cdot h^7 + P_{g8} \cdot h^8 \quad (0.2 \leq h < 3.0) \text{ の場合} \quad (A10-1-21)$$

	(0.01 ≤ h < 0.2) の場合	(0.2 ≤ h < 0.8) の場合	(0.8 ≤ h < 1.6) の場合	(1.6 ≤ h < 3.0) の場合
$P_{g0}$	-0.95328124	-0.00065011386	-0.037291611	0.14686944
$P_{g1}$	1.8935885	0.091689852	0.35782286	-0.40831459
$P_{g2}$	0.23212512	0.32182035	-0.52997568	0.94431138
$P_{g3}$	0.028649896	-0.27050885	1.3206063	-0.43384384
$P_{g4}$	-0.0061290807	0.66217032	-1.2814258	0.15046662
$P_{g5}$	-0.0034444328	-0.86908439	0.7770983	-0.040159941
$P_{g6}$	-0.0006735405	0.67270855	-0.30446291	0.0077242931
$P_{g7}$	-6.4964457E-05	-0.30617895	0.07030613	-0.00092381382
$P_{g8}$	-2.5711315E-06	0.063438439	-0.00722971111	5.0260509E-05

g が得られれば、 $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  は、式(8-9)及び(8-10)により、次式のように与えられる。

$$u_{nL} = \frac{2 \cdot g \cdot \sigma_{nL}}{\mu_{nL}^2 + \sigma_{nL}^2 - g^2 \cdot \sigma_{nL}^2} \quad (\text{A10-1-22})$$

$$p_{nL} = g \cdot \sigma_{nL} \cdot \exp(u_{nL} \cdot g \cdot \sigma_{nL}) \quad (\text{A10-1-23})$$

Step.5 : 与えられた周波数 f [GHz]、偏波に対し、ITU-R 勧告 Rec.P.838-3<sup>[18]</sup>に基づき、降雨減衰係数のパラメータ k を求める。

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_{kj} \cdot \exp\left[-\frac{(\log_{10}(f) - b_{kj})^2}{c_{kj}}\right] + M_k \cdot \log_{10}(f) + C_k \quad (\text{A10-1-24})$$

但し、上式の各パラメータは次表による。

偏波=水平偏波の場合

j	$a_{kj}$	$b_{kj}$	$c_{kj}$	$M_k$	$C_k$
1	-5.3398	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.2697	0.454		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

偏波=垂直偏波の場合

j	$a_{kj}$	$b_{kj}$	$c_{kj}$	$M_k$	$C_k$
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

Step.6-1 : 所要降雨減衰量  $A_{Req}$  [dB]が与えられた場合の降雨減衰確率  $P_{A_{Req}}$  [%]を求める。

区間の降雨減衰量  $A_{Req}$  [dB]が与えられ、降雨減衰係数のパラメータ k 及び n 乗 1 分間降雨強度の区間積分後の分布のパラメータ  $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$  が得られれば、式(8-12)により、降雨減衰確率  $P_{A_{Req}}$  は次式のように与えられる。

$$P_{A_{Req}} = F\left(\frac{A_{Req}}{k}\right) = \frac{p_{nL}}{A_{Req}/k} \exp\left(-u_{nL} \cdot \frac{A_{Req}}{k}\right) \times 100[\%] \quad (\text{A10-1-25})$$

Step.6-2 : 所要降雨減衰確率  $P_{Req}$  [%]が与えられた場合の降雨減衰量  $A_{P_{Req}}$  [dB]を求める。

累積確率値 ( $P_{Req}$ ) が与えられている時、M 分布のパラメータ ( $u_{nL}$  及び  $p_{nL}$ ) を用いて、この累積確率値を与える 1 分間降雨強度 ( $R_L^n$ ) を得るための超越方程式のパラメータ v、w が、同方程式の解を十分な精度で表す多項式とともに、文献[28]の付録の式(A・8)~(A・10)に与えられている。

$$v = \log_e \left( \frac{P_{\text{Req}}/100}{P_{\text{nL}} \cdot u_{\text{nL}}} \right) \quad (\text{A10-1-26})$$

$$R_L^n = \frac{w}{u_{\text{nL}}} \quad (\text{A10-1-27})$$

$$\log(w) = P_{w0} + P_{w1} \cdot v + P_{w2} \cdot v^2 + P_{w3} \cdot v^3 + P_{w4} \cdot v^4 + P_{w5} \cdot v^5 + P_{w6} \cdot v^6 + P_{w7} \cdot v^7 + P_{w8} \cdot v^8 \quad (\text{A10-1-28})$$

	(-15 <math>v <-4</math> の場合)	(-4 <math>v <1</math> の場合)	(1 <math>v <8</math> の場合)
$P_{w0}$	-0.2261801	-0.24630444	-0.24552567
$P_{w1}$	-0.26393457	-0.27711108	-0.28064334
$P_{w2}$	-0.031700994	-0.032015283	-0.025661578
$P_{w3}$	-0.0028133192	-0.00064017406	-0.0065284471
$P_{w4}$	-0.00016060845	0.00069586691	0.0038445205
$P_{w5}$	-5.220037E-06	0.00013619883	-0.00079946336
$P_{w6}$	-7.3056273E-08	8.9780123E-06	8.86188E-05
$P_{w7}$	-	-	-5.2149E-06
$P_{w8}$	-	-	1.28525E-07

以上より、降雨減衰量  $A_{P_{\text{Req}}}$  [dB]は次式により与えられる。

$$A_{P_{\text{Req}}} = k \cdot R_L^n = k \cdot \frac{w}{u_{\text{nL}}} \text{ [dB]} \quad (\text{A10-1-29})$$

## 謝辞

本論文をまとめるに当り、各研究ステップにおける重要な課題に対して、常に有益かつ的確なご指導をいただいた電気通信大学電気通信学部電子工学科唐沢好男教授に心より感謝申し上げます。

また、本研究において主要な要素となっている M 分布に関し、重要なご指導、ご助言をいただくとともに、その他にも種々貴重なご助言をいただいた北見工業大学電気電子工学科細矢良雄教授に深く感謝申し上げます。

KDDI 研究所野本真一執行役員には、降雨データ処理などに関し、また、大阪府立大学工学部工学研究科真鍋武嗣教授には、降雨データの測定、レドーム上の水膜による減衰量解析などに関し、有益なご助言をいただきました。深く感謝いたします。

さらに、本研究は KDDI 株式会社、KDDI 研究所の方々にご協力、ご支援をいただき、これまでの成果に結びつけることができたものであり、特に、KDDI 株式会社の原隆行氏、谷島誠氏、中間浩一氏、斉藤研次氏、西村安由氏、KDDI 研究所の難波忍氏には、データ解析等において多大なご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1]: ITU-R 勧告 Rec.P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modelling”, August 2007 .
- [2]: 森田和夫, 樋口伊佐夫, “ 降雨による電波の減衰量の推定に関する統計的研究 ”, 研実報, Vol.19, No.1, pp.97-150, 1970 .
- [3]: 森田和夫, 樋口伊佐夫, “ ミリメートル波帯降雨減衰の推定 ”, 研実報, Vol.24, No.9, pp.2061-2071, 1975 .
- [4]: 森田和夫, 樋口伊佐夫, “ 準ミリ波帯降雨減衰分布についての考察 ”, 研実報, Vol.25, No.4, pp.803-809, 1976 .
- [5]: 細矢良雄, 佐々木収, 白土正, 森田和夫, “ 20GHz 帯降雨時伝搬特性の推定 ”, 研実報, Vol.33, No.6, pp.1221-1231, 1984 .
- [6]: 岡本英二, 荘司洋三, 浜口清, 小川博世, “ P-P 方式 622Mbps ミリ波加入者系無線アクセスシステムの検討 ”, 2001 信学総大, B-5-232, p.630, 2001 .
- [7]: 野本真一, 中間浩一, 岸洋司, “ 降雨の空間相関を考慮したメッシュ型無線ネットワークの回線稼働率評価 ”, 信学技報, CS2001-50, RCS2001-57, pp.49-56, 2001 .
- [8]: 仁平勝利, 馬場光浩, 斉藤利夫, “ 26GHz 帯ワイアレス IP ネットワークシステム(ステップ2)の開発 ”, NTT 技術ジャーナル, Vol.15, No.3, pp.34-37, 2003 .
- [9]: 浜口清, 荘司洋三, 金澤亜美, 小川博世, 明山哲, 白木裕一, 廣瀬敏之, 嶋脇秀徳, 坂本孝一, “ ミリ波アドホック無線アクセスシステム III— (1) システム概念と成果の概要— ”, 2004 信学総大, 2004-3 .
- [10]: 加々見修, 豊田一彦, 梅比良正弘, “ 次世代無線 LAN 技術 ”, NTT 技術ジャーナル, Vol.16, No.11, pp.23-27, 2004 .
- [11]: 小川博世, “ 60 GHz 帯ミリ波ワイヤレスアクセスシステムの標準化動向 ”, 電気学会誌, Vol.125, No.2, pp.94-97, 2005 .
- [12]: 細矢良雄, “ 日本各地の 1 分雨量分布の一推定法 ”, 信学論(B), Vol.J71-B, No.2, pp.256-262, Feb. 1988 .
- [13]: 多賀登喜雄, 石田未央, 佐々木収, “ 無線回線設計に必要な 1 分間降雨強度分布推定法の比較と条件付 M 分布の提案 ”, 信学技報 A・P 2002-57, pp.7-12, July 2002 .
- [14]: 秋元守, 原田耕一, 渡邊和二, 市川敬章, “ 短時間降雨の経年変化と日本全国を対象とする 1 分間降雨強度分布の推定法への反映 ”, 信学論(B), Vol.J86-B, No.10, pp.2166-2173, Oct. 2003 .
- [15]: 唐沢好男, 松戸孝, “ 降雨減衰推定における安全係数の概念 ”, 信学論(B), Vol.J71-B, No.6, pp.772-778, 1988 .
- [16]: 進士昌明, “ 無線通信の電波伝搬 ”, 電子情報通信学会, 2002-3
- [17]: 森田和夫, “ 降雨強度分布についての考察 ”, 研実報, Vol.26, No.5, pp.1469-1480, 1977 .
- [18]: ITU-R 勧告 Rec.P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”, March 2005 .
- [19]: S.H.Lin, “ More on Rain Rate Distributions and Extreme Value Statistics ”, Bell Sys. Tech. J., 57, 5, pp.1545-1568, 1978-5/6 .
- [20]: 森田和夫, “ 年間および強雨期における降雨強度分布の推定法 ”, 研実報, Vol.27, No.10, pp.2249-2266, 1978 .
- [21]: 森田和夫, “ 衛星通信回線における伝搬特性の推定法(準ミリ～ミリ波帯の場合) ”, 研実報, Vol.28, No.8, pp.1661-1676, 1979 .

- [22] : F.Moupfouma , “ Rainfall rate statistics distribution and induced attenuation in equatorial and tropical climates ” , Ann. Telecommun. , 37 , 3-4 , pp.123-128 , 1982-3/4 .
- [23] : 野本真一 , 難波忍 , 中間浩一 , 小野健一 , “ 単調増加保証補間による転倒マス式雨量計データからの降雨強度算出法 ” , 信学論(B) , Vol.J88-B , No.4 , pp.762-770 , April 2005 .
- [24] : Milton Abramowitz , Irene A. Stegun “ Handbook Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables ” ,Dover Publications, Inc., New York ,pp.931-933 ,1974 .
- [25] : 真鍋武嗣 , 小林久人 , 井原俊夫 , 浦塚清峰 , 古濱洋治 , “ 降雨減衰を用いたヨーロッパ各地の降雨強度空間相関係数の検討 ” , 信学技報 , AP-84-130 , pp.47-52 , 1984 .
- [26] : Toshio IHARA, Yoji FURUHAMA, Takeshi MANABE, “Modification of Morita and Higuti’s Prediction Method of Lognormal Rain Attenuation Distribution by Using Spatial Correlation of Specific Attenuation”, The Transaction of the IECE of Japan, Vol.E69, No.2, pp.139-147, 1986 .
- [27] : 唐沢好男 , 松戸孝 “ 日本全国を対象とする 1 分間降雨強度分布推定法 ” , 信学論(B- ) , Vol.J73-B- , No.10 , pp.518-527 , 1990 .
- [28] : 伊藤知恵子 , 細矢良雄 , “ M 分布と地域気候パラメータを用いた世界的な降雨減衰分布推定法の提案 ” , 信学論(B) , Vol.J87-B , No.7 , pp.979-989 , 2004 .
- [29] : 佐藤明雄 , 小川英一 , “ 準ミリ波帯におけるガラスの反射、透過特性と整合層の効果 ” , 信学技報 A・P82-142 , pp.37-44 , 1983-02 .

## 関連論文の印刷公表の方法及び時期

- (1) 全著者名：野本真一、難波忍、中間浩一、小野健一  
論文題目：単調増加保証補間による転倒マス式雨量計データからの降雨強度算出法  
印刷公表の方法及び時期：電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J88-B, No.4, 2005年4月  
(第4章の内容)
- (2) 全著者名：小野健一、西村安由、中間浩一、斉藤研次、野本真一、唐沢好男  
論文題目：気象庁1分間降水量データを用いた1分間降雨強度累積分布の高精度推定法  
印刷公表の方法及び時期：電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J88-B, No.8, 2005年8月  
(第4章の内容)
- (3) 全著者名：小野健一、唐沢好男  
論文題目：気象庁の1分間降水量データを用いた日本各地における1分間降雨強度特性と最適な近似分布モデルについて  
印刷公表の方法及び時期：電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J89-B, No.3, 2006年3月  
(第5章の内容)
- (4) 全著者名：小野健一、唐沢好男  
論文題目：降雨減衰確率推定手法の精度向上を目的として降雨強度の $n$ 乗の空間相関特性に関する考察  
印刷公表の方法及び時期：電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J89-B, No.10, 2006年10月  
(第6章の内容)
- (5) 全著者名：小野健一、唐沢好男  
論文題目：日本全国を対象とする $M$ 分布を用いた異積分時間降雨強度確率分布の高精度変換法  
印刷公表の方法及び時期：電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J90-B, No.3, 2007年3月  
(第7章の内容)
- (6) 全著者名：小野健一、唐沢好男  
論文題目：安全係数の概念の導入した $M$ 分布近似降雨減衰確率推定法  
印刷公表の方法及び時期：電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J91-B, No.2, 2008年2月  
(第8章及び第9章の内容)

## 著者略歴

小野 健一（おの けんいち）

- 1953年8月7日 香川県に生まれる．
- 1974年3月 大阪府立工業高等専門学校電気工学科卒業．
- 1974年4月 国際電信電話株式会社入社、  
衛星通信の運用保守に従事．
- 1981年3月 国際電信電話株式会社休職、  
政府専門家（衛星通信）として南米パラグアイに派遣．
- 1985年3月 国際電信電話株式会社復職、  
その後、第二電電株式会社、日本移動通信株式会社等との合併を経て、社名は KDDI 株式会社となり、現在に至る．  
この間、下記研究の他に、地上マイクロ波伝送路、加入者無線システム、移動体通信システムの開発、建設、運用、保守等に従事．  
現職責：建設統括本部 au 建設本部建設統括部長．
- 1985年4月～1990年3月の間、国際電信電話株式会社にて加入者無線システムの開発研究に従事．
- 2001年10月～2004年3月の間、KDDI 株式会社にて降雨減衰確率推定に関する研究に従事．
- 電子情報通信学会会員．