

# 安全係数の概念を導入した降雨減衰推定法

唐沢好男<sup>\*1</sup> 安永正幸<sup>\*2</sup>  
松戸孝<sup>\*3</sup> 山田松一<sup>\*4</sup>

A prediction method of rain attenuation on earth-space paths  
incorporating a concept of the factor of safety

By

Yoshio KARASAWA, Masayuki YASUNAGA, Takashi MATSUDO:  
Radio Transmission Laboratory, KDD Meguro R&D Laboratories  
Matsuichi YAMADA : KDD Meguro R&D Laboratories

This paper describes a concept of the factor of safety for prediction of rain attenuation, the statistics of which have considerable year-to-year variations. Firstly, i) we present an improved prediction method excluding an error trend of the existing CCIR model. To put the concept of the factor of safety concretely, ii) we examine the year-to-year variation of 0.01% one-minute rainfall rate based on one-hour rainfall rate for 30 years in Tokyo and Osaka, the data of which are easily available from current meteorological observation networks such as the AMeDAS in Japan; and finally, iii) we make clear the relation between the factor of safety for rain attenuation prediction and MTBF which is a typical parameter measuring system reliability.

## 1. まえがき

10GHz 以上の電波が用いられる衛星通信回線や加入者無線回線、あるいは地上マイクロ波回線の効率的なシステム設計を行う際には、降雨による減衰や XPD 劣化等の伝搬劣化量を正確に把握することが重要である。このためには、信頼性の高い伝搬推定法が有用なものとなる。

降雨減衰推定法に限って見ても、CCIR の方法<sup>(1)</sup>を含めて相当数のものがこれまでに提案され

ている。その思想はいずれも、「特定する地域に見合った降雨強度（1分間降雨強度が多い）を入力パラメータとして得られる降雨減衰推定値が実際の降雨減衰量と一致するものを良い推定法とする」ものである。上記意味での良い推定法は特定の分野に対しては既に実用の域に達しているものもあるが、一般には、それ自体を研究の対象としているのが現状である。

一方、例え良い推定法が確立されたとしてもこれにより得られる推定値は降雨減衰の平年値を与えるもので、特定の1年に限って見れば年ごとの雨の降り方の違いに起因して推定値と実測値にはなんらかのずれが生じることになる。このため現実的には、回線設計に余裕のある範囲で、推定値

\*1 目黒研究所 無線伝送研究室担当主任研究員

\*2 ノ 無線伝送研究室主査

\*3 ノ 無線伝送研究室

\*4 ノ 次長

に適度な安全係数を掛けた少し大きめの値を用いて安全サイドの設計を行うことが多い。そういったときに、余裕をもって設定された値がどの程度安全であるかということを明らかにしておくことは、回線設計上非常に有用であると思われる。

本稿では、まず、このように年ごとにばらつく雨の降り方を統計的に対処し得るよう安全係数とMTBF (Mean Time Between Failure) の概念を述べる。次にこの概念の具体化に不可欠な良い推定法を得る観点から従来の衛星回線降雨減衰推定法の誤差の軽減を図った改良推定法を提案する。また、気象庁の地域気象観測システム (AMeDAS) 等で得られる 1 時間降雨強度から 1 分間 (あるいは 10 分間) 降雨強度を推定する方法を述べ、この方法による日本の降雨の年ごとの変化特性を明らかにする。

最後に、改良推定法と降雨の年度変化特性を利用して、降雨強度及び降雨減衰推定法における安全係数と MTBF との関係を明らかにする。

## 2. 良い降雨減衰推定法とは

### 2.1 降雨強度と降雨減衰

回線設計に利用する降雨減衰推定法は、瞬時瞬時の減衰を予測するものではなく、年間又は最悪月といった一定の期間での減衰量の確率分布 (統計値) を与えるものである。このため降雨に関する入力パラメータも対応する期間での統計値が用いられることになる。降雨に関する統計値としては、1 分間降雨強度 (1 分ごとに降雨量を計り、これを 60 倍して 1 時間当たりの降水量 (単位: mm/h) に換算したもの) が通常用いられる。

狭義の意味での良い推定法とは、正確な降雨強度の統計値を与えることにより、正確な降雨減衰の累積分布特性が推定できるものをいう。これまで衛星回線降雨減衰推定法は CCIR の方法を含め種々の方法が提案されているが、方法によって降雨強度の統計値の利用の仕方も異なっている。例えば、①CCIR の方法<sup>(1)</sup> や次章で提案する筆者らの方法のように年間降雨強度の 0.01% 値のみを用

いて全時間率の減衰量を推定するもの、②求めたい時間率ごとの降雨強度を入力してそれに対応する時間率の減衰量を推定するもの<sup>(2)</sup>、③複数の時間率 (例えば 0.01% と 0.1%) の降雨強度より全時間率に対する減衰量を求める方法<sup>(3)</sup>がある。

①に分類される推定法による場合、降雨強度の 0.01% 値は全時間率に対する降雨減衰推定の基礎となるため特に重要な意味を持つ。

いずれの場合も、精度良い推定値を得ようとする場合、その地域における正確な降雨強度分布 ( $R_{0.01}$  等) を把握することが必要となる。

### 2.2 安全係数とMTBF<sup>(4)</sup>

今、回線稼動率 (Availability) を年間の 99.99% 以上とし、これを実現するために、降雨マージン  $A_m$  (dB) を見込んで回線を設計したとする。その際の実際の稼動率が降雨の年ごとの変化に従って、例えば図 1 に示すような結果になったとする。この場合、2, 4, 5, 6, 9, … 年目は規定値を満たしているが、1, 3, 7, 8, … 年目では満たしていない。これに基づく判定を図中に○×で示している。ここで、×と×の間にある○の数を時系列で並べると、図 1 の例では、1, 3, 0, 2, … となる。この値の平均値を  $n$  とすると、この  $n$  は信頼性の評価尺度 MTBF と等価なものと見なし得る。すなわち、ここでいう MTBF $n$  年とは、1 年を単位として、「平均  $n$  年連続して規定の稼動率を満たす

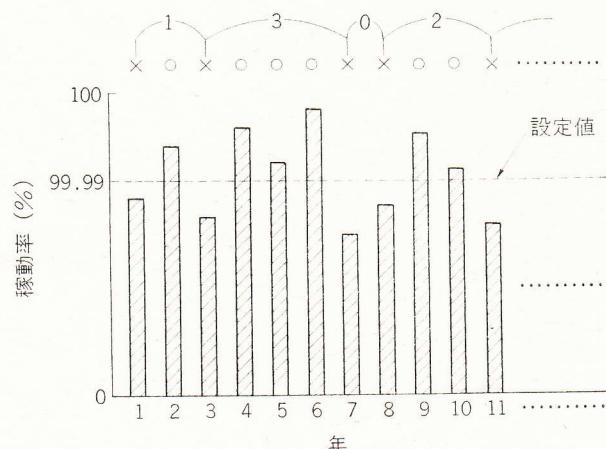


図 1 降雨の年ごとのばらつきによって変化する回線稼動率の例 (概念図)

す状態」あるいは「平均  $n+1$  年に 1 回規定の稼動率を満たさない年がある状態」で定義されるものとなる。

上記定義に基づけば、良い推定法とは、 $\eta=1$ となるような降雨減衰量  $A_1$  を正確に求め得るものということになる。この場合、 $A_m=A_1$  とする  $n=1$  となるが、例えば、回線稼動率が規定値以下となる年が 5 年に 1 回程度としたい場合（すなわち  $n=4$ ）， $A_m$  は  $A_1$  より大きい値を見込む必要がある。ここでは、 $A_m$  と  $A_1$  の比を降雨減衰量に対する安全係数  $\eta_A$  と定義する。

任意の時間率  $p$  に対する降雨減衰推定値の MTBF が  $n$  年となるような安全係数  $\eta_A$  を定めると  $\eta_A$  は、

$$\eta_A(n, p) = \frac{A(p, \eta_R(n) \overline{R_{0.01}})}{A(p, \overline{R_{0.01}})} \dots \dots \dots (1)$$

$A(p, R)$ ：1 分間降雨強度の 0.01% 値が  $R$  である地点における時間率  $p\%$  での降雨減衰推定値

$\overline{R_{0.01}}$ ：1 分間降雨強度 0.01% 値 ( $R_{0.01}$ ) の期待値

$\eta_R(n)$ ：MTBF  $n$  年に対応する降雨強度の安全係数

で表わされる。ここで  $\eta_R$  は

$$\eta_R(n) = \frac{\langle R_{\max, n+1} + R_{\max 2, n+1} \rangle}{2\overline{R_{0.01}}} \dots \dots \dots (2)$$

$\langle \cdot \rangle$ ：期待値

$R_{\max, n+1}$ ： $n+1$  年間での  $R_{0.01}$  の最大値

$R_{\max 2, n+1}$ ： $n+1$  年間での  $R_{0.01}$  の第 2 最大値である。なお、式(2)中の  $(R_{\max, n+1} + R_{\max 2, n+1})/2$  は最大値と第 2 最大値との中点を表わし、その平均値は  $n+1$  年の中で平均 1 回その値を超えることを許す閾値（降雨強度）である。4 章ではこの  $\eta_R$  及び  $\eta_A$  と  $n$  の具体的な関係について述べる。

### 3. 降雨減衰推定法の高精度化<sup>(5)</sup>

本章では、安全係数の具体化に必須な精度の良い降雨減衰推定法を得る観点から、従来手法 (C (Jan. 1989)

CIR の方法) の誤差の軽減を図った改良推定法を提案する。まず、CCIR の方法が降雨の少ない地域に対しては減衰量が過小評価となること、逆に降雨の多い所では過大評価する傾向があることを述べる。次に、雨域の広がりを  $R_{0.01}$  の関数として取り扱うことにより、上記傾向を取り除いた精度の良い方法が得られることを述べる。

筆者らは、参考文献(5)において、CCIR の方法を含む 8 種類の推定法について、10~20GHz 帯斜め伝搬路での長期間取得データ（128 種類の測定データ）に基づく推定精度の評価を行った。この評価結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 誤差の平均値に関しては、CCIR の方法が他の方法に比べて小さい。それ以外の方法については特に顕著な優劣はない。
- ② 誤差の標準偏差(ばらつきの大きさ)に関しては CCIR の方法、Misme & Waldteufel の方法<sup>(6)</sup> 及び Lin の方法<sup>(7)</sup>にやや優位性が見られる。

結論として、世界的な規模での降雨減衰量を推定するには、評価した 8 種類の推定法の中で CCIR の方法が精度の点でも、使いやすさの点でも優れていることを確認した。

更に CCIR の方法を、CCIR の降雨気候区<sup>(8)</sup>別に誤差を評価した結果、降雨強度が比較的小さい地域（例えば、ヨーロッパに多く見られる CCIR の気候区 E：1 分間降雨強度の 0.01% 値  $R_{0.01}=22$  mm/h）では過小評価（推定値 < 実測値）となること、逆に降雨強度が比較的大きい地域（例えば西日本の大部分を占める気候区 M： $R_{0.01}=63$  mm/h）では過大評価（推定値 > 実測値）となる傾向があることが分かった。以下ではこの傾向を取り除いた CCIR の改良手法（以下この方法を PROP-A と呼ぶ）を提案する。

CCIR の方法を含む多くの推定法は次の基本式によっている。

$$A = kR^\alpha \cdot L_e \quad (\text{dB}) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $kR^\alpha$  は降雨強度が  $R$  (mm/h) のときの 1km 当たりの降雨減衰量 (specific attenuation: dB/km),  $L_e$  は降雨の等価通路長 (effective path-

$\text{length : km}$ ) である。この等価通路長は、降雨の実効的な高さ及び雨域の実効的な広がりによって決定される。

ここでは、雨域の広がりの性質に着目して推定誤差の最小化を図る方法を提案する。

CCIR モデルでは、等価通路長は

で与えられている。ここで  $L_s$  は降雨の実効的な高さと仰角  $\theta$  によって決まる斜め伝搬通路長、 $L_0$  は降雨の実効的な広がりを表わす量である。式(4)は  $L_s \cos \theta \ll L_0$  のとき  $L_e \approx L_s$ 、 $L_s \cos \theta \gg L_0$  のとき  $L_e \approx L_0 / \cos \theta$  となる性質を有する。CCIR モデルでは  $L_0$  は 22.5km の固定値で与えられている。

一つの地域に限定して考えると対流性降雨のように、降雨強度が非常に大きい雨（例えば時間率0.001%に相当するような雨）では、これより弱い雨（例えば0.1%）に比較して一般に雨域の広がりは小さい。しかしながら、異なる気候区の同一時間率に対応する降雨の雨域の広がりに関しては、例えば、多雨地域の0.01%値（雨量が多い）と乾燥地帯の0.01%値（雨量は少ない）での雨域の広がりの程度に関しては必ずしも明確なものはない。そのため、CCIR モデルのように、これを一定と考えて取り扱っても、かなり良い精度で推定できることは既に述べたとおりである。

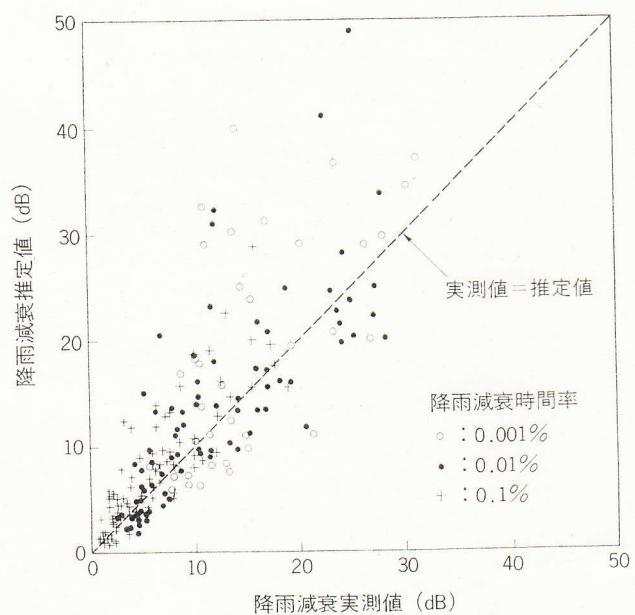
一方、前述のCCIRモデルの誤差の傾向から推定するとこのような同一時間率で統一したそれぞれの降雨であっても、雨域の広がりは若干降雨強度依存性があって、降雨強度が大きいと雨域の広がりは小さくなるものと考えた方が、より良い推定精度が得られるものと期待できる。

そこで、ここでは時間率0.01%における $L_0$ を同時間率に対応する降雨強度 $R_{0.01}$ を用いて次式で仮定する。

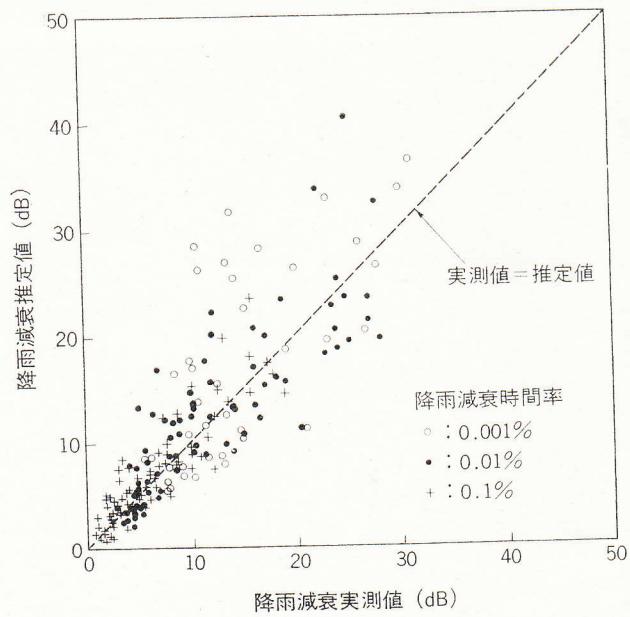
$a, b$  の値については、パラメトリックスタディの結果、推定誤差が最も小さくなるものとして、 $a=35, b=0.015$  を得た。この修正により、各時間率ごとの推定誤差 (rms 誤差) は CCIR の方法

に比較して10~20%の改善となっている。

図2は最近改訂されたCCIRのデータバンク<sup>(9)</sup>に登録されている衛星回線（ラジオメータによる測定も含む）の実測データと推定値の関係を示した散布図(scattergram)で、推定に必要な $R_{0.01}$ は実測降雨データ(94測定)を用いている。図で、○、●、+は、それぞれ0.001%、0.01%、0.1%の値を示している。図から点線の左上部分にある



(a) CCIR の方法



(b) 改良推定法 (PROP-A)

データ（過大評価のデータ）の点線からのずれが小さくなっていること、視覚的にも有意な改善が図られていることが分かる。

なお、中緯度地域にあってかつ衛星仰角が比較的高い場合には CCIR の方法と PROP-A の推定値に有意な差はない。しかしながら、衛星仰角が低い場合あるいは熱帯多雨地域では PROP-A の方法がかなり良い精度を有すると期待できる<sup>(5)</sup>。

#### 4. 安全係數

#### 4.1 降雨強度に対する安全係数

特定する地域における降雨強度の安全係数を知るためには、年間降雨統計量の年ごとのばらつきを把握しておくことが必要となる。3章で提案した推定法のように、1分間降雨強度の0.01%値( $R_{0.01}$ )を用いるものでは、その地域の $R_{0.01}$ の年ごとの変わり具合が把握できれば降雨強度の安全係数 $\eta_R$ とMTBFの関係を求めることができる。ところが、一つの地点で1分間降雨強度が長期間(例えば5~10年)測定され、かつそのデータが公表されていることは極めて稀である。

一方、気象データの収集には、近年、気象庁による地域気象観測システム(AMeDAS)が稼動しており、現在日本全国約1,300箇所の毎正時ごとの降水量(1時間降雨強度)がオンラインシステムでデータ収集されている。そこで、こういった情報を利用して、降雨の地域性、年変化特性が把握できれば、安全係数の具体化が図れることになる。

以下、年間の1時間降雨強度分布から  $R_{0.01}$  を推定する方法を示し、かつ、この長期間統計値から降雨強度に対する安全係数を示す。

#### 4.1.1 1時間降雨強度の統計データから1分間降雨強度の0.01%値を推定する方法

森田は日本の主要気象台で観測された降雨データのチャート記録から1957～1966年の10年間にわたる10分間降雨強度特性を求め、各地の0.01, 0.1, 1 %値等を明らかにしている<sup>(1)(2)</sup>。また、札幌、東京、大阪、福岡については上記10年間の年度ご

との推移を示している<sup>(1)</sup>。これに対して、本稿では、降雨情報として最も容易に入手し得る毎正時ごとの時間降水量（1時間降雨強度）に着目し、東京（東京管区気象台：大手町）及び大阪（大阪管区気象台：東区）における1956～1985年の30年間の1時間降雨強度を入手し、このデータによる1分間（及び10分間）降雨強度の時間率0.01%値の推定を試みる。

まず、森田が示した1957～1966年の各年度に対応する実測10分間降雨強度（参考文献(1)の図23, 24）に対して、同期間における1年単位の総降水量 ( $R_t$ : mm), 1時間降雨強度の最大値 ( $R_{1H}$ : mm/h), 同上位3時間の平均値 ( $R_{3H}$ ), 上位5時間の平均値 ( $R_{5H}$ ), 及び上位10時間の平均値 ( $R_{10H}$ ) との相関を調べる。

表1は東京及び大阪における上記諸量と森田の10分間降雨強度との相関係数を示している。同表から、10分間降雨強度の年間統計の0.01%値に対して、総降水量とは相関が弱く、 $R_{5H}$ と高い相関を示すことが分かる。この $R_{5H}$ と10分間降雨強度の0.01%値 $R_{0.01/10\text{min}}$ とは

で近似される.

図3は東京・大阪両地点について森田が求めた値<sup>(1)</sup>（実測値）と式(6)による推定値を比較して示したものである。両図とも $R_{5H}$ からの推定値は実測値の変化に良く追従しており、少なくとも、年間総降水量や1時間降雨強度の最大値から0.01%値を推定するよりは良い精度であると結論付けられよう。

表1 東京・大阪地区における降雨統計諸量と  
実測10分間降雨強度0.01%値(参考文献  
(1)から)との相関係数(1957~1966年)

地区	東	京	大	阪
降雨量				
$R_t$	0.604		0.677	
$R_{1H}$	0.806		0.892	
$R_{3H}$	0.957		0.919	
$R_{5H}$	0.973		0.929	
$R_{10H}$	0.953		0.930	

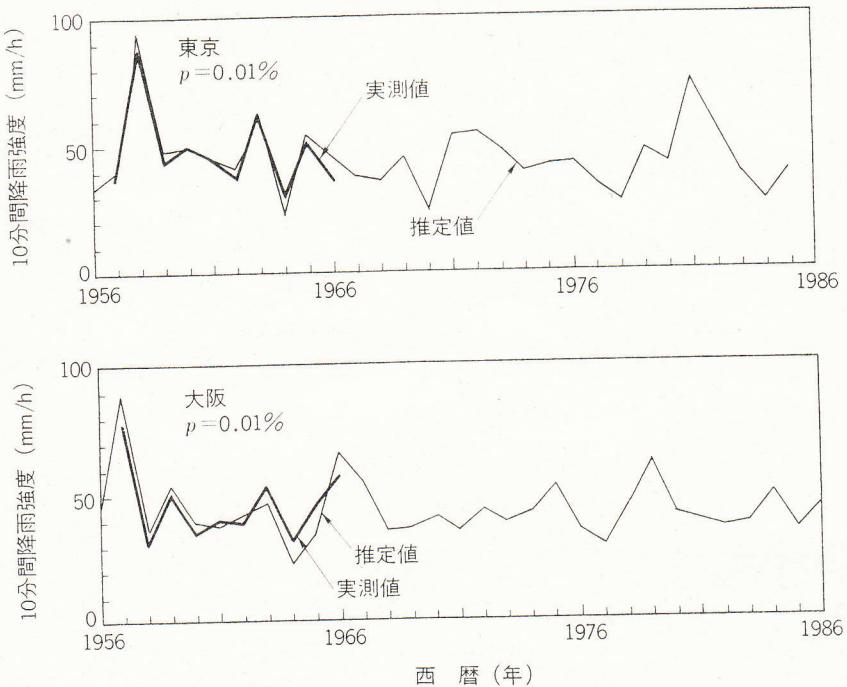


図3 東京及び大阪における  $R_{5H}$  より推定した10分間降雨強度の推定値  
(1985~1986年)と実測値(1957~1966年、参考文献(11)から)

10分間降雨強度から1分間降雨強度への換算は、降雨の実測値をベースとした理論的な考察によって<sup>10)(11)</sup> 0.01% 値で 1.16 倍となることが森田によって<sup>10)(11)</sup>、また、実験的にはこれよりやや大きめな値となることが土井らによって<sup>12)</sup> 示されているので、ここでは 1.2 倍として、1分間降雨強度  $R_{0.01}$  との関係を

で与える。この性質を利用すると、各地の気象台や測候所から報告されているデータ（気象日原簿等）やAMeDASのデータ等1時間降雨強度の統計値により、各地点の $R_{0.01}$ を推定できる利点がある。

#### 4.1.2 主要都市における降雨強度の安全係数

前項において1時間降雨強度の上位5時間平均値  $R_{5H}$  が10分間降雨強度年間累積時間分布の0.01%値と相関が強いことを述べた。本項では、各地の  $R_{5H}$  の性質を調べ降雨強度の安全係数とMTBFの関係について述べる。

図4は、札幌、東京、大阪、那覇における1956～1985年の30年間の各年度ごとの $R_{5H}$ を求め、これを式(2)の定義に従って $\eta_R$ と $n$ の関係を示し

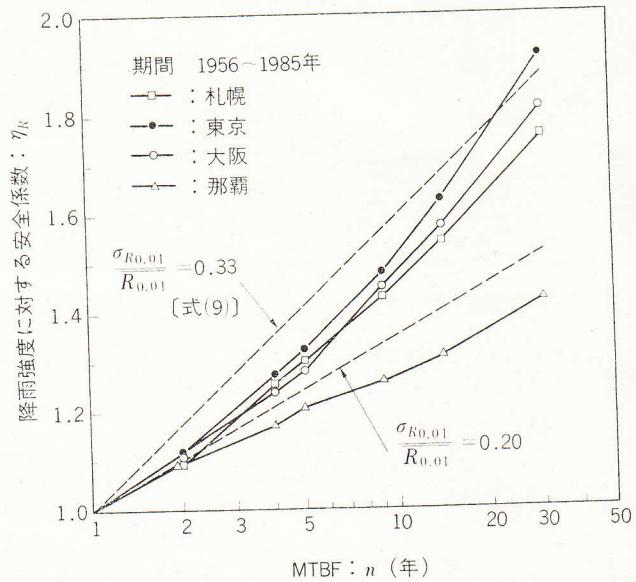


図4 1分間降雨強度0.01%値の平年値( $\bar{R}_{0.01}$ )に対する安全係数 $\eta_R$ とMTBF $n$ 年の関係

たものである.

図から、東京、大阪、札幌についてはほぼ同様な傾向があること、那覇では年度ごとのばらつきが小さいことが分かる。

図4のそれぞれのカーブは式(7)によって換算した  $R_{0.01}$  の平均値  $\overline{R_{0.01}}$  と標準偏差  $\sigma_{R0.01}$  を用いて

$$\eta_R(n, \overline{R_{0.01}}, \sigma_{R0.01}) = 1 + 1.8 \frac{\sigma_{R0.01}}{R_{0.01}} \log n$$

.....(8)

$$(1 \leq n \leq 30)$$

ではほぼ近似できる（那覇のデータ（図4における $\sigma_{R,0.01}/\overline{R}_{0.01} = 0.20$ に相当）については  $n > 5$  でやや過大評価となっている）。

表2は、日本の主要地域の1976～1986年の11年間の1時間降雨強度データ（札幌、東京、大阪、那覇は30年間のデータ）から各年度の $R_{5H}$ を求め、これを $R_{0.01}$ に換算した後、 $\overline{R_{0.01}}$ 及び $\sigma_{R_{0.01}}$ を推定したものである。参考までに森田の1分間降雨強度推定値<sup>10</sup>（総降水量、雷雨日数、台風雨日数から推定）及び土井らの生データ解析に基づく1分間降雨強度実測値<sup>13</sup>も併せて示している。観測期間の違い、データ処理方法の違い等を考慮すれば、土井らの那覇のデータを除いては、全体的に良く一致しているといえる。表2を見る限り、東日本の雨( $R_{0.01}$ )の方が西日本の雨より年度ごとのばらつきが大きい傾向が読み取れる。

表2では、ばらつきの最大値は33%程度であり、この場合について式(8)を適用すると

表2 日本の主な地域における1分間降雨強度  
0.01%値の推定値

推定法		(単位:mm/h)	
地 点		森 田	土 井 ら
札 幌	32.7 (0.278)	31.1	—
仙 台	45.0 (0.320)	39.6	41.0
東 京	53.4 (0.326)	52.7	52.0
新 潟	37.8 (0.242)	40.5	—
名古屋	60.9 (0.254)	53.6	83.0
尾 鶴	117.9 (0.243)	102.6	109
大 阪	52.3 (0.285)	50.1	—
玄 島	49.6 (0.175)	55.9	—
山 口	60.3 (0.185)	—	—
福 岡	69.1 (0.160)	57.3	71.0
那 須	88.9 (0.204)	66.0	160.0

(参考) 森田の値は参考文献(10)から、土井らの値は参考文献(13)から引用。

$$\eta_R(n) = 1 + 0.6 \log \kappa \dots \quad (9)$$

$(1 \leq n \leq 30)$

となる。特に年変化の標準偏差が明らかでない地域については、大きめな年変化を見込んだ式(9)の適用が無難である。式(9)から  $n=2, 3, 5, 10, 30$  に対して  $\eta_R$  を求めると  $\eta_R = 1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 1.9$  となる。例えば  $R_{0.01}$  が  $50\text{mm/h}$  である地域において、平均 5 年間連続して回線稼動率が年間 99.99 % を満たすような設計をしたい場合、その地域の降雨強度を  $70\text{mm/h}$  ( $= 1.4 \times 50$ ) として降雨減衰量を求めれば良いことになる。

#### 4.2 降雨減衰推定値に対する安全係数

前節において、1分間降雨強度0.01%値の年変化特性を求め、降雨減衰推定における安全係数把握のための基礎データを得た。降雨減衰推定法における安全係数とMTBFの関係を正しく評価するためには、1章で述べた意味での良い推定法が確立されていることが前提となる。ここでは、現時点において最も推定誤差が小さいと期待できるPROP-Aモデルによる計算結果を図5に示す。

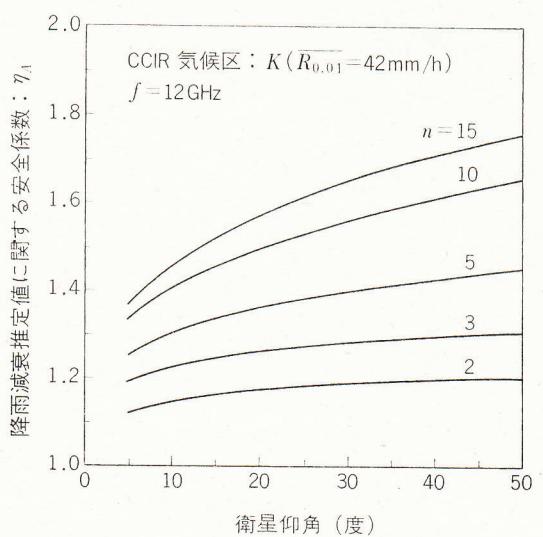


図5 温帯地域（気候区：K）の平年の降雨減衰推定値に対する安全係数 $\gamma_A$ とMTBF $n$ 年の関係（適用可能時間率 $p$ ：0.001～1%）

が低くなるに従い  $\eta_A$  が小さくなる性質は、PROP-A モデルにおける等価通路長  $L_e$  の降雨強度依存性によるもので  $n$  の増加とともに（すなわち降雨強度の増加とともに） $L_e$  が小さくなる効果が現われている。

## 5. 提案する推定法のまとめ

本稿で提案した降雨減衰推定法を step-by-step 形式で記述したものを以下に示す。

（Step 番号に 2 重線のある部分が筆者らの提案するモデルの特徴である）

Step 1 置局における 1 分間降雨強度の 0.01% 値  $\overline{R_{0.01}}(\text{mm/h})$  を求める：

- 1 分間降雨強度の年間統計値（実測値：3 年以上の期間で測定されたものが望ましい）がある場合はこれを用いる。
- 1 時間降雨強度の年間データがある場合には各年度の年間上位 5 時間分の降雨強度の平均値  $R_{5H}$  を求め、

$$R_{0.01} = 2.3 R_{5H}$$

より推定した  $\overline{R_{0.01}}$  を用いる。

（ただし、上式は日本以外の地域に対しては吟味されていない）

- いずれのデータもない場合は、CCIR Rep. 563 より置局の降雨気候区を求め、これに対応する 1 分間降雨強度を用いる。

Step 2 MTBF  $n$  年に対応する降雨強度の安全係数を求める：

$$\eta_R = 1 + 1.8 \frac{\sigma_{R0.01}}{R_{0.01}} \log n$$

$\sigma_{R0.01}$  は  $R_{0.01}$  の年ごとのばらつきの標準偏差で、この値が不明の場合は

$$\eta_R = 1 + 0.6 \log n$$

とする。

Step 3 MTBF  $n$  年に対応する 1 分間降雨強度  $R_{0.01, n}$  を求める：

$$R_{0.01, n} = \eta_R \overline{R_{0.01}}$$

Step 4 1km当たりの降雨減衰量  $A_s(\text{dB/km})$  を求める：

$$A_s = k(R_{0.01, n})^\alpha$$

$k, \alpha$  は周波数、偏波、仰角の関数として CCIR Rep. 721 に与えられている。

Step 5 斜め伝搬通路長  $L_s(\text{km})$  を求める：

$$L_s = \frac{H - H_s}{\sin \theta} \quad (\theta : \text{仰角}, \theta \geq 10^\circ)$$

ここで  $H$  は降雨の実効高で、緯度  $\phi$  の値によって次のようになる。

$$H = 4.0 \text{ km} \quad (0^\circ \leq \phi \leq 36^\circ)$$

$$H = 4.0 - 0.075(\phi - 36) \text{ km} \quad (\phi > 36^\circ)$$

また  $H_s$  は置局の海面高である。仰角  $10^\circ$  以下では地球の球形を考慮した式を用いる必要がある。

Step 6 雨域の広がりを表わす量  $L_{0, n}$  を求める：

$$L_{0, n} = a \exp(-b R_{0.01, n})$$

$$a = 35, b = 0.015$$

Step 7 等価通路長  $L_{e, n}(\text{km})$  を求める：

$$L_{e, n} = L_s / (1 + L_s \cos \theta / L_{0, n})$$

Step 8 時間率 0.01% における降雨減衰量  $A_{0.01, n}(\text{dB})$  を求める：

$$A_{0.01, n} = A_s L_{e, n}$$

Step 9 任意の時間率  $p$  (ただし  $0.001 \leq p \leq 1$ ) における降雨減衰量  $A_{p, n}$  を求める：

$$A_{p, n} = 0.12 A_{0.01, n} p^{-(0.546+0.043 \log p)} \quad (\text{dB})$$

## 6. む す び

降雨減衰推定法における安全係数の概念を述べるとともに、この概念の具体化に必須な 1 分間降雨強度の年変化特性について、1 時間降雨強度の統計値を用いた解析を試みた。本稿で述べた内容をまとめると以下のとおりである。

- ① CCIR の降雨減衰推定法には、低緯度多雨地域で減衰量を過大評価する傾向があるが、この傾向を取り除き精度の向上を図った降雨減衰推定法を得た。
- ② 年単位での回線稼動率を考え、規定の稼動率を満たす事象が平均  $n$  年連続する状態を信頼性の評価パラメータ MTBF を用いて MT

BF  $n$  年とした。また、MTBF  $n$  年に相当する推定値と MTBF 1 年に相当する推定値の比を降雨減衰推定における安全係数と定義し、この安全係数と  $n$  の関係を明らかにした。なお、ここで述べた安全係数の概念は普遍的なものと考えられるが、MTBF と安全係数との対応については、日本のデータに基づく解析結果であるため世界的なデータでの検証が必要となろう。

現在、CCIR の場でも 3 章で提示した推定法 (PROP-A) を含む多くの推定法の評価検証作業が進められており、より良い推定法実現のための努力が続けられている。また、近年異常気象が多発しているといわれており、気象の変化については電波伝搬研究の立場からも注目していく必要があると思われる。

最後に、気象データの提供、解析にご協力いただいた(財)日本気象協会関係各位に感謝する。

### 参考文献

- (1) CCIR: Propagation data and prediction methods required for earth-space telecommunication system, Rep. 564-3, SG5 (1986).
- (2) R.K. Crane: Prediction of attenuation by rain, IEEE Trans. Commun., COM-28, 9, 1717-1733 (1980).
- (3) Morita, K.: Estimation method for propagation characteristics on earth-satellite links in microwave and millimeter wavebands, Rev. of Elec. Comm. Labs., NTT, 28, 5-6 (1980).
- (4) 唐沢、松戸：降雨減衰推定における安全係数の概念、信学論 (B), J71-B, 6, 772-778 (1988).
- (5) Yamada, M., Karasawa, Y., Yasunaga, M. and B. Arbesser-Rastburg: An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz, Radio Science, 22, 6, 1053-1062 (1987).
- (6) P. Misra and P. Waldteufel: A model for attenuation by precipitation on microwave earth-space links, Radio Science, 15, 3, 655-665 (1980).
- (7) S.H. Lin: Empirical rain attenuation model for earth-satellite paths, IEEE Trans. Commun., COM-27, 5 (1979).
- (8) CCIR: Radiometeorological data, Rep. 563-3, SG 5 (1988).
- (9) CCIR: Up-dating the CCIR data bank; Slant path attenuation cumulative distributions; single-and multi-year data, IWP 5/2 document prepared by A. Paraboni, Doc. 88/3 (1988).
- (10) 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, NTT 通研実報, 27, 10, 2249-2266 (1978).
- (11) 森田和夫：降雨強度分布についての考察, NTT 通研実報, 26, 5, 1469-1480 (1977).
- (12) 土井、畑、倉橋：10秒・1分および10分間降雨強度累積時間分布の検討, 信学技報, AP 86-133, 37-44 (1986).
- (13) 土井、倉橋、三坂：日本各地における降雨強度累積時間分布の推定, 第314回 URSI-F 小委員会 (1987年5月).