

地上無線回線の降雨減衰推定法

～我が国における推定法高精度化への歩みと現行推定法の詳細～

唐沢好男

地上無線通信回線の降雨減衰推定法は、2011 年、総務省により三十数年ぶりに改正が行われ、これが現行の電波法関係審査基準に基づく計算手法となっている[1]。我が国における降雨減衰推定法構築は、電電公社時代の森田・樋口の研究[2]を嚆矢とし、1970～1980 年代、多くの研究・開発が進められた。2000 年代に入り、KDDI の小野らのグループは総務省受託研究の一環として、降雨減衰推定法の高精度化に取り組み、新たな推定法の構築を行った[3]。この手法は、森田・樋口の基本思想を踏襲し、かつ、新たな機能や独自の高精度化を取り入れたものであり、総務省の改正ではこの手法が採用された。この意味で、この推定法はオールジャパンの集大成と言えるであろう。

降雨による電波の減衰は、10GHz 以上の周波数で問題となる。第 5 世代移動通信がミリ波に至る高周波数利用を指向し、降雨減衰問題の重要性が再認識されつつある。本レポートでは、我が国における降雨減衰推定法高精度化の歩みや推定法の基本的考え方を述べると共に、新しい推定法での具体的な計算法を完備な形で示す。(なお、論文[3]及びその根拠となる一連の同一著者論文の詳細は、小野の学位論文[4]にまとめられている。)

目次

1. わが国における降雨減衰推定法開発の経緯	2
2. 降雨減衰推定法に関する基本事項	4
2. 1 降雨減衰係数	
2. 2 確率分布	
2. 3 降雨強度	
2. 4 空間相関	
2. 5 降雨減衰推定法の基本構造	
2. 6 安全係数の概念	
3. AMeDAS データを用いた日本全国の 1 分間降雨強度特性	13
4. 現行の降雨減衰推定法	14
4. 1 基本機能・特徴・モデリング思想	
4. 2 計算手順	
4. 3 レドームによる損失	
参考文献	21
付録 全国 1150 地点における 1 分間降雨強度特性値の例	23

1. 我が国における降雨減衰推定法開発の経緯

1 時間に 50mm 降る雨といえ、1 年間の最悪 1 時間に相当するような大雨である。この強さの雨が空間的に一様に降るとき、周波数 30GHz の電波は 1km 当たり凡そ 10dB の減衰を受ける。降雨強度・周波数・送受信間距離のそれぞれが大きくなるほど、減衰量も大きくなる。このため、10GHz 以上の高い周波数を用いる無線通信では、その回線設計に際して高精度な降雨減衰推定法が必要になる。

降雨減衰は、発生原因が体感的に理解できるので、雨滴に対する吸収量が電磁界解析問題として求められていれば、一見取り組みやすいように見える。しかし、降雨現象は雨の強さの統計的な性質においても、空間的な広がり方においても、地域や季節依存性が強く、年ごとの変動も大きいので、信頼度の高い回線設計を可能とする推定法（モデル）を構築するのは、思うほど簡単ではない。

降雨減衰は、無線回線の設計において世界共通の伝搬問題ではあるが、降雨特性に地域性が強いため、それぞれの国や地域で独自の推定法が作り上げられてきた経緯がある（注 1）。我が国においては、1960 年代後半より、電電公社（現 NTT）において研究が始まっている。森田・樋口は、全国の気象台での自記記録紙に記録された降雨データを読み取ってその統計的な性質を調べ、地上回線用無線システムに対する降雨減衰確率の推定法（の考え方）をまとめている[2]。この流れを汲み、1970～1980 年代において、いくつかの修正が加えられつつ高精度化が図られてきた[5]～[7]。

降雨減衰量を精度よく推定するためには、当該エリアでの降雨強度特性の把握が重要になる。降雨減衰推定で用いられる降雨強度特性は積分時間 1 分間での降雨強度（1 分間降雨強度）である。このような短い積分時間の降雨強度データ取得は、気象庁の観測所でも行われていなかったため、電波伝搬研究者が伝送実験とあわせて独自に 1 分間降雨強度データ取得に努めてきた。一方、気象庁では、1974 年より、日本全国約 1300 箇所に順次自動気象観測装置を置き、地域気象観測システム（AMeDAS）として運用を開始している（正式運用は 1979 年 11 月）。ここでは、降水量として、1 時間降水量や 10 分間降水量が取得されていて、データの一般利用も可能になった。そこで、細矢は、AMeDAS データの降雨減衰推定利用を目的として、積分時間の長い降水量を 1 分間降雨強度に変換する手法を提案した[8]。その解析の過程において、これまで、降雨強度分布が、ガンマ分布や対数正規分布で近似されていたのに対して[2],[6]、M 分布を提案し、広い確率範囲で良好な近似ができることを示した。また、伊藤・細矢は M 分布が、降雨強度ばかりではなく、降雨減衰の確率分布の近似にも適していることを示した[9]。

さらに、筆者等は、降雨強度の年ごとのばらつきが大きいことに着目して、これまでの推定法が平年値の特性を推定するものであったのに対して、平均 N 年間は連続してその特性が維持されるための安全係数の概念を提唱した[10], [11]（注 2）

このように、降雨減衰推定法について、折々に高精度化が図られていたにもかかわらず、総務省における固定局関係審査基準における降雨減衰確率計算法は、1970年代の森田・樋口法をベースとしたものから長らく改定が行われることは無かった。

1990年代に入り、地上回線としての無線の利用もマイクロ波中継から都市内での準ミリ波利用無線アクセス網への変化が顕著になってきた。折りしも、地球温暖化問題や都市部でのヒートアイランド現象など気温の長期的増加傾向が指摘され、降雨に対してもその影響があるのではという問題意識が生まれてきた。そのような折、2001年、総務省が発出した委託研究「FWAによる準ミリ波・ミリ波帯の効率的利用のための回線設計技術の調査検討」をKDDIが受託し、小野らのグループがこれを担当した。都内11箇所における1年半の測定実験で得られた降雨強度データや降雨減衰データから、降雨の空間相関特性や降雨減衰の確率分布を詳細に解析し、降雨減衰の確率分布をM分布とする新たなモデルを構築した[3]。また、AMeDASでは、1996年より1分間降水量データも取得されているが、転倒枡形の雨量計であることによって、そのまま減衰推定に用いる降雨強度とするには問題点があったが、独自の変換手法（乱数補正秒単位均し分配処理法）により、その有効活用を可能とした[12]。この手法により日本全国の降雨強度特性を明らかにし、推定法に用いるデータとして完備なデータベースを構築することができた[13], [3]。この改良された推定法と降雨強度のデータベースにより、日本全国における地上回線の降雨減衰確率を高精度に推定することが可能になった。

【注1】降雨減衰推定法では、衛星・地上回線や地域に共通な降雨減衰係数の理論研究を除いて、各国独自の計算法が用いられてきた（特に初期の頃）。しかし、衛星回線では、複数国を結ぶ国際通信が主なサービス対象であったため、世界共通の推定法が必要になり、CCIR/ITU-Rにおいて、標準推定法の構築が進められてきた。一方、本レポートが対象とする地上系の無線回線については、その地域に適用できる高精度な推定法があればそれで十分と言う意識があって、国際衛星通信回線のような標準化ニーズが低かった。ただし、近年は、ITU-Rの中では、降雨減衰推定に関して、衛星回線・地上回線の共通モデル化が志向されている。

【注2】安全係数の概念は筆者の思いつきである。なぜそれが生まれたかをメモとして残したい。筆者のKDD研究所時代に、ある企業から衛星回線の降雨減衰を計算してまとめる委託研究を受けた。内容は降雨減衰量の平年値の推定であったが、もし、報告書を提出したその年が偶然大雨の年になったとしたら、不稼働時間が予想以上に多くなって、委託元のお客さんからお叱りを受ける不安を感じた。そこで、安全係数の概念を導入することによって、そういうことにならないためにはこうしなさい、と言う逃げが用意できると思い、その報告書にこの苦肉の策を盛り込んだ。アイデアは困ったときに生まれるの例である。

2. 降雨減衰推定法に関する基本事項

2. 1 降雨減衰係数

降雨が一定強度で空間に均一に分布するとき、1km 当たりの減衰量を降雨減衰係数 (specific rain attenuation、単位 : dB/km) と呼ぶ。降雨減衰係数は雨滴の粒径分布や降雨終端速度、周波数や偏波などに依存する。図 1 は降雨減衰係数の周波数特性の理論計算値である (雨滴の粒径分布は Laws-Parsons のモデルを仮定)。図より、周波数 10GHz 以上で無視できない大きさになり、100GHz 付近までは周波数と共に増加してゆくことが分かる。また、100GHz 以上では、光波帯の漸近値に向け変化が少なくなる。降雨減衰係数 γ_R は以下の式で表すことができる。

$$\gamma_R = kR^n \quad [\text{dB/km}] \quad (1)$$

ここで、 R は降雨強度[mm/h]、パラメータ k, n は、ITU-R 勧告 P.838-3[14]において、次式で与えられている。

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

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

f : 周波数 [GHz] (適用周波数 : 1GHz~1,000GHz)

k : k_H or k_V (H:水平偏波、V:垂直偏波)

n : n_H or n_V

パラメータ k, n を構成する係数はそれぞれ表 1、表 2 で与えられる。また、計算値の一例を表 3 に示す (1GHz 刻みの計算値は[14]に)。

円偏波の場合の k, n は次式で求められる。

$$k = (k_H + k_V) / 2 \quad (4)$$

$$n = (k_H n_H + k_V n_V) / 2k \quad (5)$$

任意偏波の場合、あるいは、衛星通信のように、伝搬路に仰角が有るような場合 (斜め伝搬路) の計算式は、[14]を見てほしい。

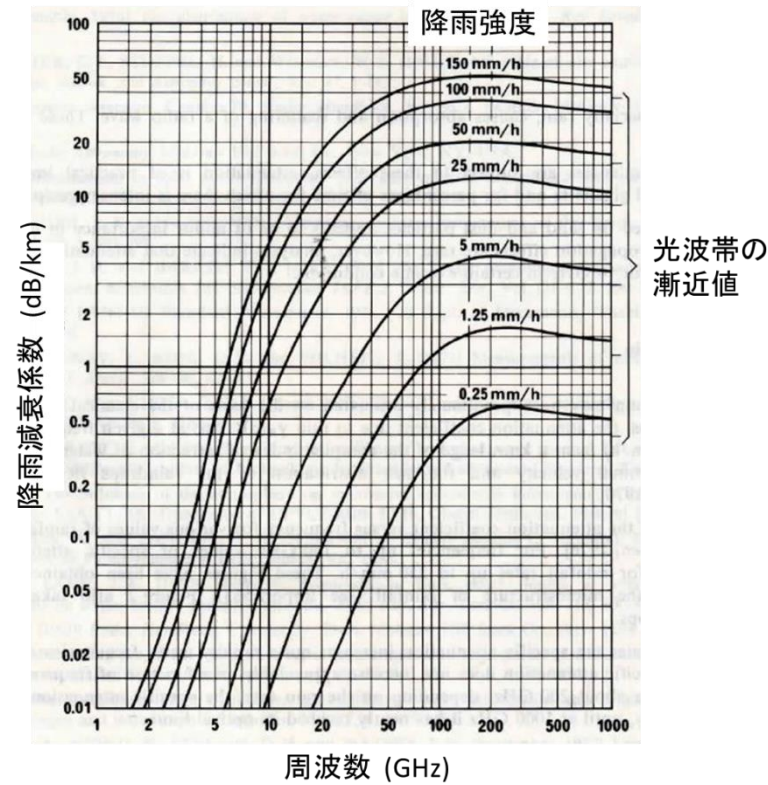


図1 降雨強度に対する減衰係数の周波数特性

表1 降雨減衰係数のパラメータ k の係数値

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		

表 2 降雨減衰係数のパラメータ n の係数値

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		

表 3 降雨減衰係数パラメータ k, n の周波数に対する値

Frequency (GHz)	k_H	n_H	k_V	n_V
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
12	0.02386	1.1825	0.02455	1.1216
14	0.03738	1.1396	0.04126	1.0646
16	0.05282	1.1086	0.05899	1.0273
18	0.07078	1.0818	0.07708	1.0025
20	0.9164	1.0568	0.09611	0.9847
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700
24	0.1425	1.0101	0.1404	0.9561
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129
35	0.3374	0.9047	0.3224	0.8761
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
45	0.5521	0.8355	0.5375	0.8123
50	0.6600	0.8084	0.6472	0.7871
55	0.7635	0.7853	0.7527	0.7661
60	0.8606	0.7656	0.8515	0.7486

2. 2 確率分布

降雨強度や降雨減衰量を近似する確率分布には、森田・樋口により、ガンマ分布や対数正規分布が用いられてきた[2], [5], [6]。その後、細矢により M 分布が提案され[8]、4 章で説明する現行推定法でも M 分布が採用されている。ここでは、この三つの分布を紹介するが、M 分布の記述に重点を置く。

対数正規分布

対数値が正規分布する確率変数の確率密度関数 f と累積分布関数 F ($F(0)=1$ とし、変数の値が大きくなるほど 0 に近づく) は次式で与えられる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6a)$$

$$F(x) = \int_x^\infty f(x)dx = 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left(-\frac{\ln x - m}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right\} \quad (6b)$$

ここで、 erf は誤差関数、 m , σ は分布のパラメータで、 $\ln x$ の平均値および標準偏差である (x そのものの平均値や標準偏差ではないことに注意を)。

降雨強度や降雨減衰の確率分布を対数正規分布近似する場合、(6)式で与えられる対数正規分布とともに、降雨の無い全体の 90%を除いた 10%の期間を 100%とする条件付対数正規分布も用いられる。

対数正規分布の特性 (平均値や分散等) や物理的意味については、[15],[16]を見てほしい。

ガンマ分布

ガンマ分布の確率密度関数と累積分布関数は次式で与えられる。

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \beta^\nu x^{\nu-1} \exp(-\beta x) \quad (7a)$$

$$F(x) = B(\nu, \beta x) / \Gamma(\nu) \quad (7b)$$

$$B(\alpha, x) \equiv \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\text{第 2 種不完全ガンマ関数})$$

ここで、 Γ はガンマ関数、 B は第二種不完全ガンマ関数である。また、 ν , β は分布のパラメータで、 ν は形状パラメータ、 $1/\beta$ はスケールパラメータと呼ばれる。

平均値は ν/β 、分散は ν/β^2 、標準偏差は $\sqrt{\nu}/\beta$ 、rms 値は $\sqrt{\nu(\nu+1)}/\beta$ となる。パラメータ β の値が同じ二つのガンマ分布：変数 $x_1(\nu_1)$ と変数 $x_2(\nu_2)$ には、和 x_1+x_2 の分布も $\nu_1+\nu_2$, β のガンマ分布になる再生性があり、この性質がモデル化に利用されている。

(細矢の) M 分布

細矢は日本各地の地域気象観測システム: AMeDAS の 1 時間降水量と 10 分間降水量データを解析し、降雨強度の確率分布が、累積確率の広い範囲に亘って次式の分布で近似できることを示した[8]。

$$f(x) = \frac{p}{x} \left(\frac{1}{x} + u \right) \exp(-ux) \quad (8a)$$

$$F(x) = \int_x^\infty f(x) dx = \frac{p}{x} \exp(-ux) \quad (x^* \leq x < \infty; F(x^*) = 1) \quad (8b)$$

ここで、 p および u は分布のパラメータ、 x^* は $F(x^*)=1$ を与える変数の下限値である。

Moupfouma は、世界の降雨強度分布特性を精度よく近似する分布として、3 パラメータによる分布 (Moupfouma 分布) を提案している[17]。細矢は、日本の降雨特性を調べた結果、Moupfouma 分布の一つのパラメータ値は定数で与えても十分な精度が得られることを見出し、二つのパラメータで表される式(8)を提案し、M 分布と呼んだ[8]。本レポートでもこの分布を M 分布と呼ぶが、類似の名前で m 分布 (仲上 m 分布) があり、混乱を避けるためにも、式(8)の分布は、「細矢の M 分布」(あるいは、「(細矢の) M 分布」と呼ばれて定着することが望ましいと筆者は思っている。M 分布は、4 章で述べる現行推定法の基本構造を与えるものになるので、その性質について詳しく示しておく。

x^* は分布がとり得る下限値で $F(x^*)=1$ より求めるが、閉形式で表せないため、[9]の付録に以下の近似式が与えられている ([8]でも(7)式として与えられているが、以下の式のほうが高精度 (近似誤差: $\pm 5 \times 10^{-7}$ 以内) のようである)。

$$x^* \approx \frac{1}{u} \sum_{i=0}^8 P_{xi} t^i \quad (t \equiv up) \quad (9)$$

ここで、係数 P_{xi} は表 4 である。

平均値 m と標準偏差 σ は、パラメータ p, u を用いて以下のように表される。

$$m = p \left[\exp(-ux^*) + E_I(ux^*) \right] \quad (10a)$$

$$\sigma = \sqrt{p \left(x^* + \frac{2}{u} \right) \exp(-ux^*) - m^2} \quad (10b)$$

ここで、 E_I は積分指数関数で次式の近似式で表される (注 3)。

$$E_I(r) \approx - \left(0.5772 + \ln r - r + r^2 / 4 - r^3 / 18 \right) \quad (10c)$$

逆に、平均値 m と標準偏差 σ が与えられているとき、パラメータ u, p は次式で表される。

$$u = \frac{2x^*}{\sigma^2 + m^2 - x^{*2}} \quad (11a)$$

$$p = x^* \exp(ux^*) \quad (11b)$$

実測データから平均値 m と標準偏差 σ を求めて、そこからパラメータ値 u, p を求めてゆく方法は、分布の裾の部分が必要になる本解析のような場合、その部分での誤差が大きくなりやすい。そこで、着目する累積分布範囲の近似精度が高くなるよう、その範囲の累積分布の2点（累積確率 p_1 で x_1 , p_2 で x_2 ）を用い、次式によりパラメータ u, p を定めるのが実際的である。

$$u = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{p_1 x_1}{p_2 x_2} \quad (12a)$$

$$p = p_1 x_1 \exp(ux_1) \quad (12b)$$

表 4 下限値 x^* の計算式(9)の係数値 P_{xi}

	($0 \leq t \leq 0.3$) の場合	($0.3 < t \leq 1$) 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

【注 3】 積分指数関数の近似式は Dover Publications, Inc., New York の「Handbook of Mathematical Functions」の P.229 に以下で与えられている。

$$E_1(z) \approx -\gamma - \ln z - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^n}{n n!}$$

式中の γ はオイラー定数で $\gamma=0.5772156649\cdots$ 。式(10c)では、本目的の計算範囲から、展開項を3次で止めている。なお、文献[4]の当該式 ((A10-1-8)式) 表示では $\cdots + r^3/18$ となっているが、ミスプリント。

それぞれの分布の特徴

上述の三つの分布は、どれも 2 パラメータで規定される分布であるため、累積確率分布上での 2 点が与えられれば一意に決定する。計算してみると分かるように、対数正規分布では、累積確率が小さい部分（例えば 0.001% 以下）の値が累積確率と共に急激に大きくなってゆく。また、ガンマ分布では、その部分が累積確率の対数値に対して直線的に変化する。一方、累積確率が比較的大きい部分（例えば 0.1% 以上）で、0 への漸近が急である。M 分布では、累積確率が小さい部分でガンマ分布の、累積確率が比較的大きい部分で対数正規分布の傾向を示し、この特性が降雨強度や降雨減衰値の実測データに良く合う。すなわち、対数正規分布では累積確率の小さい部分（すなわち x の値が大きい部分）で、また、ガンマ分布では累積確率が比較的大きい部分（すなわち x の値が比較的小さい部分）で、実測データとの乖離が大きくなっているが、M 分布は累積確率の広い範囲でよい近似を与える分布である。

2. 3 降雨強度

一定の時間間隔で雨量を測ると、その時間での積分値になる。雪やみぞれ等雨以外の現象も含めて降水と呼ばれるが、気象庁では、日本各地（約 1300 箇所）の 1 日、1 時間、10 分間、さらに最近では 1 分間毎の降水量データを取得し、公開している[18]。減衰が問題になるのは、降水のうちでも降雨にほぼ限られる。降雨量を 1 時間あたりに換算し、単位 mm/h で表したものを降雨強度と呼ぶ。1 分間降雨強度は 1 分間雨量を 60 倍したものになる。降雨減衰推定法には、この 1 分間降雨強度の統計値が用いられる。

降雨減衰問題が研究されていた当時（1990 年以前）、気象庁では 1 分間雨量が測定されていなかったため、電波伝搬研究者自らが伝送実験と並行して降雨強度測定を行い、モデル化のための基礎データとしていた。また、気象データとして入手可能な 1 時間雨量や 10 分間雨量から、1 分間降雨強度特性を推定する方法、すなわち異積分時間降雨データの変換手法の研究も行われてきた[6], [8], [13], [19]-[21]。

雨量の測定には、大別して二つのタイプの雨量計が用いられている。転倒枡形雨量計と雨滴計数型雨量計である。転倒枡形雨量計は、一定容量の枡が雨でいっぱいになると転倒し、そのタイミングからもう一つの枡が受け皿に変わる。これをシーソーのように繰り返し、転倒するたびにパルスが出る仕組みである。枡が満タンになる雨量は 0.5mm に設定されているため、分解能もこの値になる。雨滴計数型雨量計は油中を落下する雨滴を数えるタイプで、分解能 0.0083mm のものが使われる。転倒枡形雨量計は構成が簡易で無人の運用に適しており、気象庁の観測（AMeDAS の観測所等）に使われている。欠点は、弱い雨に対して、0.5mm に達するまで反応しないことによる時間遅れが有ることと分解能の低さである。雨滴計数型雨量計は、頻繁な手入れや精密な校正が必要になるが、高分解能であるため、伝搬測定でよく利用される。滝のように降る雨に対して雨滴がつながってしまい計測ができなくなる稀な事態も起こり得るが、一分間降雨強度特性の測定目的には適している。

1996 年より、気象庁も 1 分間降水量データを提供する時代になったが、その測定器が転倒枡形雨量計であるため、1 分間降雨量を単に単位変換しただけでは、精度のよい降雨強度特性にはならない。そのため、小野らは、転倒枡形降雨形データを本来求めたい 1 分間降雨強度データに変換する均し分配という手法（乱数補正秒単位均し分配処理法）を考案して、気象庁データの伝搬推定法利用への道を開いた[12]。この手法を AMeDAS データに適用することにより、推定法の計算に利用可能な日本全国の 1 分間降雨強度統計値のデータベースが構築された[13], [3]。

2. 4 空間相関

2. 1 節で、1km 当たりの降雨減衰量（降雨減衰係数）について述べた。では、通信距離が 5km であった場合、減衰量は 5 倍になるかというところはない。雨域には有限の広さや空間的な不均一性が有るためである。

我が国では、森田らの研究によって、降雨の空間相関特性は $\rho(d) = \exp(-\alpha\sqrt{d})$ (d : 空間距離) が用いられ、 $\alpha = 0.25 \sim 0.3$ とされている[2], [5], [7]。一方、ヨーロッパにおいては $\rho(d) = \exp(-\beta d)$ が用いられ、 β は 0.4 前後が適当とされている[22]。小野らは、東京都内での伝搬実験を通じて、2~3km を境に、以遠では $\rho(d) = \exp(-\alpha\sqrt{d})$ の、近距離では $\rho(d) = \exp(-\beta d)$ の性質があることを見出している[23]。4 章で述べる現行推定法の中にも、この空間相関特性が組み入れられている。

2. 5 降雨減衰モデルの基本構造

送受信間距離 D の無線回線の降雨減衰量 Z [dB] は、伝搬路の各点 r の瞬時降雨強度 R を用いて次式で表される。

$$Z = k \int_0^D R(r)^n dr \quad (13)$$

減衰量 Z の確率分布を求めたい場合には、降雨強度 R の確率分布、さらには減衰係数に比例する R^n の確率分布とその空間相関特性の情報が必要になる。いずれにしてもこれを厳密にモデル化することは困難であり、近似的考えが導入される。そのモデル化には、大別して二つの考え方がある。

一つは主に衛星回線での降雨減衰のモデル化で培われた等価通路長の概念に基づくものである。着目する累積確率（時間率） p に対して、その減衰量 Z_p を次式で与える。

$$Z_p = \gamma_p L_{e,p} \quad (\gamma_p = k R_p^n) \quad (14)$$

ここで、 γ_p は時間率 p に対する降雨強度 R_p での降雨減衰係数、 $L_{e,p}$ は実効的な雨域内伝搬通路長（等価通路長: L_e ）の時間率 p での値である。時間率 0.01% に対する等価通路長に対し

ては、Yamada らによる衛星回線での世界の降雨減衰データの分析から、次式が提案されている[24] (ITU-R P.530 [25]) (注4)。

$$L_{e,0.01\%} = \frac{D}{1 + D / [35 \exp(-0.015 R_{0.01\%})]} \quad (R_{0.01\%} \leq 100 [\text{mm/h}]) \quad (15)$$

$R_{0.01\%} > 100 \text{ mm/h}$ では、 $R_{0.01\%}$ の代わりに $100 [\text{mm/h}]$ を用いることが勧められている[25]。また、我が国のような中緯度地域（北緯 30° 以北）においては、時間率 $1\% \sim 0.001\%$ の範囲で、条件付対数正規分布を仮定した次式が与えられている。

$$Z_p = 0.12 p^{-0.546 - 0.043 \log p} Z_{0.01\%} \quad (p(\%): 0.001 \sim 1) \quad (16)$$

概略値を電卓等で簡易に求めたい場合には、役立つ式である。

モデル化のもう一つのアプローチは、森田・樋口の方法をベースとした降雨減衰量 (kR^n の区間積分値) の確率分布とそのパラメータ値を定める方法である。降雨減衰推定法の確率分布を実測にあうガンマ分布、あるいは M 分布を想定し、その分布を規定する二つのパラメータの値を統計的に定める方法である。そのためには、減衰係数の主要部分である R^n について、その空間相関特性をパラメータの中に組み入れることがモデル化の核となる。我が国の無線回線設計には、この方法（二つの方法のうち後者の方法）に基づいた推定法が使われてきた。4 章で説明する現行推定法も、このアプローチを採っている。

【注4】1980 年代後半、CCIR（現 ITU-R）では、衛星回線の降雨減衰推定法の国際標準化に向け、当時提案されていた十種に近い衛星回線降雨減衰推定法を共通のデータベースを用いて評価検証作業を行った。その結果、Yamada 等の方法[24]が、最も簡易でかつ精度が良いものとして勧告手法に採用された (Rec. ITU-R P.618)。その後、ITU-R では、降雨減衰推定の基本モデルを衛星回線・地上回線で共通にしようと言う動きになり、(15)式は、その地上回線計算用の式である (Rec. ITU-R P.530)。なお、現行の ITU-R 勧告手法は、衛星回線・地上回線とも、熱帯地域の降雨減衰特性を含めてやや複雑な計算式に変わっている。(15)式は、日本のような中緯度地域に限定して大凡の値を知りたい場合に適している。

2. 6 安全係数の概念

降雨減衰推定法は平年の統計値を推定するものである。時間率 0.01% の減衰値は年間の最悪の 53 分の値に相当する。目的の稼働率を 99.99% に設定した場合、この減衰値がしきい値になる。しかしこれは、あくまで平年値を対象とした場合である。実際の降雨強度特性は年毎にかなりのばらつきがある。

目的の稼働率を得るために回線設計のしきい値にこの値を採用すれば、確率的に 2 年に一回は、その稼働率を下回ることになる。そこで、安全を見て、目的稼働率を下回る年を $N+1$ 年に一回にしたいと言う場合もありえる。この場合、 N は連続して目的稼働率が満たされる平均年数と考えることができる。信頼性の評価尺度に、誤りが発生する平均時間間隔 MTBF (Mean Time Between Failure) がある。この時間 (time) を年 (year) と読み替えることにより、推定法にも MTBF の概念を導入することができる。この概念は筆者等の論文[10], [11]で議論している。

時間率 $p\%$ の降雨強度 R_p は $N=1$ に相当する平年値である。観測によって得られる平年値 (平均値) を $\langle R_p \rangle$, 標準偏差を σ_{R_p} とすると、 $\text{MTBF} = N$ に対する降雨強度 $R_{p,N}$ は、[3]での詳細な検討によって、次式が導かれている。

$$R_{p,N} = \left[1 + C_{1,p} \frac{\sigma_{R_p}}{\langle R_p \rangle} (\log_{10} N)^{C_{2,p}} \right] \langle R_p \rangle \quad (17)$$

日本全国に対する $\langle R_p \rangle$, σ_{R_p} , $C_{1,p}$, $C_{2,p}$ の値が、 $p=0.0001\%$ と 0.01% について求められており [1], [4]、本レポートの付録にも、東京都・神奈川県の例を載せている。

3. AMeDAS データを用いた日本全国の降雨強度特性

気象庁の AMeDAS 降水量データを、[12]で述べられた乱数補正秒単位均し分配処理法で変換する (=作り直す) ことによって、推定法に適用する日本全国 1,150 箇所の降雨強度特性データベースが構築されている [1], [4]。(本付録参照)

AMeDAS は 1974 年に運用が開始され (本格運用は 1979 年 11 月から)、現在は、日本全国約 1300 箇所で 1 時間、10 分間、1 分間降水量データが得られている。ただし、それぞれ降水量観測の開始年度は、地点によって異なっている。1 分間降水量データの取得開始は 1996 年からであり、地点も 135 箇所とまだ限られている。

日本全国の 1 分間降雨強度特性データベース作成においては、最長 27 年間分の 1 分間降雨強度の累積分布には、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的に用いている。すなわち、1 分間降水量データが利用できる箇所ではそのデータから、また、これが利用できない箇所では 10 分間降水量データを、それも利用できない場合には 1 時間降水量データから変換によって求めている。次章で述べる降雨減衰推定法では、時間率 $p = 0.0001\%$ と 0.01% の降雨強度を用いるので、データベースにはその値がまとめられている。

4. 現行の降雨減衰推定法

地上無線通信回線の降雨減衰推定法は、2011 年 6 月、総務省により、三十数年ぶりに改正が行われた[1]。この新しい推定法（といっても十年近く時がたっているが）の基本機能と特徴、及び、具体的な計算手順をまとめる。

4. 1 基本機能・特徴・モデリング思想

基本機能

- 1) 降雨減衰量の累積分布（減衰量と時間率の関係）が求められる
- 2) 日本の全域に対する推定ができる（計算に必要な日本全国 1150 箇所の降雨データが準備されている）
- 3) 年変化に伴う安全係数の概念を組み入れている
- 4) 適用周波数範囲が広い（具体的に上限を定めていないが、周波数特性を有する降雨減衰係数は 1000GHz まで適用でき、他に、大きな周波数依存要因が無いため、推定法としても、少なくとも 100GHz までは、十分適用できる）

特徴

- 1) 降雨減衰量の確率分布として、累積確率の広い範囲で実測データの特性に合う（細矢の）M 分布を採用している
- 2) 東京都内において、空間距離 1km～7km にある 11 の地点での降雨強度測定に基づく降雨の空間相関特性を把握し、その結果をモデル化して、降雨減衰推定法に組み入れている
- 3) 日本全国の降雨強度特性把握には、AMeDAS の 1 分間、10 分間、1 時間降水量データを利用し、減衰量推定に必要な 1 分間降雨強度特性に、独自に考案した乱数補正秒単位均し分配処理法を適用し、精度の高い統計値を得ている。

モデリング思想

- 1) 降雨強度 R の分布を（細矢の）M 分布とし、分布のパラメータを降雨強度の累積分布の 2 点（時間率 0.0% と 0.0001%）から定める
- 2) 減衰係数比例量 R^n の分布も M 分布とし、パラメータ値 $u_{R,n}, p_{R,n}$ を定める
- 3) 空間相関を考慮した区間積分降雨減衰比例量 $\int_0^L R^n dr$ も M 分布とし、パラメータ値 $u_{R,n,L}, p_{R,n,L}$ を定める

このように、M 分布のパラメータ値を順次変換してゆく手順をとる。厳密なことを言えば、上記 1) ～ 3) のどれか一つを M 分布とすれば、それから非線形に変換された他の量

は M 分布とは異なる分布になるが、近似の意味で、M 分布からの大きなずれは無いことが確認されている。

4. 2 計算手順

計算フローチャート

計算ステップを図 2 に示す。Step 9 が最終目的の量になる。降雨減衰量 Z を与えて、累積確率 p を求める場合が Step 9-1、累積確率 p を与えて、降雨減衰量 Z_p を求める場合が Step 9-2 である。(回線設計では、後者での算定が求められる)

計算の途中で求めるパラメータには以下のものがある。

- ・ 降雨減衰係数パラメータ : n, k (Step 3, 8)
- ・ 地点 n 乗 1 分間降雨強度 R^n の確率分布 (M 分布) のパラメータ : $u_{R,n}, p_{R,n}$ (Step 4)
- ・ 地点 n 乗 1 分間降雨強度 R^n の平均値と標準偏差 : $m_{R,n}, \sigma_{R,n}$ (Step 5)
- ・ 区間積分 n 乗 1 分間降雨強度 $\int_0^L R^n dr$ の平均値と標準偏差 : $m_{R,n,L}, \sigma_{R,n,L}$ (Step 6)
- ・ 区間積分 n 乗 1 分間降雨強度 $\int_0^L R^n dr$ の確率分布 (M 分布) のパラメータ : $u_{R,n,L}, p_{R,n,L}$ (Step 7)

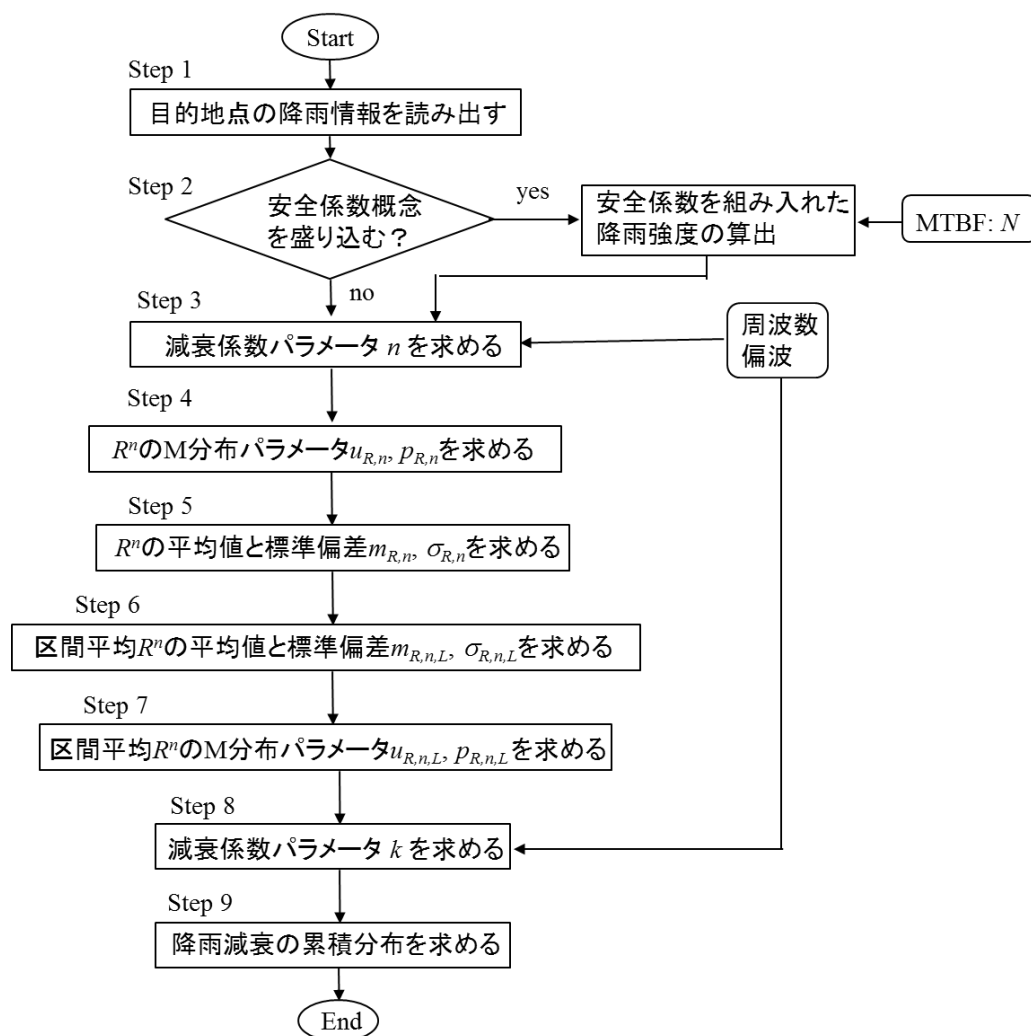


図2 降雨減衰量計算のフローチャート

具体的な計算手順

Step 1: 付録の図表（付録は例のみ；日本全国版は[1]（または[4]））から当該地点における以下の1分間降雨強度の特性値を読み取る

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	: $\sigma_{R_{0.01\%}}$
1分間降雨強度の0.0001%値の標準偏差	: $\sigma_{R_{0.0001\%}}$
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	: $C_{2,0.0001\%}$

上記以外に計算のために、

周波数	: f [GHz]
偏波	: 水平(H)または垂直(V)
伝搬距離	: L [km]
安全係数を定める MTBF 値（この計算が必要な場合）	: N [年]

目的地点のデータが無い場合には、周辺複数個所の平均値とするか、距離による重み付け平均値とすることにより。また、当該地点の値が、周囲とかけ離れた値になっている場合には、データの問題もあるかも知れず、周囲を含めた平均値を採用したほうが良い場合も有ろう。

Step 2: 安全係数を考慮した降雨強度値の計算

（このステップは、2.6 節で述べた MTBF 値 N で規定する安全係数の概念を導入したい場合に行うもので、平年値の特性 ($N=1$) を求めたい場合にはスキップする）

当該地点における MTBF が N [年] の 1 分間降雨強度の 0.01% 値: $R_{0.01\%,N}$ [mm/h]、および 0.0001% 値: $R_{0.0001\%,N}$ [mm/h] を(17)式に従って、以下で求める。

$$R_{0.01\%,N} = \left(1 + C_{1,0.01\%} \frac{\sigma_{R_{0.01\%}}}{\langle R_{0.01\%} \rangle} (\log_{10} N)^{C_{2,0.01\%}} \right) \langle R_{0.01\%} \rangle \quad (18a)$$

$$R_{0.0001\%,N} = \left(1 + C_{1,0.0001\%} \frac{\sigma_{R_{0.0001\%}}}{\langle R_{0.0001\%} \rangle} (\log_{10} N)^{C_{2,0.0001\%}} \right) \langle R_{0.0001\%} \rangle \quad (18b)$$

以後の式では、 $N=1$ の場合も含めて、 $R_{0.01\%,N} \rightarrow R_{0.01\%}$ 、 $R_{0.0001\%,N} \rightarrow R_{0.0001\%}$ と表記する。

Step 3: 降雨減衰係数パラメータ n の計算

周波数 f [GHz] と偏波 (H, V) を与えて、式(3)により、降雨減衰係数パラメータ n (n_H または n_V) を求める。

Step 4: 地点 n 乗 1 分間降雨強度 R^n の確率分布 (M 分布) のパラメータ $u_{R,n}$, $p_{R,n}$ を求める (式(12)で、 $x_1, x_2 \rightarrow R_{0.01\%}, R_{0.0001\%}; p_1, p_2 \rightarrow 0.0001, 0.000001$ より)。

$$u_{R,n} = \frac{1}{R_{0.0001\%}^n - R_{0.01\%}^n} \ln \frac{100R_{0.01\%}}{R_{0.0001\%}^n} \quad (19a)$$

$$p_{R,n} = 0.0001 R_{0.01\%}^n \exp(u_{R,n} R_{0.01\%}^n) \quad (19b)$$

Step 5: 地点 n 乗 1 分間降雨強度 R^n の平均値 $m_{R,n}$, 標準偏差 $\sigma_{R,n}$ を求める (式(10a, b)で、 $p, u, x^* \rightarrow p_{R,n}, u_{R,n}, R^{n*}$)。

$$m_{R,n} = p_{R,n} \left[\exp(-u_{R,n} R^{n*}) + E_I(u_{R,n} R^{n*}) \right] \quad (20a)$$

$$\sigma_{R,n} = \sqrt{p_{R,n} \left(R^{n*} + \frac{2}{u_{R,n}} \right) \exp(-u_{R,n} R^{n*}) - m_{R,n}^2} \quad (20b)$$

ここで、積分指数関数 $E_I(x)$ の近似式は式(10c)で与えている。また、 R^n の下限値 R^{n*} は式(9)及び表 4 より次式で求められる。

$$R^{n*} \approx \frac{1}{u_{R,n}} \sum_{i=0}^8 P_{xi}(p_{R,n} u_{R,n})^i \quad (21)$$

Step 6: 区間長 L [km] を与え、区間積分 n 乗 1 分間降雨強度 $\int_0^L R^n dr$ の平均値 $m_{R,n,L}$ および標準偏差 $\sigma_{R,n,L}$ を求める。

$$m_{R,n,L} = m_{R,n} L \quad (22a)$$

$$\sigma_{R,n,L} = \sqrt{V_1 + V_2} \quad (22b)$$

$$V_1 = \frac{2\sigma_{R,n}^2}{\beta} \left[L_0 e^{-\beta L_0} + \frac{(1 - \beta L)(e^{-\beta L_0} - 1)}{\beta} \right] \quad (22c)$$

$$V_2 = \frac{4\sigma_{R,n}^2}{\alpha} \left\{ \left(6 + 6\alpha\sqrt{L} + 2\alpha^2 L \right) e^{-\alpha\sqrt{L}} - \left[6 + 6\alpha\sqrt{L_0} + 2\alpha^2 L_0 - \alpha^2 \left(1 + \alpha\sqrt{L_0} \right) (L - L_0) \right] e^{-\alpha\sqrt{L_0}} \right\} \quad (22d)$$

$$L_0 = \begin{cases} \alpha^2 / \beta^2 & \text{for } \alpha^2 / \beta^2 < L \\ L & \text{for } \alpha^2 / \beta^2 \geq L \end{cases}$$

$$\alpha = 0.018703 - 0.12013n + 0.47627n^2 - 0.12219n^3$$

$$\beta = 0.099327 - 0.3268n + 0.51996n^2 - 0.1529n^3$$

Step 7: 区間積分 n 乗 1 分間降雨強度 $\int_0^L R^n dr$ の確率分布 (M 分布) のパラメータ $u_{R,n,L}$ および $p_{R,n,L}$ を求める (式(11)の $x^* \rightarrow g\sigma_{R,n,L}$)。

$$u_{R,n,L} = \frac{2g\sigma_{R,n,L}}{m_{R,n,L}^2 + (1-g^2)\sigma_{R,n,L}^2} \quad (23a)$$

$$p_{R,n,L} = g\sigma_{R,n,L} \exp(u_{R,n,L}g\sigma_{R,n,L}) \quad (23b)$$

ここで、 g は、次式及び表 5 により求められる ([9]の付録の式(A.4)~(A.7)より)。

$$g(h) = \begin{cases} \exp \sum_{i=0}^8 P_{gi} (\ln h)^i & (0.01 \leq h < 0.2) \\ \sum_{i=0}^8 P_{gi} h^i & (0.2 \leq h \leq 3.0) \end{cases} \quad (23c)$$

$$\text{with } h = m_{R,n,L} / \sigma_{R,n,L}$$

表 5 関数 g 中の各係数 P_{gi}

	(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

Step 8: 降雨減衰係数パラメータ k の計算

周波数 f [GHz] と偏波 (H, V) を与えて、式(2)により、降雨減衰係数パラメータ k (k_H または k_V) を求める。

Step 9-1: 所要降雨減衰量 Z [dB] が与えられた場合の累積確率 (時間率) p [%] を求める

$$p = F\left(\frac{Z}{k}\right) = \frac{kp_{R,n,L}}{Z} \exp\left(-u_{R,n,L} \frac{Z}{k}\right) \times 100 \text{ [%]} \quad (24)$$

Step 9-2: 累積確率 (時間率) p [%] を与えて、所要降雨減衰量 Z_p [dB] を求める。

式(24)は $p=p(Z)$ の形であり、ここでは、 Z を p の関数として $Z=Z(p)$ の形で求める。 $Z(p)$ については解析的に解けず、閉形式での式が得られないため、以下の近似式が与えられている ([9] の付録の式(A.8)-(A.10)より)。

$$Z_p = kR_L^n \quad (25)$$

$$R_L^n = w(v) / u_{R,n,L}$$

$$\log_{10}\{w(v)\} = \sum_{i=0}^8 P_{wi} v^i$$

$$v = \ln\left(\frac{p/100}{p_{R,n,L} u_{R,n,L}}\right)$$

w を構成する係数 P_{wi} ($i=0\sim 8$) は、 v の値によって、表 6 のように与えられる。

Step 9-1 と 9-2 を比較して分かるように、Step 9-1 の計算の方が容易である。Step 9-1 で降雨減衰量 Z を十分な精度の刻み (例えば 0.1dB 以下) で時間率を計算し、目的の時間率 p に対応する Z_p を読み取ったほうが効率的かもしれない。

表 6 関数 w の式中の係数 P_{wi}

	$(-15 \leq v < -4)$ の場合	$(-4 \leq v < 1)$ の場合	$(1 \leq v \leq 8)$ 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

4. 3 レドームによる損失

10GHz 以上の高い周波数における地上回線無線通信路の損失要因には、降雨減衰が主なものになるが、降雨時のレドームによる損失も無視できない。これについては、[1]に計算法が示されているので、ここでは割愛する。

参考文献

- [1] 総務省、電波法関係審査基準（固定局関係審査基準）の改正版, 2011.06, 降雨減衰計算部分の抜粋：http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/Rain_ATT_Calc_Method.pdf
- [2] 森田和夫, 樋口伊佐夫, “降雨による電波の減衰量に関する統計的研究,” 研実報, vol. 19, no. 1, pp. 97-150, 1970.
- [3] 小野健一, 唐沢好男, “安全係数の概念を導入した M 分布近似降雨減衰確率推定法,” 信学論(B), vol. J91-B, no.2, pp. 169-187, 2008.
- [4] 小野健一, “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,” 学位論文, 電気通信大学, 2009.03. http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/D_ronbun/ono.pdf
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 細矢良雄, 佐々木収, 白戸正, 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.
- [8] 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, 1988.
- [9] 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.
- [10] 唐沢好男, 松戸孝, “降雨減衰推定法における安全係数の概念,” 信学論(B), vol. J71-B, no. 6, pp. 772-778, 1988.
- [11] Y. Karasawa and T. Matudo, “One-minute rain rate distributions in Japan based on AMeDAS one-hour rain rate data,” IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 29, no. 6, pp. 890-898, 1991.
- [12] 小野健一, 西村安由, 中間浩一, 斎藤研次, 野本真一, 唐沢好男, “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,” 信学論(B), vol. J88-B, no.8, pp.1509-1518, 2005.
- [13] 小野健一, 唐沢好男, “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,” 信学論(B), vol. J90-B, no.3, pp.266-279, 2007.
- [14] ITU, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” Rec. ITU-R P.838-3, 2005. http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/r-rec-p.838-3-200503-i!!pdf-e.pdf
- [15] コロナ社唐沢好男, 改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2016.
- [16] 唐沢好男, “伝搬モデルに現れる確率分布,” Tech. Rep. YK-005, 2017.12. http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_005_Probability_distribution.pdf

- [17] F. Moupfouma, "Rainfall rate statistics distribution and induced attenuation in equatorial and tropical climates," Ann. Telecommun., vol. 37, no. 3-4, pp. 123-128, 1982.
- [18] 気象庁, 過去の気象データ検索, 気象庁ホームページ. (ただし 1 分間降水量はここには無い) <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [19] 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-II, no. 10, pp.518-527, 1990.
- [20] 多賀登喜男, 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.P2002-57, pp.7-12, 2002.07.
- [21] 秋元守, 原田耕一, 渡邊和, 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, 2003.
- [22] 真鍋武嗣, 小林久人, 井原俊夫, 浦塚清峰, 古濱洋二, "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, A.P84-130, pp. 47-52, 1984.
- [23] 小野健一, 唐沢好男, "降雨減衰確率推定手法の精度向上を目的とした降雨強度の n 乗の空間相関特性に関する考察," 信学論(B), vol.J89-B, no.10, pp.1998-2011, 2006.
- [24] M. Yamada, Y. Karasawa, M. Yasunaga and B. Arbesser-Rastburg, "An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz," Radio Science, vol. 22, No.6, pp. 1053-1062, 1987.
- [25] ITU, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," Rec. ITU-R P.530-13, 2009. (現行版のP.530-16では、計算法が改訂されている)

読者の皆さんへ

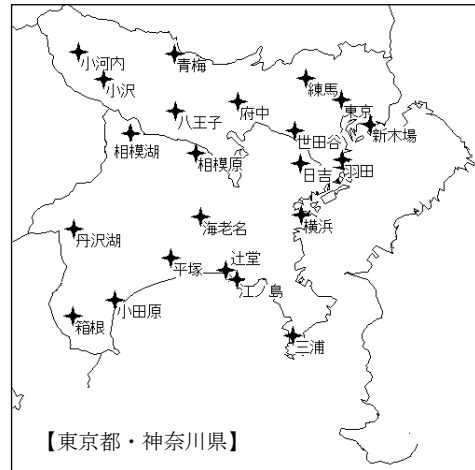
衛星回線の降雨減衰推定法標準化 (CCIR (現ITU-R) 1980年代後半) の活動を覚書にした下記レポートも公開しています。

YK-067 衛星回線降雨減衰推定法に関する覚書

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/YK-067_Rain_Attenuation_Prediction_Satellite.pdf

付録 日本全国1150地点の降雨強度データの例（東京都（島嶼部は別図）・神奈川県）

（日本全国のデータは[1]（または[4]）に。本資料ではMTBF値を N と置いているが、[1]、[4]では y としている）



地点名	安全係数の 近似式の係数 C_1		安全係数の 近似式の係数 C_2		降雨強度の 平均値 $\langle R_p \rangle$ [mm/h]		降雨強度の 標準偏差 σR_p [mm/h]		最大 MTBF N [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	36.2	26
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