

衛星回線降雨減衰推定法に関する覚書

～CCIR/ITU-R 標準化活動に参加した 1980 年代後半を中心に～

唐沢好男

降雨減衰推定法については、本シリーズの YK-022 [1]において“地上無線回線の降雨減衰推定法”をまとめている。本レポートはその衛星回線版である。ただし、現行の推定法 (ITU-R P.618-13 [2]の勧告手法) を詳しく解説するものではなく、無線通信の国際標準化機関であった旧 CCIR (現 ITU-R, 1992 年に改称) の SG5 (現 ITU-R SG3) において降雨減衰推定法の標準化が活発に議論されていた 1985～1990 年頃の話であり、筆者がこの活動に参加していたころのことである。30 年以上も前の古い話ではあるが、降雨減衰推定法の基礎が固まったころの話であり、その基本的な考え方は現在にも引き継がれているという意味で、当時を振り返ることも大事であろうと思い、この覚書をまとめている。近年になって、Ku 帯や Ka 帯を想定した OneWeb や Starlink に代表される LEO (低軌道周回衛星軌道) システムの構築が進められつつあり、HAPS やドローンも含めて三次元無線ネットワークの議論が Beyond 5G 構想として盛んになっている。衛星回線を代表とする斜め伝搬路での降雨減衰推定の考え方に役立つことを願っている。

1. 降雨減衰推定法の国際標準化

10GHz 以上の高い周波数帯の無線通信では降雨減衰が問題になり、精度の良い推定法が求められる。特に、地域や気候が異なる国と国を結ぶ国際衛星通信においては、回線設計上、各国が共通に使用できる標準化された伝搬モデルが必要になる。個々の研究者が提案する伝搬モデルを学術的に議論する場合は学会になるが、その結果を実利用に結びつける場合は国際標準化機関である。無線通信の標準化は国際電気通信連合 (ITU) の無線通信部門 (1992 年に CCIR から ITU-R に名称変更) の中にある研究グループ (Study Group: SG) である。電波伝搬は CCIR 時代は SG5、現在の ITU-R では SG3 である。

CCIR/ITU-R においては、手法の改訂は 4 年毎の本会議とその中間に行われる会議 (中間会議) で審議され、そこで承認されれば新たな勧告手法となる。改定提案は、会期間の適宜に開かれる作業班会合 (WP) で議論・審議・承認されたものが本会議/中間会議にかけられることになる。

衛星回線の降雨減衰推定法に関しては、以下の経緯をたどっている。

- (i) ～1986 : 中緯度地域での中仰角に適用できる推定法ができている
- (ii) 1985～1990 : 推定精度の向上と低仰角にも適用できる推定法の確立に向けた作業 (1990 年に改定手法を勧告)

(iii) 1990～1999：低緯度地域（熱帯強雨地域）にも適用できるモデルへの機能拡張に向けた作業（1999年に改定手法を勧告）

(vi) それ以降、今日（2021）まで、改定は行われていない。

今世紀になって、地球温暖化問題への危機感が高まり、降雨減衰に対する影響も懸念されるところであるが、現時点において、それを考慮したモデル化に見える動きは無い。

CCIR/ITU-R においては、降雨減衰推定法に関する標準化の主体はそれを必要とする衛星回線において進められ、地上回線の推定法は衛星回線の審議結果を反映するような形でモデルの改定が行われてきた[3; ITU-R P.530-18]。なお、[1]でも述べたとおり、我が国においては地上回線の降雨減衰推定法（総務省が無線回線設計に求める手法[4]）は、[3]が歩んできた道とは別な形（降雨の空間相関の特徴を取り入れて、減衰量の確率分布全体を求める形の計算式）になっている。（日本という固有の気象条件にパラメータをチューニングしているので推定精度は ITU-R の勧告式より高いであろうと期待できる）

2. 降雨減衰推定法（ITU-R 勧告手法）に関する基本的な考え方

降雨減衰の推定に関しては、様々な考え（思想やアイデア）があり、その提案手法については学会（国際シンポジウムや論文誌）の場を通じて議論が重ねられてきた。わが国においても森田・樋口により先駆的な研究がなされていたことは[1]でも述べたとおりである。一方、国際標準化機関である CCIR（当時）では、国際衛星回線の稼働率基準である 99.99%に対応する年間累積時間率 0.01%（約 50 分に相当）の減衰値に焦点を絞り、以下の基本的な考え方を採っていた。

$$A_{0.01} = \gamma_R(R_{0.01})L_e \quad (1)$$

ここで

$A_{0.01}$ ：累積時間率 0.01%に対応する降雨減衰値で単位は dB

$\gamma_R(R)$ ：一定強度 R [mm/h]の雨が均一に降るときの 1km あたりの減衰量で単位は dB/km。減衰係数（specific attenuation）と呼ばれる。

$R_{0.01}$ ：累積時間率 0.01%に対応する降雨強度。ここで言う降雨強度は 1 分間毎の雨量 [mm]を 60 倍して 1 時間あたりに換算した雨量 [mm/h]であり、1 分間降雨強度と呼ばれる。

L_e ：伝搬通路に $R_{0.01}$ の強度の雨がどのくらいに広がっているかを表す実効通路長 [km]

式の形から明らかなように、 γ_R の引数になる $R_{0.01}$ も、等価通路長 L_e も統計値であり、降雨減衰量 $A_{0.01}$ と $\gamma_R(R_{0.01}) L_e$ は、時間率 0.01%をピンポイントにした統計値対統計値の対応であって、決して降雨強度と減衰量の瞬時対応を意味するものではないと理解してほしい。すなわち、今、電波の受信点において 50mm/h の雨が降っているとすると、そのときの降雨減衰量が $R=50$ を(1)式に入れて得られる減衰量 A がそのときの降雨減衰にはならないということである（たぶん近い値になってはいると思うが）。

(1)式右辺の γ_R は、雨滴の粒径分布が分かれば、理論的に計算できるものであり、散乱問題が得意な理論家の腕の見せ所になる。ただし、これについては、実利用に十分なものが[5; P.838]に以下の形でまとめられている。

$$\gamma_R = kR^n \tag{2}$$

パラメータ k と n についても、雨滴粒径分布を Laws-Parsons 分布で仮定し、周波数 (1GHz-1000GHz) と偏波(H,V)を変数とする計算式、およびその計算結果が示されている。(注：同じITU-R の勧告 P.838 でも、数値が時代ごとに微妙に変わってきており、あるいはそれから引用した教科書もその時代を反映した値になっているので、実際の計算時には、最新版で確認すると良い。[1]の表3の値は最新のもの)。

減衰係数の部分は地上系でも衛星系でも共通であり、かつ、降雨減衰推定モデルとしては完成していると考えてよいであろう。(研究自体が終わっているわけではないが)

次に等価通路長の部分を考える。図1は衛星回線の伝搬路モデルであり、以下のパラメータが重要になる。

θ : 衛星仰角

h_s : 地上局の高度 [km]

h_R : 実効降雨高 [km] (中緯度地域で約 4km, 低緯度地域で約 5km。正確には[6; P.839])

実効降雨域を通過する斜め伝搬長 L_s とその水平面への射影長は L_G は仰角 5 度以上においては次式である。(5 度以下は地球の等価半径を用いた計算式有り [2])

$$L_s = \frac{h_R - h_s}{\sin \theta}$$

$$L_G = L_s \cos \theta$$

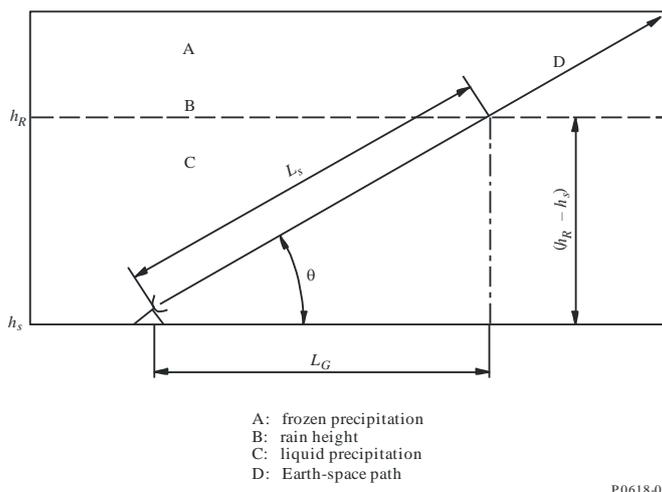


図1 衛星回線の伝搬路モデル

雨域が存在する斜め伝搬路の長さは L_s であるが、その間を均一に雨が降っているわけではなく、平均的に見ると、特に、着目している $R_{0.01}$ のような強い雨に対しては、実質的な長さ（＝等価通路長）はそれよりは短いだらうと予測できる。そこで、係数 $r_{0.01}$ を用いて

$$L_e = r_{0.01} L_s \quad (3)$$

と置いてみよう。

等価通路長の算定は係数 $r_{0.01}$ の推定に帰着できることが分かる。この係数は、それぞれの地域の気象に依存し、十分な量の測定データによらなければならないということが理解できると思う。良い降雨減衰推定モデル、すなわち、精度が高くて適用範囲が広い、であるためには等価通路長の推定が大事であって、気象パラメータやシステムパラメータを以下にうまく取り入れるかが鍵になる。この考え方は、筆者が標準化活動に参加した当時からであったが、現在においてもそのことに変わりはない。

なお、降雨減衰の 0.01% 値 $A_{0.01}$ から他の時間率値 A_p を求める手法については、簡易な計算法が用意されているので現行手法[2]を見てほしい。

3. 標準化作業の経緯

CCIR 推定法における 1986 年時点での係数 $r_{0.01}$ は次式で与えられている。

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045 L_G} \quad (4a)$$

気象要素が入っておらず、非常にシンプルな式である。上式を

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + L_G / L_0} \quad (L_0 = 22.2) \quad (4b)$$

と書き直してみると $L_0 \doteq 22$ [km] であり、大雑把に言って、 L_G が L_0 を境に、それより十分小さい場合には $L_e \doteq L_s$ に、十分大きい場合は、 L_0 を超えて大きくなりすぎないようにする働きがある。これでも、当時、中緯度地域の比較的仰角が高い（例えば、30 度程度かそれ以上）場合には、妥当なものとして受け入れられていたが、 L_G が大きくなる低仰角への適用には疑問視されていた。

我が国では KDD（現 KDDI）が山口衛星通信所からインド洋衛星にアクセスする場合、衛星軌道位置によっては仰角 5 度程度になる可能性もあり、低仰角運用時の降雨減衰の把握が課題になっていた。そのような状況において、降雨減衰推定法の高度化（適用範囲の拡大と高精度化）について二つの動きがあった。

一つは筆者が所属した KDD 研究所の無線伝送研究室での話。1982 年頃より、Ku 帯低仰角衛星伝搬（降雨減衰・XPD・サイトダイバーシチ・シンチレーション）の研究の一環として、山口および浜田に実験局を設置して衛星電波測定実験を行っていた（その間に同伴に関するインテ

ルサットの委託研究を KDD が受託していて、プロジェクトリーダーは山田松一主任研究員（当時）；主担当者は安川交二研究員（同）。筆者もこの伝搬グループのお手伝いをする形で、当時、世界各国で提案されていた 8 つの降雨減衰推定手法（式(4)の CCIR 法を含む）を、論文や国際会議予稿集等で入手できた 124 の実測データを用いて推定精度の評価を行った。全体的に、実測値と推定値には一定の傾向を持つ誤差があり、上述の $r_{0.01}$ について、以下の式

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + L_G / L_0} \quad (5)$$

$$L_0 = 35 \exp(-0.015 R_{0.01})$$

を用いるとその傾向が取り除かれ、かつ、精度（rms 誤差）も向上することを見出した。この結果を、Yamada 等の共著論文として Radio Science 誌に発表した[7]。(5)式中の L_0 は試行錯誤によって得られた経験式（先に $L_0 = a \exp(-b R_{0.01})$ の形を決め、 a, b を実測データでチューニングした）であって理論的裏づけは無いが、強い雨ほど等価通路長は短くなるという特性が組み入れられている。

もう一つの動きは、CCIR SG5 の活動自体である。1986 年の会合以前から、上記と同じような意味合いから、種々提案されている降雨減衰推定法を共通のデータ・共通の方法（基準）で評価し、新たな勧告手法を目指すと言う目的で、SG5 内にテストグループが結成された。筆者もそのメンバーに加わった。SG5 が持つ学術指向の宿命で、各種の手法の提案者、あるいは提案もとの機関の代理者が多く集まったグループなので、それぞれに思惑があつてなかなか議論が進まないこと（＝一つの手法に絞り込むことの難しさ）が懸念された。そこで、具体的に評価作業を行う責任者には、客観的な立場にある（＝評価対象の提案手法に関与がない）イタリアの Prof. Paraboni が選ばれた。筆者らの方法（すなわち(5)式）も評価対象の手法に含まれていた。テスト結果を議論する作業班会を重ね、最終的には、筆者らの提案方式（Yamada 方式）が精度が最上位グループにあつて、計算手法が簡易であることが理由となって、1990 年の SG 会合で、新しい降雨減衰推定法として勧告手法に承認された。

1990 年以降は、東南アジア、南アメリカ（ブラジルなど）、アフリカ、など低緯度熱帯地域での推定精度向上に議論が移って行き、1999 年、空間の水平方向の補正係数（ $r_{0.01}$ ）のみでなく、シャワーのように降る豪雨に対する垂直方向の補正係数（ $r_{v,0.01}$ ）も導入した新たな推定法に置き換えられ、現在に至っている[2]。この改定によって、計算式は複雑になっているが、少なくとも、中緯度地域での推定には、(5)式での推定で十分な状況は変わっていないはずである。例えば、日本においては、CS 衛星（周波数 19.45GHz）の電波を長期間測定した鹿島（茨城）[8]と寝屋川（大阪）[9]のデータに対する(5)式による推定値は図 2 になる[10]。故に、我が国において、降雨減衰の概算値を調べたいときには、簡易な(5)式を適用して問題ないであろう。

（なお、1994 年以降の改定作業には筆者は参加しておらず、新たな式の成り立ちについては把握できていない。）

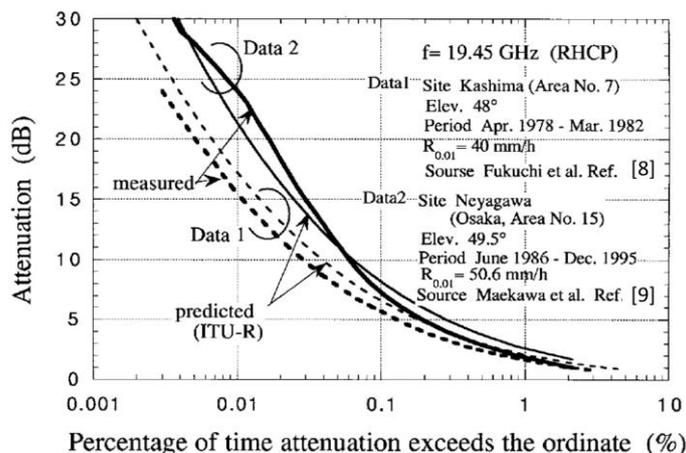


図2 我が国における衛星回線降雨減衰の長期観測結果と(5)式での計算結果の比較[10]

4. 今後の課題

ITU-R SG3における衛星回線の降雨減衰推定法改訂作業は一段落しているように見える。新たな測定データが得られて、推定法の不備が見えてきたときは改訂が必要になるが、新規手法を提案する際には、SG3に登録されているデータバンク[11; P.311]のデータ（降雨減衰データはかなり膨大）に対する現行手法との比較検証が必要になる。提案者自身にその作業が求められるとすると負担がかなり大きいように感じられる。

近年地球温暖化問題で、雨の降り方も変わってきていると言われる。その変化が降雨減衰の統計値に現れてくるなら、そのことを取り入れた推定法が求められてくるであろう。しかしながら、筆者の予備的な検討では、低時間率降雨量に影響が大きいと思われる年間最大雨量（時間降水量、10分間降水量などの）には顕著な傾向は見えてきておらず、現時点での問題はなさそうである（年毎のばらつきが大きく、長期的な変動の傾向がマスクされて見えない状態）[12]。なお、日本各地の降雨強度特性とその年度変化幅については、[4]のデータがそのまま活用できる。

降雨減衰を瞬時に見ると雨域の動きによって時間的に変化する。その雨域の中心はいつも地上局の真上にあるわけではないので、地上局から見た角度方向によって、パス上の減衰量は異なるものになる。例えば、複数の衛星（あるいはHAPSなど）が同時に見える場合には、衛星ダイバーシチが働く可能性もある。この評価には、降雨減衰の角度相関（あるいは降雨減衰差）が重要な働きを持つ。このような視点からの検討も必要であろう。（先人の検討は[13]）。

余談：伝搬モデリングの心得

伝搬モデリングには、大きく分けて二つの方法がある。伝搬劣化の原因となる物理現象（自然現象）が持つ確率的性質を取り込んで定式化する理論志向のモデル（演繹的モデル）と、実測値の統計的性質から、その結果に対する尤度が高くなるようにモデルの形を定めてゆく経験則的モデル（帰納法的モデル）である。降雨減衰モデルの場合は、前者には森田・樋口の方法（降雨

の確率分布と空間相関を用いて定式化している) [14]や Crane の方法 (2-component model) [15]に代表され、後者には本レポートで紹介した Yamada 等の方法がある。学術的には前者に理想を見るが、本レポートで述べたことがその例であるように推定精度や使いやすさの面で後者が優れている場合が多く、実用手法となるものも多い。ただ、気をつけなければいけないのは、前者のモデルでは、適用範囲外にパラメータ値を設定しても、大凡の値を算出するであろうが、後者のモデルでは、時としてとんでもない値になる恐れがあるということである。

伝搬モデリングの心得としては

- 1) 適用範囲を明確にしてその範囲内で推定精度がよい
 - 2) 計算式が簡易である (電卓で計算できるのがありがたい)
 - 3) 原因となる物理現象の性質に基づいている (適用範囲外の推定にも無理が利く)
- を大事にしたい。これからの時代の主流になるであろう AI に聞けば、違う心得を教えてくれるとは思いますが・・・。

参考文献

- [1] 唐沢好男, “地上無線回線の降雨減衰推定法,” 技術レポート (私報), TR-YK-022, 2019.03.
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/YK-022_Rain_Attenuation_Prediction_Model.pdf
- [2] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems,” P.613-13, 2017.12.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-13-201712-I!!PDF-E.pdf
- [3] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems,” P.530-18, 2021.09.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-18-202109-I!!PDF-E.pdf
- [4] 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
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/r-rec-p.838-3-200503-i!!pdf-e.pdf
- [5] ITU-R, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” P.838-3, 2005.03.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf
- [6] ITU-R, “Rain height model for prediction methods,” P.839-4, 2013.09.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.839-4-201309-I!!PDF-E.pdf
- [7] 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.
- [8] H. Fukuchi, et al., “Centimeter wave propagation experiments using the beacon signals of CS and BSE satellites,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-31, pp.603-613, 1983.
- [9] Y. Maekawa, et al., “A study on rain attenuation statistics on Ku-band and Ka-band satellite-to-ground paths,” 信学技報, A.P96, pp. 7-12, 1996.

- [10] Y. Karasawa and Y. Maekawa, "Ka-band Earth-space propagation research in Japan," Proc. IEEE, vol. 85, no. 6, pp. 821-842, 1997.
- [11] ITU-R, "Acquisition, presentation and analysis of data in studies of radiowave propagation," P.311-18, 2021.09.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.311-18-202109-1!!PDF-E.pdf
- [12] 唐沢好男, "日本の降雨量極値データを統計的に見る (改訂版)," 技術レポート (私報), TR-YK-021-rev, 2019.09.
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/YK-021_Rainfall_Statistics.pdf
- [13] 森田和夫, 樋口伊佐夫, "準ミリ波帯隣接区間の降雨減衰差の推定," 通研実報, vol.25, no.2, 1976.
- [14] 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," 通研実報, vol. 19, no. 1, pp. 97-150, 1970.
- [15] R. K. Crane, "Comparative evaluation of several rain attenuation models," Radio Science, vol. 20, pp. 843-863, 1985.