

衛星伝搬の壺

第2講

降雨減衰：ミリ波利用時の大問題

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

本シリーズでは衛星回線の電波伝搬に焦点を絞り、種々の伝搬現象のメカニズムやモデリングの壺を解説する。第2講では、ミリ波など高い周波数が用いられるときの大問題：降雨による電波の減衰を述べる。降雨減衰への理解は、雨滴による電波の減衰を求める電磁界解析と降雨の統計的性質を把握することの両輪よりなる。本講では、特に、後者に比重を置き、降雨と言う自然現象を統計的に捉えることの大切さとその難しさを述べる。また、降雨減衰モデリングにおける地上回線との考え方の違いも明らかにしたい。



👉 降雨による電波の減衰

雨は様々な形で我々の日常生活に関わっている。あるときは恵みとして、あるときは楽しみを邪魔する嫌われものとして、そして、又あるときには、災いをもたらす脅威として。日本語には、季節・地域・模様・心象などによって雨の呼び名が400近くもあるらしい。今回のテーマは降雨による電波の減衰、そう、嫌われものとしての雨である。

降雨は電波を吸収して弱くする。それが問題になるのは、10GHz以上の高い周波数であり、50mm/h、100mm/hと言うような極めて強い雨のときである。図1は、雨滴の代表的な形状を示している。弱い雨では球形であるが、強雨になるに従って、落下時の空気抵抗により、やや水平方向に扁平な形になる。大きさは半径3mm程度が最大でこれ以上に大きくなろうとすると、分裂してしまう。この雨滴に電波が当たると、次のような作用が起きる。

- ①吸収され、電波の強度が落ちる（＝減衰を受ける）
- ②周囲に散乱し、離れたエリアへの電波干渉の原因になる。
- ③形の扁平性により、水平偏波と垂直偏波で減衰量がわずかに異なり、それにより、直交偏波運用時（特に円偏波のような）にはお互いの偏波成分への漏れ込みが生じて、通信信号への干渉が起きる。

本講では、通信に対する影響度が最も大きい①に焦点を絞る。先人の努力により、降雨強度に対する雨滴

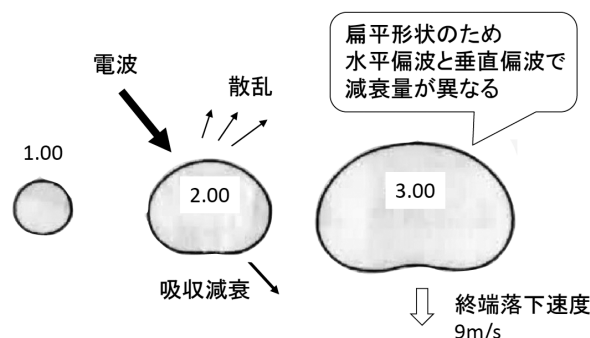


図1 変形雨滴形状と電波への作用
(雨滴の数値は等価体積球形雨滴の半径(mm))

の大きさの分布や密度が明らかにされていて、それに基づく減衰量の理論計算値が得られている。この計算式（理論計算で求めたものを電卓レベルで計算できるようにした簡易計算式）が[1]に公開されている。図2は降雨強度 R [mm/h]の雨が一樣に降っている環境における1km当たりの減衰量 γ_R [dB/km]（以後、減衰係数と呼ぶ）である。

図より、減衰係数は降雨強度と共に、又、100GHz以下では周波数と共に大きくなる様子が分かる。現実的に問題になる周波数は10GHz以上である。減衰は電波の波長が雨滴のサイズに近づくほど大きくなり、飽和点近傍の50GHz～100GHzの波長（6mm～3mm）は雨滴の最大径に近い。大雨になっても景色が真っ暗闇にならずおぼろげながらも透けて見えるように、電波も100GHz以上ではそれ以上の減衰にはならず、光の減衰量に漸近する。降雨減衰係数は降雨減衰推定法の出発点であって、難関はむしろこれからである。

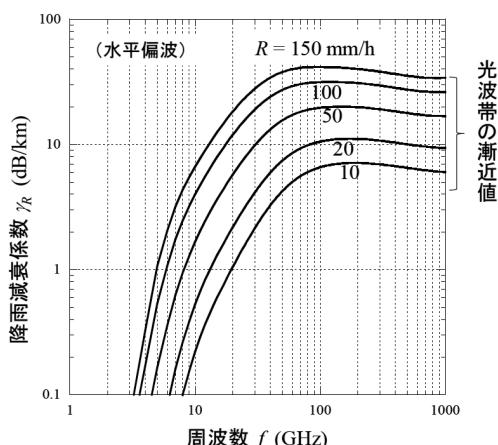


図2 減衰係数の降雨強度に対する周波数特性



降雨減衰の統計的推定

【基本的考え方】

ある時刻 t における降雨減衰量 $A(t)$ [単位: dB] は、斜め伝搬通路 l 上の減衰係数 γ_R を積分したものになる。減衰係数は降雨強度 R の、降雨強度は空間 (l) と時間 (t) の関数になるので、減衰量は次式になる。

$$A(t) = \int_{\text{斜め伝搬路}} \gamma_R \{R(t, l)\} dl \quad (1)$$

回線設計では、この瞬時減衰量の長期間統計、すなわち、累積確率分布 (時間率) $p(A)$ が必要になる。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、学会 (国際シンポジウムや論文誌) や国際無線標準化機関 (ITU-R (1992 年以前は CCIR)) の会合を通じて議論が重ねられてきた。ITU-R での降雨減衰推定法に関する基本指針は以下である。

衛星回線では、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 52 分に相当) の減衰値 $A_{0.01}$ に焦点を絞り、これをその地点の降雨強度 (後述する 1 分間降雨強度) の 0.01% 値 $R_{0.01}$ から推定する考えが採られて来た。基本式は $R_{0.01}$ に対する減衰係数を用いて以下で表される。

$$A_{0.01} = \gamma_R(R_{0.01})L_e \quad (2)$$

右辺の L_e は伝搬路路上に $R_{0.01}$ の強度の雨がどのくらいに広がっているかを表す等価通路長 [km] であり、統計的な量である。減衰係数 γ_R は電磁界解析によって十分な精度の式が得られているので、1980 年代以降は等価通路長の高精度推定に力が注がれてきた。

なお、他の時間率に対する減衰値 ($p\%$ 値) A_p は、別途定められる確率分布に従い $A_{0.01}$ を通る形で求められる。

【等価通路長 L_e 】

自然現象である降雨は、そ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。このため、信頼度の高い回線設計を可能とする推定法を構築するには、等価通路長を精度よく定めることが鍵になる。

図3は衛星回線の伝搬路モデルを説明するための図であり、衛星仰角 θ 、地上端末の高度 h_s [km]、実効降雨高 h_R [km] (0°C 層の高さ: 中緯度地域で約 4km, 低緯度地域で約 5km) が伝搬路を決めるパラメータである。降雨高 h_R から地上局までの斜め伝搬通路長を L_s 、その水平面へ射影した長さを L_G としている。

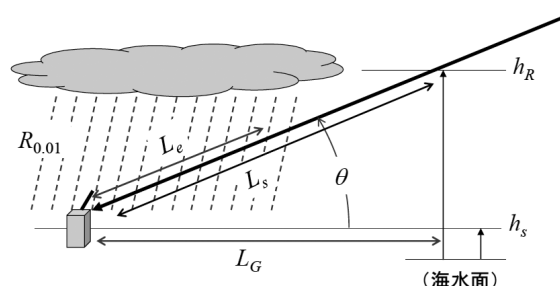


図3 減衰量 $A_{0.01}$ 推定のための衛星回線の伝搬路モデル

実際の雨は均一に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 L_s よりも短いだろうと予測できる。等価通路長の推定に注力する考え方は、筆者が標準化活動に参加した当時 (1980 年代) からであったが、現在においてもそのことには変わりはない。

1980 年代中頃、学会等において、十に近い数の降雨減衰推定法が発表されていたが、推定精度の客観的な比較評価が行われてはいなかった。当時の CCIR において、推定法の高精度化のため、共通のデータ・共通の方法で既存提案法を評価しようということになり、研究グループ (SG5) 内に作業班が結成され、筆者もそのメンバーに加わった。評価段階における侃侃諤諤の議論末、最終的には、精度に優れ、かつ、計算手法が簡易であることが理由となって以下の方法が選ばれ、1990 年の SG 会合で勧告手法に承認された。

$$L_e = \frac{L_s}{1 + L_G/L_0}, \quad L_0 = 35 \exp(-0.015 R_{0.01}) \quad (3)$$

この式は、筆者らが入手可能な世界のデータを用いた評価検証の末に見出していたもので [2]、伝搬研究が世に役立つことの喜びを味わうことができた。

1990年以降、ITU-Rの中での降雨減衰推定法については、実測データが不足していた東南アジア、南アメリカ、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も導入した新たな推定法（計算式はやや煩雑）に置き換えられ、今日に至っている[3]。図4は現行推定法により求めた降雨減衰計算結果の一例である（設定値は図中に）。小さい時間率に対してまでサービスを提供しようとする大きなマージンが必要であることが理解できると思う。

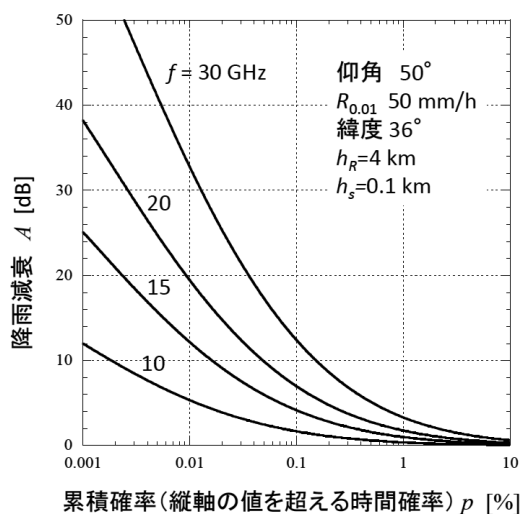


図4 降雨減衰累積分布計算結果の一例

地上回線モデリングとの違い

地上回線の場合はどうなのだろう。雨滴の電波吸収現象には衛星回線も地上回線も無く、同じ物理現象である。当該地点における降雨強度特性も共通である。大雑把で良ければ、等価通路長 L_e の式中の L_e を送受信間距離 D に置き換えればよいであろう。実際、ITU-Rの勧告手法ではそのようにして両回線間での整合性を保っていた時代があった。ただし、我が国の場合には、歴史的な経緯がある。

衛星通信は、インテルサットシステムに代表されるように、国際通信伝送路の担い手として発達してきた。このため、回線設計を可能とする降雨減衰推定法には、グローバル性（＝世界のどの地域に対しても精度良い推定ができる方法）が求められる。一方、地上回線では、例えば、日本国内でと言った当該地域限定の高精度推定ができればよいということになる。

我が国における地上回線の降雨減衰モデルについては、森田・樋口[4;1970]によって作り上げられた基

本モデルが、細矢等[5;1984]、小野等[6;2008]の改良を経て、現在の総務省の無線回線規格[7;2011]になっている。森田・樋口の降雨減衰モデルは、我が国の降雨の強度がガンマ分布に、降雨の空間相関が距離 d に対して $\rho = \exp(-\alpha\sqrt{d})$ （ α は地域依存の数値）になる特徴を用いて(1)式の瞬時減衰 A の確率分布を理論的に求めたものであり、等価通路長に注力する衛星回線モデルとは、モデル化の思想が異なっている。その改良モデル[5],[6]の推定精度は多くの国内実測データにより確認されている。

一方、世界の気象構造には多様性があり、例えば、ヨーロッパにおける降雨の空間相関は日本とは異なる関数形とされ、モデリングの出発点から再考する必要がある。それゆえ、森田・樋口モデル（あるいは欧米で独自に開発されたモデル）では、グローバルなデータに対してはどうしても誤差が大きくなり、ITU-Rでの採用には至っていない。

降雨強度特性

精度の良い推定をするためには当該地域での長期統計に基づく降雨強度特性が求められる。衛星系においても地上系においてもこのことは共通である。降雨減衰推定に用いる降雨強度は、瞬時変化を捉えるために雨量の時間分解能を高くすることが望ましく、1分間積分値のものが用いられる。1分間毎に降った雨の量[mm]を60倍して1時間の量に換算した降雨強度[mm/h]で、1分間降雨強度と呼ばれる。天気予報で言われる1時間雨量[mm/h]は、1時間に降る雨の量であり、同じ単位ながら、1分間降雨強度とは積分時間が違う（図5）。

降雨強度の測定には雨量計が用いられる。雨量計には大別して転倒杵型と雨滴計数型がある。転倒杵型は漏斗状の受水器が受けた雨水を、下に置いた杵で受ける。この杵は0.5mm貯まるたびにシーソーのように転倒を繰り返し電気パルスが発生する。獅子おどしの原理である。雨滴計数型は、受け止めた雨水を細い管から灯油中に落とすと一定の大きさの粒となって沈下するため、これを光学的に検知してパルス出力を得る。原理から明らかなように分解能は雨滴計数型が優れていて、1分間降雨強度データ取得にはこのタイプの雨量計が用いられてきた。一方、転倒杵型は構成が簡易で、校正やメンテナンスも少なく済むメリットがあり気象庁の雨量観測に用いられている。

気象庁は、1976年より、国内千数百箇所に、地域気象観測システム（AMeDAS）を順次構築し、利用

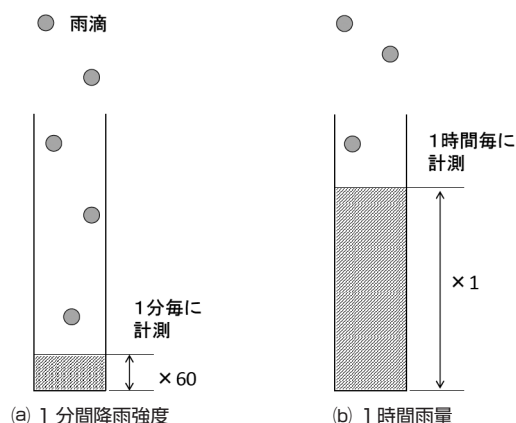


図5 1分間降雨強度と1時間雨量（単位は共に mm/h）

しやすい数値化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、1995年より、百数十箇所の気象官署（气象台や測候所）で1分間降水量データも得られるようになった。1分間降水量データは1分間降雨強度特性に近いので、おおいに利用が期待できるのであるが、転倒杵型の雨量計では、結果をそのまま使うと大きな誤差が出る。0.5mmの量がたまったごとに杵が転倒するが、この転倒間隔が1分間に一回であれば、強度30mm/hに相当する。2回なら60mm/h、3回なら90mm/hである。値が30mm/hの倍数のみでは統計値としてそのまま使うことはできない。そのため、1分の間での均しやその際の規則性排除に乱数を用いること等により、1分間降雨強度の年間累積分布が雨滴計数型雨量計の精度に匹敵する変換手法が開発されている[8]。このような変換手法によって、気象庁の降水量データが有効に活用でき、日本全国千数百箇所の1分間降雨強度特性がデータベースとして整備されている[7]。

検討課題

【稼働率の考え方】

ミリ波など高い周波数利用において、衛星回線だけを唯一の伝送路として高信頼性が求められる通信では、どんなときでも切れては困るため、降雨に対して大きなマージンを持つ高コストなシステムにならざるを得ない。しかし、地上・衛星両系が連携してサービスを担う未来のワイヤレス通信では、伝送路としてのダイバーシチ機能が高まっており、必ずしも、大きなマージンを持つ必要性はなくなる。サービスとそれを担うシステム構成視点での衛星回線の稼働率（信頼性）に対する考え方の再考が求められる。

【降雨減衰のリアルタイム予想とダイバーシチ制御】

LEOやHAPSのようにユーザから複数の飛翔体局が見える場合には、降雨状況によって最適な飛翔体局をリアルタイムに切り替えて使用するダイバーシチ運用が可能である。この降雨減衰量の短時間予測ができれば、回線の選択も柔軟に行える。このためには、時間および空間的に高分解能な降雨予想情報、例えば、気象庁の降水短時間予報システム「高解像度降水ナウキャスト」の活用が有効であろう。

次講ではシンチレーションを取り上げる。

ティータイム



統計値も揺らぐ

1980年代の前半、筆者が所属していたKDD研究所では西日本各地（山口・大分・浜田など）で降雨減衰測定実験を行っていた。その1983年7月21日から23日にかけて未曾有の豪雨が発生し、島根・山口両県に大水害（死者不明者119人、浸水1万戸）をもたらした。筆者等が測定していた降雨データから、浜田（島根県）における1983年の $R_{0.01}$ は140mm/hであった。気象庁の1976～1988の13年間の降水量データから換算推定して得た $R_{0.01}$ は、1983年を含めると60mm/h、除くと54mm/hであった[9]。降雨の統計を語るに1年間のデータでは話にならず、最低3年、できれば5年はほしいと言われる世界である。それでも、一度大雨に見舞われれば、10年の統計も1割程度は揺れるのである。

地球温暖化問題による降雨強度変化の長期傾向も気になる場所である。地球はこの百年で気温が0.73℃、日本の平均（大都市部を除く）で1.21℃の上昇が観測され、地球温暖化問題に危機感が高まっている。平均気温が上がると、その分、大気に含まれる水蒸気量も増えるため、降雨にも影響が大きく現れるのではと心配される。実際、この十年間には、土砂崩れや川の氾濫をもたらす豪雨がニュースに流れ、それに伴って線状降水帯という言葉が人口に膾炙してきた。地球温暖化によって降雨特性が年々変わってゆくようであれば、データベース化されている我が国の1分間降雨強度特性にも見直しが必要になる時期が来るだろう（ただし、まだその時期ではない）。

<参考文献>

- [1]ITU, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," Rec. ITU-R P.838-3, 2005.
- [2]M. Yamada, Y. Karasawa, et al., "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.
- [3]ITU, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," Rec. ITU-R P.613-13, 2017.12.
- [4]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.
- [5]細矢良雄他, "20GHz帯降雨時伝搬特性の推定," 研実報, vol. 33, no. 6, pp. 1221-1231, 1984.
- [6]小野健一、唐沢好男, "安全係数の概念を導入したM分布近似降雨減衰率推定法," 信学論(B), vol. J91-B, no.2, pp. 169-187, 2008.
- [7]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
- [8]小野健一他, "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.
- [9]Y. Karasawa, T. Matsudo, "One-minute rain rate distributions in Japan based on AMeDAS one-hour rain rate data," IEEE Trans Geosci. & Remote Sensing, vol. 29, no. 6, pp. 890-898, 1991.