

気候変動と電波伝搬

第4講（結の巻）

降雨減衰量変化の未来予想

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

本シリーズでは、地球温暖化に伴う降雨の長期的変動と電波伝搬（降雨減衰）の交差点部分に光を当てている。これまでの講において、日本の強雨は、1980年代後半より、25年で1割程度の上昇傾向にあることを示した。また、年ごとのばらつき幅に比べれば、まだわずかな変化であるので、この百年間を定常確率過程とみなして、豪雨の発生は極値統計理論の支配下にあることを述べた。最終回の本講では、降雨の長期変化に伴う降雨減衰量の未来予想を行う。



前講までのまとめ：強雨の長期変化傾向

この百年、地球温暖化がじわじわと進んでいる。気温上昇の影響が雨の降り方の変化に現れると、電波の伝わり方も変わってくる。故に、我々無線技術者も地球温暖化問題に関心ではいられない。そこで、あまり明確になっていない雨の降り方の長期変化傾向を知りたいと思い、気象庁が公開している日本全国百年超にわたる気象観測データ [1] を用いて、独自の統計的推定を行ってきた[2],[3]。着目したのは、日降水量や時間降水量の年間最大値、強い雨の降り方の長期的な変化がここに表れているであろうと思ったからである。都道府県庁所在地を中心とする45地点、およそ百年にわたる観測データを地点毎の平均値で割って地域に依存する強弱の違いを均した正規化降水量を用いた。

図1がその結果である（第2講図4の再掲）。図には、日降水量（130年間：実線）と時間降水量（80年間：点線）の年間最大値の正規化量の年変化を多項式関数近似（細線）と一回折れ線近似（太線）で示したものである。多項式関数近似の次数 K は AIC（赤池情報量基準）評価での最適値を選んでいる。また、両近似の AIC 評価では、日降水量に対しては多項式関数近似の方が、時間降水量に対しては折れ線近似の方が優れているとの判定を得ている（◎を付けている方）。両降水量とも、1990年前後から増加傾向に変わり、それ以降、強度の増加比率は25年間で1割程度を示している。

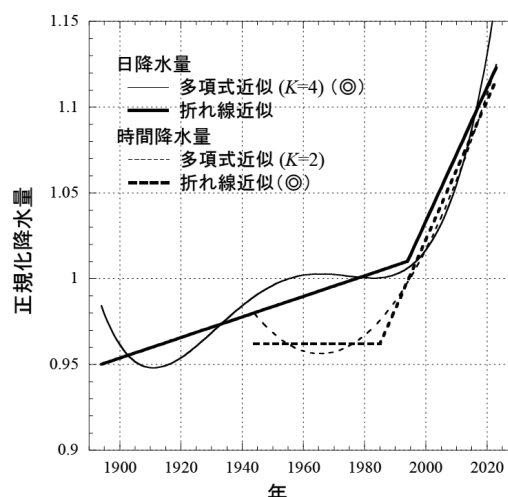


図1 日降水量と時間降水量の年間最大値正規化量の長期間変化特性の多項式および折れ線近似特性

降雨減衰推定法と1分間降雨強度 $R_{0.01}$

前講までは、電波伝搬の話に結び付ける前段として、我が国における強雨の長期的な変化について述べてきた。ここからは、最終目的である雨の影響を受ける電波伝搬（降雨減衰）の話をしたい。電波の一部は雨滴によって吸収され、ミリ波のような高い周波数ほど減衰の量が大きくなる。電波の減衰推定に用いられる降雨データは、これまで扱ってきた最大降水量とは異なるものであるため、そのまま用いることはできない。以下、減衰計算に必要な降雨強度 $R_{0.01}$ を中心に、降雨減衰推定法の概要を述べる。

◆ ITU-R の降雨減衰推定式

雨の降り方が変われば、降雨によって受ける電波の減衰も変化する。図2に示すような、衛星あるいは成層圏プラットフォーム（HAPS）と地上無線局を結ぶ斜め伝搬路を考えてみよう。対流圏下部（海拔5km（ h_R ）付近）に生まれる雨の中を電波が通過すると、雨滴による吸収によって信号強度の低下が起きる。この減衰量は、雨が強いほど、電波の周波数が高いほど、仰角が低いほど大きなものになる。無線回線（衛星回線・地上回線）に及ぼす降雨減衰の大きさを求める計算式（降雨減衰推定法）は、無線通信の国際標準化機関ITU-Rにおいて、次式で与えられている[4], [5]。

$$A_{0.01} = kR_{0.01}^{\alpha} L_e \quad (1)$$

ここで、 $A_{0.01}$ [単位：dB] は平年時における降雨減衰累積時間率の0.01%値（年間の最悪の53分に相当する減衰量）、 $R_{0.01}$ [mm/h] は無線局がある地点における1分間降雨強度（積分時間1分間の雨量で、60倍して1時間あたりに換算する）の0.01%値、 k と α は周波数や偏波に依存する係数である。右辺中の $kR_{0.01}^{\alpha}$ は、強度 $R_{0.01}$ の雨が1kmにわたって均一に降るときの減衰量[dB/km]、 L_e [km] は伝搬路中の実効的な雨域の広がりを表す等価通路長である。等価通路長は降雨高 h_R と無線局を結ぶ斜め伝搬通路長 L_s [km] や $R_{0.01}$ の関数として与えられている。最終的に求めたい量である任意の累積時間率 p [%] に対する降雨減衰量 A_p [dB] は、 $A_{0.01}$ から求める計算式が用意されている。このため、降雨減衰推定に必要な降雨情報は求めたい地点における $R_{0.01}$ が得られていれば良いということになる。（尚、我が国の地上無線回線での降雨減衰計算式は総務省の電波法関係審査基準[6]で与えられており、そこでは確率分布（細矢のM分布）を定めるために時間率の異なる2点の降雨強度が必要である）。

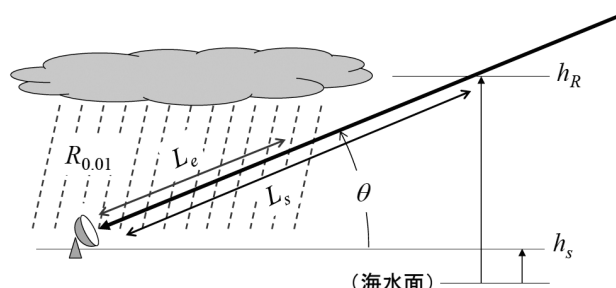


図2 衛星やHAPSなどの斜め伝搬路に対する降雨減衰

◆ $R_{0.01}$ のデータベース

1分間降雨強度の年間時間率0.01%値（ $R_{0.01}$ ）のデータベースは世界的にはITU-R P837 [7]に、日本国内については総務省の電波法関係審査基準[6]に収められている。日本のデータベースは全国1150箇所について、1976年から稼働している気象庁アメダスの3種類（時間・10分間・1分間）の降水量観測データを用いて1分間降雨強度の確率分布に変換したものが用いられている。（データベースの構築はKDDIの小野健一氏らのグループによる。その詳細は同氏の学位論文[8]に詳しくまとめられている）。

アメダスの時間降水量データは運用開始の1976年から、10分間降水量データは1995年から順次取得が行われている。一方、1分間降水量は、1996年より、百数十箇所の気象官署（気象台や測候所）で順次観測が行われている。データベース構築に用いたデータの期間は1976年から2002年の最大27年間分である。3種類のデータに対して、1分間降水量データが使える地点と期間ではそれを使い、使えない場合は10分間降水量データを、それも使えない場合は時間降水量データを用いて推定している。

時間降水量と10分間降水量は、目的とする1分間降雨強度データと雨量を図る時間間隔（積分時間）が異なるので、独自の変換手法を用いて目的の統計値を得ている。1分間降水量データは積分時間が同じなのでそのまま使えそうに思うであろうが、これも以下の理由により変換が必要になる。気象庁の雨量計は一柵0.5mm容量の転倒柵タイプ（シーソーの両側に柵（受け皿）があり、片方が満杯になると転倒して反対側の柵に変わる）のものであり、1分間に1回転倒があるとそれが1分間降雨強度換算で30mm/hとなってしまっており、分解能が悪いので、1分間降雨強度の統計値としてそのまま用いることができない。このため、独自の変換処理（乱数補正秒単位均し分配処理）を行って1分間降雨強度時系列データ（疑似データ）に作り直し、そのデータの累積分布を求めている。このように、データベース作成にはずいぶん手間暇かかっていることを理解してほしい。

👉 降水量年間最大値と $R_{0.01}$ との関係

これまで述べてきた強雨の解析の主な目的は、無線通信回線設計視点からの1分間降雨強度年間時間率0.01%値： $R_{0.01}$ [mm/h] に長期的変化があるかどうか、もしあるのならば、既存データベースの見直し時期は将来のいつごろになるかを知りたいことにある。しか

し、前述のように、 $R_{0.01}$ のデータベース構築には多大な労力が費やされており、長期的な変化を気象庁の降水量データ（アメダスデータ）から直接求めるのは簡単ではないし、現時点では観測期間も足りていない。そこで、もし、これまで述べてきた日・時間・10 分間降水量の年間最大値と $R_{0.01}$ に関連性（相関）が強いのであれば、最も相関が強いものの年変化特性を $R_{0.01}$ の長期変化とみなしてよいだろうことが期待できる。

図 3 は、地点ごとに求めた日・時間・10 分間降水量の年間最大値の長期間平均値と対応する地点での $R_{0.01}$ との関係を示す散布図である。それぞれの点は観測点（日降水量と時間降水量は 45 地点、10 分間降水量は 47 地点）に対応しており、横軸の $R_{0.01}$ の値の小さい部分は降雨強度の弱い北海道や東北地方、値の大きい部分は強度が強い九州や四国太平洋側の地点になる。三つの降水量とも $R_{0.01}$ と比例関係にあり（図に示す直線）、相関係数 ρ で見ると、日・時間・10 分間降水量に対して、それぞれ、0.898, 0.978, 0.928 とどれも高い値を示している。その中でも、時間降水量との相関が極めて高い。故に、 $R_{0.01}$ の長期変化傾向は、時間降水量の年間最大値の期待値の長期変化傾向がそのまま使えると考えて良いであろう。ちなみに、積分時間だけを考えれば、10 分間降水量との相関が最も高くなるはずと思えるが、そうならないのは、着目している累積分布の時間率の違い（10 分間降水量の年間最大値は累積時間率で 0.0019%（ $=1/365/24/6 \times 100$ ）に相当）で、このように、極端に小さい時間率には降雨に対する飽和現象が現れているからと理解できる。

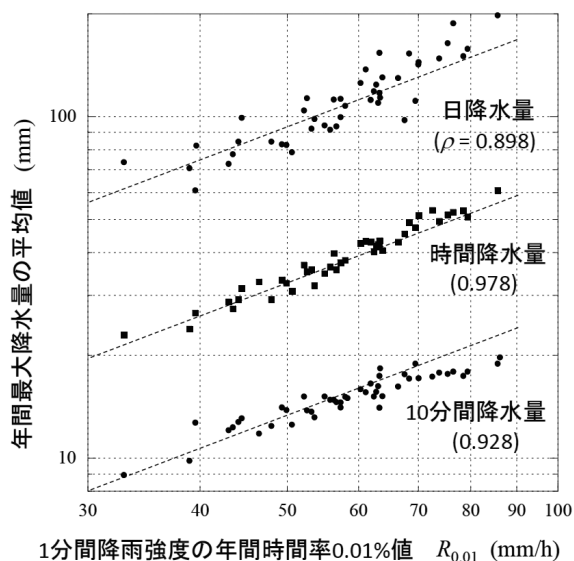


図 3 $R_{0.01}$ と日・1 時間・10 分間降水量の年間最大値（の平均値）の関係を示す散布図と相関係数（直線は比例関係を表す）

👉 降雨減衰量の大胆未来予想

降雨減衰の計算に用いられる $R_{0.01}$ と時間降水量年間最大値の平均値とは強い相関があることがわかったので、 $R_{0.01}$ の長期変化傾向を時間降水量年間最大値の長期変化傾向で代用してみよう。図 4 は、時間降水量特性において、いくつかの近似関数に対する最尤推定のうち、AIC 評価値が最も良かった折れ線近似（図 1）の結果を太線で示している。そこから先、2100 年までのレンジの外挿部分については、現時点では確たるものは何もない（地球温暖化傾向と対策が降雨特性にどう現れてくるかは専門家でも結論が出ていない）。最もありえそうな予想は 1980 年代後半以降の増加傾向がそのまま続く（太点線）であろうが、さらに加速する（細点線）かもしれないし、逆に落ち着く（一点鎖線）のかもしれない。太点線のように、直線的に増加する場合には、2000 年を基準とする降雨強度の増加比 η_R は 2100 年頃において 1.4 程度（=4 割増し）と予測できる。

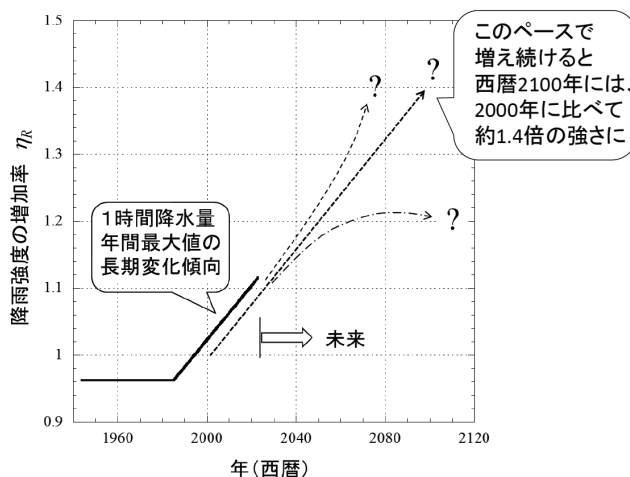


図 4 1 時間降水量年間最大値の変化傾向に対応付けした $R_{0.01}$ 増加率 η_R (2000 年を基準とする) の未来予想

図 5 は仰角 50° の衛星回線における降雨減衰の ITU-R 手法 (1 式) による計算結果である。実線は $R_{0.01}=50\text{mm/h}$ とした場合、点線は 2100 年を想定し、 $\eta_R=1.4$ 、すなわち、 $R_{0.01}=70\text{mm/h}$ としたものである [9]。図より、減衰量には無視できない差が生まれている。本当にそうなるかがわからないところでの予測であるので、2040 年頃に一度立ち止まって様子を見ることが必要になる。そのころにおいても増加傾向が続いているようであれば、観測期間が十分な長さになっている気象庁の 1 分間降水量データ（転倒枡形雨量計が使われているなら変換処理は必要であるが）を用いた降雨強度データベースの再構築が必要になる。

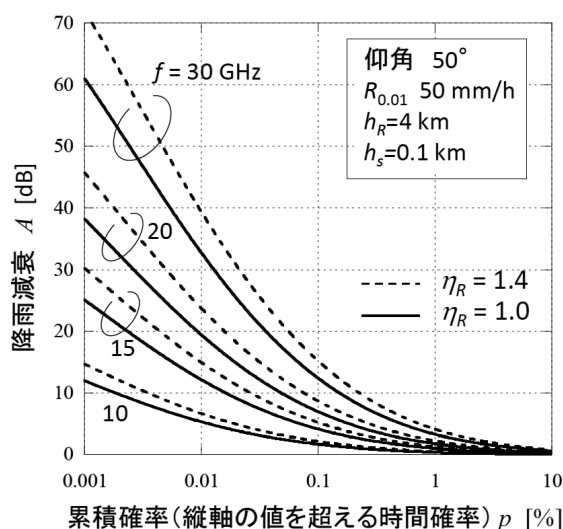


図5 衛星回線の降雨減衰の西暦2000年(実線)を基準とした2100年の予想値(点線)の計算例

それが難しい場合は図1の変化傾向をアップデートし、既存のデータベースに対する η_R 補正を行えばよいであろう。

ここでは、我が国の強雨の長期変化傾向からの予測を示した。降雨量の長期変化特性は、地域依存性が強い故に、ITU-Rのデータベースに対する長期変化予想は、地球規模での同様な評価が必要である。第1講でも述べたように、特定の地点のみに百年程度の長期降雨データがあっても、そこから結論を導くことは難しい。同じような気候帯ごとにグループ化して統計量を増やし、すなわち、正規化降雨量としてたくさんのデータから共通の傾向を見るのが良いであろう。その際、ここで示したように時間降雨量年間最大値の特性から変化傾向を見出すのが現実的であろう。

シリーズの終わりに

我が国における雨の降り方の長期的な変化を調べ、その結果が電波伝搬(降雨減衰)に与える影響について、4回にわたって解説した。(それぞれの講のPDFは筆者のURLサイト[10]で公開している)。

起：地球温暖化時代、雨の降り方も変わった？
承：雨の降り方100年間の詳細変化を見てみよう
転：豪雨は今も昔も：極値統計が支配する世界
結：降雨減衰量変化の未来予想

このシリーズの背景には地球温暖化問題がある。初講のコラムにも書いたように、地球温暖化問題は見る人によって景色が異なる難しいテーマである。この百

年をみると、大気中の二酸化炭素が年と共に増加していること、そして、地球上の気温が上昇しつつあることの2点は誰もが認める事実である。しかし、気温上昇の主原因が人間活動に由来する二酸化炭素排出にあるのか、さらには、地球全体の環境変化を人間の力によって制御できるのかというあたりで見解が分かれてくる。温暖化によって失うものがある一方、得られるものもあり、その利害関係が冷静な議論を難しくもしている。巷では、グリーンウォッシュ(実態が伴わないのに環境に配慮しているように装う「見せかけの環境対策」のこと)が問題になっているが、でも、手を拱いていて、取り返しがつかないことになってはいけない。それぞれができることをやるしかない。

本講で示した長期的な豪雨の増加傾向は自然災害の加速を予見し、重大な環境問題を孕んでいる。それを電波伝搬への影響にまで絞り込むと、日常生活において大したことのない話と思われてしまうかもしれないが、通信の信頼性向上にはこういう縁の下力持的な検討も必要になってくる。本講が、その背景である地球温暖化問題について、読者の皆様の考える機会になっていただければ幸甚である。

<参考文献>

- [1]気象庁, 過去の気象データ検索,
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [2]Y. Karasawa, "Long-term statistical properties of extreme rainfall data in Japan," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 62, 2024.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10640060>
- [3]Y. Karasawa, "Long-term variations of extreme rainfall in Japan for predicting the future trend of rain attenuation in radio communication systems," Climate, vol. 2005, 13, 145, pp. 1-19, 2025.
<https://www.mdpi.com/2225-1154/13/7/145>
- [4]ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," Recommendation ITU-R P.618-14, 2023.
- [5]ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," Recommendation ITU-R P.530-18, 2021.
- [6]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:
https://www.awcc.uec.ac.jp/radio3/ronbun/Rain_ATT_Calc_Method.pdf
- [7]ITU-R, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," Recommendation ITU-R P.837-7, 2017.
- [8]小野健一, 降雨減衰率推定法の精度および適用性の向上に関する研究, 博士論文(電気通信大学), 2009.
https://www.awcc.uec.ac.jp/radio3/D_ronbun/ono.pdf
- [9]唐沢好男, "日本の降雨極値データに見る長期変化傾向 [V]," 信学技報, AP2025-155, pp. 30-35, 2025.11.
- [10]唐沢研究室ホームページ
<https://www.awcc.uec.ac.jp/radio3/achievements.htm#kaisetu>