

# 無線回線降雨減衰量の未来予測

## ～地球温暖化時代の降雨の長期変動を踏まえ～

唐沢好男

本レポートは我が国の降雨に関する長期変化傾向をまとめた技術レポート (TR-YK-086) の続編である。近年、地球温暖化問題が言われ、世界の気温は百年で  $0.73^{\circ}\text{C}$  の、我が国でも  $1.21^{\circ}\text{C}$  上昇が指摘されている。このような長期的な変化が降雨特性にも現れれば、無線通信の回線設計に利用されている降雨強度データベース ( $R_{0.01}$ ) も、いずれは見直しが必要になろう。この降雨の問題について、前レポート (TR-YK-086) では、我が国の日・1 時間・10 分間降水量の年間最大値に着目し、およそ百年間のスケールでの長期変化傾向を非線形近似の回帰曲線で分析し、その妥当性を信頼区間や AIC (赤池情報量基準) で判定した。その結果、我が国に降る強雨の強さについては、1980 年代後半頃より、およそ 25 年に 10% 程度のペースでの増加傾向にあることが明らかになった。本レポートでは、この解析結果を踏まえ、降雨の長期変化傾向が、無線通信における降雨減衰推定に与える影響について調べ、降雨減衰の未来予想を行う。

---

注：前レポート (TR-YK-086) は英文論文[9], [10]を整理した日本語解説版である。本レポートの内容は、信学会アンテナ・伝播研究会 (AP 研, 2025.11) に発表予定である。

### 1. はじめに

無線回線の回線設計における降雨減衰推定には、1 分間降雨強度の年間累積時間率  $0.01\%$  値 ( $R_{0.01}$ ) が用いられている[1], [2]。そのデータベースは世界的には ITU-R P837 [3] に、日本国内については総務省の無線回線審査基準[4]に収められている。一方、近年、地球温暖化問題が言われ、世界の気温は百年で  $0.73^{\circ}\text{C}$  の、我が国でも  $1.21^{\circ}\text{C}$  上昇が指摘されている[5], [6]。このような長期的な変化が降雨特性にも現れれば、これまで回線設計に利用されている降雨強度 ( $R_{0.01}$ ) のデータベースも、いずれは見直しが必要になろう。地球温暖化に伴う我が国の降雨の長期的予測や強雨の変化傾向については気象庁からの報告もあるが[7], [8]、降雨強度 ( $R_{0.01}$ ) と直接結びつけられるものにはなっていない。

そこで、筆者は、我が国の県庁所在地を中心とする 47 地点での日降水量・1 時間降水量・10 分間降水量に着目し、約 100 年間分の年間最大値データの長期変化傾向を最尤推定や区間推定により調べてきた[9], [10] (そのまとめは前レポート TR-YK-086 [11])。地点毎の統計では、およそ百年間のスケールであっても、年毎のばらつきが大きいため長期変化傾向の有無を判定することはできないが、地点毎に最大値の平均値で割った正規化降水量を用いて日本全体の傾向として捉えると、

1980年代の後半ころより凡そ25年間で10%強のペースでの増加傾向が認められた。また、気象庁が報告している強雨事象の発生回数での評価結果[12]に対して、強雨地域のデータを用いて、本解析結果との整合性を示すことができた。

本レポートでは、この結果を踏まえ、研究目的の原点に帰って、気候変動時代における電波伝搬、すなわち、降雨減衰とその推定法に関する未来予想を述べる。

## 2. 降雨の長期変化に関する解析結果の整理

論文[9], [10] (解説レポート[11]) での解析 (回帰分析、区間推定、AIC (赤池情報量基準)) によって、以下の点を明らかにしている。

### 解析に用いたデータ

気象庁のホームページ[13]から公開されている以下の3種類の降水量を用いている。(データの詳細は[10]のTable 1 (あるいは[11]の表1))

- ① 日降水量の年間最大値：日本の45箇所 (県庁所在地を中心とする) の100年間 (1924-2023) と130年間 (1894-2023) の2種類
- ② 1時間降水量の年間最大値：45箇所の80年間 (1944-2023) (注：ここで言う1時間は毎正時ごとに区切った1時間ではなく、任意の時間から測った1時間。年間最大値は真の意味での最大値)
- ③ 10分間降水量の年間最大値：47箇所の70年間 (1954-2023)

①は大災害を引き起こす台風や集中豪雨 (線状降水帯等による) に、②と③は短時間の大雨 (ゲリラ豪雨など) に代表される。無線回線の回線設計には、②や③による減衰が問題になる。

### 解析結果

- 1) 降雨量は年毎のばらつきが大きいいため、100年規模のデータであっても、地点毎に見るのでは、有意な長期変化傾向を見出せないこと (95%信頼区間での推定)
- 2) 地点毎の着目降水量年間最大値の平均値で正規化した正規化降水量を用いて共通に扱えるデータ数を増やし、このデータで解析すると、100年規模の時間スケールにおいて、1割強の増加傾向が有意であること (回帰直線近似、区間推定) (気候が異なるエリアごとに同様の解析をしても、この増加傾向はほとんど同じ)
- 3) 同じデータから多項式近似や折れ線近似での回帰曲線を求め、その最適次数をAICによって定めると、増加の傾向は1980年代後半頃から顕著になっていること (非線形関数近似、AICによる最良選択)

図1はこの解析結果をまとめている。図で点線は回帰曲線を多項式近似にし、最適次数をAICで選んだもの、実線は、1回折れ曲がりの折れ線近似の中でAICが選んだものである。AIC評価において、日降水量 (130年間データ) では、多項式近似の方が、1時間降水量と10分間降水量では折れ線近似の方が良い評価値を得ている。いずれにしても、1980年代後半からの増加が共通に認められる。

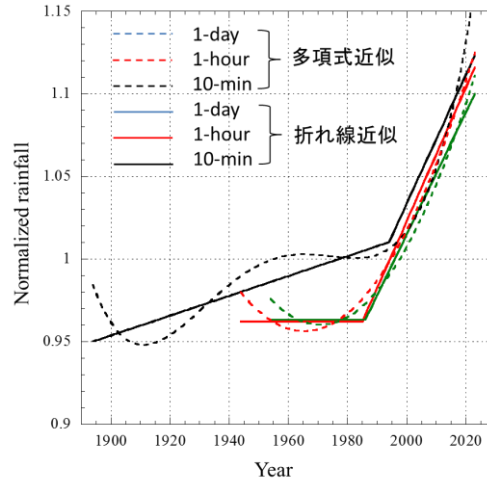


図1 3種類の正規化降水量（年間最大値）の長期変化特性  
（点線：多項式近似、実線：単曲折れ線近似）

4) 気象庁では、1976年から稼動している AMeDAS データ（約 1300 箇所）を用いて、1 時間降水量がしきい値（50mm, 80mm, 100mm）を超える強雨事象の発生回数を調べ、1980 年以降に増加傾向が見られることを示している[12]（経年変化の図は [10]の Fig. 7 参照）。同報告書では、平均年間発生回数について、最近 10 年間（2013~2022 年）を最初の 10 年間（1976~1985 年）と比べると、設定値 50mm で 1.5 倍（328 回/226 回）、80mm で 1.8 倍（25/14）、100mm で 2.0 倍（4.4/2.2）とまとめられている。気象庁が最近の強雨の増加傾向を述べるときの根拠データとなっている。強雨事象の発生回数統計と強度の増加を調べている筆者等の解析（図 1）では、視点が異なっているが、降雨量の累積確率分布を用いた検討によって、結果に整合性があることを明らかにしている。

### 3. 降雨減衰推定法と降雨パラメータ

#### 3.1 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。無線通信の国際標準化機関 ITU-R における無線回線（衛星回線・地上回線）の降雨減衰推定には、次式の形で与えられる計算式が勧告されている[1], [2]。

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

ここで、 $A_{0.01}$  [dB]は平年時における降雨減衰累積時間率の 0.01%値、 $R_{0.01}$  [mm/h]は推定したい地点における 1 分間降雨強度の 0.01%値、 $k$  と  $\alpha$ は周波数や偏波に依存する係数 [14]、 $L_e$  [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。衛星通信の場合、等価通路長は次式によって与えられる。

$$L_e = v_{0.01} r_{0.01} L_s \quad (2)$$

ここで、 $L_s$ は地上局（標高  $h_s$ ）から降雨高（ $h_R$ ）までの斜め伝搬路長（ $(h_R - h_s)/\sin \theta$ ,  $\theta$ : 衛星仰角（ただし  $5^\circ$  以上））であり、中緯度地域では  $h_R$  はおよそ 4km である（正確には[15]）。 $r_{0.01}$  は水平方向の、 $v_{0.01}$  は垂直方向の降雨の空間不均一性（等価的な広がり）を補正する係数で、それぞれ、horizontal reduction factor, vertical adjustment factor と呼ばれている。現行の推定法では  $r_{0.01}$  も  $v_{0.01}$  も  $R_{0.01}$  の関数で与えられており、(1)式による降雨減衰（ $A_{0.01}$ ）の推定には、降雨情報として当該地点における  $R_{0.01}$  が求められていれば良いということになる。なお、任意の累積時間率  $p$  [%]に対する降雨減衰量  $A_p$  は、 $A_{0.01}$  から求める計算式が用意されている。（注：歴史的経緯があつて、日本における地上回線の降雨減衰推定法[4]は等価通路長を用いる(1)式とは別の形になっているが、当該地点における 1 分間降雨強度データを使用することは共通）

### 3.2 $R_{0.01}$ のデータベース

$R_{0.01}$  のデータベースは世界的には ITU-R P837 [3]に、日本国内については総務省の電波法関係審査基準[4]に収められている。

日本のデータベース（全国 1150 箇所；データの出典は[16]）は気象庁の 3 種類の降水量観測データを 1 分間降雨強度確率分布に変換し、以下の要領でデータベースを構築している。

1) 地点数：日本全国 1150 箇所（AMeDAS 稼動地点より）

2) データ解析対象期間：1976 年～2002 年の最大 27 年。ただし、AMeDAS は運用開始日が地点毎に異なるので、解析期間も地点毎に異なる

3) 使用した降水量データ

① 1 分間降水量データ：1996 年より、百数十箇所の気象官署（气象台や測候所）で順次観測開始

② 10 分間降水量データ：1995 年より、AMeDAS 局で順次観測開始

③ 1 時間降水量データ：1976 年の AMeDAS 運用開始時より

4) 各種降水量データの 1 分間降雨強度データへの変換

#### 1 分間降水量①の 1 分間降雨強度への変換

気象庁の降雨計は一枡 0.5mm 容量の転倒枡タイプのものであり、1 分毎に 30mm/h の分解能であるため、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、[17]に述べている変換処理（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に作り直し、そのデータの累積分布を求めている。（変換手法の精度は同一地点に設置した転倒枡雨量計と分解能が高い雨滴計数型降雨強度計との比較により確認）

#### 10 分間降水量②の 1 分間降雨強度への変換

1 分間降雨強度への変換（確率分布同士の変換）は[18]の手法を用いている。（変換手法の開発と精度の検証は①の変換後データ（135 地点）を用いて行っている）

#### 1 時間降水量③の 1 分間降雨強度への変換

1 分間降雨強度への変換は[18]の手法を用いている。（変換手法の考え方は②に同じ）

5) 各地点における 1 分間降雨強度特性（ $R_{0.01}$  等）

日本の1分間降雨強度データベース作成においては、1976年から2002年の最大27年間の各年について、①>②>③の優先順位で使えるものを使い、1分間降雨強度の累積分布を求める。全国1150箇所のうち、135箇所の気象官署では①+②+③、残りの箇所では②+③である。①と②の開始の年は地点毎に異なる。(このデータベースの詳細は[16]~[18]の内容を含めて小野の博士論文[19](降雨特性は付録9-1)にまとめられている)

#### 4. $R_{0.01}$ と降水量年間最大値の平均値との相関

冒頭で述べたように、本研究の主な目的は、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の0.01%値： $R_{0.01}$  [mm/h] が長期的視点において変化しているかどうか、もし変化しているならば、そ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、3.2節で述べたように、 $R_{0.01}$ の長期的な変化を気象庁の降水量データから直接求めるのは簡単ではない。そこで、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 $R_{0.01}$ の相関を調べ、 $R_{0.01}$ の長期変化に結び付けてみたい。

図2は[10]のTable 1 (あるいは[11]の表1) に載せている日本全国47箇所の $R_{0.01}$ 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である(日降水量については100年間データ)。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 $\rho$ で見ると、日・1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、1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、1時間降水量の年間最大値の期待値の長期変化傾向を調べれば、その傾向が共通に使え则认为が良いであろう。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、これは、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%(=1/365/24/6×100)に相当)で、このように、極端に小さい時間率には強雨に対する飽和現象が現れているからと理解できる。

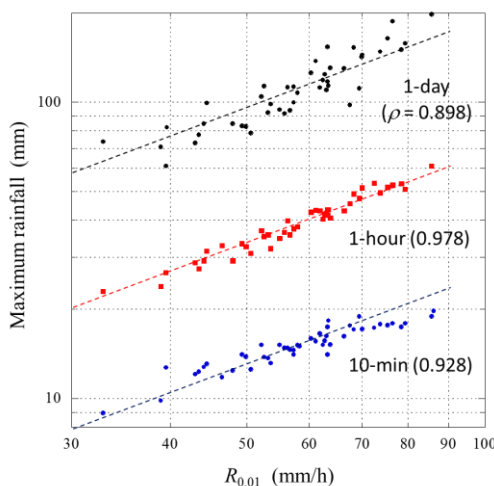


図2  $R_{0.01}$  と日・1時間・10分間降水量の年間最大値(の平均値)の関係を示す散布図(直線は比例関係)

## 5. 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 1 時間降水量年間最大値の平均値とは強い相関があるので、 $R_{0.01}$  の長期変化傾向は 1 時間降水量年間最大値の長期変化傾向で代用して良いであろう。図 3 は、1 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、2100 年までのレンジで示している。もちろん実線部分以降の外挿部分は、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[7],[8]）。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。

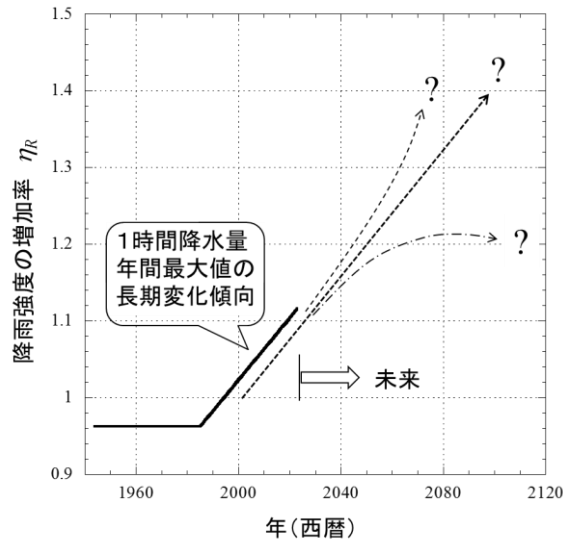


図 3 1 時間降水量年間最大値の変化傾向に対応付けした  $R_{0.01}$  増加率  $\eta_R$  (2000 年を基準とする) の未来予想

ここでは、そのまま続くこと（＝図の太点線）を想定してみよう。式で表すと以下である。

$$\begin{aligned} \hat{R}_{0.01}(Y) &\approx \eta_R(Y) \hat{R}_{0.01}(2000) \quad (2000 \leq Y < Y_{\text{future}}) \\ \eta_R(Y) &= 1 + \frac{Y - 2000}{250} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $Y$  は西暦、 $\hat{R}_{0.01}(Y)$  は西暦  $Y$  年における  $R_{0.01}$  の期待値である。期待値なので、長期的な意味でその年はそのくらいの値になるだろうと言う確率的な平均値（期待値）であって、実際その年にそのようになるというものではない。西暦 2000 年を基準（ $\eta_R=1$ ）として年々値が大きくなる係数  $\eta_R$  を用いて、2000 年以降の、すなわち、基本的には未来の  $R_{0.01}$  を予測する推定式になっている。 $\hat{R}_{0.01}(2000)$  は、現存のデータベース（[4]の  $R_{0.01}$  の値）を想定している。今のペースの増加がそのまま 100 年も続くのかどうかはわからない。故に、式の適用上限の  $Y_{\text{future}}$  は未知である。図 3 に見ら

れる直線的な増加傾向から  $Y_{\text{future}}$  は 2050 年ころまでは適用できそうと期待されるが、これもあくまで予測である。2025 年時点では、1 割程度の増加であるから、降雨減衰量に与える影響はまだ小さいが、今後数十年先には、無視し続けることはできなくなるであろう。

図 4 は仰角  $50^\circ$  の衛星回線において、ITU-R の手法 ((1)式) による降雨減衰の計算結果である。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、 $R_{0.01}=70\text{mm/h}$  にしたものである。大雑把に言って、(1)式の降雨減衰係数部分 ( $kR_{0.01}^\alpha$ ) の指数  $\alpha$  の値は 30GHz 付近では 1 に近いので、等価通路長  $L_e$  が同じなら、減衰量は降雨強度にほぼ比例する。図では、増加比率がそれよりやや小さくなっているが、これは、等価通路長（を構成する  $r_{0.01}$  と  $v_{0.01}$ ）が、 $R_{0.01}$  の関数であって、 $R_{0.01}$  の増加に対して小さくなる方向に変化しているためである。図より、減衰量には無視できない差が生まれており、そのころにおいて、降雨強度データベースの再構築がなされていない場合には、 $\eta_R$  による降雨強度補正が必要になるであろう。

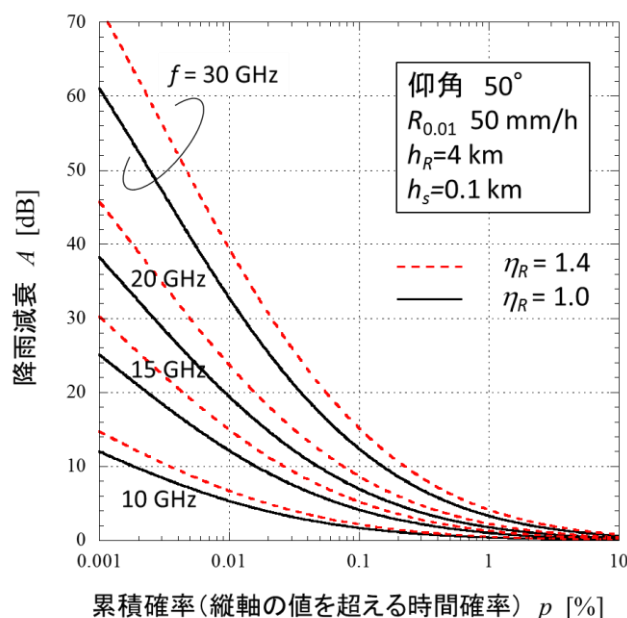


図 4 衛星回線の降雨減衰の西暦 2000 年（実線）を基準とした 2100 年の予想値（点線）の計算例

(3)式は、日本の降雨に当てはめた式なので適用地域が日本に限定される。降雨量の長期変化特性は、地域依存性が強いと予想され、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。その場合でも、本稿での評価手法が、大いに役立つものと期待している。(3)式による  $R_{0.01}$  の未来予測に関しては、3つの課題を挙げておきたい。

- ① 数十年後（2050 年ころ）に、そのときまでの気象庁データ（年間最大 1 時間降水量など）を使って(3)式の上昇傾向の確認をしてほしい。
- ② 地球規模スケールでの評価式を確立してほしい。降雨の特性は地球の気候区分によって異なるゆえに年変化傾向も異なるものとなるだろう。[9]でも述べたように、特定の地点のみに 100 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、本稿で示したように1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。

③ 式(1)で示したように、降雨減衰量の推定には  $R_{0.01}$  と共に、等価通路長  $L_e$  の長期変化も重要である[20]。現行の ITU-R 推定法では等価通路長にも  $R_{0.01}$  が関数として組み込まれているので、 $R_{0.01}$  のみの把握で計算は完結しているが、モデル構造そのものの見直しも必要になろう。等価通路長については、気温上昇に伴って増加が予想される降雨高 (0°C層の高さ) や、雨域の空間的広がり (水平・垂直の両方向) の変化傾向を見ることになり、降雨の地点データのみから推定できる  $R_{0.01}$  の予測よりは難しいであろうが、チャレンジしてほしい。

## 6. まとめ

一連の研究 ([9], [10]) によって日本の降水量の年間最大値データを用いて、降雨の統計的性質に見られる長期間の変化傾向を明らかにした。筆者の最終的な目的は無線通信の回線設計時の降雨減衰推定に用いられる  $R_{0.01}$  が、地球温暖化の影響を受けて変わりつつあるのかどうかを知りたいことにあったが、我が国の  $R_{0.01}$  の値と、1時間降水量の年間最大値の長期間平均値とが極めて高い相関を有することに着目し、 $R_{0.01}$  の長期変化傾向を見通すことができた。

日本の降雨の統計的性質に関するこれまでの検討結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 降水量は年毎のばらつきが大きいので、100年規模のデータであっても、地点毎に見るのでは、有意な長期変化傾向を見出せないこと (95%信頼区間判定において)
- 2) 地点毎の着目降水量年間最大値の平均値で正規化した正規化降水量を用いて共通に扱えるデータ数を増やし、このデータで解析すると、100年規模の時間スケールにおいて、1割強の増加傾向が見られること
- 3) 同じデータから非線形近似の回帰線を求め、その最適次数を AIC によって定めると、その増加傾向は 1990 年頃から始まっていて、その増加比率は 25 年で 10%程度であること。

また、無線回線の降雨減衰量推定に用いられる 1 分間降雨強度の累積確率 0.01% 値  $R_{0.01}$  との関係について、

- 4) 地点毎に見る  $R_{0.01}$  と三種類の降水量 (年間最大値の長期間平均値) には良い比例関係があり、特に 1 時間降水量については、相関係数 0.978 の極めて高い類似度が認められた。
- 5) 相関が強い 1 時間降水量の長期変化傾向を、 $R_{0.01}$  の長期変化傾向とみなして、 $R_{0.01}$  の未来予想式を示した。

本報で述べた降水量の年間最大値の長期変化特性は、地球温暖化問題の影響が含まれていると思われるが、それを明確にするためには多様な気候特性を持つ地球規模での同様な解析が必要である。さらに、その結果を生かして、 $R_{0.01}$  の長期変化を予想したが、これは、日本の降雨に当てはめた式なので適用地域が日本に限定される。地球規模での未来予測が待たれるが、本報での評価手法が、そのような評価において大いに役立つことを期待している。



なお、最近、日本各地の豪雨（線状降水帯の発生に伴う）がニュースで大きく取り上げられるが、その一つ一つを本報で述べたような近年の強雨の増加傾向に、さらに言えば、地球温暖化現象に結び付けて語ることは慎重になったほうが良いと思う。なぜならば、[9]でも述べたように、現時点においては、長期変化の程度が年毎のばらつきの大きさに比べてかなり小さいため、これまでの 100 年間を定常確率過程とみなして、強雨の発生頻度をみると、極値統計理論（極値分布である Gumbel 分布）に従っていて、どこにも想定外はない（起こるべきして起きている）と言えるからである。今はまだかすかに変化の兆しが見えたという段階であり、地球温暖化現象の影響が降雨特性に顕著に現れてくるのは、これからであろう。

## 参考文献

- [1] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems,” Recommendation ITU-R P.618-14, 2023.
- [2] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems,” Recommendation ITU-R P.530-18, 2021.
- [3] ITU-R, “Characteristics of precipitation for propagation modelling,” Recommendation ITU-R P.837-7, 2017.
- [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.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/Rain_ATT_Calc_Method.pdf)
- [5] 気象庁、世界の年平均気温, [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_wld.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html)
- [6] 気象庁、日本の年平均気温, [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_jpn.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html)
- [7] 気象庁、“地球温暖化予測情報 第9巻,” 2017.03, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/pdf/all.pdf>
- [8] 気象庁、日本の気候変動 2020, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>
- [9] Y. Karasawa, “Long-term statistical properties of extreme rainfall data in Japan,” *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, (to be published in 2025). Early Access area on IEEE Xplore:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10640060>
- [10] 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>
- [11] 唐沢好男, “日本の極値雨量の長期変化傾向,” 技術レポート, TR-YK-086, 2025.  
[http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/YK-086\\_Rainfall\\_Statistics\\_5.pdf](http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/YK-086_Rainfall_Statistics_5.pdf)
- [12] 気象庁、大雨や猛暑日（極端現象）のこれまでの変化,  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html)
- [13] 気象庁、過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [14] ITU-R, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” Recommendation ITU-R Rec. P.838-3, 2005.
- [15] ITU-R, “Rain height model for prediction methods,” Recommendation ITU-R Rec. P.839-4, 2013.
- [16] 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.
- [17] 小野健一, 西村安由, 中間浩一, 斉藤研次, 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.
- [18] 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.

- [19] 小野健一, 降雨減衰確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.  
[http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/D\\_ronbun/ono.pdf](http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/D_ronbun/ono.pdf)
- [20] 前川泰之, “Ku 帯衛星回線の降雨減衰統計の最近の増加傾向について”, 信学技報, SAT2018-3 (2018-05).