

気候変動と電波伝搬

第2講 (承の巻)

雨の降り方 100 年間の詳細変化を見てみよう

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。前講では、この 100 年、地球規模においても、我が国においても、気温の上昇は確実に見られるが、雨の降り方については年ごとのばらつきが大きいので、地点ごとの解析からは長期的な変化傾向を見出すのが難しいことを述べた。本講では、地点ごとの年間最大雨量を平均値で正規化し、日本全体についての長期変化傾向を種々の関数で近似し、統計的手法によってその姿を明らかにする。



👉 前講のまとめ

地球温暖化がじわじわと進んでいる。この 100 年間の気温の上昇が、世界（陸上+海上）では 0.73°C 、日本（都市化による影響が比較的小さい 15 地点の平均）では 1.2°C 、東京（千代田区：都市化率 92.9%）で約 3°C である。東京の上昇率が飛びぬけて大きいのは地球温暖化に加え、都市特有のヒートアイランド現象が重なっているためである。気温の上昇によって雨の降り方が変われば、電波の伝わり方も変わってくる。実際はどうなのだろう。前講では、日本の雨の降り方の変化について、以下の特徴を述べた

- ①強い雨が降る頻度、例えば、1 時間雨量が 50mm を超える事象の発生回数は、凡そ 40 年間で 1.5 倍に増えている（1976 年以降のアメダスデータをまとめた気象庁の報告書 [1] から）
- ②日降水量・時間降水量の年間最大値について、地点ごとに 100 年間の変化を見ても、有意な増加があるという結論を出せない。

長期変化傾向の有る無しに関して①と②では言っていることが違う。ただ、①は日本の雨全体について、②は地点毎に見ている点に違いがある。②を日本全体で見ればどうなるだろうか。本講では、その統計について調べてみよう。

👉 統計的推定の基本

昔々、ばらつきの大きいデータをプロットしたグラフにエイヤッと線を引くベテランがいて、そこに名人芸を見た。しかし、今の時代、これは通用しない。こ

こでは、解析に用いる三つの統計手法：最尤推定・区間推定・AIC（赤池情報量基準）を簡単に述べる。（個々の推定法の詳細は [2] を見てほしい）

❖最も確からしい特性を求める：最尤推定

観測値 y と変数 x の関係を、パラメータ群 $\theta (\theta_1, \theta_2, \dots)$ を用いて $y=f(x|\theta)$ の形で近似したい。本講の場合には、 y は降雨量の年間最大値、 x は西暦年である。ある年 i の観測における x_i と y_i の関係は、多数の不確定要素の作用を受けるので、そのずれを ε_i として、次式で表される。

$$y_i = f(x_i|\theta) + \varepsilon_i \quad (1)$$

モデル関数 f については、近似として良からうと思う形を事前に定め、その関数を構成するパラメータ群 θ の最も確からしい値（最尤値）を見つけないという手順をとる。その方針は、起こったことはそれが最も起きやすかったからという考えに立つ。具体的には、観測値に対する二乗平均誤差 $\langle \varepsilon_i^2 \rangle$ を次式で定める。

$$\langle \varepsilon_i^2 \rangle = \langle (y_i - f(x_i|\theta))^2 \rangle \quad (2)$$

この誤差を最小にするパラメータ θ を求める。この規範によってモデルを定める方法は最小二乗法であるが、誤差の分布が正規分布に近似できる場合は、それが最尤推定になる。このようにしてパラメータが定められた近似式 f は、得られたデータを表すのもっとも確からしい（＝尤度が高い）ということになる。

❖間違っただ判断をしないために：区間推定

最尤推定は、変数 x に対して最も確からしい一つの値を導くが、本当にそれが正しいかどうかはわからない。そこで、真の値が存在しそうな範囲を確率（例えば 95%）で押さえておけば、推定の誤りを減らすことができる。このように、存在しそうな範囲を確率で表す推定が区間推定であり、その範囲は信頼区間と呼ばれる。推定を確からしいものにしようとして確率を大きくすれば（例えば、99.9% など）区間幅が広くなり、傾向が読み取れない（＝結論が出せない）と言うジレンマに陥る。区間推定では、データにばらつきがあるほど、また、データの数が少ないほど区間幅は広くなる。性急な結論を避けて用心深い推定をしたいというときに使われる。

❖良いモデルを選ぶために：AIC（赤池情報量基準）

最尤推定は、モデルの関数形を決めたのち、データとの一致度（＝尤度）が最大になるパラメータの値を決定する。そのときの一致度は最大尤度で計られる。別のモデルを用いても、それに対する最大尤度が求められる。このように複数のモデルがあるとき、どれを選ぶべきかと言う判断指標を与えるのが、赤池弘次博士が編み出した AIC（Akaike Information Criterion: 赤池情報量基準）である。一般に、パラメータ数が多いモデルほどデータに対する近似精度が上がるため、最大尤度が高くなる。ならば、パラメータ数が多い（＝最大尤度の値が大きい）モデルが良いモデルなのであろうか。そうではない。パラメータが多すぎると、モデル作りに用いたデータへの適応が過剰になり、統計的性質が同じ別のデータに対しては、かえって、誤差が大きくなってしまうということになる。では、どのモデルが良いのであろうか。このような状況におけるモデル選択の指標が AIC であり、以下の式で与えられる。

$$AIC = -2 \times (\text{最大対数尤度}) + 2 \times (\text{パラメータの数}) \quad (3)$$

この AIC の値が小さいほど優れたモデル（＝選択すべきモデル）になる。式中の最大対数尤度は最大尤度の対数値である。高度な数理統計理論の下で編み出された計算式であるが、式そのものは非常に簡易で、使う我々には大変ありがたい。精度が同じくらいなら、パラメータ数の少ないモデルのほうが良いと言っている。オッカムの剃刀である。

👉 正規化降水量

前講でも述べたように、地点毎に、降水量（日あるいは時間）の年間最大値の推移を 100 年にわたって見ても、区間推定（95% 信頼区間）では増加の有意性が言えない。これは年毎のばらつきが大きく、信頼区間の幅が広がって様々な傾向を許容してしまうためである。この幅を狭くできれば良いのだが、そのためには、データの数を増やすしかない。しかし、データがある年数は決まっている。ではどうすればよいか。

日本のデータを一まとめにできれば、地点数の倍だけデータが増える。しかし、北海道から九州・沖縄まで降水量の差が大きいので、そのまままとめたのでは、値のばらつきの幅はさらに大きくなってしまう。そこで、各地の降水量をそれぞれの地点の平均値で割って、正規化した降水量を用いてみよう（図 1）。こうすると、地点毎の平均値が同じ（＝1）になり、年変化傾向のみが共通に扱えることになる。データは気象庁公開ページ [3] から、県庁所在地を中心とする 45 地点での各種降水量年間最大値のうち、以下のものを抽出している [4], [5]。（地点などデータの詳細は [5] の表 1）

- ①日降水量：1894～2023 年（130 年）
- ②時間降水量：1944～2023 年（80 年）

地点ごとの正規化降水量の年ごとのばらつきの標準偏差は日本のどこでも 0.4 ± 0.1 程度であり、地域依存性はほとんどない。このため、全国のデータには強弱があっても、年変化傾向は共通に現れるであろうと期待できる。

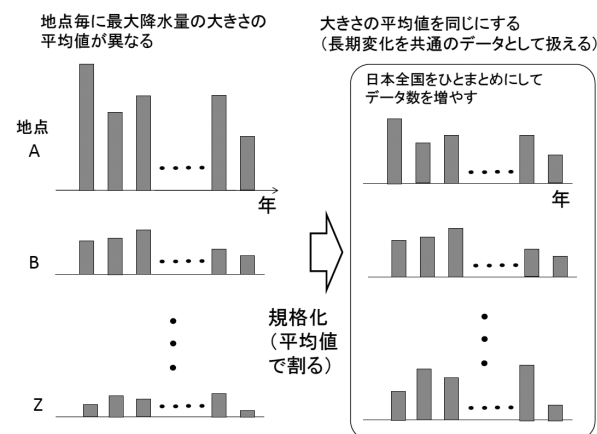


図 1 それぞれの地点での平均値で割った正規化降水量

👉 長期変化特性

❖ 回帰直線で見ると

まずは正規化降水量の増加傾向の有無を見たいため、回帰直線を求めてみよう。図2(a)は年毎の45地点の正規化時間降水量（年間最大値）をプロットしている。点の数は3600（=80×45）である。0.5～2辺りを中心に幅広く分布している。図には回帰直線（最尤推定：実線）と95%信頼区間（点線）も示している。この縦軸スケールでは、回帰直線の傾きが小さいので、変化の様子がよくわからない。そのため、縦軸の0.9～1.1の範囲を拡大したものが同図(b)である。回帰直線で見ると80年間で1.16倍の増加が、区間推定でも有意な増加傾向が示されている。

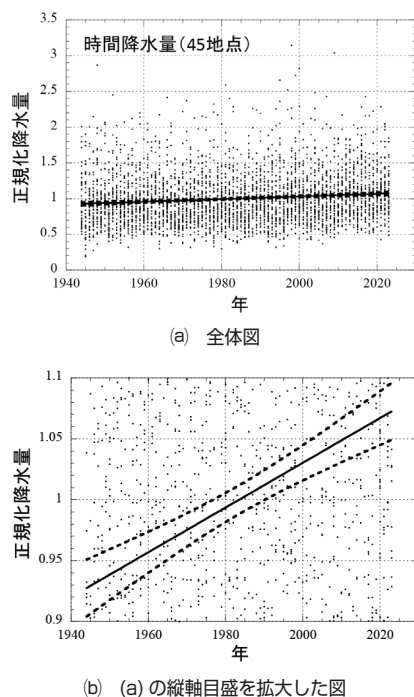


図2 日本全国45地点の正規化時間降水量年間最大値の80年間推移（実線：回帰直線、点線：95%信頼区間の上限と下限）

ここでは、時間降水量について示したが、日降水量の年間最大値に対しても、100年間（1924-2023年）で、回帰直線が1.14倍の増加がみられ、時間降水量の場合とほぼ同様の結果になった[4]。

❖ 多項式近似曲線で見ると

区間推定により観測期間中での増加傾向が確認できたので、期間内でのより詳細な変化を調べてみたい。最尤推定における近似式を直線から曲線に変えてみよう。その曲線近似に次式で表される K 次の多項式を採用する。

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_Kx^K \quad (4)$$

$K=1$ とすれば、先に求めた回帰直線である。AICの説明でも述べたように次数 K を大きくすればするほど、データに対する誤差は小さくなる（＝尤度が大きくなる）が、評価式(3)に従えば、それが良いモデルというわけではない。AIC評価で、日降水量の場合は $K=4$ が、時間降水量の場合は $K=2$ が最適と出た[5]。図3はこの結果を示している。得られた近似式の妥当性が見えるよう10年間の移動平均による正規化降水量の変化も示している。両降水量に共通して言えることは、1990年頃から増加傾向にあり、およそ25年で1割程度の増加ペースになっている。

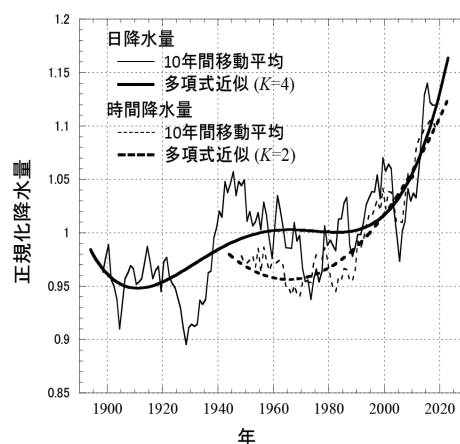


図3 多項式近似で見る日降水量と時間降水量の年間最大値正規化量の長期間変化特性（多項式近似の次数 K はAICの最良値を選択）

❖ 一回折れ線近似で見ると

多項式近似により、降雨強度の長期特性が1990年付近から増加傾向に変わることが見えたので、この特徴を顕在化させるために一回曲がりの折れ線グラフで近似してみよう。図4はこの結果である。同図には、図3で示した多項式近似も細線で示している。同図より、日降水量では1990年付近から、時間降水量では1980年代後半頃からの傾向変化が顕著にとらえられている。AICの評価では、日降水量に対しては多項式近似の方が、時間降水量に対しては折れ線近似の方が良い値を示している。日降水量に対しては、期間が130年であり、一回曲がりの折れ線近似では十分でないということのようである。図3、図4のいずれにしても、1980年代後半から、雨の降り方が強雨になる方向（＝25年で1割程度のペースでの増加）に変わり始めたということが明らかになったのである。

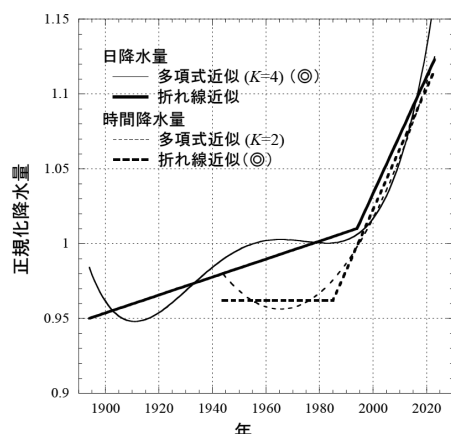
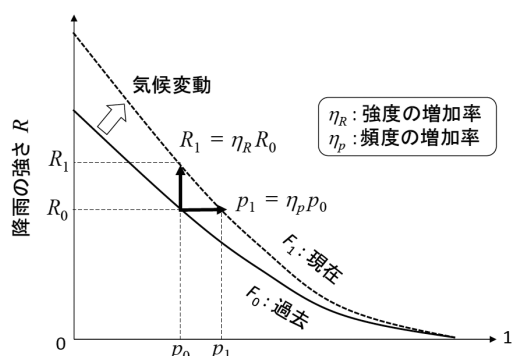


図4 折れ線近似で見る日降水量と時間降水量の年間最大値正規化量の長期間変化特性 (◎：多項式近似と折れ線近似のAIC評価で優れている方)

強い雨の降り方に対する二つの見方

前講では、日本の降雨について、強雨の発生頻度は有意に増加しているという気象庁レポート [1] を紹介した。これに対して、本講では、日および時間降水量の年間最大値の増加傾向を示した。「近年、雨の降り方が変わってきた」ということについては同じであるが、気象庁解析では「強い雨の降る回数が増えた (= よく降るようになった)」、本講解析では「雨の強さが増した (= 激しくなった)」の違いである。

図5に示す時間降雨量 R の累積確率分布で見てみよう。同図で、カーブ F_0 は気候変動前 (過去) の累積分布、 F_1 は気候変動後 (現在) の累積分布を表す模式図である。気候変動によって累積分布 F_0 が F_1 に変わったとすると、特定の時間率 p_0 で見れば、降雨強度 R_0 が R_1 に、強度 R_0 で見れば、時間率 p_0 が p_1 に変わったことになる。前後の比 $\eta_R = R_1/R_0$ は強さの増加率を、 $\eta_p = p_1/p_0$ は発生頻度の増加率を表し、前



降雨の強さが縦軸の値以上になる確率 p (対数目盛)

図5 気候変動前後の降雨強度の累積確率分布 (強度の増加率 η_R と頻度の増加率 η_p の関係を示す模式図)

者は筆者らが、後者は気象庁レポートが言う増加率である。二つの確率分布 F_0 と F_1 が得られれば、 η_R と η_p の関係が定められる。詳細は省くが、強雨地域に位置する九州地区での1980年を中心とする10年間と2017年を中心とする10年間での比較を行うと、 $R=50\text{mm}$ 付近において、 $\eta_R=1.1$ 、 $\eta_p=1.5$ となり、両結果の整合性が確かめられている [5]。これらのことより、強雨に着目する雨の強さは、1980年代後半頃から、25年に1割程度の増加傾向に変わっている、と結論できる。

データ解析によって言えることはここまで。この増加ペースが今後も続くのか、そうでないのかは、筆者には何も言えない。降雨に関する長期変動予想は、地球温暖化対策の結果にも深く関連してくるであろう。

まとめ

❖ここまででわかったこと (今回)

- ①日本全国各地の日降水量・時間降水量の年間最大値データを地点ごとの平均値で割って正規化した降水量回帰直線推定では、100年間で15%程度の増加傾向が認められ、その増加傾向は信頼区間推定においても有意である。
- ②さらに、多項式近似や折れ線近似で詳細変化を求めると、1980年代後半頃から増加傾向が顕著になり、強度の増加比率は、25年間で1割程度である。
- ③アメダスデータ解析に基づく気象庁報告書の強雨発生頻度増加率と本講で述べた強度増加率には整合性があり、近年の雨の降り方が変わってきたことは確かなものと言える。

❖さらに知りたいこと (次回以降)

- ④降雨強度の増加傾向は認められるが、年ごとのばらつきに比べればかなり小さいので、100年間全体を定常確率過程とみなし、100年に一回、1000年に一回の大雨を知ることができるだろうか
- ⑤気候変動は降雨減衰推定にどう現れるのだろうか

<参考文献>

- [1] 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
- [2] 唐沢好男、電波伝搬モデルの基礎: 確率分布と統計的推定、ネット公開私製本、http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/ronbun/TR-YK-078_Probability_Distributions.pdf
- [3] 気象庁、過去の気象データ検索、<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [4] 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>
- [5] 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>