

多変量極値解析を用いた気候変動下における河川流量の不確実性評価

中央大学大学院 学生会員 ○鈴木 真菜 中央大学大学院 学生会員 政本 未織
中央大学 正会員 小山 直紀 中央大学研究開発機構 フェロー会員 山田 正

1. はじめに

近年、計画規模を超える降雨による甚大な洪水被害が立て続けに発生しており、さらに、将来の洪水リスクが顕著になることが予想されている。洪水リスクを把握する上で、いくつかの極値水文学の同時生起頻度を推定することは極めて重要である。極値の同時生起頻度を推定するための方法として、多変量極値解析がある。しかし、計画水文学には極値資料不足による不確実性、降雨の不確実性、そして降雨の不確実性によってもたらされる降雨量・流量には不確実性が内包されることがあり、このような不確実性は、信頼区間という形で定量化することができる。清水・山田¹⁾は森口²⁾が提案した確率限界法検定に基づく信頼区間を導入した新たな水文頻度解析手法を構築した。これにより従来手法では想定外とみなされる水文現象を正当な確率年で評価を可能とした。また、治水計画の基本となる流量である基本高水流量は、計画降雨量を入力とした流出解析により求めることができる。しかし、総降雨量だけでなく降雨の時空間分布も流量に大きく影響するため、洪水リスクを把握する上において、降雨量の不確実性だけでなく流量の不確実性について考慮する必要がある。このことから本研究では、清水・山田らの手法を二変量に拡張することより、極値水文学の不確実性を考慮した洪水リスク手法を構築するとともに、大量アンサンブル気候データベース（以下 d4PDF）を用いることで、現在気候および将来気候下における洪水リスク評価を行うことを目的とする。

2. 確率限界法検定に基づく信頼区間の二変量極値解析への導入

(1) 二変量極値分布の概要

二変量極値分布とは、極値変数 X および極値変数 Y の各極値変数が従う確率分布を周辺分布として扱い、それらの極値の同時確率を用いることで、極値の同時生起率を推定する。ここで、形状母数 $\xi \neq 0$ の場合の生起率を GEV-Type、形状母数 $\xi = 0$ の場合の生起率を Gumbel-Type と表記する。本研究では Gumbel-Type を用いた。

極値変数 X の生起率は式(1)、極値変数 Y の生起率は式(2)により表すことができる³⁾。極値分布は生起率を用いて表すことができ、極値変数 X と極値変数 Y の同時生起率 $\lambda_{XY}(x,y)$ の関数形を式(3)に示す。

$$\lambda_X(x) = \begin{cases} \left[1 + \xi_X \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right) \right]^{-1/\xi_X} & (\xi_X \neq 0) \\ \exp \left[-\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right] & (\xi_X = 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_Y(y) = \begin{cases} \left[1 + \xi_Y \left(\frac{y - \mu_Y}{\sigma_Y} \right) \right]^{-1/\xi_Y} & (\xi_Y \neq 0) \\ \exp \left[-\frac{y - \mu_Y}{\sigma_Y} \right] & (\xi_Y = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_{XY}(x, y) = \left\{ \lambda_X(x)^{1/\alpha_{dep}} + \lambda_Y(y)^{1/\alpha_{dep}} \right\}^{\alpha_{dep}} \quad (3)$$

ここに、 α_{dep} は依存性のパラメータである ($0 \leq \alpha_{dep} \leq 1$)。二変量極値分布の累積分布関数 $F_{XY}(x,y)$ は式(4)により表される。

$$F_{XY}(x, y) = \exp[-\lambda_{XY}(x, y)] \quad (4)$$

(2) 確率限界法検定に基づく二変量極値分布の信頼区間の構成手法

確率限界法検定の検定手法及び特徴を以下に示す。確率限界法検定では仮定した確率分布から求めた確率表現関数の両側に確率限界線を作成し、両線により定まる値の範囲を外れる値が新たに得られた際、有意な差があると判定する。ここで、確率表現関数とは累積分布関数の逆関数であると定義されている²⁾。また、確率限界法検定は仮定した確率分布の裾部に対して極めて大きな検定力をもつため、極値の予測を精度良く行うことができる。本研究では確率限界法検定に基づく信頼区間を二変量極値解析に導入し、確率限界法検定に基づく信頼区間の構成手法については清水・山田らの論文¹⁾を参照にされたい。

キーワード 確率限界法, 二変量極値解析, 不確実性, d4PDF

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 河川・水文研究室 TEL 03-3817-1621

3. 対象流域及び計算手法

(1) 対象流域と対象データ

本研究では、利根川の治水計画の基準点となる八斗島地点上流域（流域面積5114km²）を対象とした。現在気候下における洪水リスク評価をおこなうにあたって使用した雨量データは利根川上流域における1969年～2019年（合計51年間分）の年最大流域平均3日雨量の観測値である。また、将来気候下において使用したデータはd4PDF将来実験内の4℃上昇実験データである。4℃上昇実験は60年×90アンサンブルメンバー（6SST×15摂動）の合計5400年のデータを提供している。本研究では、4℃上昇実験データのメンバ内において流域平均3日間雨量300mmを超過する割合が大きい上位3メンバ（180年分）のデータを用いた。

(2) 降雨流出計算及び河道計算

降雨流出計算には、吉見・山田⁴⁾によって提案された、斜面内多層流れを考慮した降雨流出モデルを用いた。河道部は連続式と運動方程式からなる一次元不定流計算を行った。また、対象流域の既存ダムにおける影響も考慮した。

4. 結果・考察

(1) 現在気候下における洪水リスク評価

図-1は現在気候下における確率年200年で同時に生起する年最大流域平均3日間雨量と年最大洪水ピーク流量の計算値およびその95%信頼区間を示す。この図から実線及び破線の内側に存在する●印は確率年200年の洪水と評価できる。

(2) 将来気候下における洪水リスク評価

d4PDF 4℃上昇実験データを用いて、将来の降雨特性およびピーク流量の変化による将来気候下での洪水リスク評価を行った。図-2に現在および将来気候下における確率年200年で同時に生起する年最大流域平均3日間雨量と年最大洪水ピーク流量の計算値およびその95%信頼区間を示す。将来気候下において、計画流量を超過する洪水が発生するリスクを把握できた。また、現在気候下では範囲外とされていた水色部分が将来気候下において範囲内に入っていることから、将来気候下における短時間豪雨による洪水リスクも把握することができた。また、同総雨量であっても将来気候下では現在気候と比べて95%信頼区間の幅が広い。この一因は将来気候下ではより多くの降雨の時空間分布を持つためではないかと考えられる。

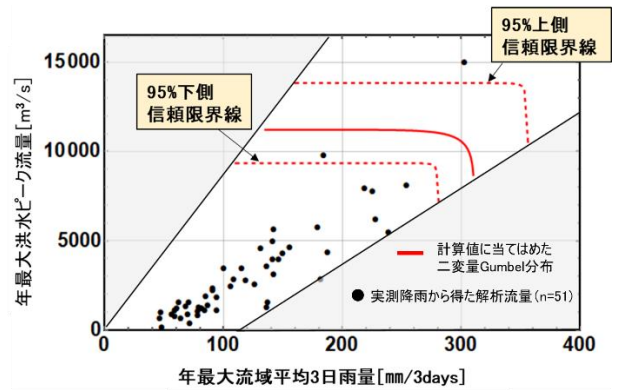


図-1 確率年200年で同時に生起する年最大流域平均3日間雨量と年最大洪水ピーク流量の計算値およびその95%信頼区間

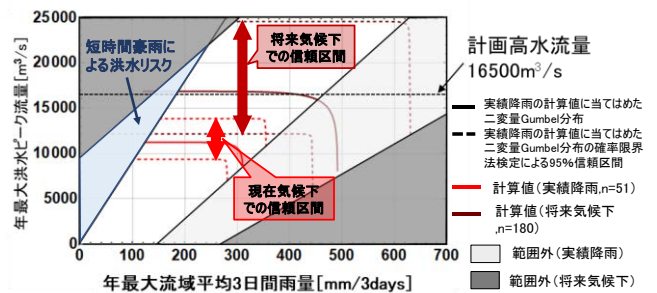


図-2 現在および将来気候下における確率年200年で同時に生起する年最大流域平均3日間雨量と年最大洪水ピーク流量の計算値およびその95%信頼区間

5. まとめ

本研究では確率限界法検定の理論を用いて二変量極値分布の信頼区間を構成する手法を示し、当該信頼区間を導入した二変量極値解析手法を提示した。

- (1) 確率限界法検定の理論により、二変量極値分布の信頼区間を構成できることを示した。
- (2) 現在および将来気候下における洪水リスク評価を行い、将来気候下において計画高水流量を超過する洪水が発生するリスクを把握できた。

参考文献

- 1) 清水啓太, 山田朋人, 山田正: 確率限界法検定に基づく確率分布モデルの信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法, 土木学会論文集 B1(水文学) Vol.74, No.4, I_331-I_336, 2018.
- 2) 森口繁一: 確率表現関数, 東京大学出版, 1995.
- 3) 北野利一, 山地秀幸, 川崎将生: 2変量 GP 分布による降水量の同時生起頻度の推定法-数学的なアイデアと現実データの接続, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_319-I_324, 2018.
- 4) 吉見和紘, 山田正: 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用, 水工学論文集第58巻, pp.367-372, 2014.