河川技術論文集，第24巻, 2018年6月

年間上位r個を対象にした極値解析による超過確率1,000年規模で設定される想定最大規模降雨の妥当性

VALIDATION OF THE PRECIPITATION OF THE PROBABILITY OF EXCEEDANCE OF RETURN PERIOD 1,000 YEARS BY USING THE r LARGEST ORDER STATISTIC MODEL

田中耕司[1]・北野利一[2]・吉田達也[3]・前田茂穂[3]
Kohji TANAKA, Tsoshikazu KITANO, Tatsuya YOSHIDA and Shigeho MAEDA

[1]正会員　博(工)　大阪工業大学工学部都市デザイン学科特任教授(〒535-0002 大阪市旭区大宮5丁目16-1)
[2]正会員　博(工)　名古屋工業大学大学院工学研究科教授（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）
[3]正会員　国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所(〒646-0004 和歌山県田辺市下万呂985-6)

Flood prone area of the Kumano river in the Shingu river system had been made under 937mm/24hr estimated as the probability of exceedance of return period 1,000 years. The precipitation of approximately 2 times was observed in September, 2011 by typhoon 12, and the rainfall without the experience was set so far in this basin. We suggested technique to evaluate the possibility to make occurrence of the precipitation of the probability of exceedance of return period 1,000 years such from a probabilistic point of view. This estimation method was confirmed the validation of the application for the generalized extreme value distribution with sample of the annual r largest order. The prediction distribution and confidence interval for the maximum values of 50 years return period was estimated by the extreme value using an extreme value statistical analysis. It was shown in this paper that the precipitation of the probability of exceedance of return period 1,000 years is included in the confidence interval. We report that the maximum precipitation estimated as the probability of exceedance of return period 1,000 years make possibility to happen practically.

Key Words : *Retuen Periods, The r largest order statistic model, Extreme value, GEV*

1．はじめに

近年，台風性や前線性による極端な豪雨が発生し，河川の氾濫による水害，深層崩壊，土石流などの土砂災害が多く発生している．これらの降雨は，今まで我々が設定した河川計画の設計値を超過している場合が多い．一般に，我々が河川計画を立案する際に目安とする河川の整備水準は，流域規模，堤内地の集積資産から設定される[1)]．具体的には，国管理の大河川で超過確率100年～200年の降雨規模を想定した降雨を対象にしている．一方で，県管理は，超過確率10～100年と流域の規模によって設計値（外力）が設定されている．

現在の設計値である整備水準は，当該流域内で起きた降雨データ群から年最大値を標本として確率処理し，計画降雨量として設定されるものである．しかし，類い希な台風や，前線性の豪雨など，想像も付かない降雨が発生することがある．その場合，確率紙上で外れ値として扱われるばかりでなく，その扱いの方法すらまだ十分な議論がなされていない．

一方で，度重なる洪水により，毎年のように河川氾濫による甚大な被害が発生していることを受け，国土交通省は，水防災意識社会の再構築[2)]の施策を打ち出した．その中で，従来河川管理者が公表してきた浸水想定区域図の対象降雨規模である治水計画の対象規模に加えて，想定最大外力を対象に新たな洪水浸水想定区域図[3)]を作

表-1　水文統計ユーティリティ[4]で対象とする確率分布

	確率分布モデル	図中表記
1	指数分布	Exp
2	ガンベル分布	Gumbel
3	平方根指数型最大値分布	SqrtEt
4	一般化極値分布	Gev
5	対数ピアソンIII 型分布(実数空間法)	LP3Rs
6	対数ピアソンIII 型分布(対数空間法)	LogP3
7	岩井法	Iwai
8	石原・高瀬法	IshiTaka
9	対数正規分布3 母数クォンタイル法	LN3Q
10	対数正規分布3 母数(Slade II)	LN3PM
11	対数正規分布2 母数(Slade I, L 積率法)	LN2LM
12	対数正規分布2 母数(Slade I, 積率法)	LN2PM
13	対数正規分布4 母数(Slade IV,積率法)	LN4PM

成し，公表に至っている．洪水浸水想定区域図における降雨量は，当該流域を含む地域区分内に発生した最大級豪雨と，超過確率1,000年規模相当の降雨のいずれか大きい方で設定されることとなっている．当然のことながら，経験値である最大級豪雨が発生した流域は，それを含めた確率処理を行っているため，必然的に超過確率1,000年値が，その経験値よりも大きく評価される．一方で，極端な豪雨を経験していない流域では，他流域で発生した最大級豪雨を設定することとなっており，超過確率1,000年規模よりも大きくなり，設定した降雨が過去のデータから数千年，数万年オーダーの再現期間として評価される場合も考えられる．

本研究は，極端な豪雨を経験した新宮川水系熊野川流域を対象に，超過確率1,000年規模の降雨の妥当性を見いだす方法を検討した．当該流域においては，50年間の観測雨量データが存在し，年最大値から評価された24時間雨量の超過確率1,000年規模が今後考え得るものであるのかを，確率的な観点から検証することを目的に実施されたものである．具体的には，1年間に発生した上位5個を抽出し，極値分布の適用性[5]を確認した後に，疑似乱数によって母数を生成させ，50年最大値の標本分布から予測分布ならびに信頼区間を求めた．これにより，現実に起きた降雨量から予測された50年最大値の予測分布から信頼区間に対して，超過確率1,000年規模相当の雨量の位置づけを考察し，現実に起きる可能性のある降雨量であることを示した結果を報告する．

2．超過確率1000年規模の雨量の設定上の課題

超過確率1,000年規模の雨量を設定する際には，汎用的に水文統計ユーティリティ[6]が使用されている．この

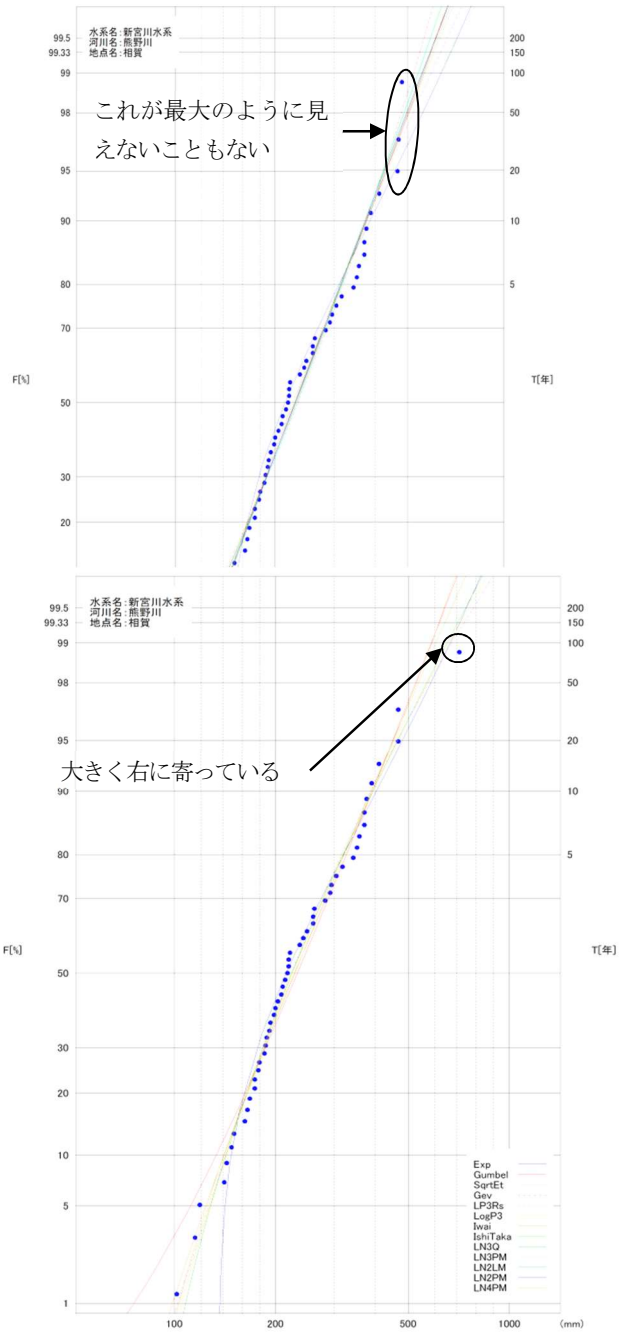

図-1 24時間継続雨量の確率評価
上段：平成23年9月台風12号を除外，下段：台風12号を考慮

表-2　各確率分布モデルの超過確率1,000年の評価値

確率手法		平成23年9月台風12号考慮			平成23年9月台風12号考慮せず		
		年超過確率1000年降雨量（mm／24hr）	SLSC	Jacknife推定誤差	年超過確率1000年降雨量（mm／24hr）	SLSC	Jacknife推定誤差
指数分布	Exp	933.8	0.034	117.6	875.0	0.049	78.1
グンベル分布	Gumbel	778.8	0.046	93.9	732.3	0.033	62.7
平方根指数分布	SqrtEt	941.7	0.027	116	916.6	0.035	104.6
一般化極値分布	Gev	1082.8	0.023	352.3	831.5	0.033	138.6
対数ピアソンIII型分布（実数）	LP3Rs	—	—	—	643.5	0.034	56.8
対数ピアソンIII型分布（対数）	LogP3	1023.9	0.022	305.8	—	—	—
対数正規分布（岩井法）	Iwai	844.7	0.025	172.2	766.4	0.026	103.1
対数正規分布（石原・高瀬法）	IshiTaka	—	—	—	699.1	0.031	60.7
3母数対数正規分布（クオンタイル法）	LN3Q	970.3	0.025	304.4	736.4	0.027	92.9
3母数対数正規分布（積率法）	LN3PM	—	—	—	693.8	0.031	59.3
2母数対数正規分布（L積率法）	LN2LM	—	—	—	749.9	0.027	95.1
2母数対数正規分布（積率法）	LN2PM	—	—	—	736.4	0.027	86.4
4母数対数正規分布(Slade IV,積率法)	LN4PM	757.8	0.029	90.6	715.8	0.026	68.1
条件【SLSC<0.04】の平均値		936.4			747.4		
条件【SLSC<0.04 & Jacfnife推定誤差最小値】の降雨量		757.8			643.5		

ツールでは，**表-1**に示す確率分布モデル[4]が使われ，超過確率1,000年規模の降雨を推定している．

1.に指摘した極端な豪雨を経験していない流域に用いれば，過去の実績雨量から推定されて，一見何ら問題がないように見え，超過確率1,000年規模の外挿処理で設定される．一方で，平成23年9月台風12号で観測された流域平均雨量によりその推定値は，どの処理方法を使えばよいのかがよくわからず，ツールに備えられている分布型のSLSCが0.04未満の適合度の高い複数の確率分布モデルによる確率雨量を平均する方法や，SLSCが最小かつJacknife推定誤差が最小の確率分布モデルを選定し，確率誤差を設定する方法がとられている．

本研究で対象にしている一級河川新宮川水系(流域面積2,251km^2(治水基準地点上流域))は，和歌山県，奈良県，三重県を流れ，従来から台風性豪雨による幾たびも浸水被害や土砂災害を経験している．特に，本論文の注目している紀伊半島大水害を引き起こした平成23年9月台風12号がもたらした豪雨は，それまでの既往最大雨量をはるかに超えるものであった．ここでは，熊野川における既往出水の洪水到達時間相当の24時間継続雨量の標本を用いて，確率評価した結果を**表-2**に示す．熊野川における平成23年台風12号を標本に入れない場合と入れた場合を比較したものである．この結果から推定される結果は，当然のことながら，乖離がある．前者は，760mm～940mm，後者は650mm～750mmの範囲に超過確率1,000年規模の雨量が設定されることになる．ちなみに，平成23年9月台風12号が熊野川流域にもたらした雨量は24時間継続最大雨量が714mm，2日雨量が1220mmである．これらの評価から実績値の確率規模を推定すると，平成23年9月台風12号を含めた雨量確率の 再現期間は， 約200～300年となる．一方で，この台風の降雨を除外した場合，24時間雨量での再現期間は約700年であり，2日雨量では約50,000年となる．このような結果は，果たして超過確率1,000年とは，除外した標本で議論すべきか，考慮した標本で議論すべきか，技術者を惑わすこともつながる．

さらに，**図-1**に示す各確率分布モデルの結果を**表-2**に示す．これによれば，平成23年9月台風12号を考慮し場合，13手法の内8手法のみ計算可能となった．また，Jacknaifeの推定誤差も100mm以上となっており，必ずしも推定値に対して安定した結果をもたらしていると言い難い結果を示すものである．

このような結果から，実際に想定最大規模降雨の浸水想定区域図を作成するに当たっては，評価値の最大値を採用することとなっているため，実務上は937mmと設定し氾濫解析によって平成29年3月に公表されている．

しかしながら，あたかも実績が超過確率1,000年の前後を右往左往している結果をみれば，実務上937mmが起こりうる雨量なのか，どうかを検証するすべがない．といいうのも，このような豪雨は著者知る限り大規模流域規模での観測事例がないため，実績からの検証は断念せざる得ない．

そこで，このような一つだけ2位以下とは明らかに傾向の異なる降雨量の扱いは，既に北野らが東海豪雨[7]や平成23年台風12号のデータから解析を行っている事例[8]がある．ここでは，熊野川流域の51年間の標本から51この最大値を用いるだけはなく，上位5位までのデータを対象に51年最大値分布の幅，すなわち51年のデータから起こりうる範囲の雨量を予測し，超過確率1,000年規模の降雨の妥当性について検証することを試みた．

3．上位r個を用いた極値統計[9]

水文学における極値統計学の目的は，時間や空間が限定された観測データから，本検討で対象にしているような51年の観測値に対して，1000年間に大きなデータが観測されるか(出現するか)を予測することである．観測データ全てではなく，大きな値を取るデータのみに分布をあてはめることを考えることとする．これにより大きなデータの適合を良くし，推測の精度を上げることを試みる．

なお，以下詳細な(r)GEVやGumbel等の基礎的な解説，さらに解析手順については，文献9)に詳しいため，ここでは割愛する．

(1) GEVのあてはめの診断

標本から年最大値(1位)を使って，GEVとGumbelを当てはめ，GumbelではなくGEVを積極的に適用できるかを検討した．すなわち，極値統計量の分布がGEV(μ,σ,ξ)に近似できるかどうかを検証する．

検証方法は，推定分布関数と経験分布関数に基づく確率プロット，確率点プロットそして再現レベルプロット，推定密度関数とヒストグラムから検証を行った．パラメータ(μ,σ,ξ)の最尤推定値$(\hat{\mu},\hat{\sigma},\hat{\xi})$とデータの大きさを順に並べた$z_1 \le z_2 \le \cdots \le z_n$を用いた．

確率プロット，確率点プロットは，式(1)と式(2)で表される点を図示したものである．

$$\left\{\left(\hat{G}(z_i),\frac{i}{n+1}\right): i=1,\ldots,n\right\} \tag{1}$$

$$\hat{G}(z_i)=\exp\left\{-\left[1+\hat{\xi}\left(\frac{z_i-\hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)\right]^{-1/\hat{\xi}}\right\} \tag{2}$$

ここで，Gに関して式(3)および式(4)のようになる．

$$\left\{\left(\hat{G}\left(\frac{i}{n+1}\right),z_i\right): i=1,\ldots,n\right\} \tag{3}$$

$$\hat{G}\left(\frac{i}{n+1}\right)=\hat{\mu}+\hat{\sigma}\left\{\left\{-\log\left(\frac{i}{n+1}\right)\right\}^{-\hat{\xi}}-1\right\}\Big/\hat{\xi} \tag{4}$$

また，再現レベルプロットは，再現期間Rに対して，

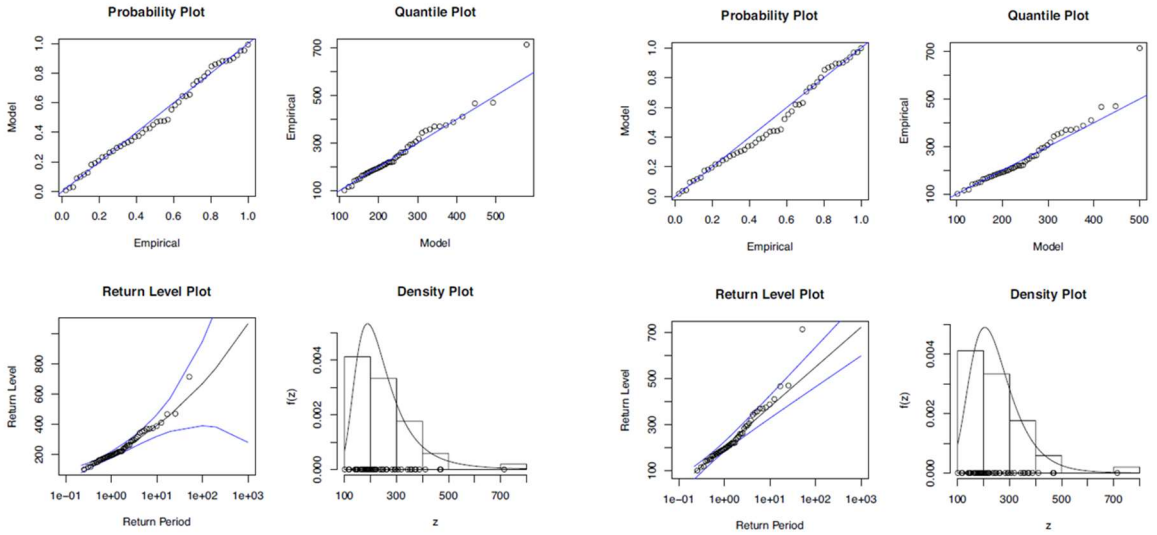

図-2　第1位の標本に対するGEV（左）とGumbel（右）モデルの適合性の比較

p=1/R(0<p<1)にとり，再現レベル $\hat{z}_p$ の最尤推定値を $(\hat{\mu},\hat{\sigma},\hat{\xi})$ から算定した．

$$\hat{z}_p = \begin{cases} \hat{\mu} + \hat{\sigma}\left(r_p^{\hat{\xi}} - 1\right)\Big/\hat{\xi}, & \hat{\xi} \neq 0 \\ \hat{\mu} + \hat{\sigma}\log r_p, & \xi = 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$r_p = -1\Big/\log(1-p) \tag{6}$$

さらに，式(7)により，経験分布関数で確率を割り付けて，再現レベルz_iをプロットした．

$$\left(-1\Big/\log\left(\frac{i}{n+1}\right), z_i\right) : i = 1,2,\ldots,n \tag{7}$$

また，Gumbelとの比較を行うため，パラメータ $(\mu, \sigma, 0)$ として同様の計算を行った．

その結果を**図-2**に示す．これによれば，プロットが単位対角線にから大きく外れている様子はない．また，系統的に外れているものもない．推定密度関数とヒストグラムも大きく外れていることは確認できない．一方で，再現レベルについては，GEVが平成23年9月台風12号の第1位に引っ張られている分布を描いており，信頼区間にも第1位を包括している．Gumbelは，第2位以下のデータが支配的であり，第1位は信頼区間の外に存在している．これらの結果から，第1位のデータだけでは，GEVを積極的に使うことはいいづらい．

そこで，年間1位から5位までのデータを使うことにしてrGEVの適用性について検討した．ここで年間1位～5位までの分布を年毎に見ていくことにする．**図-3**は，51年間の第1位から第5位の時系列的な分布を示したものである．これによれば，第2位以降のデータが他の年の第1位に匹敵あるいは超えるデータが存在していることが確認され，平成23年などの第2位，第3位といった雨量は，51年間の上位になることがわかる．

このようなデータに対して，年間1位から5位のデータをそれぞれGEVで評価した推定分布関数と経験分布関数

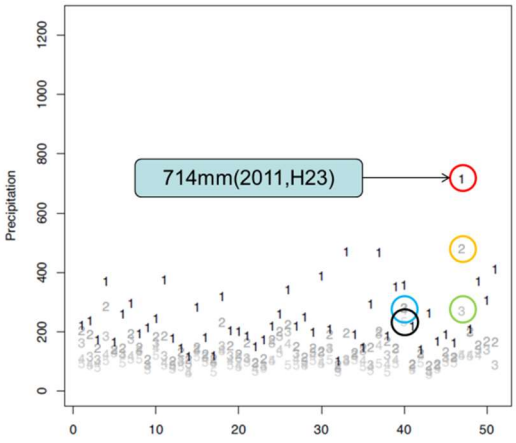

図-3　51年間の各年の上位1位から5位までの時系列変化

に基づく確率点プロットの結果を**図-4**に示す．これによれば，各順位の形状母数□は，ゼロよりも大きくなり，熊野川流域の経験的な降雨資料は，GEVで評価することが妥当であることが判断した．

(2) 50年最大値の予測分布

GEVで評価できても，観測データに基づく流域平均雨量がたかだか50個程度でGEVの適合が確認できて，超過確率1,000年に対応した雨量を求めるには，外挿する方法しかない．本研究では，上位5位程度までの255個雨量データを使って，50年最大値分布を求めることとする．具体的には，擬似乱数によって母数を生成させ，推定される標本分布を用いて予測分布や信頼区間を求める．

上位5位までのデータを用いて，北野ら[10]が提案している経験度を評価した結果を**図-5**に示す．ここに，経験度は2以上がよいとされている．**図-5**によれば，再現期間50年で概ね2となっており，100年の観測で得られる確信の度合いと等しい（期間50×2年に平均的に2回観測する）．すなわち，外挿しないのであれば，頻度の推定に

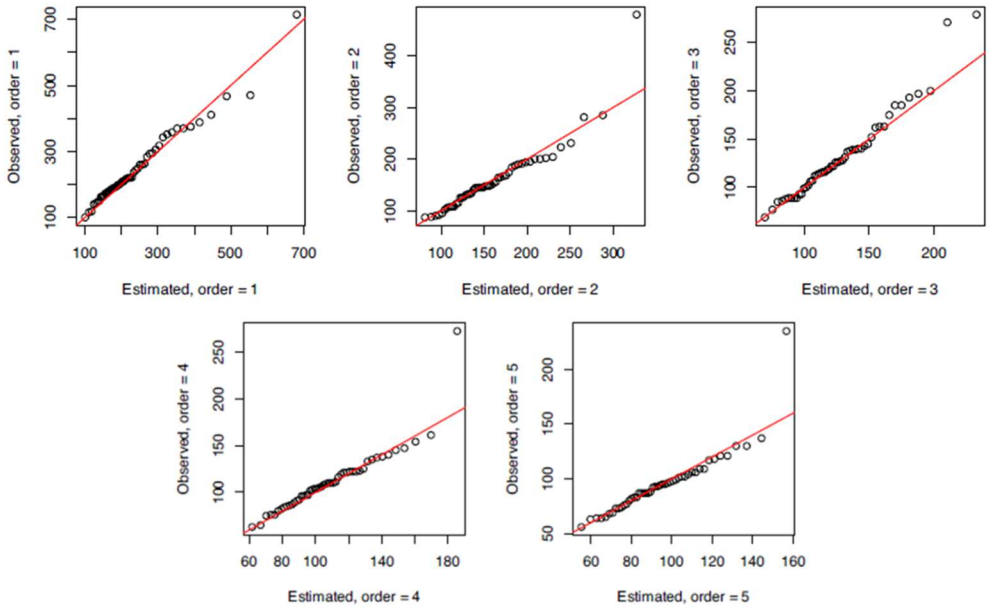

図-4　上位1～5位までのGEVでの評価

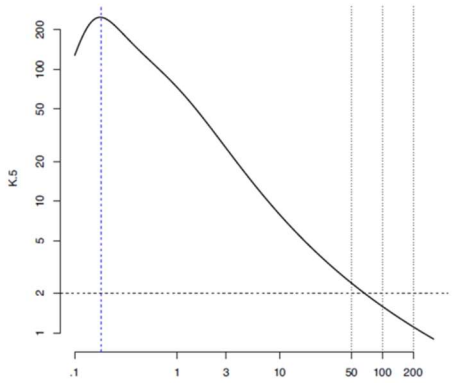

図-5　再現期間の経験度

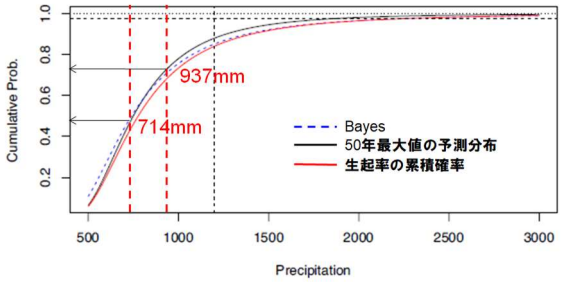

図-6　50年最大値の予測分布

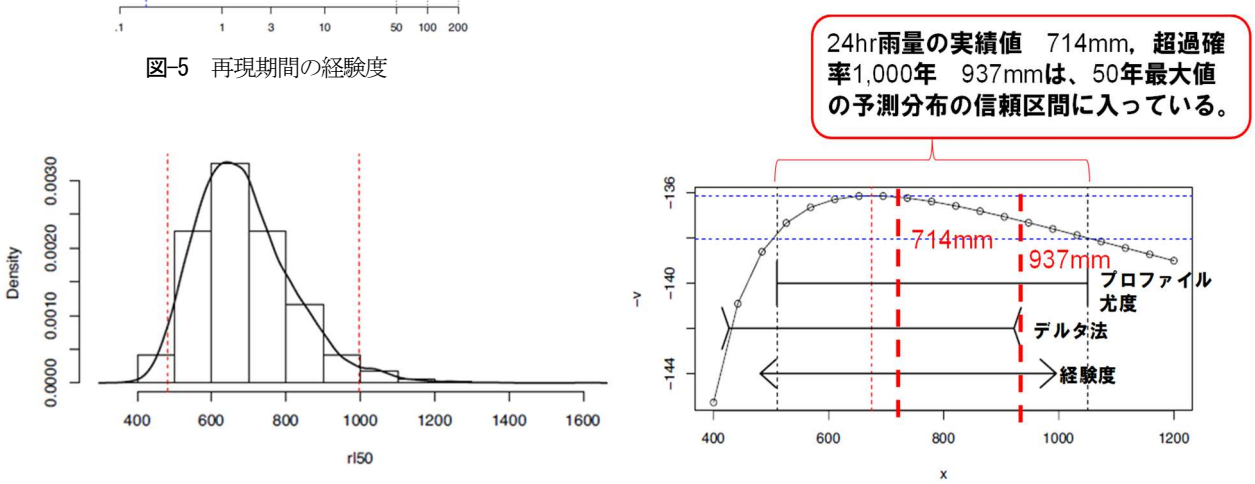

図-7　乱数生成による再現レベルのヒストグラム(左)と信頼区間(右)

用いるデータ数はそのものが経験度となる．逆にいえば，生起率関数を用いて，収集したデータ（内部の情報）を外挿したい範囲（外部の情報）に移転されることが極値解析の本質であり，その移転できる情報の量を表すことができるのが経験度である．

これにより，50年最大値を確率変数として取扱い，母数1/5.5 (50/255)として，1万個の標本を作成し，その最大値分布の確率を累積した結果を**図-6**に示す．また，累積確率を求める[11]にあたり，対数尤度による情報から生起率の累積確率，50年最大値分布，ならびにベイズ法による生起率を推定し累積確率を算出した3つの結果を比較している．これらの方法は文献11）に詳しく参考にしていただきたい．これらの結果から，実際に起きた平成23年9月台風12号の24時間雨量が714mmは概ね0.5の位置に

ばかりでなく，超過確率1,000年規模の雨量937mmが，0.7から0.8の範囲に位置することから，普通に起こりえる範囲に存在することを予測している．言い換えると，これから長期間観測すれば，この程度の雨量は十分に起こりえるものであることが推測できる．

さらに，対象にしている雨量データがGEV分布に適合していることから，形状母数のプロファイル尤度による95%信頼区間[9]を求めた．この結果を**図-7**に示す．参考までに，デルタ法および経験度を用いた対数尤度による信頼区間も示している．これによれば，24時間雨量の実績値714mmは当然のことながら最大値付近に位置しており，超過確率1,000年に相当する937mmもこの信頼区間に入ることから，累積確率と同様に，50年に1回以上起こりうる雨量の推定幅にあるということは，前述したように水文統計ユーティリティから算出された超過確率1,000年に相当する雨量は十分に起こりえる雨量であることを示唆するものと考えられる．なお，現時点では，この雨量の再現期間としては，長期間観測できたとして，その評価値がどの程度であるのは不明であり，言及しない．

4. おわりに

本検討では，平成29年3月に公表された一級河川新宮川水系の洪水浸水想定区域図の設定根拠の1つである超過確率1,000年規模相当の確率雨量の妥当性を見いだす一つの方法として，上位r個を標本とする極値統計解析による検証を実施した．その結果，以下のことがわかった．

- 対象とした熊野川においては，極値統計解析から24時間雨量714mmが妥当であることがわかった．
- 熊野川のような極端な多量の降雨量を確率評価する際に，50年確率降雨量を議論するだけでなく，50年最大値の分布を予測し，形状母数を確率変数としたサンプルを多数作成することで50年年最大値分布を予測することで，その予測幅に超過確率1,000年規模の降雨が入るかどうかを診断することが必要である．

熊野川のような事例は，極端な豪雨を経験し，これを含めた確率雨量の妥当性を確認することが可能である．しかし，極端な豪雨を経験していない河川流域では近隣で発生した実績最大雨量を採用することになる．今後経験していない河川流域や観測データが少ない中小河川流域に対して，今回のアプローチで設定した想定最大規模降雨量の妥当性について，確率的観点から検証することも必要と考えられる．

一方で，今回の検討では，確率雨量の妥当性のみに着目した検討を行った．しかしながら，これだけではまだ不十分な検討であることは言うまでもない．極端な豪雨の発生は物理現象であり，超過確率1,000年規模の雨量の妥当性は，今後起こりうる気象条件の下で気象モデルによるシミュレーション結果から最大級豪雨の結果を待つ必要がある．また，想定最大規模と設定された降雨量での洪水量を見積もるにあたり，どのような降雨波形を対象にして雨量を引き伸ばし，流出計算を実施するのかといった次のプロセスの課題もある．実務上，様々な課題があるなかで，今回試行的に極値統計解析を実施した結果から一つのチェック機能が期待されるところである．

参考文献

1) 国土交通省：河川砂防技術基準　計画編
2) 国土交通省：水防災意識社会再構築ビジョン，http://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/，(2018.4.1確認)
3) 国土交通省：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版），2015.
4) 国土交通省：浸水想定(洪水，内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法，2015.
5) Coles, S.G.:An introduction to statistical modeling of extreme alues, Springer-Verlag, 2001.
6) (財)国土技術研究センター：水文統計ユーティリティ Ver1.5, https://www.jice.or.jp/tech/software/rivers/hydrology/programdl，(2018.2.10確認)
7) 北野・高橋・田中：確率降雨量の統計解析におけるモデルの適合性の限界，土木学会論文集 B1(水工学)Vol.67, No.4, pp.I_277-I_282, 2011.
8) 北野・高橋・田中：確率統計解析による降水量の上限の推定可能性，土木学会論文集 B1(水工学)Vol.70, No.4, pp.I_451-I_456, 20141.
9) 高橋・志村：極値統計学，近代科学社，2016
10) 前出 7)
11) 北野・喜岡・熊谷：2 つの設計潮位レベルに対する統計的解釈-将来に生じうる最大値の予測と再現レベルの推定-，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol73, No.2, 2017

(2018.4.3受付)