

# 歴史データを含む琵琶湖の極値水文資料 に適合する洪水頻度モデルの検討

A STUDY ON FLOOD FREQUENCY MODELS OF EXTREME HYDROLOGIC  
DATA WITH HISTORICAL INFORMATION OF LAKE BIWA

吉田 尚<sup>1</sup>・庄 建治朗<sup>2</sup>・冨永 晃宏<sup>3</sup>  
Hisashi YOSHIDA, Kenjiro SHO and Akihiro TOMINAGA

<sup>1</sup>学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 名古屋工業大学助教 ながれ領域 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>3</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 ながれ領域 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

In this study, suitable distribution models of extreme hydrological data including historical information of Lake Biwa were investigated. Parameters of 11 candidate distributions fitted to the standardized annual maximum water level and the annual maximum rainfall totals for 30 days were estimated by the maximum likelihood method and goodness-of-fit tests were performed. Resampling tests based on the jackknife technique were also applied to evaluate the stability of quantile estimates for each distribution model fitted.

As results, 2-parameter models generally showed better performance in both of goodness-of-fit and stability tests for all cases, and introducing historical flood information improved the stability of quantile estimates.

**Key Words:** flood frequency analysis, Lake Biwa, historical flood information, maximum likelihood estimation, goodness-of-fit, jackknife, stability of quantile estimates.

## 1. はじめに

治水計画の企画立案の際には、まず対象とする洪水の規模を決める必要がある。その規模は、近代的な観測データが得られている期間よりも長い再現期間の水量となる場合も多く、標本数の不足による分布や母数の不確実性が問題となる。その解決策の一つとして、近代的な水文観測が始まる以前の歴史時代の水量を何らかの手法により復元し、これを観測データに追加して大標本を構成することがある。

歴史洪水や古洪水の情報を洪水頻度解析に用いる研究としては、以下のようなものがある。Hosking & Wallis<sup>1)</sup>, Stedinger & Cohn<sup>2)</sup>らは、歴史洪水の情報が今日得られるのは、洪水が記録や痕跡を残すに足るある一定の規模(観測閾値)に達した場合であり、記録が残らないのは洪水規模が閾値を下回ったためであるとして、こうした性質を持つデータを積率法や最尤法により観測データとともに極値確率分布モデルに導入する方法を定式化した。そして、最尤法は歴史資料の性質に合った柔軟なモデリ

ングが出来ることを示した。Hosking & Wallis<sup>3)</sup>は、数百～数千年といったある期間で最大であったことが確実なデータを1つ既存の観測データに加えた場合、特に観測データの資料期間が短い場合に大きい再現期間に対応する確率水量の推定精度が大幅に向上することを示した。

しかし、これまでの古水文学や歴史水文学の分野の海外の研究では、あらかじめ仮定した分布に対して、母数推定法や歴史時代のデータの扱い方を変えて検討を行うケースが多く、複数の分布に対して適合度を比較した研究はあまり見られない。我が国の治水計画では、複数の分布に対する適合度・安定性を検討してモデルを選択するのが標準となっている為、様々な分布に対する網羅的な研究が必要だと考えられる。多様な分布に対する適合度・安定性の評価に関しては、宝・高棹<sup>4)</sup>、田中・宝<sup>5)</sup>の研究が詳しく、適合度の評価指標としての標準最小二乗規準(SLSC)の有用性や、jackknife法による分布の安定性の評価およびモデルの選択方法を示している。

日本においては、琵琶湖流域は歴史時代の水文現象に関する情報が豊富であり、庄ら<sup>6)</sup>は歴史洪水資料の整備を進めてきた。本研究では、これまで整備してきた歴史

洪水資料を用いて洪水頻度分析を行い、様々な分布の適合度及び安定性を評価し、最適な分布モデルを検討する。

## 2. 琵琶湖の歴史洪水資料

本研究では、琵琶湖の年最大ピーク水位と、琵琶湖流域の流域平均年最大30日間降雨量という2つの極値水文資料に対して洪水頻度分析を行う。なお、本研究では対象とする江戸時代中期以降の水文現象の標本は、現在と同一の母集団に属するものと仮定し、データは定常性、独立性、均質性を前提に抽出されたものとする。

### (1) ピーク水位 (換算ピーク水位)

琵琶湖周辺では、昔から湖水位の上昇による浸水被害が頻発していたため、洪水時の水位に関する定量的な情報が古文書に多く残されている。また、膳所藩では定水杭を用いて毎月15日に定期水位観測を行っており、欠落はあるが享保6年(1721年)以降断続的に精度の高い水位記録が得られる。庄ら<sup>7,8)</sup>は、これらの記録を総合して、江戸時代中期以降の大規模洪水のピーク水位を推定した。

琵琶湖における近代的な水位観測は、1874年に始まるが、近代以降の河川改修等により琵琶湖の流出口(瀬田川)における疎通能力が大きく変動している。そこで、近年時代(毎年の水文量が観測データによって正確に得られる期間)については、均質な極値水文資料を得るため、実績水位・流出量データを用いて毎日の水位を明治時代(1870~1900年頃)の瀬田川疎通能力において実現したであろう値に変換し、それに基づき毎年の最大水位(換算ピーク水位)を求めた。

歴史時代のデータは最も古いもので1718年のものであり、近年データは1874~2007年である。近年データの最大値は1896年の3.72m、最小値は1994年の0.79mで、両者ともに異常値検定<sup>9)</sup>で棄却されなかった。また、平均、標準偏差、歪度はそれぞれ1.43m, 0.43m, 1.42である。

### (2) 流域平均年最大30日間降雨量

歴史時代における洪水期の降雨量については、洪水時のピーク水位、迎水位(洪水前の水位)、そして古日記天候記録を用いて推定したハイトグラフの概形を基に、琵琶湖流域の流出モデルを介して流域平均雨量を逆算するモデルが提案されている<sup>9,8)</sup>。本研究では、洪水期間に年最大降水量が生じたものと見做し、上記の手法により推定した流域平均雨量を洪水頻度分析のための極値水文量として用いる。本研究では、琵琶湖においては比較的長期の総降雨量が洪水防御計画において重要な水文量になること、また歴史時代における重要な水文資料である膳所藩による定水位観測が月一回であり、水位がピーク水位に達する30日程度前の迎水位のデータが比較的得やすいという事情を勘案し、30日間の流域平均総雨量を確率評価の対象とすることとした。

また、近年時代の流域平均雨量は、1896~2007年について気象庁および国土交通省(旧建設省)の日降水量資料を用い、Thiessen法で算出した。算出に用いた観測地点数は、1911年以前については10、1912年以降については、観測局の改廃等による変動があるが、15~20である。1896~1911年のデータが得られる10地点は平地に偏っているため、これらに基づく流域平均雨量は1912年以降の地点数で算出したものに比べ、系統的に小さい値となっている。そこで、両者の流域平均雨量を重複して算出できる1912~1940年について双方の値を比較し、1911年以前については単回帰による補正を施した値を用いた。

歴史時代の最も古いデータは1734年のものであり、近年データは1896~2007年である。また、近年時代の最大値は1896年の924.4mm、最小値は1939年の173.3mmで、両者ともに異常値検定<sup>9)</sup>で棄却されなかった。また、平均、標準偏差、歪度はそれぞれ397mm, 111mm, 1.04である。

こうして復元した換算ピーク水位及び年最大流域平均30日降雨量を図-1に示す。破線が歴史時代のデータで、実線が近年時代のデータである。

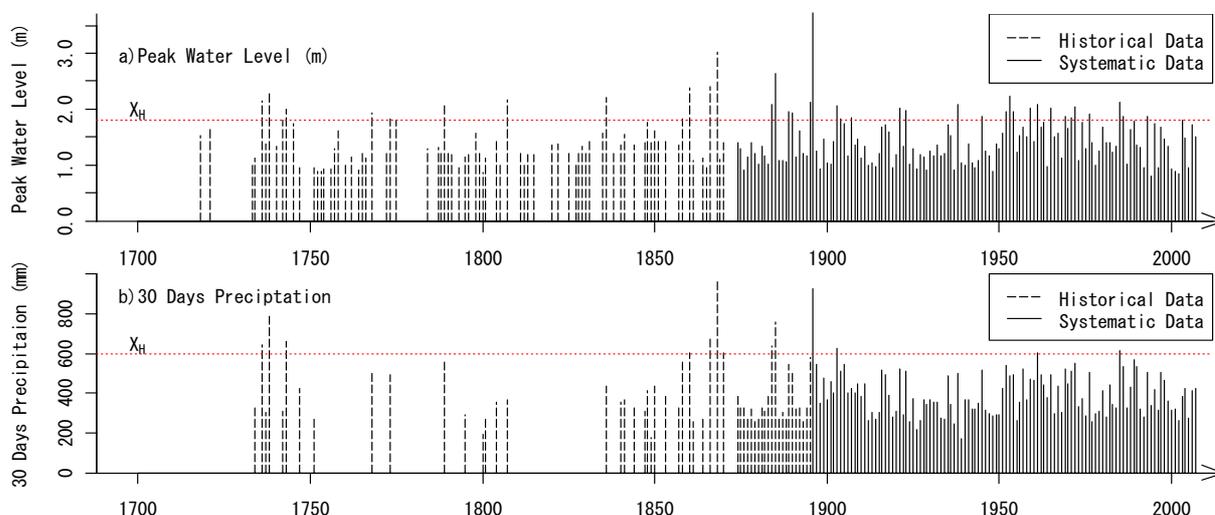


図-1 歴史洪水資料を含む琵琶湖の年最大値資料 a) 換算ピーク水位, b) 流域平均年最大30日間降雨量

### 3. 解析方法

#### (1) 歴史資料を用いる場合の確率分布の母数推定

歴史資料を用いる場合の母数推定方法としては、最尤法や積率法が検討されている<sup>1),2),3),10)</sup>が、本研究では歴史洪水データの性質に応じて柔軟に適用でき、様々な分布に対して用いることができる最尤法を用いる。最尤法は、 $n$  個の観測値  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  が得られたとき、次式で表される尤度関数

$$L_0(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n f_x(x_i; \boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

を最大化するように母数 $\boldsymbol{\theta}$ の推定を行う。ここに、 $f_x$ は確率密度関数である。

近年時代のデータは毎年得られる為、式(1)の尤度関数をそのまま用いることができるが、歴史時代においては多くの欠損値が存在する為、式(1)の尤度関数をそのまま用いることはできない。一般に、歴史時代の洪水資料は、大規模な現象ほど数多くの記録が残りデータの精度が高くなるが、中小規模の洪水は欠測となったり、記録が残る場合もデータの信頼性が低下するケースが多いという性質を持っている。そこで、歴史時代については、洪水規模がそれを上回った場合に必ず記録が残るという閾値  $X_H$  を定め、閾値以上のデータが得られない年については、洪水規模が閾値以下であったという情報のみを用い、以下に述べるように確率分布関数を用いて尤度関数を算定する<sup>2)</sup>。

ここで、近年時代と歴史時代を合わせた  $n$  年間に  $g$  年分のデータが得られ、 $k$  個が閾値以上であり、そのうちの  $h$  個が歴史時代に存在し、 $e$  個が近年時代  $s$  年間に属する（即ち、 $g = s + h, k = h + e$ ）とする。

#### a) 閾値以上の値が既知である場合

歴史時代に閾値以上であることが分かった  $h$  個の値  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_h)$  が既知であるとする場合、尤度関数は次式で表される。

$$L_1(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, X_H) = F_x(X_H; \boldsymbol{\theta})^{n-s} \prod_{j=1}^h f_x(y_j; \boldsymbol{\theta}) \prod_{i=1}^s f_x(x_i; \boldsymbol{\theta}) \quad (2)$$

ここに、 $F_x(x)$  は累積分布関数である。

#### b) 閾値以上であることだけが分かる場合

歴史時代に  $h$  個の値が閾値以上となったことのみが分かっている場合、尤度関数は次式で表される。

$$L_2(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{x}, X_H) = F(X_H; \boldsymbol{\theta})^{n-s} (1 - F(X_H; \boldsymbol{\theta}))^h \prod_{i=1}^s f_x(x_i; \boldsymbol{\theta}) \quad (3)$$

本研究で検討する確率分布は、宝・高棹<sup>4)</sup>の研究で検討した10分布に一般化極値分布を加えた計11分布、即ち Gumbel分布 (2母数)、対数Gumbel分布 (2母数[LG2]、3母数[LG3])、一般化極値分布 (3母数[GEV])、平方根指数最大値分布 (2母数[SQRT])、正規分布 (2母数)、対数正規分布 (2母数[LN2]、3母数[LN3])、Pearson III型分布 (2母数[P2]、3母数[P3])、対数

Pearson III型分布 (3母数[LP]) である。これらの分布に対し、尤度関数の対数をとった対数尤度の最大化を行う。

#### (2) 適合度と安定性の評価

##### a) 適合度の評価

適合度評価の指標としては、近年は標準最小二乗規準 (SLSC) を用いるのが主流となっている<sup>5)</sup>。しかし、本研究は欠損値や値の不確実な標本を含む歴史情報を用いるという特殊なケースであるため、SLSC以外にも最大対数尤度 (MLL)、赤池の情報量規準 (AIC) を用いる。SLSCは高棹<sup>11)</sup>が提案した適合度の評価規準で、関式推定法における当てはまりの良さを標準化したものであり、日本における水文統計の適合度評価の標準となっている。SLSCは標本となる水流量に依存せず値の大小によって絶対的な評価ができるのが特徴で、 $SLSC < 0.03$  で十分な適合度を示すとされており<sup>4)</sup>、 $SLSC \approx 0.04$  が適合度を認める判定基準とされている<sup>5)</sup>。

本研究では、SLSCの算定に必要な非超過確率  $q_i$  を与えるプロットング・ポジション公式を2つ考える。1つは、近年時代のデータのみを用いたCunanne公式であり、データを降順に並べた場合に第  $i$  番目のデータに対する超過確率の推定値  $\hat{p}_i$  を式(4)で与える。もう1つはHirsch & Stedinger<sup>12)</sup>、Hirsch<sup>13)</sup>が閾値以上の歴史資料にも適用可能なように拡張したExceedance-Cunanne (以下E-Cと略記) 公式で、閾値以上の歴史データと、近年データを合わせたものを降順に並べた場合に第  $i$  番目のデータの超過確率の推定値を式(5)で与える。また、Cunanne公式を用いて求めたSLSCをSLSC①とし、E-C公式を用いて求めたSLSCをSLSC②とする。

$$\hat{p}_i = \frac{i - 0.4}{s + 0.2} \quad (4)$$

$$\hat{p}_i = \begin{cases} \frac{i - 0.4}{k + 0.2} \cdot \frac{k}{n}, & i = 1, \dots, k \\ \frac{k}{n} + \frac{n - k}{n} \cdot \frac{i - k - 0.4}{s - e + 0.2}, & i = k + 1, \dots, g \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 $n, k, s, e, g$  は (1) 節で述べた定義と同じである。また、非超過確率  $q_i$  は  $1 - \hat{p}_i$  である。

##### b) 安定性の評価

長期的な計画を考えれば、新しい観測データの追加による分布の変動が小さい方が望ましい。宝・高棹<sup>4)</sup>は、jackknife法で標本の変動に対するモデルの安定性を評価できることを示している。jackknife法とは、得られた標本  $N$  個の中から、順番に  $i$  番目を抜いた  $N - 1$  個の標本に基づいて求めた統計量を用い、不偏推定値および推定誤差を調べる手法である。一般的なjackknife法は上述したような手法であるが、歴史時代については多くの欠落年があり、標本の性質が近年時代と大きく異なる為、本研究では近年データのみを順番に取り除いた  $s$  (近年時代の年数) 通りの部分標本に基づく不偏推定量及び推定誤差を求める。

#### 4. 解析結果及び考察

本章では、前章で示した尤度関数を最尤推定し、適合度の評価および安定性の評価を行った結果を考察する。近年データに対し、式(1)の尤度関数を最大化する場合をCase0とし、近年時代と歴史時代のデータに対して式(2)、(3)の尤度関数を最大化する場合をそれぞれCase1、Case2とする。ここで、閾値  $X_H$  の値は、庄・富永<sup>14)</sup>、Sho & Tominaga<sup>15)</sup>にしたがい、換算ピーク水位は1.8m、流域平均年最大30日雨量は600mmとした。

##### (1) 適合度

表-1は、各水文量に対して母数推定を行い、適合度を評価した結果、11分布中でいずれの規準においても適合度が高くないと判断した分布モデルを除く6つの分布についての各評価規準の値をまとめたものである。評価規準値の右側にあるのは、その評価規準の各Caseの11分布中における順位である。

換算ピーク水位に対して適合度が高いと判断された6分布は、平方根指数最大値分布を除き、全て3母数の分布となった。これは、1896年の大洪水のピーク水位が異常に大きいために、右裾が長い平方根指数最大値分布、分布形の変形が柔軟な3母数の分布が選ばれたといえる。

近年時代の標本のみに基づくCase0の場合、すべての評価規準で順位が良いものは3母数対数正規分布、対数PearsonIII型分布、平方根指数最大値分布であるといえる。MLLとAICによる評価においては3母数のPearsonIII型分布が1位となったが、SLSC①の値は0.04以上でありあまり良いとはいえない。しかし、1896年の値を除いて計算すると、3母数のPearsonIII型分布のSLSC①は表-1に示した6分布中で最も小さくなった。これは、PearsonIII型分布

が他の5分布と比較して右裾が短いため、極端に大きい1896年の値に対する当てはまりが悪くなったためと考えられる。Case1、Case2の場合もCase0と概ね同様のことが言える。

流域平均30日年最大降雨量については、すべてのCaseに共通して、表-1に抽出された6つの分布のMLLは、適合度に大きな違いは無いといえる。その為、モデルの簡潔さが考慮されるAICでは、母数が2つのGumbel分布、対数正規分布の順位が上がっている。よって、MLLとAICの規準からは、Gumbel分布および2母数の対数正規分布が良く適合したモデルであると判断できる。

SLSCについては、Case0では0.04以下を満足する分布は現れなかった。これは、図-2に示すように近年時代

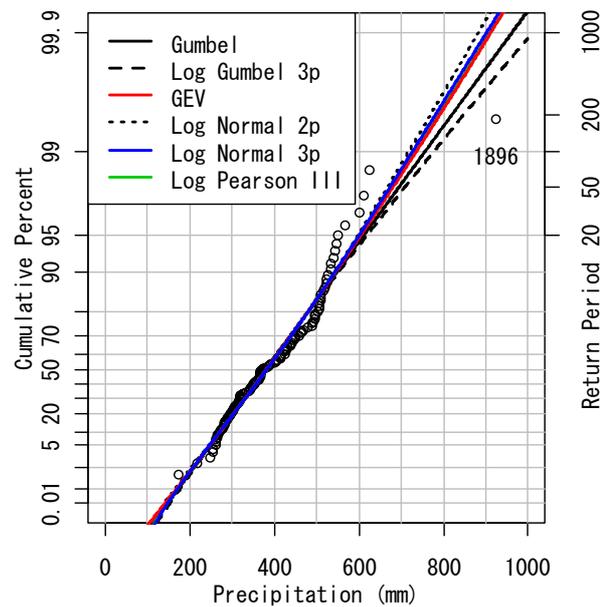


図-2 流域平均30日間降雨量のGumbel確率紙へのプロット (Cunnaneプロット 確率分布の母数はCase0)

表-1 適合度の評価基準の計算結果とその順位

a) 換算ピーク水位								b) 流域平均30日年最大降雨量										
Case	MLL	AIC	SLSC				Case	MLL	AIC	SLSC								
			①Cunanne	②E-C	①Cunanne	②E-C												
0	GEV	-59.2	5	124.3	6	0.0359	2	0.0447	2	Gumbel	-678.8	6	1361.7	2	0.0423	2	0.0393	2
	LG3	-59.2	6	124.3	7	0.0359	1	0.0447	3	GEV	-678.7	4	1363.5	6	0.0455	4	0.0486	5
	LN3	-57.8	2	121.6	2	0.0364	4	0.0478	6	LG3	-679.0	7	1364.1	8	0.0416	1	0.0361	1
	LP	-58.2	3	122.4	4	0.0364	5	0.0490	7	LN2	-678.6	3	1361.3	1	0.0482	7	0.0567	7
	P3	-56.3	1	118.6	1	0.0416	6	0.0478	5	LN3	-678.6	1	1363.2	3	0.0458	5	0.0505	6
	SQRT	-58.9	4	121.8	3	0.0363	3	0.0457	4	LP	-678.6	2	1363.2	4	0.0448	3	0.0483	4
	1	GEV	-106.2	5	218.4	6	0.0487	4	0.0266	1	Gumbel	-764.8	4	1533.7	1	0.0422	2	0.0390
LG3		-106.2	6	218.4	7	0.0487	5	0.0266	2	GEV	-764.8	3	1535.7	5	0.0423	3	0.0391	3
LN3		-105.1	2	216.2	3	0.0484	3	0.0273	4	LG3	-765.0	5	1535.9	6	0.0415	1	0.0364	1
LP		-105.5	3	216.9	4	0.0474	1	0.0267	3	LN2	-765.2	6	1534.3	2	0.0460	7	0.0485	7
P3		-104.0	1	213.9	1	0.0568	7	0.0366	6	LN3	-764.8	1	1535.6	3	0.0431	4	0.0414	4
SQRT		-106.1	4	216.2	2	0.0477	2	0.0278	5	LP	-764.8	2	1535.7	4	0.0435	5	0.0429	6
2		GEV	-106.4	5	218.8	6	0.0485	5	0.0266	1	Gumbel	-713.6	6	1431.2	2	0.0423	2	0.0395
	LG3	-106.4	6	218.8	7	0.0485	4	0.0266	2	GEV	-713.5	4	1433.0	5	0.0448	5	0.0464	5
	LN3	-105.3	2	216.6	3	0.0485	3	0.0273	4	LG3	-713.7	7	1433.4	8	0.0417	1	0.0374	1
	LP	-105.6	3	217.3	4	0.0472	1	0.0269	3	LN2	-713.4	3	1430.9	1	0.0471	7	0.0526	7
	P3	-104.2	1	214.4	1	0.0585	7	0.0376	6	LN3	-713.4	1	1432.7	3	0.0448	4	0.0471	6
	SQRT	-106.3	4	216.5	2	0.0476	2	0.0278	5	LP	-713.4	2	1432.7	4	0.0440	3	0.0453	4

の最大値である1896年の降水量が極端に大きい事と、500 mm前後の降水量のプロットが階段状になっている為、モデルとの乖離が大きいことによる。従って評価が難しいが、SLSCに関しては値の大きさを評価するのではなく、順位で比較することになると、この場合には3母数対数Gumbel分布やGumbel分布が選ばれることになる。以上から、全ての規準で順位が良く、適合度が良さそうな分布はGumbel分布に絞られる。

Case1, Case2の場合もCase0と同じ理由から、Gumbel分布が適合度の良さそうな分布と判断できる。

## 2) 安定度

再現期間 $T$ に対応する確率水文量 $X_T$ のjackknife推定値(不偏推定量)を $X_{Tj}$ , その標準偏差を $s_{Tj}$ とする。主要な河川での計画規模としてよく用いられる $T = 100$ , 200年の場合の確率水文量およびそのjackknife推定値を、表-1で抽出された6つの分布モデルについて計算したものを表-2に示す。

換算ピーク水位は、Case0では3母数の分布は $s_{Tj}$ が大きくなり、将来予測を行うには不適当であると考えられる。従って、2母数の平方根指数最大値分布が琵琶湖の換算ピーク水位を再現する最も適した分布であるといえる。

Case1, Case2においても同様な結果であるが、Case0とは異なる点が2つあり、それらについて考察する。1つは、Case0と比べて全体的に同じ再現期間に対する確率水文量が小さくなっており、危険側の値を与えていることである。歴史情報を用いた場合の計算結果は、閾値の大きさや歴史時代の長さによって多かれ少なかれ影響を受けることが知られているため<sup>16)</sup>, その結果が近年データのみに比べて危険側の設計値になる場合には、許容される範囲内で条件設定を変え、十分な検討を行う必要がある。

もう1つは、Case0と比べてjackknife推定値の標準偏差が小さくなっていることであり、特に3母数の確率モデルにおいてその度合いが強い。1章で述べたように、歴史時代のデータを加えることは、将来を予測する上での不確実性を減少させる目的がある。従って、この標準偏差の減少を、歴史時代のデータを用いることによる統計的な利益(Statistical Gain)だと考えることが出来る。今、Case0に対して、歴史時代のデータを加えたことによる分散の低減度を表すものとして、Francesら<sup>16)</sup>の研究を参考に、次式で表される指標を考える。

$$SG_i = 1 - \left( \frac{s_{Tji}}{s_{Tj0}} \right)^2 \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

ここに $i$ は各Caseの番号であり、 $s_{Tji}$ はCase $i$ における再現期間 $T$ 年の確率水文量のjackknife推定値の標準偏差である。よって、Case0におけるjackknife推定値の標準偏差と比較して、歴史データを用いるモデルの $s_{Tji}$ が小さい場合、 $SG_i$ は正の値となる。 $SG_i > 0$ のとき歴史時代のデータは再現期間 $T$ 年の確率水文量を推定するのに有効に働くが、 $SG_i < 0$ となった場合は確率水文量の予測に悪い影響をもたらす。図-3は横軸に再現期間(年)、縦軸に $SG$ をとった図であり、実線がCase1( $SG_1$ )、点線がCase2( $SG_2$ )の場合である。全体的な傾向としては、 $SG_1 > SG_2$ であること、再現期間が長くなるにつれて $SG$ が小さくなることなどが分かる。また、 $SG_1$ は3母数の分布の場合大きくなること分かる。これまで、3母数の分布はjackknife法による変動性の評価でふり落とされることが多かったが、歴史データを用いて変動性を抑制することで、その適用性が高められると考えられる。

流域平均年最大30日間降雨量は、Case0ではGumbel分布の場合に標準偏差が最も小さくなり、それ以外のCaseでは2母数対数正規分布で最小となった。しかし、2母数

表-2 jackknife法による確率水文量の不偏推定値と推定誤差(標準偏差)  
a) 換算ピーク水位(m)      b) 流域平均30日間最大降雨量(mm)

Case	Return Period T (year)						
	100			200			
	$X_T$	$X_{Tj}$	$s_{Tj}$	$X_T$	$X_{Tj}$	$s_{Tj}$	
0	GEV	2.971	3.009	0.392	3.307	3.348	0.547
	LG3	2.971	2.985	0.341	3.308	3.312	0.478
	LN3	2.990	2.986	0.285	3.314	3.301	0.376
	LP	3.052	3.104	0.364	3.416	3.474	0.500
	P3	2.822	2.598	0.188	3.054	2.796	0.223
	SQRT	2.973	3.003	0.145	3.299	3.334	0.171
	1	GEV	2.716	2.834	0.179	2.988	3.125
LG3		2.716	2.779	0.167	2.988	3.051	0.237
LN3		2.726	2.827	0.147	2.993	3.107	0.199
LP		2.752	3.049	0.172	3.039	3.441	0.239
P3		2.634	2.664	0.107	2.841	2.865	0.131
SQRT		2.772	2.880	0.081	3.063	3.189	0.096
2		GEV	2.725	2.904	0.276	3.002	3.221
	LG3	2.725	2.849	0.208	3.002	3.141	0.296
	LN3	2.729	2.859	0.196	2.997	3.152	0.264
	LP	2.763	2.815	0.226	3.056	3.092	0.313
	P3	2.618	2.688	0.125	2.823	2.894	0.153
	SQRT	2.774	2.886	0.085	3.065	3.197	0.100

Case	Return Period T (year)						
	100			200			
	$X_T$	$X_{Tj}$	$s_{Tj}$	$X_T$	$X_{Tj}$	$s_{Tj}$	
0	Gumbel	756.8	759.0	35.1	818.9	821.7	39.8
	GEV	736.0	769.6	107.0	790.5	829.9	139.4
	LG3	777.4	850.9	38.4	846.9	928.4	44.1
	LN2	718.1	721.9	36.8	768.3	773.2	42.4
	LN3	726.9	706.9	74.0	780.1	751.7	95.2
	LP	729.7	733.2	38.3	784.2	788.3	44.7
	1	Gumbel	758.6	762.3	21.3	821.0	825.2
GEV		758.3	752.1	29.3	820.6	809.1	42.1
LG3		773.3	783.7	23.4	842.2	854.5	27.2
LN2		734.5	726.3	19.4	787.5	777.2	22.7
LN3		748.2	712.0	33.6	807.0	756.3	46.8
LP		743.1	622.1	68.4	800.3	651.1	83.8
2		Gumbel	755.9	757.3	22.2	817.9	819.6
	GEV	740.4	752.3	59.7	796.0	809.8	82.7
	LG3	765.3	848.7	23.4	831.1	926.9	27.1
	LN2	725.8	734.2	21.2	777.1	786.9	24.8
	LN3	734.2	716.4	45.9	788.7	779.4	63.3
	LP	736.3	734.9	22.3	792.1	789.9	26.5

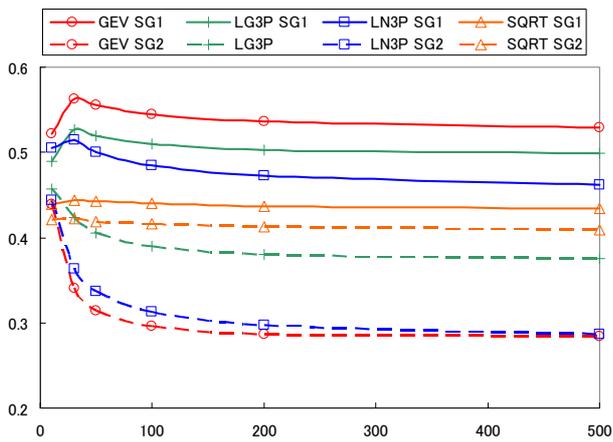


図-3 再現期間年に対する統計的利益 (SG)

対数正規分布は、先ほどのSLSCによる適合度評価で良いと判断されたGumbel分布と3母数対数Gumbel分布と比較して小さい確率水水量量となっており、安全側の予測になっていると思われる。従って、流域平均年最大30日間降雨量が適合するモデルとしてはGumbel分布が適合度・安定性共に優れていると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、歴史洪水資料により復元した歴史時代のデータを含む琵琶湖の換算ピーク水位と、年最大流域平均30日間降雨量の洪水頻度分析を行い、様々な分布モデルについての適合性と安定性を評価した。以下に得られた知見を記す。

- (1) 近年時代のデータのみで推定した場合 (Case0) と、歴史時代のデータを含めて推定した場合 (Case1, Case2) のそれぞれについて、11種類の確率分布モデルの適合度・安定性を評価したところ、良好な結果が得られる分布モデルはいずれのCaseでも変化が無く、全体として2母数の分布の方が良い評価が得られた。換算ピーク水位は平方根指数最大値分布、流域平均年最大30日降雨量はGumbel分布が最も良い評価となった。
- (2) jackknife法で求めた推定誤差は、近年時代のデータのみで求めた場合 (Case0) と比べて、歴史時代のデータを含めて求めた場合 (Case1, Case2) は小さくなり、分布の安定性が増した。特に3母数の分布モデルにおいてその効果が顕著であった。
- (3) 歴史時代のデータが確率水水量の推定誤差の低減に役に立つ割合をSGという指標で表すと、再現期間が大きくなるとSGは徐々に低下することが分かった。

本稿では、母集団の定常性を仮定し、歴史データを近年データと同等に扱っているが、近年の気候変動や土地利用の変化を考慮すれば、母集団の非定常性についても

検討する必要があると考えられる<sup>17)</sup>。今後は母数の時間変化を考慮した、非定常なモデルによる洪水頻度分析を試みたい。

謝辞：水位データ及び降水量データを提供して頂いた国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R.: The value of historical data in flood frequency analysis, *Water Resour. Res.*, Vol.22, No.11, pp.1606-1612, 1986.
- 2) Stedinger, J.R. and Cohn, T.A.: Flood frequency analysis with historical and paleoflood information, *Water Resour. Res.*, Vol.22, No.5, pp.785-793, 1986.
- 3) Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R.: Paleoflood hydrology and flood frequency analysis, *Water Resour. Res.*, Vol.22, No.4, pp.543-550, 1986.
- 4) 宝馨, 高棹琢馬: 水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準, 土木学会論文集, No.393/II-9, pp.151-160, 1988.
- 5) 田中茂信, 宝馨: 河川流量の頻度解析における適合度と安定性の評価, 水工学論文集, Vol.43, pp.127-132, 1999.
- 6) 庄建治朗, 長尾正志, 富永晃宏: 古日記天候記録を用いた琵琶湖歴史洪水の復元, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.15-25, 2000.
- 7) 庄建治朗, 長尾正志, 富永晃宏: 古記録による琵琶湖歴史洪水の水位推定, 水工学論文集, Vol.44, pp.371-376, 2000.
- 8) 庄建治朗: 琵琶湖の歴史的水文環境の推定とその水工計画的応用に関する研究, 京都大学学位論文, 2003.
- 9) Stedinger, J.R., Vogel, R.M. and Foufoula-Georgiou E.: Frequency analysis of extreme events, in *Handbook of Hydrology*, Maidment, D.R., ed., Chapter 18, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- 10) 池淵周一, 前田勝: 歴史洪水資料を利用した計画降雨算定手法, 京都大学防災研究所年報, No.34B-2, pp.103-125, 1991.
- 11) 高棹琢馬, 宝馨, 清水章: 琵琶湖流域水文データの基礎的分析, 京都大学防災研究所年報, No.29B-2, pp.157-171, 1986.
- 12) Hirsch, R.M. and Stedinger, J.R.: Plotting positions formulas for historical floods and their precision, *Water Resour. Res.*, Vol.23, No.4, pp.715-727, 1987.
- 13) Hirsch, R.M.: Probability plotting position formulas for flood records with historical information, *J. Hydrol.*, Vol.96, pp.185-199, 1987.
- 14) 庄建治朗, 富永晃宏: 歴史洪水資料を用いた琵琶湖の洪水頻度分析, 水工学論文集, Vol.48, pp.97-102, 2004.
- 15) Sho, K. and Tominaga, A.: Application of historical flood information to probability quantile estimation for Lake Biwa, Japan, *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, Vol.23, No.1, pp.87-95, 2005.
- 16) Frances, F., Salas, J.D. and Boes, D.C.: Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models, *Water Resour. Res.*, Vol.30, No.6, pp.1653-1664, 1994.
- 17) Strupczewski, W.G., Singh V.P. and Feluch, W.: Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum likelihood estimation, *J. Hydrol.*, Vol.248, pp.123-142, 2001.

(2008. 9. 30受付)