

水工学シリーズ 21-A-3

治水計画の変遷と降水量極値の変化

京都大学防災研究所 教授

田中 茂信

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

治水計画の変遷と降水量極値の変化

田中茂信

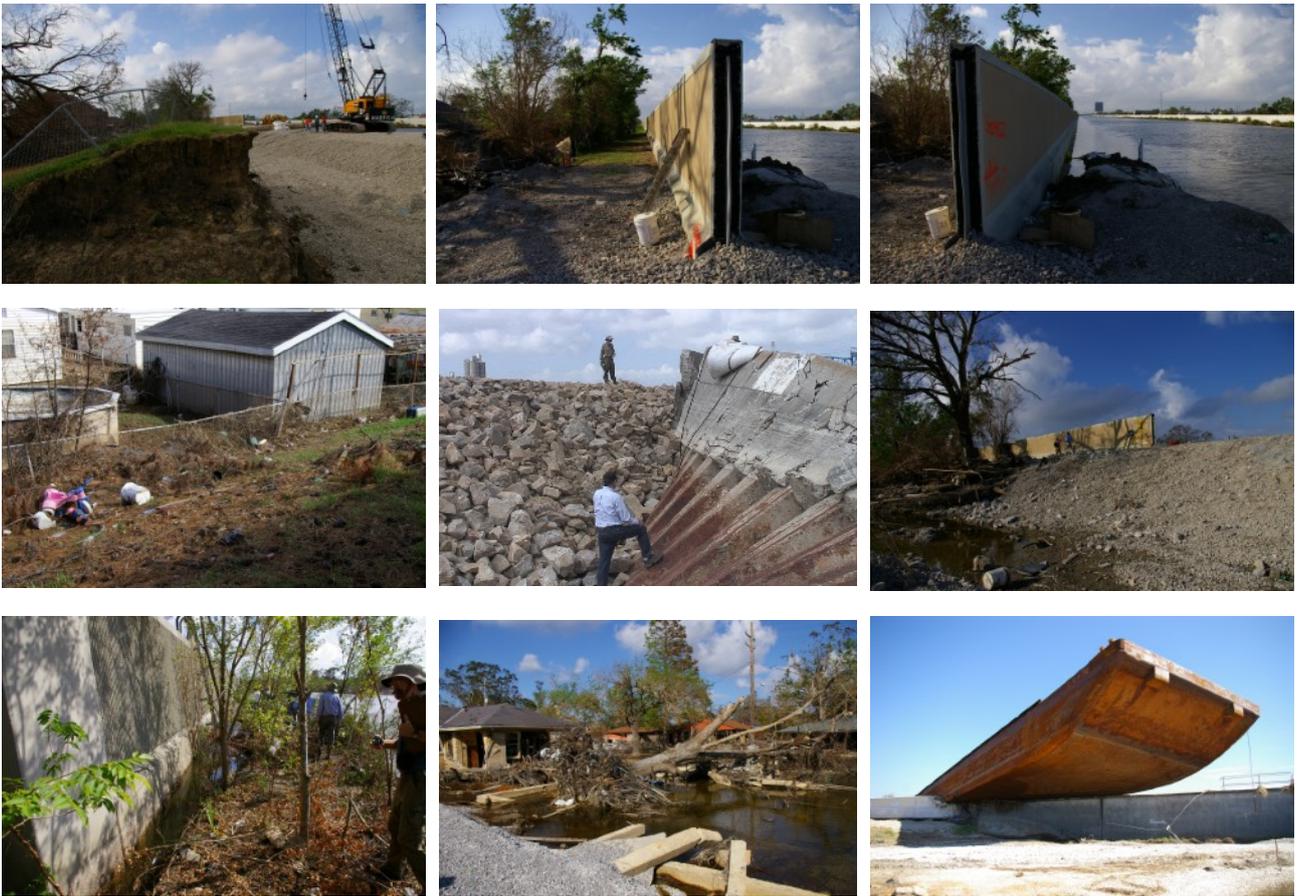
Shigenobu TANAKA

1997年に河川法が改正され、河川の計画制度が大きく変わった。本論では最初に明治以降の治水計画の歴史と河川砂防技術基準を中心とする治水の考え方を振り返り、後半で、頻度解析の方法を概観するとともに近年の災害を引き起こす甚大外力の連続的とも言える発生を踏まえ極値外力をいろいろな視点から見てみたい。

1. はじめに

一般に我々の周りには色々な災害を引き起こす外力が働く。その災害を引き起こす外力がその社会にとって対処可能な外力かどうか、また、次に想定される外力が技術的条件および社会経済条件の観点から対処しうるものかどうかなどが関心事となる。場所毎に住んでいる環境が異なり、作用する外力の種類も大きさも違う。従って、それぞれの関心は異なるのが普通であろう。日本の周りには「灘」と「浦」という呼び方があり、航行の難しさの程度を表しているという。 「灘」だからといって、頻繁に高い波が押し寄せるわけではない。潮流など諸々の条件から海難のリスクがあるというふうに捉えている。外海に面したところといっても、太平洋側と日本海側では相当意識が違う。太平洋側は、普段は読んで字のごとくで、怖いのは台風時の強風、高潮と高波などであろう。もちろん一月に2度ある大潮と重なることを警戒する。大潮と言っても毎月同じではない。台風シーズン的大潮が最も高くなる。昔からこのようなことを調べて、計画に反映してきた。日本海側は冬季風浪が恐れられているが、干満差もそれほど大きいわけではなく、また、冬場は比較的潮位が低いこともある。しかし毎年のように一冬に何度も冬季風浪はやってくる。冬をどう安全に越すかが関心事である。高潮も冬季風浪の気象外力が原因となっている。さらに脱線するが、2005年8月30日カテゴリー5のハリケーンカトリーナが米国ルイジアナ州などを襲い、州都ニューオーリンズは未曾有の被害を被った。この直後、治安がおさまらない中で国際的な調査団の活動が制限されたが、高潮災害を経験していた日本とオランダの研究者がそれぞれ1名ずつ招かれた。その時に、小生は日本の代表として現地を調査する機会を与えられた。この時調べてわかったことであるが、日本は昭和28年9月の台風13号による三河湾を中心とする高潮災害を契機に、コンクリート3面張りの海岸堤防を築き始め、伊勢湾台風時にすでに完成していた部分は大いに効能を発揮したことを踏まえ、その後の高潮対策事業の展開へと進んでいる。オランダは1953年2月の北海での高潮により大被害を受けたことが契機となってデルタプランが進められてきた。両国とも高潮対策の経験年数は同じである。何かの縁かもしれない。

我々は大規模な自然現象や大災害に遭遇するとき、それに巻き込まれる程度により全く異なる反応をすることが多い。例えば、災害により大きな被害を受けた人からは、「また、次の台風で同じようなことが起きるかもしれない。どういう対策をしてくれるのか」と言われるが、一方で、被害を受けなかった人からは「こんな大災害はわれわれが生きているうちにはもう起きない」と言われる。これは、著者が2000年の東海豪雨の直後に矢作川中流部で実際に聞いた話である。後に統計の専門家から「天災は忘れた頃来る」という言葉で有名な寺田寅彦（中谷宇吉郎(1988)は、昭和9年(1934)室戸台風の直後に「寺田が書いた「天災と国防」の中にこの言葉と同じ趣旨が書かれているが、このことばと同じ表現はどこにも書かれていない。ペンを使わないで書いた言葉といえる」と述べている。）が「ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたりするのはやさしいが、正当にこわがることはなかなかむづかしいことだと思われた」（昭和10年8月の浅間山の噴火の後の随筆）寺田寅彦（1948）と書いていると教えていただき、まさにそのとおりになっていると実感した。



2005年8月カテゴリー5のハリケーンカトリーナが引き起こしたニューオーリンズの災害
想定とは異なることがいくつも重なって起きていた（田中，2007）

このようなことがどの地域でも起きるとすると困ったことになる。すなわち、被災した人はまた被災するのが怖いから何とか対策をして欲しいと願っているし、一方、被災しなかった人は、何ら対策などする必要がないというように深刻でない認識である。このような状況は住民の意見を聞いて治水計画を立てる上で非常に大きな課題である。住民は各自が被災者ということで関係者でないかぎり対策に消極的な状況を維持し続けることになるので、多数決で決めると小規模な災害では後者の人が多い状況となり、大部分の人が被災しないかぎり抜本的な対策を行う計画に大多数の住民の賛同を得ることは一般に難しい。すなわち、このような状況が続けば、大多数の人が被災者となる大災害後に初めて認識することになる。住民は本当にそれを望んでいるのであろうか？ ただ単にそのことに気づいていないだけなのではなかろうか。大多数の人が意見を表明しないことが多いわが国においては、まず、住民が正しく判断できる情報が住民にきちんと伝わり、かつ、常に未だ経験したことのないような災害に見舞われる可能性およびその場合の困窮度について、他人の被災を情報ソースから、人事ではなく、正しく認識し必要な対策を事前に行うことが重要である。

災害への備えは重要である。なぜなら、いつも、災害やその対策のことばかり考えているのは大変である。助け合うといっても、その相互扶助的な活動が機能するためには、普段から関係者の繋がりや付き合い方が関係してくるであろう。大多数の関係者が被災するようでは、助け合いはなかなか難しい。社会基盤を充実して、常に災害対策のことを考えておかねばならない負担を軽減し、社会の余力の蓄積に貢献できれば幸福度も向上すると思われる。2011年タイ、チャオプラヤ河の氾濫は国際社会に大きな影響を与えた。保険は今後重要な役割を果たすと思われるが、近年の大災害では復旧に年月を要し、災害前の状況に戻るのに難渋し、災害関連死も少なくない。



2011年秋チャオプラヤ河の洪水で氾濫したタイ、バンコク北部

篠原無然（1915）の次の言葉に、今一度、注目したい。「**病災の損害を思えば 予防の費用は入れるほど経済**」

2. 治水計画と河川砂防技術基準の変遷

2.1 治水計画の変遷

我が国の歴史的な主要河川工事について国土交通省（2021）に一覧表があるので、それを参考にさせていただくと概要が理解できると思われる。西暦323年の淀川の茨田堤の記述から1940年までの主要事項が掲示されており、中には河川の航路としての機能を充実させるための開削も含まれている。洪水対策は、氾濫が一地域に限る地先のなものとの認識から地方負担で整備された。明治18年の全国的な水害の発生により、利根川、信濃川、淀川、筑後川等で新たな計画の基に河川整備が実施されるようになった。続く明治20年代も大洪水が続き、高水工事についても国直轄工事が強く求められるようになり、ついに明治29年旧河川法が制定され、高水工事においても国直轄工事が可能になるとともに直轄工事以外の改良工事も国庫補助する制度が定められた（松浦，1997，2000）。

1910年に全国的な大水害が発生し、勅令を以て内閣に臨時治水調査会が設置され、第一期治水計画の検討が行われ、国の事業として改修を進めるべき河川の選定、施工順位、工期及び工費が審議された。政府はこれを受け、財政的な裏付けをもって治水工事に着手した。1921年には第二期治水計画が策定され、1933年には臨時治水調査会に代わり恒久機関として設置された土木会議によって第三期治水計画が策定された。第三期治水計画の中で中小河川を対象とした補助事業が組み込まれることになり、幹川から支川へ順次事業が開された。このころの大規模工事として、荒川放水路や大河津分水路の建設等があげられるが、昭和初頭（1930年代中葉）までの大河川の改修によって、これまで氾濫を許容せざるを得なかった地域に対しても連続堤防が築かれ、河川の骨格が形成された。また、河川の工事は既往最大洪水を対象に進められたが、改修途中でその計画規模を超える洪水が発生した利根川等では、その度に計画の見直しを行った（大町，1999）。なお、計画の対象とする流量の生起確率としては、1934年の水害防止協議会決定事項の中に、氾濫区域内の道路、鉄道などの路線のうち重要なものの高さは大体20年に1回起こる程度の洪水の水位（最大洪水位）より30cm以上を標準とするとしているので、この程度を洪水防御のための洪水規模と考えていたのであろう。富永正義は計画の洪水流量としては、既往の最高流量を原則とするが、周囲の状況または財政の関係より10年に1回起こる程度の洪水流量で我慢することもあるとしている（山本，1999）。これについて、松浦（1986）は、第一次治水計画策定時は、財政規模に制約されて数年ないし10年に一回程度の大洪水を対象としていたが、その後の財政の好転によって数十年に一回生じる大洪水を対象とするようになったと考察しており、第一次治水計画における利根川、淀川、北上川、信濃川などの重要河川で当時計画高水流量を5,570m³/sにとっているのは当時の大河川の計画高水流量として取り得た最大のもので述べている。なお、5,570m³は20万立方尺である。

表-1 富永博士による洪水の分類

(1) 毎年一回起こる程度の洪水	
(2) 数年に一回起こる程度の洪水 . . .	普通洪水
(3) 十年に一回起こる程度の洪水 . . .	大洪水
(4) 数十年に一回起こる程度の洪水 . . .	非常洪水

1910年に匹敵する大災害が、1945年、1947年、1948年と相次いで起こり、その対応として従来の河川改修計画を拡大した他に、できるだけ下流河川の拡幅を避けるため、貯水池、遊水地などが上流部に計画されている。また、多目的ダムの計画・着工が行われた。昭和28年(1953)は西日本大水害、台風13号による水害など中部以西に大水害が発生し、内閣に治山治水対策協議会が設置され、建設、農林両省にわたる治山治水事業の基本対策要項が決定されている。これは国営93河川、府県営1,142河川について洪水防御施設の整備を図ろうとするもので、内容としては河川改修とあわせて99カ所のダム、52万町歩の森林整備および大量の砂防工事が含まれている（山本，1958）。この要項の中で計画論として注目すべきことは、「従来の計画洪水量および治水方式に再検討を加え、各水系毎に砂防施設、治水ダムおよび河川改修などの諸事業を総合した治水計画を樹立し、その積極的な遂行をはかる」ことである（山本，1993）。

2.2 河川砂防技術基準の策定と改定の経緯

一方、1951年頃から河川行政担当者間で、計画手法の見直しを行っている。計画対象流量が何年に1回生じる流量であるのかを年超過確率で表し、全国の河川の間でバランスを取ろうとしている。この中で中安米蔵および米田正文の論文はその後の計画洪水流量に対する考え方の基礎を作った重要なものである。以下に「河川法全面改正に至る近代河川事業に関する歴史的研究」（山本，1993）および両者の論文から、関係部分の趣旨を抜粋する。

「治水計画における洪水流量について—千代川を中心として—」（中安，1950）によると、「満州事変以降大陸政策が強行されるに至って治水事業は昭和8年を頂点として低下の一途を辿り、第2次世界大戦に入ってからほとんど休止の状態となった。災害復旧費と改修工事費とのバランスが破れたのも昭和9年からである。現在の貧困な国家財政や災害で病弊した地方財政のもとでこの巨額の試算の支出を考える時、ここでは単純な技術的理想論は許されないであろう。今後の治水計画の基本方針は現実的、かつ科学的でなければならない。この観点より治水計画実施のあり方は従来治安の面を重視してあまり考慮されなかった経済的諸関係の調査の上に立たなければならない」とあり、経済的諸関係を明らかにした上での治水計画、治水事業の確立を強く主張している。計画洪水流量の確率年として、千代川は既定計画の17年に対し、43年が適当としている。他の河川では、天神川が既定計画50年に対し、46年、斐伊川下流が既定計画57年に対し55年、吉野川岩津下流が既定計画35年に対し93年と求めている。このように単に既定計画を上回る計画とすべきとしているのではなく、防災利益率を考慮して妥当な投資レベルという観点から見ている。なお、今後の課題として、

- (1)時間雨量の観測の充実
- (2)指定水位以下の水位観測を流出の遅れ時間毎に実施すること
- (3)ピーク付近の洪水観測は30分観測とすること
- (4)全国的に雨量及び洪水観測資料の整理様式を統一すること
- (5)水文調査のため、特定河川を指定して資料の充実を図ること
- (6)水害の資料を充実すること

を強調している。

「淀川計画高水論」（米田，1952）によると、確率主義は、治水計画を理論的にし、安全、かつ信頼性のある計画と主張するが、既往最大洪水にも重きを置いている。また、計画高水とはそれまでのピーク流量のみの概念ではなく、ハイドログラフ（洪水波形）としており、この考えは後の「建設省河川砂防技術基準」における基本高水の概念と同様であり、この時代から本格的に建設されたダム計画では必要不可欠であった。淀川の計画に対しては、「過去の洪水の水位および流量、特に既往最大流量および確率洪水流量を究明し、さらにユニットグラフにより降雨と流出の関係を明らかにし降雨記録より確率降雨を求め、それに対応する流量を求め、これらの条件により判断し既往最大流量を基本とし確実にして合理的な計画高水の最大流量を決定した」と述べている。中安米蔵および米田正文の論文は昭和33年11月20日に発刊された「建設省河川砂防技術基準」に活かされている。

それでは、確率主義を実践するための方法論はどうであったかみてみる。中安(1950)は岩井(1947)の方法を用いており、米田(1952)は確率紙を用いて平分線を引く手法をとっている。河川砂防技術基準(1958)には、その解説に、「確率計算の方法としてはFuller, Hazen, Foster, Goodrich, Slade, Kimball, 岩井, Gumbel等の方法、非母数法と漸次改良され新しい提案がなされてきた。しかしいずれの方法とも全国一律の基準と決定するに至らないが、現在のところ岩井法を統計の要素の下限値が正又は零、上限値が無限大になるという条件のもとに採用するか、Gumbel法によるか、あるいは確率紙にHazenのプロットングポジションを用いてプロットし、平分線を引く簡略法を用いる場合が多い。ただし、簡略法は取り扱いに便利であるが、統計的健全性に欠け、客観性に乏しい欠点がある」という趣旨の説明がある。これと同時期に著された「河川工学」（山本，1958）には、Fullerの方法、正規分布、対数正規分布、岩井法、Hazen紙（対数確率紙）による方法およびGumbelの方法が16頁にわたって説明されている。なお、Gumbelの方法については極値理論に基づくものと説明されている。したがって、このころ既に単に変数を対数変換して正規分布を適用するものと岩井法（対数正規分布）を用いる方法および極値分布（Gumbel分布）が使用されていたと考えられる。1958年に米国で出版されたGumbelの”Statistics of Extremes”の和訳「極値統計学」（Gumbel著，河田他訳，1963）が5年後に日本で出版された。この本の極値分布に関する章の和訳を担当している角屋は翌年「水文統計論」（角屋，1964）をまとめている。これによってわが国の水文頻度解析手法が体系的に一応確立され、この「水文統計論」と角屋の成果を多く取り入れた「応用水文統計」（岩井・石黒，1970）は実務家のバイブル的な役割を果たしながら現在に至っている（宝，1995）。この後、PWM（確率加重積率）法による正規分布、対数正規分布およびピアソンⅢ型分布の解が竹内・土屋(1988)により求められ、星(1998)は、その後の発展も含めてまとめている。なお、角屋の研究を調べてみると昭和28年(1953)にすでにGumbel分布について紹介しており（角屋，1953）、上述の和訳部分に関係が深い対数極値分布A型および対数極値分

布B型について1956年に論文を発表しており、Gumbel分布と対数極値分布A型および対数極値分布B型が別々のものでなく歪み係数を通して一連の関係を有することを指摘している。

次に、河川砂防技術基準の改訂経緯とその水文統計に関する記述についてみる。水文統計に関する部分についてみると、河川砂防技術基準は昭和33年の策定以来、昭和51年(1976)、52年(1977)、61年(1986)及び平成9年(1997)に改訂されている。昭和33年河川砂防技術基準の概要は既に述べた通りである。

昭和51年河川砂防技術基準（案）：主な改訂点として、最近実務上広く用いられ、また学術上の発展も著しい水文統計および流出計算に関する事項を基準化し、調査編にそれぞれ新しい章を設けたことがあげられる。第4章水文統計第3節水文学量の生起確率の解析には38項を用いて、確率紙による簡略計算、分布関数式による確率計算およびその計算例を分かりやすく示している。取り上げている分布は毎年値資料については、対数正規分布（岩井法、石原・高瀬法）、対数ピアソンⅢ型分布、Gumbel分布、対数極値分布（最大値分布および最小値分布）、非毎年値資料については指数分布が用いられている。

なお、改訂作業の過程における主要な検討事項として、「調査編の水文統計、流出計算、粗度係数および水位計算の各章に対しては、現在の実務担当者の仕事内容と比較して、本基準はやや学術的すぎるとの意見があった」と記している。

昭和52年改訂河川砂防技術基準（案）：河川管理施設等構造令及び同施行規則並びに公共測量作業規定が制定されたことに伴う一部改定が行われている。

昭和61年二訂河川砂防技術基準（案）：52年版と同一である。測量技術の向上等を背景に建設省公共測量作業規定が改正されたことに伴い、調査編の一部改訂を行ったものである。

平成9年改訂新版河川砂防技術基準（案）：改訂の背景として、新しい技術的知見を加えて修正（水文確率分布の適用分布形の選定方法を明記）したとされているが、第4章水文統計の第3節水文学量の生起確率の解析にかかる部分は10頁弱と縮小されている。特に確率紙による簡略推定が残されているにもかかわらず、分布関数式による確率計算は3頁余りと大幅に縮小されており、具体的な計算方法等は文献を参照するほかはないにもかかわらず、参考文献のリストはあるが、具体的な対応が明確に示されておらず、実務的には不便なものになっている。

平成17年に計画編が改訂され「国土交通省河川砂防技術基準」となっている。

なお、一連の河川砂防技術基準（案）では極値分布の説明はあるものの極値の説明とその適用に関する説明は明確ではない。これは、変量を対数変換した値が正規分布に良く適合するとして経験的に対数正規分布が慣用されてきたことと無縁ではないと思われる。

実際の河川計画で確率に基づいた値が採用されたのは、昭和39年(1964)の石狩川が最初であった(山本, 1999)とされているが、「石狩川治水の曙光－岡崎文吉の足跡－」（北海道の治水技術研究会, 1990）によると「昭和28年9月神居古潭上流の区間の計画高水流量の検討の結果、確率評価1/100の計画降雨を用い、単位図法により伊納地点で3,620m³/sと定めた」とあり、これが最初の事例であると思われる。なお、この文献では昭和40年に石狩川の工事実施基本計画が改訂されており、「確率規模としての検討を全流域に対して行った初めてのものであり、水系を一貫して治水計画を策定したという意味で意義深いものである」とされている。この計画検討における確率評価の手法には岩井法と石原・高瀬法が用いられている。

米田(1952)が流域レベルで検討を行っていた淀川については、前述したように既往最大流量を基本とし「計画高水流量として80年洪水をとり7,300m³/sにすべきであるという意見書を上申したが、一方、京都大学の石原藤次郎博士は経済性の検討から淀川等の重要河川は80年洪水では不十分で数百年洪水をとっても経済的に過大といえないと論じた。このような理論的結論だけで計画高水流量を増加することは、事業規模が大きいだけに当時としては踏み切ることができず具体的な対策がまとまらないうちに昭和28年(1953)の13号台

風の出水を迎えた」とあり、翌昭和29年河川審議会の慎重な審議を経て淀川水系改修計画が策定されている。この改修計画では台風13号出水の宇治川破堤がなかった場合の枚方における既往最大流量が大体1/100であることから、三支川の流量は13号出水の実績をそのままとらず、年超過確率1/80の計画とされている（淀川百年史、1974）。このように、淀川水系改修計画では確率評価を行っているが、基本は既往最大流量に基づいている。河川法改正後昭和40年に策定された工事実施基本計画の基本高水は淀川水系改修計画の基本高水を用いており、年超過確率を1/200とした工事実施基本計画が定められたのは昭和46年であった。

極値に関する研究の歴史は、高橋・志村（2016）にまとめられている。極値分布には3つの型があって、それ以外になく、これらの3つの型の極値分布を一つの式で表したものが一般極値分布(Generalized Extreme Value distribution, GEV)と呼ばれ、区分最大値（1年間等のある区分内のデータの最大値）のデータ解析に応用されている。区分最大値のみでは利用可能データの個数は限られて精度のよい解析が行われない場合が多いが、水文学の分野で使われていたPOT(Peaks Over Threshold)法は十分大きな閾値を超過するデータが指数分布で近似できるという事実に基づく解析手法であり、その一般形が一般パレート分布である。一般極値分布と一般パレート分布の形状母数は相互に共通の形状母数を有している。

一方、わが国の水文統計解析では、対数正規分布が重用され、いろいろな改良が行われたが、極値分布に関する検討は角屋の一連の研究を除いてあまり行われてこなかった。また、角屋(1961)は年最大値(AMS; Annual Maximum Series)資料と非毎年値(POTまたはPDS; Partial Duration Series)資料の理論的關係や応用例を示す中で、資料整理の簡単なAMS解析を行うことにより、T年に1回起こるような事象から1年に何度も起こるような事象まで推定することが可能であり、AMS資料かPOT資料という問題に対してはAMS資料で実用上十分であるとしており、AMS解析への偏重に拍車をかけたきらいがある。なお、角屋のこの研究は地点雨量記録を対象に行われている。田中・宝（2001）は洪水ピーク流量を対象に解析を行い、AMS資料とPOT資料が必ずしも同じ確率水流量を与えとは限らないことおよびこの原因としてAMS資料における課題を見いだした。近年の情報機器の発達により、観測や資料整理がずいぶん楽になってきており、非毎年値資料としての時系列資料の整理も十分行える時代になってきている。AMS資料に比べPOT資料は多くのデータを扱うことができるので、気候変動の影響等の解析にも有利である。

2.3 わが国の水文資料の現状と課題

河川計画の基本となる主な外力は、対象とする施設により水位であったり、ピーク流量や流量ハイドログラフのボリュームであったりするが、基本となるのはピーク流量を含む流量ハイドログラフである。わが国の直轄河川の流出は日のオーダーの現象であり、その変化をみるには時間雨量や毎時の流量が基本量として必要である。流域が比較的小さい場合には時刻流量だけでなくピーク流量も重要となるので一般に時刻流量の最大値とは別にピーク流量もあわせて整理蓄積されており、流量年表にはこの年最大値も載っている。なお、直轄河川の重要な区間はほとんど堤防で守られており、その堤防の安定を考える上ではピーク水位だけでなく、雨量およびそれぞれの継続時間が重要となる。また、流量は流域の変化の影響を受けやすいが、降雨は自然現象であり人為的な影響を受けないと考えられること、さらに守られる地域の安全性を考える際、外水に対する安全度だけでなく内水氾濫についても考える必要があることから降雨量は最も重要な資料である。

河川統制事業調査が昭和12年(1937)に開始されている。雨量、水位、流量の観測が開始されており、他に地形地質調査、利用状況調査等から構成されている。本調査は内務省、逓信省、農林省で分担され、第1期調査分として63河川が取り上げられ、内務省はそのうち37河川を担当している。なお、利根川では大正4年から流量観測が行われており、一部の河川では河川統制事業調査よりも前から流量観測が行われている（山本、1993）。

1999年時点で、各地方建設局からいただいた資料によると、直轄河川に関する時間雨量などの比較的詳しい水文資料の多くは昭和30年前後から整備され始めており、一部には戦時中を通して観測が継続されていた観測所もあった。1999年時点で、全国の一級水系において整理されていた137カ所の年最大流量の連続した観測年数は、40年～44年が48標本、35年～39年が29標本、45年～49年が28標本、50年～54年が9標本であり、平均値は44.1年である。現在ではこれらのデータは単純に20年余蓄積が増えていると考えられる。例えば、東海地方を流れる豊川については、水位流量観測は大正8年(1919)に開始されている。降雨量については日雨量が明治26年(1893)と早くから観測されているが、時間雨量の観測資料は昭和30年(1955)からである。

観測流量は観測地点より上流の氾濫やダム等による貯留の影響を受けている可能性がある。このような流域について、河川計画の基本となる基本高水流量を流量資料から検討する場合には、これらの影響を流出解析により取り除いた流量を用いる必要があるため、その影響を取り除くために時間雨量観測データが必要となる。一般に、河川計画においては計画降雨継続時間を設定し、その時間内に降った降雨量を統計解析の対象資料とする。時間雨量の観測が開始されるまでは日雨量のみしか観測されておらず、上述の補正を行うことはできないが、計画降雨継続時間が1日や2日の場合、日降雨量や2日降雨量を確率評価することは可能である。この場合、計画規模のハイドログラフを得るにはいくつかの既往の大洪水の降雨パターンをあてはめて時間雨量（ハイエトグラフ）を作成するのが一般的である。

一方、近年は温暖化ガスの排出による地球温暖化およびそれに伴う気候変化の進行がほぼ確実となり、降雨量も地球温暖化の影響を受けて今後ますます大きな変化が起きると想定されている(Meehl, et al., 2007)。これまで水文頻度解析においては時系列資料から年最大値資料を抽出し、それを解析対象としてきたが、より多くの資料を対象に解析できるような体制を整備することが重要である。

以上のようにわが国の河川整備の歴史と水文頻度解析の関係について調べてみた。戦後の災害が頻発する中で、災害発生の有無がその河川整備の水準にも影響することおよび一度既往の出水規模を上回るような災害に見舞われるとバランスのとれた河川整備を差し置いて大規模な整備が始まること等の問題点も多い。単に災害復旧を実施するだけでなく、バランスのとれた河川整備は如何にあるべきかを考えた結果が確率主義の導入であった。これは河川整備が防災便益とバランスすべきという考えであり、このためには精度よく外力の確率評価と防災便益の評価を行う必要がある。

本来、各河川の洪水到達時間に基づいて決められる計画降雨継続時間内の降雨資料を整理し、その年最大値資料から確率水流量が求められるべきであるが、確率主義の黎明期には、それまでのデータの蓄積が少ないことから、比較的観測期間の長い日雨量や2日雨量および3日雨量が使われることが多かった。このため、日雨量や2日雨量および3日雨量の年最大値を統計解析の対象とした。確率雨量が求められた後は、降雨波形を既往の洪水時の波形等を基に設定し、単位図法等により流出計算してピーク流量や流出ボリュームを算定している。米田は流出計算に信頼が置けなかったようで、既往最大流量を基本とした考え方をとっているし、河川砂防技術基準もいろいろな要素について確率評価をするよう求めている。

水文極値の統計解析は河川計画を検討するにあたり基本的なものであり、客観的合理性を有する河川整備基本方針や河川整備計画を検討するためには必要不可欠な技術である。気候変動の影響等これまで考えてこなかった要素も考慮しなければならない。快適かつ便利になった現在の社会を支えているものの大部分は電気電子製品であり水に弱い。2005年に発生した米国ニューオーリンズのハリケーンカトリーナによる大災害等大規模な水災害は現代社会の活動継続に対して時間的にも空間的にも大きな影響を与える。世界有数の経済大国であるわが国がおかれている自然条件は厳しい。守るべき社会的な資産は非常に大きくなっているにもかかわらず、治水計画の計画規模は昭和33年当時の2倍程度にしか設定されていない。資産が増えれば大きな保険をかけたり防災システムをより強固にするのは当然であろう。気候変動に適応した治水対策検討小委員会(2007)によると、オランダでは1985年には1/10,000規模の安全度の高潮防御システムが整備され、イギリスのテムズ川には1983年に1/1,000の整備が完成している。国際社会で協調していくためには万が一の時に支援し合うのも重要であるが、普段からの備えも同程度のものが要求されていると考えるべきである。直轄河川の水文資料蓄積状況からすると、確率規模が1/100と小さければデータの蓄積によりそのうち大きな外挿をしなくてよい時代が来るが、諸外国のように大きな確率規模に対する確率水流量を推定するには少々のデータの蓄積では外挿しなくて済むようにならない。したがって、水文資料の蓄積を継続するとともに極値資料の解析技術についても検討を積み重ねる必要がある。

3. 水文頻度解析の概要

3.1 水文頻度解析によく用いられてきた確率分布モデル

極値水文資料を対象にする水文頻度解析において、多くの確率分布モデルが用いられてきた経緯がある。複数のモデルについて具体的な解説が行われている資料として、初期には角屋(1964)による「水文統計論」、岩井・石黒(1970)の「応用水文統計学」があげられる。近年では、水文・水資源ハンドブック(1997)の「7.3 水文頻度解析」がかなり詳しく紹介している。海外では、Handbook of Hydrology (1993)の第18章にStedingerらによる「Frequency Analysis of Extreme Events」があり、水文極値解析に関する幅広い解説が述べられている。これらの文献で扱われている分布モデルと母数推定法について表-2に示す。

一方、極値理論の研究者の間では、極値の解析には極値理論を用いることが当然のごとく王道と考えられている。計画外力の再現期間は既存の観測の蓄積期間に比べて大きい場合が一般的であるので、外挿のためには理論的根拠を有する極値分布を極値解析に用いるべきである。

3.2 年最大値資料(AMS)に用いる確率分布

水文時系列資料を一定の区間に分割し、それぞれの区間に含まれる最大値を収集した水文資料を区分最大値といい、一般に極値資料とも呼ばれる。区間が1年である年最大値資料(AMS: annual maximum series)は極値資料である。AMSの解析には一般極値分布(GEV:generalized extreme value)を用いる。一般極値分布の

表-2 水文頻度解析によく用いられてきた確率分布モデル

文献名 分布モデル	母数の数	水文統計論 (1964)	応用水文統計学 (1970)	水文頻度解析 (1997)	HANDBOOK OF HYDROLOGY (1993)	REGIONAL FREQUENCY ANALYSIS (1997)
一様分布	2				L積率法	L積率法
指数分布	2	積率法	積率法		積率法, L積率法	L積率法
一般パレート分布(GP)	3				積率法, L積率法	L積率法
双曲線指数分布	3	積率法				
Gumbel分布	2	積率法	積率法	積率法, L積率法	積率法, L積率法	L積率法
対数極値分布A型	3	積率法	積率法			
対数極値分布B型	3	積率法 ¹⁾	積率法 ¹⁾			
一般極値分布(GEV)	3	Jenkinsonの方法 (積率法)		積率法 ²⁾ , L積率法	積率法 ²⁾ , L積率法	L積率法
Weibull分布	3	積率法	積率法			L積率法
正規分布	2			積率法, PWM法	積率法, L積率法	L積率法
対数正規分布	3	石原・高瀬の方法, 岩井法, 順序確率法	石原・高瀬の方法, 岩井法, 順序確率法	積率法, クォン タイル法, PWM法	積率法, L積率法	L積率法
ピアソンIII型分布	3			積率法, PWM法	積率法	積率法, L積率法
対数ピアソンIII型分布	3			対数標本積率法, 対数標本PWM 法, 原標本積率法	積率法	
平方根指数型最大値分布 (SQRT-ETmax)	2			最尤法 ³⁾		
一般ロジスティック分布	3					L積率法
Kappa分布	4					L積率法
Wakeby分布	5					L積率法

- 1) 水文統計論および応用水文統計学では対数極値分布B型の場合は危険側になるのを避けるため、Gumbel分布を当てはめるべきであるとしている。
- 2) GEV分布については積率と母数の関係式は示されているがその具体的な解法は示されてない。
- 3) 最尤法の解を繰り返し計算で求める方法が示されている。

形状母数 $k = 0$ の場合が Gumbel 分布であり, x を変量とすると確率密度関数 $f(x)$, 確率分布関数 $F(x)$ はそれぞれ次のように表される.

a) Gumbel 分布

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\} \exp\left[-\exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\}\right] \quad (1)$$

$$F[x] = \exp\left[-\exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\}\right] \quad (2)$$

b) 一般極値分布(GEV)

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left\{1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right\}^{\frac{1}{k}-1} \exp\left[-\left\{1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right\}^{1/k}\right] \quad (3)$$

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - k\frac{x-\xi}{\alpha}\right)^{1/k}\right] \quad (4)$$

ここに ξ :位置母数, α :尺度母数, k :形状母数である. なお, この定義の場合, GEVは $k > 0$ のとき式(5)の上限值, $k < 0$ のとき式(6)の下限值を有する.

$$x \leq \xi + \alpha/k \quad (k > 0) \quad (5)$$

$$\xi + \alpha/k \leq x \quad (k < 0) \quad (6)$$

3.3 閾値超過資料(POT)に用いる確率分布

水文時系列資料の頻度解析の方法として, AMS以外に閾値超過資料(POT:peaks over threshold)がある. POTは, 閾値を超過する独立なピーク値を全て取り出した資料である. AMSが他の年の年最大値より大きな年間第2位や3位などのデータを使わず, また, 年によっては豪雨や洪水とみなせないような事象を含むのに対し, 適切に閾値を選べばこのように特性の異なる水文資料を含むことを回避できる利点がある. 閾値の選定によく用いられる手法としては, 指数分布の閾値超過資料の平均が閾値によらず一定である特性を活用した標本平均超過関数を用いる手法がある. POTに対して用いられる指数分布および一般Pareto分布(GP:generalized Pareto distribution)の確率密度関数 $f(x)$, 確率分布関数 $F(x)$ はそれぞれ次のように表される.

c) 指数分布(Exp)

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\} \quad (7)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\} \quad (8)$$

d) 一般 Pareto 分布(GP)

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left\{1 - k\frac{x-\xi}{\alpha}\right\}^{1/k-1} \quad (9)$$

$$F(x) = 1 - \left(1 - k\frac{x-\xi}{\alpha}\right)^{1/k} \quad (10)$$

ここに ξ :位置母数, α :尺度母数, k :形状母数であり, $k = 0$ の場合が指数分布である. なお, GEVと同様に, GP分布は $k > 0$ のとき式(5)の上限値を有する.

3.4 母数推定法

表-2より, 古くは積率法が主に用いられていたが, 「水文頻度解析」およびHandbook of HydrologyにおいてPWM法およびL積率法が加わっていることがわかる. この背景にはその当時の計算機資源などの環境が影響している. PWM(Probability Weighted Moments)法はGreenwoodら(1979)により提案された方法であり, L積率法(L-Moments)はそれを直感的に分かりやすく書き換えたものである. また, Regional Frequency Analysis(Hosking and Wallis, 1997)はL積率に関する詳しい解説と各分布のL積率による母数推定法を示している. 実務では, 積率法がアウトライヤー(はずれ値)の影響を受けやすいという欠点を改善するロバストな方法としてPWM(probability weighted moment:確率加重モーメント)法やL積率法が最近注目されている. このような状況に対し, 極値理論の専門家の間では最尤法(さいゆうほう, Maximum likelihood estimation: MLE)がもっぱら用いられている. (「尤」は「もっともらしい」, likelihoodはlikely+hoodで起こる可能性の高いまたはもっともらしい+状態という意味である.) しかし, 最尤法は簡単な式で表せないことが多く, その場合, 数値的に解かねばならないが, 多くのソフトで実装されている. 以下にこれらについて簡単に述べる.

a) 積率法

確率分布モデルの原点及び平均値まわりの積率, すなわち, 平均, 分散, 歪みをそれぞれ標本から得られる標本平均, 不偏分散, 不偏歪みに等しいとおいて分布モデルの母数を求める方法である. 確率分布モデルの積率は母数の関数で表されているので, 2母数の確率分布モデルは平均と分散に関する方程式を連立させて解く. 3母数の場合はさらに歪みが不偏歪みに等しいとおく式を加えて連立方程式を解く. なお, 3母数の場合, 種々の歪みの補正が提案されている.

確率分布モデルの確率密度関数を $f(x)$ とするとき, この平均, 分散および歪みはそれぞれ式(11), (12)および(13)で表される.

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx \quad (13)$$

一方, 標本 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ から得られる標本平均, 不偏分散および不偏歪みはそれぞれ式(14), (15)および(16)で表される.

$$\hat{\mu}_X = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_X^2 = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (15)$$

$$\hat{\gamma}_X = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n - 1)(n - 2)S^3} \quad (16)$$

例えば、Gumbel分布の場合2母数であるので、式(11)および(12)に式(1)を代入して積分を行い、式(17)および式(18)を得る。

$$\mu = 0.5772 \alpha + \xi \quad (17)$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (18)$$

これらと標本から式(14)および(15)で得られる標本平均、不偏分散が等しいと置いて母数 $\hat{\xi}$ と $\hat{\alpha}$ を求める。

b) L積率法

大きく外れたデータが含まれ歪んだ水文資料に対処するために考案された手法がPWMやL積率を用いる手法である。L積率は順序統計量の線形和で表される特徴を持つ(Lは linear combinations に由来する)。

PWMは式(19)で定義される。次数 r が大きくなっても常に変数の1乗しか含んでいないので、通常の積率に比べてアウトライヤーの影響を受けにくい。

$$\beta_r = \int_0^1 x(u)u^r du \quad (19)$$

$X_j(j = 1, 2, \dots, n)$ を標本から得られた順序統計量 $\{X_1 \geq X_2 \geq \dots \geq X_n\}$ とするとき、標本を用いたPWM推定量は式(20)で表される。

$$\begin{cases} \hat{\beta}_0 = \bar{X} \\ \hat{\beta}_1 = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-j)X_j}{n(n-1)} \\ \hat{\beta}_2 = \sum_{j=1}^{n-2} \frac{(n-j)(n-j-1)X_j}{n(n-1)(n-2)} \\ \hat{\beta}_3 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(n-j)(n-j-1)(n-j-2)X_j}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \end{cases} \quad (20)$$

L積率は式(21)のようにPWMを用いて表される。

$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta_0 \\ \lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \\ \lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 + \beta_0 \\ \tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 \\ \tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 \end{cases} \quad (21)$$

極値分布についてL積率解を表-3に示す。

例えば、Gumbel分布の場合、式(20)の最初の2式のPWM推定量を式(21)の上2式のPWMで置き換えてL積率推定量を得る。次に表-3のGumbel分布に対応する2つのL積率解の式から母数 ξ と α を求める。他の分布も同様に求めることができるが、GEVは解析的に解けないので、次のようにして求める。まず、表-4のGEVの欄の上段の式を用いて形状母数 k を求め、下段の式で順次尺度母数 α および位置母数 ξ を求める。他の分布を含め、利用しやすいように母数推定式と確率水文量推定式を表-4にまとめる。

c) 最尤法(MLE)

母数ベクトル θ で確率密度関数が $f(x) = f(x; \theta)$ で与えられるとき、次式で表される尤度関数

$$L(\theta) = L(\theta; X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{j=1}^n f(X_j; \theta) \quad (22)$$

を最大にする母数ベクトル

$$L(\hat{\theta}) = \max_{\theta} L(\theta) \quad (23)$$

を推定値とする手法が最尤法である。通常は尤度関数の自然対数をとった対数尤度関数を最大にすることにより最尤推定量を求める。なお、尤度関数の L は L 積率とは関係がない。

表-3 極値分布の L 積率解

確率分布	L 積率		
Gumbel	$\lambda_1 = 0.5772\alpha + \xi$	$\lambda_2 = \alpha \ln 2$	
GEV	$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{k}(1 - \Gamma(1+k))$	$\lambda_2 = \frac{\alpha}{k}(1 - 2^{-k})(\Gamma(1+k))$	$\tau_3 = 2 \frac{(1 - 3^{-k})}{(1 - 2^{-k})} - 3$
Exp	$\lambda_1 = \alpha + \xi$	$\lambda_2 = \alpha/2$	
GP	$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{k+1}$	$\lambda_2 = \frac{\alpha}{(k+1)(2+k)}$	$\tau_3 = \frac{1-k}{3+k}$

表-4 極値分布の L 積率解による母数推定式と確率水文量算定式

確率分布	母数推定式	確率水文量推定式
Gumbel	$\alpha = \lambda_2 / \ln 2$ $\xi = \lambda_1 - 0.5772\alpha$	$x(F) = \xi - \alpha \ln(-\ln F)$
GEV	$c = \frac{2}{\tau_3 + 3} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ より $k \approx 2.9554c^2 + 7.859c$ を得る $\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k})(\Gamma(1+k))}$ $\xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k}(1 - \Gamma(1+k))$	$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - (-\ln F)^k \right\}$
Exp ^{注)}	$\alpha = \lambda_1 - \xi$	$x(F) = \xi - \alpha \ln(1 - F)$
GP ^{注)}	$k = \frac{\lambda_1 - \xi}{\lambda_2} - 2$ $\alpha = (1+k)(\lambda_1 - \xi)$	$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - (1 - F)^k \right\}$

注) POTに用いるExpとGPは、一般的に適用時に別に閾値 ξ が決まっているのでここでは既知と扱った。

3.5 確率水文量

累積分布関数は変数を独立変数として非超過確率を求める形になっているので、逆にある非超過確率 F に対応する確率水文量(クォンタイル)は累積分布関数の逆関数で与えられ、表-4に示すとおりである。

a) AMSとPOTの関係

ここまで、すべての確率分布において非超過確率を F で表してきたが、AMSの確率評価では $1 - F$ が年超過確率を表すが、POTの確率評価の場合は観測資料全体について閾値を超える事象の確率を示しているだけで時間の概念がないので直接比較することができない。これ以降、このことを明確に区別するため、POTの閾値を超過する事象の非超過確率を $G(x)$ で表す(式(8),式(10)および表-4の関連部分)。豪雨や洪水の発生がポアソン過程に従う場合、 $G(x)$ は年最大値の非超過確率 $F(x)$ と式(24)で結びつけられる。

$$F(x) = \exp \left\{ -\lambda (1 - G(x)) \right\} \quad (24)$$

ここに、 λ は1年あたりの事象の平均的な発生率である。

表-5 プロットイングポジション (Handbook of Hydrologyより)

Name	Formula	α	T1	Motivation
Weibull	$i/(n+1)$	0	$n+1$	Unbiased exceedance probabilities for all distributions
Median	$(i-0.3175)/(n+0.365)$	0.3175	$1.47n+0.5$	Median exceedance probabilities for all distributions
APL	$(i-0.35)/n$	-0.35	$1.54n$	Used with PWMs
Blom	$(i-3/8)/(n+1/4)$	0.375	$1.60n+0.4$	Unbiased normal quantiles
Cunnane	$(i-0.40)/(n+0.2)$	0.4	$1.67n+0.3$	Approximately quantile-unbiased
Gringorten	$(i-0.44)/(n+0.12)$	0.44	$1.79n+0.2$	Optimized for Gumbel Distribution
Hazen	$(i-0.5)/n$	0.5	$2n$	A traditional choice

T1 is the return period each plotting position assigns to the largest observation in a sample of size n .

3.6 確率紙とプロットイングポジション

我が国では確率紙は観測値を横軸に、その順序統計の非超過確率を縦軸にとってプロットしたものであり、それに平分線を引いて外挿値の概略値を求めたり、考えている確率分布をプロットしてそれとの適合状況をみたりすることができる。順序統計の非超過確率を与えるプロットイングポジションには幾つかの提案があり、それらは式(25)でまとめて表すことができる。表-5に一覧を付した。

$$p_i = \frac{i - \alpha}{n - 2\alpha + 1} \quad (25)$$

ここに、 p_i は第*i*番目順序統計の超過確率（非超過確率は $1 - p_i$ ）、 n はサンプルサイズ、 α は提案ごとの定数である。Cunnaneの提案は多くの分布に対してquantile-unbiasedである。

3.7 適合度

当てはめた確率分布がどの程度標本に当てはまっているかを見る指標として、相関係数、SLSC(standardized least square criterion)、最大対数尤度(MLL)、赤池の情報量規準(AIC)などがある。SLSC(宝・高棹, 1988)は適合度の絶対的な判定規準であり、相関係数より規準の持つ意味が明確である。MLLとAICは比較対象の確率分布の中での相対的評価しかできない。なお、相関係数やSLSCはプロットイングポジションの影響を受けるが、MLLおよびAICは受けない。以下にSLSC, MLL, AICについて簡単に紹介する。

SLSCは式(26)で定義される。

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{99} - s_{01}|}, \quad \xi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - s_i^*)^2 \quad (26)$$

ここに、 s_{99} および s_{01} はそれぞれ非超過確率0.99と0.01に対する当該確率分布の標準変量、 n ：標本の大きさ、 s ：順序統計量を推定母数で変換した標準変量ベクトル、 s^* ：確率分布モデルで求めたプロットイングポジションに対応するクォンタイルを推定母数によって変換した標準変量ベクトルである。SLSCは値が小さいほど適合度が良いと判断される。

最大対数尤度は次式で表される。

$$MLL = \sum_{i=1}^n \ln(f(X_i; \hat{\theta})) \quad (27)$$

ここに $f(X_i; \hat{\theta})$ は最尤法により求められた母数ベクトル $\hat{\theta}$ を用いて計算される確率変量 X_i の確率密度である。最大対数尤度は値の大きい方が適合度がよいと判断される。

AICは次式で表される。

$$AIC = 2m - 2MLL \quad (28)$$

ここに、 m は確率分布モデルに含まれる母数の数である。一般に母数の数が増えると分布の適合度はよくなるが、AICは母数の数を考慮していることが他の規準とは異なる特徴である。AICの値が小さいほど適合度がよいと判断される。

3.8 閾値の選定方法：標本平均超過関数

POTにおける閾値の選定方法の一つとして標本平均超過関数(Sample mean excess function)がある。これは指数分布においてある値より大きい部分での平均が一定であるという性質を利用しており次式で表される。

$$e_n(u) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)I(u < x_i)}{\sum_{i=1}^n I(u < x_i)} \quad (29)$$

ここに、 $I(u < x)$ は $u < x$ のとき1で、それ以外の場合0をとる(Reiss & Thomas, 1997)。この指標による判断は、式(29)の値が一定となる上限の i である。すなわち大きい方から i 位までの値を使うことになる。なお、GP分布の平均超過関数は一定勾配である。その設定についてはここでは割愛する。

4. 甚大外力の頻発と歴史上の洪水

4.1 近年の極端豪雨事例

近年、記録を更新する大雨の事例が多い。例えば、2013年台風18号による日吉ダム流域の豪雨は、降り始めの9月15日2時から16日17時までに総雨量345mmであり、従来の記録を更新したものの計画の2日雨量349mmを超えることはなかった(角ら, 2014)。2015年関東・東北豪雨による鬼怒川の基準点石井上流の流域平均3日雨量は、501mmに達し、計画降雨量を上回るとともに既往最大値を80mm超過している(科学研究費補助金報告書, 2017)。2017年九州北部豪雨によるAMeDAS朝倉地点の9時間雨量は、2016年までの最大値の2.8倍の489.5mmであり、2016年までの資料で評価すると1/45百万年となる(図-1)(田中・佐山, 2018)。2018年の西日本豪雨では24, 48および72時間雨量について、それぞれ77, 126および124ヶ所のAMeDAS降水量観測地点で既往最大値を更新している。図-2に48時間降水量と72時間降水量とともに既往最大値を更新した106地点の分布を示す。なお、大災害になったところも多いが、これらの地点は我が国のトップ20の日降水量記録には見られない。また、広島県東部から岡山県西部にかけて見られた2日降水量最大値の200mm未満コンターがこの豪雨で解消していた(田中, 2019)。2019年の東日本台風では、表-6に示すように基準点上流の流域平均雨量が河川整備基本方針の計画降雨量を超えたり、図-3に示すようにAMeDAS箱根の地点雨量だけでなく、相模川水系城山ダム(流域面積1,201km²)上流の流域平均雨量も関東地域の想定最大クラスの降雨量を超えている。図-3に示した地点の内、奥日光、河口湖、秩父、大島では、2019年より大きな記録が残されている。相当な雨が降ったと言われる秩父では継続時間によって1947年のカスリーン台風時の記録と1位と2位が入れ替わっている。(科学研究費補助金報告書, 2020)。

想定最大クラスの降雨量とは、国土交通省が2015年に公表した

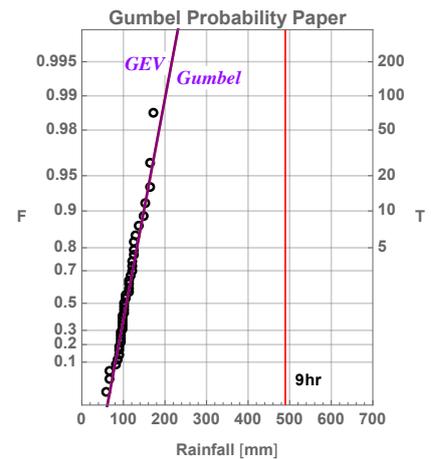


図-1 朝倉の9時間降水量の確率プロットと2017年の極値



図-2 48時間降水量と72時間降水量とともに記録更新した106地点のAMeDAS降水量観測地点の分布

表-6 一級水系の基準点上流の計画降雨継続時間内流域平均雨量の確率評価

水系名	鳴瀬川	鳴瀬川	阿武隈川	阿武隈川	久慈川	那珂川	荒川	多摩川	利根川	利根川	利根川	利根川	信濃川	信濃川
河川名	鳴瀬川	吉田川	阿武隈川	阿武隈川	久慈川	那珂川	荒川	多摩川	利根川	鬼怒川	小貝川	渡良瀬川	信濃川	千曲川
地点名	三本木	落合	福島	岩沼	山方	野口	岩淵	石原	八斗島	石井	黒子	高津戸	小千谷	立ヶ花
降雨継続時間	2d	2d	2d	2d	2d	2d	3d	2d	3d	3d	3d	3d	2d	2d
基準点上流流域面積(km ²)	551	197	3,172	5,265	898	2,181	2,015	1,040	5,108	1,247	583	472	9,719	6,442
観測開始年	1927	1927	1952	1952	1910	1929	1898	1923	1926	1926	1926	1926	1926	1926
基本方針雨量	312	335	256.5	251.6	235	300	548	457	319	361.7	300.7	418.9	186	171
2019年台風19号雨量	298.2	330.8	252.7	274.3	254.6	269	446.2	489.7	308.4	368.2	218.9	310.9	199.2	196.8
変化傾向(mm/10年)	4.1	3.4	8	8.8	2.9	2.9	-0.4	3.6	2.6	2.2	0.8	3.5	1.7	1.7
MK_Z	1.88	1.33	3	2.98	2.35	1.3	0.03	1.05	1.11	0.57	0.91	1.46	1.11	1.08
2018までの資料による2019事象の確率年	GEV	GEV	Gumbel											
2019までの資料による2019事象の確率年	53	84	250	337	151	50	105	218	156	22	20	18	278	109
2019までの資料による2019事象の確率年	GEV	GEV	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	GEV	Gumbel	GEV	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel
2019までの資料による2019事象の確率年	44	65	191	250	132	45	47	181	46	21	18	17	225	94

「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」(国土交通省, 2015)において, 全国を15の地域に分けて, その地域内の既往の観測値の時空間的な最大値をもって設定したもので, 1,2,3,6,12,24,48および72時間の8つの継続時間に対して, 1~約30,000km²の面積についての降雨量がリストアップされており, 表に無い特定の面積や時間については内挿して求めることとされている。

4.2 極値解析の際の注意点

a) 定常性

極値解析に用いるとして3章で紹介した理論は定常な時系列を想定している。気象庁(2021)は, 全国のAMeDAS降水量から, 全国の1時間雨量50mmや80mm以上, 日降水量200mmや400mm以上の年間日数は増加傾向にあり, 信頼水準95%で統計的に有意であると記述している。図-4に關係する図の一部を示した。

前節で紹介した荒川の基準点上流流域平均3日雨量についてAMeDAS観測開始と同じ1976年以降の資料をMann-Kendall Testで見ると, 増加傾向にあり信頼水準95%で統計的に有意であると判断される(図-5)。

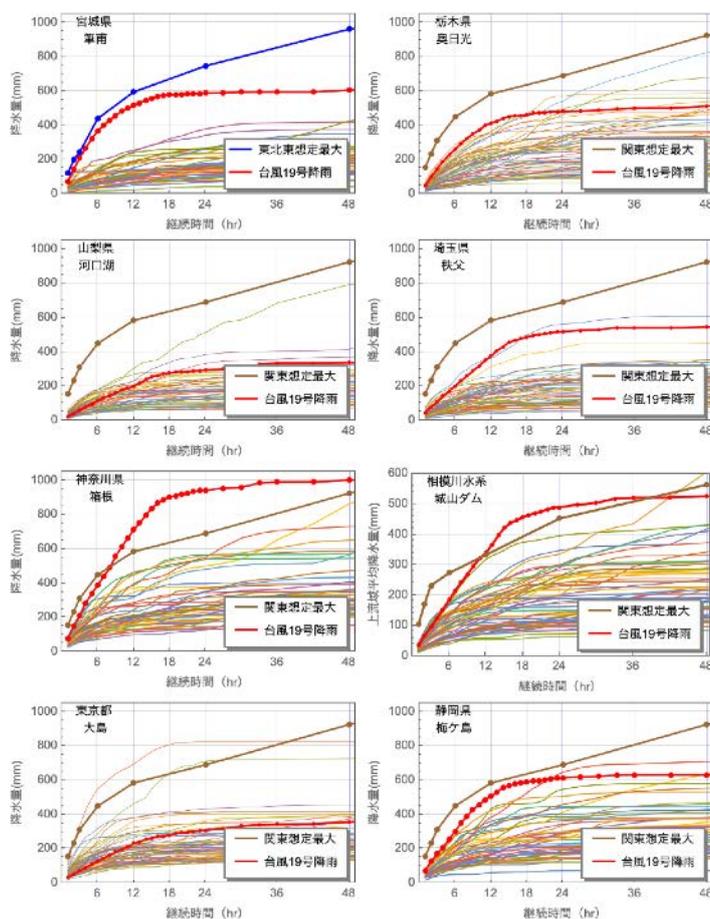


図-3 気象観測地点雨量と城山ダム流域平均雨量の継続時間ごとの年最大値。

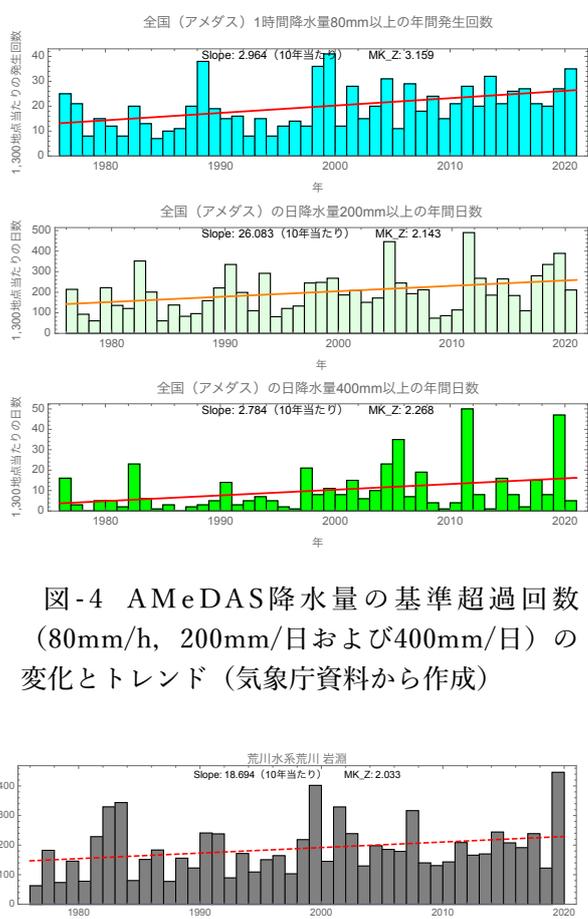


図-4 AMeDAS降水量の基準超過回数(80mm/h, 200mm/日および400mm/日)の変化とトレンド(気象庁資料から作成)

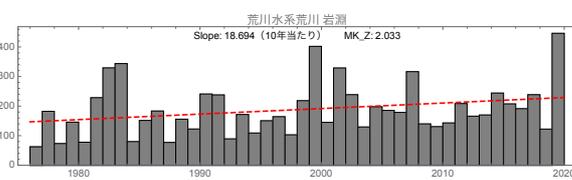


図-5 荒川の基準点岩淵地点上流の流域平均3日雨量の1976年以降時系列とトレンド

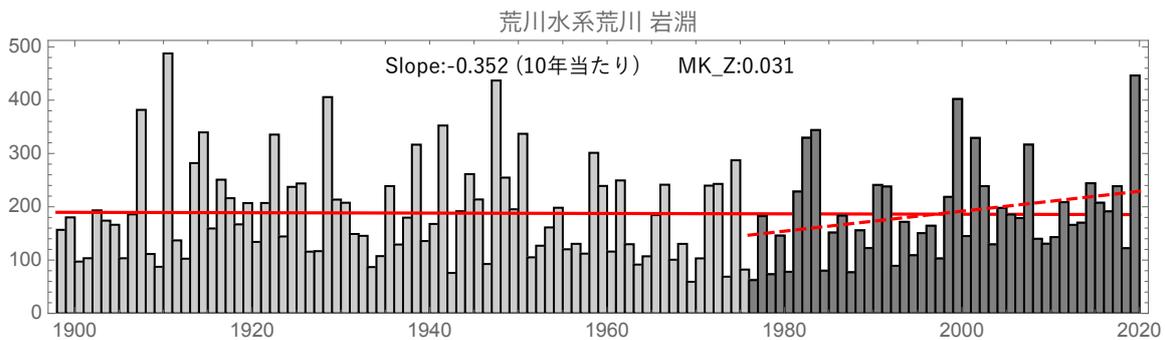


図-6 荒川の基準点岩淵地点上流の流域平均3日雨量の全時系列と1976以降時系列のトレンド比較

一方、荒川の資料は表-6に示したように1898年より蓄積されており、全期間で見るとMK_Zの値が示すようにトレンドは有意ではなく、線形回帰の勾配は僅かに負である。表-6のうち、MK_Zの値が1.96を超えているのは阿武隈川水系の福島と岩沼、それと久慈川水系の山方の3地点である。阿武隈川水系は観測開始1952年と遅く、久慈川水系の山方は1910年の開始である。山方は1952年からの資料で見ても増加傾向は有意であり、線形回帰の勾配は7.6mm/10年とより顕著になる。図-6は、上で示した荒川の全時系列を図-5と重ねて示したものである。1910年から1940年代までは比較的大きな事象が幾つか見られるが、1950年以降は1999年と2019年に大きなものが見られる以外はそれほど大きくない。この場合、既に1898年からの記録を知っているので、荒川流域は長期的に定常な範囲と考えられ、3章で示した方法を使って解析すればいいと判断できる。しかしながら、阿武隈水系の場合はどうであろうか。手持ちの資料から判断すると定常とは言えないし、荒川のようなことが起きていたかもしれないと考えると判断が難しい。当面は、非定常解析を行う根拠が明確でなければ定常解析の手法を適用すべきであろう。

図-7の上図は1900年からの風水害による死者行方不明者100名以上の災害発生年月と犠牲者数を示したものであり、1983年を最後に100名以上が犠牲となった風水害は起きていなかったが、2018年の西日本豪雨と2019年の東日本台風等で再び100名以上が犠牲となった。下図は、上図と横軸を合わせて1940年時点で観測を開始していた気象官署101地点の日降水量資料から作成した閾値超過事象の年ごとの事象数の時系列変化を示したものである。両図から、1950年前後に死者行方不明者が多い災害が集中していることおよび閾値超過資料の11年移動平均は1970年代及び1980年代に底となるような曲線を描いていることがわかる。この傾向は前述のAMeDAS資料から200mm/日の事象数が増えていることとほぼ調和的である。

しかしながら、従来、極値頻度解析は、考えている地点の雨量や流域の平均雨量を対象とすることが一般的であった。図-8は気象官署の東京と名古屋の日雨量の年最大値と70mm超過数とそれらの11年移動平均値をプロットしたものであるが、東京には図-7に見られるような長期変化は似たものが見られるものの名古屋

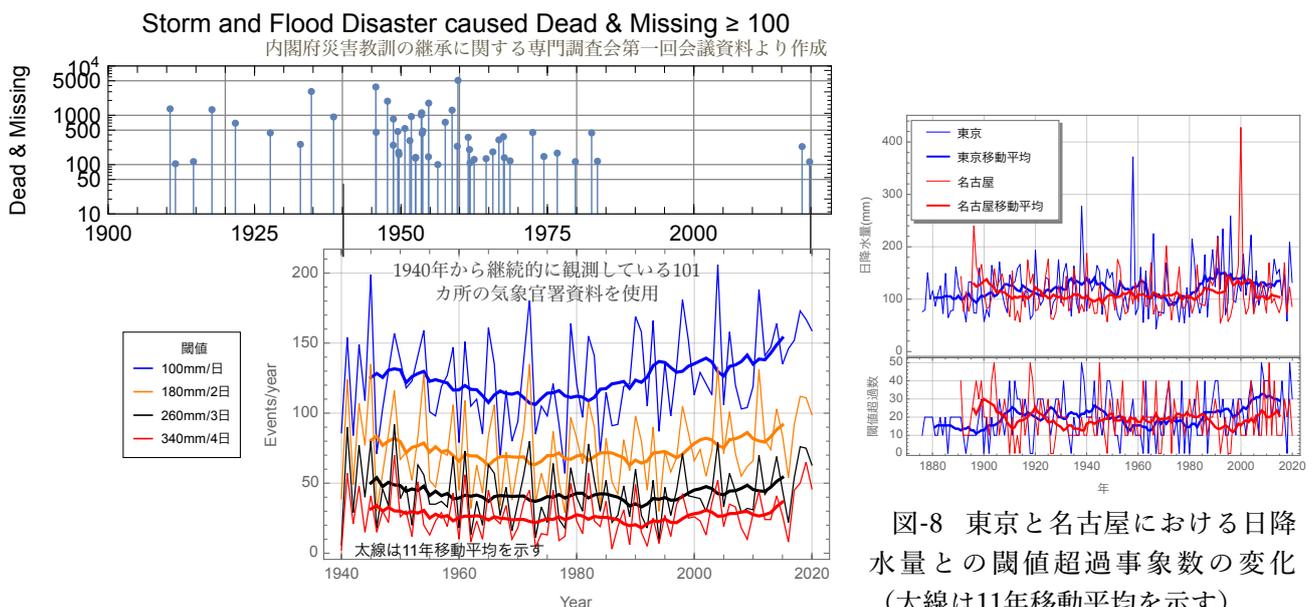


図-8 東京と名古屋における日降水量との閾値超過事象数の変化 (太線は11年移動平均を示す)

図-7 1900年から2020年までの死者行方不明者100名以上の風水害の全時系列と1940年以降の閾値超過資料の事象数の変化

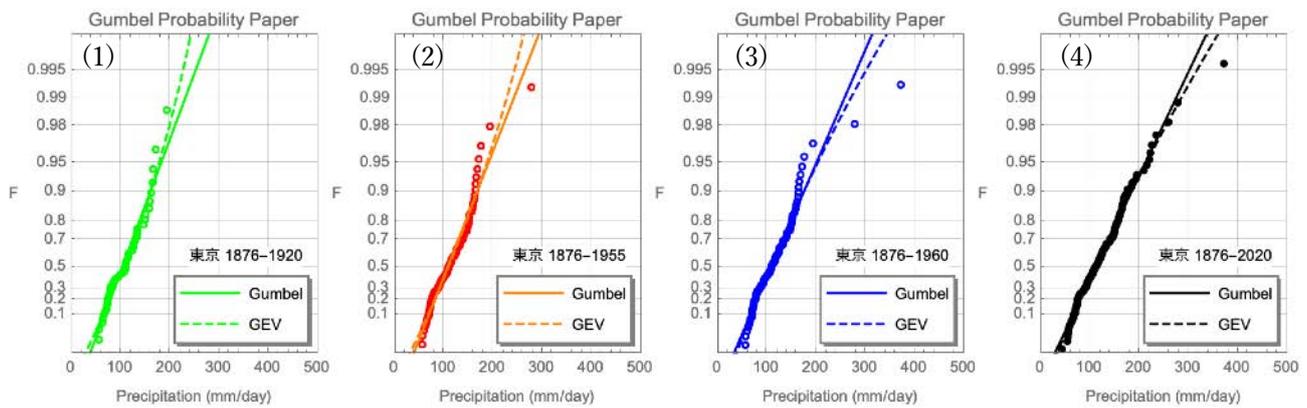


図-9 東京の観測記録の蓄積による確率プロットと確率分布の当てはめの変化
(母数推定にはL積率を使用)

には見られず、少し違ったパターンの変化が見られる。一方、流域平均雨量は広域の降雨が関係するので、強い雨の回数が増えると増加する可能性はある。阿武隈川の観測開始が1952年からであるので、これと同じ期間の年最大値のトレンドを見ると、表-6のうち鳴瀬川、吉田川、久慈川、那珂川については増加傾向が信頼水準95%で統計的に有意であると判断された。このように、現状では地点により全国の平均的な変動と異なる変動が見られ、流域平均雨量の極値についても流域により増加傾向が明確に表れている流域とそうでないものがあり、災害外力となる極値の出現が明確に説明できそうにない。これが説明できるようになれば、それをもって将来の外挿極値の推定に活用できるようになると思われるが、今しばらく資料の蓄積および研究の進捗を待つ必要がある。

b) サンプルサイズと形状母数

ところで、観測が蓄積されると確率水文量はどうなるのであろうか。その結果を河川計画等の目標値の検討に使うことを考えると、観測資料が蓄積されても変動が少ないことが望ましい。東京の降水量は1875年6月から観測されている。図-9はその蓄積につれて確率プロットがどう変わるかを示したものである。図-8の上図に示したように東京の既往最大と2位がそれぞれ1958年と1938年に発生しており、豪雨の経験とともにどう変化するかを見る。左2つはGEVの形状母数が正であり、GEVは上限を有している。ここでは母数をL積率を用いて求めている。

SLSCによる適合度で判定するなら、(2)を除きGEVの方がGumbel分布よりよく適合しているという判断になる。しかし、

(1)は上限393mmを有しており、同地点の既往最大値371.9mmとほぼ同レベルの数字である。近年は日降水量が400mmや500mmを超えるのは珍しくない。サンプルサイズが大きくない場合に、資料の蓄積につれてGEVの形状母数が正から負に変わる事例は少なくない。このため、限られた資料に対して当てはめられた確率分布を適合度のみで選ぶことは時には危険である。周辺の状況や確率プロットを合わせてみて判断するなど慎重な判断が求められる。

従来、我々が極値頻度解析に用いてきた手法は定常性を条件としている。気候変動影響に関する研究が進み、色々なことがわかってきているが、気候変動がどの程度極値に影響しているのか、いつ頃から影響しているのか、将来における影響の時期と程度はどのようになるのかなど不明なところが多く、防災計画の担当者を悩ませている。

c) 歴史洪水

第2章の始めの部分で、明治の状況に触れた。また、図-7では1900年以降の死者行方不明者100名以上の風水害についてもみたが、ちょっと風水害が少ないように感じられたので、表-7に日本災害史事典1868-2009(2010)から1868年から1899年の部分を拾って



図-10 千曲川左岸堤防決壊地点の近くにある妙笑寺の水位票 上から1742年、2019年洪水。それ以外にも1896年、1910年など他地域でも災害になっているものが少なくない

みた。1885年の大阪に関する記述は大洪水の割には死者73名（淀川百年史78名）で、1896年の344名（淀川百年史359名）よりはるかに少ない。洪水の形態が現代のものと異なることが原因していると思われる。この意味では、洪水の原因や形態がいつ頃から変化しているのかを把握した上で、図-7のリストアップをしなければ正しい理解ができない可能性がある。

2019年東日本台風による豪雨は、千曲川左岸で破堤、寛保2年（1742）の「戌の満水」に次ぐ洪水となった（図-10）。日本歴史災害事典(2012)から江戸の三大洪水と言われるものを見ると寛保2年洪水、天明6年洪水（1786）と弘化3年洪水（1846）とある。一方、淀川の方は江戸期の洪水として享和2年洪水（1802）の記述が淀川百年史にある。その洪水の絵図の研究（木谷,2015）なども行われている。興味深いのは、これらの大災害の記述の中に複数の原因（前線や台風）が影響しているものや影響範囲が広いものが少なくないことである。木下(2004)は西暦550年頃から1870年頃までの災害を整理した「日本災異史」をもとに、洪水発生頻度には300年毎にピークが現れ、このまま行けば2041年からの50年が洪水発生のピークとなると述べている。気候変動が、時期、頻度、規模など洪水の態様にどの程度影響するのかを明らかにする必要もあるが、残された時間が短いので、対策の実行中に計画を柔軟に変えられるよう仕組んでおくことも重要であろう。

d) 全国のn時間降水量の既往最大値

水文頻度解析には、対象地点あるいは地域の極値資料は必要不可欠であるが、対象資料の解析ばかりに目を奪われないよう留意すべきである。解析対象期間の資料の偶然の組み合わせから、GEVの形状母数が正になるような結果が得られることがある。前述したように資料の蓄積により、形状母数の符号も変わる可能性がある。対象地域の周辺の状態もよく調べてみる必要がある。2018年西日本豪雨の時の状況を見ると広い範囲が大きな豪雨の経験がなかったようなので、周辺を見るだけでは足りないかもしれない。参考までに、全国の1~96時間の豪雨記録を整理してみたので表-8に紹介する。

5. おわりに

1997年に河川法が改正され、新しい計画制度がスタートした。河川法には、河川整備基本方針により水系ごとに総合的管理が確保できるよう計画高水流量その他当該河川の整備についての基本となるべき方針を定めておかなければならないと規定されており、河川法施行令には、河川整備基本方針に定める河川の整備の基本となるべき事項として、基本高水並びにその河道及び洪水調節ダムへの配分、主要な地点における計画高水流量および計画高水位及び計画横断形に係る川幅に関する事項が挙げられている。具体的な整備につい

表-7 1868年から1899年の風水害

西暦	時期	死者行方不明者	説明
1868	6.28	943	中部、近畿地方、岩手・新潟方面で水害、淀川の堤防が決壊、新潟平野も大洪水
1870	10.12	669	四国以東東北地方南部にかけて暴風雨あり、特に、紀の川が大洪水
1871	7.4	751	近畿、中国、四国、北陸で風水害があった。大阪湾で高潮が発生
1884	8.25	1992	明治年間で最大級の台風が九州西岸、中国西部、日本海、秋田南部、三陸沖へ、被害は北海道と関東、東海を除く全国
	9.15	530	東海、関東地方に被害甚大。荒川、隅田川が氾濫
1885	6.15	73	大阪は梅雨前線の通過による豪雨に見舞われた。淀川本流、支流ともに急激に水高が増し、17日23時ごろ北河内郡平方町・東成郡の堤防が相次いで決壊、沿岸災害の110数か村落が水に浸かり、西区一帯が泥海と化した。18日には水はさらに溢れ出し、寝屋川堤防を撃破する勢いだったため、東成郡野田村の堤防を切開して淀川に放流した。28日午後から再び強風と豪雨、7月2日から3日にかけて、天満、天神、難波の三代橋などの橋梁が落ちた。市内内ほとんどが浸水。
			890
1889	8.19	1496	十津川大水害 大規模崩壊地1107ヶ所、閉塞で発生した新湖53ヶ所が決壊。
	9.11	1108	近畿、中部、関東、東北地方などで風水害（淀川の死者の記録なし（淀川百年史））
1893	7.23	74	岡山で暴風雨、洪水の被害。旭川、吉井川、足守川が氾濫。
	7.14	423	岡山で暴風雨、水害後に赤痢が大発生。
	8.21	81	岐阜の八幡などで大雨。山崩れ18000ヶ所、土石流で住宅崩壊など。
	10.13	1719	西日本で風水害、台風。豊後水道から四国沖へ抜けた。
1895	7.24	299	九州、中国地方および関東南部で台風襲来により被害甚大
	7.8-26	48	信濃川 横田切れ
	7.21	48	長野 千曲川、犀川、聖川で大洪水
	8月30	137	中部、近畿、四国で風水害（台風）
1896	9.6-	344	9月6日台風が紀伊半島を縦断、日本海から、秋田県、太平洋にぬけ、四国、近畿、関東に大被害。11日に別の台風が鹿児島県大隅半島、四国沖、紀伊半島、佐渡に達した。2つの台風で全国的に大規模な洪水が発生。吉野川、琵琶湖、天竜川、藤川が増水。東京では江戸川、庄内古河、中川、綾瀬川が破堤氾濫、江東地区が全面浸水。浸水は10日余り
			175
1897	7月	424	中部以東日本で風水害、台風。石狩川など多数の河川が氾濫。北海道耕地1/5以上が浸水。移住者1万名以上が引き上げた。
1898	9.6	1161	足摺岬付近に上陸。四国を斜めに横切り、別子銅山を直撃
1899	8.28		

表-8 AMeDAS降水量の全国既往最大値(1976-2019)

継続時間 h	継続時間 内降水量 mm	降雨 強度 mm/h	発生年	観測所	発生年	観測所	継続時間 h	継続時間 内降水量 mm	降雨 強度 mm/h	発生年	観測所
1	153.0	153.0	1982	長浦岳 長崎県	1999	香取 千葉県	20	967.0	48.4	1998	繁藤 高知県
2	271.0	135.5	1982	長浦岳 長崎県			21	973.0	46.3	1998	繁藤 高知県
3	338.0	112.7	1983	登別 胆振地方			22	975.0	44.3	1998	繁藤 高知県
4	426.0	106.5	2013	大島 東京都			23	977.0	42.5	1998	繁藤 高知県
5	495.5	99.1	2013	大島 東京都			24	979.0	40.8	1998	繁藤 高知県
6	549.5	91.6	2013	大島 東京都			27	996.0	36.9	2005	神門 宮崎県
7	579.0	82.7	2013	大島 東京都			30	1053.0	35.1	2005	神門 宮崎県
8	608.0	76.0	2013	大島 東京都			33	1125.5	34.1	2011	宮川 三重県
9	636.0	70.7	2013	大島 東京都			36	1182.0	32.8	2011	宮川 三重県
10	658.0	65.8	2013	大島 東京都			42	1292.0	30.8	2011	宮川 三重県
11	673.0	61.2	1998	高知 高知県	2013	大島 東京都	48	1346.0	28.0	2011	宮川 三重県
12	711.0	59.3	2019	箱根 神奈川県			54	1466.0	27.1	2011	上北山 奈良県
13	750.5	57.7	2019	箱根 神奈川県			60	1524.5	25.4	2011	上北山 奈良県
14	795.5	56.8	2019	箱根 神奈川県			66	1593.5	24.1	2011	上北山 奈良県
15	835.5	55.7	2019	箱根 神奈川県			72	1650.5	22.9	2011	上北山 奈良県
16	867.5	54.2	2019	箱根 神奈川県			78	1695.0	21.7	2011	上北山 奈良県
17	885.5	52.1	2019	箱根 神奈川県			84	1741.0	20.7	2011	上北山 奈良県
18	908.0	50.4	1998	繁藤 高知県			90	1763.5	19.6	2011	上北山 奈良県
19	954.0	50.2	1998	繁藤 高知県			96	1783.5	18.6	2011	上北山 奈良県

ては、これに基づいて段階的整備の計画を河川整備計画に定めることとなっている。すなわち、洪水対策の基本的部分は河川整備基本方針に定めることになっている。しかしながら、河川整備基本方針には時間的な記述が見られない。再現期間100年～200年の事象を対象として治水対策を進めてきているが、その外力が、気候変動の影響を受けている。目標とするのが今世紀中頃なのか末なのかあるいは次世紀なのか、それによって想定すべきものが変わってくる。

前世紀末に宝（1998）は「水文頻度解析の進歩と将来展望」と題して、気候変動を含め多様な視点から展望を記している。それから20年余が経過し、観測資料は着実に増えてきた。宝が指摘した点がどのように進化してきたのかを評価することも重要である。

謝辞

本稿を書く際に、国土交通省より、2019年東日本台風の影響を大きく受けた一級水系の観測資料を提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Greenwood, J.A., J.M. Landwehr, N.C. Matalas and J.R. Wallis: Probability Weighted Moments —Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form, *Water Resources Research*, Vol. 15, No.5, pp.1049-1054, 1979.
- Gumbel, E. J., 河田龍夫, 岩井重久, 加瀬滋男監訳: グンベル 極値統計学, 生産技術センター新社, p.404, 1963.
- Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis: *Regional Frequency Analysis –An Approach Based on L-Moments–*, Cambridge Univ. Press., p.207, 1997.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Reiss, R.-D. and M. Thomas: *Statistical Analysis of Extreme Values*, Birkhäuser, p.316, 1997.
- Stedinger, J.R., R.M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou: *Frequency Analysis of Extreme Events*, Chap. 18, *Handbook of Hydrology*, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp.18.1-18.66, 1993.
- 岩井重久: 水文学における非対称分布に就いて, *土木学会論文集*, 第1, 2号合併号, pp.93-116, 1947.
- 岩井重久, 石黒政儀: *応用水文統計学*, 森北出版, p.370, 1970.
- 大町利勝: *THE RIVER LAW WITH COMMENTARY BY ARTICLE –Legal Framework for River and Water Resources Management in Japan–*, IDI Water Series No. 4, Infrastructure Development Institute, 1999.
- 科学研究費補助金特別促進費, 平成27年9月関東・東北豪雨による災害の総合研究報告書, 研究代表者: 田中茂信, p.302, 2017.
- 科学研究費補助金特別促進費, 令和元年台風19号および台風21号による広域災害に関する総合研究所報告書, 研究代表者: 二瓶泰雄, p. 295, 2020.
- 角屋 睦: 計画洪水量に関する順序統計学的考察, *農業土木研究*, 第21巻, 第3号, pp.188-195, 1953.
- 角屋 睦: 雨量分布とその年最大値の分布, *京大防災研究所年報*, 第4号, pp.122-131, 1961.
- 角屋 睦: 水文統計論, *水工学シリーズ*, 土木学会水理委員会, 64-02, p.59, 1964.
- 気候変動に適應した治水対策検討小委員会: 第1回小委員会資料, 資料3, 2007.
- 気象庁: 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html, 2021.7.07閲覧
- 木谷 幹一: 享和2(1802)年の淀川点野切れについて—とくに「享和二年七月淀川洪水絵図」の制作時期と水害の長期化について—, *京都歴史災害研究*, 第16号, pp.1-9, 2015.

- 木下武雄：自然災害研究のための利用可能データ，統計数理，Vol.52，No.1，pp.5-24，2004.
- 建設省河川局編纂：建設省河川砂防技術基準，1958.
- 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準（案），調査編，1976.
- 建設省河川局監修：改訂建設省河川砂防技術基準（案），調査編，1977.
- 建設省河川局監修：二訂建設省河川砂防技術基準（案），調査編，1986.
- 建設省河川局監修：改訂新版河川砂防技術基準（案）同解説，調査編，1997.
- 国土交通省：河川工事年表，https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/rekishibunka/kasengijutsu16.html，2021.7.07閲覧
- 角哲也・田中茂信・本間基寛：京都・滋賀における2013年台風18号の豪雨の特徴と桂川流域被害調査，京都大学防災研究所年報，第57号 A，pp.1-16,2014.
- 篠原無然：自治格言歴，1915.
- 高橋倫也，志村隆彰：極値統計学，ISMシリーズ：進化する統計数理5，近代科学社，p.259，2016.
- 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規準，土木学会論文集，第393号/II-9，pp.151-160，1988.
- 宝 馨：水文頻度解析の進歩と将来展望，水文・水資源学会誌，Vol.11，No.7，pp.740-756. 1998
- 竹内邦良，土屋一仁：正規分布，対数正規分布およびピアソンIII型分布のPWM解，土木学会論文集，第393号/II-9，pp.95-101，1988.
- 田中茂信，宝 馨：洪水頻度解析におけるAMSとPDSの比較，水工学論文集，第45巻，土木学会水理委員会，pp.205-210，2001.
- 田中茂信：ハリケーン「カトリナ」による高潮被害について，year's 防災，No.118，2007.
- 田中茂信，佐山敬洋：降雨の極値統計と流出・氾濫現象の現地調査及びモデリング，2017年九州北部豪雨災害調査報告書，京都大学防災研究所，pp.72-79，2018
- 田中茂信：極値統計解析，平成30年7月豪雨災害調査報告書，京都大学防災研究所，pp.73-77，2019
- 寺田寅彦：小爆発二件，寺田寅彦随筆集，第五巻，岩波文庫，岩波書店，1948.
- 中谷宇吉郎：天災は忘れた頃来る，中谷宇吉郎随筆集，岩波文庫，岩波書店，1988.
- 中安米蔵：治水計画における洪水流量について—千代川を中心として—，p.145，1950.
- 日本災害史事典1868-2009，日外アソシエーツ株式会社，p.665，2010
- 北原糸子，松浦律子，木村玲欧：日本歴史災害事典，吉川弘文館，p.838，2012.
- 星 清：水文頻度解析，水文・水資源ハンドブック，水文・水資源学会編，朝倉書店，pp.238-248，1997.
- 星 清：水文統計解析，開発土木研究所月報，No.540，pp.31-63，1998.
- 北海道の治水技術研究会：石狩川治水の曙光—岡崎文吉の足跡—，北海道開発局，p.261，1990.
- 松浦茂樹：治水長期計画の策定の経緯とその基本的考え方の変遷，第6回日本土木子研究発表会論文集，pp.147-155，1986.
- 松浦茂樹：国土づくりの礎 川が語る日本の歴史，鹿島出版会，p.216，1997.
- 松浦茂樹：戦前の国土整備政策 日本経済評論社，p.353，2000.
- 山本晃一：河道計画の技術史，山海堂，p.658，1999.
- 山本三郎：河川工学，朝倉書店，p.518，1958.
- 山本三郎：河川法全面改正に至る近代河川事業に関する歴史的研究，（財）国土開発技術研究センター，p.461，1993.
- 淀川百年史編集委員会：淀川百年史，建設省近畿地方建設局，1974.
- 米田正文：淀川計画高水論，近畿地方建設局，p.161，1952