

水工学シリーズ 12-A-5

河川計画立案手法の現状と今後の展望

国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課

泊 宏

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2012年8月

河川計画立案手法の現状と今後の展望

Status and Perspectives of River Planning Scheme

泊 宏

Hiroshi TOMARI

1. はじめに

河川行政においては、平成9年に河川法が改正され、その後、109の全ての一級水系で河川整備基本方針が策定されてきており、現在は、二級水系の河川整備基本方針の策定、一級や二級河川の河川整備計画の策定が進められているところである。河川計画等に関する基本的な事項については、河川砂防技術基準同解説計画編¹⁾に示されている。本稿は、一級水系の河川整備基本方針策定の積み重ね等を踏まえ、基本高水のピーク流量の設定を中心に、河川計画立案手法の現状等について整理して示す。河川砂防技術基準同解説計画編を補完するものとしてご覧いただければ幸いである。なお、平成24年6月に、河川砂防技術基準調査編が改定された²⁾。河川計画を立案する上で、河道の特性を総体的に理解する枠組みや水文統計解析は極めて重要であるが、これらについては改定された河川砂防技術基準調査編を参照されたい。また、本稿第4章において、流出解析の概要を述べるが、流出解析についても、詳しくは改定された河川砂防技術基準調査編を参照されたい。

本稿では、まず、第2章において、制度面及び手法面から、河川計画の変遷について概観する。制度面に関しては、これまでの法改正の経緯等を述べた上で、河川整備基本方針と河川整備計画からなる現行の河川整備の計画制度の概要を述べる。また、手法面に関しては、戦前から戦後にかけて、既往最大主義から確率主義の導入やそれに寄与した技術の進展等について述べる。第3章では、河川計画を取り巻く最近の動向として、ダム事業の検証、利根川の基本高水の検証、河川津波対策について概要を述べる。

次に、第4章では、流出解析の概要について述べる。第5章では、一級水系の河川整備基本方針検討時等における具体例を示しつつ、基本高水のピーク流量の設定手法について述べる。さらに第6章では、河川計画立案手法の補論として、検討対象降雨の継続時間、対象洪水の選定、引き伸ばし後の降雨が偏る場合の取り扱いについて述べる。

第7章においては、二級水系における流出解析、基本高水のピーク流量の設定、引き伸ばし降雨波形の棄却の現状について述べる。

最後に第8章で、河川計画の今後の展望について述べる。

2. 河川計画の変遷

2.1 制度の変遷

明治29年に旧河川法が制定され、我が国で最初の近代的な公物管理制度として、河川管理についての体系的な法制度が確立された。昭和39年に新河川法が制定され、水系一貫管理制度の導入など、治水、利水の体

系的な制度の整備が図られた。この新河川法において、河川管理者は水系ごとに工事实施基本計画を定め、おこななければならない旨が規定され、水系を一貫して計画的な整備を行うこととなった。

平成9年の河川法改正において、目的規定への「河川環境の整備と保全」の追加等と併せ、新しい河川整備の計画制度が導入され、それまでの工事实施基本計画を河川整備基本方針と河川整備計画に区分した。河川の整備は将来的に達成すべき目標を定め、これに基づいて行われるが、河川の整備には多大な予算と時間を要することから、水系間や河川間等のバランスを図りながら、中期的な整備目標を定めて段階的に整備を行うことが一般的である。

河川整備基本方針は、河川整備の基本となるべき方針に関する事項を定めるものであり、治水安全度の全国バランス等を考慮しつつ、長期的な観点に立って定める河川整備の最終目標である。水系全体を見渡して定める必要のある事項として、基本高水、その洪水調節施設と河道への配分、主要地点の計画高水流量、計画高水位、計画横断形に係る川幅、流水の正常な機能を維持するため必要な流量等に関する事項を定めることとしている。一級河川において、河川整備基本方針は、河川管理者である国土交通大臣が社会資本整備審議会の意見を聴いて定める。

河川整備計画は、長期的な目標を定める河川整備基本方針に沿って、中期的な具体的な整備の内容を示すものであり、計画対象期間はおおよそ計画策定時から20～30年間程度を一つの目安としている。いわゆる直轄河川において、河川整備計画の作成に関する国土交通大臣の権限は、地方整備局長及び北海道開発局長に委任されている。地域の意向を十分に反映するための手続として、学識経験者の意見聴取、関係住民の意見を反映させるために必要な措置、地方公共団体の長の意見聴取が定められている。学識経験者への意見の聴き方としては、個別に意見を聴く、〇〇川検討委員会といった委員会を設けて意見を聴くなど、地域の実情に応じた対応が可能である。「関係住民の意見を反映させるために必要な措置」とは、公聴会のほか、説明会の開催、公告・縦覧・意見書の提出、説明書の配布、インターネット等が考えられ、いずれによるかは、河川管理者が当該河川整備計画の内容や地域の状況等を踏まえて適宜判断すべきものである。学識経験者の意見聴取と住民の意見反映措置とは、河川法第16条の2第3項、同第4項の順番になっているが、地域の実情に応じて、この逆でもいいし、また、同時進行で行ってもよい。

一級水系において、河川整備基本方針が109のすべての水系で平成21年3月までに定められ、河川整備計画が71水系で定められている（平成24年7月9日現在）。また、二級水系においては、河川整備基本方針が460水系、河川整備計画が339水系で定められている（平成24年2月6日時点）。

2.2 立案手法の変遷

戦前において、計画の対象とする流量は、原則として、既往最大洪水によってその規模を決定していた。昭和20年代後半頃から計画手法の見直しが行われた。それまでの既往最大洪水では、既往最大を超える洪水が発生しそのたびに計画を見直したことで、過去の記録の年数に関係のないただ1回の偶然的な洪水に支配されること、普遍的な統一した尺度で表すことができないこと等から、計画の対象とする流量を年超過確率で表し、全国の河川の間でバランスを採ろうという考え方を検討した。

昭和29年には淀川水系改修基本計画³⁾が年超過確率を「1/100」とした上で策定されるとともに、昭和33年に策定された建設省河川砂防技術基準⁴⁾において「計画対象地域の重要度に応じて年超過確率を考慮する」という概念が導入された。

その後、全国の多くの河川で年超過確率を用いて検討され、工事实施基本計画の策定や改定が行われるようになった。このことが可能となったのは、水文資料の蓄積や水文統計解析、流出解析などの水文学の発展とその周辺技術として電子計算機の登場、発展が寄与したと考えられる。

3. 河川計画をめぐる最近の動向

3.1 ダム事業の検証

平成 22 年 9 月に、全国の 83 のダム事業（84 施設）を対象として、国土交通大臣から検討主体（関係地方整備局等、水資源機構、関係道府県）に対し、ダム事業の検証に係る検討を行うよう、指示又は要請を行った。これは、平成 21 年 12 月に「今後の治水対策のあり方に関する有識者会議」を発足し、12 回にわたる討議を経て「中間とりまとめ」⁵⁾が示され、これに沿って、指示又は要請を行ったものである。あわせて、検討の手順や手法を定めた「ダム事業の検証に係る検討に関する再評価実施要領細目」⁶⁾を通知した。

ダム事業の検証は、事業の再評価の枠組みを活用するとともに、河川法第 16 条の 2（河川整備計画）等に基づいて関係者の意見を聴く過程を組み込んでいる。また、同細目において、幅広い治水対策案を検討し、様々な評価軸による評価を行うこと、治水対策案の一つは、検証対象ダムを含む案とし、その他に、検証対象ダムを含まない方法による治水対策案を必ず作成すること、検証対象ダムを含む案は、河川整備計画が策定されている水系においては、河川整備計画を基本とすること、治水対策案は、河川整備計画において想定している目標と同程度の目標を達成することを基本として立案すること等が定められている。

検討主体から検討結果の報告を受けた後、国土交通大臣は、本中間とりまとめで示す個別ダム検証に当たっての共通的な考え方に沿って検討されたかどうかについて当有識者会議の意見を聴き、国土交通省の対応方針を決定し、公表していくこととしている。これまでに、32 のダム事業について国土交通省の対応方針（「継続」が 22 事業、「中止」が 10 事業）を公表してきている（平成 24 年 7 月 9 日現在）。

3.2 利根川の基本高水の検証

利根川水系においては、平成 17 年度の河川整備基本方針策定時に飽和雨量などの定数に関して十分な検証が行われていなかったこと等から、データを点検した上で、現行の流出計算モデルの問題点を整理し、蓄積されてきたデータや知見を踏まえて新たな流出計算モデルを構築し、これを用いた基本高水の検証を行うこととした。これらは国土交通省が自ら行うものであるが、学術的な評価を日本学術会議に平成 23 年 1 月に依頼した⁷⁾。

日本学術会議では、土木工学・建築学委員会に設置されていた河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会において審議することとし、平成 23 年 1 月から 6 月まで、合計 11 回の分科会が開催され、9 月に同会議から回答が示された⁸⁾。国土交通省が行った利根川の基本高水の検証については、日本学術会議の分科会に提示した主な資料を再構成して「利根川の基本高水の検証について」⁹⁾としてとりまとめ、公表してきている。

3.3 河川津波対策

平成 23 年 3 月 11 日、三陸沖を震源とするマグニチュード 9.0 の「東北地方太平洋沖地震」が発生した。その際、河川を遡上し、又は流下した津波は沿川地域に甚大な被害をもたらした。河川津波対策に関しては、沿岸域における津波防災を考える上で、海岸での防御と一体となった河川津波への対策が重要であることから、河川津波対策検討会により検討がなされ、今後の河川津波対策が円滑に進むよう、対策の考え方が緊急的にとりまとめられた¹⁰⁾。その結果を踏まえ、国土交通省水管理・国土保全局河川計画課長・治水課長から地方整備局河川部長等あてに当面の河川津波対策について通知した¹¹⁾。この通知では、河川管理においては、基本的に次の二つのレベルの津波を想定することが示されている。一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で設定する津波であり、津波堆積物調査や地殻変動の観測等をもとにして設定され、発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす「最大クラスの津波」であり、もう一つは、津

波による堤内地の浸水を防ぐ河川管理施設等の整備を行う上で想定する津波であり、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす「施設計画上の津波」である。また本通知には、その施設計画上の津波により、堤防の高さの設定や河川構造物の構造の検討を行う際の手法等が示されている。

4. 流出解析

河川計画を立案する上では、どのような流出計算モデルを選定するかが重要である。現状で、一級河川では、貯留関数法を用いている河川が多いが、流域の特性等に応じて、準線形貯留型モデル、タンクモデル等を用いている河川もある。

貯留関数法は流域ないし河道をひとつの貯水池と考え、貯留量と流出量の関係（貯留関数）を運動方程式とし、これを連続方程式と組み合わせて、流出量を追跡する方法である。我が国では、1961年木村によって提案された、浸透域と流出域に分割し流出計算を行う貯留関数法^{12), 13)}が広く利用されている。また、浸透域と流出域に分割せず有効降雨を設定して流出計算を行う貯留関数法も用いられている。最近では、利根川において、貯留関数法を用いて新たな流出計算モデルを構築している例がある⁹⁾。

次に、木村の貯留関数法の基礎式を示す。

貯留関数法の流域の貯留関数及び連続方程式は、それぞれ下式で表される。

$$s_\ell = kq_\ell^P \quad (\text{式 1})$$

$$\frac{ds_\ell}{dt} = r_{ave} - q_\ell \quad (\text{式 2})$$

ここで、 s_ℓ ：みかけの流域貯留高(mm)、 q_ℓ ：遅滞時間を考慮した流域からの直接流出高(mm/h)、 r_{ave} ：流域平均降雨強度(mm/h)、 k, p ：流域による定数を表す。

河道区間の貯留関数及び連続方程式は、それぞれ下式で表される。

$$S_\ell = KQ_\ell^P - T_\ell Q_\ell \quad \text{又は} \quad S_\ell = KQ_\ell^P \quad (\text{式 3})$$

$$\frac{dS_\ell}{dt} = \sum_{j=1}^n f_j I_j - Q_\ell \quad (\text{式 4})$$

ここで、 S_ℓ ：みかけの河道貯留量(m^3/s)h)、 Q_ℓ ：遅滞時間を考慮した河道区間下流端流量(m^3/s)、 T_ℓ ：遅滞時間(h)、 I_j ：流入量群(m^3/s)、流域、支川等から対象河道区間に流入する量又は河道区間上流端流量
 K, P ：河道による定数、 f_j ：流入係数である。

木村の貯留関数法では、流出率 f は降雨量 r_{ave} に係る係数ではなく、流域面積 A に係る係数であると考えられる。すなわち、降雨初期には $f=f_1$ (1次流出率という) として $f_1 A$ の面積(流出域という)だけで流出が発生するとし、累加雨量が R_{sm} (飽和雨量)を超えると $f=1$ (飽和流出率) となって残りの $(1-f_1)A$ の部分(浸透域)からも流出が発生すると考える。ただし、流出域と浸透域とは洪水の終わりまで別個に流出計算を行うものとし、流出域からの流出量と浸透域からの流出量の和に基底流量を加えた値をもって流域流出量とする。流域からの計算流出量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ は基底流量を加えて次の式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{3.6} f_1 A q_1 + \frac{1}{3.6} (1-f_1) A q_{sa,1} + Q_i \quad (\text{式 5})$$

ここで、 f_1 ：1次流出率、 A ：流域面積(km^2)、 q_1 ：全降雨による流出高(mm/h)、 $q_{sa,1}$ ：飽和点以後の降雨によ

る流出高(mm/h)、 Q_i ：基底流量(m^3/s)である。

また、浸透域と流出域に分割せず有効降雨を設定する貯留関数法の基礎式を示す¹⁴⁾。

流域の貯留関数は(式1)と同じ式である一方、流域の連続方程式は下式となる。

$$\frac{ds_\ell}{dt} = r_e - q_\ell \quad (\text{式 6})$$

ここで、 s_ℓ ：みかけの流域貯留高(mm)、 r_e ：流域平均有効降雨強度 (mm/h)、 q_ℓ ：遅滞時間を考慮した流域からの直接流出高(mm/h)である。

有効降雨の算出はいかなる手法の適用も可能であるが、木村の貯留関数法における一次流出率と飽和雨量の考え方を踏襲し、累加雨量が R_{sa} (mm)に達するまでは流出率を f_i として、それを超えると流出率は1として、 r_e を算出する計算方法をとる場合が多い。流域からの計算流出量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ は基底流量を加えて次の式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{3.6} Aq + Q_i \quad (\text{式 7})$$

ここで、 q ：計算流出高 (mm/h)、 Q_i ：基底流量 (m^3/s)である。

流出解析は、河川計画のほか、実時間での河川流量の予測、流域や気候の変化に伴う水循環の変化の予測等の目的で行われている。流出計算モデルは、洪水流出解析の目的や必要とされる水文資料の有無等に応じて、適切なモデルを選定し、必要に応じて改良を加えることが重要である。流出計算モデルの種類と特徴、流出計算の手順等は、改定された河川砂防技術基準調査編を参照されたい²⁾。

5. 基本高水のピーク流量

5.1 計画規模

計画の規模は、河川の重要度を重視するとともに、既往洪水による被害の実態、経済効果等を総合的に考慮して定める。計画の規模は計画対象地域の洪水に対する安全の度合いを表すものであり、それぞれの河川の重要度に応じて上下流、本支川でバランスが保持され、かつ全国的に均衡が保たれることが望ましい。この河川の重要度は、洪水防御計画の目的に応じて流域の大きさ、その対象となる地域の社会的経済的重要性、想定される被害の量と質、過去の災害の履歴などの要素を考慮して定めるものである。参考に全国の一級水系の想定氾濫区域内人口、同資産、流域面積と計画規模を図1に示す。

5.2 既定計画策定後の状況

既定計画の策定以降、計画を変更するような大きな洪水が発生しているかどうかについて、年最大雨量及び年最大流量の経年変化を整理する。

整理した例を図2に示す。この例では、流量観測開始前の大きな洪水も評価を行うため、流域内の日雨量観測が比較的充実してきた期間(昭和18年～)の日雨量や、その日雨量を用いて推定した流量も用いている。ここで、年最大流量の計算条件については、①昭和18～29年は流域内観測所の日雨量データを、近傍の時間雨量が存在する流域外観測所の時間雨量を用いて降雨波形を作成し、流出計算を実施、②昭和30～43年は流域内観測所の時間雨量データが充実したことにより、これを用いて降雨波形を作成し、流出計算を実施、③昭和44～平成17年は基準地点の流量観測が実施されたことにより、基準地点の実績流量に、流出計算で求めた既設ダムの効果量を加え、算出している。

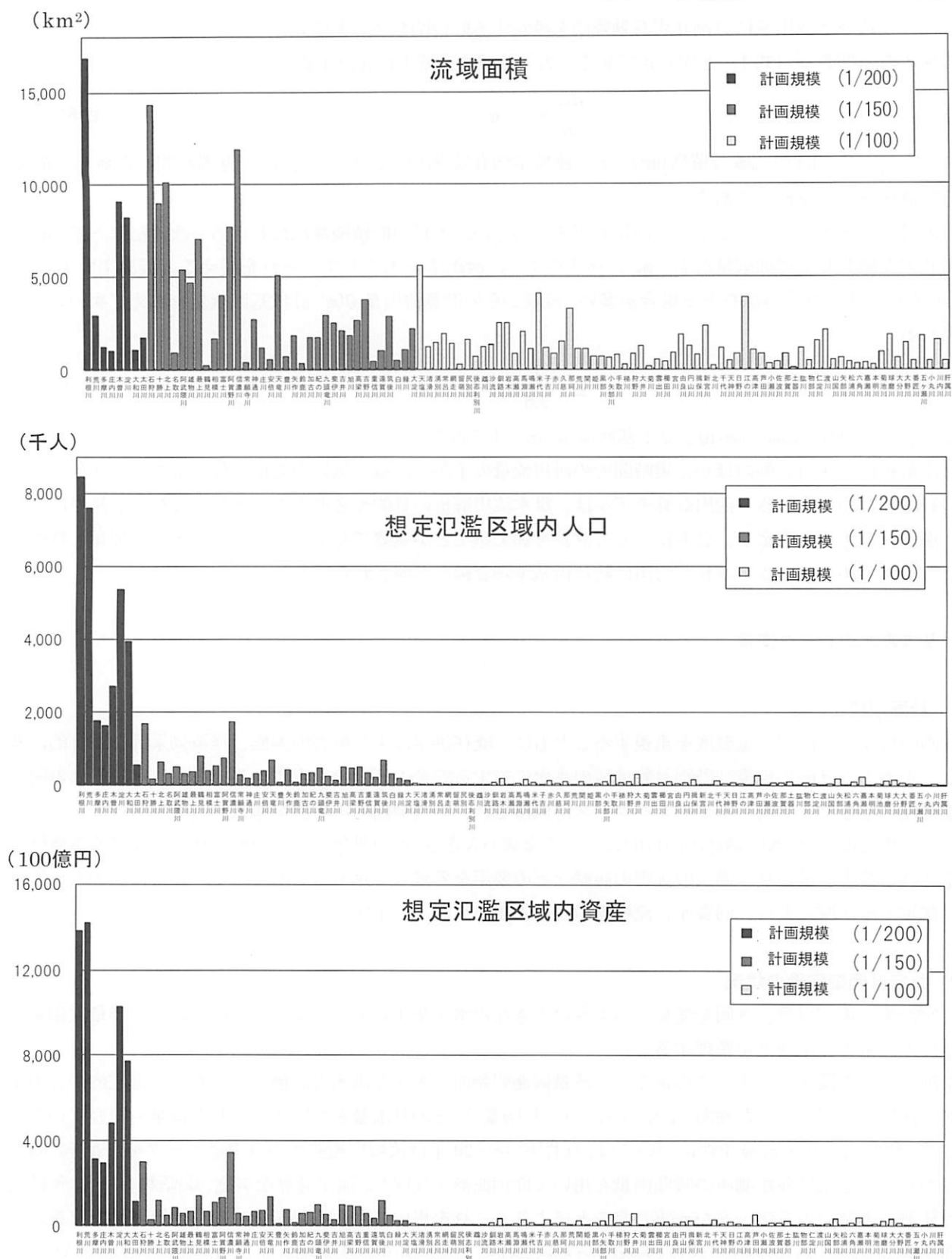


図1 一級水系の想定氾濫区域内人口、同資産、流域面積と計画規模

[文献 15 を一部修正]

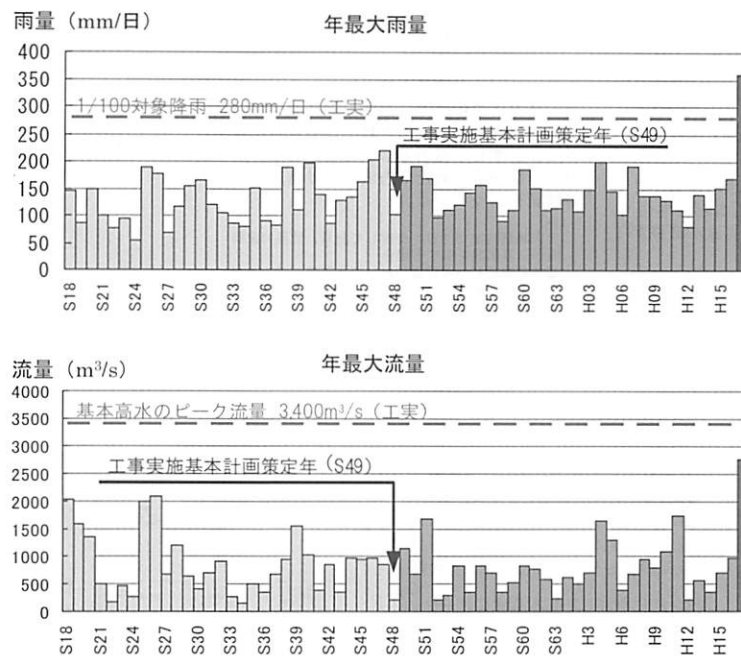


図2 年最大雨量及び年最大流量の経年変化の整理の例¹⁶⁾

5.3 基本高水のピーク流量の設定の考え方

基本的に、最近のデータまで含めた治水計画とすべきであるが、変動する毎年のデータを用いて頻繁に見直すことは長期的な観点で整備する治水計画の設定としては適切でない。このため、計画策定以降に観測された洪水流量がこれまでの計画を上回っている場合や最近の洪水流量の検証から見直す必要がある場合などには、一般的に基本高水の見直しを行っている。また、工事実施基本計画では、当時の雨量データ等の蓄積状況や解析技術等を踏まえ、基本高水のピーク流量を算出しているが、使用した方法の中には、当時の制約条件等により近年一般的に使用されている方法と比べて、必ずしも適当でない場合がある。このような場合、河川整備基本方針の策定に当たって、新たな方法により基本高水の確認を行っている。このような場合の例としては、降雨継続時間に1日を使用しており計画対象降雨が日界問題を有する場合、基本高水のピーク流量において上下流バランスが崩れている場合、降雨の時間・空間分布特性を適切に反映できない合理式の場合などがある。以上のような、一般的に基本高水の見直しを行う場合や新たな方法による基本高水の確認を行う場合は、既定計画の基本高水のピーク流量、流量データによる確率からの検討、雨量データによる確率からの検討、既往洪水による検討、確率規模モデル降雨波形による検討を総合的に判断して基本高水のピーク流量を設定することが多い(図3)。

一方、工事実施基本計画策定以降に計画を変更するような洪水が発生していない場合は、河川整備基本方針の策定に当たって、既定計画の基本高水のピーク流量の検証を行うこととし、既定計画の基本高水のピーク流量、流量データによる確率からの検討、既往洪水による検討を総合的に判断して基本高水のピーク流量を設定することが多い(図3)。

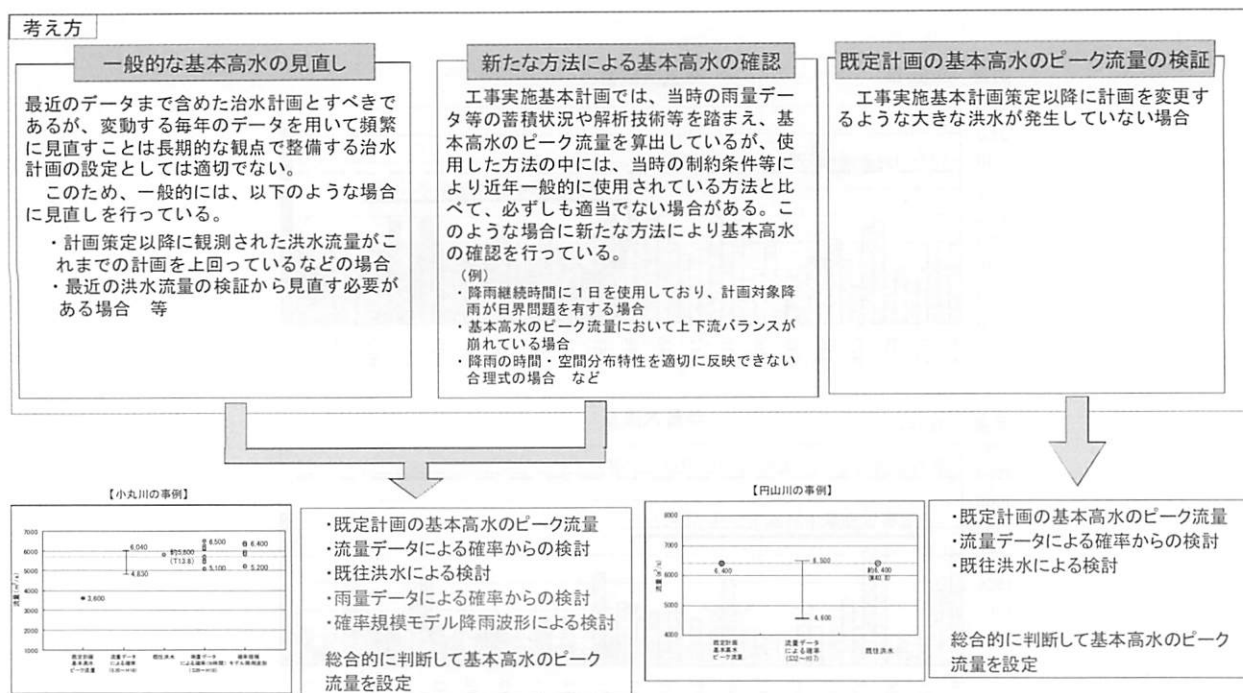


図3 基本高水のピーク流量の設定の考え方

[文献17から抜粋]

(1) 既定計画の基本高水のピーク流量

河川整備基本方針を策定する場合には、既定計画（例えば、工事実施基本計画）について分析しておくことが重要である。そこで、既定計画における計画規模や基本高水のピーク流量の算出過程等を整理する。例えば、基本高水のピーク流量が雨量データによる確率から検討されて設定されていた場合は、計画降雨量の設定、降雨をハイドログラフに変換するための流出計算モデルの設定、主要洪水における計画降雨量への引き伸ばしと流出計算等について整理する。

(2) 流量データによる確率からの検討

流量データをもとに、確率分布モデルを用いて、計画規模相当の年超過確率の流量を推定し、基本高水のピーク流量について、流量データによる確率から検証する。

流量データによる確率からの検討の例を以下に示す。この例では、使用する流量の標本については、

表1 確率分布モデル

[文献16を一部修正]

指数分布
ガンベル分布
平方根指数型最大値分布
一般極値分布
対数ピアソンⅢ型分布（実数空間法）
対数ピアソンⅢ型分布（対数空間法）
岩井法
石原・高瀬法
対数正規分布3母数クォンタイル法
対数正規分布3母数（SlideⅡ）
対数正規分布2母数（SlideⅠ,Ⅱ積率法）
対数正規分布2母数（SlideⅠ,Ⅲ積率法）
対数正規分布4母数（SlideⅣ,Ⅲ積率法）

年最大流量標本とし、基本的には実績流量に、既設ダム等による洪水調節の影響や氾濫の影響を考慮した流量（ダム等の洪水調節がなかったとした場合の流量や氾濫がなかったとした場合の流量を流出計算で算出。）としている。そして、表1に示す確率分布モデルを用いて計画規模相当の年超過確率の流量を推定している。この際、全ての確率分布モデルに適用可能とされるカナン公式（式8において、 $\alpha=0.4$ ）を用いて、流量の標本をプロットし、確率分布モデルの適合度を確認している。

$$P_i = \frac{(i-\alpha)}{(N+1-2\alpha)} \quad (\text{式 } 8)$$

ここで、 p_i は非超過確率、 N は標本の大きさ、 i は i 番目の順位標本値、 α は0～1である。

適合度は式9に示すSLSC（標準最小二乗規準）を用いて、0.04以下の場合に適合度が良いと評価し、図4に示すように、適合度の良い確率分布モデルを用いて計画規模相当の年超過確率の流量を推定している。

$$SLSC = \frac{\sqrt{\zeta^2}}{|S_{0.99} - S_{0.01}|} \quad \zeta^2 = \frac{1}{N} \sum (S_i - S_i^*)^2 \quad (\text{式 } 9)$$

ここで、 $S_{0.99}$ 、 $S_{0.01}$ はそれぞれの非超過確率0.99及び0.01に対する標準変量、 N は標本の大きさ、 S_i は順序統計量を推定母数で変換した標準変量、 S_i^* はプロット位置に対応したクォンタイルを推定母数によって変換した標準変量である。

(3) 雨量データによる確率からの検討

基本高水のピーク流量について、雨量データによる確率から検証する。

一般的に、計画の立案に当たって必要となる対象降雨は降雨の量、時間分布及び地域分布の3要素によって表される。さらに、対象降雨の降雨量は計画規模と降雨継続時間を定めることによって決定する。これまで、「計画降雨継続時間」「計画降雨量」という用語が用いられることがあったが、本稿では、基本高水のピーク流量の設定に当たり、雨量データによる確率からの検討を行う場合において、設定する対象降雨の継続時間を「検討対象降雨の継続時間」、前述の5.1で定めた計画規模に相当する対象降雨の降雨量を「計画規模の降雨量」とそれぞれ表記することとする。

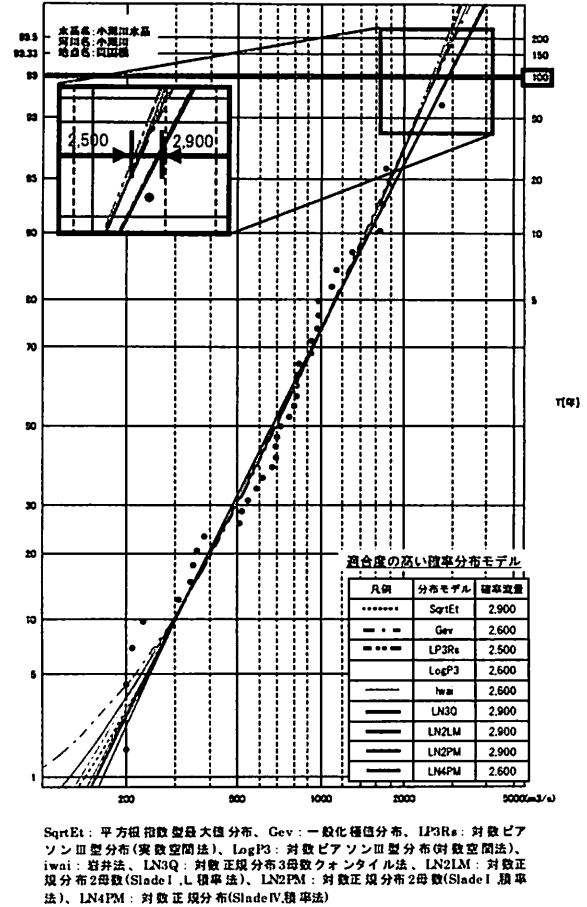


図4 計画規模相当の年超過確率の流量の推定の例¹⁶⁾

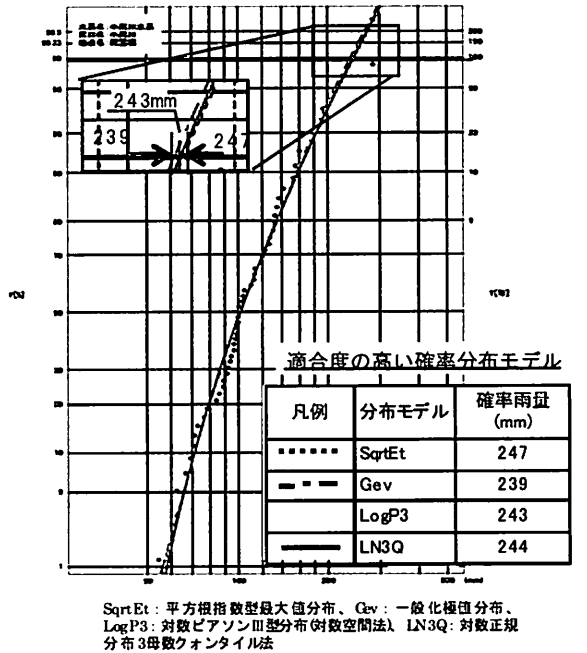


図5 計画規模の降雨量の設定の例¹⁶⁾

雨量データによる確率からの検討の例を以下に示す。この例では、時間雨量データの存在する期間の主要な洪水を対象に、洪水到達時間や強度の強い降雨の継続時間等から、総合的に判断して検討対象降雨の継続時間を9時間と設定している。なお、検討対象降雨の継続時間の設定の詳細については、後述の6.1を参照されたい。次に、使用する雨量の標本については、検討対象降雨の継続時間における年最大雨量標本とし、雨量データの存在する期間を対象に、5.3(2)と同様に確率分布モデルを用い、SLSCにより確率分布モデルの適合度を確認している。図5に示すように、適合度の良い確率分布モデルによる計画規模相当の年超過確率の雨量の平均値から計画規模の降雨量を243mm/9時間と設定している。次に、表2及び図6に示すように、過去の主要洪水を対象(対象洪水の選定については、後述の6.2を参照されたい。)に、設定された計画規模の降雨量となるような引き伸ばし降雨波形を作成し、流出計算モデルにより流出計算を行い、基準地点において流量を推定している。なお、この例で平成17年9月洪水については、9時間雨量(285mm)が1/100年超過確率降雨量(243mm)よりも大きいため、引き伸ばし(引き伸ばし率<1)は行わず、実績雨量を用いて流出計算を行っている。

(4) 既往洪水による検討

既往洪水による検討は、観測値が存在する実績の洪水や過去の著名な洪水を再現し、基本高水のピーク流量が現実起こり得る値かどうかという観点から、基本高水のピーク流量を検証する。

既往洪水による検討については、観測値を用いる方法と文献による被害記録等を用いる方法とに大別される。観測値を用いる方法については、観測流量等を用いる方法と観測雨量を用いて流出計算により河道を流下する流量を推定する方法とがあり、前期降雨があり流域からの降雨量がそのまま流出しやすい湿潤状態において洪水が発生したと仮定し、流出計算を行っている例もある。また、文献による被害記録等を用いる方法については、(i)河道と氾濫域に分け、氾濫解析を行い、被害記録等を用いて、河道の流量を推定する方法、(ii)河道(いわゆる「氾濫域」を含める場合もある)の流れの計算を行い、被害記録等を用いて流量を推定する方法がある。

(i)の例を以下に示す。この例では、明治元年7月洪水について、降雨波形を仮定して数段階の流量規模のハイドログラフを設定し、氾濫再現計算(図7)を実施している。文献に記録されている当該洪水の浸水範囲、浸水深を概ね再現できるハイドログラフについて、基準地点におけるピーク流量は約5,400m³/sと推定している。

表2 引き伸ばし降雨波形による流出計算結果の例
[文献18を一部修正]

No	洪水年月日	両国橋 流域平均9時間雨量(mm)			両国橋流量(m ³ /s)
		順位	雨量	引伸し率	
1	S45.8.15	5	156.5	1.553	2,500
2	S50.8.17	3	164.9	1.474	1,500
3	S51.9.13		137.6	1.766	4,400
4	S55.5.20		126.7	1.918	1,500
5	S57.8.27		130.6	1.861	3,100
6	H4.8.8	2	194.3	1.251	2,700
7	H8.8.14		123.7	1.964	2,100
8	H9.6.28		132.6	1.833	2,300
9	H11.9.21		123.3	1.971	2,200
10	H11.9.24		133.5	1.820	5,200
11	H16.8.30	4	161.6	1.504	2,200
12	H17.9.6	1	285.0	1.000	2,700

1/100年超過確率の降雨量 → 243

昭和51年9月13日型洪水

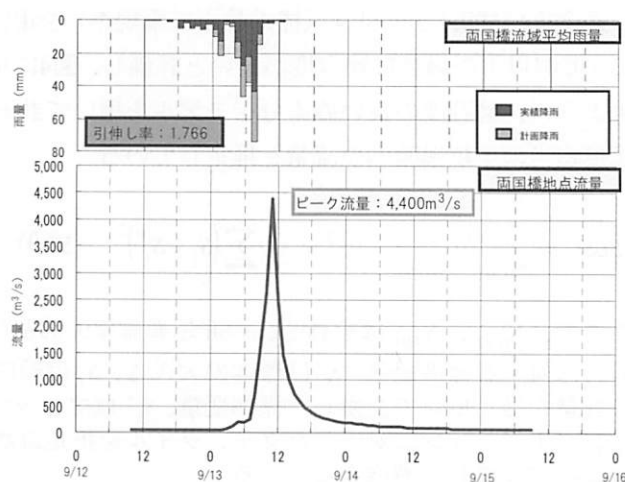
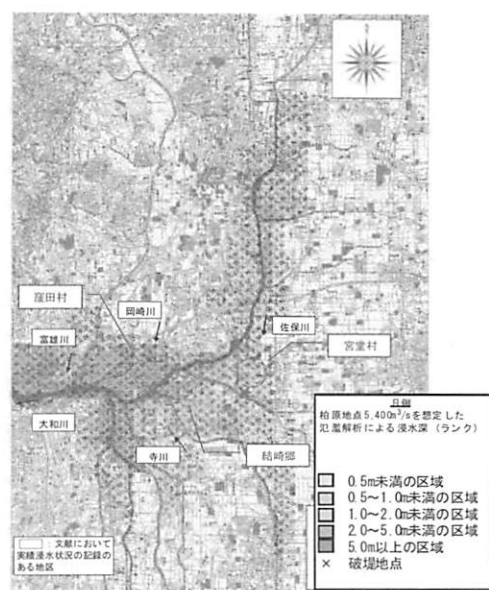


図6 引き伸ばし降雨波形による流出計算結果の例
[文献16を一部修正]

(ii) の例を以下に示す。この例では、明治 17 年洪水について、一次元不等流計算により得られる $H \sim Q$ 曲線より痕跡水位（図 8）の流量を推算している。その結果、基準地点におけるピーク流量は $18,127\text{m}^3/\text{s} \sim 20,715\text{m}^3/\text{s}$ と推定している。また、最近では、利根川において、平面二次元不定流計算（図 9）を行って推定した例がある。



図 8 痕跡水位の例²⁰⁾



実績浸水深と計算浸水深の比較
(柏原: $5.40\text{m}^3/\text{s}$ 想定 窪田村)

降雨波形	実績浸水深	計算浸水深
S54.6	※2.1m	2.02~3.08m
H5.7		1.76~2.82m
H7.7		1.50~2.20m

※『奈良県気象災害史』（「大和風水害報文」からの引用）

図 7 氾濫再現計算の例¹⁹⁾

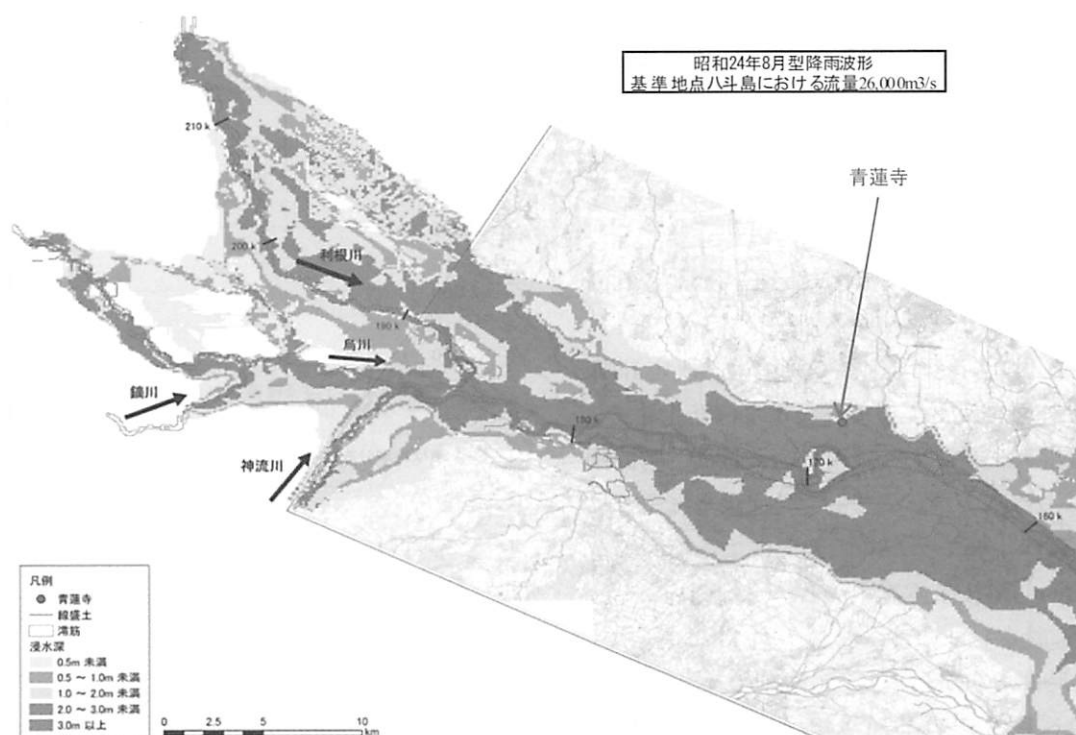


図 9 平面二次元不定流計算の例¹⁵⁾

(5) 確率規模モデル降雨波形による検討

基本高水のピーク流量について、モデル降雨波形による流出計算を行い検証する。

モデル降雨波形は、全ての降雨継続時間において、計画規模相当の年超過確率の雨量となるように設定するとともに、実際の洪水の降雨波形に類似するように設定する。具体的には、計画規模相当の年超過確率の n 時間雨量($n = 1, 2, \dots$)を算出し、対象洪水の降雨波形のピーク位置に計画規模相当の年超過確率の1時間雨量を配置する。さらに計画規模相当の年超過確率の2時間雨量から計画規模相当の年超過確率の1時間雨量分を先取りした残りの雨量を、対象洪水の降雨波形におけるピークの前1時間と後1時間の時間雨量を比べて大きい方に配置する。以降、同様に計画規模相当の年超過確率の3時間雨量から計画規模相当の年超過確率の2時間雨量分を先取りした残りの雨量を、対象洪水の降雨波形におけるピーク付近2時間の前1時間と後1時間の時間雨量を比べて大きい方に配置する。このような処理を降雨継続時間まで行ってモデル降雨波形を作成する。そして、主要な洪水について、モデル降雨波形による流量を流出計算モデルにより計算する。

確率規模モデル降雨波形による検討の例を図10に示す。

5.4 基本高水のピーク流量の設定

前述の5.3で述べたような検討等を総合的に判断して、基本高水のピーク流量を設定する。

設定の例を図11に示す。この例では、既定計画策定以降に計画を変更するような洪水は発生しておらず、流量データによる確率からの検討、時間雨量データによる確率からの検討、既往洪水による検討、1/200 確率規模モデル降雨波形による検討等を総合的に検討して、基本高水のピーク流量を $5,200\text{m}^3/\text{s}$ と設定している。なお、図11において、地域分布、時間分布から著しい引き伸ばしとなっている洪水は「●」で表記しているが、これについては後述の6.2を参照されたい。

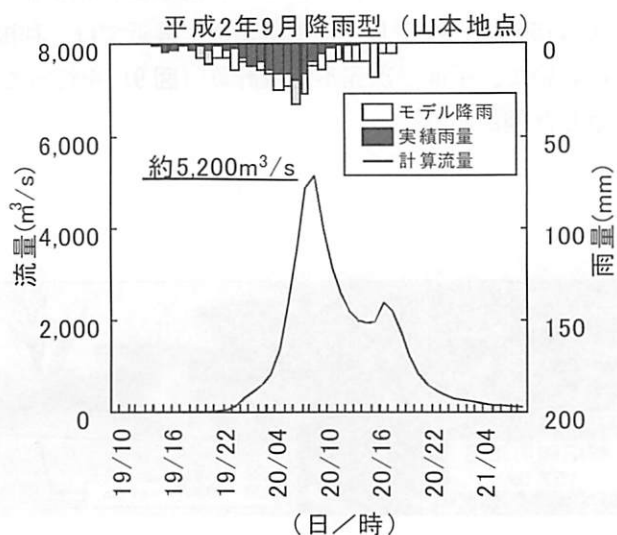


図10 確率規模モデル降雨波形による検討の例²¹⁾

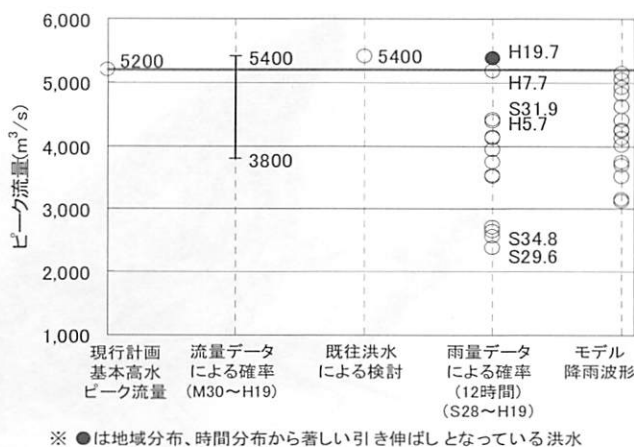


図11 基本高水のピーク流量の設定の例¹⁹⁾

6. 河川計画立案手法に関する補論

6.1 検討対象降雨の継続時間

洪水のピーク流量は、洪水到達時間内の降雨等の降雨特性に加え、流域の地形、河川の状況等の影響を受ける。このため、雨量データによる確率からの検討にあたって設定する検討対象降雨の継続時間は、洪水到達時間、過去の洪水の降雨状況、流出特性等を総合的に検討のうえ設定する。流域の大きさや流域の形状等を踏まえ、洪水到達時間内の降雨が洪水のピーク流量に大きく影響すると考えられる場合には、洪水到達時間を重視し、検討対象降雨の継続時間を設定する。

検討対象降雨の継続時間の設定の例を以下に示す。この例では、表3に示すように、時間雨量データの存在する期間の主要な洪水（15洪水）を対象に、以下に示す（1）～（4）から、総合的に判断して検討対象降雨の継続時間を9時間と設定している。

（1）Kinematic Wave 法による洪水の到達時間

Kinematic Wave 法は矩形斜面上の表面流に Kinematic Wave 理論を適用して洪水到達時間を導く手法である²²⁾。図12に示すように、実績のハイトグラフとハイドログラフを用いて、ピーク流量生起時刻以前の雨量がピーク流量生起時刻(t_p)の雨量と同じになる時刻(τ_p)により $T_p = t_p - \tau_p$ として推定する。ここで、 T_p は洪水到達時間、 τ_p はピーク流量を発生する特性曲線の上流端での出発時刻、 t_p はその特性曲線の下流端への到達時刻、 r_e は $\tau_p \sim t_p$ 間の平均有効降雨強度、 q_p はピーク流量である。

（2）角屋式による洪水の到達時間

角屋の式は Kinematic Wave 理論の洪水到達時間を表す式に、河道長と地形則を考慮した式である²⁴⁾。

$$T_p = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (\text{式 } 10)$$

ここで、 T_p は時間(min)、 A は流域面積(km²)、

表3 検討対象降雨の継続時間の設定の例¹⁶⁾

Kinematic Wave 法による洪水の到達時間	1.0～20.0時間、平均 7.9時間
角屋式による洪水の到達時間	4.7～7.8時間、平均 6.3時間
強度の強い降雨の継続時間	9時間程度で、5mm以上または10mm以上の強い強度の降雨の継続時間をカバーできる洪水が多い
両国橋ピーク流量とn時間雨量との相関から見て必要な降雨継続時間	6時間を超えると十分な相関関係が確認できる

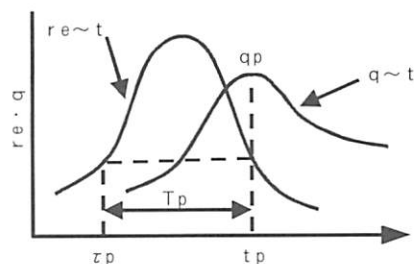


図12 kinematic wave 法による T_p の定義²³⁾

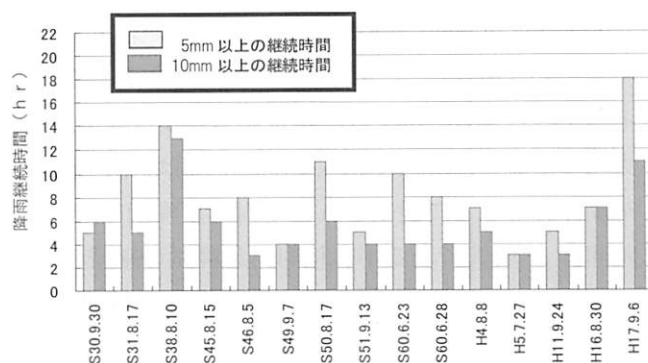


図13 強度の強い継続時間¹⁶⁾

r_e は時間当たり雨量 (mm/hr)、 C は流域特性を表す係数であり、丘陵山林地域の場合は $C=290$ 、放牧地の場合は $C=190\sim210$ 、粗造成宅地の場合は $C=190\sim120$ 、市街化地域の場合は $C=160\sim190$ である。

(3) 強度の強い降雨の継続時間

図 13 の例では、実績雨量からの必要な降雨継続時間は、5mm/hr 以上の継続時間で平均 8 時間、10mm/hr 以上の継続時間で平均 6 時間程度であり、これらの降雨をカバーできる9時間が妥当としている。

(4) 基準地点におけるピーク流量と n 時間雨量との相関から見て必要な降雨継続時間

図 14 の例では、基準地点ピーク流量と n 時間雨量との相関について、ピーク流量生起時刻から遡る n 時間雨量による方法とピーク流量生起時刻前で最大となる n 時間雨量による方法でそれぞれ相関係数を求め、6 時間を超えると十分な相関関係があることを確認している。

しかしながら、必ずしも継続時間についての水文資料が得られるとは限らないので、統計解析等の理由からやむを得ず1日から3日を採用する場合もある。また、流域面積が大きい場合では、流域における雨域の空間分布やその雨域の流域内での移動により、有効降雨強度が空間的に一様、かつ時間的に一様ないし平均量として取り扱うことを前提とした Kinematic Wave 法や角屋式から求めた洪水到達時間という概念^{22), 24)}が成立しにくい場合がある。そのような場合、例えば一級水系木曽川（基準地点犬山の上流の流域面積約 4,700km²）では、洪水到達時間等を考慮して設定された検討対象降雨の継続時間は 18 時間であるが、検討対象降雨の継続時間を2日として雨量データによる確率からの検討を行っている²⁵⁾。

6.2 対象洪水の選定と降雨の引き伸ばし

雨量データによる確率からの検討を行う際の対象洪水は、流域の地形特性、降雨特性等を勘案し、

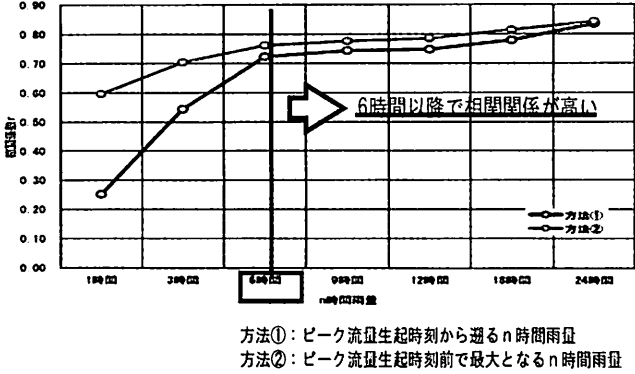


図 14 基準地点ピーク流量と n 時間雨量との相関¹⁶⁾

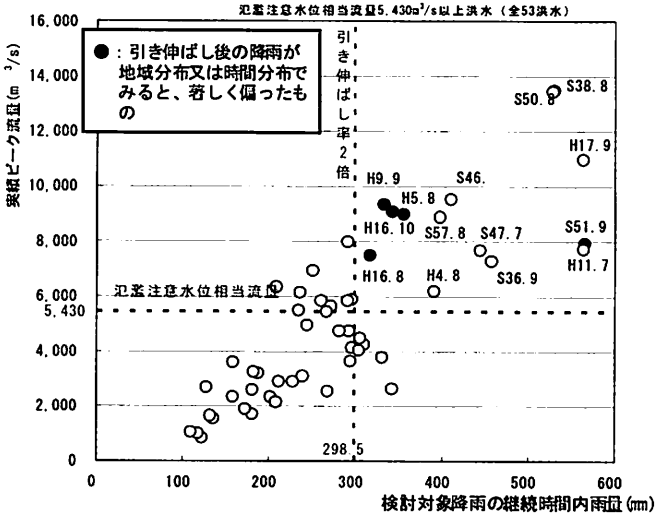


図 15 対象洪水の選定の例
[文献 26 を一部修正]

大きな実績流量の洪水、計画規模の降雨量まで引き伸ばした場合に著しい引き伸ばし率とならない洪水とする。

対象洪水の選定の例を図 15、表 4 に示す。この例では、基準地点で実績流量が氾濫注意水位相当流量（ $5,430\text{m}^3/\text{s}$ ）以上で、降雨量の引き伸ばし率が、2 倍未満となるものを選定している。

また、対象洪水の選定に当たっては、実績洪水の地域分布と時間分布を確認し、様々な洪水パターンが含まれるようにする。例えば、地域分布として、上流型、中流型、下流型等、時間分布として、一山型、二山型、中央集中型、後方集中型、フラット型等の洪水パターンを検討し、様々なパターンが含まれるよう、対象洪水を選定する（例えば、図 16）。

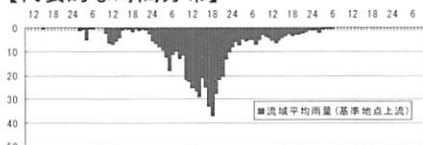
このように選定した対象洪水について、検討対象降雨の継続時間内の雨量を計画規模まで引き伸ばし、流出計算を実施する。引き伸ばしの例を図 17 に示す。この例では、一連の降雨中の主体とみなされる部分を中心において、検討対象降雨の継続時間に相当する時間内の降雨量が計画規模の降雨量に等しくなるように引き伸ばし、検討対象降雨の前に接続して存在する降雨については、実績降雨をそのまま用いている。

表 4 対象洪水の選定の例

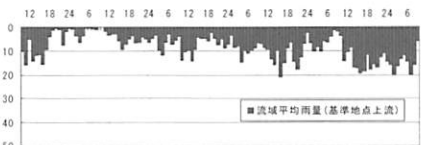
[文献 26 を一部修正]

No.	年月日	実績ピーク 流量 (m^3/s)	検討対象降雨の 継続時間内雨量 (mm/2日)	
			実績の降雨量	計画規模の降雨量
1	S. 36. 9. 16	7,285	456.74	597
2	S. 38. 8. 9	13,514	529.62	
3	S. 46. 8. 30	9,534	410.11	
4	S. 47. 7. 24	7,680	442.75	
5	S. 50. 8. 17	13,461	527.69	
6	S. 51. 9. 13	7,930	564.04	
7	S. 57. 8. 27	8,899	396.37	
8	H. 4. 8. 18	6,218	390.44	
9	H. 5. 8. 10	8,997	355.56	
10	H. 9. 9. 16	9,340	331.92	
11	H. 11. 7. 27	7,748	563.34	
12	H. 16. 8. 30	7,485	316.51	
13	H. 16. 10. 20	9,080	341.74	
14	H. 17. 9. 6	10,997	562.18	

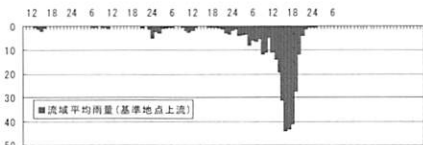
【代表的な時間分布】



S38. 8洪水（中央集中型）

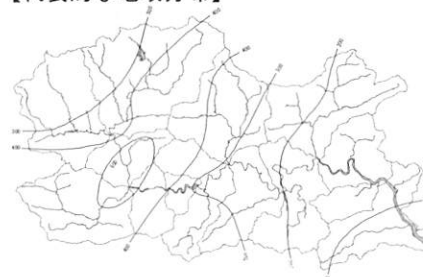


S51. 9洪水（フラット型）

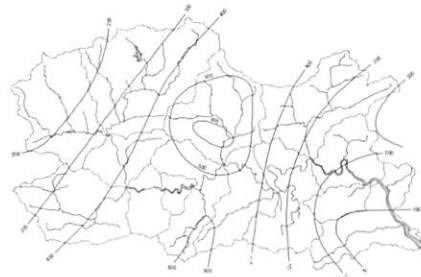


H9. 9洪水（後方集中型）

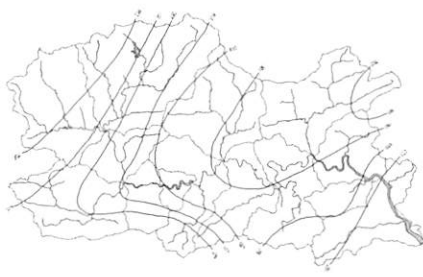
【代表的な地域分布】



H16. 8洪水（中上流型）



H5. 8洪水（中流型）



S50. 8洪水（下流型）

図 16 代表的な時間分布・地域分布の例²⁶⁾

引き伸ばしを行う際に、引き伸ばし後の降雨が地域分布又は時間分布でみると、著しく偏る場合がある。図 18 の例では、引き伸ばし後の降雨が地域分布又は時間分布でみると、著しく偏ったものを参考値として取り扱った上で(図では「●」で表記されている)、総合的に判断し、基本高水のピーク流量を設定している。

7. 二級水系における基本高水のピーク流量の設定等の現状

二級水系における流出解析については、過去の流量資料がない小さな流域での基本高水のピーク流量の計算手法として、土地利用に応じた定数の標準値の調査実績が豊富である合理式が用いられている場合があるが、貯留関数法が用いられている場合もある。

基本高水のピーク流量の設定については、過去の主要洪水を対象に、所定の治水安全度に対応する年超過確率をもつ計画降雨量となるような引き伸ばし降雨波形を作成し、流出計算モデルにより計算されたハイドログラフ群の中から、最大流量となるハイドログラフのピーク流量を基本高水のピーク流量と設定する方法がこれまで多く用いられてきているが、最近では、複数の検討を総合的に判断して基本高水のピーク流量を設定する例が多くなってきている。後者の場合、二級水系においては、必ずしも 5.3 (1)～(5) で示したすべてについて検討する必要はなく、流域の特性や活用できるデータ等に応じて、既定計画の基本高水のピーク流量、雨量データによる確率からの検討、既往洪水からの検討などを総合的に判断して基本高水のピーク流量を設定することでもよい。

また、引き伸ばし降雨波形の棄却については、地域分布、時間分布等から著しい引伸ばしとなっている降雨波形を検討対象降雨から棄却する方法がこれまで多く用いられてきているが、最近では、6.2 で示したように、引き伸ばし後の降雨が地域分布又は時間分布でみると、著しく偏ったものを参考値として取り扱う例が多くなってきている。

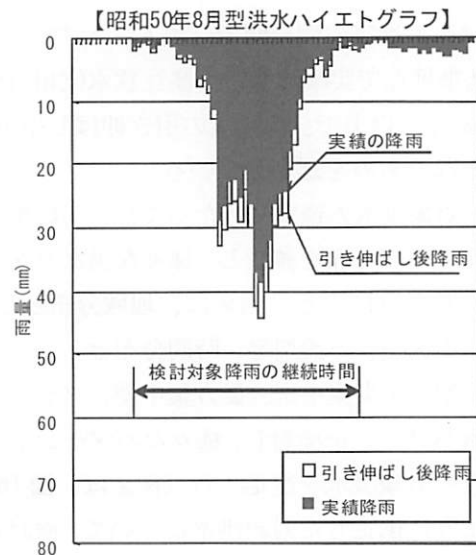


図 17 対象洪水の引き伸ばしの例
[文献 26 を一部修正]

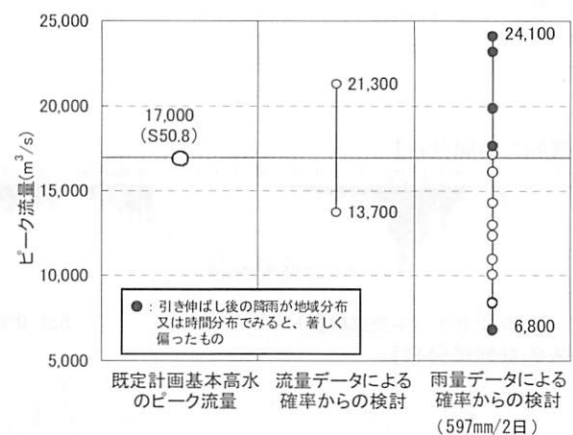


図 18 基本高水のピーク流量の設定の例
[文献 26 を一部修正]

8. 河川計画の今後の展望

地球温暖化に伴う気候変化により海面水位の上昇、豪雨や台風の強度の一層の増大、渇水の深刻化等による水災害の激化が懸念されている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次評価報告書²⁷⁾では、CO₂等温室効果ガスの削減を中心とした温暖化の「緩和策」には限界があり、「緩和策」を行ったとしても気温の上昇は数世紀続くことから、温暖化に伴う様々な影響への「適応策」を講じていくことが「緩和策」と同様に重要であるということが指摘されている。水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方については、国土交通大臣から諮問し、社会資本整備審議会から答申されてきている²⁸⁾。今後とも、モニタリングを継続的に実施していくとともに、非定常過程の水文統計解析などに関する知見の蓄積を図り、適応策への反映を検討していくことが重要である。

雨量観測については、近年増加する集中豪雨や局所的な大雨（いわゆるゲリラ豪雨）による水害等に対応するため、局所的な雨量を高精度かつ高分解能で観測し、ほぼリアルタイムに配信可能である「XRAIN（エクスレイン）」（XバンドMPレーダネットワーク）の整備を進めており、河川管理や防災活動等に活用している。流量観測については、従来の浮子による観測方法に加え、ADCP（超音波ドップラー流向流速計）や非接触型流速計、画像解析の活用など、流量観測の高度化の検討が行われており、低コストで安全に実施でき、かつ精度の高い流量観測が可能となることが期待されている。また、流出解析に用いる流出モデルは多種多様であり、また、次々と新たな流出モデルや解析手法が考案されている。流出モデルは、洪水流出解析の目的や必要とされる水文資料の有無等に応じて、適切な流出モデルを選定し、必要に応じて改良を加えることが重要である。さらに、水の流れや物質の移動などの複合現象を解析するために、複数の水理・水文解析プログラムを連携して稼動されることができるようソフトウェアの共通基盤であるCommonMP（Common Modeling Platform for water-material circulation analysis）プロジェクトにより解析手法を共有する技術開発が進んでおり、水理・水文モデルの開発や利用の活性化などが期待されている²⁹⁾。このような技術の開発や知見の蓄積に努めるとともに、これらの技術の進展を河川計画の立案手法や立案過程にどのように反映していくかを含めて、検討を進めていくことが重要である。

河川の計画の立案に当たっては、水文観測資料が不可欠であり、適切に観測成果の品質管理を行っていくとともに、技術的な文書を含めて情報の公開に努めていくことが重要である。平成9年に河川法が改正され、全国の河川で河川整備計画の検討が進められ、その作成段階で関係住民の意見を反映するための措置が講じられてきている。今後とも、地域の意向を反映するよう、地域の実情等を踏まえて、様々な工夫を行っていくことが重要である。以上に述べたような取り組みを進め、実現性の高い治水計画の立案に向けて努力を積み重ねていくことが必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局監修，社団法人日本河川協会編：国土交通省河川砂防技術基準同解説，計画編，山海堂，2005.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準調査編，2012.
- 3) 建設省近畿地方建設局：淀川水系改修基本計画，1954.
- 4) 建設省河川局編纂：建設省河川砂防技術基準，社団法人日本河川協会，1958.
- 5) 今後の治水のあり方に関する有識者会議：今後の治水対策のあり方について，中間とりまとめ，2010.
- 6) 国土交通省河川局：ダム事業の検証に係る検討に関する再評価実施要領細目，2010.
- 7) 国土交通省河川局長：河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価について（依頼），2011.

- 8) 日本学術会議：河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価（回答），2011.
- 9) 国土交通省：利根川の基本高水の検証について，2011.
- 10) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言，2011.
- 11) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課長，治水課長：河川津波対策について，2011.
- 12) 木村俊晃：貯留関数法による洪水流出追跡法，建設省土木研究所，1961.
- 13) 木村俊晃：貯留関数法，河鍋書店，1975.
- 14) 角屋睦，永井明博：流出解析手法（その10）―― 4. 貯留法一貯留関数法による洪水流出解析，農業土木学会誌，第48巻第10号，1980.
- 15) 社会資本整備審議会河川分科会（第44回），資料1-3，2011.
- 16) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第84回），資料2-2，2008.
- 17) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第84回），資料2-1，2008.
- 18) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第80回），資料4-2，2007.
- 19) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第97回），資料2-1，2008.
- 20) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第69回），資料2-2，2007.
- 21) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第90回），資料2-1，2008.
- 22) 石原藤次郎，高棹琢馬：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第60号，別冊3-3，1959.
- 23) 土木学会：水理学公式集，1999.
- 24) 角屋睦，福島晟：中小河川の洪水到達時間，京大防災研年報，第19号B，1976.
- 25) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第72回），参考資料4-2，2007.
- 26) 社会資本整備審議会河川分科会河川整備基本方針検討小委員会（第89回），資料1-3，2008.
- 27) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : Climate Change 2007 : Synthesis Report, Fourth Assessment Report, 2007.
- 28) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申），2008.
- 29) CommonMPプロジェクト推進委員会監修，椎葉充晴・立川康人編：CommonMP入門，水・物質循環シミュレーションシステムの共通プラットフォーム，技報堂，2011.