

回答骨子 4（案）

第 1 節 流出解析法のレビューと貯留関数法の位置づけ

1.1 流出解析法の目的と分類

- 流出解析の目的には、河川計画や水工構造物の設計のための河川流量の予測、実時間での予測、長期の河川流量の変化予測、水文観測のない流域の水循環予測、流出現象の理解などがある。
- 流出解析法(モデル)は以下のように分類される：
 - (1) 予測期間の観点：短期流出モデル（洪水流出モデル）、長期流出モデル（流況予測モデル）
 - (2) 降雨－流出応答の考え方の観点：応答モデル、概念モデル、物理モデル
 - (3) モデルの空間的な構成法の観点：集中型モデル、分布型モデル
 - (4) 時間的連続性の観点：イベントモデル、連続時間モデル

1.2 貯留関数法の基本構造とその留意点

- 貯留関数法は、短期流出モデル、集中型モデル、かつイベントモデルであり、個々のイベントの降雨系列と流量系列の観測値に適合するように、有効降雨を推定し、パラメータを推定する手法が複数開発されている。
- しかし、観測されていないイベントに対して、どのように飽和雨量を設定するか、個々のイベントに適合するパラメータが降水規模や降雨分布とどのような関係にあるか、流域特性の長期変化によってパラメータがどのように変化するかについては、当該流域の水文資料をよく吟味、検討して、適用することが必要である。

1.3 流出解析法の発展と貯留関数法の位置づけ

- 過去の事例では必要なデータが必ずしも得られない場合もあり、適用実績のある貯留関数法を、その特性について十分注意しながら利用していくのは現実的である。
- ただし、流出解析法は、流域内の水文要素の物理過程を考慮し、人工的な流水制御系も組み込んだ要素モデルによる分布型・連続時間のモデルへと発展して行っており、今後は分布型・連続時間の流出モデルによる計画手法の確立が望まれる。

第2節 貯留関数法とその適用法

2.1 概説

- 貯留関数法には、有効降雨、遅れ時間(二価関数)、流出域区分の取り扱いや、パラメータの決定方法などにおいて、様々な手法が開発されており、適用に当たっては各手法の違いとその意味を明確にする必要がある。
- 入力値である流域平均降水量は、パラメータ推定や再現計算に大きく影響するので、その算定には十分留意する必要がある。

2.2 流域平均降水量

- 流域平均降水量算定手法には、等雨量線法、ティーセン法、算術平均法、支配圏法、高度法などがある。

2.3 有効降雨

- 有効降雨の算定に必要な直接流出量の分離には、バーンズ法、水平分離法、ハイドログラフ逡減部の折曲点による方法などがある。
- 有効降雨のモデル化には、飽和雨量・一次流出率・飽和流出率による方法、雨水保留量曲線法、浸入能方程式による方法、 ϕ index 法、カーブナンバー法などがある。
- 有効降雨の算定に当たって流域の乾湿条件を考慮する方法として、前期無降雨日数、API、初期流量などを用いる方法がある。

2.4 貯留関数法

- 貯留関数法には、木村、角屋・永井、Prasad、星などより、パラメータや運動方程式の扱いが異なる手法が開発されている。
- 木村の貯留関数法は、遅れ時間の概念を導入している点、さらに1つのサブ流域を流出域と浸透域に分割し、各領域の計算流量を合算して、流域ブロック下流端の計算流量としている点に特徴があり、その流出域・浸透域分割の扱いと有効降雨の扱いは一体となっている。ただし、貯留量ー直接流出量関係に基づくパラメータ決定の段階では、前述の領域分割は考慮されていない。
- 角屋・永井の方法では、1つのサブ流域を流出域と浸透域に分割しない点、有効降雨を先に計算しておき、それを貯留関数モデルに入力する点、計算ハイドログラフが観測ハイドログラフに合致するようにパラメータを最適化する方法が常用されている点などが特徴的である。
- 星らの方法では、角屋・永井の方法の特徴に加え、運動方程式を工夫することで遅れ時間の概念を用いていない点において、木村の貯留関数法とは異なっている。

2.5 パラメータの総合化

- 木村の貯留関数法で採用されてきたパラメータの総合化式として、総合貯留関数法や利根川方式などがある。
- 雨水流法と貯留関数法の相互関係から導出された総合化式として、永井らの総合化式、杉山らの総合化式、星らの総合化式などがある。

参考資料 1 山岳部を含むダム流域における流域平均雨量の扱いについて

大迫ダム流域の事例（角屋・田中丸）

参考資料 2 総雨量と総直接流出量の観測事例について

国土交通省から提供された 8 河川流域（浅川、鈴鹿川、砂川、芦田川、印賀川、土器川、重信川、遠賀川）の総雨量－総直接流出量関係を作図し、これらに飽和雨量・一次流出率・飽和流出率による方法を適用する。

第 3 節 貯留関数法の利根川への適用

3.1 貯留関数法の利根川への適用における留意事項

- 社会基盤計画の基礎と位置づけられる基本高水の算定に当たって、河川管理者は算定の背景・経緯について十分な説明と、科学的な追検証の可能性を担保すべきである。そのためには、手法を詳述する技術文書を作成しレビューできる体制を国土交通省として構築すること、観測資料の収集、品質管理、精査、アーカイブとその経緯を記した文書を整備すること。
- 貯留関数法の適用に当たっては、その頑健性を確保することを目的として、簡潔なモデル構造と適切な数のパラメータの組み合わせを用いること。
- 十分な観測密度と精度、観測レンジを有する大出水時の観測データを用いてパラメータの推定などキャリブレーションを行い、さらにキャリブレーションに用いられていないデータを用いて検証を行い、その性能を評価すること。
- 有効降雨モデルの開発に当たっては、各出水の総雨量(mm)と総直接流出量(mm)の収支が合うことを確認し、地質区分を考慮して設定すること。
- パラメータのパラツキによるピーク流量値の変化に関する感度分析を行い、カスリーン台風の洪水ピーク流量の推定幅を算定して提示すること。
- サブ流域の水文学的均一性、観測データの利用可能性に留意し、追検討可能な形式にすること。
- 森林の変化による河川流出への影響については、小試験流域における観測研究から、下記の知見が得られている。利根川への貯留関数法の適用に当たっては、これらの知見を参照して、長期にわたって同じモデルの適用が可能であることを注意深く検討する

ことが必要である。

- (1) 伐採後などは蒸発散量が少なくなり、流出量が大きくなるが、規模の大きな洪水流出への影響は小さい。
- (2) 花崗岩のはげ山のように植生と土壌が存在しない場合は、土壌のある場合に比べ洪水流出量が非常に大きくなる。
- (3) わが国では、長期にわたる森林の生活利用が森林土壌を失わせてきたが、花崗岩以外の地質では、貧弱な森林と下層土壌は残された。この場合、洪水流出量は元の原生林に比べて大きくなった。その後 1960 年代の燃料革命以後、伐採利用がなされずに森林が成長してきたため、土壌の厚さや貯留機能が長い年月をかけて原生林の時の状態に移行してゆくと推定されるが、現在のところ、洪水流出量が小さくなったことを確認できる結果は得られていない。

3.2 新たな貯留関数法(新モデル)の提案、観測データの整備と適用

- 木村の貯留関数に基づくと考えられる現行モデルに対して、分科会からの推奨に基づき、下記の新手法によりモデルが構築され、その方法を記述する文書が提出された。なお、新モデルでのサブ流域区分は公開されることとなった。
 - (1) 地質区分と降雨観測データの利用可能性を考慮して対象流域を 4 つの中流域に区分して、近年の 15 出水の総雨量(mm)と総直接流出量(mm)を用いて、第 4 紀火山岩類の流域では一次流出率のみ、それ以外は一次流出率と飽和雨量からなる有効降雨モデルを開発した。
 - (2) 貯留量-直接流出高の関係図を用いてモデルパラメータ T1、K、P を推定した。
 - (3) 流出域、浸透域に分けることなく、一つの貯留関数で流出計算を行い、観測ハイドログラフにおけるピーク流量と洪水低減部にて計算値が適合するように K、P を調整した。

分科会では、事後解析にあつては総雨量(mm)と総直接流出量(mm)の収支が合うことが担保されている方法であると評価された。また地質によっては飽和雨量より大きい降雨について、流出率が 1.0 以下となることもありうるという判断も示された。

- 時間雨量観測点の少ない昭和 22 年、33 年、34 年については、観測日雨量と観測時間雨量とを組み合わせることで時間雨量観測密度を増加させたこと、また時間観測箇所が特に少ない昭和 22 年については等雨量線図や観測所の時間分布で代表できる区域(影響区域)を設定することによってより適切な時間雨量データを推定して、解析に用いる降雨データの質、量を向上させた。この結果は、分科会で独自に計算した降雨分布データと、新モデルサブ流域単位で比較され、その妥当性が示された。
- 昭和 33 年、34 年の実績流量の精査が行われ、ハイドログラフの変更が報告されたが、その理由については不明であるとされた。分科会ではその影響の大きさに鑑み、第一

に変更理由が不明であるのは河川管理者として不適切であるとした上で、理由の更なる追求と、今後の観測データ管理においてはデータ精査の履歴が分かるよう文書等で記録する体制づくりが要望された。

3.3 貯留関数法(新モデル、現行モデル)の検討、評価

- 検証、評価に当たっては、以下の5つの評価軸を設定した。
 - (1) 学術的な先端性(予測への利用可能性、気候変動への適用可能性も検討)
 - (2) 実用技術としての成熟度・実績
 - (3) 基礎方程式、数値計算手法において誤りがない
 - (4) 物理的意味合いの妥当性
 - (5) 異なる事例にあってもモデルの適用性が担保されている(頑健性)
- ※ (1)、(2)は1節で検討済み
- 基礎方程式、プログラムソースコード確認した上で、新モデルは国土センターシステム上で、現行モデルは Common MP 上で、分科会にてその動作確認と国土交通省の算定結果との比較を行った。また、分科会メンバーが開発した貯留関数モデルと比較した。これらを通して両モデルともに基礎方程式、数値計算手法において誤りがないことを確認した。さらに、新モデルに対して、分科会メンバーが有する2つの異なる連続時間分布型モデルによるシミュレーションと比較して、観測データのある昭和33年、34年、57年、平成10年では洪水再現実験と類似の結果であること、流量観測データが利用できない昭和22年においてもシミュレーションによる洪水ピーク流量と10%程度の差にとどまっていることが示し、算定結果の妥当性を確認した。
 - 新モデル、現行モデルを用いて飽和雨量 R_{sa} の感度分析を行った結果、ハイエトグラフが先鋭な場合は洪水ピーク流量に対する R_{sa} の感度は高いが、比較的幅広のハイエトグラフの場合には、 R_{sa} の影響はハイドログラフの立ち上がり部に影響を与えるものの、洪水ピーク流量に与える影響は比較的小さいというが示された。また、連続時間分布型モデルによるシミュレーション結果と比較して、流域平均貯留高との関係は明確ではなかったが、サブ流域平均表層土壌水分との対応関係はある程度示された。このように、 R_{sa} の物理的意味合いがより明らかにされた。
 - 昭和22年の事例を対象に、無降雨期間を含む出水における浸入能、保留能の回復が見込まれる場合か否かについて、分科会メンバーの有する長短期流出両用モデルを分布的に用いた場合と、連続時間分布型モデルを用いて検討した結果、浸入能、保留能の回復は見込めないことが示され、提案されている有効降雨モデルで適応可能であることが示された。浸入能、保留能の回復が見込める場合の方法論についても示された。
 - 昭和22年の洪水事例について、データの利用が可能な一部河道について、河道貯留(もしくは河道近傍の氾濫)の効果を考えると、算定された洪水波形が時間的に遅れ、またピークも低下して、観測流量に近くなることが示された。昭和22年の洪水で、大規模

氾濫とまではいかなくても、河道貯留(もしくは河道近傍の氾濫)によって、八斗島では実績流量が計算洪水流量より低くなることは十分に考えられることが示された。

- 近年 15 洪水によって求められた新モデルのパラメータの中で、対象洪水期間中最大流量となる場合の K , p を設定することによって、昭和 33 年、34 年洪水の再現性が良いことが国土交通省によって示された。分科会では、モデルパラメータの感度分析を行い、 K , p とともにその値の違いが計算流量に与える影響は大きいことを示し、こうした大きな変化がある中で、その同定に用いなかった昭和 33 年 9 月洪水、昭和 34 年 8 月洪水に適用した場合の再現結果がよいということは、新モデルの頑健性を示すものと判断する。ただし、10,000 (m³/s) 程度のチェックのみでは、昭和 22 年の 20,000 (m³/s) 程度洪水に適用可能かどうかの確認はできない。現段階では、これは観測データの限界上、致し方ないと考える。
- 観測流量データがない既往最大と考えられる昭和 22 年の洪水流量および 200 年確率流量の推定について、その推定幅を検討した。貯留関数パラメータについてはその頑健性が示され、基底流量についてはその感度が極めて低いことが確かめられたので、初期損失雨量と飽和雨量の影響を調べた。近年 15 洪水で求められた初期損失雨量と飽和雨量の平均値に対して、各洪水ごとに求められる両者の値をそれぞれ用いてピーク流量の再現計算をしてその差を求め、推定値の幅は $-0.3\% \sim +2.8\%$ とした。
- 洪水時の森林の保水力とは、植生や薄い落葉層の雨水貯留ではなく、風化基盤岩の上に載った土壌層全体における雨水の一時的貯留、水を流す速度を遅くすることに基づく。戦後から現在まで、おおむね森林が伐採されずに成長してきたことは確かであり、保水力増加の方向に進んではいるとしても、洪水ピークにかかわる流出の場である土壌層全体の厚さが増加するには年月が短すぎることも確かである。そのため、戦後から現在まで森林変化が流出モデルのパラメータへ与える影響は認められなかった。ただし、森林を他の土地利用に変化させたり、河道整備などが洪水に影響している可能性があり、また、人工林の間伐遅れや伐採跡地の植林放棄などの森林管理のあり方によって流出モデルのパラメータが変化する可能性も十分あることに留意する必要がある。

3.4 総合確率法について

- 基本高水の算定法の一手法として提案されている総合確率法は、河川計画で対象とする期間総降雨量(利根川流域の場合は 3 日雨量)から、降雨の時間分布特性(ハイエトグラフ)の多様性を考慮して、計画超過確率(利根川流域の場合は 1/200)に対応する洪水ピーク流量を算定する手法として妥当と判断する。
- 総合確率法では、各洪水ピーク流量に対して、様々な降雨波形に対応してその洪水ピーク流量を生じる降雨総量の超過確率(すなわちその降雨波形を条件として与えたときの洪水ピーク流量の条件付き超過確率)を算定して、その超過確率と降雨波形の生起

確率との積を求め、すべての降雨波形に渡って加算して、洪水ピーク流量の超過確率を求めている。各降雨波形に対応して、洪水ピーク流量の確率の変動を与える主要因は降雨規模そのものであって、初期損失量、飽和雨量の変化による変動の影響は小さい。したがって、個々の降雨波形に対して、洪水ピーク流量の超過確率を算定するときには、降雨の規模以外の諸量の不確かさによる推定幅は考えないこととする。

- 基本高水の算定には、確率降雨から流出モデルを用いて得られる値、総合確率法による算定値、流量データの確率から得られる値、既往洪水の解析による推定値などを総合的に検討し、妥当性が理解されるよう要請する。

第4節 結論

- 本分科会では、まず、不十分な情報しか提供されない中で、現行モデルの内容を理解した上で問題点を整理し、水収支に着目した有効降雨モデルに基づく貯留関数の新モデルの開発方法を推奨した。次に、両モデルについて、プログラムの確認、分科会自身での動作チェックを通じて、基礎方程式、数値計算手法において誤りがないことを確認した。さらに、感度分析やシミュレーション結果の整理により、新モデルの物理的意味合いを検討した。その上で、新モデルを観測データのない事例や計画策定へ適用するために必要となるモデルの頑健性ならびに不確定性を評価した。これらの評価は、両モデルのみならず、分科会独自のモデルをも使って実施した。その結果、八斗島地点における昭和22年の既往最大洪水流量の推定値は $21.100\text{m}^3/\text{s}$ の $-\triangle\% \sim +\diamond\%$ の範囲、**200年超過確率洪水流量は $\odot\odot\text{m}^3/\text{s}$** が妥当であると判断する。

第5節 今後の展望について

- 既往最大洪水流量や200年確率洪水流量の推定値は、上流より八斗島地点まで各区間で計算される流量をそれぞれの河道ですべて流しうると仮定した場合の値である。昭和22年洪水時に八斗島地点を実際に流れた**最大**流量は上流での氾濫等の**影響**により $17,000\text{m}^3/\text{s}$ と推定されており、分科会では上流での河道貯留(もしくは河道近傍の氾濫)の効果を考えることによって、洪水波形の時間的遅れおよびピーク流量の低下の計算事例を示した。既往最大洪水流量や200年確率洪水流量の推定値と実際に流れたとされる流量の推定値に大きな差があることを改めて確認したことを受けて、これらの推定値を現実の河川計画、管理の上でどのように用いるか、慎重な検討を要請する。
- IPCC第4次評価報告においては、気候変化による大雨の頻度の増加、渇水を受ける地域の拡大、**熱帯低気圧(台風)の強度の増大**が指摘された。わが国でも時間 50mm や 100mm を越える雨の発生回数の増加が報告され、近年頻発する局所的集中豪雨(ゲリラ豪雨)に対する国民の関心も高まっている。これらの大雨の変化を**考慮すると**、河川計画において根拠としてきた定常確率過程の前提を**再検討する必要がある**。一方、流域管理、コミュニティ防災等、新たな治水の考え方も提案されているところである。

今後起こりうるリスクを徹底的に吟味し、様々な対応策のオプションを用意した上で、新たな河川計画、管理のあり方を検討することを要請する。

- 今回の検討で学術会議は、社会基盤の構築の基本値の一つである基本高水に関して、確かな情報が広く共有されていない状況が、社会の混乱、合意形成の障害を引き起こすことを認識した。基本高水の算定には、我が国でこれまで多数の流域で適用実績を持っていて信頼性がある貯留関数法を、ある程度、分布型のモデル形式にして利用してきた。しかし、衛星やレーダ等の観測体制が充実し、再解析などのモデル出力が利用可能となってきた。さらに、流域内で実際に生じている雨水流出現象の物理機構を捉えてモデル化するという方法や、貯留施設や河道整備などの人工的な流水制御の影響を取り入れ、森林や農地、宅地等の土地利用の変化の効果を定量的に評価する分布型・連続時間の流出モデルによるシミュレーション技術が発展してきている。これらの科学技術、学術の近年の成果を効果的に取り組んだより合理的な河川計画の手法を確立し、そこから生み出される確かな情報を広く共有することによって、合意形成を図る計画論の形成を要請する。