

## 学位請求論文要旨

流域治水に活用するための実時間水面形予測法と本川・支川群を一体とした降雨流出・洪水解析法に関する研究  
Study on real-time prediction method for water surface profiles and rainfall-runoff-flood flow analysis method integrating the  
main river and its tributaries for implementing the integrated river plan

都市人間環境学専攻 見上哲章

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Tetsuaki Mikami

### 【研究の背景と目的】

我が国では、国、都道府県等の管理区間に指定された流域を構成する河川は、長期的な視点に立った河川整備基本方針と、それに基づき今後20～30年の具体的な個別事業の内容を明らかにした河川整備計画に基づき、堤防、河道、洪水調節施設等の整備が進められている。しかし、多くの河川は整備途上であり、近年、計画規模を上回る豪雨により甚大な水災害が発生している。被害の特徴として、国管理区間の破堤氾濫は甚大な人的・経済的被害をもたらす。整備率の低い都道府県管理の中小河川では水害が多発し、住民避難の逃げ遅れなどが生じている。これまでの水災害対策は治水と水防の両輪で対応してきた。しかし、近年の被害実態から、この両者だけでは気候変動の影響を踏まえた水災害に対して限界があることが社会に認識され、現在「流域治水」の取り組みが始まっている。しかし、流域治水の具体的な対策は、関係機関で協働して進めていくため検討を要する課題がある。

本研究では、流域治水の取り組みをより具体にするため、以下の2つに着目する。1つ目は、現状、河川の施設能力を上回る洪水が発生し、住民の避難の逃げ遅れや人的被害が生じていることから、住民避難のための地先単位の高精度な水位予測情報を提示する洪水予測技術の開発である。近年は、全国の河川に危機管理型水位計が整備されつつある。しかし、長大な河川の地先単位の水位、すなわち縦断水位の情報は十分ではない。このため、観測精度の高い多地点かつ多量な水位データと洪水解析法を組み合わせた新たな洪水予測技術が求められる。そこで、本研究では、精度の高い観測水面形時間変化に基づく洪水同化解析モデルの開発を行う。また、同化解析により得られた水理量を基にした新たな洪水予測手法を提示しその妥当性を評価する。

流域治水への活用を狙いとする本研究の着眼点2つ目は以下のとおりである。流域治水を進める上で重要なことは、現状における流域を構成する本・支川等と降雨によりそれらに流入する小流域を一体として洪水現象を理解すること、豪雨に対してダム、河道、流域にいつの時点にどの程度の水量が存在しているかという水収支分布を明らかにすることである。すなわち、現状における流域で生じる本・支川等の洪水現象と豪雨に対する洪水分担量を流域治水を進める関係者で共有できれば、河川と流域の今後の治水対策につながる。このため、流域内で時空間的に変動する降雨による流出量、本・支川等の水面形時間変化、それより定まる支川流入量、さらには本川上流と支川群から形成される流量と水収支の時間変化を一体的に評価する高精度な流出解析法と洪水解析法が必要である。本研究では、流域で生じる洪水現象の理解を図るための本・支川・2次支川と小流域を一体とする降雨流出・洪水解析法の開発と、それに基づく本川と支川流域単位の水収支分布を明らかにし今後の流域治水対策の方向性を提示する。

### 【本論文の内容と成果】

本論文は6章で構成される。各章の内容と成果の概要は以下のとおりである。

**第1章**「序論」では、研究の背景、目的、本論文の構成を示した。

**第2章**「我が国の治水と流域治水」では、第一に、我が国の水災害対策の両輪である治水と水防に関して、社会環境の変化を踏まえた取り組みの変遷を振り返るとともに、両者の一体的な取り組みが重要であることを示した。また、流域治水の考え方を示し、利水ダムも含めた既存ダムの事前放流による有効活用、全国の一級河川の流域治水プロジェクトの策定・公表等の近年の動向を説明した。また、アメリカにおける保険制度を利用した先進的な氾濫原管理をまとめた。アメリカの国による保険制度と自治体による土地利用規制施策、及び住民による対策を一体とする氾濫原管理のシステムは非常に合理的であり、我が国の氾濫原管理の施策に参考とすべきであることを述べた。

**第3章**「洪水解析とリアルタイム洪水予測に関する既往調査研究と本研究の位置付け」の洪水予測については、各種の洪水予測手法、観測データと数値シミュレーション結果をつなぐデータ同化技術に関する既往研究を概観した。洪水予測手法は、(1)降雨流出解析法を用いた研究、(2)上記と一次元不定流解析法を組み合わせた研究、(3)予測地点の水位を直接予測する研究、(4)観測水位に基づく洪水予測手法に関する研究に大別される。(1)、(2)の課題は、観測水位に比べて精度の低い流量を基に実施していることである。(4)は粒子フィルター法を用いた研究が挙げられる。粒子フィルター法を用いた水位同化手法は、河道を分割し1点程度の観測時間水位を逐次的に同化する考えであるため、水面形が縦断方向に連続しない場合がある。福岡は、観測水面形に対して洪水流解析の縦断水面形を説明できるように粗度係数等を調整することで流量の時間変化を高精度に推定している。一方、この手法は洪水後に得られたデータを基に手動で検討されているため、進行中の洪水に対してはリアルタイムに自動で縦断水面形を観測水面形に同化する技術が必要である。観測水面形への同化解析に必要な観測水位の数の評価については、十分な検討はなされていない。また、同化解析結果を基にして洪水流伝播の特性を反映した水面形予測の検討や流出解析結果を修正することで水面形予測の高精度化を図った研究は行われていない。そこで、本研究の第4章では、同化解析技術に収支や力学との整合を満足するアジョイント法を採用し、観測水面形時間変化に対する平面二次元洪水流同化解析モデルの構築を行い、上述に関する検討を行っている。

降雨流出・洪水流解析である洪水解析の既往研究は、観測水位に比べて精度の低い流量をベースとして、目的とする降雨流出現象や洪水流現象の分析が行われてきた。また、国や都道府県の治水計画では、それらの手法を用いて、管理境界で区切った検討、例えば国の治水計画は都道府県管理の支川は流域とみなし、支川からの流入量を貯留関数法により与える検討事例が多い。流域治水は、豪雨に対して、例えば国管理の本川と都道府県管理の支川群の河道整備、洪水調節施設の整備や洪水時の運用の他、小流域や地域での流域対策を行い河川への流出量抑制を図る。このため、観測精度の低い流量をベースとする手法や国や都道府県の管理境界で洪水流解析区間を区切る検討方法では、流域を構成する本・支川・2次支川等の流量や水位の縦断的な時間変化の評価、降雨流出量の評価は不十分である。そこで、本研究の第5章では、本・支川さらには2次支川で整備が進む観測精度の高い観測水面形の時間変化を基にした流域と本・支川一体の降雨流出・洪水流解析法を開発し、利根川の洪水に適用することで本・支川で生じる洪水現象を説明する。また、本川と支川流域単位で、降雨に対するダム、河道、流域の貯留量の時間変化である水収支分布を求め、流出特性を分析することで今後の流域治水対策の方向性を提示する。

**第4章**「観測水面形時間変化を用いた洪水流同化解析法とそれに基づく洪水予測モデルの開発および適用性の検討」では、洪水時の早期の住民避難に役立てることを目的に、観測水面形時間変化を基にしたアジョイント法による洪水流同化解析モデルを構築し、利根川の上流区間において近年の洪水に適用した。また、観測水面形の同化解析デ

ータを利用した新たな洪水予測手法を提示しその妥当性を評価している。以下に、本章の検討内容と成果を示す。

第一に、河川の縦断水面形を高精度に推定するために、精度の高い多地点での水位情報から得られる観測水面形の時間変化に解析水面形が合致するように、上流端流量ハイドログラフ、直接的な計測ができない粗度係数、樹木群透過係数を最適化する同化解析法の考え方を示した。上記を制御変数として、多地点の観測水位と平面二次元洪水流解析モデルに対してアジョイント法を適用することで水面形時間変化を推定する洪水流同化解析モデルの開発を行った。

第二に、構築した洪水流同化解析モデルを利根川上流区間の2洪水に適用した。制御変数の要素数は6つであり、水面形の同化に用いた観測地点は3箇所である。この結果、観測水面形時間変化に対する解析水面形の同化と、上流端流量ハイドログラフ、分類化された粗度係数(4分類)、樹木群透過係数の同定を、10回程度の反復計算により自動的に解析可能であることが示された。制御変数が観測地点数よりも少ない場合であっても水面形の同化は可能である。但し、その場合、抵抗特性値とピーク流量の推定値に幅が生じることがわかった。

第三に、上記の抵抗特性値及びピーク流量値に影響する制御変数の要素数と同化解析に必要な水位計の数の関係を検討した。縦断的に9地点の密な水位計測が行われたH29年10月出水データを用いて、水位計を間引くことで設置数を変えた7パターンの観測情報を用意し、それらに対して同化解析を行うことで、水面縦断形時間変化や流量ハイドログラフ、分類化した粗度係数、樹木群透過係数の同定に必要な水位観測の数を検討した。この結果、水位計の数が制御変数の要素数と同程度あれば抵抗係数や流量は概ね1つの値として決まることが示された。

最後に、洪水流同化解析モデルを用いた洪水予測手法に関する検討を行った。進行中の洪水に対して、最新の水位・雨量観測データが得られた現在時刻から将来数時刻先の水位を推定する時間を予測時間とする。本研究が提示する水面形予測の考え方は以下の2つである。1つ目は、対象とする河道の下流区間における現在時刻からの予測水位は、一般的に上流からの洪水流伝播で定まるため、予測時間が伝播時間以内であれば降雨流出解析による流量ハイドログラフを用いなくとも、高精度な縦断水面形が得られていれば当該時刻までの河道の洪水流解析だけで下流区間の水位は精度よく予測できるという考えである。しかし、洪水予測に必要な予測時間が洪水伝播時間よりも長い場合は、解析区間の上流端で、降雨の時系列データを入力条件とする降雨流出解析法から定まる流量ハイドログラフが境界条件として必要となる。この2つ目の降雨情報を用いた予測水面形の信頼性を高めるためには、降雨から定まる流量ハイドログラフは下流の観測水面形の時間変化を説明できていることが求められる。1つ目の水面形予測については水位の伝播時間の定量化が必要である。本研究では、観測水面形時間変化に基づく同化解析より得られた縦断水面形と流量ハイドログラフを基に、後述する対象区間の非定常性が小さいため、流量の縦断変化は、水位、川幅、水面勾配、粗度の縦断変化で近似できる特徴を用いて、解析上流端の水位を連続式に対する特性曲線法にしたがって下流側に伝播・変形させることにより、水位伝播時間を定量的に評価し、それを予測時間とする水面形予測手法(手法1)を提示した。また、2つ目の降雨情報を用いた水面形予測については、上記の観測水面形時間変化を説明する流量ハイドログラフに対して上流域から算出されるタンクモデルの状態量である水深を調整し流出量を整合させる水面形予測手法(手法2)を提示した。上記の水面形予測手法を平成25年9月洪水の利根川181.5km~133.0km区間に適用した結果、下流区間17kmの洪水流伝播特性を利用した水面形を予測するために必要な水位伝播時間は、洪水上昇期では伝播速度が大きくなり5~3時間、洪水ピーク時は2.6時間であり定量的に示された。また、上記手法1の水位伝播時間を予測時間とする洪水流解析水位は観測水位に概ね一致した。本解析法を対象区間の洪水予報システムとして適用すれば、1.5時間毎に3~5時間先までの予測水位情報を提供可能である。手法2では、観測水面形の時間変化に基づく同化解析流量ハイドログラフの解に対して、山地流域でのタンクモデルの水深を時々修正することで解析流出量が改善される。これによる水位ピーク時の予測水面形は、6~7時間の長い予測時間においても観測水面形への適合性が高いことが示された。

**第5章**「流域と本・支川を一体とした降雨流出・洪水流解析法の検討と流域治水への活用」では、流域治水を進める関係者に対して、流域で生じる洪水現象の理解と今後の流域治水対策の方向性を与えることを目的に、まず、観測水面形を基にした本・支川を一体とした降雨流出・洪水流解析法を示している。次いで、その解析法を利根川上流区間とそれに流入する烏川、群馬県管理の3支川、埼玉県管理の2支川の令和元年台風19号出水に適用している。そして、観測データに基づく本川と支川群の水収支分布や流出特性に関する検討を行っている。以下に本章の検討内容と成果を示す。

第一に、令和元年台風19号の豪雨に対して、利根川上流域の本川と支川群に設置された観測水面形の時間変化やダム貯留量、雨量の時間変化を分析した。これより、利根川本川の洪水に対して、上流ダム群の洪水調節による流量低減効果は大きい。しかし、利根川への支川烏川の流入量が大きく、且つ小山川等の県管理支川群の洪水ピークと本川のピークがほぼ重なったため、本川や支川の一部区間で計画高水位を超過する降雨流出・洪水流特性であった。

第二に、本・支川・2次支川に整備された観測水面形の時間変化は、流域に降った雨量の時空間の流出特性や洪水流特性を表していることに着目し、観測水面形に基づく本・支川一体の平面二次元洪水流解析法と、その解析水面形を観測水面形に合致するように小流域の降雨流出量をタンクモデルにより評価する流域一体の降雨流出・洪水流解析モデルを開発した。

第三に、上記解析法を利根川上流域に適用した。この結果、2次支川の測量データが十分でない支川流域では、精度の高い1次支川の観測水面形の時間変化に解析水面形を合致させる方法により、タンクモデルによる2次支川の流入量を水位から推定できること、本川と支川の一体的な水面形解析により高精度に支川流入量を評価可能であることを示した。また、2次支川の測量データが整備された支川流域では、2次支川までを洪水流解析の対象とすれば、概ね1次支川の縦断水面形や流量の縦断変化を評価可能であることを示した。構築した流域一体の解析結果から、台風19号による利根川の流量ハイドログラフの形成特性及び上記の本川と支川群の降雨流出・洪水流特性を定量的に説明した。本研究で提示した本・支川の降雨流出・洪水流の評価法は一般性が高く、他河川の流域治水の検討に活用可能である。

第四に、雨量、ダムデータ及び観測水面形を説明した解析流量等に基づき本川と支川群の水収支分布の時間変化を作成した。本川と支川群の流末流量ピーク時の降雨量に対する流域、ダム、河道の貯留量、及び流末流出量の洪水分担量を明らかにし、水収支分布図は、流域の貯留に適した空間を見出す有力なツールとなり得ることを示した。また、利根川の洪水と支川群の洪水ピークが重なる場合が、本川と支川群の氾濫リスクが高まることを踏まえて、流出率が比較的大きい小山川では、流域からの流出量を抑制する対策や上流区間で流量低減を図る対策が有効であること、流出率が小さい広瀬川では流域の浸透特性を保持して流出抑制を図ること等、支川流域の流出特性を踏まえた今後の流域治水の方向性を示した。本川と支川群のH.W.L.に対する縦断水面形の時間変化を治水安全度として見える化し、小山川と早川合流後の利根川区間は、川幅が減少しているため水位上昇を引き起こしていることを説明した。

最後に、今後、流域の防災関係者が、流域、ダム、河道等で様々な治水対策を取り組むことを踏まえ、対策前後の水収支分布の活用方法を示した。効果の高い対策は、水収支分布のダム貯留量、流域貯留量、河道貯留量を増大させ、洪水ピークまでに検討地点の河川分担量を減少させること、ピーク水位や流量を低減させることにある。

**第6章**「結論」では、本論文で得られた結果を総括した。同化解析水理データに基づく洪水流の伝播と降雨情報から解析される流出量ハイドログラフを観測水面形を説明する流量に対して修正する水面形予測手法を提示した。観測水面形に基づく本・支川一体の平面二次元洪水流解析法とタンクモデルを構築し、1次支川、本川の流量ハイドログラフが高精度に推定可能であることを示した。本研究で示した降雨流出・洪水流解析法に基づいて水収支分布を活用することは、今後の河川と流域での治水対策の評価及び進め方に対して重要な考え方となることを明らかにした。