

中央大学博士論文

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・洪水流解析法に
関する研究

Tetsuaki Mikami

見上 哲章

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
都市人間環境学専攻

令和4年度
2022年9月

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且つ多量な水位データと洪水解析法を組み合わせる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。

目次

第1章 序論

1.1 研究背景と目的	1
1.2 本論文の構成	4
参考文献	

第2章 我が国の治水と流域治水

2.1 治水と水防の変遷	7
2.2 海外における氾濫原管理と気候変動適応策への取り組み	15
2.3 流域治水の考え方と本研究の着眼点	21
参考文献	

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

3.1 降雨流出解析と洪水流解析に関する既往研究	30
3.1.1 降雨流出解析モデルの既往研究	30
3.1.2 洪水流解析法の既往研究	34
3.2 我が国の治水計画に用いられる降雨流出解析法と洪水流解析法	38
3.3 データ同化手法とリアルタイム洪水予測解析法に関する既往研究	41
3.3.1 データ同化手法の既往研究	41
3.3.2 洪水予測手法の既往研究	42
3.4 本研究の特徴	46
3.4.1 流域と本・支川を一体とした降雨流出・洪水流解析法の構築	46
3.4.2 観測水面形時間変化を基づく洪水予測モデルの開発	47
参考文献	

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

4.1 緒言	52
4.2 アジョイント法を用いた縦断水面形時間変化の同化解析モデルの開発	52
4.2.1 縦断水面形時間変化への同化の考え方と制御変数	52
4.2.2 評価関数	53
4.2.3 平面二次元流解析モデル	53
4.2.4 アジョイント法	54
4.3 対象河川の河道特性と洪水特性	56
4.3.1 利根川上流区間の観測体制	56
4.3.2 河道特性と洪水観測結果	57

4.4	洪水流水面形同化解析モデルの適用性	63
4.4.1	解析条件	63
4.4.2	平成23年9月洪水, 平成27年9月洪水, 平成29年10月洪水への適用結果	65
4.5	地形計測データと水位観測データの密度が水理解析結果に及ぼす影響	76
4.5.1	地形計測データの密度が水理解析結果に及ぼす影響検討	76
4.5.2	水位計の数が同化解析結果に及ぼす影響	80
4.6	アジョイント法による同化推定解析値の分布と粒子フィルター法による同化解析水面形の比較	83
4.6.1	アジョイント法による同化解析値の分布の評価	83
4.6.2	アジョイント法と粒子フィルター法による同化水面形の比較	87
4.7	水面形同化解析データに基づく洪水流の伝播と流出量修正に基づく水面形予測の検討	89
4.7.1	新たな洪水予測手法の全体像	90
4.7.2	洪水流同化解析法と降雨流出解析法及び解析条件	91
4.7.3	水面形時間変化の同化解析結果	94
4.7.4	洪水流伝播特性に基づく下流区間の水面形予測	96
4.7.5	同化解析流量に基づくタンクモデル流出量の修正と水面形予測	100
4.8	結言	103
	参考文献	

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

5.1	緒言	107
5.2	利根川上流域の対象河川と令和元年台風19号洪水の降雨流出特性	108
5.2.1	対象河川と水位観測体制	108
5.2.2	降雨の時空間分布と利根川本・支川の観測水面形の時間変化	111
5.3	流域と本・支川を一体とした降雨流出・洪水流解析モデルの構築	121
5.3.1	降雨流出・洪水流解析モデルの全体像	121
5.3.2	本・支川等の洪水流解析法	125
5.3.3	小流域の降雨流出解析法	126
5.4	降雨流出・洪水流解析モデルの利根川上流域への適用	128
5.4.1	洪水流解析の条件	128
5.4.2	小山川, 石田川等における2次支川の流入量算定法	130
5.4.3	本・支川等の水面形時間変化と本川流量ハイドログラフの形成特性	147
5.5	流域治水への活用に向けた本川, 支川群流域の水収支分布と流下能力の検討	152
5.5.1	豪雨による水収支分布の時間変化の算定法	153
5.5.2	利根川本川, 支川群の水収支分布と流出特性の検討	155

5.5.3 利根川本川，支川群における流下能力の時空間変化の分析	168
5.5.4 流域治水の各種対策に対する水収支分布の活用	176
5.6 結言	179
参考文献	

第6章 結論

6.1 結論	181
6.2 今後の課題	184
謝辞	186

第1章 序論

1.1 研究背景と目的

(1) 我が国の河川整備の現状と近年の水災害の被害特性及び流域治水への転換

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、それぞれの管理の下で河川整備が段階的に進められ、流域の治水安全度の向上が図られている。具体的には、流域内の本・支川の管理区間において、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 年から 30 年の個別事業を含む具体的な河川整備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等が進められている。しかし、多くの河川は、整備途上にあり、上記の河川整備計画で定めた目標流量に対して、一部の区間で安全を確保できていないのが現状である。

全国の河川の治水安全度が十分でない中、近年、全国各地で河川整備計画あるいは河川整備基本方針の目標とする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^{1)~4)}。水害被害の特徴は、国直轄区間の堤防の破堤氾濫は甚大な人的・経済的被害をもたらすこと、大河川に比べて整備率の低い都道府県管理の中小河川で水害が多発すること、また、住民の避難の逃げ遅れなどが挙げられる。これらの水害の激甚化や頻発化を生じさせる降雨には、総降水量の増加、短時間強雨と大雨の頻度・強度の増加などの地球温暖化の進行に伴う気候変動⁵⁾の影響が顕在化している。

このような、近年の甚大な水災害を受け、河川行政は、施設能力を超過する洪水が発生するものへと意識を改革し、氾濫に備えるソフト対策を充実させてきた⁶⁾。例えば、堤防の決壊や越水による氾濫に対して、住民の避難の重要性が高まっていることを踏まえ、従来の疎な間隔の観測所水位に基づく情報よりも密な水位情報を提供することを目的に、低コストでメンテナンス労力を抑えた「危機管理型水位計」を全国の国・都道府県管理河川に多数設置している⁷⁾。

上記の取り組みは主に河川を主体とする枠組みであったが、国の社会資本整備審議会は、上記の取組をさらに一步進め、気候変動の影響や社会状況の変化などを踏まえ、あらゆる関係者が協働して流域全体で対応する「流域治水⁸⁾」へ転換する方針を示した。流域治水は、「河川等の管理者が主体となって行う対策に加え、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その流域全員が協働して、1. 氾濫をできるだけ防ぐ・減らす対策、2. 被害対象を減少させるための対策、3. 被害の軽減、早期復旧・復興のための対策、までをハード・ソフト対策を多層的に取り組む」とされている。

河川の整備水準を向上していくには多大な時間を要する。このような中、気候変動による降雨量増加が予想されることを踏まえると、従来の河川区域の対策だけでは、氾濫に伴う被害の最小化は難しいと考えられる。このため、流域全体で今次・将来の豪雨に対応する流域治水への転換は妥当と言える。一方、上記3つの柱の具体的な取り組みや対策については、

今後、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。

(2) 研究の課題と目的

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、現状の河川の施設能力を上回る洪水が発生し、今後もその頻度は増加することが予想される中、住民の避難の逃げ遅れや人的被害が生じているため、①被害軽減に資する洪水時早期の住民避難のための高精度な洪水予測技術の開発である。

2つ目に関しては以下のとおりである。流域治水は、河川区域では本川と支川群の河道改修の加速化やダム・遊水地による洪水調節の効果的な運用を行い、流域では都市部の雨水貯留施設や調整池、水田地域の雨水貯留等の流出抑制対策を行うとともに、地域では防災まちづくりを進め、河川と地域の治水安全度を向上していく。このため、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、それらを評価可能な②本・支川を一体とした新たな降雨流出・洪水解析モデルの開発が必要である。

上述した①洪水予測についての現状と課題を述べる。

洪水時の早期の住民避難を促すためには、堤防からの溢水、越水の危険度を示す水位情報の提供が有効である。このような理由から、国・県の洪水予報河川や水位周知河川では、円滑な水防活用や早期の住民避難を目的に、進行中の洪水に対して、現状と将来数時間先の水位変化を予測している。しかし、現状の洪水予測には以下の2つの課題がある。

第一の課題は、進行中の洪水に対する水位情報を、計測した特定の場所だけに示すのではなく、地先単位の河川縦断水面形の時間変化を高精度に評価し提供することである。上述したように、全国の河川に危機管理型水位計が整備されているが、長大な堤防に沿う縦断水面形の時間変化を未だ網羅できていないのが現状である。従来の洪水予測^{9),10),11)}でも、観測地点の水位予測や、縦断水面形の予測は流量に基づき実施されてきた。具体的には、降雨量に対して流出解析を実施し、それを河道区間の上流端境界条件に与えて洪水解析により水位を検証または予測されている。しかし、流量は堰やダムなどを除けばリアルタイムに知ることが難しく、流量観測の精度は観測水位に比べて低いため、流量をベースとする予測水位の信頼性には課題が残されている^{12),13)}。これに対して、福岡ら^{12),13)}は、洪水時に観測された精度の高い水面形の時間変化を説明するように平面二次元解析法¹⁴⁾や一般底面流速解析法¹⁵⁾、FEBS法¹⁶⁾による洪水解析を行うことで、多くの河川で洪水流の水面形の時間変化、流量ハイドログラフ及び河道貯留量を工学的に十分な精度で算出可能であることを示している。この考え方は、洪水解析により得られる縦断水面形を観測水面形に手動で同化することで、同化水面形解析値とそれからの情報を得ていることに相当し、洪水予測の高精

度化に重要な情報を与えている。しかし、福岡らの観測水面形時間変化への同化方法は、洪水後に得られたデータに基づいて手動で行うものであり、進行中の洪水に対してリアルタイムに自動で同化が可能であるかは検討の余地がある。このため、洪水中に得られる離散的な観測水面形の時間変化に対して洪水流解析により得られる縦断水面形をリアルタイムに自動で同化する技術が必要である。

第2の課題は、進行中の洪水に対する将来数時間先の水面形予測の高精度化である。河川の洪水にあつては、対象とする河道の下流区間の水位は、一般的に上流からの洪水流伝播で定まる。このため、伝播時間以内であれば流出解析を用いなくとも、高精度な縦断水面形が得られ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。しかし、洪水予測に必要な予測時間であるリードタイムが洪水伝播時間よりも長い場合は、解析区間の上流端で流出解析流量などの適切な境界条件が必要となる。したがって、洪水流の伝播特性を適切に評価するとともに、下流区間の縦断水面形時間変化を説明する上流域からの流出予測流量の精度向上が課題である。

次に、流域治水を河川側からアプローチする②本・支川を一体とした新たな降雨流出・洪水流解析モデルの開発の課題を示す。流域の本・支川の河川整備は、(1)に示したように国と都道府県のそれぞれの管理区間で計画的に実施され、治水安全度を向上させてきたが、観測データや検討方法が十分でなかったため、流域全体を考えた治水計画や河川管理となっていない面がある。例えば、国管理河川に合流する都道府県管理河川の流入量は、治水計画上、一般に降雨流出解析により与えられている。しかし、支川流入量のハイドログラフは本川水位と支川水位との関係で定まる。このため、山間部等の勾配の大きい河川を除き、上記の支川流入量の評価は十分とは言えない。また、平成30年7月豪雨(西日本豪雨)による真備町の水害¹⁷⁾では、高梁川の水位が上昇し、真備町を流れる1次支川の小田川の洪水が吐けず、2次支川も含めて8カ所の同時多発的の氾濫被害が発生している。このように、流下能力の低い2次支川等の中小河川から越水や氾濫が生じやすい。

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分布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流解析法が必要である。流域で生じる洪水現象を理解し、豪雨の水収支関係が明らかとなれば、流域治水を進める関係者で共有でき、協働による今後の治水対策につながると考えられる。

このような背景のもと、本研究では、第一に、精度の高い観測水面形時間変化に基づく洪水流同化解析モデルの開発を行いその適用性を検討する。また、観測水面形時間変化への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。

第二に、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・洪水流解析法の開発と、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。

1.2 本論文の構成

図 1.2.1 に本研究の構成を示す。

第 1 章では、研究の背景と目的、本研究の構成を示す。

第 2 章では、まず、我が国の水災害対策の両輪である治水と水防の変遷を振り返り、治水と水防の一体的な取り組みが重要であることを示す。次いで、海外の氾濫原管理の取り組みを示す。そして、現在、関係者が一体で進めている流域治水について、基本的な考え、ここ数年の動向、本研究の着眼点を示す。

第 3 章では、降雨流出解析モデルと洪水流解析モデルに関する既往研究を概観する。次に、我が国の治水計画に採用されている両者の解析法を国の技術基準を基に示す。さらに、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手法、及びそれを用いた洪水予測手法の既往研究をレビューする。流域治水を推進する上で必要な技術的課題や洪水予測の高精度化に必要な課題を整理した上で本研究の特徴について述べる。

第 4 章では、精度の高い観測水面形時間変化を用いた洪水流同化解析に基づく洪水予測モデルの開発を行い、その適用性について次の 4 項目の検討を行う。第一に、多地点の観測水位の時間変化と平面二次元浅水流解析法に対して、アジョイント法を適用することにより、自動的に流量ハイドログラフ、抵抗係数の同定と縦断水面形の同化が可能な解析モデルを開発する。第二に、上記の同化解析モデルを利根川上流区間の洪水に適用し、本解析法の妥当性を検証する。第三に、ALB 測量による詳細な河道内地形と簡易水位計データを含めた密度の高い観測水位情報を用いて、河川の水理解析に必要な水面下の地形情報密度と、水面形同化解析に必要な水位計の数についての検討を行う。第四に、水面形同化解析により得られた水面形時間変化と流量ハイドログラフを用いた新たな洪水予測手法の検討を行う。

第 5 章では、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、観測水面形を基にした本・支川等を一体とした降雨流出・洪水流解析法の検討、観測データに基づく本川と支川群における水収支分布図を作成し流出特性に関する検討を行う。対象河川は、利根川上流の国直轄区間とそれに流入する群馬県管理の 3 支川、及び埼玉県管理の 2 支川とする。第一に、令和元年台風 19 号出水について、流域の降雨分布と観測水面形の時間変化から洪水の特徴を分析する。第二に、本・支川等を一体とする洪水流解析モデルを構築するとともに、それに流入する 2 次支川流域を結合した流域全体の降雨流出・洪水流解析モデルを構築する。第三に、上記の本・支川等の水面形時間変化を基にした降雨流出・洪水流一体解析法を上記の洪水に適用し、本・支川の水面形時間変化、2 次支川と 1 次支川からの流入量、及び本川の流量ハイドログラフを高精度に算定できることを示す。第四に、これまでの検討で明らかとなった令和元年台風 19

号洪水に対する本川と支川群の降雨量，ダム貯留量，流域貯留量，河道貯留量，河道通過流量の時間変化である水収支分布図を作成する．水収支分布図を基に流出特性を分析するとともに，解析水面形とH.W.L.の関係から本・支川群の流下能力の時間変化を分析し，今後の治水対策の方向性を提示する．

第6章では，本研究で得られた成果を総括し，結論と今後の課題について述べる．

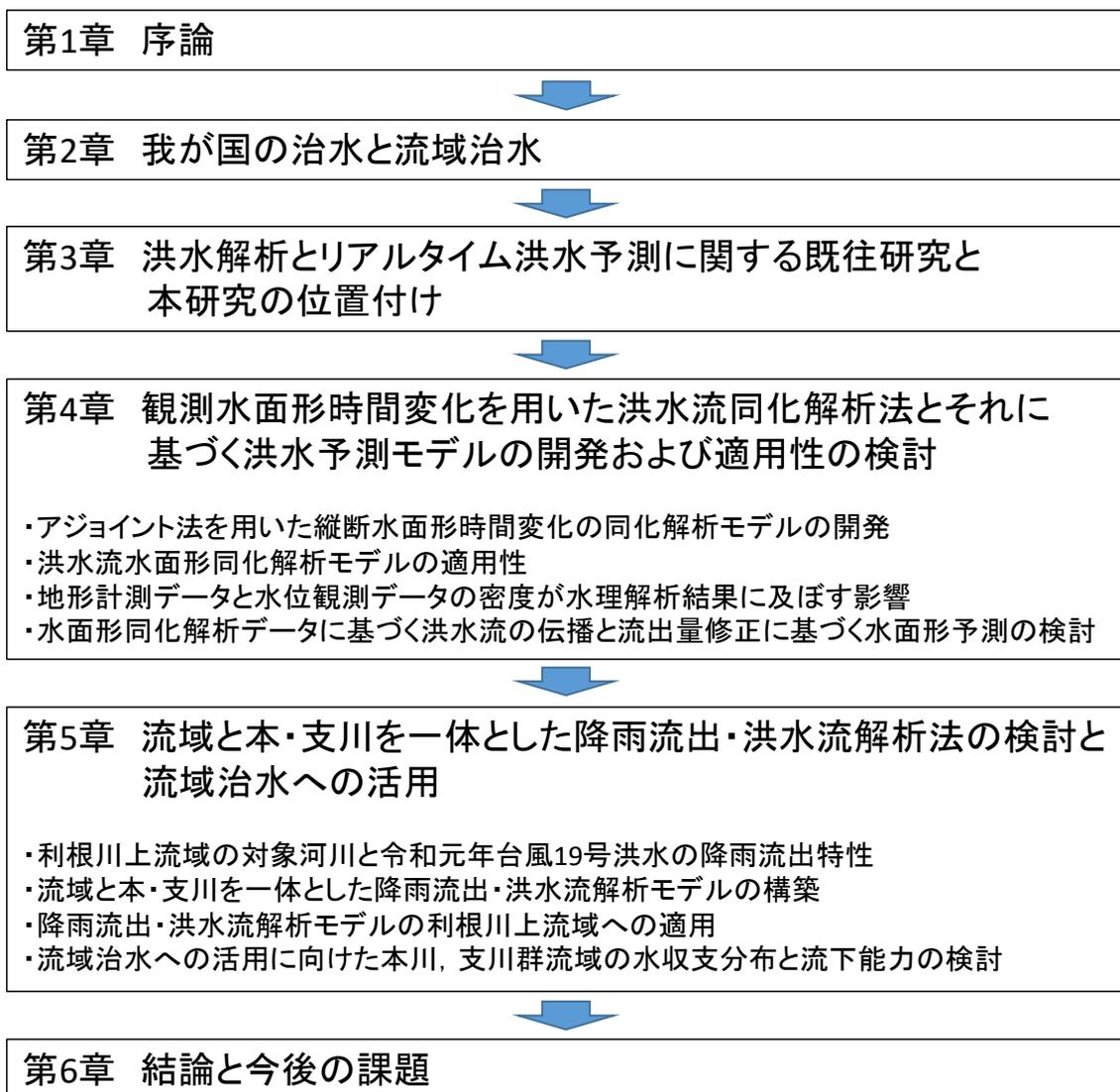


図 1.2.1 本研究の構成

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害の概要
- 2) 土木学会水工学委員会水害対策小委員会：2018 年 7 月西日本豪雨災害調査団（中国地区）報告書，2019
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局：令和元年台風 19 号に係る被害状況について
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局：令和 2 年 7 月豪雨による被害と対応
- 5) 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）：第 5 次評価報告書
- 6) 社会資本整備審議会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～，2015
- 7) 国土交通省 水管理・国土保全局：革新的河川技術プロジェクト ～危機管理型水位計の実装状況とその効果～，建設マネジメント技術，pp. 24-28，2020
- 8) 社会資本整備審議会：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について ～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～，2020
- 9) 椿涼太，小林健一郎，内藤正彦，谷口丞：洪水予測技術の現状と課題について，河川技術論文集，第 19 巻，pp. 1-6，2013.
- 10) 佐山敬洋，立川康人，寶馨：バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化，土木学会論文集 B，Vol. 64，No. 4，pp. 226-239，2008.
- 11) 宮田昇平，中島隆信，白石芳樹，鳥元尚徳：分布型洪水予測モデルのパラメータ同定及びフィードバック手法に関する研究，河川技術論文集，第 19 巻，pp. 313-318，2013.
- 12) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術（招待論文），河川技術論文集，第 12 巻，pp. 1-6，2006.
- 13) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方ー多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化するー，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73，No. 4，I_355-I_360，2017.
- 14) 福岡捷二，渡邊明英，永井慎也：河道内貯留量推算のための水位観測法と粗度係数に与える流れの非定常性の影響，河川技術論文集，第 10 巻，pp. 71-76，2004
- 15) 後藤岳久，福岡捷二，大作和弘：観測水面形時系列から求めた本・支川の流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの同定定数と洪水予測計算，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 75，No. 2，I_1291-I_1296，2019.
- 16) 大野純暉，佐々木博文，竹村吉晴，福岡捷二：巨岩・巨石で覆われた河川の観測水面形に基づく洪水流量の算定法に関する研究，河川技術論文集，第 27 巻，pp. 265-270，2021
- 17) 内閣府：平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について

第2章 我が国の治水と流域治水

近年、我が国では、豪雨に伴う水災害^{1)~4)}が激甚化、頻発化しており、水害リスクが増大している。具体的には、流域の本川で生じる氾濫は、人命・資産・社会経済に著しい被害が生じ、河川改修の進捗が遅い支川等の中小河川では、氾濫頻度と逃げ遅れによる死者数が増大している。

我が国の水害対策は、治水と水防の両輪で対応してきた。治水対策は、河川の上流、本支川、左右岸の流下能力バランスに配慮してハード中心の整備を行い、洪水氾濫リスクを減少させてきた。水防は平時と洪水時において都道府県、市町村、住民に役割を与えており、洪水の氾濫の危険性が高まるとそれぞれの主体が主にソフト対策により地先を対象として浸水被害の防御や減少を図ってきた。この治水と水防の両輪による水害対策は、大規模な洪水氾濫が生じている今日においても、また気候変動の影響がさらに顕在化し被害の増大が懸念される将来においても果たす役割は非常に大きい。しかし、近年の水害被害の実態から、この両者だけでは気候変動を踏まえた水災害に対応できないことが理解されてきた。このような背景の下、従来の河川管理者による治水対策に加えて、集水域から氾濫域にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して様々な対策に取り組む「流域治水⁵⁾」が重要であることが社会で認識され、現在、流域治水の取り組みが始まっている。

本章では、まず、我が国の水災害対策の両輪である治水と水防に関して、社会環境や水害の変化を踏まえてそれらの変遷を振り返り、治水と水防の一体的な取り組みが重要であることを示す。次いで、アメリカとオランダにおける氾濫原管理の取り組みを示す。そして、現在、関係者が一体として進めている流域治水について、基本的な考え、ここ数年の動向、本研究の着眼点を示す。

2.1 治水と水防の変遷

2.1.1 治水の目的

「治水」とは、洪水による氾濫を防ぐことである。それゆえ、治水事業の目的は、水害から国民の生命や財産を守ること、安全・安心な社会の形成と社会経済の発展をもたらすことである。治水の原則は河川の水位を下げることである。そのため、我が国の治水方式は、築堤、ダムや遊水地による洪水調節施設の整備、河道の拡幅、河床掘削、放水路の整備等を実施してきた。他にも、上流のある場所で溢れさせることで下流区間の水位を下げる方法が古くから用いられてきたが、この治水方法は、下流域に住む多くの住民の生命や財産及び社会経済のために上流の地域が水災害を被ることになる。そのため、現代において、上記の上流域の氾濫を許容する治水方式には課題が残っている。

「水防」は、洪水または高潮に対して、水災害を警戒し防御することで被害の軽減を図り、公共の安全を保持することを目的とする。水防は、昔から村落を中心に自治組織で実

施されてきた歴史的経緯がある。このため、水防は地先の洪水被害の減少を第一の目的としている。

以下に、我が国の治水事業と水防に関わる変遷を振り返り、流域の水害リスク軽減を図る上では治水と水防の一体的な取り組みが重要であることを示す。

2.1.2 社会環境の変化と治水の変遷⁶⁾

(1) 地先防御の治水

明治以前の治水方式は、地先の集落や田畑を水害から守るための地先防御が基本であった。具体的には、その地域の地形特性や地先の重要度を考慮して左右岸や上下流で堤防高を変えたり、集落の近くに堤防を設けたり、自然堤防を利用するなどして集落や田畑に氾濫水が流入しないような取り組みを行っていた。また、富士川の支川である笛吹川に代表される水害防備林のように、あらかじめ洪水を越水させる場所に水防林を設け、氾濫流の勢いを減少させることで地域を水害から守る取り組みを住民自らが取り組んでいた。さらに、水害常襲地帯では、現在の避難所や水害時の非常食を備えた水塚や水屋を設け、各世帯には揚げ船を準備しておくなど、洪水への備えや対策を実施していた。

現在の河川改修は高水工事といわれる堤防整備や河道掘削が主体であるが、明治中期までの河川事業は低水工事が主体であった。これは、当時の国内の大量な物資輸送手段は舟運であり、その大動脈として河川の役割が大きかった。

(2) 河川法の制定による近代治水のはじまり

近代治水は明治 29 年の河川法の制定からはじまる。河川は、自然公物であるがこの法律により公物管理として制度化された⁷⁾。この法律の制定により、国や地方自治体が河川を管理する河川管理する体系化が確立され、本格的な河川改修を行うことができるようになった。

河川事業は長期計画に基づき実施されるものであるが、我が国の初めての長期計画は、明治 43 年の全国的な大水害を設置された臨時治水調査会で策定された。この大水害は、利根川、荒川、多摩川水系の広範囲にわたって各地で堤防が決壊し関東平野を浸水させ、関東地方の被害は、死者 769 人、行方不明 78 人、家屋全壊 2,121 戸、家屋流出 2,796 戸に及ぶ⁸⁾。米や日用品の市場価格は水害前に比べて約 1.4 倍に高騰した⁹⁾。このように大水害が一度発生すると社会や経済に大きな影響を与える。この水害を契機に、国は、長期的な治水事業の重要性を認識し、第一次治水計画が策定され、65 河川を直轄河川として治水事業が進められた。昭和 8 年に策定された第三期治水計画では、中小河川を対象とした補助事業も組み込まれ、本川から支川の河川改修を進められることになった。当時の大河川の改修では、これまで氾濫を許容する治水方式から、連続堤防の築堤や狭窄部や川幅の拡幅等の事業による河川内で洪水を安全に流す現在の治水方式に変更された。現在の計画規模は年超過確率に基づいているが、この当時の計画対象流量の決定は既往最大洪水を対象としていた。

(3)戦後における治水計画の基盤構築と河川法の改正

①治水計画の基盤構築¹⁰⁾

昭和20年から30年前半にかけて、カスリーン台風(昭和22年)、キティ台風(昭和24年)、狩野川台風(昭和33年)等の激甚な豪雨災害が多数発生した。上述したように治水事業の計画規模は既往最大洪水流量を対象としていたが、利根川では幾度も計画規模を変更している。このため、昭和33年策定の河川砂防技術基準では、既往最大流量の設定方法から計画規模の年超過確率に対する降雨量と降雨流出モデルを用いて計画流量を設定する方法に変更された。その後、河川砂防技術基準は幾度となく改定されているが、基本的な考えは以下のとおりである。「計画規模は一般には計画降雨の降雨量は年超過確率で評価するものとし、その決定にあたって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ものとする。」と記載されている。以下に、計画規模の設定の要素である河川の重要度との関係、水害被害の実態、経済効果に関して説明する。

表2.2.1は、現行の河川砂防技術基準(平成30年3月改定)¹¹⁾の河川の重要度と計画規模を示している。一般には、河川の重要度は一級河川の主要区間においてはA級またはB級、一級河川のそのほかの区間及び二級河川においては、都市河川はC級、一般河川は重要度に応じてD級あるいはE級が採用されている例が多い。

次に、既往洪水による被害の実態についてであるが、これは現在の水害統計調査¹²⁾により把握可能である。この水害統計調査は、1年毎に整理されており、1年間に発生した洪水、内水、高潮、津波、土石流等の水害被害を対象に、各種資産や河川・道路等の公共土木施設及び運輸・通信等の公益事業施設等に発生した被害額を整理している。水害統計調査は、昭和36年より毎年継続して実施されている。このため、特に著しい被害を被った地域については既往洪水を無視して計画規模を定めるのではなく、上記の水害統計書等の被害実態を踏まえて、実績洪水規模の再度災害が防止されるように計画を定めている。

表 2.1.1 河川の重要度と計画の規模

河川の重要度	計画の規模(対象降雨の降雨量の超過確率年)
A級	1/200以上
B級	1/100～1/200
C級	1/50～1/100
D級	1/10～1/50
E級	1/10以下

最後に、治水事業の投資効果について示す。上述したように治水事業の便益は、治水工事を実施したことによる浸水被害額の減少分を評価している。なお、費用は事業費や維持管理費等である。中安は、この当時の最先端の降雨流出モデルである単位図法¹³⁾の開発者であるが、経済評価指標も提案しており、ある超過確率の流量を対象にした治水工事を行うことにより得られる利益の年平均を期待値とし、これを全工事費で割った防災利益率 B/C を提案している。その後、国土交通省により 1970 年に治水経済調査要綱が策定され、2000 年には治水経済調査マニュアル(案)¹⁴⁾が策定された。この治水事業の投資効果の算定方法が示されたことで、事業の妥当性が国民に理解されることとなった。治水事業の投資効果は、現在、事業評価に名前を変えているが、事業の新規採択時評価、約 3 年毎の事業再評価、事後評価等が実施されている。

以上に示したように、治水事業の目標とする計画規模への年超過確率の導入、降雨流出解析モデルの開発、水害被害額の統計調査の整備、治水事業の費用対効果の算定法が確立され、現在の治水計画の統合的な技術体系が確立された。

② 河川法の改正(昭和 39 年)

戦後の高度成長期には、経済の発展に伴う電力需要の増大、経済発展に伴う工業用水や都市用水の需要に対応するため、治水・利水の目的を有する多目的ダムの開発が進められた。

昭和 20 年から 30 年の大水害が多発したこと等を受け、また、社会経済の発展に伴う流域の開発と各種用水の増加に対応するため、さらに、利水事業の進展に伴い、新たな水利使用と既存の水利用の調整など利水関係規定の整備を行う必要が高まったことを受け、昭和 39 年に河川法の改正が行われた。この法律改正により、河川整備の目的として、治水に加え利水が追加された。また、水系毎に工事実施基本計画の策定が義務付けられ、これまでの区間ごとの管理から上流から下流までの水系一貫した河川管理へと転換された。水系一貫の河川管理という理念はこの当時から使われていたようである。しかし、実際のところは本川主義、すなわち水系を構成する本川が一度氾濫すると激甚な災害が生じるため本川の治水事業や管理を優先することに重きが置かれた。

上記の治水計画の技術体系が整備される時期に同じくして治水事業の長期的予算が確保された。昭和 34 年の伊勢湾台風を契機として、長期的な視点に立ち計画的に治水事業を実施することを目的に、昭和 35 年に治水特別会計法が制定され、初めて法律に基づく治水事業の長期計画が策定されることになった。これにより、昭和 35 年より 9 次にわたる治水事業五箇年計画として財政的な裏付けのある治水事業が平成 15 年度(第 9 次治水事業七箇年計画(平成 9~15 年度))まで行われた。

また、伊勢湾台風を契機に昭和 36 年に災害対策法が制定された。伊勢湾台風による犠牲者数は 5,098 名に及ぶ¹⁵⁾。この多数の犠牲者を出した災害の誘因は高潮であるが、住民への情報伝達不足、危険地帯の周知徹底が十分でなかったこと、さらには行政の不十分な防災体制が被害を拡大した。当時の世論からも行政の防災に対する要望が強まったことを受け、災害対策基本法が制定された。災害対策基本法の主な内容は、①防災に関する責務の明確化、

②総合的防災行政の整備、③計画的防災行政の整備、④災害対策の推進、⑤激甚災害に対処する財政援助等、⑥災害緊急事態に対する措置、の6点である。この法律は、平常時、災害時、災害復旧時等における国、都道府県、市町村の計画的な防災行政の整備と推進を図ることを目的としている。

(4)急速な都市化の進展に対応するための総合治水対策

高度成長期の都市部では、周辺の山を切り崩したり、水田を埋め立てるなどして宅地開発が進められ、これらにより流域内の保水機能や遊水機能が低下し、洪水時の雨水流出量が増大した。例えば、鶴見川流域では、高度成長期に鉄道や幹線道路が次々に整備されたことにより、首都圏のベッドタウンとして市街地が拡大していき、昭和33年の市街地率は約10%であったのに対して、昭和50年には市街地率は約60%に、現在の市街地率（平成25年）は約86%に達している¹⁶⁾。このような市街化の発達は、流域からの流出量を増大させ、河川だけで洪水を安全に流すことが難しくなり、外水氾濫や内水氾濫によるいわゆる都市型水害が頻繁する状況となった。

このような都市部での水害は、全国的にも多く見られるようになった。これを受け、都市部の治水対策は、河川対策のみならず流域対策も含めて河川管理者、下水道管理者、流域の自治体が一体となって取り組む必要があるとの認識が高まり、図2.1.1に示すように、関係管理者が連携して、河川整備、雨水の貯留・浸透対策等の流域対策、警戒避難体制の確立等による被害軽減対策を柱とする総合治水対策¹⁷⁾が昭和54年より全国の河川で実施された。

総合治水河川は、現在、全国17河川で指定されている。総合治水対策は、計画目標を定めた河川整備計画と流域整備計画の2つに基づき実施される。総合治水対策に関する協議会の設置とそれによる取り組みが進められたが、総合治水対策は法的拘束力がないため、河川管理者と自治体の努力義務による。また、市街化の進展に対して治水施設の整備や流域対策の整備が追いつかない、計画期間内に治水施設が完成しない、3地域区分が土地利用計画に反映されない等の課題が生じた。河川区域外の水害に関する法律には、水防法、建築基準法等があるが、上記の総合治水対策を効果的に推進する法律は存在しなかった。これを受け、平成15年に総合治水対策の法定計画とも解される特定都市河川浸水被害対策法が制定された。この法指定を受けた都市河川では、雨水浸透阻害行為の許可制、保全調整池の指定等に法的根拠をもたせ、流域整備計画に代わる流域水害対策計画を策定し、それを通じて河川管理者と下水道管理者、自治体における連携強化が図られた。

しかし、上記の特定都市河川浸水被害対策法は、開発が進展する都市河川への法律であるため、地方を含めた個別の問題をかかると河川に適用できない課題があった。

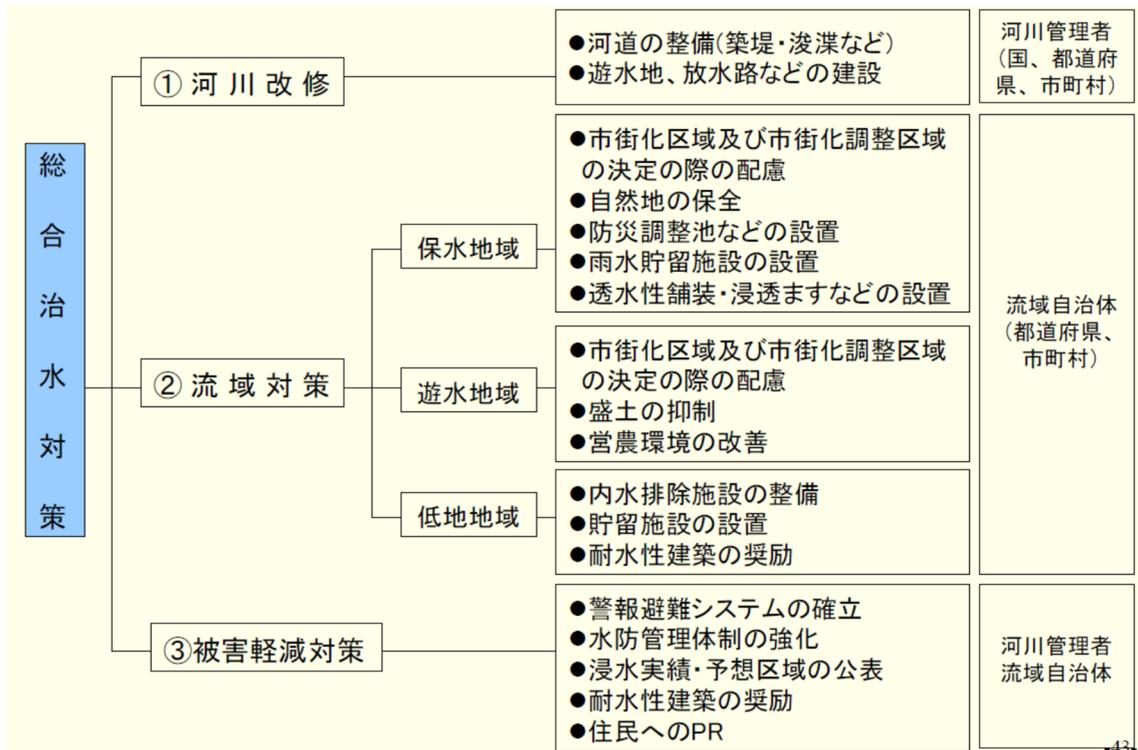


図 2.1.1 総合治水対策の取り組み¹⁷⁾ 出典：国土交通省

(5) 河川の整備計画制度の見直し

改正前の河川法(昭和39年制定の旧河川法)には以下の課題があった。一つ目は、旧河川法に基づき水系毎に「工事実施基本計画」を策定していたが、河川管理者のみが策定しており、その手続きにおいても地域住民の意見は反映されていない問題があった。二つ目は、これまでの河川管理は治水と利水が主体であったが、昭和後半から平成初頭にかけて自然愛護思想と地球環境問題への関心が高まり、社会で河川環境の重要性が認識されてきた。特に、当時の中小河川はコンクリート三面張りで覆われた河川が多く、河川が本来有している生物の生息環境や多様な景観を失っていた。これらの課題を受けて平成2年から多自然型川づくりの推進が図られるようになった。三つ目は、これまでの工事実施基本計画は河川整備の内容が詳細に決められておらず、具体的な川づくりの姿が明らかとなっていなかった。

これらの課題を受け、工事実施基本計画の制度を見直し、新たな計画制度を創設した。具体的には、工事実施基本計画で定めている内容を、河川整備の基本となるべき方針に関する事項を定める「河川整備基本方針」と具体的な河川整備に関する事項を定める「河川整備計画」に区分した。河川整備計画については、具体的な川づくりを明らかにするとともに、地域の意向を計画に反映する手続きを導入した。また、河川整備の目的に、「河川環境の整備と保全」を新たに追加することで、治水、利水、環境の総合的な河川整備を図ることとした。

河川整備基本方針は、長期的な視点に立った河川整備の基本的な方針を示すものである。このため、河川整備基本方針の治水に関しては、基本高水流量、計画高水流量の配分等を定めているが、個別事業など具体の河川整備の内容は定めていない。一方、河川整備計画は、

今後 20～30 年後の河川整備の目標と内容を明確にする。具体的な治水に関しては、整備目標は戦後最大洪水を対象とすることが多い。また、個別の河川工事の目的、種類、場所を明記する。現在、河川整備基本方針は 109 水系全てで策定されている。河川整備計画は、平成 13 年以降より順次策定されている。

その後、河川整備計画に基づく治水事業は着実に進められてきたが、設置後 40 年以上経過する河川管理施設の老朽化が課題となった。河川管理施設は、洪水時にその機能を発揮することが求められ、平常時の維持管理が必要である。平成 25 年の河川法の一部を改正する法律では、河川管理施設及び許可工作物に関して、良好な状態に保つよう維持又は修繕の義務を明確化し、事後保全から予防保全の維持管理に変更した。また、維持管理に関する技術基準を定めた。

近年、気候変動の影響が顕在化し、全国で計画規模を超える洪水が全国で多発し、水害被害が甚大化している。国は、このような自然災害の激甚化や頻発化に対応するため、国土強靱化基本計画に基づき、平成 30 年度から防災・減災、国土強靱化のための 3 カ年緊急対策、及びそれを深化させ、令和 3 年度から防災・減災、国土強靱化のための 5 カ年加速化対策により、治水事業の効果を早期に発現させることを目的に全国の河川整備事業を従来の工程から前倒しで進めている。

2.1.3 水防の変遷

水防は、洪水または高潮に対して、水災害を警戒し防御することで被害の軽減を図り、公共の安全を保持することを目的に昭和 25 年に制定された。

水防は、洪水時の水防活動と洪水への備えとして平時からの取り組みに大別され、国、都道府県、市町村、住民毎の活動が明確化されている。

洪水時の水防活動は、都道府県の水防計画に定めた市町村の水防活動に基づき、増水した河川のパトロールや堤防に土嚢を積んで越水を防ぐなどの水防工法を用いることで被害を最小限にする活動である。水防は、昔から村落を中心に自治組織で実施されてきた歴史的経緯がある。このため、水防活動は、水防管理団体と呼ばれる市町村、または水防事務組合等が責任を負い、市町村が主体となって消防機関や水防団（消防団）が出動し洪水時に対応している。このような意味で、水防は地先の洪水被害の減少を第一の目的としている。

平時からの水防の取り組みを概観すると以下のとおりである。昭和 30 年に洪水予報河川、平成 17 年に水位周知河川が制度化され、洪水時の観測水位や水位予測結果を基に洪水予報が住民に周知されるようになった。また、計画規模を対象に、河川が氾濫した場合に想定される浸水区域や浸水深の公表、それに基づく洪水ハザードマップが作成され、住居や工場等の水害リスクと避難方法等が住民や地域に周知されることになった。また、平成 23 年の東日本大震災や計画規模を超える降雨による水災害が多発していることを踏まえて、想定最大規模の降雨による浸水想定区域の指定や公表を行い住民へ周知された。このように、洪水時の水害リスク、洪水時の情報伝達、避難方法等を住民に伝えてきたが、避難の逃げ遅れに

よる死者数は毎年発生している。この原因には、計画的に整備されてきた治水事業の効果により氾濫頻度が減少することで水害に備える意識の低下や、要配慮者利用施設における入居者の逃げ遅れが挙げられる。また、洪水時の水位情報が当時はプル型の伝達方法であったこと、その水位情報は住民の住む地域よりも遥か上流に位置し地先の洪水危険性を表していないこと、ハザードマップは市町村により周知しているが、住民自らが行動する避難方法を示していないこと等の課題が上げられる。また、水害リスク情報としての浸水想定区域は、上記の計画規模降雨と想定最大規模降雨を対象に周知されたが、これらは確率規模が大きいため、現状の施設能力を上回る程度の高頻度の洪水規模における浸水想定区域を示すことが重要である。

上述の課題と平成後半以降の水災害を受けて、国は水防法の一部を改正した。大きな取り組みとして、平成 29 年に、水害に対する意識を「施設整備による洪水の発生を防止するもの」から「施設では防ぎきれない大洪水は発生するもの」へと根本的に転換した。ハード・ソフト対策を総合的に行い、社会全体で水害に備える「水防災意識社会」を再構築するため、大規模氾濫減災協議会が創設された¹⁸⁾。これにより、河川管理者、都道府県、自治体の関係者が一体となって主にソフト対策を中心とした取り組みが実施されている。また、自治体による洪水対応のタイムライン、住民による洪水時のマイタイムラインの作成が取り組まれ、地域と住民の水防も進みつつある。

全国の河川に危機管理型水位計¹⁹⁾が設置され始め、洪水時の分かりやすい情報周知の方法も見直され、住民が地先の水位情報を知ることが容易となりつつある。学習指導要領も見直され、子供への防災教育も取り組まれている。要配慮者利用施設や地下街等の様々な施設管理者に対して避難確保計画や浸水防止計画作成の義務付け等の水災害防止体制全般の整備を盛り込んだ水防法改正が行われている。また、台風時に、鉄道等の公共機関を計画的に運休すること利用する者の安全を確保する取り組みも行われている。このように、近年は、昔の地先を対象とする水防に加えて、より広い概念の「水防」の観点が追加されている。

本節では、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。治水に関しては、河川整備基本方針と河川整備計画に基づく河川整備、都市部における総合治水対策、今般の河川整備事業の加速化について述べた。一方、治水事業は長期間を要するため、現在の施設能力を上回る洪水の発生や計画規模を上回る洪水も発生する可能性がある。このため、現状の施設能力を上回る進行中の洪水に対しては水防により浸水被害減少を図る対策を行っている。具体的には、浸水想定区域図やハザードマップによる平時からの水害リスクの住民への周知や避難方法の提供、事前防災計画であるタイムラインやマイタイムラインの作成、子供への防災教育の実施、危機管理等も含めた地先水位情報の提供、大規模減災協議会による河川管理者、都道府県、自治体等の一体的な取り組みを行い、治水と水防によるハード・ソフトの総合的対策により被害の最小化を図ることが水害対策の基本であることを示した。

2.2 海外における氾濫原管理と気候変動適応策への取り組み

2.2.1 アメリカの氾濫原管理

氾濫原管理(Floodplain management)は、河道やダム、堤防等の治水施設のみによる対策だけでなく、氾濫原で浸水被害の減少を図るための対策を行うものである。具体的な氾濫原の対策には、土地の嵩上げ、建物の構造上の工夫(例えば、ピロティ構造)、輪中堤、貯留浸透施設等による流出抑制、土地利用の規制、居住地の誘導、水害保険、土地の買取り(バイアウト)、さらにはハザードマップによる危険区域の周知等、様々な施策が挙げられる。ここでは、館²⁰⁾がまとめたアメリカ合衆国(以下、アメリカという)で実施されている氾濫原管理について土地利用に関連する施策を中心に説明する。

アメリカの水害対策は、構造物対策と非構造物対策に大別²¹⁾される。大河川を対象に概説すると、構造物対策は、陸軍工兵隊(Army Corps of Engineers:USACE)などの機関が洪水防御、舟運、水供給、水力発電、水質等について、計画、設計、施工、運用、維持管理を行っている。また、非構造物対策は、防災や消防部門の事業を担当する連邦危機管理庁(Federal Emergency Management Agency:FEMA)などの機関が、被害軽減対策として、洪水保険、避難や物資の貯蔵、警報伝達、被害評価、復旧、災害援助等を実施している。後述する洪水保険や土地利用規制等の氾濫原管理の施策の多くは連邦危機管理庁(FEMA)に管轄され、直接実施しているのは自治体(Community)である。但し、氾濫原管理のうち、浸水の危険がある地域の建物の嵩上げや移築等に関しては構造物対策を担当する陸軍工兵隊(USACE)が実施している。アメリカの治水に関する施策は、ダムや堤防等の構造物による整備と氾濫原管理である。

アメリカでは、1900年代前半から幾度となくミシシッピ川等で洪水氾濫が発生しており、堤防整備やダム整備を行い被害軽減を図ってきた。しかし、洪水被害は増え続け、従来の方法では限界があることが示された。1966年、White教授を議長とする連邦治水政策専門委員会では、洪水被害の危険がある場所での土地利用管理を含む幅広い手段を統一的に講じるという連邦方針が示された。Whiteは、1942年の学位論文”Human Adjustment to Flood”²²⁾で、洪水による氾濫原管理を提案し、それ以降の氾濫原管理の施策に最も大きな影響を与えている。

このような背景を受け、1968年に洪水保険法(National Flood Insurance Act:NFIA)が制定され、連邦の補助による国家洪水保険が開始された。洪水保険は、国民の生命を守り、洪水被害による財産の損害を減少させることを目的としており、後述する氾濫原管理と密接に関係している。また、氾濫原管理を推し進めたのは1993年のミシシッピ川とミズーリ川で発生した大洪水²³⁾が契機とされている。この水害を受けて、構造物対策に偏重した洪水被害軽減手法の反省、氾濫原の自然機能の重要性の認識、地方や個人のインセンティブを重視した施策が認識され、治水対策の変革の方向性が示された。

洪水保険と氾濫原管理を簡潔に説明すると以下のとおりである。自治体が洪水保険に参加するためには最低限の内容を含む氾濫原規制法の制定と施行が必要である。自治体

の住民は洪水による危険性の高い場所(年超過確率 1/100 の浸水想定区域)に新築または改築する際、連邦から貸付を受ける場合は洪水保険に加入する必要がある。すなわち、貸付を必要とする者が氾濫危険性の高い場所に住む場合には、自治体が定める建築物規制等に従う必要があり、自治体は連邦の洪水保険への参加を通じて氾濫原対策を実施・指導する必要がある。これにより、国民が危険な場所に住むことの抑制につながり、仮に居住する場合には被害軽減を図る対策が必要となり、さらに、洪水被害を受けた際には保険の支払いにより被害額を軽減する仕組みである。

以下に保険制度を活用した氾濫原管理の内容を補足説明する。アメリカの危機管理庁(FEMA)は、洪水保険法に基づき洪水保険プログラム(National Flood Insurance Program: NFIP)で氾濫原管理を行っている。このプログラムでは、図 2.2.1 に示す洪水保険料率図(Flood Insurance Rate Map:FIRM)²⁴⁾を作成し、年超過確率 1/100、さらには 1/500 の浸水区域等を示すことで洪水氾濫による危険度を住民に周知している。氾濫原管理の対象となるのは 1/100 以上の浸水区域(Special Flood Hazard Area:SFHA)である。保険料はこの浸水区域図により設定されている。上述したように、住民が SFHA 内での建物を取得や新築または改築する場合は、連邦関連の貸付けを受ける際に連邦の洪水保険に加入しなければならない。また、その他の融資機関は保険購入の義務があることを借り手に伝えなければならない。なお、保険の販売は、民間保険会社と FEMA で行われており、民間の営業ノウハウを活用している。

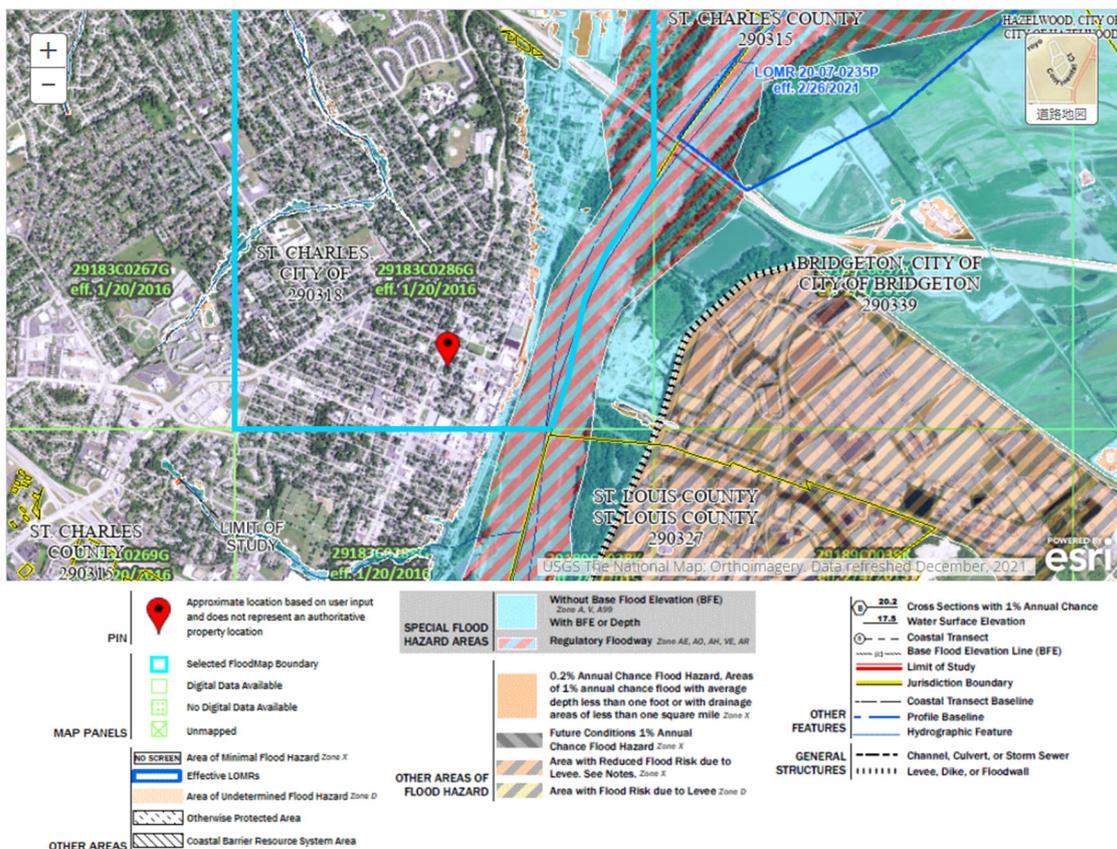


図 2.2.1 洪水保険料率図(Flood Insurance Rate Map:FIRM)²⁴⁾

自治体は国による洪水保険へほぼ強制的に参加しており、建築基準法、土地のゾーニング等の土地利用規制法等の氾濫原規制に関する条例や法律を策定する。自治体がSFHA内で居住する者に要求する建築物規制を示すと以下のとおりである²⁵⁾。建物の最も低い床面より下は駐車場や建物、シェルター等への進入路しか許されない、浸水の可能性がある場合は壁の内外の水圧が自動的に釣り合うような構造にすること、新築や改築する場合は図2.2.1に示した1/100発生確率の設計洪水位(Base Flood Elevation: BFE)よりも高く嵩上げする、もしくは耐水化することなどを示している。自治体には、図2.2.1の洪水保険料率図に示した規制洪水路(Regulatory Floodway)について、洪水水位を1フィート以上上昇させる盛土、新築、改築等の行為を禁じている。

1994年には、氾濫原管理をより一層推進し、氾濫原規制のより強力な適用を目指すことを目的に洪水保険法の改正が行われている。代表的なものに洪水保険プログラムの自治体格付けシステム(Community Rating System: CRS)²⁶⁾とバイアウト(Property Acquisition Project)²⁷⁾である。

自治体格付けシステム(CRS)は、国の洪水保険に参加している自治体に対して、氾濫原管理のインセンティブを与えることを目的としている。具体的には、表2.2.1に示す自治体による事業種別の氾濫原対策項目について取り組みを得点化し、得点に応じた氾濫原管理レベルを10の階級に格付けして、保険料の割引率を設定している。

バイアウトとは、連邦危機管理庁(FEMA)が、洪水で被害を受けた不動産を取得し、その不動産所有者を氾濫原の外に移転させる氾濫原対策である。バイアウト事業では、建物は取り壊され、その土地は湿地等の自然生態系の復元や公園等のレクリエーションとして整備される。バイアウトは、洪水被害を受けても保険制度を利用して氾濫原に戻って家屋を修復し、次の洪水に備える世帯がある程度存在していたため、その負のサイクルを打ち切るため、またそのような繰り返し発生する被害は保険支払いや災害援助による連邦予算を圧迫し続けたため導入された経緯がある。ミズーリ州では、1993年の大洪水で大きな被害を受けたため、大規模なバイアウトプロジェクトが実施された。1995年に同規模の洪水が発生したが、浸水の危険性の高い地域の住居の2/3以上が取り壊されていたため、被害は劇的に減少し、バイアウトの事業効果が発揮された²⁸⁾。

表 2.2.1 事業種別の氾濫原対策項目(CRSの得点項目)

住民への情報提供		洪水被害軽減	
	標高証明		氾濫原管理計画
	地図情報		家屋の取得と移築
	住民参加プロジェクト		家屋の改築
	危険情報の公開		排水施設の管理
	洪水防御と所管	洪水への事前対応	
	洪水防御の支援		洪水警報
地図の作成及び規制			堤防の安全確保
	追加的洪水データ		ダムの安全確保
	空き地の保全		
	より高度な規制		
	洪水データの管理		
	雨水管理		

以上に示したアメリカの氾濫原管理は、広大な国土と河川の大部分が掘り込み河道で流下型氾濫形態の河川特性及び氾濫特性を踏まえた取り組みである。一方、我が国は、国土の約 10%しかない洪水氾濫原に、人口の約 50%、資産の約 75%が集中しており、堤防により氾濫被害を防ぐ対策を実施しているが、ひとたび氾濫すれば氾濫流が拡散し被害を甚大化する。このため、日本は、アメリカに比べると洪水に対する土地利用の施策範囲は限られ、上述した保険加入の対象となる 1/100 以上の浸水区域の被害ポテンシャルは大きい。このため、アメリカの保険制度やパイアウトをそのまま取り入れることは難しい。我が国の国土利用と河川特性、氾濫特性に応じた氾濫原管理が必要である。そのためには、流域で生じる本川と支川群を一体として捉えた洪水現象の理解と、それぞれの河川の確率規模毎の浸水状況を把握し、その地域の実情に沿った氾濫原対策を考えていく必要がある。

一方、アメリカの保険制度と自治体の土地利用規制や対策、及び住民による対策を一体とする合理的な氾濫原管理のシステム、さらに氾濫原管理を推進する CRS の取り組みは非常に合理的である。このようなアメリカの合理的な施策のシステムは、我が国の今後の流域治水の氾濫原管理において、国の法律と自治体の条例、住民による対策の連携方法に対して参考にするべきである。

2.2.2 オランダの治水分野における気候変動適応策の取り組み

気候変動に関する政府間パネルの第 4 次報告書(2007 年)及び第 5 次報告書(2013)を受けて、オランダ、イギリス、アメリカ、日本等の先進諸国では、気候変動適応策が展開されている。特に、オランダでは、気候変動による将来の降雨予測から河川流量及び氾濫リスクの増加の推定、適応策と法整備、治水事業のハード対策に至るまでの一貫した取り組みを進めている。ここでは、北海道河川財団、国土交通省、北海道大学等がまとめたオランダにおける気候変動適応策^{29,30)}の気候変動予測、洪水リスク評価と対応策等について示す。

オランダは国土の約 1/4 が海水面以下にあり、過去の大水害の経験から堤防リングに囲まれている。オランダの治水に関する行政組織は国、州、自治体から成るが、デルタ委員会(Delta Program Commissioner)や水管理委員会(Water Board)の独自組織がある。デルタ委員会は、各組織の連絡役と後述する気候変動に関する治水の具体策を示したデルタプログラムを進めている。水管理委員会は、水管理・氾濫防御に関する歴史のある行政組織で非常に重要な役割を担い、上下水道から洪水氾濫防御までの水に関する責任を有する。表 2.2.2 に示す日本とオランダの治水安全度目標と整備率を見ると、オランダの治水安全度は日本に比べて高い。2017 年以降は、下記に示す気候変動予測を踏まえて、従来の流量確率から氾濫確率に基づく整備目標に移行している。

オランダは、2007 年 EU 洪水指令³¹⁾を契機に、気候変動の影響を考慮した洪水リスク管理をデルタプログラムの目標の 1 つとして、政府主体で取り組んでいる。日本の気象庁に相当するオランダ王立気象研究所(koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut:KNMI)は、

表 2.2.2 日本とオランダの治水安全度目標と整備率³⁰⁾

項目	日本	オランダ	
		2016 年まで	2017 年以降
治水安全度の目標	降雨確率： 1/200～1/100	流量確率： 1/10,000～1/1,250	洪水氾濫発生確率： 1/100,000～1/300
整備率	約 40%(※1)	概成	不明

※荒川の堤防整備率を示している。

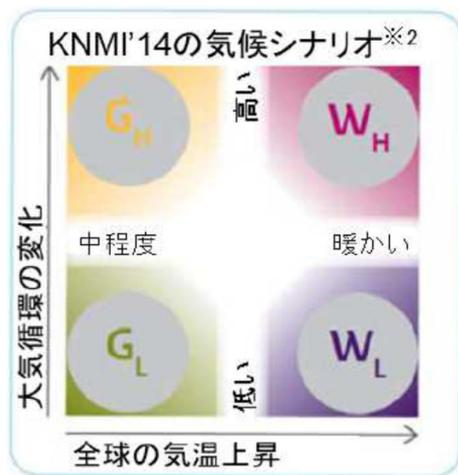


図 2.2.2 KNMI'14 における将来シナリオの分類³²⁾



図 2.2.3 堤防の洪水防御基準³⁴⁾

2050 年時点の世界の気温上昇と大気循環の強弱について、図 2.2.2 に示す独自の 4 つの気候変動シナリオを設定³²⁾し、欧米を中心に用いられている分布型の降雨・流出解析モデル (HBV モデル³³⁾) を用いて将来の流量を予測している。

デルタプログラムでは、上記の 2100 年あるいは 2085 年の将来予測流量値を参考に、2050 年までに図 2.2.3 に示す洪水による堤防の防御基準³⁴⁾を達成する事業を予定している。なお、図 2.2.3 の洪水防御基準は、その堤防からの越水を生じさせない基準水位の年超過確率だけではなく、堤防の滑りやパイピング等も含めた洪水氾濫発生確率である。

洪水リスク評価は、リスクベース・アプローチが適用されている。このリスクとは、洪水発生確率に浸水被害額を乗じたものである。洪水リスク管理は、表 2.2.3 に示す重層的な氾濫対策³⁵⁾により実施される。第 1 層の洪水防御を最優先とし、上述した堤防整備が最も重要な対策である。第 2 層の土地利用に関する対策、第 3 層の危機管理の対策については現在取り組みが進められている。デルタ地帯の南部に位置するドルドレヒトは、高潮と洪水の

両方の影響により水位上昇を生じやすく浸水リスクが高い地域であり、上記の重層的な氾濫対策のパイロットエリアとされている。ドルドレヒトでは、第1層の対策では上述したように浸水リスクが高いため1ランク高い堤防防御基準に引き上げ、第2層の対策として文化財を守るための小堤防の設置、家屋の1階部分が浸水しないように高床にするなどの対策を実施している。第3層の危機管理対策では、洪水に関する展示や避難の情報提供や避難訓練、子供への防災教育、避難情報の伝達方法を住民に周知している。第2層の対策は、現状では法的に規定されていないため、できるだけのことをするスタンスとされている。今後、法的に規定されれば土地利用規制や建物の構造上の工夫の取り組みが進むと予想される。

我が国においても、オランダの先進的な知見を参考として、気候変動の影響予測や適応策検討の発展が望まれる。但し、オランダの重層的な氾濫対策である第2層の土地利用に関する対策、第3層の危機管理に関する対策は、現在の日本で実施している対策と比べると大きな違いはない。

表 2.2.3 オランダにおける重層的な氾濫対策³⁵⁾

	各層の詳細	オランダで実施されている対策
第3層: 	◎あらゆる氾濫に対応する危機管理 情報提供(洪水警報、リスクマップなど)、 避難施設の整備	・洪水警報 ・リスクマップ ・ハザードマップ ・アプリ「浸水するの?」 ^{※3} (Overstroom ik?) ^{※3} など
第2層: 	◎氾濫被害を抑制する土地利用 氾濫流の抑止 土地利用など	・土地利用計画 ^{※2} (Land use planning) ・建築基準法 ^{※2} (Building codes) ・耐水建築物 ^{※2} (Water proof building) など
第1層: 	◎予防策を実施する氾濫防御 最優先 氾濫防御基準を満たすために、 定期点検(6年毎)、ハード対策の実施 ^{※2}	・砂浜の形成(Sand Motor) ・防波堤や高潮堰、堤防の建設 ・河川空間拡張プロジェクト (Room for the River) など

2.3 流域治水の考え方と本研究の着眼点

2.3.1 流域治水への転換に至るまでの取り組み

(1) 「流域の対応を含む効果的な治水の在り方」中間答申³⁶⁾

流域治水の取り組みの始まりは、滋賀県の平成26年「滋賀県流域治水の推進に関する条例³⁷⁾」とされることが多いが、福岡³⁸⁾が指摘しているように、流域治水が河川行政の中に最初に表れたのは、平成12年河川審議会流域治水小委員会「流域の対応を含む効果的な治水の在り方」中間答申³⁶⁾である。中間答申では、ダムや築堤などの通常の河川改修を引き続き着実に実施することに加え、

- ・輪中堤・宅地嵩上げ及び土地利用方策
- ・河川と下水道との連携強化
- ・貯留施設等による流出抑制対策
- ・ハザードマップの作成・公表 等

の流域対策を導入し、治水対策のメニューの多様化を図ること、それにより地域の治水対策の選択肢を増やし、地域や河川の特性に応じたより効果的な治水対策を実施することをとりまとめた。福岡³⁸⁾によれば、上記の取り組みは期待したほどには進展しなかったようである。しかしながら、都市部の河川に限らず全国の河川での雨水流出域での貯留または浸透による流出抑制対策の導入や、氾濫域での二線堤による浸水被害拡大の防止、霞堤の特徴を活かした氾濫水の排水機能を確保するための保全や土地利用規制、災害危険区域の指定等、現在の流域治水対策の一部施策に重複するものがある。

(2) 滋賀県の流域治水の取り組み

滋賀県では、平成26年に「滋賀県流域治水の推進に関する条例³⁷⁾」を制定し、河川の整備による「ながす」対策を基幹対策とし、森林や農地の浸透の保持、公園や建物等において雨水貯留浸透機能の維持を行う「ためる」対策、氾濫原における建築制限い被害を最小限に「とどめる」対策、避難行動方法や地域防災力を「たかめる」対策の4つを柱とする流域治水を総合的に実践している。さらに、浸水想定区域図の指定・公表を義務付けられている一級河川と二級河川に加えて、その公表が義務付けられていない普通河川等も対象に、浸水想定区域図を作成し「地先の安全度マップ」として公表している。現在の流域治水の先進的な取り組みと言える。

(3) 土木学会による今後の防災・減災に関する提言^{39), 40)}

土木学会は、令和元年台風19号災害を受けて設置した調査団において、後述する流域治水に関して同様の提言をされている。その中で、現在の浸水想定区域図は、想定最大規模降雨と河川整備基本方針の外力規模を対象としており、市町による土地利用計画へ反映するには情報が不足していることを指摘している。このため、河川整備の現状や整備の進捗に合わせて、さらに小さい洪水規模も対象として、どの程度の降雨で、どの地域が、

どの程度浸水するかがわかる「多段階リスク明示型浸水想定図(仮称)」を新たに作成し、まちづくりへの反映や地域住民に周知することを提言している。

2.3.2 流域治水の考え方

(1) 流域治水の考え方⁵⁾

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が、以下の課題がある。

- ・気候変動による外力増大に対して、今後さらなる水災害の激甚化・頻発化が予想される。
- ・現状においても気候変動の影響が顕在化しており、その外力のスピードに対して河川整備の事業進捗が追いついておらず、従来の河川区域を中心としたハード対策だけでは対応が難しい
- ・人口減少や少子高齢化、空き地や耕作放棄地の増大が進む中、国土形成も「コンパクト＋ネットワーク」を基本とする土地利用に大きく変わる方向にある。社会と国土利用が変化する中、流域内で水災害リスクをどのように分担させるかについて、土地利用誘導、地域のまちづくり、住まい方へ反映する時期にある。
- ・これまでの水災害対策は、河川管理者が河川の氾濫を防ぐまたは氾濫被害を減少させる取り組みを事前防災として取り組み、氾濫するおそがある場合には地先や地域で水防により被害最小化に取り組んでいる。一方、昔の江戸時代の治水は、地域を水害から守るために地形特性や自然堤防を利用するなどして、住民自らが被害を軽減する取り組みを行っていた。このように流域のあらゆる関係者で水災害対策に対して意識を持ち連携や行動することが重要である。

以上の課題を踏まえ、流域治水は、気候変動による外力増大の影響を踏まえ、また、国土の強靱性、持続可能性、包摂性の視点を取り入れた新しい水災害対策を目指す。流域治水の定義は以下のとおりである。

「河川、下水道、砂防、海岸等の管理者が主体となっていく対策に加え、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その流域全員が協働して、①氾濫をできるだけ防ぐ・減らす対策、②被害対象を減少させるための対策、③被害の軽減、早期復旧・復興のための対策、まですべてを多層的に取り組む」

流域治水の具体の対策は図 2.3.1 に示すとおりである。



図 2.3.1 流域治水の施策のイメージ⁵⁾ 出典：国土交通省

流域治水の特徴は以下のとおりである。

① 氾濫をできるだけ防ぐ・減らす対策

河川整備や下水道整備等による従来の治水対策の事業をこれまで以上に加速化することが基本である。また、既存ダムやため池等の貯留施設の有効活用を図り下流への流量低減を図る対策、都市部に限らず雨水貯留浸透施設の整備を推進し集水域から河川への流入量を低減させる対策、浸水頻度の高い土地や既存の霞堤等の河川沿いの遊水機能が高い区域を適切な土地利用制限を図ることで下流の洪水流量を低減させる対策等が挙げられる。このうち、利水ダムも含めた既存ダムの有効活用については、令和2年6月に、国が管理する一級水系でダムを有する全99水系において、利水者の同意の下に治水協定が締結された。令和3年4月末には、二級水系のうち321水系で治水協定が合意された。これらの治水協定に基づき、一定規模の大雨が予想された時にダムの洪水調節容量を拡大する「事前放流」が実施され、下流の浸水被害リスク軽減を図っている。

これまでの治水対策は、事前にハード施設を整備し、洪水時にその機能を発揮させる洪水に備えた対応であったと考えられる。流域治水は河川区域の施設だけでなく流域内の既存施設を徹底活用する。これは上記の洪水に備える対策という観点では同じであるが、事前放流のように運用方法についても最大の効果を発揮させる時間軸の考えが導入された治水対策と考えられる。

② 被害対象を減少させる対策

上記①の氾濫をできるだけ防ぐ対策が水災害対策の基本であるが、河川施設の能力を上回る洪水が発生し氾濫することも視野に入れた被害対象を減らす対策が必要である。これには浸水リスクの軽減を図ることを目的に、都市部局と河川部局が連携し、地域のまちづくりや、土地利用規制や誘導、住まい方の工夫等により対応することが重要である。具体的な取り組みとしては、浸水リスクの高い区域の土地利用規制や災害危険区域の指定、より浸水リスクの低い区域への居住の誘導、盛土構造物を活用あるいは保全して浸水区域を限定する対策、一定の浸水リスクが生じる区域の宅地の盤上げや建築物のピロティ化等の工夫等の対策が有効と考えられる。この取り組みを進めるため、「水災害対策とまちづくりの連携のあり方」検討会が設置され、令和2年8月に提言がとりまとめられ、「水害リスクを踏まえた防災まちづくりのガイドライン⁴¹⁾」が策定された。さらに、国土交通省では、令和3年度末時点現在、上記の取り組みをさらに推進することを目的として、発生頻度が高い降雨規模から低頻度の降雨規模で想定される浸水範囲や浸水深を示した「多段階の浸水想定図」と「水害リスクマップ」を作成し、公表を進めている。このような取り組みが、今後の市町村の立地適正化計画の防災指針に反映され、事前防災型まちづくりへと転換することが期待される。また、地域で必要なハード・ソフト対策が検討され、地域の治水安全度が向上することが期待される。

③ 被害の軽減・早期復旧・復興のための対策

全国の国管理河川と都道府県管理河川で大規模氾濫減災協議会が設置され、現在、河川管理者、都道府県、市町村、气象台等の関係者等が連携して、避難の取り組み、水防活動の取り組み、氾濫水の排水や浸水被害軽減に関する取り組み、災害時の復旧支援や情報共有体制の強化を図っている。

④ 総合治水対策との違い

流域治水と総合治水の違いについて示す。総合治水の対象は都市部を流れる河川を対象とし、流域の急激な開発に伴う雨水の河川への流出増に対して、土地利用の誘導や貯留浸透施設等を整備することで、都市河川流域の流出量を抑える対策を基本とした考えである。したがって、ハード対策の基本的な考えは、開発による流出量の増大分を貯留浸透施設で減少させることで代替するものである。

一方、流域治水は、気候変動による降雨量増大を踏まえつつ、都市を流れる河川だけではなく全国の河川を対象とし、流域の既存ストックを有効活用するとともに、地域のまちづくりや、土地利用規制や誘導、住まい方の工夫等まで含めて、流域全員で多層的な対策を実施する治水対策である。

2.3.3 流域治水の動向

流域治水について、福岡⁴²⁾は、洪水流が河川から溢れることを防御する治水と地域での洪水氾濫や水害リスクを軽減する水防の両者が、大規模氾濫時の被害軽減に対して果たす役割が大きいことに着目し、治水と水防に関する技術と法律の関係、法律の作用及び望ましい法律間の相互関係について論じている。図 2.2.2 は、福岡が当時提案した大規模氾濫時の被害軽減のための法律を「氾濫を抑える対策」、「氾濫に備える対策」、「まちづくり・住まい方の工夫」で仕分けし、ソフト技術とハード技術それぞれについての取り組み項目と実施者の所管を示している。福岡⁴²⁾は、図 2.3.2 で示した項目について、水防行政に関わる河川、下水道、都市、建築、土地不動産行政等の関係機関が連携して対策を一体的に取り組むことが大規模氾濫への対応能力が高まることを述べている。これは、言い換えれば法律と技術が一体として機能しないと流域治水の実行性が担保されないことを示していると考えられる。

流域治水の計画・体制の強化と上記①～③の対策の4項目の実行性を高めるために、特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律（通称、流域治水関連法）が令和3年5月に交付された。この関連法は、特定都市河川浸水被害対策法、水防法、土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律、河川法、下水道法、都市計画法、防災のための集団移転促進事業に係る国の財政上の特別措置等に関する法律、都市緑地法、建築基準法を一括改正する法律である。

令和3年3月に、全国の109全ての一級水系において、「流域治水プロジェクト」を策定・公表し、流域内の河川管理の異なる本・支川の河川改修、流域対策、ソフト対策等の取り組みを進め、流域のあらゆる関係者が事前防災対策を加速させている。

今後も必要な法律整備や流域治水協議会により流域治水の取り組みが進むと考えられるが、それを支える技術の向上が求められる。流域治水の技術面における本研究の位置づけは2.3.4に示す。



図 2.3.2 大規模氾濫時の被害軽減に向けた法律と対策項目の関係⁴³⁾

2.3.4 流域治水への本研究の着眼点

本研究では、流域治水の取り組みに実効性を持たせることを目的に、以下の2つの技術開発を行う。

現状、河川の施設能力を上回る洪水が発生し、今後も気候変動の影響によりその頻度や被害の大きさは増加することが予想される中、住民の避難の逃げ遅れや人的被害が生じている。現在、危機管理水位計を含めた水位計が本・支川において密に設置され、洪水時の水位情報が得られようになった。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。このため水防に着目した検討を行う。1つ目の技術開発は、観測精度の高い離散的な観測水位の時間変化に対して洪水流解析により得られる縦断水面形をリアルタイムに自動で同化し、今後数時間先の将来を予測する「住民避難に資する高精度な洪水予測」の検討を行う。

2つ目に関しては以下のとおりである。全員参加の流域治水は、国・都道府県管理の河川改修等の加速化を行い、流域内の既存施設の有効活用、リスクの低いエリアへの誘導、住まい方の工夫等まちづくりも含めた対策を講じていく。このため、河川管理者には、流域を構成する本・支川の降雨流出量、河道流下能力、氾濫リスク等を適切に評価し、関係者へ提示することが求められる。現状の河川の管理や計画は、管理境界で区切られて実施されている。この管理区間に基づく河川計画や管理は、管理責任や割り当てられる事業予算等の現実的な観点からみれば間違っておらず、それぞれの管理区間の治水安全度を効率的に向上させてきた。一方、流域治水は、管理区間の異なる本・支川の流下能力や氾濫リスクを流域全体や支川流域の視点から捉えて評価し、まちづくりと一体となって水害対策を進める。このため、従来の本川と支川等の管理境界に分けて検討するのではなく、流域を構成する例えば支川小流域と本・支川群を一体とみて、流域で生ずる降雨流出現象、洪水流現象を関係者で理解することがまず重要である。流域治水は、河川区域では本川と支川群の河道改修やダム・遊水地による洪水調節の効果的な運用を行い、流域では都市部の雨水貯留施設や調整池、水田地域の雨水貯留等の流出抑制対策を実施することで、河川と流域が協働して治水安全度を向上していく。このため、現状の本川・支川群の流域において、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を明らかにすることは、今後の河川改修と流域対策への基本情報を与える。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を一体的に評価する高精度な降雨流出・洪水流解析法と、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。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害の概要
- 2) 土木学会水工学委員会水害対策小委員会：2018 年 7 月西日本豪雨災害調査団（中国地区）報告書，2019
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局：令和元年台風 19 号に係る被害状況について
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局：令和 2 年 7 月豪雨による被害と対応
- 5) 社会資本整備審議会：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について ～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～，2020
- 6) 国土交通省 水管理・国土保全局：近代治水百年を振り返って
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/shinngi/to-1.html
- 7) 岸田弘之：公物管理に関する河川と海岸の比較分析に基づく沿岸域管理のあり方について，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 67，No. 2，2011.
- 8) 松浦茂樹：明治 43 年水害と第一次治水長期計画の策定，国際地域学研究，11 号，pp. 149-173，2008.
- 9) 松浦茂樹：治水長期計画の策定の経緯とその基本的な考え方の変遷，第 6 回日本土木史研究発表会論文集，pp. 147-155，1986.
- 10) 小池俊雄：社会基盤は文明を拓く転換装置 ～特集：気候変動を踏まえた今後の水災害対策について～，河川，No. 890，pp. 4-9，2020.9
- 11) 国土交通省 水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 計画編，調査編
- 12) 国土交通省 水管理・国土保全局：水害統計調査
- 13) 中安米蔵：本邦河川洪水の Unit Graph について，建設省直轄工事第 7 回研究報告，pp. 333-346，1956
- 14) 国土交通省 水管理・国土保全局：治水経済調査マニュアル（案），令和 2 年 4 月
- 15) 細田大造：伊勢湾台風と災害対策基本法の制定，季刊消防科学と情報，98 巻，pp. 8-13，2009.
- 16) 竹田正彦：鶴見川流域における特定都市河川指定による効果事例 ～特集：流域治水関連法～，河川，No. 900，pp. 13-20，2021.7
- 17) 国土交通省 水管理・国土保全局：総合治水対策の仕組みと現状・効果
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/gaiyou/seisaku/sougouchisui/pdf/2_2genjou.pdf
- 18) 社会資本整備審議会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について ～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～，2015
- 19) 国土交通省 水管理・国土保全局：革新的河川技術プロジェクト ～危機管理型水位計の実装状況とその効果～，建設マネジメント技術，pp. 24-28，2020
- 20) 舘健一郎：アメリカの氾濫原管理のいま，国土技術総合研究所資料，No. 106，2003.5.

- 21) 栗木稔, 末次忠司: アメリカの治水戦略 ―日本の治水対策の比較を通じて―, 土木研究所資料, 第 3279, 1994. 5.
- 22) Gilbert F. White : Humax Adjustment to Floods - A Geographical Approach to the Flood Program in the United States, University of Chicago, 1945.
- 23) 米国河川研究会 : 洪水とアメリカ ミシシッピ川の氾濫原管理 1993 年ミシシッピ川大洪水を考える, 山海堂, 1994. 12.
- 24) FEMA のホームページ (<https://msc.fema.gov/>)
- 25) Federal Emergency Management Agency : Protecting Building Utilities from Flood Damage, 1999. 11.
- 26) Federal Emergency Management Agency : Flood Insurance Program Community Rating System Biennial Report to Congress, 200. 10.
- 27) Raymond J. Burby : Cooperating with Nature, Confronting Natural hazards with Landuse Planning for Sustainable Communities, Joseph Henry Press, p. 47-49, 1998.
- 28) Stemming the Tide of Flood Losses, Stories of Success from The History of Missouri' s Flood Mitigation Program, Missouri State Emergency Management Agency.
- 29) 千葉学, 戸村翔, 山本太郎他 : オランダの治水分野における気候変動適応策の検討・実施状況に関する調査報告, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp. 463-468, 2018.
- 30) 国土交通省 北海道開発局 : オランダにおける気候変動適応方策について
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000001weys-att/splaat000001wf69.pdf
- 31) The European Parliament and the Council of the European Union : DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, 2007
- 32) KNMI : KNMI' 14: Climate Change scenarios for the 21st Century - A Netherlands perspective, pp16, 2014.
- 33) Deltares: Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins Final report of GRADE 2. 0.
- 34) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs : National Water Plan 2016-2021, pp14, 2014.
- 35) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs : Delta Programme 2015 : Working on the delta, pp14, 2014.
- 36) 河川審議会計画部会 : 流域での対応を含む効果的な治水の在り方 中間答申, 2000.
- 37) 滋賀県 : 滋賀県流域治水の推進に関する条例
- 38) 福岡捷二 : 近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える, 河川技術論文集, 第 28 巻, 2022. 投稿中
- 39) 土木学会台風 19 号災害総合調査団 : 台風 19 号災害を踏まえた今後の防災・減災に関する提言 ～河川, 水防, 地域・都市が一体となった流域治水への転換～, pp. 1-6, 2020.

- 40) 公益社団法人土木学会：豪雨激甚化と水害の実情を踏まえた流域治水の具体的推進に向けた土木学会声明，pp. 1-11，2021.
- 41) 国土交通省 都市局，水管理・国土保全局，住宅局：水害リスクを踏まえた防災まちづくりのガイドライン，2021.
- 42) 福岡捷二：大規模氾濫時の被害軽減のための水害共生社会制度の構築に向けて一治水施設のストックと水防法等の発展を融合させた流域治水一，法律時報 91 巻，12 号，pp. 72-78，2019. 11.

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

一般に、流域に降った雨は、地表面や土壌の中を浸透しながら流れ河川へ流出する過程と、河川水として河道を流下する過程にわけることができる。本研究では、前者を降雨流出過程、その過程を概念的または物理的な数理モデルで表現したものを降雨流出解析モデルと定義する。また、後者については、河道内を洪水として流れるため洪水流と呼び、その現象を水理学的または水文学的な数理モデルで表現したものを洪水流解析モデルとする。さらに、上記一連の解析を「洪水解析」、または「降雨流出・洪水流解析」と定義する。

本研究で取り組む流域全体で生じる洪水現象を理解するために必要な新たな洪水解析法を検討するにあたり、まず、降雨流出解析モデルと洪水流解析モデルに関する既往研究を概観する。次に、我が国の治水計画に採用されている両者の解析法を河川砂防基準調査編・計画編¹⁾等を基に示す。そして、流域治水を進めるためには、従来の治水計画で用いられる解析法では十分な検討や評価が難しいことを示す。

洪水予測の検討では、まず、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を外観する。そして、降雨から流出量を求める手法と、時系列解析や機械学習(AI)などの統計的手法によるもの、観測水位データを用いた水位予測手法の既往研究をレビューする。これらの整理結果から、観測水面形時間変化を説明する高精度な河川縦断水面形の推定とそれを用いた洪水予測手法の課題を示す。

以上の課題に対する本研究の位置づけと特徴を示す。

3.1 降雨流出解析と洪水流解析に関する既往研究

3.1.1 降雨流出解析モデルの既往研究

(1) 降雨流出解析モデルの分類

降雨流出解析は、流域に降った雨量を入力として、流出過程をモデル化して、流域からの洪水流量ハイドログラフの推定や濁水流量の予測に役立てられている。ここでは洪水に着目する。洪水に対する降雨流出解析モデルは、これまでに多くの様々な解析モデルが開発されてきている。呉ら²⁾、河村³⁾は、降雨流出解析モデルを網羅的にまとめているため、これらを参考に特徴をまとめる。

表 3.1.1 に降雨流出解析モデルの分類を示す。

呉ら²⁾によると、降雨流出解析モデルを以下の3つに分類している。1つ目の分類は、合理式、単位図法、降雨と流出の応答関係を時系列形式で表現するAR(Autoregressive Regressive)法⁴⁾、ARMA(Autoregressive Regressive Moving Average)法⁵⁾のように流出現象を抽象化して表現する「概念モデル」である。2つ目の分類は、貯留関数法⁶⁾、タン

クモデル⁷⁾のようにある程度の物理性は有するが流出過程をモデル化した「概念的物理モデル」である。3つ目の分類は、Kinematic Wave 法⁸⁾、飽和・不飽和浸透モデル⁹⁾、RRI (Rainfall Runoff Inundation)モデル¹⁰⁾、デンマーク水理研究所がイギリス・フランスの研究所と共同開発した SHE (System Hydrologique European)モデル¹¹⁾のように、降雨が地表面に到達してから、地形標高、土壌特性等に基づき、可能な限り現象を物理的に表現する「物理モデル」である。河村³⁾は、上述した「概念モデル」と「概念的物理モデル」を1つの「概念モデル」とみなしている。また、概念モデルのうち、貯留関数法やタンクモデルは、流出過程をモデルパラメータ（定数）に集中させる意味合いから、集中定数系モデルまたは集中型モデルと呼ばれることもある。

近年では、流域を細かいメッシュで分割し、流出現象を説明する分布型モデルの研究¹²⁾、¹³⁾が行われている。この場合、洪水流の過程は、河道を矩形形状として扱い洪水流追跡は kinematic wave 法で解析する研究が多い。佐山らが開発した RRI モデル¹⁰⁾は、流出過程を立川ら⁹⁾の飽和・不飽和浸透モデルで、洪水流追跡を kinematic wave 法、または diffusion wave 法のどちらかを選択して解析するとともに、さらに洪水氾濫現象を二次元の diffusion wave 法により、流域の洪水と氾濫を一体的に解析する手法である。RRI モデルの特徴は、降雨情報を入力すれば、任意地点の河川流量と洪水氾濫状況を時系列に解析できる点にある。このため、水位や流量の観測情報の少ない海外の河川への適用¹⁴⁾、¹⁵⁾や、我が国では中小河川において適用例が増えている¹⁶⁾。

我が国では、概念（集中型）モデルとしてのタンクモデルと貯留関数モデルが良く利用されている。タンクモデル⁷⁾は菅原によって考案され、工学的に汎用性が高い。貯留関数法⁶⁾は木村により提案され、角屋らの有効降雨を用いた貯留関数法¹⁷⁾も広く利用されている。

表 3.1.1 降雨流出解モデルの分類

分類	降雨流出解モデル
概念モデル	合理式，単位図法，AR モデル，ARMA モデル
概念的物理モデル(※)	貯留関数法，タンクモデル，星の貯留関数モデル
物理モデル	Kinematic Wave 法，飽和・不飽和浸透モデル，RRI モデル，SHE モデル，山田モデル

※概念的物理モデルは、概念モデルにみなされることもある。

貯留関数法は、流域面積が比較的大きい我が国の河川の治水計画に採用されている。これについては詳述するため、ここでは貯留関数法の概要を示す。

基礎式は以下のとおりである。

$$\text{連続式: } \frac{ds}{dt} = r_e(t - TL) - q(t) \quad (3.1)$$

$$r_e = r \times f_1 \quad (\text{累加雨量} \leq R_{sa})$$

$$r_e = r \times f_{sat} \quad (\text{累加雨量} > R_{sa})$$

$$\text{運動式: } s(t) = kq(t)^p \quad (3.2)$$

$$Q(t) = 1/3.6 \times A \times q(t)$$

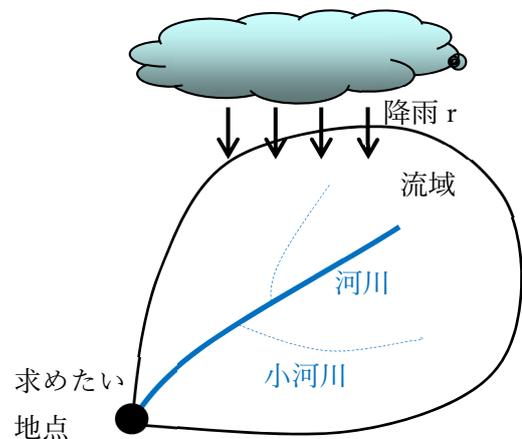


図 3.1.1 降雨と流域の関係

ここに、 t :時間(hr), $s(t)$:流域の概念的貯留高(mm), $r(t)$:雨量(mm/hr), $r_e(t)$:有効雨量(mm/hr), f_1 :一次流出率, f_{sat} :飽和流出率, R_{sa} :飽和雨量(mm), $q(t)$:直接流出高(mm/hr), k, p :流域毎に決まるモデル定数, A :流域面積(km^2), $Q(t)$:流量ハイドログラフ(m^3/s)である。

貯留関数の特徴を整理すると以下のとおりである。雨の降り始めからの総雨量が飽和雨量 R_{sa} に達するまでは一定割合 $(1-f_1)$ で流域に保水(損失)される機構を有する。モデル定数 k, p と流出率 f_1 は流域毎に設定する必要がある。実流域への適用に際しては、流域を支川単位で分割したり、地形や地質の特性に応じて小流域に分割して、小流域単位に降雨流出解析するケースが多い。その流域面積の適用範囲としては 100km^2 前後のものが望ましいとされている。貯留関数法は、洪水の度に定数の検討や検証が実施されてきたため、我が国における洪水流出に対して、高い再現性を有し広く利用されている。

(2) 降雨流出解析を検討する上での課題

降雨流出解析モデルは、(1)に示したように様々なものが開発され、実河川に適用され、目的とする降雨流出現象の分析に役立てられている。したがって、解析モデルについて論じることには意味はない。ここでは、流出解析を行う上での入力条件、検証に用いる観測流量の精度の課題について示す。

1つ目の課題は、降雨流出解析の入力条件となる降雨量の観測精度である。流域内の平均雨量は、流域内に設置された地上雨量計の雨量値を基にティーセン法により推定する方法や、近年では、レーダー雨量計により流域内の面的な雨量分布を高頻度に観測することにより推定されている。昔の地上雨量計の観測整備状況は十分とは言えず、限られた地点雨量から流域平均雨量を推定するしか方法はなかった。従って、カスリーン台風や狩野川台風などの著名な大洪水に対しての降雨流出解析に基づく流量ハイドログラフは、上述した限られ

た観測体制化での雨量を用いた値であることに留意する必要がある。現在の雨量計の整備は進んでいるため、かなりの精度で流域内の降雨分布を把握できている。しかし、標高が高い地点での降雨観測密度は低いため、流域平均雨量が過小に見積もられる可能性が指摘されている¹⁸⁾。一方、近年は、Cバンドレーダー雨量やXバンドMPレーダー雨量のように、250m～1kmメッシュの雨量値を高頻度取得可能である。特にXバンドレーダー雨量を用いたXRAINは平成23年以降、全国に整備され、局所的な豪雨や線状降水帯の降雨観測等の防災情報に活用されている¹⁹⁾。レーダー雨量の観測精度は年々向上しているが、強降雨時や場所によっては観測精度が十分でない場合もある。以上より、レーダー雨量と地上雨量を比較し観測特性や精度を確認、検証することで、降雨流出解析に対して適切な入力条件を与える必要がある。

2つ目の課題は、降雨流出解析の検証に用いる観測流量の精度と観測地点数が少ないことである。降雨流出解析は、降雨を入力条件として流量ハイドログラフを出力している。流出解析モデルは、流出過程をモデル化しており、それがモデルパラメータに集約されている。このため、対象とする流域の流出解析モデルを構築する場合には、幾つかの大きな洪水群を対象に流出モデルのパラメータを同定することが一般である。降雨量の課題は上述したため、検証データとなる流量観測値の精度について述べる。

流量観測は、ダム、堰、及び河川の基準地点や主要地点の橋から浮子法を用いて実施されている。このうち、ダムの流入量・放流量と堰の観測流量の精度は高い。このため、それらの流量観測値を検証データとした流出解析によるパラメータ同定に大きな問題はない。一方、古くから河川流量を観測するために実施されてきた浮子法は、洪水時の横断方向の測点数が少ないことに加えて、洪水時の河床変動が大きく滞筋が変化する河川や蛇行している区間などでは、浮子がまっすぐ流れず流速の早い領域に集中するため、十分な横断流速分布を得られず流量の観測精度を低下させている²⁰⁾。また、急流河川のように洪水中に河床が大きく変動する場合には、河積も変化しており流量観測を難しくしている。このような地点において、降雨流出解析結果を検証する場合には、観測流量の精度が低いため、解析モデルの信頼性に課題が残されている。また、流量は、ダムや堰を除けばリアルタイムにその情報を知ることができない。

もう1つの流量観測上の課題は、橋上等の限られた箇所ではしか観測できないなどの理由により観測点が少ないことである。本川の流量を観測することは治水計画を策定する上で必要不可欠である。降雨流出解析の目的は、支川や2次支川などの山地部等の上流域や小流域からの流出量を推定することにある。このため、そのような比較的規模の小さい河川の流量を観測し、流出モデルの構築に役立てる必要がある。しかし、このような河川を管理する都道府県の流量観測データや河道測量データは少ないのが現状である。近年は、全国の河川に危機管理型水位計²¹⁾が設置され、多地点の水位を測ることが容易になった。以上より、観測流量よりも精度が高く、本川、その上流区間、支川、2次支川等において密に配置され洪水情報を表す水位観測データを活用し、流出解析モデルの精度向上を図ることが急務の課題である。

3.1.2 洪水流解析法の既往研究

洪水流解析法は水理学的手法と水文学的手法の二つに大別される。以下では、それらを水理学的洪水流解析法と水文学的洪水流解析法と定義し、それらの既往研究を概観する。

(1) 水理学的洪水流解析法

① 洪水流解析法の分類と適用性

洪水流は、河道の縦断形状、横断形状、平面形状、低水路河床材料の大きさ、樹木繁茂状況、高水敷の地被状況を与条件として、上下流の水位の勾配を駆動力として河道を流れる非定常な現象である。

洪水流解析法の分類と適用性は、水理公式集²²⁾にまとめられている。非定常の洪水流解析法は、一次元解析、準二次元解析、二次元解析、準三次元解析（静水圧準三次元解析、非静水圧準三次元解析）、非静水圧三次元解析に分類される。洪水流の検討において、その目的に応じた洪水流解析法を選定する際は、対象とする現象やスケールを踏まえ、それぞれの手法による解析可能な水理量と表 3.1.2 に示した適用性から手法を選択する必要がある。

表 3.1.2 要求される精度が確保できるという観点からの洪水流解析法の適用性²²⁾

洪水流解析法の分類	確保できる空間解像度	考慮できる主たる河道情報（必要な河道情報）	断面形状の縦断方向変化が小さい		左記に当たらず		急流、急縮、急曲	分流部、合流部	橋造物の感流、跳水	非水没構造物周り
			横断面		縦断面水路または樹木群の繁茂					
			直線状	湾曲、蛇行	直線状	湾曲、蛇行				
一次元解析	川幅程度以下のスケール	横断形状とその選定全体の粗度	●	○	△※1	△※1				
準二次元解析	川幅程度以下のスケール	横断形状とその選定内の粗度分布			●	△※3				
鉛直二次元解析	計算格子に依存	横断形状とその底面粗度	○*1	/	/	/	/	/	○	/
平面二次元解析	水深より大きいスケール		●	△※2	●	○*2*3	○*2*3	○*2*3	○*5*6	○*2*3
静水圧準三次元解析	水深より大きいスケール	河床高の平面分布、堤防、堰などの河川標造物の形状、粗度の平面分布	○*1	○*2	○*1	○*2	○*2	○*2	△※5	○*2*7
非静水圧準三次元解析	水深スケール以下		○*1	●	○*1	●	●	●	○*6*7	○*7
非静水圧三次元解析	計算格子、乱流モデルに依存		●	●	●	●	●	●	●	●

ここでは、一次元解析と準二次元解析は縦断面形状や断面平均流速（一次元）あるいは各断面平均流速（準二次元）について、平面二次元解析は水深平均流速の平面分布について、鉛直二次元解析、静水圧準三次元解析、非静水圧準三次元解析、非静水圧三次元解析は流れの鉛直分布について精度が確保できるかを評価基準として、△/○●および注釈を示している。各マークの意味及び注釈は以下の通りである。

- ：計算法が適切な場合、良好な精度が期待できる。
- ：計算法が適切な場合、基本的には適用可能である。ただし、対象とする洪水、河道条件によっては精度が確保できない場合があるため、以下に留意する必要がある。
- *1 第二種二次波などの乱れに起因する縦断が発生している場合は流速鉛直分布の精度は確保できない。
- *2 圧力が静水圧分布に近い場合で、壁付近を除く。
- *3 二次流等の流速鉛直分布による運動量交換の影響が大きくない場合。
- *4 跳水は不連続な断面として計算される。
- *5 圧力の非静水圧分布が解けないため、急流部分では精度が確保できないことに注意する。
- *6 跳水部分の局所的な流速分布や水面が激しく変形する場合を除く。
- *7 非定常三次元乱流運動の影響が大きい場合を除く。

△：以下の理由により実用上必要となる精度が確保できない場合が多い。

- ※1 断面の抵抗を適切に評価できない。
- ※2 二次流による運動量輸送が流速分布に与える影響が評価できない。
- ※3 横断面内の水位を一定として連続式から縦断方向流速の横断分布を計算する準二次元解析法では、横断方向流速の慣性力が評価できない。関連する記述が 2.3.5 (b) にある。
- ※4 対象とする現象を包含する流れの大局的状態は把握できるが、現象そのものの詳細な状態は把握できない。
- ※5 圧力の非静水圧成分の影響を強く受ける流速鉛直分布を考慮できない。

/：横断方向の流れの変化が重要であり、鉛直方向の流れの変化のみに着目した鉛直二次元解析は適用対象外である。

② 観測水面形の時間変化を反映した洪水流解析

従来の洪水流解析では、上述した目的に応じた解析モデルに対して、上流端に流量ハイドログラフを、下流端に水位ハイドログラフを境界条件として与え、水位や流速場の時間変化を解く方法が一般的に用いられてきた。このため、解析区間の水位は未知量として扱われてきた。上流端境界条件として与えられる流量の精度は、先に述べたように観測水位に比べて低いため、流量をベースとする洪水流解析結果の信頼性には課題が残されている。

一方、近年は、多地点の水位を測ることが容易になり、高精度な観測水面形時間変化を容易に取得可能になった。このため、従来のように流量ハイドログラフを上流端の境界条件とするよりも、上流端境界条件、下流端境界条件に水位ハイドログラフで与え、流量ハイドログラフを洪水の未知量とする解析法が、高精度な実河川の解析と考えられる。

福岡らは²³⁾、このような考えの基に、多くの河川で洪水時の観測水面形の時間変化を洪水流解析水位の解として用い、水理現象を的確に説明している^{24),25)}。具体的には、図 3.1.2 に示す解析手順に従い、上流端、下流端の水位ハイドログラフを境界条件とし、非定常流の準二元解析²⁶⁾、二次元解析²⁷⁾、BVC 法²⁸⁾や FEBS 法²⁹⁾を用いた準三次元解析を行い、各時間の観測水面形と一致するように粗度係数や樹木透過係数を調整して流れを解き、河道貯留量、流速分布、流量等の時空間分布等を求め、現象解明を図るとともに、解析結果を河川管理に活かす具体的な方策を提示している。なお、図 3.1.3 は観測水面形時間変化に基づく洪水流と河床変動の一体解析法を示しているが、洪水流解析に対しても同様である。

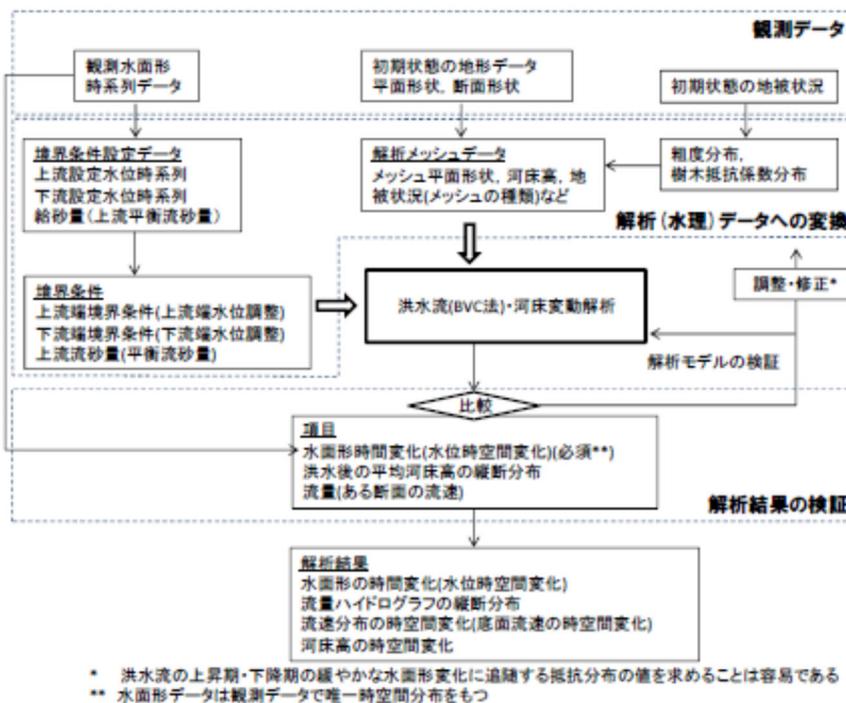


図-1 水面形時系列データに基づく洪水流・河床変動解析フロー

図 3.1.2 観測水面形時間変化に基づく洪水流・河床変動解析法のフロー²³⁾

(2) 水文学的洪水流解析法

水文学的な洪水流解析法には、Muskingum法³⁰⁾、貯留関数法等が挙げられる。これらの手法は、非定常の連続式と、運動方程式の代わりに流量と貯留量の関係を表す経験的な貯留方程式に基づき、洪水流量ハイドログラフの伝播と変形を追跡するものである。

我が国では、木村の貯留関数法が治水計画の洪水流解析に採用されてきた。以下にその概要を示す。河道の貯留関数法は、降雨に対する流域からの流出量を算定する貯留関数法と同じ式形で表される。貯留関数法の基礎式を式(3.3)、式(3.4)に、モデル概要を図3.1.3に示す。力学に基づく非定常流解析では、一次元解析や二次元解析等において縦断・横断方向に解析メッシュを細分化されているが、水文学的の貯留関数法は、縦断方向に長い区間を対象にしている。特徴としては、上流からの流量ハイドログラフに対して、その区間の河道貯留に伴う流量低減が(3.4)式に、流下遅れは(3.3)式に考慮されている。但し、運動式は定常条件としているため、実際の洪水で生じている時間的に変化する縦断水面形とそれに伴う流速の場所的・時間的な変化の評価はできない。

$$\text{連続式: } \frac{dS}{dt} = Q_{in}(t - TL) - Q(t) \quad (3.3)$$

$$\text{運動式: } S = KQ^P \quad (3.4)$$

ここに、 S :みかけの河道貯留量、 Q_{in} 、 Q :流入量、区間 L からの流出量、 K 、 P は定数、 TL は距離 L を流れる流下時間(遅れ時間)である。

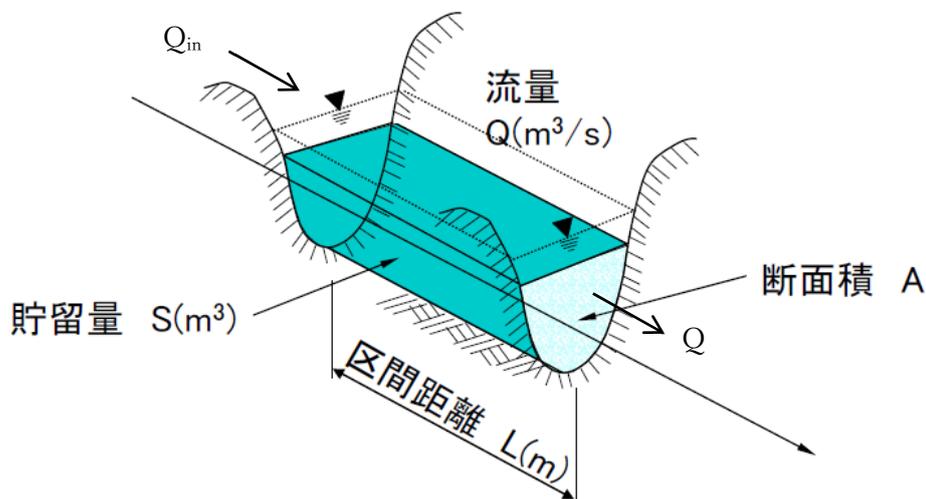


図 3.1.3 河道の貯留関数法の概要

(3) 洪水流解析の課題

本節では、水理学的な洪水流解析法と水文学的な洪水流解析法の分類を示すとともに、近年の福岡らの観測水面形の時間変化を反映した洪水流解析法を示した。

対象河道の洪水流現象を理解し、そこで生じている課題に対応するためには、福岡らの高精度な洪水流解析法が有効である。国管理河川の一部では、多地点の水位計データを用いた上記手法に基づく研究^{31), 32), 33)}が行われている。今後、他の国管理河川においてもこのような取り組みが強く望まれる。

一方、都道府県管理河川の洪水流の検証は、今日まで、水位や流量観測データが少なかった理由によりほとんど実施されていない。これに対して、近年は、先に述べたように都道府県管理の河川にも危機管理型水位計が設置され、多地点の水位を測ることが容易になった。また、河道管理の効率化のために航空測量が発展しレーザ測量データや水面下の ALB 測量データ³⁴⁾が取得され始めている。今後、都道府県管理河川においてもデータ整備が進んでいくため、まず、洪水現象の理解や洪水検証を目的に、福岡らの洪水流解析法を河川へ適用し、粗度係数の推定やその結果を活かして実態に即した治水計画や河川管理につなげることが課題である。

また、我が国の一級河川についてはその中の主要な河川を2つに区分して、特に重要な幹川（例えば本川）を国が管理し、それ以外の区間（例えば支川）を都道府県が管理している。それぞれの管理区間の河道流下能力評価や河道管理は治水上重要である。一方、今後の流域治水を検討する上ではそれだけでは十分でない。管理区間で区切るのではなく、本・支川あるいは2次支川程度までを一体でつなげた洪水流解析を行い、本・支川等で生じる洪水現象を理解する取り組みとその評価が必要である。

3.2 我が国の治水計画に用いられる降雨流出解析法と洪水流解析法

(1) 我が国の治水計画に用いられる降雨流出解析と洪水流解析

2章で述べたように、国管理河川や都道府県管理河川では、河川整備基本方針を策定し、それに基づき今後20～30年の個別事業を含む具体の河川整備内容を明らかにした河川整備計画に基づき、堤防整備、河道掘削、洪水調節施設、放水路等の整備が進められている。

管理河川の河川整備基本方針と河川整備計画に基づく治水計画を策定する際には、計画の降雨を基に流出解析を実施し目標流量が設定されている。以下では、模式的に示した流域と本・支川を例に降雨流出解析法と洪水流解析法を用いた流量算出を説明する。なお、先に述べたように降雨流出モデルと洪水流解析法は、我が国の治水計画に多く採用されている貯留関数法⁶⁾とする。

図3.2.1は水系の流域全体、国管理河川の区間、県管理河川・区間の例³⁵⁾を示している。一級水系では、図3.2.1に示すように河川や区間により管理が異なる。図3.2.2は、国管理河川の基準点Eまでの降雨流出・河道流の系統図を示している。図3.2.2の△は図3.2.1に示した支川流域や残流域を模式化して表しており、□は河道区間を模式化している。このように流域は、支川単位、2次支川単位、地形や地質の特性等に応じて小流域に分割され、本川の河道は支川流入地点を境界に区分化される。上記の小流域と河道の分割を基にして、降雨量に対する小流域からの流出量は(3.1)式、(3.2)式で算出され、それをモデル化した河道への流入量として与え、河道からの流出量を水文学的洪水流解析法の(3.3)式、(3.4)式で算出し、上流から順に解析することでE地点の流量ハイドログラフが推定される。

一方、都道府県管理の支川を対象とする場合は、例えば図3.2.1の支線1に着目すると、国管理河川の流出ブロックと同じにしたり、2次、3次支川を小流域分割し、1次支川を河道区間としてモデル化することにより、降雨流出・洪水流過程をより詳細に表現している。

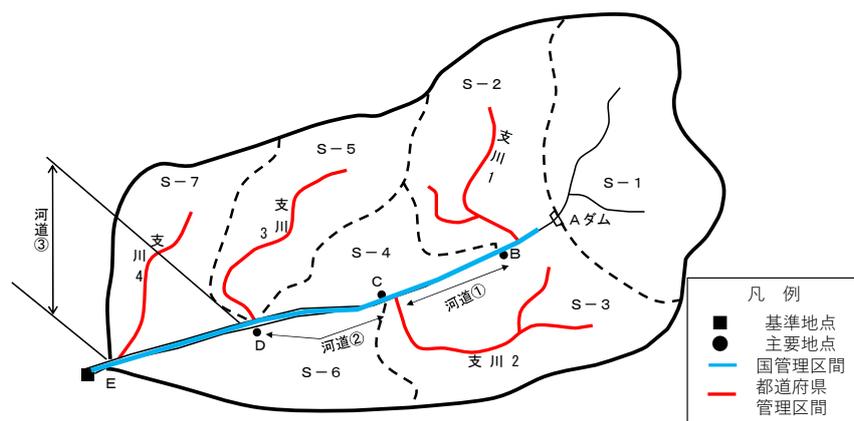


図3.2.1 国と都道府県の管理区間と流域分割の例³⁵⁾

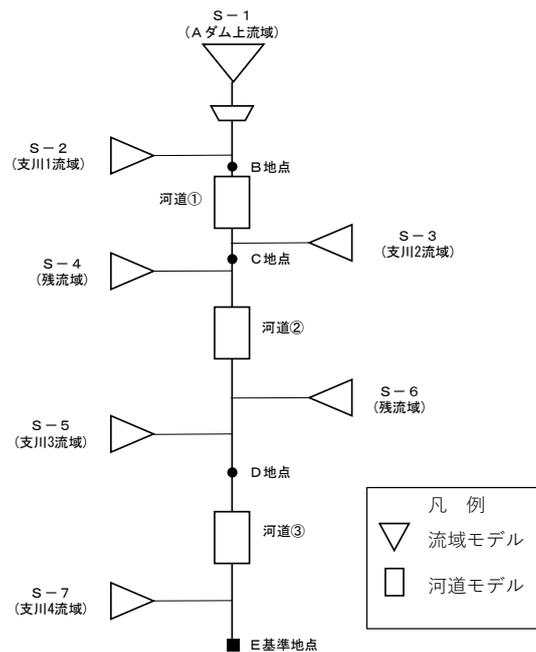


図 3.2.2 降雨流出・河道流の系統図（国）

(2) 流域治水を検討する上での課題

我が国の治水計画のベースとなる貯留関数を用いた流量算定方法は、先に説明したように、洪水の度に定数の検討や検証が実施されてきたため、高い再現性を有し広く利用されてきた。計画が策定された当時の限られた観測データや解析法を基にした評価法であったが、治水計画の手順や方法に問題はない。また、国と都道府県のそれぞれの管理区間では、これらの目標流量に対して、計画的に河川整備が実施され、治水安全度を向上させており、被害の軽減を図ってきた。

一方、国と都道府県のそれぞれの管理区間で整備が進んでいる現在、気候変動による豪雨の増加やそれによる被害の甚大化を踏まえると、流域全体を考えた治水や河川管理となっていない面がある。例えば、図 3.2.1 に示した国管理河川に合流する都道府県管理河川の流入量は、治水計画上、一般に降雨流出解析により与えられている。しかし、支川流入量のハイドログラフは本川水位と支川水位との関係で定まる。このため、山間部等の勾配の大きい河川を除き、上記の支川流入量の評価は十分とは言えない。また、平成 30 年 7 月豪雨(西日本豪雨)による真備町の水害³⁶⁾では、高梁川の水位が上昇し、真備町を流れる 1 次支川の小田川の洪水が吐けず、2 次支川も含めて 8 カ所の同時多発的の氾濫被害が発生している。このように、流下能力の低い 2 次支川等の中小河川から越水や氾濫が生じやすい。また、図 3.2.3 に示す流域治水の施策³⁷⁾をみてもわかるように、流域治水では、河川区域の対策のみならず、集水域からの雨水貯留施設の整備や田んぼダム等による流出抑制などの対策も検討される。このため、それぞれの管理区間に着目するだけでなく、本川、1 次支川や 2 次支川等まで洪水流を一体とし、本川や支川への流入量や、本・支川・2 次支川の河道縦断水位・流量を評価すること、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

いう水収支分布の変化を評価すること、それらを踏まえた集水域や氾濫域等での対策を検討し、河川水位や流量、氾濫被害等がどの程度減少したかの効果を評価して、流域治水の施策に反映することが求められる。

流域の降雨流出解析と本・支川等の洪水流を一体的に扱う手法には、佐山ら¹⁰⁾の降雨流出氾濫解析 RRI モデルが挙げられるが、RRI モデルの洪水流解析法は、次元の diffusion wave 法であるため、時間・縦断的に変化する洪水流の非線形性は十分に評価できない。これは、RRI モデルを利根川に適用した研究からも、支川流入量の精度が低下した要因の1つに、洪水流解析に不定流効果を取り込まれていない点を挙げている³⁸⁾。これに対して、後藤ら³⁹⁾は、観測水面形から求めた本支川の流量ハイドログラフを基に流出解析モデルの定数同定を行い、他洪水へ適用し解析法の妥当性を示している。後藤らの研究は、河川の観測水面形の時間変化を洪水流解析に対して利用するだけでなく、流出解析モデルの検証にも利用したことに意義があり、本研究に有用な情報を与えている。



図 3.2.3 流域治水の施策について³⁷⁾

3.3 データ同化手法とリアルタイム洪水予測解析法に関する既往研究

洪水中に実施される洪水予測解析では、円滑且つ迅速な住民避難や水防活動を目的に、今後数時間先の河川水位やダム流入量の予測が行われている。洪水予測解析は、様々な解析手法を用いて実施されている。しかし、解析モデルに降雨等の入力条件を与えて予測するだけでは、その解析水位が実測水位に合致することは難しい。このため、一般の洪水予測解析では、現在時刻までに得られた洪水中の観測結果を基に、予測水位や流量または解析モデルの状態量をデータ同化技術により修正することで、将来の予測解析結果の信頼性を向上させている。ここでは、データ同化技術とそれを用いた洪水予測手法を概観し、観測水面形時間変化を説明する高精度な河川縦断水面形の推定とそれを用いた洪水予測手法の課題を示す。なお、本研究では、降雨の予測精度は洪水予測の精度に大きな影響を与えるが対象としない。

3.3.1 データ同化手法の既往研究

データ同化とは、観測データと数値解析結果をつなぐもので「数値シミュレーションに実測データを埋め込み、馴染ませること」である⁴⁰⁾。このデータ同化を適正に行うことにより、観測側からは、離散的な観測値の時間・空間的な補間値が得られ、数値解析モデル側からは、観測データを基にしたモデルパラメータ、初期値、境界値等の最適値が得られる。すなわち、データ同化は、得られる情報の精度や量を向上させるための観測と解析の相互補間の関係にあり、観測結果に基づいて数値解析結果の信頼性を確保し、膨大な推定情報を得ることが可能となる。このため、同化解析の基本は、数値解析モデルの解析値と観測値の差などで表した評価関数が最小となるように、初期条件や境界条件、モデルパラメータなどの入力条件である制御変数を最適化する。すなわち適切な境界条件やパラメータを逆推定し、それに基づいた解析結果である同化解析値を得ている。

データ同化手法には多くの解析法があり、気象分野や海洋分野を中心に研究されてきた⁴¹⁾。それらの分野で比較的多く利用される同化手法を表3.3.1にまとめた。カルマンフィルターは、線形の数理解析モデルに適用されてきた。その後、非線形問題への拡張としてEvensen⁴²⁾によるアンサンブルカルマンフィルターや、北川⁴³⁾の粒子フィルター法等が提案されている。これらの手法は、観測情報の取得時に逐次的に解析データを修正・更新していくものである。一方、時間や空間に対して連続的な同化解析値を得る手法にアジョイント法⁴⁴⁾、⁴⁵⁾、⁴⁶⁾がある。アジョイント法では、現象を支配する基礎方程式を拘束条件に課し、ラグランジュの未定係数法に基づいて入力条件に対する変分を求め、条件付の最小二乗法に相当する最尤推定に基づいて最適化を行う方法の一つである。

時間連続型のアジョイント法と近年河川分野に多く適用されている時間逐次型の粒子フィルター法の特徴を整理すると以下のとおりである。まず、得られる同化解析値については、アジョイント法は決定論的に1つの解析解（確率分布の最頻値）を求めるのに対して、アンサンブル型の粒子フィルター法は多粒子によって疑似的に確率分布を推定している。したがって、粒子フィルター法は解析値の分散の解析は可能である。状態量の保存性はアジョイ

表 3.3.1 比較的多く利用されているデータ同化手法

分類		手法
簡便法		直接挿入 ナッジング
3次元データ同化		最適内挿法 3次元変分法
4次元データ同化 (時間+3次元)	時間逐次型の3次元同化	カルマンフィルター(KF) アンサンブルカルマンフィルター(EnKF) 粒子フィルター(PF)
	時間連続型の3次元同化 (時間非逐次型)	4次元変分法(アジョイント法) 4次元アンサンブルカルマンフィルター

※表中では、数理解析モデルは3次元モデルを条件として記載している。

ント法が優れている。粒子フィルター法は、状態量を逐次修正し、それによる期待値をアンサンブル平均しているため、基礎方程式群が非線形な場合、期待値の保存性は必ずしも保証されない。計算コストで見れば、アジョイント法が優位である。これは、粒子フィルター法では、多数の粒子を必要とするため、大規模な計算を行う場合、多数の計算機を用いた並列計算が必要となる。一方、同化手法の実装に要する作業コストは、アジョイント法に比べて粒子フィルター法は非常に小さく容易である。

最後に、同化解析の留意点を述べる。同化解析は、あくまで観測データと数値解析結果をつなぐものであるため、それぞれの信頼性が低ければ、当然のことながら同化後の解析値の信頼性も低い。このため、現象解析に用いる解析モデルが実現象を定量的に十分正しく表現すること、かつ観測値がその解析モデルと同程度の精度で観測することができなければ、同化結果の精度の保証はできない。このため、同化解析値の信頼性を確保するには、洪水現象を説明する解析モデルと洪水観測する諸量の精度は高いことが必要条件となる。

3.3.2 洪水予測手法の既往研究

洪水予測に用いられる手法は数多く存在し、椿ら⁴⁷⁾、一言ら⁴⁸⁾、小山⁴⁹⁾はそれらを網羅的に纏めている。表 3.3.2 に洪水予測手法の分類を示す。表 3.3.2 と表 3.1.1 を比較すると、洪水予測手法のほとんどが、3.1.1 に示した降雨流出解析法や 3.1.2 に示した洪水流解析法であることがわかる。但し、洪水予測の洪水流解析では、区間延長や計算時間などを考慮して一次元モデルが多く採用されている。近年盛んに研究されている機械学習を用いた洪水予測の研究が多い。

表 3.3.2 洪水予測手法の分類

大分類	中分類	手法	解析から得られる内容	
			未知量	空間
降雨流出モデル	概念モデル	タンクモデル, 貯留関数法等	流量	点
		概念モデルを流域に分布させたモデル	流量	面
	物理モデル	分布型モデル(RRIモデル, 京大モデル等)	流量	面, 線
降雨流出モデル + 不定流解析モデル	概念モデル, あるいは 物理モデルを利用	降雨流出モデルと一次元不定流解析を 組み合わせることが多い	流量と水位	面あるいは 線
直接水位予測手法	相関解析	重回帰分析	水位または流量	点
	時系列解析	AR, ARMA等	流量	点
	機械学習	ANN, SVM法等	水位	点
観測水位に基づく予測手法		立川, 二瓶らの研究等	流量と水位	面(立川) 線(二瓶)

(1) 降雨流出解析法を用いた研究

降雨流出解析に基づく予測では, 将来数時間先の予測雨量を入手して, 解析モデルにより予測地点の流量ハイドログラフを予測し, 過去の資料で作成された水位流量関係式(H-Q式)を利用して予測の水位ハイドログラフを推定している. 流出解析モデルには, 3.1.1(2)の課題に示したとおり, 降雨観測誤差, 流量観測誤差, それに伴うパラメータ同定の不十分さ, また流出モデル自体の不完全性等を有する. このため, 流出モデルを用いて予測する際には, 現在時刻までの流量データを利用して, 簡便な方法や同化解析手法を用いてモデルの状態量や流量を時々修正して予測している.

具体的な方法は以下のとおりである. 最も簡便な方法は, 現在時刻で得られた観測水位から H-Q 式により流量 (HQ 流量) を求め, 流出解析結果の流量と比較し, その差分を補正量として将来の予測流量を修正するものである. その他にも, 現在時刻の解析流量を上述の HQ 流量に等しくなるように流出モデルの定数や状態量を修正する方法⁵⁰⁾がある. また, データ同化手法を用いた研究として, 日野⁵¹⁾は貯留関数法にカルマンフィルターを適用し, 流量データを基に状態量である貯留量を修正する手法を提案した. 星ら⁵²⁾は, 一般化貯留関数法とカルマン・フィルター予測理論を組み合わせたオンライン同定による洪水予測システムを開発し, 北海道開発局の事務所で運用されている. 立川ら⁵³⁾は, 分布型流出モデルにバイアス補正カルマンフィルターを組み合わせた洪水予測の研究を行っている. 工藤ら⁵⁴⁾は, 流域を小流域と河道流で表し, それぞれタンクモデルと kinamtic wave 法で流量を追跡する洪水予測モデルを構築し, 流量データを基に粒子フィルター法を用いてタンク水深をフィルタリングする実時間洪水予測の研究を行っている.

(2) 降雨流出解析法と一次元不定流解析法を組み合わせた研究

縦断水面形の時間変化を予測する手法としては, 小流域を集中型モデルで, あるいは流域

全体を分布型モデルで表現し、水位を予測する区間を対象に一次元不定流解析モデルで水面形を解析する方法がある⁵⁵⁾。この方法では、上述した降雨流出解析を実施しHQ換算流量を基に流量を補正し、それを河道区間の上流端境界条件に与え、一次元不定流解析により水面形の時間変化を予測している。

(1)、(2)に示した降雨流出解析モデルと降雨流出解析モデルに洪水流を一次元不定流モデルで組み合わせた水位予測手法は、流量をベースとする方法と言える。当該洪水の流量観測値は、ダムや堰などを除けば、リアルタイムで得ること難しく、河道流量は、上述したように過去の資料で作成された水位-流量関係式を用いて流量を推定しているため、洪水流の水面形の時間変化はこの精度が十分でない流量ハイドログラフに大きな影響を受ける。

(3) 直接水位予測の研究

直接水位予測には、予測地点の水位と上流の水位の予測する水位相関法や、水位や流量の時系列解析により将来の水位を予測するAR法⁴⁾、ARMA法⁵⁾などがある。

近年では、過去の洪水パターンを学習して、現在時刻までの水位変動のパターンから将来の水位を予測するニューラルネットワーク(Artificial Neural Network; ANN)モデル⁴⁸⁾などが実河川に適用されている。さらに、一言らは、上記の深層ニューラルネットワークモデルと降雨流出解析の分布型物理モデルを組み合わせたハイブリッド河川水位予測手法⁵⁶⁾を開発し、その予測水位はニューラルネットワークモデルや分布型物理モデルによる予測水位よりも実測水位への適合性が高いことを報告している。

(4) 観測水位を用いた洪水予測

立川ら⁵⁷⁾は、図3.3.1に示す水位を基にした粒子フィルター法による水位予測手法を提案している。図3.3.1はその予測手法の全体構成を示しており、緑範囲の流域全体を対象として流量を予測する分布型流出予測モデルと、それを境界条件として洪水流(青線)を一次元不定流モデルで追跡する手法を提案している。但し、洪水流解析区間は、図3.3.1の青線に示すように全区間を対象とするのではなく、少なくとも水位計を1か所含むように区分分けする考えである。ここまでの説明は(2)の手法と比べて大差はない。立川らの手法の特徴は、洪水流解析水位を観測水位に同化させることにある。同化技術には粒子フィルター法が採用され、フィルタリング対象の粒子である制御変数は、流量を補正する倍率、粗度係数である。国土交通省国土技術総合研究所(国総研)⁵⁸⁾では、上記の立川の研究成果を基に、荒川流域を対象に流出モデルのタンク水深や一次元不定流モデルの粗度係数等をフィルタリング対象とし、多地点水位を用いた水位予測を検討している。

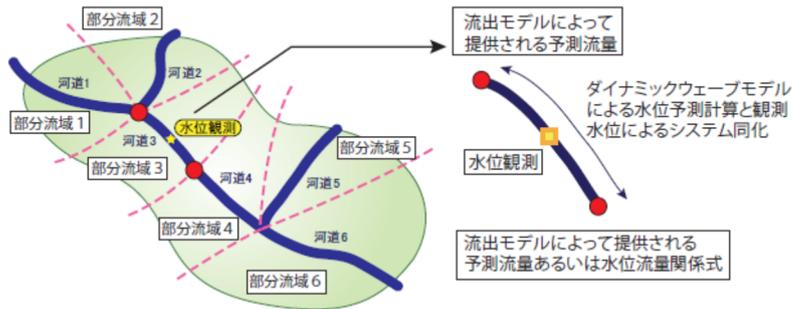


図 3.3.1 立川ら⁵⁷⁾の実時間流出予測システムの全体構成

国内の水分野にアジョイント法を適用した研究は川原⁴⁴⁾に始まる。また、川原ら⁵⁹⁾は、同化解析の収束性を高めることを目的に、ニュートン法の 2 次の項を直接計算するために第 2 変分まで解く second order adjoint method の検討を行い、解析時間の高速化を図っている。河川分野においては、吉田らは、観測水位に基づいたアジョイント法を実河川に適用することにより、流量ハイドログラフを制御変数として逆推定する研究⁶⁰⁾や粗度係数を制御変数として逆推定する研究⁶¹⁾を行っている。この研究では、同化に利用した水位計は 1 点もしくは 2 点であり、感度分析的な検討が行われている。このため、観測水面形の時間変化を考慮した検討とは言い難い。西口ら⁶²⁾は、流量ハイドログラフを制御変数として、一次元不定流モデルにアジョイント法を適用し、鶴川や多摩川を対象に観測水面形の同化と流量ハイドログラフを逆推定している。

この他にも、簡易水位計の増加と相まって、河川水位の同化と水位予測手法^{63), 64)}について検討され始めている。二瓶ら⁶⁵⁾は、事前に既往洪水の痕跡水位を基に粗度係数を同定しておき、実洪水の現在時刻の水面形と解析水面形を比較し、そのズレを運動方程式の付加項として与えて将来の水面形を予測している。現在時刻の解析水面形が観測水面形を説明できない要素として、流量の観測誤差、河道地形の不十分な表現、樹木や植生等の抵抗係数の影響を挙げている。

(5) 既往研究の課題

降雨流出解析法と、それに一次元不定流解析法を組み合わせる河川水位を予測する従来手法の課題は、観測水位に比べて精度の低い流量を基に行っている点にある。このため、近年では観測水位を基にした洪水予測手法が検討されている。

直接水位予測の手法に関しては、過去の河道・出水情報に基づいて特定の地点に関するのみ水位を推定するため、本研究で目指す縦断水面形の時間変化を適切に推定することは難しい。

観測水位を基にした縦断水面形の予測に関する研究の課題は以下のとおりである。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り、洪水流伝播の特性を表す観測縦断水位の時間変化を反映した洪水流解析とは必ずしも言えない。また、この方法では河道分割地点の上下流で水面形が連続しない場合があり、粒子の期待値として評価した縦断水面形や流量ハイドログラフの収支関係

は必ずしも保存されない。一方、連続式や運動方程式の収支や力学関係を満足し洪水期間を対象とするアジョイント法を用いた同化解析は、上記の粒子フィルター法の課題を解決する。但し、アジョイント法を用いた既往研究は基礎的な検討に留まっており、洪水流解析の不確定要素である流量ハイドログラフや樹木の抵抗、粗度係数を進行中の洪水に対して同時に同定しながら観測水面形時間変化に解析縦断水面形を同化させる検討は行われていない。また、観測水面形に洪水流解析の水面形を同化する際に、流量や抵抗係数の同定に必要な水位計の数や密度の検討は十分ではない。さらに、洪水流解析による水面形時間変化を推定するためには、地形形状の正確さが求められるが、水面下の河床形状を含めて、どの程度の地形情報密度を用いれば良いか、十分にわかっていない。

洪水流の予測を実施する上での留意点として、対象とする河道の下流区間の水位は、一般的に上流からの洪水流伝播で定まる。このため、伝播時間以内であれば流出解析を用いなくとも、高精度な縦断水面形が得られ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。しかし、洪水予測に必要なリードタイムが洪水伝播時間よりも長い場合は、解析区間の上流端で流出解析結果等の適切な境界条件が必要となる。このため、同化解析により得られた高精度な縦断水面形や流量ハイドログラフを用いて、洪水流伝播特性や降雨情報に基づく長いリードタイムの水面形予測精度を確保した高精度な洪水予測手法を確立することが課題である。

3.4 本研究の特徴

3.4.1 流域と本・支川を一体とした降雨流出・洪水流解析法の構築

3.1節と3.2節により、既往研究では、水位に比べて観測点が少なく観測精度の低い流量をベースとした降雨流出解析法や洪水流解析法を用いて、目的とする降雨流出現象や洪水現象の分析が行われてきた。また、実務では、それらの手法を用いて、国と都道府県管理の境界で実施される事例が多い。流域治水を実行するにあたり、流量をベースとする既往研究手法や我が国の治水に用いられてきた手法では、流域を構成する本・支川・2次支川等の降雨流出量、河道の流量や水位の縦断的な時間変化の評価は不十分であることが示された。一方、近年は、水位計が多く整備されてきており、流量に比べて精度の高い観測水面形の時間変化を基にした洪水流解析から現象解明を図る研究や流出解析モデルの検証を行う研究がみられる。

流域治水を進めていく上で最も重要なことは、流域を構成する本川と支川群の洪水流、降雨に対して小流域からそれらに流入する流量を一体として評価し、洪水現象を理解することである。すなわち、本・支川等の水面形の時間変化、流量ハイドログラフが高精度に求まることにより、流域で生じる洪水現象の特性を国・都道府県等の関係者で共有でき、まちづくりとの連携を踏まえた関係者による今後の流域治水の対策につながる。

そこで本研究では、流域と本・支川一体の高精度な降雨流出・洪水流解析法を開発する。具体的には、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本・支川一体の洪水流解析と、観測水面形に解析水面形が合致するように小流域単位の降雨流出量をフィードバックする降雨流出・洪水流解析の高精度化を図る検討を行う。本研究では、これを第一の目的とし、利根川上流の国直轄区間とそれに流入する群馬県管理の3支川、及び埼玉県管理の2支川を対象として、洪水流モデルと流出解析モデルの一体的な構築を行う。そして、上記解析モデルを令和元年台風19号出水に対してその適用性を検討し、本・支川の水面形時間変化、2次支川と1次支川からの流入量、及び本川の流量ハイドログラフの形成について検討した結果を述べる。

そして、上記検討より得られた本川と支川群の降雨量、ダム貯留量、流域貯留量、河道貯留量、河道通過流量の時間変化を基に水収支分布図を作成し、流出特性を分析することで、今後の河川と流域の治水対策の方向性を提示する。

3.4.2 観測水面形時間変化を基づく洪水予測モデルの開発

早期の住民避難に活用される洪水予測手法は数多く存在するが、近年の観測精度の高い水位を基にした縦断水面形時間変化の同化解析法とそれを用いた実河川への適用性に関する研究は行われていない。また、観測水面形への同化解析に必要な観測水位の数の検討、さらには、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、平面二次元洪水流同化解析モデルの構築を行い、利根川上流区間を対象に洪水への適用性を示し、上述の課題について検討した結果を述べる。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準 計画編，調査編
- 2) 呉修一，山田正：既往概念流出モデルの理論的導出，水文・水資源学会誌，Vol. 22，pp. 386-400，2009.
- 3) 都市流域における洪水流出解析の現状と将来展望，水文・水資源学会誌，Vol. 31，No. 6，pp. 451-466，2018.
- 4) 日野幹雄，金治弘：フィルター分離 AR 法とカルマン・フィルターによる洪水予測法に関する研究，土木学会論文集，第 351 号/II-2，pp. 155-162，1984.
- 5) 日野幹雄，長谷部正彦：フィルター分離 AR 法による非線形流出系の同定と予測(時間単位)，土木学会論文集，第 324 号，pp. 83-94，1982.
- 6) 木村俊晃：貯留関数法 (1)．土木技術資料 3 (12)，pp. 36-43，1961.
- 7) 菅原正巳：流出解析法 水文学講座，共立出版；257pp，1972.
- 8) 椎葉充晴・立川康人・市川 温：水文学・水工計美学．京都大学学術出版会；pp. 3-51，2013.
- 9) 立川康人，永谷言，寶馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，水工学論文集，第 48 巻，pp. 7-12，2004.
- 10) 佐山敬洋，岩見洋一：降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用，土木技術資料 56-6，pp1-4，2014.
- 11) Bathurst JC, Wicks JM, O'Connell PE. : The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In Computer Models of Watershed Hydrology, Singh VP(ed). Chap.16, Water Resources Publications, Highlands Ranch; pp.563-594, 1995.
- 12) 市川 温・村上将道・立川康人・椎葉充晴 2001. 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発. 土木学会論文集 691/II-57, pp. 43-52, 2001.
- 13) 宮田昇平，中島隆信，白石芳樹，鳥元尚徳：分布型洪水予測モデルのパラメータ同定及びフィードバック手法に関する研究，河川技術論文集，第 19 巻，pp. 313-318，2013.
- 14) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., Fukami, K. : Rainfall-Runoff-Inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, Hydrological Science Journal, 57(2), pp.298-312, 2012.
- 15) Sayama, T., Tatebe, Y., Iwami, Y., Tanaka, S. : Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation: 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, pp. 1617-1630, doi:10.5194/nhess-15-1617-2015.
- 16) 近者敦彦，関本大成，橋本舜也ら：兵庫県全域リアルタイム氾濫予測システムの構築，河川技術論文集，第 27 巻，pp. 69-74，2021.

- 17) 角屋睦, 永井明博: 流出解析手法(その 10) —4. 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, pp. 43-50, 1980
- 18) 林義晃, 手計太一, 山崎惟義: 我が国の地上雨量観測所における観測体制と蓄積データの時空間特性に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol. 30, pp. 43-53, 2017.
- 19) 山地秀幸, 川崎将生, 土屋修一: XRAIN 雨量情報を活用した水災害への対応強化, 土木技術資料 56-12, pp. 22-25, 2014.
- 20) 原田靖生, 二瓶泰雄, 酒井雄弘, 木水啓: 浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討, 水工学論文集, 第 51 巻, I_1081-186, 2007.
- 21) 国土交通省 水管理・国土保全局: 革新的河川技術プロジェクト ～危機管理型水位計の実装状況とその効果～, 建設マネジメント技術, pp. 24-28, 2020
- 22) 土木学会水理公式集: 2018 年度版
- 23) 福岡捷二: 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp. 253-258, 2014.
- 24) 福岡捷二: 洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術(招待論文), 河川技術論文集, 第 12 巻, pp. 1-6, 2006.
- 25) 福岡捷二: 洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73, No. 4, I_355-I_360, 2017.
- 26) 福岡捷二, 佐藤宏明, 出口桂輔: 洪水流の非定常準二次元解析法の研究, 土木学会論文集 B, Vol. 65 No. 2, pp. 95-105, 2009.
- 27) 福岡捷二, 渡邊明英, 永井慎也: 河道内貯留量推算のための水位観測法と粗度係数に与える流れの非定常性の影響, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp. 71-76, 2004.
- 28) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 水工学論文集, 第 56 巻, I_1225-1230, 2012.
- 29) 竹村 吉晴, 福岡 捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 75, No. 1, pp. 61-80, 2019.
- 30) Takeuchi K, Ao TQ, Ishidaira H.: Introduction of blockwise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin. Journal of Hydrological Sciences 44(4), pp. 633-646, 1999. DOI: 10.1080/02626669909492258.
- 31) 福岡捷二, 石塚宗司, 田端幸輔: 堤防脆弱性指標を用いた平成 28 年十勝川大洪水時における丘陵堤整備区間の浸透破壊に対する安全性と破堤リスク軽減に向けた今後の堤防設計の考え方, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 75 No. 2, I_1399-1404, 2019.
- 32) 竹村吉晴, 福岡捷二, 吉井拓也: 広大な高水敷と横堤群を有する荒川中流部の洪水調節機能に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 74, No. 4, pp. I_1387-I_1392, 2018. 2.

- 33) 福岡捷二, 田端幸輔, 出口桂輔:平成 27 年 9 月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力, 河道貯留及び河道安定性の検討, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp.373-378, 2016.
- 34) 山本一浩, 中村圭吾, 福岡浩史, 戸村健太郎, 金田真一:グリーンレーザ(ALB)を用いた河川測量の試み, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.293-298, 2017.
- 35) 中小河川検討会:中小河川計画の手引き(案)～洪水防御計画を中心として～, 平成 11 年 9 月
- 36) 内閣府:平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について
- 37) 社会資本整備審議会:気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について ～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～, 2020
- 38) 阿部紫織, 清水義彦, 浅沼順, 佐山敬洋:令和元年台風 19 号による利根川上流域の洪水外力の推定と治水課題の考察, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.71-76, 2020.
- 39) 後藤岳久, 福岡捷二, 大作和弘:観測水面形時系列から求めた本・支川の流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの同定定数と洪水予測計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.75, No.2, I_1291-I_1296, 2019.
- 40) 細川敬祐 編:データ同化の考え方とその方法(講演:中野慎也), MTI ハンドブック, 2009
- 41) 淡路敏之, 蒲地政文, 池田元美, 石川洋一:データ同化 観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, 2009.
- 42) G. Evensen, “Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics”, J. Geophys. Research, Vol.99, pp.10143-10162, 1994.
- 43) 北川源四郎:時系列解析入門, 岩波書店, 2005.
- 44) 川原睦人:特別講演 非構造分野における有限要素法の発展と今後の展望--随伴方程式法および有限要素法による逆解析への展開, 応用力学論文集, Vol.8, pp.3-14, 2005.
- 45) Ding, Y., Jia Y. and Wang, S.S.Y. (2000), Identification of Manning’s roughness coefficients in shallow water flows, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol.130, No.6, pp.501-510.
- 46) Sanders, B. F. and Katopodes, N. D. (2000), Adjoint sensitivity analysis for shallow-water wave control, Journal of Engineering Mechanics, 126-9, pp.909-919.
- 47) 椿涼太, 小林健一郎, 内藤正彦, 谷口丞:洪水予測の現状と課題について, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.1-6, 2013.
- 48) 一言正之, 桜庭雅明:深層ニューラルネットワークと分布型モデルを組み合わせたハイブリッド河川水位予測手法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.1, I_22-33, 2017.
- 49) 小山直紀:観測水位及び降雨データを用いた時系列解析による実時間洪水予測手法の適用性とその応用に関する研究, 中央大学博士論文, 2020.
- 50) 森田敏徳, 水草浩一, 佐々木淑充, 廣木謙三, 天野卓三:中小河川における各種洪水予測モデルの特徴分析, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.71-72, 2004.

- 51) 日野幹夫: 水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用, 土木学会論文報告集, pp. 39-47, 1974.
- 52) 星清, 片山直樹, 橋本織秀: 予測雨量の誤差を考慮した実用的洪水予測モデルの開発, 土木学会北海道支部論文報告集, 第60号II-6, pp. 292-295, 2003.
- 53) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨: バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化, 土木学会論文集 B, Vol. 64 No. 4, pp. 226-239, 2008.
- 54) 工藤亮治, 近森秀高, 永井明博: 粒子フィルタを用いた実時間洪水予測システムの構築と河道任意地点における予測精度の検証, 水文・水資源学会誌, Vol. 24, pp. 137-148, 2011.
- 55) 天野卓三, 三輪準二, 水草浩一, 金木誠: 中小河川における各種洪水予測モデルの適用性に関する研究, 河川技術論文集, pp. 61-66, 2003.
- 56) 一言正之, 櫻庭雅明, 清雄一: 深層学習を用いた河川水位予測手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, I_187-I_192, 2006.
- 57) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 土木学会論文集 B2(水工学), Vol. 67, No. 4, I_511-I_516, 2011.
- 58) 川崎将生, 猪股広典: 洪水予測の精度向上に向けた技術検討 ～粒子フィルタの適用～, 自然災害への対応, 国総研レポート 2014.
- 59) T. Kurahashi and M. Kawahara: Application of second-order adjoint technique for conduit flow problem, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 54, pp. 1269-1290, 2007.
- 60) 吉田圭介, 石川忠晴: Adjoint 法による流量ハイドログラフ推定法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 68, No. 4, I_1264-I_1266, 2012.
- 61) 吉田圭介, 石川忠晴: 変分法と浅水流モデルを併用した河床粗度の逆推定に関する研究 水工学論文集, 第54巻, pp. 991-996, 2010.
- 62) 西口亮太, 田方俊輔, 影山建太郎, 泉典洋, 関根正人: 河川流の逆解析・データ同化に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 76, No. 1, pp. 30-41, 2020.
- 63) 星野剛, 齊藤充紀, 安田浩保: 粒子フィルタを導入した河道網の水理解析, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73, No. 4, I_661-I_666, 2017.
- 64) 後藤岳久, 柴田亮, 山本浩之, 廣野太志, 福岡捷二: 多点水位計測システムを用いたリアルタイム水面形・流量推算手法, 河川技術論文集, 第23巻, pp. 257-262, 2017.
- 65) 柏田仁, 二瓶泰雄: 一次元不定流解析のための新たな水位同化手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73, No. 4, I_595-I_600, 2017.

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

4.1 緒言

本章では、洪水時の早期の住民避難に役立てることを目的に、精度の高い観測水面形時間変化を用いた洪水流同化解析に基づく洪水予測モデルの開発を行い、その適用性について以下の検討を行っている。

第一に、多地点の観測水位の時間変化と平面二次元浅水流解析法に対して、アジョイント法^{1),2)}を適用することにより、自動的に流量ハイドログラフ、抵抗係数の同定と堤防に沿う左右岸の縦断水面形時間変化の同化を行う解析モデルを開発している。第二に、上記の同化解析モデルを利根川上流区間の洪水に適用し、本解析法の妥当性を検証している。第三に、ALB 測量による詳細な河道内地形情報と簡易水位計データを含めた密度の高い観測水位情報を用いて、河川の水理解析に必要な水面下の地形情報密度と、水面形同化解析に必要な水位計の数について検討を行っている。この結果、同化解析の制御変数の数に対して必要な水位計の数の評価はできたが、制御変数と水位計の数に応じた同化解析水位や制御変数の推定値の分布は不明なため、その検討を行っている。以上の検討を踏まえ、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、洪水流伝播を利用した水位予測手法とタンクモデルの流出量を修正した水位予測手法を提案し、その妥当性を検討している。

4.2 アジョイント法を用いた縦断水面形時間変化の同化解析モデルの開発

4.2.1 縦断水面形時間変化への同化の考え方と制御変数

一般的に観測所水位の時間変化は定点で精度良く計測されている。縦断的に整備された観測所水位の時間変化は、観測所間等の水面形の移動や変形の時間変化情報を表している。このため、精度の高い縦断水面形時間変化を推定するには、点情報から得られる観測水面形の時間変化に解析水位が合致するように、解析結果に影響する制御変数(境界値・初期値・パラメータ等)を最適化することが重要と考える。

本研究ではこの考えに従い収支や力学との整合性の高いアジョイント法^{1),2)}による水面形同化解析モデルを構築する。最適化する制御変数は、水位に比べて観測精度の低い上流端からの流量ハイドログラフと直接的な計測が不可能な粗度係数及び樹木群透過係数を対象とした。本研究では計算開始までの助走期間を設けることで初期条件の影響は考慮しない。また、洪水期間中の河床変動の影響は考慮しない。

4.2.2 評価関数

評価関数は式 (4.1)で定義する. 右辺第1項 J_H 及び第2項 J_Q は,それぞれ観測水位と計算水位のミスフィット,流量観測値とのミスフィットである.第3項 J_{n_init} 及び第4項 J_{K_init} は,それぞれ同化解析の事前に設定する粗度係数及び樹木群透過係数と同化後の最適値との差異を表すもので,説明可能な値に収まるようにある程度の拘束を与える.なお,式(4.1)の評価関数で最も大きなウエイトを占めるものは第1項の水位の適合度である.

$$\begin{aligned}
 & J(Q_{bound}, n, K) \\
 & = J_H + J_Q + J_{n_init} + J_{K_init} \\
 & = \int_{T_a}^T \int_A \sum_k \delta(x-x_{mH}, y-y_{mH}, t-t_k) \frac{\{H_c(x, y, t) - H_o(x, y, t)\}^2}{2\sigma_{H_o}^2} dAdt \dots\dots\dots (4.1) \\
 & + \int_{T_a}^T \int_A \sum_k \delta(x-x_{mQ}, t-t_k) \frac{\{Q_c(x, t) - Q_o(x, t)\}^2}{2\sigma_{Q_o}^2} dAdt \\
 & + \sum_{id=1}^{num_an} \frac{\{n(id) - n_{init}(id)\}^2}{2\sigma_{n_init}^2} + \sum_{id=1}^{num_ak} \frac{\{K(id) - K_{init}(id)\}^2}{2\sigma_{K_init}^2}
 \end{aligned}$$

ここに, T_a, T :同化開始時刻,終了時刻, (x_{mH}, y_{mH}) :水位観測点の位置, t_k :観測時刻, x_{mQ} :流量観測の横断測線の縦断位置, H_o :観測水位, H_c :計算水位, Q_o :観測流量(HQ換算流量), Q_c :計算流量, σ_{H_o} :観測水位の誤差標準偏差, σ_{Q_o} :観測流量の誤差標準偏差, Q_{bound} :上流端流量ハイドログラフであり10分間隔で推定する. num_an :最適化する粗度係数の区分数, n_{init} :同化解析の最初に設定した粗度係数値, n :最適化する粗度係数値, σ_{n_init} :粗度係数値のバラツキ(標準偏差), num_ak :最適化する樹木群透過係数の区分数, K_{init} :同化解析の最初に設定した樹木群透過係数, K :最適化する樹木群透過係数, σ_{K_init} :樹木群透過係数値のバラツキ(標準偏差)である.

4.2.3 平面二次元流解析モデル

洪水流の基礎方程式は,福岡³⁾の一般座標系物理成分表示の平面二次元非定常流解析モデルを用いる.ここで,洪水流解析法に平面二次元解析を採用した理由を示す.後述する対象の利根川は高水敷を有する複断面河道であり,緩やかではあるが湾曲部と蛇行部の平面形状を有している.このため,一次元流解析法では河床材料や植生の地被状況,及び河道の平面的な地形形状による流速分布の変化やそれに伴う流体抵抗を十分に表現できない.一方,平面二次元流解析では,構造物周辺の流れを除き上記の内容を概ね説明できることがわかっている.

以下に,連続式と ξ, η 方向の運動方程式は以下のとおりである.

【連続式】

$$J \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\tilde{J} d\eta \cdot \tilde{U} h) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\tilde{J} d\xi \cdot \tilde{V} h) = 0 \dots\dots\dots (4.2)$$

【反変 ξ 方向の運動方程式】

$$\begin{aligned}
& h \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \tilde{U} h \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} + \tilde{V} h \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} - \tilde{J} (\tilde{V} - \tilde{U} \cos \theta^{\eta\xi}) \left(\tilde{U} h \frac{\partial \theta^{\xi}}{\partial \tilde{\xi}} + \tilde{V} h \frac{\partial \theta^{\xi}}{\partial \tilde{\eta}} \right) \\
& = -gh \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \tilde{\xi}} + \cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \tilde{\eta}} \right) - g \left(\frac{n^2}{h^{1/3}} + \frac{h_{ree}}{K^2} \right) \tilde{U} \sqrt{u^2 + v^2} \\
& \quad + \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} (\tilde{J} d\eta \cdot h \tilde{\tau}_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\tilde{J} d\xi \cdot h \tilde{\tau}_{\xi\eta}) \right\} \\
& \quad - \tilde{J} h \left\{ (-\tilde{\tau}_{\xi\xi} \cos \theta^{\eta\xi} + \tilde{\tau}_{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\xi}}{\partial \tilde{\xi}} + (-\tilde{\tau}_{\xi\eta} \cos \theta^{\eta\xi} + \tilde{\tau}_{\eta\eta}) \frac{\partial \theta^{\xi}}{\partial \tilde{\eta}} \right\}
\end{aligned} \quad \dots(4.3)$$

【反変 η 方向の運動方程式】

$$\begin{aligned}
& h \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} + \tilde{U} h \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \xi} + \tilde{V} h \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \eta} - \tilde{J} (\tilde{U} - \tilde{V} \cos \theta^{\eta\xi}) \left(\tilde{U} h \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \tilde{\xi}} + \tilde{V} h \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \tilde{\eta}} \right) \\
& = -gh \left(\cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \tilde{\xi}} + \frac{\partial \zeta}{\partial \tilde{\eta}} \right) - g \left(\frac{n^2}{h^{1/3}} + \frac{h_{ree}}{K^2} \right) \tilde{V} \sqrt{u^2 + v^2} \\
& \quad + \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} (\tilde{J} d\eta \cdot h \tilde{\tau}_{\eta\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\tilde{J} d\xi \cdot h \tilde{\tau}_{\eta\eta}) \right\} \\
& \quad - \tilde{J} h \left\{ (-\tilde{\tau}_{\xi\xi} + \tilde{\tau}_{\xi\eta} \cos \theta^{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \tilde{\xi}} + (-\tilde{\tau}_{\xi\eta} + \tilde{\tau}_{\eta\eta} \cos \theta^{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \tilde{\eta}} \right\}
\end{aligned} \quad \dots(4.4)$$

ここに、 \tilde{U} 、 \tilde{V} ：反変 ξ 、 η 方向の水深平均流速ベクトルの物理成分、 u 、 v ： x, y 方向の水
深平均流速、 h ：水深であり、 n ：粗度係数、 K ：樹木群透過係数、応力テンソルに関する下
付の文字は応力の作用面と作用方向を示している。詳細は福岡ら³⁾の研究を参照されたい。

4.2.4 アジョイント法

(1) 汎関数とアジョイント方程式

4.2.3 に示した浅水流解析モデルを満足する制約条件の下、上流端流量ハイドロと粗度係
数等を最適化することで式(4.1)の評価関数値を最小化する。この制約条件ありの問題をラグ
ランジュの未定定数法を用いることで、制約条件なしの最適化問題として扱う。具体的には、
解析モデルの従属変数 h 、 \tilde{U} 、 \tilde{V} に対応するラグランジュの未定係数をそれぞれ λ_h 、 λ_U 、 λ_V
とし、式(4.2)の連続式の左辺から右辺を引いたものを F_h 、式(4.3)、式(4.4)に示した ξ 、 η 方向
の運動方程式について、それぞれ左辺から右辺を引いたものを F_U 、 F_V と記載し、汎関数 L
を式(4.5)で定義する。

$$L = J + \int_{T_a}^T \int_A (\lambda_h \cdot F_h + \lambda_U \cdot F_U + \lambda_V \cdot F_V) dAdt \quad \dots(4.5)$$

各従属変数に対応する $\lambda_h, \lambda_U, \lambda_V$ のアジョイント方程式は、汎関数のそれぞれの停留条件 $\partial L/\partial h = 0, \partial L/\partial \tilde{U} = 0, \partial L/\partial \tilde{V} = 0$ から得られる。実際は、偏微分方程式に基づく連続系から求めるのではなく、差分方程式からの変分に基づきアジョイント方程式を誘導している⁴⁾。

この方法では観測値と解析値のミスフィットの二乗和の変分勾配がラグランジュの未定係数（随伴変数）を通して時間後方的に上下流端に輸送される。

(2) 評価関数の勾配量と最適化法

制御変数による評価関数の勾配は以下のように求められる。上流端流量境界条件による勾配 $\partial J/\partial Q_{\text{bound}}$ は、境界条件を含む領域での差分方程式の変分に基づきラグランジュの未定係数から求められ、粗度係数や透過係数に対しては、ラグランジュの未定係数が掛かった対応する変分項の領域積分から得られる。粗度係数に関して整理すれば式(4.6)に示す通りである。

$$\frac{\partial J}{\partial n(id)} = \frac{n(id) - n_{\text{mit}}(id)}{\sigma_{n_{\text{mit}}(id)}^2} + \int_{T_0}^T \int_A \left(\lambda_U \cdot 2g \frac{n(id)}{h^{1/3}} \tilde{U} \sqrt{u^2 + v^2} + \lambda_V \cdot 2g \frac{n(id)}{h^{1/3}} \tilde{V} \sqrt{u^2 + v^2} \right) dAdt \quad \dots(4.6)$$

本手法では、上流端流量ハイドログラフ及び粗度係数値等に対する評価関数値を式(4.1)から、その勾配を式(4.6)等により算定し、準Newton法のBFGS公式⁴⁾を用いた繰り返し計算により評価関数を最小化することで上記の制御変数を推定した。

図4.2.1に同化解析手順を示す。収束判定は、観測誤差標準偏差程度まで計算水位が観測水位に合致するまで繰り返した。

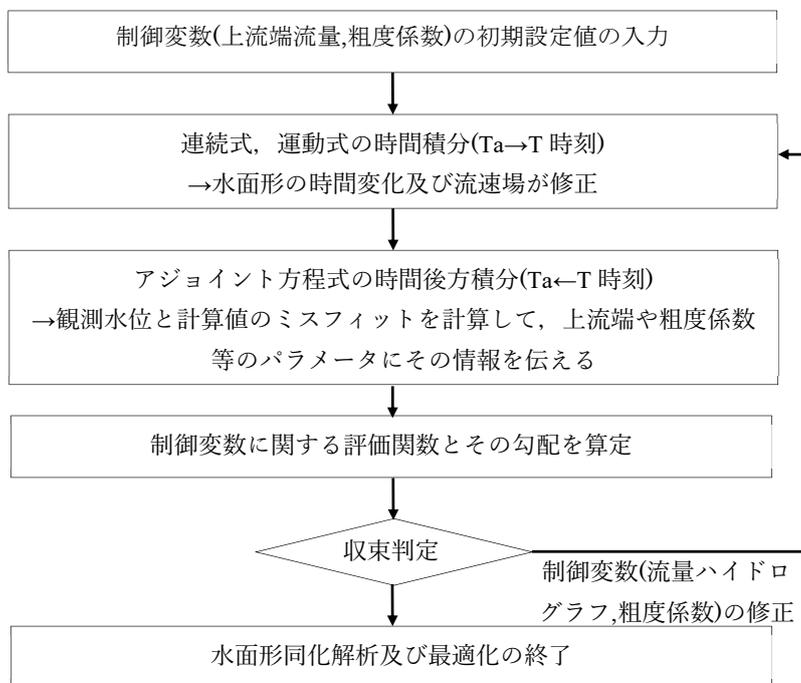


図 4.2.1 縦断水面形時間変化の同化解析の手順

4.3 対象河川の河道特性と洪水特性

4.3.1 利根川上流区間の観測体制

図 4.3.1 は、本研究の対象とする利根川上流区間と水位の観測体制を示している。

アジョイント法を用いた観測水面形時間変化への同化解析の適用性の検討は、利根川 133km～152km が対象である。解析区間の直下流には支川の渡良瀬川が合流している。このため、渡良瀬川の洪水規模が利根川の洪水に対して小さい場合は本川洪水として検討区間を流れ、渡良瀬川の洪水が大きい場合は検討区間の水面形は渡良瀬川洪水の背水の影響を受ける。研究対象区間の拡大図は図 4.3.2 に示すとおりである。

検討洪水は、H23 年 9 月台風 15 号, H27 年 9 月台風 18 号, H29 年 10 月台風 21 号である。

図 4.3.2 を用いて洪水時の水位観測体制を説明する。図 4.3.2 の▲印は、国土交通省が設置した水位計を示しており、約 19km の検討区間に 5 地点の観測水位データが得られる。しかし、水位計の配置をみると、空間的に偏りがあることや洪水によっては水位データに欠測がみられた。このため、後述の同化解析や流量の同定に対して必要な水位計の数の検討を行うにあたり、現状の水位計だけでは十分ではないと考え、圧力式簡易水位計(図 4.3.2 の○印)を平成 29 年の出水期に設置し、洪水データを取得することにした。表 4.3.1 に簡易水位計の諸元を示す。これにより、平成 29 年 10 月台風 21 号の洪水では、簡易水位を含めて計 10 箇所の貴重な水位データを取得した。この観測結果は後述する。

流量観測は、国土交通省利根川上流河川事務所により川俣地点(150.2km)の大正橋と埼玉大橋で計画されているが、平成 27 年 9 月台風 18 号洪水の川俣地点のみ実施されていたためその流量データを利用する。



図 4.3.1 利根川上流区間の全体図



図 4.3.2 検討対象区間の水位計設置状況(平成 24 年撮影)

表 4.3.1 簡易水位計諸元および計測設定

項目	内容
簡易水位計	S&DLmini
計測時間間隔	1 回 / 1 分(瞬間値)
計測範囲	水深 0 ~9m
水位分解能	0.1 cm
記録方式	自記式

4.3.2 河道特性と洪水観測結果

本研究では、国土交通省利根川上流河川事務所より提供いただいた測量データ、水位と流量観測データ等の他、本研究による簡易水位計データ、現地踏査及びヘリコプターを用いたレーザ航空測量(*Airborne LiDAR Bathymetry*, 以後 ALB⁵⁾)から、河道特性や洪水特性を整理し、平面二次元洪水流解析モデルの構築を行った。

(1) 河道特性

対象区間の地形特性や地被特性を得るために、現地踏査を平成 28 年 8 月 24 日、25 日の 2 日間、ALB 計測を平成 28 年 10 月 20 日、21 日に実施した。ALB の計測の諸元を表 4.3.2 に示す。表 4.3.2 より、水中の計測密度はアザーパルスを含んだ値となっており、平均的に 2.7 点/m²、陸上部は 17.8 点/m² の詳細な地形データを取得した。上記の ALB 測量の標高分布を図 4.3.3 に示す。測量を精査した結果、水面下の水深 2.0m より深い範囲で欠測が生じた。そのデータ欠損部分は全体の 2%程度であった。この原因は、この時期の透視度が低いため

である。このため、透視度の高い冬季の平成 29 年 2 月に再計測を実施し、水面下の欠損領域の補填を行った。

ALB 計測により得られた地形形状の精度を検証するために、図 4.3.4 には、131.0km 地点の平成 24 年横断測量と本研究の ALB 計測結果の断面形状を比較して示している。この結果、ALB 測量結果は、水中部を含めて、概ね横断測量（深淺測量）による地形形状と一致している。また、他の距離標測線についても同様の比較をしており、横断測量と ALB 測量の標高差は陸上部、水中部ともに標準偏差として 35cm 程度であり、比較する測量年次が若干違うこともあるが、概ね良好な結果である。以上より、ALB 測量の取得精度に特段の問題はない。

表 4.3.2 ALB 計測緒元

機材	項目	緒言
ヘリコプター	機体	AS350B3
	対地速度, 対地高度	120km/h, 400m
ALB	レーザ装置	Leica Chiroptera™II
	地上(近赤外)	225kHz(実績:17.8 点/m ²)
	水中(グリーン)	35kHz(実績:2.7 点/m ²)

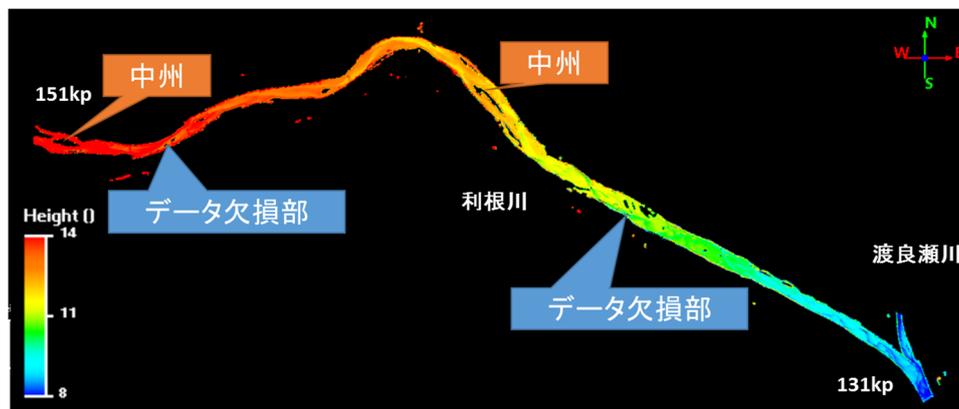


図 4.3.3 水中地形の標高段彩表示

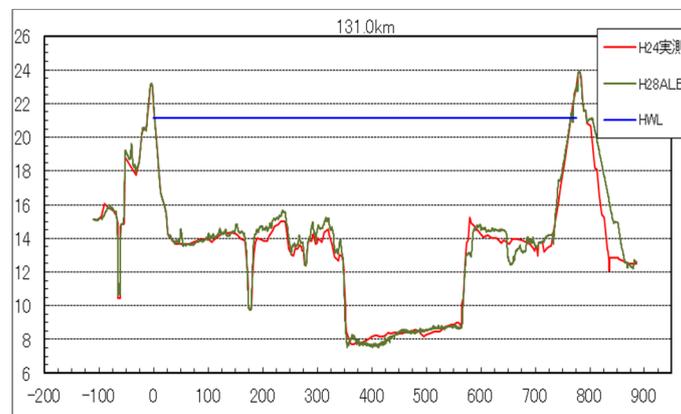


図 4.3.4 ALB 計測結果と定期横断測量成果との比較(131.0km 地点)

検討対象である H23 年 9 月，H27 年 9 月，H29 年 10 月洪水に近い年次の河道地形と地被状況の解析モデルを構築する。

まず，平成 23 年 9 月時点の河道特性を整理した。地盤高は，図 4.3.5 に示すように，平成 24 年の定期横断測量と平成 24 年の LP データから作成した。植生の平面分布は平成 23 年の植生調査(河川環境情報図)から計算メッシュ単位で整理した。樹高は平成 24 年の LP データから算出された値を用いた。

次に，平成 27 年 9 月洪水と平成 29 年 10 月洪水に対する河床形状は，上述の ALB 測量より作成した。図 4.3.6 に ALB 計測で得られた地盤高を示す。

植生の平面分布は，河川環境情報図，植生調査，及び ALB で得られたパルスデータに VOXCEL 解析⁹⁾を適用し，得られた植生の鉛直密度から図 4.3.7 に示すように整理した。樹高は VOXCEL 解析結果から 1m 単位で整理しており，高い樹木(5m 以上)，低い樹木(2m~5m)，それ以下の 3 種類の分類で示している。

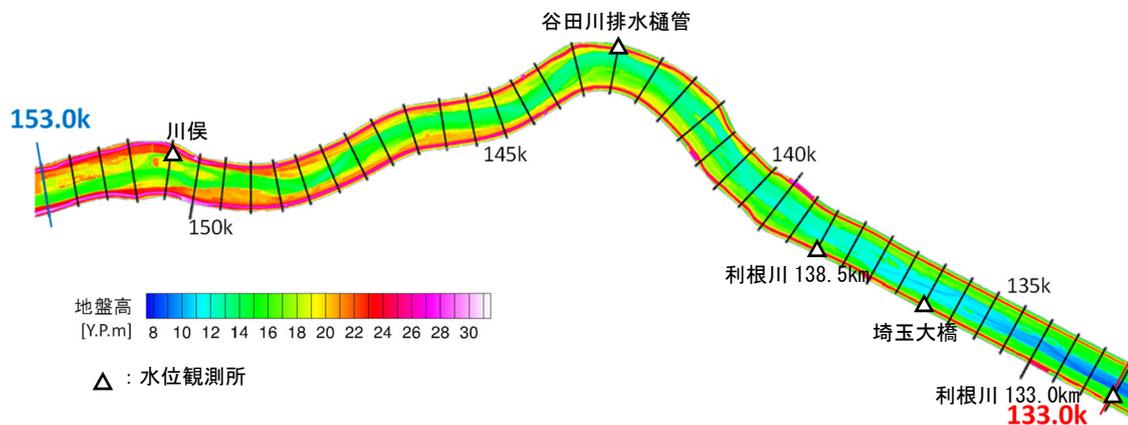


図 4.3.5 平成 24 年横断測量+平成 24 年 LP 測量の地盤高(平成 23 年 9 月洪水)

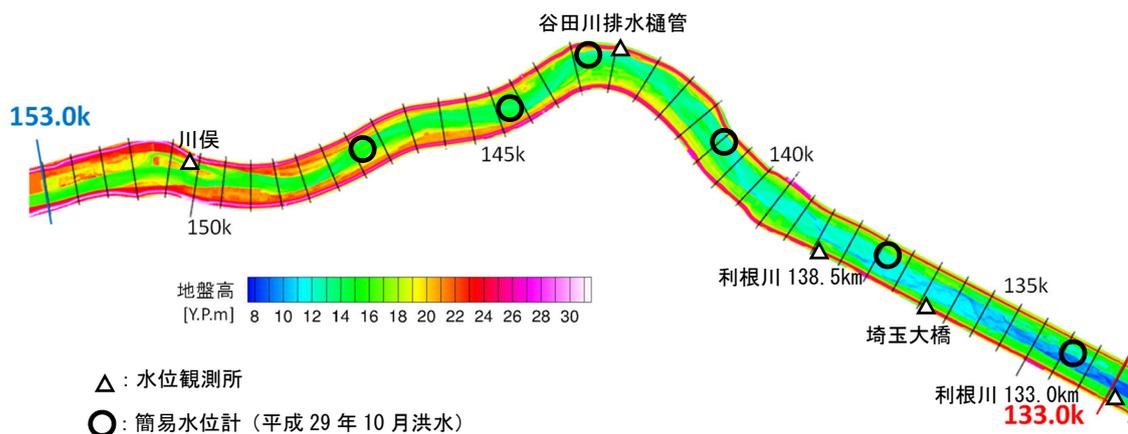


図 4.3.6 本研究の ALB 計測による地盤高 (平成 27 年 9 月洪水と平成 29 年 10 月洪水)

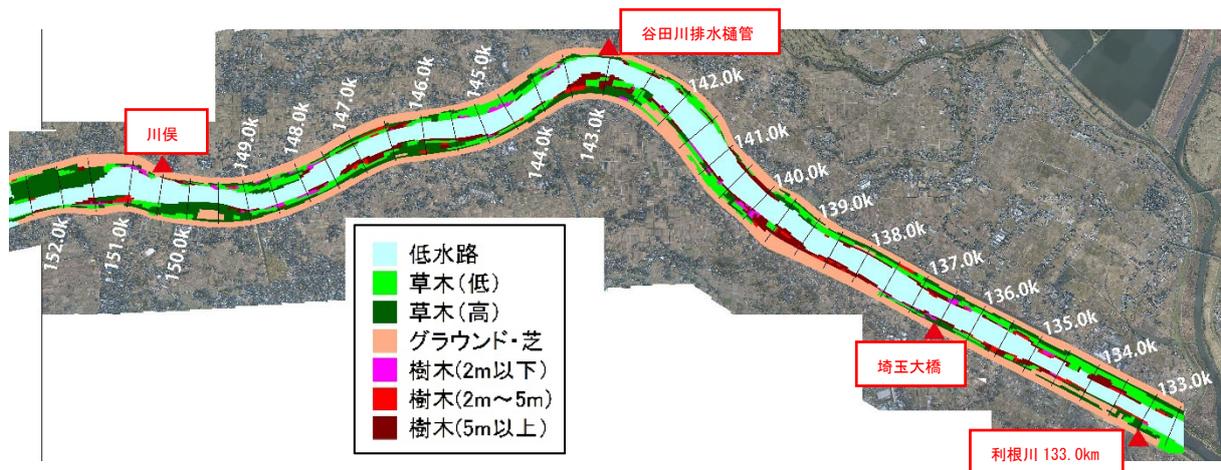


図 4.3.7 植物群の平面分布図と樹高 (H28. 10:ALB+VOXCEL 解析)

(2) 洪水特性

検討対象とする H23 年 9 月台風 15 号, H27 年 9 月台風 18 号, H29 年 10 月台風 21 号の水位観測結果を以下に示す. なお, 観測水位データを精査した結果, 利根川 1385(138.5km)は上下流水位に対して高さの逆転が見られたため欠測扱いとした.

図 4.3.8 と図 4.3.9 に平成 23 年 9 月台風 15 号の観測水位ハイドログラフと観測水面形時間変化を示す. また, 図 4.3.10 と図 4.3.11 には平成 27 年 9 月台風 18 号の観測水位ハイドログラフと観測水面形時間変化を示す.

2 つの洪水観測結果より, 上昇期と川俣水位ピーク時, 減水期の水面形の様子がわかる. 平成 27 年 9 月洪水では, 減水期の 143 k 下流の水面形の勾配が小さい. これは, この時点において支川渡良瀬川からの流量が本川流量に比べて大きいため, 背水の影響を受けていることを表している.

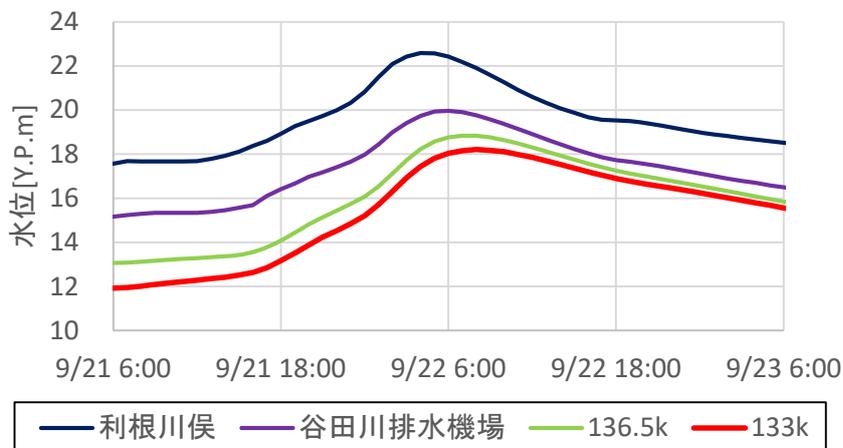


図 4.3.8 平成 23 年 9 月台風 15 号の観測水面形時間変化

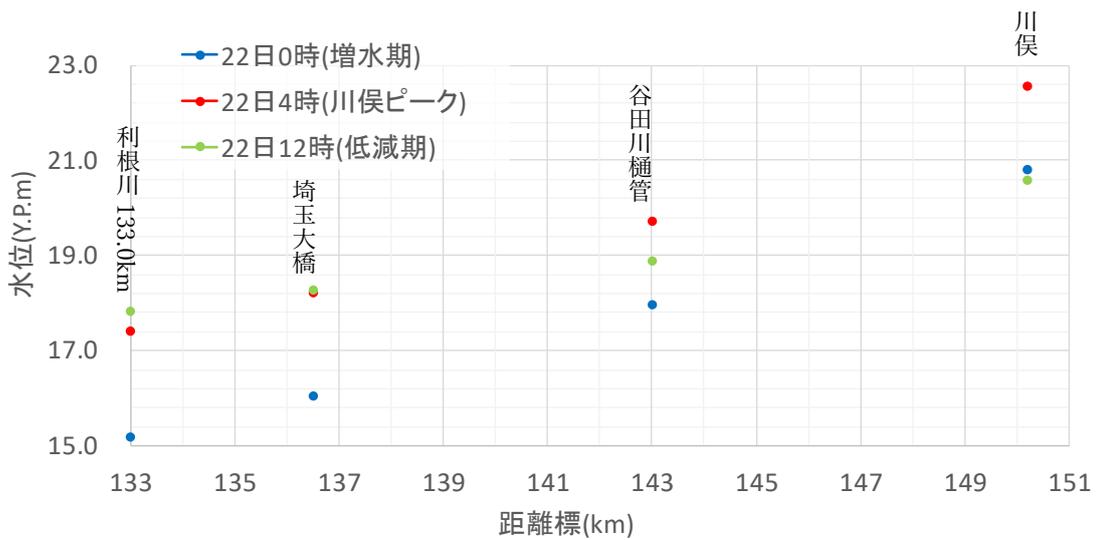


図 4.3.9 平成 23 年 9 月台風 15 号の観測水面形時間変化

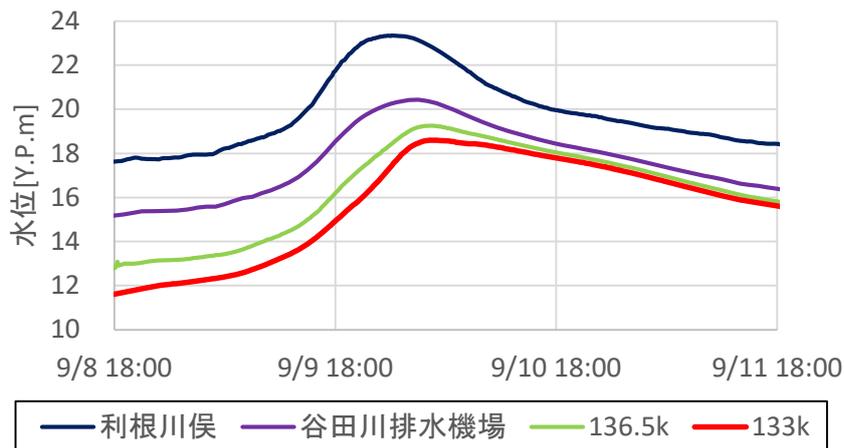


図 4.3.10 平成 27 年 9 月台風 18 号の観測水面形時間変化

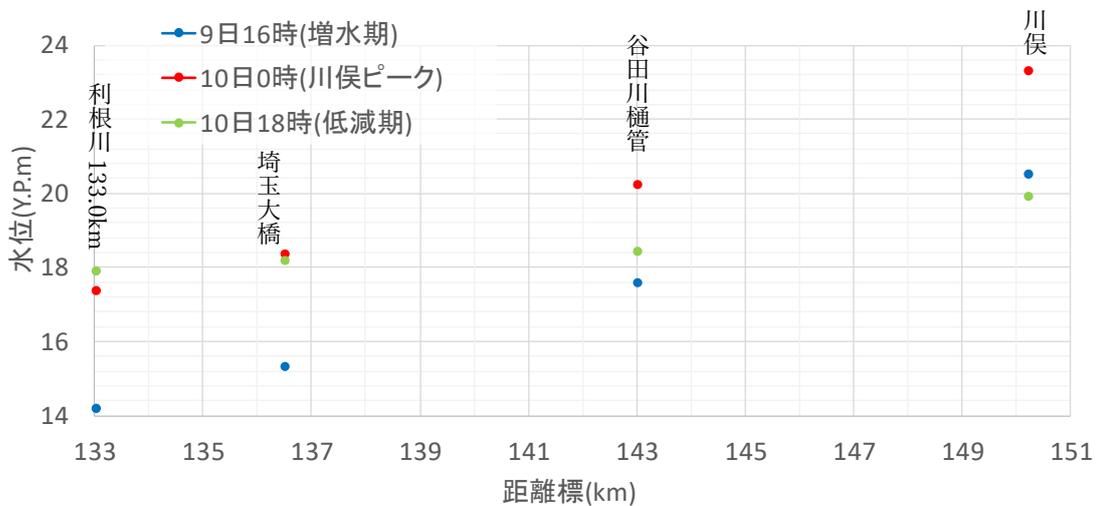


図 4.3.11 平成 27 年 9 月台風 18 号の観測水面形時間変化

次に、簡易水位計を含めて縦断的に水位が観測された平成 29 年 10 月台風 21 号洪水の観測結果を示す。図 4.3.12 に観測水位ハイドログラフを示す。埼玉大橋では 22 日 4 時から 12 時にかけて上流観測水位との逆転が生じているが限定的であり、全観測地点の観測水位ハイドログラフは精度良く観測できていることがわかる。同図より、上流側から下流に向けて水位の波形がきれいに伝わっていることが確認される。また、川俣地点と 133km のピーク水位の時差は 3 時間程度である。図 4.3.13 に観測水面形の時間変化を示す。非常に多くの水位データを取得できたことにより、観測水面形は点ではあるが、線とみなして問題ない。この図より、上昇期から川俣地点のピーク水位時刻にかけての水面形は、水面勾配に大きな変化はなく、そのまま平行移動して水位が上昇している様子がみてとれる。一方、減衰期の観測水面形をみると、下流側の水面勾配が明らかに緩くなっており、渡瀬川からの出水の影響を受けて堰き上がっていることがわかる。

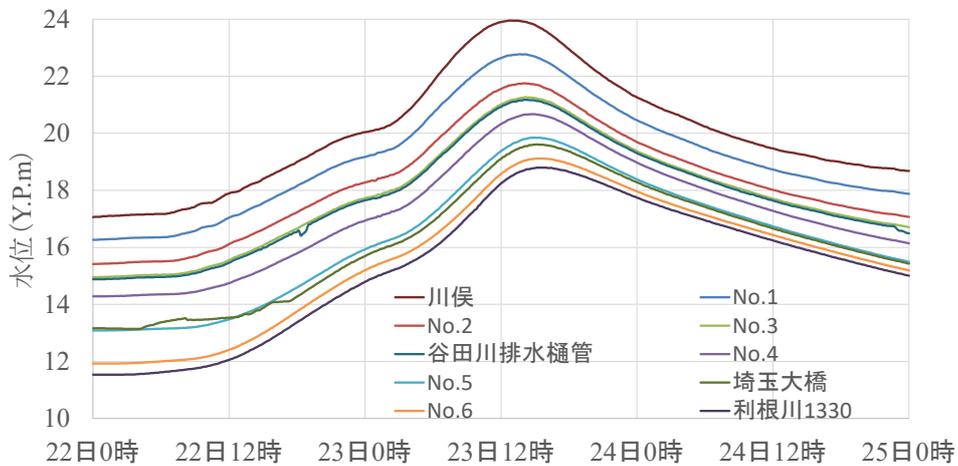


図 4.3.12 平成 29 年 10 月洪水の水位ハイドログラフ

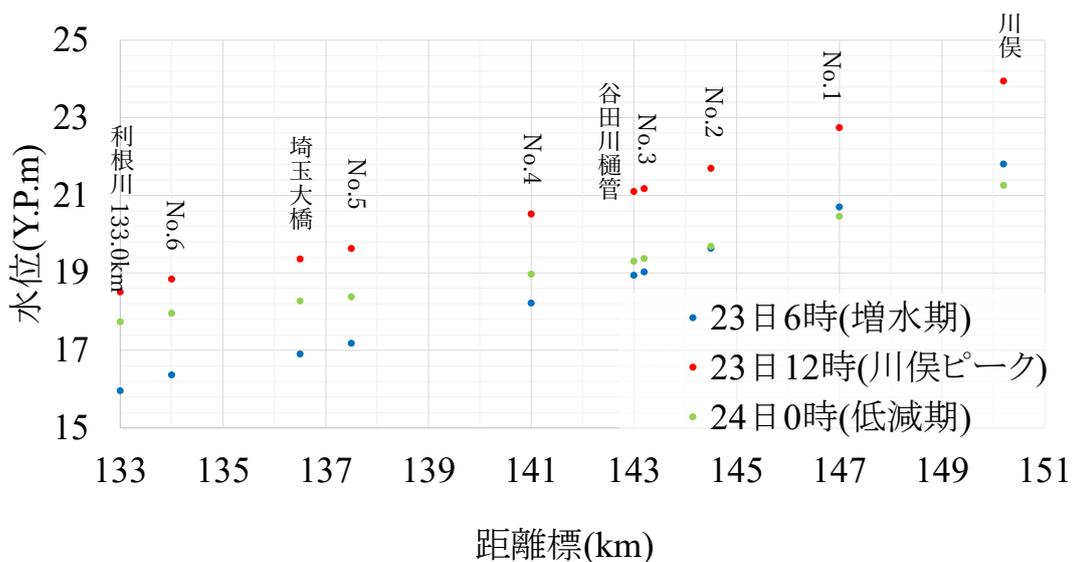


図 4.3.13 平成 29 年 10 月洪水の観測水面形時間変化

4.4 洪水流水面形同化解析モデルの適用性

本節では、4.2 節で構築した観測水面形の時間変化に平面二次元洪水流解析の解析水面形を同化させるアジョイント法を用いて、4.3 節で示した利根川上流区間の 3 洪水に適用した結果について示す。

4.4.1 解析条件

(1) 平面 2 次元流解析モデルの計算条件

4.3 節で示した利根川上流区間の河道地形や地被特性を条件として平面二次元洪水流解析モデルを構築した。計算メッシュは縦断、横断方向に約 30m とし、上流端(153.0km)に流量境界条件、下流端(133.0km)に水位境界条件を設定した。下流端の水位は利根川 133.0km の観測値を与える。水面形時間変化の同化解析では、観測水面形時間変化との合致度を表す式(4.1)の評価関数値を最小にするように上流端流量ハイドログラフ、粗度係数、樹木群透過係数が修正される。このため、平面二次元流解析は図 4.2.1 に示したようにこれらの制御変数を基に行われることになる。以下に、同化解析の制御変数とその初期設定値、観測誤差の設定を示す。

(2) 制御変数

同化解析にあたっての制御変数は、先に示したように観測精度の信頼性に課題がある上流端における流量ハイドログラフと、表 4.4.2 に示す直接の計測ができない低水路上流区間(153k~143k)、低水路下流部区間(143k~133k)、高水敷の低い草本と高い草本の粗度係数、樹木群透過係数とした。

(3) 観測誤差や同化解析の初期設定値

同化解析に用いられる観測データは、観測水位と既往洪水で観測された流量に基づく水位流量関係式による流量(HQ 流量)の時系列データである。

表 4.4.1 に、HQ 流量と観測水位の誤差標準偏差を示す。観測水位の誤差は不明なため誤差標準偏差は経験的に 10cm とした。谷田川樋管はデータ精査の結果、他の水位観測値に対して重みを小さくして扱った。川俣での HQ 流量ハイドログラフの観測誤差標準偏差は、各時刻の流量値に対して 20%と仮定した。なお、流量は水位に比べて観測精度が低いため、上述のように設定している。また、流量データは、川俣地点でしか得られないのに対して観測水位は多地点で観測されている。このため、本検討の同化解析では、必然的に観測水面形の時間変化への同化が支配的になる。

表 4.4.2 に粗度係数の初期設定値と範囲等を示す。高水敷の地被区分については、図 4.3.7 に示したように河川環境情報図や VOXCEL 解析結果に基づいて植生高さを設定している。粗度係数の初期値や範囲は既往洪水の逆算粗度や研究⁷⁾を参考に設定した。

樹木群の抵抗は以下のように設定した。樹高は図 4.3.7 に示した ALB 計測結果から与え、

透過係数は、検討区間では粗密の差が大きくなかったため全体で1区分とし、既往文献値⁸⁾を基に初期設定を40m/s、最小値を20m/s、最大値を80m/s、標準偏差を8m/sとした。ALB計測結果やVOXCEL解析結果から樹木高のみ考慮したが、樹木群密度の推定方法は今後課題である。

上流端流量ハイドログラフの初期設定値には、川俣地点のHQ流量ハイドログラフを流下遅れ時間を考慮せずに与えている。

表 4.4.1 観測誤差の設定

観測所	項目	観測誤差の標準偏差
川俣(昭和橋)	流量	各時刻のHQ換算流量の20%
谷田川樋管(143.0k右岸)	水位	20cm(60分データ)
それ以外の水位観測所	水位	10cm(10分データ)
簡易水位計(平成29年10月洪水)	水位	10cm(10分データ)

表 4.4.2 粗度係数と樹木群透過係数の初期設定値と範囲の設定

区分	初期値	最小値	最大値	標準偏差
低水路(153k~143k)	0.027	0.020	0.035	0.0025
低水路(143k~133k)	0.025	0.018	0.030	0.0025
草本(低)	0.035	0.025	0.050	0.0035
草本(高)	0.050	0.030	0.080	0.0050
グラウンド・芝地	0.025	固定		
樹木群の地表面	0.025	固定		
樹木群透過係数(m/s)	40	20	80	8

4.4.2 平成23年9月洪水, 平成27年9月洪水, 平成29年10月洪水への適用結果

構築した解析モデルを用いて, 対象3洪水の縦断水面形時間変化の同化結果を示す.

(1) 平成23年9月台風15号洪水

評価関数値の変化を図4.4.1に示す. この計算においては, 評価関数値は反復回数が10回程度で一定値となった. ここに示した反復回数は, 図4.2.1の「連続式, 運動式の時間積分」～「収束判定」までの繰り返し回数である. 図4.4.2に, 制御変数である粗度係数及び樹木群透過係数の収束状況を示す. 低水路(143.5km～153km)と樹木群透過係数は, 初期設定値から変化していることが確認される. それ以外の地被分類の粗度係数は, 初期設定値を適切に設定することで大きな変化はない. 反復回数の4回目以降の粗度係数や樹木群透過係数は, いずれも一定値になっている.

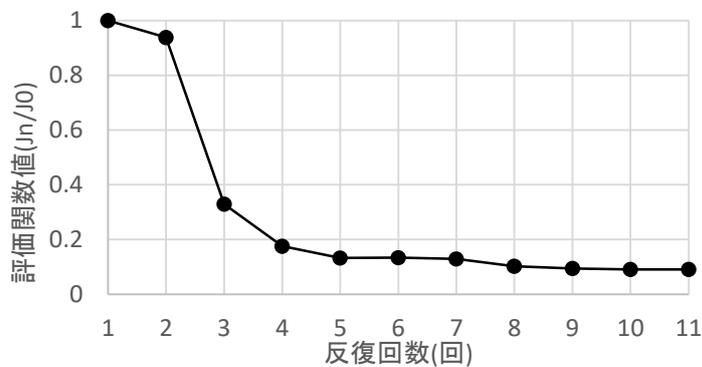


図4.4.1 評価関数(平成23年9月洪水)の収束過程

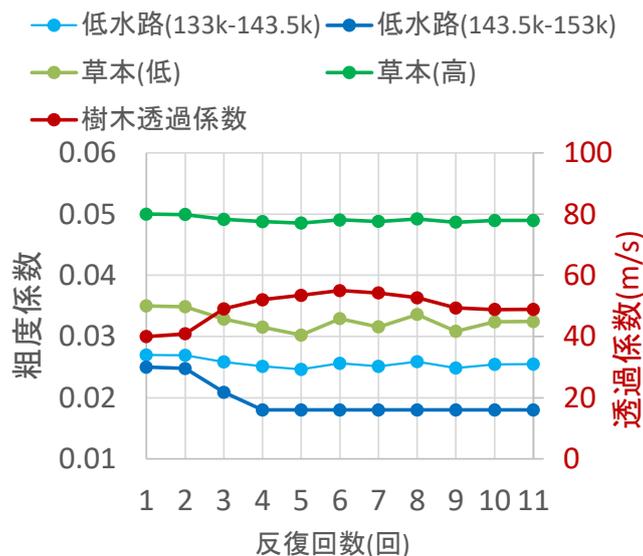


図4.4.2 粗度係数と樹木群透過係数の同定(収束)過程

次に、もう一つの制御変数である上流端流量ハイドログラフについて、上流端に近い川俣地点の流量ハイドログラフをHQ換算流量と比較する（図4.4.3）。図4.4.3に示した11回目の同化解析結果は最適化が終了しているため、その結果に着目すると、観測水面形に同化されたピーク流量は、HQ換算流量に比べて若干大きく、低減期の流量はHQ換算流量より小さいことが確認される。

図4.4.4、図4.4.5に川俣と埼玉大橋地点の水位ハイドログラフの同化過程と同化後（図中の11回目）の解析結果を示す。赤線で示した解析1回目では、川俣の水位は全体的に遅れており、特に低減期では観測値より1m程度高い結果となっている。アジョイント法により上流端流量や粗度係数などを修正することで、11回目には観測値を概ね再現していることが確認される。埼玉大橋では、1回目から概ね再現されている。埼玉大橋地点では、川俣ほど水位ハイドログラフの変化はなく、11回目の結果は、観測値を良く再現している。

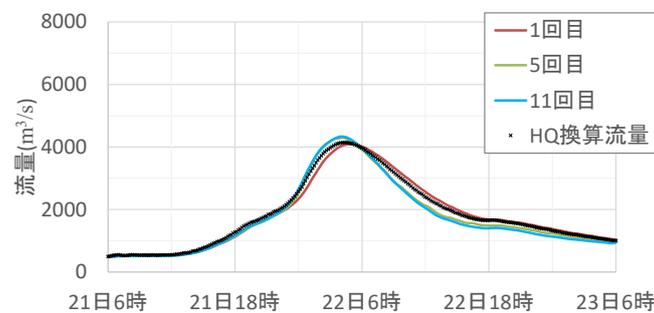


図 4. 4. 3 川俣の流量の同定過程と同定結果 (H23. 9 洪水, 利根川 150. 2km)

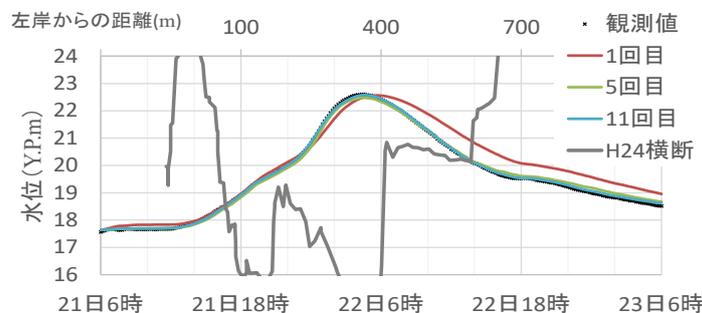


図 4. 4. 4 川俣の水位の同化過程と同化結果 (H23. 9 洪水, 利根川 150. 2km)

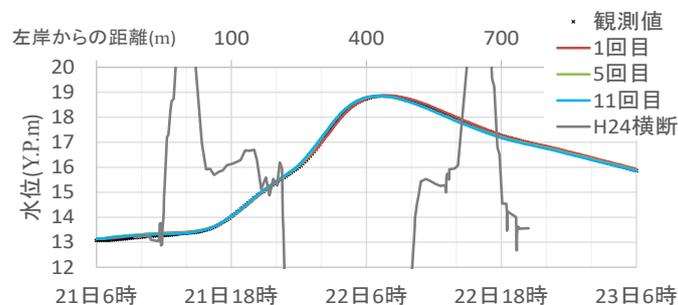


図 4. 4. 5 埼玉大橋の水位の同化過程と同化結果 (H23. 9 洪水, 利根川 136. 5km)

以上の同化解析により得られた左右岸の縦断水面形の時間変化を図 4.4.6 に示す。同化後の解析値である縦断水面形時間変化は、洪水の立ち上がり、川俣ピーク、低減期において▲で示した観測水面形時間変化に合致することが確認される。観測所間の水面形については、観測点が不足しており確認できていないため、後述する平成 29 年 10 月洪水の検証で確認する。また、図には、○と□の左右岸痕跡水位も合わせて示されているが、水位観測値と比べて低くいため、同化水面形との比較検証は行っていない。

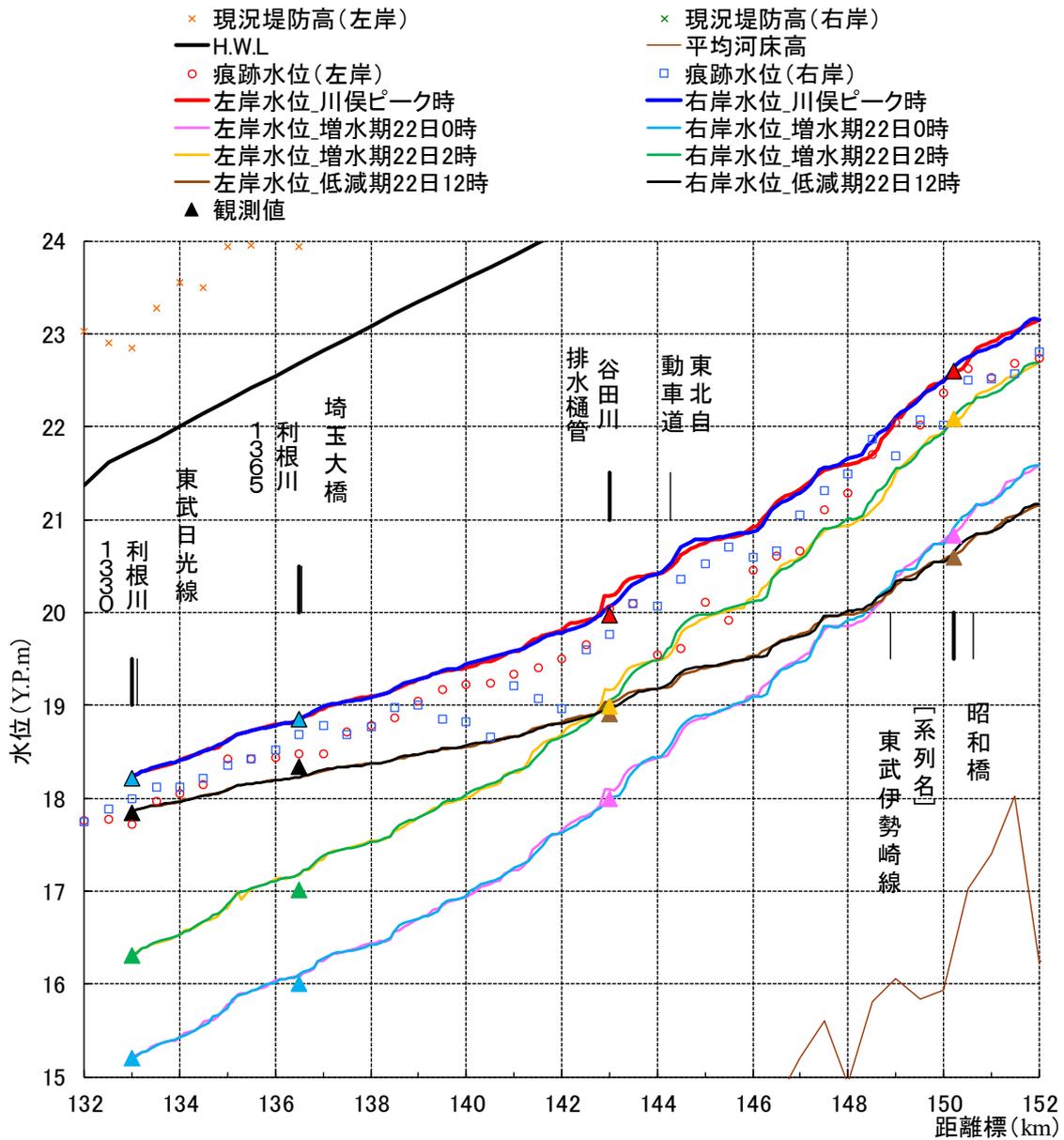


図 4.4.6 同化解析で得られた縦断水面形の時間変化 (H23.9 洪水)

以下に、解析結果を用いて、流量観測地点である昭和橋の流量観測を行う上での課題を示す。

図 4.4.7 は、H23 年 9 月 21 日 22 時における同化解析より得られた平面流速ベクトルを示している。このときの川俣の水位は Y.P. 20.05m であり、洪水流は左岸の発達した中州に乗った状況にある。流量は $2,000\text{m}^3/\text{s}$ であった。川俣の水位観測所は昭和橋の下流部に位置している。このときの昭和橋下流における同化解析後の流速ベクトルをみると、流れは、左岸寄りの中州に向かう流れとなっている。この洪水では流量観測を実施していなかったが、このような流況下で浮子観測を実施すると、浮子はまっすぐ流れず流速の早い領域に集中するため、十分な横断流速分布を得られず流量の観測精度を低下させる。

一方、本研究では上流端を 153.0km まで延伸して、川俣地点の複雑な流れを直接解きつつ、観測水面形の時間変化を説明する流量ハイドログラフを通過流量として評価している。

以上より、本手法は、観測所が無い任意の位置に上流端を設定でき、計算区間内にある観測水位に整合の取れた流況解析が行えることが確認された。あらかじめ河道の粗度係数や樹木等の条件を精査し設定しておけば、より簡便に水位情報から縦断水面形を再現可能と考えられる。

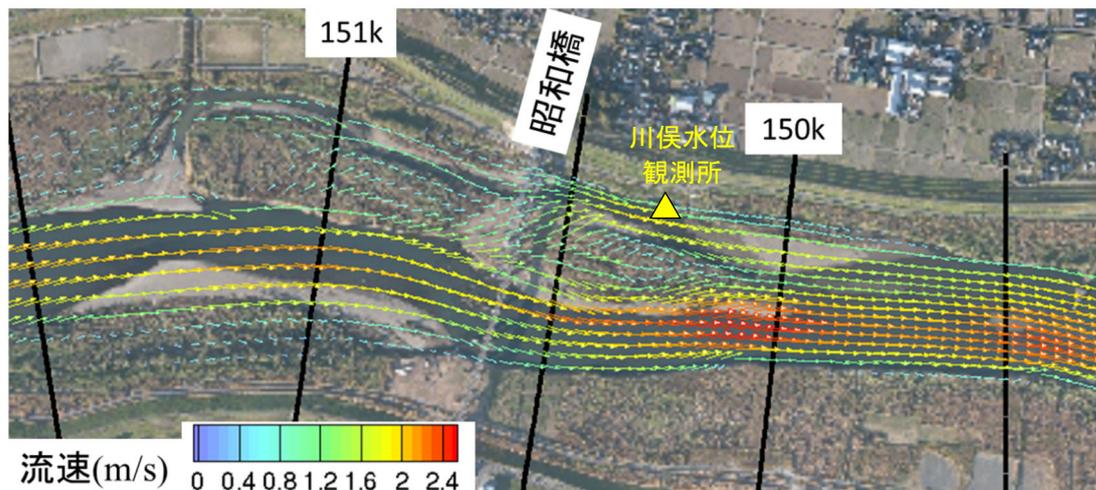


図 4.4.7 川俣周辺の流況 (H23 年 9 月 21 日 22 時 : 同化解析結果)

(2) 平成 27 年 9 月台風 18 号洪水

評価関数値の変化を図 4.4.8 に示す. 評価関数値の収束の傾向や収束した値は, 平成 23 年 9 月洪水と同程度であった. 図 4.4.9 に粗度係数及び樹木群透過係数を示す. 最終的に同定された粗度係数は平成 23 年 9 月洪水と比較すると, 低水路粗度の変化は小さいが, 草本(高)が変化している. また, 樹木群透過係数は, 平成 23 年 9 月洪水の計算では 50m/s 程度に対し, 平成 27 年 9 月洪水では 80m/s 弱となり, 同定された値に差が生じている. この差は, 繁茂状況が変化したことによる影響が同定結果に現れている可能性と以下の理由が考えられる. 平成 23 年 9 月洪水と平成 27 年 9 月洪水では, 同化に用いる水位観測点が 3 地点と少ない. このため, 複数の粗度係数や樹木群透過係数を上流端流量と同時に同定した場合, 3 地点の観測水位を満足するパラメータの組み合わせが複数存在し, 同定された値が正しいとは限らない. 水位観測点を複数含む条件下での検証が必要と考えられる. このため, 次節で同化解析の制御変数の数に対して必要な水位計の数の検討を行う.

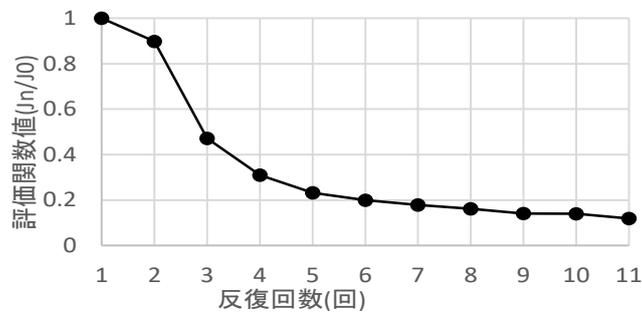


図 4.4.8 評価関数 (平成 27 年 9 月洪水) の収束過程

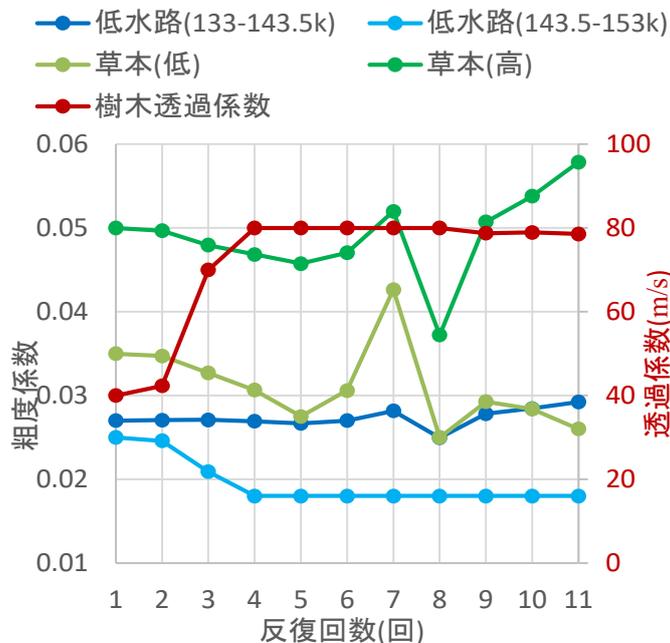


図 4.4.9 粗度係数と樹木群透過係数の同定 (収束) 過程

図 4. 4. 10 に川俣地点の流量ハイドログラフの同定過程を示す。この洪水では浮子流観が実施されているので併せて比較し示している。反復 1 回目では、HQ 換算流量と同じ波形であるのに対し、5 回目には 11 回目と同様の波形となり、低減期に若干の変化がある程度であった。また、最適化後の 11 回目の同化結果で得られた流量ハイドログラフは、浮子流観に近い結果となっていることが確認された。9 日 23 時付近の流量観測値が同化解析の流量に対して大きい理由は、上述の川俣付近の複雑な流況により浮子が流速の大きい主流を流れ、それに基づいて流量を評価した可能性がある。

図 4. 4. 11, 図 4. 4. 12 に示す水位ハイドログラフについても平成 23 年 9 月の再現検証と同様に、反復を繰り返すことで観測値と整合の取れた水位変化を表現しており、アジョイント法による同化が適切に行われていることが確認される。

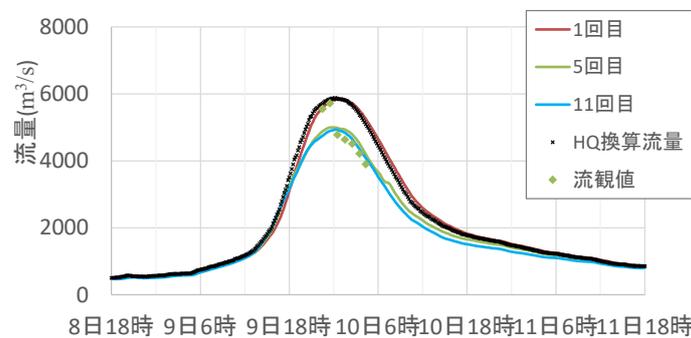


図 4. 4. 10 川俣の流量の同定過程と同化結果 (H23. 9 洪水, 利根川 150. 2km)

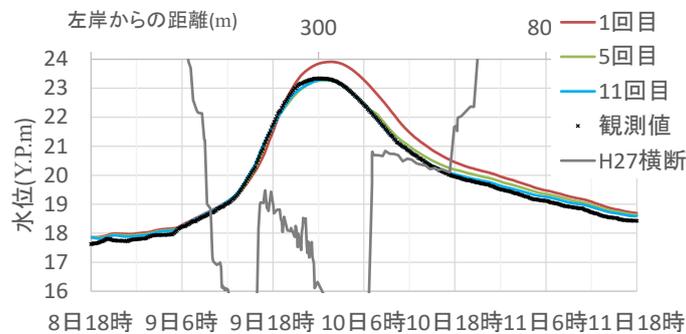


図 4. 4. 11 川俣の水位の同化過程と同化結果 (H23. 9 洪水, 利根川 150. 2km)

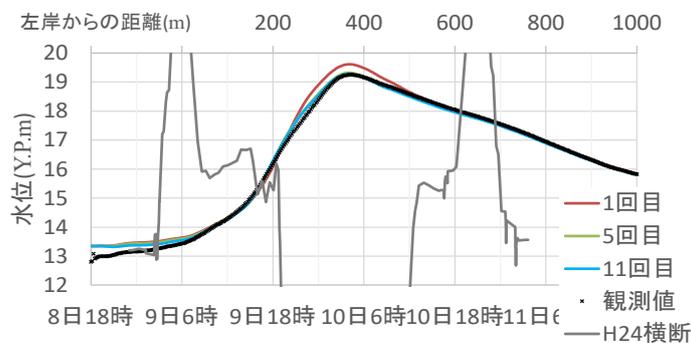


図 4. 4. 12 埼玉大橋の水位の同化過程と同化結果 (H27. 9 洪水, 利根川 136. 5km)

図 4. 4. 13 に同化解析で得られた左右岸の縦断水面形の時間変化を示す。同化解析の縦断水位は谷田川排水樋管の観測値に対して洪水立ち上がりで低めであるが、川俣、埼玉大橋 (136. 5km) では観測値と概ね一致している。低減期は 143. 5km 上流側と比べて、下流側は渡良瀬川の洪水の影響を受けることで水面勾配は小さくなる傾向にある。同化解析結果は洪水の立ち上がり、川俣ピーク時、低減期のそれぞれについて、適切に観測水面形の時間変化を説明していることが確認される。

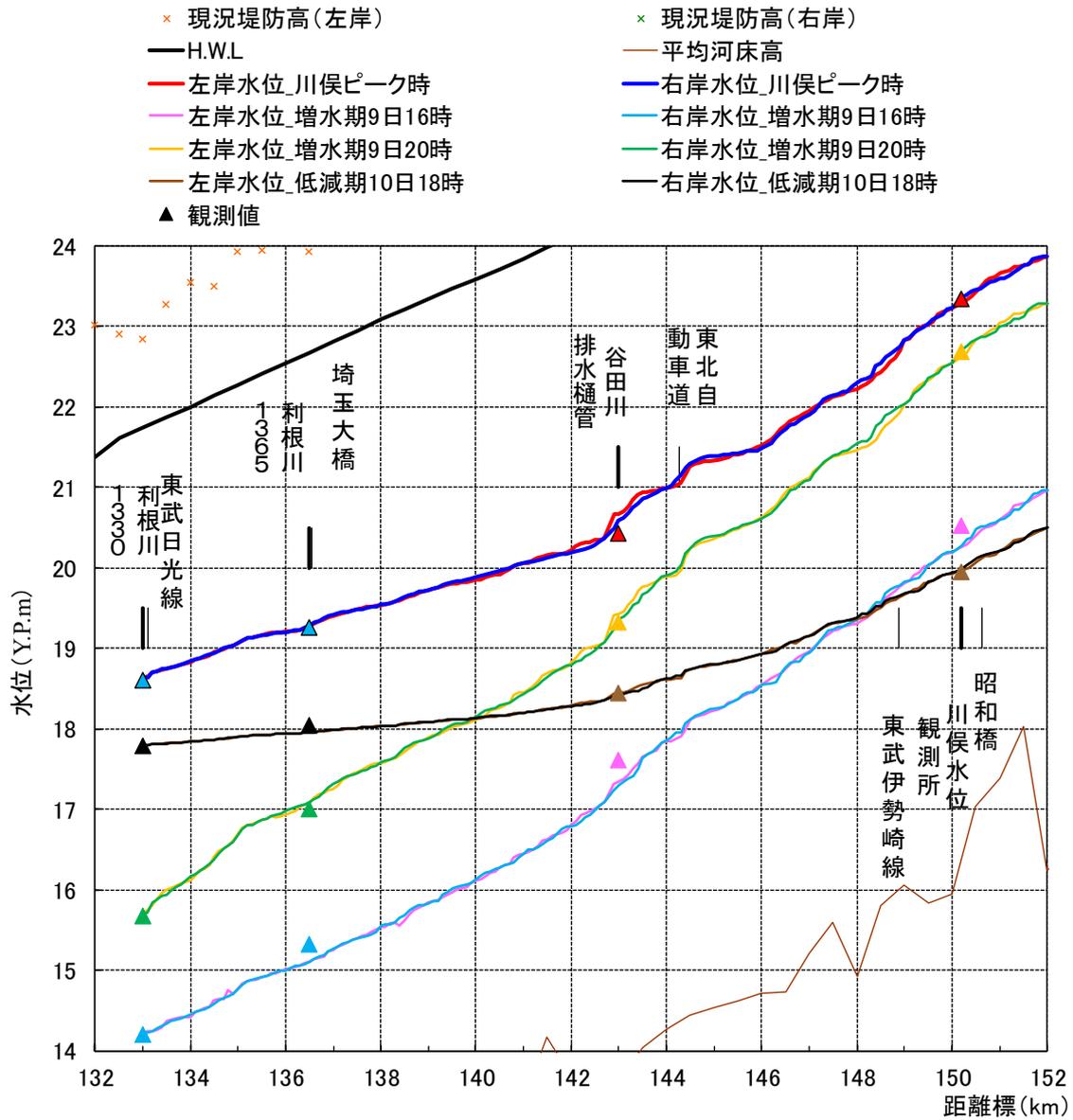


図 4. 4. 13 同化解析で得られた縦断水面形の時間変化 (H27. 9 洪水)

(3) 平成 29 年 10 月台風 21 号洪水

平成 29 年 10 月台風 21 号洪水では、先に示したように簡易水位計 6 地点を含め、計 10 地点と多くの観測水位データを取得することができた。ただし、図 4.3.2 に示したとおり、簡易水位計 No. 3 と谷田川排水樋管の観測位置が接近しており、同化解析にその両方を用いると、143km 付近の水位データの重みが過大になる。このため、本検討では No. 3 を観測水位への同化対象から外し、さらに下流端境界条件に用いている利根川 133.0km を除く計 8 地点の観測水位情報から水面形の同化を行った。

図 4.4.14 に評価関数の収束状況を示す。平成 29 年 10 月洪水では、これまでの 2 洪水に比べて観測水面形の同化に用いる地点数が増えたことにより、収束性が低下することが予想されたが、概ね 10 回程度で収束している。これは平成 23 年 9 月、平成 27 年 9 月洪水と同程度の収束性であった。

図 4.4.15 に観測水位と同化解析水位のハイドログラフを比較して示す。細かく見れば一致していないところもあるが、全体的にはほぼ一致しているとみて良い。図 4.4.16 に縦断水面形の時間変化を示す。各位置と各時間において十分に再現できている。H23 年洪水と H27 年洪水にて観測データが得られておらず、解析の精度が明確でなかった 146km～148km の区間も、データ同化を行うことで計算値と観測値が概ね一致していることが見てとれる。ただし、同化解析では解析区間および期間全体で水位の最適解を求めているので、局所的には同化後も観測値との差が残りうる。簡易水位計 No. 1 における 23 日 12 時における観測値と計算値の差は、おおよそ 20cm である。

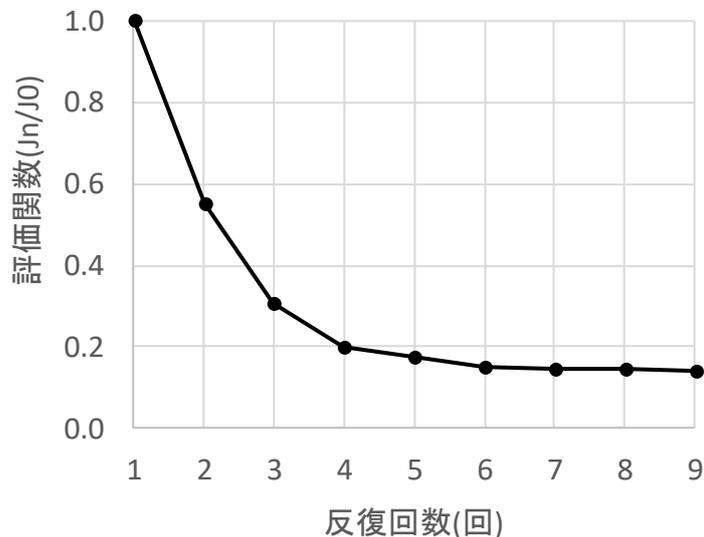


図 4.4.14 評価関数（平成 29 年 10 月洪水）の収束過程

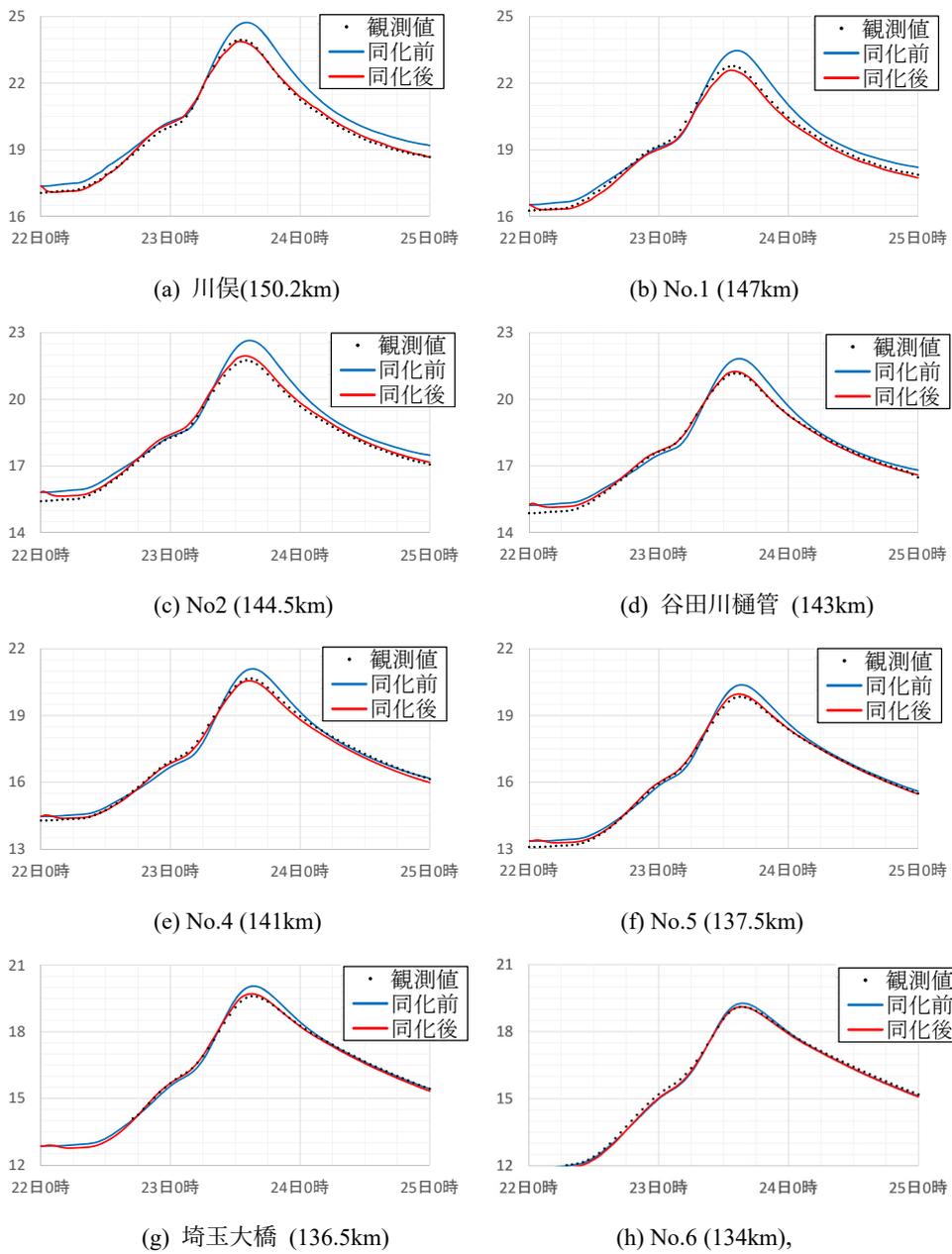


図 4. 4. 15 平成 29 年台風 21 号出水時の観測水位と同化解析水位のハイドログラフ

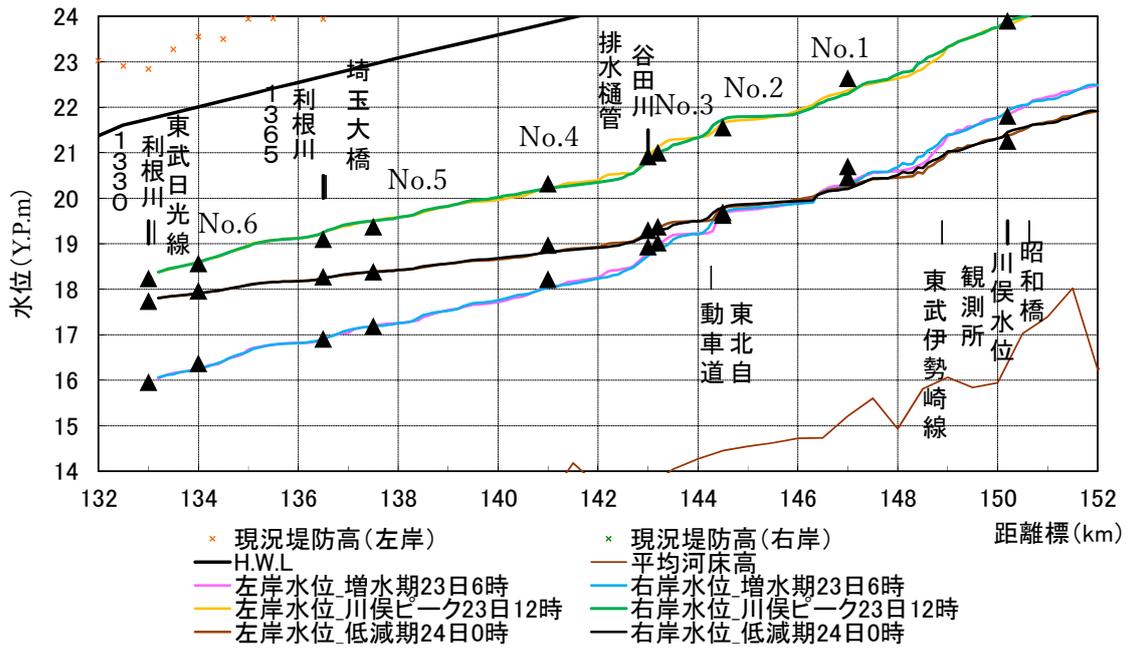


図4. 4. 16 縦断水面形の時間変化(平成29年10月台風21号, データ同化後)

同化解析前後における上記の制御変数の値を表4. 4. 3に, 8地点の水位同化により推定された流量ハイドログラフを図4. 4. 17に示す. 解析から推定された抵抗特性は事前の設定値に対して大きな変動はみられず, 1割~2割程度の変化であった. 観測水面形を説明するピーク流量についても, 図4. 4. 17に示したHQ換算流量に対して, おおよそ6%小さい程度であり, 浮子観測の精度を考慮すれば十分取りうる差異であると考えられる.

表4. 4. 3 同定された抵抗特性

パラメータ	同化前	同化後
粗度(低水路上流端-143km)	0.027	0.022
粗度(低水路 143km-下流端)	0.025	0.023
粗度(低い草本)	0.035	0.032
粗度(高い草本)	0.050	0.041
樹木群透過係数	40	37

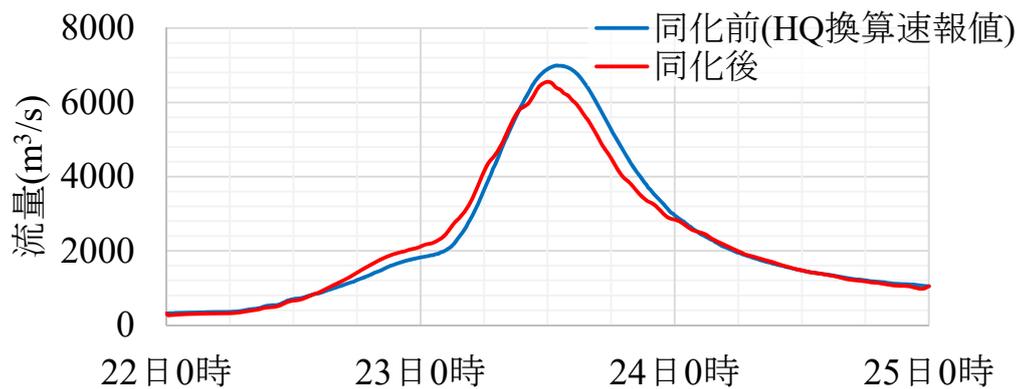


図4.4.17 川俣観測所の同化前後の流量ハイドログラフ

(4) まとめ

アジョイント法を用いた平面二次元流同化解析モデルを構築し、利根川上流区間の3洪水に適用した。この結果、観測水面形時間変化を説明する縦断水面形の同化と、上流端流量ハイドログラフ及び粗度係数、樹木群透過係数の同定が自動的に解析可能であることが示された。このとき、対象とする区間では、同化する水位観測地点数が2~3点でも水面形の同化は可能である。同化する水位計の数が多い場合、同化解析の水面形と同定される流量ハイドログラフ、抵抗係数の信頼性は向上する。

一方、水面形の同化や流量、分類化された抵抗係数の同定に対して、必要な水位計の数はわかっていない。また、水面形解析に用いる地形情報密度はどの程度を用いれば良いのか十分な評価はできていないため、次節でこれらの検討を行う。

4.5 地形計測データと水位観測データの密度が水理解析結果に及ぼす影響

LPに代表される陸上部の航空測量に加えて、水深と水質の制限を受けるもののALB^{5),9)}により水面下の河床形状を計測可能になっている。しかし、河川の水理解析に対して水面下の河床形状を含め、どの程度の地形情報密度を用いれば信頼性の高い結果を得られるか、また、4.4節の検討から明らかとなった水面形の同化解析と流量、分類化された粗度係数、樹木群透過係数の制御変数の同定に対して必要な水位計の数^{10),11)}について、河川の特性や規模に依存すると考えられるため、十分な密度の地形計測データや観測水位データを用いた評価が必要となる。

本節では、利根川上流部における平成28年ALB計測結果から計測情報を間引いて解析格子の地形高さを作成し、地形のデータ密度が平面二次元流解析の水位解析結果に及ぼす影響を検証した結果について述べる。次いで、縦断的に密な計測が行われたH29年10月出水データから水位計を間引いて水位計の数を変えた7パターンのデータに対して同化解析を行い、水面縦断形時間変化の同化解析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について検討を行った結果について述べる。

4.5.1 地形計測データの密度が水理解析結果に及ぼす影響検討

本研究での水面下のALB計測は、表4.3.2に示した約2.7点/m²の点群データを取得している。図4.5.1にALBのパルスデータからTIN内挿により1m直交直線メッシュ地盤高に整理した結果を示す。研究対象の利根川上流区間(133km~152km、川幅約600m)では、川幅が広く、検討区間も比較的長いため、この区間の縦断水面形の時間変化を推定する場合には、上記よりも粗なデータ密度で作成された地形形状でも十分な精度で水面形の推定が可能と考えられる。また、その場合には計算コストも抑えられる。このため、ALB計測のデータ密度と水面形推定値の関係を検討することは重要である。そこで、平面二次元洪水解析モデルのメッシュの地形高さの基になる計測データ密度が、水面形解析結果に与える影響を検討する。

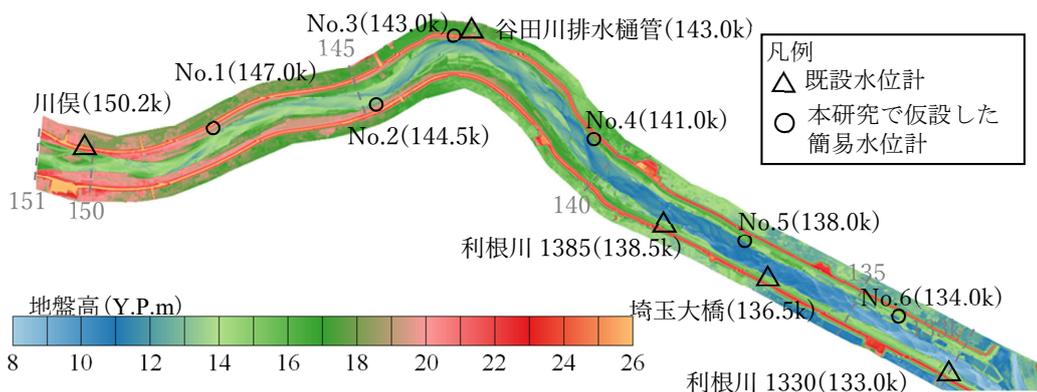


図 4.5.1 ALB 計測で得られた地盤高と水位計測地点

(1) 解析条件

上記の検討を行うため、計測される点群密度を変化させた河道地形をいくつか設定する。具体的には、前述の ALB の 1m メッシュデータ、すなわち、Case1 : 1 点/m² のデータを用いた場合、Case2 : 10m×10m に 1 点 (=1 点/100m²)、Case3 : 20m×20m に 1 点 (=1 点/400m²) の 3 ケースについて水理解析に用いる計算メッシュデータを作成し、解析に与える影響を確認した。本研究では縦断、横断方向に 10m 程度の解像度の一般座標系による計算メッシュを用いている。計算メッシュ上の点の地盤高は、Case1 では前述の 1m 直交直線メッシュデータ、Case2、Case3 では上述の条件にしたがいそれを間引いた点標高から距離の逆数を重みとした加重平均により算出した。作成した河床形状について、各ケースで顕著な差が生じた 135km-140km 区間の地盤高コンターを図 4.5.2 に示す。図 4.5.2 から Case1 と Case2 では、大きな変化は見られない。一方、Case2 と Case3 を比較した場合、滲筋が Case3 ではぼやけている。この理由は、メッシュ解像度に対して用いるデータの解像度が低く、平滑化されるためである。図 4.5.3 に計算メッシュ作成に用いるデータ密度を変えた場合の横断形状への影響を示す。データ密度を小さくした場合には、低水路河岸際でわずかに差が出る程度であった。

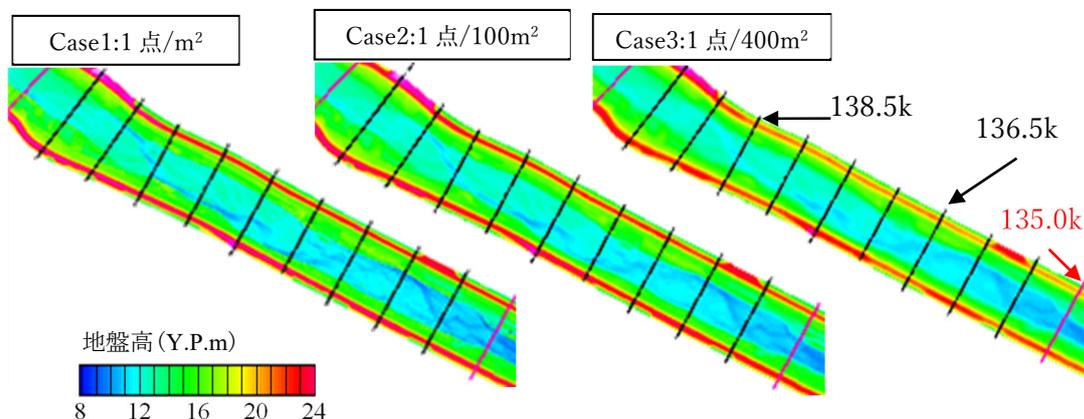


図 4.5.2 地形データ密度の違いによる標高コンターの違い

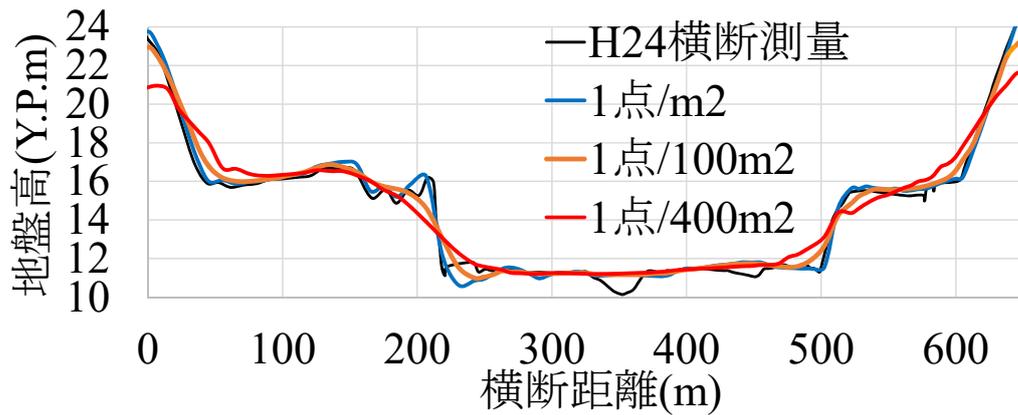


図 4.5.3 地形データ密度と計算メッシュ横断形状の関係(136.5k)

(2) 検討結果

平成 27 年 9 月洪水を対象に作成した地盤高のデータ密度が縦断水位解析値に及ぼす影響を検討した。図 4.5.4、図 4.5.5 に、上述した Case1~3 のメッシュ地盤高を用いて水理解析を実施した川俣地点と埼玉大橋の水位ハイドログラフを実測水位と比較して示す。上流端流量ハイドログラフ、粗度係数、樹木群透過係数に関しては、4.4 節の同定結果の値を与えている。図 4.5.4、図 4.5.5 より、Case1 および Case2 の計算水位はほぼ等しく、観測値との再現性も高い。一方、Case3 の結果は Case1、2 に比べて再現性は若干低下し、観測値とのズレは 20~30cm 程度である。

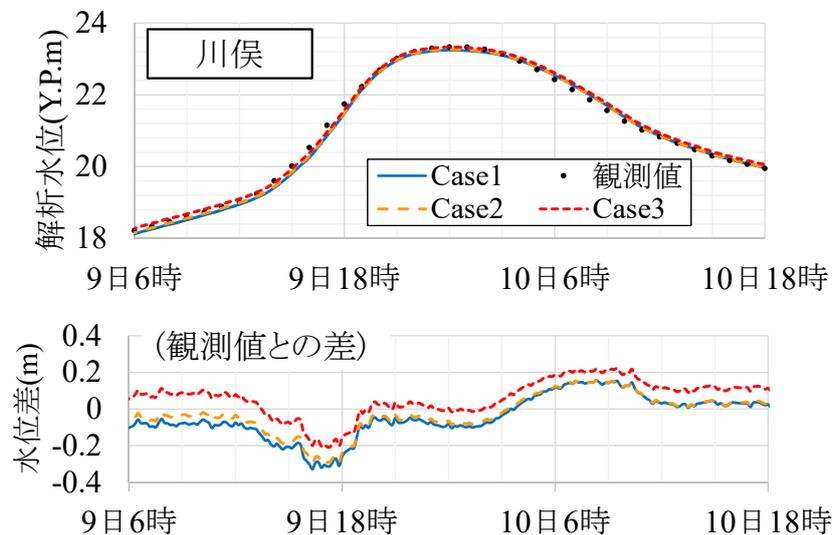


図 4.5.4 地形データ密度の違いによる水位ハイドログラフの差異(川俣)
上：水位ハイドログラフ，下：観測値との差

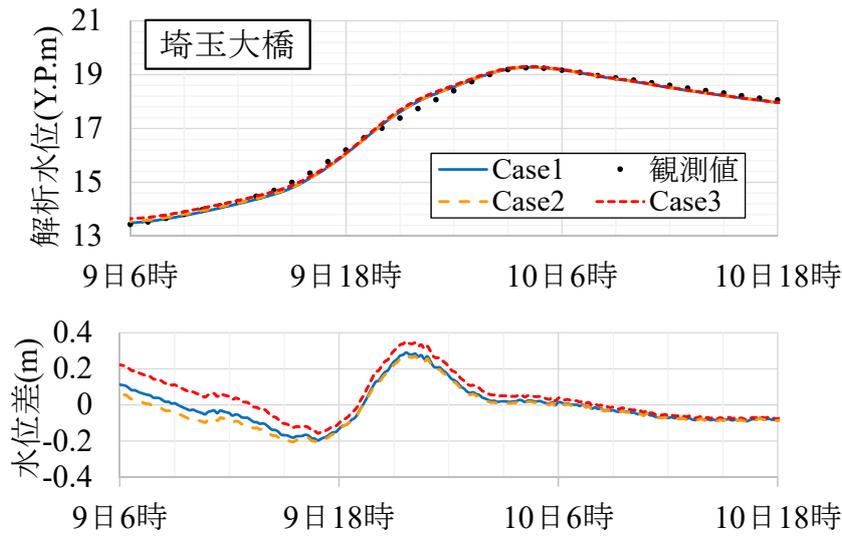


図 4.5.5 地形データ密度の違いによる水位ハイドログラフの差異（埼玉大橋）

上：水位ハイドログラフ，下：観測値との差

次に縦断水面形の時間変化やピーク水位への影響について考察する. 図 4.5.6 に Case1 と Case3 の河床形状を用いて解析した縦断水面形の時間変化と最高水位縦断を示す. 同図より大きな違いは見られないが, Case3 は Case1 に対して若干水位は高い傾向である. 図 4.5.7 にはピーク水位に着目した Case1 の計算水位に対する Case2, Case3 の計算水位との差分結果を縦断的に示している. 図 4.5.7 より, Case2 のピーク水位は Case1 とほとんど変わらず, Case3 の縦断水位は大きい所で 10cm 程度の違いである.

以上より, 利根川 133km~152km 区間を対象とした縦断水位の時間変化を推定する場合, 地盤高のデータ密度が 1 点/100m² 程度であっても水面形を十分な精度で推定可能であることが示された.

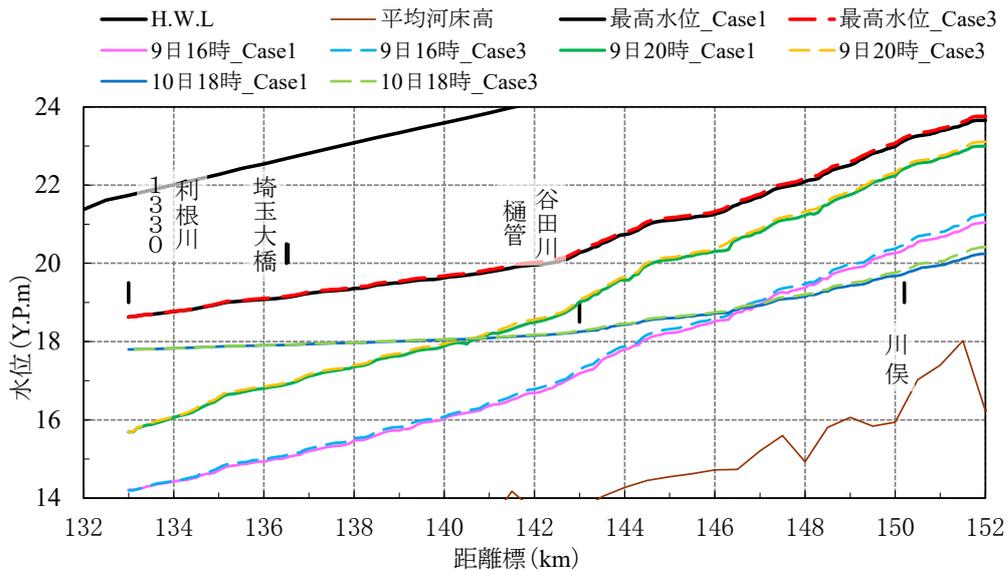


図 4.5.6 ALB 計測によるデータ密度(間隔)の違いによる縦断水位の時間変化

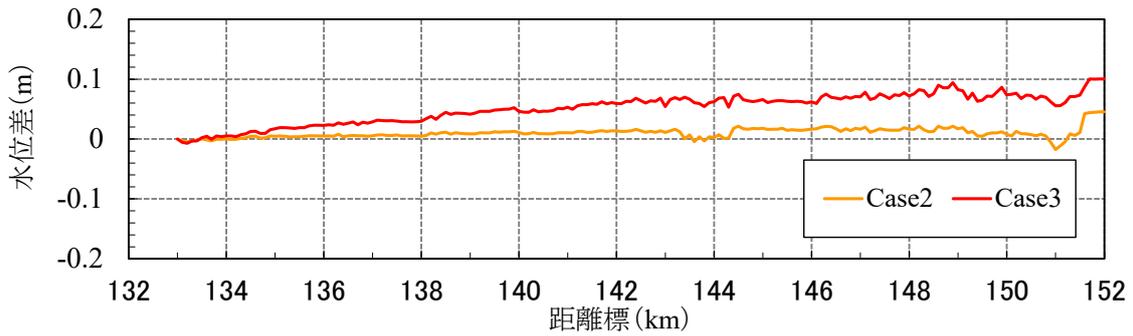


図 4.5.7 Case1 のピーク水位に対する Case2, Case3 の解析水位の差分

4.5.2 水位計の数が同化解析結果に及ぼす影響

4.4 節の観測水面形の時間変化の同化解析の検討では、平成 23 年 9 月洪水と平成 27 年 9 月洪水については、左右岸の縦断水面形の同化が可能であり、抵抗特性値もある程度確からしい値が推定された。ただし、水面形データ同化の制御変数の数に対して水位観測点数は 2, 3 点と少なかったため、水位計の数と推定される制御変数値の確度の関係を得ることが課題であった。

そこで、水位計の数を変化させて同化解析を行うことにより、それによる水面縦断形時間変化と同定される流量ハイドログラフ、分類化した粗度係数、樹木群透過係数への影響を検討した。

(1) 解析条件

多くの水位情報が得られた平成 29 年 10 月台風 21 号を対象とする。水位計の最大数は 4.4 節と同様に 8 地点である。検討では、図 4.5.8 に示すように水位計を間引いて水位計の数を変えた 7 パターンについて同化解析を行う。なお、図 4.5.8 の同化 3 地点が、河川管理者の下で洪水時に観測される水位計の数で、平成 23 年 9 月洪水と平成 27 年 9 月洪水の解析で利用した水位計である。

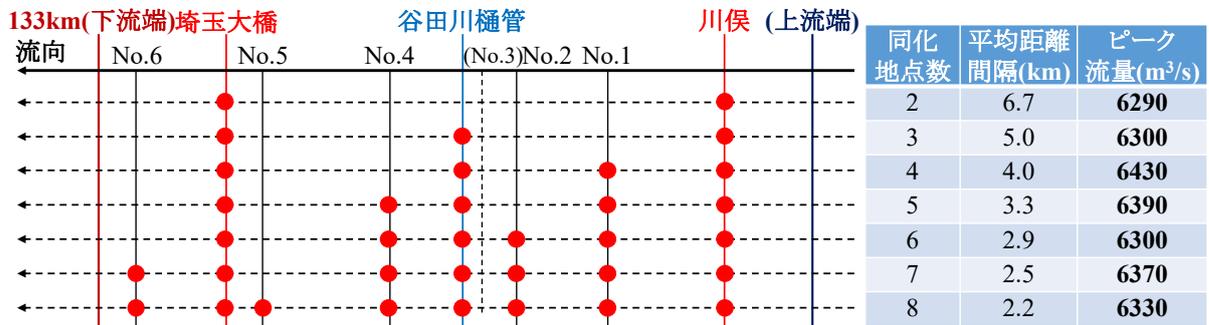


図 4.5.8 同化に用いた観測地点の組み合わせとピーク流量

(2) 検討結果

図 4.5.8 に示した水位観測点数を変えて同化解析を行った。図 4.5.9 に H23 年洪水及び H27 年洪水の同化解析で用いられたものと同じの 3 地点の観測水位を同化したケースと、前述の 8 地点の水位を同化したケースについて、左岸の縦断水面形を比較したものを示す。縦断水面形を比較すると、両者の水面形はほぼ同一であり、観測水面形の時間変化を概ね再現している。

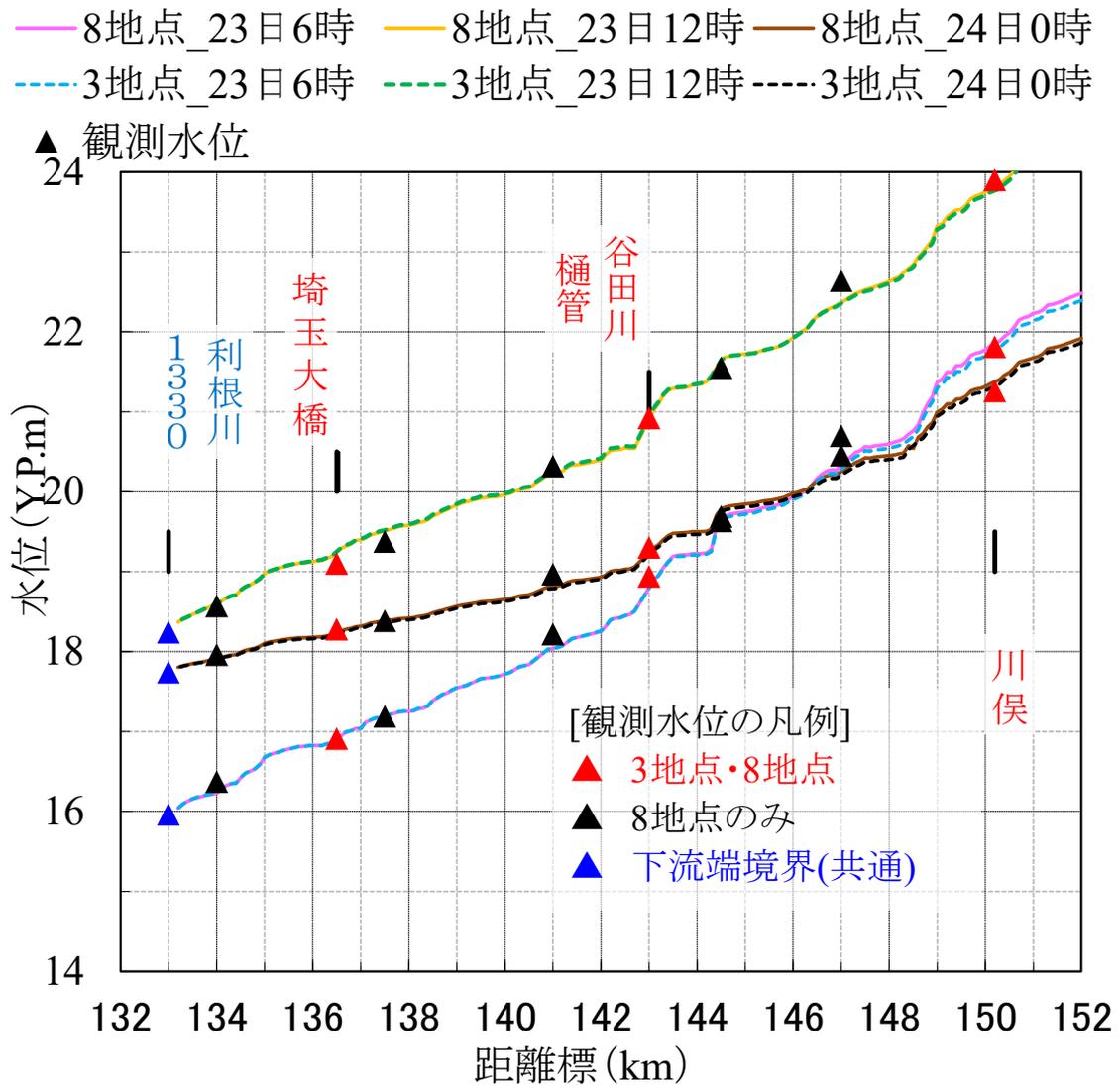


図 4.5.9 同化対象とした地点数の違いによる縦断水面形の比較(左岸)

水位計の観測点数とそれを基にして同化解析により得られた抵抗特性値の関係を図 4.5.10 に示す。また、図 4.5.8 には、上記と同様の方法により得られた解析ピーク流量を示している。図 4.5.10 より、対象区間内部の観測地点数が増加するにしたがって、同化解析の過程で収束した流量を含む 4 分類の粗度係数と樹木群透過係数の組み合わせが収斂していく様子が見られる。本検討での制御変数は 6 つであり、図 4.5.10 より水位計が 6 基あれば抵抗係数や流量は概ね 1 つの値として決まると考えられる。最小二乗法の観点からすれば計測点数が増えることで推定値の確度が高まることは当然であると思われるが、今回の観測結果から実際に確かめることができた。

本研究のような 1 本河道において、制御変数の数に対して必要な水位計について示す。今回の検討のように、事例が一つなので確実とは言えないが、必要な観測点数はおおよそその目安として、制御変数の数よりも多いことが望ましい。水位計の数が未知な制御変数の数よりも少なくとも、水面形の時間変化の同化は可能である。しかし、その場合の推定流量値と粗度係数、樹木群透過係数は、それらの組み合わせが幾つか存在し、1 つの値としては決まらず、ある幅を持つ中での推定値としてみるべきである。

一方、危機管理型水位計の配置が増え、水位データを多地点で計測可能となった現在、特に国管理河川では、上記の問題はある程度解決されると考えられる。都道府県管理の河川でも水位計の設置数は増えているが十分ではない箇所もある。したがって、水位計の数が十分でない河川で同化解析を行う場合には、必要な推定精度と水位計の設置状況を勘案した上で、制御変数を適切に絞り込むことが重要である。

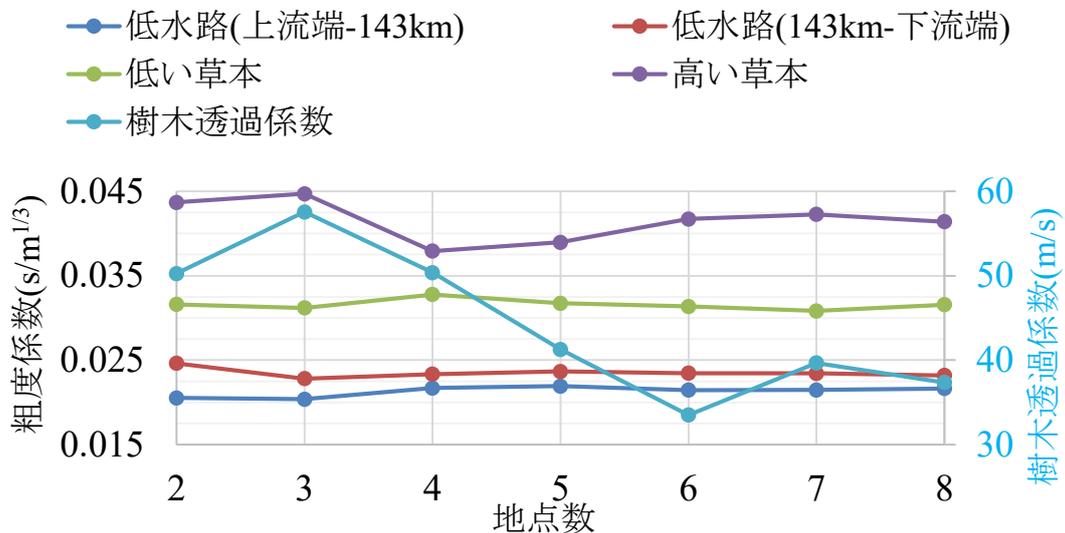


図 4.5.10 水位観測地点数と推定パラメータの関係

4.6 アジョイント法による同化推定解析値の分布と粒子フィルター法による同化解析水面形の比較

4.5節の検討より、縦断水面形の時間変化の同化解析では、対象区間の水位計の数に対して、同定される制御変数（流量ハイドログラフ、分類化された粗度係数、樹木群透過係数）の数が多い場合に、制御変数の推定値に変動幅を有することが分かっている。このため、このような条件の場合に、推定される制御変数の分布や縦断水面形の分布を調べることは重要である。

本節では、同化解析において事前に設定する上記の制御変数に分散を反映したアンサンブル粒子を幾つか用意し、それらを個別に同化解析することで得られるアンサンブル結果を整理することで、同化推定値と制御変数の分布を得る検討を行っている。また、近年、データ同化の研究で多く取り組まれている粒子フィルター法^{12),13)}を用いた洪水流の同化解析を行い、本研究で示したアジョイント法による推定値の違いについて検討した結果について述べる。

4.6.1 アジョイント法による同化解析値の分布の評価

(1) アジョイント法の課題と分散を考慮した手法の導入

本研究の水面形同化解析に導入したアジョイント法は、式(4.1)に示した評価関数の右辺第3項、4項のように、同定される粗度係数や樹木群透過係数値に対して事前設定値から大きく離れないように、事前に与えた分散でそれらを除した形で拘束を課して最適化を図っている。これは、式(4.1)の右辺第1項の解析水位と観測水位の尤度についても同様であり、観測誤差を踏まえた評価である。これらの制御変数の事前設定値とその分散値は表4.4.2に、水位観測誤差は表4.4.1に示すように10cmの誤差標準偏差を経験的に与えている。観測値やモデルパラメータの真値は分からず分散を持っているが、同化解析値の信頼性(分散)を評価できるようにすることが必要である。

上述の課題解決のために、制御変数の期待値周りに多数のノイズを持たせた粒子を用意し、それぞれを個別にアンサンブル同化解析することで制御変数の分布やそれによる同化水位と推定流量の分布を評価した。具体的には、各粒子に対して表4.4.2に示す粗度係数・樹木群透過係数の事前設定値に正規乱数による分散を与えると共に、観測値も計測機器や水面の揺動などによる偶然誤差を有することを考慮して、水位観測値に正規乱数の揺動を与えて同化解析を実施した。なお、乱数を与える際には、粗度・樹木群透過係数に対しては事前に仮定した標準偏差の2倍以下となるように、観測水位に対しては上述した誤差標準偏差 $\sigma=0.1\text{m}$ に対して、 $\pm 0.3\text{m}$ を上下限として生成している。なお、粒子化した制御変数や観測量の誤差は、全て表4.4.2に示した標準偏差の値で生成した。計算負荷が大きいため複数台のサーバによる並行・並列計算を行っている。以下では、これを「アンサンブルアジョイント法」と定義する。

(2) H23年出水に対するアンサンブル同化解析結果

図 4.6.1 に、約 100 ケースのアンサンブルアジョイント法によって得られた川俣観測所および埼玉大橋における H23 年 9 月出水の水位分布の期待値および従来のアジョイント法の結果を示す。100 ケースのアンサンブル解析結果は、埼玉大橋においては、低減期の解析水位が実測水位に対して低いが、概ね観測水位の中心付近に解析結果のハイドログラフが集まる。アンサンブルアジョイント法による期待値とアジョイント法の計算結果はほぼ一致している。解析期間における最大変動幅は、川俣において 0.22m、埼玉大橋において 0.10m である。水位分布の標準偏差の時間平均はそれぞれ 0.04m、0.02m であり、観測摂動として与えた標準偏差 0.1m と比較して小さい。これは、事前に与えた観測誤差に対して、洪水流解析モデルで同化したことにより、同化後の推定値の誤差標準偏差が減少したことを表している。

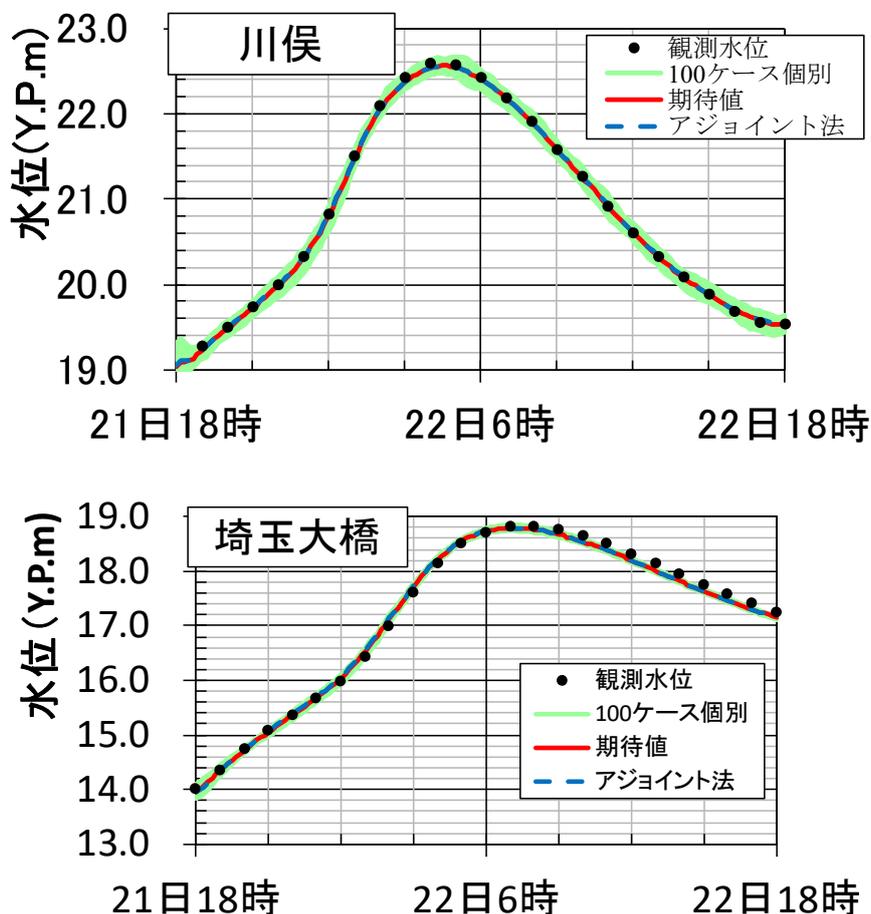


図 4.6.1 川俣観測所(上)および埼玉大橋(下)における水位ハイドログラフ

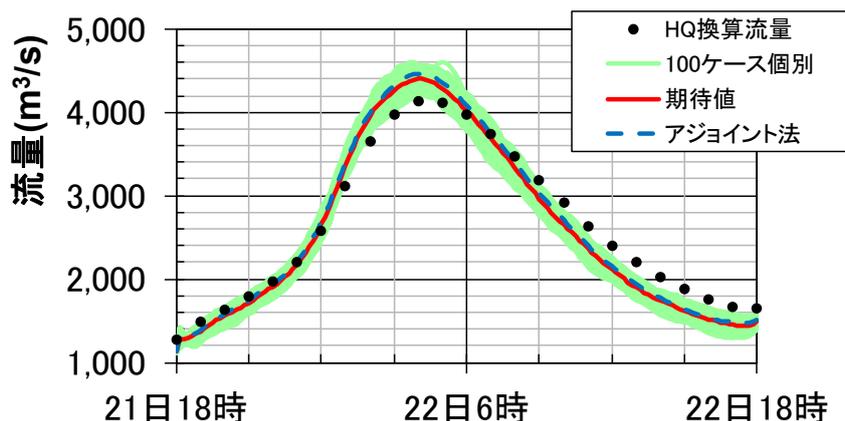


図 4.6.2 川俣観測所における流量ハイドログラフ

同様に、約 100 ケースのアンサンブルアジョイント法による川俣地点の流量ハイドログラフとその期待値、および従来のアジョイント法により同定されたものを図 4.6.2 に示す。同化されたピーク流量は HQ 換算値と比べて大きくなり、低減期は小さくなっている。アンサンブル期待値とアジョイント法の流量推定値には若干の差があるがほぼ等しい。アンサンブル計算による流量変動の標準偏差の平均は $75(\text{m}^3/\text{s})$ であった。

図 4.6.3 に、同定された制御変数（ピーク流量、分類化した粗度係数、樹木群透過係数）の頻度分布を示す。分布形状は若干歪んでいる。アンサンブル同化解析によりそれぞれ同定された推定値群は、最頻値に対して、ピーク流量と低水路上下流の粗度係数は $\pm 5\sim 10\%$ に分布し、高水敷の草本(低)、草本(高)の粗度係数は概ね $\pm 20\%$ に分布していることがわかる。表 4.6.1 に、各制御変数について、アンサンブル計算の同定結果の期待値と標準偏差をアジョイント法の結果と併せて示す。ピーク流量と粗度係数については、アジョイント法による計算結果は、アンサンブル計算の期待値に対する標準偏差内に収まっている。表 4.6.1 の同化後の標準偏差は、表 4.4.2 に示した事前に設定した標準偏差と比較すると、低水路の粗度係数は事前設定値と比較して $1/3$ ほどに減少している。草本の粗度係数はあまり変化がなく、樹木群透過係数の標準偏差は同化後の方がわずかに大きい。表 4.6.2 に同定された各パラメータの相関係数行列を示す。粗度係数は n^2 、透過係数は $1/K^2$ で数値化した上で整理している。表 4.6.2 の黄色のハッチングで示したとおり、ピーク流量と低水路粗度係数に関しては、負の相関が見られる。一方、草本の粗度係数や樹木群透過係数に関しては、相関係数の大きい制御変数は見られない。このことから、この洪水の観測水面形の時間変化に解析水面形を同化する解析では、流量と低水路粗度係数の影響が大きく、水面形を同化に両者は相互に関係することを表している。上記は、福岡¹⁴⁾の高精度な洪水流解析法において、低水路粗度係数と上流端水位ハイドログラフを相互に調整して、解析水面形を観測水面形の時間変化に合致する方法と対応している。

以上の結果は、物理計測によって正確に値を推定することが難しく、また前述の通り分散を持つパラメータである流量、粗度係数や樹木群透過係数の値とその範囲を事前に推定する上で有用な指標となりうる。

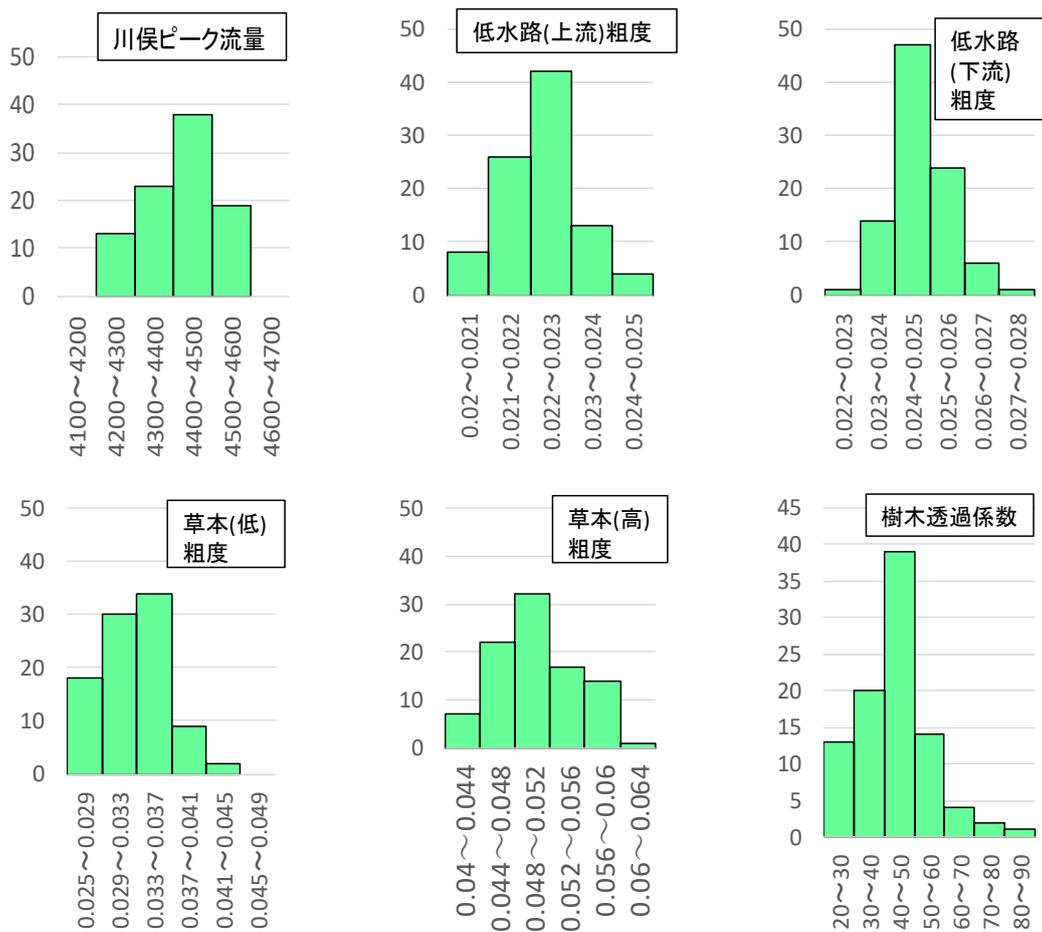


図 4.6.3 100 ケースのアンサンブルアジョイント法により同定された制御変数の頻度分布

表 4.6.1 アンサンブル解析による同定結果

同化手法 制御変数	アンサンブルアジョイント法		アジョイント法
	期待値	標準偏差	
川俣ピーク流量(m ³ /s)	4398	96	4462
低水路(上流)粗度	0.022	0.001	0.022
低水路(下流)粗度	0.025	0.001	0.025
草本(低)粗度	0.033	0.004	0.034
草本(高)粗度	0.051	0.005	0.052
樹木群透過係数	44	12	60

表 4.6.2 同定された各制御変数の相関係数

	川俣流量	低水路(上)	低水路(下)	草本(低)	草本(高)	透過係数
川俣ピーク流量(m ³ /s)	1.00	-0.50	-0.68	0.21	0.14	-0.05
低水路(上流)粗度	-0.50	1.00	0.52	-0.31	-0.27	0.00
低水路(下流)粗度	-0.68	0.52	1.00	-0.17	-0.24	-0.18
草本(低)粗度	0.21	-0.31	-0.17	1.00	0.05	-0.24
草本(高)粗度	0.14	-0.27	-0.24	0.05	1.00	0.02
樹木群透過係数	-0.05	0.00	-0.18	-0.24	0.02	1.00

4.6.2 アジョイント法と粒子フィルター法による同化水面形の比較

ここでは、アジョイント法と提案したアンサンブルアジョイント法、同化解析手法として近年適用されることが多い粒子フィルター法を用いた縦断水面形の同化解析結果を比較し、同化解析技術の実務への反映について述べる。

(1) 粒子フィルター法の概要

同化手法の比較は、河川流を対象とした立川ら¹³⁾に倣い検討した。粒子化の対象は、アジョイント法と同様に上流端流量ヒドログラフ、粗度係数 n 、樹木群透過係数 K である。流量については立川らと同様に補正係数 r_q を乗じる方法とした。粒子数は、概ね 300 個で妥当な結果を得られたため 300 個とした。尤度の算出は、表 4.4.1 に示した水位観測所の 1 時間間隔データと観測誤差を用いて、計算水位とのミスフィットを遡り期間で正規分布により評価した。リサンプリング後の粒子へのノイズは式(4.7)～式(4.9)に示す一様乱数を与えた。

$$n_t = n_{t-1} + \xi_n, \quad \xi_n \sim \text{uniform}[-0.2n_{t-1}, +0.2n_{t-1}] \quad \dots\dots\dots(4.7)$$

$$K_t = K_{t-1} + \xi_k, \quad \xi_k \sim \text{uniform}[-0.2K_{t-1}, +0.2K_{t-1}] \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

$$r_{q,t} = r_{q,t-1} + \xi_q, \quad \xi_q \sim \text{uniform}[-0.05, +0.05] \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

(2) 各同化手法による解析水面形の比較結果

平成 23 年 9 月洪水に対して、観測水面形の時間変化と洪水流解析モデルにアジョイント法、アンサンブルアジョイント法、粒子フィルター法をそれぞれ適用した。図 4.6.4 に川俣地点のピーク水位時刻の縦断水面形(右岸)の期待値を示す。各同化手法に依らず水面形はほぼ一致している。同図下に示す同化解析水位の標準偏差は 0.1m 程度の幅を有しており、流下距離に応じて小さくなっていることがわかる。この結果より、アジョイント法、アンサンブルアジョイント法の水位同化解析結果は、粒子フィルター法のものと同程度である。以上より、同化に用いるデータと洪水流解析モデルが同じであれば、同化解析結果から得られる水面形の推定値などは同化解析モデルに依らない。

同化解析技術の実務への反映について考察する。アジョイント法は他の 2 手法に比べて同化解析値の分散推定が難しい一方で、計算コストは 1 オーダ低かった。一方、アンサンブル化する場合には、計算機を多数用意し並行・並列計算するなどの対応が必要であり、計算サーバコスト、計算結果の確率表示の要否の判断を踏まえて手法を選択することが重要である。

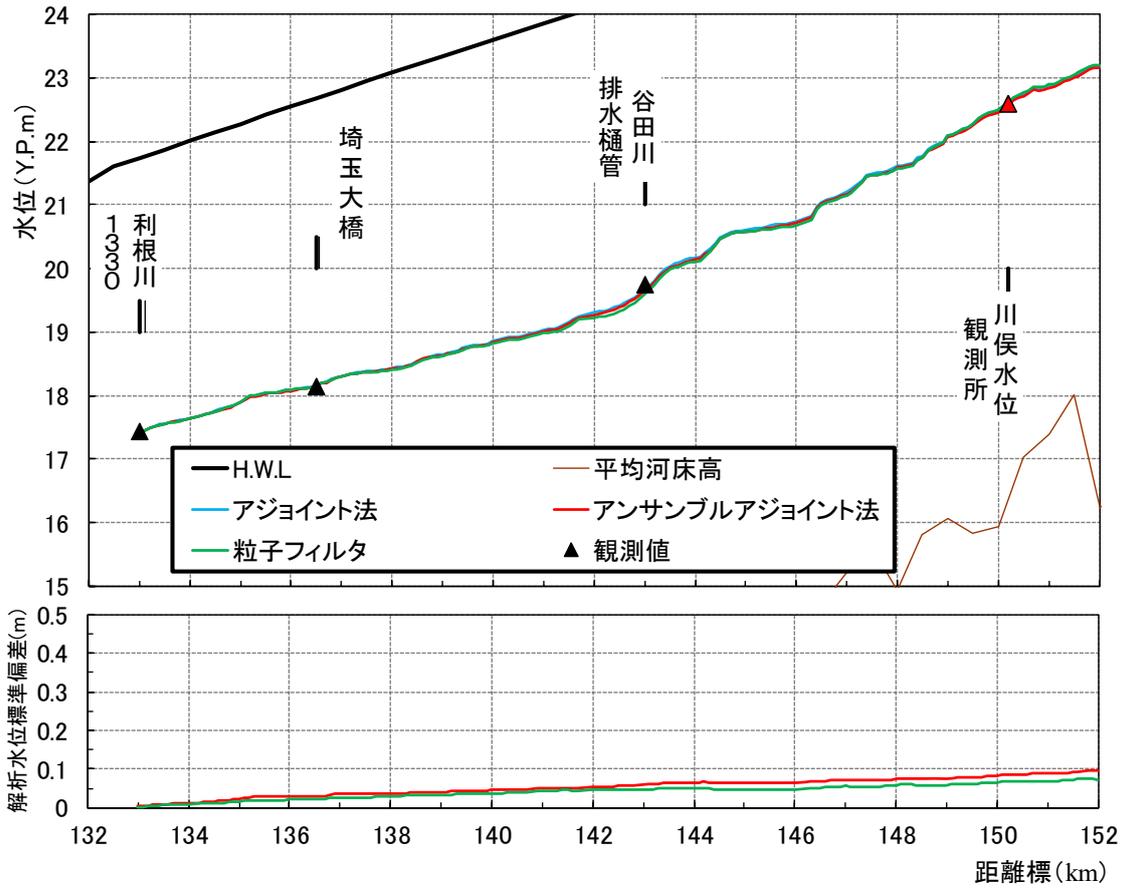


図 4.6.4 川俣ピーク時刻の水面形の同化解析値 (H23 年 9 月洪水)

4.7 水面形同化解析データに基づく洪水流の伝播と流出量修正に基づく 水面形予測の検討

洪水予測においては、進行中の洪水時に得られる精度の高い観測水位情報を活用した高精度な水面形予測手法が求められる。また、洪水時の住民避難は時間を要するため、水位予測時間であるリードタイムは十分長いことが求められる。

前節までの検討より、利根川上流区間を対象に、多地点の観測水位と平面二次元洪水流解析に対して、アジョイント法を適用することにより、自動的に流量ハイドログラフ、抵抗係数が同定され、堤防に沿う縦断水面形の時間変化を高精度に推定されることを示している。

対象とする河道の下流区間の水位は、一般的に上流からの洪水流伝播で定まるため、伝播時間以内であれば流出解析を用いなくとも、高精度な縦断水面形が得られ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^{15),16),17)}。しかし、洪水予測に必要なリードタイムが洪水伝播時間よりも長い場合は、解析区間の上流端で適切な境界条件が必要となる。

以上を踏まえ、本節では、まず、リアルタイムに得られた観測水面形に基づく新しい洪水予測手法の全体像を示す。次に、手法の全体像に沿って、平成25年9月台風18号を対象として、観測水面形時間変化への同化解析により得られた縦断水面形と流量ハイドログラフを基に、洪水流伝播を利用した水位予測手法と、タンクモデル¹⁸⁾の流出量を修正した水位予測手法の妥当性を検討する。

4.7.1 新たな洪水予測手法の全体像

(1) 対象区間と対象洪水

対象河川は利根川上流区間とし、洪水流が高水敷に2~3m程度乗り上げたH25.9台風18号出水を検討対象とする。図4.7.1に検討対象の洪水流解析区間と水位観測位置、八斗島地点より上流の流域と流出解析の分割流域，その定数同定に利用した水位流量観測所を示す。図4.7.2は河道区間の拡大図であり、平面二次元洪水流解析の水面形を7カ所の観測水位に同化させる約50kmの全体区間(182km~133km)と、洪水流伝播に基づき水面形を予測する約17kmの予測区間(150km~133km)を示している。



図 4.7.1 洪水流解析区間と八斗島地点上流域の流域分割

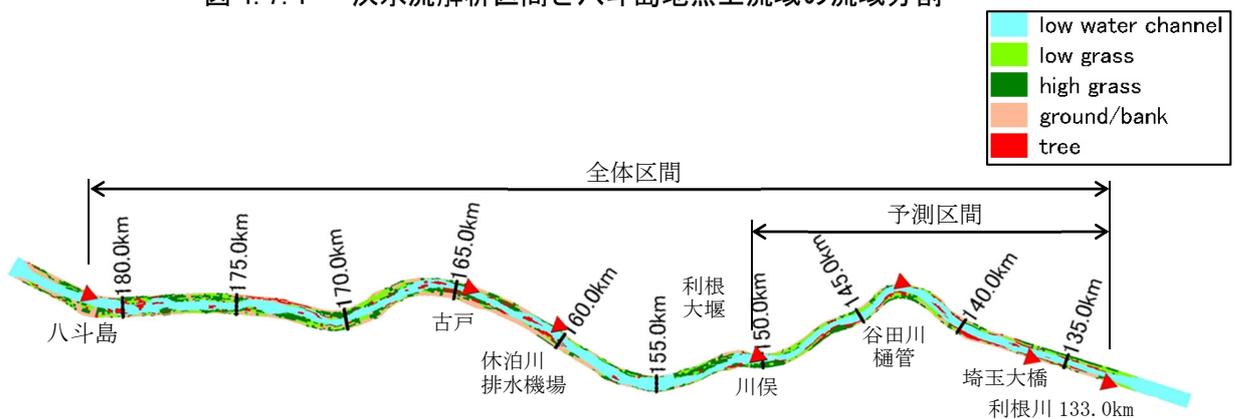


図 4.7.2 洪水流解析の水面形同化区間，予測区間，地被分布

(2) 洪水予測手法の全体像

図 4.7.3 に本手法の全体像を示す。手法と検討は大きく 4 つにわかれている。まず、H25.9 出水に対して、全体区間を対象にアジョイント法を用いた観測縦断水面形の同化解析を行い、縦断水面形時間変化と八斗島地点の流量ハイドログラフを精度良く求める(検討①)。同時に出水期間一定とした粗度係数や樹木群透過係数も同定する。

次に、同化解析から得られた水位、水面幅、水面勾配等の断面平均量を用いて流量との関係を調べ、連続式を特性曲線法で解くことにより水位伝播時間を検討する(検討②)。そして、進行中の洪水に対する水位予測を実施し検証する。具体的には、得られる観測水位情報の時刻(現時刻)を逐次変え、その時刻までの水面形同化解析を実施し、水位伝播時間をリードタイムとした洪水流予測解析を行い、実測水位との適合度を検証する(検討③)。

最後に、タンクモデル¹⁸⁾に予測雨量を与えて流量を推定し、それを河道上流端の境界条件として洪水流解析により水位を予測する。このとき、水面形同化から得られた八斗島地点の同化解析流量に、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ておく。

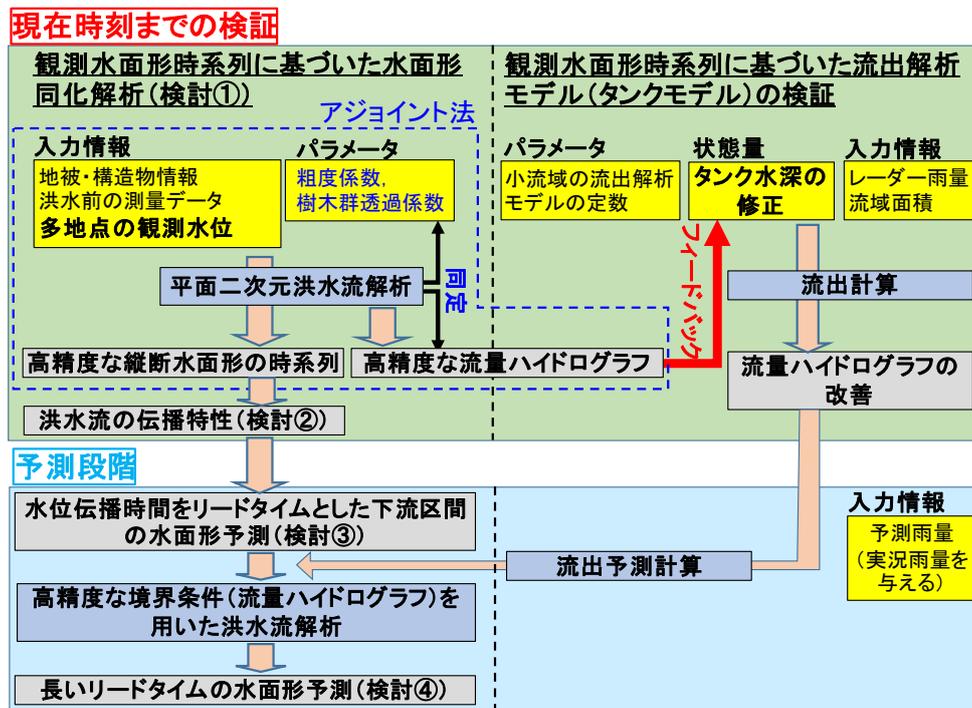


図 4.7.3 本研究の洪水予測手法の説明

4.7.2 洪水流同化解析法と降雨流出解析法及び解析条件

(1) 同化解析モデル

4.2 節で構築した平面二次元洪水流解析に対する同化モデルを H25.9 出水に適用し、水面形同化を行う。評価関数に対する制御変数は、これまでの検討と同様に、上流端からの流量ハイドログラフと粗度係数及び樹木群透過係数とした。粗度係数区分や樹木群透過係数の

初期設定値や範囲⁷⁾・⁸⁾等は表 4.7.1 に、植生の平面分布は図 4.7.2 に示すとおりである。上流端流量の初期設定値には、八斗島地点の流量観測により得られた HQ 換算流量を与えた。154km には利根大堰が設置されており、解析にはゲートの実際の開閉操作を反映した。観測水位の誤差標準偏差は 10cm、川俣地点と古戸地点等の HQ 換算流量の誤差標準偏差は時系列の流量値に対してそれぞれ 20%と仮定した。

表 4.7.1 粗度，樹木群透過係数の初期設定値，範囲等の設定と同定値

区分	初期値	最小値	最大値	標準偏差	同定値
低水路(182km - 169.5 km)	0.032	0.030	0.035	0.0032	0.034
低水路(169.5 km - 162 km)	0.030	0.025	0.032	0.0030	0.028
低水路(162 km - 154 km)	0.027	0.020	0.030	0.0027	0.025
低水路(154 km - 143 km)	0.027	0.020	0.030	0.0027	0.028
低水路(143 km - 133 km)	0.025	0.018	0.030	0.0025	0.025
草本(低)	0.035	0.025	0.050	0.0035	0.036
草本(高)	0.050	0.030	0.080	0.0050	0.051
グラウンド・芝地	0.025	固定			
樹木群の地表面	0.025	固定			
樹木群透過係数(m/s)	40	20	80	8	27

(2) タンク流出モデル

流出解析法には、永井¹⁸⁾のべき乗タンクモデルを採用した。このモデルは図 4.7.4 に示すように、第 1 タンクが洪水流出の直接流出成分を担い、第 2 タンクが地下水流出（基底流出）成分を受け持つ。基礎式は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= a_1(s_1 - z_1)^m & , & & s_1 \geq z_1 \\ &= 0 & , & & s_1 < z_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\left. \begin{aligned} q_2 &= a_2(s_2 - z_2) & , & & s_2 \geq z_2 \\ &= 0 & , & & s_2 < z_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.8)$$

$$g_1 = b_1 s_1 \dots\dots\dots (4.9)$$

$$g_2 = b_2 s_2 \dots\dots\dots (4.10)$$

$$\frac{ds_1}{dt} = r - (q_1 + g_1) \dots\dots\dots (4.11)$$

$$\frac{ds_2}{dt} = g_1 - (q_2 + g_2) \dots\dots\dots (4.12)$$

$$Q = \frac{1}{3.6} A(q_1 + q_2) \dots\dots\dots (4.13)$$

ここに、 q_1 、 q_2 は河川への流出高(mm/h)、 s_1 、 s_2 は 1、2 段タンクの貯留高(mm)、 a_1 、 a_2 は流出孔係数(1/h)で、 z_1 、 z_2 はそのタンク底面からの高さ(mm)、 g_1 、 g_2 は下層への浸透量(mm/h)、 b_1 、 b_2 は浸透孔係数(1/h)、 r は流域平均雨量(mm/h)、 Q は流量(m^3/s)、 A は流域面積(km^2)である。なお、 m は 5/3 (斜面流がマンニングの抵抗則に従う) とする。

タンク定数は、図 4.7.1 に示した小流域毎に設定している．具体的には、H10～H24 の 6 洪水に対して、降雨流出解析を実施してダム流入量もしくは水位流量観測所の H-Q 流量に平均的に合致するように設定した（表 4.7.2）．図 4.7.5 は、上流域から順に計算されるタンクモデルによる八斗島地点流量の算定方法を示している．図中には流出遅れ時間 TL を示している．流出域の番号は図 4.7.1 の番号に対応している．また、図 4.7.5 に示す河道区間の流量は一般的な貯留関数法により算定される．後述の H25.9 出水にタンクモデルを適用する際の降雨データは国土交通省オンライン合成レーダ雨量を用いた．図 4.7.6 に、H25.9 台風 18 号の 48 時間累加雨量を示す．図 4.7.6 より、八斗島上流域では 100mm～200mm 以上の雨量が観測されているのに対して、八斗島下流域の雨量は少ないことが確認される．これより、H25.9 出水は、本川上流の洪水であり、八斗島より下流に流入する広瀬川、早川、石田川、小山川、福川の支川の洪水規模は相対的に小さいことがわかる．このため、同洪水の下流区間の水面形の時間変化は、上流からの洪水流伝播で定まる．

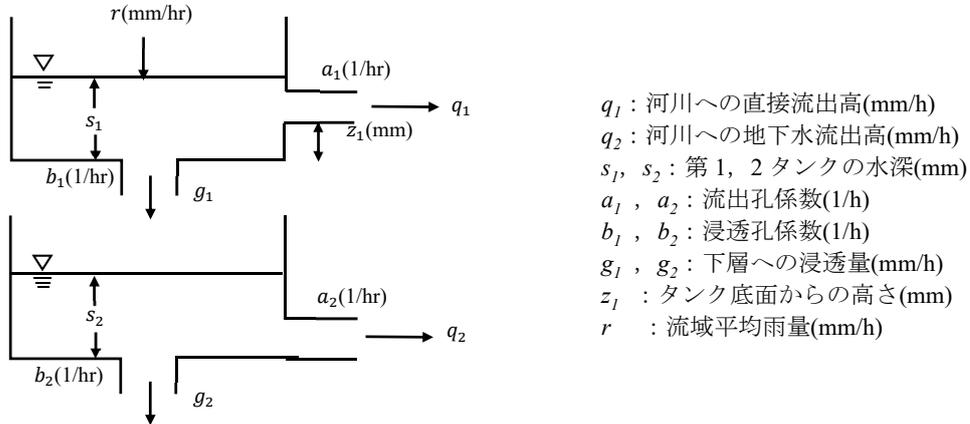


図 4.7.4 タンクモデルの説明

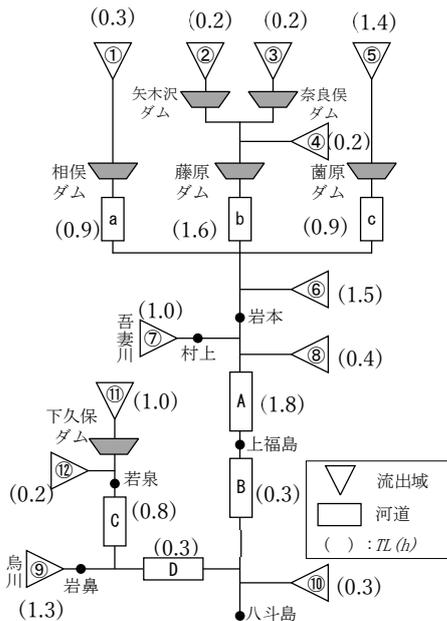


図 4.7.5 タンクモデルによる八斗島地点の流量

表 4.7.2 タンクモデルの定数

流域No	流域名	a1 (1/hr)	b1 (1/hr)	z1 (mm)	a2 (1/hr)	b2 (1/hr)	z2 (mm)	TL (hr)	m	λ (1/hr)	流域面積 (km ²)
①	相俣ダム	0.0049	0.064	13	0.011	0.0010	0	0.335	5/3	0.0119	109.8
②	矢木沢ダム	0.0134	0.057	17	0.009	0.0087	0	0.167		0.0175	170.4
③	奈良俣ダム	0.0154	0.085	12	0.013	0.0028	0	0.167		0.0160	60.5
④	藤原ダム	0.0134	0.057	17	0.009	0.0087	0	0.167		0.0175	163.7
⑤	岩原ダム	0.0046	0.034	25	0.012	0.0010	0	1.395		0.0128	490.6
⑥	岩本陸流域	0.0060	0.146	0	0.010	0.0010	0	1.546		0.0109	716.2
⑦	村上(吾妻川)	0.0061	0.050	56	0.0081	0.0030	0	1.000		0.0111	1235.6
⑧	上福島陸流域	0.0061	0.050	56	0.0081	0.0030	0	0.406		0.0111	358.7
⑨	岩鼻(鳥川)	0.0042	0.035	15	0.013	0.0010	0	1.271		0.0136	1228.7
⑩	八斗島陸流域	0.0036	0.021	46	0.014	0.0010	0	0.250		0.0151	248.8
⑪	下久保ダム	0.0034	0.027	40	0.014	0.0010	0	1.049		0.0151	323.4
⑫	若泉陸流域	0.0036	0.021	46	0.014	0.0010	0	0.167		0.0151	61.8

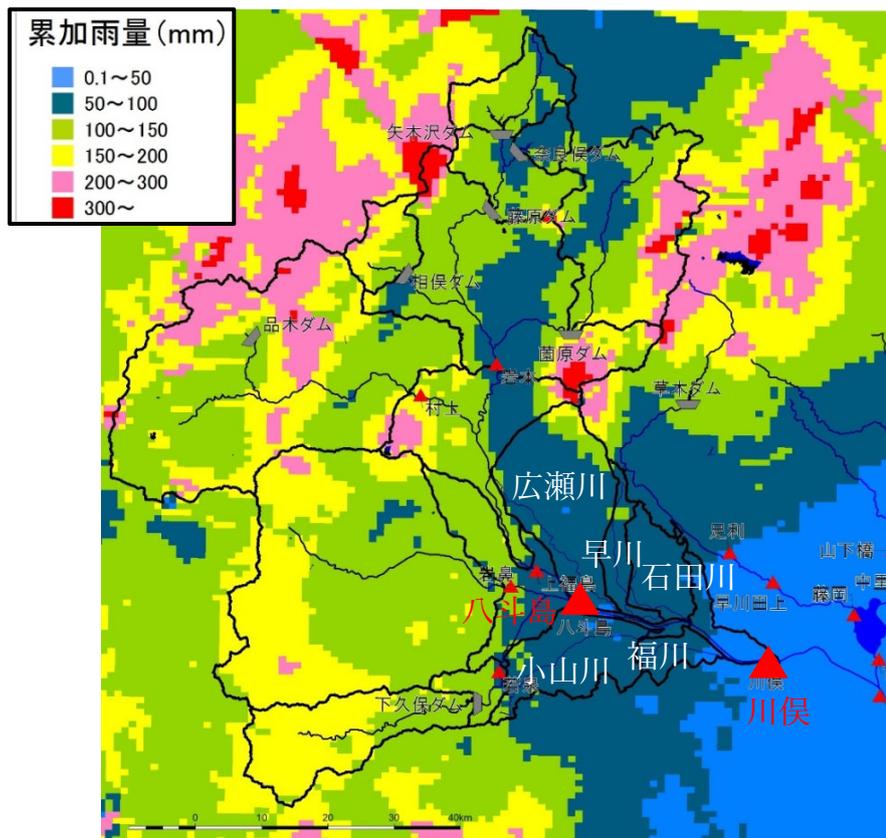


図 4.7.6 H25.9 台風 18 号の 48 時間累加雨量

4.7.3 水面形時間変化の同化解析結果

河道区間全体での観測縦断水面形の同化解析結果を示す。図 4.7.7 は、洪水上昇期、ピーク時、低減期の観測水面形と同化解析水面形を示している。また、図 4.7.8 は観測地点の実測水位と同化前後の解析水位のヒドログラフを比較して示している。図 4.7.7 より、同化解析水面形は観測水面形の時系列をほぼ再現していることが確認できる。図 4.7.8 の同化後の水位ヒドログラフは同化前(初期設定)に比べて観測値に合致している。同化解析から得られた制御変数である抵抗係数を表 4.7.1 の右欄に示す。これより、低水路粗度係数は初期設定値に対して ± 0.002 程変化している。一方、樹木群透過係数は $40\text{m/s} \rightarrow 27\text{m/s}$ となり流水への樹木群抵抗はやや大きい同定結果であるが、福岡ら⁸⁾の栗橋(130.4km)～江戸川分派点(121.5km)で検討された樹木群の抵抗 $20\text{ m/s} \sim 80\text{m/s}$ の範囲内であり問題ない。

図 4.7.9 は、上述の抵抗係数と観測水面形を説明した八斗島地点の同化解析流量と初期設定流量を示す。また、降雨ハイトグラフから求めたタンクモデルによる計算流量を示す。これより、タンクモデルによる計算流量は観測水面形を説明する同化解析流量に比べて、洪水立ち上がりからピーク時刻にかけて $500\text{m}^3/\text{s} \sim 1400\text{m}^3/\text{s}$ 大きい。

図 4.7.8 に示した同化前(初期設定)の解析水位と実測水位のヒドログラフの比較は上流端流量を境界条件とした流量ベースの検討結果であり、両者の違いは大きい。このため、観測に基づいた HQ 流量は、必ずしも下流の水位を説明できていないことがわかる。

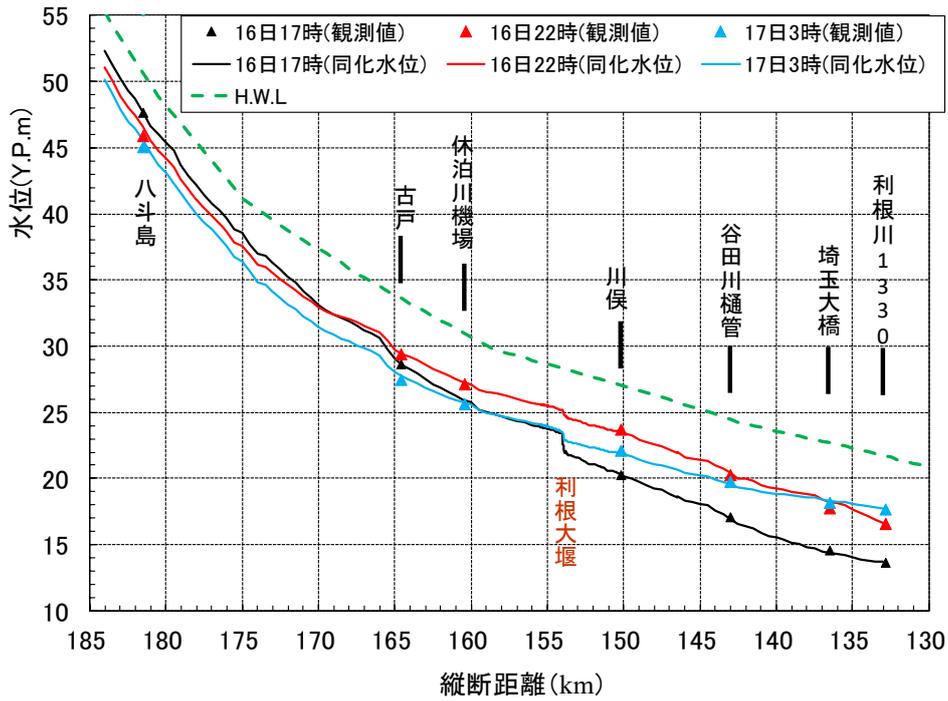


図 4.7.7 観測水面形と同化解析水面形の時間変化の比較

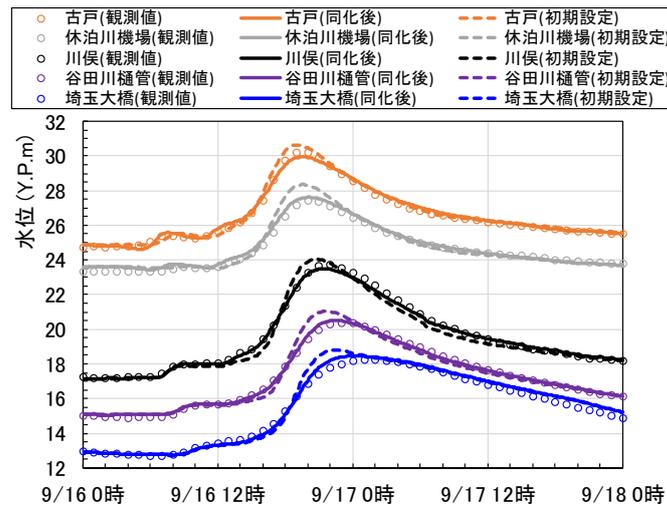


図 4.7.8 観測水位と同化解析水位のヒドログラフ

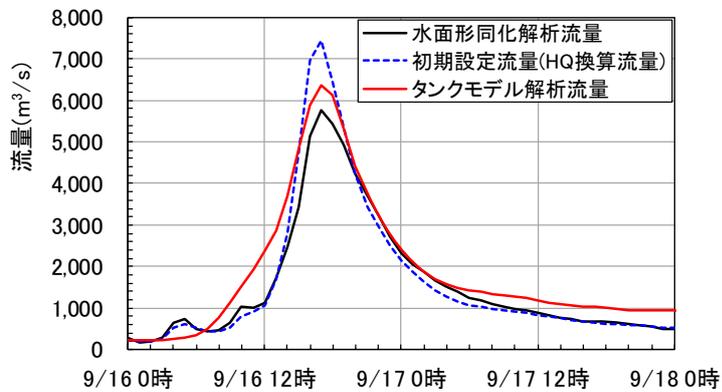


図 4.7.9 八斗島地点の流量ヒドログラフ

4.7.4 洪水流伝播特性に基づく下流区間の水面形予測

(1) 洪水流の伝播特性

4.7.3 で得られた H25.9 出水の洪水現象を説明した水面形同化解析データを用いて、全体区間の上流端(182km)から予測区間の上流端(150km)に要する水位伝播時間を明らかにする。縦断距離と時間に対して水位伝播特性を検討する。

利根川のように水深に比して川幅が大きく、洪水の非定常性が小さいことを考慮し、予測区間上流端までの同化解析から得られた断面平均水量、すなわち水位、水面勾配、流量に着目し、以下の関係を仮定する。

$$Q = F(A(H), B(H), I_w(H), \alpha) = \alpha AR^{2/3} I_w^{1/2} = \alpha C_H \dots\dots\dots (4.14)$$

ここに、 H : 同化解析水位、 A : 流水面積、 B : 水面幅、 R : 径深($\cong A/B$)、 I_w : 水面勾配、 C_H : 水位から求まる通水能、 α : 総粗度である。 α は、2次元の運動や粗度係数を式(4.14)の1次元方向に集約化したことによる定数で総粗度と定義する。また、通水能^{19), 20)}は $AR^{2/3}/n$ と定義されるが、本検討では水位から求まる量 $AR^{2/3}I_w^{1/2}$ で定義している。

図 4.7.10 に、同化解析より得られた流量と通水能の関係を示す。図 4.7.10 から明らかのように、利根川の全体区間においては、それぞれの断面で流量と通水能の関係は直線的である。このため、全体区間の縦断水面形の時間変化が精度良く解析もしくは観測できれば、流量はほぼ推定可能である。

次に水位の伝播時間を同化解析データを基に調べる。式(4.14)に示した流量の縦断変化は、水位、水面幅、水面勾配、総粗度の縦断変化として仮定すると、連続式は以下のように表現される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + C \frac{\partial A}{\partial x} = -D \dots\dots\dots (4.15)$$

$$C = \frac{5}{3} V, \quad D = \left(-\frac{2Q}{3B}\right) \frac{\partial B}{\partial x} + \left(\frac{1Q}{2I_w}\right) \frac{\partial I_w}{\partial x} + \left(\frac{Q}{\alpha}\right) \frac{\partial \alpha}{\partial x} \dots\dots\dots (4.16)$$

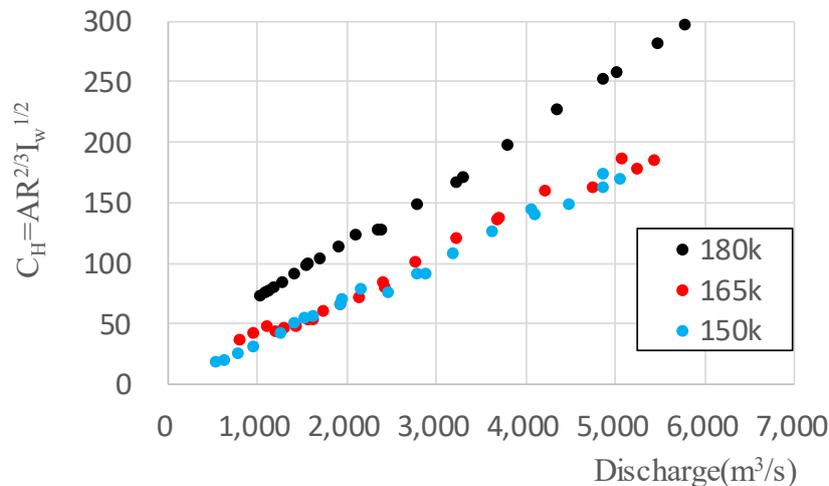


図 4.7.10 同化解析により得られた時系列流量と本研究で定義した通水能の関係

水位の伝播距離と時間は、式(4.15)の特性曲線²¹⁾を追跡することで得られる。解析の概要を図4.7.11に示す。特性曲線の解析において、 $C(t, x)$ と $D(t, x)$ は、同化解析結果の断面平均値から式(4.16)により与えられる。この計算に用いた Δx は100m、 Δt は1分の出力データを用いた。利根大堰は式(4.14)の適用外であるため、その上下流で分離して解析した。図4.7.12に解析結果の特性曲線の経路図を、図4.7.13に解析上流端(182km)から予測区間上流端(150km)までに要する水位伝播時間を示している。この結果から、洪水上昇期(16日15時まで)は伝播速度が大きく伝播時間は5時間~3時間であるが、下降期では徐々に伝播速度は小さくなり、伝播時間も長くなることわかる。ピーク時の伝播時間は約2.5時間である。

150km下流の水位予測区間に対する水位伝播時間は、未来の情報を必要とせず、それより上流からの洪水解析を時間延長するだけで水面形の予測が可能なりードタイムの長さであることを示している。

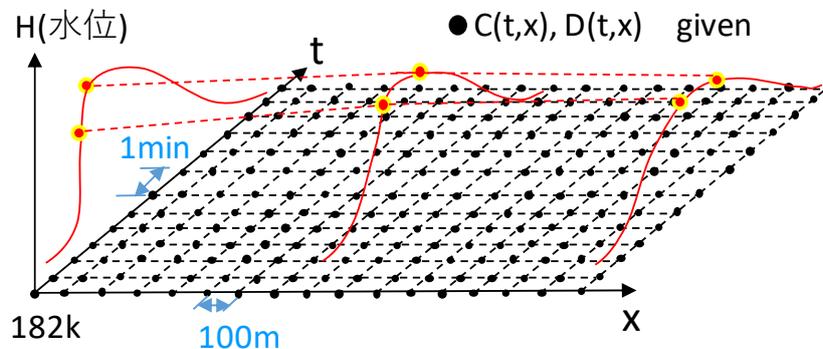


図4.7.11 水位の伝播距離と時間を特性曲線で追跡する方法の説明

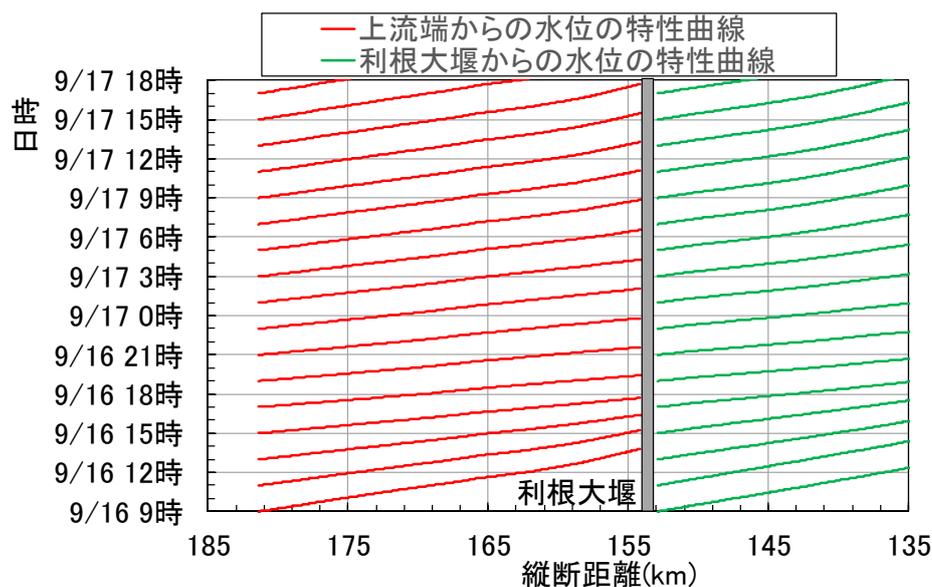


図4.7.12 H25.9洪水の水位伝播の特性曲線

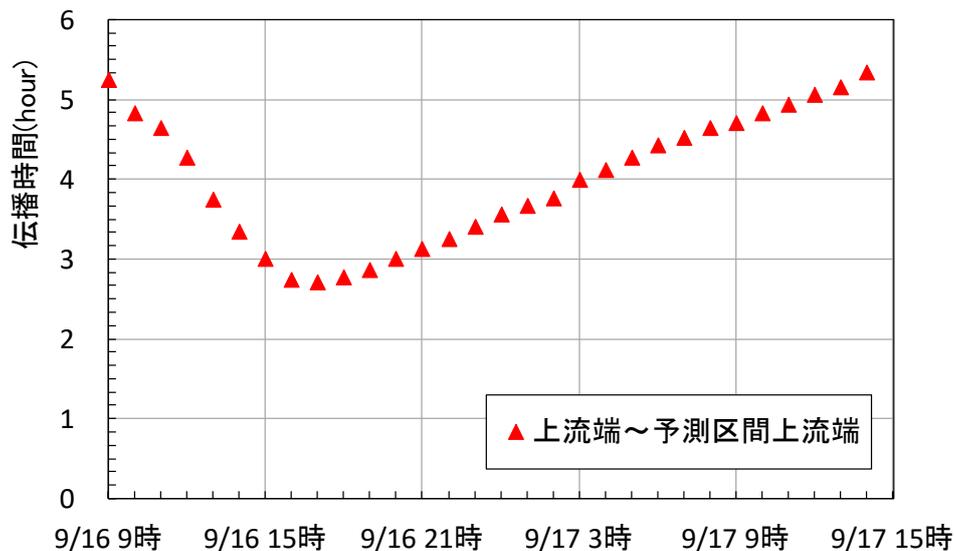


図 4.7.13 予測区間上流端(150km)までに要する水位伝播時間

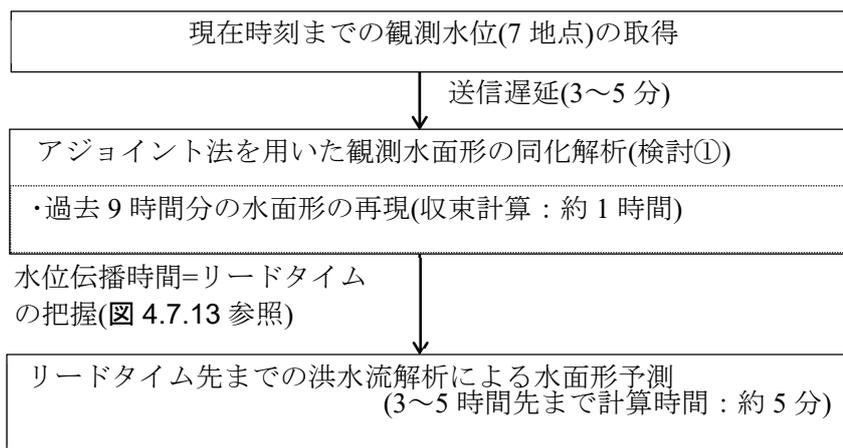


図 4.7.14 リアルタイム性を考慮した洪水予測の解析フロー

(2) 洪水流伝播に基づく下流区間の水位予測

上記(1)により明らかとなった予測区間のリードタイムを基にした下流区間の水位予測手法とその妥当性を検証する。図 4.7.14 に解析フローを示す。リアルタイムの洪水予測では、現在時刻を基準として、7地点の観測水位を取得した後、伝播時間よりも十分長い時間(本検討では過去9時間と設定)に対して、水面形同化解析を実施する。次に、その時刻でのリードタイム(水位伝播時間)まで時間延長した平面二次元洪水流解析を全区間で実施し、縦断水面形の時間的変化を求める。予測区間は 150 km~133 km である。予測期間中の上流端境界条件には、現在時刻の流量を継続して与えた。また、下流端境界水位には実測値を与えた。予測期間中の利根大堰のゲート操作は、実際の開閉状況を反映した。

図 4.7.15 は、9/16 9時、15時、18時のそれぞれを現在時刻にして予測解析を行った川俣地点(150km)と谷田川樋管地点 (143km)の予測水位を観測水位と共に示している。図 4.7.16 は、9/16 15時を現在時刻としてリードタイム 3 時間先の縦断水面形予測結果を実測水位と比較して示している。図 4.7.15 より、予測水位はピーク時刻まで観測水位に概ね合致している。また、図 4.7.16 に示した 3 時間先の予測水面形は、同時刻の観測水面形に概ね合致していることから、本手法の結果は有効と考えられる

図 4.7.14 のフローには、データ取得の遅延時間、同化と予測に要する計算時間を併せて示している。これより、1 回の水位予測に要する時間は Total で 1 時間 10 分程度であった。これらの計算は IBM POWER8 (CPU3.45GHz, 18core×2CPU)を用いて MPI 6 プロセスで実行された。本解析法を対象とする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河川管理者や住民等に提供可能である。

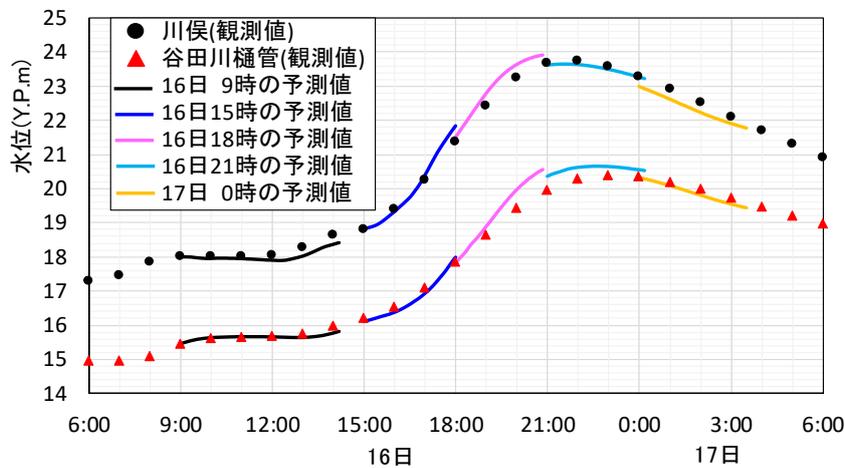


図 4.7.15 観測水位と水位予測値の比較(洪水流伝播)

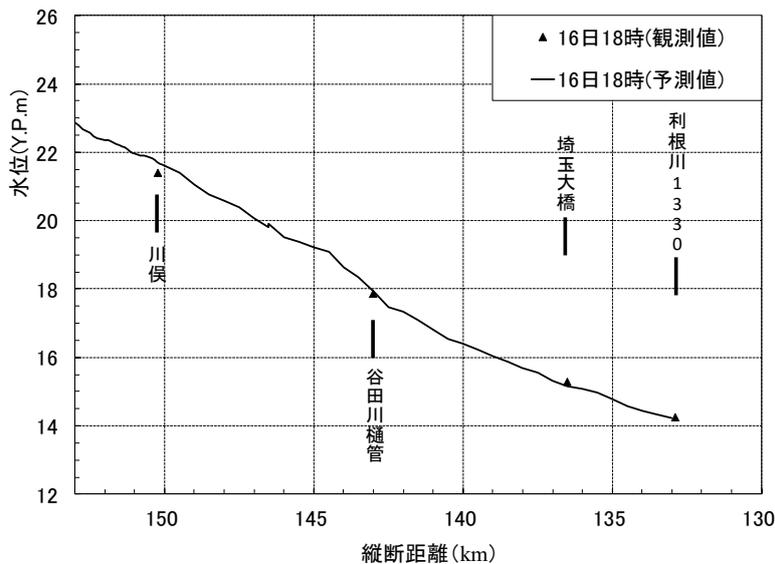


図 4.7.16 9/16 15 時実施の予測水面形と観測水面形の比較(洪水流伝播)

4.7.5 同化解析流量に基づくタンクモデル流出量の修正と水面形予測

(1) 手法

水面形同化解析より得られた八斗島地点の流量を基に、タンクモデルの状態量である水深を修正することで、流出解析モデルを用いたより長いリードタイムの水面形予測への適用性を検討する。

タンクモデルの水深の補正方法は以下のとおりである。図 4.7.17 に示した観測水面形を説明した現在時刻の八斗島流量(同化解析流量)とタンクモデルによる計算流量を比較する。両者に違いがある場合は、図 4.7.1 に示したダム下流小流域の上段タンク水深(図 4.7.4 の s1)について、八斗島地点への流出遅れ時間を遡って倍率補正することで同化解析流量に整合させる。なお、上段タンク水深を対象とする理由は、洪水の直接流出成分に寄与するためである。また、八斗島地点への流出遅れ時間は、図 4.7.5 に示したダム下流の TL 等を考慮して 4 時間とした。

図 4.7.17 は、9/16 15 時を現在時刻として上記の方法にしたがい実施した八斗島地点における修正前後のタンクモデルの流量ヒドログラフを示している。同図より、16 日 15 時のタンクモデル流量値(緑線)は同化解析流量値(黒線)に比べて大きいいため、15 時の同化解析流量値に整合するように 4 時間前に遡ってタンク水深を補正する(黄色線)。その後の予測流量(青線)は、上述の改善されたタンク水深に基づき、予測雨量に実績雨量を与えて算出したものである。

上記の改善されたタンクモデルの予測流量ヒドログラフを上流端境界条件(八斗島)に与え水位予測計算を実施した。予測時間であるリードタイムは、各時刻の洪水流伝播時間に流出遅れ時間である 4 時間を加えたものとした。

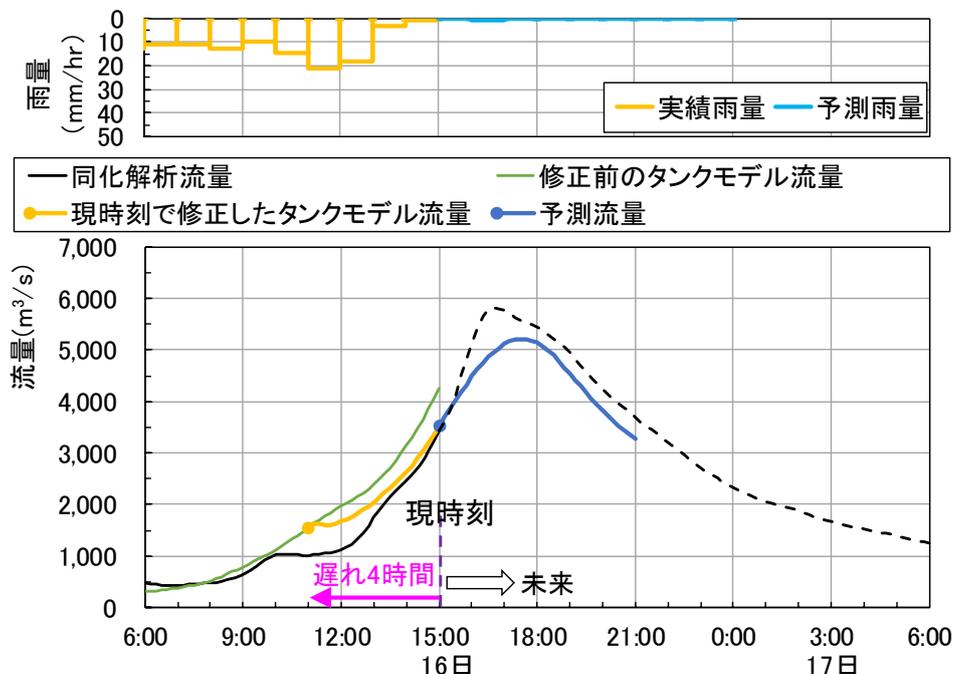


図 4.7.17 八斗島地点の同化解析流量とタンクモデル流量の比較

(2) 水面形予測結果

図 4.7.18 は、9/16 9時、15時、18時の同化解析データに対して行った川俣地点と谷田川樋管地点の予測水位と観測水位を示している。タンクモデルによる流量を観測水面形に基づく流量で修正することにより、各時刻からの予測水位は概ね観測水位に合致している。図 4.7.15 に示した洪水流伝播を利用した洪水予測手法は、ピーク付近の水位を3時間前にしか予測できていないが、図 4.7.18 に示す流出解析を組み合わせた洪水予測手法では、ピーク付近の水位を6~7時間前に概ね予測できている。

図 4.7.19 は、9/16 15時に予測した縦断水面形を観測水面形と比較している。予測結果は概ね観測水面形に合致しており、本水面形予測手法の妥当性が確認される。

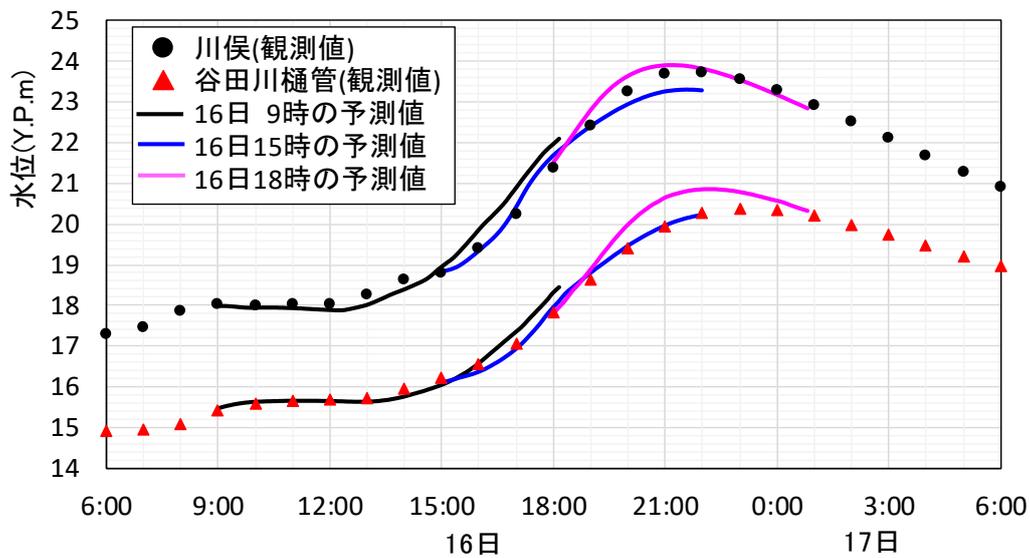


図 4.7.18 観測水位と予測水位の比較 (洪水流伝播+流出予測流量)

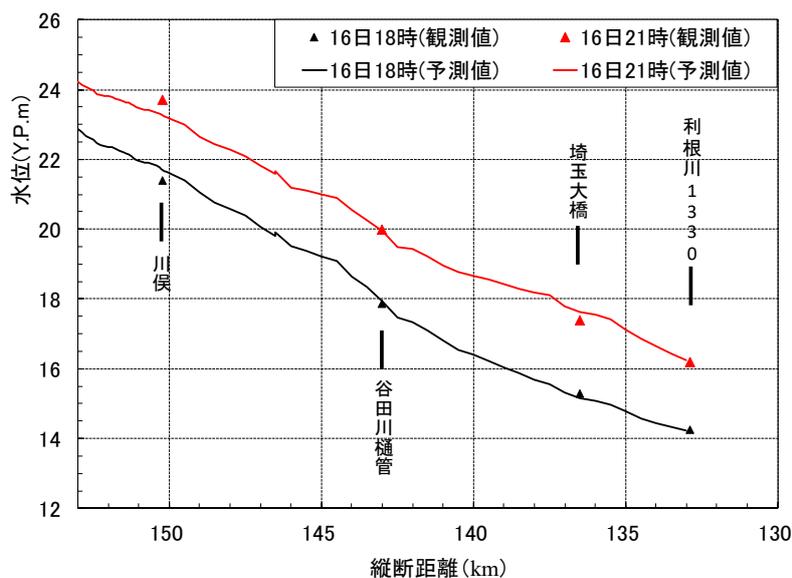


図 4.7.19 9/16 15時実施の予測水面形と観測水面形の比較 (洪水流伝播+流出予測流量)

最後に、本手法による水位ベースの水面形予測と観測流量(HQ 流量)に基づく流量ベースの水面形予測の比較を行う。図 4.7.20 は、9/16 15 時に実施した両者の予測水面形を観測水面形と比較している。水位ベースの予測水面形は図 4.7.19 と同じである。流量ベースの検討では、現在時刻までの上流端流量は HQ 流量を与え、予測時間の流量は上記の修正方法と同様にタンクモデルの流出量を現在時刻の HQ 流量に整合するようにタンク水深を補正し、将来の降雨量を与えて流出予測流量を推定している。そして、洪水流解析では上述の流量ハイドログラフを境界条件として与えて水面形を予測した。

図 4.7.20 より、現在時刻までの観測水位情報を考慮していない流量ベースの予測水面形は、本手法の水位ベースの予測水面形に比べて、実測水位への適合度が低いことがわかる。

(3)まとめ

本節では H25.9 洪水を対象に、観測水面形時間変化に基づいた同解析を行い、得られた縦断水面形と流量時系列情報を基に、洪水流伝播を利用した水位予測手法とタンクモデルの流出量を修正した水位予測手法の妥当性を検討した。

この結果、H25.9 洪水の水位伝播時間が明らかとなり、それをリードタイムとした予測水位は観測水位に概ね合致した。また、観測水面形時間変化を説明する同解析流量に基づきタンクモデルの状態量を修正した予測流量ハイドログラフを推定し、それを境界条件とする水面形を予測することで、長いリードタイムにおいても観測水位への適合度が高いことが示された。このため、本予測手法の防災情報への利用性は高いことが示された。

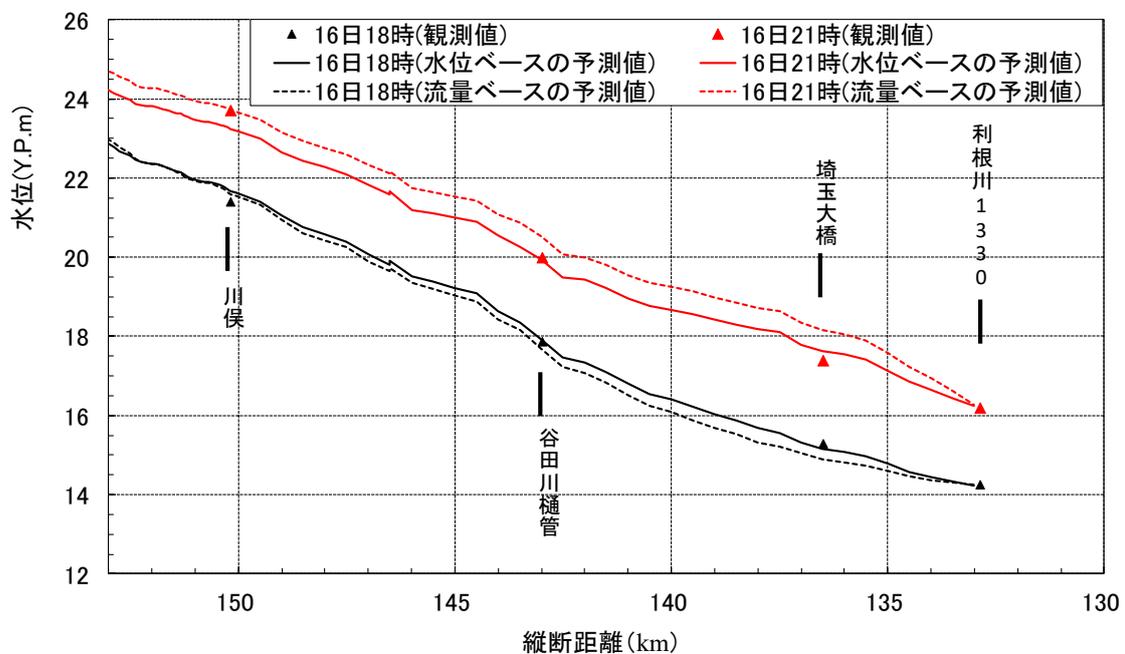


図 4.7.20 9/16 15 時実施の予測水面形と観測水面形の比較

(実線：水位ベースの予測結果，点線：流量ベースの予測結果)

4.8 結言

本章では、洪水時の早期の住民避難に役立てることを目的に、精度の高い観測水面形時間変化を基にした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、ALB 測量による詳細な河道内地形情報と簡易水位計データを含めた密度の高い観測水位情報を用いて、河川の水理解析に必要な水面下の地形情報密度と、水面形同化解析に必要な水位計の数について検討を行った。観測水面形の同化解析データを利用して洪水流伝播時間を検討し、それをリードタイムとする洪水流解析を行い実測水位と解析水位の適合性を検討した。また、観測水面形を説明する流量ハイドログラフにタンクモデルの流出量を整合させる水面形予測手法を用いて、長いリードタイムでの予測水位と実測水位の適合性を検討した。

以下に本章で得られた結論をまとめて示す。

(1) アジョイント法による洪水流同化解析モデルの開発

河川の縦断水面形を高精度に推定するために、精度の高い点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、解析結果に影響する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。

(2) 洪水流同化解析モデルの適用性

構築した洪水流同化解析モデルを利根川上流区間の 3 洪水に適用した結果、観測水面形時間変化を説明する縦断水面形の同化と、上流端流量ハイドログラフ、分類化された粗度係数、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。

制御変数の要素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、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。

(3) 地形計測密度が縦断水面形の解析値に及ぼす影響

川幅 650m、低水路幅 300m 程度の利根川区間(153.0km~133.0km)において、洪水流解析モデルの地形形状を表現しつつ信頼性の高い解析水面形を得るに必要な地形計測密度を検討した。この結果、計測データ密度が 1 点/100m² 以上であれば、縦断水面形を十分な精度で推定可能であることが示された。

(4) 同化解析に必要な水位観測地点数に関する知見

H29年10月台風21号の出水において数多くの貴重な水位データを取得することができた。この観測水位データから、同化に用いる観測地点数と解析から得られる推定値の収斂性の関係を見出すことができた。これによれば同化解析に用いる制御変数の要素数が観測地点数よりも少なければ逆推定される制御変数のパラメータ値が一定値に決まることが示された。

(5) 同化解析値の推定精度と他手法との比較に関する知見

制御変数の要素数が観測地点数より多い条件下で推定される制御変数の分布や縦断水面形の分布を調べるためにアンサンブルアジョイント法を開発した。この結果、同化解析に大きく影響する流量と低水路粗度係数の分布は、期待値もしくは最頻値に対して5%~10%の範囲となり、高水敷の草本(低)、草本(高)の粗度係数は概ね±20%に分布する。今後、同様の対象区間でこれらの諸量を事前に推定する際に有用な情報を与える。

(6) 河道管理に関する知見

(3)、(4)、(5)に示した河川の水理解析に必要な水面下の地形情報密度と水面形同化解析に必要な水位計の数は、河道の維持管理に行う上で重要な情報になる。一方、縦断水面形や流量の時間変化、抵抗特性の推定精度は、河道地形計測密度や水位計設置密度に影響する。このため、今後の課題として、スケールの異なる河川を対象として同様の検討を行い知見を深めることが重要である。

(7) 同化解析データを利用した洪水流伝播と降雨流出解析モデルの流出量修正に基づく

水面形予測

平成25年9月洪水に対して利根川181.5km~133.0kmの水面形同化解析により得られた水理データを用いて、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リードタイムである伝播時間が定量的に示された。洪水流伝播特性に基づくリードタイムまでの予測水位は観測水位に概ね一致した。これにより、本予測手法は、計算コストはそう大きくなく、防災情報への利用性は高い。

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を解として、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。これによる予測水位は、長いリードタイムにおいても観測水位への適合性が高いことが示された。

長いリードタイムに対して水位予測の精度をより高めるためには、水面形追跡区間を長く採ることが肝要である。

参考文献

- 1) 川原睦人：特別講演 非構造分野における有限要素法の発展と今後の展望—随伴方程式法および有限要素法による逆解析への展開，応用力学論文集，Vol. 8，pp. 3-14，2005.
- 2) 吉田圭介，石川忠晴：Adjoint 法による流量ハイドログラフ推定法に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 68，No. 4，I_1264-I_1266，2012.
- 3) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，第 761 号/II-67，pp. 45-56，2004.
- 4) 露木義：変分法によるデータ同化，気象庁数値予報課報告・別冊，第 43 巻，pp. 102-165，1997.
- 5) 山本一浩，中村圭吾，福岡浩史，戸村健太郎，金田真一：グリーンレーザ(ALB)を用いた河川測量の試み，河川技術論文集，第 23 巻，pp. 293-298，2017.
- 6) ALB による定期縦横断測量の精度向上方策と欠測が水理解析に及ぼす影響の検討：鈴木裕三，横溝和則，弓真由子ほか，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 75，No. 2，I_607-I_612，2019.
- 7) 建設省河川局治水課，土木研究所河川研究室：河道特性に関する研究，第 42 回建設省技術研究会報告，1988.
- 8) 福岡捷二，藤澤寛，大沼史佳：利根川河道の樹木群透過係数と高水敷粗度係数，河川技術論文集，第 13 巻，pp. 333-338，2007.
- 9) 鈴木裕三，森本洋一，角埜嵩文：ALB（航空レーザ測深機）による河床把握に関する検討，日本写真測量学会平成 29 年度秋季学術講演会，2017.
- 10) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73，No. 4，I_355-I_360，2017.
- 11) 後藤岳久，柴田亮，山本浩之，廣野太志，福岡捷二：多点水位計測システムを用いたリアルタイム水面形・流量推算手法，河川技術論文集，第 23 巻，pp. 257-262，
- 12) 工藤亮治，近森秀高，永井明博：粒子フィルタを用いた河川流域における実時間洪水予測，農業農村工学会論文集，No. 259，pp. 17-25，2009.
- 13) 立川康人，須藤純一，椎葉充晴，萬和明，キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発，土木学会論文集 B2(水工学)，Vol. 67，No. 4，I_511-I_516，2011.
- 14) 福岡捷二：実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性，河川技術論文集，第 20 巻，pp. 253-258，2014.
- 15) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第 12 巻，pp. 1-6，2006.
- 16) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形

- から河道の水理システムを見える化するー, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73, No. 4, I_355-I_360, 2017.
- 17) 後藤岳久, 福岡捷二, 大作和弘: 観測水面形時系列から求めた本・支川の流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの同定定数と洪水予測計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 75, No. 2, I_1291-I_1296, 2019.
 - 18) 永井 明博: 洪水流出タンクモデルの総合化に向けて, 農業土木学会論文集, No. 176, pp. 95-103, 1995.
 - 19) Chow, V.T. (1959), Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, pp.128-129
 - 20) 本永良樹, 銭潮潮, 山田正, 山坂昌成: 水位 - 通水能曲線 (HK 曲線) を利用した新しい流量算出手法, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 68, No. 4, I_1357-I_1362, 2012.
 - 21) 平野宗夫, 森山聡之, 山下三平, 中山比佐雄: 洪水位の短時間予測に関する研究, 第 31 回水理講演会論文集, pp. 137-142, 1987.

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

5.1 緒言

流域治水は、河川区域では本川と支川群の河川改修の加速化やダム・遊水地による洪水調節の効果的な運用を行い、流域では都市部の雨水貯留浸透施設の整備や水田地域の雨水貯留等による流出抑制対策の他、地域の水害リスクを踏まえたまちづくり等を実施することで、河川と流域の関係者が協働して河川と地域の治水安全度を向上するものである。

本章では、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、観測水面形を基にした本・支川等を一体とした降雨流出・洪水流解析法の検討、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している。

対象河川は、利根川上流河川事務所が管理する国直轄区間と、それに流入する国管理の烏川、群馬県管理の3支川、及び埼玉県管理の2支川である。

具体的な検討は、第一に令和元年台風19号出水について、流域の降雨分布と観測水面形の時間変化から洪水の特徴を分析している。第二に、本・支川等を一体とする洪水流解析モデルを構築するとともに、それに流入する2次支川流域を結合した流域全体の降雨流出・洪水流解析モデルを構築している。第三に、上記の本・支川等の水面形時間変化を基にした降雨流出・洪水流一体解析法を上記の洪水に適用し、本・支川の水面形時間変化、2次支川と1次支川からの流入量、及び本川の流量ハイドログラフを高精度に算定できることを示している。第四に、これまでの検討で明らかとなった令和元年台風19号洪水に対する利根川本川と支川群の降雨量、ダム貯留量、流域貯留量、河道貯留量、河道通過流量の時間変化である水収支分布図を作成する。水収支分布図を基に流出特性を分析するとともに、解析水面形とH.W.Lの関係から本・支川群の流下能力の時間変化を分析し、本・支川群の今後の治水対策の方向性を提示している。

5.2 利根川上流域の対象河川と令和元年台風19号洪水の降雨流出特性

5.2.1 対象河川と水位観測体制

(1) 対象河川

利根川上流域の全体を図5.2.1に、本研究で対象とする利根川上流域と本・支川群の位置関係を図5.2.2に示す。本研究で対象とする利根川本川と一次支川は、図5.2.2に示すとおり、本川の利根川については192.0km～渡良瀬川合流前の133.0km区間とし、利根川に流入する支川群は、最大支川である国管理の烏川、利根川左岸に流入する群馬県管理の広瀬川、早川、石田川、右岸に流入する埼玉県管理の小山川、福川である。なお、利根川の186.5kmより下流は国管理区間、その上流は群馬県管理区間である。これらの各河川の諸元を表5.2.1に示す。

また、図5.2.2と表5.2.2には、利根川に対する2次支川を示している。2次支川の扱いは5.3節で詳述するが、測量断面の精度に問題のない広瀬川の支川である桃ノ木川、粕川、荒砥川、赤城白川、及び烏川の支川である神流川については、洪水解析区間の対象とし、それ以外の2次支川は流域として扱い、降雨流出解析モデルを用いて支川への流入量を算出する。

なお、図5.2.1に示したように、検討区間の上流には、利根川本川に対して八木沢ダム、奈良俣ダム、藤原ダム、園原ダム、相俣ダム、八ッ場ダムが整備され、烏川の支川である神流川上流には下久保ダムが整備されている。洪水時に、これらのダム群は、洪水調節操作により洪水の一部をダムで貯留することで、下流区間の流量を低減し水位を低下させ、治水効果を発揮している。

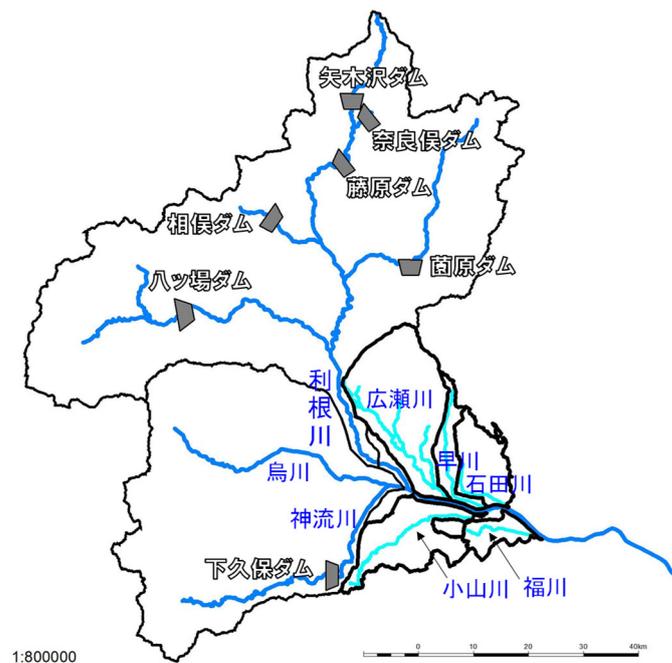


図5.2.1 利根川上流域全体，主要支川の各流域，ダムの位置

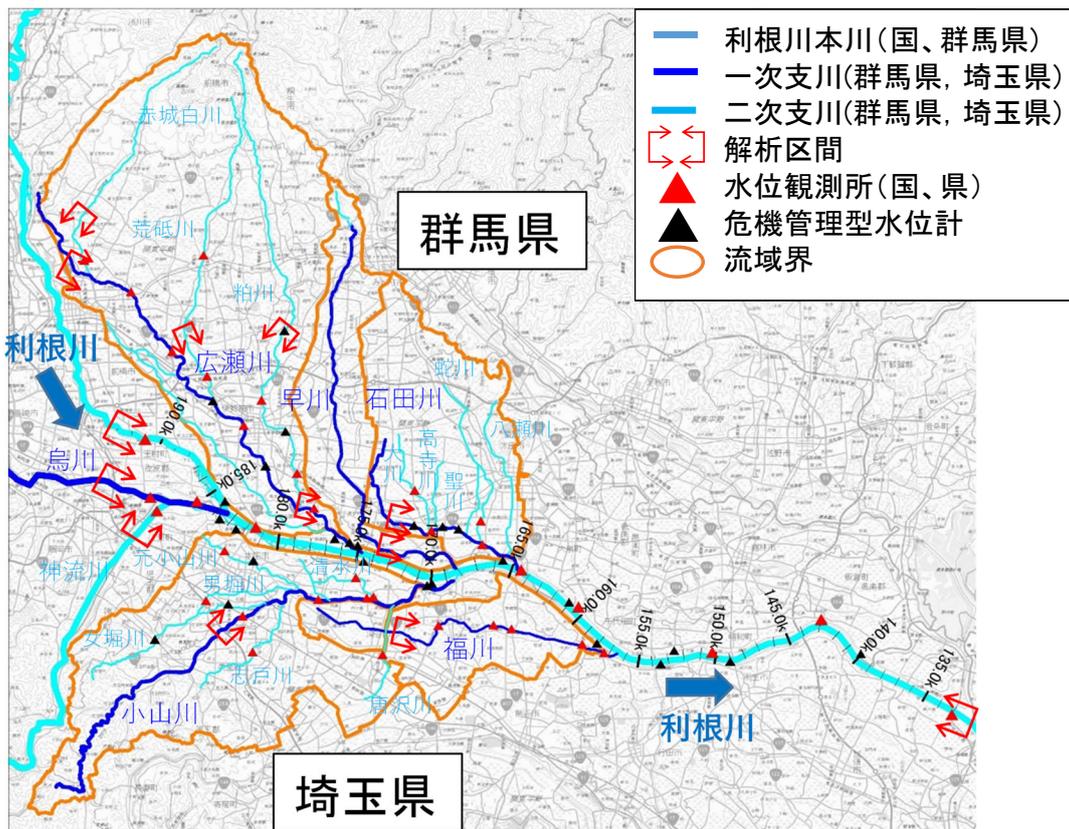


図 5.2.2 検討対象の利根川上流域の本川，支川，2次支川

表 5.2.1 検討対象の利根川本・支川の諸元

河川	流域面積	利根川の 合流点	検討区間	管理者
利根川	3,661 km ² (上福島上流)	—	192.0 km～133.0km	186.5km 上流：群馬県 186.5km 下流：国
烏川	1,800 km ²	184.0km	6.2 km～合流点	国
広瀬川	345 km ²	175.5km	27.6km～合流点	群馬県
早川	79 km ²	168.7km	3.6km～合流点	群馬県
石田川	125 km ²	164.8km	9.4km～合流点	群馬県
小山川	200 km ²	168.5km	14.0km～合流点	埼玉県
福川	77 km ²	156.7km	16.0km～合流点	埼玉県

表 5.2.2 支川の対象区間に流入する 2 次支川

支川	2 次支川	管理者
烏川	神流川	国
広瀬川	桃ノ木川	群馬県
	粕川	
	荒砥川	
	赤城白川	
	蕪川	
	大川	
石田川	八瀬川	群馬県
	蛇川	
	聖川	
	高寺川	
	大川	
早川	なし	群馬県

支川	2 次支川	管理者
小山川	唐沢川	埼玉県
	清水川	
	備前渠川	
	元小山川	
	女堀川	
	志戸川	
福川	なし	埼玉県

(2) 対象洪水と水位観測体制

本研究では、本・支川を一体とする洪水流解析モデルを構築し、令和元年台風 19 号出水を対象にその適用性を検討する。前頁の図 5.2.2 には、対象洪水である令和元年台風 19 号の水位観測体制を示している。1 次支川には 2 基以上の水位計が設置され、2 次支川にも既設の水位計に加えて整備が進む危機管理型水位計¹⁾が設置されている。危機管理型水位計は洪水水位の高い期間で観測されていた。このように、水位計は、国管理河川のみならず県管理河川にも増設されている。このため、洪水時に観測される多地点多量の水位データを活用した各区間の河道管理や、洪水時に観測される本・支川・2 次支川の観測水面形の時間変化を分析することで流域で生じる洪水現象の理解や今後の河川と流域で実施される対策効果の見える化等への活用が期待される。

5.2.2 降雨の時空間分布と利根川本・支川の観測水面形の時間変化

(1) 降雨の時空間分布

① 国土交通省オンライン合成レーダ雨量の精査

図 5.2.3 に、利根川上流域における国土交通省オンライン合成レーダ雨量（以下、国交省レーダ雨量という）を用いた令和元年台風 19 号の 3 日間雨量(10/11 1 時～10/14 0 時)を示す。図 5.2.3 に示した国交省レーダ雨量は、降雨流出解析を行う際の入力条件になる。このため、国交省レーダ雨量を地上雨量計データや気象庁の解析雨量（以下、気象庁レーダ雨量という）と比較することで雨量データの信頼性を確認した。

以下では、特に広瀬川流域について国交省レーダ雨量の観測精度に問題がみられたため、その説明と対応を示す。図 5.2.4(a) (b) に、国交省レーダ雨量と気象庁レーダ雨量の同期間の 3 日雨量を比較して示す。両者とも 1km メッシュの雨量値である。また、図 5.2.4(c) は、国交省レーダ雨量と気象庁レーダ雨量の差を示している。図 5.2.4(c) より、赤城山山頂上付近で両者に 50mm～250mm の違いがみられる。なお、広瀬川に隣接する早川流域、石田川流域、右岸の小山川流域については、両者に大きな違いは認められない。

次に、上述した 2 つのレーダ雨量の精度を検討する。その検討方法は、地上雨量計の雨量値とその直上で観測されたレーダ雨量値を比較する。図 5.2.5 には、広瀬川流域内外の国管理と気象台管理の地上雨量計とレーダ雨量 1km メッシュの観測位置関係を示している。レーダ雨量値と比較する地上雨量計は、赤城山観測所、前橋観測所（気象台）、苗ヶ島観測所、伊勢崎観測所（気象台）、八斗島観測所とした。

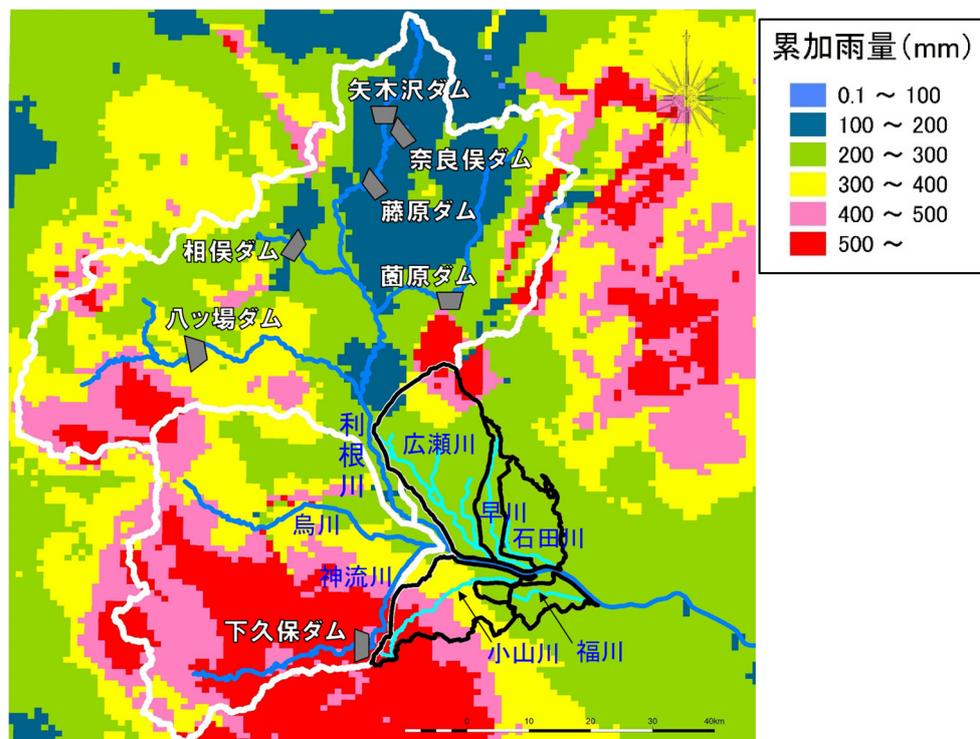


図 5.2.3 令和元年台風 19 号の 3 日間雨量図(10/11 1 時～10/14 0 時)

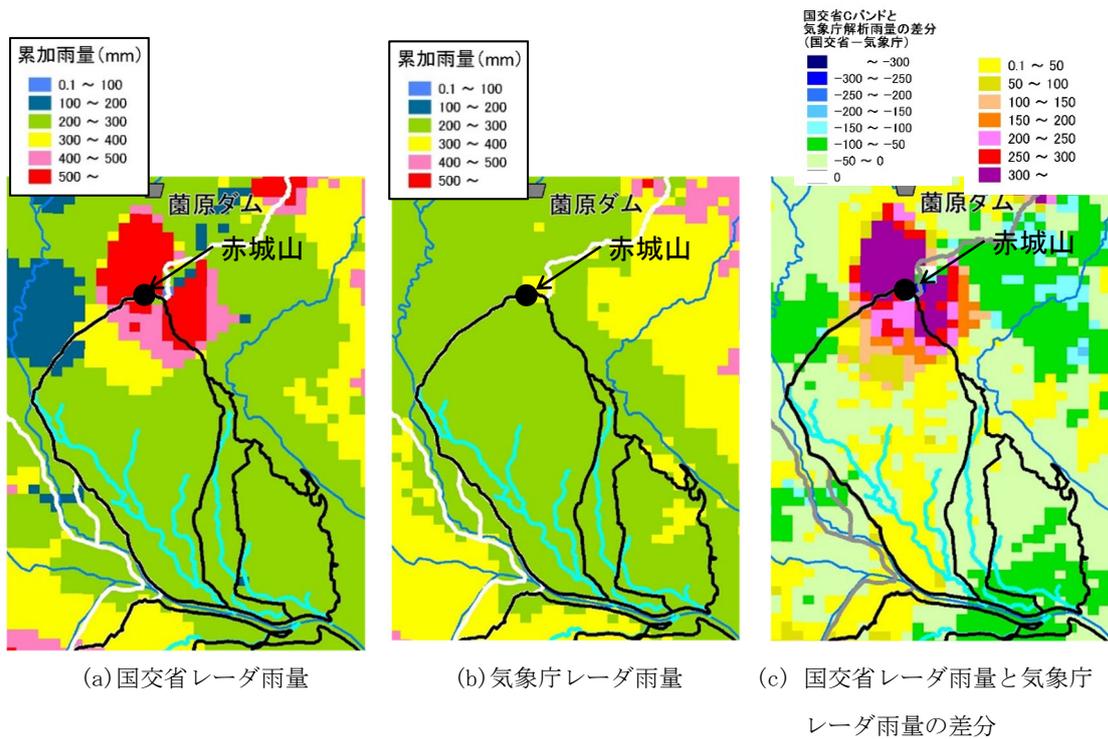


図 5.2.4 国交省レーダと気象庁レーダによる令和元年台風 19 号の 3 日間雨量 (10/11 1 時~10/14 0 時)

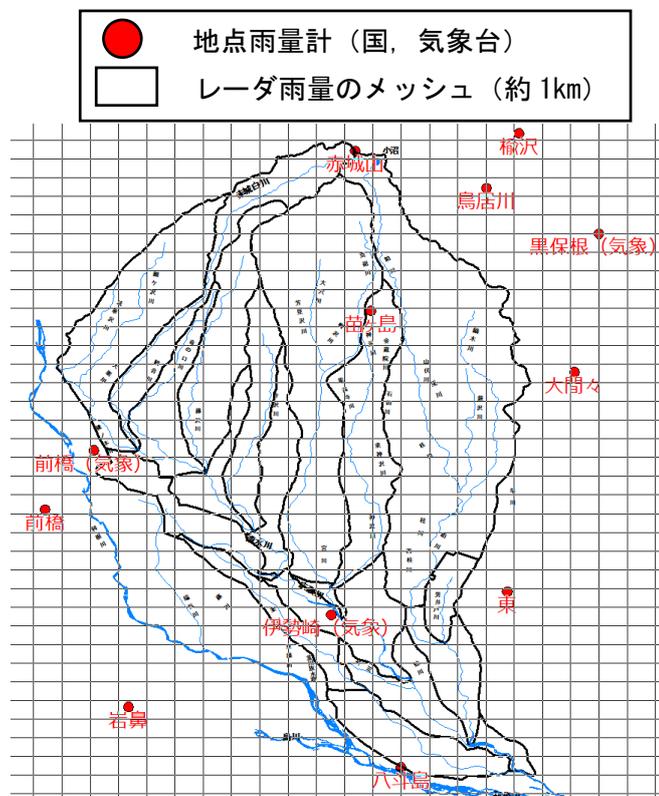
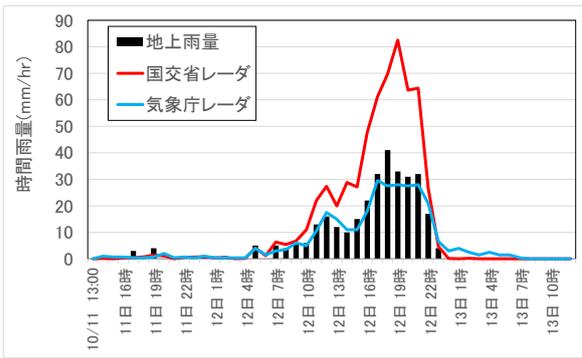
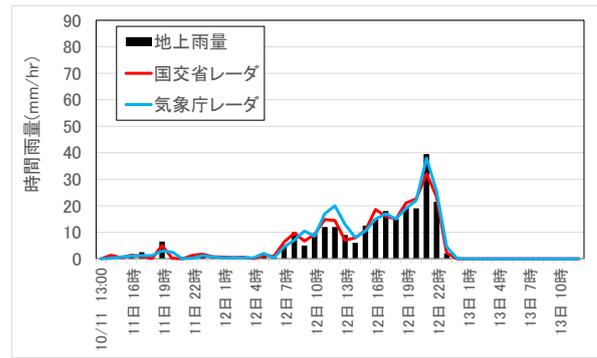


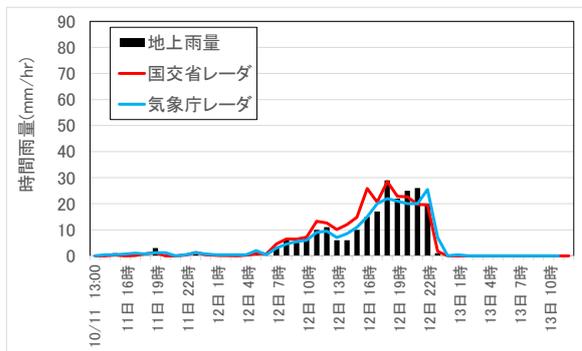
図 5.2.5 地上雨量計と国交省レーダ, 気象庁レーダによる 1km 雨量メッシュの関係



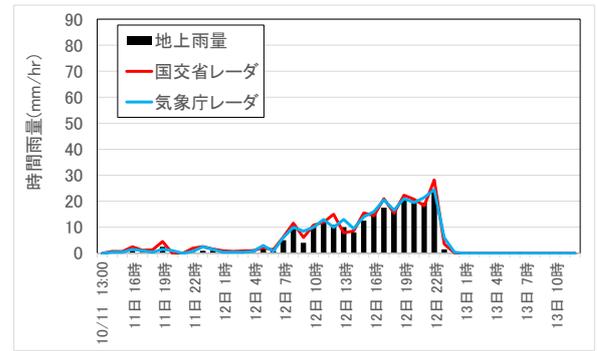
(a) 赤城山観測所



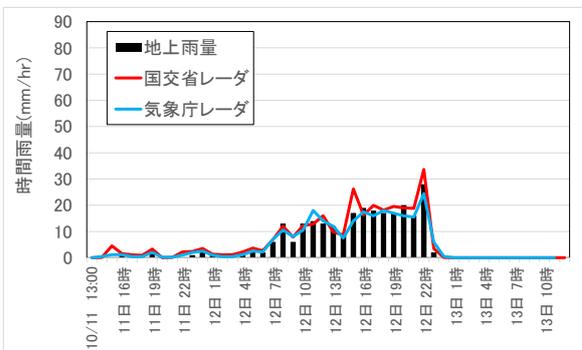
(b) 前橋観測所（気象台）



(c) 苗ヶ島観測所



(d) 伊勢崎観測所（気象台）



(e) 八斗島観測所

図 5.2.6 地上雨量観測所の雨量値とその直上に位置する国交省レーダ，気象庁レーダの 1km メッシュ雨量値との比較

図 5.2.6 に、地上雨量観測所の雨量値とその直上に位置する国交省レーダ雨量及び気象庁レーダ雨量の 1km メッシュ雨量値を比較して示す。図 5.2.6 より、国交省レーダ雨量は、赤城山観測所で計測された雨量値に対してピーク時刻で 2 倍程度大きい。一方、その他の観測所では、国交省レーダ雨量の時間変化は、地上で計測された雨量に概ね合致している。これに対して、図 5.2.6 に示した気象庁レーダ雨量は、地上観測所の雨量値と合致していることが確認される。なお、国交省レーダ雨量は、図 5.2.7 に示すとおり、全国に整備された

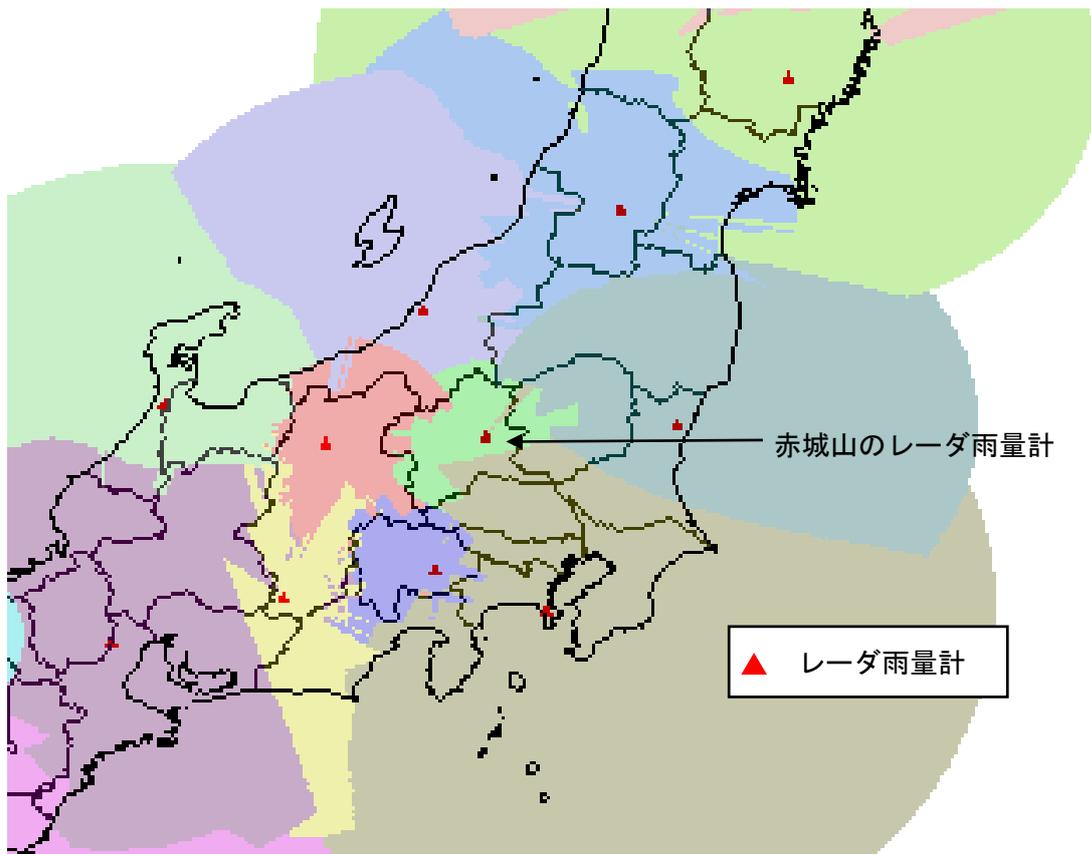


図 5.2.7 国交省レーダ雨量計の全国合成マップ

国交省レーダ雨量計による雨量を合成し作成されている。図 5.2.7 と図 5.2.4(a) をみると、上述の赤城山付近で過大なレーダ雨量は、赤城山の頂上付近に整備されたレーダ雨量計によるものと確認される。但し、国交省レーダ雨量が地上雨量や気象庁レーダ雨量に比べて大きく観測される理由は定かではない。一方、図 5.2.7 より、上述の観測精度の低い国交省レーダ雨量の範囲は、広瀬川のごく一部であり、上述したとおり早川、石田川、小山川には影響しない。これは、図 5.2.6 に示した地上雨量と国交省レーダ雨量値の比較結果からも、赤城山付近を除き概ね良好な観測が行われていることが確認できる。

以上より、後述する本・支川の観測水面形への応答評価や降雨流出解析の入力条件に利用する雨量は、赤城山を含む広瀬川流域については気象庁レーダ雨量を、それ以外の流域は国交省レーダ雨量を採用することとした。

②降雨の時空間分布特性とダムの洪水調節効果

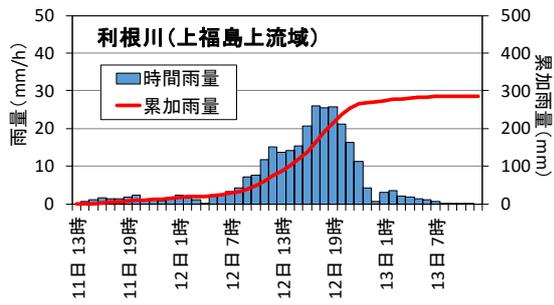
図 5.2.3 に示した 3 日間雨量分布より、ハッ場ダム上流で総雨量 400mm を超える降雨が生じている。図 5.2.8 には、先に示したレーダ観測雨量を用いて整理した利根川本川と支川の流域平均時間雨量を示している。図 5.2.8(a) より、利根川の上福島上流域では、12 日 16 時から 20 時にかけて時間雨量 20mm 以上の豪雨となり、総雨量は 300mm 程度であった。支川の烏川では、図 5.2.8(b) より、12 日 8 時から 21 時まで時間雨量 20mm 以上の降雨が続き、

総雨量は約 450mm に達した。烏川流域の大雨は、図 5.2.3 からわかるように、その支川の神流川上流域の豪雨によるものである。また、図 5.2.8(a)と図 5.2.8(b)を比較することで、烏川流域の強い降雨は、利根川上流域よりも早い時間帯に生じていることがわかる。

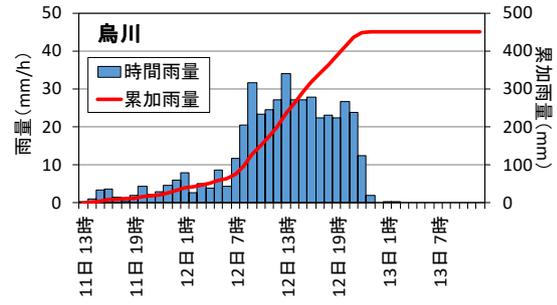
埼玉県管理河川の小山川の上流域では、図 5.2.3 より隣接する神流川上流と同程度の総雨量が生じ、図 5.2.8(c)より降雨のピークは 12 日 22 時でその時間雨量は 35mm であった。図 5.2.8(d)より、福川の流域平均雨量は、ピーク時の時間雨量は 20mm 程度で総雨量は 240mm 程度であり、小山川に比べると小さいことがわかる。

群馬県管理の 3 支川の降雨特性は、図 5.2.8(e), (f), (g)に示すとおり、3 河川ともに概ね同じであり、石田川でみると 12 日 17 時～22 時に時間雨量 20mm 前後のまとまった降雨が確認される。

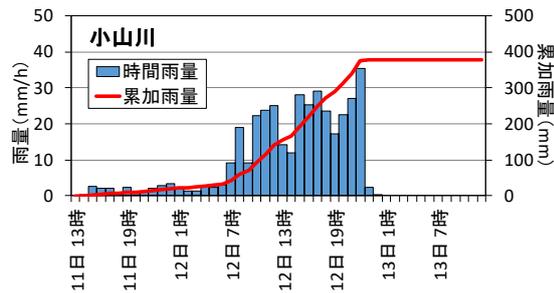
上述の令和元年台風 19 号の豪雨に対して、当時の八ッ場ダムでは、本運用前の試験湛水を実施しており、約 7,500 万 m³ の洪水が貯留された。また、図 5.2.3 に示した利根川上流ダム群の洪水調節操作により、計約 14,500 万 m³ の洪水が貯留され、速報値として、八斗島地点で、約 1m の水位低下の効果が報告²⁾されている。



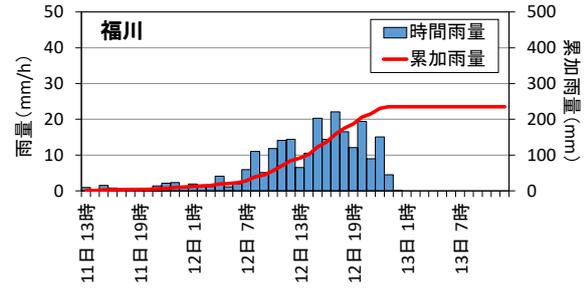
(a) 利根川上福島上流域



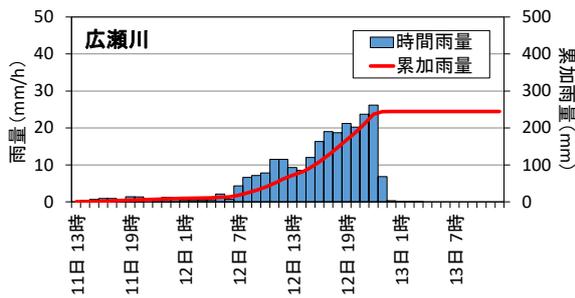
(b) 烏川流域



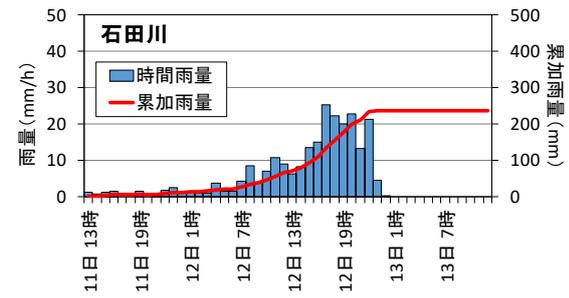
(c) 小山川流域



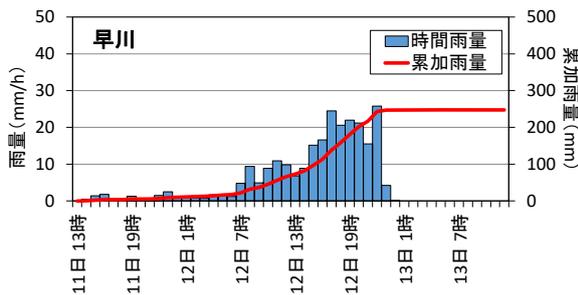
(d) 福川流域



(e) 広瀬川流域



(f) 石田川流域



(g) 早川流域

図 5.2.8 利根川本川と支川の流域平均時間雨量

(2) 本川と支川群の観測水面形

上記の降雨分布による支川群の洪水が利根川本川の洪水に与える影響を観測水面形に基づき説明する。図 5.2.9 は、烏川合流点上流の本川上福島と烏川の新町、及び合流後の本川八斗島の水位ハイドログラフを比較し示している。図 5.2.9 より、図 5.2.3 と図 5.2.8(b) に示した烏川流域の多量の降雨に伴い、烏川は本川の上福島に対して早い出水がみられる。八斗島水位ハイドログラフは最大支川である烏川の流入量の影響を強く受けていることがわかる。

次に、利根川本川の観測水面形時間変化を図 5.2.10 に△のプロットで示す。図 5.2.10 の八斗島ピーク水位時刻である 13 日 0 時の縦断水面形をみると、群馬県と埼玉県の河川が流入する支川群の下流、特に小山川合流後の古戸 (164.5km)～川俣(150.2km)の区間で、観測水位が H.W.L 付近まで、あるいは H.W.L を超過していることが確認される。これは、この時点で本川下流の水面形形成に対して県管理河川の流入量の影響が大きかったことを意味している。これを説明するために、図 5.2.11 に小山川の観測水面形時間変化を△のプロットで示す。同図の 13 日 0 時の観測水面形をみると、5km 上流の自己流区間とそれより下流の本川水位の背水の影響を受ける区間で H.W.L 付近まで水位が上昇している。したがって、台風 19 号による小山川の洪水は、上流に降った大雨により多量の流量が流れ、本川水位の影響を受けながら利根川に合流したと言える。

他の支川群である広瀬川、早川、石田川、福川の観測水面形時間変化を図 5.2.12 から図 5.2.15 に示す。利根川本川水位の高い 13 日 0 時のいずれの支川の観測水面形は、小山川と同様に本川の背水の影響を一部区間で受けており、広瀬川を除いて水位が H.W.L 付近まで上昇または一部区間で超過していることが確認される。特に、図 5.2.15 に示した福川では、利根川の背水の影響が 12km 付近まで及んでいる。この福川の水面形は、明治時代末まで、この地域の平地の地形特性を活かして、利根川の洪水を中条堤の上流側へ一時的に湛水させ下流側を洪水の被害から守ってきた遊水特性を表している。

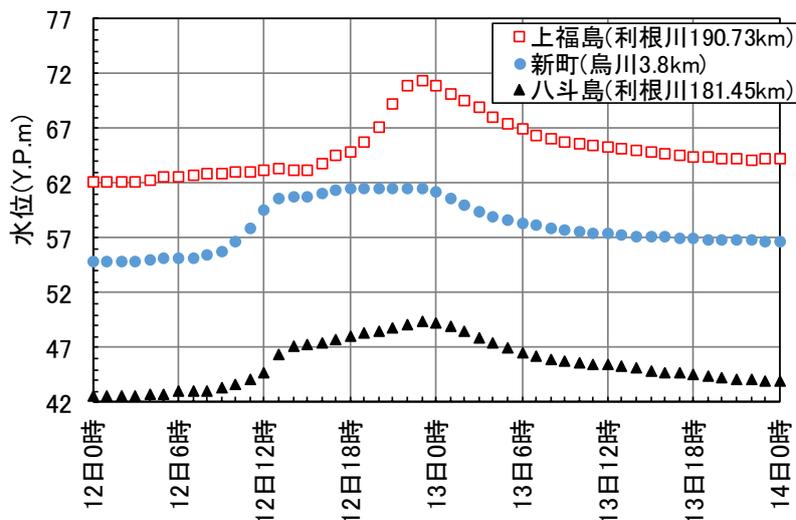


図 5.2.9 利根川と烏川の水位ハイドログラフ

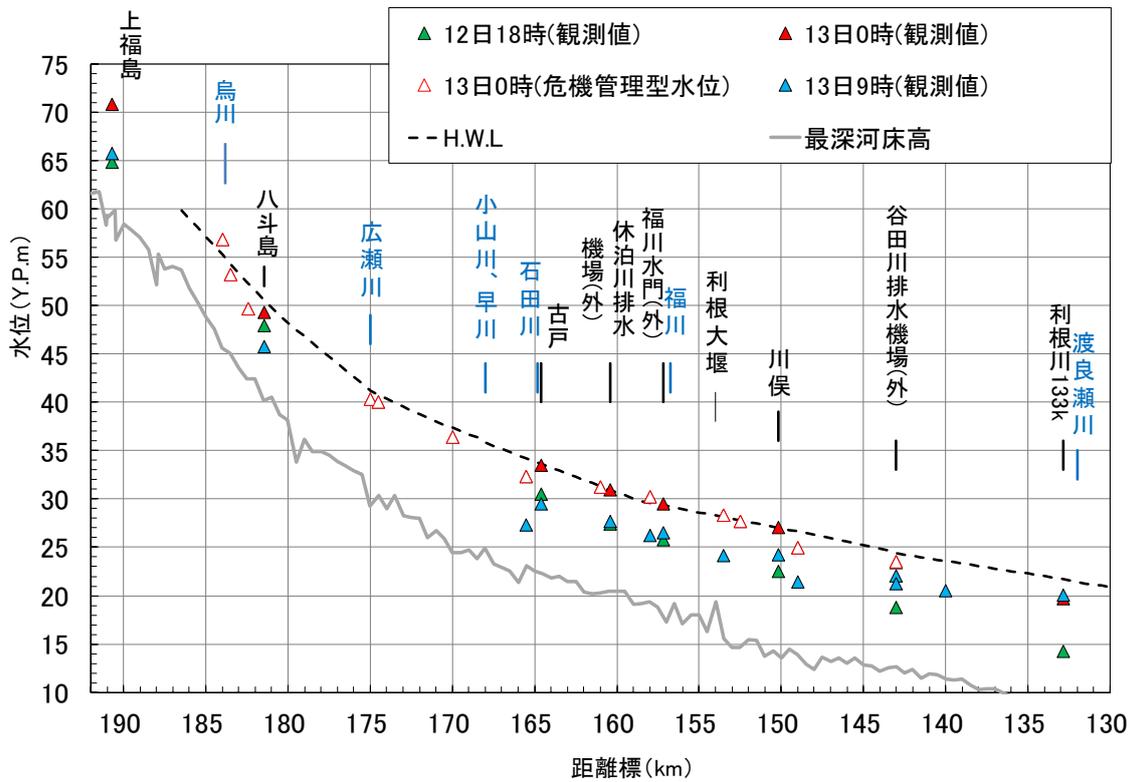


図 5. 2. 10 利根川における観測水面形の時間変化

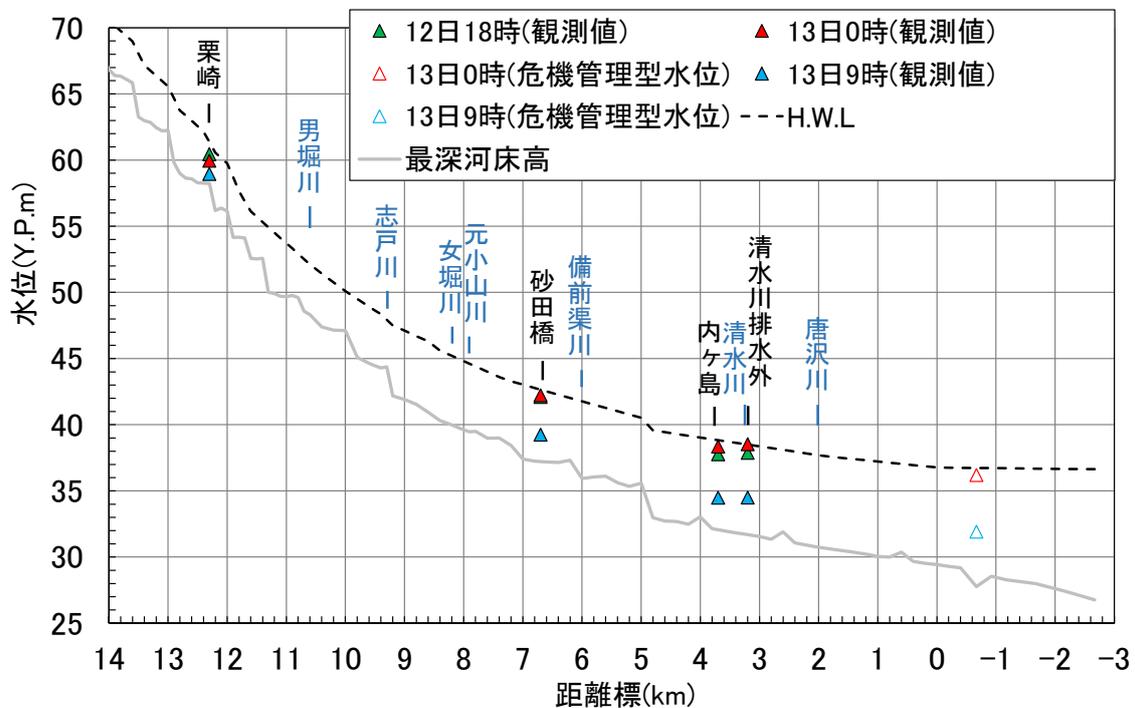


図 5. 2. 11 支川の小山川における観測水面形の時間変化

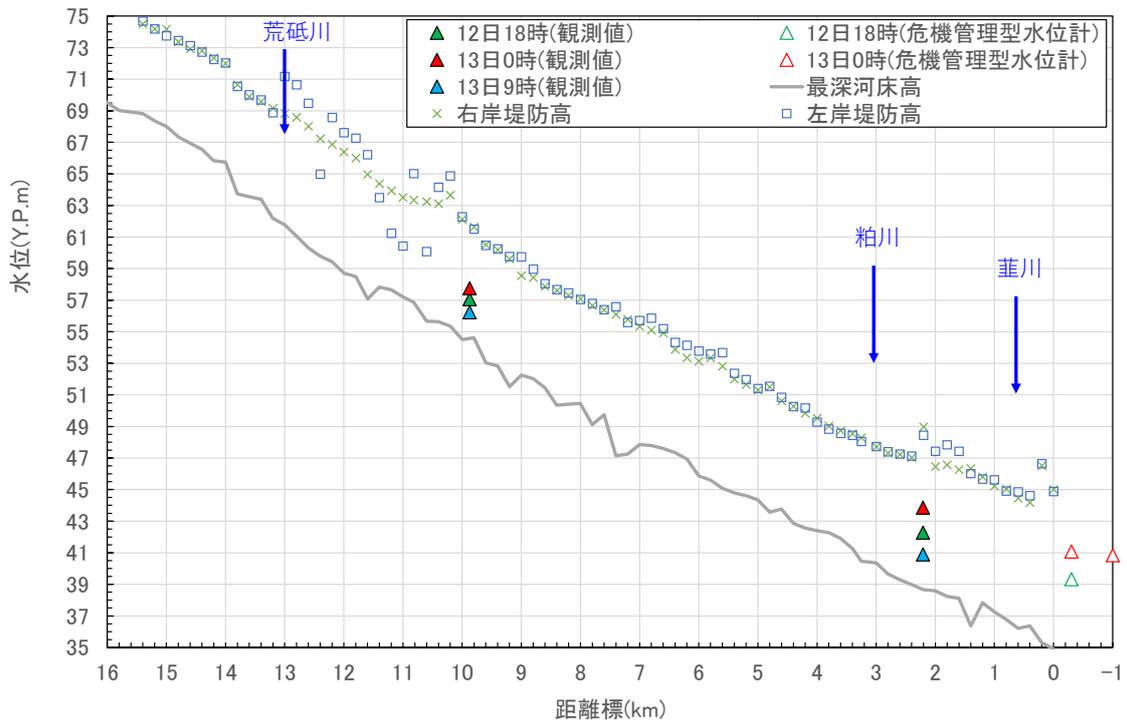


図 5.2.12 支川の広瀬川における観測水面形の時間変化

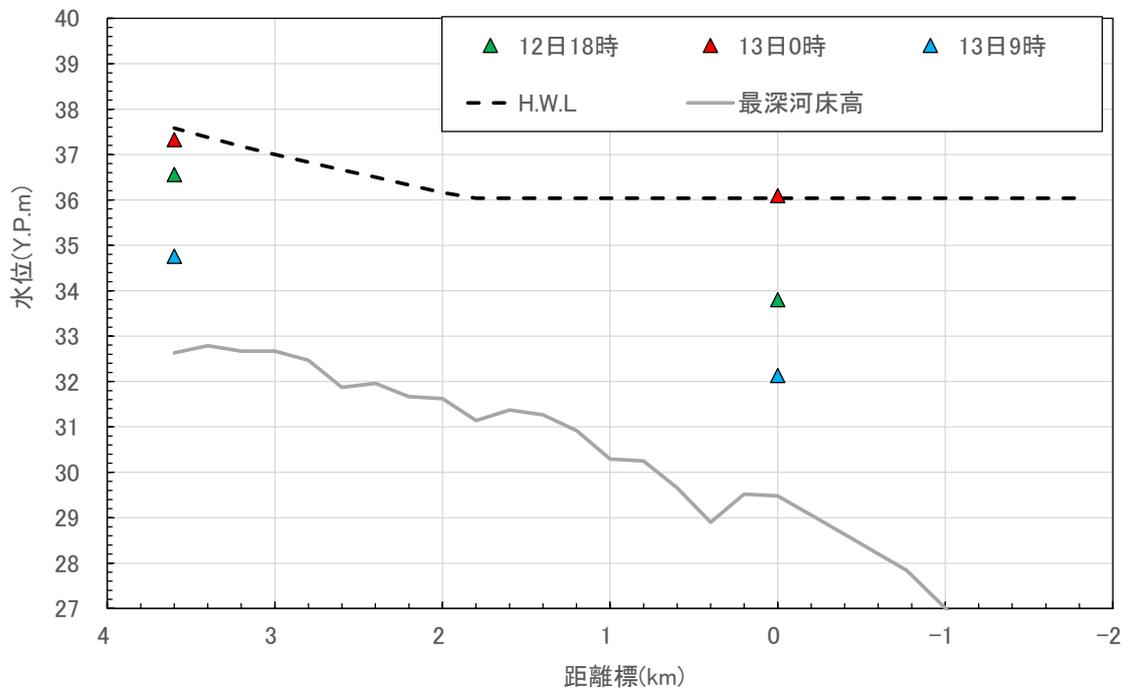


図 5.2.13 支川の早川における観測水面形の時間変化

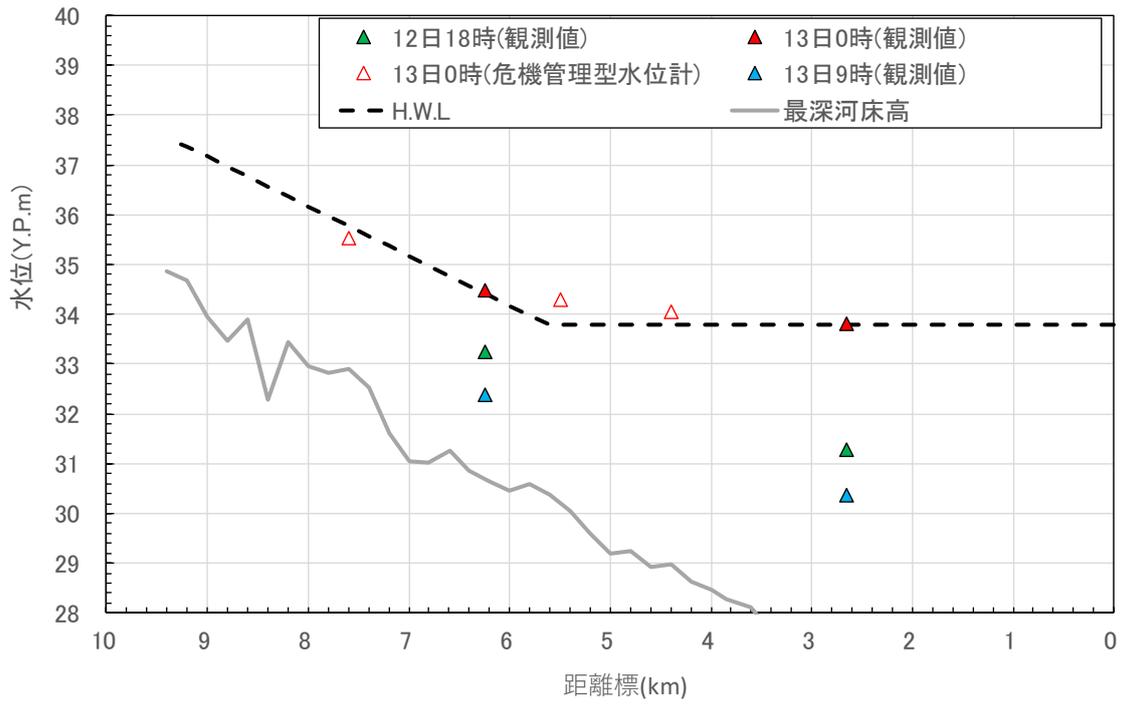


図 5. 2. 14 支川の石田川における観測水面形の時間変化

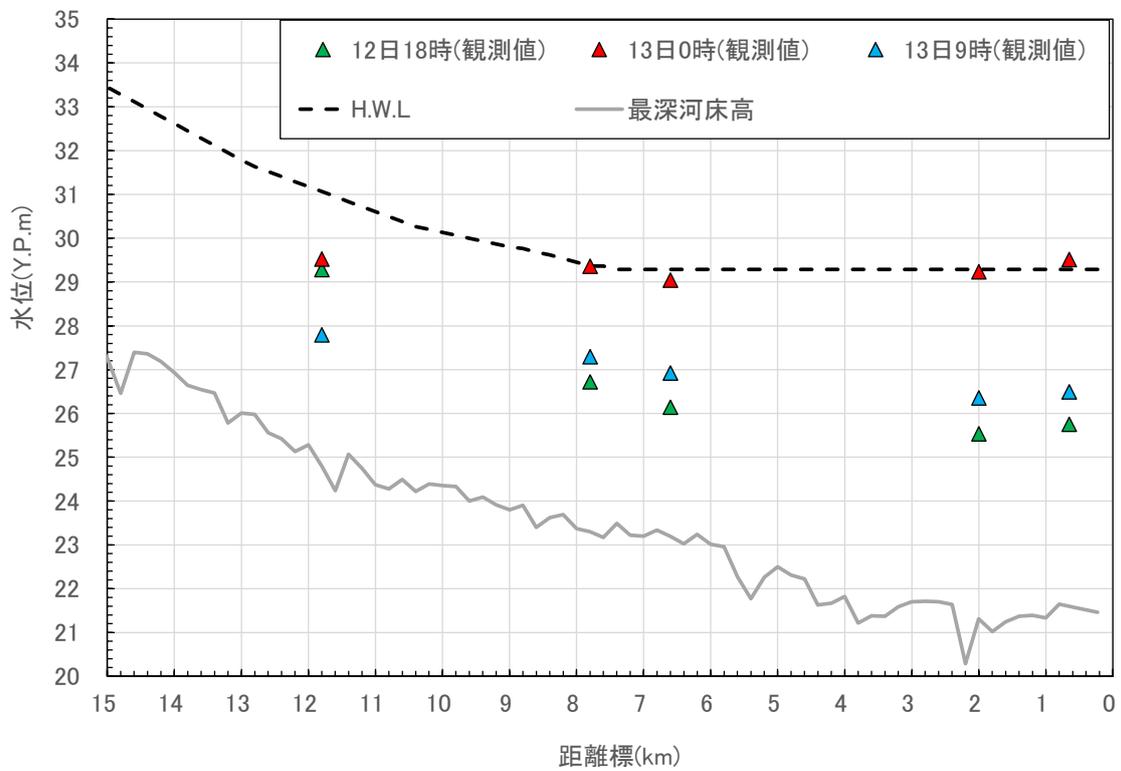


図 5. 2. 15 支川の福川における観測水面形の時間変化

5.3 流域と本・支川を一体とした降雨流出・洪水流解析モデルの構築

5.3.1 降雨流出・洪水流解析モデルの全体像

(1) 解析法の考え方

治水計画の立案や洪水予測に用いられてきた降雨流出解析と洪水流解析は、各々独立してモデル構築され、流出解析で流量を、洪水流解析で水位を算出してきた。図 5.3.1 には代表的な流域内の本・支川・2次支川の関係と平成初頭(昔)の水位観測所及び流量観測所の整備状況を示している。図 5.3.1 に示したように、昔は水位計や流量観測地点が少なく、限られた洪水情報を基に降雨流出現象や洪水流の現象を解明することが求められていた。流出解析では、降雨の時系列情報を与条件として流量ハイドログラフを算出する。このため、流出解析モデルの検証は、ごく限られた少ない流量観測値を基に検討され、そのモデル定数の同定が行われるのが一般的であった。また、洪水流解析では、上記の流出モデルにより得られた流量ハイドログラフを上流端境界条件に与え、下流端境界条件には水位ハイドログラフを与えて、痕跡縦断水位等を検証材料として粗度係数を同定して洪水現象を説明していた。したがって、降雨量と流量を既知量とし、水位を未知量とする考えの基に降雨流出解析と洪水流解析は実施されてきた。また、対象区間、国管理と都道府県管理の境界で区切られた検討が多い。

これに対して、近年では、図 5.3.2 に示すように、本・支川さらには2次支川等において、流量よりも観測精度の高い水位計の整備が進められている。これらの多くの地点で観測された水面形データは、時空間分布を持つため、極めて限られた地点で観測される流量に比べて、流域に降った雨に対する流出や洪水流の応答を表している。そこで、本研究では、流域を対象に本・支川・2次支川の観測精度の高い水位計データを基にした降雨流出・洪水流解析の高精度化を図る。

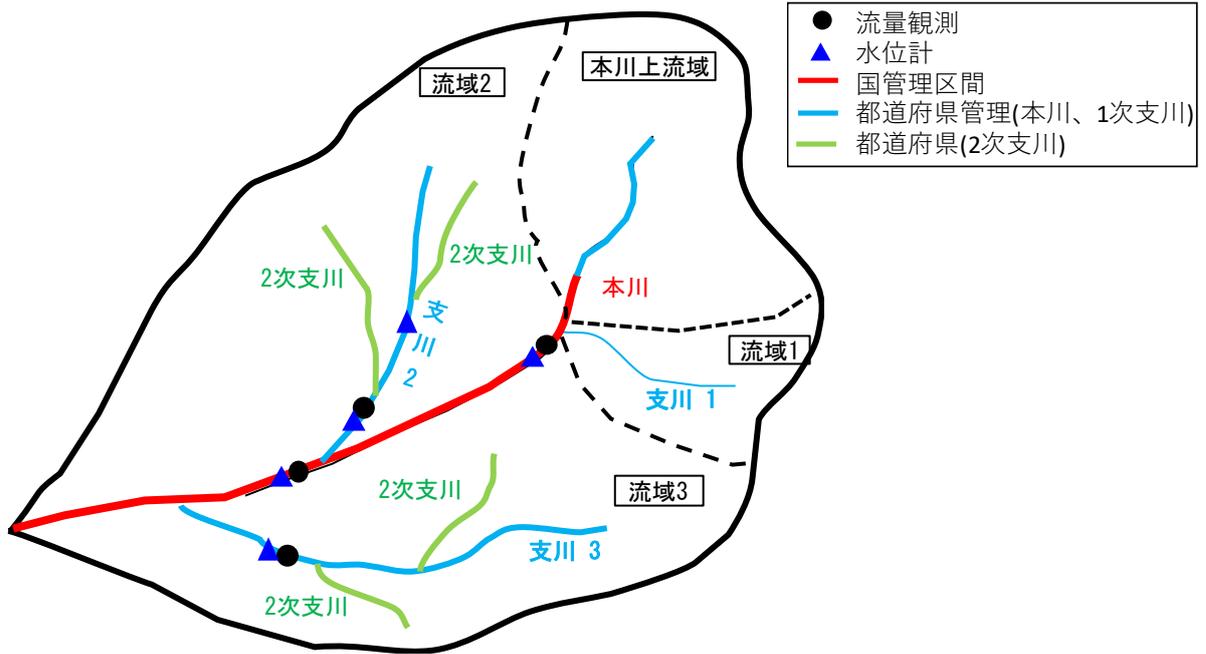


図 5.3.1 代表的な流域の本・支川・2次支川の関係と昔の水位・流量観測所の整備状況

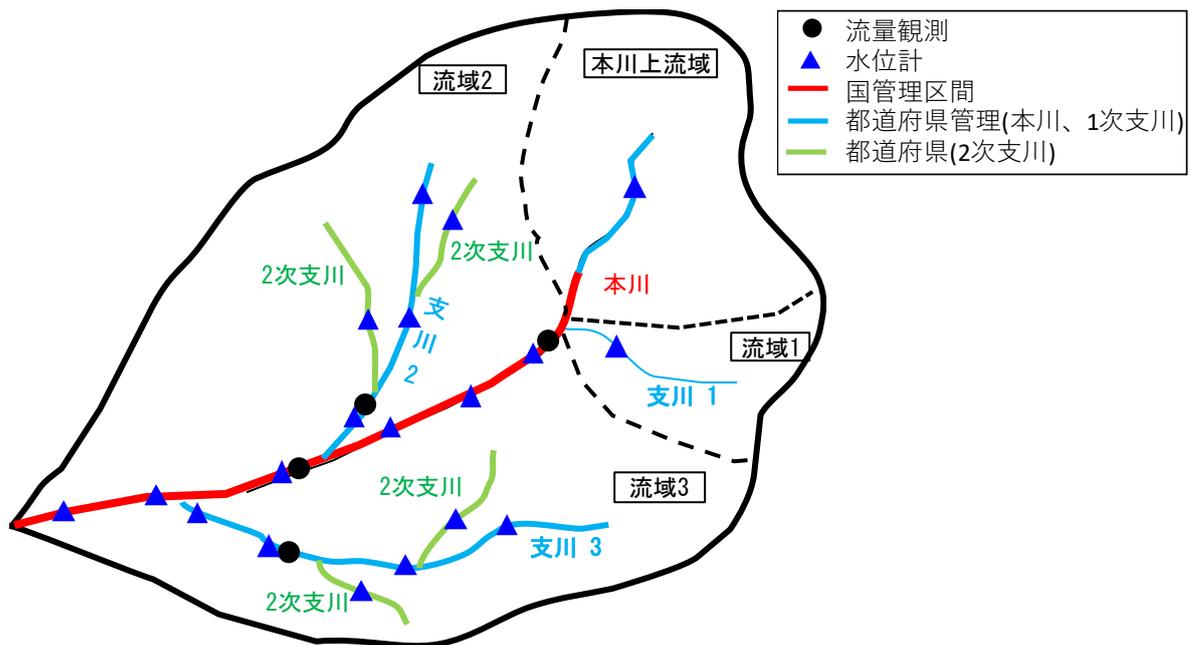


図 5.3.2 代表的な流域の本・支川・2次支川の関係と近年の水位・流量観測所の整備状況

流域の洪水解析の高精度化は、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本・支川一体の洪水流を追跡するとともに、観測水面形に解析水面形が合致するように小流域単位の降雨流出量をフィードバックする降雨流出・洪水流の一体解析を行うことで達成される。本研究による手法を従来手法との違いの観点から

列挙すると、観測精度が高く時空間分布を持つ水位に基づく流出解析及び洪水流解析を実施していること、降雨量、水位を既知量とし流量を未知量にしていること、国管理と都道府県管理の本川・1次支川・2次支川と小流域を一体として検討する点にある。

上記の高精度な降雨流出・洪水流解析が可能となれば、本・支川・2次支川の水面形時間変化、1次・2次支川からの流入流量、本川流量が高精度に求まることで、流域で生じる洪水現象の理解とそれに基づく水収支分布が明らかとなり、国・都道府県等の関係者による今後の流域治水の対策につながると考えられる。

後述するが、本研究では、洪水流の解析法には平面二次元洪水流解析法³⁾を、降雨流出解析法にはタンクモデル⁴⁾を用いる。

(2) 解析フロー

図 5.3.3 に、観測水面形の時間変化に基づく流域と本・支川等を一体とした降雨流出・洪水流解析のフローチャートを示す。図 5.3.3 は、2次支川の測量データが整備されておらず本川と支川を洪水流解析区間とし、2次支川以下を小流域とみなし降雨流出解析モデルで表現する例を示している。なお、2次支川の測量データが整備される場合は、洪水流解析区間を2次支川まで対象とし、3次支川以下を小流域とみなして降雨流出解析モデルで表現すればよい。図 5.3.3 の本・支川の洪水流解析の手法の部分は、福岡⁵⁾の洪水流解析法と同じである。すなわち、本・支川の上流端には観測所水位ハイドログラフを境界条件に、本川の下流端についても水位ハイドログラフを境界条件として与え、水面勾配により洪水流を流下させる考えの基に、非定常平面二次元解析法を用いて、各時間の観測水面形と解析水面形が一致するように流れを解く。

上記の洪水流解析のみで洪水現象を説明することは、本・支川の解析区間に対してそれよりも低次の小河川からの流入量の影響が相対的に小さい場合に説明可能である。一方、2次支川の集水性が高い流域では、上記の本・支川の洪水流解析だけでは流量ボリュームが不足するため、これらの流入量を1次支川に反映する必要がある。そこで、2次支川や残流域からの1次支川への流入量を小流域からの流入量とみなして、降雨流出解析モデルを用いて算出する。本検討では、降雨流出解析モデルとして3段タンクモデル⁴⁾を用いる。上記のタンクモデルによる流入量を洪水流解析区間に適切に与えることで、解析水面形の時間変化が観測水面形を説明できるか検討する。また、幾つかの地点で流量観測値が得られていれば、流量ハイドログラフについても比較するが、観測精度は水位に比べて低いため参照する程度とする。

上記の解析結果の検証が十分でない場合は、洪水流への抵抗と洪水ボリュームが主な要因と考えられるため、粗度係数・樹木群透過係数や流出モデルの定数を修正し、それによる解析水面形の時間変化が観測水面形を説明できるかを再度検討する。

以上の試行計算の検討により得られた解析結果は、本・支川の水面形の時間変化、本川や1次支川への流入量ハイドログラフ、本川の流量ハイドログラフの形成等を示す。

2次支川等の小流域のタンクモデル

本・支川の平面二次元洪水流解析法

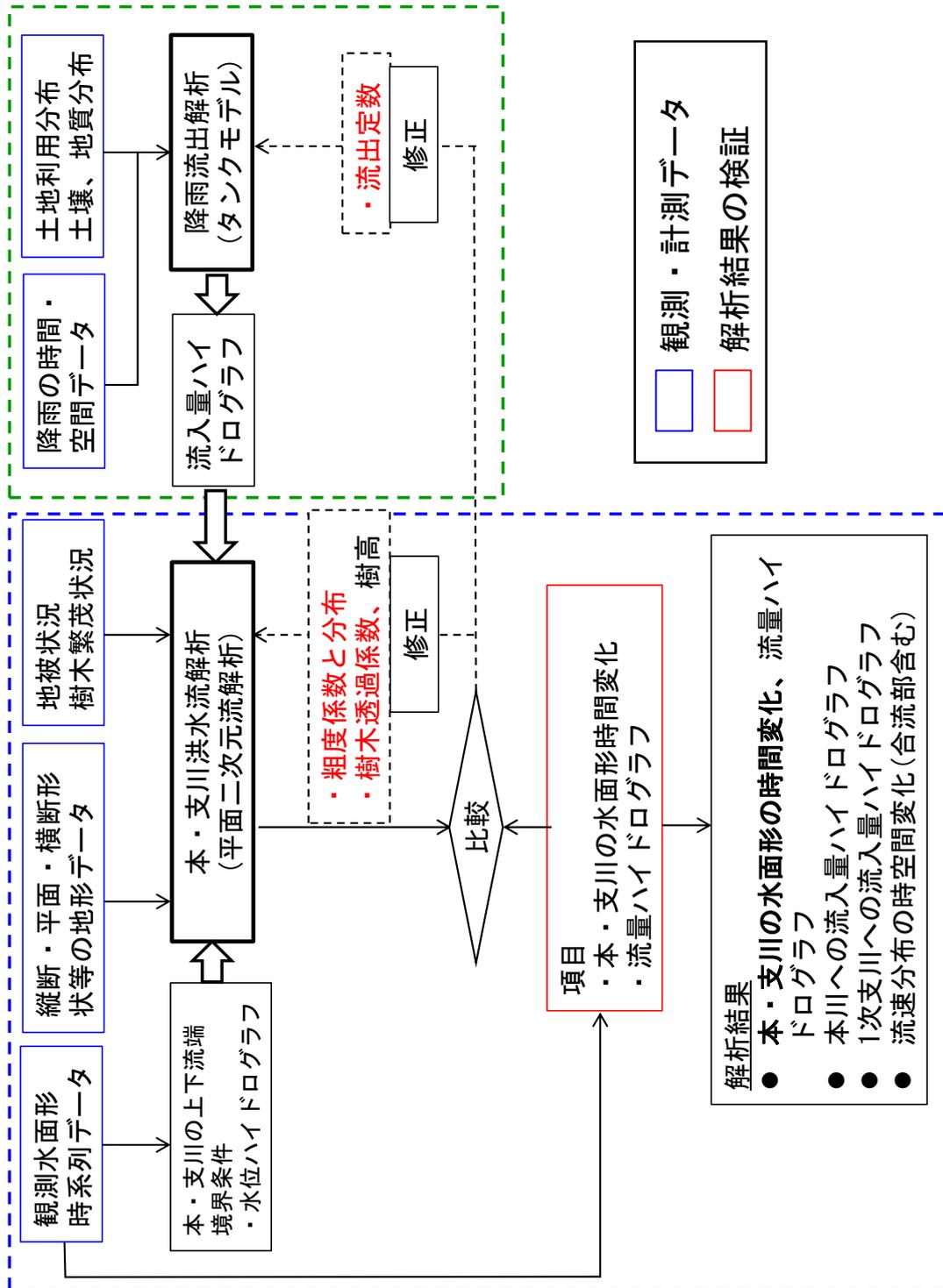


図 5.3.3 流域と本・支川等を一体とした降雨流出・洪水流解析のフロー

(本・支川の河道で測量が整備されており、2次支川以下を小流域とみなして洪水流・降雨流出解析モデルで表現する場合)

5.3.2 本・支川等の洪水流解析法

以下に本川・支川・2次支川を洪水流解析の対象とした場合について示す。

本川，支川，2次支川の洪水流は，平面二次元洪水流解析法³⁾を用いて検討する．平面二次元洪水流解析法の基礎式は，4.2.3に示したとおりである．以下に，上記の解析法を採用した理由を述べる．

本研究で提案する流域と本・支川等を一体とした降雨流出・洪水流解析モデルを流域の河川に適用する場合，主な対象河川や区間は，国管理や都道府県管理の河川区間になる．川幅は，都道府県管理河川上流部の十メートル程度から国管理河川の河口部の数百メートル程度になる．また，河川の縦断形状，横断形状，平面形状，樹木・植生の繁茂状況等は，山地部の上流から低地部の下流まで大きく変化し，洪水流はその影響を受けながら流下する．さらに，2次支川と1次支川の合流部，1次支川と本川の合流部では，渦流など複雑な流れを形成している．したがって，本研究では，上記の本・支川・2次支川の河道の縦横断平面特性及び合流部の複雑な流れを概ね説明できる一般曲線座標系の平面二次元洪水流解析法を採用した．

上記の平面二次元洪水流解析法を対象河川に適用する際には，図5.3.4に示したように，福岡⁵⁾の観測水面形の時間変化を反映した洪水流解析で検討する．本川，支川，2次支川の上流端と下流端に水位ハイドログラフを境界条件とし，平面二次元洪水流解析法を用いた解析を行い，各時間の観測水面形に一致するように粗度係数や樹木透過係数を調整して流れを解き，水位，流速分布の時空間分布や流量を求める．

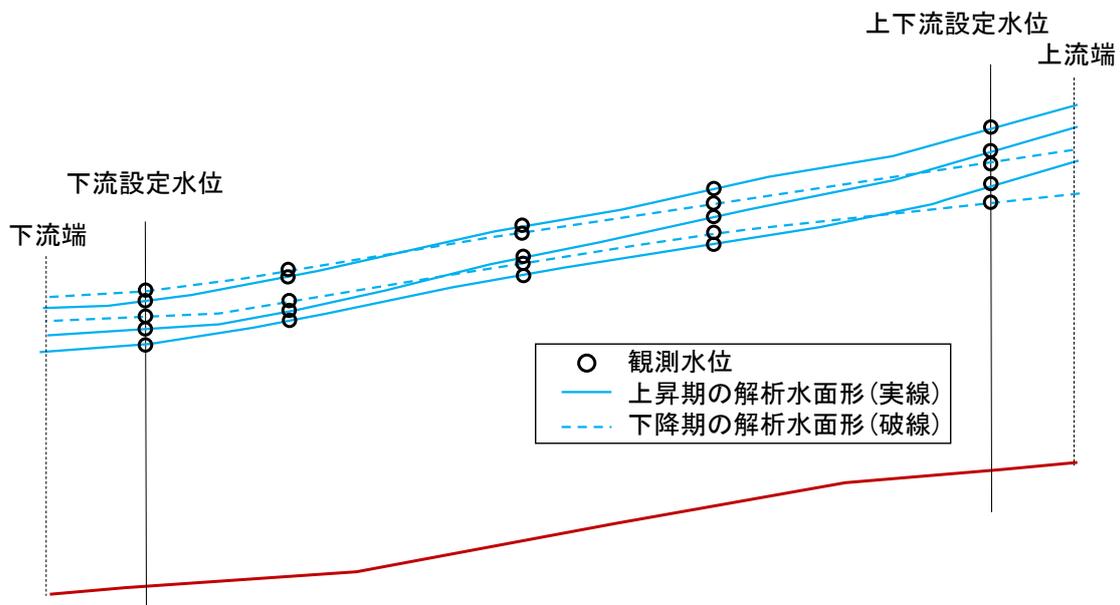


図 5.3.4 観測水面形の時系列データを用いた洪水流解析法

5.3.3 小流域の降雨流出解析法

測量断面が整備されていない低次の支川からの流入量ハイドログラフは、3段タンクモデル⁴⁾を用いて評価する。図5.3.5に3段直列のタンクモデルを示す。基礎式は以下のとおりである。

第一タンクについて

$$\frac{dh_1}{dt} = r(t - TL) - q_{11} - q_{12} - q_{13} - g_1 \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned} q_{11} &= a_{11}(h_1 - z_{11}) && : h_1 > z_{11} \\ &= 0 && h_1 \leq z_{11} \\ q_{12} &= a_{12}(h_1 - z_{12}) && : h_1 > z_{12} \\ &= 0 && h_1 \leq z_{12} \\ q_{13} &= a_{13}(h_1 - z_{12} - z_{13}) && : h_1 > z_{12} + z_{13} \\ &= 0 && h_1 \leq z_{12} + z_{13} \end{aligned} \right\} (5.2)$$

$$g_1 = b_1 \times h_1 \quad (5.3)$$

第二タンクについて

$$\frac{dh_2}{dt} = g_1 - g_2 - q_2 \quad (5.4)$$

$$\left. \begin{aligned} q_2 &= a_2(h_2 - z_2) && : h_2 > z_2 \\ &= 0 && h_2 \leq z_2 \end{aligned} \right\} (5.5)$$

$$g_2 = b_2 \times h_2 \quad (5.6)$$

第三タンクについて

$$\frac{dh_3}{dt} = g_2 - g_3 - q_3 \quad (5.7)$$

$$\left. \begin{aligned} q_3 &= a_3(h_3 - z_3) && : h_3 > z_3 \\ &= 0 && h_3 \leq z_3 \end{aligned} \right\} (5.8)$$

$$g_3 = b_3 \times h_3 \quad (5.9)$$

$$Q(t) = A/3.6 \times \{q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t) + q_2(t) + q_3(t)\} \quad (5.10)$$

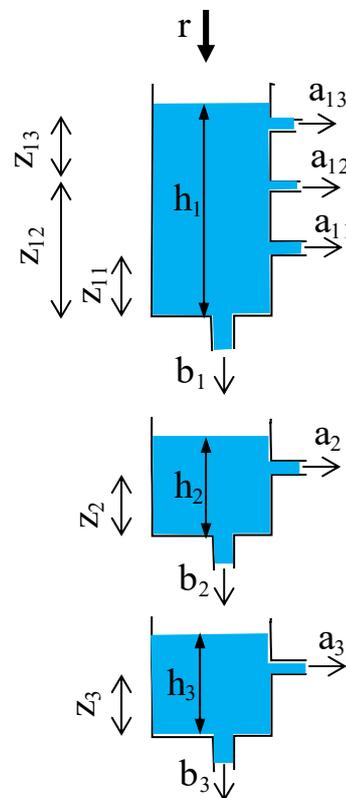


図 5.3.5 3段タンクモデルの説明

ここに、 r :降雨量(mm/hr), TL :流出遅れ時間(hr), h_1, h_2, h_3 :第一, 二, 三タンクの水
深(mm), a_{11}, a_{12}, a_{13} :第一タンクの流出孔の係数(1/hr), b_1 :第一タンクの浸透孔の係
数(1/hr), a_2 :第二タンクの流出孔の係数(1/hr), b_2 :第二タンクの浸透孔の係数(1/hr), a_3 :
第三タンクの流出孔の係数(1/hr), b_3 :第三タンクの浸透孔の係数(1/hr), z :各タンクの流
出孔の高さ(mm), q_{11}, q_{12}, q_{13} :第一タンクの流出高(mm/hr), q_2, q_3 :第二, 三タンクの流
出高(mm/hr), $Q(t)$:流量ハイドログラフ(m^3/s)である。

タンクモデルは、仮定の貯留型タンクを複数個組み合わせることにより、流出機構のモデ
ル化を試みたものである。図5.3.5に示した直列の3段タンクモデルが、一般的に洪水解

析に用いられている。3段タンクモデルでは、第一タンクが表面流や早い中間流の流出成分を、第二タンクが遅い中間流の成分を、第三タンクが地下水流出成分を表現していると考えられている。

タンクモデルの利点は、簡単な構造であるにも関わらず、降雨流出現象の非線形性を上手に表現できることである。これは、対象流域の大きさや流出特性に応じて、モデル定数を変化させることができるためである。このため、精度の高いシミュレーション結果を得るためには、孔の高さや係数であるモデル定数を適切に同定することが重要である。水理公式集⁴⁾で示されている3段タンクモデルの定数の範囲は、図5.3.6に示すとおりである。

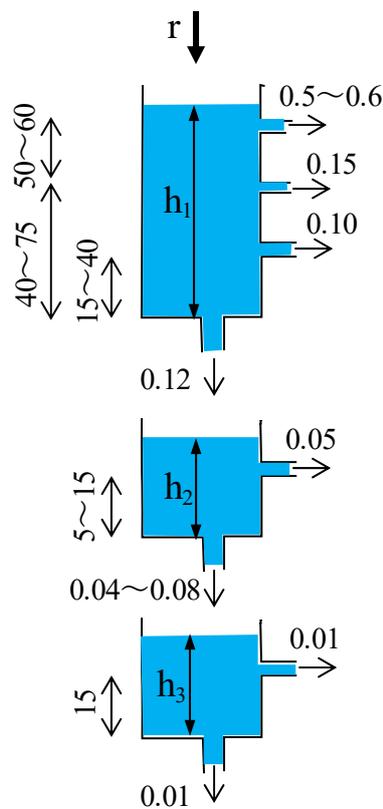


図 5.3.6 3段タンクモデルの定数の例(単位：高さは mm，浸透孔の係数は 1/hr)

5.4 降雨流出・洪水流解析モデルの利根川上流域への適用

5.3 に示した観測水面形に基づく小流域と本・支川を一体とする降雨流出・洪水流解析法を利根川上流域の令和元年台風 19 号洪水に適用する。具体的には、1 次支川である小山川と石田川における 2 次支川から流入量を、観測水面形の時間変化からタンクモデル群のパラメータを同定することで降雨流出解析により評価する。洪水流解析区間を 2 次支川まで反映した広瀬川についても同様の手法を用いて検討を行い、河道の洪水流追跡と小流域からの流出量を一体として推定する本手法の降雨流出・洪水流解析法は一般性が高いことを示す。また、令和元年台風 19 号洪水の利根川本・支川の水面形時間変化、支川流入量、本川の流量ハイドログラフの形成特性について示す。

5.4.1 洪水流解析の条件

本研究では、本・支川・2 次支川を一体化し、観測流量や水位流量関係式に依存しない特徴を持つ観測水面形時系列に基づいた一般座標系平面二次元洪水流解析法⁴⁾が採用されている。

表 5.4.1 に本川、支川、2 次支川の対象河川と洪水流解析区間を示す。表 5.4.1 と表 5.2.2 の 2 次支川を比較すると、小山川、石田川に関する 2 次支川が洪水流解析区間に考慮されていないことがわかる。小山川、石田川に関する 2 次支川を洪水流解析に反映していない理由は、2 次支川の測量断面が整備されていない、または LP 測量による横断形状であり、水面下の河床形状が表現できず、洪水流解析による水面形の算定精度が低下するためである。

解析メッシュは、利根川本川の低水路で横断方向に 20～30m、支川群は上流端で横断方向に 3～5m、本川と支川の合流点は 10m 程度に細分化することで、堤防や低水路河岸の線形、合流点形状を可能な限り再現している。地形形状の作成には H23～H30 の測量データを用いた。解析モデルの地盤高コンターを図 5.4.1 に示す。

本・支川の上下流端の境界条件は、図 5.4.1 に示した解析区間内の最上流に位置する観測所水位ハイドログラフに解析水位が合致するように、上流端で水位を与えた。利根川の下流端には、133.0km の観測水位ハイドログラフを与えた。小山川、石田川の 2 次支川、広瀬川の 3 次支川等については、後述するようにタンクモデルを用いて流入量を与えた。

河道の粗度係数は、国・県管理河川の河道計画で設定されている値を基本とし、低水路で 0.022～0.034、高水敷で 0.025～0.050 を与えた。本解析では水位の変化による粗度係数の時間変化は考えていない。利根川本川では、低水路と高水敷の境界で樹木が密に繁茂している箇所があるため、樹木群透過係数 27m/s^6 を与え、樹木群が流れに及ぼす抵抗を考慮した。橋脚の抵抗は、局所的であり縦断水面形に対しての影響が小さいため考慮していない。

表 5.4.1 本川，支川，2次支川の洪水流解析区間

本川	支川	2次支川	解析区間	利根川の合流点	管理者
利根川			192.0 km～133.0km	—	186.5km上流:群馬県 186.5km下流:国
	烏川		6.2 km～本川合流点	184.0km	国
		神流川	1.2 km～烏川合流点	—	国
	広瀬川 (桃ノ木川を含む)		27.6km～本川合流点	175.5km	群馬県
		粕川	13.6km～広瀬川合流点	—	群馬県
		荒砥川	3.4km～広瀬川合流点	—	群馬県
		赤城白川	5.4km～広瀬川合流点	—	群馬県
	早川		3.6km～本川合流点	168.7km	群馬県
	石田川		9.4km～本川合流点	164.8km	群馬県
	小山川		14.0km～本川合流点	168.5km	埼玉県
福川		16.0km～本川合流点	156.7km	埼玉県	

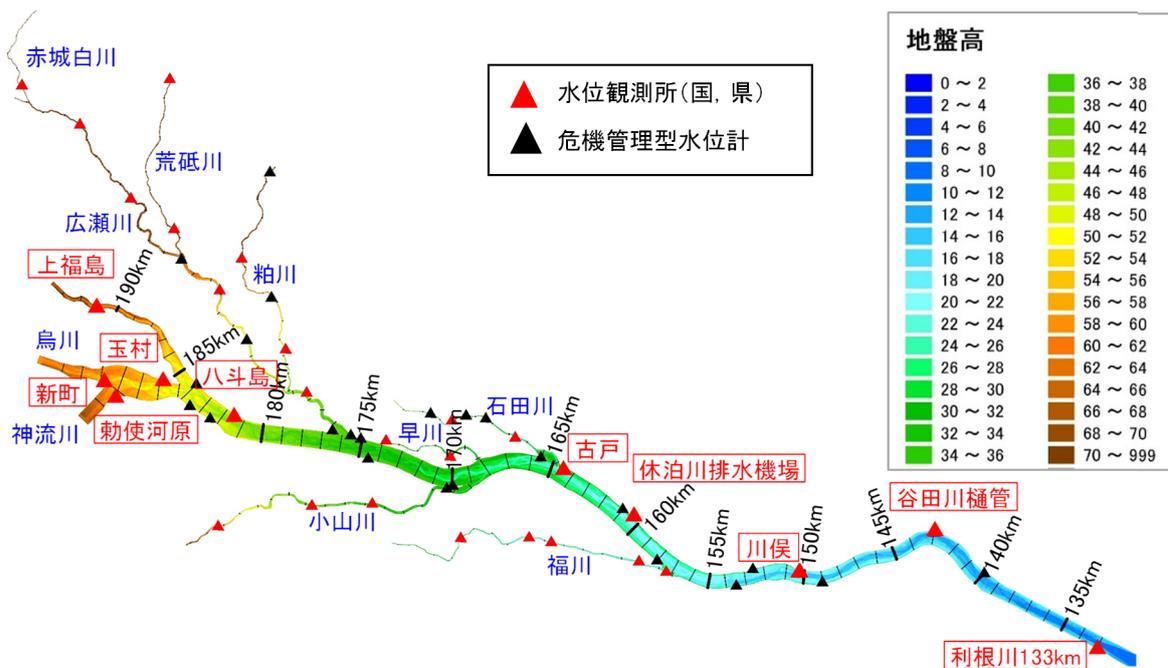


図 5.4.1 利根川本川，支川，2次支川の洪水流解析区間と水位観測位置

5.4.2 小山川、石田川等における2次支川の流入量算定法

図5.4.2に小山川の流域図を示す。これより、2次支川の集水特性を見ることができる。これは、後述する石田川も同様である。このような河川に施設能力以上の外力が生じると、流下能力の低い2次支川から越水や氾濫が生じやすい⁷⁾。したがって、本・支川への適切な流入量や氾濫リスクを評価するためには、2次支川くらいまでを解析対象とすることが望ましい。今後の流域治水を検討する上で、2次支川まで設置された観測水位データと測量データを基に本川・1次支川・2次支川の洪水流を一体的に解き、それらの観測水面形の時間変化を説明できる流出解析結果から洪水現象を評価する。

本検討では、上記の考えに従い、小山川と石田川の2次支川の流入量を算定することを試みたが、先に述べたように河道の測量データや精度が十分でなかったため、2次支川から1次支川への流入量を、2次支川流域の降雨流出量が1次支川に流入する考えの下に、降雨流出解析により推定することにした。なお、上記のような2次支川からの流入量は、合流先の支川水位と2次支川の水位との関係で定まるものである。しかし、本研究で対象とする2次支川の合流部の勾配は比較的大きいため、2次支川で作られる水面形により支川への流入量が決まるため、支川水位との2次支川水位との関係を用いない降雨流出解析法で説明できる。したがって、低平地を流れる本・支川・2次支川群については、一体とした洪水流解析を実施し、水面形、支川流入量、本川流量形成を検討する必要がある。

また、広瀬川についても、主要な2次支川を洪水流解析区間としているが、一部の2次支川や3次支川についてはそれらの流入量を対象としていないため、上記と同様の検討を行う。なお、その他の支川である早川と福川に関しては、検討区間に県管理の2次支川は存在しないため、1本河道として扱う。



図5.4.2 小山川に流入する2次支川と小流域分割

(1) 小山川

図 5.4.3 の令和元年台風 19 号の 3 日間累加雨量が示すように、小山川上流域とその支川の女堀川の上流域及び志戸川の上流域で降った大雨により、小山川の水位が上昇している。

先に述べたように、2 次支川から 1 次支川への流入量の評価は、2 次支川流域の降雨流出量が 1 次支川に流入するとして降雨流出解析法を用いて推定する。2 次支川の流域分割は、図 5.4.2 に示したとおりである。図 5.4.4 は、小山川の洪水流解析区間と 2 次支川を小流域として降雨流出解析により流入量を算定する模式図を示している。平面二次元流解析では、栗崎の水位を上流端境界条件とし、内ヶ島水位を下流端境界条件とした。2 次支川から小山川への流入量は、図 5.4.5 に示す 3 段タンクモデル³⁾を構築し、降雨流出解析により算出した。タンクモデルの定数は、上記の洪水流解析による水位が砂田橋の観測水位ハイドログラフに合致するように、水理公式集に示された定数の範囲³⁾に概ね収まるように、主に直接流出成分である 1 段タンクのもの进行调整し同定した。この際、図 5.4.4 に示した 2 次支川流域群のタンク定数は、解析区間に水位計が 1 箇所しかないため同じ値とした。

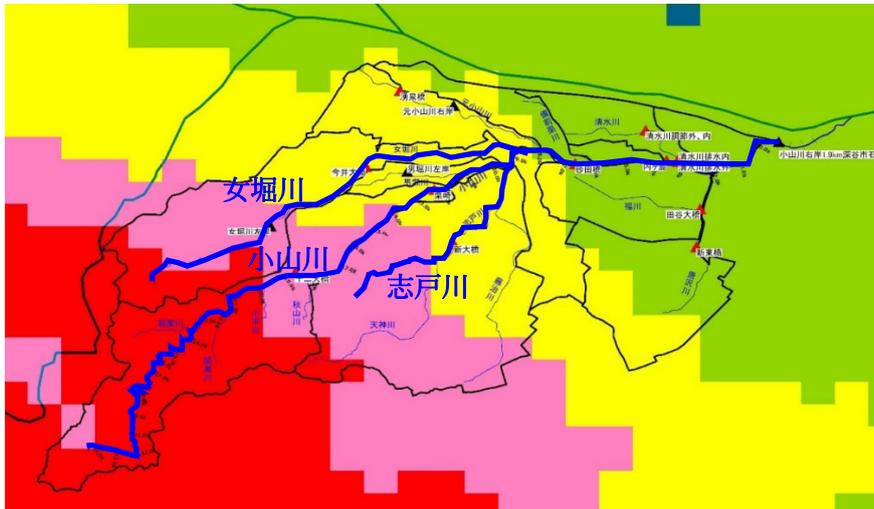


図 5.4.3 小山川流域の令和元年台風 19 号の 3 日間雨量 (10/11 1 時～10/14 0 時)

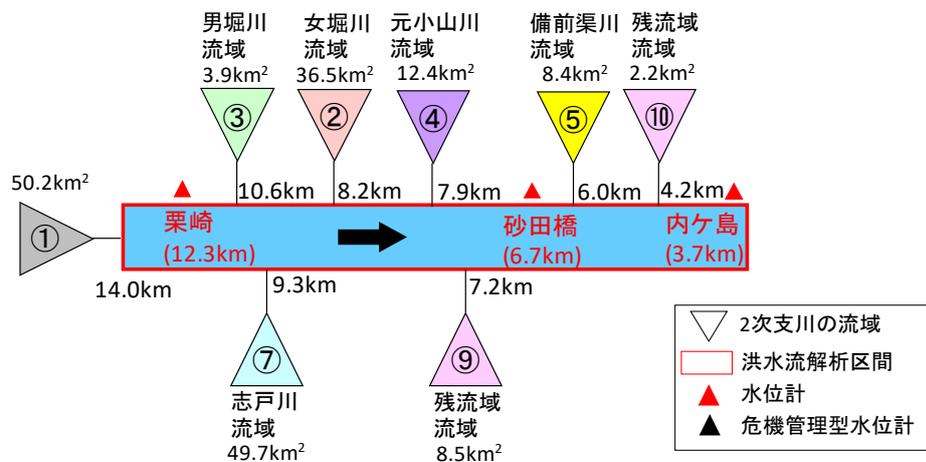


図 5.4.4 小山川の降雨流出・洪水流解析モデル

表 5.4.2 は、上記の方法より同定したタンクモデル定数である。図 5.4.6 には、表 5.4.2 に示したタンクモデル定数を用いて降雨流出解析により得られた 2 次支川から小山川への流入量ハイドログラフを示している。この結果より、女堀川と志戸川の 2 次支川流量は、図 5.4.3 に示した上流域での大雨によりそれぞれ $260\text{m}^3/\text{s}$ 、 $360\text{m}^3/\text{s}$ であり、他の 2 次支川の流量に比べて大きいことがわかる。

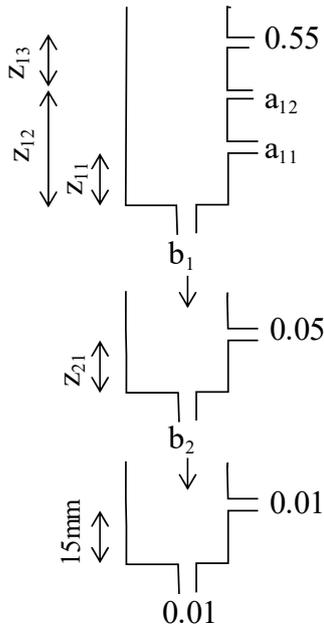


表 5.4.2 同定されたタンクモデルの定数

流域名	流域番号	a_{11} (1/h)	a_{12} (1/h)	z_{11} (mm)	z_{12} (mm)	z_{13} (mm)	b_1 (1/h)	z_{21} (mm)	b_2 (1/h)	t_l (hr)
小山川	①	0.10	0.15	40.0	57.5	55.0	0.12	5.0	0.04	0.5
	②									0.5
	③									0.0
	④									0.0
	⑤									0.0
	⑥	0.10	0.15	40.0	57.5	55.0	0.12	15.0	0.08	0.0
	⑦									0.5
	⑧									0.25
	⑨									0.0
	⑩									0.0
	⑪									0.0
石田川	①	0.10	0.15	15.0	75.0	55.0	0.12	15.0	0.08	1.5
	②	0.04	0.06	15.0	75.0	55.0	0.15	15.0	0.08	2.0
	③									0.0
	④									0.0
	⑤									1.5
	⑥	0.10	0.15	27.5	57.5	55.0	0.12	10.0	0.06	0.0
	⑦									0.0
	⑧									0.0

図 5.4.5 3 段タンクモデルの説明

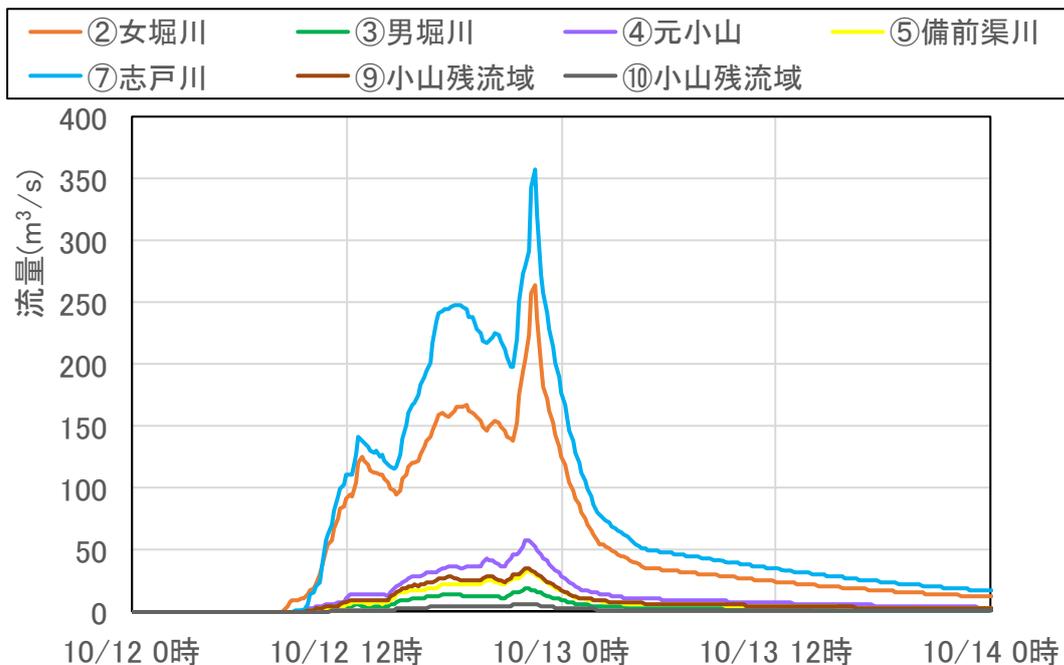


図 5.4.6 小山川の観測水面形を説明するタンクモデルによる 2 次支川の流量ハイドログラフ

図 5.4.7 は、図 5.4.6 に示した 2 次支川流入量を洪水流解析に考慮した小山川の解析水面形と観測水面形の時間変化を比較して示している。また、図 5.4.8 に砂田橋の観測水位と解析水位ハイドログラフの比較を砂田橋の測量断面に対して示す。図 5.4.7 と図 5.4.8 より、解析水面形の時系列結果は観測水面に概ね一致していることが確認される。図 5.4.9 には、2 次支川が小山川に流入する上下流の通過流量を比較している。これより、2 次支川合流前の栗崎地点のピーク流量は $386\text{m}^3/\text{s}$ 、2 次支川合流後の砂田橋は $1,048\text{m}^3/\text{s}$ であり、小山川の流量形成に対して、2 次支川流域からの流入量の影響が大きいことが確認される。

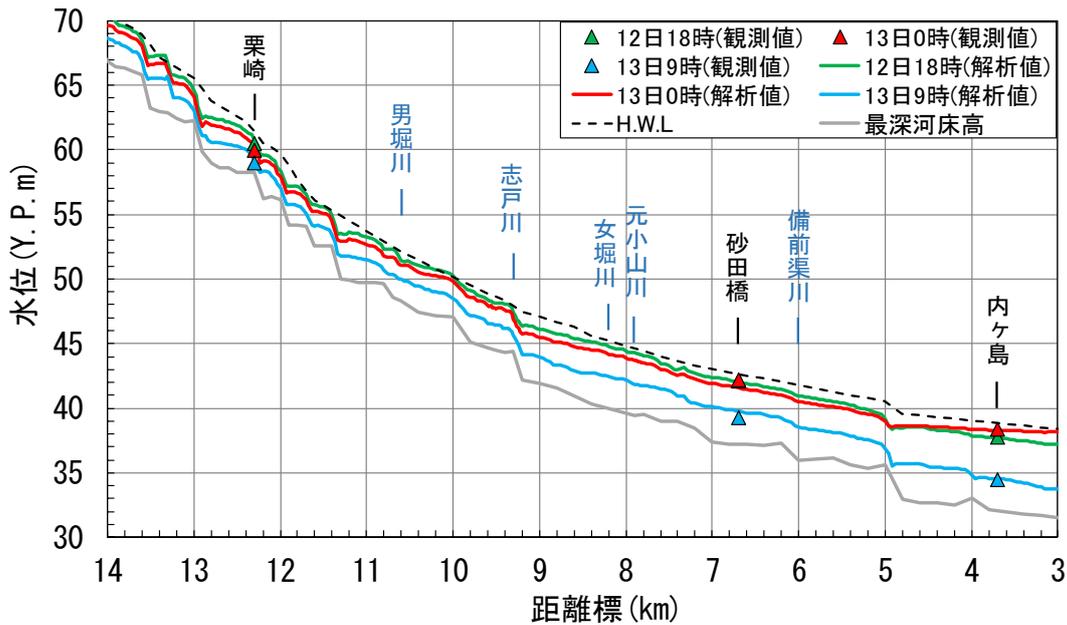


図 5.4.7 小山川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

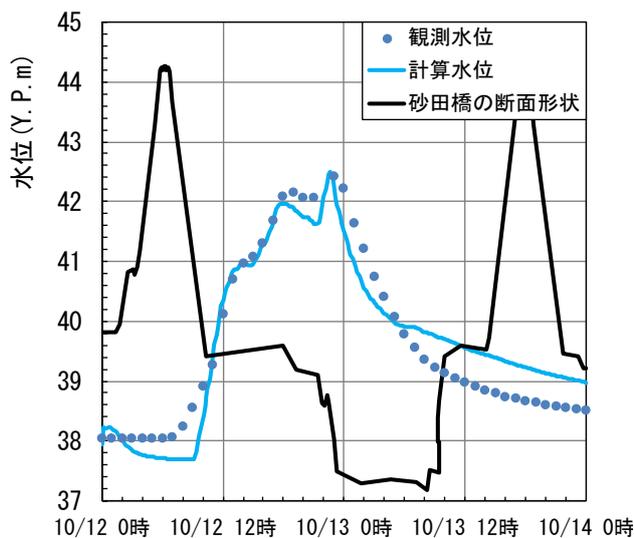


図 5.4.8 砂田橋の観測水位と解析水位のハイドログラフ

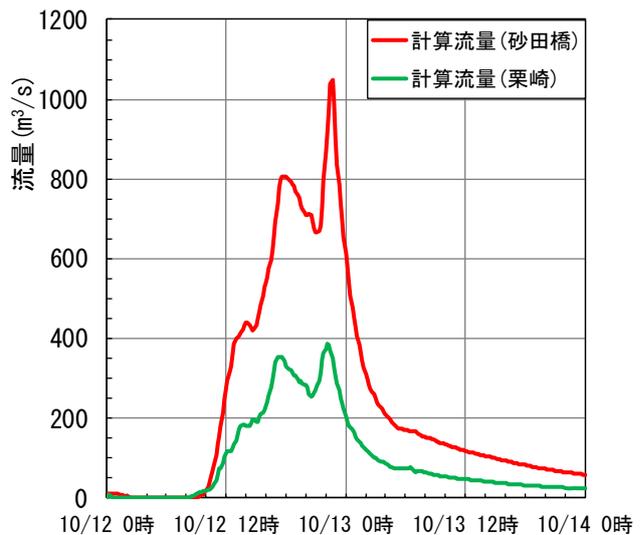


図 5.4.9 栗崎と砂田橋の解析流量ハイドログラフ(2次支川の流入前後)

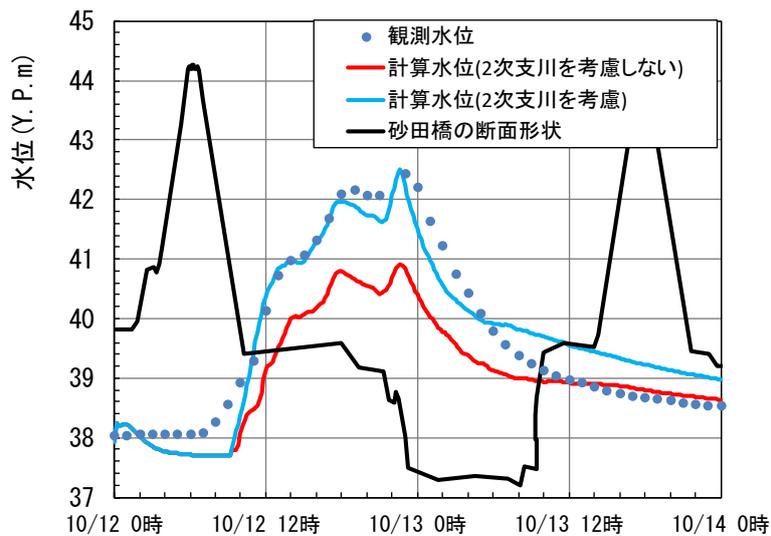


図 5. 4. 10 2 次支川流入量の考慮有無による砂田橋の水位ハイドログラフ

小山川の洪水解析に対して、2 次支川まで反映することの重要性を説明する。図 5. 4. 10 は、小山川への 2 次支川流入量を考慮した場合、しない場合を条件とした洪水解析を実施した砂田橋の水位ハイドログラフを比較している。これより、2 次支川を考慮しない砂田橋の水位ハイドログラフは実測水位に対して 1m 程度低く、洪水ボリュームが少ないことがわかる。以上より、小山川のような 2 次支川の集水特性がみられる流域では、洪水ボリュームに影響する支川群まで解析対象として検討することが、洪水現象の理解する上で重要である。

(2) 石田川

次に、群馬県管理の石田川に流入する 2 次支川の流量の解析法を示す。図 5. 4. 11 は、石田川に流入する 2 次支川とそれを基本に分割した小流域を示している。また、図 5. 4. 12 は洪水解析区間と 2 次支川を小流域として降雨流出解析により石田川への流入量を算定する分割図を示している。石田川下流区間は利根川の背水の影響を受ける。このため、解析では、本川の洪水解析区間を石田川合流点直下流の古戸観測所までとし、それに合流する石田川の洪水流を一体的に扱い、2 次支川からの流入量をタンクモデルにより与える降雨流出・洪水解析モデルで表現した。石田川の上流端境界条件は下田島の観測水位に合うように与え、本川下流端条件は古戸の観測水位を与えた。タンクモデルによる流入量は、図 5. 4. 12 に示した観測所水位計と危機管理型水位計によ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小山川と同様の方法で算出した。

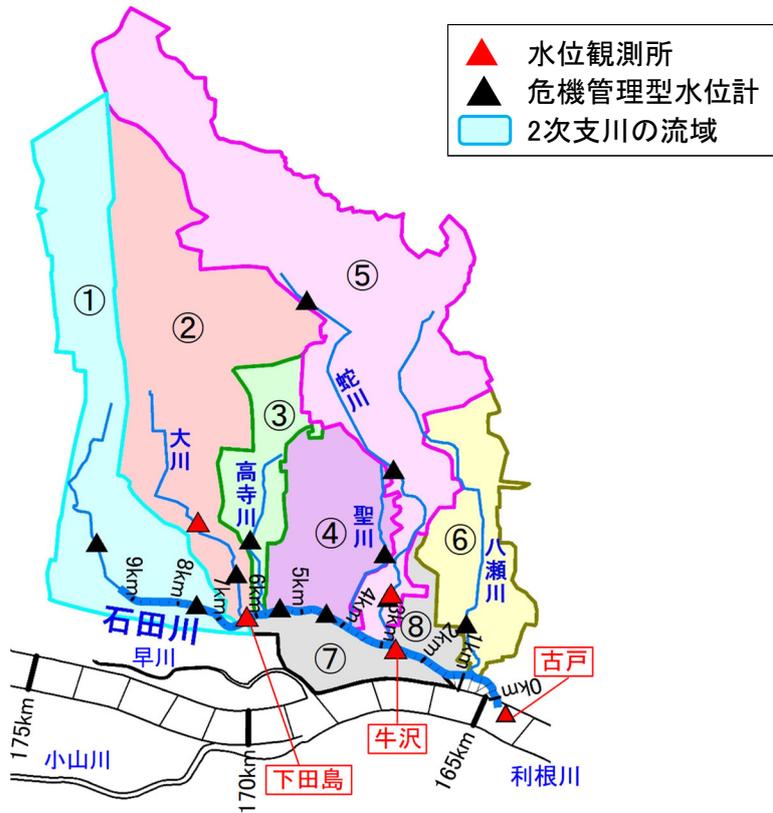


図 5.4.11 石田川に流入する 2 次支川と小流域分割

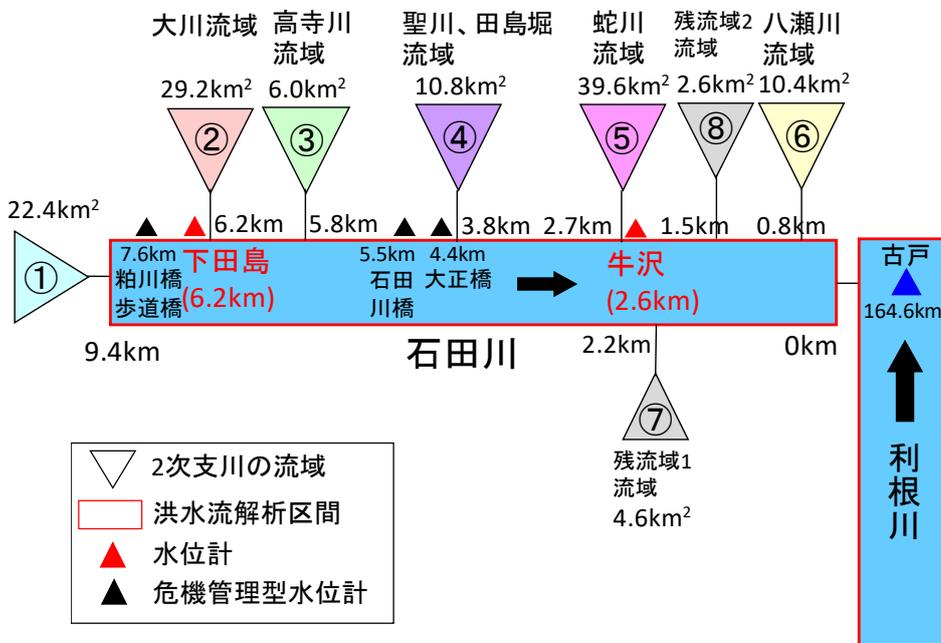


図 5.4.12 石田川の降雨流出・洪水解析モデル

同定されたタンクモデルの定数は表 5.4.2 に示す。図 5.4.13 には、表 5.4.2 に示したタンクモデル定数を用いて降雨流出解析により得られた 2 次支川から石田川への流入量ハイドログラフを示している。図 5.4.13 の 2 次支川からの流入量の結果は、図 5.2.3 に示したように石田川流域内の総雨量分布がほぼ一様なため、集水面積の大きな蛇川(39.6km²)と大川(29.2km²)でピーク流量が大きいことを示している。

上記の 2 次支川の流入量を考慮して洪水流解析により得られた石田川の解析水面形の時間変化と観測水面形の比較を図 5.4.14 に示す。

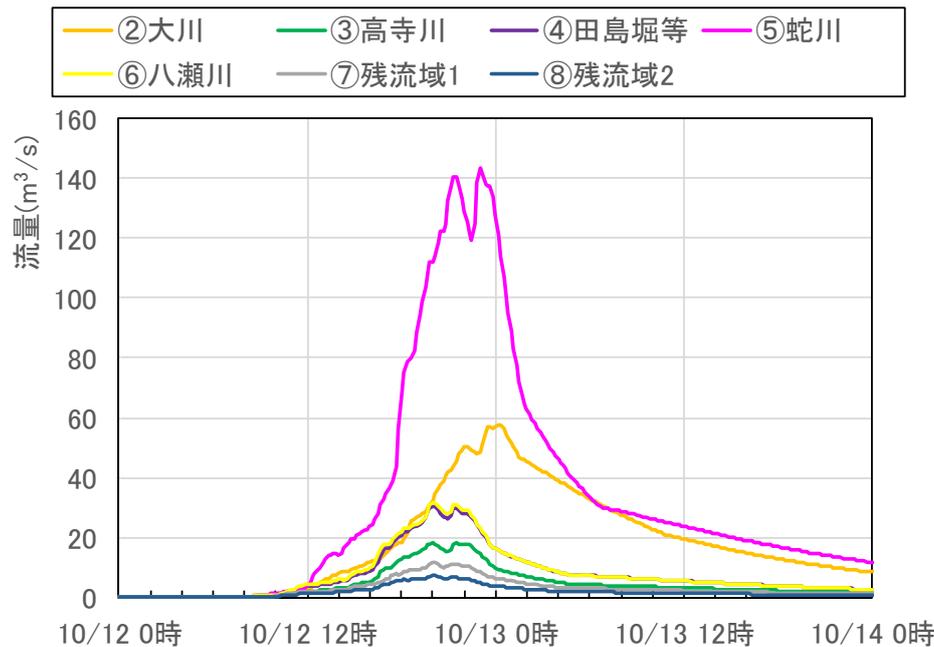


図 5.4.13 石田川の観測水面形を説明するタンクモデルによる 2 次支川の流量ハイドログラフ

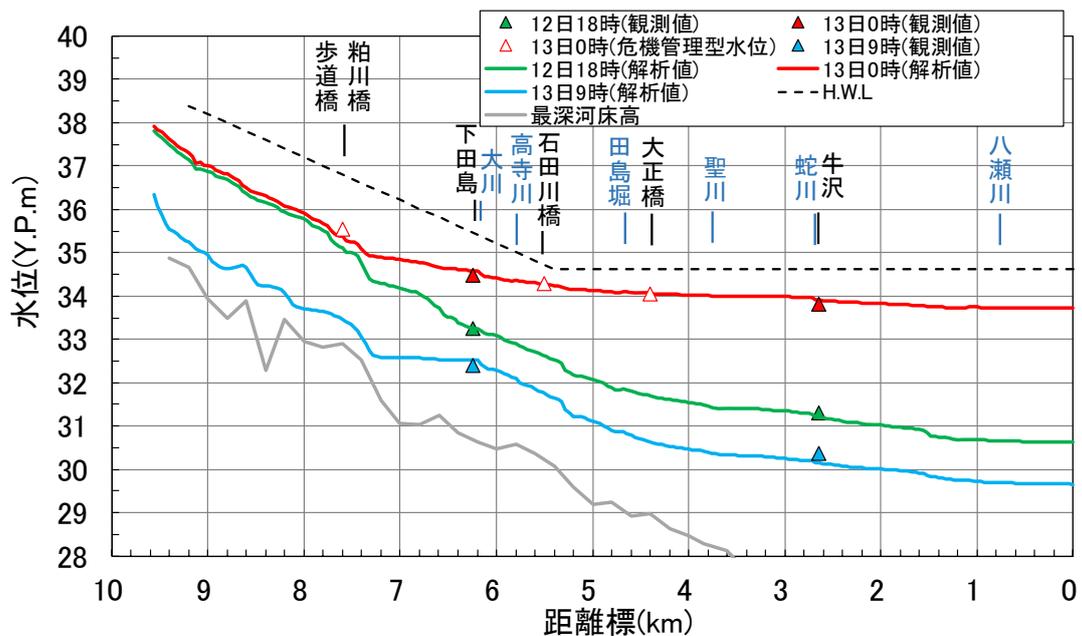


図 5.4.14 石田川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

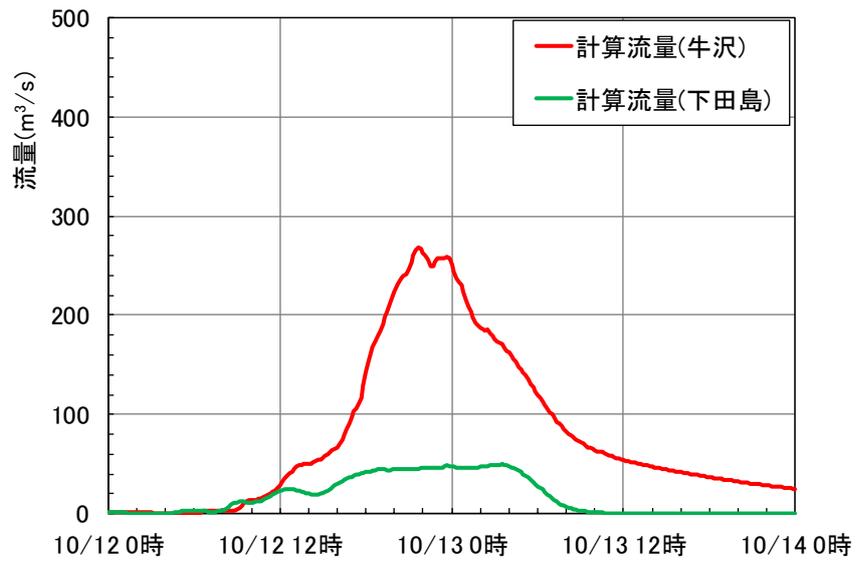


図 5.4.15 下田島と牛沢の解析流量ハイドログラフ(2次支川の流入前後)

図 5.4.14 より、石田川の解析水面形の時間変化は観測水面に概ね一致していることが確認される。図 5.4.15 には、2次支川が石田川に流入する上下流観測所の通過流量を比較している。図 5.4.15 より、大川や蛇川等の2次支川合流後の牛沢地点のピーク流量(268m³/s)は、2次支川合流前の下田島地点の流量(50m³/s)に比べて約 220m³/s 増大しており、2次支川の影響が大きいことが確認できる。

(3) 広瀬川

最後に、群馬県管理の広瀬川に流入する2次支川の降雨流出・洪水流解析法を示す。広瀬川と主要な2次支川である桃ノ木川、荒砥川、粕川、赤城白川は測量断面が整備されていたため、これらの1次支川と2次支川を洪水流解析の対象とした。図5.4.16は、1次支川である広瀬川と2次支川の洪水流解析区間、及び2次・3次支川等を基本に分割した小流域を示している。なお、洪水流解析区間に水位計が設置されている場合には、観測所上流域で流域を分割した。表5.4.3は小流域分割された集水面積を示している。図5.4.17は上述した洪水流解析区間と小流域に対して降雨流出解析により流入量を算定する分割図を示している。

先に示した小山川と石田川の2次支川からの流入量の検討結果より、広瀬川を除く支川流域の降雨流出量が評価された。このため、図5.4.16と図5.4.17には利根川合流点付近までしか示していないが、検討では利根川とそれに流入する烏川、広瀬川、小山川、石田川、早川、福川の支川群及び主要な2次支川の桃ノ木川、荒砥川、粕川、赤城白川を一体とする図5.4.1に示した全区間の洪水流解析を行う。この際、広瀬川流域については、残りの2次支川である大川、葦川、また3次支川等は流域としてモデル化してこれまでと同様にタンクモデルにより河川への流入量を算出する。

洪水流解析における本川、支川、2次支川の上下流端の境界条件は、図5.4.1に示した解析区間内の最上流に位置する観測所水位ハイドログラフに解析水位が合致するように、上流端で水位を与えた。利根川の下流端には、133.0kmの観測水位ハイドログラフを与えた。

図5.4.16に示した広瀬川の小流域からのタンクモデルによる流入量は、図5.4.17に示した観測所水位計と危機管理型水位計によ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推定した。

タンクモデルは、気象庁の解析雨量を入力条件として、小山川と石田川の2次支川流域に対して採用した3段タンクモデルを当初採用し検討した。しかし、解析流量ハイドログラフのボリュームが大きく、1次支川である広瀬川と2次支川の観測水面形を説明できなかった。この原因を流域の土地利用と土壌特性から考察することで、タンクモデルの改良を図ることとした。



表 5.4.3 小流域分割の面積

流域番号	小流域名	流域面積 (km ²)
①	広瀬川上流	30.13
②	赤城白川	18.47
③	滝の口川	11.82
④	藤沢川	20.30
⑤	寺沢川	12.83
⑥	荒砥川	55.84
⑦	神沢川	24.07
⑧	粕川	80.18
⑨	男井戸川	5.25
⑩	粕川残流域	9.69
⑪	桃ノ木残流域1	7.45
⑫	桃ノ木残流域2	11.29
⑬	広瀬残1	11.04
⑭	広瀬残2	14.70
⑮	大川	13.66
⑯	葦川	22.32
合計	全流域	349.01

図 5.4.16 広瀬川に流入する2次支川と小流域分割

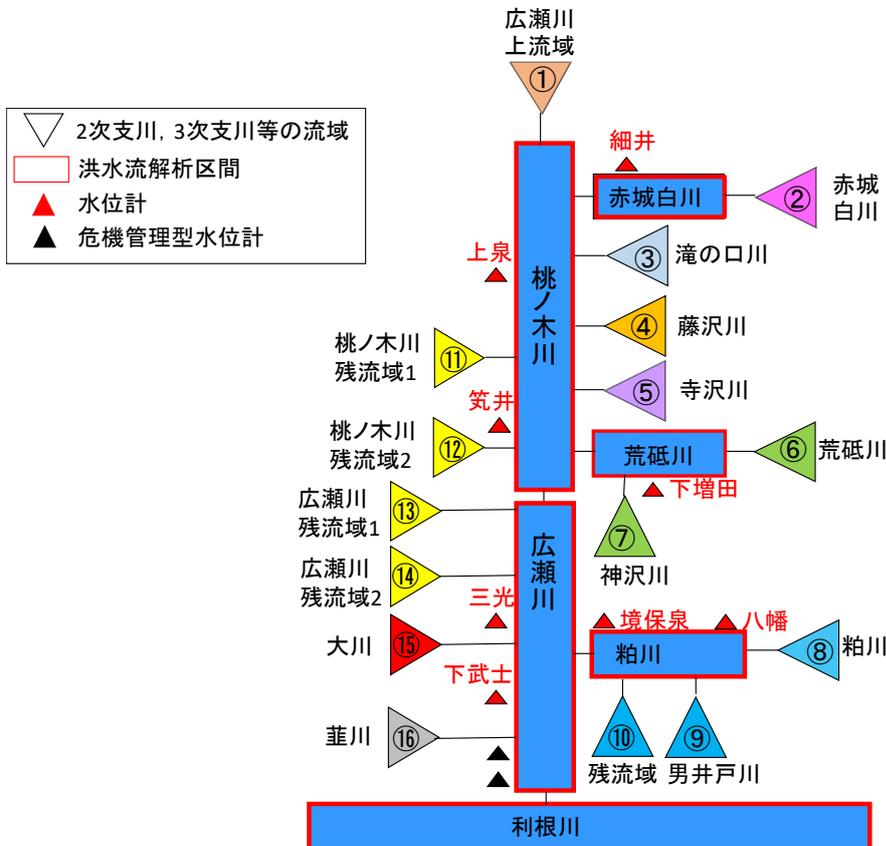


図 5.4.17 石田川の降雨流出・洪水解析モデル

図 5. 4. 18 は国土地理院の国土数値情報土地利用 100m メッシュデータ (H28) を, 図 5. 4. 19 は国土地理院の土地分類 1km メッシュデータ (基準年 : S54) の土壌分類を示している. 図 5. 4. 18 の土地利用と図 5. 4. 19 の土壌分類より, 広瀬川の上流域は森林であり, 赤城山の火山噴火に伴い堆積したロームの上に浸透性の高い黒ボク土壌が分布している. このような地域に降った雨は, 土壌に鉛直浸透して時間をかけて河川へ流れると考えられる. 一方, 早川, 石田川流域の土壌特性をみると, 粗粒淡色の黒ボク土壌が分布しているが赤城山からの距離は離れており, 土地利用形態も水田と宅地が広く分布しているため, 土中への浸透性は広瀬川流域に比べて小さいと考えられる. 以上より, 広瀬川流域の降雨流出特性は, 土壌内を側方浸透する中間流出成分は小さく, 地下への浸透性が高いと考えられる.

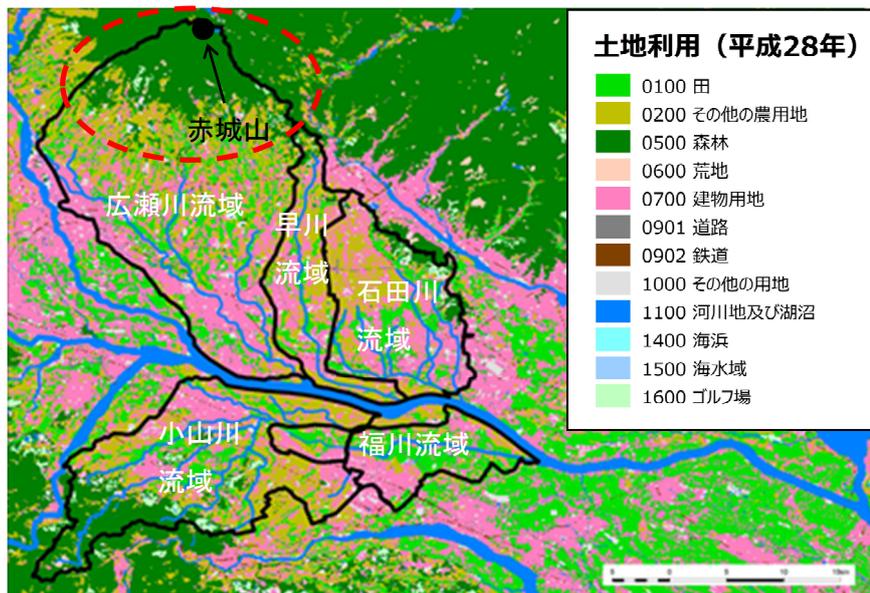


図 5. 4. 18 対象支川流域の土地利用特性

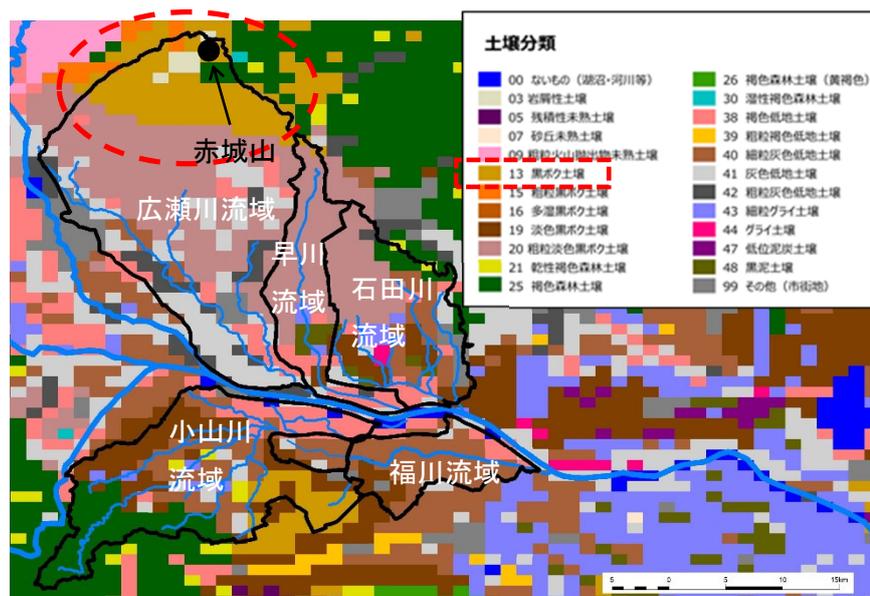
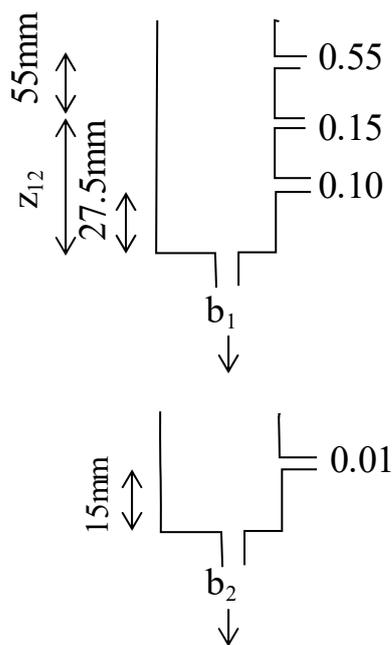


図 5. 4. 19 対象支川流域の土壌特性

上記の考えに基づき、広瀬川流域の降雨流出現象は、3段タンクモデルから、直接流出成分と地下水流出成分の2段で表現するタンクモデルに変更し解析した。図5.4.20には、広瀬川流域で用いる2段タンクを示している。図中の数値は、水理公式集で示された定数の標準値または平均値である。定数同定では、浸透量を示す b_1 、 b_2 とピーク流量に影響する1段タンクの2つ目の流出孔の高さ z_{12} を調整することで流入量を推定した。表5.4.20は、観測水面形を説明する小流域の2段タンクモデルの同定定数を示す。

図5.4.21に降雨流出・洪水流一体解析により得られた広瀬川の観測水面形と解析水面形の時間変化を示す。図5.4.22から図5.4.28に、2次支川である桃ノ木川、荒砥川、粕川、赤城白川の観測水面形と解析水面形の時間変化を示す。これらの結果より、広瀬川と2次支川の解析水面形は観測水面形に概ね合致している。広瀬川とそれらの2次支川の水位ピークは12日22時から23時であり、図5.4.22から図5.4.28に示した12日22時の解析水面形と左右岸堤防高の関係を見ると、堤防の一部低い箇所を除き3m程度の余裕があることがわかる。

表 5.4.20 同定されたタンクモデルの定数



流域番号	z_{12} (mm)	b_1 (1/h)	b_2 (1/h)	t_l (hr)
①	40.0	0.25	0.03	0.0
②	40.0	0.25	0.03	0.0
③	40.0	0.25	0.03	0.0
④	40.0	0.30	0.03	0.0
⑤	40.0	0.30	0.03	0.0
⑥	57.5	0.12	0.01	0.0
⑦	57.5	0.12	0.01	0.0
⑧	50.0	0.30	0.06	0.0
⑨	50.0	0.30	0.06	0.0
⑩	50.0	0.30	0.06	0.0
⑪	40.0	0.30	0.03	0.0
⑫	40.0	0.30	0.03	0.0
⑬	57.5	0.12	0.01	0.0
⑭	57.5	0.12	0.01	0.0
⑮	57.5	0.12	0.01	0.0
⑯	50.0	0.30	0.06	0.0

図 5.4.20 広瀬川流域に適用する2段タンクモデル

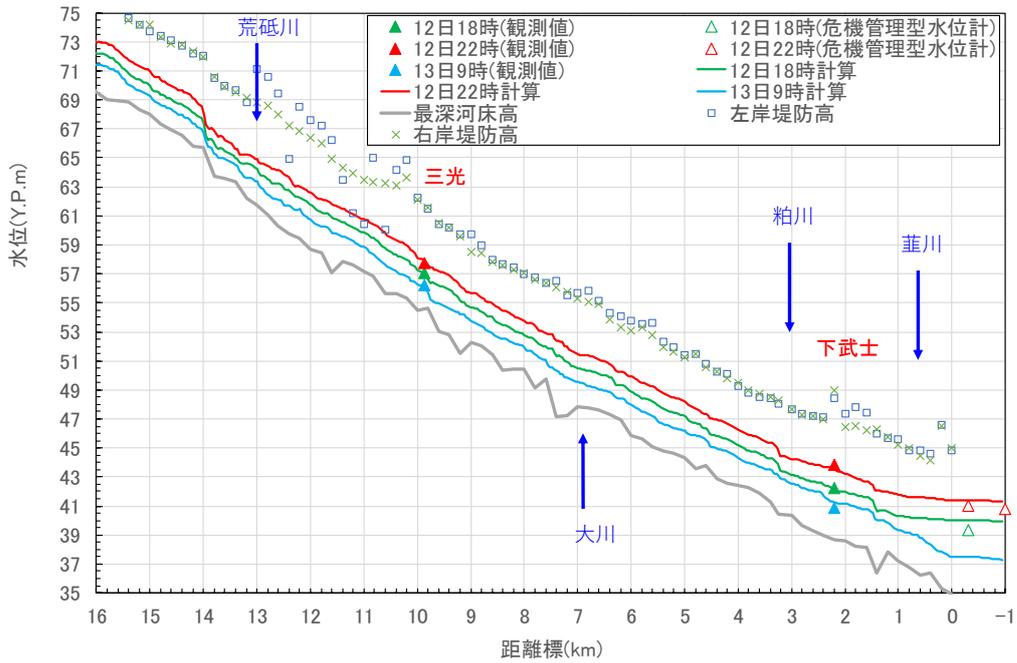


図 5. 4. 21 広瀬川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

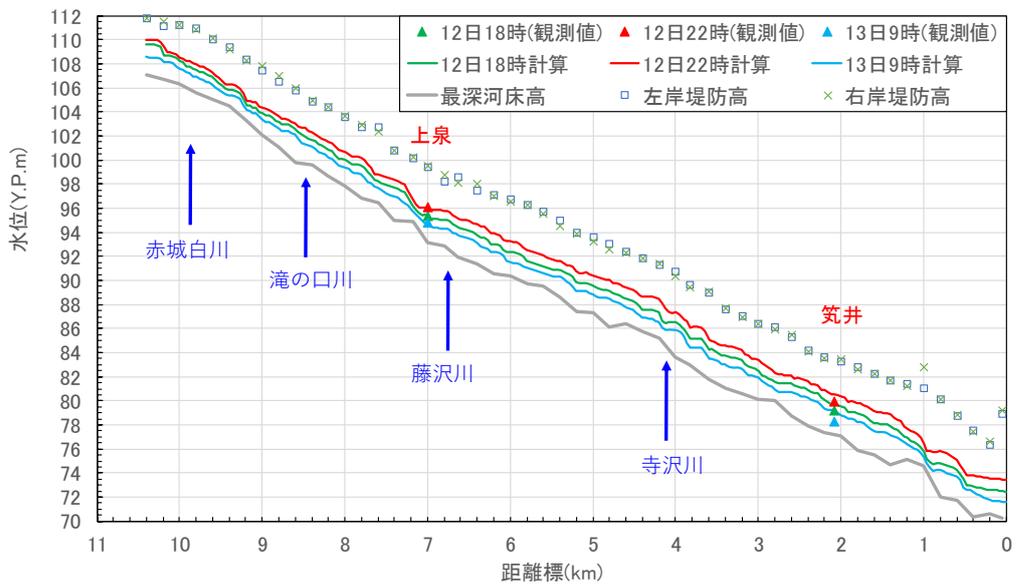


図 5. 4. 22 2次支川の桃ノ木川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

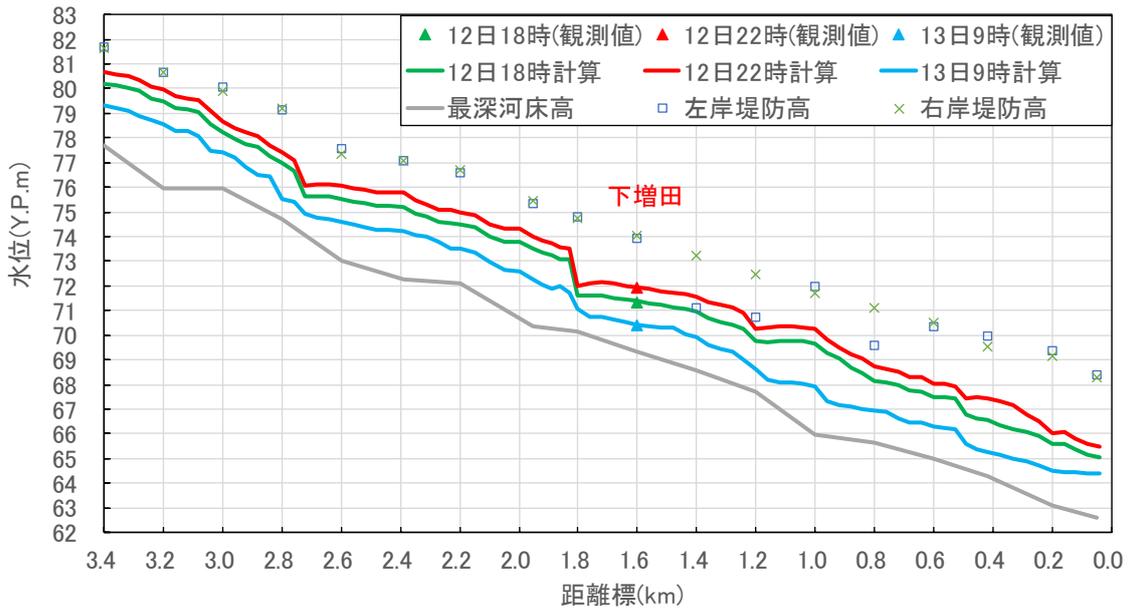


図 5. 4. 23 2 次支川の荒砥川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

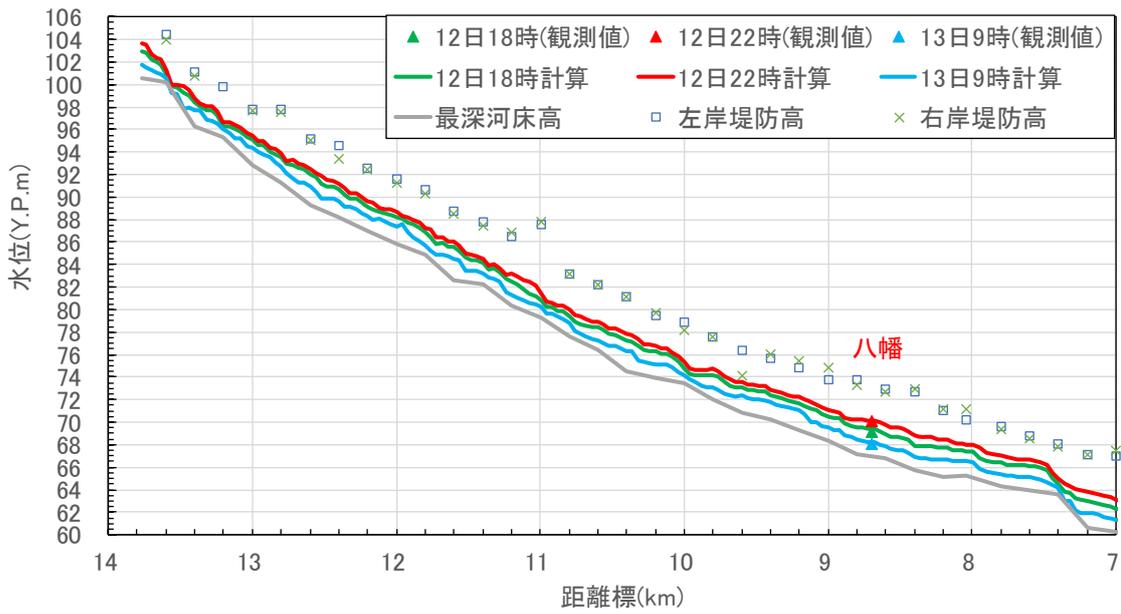


図 5. 4. 24 2 次支川の荒砥川(13. 6km~7. 0km)における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

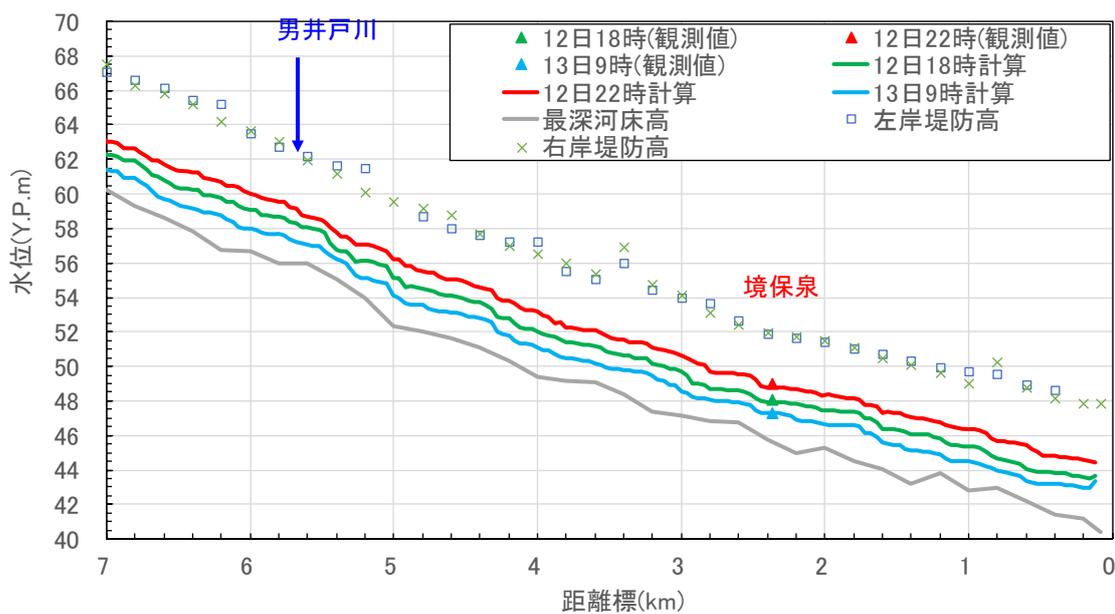


図 5. 4. 25 2 次支川の荒砥川 (7. 0km～広瀬川合流点) における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

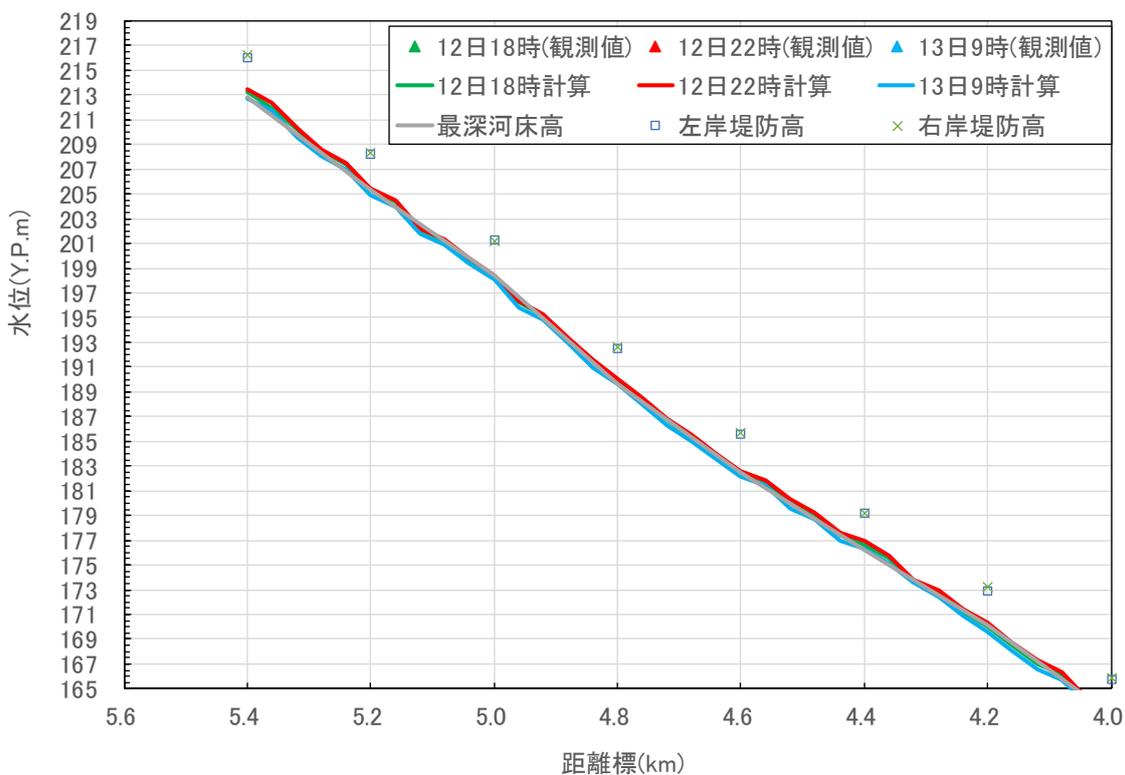


図 5. 4. 26 2 次支川の赤城白川 (5. 4km～4. 0km) における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

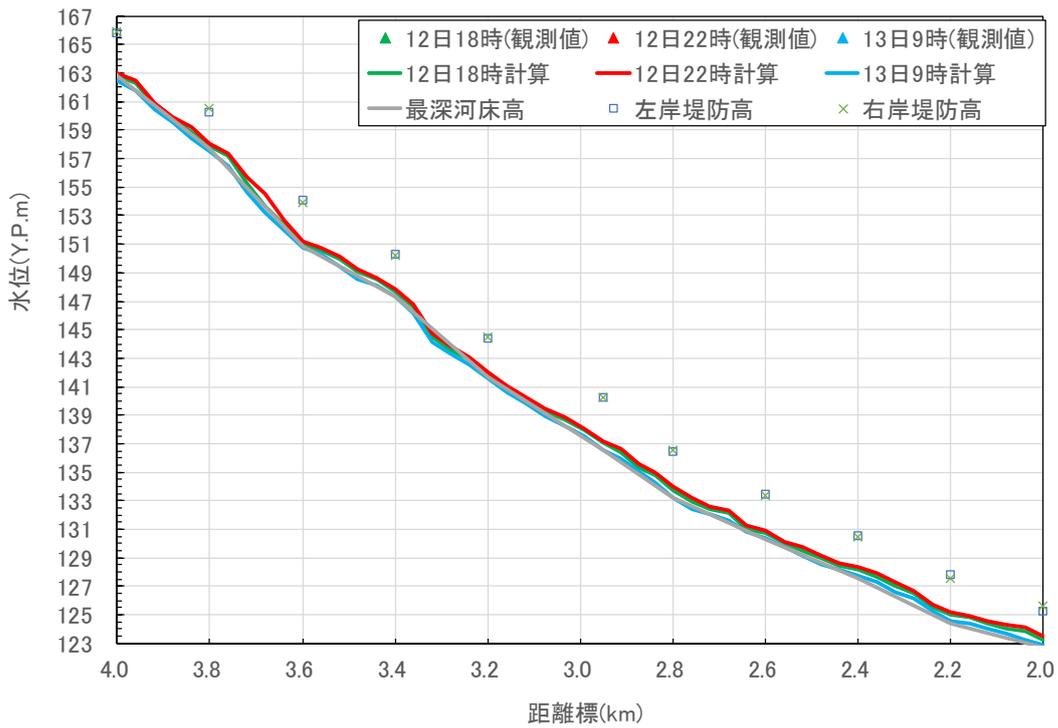


図 5. 4. 27 2 次支川の赤城白川 (4. 0km~2. 0km) における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

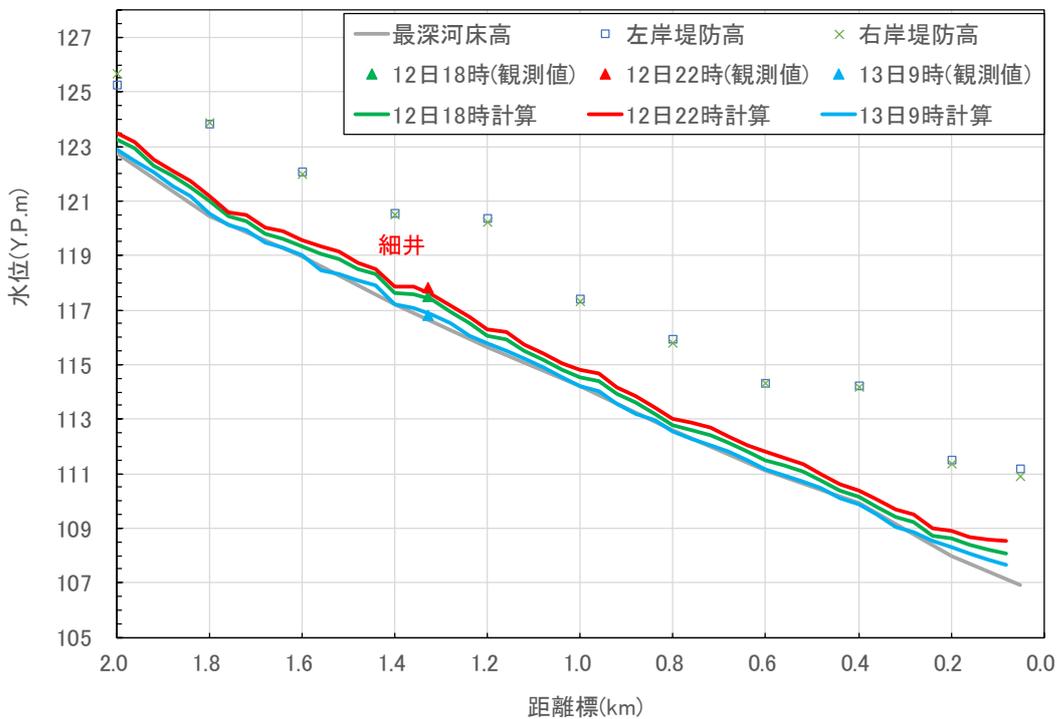


図 5. 4. 28 2 次支川の赤城白川 (2. 0km~桃ノ木川合流点) における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

上記の観測水面形を説明した赤城白川、荒砥川、粕川の広瀬川への流入量ハイドログラフを図 5.4.29 に示す。上記 3 つの 2 次支川の流量は、広瀬川の水位とそれぞれの 2 次支川の水位の関係で定まる洪水解析から得られたものである。これより、令和元年 10 月台風 19 号による荒砥川のピーク流入量は $210\text{m}^3/\text{s}$ 、粕川の流入量は $150\text{m}^3/\text{s}$ 程度である。図 5.4.30 には、上記の主要な 2 次支川と蕪川及び 3 次支川流入後の広瀬川の流量ハイドログラフを上流から下流の順に示している。図 5.4.30 より、広瀬川の流量が大きく変化している地点は、上述した主要な 2 次支川である荒砥川合流後と粕川合流後であることが確認される。なお、図 5.4.17 に示した赤城白川から荒砥川の間に入流する滝の口川や藤沢川等の 3 次支川群の流入量が広瀬川の流量形成に与える影響は多少あるが、2 次支川の流入量に比べると小さいことがわかる。

以上の小山川、石田川における降雨流出・洪水解析は、水位流量関係式を用いず、観測水面形の時間変化に基づき算定している。このように、1 次支川の河道測量データと観測水面形の時間変化が得られれば、2 次支川から 1 次支川への流入量と 1 次支川の水水面形、及び本川への流入量が高精度に評価可能である。また、広瀬川の検討より、主要な 2 次支川と 1 次支川を一体とする洪水解析を行えば、概ね 1 次支川の水水面形時間変化と流量の縦断変化を評価できることを示した。

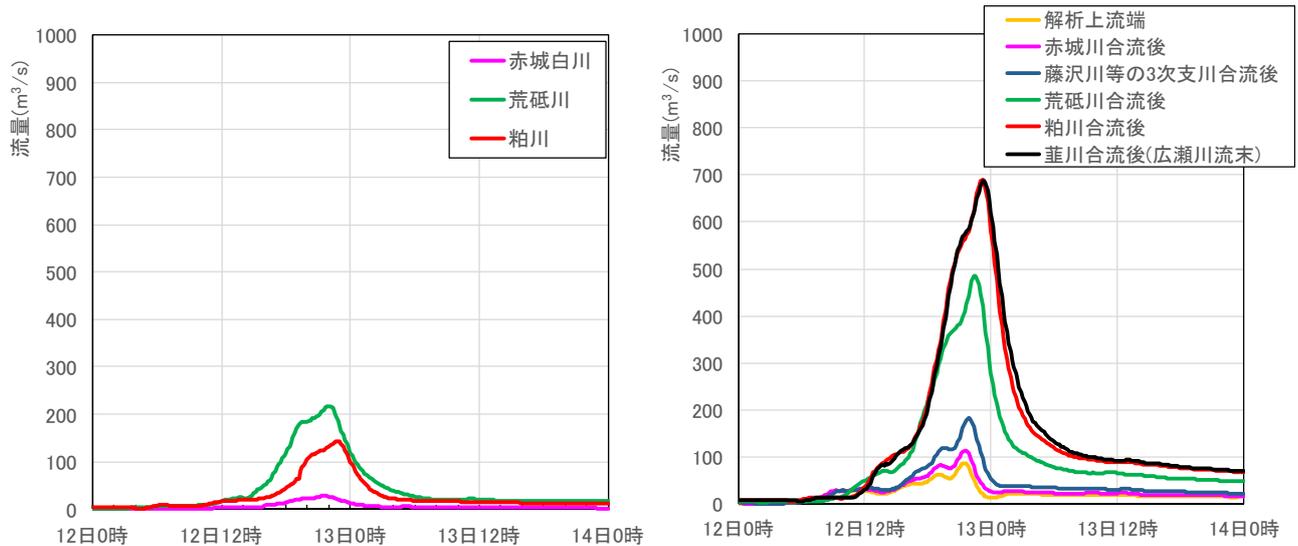


図 5.4.29 主要な 2 次支川の流入量ハイドログラフ 図 5.4.30 広瀬川の流量ハイドログラフ
(令和元年台風 19 号)

5.4.3 本・支川等の水面形時間変化と本川流量ハイドログラフの形成特性

5.4.2 に示した小山川、石田川及び広瀬川の2次支川から1次支川への流入量と、それを反映した本・支川の洪水流一体解析により得られた利根川の水面形時間変化と流量ハイドログラフの形成特性について示す。

図 5.4.31 には、利根川の観測水面形の時間変化と解析水面形の時間変化を示している。この図より、13日0時の利根川の解析水面形は、184.0km に合流する烏川の流入量や 175.5km ~156.7km に合流する群馬県と埼玉県管理の支川流入量の影響を受けていることがわかる。ただし、洪水低減期である13日9時の解析水面形は、164.6km の古戸観測所から下流で観測水面形より低めに見積もられている。この原因は定かでないが、洪水中に生じた河床波により、それが減水期の水面形に影響を与えていること、支川流域に降った豪雨により石田川では内水被害と越水被害⁸⁾が報告されていることから、その氾濫水が洪水低減期に流れていることなどが考えられる。

図 5.4.32 から図 5.4.35 には、全川を一体で解析した同手法の小山川、石田川、早川、福川の解析水面形を観測水面形と比較している。なお、広瀬川の水面形結果は図 5.4.21 に示したとおりである。図 5.4.32 に示した小山川の解析水面形は2次支川からの流入による上流区間の水位上昇及び下流区間の利根川本川の背水の影響を説明できている。図 5.4.33 と図 5.4.34 の石田川と早川の水面形は、八斗島ピーク時刻である13日0時までの観測水面形への再現性は良好である。但し、低減期の13日9時の水面形は、上述した利根川の解析水位が実測水位よりも低めに評価されているため、背水の影響を受ける石田川、早川についても同様に実測水位に対して低い傾向である。図 5.4.35 に示した福川の解析水面形と観測水面形の比較についても同様の傾向がみられる。

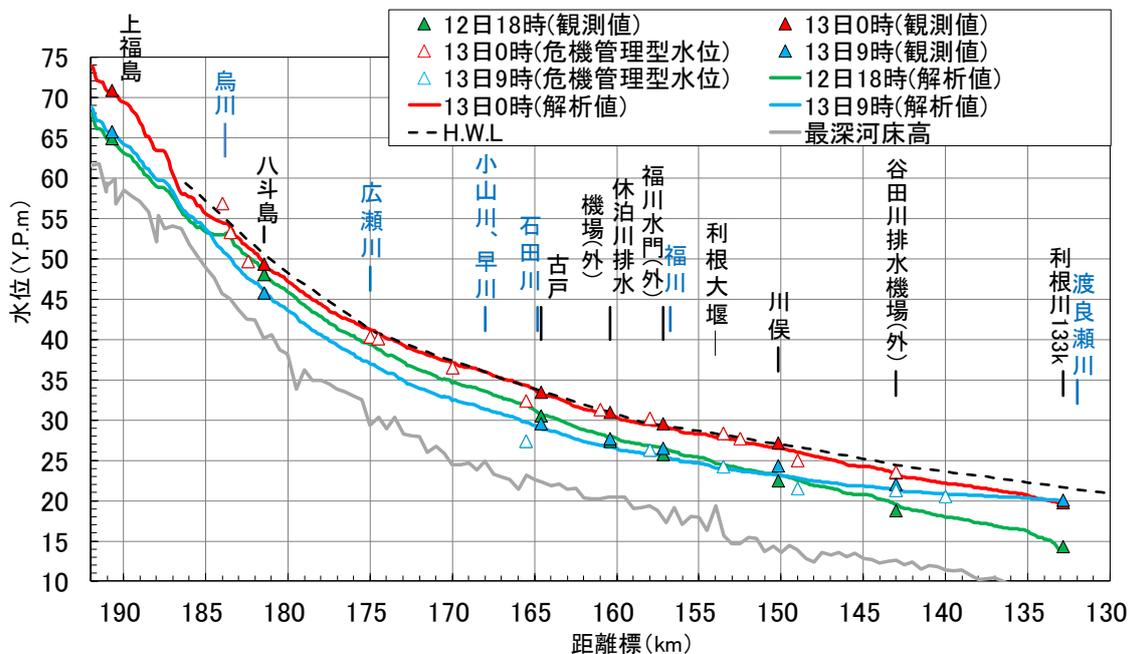


図 5.4.31 利根川の観測水面形と解析水面形の時間変化(本・支川等の一体解析)

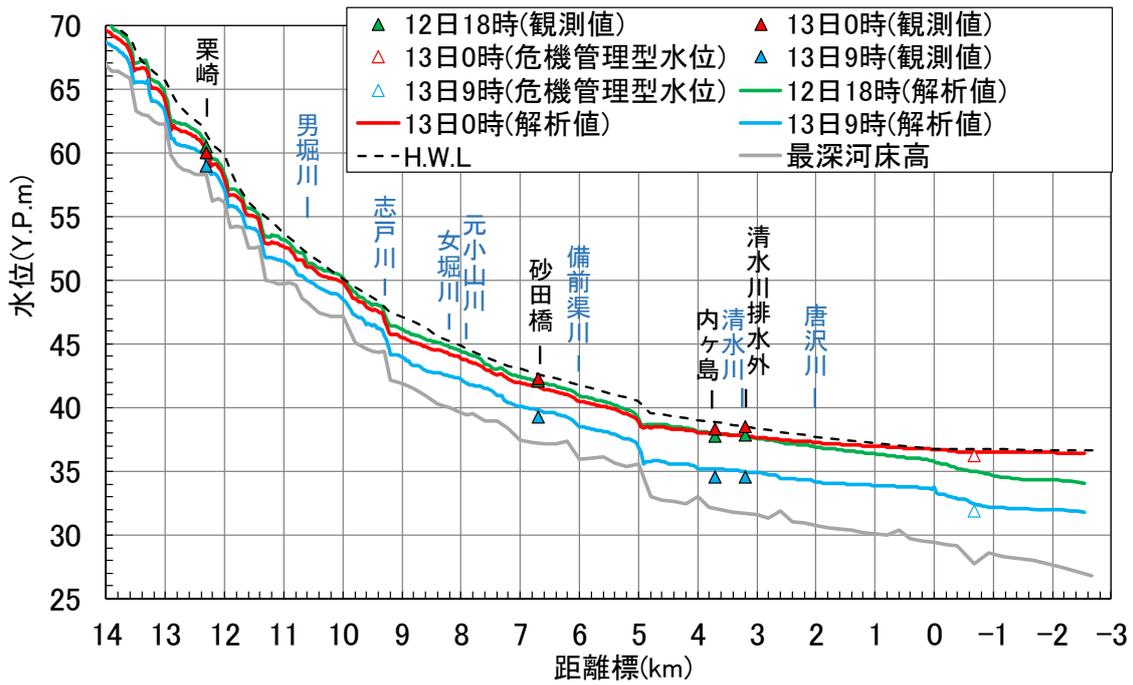


図 5. 4. 32 小山川の観測水面形と解析水面形の時間変化(本・支川等の一体解析)

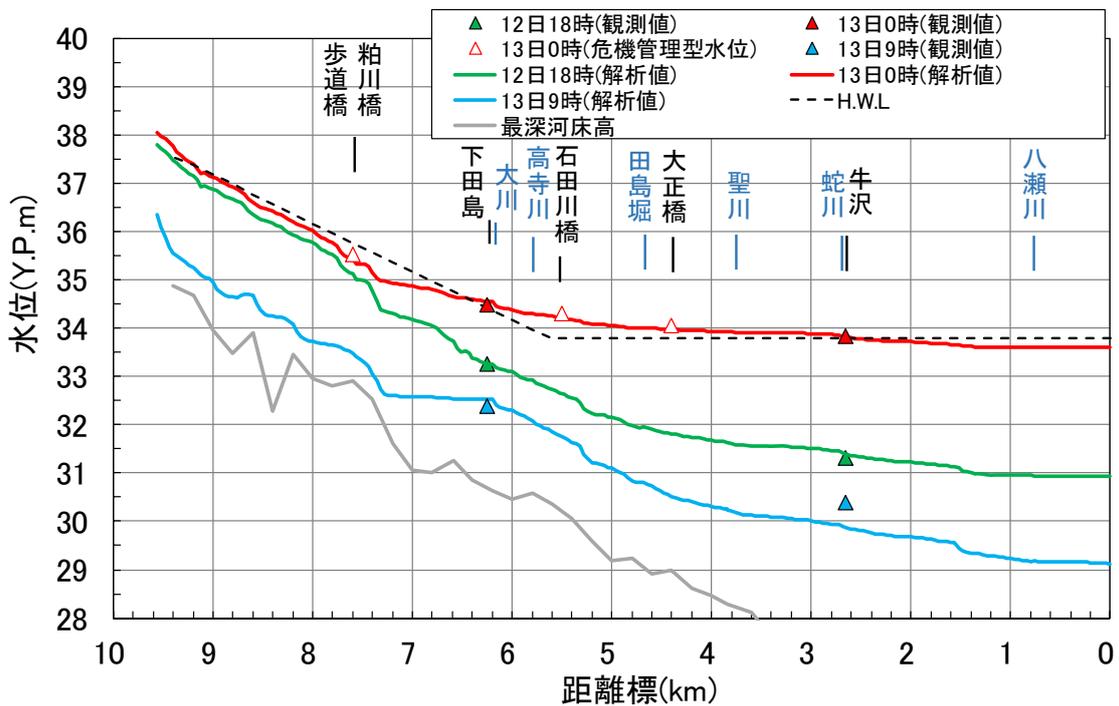


図 5. 4. 33 石田川の観測水面形と解析水面形の時間変化(本・支川等の一体解析)

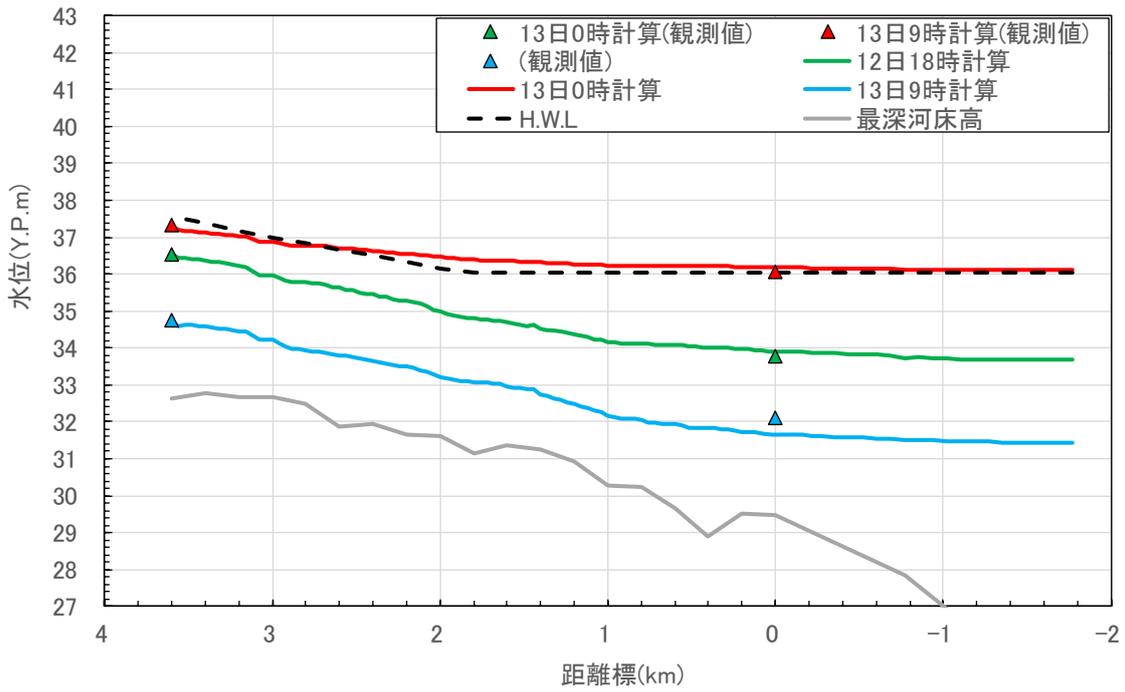


図 5. 4. 34 早川の観測水面形と解析水面形の時間変化(本・支川等の一体解析)

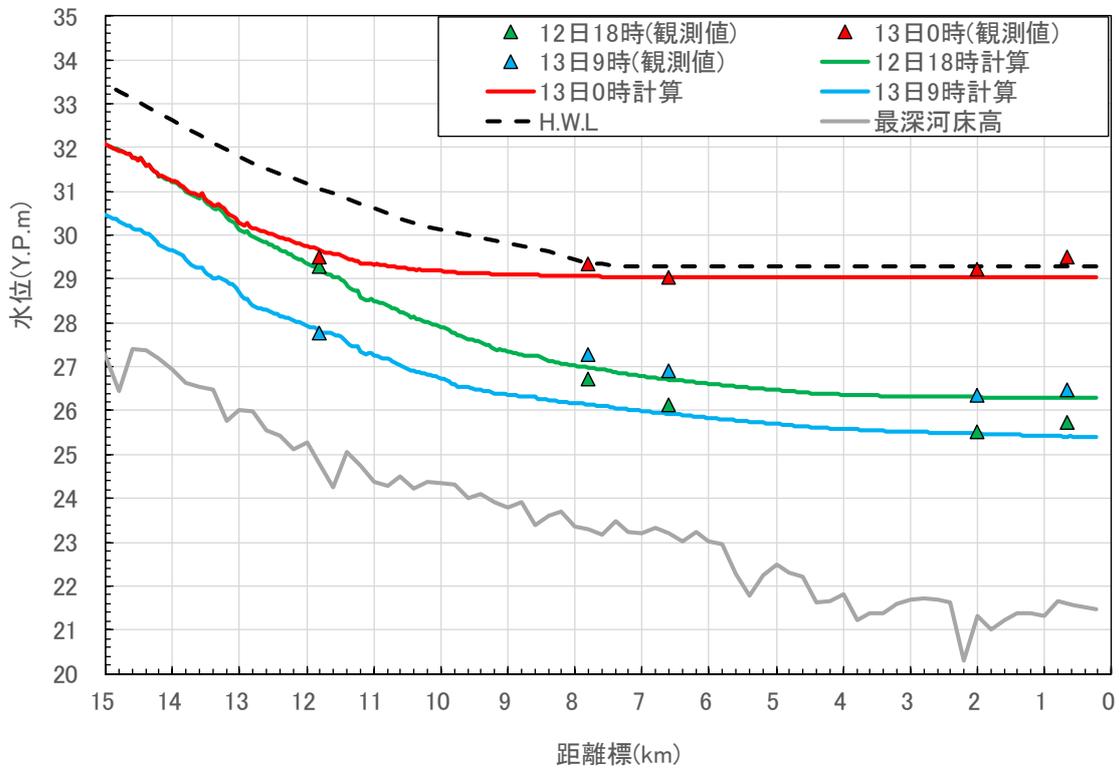


図 5. 4. 35 福川の観測水面形と解析水面形の時間変化(本・支川等の一体解析)

図 5.4.36 に利根川本川と烏川の流量ハイドログラフを示す。図 5.4.37 に群馬県と埼玉県管理の支川群から本川に流入した流量ハイドログラフを示す。利根川上流ダム群の洪水調節効果を受けた本川の上福島地点の流量は、ピークで約 5,200m³/s と推定され、その下流では出水の早い烏川から約 7,800m³/s の流量が合流し、八斗島地点でそれらの合成流量ハイドログラフを形成している。その後、図 5.4.37 に示した群馬県と埼玉県管理の支川群からの流入のタイミングが本川と大体重なり、約 2,200m³/s の流量が合流して古戸地点での洪水流量ハイドログラフを形成している。川俣地点のピーク流量は、古戸地点に比べて約 540 m³/s の減少がみられる。これは、利根大堰(154km)による堰上げや 2 地点間の約 14.4km で生じる河道貯留効果、及び福川等への逆流による貯留が考えられる。

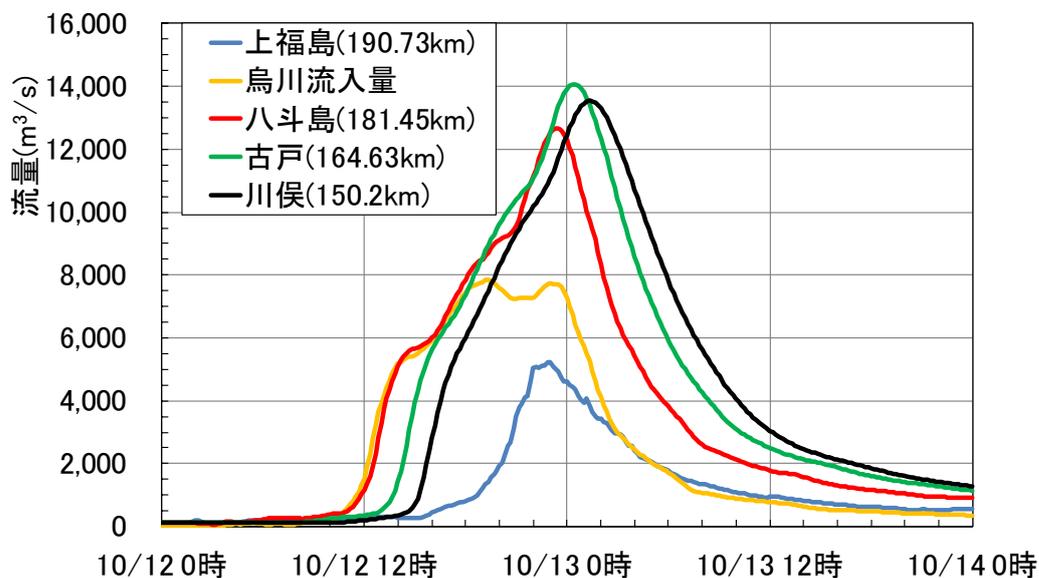


図 5.4.36 利根川と烏川の流量ハイドログラフ

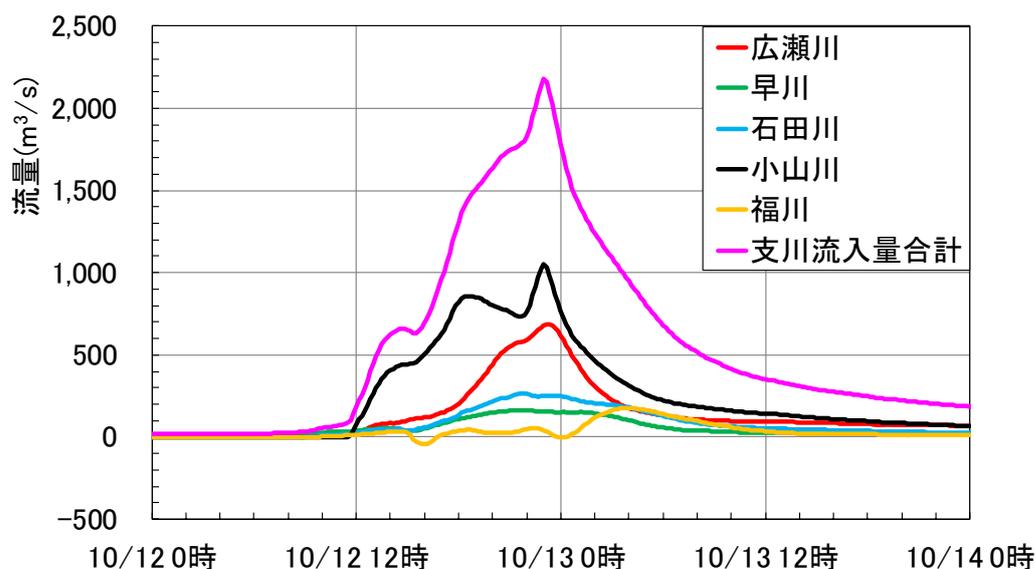


図 5.4.37 群馬県と埼玉県の支川群の流入量ハイドログラフ

利根川本川，烏川，群馬県と埼玉県管理の支川群を一体として捉え，令和元年台風 19 号による 2 次支川流域レベルの降雨の時間変化と観測水面形の時間変化を基に，本・支川の縦断水面形の時間変化，1 次支川や本川への流入量，及び本川の流量ハイドログラフの形成特性を示した。

本研究の特徴は，観測精度の高い 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 次支川の流入流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した点にある。上記の本・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な情報を与えている。

本研究で示した解析法を他河川に適用する上での課題と注意点を示す。課題点としては，本解析法は本川・1 次支川・2 次支川を一体とした洪水流解析を行う方法を提案しているが，小山川や石田川の検討で示したように 2 次支川の測量データの整備が十分でなかった。今後，中小河川の測量データの整備が期待される。次に，本研究で提示した測量データが十分ではない 2 次支川からの流入量推定法について述べる。本研究では利根川上流域という比較的勾配の大きい地形特性であったため，タンクモデルにより直接的に流入量を与えている。一方，地形勾配の緩い低地河川や平野部では，流出解析法を用いて支川流入量を評価するのではなく，2 次支川まで洪水流解析区間を延伸し，1 次支川の水位との関係で流入量を評価する必要がある。

5.5 流域治水への活用に向けた本川、支川群流域の水収支分布と流下能力の検討

流域治水は、河川区域では本川と支川群の河川改修やダム等による洪水調節の効果的な運用を行い、流域では、都市部の雨水貯留浸透対策、水田地域の貯留対策、地域の水害リスクを踏まえたまちづくり等、河川と流域の関係者が一体となって取り組む。このため、本川と支川群の流域に降った豪雨に対して、ダム、河道、流域に、いつ、どれくらいの量が存在しているかを明らかにすることは、河川管理者や流域の関係者に重要な情報を与える。本研究では、豪雨に対してダムや遊水地等の洪水調節施設による貯留量、流域内での貯留量、河道内で洪水を貯める河道貯留量、そして対象区間の末端で放出される洪水ボリュームの時間変化を示したものを、「洪水による水収支分布の時間変化」と定義する。なお、上記の流域内での貯留については、降雨が田んぼ等に貯留するものと、降雨が土中に浸透しいずれは河川へ流出するものや地下水へ涵養するものなどがあるが、本研究では河川やダムに流出していないこれらの貯留や浸透を区別せずにまとめて、降雨による流域の貯留と定義する。

現状における豪雨に対する水収支分布の時間変化が、支川流域、流域全体等でわかれば、豪雨に対する河道とダム及び流域の洪水分担量や流出特性が明らかになる。今後、それぞれの領域でどのような治水対策が有効かを全流域レベル、各支川流域レベル、氾濫域レベルで検討されることとなるが、水収支分布はその効果を見える化でき、流域治水を進める防災関係者間（河川、都市、農林等の管理者や関係者）の合意形成にも活用可能と考えられる。

洪水による水収支分布は高精度に算定可能である。この理由は、まず流域の本川、支川群の洪水流量と河道貯留量の時空間変化は、5.4節の検討結果が示すように、本川、支川群の河道沿いに多数の水位計が設置された観測水面形の時間変化に解析水面形を合致させる洪水流解析法を用いることで、高精度に得ることが可能である。また、ダムにおいても精度の高い貯水位の観測と放流量の時間変化が得られる。雨量については時空間に対して詳細な Xrain 等のレーダ雨量計によるメッシュ雨量が提供されている。

本節では、流域における豪雨による水収支分布の算定方法^{9),10),11)}を説明し、次いで、令和元年台風19号豪雨に対して利根川本川と支川群の水収支分布の時間変化を示し、洪水分担量や流出特性を明らかにする。さらに、同洪水について観測水面形を説明した本川と支川群の解析水面形の時間変化と H. W. L. との関係を用いて、本川と支川群を一体としてみて、流下能力が面的、時間的にどのような状態であったのかを分析する。そして、今後、流域の防災関係者が流域治水の様々な対策を検討する際の水収支分布の活用方法を示す。

5.5.1 豪雨による水収支分布の時間変化の算定法

(1) 本川と支川群河道の洪水流の水収支

流域の水収支の時空間分布の算定方法を以下に示す。解析の考え方は、5.4で検討したように、流域の本川、支川群の河道沿いに多数の水位計や危機管理型水位計を設置することによって、各時間の河道の水位の時・空間分布を密に観測し、解析モデルより観測縦断水位分布を説明する流れ場を用いて貯留量の時間分布を求める。この方法は、今日の進んだ観測、解析技術を用いる工学的に信頼性の高い方法である。

洪水流の貯留量 S_{river} は、式(5.5.1)で与えられる。

$$dS_{river}/dt = Q_{in} - Q_{out} \quad (5.5.1)$$

ここに、 S_{river} は、河川の二つの断面間の貯留量(m^3)、 Q_{in} は、対象とする区間の上流断面からの流入流量とこの本川区間に流入する支川の合流量の和であり、 Q_{out} は、対象流域河川の流末断面からの流出流量(m^3/s)である。 Q_{in} 、 Q_{out} は、河道の縦・横断面形を与え、洪水流の平面二次元解析法³⁾または準三次元解析法(Q3D-FEBS法)¹²⁾を用いて各時間の水面形を説明するように上流端と下流端の流速分布を求め、これと河道断面積から流量ハイドログラフ Q_{in} と Q_{out} を求める。 Q_{in} には支川流入ハイドログラフを足し、式(5.5.1)より時間積分して S_{river} を求める。全区間の洪水水面形とそれに対する流速分布の時間変化が求められているので、河川のどの区間に対しても貯留量 S_{river} を計算することが可能である。本検討では、5.4に示した降雨流出・洪水流解析結果を用いて、本川と支川単位毎に河道貯留量を算定する。

(2) 洪水による水収支分布の時間変化

流域に降った雨量と、ダムや遊水地等で洪水調節した貯水容量の時間変化、式(5.5.1)で求めた河道貯留量の時間変化がわかれば、流域の水収支の時間分布は以下のように求まる。

$$dS_{river}/dt + dS_{dam}/dt + dS_{basin}/dt = A \cdot R/3.6 - Q_{out} \quad (5.5.2)$$

ここに、 A は対象とする流域面積(km^2)、 R は対象流域に降った雨量(mm/hr)、 S_{dam} はダム等の洪水調節施設の貯水量(m^3)、 S_{basin} はその時刻において河川やダムに流入しておらず流域で貯留している水量(m^3)であり、定義は前頁に示したとおりである。式(5.5.2)の dS_{basin}/dt は、直接計測できないため、それ以外の項から逆推定する。他の推定方法として、気象モデルや雨量データに基づき降雨量分布を推算し、流出解析モデルを介して土中に浸透する量と洪水流量を推定する。

降雨量観測データ、水位観測データ、ダム流入・放流量・貯水位から貯留量を推算する式(5.5.1)、(5.5.2)の方法は、測られたデータを直接使って求めることから解析の信頼度が高い。また、式(5.5.1)、(5.5.2)を支川毎や本川流域に適用することにより、豪雨に対してダ

ム、河道、流域に貯留する水量と下流から流出する水量が時系列に求まることから、小流域毎の水量分布を詳細に知ることができ、その流域や河道区間で実施する治水対策の検討につなげることが可能となる。

本検討では、降雨量については気象庁のレーダ解析雨量を、ダム貯留量については、公表されている水文水質データベース等の流入量、放流量の時刻データに基づき算出した。河道貯留量は、5.4に示した降雨流出・洪水流解析結果を用いて、本川と支川単位毎に算出した。

5.5.2 利根川本川，支川群の水収支分布と流出特性の検討

(1) 本川と支川群の水収支分布を評価する河道，ダム，流域の説明

令和元年台風19号豪雨による利根川本川と支川群を対象に，5.5.1に示した算定方法を用いて洪水による水収支分布の時間変化を作成する．本川と支川群の水収支の概要を説明する．図5.5.1は，利根川上流域と支川群の流域とダムの整備位置を示しており，水収支分布はそれぞれの流域で作成する．図5.5.2は，利根川，群馬県管理の広瀬川，早川，石田川，埼玉県管理の小山川，早川，及び烏川の洪水流解析区間を示している．

図5.5.3に利根川上流域の洪水による水量収支分布の概念図を示す．本川の流末は川俣地点とする．利根川上流域をひとつの河道システムとして捉えると，ダム流域への流入量と放流量の関係からダム貯留量がわかる．本川の上福島の流量と支川群の流入量の合計が本・支川群の河道システムの全流入量となり，利根川流末の川俣流量が流出流量と見ることができる．本川と支川群の河道貯留を評価する区間は表5.4.1に示したとおりであり，河道貯留量は式(5.5.1)から算定できる．本研究では，利根川の上福島地点上流は洪水流解析の対象外であるため，ダム下流から上福島までの河道貯留量は評価しない．

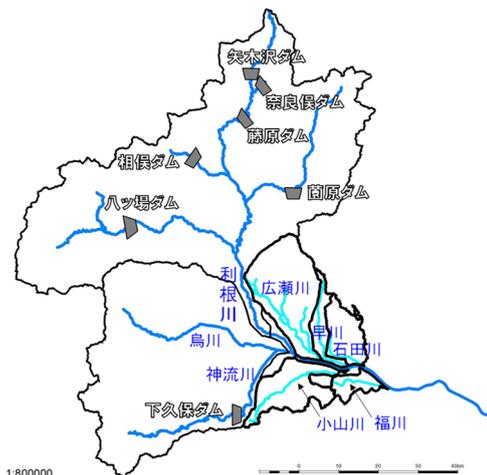


図 5.5.1 利根川上流域と支川群の流域及びダム整備位置

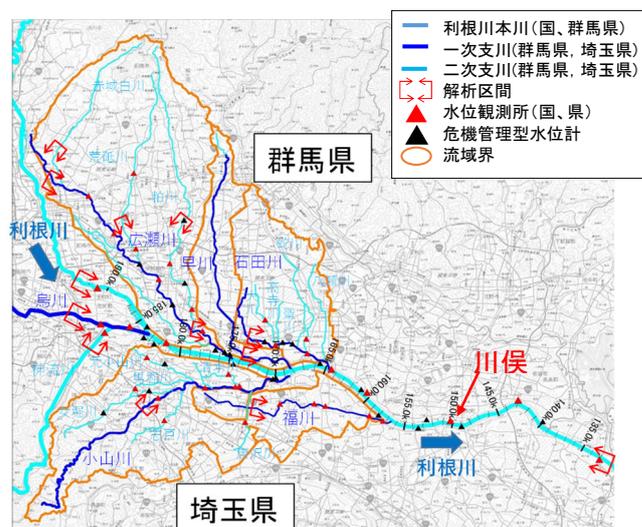


図 5.5.2 検討対象の利根川本川，支川，2次支川

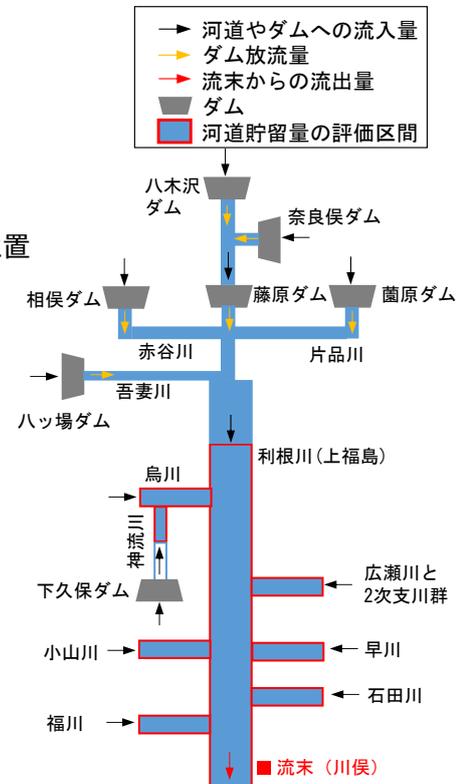


図 5.5.3 利根川の水収支の概念

図 5.5.4 に支川群の水量収支の概念図を示す。流末は、利根川との合流点とし支川群からの流出量を評価する。広瀬川の河道貯留は、その支川群まで洪水流解析を検討しているためそれらを含めて評価する。

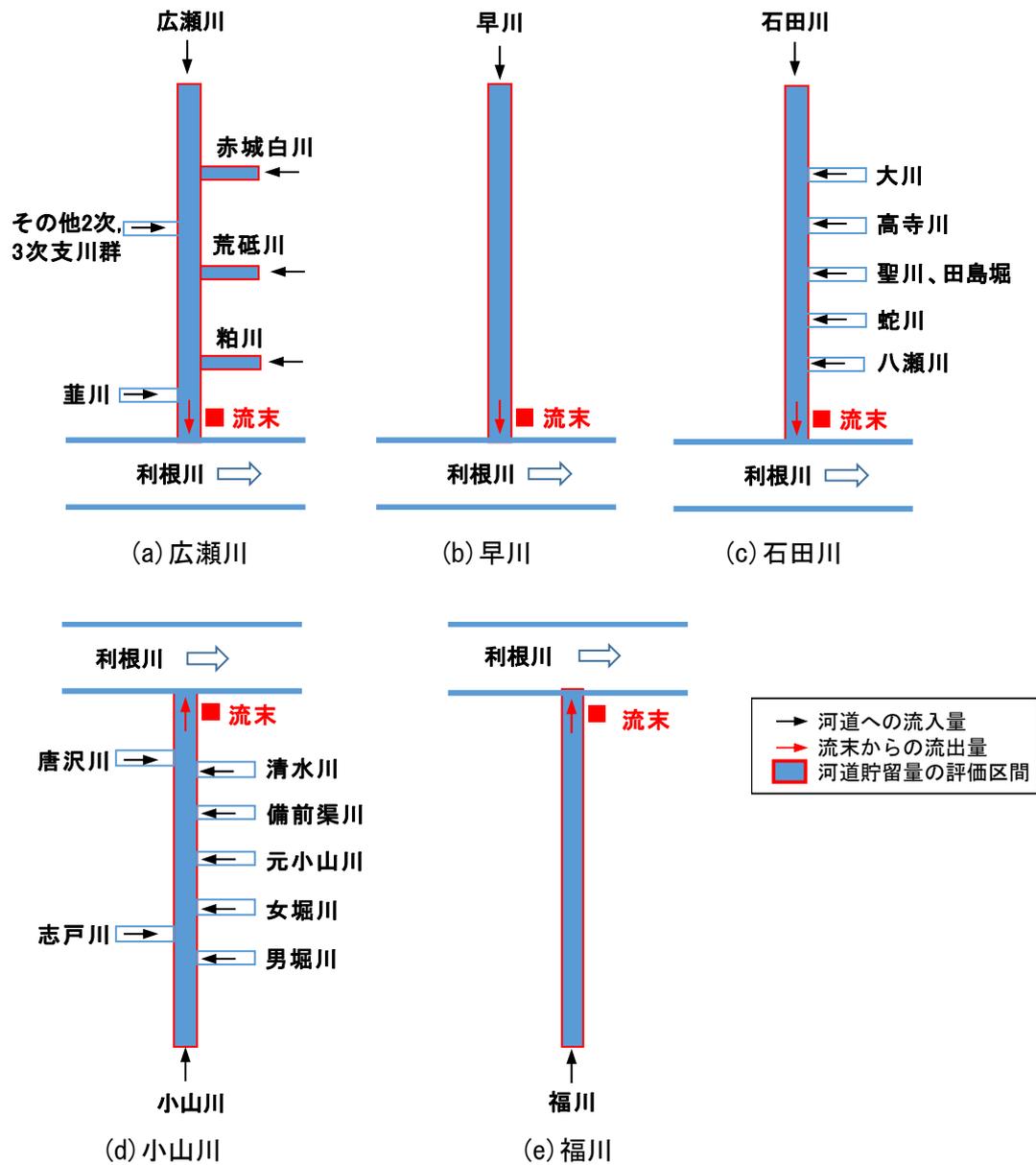


図 5.5.4 支川群の水収支の概念

(2) 利根川上流ダム群の貯留量の時間変化

令和元年台風19号豪雨による利根川本川の川俣上流域の水収支分布を作成するにあたり、図5.5.1に示した利根川上流ダム群の貯留量の時間変化を整理する。図5.5.5は、令和元年台風19号の豪雨に対して、各ダムの流入量と放流量の1時間データを基に算出した貯留量の時間変化を示している。当時のハッ場ダムでは、本運用前の試験湛水を実施しており、川俣地点の水位ピーク時刻の13日2時までに、約6,900万 m^3 の洪水を貯留している。また、2日雨量400mmを越える大雨が降った烏川支川の神流川上流に整備された下久保ダムでは、同時刻までに約3,000万 m^3 の洪水が貯留されている。7つの利根川上流ダム群の洪水調節操作により、計約11,100万 m^3 の洪水が貯留され、下流の水位低下の効果が報告²⁾されている。

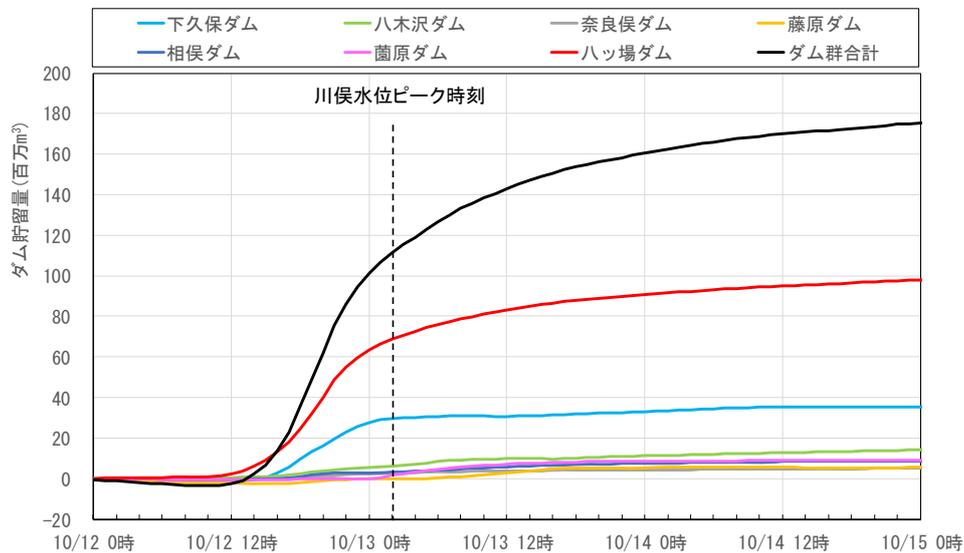


図 5.5.5 令和元年台風19号豪雨における利根川上流ダム群の貯留量の時間変化

(3) 支川群流域の水収支分布の時間変化と洪水量分担及び流出特性

図 5.5.6 に、令和元年台風 19 号の豪雨による小山川流域における河道貯留量、水収支分布、流出率の時間変化を示す。同図の(a)流量ハイドログラフをみると、小山川への流入量と流末からの流出量のハイドログラフはほぼ並行に移動しており流量低減は小さい。(b)河道貯留量の時間変化をみると、河道貯留量は最大で約 470 万 m^3 である。(c)水収支分布の時間変化をみると、流域貯留量、河道貯留量、流末流出量である洪水ボリュームの分担量がみてとれる。流末の流量ピーク時刻に着目すると、累加雨量のボリュームである 7,200 万 m^3 の洪水水量に対して、流域で約 4,210 万 m^3 を貯留し、河道で約 410 万 m^3 を貯留し、流末からは 2,660 万 m^3 を放出している。河道貯留量は流域貯留量に対して約 1 割程度であるが、水位上昇した洪水を堤防間で流していることに注目すべきである。また、(d)の直接流出量を累加雨量で除した流出率は、洪水終了の 10/15 0 時で 0.7 程度と大きい。令和元年洪水では、図 5.4.36 と図 5.4.37 に示したとおり小山川の流量ピーク時刻と利根川本川のピーク流量がほぼ重なり、さらに図 5.4.32 に示した小山川の水面形の時間変化と H. W. L. の関係を見ると、上流区間においても水位は高い状態にあった。このため、小山川では流域からの流出量をさらに抑制する対策や、河川の上流区間で流量を低減させる対策が今後必要と考えられる。

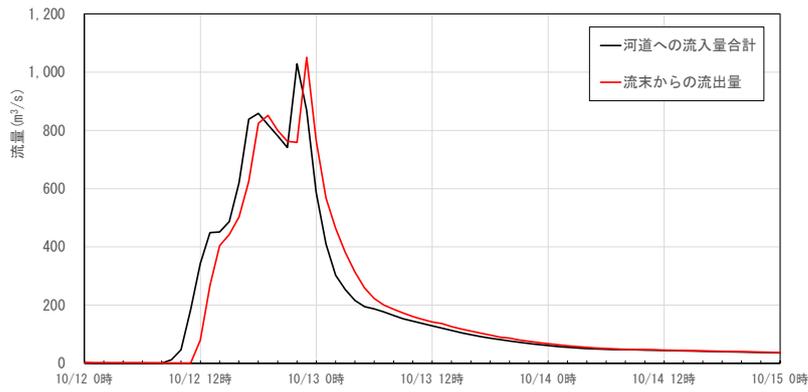
図 5.5.7 に広瀬川流域の河道貯留量、水収支分布、流出率の時間変化を示す。(a)流量ハイドログラフをみると、広瀬川へのピーク流入量(745 m^3/s)に対する流末からのピーク流出量(678 m^3/s)は約 70 m^3/s 程度の流量低減が確認される。(b)河道貯留量の時間変化をみると、河道貯留量は最大で約 540 万 m^3 であり、2 次支川の赤城白川、荒砥川、粕川の河道貯留量は大して大きくないことから、広瀬川の河道貯留量が支配的である。(c)水収支分布をみると、流域での貯留量が雨量ボリュームに占める割合が大きいことがわかる。(d)流出率をみても洪水終了時で 0.4 程度と小さい。これは、図 5.4.19 に示したように広瀬川の上流域は火山灰が風化した黒ボク土壌に覆われているため、地下への浸透量が大きく、河川への流出量が小さいことが理由としてあげられる。したがって、広瀬川流域では、今後の豪雨の増大に対して流域の有する浸透特性を保持し流出抑制を図ることが重要である。

図 5.5.8 に福川流域の河道貯留量、水収支分布、流出率の時間変化を示す。(a)流量ハイドログラフをみると、流末からの流出量は、上流端の流量に比べて大きく変形しており、利根川の背水の影響を強く受けている。(b)河道貯留量の時間変化をみると、最大で約 280 万 m^3 である。(d)流出率をみると洪水終了の 10/15 0 時で 0.35 程度と小さいことがわかる。洪水終了時の流出率が小さい理由を考察する。本検討では福川は大きな 2 次支川が存在しないため 1 本河道として扱ったが、図 5.5.9(1)の土地利用と地盤高分布に示すように、特に福川の中下流域は平坦な地形形状で水田が広く分布しており、これらの水田地域に降った降雨は利根川の水位が下がった後に、図 5.5.9(1)に示した小河川や用水路を通じて樋管から福川にゆっくり排水される。本検討ではこれらの排水量を考慮していないため、河川への流入量が過小に見積もられ流出率が小さいものと考えられる。福川のように水田が広く分布し(低)平地河川の流域治水を対象とする際には、上記のような水田貯留やそれらの排

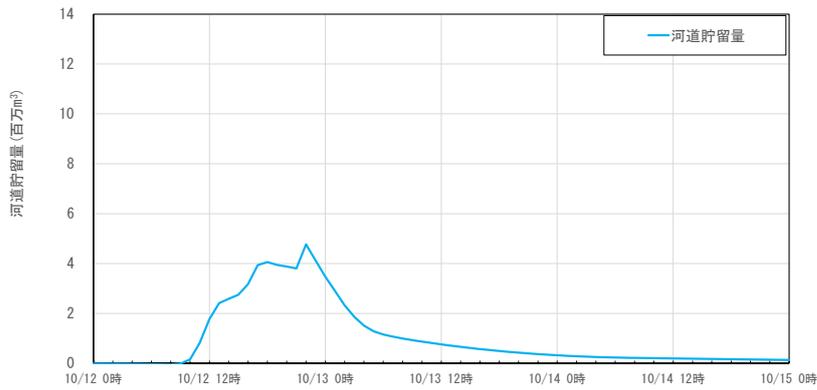
水を考慮した検討が望まれる。

一方, 図 5. 5. 9(2) に示す福川の右岸に位置する中条堤は, 明治 43 年の水害で一部決壊し, それ以降は治水に使われなくなったが, 江戸時代を通じて, 利根川の洪水を福川流域に氾濫させ下流の流量を低減させる治水方式を採用していた¹³⁾。福川流域は, このような治水の歴史があり, 現在の平坦な地形と水田利用が行われていることから, 流域で雨水を貯留し, 河川では福川と利根川の水位状況に応じた水門操作を行いながら, 上手く洪水の貯留と流出の調整を実施して洪水被害を軽減することが重要である。

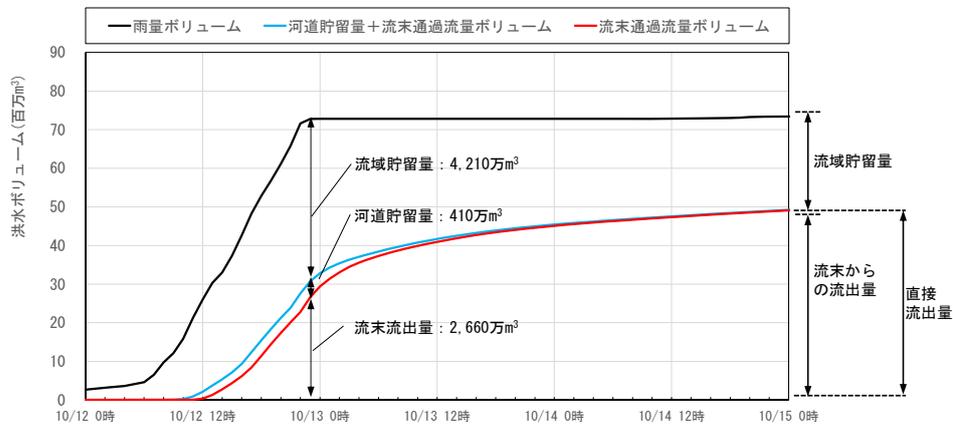
図 5. 5. 10 と図 5. 5. 11 に石田川流域と早川流域の河道貯留量, 水収支分布, 流出率の時間変化を示す。(a) 流量ハイドログラフをみると, 2 河川ともに流入量に対して流末からの流出量は利根川の背水の影響を受けて大きく変形している。(d) 流出率の時間変化をみると, 2 河川ともに 0.5 程度である。



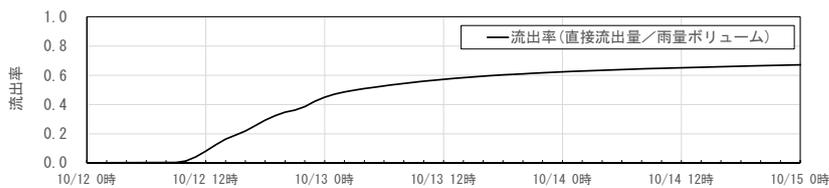
(a) 小山川の流量ハイドログラフ



(b) 小山川の河道貯留量の時間変化

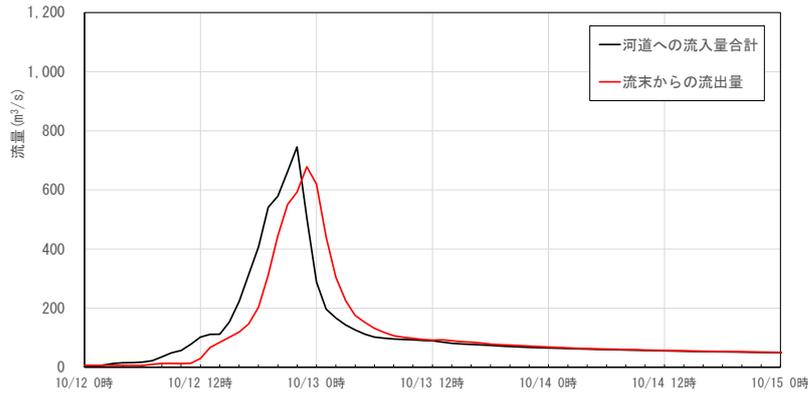


(c) 小山川流域の全洪水ボリュームと流域貯留量、河道貯留量、流末流出量の時間変化（水収支）
 (※図中の各貯留量と流出量の数値は、流末の流量ピーク時刻における洪水ボリュームの分担量)

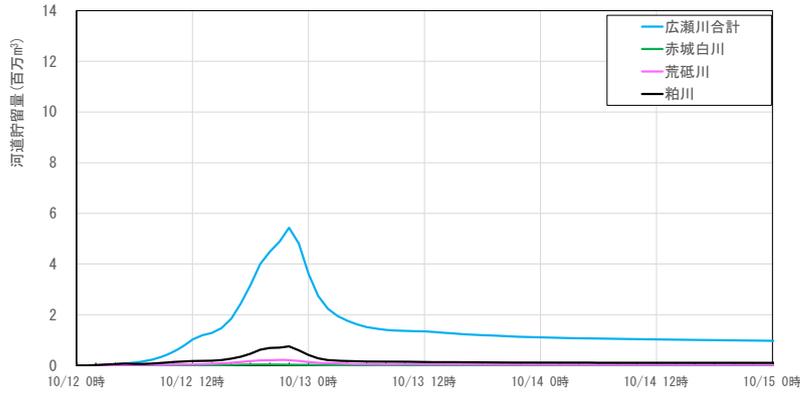


(d) 流出率の時間変化

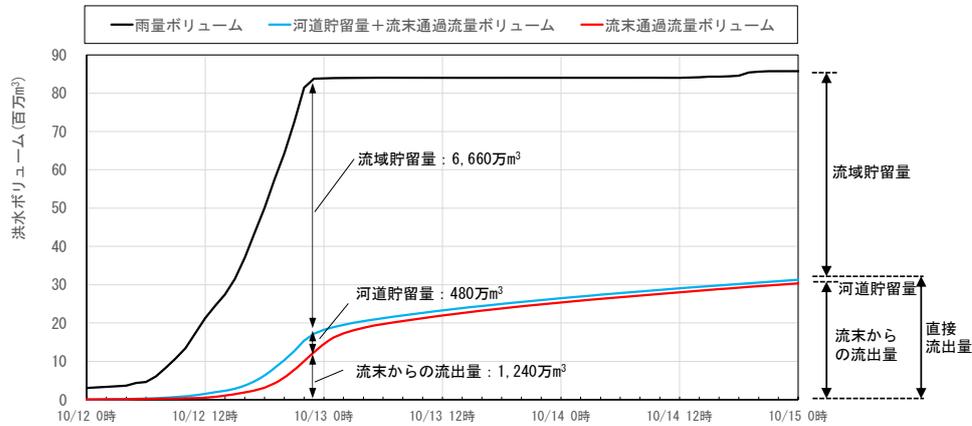
図 5.5.6 小山川における河道貯留量と流域水収支の内訳及び流出率の時間変化



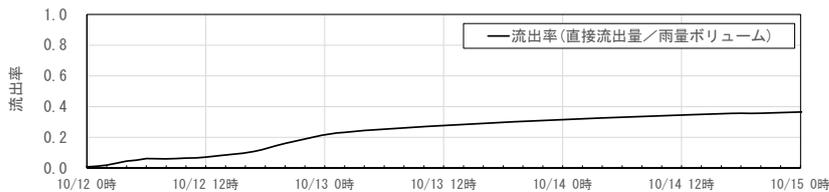
(a) 広瀬川の流量ハイドログラフ



(b) 広瀬川の河道貯留量の時間変化

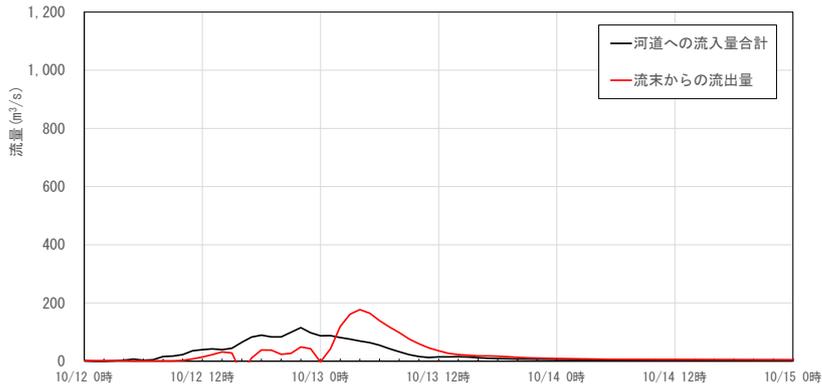


(c) 広瀬川流域の全洪水ボリュームと流域貯留量，河道貯留量，流末流出量の時間変化（水収支）
 (※図中の各貯留量と流出量の数値は，流末の流量ピーク時刻における洪水ボリュームの分担量)

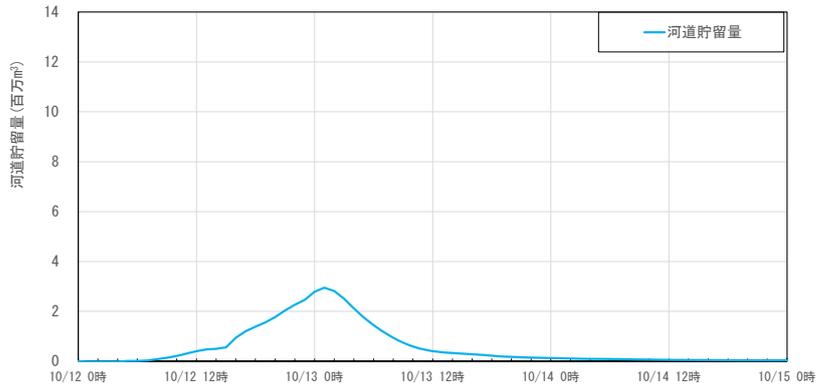


(d) 流出率の時間変化

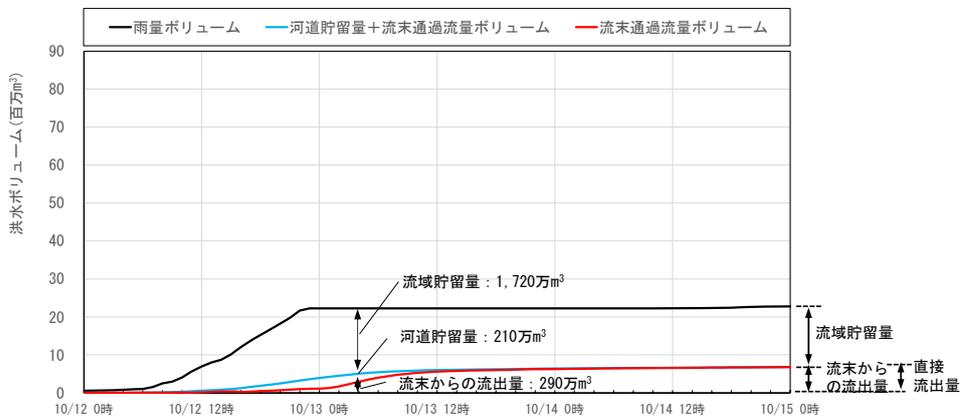
図 5.5.7 広瀬川における河道貯留量と流域水収支の内訳及び流出率の時間変化



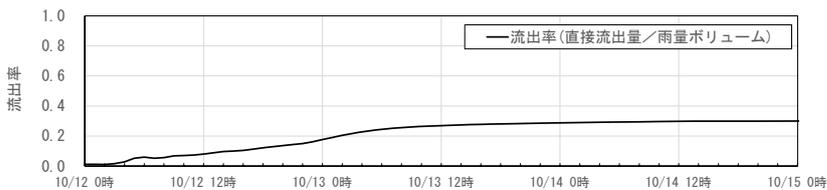
(a) 福川の流量ハイドログラフ



(b) 福川の河道貯留量の時間変化



(c) 福川流域の全洪水ボリュームと流域貯留量、河道貯留量、流末流出量の時間変化（水収支）
 (※図中の各貯留量と流出量の数値は、流末の流量ピーク時刻における洪水ボリュームの分担量)



(d) 流出率の時間変化

図 5.5.8 福川における河道貯留量と流域水収支の内訳及び流出率の時間変化

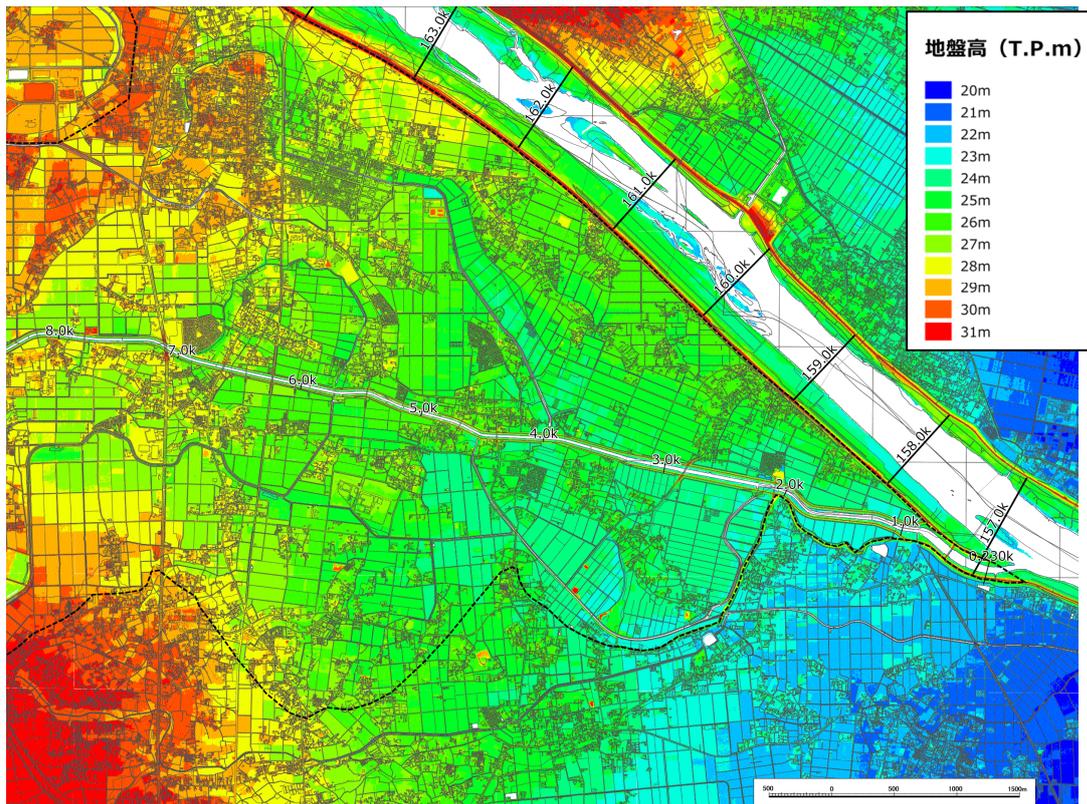


図 5. 5. 9(1) 福川中下流域の土地利用と地盤高

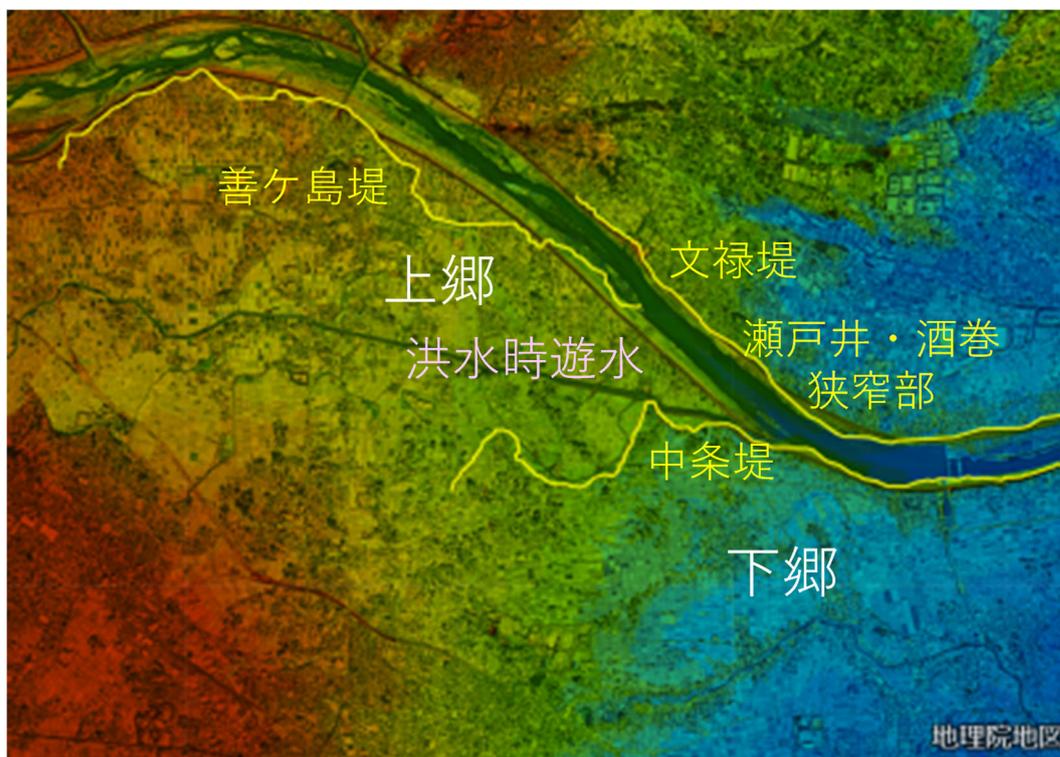
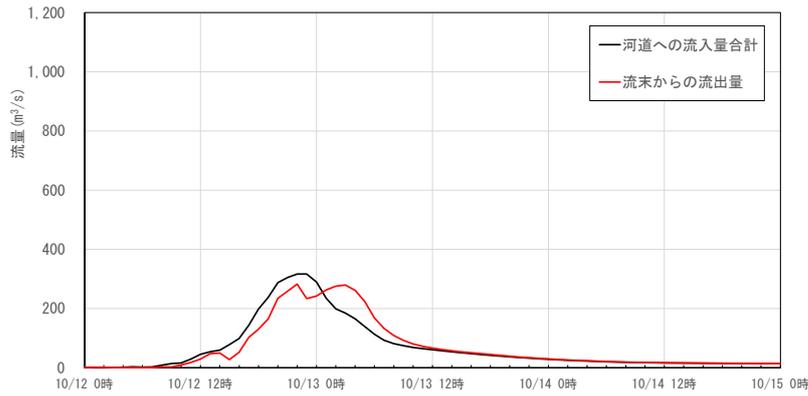
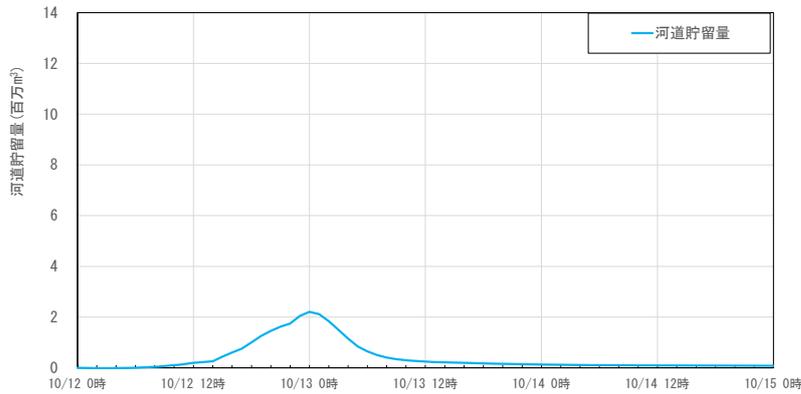


図 5. 5. 9(2) 中条堤の位置¹³⁾

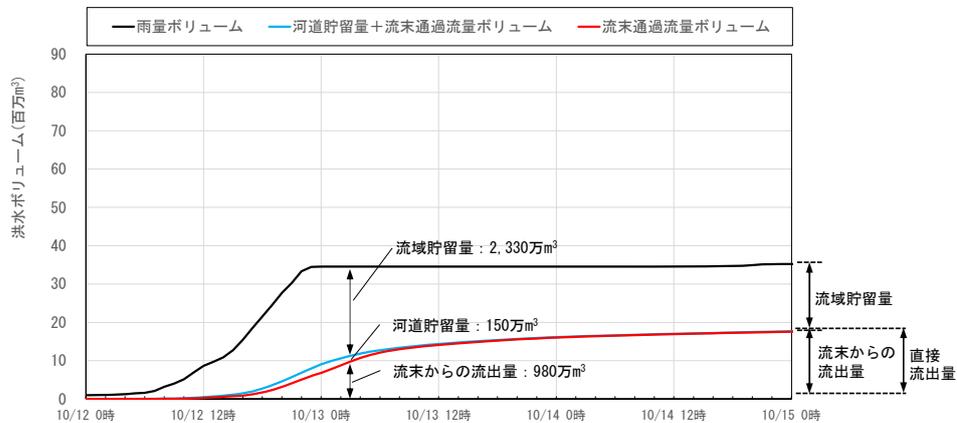
(出典) 諏訪義雄: 河川構造物の洪水に対する応答特性と減災への反映, 中央大学博士論文 2021.



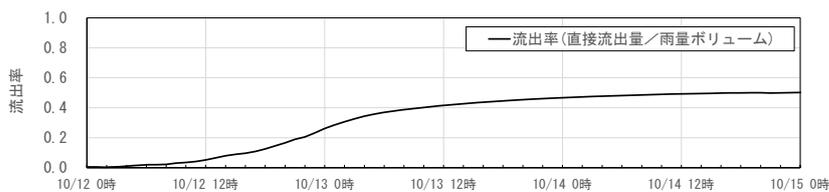
(a) 石田川の流量ハイドログラフ



(b) 石田川の河道貯留量の時間変化

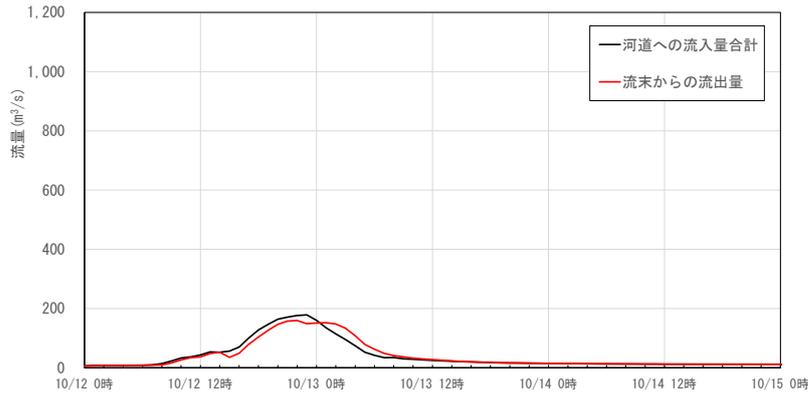


(c) 石田川流域の全洪水ボリュームと流域貯留量, 河道貯留量, 流末流出量の時間変化 (水収支)
 (※図中の各貯留量と流出量の数値は, 流末の流量ピーク時刻における洪水ボリュームの分担量)

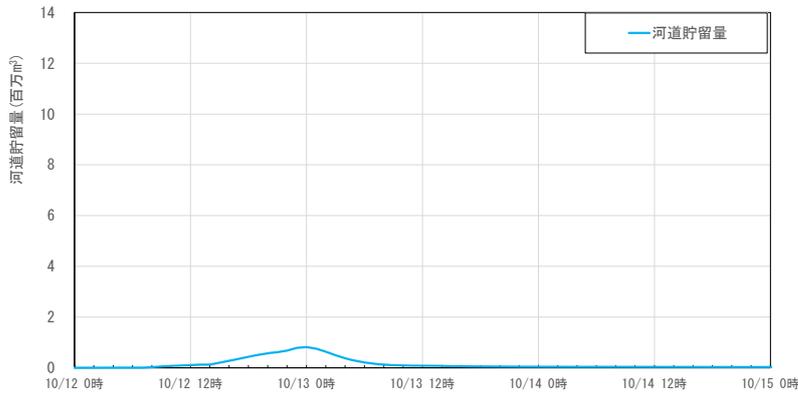


(d) 流出率の時間変化

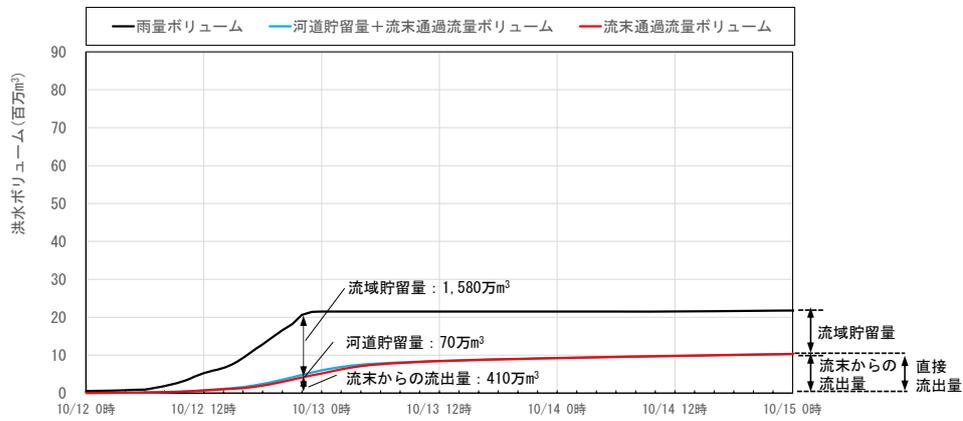
図 5.5.10 石田川における河道貯留量と流域水収支の内訳及び流出率の時間変化



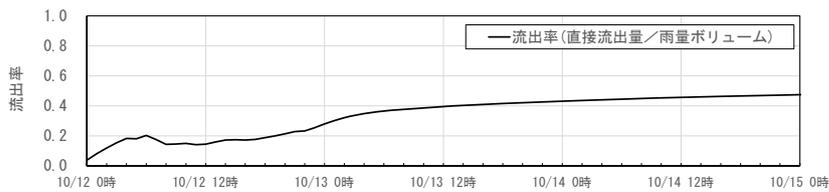
(a) 早川の流量ハイドログラフ



(b) 早川の河道貯留量の時間変化



(c) 早川流域の全洪水ボリュームと流域貯留量、河道貯留量、流末流出量の時間変化（水収支）
 (※図中の各貯留量と流出量の数値は、流末の流量ピーク時刻における洪水ボリュームの分担量)



(d) 流出率の時間変化

図 5.5.11 早川における河道貯留量と流域水収支の内訳及び流出率の時間変化

(3) 利根川流域における水収支の時間変化と洪水量分担及び流出特性

令和元年台風19号の豪雨による利根川の川俣上流域の水収支分布を作成し、流出特性や洪水量分担を分析する。流域の水収支の概念図は図5.5.3に示したとおりである。利根川上流ダム群の貯留量は図5.5.5に示したとおり、川俣の水位ピーク時刻である13日2時（流量のピーク生起時刻も同じ）で約1.1億 m^3 である。

図5.5.12は、利根川本川への流入量と川俣から放出される流出量を示している。ピーク流入量は約15,000 m^3/s 、川俣地点のピーク流出量は約13,300 m^3/s であり、流量低減量は約1700 m^3/s と大きい。図5.5.13は、上記の流量低減を引き起こした本川と支川群の河道貯留量の時間変化を示している。河道貯留のピークは13日0時であり、本川の河道貯留量は1.8億 m^3 、支川群については烏川で約0.1億 m^3 、群馬県と埼玉県管理の5河川で約0.1億 m^3 であり、本・支川群の最大貯留量は約2億 m^3 に達する。なお、川俣のピーク流量生起時刻である13日2時の河道貯留量は、1.7億 m^3 であった。このため、河道貯留量は上記のダム貯留量（約1.1億 m^3 ）に比べて大きく、川俣の流量低減に大きな効果を発揮した。

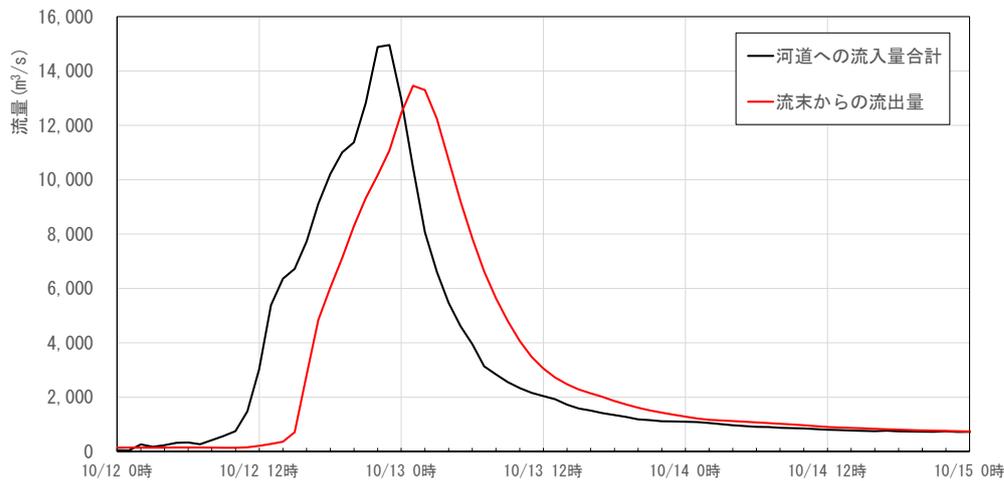


図 5.5.12 利根川本川と支川群への流入量と川俣流量ハイドログラフ

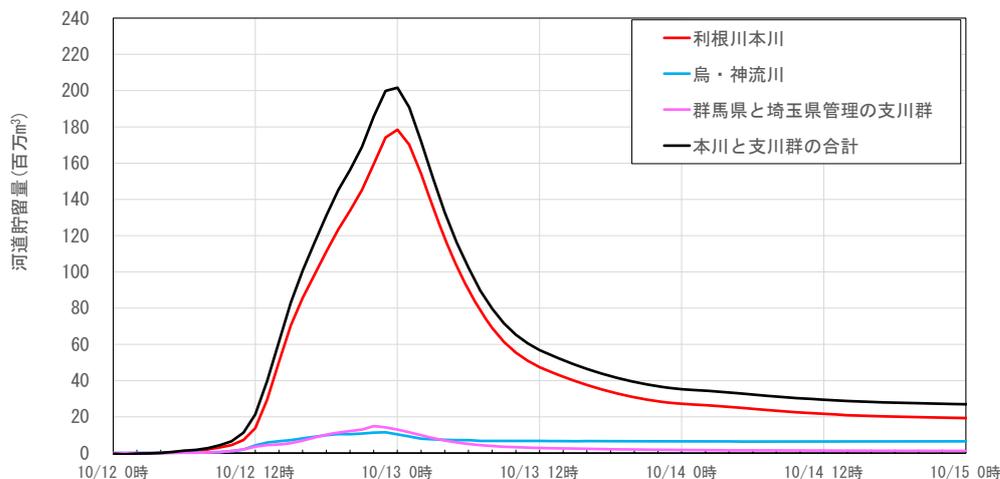


図 5.5.13 利根川本川と支川群の河道貯留量の時間変化

図 5.5.14 は、川俣地点上流域における水収支分布の時間変化を示している。同図より川俣地点の流量ピーク時刻(13日2時)における洪水ボリュームの分担量がみてとれる。累加雨量のボリューム約 18.2 億 m³ の洪水水量を、流域で約 11.7 億 m³、ダムで 1.1 億 m³、河道で約 1.7 億 m³ を貯留し、流末からは 3.7 億 m³ を放出している。図 5.5.5 に示す流出率の時間変化をみると 10/15 0 時点で 0.5 程度である。なお、利根川の洪水は長いいため解析を 18 日 0 時まで実施しており、その洪水全期間の流出率は 0.6 程度となる。

以上の令和元年台風 19 号による本川と支川群の水収支分布の時間変化は、ダム、河道、流域等の各領域での洪水水量の分担量や流出特性を示している。

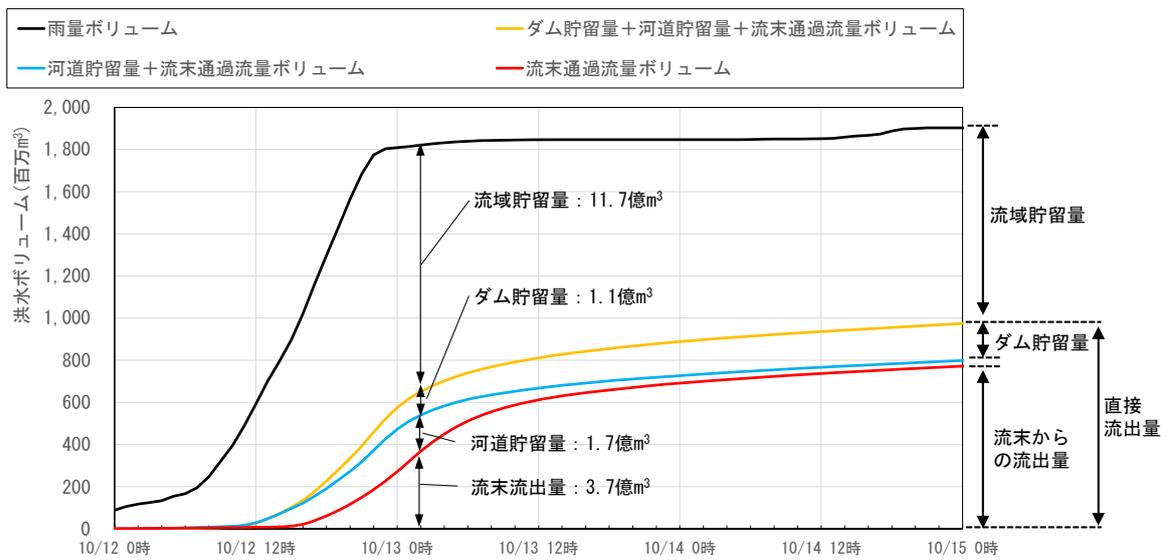


図 5.5.14 川俣上流域の全洪水ボリュームと流域貯留量、河道貯留量、川俣流出量の時間変化 (※図中の各貯留量と流出量の数値は、流末の流量ピーク時刻における洪水ボリュームの分担量を示している)

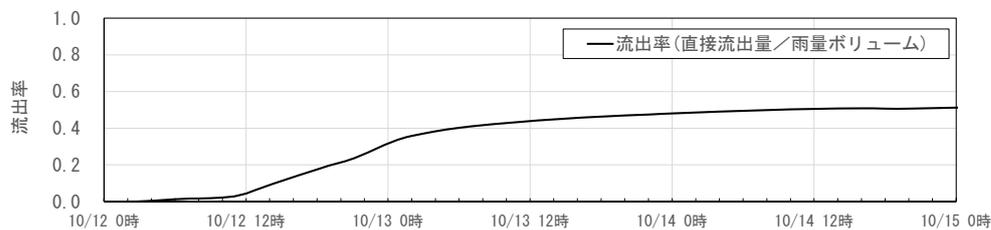


図 5.5.15 流出率の時間変化

5.5.3 利根川本川、支川群における流下能力の時空間変化の分析

5.5.2に示した本川と支川群の水収支分布の時間変化は、ダム、河道、流域等の各領域での洪水水量の分担量や流出特性を示し、各領域での今後の治水対策の方向性を検討する基盤を与えるものである。一方、河道に着目すると、河道貯留量は長大な区間の水面形時間変化を縦断方向に積分して評価しているため、水収支分布だけでは、対象とする豪雨に対して、河道のどの区間に流下能力上の問題があるのか、上下流の流下能力関係、本川と支川群の流下能力関係等はわからない。これに対して、図5.4.31から図5.4.35に示した本川と支川群における水面形の時間変化を、法で定める洪水を安全に流す高さである計画高水位(H.W.L.)との関係で比較し面的且つ時間的に見える化すれば、洪水による上述の本川と支川群の具体的なボトルネック箇所等の状況や今後の課題が見えてくると考えられる。

図5.5.16から図5.5.23に、本川と支川群の観測水面形の時間変化を説明した解析縦断水位とH.W.L.の水位差の時系列を示す。なお、広瀬川とその支川のH.W.L.は、多くの区間で設定されていなかったため、左右岸堤防高の平均から計画余裕高を差し引いた値で評価した。図5.5.24は、観測水面形を説明した本川と支川群の流量ハイドログラフを示しており、以下の説明のために図5.4.36を再掲載している。

図5.5.24の10月12日18時は、支川である烏川と小山川の洪水1山目のほぼ流量ピーク時刻であり、同時刻にあたる図5.5.16の縦断水位とH.W.L.の差分をみると、烏川と小山川ではH.W.L.から1.5m未満の区間が占め水位は高い状態にある。神流川では、上流に位置する下久保ダムの洪水調節効果が発揮され、H.W.L.に対して余裕がある。

図5.5.24の12日23時は、利根川本川の上福島と八斗島、広瀬川流末、小山川流末で流量はほぼピークに達している。図5.5.19に示した上記の時刻の縦断水位とH.W.L.の差分をみると、烏川における利根川との合流部と小山川の下流の一部区間でH.W.L.を超過している。これら2河川は利根川本川水位の背水の影響を大きく受けている。一方、広瀬川は、これまでに考察したように流出率が小さいため、2次支川を含めて十分な余裕がある。なお、早川、石田川、福川の縦断水位もH.W.L.から1.5m未満の区間が大半を占める。

図5.5.20、図5.5.21、図5.5.22に示す13日0時、1時、2時の縦断水位をみると、最大支川烏川の流入量の影響を強く受けた利根川の洪水と群馬県・埼玉県管理の支川群の流入量が相まって、洪水が利根川の下流に伝播する特性と、早川、石田川、福川について利根川の背水の影響を受ける様子がみてとれる。具体的には、図5.5.20の13日0時に着目すると、利根川では、小山川と石田川が合流する区間及び広瀬川合流後の一部区間でH.W.L.を超過している。これは、図5.5.25に示す利根川の川幅縦断変化をみるとわかるように、小山川と早川合流後に川幅が狭くなっているためである。また、このような河道に令和元年洪水の利根川本川の洪水ピークに支川群の洪水ピークがほぼ重なると、その合流後の下流区間は水害リスクが高まることを示している。支川では利根川の背水の影響を受け、早川のほぼ全区間と石田川の3km～6km区間でH.W.L.を超過している。

福川の右岸堤防と旧河道は図5.5.9(2)に示したように中条堤があり、明治43年の水害以前は、利根川の洪水は福川下流の狭窄部で洪水を堰上げ、福川流域に洪水を氾濫させる治水

方式を採用してきた。上記の水害以降は連続堤の整備が進められた。このように、小山川下流で川幅が狭い理由は、地形特性と昔の治水方式が関係していると考えられる。

図 5.5.21 の 13 日 1 時の縦断水位をみると、利根川の洪水が下流に伝播しているが、小山川と石田川が合流する区間は依然として水位が高く H.W.L. を超過している。支川においては、早川、石田川、福川の長い区間で H.W.L. を超過していることが確認される。

令和元年 10 月洪水による対象区間の流下能力の特徴をまとめると以下のとおりである。

- ・ 令和元年洪水では、利根川上流ダム群の洪水調節効果が発揮され、対象区間への本川流量を大きく低減させた。しかし、烏川からの流入量の影響は大きく、県管理の支川群の流入量の影響は無視することができず、小山川合流後の下流(159km～144km 付近)で H.W.L. を上回る洪水であった。
- ・ 利根川洪水と小山川等の支川群の洪水が重なると、利根川では川幅が狭くなる小山川合流後の下流区間が流下能力上、注意を要する区間である。
- ・ 烏川流域においても下久保ダムの洪水調節効果が発揮されたが、大洪水であったため、利根川への流入量が大きく、利根川との合流部で H.W.L. を一時的に超過している。
- ・ 広瀬川は、流下能力に余裕があった。
- ・ 小山川は、同洪水の流出率が大きく、利根川の洪水ピークと大体重なり、ほぼ全区間で水位上昇し下流の一部区間で H.W.L. を超過していた。
- ・ 小山川、早川、石田川、福川は利根川の背水の影響を強く受け、利根川の水位と連動し、合流点から上流にかけて H.W.L. を超過する区間が生じた。

以上の本川と支川群の時系列の流下能力を分析した結果、利根川本川では、今後、小山川合流後の下流区間の掘削等による河川改修を進め、水位を低下させることが重要である。広瀬川を除く支川群においては、令和元年洪水でみられた本川洪水ピーク時刻にできるだけ重ならないように、支川群の流域対策や上流区間で洪水流量を低減させる対策を行っていく必要がある。

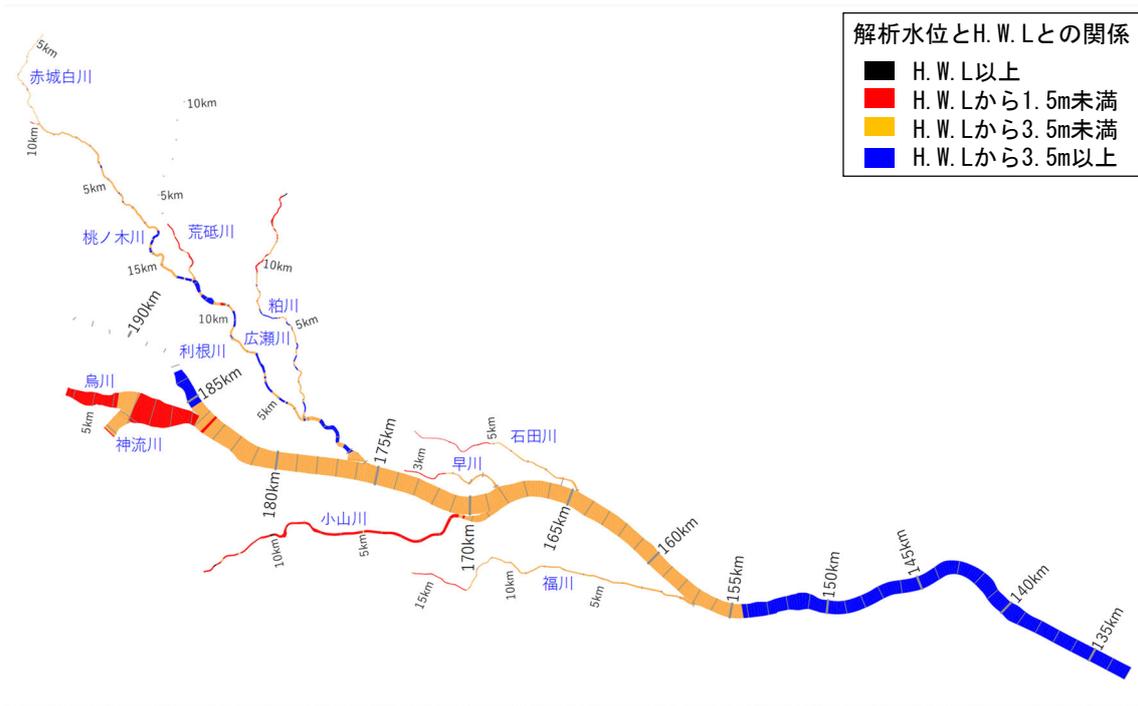


図 5.5.16 2019/10/12 18:00 における H.W.L と解析水面形の差分

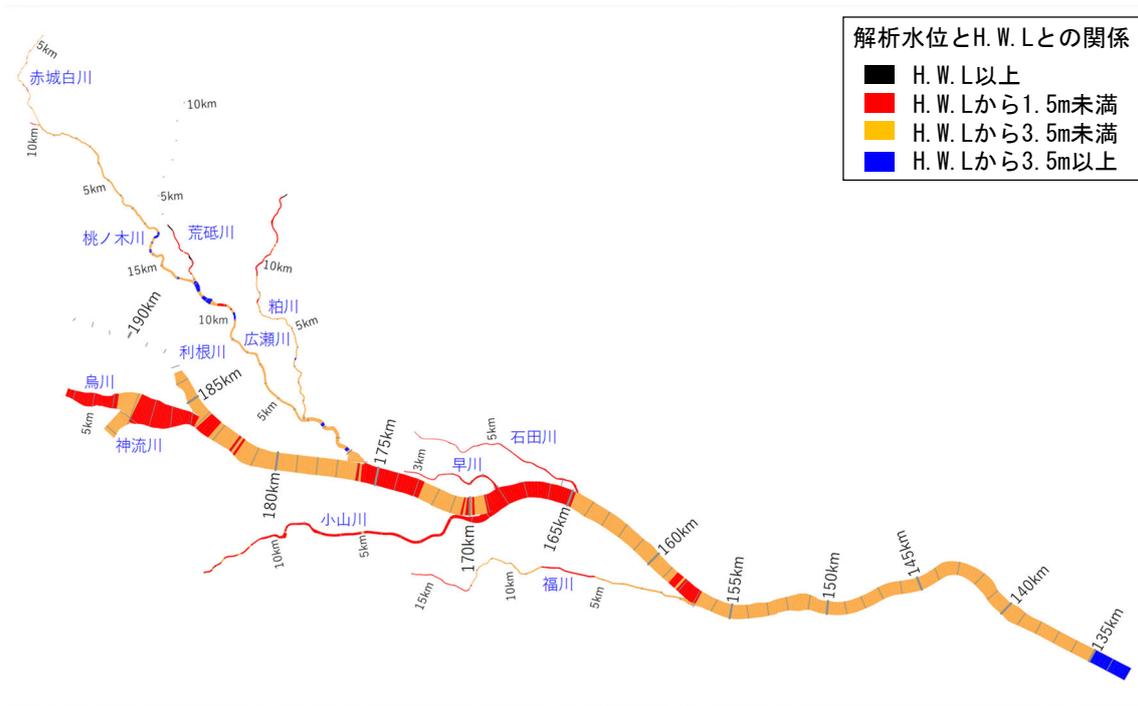


図 5.5.17 2019/10/12 21:00 における H.W.L と解析水面形の差分



図 5.5.18 2019/10/12 22:00 における H.W.L と解析水面形の差分

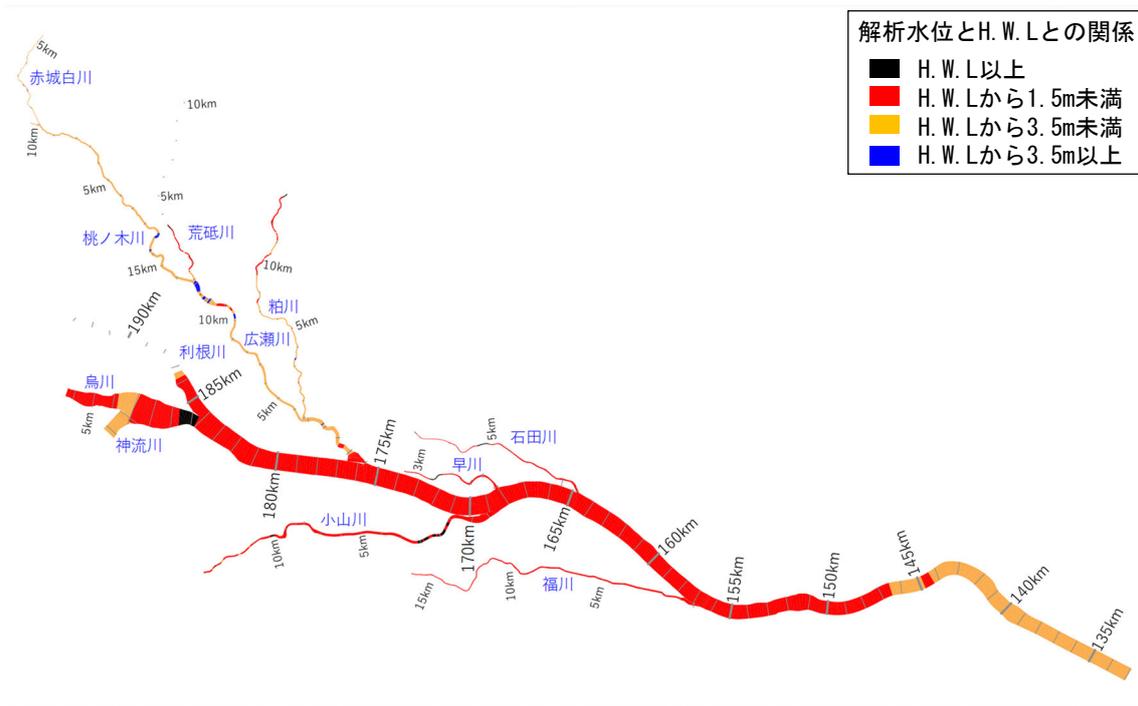


図 5.5.19 2019/10/12 23:00 における H.W.L と解析水面形の差分

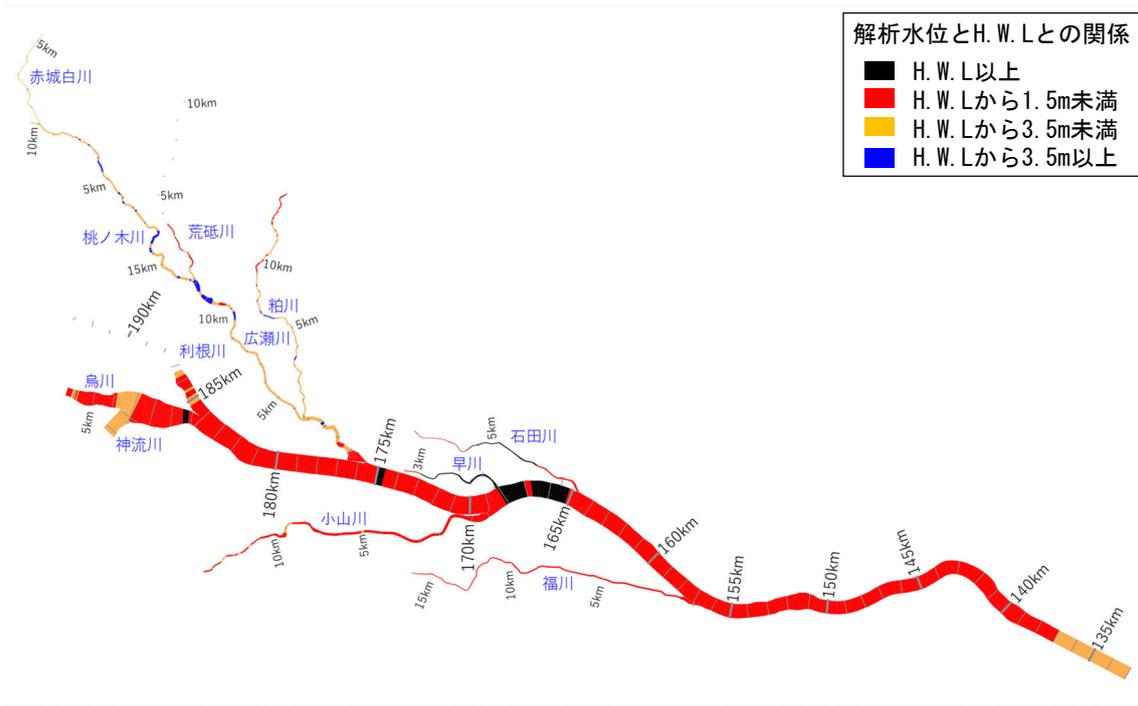


図 5.5.20 2019/10/13 0:00 における H.W.L と解析水面形の差分

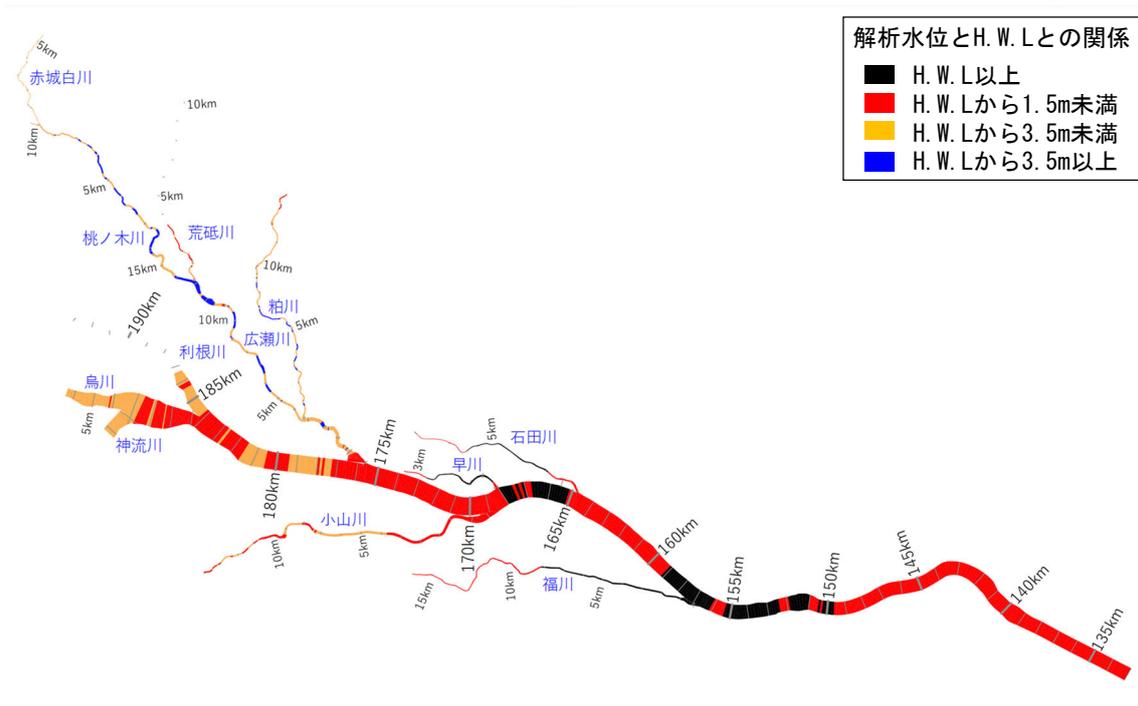


図 5.5.21 2019/10/13 1:00 における H.W.L と解析水面形の差分

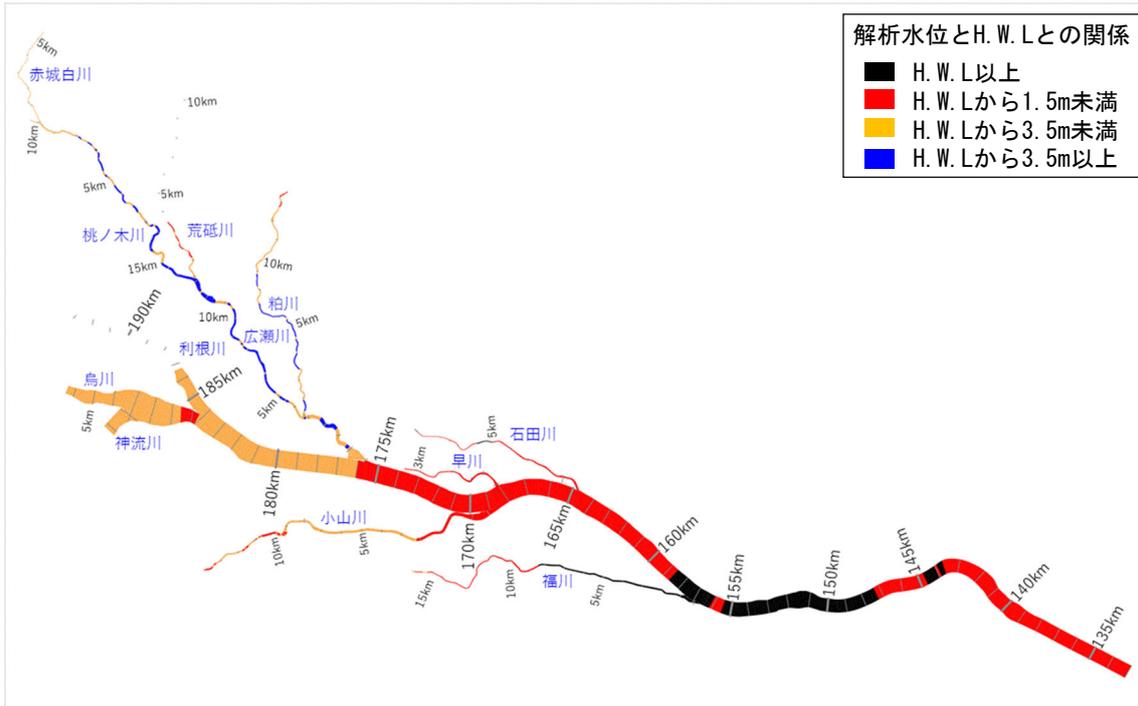


図 5.5.22 2019/10/13 2:00 における H.W.L と解析水面形の差分

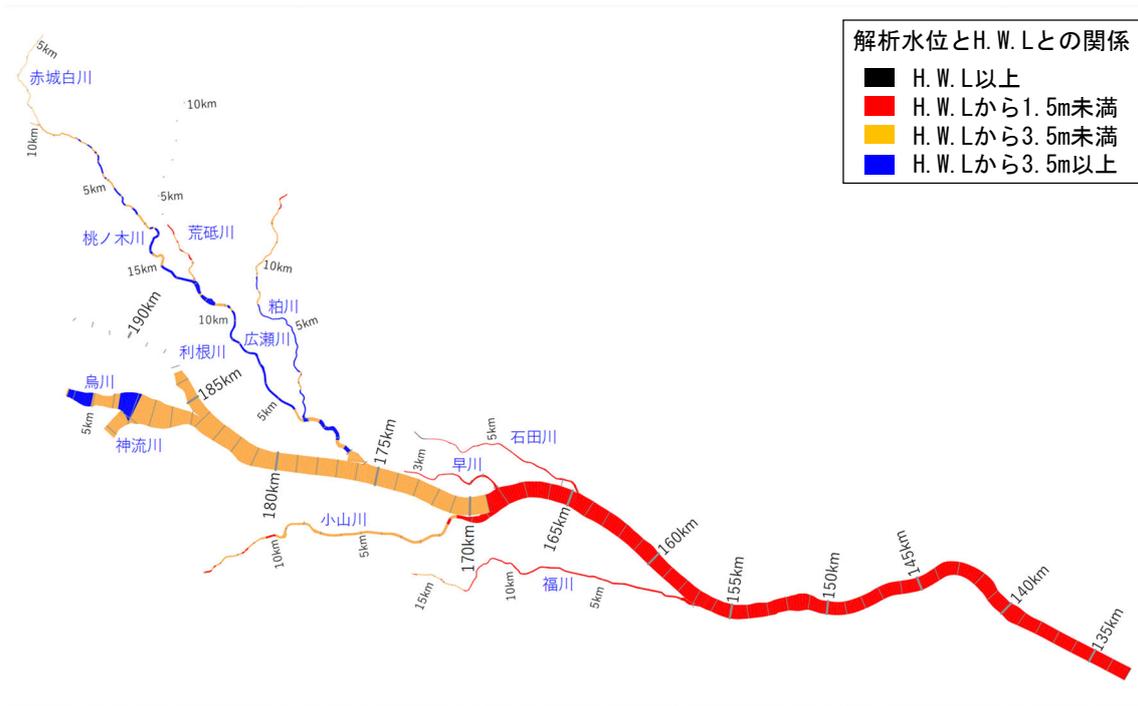
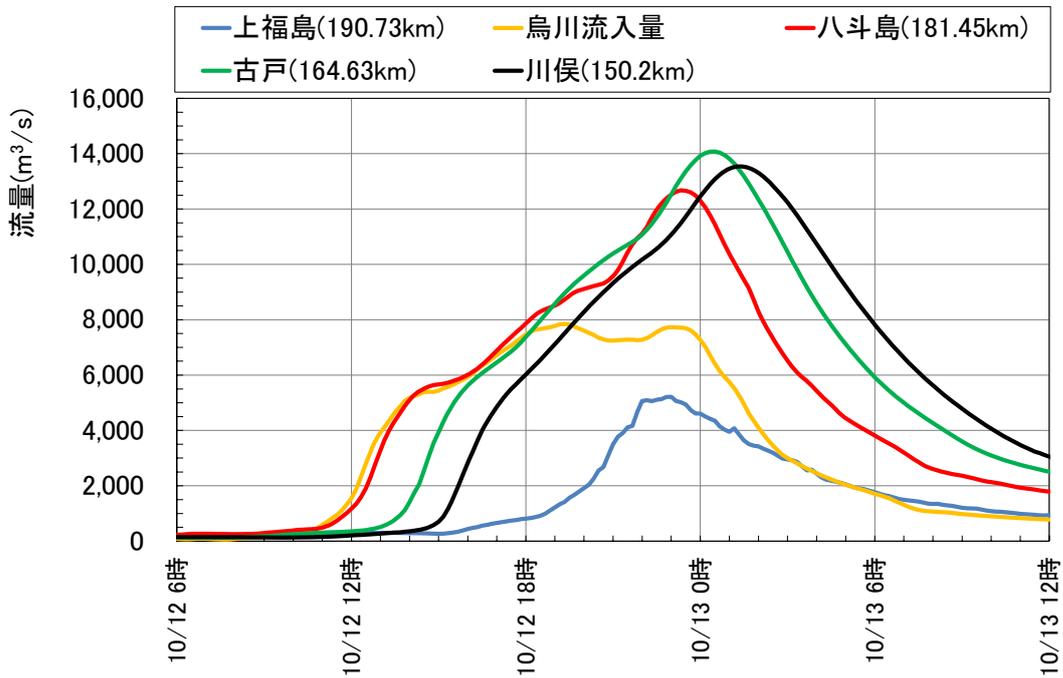
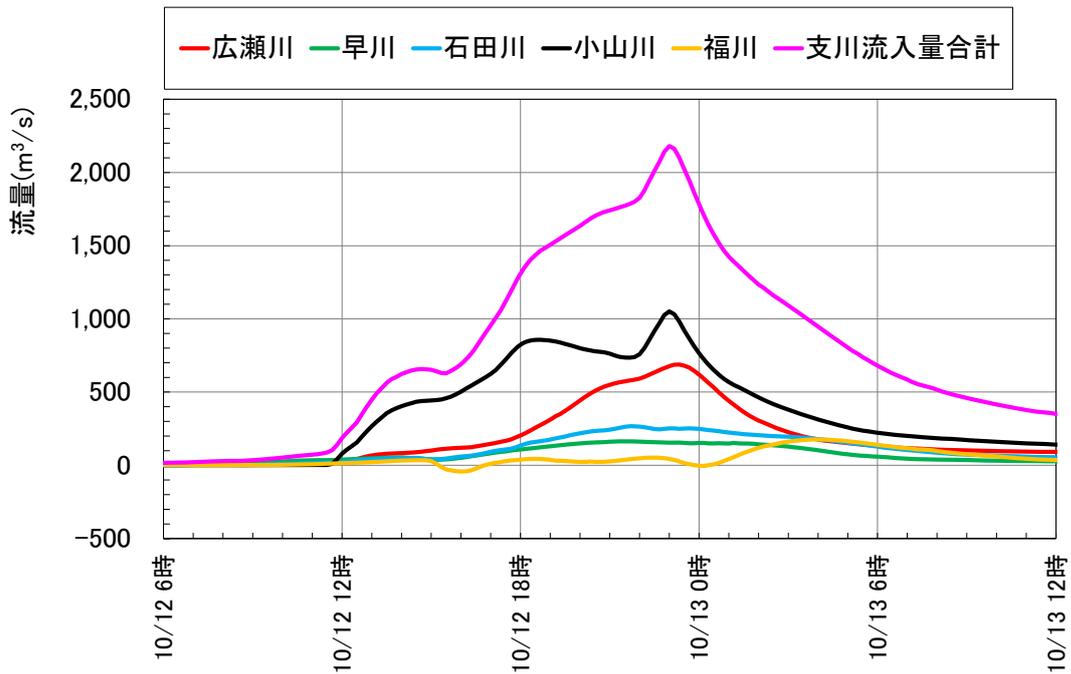


図 5.5.23 2019/10/13 3:00 における H.W.L と解析水面形の差分



(a) 利根川と烏川の流量ヒドログラフ



(b) 群馬県と埼玉県の支川群の流入量ヒドログラフ

図 5. 5. 24 観測水面形の時間変化を説明した解析流量ヒドログラフ

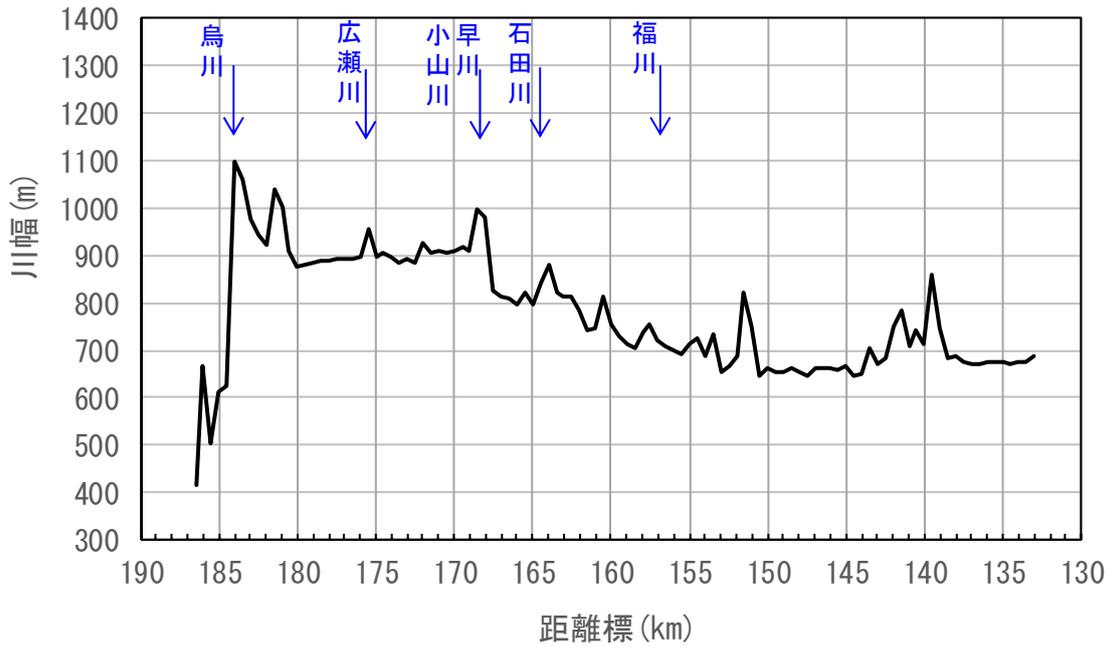


図 5. 5. 25 利根川の堤防間幅

5.5.4 流域治水の各種対策に対する水収支分布の活用

流域治水は、全流域レベル、支川流域レベル、あるいはさらに小さい氾濫域上流が対象となる。検討では、本川上流域、支川流域、小単位の地域、河川等の特性を踏まえて、既存ストックを上手く活用した様々なメニューを抽出し、有効な対策について防災関係者（河川、都市、農林等の管理者や関係者）が実施することになる。

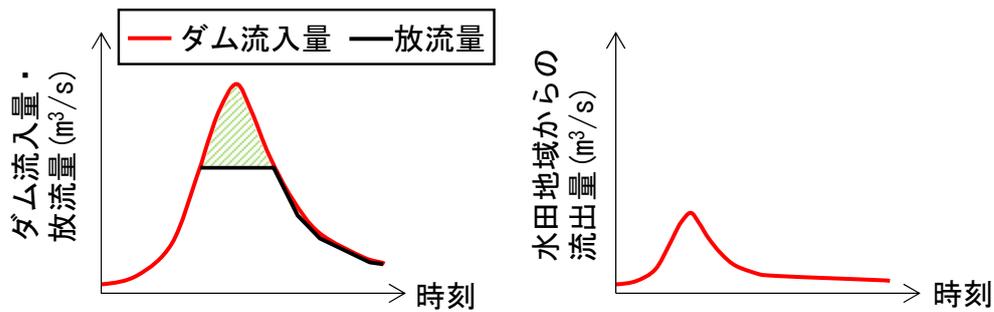
5.5.2 では令和元年台風 19 号における利根川本川と支川群の洪水による水収支分布の時間変化を作成し、洪水水量の分担量や流出特性を説明した。5.5.3 では、同洪水における本川と支川群を一体とみて、H. W. L. に対する流下能力の時空間分布を説明した。これらは、流域の関係者が洪水現象を理解するための基盤情報を与えている。

一方、上記の検討は流域治水の各種対策に対してどのように活用すればよいかを示していない。このため、流域治水の各種対策を踏まえた水収支分布の活用方法を示す。なお、具体の流域治水対策の検討は本研究の範囲ではないため、方向性を示すという観点から、流域治水の施策の一部であるダム事前放流操作による運用と田んぼ貯留に着目し、模式図を使って説明する。

図 5.5.26 は、流域治水対策前の現状におけるダムと水田地域の運用を続けた場合の洪水に対する流量の時間変化を概念図として示している。図 5.5.27 は、同洪水に対して先に示した算出方法にしたがい作成した検討地点上流域の水収支分布と検討地点の流量ハイドログラフを概念図で示している。一方、図 5.5.28 は、上記のダム事前放流操作により治水容量を増やし、現行操作よりもダム放流量を小さくした模式図と、水田所有者が豪雨時に貯留させる取り組みを行うことにより水田地域からの河川流出量を減少させた模式図を示している。図 5.5.29 は、上記の対策を反映した水収支分布と検討地点の流量ハイドログラフを示している。

水収支分布の活用は、地域や支川流域、本川上流域等で、河川、ダム、流域で考えられる対策メニューについて、対策前後で水収支分布や検討地点の水位、流量の時間変化がどのように変わるかを検討し、効果的な対策を見出すことである。具体的には図 5.5.27 の流域治水対策なしの水収支分布と図 5.5.29 の対策ありの結果を比較し、ダム事前放流操作と洪水に対して実施する高度なダム操作により、水収支分布のダム貯留量を検討地点のピーク時刻前にどの程度増加できるか、それに伴う検討地点の水位・流量のピークをどの程度抑えられるかを検討する。また、田んぼ貯留を実施することで、水収支分布の流域貯留量を洪水ピーク前に増加できるか、また、検討地点の水位や流量にどの程度効果を発揮するかを確認する。重要なポイントは、ダム、流域、河道の分担量、すなわちダム貯留量、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下流の河川分担量を減らすこと、検討地点の洪水ピーク水位や流量を低減させ、波形を寝させることである。また、上述の対策により、その下流では、氾濫した場合のボリュームが減少するため、堤内地盤高と高水敷高の高い方の敷高（堤防が破堤した場合の敷高）以上となる流量ハイドログラフのボリュームの減少効果も評価すべきである。これらの検討は、上述したように全流域レベルを対象にするのか、支川流域レベル、さらに小さい氾濫域上流を対象にするか、また、洪水波形や洪水規模によ

って効果が異なる。流域治水の取り組みは始まったばかりであり、自治体と河川管理者等が協働して有効な対策を考え、その効果を検討し実践していく。有効な対策として第一に重要なことは、対策を行う地域と地域を流れる河川の治水安全度を向上する取り組みである。本川下流の治水安全度の向上は、上記の個別対策の積分として作用するものもある。対策の効果を評価する場合は、水収支分布図と併せて、対策有無による縦断水面形の時間変化や本検討の見える化した流下能力図を用いて、対策の影響区間を分析することが重要である。



(a) ダムの流入量と放流量のハイドログラフ (b) 水田地域からの流出量ハイドログラフ

図 5.5.26 現在(流域治水の対策なし)のダム運用と水田地域からの流出量の概念

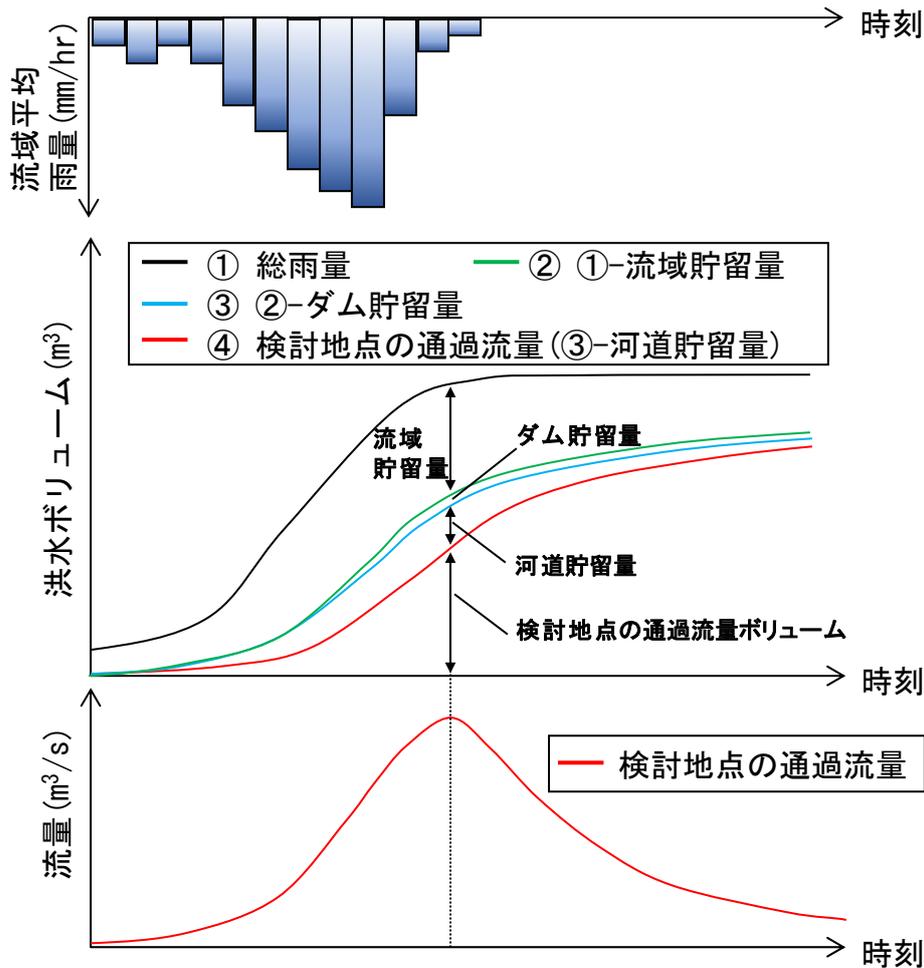
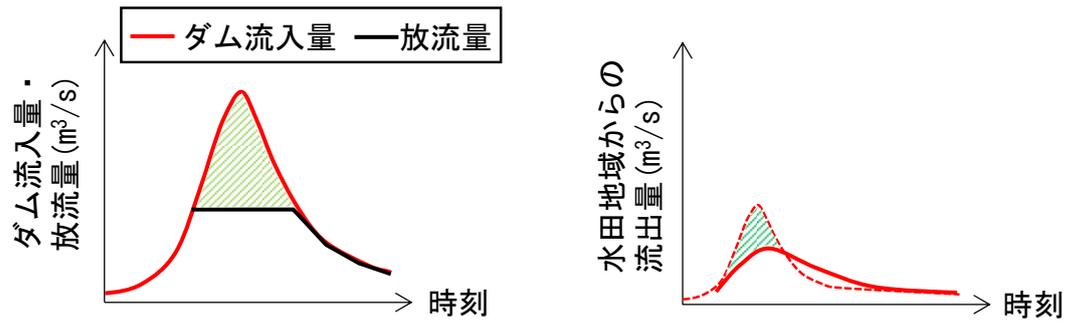


図 5.5.27 現在(流域治水の対策なし)の水収支分布の時間変化



(a) ダムの流入量と放流量のハイドログラフ (b) 水田地域からの流出量ハイドログラフ

図 5.5.28 流域治水を踏まえたダム事前放流による高度な運用と田んぼダムによる流出量変化の概念

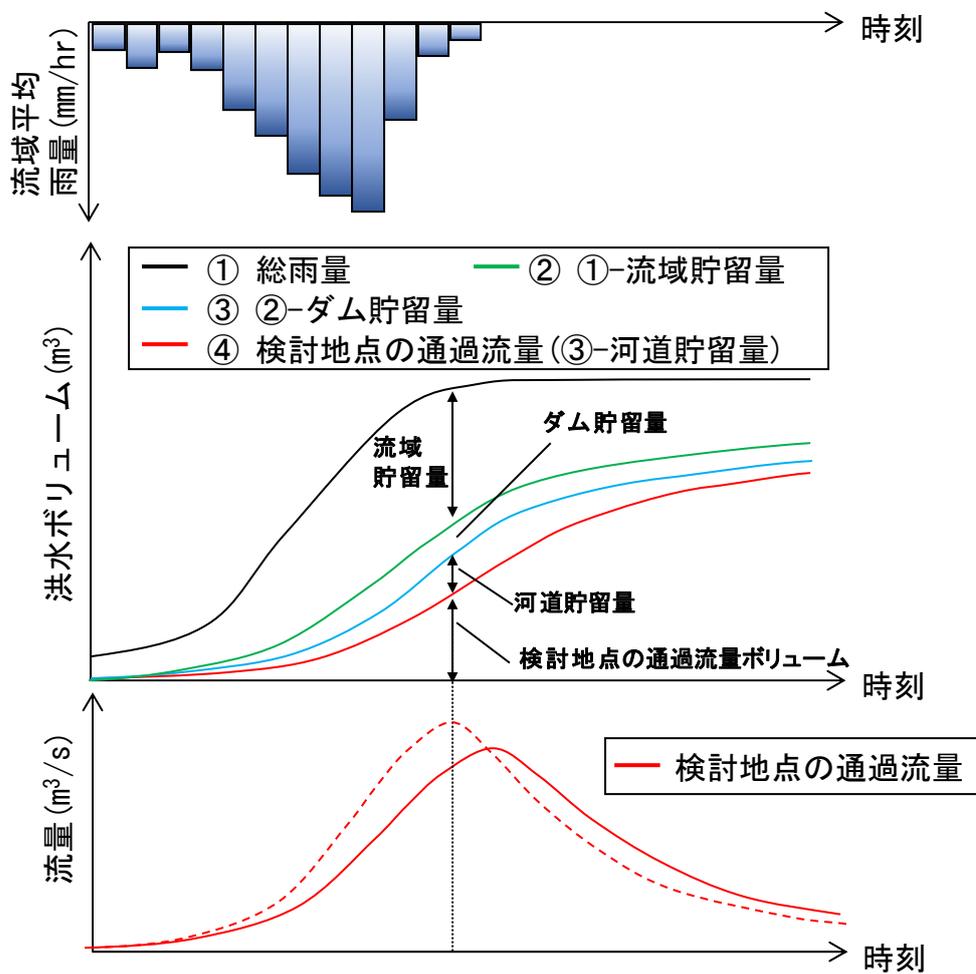


図 5.5.29 流域治水の対策メニューを反映した水収支分布の時間変化

5.6 結言

本章では、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た。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号出水に適用した。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た。以下に本章で得られた結論を示す。

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。

本研究では、本・支川・2次支川に整備された観測水面形の時間変化は、時空間分布を持ち、降雨に対する流出の応答や洪水流下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。上記解析法を利根川上流域に適用した結果、観測精度の高い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。令和元年台風19号の豪雨に対する上記の利根川の流量ハイドログラフの形成特性を説明した。上記の本・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。

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・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たことを説明した。

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に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。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：革新的河川技術プロジェクト ～危機管理型水位計の実装状況とその効果～，建設マネジメント技術，pp. 24-28，2020
- 2) 国土交通省関東地方整備局：台風 19 号における利根川上流ダム群の治水効果（速報），2019. 11.
- 3) 福岡捷二，渡邊明英，永井慎也：河道内貯留量推算のための水位観測法と粗度係数に与える流れの非定常性の影響，河川技術論文集，第 10 巻，pp. 71-76，2004.
- 4) 土木学会水理公式集：2018 年度版
- 5) 福岡捷二：実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性，河川技術論文集，第 20 巻，pp. 253-258，2014.
- 6) 見上哲章，福岡捷二，渡邊明英：観測水面形の同化解析データを利用した洪水流伝播とタンクモデルの流出量修正に基づく水面形予測，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 76, No. 2, I_775-I_780，2020.
- 7) 内閣府：平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について
- 8) 太田市：令和元年東日本台風（台風第 19 号）【被害概要等報告書】（第 2 版）
- 9) 福岡捷二，田端幸輔，出口桂輔：平成 27 年 9 月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力，河道貯留及び河道安定性の検討，河川技術論文集，第 22 巻，pp. 373-378，2016.
- 10) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて，河川技術論文集，第 23 巻，pp. 251-256，2017.
- 11) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第 28 巻，pp. 457-462，2022.
- 12) 竹村 吉晴，福岡 捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集 B1(水工学)，Vol. 75, No. 1, pp. 61-80，2019.
- 13) 諏訪義雄：河川構造物の洪水に対する応答特性と減災への反映，中央大学博士論文，2021.

第6章 結論

6.1 結論

本研究では、水災害による洪水時の住民避難に資する高精度な実時間水面形予測手法を開発した。また、流域で生じる洪水現象を理解するために必要な本川、支川群及び小流域を一体とした降雨流出・洪水流解析法を提示し、観測データと解析結果に基づく支川群流域と本川流域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している。

以下に本研究で得られた結論を示す。

2章では、まず、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示した。次に、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示し、合衆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。

3章では、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と各種の洪水予測手法に関する既往研究を概観した。既往研究では、近年の観測精度の高い水位を基にした同化解析や洪水予測に関する研究はあるが、進行中の洪水に対して、リアルタイムに自動で縦断水面形を観測水面形に同化し洪水予測に適用した研究は少なく、観測水面形への同化解析に必要な観測水位の数の検討、さらには、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。このため、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うこととした。

降雨流出・洪水流解析に関する既往研究では、水位に比べて観測点が少なくダムや堰を除いて観測精度が高くない流量をベースとする検討が多く行われている。また、我が国では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が多い。このため、これらの検討方法では、流域治水を進める本・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ことを示した。そこで、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、それに基づいた本川と支川流域単位の降雨に対するダム、河道、流域の水量分担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ことを本研究の位置づけとした。

4章では、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と、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。

構築した洪水流同化解析モデルを利根川上流区間の3洪水に適用した。この結果、観測水面形時間変化を説明する縦断水面形の同化と、上流端流量ハイドログラフ、分類化された粗度係数、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を示した。

H29年10月台風21号の出水において数多くの貴重な水位データを取得することができた。この観測水位データから、水面形同化解析に用いる制御変数の要素数が観測地点数よりも多ければ逆推定される制御変数のパラメータ値が一定値に定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。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の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を精度よく予測できるという考えである。2つ目の予測の考え方は、上記に関して、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であり、その流量は下流の観測水面形の時間変化を説明できることが求められる。1つ目の水面形予測の検討で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、利根川の洪水流量の縦断変化は、水位、川幅、水面勾配、粗度の縦断変化で近似し、解析上流端の水位を連続式に対する特性曲線法により下流側に伝播・変形させ、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の検討では、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山地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利根川の洪水に適用した結果、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が時系列に定量的に示された。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。

5章では、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・洪水流特性であることを説明した。

本研究では、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。

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。

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。

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。

以上の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。

6.2 今後の課題

(1) 洪水予測の課題

本研究では、精度の高い観測水面形の時間変化を基にした現在時刻の河川縦断水面形の同化手法と今後数時間先の水面形を予測する高精度な洪水予測手法を提示した。本手法は本川の1本河道を対象としている。今後は、提示した手法を都道府県管理区間まで延伸し、本川上流区間や支川群を含めて流域河川全体に適用することで、水位伝播時間を延ばし予測時間の長時間化を図ることが重要である。その場合、支川や2次支川等の都道府県管理区間での水位計の整備と河道測量の取得が洪水予測の精度に影響するため重要な情報となる。

(2) 支川に流入する2次支川等における観測データの整備と流域内の詳細な流出過程や対策を反映可能な流出解析モデルの改良

本検討では、群馬県管理の広瀬川を除き、2次支川の測量精度が十分でなかったため、洪水解析区間は本川と1次支川を対象とした。我が国には、埼玉県管理の小山川のように、2次支川の集水特性を有する支川流域が数多くある。このような河川に施設能力以上の外力が生じると、流下能力の低い2次支川から越水や氾濫が生じやすい。したがって、本・支川への適切な流入量や氾濫リスクを評価するためには、2次支川やさらに低次の支川も検討対象にすることが望ましい。今後、上記の中小河川の測量断面データの整備が期待される。また、流域の都市部や田んぼなどで今後実施されるであろう流出抑制対策は、これら支川や2次支川あるいは3次支川に流入する地域で行われるため、上述の測量断面の整備の他、流域対策の効果を評価するため、水位観測等の洪水観測も必要不可欠である。

流域内の河川網に対する測量データと水位データが得られれば、観測水面形に基づく洪水解析法を用いて、河川網の水位・流量・河道貯留量が高精度に算出可能である。これまで限られた河川でしか評価されなかった河道貯留量が、流域内の河川網を対象に評価されることにより、水収支分布の信頼性が向上する。

一方、降雨に対する小流域からの流出量の検討については課題がある。本研究の降雨流出解析法は2次支川流域を対象としたタンクモデルであり、2次支川から1次支川への流入量を説明する場合は問題ないが、流域内の地形や土地利用、地質に応じた場所毎の流出量は評価できていない。また、流域対策は個別施設や地域レベルで実施されるため、降雨流出モデルには、対策内容に応じた貯留機構を考慮する必要がある。今後の課題として、上述した流域の地形・土地利用・地質や人為的な流域対策等を降雨流出過程に反映し、また、雨水が吐けない場合は内水氾濫も表現可能な解析法に改良する必要がある。このような検討が可能になれば、河道、ダム等の河川区域を除いた流域の面的・時間的な雨量の貯留・排水状況と流域対策の効果も評価可能になる。また、水収支分布図に示した流域貯留量の中身の詳細もわかり、今後の流域対策を検討する際に役立つと考えられる。

(3) 気象予測モデルの降雨量を検証するための地上から求まる雨量データの提供

今後、河川では、気候変動による降雨量増加を勘案した治水計画に取り組む。外力である降雨予測は気象モデルに基づくため、その信頼性が求められる。本研究では、1次支川の観測水面形に基づき、洪水流と降雨流出の解析モデルを介して2次支川からの流入流量を推定している。今後、同手法を他の洪水に適用することで、流出解析モデルの定数の信頼性を高めていく。

今後生じる上記とは異なる大規模な洪水に対して、観測水面形の時間変化から小流域の雨量の時間変化を逆推定する。これにより、空から求まる気象モデルによる降雨量を精度検証する地上から求まる雨量データを提供する。

謝辞

私は、平成 16 年 4 月に株式会社東京建設コンサルタントに入社しました。その後 15 年が経過した平成 31 年 4 月に中央大学大学院社会人博士課程に入学し「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・洪水流解析法」に関する研究を始め、この 3 年半の間、多くの人に支えられながら、どうにか論文をまとめることができました。

本研究のテーマを与えて頂き、最後までご指導いただいた中央大学研究開発機構 福岡捷二教授には深甚なる感謝の意を表します。福岡先生には、研究の方針や内容について、いつも大局的視点から多くのご指導・ご鞭撻を賜りました。また、研究に限らず、技術者のあるべき姿、日常から物事を考えること、知的好奇心をもつことなど、様々な面においてご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

主査である中央大学理工学部 檜山和男教授には、解析法や研究のとりまとめ方等について貴重なご指摘とご助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

中央大学理工学部 手計太一教授、谷下雅義教授、鎌倉稔成教授、埼玉大学大学院理工学研究科 田中規夫教授には、ご多忙の中、論文審査を通じて有益なご指摘とご助言を賜りました。ここに御礼申し上げます。

国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所、埼玉県県土整備部河川砂防課、群馬県県土整備部河川課の皆様には、貴重な観測データのご提供を受けました。また、国土交通省関東地方整備局河川部におかれましては、私の研究発表の場を与えて頂きました。ここに御礼申し上げます。

中央大学研究開発機構 後藤岳久准教授、竹村吉晴准教授、高鋸裕也助教、琉球大学(前中央大学研究開発機構)福田朝生准教授、国土交通省国土政策総合研究所(前中央大学研究開発機構)田端幸輔主任研究官には、研究内容について議論し、多くのアドバイスを頂きました。心より感謝致します。また、仲井いく子様には、私が研究に専念できるように多大なご配慮をいただきました。厚く御礼申し上げます。研究室の学生皆様の研究に対する熱心な取り組みが私の刺激となり、研究を進めることができました。研究室の学生皆様に感謝致します。

株式会社東京建設コンサルタントの渡邊明英氏は、洪水予測に関する研究の共同研究者であり、多くの議論を行い、私の数値解析技術の能力を向上させて下さいました。また、幸弘美 前環境防災本部長をはじめとする皆様には、社会人である私の大学への進学をご理解いただき、在学中にも多大なご支援を賜りました。心より御礼申し上げます。

最後に、私の研究を理解し、常に支え続けてくれた妻 恵と、子 陽向、杏奈に心より感謝致します。