

技術報 河道一次元不定流モデルを活用した中小河川の洪水予測モデル構築

河川計画事業部 第三部 ○吉田 天 / 飯野 広大 / 大橋 真人

近年の自然災害の激甚化・頻発化を起因とした洪水氾濫により各地で浸水被害が多発している。甚大な被害を防止・軽減するために、国土交通省や各自治体が発表する洪水予報の精度を高めることが重要である。国土交通省ではバックウォーター現象などによる本川・支川合流地点における浸水被害の発生を予測するため、本川・支川一体で水位予測を行うモデルを導入し、直轄管理洪水予報河川だけでなく、その上流部や支川についても高精度で長時間先の予測を行うこととした。一方で、本川・支川一体で水位予測を行うモデルの構築は、県管理河川の限られた基礎資料の中で流域特性に応じたモデリングおよびシステム化を行う必要がある。本稿では、本川・支川一体の洪水予測モデル構築時における一次元不定流モデルの活用事例を報告する。

キーワード：洪水予測、RRI モデル、河道一次元不定流モデル、水害リスクライン

1. はじめに

近年、気候変動の影響により全国的に豪雨による洪水氾濫が激甚化・頻発化しており、甚大な浸水被害等が増加している。また、本川・支川の合流地点については、本川からのバックウォーター現象により、支川の流下能力が減少し、氾濫が発生している。このような洪水氾濫に対応するには、ハード対策のみでは対応しきれない場合も多く、洪水の危険度情報を早期かつ的確に発信することで、的確な水防活動や住民の迅速な避難が求められている。そのため、直轄管理河川だけでなく、県管理河川においても洪水予報河川および水位周知河川の水位をリアルタイムかつ的確に予測するための洪水予測システムの構築および改良が求められている。

国土交通省では、水害リスクラインと呼ばれる、全国 109 水系統一の計算手法で構築された洪水予測システムを令和 3 年度より運用しており、各直轄管理観測所における 6 時間先までの予測水位および予測縦断水位を行政向けに公開している。

本業務は、国土交通省が管理する X 水系について、流域内の直轄管理および県管理の洪水予報河川、水位周知河川の水位を本川・支川一体で予測する洪水予測システム構築を目的とした。洪水予測システムは国立研究開発

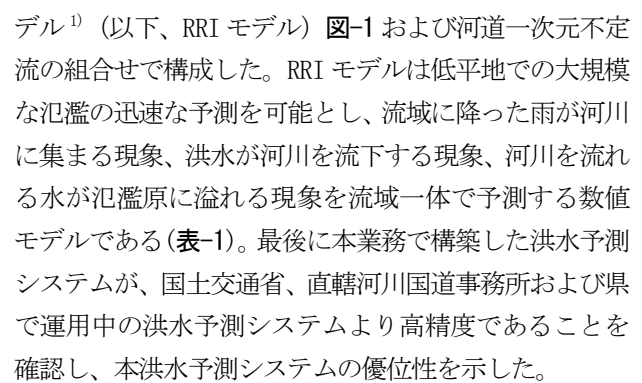
法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）が開発した Rain-Runoff-Inundation モデル¹⁾（以下、RRI モデル） および河道一次元不定流の組合せで構成した。RRI モデルは低平地での大規模な氾濫の迅速な予測を可能とし、流域に降った雨が河川に集まる現象、洪水が河川を流下する現象、河川を流れる水が氾濫原に溢れる現象を流域一体で予測する数値モデルである（表-1）。最後に本業務で構築した洪水予測システムが、国土交通省、直轄河川国道事務所および県で運用中の洪水予測システムより高精度であることを確認し、本洪水予測システムの優位性を示した。

表-1 分布型モデルと RRI モデルの比較表

分布型	←比較→	RRI モデル
KinematicWave 法	斜面・河道の追跡	DiffusionWave 法
×	河道からの氾濫	○
河道の流量は下流方向に逆転しない		河道と斜面で水交換するので氾濫を考慮できる
地勢勾配 流下方向を 予め設定	斜面の流下方向	水面勾配 流下方向を 逐次意思決定

2. 存在した課題

1) 県管理観測所の流量データを利用しない RRI モデル調整

RRI モデルの構築において、より詳細な流出特性を表現できるよう、上流側から河川ごとに分割した流域単位で構成しパラメータ調整を行う必要がある。直轄管理観測所がモデル流域に存在する場合は、モデル検証に観測流量を利用可能であるが、県管理観測所において観測されるデータは水位のみのため、モデル検証に実績流量が利用できない。また、航空レーザ測量データから作成した H-Q 式のモデル検証への利用は、誤差要因排除の観点から望ましくないと考えられる。県管理観測所における実績水位データを利用した、RRI モデルのパラメータ調整が課題である。

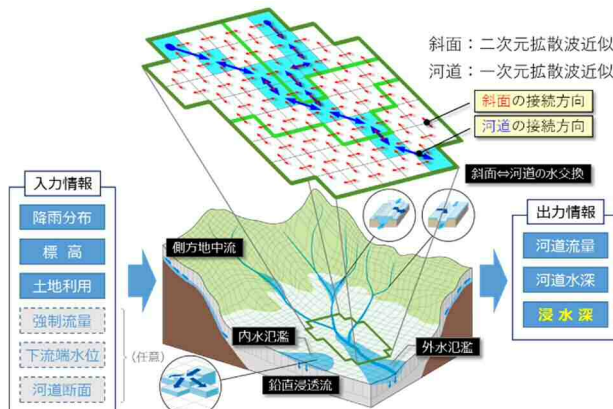


図-1 RRI モデルの概念図

2) バックウォーター現象による県管理河川の洪水

再現

本川・支川の合流点において本川からのバックウォーター現象で支川の流下能力が減少し、特に支川下流側で水位が上昇しやすくなる。このような中、現在、行政向けの水害リスクライン画面においては、洪水の危険度に応じて直轄管理区間の河川堤防を 5 段階で着色し、線情報として水位予測値を提供しており、また今後県管理区間への機能拡充が想定されている。

バックウォーター現象による支川の水位上昇を的確に予測するために、直轄本川を流下する流量および水位の再現予測精度を確保することが課題である。

3. 解決する技術

1) 河道一次元不定流モデルと組合わせた RRI モデル検証

本業務において、国土交通省が指示する RRI モデル検証方法は、実績流量を境界条件とした RRI モデル流域ごとの個別流量検証であり、RRI モデル検証時に河道一次元不定流モデルとの接続を行わないこととしていた。しかし、本業務では県管理観測所の実績水位を RRI モデル検証に利用するために、RRI モデルと組合わせた河道一次元不定流モデルの計算水位を検証する方法を提案した。具体的には、RRI モデルで算定した計算流量を、落水線に応じた適切な河道一次元不定流モデル断面に横流入の境界条件として与え、実績水位による検証後、RRI モデルと河道一次元不定流モデルを同時に調整した(図-2)。河川流域ごとに作成した RRI モデルは 22 モデルであり、そのうちモデル検証に県管理観測所の実績水位データを利用したモデルは 10 モデルである(表-2)。

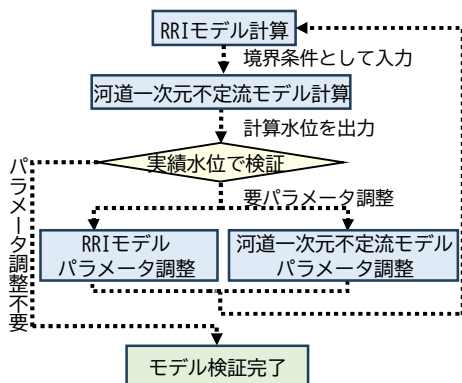


図-2 実績水位によるモデル検証フロー

RRI モデルの計算流量を落水線に応じた河道一次元不定流モデルの断面に与えるため接続設定を行った。

まず、地形情報のモデル化にあたり、日本域表面流向マップ (v. 1.4) ²⁾より 1 秒 (約 30m) メッシュで整備さ

表-2 RRI モデル検証方法とモデル数

検証地点	モデル検証方法	RRI モデル数
直轄管理観測所	実績流量を用いた RRI モデル単体検証	6
ダム	ダム流入量を用いた RRI モデル単体検証	6
県管理観測所	実績水位を用いた河道一次元不定流モデルによる検証	10

れている水文地形データから地盤高 (DEM)、流下方向 (DIR)、上流集水ピクセル (ACC) を抽出し、1 秒メッシュデータを 10 秒メッシュへスケールアップしたデータを利用した。スケールアップした際に流路網が現実と乖離していた場合には、航空写真や GIS データ等を参考に修正を行った。河道一次元不定流モデルの河道断面ピッチは直轄管理河川で 200m としたが、県管理河川においては急勾配の水位計算を安定的に実施するため、100m ピッチを基本として構築した。作成した 10 秒メッシュの流下方向 (DIR) と河道一次元不定流モデルの測線を重ね合わせ、河道一次元不定流モデルに横流入を設定する測線を検討した。河道一次元不定流モデルに入力する横流入量はおよそ 500m ピッチとし、RRI モデルの河道メッシュから出力される計算流量の下流側と上流側の差分を与えた。図-3 に示す例において、河道一次元不定流モデル 15.1k 地点に設定する横流入量は 14.6k 地点 RRICalcQ と 15.1k 地点 RRICalcQ の差分とした。

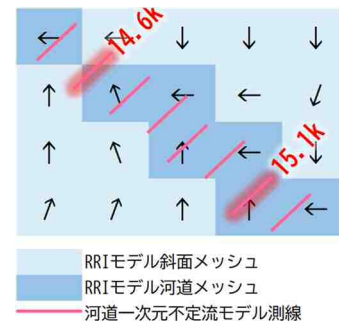


図-3 河道一次元不定流モデルへの横流入設定例

モデルパラメータ調整の要否は、図-4 に示すように、洪水波形の立ち上がりから低減部までの計算水位を Nash-Sutcliffe 係数 (以下、NS 係数) を用いて誤差評価し、0.7 以上でモデル検証完了とした。

$$NS \text{ 係数} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_{o(i)} - H_{c(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (H_{o(i)} - H_{av})^2}$$

$$H_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{o(i)}$$

このとき、 N = 計算時間数、 $H_{o(i)}$ = 実績水位、 $H_{c(i)}$ = 計算水位、 H_{av} = 実績水位の平均値

当手法では、RRI モデルと河道一次元不定流モデルを同時に調整する必要があり、計算誤差の要因となっているモデルの分析および選定が困難になりうる。そこで予め直轄管理観測所を包括するように RRI モデル分割を行い、直轄管理観測所の実績流量で RRI モデルパラメータを一次設定することでパラメータ調整を容易にした。

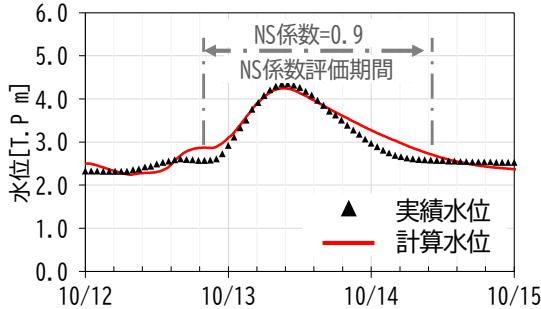


図-4 k 観測所における NS 係数算出結果

2)高水時に着目した水系全体の河道一次元不定流モデル改良

現在国土交通省で運用されている水害リスクラインにおいても河道一次元不定流モデルが適用されている。しかし、外水氾濫が考慮されておらず、河道に流出する計算流量の全量が流下するため、特に流下能力が不足していると考えられる県管理河川上流の氾濫およびそれに起因する流量低減が再現できず、下流河川の計算水位が過大に評価されてしまう傾向にある。そこで本業務では、図-5 に示すように河道一次元不定流モデルに堤防越水機能を追加し、河道水位が堤防高を超過した場合に本間の越流公式の完全越流として越水量を算出し、河道流量の低減が再現可能な洪水予測モデルとして改良を行った。堤防越水機能を追加する区間は直轄管理観測所および県管理観測所の山付き区間を除く全区間とした。なお、山付区間および堤防高は、直轄管理河川においては基準水位算定表（令和 4 年度版）および定期横断測量から整理し、県管理河川については航空レーザ測量データから作成した河道横断データおよび航空写真、現地調査から整理した。

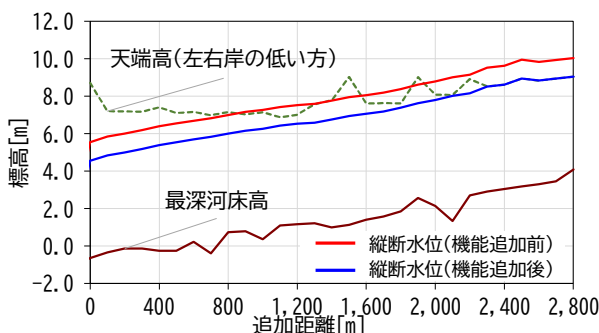


図-5 k 観測所における堤防越水機能効果

また、対象とした X 水系においては直轄管理河川本川 X 川の中流部高水敷で広大なりんご園が営農されており、洪水時の水位上昇に影響を及ぼしていると考えられる。そのため、本業務では河道一次元不定流モデルの河道粗度係数に着目し、りんご園の河道粗度係数を考慮した改良を行うことで、高水敷を超過するような大洪水時の縦断水位に対しても再現精度を確保した。河道粗度係数の検討においては、まずデフォルト値として令和 5 年度 X 水系河川整備計画に記載された低水路粗度係数、高水敷粗度係数、りんご園粗度係数を河道断面ごとに設定した。その後、実績水位による検証とパラメータ調整を行い、適切な河道粗度係数を設定した。表-3 には本川 X 川で設定した河道粗度係数、図-6 および 図-7 には本川 X 川における水位再現精度を示す。

表-3 本川 X 川における変更後の河道粗度係数

河川名	区間[km]	高水敷粗度係数		
		低水路	植生域	りんご園
X 川	0.0-0.9	0.020	0.073	-
	9.2-18.0	0.020	0.045	-
	18.2-28.0	0.038	0.028	-
	28.2-37.0	0.032	0.022	0.137
	37.2-46.0	0.038	0.033	0.185
	46.2-52.0	0.034	0.039	0.200
	52.2-57.2	0.033	0.045	0.080

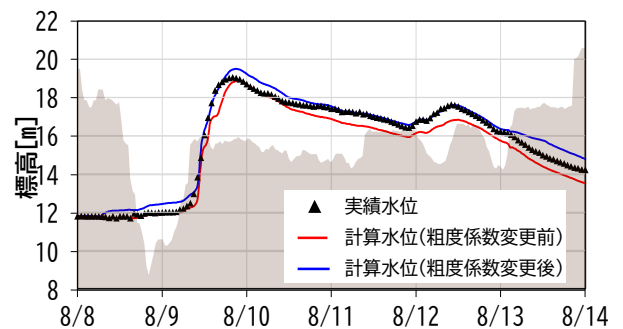


図-6 本川 X 川 s 観測所における水位再現精度の比較

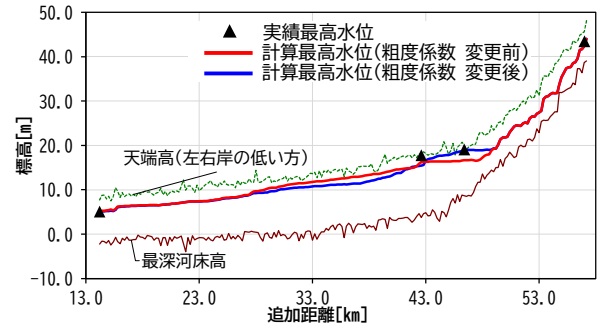


図-7 本川 X 川(13.0k-57.2k)における縦断水位再現精度の比較

洪水予測システムの運用時には水位予測値を出力するすべての対象水位観測所で、10 分間隔で 36 時間先までの水位予測値を演算し配信を完了する必要がある。

る。ただし本手法では、直轄管理区間の河道一次元不定流モデルの各断面は、河道粗度係数を区分ごとに与えるために複断面として計算しており、単断面として計算する場合と比較して予測計算時間が増加する。表-4 に示す、洪水予測システム運用時に利用する降雨プロダクトと同一の条件で予測時間を検証した結果、予測計算時間が 10 分を超過していたため、図-8 に示すように河道一次元不定流モデルの各河道断面を単純化し、測点を概ね 1/10 程度まで減少させることで対応した。

表-4 運用時に利用する降雨プロダクト一覧

降雨プロダクト 項目	Cバンドレーダー オンライン合成雨量	降水ナウキャスト	降水短時間予報	MSM
所管	国交省	気象庁	気象庁	気象庁
書式	統一S独自書式	統一S独自書式	統一S独自書式	GRIB2で圧縮
サイズ	1km	1km	1km	5km
配信間隔	5分毎	10分毎	30分毎	3時間毎
予測ピッチ	-	10分先	1時間	1時間
予測時間	実況雨量	60分先まで	6時間先まで	39時間先まで

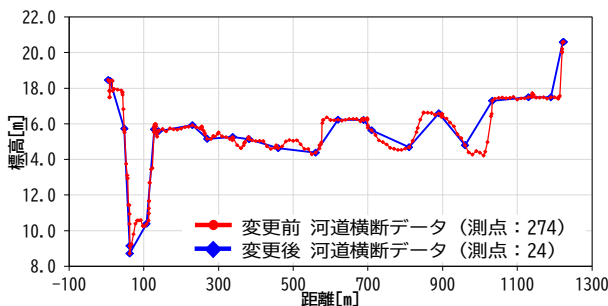


図-8 本川X川46.2k地点における河道横断データの比較

4. まとめ

本業務では、都道府県への水位予測情報提供を前提に、本川・支川一体の洪水予測システムを最適な手法で構築した。また、河道一次元不定流モデルの活用が、下記に示す中小河川の洪水予測システム構築における特有の課題に対する解決策の一事例となることが示唆された。

課題1) 県管理観測所の流量データ未観測

課題2) バックウォーター現象による洪水氾濫

最後に本洪水予測システムで得られた予測水位を、現行運用されている水害リスクラインおよびA河川国道事務所独自システム（分布型モデルおよび貯留関数法モデル）で出力された予測水位と比較し、本洪水予測システムの優位性を評価した。水位予測精度評価には3.1で前述のNS係数を用い、運用時と同一の降雨プロダクトを用いた予測計算に対して、予測先行時間ごとに6時間先予測までの評価を行った。表-5には例として、支川H川

T観測所における予測水位精度評価の結果を示す。全ての予測先行時間において、本検討システムのNS係数が最も良好であることが示された。また、その他の水位観測所においても概ね本検討システムの予測精度が最も良好であることを確認した。

表-5 T観測所における予測水位精度評価の比較

(2022年8月洪水)

洪水予測システム		NS係数					
		1時間後	2時間後	3時間後	4時間後	5時間後	6時間後
T観測所	本検討システム	0.99	0.98	0.97	0.93	0.88	0.80
	水害リスクライン	0.97	0.95	0.94	0.87	0.83	0.80
	事務所(分布型)	0.98	0.95	0.93	0.89	0.81	0.70
	事務所(貯留関数法)	0.99	0.97	0.94	0.89	0.83	0.78

※表中の下線は予測先行時間ごとに最も予測精度が良好な

洪水予測システムのNS係数

本川・支川一体の洪水予測システムによって取得した予測水位情報を、都道府県の意向に応じて都道府県管理洪水予報河川における洪水予報にも活用可能となる「気象業務法および水防法の一部を改正する法律」が令和5年11月に施行された。国土交通省が都道府県と連携することで災害対応や流域住民の避難行動を効果的に支援する。また、予測水位に基づく洪水予報の発表で従来より早い段階からの警戒呼びかけを行うなど、氾濫危険情報の発表前倒し³⁾も行われている中、例えば一市町村の中で住民の避難を完結することが困難となるような広域的な災害では、市町村界を超えた広域避難を実施する必要がある、多くのリードタイムを要する。本業務で対象としたシステムは改良を完了し令和7年度に運用開始予定であるが、洪水予測システム構築業務に多く携わる河川技術者として今後は、本業務で得た知見を活かしながら36時間先までの長時間水位予測の精度向上に着目した技術提案を行えるよう、自己研鑽に引き続き努めていきたい。

参考文献

1) Rain-Runoff-Inundationモデル：

https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index_j.html

2) 日本域表面流向マップ(v.1.4)：

<https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/JapanDir/> (1 Dec,2022)

3) 氾濫危険情報の発表前倒しについて：

https://www.skr.mlit.go.jp/oozu/kawa/hijikawa_dk/gensai/13/13_s_hiryol-5.pdf