

中小河川を対象としたリアルタイム水位予測の開発と課題

柿沼太貴・沼田慎吾・望月貴文・久保田啓二郎

1. はじめに

我が国における中小河川はその流域特性上、急激に水位上昇するため、今後、地球温暖化に伴う気候変動により洪水の発生頻度の増加が想定される。安全な避難を確保するためには、少しでも先の水位状況を予測し、住民の避難行動や行政の災害担当者による対応の迅速化を支援するための水位予測システムの整備が急務とされている。

きめ細やかな水害リスク情報の提供は、流域治水における「被害の軽減・早期復旧復興への対策」の一つとして重要な対策である。現在、一級水系においては、上下流連続的に点ではなく線として洪水危険度が把握できる水害リスクラインの整備が進められている¹⁾。一方で二級水系は、一級水系よりもはるかに数が多く、流達時間が短いため、水位予測には即時性が求められ、整備にはより高い技術力が必要である。都道府県管理河川における河川の中でも、ひとたび氾濫すると相当な被害が発生する河川は約1,500河川あるが、水位予測情報を提供している都道府県管理河川は約130河川に留まっているのが実状である。

土木研究所では、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）の一環として、都道府県等が管理する中小河川を対象に安価・簡便なリアルタイム水位予測システムの開発に取り組んでいる²⁾。本稿では、上記取り組みにおいて開発した水位予測システムの手法を示す。また、日本全国から抽出した流域面積・土地利用が多様な125河川（1,500河川の約1割）に開発したシステムを適用した際の予測結果および流出モデル構築時に発生した問題、対応策について述べる。

2. 水位予測システムの構築プロセス

本システムは、大きく分けて4つのプロセスに

より構築している。デフォルトパラメータおよび最適化を用いた流出モデルの構築。予測精度を保ちながらリアルタイム計算を行うための粒子フィルタの適用。データの収集および水位予測解析を短時間で可能とするDIAS上でのシステム構築である。詳細を下記に説明する。

2.1 RRI_GUIを用いたベースモデルの構築およびデフォルトパラメータによる初期解析

水位予測システムにおけるベースモデルを構築するにあたって、物理モデルをベースとし、表面流・中間流・河道流を一体的に扱う分布型流出モデルであるRainfall Runoff Inundationモデル（RRIモデル）³⁾を用いることとした。RRIモデルのGUI（Graphical User Interface）に、地形データとして2018年から山崎ら⁴⁾が公開している日本全域を対象とした日本域表面流向マップ（空間解像度1秒のデータを5秒にスケールアップ）を整備した。降雨データとしてバイナリファイル形式の解析雨量データのフォーマット変換機能等の追加、土地利用データには国土数値情報土地利用細分メッシュデータを加えGUIの汎用性を高めた。なお、河道形状は測量データや衛星画像を基に矩形を仮定し、レジーム則を基本として河道幅・深さを設定している。

次のステップであるパラメータ最適化の実施前に、表-1に示すデフォルトパラメータを用いてベースモデルの精度を確認する。具体的には無降雨時における平水位の整合性や降雨に対するハイドログラフの応答性、H-Q式の信頼性を確認する。デフォルトパラメータとしては、RRIモデルマニュアルに記載されている一般値や既往のモデル構築経験を参考に、国内における中山間地河川に対して平均的な値としている。観測水位による精度検証を行う上で、流出解析結果から得られる河川流量を水位に変換する必要がある。中小河川では水文データが不足している河川が多いため、H-Q式がない場合には水位観測地点における河道

断面や河床勾配を用いて、等流計算によりH・Q式を作成した。

2.2 SCE-UA法^{*}を用いたパラメータ最適化および検証

モデルの再現性を大きく左右するパラメータの推定には、従来から時間と労力を要してきた。また、使用者の一定の水文学的知識に加え、RRIモデルが扱う水文現象の理解が必須である。これが、洪水予測システムを広く普及させるための課題であり、先行研究⁵⁾において洪水予測に適したRRIモデルパラメータの最適化手法を提案している。最適化手法として水文モデルに広く使用されているSCE-UA法（Shuffled complex evolution method）を用いた。

本研究においてもその手法を踏襲し、少なくとも2つのイベントに対して最適化を実施した。基本として、最適化期間は水位の立ち上がりから逡減部までの期間、評価関数はNS（Nash-Sutcliffe）値、最適化パラメータの探索範囲は物理性を損なわない範囲（表-1）を採用している。

2.3 粒子フィルタによる水位予測

粒子フィルタは非線形・非ガウス型の状態空間モデル^{*}に適用可能なフィルタリング手法である。演算機のCPU向上にも相まって、近年粒子フィルタを用いた水位予測が多く行われている。本研究において、システムノイズを与える状態変数は、メッシュ毎の不透水層からの水深に対する補正係数を状態変数として逐次推定する。

尤度評価に関しては、履歴誤差を考慮するために同化期間における各計算値と観測値から算出したRMSE（二乗平均平方根誤差）を評価指標とした。予測時点毎の初期状態量（修正前の斜面水深や河道水深）の与え方は種々あるが、本研究では、モデルの安定性を重視し、重み付き平均値を基本設定としている。粒子フィルタの設定に関しては、参考論文を参考されたい⁶⁾。入力降雨としては、リアルタイム計算時には、気象レーダーと地上雨量計を組み合わせた解析雨量と、解析雨量から得られる降水量分布とそこから算出される移動速度を用いて6時間先までの降水量を示す降水短時間予報を組み合わせた。1ステップ毎に直近3時間を同化期間として、直後6時間の予測を行っている。いずれの設定値も基本値であり、対象流域の特徴に合わせて変更する必要がある。なお、予測

表-1 RRIモデルにおけるデフォルトパラメータと山地の最適化探索範囲

パラメータ	単位	デフォルト	下限	上限
河道の粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$	0.03	0.03	0.05
斜面の粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$	0.6	0.4	1.0
飽和空隙率	-	0.3	0.1	0.6
飽和水平透水系数の α ($k_a = 10^{-\alpha}$)	m/s	2	1 (冪数)	2.3 (冪数)
不飽和空隙率の β ($\gamma_m = \gamma_a / \beta$)	-	2.5	2 (係数)	3 (係数)
土層厚	m	0.5	1.0 固定	

水位の検証を行う際には、降雨の予測精度と区別する必要があるため、実績雨量を予測雨量として扱う降雨完全予測実験（以下「完全予測」という。）と予測雨量のみを用いる実降雨予測実験の2種類の解析を行い、その結果を検証している。

2.4 データ統合・解析システムDIAS上でのリアルタイム水位予測

構築したモデルを用いてリアルタイム水位予測を実施するために、データ統合・解析システム（DIAS: Data Integration and Analysis system）上に自動演算・配信システムを試作した。システムでは降雨や水位等の観測データを収集および格納し、構築したモデル河川を用いたリアルタイム演算、計算結果の描画および配信を行っている。その結果から水位予測手法を改めて評価し、当該研究開発にフィードバックしている。現況では計算間隔を30分とし、予測水位に応じたアラート機能も整備している。

3. 水位予測結果および課題

上記水位予測システムを、日本全国から抽出した125河川に適用し、2008年～2022年に発生した計178イベントにおいて精度検証を実施した結果、約5割のイベントにおいて2時間以上のリードタイムが得られた。また、完全予測を含んだ場合には、全体の約8割で2時間以上のリードタイムが得られた。

構築したモデルを用いて、令和2年7月豪雨時に、実際にリアルタイム水位予測計算された予測結果を図-1に示す。図には検証のために、現時刻から先の水位を付記している。当該河川は流域面積が約60km²、山地の割合が7割の中山間地河川である。結果として、7月14日1時30分の時点で7

^{*}土木用語解説：SCE-UA法、非線形・非ガウス型状態空間モデル

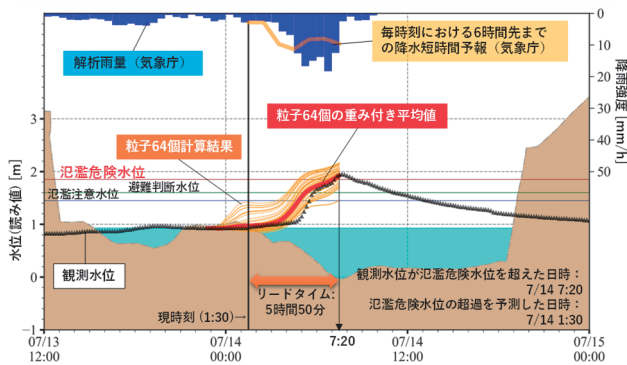


図-1 令和2年7月豪雨におけるDIAS上でのリアルタイム水位予測結果の一例

時10分に氾濫危険水位に水位が到達すると予測し、実際に観測水位が氾濫危険水位に到達するのは7時20分であったことから、5時間50分のリードタイムが得られた。

完全予測でも目標とするリードタイムを確保することができなかったイベントの原因については、下記が予想され随時改善手法を検討している。

- (1) 水位上昇時において粒子フィルタの効果により補正係数が過度に働き、斜面水深が過小になる場合、流出量が減少し、予測水位が低下する。
- (2) 洪水もしくは人為的な影響により、河道の断面形状が変化し、モデル構築時に使用したH-Q式が実河川と乖離。

中山間地河川ではその流出特性から洪水到達時間が早く、目標とするリードタイムが得られるかどうかは、降雨の予測精度に依存するということは明白である。本研究の重要な考え方として、各流域において時々刻々と変化する流出量を如何に精度よく迅速に計算するかに重きを置いている。つまり、降雨の予測精度に依存しない、各流域が持つ洪水到達時間内の水位予測をパラメータ最適化やデータ同化技術を使用して精度を高めることにある。よって、2時間以上のリードタイムに加えて、例えば洪水到達時間が1時間の流域においては、少なくとも1時間のリードタイムが確保できているかどうかを確認している。

4. モデル構築時に生じた問題と対応策

水位予測システムを約1,500 河川で構築するためには、構築手法の容易性が求められる。しかし

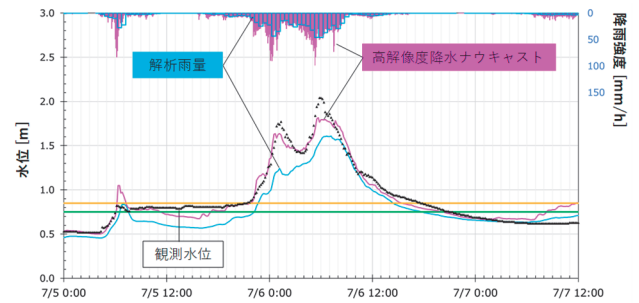


図-2 解析雨量および高解像度ナウキャストを用いたRRIモデル計算結果

表-2 水収支算出結果 (単位: mm)

	解析雨量	高解像度 降水ナウキャスト
累積雨量 (A)	463	688
流域貯留変化量 (B)	21	17
計算流量から算出した 累積流量 (A-B)	442	671
観測水位からH-Q式を通して 算出した累積流量	680	680

※日流出高(mm/day)=流量(m³/s)×(86.4/流域面積(km²))

累積流量(mm)=日流出高×水収支計算期間(day)

ながら、各流域はそれぞれ降雨特性や地質・土地利用等の多様な特徴を有しているため、構築手法の標準化、モデル構築時の問題および解決策の類型化が必要である。ここでは、特に重要な課題を記載する。

- (1) 使用する降雨データの信頼性が低いことによる、計算水位の再現性の低下。
- (2) 測量データやH-Q式が無い、もしくは古い、洪水時の水位データが無い等の水文データが不足している。
- (3) 河川改修等によって、人為的に河道幅・深さが変化する河川ではレジーム則が適用できない。
- (4) デフォルトのモデル空間解像度や30分間隔の解析雨量では、小流域の水位波形を再現することが困難。
- (5) 河床変動が卓越する河川。

現在、それぞれの問題に対しての対応策を検討中であり作成中の水位予測モデル構築マニュアルに取り入れている。紙面の関係上(1)のみを説明する。

モデル構築中、モデルパラメータを調整しても再現精度が向上しない河川・イベントケースが見られた。そこで、原因を特定するために、短期水

収支法による洪水期間中の大まかな水収支の計算による精度検証を行った。具体的には、洪水期間中の流域貯留変化量をRRIモデルから算出し、その値と累積雨量との差が観測水位からH・Q式を通して算出した累積流量と一致しているかを検討した。流域面積が約9km²と小流域における解析結果の一例を図-2に示す。計算水位はデフォルトのパラメータセットを使用した結果である。解析雨量を用いて上記手法により水収支を計算した結果、RRIモデルおよび観測水位から算出した累積流量は、それぞれ表-2に示すように442、680mmと計算値が観測値の7割程度であった。原因としてH・Q式および使用した降雨データの信頼性が低いことが考えられる。H・Q式に関しては、作成年度が対象イベントと近く、低水位も表現できていることから、使用した降雨データの解析雨量が原因と推察される。解析雨量等の信頼性を確認する手法の一つとして地上雨量計設置地点における地点雨量と比較する方法があるが、本対象流域内には地上雨量計が無い場合、空間解像度が250mの高解像度降水ナウキャストを用いて水収支を確認した(図-2)。その結果、計算累積流量は671mmと観測値と概ね一致し洪水波形の再現性も向上した。本イベントでは解析雨量の精度が低下していたが、一方で高解像度降水ナウキャストを使用した場合、水収支の一致度合が解析雨量より劣るケースもあった。

解析雨量等の気象レーダーを用いている降雨データの精度が低下する原因として、建物や山地による電波遮蔽や強雨域による電波減衰等がある。つまり河川の空間的な位置や洪水時の降雨分布によって、降雨データの精度が低下する可能性がある。モデル構築時には上記水収支による精度確認や地上雨量との比較等により、河川や洪水に応じた適切な降雨データの選択が重要である。

4. 終わりに

本稿では中小河川におけるリアルタイム水位予測システムの構築を目的として、RRI_GUIの整備、SCE-UA法によるパラメータの最適化、粒子フィルタを適用した水位データ同化によって、簡便かつ高い洪水再現能力を有する水位予測システムを紹介した。本手法を日本全国から選出した125河川において、精度検証を実施した結果、実績雨量を予測雨量として計算した場合には、約8割のイベントにおいて2時間以上前に予測することができた。また、モデル構築時において生じた問題およびその対応策を示した。今後も多種多様な流域における水位予測ニーズに対応するための研究開発を進めると共に、マニュアル作成し、公開する。

参考文献

- 1) 土屋修一、川崎将生、幕内加南子：水害リスクラインによる洪水危険度の見える化、国総研レポート2019
- 2) 柿沼太貴、沼田慎吾、望月貴文、大沼克弘、伊藤弘之、安川雅紀、根本利弘、小池俊雄、池内幸司：中小河川を対象とした洪水時におけるリアルタイム水位予測システムの開発に向けた研究、河川技術論文集、第27巻、pp.105~110、2021
- 3) 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、第56巻、第6号、pp.18~21、2014。
- 4) 山崎大、富樫冨佳、竹島滉、佐山敬洋：日本全域高解像度の表面流向データ整備、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.74、No.5、pp.163~168、2018
- 5) 柿沼太貴、中村要介、伊藤弘之、池内幸司：複数洪水イベントの組み合わせによる洪水予測に適したRRIモデルパラメータの最適化手法に関する検討、河川技術論文集、第26巻、pp.199~204、2020
- 6) 中村要介、小池俊雄、阿部紫織、中村和幸、佐山敬洋、池内幸司：粒子フィルタを活用したRRIモデルによる河川水位予測技術の開発、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.74、No.5、pp.I_1381~I_1386、2018

柿沼太貴



土木研究所 水災害研究グループ 研究員、博士(工学)
Dr. KAKINUMA Daiki

沼田慎吾



土木研究所 水災害研究グループ 交流研究員
NUMATA Shingo

望月貴文



土木研究所 水災害研究グループ 主任研究員
MOCHIZUKI Takafumi

久保田啓二郎



土木研究所 水災害研究グループ 上席研究員
KUBOTA Keijiro