

中小河川を対象としたリアルタイム水位予測システム

a)背景

近年、豪雨の激甚化・頻発化により、水害による人的・物的被害が日本のみならず世界各国で発生しています。これらの被害は大河川だけでなく、日本でいうところの都道府県や政令指定都市が管理する中小河川においても顕著です。中小河川は流域面積が小さく、降雨発生から水位上昇までの時間が短いため、住民の避難判断に十分なリードタイムを確保することが難しいという課題を抱えています。また、水位や流量といった水文データや河道断面情報が十分に整備されていない河川も多く、従来型の高度な洪水予測システムを導入することは容易ではありません。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中、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知るための水位予測システムの整備が急務となっています。

こうした背景のもと、土木研究所では内閣府官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）（平成30年度～令和4年度）の支援を受け、「住民避難が必要となる河川水位にいつ到達するか」を約2時間前までに予測することを一つの目標とし、中小河川においても導入可能な、短時間で計算可能かつ安価・簡便に必要な精度を有するリアルタイム水位予測システムの開発に取り組みました。本研究は、現場での実用を強く意識し、研究開発から実証、さらに全国展開を見据えたマニュアル整備までを一体的に進めた点に特徴があります。本稿では、本システムの概要について紹介します。詳細については、後述の参考文献を参照してください。

b)リアルタイム水位予測システムの概要

本システムは、大きく分けて以下の5つのプロセスから構成されています（図1）。

1. RRI_GUIを用いたベースモデルの構築
2. デフォルトパラメータによる初期解析
3. SCE-UA法による自動パラメータ最適化
4. 粒子フィルタを用いた水位データ同化
5. DIAS上でのリアルタイム演算・配信

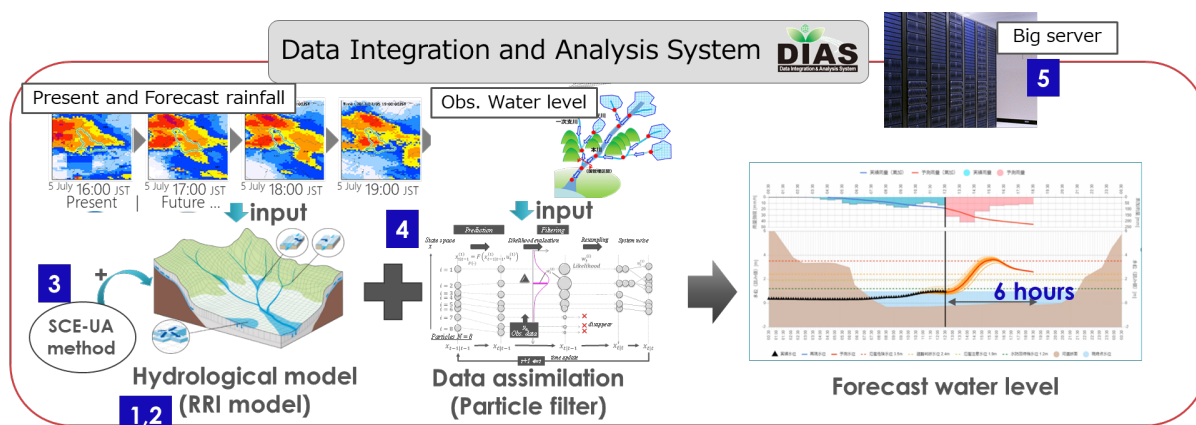


図1 水位予測システムの概要

降雨流出解析には、オープンソースで公開されている降雨流出氾濫モデル（RRI モデル）を採用し、国内データとの親和性を高めた GUI を新たに整備することで、地形データや土地利用データの取得からモデル構築までを簡便に行えるよう改良しました。降雨データについては、気象庁が提供する解析雨量、降水短時間予報、高解像度降水ナウキャストおよび地上雨量に対応しています。なお、本研究で構築したモデルでは、河道横断は矩形断面とし、レジーム則により河道幅および河道深さを設定しました。これらの機能を備えた GUI を用いて、各河川のベースモデルを構築しています。モデルの空間解像度は 5 秒を基本としています。

続いて、デフォルトパラメータを用いた初期計算を実施し、その結果を踏まえて H-Q 式の修正や降雨プロダクトの見直しを行います。デフォルトパラメータとは、RRI モデルのマニュアルに記載された一般値や、200 河川のモデル構築経験を踏まえて設定した平均的な値です。この工程では、主に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を確認し、パラメータ調整以前に存在する課題を抽出することを目的としています。

さらに、モデル構築に要する時間と労力を軽減するため、Duan らによって開発された SCE-UA 法によるパラメータ最適化手法を RRI モデルに組み込み、複数洪水イベントを用いた自動キャリブレーションを可能としました。これにより、従来は専門的知識と多大な作業時間を要していたパラメータ調整を大幅に効率化しています。

そして、粒子フィルタを用いた水位データ同化について説明します。本手法は本システムの中核をなす要素であるため、ここではその考え方と適用方法を概説します。

今回採用した RRI モデルでは、蒸発散などの水・エネルギー収支を考慮していないことから、リアルタイム予測において長時間の計算を継続すると、初期値の誤差が次第に蓄積し、予測結果に大きな影響を及ぼします。この誤差を補正するため、データ同化技術の一つである粒子フィルタを RRI モデルに組み込み、観測水位を用いて計算水位を逐次補正する手法を採用しました。

逐次補正を行う状態変数としては、不透水層からの斜面水深 h_s を選定しました。これは、土壌水分量をリアルタイムで直接観測することが困難であることに加え、RRI モデルにおいて斜面水深の挙動が最終的に出力される河川水位に大きく影響するためです。一方で、河川セルの貯留量など他の状態量に粒子フィルタを適用する研究事例も報告されており、今後さらなる改良の余地があります。なお、中小河川では水位計が 1 地点のみ設置されている場合がほとんどであることから、本システムでは水位計設置地点を評価地点とし、補正係数は流域全体に一律に与える設定を基本としています。

構築したモデルは、データ統合・解析システム（DIAS）上に実装し、降雨および水位の観測データを自動取得したうえで、30 分ごとに最大 6 時間先までのリアルタイム水位予測を実行・配信する仕組みとして構築しました。入力降雨については、現時刻から過去 3 時間分には解析雨量を用い、将来 6 時間分には降水短時間予報を組み合わせ、1 回の計算で計 9 時間分の降雨を対象としています。

本システムで出力された予測水位の精度を評価する際には、降雨予測誤差の影響とモデル自体の再現性を区別する必要があります。そのため、精度検証においては、実績雨量を予測雨量として扱う解析も併せて実施しています。

c)実証結果と精度検証

本水位予測システムを、図 2 に示す通り、多様な地形・土地利用特性を有する中小河川へ適用するため、日本全国から 200 河川を対象にリアルタイム水位予測システムを試行的に構築し、291 洪水イベントについて精度検証を実施しました。その結果、氾濫危険水位またはそれに類する水位を $\pm 50\text{cm}$ の精度で2時間以上前に予測できた事例は全体の75%に達しました。さらに、洪水到達時間が短い小流域を考慮し、「各流域の洪水到達時間内に $\pm 50\text{cm}$ で予測」という基準で評価すると、累計で89%のイベントで目標を達成しました(図3)。

また、構築したモデルを用いて、令和2年7月豪雨時に実際のリアルタイム水位予測を実施した事例を図4に示します。図は DIAS 上で描画される画面に、検証のため現時刻以降の予測水位を付記したものです。当該河川は流域面積約 60km^2 、山地の割合が約7割の中山間地河川です。7月14日1時30分時点において、7時10分に氾濫危険水位へ到達すると予測し、実際の到達時刻は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ました。

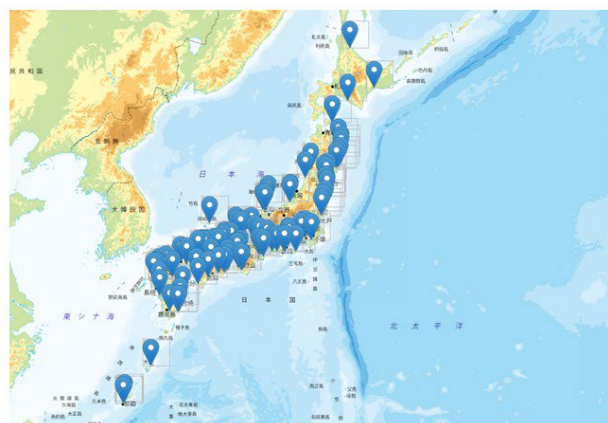


Image of browsing screen of real-time automatic distribution system

図 2 適用した中小河川の位置

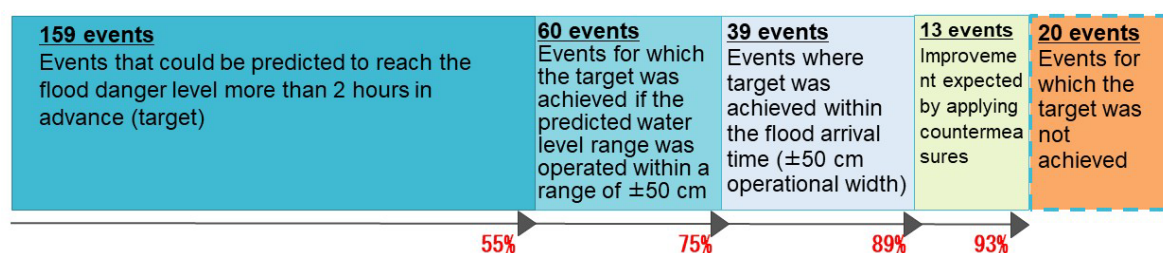


図 3 精度検証結果

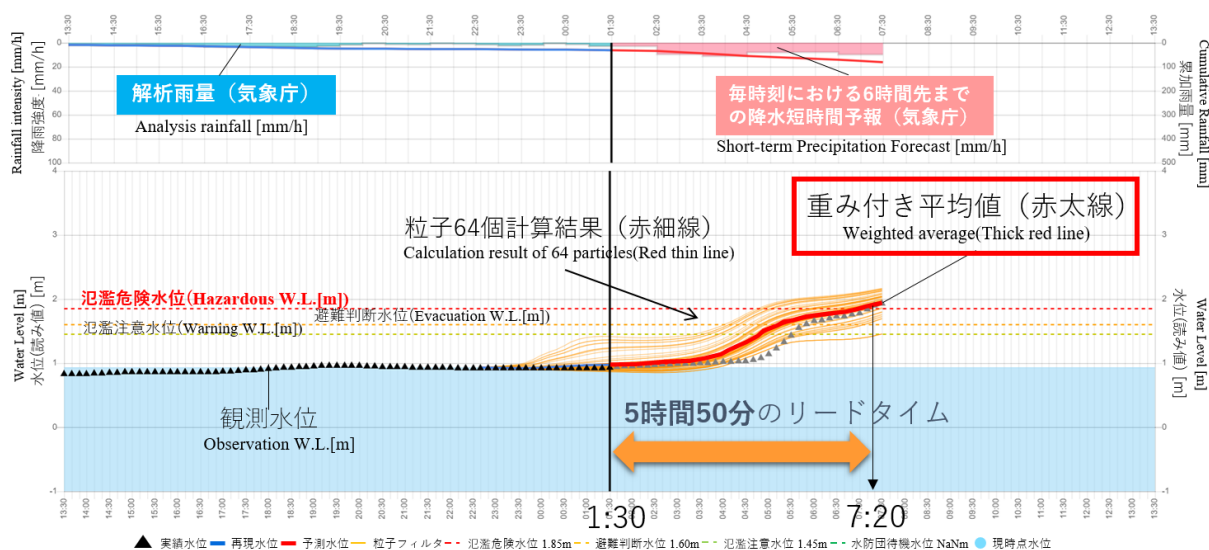


図 4 流域面積約 60km²、土地利用の 7 割が山地の典型的な中山間地河川での豪雨によるリアルタイム水位予測結果(2020 年 7 月 14 日 1:30 時点)。

d)モデル構築マニュアルの整備と全国展開

200 河川におけるモデル構築および検証の過程で得られた知見は、「中小河川洪水予測モデル構築マニュアル」として体系化しました。本マニュアルでは、必要最小限の機能で構築可能な「スタンダードモデル」と、河川特性に応じて選択できる「オプション」を整理しています。

洪水時の水位データが存在しない河川に対しては、流域面積や土地利用割合などを用いた主成分分析により類似流域を抽出し、そのパラメータを流用する手法を提示しました。また、小流域や人為的流量変動、背水や潮位の影響を受ける観測所など、現場で想定される課題についても対応方法を整理しています。

(中小河川洪水予測モデル構築マニュアル：https://www.pwri.go.jp/icharm/research/articles/project-prism_manual_j.html)

e)まとめ

本研究では、RRI モデルを基盤とし、SCE-UA 法による自動パラメータ最適化および粒子フィルタによる観測水位同化を組み合わせることで、簡便でありながら高い再現性を有するリアルタイム水位予測システムを構築しました。全国 200 河川における実証により、約 75%の事例で 2 時間以上前の予測を実現し、洪水到達時間基準では約 9 割に達する精度を確認しています。

研究開発にとどまらず、モデル構築マニュアルとして体系化したことで、現場導入を見据えた社会実装段階に到達した点は大きな成果と言えます。本技術が中小河川を抱える地域において広く活用されることで、住民の円滑な避難行動の実現と水害被害の最小化につながることが期待されます。

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、pp56-6、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

