

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

DEVELOPMENT OF REAL-TIME FLOOD FORECASTING SYSTEM FOR THE SMALL AND MEDIUM RIVERS

柿沼太貴¹・沼田慎吾²・望月貴文²・大沼克弘²

伊藤弘之²・安川雅紀³・根本利弘³・小池俊雄⁴・池内幸司⁵

Daiki KAKINUMA, Shingo NUMATA, Takafumi MOCHIZUKI, Katsuhiko OONUMA, Hiroyuki ITO, Masaki YASUKAWA, Toshihiro NEMOTO, Toshio KOIKE and Koji IKEUCHI

¹正会員 博士 (工学) 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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³非会員 東京大学 地球観測データ統融合連携研究機構
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

⁴フェロー会員 博士 (工学) 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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁵正会員 博士 (工学) 東京大学大学院工学系研究科 教授
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

The purpose of this study is to develop an inexpensive and easy-to-operate real-time flood forecasting system for the small and medium rivers where flood damage has been increasing in recent years. The flood forecasting system constructed with the following five processes, and verified accuracy at 18 rivers and 28 events. 1) Simplification of model construction by improving RRI_GUI. 2) Initial analysis with default parameters. 3) Automatic model parameters optimization with the SCE-UA method. 4) Water level forecasting considering data assimilation with a Particle Filter. 5) Real-time flood forecasting on the Data Integration and Analysis system (DIAS). As a result, a lead time of 2 hours or more was obtained in 23 of the 28 events. In addition, since the lead time for the flood arrival time was obtained in the remaining 5 events, it was confirmed that developed real-time flood forecasting system was able to reproduce the rainfall-runoff mechanism that changes from moment to moment in each basin.

Key Words : Real-time flood forecasting, RRI model, parameter optimization, data assimilation, DIAS

1. はじめに

近年、豪雨の激甚化・頻発化により毎年のように水害による多くの人的被害が発生している。その被害は主要な大河川のみならず、2016年台風10号による小本川での洪水¹⁾や2019年台風19号による五福谷川での洪水²⁾のように都道府県が管理する中小河川における水害が著しく増加している。我が国における中小河川はその流域特性上、急激な水位上昇を引き起こすため、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

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されている。現在一級水系においては、流出モデル、河道モデル、多地点水位データ同化技術により河川縦断水位と堤防高、氾濫危険水位等の関係を介して、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³⁾。しかしながら、多くの二級河川は、一級水系よりもはるかに数が多く、水位予測システムの整備には高い技術力と多額の費用が必要であり、大部分の河川では水位の監視や予測を実施できていないのが実状である。土木研究所では、内閣府総

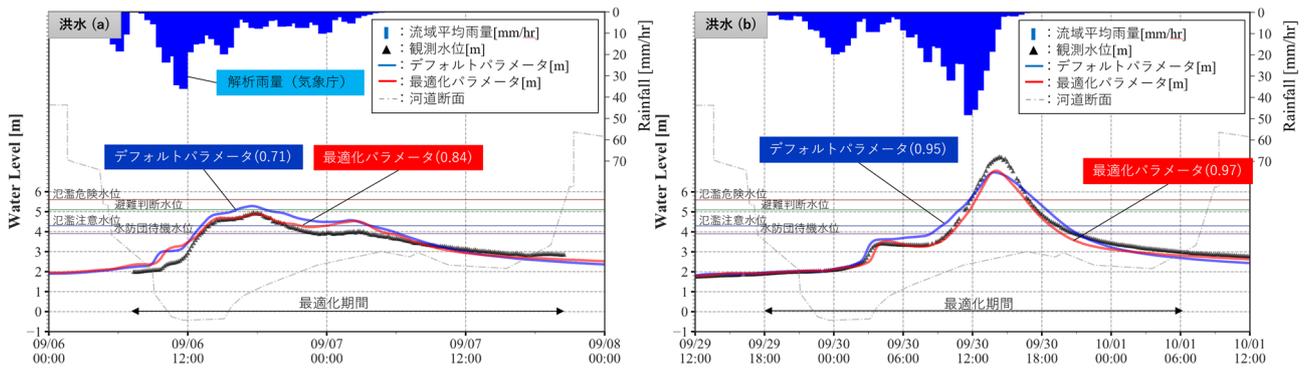


図-1 デフォルトパラメータを用いた計算結果（青線）と2洪水に対してSCE-UA法によって最適化されたパラメータを用いた計算結果（赤）の比較。最適化期間は図示している期間とし、それぞれのNS値の合算値が最小になるように最適化している。

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、速やかな避難判断を促し、人命を保護するために、水位が氾濫危険水位に到達する2時間以上前を一つの目標値として、水位を予測することを念頭に汎用性のある「短時間で計算可能な」、「安価」・「簡便」で「必要な精度」を有するリアルタイム水位予測モデルの開発を目的として取り組んでいる。本論文では、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とともに、現段階において得られた成果を示す。

2. 水位予測モデルの構築プロセス

本研究では、大きく分けて5つのプロセスにより水位予測モデルの構築を行い、比較的水文データがある18河川28イベントに適用しその結果を検証した。それぞれのプロセスを詳述する。

(1) RRI_GUIを用いたベースモデルの構築

ベースモデルを構築するにあたって、安価・簡便かつ既往研究が多く信頼性の高い分布型流出モデルであるRRI⁴⁾モデルを用いることとした。RRIモデルのGUIはすでに整備されているが、更に汎用性を高めるために、地形データとして、2018年から山崎ら⁹⁾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）の整備や、降雨データとしてバイナリー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を加えたGUIを開発した。これにより、より簡便にベースモデルの構築、解析入力データの準備をすることが可能になった。なお、河道形状は測量データや衛星画像を基にレジーム則により設定している。

(2) デフォルトパラメータによる初期解析

パラメータの最適化を実施する前に表-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。

表-1 デフォルトパラメータと最適化探索範囲。

最適化パラメータ	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	0.015	0.04
斜面の粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$	0.6	0.06	1.0
飽和空隙率	-	0.3	0.1	0.6
飽和水平透水係数	m/s	0.01	1(幂数)	3(幂数)
不飽和空隙率	-	0.12	1(係数)	10(係数)
土層厚	m	0.5	1.0	固定

デフォルトパラメータとは、RRIモデルマニュアルに記載されている一般値等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をデフォルトパラメータとしている。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。一級河川では主だった洪水イベント時に、流量観測によりH-Q式が作成されていたり、縦断的に豊富な測量断面データから不等流・不定流計算により水位を算出しているが、中小河川においてはそれらの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。精度検証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する。具体的には、観測水位が無降雨時にもかかわらず急激に変化する等の、通常では考えにくい挙動を示すデータの有無や、降雨に対して観測水位が過大に増加している場合は解析雨量では捉えられていない局所的な豪雨の有無について確認している。

(3) 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。そのため、洪水予測システムを広く普及させるという観点からは課題といえる。先行研究⁶⁾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。本研究においてもその手法を踏襲し、少なくとも2つの複数イベントに対して最適化を実施することとした。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値、最適化パラメータの探索範囲は表-1に示すように物理性

を損なわない範囲を採用しており詳細は論文を参考にされたい⁶⁾。そして、得られた最適化パラメータを用いて未学習のイベントに対して検証を行った。図-1に最適化を実施した2洪水(a,b)の事例を示す。対象流域の概要として、流域面積約200km²、流域の9割が山地に覆われている典型的な中山間地河川であり、本研究で取り扱う河川としては比較的流域面積が大きい河川である。なお、水位観測所への潮位変動の影響はない。最適化の結果、デフォルトパラメータを使用した場合、NS値はそれぞれ、a:0.71, b:0.95, 最適化後には、a:0.84, b:0.97とNS値が向上し、高い再現精度を示した。いずれのケースにおいてもNS値は高いものの、洪水(b)に関しては水位ピークが過小評価であった。これは評価関数をNS値にしていることが要因の一つとして考えられるため、先行研究⁹⁾のようにNS値とピーク二乗誤差を足し合わせたものを評価関数とすることや、ある水位以上を評価期間とする等の検討も今後していく。次に、未学習のイベント洪水(c)に対して、デフォルトパラメータと2洪水で最適化されたパラメータを用いた計算結果を図-2に示す。NS値はそれぞれ、0.93, 0.98と流出モデルとしては十分な精度を得られていることがわかる。以上により得られたパラメータを本流域の最終パラメータとして次のデータ同化に進む。

(4) 粒子フィルタを用いたデータ同化技術を組みこんだ水位予測

実時間水位予測に関して、昔から多数の研究が行われており^{7,8)}、近年においては観測値と計算値を逐次修正するデータ同化技術を用いた研究が盛んに取り組まれている^{9,10)}。その中でも、非線形・非ガウス型の状態空間モデルに適用可能な粒子フィルタが、演算機のCPU向上にも相まって、近年広く普及している。中村ら¹¹⁾はRRIモデルに粒子フィルタを組み込み、その有効性を示している。本研究においても同様の手法により水位予測を実施しており、逐次修正を行う状態量を不透水層からの水深の初期値としてデータ同化を行った。詳細は論文を参考されたい¹¹⁾。なお、尤度評価関数にはRMSE、リサンプリングにはドント方式を採用し、システムノイズは固定粒子を除く全粒子に0.05を与えた。入力降雨としては、解析雨量と降水短時間予報を組み合わせた、後ろ3時間、前6時間の計算とした。予測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(以下、完全予測と実予測とする。)を行い、その結果を検証した。

(5) 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

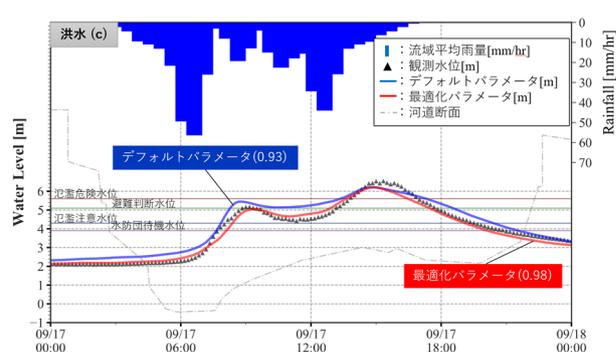


図-2 デフォルトパラメータと最適化されたパラメータを用いた未学習洪水における計算結果。

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。また、2019年台風19号の時のように広範囲で大雨が発生することによって、多数の河川で同時に出水がある場合には、計算負荷および計算時間の著しい増加が予想される。その場合において配信遅延が発生しないようにするために、計算機資源を効率的に配分し各計算機の負荷を均衡化する手法の検討を進めている。

3. 水位予測結果および洪水到達時間に基づく精度評価

(1) 水位予測結果

洪水(c)に対して実予測(図-3左)と完全予測(図-3右)の結果を示す。青線は2章(3)の最適化により得られたパラメータを用いて解析雨量のみを使用したオフライン計算結果を示しており、複数の赤線は各時間ステップにおける粒子64個の水位予測結果の重み付き平均値を示している。また、図の青の棒線は解析雨量、図-3左の黄色線は各時間ステップにおける6時間先までの予測雨量を示しており、矢印で示す太黄色線は現時刻(9月17日8時)において使用した予測雨量を示す。結果として、オフライン計算のイベント全体における精度は高いものの、水位の立ち上がり部や2つ目の水位ピークが観測水位よりやや小さい傾向にあったが、データ同化によって観測水位に追従するように計算値が修正されているのがわかる。また、観測水位が氾濫危険水位を超えた日時は9月17日13時50分であり、両実験の結果は完全予測では7時30分に氾濫危険水位に到達すると予測、実予測の場合は8時に予測したことから、それぞれリードタイムは6時間20分と5時間50分であった。本研究の目標と

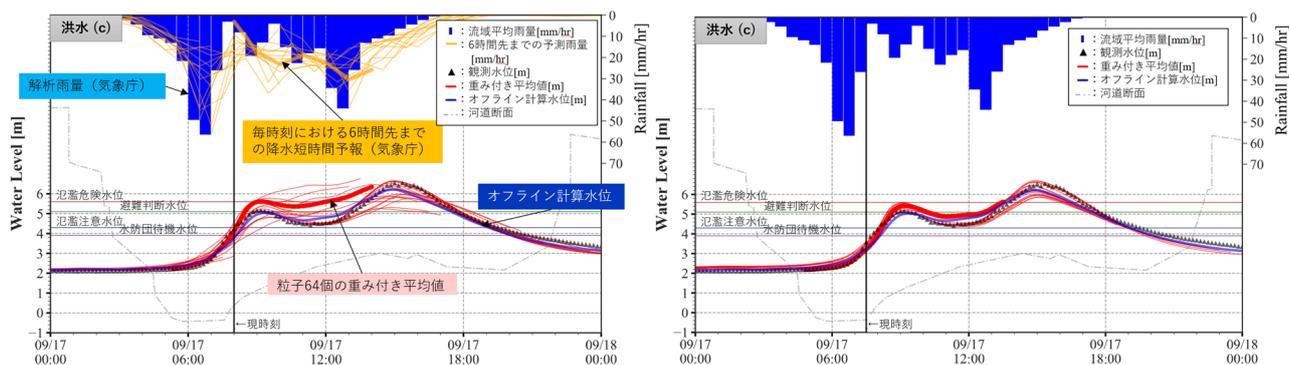


図-3 粒子フィルタを用いた実降雨予測実験（左：9月17日8時時点）と降雨完全予測実験（右：9月17日7時30分時点）における水位予測結果。

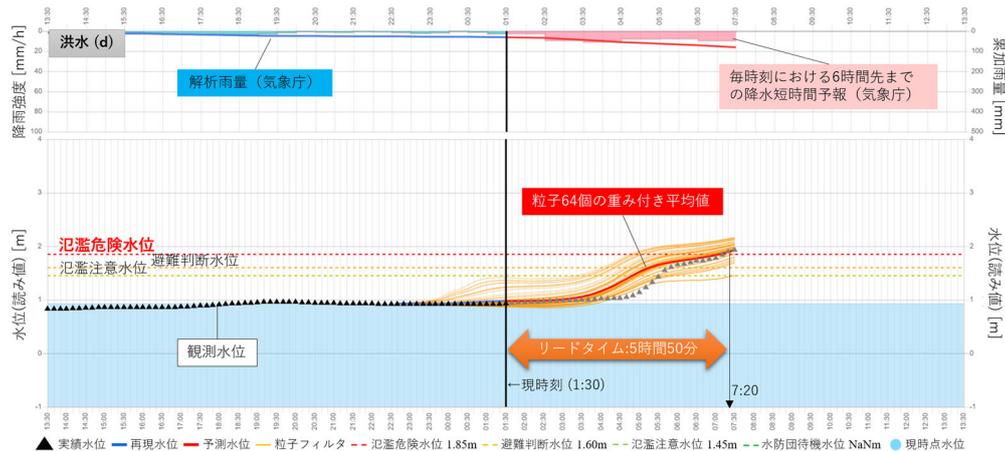


図-4 令和2年7月豪雨におけるDIAS上におけるリアルタイム水位予測結果の一例。7月14日1:30時点の水位予測結果。

するリードタイムは2時間以上であるため、本イベントでは十分な水位予測精度が得られていることがわかる。なお、実予測において観測水位が氾濫危険水位に到達する時刻よりも早く予測しているケースがいくつかある。これは完全予測と比較すると、予測雨量が実降雨よりも過大に予測されていることが要因として考えられる。

上記手法を日本全国における比較的に入水文データが揃っている中小河川18河川28イベントにおいて適用したところ、実予測においては23イベントで目標とする2時間以上のリードタイムを確保することができ、構築した水位予測システムの有用性を示した。なお、残りの5イベントにおける完全予測による計算結果は、5イベント全てにおいて目標とするリードタイムが得られていたことから、予測雨量の精度の影響と考えられる。詳細は後述する。

次に、上記で示したプロセスによって構築したモデルを用いて、令和2年7月豪雨時（洪水（d））において実際にDIAS上でリアルタイム計算された予測結果を図-4に示す。図はDIAS上で描画される図面に、図の説明を加筆しており、現時刻から先の水位は検証のため表記している。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分時点で7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、精度の高い水位予測かつ、5時間50分のリードタイムが得られた。

(2) 2時間以上のリードタイムが得られなかったイベントの検討

目標とする2時間以上のリードタイムを確保することができなかった河川は、流域面積が150km²以下の小さな流域であり、かつ突発的な豪雨の予測精度が悪いイベントであった。図-5に5イベント中の1事例（洪水（e））を示す。当該河川は流域面積が約50km²、山地の割合が8割の中山間地河川である。観測水位が氾濫危険水位に到達するのは7月6日5時であり、そこから0.5、1.0、1.5、2.0、2.5時間遡った各時刻（4:30、4:00、3:30、3:00、2:30）における実予測（図-5左）と、図示している期間における各時間ステップの完全予測（図-5右）の計算結果を示しており、いずれの計算結果も現時刻から後ろ3時間、前6時間の粒子64個の重み付き平均値を示している。なお、実予測には、計算に使用した予測雨量を予測水位の色と対応させて示している。また、青線はオフライン計算結果である（NS値: 0.90）。両実験の結果は、実予測の場合は7月6日4時30分に氾濫危険水位に到達すると予測、完全予測では7月5日23時30分に到達すると予測したことから、それぞれリードタイムは30分と5時間30分であった。実予測のリードタイムが30分であった理

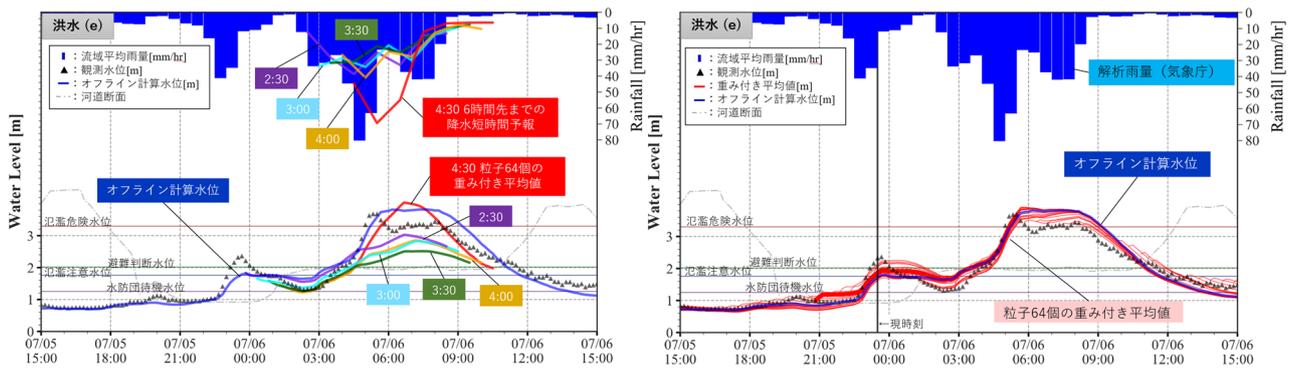


図-5 7月6日4:30, 4:00, 3:30, 3:00, 2:30時点における実降雨予測実験 (左) と各時刻における降雨完全予測実験 (右: 7月5日 23:30時点) における水位予測結果.

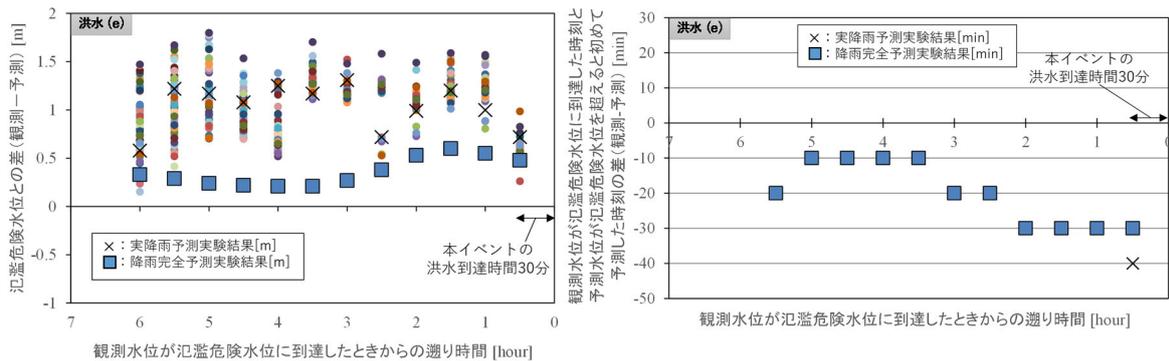


図-6 洪水 (e) における, 観測水位が氾濫危険水位を超えた時刻から6時間前までの, 各時刻の水位予測値誤差分布図 (左) と水位予測時間誤差分布図 (右) .

由として, 図-5左の2時30分~4時における予測雨量が, 7月6日4時~6時に発生している降雨を過小に予測していることが考えられる.

しかしながら, 中山間地河川において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, 上記で示したように降雨の予測精度に大きく依存するという事は明白である. 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降雨流出機構を如何に精度よく迅速に計算すること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よく予測する水位予測システムを構築することにある. よって, 降雨の予測精度に依存しない, 対象流域の洪水到達時間分のリードタイムが確保できているのかを確認する必要がある. ただ, 上記を確認するのみであるならば完全予測の結果と洪水到達時間を照らし合わせれば確認することは可能である. 本研究では更に, リードタイムのみの評価ではなく, 得られた水位予測結果の値および予測時間の精度にも着目した評価を行った.

(3) 洪水到達時間に基づく精度評価

まず予測値に対する評価方法を示す. 図-6左に, 観測水位が氾濫危険水位に到達した時刻から6時間前までの

各遡り時間における氾濫危険水位から予測水位を引いた水位予測値誤差分布を示しており, 0より大きい場合は予測値が過小, 小さい場合は過大となる. 図の説明として, 図-5左で示す7月6日4時30分から0.5時間先の5時の重み付き平均値は2.58m, 氾濫危険水位は3.30mであることからその差は0.72mであり, 図-6左の遡り時間0.5時間のx印でその値を示している. 同様の方法により, 64個の粒子と完全予測 (■) の結果を遡り時間毎に示している. 洪水到達時間は本研究ではイベントベースで考え, 降雨ピークと水位ピークの時間差を洪水到達時間としており, 洪水 (e) は30分であった. 結果として, 実予測では洪水到達時間内を含む全ての時刻において差が0.5m以上過小評価であった. 完全予測については許容誤差を $\pm 0.3m$ 程度とした場合, 6時間前から3時間前までは十分な精度が得られているが2.5時間前から0.5時間前までは, 0.5m程度, 過小評価であった.

次に予測時間に対する評価方法を示す. 図-6右に, 観測水位が氾濫危険水位を超えた時刻から6時間前までにおいて, 観測水位が氾濫危険水位に到達した日時から, 予測水位が氾濫危険水位を超えると初めて予測した日時を引いた水位予測時間誤差分布を示す. 0より大きい場合は予測時間が早く, 小さい場合は遅く予測している結果となるので, 洪水予測の観点からは, 早く予測する正の値が望ましい. 図-5左で示す, 7月6日4時30分に氾濫

危険水位を超えると予測した時刻は5時40分。観測水位が氾濫危険水位を超えた時刻は5時であるから40分遅く予測したことになる。同様の方法により各遡り時間における両実験の時間誤差を図に示している。実予測の結果が1点しか表示されていないのは、予測降雨が過小であったため氾濫危険水位以上の値を予測できていなかったからである。完全予測では、5.5時間前から2.5時間前までは20分以下の遅れと再現精度が高いが、2時間前から0.5時間前は30分遅く予測する結果となった。

これらの値と時間の精度評価から、洪水到達時間内に着目すると、実予測および完全予測では洪水到達時間分のリードタイムは得られているものの、予測値は過小、予測時間は遅れる予測結果であった。つまり、これらの結果から、モデルが流出しにくい設定にあり、精度を上げるためには流出成分を大きくし、より早く流出させる必要があると考えられる。もう一つの要因として、完全予測の精度が悪化し始める2時間前において、その時刻7月6日3時から計算に用いる3時間前のオフラインの計算結果が観測水位に対して過大に評価されていることにより、データ同化による修正は観測値に合わせようと流出量を少なくする修正が働いている。そのため、その流域状態量を現時刻のRRIモデルが引き継いだため、予測値が過小傾向になったことが考えられる。このことから、洪水到達時間が数十分と特に早い河川においては、履歴誤差を評価する時間を短くする等の検討を他河川の適用事例も増やしつつ取り組んでいく必要がある。

以上の評価方法によって、各時間ステップの水位予測結果が、予測降雨の精度と区別し、モデル自体の精度をより詳細に評価することが可能となり、さらなる予測システムの精度向上につながることを示した。本システムの実用にあたっては、2時間以上前のリードタイムを得ることと、当該河川の洪水到達時間等の特徴を踏まえ、上記の評価方法による、各流域のモデルの性能を理解したうえで活用していく。

本研究では、比較的水文データが充実している中小河川を対象としたが、例えば洪水データや河道断面データが不足もしくは無い河川、河床変動が活発な河川等の河川は多々存在する。今後は本システムを基軸として各河川の特徴に応じて機能を取捨選択する方法も含めて体系化していく。

4. まとめ

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

1) 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る時々刻々と変化する降雨流出機構を適宜修正することによって、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構築した。本手法を18河川28イベントに

適用した結果、予測雨量を用いた場合、23イベントで目標とする2時間以上のリードタイムが得られた。また、残りの5イベントにおいて、完全予測による計算結果では、全てにおいて目標とするリードタイムが得られた。

- 2) 構築したモデルをベースとして、DIAS上でリアルタイム水位予測計算を行った結果、令和2年7月豪雨にて5時間以上のリードタイムが得られ、水位予測システムの有用性を確認できた。
- 3) 洪水到達時間に基づく予測値および予測時間に関する評価方法によって、予測降雨の精度と区別して、モデル自体の精度をより詳細に評価することが可能となり、さらなる水位予測システムの精度向上につながることを示した。

参考文献

- 1) 総務省消防庁：台風10号に係る被害等（平成28年版消防白書）平成28年12月,2016.
- 2) 国土交通省：令和元年台風第19号による被害等，令和元年11月,2019,https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kas-enbunkakai/shouuinkai/kikouhendou_suigai/1/pdf/02_siryoub.pdf
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 山崎大，富樫呀佳，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.75, No.5, pp.163-168,2018.
- 6) 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.
- 7) 例えば，鈴木俊明，寺川陽，松浦達郎：実時間洪水予測のための分布型モデルの開発，土木技術資料，Vol.38-10, pp.26-31,1996.
- 8) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，2004.
- 9) 例えば，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B1（水工学），Vol.67, No.4, I_511-I_516,2011.
- 10) 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, No.4, I_187-I_192,2016.
- 11) 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, I_1381-I_1386,2018.