

流量を介さない水位予測について

徳島河川国道事務所 河川調査課
徳島河川国道事務所河川調査課長
徳島河川国道事務所河川調査課 計画係長

古屋 健登
相田 晴美
小松 悠

水位予測には大きく2種類の誤差が考えられる。一つはモデル誤差、もう一つは予測モデルへの入力データの誤差である。本論文では、流量を介さず水位予測を行うことで、モデル誤差の影響を少なくする手法及び、予報雨量誤差をモデル化することで、入力データの誤差を少なくする手法について検討し、その妥当性を吉野川の基準地点である岩津において確認した結果について報告する。

キーワード：洪水予測、予報誤差、吉野川

1. はじめに

気象災害が激甚化するなか、河川水位の上昇に伴い自治体が避難勧告・避難指示を発令する機会が増している。河川管理者に対しても自治体が判断するための適切な情報提供が求められるほか、地域住民からも水害被害の軽減や判断に資する情報への関心が高まっている。これらを背景として観測水位だけでなく、より実用的な水位予測情報が求められているが、水位予測には様々な誤差が含まれており、水位を過小に予測することもある。過小予測は避難行動の遅れにも繋がるため、従来の水位予測とは異なる水位予測を検討し、従来水位予測と合わせて水位予測の精度を高めることが必要である。

従来の水位予測には大きく2種類の誤差が考えられる。一つはモデル誤差であり、方程式の近似に起因する誤差のほか、モデル構築に利用した地形・河道データの測量誤差、H-Q式のループ誤差や流量観測の誤差などがある。もう一つの誤差は予測モデルへの入力データの誤差であり、雨量の観測値・予報値の誤差のほか、手法によっては観測水位・流量の誤差も影響する。この誤差を適切に取り扱うことでより実用的な水位予測情報を提供することができる。

本論文では、予報雨量誤差をモデル化することで、入力データの誤差を少なくする手法及び、流量を介さず水位予測を行うことで、モデル誤差の影響を少なくする手法を検討し、その妥当性を吉野川の基準地点である岩津において確認した結果について報告する。

2. 予報雨量誤差の分析とモデル化

(1) 吉野川流域における予報雨量誤差の分析

吉野川流域を対象として予報雨量誤差をモデル化し、予報雨量誤差を考慮して岩津水位観測所（図-2）の河川水位予測を実施した。

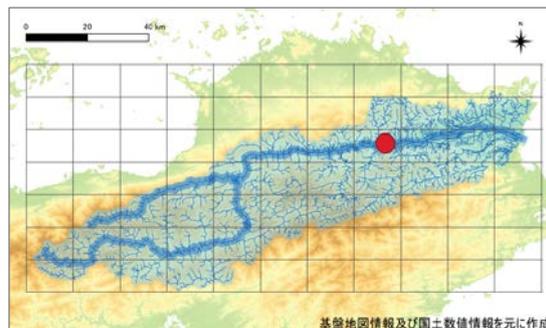


図-2 吉野川流域岩津（赤点）および雨量誤差の評価メッシュ幅（灰線）、流域を含むメッシュを評価対象とする

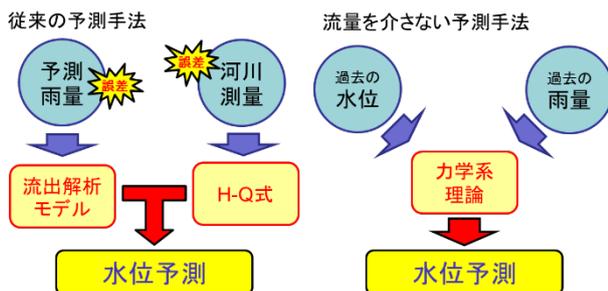


図-1 従来の予測手法と流量を介さない予測手法イメージ

吉野川は四国中心部から東流する一級河川であり、流域面積は3,750km²に及ぶ。吉野川流域において2014年～2017年の5/1～10/31までの降水短時間予報に対し、気象庁の解析雨量¹⁾を正として、1kmメッシュを11×11の領域で平均化した雨量の予報誤差を分析した。評価対象とした降雨時間は気象庁と同様の基準であるが、1～6時間予報のうち、少なくとも1時刻で基準を満たす雨を対象とした。

$$r(t) + \hat{r}(t|t-p) \geq 20 \quad \exists p \in \{1,2,3,4,5,6\}. \quad (1)$$

$\therefore r(t)$: 実績雨量[mm/h]

$\therefore \hat{r}(t|t-p)$: 時刻 $t-p$ における t の予報雨量[mm/h]

(1)式を満たす予報雨量に対し、1、3、6時間後の予報雨量と実績雨量を比較した散布図を図-3に示す。また予報雨量と実績雨量との相関係数を図-4に示す。予報時刻 p が大きくなるにつれ、予報雨量は過小評価の傾向がみられ、6時間予報では実績雨量との相関係数は0.2を下回る結果となった。また図-4では持続予測（現状の観測値がそのまま続くとする予測）をベンチマークとして相関係数を比較しているが、 p が大きくなるにつれて両者は漸近し、 $p=6$ ではほぼ変わらない結果となる。これらの結果から分かる通り、やや強い雨に対する降水短時間予報の精度は低く、降水短時間予報を入力とする予測水位も大きく影響を受ける。

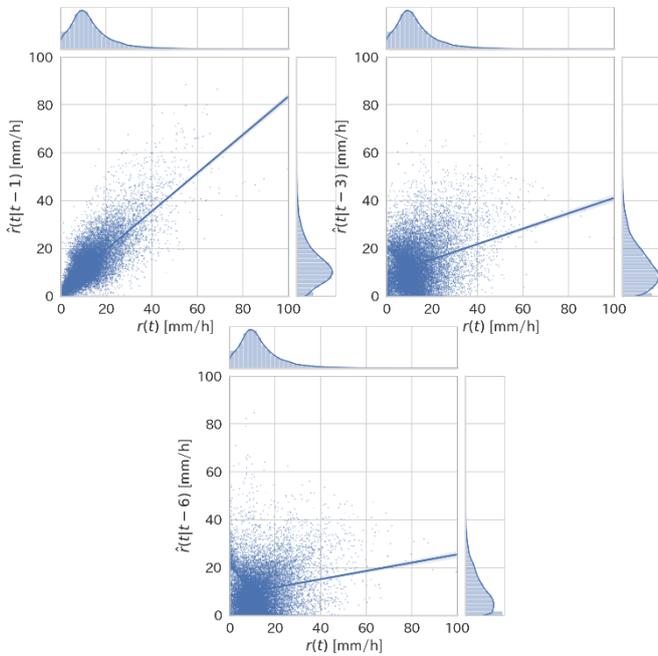


図-3 吉野川流域における1、3、6時間後予報雨量と実績雨量の比較

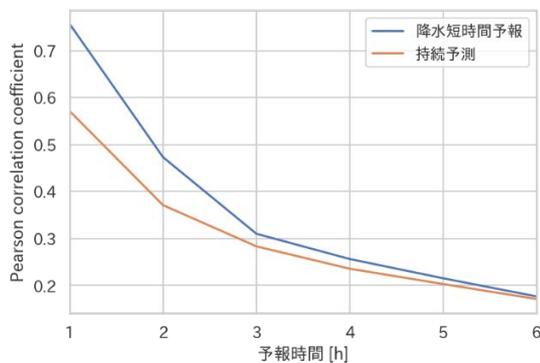


図-4 吉野川流域における降水短時間予報および持続予測の実績雨量との相関係数の比較

(2) 洪水予測に適した予報雨量誤差のモデル化

本検討では、予報雨量誤差の分布に着目し、洪水予測への適用に適したモデル化を行う。予報雨量と実績雨量との対数比に着目する。

$$\epsilon_p(t) = \ln(\hat{r}(t+p|t)/r(t+p)), \quad (2)$$

$\therefore r(t+p)$: 時刻 $t+p$ における実績雨量[mm/h]

$\therefore \hat{r}(t+p|t)$: 時刻 t における $t+p$ の予報雨量[mm/h]

吉野川流域にて前節の誤差分布と同一の条件で雨量を抽出し、(2)式により対数比 ϵ_p を算出した。 ϵ_p の頻度分布と、データから推定した正規分布をプロットしたものを図-5に示す。予報雨量誤差の対数比はほぼ正規分布に従っていることがわかる。また、図-6に ϵ_5, ϵ_6 の散布図を示すが、隣接する時間ステップにおいて誤差の相関は無視できず、同一時刻に発令した予報は同じ傾向で誤差を生じやすいと言える。

以上の分析より、本検討では、気象庁の定義するやや強い雨の誤差 ϵ は多変量正規分布に従う ($\epsilon \sim N_6(\mu, \Sigma)$) とし、分布の母数である $\mu \in \mathbb{R}^6, \Sigma \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ を過去の実績雨量・予報雨量から推定し利用する。ただし推定した平均ベクトル μ は、補正後の値が予測値よりも小さくならないよう、下限値を1とした。

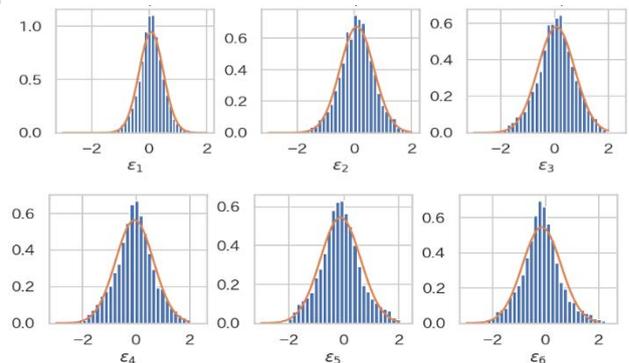


図-5 吉野川流域における ϵ_p の頻度分布および観測値より推定した正規分布（橙色）

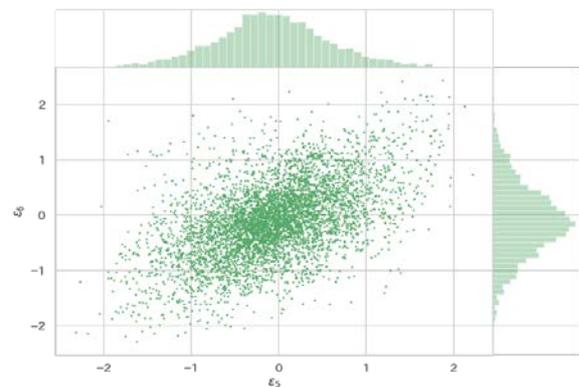


図-6 ϵ_5, ϵ_6 の散布図

3. 予報雨量誤差を考慮した水位予測

前章で提案した誤差の確率分布モデルを予報雨量に適用することで、予報雨量誤差を考慮しながら河川水位を予測できる。予報雨量誤差の確率分布を考慮し、任意の水位予測手法で予測結果の信頼区間を算出する方法を述べる。推定した確率分布から雨量誤差をランダムにサンプリングし、水位予測結果を複数求め、信頼区間を算出する。例えば80%信頼区間を求める場合、各サンプルの予測結果を元にそれぞれの予測ステップの下側10%（10パーセンタイル点）と上側10%（90パーセンタイル点）を除外した80%の予測メンバが存在する区間を信頼区間として求めることができる（図-7）。

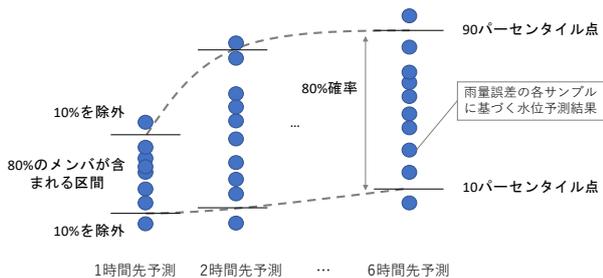


図-7 サンプリングによる信頼区間の近似イメージ

4. 吉野川流域 岩津における予報雨量誤差を考慮した水位予測結果

(1) 力学系理論にもとづく水位予測モデル構築

本検討では、力学系理論に基づく水位予測手法²⁾を適用する。本手法は降雨流出過程を決定論的に決まる複雑なシステムとみなし、過去の雨量、水位の観測値から、力学系理論に基づいて時間遅れ座標を用いて元システムの軌道を再構成し、再構成した軌道をもとに、予測時点の座標に近い軌道をたどると想定して短時間の河川水位を予測するものである。その考え方の基礎となっているのはTakensの埋め込み定理と言われるものであり、軌道の再構成についての考え方を図示すると下図のとおりとなる。

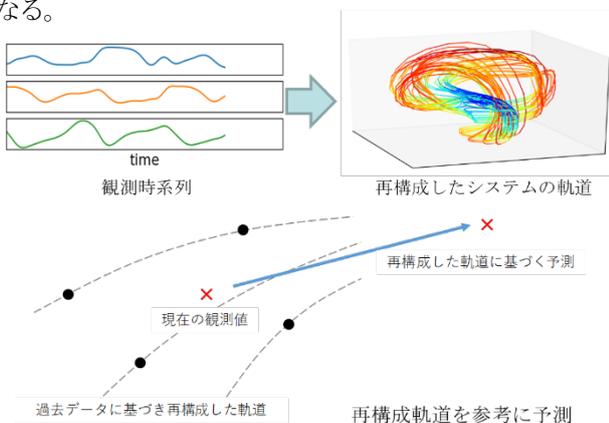


図-8 時間遅れ座標による1変数時系列からのアトラクタ再構成と予測（イメージ図）

吉野川では多数の上流水位とメッシュ雨量データが利用できるため、多変量データへ適した予測手法²⁾を適用する。予測対象地点は吉野川流域岩津（図-2）とし、平成30年7月豪雨時の水位上昇を、1時間単位で6時間先まで再現予測する。水位予測モデルの構築には、2006年4月14日～2019年06月13日のうち、平成30年7月豪雨時のデータ（2018年7月）を除外した水位・雨量データを用いた。水位は岩津と上流6地点及び下流1地点の観測データを、雨量は吉野川流域内で1kmメッシュ雨量を11×11メッシュの領域で平均化した複数の値を用いた。

(2) 平成30年7月豪雨における水位予測結果

図-9に平成30年7月豪雨時のハイトグラフおよび予報雨量誤差を示す。予報雨量誤差は各時間ステップにおいて、指定時間ステップ p までの誤差の累積和を表示しており、小さいほど予報が過小評価であったことを示す。図-10では1時間・3時間・6時間先までの累積誤差をそれぞれプロットしている。7月豪雨時には、6時間先までの累積誤差で評価すると最大80mm/h程度過大、また60mm/h程度過小に評価している。特に2018年7月6日の正午から7日にかけて予報は実績雨量を大きく過小評価しており、水位も過小に予測される可能性がある。次に図-10に水位の観測値（1時間単位）と、1時間(a)・3時間(b)・6時間先(c)の水位予測中央値とその95%信頼区間を示す。1時間先予測では予報雨量誤差の影響をほぼ受けず、高精度に予測できていることが分かるが、3時間先予測では予報雨量誤差に伴い信頼区間が大きくなり、6時間先予測でその傾向は顕著である。図-10(c)の6時間先予測の中央値に着目すると、2018年7月6日の昼過ぎから7日深夜にかけて水位を過小に予測している事が分かる。これは図-10(b)で雨量を過小評価している時間帯に一致し、状況によっては見逃しにつながる。一方、図-10(c)の信頼区間に着目すると、水位を過小評価する時間においても概ね信頼区間の中に実測値が収まっていることが分かる。このように信頼区間によって予測水位の不確実性を定量的に表現することで、予測に過度に依存せず、予報雨量が外れた場合の見逃しを減らすことができる。

表-1に、予報雨量を確率分布により補正した水位予測結果の中央値と、補正せずに予測モデルに入力した場合の予測結果のRMSEを示す。7月豪雨のケースでは予報雨量を補正することで中央値の予測結果も改善されたことが分かる。ただし中央値は $\hat{\mu}$ によって元の予報雨量をやや大きく補正するため、予報自体が過大評価であった場合はさらに誤差を拡大することになる点に注意が必要である。

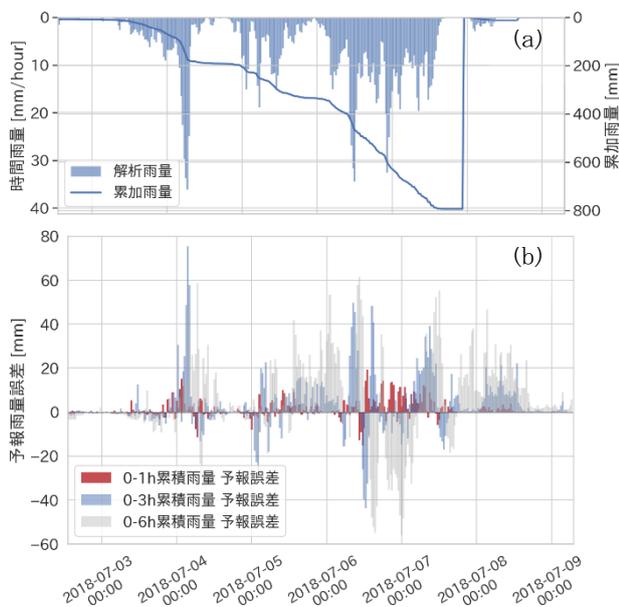


図-9 平成30年7月豪雨時のハイエトグラフおよび予報雨量誤差

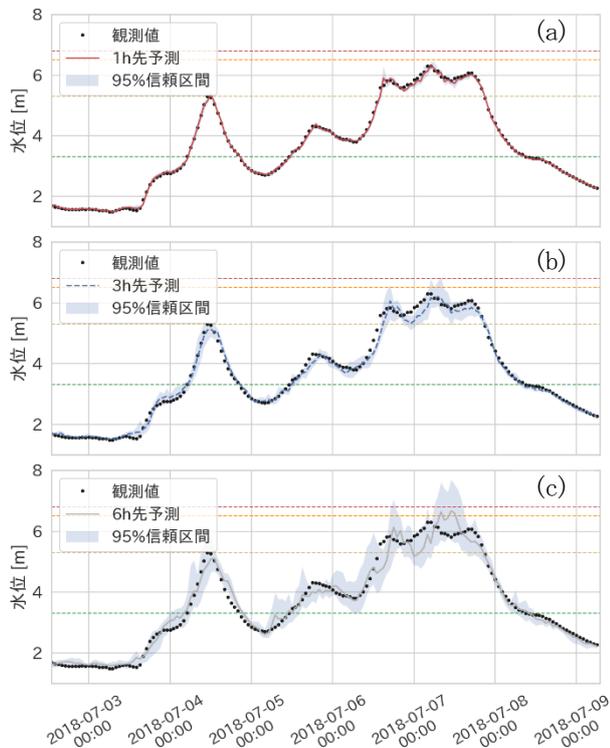


図-10 平成30年7月豪雨時の岩津における1時間先(a)、3時間先(b)、6時間先(c)の予測中央値と95%信頼区間(緑線、黄線、橙線、赤線はそれぞれ水防団待機水位、はん濫注意水位、避難判断水位、はん濫危険水位)

表-1 予報雨量の補正有無/誤差有無とRMSE

ケース	予測ステップ					
	1h	2h	3h	4h	5h	6h
補正あり	0.066	0.116	0.160	0.193	0.224	0.265
補正なし	0.066	0.117	0.164	0.203	0.242	0.284

5. まとめ

本論文では、やや強い雨を対象として予報雨量の誤差をモデル化し、河川水位予測へ適用した。本モデルにより、既往研究では過小に評価されていた実績雨量の確率分布を洪水予測に適した形で提供することができるようになったほか、従来考慮できなかった時間ステップ毎の相関を考慮することができるようになった。また、本確率分布に基づいて河川水位予測の信頼区間を求める手法を提示し、吉野川水系岩津地点においてその妥当性を確認した。

本手法を用いて、昨年度出水を予測した結果を図-11に示す。従来手法より実測水位に近い予測ができていることがわかる。昨年度出水は規模も小さかったため、予測のばらつきも小さかったが、今後も本手法を用いて従来の水位予測と併用することで、水位予測の見逃しを減らし、地域住民の適切な避難行動につながる情報提供に役立てていきたい。

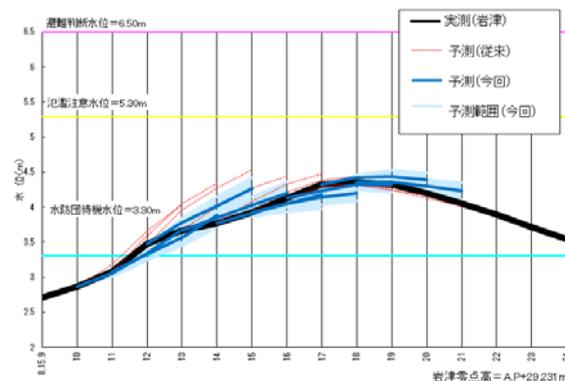


図-11 令和元年台風10号の岩津における実測水位と1~3時間先の本手法の予測中央値と予測幅、1~3時間先の従来手法による予測水位(水色線、黄線、桃色線はそれぞれ水防団待機水位、はん濫注意水位、避難判断水位)

参考文献

- 1) 気象庁, 解析雨量, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kaiseki.html>.
- 2) Okuno, S., Aihara, K. & Hirata, Y. Forecasting high-dimensional dynamics exploiting suboptimal embedding. *Sci. Rep.* **10**, 664 (2020)