

予報雨量誤差に基づく河川水位の確率的予測

PROBABILISTIC RIVER STAGE FORECASTING BASED ON PRECIPITATION FORECAST ERROR

奥野 峻也¹・瀧川 宏樹²・宮藤 秀之³

Shunya OKUNO, Hiroki TAKIKAWA and Hideyuki MIYAFUJI

¹正会員 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²非会員 株式会社構造計画研究所 気象防災ビジネス室 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)

³正会員 (前) 国土交通省 四国地方整備局 徳島河川国道事務所 (〒770-8554 徳島県徳島市上吉野町3-35)

River stage forecasts are useful for decision makers to minimize flood damage. However, it is difficult to interpret the forecasts properly because of the forecast uncertainty. One of the biggest causes of the forecast errors is precipitation forecast errors. Here we propose a probabilistic distribution to model the precipitation forecast errors. The proposed distribution does not underestimate heavy precipitation and considers correlations among forecast horizons unlike existing studies. We also propose methods to evaluate confidence intervals of the river stage forecasts and excess probabilities of certain water levels using the proposed distribution. We applied the methods to Yoshino river system during the 2018 Japan floods. The methods yielded better Ignorance scores of excess probabilities and valid confidence intervals. The proposed methods can be applied to any river stage forecasting methods and are expected to be introduced to actual rivers for better decision making.

Key Words: Flood forecasting, precipitation forecast error, phase-space reconstruction, Yoshino River

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、経験豊富な専門家でない適切に予測結果を解釈できない場合がある。

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。入力データの誤差のうち最も支配的と考えられるのは予報雨量の誤差であり、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。予報雨量誤差をモデル化

した既往研究¹⁾はあるが、予報雨量精度が低い場合に実績雨量を過小評価するという課題があり、洪水予測へ適用するには必ずしも適切でない。

本研究では、予報雨量の誤差を、水位予測への応用に適した形でモデル化し、誤差を考慮した確率的な水位予測結果を算出する。また水位予測結果に信頼区間を持たせるだけでなく、はん濫危険水位など特定の閾値を超過する確率の算定手法も提案し、実務担当者の意思決定に役立つ情報の提供を目指す。

2. 予報雨量誤差の分析とモデル化

(1) 気象庁による降水短時間予報の予報雨量誤差評価

本研究では、気象庁の降水短時間予報²⁾を対象に予報雨量誤差の分析を進める。背景として気象庁では、やや強い雨に対する降水短時間予報の予測精度の指標（以下気象庁スコア）を独自に算出しており³⁾、2～3時間後の予報雨量を5km格子ごとの値に平均し、次式により算出する。

$$\frac{1}{n} \sum_t \frac{\min(\hat{r}(t|t-p), r(t))}{\max(\hat{r}(t|t-p), r(t))} . \quad (1)$$

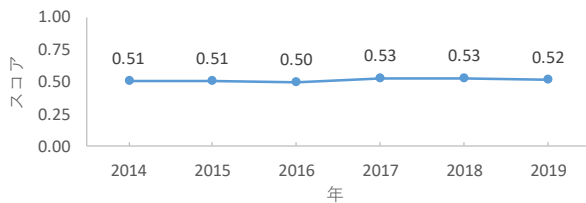


図-1 降水短時間予報の気象庁スコア推移³⁾

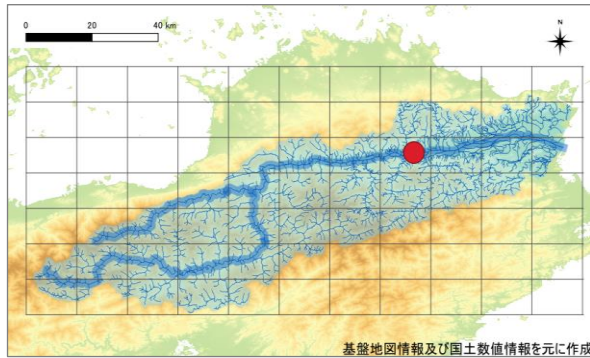


図-2 吉野川流域岩津（赤点）および雨量誤差の評価メッシュ幅（灰線）、流域を含むメッシュを評価対象とする

ただし、 $r(t)$ は実績雨量[mm/h]、 $\hat{r}(t|t-p)$ は時刻 $t-p$ における t の予報雨量[mm/h]、 n は対象となるサンプル数であり、

$$r(t) + \hat{r}(t|t-p) \geq 20, \quad (2)$$

なる t を対象に評価を行う。気象庁では、本指標を全国の陸上付近で1年間にわたり平均したスコアを開示している（図-1）。本指標は0～1の値をとり、1に近いほど予測精度が良いことを示す。気象庁では予報精度改善のため様々な努力をしているが、水位予測に必要な雨量という観点では2014年以降、0.5程度の値からほぼ改善が見られない。これは2～3時間後の実績雨量は、平均して予報雨量の倍または半分程度の値となるような誤差を含むことを意味する。

(2) 吉野川流域における予報雨量誤差の分析

本研究では、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する。吉野川は四国の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、同じく気象庁の解析雨量⁴⁾を正として、本研究で適用する河川水位予測の入力データに合わせ1kmメッシュ（3次メッシュ、約1km²）を11×11の領域で平均化した雨量の予報誤差を分析した。詳細は後述するが、本研究で適用する河川水位予測手法は各点における水位・雨量の時系列データを利用する。1kmメッシュ単位の雨量は近隣メッシュとの相関が非常に高いほか、雨雲の位置ずれによる予報誤差の影響を強く受ける。そこで雨量観測所の設置間隔や相関係数を参考に、11×11の領域で平均化した雨量を採用している。

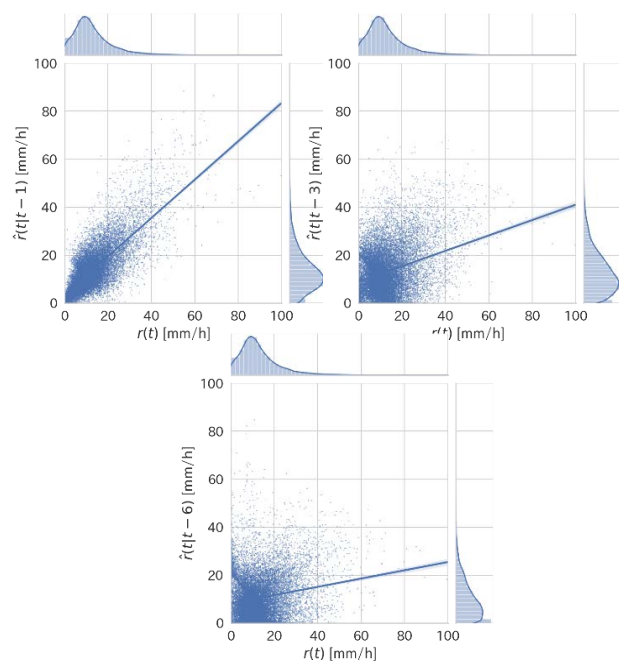


図-3 吉野川流域における1、3、6時間後予報雨量と実績雨量の比較

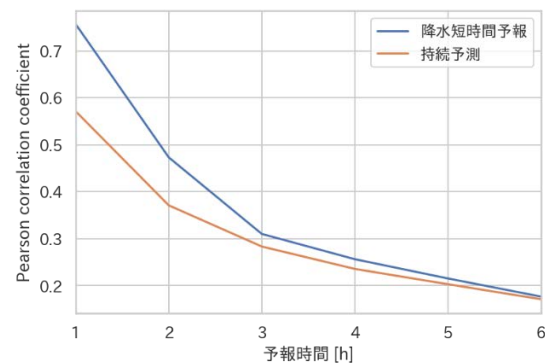


図-4 吉野川流域における降水短時間予報および持続予測の実績雨量との相関係数の比較

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。

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

上記の条件で対象となる雨を流域内から時空間的に抽出すると19034点となった。気象庁スコアを計算すると $p=2$ で0.57、 $p=3$ で0.52となり、全国の気象庁スコア（図-1）よりやや良好な結果が得られる。(3)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て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。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

表-1 吉野川流域での6時間先予報雨量を与えた場合の
二次元指数分布に基づく実績雨量期待値

予報雨量 [mm/h]	10.0	20.0	40.0	80.0
実績雨量期待値 [mm/h]	7.3	13.4	25.1	47.9

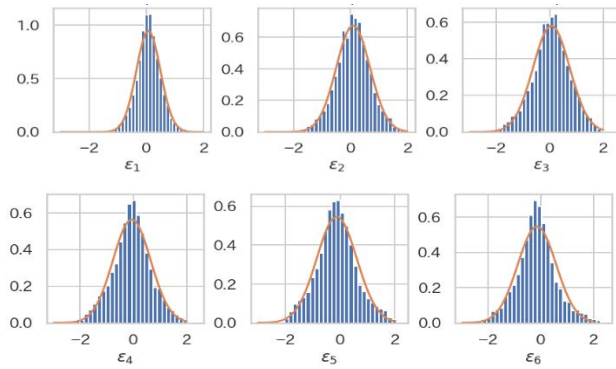


図-5 吉野川流域における ε_p の頻度分布および観測値より
推定した正規分布（橙色）

結果となった。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。

(3) 既往の予報雨量誤差モデルの課題

予報雨量の誤差分布を考慮した研究として、ガンマ分布を適用した東海林ら⁹⁾によるものや、二次元指数分布を適用した田中ら¹⁾の研究がある。田中らの研究では、東海林らの方法の母数の経験的な設定を回避するため二次元指数分布

$$f(r|\hat{r}) = \frac{1}{\sigma_r(1-\rho)} \exp\left[-\frac{r}{\sigma_r(1-\rho)} - \frac{\rho\hat{r}}{\sigma_r(1-\rho)}\right] \cdot I_0\left[2\sqrt{\hat{r}r/\sigma_r}\sqrt{\rho/(1-\rho)}\right], \quad (4)$$

を導入した。田中らの研究では雨量（実績雨量 r および予報雨量 $\hat{r}$ ）にデータ変換（1/2乗）を施している点に注意されたい。 $\sigma_r, \sigma_{\hat{r}}$ の最尤推定値はデータの平均値に一致し、 ρ は r と $\hat{r}$ の相関係数で近似できるため、非常に容易に適用できる点が特徴である。一方で、予報雨量 $\hat{r}$ が与えられた場合の実績雨量 r の条件付き期待値は

$$E(r|\hat{r}) = \sigma_r + \frac{\sigma_r}{\sigma_{\hat{r}}} \rho(\hat{r} - \sigma_{\hat{r}}), \quad (5)$$

である⁹⁾。予報雨量の精度が低い場合、 ρ が小さいため第二項は0に近づき、期待値は過去雨量の平均値である σ_r に漸近する。これは平均予測を意味し、強い雨を大きく過小評価するため、洪水予測へ適用するには防災上の問題がある。実際に(4)式において $\rho=0$ とすると、

$$f(r|\hat{r}, \rho=0) = 1/\sigma_r \exp[-r/\sigma_r], \quad (6)$$

となり、過去雨量の平均値にのみ依存する単純な指数分布を示す。表-1に吉野川流域で二次元指数分布を適用した場合の例を示すが、例えば80.0mm/hの予報雨量を与えても実績雨量期待値は47.9mm/hと大きく過小評価する。

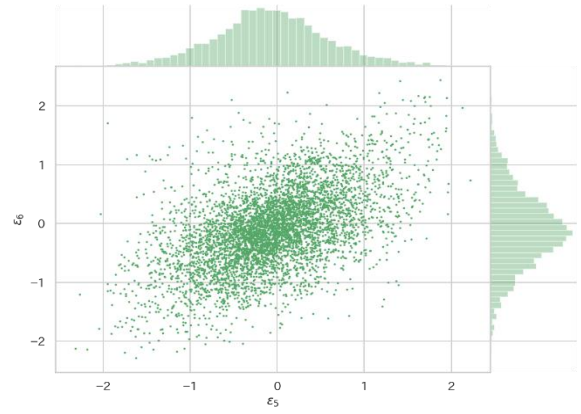


図-6 $\varepsilon_5, \varepsilon_6$ の散布図



図-7 推定した共分散行列

また1～6時間予報など複数時間の予報を考慮する場合、その相関を検討する必要があるが、二次元指数分布を時間方向へ拡張すると非常に複雑な式となり実用的でない。

(4) 洪水予測に適した予報雨量誤差のモデル化

本研究では、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、

$$\varepsilon_p(t) = \ln(\hat{r}(t+p|t)/r(t+p)), \quad (7)$$

に着目する。 p は予報時刻（ $p \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ）であり、 $\ln$ は自然対数を示す。吉野川流域で(2)節の誤差分析と同一の条件で雨量を抽出し、 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 $\varepsilon_5, \varepsilon_6$ 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。

以上より、本研究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（ $\varepsilon \sim N_6(\mu, \Sigma)$ ）とし、分布の母数である平均ベクトル $\mu \in \mathbb{R}^6$ 、共分散行列 $\Sigma \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 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り危険側の計算にならないよう、上限値

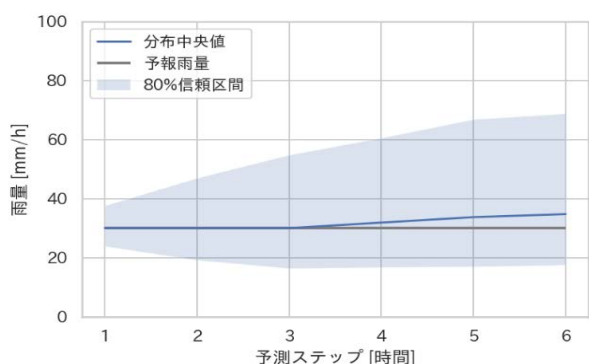


図-8 30mm/h一定の予報雨量を推定した分布に与えた場合の中央値および80%信頼区間

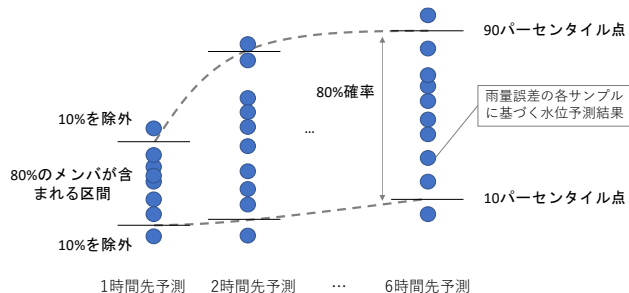


図-9 サンプルによる信頼区間の近似イメージ

を0とした。推定した平均ベクトルは $\hat{\mu}=[0, 0, 0, -0.06, -0.12, -0.15]$ となり、共分散行列は図-7に示す通りとなった。図-8に、推定した分布に1～6時間先まで30mm/h一定の予報雨量を与えた場合の、分布により補正された雨量の中央値と80%信頼区間（下側10%点～上側10%点）を示す。推定した確率分布を適用することで中央値はやや大きく補正され、予測ステップが大きくなるほど信頼区間が大きくなる。本分布を適用することで、平時より水防に携わる専門家でも予報雨量の誤差に起因する水位予測の不確実性を正しく把握し、予報雨量が過小であっても見逃しを減らす効果が期待できる。

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。次節より、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や閾値の超過確率を算出する方法を述べる。

(1) 信頼区間の算出

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%の予測メンバー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-9）。

(2) 閾値の超過確率の算出

前節と同様な考え方で、閾値の超過確率を計算することができる。閾値として水防団待機水位・はん濫危険水位など任意の値を設定し、特定の閾値を超過する予測サンプルを数え上げ、（閾値を超過した予測サンプル）／（全予測サンプル）により閾値の超過確率を近似できる。各予測ステップで確率を求めることができるほか、全予測ステップの中で少なくとも一度超過する確率を求めることもできる。

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

前章で述べた信頼区間や超過確率の計算は、原理的には任意の水位予測へ適用できるが、サンプリングによる近似を考えると高速に計算できる手法が望ましい。そこで本研究では、力学系理論に基づく水位予測手法⁷⁾を適用する。本手法は観測データが決定論的力学系に従うと仮定し、過去の河川水位・雨量データのみから降雨流出過程を再現し将来の水位を予測するものであり、水文分野ではphase-space reconstructionアプローチとして知られる⁸⁾⁹⁾。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、多変量データに適した予測手法⁷⁾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地点のデータを水文水質データベース¹⁰⁾からダウンロードして利用し、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-10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

$$\sum_p [\hat{r}(t+p|t) - r(t+p)], \quad (8)$$

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(b)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程度過大に、また60mm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。

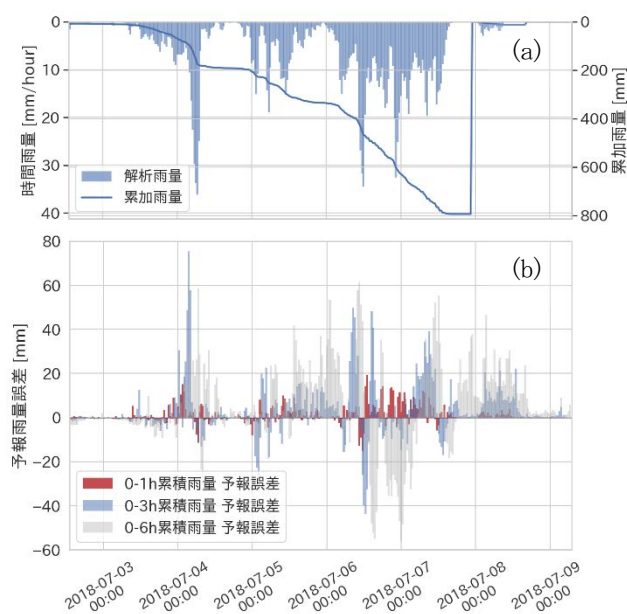


図-10 平成30年7月豪雨時のハイトグラフおよび予報雨量誤差

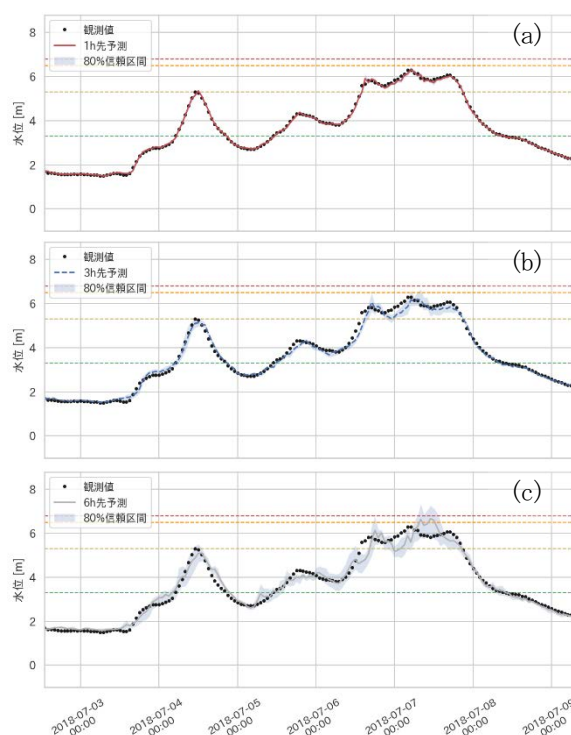


図-11 平成30年7月豪雨時の岩津における1時間先(a)、3時間先(b)、6時間先(c)の予測中央値と80%信頼区間(緑線、黄線、橙線、赤線はそれぞれ水防団待機水位、はん濫注意水位、避難判断水位、はん濫危険水位)

表-2 予報雨量の補正有無／誤差有無とRMSE [m]

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

次に図-11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80%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-11(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-11(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-2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、図-11表示区間における予測結果のRMSE [m]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。本補正は $\hat{\mu}$ により予報のバイアスを修正することに相当する。大きく値が改善することはないが、推定時に平均ベクトルに上限値をもうけたことで水位予測の過小評価を防ぐ効果がある。ただし、 $\hat{\mu}$ によって元の予報雨量を常に補正するため、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されたい。

(3) 平成30年7月豪雨における予測水位超過確率

平成30年7月豪雨に対し、水防活動における重要な指標である水防団待機水位の超過確率を算出した。図-12に、水防団待機水位を6時間以内に少なくとも一度超過する確率を示す。水位上昇時には超過確率が振動しながら上昇する一方、水位下降時は急に低い値になることが分かる。水位上昇時は予報雨量の値が大きく、また各時間で予報結果も異なることから、水位の超過確率も各時間の予報の影響を受け振動する。一方、水位下降時には予報雨量の大きさが小さく水位にも影響しづらいため、振動することなく下降することがわかる。

予測水位の超過確率を定量的に評価するため、確率予測の評価指標であるIgnorance (logarithmic score)^{11),12)}を導入する。本研究では、 $j=0$ を基準水位の非超過、 $j=1$ を超過した際のイベントとし、6時間以内の発生確率 $f_{t,j}$ をIgnorance

$$I := -\frac{1}{n} \sum_t \sum_j o_{t,j} \ln(f_{t,j}), \quad (9)$$

により評価する。ただし $o_{t,j} \in \{0,1\}$ であり、実際にイベント j が発生した場合は1、しなかった場合は0をとる。

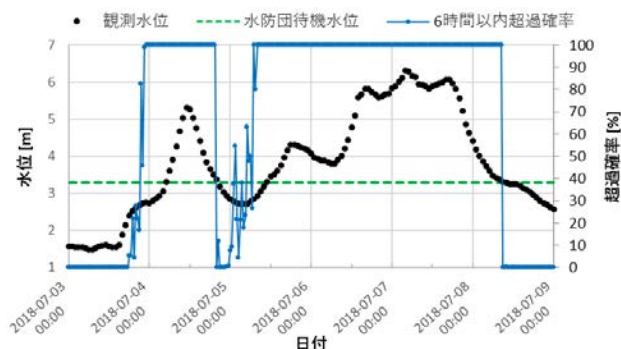


図-12 実測水位と各時刻における6時間以内超過確率

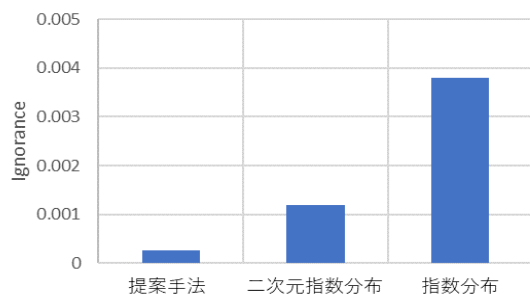


図-13 水防団待機水位に対する6時間以内超過確率のIgnorance

また提案手法だけでなく、比較対象として二次元指数分布¹⁾、および(6)式の指数分布に従って予報雨量を生成し水位予測の入力とした場合の予測結果を同様に評価した。Ignoranceによる評価結果を図-13に示す。Ignoranceは値が小さいほど良好な予測であることを示すが、提案手法が最も小さい値を示し、次に二次元指数分布、指数分布の順に小さな値をとる結果となった。単純な指数分布では予報雨量を全く考慮していないが、二次元指数分布でも相関係数 ρ が小さい場合は指数分布に漸近し雨の過小評価につながる。本評価ケースでは提案手法が最も良好なモデルと言える。また岩津は洪水到達時間が長く長期の予報雨量の影響を受けにくい、流域の小さい中小河川ではより顕著な差異が生じうる点に注意されたい。

5. 結論

本研究では、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および閾値の超

過確率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。本手法を適用することで、経験の長い実務担当者でなくとも予測の不確実性を客観的に把握することができ、より適切な意思決定ができること期待される。

本研究では力学系理論に基づく予測手法を採用したが、例えば田中ら¹⁾のように分布型流出モデルと粒子フィルタを組み合わせることも可能である。また雨の抽出基準を気象庁の基準に合わせたが、より適切な抽出方法を検討する余地がある。加えて、本研究では流域単位で雨量を抽出し同一の分布に従うとして誤差をモデル化したが、より広い範囲の雨量で十分な場合や、逆により狭い範囲で空間的な依存性を考慮したりすることでより妥当なモデル化ができる可能性もある。これらは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 田中耕司, 辻倉裕喜, 大八木豊, 杉浦正之, 予測雨量誤差を考慮した洪水予測システム開発, 水工学論文集 **36**, 183-186 (2013).
- 2) 気象庁, 降水短時間予報と降水ナウキャスト, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kotan_nowcast.html.
- 3) 気象庁, 降水短時間予報の精度検証結果, https://ds.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kotan_kensho/kotan_hyoka.html.
- 4) 気象庁, 解析雨量, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kaiseki.html>.
- 5) 東海林勉, 星清, 藤田暁, 予測降雨情報の推定誤差に関する定量解析, 河川技術論文集 **10**, 53-58 (2004).
- 6) 長尾正志, 角屋睦, 二変数ガンマ分布とその適用に関する研究-二変数指数分布の基礎理論-, 京都大学防災研究所年報 **13(B)**, (1970).
- 7) Okuno, S., Aihara, K. & Hirata, Y. Forecasting high-dimensional dynamics exploiting suboptimal embeddings. *Sci. Rep.* **10**, 664 (2020).
- 8) Jayawardena, A. W. & Lai, F. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. *J. Hydrol.* **153**, 23-52 (1994).
- 9) Laio, F., Porporato, A., Revelli, R. & Ridolfi, L. A comparison of nonlinear flood forecasting methods. *Water Resour. Res.* **39**, 1129 (2003).
- 10) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>.
- 11) Good, I. J. Rational Decisions. *J. R. Stat. Soc. B* **14**, 107-114 (1952).
- 12) Roulston, M. S. & Smith, L. A. Evaluating probabilistic forecasts using information theory. *Mon. Weather Rev.* **130**, 1653 -1660 (2002).

(2020. 4. 2受付)