

河川工事のための出水予測における 降水予報誤差分析とその活用

飯村 浩太郎*¹・高山 百合子*¹・織田 幸伸*¹

Keywords : precipitation forecast, water level prediction, error analysis, river construction, MSM

降水予報, 出水予測, 誤差分析, 河川工事, MSM

1. はじめに

河川工事において降水時には、作業員や建設資機材を河川の出水の数時間から数十時間前に退避させることが求められる。河川工事の安全管理のため、著者らは工事地点の水位を事前に予測し、警戒水位に達する可能性がある際に工事関係者にメールや WEB でアラートを配信する「出水警報システム T-iAlert[®] River」(以下、本システム)を開発した¹⁾。本システムは 2008 年以降複数の河川工事において適用されている。

本システムの水位予測には、降水予報を用いている。降水予報の例としては、気象庁が運用している数値モデル(局地モデル, メソモデル, 全球モデル等)²⁾がある。このうち、十分なリードタイムを確保し、できるだけ早期に出水の危険性を現場に周知させるため、39 時間先の予報まで提供されている、気象庁のメソ数値予報モデル GPV (以下 MSM, 5km メッシュ)を用いて予測を行っている。

ただし、予報降水量は実測降水量に対する誤差があり、予報降水量が実際よりも過小であると予測水位も過小となり、出水を見逃す懸念がある。実際に、予報降水量が実測降水量と大きく乖離していた事例はいくつか存在する。例えば、2020 年の熊本豪雨において、気象庁は 2020/07/03 午後の段階で熊本県内の翌日までの 24 時間降水量は多くて 200 mm と予想していたが、実際には予想の 2 倍を超える 441.5 mm が観測された⁴⁾。気象予報の精度について気象庁では、毎年気候状況が異なり精度は変動すると公表している⁵⁾。また、降水発生の有無についての的中率は定期的に公表されているが、予報降水「量」の的中精度は公表されていない。

気象予報の誤差は、近似に伴うモデル自体の誤差と、初期値のわずかなズレによるカオス的な誤差の 2 つがある³⁾。近年、これらの誤差を加味し予報を多数用意したアンサンブル予報も存在するが、工事の支援のために降水予報をリアルタイムで入力し、水位を予測することを考えると、計算量が少ない従来の MSM 等の利用が好ましいと考えられる。

予報降水量と実測降水量の誤差、また予報降水量を用いた水位予測の誤差については従来から研究されている。田中ら⁶⁾や奥野ら⁷⁾は、予測降水量と実測降水量の誤差分布をモデル化し、1~6 時間先までの降水予測誤差分布を解析することで水位の確率分布を算出している。水位の算出手法としては、前者は分布型流出モデルを、後者は力学系理論に基づく予測を採用している。また、深草ら⁸⁾は確率統計解析を用いた予測降水量の上限値と下限値の算定手法を提案し、ダム流入量の上限値と下限値について検証している。しかし、39 時間先など長時間先までの降水予報を対象に予報の誤差を分析した研究は少ない。加えて、現場に向けての出水警報システムを迅速に構築し、リアルタイムで現場へ配信するためには、物理モデルよりも比較的簡易な手法(タンクモデルや回帰式等)の方が実務に沿っているが、予報降水量の誤差とこれらの手法を組み合わせた例は見られない。

そこで本論では、水位予測における出水の見逃しを減らすことを念頭に、以下の 2 点を目的とした。

- 1) 39 時間先までの予報降水量の誤差分析を行い、予報降水量と誤差の関係を整理すること。
- 2) 上記の誤差を考慮した水位予測方法を検討し、出水の見逃し低減への効果を検証すること。

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

2. 熊野川流域と降雨の特徴

本研究では、熊野川流域を分析対象地域とした(図-1)。熊野川は、流域面積 2,360km² の紀伊半島最大の一級河川である。この地域は山地が多く、台風の経路と重なることが多いため、全国平均値の約 1.6 倍の年降水量となる非常に多雨な地域とされている⁹⁾。図-2 は、熊野川河口付近の新宮観測所を含む 3 か所の AMeDAS 観測所(新宮、東京、宇和島)における、2006 年から 2019 年までの降水量の 1mm/h ごとの頻度分布である。0mm/h を除く雨が降った際のデータのみを集計している。図-2 より、東京と宇和島では降水量の最大値は 30mm/h 程度であるのに対して、新宮での最大値は 40mm/h 程度である。加えて、新宮の降雨頻度は宇和島の 1.25 倍、東京の 1.34 倍であることから、新宮周辺は量的にも頻度的にも多雨な地域と言える。

3. 予報降水量の誤差分析方法

本研究では、熊野川流域内の相賀水位観測所の水位を予測することを目的に、相賀に最も近い AMeDAS 観測所(新宮)を対象に予報降水量の誤差を 14 年分集計した。予報降水量は MSM 予報降水量を用いた。実測と予報の誤差の例として、図-3 に熊野川の新宮観測所の実測降水量と、その直近の MSM 格子点における予報降水量(39 時間先予報)を比較したハイトグラフを示す。図-3 より、2017 年 2 月 20 日と 2 月 23 日において、実際は降水予報の倍以上の雨が降ったことが分かる。

次に、集計結果から誤差の頻度分布を作成し、出水の見逃しにつながる、予報が過小となる割合について予報降水量の大きさや月ごとの特徴を調べた。具体的な方法を以下に記す。

3.1 予報誤差の累積頻度分布

新宮 AMeDAS 観測所の実測降水量(R_m)とその直近座標の MSM 予報降水量(R_p)について量的な誤差(予報誤差 ΔR とする、 $\Delta R = R_p - R_m$)を 2006 年から 2019 年までの約 14 年分集計した。集計結果をもとに、2 mm/h ごとにランク分けした R_p ごとの ΔR の累積頻度分布を作成した。例として、予報が $6 < R_p \leq 8 \text{mm/h}$ となるデータを対象とした累積頻度分布を図-4 に示す。なお、MSM は 39 時間先までの予報があるが、集計において 1 時間先~39 時間先の予報の誤差に明確な傾向の違いが見られなかったため、本集計では 1 時間先~39 時間先の予報の頻度分布を合算して評価した。また図-4 に示すよ

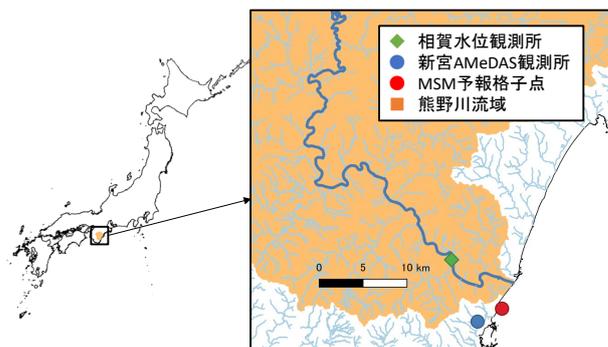


図-1 熊野川流域

Fig. 1 Kumano River basin

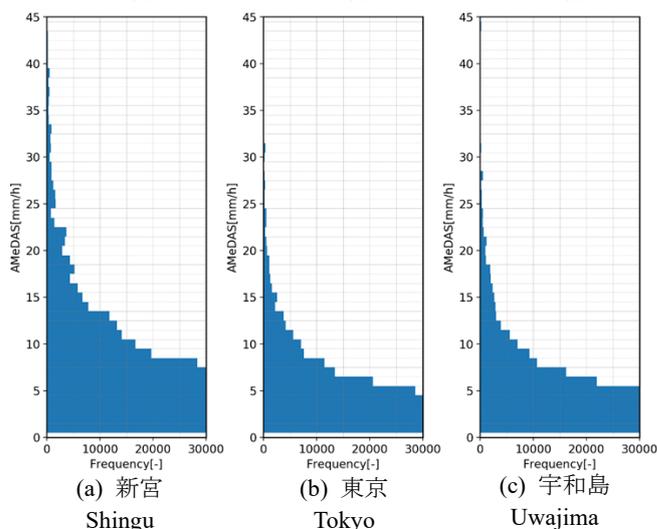


図-2 AMeDAS 観測所(新宮、東京、宇和島)における 2006 年から 2019 年までの降水量の頻度分布
Fig. 2 Frequency distribution of precipitation at AMeDAS stations (Shingu, Tokyo, and Uwajima) from 2006 to 2019

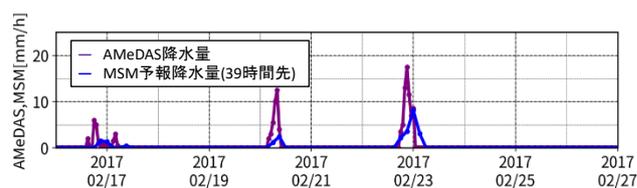


図-3 予報降水量(MSM, 39 時間先)と実測降水量(AMeDAS)のハイトグラフ(新宮観測所)
Fig. 3 Hietograph of precipitation forecast (MSM, 39 hours ahead) and observed precipitation (AMeDAS) (Shingu Observatory)

うに、本集計では $\Delta R \leq -1 \text{mm/h}$ を「予報が過小」、 $-1 \text{mm/h} < \Delta R \leq 1 \text{mm/h}$ を「予報が的中」、 $\Delta R > 1 \text{mm/h}$ を「予報が過大」と定義する。

加えて、上記と同様の方法で、 R_p を 1 月~12 月の月ごとに区分けして、 ΔR の累積頻度分布を作成し、特徴を整理した。

3.2 信頼区間

予報降水量(R_p)と、出水の見逃しにつながる過小側の予報誤差(ΔR)の関係を整理するために、 ΔR の累積頻度分布の信頼区間を設定し、その下限値を過小側の

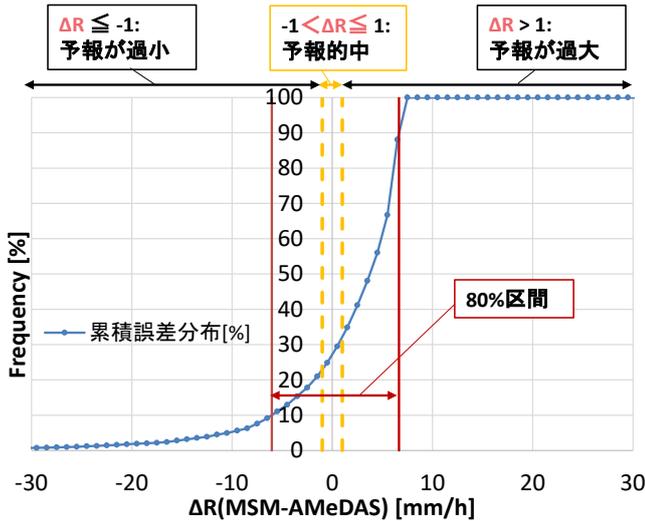


図-4 6<Rp≤8mm/hの予報降水量ランクの累積頻度分布
Fig. 4 Cumulative frequency distribution of forecast precipitation rank: 6<Rp≤8mm/h

誤差の限界値として用いた。累積頻度分布の100%の範囲を対象とすれば、14年分のすべてのΔRを考慮できるが、特異的に大きい誤差を含む可能性がある。一方、信頼区間を絞りすぎるとΔRの下限値が的中に近づき、過小となる下限値を評価することが難しくなる。そのため、信頼区間は60%~80%の範囲で10%おきに検討した。例えば、図-4より、Rpが6~8mm/hにおける信頼区間80%のΔRの下限値は-6.04mm/hであるため、信頼区間80%において予報降水量は最大で6.04mm/h過小となる可能性があることを示している。

4. 予報降水量の誤差分析結果

4.1 予報誤差の累積頻度分布

表-1(a)に予報降水量ランクごとの、(b)に月ごとの、予報誤差ΔRが過小・的中・過大となった割合を示す。なお特に過小に着目するため、過小となる割合の中で高かったものを赤色で色付けた。

表-1(a)より、予報降水量Rpが0~2mm/hのランクでは他のランクと比べて的中となる割合が高く、2mm/h以下の降雨予報は比較的当たりやすい結果となった。次に、過小となる割合に着目する。過小となる割合は、Rpが2~8mm/hと比較的少ないランクで21~24.5%と相対的に高く、8mm/hより大きいランクでは過小となる割合はRpが大きくなるにつれて減少した。一方、降雨予報が過大となる割合については、予報が2mm/hより大きい場合、Rpが大きくなるにつれて割合は増加した。

表-1(b)の月ごとの割合の結果より、季節によらず的

表-1 予報降水量が過小・的中・過大となる割合
Table 1 Percentages where precipitation forecasts were underestimated, precisely predicted, and overestimated

(a) 予報降水量ランクごと
By forecast precipitation rank

予報降水量 (Rp) ランク	過小 (ΔR ≤ -1) [%]	的中 (-1 < ΔR ≤ 1) [%]	過大 (ΔR > 1) [%]
0 < Rp ≤ 2	17.1	75.3	7.6
2 < Rp ≤ 4	24.5	18.9	56.7
4 < Rp ≤ 6	23.5	11.9	64.7
6 < Rp ≤ 8	21.0	8.5	70.5
8 < Rp ≤ 10	19.0	6.6	74.4
10 < Rp ≤ 12	18.2	4.6	77.2
12 < Rp ≤ 14	13.8	4.4	81.8
14 < Rp ≤ 16	13.8	3.2	83.1
16 < Rp ≤ 18	13.2	1.6	85.2
18 < Rp ≤ 20	12.7	4.8	82.5

(b) 月ごと
Monthly

月	過小 (ΔR ≤ -1) [%]	的中 (-1 < ΔR ≤ 1) [%]	過大 (ΔR > 1) [%]
1	11.7	77.9	10.3
2	21.5	66.1	12.4
3	24.0	60.6	15.5
4	24.0	60.0	16.0
5	24.7	57.5	17.8
6	22.7	58.7	18.6
7	15.1	58.5	26.4
8	11.4	55.5	33.1
9	13.9	50.0	36.1
10	20.7	52.4	26.9
11	16.1	62.3	21.6
12	14.5	69.3	16.1

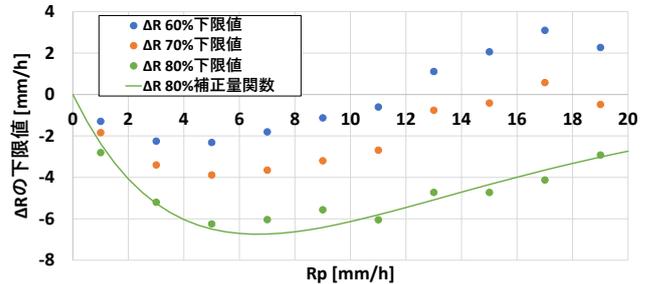


図-5 信頼区間60%~80%における予報誤差ΔRの下限値と予報降水量Rpの関係
Fig. 5 Relationship between the lower limit of forecast error ΔR and the forecast precipitation Rp in the 60% to 80% confidence interval

中となる割合は過小・過大となる割合よりも高かった。また、予報が過小となる割合は、3月~6月頃に高い傾向となった。一方、予報が過大となる割合については、7~10月ごろの台風シーズンにおいて高い傾向となった。

4.2 予報降雨と過小側の誤差の関係

予報誤差ΔRの信頼区間60%~80%において、予報降水量(Rp)ランクごとに下限値、つまり過小側の誤差の限界値を求め、図-5にプロットした。例えば、Rpが0~2mm/hの場合のΔRの下限値は、ランク内の中央値であるRp=1mm/hの位置にプロットしている。なお、図中の緑線については5章に後述する。図-5における信頼区間の下限値とRpの関係を見ると、いずれの信頼

区間においても下限値は、 R_p が 4~6 mm/h で最小、すなわち過小側の誤差が最大となり、それより大きい R_p では下限値は的中・過大側に近づく傾向が示された。ここで、表-1(a)において、過小となる割合は R_p が 2~8 mm/h で高く、8 mm/h より大きいランクでは R_p が大きくなるにつれて減少する。つまり、的中もしくは過大の頻度が増加する傾向を示していたことを踏まえると、2~8 mm/h 程度の予報降水量は頻度的にも量的にも過小となりやすい特徴がある。

R_p が 12 mm/h より大きい範囲では、信頼区間 60%と 70%では ΔR の下限値が $\Delta R > 0$ 、つまり的中、または過大評価側の値となっている。従って、比較的大きい予報降水量では、信頼区間 60%と 70%では過小側のデータを評価できていない。上記の内容に加えて、表-1(a)の過小となる割合の最小値は 10%程度であったことも考慮し、過小側を 10%分除外する信頼区間 80% (10%~90%の範囲) の予報誤差を用いて水位を予測することとした。

5. 予報の誤差を考慮した水位予測方法

集計結果から得られた信頼区間 80%における予報誤差 ΔR の特性を水位予測に反映させる方法について検討した。具体的には、誤差分布の 80%信頼区間の ΔR の下限値と予報降水量 R_p の関係をもとに補正量関数を決定した。その関数を用いて補正した R_p を水位予測の入力値として、熊野川流域の観測所（相賀）の水位を予測し、 ΔR の考慮による出水の見逃しの低減効果について考察した。水位予測の対象地点の選定にあたっては、水文水質データベースより実測値を入手でき、潮位の影響がない相賀観測所を選んだ。

5.1 過小側の誤差の補正量関数

過小となる予報誤差を予測水位に反映する方法として、以下の手順で補正量関数を求めた。信頼区間は前述した 80%を採用した。まず、予報降水量 R_p の大きさに対して R_p の何倍程度の誤差となるか把握するため、 ΔR の 80%信頼区間の下限値を R_p で除した値と R_p の関係を求めた (図-6)。 R_p が大きくなるにつれて下限値は指数関数的に 0 に近づいた。この近似曲線 (式(1)、図-6 緑線) をもとに、 ΔR の下限値を割り戻し、 ΔR の補正量関数 (図-5 緑線) を求めた。補正量関数は、過小側 ($\Delta R < 0$) の評価関数とするため R_p が大きくなるにつれて $\Delta R = 0$ に漸近する以下の関数とした。

$$f'(R_p) = -2.7505 \times \exp(-0.15 \times R_p) \quad (1)$$

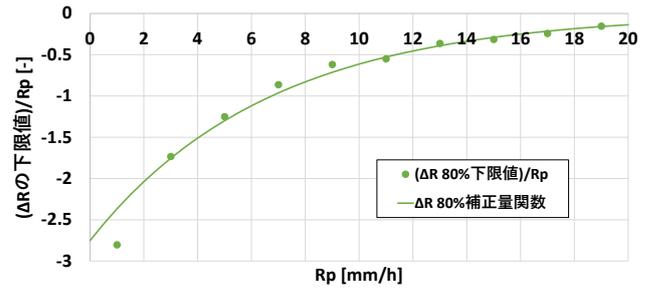


図-6 予報降水量 R_p で除した ΔR の下限値と R_p の関係
Fig. 6 Relationship between the lower limit of ΔR divided by the forecast precipitation R_p , and R_p

$$f(R_p) = f'(R_p) \times R_p = \{-2.7505 \times \exp(-0.15 \times R_p)\} \times R_p \quad (2)$$

ここで、 R_p は予報降水量、 f' は ΔR の下限値を R_p で除した値を表す関数、 f は ΔR の下限値を表す関数である。

5.2 水位予測モデル

相賀観測所の実測水位データから 12 の出水イベントを選定し、実測降水量と実測水位の関係を定式化した回帰式とタンクモデルを作成し、全出水イベントにおいて ΔR の補正量関数の適用有無による予測水位を比較した。なお、出水イベントは、2020 年 1 月から 2022 年 12 月までの 3 年間で相賀の水位が仮の警報水位 T.P.+8.0 m を超えたイベントを選定した。また、各モデルの作成にあたっては相賀上流の解析雨量（気象庁、1km メッシュ）を用いた。予報誤差を算出するために用いた AMeDAS の実測降水量を用いてモデルを作成することが理想ではあるが、水位には上流域全体の降雨の影響がある。よって、より精度を高めるためにモデル作成時は、面的にデータが存在する解析雨量の流域平均値を用い、6 章に後述する水位予測時には MSM 予報降水量を用いた。

回帰式は、以下のように定式化した。

$$\eta(t) = \eta(t-1) + 0.5 \times \{R(t-8) - R(t-9)\} \quad (3)$$

ここで、 η : 予測水位(m)、 R : 降水(mm/h)、 t : 予測時刻であり、 $\eta(0)$ は相賀観測所の予測開始時の実測水位とする。降水を入力値とすると、降水の増減がそのまま予測水位波形に現れ、実測の水位波形と乖離していたため、回帰式作成および水位予測時の降雨には 12 時間の移動平均値を用いた。実測降水量と実測水位を比較したところ、1 時間あたりの降水変動量との相関が比較的高く、降水変動に対し出水のピークはおおよそ 8 時間の遅れがあったことから、回帰式では時刻($t-8$)と

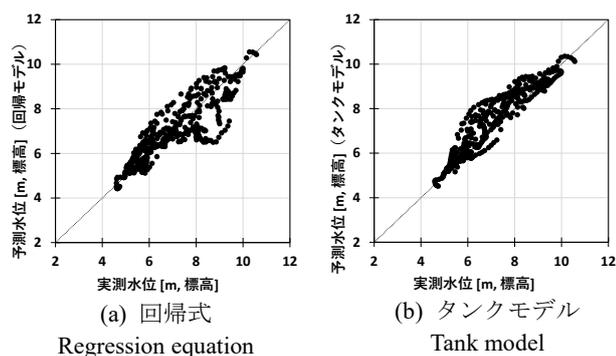


図-7 相賀の実測水位と予測水位の関係
Fig. 7 Relationship between observed and predicted water levels at Ouga Observatory

($t - 9$)の降水量を用いた。

次に、タンクモデルとして標準的な 4 段の直列貯留型モデルを作成した。タンクモデルの各パラメータは、降水量の上昇に対する相賀観測所の実測流量波形の立ち上がりの時間遅れを表現するよう調整した。また、対象とした降雨イベントにおける相賀の実測流量と水位の関係から H-Q 式を導き、タンクモデルの出力流量を水位に換算した。

全 12 イベントの水位について、相賀の実測水位と各モデルによる予測水位の関係を図-7 に示す。ここで、河川工事を念頭におくと、出水の立ち上がりを再現することが重要であると考え、図-7 には各イベントにおける実測水位のピークまでをプロットしている。図-7 より、回帰式は概ね±1m 程度の誤差があり、タンクモデルの結果は概ね+1m 程度の誤差がある。また、予測水位が警報水位を超えた場合は「的中」、警報水位を超えなかった場合は「見逃し」として各イベントの予測水位の時系列を確認したところ、全 12 イベントのうち、タンクモデルでは 11 イベントは的中、1 イベントは見逃し、回帰式では 8 イベントは的中、4 イベントは見逃しとなった。

6. 水位予測結果

前述の回帰式およびタンクモデルを用い、全 12 イベントの降水予報を入力値として水位を予測した。図-8 に予報降水量 R_p が比較的大きい 10 mm/h を超えるイベント(a)と 10 mm/h 以下のイベント(b)における水位の予測結果を示す。図-8 には、実測水位、予測水位、実測降水量 R_m 、予報降水量 R_p を表示している。予測水位と予報降水量は、補正量関数を適用して誤差を考慮した値(黄線)と、していない値(青線)をそれぞれ示

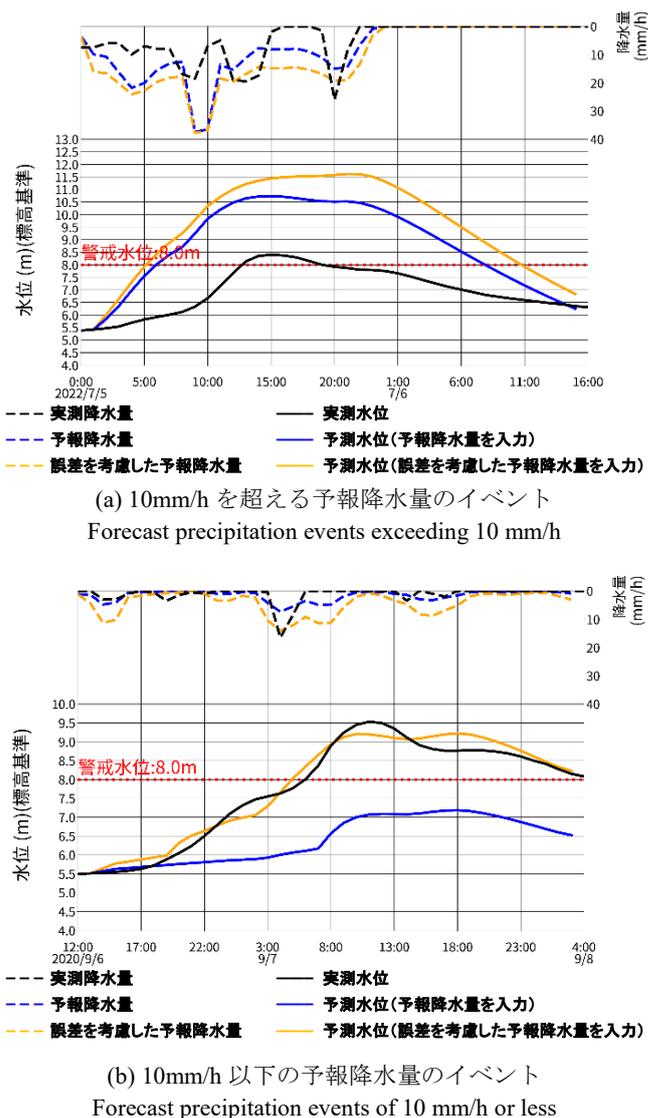


図-8 予報誤差の考慮有無によるタンクモデルの水位予測結果の比較
Fig. 8 Comparison of tank model water level prediction results with and without the consideration of forecast errors

している。なお、回帰式およびタンクモデルにおいて同様の傾向が確認できたため、以降はタンクモデルについてのみ議論する。

図-8(a)は、比較的大きい 10 mm/h を超える予報の場合であり、予測水位は誤差の反映によらずに実測水位を大きく上回った。これは、2022/7/5 0:00 から 11:00 ごろまで、予報降水量が実測降水量より大きいためであった。本手法は予報が実測よりも過小となる場合に誤差分を加える補正を行っているため、図-8(a)のような場合の誤差を考慮するには、今後過大側の評価が必要である。

図-8(b)は、予報降雨が 8mm/h 以下であり、 ΔR の集計結果から予報が過小となるのが懸念されるイベン

トである。予報誤差 ΔR を考慮しない予測水位は、実測水位より大幅に低いが、誤差を考慮することで予測水位はこれより高くなり、実測水位に近づいた。予報降水量が実測降雨より小さく、補正量関数を適用したことでその差をある程度縮めることができたことが分かる。採用した補正量関数(式(2))は2~8mm/h程度の予報において降水量を大きくなるように補正するものであり、図-8(b)の予報(青破線)のように、ピーク降水量が6mm/h程度の場合における有効性が示された。

7. 予報降水量の補正効果と実務上の課題

予報降水量の補正量関数を適用する場合としない場合のタンクモデル及び回帰式の各予測において、予測水位が「的中・見逃し・空振り・出水なし」となった頻度を集計した。頻度集計の条件を表-2と図-9に、集計結果を図-10に示す。集計は、実測水位が警戒水位8.0m以上の時、予測水位も8.0m以上ならば「的中」、それ未満ならば「見逃し」とした。また、実測水位が8.0m未満の場合は、予測水位が8.0m以上ならば「空振り」、それ未満の場合は「出水なし」とした。なお、出水ピークのタイミングや量を精度よく予測できることが理想ではあるが、河川工事の観点からは警戒水位を超える出水を数時間前に把握することが大切である。ここでは、例えば実測と予測水位が警戒水位を超えるタイミングに時間的な差異があった場合でも、双方が警戒水位を超えていれば「的中」と評価した。2020年から2022年までの3年間のうち、12の出水イベント中に配信された全予報を対象とした。MSM予報は3時間毎に配信されるため、1~12の全イベント期間を対象としたとき、MSMの予報回数(つまり水位予測回数)は262回となる。

図-10より、予報誤差 ΔR を考慮することによって、空振りは2,3回分増加したが、見逃しの回数は約1/4に減り、「的中」の回数は増加した。本方法によって空振りは多少増えたが見逃しの低減効果はそれ以上であり、見逃し防止への活用可能性が示されたと考えられる。

以上の集計結果から、本手法は出水の見逃し低減効果を確認できたため、河川工事の安全管理の一助になると考える。ただし、空振りの増加割合は少ないが、出水イベント以外の平常時に本手法を適用した際には、上記の集計結果以上に空振りはさらに増加する可能性がある。対策としては、補正量関数を適用した予測水位の発生確率や警戒水位の超過確率を合わせて示し、一定確率以上の予測出水のみをターゲットにする等の工夫が挙げられる。また、出水のタイミングや量の予

表-2 頻度集計条件

Table 2 Conditions for the frequency aggregation

	実測水位 8.0m 以上	実測水位 8.0m 未満
予測水位 8.0m 以上	的中	空振り
予測水位 8.0m 未満	見逃し	出水なし

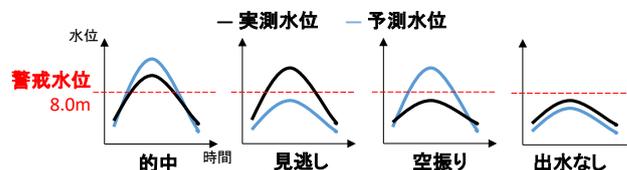


図-9 的中・見逃し・空振り・出水なしの比較

Fig. 9 Comparison between precise prediction, overestimation, underestimation, and no water level rise

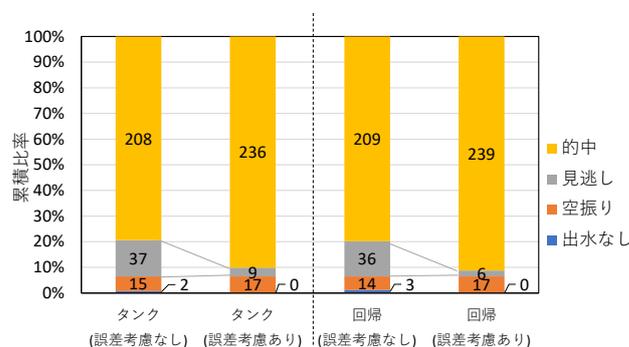


図-10 予報誤差の考慮有無によるタンクモデル及び回帰式の水位予測結果の集計

Fig. 10 Aggregation for the tank model and the regression equation with and without the consideration of forecast errors

測が重要となる場合にも、上記のような確率の表示は有効であると考えられる。

8. まとめ

本研究では、河川工事のための水位予測における見逃しを減らすことを念頭に、熊野川流域を対象に予報降水量の誤差分析を行い、その予報誤差 ΔR を考慮した水位予測方法を検討した。以下に、本研究で得られた主要な知見を示す。

- 1) 熊野川河口付近の新宮観測所を対象に、予報誤差 ΔR の誤差分析を行った。予報が過小となる割合は、予報降水量 R_p が2~8mm/hと比較的少ない場合に高い傾向となった。次に、 ΔR の頻度分布の信頼区間の下限值、つまり過小側の誤差の限界値と R_p の関係を見ると、下限値は R_p が4~6mm/h程度で最小となり、過小側の誤差が大きくなる傾向が示された。
- 2) 降雨から水位を求めるタンクモデルと回帰式を作

成し、12 の出水イベントにおいて補正量関数の適用有無による予測水位を比較した。誤差を考慮することで、比較的小さい降水予報の場合に警報水位を超える出水の見逃しを防止できる場合があった。そして、全イベント期間を対象に見逃し・的中・空振りとなった回数を集計したところ、誤差の考慮によって見逃し回数が低減し、見逃し防止への活用可能性が示された。

本研究における集計対象は AMeDAS 観測所 1 か所とその直近の MSM 格子点 1 か所にとどまっている。そのため、面的な降雨分布や局地的な降雨、他地域における誤差特性について確認することが課題である。これらを含めてより実用的な誤差評価手法の検討を続け、実用性を向上させていく予定である。

参考文献

- 1) 大野剛, 永野雄一, 本田隆英, 高山百合子, 伊藤一教: 河川工事の安全管理に用いる「出水警報システム」の長期適用と予測精度の向上に関する検討, 河川技術論文集, 第24巻, pp.425-430, 2018.
- 2) 大野剛, 永野雄一, 本田隆英, 高山百合子, 伊藤一教: 出水警報システム「T-iAlert River」の河川工事への長期適用と予測精度の向上に関する要因の把握, 大成建設技術センター報, 第51号, 43, 2018.
- 3) 気象庁: 令和4年度数値予報解説資料集, pp.98-138, 2022, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/R4/No55_all.pdf.
- 4) 日本経済新聞: 予想外れ「重く受け止め」熊本豪雨で気象庁長官, 2020, <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO61559470V10C20A7CC1000/>.
- 5) 気象庁: 天気予報の精度の例年値とその特徴, https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/expln_reinen.html.
- 6) 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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.57, No.4, I_1591-I_1596, 2013.
- 7) 奥野 峻也, 瀧川 宏樹, 宮藤 秀之: 予報雨量誤差に基づく河川水位の確率的予測, 河川技術論文集, 第26巻, pp.37-42, 2020.
- 8) 深草 新, 辻倉 裕喜, 福井 治, 増本 健佑, 田中 耕司: 長時間予測雨量の誤差推定と多地点順次データ同化による不確実性を考慮した洪水予測手法の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, I_1363-I_1368, 2018.
- 9) 国土交通省 水管理・国土保全局: 新宮川水系河川整備基本方針, pp.1-5, 2021.