

都市型河川工事のための 降水短時間予報を活用した水位予測

飯村 浩太郎^{*1}・高山 百合子^{*2}・織田 幸伸^{*2}

Keywords : river work, torrential rain, precipitation forecast, water level prediction, forecast error, safety management

河川工事, 短時間大雨, 降水予報, 水位予測, 予報誤差, 安全管理

1. はじめに

河川工事の安全管理において、降水による出水の危険があり人員や資機材を退避させる場合に、数時間のリードタイムが必要となる。これに対し、著者らは工事地点の河川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),2)}。本システムは2008年以降複数の河川工事において適用している。本システムは、長時間先までの予報降水量を入力として水位を予測し、出水の危険を関係者に事前通知することにより、退避に必要なリードタイムの確保に活用できる。水位予測の入力値としては、39時間先までの予報データがある、気象庁のメソ数値予報モデル（以下 MSM、5km メッシュ）を主に用いている。

近年、短時間大雨が多く発生しており、特に都市型の中小河川では、降雨後に短時間で水位が上昇する場合がある。短時間大雨の場合、雨雲が短時間かつ狭い範囲で急激に発達するため、長時間予報（MSM）では解析格子が粗く、降雨を精度よく予報できない場合がある。気象庁³⁾によると、MSMは梅雨前線や積乱雲群などの数十時間から数日に及ぶ、数10km以上の水平範囲を持つ気象現象を予測対象としており、短時間大雨をもたらすような数時間単位で10km以下の水平解像度を持つ現象の予測は難しいと考えられる。従って、都市型の中小河川に対応した水位予測を行うためには、降水短時間予報（1km メッシュ）等の短時間予報を用いることが有効と考えられる。

本システムの入力値となる予報降水量は誤差を含ん

*1 東京支店 土木工事作業所

でおり、水位予測結果に影響を及ぼす。特に、予報降水量が実際の降水量を下回る場合、それを入力に算出した予測水位も実際の水位を下回り、出水を見逃すことになる。河川工事においては、このような「見逃し」を低減することが求められる。これに対して、これまで著者らは MSM を対象として、予報降水量とその予報誤差 ΔR (= 予報降水量 - 実測降水量) の関係を定式化し、この ΔR を加味した予測水位の上限値評価方法を提案し、出水の見逃し低減に対する有効性を確認している^{4),5)}。

MSM と同様に降水短時間予報にも誤差は含まれる。短時間大雨の場合は、降り始めてから出水するまでの時間が短いため、水位予測において出水を見逃した場合は退避が間に合わないことが懸念される。従って、降水短時間予報の誤差を定量的に評価し水位予測に反映することで、出水の見逃しを減らし、退避のためのリードタイムを少しでも長く確保することが重要である。しかしながら、降水短時間予報は MSM に対して予測対象とする気象現象の空間範囲とライフサイクルが異なることから、前述の MSM の誤差に基づく手法（以下、既往手法）では、降水短時間予報の誤差を評価できない可能性がある。

降水短時間予報の誤差に着目した研究として、奥野ら⁶⁾は、降水短時間予報と実測雨量の誤差を時刻ごとに對数比でモデル化し、吉野川水系の水位予測に適用して手法の妥当性を確認している。中村ら^{7),8)}は、RRI モデルに降水短時間予報を入力することで、予測時間が長くなるほど予測水位の誤差幅が大きくなることや、台風性と非台風性降雨のいずれのイベントにおいても予測水位は過小傾向となることを示している。しかし、

*2 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

短時間大雨において降水短時間予報の誤差を評価した研究や、誤差を定量化して都市型の中小河川に適用した例は見られない。

以上を踏まえ本研究では、降水短時間予報を対象に降水量の予報誤差を加味する方法を検討し、この方法による短時間大雨における出水の見逃し低減効果と、確保できるリードタイムへの影響を整理することとした。

2. 水位予測と予報誤差集計の対象

水位予測においては、東京都内の都市型中小河川である神田川の飯田橋水位観測所を予測対象とした。神田川は延長距離 25.6 km、流域面積 105 km² の都内都市部での最大級の中小河川である。神田川流域と飯田橋水位観測所、流域内の実測降水量（解析雨量）と予報降水量（降水短時間予報）に共通する格子点位置を図-1(a)に示す。また、図-1(b)に示すように飯田橋水位は東京湾潮位の影響を受けるため、東京湾潮位の実測値に基づき実測潮位成分を差し引いた、降雨による水位上昇量のみを予測対象とした。なお、後述する予報誤差集計においては実測降水量、予報降水量とともに図-1(a)に示す格子点の流域平均値を用いた。

3. 降水短時間予報の誤差特性

3.1 予報誤差の算出方法

神田川流域を対象に、降水短時間予報の予報誤差 ΔR (= 予報降水量 R_f - 実測降水量 R_m) の算出と集計を行った。また、降水短時間予報の誤差傾向を比較するため、MSMについても同じ条件で同様の集計を行った。実測降水量には解析雨量を用いた。対象期間は 2018 年から 2023 年とし、1 mm/h 以上の予報降水量が記録されたイベントを選定した。本研究の対象である短時間大雨のみのデータを対象に集計することも可能であるが、1 時間程度で降水量が 20 mm/h 程度まで上昇するようなイベント数が少なく統計的な誤差の評価が難しかったため、降雨形態で区別せずにイベント数の確保を優先した。具体的な集計方法は以下の通りである。

予報降水量と実測降水量の流域平均値から求めた予報誤差 ΔR について、2 通りの方法で集計した。一つめの集計方法として、予報降水量と予報誤差の関係について整理した。予報降水量を 2 mm/h ごとにクラス分けし、クラスごとに ΔR の累積頻度分布を作成した。誤差が極端に大きい場合を除くため、累積頻度分布の信

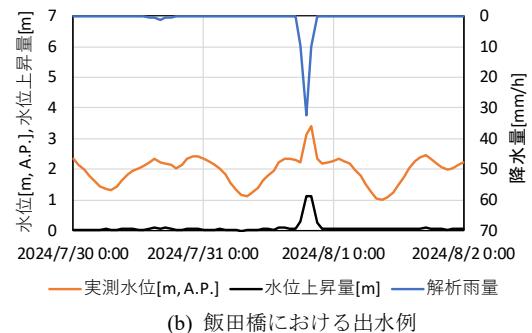
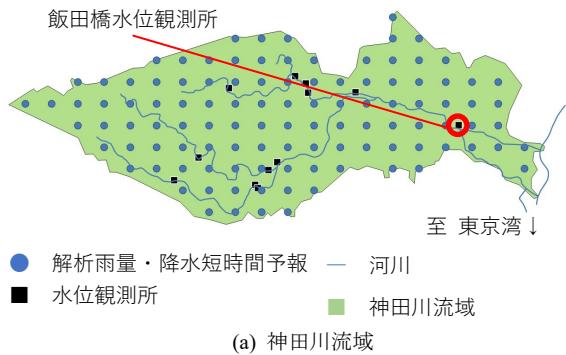
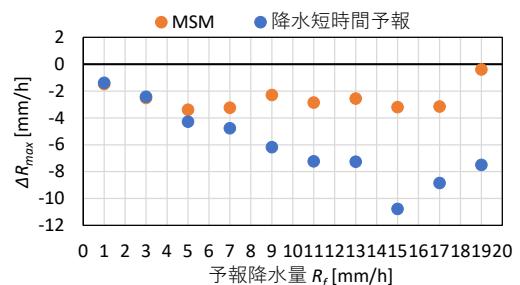


図-1 予測対象地点と降水量と水位の関係
Fig.1 Kanda river basin, and the relationship between the rainfall and the water level



頼区間を設定し、信頼区間において予報が実測に対して過小 ($\Delta R < 0$) つまり「見逃し」となる、マイナス側の誤差の最大値を ΔR_{max} として、各クラスの ΔR_{max} を算出した。なお、上記は既往手法^{1), 2)}における整理方法と同様である。また別の集計方法として、N 時間先予報と予報誤差 ΔR の関係を整理した。MSM では N=1~39、降水短時間予報では N=1~6 であり、以降 N を予報時刻と称する。予報時刻ごとに ΔR の累積頻度分布を作成し、信頼区間を 90 ~ 99% の間で設定した。そして前述の手法と同様に、見逃し側の最大誤差 ΔR_{max} を予報時刻ごとに算出した。

3.2 予報降水量と予報誤差の関係

図-2 に MSM と降水短時間予報について、予報降水量 R_f と見逃し側の最大誤差 ΔR_{max} の関係を示す。図-2 は、

信頼区間を80%に設定した結果である。MSMに着目すると、 R_f が5 mm/hまで誤差が大きくなり、 R_f が5~17 mm/hの間は同程度の誤差、 R_f が19 mm/hのときは誤差がほぼないことが分かる。著者らはMSMの誤差について、予報が比較的小さい場合に誤差が最大となり、予報がそれより大きくなると誤差が小さくなる傾向を確認しており^{1),2)}、図-2の結果はこれと整合している。一方、降水短時間予報では、 R_f が15 mm/hまでは R_f が大きくなるほど誤差は大きくなり、以降は誤差が若干小さくなっている、MSMとは明確に特徴が異なる。なお、信頼区間を70%から90%の間で変更して整理した場合も同様の傾向であった。

図-2では、 R_f が大きくなるほどイベント数が減るため、データ数は少なくなっている。MSMの場合は、予報が大きくなるほど誤差が0に近づく傾向があったため、20 mm/h等の大きい予報降水量のデータ数は少ないものの、誤差はほぼないものと評価できた。これに対し、降水短時間予報の場合は、 R_f が大きくなるほど ΔR_{max} は概ね大きくなる傾向を示している。これは、大きい降水量のデータ数が少ないと影響している可能性が考えられる。以上より、既往手法^{1),2)}による誤差評価は困難であることが分かった。

3.3 予報時刻と予報誤差の関係

予報時刻と ΔR_{max} の関係を整理した結果を、降水短時間予報とMSMについて、信頼区間ごとに図-3に示す。まず降水短時間予報について、図-3(a)より、いずれの信頼区間においても予報時刻が長いほど誤差が大きくなり、また2~4時間先予報は同程度の誤差となる傾向となった。奥野ら⁶⁾は予報時刻が長いほど実測降水量と予報降水量の相関係数が小さくなる傾向があることを、また中村ら⁷⁾は1~3時間先の予報降水量の相関係数は大きいが、4~6時間先の予報では予報時刻が長いほど相関係数が小さくなる傾向を、それぞれ示しており、図-3(a)の結果はこれらに整合する。一方、図-3(b)のMSMの場合、いずれの信頼区間においても予報時刻と誤差の間に明瞭な関係は見られなかった。なお、7時間以上の予報時刻についても同様であった。

気象庁⁹⁾によると、降水短時間予報では、解析雨量をもとに降水分布の移動を予測する実況補外型予測と、MSM等の数値予報モデルの降水量予測値を合成することで予報を作成しており、1時間先予報の方が前者の影響が強く、予報時刻が長くなるほど後者の影響が強くなる。このため、降水短時間予報では予報時刻が短いほど予報誤差 ΔR が小さくなっていると考えられる。

上述したように、予報降水量が大きくなるほどデータ数が減るため、予報 R_f と予報誤差 ΔR の関係においては大きな雨になるほど誤差評価の信頼性が低下していると考えられる。本研究は降水量が20 mm/h程度まで上昇するような短時間大雨を対象とするため、以降では、既往手法に従って予報降水量との関係から誤差を評価するのではなく、予報時刻と予報誤差の関係を用いることで誤差を評価することとした。

4. 誤差を考慮した予測水位の評価

4.1 水位の評価手法

水位予測において、予報時刻と予報誤差の関係から降水短時間予報の誤差を考慮する手法（以下、本手法）を以下に示す。まず、図-3(a)より得られた見逃し側の最大誤差を予報時刻ごとに予報値に加算し、予報降水量を補正した。これを信頼区間ごとに行い、補正した予報降水量を、後述する水位予測モデルの入力値として、飯田橋の水位上昇量の予測を行った。

水位予測モデルでは、神田川流域における平均降水量を入力として、飯田橋の水位上昇量を予測するタンクモデルを作成した。モデル作成にあたって、2018年

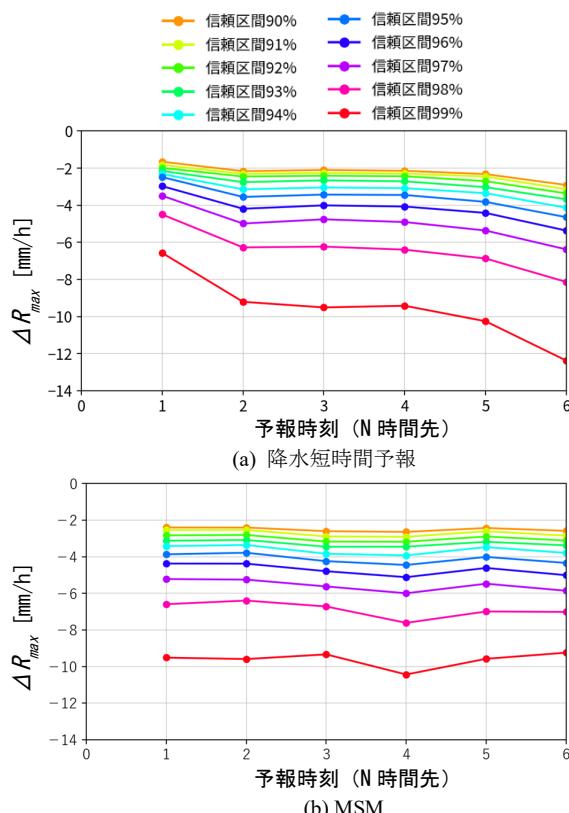


図-3 予報時刻ごとの見逃し側の最大誤差 ΔR_{max}
Fig.3 The relationship between the maximum error for underpredicted forecasts ΔR_{max} and the forecast time

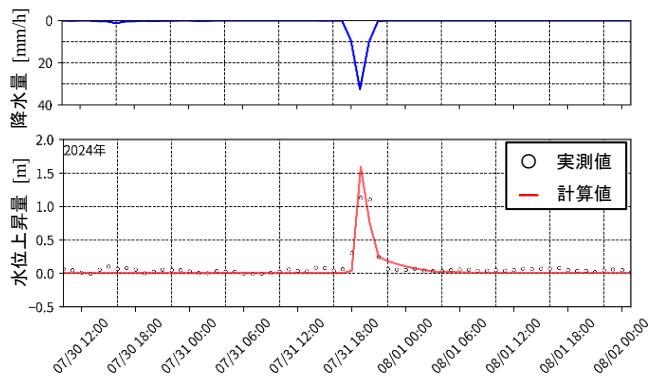


図-4 タンクモデルによる水位上昇量の予測例

Fig.4 Example of water level rise calculation using a tank model

から 2024 年までの飯田橋の実測水位データから、短時間大雨の出水イベントを抽出した。出水イベントは、1~2 時間程度で降水量が急上昇した後、1~2 時間程度で降水量がほぼ 0 mm/h まで低下するような降雨で、かつ、水位上昇量が仮設定した警戒水位上昇量 0.5 m を超えるイベントとした。

次に、出水イベント時の実測水位上昇量と実測降水量の流域平均値を用い、標準的な 4 段の直列貯留型タンクモデルを作成した。通常、タンクモデルの出力は流量であり、実測流量と実測水位から算定した H-Q 式を用いて流量を水位に換算する。しかしここでは、実測流量は潮位の影響を含むため、タンクモデルに直接用いることができない。そこで、H-Q 式に相当する、降雨による流出量と水位上昇量の関係式をモデル内部に組み込み、モデルの出力を水位上昇量とした。出力された計算水位上昇量と実測水位上昇量の波形が概ね一致し、計算値が実測値を安全側に再現するよう、タンクモデルの流出パラメタと H-Q 式の定数を試行的に同時に調整した。なお以降、予報降水量を入力とした予測結果を予測水位上昇量、実測降水量を入力とした予測結果を計算水位上昇量と称する。

タンクモデルによる水位上昇量の予測例として、2024/07/31における水位予測結果を図-4に示す。降水量の増加に伴う水位上昇量の増加を再現できていることが分かる。また、選定した出水イベントにおける実測水位上昇量と計算水位上昇量、それぞれの最大値の比較を図-5 に示す。計算値が実測値に対して安全側となるようモデル化したため、計算精度は-0.2 m から+0.8 m 程度の誤差範囲内にあり、出水のピークをやや過大評価する傾向にある。なお、本研究では水位上昇量の定量的評価が主目的ではなく、出水有無を予測することが目的であるため、警戒水位上昇量を超えるタイミ

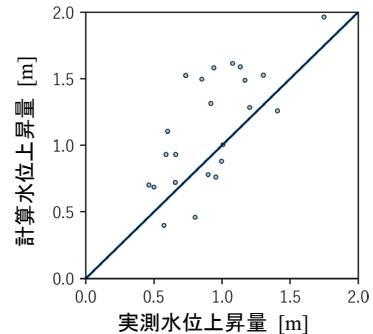


図-5 実測水位上昇量と計算水位上昇量の最大値の比較

Fig.5 Comparison between the observed and calculated values of maximum water level rise

ングに着目して評価を行った。図-5 のプロットのばらつきは、短時間大雨では局地的なばらつきが大きく、実測降水量の流域平均値が同じであったとしても、水位上昇量への影響度が異なるためだと考えられる。降雨の局地的なばらつきを考慮する場合には分布型流出モデル等の適用が考えられるが、同定するパラメタが多くなるため、本研究では実務への適用を念頭に、比較的簡易にモデル構築が可能で、計算負荷も少ないタンクモデルを採用した。

4.2 水位上昇量予測の上限値評価

警戒水位上昇量 0.5 m を超えた短時間大雨の出水イベントを対象として、飯田橋の水位上昇量を予測した。1 つのイベント期間は、水位上昇量が増加し 0.1 m 以上となった時刻の 6 時間前から、水位上昇量が 0.1 m 以下まで低下した時刻までとした。出水イベントは合計 28 個あり、各イベントにおいて、以下に示すように水位上昇量予測の上限値を評価した。まず、全てのイベント期間に配信された降水短時間予報を対象に、予報時刻と見逃し側の最大誤差 ΔR_{max} の関係から、各予報時刻における誤差分を予報値に加算することで、予報降水量の上限値を算出した。これを信頼区間 90 ~ 99% のそれぞれの場合で行い、予報降水量の 90 ~ 99% 上限値を求めた。そして、補正しない予報降水量および予報降水量の 90 ~ 99% 上限値を入力とした、水位上昇量予測を行った。

予測水位の上限値評価結果の例を図-6 に示す。図-6 の矢印は降水短時間予報が配信されたタイミングであり、例えば図-6(a)(b) のように、実測水位上昇量ピークの 3 時間前に配信された予報を用いた予測を、ここでは 3 時間前予測と称する。

図-6(a)では、補正なしの予報降水量は実測降水量の

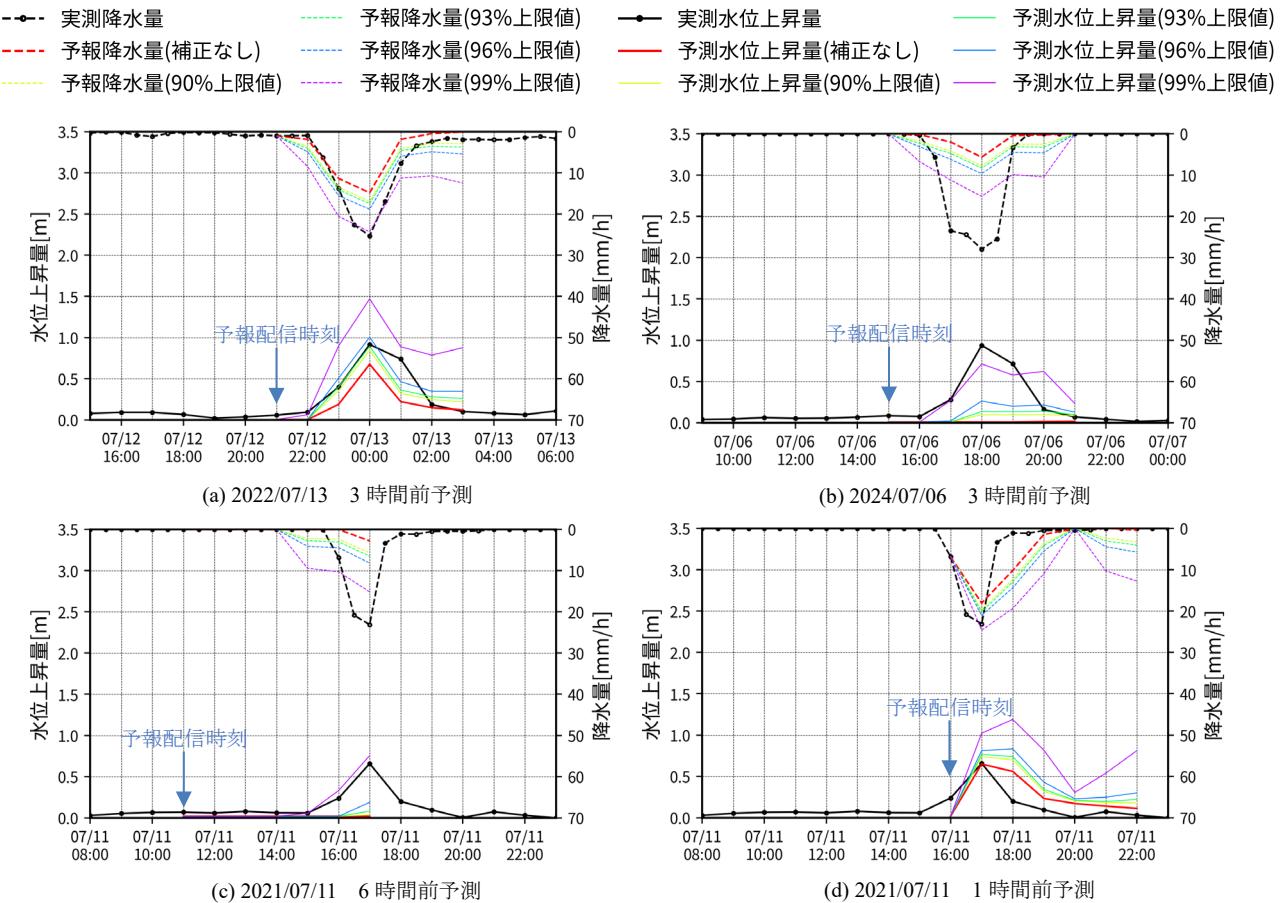


図-6 予測水位の上限値評価例
Fig.6 Examples of the upper evaluation of water level prediction

ピークに対して半分程度であるのに対し、予報の 99% 上限値まで誤差を考慮することで実測に近づいていることが分かる。水位上昇量については、補正なしの水位上昇量は実測水位上昇量に対して過小、つまり見逃しとなっていたが、信頼区間 96%以上の上限値は実測値以上となり、見逃しを防止している。

図-6(b)は、予報降水量の 99% 上限値であっても、実測降水量に対して大きく過小となる極端な事例である。予報降水量が実測降水量を大きく下回っている場合は、水位を安全側に予測することは本手法を用いても困難であるが、予測水位上昇量の 99% 上限値については、実測に対して過小であるものの警戒水位 0.5 m を超えるタイミングは予測できている。

図-6(c)(d)は、それぞれ同じイベントにおける、出水ピークの 6 時間前予測と 1 時間前予測である。図-6(c)では、予報降水量は実測降水量に対して大きく過小であったが、6 時間先予報に誤差を加味することで実測に近づけることができている。これは、図-3 の集計結果をもとに、統計的に誤差が最も大きくなる 6 時間先予報を大きく補正したためと考えられる。一方、図-6(d)

の 1 時間先予報では誤差が小さかったため、補正なしの予測水位でも出水ピークを的中できたことが分かる。

以上より、短時間大雨に伴う出水に対して、本手法が見逃しを抑制することに有効であることを確認した。なお、図-6 の予測結果には水位予測モデルの誤差も含まれるため、降水予報の誤差だけの評価ではないことに留意が必要である。

4.3 的中・見逃し・空振りの頻度

補正なしの予報降水量を入力とした場合と、予報降水量の 90 ~ 99% 上限値を入力とした場合の水位上昇量予測について、的中・見逃し・空振りとなった回数を集計した。なおここでは、降水短時間予報の配信頻度に合わせて、水位上昇量予測は 30 分おきに行った。以降、実測水位上昇量が警戒水位上昇量を超えた時刻を出水タイミングと称する。30 分おきの各水位上昇量予測において、出水タイミングの±1 時間の間で、予測水位上昇量が警戒水位上昇量を超えた場合は「的中」、±1 時間の間で警戒水位を下回った場合は「見逃し」とした。また、実測水位上昇量が警戒水位を上回らない場

合に、予測水位上昇量が警戒水位を超えた場合は「空振り」、警戒水位を下回った場合は「出水なし」とした。短時間大雨の際には急激に降水量が増加し、1時間程度で出水が発生する場合がある。1時間以上の予測の遅れは退避行動において致命的な退避の遅れにつながる可能性があるため、ここでは、予測と実測の出水タイミングの間のズレを±1時間以内として評価した。

図-7に各項目の集計結果を信頼区間ごとに示す。まず、的中と見逃しについて、図-7(a)より、補正なしと比較して、信頼区間を大きくするほど見逃しは減少した。具体的には、補正なしの場合と比べて、99%上限値の場合の見逃し頻度は約3%まで減少した。これは、図-6(c)のように予測水位上昇量が過小となる場合に、信頼区間を大きく設定することで予測値が実測値に近づき、見逃しが的中へ変わるためにある。本手法により見逃しは低減するが、一方で、図-7(b)から分かるように信頼区間を大きく考慮するほど空振りは増加する。99%上限値の場合、補正なしの場合と比べて空振りは7倍以上の頻度であった。見逃しと空振りはトレードオフの関係にあり、例えば飯田橋においては、信頼区間96%や97%に設定することにより、見逃しが半分程度に減少し、空振りが倍程度の増加で収まる結果となつた。空振り増加の許容度については、工事内容や河川の出水傾向等を加味して慎重に判断する必要がある。

4.4 リードタイム

全出水イベント期間中の「的中」となった水位上昇量予測を対象に、予測を行うことで確保できたリードタイムを集計した。ここでは、各イベント期間内で30分おきに出力される予測結果のうち、初めて的中となったときの配信時刻から実測値の出水ピークまでの時間をリードタイムと定義した。これは、河川工事において工事関係者が予測結果を受信してから、出水が起ころまでの間に退避準備に使える時間を意味する。これを各イベントにおいて、補正なしと90~99%上限値、それぞれの予測について行い、各イベントのリードタイムを平均した。集計結果を図-8に示す。

図-8より、補正なしの予測と比べて誤差を考慮することでリードタイムが延長されることが示された。例えば90%ではリードタイムが約40分延長でき、3時間となった。90~95%上限値の間ではリードタイムに大きな差異はないが、96%以上限値以上では信頼区間が大きくなるほどリードタイムも長くなる傾向が見られた。これは、図-6(d)のように、96%以下の信頼区間では1時間前予測でなければ的中とならなかつた水位

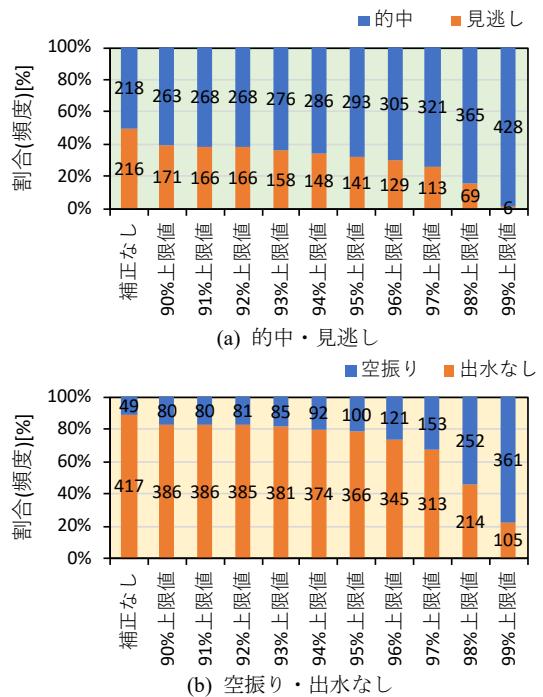


図-7 信頼区間ごとの上限値評価の集計

Fig.7 Aggregation of upper evaluation by confidence interval

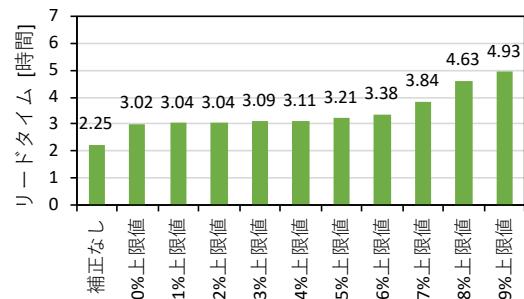


図-8 信頼区間ごとの平均リードタイム

Fig.8 Average lead time by confidence interval

上昇量予測が、図-6(c)の99%上限値のように信頼区間を大きく考慮することによって5時間前や6時間前に出水を予測できたケースが増えたことによると考えられる。上記より、本手法を適用することで短時間大雨に対するリードタイム、つまり退避準備に使える時間を延長できることが分かった。ただし、リードタイムは概ね3時間程度と長くないため、実務適用にあたつては迅速な退避計画を策定することが重要である。

5. まとめ

本研究では、降水短時間予報を対象として水位予測に予報誤差を加味する方法を検討し、短時間大雨による出水の見逃し低減効果と、確保できるリードタイムへの影響を確認した。以下に主要な知見をまとめる。

1) 降水短時間予報の誤差について、予報時刻が長いほ

- ど誤差が大きくなり、2~4時間先予報の間では同程度の誤差となる傾向を得た。
- 2) 降水短時間予報の誤差を考慮した予測水位上昇量の上限値評価では、誤差の信頼区間を設定することで見逃し低減効果が得られ、信頼区間を広げることによりその効果が大きくなることを確認した。ただし、空振りも増加するため、信頼区間は慎重に設定する必要がある。
- 3) 上限値評価において、確保できるリードタイムを集計した結果、予報誤差を考慮することでリードタイムを最低でも1時間弱延長する効果が期待できる。この効果は、96%以上の信頼区間で顕著であった。
- 本研究では短時間大雨のイベントのみを対象としたが、実際の河川工事に適用する場合は、台風や前線性の雨等、他の降雨形態に対する本手法の適用性を確認する必要がある。また、期待できるリードタイムは3時間程度と長くなかつたため、実務運用にあたっては長時間予報と短時間予報、それぞれの誤差を考慮し、組み合わせて活用することが必要と考える。

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-iAlertRiver」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：気象に関する数値予報モデルの種類、<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-4.html>.
- 4) 飯村浩太郎、高山百合子、織田幸伸：河川工事のための出水予測における降水予報の誤差分析、河川技術論文集、第29巻、pp.605-610、2023.
- 5) 飯村浩太郎、高山百合子、織田幸伸：降水予報の誤差傾向を加味した予測水位評価の汎用性検討、河川技術論文集、第30巻、pp.465-470、2024.
- 6) 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.
- 7) 中村要介、池内幸司、阿部紫織、小池俊雄、江頭進治：中山間地河川における洪水予測と予測水位誤差－平成29年7月九州北部豪雨を例として－、土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, I_1177-I_1182, 2018.
- 8) 中村要介、遠藤咲季、阿部紫織：日和佐川月輪地点における洪水予測の不確実性に関する研究、土木学会論文集, Vol.81, No.16, 24-16052, 2025.
- 9) 気象庁：第7章 降水短時間予報等の改善、<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/24/chapter7.pdf>.