

技術報 中小河川における河川水位の予測精度 ～日和佐川を例として～

水防災予測情報研究グループ

近年、気候変動等の影響を受け豪雨災害が激甚化・頻発化し、特に中小河川では甚大な水災害の発生が懸念されている。このような水課題に対し、河川管理者は流域治水を推進しており、その解決策の一つとして洪水の早期警報システムの整備や長時間予測の技術開発に取り組んでいる。本稿では中小河川の日和佐川を対象に、従来の 6 時間先までの短時間予測の精度検証とデータ同化による予測精度向上を報告するとともに、36 時間先 (最大 72 時間先) の長時間・アンサンブルの予測精度についても報告する。

キーワード：RRI モデル、降水短時間予報、MSM、MEPS、データ同化

1. はじめに

洪水は壊滅的な被害をもたらす災害の一つであり、洪水リスクは世界的に増加している。それは日本でも例外ではなく、毎年のように全国のどこかで洪水被害が発生している。特に多くの中小河川は大河川に比べて川幅が小さく急勾配のため、豪雨によって短時間で急激な水位上昇が生じやすい。このような背景を踏まえ、国土交通省や都道府県などの河川管理者は気象庁と共同で指定河川洪水予報を実施してきた。気象庁により、国土交通省が管理する直轄河川では水害リスクラインが整備され、全国 109 水系・298 河川で運用されている。しかし、都道府県が管理する河川では 68 水系・138 河川にとどまっているのが現状である。また、昨今の流域治水では、避難体制を強化するため、現行の 6 時間先までの短時間予測から 36 時間先までの長時間予測技術の高度化に取り組んでいるが、その予測精度に関する知見は十分に蓄積されていない。また、アンサンブル予測については直轄河川でも一部の主要河川を除き、適用事例は限られている。

そこで本研究では、中小河川における過去の複数の実績洪水を対象に、従前から実施されている 6 時間先の短時間洪水予測の精度検証とデータ同化を活用した予測精度向上を報告するとともに、36 時間以上先の長時間・アンサンブル予測の予測精度についても報告する。

2. 対象河川

本研究では徳島県南東部に位置する美波町を流れる二級水系の日和佐川を対象河川としている。美波町と日和佐川流域図を図-1 に示す。

日和佐川は、美波町の八郎山 (標高 919 m) を源流とし、山河内谷川や北河内谷川等の主要支川を合わせ、日和佐湾に注ぐ、幹川流路延長 21.0 km、流域面積約 71.0 km² の二級河川である。流域内の土地利用は、山林が約 95 %、水田や畑等の農地が約 4 %、宅地等の市街地が約 1 %となっている。

予測精度の検証地点は徳島県が管理する月輪水位観測

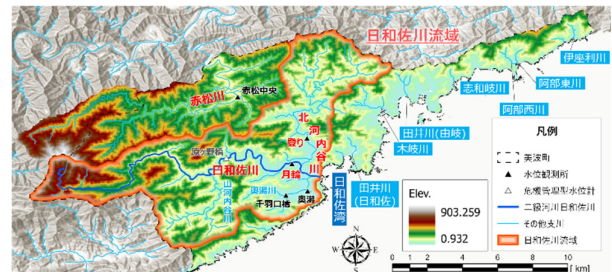


図-1 美波町と日和佐川流域図

表-1 月輪地点における 2006～2022 年の上位 20 イベントと 2023 年 6 月 2 日の参考洪水の一覧表

No.	洪水名 ※ピーク年月日	実績 水位	パラメータ同定		予測実験			生起要因 ※天気図 より
			最適化 洪水	検証用 洪水	降水 短時間 予報	MSM 数字: 最大予 報時間	MEPS	
1	2010年04月27日洪水	4.31m	●					低気圧
2	2016年09月20日洪水	4.28m		●	●			台風
3	2008年06月29日洪水	4.11m	●					梅雨前線
4	2008年04月10日洪水	3.95m		●				低気圧
5	2021年09月08日洪水	3.88m	●			● 51	●	線状降水帯
6	2015年07月17日洪水	3.75m		●	●			台風
7	2009年11月11日洪水	3.73m	●					低気圧、前線
8	2014年08月02日洪水	3.70m		●	●			台風
9	2011年10月14日洪水	3.59m	●		●			前線+低気圧
10	2006年04月11日洪水	3.59m		●				前線+低気圧
11	2014年08月10日洪水	3.56m	●		●			台風
12	2011年09月03日洪水	3.52m		●				台風
13	2012年07月12日洪水	3.46m	●		●			梅雨前線
14	2018年07月07日洪水	3.45m		●	●			梅雨前線
15	2011年07月20日洪水	3.42m	●		●			台風
16	2009年08月09日洪水	3.39m		●				台風
17	2010年06月26日洪水	3.39m	●					梅雨前線
18	2016年10月17日洪水	3.24m		●				低気圧
19	2019年05月21日洪水	3.21m	●					寒冷前線
20	2017年10月22日洪水	3.19m		●				台風
(参考)	2023年06月02日洪水	3.93m		●	●	● 78	●	梅雨+台風

■基準水位(月輪): 氾濫危険水位3.7m | 避難判断水位3.3m | 氾濫注意水位3.3m | 水防団待機水位2.6m

所 (以下、月輪地点) とした。月輪地点は美波町の市街地 (旧日和佐町) の上流に位置し、防災上の重要地点である。

日和佐川における過去の洪水実績を調査するため、月輪地点における水位データを収集し、2006 年から 2022 年までの上位 20 洪水を表-1 にまとめている。なお、2023 年 06 月 02 日洪水は、当時の記録水位が「速報値」であったため上位 20 洪水からは除外し、参考洪水として扱っている。現在は「確定値」として公表されている。

3. 洪水予測モデルと降雨データ

(1) 降雨流出モデル

降雨流出モデルには降雨流出から洪水氾濫までを流域スケールで一体的に解析できる RRI モデル³⁾を適用した(図-2)。RRI モデルは土木研究所 ICHARM が開発した分布型流出モデルであり、オープンソースとして公開されている。モデル構築のための GUI やパラメータ探索法⁴⁾などのツールが充実しているため、一級水系の水害リスクラインだけでなく、二級水系を対象とした「中小河川洪水予測モデル構築マニュアル」⁵⁾でも適用されている。

解析領域は美波町全域と赤松川左支川流域を加えた領域(図-1の標高値がある領域)とし、2秒角メッシュ(約60mメッシュ)の空間解像度でモデリングする。地形モデルは日本域表面流向マップ⁶⁾を基本とし、土地利用モデルは国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成28年度)から水田・畑地・山地・都市・水域に5分類する。

モデルパラメータは、2006 から 2022 年に発生した上位 20 洪水を対象に、奇数位の洪水イベントでパラメータ最適化を行い、残りの偶数位の洪水イベントでそのパラメータを検証している(表-1の4列目・5列目)。パラメータ最適化手法は柿沼ら(2020)の先行研究⁴⁾をベースに、Kling Gupta Efficiency⁷⁾(KGE)を目的関数とした SCE-UA 法に改良している。その結果、モデルパラメータセットは 286 回の探索で最適化プロセスを完了し、10 洪水平均値の KGE は 0.51 から 0.77 に改善している。KGE と類似の NSE では、一般的に 0.7 以上で水文モデルとしての説明能力が高いとされていることから、本モデルは十分な再現性能を有すると評価できる。また、求められたモデルパラメータセットは、北河内谷川の登り地点でも過去の洪水を良好に再現できることを確認している。なお、計算された流出量から河川水位への変換にはいずれも H-Q 式(不等流による計算水位の近似式)を用いている。

(2) データ同化手法

データ同化手法には、RRI モデルに粒子フィルタを適用した中村ら(2018)⁸⁾の手法を適用している。この手法は、予測モデル内部に含まれる初期条件の不確実性に着目した状態修正のアルゴリズムである。そのため、予測時間が長くなるほど状態修正の効果は小さくなり、先行研究⁸⁾では概ね 3 時間までがデータ同化の効果の限界と結論づけている。したがって、短時間の洪水予測のみに粒子フィルタによるデータ同化後の初期値を適用し、長時間・アンサンブル予測ではデータ同化を適用しない。

(3) 降雨データ

本稿の予測実験では、表-2に示す4種類のメッシュ雨

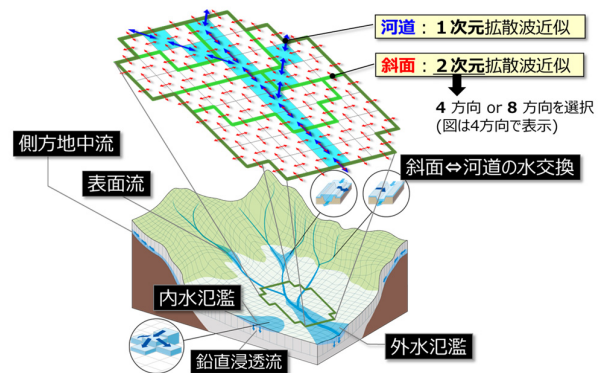


図-2 RRI モデルの概念図

表-2 予測シミュレーションに用いた降雨データ

降雨データ	実況雨量	予測雨量		
プロダクト名	解析雨量	降水短時間予報	MSM GPV [‡]	MEPS GPV [‡]
空間解像度	1km	1km	5km	5km
更新頻度	30分	30分	3時間	6時間
予報時間(最大)	—	6時間 (最大10時間*)	39時間 (最大75時間)	39時間
アンサンブル数	—	—	—	21メンバー
配信時刻	+15分	+20分	+2時間30分	+4時間

* 7-10時間先の空間解像度：5km

‡ 2013年5月29日から39時間予報値の提供開始

‡ 2019年6月27日から提供開始

量データを扱う。実況雨量には「解析雨量」を用い、予測雨量には「降水短時間予報」「MSM(メソ数値予報モデル)」「MEPS(メソアンサンブル数値予報システム)」を用いる。

解析雨量は、気象レーダーから観測された降雨分布を地上観測された雨量データで補正することで、空間的にも定量的にも品質の高い実況雨量の降雨プロダクトと考えられる。本稿では正規版の解析雨量を用いる。

降水短時間予報は、解析雨量を初期分布として移動解析により数時間先の降雨分布を追跡する方法と、数値予報モデルによる方法をブレンディングして、6時間先までを1kmの空間解像度で予報値を求めている。なお、最大10時間先まで予報しているが、7時間先以降は5kmに低解像度化される。本稿では現業の水害リスクラインで一般的に用いられている6時間先までの予報値を用いて、短時間の洪水予測の精度検証を行う。

MSM や MEPS はいずれも 5 km の空間解像度による長時間の予報値である。MSM は、MEPS に比べて更新頻度が高く予報時間も長い、予報値を単一予測(決定論予測)でしか伝えられない。一方、MEPS は更新頻度や予報時間は MSM に比べて劣るが、アンサンブル手法を用いて 21 メンバーの予報値を持っているため、豪雨発生の不確実性を確率的に捉えることができる。本稿では両者の優位性を明らかにするため、両方の予測雨量を用いて洪水の予測精度を確認している。なお、配信時刻の遅れに留意さ

りたい。例えば、MSM は初期時刻から約 3 時間 (2 時間 30 分) 後に配信されるため、洪水予測では実質的な最大予測時間である 72 時間と考える。

4. 予測実験と結果

(1) 短時間予測実験

月輪地点で避難判断水位を超過し、かつ降水短時間予測の予報データが入りできた 11 洪水 (表-1・6 列目) を対象に、データ同化あり・データ同化なしの短時間予測実験を実施した。図-3 には 11 洪水を代表して 2023 年 6 月 2 日洪水における短時間の予測結果を示す。予報時刻の 9 時 30 分は月輪地点で初めて氾濫危険水位を超過した時刻であり、実際に氾濫危険水位を超過したのが 12 時 30 分であることから、外水氾濫の可能性を 3 時間前に予見できていたと評価できる。

次に出水時の予測精度を議論するため、実績水位が水防団待機水位 (2.6m) 以上となった時間帯 (図-3「評価期間」) を対象に、実績水位と現時点 $F_t=0$ を含む 6 時間先までの予測水位との水位誤差 (= 予測水位 - 実績水位) を求め、予測時間 (Lead-time: $F_t=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ [hour]) ごとの誤差分布をバイオリンプロットで表す。図-4 には 2023 年 6 月 2 日洪水の結果、図-5 には 11 洪水をまとめた結果を示す。その結果、2023 年 6 月 2 日洪水 (図-4) ではデータ同化によって四分位範囲 (第 1 四分位 ~ 第 3 四分位) および中央値がわずかに改善している。特に 2 時間先までは予測精度の改善がみられる一方で、3 時間先以降は誤差分布に大きな変化はない。この結果は、先行研究⁹⁾でも指摘されているように、初期値の不確実性に着目したため、時間発展 (予測時間の進行) とともにデータ同化の効果が小さくなることを意味している。

11 洪水をまとめた結果 (図-5) では、データ同化によって四分位範囲がわずかにゼロに寄っていることから、データ同化の有効性が確認できる。しかし、予測時間が長くなるにつれ、予測誤差の分布はマイナス領域に遷移している。つまりデータ同化の適用に依らず、予測時間が長くなるほど過少予測になることを意味している。

以上より、日和佐川の月輪地点では、2023 年 6 月 2 日洪水において 3 時間前に氾濫危険水位の超過を予見できることがわかった一方で、3 時間先以降は過少予測される課題が明らかになった。

(2) 長時間・アンサンブル予測実験

MSM および MEPS を用いて 2 洪水 (表-1 の 7 列目・8 列目) を対象に、長時間・アンサンブル予測実験を実施した結果を図-6 に示す。図の上段は 2021 年 9 月 8 日洪水、下段は 2023 年 6 月 2 日洪水の予測結果である。

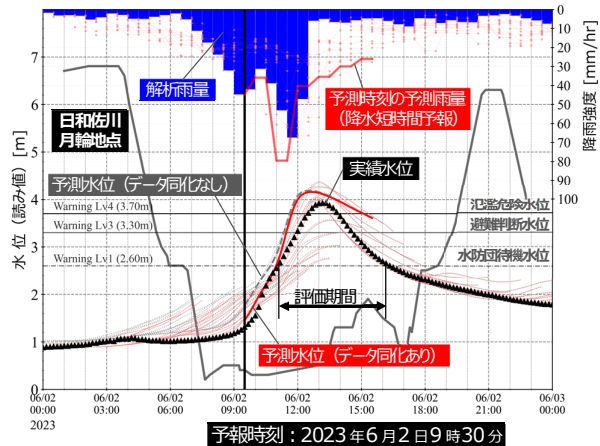


図-3 2023 年 6 月 2 日洪水において日和佐川月輪地点で初めて氾濫危険水位を超過した時刻 (9 時 30 分時点) の 6 時間先の予測結果を示す。上段のハイトグラフには実績雨量として解析雨量、予測雨量として降水短時間予報を重ねている。いずれも地点上流の流域平均雨量である。下段のハイドログラフには実績水位 (図中▲) と 2 種類の予測水位を重ねている。一つはデータ同化なし (灰色点線)、もう一つはデータ同化あり (赤色実線) である。

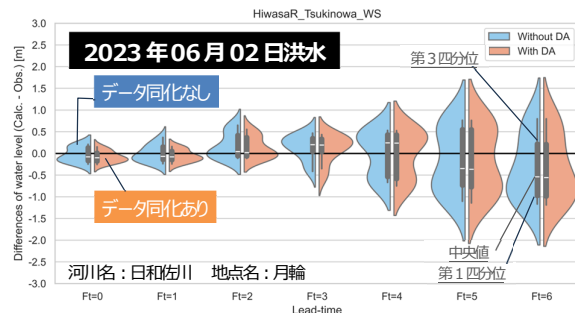


図-4 2023 年 6 月 2 日洪水におけるデータ同化ありとデータ同化なしの予測水位誤差をバイオリン図で示す。予測水位誤差は 1~6 時間先まで 1 時間毎に算出している。プラス領域は過大予測、マイナス領域は過少予測を意味している。

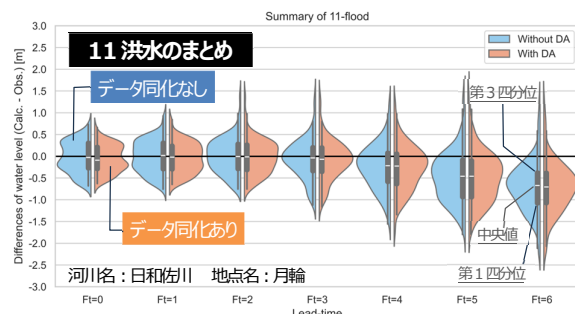


図-5 11 イベントにおける予測水位誤差のバイオリン図

いずれの洪水においても、MSM による予測水位は実績水位のピークに対して明らかに過少予測している。しかし、2021 年 9 月 8 日洪水ではピーク付近 (9 月 8 日 13 時頃) に MSM の予測水位の洪水ピークが集中していることから、増水のタイミングは予見できていたことにな

る。したがって、前日の段階で翌日の防災体制の準備を検討するための情報として活用可能と考えられる。また、2023 年 6 月 2 日洪水では、2021 年 9 月 8 日洪水に比べて、MSM と MEPS のばらつきが小さいことから、増水の可能性を比較的高い確度で予見できていたと評価できる。さらに、2023 年 6 月 2 日洪水では MSM で最大 72 時間先まで予測できるようになったため、ピークアウトした 2 日後 (6 月 3 日 12 時頃) の水位低下も予見できている。これは平常時の水位への回帰を示唆しており、早期復旧に向けた初動に有効な情報であると考えられる。

以上より、MSM や MEPS を用いた現時点での長時間・アンサンブル予測は、短時間予測ほどの予報精度は期待できないが、1 日以上先の増水の可能性を議論することができると考えられる。

5. まとめ

本稿では、中小河川日和佐川の 11 洪水を対象に、降水短時間予報を用いて 6 時間先までの河川水位の予測精度を検証するとともに、粒子フィルタを用いたデータ同化実験による改善結果を報告した。また、MSM や MEPS を用いて 36 時間以上先 (最大 72 時間先) の長時間・アンサンブル予測実験を実施し、現状の予測精度を報告した。得られた成果を以下にまとめる。

- RRI モデルは日和佐川における過去の複数洪水に対して十分な再現精度を示した。
- 降水短時間予報を用いた短時間予測では、予測時間によらず過少予測傾向であるとともに、予測時間が長くなるほど過少予測誤差は大きくなる。
- 粒子フィルタによって初期値を逐次修正することで、概ね 2 時間先までの予測誤差が改善されている。一方、3 時間先以降の改善効果は限られている。
- MSM を用いた長時間予測では実績ピーク水位に対して過少予測となる傾向が確認された。しかし、短時間予測では見えない河川の増水への備えや早期復旧に向けた初動に有効な情報となる可能性を示唆している。
- MEPS を用いた長時間・アンサンブル予測も MSM と同様に過少予測であった。しかし、21 のシナリオから出水発生の不確実性を定量的に評価できる可能性が示された。

以上より、短時間予測と長時間・アンサンブル予測を組み合わせることで、適切な避難体制の強化が期待できる。ただし、中小河川にとって 3 時間先以降の予測精度も無視することはできない。そのため、今後は降水短時間予報の不確実性を考慮することにより、3 時間先以降の予測の不確実性評価を進めていく。

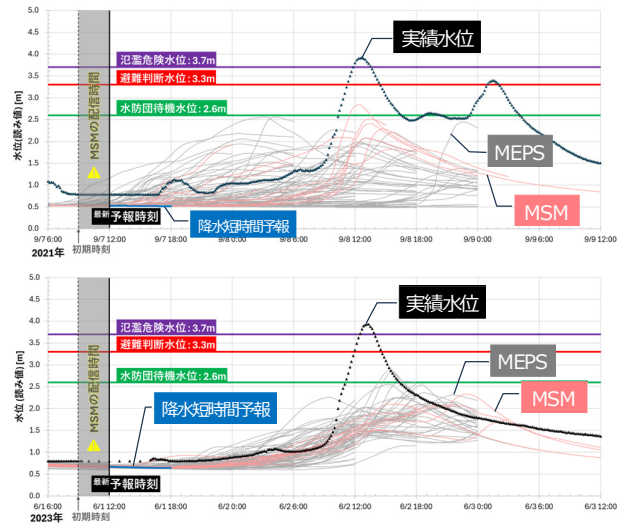


図-6 MSM と MEPS を用いた長時間・アンサンブル予測実験結果を示す。上段は 2021 年 9 月 8 日洪水、下段は 2023 年 6 月 2 日洪水である。予測水位は洪水ピークから 24 時間以上前の予測結果のみを重ねている。

また、本稿では MSM や MEPS の GPV を用いて長時間・アンサンブル予測実験を行ったが、最近ではこれらのガイダンスが配信されている。引き続き、長時間・アンサンブルの予測精度を検証していく。

謝辞: 本研究の取り組みにあたり、徳島県県土整備部河川整備課には貴重な河川データを提供していただいた。また、美波町建設課には現地のニーズ調査にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁ウェブサイト: ホーム>知識・解説>指定河川洪水予報, 令和7年3月25日現在. (2025年5月28日閲覧)
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/flood-map.pdf>
- 2) 徳島県: 二級河川日和佐川水系河川整備計画, 令和3年4月.
- 3) 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, 平成26年6月号, pp.18-21, 2014.
- 4) 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, 26 巻, pp 199-204, 2020.
- 5) 中小河川洪水予測モデル開発研究会: 中小河川洪水予測モデル構築マニュアル (Version. 1), 2023.3.22.
- 6) 山崎大, 富樫冨佳, 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.74, No.5, pp. 163-168, 2018.
- 7) Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, 377, 80–91, 2009.
- 8) 中村要介, 小池俊雄, 阿部紫織, 中村和幸, 佐山敬洋, 池内幸司: 粒子フィルタを適用した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, 1381-1386, 2018.