

京都府鴨川流域を対象にしたRRIモデルによる上流の水位再現性

Reproducibility of Water Level at Upstream Gauging Stations Using RRI Model for the Kamo River Basin, Kyoto Prefecture, Japan

山本浩大・佐山敬洋・山路昭彦・小林哲也⁽¹⁾・大石直樹⁽¹⁾・下釜卓⁽¹⁾
関本大晟⁽²⁾・近者敦彦⁽²⁾

Kodai YAMAMOTO, Takahiro SAYAMA, Akihiko YAMAJI, Tetsuya KOBAYASHI⁽¹⁾, Naoki OISHI⁽¹⁾,
Takashi SHIMOGAMA⁽¹⁾, Taisei SEKIMOTO⁽²⁾ and Atsuhiko KONJYA⁽²⁾

(1) 京都府建設交通部砂防課

(2) 三井共同建設コンサルタント株式会社

(1) Sabo office, Construction and Transport department, Kyoto Prefecture

(2) Mitsui Consultants Co., LTD.

Synopsis

Due to recent flood disasters, it is important to understand water level and flood damage at multiple locations over a basin. However, the reproducibility of rainfall-runoff model was not well investigated at upstream locations in small-to-medium sized rivers. This research aims to validate the applicability of the RRI for discharge and water levels in small and medium rivers. The RRI was applied to Kamo river basin with resolution of 120m using river cross section data measured by laser profiler and was calibrated for 6 flood events at a gauging station. The model is capable of reproducing time series and peak of water level at upstream stations for 7 flood events. In addition, the model is capable of simulating time when water level exceeds a warning level. In conclusion, this study shows that the RRI is applicable to upstream gauging stations in Kamo river basin.

キーワード: 洪水, 中小河川, 降雨流出氾濫モデル

Keywords: flash flood, small-to-medium sized rivers, Rainfall-Runoff-Inundation model

1. はじめに

近年、頻発する豪雨において、流域内で同時多発的に洪水災害が発生している。こうした洪水災害に対し、市町村の防災担当者は、早期に流域各地の河川水位及び被害状況を把握することが重要である。避難勧告の判断に重要な水位の予測は、大河川を中心に行われている。中小河川では、降雨が発生した直後に、洪水時に水位が急激に上昇し、被害が発生する危険性が高い。しかしながら、水位予測の不確実性や水位計の不足などの理由から降雨流出モデル

を用いた流量・水位の検証は、十分に研究されていなかった。

本研究では、京都府京都市鴨川流域を対象に、降雨流出氾濫（RRI）モデル（Sayama, 2012）の流量・水位の精度検証を行った。特に、以下の2点の研究課題に着目して研究をおこなった。

- ・流域の上流の観測所で、河川流量と河川水位が再現できるのか？
- ・氾濫危険水位や避難判断水位を再現できるのか？

2. 対象流域

鴨川流域は流域面積210km²である (Figure1) . 上流から賀茂川と高野川が流れ、鴨川流域内には11か所の水位観測所が設置されている。平成30年より、鴨川の支川である岩倉川のG4地点において、2018年に危機管理型水位計を設置されている。

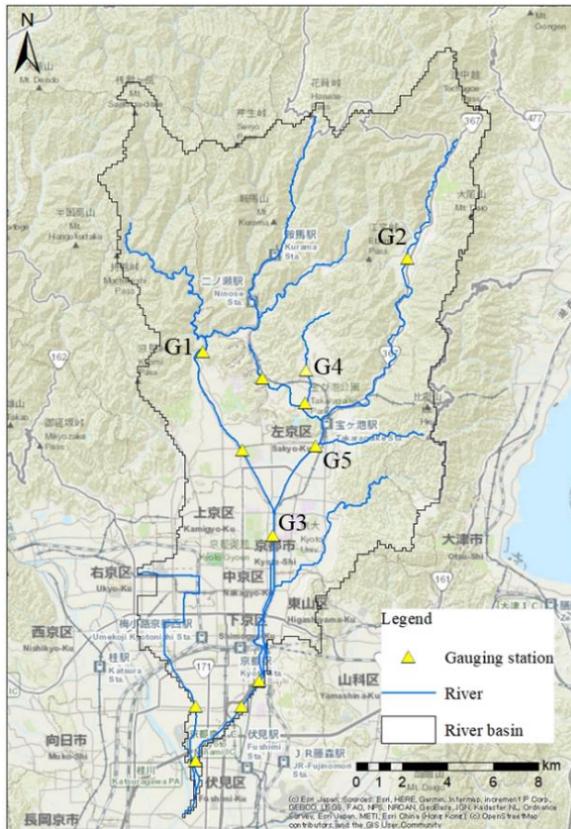


Figure 1 A map of Kamo river basin and gauging stations

3. 対象洪水

Table1に示している2012年から2020年の7出水を対象とする。降雨の要因は、前線及び台風起因している。7出水期間中、G3地点で水位が年最大値に達している。G4地点においては令和2年の7月8日に最大時間雨量が51mmの豪雨が発生し、観測開始から約1時間以内に危機水位を超えた。

Table 1 Flood event used for simulation

Event name	Duration	Meteorological event
Event1	2012/7/15～2012/7/15	Heavy rainfall

Event2	2013/9/15～2013/9/19	Typhoon No 18
Event3	2014/8/8～2014/8/12	Typhoon No. 11
Event4	2014/8/14～2014/8/17	Heavy rainfall
Event5	2015/7/16～2015/7/18	Typhoon No.11
Event6	2018/7/5～2018/7/12	Heavy rainfall
Event7	2020/7/6～2020/7/10	Rainfall

4. RRIモデルの構築

4.1 使用データとRRIモデルの構造及びパラメータの決定方法

解析雨量 (空間解像度1km) と山崎 (2018) の地盤データ (空間解像度30m) を用いた。地盤高さを120mにアップスケールして、RRIモデルを鴨川流域に適用し、荒神橋地点の河川流量の再現性を基に最適なパラメータセットを選択した。モデル構造及びパラメータセットは土地利用ごとに決定した。森林域には、立川 (2009) の不飽和・飽和側方流と表面流を一体的に解析する流量流積関係式を適用し、都市部と水体は表面流のみを仮定し、マンニングの方程式を適用した。また、田畑と荒地には、Green-Amptモデルを適用した。事前に2つの洪水イベントと2つのダム流域で行った多量の流出計算から、ハイドログラフをk-mean法でクラスタリングし、異なる挙動をする5種類のパラメータから構成される40組の代表的なパラメータセット作成した (佐山, 2021) 。40通りのパラメータをFigure1の森林域に与え、2012年から2018年の6洪水イベントの流出計算を実行した。その他の土地利用は、Sayama (2012) を参考に既定のものを用いた。荒神橋地点の河川流量を基準に、ピーク相対誤差が0.1以下、かつ相関係数が0.85以上の再現性をもつイベント数を、パラメータセット毎に計算した。再現性の条件を満たす洪水イベントの数が最も多いパラメータセットを選択した。河川流量は、(1)と(2)のH-Q曲線を用い水位から換算した。

$$Q = 115.79(H - 0.15)^2 \quad (H \geq 1.58) \quad (1)$$

(G3地点, 適用期間: 平成27年から令和2年)

$$Q = 71.69(H + 0.18)^2 \quad (H \geq 0.96) \quad (2)$$

(G5地点, 適用期間: 令和2年)

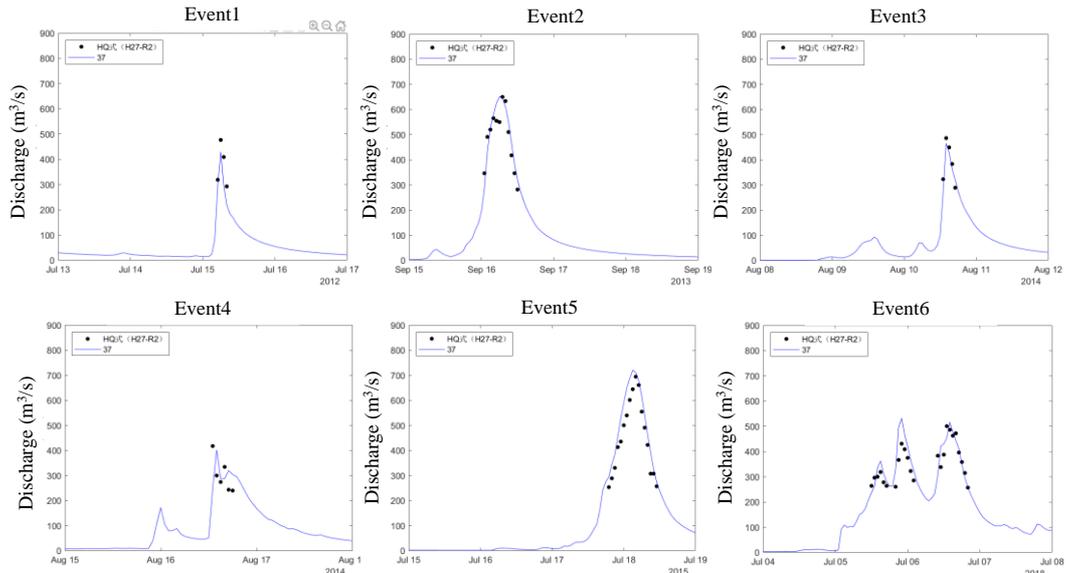


Figure 2 Comparison between simulated discharge and observed discharge at G3 station.

4. 2 LP断面を活用したRRIモデルの構築

計389のレーザープロファイラー (LP) により測定された断面を鴨川と高野川が位置する格子に適用した。データが無い格子は、隣接する格子のLP断面を用いた。支川は、矩形断面を想定し、上流域の面積を関数とした経験式から幅と深さを求めた。LP断面の標高を用いて、標高データから求めた堤内地盤高さを基準に、各格子における深さと堤防高を求めた。

5. パラメータの選択と河川流量の検証結果

荒神橋地点で河川流量の再現性の評価基準を満たす合格数が一番多いTable2のパラメータセットを選択した。Table2のパラメータセットを森林に適用し、荒神橋地点と松ヶ崎地点において計算流量と観測流量を比較した。

Table 2 Optimized parameter sets for 6 flood events

	n_{slope}	D	γ_a	k_a	γ_m
Forest	0.5	1	0.4	0.05	0.25

Figure2にG3地点の計算流量と観測流量を示す。Table3に示す通り、G3地点において、6出水イベントにおけるNash係数が、0.9以上と相関係数が0.97以上であり、流量の時系列変化が再現できていることがわかる。また、同イベントで相対ピーク誤差が0.1以下であり、ピーク流量の再現性も非常に高い。上流のG5地点においても、6出水においてNash係数は概ね0.9以上及び相関係数は0.95以上であり、流量の時系列変化が非常によく再現できていることがわかる。

同地点において、Event1とEvent4を除き、ピーク相対誤差は、0.1以下でありモデルはピーク流量を非常によく再現している。

Table 3 Performance indices for river discharge at G3 and G5 stations. NSE denotes Nash-sutcliffe efficiency index, PE denotes an absolute value of a relative peak error and CC denotes Pearson correlation coefficient.

Event name	Stations	NSE	PE	CC
Event1	G3	0.937	0.1	0.985
	G5	0.924	0.219	0.982
Event2	G3	0.975	0.001	0.993
	G5	0.945	0.018	0.928
Event3	G3	0.914	0.044	0.973
	G5	0.899	0.073	0.957
Event4	G3	0.77	0.038	0.925
	G5	0.848	0.177	0.935
Event5	G3	0.969	0.037	0.996
	G5	0.991	0.086	0.996
Event6	G3	0.949	0.063	0.983
	G5	0.904	0.074	0.968

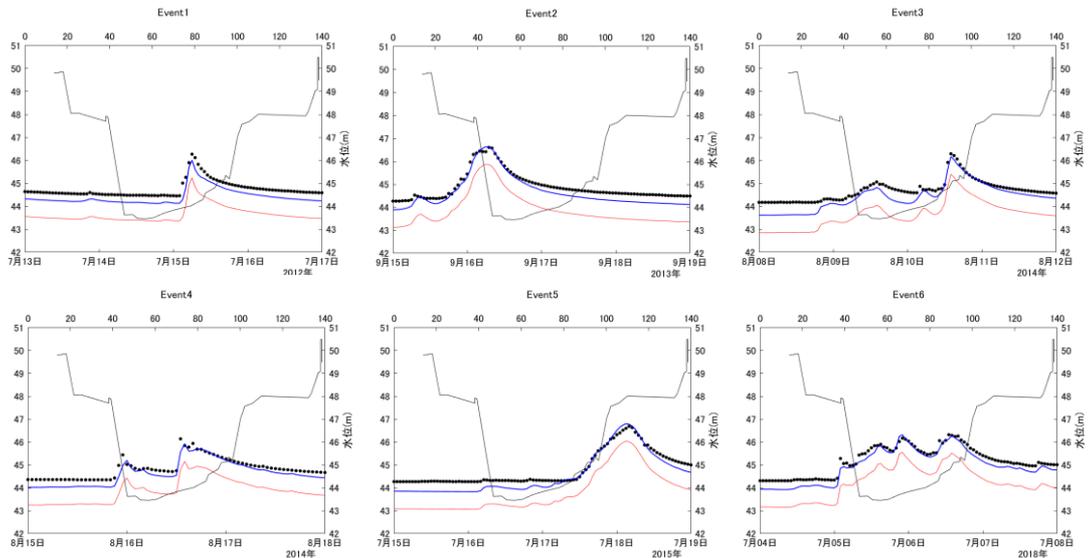


Figure 3 Simulated water level at G3 station for 6 flood events. Red line and blue line shows simulated water level before and after correction, respectively. Cross shows observed water level.

6. 河川水位の検証

RRIモデルの計算水深(変数名: hr)はLP断面の最深部を原点とした値であり、観測水位は、各観測地点の零点高さを基準にした値である。比較するためには、両者の基準高を統一する必要がある。本検証では、RRIモデルの河川水深の値にLP断面の最深部の標高(T.P.)を足して計算水位標高を求めた。一方、水位観測所の零点高さ(T.P.)に観測水位を足して観測水位標高を求めた。Figure 3にG3地点において、6つの出水期間の補正前の計算水位と観測水位の比較を示す。水位の時間的な変化は再現されているが、全体的に水位が顕著に小さく推定されていた。

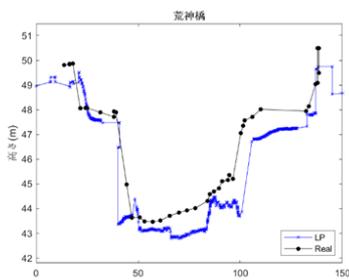


Figure 4 Comparison between river cross section estimated by laser profiler and one at a gauge station. LP denotes the river cross section measured by laser profiler. Real denotes a river cross section used at a gauge station.

この原因を明らかにするため、観測所の断面と同じ格子にあるLP断面を比較した。Figure 4にG3地点が位置する格子のLP断面と実際の水位観測所の断面を示す。LP断面は、観測点の断面形状を表している

が、LP断面と実測断面の標高に差が生じていることがわかる。また、付録1に示されている通り北山大橋地点でもLP断面と実測断面の標高に差が生じていることがわかった。

付録2に鴨川流域内の水位観測所における計算断面の底面の平均的な標高と水位観測所の実測断面の底面の平均的な標高差を示す。例えば、荒神橋地点では、観測所の断面に対して、LP断面が0.8 m程度低いことがわかる。このような差が生じる原因は、観測所の位置とLP断面が測量された位置が完全には一致していないことであると考えられる。

観測所の観測水位と比較するために、RRIモデルで計算された水位標高に断面の位置ずれを用いて、補正をする必要がある。Figure 3にG3地点における6つの出水期間の補正計算水位標高と観測水位標高の比較を示す。ここで、補正計算水位標高は、計算水位標高に付録2に示すLP断面に対する観測断面の標高差を加えた値である。G3地点において、補正前の計算水位で示されていた全体的な水位差はなくなったことがわかる。

次に、G3地点を含めた上流の観測所における水位の再現性を検証する。Figure 5, 6, 7, 8に7出水期間の上流の水位観測所の計算水位と観測水位の比較を示す。G1, G2とG3地点において、7出水期間のハイドログラフの時間変化、ピーク水位及びピークの生起時刻が再現できていることがわかる。Table 4に示されている通り、3地点において7つの出水期間でピーク相対誤差が0.15以下、相関係数が0.95以上であり水位のピーク値及びハイドログラフの時系列変化をよく再現していることがわかる。Figure 5は前線に

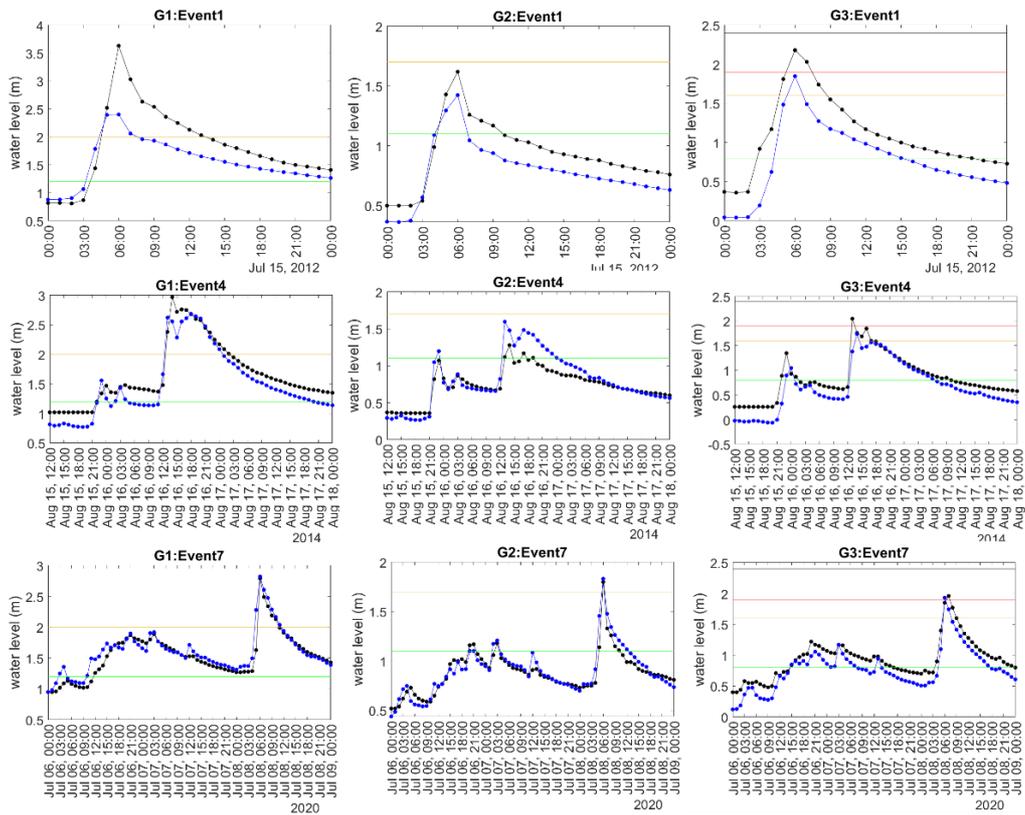


Figure 5 Comparison between simulated water level and observation at G1, G2 and G3 gauging stations for Event1, Event4 and Event6. Figure includes 4 warning levels. Black dotted line shows observed water level. Blue dotted line shows simulated water level. Green, yellow, red and black line denotes 1st, 2nd, 3rd and 4th warning level, respectively. 3rd warning level is used for evacuation order and black line denotes 4th warning level that indicates river flooding can occur.

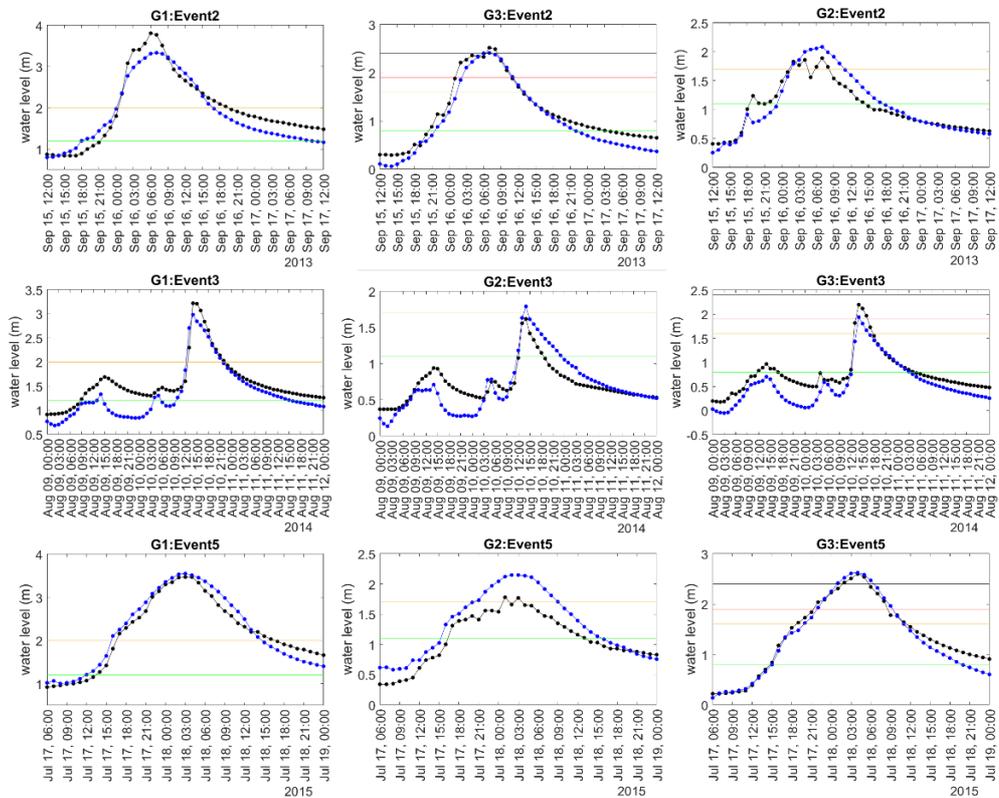


Figure 6 The same figure as Figure 5 but for Event2, Event3 and Event5

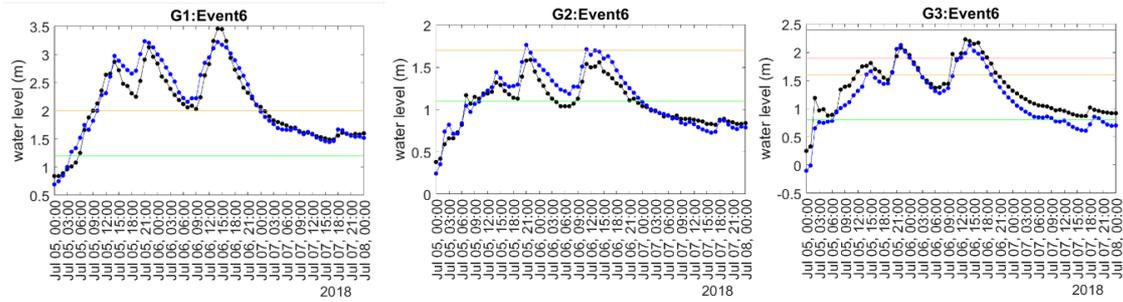


Figure 7 The same figure as Figure 5 but for Event6

Table 4 Performance indices for simulated water level during flood duration in Table 1. Bold numbers denote NSE is greater than 0.75 or PE is smaller than 0.15 or CC is more than 0.95. Evaluation period is 4 days including flood events.

Event name	Stations	NSE	PE	CC
Event1	G1	0.79	0.38	0.967
	G2	0.48	0.118	0.982
	G3	0.22	0.121	0.981
Event2	G1	0.854	0.139	0.959
	G2	0.873	0.102	0.969
	G3	0.812	0.036	0.988
Event3	G1	0.667	0.084	0.955
	G2	0.528	0.104	0.923
	G3	0.487	0.094	0.964
Event4	G1	0.848	0.11	0.982
	G2	0.668	0.242	0.981
	G3	0.702	0.12	0.968
Event5	G1	0.927	0.026	0.989
	G2	0.785	0.203	0.979
	G3	0.844	0.008	0.99
Event6	G1	0.952	0.006	0.984
	G2	0.884	0.131	0.989
	G3	0.845	0.001	0.992
Event7	G1	0.873	0.014	0.944
	G2	0.814	0.018	0.948
	G3	0.551	0.011	0.967

伴う降雨による出水であるEvent1, Event4, Event7を示している。Event1ではG1地点において観測水位が上昇してから3時間後に氾濫注意水位に達している。モデルの水位は観測と同時刻に氾濫注意水位に達している。G2地点では、観測水位が上昇し始めてから3時間後に水防団待機水位を超えており、モデルも同時刻に水防団待機水位を超えている。G3地点では、観測水位が上昇し始めてから4時間後に避難判断水位を超えており、モデルも同時刻に避難判断水位を超えている。G1地点では、モデルによるピーク水位は過小評価（相対誤差：0.38）されているが、G2とG3地点ではモデルはピーク水位を再現できていることがわかる。

Event4は、ピーク水位が2回発生している。G1地点では、1回目の水位上昇時に、水防団待機水位を超過し、2回目の水位上昇時の2時間後に氾濫注意水位を超過している。モデルの水位は、同時刻に氾濫注意水位に達している。G2地点では、2回の水位上昇時において、水位が水防団待機水位を超過している。モデルの水位は、同時刻に氾濫注意水位に達している。G3地点では、1回目の水位上昇時に水防団待機水位を超過しそれ以下に下降せず、2回目の水位上昇開始の2時間後に避難判断水位を超過している。モデルは避難判断水位を超過しなかったが、ピーク水位値は良く再現できている。

Event7は、二山の水位がみられる。G1地点では、1度目の水位上昇時に水防団待機水位まで上昇した後それ以下に下がらず、2度目で、水位の上昇開始から2時間後に氾濫注意水位を超過している。G2地点では、2度目の水位上昇が、水防団待機水位以下から開始し、2時間後に氾濫注意水位を超過している。G3地点では、2度目の水位上昇が、水防団待機水位付近より開始し、4時間後に避難判断水位を超過している。3地点ともモデルは基準線を越えた時刻を再現できている。また、モデルはピーク水位誤差も小さく、ピーク水位を再現している。G4地点では、水位上昇開始から1時間で危機水位を超過している。モデルも同様の時刻に危機水位を超過しており、ピーク水位も再現している（Figure8）。

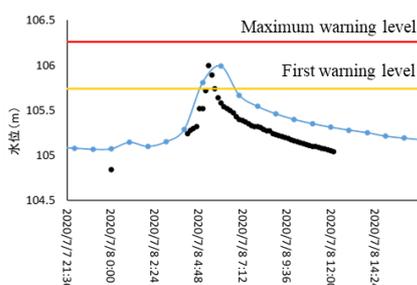


Figure 8 Comparison between simulated water level and observation at G4 station for Event7.

Figure6は、台風による降雨イベントである。Event2, 3, 5を示している。Event2は、G1地点で水位の立ち上がりから8時間後に氾濫注意水位を超過している。G2地点では、水位の立ち上がりから11時間後に氾濫注意水位を超過している。G3地点では、水位の立ち上がりから9時間後に避難判断水位に達し、14時間後に氾濫危険水位を超過している。モデルは、3地点で同様の時刻に基準水位を超過している。Table4よりピーク値の再現性も高いことがわかる。

Event3は二山の水位変化が発生している。G1地点では、一山目で、水位が水防団待機水位まで上昇し、二山目で水位の上昇開始から2時間後に氾濫危険水位まで上昇している。モデルも同時刻に基準水位を超えている。G2地点では、一山目で、水位が水防団待機水位まで上昇し、二山目で氾濫危険水位近くまで上昇している。モデルの同時刻の水位は、氾濫危険水位を超過しているが、ピーク相対誤差は0.104であり、誤差は小さい。G3地点では、一山目で、水位が水防団待機水位を超過し、二山目で避難判断水位を超過している。モデルの同時刻の水位も避難判断水位を超過している。ただし、3地点ともNSEは良くないが、一山目の水位時系列変化があまり再現されていないためだと考えられる。

Event5は、G1地点で水位の立ち上がりから11時間後に氾濫注意水位を超過し、22時間後にはピーク水位に達している。G2地点で水位の立ち上がりから17時間後にピーク水位に達し、氾濫危険水位を超過している。G3地点で水位の立ち上がりから14時間後に氾濫危険水位を超過し、16時間後にはピーク水位に達している。モデルは、3地点で同様の時刻に基準水位を超過しており、Table4に示される通りピーク値及びハイドログラフの時系列変化の再現性も高い。

Event6は、2018年の西日本豪雨による出水イベントであり、通常の前線に伴う雨による出水と異なる。出水期間中に3つのピーク水位が発生しており、水位の上昇時間も比較的長くという特徴がある。G1地点では、8時間で氾濫注意水位を超過し、3回のピーク値とも氾濫注意水位を継続して超過している。モデルも同様の時刻に氾濫注意水位を超過している。G2地点では、24時間以内に氾濫注意水位を超過し、その後再び氾濫注意水位を超過している。モデルは、氾濫注意水位は超えなかったが、水位の時系列変化及びピーク水位は再現されている。G3地点では、24時間以内に避難判断水位を超過し、その後再び避難判断水位を超過している。G2地点を除き、モデルも同時刻に避難判断水位を超過している。

3地点の水位観測所において、前線起因の降雨による出水と台風起因の降雨による出水に分け、水位の再現性を検証した。Event6を除く前線起因の出水イ

イベントでは、水位が2時間から4時間で、氾濫注意水位や避難判断水位などの基準水位に達する。モデル水位は観測水位と同時刻に基準水位を超過しており、ピーク値及びハイドロの時系列変化の再現性も高いことがわかった。Event7では、モデルは危機管理水位計の水位変化をよく再現していた。また、Event6でも同様の再現性が確認された。台風起因の出水イベントでは、水位が9時間から24時間の間に氾濫注意水位や避難判断水位などの基準水位に達する。モデル水位は観測水位と同時刻に基準水位を超過しており、ピーク値及び水位の時系列変化の再現性も高いことがわかった。

7. おわりに

京都府京都市の鴨川流域を対象に、120mの空間解像度のRRIモデルを構築し、上流の観測地点の流量と水位の検証を行った。高野川及び鴨川本川には、LPで測定した実測の河川断面を適用したことが本モデルの特徴である。6出水を用いG3地点の河川流量でカリブレーションした。モデルは、G3地点と上流のG5地点における6出水期間の河川流量の時系列変化とピーク値を再現していた。次に、7出水期間において、3つの上流の観測地点の水位の再現性を検証した。まず、観測水位とRRIの水深を海面を基準にして比較したが、G3地点において計算の水位が全体的に小さいことがわかった。これは、LP断面は、観測点の断面形状を表しているが、LP断面と実測断面の標高に差が生じていることが原因であることがわかった。このような差が生じる原因として観測所の位置とLP断面が測量された位置が完全には一致していないことであると考えられる。観測所の観測水位と比較するために、RRIモデルで計算された水位標高に断面の位置ずれを用いて、補正をしたうえで、水位の検証を行った。

前線起因の降雨による4つの出水と台風起因の降雨による3つの出水に分け、水位の再現性を検証した。Event6を除く前線起因の出水イベントでは、水位の立ち上がりから2時間から4時間後に氾濫注意水位や避難判断水位などの基準水位に達する。台風起因の出水イベントでは、水位が9時間から24時間の間に氾

濫注意水位や避難判断水位などの基準水位に達する。モデル水位は観測水位と同時刻に基準水位を超過しており、ピーク値及びハイドロの時系列変化の再現性も高いことがわかった。

LPによる実測断面を適用し、RRIモデルは複数の出水イベントで降雨の生起要因によらず上流の水位の時系列変化とピーク値を再現できることがわかった。また、氾濫注意水位や避難判断水位などの基準水位の生起時刻の再現できることがわかった。RRIモデルは鴨川流域の上流の水位を再現可能であることが結論付けられた。今後は、同流域で降雨の予報情報を用い、上流地点の水位予測可能性について検証する予定である。また、京都府の洪水予報河川である桂川と園部川を対象に水位の予測可能性について検証を進めていく予定である。

参考文献

- 山崎大・富樫冨佳・竹島滉・佐山敬洋 (2018) : 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, I_163-I_168.
- 立川康人・永谷言・寶馨 (2004) : 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発. 水工学論文集, 第48, pp. 7-12.
- 佐山 (2021) : 日本全国の中小河川を対象にした分布型洪水予測モデルのパラメータ地域統合化, 水文・水資源学会/日本水文学会 2021年度研究発表会.
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K. (2012): Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. Hydrological Sciences Journal, Vol.57, No.2, pp. 298-312.

付 録

- 1 LP 断面（青線）と実測断面（黒線）の比較
- 2 LP 断面の最深部の標高、観測水位の零点高さと断面に関する補正量

（論文受理日：2022年8月31日）