

# 流域治水対策評価モデルの開発に向けた 課題整理と初期検討結果

佐山 敬洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

E-mail: sayama.takahiro.3u@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

従来の大規模な治水対策に比べて、流域治水対策は小規模かつ分散的な対策が多く、かつその効果も流域全体に及ぼすものから、その周辺にのみ影響するものまでさまざまである。流域治水の根幹は、種々の主体が講じる対策を総合して治水効果を生み出すことにあり、各種の対策効果を可視化しながら比較検討することが重要となる。そうした議論を展開するためには、河道周辺の遊水地の効果や、霞堤周りの洪水流など場所を限定した詳細なモデリングはもとより、流域スケールで降雨から流出や洪水氾濫までを一体的に解析しつつ、地先の状況を反映したり、その結果を確認したりできるようなモデリングが不可欠である。後者は、分布型の降雨流出・洪水氾濫一体型モデル<sup>1,2)</sup>のカテゴリーに入るものであり、筆者らは Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)モデルの開発と応用研究を進めてきた。本報は、RRI モデルをベースにして「流域治水検討用一体型モデル」を構築することを想定した場合に、どのような課題と解決方法があるかを整理する。また、2020 年球磨川豪雨を対象にして、既存のモデルを用いて田んぼダムや河道周辺の遊水効果を推定するための簡易手法を提示し、その初期検討結果を報告する。なお、「流域治水検討用一体型モデル」という名称は、令和 4 年度の河川砂防技術研究開発公募 河川技術部門 河川技術・流域管理分野の指定課題として開始したプロジェクト（代表：滋賀県立大学 瀧 健太郎准教授）の標題である。筆者も同プロジェクトに参画し、RRI モデルの改良を通じて「流域治水検討用一体型モデル」の開発に携わる。同プロジェクトでは、RRI モデルに基づく流域スケールのモデルに加えて、より詳細な洪水流モデル（河道・氾濫域を対象）と田んぼダムの流出機構に特化したモデルを統合する。統合したモデルを用いて、流域治水対策の効果を定量化、可視化することが研究開発の目的である。

## 2. RRI モデルの概要と本報の条件設定

RRI モデルは、降雨流出と洪水氾濫を一体的に解析する分布型のモデルである。流域を斜面部と河道部に分けて、それぞれ 2 次元、1 次元の拡散波近似モデルを適用する。パラメータの設定によって、モデルで表現する斜面部の降雨流出過程を変更できる。具体的には、地表流のみを再現する、土層中の側方流と地表流を再現する、土層への鉛直浸透と余剰型の地表流を再現する、上記に併せて山体の基岩地下水を再現するといった変更ができる。本報で議論する RRI モデルは、土地利用に応じて山地部では土層中の飽和・不飽和側方流と地表流を、平野部では鉛直浸透と地表流を再現する。国土の多くが山地森林域を占める我が国においては、河川の洪水流出を再現するうえで山地部の飽和・不飽和側方流のモデリングが重要となる。

RRI モデルは、計算上河道が存在するグリッドセルと、存在しないグリッドセルに分類する。河道が存在するグリッドセルは、流出および氾濫を一体的に解析する斜面と、上下流の河道に接続する一次元の河道が存在する。斜面

の標高は、おおそ氾濫原の高さになっていることを前提にして、河道の形状を氾濫原の高さから相対的な高さで設定することができる。もしくはそうした情報が入手できない場合や反映する必要が無い場合は矩形断面を仮定して反映することができる。

筆者らは、RRI モデルをベースにして、全国版のモデル(以下 JRRI モデル)の開発を進めている。このモデルは日本全国を14の地域に分けて、空間解像度5秒(約150m)で構築する<sup>3)</sup>。地形情報は国土地理院の数値標高情報をもとに空間解像度1秒(約30m)で整備した日本域表面流向マップ<sup>4)</sup>に含まれる情報をもとに5秒にアップスケールする。JRRI モデルの特徴は、全国を同じモデリングの枠組みで構築することによって、平均的な挙動を示すようなモデルを開発している点にある。モデルが正しく表現できない場合にこそ、当該流域の水文学的な特殊性が現れている可能性がある。ただし、全国を俯瞰して一定の再現性を担保するために、モデルパラメータは土壤マップをもとに地域統合化している。また、直轄河川の断面情報を用いて約26,000の断面形状を反映している。さらに、断面情報が存在していない河川については、それらの情報を用いて河積や川幅水深比を推定して矩形断面を設定している。氾濫の推定精度を向上するため、河道周辺の地形を補正<sup>5)</sup>している。

### 3. 2020年球磨川豪雨の再現計算の設定と結果<sup>6)</sup>

元の地形データを用いて矩形断面を設定する場合をCase1、地形補正を施したうえで実際の河道断面の情報を反映する場合をCase2として両者を比較する。図-1は、球磨川豪雨のピーク浸水深をCase1とCase2で比較する。実績の浸水範囲に比べて、Case1は過小評価であるのに対し、Case2ではその点が解消されている。図-3は、球磨川の渡地点上流に右岸側から流入する小川地点、および本川沿いの人吉、渡、横石地点の水位と流量を示す。人吉地点では、7月4日0:00~12:00頃にかけて水位が上昇しており、Case2の結果は観測水位と良好に対応している。それ以前の水位は、観測水位に比べてモデルは4m程度小さい。これはモデルの初期値の設定に依存するものであり、本研究では簡便のため初期値をゼロにして計算を開始している。地形補正を施さず矩形断面を設定した場合、7月4日0:00~12:00頃の水位上昇の変化傾向は観測とおおよそ対応しているのに対し、その絶対水位が過小に評価される。球磨川は渡地点から下流部にかけて長い狭窄区間があり、そこに流入する河川の下流地点の水位変化は本川水位に大きく影響を受ける。そのため、Case1では推定された水位変化が小さく、危機管理型水位計で捉えられた水位変化をモデルで表現できていない。それに対し、Case2では上昇時の水位を良好に再現する。ただし、小川地点の水位の低減部は全体的に過大評価傾向がみられる。これはJRRIモデルのCase2における狭窄部の表現に課題があるためと考える。具体的には、渡地点に着目すると、欠測が生ずるまでの水位も全体的に3~4m程度高くなる。地形補正の手法を適用した際に、渡地点のように氾濫原の標高が明確に捉えられない場所では、その周辺部の標高、すなわち河道周辺の山地標高の影響を強く受けて、全体的に標高を過大に推定するためと考えられる。結果として、渡地点の河床が実態に比べてモデル上で相対的に高い位置に設定され、上流の盆地で水位を堰上げる効果が現実以上に顕著に出現している可能性がある。さらに下流に位置する横石地点ではCase2の計算水位が観測水位とよく対応している。

流量については、人吉や渡地点でピーク水位が観測できておらず、かつ上流やその近傍で氾濫が生じているため、市房ダムがある状態で、氾濫が発生しない場合の流出解析結果を国土交通省が暫定値として公表している<sup>7)</sup>。その結果によれば、人吉、渡、横石地点のピーク流量は、それぞれ約7,400m<sup>3</sup>/s、約9,800m<sup>3</sup>/s、約12,000m<sup>3</sup>/sである。図-2に示したモデルの結果と比較すると、Case1で推定されたピーク流量に近い値である。一方、Case2の推定は、氾濫の効果を考慮に入れた推定流量である。人吉、渡、横石地点の順に、6,844m<sup>3</sup>/s、7,935m<sup>3</sup>/s、9,616m<sup>3</sup>/sとなっており、下流の方がCase1との差が大きくなる。すなわち、球磨川の流量の低減効果を算定するうえでも氾濫の影響を考慮することが重要である。

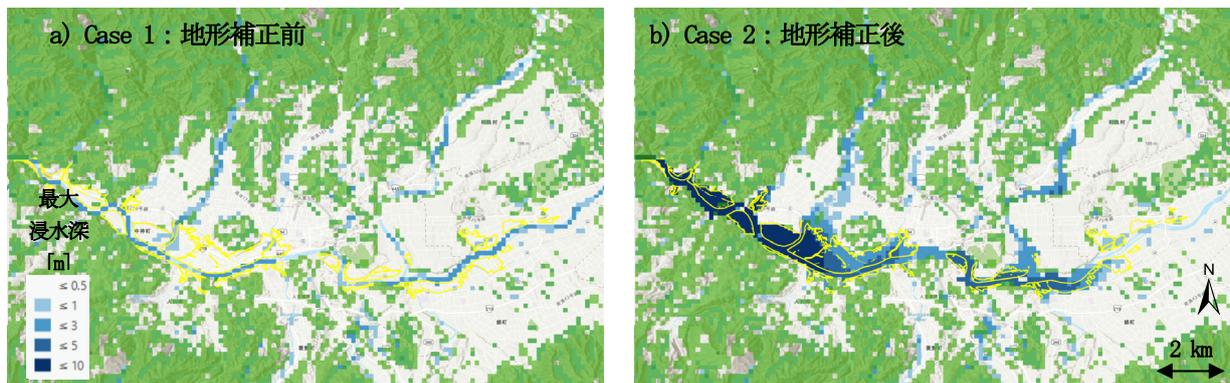


図-1 球磨川周辺のピーク浸水深：a) 地形補正前、b) 地形補正後の推定（黄線は国土地理院による7/4 1500の推定浸水域）

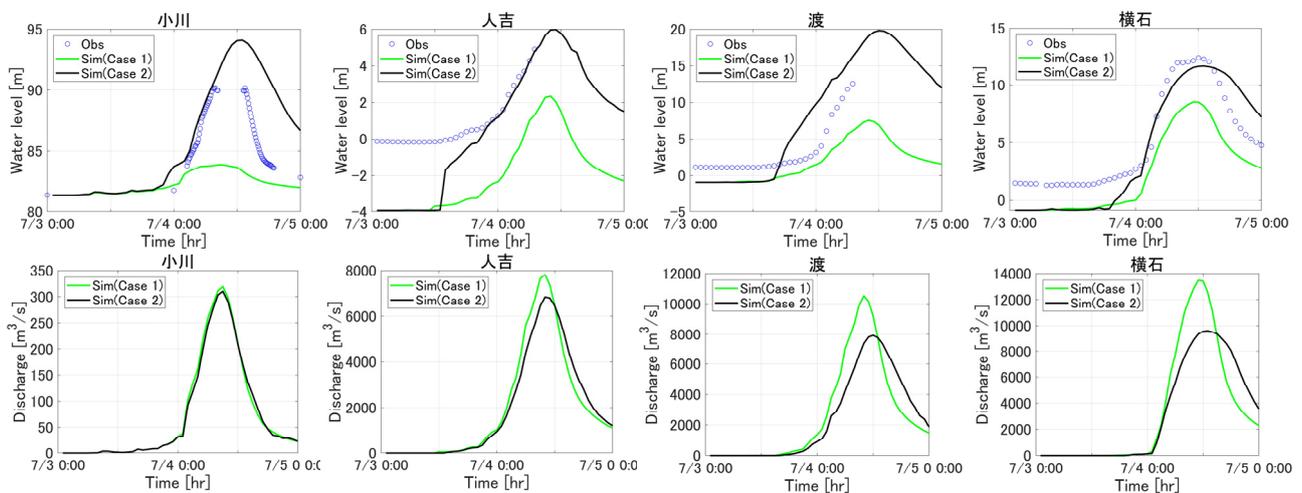


図-2 球磨川豪雨時の水位（上段）と流量（下段）のCase比較

#### 4. 球磨川流域の水田における雨水貯留の効果分析

上述の通り平野部では Green-Ampt モデルを用いて鉛直浸透量を計算し、その余剰分を表面流として流出計算を行う。図-3 に示すように、流域の中心に位置する盆地には広大な水田地帯が広がり、いくつかの水田では雨水を貯留する田んぼダムの実証実験が進む。「流域治水検討用一体型モデル」の研究開発においては、田んぼダムによる貯留効果を明示的に計算する要素モデルを開発し RRI モデルに導入する予定である。ここでは、その予備的な検討として、Green-Ampt モデルで水田における浸透を考慮せずに水田からの貯留効果をほとんど見込まない場合 (exp 1) と、Green-Ampt モデルで浸透をやすくして簡易的に貯留を想定した場合 (exp 2) とで、球磨川本川および支川の河川水位や浸水深分布にどの程度の違いが生じるのかを明らかにする。なお、exp 2 では水田の土層厚を仮に 3 m と仮定し、Sandy Loam のパラメータを設定した。Sandy Loam を想定したパラメータの空隙率は 0.453 であるため、出水期間中の最大貯水量は 1.36 m となる。また、Sandy Loam の飽和透水係数は  $6.06 \times 10^6 \text{ m/s}$  なので、単位換算をすれば 21.8 mm/h の浸透速度となる。一方、exp 1 は土層厚を考慮しないため、表面流としての一時貯留を除いては実質的な貯留を見込まない。ちなみに、上述の再現計算においては、水田の設定が土層厚を 1.0 m と仮定して、Clay Loam のパラメータを設定している。その場合の空隙率は 0.464、透水係数は  $5.56 \times 10^7 \text{ m/s}$  ( $= 2.00 \text{ mm/h}$ ) となり、Sandy Loam のパラメータに比べて浸透速度が約 10 分の 1 と小さい。

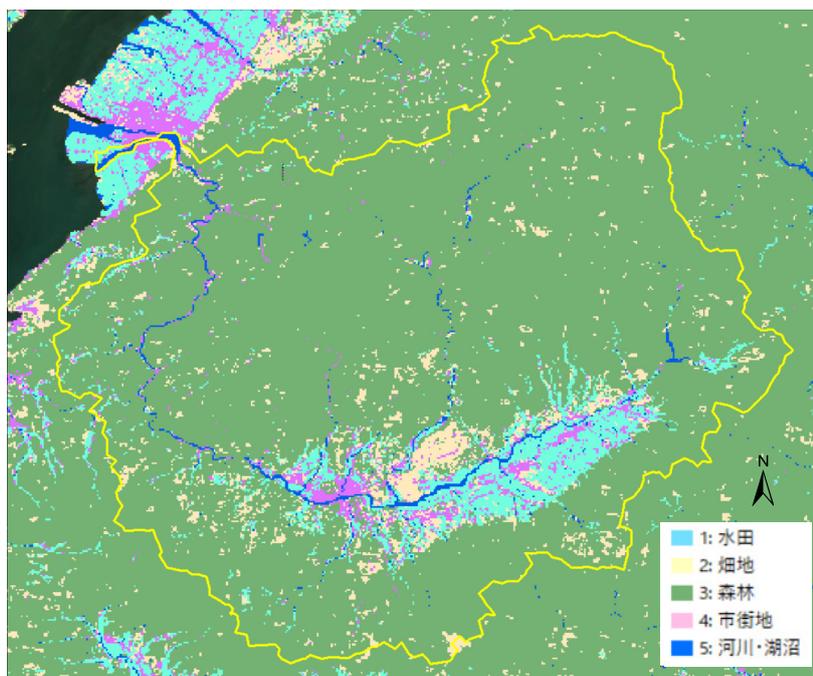


図-3 球磨川流域の土地被覆分布

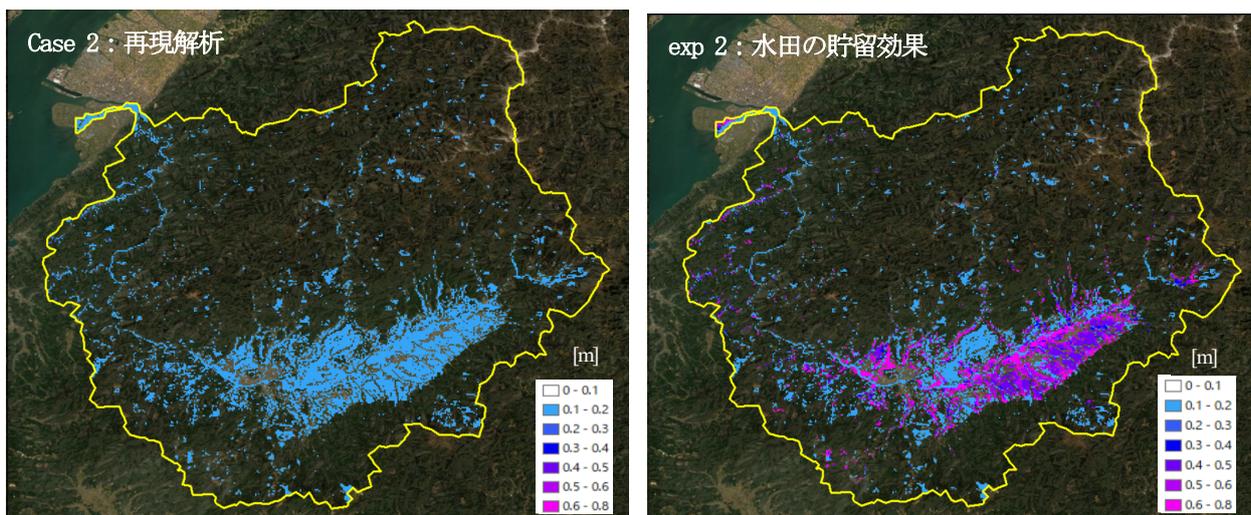


図-4 Green-Ampt モデルによる積算浸透量 (左：再現解析(case 2)、右：水田部の浸透可能性を大きく設定(exp 2))

上記の条件(exp 2)で球磨川豪雨を解析した際の積算浸透量を図-4(右)に示す。図中で青く示されている場所は畑地に対応する場所であり約0.2m程度の浸透量となっている。図-4(左)に示すように、Case2の再現解析では水田部も畑地と同じパラメータを用いているため両者が同程度の浸透量となっている。一方、図-4(右)の水田部の積算浸透量は河川から離れた場所で0.3～0.6 m程度、河川付近で氾濫水が湛水する場所では一部0.6～0.8 m程度となっている。ここで示した簡易的な感度分析では、水田での貯留を雨水貯留と氾濫水の流入に伴う遊水効果の両者を考慮していることになる。また水田ダムにおける雨水貯留の効果については、その量や貯留のタイミングを適切に表現したものではなく、あくまで Green-Ampt モデルで代替したものである。exp 2 は全体的に水田での貯留効果を大きめに見積もった結果である。

図-5 は Case 2 と exp 2 の条件で算定された最大浸水深の差分を示す。球磨盆地で被害が大きかった人吉市街地周辺に着目すると、浸水深の差分が0.5～0.7 m程度となっている。この地域はCase 2の再現解析で5 mを超えるような浸水が発生した場所に相当しており、約 1 割程度の浸水低減効果が見込まれる。一方、球磨盆地の上流側に着目する

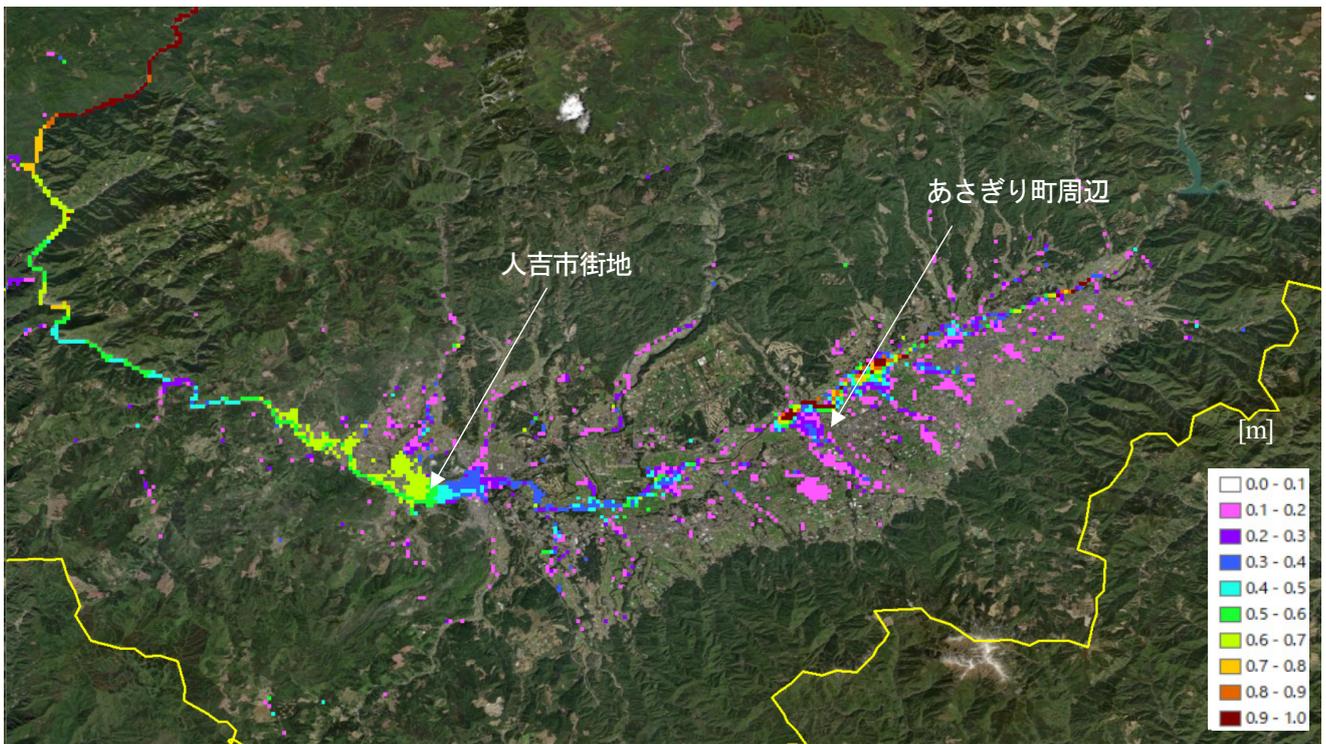


図-5 再現解析(Case 2)と水田貯留効果あり実験(exp 2)の最大浸水深の差

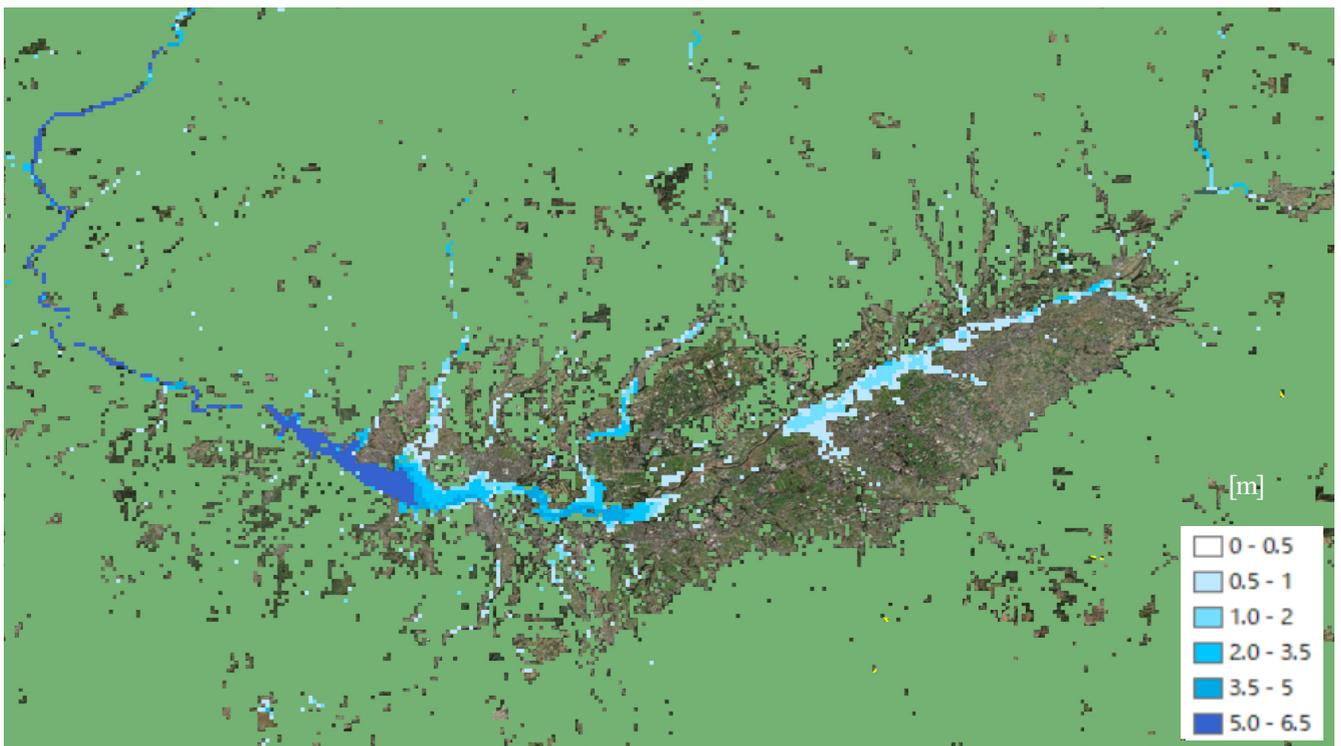


図-6 再現解析(Case 2)の最大浸水深

と、Case 2の再現解析でも浸水深が50 cm未満でかつ水田の場所において、ピンク色から紫色で示された浸水深の低減量が0.1~0.2 mの場所が点在している（例えば、あさぎり町周辺）。これは、田んぼダムを実施している地域の中小河川からの氾濫や内水氾濫が軽減されている効果を示している。

支川の水深がどの程度変化するかを分析するために、Case 2の再現解析のピーク水深をモデルで設定した最大河道水深で除した値(h<sub>nr</sub>と称する)の空間分布を図-7に示す。この値が1を超える部分は氾濫していることを示唆しており、本川下流部や山地の中小河川の他、球磨盆地の平野部を流れる河川（例えば、免田川）でも一部1を超える区間

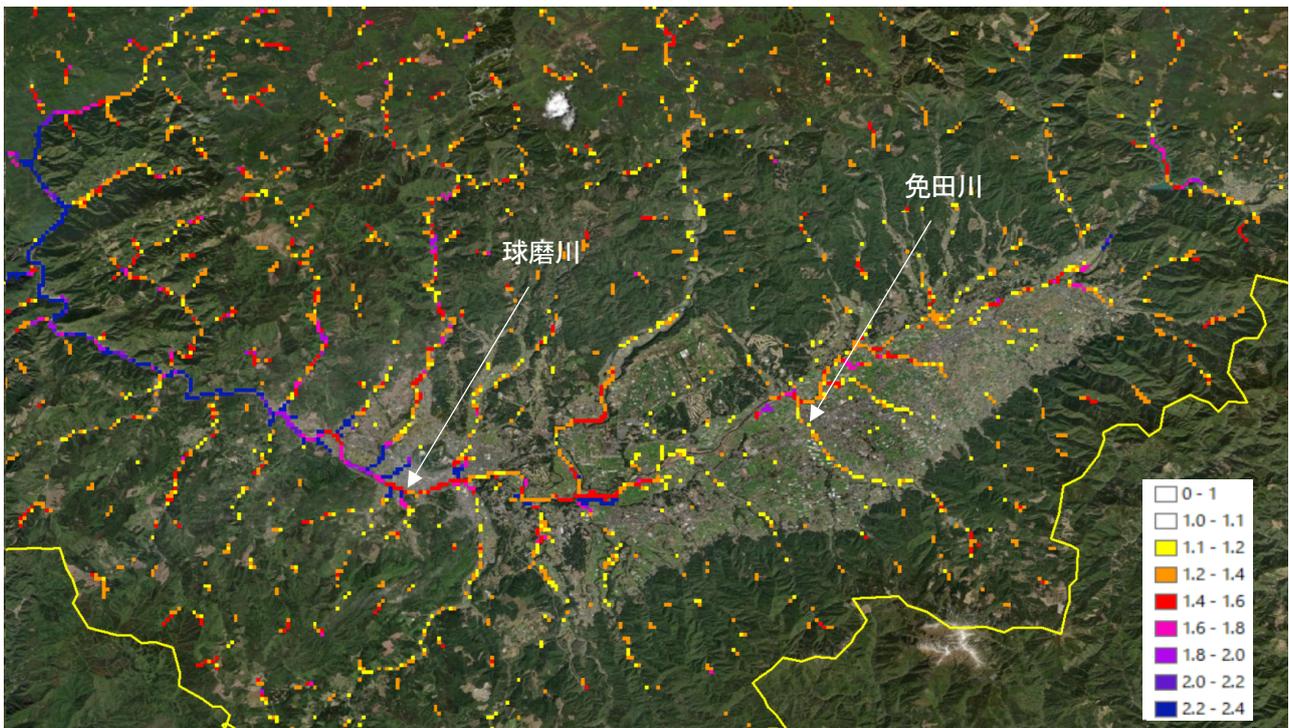


図-7 再現解析(Case 2)の水深比 (=ピーク水深/河道の最大水深)

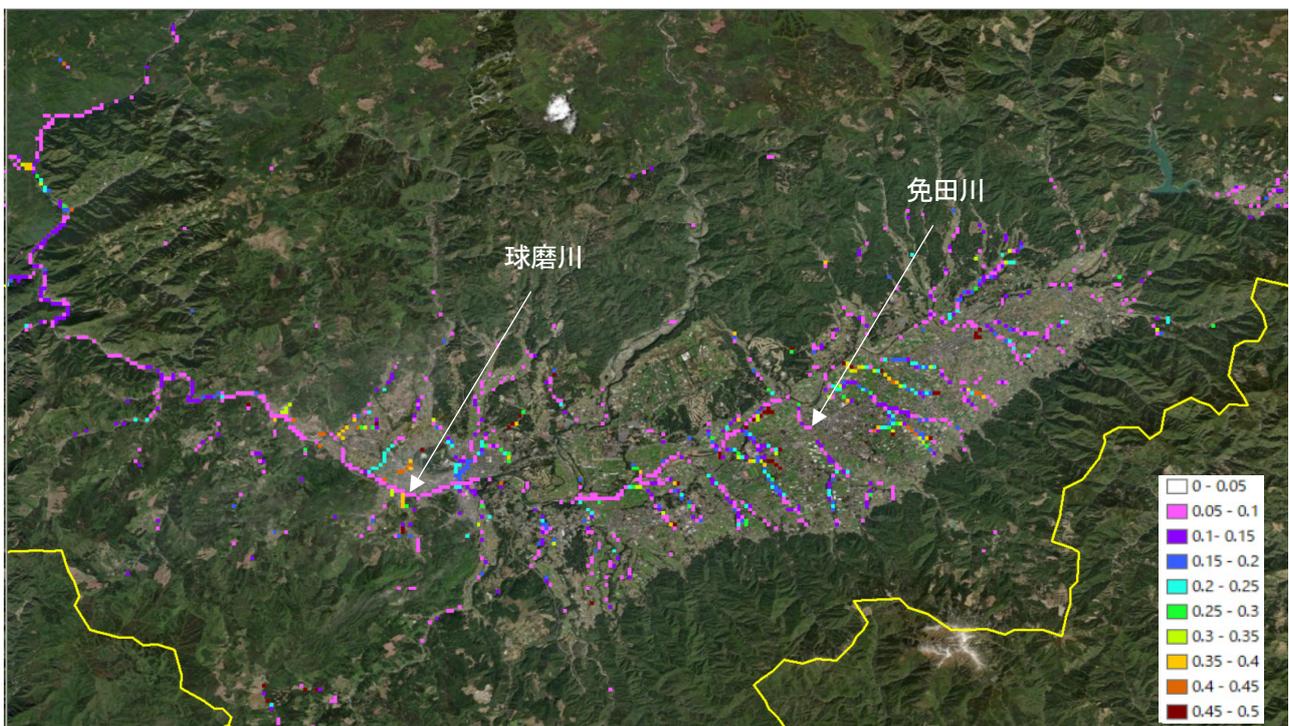


図-8 再現解析(Case 2)と水田貯留効果あり実験(exp 2)の水深比の差

が確認される。図-8 は Case2 から exp2 に変更した場合の hrr の変化量を示す。球磨盆地の平野部を流れる免田川などで hrr の変化量が 0.1～0.2 程度になっており、同河川のピーク水深が 0.1～0.2 程度軽減することを意味している。

本川沿いの水位についても図-9 に示すように同程度の軽減効果が確認された。特に小川のように背水の影響を強く受けるとような合流支川の下流部においては流量は水田貯留効果の有無でほとんど変化が見られないが、本川水位の低減効果によって当該地点の水位も低減している。

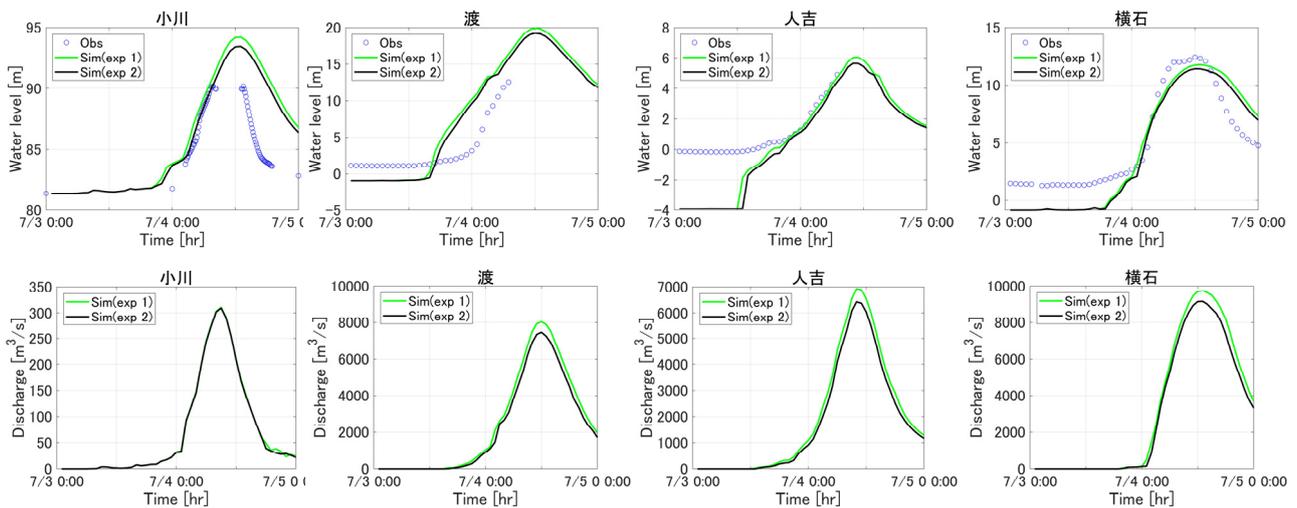


図-9 水田貯留効果なし実験(exp 1)と水田貯留効果あり実験(exp 2)による水位(上段)と流量(下段)の比較

## 5. 流域治水対策の定量化に向けた今後の課題

上述のように本報で示した分析は水田貯留の効果を比較的大きく見込んだ場合を想定しており、流域内の全ての水田で治水対策が講じられることを前提としている。実際には、これほど大きな効果は期待できないと思われるが、本報で例示したように、本川沿いと中上流域の支川沿いの浸水深、およびそれぞれのピーク水位の変化傾向を示すことで流域治水対策の洪水ハザードに対する効果を示すことができる。

今後、流域治水対策の効果をより詳細に検証するためには貯留の過程をより詳細にモデル化する必要がある。具体的には、水田の畦畔高、水田から排水柵への流出、落水量調整板の効果などをモデル化することが大切である。水田の現地調査に基づいた詳細なモデリングを参照し、本報で示したような流域スケールのモデルでも同様の効果を反映できるようなモデル化手法を検討する。その他の課題として、本報では Green-Ampt 式で表現した基本的な浸透量をどの程度見込むかということも大切である。これまでの流出モデルは主として山地からの流出過程に着目することが多く、少なくとも RRI モデルでは平野部における流出のパラメータやモデル構造の妥当性については十分な検討ができていない。水田における浸透量は、地下水位、土壌の保水性・透水性、湛水の状態によっても変化するはずであり、それらの項目の推定とモデルへの反映についても今後の課題である。

さらに、本報では水田における雨水貯留と氾濫水の流入に伴う遊水効果の評価が混在していた。後者については、河川と氾濫原との境界の構造や流速が挙動に大きく影響を及ぼすため、河道・氾濫域に特化した2次元浅水方程式ベースの洪水流モデルを用いることで推定精度の向上が期待される。洪水流モデルと RRI モデルとの統合方法についても今後検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 小林 健一郎, 田中 規夫, 丸山 恭介, 田中 翔, 渡部 哲史, 北野 利一: 令和元年東日本台風による荒川中流部洪水再現, 土木学会論文集 B1 (水工学), 77(2), pp.I\_1393-I\_1398, 2021.
- 2) 重枝 未玲, 秋山 壽一郎, 王 少博, 勝原 亮介: 地中流を考慮した地表面流・洪水氾濫ダイナミック解析モデルの構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75(2), pp. I\_1303-I\_1308, 2019.
- 3) Sayama, T., Yamada, M., Sugawara, Y. and Yamazaki, D.: Ensemble flash flood predictions using a high-resolution nationwide distributed rainfall-runoff model: case study of the heavy rain event of July 2018 and Typhoon Hagibis in 2019. Prog Earth Planet Sci 7, 75, 2020.

- 4) 山崎 大, 富樫 冴, 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) , 74(5), pp. I\_163-I\_168, 2018.
- 5) 近者 敦彦, 関本 大晟, 阿部 紫織, 岩崎 貴志, 崔 国慶, 小島 広宜, 中村 要介, 佐山 敬洋 : 降雨流出氾濫一体解析を用いた全国ベースでの氾濫予測の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学) , 75(2), pp. I\_1321-I\_1326, 2019.
- 6) 佐山 敬洋, 山田 真史, 菅原 快斗, 近者 敦彦, 関本 大晟, 山崎 大 : 広域降雨流出氾濫モデルによる浸水分布の推定 - 地形補正の効果検証 -, 土木学会論文集 B1 (水工学) , 2022 (投稿中)
- 7) 国土交通省九州地方整備局, 熊本県: 第 2 回令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会説明資料, 令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会, 2020.