

第19回河川技術シンポジウム (OS1)
令和5年6月22日 9:30 - 12:00

OS1 「流域治水が駆動する技術・研究の発展と社会実装の加速 ～歴史的な洪水となった
令和2年7月球磨川水害からまなぶ～」

「令和2年7月球磨川大洪水，大災害 の教訓を流域治水の確かな技術 として生かそう」

中央大学研究開発機構
福岡捷二

講演内容

1. 新しい水理現象の出現と今後の河道計画への反映のあり方の教訓
2. 治水, 河川環境, 河川利用を総合的に考えた複断面蛇行河道の作り方の教訓
3. 人吉市の内水氾濫とそれに続く外水氾濫がもたらした住民避難上の問題と減災まちづくりへの教訓

1. 新しい水理現象の出現と河道災害の発生，今後の河道計画への反映のあり方の教訓

1. 複断面水路で高水敷水深と蛇行低水路水深が0.3を超えると，遠心力による反時計回りの二次流（第1種二次流）と逆の向きに回転をする二次流が発生した．これは，これまでの河道計画で考慮されて来なかった卓越した水理現象が発生した．これによって，内岸側の流速増大，侵食力の増大が生じた．
 - ・このような流れは，高水敷上を流れて来た遅い流速の流れが，蛇行した低水路の外岸側から大量に入り込み，低水路の外岸よりの流れを遅くし，結果として内岸側の流速を高めることにより起こる．

球磨川での実例

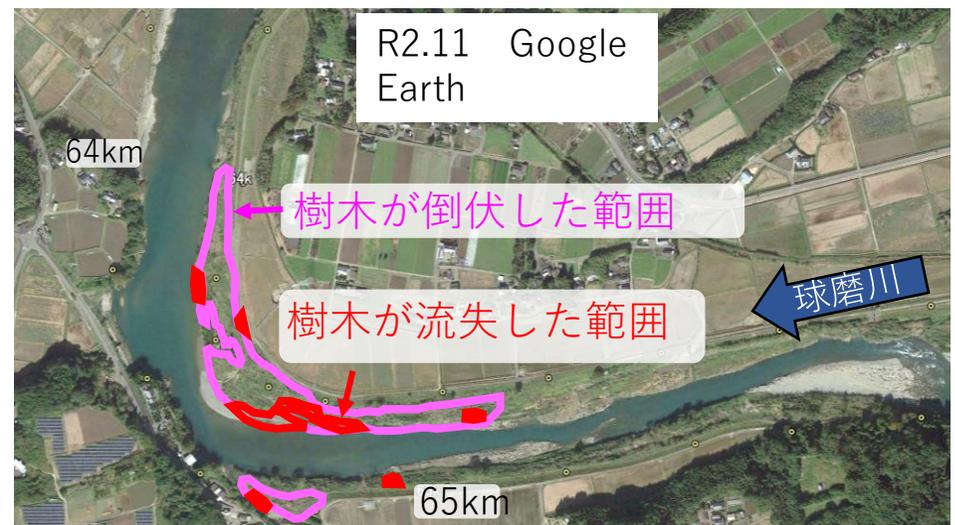
- ・天狗橋(56km)では，内岸側の堤防付近に位置する橋台背面の盛土が流失する被害が生じた
- ・64km~66km区間では，内岸側の高水敷に繁茂していた樹木群が倒伏，流失した．その結果内岸側の流下断面が広がった．

2. 河道計画（治水）への反映

複断面河道において，洪水水位が高くなると，縦・横断面の流速分布，河積の変化が起こり，水位の縦横断分布が変化する可能性が高い．これについては今後の検討課題である．

内岸寄りおよび内岸高水敷上の樹木群は，洪水流の流下阻害になることから，洪水前に事前に刈っておくことにより洪水高水時の河道断面を広く活用できる．

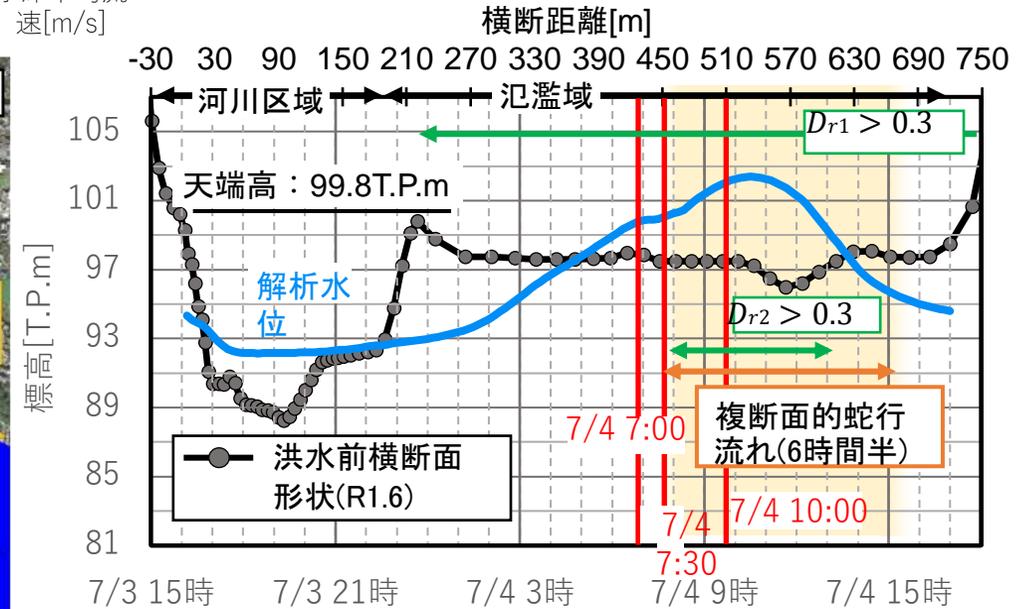
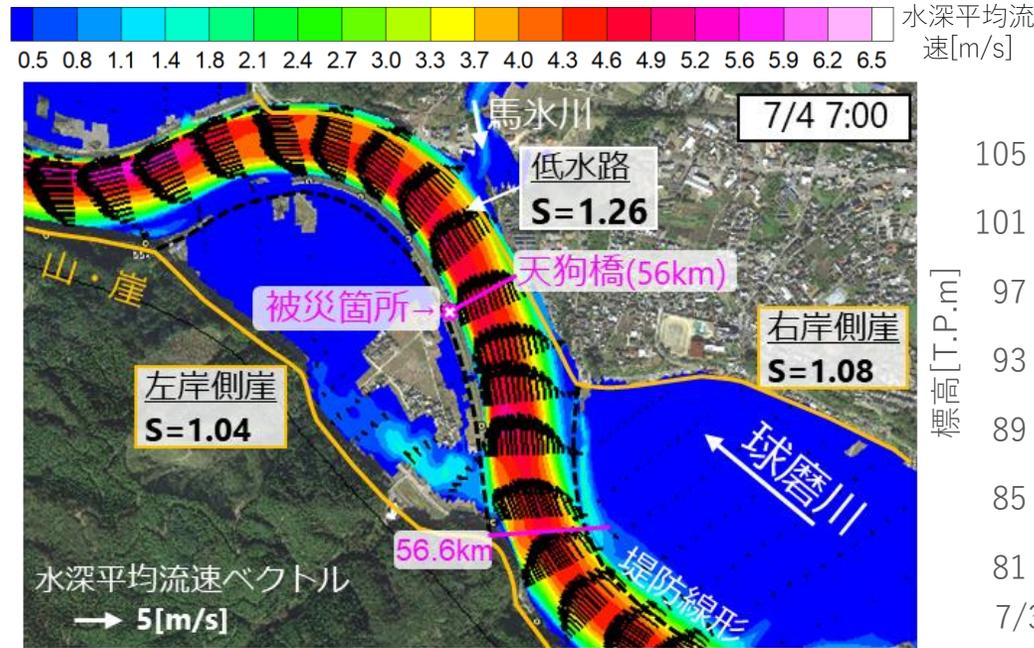
令和2年7月球磨川豪雨による河道被災状況



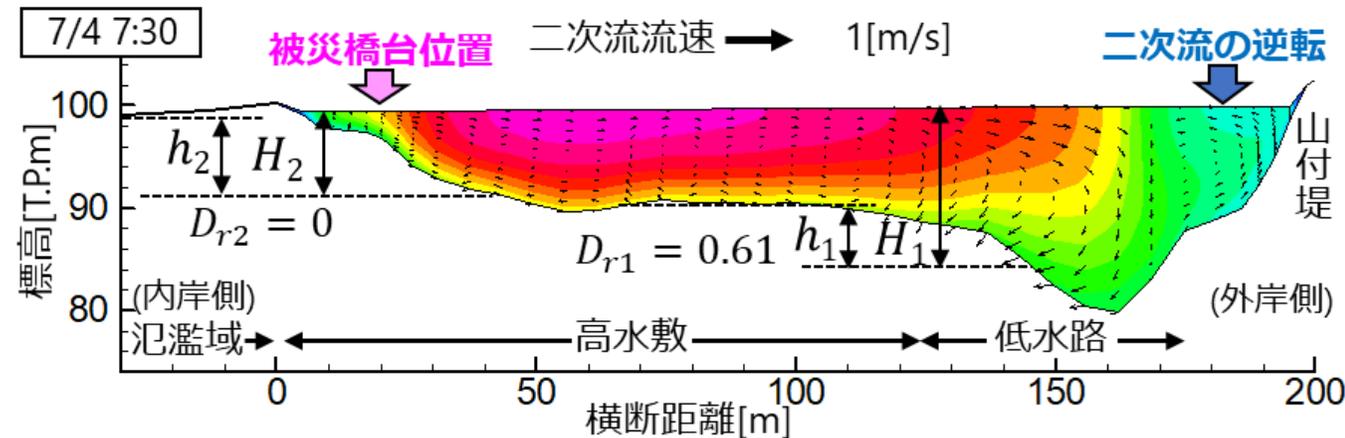
- 令和2年7月球磨川豪雨では、河川水位が軒並み堤防天端を越え、河道を低水路、堤内地を高水敷として洪水流が激しい複断面的蛇行流れとなって流下した。
- 球磨川の天狗橋(56km)では、内岸側の堤防付近に位置する橋台背面の盛土が流失する被害が生じた。
- 64km~66km区間では、内岸側の高水敷に繁茂していた樹木群の倒伏範囲と流失した。

天狗橋(56km)付近の水深平均流速・二次流分布の時間変化(7/4 7:30)

7/4 7:30の水深平均流速分布



56km地点の二次流の解析結果

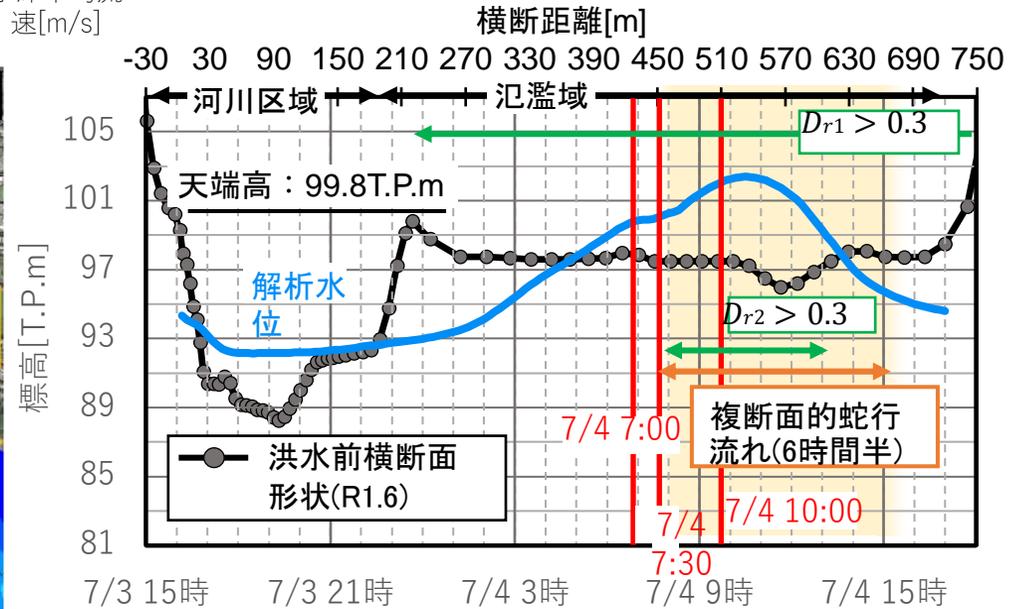
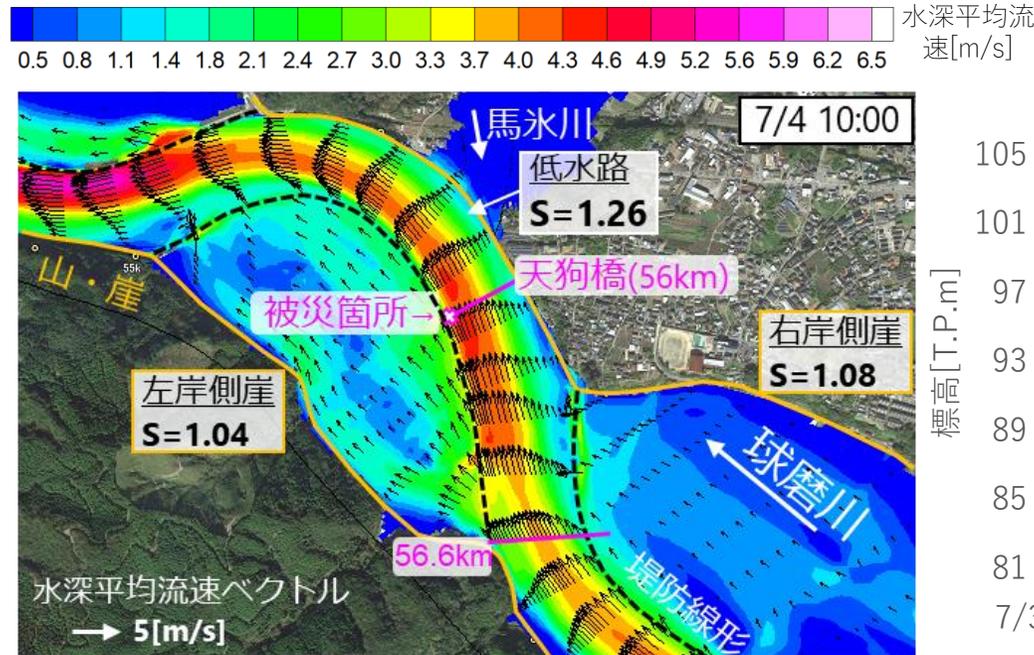


水位が堤防天端高を上回り、氾濫域と河川区域との相対水深 D_{r2} が約0.3を超える時間帯(7/4 7:30~12:30頃)になると、氾濫域の比較的遅い流れが外岸側に相当量流入し、強い流れの混合が生じる。

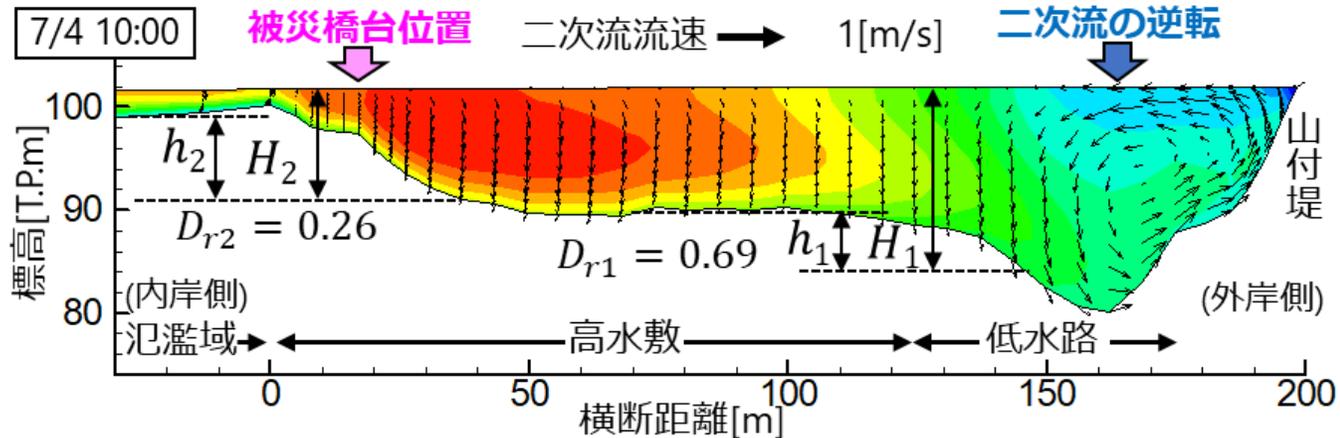
これにより、逆回りの二次流が生じ始め、高速流の発生位置も内岸側に遷移している。
(複断面的蛇行流れ)

天狗橋(56km)付近の水深平均流速・二次流分布の時間変化(7/4 10:00)

洪水ピーク時(7/4 10:00)の水深平均流速分布

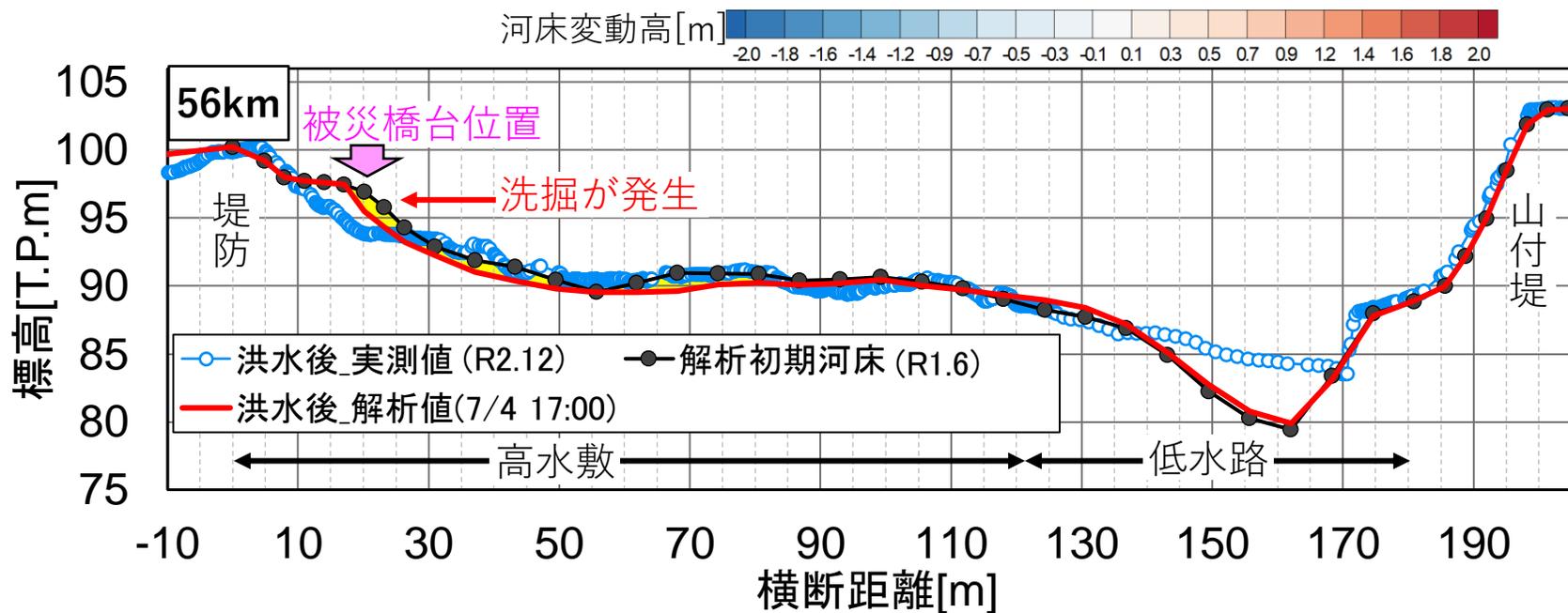


56km地点の二次流の解析結果



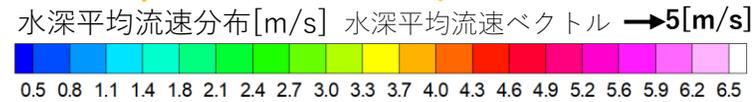
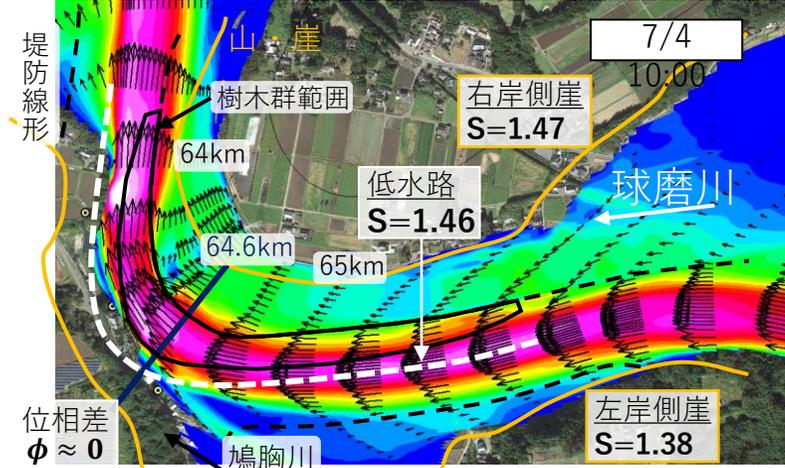
さらに、洪水ピーク付近になると氾濫域からの流入量が増加し、流れの混合が激しくなることで逆回りの二次流が発達し、高速流の発生位置が内岸側の被災橋台付近まで移動している。(複断面的蛇行流れ)

天狗橋(56km)における洪水前後の河床変動高

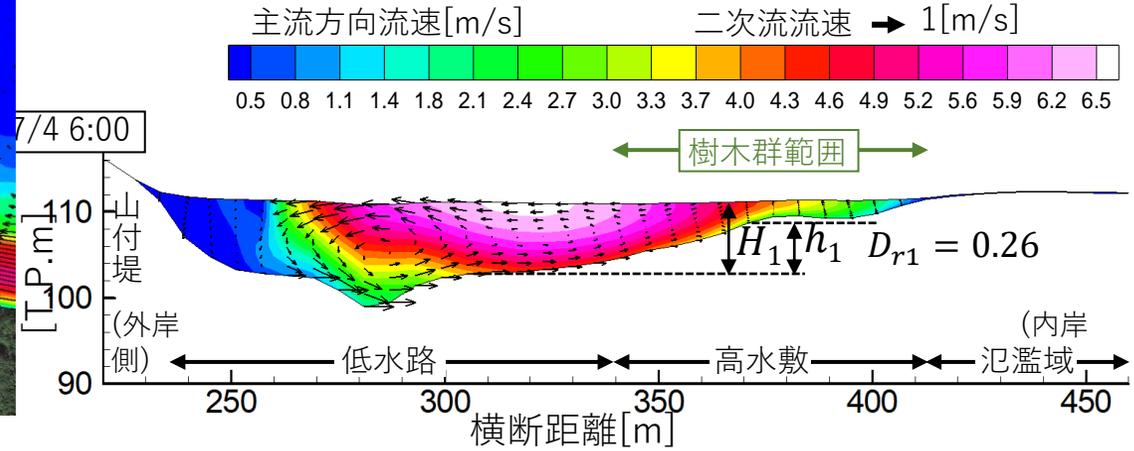


内岸高水敷上の樹木群が流失した64km～66km区間の河道線形と流れ構造

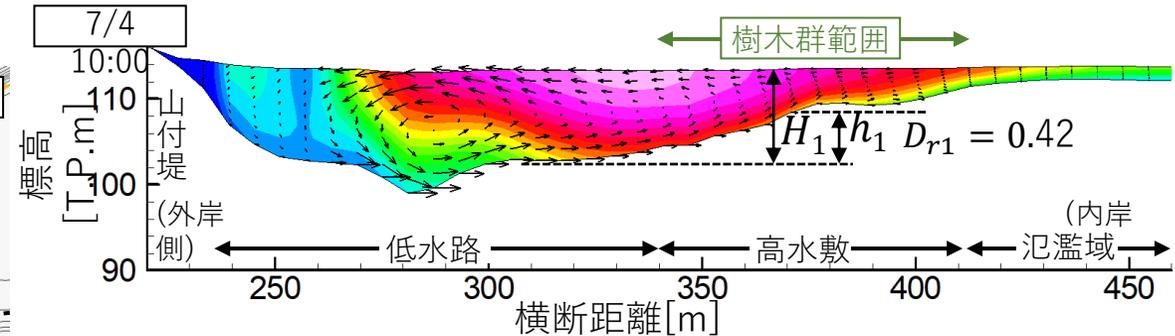
水深平均流速分布（洪水ピーク時）



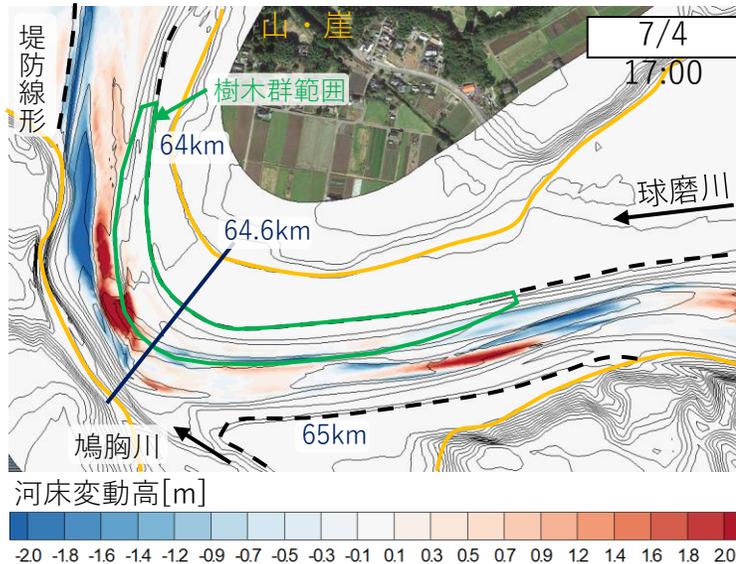
堤防満杯時(7/4 6:00) | 64.6km地点 |



洪水ピーク時(7/4 10:00) | 64.6km地点



洪水前後の解析河床変動高



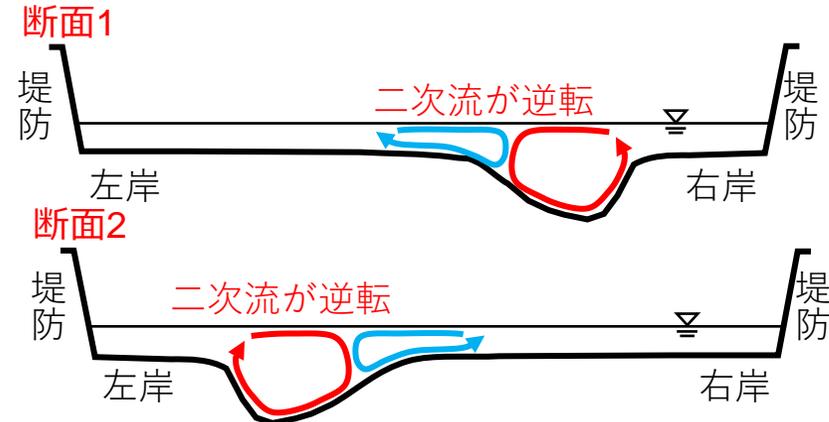
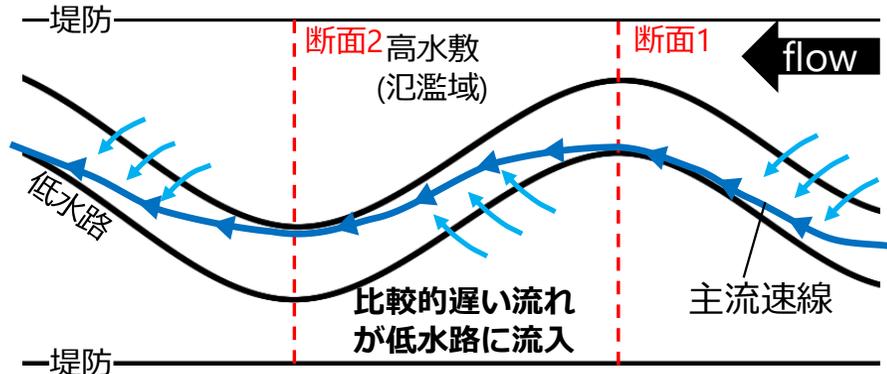
この区間の上流側は山付堤で広い高水敷を有していないこと、堤防線形と低水路線形の蛇行度と位相がほぼ同程度であることから、高水敷から低水路への遅い流れの流入量が制限され、相対水深が0.3を超えても二次流の逆転は生じず、明確な複断面的蛇行流れは生じていない。

2. 治水，河川環境，河川利用を総合的に考えた複断面蛇行河道の低水路と高水敷の配置，作り方の教訓

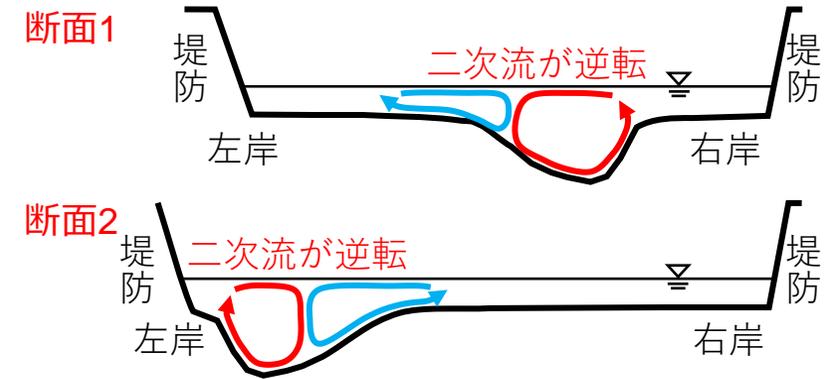
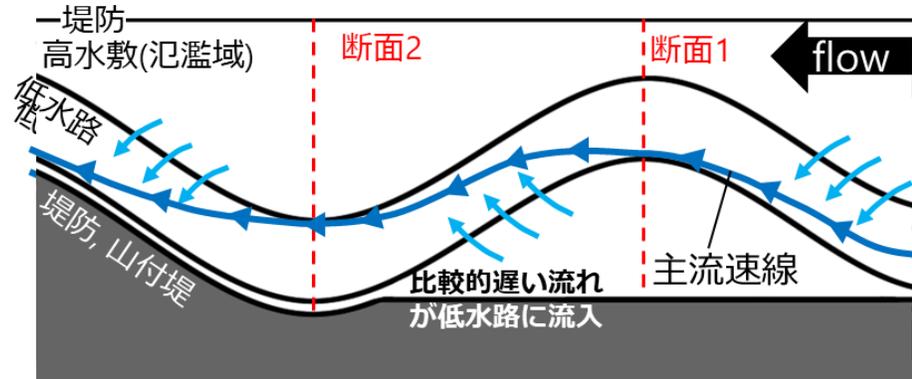
1. 低水路が蛇行している複断面河道では，低水路の平面位置によっては高水敷の広さに違いが生ずる．先に述べたように，高水敷の大きさや配置によっては高い水位での洪水流の構造が変化し，河川の治水安全度から見て高水敷の持つ役割は大きい．
2. 河川の高水敷は，洪水時，平常時ともに河川環境上，河川生態系上，その果たす役割は大きく，蛇行する低水路との関係でその配置や大きさはどのようにあるのがよいのか検討するのが望ましい．
3. 河川の高水敷は，地域住民にとって，重要な利用空間である．高水敷の利用空間の大きさは，左右岸の自治体にとって大きな関心事であるが，現在の利用形態を変更することは非常に難しい．しかし，球磨川の洪水は，高水敷と低水路の位置関係の治水上の重要性を示して来た．蛇行する低水路の両岸にほぼ同様に高水敷が存在すれば治水上も環境上も利用上も好ましいと言える．
4. 治水，河川環境，利用を総合的に考えて河川管理を行うことは河川管理者の重要な仕事である．球磨川の災害が与えた教訓の一つは，これまでの治水，河川環境，利用を総合管理のひずみをどのように修正していくかである．複断面蛇行河道の水理的な検討を行うことがその解決の方向性を与えると思う．

複断面的蛇行流れの発生機構と河道条件

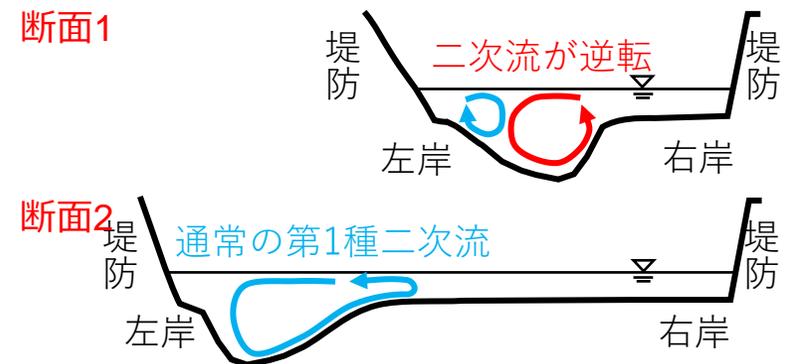
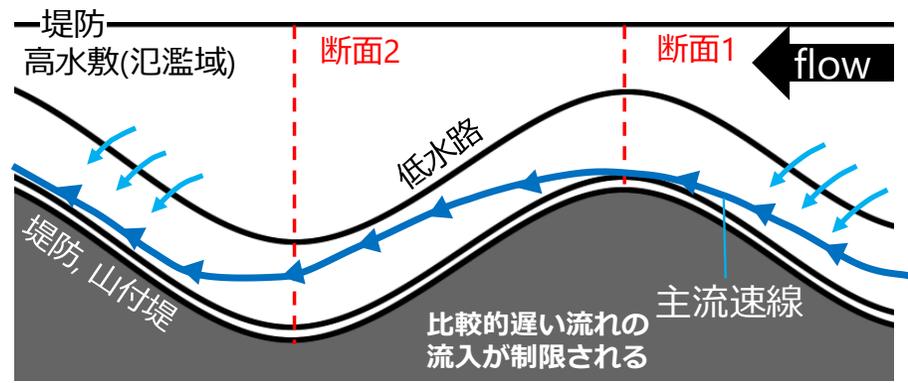
① 蛇行低水路の両側に広い高水敷が存在する



② 低水路の片側の堤防の一部が山付堤



③ 片側の堤防が山付堤



3. 人吉市の内水氾濫とそれに続く外水氾濫がもたらした住民避難上の問題と減災まちづくりへの教訓

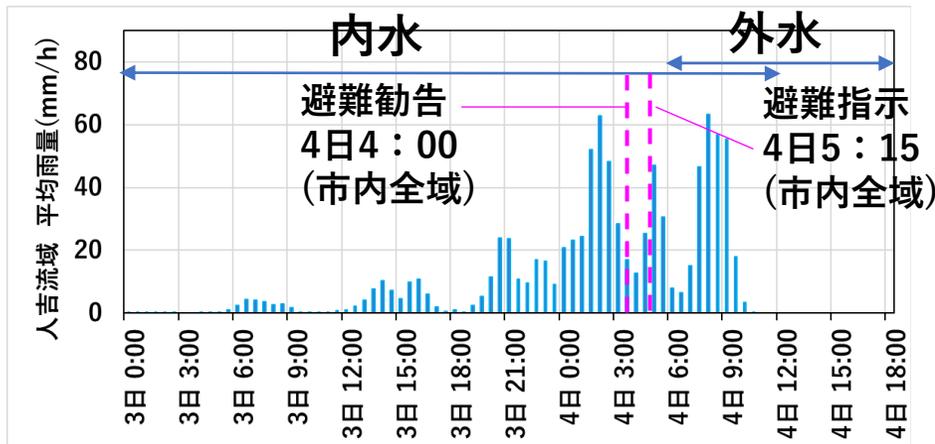
1. 令和2年7月3日、4日の熊本豪雨では、人吉市内は3日からの豪雨で、4日午前3時には、内水氾濫が激しく、道路が冠水、水路化し、避難が難しい状況となった。
2. 7日午前6時には、球磨川からの外水が市内に流入し、内水と外水が重なった氾濫流が発生し、人吉市内に大変な被害（死者20名、関連死1名）を起こすとともに、少なくとも人命を失わないための内水と外水の重なりを考えた早期避難のための検討が急がれる。
3. 内水氾濫モデルにより内水氾濫の実態を明らかにし、避難場所までの道路上の冠水状況を時系列で示すことにより、今後の避難計画、まちづくりの考え方を示した
4. 内水氾濫の解析から求めた水収支図により、内水対策としてどのような手段を講ずべきかを流域全体で検討する上で、水収支図が有力な方法を与えることを示した。

- 令和2年7月豪雨において、人吉市では、6時頃に球磨川とその背水の影響を受けた山田川、6時30分頃には万江川から外水が市街地に流れ込み、甚大な被害が生じたことが明らかにされている¹⁾。

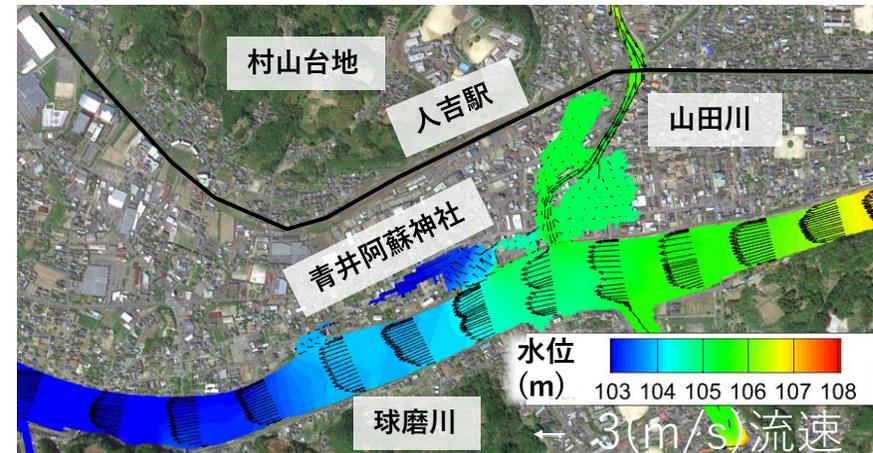
- 一方で、外水氾濫前の避難時に内水氾濫が生じていたことが指摘されているが、内水氾濫による浸水状況や発生機構や避難にどの程度の影響を与えたか等は明らかになっていない。

地形や降雨情報を詳細に考慮した内水氾濫解析を行うことにより、人吉市における内水氾濫機構の実態を高精度に解明し、豪雨時には流域のどこに、どのような量の水が存在しているのかを示す流域水収支分布の分析から氾濫被害軽減に向けた検討を行う。

内水氾濫に引き続く外水の氾濫が住民避難に与えた影響を評価し、今後の水防災・減災まちづくりに資する情報を示すことを目的とする。



令和2年7月豪雨の人吉流域平均雨量

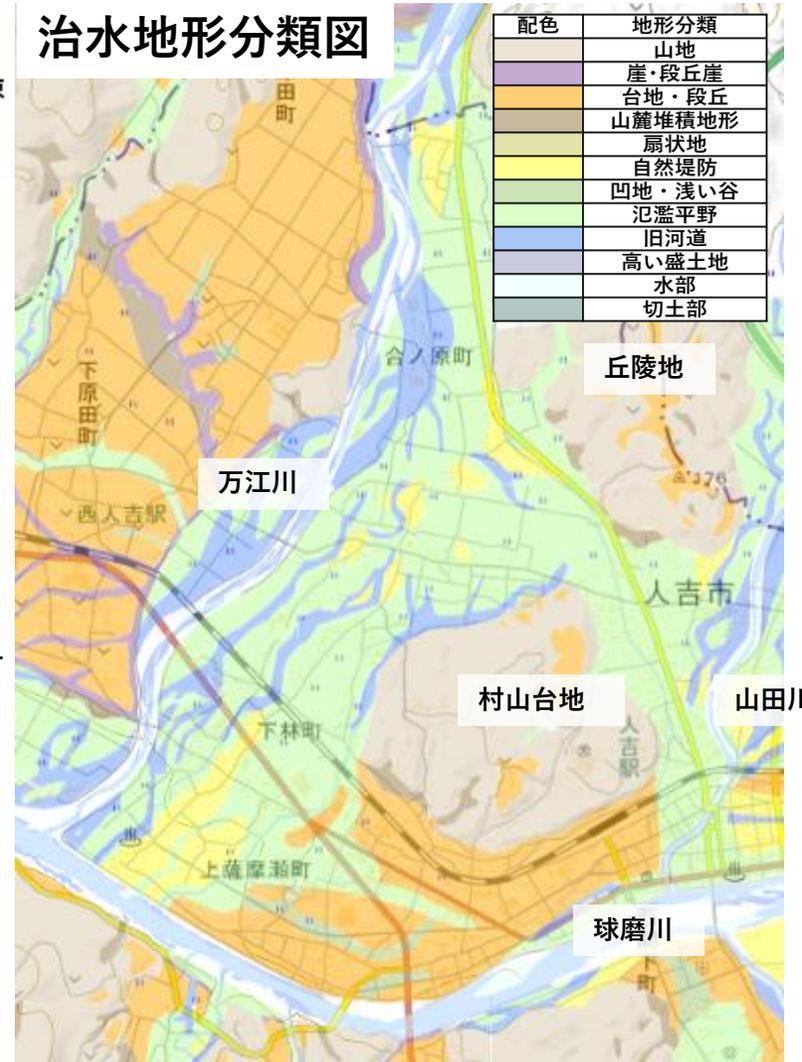
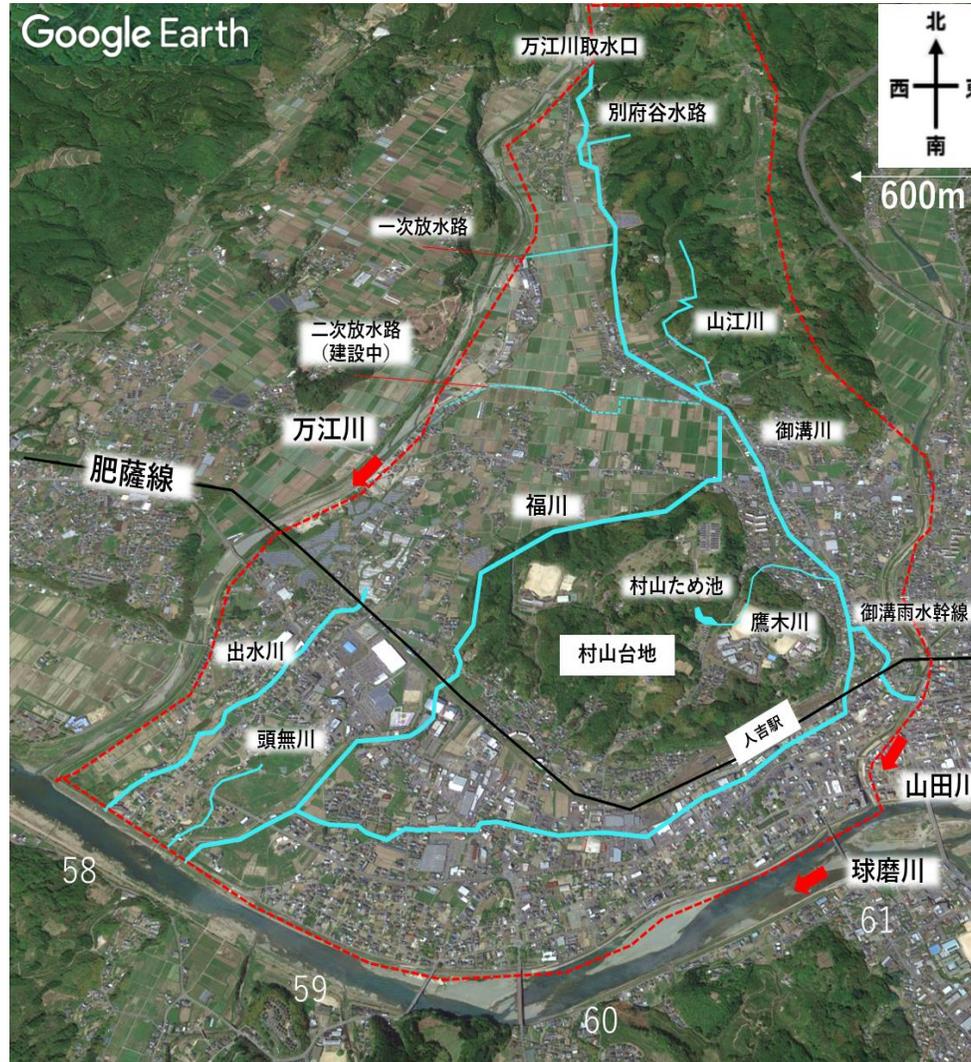


令和2年7月豪雨時の6時の外水流入の状況¹⁾

1) 田端ら, 河川技術論文集, 第27巻, pp.597-602, 2021.6.「令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と狭隘区間の集落の被害分析」

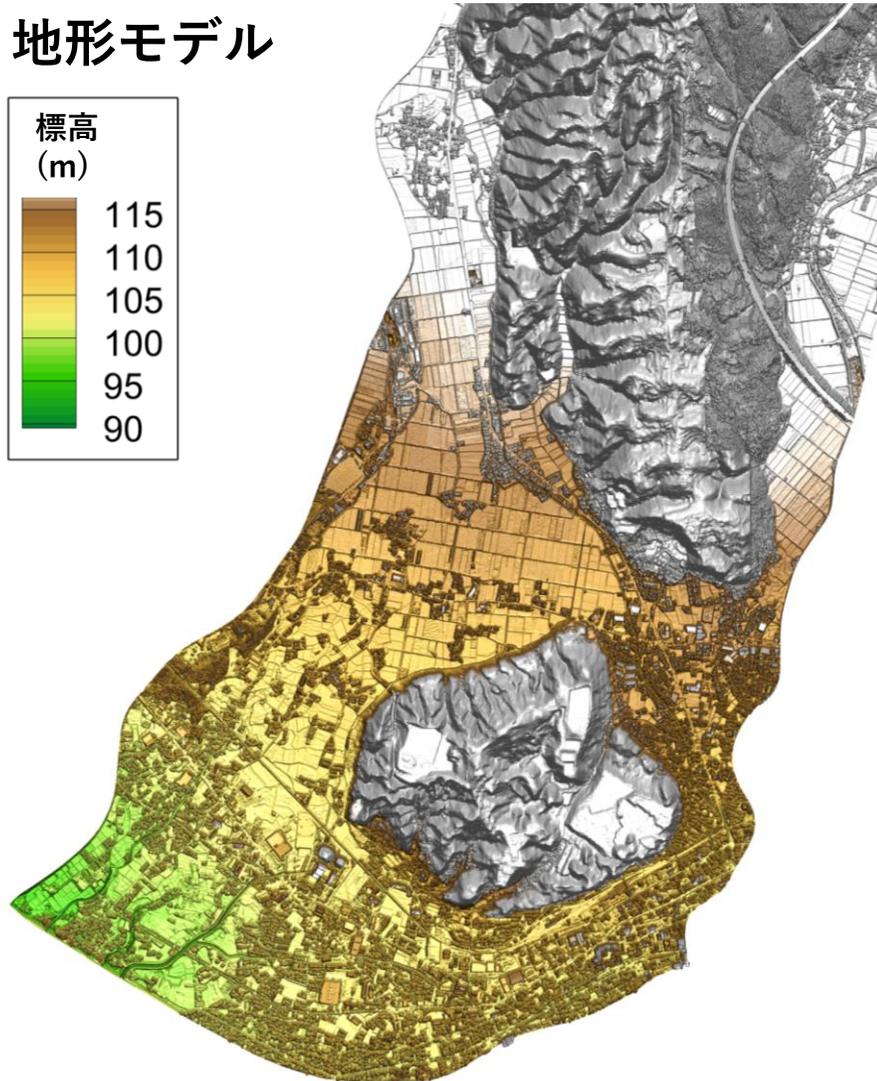
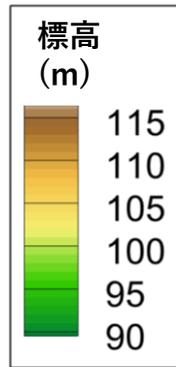
対象領域：約10km²

- ・標高の最も低い南西部に向かい雨水が集まりやすい。
- ・市内には水路網が張り巡らされており、農業水路等の既存施設を活用しながら、雨水を排水する。
- ・豪雨時には、水路網からの内水氾濫が高頻度で発生する。



本解析では、**台地や丘陵地の降雨流出**，**水路網の流れ**，**氾濫について**を平面二次元不定流解析法を全流域に適用している．降雨は，**解析雨量を用いて流域25分割し**，**時空間分布を考慮**した．地形は，L.P.オリジナルデータ及び河道データ等を基に，**解像度2mのメッシュ**で水路網・住宅群・道路網を詳細に再現している．

地形モデル



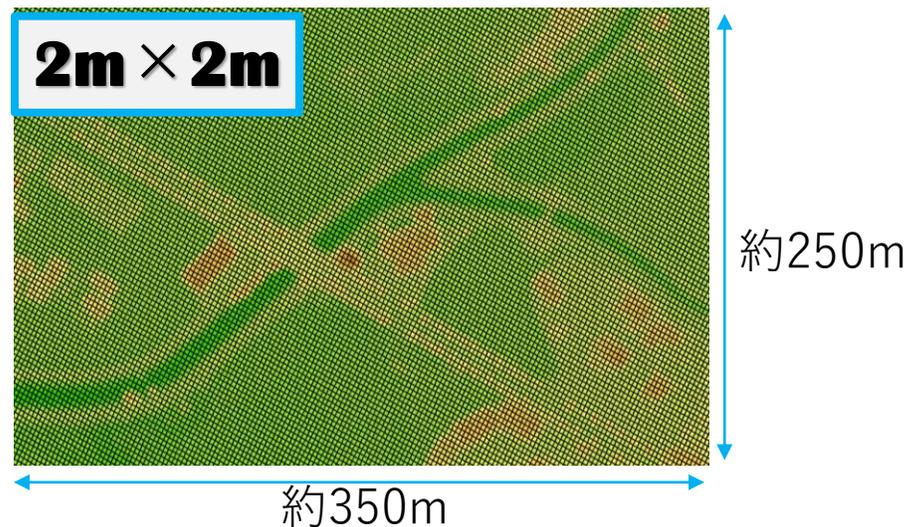
平面二次元不定流解析法(一般座標系)

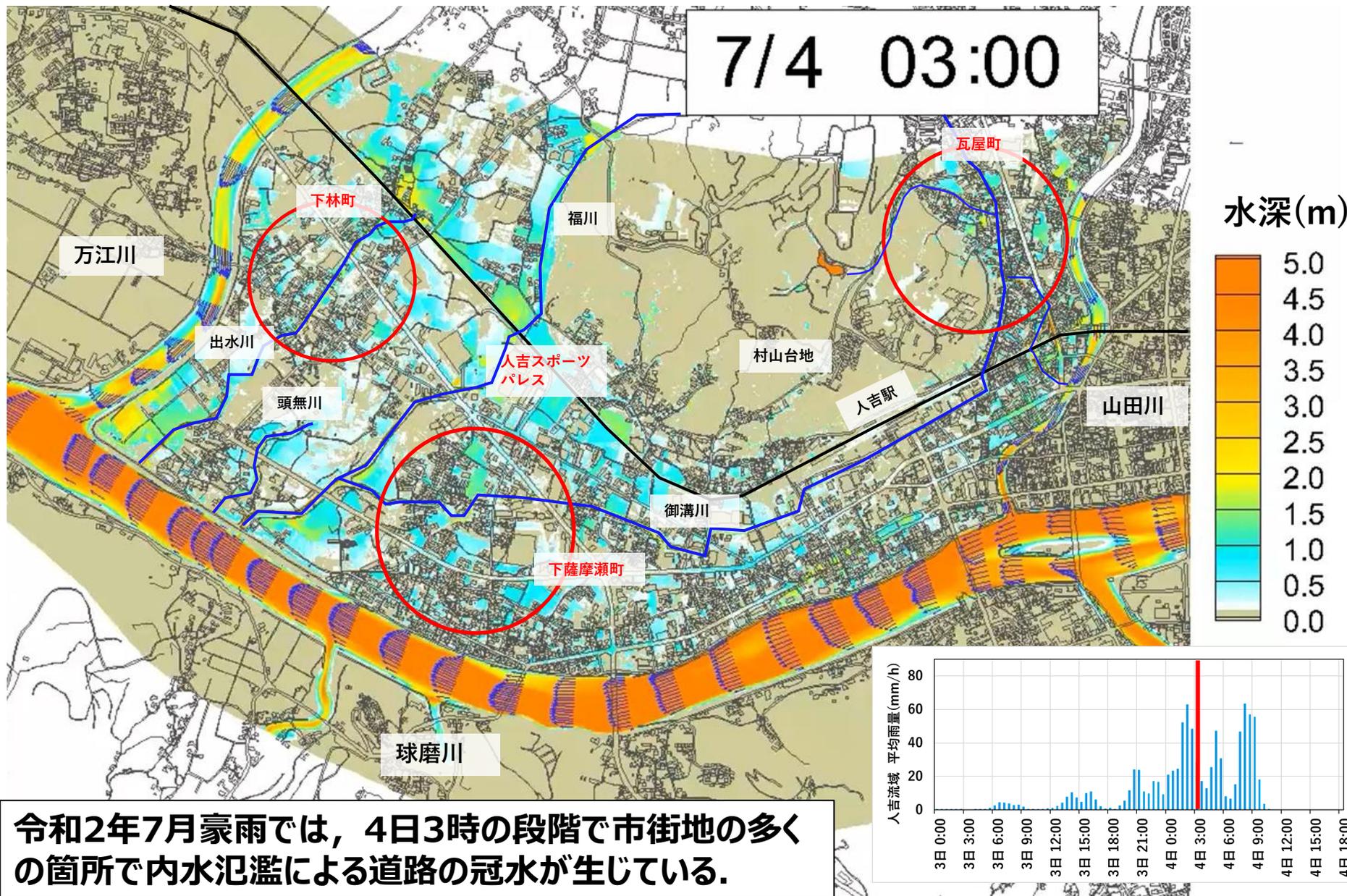
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = r$$

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho}$$

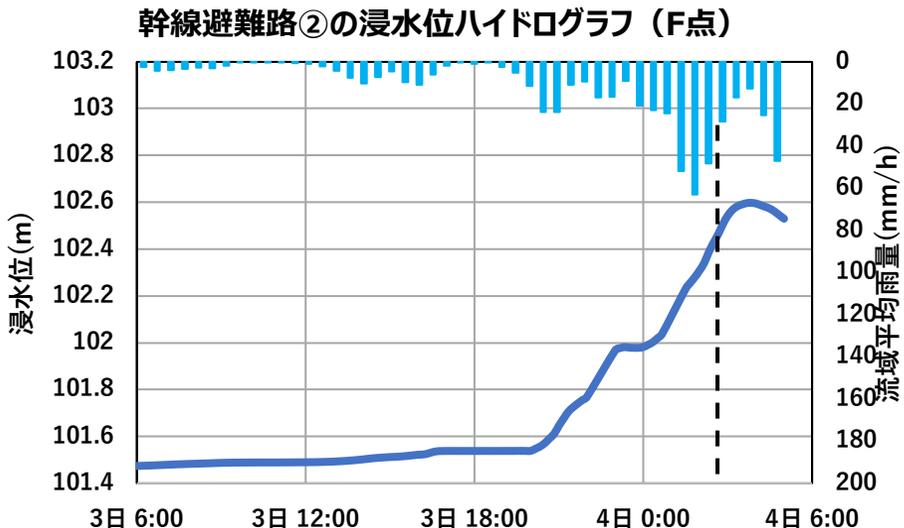
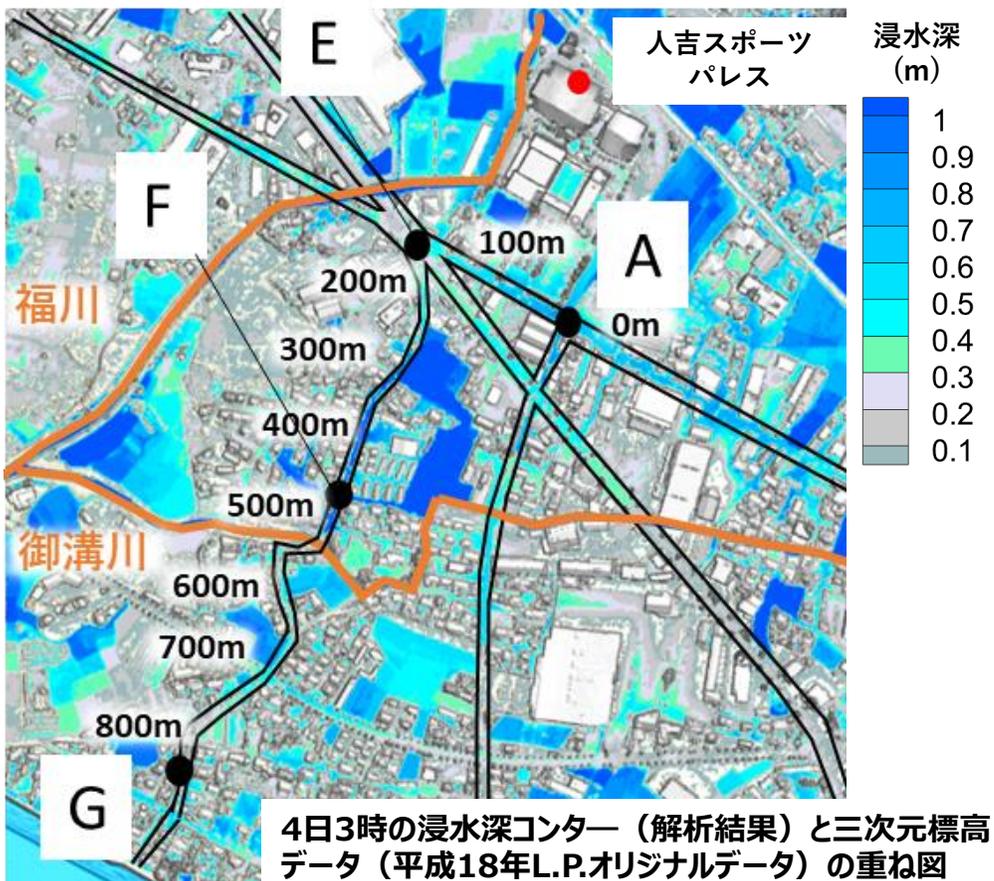
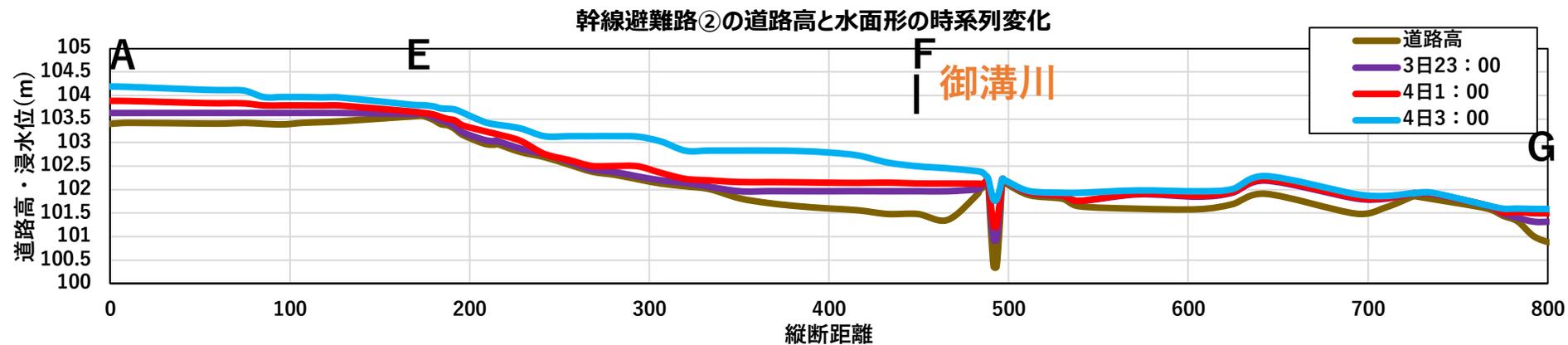
$i, j: 1, 2$, $x_i: x, y$, h : 水深, t : 時間, U_i : x_i 方向の水深平均流速, r : 解析雨量, g : 重力加速度, z_s : 基準面からの水位, τ_{bi} : x_i 軸方向の底面せん断力, ρ : 水の密度

格子サイズ





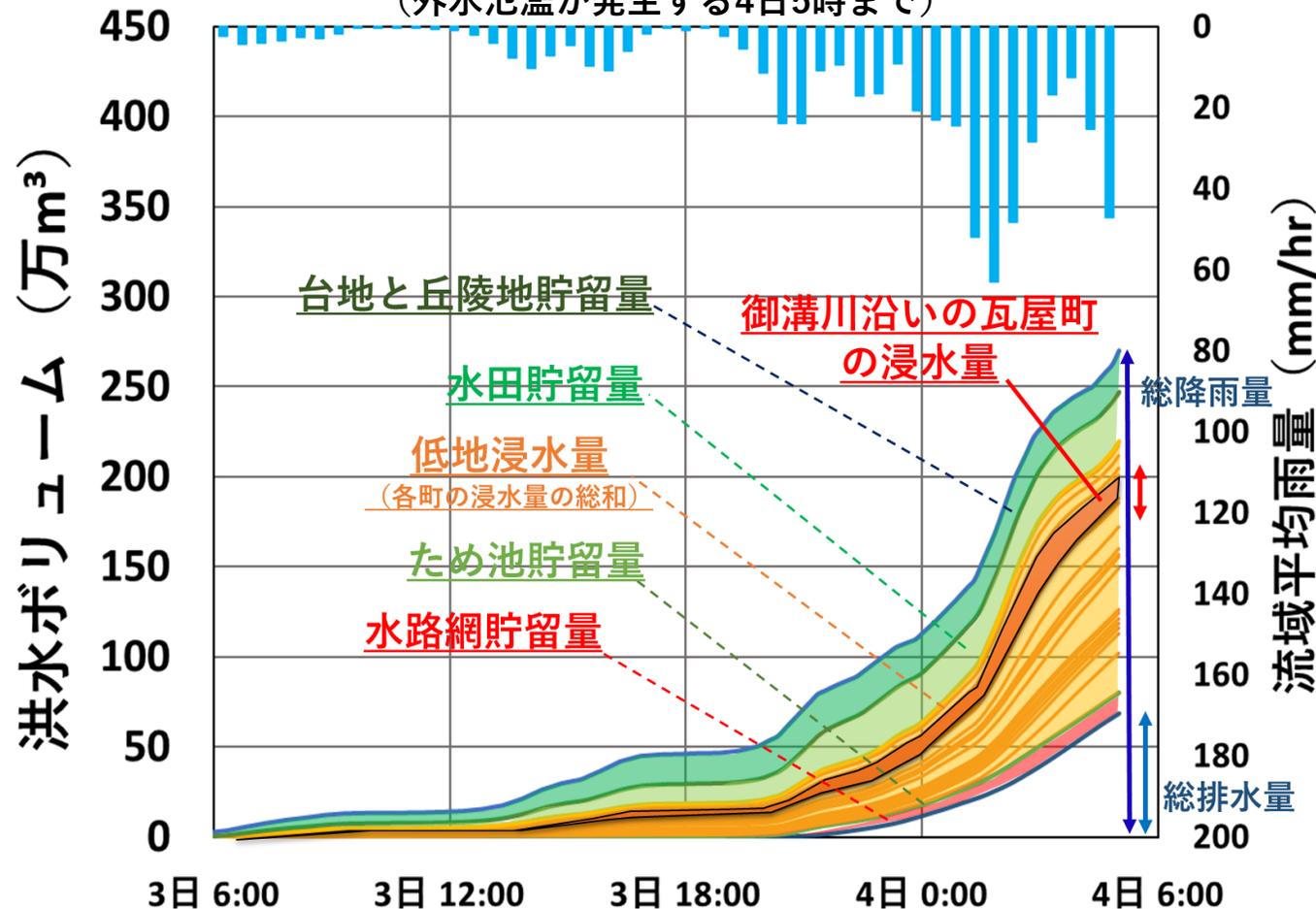
令和2年7月豪雨では、4日3時の段階で市街地の多くの箇所で内水氾濫による道路の冠水が生じている。



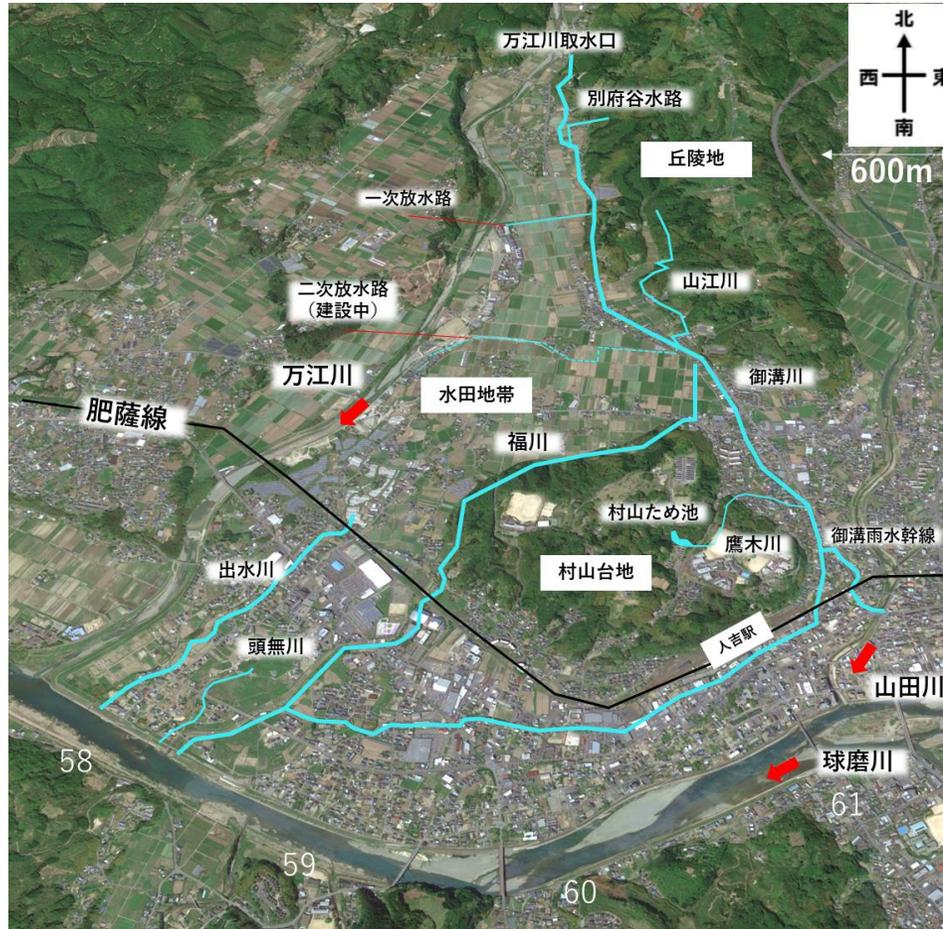
降雨が強まると、福川や御溝川からの氾濫流と雨水が避難路に集水され、浸水位が急激に上昇する。
 幹線避難路②では、4日3時になると多くの区間で浸水深70cmを超え、歩行避難の難しい状況となっている。

流域の豪雨分布と内水氾濫解析より得られた**流域水収支分布図**を示す。
 緑・薄緑色で台地や丘陵地、水田の貯留量，黄色で低地の浸水量，黄緑色でため池の貯留量，赤で水路網の貯留量を表している。また，流域に含まれる19の町の**浸水量分布**を反映させることで，**流域内の高浸水リスク地**や**対策優先箇所**の見える化している。下図では，一例として瓦屋町の浸水量を茶の濃い色で強調している。
 令和2年7月豪雨時には，**降雨強度の増大に伴い，低地の浸水量が急激に増加**している。低地の浸水量は139万 m^3 に達し，総降雨量の50%を占めている。

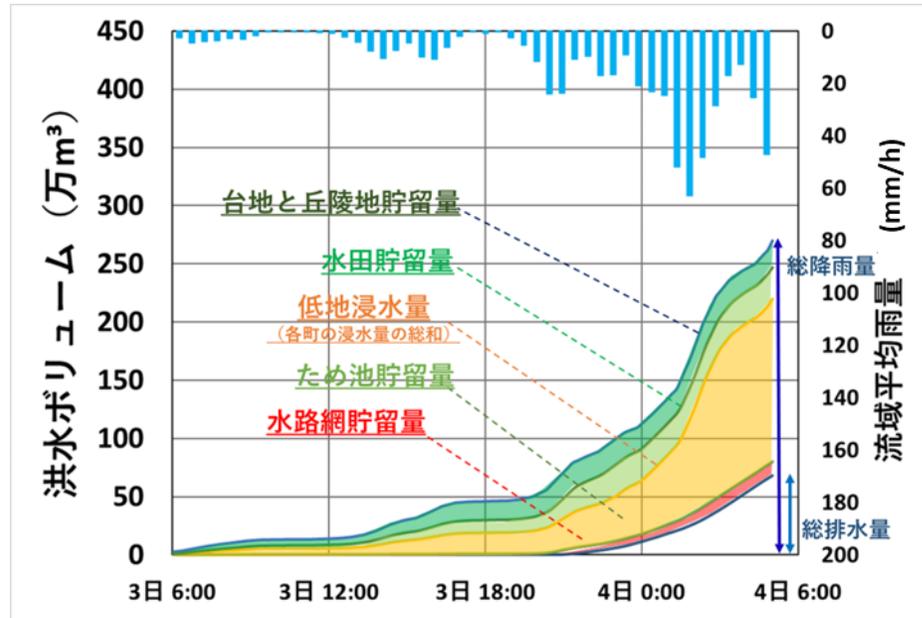
令和2年7月豪雨時の人吉流域の水収支分布図
 (外水氾濫が発生する4日5時まで)



人吉市の内水氾濫は、村山台地や丘陵地、北部水田地帯等の上流域からの豪雨流出の影響を大きく受けることが分かった。このため、内水問題解決のためには、**流域水収支分布図の緑や黄緑色、薄緑色で示す上流域の貯留量を増加**させることや**市街地の upstream 区間での分流**によって、**下流の低地に到達する洪水流量を低減**させることや**ピークの発生を遅らせる**ことが重要な対策として考えられる。
また、**球磨川水位の低下による総排水量を増加**させる等の**各主体の取組を一体的に検討**することが重要となる。



令和2年7月豪雨時の人吉流域の水収支分布図
(外水氾濫が発生する4日5時まで)



流域水収支分布図を対策前後で比較し、減災対策の効果を地域の人々と議論することが水防災・減災まちづくりを進める上で重要となる。

- (1) 令和2年7月豪雨時において、人吉市では上流域に降雨が集中し、大量の雨水が御溝川や出水川等へ流れ込むことで市街地の内水氾濫水位の上昇が急激に生じた。このため外水氾濫が発生する前の避難が難しい状況となった。
- (2) 流域水収支分布の分析から、人吉市の内水問題解決に向けては、上流域での貯留対策等を通じて下流市街地に到達する洪水流量を低減することやピークを遅らせることが有効であることを示した。
- (3) 内水氾濫に続く外水氾濫が全国で発生していることから、令和2年の人吉水害は、多段階リスク情報付き浸水想定図を公表しながら内水氾濫と外水氾濫を一体的に考えた流域治水対策を計画的に進めていくことの重要性を示した。