

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

FLOOD DAMAGE ANALYSIS FOR URBAN DISTRICT AND MOUNTAINOUS
NARROW AREA BY INTEGRATING ANALYSIS OF FLOOD FLOW AND
INUNDATION UNDER THE 2020 KUMAGAWA HEAVY RAIN

田端 幸輔¹・後藤 岳久¹・竹村 吉晴¹・酒匂 一樹²・福岡 捷二³
Kosuke TABATA, Takahisa GOTOH, Yoshiharu TAKEMURA,
Kazuki SAKOU and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所 調査課長
(〒866-0831 熊本県八代市萩原町1丁目708-2)

³フェロー Ph. D. 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The Kuma River large flood in July 2020 that greatly exceeded the design flood level caused enormous damage to the city in Hitoyoshi Basin area and the towns in mountainous narrow section. In this study, an integrating analysis model of flood flow, inundation and bed variation based on the observed water surface profiles during the Kuma River 2020 flood is developed for considering the flood control plan in the basin with geometrically complicated features. Characteristics of the runoff from the Kuma River and tributaries and the flood propagation are analyzed by using the quasi-three dimensional model. Also, the relationship between inundation flows and the damaged places in the Hitoyoshi city area and Sakamoto district of the narrow section are clarified, at two stages of the start and the peak of the inundation and the flood peak.

Key Words: Kuma River 2020 flood, flood flow, inundation, bed variation, observed water surface profiles, compound meandering channel flow, integrating analysis of flood flow and inundation

1. 序論

令和2年7月豪雨で発生した球磨川洪水では、基本高水流量を超える大流量が流下し、人吉盆地市街地とその下流の山間狭隘区間集落に甚大な氾濫被害をもたらした¹⁾。今次大洪水の洪水氾濫データを科学的に説明できる流域全体の水理解析モデルを構築し、大規模洪水の流下・氾濫機構と家屋等の被災要因を明らかにすることが、有効な流域治水対策を検討していくためのキーとなる。このようなモデルが構築出来れば、異なる降雨外力条件に対する本支川の洪水流下機構や氾濫被害の予測、治水対策の効果を知ってのまちづくり等への展開が可能となる。したがって、今後の治水対策を考える上でも、今次大洪

水について流域全体で高精度な検討が求められる。

今次洪水は、その特異な地形特性のため、河川水位が堤防天端を軒並み越え、河道が低水路、堤内地が高水敷として激しい複断面的蛇行流れ²⁾となって流下し、そのことが大災害を引き起こした。このため、低平地で用いられる一般的な破堤氾濫計算のように、河道の一次元不定流モデルと堤内地の平面二次元氾濫流解析モデルを、河川と堤内地の水位差の関数で表される横越流公式を介して接続する解析法では、複断面的蛇行流れの流れ場を再現できず、観測データを有しない異なる外力条件・河道条件に対する被害予測は困難となる。また、大洪水時の河床変動特性を把握していくことも重要となるが、球磨川のような急勾配石礫河川には、砂河川の河床変動解析に適した平衡流砂量式の準用は適切でなく、石礫土砂

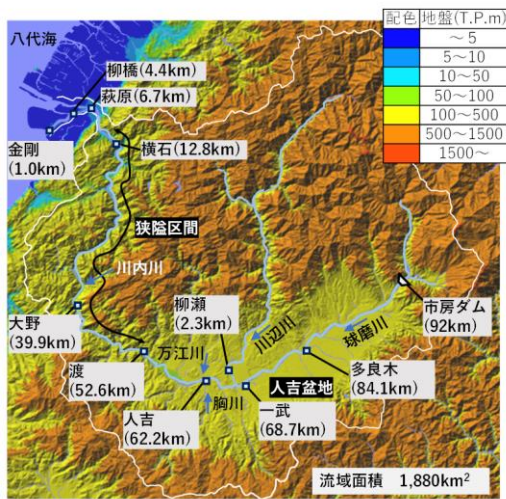


図-1 球磨川の流域図

運動の非平衡性を考慮した河床変動解析が必要となる。

よって本研究では、平面二次元モデルの枠組みで三次元流れを合理的に解くことのできるQ3D-FEBS法³⁾と、石礫粒子の非平衡運動に適した長田・福岡モデル⁴⁾を修正した修正長田・福岡モデル⁵⁾を用いて、令和2年7月球磨川豪雨による洪水流と氾濫流、河床変動の一体解析を行う。そして、構築したモデルを用いて、洪水水位波形の伝搬特性、人吉市街地と狭隘区間集落の氾濫流の挙動と被災形態の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 令和2年7月球磨川豪雨の特徴

球磨川の流域図を図-1に示す。球磨川は、盆地と山間狭隘区間を貫流し、多くの支川を合流しながら八代平野に至り、八代海に注ぐ。本川と主要支川である川辺川の流域は羽状で、これらに流入する多数の支川群流域と一体として円型に近い流域を形成している。図-2に、令和2年7月豪雨時の雨域の移動特性と、降雨観測データから作成した流域平均雨量を示す。まず、7/4 0:00~1:00頃に、狭隘区間と、南側の胸川等の支川流域に時間雨量約30mmの降雨をもたらした(図-2①)。その後、同日2:00~5:00に、狭隘区間、川辺川上流域、本川上流域を含む北側の広い範囲で時間雨量50mmを超える降雨をもたらした(図-2②)、更に、同日7:00~9:00に再び南側エリアで激しい降雨をもたらした(図-2③)。この結果、大洪水により人命、家屋等の損傷が生じた。人吉市街地では、窪地になっている蓮池や道路沿いの家屋が、狭隘区間では河道沿いの宅地が損傷被害を受けた⁶⁾。

3. 解析モデルの構築

(1) 数値解析法

本研究では、河道と堤内地の流れを一体としてモデル

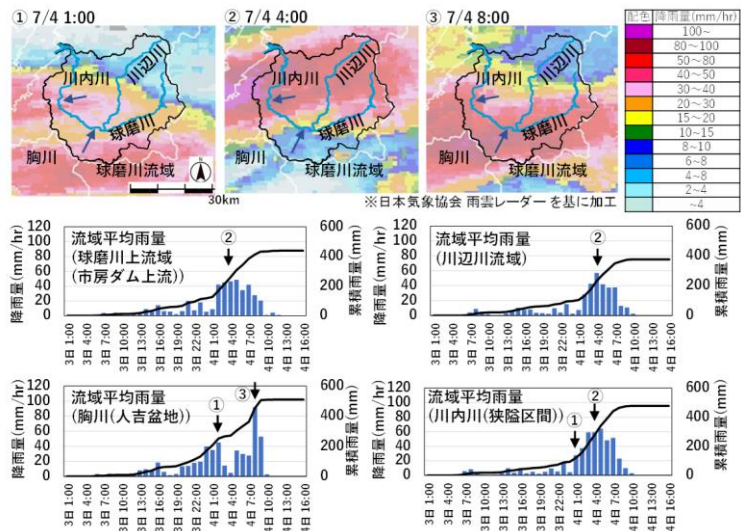


図-2 雨域の移動特性(上図)と流域平均雨量(下図)

化し、観測水面形時系列に基づいた一般座標標準三次元洪水流・河床変動解析法を採用した。解析メッシュは、流下方向に20m、横断方向に10m間隔を基本とし、堤防や河岸の線形、合流点形状を再現した。堤防近傍では解析メッシュの横断間隔を最小で約2mまで細かくすることで、堤防断面形状を可能な限り再現した。

流れの計算にはQ3D-FEBS法³⁾を、河床変動解析には流砂の非平衡性を考慮した修正長田・福岡モデル⁵⁾を適用した。Q3D-FEBS法は非静水圧分布を考慮した準三次元解析であり、水深平均と底面・水面の運動方程式が直接解かれる。流速鉛直分布は水深平均流速、底面・水面流速、水深による3次関数で表現され、運動量輸送に伴う流速分布の変形も考慮されることから、複断面的蛇行河道流れの特徴である低水路と高水敷の流れの混合を伴う三次元流れの解析に適用できる。また、堤防からの越流に対しては、堤防線形、高さを再現した計算メッシュを用いて、大きな慣性力を持って堤防を乗り越え、堤内地へと流入する流れを解くことが出来る。

氾濫域では、微地形だけでなく家屋群や道路網を考慮した。一般に、家屋形状を解像した三次元氾濫解析では、家屋まわりの圧力とせん断力分布から、家屋に作用する抗力が求められるが、本手法は広域の洪水流・氾濫流の解析を目的とし、個々の家屋よりも大きなスケールの計算メッシュを用いた水深積分モデルである。このため、式(1)に示すように、家屋占有率と抗力係数を用いて家屋群が流れに及ぼす抗力を表現し、運動方程式に組み込んでいる²⁾。同様の考え方により、底面および水面の運動方程式にも家屋群による抗力を考慮した。また、連続式は式(2)で表し、計算メッシュ内の家屋群占有率に応じた通水断面積の減少を考慮した。家屋内は、家屋外の水位と同じ高さまで直ちに湛水すると仮定した。

$$\frac{F_i}{\rho} = \frac{1}{2} C_D U_i \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\alpha_i B_i h}{A} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(1-\alpha_i)U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

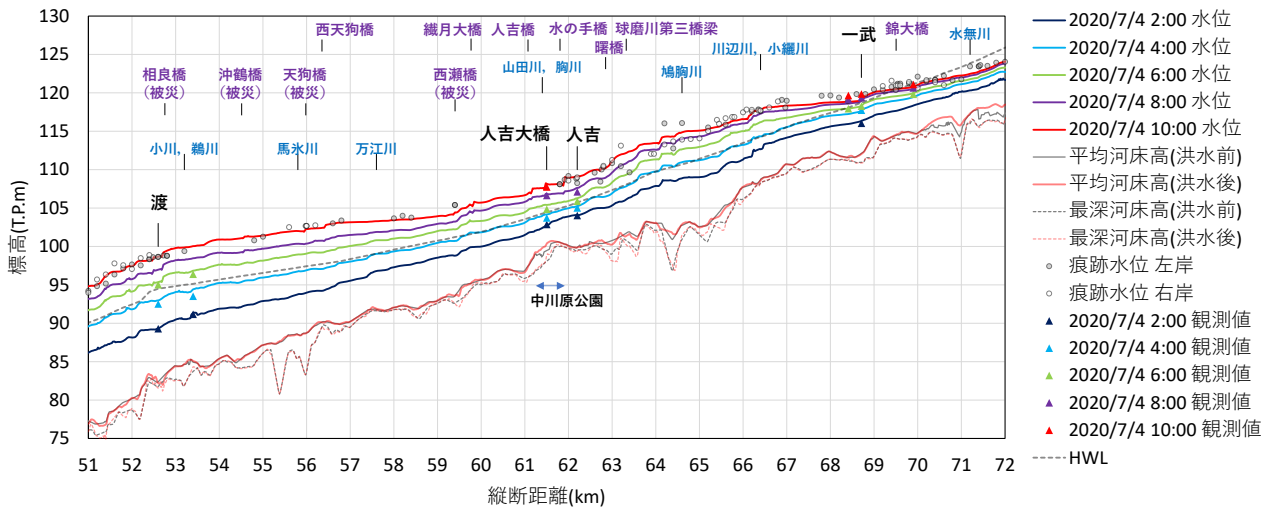


図-3 水面形時系列の解析値と観測値の比較

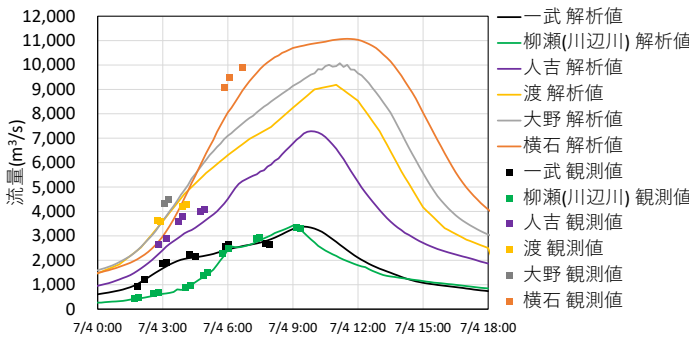


図-4 流量ハイドログラフの解析値と観測値の比較

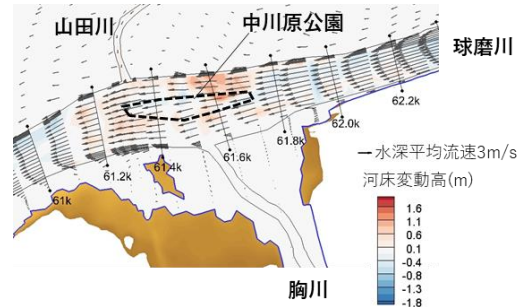


図-5 ピーク付近(7/4 10:00)の中川原公園周辺の流況と、洪水後の河床変動(解析結果)

ここに、 F は家屋群から受ける力、 $i=1,2$ 、 l は i と同じであるが総和規約に従わない。 ρ は流体の密度、 U_i 、 u_x, v はそれぞれ i 方向、 x, y 方向の水深平均流速、 α はメッシュ内の家屋存在割合、 A はメッシュ面積、 B は i 方向の流れに対するメッシュ幅、 h は水深である。抵抗係数 C_{Dl} は1とした。他にも、61.5kの河道中央に存在する中川原公園や、水面下に没した後の橋桁については、式(1)と同様の考え方により構造物から受ける抗力を考慮した。

(2) 解析条件

解析対象範囲は、球磨川本川および川辺川とし、球磨川については河口から市房ダム下流までの91.8km、川辺川は球磨川合流点から7kmまでの区間を解析した。球磨川上流端には市房ダムからの実績放流量ハイドログラフを、川辺川上流端には柳瀬の観測水位ハイドログラフを、球磨川下流端には実績潮位をそれぞれ与えた。その他の支川からの流出量については、実績降雨を基に国交省が貯留関数法を用いて流出計算した結果を与えた。各支川の流域面積は5km²~90km²程度であり、流出計算を適用する際の目安とされる100km²よりも小さいことから、流出計算結果を用いて解析を行うものとした。次節で示されるが、貯留関数法で求めた支川流量を与えて解析された本川の全区間にわたる各時刻での洪水水位縦断形は、観測値とほぼ一致したことから、球磨川流域では貯留関数法が有効であることが確認されたといえる。

河道の粗度係数は、河道計画で設定されている値を基に、観測水面形を再現するように調整し、最終的に低水路に0.022~0.038m^{-1/3}s、露岩箇所には0.037~0.048m^{-1/3}s、高水敷に0.035~0.075m^{-1/3}sを与えた。本解析では、水位の変化による粗度係数の時間変化は考えていない。また、川辺川合流点付近等、樹木が密に繁茂している箇所では樹木群透過係数を与え⁸⁾、樹木群が流れに及ぼす抵抗を考慮した。堤内地の粗度係数は、土地利用に応じて設定した⁹⁾。河道断面形状は平成29年度~令和元年度の測量成果を、堤内地盤高は平成27年度レーザープロファイラデータを基に設定した。左岸55.0kと右岸56.4kでは、氾濫流の河道への戻りによって堤防決壊が生じた¹⁰⁾。両地点とも7/4 9:30~15:00の間に決壊が発生したとされているが、具体的な決壊時刻は不明である。ここでは、両地点とも氾濫戻り開始から2時間後となる7/4 12:00に決壊が生じたものと仮定し、この時刻に達した直後に堤防高を高水敷高まで下げることで、決壊を考慮した。河床変動解析は河道低水路部分についてのみ実施し、初期河床の粒度分布には平成17年度河床材料調査結果を与えた。

(3) モデルの検証

図-3, 4に、水面形の時間変化と洪水前後の河床高縦断分布と流量ハイドログラフの解析値と観測値の比較を、人吉盆地区間を例に示す。なお、現時点では洪水後の横断測量データが得られていないため、河床変動について

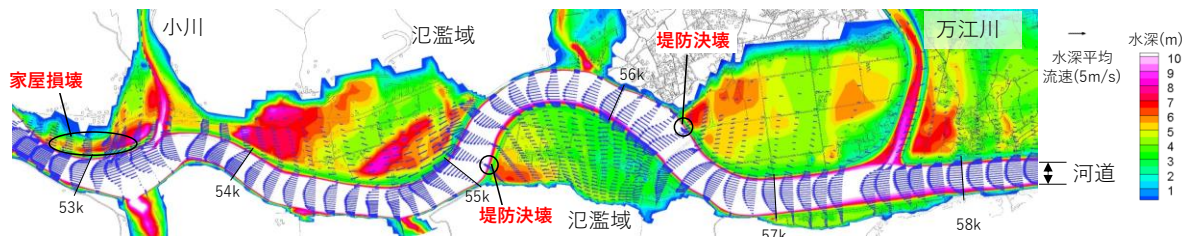


図-6 ピーク時における人吉付近の洪水氾濫状況の解析結果

は解析結果のみを示している。洪水流の水面形の時間変化の解析結果（実線）は、観測値（プロット）を再現できている。また、流量ピーク時となる7/4 10:00の解析水位は、洪水痕跡水位と概ね一致している。水面形時系列を再現した結果得られた観測所の流量ハイドログラフ（図-4）は、人吉、横石地点で観測値よりも低めの値を示すものの、全体的には観測値を概ね説明できている。本解析における人吉のピーク流量は約7,300m³/sである。

図-5は、61.5k付近の河道中央に存在する中川原公園周辺の河床変動高の解析結果の段彩図である。中川原公園とその付近の橋梁が抵抗として働いたこと、公園周辺で土砂の堆積が生じたことが、上流側の水位上昇を引き起こしていたと思われる。この点については、洪水後の横断測量データと河床変動解析結果を用いて、今後詳細な検証を行う予定である。

図-6に、ピーク時における人吉付近の洪水氾濫状況の解析結果を示す。この図から、洪水流は河道を低水路、堤内地を高水敷とする複断面的蛇行流れを呈している。複断面的蛇行流れは蛇行度と相対水深によって低水路内の流速分布が大きく変化する特徴を有する²¹⁾。また、複断面的蛇行流れが長時間続くと、内岸河床の洗掘を引き起こす可能性がある。このことは、水際構造物設計や安定河道を論じる際に重要となる。53k右岸の家屋被害や左岸55.0kと右岸56.4kの堤防決壊箇所は、複断面的蛇行流れの形成によって流れが低水路（河道）から高水敷（堤内地）に乗り上げる箇所と、高水敷（堤内地）から低水路（河道）に戻る箇所に相当していることが分かる。人吉盆地の52～63kの氾濫ボリュームの解析値は1,550万m³で、氾濫痕跡調査による推定値1,530万m³と良好な対応を示している。なお、後者は大本¹²⁾が推定した値と同様である。以上より、構築したモデルは球磨川の大規模洪水流・氾濫流の挙動を十分説明できていると判断した。

4. 洪水伝搬の特徴と氾濫被害の分析

(1) 洪水伝搬の特徴

本解析モデルにより算出した各観測所の水位ハイドログラフを図-7に示す。柳瀬、一武、人吉、渡は人吉盆地に、大野、横石は狭隘区間に、萩原、柳橋、金剛は八代平野にそれぞれ位置する水位流量観測所である。人吉盆地区間では、一武～人吉～渡にかけてピーク時刻が約1

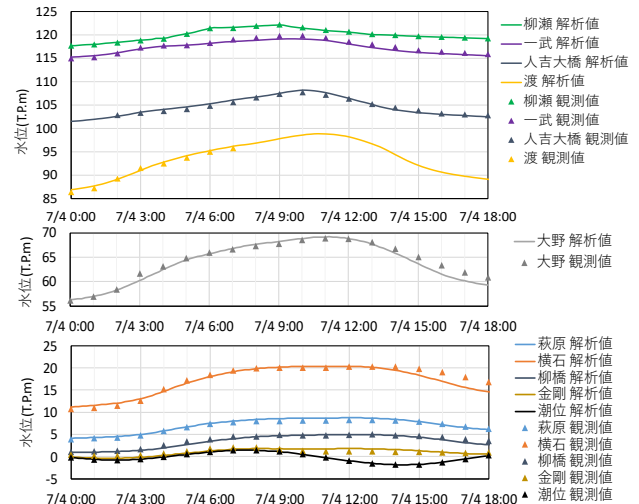


図-7 本川の水位ハイドログラフの伝搬

時間ずつ遅れており、洪水波形の縦断変化が大きくなっている。これは、支川群の合流、河道縦横断面形の変化、河道から堤内地への氾濫・戻り、連続した橋梁群による抵抗等の影響によるものと考えられる。

狭隘区間では、支川群の合流に加えて、坂本地区等の特殊堤で制御された河道沿い集落の大規模氾濫を伴って洪水が流下したことで、更なる波形の変形が生じ、狭隘区間出口付近の横石では台形型の波形が形成されている。このため、下流平野部の土堤区間に高い水位が長時間継続したことになり、堤防浸透破壊や越水破壊のリスクは高まっていた¹³⁾。また、今次洪水では7/4 9:00以降に潮位が下がっており、もし上げ潮となっていれば洪水ピークと同時生起し、氾濫危険性が高かった可能性がある。

(2) 氾濫被害の分析

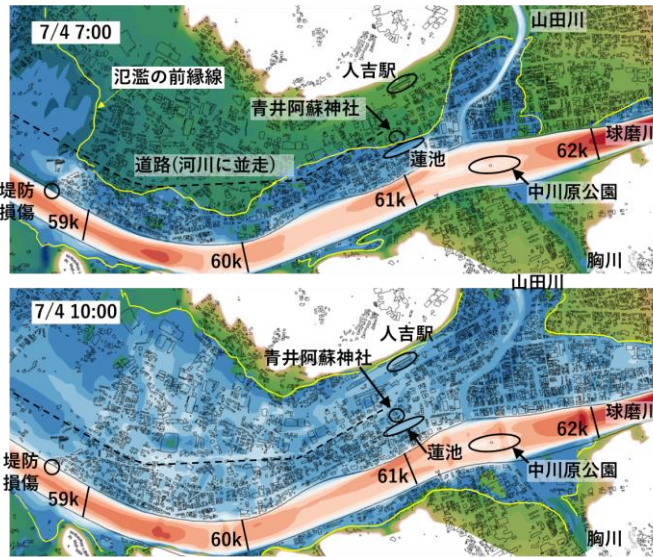
a) 人吉市街地

図-8に人吉市街地の治水地形分類図と氾濫流況を示す。人吉駅や青井阿蘇神社は台地・段丘の上に位置しており、神社前の蓮池の窪地は旧河道となっている（図-8(a)）。山田川周辺は相対的に地盤高の低い氾濫平野となっている。右岸堤防は、58.8kより上流が特殊堤、下流が土堤防となっており、この付近で堤防損傷被害が生じた¹⁴⁾。

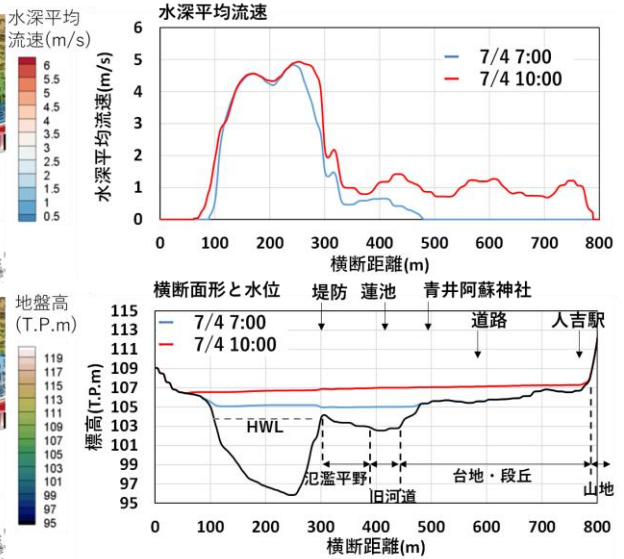
人吉地点の流量が5,300m³/sに達する7/4 7:00頃には、本川及びその背水を受けた山田川の水位が堤防天端高を超えて氾濫し、氾濫平野（図-8(a)の黄緑色）を中心に浸水域が拡がり始める。図-8(c)の水位横断分布より、浸水深は1～2mである。また、蓮池付近等で局所的に大きな流速が発生している箇所もあるが、この時点では、氾



(a) 治水地形分類図 (左) と被災状況 (青井阿蘇神社付近) (右)



(b) 氾濫流況



(c) 流速と水位の横断分布 (61k)

図-8 人吉市街地の治水地形分類図と氾濫流況特性 (解析結果)

氾濫の高流速発生箇所は堤防付近に限定される。58.8k 右岸付近では、台地・段丘から氾濫平野へと落ち込む流れによって、2m/sを超える高速流が発生しており、これが58.8k右岸堤防の損傷に繋がった可能性がある。

人吉地点の流量がピークに達する7/4 10:00頃になると、図-3に示した解析水面形から分かるように、山間狭隘部の背水による影響が顕著に現われる。更に、中川原公園及び橋梁による抵抗増大の影響も加わることで水位が上昇し、人吉市街地の氾濫域は更に拡大する。この時点になると、川から離れた箇所にある台地・段丘も浸水し、青井阿蘇神社も浸水するようになる。図-8(c)の流速と水位の横断分布に示すように、堤防が潜り状態になり、複断面流れの様相を呈する。河道中央の流速は7:00時点と大きくは変わらないが、河道と堤内地の境界付近(図-8(c)の横断距離300m付近)から堤内地にかけての流速は増大している。堤内地の家屋密集地帯では、大きな抵抗が働くため1m/s以上の高流速は発生していないが、蓮池や、河川と並走して東西に整備された道路では流速が1m/sを超えており(図-8(c)の横断距離600m付近)、これが家屋の損傷に繋がったと考えられる。

b) 山間狭隘区間 (坂本地点)

図-9に、狭隘区間 (坂本地区) の治水地形分類図と氾濫流況を示す。狭隘区間では、山地から供給された土砂で形作られた山麓堆積地形と、氾濫平野に該当する地域が、堤防等によって制御された宅地として利用されている。氾濫平野は、湾曲部内岸に形成された砂州であり、

古くから砂州の上が宅地開発されていた。しかし、浸水被害が頻発する水害常襲地帯となっていたことから、宅地等水防災対策事業等により、平成元年頃から宅地嵩上げ、堤防整備等が実施された(図-9(c)の下図の横断距離100~150m)。これにより、特殊堤天端を越えない7/4 6:00頃までは氾濫を免れることができた(図-9(c)、青色線)。しかし、ピーク付近となる7/4 10:00には、洪水水位が堤防天端高を大きく超え、浸水深は5mにも及んだ。また、河道湾曲内岸側を直進して流れたことで、堤内地で2~3m/sにも及ぶ高流速が生じ(図-9(c)、赤色線)、沿川家屋に甚大な被害をもたらした(図-9の写真)。一方、治水地形分類図を参照すると、損傷を受けた家屋の多くは氾濫平野に位置しており、山麓堆積地形に位置する家屋の多くは被害を免れていた。また、湾曲の川裏となる18k上流の右岸側、19k上流の左岸側の氾濫域では、0.5m/s以下の低流速域となっていたことが分かった。

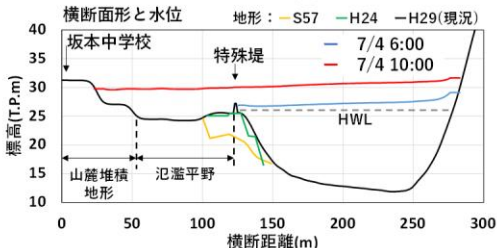
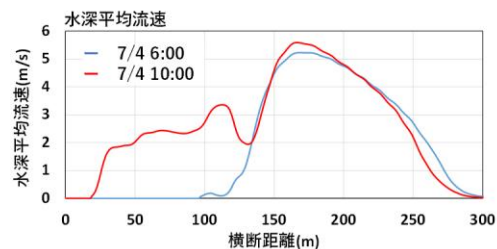
5. 結論

球磨川流域治水の検討に資するために、球磨川の地形特性、流れの特性を考慮し、複断面的蛇行流れに特有の河道と氾濫域を一体とした解析モデルを構築し、流域全体の洪水伝搬、氾濫被害特性を分析した。

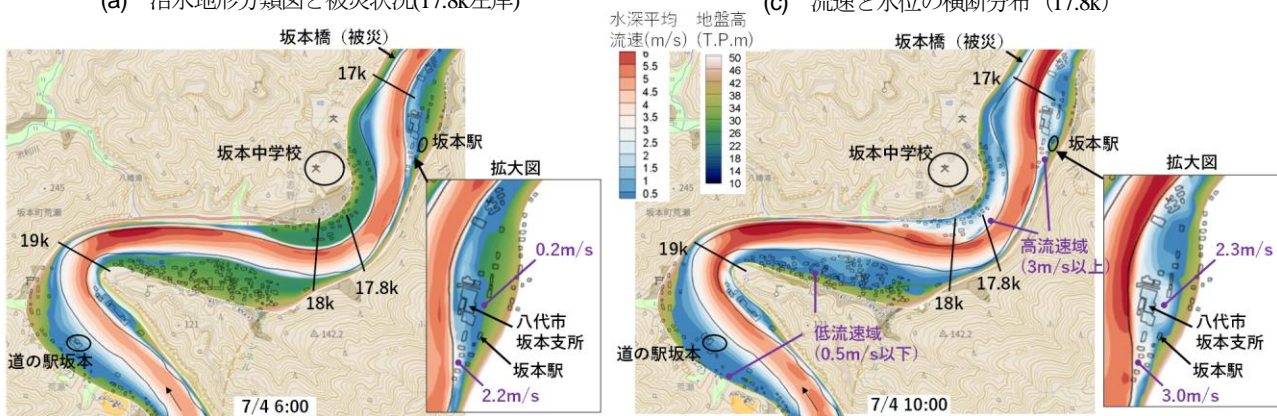
人吉盆地区間では、河道縦横断面形変化、河道から堤内地への氾濫・戻り、連続した橋梁群による抵抗の影響



(a) 治水地形分類図と被災状況(17.8k左岸)



(c) 流速と水位の横断分布 (17.8k)



(b) 氾濫流況

図-9 人吉市街地の治水地形分類図と氾濫流況特性 (解析結果)

が、洪水波形の縦断変化に顕著に表れる。このことは、当該区間では河道と氾濫域の流れを一体的に精度よく解く必要があることを意味している。人吉区間で大規模に氾濫した洪水流が狭隘区間に流入し、そこに支川群が合流する場合には、洪水波形が更に変形し、台形型の洪水波形が形成される特徴を有する。このような波形の変形を精度よく捉え、考慮した流域治水計画が必要である。

氾濫の多くは氾濫平野で起こっており、これは治水地形分類図を参照すればよく分かる。また、人吉市街地では、球磨川に平行して東西に走る道路や、段丘から氾濫平野に落ち込む箇所で大規模な氾濫流速が発生した。複断面的蛇行流れが形成された渡地区や狭隘区間の坂本地区では、蛇行部の内岸側に相当する箇所でも高速流が生じた。このような流れが家屋被害に繋がったことを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局, 熊本県: 第一回令和2年7月球磨川豪雨検証委員会, 2020.8.
- 2) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 3) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75.No.1, pp.61-80, 2019.7.
- 4) 長田 健吾, 福岡 捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会

論文集B1, Vol.68, pp.1-20, 2012.2.

- 5) 竹村吉晴, 久保宜之, 岡田将治, 福岡捷二: 洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究, 河川技術論文集, 26巻, pp.669-674, 2020.6.
- 6) 水井良暢, 三浦伸也, 山崎文雄, 自然災害情報室: 令和2年7月豪雨現地調査報告, 防災科学研究所調査速報, 2020.8.
- 7) 内田龍彦, 福岡捷二, 福島琢二, 田中正敏: 大型粗度上の浅い流れの平面二次元解析とその応用, 土木学会論文集, No.691.II-57, pp.93-103, 2001.11.
- 8) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, pp.607-612, 2007.2.
- 9) 田端幸輔, 福岡捷二, 吉井拓也: 平成27年9月鬼怒川流域における洪水流・氾濫流の一体解析に基づく水害リスク軽減策に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1399-I_1404, 2018.2.
- 10) 球磨川堤防調査委員会報告書, 2021.3.
- 11) 岡田将治, 福岡捷二: 複断面河道における洪水流特性と流砂量, 河床変動の研究, 土木学会論文集, No.761, II-67, 19-32, 2004.5.
- 12) 大本照憲: 令和2年7月九州豪雨災害の中間調査報告, 第65回水工学講演会河川災害シンポジウム, 2020.11.
- 13) 福岡捷二: 浸透破堤, 侵食破堤, 越流破堤の危険性の小さい堤防・河道の一体的設計法, 河川技術論文集, 26巻, pp.253-258, 2020.6.
- 14) 「令和2年7月豪雨」による災害の緊急調査速報, 土木技術資料62-11, 2020.

(2021.4.2受付)