

豪雨時における人吉市内の内水氾濫機構の分析 と被害軽減に向けた検討

ANALYSIS OF URBAN FLOODING MECHANISMS IN HITOYOSHI CITY
UNDER HEAVY RAINFALL AND STUDY FOR DAMAGE MITIGATION

福岡龍¹・福岡捷二²・赤池雄二³・万江尚幸⁴・山本修一⁵・鳥越輝喜⁶・
仲田裕一郎⁷・向田清峻⁸

Ryu FUKUOKA, Shoji FUKUOKA, Yuji AKAIKE, Naoyuki MAE, Shuichi YAMAMOTO,
Teruki TORIGOE, Yuichiro NAKATA and Kiyotaka MUKAIDA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程前期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

²フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授 (同上)

³人吉市水道局下水道課長 (〒868-8601 熊本県人吉市西間下町7-1)

⁴人吉市復興建設部 道路河川課長 (同上)

⁵前人吉市経済部 農林整備課長 (同上)

⁶人吉市総務部 防災課長 (同上)

⁷熊本県河川港湾局 河川課長 (〒862-8570 熊本県熊本市中央区水前寺六丁目18-1)

⁸国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所 流域治水課長
(〒866-0831 八代市萩原町一丁目708-2)

令和2年7月豪雨において、人吉市では球磨川等の外水氾濫により甚大な被害が生じた。一方で、内水氾濫によって避難行動が制限されていたことが指摘されている。今後、人吉市では、外水氾濫前に発生している内水氾濫時の住民の安全な避難が特に重要となる。このため、内水氾濫の状況やその機構を明らかにすることが第一義的に重要な課題である。

本研究では、令和2年7月豪雨時の人吉流域を対象に、降雨と地形を詳細に取り込んだ内水氾濫解析を行い、外水氾濫前の豪雨や市内を流れる水路網からの内水氾濫によって道路が浸水し、避難が難しい状況になっていたことを明らかにした。また、内水氾濫と流域水収支分布の分析から、上流域での貯留等が下流市街地の被害軽減に有効であることを示した。その上で、各地域の治水的課題の解決に合わせて、流域治水を進める上で重要となる貯留対策を検討する意義を述べ、有効な貯留空間を見出すために流域水収支分布図の作成とその活用が、地域の人々の理解と協働にとって重要となることを示している。

Key Words: Kuma River 2020 flood, Hitoyoshi city, inundation, integration analysis of urban basin, community planning for flood prevention

1. 序論

令和2年7月豪雨において、人吉市では全世帯の5分の1が浸水し、人的被害が21名（関連死1名を含む）に上る甚大な被害が生じた。田端ら¹⁾の球磨川本支川の洪水流と氾濫流の一体解析により、図-1に示すように、7月4日6時00分頃には球磨川本川とその背水を受けた山田川、6時30分には、万江川から外水が市街地へ流れ込み、市内の道路で流速1m/sを超える氾濫流が流下したことが明らかにされている。一方で、球磨川等からの外水氾濫前に、市内で内水氾濫が生じたことにより、避難行動が制限さ

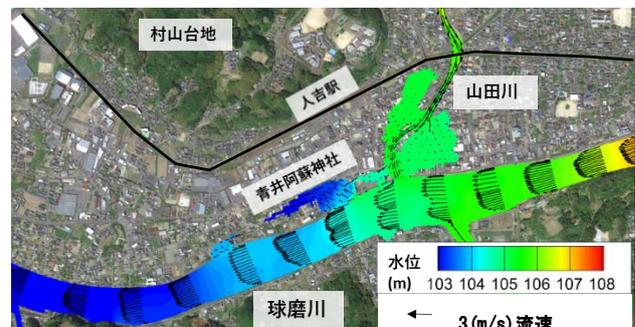


図-1 令和2年7月豪雨における6時00分頃の
外水流入の状況¹⁾

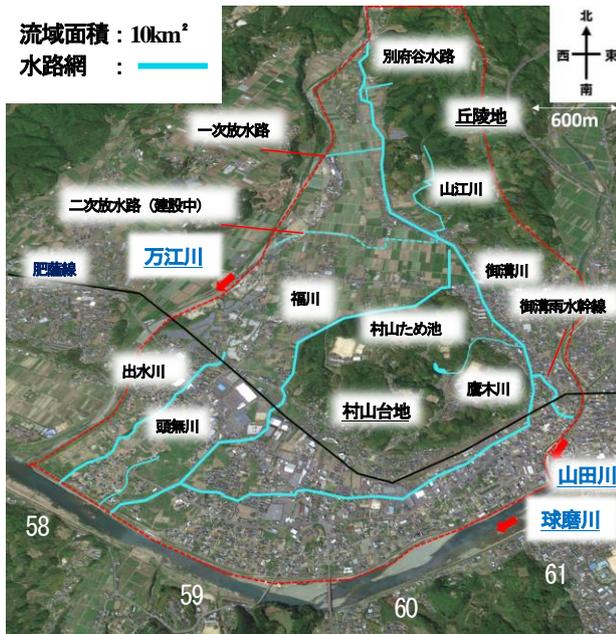


図-2 人吉市の流域図

れていたことが指摘されている²⁾。市内には、北部水田地帯から続く水路網が張り巡らされている。豪雨時には、水路網からの内水氾濫による道路冠水が高頻度で起こる等、内水氾濫対策は地域の重要課題の1つとなっている³⁾。人吉市では、内水と外水という異なる洪水外力に対する水防災・減災まちづくりを段階的に進めることになるが、外水氾濫発生前の住民の安全な避難は特に重要となる。このため、外水氾濫前に起こっている内水氾濫の状況やその発生機構を明らかにすることが第一義的に重要な課題となる。近年では、都市域を対象として、街路や下水道ネットワークを忠実に考慮した高精度な内水氾濫解析モデル⁴⁾が構築されている。人吉市の対象地域では、一部の市街化された区域において、幹線下水道が整備されているが、都市域のような地下の下水道施設や下水道網による排水機構とは異なり、図-2の空色で示す幅4m程の農業用水路等の既存施設を活用しながら球磨川等へ排水する機構となっている。本研究では、人吉市の内水域の雨水の集水過程や水路網の流れ、道路上を流れる氾濫流の挙動を詳細な解析メッシュを用いて解析することで、検証データが少なく、実態が十分に明らかになっていない令和2年7月豪雨時の内水氾濫現象を高精度に解明することを試みる。内水氾濫に続いて外水氾濫の発生が予想される場合には、解析精度が多少低下しても十分なリードタイムを持って安全な避難ができるような解析を行うことで、内水氾濫リスクを予め把握することが重要となる。詳細な地形情報や降雨の時空間分布を考慮した解析から各地点の真値に近い水理情報を取得することは、今後の避難に活用可能な内水氾濫予測モデルの構築に向けた教師データを与えることとなる。

このような洪水氾濫の集中する市街地帯を含めた流域治水を検討する上で、福岡⁵⁾は、各流域での施策を一体

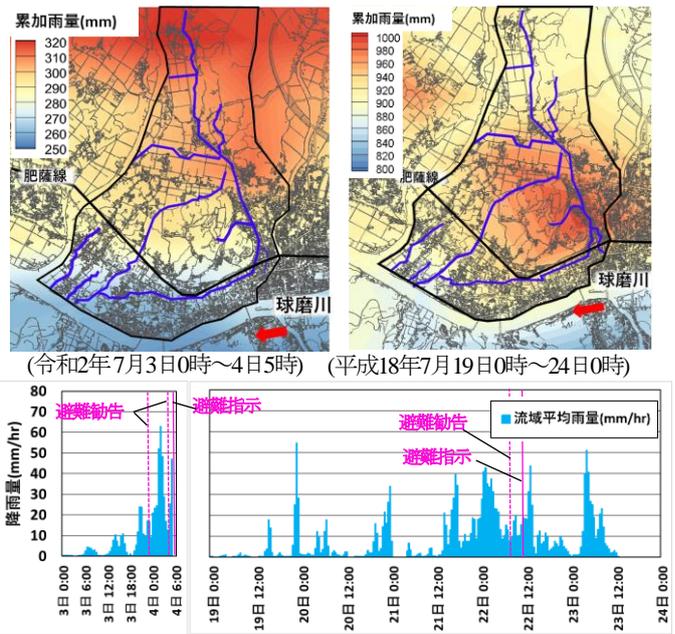


図-3 令和2年7月豪雨（左図）と平成18年7月豪雨（右図）の降雨の時空間分布

的に評価可能な水面形の観測と解析に基づく水収支分布図を作成し、これを用いた各支川流域も含めた対策の選択によって流域全体の治水を効果的に進めていくことを提案している。見上⁶⁾は、利根川上流域の本支川一体の水面形の観測と解析から、本川と支川群を含む流域全体での水収支分布図を作成し、利根川上流域の洪水水量の分担量や洪水流出特性を明らかにしている。そして、今後の各流域での治水対策を検討するために、流域水収支分布図の作成とその活用が有効であることを示している。

これらを踏まえ、本研究では、豪雨時の人吉市における詳細な内水氾濫解析及び水収支分布分析から水防災・減災まちづくりに資する情報を示すことを目的としている。また、降雨の特徴の違いによって、氾濫の機構や避難の考え方は異なることから、複数の外力に対する備えを検討することは水防災・減災まちづくりの基本となる。そこで、市内を流れる御溝川の河川整備計画⁷⁾や球磨川の内水対策検討⁸⁾等の外力として挙げられる平成18年7月豪雨を合わせて検討することで、降雨の違いが市内の浸水状況等に及ぼす影響を分析する。令和2年7月豪雨については、外水氾濫発生前の4日5時までの豪雨に着目する。

2. 人吉流域と対象豪雨の特徴

人吉流域の内水氾濫に関係する流域図を図-2に示す。図-2の赤い破線で示す球磨川58km～61km、山田川、万江川に囲まれた約10km²が対象となる。御溝川や出水川等の水路幅4m程の河川が水路網として市内を縦横に流れている。最も標高が低い出水川下流域や、台地や丘陵地から続く水路と合流する御溝川の中流域において高頻度で内水氾濫が生じている。図-3に令和2年7月と平成18年7

月豪雨の累加雨量コンター図と流域平均雨量の時間変化を示す。令和2年7月豪雨時には、上流域に降雨の空間分布が集中しており、下流市街地に比べて最大70mm程多くの雨が短時間に降っている。平成18年7月豪雨は、降雨が5日間継続して降り続いており、累加雨量が1000mmに達する降雨となっている。両豪雨ともに、村山台地や丘陵地、北部水田地帯に集中しており、このような小流域でも降雨の空間分布を考慮することが重要となる。

3. 内水氾濫解析手法

本研究では、村山台地や丘陵地からの降雨流出及び水路網の流れ、氾濫について平面二次元不定流解析法を全流域に適用し解析を行う。与える降雨については、図-3の30分毎の降雨量データが含まれる気象業務支援センターの解析雨量を用いて、流域を25分割し、降雨の時空間分布を考慮する。各水路の下流端には、田端りの球磨川本支川一体での洪水流・氾濫解析より得られた水位を与える。内外水位がゲート開度を超えた場合には、ゲートの算定式で流出量を求めている。粗度係数は、台地と丘陵地を0.06、それ以外の水路や道路等については一律に0.03を与えている。

また、雨水の集水過程や内水氾濫機構、避難路の浸水状況等を適切に評価するためには、詳細に地形を取り込み、各地点での水理情報を得ることが重要となる。市内を流れる御溝川や出水川等の水路網、避難路となる道路網、住宅群等を解析に考慮するために、レーザープロファイラデータ（オリジナル）及び河道データ⁷⁹⁾を参考に、対象領域全体を解像度約2mのメッシュを用いて詳細に地形を再現している。図-2の空色で示す幅4m程の水路を扱うため、水路に対応する箇所を1メッシュずつ河床高とし、水路内の流れを解析できるよう工夫した。住宅群の形状と標高は不透過な地形として取り込んでいる。更に、村山台地と丘陵地での減災対策等を検討するためには、その集水過程や台地等から続く水路との合流の影響を明らかにする必要がある。そこで、国土地理院が公表しているDEMデータを用いて、村山台地や丘陵地の地表面の形状を表現している。また、村山台地上のため池は御溝川と合流する鷹木川の源流であるため、適切に流出過程を扱う必要がある。ため池水帳を基に地形モデルを作成し、常時満水位を初期条件に与えている。そして、降雨が集水され、ため池水位が洪水吐高さを越えると接続される鷹木川へ雨水を自然排水させている。

また、令和2年7月豪雨のような高強度降雨が小流域に集中する場合には、表面流が支配的になるため、村山台地や丘陵地、平野部の地下浸透や浸透流は考慮していない。

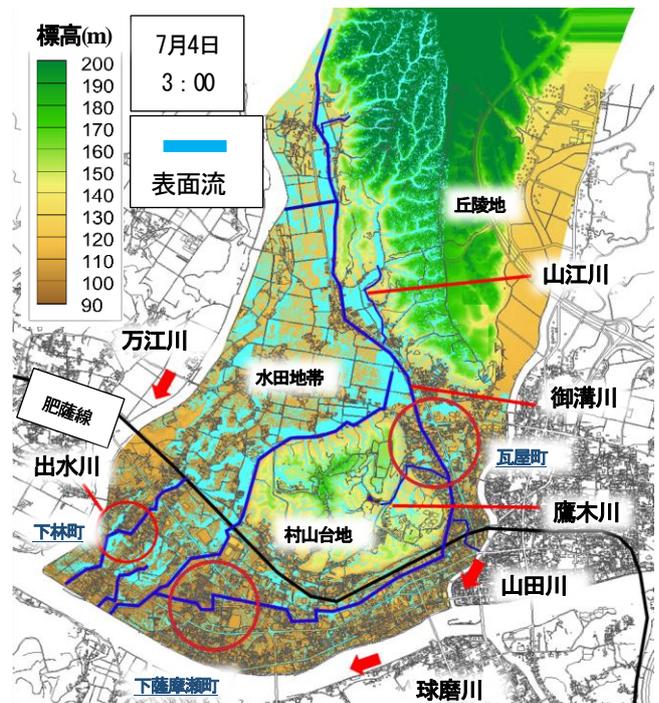


図-4 令和2年7月豪雨時の人吉流域の雨水の流れ

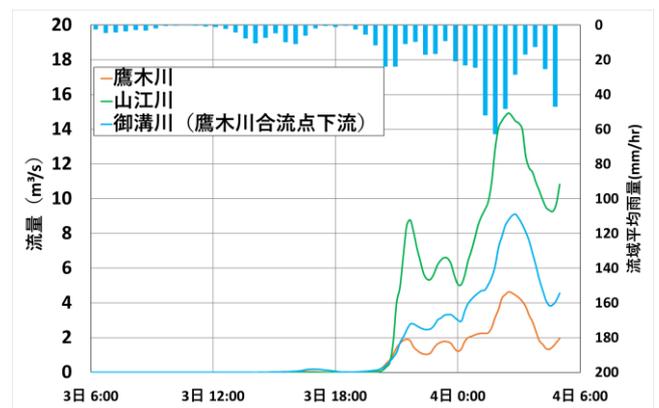


図-5 令和2年7月豪雨時の支流と御溝川の流量ハイドログラフ 別府谷水路

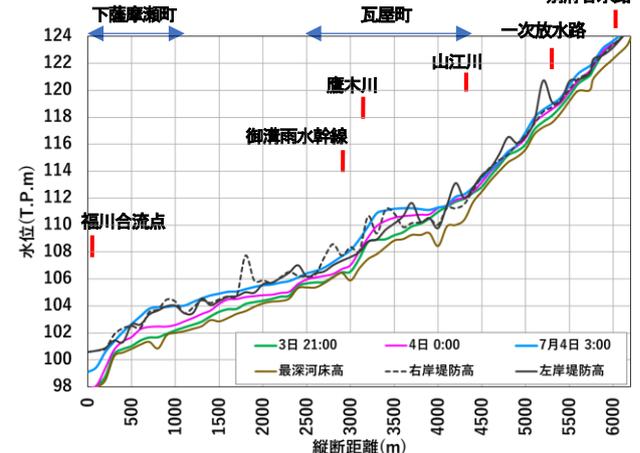


図-6 令和2年7月豪雨時の御溝川の水面形時系列変化

4. 令和2年7月豪雨時の内水氾濫機構の分析

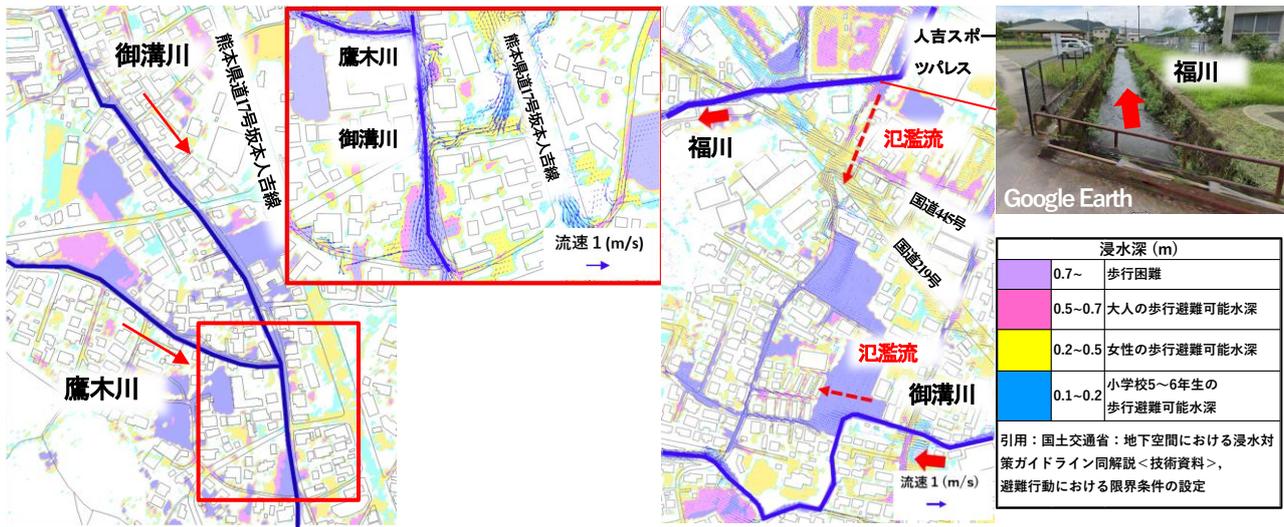


図-7 御溝川沿いの浸水状況(令和2年7月4日3:00, 左:瓦屋町, 右:下薩摩瀬町)

(1) 人吉流域における降雨流出特性

図-4は、標高コンターと解析による表面流(空色)を重ねることで人吉流域全体での雨水の集水過程を示す。ここでは、表面流として水深5cm以上流速0.1m/s以上で流れる雨水に着色している。村山台地や丘陵地、北部水田地帯から多くの雨水が地形に沿って流下していることが分かる。図-5は、丘陵地から流れ出る山江川、村山台地から流れ出る鷹木川、鷹木川合流点下流の御溝川の流量ハイドログラフを示す。山江川や鷹木川等の小河川は、市街地を流れる御溝川と合流する。内水氾濫が生ずる前の3日21時には、御溝川を流れる流量は約2m³/s程度であった。それに対し、降雨のピーク時には、山江川から15m³/s、鷹木川から4m³/sが流入することで、御溝川流量が急激に上昇している。また、御溝川の下流流量が山江川からの流入量よりも小さな値となるのは、山江川との合流点で氾濫が生じ、氾濫水の多くが水田部に流れ込んでいるためである。降雨と支流の流出の時間差に着目すると、降った雨が30分後には下流の御溝川に到達しており、短時間で大量の雨水が市街地に到達している。

(2) 内水氾濫機構と浸水状況の分析

図-6は、御溝川の水面形の時系列変化を示す。(1)で述べた山江川と鷹木川の合流点に挟まれる御溝川の瓦屋町区間で、水位が上昇している。この区間では、村山台地上から流れる鷹木川が直角合流し、御溝川の流れの抵抗となることで水位が上昇しており、その影響が上下流へと及んでいる。鷹木川合流点の上流区間では、河床高が周辺に比べて高く、合流に伴う背水の影響を受けやすい。下流区間では、御溝雨水幹線への流出によって水位が低減されることで急な水面勾配が生じている。これにより、降雨のピーク時に、沿川道路では氾濫流が流速0.8~1m/s程で流下した。図-7で示すように、瓦屋町の御溝川沿いの道路一帯は、歩行避難が難しい浸水深70cm以上で冠水している。また、御溝川の下流域の下薩摩瀬町でも、御

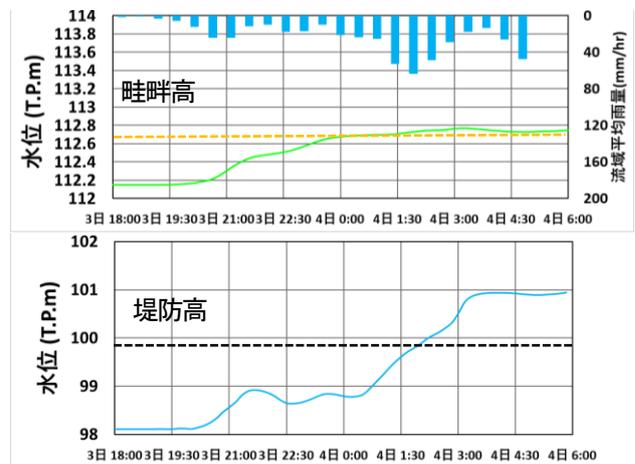


図-8 令和2年7月豪雨時の北部水田(上図)と出水川(下図)の水位ハイドログラフ

溝川と福川の水路幅が狭く流下能力の低い区間から氾濫が生じ、避難所となる人吉スポーツパレスに向かうための住宅前の避難導線で浸水深70cm以上となった。御溝川沿川の多くの地点で内水氾濫が生じ、避難時に危険な浸水状況となっている。

一方、南西部を流れる出水川は、図-4で示すように地形に沿って北部水田地帯からの多くの雨水が流入している。4日0時頃に水田水位が畦畔高を超えて流出し、下流の出水川の水位は4日0時30分頃から急激に上昇している(図-8)。その結果、図-9で示すように、4日3時には、出水川沿いの道路で氾濫流速0.5m/s、浸水深は70cmを超える状況となっている。避難情報との関係を整理すると、3日23時に球磨川より南側の山沿い地域に避難勧告、4日4時に市内全域に避難勧告、4日5時15分に市内全域に避難指示が発令されている(図-3)。つまり、水路網の沿川地域では、避難情報の発令前の降雨の強まる4日2時~3時には内水氾濫が生じていた。令和2年7月豪雨時、人吉流域では上流域に降雨が集中し、村山台地や丘陵地、北部水田地帯から多くの雨水が市街地を流れる水路へ流

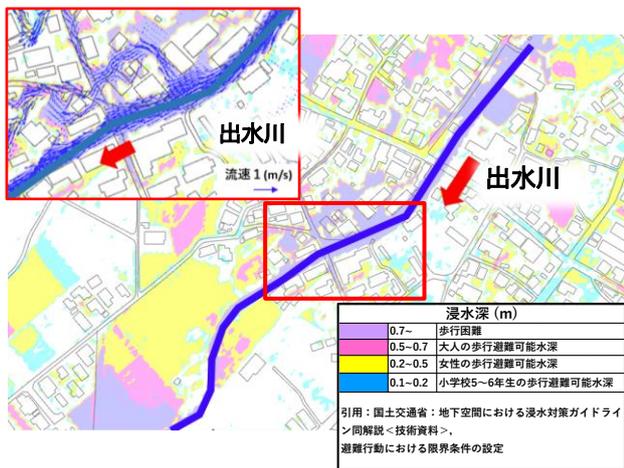


図-9 出水川沿いの下林町の浸水状況(令和2年7日3:00)

入することで、外水氾濫の発生より早い時間帯で内水氾濫が生じ、避難の難しい状況となっている。

5. 流域水収支分布の分析と平成18年7月豪雨との比較

(1) 令和2年7月豪雨の流域水収支分布

図-10は、流域の豪雨分布と内水氾濫解析より得られる令和2年7月豪雨時の人吉流域における水収支分布⁵⁰⁾の時空間変化を示している。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。総降雨量270万 m^3 に対し、樋門や樋管からの総排水量は68万 m^3 となっており、総降雨量の約70%が人吉流域内に存在している。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。そして、人吉流域内の70%の雨量をどのように貯めて、浸水を起こした量を低減させるかが重要となり、水収支分布図を用いることで、減災対策等の検討が可能となる。この点については、6章で詳しく述べる。更に、水収支分布図へ流域に含まれる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が可能となる。一例として、図-10では、降雨の降り方に対する御溝川沿川の瓦屋町の量の時間変化を茶の濃い色で強調している。

(2) 平成18年7月豪雨との比較

平成18年7月豪雨は、令和2年7月豪雨に比して、長期間にわたり降り続ける総降雨量の多い事例である。避難情報については、図-3に示すように、22日5時に市内の下薩摩瀬町の一部等に避難勧告、22日9時に瓦屋町の一部地域に避難指示が発令されている(人吉市提供資料)。この豪雨においても、市内水路で内水氾濫が生じ、図-

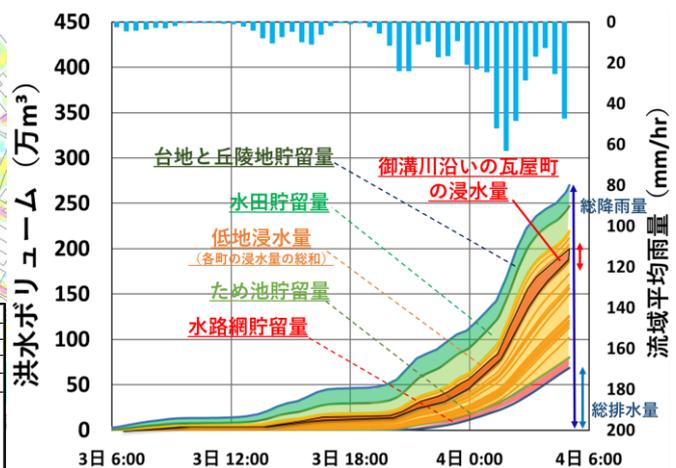


図-10 令和2年7月豪雨時の人吉流域の水収支分布図

7.9と同様な浸水状況となった。一方で、令和2年7月豪雨との違いは、この危険な浸水状況に至るまでの時間の長さにある。例えば、図-9の出水川沿いの道路は、令和2年7月豪雨時には、降り始めから1日前後で内水氾濫が生じ、歩行避難の難しい状況となっている。平成18年7月豪雨では、22日3時と降り始めから2日～3日を要している。人吉流域全体としては、避難のリードタイムが長い豪雨であった。図-11は、平成18年7月豪雨時の人吉流域の水収支分布図を示す。比較のため、令和2年7月の水収支分布図と同一の時間と洪水ボリュームのスケールで示している。平成18年7月豪雨は、総降雨量が900万 m^3 程と洪水ボリュームの非常に大きい豪雨となっており、市街地の浸水量も最大で158万 m^3 と大きな値となる。しかし、黄色で示す市街地の浸水量が急峻な傾きで増加する令和2年7月豪雨に比べ、ゆるやかに増加している。そのため、令和2年7月豪雨のように、流域内の浸水量が急激に増加した場合には、避難時間が短いため大きな問題が生じたと考える。

6. 被害軽減に向けた考察

5章では、各豪雨の流域水収支分布図を示し、その比較を行った。図-11のように、異なる降雨外力に対して水収支分布図を作成することで、降雨ごとの流域の洪水流下特性と洪水水量の分担量を比較・検討することが出来る。平成18年7月豪雨は、令和2年7月豪雨に比べて、総降雨量が3倍程であるが、降雨の時間分布の違いから総排水量が大きく、市街地の最大浸水量は1.1倍程度になっている。一方で、避難時に問題になるのは、市街地の浸水量の増加速度である。そこで、令和2年7月豪雨のような流域に降雨が短時間で集中した場合に、水路網への雨水の集中と浸水量の急激な増加を抑制することが第一に重要となる。人吉市の内水氾濫は、4章の氾濫機構の分析より、村山台地や丘陵地、北部水田地帯等の上流域から豪雨流出の影響を大きく受けることが分かった。

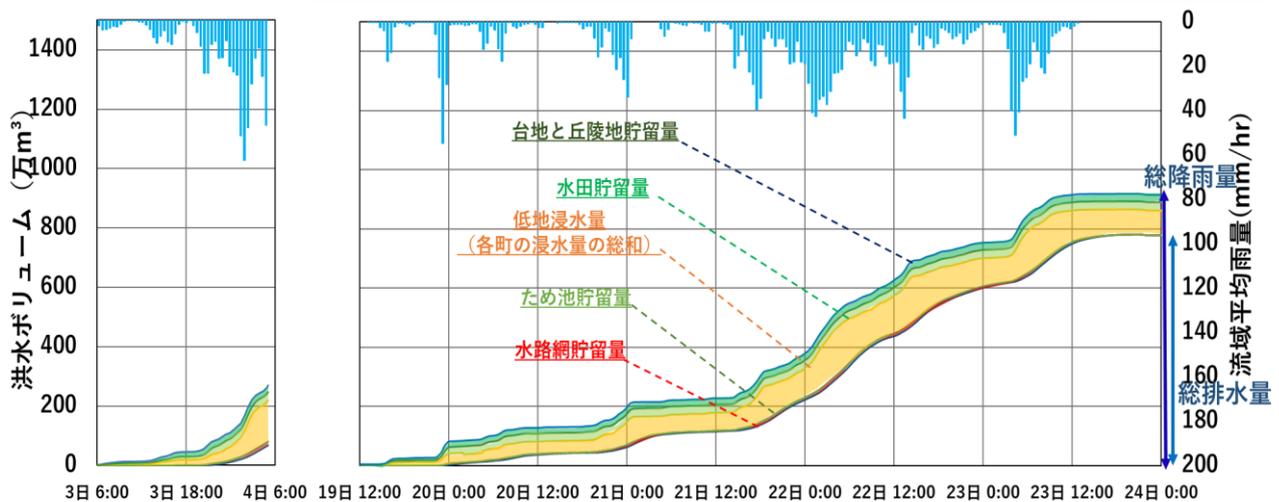


図-11 令和2年7月豪雨(左)と平成18年7月豪雨(右)の水収支分布の比較

このため、内水問題解決のためには、水収支分布図の緑や薄緑、黄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上流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。これらにより、内水氾濫の被害軽減や避難時間の確保につながるものとする。その上で、水収支分布図を対策前後で比較することで、減災対策の効果を地域の人々と議論していくことが水防災・減災まちづくりを進める上で重要な視点となる。さらに、各地域が抱える治水的課題の解決に向けて、適切な場所に貯留空間を見出すことを各主体が行い、加えて河川事業等のあらゆる対策と協働し、地域の治水効果を高めながら、それらを統合化することで流域全体の治水安全度を向上させることが望まれる。これらを通じて、治水とまちづくりを一体的に考える流域治水が進められるものとする。

7. 結論

令和2年7月豪雨において、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、外水氾濫が発生する前に内水氾濫によって、避難が難しい状況になっていた。平成18年7月豪雨との比較から、短時間に高強度降雨が集中する豪雨では、市街地の浸水量が急激に上昇するため、避難時に問題が生じやすいことを明らかにした。その上で、内水氾濫に続いて外水氾濫の発生が予想される場合には、内水氾濫の初期段階で避難を行うことが特に重要となる。このため、令和2年7月の豪雨分布に対して本解析で得られた各地点の詳細な浸水深や氾濫流速等を教師データとして、十分なリードタイムを持った避難に活用可能な内水氾濫予測モデルを構築することが今後の課題となる。

人吉市の内水問題の解決に向けては、流域水収支分布の時空間変化の分析から、上流域の貯留対策を通じて下流市街地に到達する洪水流量の低減やピークを遅らせること等が有効であることを示した。水防災・減災まちづくりに資する流域治水を進めるためには、豪雨時に市街地で生ずる内水氾濫機構を解明し、各地域が抱える治水的課題の解決とともに、流域治水を進めていく上で重要な貯留対策を合わせて検討していくことが重要となる。その上で、有効な貯留空間を見出すために、流域水収支分布図の作成とその活用が、地域の人々の理解と協働にとって重要となる。

参考文献

- 1) 田端幸輔, 後藤岳久, 竹村吉晴, 酒匂一樹, 福岡捷二: 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狹隘区間の集落の被害分析, 河川技術論文集第27巻, pp.597-pp.602, 2021.
- 2) 人吉市HP: 地区懇談会だより vol.1(広報ひとよし6月号), 薩摩瀬地区ご意見(第1回, 第2回)
- 3) 国土交通省: 第6回球磨川流域治水協議会, 資料2, pp.13, 2022.
- 4) 関根正人: 住宅密集地域を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.2, I_70-I_85, 2011.
- 5) 福岡捷二: 近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える, 河川技術論文集第28巻, pp.457-pp.462, 2022.
- 6) 見上哲章, 水草浩一, 西澤洋行, 安達孝実, 福岡捷二: 利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解析—流域治水への活用に向けて—, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.2, I_427-I_432, 2021.
- 7) 熊本県: 御溝川河川整備計画検討業務報告書, 2008.
- 8) 国土交通省: 球磨川内水対策検討資料, 2010.
- 9) 熊本県: 平成18年度洪水浸水想定区域調査業務報告書, 2009.

(2023. 3. 24受付)