

河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職
		田井明（たいあきら）	福岡工業大学	准教授
②研究テーマ	名称	山間狭窄部における超過洪水に対する人的被害最小化のための方策に関する研究		
③研究経費 （単位：万円） ※端数切り捨て。		令和 4 年度	令和 5 年度	合 計
		2 2 0 万円	2 2 0 万円	4 4 0 万円
④研究者氏名				
氏 名		所属機関・役職（※令和 5 年3月31日現在）		
押川英夫		佐賀大学・准教授		
三島伸雄		福岡大学・教授		
橋本彰博		福岡大学・准教授		
齋田倫範		鹿児島大学・准教授		
⑤技術研究開発の目的・目標				
令和 2 年 7 月 3 日から 7 月 31 日にかけて、日本付近に停滞した前線の影響で、日本各地で大雨になり、人的被害や物的被害が発生した。九州地方では 7 月 4 日から 8 日にかけて記録的な大雨となり、九州地方の多くの地点で、24, 48, 72 時間降水量が観測史上 1 位の値を記録した。特に、球磨川中流域人吉盆地では 7 月 4 日に大規模な洪水氾濫が発生し、甚大な被害が生じた。九州地方における死者・行方不明者は計 79 名（死者 77 名、行方不明者 2 名）で県別では熊本県が最も多く 67 名で、次いで大分県が 6 名、長崎県 3 名、福岡県 2 名、鹿児島県 1 名であった。ここで、人的被害は避難の方法・タイミングの他に住宅の浸水・流出状況に大きく影響を受けると考えられる。今次水害でも住宅の浸水・流失等の被害も発生しているが、現行の建築基準法は氾濫流に対する規定はなく、洪水時の住宅の安全対策や危険性などの検討は遅れているのが現状である。 そこで、本研究では、令和 2 年 7 月球磨川流域の被害をモデルケースとして、建築学と土木工学の協働により住宅の耐水害性の力学的な検討、氾濫シミュレーションの高精度化手法の開発を行い住宅の安全性や水平・垂直避難の適切な選択方法を検討していく知見を得ることを目的とする。 （調査・研究内容及び成果） 本研究では、3 つのサブテーマを実施する。 ■令和 2 年 7 月の球磨川流域の人的被害拡大要因の分析 球磨川流域の人的被害発生状況および家屋の被害情報（人吉盆地、球磨川狭窄急流部）を整理し、住宅被害と人的被害発生要因についてまとめる。 ■住宅の耐水害性の力学的な検討 模型実験および 3 次元数値実験により氾濫流と住宅の力学的特性を検討する。抗力係数および抗力算定のために使用する流速の定義について検討する。 ■住宅の耐水害性を検討するための氾濫シミュレーション技術の開発 氾濫流の 2 次元シミュレーションにおいて 2. で検討した流速を適切に算出するための格子サイズおよび微地形などの必要解像度について検討を行う。				

⑥研究成果

1. 住宅被害と人的被害の検証による人的被害拡大要因の分析

本研究では、洪水関連で溺死された方が非常に多い人吉市街地に着目し、人的被害とその発生要因を検討した。まず、人吉市内の被害状況・氾濫過程を検証するために、洪水痕跡高調査の結果を図1に示す。洪水痕跡高は痕跡が明瞭なものおよび住民の方の証言や写真、SNSでの情報などを照らし合わせながら最大水位として確定できるもののみをスタッフにより測定したものである。洪水痕跡位置の地盤高および堤防高はRTK-GNSSにより測量した。洪水痕跡調査より、人吉市街地では直近の球磨川本川堤防上約2~3mの痕跡水位が広範囲に確認できた。

次に、表1に人的被害者の年齢、性別、住所、発見場所を整理したものを示す。人吉市での溺死人数は19人でそのうち自宅内で亡くなったのは10人であったことから逃げ遅れが過半数の要因となっていることが分かる。地区毎では、下林町と下青井町の犠牲者は全て自宅内で亡くなっていた。屋外で発見された方々の中には、自宅が全壊し氾濫流に流された事例や避難中に車で氾濫流に流された事例が確認された。また、一度、避難所に避難したがペットが心配になり自宅に戻られて被災し、犠牲になられた事例もあった。

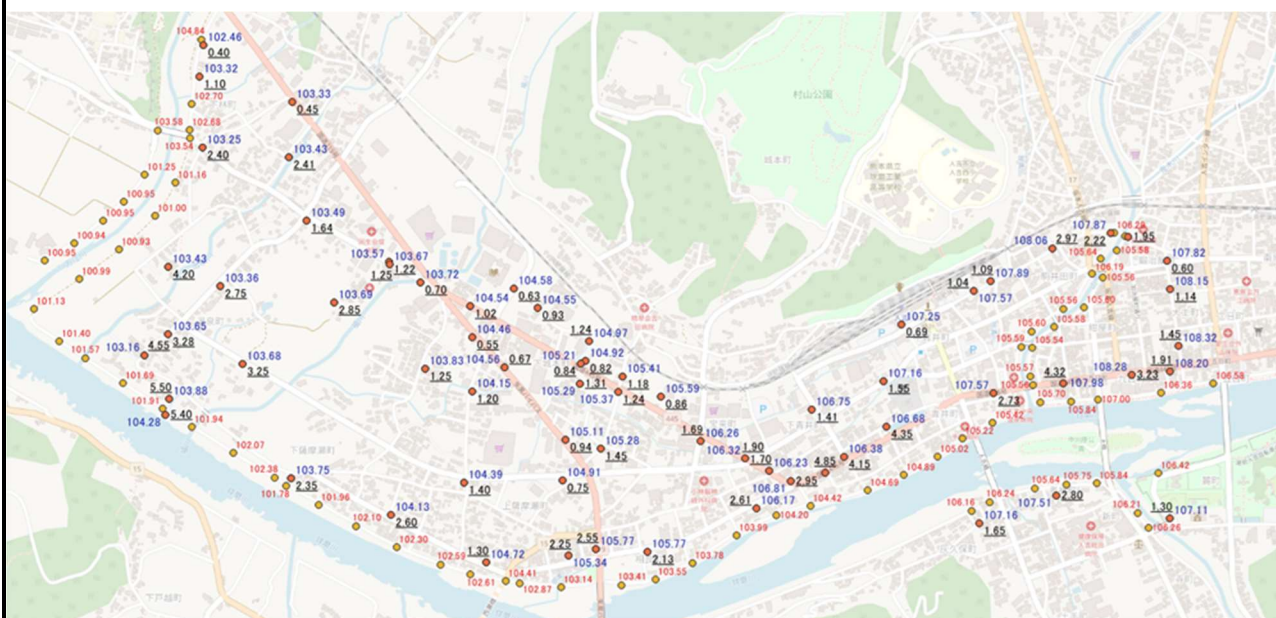


図1 洪水痕跡高の調査結果 黒字：浸水深，青字：浸水水位（標高），赤字：堤防高（標高）

表1 人吉市内における人的被害の状況

年齢	性別	住所	発見場所	場所区分
70	女	人吉市 老神町	自宅内	自宅内
83	男	人吉市 老神町	自宅内	自宅内
67	男	人吉市 下青井町	自宅内	自宅内
77	男	人吉市 下青井町	自宅内	自宅内
92	女	人吉市 下青井町	自宅内	自宅内
85	男	人吉市 下林市	自宅内	自宅内
82	女	人吉市 下林市	自宅内	自宅内
84	男	人吉市 下林町	自宅内	自宅内
62	男	人吉市 下林町	自宅内	自宅内
88	男	人吉市 紺屋町	自宅内	自宅内
74	女	人吉市 下薩摩瀬町	温泉町	自宅外
83	男	人吉市 下薩摩瀬町	温泉町	自宅外
80	男	人吉市 下薩摩瀬町	下林町	自宅外
79	女	人吉市 下薩摩瀬町	下林町	自宅外
65	男	人吉市 上薩摩瀬町	下青井町	自宅外
81	男	人吉市 下薩摩瀬町	下薩摩瀬町	自宅外
50	女	人吉市 相良町	上薩摩瀬町	自宅外
61	女	人吉市 中神町	同町自宅前	自宅外
57	女	人吉市 紺屋町	同町屋内	自宅外

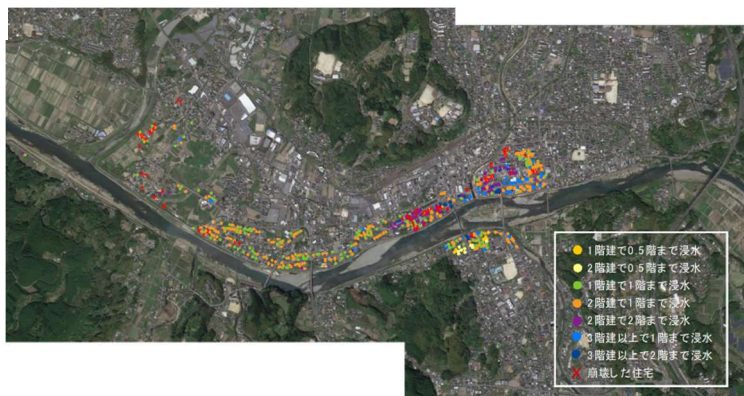


図2 人吉市内における住宅の階数と浸水状況

2. 数値・室内実験による住宅の耐水害性の力学的な検討

前節の考察からも今次災害では浸水開始後に水平避難と垂直避難の適切な選択が難しかったと考えられる。垂直避難においては建築物が洪水流に耐えられるかどうかが重要になる。加えて、自宅内で亡くなっているケースも多く発生しており、住宅内への浸水が人的被害を拡大させたと考えられる。洪水時の住宅内への浸水は住宅周りの浸水位の高さの他に氾濫流が構造物へ衝突し、速度水頭が位置水頭へ変換されることで局所的に浸水深を増大させ、被害を拡大させたと考えられる。特に、人吉市街地においては球磨川に沿って氾濫流が高速で流れたことからこの局所的な浸水深の増大が顕著に生じていると考えられる。このことを定量的に示すために数値流体解析ソフトウェア OpenFOAM を用いて構造物に氾濫流が衝突した際の水位や流速の変化について検証を行った。解析は自由表面の変化について検討するため、VOF 法を用いた二相流ソルバーを用いた。

シミュレーションでは住宅に見立てた直方体の内部構造物に、真正面から水流を当てることで、住宅地の氾濫流を再現した。氾濫流は、流入の断面積と初速度を与えることで再現した。内部構造物の幅を 5m にした結果を以下の表-1 に示す。氾濫流の流速が速くなっても、構造物直前での流速ある値に漸近していく様な、挙動を示した。エネルギーの多くが位置水頭へと変換される可能性がある。1m の流れであれば住宅 1 階(2.5m 程度)同じ高さの水位となることが分かった。このような局所的な浸水深の増大は構造物内への浸水をより急激で大きなものにすると考えられる。

住宅に働く流体力の適切な算出方法について提案することを最終目的とし、窓や部屋割りの有無を考慮した住宅模型を作成し、室内実験によって家屋一棟にかかる流体力と水位上昇量を検討した結果を報告する。

住宅模型は一般的な 2 階建て一軒家を想定し、8cm (幅 b) $\times$ 6cm (奥行き l) $\times$ 8cm (高さ k) の中空直方体 (case1)、中空直方体に窓を設けた場合 (case2)、窓と部屋を設けた場合 (case3) の 3 パターンの模型を作成した (縮尺比 1/70)。模型の底面に三分力計を設置し、 x , y , z の各方向の模型にかかる力を求めた。また、水位上昇量を求める際には、ポイントゲージを使用し、模型直前の水位から模型から 1m 上流側の水位を引いた値を水位上昇量とした。実験では模型の 1m 上流地点の水深が 4cm (1

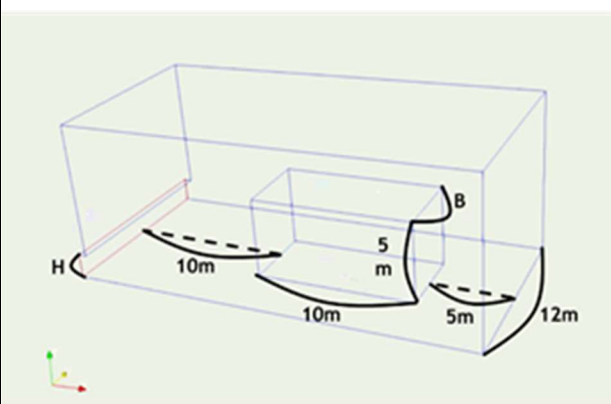


図3 計算領域およびモデル構造物の諸元

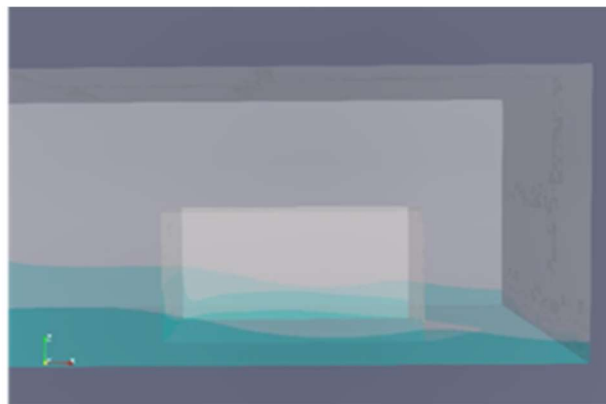


図4 氾濫流の挙動の一例

階部分が浸水する想定) となるように水路下流端の堰を調節し、フルード数 Fr が 1.0 以下になるように流量条件を設定した。実験から算出した流体力と水位上昇量からフルード数 Fr と流加方向の抗力 F_x 、フルード数 Fr と鉛直方向の抗力 F_z 、フルード数 Fr と抵抗係数 CD 、レイノルズ数 Re と抵抗係数 CD 、フルード数と水位上昇量を表すグラフとして、結果をそれぞれ(図-4 から図-8)に示す。

図 5 のフルード数 Fr と流下方向の抗力 F_x のグラフからは、フルード数の増加とともに抗力も増大しているが、Case1 に比べて Case2, Case3 の場合には抗力が低下していることが分かる。

図 6 のフルード数 Fr と鉛直方向の効力 F_z では、窓を設けると内部に水が入ってくるため、水の重さが模型に加わることで鉛直上向きの力が小さくなる。また、部屋を設けると模型から水が出にくくなるため、鉛直上向きの力はより小さくなる。なお、中空直方体において $Fr > 0.5$ の範囲で F_z が増大しているが、これは水位が 4cm を上回り、2 階部分まで水が流れ込んだ水の重量が影響していると推察される。

図 7 からは、フルード数またはレイノルズ数が大きくなるにつれどの模型も抵抗係数の値が 2.5 程

度に収束していることがわかる．窓を設けた方が中空直方体よりも少し小さい値をとる傾向にあることがわかる．

フルード数と水位上昇量の関係を図 8 に示す．全てのパターンでフルード数が大きくなるほど水位上昇量が大きくなっているが、窓を設けたモデルでは、水が通り抜けるため、構造物近傍の流れが複雑になり水位上昇量が大きくなる．また、勾配を変えて流量を大きくしたところから上昇量が 1cm を上回り、2 階部分まで水が流れ込んでいる結果となった．

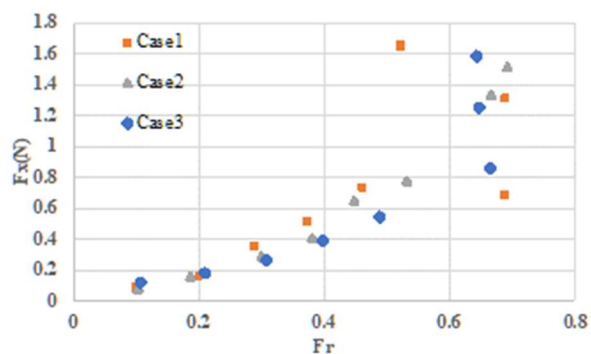


図5 フルード数 Fr と鉛直方向の効力 F_z
(鉛直下向きを正とする)

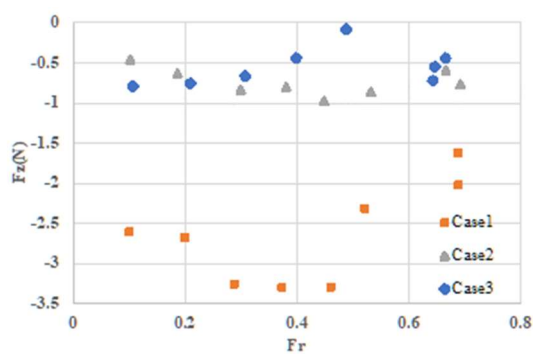


図6 フルード数 Fr と抵抗係数 C_d

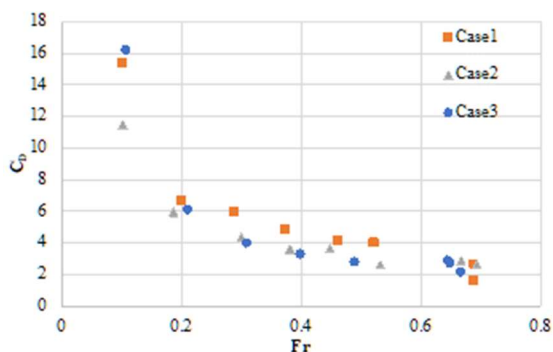


図7 フルード数 Fr と抵抗係数 C_d

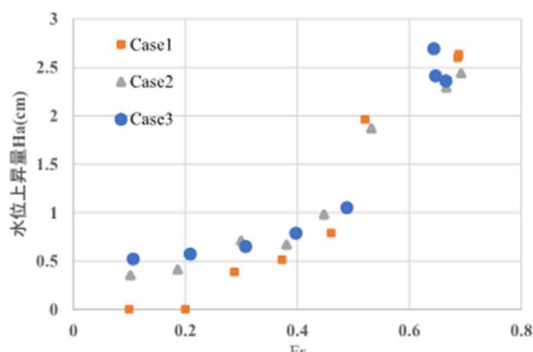


図8 フルード数と水位上昇量

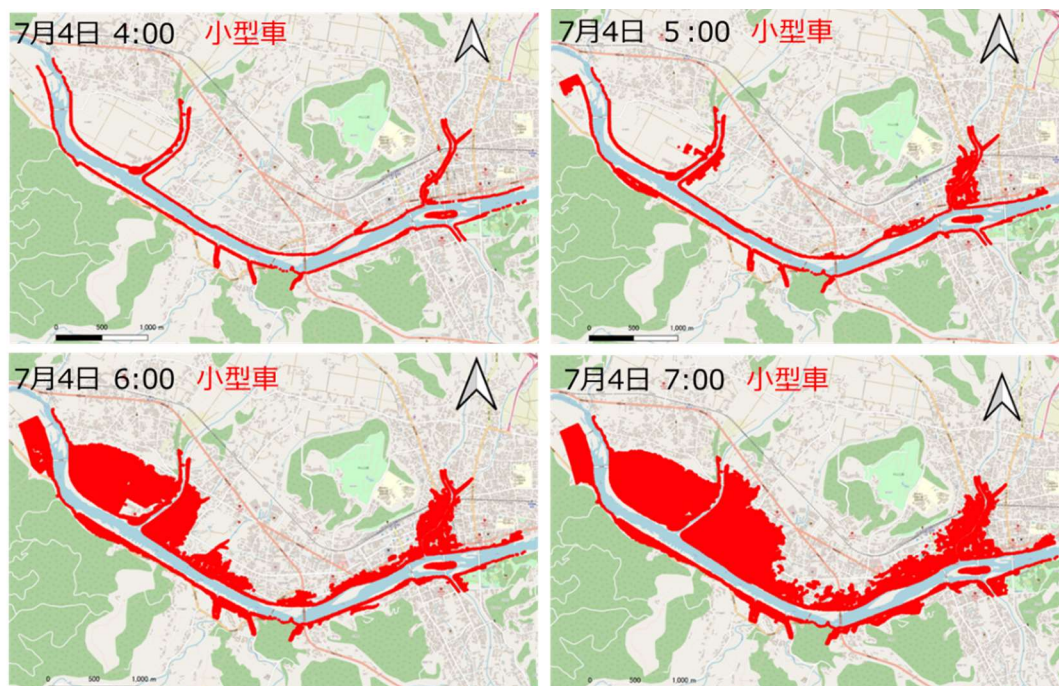


図9 自動車の走行不能箇所の分布

3. 車の走行危険性および住宅の耐水害性を検討するための氾濫シミュレーション技術の開発

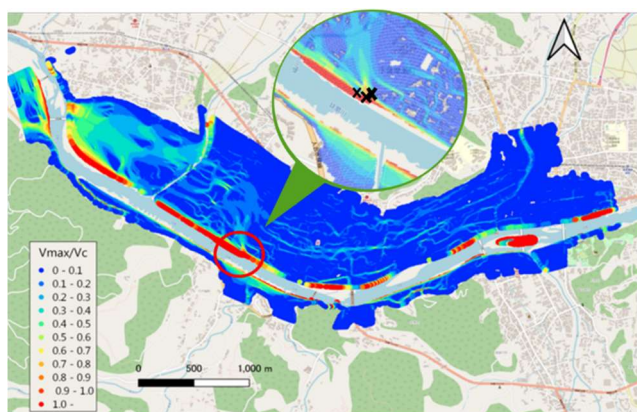


図 10 氾濫流に対する構造物の崩壊危険度

人吉市街地での詳細な氾濫状況を把握するため、河川数値シミュレーションソフトウェア iRIC のソルバーの一つである Nays2DFlood を用いた。まず、大領域として人吉橋から球磨川渡水位観測所までの範囲を、計算格子サイズ $10\text{m} \times 10\text{m}$ で解析を行った（図 5）。構造物は、数値情報ファイルからポリゴンデータとしてインポートし、本川流量は、人吉観測所の予測データを用いた。支川からの流入流量は、貯留関数法により流域毎に求めたものを与えた。また、解析領域下端の水位変化は渡観測所のデータが欠損していたため、国土交通省発表データより予測を行った。解析は令和 2 年 7 月 3 日 12 時から



48 時間分の計算を行った。次に、構造物の影響をより高解像度に表現するために、解析領域を人吉橋から天狗橋に限定し、格子を $5\text{m} \times 5\text{m}$ とした解析を行った（図 5 の緑枠内）。下流端水位は大領域の解析で得られた結果を用いて設定した。球磨川と支川である山田川及び万江川との合流部を中心に大規模な氾濫が生じており、最大浸水深も大きくなっていることが分かった。また、構造物を考慮した場合の氾濫流の流れは、建物を横切るように流速を増大させて流れており、建物が密集している領域の内部では流速は小さくなっていることが確認できた。

既往の研究により冠水時の自動車通行の危険性について、押川ら（2011）の研究結果を元に検討を行った。図 8 に自動車の走行不能箇所を示す。赤色が小型車の走行不能箇所を示している。7 月 4 日 4:00 頃から市街地に浸水が始まったことで走行不能箇所が発生し始め、その後、3 時間で急激に範囲が増えていることが分かる。

現在、わが国の建築物は津波や洪水、高潮による氾濫流に対して耐水構造設計がされていない。桑村（2017）は、氾濫流により生じる水平抗力が、風圧力や地震力と同様の性質を持つと考え、構造物の危険度判定を行う手法を示した。本研究ではそのなかの木造 2 階建、住宅幅 10m の結果を用いて崩壊危険度の解析を行った。その結果を図 10 に示す。球磨川沿いに崩壊危険度（最大流速 V_{max} / 崩壊流速 V_c ）が 1 を超える領域もあるが、多くの場所で 1 以下であり安全であると判断できる。これは、実際の氾濫時に当該領域内で構造物の被害は少なかったことと整合している。一方、特に危険な地域であると示された領域では実際に建物の崩壊や流出が見られたことから、定性的には確度の高い危険度判定が行われていると考える。一方、球磨川狭窄部においては、抗力による崩壊危険度が 1 を上回る場合もあることが分かる。さらに浮力のみを考えた流出危険度に至っては解析領域のほぼ全域で流出危険度が 1 を上回る結果となった。以上の研究成果を踏まえ、自宅もしくは近くの 2 階建て以上の構造物（住宅）に垂直避難の判断をするタイミングの考え方は地域で異なり、以下のように考え方を整理した。

■人吉市街地：構造物の崩壊・流出の危険性が高い地域はある程度絞られるため、その危険性が低い地域や建物（RC 造など）の場合は垂直避難に切り替えたほうが安全なケースも想定される。

■球磨川狭窄部：同様に膝高さ程度（50cm 程度）以上の水深がある場合は流速が大きいことから、徒歩のみならず車で避難でも危険性が伴うが、木造家屋の場合、崩壊、流出の危険度もかなり高いため、安全に移動できる範囲の相対的に安全な建物（場所）への垂直避難を行うことが望ましい。

⑦研究成果の発表状況・予定

国際会議、学会等における発表状況

山本理子，田井明

「令和２年７月豪雨時の人吉市街地における自動車走行及び住宅の危険度判定」

令和４年度土木学会西部支部研究発表会，令和５年３月４日，熊本大学

⑧研究成果の社会への情報発信

現在のところ特にありません。

⑨表彰、受賞歴

現在のところ特にありません。

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

本研究では、令和2年7月球磨川流域の被害をモデルケースとして、建築学と土木工学の協働により住宅の耐水害性の力学的な検討、氾濫シミュレーションの高精度化手法の開発を行い住宅の安全性や水平・垂直避難の適切な選択方法を検討していく知見を得ることを目的とする。

特に氾濫シミュレーションの際の、最適な構造物や道路などの考慮の仕方について知見を得ることが可能になっている。今後、洪水時の流水が、住宅によりどのような阻害を受けているのかを明らかにし適切な阻害率の設定方法を提案することが必要である。

住宅の危険度判定では、土木工学の氾濫流の数値シミュレーション技術に建築学の知見を取り入れることで、危険度の評価および数値モデルによる詳細な検討を実施することが可能になった。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

・住宅の耐水害性に関する提案

次年度以降、室内実験&数値シミュレーションにより特定都市河川法施行規則にある想定洪水時の構造耐力を確認するための計算式や抗力係数などの設定により算出される浸水被害防止区域で規制される基準が、球磨川流域（人吉盆地&山間狭窄部）において、妥当なのか検証することが可能になる。その検証結果を用いて、球磨川流域内の住まいや防災拠点のあり方（構造・材質等）への提言につながれると市町村の復興計画にも寄与できる可能性がある。例えば、中流の山間狭窄部における、宅地かさ上げ時の住宅構造や宅地範囲等の整備内容検討への活用が期待される。

・住民の避難行動への寄与

住宅の耐水害性と関連するが、避難方法を考える上での活用が考えられる。住宅構造（木造 or RC 構造、平屋 or 2階建て等）から垂直避難が可能なのか、水平避難をするべきなのか判断する基準を示すことが可能になる。また、水平避難が必要な場合、避難にあたっての有効な避難経路やタイミングを決定するための基礎情報を提示することが出来る。

・住民へのリスク情報提示による避難行動促進

住民の避難につながるようなリスク情報として、行動制限の発生（徒歩移動や自動車移動、避難不可能状態）を示すことが可能になった。氾濫解析シミュレーションを行う上で住宅の阻害率を設定する必要があるが、適切な阻害率設定にあたって、より実現象に近く参考となるような考え方（阻害率の設定の仕方）を提案可能になる。