

令和2年度 科学研究費助成事業・特別研究促進費

令和2年7月九州豪雨災害の総合調査・研究 報告書



令和3年3月

研究代表者 大本照憲（熊本大学）

目次

第1編	災害概要	1
第2編	気象・水文グループ	13
第3編	土砂・流木災害グループ	59
第4編	河川災害グループ	113
第5編	構造物被害グループ	209
第6編	避難・避難所グループ	241
第7編	今後に向けた提言	295

第1編

災害概要

研究代表者 熊本大学 大本 照憲

第1章 本研究の目的と研究体制

熊本大学 大本 照憲
石田 桂

1.1 はじめに

令和2年7月には暖かく湿った空気が梅雨前線に流れ込み九州を中心に日本各地で豪雨を引き起こした。特に、7月4日には球磨川流域を中心に激しい豪雨が生じ、甚大な被害をもたらした。詳細は後章で解析結果を示すが、今次の球磨川流域における雨量の空間分布特性として、7月3日から4日の間で400mm～500mmの雨が一樣に降ったことが挙げられる。人的・物的被害では、消防庁災害対策本部のまとめによれば2020年7月20日付けで、熊本県における令和2年7月豪雨によって死者65名、行方不明者2名、住家被害は全壊557棟、半壊43棟、床上浸水5895棟、床下浸水1990棟であった。特に、河道部と堤内地が一体となった球磨村渡地区、八代市坂本地区および下釜瀬地区においては住家の流失が顕著であった。また、洪水痕跡から人吉市における国宝・青井阿蘇神社の楼門では1.5mの浸水であった。人吉市史によれば寛文9年(1669年)8月に青井阿蘇神社の楼門が3尺(0.9m)余り浸水したとされている。境内の標高は近辺の道路より2.8m高い位置にあり、約350年間では今次の水害が最大規模であることが認められた。一方、近年との比較では青井阿蘇神社の近傍における道路標識に記された洪水痕跡から浸水深は、昭和40年では2.3m、昭和57年では1.3mに対し、今次の水害では4.3mであり、人吉市においては圧倒的に浸水被害が拡大したことが分かる。今次の豪雨災害では、災害発生前のリスクマネジメント、発生後のクライシスマネジメントにおいて被害最小化と効率的復興に向けた多くの課題や教訓が含まれており、今後のわが国の防災・減災のあり方に及ぼすインパクトは大きい。

1.2 目的と研究内容

本研究において、(1)気象・水文学的課題：今次豪雨をもたらした気象条件及び発生機構と解明、被害の起因となった降水量及び流出の特性の分析、(2)地盤工学的課題：山腹崩壊の素因の分析・地域特性の解明、流木災害のリスク評価、堤防などの破壊機構の分析、(3)河川工学的課題：洪水痕跡および氾濫流速の実態解明、流下能力を大幅に上回る流量における河道部洪水流、盆地および谷底平野の氾濫流の解明および河川災害軽減策の検討(4)構造工学的課題：橋梁被害の実態・特徴の分析、洪水時の農地の活用方法の検討、人的被害を低減させる建築的対処の検討、(5)危機管理、災害情報学・災害復興的課題：コロナ禍での避難生活を含む災害発生直前、発生時、発生後の各主体の今回の災害への対応状況の実態の解明を行っていく。

本研究では、今次災害の調査研究を行い上記の課題に取り組むことにより、広域に亘り豪雨をもたらした気象条件・発生機構、一級河川において過去に類を見ない水位上昇をもたらした降雨流出プロセス、豪雨による土石流・流木の発生メカニズム、急流河川における洪水流・氾濫流と激甚化した流木による被害拡大メカニズム、これらによる構造物の被災メカニズムと水・土砂災害対策のあり方などについて、今後の防災・減災技術に関する基礎的・基盤的な知見を得るとともに、情報の収集と発信状況およびそれに基づく避難行動を整理し、今次の被災地のような山間地における地域防災の課題を抽出し、今後の

第1編

豪雨災害に対する防災・減災策に資する技術や情報を提示する。

以上の課題は、これまでの豪雨災害の調査・研究において明らかになっておらず、これらの解明を行うこと自体が本研究の学術的な特色・独創的な点である。また極端気象時代の豪雨災害に対する適応策および緩和策は、わが国の今後の防災・減災において極めて重要な課題であり、これに対して有益な知見を与え得る本研究の成果は学術的・社会的に大きな意義を持つものと考える。

1.3 研究体制

本研究では、図 1.1 に示すように気象・水文、土砂・流木災害、河川災害、構造物被害、避難・避難所の5グループからなる「研究組織」で推進する。地方公共団体との協力関係を構築するために基本的に九州地区の研究者らが中心となり、他の地区の研究者らが補佐をするという体制をとる。先行調査を率先して行っている地盤工学会・令和2年7月九州北部豪雨地盤災害調査団の団長、土木学会水工学委員会・令和2年7月九州北部豪雨災害調査団の団長・副団長・幹事、熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センターのセンター長・部門長が研究分担者に含まれており、連携を介して実質的にはより包括的かつ全国的な研究実施体制となっている。

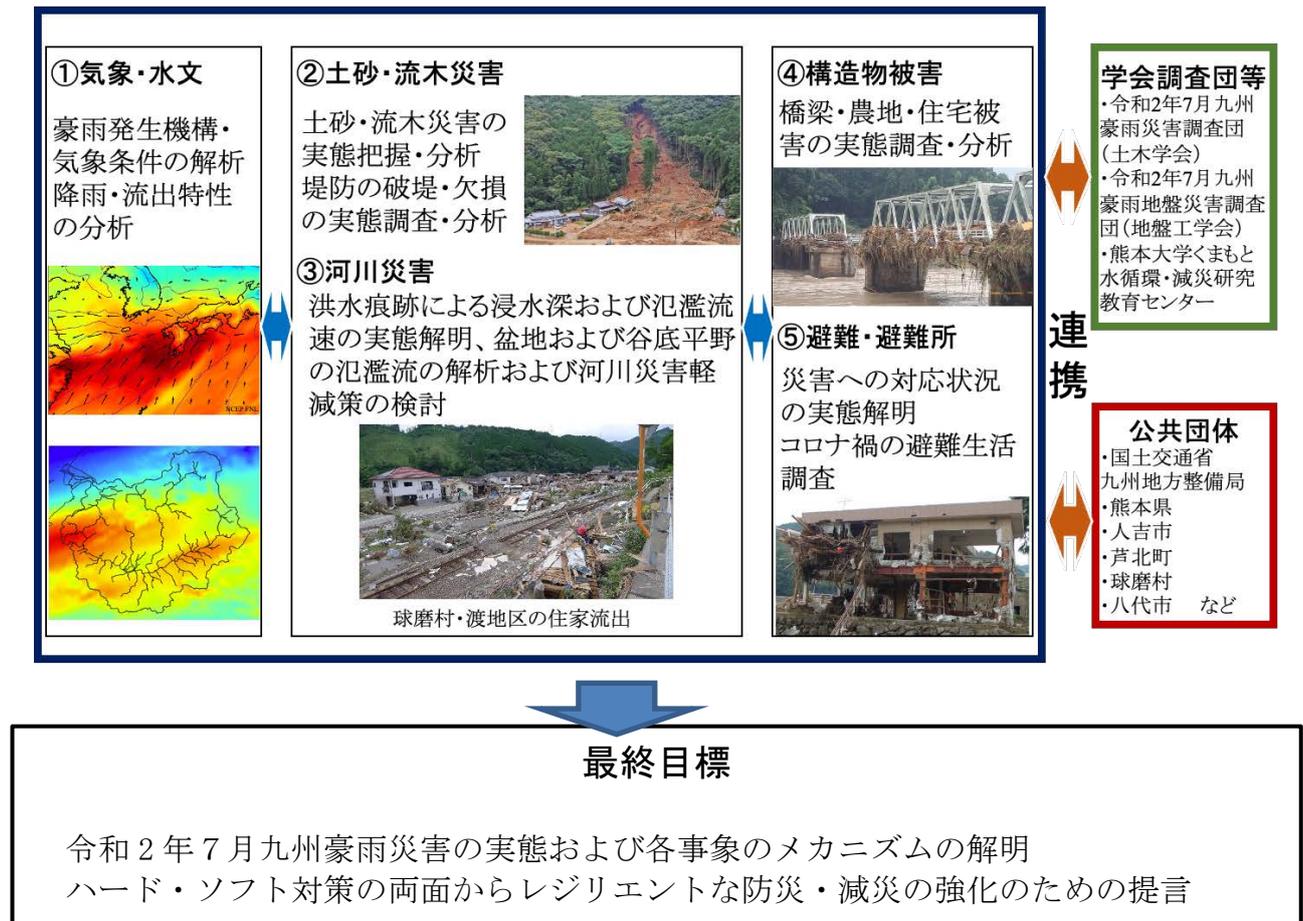


図 1.1 各調査・研究グループの研究内容と相互の関係及び外部機関との連携

第1編

各調査・研究グループの調査・解析等の研究概要は次の通りである。なお、各グループには各グループの研究推進を担当するグループリーダーを配置している。以下において研究者に付した下線はグループリーダーを示す。

気象・水文グループ（石田・竹見・上米良・栃本）

近年観測技術や数値計算手法が発展してきているが、未だに豪雨の高精度な予測は非常に困難である。一方、防災・減災のためには豪雨予測の精度向上が不可欠であり、予測精度向上には発生した豪雨の発生メカニズムを詳細に解析することが重要となる。今次豪雨では、梅雨前線に暖かく湿った空気が流れ込んだだけでなく、梅雨前線上に低気圧が存在し影響していたと考えられている。そこで、大気再解析データ、気象庁地上・高層気象観測データ、レーダー観測データ、領域気象モデルシミュレーション等を用い、過去の類似した気象条件との比較等を含め複数の観点から、令和2年7月豪雨における主に九州地方で発生した豪雨の発生機構及び豪雨発生時の気象条件の解析を行う。さらには、今次豪雨における降水の分布特性や流出特性が被害の大きさに影響していた可能性があり、それらの特性を把握することは今次豪雨災害の特徴を把握する上で重要であり、また本研究課題の他のグループの重要な入力となる。そこで、今次豪雨における降水特性と流出特性の把握を行う。

土砂・流木災害グループ（椋木・矢野・山崎・安福）

土砂災害・流木災害の発生要因もしくは発生源を調査することは防災・減災に重要となる。今次豪雨において芦北町と津奈木町の周辺では崩壊が多発しているが同量以上の降雨があった可能性のある内陸部山地にはほとんど崩壊が発生していないが、既存の知識ではこの差を説明できない。また、球磨川では河川堤防が破堤したり欠損したりしており、筑後川では破堤には至っていないもののパイピングが発生している。そこで、電気探査等をはじめとした物理探査、海岸線沿いに明瞭に露出する亀裂系・断層系・地質ユニットの調査を行う。また、被災した堤防の堤体土と基礎地盤を構成する土質の水分特性と締固め特性を明らかにする。さらには、球磨川の急流区間で流水に加えて流木等が混じることによって建物の破壊の規模が大きくなったものと推測され、八代海には大量の流木が流出による漁業被害も発生した。そこで、ロジスティックモデルによる流木発生量推定法を適用して発生流木量の推定を試みる。

河川災害グループ（竹林・重枝・朝位・岡田・辻本・二瓶・川池・平川・矢野）

今次の豪雨災害では、熊本をはじめ、福岡、大分、佐賀など九州の広い範囲で洪水・土砂・流木の氾濫が発生した。特に熊本では、流下能力を大幅に超えた量の水が人吉・球磨盆地を貫流したことにより河道と堤内地の境界が判別出来ないような状態で水が流れ、球磨川に沿った人吉市街地や球磨村では大量の土砂を含んだ氾濫事象が発生した。また、山地域では土石流による土砂の氾濫が多発するとともに、谷底平野を勢いよく洪水流が流れ下り、河道周辺の道路の損壊や橋梁・家屋の流出が発生した。有明海に面する平野部ではポンプによる排水能力以上の豪雨となり、内水氾濫が発生した。さらに、八代海への土砂流入による海底地形の変化や沿岸域の構造物への流木等の堆積によって、構造物の消波機能等の低下も危惧されている。このような計画規模を大幅に上回る豪雨及び洪水流による氾濫・破壊・流出現象は発生頻度が低いため十分な知見が蓄積されていない。そこで、本グループでは、各地の氾濫流の水深・流速の実態を現地調査及び衛星画像で把握するとともに、流下能力を大幅に上回る流量における河道、盆地および谷底平野での洪水流下特性を現地調査と数値シミュレーションで明らかにする。また、流域からの土砂・流木などの流出特性も現地調査と数値シミュレーションで明らかにする。最後に、これら

第1編

の結果に基づいて計画規模を大幅に上回る豪雨及び洪水時における河川災害軽減策について検討する。

構造物被害グループ（松村・西嶋・濱・友清）

今回の豪雨災害では、河川氾濫と土砂崩れにより橋梁、住宅の流失、水利インフラに重大な被害が発生した。本研究グループでは、土木インフラ、農業インフラ、住宅など構造物被災・損傷状況や水流や土砂流の発生状況、痕跡を現地調査し、国や県による緊急調査結果からは明らかにすることが困難な、構造・立地・地理的な条件と各種構造物の被災状況の関係、損傷に至った過程を明らかにする。急がれている復旧・復興に際しても有用な知見となる、構造物被害に伴う二次災害や人的被害を低下させるために可能な構造物的対処の可能性、洪水緩和機能を担う地理的条件を明らかにし、洪水に対して脆弱な地点の遊水地としての活用の可能性について検討する。また、これらを総合的に評価し、激甚化する気象災害に対する、早期復旧や人命確保のための構造物のあり方についても検討する。

危機管理、災害情報学・災害復興グループ（柿本、畑山、竹内、吉田）

令和2年7月豪雨では、全国で死者・行方不明者85名を出す大規模な災害となった。特に4日未明から朝にかけての猛烈な雨が降った熊本県南部の人吉、球磨、芦北、八代では死者・行方不明者は65名と甚大な被害が発生しました。本研究グループでは、熊本県南部を中心に避難情報等の発生状況、それに伴う住民の避難行動、またコロナ禍での避難生活について現地ヒアリングとアンケート調査を行う。そのことにより、災害発生直前、発生時、発生後の各主体の今回の災害への対応状況の実態を明らかにすることを目的とする。

なお、各グループの調査では、国交省や地方自治体が災害査定を目的に調査する可能性のある地形測量、構造物被害、洪水痕跡等とは異なり、災害の本質であるメカニズムの解明を目的としている。そのため、本研究で実施する計測や調査などは、研究遂行のため早急な実施が必要なものや、現象解明等、学術的に必要なものに限定された。例えば、河川管理者が被災直後には測定しないものの、流出土砂量や分級現象の推定において重要な河床材料の粒径などは早急に実施する必要があった。

表 1.1 各調査・研究グループの各メンバー構成及び所属・役職，専門分野，役割分担

	氏名	所属・役職	専門分野	役割分担
代表	大本 照憲	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授	河川工学	総括
気象・水文グループ	石田 桂	熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・准教授	水文学	水分移動の解析
	竹見 哲也	京都大学・防災研究所・准教授	気象学	豪雨の特性・発生機構と気象条件の解析
	上米良 秀行	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・特別研究員	水文学	降雨と被害の関係の分析
	栃本 英伍	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・特別研究員	気象学	メソ低気圧の特徴と豪雨の関係
土砂・流木災害グループ	椋木 俊文	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授	地盤工学	土砂・流木グループの統括・土-水の相互作用による土構造の破壊機構分析
	矢野 真一郎	九州大学・工学研究院・教授	水工学	球磨川流域での流木災害リスク評価，筑後川でのダムの異常洪水時防災操作の効果検証
	山崎 新太郎	京都大学・防災研究所・准教授	応用地質学	斜面災害の素因分析
	安福 規之	九州大学・工学研究院・教授	地盤工学	堤体土の不飽和物性値の評価と適用
河川災害グループ	竹林 洋史	京都大学・防災研究所・准教授	水工学	流体现象を伴う土砂災害
	重枝 未玲	九州工業大学・大学院工学研究院・准教授	水工学	洪水氾濫プロセスの再現と急流河川流域での災害リスクの検討
	朝位 孝二	山口大学・大学院創成科学研究科・教授	防災水工学	衛星画像を用いた流域被災状況の解析
	岡田 将治	高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・准教授	河川工学	洪水はん濫被害調査分析
	大本 照憲	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授	河川工学	河道地形が洪水流に与える影響
	平川 隆一	前橋工科大学・工学部・准教授	水工学	谷底平野や盆地の氾濫流解析および洪水被害分析
	辻本 剛三	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授	海岸工学	沿岸域への影響
	二瓶 泰雄	東京理科大学・理工学部・教授	河川工学	洪水氾濫状況と人的・物的被害の関係の把握
川池 健司	京都大学・防災研究所・准教授	防災水工学	内水氾濫発生機構とその対策	
構造物被害グループ	松村 政秀	熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・教授	構造工学	インフラ被害調査
	西嶋 一欽	京都大学・防災研究所・准教授	自然災害リスク工学	土砂崩れによる住宅被害分析
	濱 武英	京都大学・農学研究科・准教授	農業土木	農業施設等の被害
	友清 衣利子	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授	建築構造	土砂崩れによる住宅および人的被害分析
避難・避難所グループ	柿本 竜治	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授	土木計画学	避難行動分析
	竹内 裕希子	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授	地域防災学	避難所・学校・福祉施設の課題整理
	畑山 満則	京都大学・防災研究所・教授	防災情報学	避難行動分析
	吉田 護	長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・准教授	土木計画	自治体の危機管理

参考文献

総務省消防庁：令和2年7月豪雨による被害及び消防機関等の対応状況(第55報)，2021。

https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/210107_oame55.pdf（令和3年2月24日閲覧）

第2章 災害の概要

熊本大学 大本 照憲

1.1 人的・住家被害

令和2年7月豪雨による各都道府県における人的被害・住家被害を表2.1に示す（総務省消防庁，2021）。今次豪雨における人的被害は全国で死者が84名，行方不明者が2名，負傷者（重傷者及び軽傷者）が77名であった。また，住家被害は全国で全壊1,621棟，半壊4,504棟，一部破損3,503棟，床上浸水1,681棟，床下浸水5,290棟であった。住家被害では特に熊本県及び福岡県の被害が多く，熊本県では全壊1,490棟，半壊3,092棟，一部破損1,940棟，床上浸水329棟，床下浸水561棟であった。また，福岡県では全壊14棟，半壊992棟，一部破損977棟，床上浸水681棟，床下浸水1,920棟であった。全壊は熊本県が全体の92%，半壊が69%を占め，福岡県の半壊の棟数は全体の22%を占めた。さらに，人的被害は熊本県に集中していた。熊本県における死者が65名であり全体の77%を占める。死者は大分県で6名，長崎県で3名，福岡県で2名，鹿児島県で1名であり，九州地方で全体の92%を占めている。このように今次豪雨は全国的に被害をもたらしたが，熊本県を中心とし九州地方での被害が特に大きかったと言える。

熊本県における市町村別の人的被害・住家被害を表2.2に示す（内務省，2021）。熊本県内の住家被害は特に人吉市で大きかった。人吉市における全壊900棟，半壊1443棟，一部破損286棟，床上浸水309棟，床下浸水164棟であった。住家被害は次に芦北町で大きく，全壊72棟，半壊910棟，一部破損559棟であった。ただし，全壊を見ると球磨村が332棟であり，人吉市の次に大きくなっている。一方，人的被害は，球磨村で死者が25人と最も多い。次に人吉市で20人であり，芦北町で11人である。国土交通省九州地方整備局・熊本県（2020）によれば，熊本県の死者のうち50名が球磨川流域内と推測されている。

1.2 球磨川流域における施設被害・浸水面積

国土交通省九州地方整備局および熊本県（2020）によれば，今次豪雨により球磨川水系82河川のうち53河川，299箇所において河道埋塞，堤防決壊，側方侵食，護岸の一部欠損などの施設被害が報告されている。被害総額は106億円と見積もられている。施設被害は，上流部で80箇所，人吉地区で76箇所，中流部で117箇所，川辺川筋で26箇所と，中流部で最も多くなっている。また，橋梁は17橋の流出が確認されており，国道や鉄道にも大きな被害をもたらしている。浸水面積は，球磨川流域で約1,050haと推定されている。このうち，人吉市が約518ha，錦町が約290ha，相良村が約220ha，球磨村が約70ha，八代市が約25ha，あさぎり町が約20ha，芦北町が約5haである。浸水面積は人吉市が最も大きい。

表 2.1 令和2年7月豪雨による都道府県別人的被害・住家被害（総務省消防庁，2021）

都道府県	人的被害					住家被害					
	死者	行方不明者	負傷者		合計	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水	合計
			重傷	軽傷							
	人	人	人	人	人	棟	棟	棟	棟	棟	棟
青森県										1	1
岩手県									1	28	29
秋田県								3	10	77	90
山形県			1		1	1	62	7	150	555	775
福島県				1	1					26	26
栃木県										0	0
群馬県								1			1
埼玉県								77		2	79
千葉県										2	2
東京都									3		3
神奈川県				1	1			6	1	9	16
新潟県									3	49	52
富山県	1				1					1	1
福井県										3	3
山梨県										4	4
長野県	1		2		3		1	4	5	109	119
岐阜県			1	1	2	6	36	85	31	304	462
静岡県	1				1		2	41	12	59	114
愛知県							1	8		20	29
三重県								9	7	8	24
滋賀県									1	12	13
京都府				2	2		1	7		29	37
大阪府								4		1	5
兵庫県						2			4	1	7
奈良県									1	2	3
和歌山県				1	1			3		6	9
島根県						2	40	3		52	97
岡山県							1			17	18
広島県	2		2	1	5	1	11	15	4	111	142
山口県							4		17	192	213
徳島県						1					1
愛媛県	2			1	3	1	2	34	5	67	109
福岡県	2		5	4	11	14	992	977	681	1920	4584
佐賀県				3	3	2	9	7	25	144	187
長崎県	3		1		4	4	3	4	124	136	271
熊本県	65	2	10	34	111	1490	3092	1940	329	561	7412
大分県	6		1	1	8	68	209	202	129	469	1077
宮崎県						4	3		2	13	22
鹿児島県	1			4	5	25	35	66	136	300	562
合計	84	2	23	54	163	1621	4504	3503	1681	5290	16599

表 2.2 令和2年7月豪雨による熊本県内の市町村別人的被害・住家被害（内務省，2021）

都道府県	市町村	人的被害					住家被害					
		死者	行方不明者	負傷者		合計	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水	合計
				重傷	軽傷							
人	人	人	人	人	棟	棟	棟	棟	棟	棟		
熊本県	熊本市								1		6	7
	八代市	4	1		19	24	147	160	97			404
	人吉市	20		9	10	39	900	1443	286	309	164	3102
	荒尾市							133	105			238
	水俣市							11	108			119
	玉名市							8	18			26
	山鹿市	2			1	3		8	19	1	7	35
	菊池市						1	2	2			5
	宇城市								1		48	49
	天草市				4	4		24	232	18	166	440
	合志市							1				1
	南関町							39	8			47
	長洲町										2	2
	和水町							1	27		15	43
	南小国町							9	29			38
	小国町						3	29	20		40	92
	産山村								1		1	2
	西原村								1			1
	南阿蘇村										2	2
	甲佐町										5	5
	山都町								1			1
	芦北町	11	1			12	72	910	559			1541
	津奈木町	3				3	4	12	89			105
	錦町							64	75			139
	多良木町						1	8	15		50	74
	湯前町								41		1	42
	水上村							1	4		6	11
	相良村						18	90	75			183
	五木村						1			1	5	7
	山江村						11	14	20			45
球磨村	25		1		26	332	74	51			457	
あさぎり町							51	55		43	149	
合計	65	2	10	34	111	1490	3092	1940	329	561	7412	

参考文献

国土交通省九州地方整備局・熊本県：第1回令和2年7月球磨川豪雨検証委員会説明資料，2020.

http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/site_files/file/bousai/gouukensho/200825shiryoku1.pdf

http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/site_files/file/bousai/gouukensho/200825shiryoku2.pdf

http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/site_files/file/bousai/gouukensho/200825shiryoku3.pdf

http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/site_files/file/bousai/gouukensho/200825shiryoku4.pdf

(令和3年2月24日閲覧)

総務省消防庁：令和2年7月豪雨による被害及び消防機関等の対応状況(第55報)，2021.

https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/210107_ooame55.pdf (令和3年2月24日閲覧)

内閣府：令和2年7月豪雨による被害状況等について，2021.

http://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/pdf/r20703_ooame_40.pdf (令和3年2月24日閲覧)

第2編

気象・水文グループ

グループリーダー	熊本大学 石田 桂
研究分担者	京都大学 竹見 哲也 防災科学技術研究所 栃本 英伍 上米良 秀行
連携研究者	防災科学技術研究所 飯塚 聡 大東 忠保

第1章 概要

熊本大学 石田 桂

気象庁の発表によれば、令和2年は梅雨明けが平年値より非常に遅く、沖縄や奄美地方を除いて7月末付近であった。梅雨明けは九州南部でも7月28日（平年値より14日遅れ）、九州北部では7月30日（11日遅れ）であった。結果として日本各地に豪雨を生じ、「令和2年7月豪雨」の期間は7月3日から7月31日とされた。特に7月上旬は九州地方を中心に集中豪雨が発生し、球磨川流域をはじめ各地に甚大な被害をもたらした。今後、豪雨の予報精度向上を含め防災・減災を進めて行くためには、今次豪雨と発生機構の解明、豪雨と被害との関係を明らかにすることが重要となる。そこで、以下のような調査・研究を行なう。

まず第2章では、今次豪雨時の降雨特性、豪雨の発生機構、並びに発生時の気象条件を明らかにする。気象庁による地上・高層気象観測データ、レーダー観測データ、気象庁メソ予測モデルによる客観解析データを用い、主に九州地方で発生した豪雨の降雨特性および発生機構、豪雨発生時の気象条件の解析を行う。また、短時間から期間全体に至る様々な時間スケールで記録的な降雨が生じた今次豪雨の特性や気象条件を明らかにする。

第3章では、今次豪雨とメソ α 低気圧との関係を明らかにする。九州地方の豪雨に着目し、九州付近に接近した過去のメソ α 低気圧と今次豪雨が発生した際のメソ α 低気圧に伴う水蒸気輸送の特徴を比較する。また、数値シミュレーションを用いて、対流圏上層のトラフがメソ α 低気圧および球磨川流域周辺に生じた豪雨に与えた影響を評価する。

第4章では、九州地方に注目し、2020年7月上旬における大気場、特に水蒸気輸送と今次豪雨との関係を明らかにする。まず、欧州中期予報センター(ECMWF)が提供する大気再解析データ ERA5 を用い広域の水蒸気輸送の解析を行う。その後、領域大気モデルである Weather Research and Forecasting Model (WRF)を用いた再現計算を行う。再現計算の結果を用い、より詳細に今次豪雨をもたらした3次元大気場の解析を行う。

第5章では、今次豪雨の降水特性特に統計学的特性を明らかにし、また降水特性と被害との関係を明らかにする。まず、「集水域平均雨量」に注目し、様々な時間スケールで降水量を集計し、過去のデータとの比較により統計的に解析する。また、Flow accumulation などを通して被害との関係を調査する。

最後に、第6章では、各章で得られた知見、今後の課題をまとめる。

第2章 豪雨の特性・発生機構と気象条件の解析

京都大学 竹見 哲也

2.1 はじめに

近年、風水害が続発している。気象庁により固有名詞が付された事象だけでも、平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月豪雨、令和元年房総半島台風、令和元年東日本台風、そして令和2年7月豪雨と毎年のように激甚な災害をもたらした豪雨が発生している。また、このように固有名詞が付けられていない事象としても、2018年台風21号や台風24号による暴風・高潮、2019年8月下旬に九州北部で発生した豪雨、2019年10月下旬の低気圧による大雨など、記録的な大雨や暴風が発生し、大きな災害となった事象が多発している。

豪雨災害をとってみると、平成30年7月豪雨では、200名を超える方が犠牲となり、平成年間のうちの風水害で最悪の犠牲者を出した事象となった。豪雨発生前に台風7号が日本列島を通過し、その後、北海道、中部地方、近畿地方、中国地方、四国地方、九州地方の広域で豪雨が発生し、各地で甚大な被害が発生した。このような広域の豪雨災害は稀にしか発生しない特異な事象として取り扱うわけにはいかないことを、2020年7月に発生した豪雨災害は明確に示している。このような豪雨災害は、地球規模の気候変動の影響を受けて、人生に一度きりの特異なものではなく、複数回経験してしまう可能性は否定できない状況にあると言える。このような認識のもと、令和2年7月豪雨の気象学特性について明らかにすることを本研究の目標とする。

本章では、令和2年7月豪雨時の降雨特性、豪雨の発生機構ならびに発生時の気象条件を明らかにする。気象庁による地上・高層気象観測データ、レーダー観測データ、気象庁メソ予測モデルによる客観解析データを用い、主に九州地方で発生した豪雨の降雨特性および発生機構、豪雨発生時の気象条件の解析をする。短時間から期間全体に至る様々な時間スケールで記録的な降雨が生じた今回の豪雨特性や気象条件を明らかにすることにより、今後の豪雨予測の向上への一助としたい。

2.2 使用データ

本研究では、実測値として、気象庁による通常の観測データを用いた。使用したデータは、地上・高層気象観測データ、気象庁解析雨量データである。

3次元的な気象場の解析には、気象庁メソスケールモデル (MSM) の客観解析データを用いた。3時間毎の解析値により、メソスケールでの環境条件を把握することに利用する。MSM 解析値から、積乱雲の発達を診断する様々な環境指標について調べた。これらの環境指標の選定には、Unuma and Takemi (2016a, 2016b) に従った。

さらに、積乱雲の発生条件を診断する大気的不安定場の解析に、湿潤絶対不安定層 (Moist Absolutely Unstable Layer; MAUL) に着目した。MAUL の概念は、Bryan and Fritsch (2000) により提唱されたもので、通常気象学の教科書的な大気の安定条件として知られる、1) 絶対安定、2) 湿潤中立、3) 条件付き不安定、4) 乾燥中立、5) 乾燥絶対不安定、の5つの状態に加え、6番目の状態として MAUL が位置づけられる。MAUL とは、気温減率が湿潤断熱線よりも大きく、かつその大気層が飽和に達している状態のことを言う。この MAUL が、令和元年東日本台風 (2019年台風19号) による豪雨発生時に見られ

第2編

たことが示されている (Takemi and Unuma, 2020). 本章では, この MAUL にも着目して解析を進めた. なお, 時刻はすべて日本標準時刻とした.

2.3 地上・高層・レーダー観測から見た降雨および気象条件の特徴

最初に, 2020年7月3~8日午前9時の地上天気図を図2.1に示す. 梅雨前線が, 南北に移動を繰り返しながらも, 九州地方に長時間停滞している様子が分かる. この長時間停滞した前線帯において, 九州の広域で大雨が発生した.

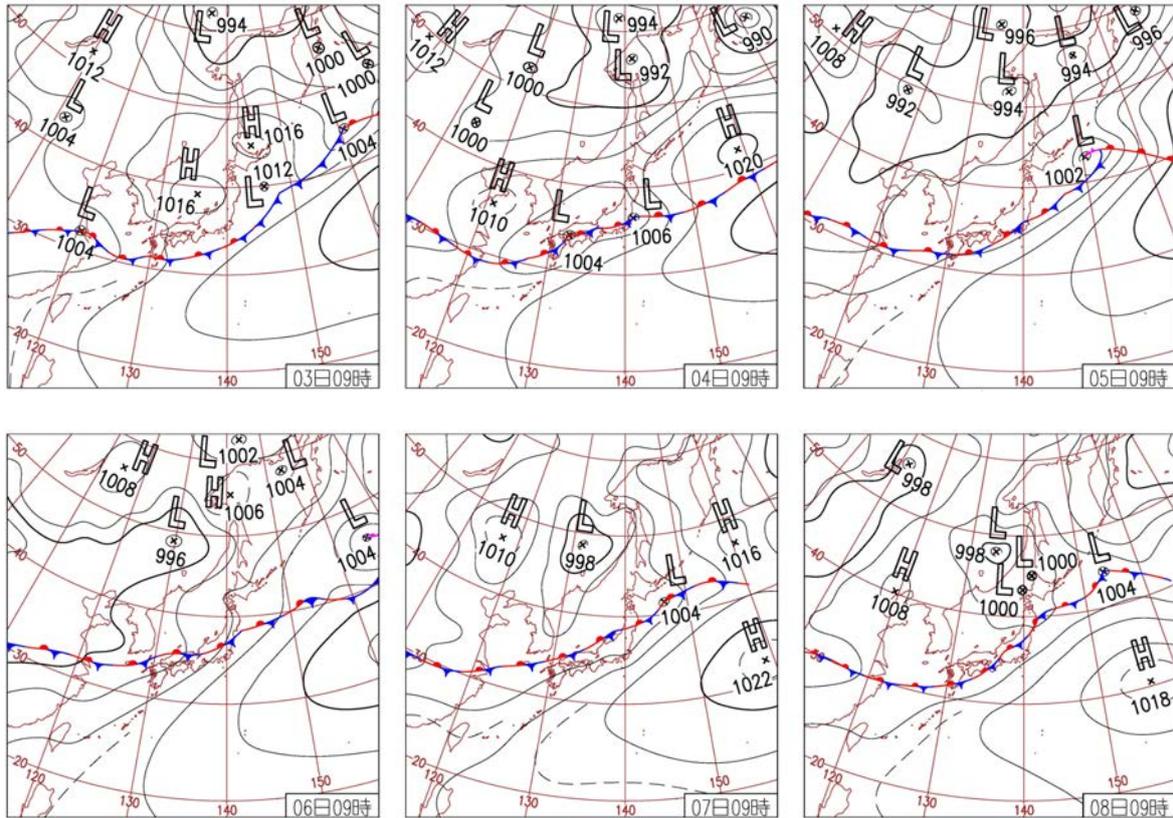


図 2.1 2020年7月3~8日の午前9時における地上天気図 (気象庁による)

図 2.1 に対応した 7 月 3~8 日の日雨量を解析雨量から求めた空間分布を図 2.2 に示す. 梅雨前線の暖域側において日雨量 150 mm (黄色) 以上の大雨の領域が広がっている様子が分かる. 特に, 7 月 4 日, 6 日, 7 日には, 日雨量 300 mm を超える領域が広がっており, 豪雨の凄まじさが見てとれる.

次に, 地上観測および高層観測から見た降雨とその発生時の気象状況について示す. 図 2.3 に, 鹿児島および福岡における地上観測による 12 時間降水量と高層観測による相対湿度を示す. ここに示す 12 時間降水量は, 当該時刻から 12 時間後までの積算雨量である. 降雨発生前には, 地上から高度 3~4 km の大気下層から中層にかけて相対湿度 90% 以上の高湿な状態が継続していることが分かる. 特に 7 月 4 日には, 降雨の発生直前の時刻において, 90% 以上の高湿な状態が中層から高度 8 km にまで達している状況が分かる.

高層気象観測から, 大気安定度に係るパラメータを調べた. 調べた安定度は, Unuma and Takemi (2016a) によるが, ここでは, CAPE (対流有効位置エネルギー), ショワルター指数, K 指数, 可降水量を示す.

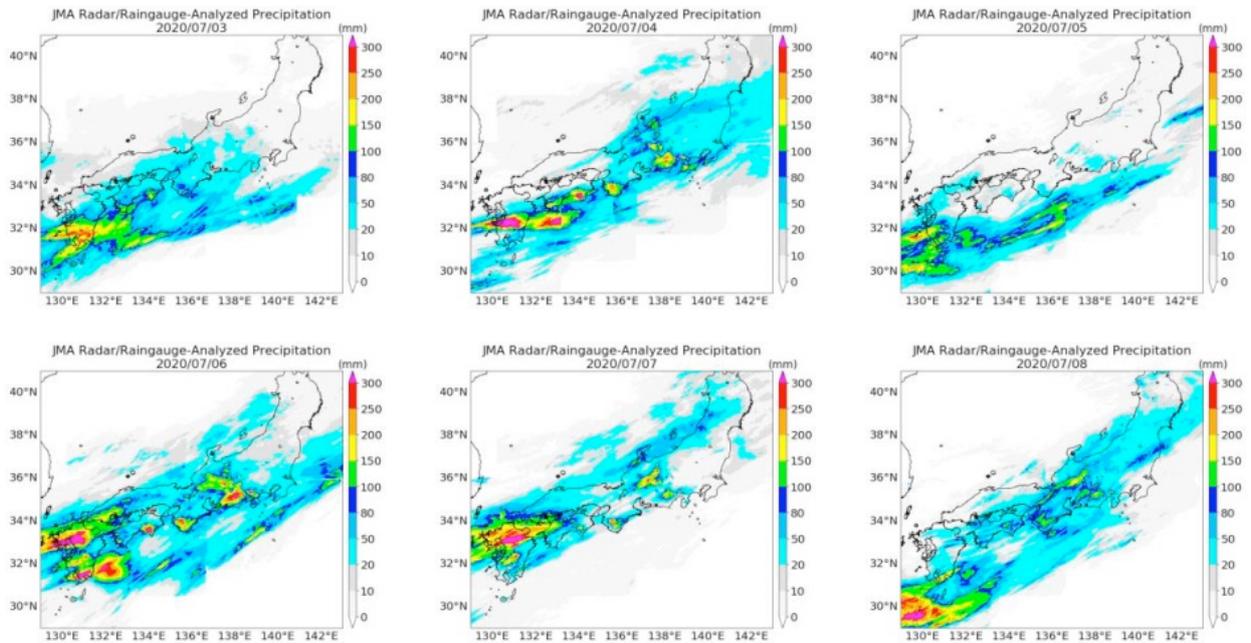


図 2.2 2020 年 7 月 3～8 日の日積算雨量の分布

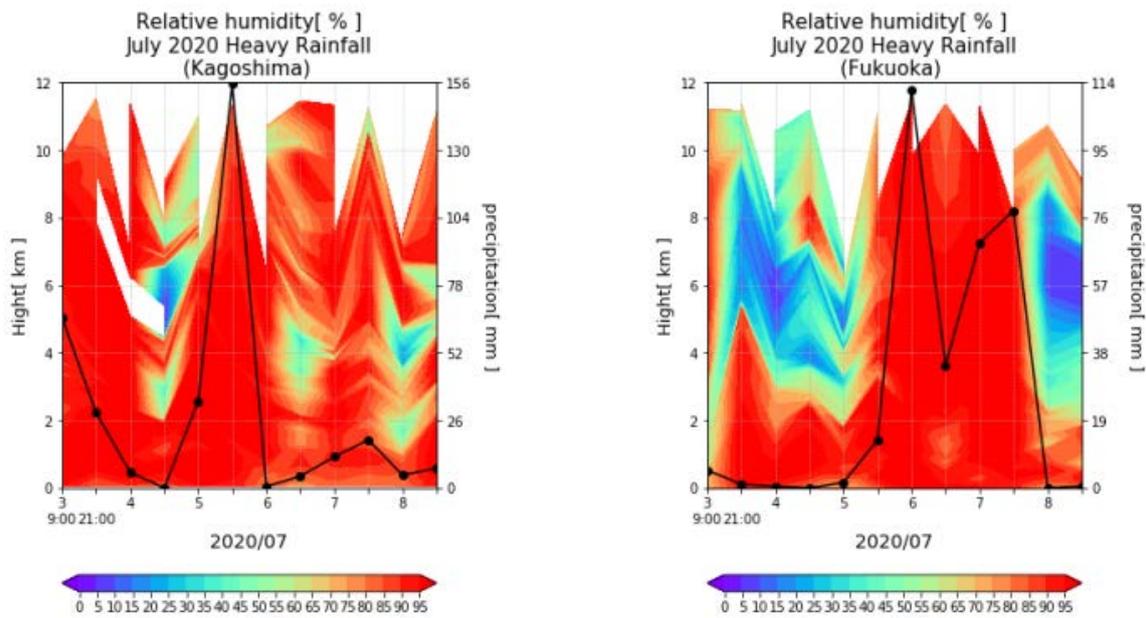


図 2.3 鹿児島（左）および福岡（右）における 12 時間降水量 (mm) (黒実線) および相対湿度 (%) (カラー) の時系列. 12 時間降水量は、示した時刻から 12 時間後までの積算値である

図 2.4 は、鹿児島および福岡における CAPE の時間変化を時間降水量とともに示す. 降水強化前には、CAPE が福岡で 1000～1500，福岡で数 100 程度であり、降水強化の前に若干 CAPE が大きくなる傾向があるように見えるものの、明瞭な傾向とは言えない. 一般に、梅雨期の CAPE は数 100 程度であり (Unuma and Takemi, 2016a など)、令和 2 年 7 月豪雨の CAPE の値も特段大きなものとは言えない.

ショワルター指数 (SSI) および K 指数について見てみる (図 2.4, 2.5). ショワルター指数は、鹿児島・福岡の地点において、7 月 5 日の降水量増大前の数値が 0 前後で推移している. Unuma and Takemi (2016a) による準停滞性降水系の場合の SSI と比べると、図 2.4 で示される数値は、とりわけ不安定な状況ではないと言える. 一方、KI については、鹿児島では 7 月 4 日 21 時から 7 月 5 日 9 時にかけて数

第2編

値が急上昇していることが分かる。この急上昇に対応して、9時以降に鹿児島で降水量増大していることが分かる。福岡においても、7月5日9時から21時にKIが40前後の数値まで急上昇し、その後降水が強まっていることが分かる。40前後のKIの数値は、Unuma and Takemi (2016a) による統計値に比べると大きな数値の極端側にあり、平成30年7月豪雨の事例の数値 (Takemi and Unuma, 2019) の場合と同等の不安定な数値である。

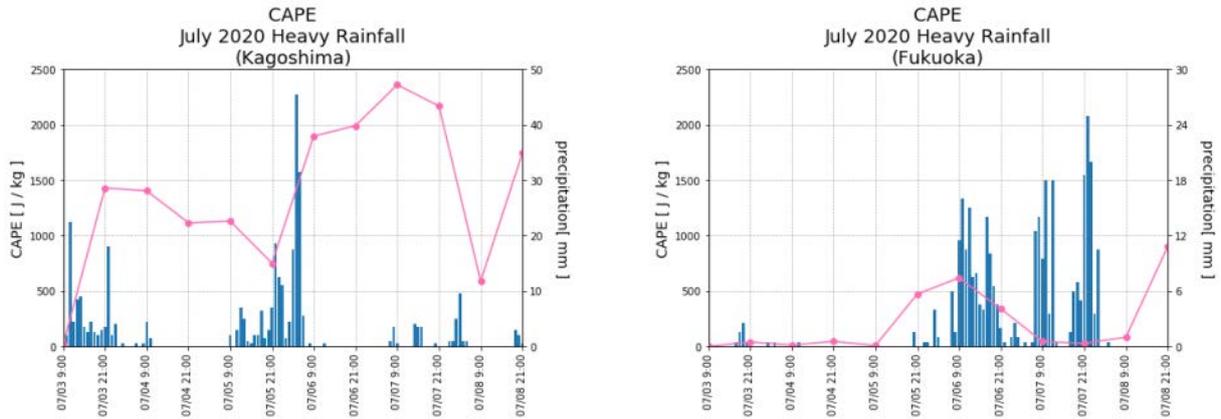


図 2.4 鹿児島（左）および福岡（右）における時間降水量 (mm) (棒グラフ) および CAPE (J/kg) (実線) の時系列

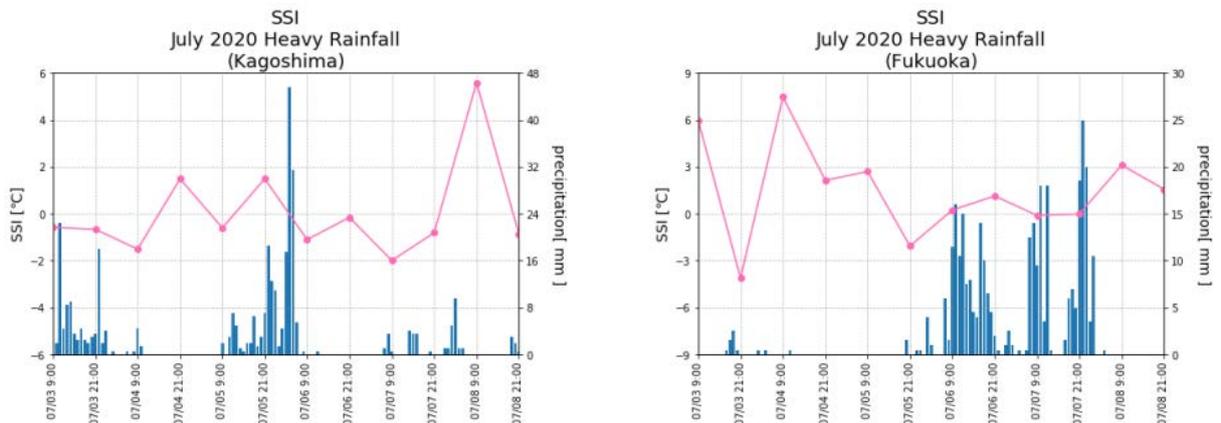


図 2.5 図 1.4 と同じ、ただしショワルター指数について示す

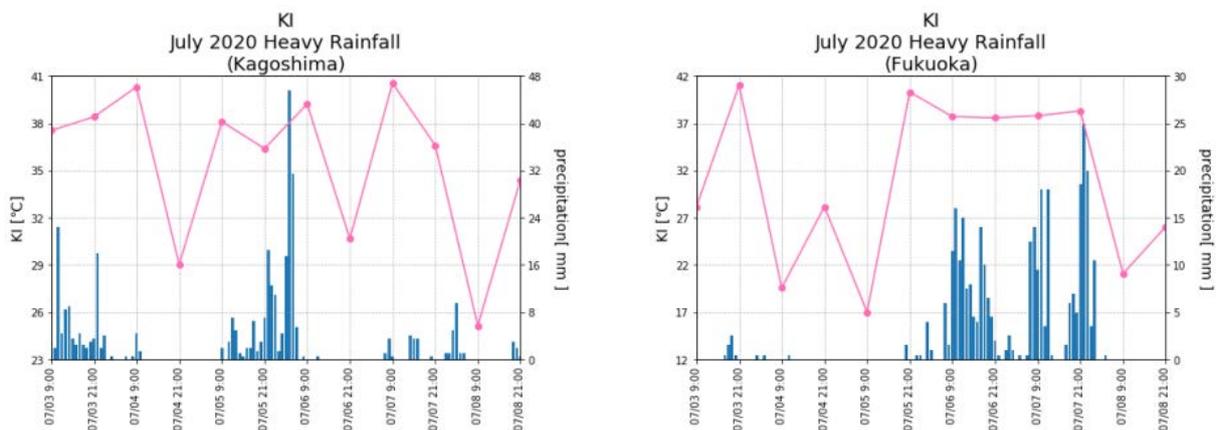


図 2.6 図 2.4 と同じ、ただし K 指数について示す

第2編

KI とは、対流圏中下層の気温減率と中層の水蒸気量や湿度の組み合わせの複合パラメータである。そこで可降水量について調べた。図 2.7 は、鹿児島と福岡における可降水量の時間推移を示す。7月5日以降に降水が強化される以前の時点では、鹿児島においては 50~80 近くの範囲、福岡では 40~65 の範囲で変動している。特に降水強化の前の 60 台の可降水量は、Unuma and Takemi (2016a) による統計値に比べると、75 パーセントイル値を超えるような大きな値である。このような豊富な水蒸気量が、今回の豪雨の環境条件のひとつとして挙げられる。

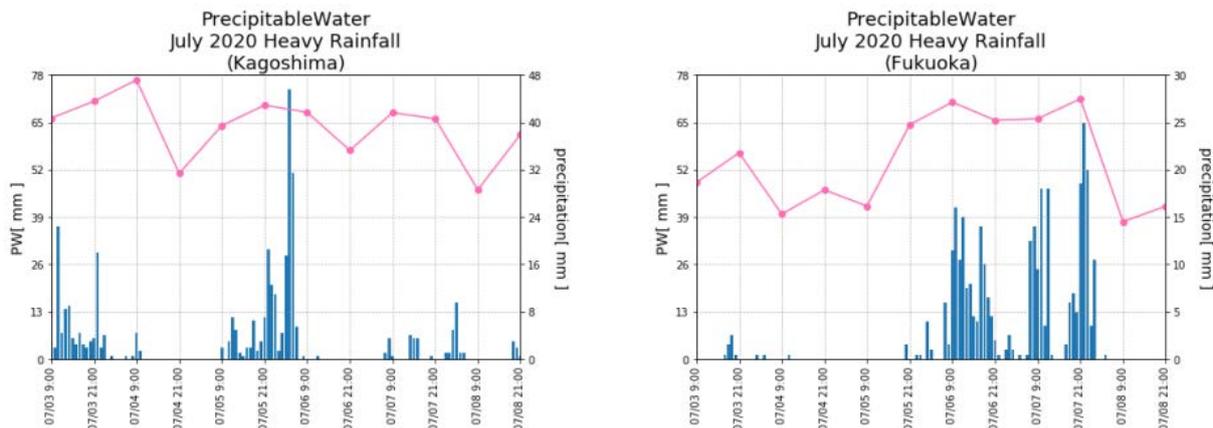


図 2.7 図 2.4 と同じ、ただし可降水量について示す

2.4 メソ解析値から見た豪雨発生の気象場の解析

本節では、MSM 解析値により調べた豪雨発生時の気象場の解析結果について述べる。1.3 節と同様に、Unuma and Takemi (2016a, 2016b) を参考にして、大気不安定度に係るパラメータを調べた。MSM データを用いることで、大気不安定度の空間分布の特徴を明らかにすることができる。

最初に、CAPE の空間分布を図 2.8 に示す。ここで示す CAPE は、3 時間間隔のデータを日平均したものであり、7月3~8日の6日分について示す。図 2.1 の地上天気図と見比べると、CAPE は、梅雨前線の南側の暖域側で 200 を超えているものの、おおむね 200~600 程度の数値となっており、Unuma and Takemi (2016a) の統計値と比べて特段大きな数値ではなく、梅雨期には典型的な数値と言える。下部対流圏である 850 hPa と 500 hPa の間の気温減率について見てみると (図 2.9)、梅雨前線帯では 5 K/km 前後の減率であり、湿潤断熱線に近いものである。この数値も、条件付き不安定ではあるものの、湿潤中立に近い成層状態と言え、気温減率の観点からも大気は不安定だとは言えない。

水蒸気量に係るパラメータである可降水量の空間分布を図 2.10 に示す。梅雨前線の暖域側に中国大陸から東シナ海に西から東へと伸びるバンド状の高可降水量の領域が存在することが分かる。可降水量は 60 を超えており、平成 30 年 7 月豪雨時に見られたような豊富な水蒸気量が集中化していることが分かる。

このように、気温減率としては湿潤中立に近い成層状態であったものの、水蒸気量が豊富であったことが、今回の豪雨の特徴であり、これは平成 30 年 7 月豪雨時に見られたよう共通したものである。さらに、中層の 500 hPa 面における相対湿度について見てみる (図 2.11)。相対湿度が 90 % を超える高湿な領域が東西にバンド状に伸びており、この高湿な領域は図 2.10 に示す高い可降水量の分布に対応している。

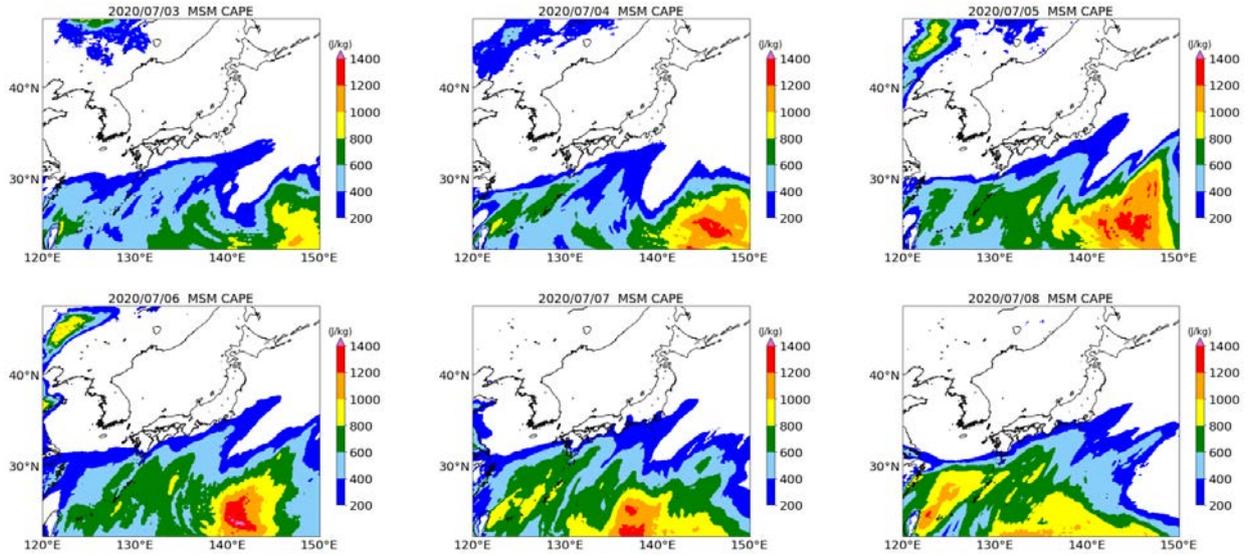


図 2.8 MSM 解析値から求めた 7 月 3～8 日の日平均した CAPE

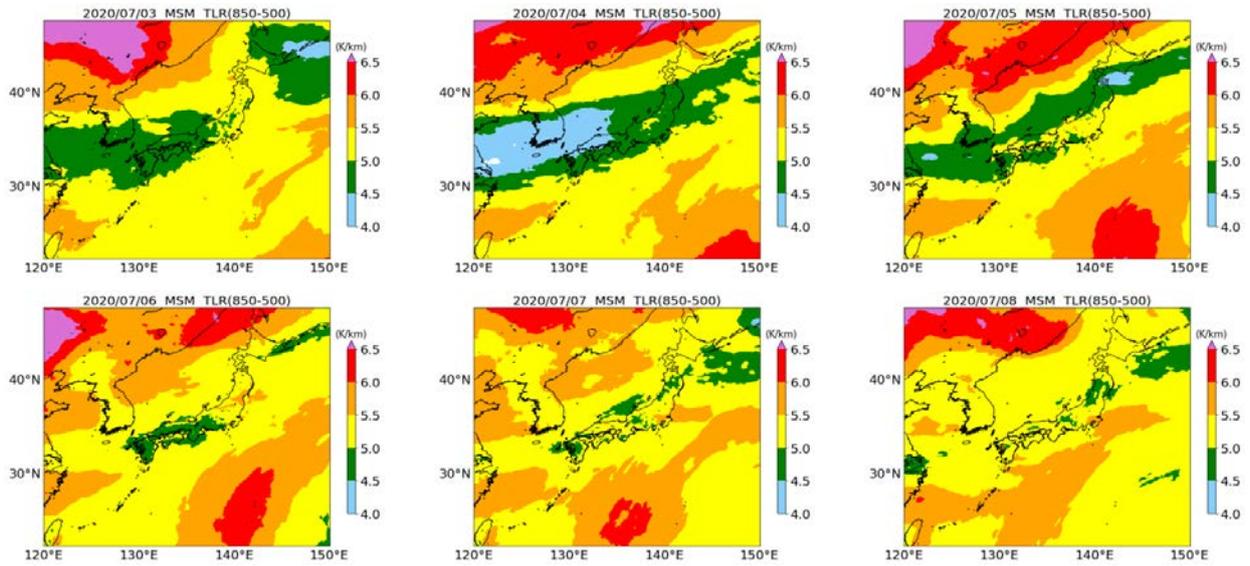


図 2.9 図 2.8 と同じ，ただし 850 hPa と 500 hPa との間の気温減率を示す

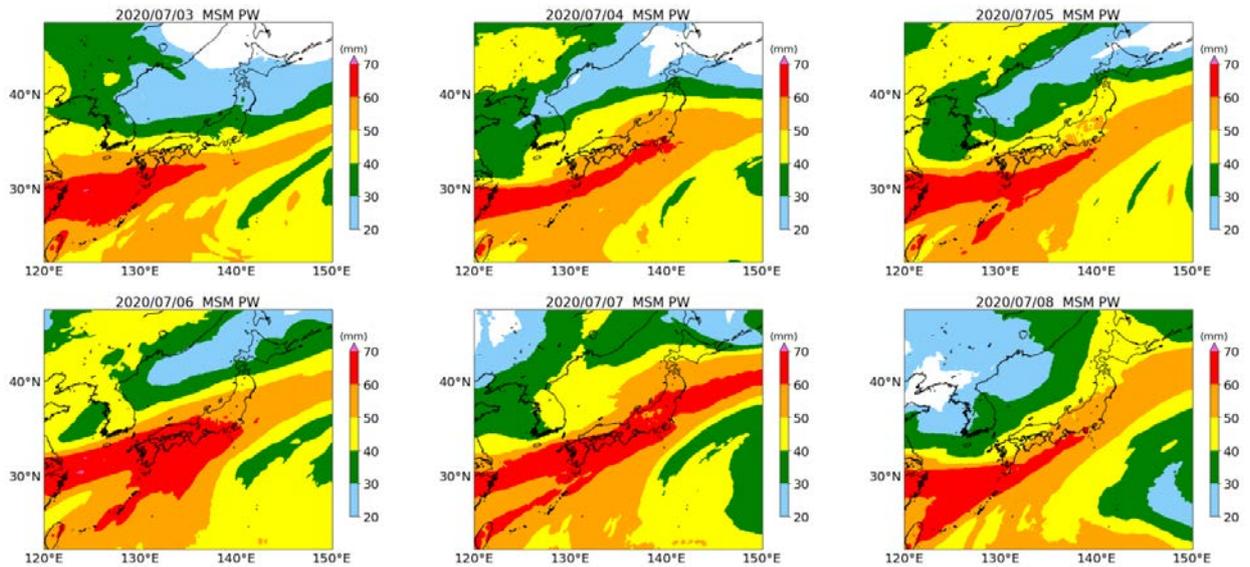


図 2.10 図 2.8 と同じ，ただし可降水量について示す

第2編

気温減率と水蒸気量や湿度の複合パラメータである K 指数の分布を図 2.12 に示す。豊富な可降水量と高い相対湿度の条件に対応し、高い数値の K 指数の領域が中国大陸から東シナ海上を東西に伸びており、この K 指数の高い数値の領域が九州地方に差し掛かっている様子が見てとれる。この K 指数の高い領域が豪雨域に対応している。こういった K 指数の特徴は、平成 30 年 7 月豪雨 (Takemi and Unuma, 2019) でも見られた特徴である。

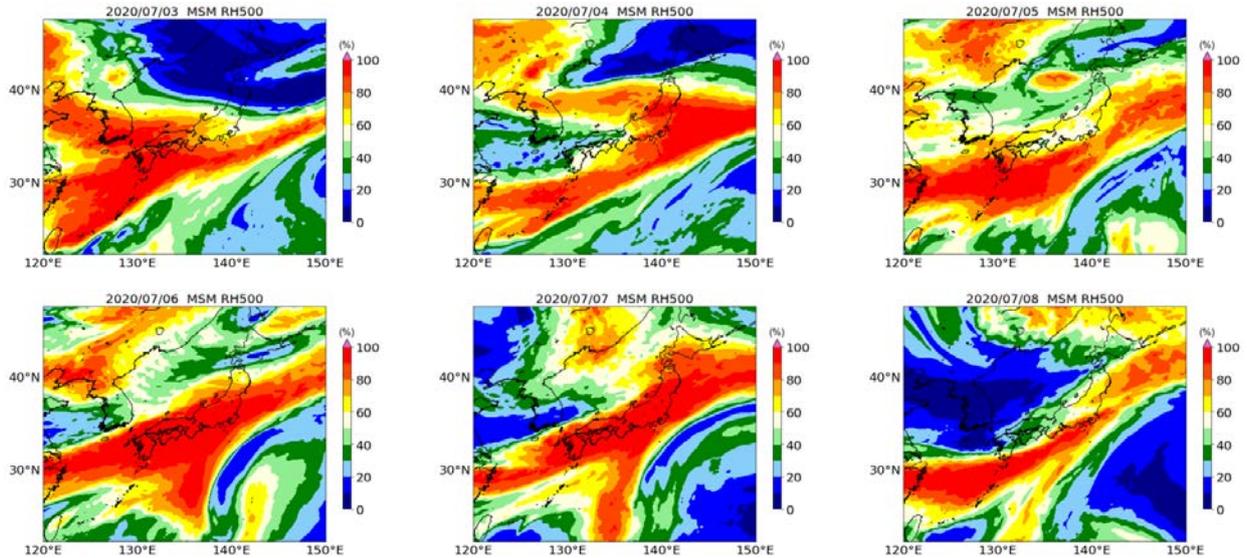


図 2.11 図 2.8 と同じ、ただし 500 hPa 面での相対湿度を示す

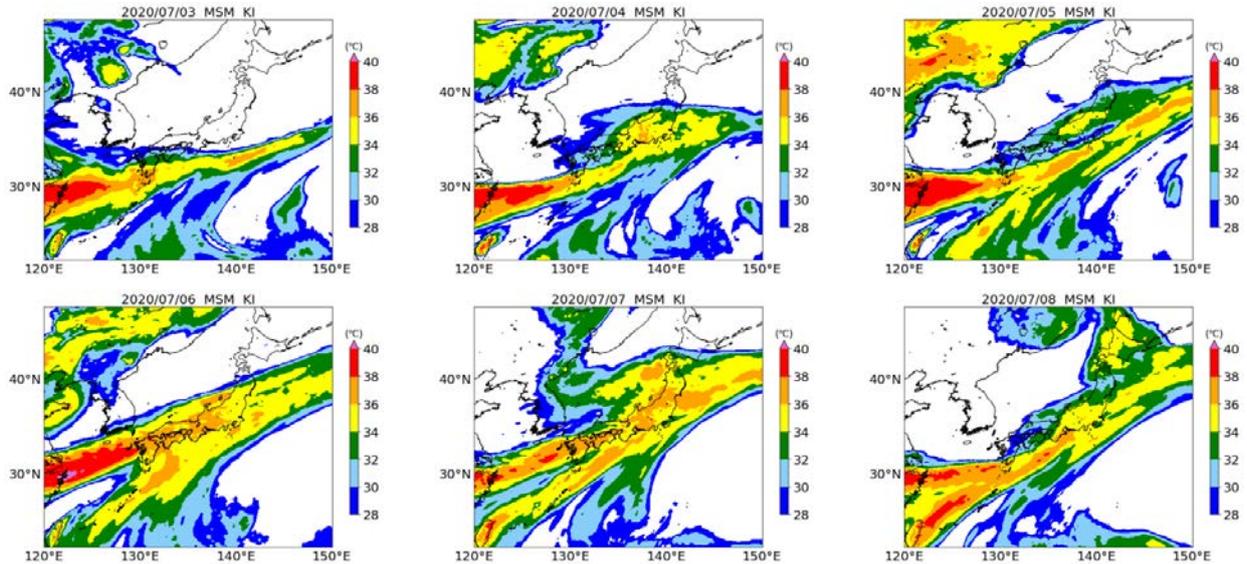


図 2.12 図 2.8 と同じ、ただし K 指数について示す

2.4 湿潤絶対不安定

本節では、大気成層の特徴を湿潤絶対不安定に着目して解析した結果を述べる。湿潤絶対不安定の大気層 (MAUL) の厚さ (km) の 7 月 3 日 18 時~4 日 9 時の空間分布を図 2.13 に示す。この図には同時に、当該時刻から 3 時間後までの積算雨量が 80 mm 以上の領域も示している。2 km 以上の厚みを持つ MAUL があることにより、その後の 3 時間で 80 mm 以上の大雨が発生していると言える。

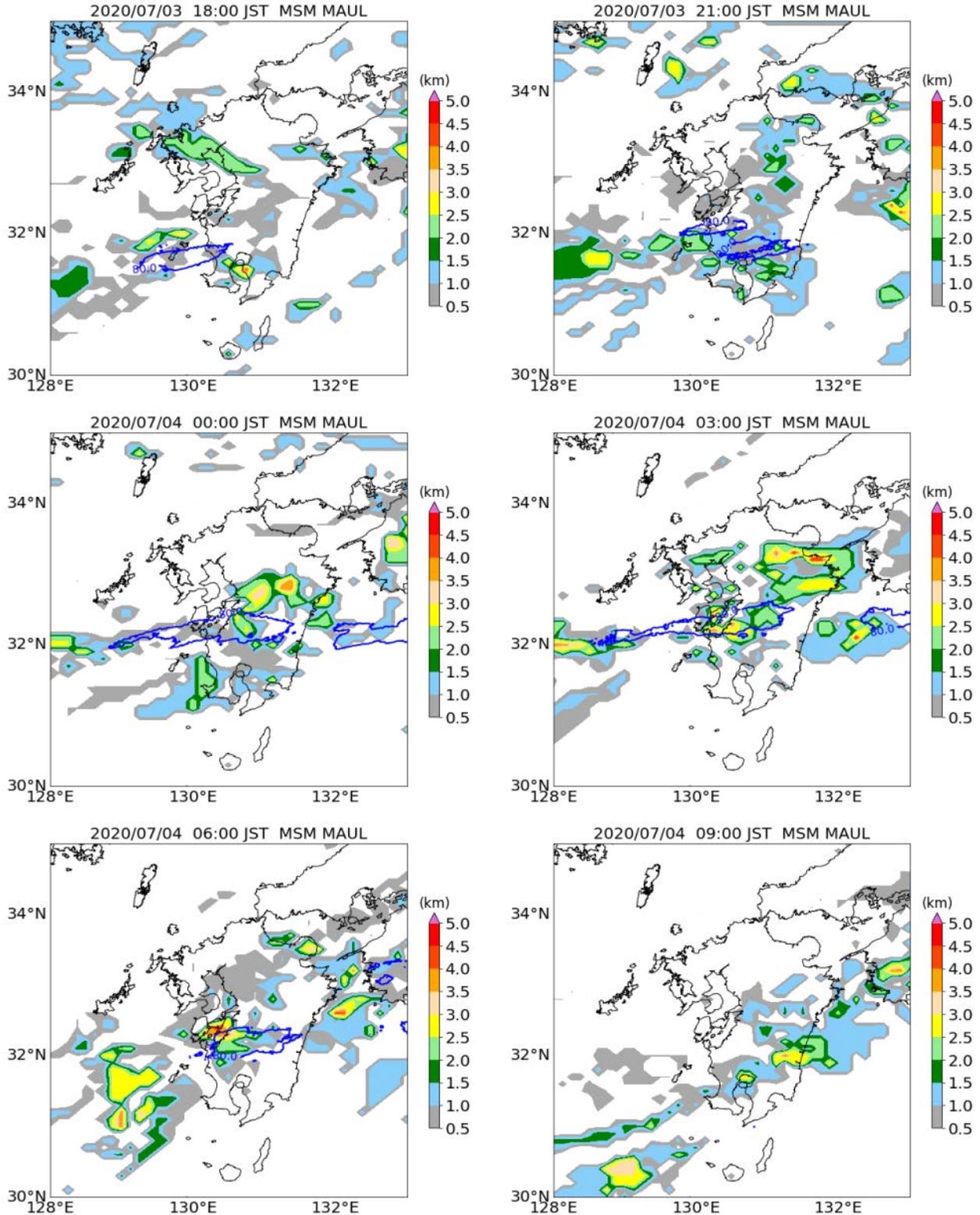


図 2.13 2020 年 7 月 3 日 18 時から 9 日 9 時にかけての MAUL の厚み (km) (カラー) および各時刻から後 3 時間の積算雨量が 80 mm 以上の領域 (青実線で囲まれた範囲)

さらに、MAUL の底の高度についても調べた。図 2.14 にその空間分布を 2020 年 7 月 3 日 18 時から 9 日 9 時にかけて 3 時間毎に示す。図より、MAUL の底は、海拔高度 2 km よりも低い高度に位置していることが分かる。このような低い高度から MAUL が存在していることで、地形による強制上昇によ

第2編

り MAUL 全体が持ち上げられ, 対流雲が急速に発達すると考えられる. 低い高度から MAUL が存在していることが豪雨に繋がったことは, 令和元年東日本台風の事例でも見られたものであり (Takemi and Unuma, 2020), 地形性の強制上昇をきっかけとして豪雨に繋がるという共通する特徴が表れているものと言える.

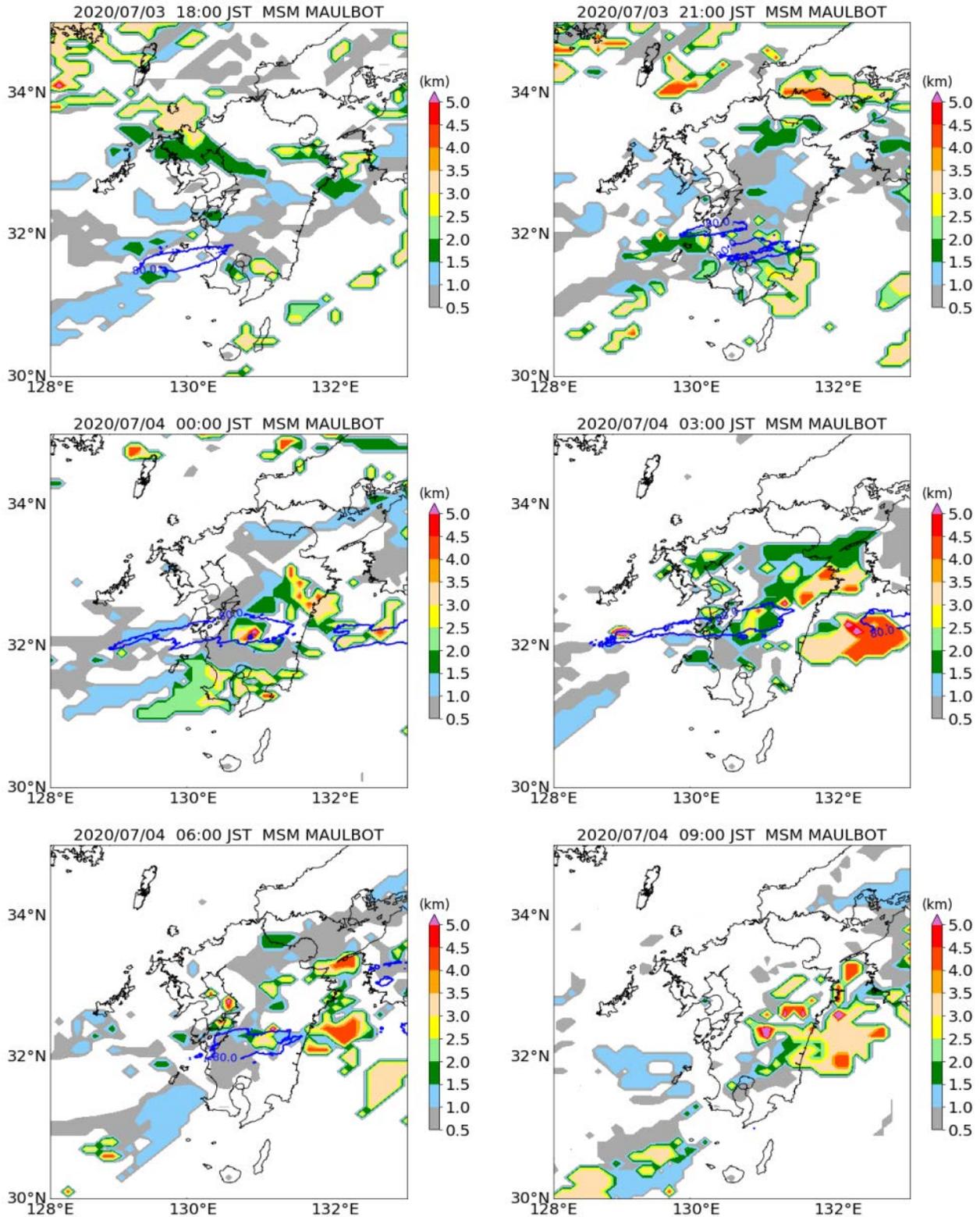


図 2.14 図 2.13 と同じ, ただし MAUL の底の高度 (km) (カラー) について示す

2.5 まとめ

令和2年7月豪雨が発生した気象条件として、大量の可降水量に見られるように水蒸気量が豊富であったこと、大気の下層から中上層にまでほぼ飽和に達している高湿な状態にあったこと、これにより、気温減率が湿潤断熱線よりもやや大きいくらいであった状態で湿潤絶対不安定な大気層（MAUL）が形成されていたこと、が挙げられる。このような特徴は、令和元年東日本台風に伴う豪雨の発生環境にも見られた共通するものである。今回の豪雨の特筆すべき点は、梅雨前線が長時間に及んで持続していたことが挙げられる。MAULの存在により時間雨量として強い雨が発生したとともに、停滞する梅雨前線に沿って豊富な水蒸気量が持続して供給されたことにより長い継続時間の雨が発生した。これにより、短時間強雨についても長時間持続する大雨としても過去の記録を上回るような豪雨が発生した。

2.6 今後の課題

今回の令和2年7月豪雨の特異性はどのように捉えたらよいであろうか。豊富な可降水量、下層から中上層まで十分に湿った大気条件というのは、梅雨期には珍しい状況ではなく、より大きな規模での気象状況によってしばしば形成されるものであると言える。豪雨の環境条件を考える上で重要な視点は、これらの条件の定量的な状況である。過去の統計値と比べて、どの程度の可降水量があったのか、また大気の相対湿度が100%にどの程度近いのか、といったことを定量化することであろう。また、MAULといった不安定状態が湿潤気候下での対流雲活動では特に重要であると言える。

地球温暖化が着実に進行している状況を考えると、気温が高くなることが水蒸気量を増加させることに直結するため、豪雨への温暖化の影響は無視できない。人生においてこれまで経験したことのなかった豪雨というのは、今後は、人生で複数回経験するということが十分にあり得る。これまでの考え方で豪雨対策は通用しなくなることが懸念され、温暖化影響を適切に考慮することで、今後の豪雨災害への備えを強化することが大事である。

謝辞

本研究は、京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士課程の中七海さんの成果に基づいてまとめたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- Bryan, G. H., and Fritsch, J. M.: Moist absolute instability: The sixth static stability state. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 81, pp. 1207-1230, 2000.
- Takemi, T., and Unuma, T.: Diagnosing environmental properties of the July 2018 Heavy Rainfall event in Japan. *SOLA*, Vol. 15A, pp. 60-65, doi: 10.2151/sola.15A-011, 2019.
- Takemi, T., and Unuma, T.: Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis (2019). *SOLA*, Vol. 16, pp. 30-36, doi:10.2151/sola.2020-006, 2020.
- Unuma, T. and Takemi, T.: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, Vol. 142, pp. 1232-1249, 2016a.
- Unuma, T. and Takemi, T.: A role of environmental shear on the organization mode of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *SOLA*, Vol. 12, pp. 111-115, 2016b.

第3章 梅雨前線上のメソ低気圧と令和2年7月豪雨の関係

防災科学技術研究所 栃本英伍・飯塚聡・大東忠保

3.1 はじめに使用データおよび解析期間・解析方法

令和2年7月は熊本、九州北部など九州地方を中心に集中豪雨が発生した。今回の集中豪雨の発生に伴って、梅雨前線上にメソ α スケールの低気圧(以後、メソ α 低気圧)の存在が複数回確認されており、豪雨との関係が示唆されている(Araki et al. 2020; Hirockawa et al. 2020)。本研究は、特に九州地方の豪雨に着目し、九州付近に接近した過去のメソ α 低気圧と令和2年7月豪雨が発生した際のメソ α 低気圧に伴う水蒸気輸送の特徴を特徴を比較した。また、数値シミュレーションを用いて、対流圏上層のトラフがメソ α 低気圧および熊本県で発生した豪雨に与えた影響を評価した。

3.2 使用データおよび解析期間・解析方法

3.2.1 使用データ・解析期間

使用したデータはJRA-55再解析データ(Kobayashi et al. 2015)である。メソ α 低気圧を抽出するために、モデル格子の解像度データを用いた(水平約60km格子間隔)。解析値は00, 06, 12, 18 UTCのデータ、予報値は03, 09, 12, 15, 21 UTCのデータを用いた。1979年-2020年の6, 7月である。

3.2.2 メソ α 低気圧の検出

まず、梅雨前線上のメソ α 低気圧の自動検出を行った。手順は、Yanase et al. (2016)がポーラーロウを検出するために用いた手法と同様の手法である。まず、メソ α スケールの擾乱を取り出すために、海面気圧データに対して、T106-42の空間bandpassフィルタを施した。続いて、Hodges(1995, 1999)のtrackingアルゴリズムを用いて、メソ α 低気圧のトラックデータを作成した。ここで、6時間間隔の解析値の間に予報値のデータを補間することにより、より精緻なメソ α 低気圧のトラックデータを作成した。梅雨前線上のメソ α 低気圧を扱うために、相当温位勾配が1.5K/100km以上の領域に存在した低気圧のみを扱った。また、弱い擾乱を解析から除くために、鉛直相対渦度が 1.0×10^{-4} よりも強くなった擾乱のみを扱った。

3.3 メソ低気圧と特徴と豪雨との関係

まず、1979-2020年までの6, 7月に検出されたメソ α 低気圧の個数を調べた(図3.1)。その結果、令和2年6, 7月は1979-2020年の42年間で最も多くのメソ α 低気圧が発生していたことがわかった。中国大陸～日本列島西側領域(図3.1aの緑枠)において検出されたメソ α 低気圧は平均で30個程度であるが、令和2年は47個の低気圧が検出された。また、中国大陸～九州の西側に限定した領域で比較しても、例年は平均で12-13個程度であるのに対して、令和2年は20個の低気圧が検出されている。

JRA-55で抽出されたメソ低気圧の活動度

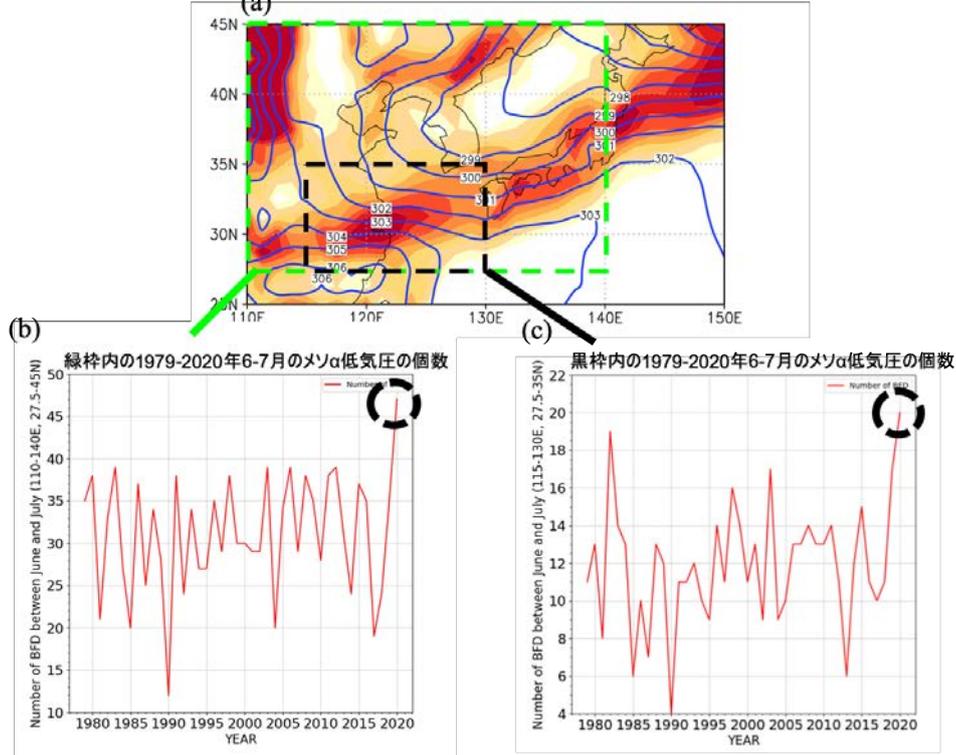


図 3.1. (a) 令和2年7月1-15日で期間平均した900-hPa面水平温度勾配と、JRA-55で検出されたメソα低気圧の年々変動。(b) 上段図の緑枠内で1979-2020年の6-7月に検出されたメソα低気圧の個数。(c) 黒枠内で検出されたメソα低気圧の個数。

メソ低気圧をpick-upした領域(赤枠)と各物理量の計算領域(緑枠)

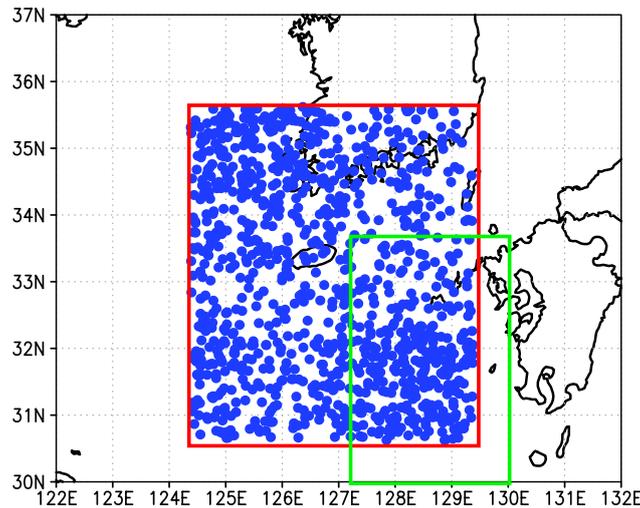


図 3.2 赤枠内で1979-2020年の間に検出されたメソα低気圧の位置(青点)

メソα低気圧の接近に伴い、対流圏下層の水平気圧勾配が強くなり風速が強化されることで、水蒸気フラックスが強化されることが知られている。したがって、頻繁なメソα低気圧の通過が、長期間にわたる豪雨の環境場形成の一つの要因となったことが示唆される。そこで、九州の西側の海上にメソα低気圧が接近した際の水蒸気フラックスの統計的特徴を調べ、令和2年7月豪雨の際の水蒸気フラックス

の強さと比較した。

図 3.2 の赤枠領域で検出されたメソ α 低気圧に伴う水蒸気フラックスの緑枠内における最大値・領域平均値の密度分布を調べた。図 3.3 は、950hPa 水蒸気フラックスの領域平均値の密度分布を示している。水色は、メソ低気圧の接近に関係なく、図 3.2 の緑枠内で計算された下層水蒸気フラックスの6時間ごとの領域平均値の密度分布であり、橙色がメソ低気圧接近時の下層水蒸気フラックスの密度分布を示している。両者を比較すると、全体の水蒸気フラックスのピーク頻度は約 $60 \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ であるのに対して、メソ α 低気圧が接近している時は、ピーク頻度が $180 \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ と、メソ低気圧が接近すると、下層の水蒸気フラックスが強化されていることが統計的にわかる。すなわち、メソ α 低気圧が接近することにより、水蒸気輸送が九州付近への水蒸気輸送が強化される。

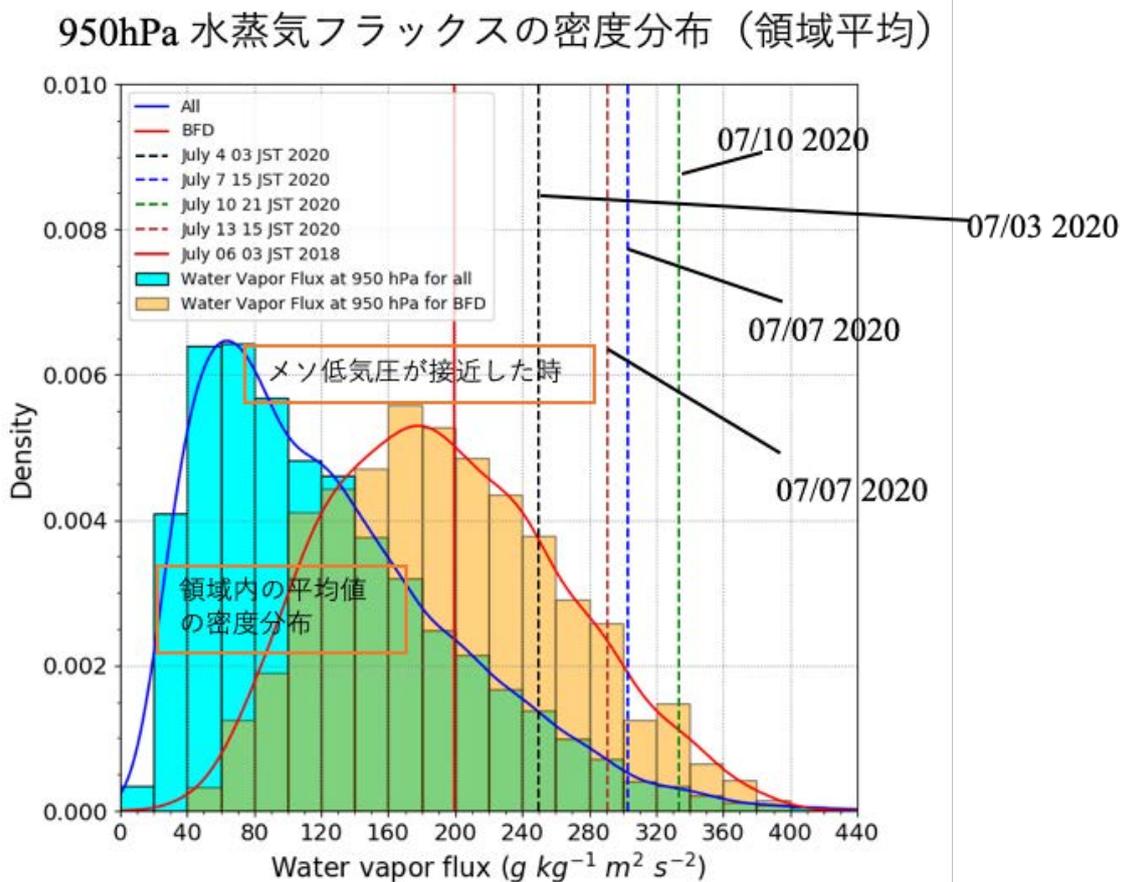


図 3.3 図 3.2 の緑枠内で領域平均した 950hPa 水蒸気フラックスの密度分布。青：1979-2020 の間の 6 時間ごとの水蒸気フラックスの密度分布。橙色：赤枠内にメソ α 低気圧が存在していた時の水蒸気フラックスの密度分布。波線は、2020 年 7 月 3 日、6 日、7 日の水蒸気フラックスの値

また、令和 2 年 7 月上旬に豪雨が発生した際の下層水蒸気フラックスと比較すると、令和 2 年 7 月上旬の豪雨発生時（図 3.3 破線）の方が、統計的なメソ低気圧接近の際の密度分布よりも大きくなる傾向があることがわかる。この水蒸気フラックスが大きくなる傾向は、下層風速の強さに起因している。下層風速の密度分布と比較すると、令和 2 年 7 月上旬の集中豪雨発生の際には、統計的な密度分布と比較して、下層風速が大きくなる傾向にある（図 3.4）。一方、下層水蒸気量には顕著な差は見られない（図略）。したがって、メソ低気圧が接近することにより、水平気圧傾度が強化され、風速が強化されることにより水蒸気フラックスが大きくなっていると考えられる。

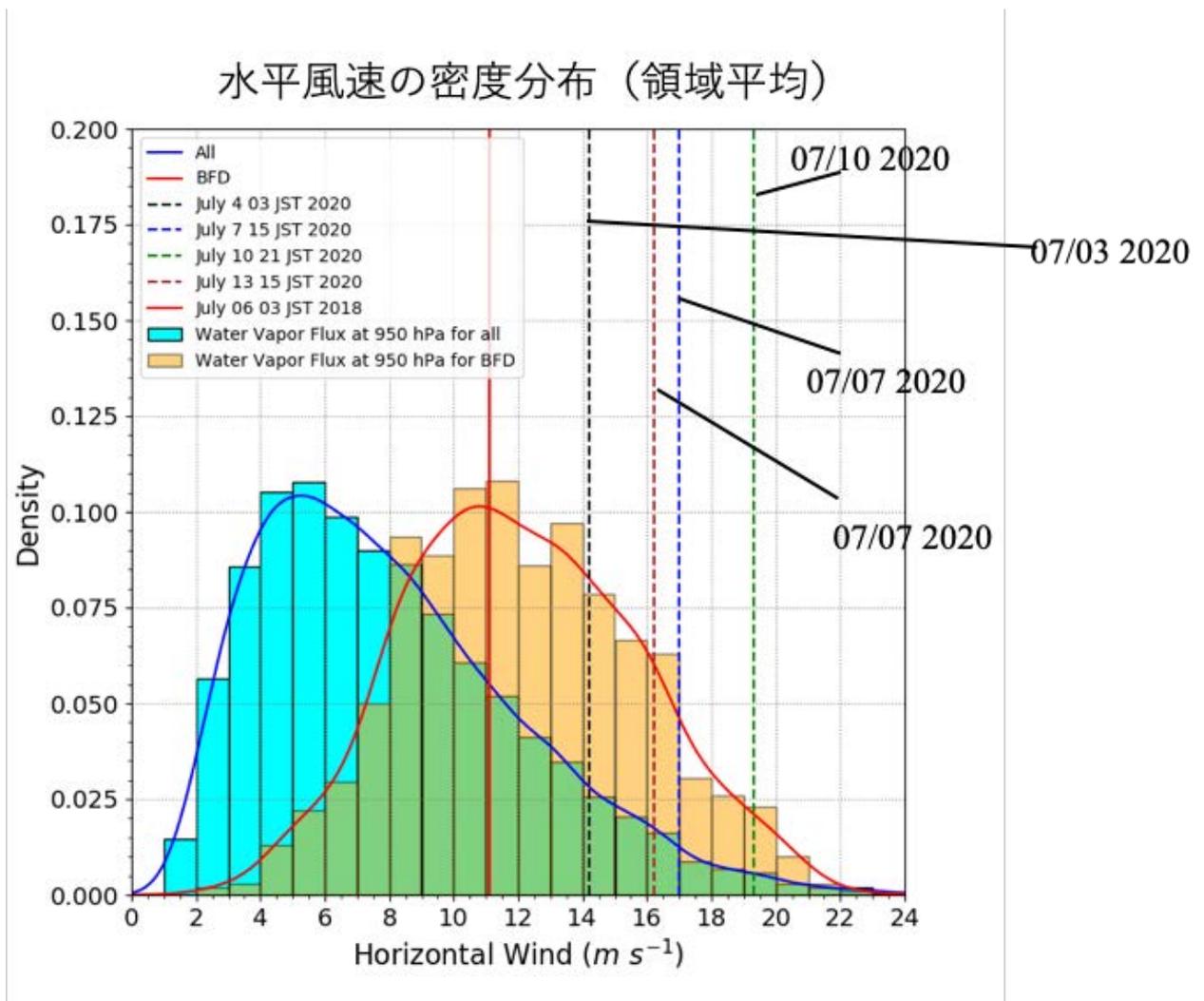


図 3.4 図 3.2 の緑枠内で領域平均した 950hPa 風速の密度分布. 青：1979-2020 の間の 6 時間ごとの風速の密度分布. 橙色：赤枠内にメソ α 低気圧が存在していた時の風速の密度分布.

これらのことから、令和 2 年 7 月豪雨の際には、メソ α 低気圧が例年よりも頻繁に通過し、例年よりも強い水蒸気フラックスによって九州付近に多量の水蒸気が輸送されたことにより、豪雨発生に好ましい環境場が何度も形成されたと考えられる。

ここからは、令和 2 年の梅雨期においてメソ α 低気圧が多く発生した要因について考察する。まず、一つの要因として考えられるのが、上層擾乱の活動である。図 3.5 は対流圏上層 (250 hPa) の渦位の分布を示している。熊本および九州北部で集中豪雨が発生していた 7 月上旬において、上層擾乱が頻繁に通過していた。この上層擾乱の活動がメソ α 低気圧の発生・発達に影響していたことが示唆される。

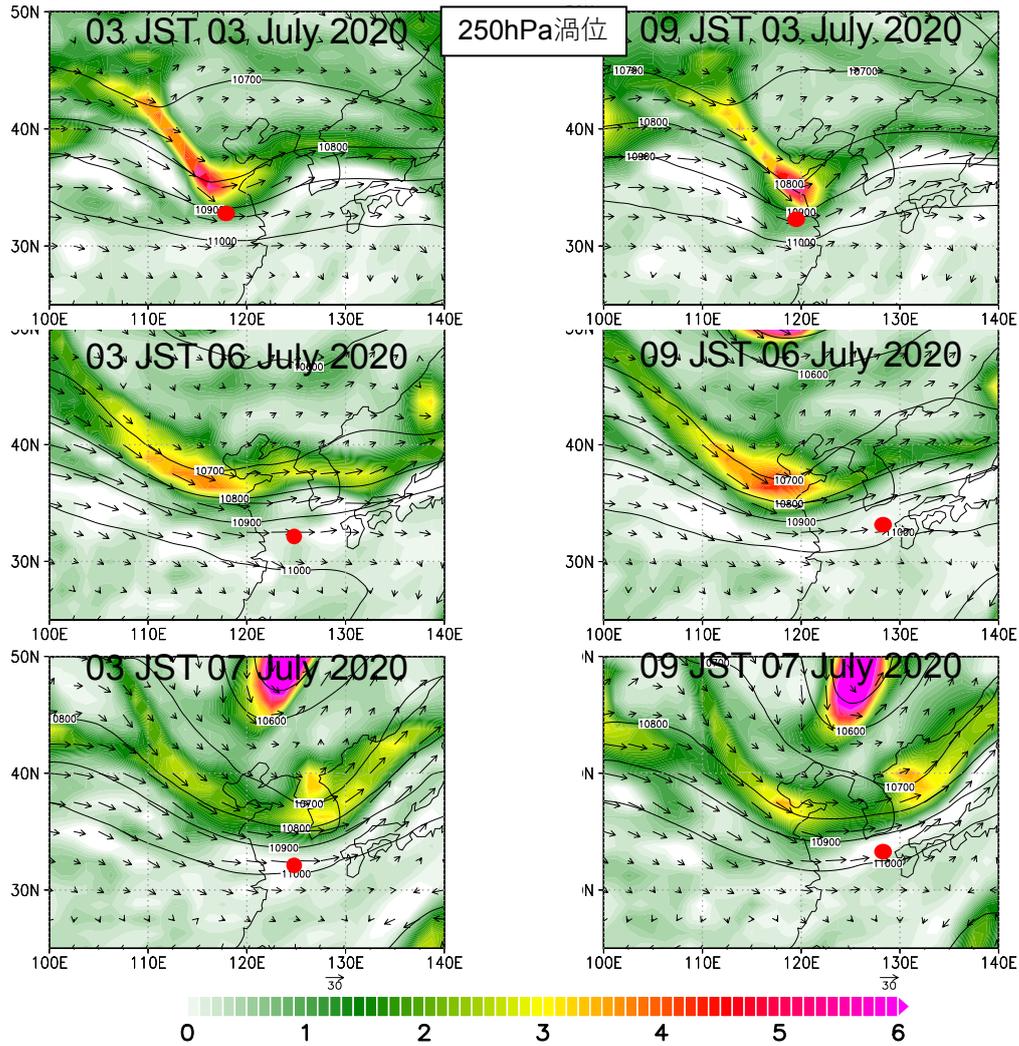


図 3.5. 250hPa 面の渦位 (色 ; PVU) とジオポテンシャル高度 (実線) の水平分布図. 赤点はメソ α 低気圧の位置.

続いて、下層の環境場とメソ α 低気圧の関係を議論する. ここでは、特に九州で大雨が頻繁に発生した7月上旬に着目する. 図 3.6 は 900hPa 相対渦度場の7月1日-15日の平均値と気候値との差を示している. 中国大陸から東シナ海、日本列島にかけて、相対渦度の強い領域が広がっており、気候値と比較して強いことがわかる. このことから、環境場の相対渦度場とメソ α 低気圧が関係している可能性がある. そこで、7月1-15日において、15日間の lowpass filter を施した相対渦度場を九州の西側領域 (115-130E, 28.75-35N) で領域平均した値の年々変動とメソ低気圧の個数の年々変動の関係を調べた (図 3.7). 相関係数を求めると、低気圧の個数と環境場の相対渦度場との相関係数は 0.73 であり、lowpass 成分の渦度場と低気圧の個数は強く関係していることがわかる. このことから、環境場の相対渦度場とメソ α 低気圧活動の関係が示唆される.

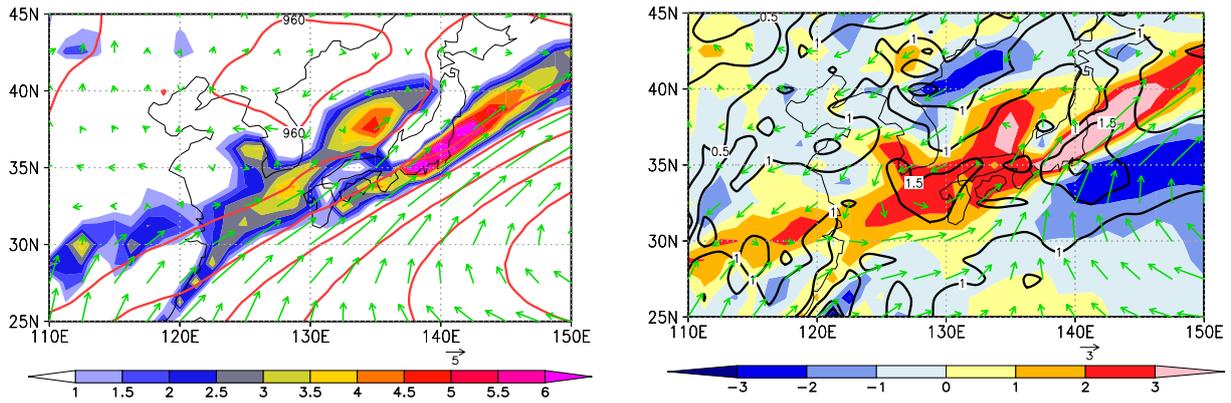


図 3.6 (左図) 7月 1-15 日の 900hPa 相対渦度 (色; s^{-1}) とジオポテンシャル高度 (実線; m) の平均場. (右図). 900hPa 相対渦度の気候値との差 (色) と標準偏差 (実線).

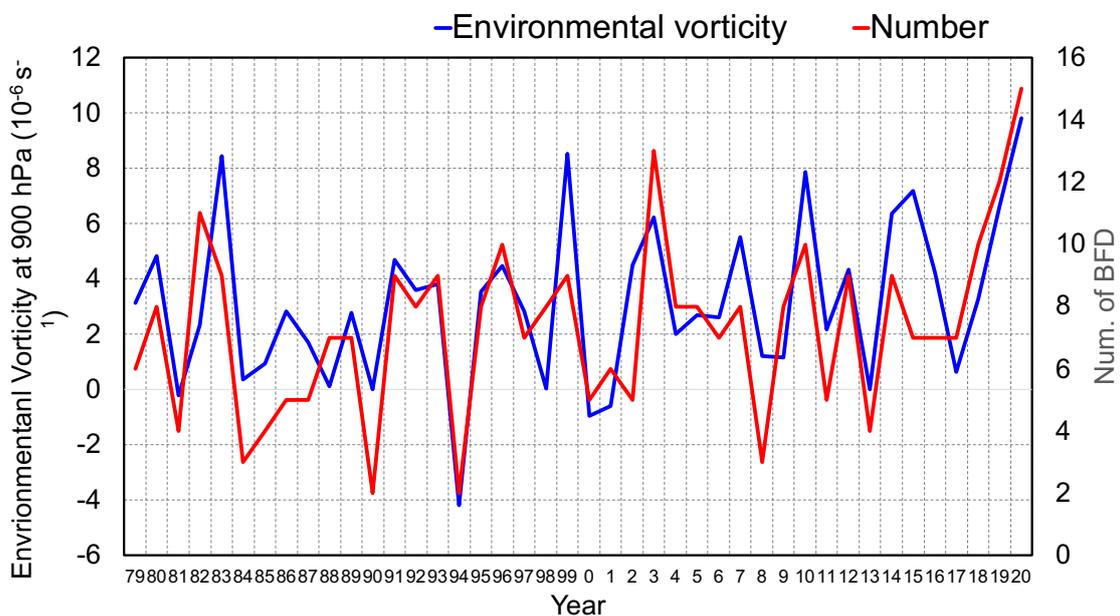


図 3.7 15 日 lowpass フィルターを施した 900hPa 相対渦度の年々変動 (青) とメソ α 低気圧個数の年々変動 (赤).

一方、図 3.8 は 900hPa 水平温度勾配の 7 月 1-15 日間の平均場を示している。中国大陸から九州、本州にかけて、水平温度勾配の大きな領域が広がっており、気候値と比較すると 1 標準偏差以上の差が見られる。このことから、令和 2 年 7 月の前半は、例年と比較して傾圧性が強かったことが示唆される。そこで、環境場の傾圧性の指標としてよく用いられている Eady growth rate (e.g., Hoskins and Valdes 1990) の、15 日間 lowpass 成分の年々変動を調べたところ (図 3.9)、メソ α 低気圧の検出数との相関係数は 0.44 であった。また、環境場の下層傾圧性は 42 年間で一番強くなっていた。これらのことから、環境場の傾圧性が強かったことがメソ α 低気圧の活動と関係していたことが示唆される。

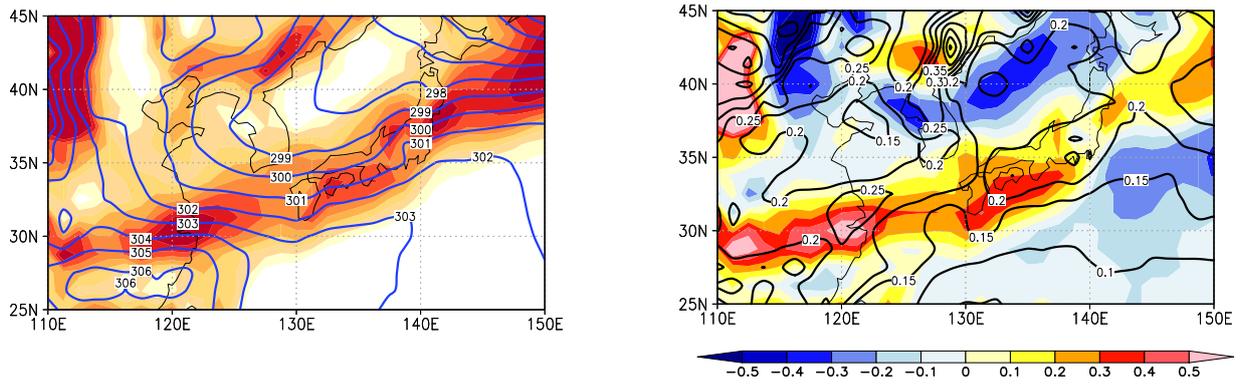


図 3.8 (左図) 7月 1-15 日の 900hPa 水平温位勾配 (色; $K (100km)^{-1}$) と温位 (実線; K) の平均場. (右図). 900hPa 水平温位勾配の気候値との差 (色) と標準偏差 (実線).

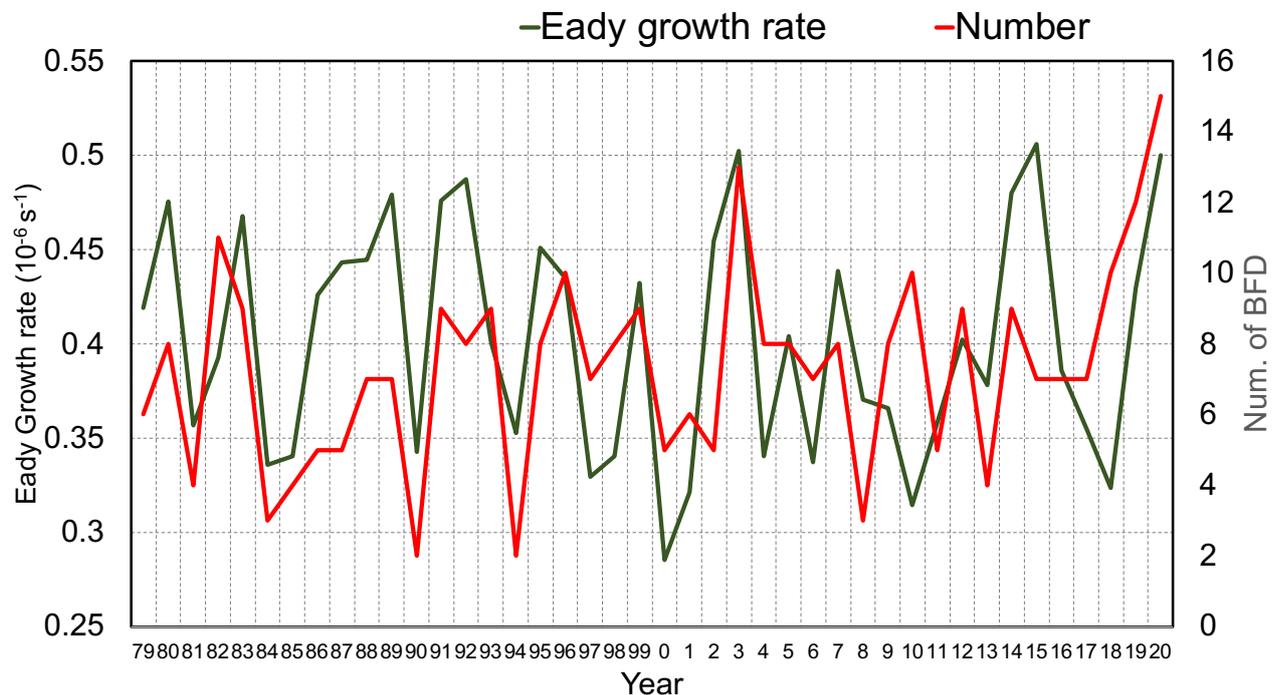


図 3.9 15 日 lowpass フィルターを施した 900hPa Eady 成長率の年々変動 (緑) とメソ α 低気圧個数の年々変動 (赤).

3.4 豪雨に対する上層トラフの影響

図 3.5 で示したように、上層トラフの接近がメソ α 低気圧の発生・発達および、豪雨へ影響していたことが示唆された。ここでは、Weather Research and Forecasting (WRF) model による数値シミュレーションを用いて、上層トラフがメソ α 低気圧および 7 月 3-4 日にかけて熊本で発生した豪雨に与えた影響を調べた。水平解像度は 3km とし、水平・鉛直格子数は 1500x1500x50 層とした。メソ α 低気圧の発生に対する上層トラフが与える影響を調べるために、低気圧発生前の時刻 (7 月 2 日 09 JST) を数値シミュレーションの開始時刻とした。初期値・境界値には Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Kobayashi et al. 2015)を用いた。

上層トラフの影響を調べるために、標準実験 (CNTL) と、上層トラフを初期値・境界値から除いた感度実験 (NOUL) を行った。Davis and Emanuel (1991) によって開発された、Piecewise PV inversion を用いて、

第2編

対流圏上層の正の PV アノマリによって誘起される 3 次元的な風場・温度場・気圧場を求め、CNTL の初期値・境界値から差し引くことで、上層トラフの影響を取り除いた。まず、CNTL と NOUL の結果を比較することで、メソ α 低気圧に上層トラフが与えた影響を調べた。メソ α 低気圧は中国大陸上で発生し、その後東シナ海を東進して九州に豪雨をもたらした。図 3.10 は CNTL と NOUL における 7 月 3 日 3 時の降水強度を示している。CNTL では中国大陸上における強い降水に伴って、低気圧が強化されている。一方、NOUL では、降水の強化が CNTL 弱く、メソ α 低気圧もあまり発達しない。したがって、上層トラフの存在が中国大陸上の対流を強化し、低気圧の発達に寄与したことが示唆される。

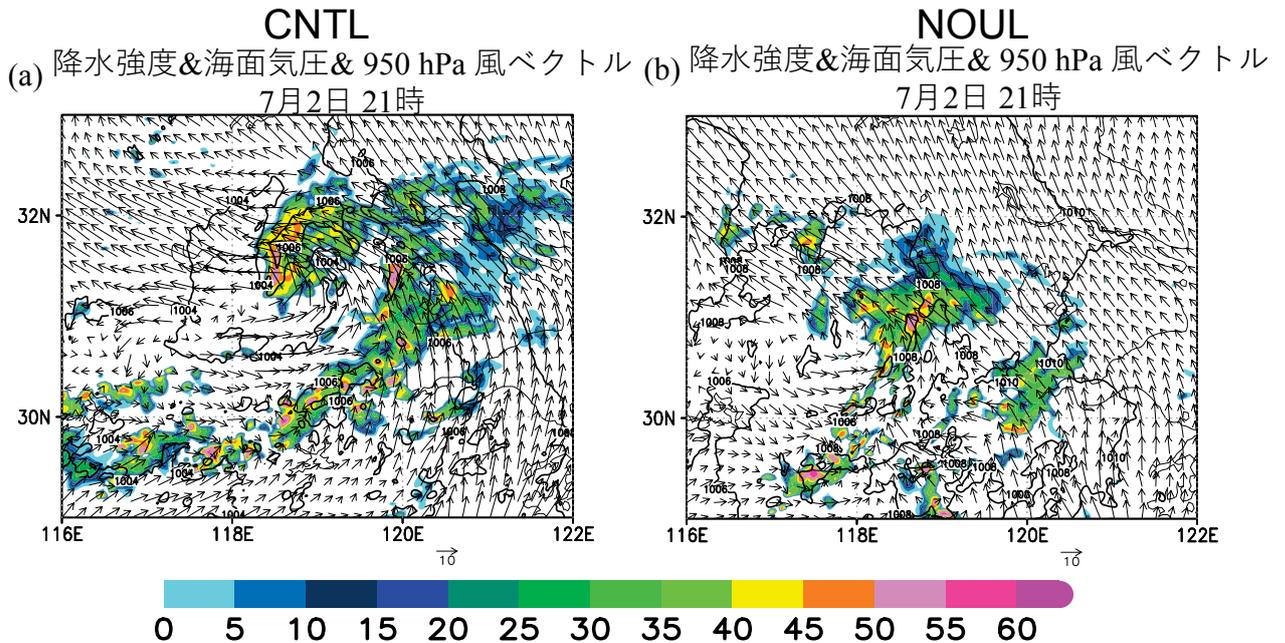


図 3.10 7 月 2 日 21 時における、(a)CNTL、(b)NOLH のシミュレートされた降水強度分布（カラー； dBZ）。実線は海面気圧，矢印は 500m 高度の水平速度ベクトルを表す。

続いて、CNTL と NOUL の降水量を比較する。CNTL における 12 時間降水量を図 3.11 に示している。熊本付近に 300mm 程度の降水量が再現され、降水量は過少評価ではあるものの、降水の空間分布などは良く度再現できていると考えられる。一方、NOUL では、九州での大雨は再現されておらず、降水分布は CNTL と比較すると大きく南にシフトしている。これらのことから、上層トラフがメソ α 低気圧の発生・発達に影響し、その結果熊本で発生した豪雨に大きな影響を与えていたことが示唆される。

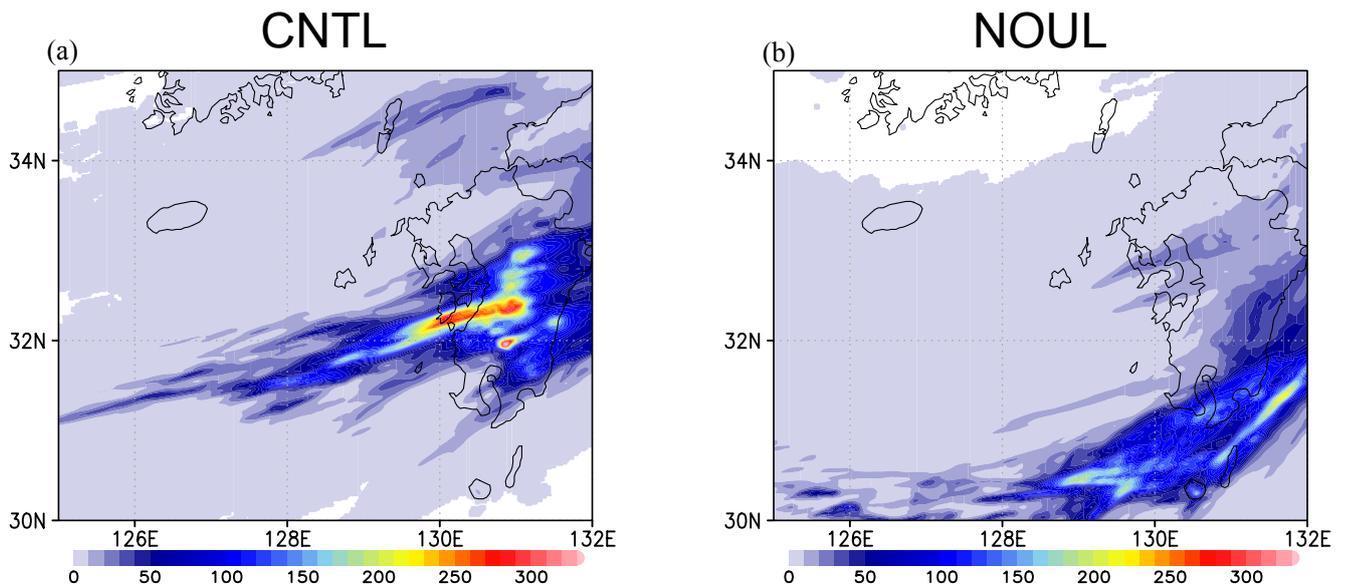


図 3.11 7月4日00時～09時までの(a)CNTL と(b)NOUL における12時間降水量.

3.5 まとめ

本研究は、令和2年7月豪雨とメソ α 低気圧の関係を調べた。過去42年間にメソ α 低気圧が九州付近に接近した際の下層水蒸気フラックスの密度分布は、メソ α 低気圧が接近していない時よりも顕著に大きくなっていった。すなわち、メソ α 低気圧が接近すると下層水蒸気フラックスが強化され、大雨発生環境場を形成しやすくなることを示唆している。

また、令和2年6-7月は、過去42年間で最も多くのメソ低気圧が検出された。メソ α 低気圧が多かった理由として、環境場の水平シアおよび傾圧性が強くなっていたことが示唆される。擾乱の発達に有利な環境場が形成されたことが、多くのメソ α 低気圧発生に寄与し、それに伴う強い水蒸気フラックスが何度も出現したことが、豪雨が何度も生じた環境場形成に重要な役割を果たしていたことが示唆される。

さらに、上層トラフが熊本県の豪雨に与えた影響を、数値シミュレーションを用いて調べた。標準実験は、概ね7月4日に発生した熊本県での豪雨の降水分布を再現していた。そこで、上層トラフの影響を除いた実験を行い、その影響を評価した。その結果、上層トラフを除くと、中国大陸上でのメソ α 低気圧の強化が顕著に弱まり、その後の熊本県での豪雨も再現されなかった。このことから、上層トラフは、中国大陸上でのメソ α 低気圧の強化に大きな役割を果たし、その結果豪雨に影響していたことが示唆された。

3.6 今後の課題

今回の研究により、梅雨前線上のメソ α 低気圧の豪雨に対する重要性が明らかとなった。今後、豪雨の予報精度向上に役立てていくためには、どのような構造・環境場を持つメソ α 低気圧が豪雨を引き起こすのかを詳細に理解する必要がある。また、メソ α 低気圧がどの程度の精度で予測できるのかといった予測可能性の研究も必要である。

第2編

参考文献

- Araki, K., T. Kato, Y. Hirockawa, and W. Mashiko: Characteristics of atmospheric environments of quasi-stationary convective bands in Kyushu, Japan during the July 2020 heavy rainfall event. *SOLA*, Vol. 17, pp8-15, 2021.
- Davis, C. A., and K. A. Emanuel, 1991: Potential vorticity diagnosis of cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 119, pp. 1929–1952.
- Hirockawa, Y., T. Kato, K. Araki, and W. Mashiko: Characteristics of extreme rainfall event in Kyushu district, southwestern Japan in early July 2020. *SOLA*, Vol. 16, pp265-270, 2020b.
- Hoskins, B. J., and P. J. Valdes: On the existence of storm tracks. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 47, pp1854–1864, 1990.
- Yanase, W., H. Niino, S.-I. I. Watanabe, K. Hodges, M. Zahn, T. Spengler, and I. A. Gurvich, 2016: Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 Reanalysis. *J. Climate*, Vol. 29, pp419–437, 2016
- Kobayashi, S., and Coauthors: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 93, pp5–48, 2015.

第4章 豪雨時の気象場の再現計算

熊本大学 石田 桂

4.1 はじめに

気象庁の発表によれば、令和2年は梅雨明けが平年値より非常に遅く、沖縄や奄美地方を除いて7月末付近であった。梅雨明けは九州南部でも7月28日（平年値より14日遅れ）、九州北部では7月30日（11日遅れ）であった。結果として日本各地に豪雨を生じ、「令和2年7月豪雨」の期間は7月3日から7月31日とされた。九州を中心に長期間に渡り大雨をもたらした7月3日～14日にかけての大気の状態についても気象庁から速報が出されている（気象庁、2020）。本研究では、気象庁の速報とは少し異なった視点から、九州に豪雨をもたらした気象条件、特に水蒸気輸送に注目し解析を行う。まず、欧州中期予報センター(ECMWF)が提供する大気再解析データ ERA5 を用い広域の水蒸気輸送の解析を行う。その後、領域大気モデルである Weather Research and Forecasting Model (WRF)を用いた再現計算を行い、より詳細な解析を行う。ここに、WRFの初期・境界条件には同様に ERA5 を用いる。

4.2 広域の水蒸気輸送

ERA5 から取得した九州において豪雨が発生した7月上旬の九州付近の Water Vapor Flux を図4.1に示す。7月3日19:00～4日6:00の Water Vapor Flux の平均値を見ると、九州南部に大気中の水蒸気が収束している（図4.1a）。また、7月6日7:00～18:00の Water Vapor Flux の平均値（図4.1b）は九州の熊本以北に集中している。このように大気中の水蒸気が収束したことにより、7月上旬に九州で豪雨が発生したものと考えられる。

次に、7月上旬の広域の水蒸気輸送(Water Vapor Flux)などを調べた。ERA5 から1時間毎の東向き Water Vapor Flux, 北向き Water Vapor Flux, 可降水量, 海面温度, 及び蒸発散量を抽出した。東向き・北向き Water Vapor Flux から絶対値及び向きを計算した。また、ERA5に含まれるデータ名 Evaporation は簡易モデルによる蒸散量を含むため蒸発散量として使用した。ただし、Evaporation データには凝縮も含まれており負値として扱われている。

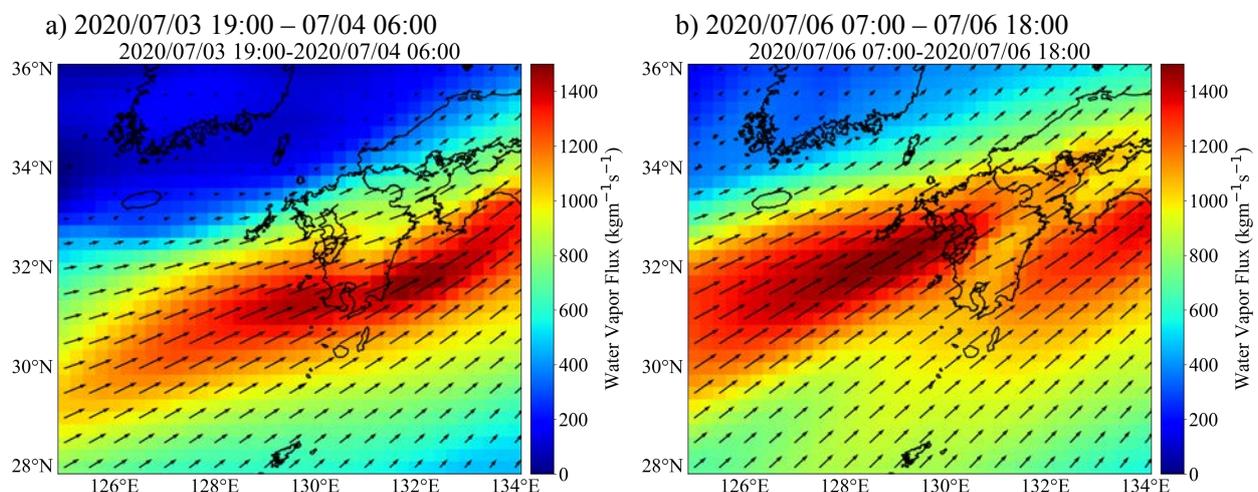


図4.1 7月3日19:00～4日6:00及び7月6日7:00～18:00の12時間平均 Water Vapor Flux

図 4.2 にアジア周辺における 7 月 1 日～3 日及び 7 月 5 日～7 日の 3 日間平均の Water Vapor Flux, 可降水量, 海面温度, 及び蒸発散量を示す. 7 月 1 日～3 日における Water Vapor Flux (図 4.2a) を見るとインド洋から東南アジアを通り南シナ海・東シナ海をとる水蒸気の流れが見受けられる. そして, 南シナ海から中国方向への流れと中国・台湾間の台湾海峡を通る流れが発生している. そこから, 九州の方向に流れ込んできているのがわかる. また, 太平洋からも強くはないが広範囲に亘り日本に向かう水

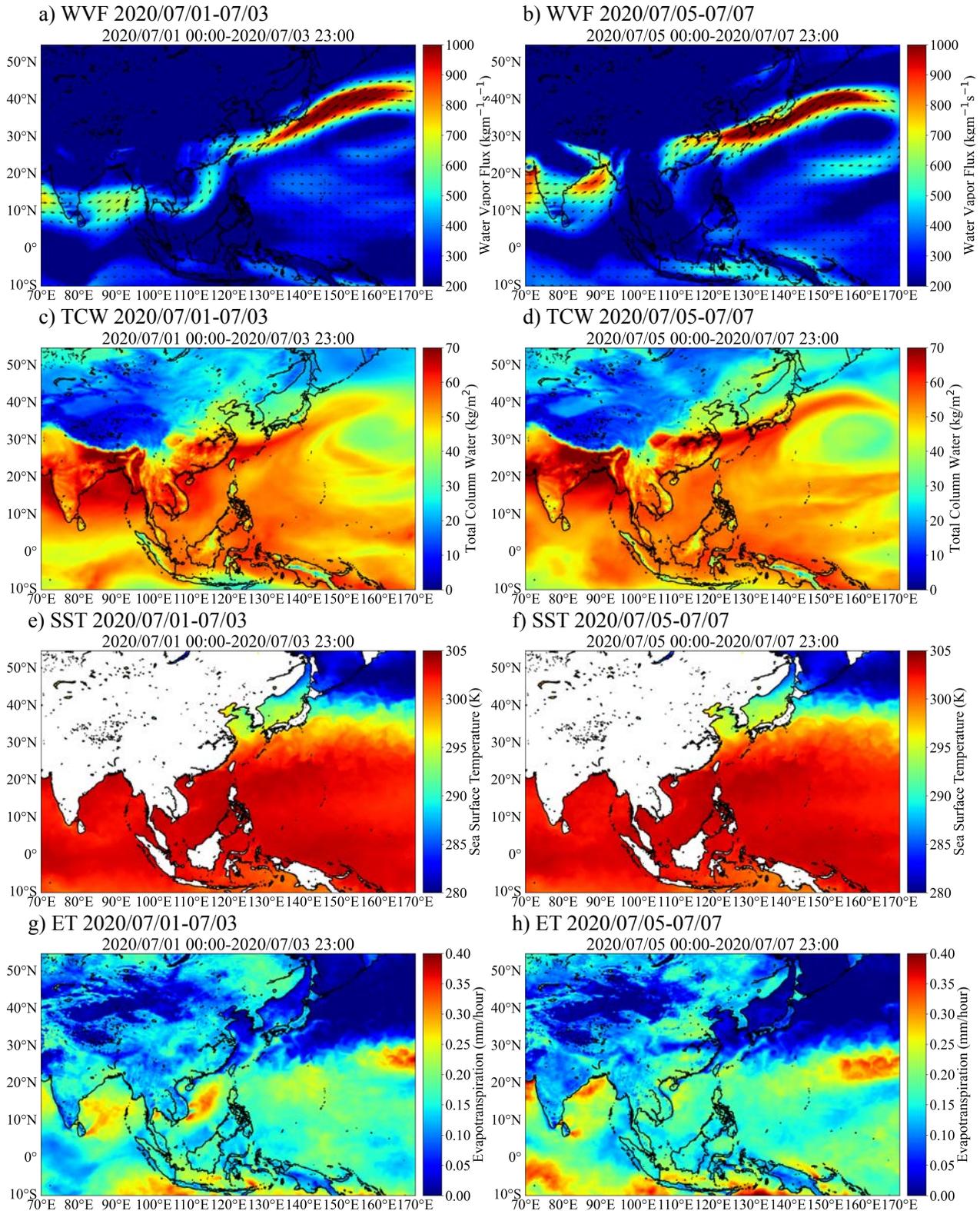


図 4.2 7 月 1 日～3 日及び 7 月 5 日～7 日の 3 日間平均の a,b)Water Vapor Flux (WVF), c,d)可降水量 (TCW), e,f) 海面温度(SST), 及び蒸発散量(ET).

第2編

蒸気の流れが確認される。図 4. 2c に示すように、可降水量は九州より南側で高い値を示している。特にインド洋、南シナ海西側、台湾北側の中国と沖縄諸島の間など、Water Vapor Flux が強くなっている領域で比較的高くなっている。海水面温度は南シナ海や太平洋の緯度 10 度～25 度程度の範囲や南シナ海で高い傾向にある（図 4. 2e）。さらに、蒸発散量（図 4. 2g）を見ると、約緯度 25 度以南で高い傾向にあり、インド洋や南シナ海を特に高い領域がある。沖縄諸島の西側や九州周辺の海域でも周辺と比べ蒸発量が高くなっている。以上のように、Water Vapor Flux の 3 日平均値を見るとインド洋からまとまった水蒸気の流れが日本にまで流れ込んできているように見受けられるが、他の変数を見ると途中で海水面温度の高い領域において海面からの蒸発により多くの水分が供給されていたと考えられる。さらには、沖縄諸島西側において蒸発した水分も 7 月 3 日～4 日の九州南部の豪雨に寄与している可能性がある。

7 月 5 日～7 日における Water Vapor Flux の平均値（図 4. 2b）は、7 月 1 日～3 日と同様に中国から東向きに強い値を示しているが、他の領域では 7 月 1 日～3 日と違いがある。7 月 5 日～7 日には、インド洋から東シナ海を通る流れが見受けられない。一方で、フィリピンとインドネシアの間を通過後、南シナ海を通り中国に流れ込んでいる流れが存在する。海水面温度（図 4. 2f）を見ると 7 月 1 日～3 日の大きな違いは見受けられないが、可降水量は 7 月 1 日～3 日には南シナ海の西側で値が大きくなっているのに対し、7 月 5 日～7 日には特徴的な差は無くなっている（図 4. 2d）。それに伴い、7 月 1 日～3 日に南シナ海西側で大きな値を示していた蒸発量が 7 月 5 日～7 日には小さくなっている（図 4. 2h）。それに対し、蒸発散量が中国と台湾近海で 7 月 1 日～3 日より大きくなっている。これに伴い、7 月 5 日～7 日には中国側及び台湾の東側海域からの Water Vapor Flux の流れが強まっているように見受けられる（図 4. 2b）。特に、中国の長江流域で可降水量が強まっており（図 4. 2d）、そこから多量の水蒸気が日本の方向に流れ込んでいる（図 4. 2b）。

上記に加え、東アジア周辺における 7 月 2 日 8:00～4 日 0:00 の Water Vapor Flux の時系列変化を調べた（図 4. 3）。7 月 2 日 8:00 時点では、台湾海峡に特に強い水蒸気の流れがあり、他にも中国を通る流れと、台湾の東側から沖縄諸島を通る流れが見受けられる（図 4. 3a）。7 月 2 日 16:00 には、沖縄諸島右辺で Water Vapor Flux が強まっている。また、中国の長江流域で水蒸気が集積している（図 4. 3b）。その後、台湾海峡や沖縄諸島付近で Water Vapor Flux が強まっており、長江流域における水蒸気の流れも徐々に東向きを変えている（図 4. 3c）。7 月 3 日 8:00 には、長江流域からの水蒸気の流れと、台湾海峡からの流れが合わさり、東シナ海の中国寄りの領域で Water Vapor flux が強まっている（図 4. 3d）。加えて、太平洋を時計回りに流れ強くはないが広範囲にわたり水蒸気が流れ込んできている。これら複数の流れが合わさり、7 月 3 日 8:00 以降、九州の西側海域で Water Vapor Flux を強まり、それが九州を含む日本に流れ込んできている。以上のように、様々な地域から複数のルートを通り水蒸気が集積し、図 4. 1a に示すような Water Vapor Flux が九州南部において収束したものだと考えられる。

4.3 領域大気モデルによる再現計算

領域大気モデル WRF を用いて豪雨の再現計算を行なった。ここでは、今次豪雨時に特に大きな被害をもたらした球磨川流域を注目した。WRF の初期・境界条件は ERA5 から得た。ERA5 の時間解像度は 1 時間であり、水平空間解像度は 0.25 度×0.25 度である。WRF の計算領域を図 4. 4 に示す。計算領域として 3 つのネストした領域を用いた。ERA5 の水平空間解像度を考慮し、計算領域の水平解像度は外側から 8.1 km×8.1 km, 2.7 km×2.7 km, 0.9 km×0.9 km とした。ここで、最内の計算領域が九州本島ほぼ全域を覆い、かつ水蒸気が流れ込んでくる西側の海域を含むように設定し、外側の計算領域は最内のもの

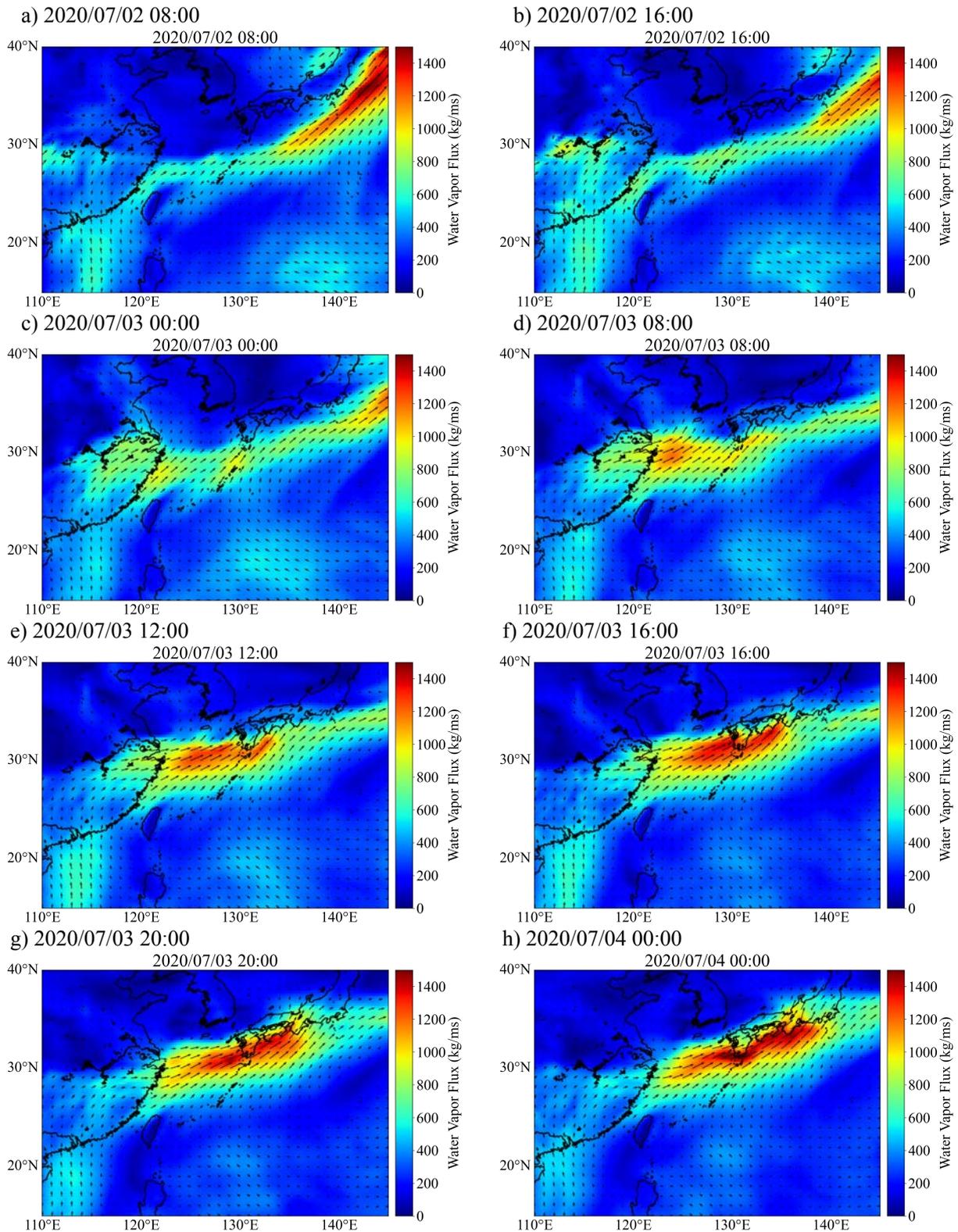


図 4.3 7月2日8:00～4日0:00のWater Vapor Flux.

のに合わせ設定した。鉛直方向には 58 分割した。球磨川流域の豪雨をもたらした大気場の解析に注目するため約 1 日のスピナップ期間を設けて、計算開始日時を 2020 年 7 月 2 日 9 時とし計算終了日時を 2020 年 7 月 5 日 9 時とした。WRF は雲微物理モデル、積雲パラメタリゼーション、陸面モデルなどのパラメタリゼーションに複数のスキーム・モデルを用意しており、適切なものを選定する必要がある。そのため、球磨川流域に豪雨が生じた期間を含む 24 時間降水量の分布をもとに試行錯誤的に各パラメ

第2編

タリゼーションのスキーム・モデルを選定した. 図 4. 5a に WRF を用いた再現計算により得られた 2020 年 7 月 3 日 12:00~2020 年 7 月 4 日 12:00 の 24 時間積算降水量の分布を示す. 同時に図 4. 5b に気象庁の解析雨量から得た 2020 年 7 月 3 日 12:00~2020 年 7 月 4 日 12:00 の 24 時間積算降水量の分布を示す. 再現計算により得られた降雨分布は解析雨量より多少南寄りであり南北に傾いているが, 概ね降水分布の広がりや強い降水強度を再現できている. 次に, この再現計算で得られた 3 次元大気場の解析を行う.

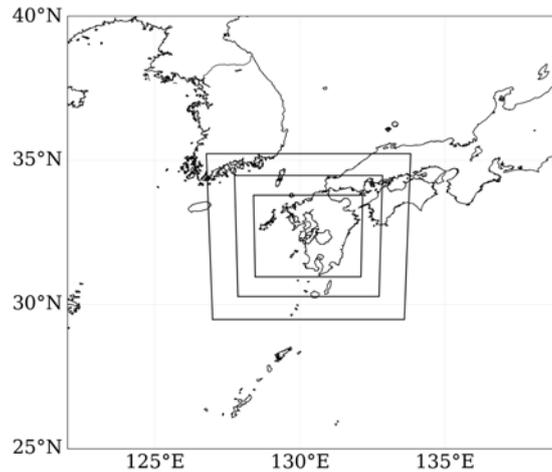


図 4. 4 WRF の計算領域

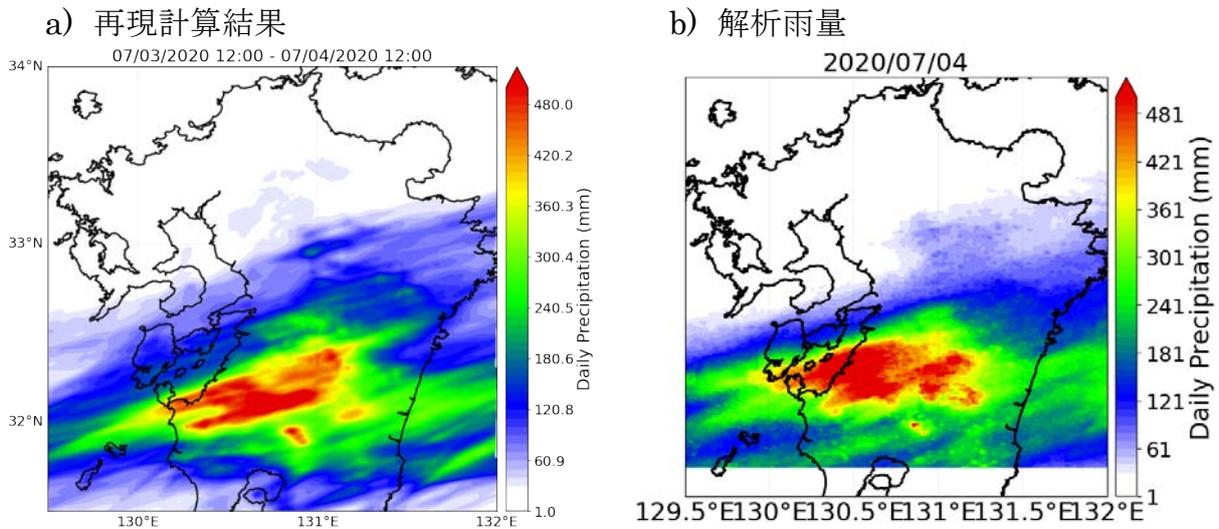


図 4. 5 7 月 3 日 12:00~4 日 12:00 の積算降水量 a)再現計算, b)解析雨量.

4. 4 再現計算で得られた 3 次元大気場の解析

図 4. 6 に WRF を用いた再現計算により得られた 2020 年 7 月 3 日 14:00~4 日 12:00 の水蒸気の 3 次元分布を示す. ここに最内の領域は範囲が狭いため中間の計算領域の結果を用いた. 2020 年 7 月 3 日 14:00 から徐々に九州南部に向かい多量の水蒸気が入り込んできているのがわかる. 7 月 3 日 20:00 から徐々に熊本平野にも多量の水蒸気が入り込んできている. 7 月 4 日 0:00 以降徐々に多量の水蒸気の流れ込んで来る位置が南下していき, 特に 7 月 4 日 4:00~6:00 には九州山地の南部に多量の水蒸気の流れ込んでくる.

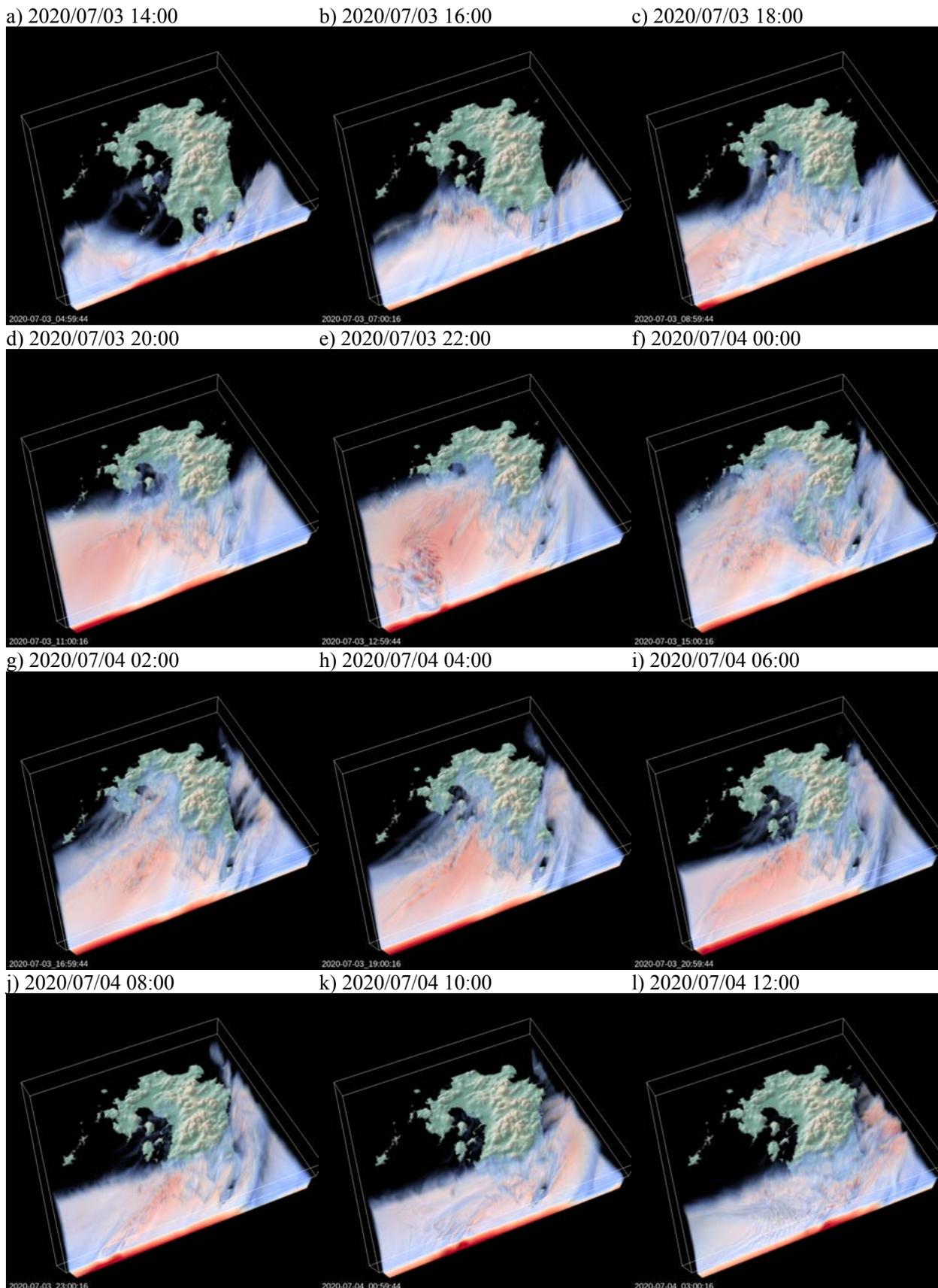


図 4.6 2020 年 7 月 3 日 14:00~4 日 12:00 の水蒸気の 3 次元分布.

第2編

次に図 4.6 に WRF を用いた再現計算により得られた 2020 年 7 月 3 日 14:00～4 日 12:00 の高度 500 m における気温分布及び風速分布を示す。水蒸気輸送と同様に 2020 年 7 月 3 日 14:00 から徐々に気温勾配が大きい位置が北に移動し、7 月 3 日 22:00 には九州北部に達している。一方、風速分布を見ると 7 月 3 日 16:00 には熊本平野（菊池・八代平野などを含む）上を北向きに流れているが、3 日 20:00 辺りから徐々に熊本平野上の風向きが東向きに変化している。気温勾配が大きい位置は 7 月 3 日 22:00 以降南下し、7 月 4 日 2:00～8:00 には九州西側では球磨川流域に近い位置で温度勾配が大きくなっている。このとき、風速分布を見ると風が球磨川流域周辺に収束していることがわかる。7 月 4 日 8:00 以降は徐々に九州西側における南北方向の温度勾配は小さくなっており、九州南部の風速は東向きに変化している。

図 4.7 に WRF を用いた再現計算により得られた 2020 年 7 月 3 日 14:00～4 日 12:00 の雨水の 3 次元分布を示す。再現計算では 2020 年 7 月 3 日 16:00 の時点では九州南西の海域で強い雨水分布が見られるが九州本島では雨水の分布は弱い。7 月 3 日 18:00 以降徐々に九州上に強い雨水分布が見られる。7 月 3 日 18:00 の時点では九州南部に強い雨水分布があり、7 月 3 日 22:00 にかけて雨水分布が北上している。また、7 月 3 日 22:00 の時点で九州南西の海域に強い雨水分布が見られる。7 月 3 日 00:00 時点では九州南西にあった雨水分布と九州上にあった雨水分布が合わさり、その後九州南部、大凡球磨川流域周辺に強い雨水分布が位置している。そして、7 月 4 日 6:00 以降徐々に強い雨水分布が南東に移動している。

本解析は再現計算を元に行っている。図 4.5 に示すように再現計算では降水分布が解析雨量より南にずれている。また、7 月 4 日 0:00 以前の降水が強く出過ぎている。観測された降水分布を考慮すると、実際には雨水分布はより東西向きにまた少し北側で発生していたものと考えられる。しかしながら、再現計算により 7 月 4 日 0:00 以降の現象は大まかには捉えられていると考えられる。上記の変数を合わせて見ると、温度勾配が大きい位置つまり前線が 7 月 3 日 22:00 から南下して、7 月 4 日 2:00～8:00 には球磨川流域南端周辺にあり、そこに水蒸気が収束している。九州西側の海域の温度勾配が大きい位置で強い雨水分布が見られるが、九州山脈上でより強くなっている。これらのことから、多量の水蒸気の流れが前線と九州山地に阻まれ持ち上げられることにより今次豪雨が発生したものと考えられる。

4.5 まとめ

本研究ではまず大気再解析データである ERA5 を用いて広域な水蒸気輸送の解析を行なった。インド洋からまとまった水蒸気の流れが日本にまで流れ込んできて、途中海水面温度の高い領域において海面からの蒸発により多くの水分が供給されていたと考えられる。また 7 月初旬に東シナ海周辺では複数の方向から水蒸気が収束し九州周辺に流れ込んでおり、これらが九州南部に多量の水蒸気をもたらしたと考えられる。また、本研究では領域大気モデルである WRF を用いて球磨川流域に注目し再現計算を行なった。24 時間積算値で見たところ降水は分布及び強度ともに大まかにではあるが再現された。最後に再現結果を用い 3 次元の大気場の解析を行なった。再現結果による 3 次元水蒸気量、高度 500 m の風速・気温分布、3 次元雨水分布などを見ると、多量に供給された水蒸気が南下してきた前線と九州山地に阻まれ持ち上げられることにより豪雨を発生したと考えられる。

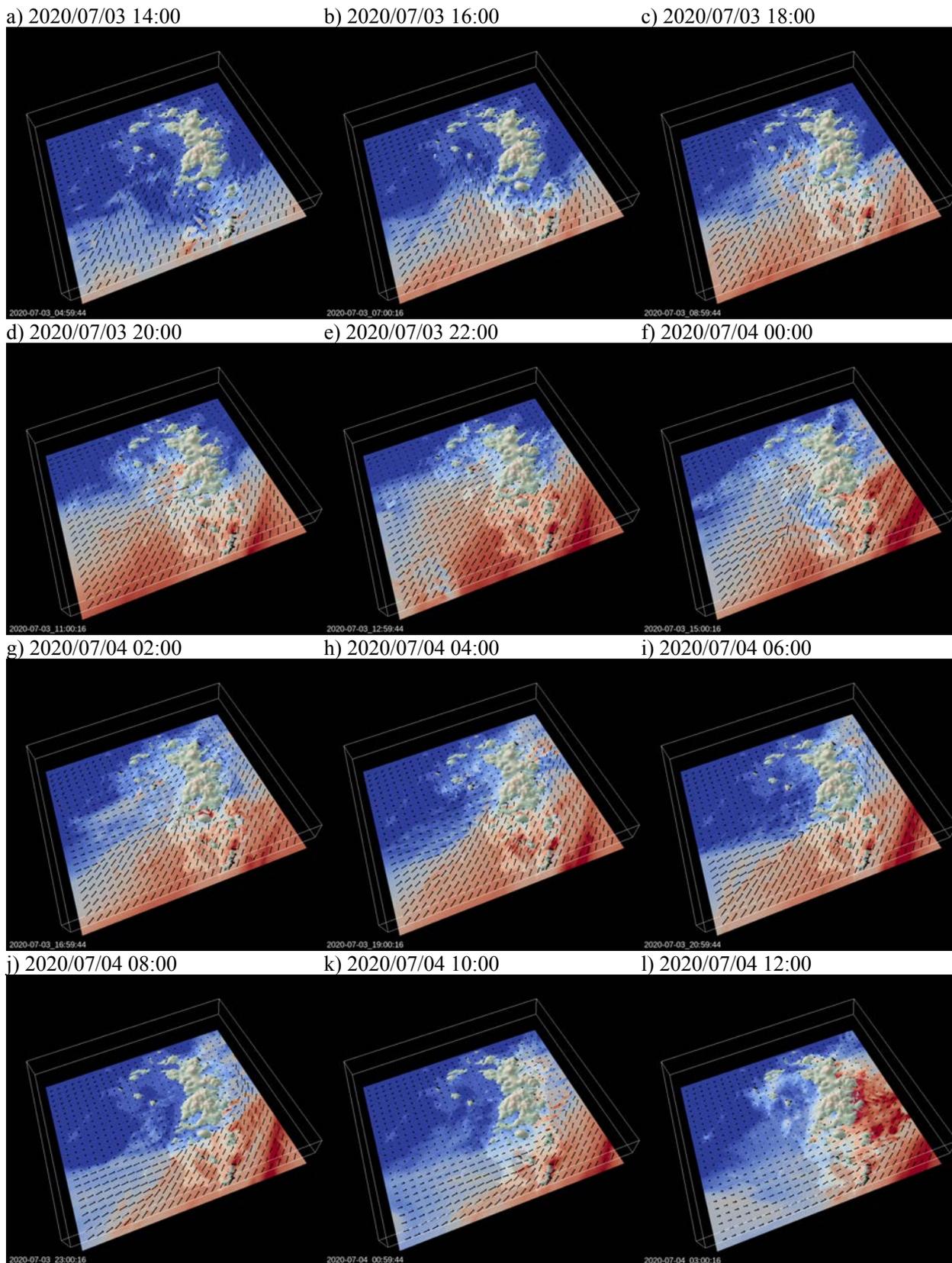


図 4.7 2020 年 7 月 3 日 14:00~4 日 12:00 の高度 500 m における気温分布及び風速分布.

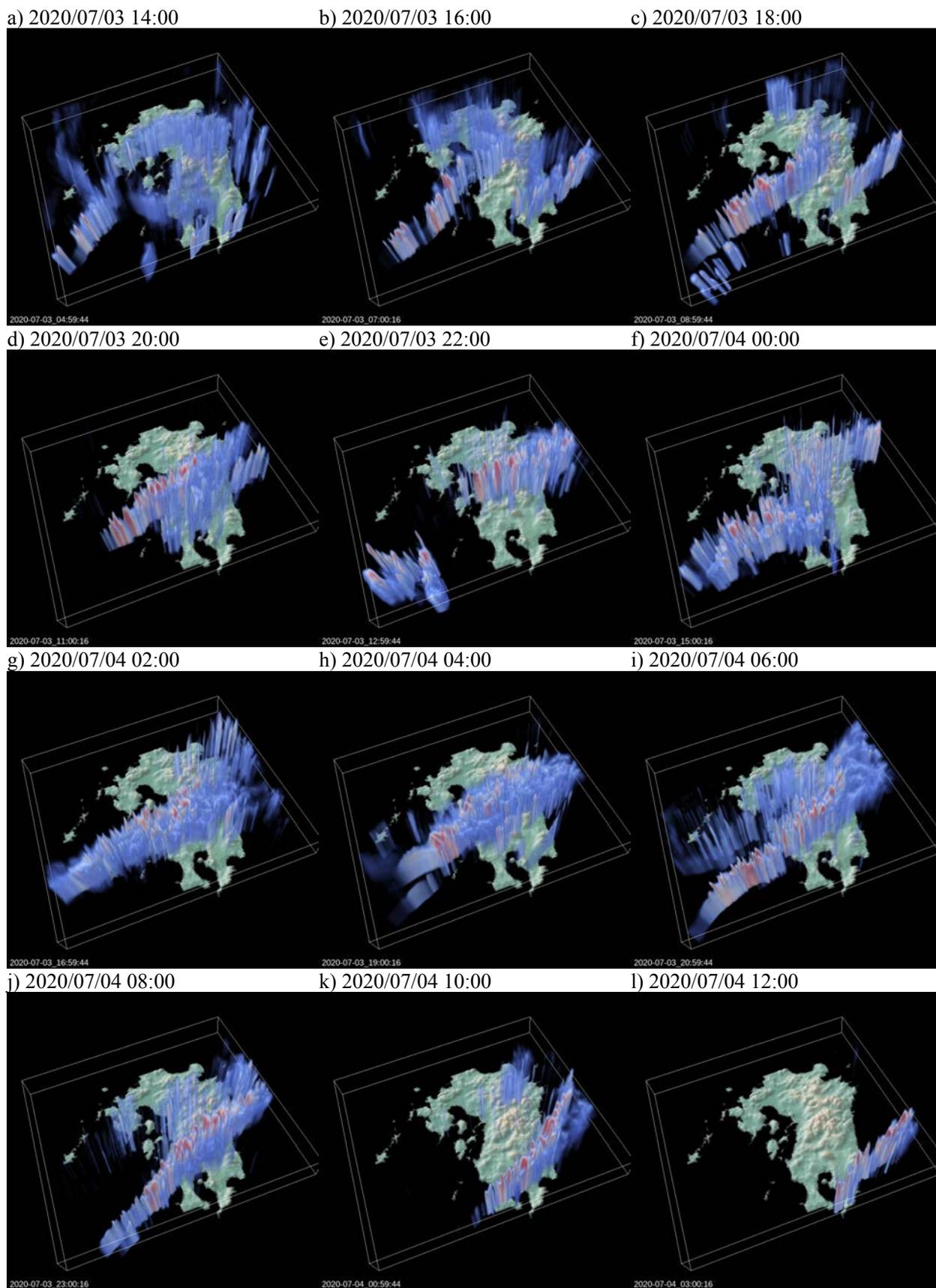


図 4.8 2020 年 7 月 3 日 14:00~4 日 12:00 の雨水の 3 次元分布.

4.6 今後の課題

豪雨災害による人災を防ぐためには豪雨の予報精度の向上が不可欠である。しかしながら、豪雨の発生機構は複雑かつ多様である。本研究を含めこれまでに行なってきたように豪雨の発生機構に関する詳細な解析を継続していく必要があり、また解析で得られた結果・知識を集積していく必要があると考えられる。さらには、観測技術の向上、観測網の高密度化・広域化、モデルの精度向上なども必要になると考えられる。本研究における再現計算では大まかには降水分布・強度及び3次元大気場を再現できていると思われる。一方で、再現計算にあるにも関わらず降水分布・強度でさえ完璧ではないとも言える。再現計算による降水分布や前線位置などは実際よりも少し南にずれていた。図 4.1a に示すように初期・境界条件に用いた ERA5 において Water Vapor Flux が大きい位置は球磨川流域より南にあり、ERA5 自体による問題だと考えられる。本研究では事前に他にもいくつかの再解析データを試し、最も再現性の良かった ERA5 を最終的に用いた。つまり、再現計算の精度向上には再解析データの精度向上が必須である。そして、再解析データの精度向上には観測技術の向上、観測網の高密度化・広域化、モデルの精度向上が不可欠である。予報精度の向上はより困難であり、より多くの改善が必要となる。豪雨に関わる様々な研究の進展が期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、欧州中期予報センター(ECMWF)が提供する大気再解析データ ERA5 を用いた。また、解析雨量は気象庁より同庁福岡管区气象台を通じ提供していただいた。

参考文献

気象庁：「令和2年7月豪雨」の特徴と関連する大気の流れについて，2020.

<http://www.jma.go.jp/jma/press/2007/31a/r02gou.pdf>

第5章 球磨川流域の降雨と被害の関係について

防災科学技術研究所 上米良 秀行

5.1 はじめに

本研究では、令和2(2020)年7月豪雨時の降雨と被害の関係について、熊本県南部を流れる一級河川球磨川の流域を対象に調査を進めた。球磨川の流域面積は1,880 km² (国土交通省河川局, 2007)であり、気象庁の解析雨量データ(オフライン版)によると、流域全体で空間平均(流域平均)した年雨量の16年間(2004–2019年)の累年平均は3,061 mm (year)⁻¹、7月の月雨量の累年平均は578 mm (month)⁻¹である。災害が発生した2020年7月4日の日雨量の地理的分布(図5.1)をみると、球磨川流域のあたりに集中して降雨があったことが分かる。この7月4日の1日だけで、累年平均月雨量の57%を占める329 mm d⁻¹の日雨量を記録した。日雨量ではなく24時間雨量の最大値をみると、7月4日10時までの24時間で421 mm (24 h)⁻¹を記録した(累年平均月雨量の73%)。

令和2年7月豪雨のような大雨事象に伴う災害発生について、その場の降雨だけを見ていても、流域のある地点における危険性はよくわからない。その地点からみて上流にあたる面積全体、すなわち、その地点が受け持つ面積全体の降雨について丁寧に調べる必要がある。また、雨量を集計する際の時間スケール(時間の長さ)についても注意を払う必要がある。半日や1日、2日といった、人間にとって都合のよい時点の雨量や都合のよい時間スケールの雨量だけを見ていても、災害発生危険性はよくわからない。

本研究では、流域のある地点が受け持つ上流の面積全体のことを「集水域」と呼ぶ。また、集水域全体で空間平均した雨量のことを「集水域平均雨量」と呼ぶ。この集水域平均雨量を1時間から48時間まで様々な時間スケールで1時間ごとに集計し、令和2年7月豪雨が過去の降雨に比べて統計学的にどのくらいめずらしい降雨であったのか、災害発生との対応はどうであるか、などについて調査を進めた。

5.2 データと方法

5.2.1 データ

本研究では以下に示すデータを用いた。

a) 雨量データ

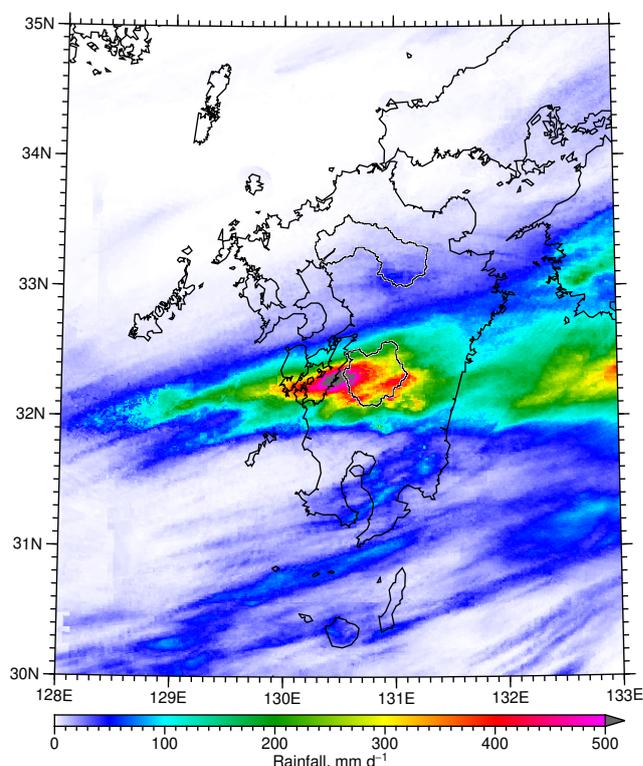


図5.1 解析雨量データ(オンライン版)に基づく2020年7月4日の日雨量の地理的分布。

第2編

気象庁による雨量解析データの毎正時の1時間雨量を用いた。

- 1988年4月–2019年12月: オフライン版
- 2020年: オンライン版

b) 河川流路網データ

格子間隔緯度経度15秒(約500m)の格子型データ HydroSHEDS (Lehner *et al.*, 2008)の drainage direction (DIR), flow accumulation (ACC)を用いた。

5.2.2 方法

河川流路網データ HydroSHEDS DIR から球磨川の流域を抽出した。格子点(ます目)の総数は10,487である。この10,487のすべての格子点(以降,単純に地点と呼ぶ)について,解析雨量データを用いて1988年4月から2020年12月までの約33年分の1時間ごとの集水域平均雨量を求めた。各地点のます目の面積は, Oki and Sud (1998)の方法で求めた。

つぎに,1988年4月から2020年12月までの期間について,解析雨量データの欠損状況を調べた。その結果,2003年以前のデータには欠損が多いことがわかった(図5.2左)。流域出口地点の集水域平均日雨量の年最大値の経年変化(図5.2右)をみると,1993年や1995年にも2020年の数値に匹敵する大きな数値が示されている。これらの数値を以降の分析に用いるか否かで分析結果が大きく変わる可能性がある。その他の年の数値についても,データの欠損により真の年最大値を示していない可能性がある。これらを原因とする誤解釈を防ぐために,2003年以前のデータは以降の分析には用いないことにした。

つぎに,流域各地点について,2004年から2020年までの17年分の集水域平均雨量を2時間から48時間まで1時間刻みの時間スケールで集計した(流域出口地点のみ,49時間から72時間までの時間スケールについても集計)。そして,流域各地点,各時間スケールについて,集水域平均雨量の年最大値を抽出し,L積率法で Gumbel 分布にあてはめることにより確率密度関数を求めた。

こうして求めた多数(10,487地点 × 48スケール = 503,376)の確率密度関数を用いて,2020年7月4

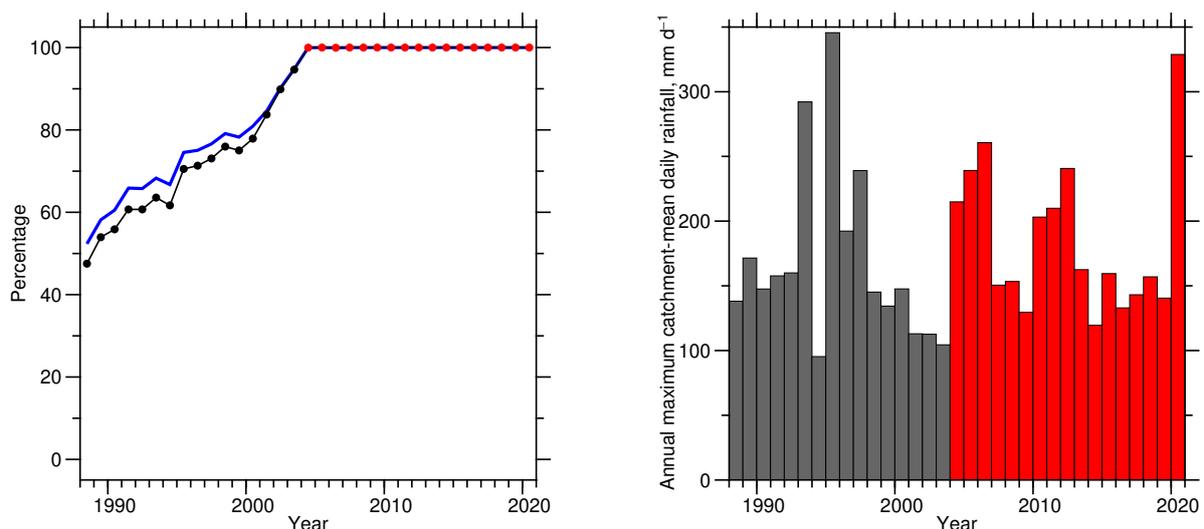


図5.2 解析雨量データの年ごとの非欠損率(丸)・平均非欠損面積率(青の実線)(左)および流域出口地点の集水域平均日雨量の年最大値(右)の経年変化。非欠損率は欠損を含まないファイルの存在率。非欠損面積率は流域面積に占める非欠損面積の割合。データに欠損のない(2004, 2006年はほぼない)2004年以降に赤の着色を施してある。ただし,2004年の1時間分,2006年の3時間分のデータに若干の欠損がある。また,2006年は1時間分のデータが存在しない。

第2編

日を中心とする7月1日から7日までの7日間の流域各地点、各時間スケールの1時間ごとの集水域平均雨量を再現期間に変換して分析した。

5.3 結果と考察

5.3.1 集水域平均雨量の確率密度関数

球磨川流域の全地点の確率密度関数を求める前に、流域全体の平均的な降雨の様子を概観するために、流域出口地点の集水域平均雨量（流域平均雨量）について解析し、以下のような結果を得た。

2004年から2020年までの17年間について、流域出口地点の集水域平均雨量の年最大値と時間スケールの関係を見ると、令和2年7月豪雨では概ね時間スケール40時間以下の場合に過去（2004–2019年）の最大値を上回る量の降雨があったことが分かる（図5.3a）。

このデータに基づいて、雨量と時間スケールの2変数の確率密度関数を求めた。2019年までのデータを用いて求めた確率密度関数（U19、図5.3b）と、2020年の数値を含む全データを用いて求めた確率密度関数（U20、図5.3c）を比較しても、両者のちがいはほとんど分からないが、例えば、24時間雨量の確率密度関数だけを比較してみると、2020年の大きな数値に引きずられて、U20の分布はU19の分布よりも正の方向に裾野が分厚く長く伸びていることがわかる（図5.3d）。

2020年の24時間雨量の最大値は $421\text{ mm (24 h)}^{-1}$ であり、これを再現期間に変換すると、U19では242年、U20では63年となる（図5.3d）。421という数値を統計に含むか否かによって、再現期間が文字通り桁違いに大きく異なることから、2020年の雨量が過去（2004–2019年）の雨量に比べて如何に多いものであったのか理解できる。再現期間の極大は時間スケール5時間や9時間の場合であり、U19に基づけばそれぞれ9,086年と8,040年であるが、U20に基づけば265年と255年である（図5.3e）。これらの結果から、以降の解析では、2020年を含む全データを用いて求めた確率密度関数U20を用いることにした。

5.3.2 集水域平均雨量と再現期間

確率密度関数U20を用いて求めた各時間スケールの集水域平均雨量の再現期間の最大値の地理的分布のうち、時間スケール5, 9, 12, 18, 24, 26時間の地理的分布（図5.4右、図5.5右）を集水域平均雨量の地理的分布（図5.4左、図5.5左）と共に観察してみよう。

時間スケール5時間の地理的分布では、流域西部の芦北町東部や球磨村北部を中心とする多雨域（R1）が認められる（図5.4上段左）。再現期間の地理的分布は雨量の地理的分布と一致しておらず、山江村中央部を中心として東西に伸びる再現期間の長い（めずらしい雨が降った）地域（P1）が認められる（図5.4上段右）。

時間スケール9時間の地理的分布では、時間スケール5時間の場合に見られた多雨域R1に加えて、流域南西部の人吉市南西部のあたり（R2）、および、流域東部の多良木町中部、湯前町、水上村南東部のあたりに多雨域（R3）が認められる（図5.4中段左）。また、時間スケール5時間の場合と同様に、再現期間の地理的分布は雨量の地理的分布と一致しておらず、P1地域に加えて、あさぎり町北部、多良木町北部、湯前町のあたりに球磨川に沿って東西に伸びる再現期間の長い地域（P2）が認められる（図5.4中段右）。

時間スケール12時間の地理的分布では、集水域平均雨量の特徴については、時間スケール9時間の場合と大きく違わない（図5.4下段左）。再現期間については、P1地域がやや不明瞭となる一方、P2地

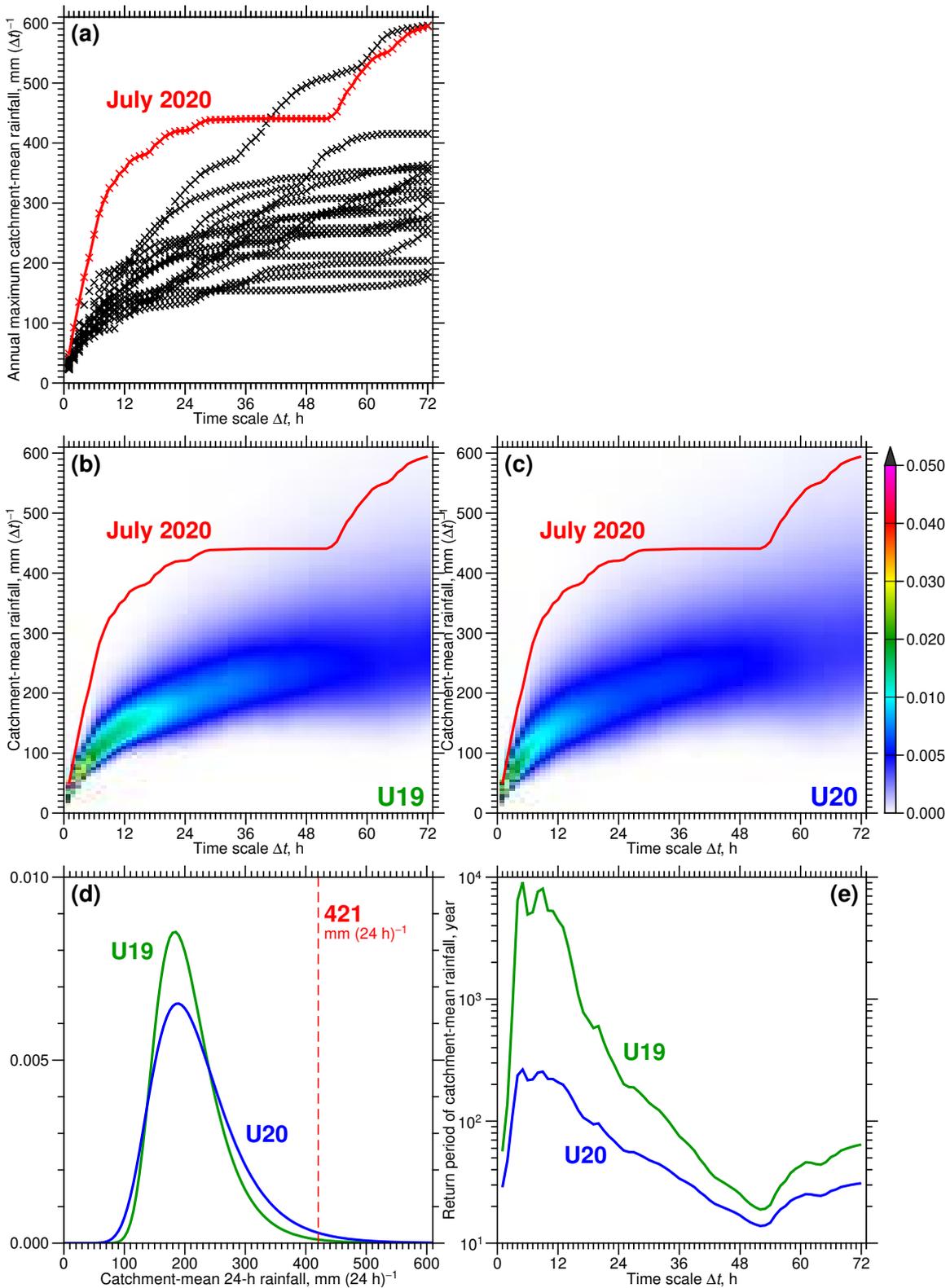


図 5.3 2004 年から 2020 年までの球磨川流域出口地点の集水域平均雨量（流域平均雨量）に関する解析結果. (a) 年最大雨量（縦軸）と時間スケール（横軸）の関係. 赤のバツ印は 2020 年, 黒のバツ印は他の年の最大雨量, 赤の実線は 2020 年 7 月 1-7 日の最大雨量. (b) 2019 年までのデータを用いて求めた雨量と時間スケールの 2 変数確率密度関数 (U19). 赤の実線は(a)と同じ. (c) 2020 年を含む全データを用いて求めた 2 変数確率密度関数 (U20). 赤の実線は(a)と同じ. (d) U19 と U20 から抽出した 24 時間雨量の確率密度関数. (e) U19 と U20 を用いて求めた時間スケールごとの再現期間.

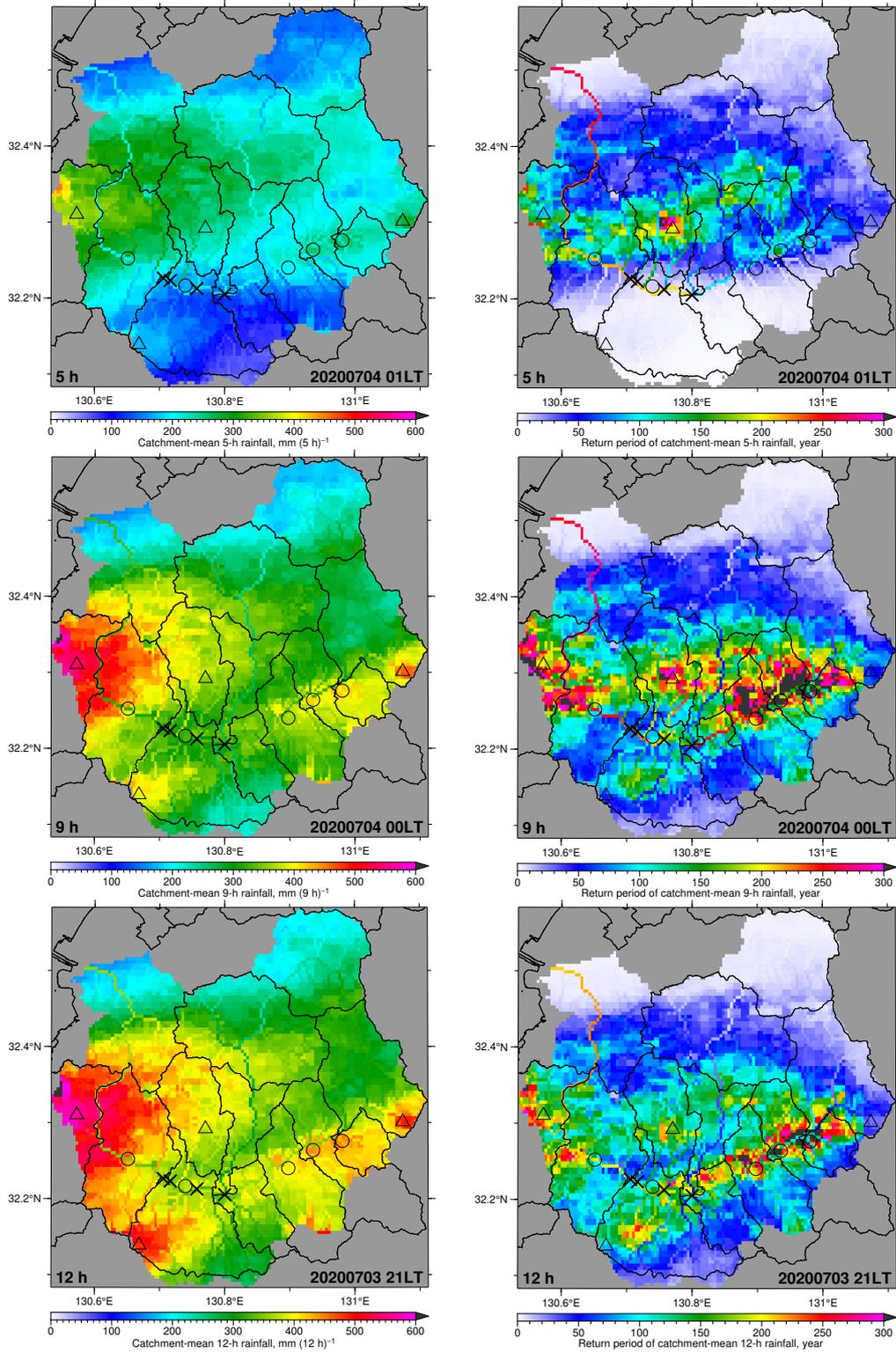


図 5.4 球磨川流域の集水域平均雨量の最大値 (左) とその再現期間 (右) の地理的分布. 上段 : 時間スケール 5 時間, 中段 : 9 時間, 下段 : 12 時間. 5 つの丸は, 左 (西) から順に, 球磨村役場, 人吉市役所, あさぎり町役場, 多良木町役場, 湯前町役場の位置を示す. 4 つの三角は, 芦北町東部 (流域西部, 芦北町は球磨村の西隣), 人吉市南西部 (流域南西部), 山江村中央部 (流域中央部, 山江村は人吉市の北隣), 水上村南東部 (流域東部, 水上村は湯前町の北隣) を示す. 4 つのバツ印は, 左から順に, 球磨川の破堤箇所 (55.0k 左岸, 56.4k 右岸), 山田川合流点, 川辺川合流点の位置を示す.

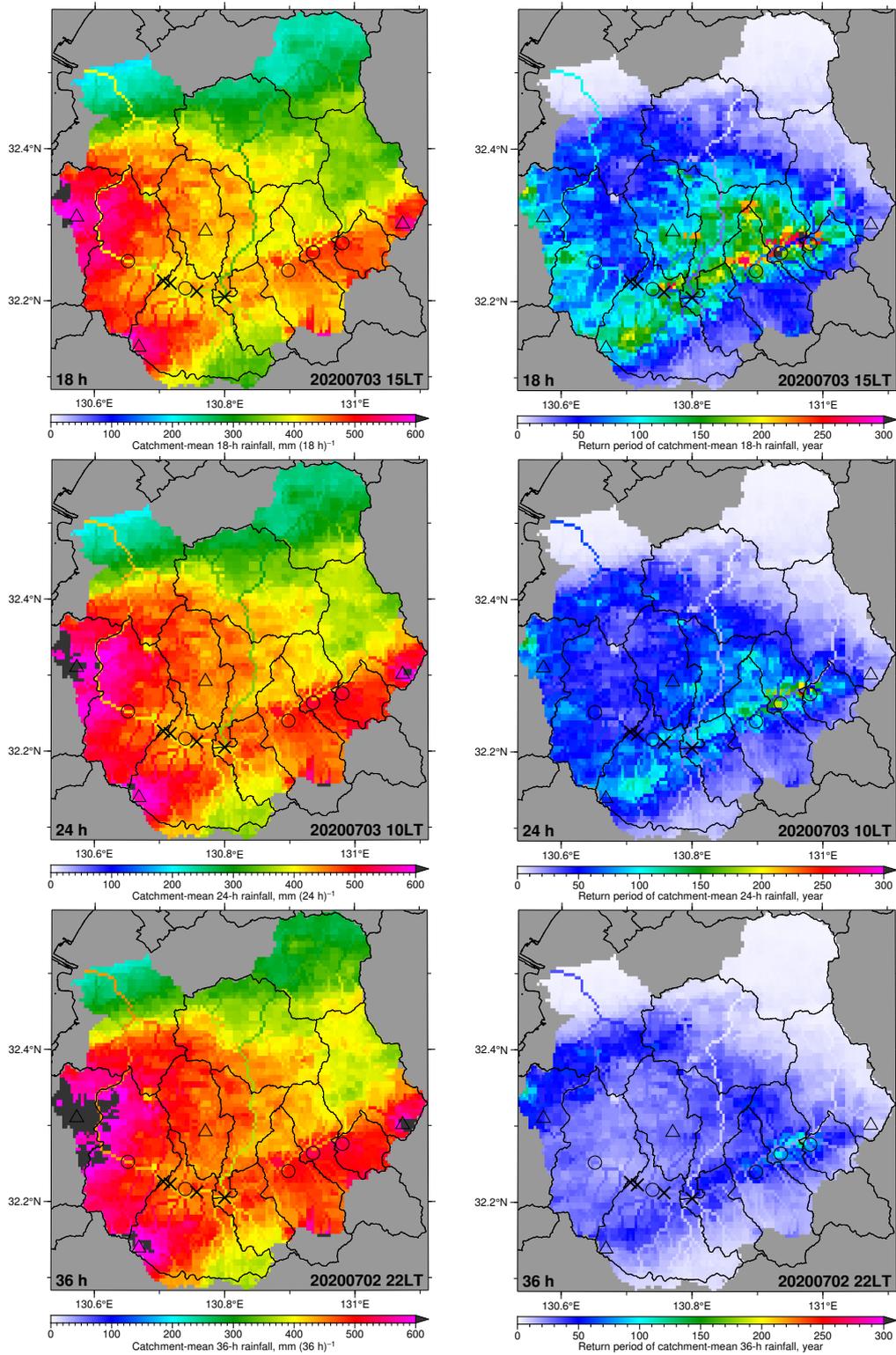


図 5.5 球磨川流域の集水域平均雨量の最大値 (左) とその再現期間 (右) の地理的分布. 上段: 時間スケール 18 時間, 中段: 24 時間, 下段: 36 時間. 丸・三角・バツ印は, 図 5.4 に同じ.

第2編

域が西側に伸びて、人吉市南部から湯前町までまっすぐに伸びる帯状の地域を形成している（図 5.4 下段右）。

時間スケール 18, 24, 36 時間の地理的分布では、集水域平均雨量の特徴については、時間スケール 9, 12 時間の場合と大きく変わらない（図 5.5 左）。再現期間については、P2 地域が維持される一方、P1 地域は時間スケールが長くなるにつれて、しだいに見えなくなる（図 5.5 右）。時間スケール 36 時間の場合には、弱い（周囲に比べて相対的に再現期間が長い、数十年程度）ながらも流域北西部に東西に伸びる再現期間の長い第三の地域（P3）が認められる（図 5.5 下段右）。

以上の結果をまとめると、集水域平均雨量と再現期間の地理的分布はかならずしも一致しておらず、また、特に再現期間については、時間スケールごとに地理的分布の特徴が異なることがわかった。

5.3.3 多時間スケール再現期間情報の要約

以上の結果を踏まえながら、集水域平均雨量の多時間スケール再現期間情報の要約方法について検討してみよう。

集水域平均雨量の再現期間の最大値が各時間スケール（1-48 時間）でしきい値を超えた回数の地理的分布（図 5.6）を見ると、しきい値を 50, 100, 150, 200, 250, 300 年と長くするにつれて、しだいに再現期間の長い地域、すなわち、過去の降雨に比べて統計学的にめずらしい雨が降り、災害発生の危険性が高い地域が絞られてゆくことがわかる。

このことを要約して 1 枚の地図上に表現するために、6 枚の地図（図 5.6）を合成する。各しきい値での地理的分布（図 5.6）を二値化（回数 1 以上を 1、回数 0 を 0 とする）して足し合わせ、50（年）を掛けることで、図 5.7 右上に示す地理的分布が得られる。これと同じものは、令和 2 年 7 月豪雨時の各時刻、各時間スケールの両方でみて再現期間の最も長かった数値を各地点の代表として取り出すことによっても描くことができるため、この地理的分布を「再現期間最大値分布」と呼ぶことにする。

この再現期間最大値分布（図 5.7 右上）では、集水域平均雨量の地理的分布（図 5.7 左上）の多雨域とは異なる場所に再現期間の長い地域が認められる。すなわち、前小節で見たように、再現期間の長い 2 つの地域 P1 と P2 が明瞭に示されており、また、球磨川やその各支川の状況もあわせて俯瞰的に把握できる。ただし、河道沿いの情報と河道周辺地域（山地や堤内地）の情報が混在しているため、両者を区別して示すことが望ましいと考えられる。そこで、例えば、ACC（図 5.7 左下）が 30 以上の地点を河道、30 未満の地点を河道でない地点とみなして後者の再現期間の色を薄く表示（図 5.7 右下）すれば、情報を読み取りやすくすることができる。

以上のような検討を経て作成した再現期間最大値分布（図 5.7 右下）では、合計 35 か所で破堤や越水・溢水が確認された（国土交通省, 2021）球磨川本川が、甚大な浸水被害を生じた人吉市（図中、右から 1 番目や 2 番目のバツ印のあたり）や球磨村、芦北町、八代市を流れ下って河口に至るまでの区間において、再現期間最大値 200 年以上を示す黄色や、250 年以上を示す赤色の地点が連続して示されており、それぞれの地点でみてその上流において、過去の降雨に比べて統計学的にめずらしい雨が降り、災害発生の危険性が高い状況であったことが理解できる。

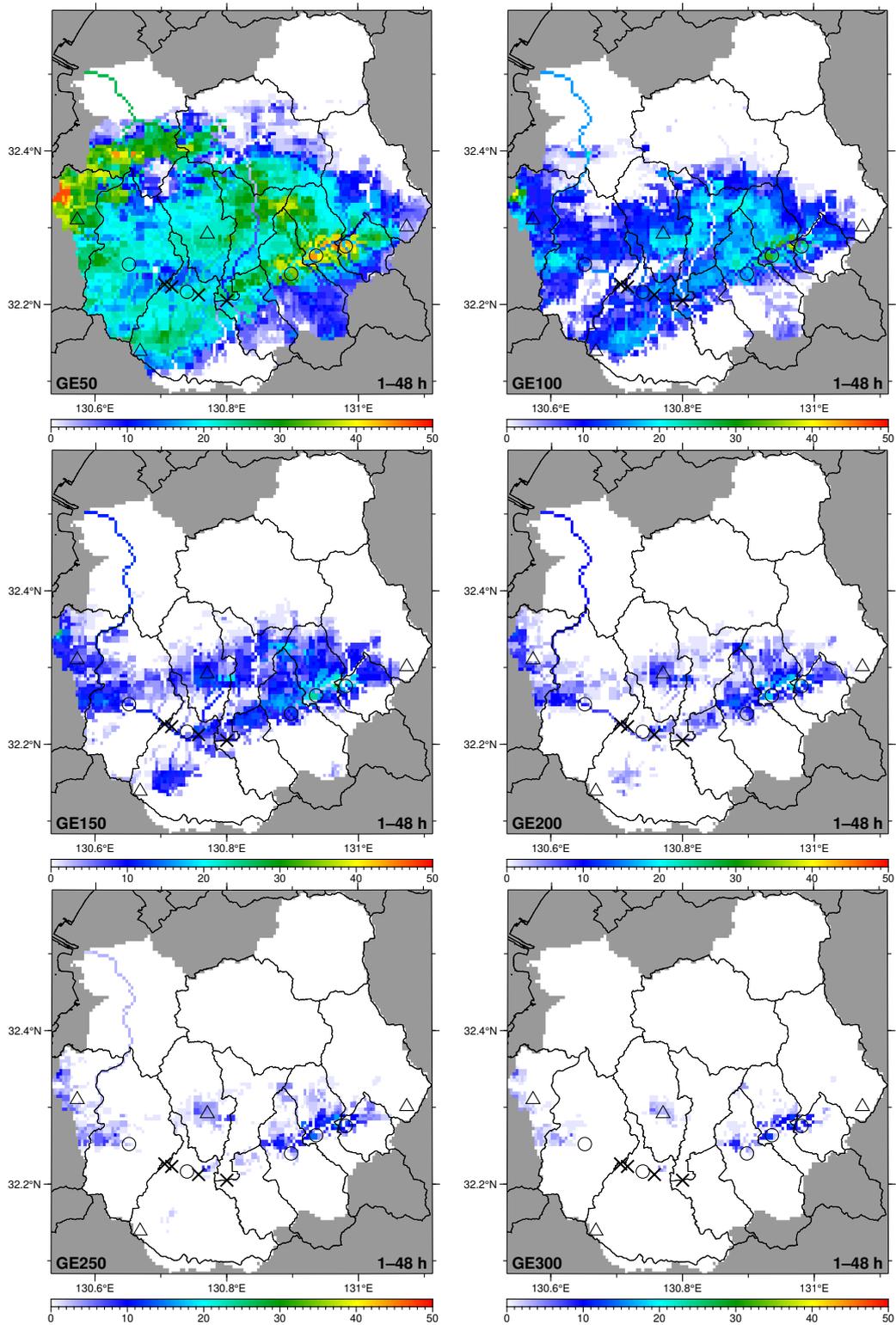


図 5.6 集水域平均雨量の再現期間の最大値が各時間スケール (1-48 時間) でしきい値を超えた回数の地理的分布. 上段 : しきい値 50 年 (左), 100 年 (右), 中段 : 150 年 (左), 200 年 (右), 下段 : 250 年 (左), 300 年 (右). 丸・三角・バツ印は, 図 5.4 に同じ.

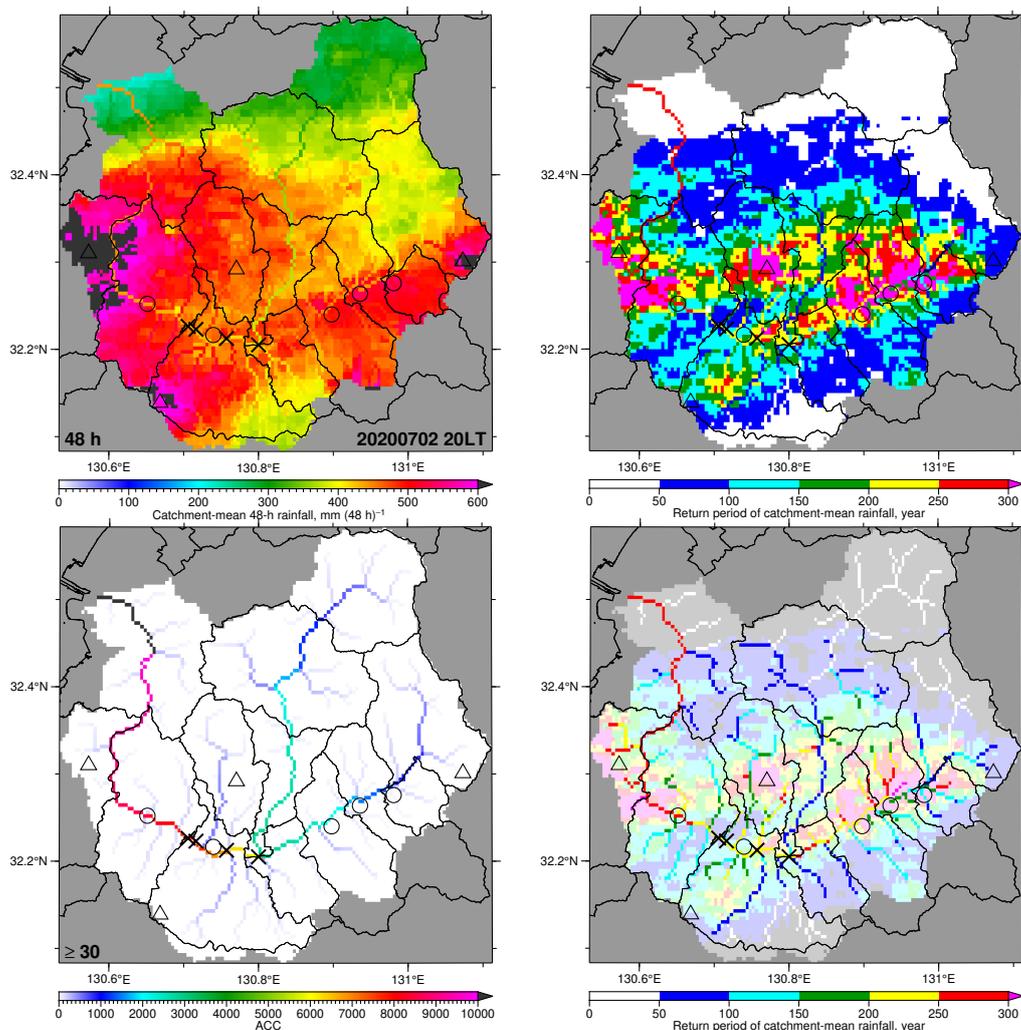


図 5.7 集水域平均 48 時間雨量 (左上), 再現期間最大値 (右上), ACC (左下) の地理的分布. 右下の図は右上の図と同じものを示しているが, ACC 30 未満の地点を河道でない地点とみなし, 再現期間の色を薄く表示したもの. 丸・三角・バツ印は, 図 5.4 に同じ.

5.4 まとめと今後の課題

本研究では, 令和 2 年 7 月豪雨時の降雨と被害の関係について, 熊本県南部を流れる一級河川球磨川の流域を対象に調査を進めた. まず, 2004 年から 2020 年までの 17 年分の解析雨量データを用いて, 流域の全地点で, 1 時間から 48 時間まで 1 時間刻みの各時間スケールで 1 時間ごとの集水域平均雨量を求めた. つぎに, 流域各地点, 各時間スケールについて確率密度関数を求めて, それをもとに, 令和 2 年 7 月豪雨時の集水域平均雨量の最大値を再現期間に変換した. その結果を, 再現期間最大値分布というかたちで要約・整理した. この再現期間最大値分布は, 人吉市, 球磨村, 芦北町, 八代市などでの, 球磨川本川沿いやその近傍の破堤や越水・溢水の状況とよく対応していた.

本研究において考案した手法により, あらかじめ対象河川流域の確率密度関数を作成しておけば, 実時間で取得できる解析雨量や予測雨量を用いて時々刻々の再現期間最大値分布を作成することも可能であり, 今後の応用が期待できる. 他方, 他の河川流域や他の降雨事例についても本手法を適用して, 手法の信頼性の検証を重ねてゆくと共に, データ処理の高速化についても研究を進める必要がある.

第2編

参考文献

Lehner, B., Verdin, K. and Jarvis, A.: New global hydrography derived from spaceborne elevation data, *Eos, Transactions*, Vol. 89, No. 10, pp. 93–94, 2008.

Oki, T. and Sud, Y. C.: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP): A global river channel network, *Earth Interactions*, Vol. 2, pp. 1–36, 1998.

国土交通省: 令和2年7月豪雨災害による被害状況等について (第53報) , 2021.

国土交通省河川局: 球磨川水系河川整備基本方針, 2007.

第6章 まとめ

熊本大学 石田 桂

6.1 第2編の各調査・研究で得られた結果・知見

第2編で得られた結果・知見を以下に纏める。

- 1) 今次豪雨が発生した気象条件として、大量の可降水量に見られるように水蒸気量が豊富であったこと、大気の下層から中上層にまでほぼ飽和に達している高湿な状態にあったこと、これにより、気温減率が湿潤断熱線よりもやや大きいくらいであった状況で湿潤絶対不安定な大気層（MAUL）が形成されていたこと、が挙げられる。MAULの存在により時間雨量として強い雨が発生したとともに、停滞する梅雨前線に沿って豊富な水蒸気量が持続して供給されたことにより長い継続時間の雨が発生した。これにより、短時間強雨についても長時間持続する大雨としても過去の記録を上回るような豪雨が発生した。
- 2) 豊富な可降水量、下層から中上層まで十分に湿った大気条件というのは、梅雨期には珍しい状況ではなく、より大きな規模での気象状況によってしばしば形成されるものであると言える。豪雨の環境条件を考える上で重要な視点は、これらの条件の定量的な状況である。過去の統計値と比べて、どの程度の可降水量があったのか、また大気の相対湿度が100%にどの程度近いのか、といったことを定量化することであろう。また、MAULといった不安定状態が湿潤気候下での対流雲活動では特に重要であると言える。
- 3) 今次豪雨とメソ α 低気圧の関係を調べところ、過去42年間にメソ α 低気圧が九州付近に接近した際の下層水蒸気フラックスの密度分布は、メソ α 低気圧が接近していない時よりも顕著に大きくなっていった。すなわち、メソ α 低気圧が接近すると下層水蒸気フラックスが強化され、大雨発生環境場を形成しやすくなることを示唆している。さらに、令和2年6-7月は、過去42年間で最も多くのメソ α 低気圧が検出された。メソ α 低気圧が多かった理由として、環境場の水平シアおよび傾圧性が強くなっていたことが示唆される。擾乱の発達に有利な環境場が形成されたことが、多くのメソ α 低気圧発生に寄与し、それに伴う強い水蒸気フラックスが何度も出現したことが、豪雨が何度も生じた環境場形成に重要な役割を果たしていたことが示唆される。
- 4) 上層トラフが熊本県の豪雨に与えた影響を、数値シミュレーションを用いて調べた。標準実験は、概ね7月4日に発生した熊本県での豪雨の降水分布を再現していた。そこで、上層トラフの影響を除いた実験を行い、その影響を評価した。その結果、上層トラフを除くと、中国大陸上でのメソ α 低気圧の強化が顕著に弱まり、その後の熊本県での豪雨も再現されなかった。このことから、上層トラフは、中国大陸上でのメソ α 低気圧の強化に大きな役割を果たし、その結果豪雨に影響していたことが示唆された。
- 5) インド洋からまとまった水蒸気の流れが日本にまで流れ込んできて、途中海面温度の高い領域において海面からの蒸発により多くの水分が供給されていたと考えられる。また7月初旬に東シナ海周辺では複数の方向から水蒸気が収束し九州周辺に流れ込んでおり、これらが九州南部に多量の水蒸気をもたらしたと考えられる。
- 6) 領域大気モデルを用いた再現結果によれば3次元水蒸気量、高度500mの風速・気温分布、3次元雨

第2編

水分布などを見ると、多量に供給された水蒸気が南下してきた前線と九州山地に阻まれ持ち上げられることにより豪雨を発生したと考えられる。

- 7) 今次豪雨時の降雨と被害の関係について、熊本県南部を流れる一級河川球磨川の流域を対象に行なった調査結果によれば、再現期間最大値分布は、人吉市、球磨村、芦北町、八代市などでの、球磨川本川沿いやその近傍の破堤や越水・溢水の状況とよく対応していた。

6.2 今後の課題・今後に向けた提言

第2編の調査・研究より得られた結果・知見から、以下のような事柄が今後の課題・今後に向けた提言として挙げられる。

- 1) 地球温暖化が着実に進行している状況を考えると、気温が高くなることが水蒸気量を増加させることに直結するため、豪雨への温暖化の影響は無視できない。人生においてこれまで経験したことのない豪雨というのは、今後は、人生で複数回経験するということが十分にあり得る。これまでの考え方で豪雨対策は通用しなくなることが懸念され、温暖化影響を適切に考慮することで、今後の豪雨災害への備えを強化することが大事である。
- 2) 梅雨前線上のメソ α 低気圧の豪雨に対する重要性が明らかとなった。今後、豪雨の予報精度向上に役立てていくためには、どのような構造・環境場を持つメソ α 低気圧が豪雨を引き起こすのかを詳細に理解する必要がある。また、メソ α 低気圧がどの程度の精度で予測できるのかといった予測可能性の研究も必要である。
- 3) 豪雨災害による人災を防ぐためには豪雨の予報精度の向上が不可欠である。しかしながら、豪雨の発生機構は複雑かつ多様である。本研究を含めこれまでに行なってきたように豪雨の発生機構に関する詳細な解析を継続していく必要があり、また解析で得られた結果・知識を集積していく必要があると考えられる。さらには、観測技術の向上、観測網の高密度化・広域化、モデルの精度向上なども必要になると考えられる。
- 4) 第5章の研究において考案した手法により、あらかじめ対象河川流域の確率密度関数を作成しておけば、実時間で取得できる解析雨量や予測雨量を用いて時々刻々の再現期間最大値分布を作成することも可能であり、今後の応用が期待できる。他方、他の河川流域や他の降雨事例についても本手法を適用して、手法の信頼性の検証を重ねてゆくと共に、データ処理の高速化についても研究を進める必要がある。

第3編

土砂・流木災害グループ

グループリーダー	熊本大学	椋木 俊文
研究分担者	京都大学	山崎 新太郎
	九州大学	矢野 真一郎
		安福 規之
連携研究者	京都大学	荒井 紀之
	九州大学	アデル アロウイシー

第1章 九州地域の地盤災害の概説

熊本大学 椋木 俊文

1.1 地盤災害発生時期の九州の様子

2020年7月3日より暖かく湿った空気が流れ込み、夜には九州南部で豪雨となった。アメダスの記録によれば、4日早朝にかけては先に芦北地方に時間雨量60mmを超える雨が降り、その後前線は徐々に南東に移動して人吉球磨地域に集中豪雨が生じた。球磨川流域の降水量の空間分布は、7月3日から4日にかけて400~500mmの一様性を示した。結局、2020年7月4日午前4時50分に気象庁から熊本県南部の宇喜・屋代・天草・芦北・球磨地方と鹿児島県北部の出水・伊佐地方に集中豪雨の緊急警報が発令された。大雨特別警報は2013年に制定され、これまでに全国の各都道府県に52回発令されている。熊本県では初めてだったが、鹿児島県ではこれまでに3回。気象庁のレーダー観測によると、熊本県の芦北では1時間に129mmの降水量を記録。水俣市では24時間降水量が400mmを超えた。同様に宮崎県えびの市では320mm、鹿児島県鹿屋市では280mmを記録した。日本三大急流と呼ばれる球磨川に沿って、芦北町、坂本町、球磨村、人吉市周辺で河川が氾濫し、多くの道路が冠水した。濁流の影響で護岸が侵食され、10の橋梁が破壊された。一方、芦北町と津奈木町の2所で土砂崩れが発生し、5人が死亡した。集中豪雨の緊急警報は7時間後に解除されたが、九州地方付近ではまだ雨前線が活動していたため、2020年7月末までには地すべり警報は解除された。そのため、球磨村では孤立した村の人々の救出には、特別警報発生から8日間を要した。これは、球磨川沿いの国道219号線が大きな被害を受けたため、一時的な復旧作業に時間を要した。一方、球磨川の堤防の氾濫が認められたのは14箇所、堤防の決壊が認められたのは2箇所のみであった。また、球磨川支流から流木の流入により、特に河道と河川堤防の土地がつながっている球磨村地域では流木被害も目立った。

7月5日の九州南部では雨はなかったが、5日午前6時までの24時間の予報降水量は、熊本県で150mm、鹿児島県で180mmとなった。一方、6日には九州北部を中心に局地的な集中豪雨が発生し、その後、昼頃から九州北部に集中豪雨が移行した。九州北部では、停滞していた季節性梅雨前線が活発化したため、午後から集中豪雨となった。これにより筑後川や山側に住む人々は、河川の氾濫や土砂崩れ、低地の浸水などに最大限の警戒が必要となった。結局、7月6日午後4時30分に大牟田市や八女市など福岡県4市町、長崎市や諫早市など長崎県7市町に緊急警報が発令され、筑後川沿いの洪水による被害が多数報告された。このとき、筑後川が流れる久留米流域の堤防の一部で破堤にまでは至らなかったものの、パイピングが確認された。また、九州本島南部に位置する鹿児島でも、7月4日ではなく7月6日に被害が出た。鹿児島では、7月6日の降水量が4日より多く、その結果曾根市のシラス台地の一部が大規模侵食されたことが報告された。

最終的に、梅雨明けは、九州南部では7月28日、九州北部では7月30日と、例年より約2週間遅れであった。九州では7月末よりCOVID-19の再拡散が始まったため、調査活動は限定的なものとなった。原則調査チームは、各県のグループごとに各県の被災地を調査し、副調査チームとして他県の人たちによる調査は行わないことにした。豪雨による二次災害を回避するために、河川堤防、斜面崩壊、土砂崩れなどの緊急診断調査を自治体に依頼した。

第3編

1.2 第3編の内容

令和2年7月3日夜から7月7日にかけて九州各地でもたらされた局地的豪雨は、斜面崩壊、地すべり、土石流、流木、護岸侵食、堤防周辺におけるパイピングなど、様々な地盤災害を引き起こした。しかしながら、COVID-19感染拡大防止の観点から、越県した現地調査は可能な限り自粛したため、本編における地盤災害報告は、限定的な内容となっている。九州各地で発生した地盤災害については地盤工学会で発足した地盤災害調査団が各県の大学関係者と連携し、Geo-disaster report¹⁾を報告しているので、そちらを参照されたい。本編では、次のような構成で調査活動内容を報告する。

1章：地盤災害発生時の九州の状況

2章：斜面崩壊・地すべり

3章：地質学視点からの斜面崩壊

4章：流木の発生状況

5章：パイピング

6章：まとめ

参考文献

- 1) Mukunoki, T. Suetsugu, D, Sako, K., Murakami, S., Hino, T., Fukubayashi, Y., Ishikura, R., Sugimoto, S., Wakinaka, K., Ito, S., and Koyama, A. (2021), “Reconnaissance report on geotechnical damage caused by a localized torrential downpour with emergency warning level in Kyushu, Japan”, Soils and Foundations, Geo-disaster report (in print).

第2章 斜面崩壊・地すべり・侵食

熊本大学 椋木俊文

2.1 はじめに

令和2年7月3日夜中から7日にかけて、九州に断続的に降った豪雨は各地で地盤災害をもたらした。佐賀を除く各県では、大なり小なり斜面崩壊、地すべり、道路崩壊等が起きているが、各県の被害状況はダイジェスト的に Geo-disaster report で紹介されているので、そちらを参照されたい。本章では、熊本県葦北郡芦北町女島地内塩尾地区で発生した深層崩壊に分類される斜面崩壊、人吉市西大塚町で発生した地すべり、鹿児島県曽根市大隅町別府市内で発生したシラスの大規模侵食について報告する。

2.2 累積雨量とスネーク曲線

2.2.1 熊本県南域から南九州の降水状況

熊本県が設置した芦北の観測所では、7月3日午前5時から4日午前10:00までに連続雨量546mm、7月3日午前9時から7/4午前8:00までの最大24時間雨量は497mm、そして、7月3日午前0時から7/4午前1:00まで最大時間雨量95mmを観測している。図2.1は、気象庁が設置した田浦町の時間雨量および累積雨量分布であるが、県が設置した芦北観測所と田浦の観測所とは直線距離にして約10km離れているが、最大時間雨量が95mmのような記録は図2.1には見られないことから、当時の豪雨が短時間で局地的にもたらされたことが伺える。図2.1のデータは、気象庁のホームページより抽出することが可能であるが、地方自治体が独自に設置している雨量計は、各自治体に尋ねないとわからないことがあるため、発災地の外力をできるだけ正確に評価するためには発災地近くの雨量計を調べることが重要である。



図 2.1 田浦町の時間雨量と累積雨量分布

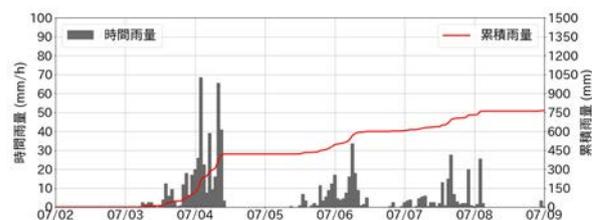


図 2.2 人吉市の時間雨量と累積雨量分布

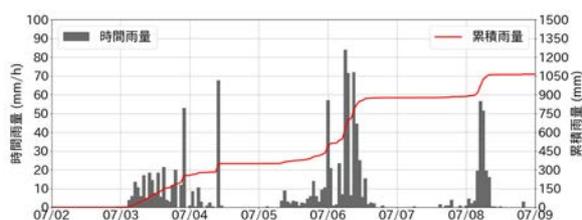


図 2.3 鹿屋市の時間雨量と累積雨量分布



図 2.4 曾於市の時間雨量と累積雨量分布

第3編

図 2.2 は、気象庁が設置した人吉市の雨量データである。図 2.1 と比較すると、人吉市周辺の 4 日の累積雨量の増加率は、田浦町と比較して緩やかであることがわかるが、最終的に 9 日までの累積雨量は人吉市の方が 140mm ほど多い結果となった。特に、北部九州で大雨特別警報が出たタイミングでは、人吉市でも時間雨量が 30mm を超えるよう激しい雨を観測している。一方、芦北地方は 4 日未明の 50mm 以上時間雨量が少なくとも 4 時間も続いており、この状況が芦北から津奈木にかけて土砂災害をもたらしたと言える。

さて、図 2.3 と 2.4 は鹿児島県鹿屋市と曾於市で確認された時間雨量と累積雨量分布である。九州南部の地盤を代表するシラスは、豪雨時には斜面崩壊を引き起こしたが、今回の豪雨でも大規模な侵食をもたらしたため、降水状況を確認した。図 2.3 を見ると芦北地方で土砂災害が起きる前に時間雨量 20mm の強い雨が断続的に降っており、熊本県南で大雨特別警報が発令されタイミングでは鹿児島と熊本の県境を除いて、降雨は小康状態に推移している。そして、九州北部で特別警報が発令された時、鹿児島でも時間雨量 70mm を超える状況が確認されており、同じく 7 月 3 日から 9 日までの累積雨量は、鹿屋市の方が熊本よりも 400mm 多い状況となっていた。しかしながら、人命を損なうような災害が発生しなかったため、この事実は特にフォーカスされなかったと言える。曾於市では大規模なシラス台地の侵食が生じた。

2.2.2 スネーク曲線

図 2.5 および 2.6 は、各地域のスネーク曲線である。横軸の土壌雨量指数は、タンクモデルから推定される土中の水分量として計算されたものである。参考値として、大雨注意報、大雨警報、土砂災害発生基準線 (Critical Line : CL) を示しているが、いずれも土砂災害発生基準線を超えており、実際に土砂災害が起きている。土砂災害発生基準線は、ある一定の範囲の土砂災害の危険度を降雨に基づいて評価するために設定するものであり、土砂災害危険箇所ごとの地形・地質および植生等の影響をも考慮して土砂災害の危険度を評価するために設定するものではない。過去に土砂災害が発生しなかったときの降雨量を用いて設定した土砂災害の危険性が低いと想定される降雨の発現する確率の高い領域と、過去の土砂災害の発生状況や避難勧告等の実態などを総合的に勘案して、安全領域と土砂災害の危険性が相対的に高いと想定される降雨の発現する確率の高い領域の境界として設定されている。したがって、近年豪雨レベルがさらに上がってきていることから土砂災害発生基準線の見直しが行われることはあるであろう。

図 2.7 は、平成 30 年に発生した西日本豪雨災害の時に記録されたスネーク曲線であり、図 2.8 は図 2.5 と 2.6 に鹿屋市のスネーク曲線データを加えたものである。雨量だけで比較すると、令和 2 年 7 月豪雨は西日本豪雨よりも非常に強い集中豪雨をもたらされたことは明らかである。しかしながら、地盤災害としては西日本豪雨災害の方がメディアでもクローズアップされたが、これは損なわれた人命の規模によるところもあると言える。令和 2 年 7 月豪雨のような集中豪雨は、その後日本各地で生じ、様々な被害をもたらされたことから、災害外力の強大化を想定して、すでに認識されている危険斜面度マップにおいてこれらの降雨が威力を与え、降雨によりどのような斜面崩壊が想定されるかといった危険度マップの高度化も今後期待される。

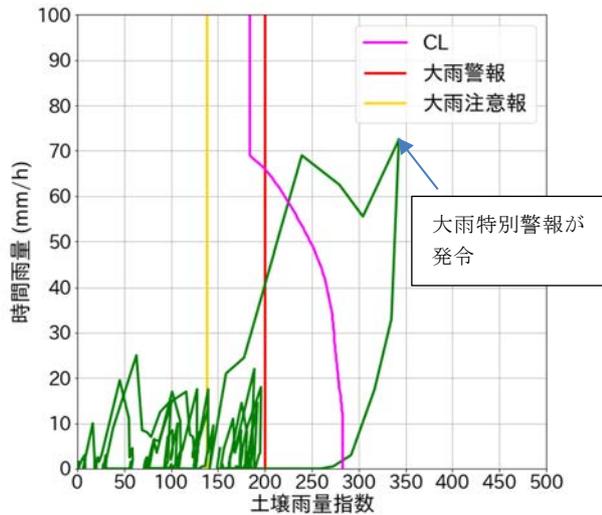


図 2.5 スネーク曲線 (田浦)

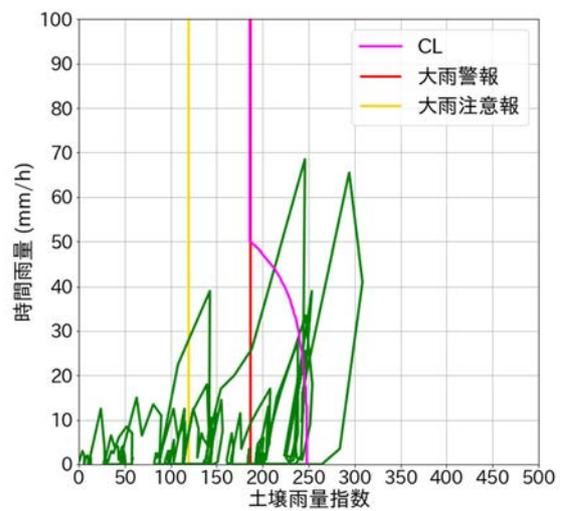


図 2.6 スネーク曲線 (人吉)

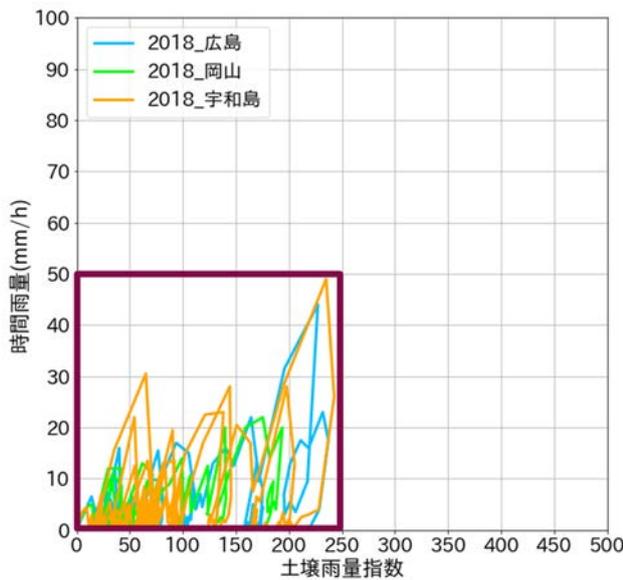


図 2.7 スネーク曲線 (H30 7月豪雨中国地方)

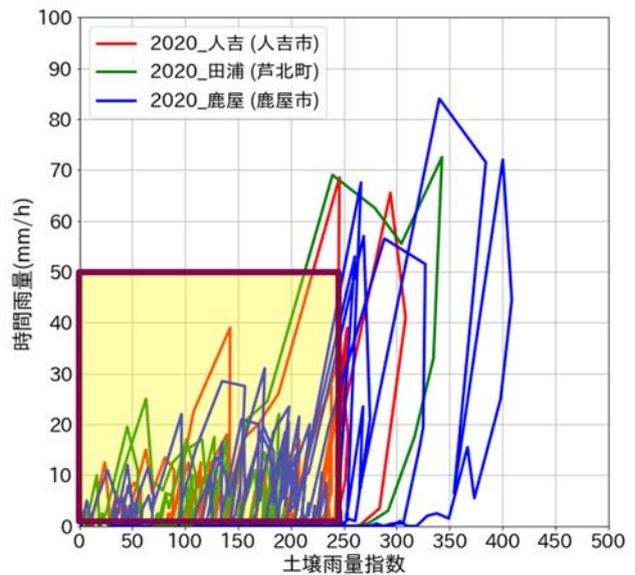


図 2.8 スネーク曲線 (R2 7月豪雨九州南部)

2.3 斜面崩壊

2.3.1 九州南部斜面災害の特色

九州南部で人命を奪ったのは、熊本県の芦北町と津奈木町で発生した土砂崩れのみであった。熊本県芦北町と津奈木町の山間部で斜面崩壊が相次いで発生し、甚大な被害が出ている。県や地方支庁によると、芦北町の住宅が土砂に飲み込まれ、80代の女性が死亡、2人が心肺停止、4人が行方不明、1人が重体となっている。土砂崩れによる道路の破損や通行止めなどで、熊本県が発表した砂防災害は計3640件となった。鹿児島県砂防課(2020年8月31日現在)は、鹿児島県内の土砂災害が59件、土石流が10件で、ホームページで調査中との報告があり、合計69件となった。福岡県や長崎県でも大規模な斜面

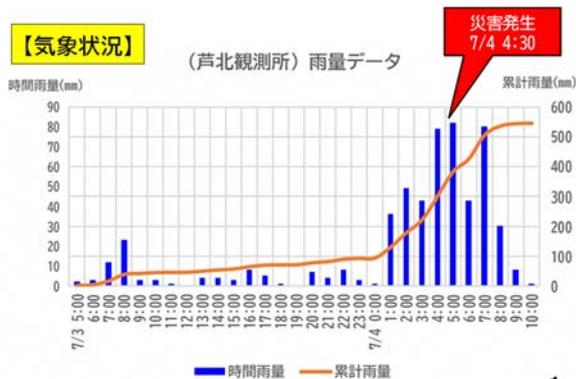
第3編

崩壊が報告されている。2020年7月5日から7日にかけて八女市橘町上辺原で発生した集中豪雨（総降水量772mm，毎時最大降水量52mmを記録）により，斜面崩壊が発生し，崩壊した土砂が崩壊現場から約200m離れた県道や河川にまで到達した。本章では，熊本県と鹿児島県で発生している特徴的な土砂災害を，深層崩壊，地すべり，大規模侵食の3つの分野に分けて解説する。

2.3.2 芦北町で起きた深層崩壊

図2.9は，芦北観測所で観測された雨量データである。被災箇所は熊本県設置の雨量観測所からは直線距離にしておよそ2.0km離れた場所である。図2.10に示すように，塩尾地区横の釜地区では土石流が発生していた。幸い非難が完了していたため，土石流が発生した地域では人命は損なわれなかったが，塩尾地区では5名が亡くなった。この地域は昭和54年に土砂災害危険区域に指定されているため，昭和57年に当時の県の基準で厚さ1mの土砂災害を想定して擁壁が設置されていた。写真2.1に示すように昭和57年設置された擁壁が釜地区の方から被災現場まで設置されていた。擁壁は，高さが3.4～5.9メートル，幅140メートルコンクリートの基礎に鉄柵と金網を敷き，落石を防ぐための金網で構成されていた。また，図2.11は被災現場の側面図であるが，傾斜角度は約30-40度であり，設置した擁壁は，崩落土砂を補う目的で待機擁壁と位置付けられていたようである。擁壁の上部には落石防止柵を設け，擁壁と連動して崩落表土のポケットを設けてあったが，今回のように深層崩壊に対しては擁壁の下からえぐられた形になったため擁壁としての役目を果たせなかったと言える。写真2.2と写真2.3は，発災から1か月後の被災現場の写真である。現地には，赤土が広く観察された。実際に斜面を登ってみると崩壊源付近では黒色の泥岩やチャート，硬質な粘土が多数発見され，深層崩壊後に見られやすい地質状況が確認された。芦北地域振興局の話では，現場に駆け付けたときは，水が斜面を這うような挙動ではなく，斜面から水が飛び出しているような状況が観察されたという。当時写真周辺の山の土壌水分量が強く危険な状態であったことが伺えた。

昭和57年に擁壁が設置されて以降，振興局職員等により擁壁の定期点検は行われていた。調査台帳を確認させていただいたが，擁壁そのものの記述は多数あったが，斜面に対する記述は多くなかった。また，擁壁の対象は深層崩壊を想定していたものではなく，当時斜面に散見された巨大な岩の落下防止対策としての擁壁であった。いわゆる想定外の斜面崩壊（深層崩壊）が起きたため，この擁壁では防ぎきれなかったと言える。



芦北観測所は，被災地から南東へ直線距離にして約2km離れたところに設置

図2.9 芦北観測所の降雨データ



図2.10 被災地周辺の地形図 (国土地理院)



写真 2.1 被災現場前回

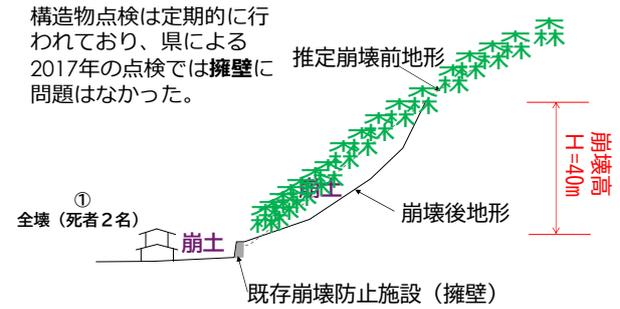


図 2.11 被災箇所側面図



写真 2.2 破壊された擁壁からの崩壊斜面



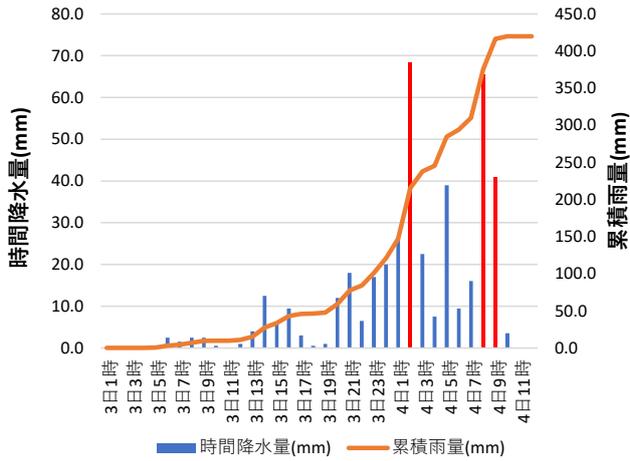
写真 2.3 崩壊源近辺から崩壊方向の写真

現行の設計基準では、擁壁の安全率は、自重やバックフィルの外力・土圧などの平常時の荷重、塩害による劣化やガードレールに加わる衝撃力などの地震力などを組み合わせたものとされている^{1),2)}。このため、擁壁内への表層土の流入による衝撃力や、崩壊した表層土の堆積による土圧については、いまだに検討されておらず、研究段階にある³⁾。崩壊現場の急斜面は、衝撃力の適用を考慮されていなかったのではないかと考える。現行の設計基準でも、擁壁に作用する衝撃力に用いる崩壊土の移動高さは一般的に1mであるため、想定以上の崩壊深さであれば、今回のように擁壁が持ちこたえられないはずである。また、当時擁壁設置のタイミングではすでに集落が形成されており、民家がある状態での工事となったことも当時の工事の困難さが伺える。

2.4 地すべり

2.4.1 人吉市西大塚胸川の被災状況

気象庁の人吉市雨量観測所による降雨データより作成した7月3日12時から7月4日12時にかけての時間降水量と累積雨量に関するグラフを図2.12(a)に示す。図2.12(a)より豪雨において7月3日24時から時間降水量20mmに達し、7月4日午前2時においてこの豪雨における最大時間雨量69mmを記録している。図2.12(b)に示すように、対象地すべりは幅約150m、長さ約85m、斜面勾配20°の自然斜面が移動したものである。また、この自然斜面に対して施工されていた既存の砂防施設が7月4日未明に豪雨を起因とした地すべりにより河道に押し出された(写真2.4(a))。本研究対象地はこの地域で発生



(a) 人吉雨量観測所の降雨データ

(b) 被災地のトポロジカルマップ

図 2.12 国土地理院から引用した現地地図



(a) 被災現場の上空写真

(b) 橋梁が国道の一部まで破壊した様子

写真 2.4 地すべり現場付近上空から撮影された UAV 写真

したほかの土砂災害とは異なり、地すべり土塊の移動範囲に管理橋が存在し、写真 2.4(a) (b) のように河川の対岸にある道路へ押し出す二次被害をもたらした。

2.4.2 ボーリング調査による地質、地下水位、すべり面の評価

写真 2.5 は地すべりによって破壊された写真の全景である。写真 2.5(a) のように橋梁の上部構造だけでなく下部構造まで押し出されている様子が見える。このことからすべり線の位置が、少なくとも橋脚付近まで存在していることが推測された。写真 2.6 は、沈下した橋梁付近の斜面の様子であるが、ここでもやはり斜面から噴水のように水が噴き出していたという証言が得られ、地すべり現場の水分量が過飽和状態になっていたことが推測される。地すべり現場付近の護岸の様子から、濁流によって護岸が破壊されたというよりは、護岸背面から押し出されたような状況が見られたことから地すべり土塊が護岸ごと押し出したように見られた。写真 2.7 に示すように 2-3m ほどの地すべりによって沈下した様子が見ら

第3編

れ、この土塊が外力となって橋梁端部に作用したと考えられる。この時、すべり線がどの辺に現れたのかが現地で議論になったが、写真2.5から推測するに、橋梁端部よりも橋梁下部付近まですべり線が出ている可能性があることを考え、ボーリング箇所の検討を行った。写真2.8は、UAVで撮影した地すべり現場の全景写真にボーリング地点と後述する数値解析対象現場の線を示している。



写真 2.5 地すべり現場付近橋梁



写真 2.6 沈下した橋梁近辺の様子



写真 2.7 地すべり現場の写真



写真 2.8 地すべり土塊域全景



(a) コアサンプル



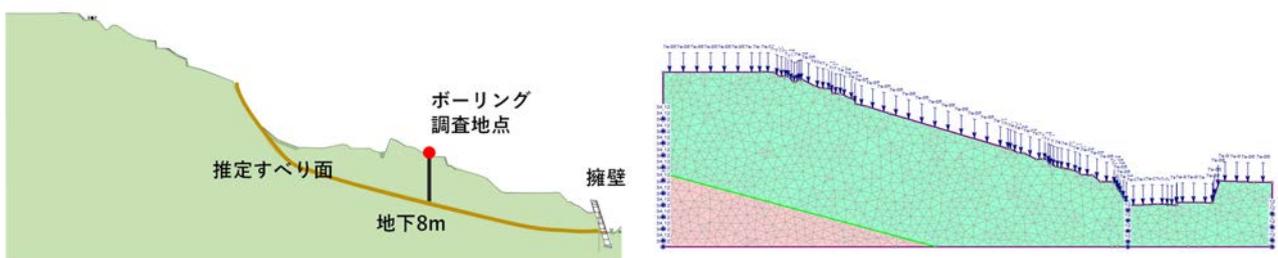
(b) 各試料の分類

図 2.9 現地での解析対象地線上のボーリング写真

図 2.9 は、写真 2.8 で示した解析線上のボーリング箇所でのボーリング調査でサンプリングされたコアと各試料の地質分布を示している。地すべりを起こした移動土塊に対して実施された調査ボーリングから、すべり面を形成した層の工学的地質区分名は風化凝灰岩礫岩に分類され、ボーリングコアは比較的新鮮な安山岩の岩塊または礫を多く含まれていたことがわかった。また、礫間の基質は軟質であり部分的に礫混じりのシルト質砂から砂質シルトで構成されており、軟質部のせん断破壊によってすべり面が形成され崩壊に至ったと考えられる。この調査ボーリングは被災後 2 か月経過した後に実施されたものであり、孔内水位は降雨が降っていないときおよそ地下 16m の位置に地下水位は分布していたことが分かった。

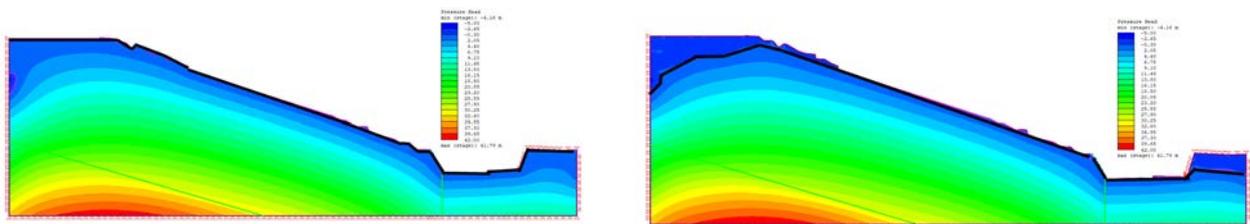
2.4.3 せん断強度低減法による弾完全塑性土水連成解析⁴⁾⁻¹¹⁾

ここでは、降雨が降っていない状態における弾塑性土水連成解析によって斜面の安全率 1.2 に相当する強度定数を求め、そのパラメータを用いて降水条件を外力とした数値解析を行った。降伏基準にはモール・クーロンの破壊規準式を用いた。解析手法は、参考文献^{4), 5)}を参照されたい。今回、現地のボーリング調査からすべり線がある程度想定できたことから、解析で得られる塑性ひずみ分布との比較において解析の妥当性を評価した。図 2.9 のボーリング調査結果からもわかるように現地の地盤は非常に複雑であり、かつ地盤パラメータを求めるための力学試験を行うことも困難である。特に、球磨地域では直径が少なくとも 30 cm 以上に相当する安山岩の塊が分布する地域であり、そのような状況での地盤パラメータを決めるのは困難であった。そこで、相対評価として降雨条件によって地すべり現場の安全率がどの程度低下したのかを議論するために、このような解析を実施した。まず常時の安全率を求めたかったが、これについては災害手帳で定められている一般的な値としての 1.2 に着目し、解析結果として安全率が 1.15-1.25 が得られるような粘着力及び内部摩擦角について検討した。図 2.13 は解析対象の側面図と解析モデルである。解析結果から、粘着力は 0 から 10kPa 結果として、内部摩擦角は 29-45° が得られた。次に定常状態の時、安全率が 1.15-1.25 の状態に外力として図 2.12 に示された 7 月 3 日 23 時の時間降水量 17 mm を与えた場合の状況を考え、降雨によって地下水面の位置を確認した。土水連成解析において、地盤の透水係数が必要となるが、具体的な値がわからないため、ここでは試行的に透水係数を与え、地下水面がすべての地表面と同じにならない結果を検討した。図 2.14 は、対象緩斜面



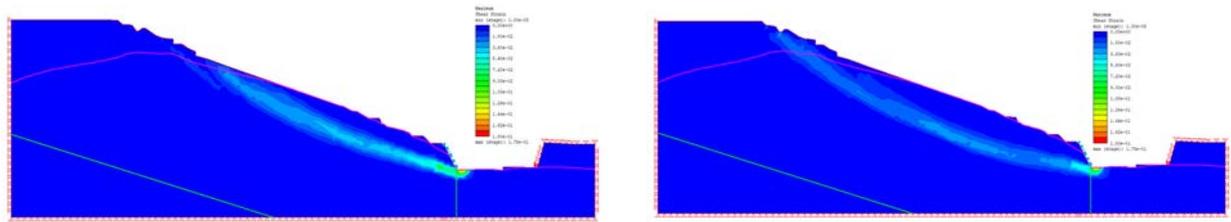
(a) 解析対象の側面図 (b) 解析モデル

図 2.13 解析モデル



(a) $k=10^{-5}$ m/s のオーダー (b) $k=10^{-4}$ m/s のオーダー

図 2.14 地下水面と間隙水圧分布



(a) $c=5(\text{kPa})$, $\phi=34^\circ$ ($F_s=1.2 \rightarrow 0.91$)

(b) $c=10(\text{kPa})$, $\phi=29^\circ$ ($F_s=1.22 \rightarrow 1.0$)

図 2.15 有限要素法とせん断強度低減法による

内の間隙水圧分布と地下水位の位置である。透水係数 $k=10^{-5} \text{ m/s}$ のオーダーにすると、地下水面が地表面になってしまい、時間降水量 17 mm の条件で対象緩斜面が飽和状態ということになる事から、地下水面を少し下げのために 1 オーダー大きい透水係数を使って計算したところ図 2.14 (b) のような結果が得られた。これ以上の検証は困難であるため、現状この透水係数を使って安定計算を実施し図 2.15 のような塑性ひずみ分布が得られた。ボーリング調査によって得られたすべり線位置と比較すると図 2.15 (a) の結果が近い状態を示している。緩斜面といえども安全率が降雨条件によって安全率が 1 を下回る事が確認できた。実際に地すべりが起こった時刻が最大時間降水量を記録した 4 日 2 時やそれ以降であるとした場合、上記の安全率の低減の様子から粘着力はある程度の値を持っていたことは想定できる。現地のボーリングコアにより対象斜面の地質は砂礫質を主体とした地盤条件にしているため、この平均的な処理については当然議論が必要である。引き続き、対象緩斜面の物性評価を行い、もう少し地盤条件を実際の条件に近づけた場合との結果の比較を継続する。

2.5 シラス地盤の侵食^{11), 12)}

鹿児島県曾於市大隅観測点周辺の累積降水量は、7 月 3 日から 4 日の午後に 225.5mm, 7 月 5 日から 6 日の 2 日間に 381mm となった。また、土壌水分量も 100~350mm の範囲で推移していたことが確認され、いつ災害が発生してもおかしくない状況であった。図 2.16 (a), (b) は、破壊現場の地図と崩壊前の写真である。また写真 2.9 は、令和元年から侵食箇所の状態を時系列で示した写真である。この地域の溪流には 4 本の波板が設置されており、鹿児島県から 1 号, 2 号, 3 号, 4 号と番号が付けられ、1 号と 4 号の 2 本の波板が倒壊した。2019 年 7 月には、この斜面での集中豪雨により、一時的な排



(a) 現地等高線図



(b) 崩壊前の現場の航空写真

図 2.16 シラス台地侵食前の現場



写真 2.9 令和元年から進行するシラス地盤の侵食（鹿児島県提供）

水路としての1号の波板管が流れすぎて1号の溪流が越流し、最終的には溪流の侵食・崩壊が増加した。その後、第4号溪流には二次排水管としてコルゲート管を再設置したが、結局2020年7月の集中豪雨により仮排水路が再びオーバーフローした結果、第4号溪流に再び大規模な侵食・崩壊が発生し、これらの小川はいずれも降水のたびに規模を拡大して、高さ約50mの急峻な白壁の断崖を形成した。写真2.9に示されているように、台地周辺を走る国道269号線ぎりぎりまで侵食が起きており、道路が寸断されてもおかしくない状況であった。一般に地盤に対し、一か所に水が集中すると細粒分が移動して侵食が一気に進むことから、シラス台地以外の場所でも起こりうる現象と言える。しかしコルゲート管から排水された箇所がシラス侵食のトリガーになったことは、管理およびメンテナンス不十分の問題ともいえることから、今後の集中豪雨に伴う降水量の増加を考慮して、シラス台地の縁側斜面の排水システムを再検討する必要がある。

2.6 今後の課題

2.3節と2.5節で報告した地盤災害に関しては、被災時の状況と発生要因などを考慮すると、今後の集中豪雨に対するインフラ整備とメンテナンスの強化の必要性があると言える。今回、紙面の都合で報告しきれなかった斜面崩壊現場のいくつかでは、おそらく施工時期が異なる擁壁の接続部分から土砂流出が起きており、球磨川沿いの国道219号線でも施工時期が異なると思われる護岸で侵食や道路崩壊が起きていることが確認された¹³⁾。インフラの点検時においては、インフラ本体の状態に意識が集中しがちであるが、インフラに作用する外力は土砂であることから、土砂の堆積状況についても定量的なデータを残すことを検討すべきと考える。また、すでに地形判読と質学的観点に基づいた斜面に関する危険

第3編

度ハザードマップがあることから、これに外力としての降雨が作用する場合にハザードマップの状況がどの程度変化していくのか？ということについても検討できる段階に来ていると考える。これまでに発生した各地の土砂災害によって、ボーリングデータも充実してきたことから、2.4節で紹介したようなシンプルなアプローチで現状の斜面状態が降水によってどの程度不安定になるのかということが評価できる。地盤のより危険な状態に関する情報発信ができる仕組みを構築することはたいへん重要な課題と考える。

謝辞

本調査を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局河川部をはじめ、熊本県土木部砂防課、芦北地域振興局、鹿児島県にはデータ提供等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。また、2.2で示したデータは鹿児島大学酒匂一成教授、伊藤真一助教の協力によるものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路橋示方書，道路土工—擁壁工指針 平成24年度版。
- 2) Kunieda, M. and Rokugo, K. (2006), Recent Progress on HPFRCC in Japan Required Performance and Application, *Journal of Advanced Technology*, Vol.4, No.1, 19-33.
- 3) 内田太郎, 急傾斜地崩壊対策に用いられる待受け式擁壁の安定性, *土木技術資料*48巻5号30-33, 2006.
- 4) 鶴飼恵三, 蔡飛, 阪上最一, 若井明彦, 降雨時の斜面安定性の全体安全率による評価, *Journal of Japan Landslide Society*, 第35巻, 第1号, 1998
- 5) 鶴飼恵三, 弾塑性FEMによる斜面の全体安全率の計算法, *土質工学会論文報告集*, Vol.29, No.2, 190-195, 1989.
- 6) 蔡飛, 鶴飼恵三, 黄文峰, 斜面安定性の評価-極限平衡法と弾塑性FEMの比較, *地盤工学会誌*Vol.39, No.4, pp395-402, 2003.
- 7) 鶴飼恵三:地すべり解析における有限要素法の利用講座, 第3回, 弾塑性FEMの考え方(後編) 2003
- 8) 岩井明彦:地すべり解析における有限要素法の利用講座, 第4回, FEMによる地すべり解析の基礎理論, 2003
- 9) 山田正雄:地すべり解析における有限要素法の利用講座, 第13回,FEMの地すべり解析への適用例, 2013.
- 10) 亀井健史, 榎本正雄:降雨及び地下水流が斜面内の間隙水圧挙動に及ぼす影響, *日本地すべり学会*, 第33巻, 第2号, 1996.
- 11) Haruyama, M. (1974), Features of Slope-Movements due to Heavy Rainfalls in the SHIRASU Region of Southern Kyushu, *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University*, Vol. 10, pp.151-163.
- 12) Haruyama, M. and Kitamura, R. (1984), Anisotropic Deformation-Strength Properties of Soft Sedimentary Rock "Shirasu" originated from Pyroclastic Flows, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No.4, pp.84-94.
- 13) Mukunoki, T. Suetsugu, D, Sako, K., Murakami, S., Hino, T., Fukubayashi, Y., Ishikura, R., Sugimoto, S., Wakinaka, K., Ito, S., and Koyama, A. (2021), "Reconnaissance report on geotechnical damage caused by a localized torrential downpour with emergency warning level in Kyushu, Japan", *Soils and Foundations*, Geo-disaster report (in print).

京都大学防災研究所 山崎 新太郎

京都大学防災研究所 荒井 紀之

3.1 はじめに

2020年7月3日から4日午前中にかけて熊本県南部を中心に発生した豪雨によって土砂災害が多発した。この期間の気象庁、水俣観測点では7月3日と4日の2日間の合計の降雨量は513 mmであるが、沿岸部の芦北町や津奈木町付近では解析雨量において2日間で650 mmの降雨量を超える地域もあった(図3.1, 2)。また、降雨強度も著しく2020年7月5日に公開された熊本地方気象台、災害時気象資料(2020)によれば4日未明に同地域周辺で時間110 mm程度から120 mm超の降雨も記録されていた。この豪雨では地質構造に崩壊の素因があり、概ね崩壊深度が大きい「岩盤崩壊」が多発し、その大きな破壊力によって死傷者を含む甚大な被害をもたらした。岩盤崩壊は「深層崩壊」とも呼ばれることがあるが、「深層崩壊」の典型的事例として知られている2011年台風12号による紀伊半島中央部の崩壊事例に比べれば規模は小さいものが多いため、ここではあえて「岩盤崩壊」という表現を用いる。今回豪雨で被災した地域は付加体および火山岩の分布地域であり、同様地質の地域ではこれまでも豪雨によって岩盤崩壊の発生が報告されている。本報告では今回豪雨で発生した岩盤崩壊箇所の現地踏査を行い、その発生場の地質・地形学的な特徴を報告する。

ところで、岩盤崩壊はその地下深部の地質構造に崩壊の素因があり、崩壊発生前に多量の降雨が地下に浸透する構造が形成されていたと考えられている。この変形は、斜面の自重による変形であり、斜面重力変形(Deep-seated Gravitational Slope Deformation, DGSD)と呼ばれている。斜面重力変形によって線状凹地や小崖、縦断形が凸型をした斜面などの微地形が形成される場合もある。このような微地形は崩壊の発生後の調査で近傍に発見されることが多かったが、既に崩壊で失われてしまったものを検討することは不可能であった。また既存の2万5千分の1地形図では解像度において判別が困難であり、空中写真では植生などが妨げとなり地表面そのものの微地形を検討することは不可能であった。しかし2000年代以降全国各地で取得されるようになった航空レーザ測量技術によって高密度地形データが取得されるようになった。この技術では植生を透過して地表面そのものの地形データを取得することができる。このデータから地形モデルを作成すれば前述の微地形を検出することが可能である。日本測量技術調査協会の航空レーザ測量データポータルサイト(<https://www.sokugikyo.or.jp/laser/>)によれば熊本県南部地域においても2005年以降計測密度0.5 mから2 m程度の地形データが取得されている。また国土交通省川辺川ダム砂防事務所によって2010年および2013年に2020年7月豪雨によって崩壊が多発した地域で既に計測密度1 mの航空レーザ地形データが取得され、筆者らは崩壊発生前の地形データを入手可能であった。そのため、崩壊発生前に崩壊と関連する微地形があったのかどうかを計測密度の範囲内で確認できた。本報告では、航空レーザ地形データの分析が崩壊の予測に役立つかどうかについても個別事例を挙げながら述べる。

本報告は、地形地質調査においては、徳島大学・西山賢一氏と行った成果を含む。また、日本応用地質学会災害地質研究会九州豪雨調査団と現地討論を行った成果も含んでいる。さらに、降雨データの分析に関しては九州大学工学研究院・矢野真一郎氏、丸谷靖幸氏にご協力頂いた。航空レーザ地形デー

第3編

タに関しては、国土交通省川辺川ダム砂防事務所および国土地理院に提供頂いた。

3.2 岩盤崩壊地の降雨と地形地質概要

調査を行った岩盤崩壊の分布を図3.1に示す。筆者らが現地調査で発見した崩壊深が3m程度以上ある岩盤崩壊は10カ所であるが、災害後の衛星写真等を現時点では分析できておらず、交通障害も継続していたためにすべての岩盤崩壊を抽出できていない。そのために、この分布図はすべてを網羅したものではないが、発見された岩盤崩壊は芦北町と津奈木町の沿岸部に集中しており、内陸部の球磨川流域およびその支流の川辺川の流域にもあるものの少ない。なお、ここに挙げた内陸部の崩壊地に関しては衛星画像を利用した日本応用地質学会調査団と共同調査行った箇所であり、いずれも今回発生した中で最大規模およびそれに次ぐ規模の崩壊である。

地形は沿岸部では標高300m以下の山地であり、リアス式海岸に接する地域である。一方で球磨川流域など内陸部は九州山地の一部であり最大比高差が1000m程度に達する急峻な山地である。

豪雨が発生した2020年7月3日と4日の気象庁解析雨量の総計では各地に650mmを超える降雨があったとされる(図-1B)が、それらの地域は特に沿岸部の芦北町と津奈木町付近にあった。筆者らが記録した沿岸部の岩盤崩壊は沿岸部の降雨量総計650mm以上の地域に集中する。

豪雨は7月3日午前中から4日の午前中にかけて断続的に強い降雨をもたらした。気象庁アメダスのデータを参考に

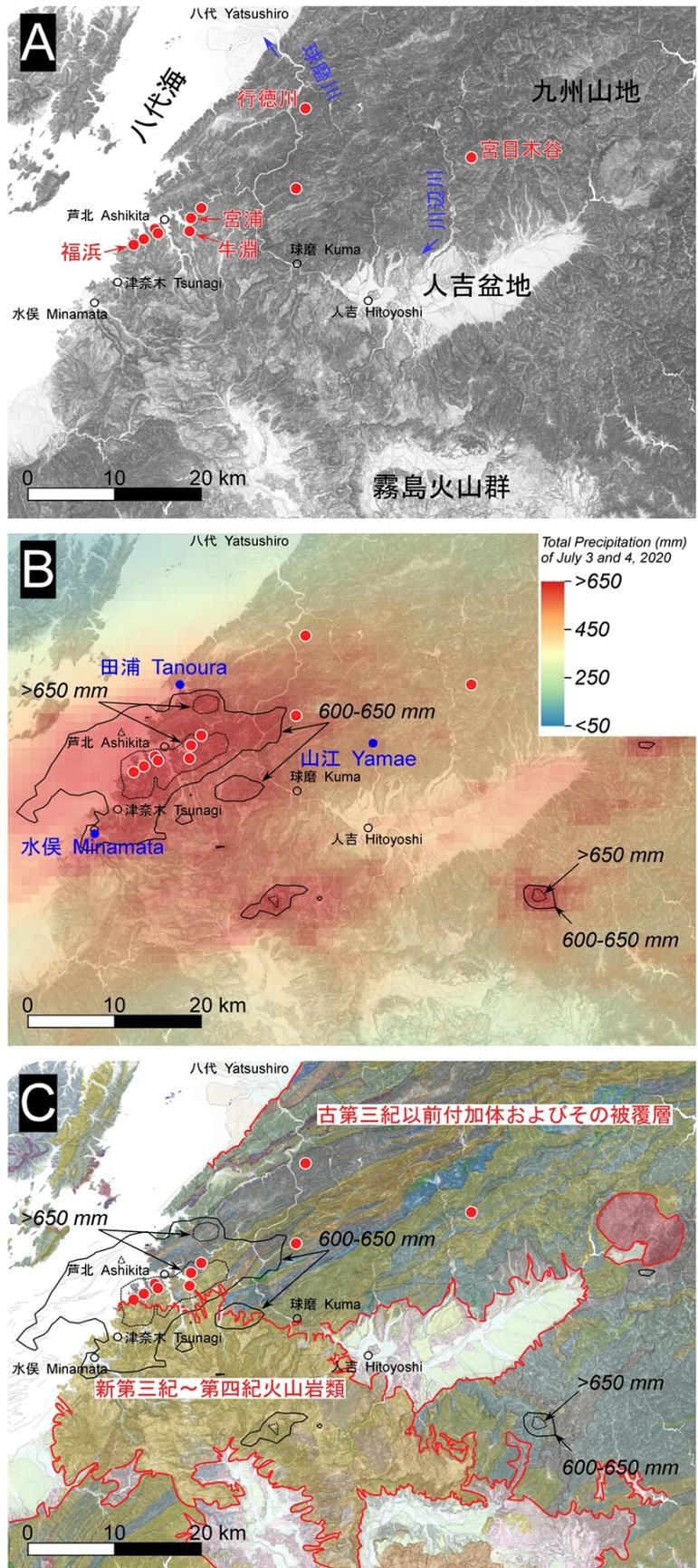


図 3.1 熊本県南部地域の地形と岩盤崩壊の分布(A)・気象庁解析雨量に基づく令和2年7月3、4日にかけての総降雨量の分布(B)・地質の分布(産業技術総合研究所, シームレス地質図, C)

第3編

すれば、芦北町田浦，水俣市，山江村で特に4日の未明から午前中に降雨が集中していた（図3.2）。この芦北町と津奈木町付近の降雨もアメダスデータに認められるように大部分が4日の未明からの雨と考えられる。

地質は、斎藤ほか（2010）の20万分の1地質図幅「八代及び野母崎の一部」および、それを元にしたシームレス地質図v2（地質調査総合センター）によると、ジュラ紀に成立した付加体（「秩父帯」），または古第三紀以前に成立した付加体（「四万十帯」）が広く分布している。また、地域南側にはそれ

を覆って新第三紀～第四紀の火山岩類（肥薩火山岩類）がある。地質図を元にするると崩壊は付加体地域に集中しているが、一部肥薩火山岩と思われる岩石が崩壊した箇所もあった（後述する、福浜の崩壊）。

前述したように付加体地域や火山岩の分布地域では岩盤崩壊が発生することが以前から知られており、2011年の台風12号による「紀伊半島豪雨」で発生した「深層崩壊」も四万十帯の付加体地域で発生したものである。九州地域では、2005年の台風14号に伴う宮崎県耳川流域の同じく四万十帯でも発生した。また、火山岩の分布地域では、2017年九州北部豪雨では日田市小野で安山岩溶岩の分布地で岩盤崩壊が発生した他（千木良ほか，2018），今回豪雨被災地近隣の同じく肥薩火山岩に属する火山岩の分布地においても、1997年7月豪雨による出水市針原や2003年7月豪雨によって水俣市宝川内集において死傷者を発生させる甚大な岩盤崩壊が発生している（産総研，2003など）。

3.3 令和2年7月豪雨で発生した岩盤崩壊の事例

表3.1に比較的規模が大きく調査を行った岩盤崩壊を5例示す。岩盤崩壊はこれら以外にも存在するが、アクセスが困難なために調査ができなかったものもあった。通番1～3は沿岸部で7月3日と4日で解析雨量650mmを超える地域で発生したものである（図3.1，図3.3）。一方で4，5はそれよりも少ない降雨量の地域で発生したものである（図3.1）。各崩壊の最大幅，最大崩壊深に関しては，現地取得のUAV画像からの推定，歩測もしくは，各種航空測量会社が公表している写真などから推定したものであり，今後修正される可能性がある。以下，各崩壊についてその特徴を述べていく。なお本章以降，計測密度1mの航空レーザ地形データから作成した傾斜量図で各崩壊地形の前地形について説明する。傾斜量図は地形を立体的に表現するために利用される表現手法であり，ここでは傾斜量の大小を明

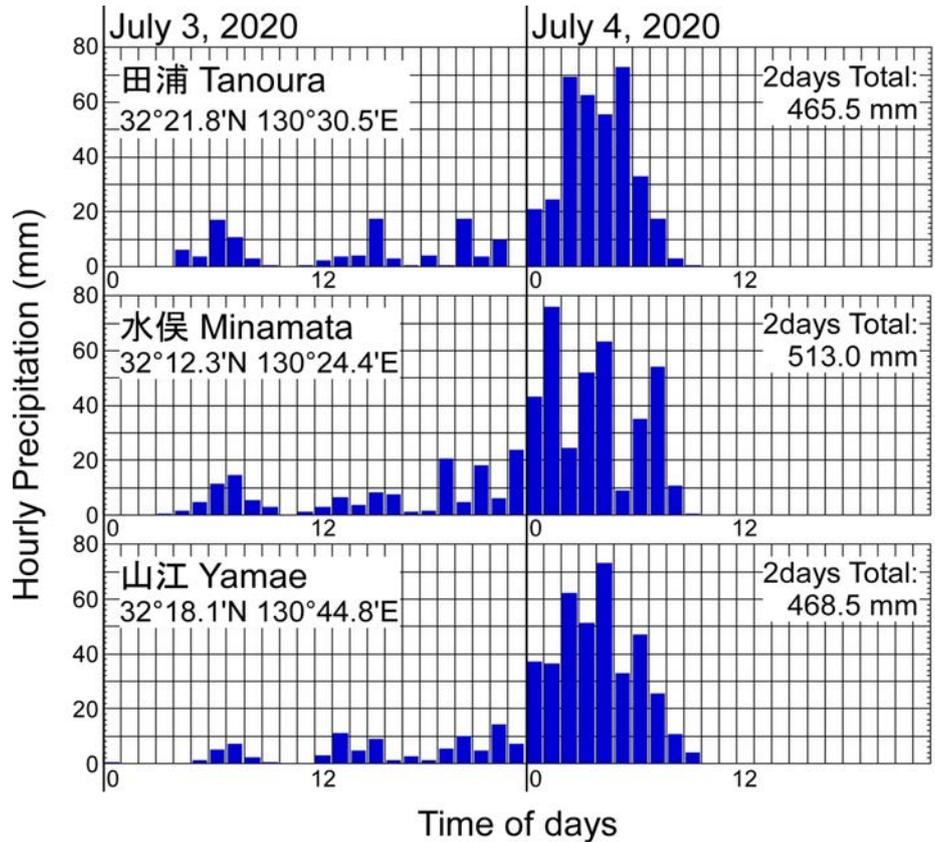


図3.2 気象庁観測点の時間毎のアメダス雨量データ

表 3.1 調査を行った岩盤崩壊（最大崩壊深度 3m 以上のもの、計測値などは簡易測量、図上計測で行った暫定版である）

	1	2	3	4	5
岩盤崩壊事例	宮浦（芦北町）	牛淵（芦北町）	福浜（津奈木町）	行徳川（八代市坂本町）	宮目木谷（五木村）
発生場周辺の2日間降雨量	650 mm以上	650 mm以上	650 mm以上	450 mm前後	上流域も含めて450 mm前後
崩壊源の最大幅 (m)	50	50	45	80	100
推定最大崩壊深 (m)	10	10	6	3	10
地質	砂岩・泥岩、砂岩・泥岩の境界部に断層破砕帯が存在	砂岩・泥岩・チャート、断層破砕帯が存在	珪長質火山岩、下位に泥岩・礫岩	砂岩・泥岩・チャート、断層破砕帯が存在	片状構造の発達する泥岩
推定される崩壊要因	交差した断層面がくさび形の分離体を形成	断層により岩盤の分離面が形成されていた	地下水の集中、火山岩・堆積岩境界部に脆弱粘土層が存在	断層により岩盤の分離面が形成されていた、斜面重力変形	斜面重力変形
崩壊に関わるその他要素	強風化	強風化	火山岩は球状風化を呈する	強風化、1988年以降の道路開削で末端が切られていた？	降雨時に斜面下部で急速な侵食が発生
航空レーザー地形図に認められる発生前の地形特徴	小谷と小型の沖積錐が存在	ゆるく平滑な谷が存在	侵食が活発に行われていると考えられる顕著な谷が存在	斜面重力変形による小崖と凸地形あり、道路沿いに多数の崩壊痕	明瞭な斜面重力変形地形による小崖（地すべりが既にあった）
航空レーザー地形図から崩壊可能性を予測できたか？	×	×	△	○	○

第3編

表現している（視覚的に理解しやすいため、明るいほど傾斜量が小さいに処理した）。傾斜量図では標高は表現されないが、斜面の凹凸や形状が立体的に表現される。また、陰影図と異なり方向への依存性が無い。今回作成した傾斜量図は地形上に存在する植生や人工物の被覆を取り除いた GROUND データを元としているが、この除去処理が十分でない場合も多く、処理しきれなかった樹林が点紋として傾斜量図に表現されたり、傾斜量図に不自然な線などのアーティファクトが出現したりしている。それらを地形として誤認しないように注意が必要である。傾斜量図は無償 GIS ソフトウェア、QGIS でも作成可能であり、本研究でも同ソフトウェアを用いて作成した。

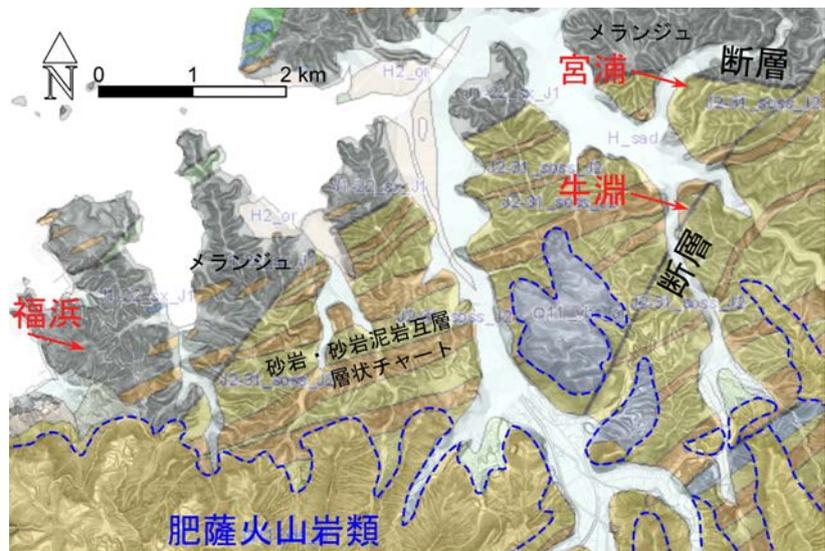


図 3.3 調査した芦北町・津奈木町沿岸域の崩壊地と地質図
(産業技術総合研究所, シームレス地質図 v2 を元に作成)

①芦北町宮浦

同崩壊は斎藤ほか（2010）の 20 万分 1 地質図図幅に記載のジュラ紀付加体「秩父帯」の整然相の分布地に位置している。同図では泥岩および砂岩泥岩互層を伴う砂岩が分布する地域となっており、現地の崩壊源にも砂岩と泥岩が露出していた。また、同上の地質図上では本地域の北に約 100 m 離れた場所に整然相地域とメランジュ地域を境する断層があるとされる。

傾斜量図（図 3.4A）を観察すると崩壊前に小谷があり。崩壊はこの小谷の谷頭部を拡大させるように発生していた。しかし、線状凹地や小崖などの重力変形の進行によって生じるような微地形はこの傾斜量図からは読み取ることができ無い。

崩壊物質によって削剥されて露出した谷の北側には泥岩、谷の南側や崩壊源には砂岩が主体の砂岩泥岩互層が認められた。この砂岩は亀裂に富んでおり、亀裂を黒色の鉱物脈が網状に充填していた。この砂岩が主な崩壊物質である。また、砂岩は全体的に黄褐色に強く風化しており、容易にハンマーの打撃で破壊できた。谷頭部の南側の砂岩には複数枚の平滑な面が認められた（図 3.4B, 3.4C）。この面は波を打つように大小の波長を持って湾曲しており、せん断作用によって形成されたと考えられる断層面である。さらに、谷の中央部には幅 1 m 程度の破碎帯があり、破碎帯の全体姿勢と一致するシャープな面（Y 面）が複数、平行に認められた（図 3.4B, 3.4C）。この破碎帯は前述した北側の泥岩主体の岩相と南側の砂岩主体の岩相を区分している。しかし、断層の下盤にある泥岩は比較的新鮮である。詳しくは後述するが、この断層面も崩壊の分離面となっており、主に砂岩からなるくさび形のブロックが崩壊したと考えられる。2020 年秋の時点ではさらに崩壊源の上方で岩盤が分離し、亀裂が形成されている状況が確認できた（図 3.4B）。

②芦北町牛淵

同崩壊は斎藤ほか（2010）の 20 万分 1 地質図図幅に記載のジュラ紀付加体で砂岩を主体とする層と

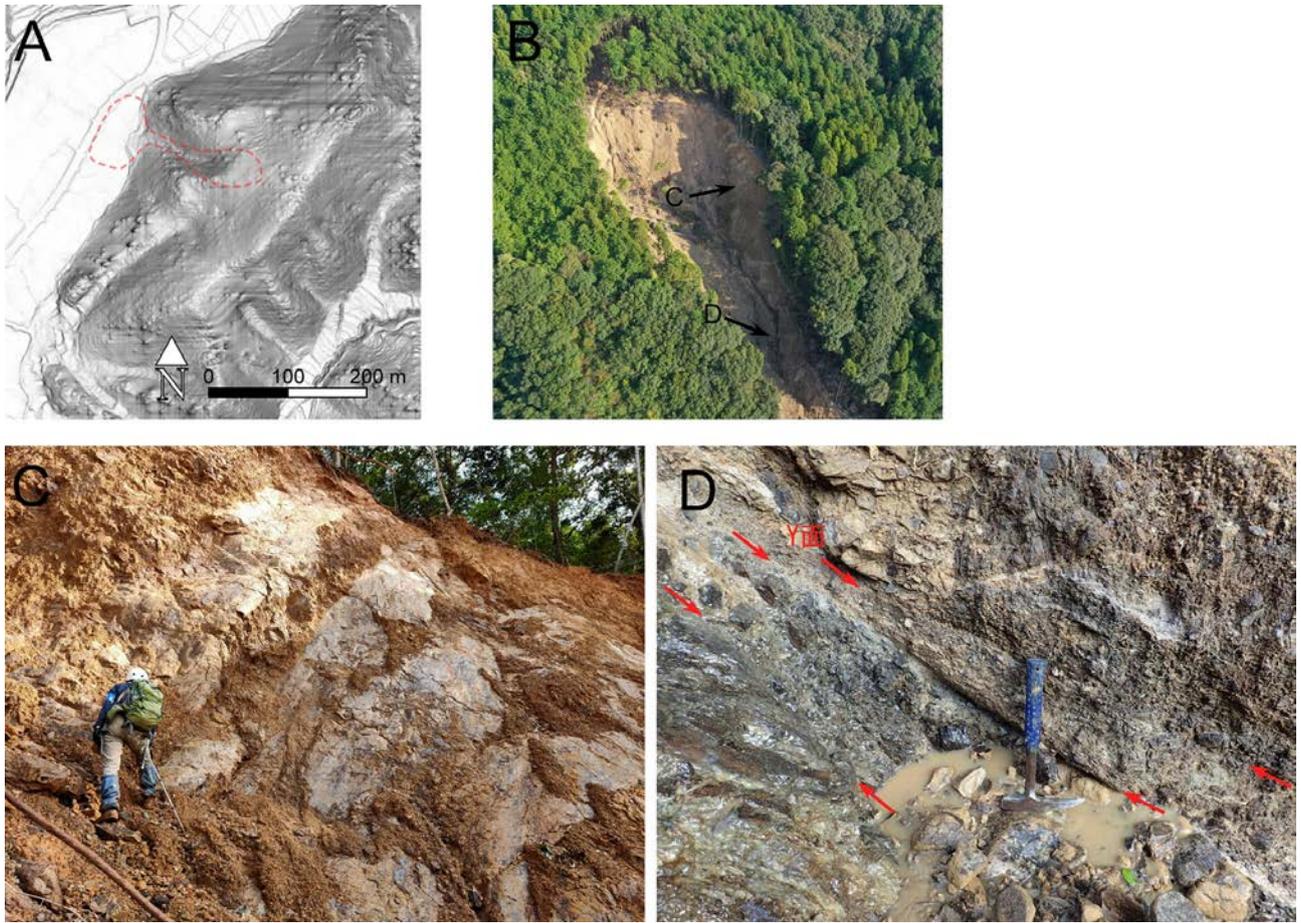


図 3.4 宮浦の岩盤崩壊の地形と露頭写真，A:傾斜量図と崩壊範囲（赤破線），B：上空からの写真．崩壊の向かって左上方に亀裂が観察できる．C:崩壊跡に露出した断面，D:谷底に観察された断層破碎帯

層状チャートの整然相の分布地域に位置している．また，以上の砂岩や層状チャートの層を切断する断層が同地質図には記載されている（図 3.3）．

傾斜量図を観察すると平滑で浅い谷が形成されている場所で発生しているが，線状凹地や小崖などの重力変形の進行に伴って生じるような微地形はこの傾斜量図からは判別でき無い（図 3.5A）．崩壊は谷の上部で発生し，崩壊に伴って断層ガウジやチャートの角礫を伴う幅 5 m 以上ある厚い破碎帯が露出した（図 3.5 B, C, D）．破碎帯は明瞭に観察できる 2 枚の Y 面と，それに合流するような形で存在する湾曲した断層面の両方を使って分離するように発生したと考えられる．発生直後の航空写真を観察する限り，おそらく崩壊は 2 波以上あり，第 1 波は，谷の南側（左岸側）で前述した破碎帯の断層面を分離面とするもので深さは最大 10 m 程度あり V 字の谷を形成した．その時に崩壊した岩石は主に砂岩で，チャートも混じる．この砂岩は黄褐色に強く風化しており，灰白色の粘土脈を伴うこともある．第 2 波は谷の北側（右岸側）で発生したもので，地表付近に分布する厚さ 1, 2 m 程度の赤褐色の土層が表層崩壊したものである．

③福浜

同崩壊は斎藤ほか（2010）の 20 万分 1 地質図図幅ではジュラ紀付加体でメランジュを主体とする地域に位置している．ただし，崩壊後露出した場所には，顕著な変形や変質を受けていない珪長質の火山岩が，礫岩，泥岩からなる堆積岩の上に堆積している状況が確認できた．この火山岩は版状の斜長石斑

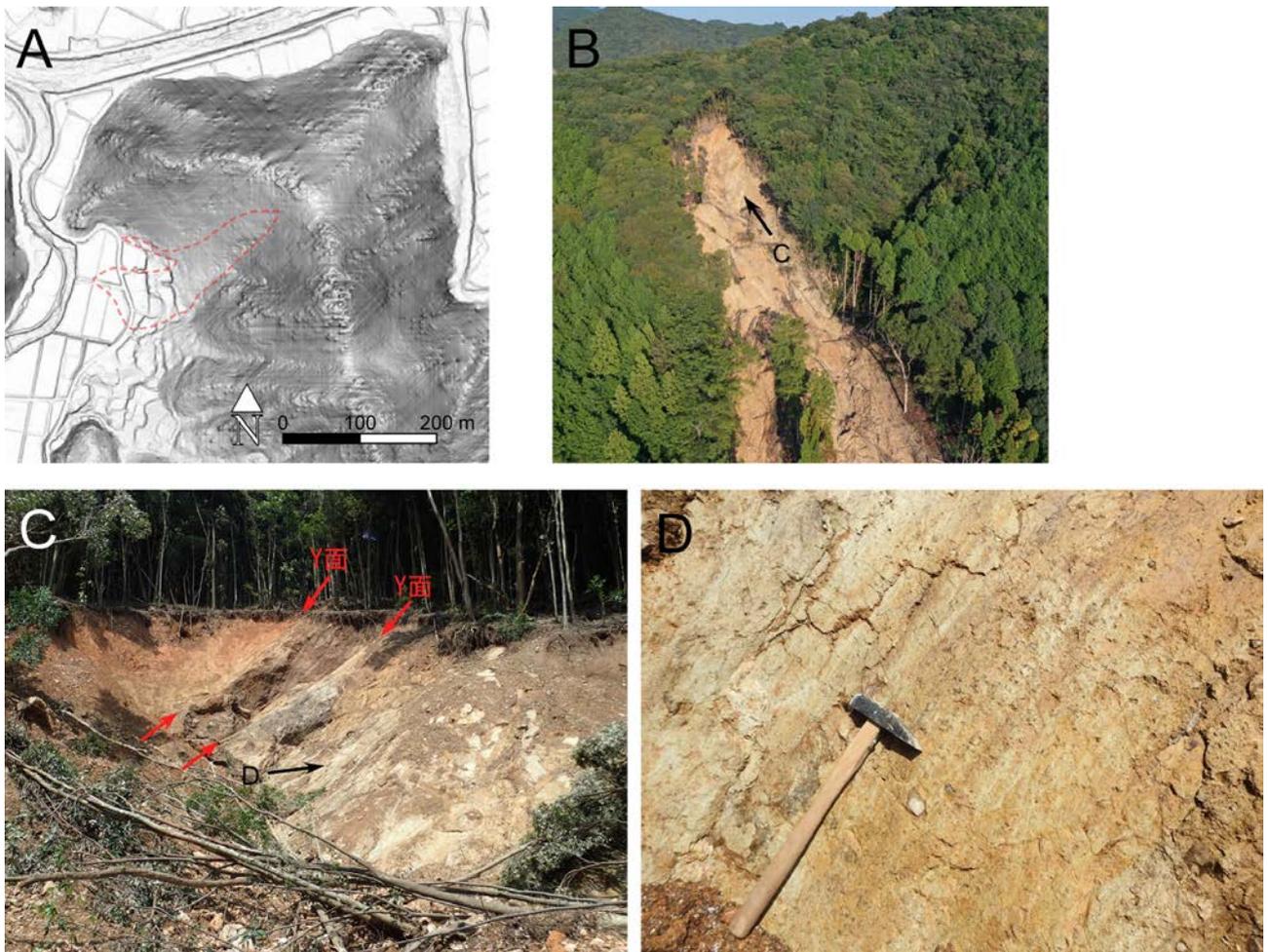


図 3.5 牛淵の岩盤崩壊の地形と露頭写真，A:傾斜量図と崩壊範囲（赤破線），B：上空からの写真．C:崩壊跡に露出した断層面，D:断層ガウジと顕著に発達する条線（位置はC）

晶に富んでいる灰白色の岩石であり，地域南側に分布する肥薩火山岩類の可能性がある．

傾斜量図（図 3.6A-1, 2）を観察すると崩壊前にも周囲に比べて顕著な谷が形成されており，今回の崩壊はこの谷の谷頭をさらに拡大するように発生した．この谷はその上方の集水域が小さいにも関わらず，山側深く食い込むように発達しており，侵食が周囲に比べて顕著に進行してきた状況が推定できる．また，傾斜量図からは明瞭な遷急線が読み取れる，これは火山岩と下方の礫岩・泥岩の堆積岩との地質境界を反映してしていると思われる（図 3.6 A-2, B）．崩壊発生後の 2020 年 7 月 17 日の調査時には火山岩と前述の礫岩・泥岩からなる堆積岩の境界付近に多量の湧水が認められた．また，火山岩の直下に軟弱な粘土層があり，この粘土層が湧水で侵食されていた（図 3.6 C）．この粘土については現在分析中である．湧水は，上方の火山岩を浸透した水がこの粘土層付近で遮水され側方に流下していると思われる，降雨時にはその水圧が崩壊源に集中していた可能性がある．前述の顕著な谷が形成されていることを考えるとこの場所は周辺部と比べて特異的に地下水が集中する場所であった可能性がある．なお，火山岩は球状風化を受けており，それから分離した火山岩の巨礫が滑落崖に露出し，崩壊堆積物にも残存していた（図 3.6 C）．

④行徳川

同崩壊は沿岸域から離れた内陸の大比高差の地域の尾根上で，道路付近で発生し，道路を塞いだ（図 3.7 A），さらに土砂が下方の球磨川支流・行徳川を流下して球磨川本流に到達し，本流沿いの道路，鉄

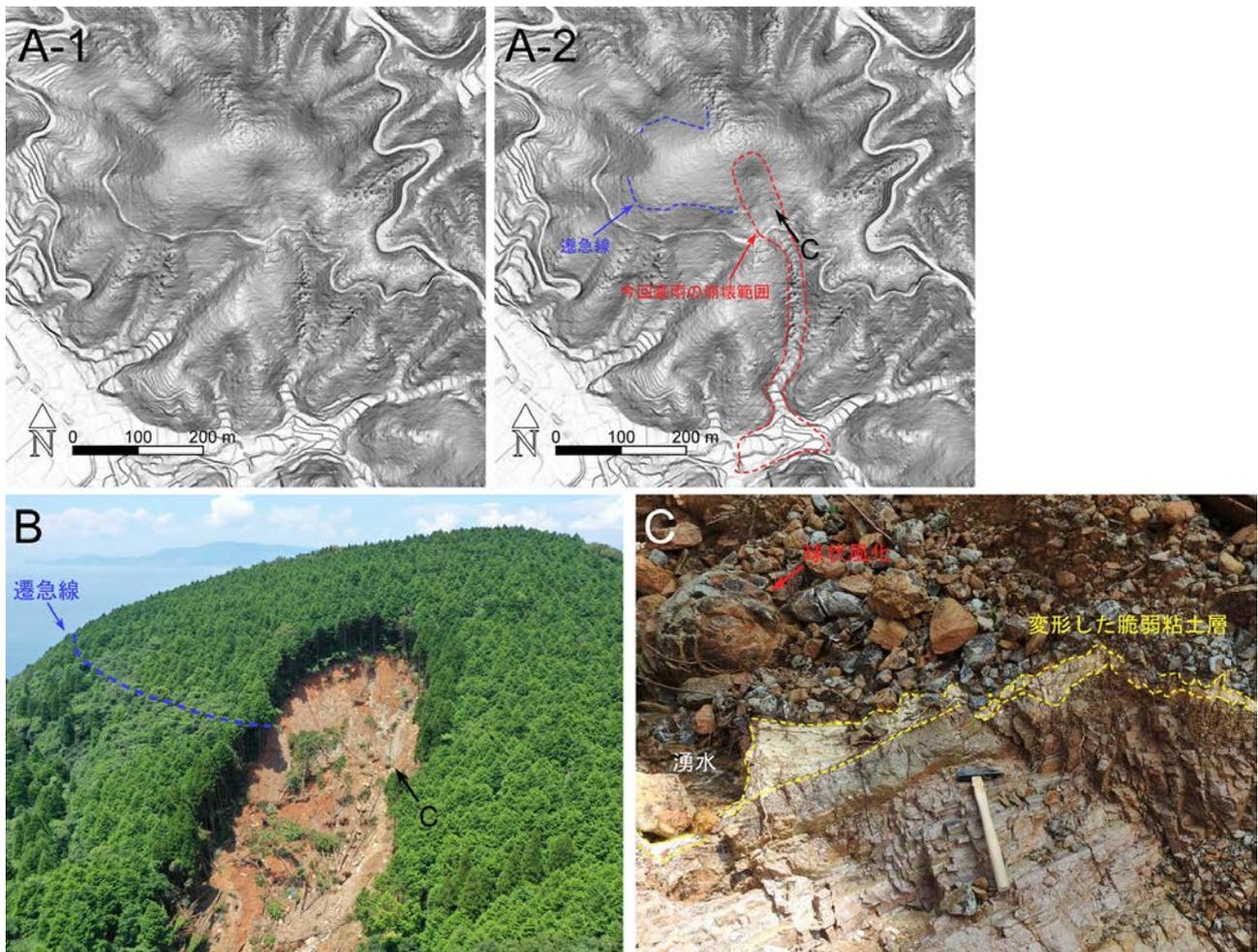


図 3.6 福浦の岩盤崩壊の地形と露頭写真，A-1:傾斜量図（A-2 は崩壊・堆積範囲，遷急線，写真位置を記載），B：上空からの写真．C:湧水点付近の露頭（位置は A-2,B），上方に火山岩の風化物があり，粘土層を挟んで下方に泥岩層がある

道構造物などを破壊したと思われる．解析雨量のデータによると同地点周辺の 2020 年 7 月 3 日および 4 日の総雨量は 450 mm 程度と推定され，崩壊が多発した沿岸域の同総雨量 650 mm 以上の地域からは離れている．

同崩壊は，斎藤ほか（2010）の 20 万分 1 地質図図幅に記載のジュラ紀付加体でメランジュを主体とする地域において発生していた．また，現地に認められる地質もチャート，砂岩，泥岩の混在物質であった．

地域には北東南西方向に伸びる尾根があり，その尾根の直下に道路がある．過去の国土地理院の空中写真データベースを分析したところこの道路は 1988 年から 2003 年頃に建設されたと考えられる．傾斜量図（図 3.7B）を観察すると，尾根の南東側には，小崖と地形的な膨らみ（凸型縦断形の斜面）からなる重力変形地形が複数発達し，今回崩壊した場所もその一部である．さらに過去に崩壊したと考えられる馬蹄形の崩壊痕跡が今回崩壊地の周囲の道路沿いに多数認められ，今回崩壊した場所の下部道路沿いにも崩壊と考えられる痕跡が認められていた．崩壊地に露出した岩石は著しく変形しており，崩壊の流下方向に傾斜する断層面が認められ，さらに，同じく断層面の可能性がある崩壊範囲を区分する平滑面が認められた（図 3.8）．これらの不連続面が崩壊物質のすべりまたは分離をもたらしたと考えられる．また崩壊物質や崩壊後に残された岩盤は，黄褐色，赤褐色，白色の色を呈して顕著に風化していた．

第3編

⑤宮目木谷

同崩壊は沿岸域から離れた内陸の大比高差の地域で、川辺川支流の宮目木谷上流部で発生した（図 3.9）。解析雨量のデータによると同地点周辺の7月3日および4日の総雨量は450 mm程度と推定され、崩壊が集中した総雨量650 mm以上の地域からは離れている。後述するように、この崩壊は崩壊源の下端部におそらく常時流水の無い小河川があり、崩壊はその侵食が誘因と考えられるが、崩壊地の上流域も概ね同期間の総雨量が450 mm程度であったと推定される。

この崩壊は、斎藤ほか（2010）の20万分1地質図幅では白亜紀付加体地域に位置する。現地には砂岩と泥岩が認められるが、規模が大きい北側の崩壊は主に泥岩からなる。この泥岩は変成しており、顕著な片状構造が発達している。同地質図幅では高角の断層の記載も崩壊の近傍にあるが崩壊との関係に関しては不明である。

傾斜量図（図 3.9B, C）を観察すると、現地には顕著な遷急線が宮目木谷の南側（左岸側）にあり、これらの遷急線を変形させるように遷急線の上方から小崖、断面形が凸型の斜面形状を持つ重力変形が発達している。今回崩壊した場所の一部には発生前に比較的明瞭な崖地形があり、崩壊発生前にこの崖を境界として岩盤が分離していた可能性がある。

前述したように、今回崩壊した場所の下端に接して宮目木谷に支谷である小河川があり、この小河川は地形図では河川との記載がないために常時流水が無いと思われるが、流入する集水面積は図上計測で1.8 km³と大きく、豪雨時には大量の降水が流下したと思われる。おそらく流水が重力変形していた斜面の下端部を侵食したことが崩壊の

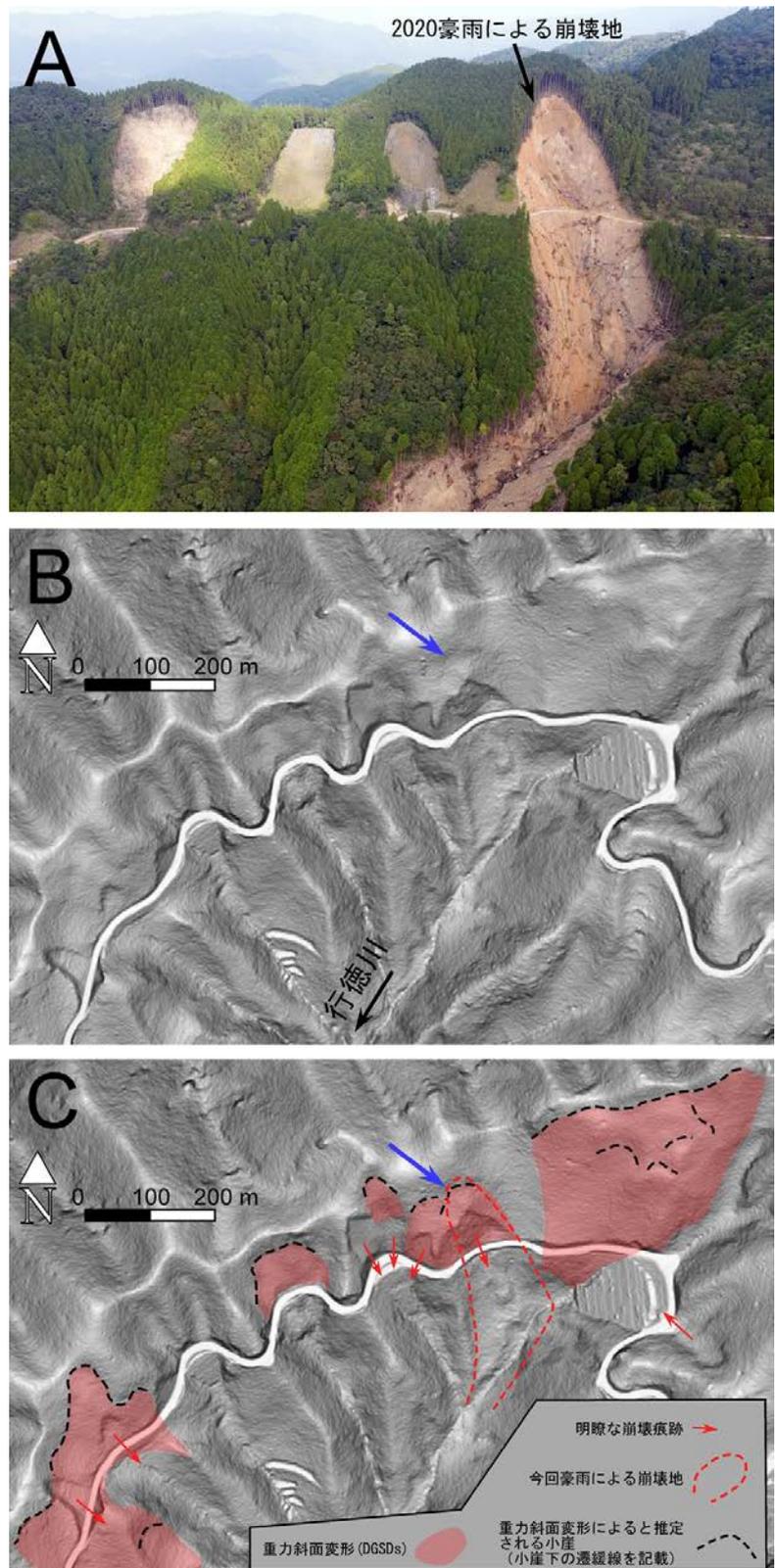


図 3.7 行徳川の岩盤崩壊の地形，A:2020年豪雨の崩壊地と林道，崩壊のために設置されたと思われる法枠工が周囲に観察できる．B, C: 傾斜量図とその解釈（青矢印は同じ位置を示している）

第3編

誘因である。この小河川沿いにも複数の重力変形地形が認められる。

3.4 崩壊と断層の関係について

付加体地域では頻繁に断層が認められたり、岩石も劈開面、片理面等の片状構造を有したりする場合がある。層理面に加えて、これらの面が崩壊のすべり面や分離面として利用される。今回発生した岩盤崩壊は、特に断層面起源の平滑な面が崩壊後に露出していた。



図 3.8 西から行徳川の崩壊地と観察された平滑な分離面と斜面に平行な断層面

図 3.10 は宮浦、牛淵、行徳川の各崩壊地で認められた断層面と層理面、概ねの斜面の傾斜角と傾斜方向をステレオネットに下半球投影したものである。

宮浦では、概ね2方向の断層面が崩壊地内部で斜行しており、断層面に挟まれたくさび形のブロックが崩壊したと考えられる。なお認められた層理面は、斜面の傾斜方向とは逆方向であった。くさび形崩壊はこれまでも付加体地域で頻繁に報告されている。

牛淵の崩壊では、断層面がすべり面となって上方の岩盤が崩壊したと思われる。断層近傍の崩壊は深くV字の地形を形成した。粘土質の断層ガウジの存在や、断層下盤が比較的堅硬であったため、降雨時に浸透水が断層の場所で遮られ、それによって断層直上が飽和し、強度を失った可能性がある。砂岩の風化物は水の飽和によって強度を失いやすい砂粒子が主であり、そのため崩壊は土石流化して長距離流動した。

行徳川では一つの断層面は崩壊のすべり面として、他の一部の面は断層面であるかどうか未調査であるが、崩壊の分離面として働いたと思われる(図 3.8)。断層破碎帯が複数認められるが、その姿勢は斜面を横断するものもあり、それらがどの程度崩壊に寄与したかは不明である。

宮浦、牛淵、行徳川のいずれの崩壊地も岩盤が赤系色、黄系色、白色などに岩石色が変化するように強い風化の影響を受けており、おそらく風化によって岩盤全体の強度が低下した結果、強度の境界である断層面等で岩盤崩壊が発生したと考えられる。宮浦や牛淵は沿岸付近の低比高地であり、さらに行徳川の崩壊地は尾根付近である。いずれも侵食を免れ比較的長時間に亘って風化の影響にさらされる環境であった。

3.5 航空レーザ地形データを用いた崩壊の予測可能性について

岩盤崩壊が降雨を誘因として発生するには、地下深部までの浸透水の流入する経路が必要である。し

第3編

かし、地下深部で形成された岩石は、初生的にはそのような構造を持たない。斜面は、その自重や地震動などの外力で変形し、こうした経路を持つようになる。このような変形が微地形（線状凹地や小崖）としてあらわれ、また変形した結果、急斜面上に緩い斜面があらわれる（例えば、千木良, 2018）。斜面の変形を示す地形をあらかじめ検出できれば、崩壊の危険が迫る斜面として予測を行える可能性がある。しかし、全数を踏査することは不可能であるため、危険性の高い斜面を検出するために、これまでも計測密度高い航空レーザ地形図によって検討が進められてきた。

今回岩盤崩壊が発生した場所の場合、行徳川と宮目木谷の岩盤崩壊は明確に斜面重力変形が発生していた場所で発生した。これらの崩壊地付近で、地すべりや斜面重力変形は防災科学技術研究所の整備した地すべり地形分布図（J-SHIS Map, 2021,2,12 閲覧）に記載されてはいない。斜面重力変形で生じるような微地形は高密度航空レーザ地形図によりはじめて判読可能なものであり、それによって予測できた可能性がある。福浜の岩盤崩壊地では、高密度航空レーザ地形図では重力変形などの直接的な微変形は観察できないが、谷地形の状況からこの場に侵食が集中してきたことが読み取れる。一方で、宮浦や牛淵の崩壊では斜面重力変形を示すような微地形を見いだしたり、侵食が活発に行われている状況を見いだしたりするのは困難であった。

3.6 まとめと課題

本報告では、2020年7月豪雨で発生した特に崩壊深が3m以上の岩盤崩壊の地形・地質学的特徴を報告し、そして近年整備されつつある高密度の航空レーザ地形データ・地形図（傾斜量図）を用いて崩壊発生前の地形観察の

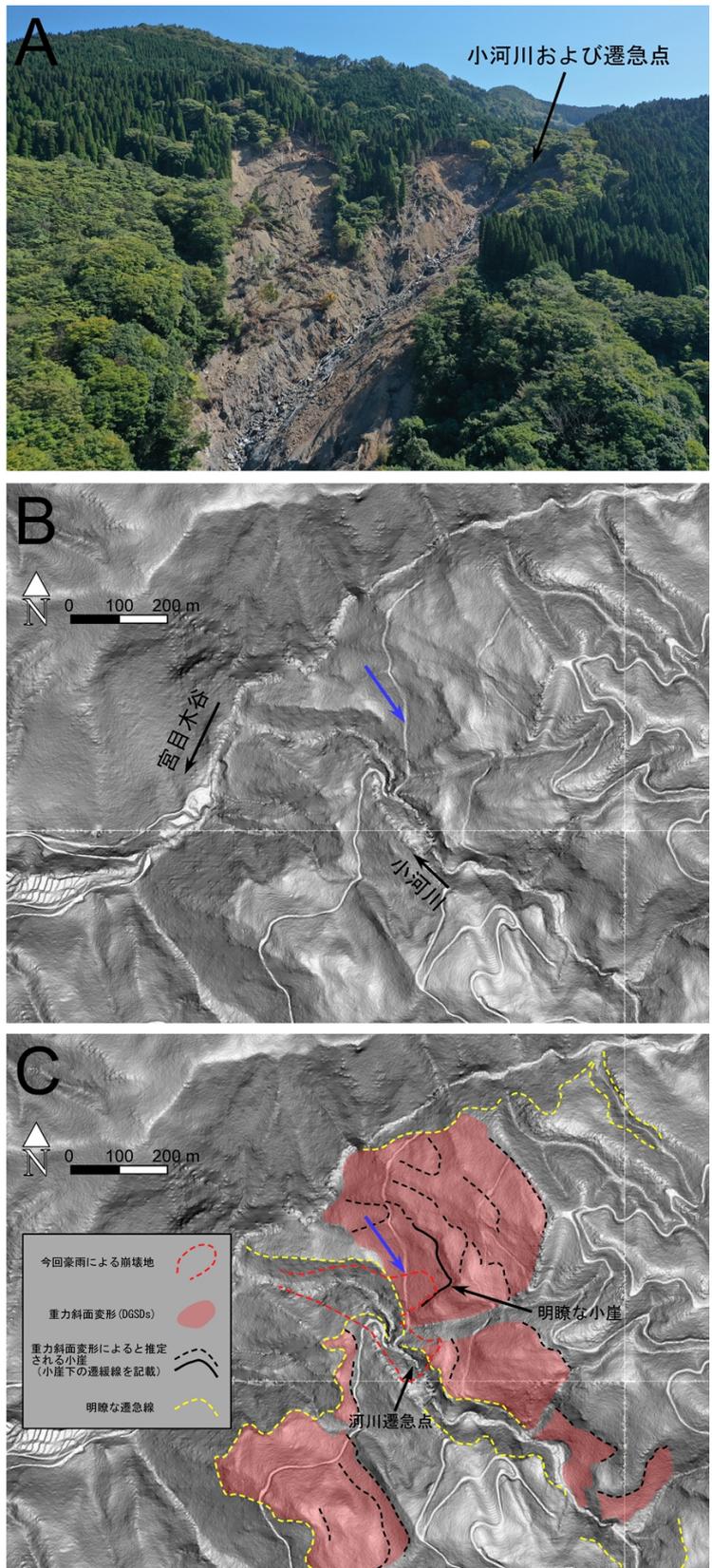


図 3.9 宮目木谷の岩盤崩壊の地形、A:2020年豪雨の崩壊地の斜め空中写真、B、C:傾斜量図とその解釈（青矢印は同じ位置を示している）

第3編

結果を述べてきた。その中で、特に付加体地域に高頻度で出現する断層面が崩壊源に頻繁に認められたこと、そして、それらが崩壊の分離面またはすべり面となったことを述べた。断層付近で岩盤崩壊が発生した事例はこれまでも付加体地域で報告されているが、崩壊と関わる断層の位置をどう知るかというところにおいて課題が残る。今回は実施できなかったが物理探査等の地下構造の調査による検討が重要になるだろう。

調査した5つの岩盤崩壊地のうち行徳川と宮目木谷の2例に関しては高密度航空レーザ地形図からその発生の可能性を読み取れる可能性があったと思われる。さらに、不安定岩盤の範囲や規模を予測することは困難ではあったと思われるが、福浜の崩壊についてもその場所で活発に侵食が起きていることを高密度航空レーザ地形図から読み取ることができた。一方で、宮浦と牛淵の2例に関しては高密度計測の航空レーザ地形図からは岩盤崩壊が発生する可能性を読みとることは難しかった。これらに関しては計測密度が向上すれば崩壊に関わる微地形を読み取ることができたのか？それとも、地表面の形状からは判別することが困難であるのか？など多くの点で不明であり、予測につなげるためには、さらに事例の蓄積が必要である。

参考文献

産業技術総合研究所：緊急調査：熊本県水俣市宝川内集地区
土石流災害

(https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2003/nr20031009/nr20031009.html), 2003, (2021,2,12閲覧)

斎藤 眞・宝田晋治・利光誠一・水野清秀・宮崎一博・星住英夫・濱崎聡志・阪口圭一・大野哲二・村田泰章：20万分の1地質図幅、八代及び野母崎の一部，地質調査総合センター，2010.

千木良雅弘，凌斯祥，松四雄騎：2017年九州北部豪雨災害による斜面災害の特徴，京都大学防災研究所年報，A61, pp. 28-35, 2018.

千木良雅弘：災害地質学ノート，近未来社，2018.

熊本地方気象台，災害時気象資料 (http://www.jma-net.go.jp/kumamoto/kakusyusiryoyou/20200705_kumamoto.pdf)，2020, (2021,2,12閲覧)

防災科学技術研究所：地すべり地形分布図，地震ハザードステーション (J-SHIS Map), (<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>), (2021,2,12閲覧)

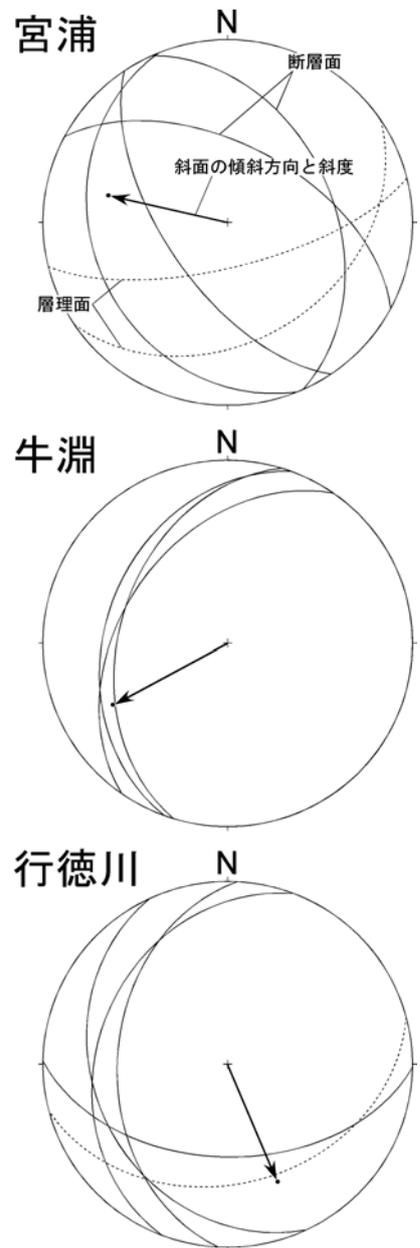


図 3.10 各崩壊地に露出した分離面，すべり面，断層破碎帯のせん断面（実線）と層理面（破線）のステレオ投影図（下半球投影）

第4章 流木災害の状況

九州大学 矢野 真一郎

4.1 はじめに

近年頻発している大規模水害においては、山地の豪雨に起因して斜面崩壊が多数発生し、その結果として土砂と流木が河道へ流出し、水害による被害を拡大する傾向が概ね見られている。例えば、平成24年7月九州北部豪雨では、山国川、花月川（筑後川水系）、玉来川（大野川水系）、合志川（菊池川水系）、白川などで流木による被害が発生した（土木学会九州北部豪雨災害調査団, 2013）。花月川では、夕田橋に流木が集積した結果、上流側に堰上げが発生したため堤防からの越流が生じ、日田市内にはん濫が生じた（矢野ら, 2016）。平成28年の台風10号では岩手県を流れる2級河川小本川において流木災害が発生し、グループホームで高齢者の被害者が多く出た（末次, 2017）。平成29年7月九州北部豪雨では、過去最大の溪流面積あたりの流木流出量を記録し、筑後川中流域右岸側の支川において甚大な流木災害が発生した（例えば、矢野ら, 2018；守屋ら, 2018）。平成30年7月の西日本豪雨では、広島県の太田川水系三條川などで流木に伴う橋梁被害が発生している（井上ら, 2019）。さらに、令和元年東日本台風では、宮城県丸森町を流れる阿武隈川水系の内川・五福谷川・新川の流域で大規模な斜面崩壊が多発し、大量の流木と土砂が下流の集落を埋め尽くした（矢野ら, 2020）。

このように、今後も起こり続けるだろう大規模豪雨や強大な台風における流木災害については、その防災・減災に向けた対策が急がれる。また現在、国が進めている気候変動の影響を踏まえた治水計画への展開においても、土砂と流木の影響を加味した河川計画への研究や技術開発の必要性が謳われている（気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, 2019）。

令和2年7月豪雨では、7月3日から4日にかけて球磨川流域で、7月5日から8日にかけて筑後川流域で大雨をもたらした。本章では、これら2つの河川における流木災害の実態について現地調査を行った結果を報告する。加えて、矢野ら(2020)が令和元年東日本台風による丸森町の4河川において、正垣ら(2020)が平成29年7月九州北部豪雨による筑後川中流右岸支川15河川において、津末ら(2021)が平成30年西日本豪雨による被災河川において、それぞれ開発しているロジスティックモデルによる流木発生量評価モデルを球磨川流域へ適用し、球磨川支川の川辺川に建設する方針が示されている川辺川ダムの集水域における流木リスクの評価などを試みたので、併せて報告する。

4.2 今次水害における流木災害

4.2.1 球磨川流域における流木災害の状況

令和2年7月豪雨では、7月3日から4日午前中にかけて球磨川流域に大雨が発生した。流域内の代表的な雨量観測所の7月3日0時から4日24時までの48時間雨量として、気象庁の人吉地点で420mm、上地点で466.5mmが得られている（国土交通省九州地方整備局、熊本県, 2020a）。球磨川の河川整備方針では、基本高水流量として再起確率1/80の12時間累積雨量に対して人吉地点で7,000 m³/sが設定されている。国土交通省が試算した結果では、今次水害のピーク流量は7,900 m³/s（氾濫戻し、市房ダムなしの場合）であった（国土交通省九州地方整備局、熊本県, 2020b）。このように方針規模を越える流量が見られた洪水であり、相当量の土砂と流木が流出したことが想定された。

第3編

流木量については、球磨川流域全体についての包括的なデータが存在していないため、現状では断片的なデータを基に議論せざるを得ない。まず、球磨川本川上流の球磨郡水上村にある市房ダム（熊本県管理、集水面積：157.8 km²、総貯水容量：40.2 百万 m³、昭和 35 年運用開始、洪水調整・発電・かんがいの多目的ダム（熊本県、2020a））において、約 20,000 m³（推定値）の流木捕捉を行っている（国土交通省九州地方整備局、熊本県、2020b）。一方、球磨川の支川においては被害が甚大だったことから、国による権限代行で流木処理が行われた河川があった。それら代行業における撤去量データより、表 4.1 に示す流木量が得られている。加えて市房ダムの直下にある幸野（この）ダム（熊本県管理、集水面積：161.1 km²（ただし、市房ダムを含む）、総貯水容量：325.9 千 m³、昭和 36 年運用開始、発電・かんがいの多目的ダム（熊本県、2020b））における流木量も併せて示す。

これらの情報、ならびに著者らが発災直後（2020 年 7 月 7 日、11～12 日）に行った先行調査で見られた流木発生状況を基に、調査地域を市房ダム上流域、万江川、川辺川、小川などの支川流域に限定して行った現地調査から得られた流木発生源の情報を以下に解説する。

a) 市房ダム上流域

市房ダム上流域において、2020 年 10 月 18～20 日ならびに 12 月 11～13 日に現地調査を行い、流木発生源となる斜面崩壊地の位置、崩壊面積などを調べた。崩壊地の探索は、初回の調査において、河道をいくつかの領域に区分して各エリアでドローン（Mavic 2 Pro, DJI 社製）を飛行させ、連続的に写真撮影をし、その画像から崩壊地の位置を特定した。そして、2 度目の調査では、特定している崩壊地上空にドローンを飛行させ、上空から写真測量を行った。ただし、斜面への人のアプローチがほとんどの箇所できなかつたため、対空標識を設置して行うような精度の高い測量は行っていない。また、事前調査で特定されていなかった斜面崩壊を発見した場合には、その場でドローン測量を追加実施して、極力多

表 4.1 流木データ（*以外は九州地方整備局まとめ）

河川名	流木量(t)	流木量(m ³)	備考
市之俣川	9	12.9	
川内川	88	125.7	
芋川	8	11.4	庄本川を含む
中園川	31	44.3	
小川	97	138.6	
鶴川	10	14.3	
幸野ダム*	6.15	8.8	熊本県まとめ

※流木量は重量で示されているため、比重 0.7 で体積換算した。



図 4.1 斜面崩壊地オルソ画像（市房ダム上流球磨川本川、I-2 地点他）



図 4.2 斜面崩壊地オルソ画像（市房ダム上流湯山川、Y-5 地点他）

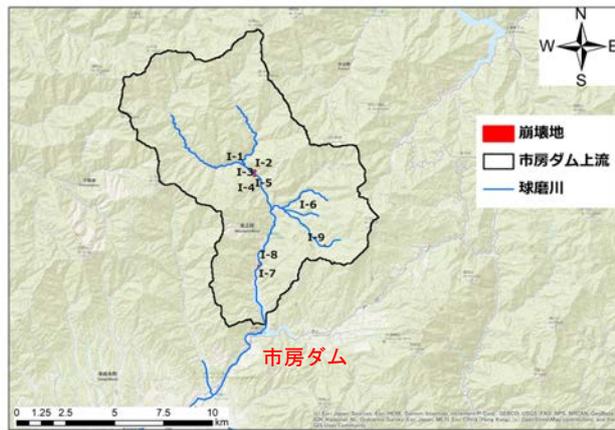


図 4.3 崩壊地ポリゴン図（市房ダム上流球磨川本川流域）

図 4.4 崩壊地ポリゴン図（市房ダム上流湯山川流域）

表 4.2 各崩壊地の面積と推定流木発生量（市房ダム上流域）

エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)	エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)
球磨川本川流域	I-1	0.041	22.5	湯山川流域	Y-11	0.014	29.2
	I-2	0.253	138.9		Y-12	0.056	0.0
	I-3	0.058	0.0		Y-13	0.032	0.0
	I-4	0.003	0.0		Y-14	0.024	17.7
	I-5	0.075	0.0		Y-15	0.049	13.3
	I-6	0.014	0.0		Y-16	0.074	27.1
	I-7	0.033	18.4		Y-17	0.041	40.7
	I-8	0.024	0.0		Y-18	0.042	22.7
	I-9	0.015	0.0		Y-19	0.078	23.1
湯山川流域	Y-1	0.064	35.4		Y-20	0.043	43.0
	Y-2	0.064	35.0		Y-21	0.021	23.4
	Y-3	0.072	39.5		Y-22	0.016	11.8
	Y-4	0.179	98.1		Y-23	0.026	8.6
	Y-5	0.600	0.0		Y-24	0.014	14.5
	Y-6	0.034	0.0		Y-25	0.024	7.9
	Y-7	0.019	10.7		Y-26	0.018	13.0
	Y-8	0.014	7.6		Y-27	0.025	10.0
	Y-9	0.061	33.4		Y-28	0.013	13.6
	Y-10	0.053	35.4		Y-29	0.026	7.1
					Y-30	0.011	0.0

数の崩壊地データの取得に努めた。撮影した多数の写真を重ね合わせることでオルソ画像化した。データ処理にはソフトウェア Metashape (Agisoft 社製) を用いた。最終的に、ポリゴン化した崩壊地データをドローンで記録された座標データを用いて GIS 上に整理した。

図 4.1, 2 にオルソ画像化した崩壊地 2 か所について一例として示した。市房ダムの集水域は球磨川本川流域と支川の湯山川流域に大きく区分される。それら流域について、今回の調査で取得された崩壊地の位置図を図 4.3, 4 にそれぞれ示した。また、表 4.2 に各崩壊地の面積と推定される流木発生量を示した。今次豪雨では両方の流域における降雨は同程度であったが、斜面崩壊は湯山川流域の規模が相対的に大きかった。流木発生量 V は、矢野ら(2020)などで用いた崩壊面積 A に単位面積あたり材積量 β_{hw} を乗じる方法で算出した。その際、表面被覆データから針葉樹、広葉樹、裸地・草地に分類し、それぞれの β_{hw} を $54,900 \text{ m}^3/\text{km}^2$, $100 \text{ m}^3/\text{km}^2$, $0 \text{ m}^3/\text{km}^2$ としている。この流域で最大の崩壊は Y-5 地点で $A=0.6 \text{ ha}$ であった。両流域で発生した合計流木量は 770.8 m^3 であり、市房ダムに流入したと推定された量と比べると 1 割以下と非常に小さい。これは、崩壊地を完全に網羅できていない可能性があること、河畔林由来の流木量をカウントしていないこと、過去の出水で河道などに堆積していた倒木や間伐材の流入量が含まれていないこと、さらに市房ダムの流木捕捉量は貯水池内に浮かんだ流木の面積から概算されたものであり誤差があることなどが考えられる。H29 九州北部豪雨、H30 西日本豪雨、ならびに R1 東日本台風などの近年の大規模水害では斜面崩壊地のデータが国土地理院や国土交通省による航空写真からの解析結果として公開されることが多く、流域内の斜面崩壊地を網羅的に把握できていたが、今回はそのような情報が無く、自前でデータを収集せざるを得なかった。山地におけるドローン調査では、平地と比べコントローラーとドローン本体間の通信距離が小さくなるなど、広範囲な飛行が困難なこともあり、十分に調査しきれていない。今後、行政による崩壊地の包括的なデータセットが公開された後に、再度評価する必要がある。

b) 万江川流域

球磨川の 2 番目に大きい支川である万江川流域（流域面積 90.3 km^2 ）において、2020 年 12 月 11～13 日に現地調査を行い、流木発生源となる斜面崩壊地の位置、崩壊面積などを調べた。調査方法は前述の市房ダム上流域と同様である。

図 4.5 に崩壊地オルソ画像の一例を、また取得された崩壊地の位置図を図 4.6 にそれぞれ示す。また、表 4.3 に各崩壊地の面積と推定される流木発生量を示す。この流域で最大の崩壊は M-6 地点で $A=0.159 \text{ ha}$, $V=87.2 \text{ m}^3$ であった。流域で発生した合計流木量は 320.7 m^3 と見積もられた。



図 4.5 斜面崩壊地オルソ画像（万江川、M-6 地点他）

図 4.6 崩壊地ポリゴン図（万江川流域）

表 4.3 各崩壊地の面積と推定流木発生量（万江川）

エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)	エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)
万江川流域	M-1	0.106	58.2	万江川流域	M-7	0.125	68.4
	M-2	0.034	0.0		M-8	0.019	0.0
	M-3	0.083	45.8		M-9	0.022	11.9
	M-4	0.021	0.0		M-10	0.062	33.9
	M-5	0.067	0.0		M-11	0.011	5.9
	M-6	0.159	87.2		M-12	0.017	9.3

c) 川辺川

球磨川で最も大きい支川である川辺川流域（流域面積 533 km²）において、2020年12月11～13日に現地調査を同様に行った。ただし、日程上の都合で川辺川本川沿いの中流域までの範囲での調査となっている。

図 4.7 に崩壊地オルソ画像の一例を、また取得された崩壊地の位置図を図 4.8 にそれぞれ示す。また、表 4.4 に各崩壊地の面積と推定される流木発生量を示す。中流域までで最大の崩壊は K-3 地点で A=0.086 ha, V=47.4 m³ であった。川辺川本川中流域までで発生した合計流木量は 104.9 m³ と見積もられた。

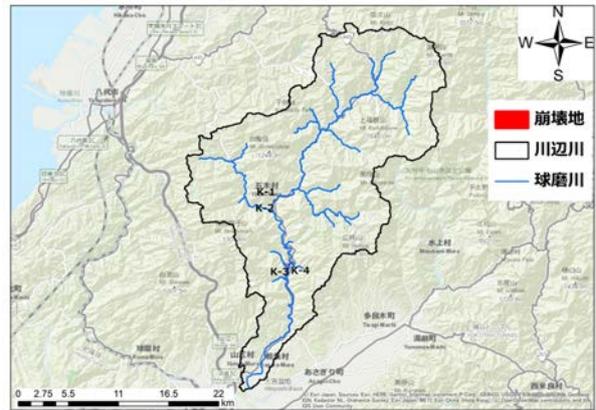


図 4.7 斜面崩壊地オルソ画像（川辺川、K-3 地点他）

図 4.8 崩壊地ポリゴン図（川辺川流域）

表 4.4 各崩壊地の面積と推定流木発生量（川辺川）

エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)	エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)
川辺川	K-1	0.034	0.0	川辺川	K-3	0.086	47.4
	K-2	0.052	28.4		K-4	0.053	29.1

d) 小川、他

最後に球磨川支川の小川（流域面積 29.8 km²）と中園川（33.2 km²）について、2020年10月18～20日ならびに12月11～13日に現地調査を同様に行った。ただし、小川においては道路が崩落しており中

第3編

流域まで、中園川も下流域で道路が崩落しており下流の狭い範囲のみの調査となった。小川については、先行調査の際に球磨川との合流地点となる渡地区周辺で大量の流木がはん濫流によって堤内地に流入し、家屋を破壊した様子が見られた（図 4.9）。また、ドローンで撮影した写真によって流木が小川右岸側の渡小学校横の道路や周辺の家屋に堆積している様子が見られた（図 4.10）。これらの流木は堆積状況から、球磨川本川からではなく小川から流出したものと推測される。

図 4.11, 12 に崩壊地オルソ画像の一例を、また取得された崩壊地の位置図を図 4.13, 14 にそれぞれ示す。また、表 4.5 に各崩壊地の面積と推定される流木発生量を示す。この流域で最大の崩壊は O-16 地点で $A=0.109$ ha, $V=60.1$ m³ であった。流域で発生した合計流木量は 442.9 m³ と見積もられた。表 4.1 に示された小川の流木量より大きいのが、これは本川まで到達して流下した分が加わるためと推測される。

小川より下流で合流する中園川については、下流付近で道路の大規模な崩落が起こっており、上流へ向かうことができなかった。その崩落箇所周辺で見られた 3 つの斜面崩壊からの流木発生量は、65.7 m³ と見積もられた。



図 4.9 流木被害状況（渡地区. 2020/7/7 撮影）



図 4.10 流木被害状況（渡地区. 2020/7/11 撮影）



図 4.11 斜面崩壊地オルソ画像（小川. O-16 地点他）



図 4.12 斜面崩壊地オルソ画像（中園川. N-1 地点他）

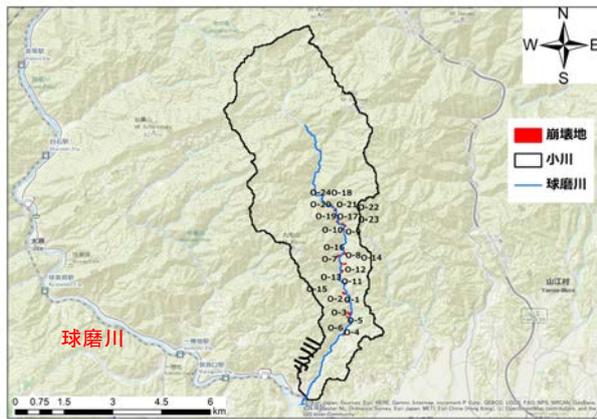


図 4.13 崩壊地ポリゴン図（小川流域）



図 4.14 崩壊地ポリゴン図（中園川流域）

表 4.5 各崩壊地の面積と推定流木発生量（小川流域）

エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)	エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)
小川流域	O-1	0.083	45.5	小川流域	O-13	0.050	27.3
	O-2	0.070	38.7		O-14	0.018	10.1
	O-3	0.044	24.2		O-15	0.012	6.7
	O-4	0.033	0.0		O-16	0.109	60.1
	O-5	0.081	44.2		O-17	0.032	17.7
	O-6	0.105	57.7		O-18	0.012	0.0
	O-7	0.053	0.0		O-19	0.034	0.0
	O-8	0.052	28.6		O-20	0.018	0.0
	O-9	0.063	34.7		O-21	0.031	0.0
	O-10	0.036	0.0		O-22	0.013	0.0
	O-11	0.024	13.3		O-23	0.016	0.0
	O-12	0.062	34.2		O-24	0.010	0.0

4.2.2 筑後川流域における流木災害の状況

令和2年7月豪雨では、7月5日から8日未明にかけて筑後川流域に大雨が発生した。流域内の代表的な雨量観測所である国交省の下笠地点で7月5日17時から8日5時までの60時間累積雨量として812 mm、1時間最大雨量として7日6時の107 mmが記録されている（国土交通省九州地方整備局、2020）。流域での最大60時間雨量は鯛生雨量観測所の936 mmであった。また、気象庁のアメダス玖珠では、512 mmが記録された。今次豪雨では、筑後川支川の玖珠川で大規模なはん濫が発生し、谷底河川となっている日田市天ヶ瀬において兩岸の温泉街を高速流が通過し、死者1名を出した。また、本川上流にある下笠ダムにおいて昭和47年の供用開始以降初めて異常洪水時防災操作が行われ、7月8日0時に計画最大放流量350 m³/sを大きく越える放流量1,250 m³/sが記録された。ただし、今回の放流を全て直下にある松原ダムがカットすることに成功しているため、この放流によるダム下流への直接的な被害はなかった。また、下流域の久留米市周辺では筑後川に合流する支川において内水はん濫が発生し、本川水位が下がるのに時間を要したため、排水に時間がかかるなど脆弱性を露呈した。このように、今次水害では球磨川と比べると小さいものの大きな被害が発生している。

流量量については、球磨川同様に流域全体についての包括的なデータが存在していないため、現状で

第3編

は断片的なデータを基に議論せざるを得ない。玖珠川では大きな出水が起こっているが、現状では流木が大きく作用した被災形態は報告されていない。一方、本川上流の松原ダムと下笠ダムではそれぞれ 3,380 m³, 2,710 m³ の流木が捕捉された（国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統合管理事務所, 2020）。また、水資源機構が管理する寺内ダム（集水面積：51 km², 総貯水容量：18 百万 m³, 昭和 63 年運用開始, 洪水調整・かんがい・上水などの多目的ダム）で 1,030 m³ が回収され、大山ダムでも流木が回収されたが回収量は明らかになっていない。寺内ダムは平成 29 年 7 月九州北部豪雨の被災河川である筑後川支川の佐田川にあり、H29 水害では上流から流入した水、土砂、流木を全て受け止めたことで下流を完全に守ることができたダムである。今次水害では H29 水害で発生した倒木等が流出した分があったのではないかと推測されるが、この点については情報が揃っておらず不明であるので、今後の解明が必要と考えられる。

これらの情報、ならびに著者らが 2020 年 10 月 15～16 日に行った先行調査で見られた流木発生状況を基に、調査地域を松原ダム、下笠ダム上流域に限定して行った現地調査から得られた流木発生源の情報を以下に解説する。

a) 松原ダム上流域

筑後川本川上流の大分県日田市大山町にある松原ダム（国直轄, 集水面積：491 km²（下笠ダム集水域も含む）, 総貯水容量：54.6 百万 m³, 昭和 48 年運用開始, 洪水調整・発電・上水などの多目的ダム）において、約 3,380 m³（推定値）の流木捕捉を行っている（国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統合管理事務所, 2020）。松原ダムへは直上にある下笠ダムからの放流水と筑後川本川である杖立川からの水が流入している。下笠ダム上流域からの流木は下笠ダムで捕捉されるため、松原ダムへは杖立川流域からの流入と考えて良い。

そこで、杖立川流域における斜面崩壊の状況を球磨川と同様な調査手法で、2020 年 11 月 19 日に実施した。図 4.15 に崩壊地オルソ画像の一例を、また取得された崩壊地の位置図（後述の下笠ダム上流域も含む）を図 4.16 にそれぞれ示す。また、表 4.6 に各崩壊地の面積と推定される流木発生量を示す。



図 4.15 斜面崩壊地オルソ画像（杖立川、T-3 地点）



図 4.16 崩壊地ポリゴン図（松原・下笠ダム上流域）

表 4.6 各崩壊地の面積と推定流木発生量（松原ダム上流杖立地区）

エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)	エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)
杖立	T-1	0.080	36.4	杖立	T-3	0.386	81.2
	T-2	0.072	39.3				

第3編

中流域までで最大の崩壊は T-3 地点（杖立温泉周辺）で $A=0.386$ ha, $V=81.2$ m³ であった。川辺川本川中流域までで発生した合計流木量は 156.9 m³ と見積もられた。この量はダムで捕捉された量の 1 割にも満たない量であり、現状では発生源を特定できていない箇所が多数あると見込まれる。

b) 下笠ダム上流域

筑後川本川上流の大分県日田市大山町にある松原ダムの直上に位置する（国直轄，集水面積：185 km²，総貯水容量：59.3 百万 m³，昭和 48 年運用開始，洪水調整・発電などの多目的ダム）において，約 2,710 m³（推定値）の流木捕捉を行っている（国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統合管理事務所，2020）。下笠ダムへは筑後川支川である津江川からの水が流入している。

そこで，津江川流域における斜面崩壊の状況を球磨川と同様な調査手法で，2020 年 11 月 19 日に実施した。図 4.17, 18 に崩壊地オルソ画像の一例を示す。崩壊地の位置は図 4.16 に示している。また，表 4.6 に各崩壊地の面積と推定される流木発生量を示す。中流域までで最大の崩壊は S-9 地点で $A=0.260$ ha, $V=142.9$ m³ であった。下笠ダム集水域で発生した合計流木量は 428.7 m³ と見積もられた。やはり松原ダム同様，ダムで捕捉された 16%程度であり，他の発生源があることが推測される。



図 4.17 斜面崩壊地オルソ画像（杖立ダム上流，S-9 地点）

図 4.18 斜面崩壊地オルソ画像（杖立ダム上流，S-11 地点）

表 4.7 各崩壊地の面積と推定流木発生量（下笠ダム上流域）

エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)	エリア	地点	崩壊面積 (ha)	流木発生量 (m ³)
下笠ダム上流域	S-1	0.049	27.1	下笠ダム上流域	S-7	0.021	11.5
	S-2	0.067	35.6		S-8	0.008	4.1
	S-3	0.028	15.3		S-9	0.260	142.9
	S-4	0.016	8.6		S-10	0.139	59.9
	S-5	0.024	0.2		S-11	0.211	115.8
	S-6	0.014	7.6				

4.3 ロジスティックモデルによる球磨川の流木発生量評価の試み

近年の大規模流木災害においては多数の斜面崩壊データ取得が可能であったことから、正垣ら(2020)、矢野ら(2020)、津末ら(2021)は、ロジスティック回帰分析手法を用いて、流木発生量を予測可能とする統計モデルを各豪雨イベントに対して開発した。

正垣ら(2020)は、平成29年7月九州北部豪雨で斜面崩壊・流木災害の被害が顕著であった筑後川中流部支川15河川を対象にして、斜面崩壊に寄与すると考えられる主要な要因を説明変数として組み込み、ロジスティック回帰分析を行った。各河川で概ね±20%の精度で流木発生量を予測している。津末ら(2021)は、平成30年西日本豪雨で被災した呉市、東広島市、宇和島市の被災17河川を対象に同様にロジスティックモデルを作成し、概ね±20%の精度で各河川の流木発生量を予測している。さらに矢野ら(2020)は、令和元年東日本台風で被災した宮城県丸森町の被災4河川を対象にロジスティックモデルを作成し、やはり概ね±20%の精度で各河川の流木発生量を予測した。

そこで、これら既存のモデルを球磨川流域へ適用し、今次豪雨での流木発生量の再現を試みた。まず、対象流域を30mメッシュに区分し、要因データを作成した。要因データは斜面崩壊に寄与する素因として、傾斜角・地質・断面曲率・累積流量・土壌被覆を用いた。誘因として最大累積雨量(1時間・3時間・6時間・12時間・24時間)を設定した。ここでは、2012年、2017~2020年の各年の最大降雨イベントについて国土交通省のC-X雨量データから得られる各時間の最大累積雨量を作成した。

次に既存3種のロジスティックモデルを適用し、メッシュ毎の斜面崩壊発生確率 $P(z)$ を次式より算出する。

$$P(z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)} = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)} \quad (1)$$

ここで、 $z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$ 、 β_i : 回帰係数(最尤法により決定)、 X_i : 説明変数である。各モデルにおける β_i は、表4.8に示すとおりである。なお、H29豪雨とH30豪雨のモデルでは、最大累積雨量について各時間雨量間での多重共線性を回避するために、一つ小さい時間の雨量を差し引く操作を行っている。

次に、メッシュ毎に得られた $P(z)$ を溪流単位で集計し平均することで、溪流毎の平均斜面崩壊発生確率 $\overline{P(z)}$ を算出する。そして崩壊した溪流のデータから決定された崩壊地面積率と $\overline{P(z)}$ の単回帰式を用いて、崩壊地面積率を予測する。最後に、流木発生量 V は各溪流における崩壊面積 A から、上述の現地調査による斜面崩壊地からの算出方法を適用して算出した。モデルの詳細は各文献を参照されたい。

表 4.8 各モデルの回帰係数

要因	区分	H29モデル回帰係数	H30モデル回帰係数	R1モデル回帰係数	
素因	傾斜角	0.068	0.025	0.027	
	平面曲率	-16.909	---	21.108	
	地質	火山岩	-0.346	2.142	10.605
		深成岩	0.048	2.711	11.780
		変成岩	0.561	---	---
		堆積岩	---	1.448	11.054
	累積流量	1.033	0.037	1.827	
	土壌被覆	広葉樹	1.004	1.890	-0.100
		針葉樹	-1.235	1.789	-1.268
		草地+裸地	-0.272	0.519	0.582
誘因	最大累積雨量	1時間	※0.065	※各時間雨量の差分を取り扱う	0.018
		3時間	※0.022		0.033
		6時間	※0.030	0.023	0.009
		12時間	※各時間雨量の差分を取り扱う	※0.077	0.101
		24時間		※0.013	-0.103
		切片	-14.953	-15.502	-15.304

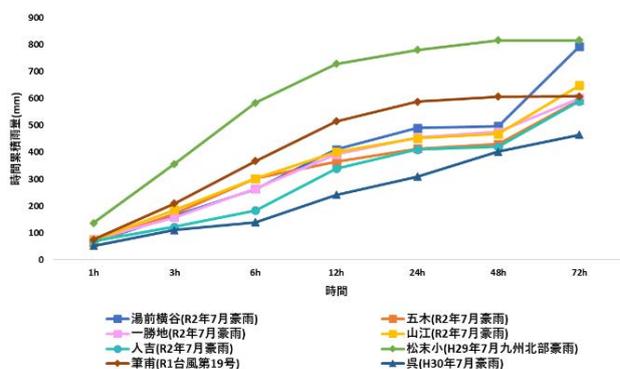


図 4.19 各モデルの対象豪雨と今次豪雨の累積雨量パターンの比較

第3編

次に既存3種のロジスティックモデルを適用し、流木発生量を評価した。今次水害で評価を行った場合、H29とR1豪雨モデルでは流木の発生が見込めない結果を示す河川があったが、H30豪雨モデルではすべての河川で流木発生量が評価された。これは、今次豪雨の球磨川流域における降雨パターンが、比較的H30豪雨に近いと考えられる(図4.19)。なお、各流域における発生流木量の実績データとして利用可能なものがないため、計算結果の再現性についての議論はできない。

図4.20、21にH30豪雨モデルによる今次豪雨に対する小川と川辺川流域における溪流毎の崩壊地面積率分布の評価結果を示す。小川では今回調査を行った中下流域に崩壊が集中する結果となった。しかし、崩壊面積は過大評価気味であった。川辺川については、下流域に崩壊地が集中している。川辺川ダムは流水型ダムとしての建設が計画されているが、流水型ダムの問題の一つとして、土砂・流木が排水孔に大量に集積することで排水不能が起こる可能性が指摘されている。今回の評価結果によると、R2豪雨では川辺川ダム上流域からの流木発生の可能性は低いという結果を示した。このことはダムへ流木が流入するリスクは比較的小さいことを示している。ただし、現地調査ではダム建設予定地上流にも崩壊地が見つかっており、他の降雨パターンについての詳細な検討が必要である。

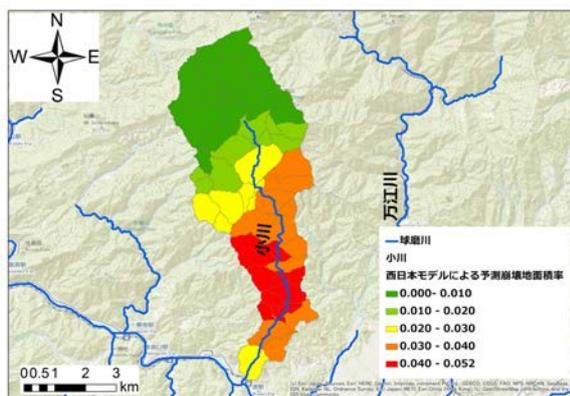


図4.20 H30豪雨モデルにより算出した小川流域の崩壊地面積率の分布

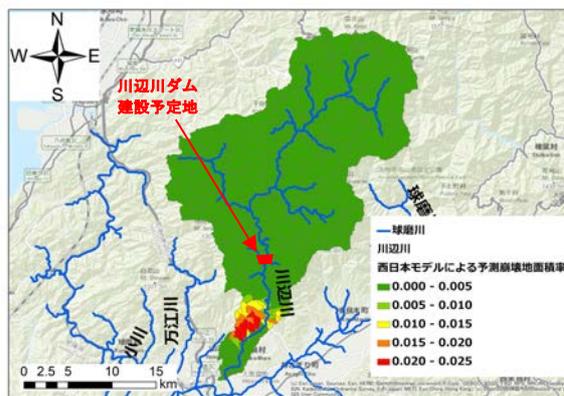


図4.21 H30豪雨モデルにより算出した川辺川流域の崩壊地面積率の分布

4.4 まとめ

今次豪雨による球磨川と筑後川について、流木の発生が顕著であった流域についての発生源調査をドローンによる写真測量により行った。その結果、両河川流域で100カ所以上となる多数の斜面崩壊地データを収集できたが、行政により報告されている発生流木量の推定値に比べそれら斜面崩壊地からの流木発生量の総量はかなり少ないものであった。ドローンでは飛行距離の限界や山地の斜面上を飛行する際に墜落のリスクがあることなどから広域の調査を行うには限界があるため、崩壊地の全容を捉えきれないためと考えられた。国などによる航空写真撮影や衛星データなどを用いた広範囲のリモートセンシングによる包括的なデータ収集が必要である。

また、過去の大規模流木災害から開発された流木発生量を評価するためのロジスティックモデルを球磨川流域へ適用した。その結果、降雨パターンが比較的近い平成30年西日本豪雨に最適化したモデルにより、今次豪雨による斜面崩壊の発生の傾向性が表現できた。今次豪雨による災害を受けて建設が表明された川辺川ダムの集水域においては、比較的流木の発生する可能性が低いことが示された。このことは一般的に大量の土砂や流木の流出についての脆弱性が指摘されている流水型ダムを建設する上で

第3編

は、好条件が示されたことを意味している。

4.5 今後の課題

まず、今次豪雨において球磨川と筑後川の流域で発生した斜面崩壊地の包括的なデータの作成が必要不可欠である。これが揃うことで、両流域における今次豪雨に起因する流木発生 の要因分析が完全な形で可能になる。加えて、本調査で適用したロジスティックモデルは他の水害に最適化されていることから、今次豪雨に最適化したモデルの開発が必要である。調査で得られた崩壊地データは、統計解析するには数的に不十分であることや、崩壊が確認できていないエリアにある崩壊地を適切に評価しなければモデル開発ができないことから、包括的データの整備が必要不可欠である。

川辺川に建設される可能性が高まっている流水型ダムについての懸念事項の一つである流木流入の影響については、現状の解析ではリスクは相対的に低いと示されたが、これについてもより信頼性の高い評価のために今次豪雨に最適化したモデルによる再解析が必要である。

今次災害に限らず流木災害については、発生量データの精度が高くないことや、発生したタイミングが不明確であることが多く、検証が困難であることが多い。現在、国が進めている気候変動の影響を組み込んだ治水計画への方針転換においても、土砂や流木の影響を加味する必要性が指摘されている。これらのリスク評価を合理的に、かつ精度良く行うためにも基礎データの収集体制の確立が求められる。

また、流木災害の減災については、基本的には発生源対策となる森林の健全な管理、砂防施設の充実、ダムにおける網場の強化、河道における流木捕捉施設整備、危険性の高い橋梁の改修促進、などが重要であるが、両河川流域においてこれらを行うためにも、流域一貫した流木災害リスク評価手法の確立が求められる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局、熊本県、水資源機構にはデータ提供等で多大な協力を得た。また、球磨川と筑後川の現地調査とデータ解析、ならびにロジスティックモデル解析においては、九州大学大学院工学研究院環境社会部門の丸谷靖幸助教、九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻の正垣貴大君、Wu Yiewn 君、矢藤壮真君、九州大学工学部地球環境工学科の小林知朋さん、福田凌大君、他九州大学環境流体力学研究室の学生諸氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 井上隆，山村優佳，二瓶泰雄：豪雨時の橋梁被害リスク評価指標の検討～H30年西日本豪雨の三條川橋梁被害縦断分布データを用いて～，土木学会論文集B1（水工学），75(2)，pp.I_1417-I_1422，2019。
- 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言，p.25，2019。
- 熊本県：市房ダムの概要，2020a，<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/106/2587.html>（2021年2月1日現在）。
- 熊本県：幸野ダムの概要，2020b，<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/120/5213.html>（2021年2月1日現在）。
- 国土交通省九州地方整備局：令和2年7月豪雨における出水について（第2報），2020。
- 国土交通省九州地方整備局，熊本県：第1回令和2年7月球磨川豪雨検証委員会説明資料，2020a，http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/river/r0207_ryuikitisui_goukensho/index.html（2021年2月1日現在）。
- 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，2020b，

第3編

http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/river/r0207_ryuikitsui_gouukensho/index.html (2021年2月1日現在).

国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統合管理事務所：令和2年7月豪雨の概要と松原ダム・下笠ダムの防災操作について，2020.

正垣貴大，津末明義，Wu Yiwen，矢藤壮真，矢野真一郎，笠間清伸：ロジスティック回帰分析による平成29年7月九州北部豪雨における流木発生傾向推定モデルの改良，令和2年度土木学会年次学術講演会概要集，2020.

末次忠司：平成28年の台風10号による福祉施設の被災と減災対策，水利科学，354，pp.98-106，2017.

竹村大，増田淑稀，津末明義，大久保遼太，富田浩平，矢野真一郎，笠間清伸：石橋に対する流木捕捉実験に基づく星野川における流木災害リスクの評価，土木学会論文集B1（水工学），74(5)，pp.I_1057-I_1062，2018.

津末明義，正垣貴大，矢野真一郎，他：平成30年西日本豪雨における流木災害評価のためのロジスティック回帰分析，2021.（投稿準備中）

堂菌俊多，坂井健太，小林侑，仁田原公亮，柏原佳明，青木規，太井正史，大野勝正，土橋将太，矢野真一郎：河川流域の流木災害リスク評価手法の改善と球磨川中流域への適用，土木学会論文集B1（水工学），73(4)，pp.I_343-I_348，2017.

土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書，p.104，2013.

守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，峯浩二，鮎本健治，矢野真一郎，渡辺豊，福田信行：平成29年九州北部豪雨による福岡県北川の流木災害の検討，土木学会論文集B1（水工学），74(4)，pp.I_1195-I_1200，2018.

矢野真一郎，土橋将太，堂菌俊多，笠間清伸，北隆範：流木発生ポテンシャルの概念に基づく花月川の橋梁における流木災害リスク評価，土木学会論文集B1（水工学），72(4)，pp.I_289-I_294，2016.

矢野真一郎，大久保遼太，津末明義，竹村大，富田浩平，笠間清伸，二瓶泰雄：平成29年7月九州北部豪雨による流木災害の発生要因に関する分析，土木学会論文集B1（水工学），74(5)，pp.I_1063-I_1068，2018.

矢野真一郎，正垣貴大，矢藤壮真，津末明義，Wu Yiwen，笠間清伸：令和元年東日本台風による丸森町における斜面崩壊のロジスティックモデルの開発と流木発生量の推定，土木学会論文集B1（水工学），76(1)，pp. 253-263，2020.

第5章 被災河川堤防堤体土の水分特性の評価とその適用

九州大学 安福 規之
九州大学 アデル アロウイシー

5.1 はじめに (研究の背景と目的)

今次の九州を襲った豪雨により、筑後川では、危険水位を超える水位が長時間継続した。その結果、河川堤防そのものの不安定化には至らなかったものの、39k600-800の右岸側の金島地区でパイピングのような現象が複数箇所を確認されている。一方、球磨川では、堤高を超える河川水位が長時間継続し、56.4k右岸側に位置する八久保地区と55k左岸側に位置する大柿地区の2ヶ所で河川堤防が破堤した。このような被害状況下、地盤工学的な観点から河川堤防の危険性リスクを分析するには、堤防土層断面を構成する堤体および基礎地盤の土の水分特性曲線と不飽和透水係数を適切に評価しておくことが基盤的な取り組みとして、不可欠である(石蔵ら,2019)。

本研究では、このような観点から、新たに開発している連続加圧式の保水試験装置の実用性を活かして、筑後川で被害を受けた堤防の堤体土と堤防直下の基礎地盤を構成する土質材料の基本的な性質と水分特性を実験的に調べている。また、球磨川で破堤した堤防の旧堤体土と平成30年度の補修工事で旧堤体土と置き換えられた置き換え土の粒度特性などを分析している。そのうえで、得られた実験結果をベースにして、解析に必要なパラメータを同定し、被災した堤体断面を対象に記録として残っている河川水位の時間的変化を反映した不飽和浸透流・安定解析を実施し、筑後川河川堤防のパイピングリスク評価と球磨川での堤防の破堤機構の要因分析を行った。

5.2 筑後川堤防と球磨川堤防の被害と被災を受けた地質・地盤断面の概要

5.2.1 筑後川河川堤防の被害の概要と特色：

筑後川本川の肩ノ瀬水位観測所(福岡県久留米市)では、**図 5.1**に示すように令和2年7月6日14時から7月8日13時の46時間にわたり氾濫注意水位を超過し(ピーク水位 10.52 m)、観測史上第一位の水位を記録した。その結果として、**写真 5.1**に示すように金島地区に位置する「① 39k600+10 付近 (右岸側)」に自噴箇所が確認されているが、自噴にはわずかな砂分の流出はあるものの、多量な湧水や噴砂は確認されていない。上記箇所以外に少量の砂の流出箇所が「② 39k600+120 付近」、「③ 39k600+180 付近」、「④ 39k800+120 付近」の3か所で確認された。噴出した砂は、微砂から細砂であった。

自噴にはわずかな砂分の流出はあるものの、多量な湧水や噴砂は確認されていない。上記箇所以外に少量の砂の流出箇所が「② 39k600+120 付近」、「③ 39k600+180 付近」、「④ 39k800+120 付近」の3か所で確認された。噴出した砂は、微砂から細砂であった。

図 5.2 (a), (b), (c), (d)は、今回、不飽和浸透・安定解析によって堤防の危険度リスク分析を行った地質地盤断面をまとめて示したものである(筑後川河川堤防調査委員会, 2021)。

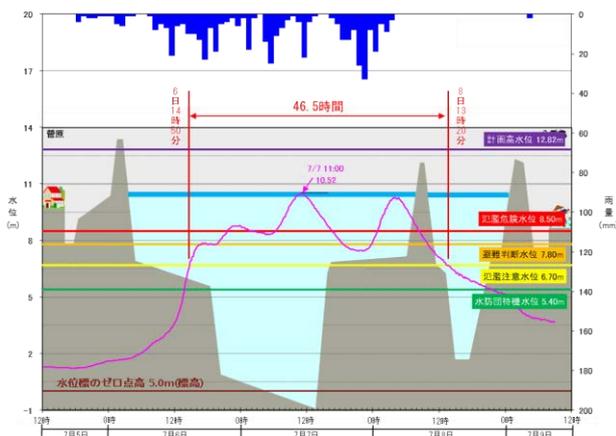


図 5.1 筑後川河川水位記録(7月6日-8日)



写真 5.1 金島地区での自噴の様子

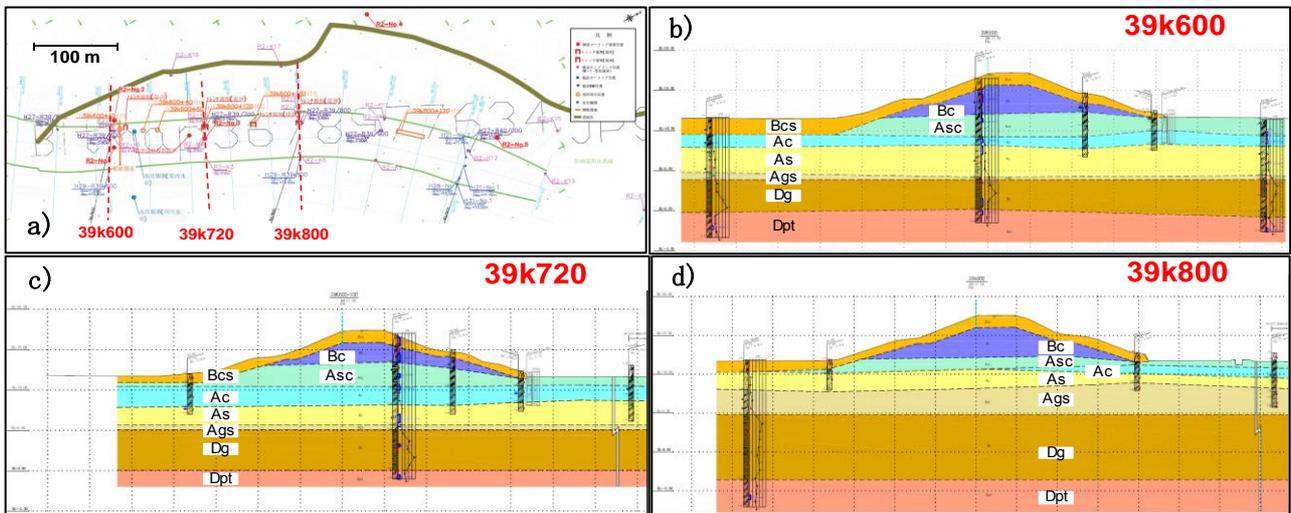


図 5.2 a) : 筑後川被害地区の河川堤防横断面図と解析断面, b) : 39K600 地点の、地層断面(自噴地点)、
c) 39K720 地点の地層断面(試料採取地点), d) : 39k800 地点の地層断面

具体的には、堤体土層での試料が採取された「39k720」、自噴が確認された①近傍の「39k600+5」と噴砂の確認された③近傍の「39k800」での地質地盤断面をそれぞれ示しており、これらの断面を対象に二次元場での不飽和浸透解析を行った。

5.2.2 球磨川河川堤防の被害の概要と特色 :

球磨川流域では線状降水帯が形成され、広域で時間雨量 30mm を超える激しい雨が、7月4日未明から朝にかけて、8時間にわたって連続して降り続いた。本川の中流部から上流部および最大支川の川辺川の各雨量観測所における降雨量は、6時間雨量、12時間雨量および24時間雨量において、戦後最大の降水被害をもたらした昭和40年7月洪水や昭和57年7月洪水を上回る降雨を記録し、河口から約13kmに位置する横石観測所(八代市)から、約69kmに位置する一武観測所(錦町)に至る各観測所において計画高水位を超過する水位となった。この記録的な降雨によって、国管理区間で災害復旧事業としての対応が必要な管理施設被災としては、堤防決壊2か所、堤防損傷10か所、護岸欠損17か所、排水施設3か所、排水機場1か所などの全36か所で確認されている(球磨川河川堤防調査委員会,2021)。本研究では、堤防決壊2か所(56.4k右岸と55.0k左岸)のうち、紅取橋下流の球磨川右岸56.4kでの決壊箇所(八久保地区と称する)に焦点をあて、不飽和浸透・安定解析を通して、堤防決壊の要因分析を行った。写真5.2は、その状況を撮影したものである。周辺の状況は、決壊地点に比べて下流側の地盤高が高く、山付きの地形状況であった。決壊はその山付き地形の直上流の堤防で約30mの範囲で発生した。図5.3は、決壊箇所の堤防構造の



写真 5.2 球磨川堤防決壊の様子(56.4k右岸)

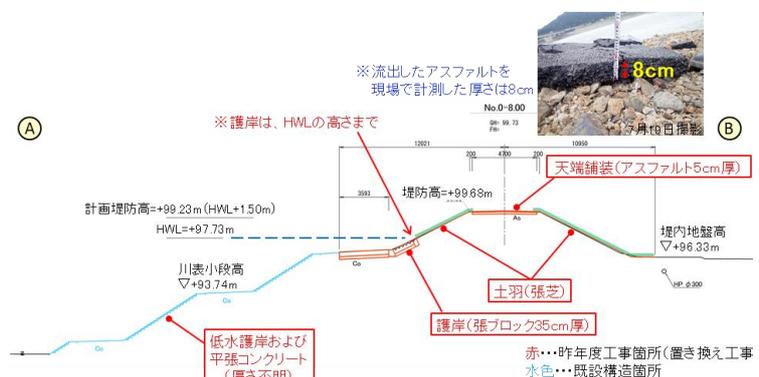


図 5.3 決壊箇所の堤防構造

のうち、紅取橋下流の球磨川右岸56.4kでの決壊箇所(八久保地区と称する)に焦点をあて、不飽和浸透・安定解析を通して、堤防決壊の要因分析を行った。写真5.2は、その状況を撮影したものである。周辺の状況は、決壊地点に比べて下流側の地盤高が高く、山付きの地形状況であった。決壊はその山付き地形の直上流の堤防で約30mの範囲で発生した。図5.3は、決壊箇所の堤防構造の

代表断面を示したものである。堤防は土堤構造で、計画堤防断面で施工された完成堤である。低水護岸に関しては、法覆工としてブロックで保護され、高水護岸は計画高水位まで控え厚 35cm の張りブロック、堤防天端までの範囲は張芝となっている。堤防天端はアスファルト舗装(設計厚 5cm/現地計測 8cm)が施工され、裏法は張芝で保護された構造であったことがわかっている。図 5.4 は解析対象とした八久保地区の旧堤体土で築堤された土層想定断面と平成 30 年の置き換え工事で使用された築堤土質材料(置き換え土と称する)で築堤された想定断面をそれぞれまとめて示している(球磨川河川堤防調査委員会, 2021)。この二つの土層断面を使って後述の数値解析を実施した。

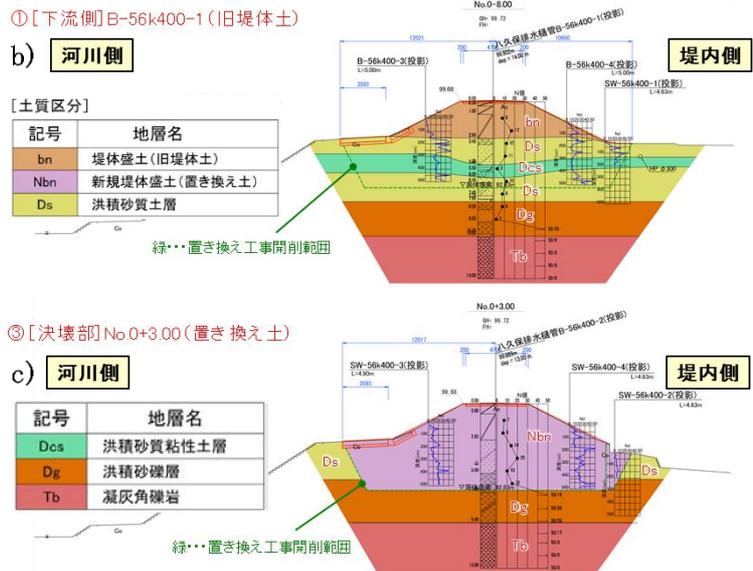
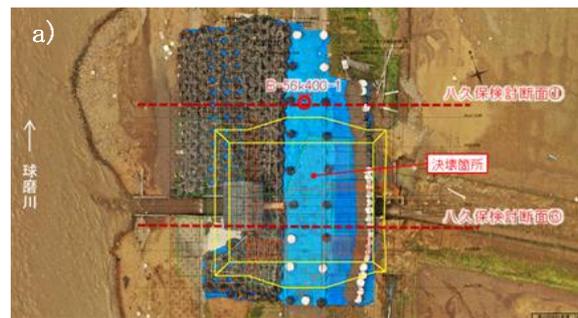


図 5.4 a)：球磨川八久保地区の河川堤防横断面図, b)：旧堤体土で築堤された土層想定断面, (c)：置き換え土で築堤された土層断面

5.3 対象とする主要な堤体土の不飽和浸透特性値の評価

5.3.1 対象とした堤体土の採取地点とその基本的性質

筑後川では、パイピング現象が起こった地点(右岸 39.6k 付近)から、図 5.2 (c) に示す堤体と基礎地盤を構成する土層(砂質土と粘性土)から採取したサンプリング試料(写真 5.3 (a) 参照)を対象に基本的性質ならびに水分特性を調べた。なお、試料の採取地点は、39k720 付近であり、先に示した筑後川堤体の地質・地盤断面中(図 5.2 (a) (c))に示している。表 5.1 は、事前に行われた現地土質調査の結果を図 5.2 (c) に示す土層層序に合わせて土層ごとにまとめたものである(筑後川河川堤防調査委員会, 2021)。表層の Bcs 層から最下部層の Dgt 層までの N 値, 物理特性をまとめている。また、図 5.5 は、各層の粒度分布の代表値をまとめて示したものである。表中には均等係数 U_c も示しているが、総じてどの層も粒度の良い材料で構成されていることがわかる。



写真 5.3 a)：筑後川 39k720 地点で採取した Bcs 層と As 層試料, b)：球磨川 左岸 55k で採取された旧堤体土と置き換え土

表 5.1 各地層断面内の土層の N 値と物理特性(筑後川 39k600-800 の範囲の河川堤防の標準値)

土質名	記号	N-値	物理特性				
			γ_t (kN/m ³)	Fc (%)	U_c	W _L (%)	PI
シルト質砂	Bcs	1-3	17.0	68.7	>50	49.5	15.6
砂質シルト	Bc	1-4	17.3	76.2	>10	47.7	16.3
砂質シルト～シルト質砂	Asc	0-2	15.7	66.0	>50	44.3	12.2
粘土質シルト	Ac	0-3	16.3	86.3	>10	53.7	17.5
シルト混じり砂	As	2-14	18.9	11.0	4	-	-
礫混じり砂	Ags	4-21	19.0	6.8	8	-	-
砂礫	Dg	12-46	21.0	6.8	15	-	-
火山灰質砂	Dpt	6-33	17.0	-	8	-	-

表 5.2 は、球磨川の右岸 56.4k 付近(八久保地区)で、事前に行われた現地土質調査の結果をまとめたものである(球磨川河川堤防調査委員会, 2021)。また、図 5.6 は、堤防が破堤した球磨川左岸 55k 付近(大柿地区)で採取された旧堤体土と平成 30 年に置き換え工事が行われた際の置き換え土の粒度分布の代表値をまとめている。図中には、参考のために築堤材料として利用するときの適用範囲(球磨川河川堤防調査委員会, 2021)を合わせて示している。

この図から、河川堤防の築堤材料として利用するときの適用範囲も示しているが、旧堤体土、置き換え土共に適用範囲内に入っている。写真 5.3 (b) に示すように被災

付近で採取した旧堤体土と置き換え土が得られており、今後、基本的性質などを詳細に調べることにしている。

5.3.2 連続加圧型の保水性試験の概要と特徴

a) 連続加圧法の加圧形態:

本研究では、図 5.7 (a), (b) に示す連続加圧型 (Continuous Pressurization Method : CPM) の保水性試験装置を用いて(安福ら, 2019,2020,2021, Alowaisy ら,2020, 畠山ら, 2019), サンプル試料の水分特性を調べた。その特徴は、通常の段階加圧法 (Multi-step Flow Method: MSFM) に比べると、短時間でかつ連続的な水分特性曲線が得られるところにある。空気圧を連続加圧する CPM 保水性試験システムの核となる試験容器(圧力室)の模式図を図 5.7 (b) に示す。段階加圧法では、通常、空気圧 u_a による供試体からの排・吸水量が一定値になる平衡状態を確認する必要があり、その時の各段階の u_a をマトリックサクシオン $\psi (= u_a)$ と定義している。これに対し、CPM 保水性試験システムでは、空気圧 u_a を図中の①からある一定の増圧あるいは減圧速度で負荷し、供試体中央に設置した②のマイクロテンシオメータ (Micro-Tensiometer: MT) で間隙水圧 u_w を計測することで、マトリックサクシオン ψ を次式から求めている。

$$\psi = u_a - u_w \quad (1)$$

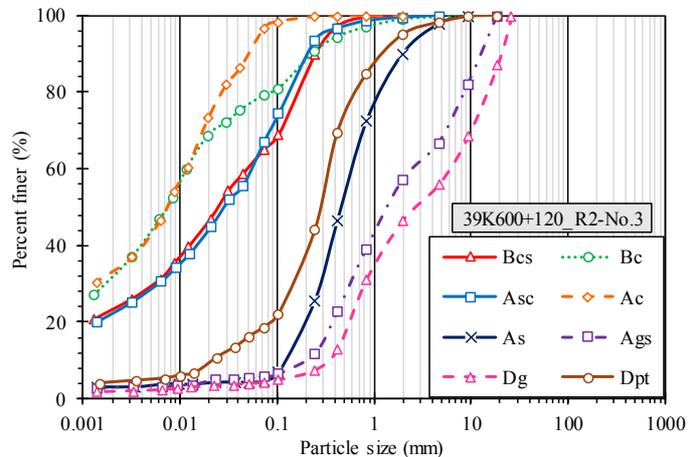


図 5.5 各地層断面内の土層の粒度分布 (代表値)

表 5.2 球磨川 56.4k (八久保地区) の旧堤体と置き換え土の土質分類と物理特性

No.	対象	地層区分		分類	γ_t (kN/m ³)	
		地層名	記号	名称		
①	"八久保下流 B-56k400-1"	[旧堤体土]	旧堤体土	bn	細粒分質砂質礫	21.5
			洪積砂質土層	Ds	細粒分質礫質砂	20.6
			洪積砂質粘性土層	Dcs	-	15
			洪積砂質土層	Ds	-	16
			洪積砂礫層	Dg	細粒分混じり砂質礫 細粒分質砂	18
③	"八久保決壊部 No.0+3.00"	[置き換え土]	置き換え土	Nbn	細粒分砂混じり礫 細粒分混じり砂質礫	21.3

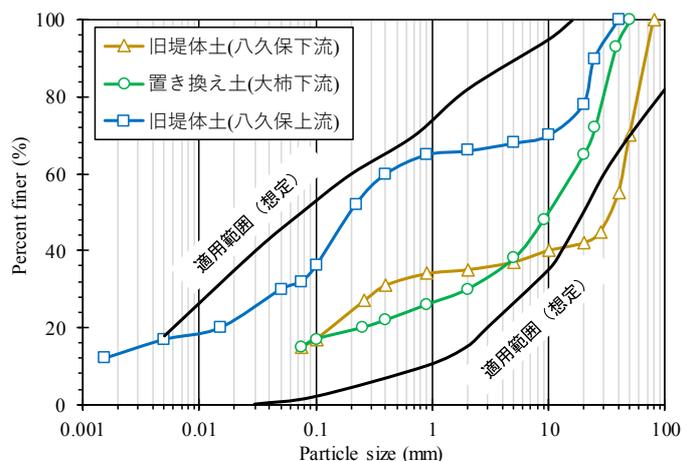


図 5.6 球磨川堤防被災地点近傍で採取された旧堤体土と置き換え土の粒度特性

この算定法により、加圧板法のように供試体内の水分平衡状態を担保する必要がなく、大気圧変化の影響除去や試験時間の大幅な短縮を実現することが検証されている。例えば、砂質土系の試料であれば、加圧型の装置に比べて約 20 分の 1 の時間で水分特性曲線が連続的に得られることが報告されている (安福ら, 2021, Allowaisy ら, 2020)。

b) 保水試験装置の構成と特徴的な構造, 計測精度:

CPM 保水性試験システムは、試験容器 (圧力室)、電子天秤 (排・吸水量の測定)、調圧装置、計測・制御用のロガーとパソコンから構成されている (Allowaisy ら, 2020, 畠山ら, 2019)。供試体から排水・吸水される間隙水は、電子天びんを使って測定できる構造となっている。計測、測定は自動で行われ、排水量は 0.001g、空気圧、水圧は、0.025kPa の精度で計測可能である。すべての試験は、十分に飽和した状態から始めており、供試体の含水比は、初期か最終の供試体の含水比と実験中に測定する排水量・吸水量に基づいて算定される。

試験容器は、内径 5cm のアクリル製の円筒容器で、高さ 5cm までの供試体が設置できる構造となっている。また、試験容器の底板には、セラミック板 (Ceramic disk: CD) が固定されており、その中心には図に示すように最大 3 本の長さの異なる MT が鉛直に取り付けられる構造となっている。実務的には、MT を供試体中央に 1 本設置すれば適切な精度で SWCC が求められることを明らかにしている。なお、MT と CD の空気侵入値 (Air Entry Value: AEV) は、対象とする試料の特性に応じて、カタログ値で 100 kPa と 200 kPa のものを使い分けている。また、システム内の各装置の仕様、MT の設置方法など実験開始までの準備については論文等で詳述している (Allowaisy ら, 2020)。図 5.8 は、一つの代表的な計測例であり、豊浦砂を使って実験した時の空気圧 u_a を 0.05kPa/min で制御し、その間の間隙水圧 u_w と含水比 w の時間的変化を示したものである。この結果を整理することで SWCC が連続的に描けることになる。図 5.9 は、CPM と従来の MSFM で得られた豊浦砂の SWCC を比較したものである。CPM は 3 種の加圧速度の結果を併記している。排水、吸水過程ともに

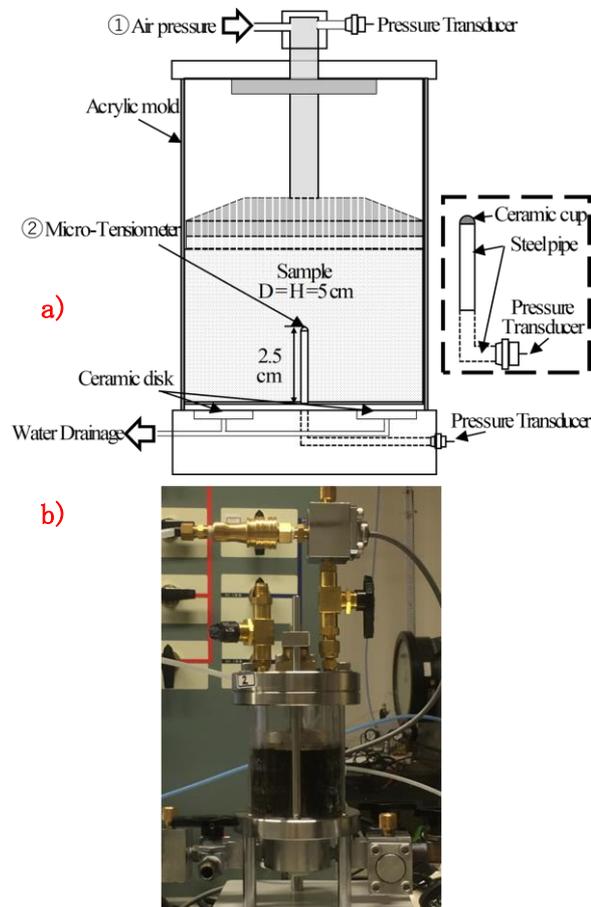


図 5.7 連続加圧型の保水性試験装置の概要

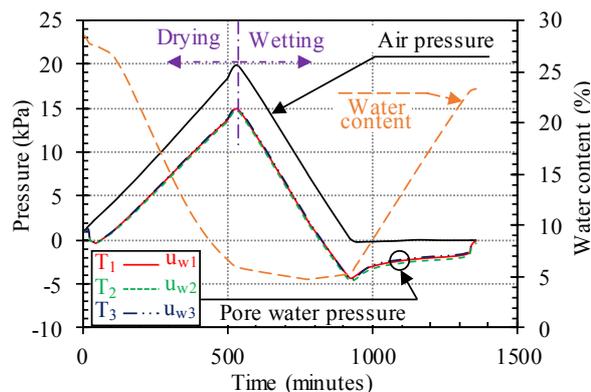


図 5.8 空気圧、間隙水圧、含水比の時間的変化

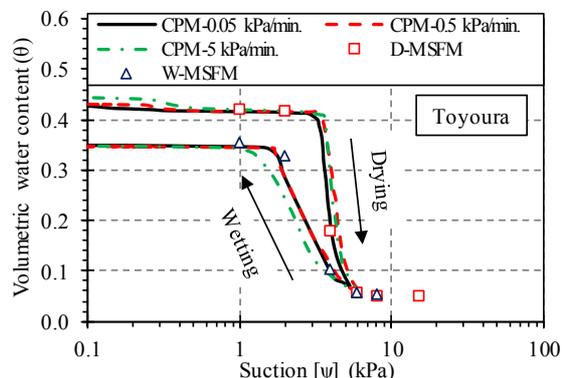


図 5.9 実験で得られる SWCC の代表例

幅広いサクシオン領域において、よく一致する結果が得られることが確かめられている。以下に、本装置を活かして求めた、実際に採取された堤体土の代表的な水分特性の結果を示す。

5.3.3 実験結果と考察 - 筑後川被災地点 (39K720) の Bc 層と As 層の水分特性曲線

図 5.10 (a), (b) は、筑後川 39k720 地点で採取された Bcs 層と Acs 層の土質材料の排水過程での水分特性曲線を示したものである。それぞれの図には、ベンチマークとして豊浦砂の結果、過去のデータベースを活かして粒度分布から算定される結果も比較のために示している。これらの結果から、計測された水分特性曲線と粒度分布から推定されるそれとは Bc 層、As 層ともに大きな違いがみられることがわかる。このことから、不飽和浸透の解析に大きな影響を与える特性であるにもかかわらず、簡易的に粒度分布から推定する水分特性曲線には、このような違いがあることを認識しておくことが大切であろう。今回、不飽和浸透の数値解析を行う上で、堤体の土層断面の多くの層は、粒度分布から水分特性に関するパラメータを算定せざるを得ない状況にあることに留意が必要であり、数値解析の精度を高めるためには、各土層の標準的な水分特性曲線を事前に求めておくことが推奨される。今後の備えとして、浸透流解析の技術水準を高めることを念頭におけば、少なくとも国管理の一级河川では、基準土層断面を設定し、浸透解析に必要な各層の水分特性などは主導的に整備していくことが、事前防災の観点からも重要であると考えられる。

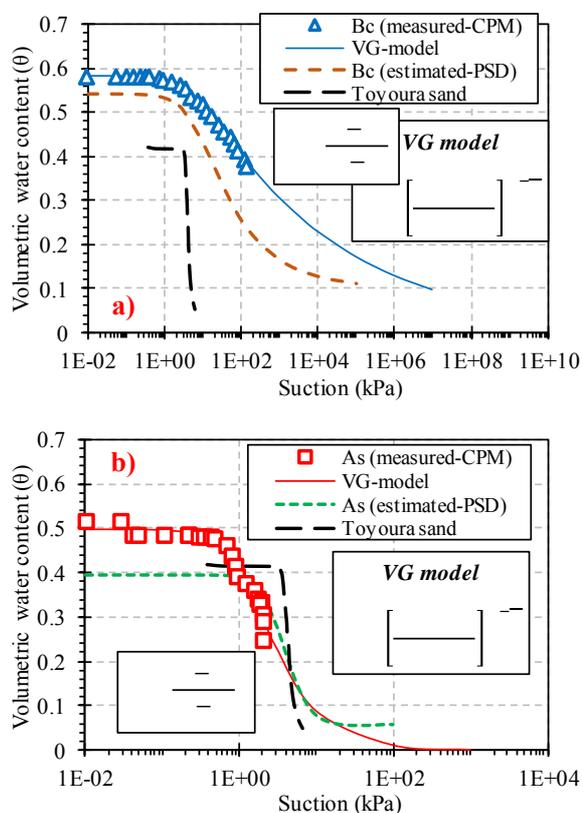


図 5.10 a)：排水過程での Bc 層の SWCC, b)：排水過程での As 層の SWCC

5.4 不飽和飽和浸透流・安定解析による堤体の健全性評価

本研究では、図 5.2 に示した筑後川の被災地点 3 か所の土層断面、図 5.4 に示した球磨川の河川堤防の破堤断面(八久保地区)を対象に有限要素法による 2 次元不飽和飽和浸透流・安定解析を実施し、下記に示す着目点を設定し堤体のリスク分析を行った。

- A) 筑後川の場合の着目点：基礎地盤を含む堤体土層断面の違いに着目し、計測されたハイドログラフをベースに自噴した地点(39k600)、噴砂を観察されている 2 地点(39k720,39k800)においてパイピングリスクの時系列的推移を土中の水の流れと関連づけて分析する。
- B) 球磨川の場合の着目点：河川堤防が破堤した 56.4k(八久保地点)を対象に 1)堤体を構成する堤体土の違い、つまり旧堤体土と置き換え土の違い、2)天端の保護の状況の違いを着目点として、堤体の安定性に与える影響の分析を行う。

5.4.1 解析で用いたハイドログラフと降雨条件の設定

解析にあたっては、外力としてのハイドログラフと降雨条件の設定が重要となる。ハイドログラフは、

筑後川，球磨川それぞれの解析断面近傍で計測された記録データを利用して設定した．図 5. 11(a)は，解析に用いた筑後川のハイドログラフの時刻暦を示している．また，図 5. 11(b)は，球磨川の場合のハイドログラフと降雨条件の時刻暦を示している．

筑後川では，最高水位が 10.52m であり，計画高水位 12.82m を超えることはなかったものの，氾濫危険水位 8.5m をかなりの時間上回る結果となっている．球磨川の場合は，越水時間は 6 時間以上となり，堤防の天端よりも 2m 以上高い河川水位を記録した時間帯が記録されている．また，越水中，堤内地での内水位が堤外地の外水位を上回る時間帯が存在し，逆越流の現象が生じていたことが確認されている．

5. 4. 2 適用した解析手法と解析に必要な土質パラメータ

本研究で実施した二次元不飽和飽和浸透・安定解析に必要な土質パラメータは，表 5. 3 に示すように大きく浸透に関するパラメータ群と強度・変形に関するパラメータ群に分けられ，それらを各層ごとに具体化する必要がある．各層に対して詳細な土質試験結果があるわけではないことから，ここでは，得

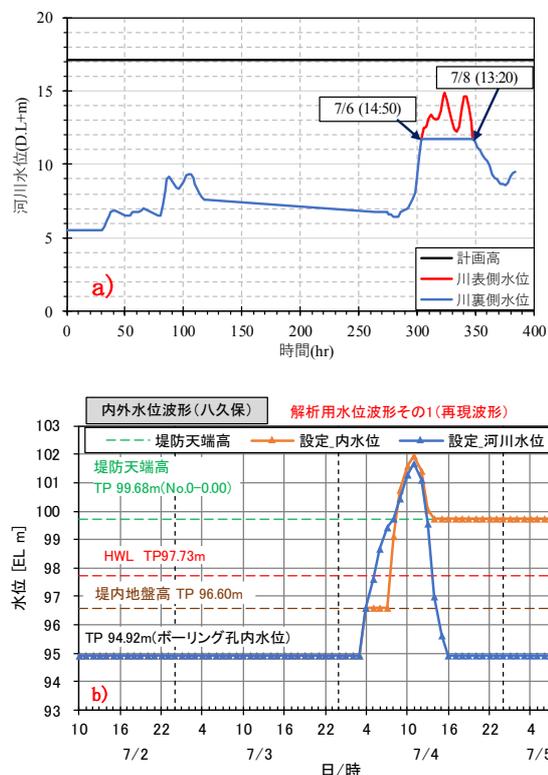


図 5.11 a)：筑後川金島地区で記録されたハイドログラフ，b)：球磨川八久保地区で推定されたハイドログラフ

表 5.3 a)：筑後川での解析に用いた各層の浸透と力学特性に関する土質パラメータ

Parameter	Chikugawa								
	Bcs	Bc	Asc	Ac	As	Ags	Dg	Dpt	
s	0.48366	0.58250	0.42906	0.50483	0.49567	0.37556	0.37590	0.38549	
r	0.08295	0.00001	0.07701	0.10140	1.8863×10^{-6}	0.053272	0.05283	0.04039	
(l/cm)	0.01035	0.01726	0.01056	0.01178	0.06912	0.03236	0.03281	0.04118	
n	1.49403	1.12500	1.45398	1.41611	1.8793	3.18621	3.48769	1.76001	
k_s (m/sec)	3.10×10^{-7}	4.80×10^{-6}	7.70×10^{-10}	1.43×10^{-6}	9.54×10^{-5}	3.51×10^{-3}	1.60×10^{-4}	1.96×10^{-6}	
G_s	2.648	2.636	2.613	2.584	2.717	2.679	2.685	2.473	
c' (kPa)	3.6	0	0	0	13	0	0	0	
ϕ' (°)	26.69	31.19	35.12	32.49	38.08	24.49	36.91	31.43	
ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	
E (MPa)	2.180	2.627	2.746	5.492	16.720	16.475	87.868	49.426	

表 5.3 b)：球磨川での解析に用いた各層の浸透と力学特性に関する土質パラメータ

Parameter	Kumagawa						
	bn	Ds	Dcs	Ds	Dg	Nbn	
s	0.37470	0.38580	0.45880	0.37470	0.37470	0.37470	
r	0.05300	0.11690	0.09820	0.05300	0.05300	0.05300	
(l/cm)	0.03530	0.03340	0.01500	0.03530	0.03530	0.03530	
n	3.17980	1.20670	1.25290	3.17980	3.17980	3.17980	
k_s (m/sec)	8.51×10^{-6}	2.91×10^{-8}	1.00×10^{-7}	2.91×10^{-8}	2.10×10^{-4}	4.50×10^{-5}	
G_s	2.670	2.670	2.750	2.700	2.700	2.670	
c' (kPa)	18	18	19	18	18	12	
ϕ' (°)	41.9	33.3	0	31.6	31.2	39.3	
ν	0.25	0.31	0.33	0.32	0.33	0.27	
E (MPa)	62.741	105.910	2.000	124.294	160.237	96.263	

られている基礎的な情報をベースにパラメータを同定する流れを図 5.12 のように設定し、各層で求められるパラメータを算定した。図にあるように、それぞれのパラメータの算定は、いくつかの手法をリスト化し、その中でまず、1- で示した方法を優先的に選択し、土質情報がなければ 2-、3- の方法で求めるといった方法を採用した。その結果として、表 5.3(a), (b)には、解析に使用したパラメータを筑後川、球磨川に分けてまとめている。したがって、得られる解析結果は、この表にまとめられた物性値を有するモデル地盤における結果であることの認識が大切である。

図 5.13(a), (b)は、浸透に関するパラメータを基に描いた筑後川と球磨川の解析対象断面の各土層の水分特性曲線をまとめて示したものである。

5.5 解析結果と考察

5.5.1 筑後川の被害堤防の解析断面の違いに着目したパイピングの危険度分析

図 5.11(a)のハイドログラフ(筑後川河川堤防調査委員会, 2021), つまり河川水位の変化を圧力ヘッドに置き換え、それを対象とする解析断面の表層面に時刻暦として与え、水平距離 100m を標準として設定されている解析断面ごとに不飽和・飽和浸透流解析(Hydrus2D)を実施した。パイピングの危険度分析は、裏法尻近傍の被覆層直下の透水層における図 5.2 中の地点 X での G/W (G:被覆層の重量, W:被覆層底面に作用する揚圧力)を比較することで行った。ここでは、表 5.4 に示す

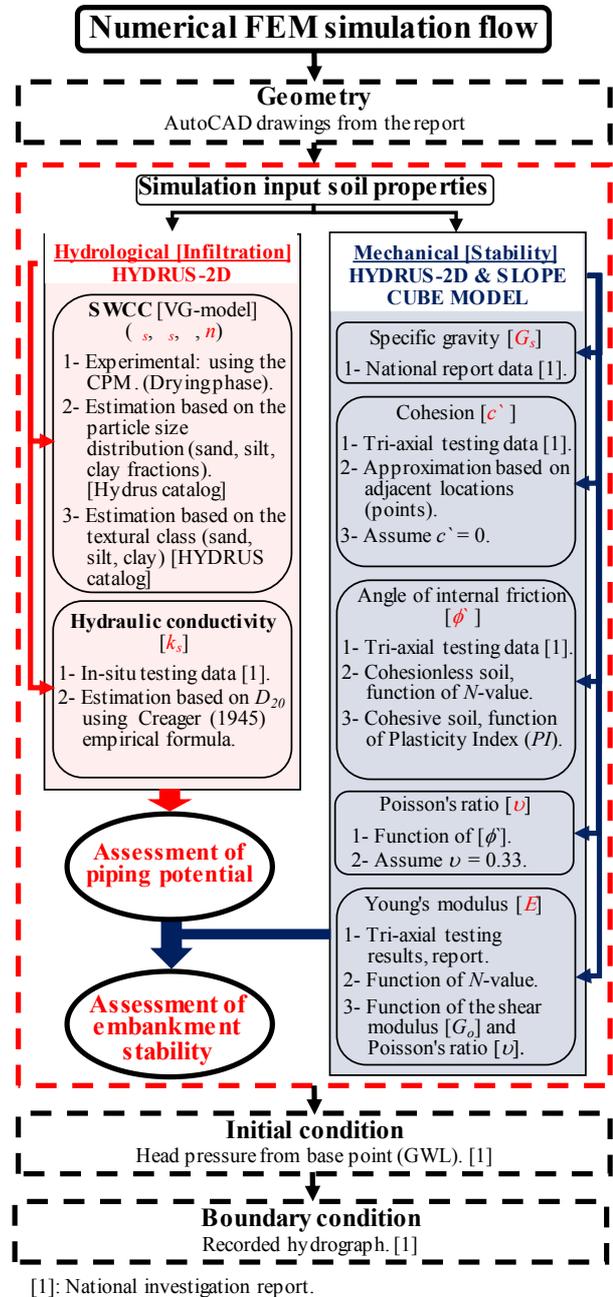


図 5.12 解析用パラメータの決定フロー

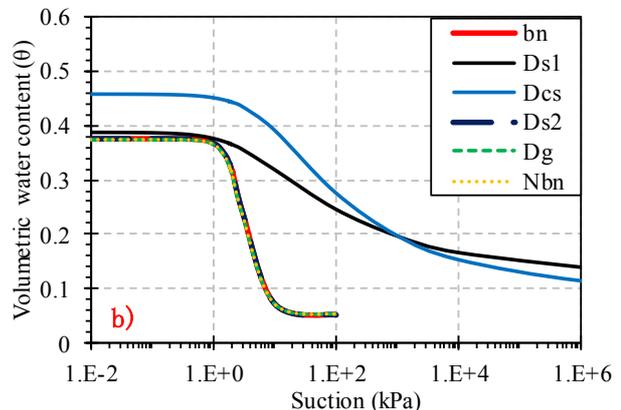
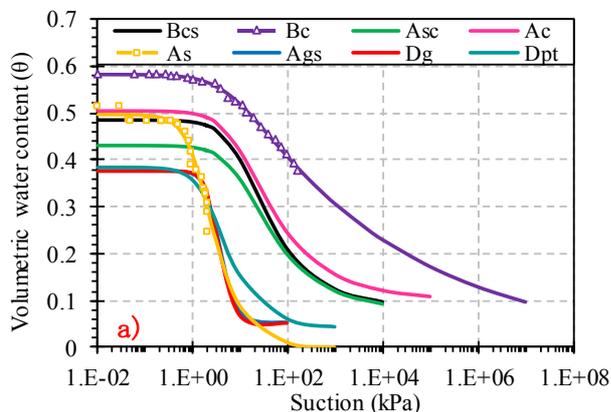


図 5.13 a): 解析パラメータを使って描いた筑後川の各層の SWCC, b): 同様の球磨川の各層の SWCC

表 5.4 各断面における被覆層と透水層の厚さ、飽和透水係数の比較

	Cross section	39k600+5.00			39k720			39k800		
		Thickness	k_s	k_{eq}	Thickness	k_s	k_{eq}	Thickness	k_s	k_{eq}
		(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m/s)
Impermeable	Asc	1.71	7.70×10^{-10}	1.53×10^{-9}	1.132	7.70×10^{-10}	2.17×10^{-9}	0.575	7.70×10^{-10}	2.23×10^{-9}
	Ac	1.7	1.43×10^{-6}		2.065	1.43×10^{-6}		1.093	1.43×10^{-6}	
permeable	As	3.939	9.54×10^{-5}	1.06×10^{-4}	2.783	9.54×10^{-5}	1.15×10^{-4}	1.281	9.54×10^{-5}	3.63×10^{-4}
	Ags	0.445	3.51×10^{-3}		0.6	3.51×10^{-3}		4.002	3.51×10^{-3}	

ように透水係数の値から被覆層として Asc 層と Ac 層を、透水層として As 層と Ags 層を選定して G/W を求めている。表中に示すように、被覆層の等価飽和透水係数はいずれの断面も 10^{-9} (m/s)オーダーを示し、透水層の等価飽和透水係数はいずれの断面も 10^{-4} (m/s)オーダーとなっている。図 5.14 は、解析結果であり、39k600, 39k720, 39k800 地点の対象土層断面における G/W の時間的変化を示している。この結果から言えることは、河川水位が急増した時点（7月6日 14

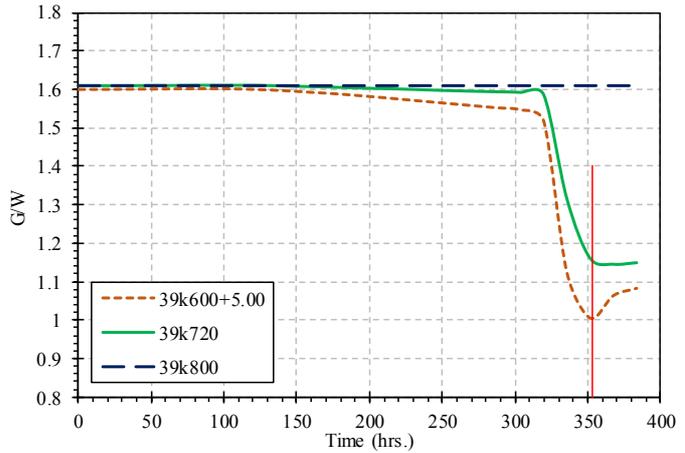


図 5.14 各断面の地点 X での G/W の時間的推移

時 50 分)以降、39k600, 39k720 地点では G/W の低下が急激に起こり始めていることが読み取れる。ただし、パイピングの発生の目安として考えられる G/W が 1.0 を下回ることはなかった。それに対して 39k800 地点の場合、被覆層厚は相対的に他の地点に比べると薄いにも関わらず、その G/W は、大きく変化することなく、初期の状態とほぼ同じ一定値を示す結果となった。

図 5.15 は、G/W が最も小さくなった時の土中水の流れを示したものである。水が浸透する境界に着目すると 39k600 地点では被覆層である Bcs 層が透水層である As 層を覆い、39k720 地点では As 層と Ags 層の一部を覆うように堆積している。また、39k800 地点では Bcs 層が As 層と Ags 層を完全に覆って堆積しており、今後、さらに詳細な分析が必要であるが、解析的には、このような土層断面の構造の違いが土中水の流れに影響し、結果として揚圧水の発生の仕方に影響を与えた可能性が示唆される。

5.5.2 球磨川の場合の破堤要因に関する影響分析

図 5.16(a) は、八久保地区で推定された今回の豪雨によるハイドログラフを示している(球磨川河川堤

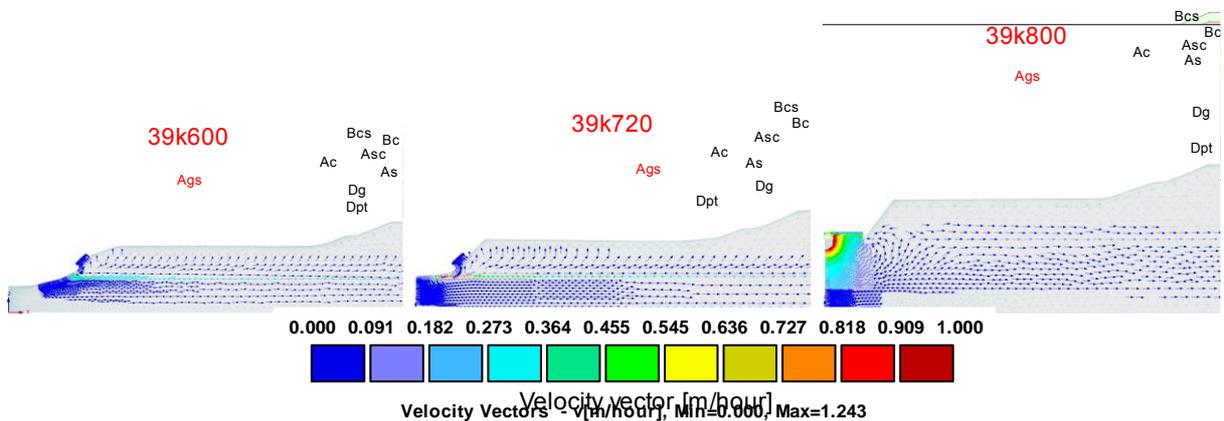


図 5.15 G/W が最小値を示す時の各断面における土中水の流れの解析結果

防調査委員会, 2021). 解析ではこの河川水位の変化を圧力ヘッドに置き換え, それを対象とする解析断面の表層面に時刻暦として与え, 解析断面ごとに不飽和・飽和浸透流・安定解析 (Hydrus2D+Slope Cube Model) を実施した. この図には, 着目した時点①~⑤を記している. 具体的には,

- ① : 解析初めから 42 時間後で, 内水位が堤内地盤高に達した時点,
- ② : 46 時間後で内水位と外水位が堤防天端高をおおよそこえた時点
- ③ : 47 時間後で内・外水位が堤防天端の高さを上回り, また内水位が外水位よりも高くなった時点,
- ④ : 49 時間後で, 内水位が天端より 2m 以上高くなり, 今回の内・外水位の最高水位を示した時点
- ⑤ : 解析ができなくなった時点 (完全に崩壊した状態と推察される)

この解析では, モール・クーロン破壊包絡線に対して今の応力状態で描くモールの応力円がどれくらい近い位置にあるかを算定し, 任意の地点(要素)の局所安全率が計算され, この値が 1 になると破壊包絡線とモールの応力円が接することを意味する. ここでは, この局所安全率の推移を堤体天端中央および両端からそれぞれ 1.5m 下端の点に着目して, そこでの局所安全率の推移を分析した.

解析対象は, 前述したように実際に決壊した球磨川右岸 56.4K の八久保地区の河川堤防である.

図 5.3, 図 5.4 に示すように決壊した堤体は, 下流域と上流域では, 堤体土が異なっていることから, 堤体土として「旧堤体土」と「置き換え土」と呼称した土層断面それぞれで堤体の局所安全率の時間的変化の比較を行った. 解析に用いた土質パラメータは, 表 5.3 にまとめている. 入力している土質パラメータの精度を踏まえると, 得られた結果(数値) そのものよりも相対的なリスク評価に解析結果は意味を持つと考えて, 今回の結果を分析した.

また, もうひとつの視点として, アスファルト舗装で天端が完全に保護され天端から河川水が入り込まない状況(天端から水が入り込まない初期条件を設定)と天端から自由に河川水が入り込む条件で解析を行い, 堤体の着目した地点での局所安全率に天端の保護の有無が与える影響の推移を分析した.

図 5.16(b), (c) は, 堤体が, 旧堤体土で構成された場合の解析結果であり, (b) 図は天端が保護されていない場合, (c) 図は天端が保護されている場合の着目した 3 地点での局所安全率の時間的推移を表し

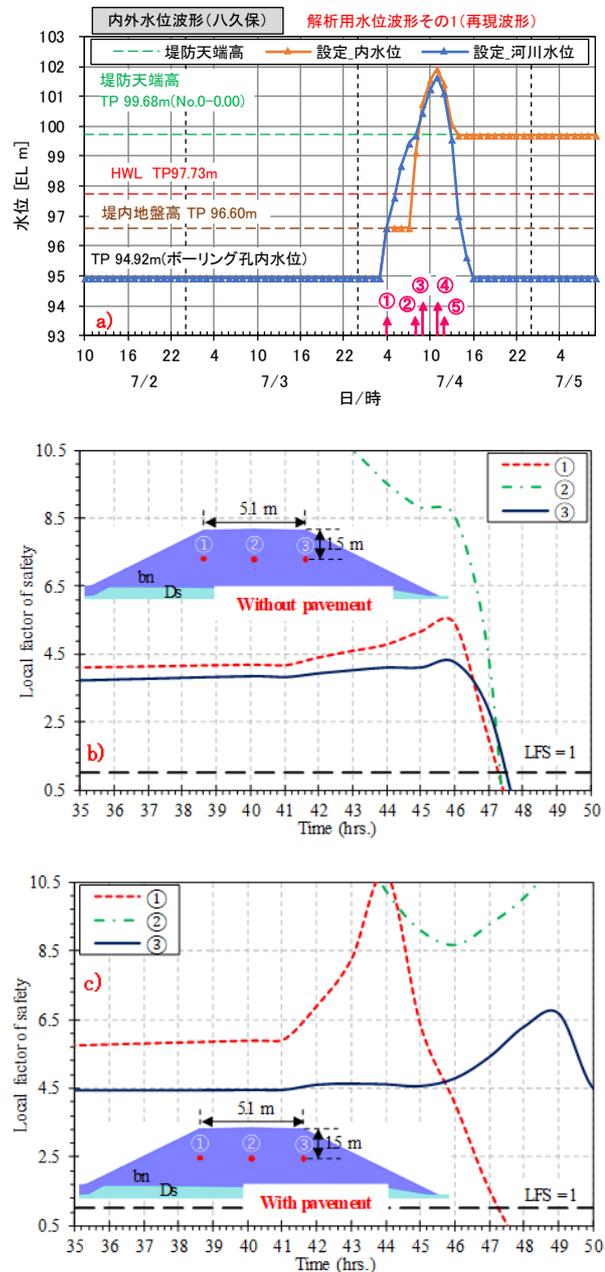


図 5.16 a) : 解析に用いたハイドログラフ, b) : 天端からの浸水を許容した旧堤体土からなる堤体の局所安全率の推移, c) : 天端からの浸水を許さない場合の旧堤体土からなる堤体の局所安全率の推移

ている。図 5.16(d), (e)は、堤体土として置き換え土を用いた場合の同様の解析結果である。さらに、図 5.16(f), (g)は、着目した①～⑤の時点での旧堤体土と置き換え土を堤体土とした場合の土中の水の流れの大きさや方向を示したものである。これらの解析結果から考察できることを簡潔に示す。

- 1) 天端から河川水が自由に浸透できる条件を設定した場合(図 5.16(b), (d)), 旧堤体土, 置き換え土ともに, 着目した3地点での45時間後から48時間後の中で局所安全率は1.0を下回った。ただし, 局所安全率が1.0を切る時間帯は, 相対的には置き換え土の場合が早い結果となった。また, 最初に局所安全率が1.0を切る地点は, 旧堤体土, 置き換え土にかかわらず堤外側に近い①の地点であった。
- 2) 天端から河川水が自由に浸透できる条件と浸透できない条件(舗装がなされている状況を想定)を設定した解析結果が「旧堤体土」の場合, 図 5.16(b), (c), 「置き換え土」の場合, 図 5.16(d), (e)にまとめられている。

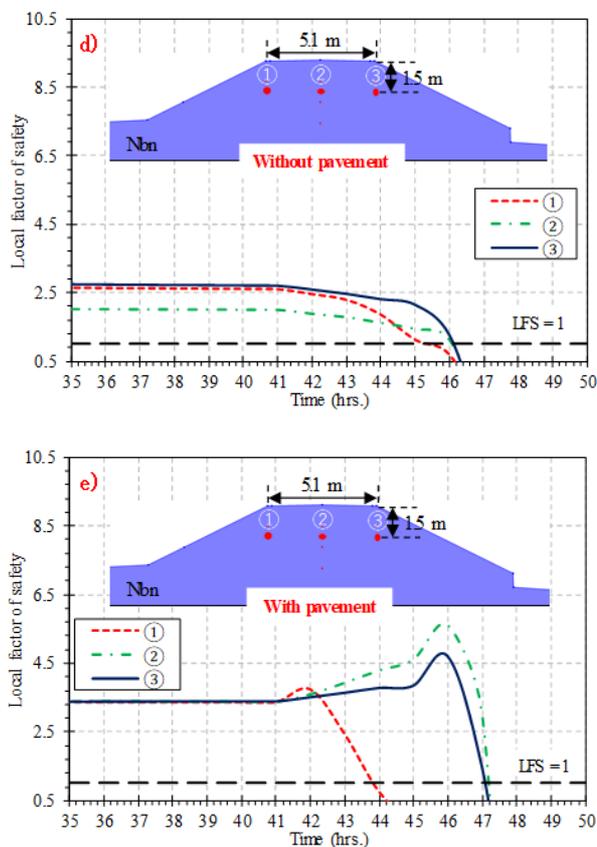


図 5.16 d):天端からの浸水を許容した置き換え土からなる堤体の局所安全率の推移, e): 天端からの浸水を許さない場合の置き換え土からなる堤体の局所安全率の推移

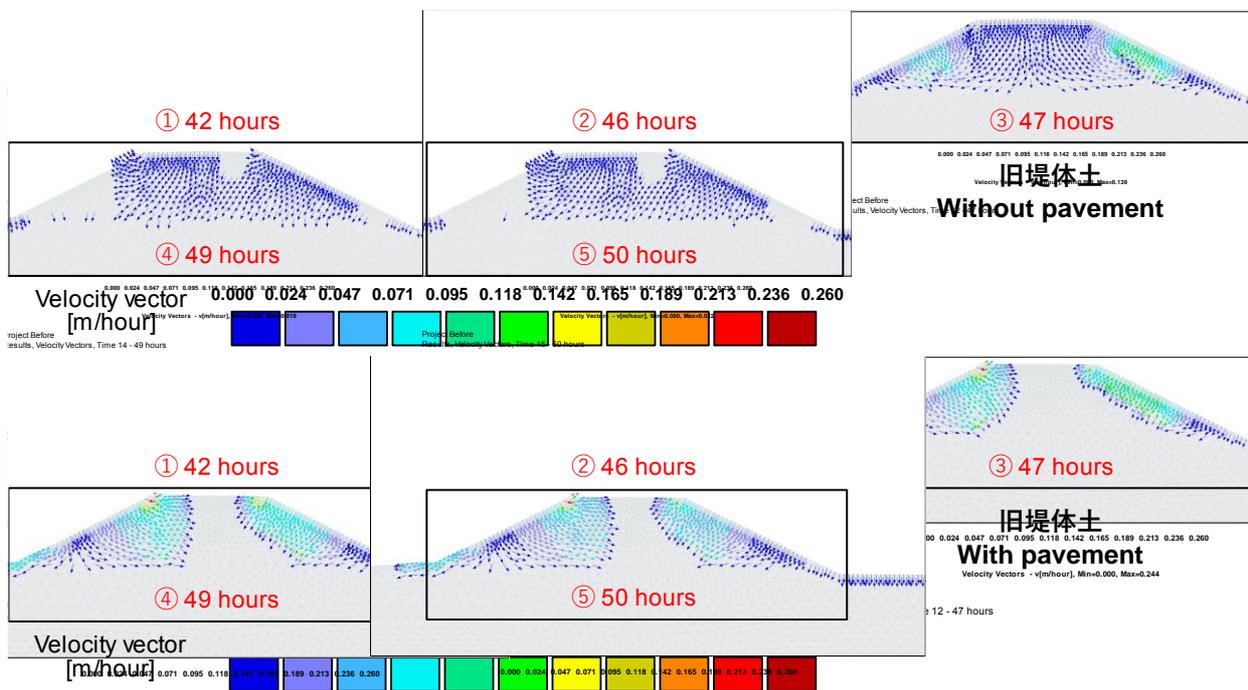


図 5.16 f): 旧堤体土を堤体土としたときの堤体内の土中水の流れの方向と速さのベクトル図

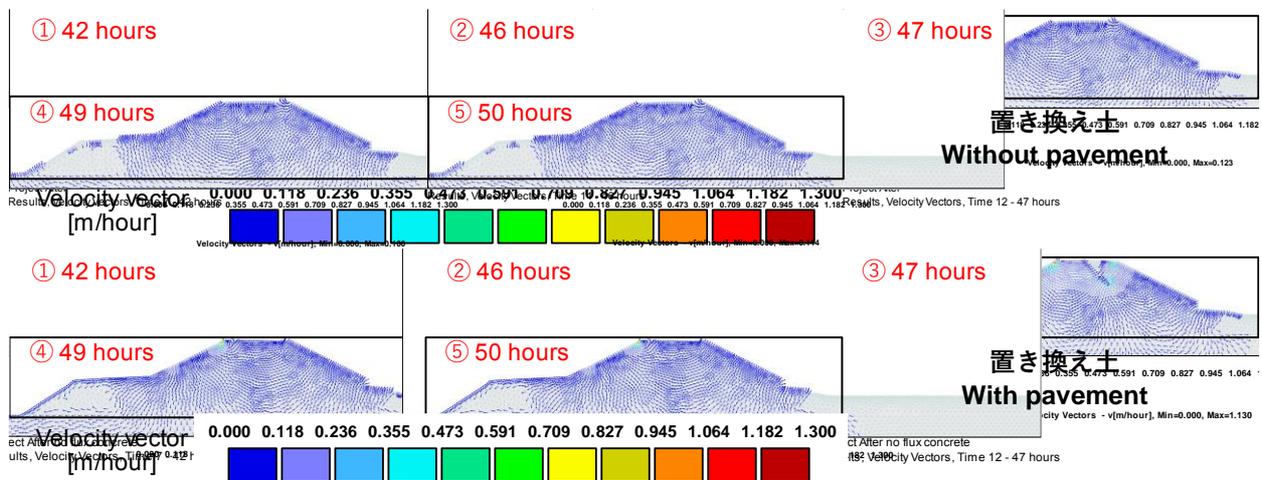


図 5.16 g) : 置き換え土を堤体土としたときの堤体内の土中水の流れの方向と速さをベクトル図

これらの結果から、天端からの浸透がないと両堤体土ともに着目した地点の局所安全率が 1.0 を下回る時間が総じて遅くなっている。このことから越水が起こるような場合、舗装で天端を保護することが堤体の粘り強さを確保するうえで意味を持つと言えよう。

- 3) 図 5.16 (f), (g) は、それぞれ旧堤体土と置き換え土を堤体土としたときの堤体内の土中水の流れの方向と速さをベクトル図でまとめたものである。これらの図から図 5.16(a) に示すハイドログラフに示した①～⑤の時点の土中水の動きが読み取れる。こうした結果は、どういった点が弱部となるのかを分析し、それを補うためにどういった補強が効果的なのかを考えるうえでのヒントを与えているものと考えられる。

5.6 まとめと今後の課題

本研究では、連続加圧型の保水試験装置の実用性を活かして、筑後川で被害を受けた堤防の堤体土(Bc 層)と堤防直下の基礎地盤を構成する土質材料(As 層)の水分特性を実験的に調べた。そのうえで、得られた実験結果をベースにして、被災した堤体断面を対象に記録として残っている河川水位特性の時間的变化を反映した不飽和・飽和浸透流解析を実施し、筑後川河川堤防のパイピングリスクに与える地層断面の影響について考察した。また、球磨川河川堤防については、堤体土の特性の違い、天端の保護の有無が堤体の安定性に与える影響について不飽和・飽和浸透流・安定解析を通して分析した。得られた知見と今後の課題をまとめると以下のようである。

1) 連続加圧型の保水性試験によって筑後川 39k720 で採取された Bc 層, As 層の排水過程での水分特性曲線を明らかにした。その結果は、粒度分布から推定される水分特性曲線とは大きな違いがみられる結果となった。このことから、不飽和浸透の数値解析を行う上で、堤体の土層断面の多くの層は、粒度分布から水分特性に関するパラメータを算定せざるを得ない状況にあること指摘した上で、今後、数値解析の精度を高めるためには、各土層の標準的な水分特性曲線を事前に求めておくことが重要であるとした。その上で、一つの提案として、浸透流解析の技術水準を高めることや防災・減災に活かす観点からも、少なくとも国管理の一級河川では、基準土層断面を設定し、浸透解析に必要な各層の水分特性などを主導的に整備していただきたいことを強調した。

2) 球磨川で堤防が決壊した八久保地区(右岸 56.4k)で推定された今回の豪雨によるハイドログラフをもとに、不飽和・飽和浸透流・安定解析を実施した。天端から河川水が自由に浸透できる条件と浸透で

きない条件(舗装がなされている状況を想定)を設定した解析結果から天端からの浸透がないと二種類の対象とした堤体土ともに着目した地点の局所安全率が 1.0 を下回る時間が総じて遅くなる結果となった。このことから越水が起こるような場合、例えば、舗装で天端を保護することが堤体の粘り強さを確保するうえで意味を持つことを指摘した。

3) 球磨川での解析結果を踏まえ、堤体内の土中水の流れの方向と速さをベクトル図として示した。この解析結果は、図 5.16(a)に示すハイドログラフに示した①～⑤の時点の土中水の動きをまとめており、こうした結果を活かして、越流するような場合に堤体の弱部となる箇所を分析し、それを補うためにどういった補強が効果的なのかを考えていく必要があることを述べた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局にはデータ提供等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。また、石藏良平氏(九州大学大学院准教授)には、結果を整理するにあたり、文献などを通してアドバイスなどいただいた。加えて、九州大学大学院工学府地盤工学研究室の Jumana HUSSARY 氏、小井手宏行氏、長崎智洋氏、前田成美氏、相良知輝氏にはデータ整理、数値解析等に協力いただいた。ここにあらためて感謝申し上げる。

参考文献

- 石藏良平, 田井 明, 橋本彰博, 安福規之, 2019. 将来気候データを用いた河川堤防基礎地盤のパイピング破壊リスクに関する解析的検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, I_1393-I_1398, 2019.
- 筑後川河川堤防調査委員会, 筑後川河川堤防調査委員会報告書(ドラフト版), 九州地方整備局, 2021
- 球磨川河川堤防調査委員会, 筑後川河川堤防調査委員会報告書(ドラフト版), 九州地方整備局, 2021
- 安福規之, Alowaisy Adel, 石藏良平, 畠山正則, 京野修. 連続加圧型の保水性試験とそれを活かした排吸水過程での不飽和火山灰質土の強度定数の評価. *地盤工学会誌*, 69(1), pp.17-22, 2021.
- 安福規之, Alowaisy Adel, 石藏良平, 畠山正則, 京野修. 連続加圧式の保水試験装置による不飽和浸透特性値の算定. *地盤工学会誌*, 68(7), pp.6-10, 2020.
- Alowaisy A., Yasufuku, N., Ishikura, R., Hatakeyama, M. and Kyono, S. Continuous pressurization method for a rapid determination of the soil water characteristics curve for remolded and undisturbed cohesionless soils. *Soil and Foundation*, 60(3), 634-647, DOI: 10.1016/j.sandf.2020.03.014, 2020.
- 安福規之, ALOWAISY Adel, 石藏良平, 畠山正則, 京野修, 2019. 被災斜面で原位置サンプリングした乱れの少ない試料の水分特性曲線 (特集 不飽和土の地盤特性). *地盤工学会誌*, 67(9), pp.24-27, 2019.
- 畠山正則, 京野修, 安福規之, 石藏良平, 連続加圧方式による保水性試験, *地盤工学会誌*, 67(1), pp.28-31, 2019.

第6章 まとめ

熊本大学 椋木俊文

第3編では、第2章において、まず現地の降雨状況について、令和2年7月3日から9日にかけての時間雨量と累積雨量に加えスネーク曲線も紹介し、災害外力としての降雨量について説明した。また、それによって生じた熊本県南域で見られた深層崩壊、地すべり、また鹿児島県のシラス台地の侵食現場についてダイジェスト的に報告された。地すべり現場については、せん断強度低減法を用いて現地で計測されたすべり線と解析によって示されたひずみの局所化との関係に基づき、今後の斜面崩壊危険度マップの高度化への可能性について言及した。第3章では熊本県南地域を対象に地質学的見地から特に豪雨と深層崩壊の関係に焦点を当て、第2章では触れられていない芦北町の新崩壊事例、津奈木町福浜で生じた崩壊事例について説明した。そして、深層崩壊と断層の関係について言及し、風化によって岩盤全体の強度が低下した結果、強度の境界である断層面等で岩盤崩壊が発生したのではないかという結論を導いた。第4章では、球磨川流域の流木災害を対象に、流木の発生状況が取りまとめられた。流木発生量については、小川と川辺川を対象にロジスティックモデルを用いて定量化され、平成30年西日本豪雨に最適化されたモデルにより算出した崩壊地面積率の分布と比較を行った。その結果、令和2年豪雨では川辺川ダム建設予定地の上流域からの流木発生の可能性は低いという結果を示され、ダムへ流木が流入するリスクは比較的小さいことが示唆された。第5章では、河川堤防問題に着目し、破堤が確認された熊本県人吉市錦町の球磨川の堤防とパイピングが確認された福岡県久留米市を流れる筑後川の堤防について報告された。現地から採取した試料を用いて、まず球磨川の堤防については天端からの浸水を許容した旧堤体土からなる堤体の局所安全率を求め、破堤時の状況を考察した。また、連続加圧型の保水実験を実施し、筑後川で被害を受けた堤防の堤体土と堤防直下の基礎地盤を構成する土質材料の水分特性を実験的に調べた。また、得られた水分特性パラメータを用いて不飽和浸透流解析を実施、パイピング発生時の浸透流動を示した。

地盤災害にのみいえることではないが、やはり求められるのは災害発生に対する予測技術の向上である。今回第3編で対象にした地盤災害、流木災害の発生要因が、地形、地質、地盤条件、降雨条件、そしてこれまで蓄積した災害履歴であることを考えると本報告内容を如何に災害発生予測に関する研究に対し貢献できるか（すべきか）を議論し、異分野が融合して災害発生予測の高度化を目指すべきと考える。

第4編

河川災害グループ

グループリーダー	京都大学 竹林 洋史
研究分担者	山口大学 朝位 孝二 九州工業大学 重枝 未玲 東京理科大学 二瓶 泰雄 前橋工科大学 平川 隆一 熊本大学 大本 照憲 辻本 剛三 高知工業高等専門学校 岡田 将治 京都大学 川池 健司
連携研究者	山口大学 白水 元 神戸市立工業高等専門学校 柿木 哲哉

第1章 概要

京都大学 竹林洋史

今次の豪雨災害では、熊本をはじめ、福岡、大分、佐賀など九州の広い範囲で洪水・土砂・流木の氾濫が発生した。特に熊本では、流下能力を大幅に超えた量の水が人吉・球磨盆地を貫流したことにより河道と堤内地の境界が判別出来ないような状態で洪水流が流れ、球磨川に沿った人吉市街地や球磨村では大量の土砂を含んだ氾濫事象が発生した。また、山地域では土石流による土砂の氾濫が多発するとともに、谷底平野を勢いよく洪水流が流れ下り、河道周辺の道路の損壊や橋梁・家屋の流出が発生した。有明海に面する平野部ではポンプによる排水能力以上の豪雨となり、内水氾濫が発生した。さらに、八代海への土砂流入による海底地形の変化や沿岸域の構造物への流木等の堆積によって、構造物の消波機能等の低下も危惧されている。このような計画規模を大幅に上回る豪雨及び洪水流による氾濫・破壊・流出現象は発生頻度が低いいため十分な知見が蓄積されていない。

そこで、河川災害グループでは、各地の氾濫流の水深・流速の実態を現地調査及び衛星画像で把握するとともに、流下能力を大幅に上回る流量における河道、盆地および谷底平野での洪水流下特性を現地調査と数値シミュレーションで明らかにする。また、流域からの土砂・流木などの流出特性も現地調査と数値シミュレーションで明らかにする。最後に、これらの結果に基づいて計画規模を大幅に上回る豪雨及び洪水時における河川災害軽減策について検討する。

第2章 衛星画像を用いた被災領域の状況

山口大学 朝位孝二
白水 元

2.1 災害の概況と発災後の衛星探査

2.1.1 はじめに

令和2年7月豪雨は、九州・東海・東北など多くの地方で記録的な降水を引き起こし、全国で約65万世帯、約140万人に避難指示が発令された。7月3日夜には梅雨前線が九州北部地方に北上し、低気圧や前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだことで、大気が不安定な状態となり、7月3日から4日の2日間の降雨は7月の平均月間雨量と同等規模となる大雨であった。熊本県の球磨川中流域では、この大雨により洪水が発生し、球磨川の堤防2箇所が決壊し、数箇所で越水、人吉市の中心市街は記録的な浸水深を経験し、多数の家屋が浸水した。また、支川の小川と球磨川の合流部に位置する球磨村渡の特別養護老人ホームでは14名の犠牲者が出る等、人的にも甚大な被害が生じた。

かねてより発災後短時間で被災地の画像を取得し被災状況や二次災害の危険状況の把握を目的として、Lバンド合成開口レーダ「PALSAR-2」を搭載した陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALSO-2)が運用されている。合成開口レーダー(SAR)は人工衛星から電磁波を発射し、地表面からの後方散乱波を受信し地表面の状態を把握するもので、豪雨による河川氾濫や浸水などの気象災害に対して有力な観測手段となっている。今回の令和2年7月豪雨についても、発災直後からこのだいち2号による観測が実施され、筆者らは浸水域情報をいち早く提供した(防災科研, 2020)。本研究では、今後の発災直後の浸水深度情報提供の迅速化や精度向上に向け、球磨川流域における観測成果であるPALSAR-2合成開口レーダ画像と数値標高モデル(DEM)と組み合わせて浸水深分布を推定する手法(白水ら, 2019)の本災害への適応についての検討した結果を示す。加えて、今日多数利用可能となった民間の高解像度光学衛星による観測成果を利用し、洪水による家屋被害を検出した。流況の検討に資するデータとするため、発災前後の家屋の移動方向等の被災の方向を整理した結果を示す。

2.1.2 だいち2号による球磨川流域観測

球磨川流域を対象とした発災直後のPALSAR-2高分解能モード1(単偏波, 観測幅50km, 分解能3

表2.1 発災直後のだいち2号による球磨川のSAR観測

シーンID	観測日時 JST	衛星進行方向	観測方向	オフナディア角 (deg)	偏波
ALOS2330172910- 200704	2020/7/4 13:13	Descending	LEFT	50.9	HH
ALOS2330240640- 200704	2020/7/50:04	Ascending	RIGHT	18	HH
ALOS2330462970- 200706	2020/7/6 12:18	Descending	RIGHT	32.4	HH

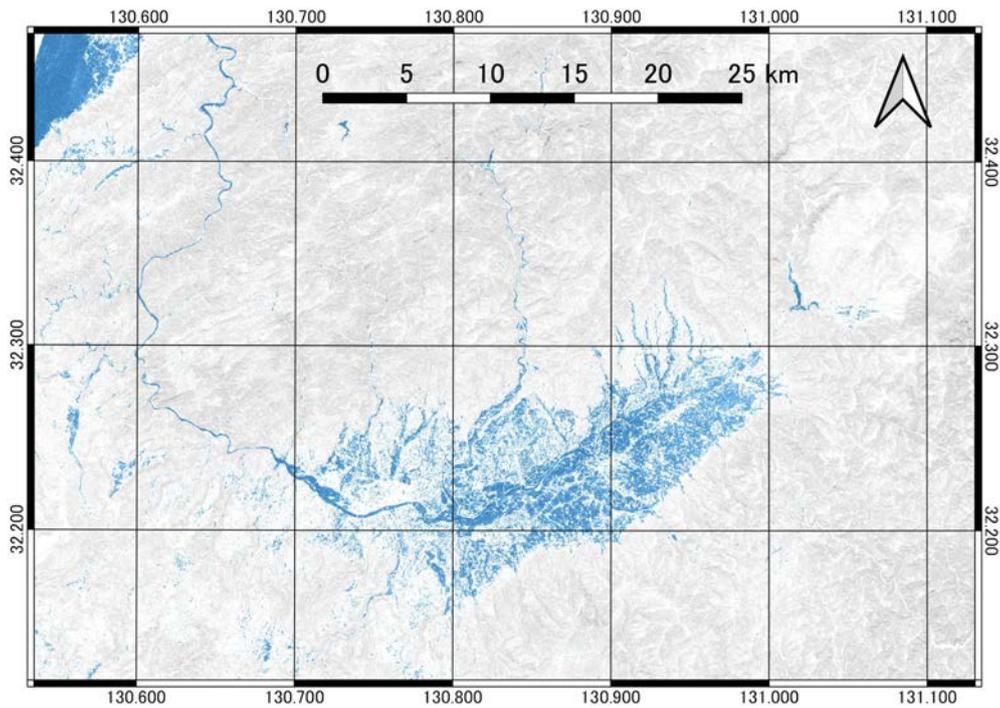


図 2.1 球磨川流域の SAR 観測結果から検出した水域（着色箇所）



図 2.2 球磨川流域内の浸水深推定対象範囲（国土交通省八代河川国道事務所資料を加工）

m) による観測は、日本時間 7 月 4 日昼、7 月 5 日未明、7 月 6 日昼に行われている。表 2.1 に観測条件の概要を示す。衛星進行方向は衛星の南北の移動方向を示し、Descending は南下しながらの観測であることを示す。北上中の観測の場合は Ascending と表現される。観測方向は進行方向を正面として左側(LEFT)にセンサを振った観測か右側(RIGHT)に振った観測かを示す。オフナディア角は衛星の直下と衛星から観測対象中心を覗いた線とがなす角である。図 2.1 に示す広域の浸水範囲の可視化には 7 月 4 日と 7 月 6 日のもの、後述する球磨・人吉地区の浸水深推定には 7 月 6 日のものを使用した。SAR 観測結果から海や河川・湖沼といった恒常水域のピクセル値の平均値と標準偏差の和以下の箇所を青色に着色した。これによりおおよその浸水域を確認することができる（大木ら、2016）。球磨村渡や人吉西部での浸水が捉えられているが、上流の広大な水稻耕作地も水域として抽出されていることに注意さ

2.2 浸水深推定と検証

本節では、前述の発災後の観測によって得られた SAR 画像を解析し、球磨川流域球磨村渡から人吉中心市街地まで区間で浸水域検出および浸水深分布を推定する。また浸水痕跡高の実測結果との比較を行い、適合性を評価する。

2.2.2 浸水深解析手法

解析時には、前処理としてスペックルノイズ低減のために Lee filter 処理を付加した。また、「球磨川流域ハザードマップ」に示されている洪水浸水想定区域(想定最大規模)を浸水深解析対象区域とした。

合成開口レーダの画像から池など恒常的に水域である箇所を多数サンプルとし、水域の後方散乱係数の平均値と標準偏差を求めた。後方散乱係数が求めた平均値と標準偏差の和以下となる箇所を二値化して水域として抽出した。この水域の分布を示すラスター画像に Majority filter を適用し明瞭化した後ポリゴン化した。そのうち 1 m²以上の面積のポリゴンについてポリゴンの頂点の DEM データを参照して水際の地盤高(仮想水面高)を推定した。図 2.3 にハザードマップの洪水浸水想定区域内に 1 m²以上の水域を示す。

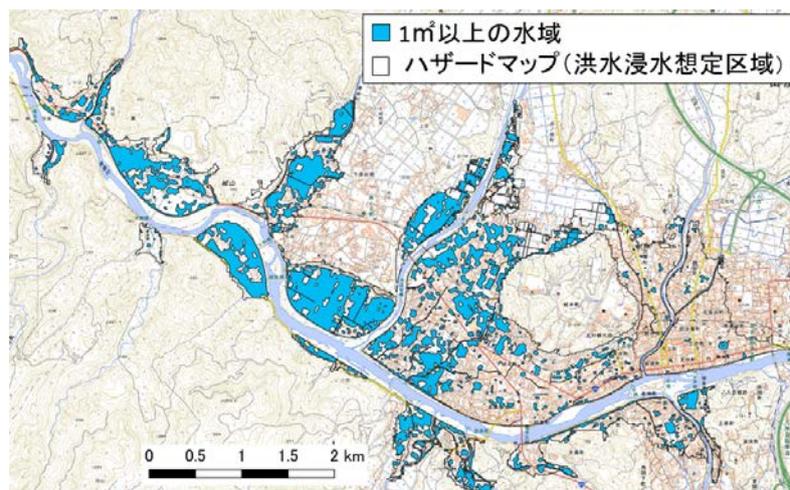


図 2.3 SAR 画像により抽出した水域

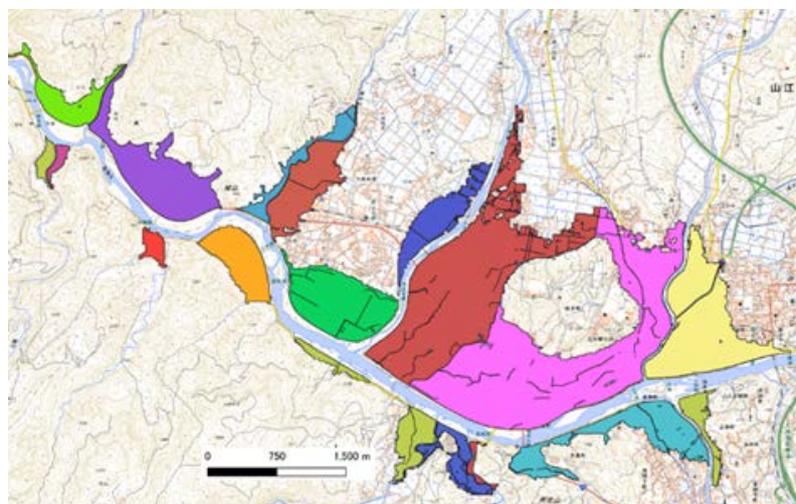


図 2.4 浸水想定に基づくエリア分け

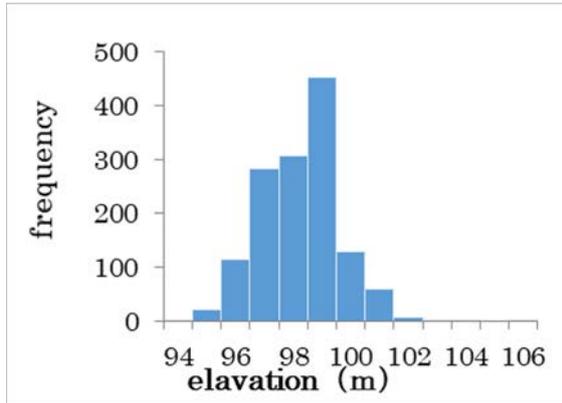


図 2.5 通常型

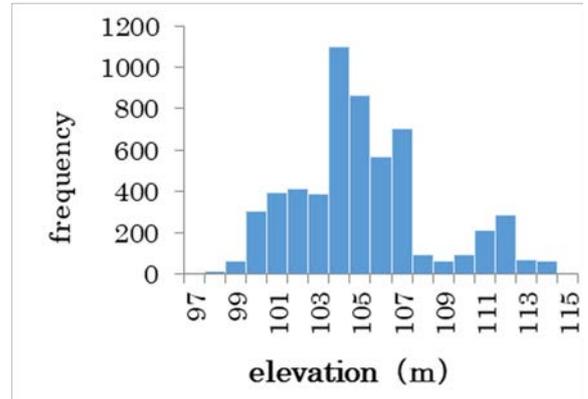


図 2.7 歯抜け型

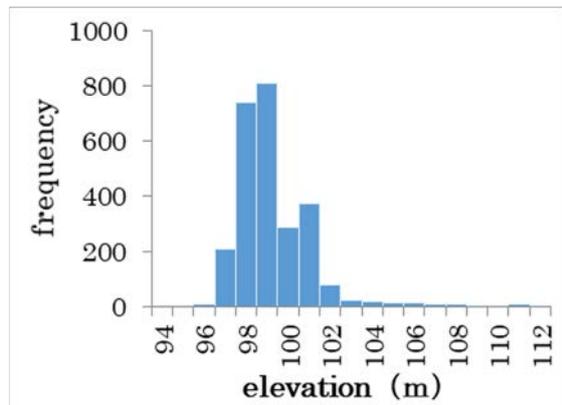


図 2.6 歪み型

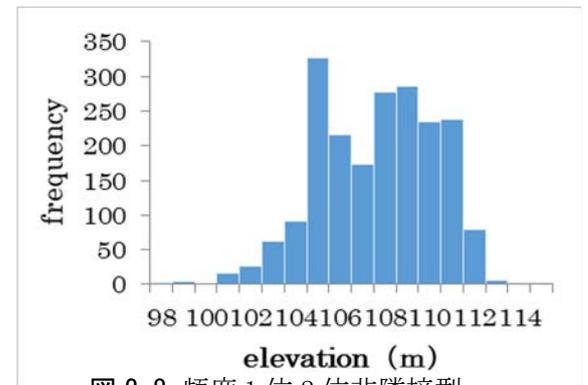


図 2.8 頻度1位2位非隣接型

ハザードマップを河川で区切りエリアごとに、その内部の水域を抽出し、水域ポリゴン境界の標高を参照して仮想水面高を決定した。ハザードマップに示されている浸水領域を支川で区切りエリア分けを行った。それを図 2.4 に示す。エリアごとに水域ポリゴン境界の標高の頻度をヒストグラムで表した。その分布形状から仮想水面高の代表値の取り方を判別した。ヒストグラムの分布形状は通常型、歯抜け型、歪み型、頻度1位2位非隣接形の4種類に分類した。4種類のヒストグラム形状の一例を図 2.5 から図 2.8 に示す。通常型は水域ポリゴン境界の上位5%の数値の平均値をとり、歯抜け型は水域ポリゴン境界の第三四分位数をとり、歪んだ型は水域ポリゴン境界の上位25%の数値の平均値をとり、頻度1位と2位が隣り合っていない形は中央値を仮想水面高の代表値とした。この仮想水面高と標高の差を推定浸水深として求めた。

2.1.2 解析結果と検証

仮想水面高と範囲内の標高地の差を浸水深分布として図 2.9 に示す。図中の○は浸水痕跡の調査位置を示す。推定浸水面積は771haであった。一方で、国土地理院は7月4日10時までには収集したSNS画像・航空写真と標高データを用いて、浸水範囲における水深を推定し、図 2.10 で示す段彩図を発表している。国土地理院の推定浸水深面積は499haである。データの取得時刻の違いがあるものの、本研究で実施した推定手法で求めた浸水域は概ね国土地理院の推定浸水範囲をカバーしており、より広範な範囲を浸水域と判定する結果であった。提案手法では支川沿いの水田が浸水域とされたことが推定浸水深面積の差に多大な影響を与えている。一方で、人吉駅前の目抜き通りの浸水などは過小評価された結果となった。

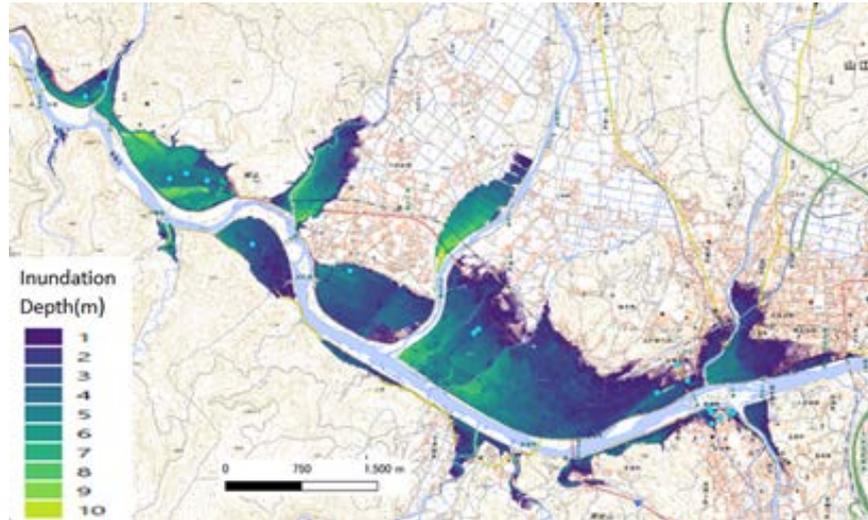


図 2.9 衛星 SAR 画像推定浸水深分布

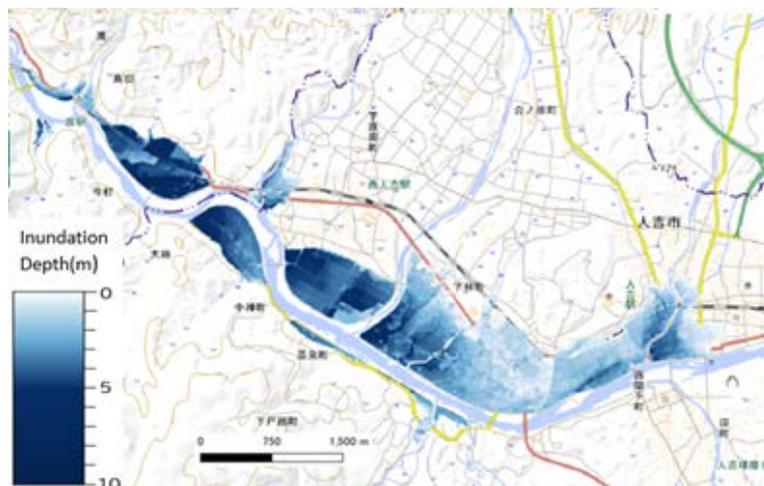


図 2.10 国土地理院による推定浸水深分布

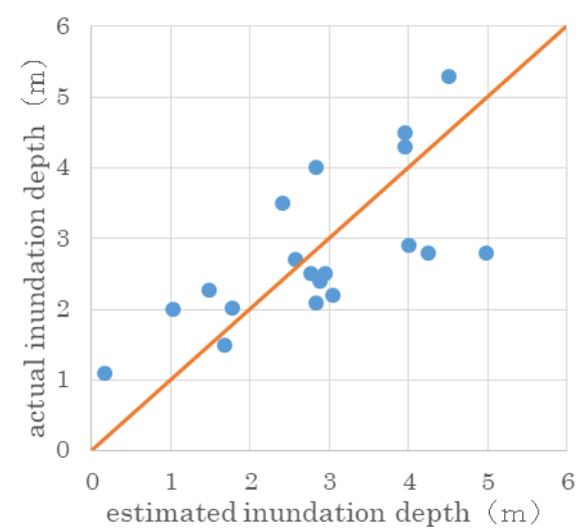


図 2.11 実測浸水深と推定浸水深の比較

第4編

本研究で提案する浸水深推定手法の妥当性の検証を目的として、実測値との比較を行う。図 2.10 の横軸は図 2.8 による推定浸水深で縦軸は実測浸水深である。この図面に傾き 1:1 の二等分線を描き、プロットされた描点がこの線上にあれば両者の数値は一致していることになり推定精度が良好であることを意味する。実測値に対する平均絶対誤差は 0.77m 程度で、RMSE（二乗平均平方誤差）は 0.91 となった。誤差が大きい箇所は、数値標高モデルと実測標高の差があることが一因となっている。

2.3 衛星光学画像を利用した家屋被害の検出

本節では、流況解析の検討に資するデータを得る目的で、衛星光学画像を利用し、広範に及ぶ家屋被

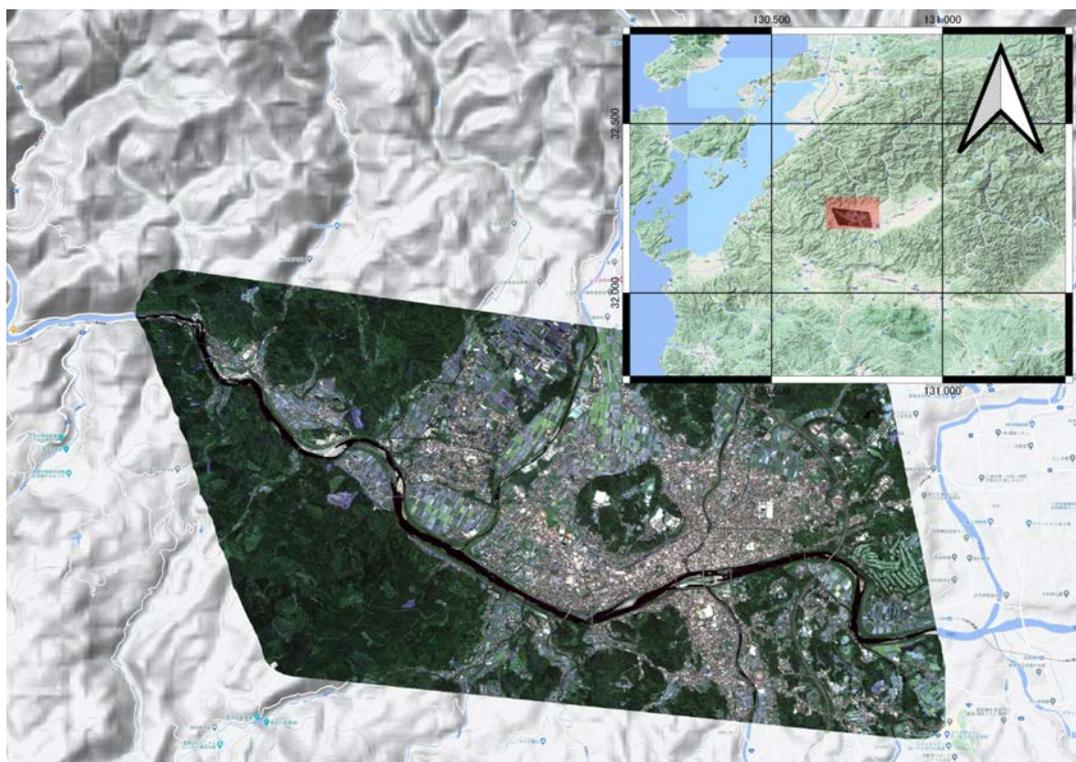


図 2.12 衛星光学画像の取得範囲と概況

表 2.2 利用した光学衛星観測の概要

衛星種別	カタログ ID	撮影日 JST	パンクロセン サ解像度 (m)	マルチセン サ解像度 (m)	オフナディア 角 (deg)	太陽高 度 (deg)
WorldView w-2	10300100424E940 0	2015/05/ 05	0.58	2.31	27	66. 1
WorldView w-2	103001004236A60 0	2015/05/ 05	0.57	2.27	27	66. 2
GeoEye-1	10500C0025D9B60 0-JJ	2020/7/3 1	0.47	1.89	19	67. 6



図 2.13 家屋被災移動方向の分類

害の検出を行った結果を示す。球磨村渡地区と人吉市市街地を含む $10\text{ km} \times 20\text{ km}$ の範囲を対象とし、発災前後の画像を判読し、家屋の移動や損壊、土砂等の付着状況から被災の方向を整理した。以降、本稿ではこれらの被災の方向を総称して被災方向とする。

2.3.1 光学衛星画像の諸元

利用した光学画像は解像度 $40\text{ cm} \sim 50\text{ cm}$ 級のもので、発災前として WorldView-2 による 2015 年 5 月 5 日、発災後として GeoEye-1 の 2020 年 7 月 31 日の観測成果を利用した。観測の概要を表 2.2 に示す。表中のパンクロセンサ解像度は高解像度のパンクロマチックセンサの解像度で、マルチセンサ解像度は多波長帯センサの合成画像の解像度である。本研究では、パンクロマチックセンサ画像とマルチセンサ画像を合成した RGB+近赤外の 4 バンドパンシャープン画像を利用した。発災後の観測はこれ以前にも複数あるが、雲量率十分低い成果が得られた中で最も発災日に近い日程ものを選択した。

2.3.2 家屋被災の方向分類

対象範囲の下流では多数建物の移動が見られた。また、移動していない家屋についても半壊するなど、力を受けた方向を示唆する状況も見られた。加えて、堆積物の乗り上げや漂流物が掛かった状況が見られた家屋についても流向と対応した方向がみられるものがあった。こうした家屋について被災前後の衛星画像を用いて比較し、被災の方向を 8 方位に分類した。

2.3.3 流況解析と被災方向の照合

a) 流況解析の概要

iRIC ソフトウェアの Nays2D Flood ソルバを用いた計算結果と対照し、計算流況との対応を比較することで、詳細な氾濫過程を再現する上で考慮すべき事項を整理する。Nays2D Flood は一般曲線座標で境

第4編

界適合座標を用いた非定常平面2次元流計算による氾濫流解析用ソルバである。上流端および左右側方の任意の複数の箇所からの非定常流量の流入条件を容易に設定できる。地形データ、粗度データ、および各河川または各流入箇所（支流等）からの流入流量データを入力して計算を行った。流量は国土交通省八代河川国道事務所資料および降雨流出氾濫モデル RRI での計算結果を参考に時系列として与えた。氾濫解析の計算期間は2020年7月3日18時から7月4日の12時の計18時間とする。家屋被害が多くみられた人吉市大柿を含む計算対象範囲として、上流端を緋月大橋（河口から60.0km）とし、下流端は河口から54.8km地点の4.5×1.0kmを設定した。同様に、家屋被害の多い球磨村渡についても、上流端を河口から55.4km地点、下流端を河口から52.4km地点の4.5×1.0kmの計算対象範囲を設けた。格子間隔は10mである。人吉市大柿を含む解析範囲を図2.14に、球磨村渡を含む解析範囲を図2.15に示す。計算条件として、地勢データ、粗度係数、建物占有率セル、障害物セル、流量を設定した。地勢データは国土地理院基盤地図情報 DEM5m メッシュを用いた。粗度係数と建物占有率のパラメータを表

表 2.3 土地状況による粗度係数と建物占有率パラメータ設定

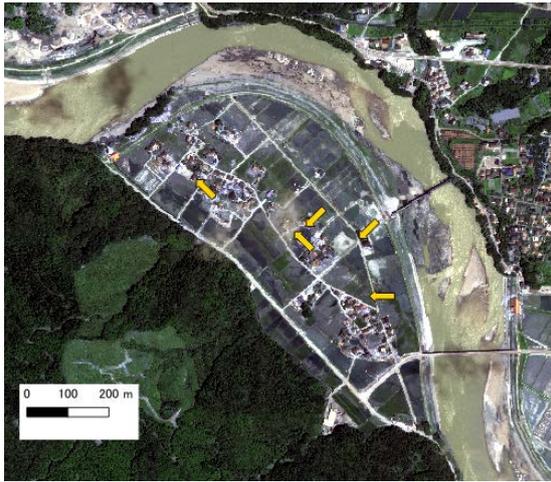
Roughness					Building occupancy
Road	Fields	River channel	Forest	Residential areas	
0.013	0.02	0.025	0.03	0.08	0.03



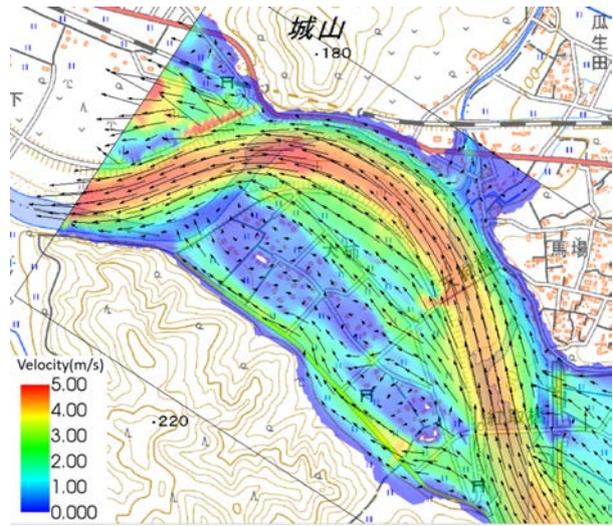
図 2.14 Nays2DFlood 解析範囲 1 (人吉市大柿含む)



図 2.15 Nays2DFlood 解析範囲 2 (球磨村渡)



a) 判読した被災方向 (渡上流側)

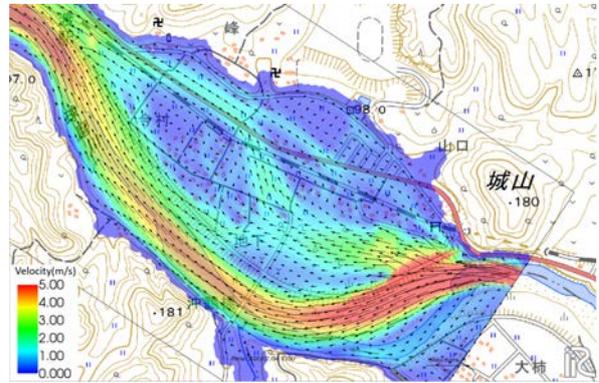


b) 最大浸水範囲時の流速分布と流向 (渡上流側)

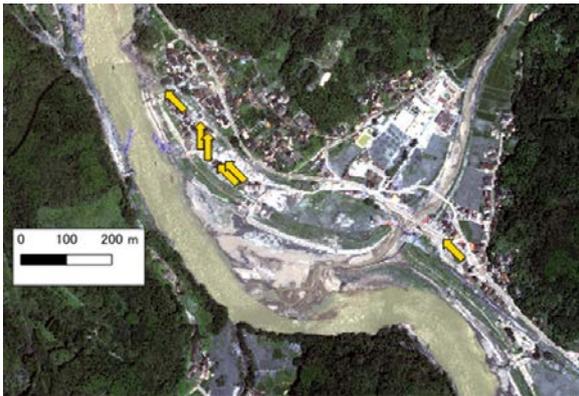
図 2.16 光学衛星画像から判読した被災方向と流況シミュレーションの対応(人吉市大柿)



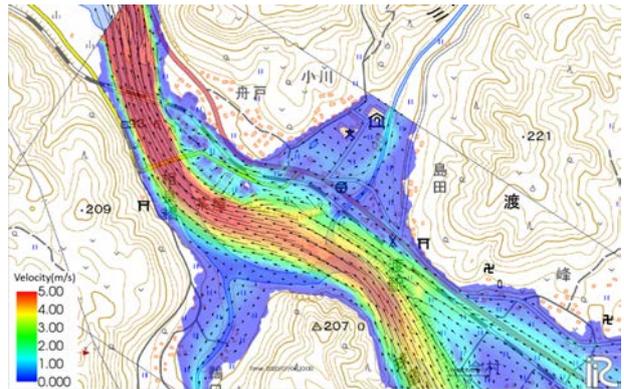
a) 判読した被災方向 (渡上流側)



b) 最大浸水範囲時の流速分布と流向 (渡上流側)



a) 判読した被災方向 (渡下流側)



b) 最大浸水範囲時の流速分布と流向 (渡下流側)

図 2.17 光学衛星画像から判読した被災方向と流況シミュレーションの対応(球磨村渡)

2.3 に示す. 計算タイムステップは 0.25 秒とした. また本川である球磨川には上流端を始めとする下流端までの 200m 地点ごとに, 河川横断測量データを用いた河道形状を付与して, 線形補間を行った. その他の計算条件として, 側方の境界条件は流入, 下流端水位は自由流出と設定している. 移流項の差分方法は建物への浸水を有効にするため, 風上差分法を用いた. さらに初期水面形は水深ゼロと設定した.

第4編

また本研究では、解析領域内での破堤や降水は考慮していない。

b) 被災方向と流況シミュレーションの対応

図 2.16 に人吉市大柿の光学衛星画像から得られた被災方向と流速分布及びベクトルの対応を示す。紅取橋（上流側の橋梁）周辺の越流，および山側の流下方向の流速ベクトルについては判読された被災方向と良く対応している。しかし，天狗橋から下った河岸側にみられる南西向き of 被災方向に対応した流速ベクトルは見られない。これは解析では設定できてない天狗橋の基部構造が障害となって河岸側の家屋に氾濫流が流れてきたものだと考えられる。

図 2.17 に球磨村渡の光学衛星画像から得られた被災方向と流速分布及びベクトルの対応を示す。上流側と下流側の間中間付近，支流の小川までの区間では被災方向は球磨川の右岸に位置する鉄道・国道に沿って流れるベクトルと一致していることが分かる。今村・地下の辻周辺では，本川から鉄道・国道に向かって流れる北東向きへのベクトルは被災方向と対応している。より下流側で被災が集中していた船戸付近の被災方向を見ると，支川の小川の氾濫流より球磨川本川からの氾濫流による影響が強いことが見受けられる。ここでも沿道の家屋は道路に沿った移動が多かった。

鉄道や道路の通水能力を上げる意図で粗度設定を行い，こうした解析結果が得られた。適切な粗度設定で定性的には被災方向と概ね一致する結果が得られている。一方で，球磨川本川からのピンポイントな越流については，被災方向との不一致も見られ，こうした局所的な流況を把握するには，より詳細なパラメータ設定や，解析スキームの変更を含めた検討が必要だろう。

2.4 まとめ

本研究では，発災後の地球観測衛星の観測結果の利用について，今後の災害発生直後の状況把握に活用するべく，PALSAR-2 合成開口レーダ画像と数値標高モデル(DEM)とを組み合わせる水深分布を推定する手法を球磨川流域の氾濫への適用を通して迅速化・高精度化に資する検討を行った。既存の氾濫想定(ハザードマップ)を利用することで，レーダ波の陰となる箇所を誤って水域として検出してしまうことを防ぎつつ，仮想水面の設定にも有用なエリア分割を行うことができた。加えて，エリアごとの浸水域境界の標高分布の整理により好適な水面高の推定が行える可能性が示された。また，民間の高解像度光学衛星コンステレーションによる日々の観測成果を利用し，洪水による家屋被害を検出，流況の検討に資するデータとするため，発災前後の家屋の移動方向等の被災の方向を整理した結果を示した。

2.5 今後の課題

合成開口レーダは，その利点を生かし，今後も発災直後の観測に運用される。水工学・防災の分野としては，場合によっては最速で非常に広範囲の浸水状況を得られるこの技術を巧く活用するべきである。今後も継続した活用手法の検討を行う。また，すでに構築された高解像度光学衛星コンステレーションを被災の定量的な検討に応用するべく，機械工業分野で利用されているエッジ検出などのコンピュータビジョン技術による異常検知などを参考に合理的・省力的な自動検出スキームの構築を目指す。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，宇宙航空研究開発機構(JAXA)西日本衛星防災利用研究センターにはデータ提供等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 防災科研「令和2年7月豪雨に関する防災科研クライシスレスポンスサイト」,
<http://crs.bosai.go.jp/DynamicCRS/index.html?appid=eb80ae7c6baa4754914c1b8310be9c4c>
白水 元・金城 海輝・山本 晴彦・朝位 孝二：合成開口レーダーを用いた浸水域および浸水深および浸水深の推定法に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75 巻 2 号, p. I_1471-I_1476, 2019.
- 国土交通省「国土数値情報（洪水浸水想定区域データ）」
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A31-v2_1.html (2020年12月4日取得)
- 大木 真人・渡邊 学・夏秋 嶺・本岡 毅・永井 裕人・田殿 武雄・鈴木 新一・石井 景子・伊藤 拓弥・山之口 勤・島田 政信：ALOS-2 PALSAR-2 データによる平成27年8月関東・東北豪雨の洪水域把握と精度検証, 日本リモートセンシング学会誌 36(4), 348-359, 2016.
- 国土交通省九州地区整備局八代河川国道事務所, 早よみなっせ球磨川リアルタイム防災情報,
<http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/kumagawa/bousai/camera0000.html> (2020年10月24日取得)
- 国土地理院 令和2年7月3日からの大雨による浸水推定図 球磨川水系球磨川人吉市周辺
https://www1.gsi.go.jp/geowww/saigai/202007/shinsui/01_shinsui_kuma_01.pdf (2020年10月25日取得)

第3章 球磨川流域の流量の推定と胸川流域の洪水氾濫プロセス

九州工業大学 重枝 未玲

3.1 はじめに

令和2年7月豪雨では、7月3日～4日に九州南部で記録的な豪雨となり、球磨川流域を中心に甚大な被害が生じた。球磨川流域は、日本を代表する急流河川流域であり、同流域では急激な水位上昇による本・支川の大規模な洪水氾濫、橋梁群の流出等の急流河川流域特有の被害が発生した。このような急流河川における洪水氾濫特性を調査・研究することは、流域治水を含め、極端気象時代を迎えるわが国の今後の防災・減災において極めて重要な情報を提供できると考えられる。本章では、令和2年7月豪雨時の球磨川流域を対象に、今次災害の被害状況の調査を行うとともに、現地調査と観測水位や降雨量に基づき、出水時の流量の推定と胸川流域での洪水氾濫プロセスの検討を実施した。

3.2 球磨川流域と災害の概要

3.2.1 球磨川流域の概要(国土交通省, 2007)

球磨川は、熊本県南部の人吉盆地を貫流する一級河川である。その流域面積は1,880km²、幹線流路延長は115kmであり、周囲を急峻な山々で囲まれている。球磨川上流域には市房ダム、免田川、小さで川、川辺川、山田川、万江川などの支川が合流している。同流域の土地利用は山地等が83%、水田や果樹園等の農地が7%、住宅等の市街地が約10%を占めている。市房ダム～渡地点を上流部、渡～遙拝堰までを中流部、遙拝堰～河口までを下流部として分類されている。図3.1に、球磨川流域の概要、本・支川、地上雨量・水位観測所、市房ダム等のダムを、図3.2にALOS2(JAXA, 1997)より作成した流域の土地利用を示す。背景図については、いずれも国土地理院の地理院タイル(国土地理院, 2020a)を用いた。

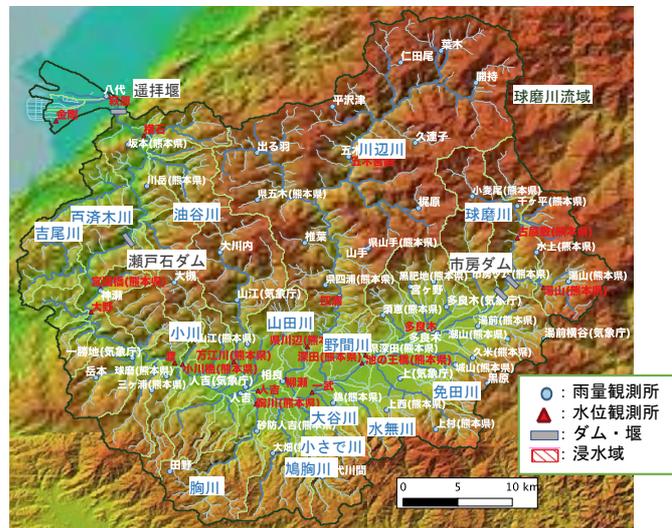


図 3.1 球磨川流域の概要

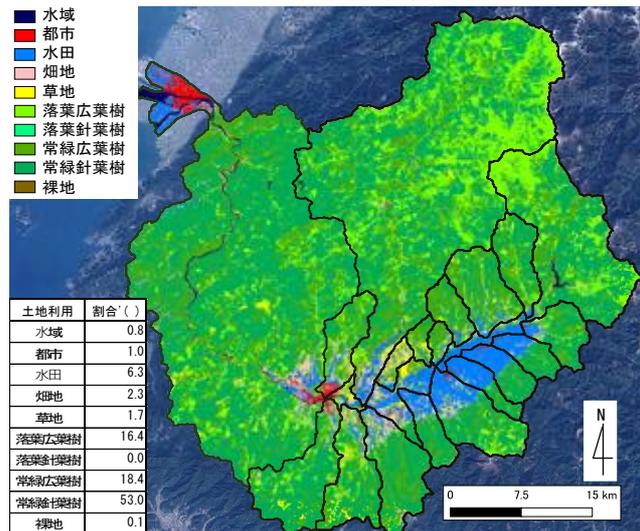


図 3.2 球磨川流域の土地利用

3.2.2 令和2年7月豪雨による災害

令和2年7月豪雨では、7月3日深夜～7月4日の12時に複数の線状降水帯が発生し、球磨川流域で豪雨となった(国土交通省九州地方整備局・熊本県, 2020)。図3.3に、XRAIN(DIAS, 2020)より求めた球磨川流域での降雨強度と累加雨量の経時変化、図3.4にXRAIN及び地上観測雨量(国土交通省, 2020)より求めた球磨川の人吉観測所より上

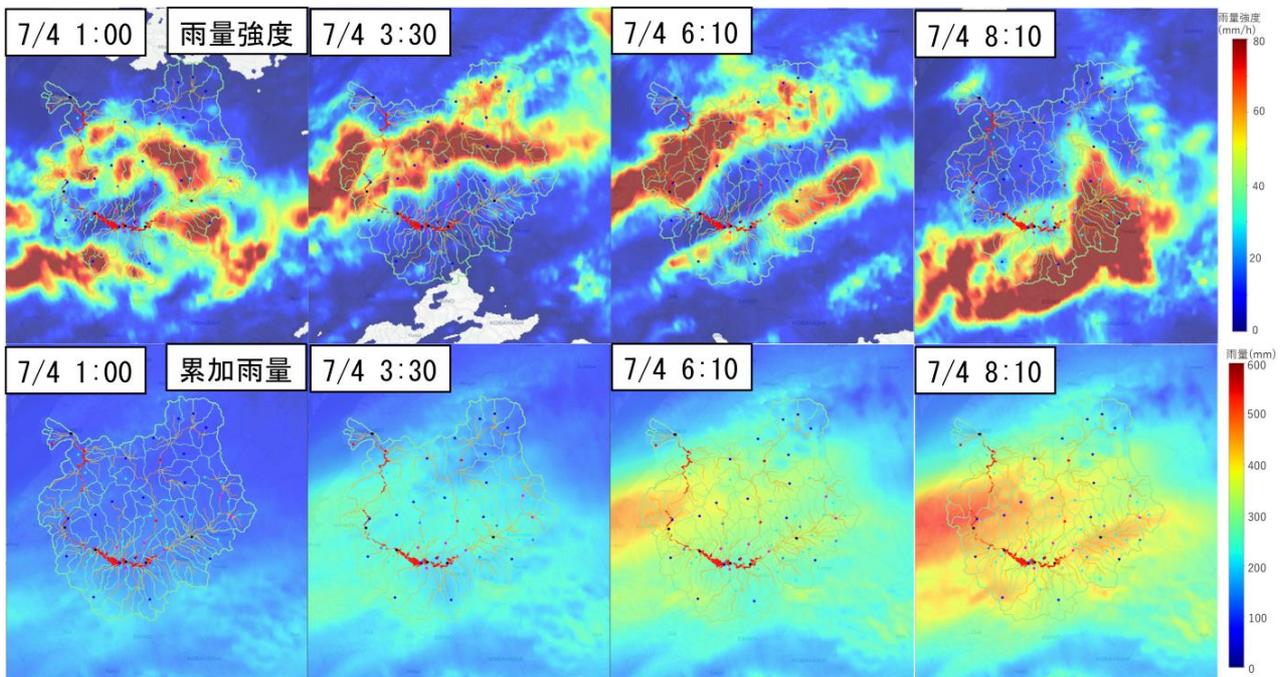


図 3.3 XRAIN(DIAS, 2020)より求めた球磨川流域での降雨強度と累加雨量の経時変化

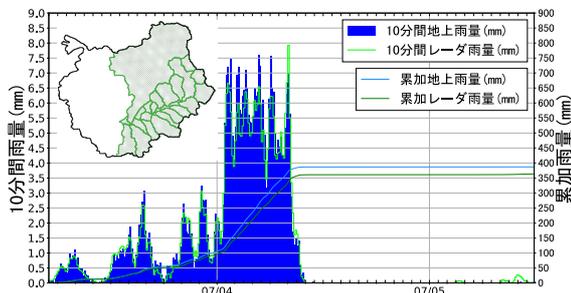


図 3.4 人吉観測所より上流流域での流域平均雨量

表 3.1 熊本県の被害状況 (大本, 2020)

死者	65名	
行方不明者	2名	
住宅被害	全壊	1,470棟
	半壊	3,023棟
	床上浸水	1,519棟
	床下浸水	1,144棟
	一部損壊	1,719棟

流域での流域平均雨量を示す。これらより、(1)7/4の1時頃に上流域で、3時半頃には中流域で、6時10分~8時10分には中・上流域で豪雨となったこと、(2)球磨川本川に沿って豪雨域が発生していること、(3)XRAIN(DIAS, 2020)と地上雨量より求めた球磨川上流域の流域平均雨量の波形には大きな差がないこと、(4)12時間雨量については、XRAIN(DIAS, 2020)で288mm、地上雨量で309mm程度であり、計画降雨量の262mmを超えたこと、などが確認できる。

この豪雨により、球磨川流域では、複数の水位観測所で計画高水位を超え欠測が生じた。破堤は2箇所、溢水・越水は11箇所が発生し、14の道路橋、3の鉄道橋が流失した(国土交通省九州地方整備局・熊本県, 2020)。図 3.5 に、球磨川流域での溢水・越水地点、破堤地点、流出した橋梁、浸水域をまとめたものを示す。熊本県で死者65名・行方不明者2名であり球磨川流域では50名の死者となった。その多くは人吉市街地、球磨村渡地区に集中していた。表 3.1 に熊本県の被害状況を示す(大本, 2020)。

3.3 球磨川流域のピーク流量の推定

3.3.1 解析の概要

流量の推定には「水面形を与条件とした流量・粗度係数の推定法」(重枝ら, 2017a, 重枝ら, 2018a)(以下、推定法と呼ぶ。)と分布型流出・1次元河道網洪水流解析モデル(重枝ら, 2018b)(以下、洪水追跡モデルと呼ぶ)を用いた。洪水追跡モデルは、流出解析モデルの「セル分布型流出解析モデル」(重枝ら,

第4編

2010)と1次元洪水流解析モデルの「1次元河道ネットワークモデル」(重枝ら, 2018c)で構成され, ①では標高や土地利用などの流域特性を考慮した上で流域の雨水の挙動の予測を, ②では河道幅の変化などの河道特性や橋梁等の河川構造物を考慮した上で洪水追跡を行う。両モデルは, ①より求まる河道への流出流量を②の境界あるいは内部境界条件として与えることで接続される。これらの推定法やモデルの詳細については, 参考文献を参照されたい。なお, 今回の解析では, 河道と氾濫原を1横断面で1次元解析的に取り扱うことで氾濫を考慮した。そのため, 氾濫原を平面2次元解析で取り扱った解析に比べ, 氾濫流は下流に流下するため流量は大きく評価される可能性があることを付記しておく。

解析対象領域は, 図 3.6 に示す球磨川上流域である。いずれの解析も, 平成 30 年測量の横断面データと数値地図標高の 5m メッシュ(国土地理院, 2020b)より解析横断面を作成した。推定法の解析の実行に必要な水位と一区間の粗度係数には, 痕跡水位(令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会, 2020)と最上流端の粗度係数を与えた。最上流端の粗度係数は, 解析対象の全区間で, 粗度係数を与える一区間を変更した解析を実施し, 粗度係数が 0 や流量がマイナスになるなど, 流量や粗度係数が非物理的な値とならない区間の解析結果に基づき平均値から求めた。この際の粗度係数には, 計画粗度係数を用いた。洪水追跡モデルによるピーク流量の推定では, 解析対象時刻を

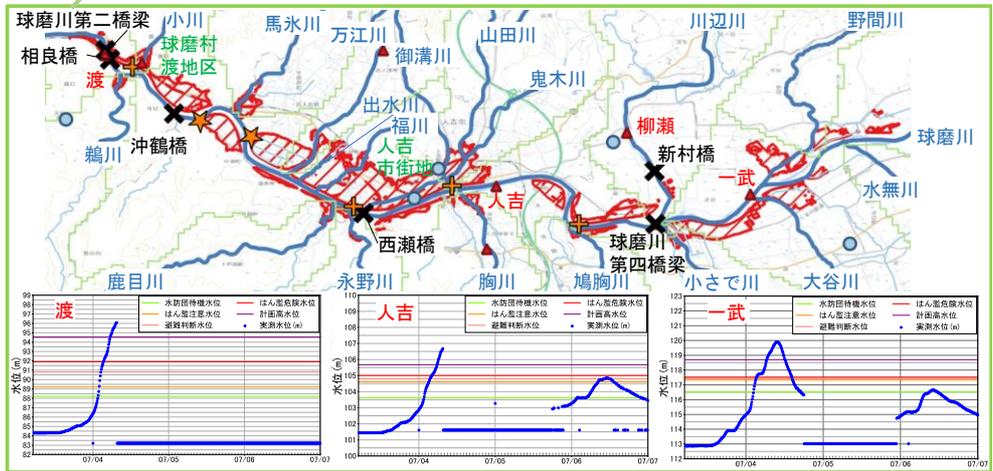
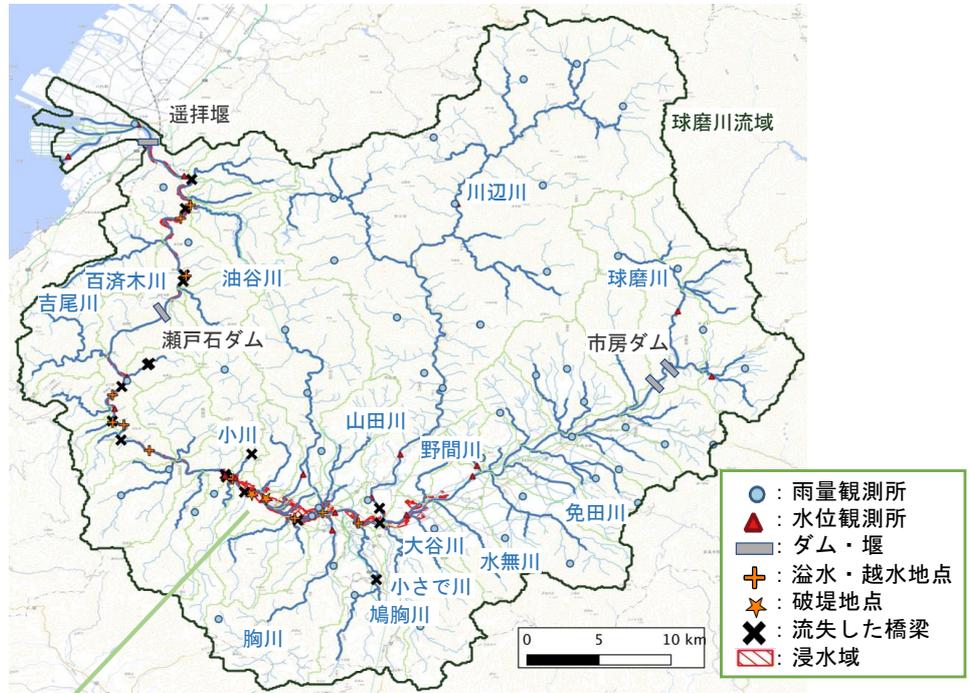


図 3.5 球磨川流域での被害の概要

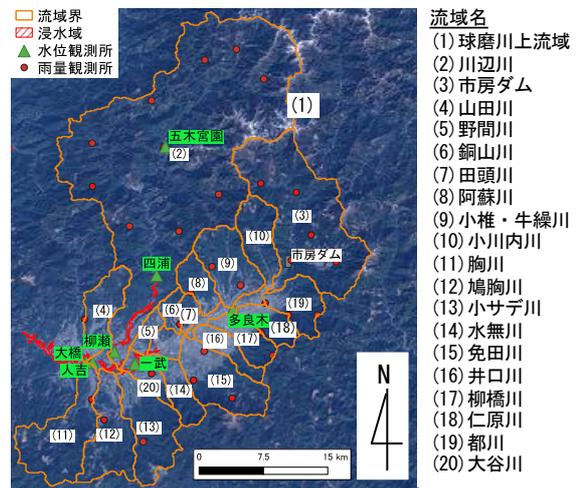


図 3.6 球磨川上流域

表 3.2 モデルパラメータの範囲

	森林					水域
	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$k_a(m/s)$	$d_c(m)$	$d_s(m)$	β	$N(m^{-1/3} \cdot s)$
市房ダム	0.4-0.8	0.0000001-0.05	0.2-0.4	0.2-0.4	2-6	0.05
川辺川	0.4-0.8	0.0000001-0.05	0.2-0.4	0.2-0.4	2-6	0.035-0.15

表 3.3 モデルパラメータ値

	森林					水域
	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$k_a(m/s)$	$d_c(m)$	$d_s(m)$	β	$N(m^{-1/3} \cdot s)$
市房ダム	0.6	0.025	0.16	0.4	2	0.05
川辺川	0.6	0.025	0.2	0.4	2	0.0925
その他	0.6	0.025	0.18	0.4	2	0.07125

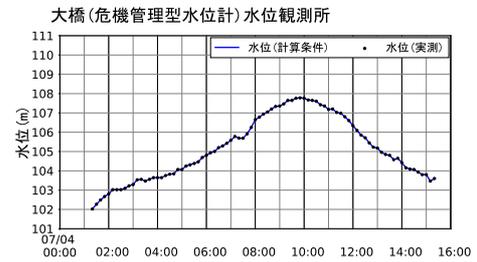


図 3.7 大橋水位観測所の水位の経時変化

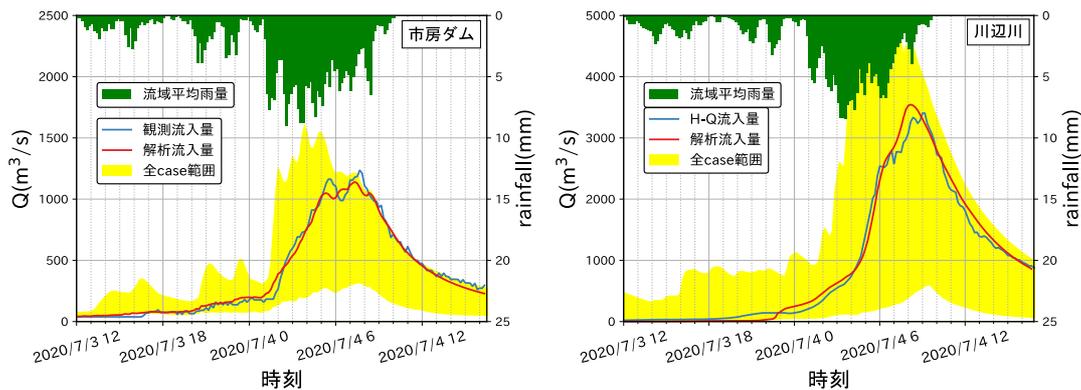


図 3.8 市房ダム流域と川辺川流域の解析流量ハイドログラフ

2020年7月3日0時20分から5日12時とした。雨量にはXRAIN(DIAS, 2020)を用いた。分布型流出の標高データには、数値地図標高10mメッシュ(国土地理院, 2020b)を30mメッシュに補間したものを、土地利用にはALOS2(ALOS2, 1997)を用いた。

分布型流出解析のモデルパラメータは以下のように設定した。まず、実験計画法により解析条件を設定し、この解析条件で解析を実施した。次に、市房ダム流域と川辺川流域における実測流量、水位流量曲線より求めた流量との誤差が最も小さいパラメータの組み合わせを最適値とした。さらに、その他の流域については市房ダム流域と川辺川流域は平均値を与えた。地中流に関するパラメータについては、森林の土地利用のみ考慮した。その他の土地利用は、それぞれの標準的な等価粗度係数を与えた。なお、川辺川流域は水域の等価粗度係数も独立変数とした。表 3.2 にモデルパラメータの範囲を示す。実験計画法の解析条件は、市房ダムと川辺川流域でそれぞれ 54 と 68 通りであった。解析横断面には推定法と同様なものを、粗度係数には推定法より得られた流量から洪水痕跡に基づき求めた逆算粗度係数を、痕跡水位が測定されていない断面には計画粗度係数を与えた。橋梁は、水の手橋、球磨川第三橋梁、球磨川第四橋梁、木綿葉大橋を考慮した。下流端境界条件には、図 3.7 に示す大橋水位観測所の水位の経時変化を与えた。

3.3.2 流量の推定結果

図 3.8 に、最適パラメータを用いた分布型流出解析により得られた市房ダム流域と川辺川流域の流量ハイドログラフを示す。図中には観測結果あるいは水位流量曲線より推定された流量も合わせて示している。これより、(1)いずれの流域も、観測結果の波形を概ね再現できること、(2)市房ダム流域では、ピーク流量を 8%程度の誤差で再現できること、(3)川辺川流域では、ピーク流量の発生時刻が観測値より 1 時間程度早いため、流量を 4%程度の大きく評価していることがわかる。本解析では、河道を一つの計

第4編

算格子で取り扱っており、河道平面形状を適切に取り扱うことができないため流下時間が早く、上記の差が生じたと考えられる。

表 3.3 に、市房ダム流域と川辺川流域の最適モデルパラメータ値を示す。これより、(1)市房ダム流域の値と川辺川流域の値が同程度であること、(2)土層厚は 0.4m であり、球磨川流域の森林保水機能の 0.2m ~ 0.4m の範囲(令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会, 2020)にあること、などが確認できる。

図 3.9 に、洪水追跡モデルより得られたピーク流量、推定法による推定流量の縦断変化を示す。図中には令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会で示された市房ダムを考慮した氾濫戻しを含む推定流量(令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会, 2020)をオレンジの○で示す。なお、検証委員会の推定流量は、降雨に地上雨量を用いた貯留関数法で求められている。推定法と洪水追跡モデルで推定された流量を比較すると、62km~63km の区間を除き概ね一致している。一方で、推定法では、62km~63km の区間では橋梁が存在しており、この流水抵抗を考慮できないため流量の再現性が低下したと考えられる。この点については、今後推定法の改善をしたいと考えている。検証委員会では氾濫戻しを含む流量は 7,400m³/s と推定されている(令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会, 2020)。また、洪水追跡モデルによるピーク流量は 7,524 m³/s であった。上述したモデルの性質などから、検証委員会の氾濫戻しを含む流量よりも 2%程度大きく評価しているものの概ね一致している。

図 3.10 に、洪水追跡モデルより得られたピーク水位の縦断変化と痕跡水位との比較を示す。ピーク水位の縦断変化の比較には、橋梁を考慮していない結果もあわせて示している。図中には推定法で用い

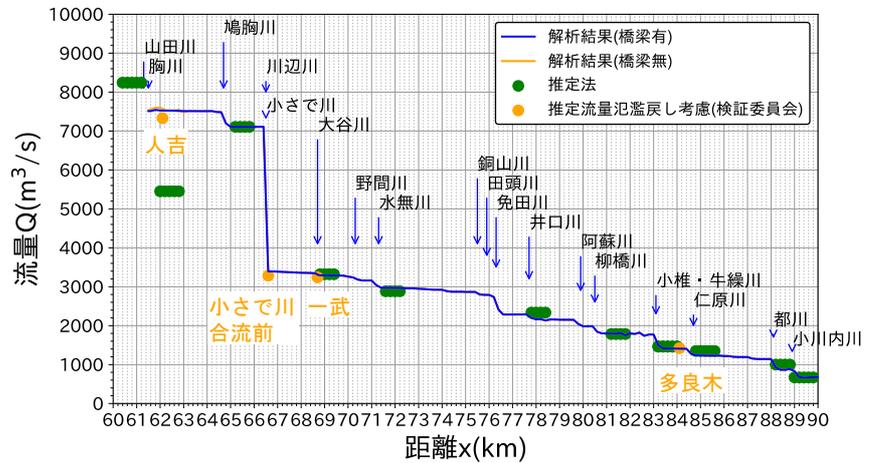


図 3.9 ピーク流量の縦断変化

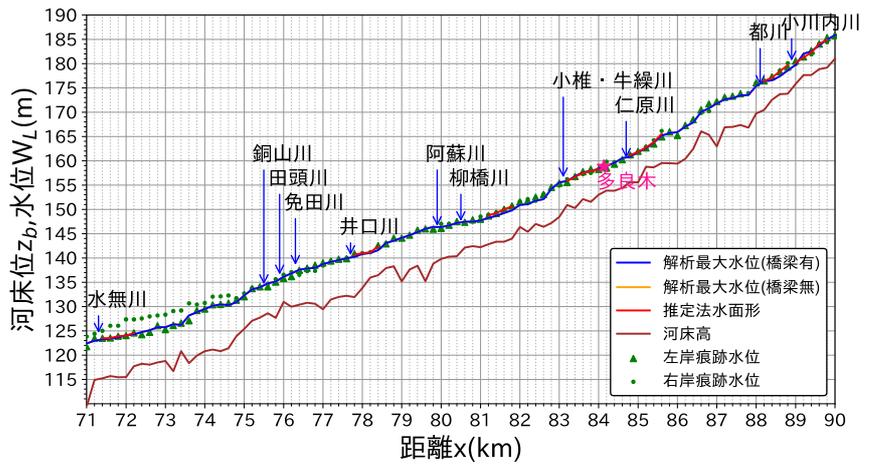
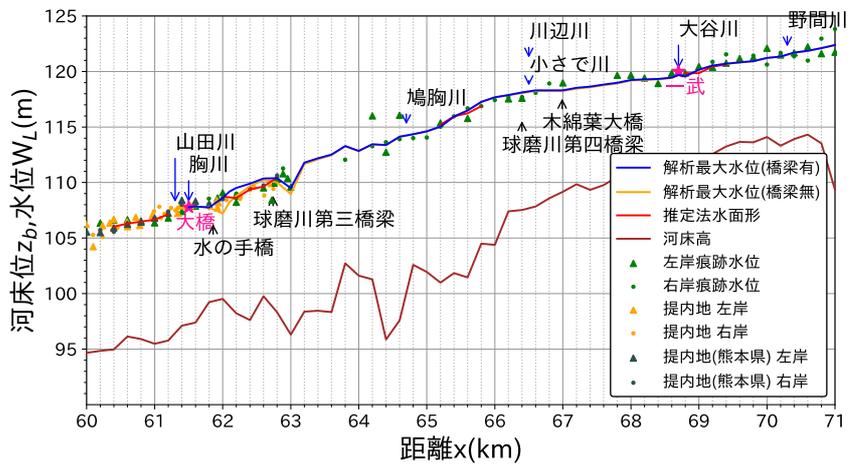


図 3.10 ピーク水位、痕跡水位の縦断変化

第4編

た痕跡水位の縦断変化も合わせて示している。これより、(1)本洪水追跡モデルは痕跡水位を再現していること、(2)橋梁の有無による水位の違いは、水の手橋から球磨川第三橋梁の区間で大きいこと、などが確認できる。水の手橋の桁高は標高 106.64m にあり、痕跡はそれよりも大きいことから水位は橋桁に到達しており、その影響が大きくなったと考えられる。また、全区間を通じて、解析結果は痕跡水位を再現していることから、図 3.9 の支川からの流入流量の妥当性も確認できる。

3.4 胸川流域の洪水氾濫プロセスの検討

3.4.1 解析の概要

球磨川の支川である胸川を対象に、洪水氾濫プロセスを検討した。胸川は人吉市を貫流する球磨川支川であり、球磨川の距離標 61.6km 付近で、球磨川と合流している。流域面積は 68.9km² であり、その土地利用は、都市 1.1%、山林 92.7%、水田 2.1%、その他 4.1% である。合流点から約 1.4km の地点に県管理水位観測所が設置されている。図 3.11 に胸川流域の概要を示す。令和 2 年 7

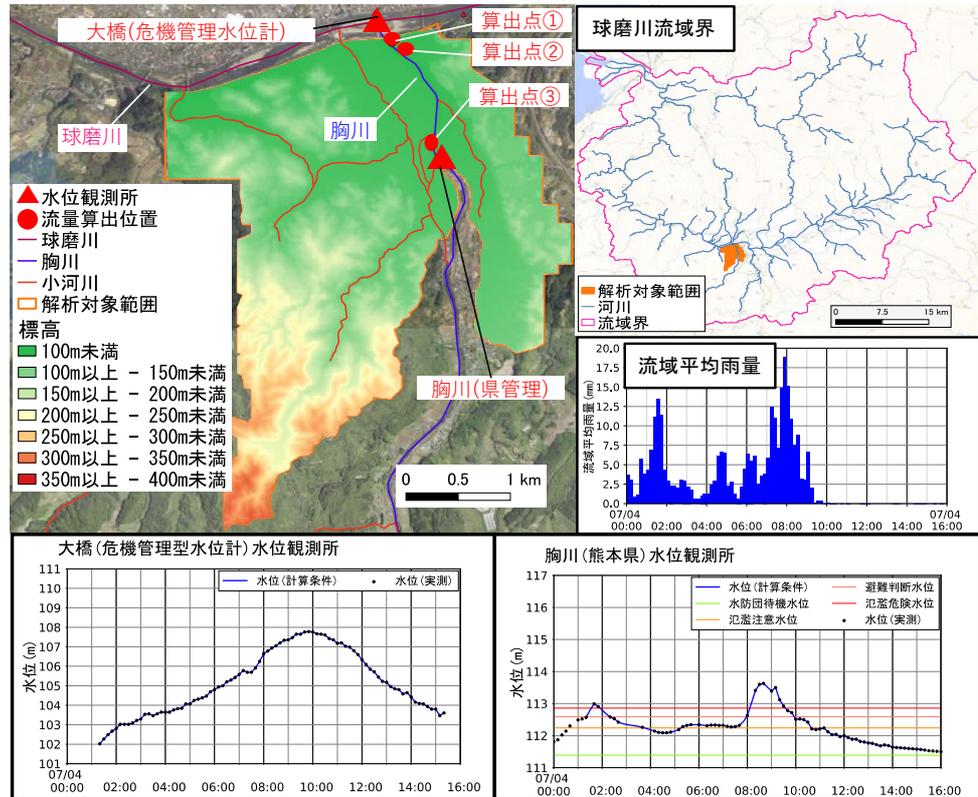


図 3.11 胸川流域の概要

月豪雨では本川との合流部から約 1.0km にかけて広範囲に氾濫が発生し、浸水被害が生じた(国土交通省九州地方整備局・熊本県, 2020)。

本解析では、降雨量と観測水位ハイドログラフを与条件として、地中流を考慮した降雨流出・洪水氾濫ダイナミックモデル(重枝ら, 2019)による降雨流出・洪水氾濫解析を実施した。地中流を考慮した降雨流出・洪水氾濫ダイナミックモデルは、河道内構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ平面 2 次元洪水流解析モデル(重枝ら, 2017b)に、雨水の土壌への浸透と自由水面地下水流を考慮したものである。今回の解析の特徴は、水位を境界条件(重枝ら, 2018d)として解析条件に流量を用いていない点にある。

解析対象範囲は、図 3.11 に示す胸川の胸川水位観測所と大橋危機管理水位計の区間とその流入域を除いた胸川流域とした。解析対象時刻は、令和 2 年 7 月 4 日 1 時 20 分から 15 時 20 分とした。降雨外力には XRAIN(DIAS, 2020)の雨量を、上・下流端境界条件には図 3.11 に示す各観測所の水位ハイドロ

表 3.4 粗度係数

土地利用	粗度係数
水域	0.030
都市	0.040
水田	0.025
畑地	0.025
草地	0.030
森林	0.060
裸地	0.030

第4編

グラフを用いた。図 3.11 には XRAIN より求めた流域平均雨量も合わせて示している。標高には図 3.11 に示す 5m メッシュの LP データを、土地利用には ALOS2 (ALOS2,1997) のデータを用いた。粗度係数には土地利用に応じて表 3.4 を与えた。降雨の土壌への浸透は土地利用が森林の場合にのみ考慮し、森林の土層に関するパラメータは表 3.5 を与えた。

3.4.2 胸川流域での洪水氾濫プロセス

図 3.12 に、実測浸水域(国土交通省九州地方整備局・熊本県, 2020)と解析最大浸水域との比較を示す。これより、解析最大浸水域は、実測浸水域を概ね再現していることが確認できる。以下では、この結果に基づき洪水氾濫プロセスを検討した。

図 3.13 に浸水深の経時変化、図 3.14 に水面形の経時変化を示す。これらの結果から、令和 2 年 7 月豪雨時の胸川流域での浸水プロセスは以下であったと考えられる。(1)7 時 40 分頃には、胸川の流量が増加し、兩岸で水位が周辺の地盤高より高くなる区間が生じ、胸川と球磨川合流部周辺で浸水が生じる。その 20 分後の 8 時 00 分頃には浸水深が 1m を超える地域も出始める。(3)8 時 00 分頃、合流部付近で浸水域が拡大する。氾濫が開始する区間では、結果は示していないが、上流の地点②の流量に比べ、下流の地点③のピーク流量が大きく、この区間では氾濫原から胸川へ氾濫戻しが発生していた。(4)11 時 00 分頃には、合流部から排水され浸水域が減少し始める。なお、小河川と合流部で氾濫が発生し、この氾濫は球磨川本川の下流側で広がったことも確認でき、最大浸水深が 2.0m 以上となった場所もあった。解析範囲の排水は、胸川と図 3.11 の赤線で示す小河川で行われており、一部の地域を除き速やかに排水されることも確認できる。

このように、胸川では球磨川本川の水位上昇に伴い合流部周辺で氾濫が生じるが、一方で胸川周辺は氾濫水が排水されやすい地形であり、本川水位の低下とともにすみやかに排水される。氾濫開始から 7 時 40 分頃から本川への排水が開始される 11 時までは、3 時間半程度であり、当時の洪水氾濫状況は、急激に変化したことが解析結果からもわかる。

氾濫が開始する 7 時 40 分では、大橋水位観測所の水位は 106.0m で、胸川水位観測所の水位は 112.5m であった。胸川水位観測所の水位 112.5m は、氾濫注意水位を下回っていた。このことは、大橋水位観測所の水位は、胸川下流の浸水リスクを判断する重要な指標であり、大橋水位観測所の水位が 106.0m を超えると、胸川下流の水害リスクが高まることがわかる。このように、大橋水位観測所の水位は胸川の浸水リスクを評価する上で重要な指標と考えられる。

急流河川では、解析結果からも明らかなように、洪水到達時間が短く、短時間で洪水氾濫状況が変化する。胸川では氾濫開始から 10 分程度で浸水が急激に広がり被害を拡大させる一方で、河川周辺の地形も起伏によっては氾濫水の拡がりがある程度制限される。今回浸水した地域は、水害リスクの高い地域であり、このような地域では、浸水の拡大速度などを把握し水害リスクを把握することで、避難体制や土地利用規制も含めた地域に応じた減災対策が可能になる。本研究の解析法は、その検討手段の一つ

表 3.5 土壌に関するパラメータ

土層厚 D s (m)	土層厚 D c (m)	水平方向透水係数 K a (m/s)	β
0.2	0.0025	1.00E-03	6.0

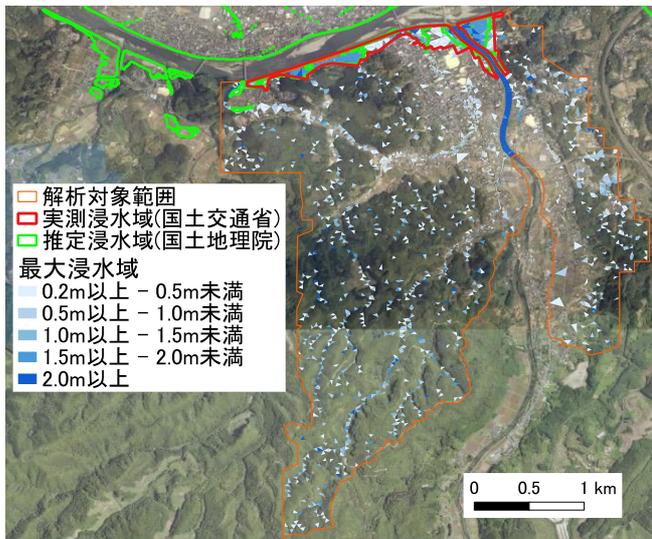


図 3.12 胸川流域の浸水域の比較

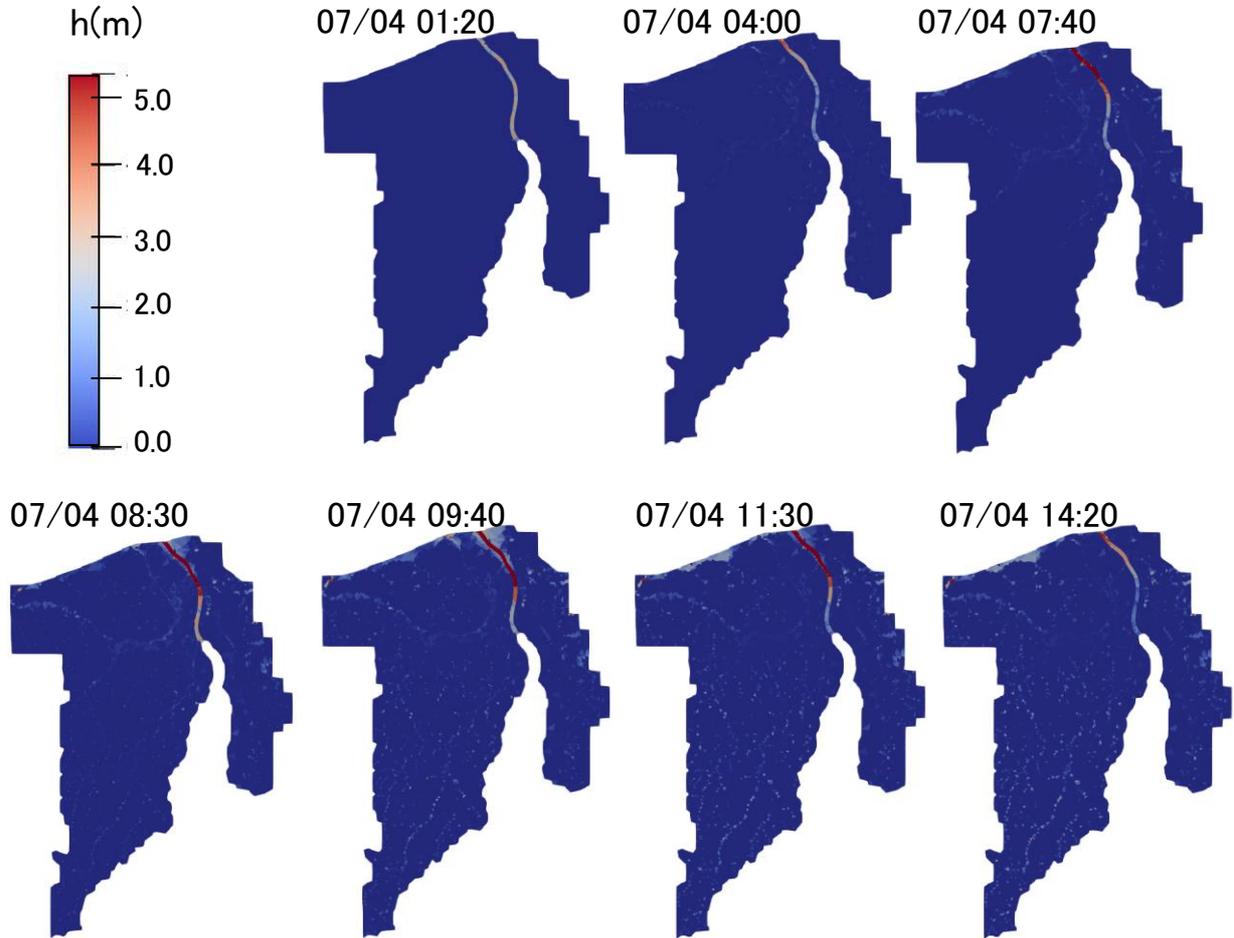


図 3.13 胸川流域の浸水深の経時変化

になると考えられる。

3.5 まとめ

本研究から、以下が確認された。

- (1) 推定法，洪水追跡モデルの推定流量と検証委員会の推定流量をまとめると図 3.9 のようになる。洪水追跡モデルの人吉地点の推定流量は 7,524 m^3/s であった。同モデルの性質上，流量は大きく評価されることから，今次豪雨の人吉地点の氾濫戻しを含む流量は，検証委員会で推定された流量 7,400 m^3/s であったと考えられる。
- (2) 胸川流域での洪水氾濫プロセスは，図 3.13, 14 であったと考えられる。同地域の浸水は，本川合流部での堰上げによるものであるが，氾濫水は胸川と周辺の小河川によって速やかに排水される。時間的にも早く 10 分間で浸水域は大きく変化する。
- (3) 大橋に設置された危機管理型水位計の情報は胸川流域の浸水リスクを把握する上で重要な情報であり，同観測の水位が 106.0m を超えると胸川で浸水が開始される。胸川では胸川水位観測所と大橋の危機管理型水位観測所が浸水リスクを判断する有用な情報になる。

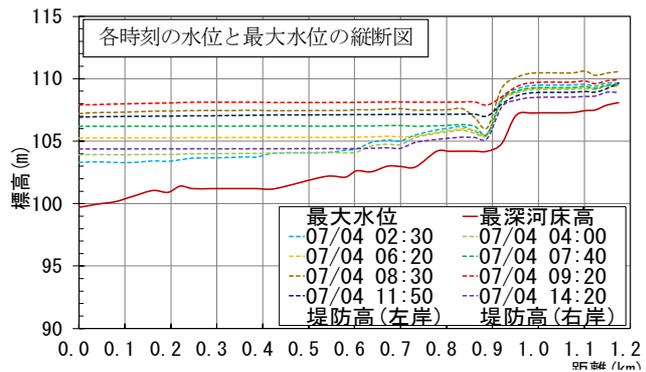


図 3.14 水面形の経時変化

本研究で示した解析法は、流量の推定、洪水氾濫プロセスの推定に有用な解析手法であり、今後、同流域での水害リスクを把握する上で有用な手法であると考えられる。

3.6 今後の課題

今後、危機管理型水位計の設置が促進され、本解析のように降雨と水位の情報を用いて解析を実施することができれば、リアルタイムで河川の洪水氾濫状況を予測できることとなる。このような水位情報と同モデルを活用することで、危機管理対策に有用な情報提供につながると考えられる。水位情報に基づくこのような技術は、今後重要となる中小河川も含む危機管理対策につながると考えられる。そのためには、危機管理型水位計の増設、防災・減災上重要なポイントへ設置するとともに、これらを利用した洪水氾濫解析の高度化が必要となる。水位を境界条件とした解析法は、常流であれば河道全体での水位が流量の結果に影響を及ぼすため、河道内の抵抗評価が極めて重要となる。今後は、同解析法の水位や流量の定量的な検証を行ない、その再現精度の検証が必要と考えられる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、国土交通省九州地方整備局、国土交通省国土地理院、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム(DIAS)からデータの提供を受けた。また、本学学部生の伊藤翔吾君、林 泰史君には解析の実行、本学大学院生の桂佑樹君、金屋諒君、太田幸子さん、吉永僚介君にはデータ整理等で協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

DIAS : <http://www.diasjp.net/service/xrain/>, 2020.

JAXA: 高解像度土地利用土地被覆図ホームページ, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/jlulc_jpn.htm, 1997.

大本照憲 : 令和2年7月九州豪雨災害の中間調査報告, 土木学会水工学委員会, 河川災害シンポジウム資料, 2020.

国土交通省 : 球磨川水系河川整備基本方針, 2007.

国土交通省 : 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp>, 2020.

国土交通省九州地方整備局・熊本県 : 第1・2回令和2年7月球磨川豪雨検証委員会説明資料, 2020.

国土地理院 : 地理院タイル, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, 2020a.

国土地理院 : 基盤地図情報, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, 2020b.

重枝未玲, 秋山壽一郎, 小園裕司 : 遠賀川流域の分布型流出解析と複数の支川を考慮した平面2次元洪水追跡, 河川技術論文集, 第16巻, pp.443-448, 2010.

重枝未玲, 秋山壽一郎, 阿部琢哉, 田口英司, 武久晋太郎, 西山晋平 : 洪水痕跡によるピーク水位時の流量と粗度係数の推定, 河川技術論文集, 第23巻, pp.73-78, 2017a.

重枝未玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中木翔也 : 河川横断構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ平面2次元洪水流モデルの構築, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I1423-I1428, 2017b.

重枝未玲, 秋山壽一郎, 田口英司, 武久晋太郎 : 水面形の経時変化に基づく複断面直線水路での流量・合成粗度係数の推定, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, I649-I654, 2018a.

重枝未玲, 秋山壽一郎, 中木翔也, 勝原亮介, 大久保剛貴 : 平成29年7月九州北部豪雨時の筑後川右岸流

第4編

- 域を対象にした分布型流出・1次元河道網洪水流解析, 河川技術論文集, 第24巻, pp.445-450, 2018b.
- 重枝未玲, 秋山壽一郎, Adelaida Castillo DURAN, 中木翔也, 西山晋平, 勝原亮介: 1次元河道ネットワークモデルを用いた分布型流出・洪水流解析と彦山川流域への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I1495-I1500, 2018c.
- 重枝未玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中島晴紀: 水位ハイドログラフを境界条件とした平面2次元洪水流解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I1453-I1458, 2018d.
- 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), Vol.75, No.2, pp.I1303-I1308, 2019.
- 令和2年7月球磨川豪雨検証委員会: 参考資料, 2020.

第4章 球磨川流域の氾濫特性と人的被害

東京理科大学 二瓶 泰雄

4.1 はじめに

令和2年7月豪雨は、7月3～31日にて梅雨前線の影響により、西日本から東北地方の広い範囲で記録的な大雨となった。これにより、全国の広い範囲に人的・住家被害が発生した。表4.1のように、人的被害は死者84名、行方不明者2名、重傷23名、軽傷54名、家被害は全壊1,621棟、半壊4,504棟、一部破損3,503棟、床上浸水1,681棟、床下浸水5,290棟という甚大な被害が発生した（内閣府、2021年1月7日版）。この中でも、人的被害のうち死者・行方不明者の和は、熊本県が67名（全体の77.9%）、九州全体で79名（同91.8%）と突出している。また、住家被害の合計でも熊本県7,412棟（同44.7%）、九州全体で14,115棟（同85.0%）となり、熊本県を中心とした九州地方における被害が多い。

表4.1 全国の人的・住家被害状況（内閣府、2021年1月7日版）

	人的被害					住家被害					
	死者	行方不明者	重傷	軽傷	合計	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水	合計
青森県										1	1
岩手県									1	28	29
秋田県								3	10	77	90
山形県			1		1	1	62	7	150	555	775
福島県				1	1					26	26
群馬県								1			1
埼玉県								77		2	79
千葉県										2	2
東京都									3		3
神奈川県				1	1			6	1	9	16
新潟県									3	49	52
富山県	1				1					1	1
福井県										3	3
山梨県										4	4
長野県	1		2		3		1	4	5	109	119
岐阜県			1	1	2	6	36	85	31	304	462
静岡県	1				1		2	41	12	59	114
愛知県							1	8		20	29
三重県								9	7	8	24
滋賀県									1	12	13
京都府				2	2		1	7		29	37
大阪府								4		1	5
兵庫県						2			4	1	7
奈良県									1	2	3
和歌山県				1	1			3		6	9
島根県						2	40	3		52	97
岡山県							1			17	18
広島県	2		2	1	5	1	11	15	4	111	142
山口県							4		17	192	213
徳島県						1					1
愛媛県	2			1	3	1	2	34	5	67	109
福岡県	2		5	4	11	14	992	977	681	1,920	4,584
佐賀県				3	3	2	9	7	25	144	187
長崎県	3		1		4	4	3	4	124	136	271
熊本県	65	2	10	34	111	1,490	3,092	1,940	329	561	7,412
大分県	6		1	1	8	68	209	202	129	469	1,077
宮崎県						4	3		2	13	22
鹿児島県	1			4	5	25	35	66	136	300	562
九州計	77	2	17	46	142	1,607	4,343	3,196	1,426	3,543	14,115
合計	84	2	23	54	163	1,621	4,504	3,503	1,681	5,290	16,599

2020年7月3～4日において、線状降水帯が球磨川流域全域にかかったため、上記の熊本県に甚大な被害が生じた。この大雨による12時間雨量は、人吉上流域で321mm、横石上流域で347mmとなり、これは計画降雨量の262mm（人吉、計画規模1/80）、261mm（横石、計画規模1/100）を大きく超える雨量であった（国交省九州地方整備局，2020）。これにより、球磨川本川にて浸水面積1020ha、家屋被害約6110戸、支川の川辺川でも130ha、約170戸の浸水被害が発生し、球磨川流域における犠牲者数は50名に達した（国交省九州地方整備局，2020）。また、今次水害により、17の橋梁が流失した。

本章では、球磨川流域の人的被害や浸水・建物被災状況を調査し、人的被害に及ぼす水理学的要因（浸水深や建物流失状況）を明らかにすることを目的とする。2020年度はコロナ感染拡大のため現地調査に大きな制約があったため、地元の研究者との連携や行政機関・マスメディアからの情報収集、インターネットを活用し、発災直後の被災状況の把握に努めた。

4.2 研究方法

4.2.1 球磨川流域の概要

球磨川は、幹川流路延長115km、流域面積1,880km²の一级河川であり、急峻な山々を上流域に抱える三大急流の一つである。流域の土地利用としては、山地が約83%、農地が約7%、市街地が約10%となっており、大部分が山地となっている。球磨川の河床勾配は、市房ダムから渡地点（52kp）までの上流域では1/200～1/600、渡地点から遙拝堰までの中流部で1/300～1/1000、遙拝堰からの下流部では1/7000となっている。図4.1に示すように、上流部（52kp～）は球磨盆地、中流部（10～52kp）は幅の狭い狭隘河道、下流部（0～10kp）は八代平野を有し、ボトルネックとなりやすい盆地と狭窄部が存在する。支川は最大の川辺川を始め、万江川や山田川、川内川、油谷川などがある。

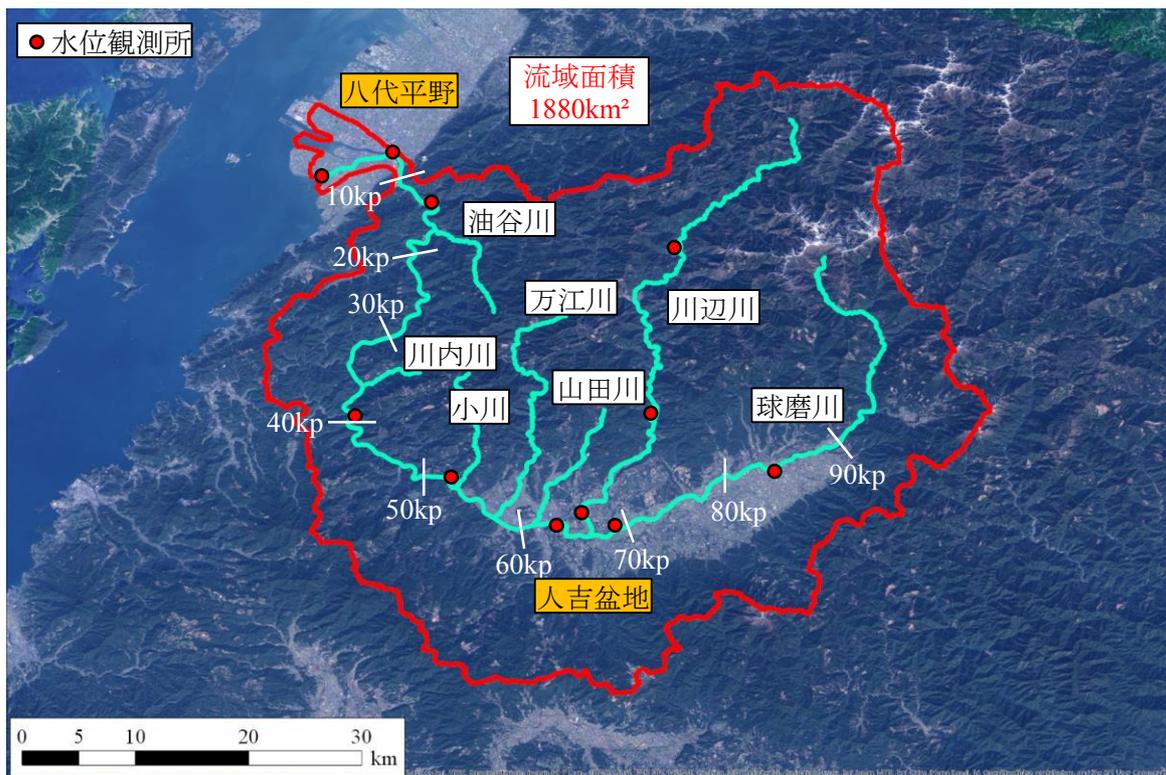


図4.1 球磨川流域の概要

第4編

4.2.2 遠隔での被害情報収集

今次水害では、コロナ禍のため、発災直後は現地に行けずに、遠隔で情報収集した。人的被害については、熊本県「令和2年7月豪雨に係る熊本県災害対策本部会議」公開資料より、死者氏名、年齢、住所等を収集した。浸水情報は、国土地理院・浸水推定図で公開している浸水範囲の輪郭を取得した。さらに、輪郭線上の標高を浸水位として内挿して、地盤標高との差を取り浸水深マップを作成した。建物被害については航空写真(令和2年7月豪雨に関する防災科研クライシスレスポンスサイト)から「流失」家屋を特定した。

4.2.3 現地調査概要

洪水氾濫状況と建物被災状況を把握するための現地調査を2020/11/11-12, 11/25-26, 12/16-17の計3回実施した。調査対象地域は球磨川の9kpから62kpまでの区間とした。調査内容は、洪水痕跡調査と建物被害調査の2つとした。洪水痕跡調査では、犠牲者が発生した場所を中心として、RTK-GNSS(R10, Trimble社製)とスタッフを用いて浸水深と浸水位を測定した。調査地点数は計120点である。建物被害調査としては、ゼンリン住宅地図に示されている建物(小屋等の住宅以外の建築物も含む)を対象に、建物の状態を「流失」、「浸水有」、「浸水無」の3段階で評価した。また、私有地等で直接目視で観測できなかった範囲については、被災後の航空写真を基に判定を行った。ここでの「流失」とは、**図4.1**に示すように、洪水流により家屋が完全に流されているケースだけでなく、原位置から離れて傾斜したケース、土砂で埋まっているケースとした。流失でない場合は、浸水範囲内の場合は「浸水有」、それ以外は「浸水無」とした。

4.3 洪水氾濫・建物被害状況

4.3.1 河川水位の時間変化特性

まず、今次豪雨における洪水状況を把握するために、流域平均の時間・累積雨量及び河川水位の経時変化を**図4.2**に示す。この流域平均雨量は、流域内の雨量観測点(計22地点)の時間雨量を算術平均したものであり、累積雨量は2020/7/3 0時から求めた結果である。また、河川水位に関しては、球磨川本川の上流より一武(河口より68.7kp)、人吉(62.0kp)、渡(52.7kp)、大野(39.9kp)、横石(12.8kp)、萩原(6.7kp)における10分ごとの実測水位(図中実線)と共に、各地点の計画高水位(HWL, 図中点線)を図示している。なお、今次豪雨では河川水位の欠測が多く、一武・人吉・渡・大野地点でも欠測した。このうち、一武・大野地点では、ロガーデータの記録値(国交省九州地方整備局, 2020)を用いて補間した。また、人吉地点については、500m下流の大橋地点における危機管理水位計の実測値を用いて、欠測期間(7/4 7:40以降)における水位量が両地点で同一であると仮定して補間した。そのため、図中では、データ欠測は渡地点のみであり、欠測期間は7/4 7:40以降である。この図を見ると、7/3より断続的に雨が降り、7/4 2時~7時まで時間雨量は30mmを超え、ピークの時間雨量は同日5時の43.7mmであった。累積雨量は、トータルで390mmに達し、12時間雨量の最大値は310mmと計画雨量(261mm/12h)の約1.2倍に達した。

一方、河川水位に関しては、7/3午後から夕方にかけて、緩やかな水位上昇が上流、中流、下流地点と順番に見られた。7/4 0時頃より中流部の大野・渡地点において1時間で0.5m以上の水位急上昇が見られ、その後に上流の一武・人吉地点や下流の横石・萩原地点でも水位急上昇が記録された。雨が概

第4編

ね止んだ7/4 9時過ぎにピークを迎え、各地点のピーク時刻は、一武9:30、人吉9:50、大野11:20、横石12:00、萩原12:20となった。このように上流・一武地点と下流・萩原地点のピーク時間差から求められる洪水波の伝播速度は5.44m/sと非常に大きく、非常に短時間に洪水波が伝播したことが分かる。萩原地点を除く水位観測地点におけるピーク水位は、HWLを長時間超えており、その超過開始時間は7/4 5、6時台と早朝であった。また、人吉・渡地点では堤防高を上回る水位を記録した。

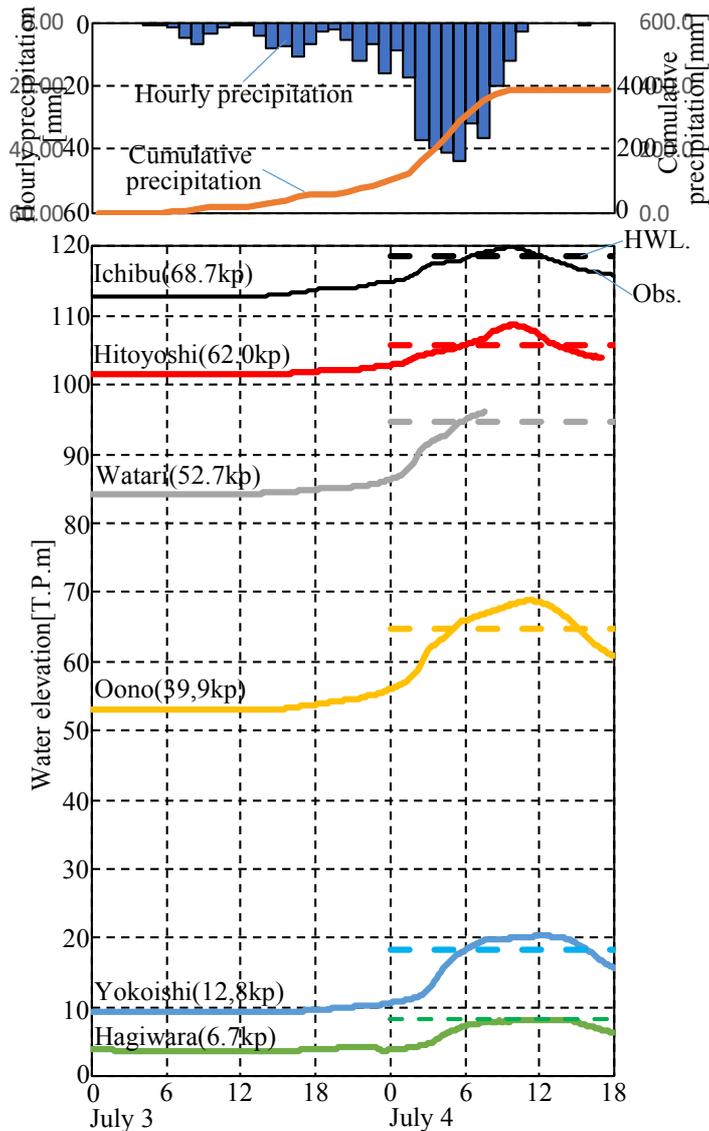


図 4.2 時間・累積雨量（流域平均）と河川水位の時間変化
 (下図の実線は実測水位、点線は各地点の HWL をそれぞれ示す)

4.3.2 河川水位縦断分布特性

次に、河川水位の縦断分布特性を把握するために、球磨川本川沿いの水位観測所における実測水位の縦断分布を図 4.3 に示す。ここでは、増水期前半（7/4 3時）と増水期後半（同7時）における実測値と最深河床（国交省九州地整提供）を図示する。本川沿いにおける従前の自記水位計の観測地点（多良木（84.2kp）、一武、人吉、渡、大野、横石、萩原地点）に加えて、危機管理型水位計 17 地点、合わせて 24 地点の結果を表示している。危機管理型水位計に関しては堤防高を基準とした水位が公開されているため、標高表示（T.P.）に直す際には、堤防高の実測値などから換算している。なお、この換算値

第4編

は速報値であり今後変わる可能性があることに注意されたい。これより、全般的には水面は河床と概ね平行になっているが、52kpの狭窄部入り口から上流側の水面勾配が河床と比べて緩やかであり、その様子は7/4 3時時点よりも7時時点の方が顕著になっていることが分かる。これは狭窄部における水位上昇の影響が上流部にも伝播するバックウォーター現象が生じているためであり、この影響は少なくとも人吉地点（62kp）までは現れているものと考えられる。

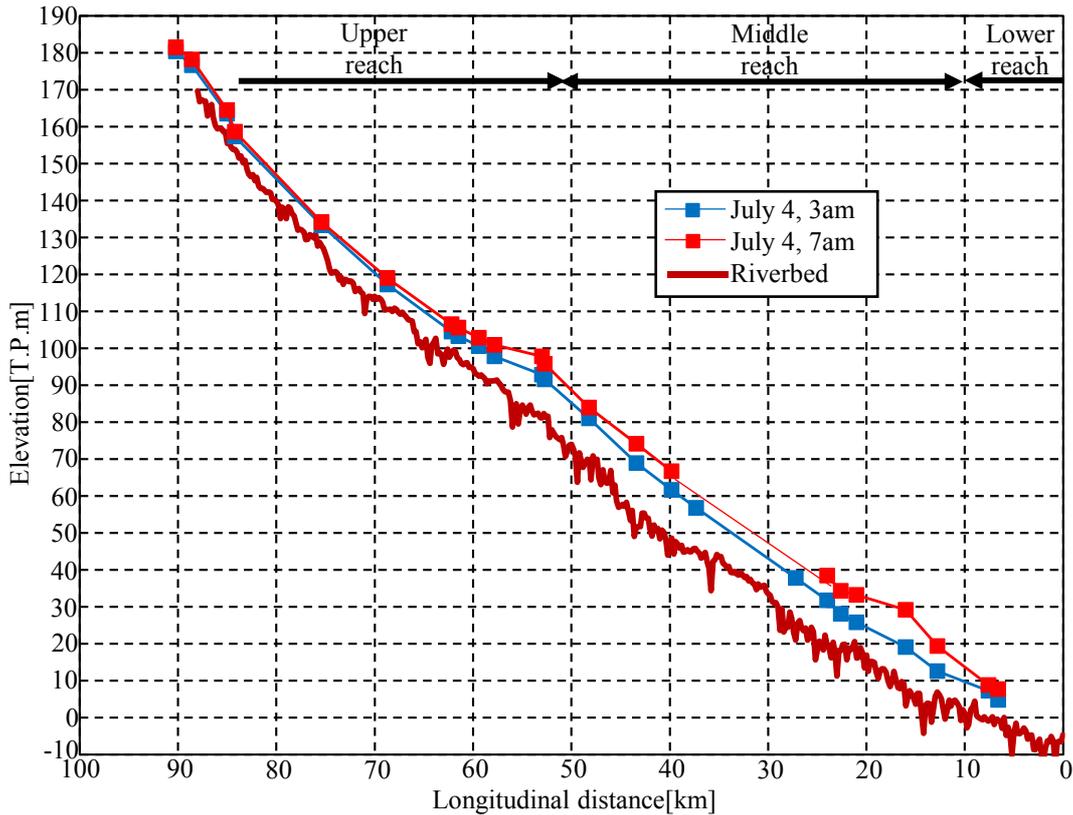


図 4.3 7/4 3時と7時における河川水位縦断分布

次に、これら水位データを用いて、洪水氾濫がいつ、どこで発生したかを把握するために、氾濫発生期間と堤防高を基準としたピーク水位の縦断分布を図4.4に示す。ここでは、水位が堤防高を超えて氾濫発生した後にデータ欠測が発生したことを考慮し、図中(a)の氾濫発生期間についてデータ欠測の無かった地点ではオレンジの実線、データ欠測があった地点ではグレーの実線で分けて示し、かつ、データ欠測が発生した時刻を×印で明示している。また、図中(b)でもデータ欠測の有無に応じて、グレー、オレンジのマークで表示している。データ欠測があった地点では、データ欠測までの結果が示されているため、氾濫期間やピーク水位は過小評価していることに留意されたい。まず、52kpより上流域に着目すると、氾濫開始は、川瀬橋（78.8kp）を除くと5-7時台に集中しており、日の出時刻（5:14）より後に氾濫が発生している。この氾濫発生時刻は、85kp・大王橋では5:30、次に57kp 護岸 6:00となり、61.5kp・大橋では7:30となっており、単純に上流側からの洪水伝播だけない状況が読み取れる。氾濫期間は12-14時台まで継続しており、最大8時間の氾濫が確認される。上流域のピーク水位は、川辺川合流点（66kp）より上流地点の多くは堤防高基準のピーク水位は負になっており、氾濫発生は限定的である。一方、川辺川合流点（66kp）より下流側ではピーク水位は2-3mとなっており、一般的な越流水深が大きくて50m程度であることを考えると非常に大きな値であり、河道周辺の堤内地一帯が浸水した状況が伺える。なお、78.8kp・川瀬橋でのデータは氾濫発生が非常に早いこととピーク水位も大きく、周

第4編

辺の観測地点とは異なる結果となっており、今後データの必要である。

次に10kp～52kpの中流域に着目すると、氾濫開始は早くて3:50であり、4時台を記録した観測地点が13-37kpに集中して存在している。これより、このエリアでは日の出前に氾濫が開始したことを意味する。氾濫は14時から17時まで継続しており、上流域よりもより長時間にわたり氾濫が生じていたことが分かる。また、堤防高基準のピーク水位は3mを超える地点が多く、最大値は深水橋(13.3kp)にて5.6mを記録した。この深水橋ではデータ欠測が生じたため、実際はもっと大きなピーク水位であったと考えられる。

最後に下流域(～10kp)では、ピーク水位は堤防高よりも低く、外水氾濫は発生していない。以上より、洪水氾濫は上・中流域の非常に広い範囲で発生しており、そのピーク水位や氾濫発生期間中は流域でより顕著であったことが分かる。なお、このような大規模な洪水氾濫に伴って、多くの自記水位計の欠測が発生した。球磨川本川沿いの水位欠測地点は、従前の自記水位計では8地点中5地点、危機管理型水位計では24地点中13地点となっている。氾濫発生前のデータを計測・発信できている地点が多いが、いざ氾濫が起こると欠測が生じるのは危機管理上問題があり、氾濫時も想定した水位計の設置位置の見直しは急務の課題である。

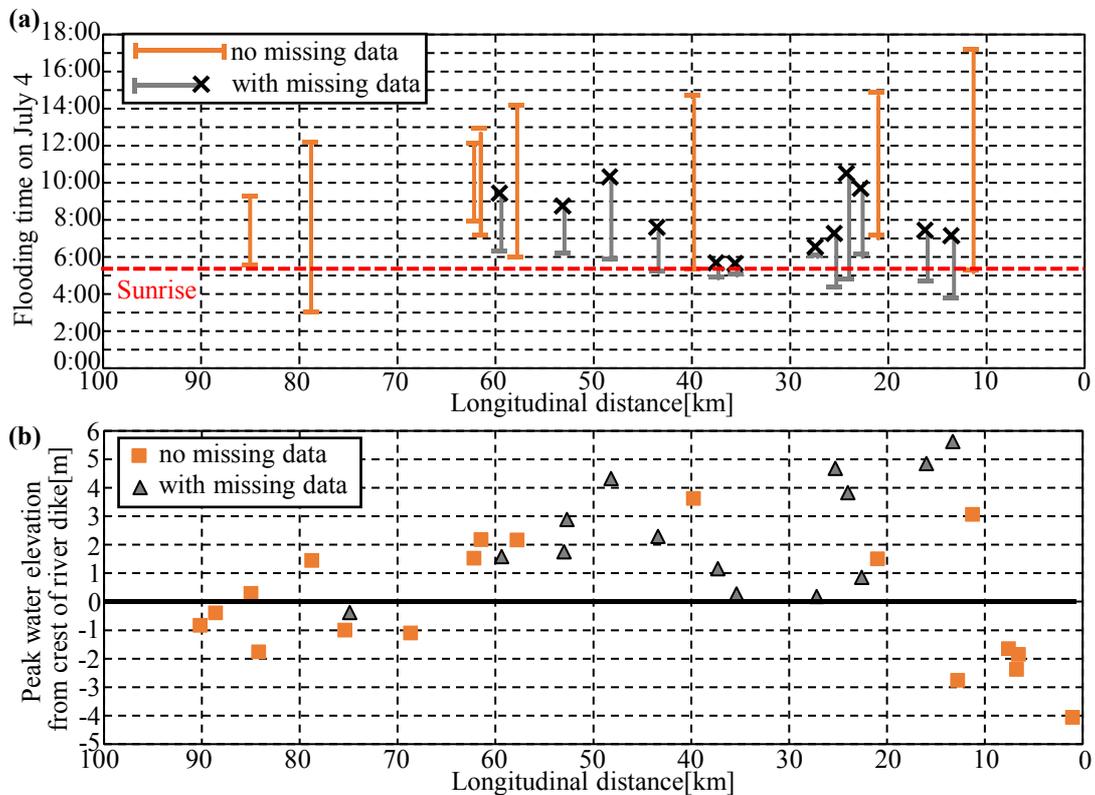


図 4.4 球磨川本川における氾濫発生期間(a)と堤防高を基準としたピーク水位(b)の縦断分布

(図中(a): 氾濫発生期間の表示では、データ欠測無, 有の観測所はオレンジ, グレーで示し, データ欠測開始時を×印で表示する.)

4.3.3 洪水氾濫状況

今次水害における洪水氾濫状況を把握するために、球磨川上流域における浸水深コンターを図 4.5 に示す。ここでは、国土地理院が発災直後に公表した浸水推定図に示されている「浸水範囲の輪郭線」をダウンロードし、浸水範囲の水際 (= 輪郭線上) の標高が周辺の浸水位と等しいと仮定して浸水位を GIS

第4編

上で内挿し、地盤標高 (DEM, 5m 解像度) との差から浸水深を求めた結果である。ただし、国土地理院の浸水推定図と国交省による浸水範囲 (国交省九州地整, 2020) を比較し、国土地理院データが過小評価している領域については、国交省データと一致するように修正した。また、川辺川周辺でも浸水しているが、一部しか図化できていないことにも注意されたい。これより、狭窄部入り口 (52kp) に近づくほど浸水深は大きく、最大で 7m を超える浸水深となっている。これは 2 階建ての家がすっぽり浸水している状況に相当している。また、家屋 1 階分に相当する浸水深 3m 以上となる範囲が 52-59kp, 60-62kp, 66-67kp と広い範囲に存在している。

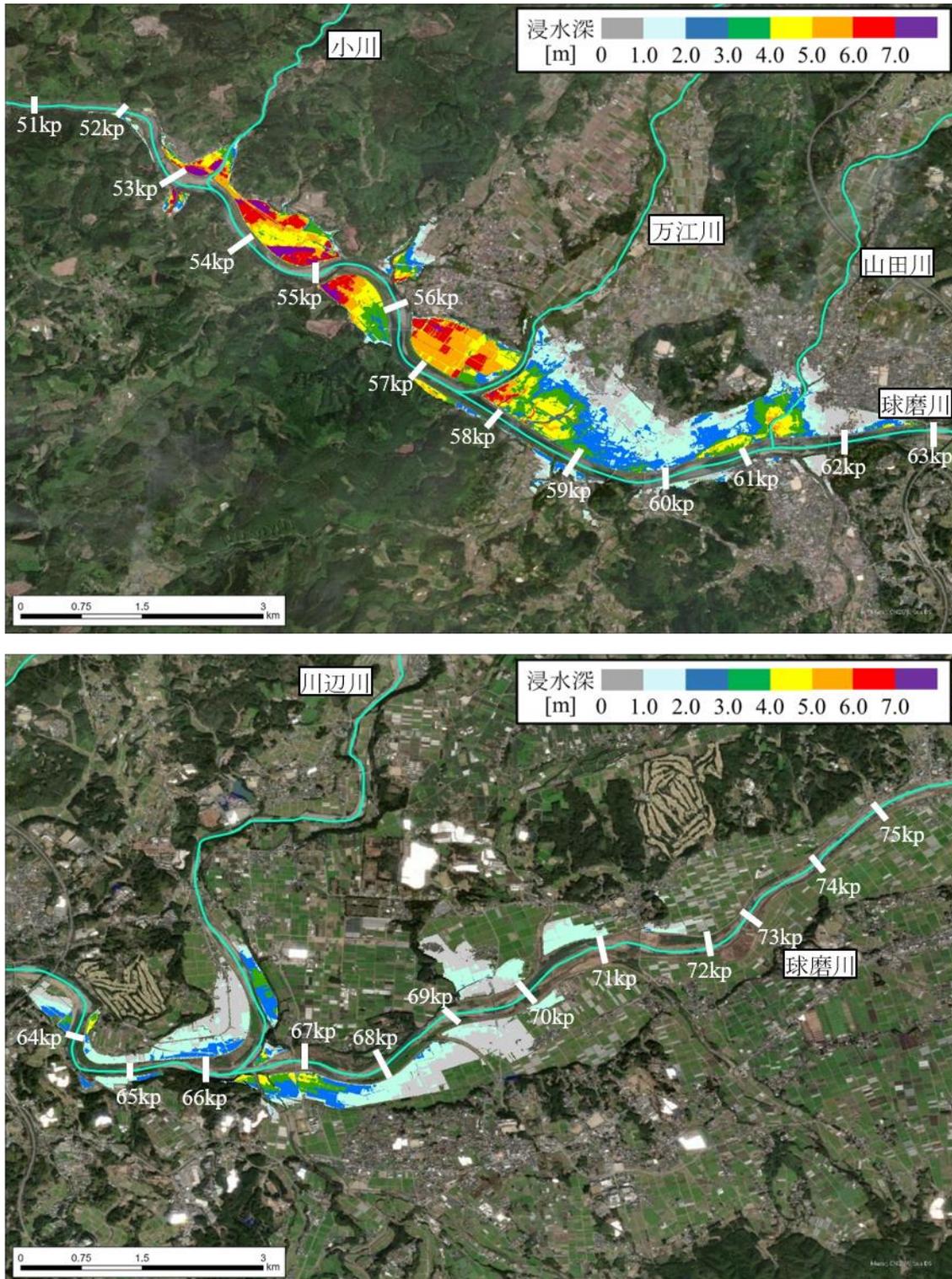


図 4.5 浸水深コンター (上 : 51~63kp, 下 : 63~76kp)

第4編

得られた浸水深コンターより、氾濫面積と氾濫水量を求めた結果、それぞれ約 9.33km²、2.3 千万 m³ であった。この比より氾濫域における平均浸水深が得られ、今次水害における平均浸水深は 2.47m となり、近年の洪水と比べて浸水深が大きな洪水氾濫であったことが分かる。

4.3.4 建物被害

今次水害では、前述のように自宅流失に伴う人的被害が大きな特徴の一つであったことから、球磨川本川沿いにおける建物流失数の縦断分布を図 4.6 に示す。ここでは、右岸と左岸に分けて 1km ごとに建物流失数と共に、流入支川分も表示している。これより、建物被害は 52kp より上流の左右岸において顕著であるとともに、37kp 支川（川内川）や 17-19kp 左右岸（八代市坂本町）でも甚大となっており、合計 305 棟が流失した。この中で人的被害が発生したのは、44kp 左岸（2 棟）と 59kp 右岸（1 棟）のみであり、水平避難が遅れていれば、さらなる人的被害発生につながった可能性が高い。

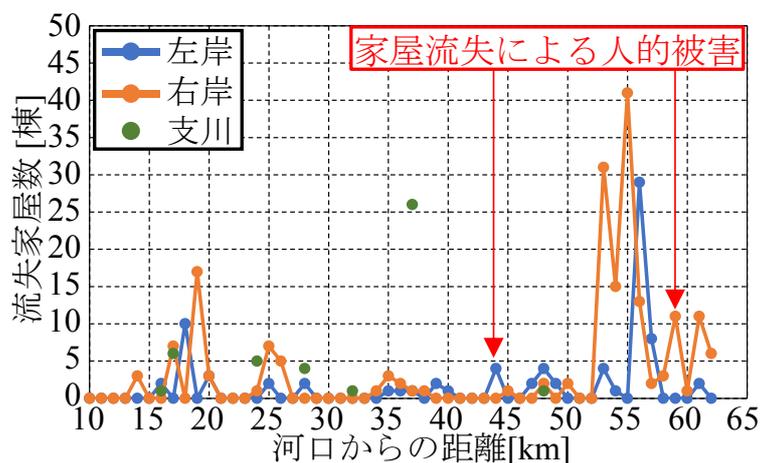


図 4.6 流失建物数の縦断分布

建物被害状況を詳細に検討するために、最大の被害があった球磨村渡地区・茶屋集落における建物被害・浸水深マップを図 4.7 に示す。これより、狭窄部入り口（図中点線）において、帯状に多くの建物が流失した。ここは、JR 肥薩線線路と河川堤防に挟まれた低地かつ狭窄部入り口という特殊な地形が高速流を生み、建物流失に至ったものと推察される。

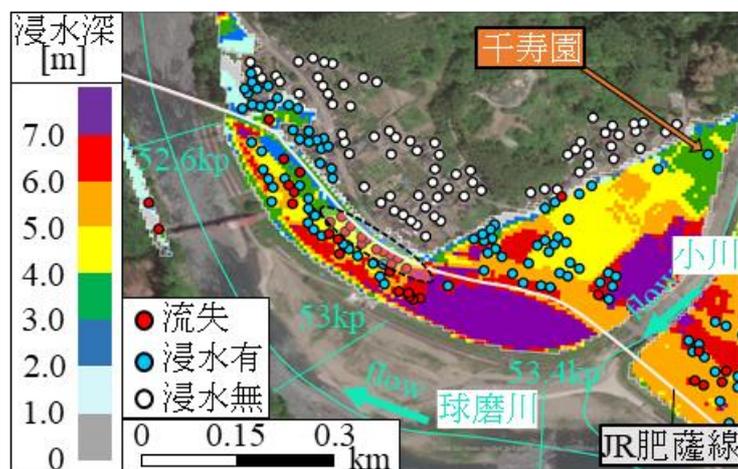


図 4.7 球磨村渡地区の建物被害・浸水深マップ

4.4 人的被害状況

人的被害の発生位置は、上流部人吉市が最大の25名、中流部球磨村が20名と続く。球磨村では特別養護老人ホーム・千寿園の入所者14名が犠牲となった。また中流狭隘部の芦北町や八代市・坂本町でも計5名が亡くなった。この犠牲者の被災時の状況をまとめたものを図4.8に示す。これより、被災場所（犠牲者が発災時にいたと思われる場所）は、自宅が44名、屋外（自宅前）が4名、不明は2名であった。これより自宅内やすぐそばが48名（全体の96%を）となり、大半の犠牲者が自宅に滞在し、水平避難をしなかった、もしくは試みたが間に合わなかったと考えられる。自宅内の発見場所としては、44名中1階が35名、2階が2名、自宅流失が7名であった。1階で発見された方の自宅は平屋が15名、2階建てが20名であり、垂直避難すらできなかった状況が過去の災害（2018年西日本豪雨や2019年台風19号）と同様に見られた。この20名中14名は前述の千寿園の入所者であり、要支援者の事前避難はもちろんのこと、万が一に備えた効果的な避難誘導対策の重要性が示唆された。また今次水害では2階建ての自宅2階で被害を受けたことや自宅流失の被害が多いことも大きな特徴であり、垂直避難が通用しない災害であったことが分かる。さらに浸水開始時間は日中が多いが（72%）、朝早い時間（AM5～7時頃）であったため、前日夜（就寝前）までに大雨予報が出れば住民の備えも変わったと推察される。

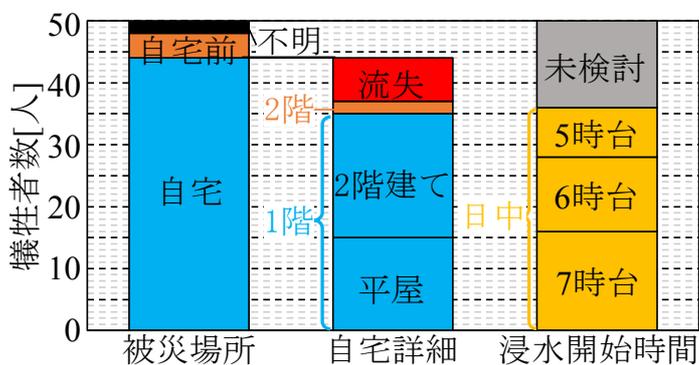


図 4.8 人的被害の被災状況まとめ

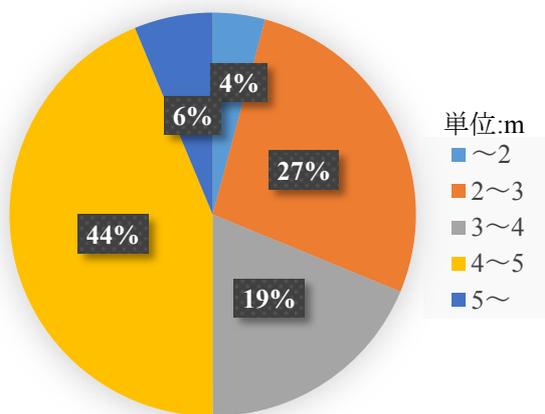


図 4.9 被災場所の浸水深

人的被害の被災要因として「不明」を除く48名に関する被災場所の浸水深を図4.9に示す。これより、浸水深2m以下も4%(2名)いるが、大多数は2m以上となっていることが分かる。このように、目安の下限値2mは屋内の床面基準では1.5m程度の水深に相当しており、大人が立てるかどうかの浸水

第4編

で人的被害が発生していることが分かる。また、今次水害では浸水深 5m 以上の犠牲者は 3 名おり、そのうち 2 名が自宅二階で発見された。

4.5 まとめ

球磨川流域における今次水害における人的被害の特徴としては、50 名という甚大な被害が発生したことに加えて、家屋流失による犠牲者 7 名と自宅 2 階で発見された 2 名がいたという垂直避難が通用しなかった事例が多く発生したことが挙げられる。このためには、早めの水平避難が必要となるが、氾濫開始が 7/4 の未明から早朝にかけて行ったことを考慮すると、前日夜の就寝前までに大雨予報が出されるべきであったと言える。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局にはデータ提供等で多大な協力を得た。また、浸水状況に関しては、九州大学・矢野真一郎教授、山口大学・赤松良久教授に情報提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

国土交通省九州地方整備局，熊本県：第1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8月25日），2020。

国土地理院：令和2年7月豪雨に関する情報，浸水推定図，https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R2_kyusyu_heavyrain_jul.html#9。

内閣府：令和2年7月豪雨による被害状況について（令和3年1月7日現在），2021。



図 5.2 球磨川渡地区付近の航空写真

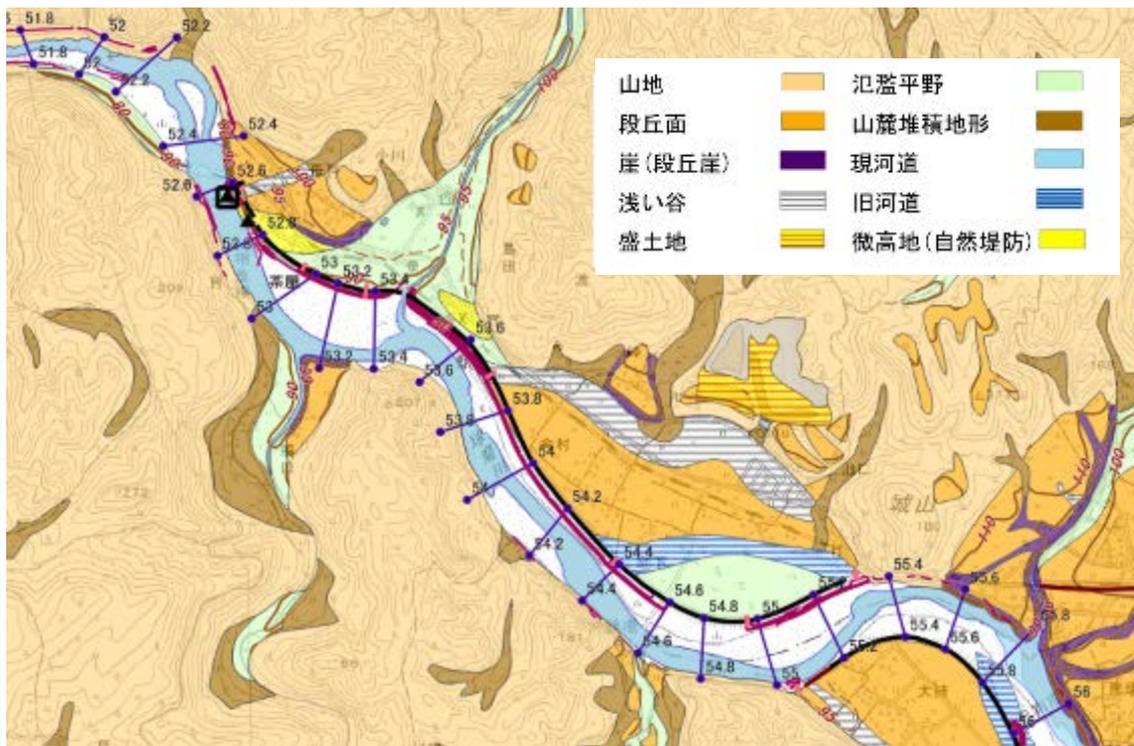


図 5.3 球磨川渡地区付近の治水地形分類図

集落では、上流側は氾濫平野、下流側は微高地（氾濫平野）であることが確認できる。

上記集落周辺の標高図（地理院地図にて作製）を図 5.4 に示す。地下集落では、旧河道部で低く、その背後の地盤高は高くなっている。そこから今村集落にかけて、地盤高は緩やかに低くなり、渡駅付近では 2m 程度高くなっていることが確認できる。下流の茶屋集落では、堤防と鉄道に囲まれた範囲で地盤は全体的に低くなっている。

球磨川上流部の洪水浸水想定区域図（計画規模）（国土交通省九州地方整備局）を、図 5.5 に示す。茶

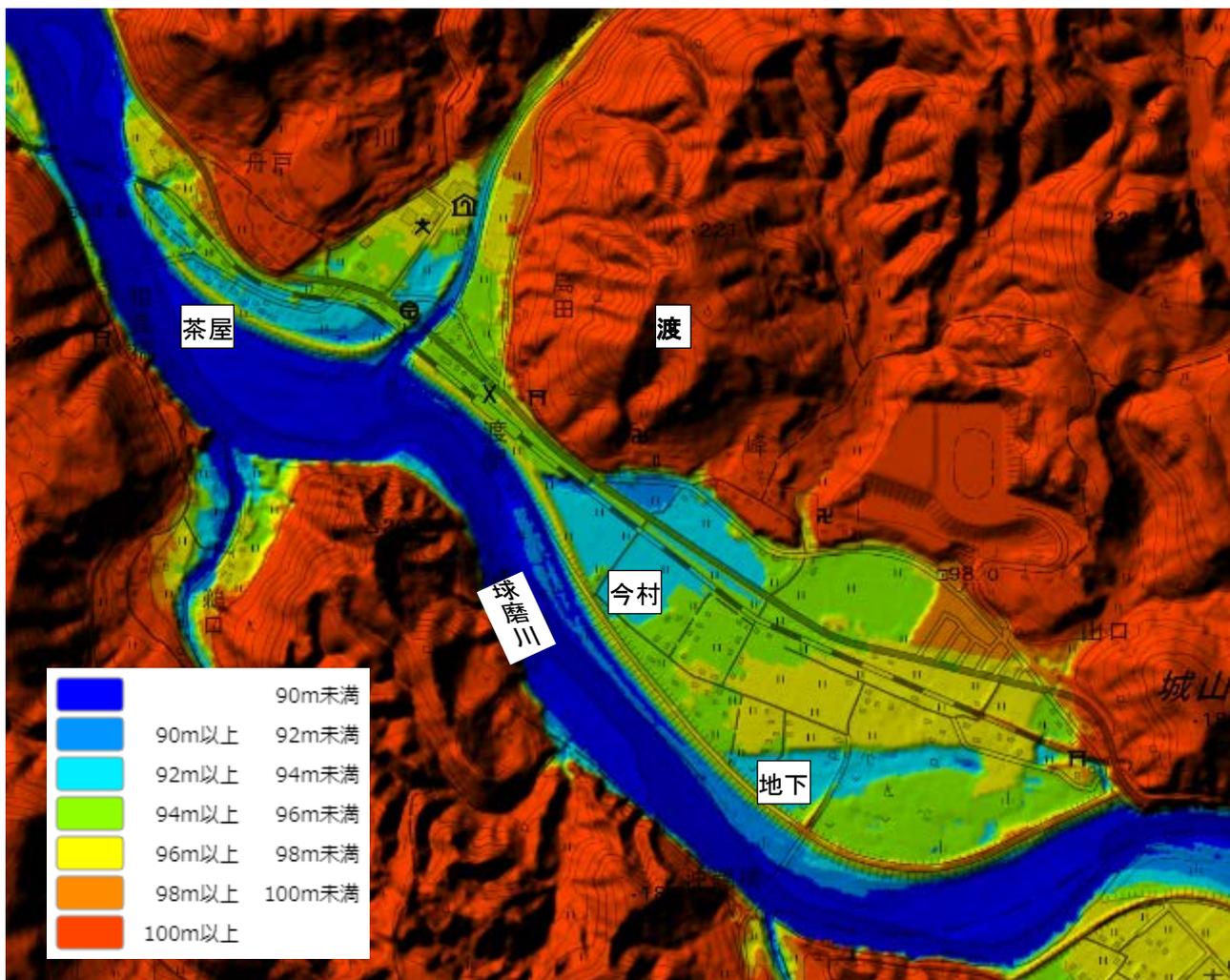


図 5.4 球磨川渡地区付近の標高

屋集落，今村集落，地下集落のいずれも浸水した場合に想定される水深は，0.5m～5.0mである。

洪水浸水想定区域図（家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流））を図 5.6 に示す。茶屋集落，今村集落，地下集落の家屋のほとんどが，家屋倒壊等氾濫想定区域に指定されている。

球磨村渡地区茶屋集落の被害の状況写真を図 5.7 および図 5.8 に示す。堤防と鉄道に挟まれた領域で，線路側の家屋が流失し，堤防側の家屋は流失を免れていることが確認できる。これは，洪水流が低水路や堤防に沿って流下したのではなく，右岸側支川の小川との合流地点付近で洪水流が導流堤（上久保，2014）や堤防を乗り越え，障害物が少なく流れやすい鉄道沿いに流れが集中し，そこを高速で流下したためだと考えられる。

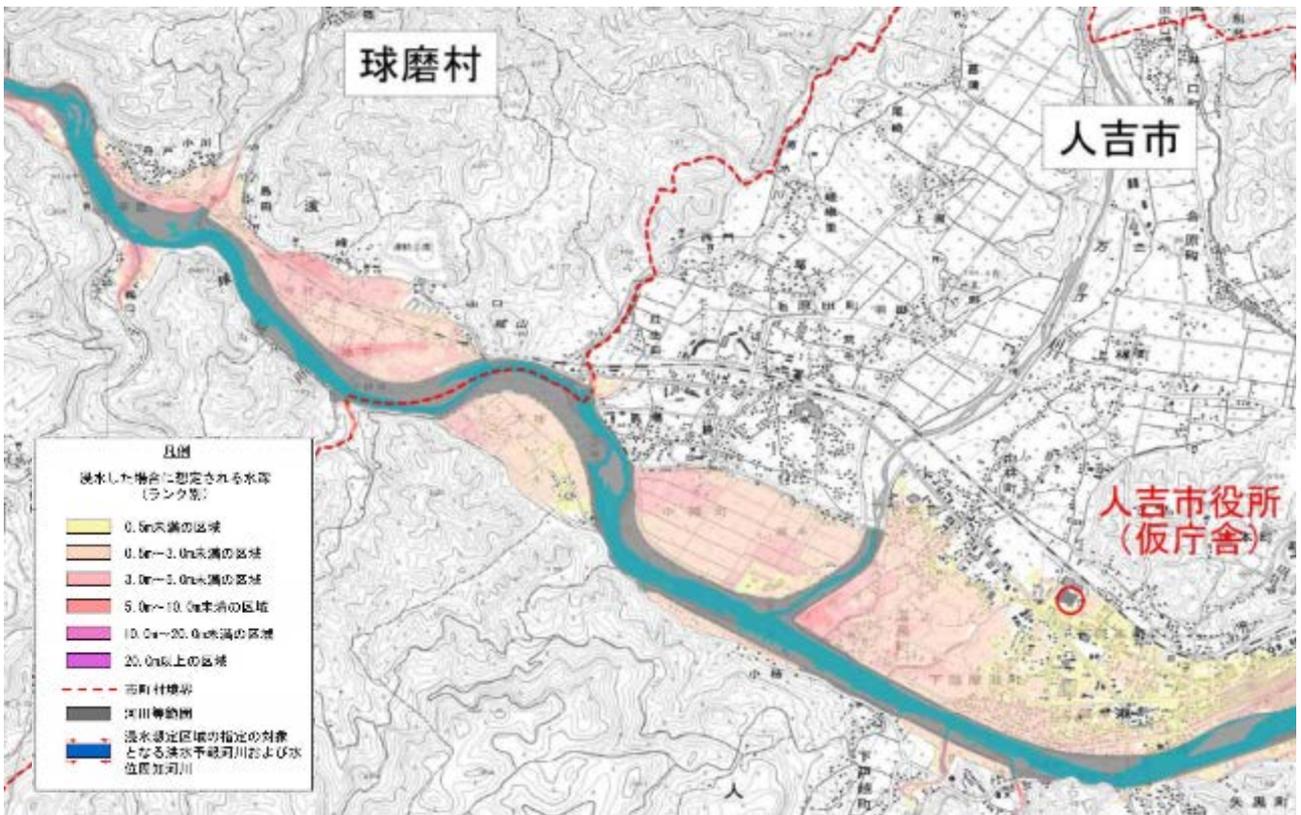


図 5.5 浸水想定区域図（計画規模）（国土交通省資料の一部。）

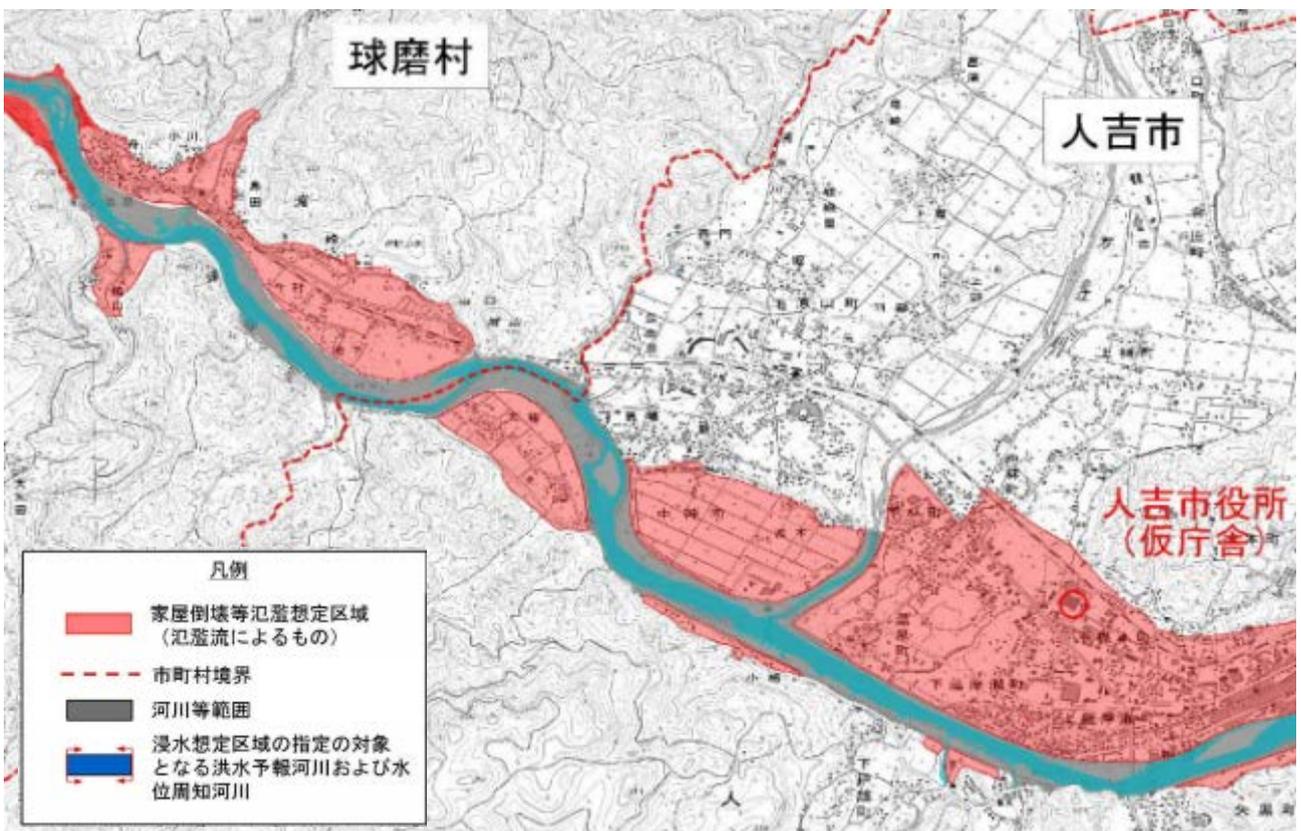


図 5.6 家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流）（国土交通省資料の一部。）

渡地区の家屋被害の内，流失家屋の位置を図 5.9 および図 5.10 に示す。家屋被害は被害度によって



図 5.7 被害の状況. 7月10日午前8時30分頃.
(球磨村渡地区) (熊本県資料)



図 5.8 被害の状況. 7月08日撮影.
(球磨村渡地区) (写真提供: 熊本大 大本先生)



図 5.9 球磨村渡地区茶屋集落の
家屋流失状況



図 5.10 球磨村渡地区地下・今村集落の
家屋流失状況

床下浸水, 床上浸水や, 軽微, 小破, 中破, 大破, 崩壊, 流失などに分けられるが, ここでは水害前後の航空写真から, 基礎だけを残してあるいは基礎もろとも上部構造の全体または大部分が消え失せていることが判別可能な, 流失のみを黒色の四角でプロットした. 球磨郡渡地区のうち, 球磨川上流側の地下集落および今村集落では, 集中した箇所で流失している様子は見られない. 図 5.4 の標高図と比較すると, 家屋流失が確認できたほとんどは 94m 以上 96m 未満の領域であった. なお, 地下集落上流の青色で囲んでいる箇所は, 植生が矢印方向に倒れているのが確認できた箇所である. この領域では流体力が徳に大きく働いたことが考えられる.

渡地区下流側の茶屋集落を見ると, 家屋流失の場所は集中しているように見える. 特に, 鉄道と県道に挟まれた領域で家屋流失が多いことが確認できた. このことから, 氾濫流はこの狭い範囲に集中していたと考えられる. なお, 赤で囲った3箇所の領域は, 流木の堆積が確認できた箇所である.



図 5.11 浸水推定および死者発生の位置（国土交通省，朝日新聞資料に加筆.）

表 5.1 各蛇行部における蛇行度と相対水深

	茶屋集落	地下・今村集落	大柿集落
蛇行度	1.20	1.26	1.61
相対水深	0.43	0.43	0.5

浸水推定図と水死の位置図（国土交通省，朝日新聞）を図 5.11 に示す。球磨村では 16 名の方が亡くなられており，その内の 14 名は，球磨川右岸側支川の小川の右岸にある特別養護老人ホームで亡くなられていた。

球磨郡渡地区の蛇行部の蛇行度（=蛇行流路長 / 蛇行波長）（石垣ら，2010）と相対水深（浸水深 / 蛇行河道部の水深），および人吉市の大柿地区の蛇行度と相対水深を表 5.1 に示す。蛇行度は上流から 1.61，1.26，1.20 であり，下流に向かって小さくなっている。相対水深は，上流から 0.5，0.43，0.43 であった。これらはすべて 0.3 を大きく上回っており，水位ピーク付近では高水敷から低水路への流れ込みによる二次流が卓越する複断面蛇行流れであったと考えられる。

5.3 洪水氾濫シミュレーションによる検討

氾濫水が集落や橋梁を襲い，家屋の流失に加えて，九州を横断する国道 219 号線や JR 薩肥線等の主要交通網も，浸水被害や橋梁流失の被害を受けた。ここでは，球磨郡渡地区の地下集落，今村集落，茶屋集落における，蛇行流れと氾濫流による流下型氾濫がどのような挙動で流下したのを知る

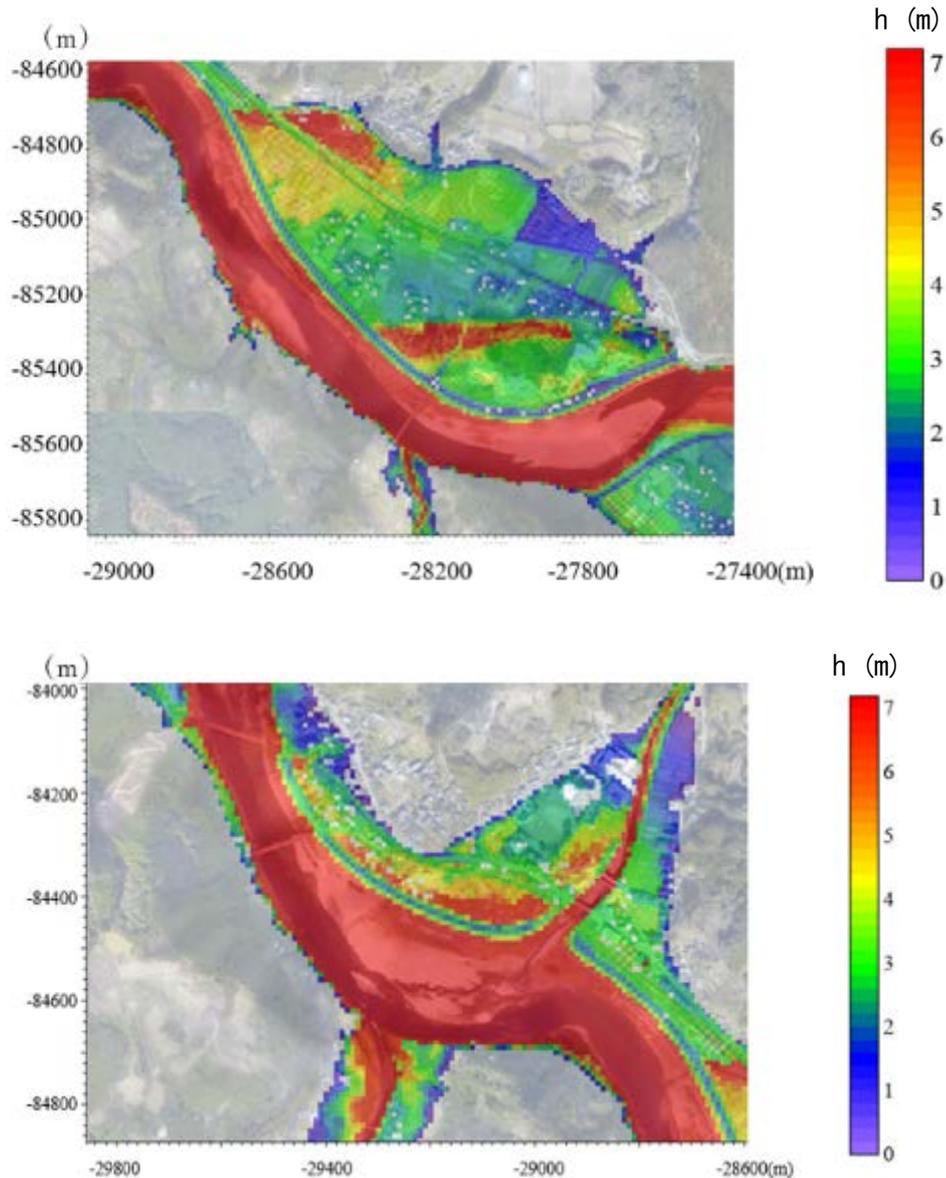


図 5.12 浸水深分布（上段：地下および今村集落．下段：茶屋集落）

ために、氾濫流解析から考察した。

氾濫解析に用いた地形データは、国土地理院・基板地図データ（5m メッシュ）を用いた。執筆時点で球磨川本川および支川の流量の情報はなく、ここでは茶屋地区の氾濫水深がおおよそ再現できるように試行的に決めた。その結果、球磨川本川のみを考慮して流量 $10,000\text{m}^3/\text{s}$ としてこれを一定時間与えた。参考までに球磨川の河川整備基本方針（国土交通省河川局，2007）によれば、河口から 62.2km の人吉地点の基本高水のピーク流量は $7,000\text{m}^3/\text{s}$ 、計画高水流量は $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 、計画高水位は 105.68m、河口から 52.6km の渡地点の計画高水流量は $5,500\text{m}^3/\text{s}$ 、計画高水位は 94.54m である。

地下、今村集落および茶屋集落における浸水深分布を図 5.12 に示す。図 5.11 の浸水推定図と概ね一致する。地下および今村集落では、蛇行部の上流側では、図 5.4 で地盤高が低い箇所、すなわち図 5.3 に示した治水地形分類図で旧河道の地形上で浸水深が大きいことが確認できる。蛇行部の下流側では、地盤高は国道 219 号線および鉄道の両側でほぼ等しいが、浸水深は北側が南側よりも大きくなった。これは、蛇行部の下流端で北側から山地が国道 219 号線まで張り出しており、それによって洪水流の流下

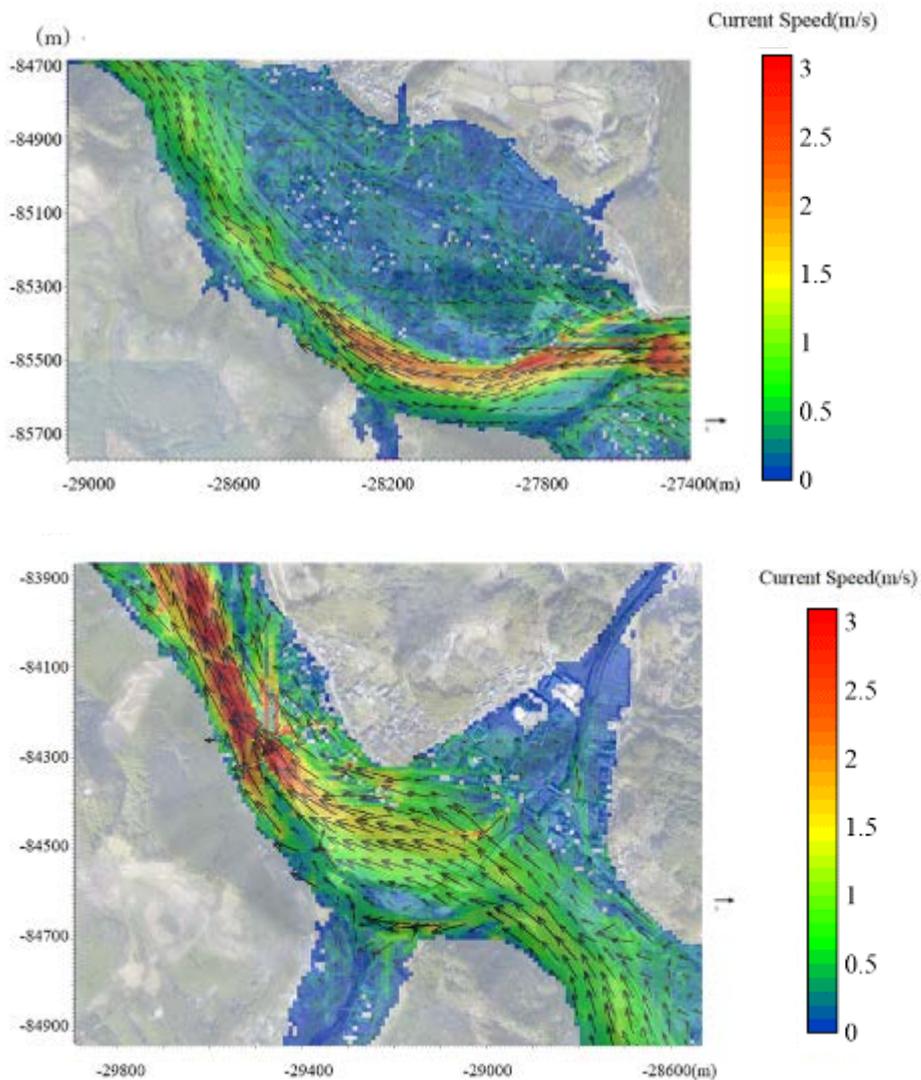


図 5.13 流速分布（上段：地下および今村集落．下段：茶屋集落）

幅が狭められ、山地と国道の盛土で挟まれた領域の水位が上昇したと考えられる。一方茶屋集落では、蛇行部の上流側である小川との合流地点から堤防に沿って、水深が大きいことが確認できる。この場所は、標高が堤内地の他の箇所よりも低い箇所である。図の真ん中付近で北側から山地が張り出し、流下幅が狭くなっているが、今村地区に見られた狭窄部の水位上昇は、この場所では明瞭に確認できない。

流速分布および流速ベクトルを図 5.13 に示す。地下および今村集落の蛇行部では、洪水流の主流部は概ね低水路に沿って流下している様子が確認できる。堤内地へは蛇行部の上流側から流入し、蛇行部の下流端で本川に戻っている。それに対して茶屋集落の蛇行部では、JR 渡駅の対岸側に形成されている主流部は蛇行部の上流側で低水路に沿って流下しておらず、右岸堤防に沿って主流部を形成していることが確認できる。これは、蛇行部上流部で左岸側にあった洪水流の中心部が、遠心力によって茶屋集落上流部の右岸堤防を乗り越えたと考えられる。また、堤防を乗り越えた流れは、そのまま直進して山地が北から南に張り出している所に向かって流下し、張り出しの頂部近傍で流速は速くなっている。それらの二手に分かれ流れは蛇行部下流側で合流し、流失した相良橋（図 5.14）付近で高速流となっていることが確認できる。

氾濫流が家屋に作用する力である流体力の分布を図 5.15 に示す。ここでは、よどみ点での速度圧



図 5.14 相良橋右岸の様子 (2020 年 12 月 07 日 16 時頃撮影)

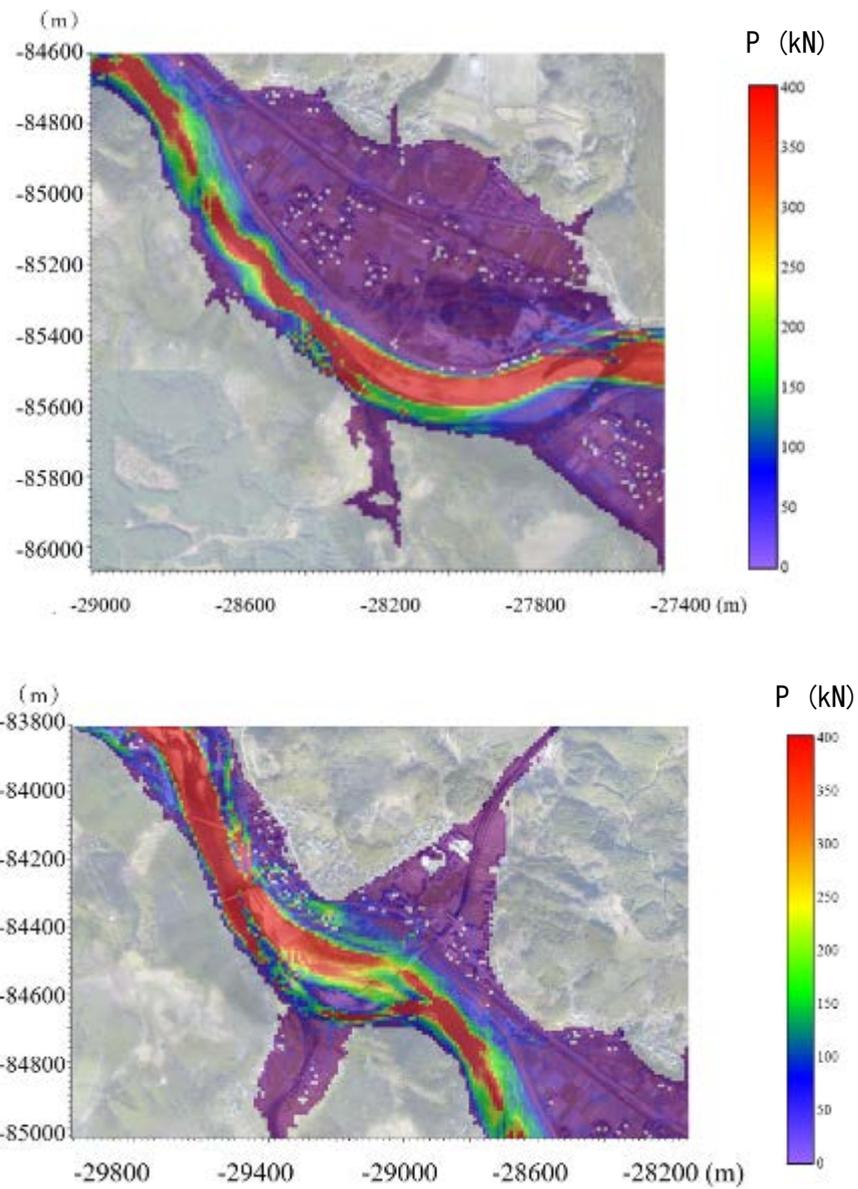


図 5.15 流体力分布 (上段：地下および今村集落. 下段：茶屋集落)

$\rho v^2 / 2$ と抗力係数 C_d を用いた次式で表した.

$$P = C_d \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot Bh$$

ここで、 C_d ：抗力係数、 B ：流れ直交方向の構造物の幅、 h ：構造物の影響を受けない接近流の浸水深である。今回、抗力係数はアメリカの連邦緊急事態管理庁 FEMA が推奨している $C_d = 2.0$ 、構造物の幅は $B = 10$ とした。

地下および今村集落の蛇行部において堤内地で流体力が大きいのは、上流端と下流端であることが確認できる。ただし、家屋流失箇所での明瞭な極大値は確認できなかった。茶屋集落においては、堤内地の鉄道に沿って流体力の大きい領域が形成されていることが確認できる。これは、航空写真で家屋流失が確認できた領域と概ね一致する。

5.4 まとめ

本調査によって得られた知見は以下の通りである。

- ・浸水想定区域図（計画規模）から、渡地区の水深は 0.5～5m とされていた。家屋倒壊等氾濫想定区域（氾濫流）によると、渡地区では山地以外の箇所はすべて指定されていた。そのような中で、今回の水害では茶屋地区の家屋流失が目立ったのは、堤防沿いではなく鉄道と県道に挟まれた領域であった。
- ・球磨川の球磨郡球磨村渡地区における氾濫流の挙動は流下型氾濫形態である。支川からの流入を考慮しない計算からは、氾濫流は連続した蛇行部の上流から堤防を乗り越えて堤内地に侵入したことが確認された。ただし、排水ポンプや支川合流点での導流堤などの整備が進む中で、計画規模を上回る氾濫流の流下が今回の被害をもたらしたことが認められた。
- ・渡地区における連続した蛇行部では、上流部では遠心力による堤内地への明瞭な流入は確認できなかったが、下流部では遠心力によると思われる堤内地への流入が見られた。茶屋集落ではその流れによって流体力が大きくなる箇所が生じ、そこは家屋流失が集中した箇所と概ね一致していた。

5.5 今後の課題

国内に多く見られる複断面蛇行河道が氾濫流の流下にどのような影響をおよぼすかを検証し、有用な治水対策を見いだすことが重要となる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局にはデータ提供等で多大な協力を得た。また、氾濫解析では卒業生の陳翔博士（現・水資源機構）の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

石垣泰輔，武藤裕則，Koji Shiono：複断面流れの構造と抵抗予測，ながれ 29，pp.177-186，2020。

上久保祐志，藤野和徳，岩部司，堂園俊多，的場孝文，村岡薫：球磨川流域における減災対応に関する官学連携の取組，土木学会論文集F6（安全問題），No.70，No.2，pp.I_53-I_58，2014。

熊本県：令和2年7月豪雨に係る「くまもと復旧・復興有識者会議」，会議資料，令和 2年 8月30日，<http://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/1/51191.html>。

桑村仁：建築水理学，水害対策の知識，技報堂出版，2017。

第4編

国土交通省河川局：球磨川水系河川整備基本方針，http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/river/kumagawa_kasen/kihon_seibi.html

国土交通省九州地方整備局：球磨川水系洪水浸水想定区域図，http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/bousai/kuma_shinsui.html

福岡捷二，小俣篤，加村大輔，平生昭二，岡田将治：複断面蛇行河道における洪水流と河床変動，土木学会論文集，621/II-47，pp.11-22，1999.

第6章 人吉市・中川原公園および橋梁が洪水流に与えた影響

熊本大学 大本照憲

6.1 人吉・球磨盆地の人的・物的被害

6.1.1 人的被害

図6.1は、令和2年7月の人吉・球磨盆地の人的被害36名と浸水深の状況を示す。人吉地区では、20人の人的被害が発生している。その中で人吉市では地表高の低い右岸側堤内地で浸水の範囲が広く、球磨川と山田川の合流点付近で浸水深が大きくなっていることが分かる。^{1~3)}

球磨川右岸に沿って多くの人的被害が発生したのは、中川原公園および水の手橋、大橋、人吉橋の橋桁の表面流阻害による水位の急激な上昇、その結果として2mを超える越流水深が発生したことが主因と考えられる。この件については、今後の対策を含めた詳細な検討が必要である。

また、万江川と球磨川の合流点付近も同じように浸水深が大きい。

球磨村・渡地区では、16人の人的被害が発生している。そのうち14名は介護老人施設の千寿園の入所者となっている。支川である小川からの氾濫流が主因であるが、この場所では小規模な土石流も発生した。

図6.2は、遥拝堰から球磨村渡の間の山間狭窄部では、氾濫流によって溺死として14名の内の13名が犠牲になった場所を示す。球磨川沿いの芦北町簞瀬地区でも1名が溺死で亡くなった。谷底平野では、水位が大幅に増水したため河道の一部となり、浸水深および氾濫流速とも極めて大きく、川沿いの住家の多くは基礎工を残すのみで流失した。

犠牲者の年齢構成は、50歳代4名、60歳代7名、70歳代10名、80歳代22名、90歳代7名であった。70歳を超えた割合は78%であり、高齢者の方々の犠牲割合が高いことが分かる。

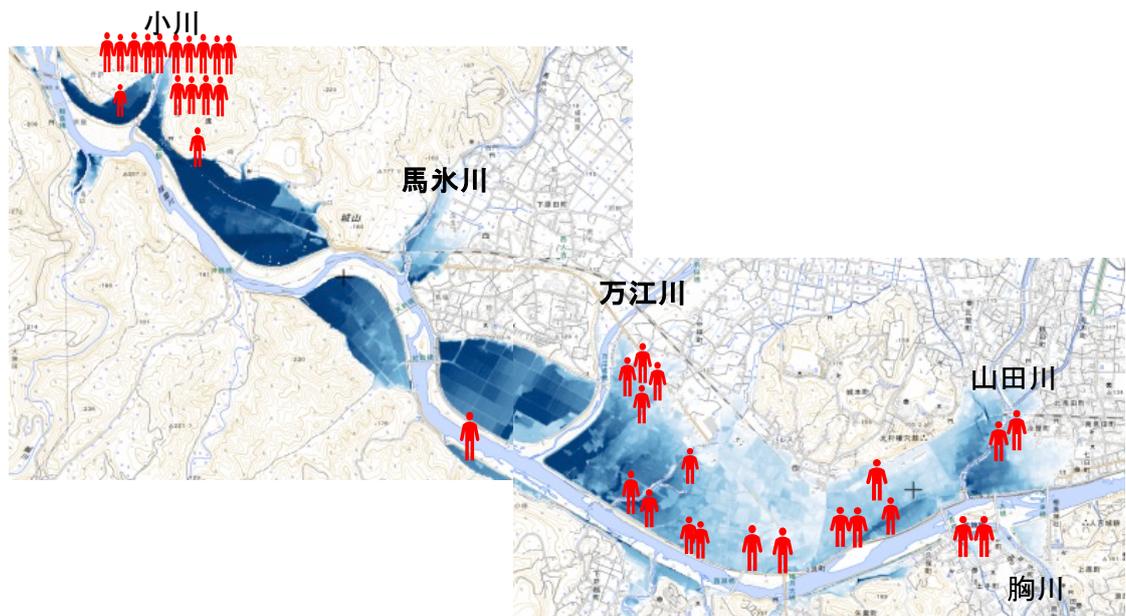


図6.1 人吉・球磨盆地における人的被害場所 (出典国土地理院および朝日新聞)

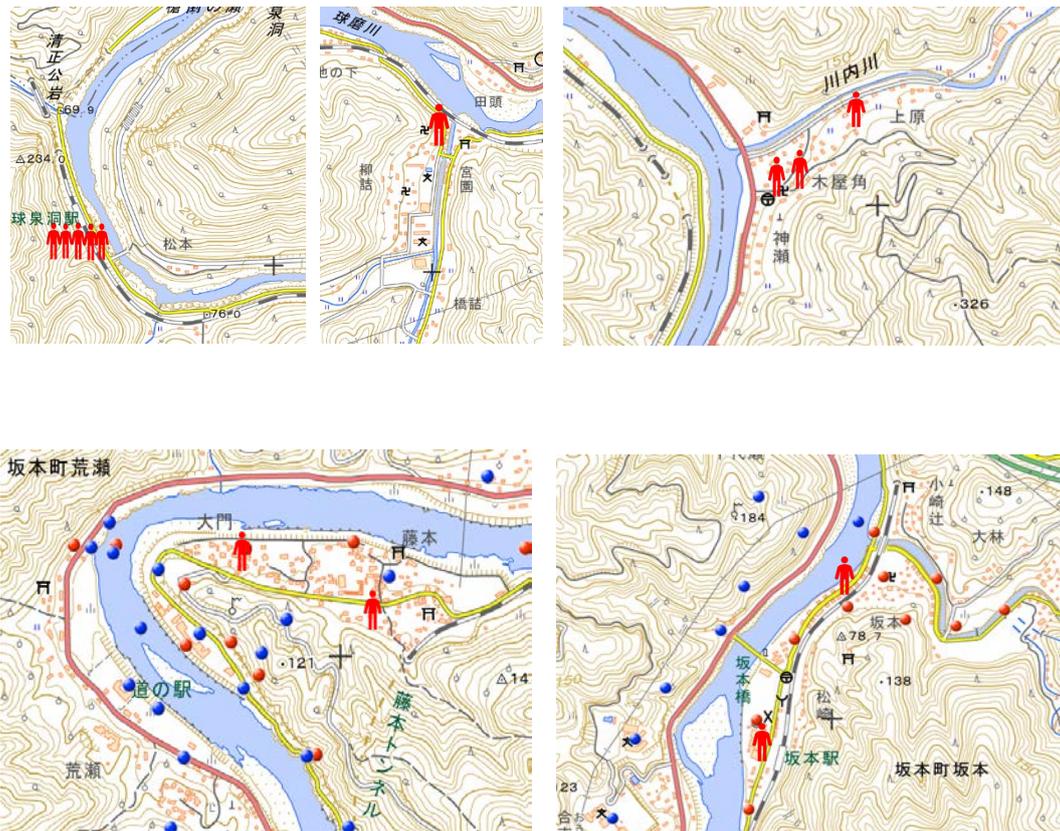


図 6.2 球磨川・山間狭窄部における人的被害場所

6.1.2 住家被害

球磨川の氾濫状況を象徴する箇所は、1)球磨川と山田川の合流部で地表高の低い青井阿蘇神社の近傍、2)万江川合流部の左岸側堤内地、3)万江川合流点から球磨村渡地区までの区間で連続した蛇行部および4)八代市坂本地区の家屋流失である。

図 6.3 は、青井阿蘇神社境内の楼門が 1.5m であったことを示す。人吉市史によれば寛文 9 年（1669 年）8 月に青井阿蘇神社の楼門が 3 尺 (0.9m) 余り浸水したことを示す。記録上、351 年間の中で今次水害が最大の浸水深であったことが分かる。境内の地表高は周辺の道路より 2.8m 高い位置にあり、道路標識には昭和 40 年の浸水深 2.3m に対して今次の令和 2 年水害では 4.3m に達し、2m も浸水深が大きい。なお、同一場所で昭和 57 年水害では 1.3m の浸水深であった。

図 6.4, 万江川合流部近傍で球磨川に近い堤内地の洪水痕跡を示す。家屋の流失は発生していないが、道路上では大量の土砂が堆積した。浸水深は、4m に達し、いずれも昭和 57 年水害の浸水深 1.2m を大幅に上回った。

図 6.5 は、人吉・球磨盆地の出口である球磨村・渡地区の被害状況を示す。渡地区では、浸水深が 6m を超えると同時に家屋の流失が顕著であり、基礎型枠のみが残る住家被害が目視された。また、家屋は全壊で屋根瓦の多くが剥がれているのが分かる。また、小川が球磨川に合流する地点では流木が住家の屋根や道路上に散在し、家屋は大破していた。灌木や雑草による洪水痕跡から浸水深は 6.2m であった。

図 6.6 は、渡地区上流の蛇行部に沿った堤内地の被害状況を示す。沖鶴橋付近の国道 219 号では電線の洪水痕跡から浸水深は、6m 近くに達していることが分かる。また、電柱や道路標識も転倒していることが分かる。なお、球磨川に近い沿道では電柱や道路標識は転倒していないことから 219 号線は氾濫流が短絡したことが考えられる。^{4~6)}



図 6.3 青井阿蘇神社周辺の浸水状況

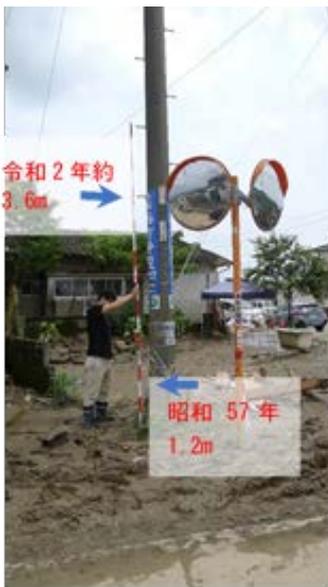


図 6.4 万江川合流部近傍で球磨川に近い堤内地の洪水痕跡

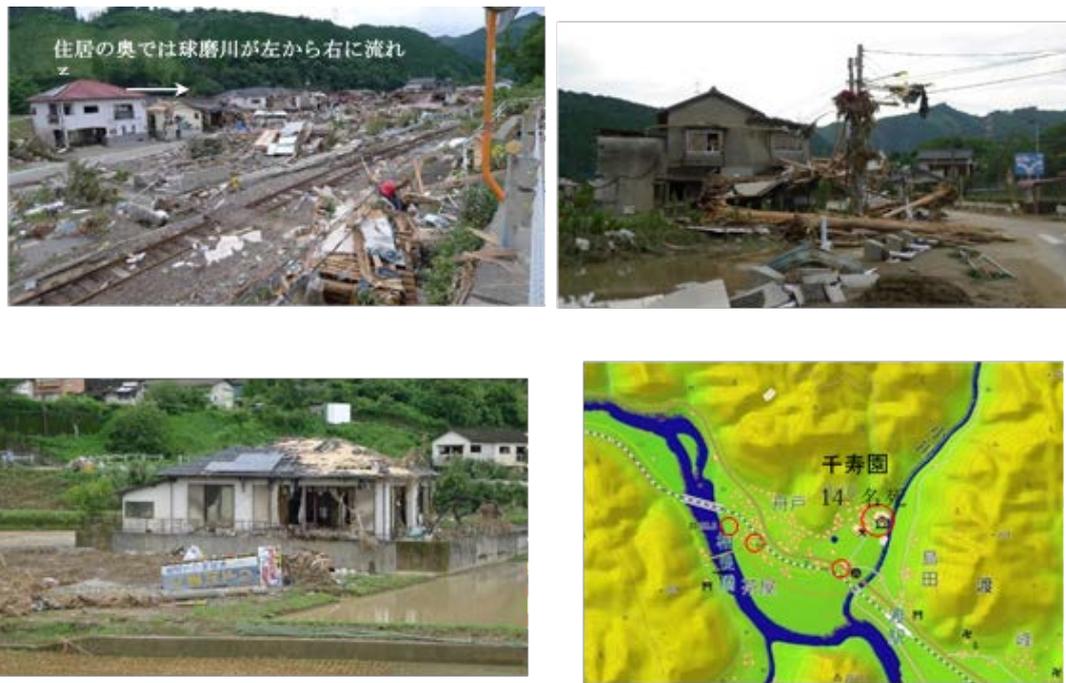


図 6.5 球磨村・渡地区における氾濫被害



図 6.6 万江川合流部近傍で球磨川に近い堤内地の洪水痕跡

第4編

万江川合流点から球磨村渡地区までの区間では、連続した蛇行が続き、蛇行度 S は、下流から上流に向けて1.20, 1.26, 1.61であり、蛇行区間の堤内地の浸水深は何れも6mを超えた。災害時における河道部の代表水深が13~15.5mの範囲にあることから、相対水深は0.39~0.46の範囲にあり、相対水深が0.3を超えると複断面蛇行流れの流況を示す(福岡ら)。即ち、堤内地の浸水が低い場合には単断面蛇行流れとなるが、浸水深が大きくなれば堤内地から河道部への流れ込みによる影響が大きく河道部の二次流は堤内地の流れ込みに支配され、更に、堤内地の氾濫流は直進性が高まり高速化されたことが予想される。

6.1.3 人吉市・中川原公園の浸水状況

図6.7は、2020年11月19日にドローンを用いて撮影した人吉市中川原公園および上流の水の手橋、大橋、人吉橋を示す。また、右支川の山田川および左支川の胸川が球磨川に合流する。

図6.8は、球磨川絵図に示された人吉市街部を示す。中川原公園は、河道中央部に発生した礫洲を固定化したものである。この礫洲は、右岸側の濠筋に架かる大股橋、左岸側の濠筋に架かる小俣橋を接続するために利用されていた。人吉市史によれば、大股橋、小俣橋の最初の普請は1607年、伊能忠敬(1810年)の測量では「球磨川二流、大股63間(115m)、小俣51間(93m)」であるとの記載があった。球磨川の大橋地点における川幅は、江戸後期で208mであるのに対して現在は、240mあり、更に周辺の河道幅より広がっていることが分かる。中洲の固定化により河岸浸食が進行したことが予想される。

リスクマネジメントでは、リスクはハザード、暴露および脆弱性の3点から評価される。人吉市は、



図-6.7 中川原公園および水の手橋・大橋・人吉橋 (2020.11.19撮影)

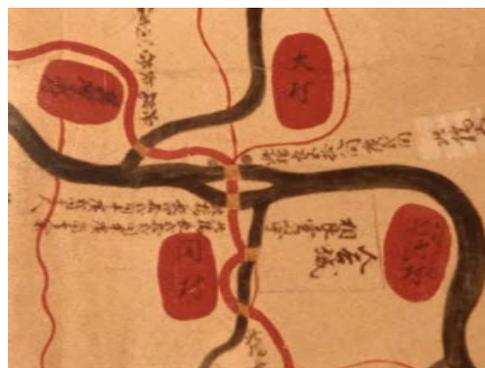


図-6.8 江戸後期の球磨川絵図(大股橋、小俣橋)

第4編

四方を山で囲まれた盆地であり各流域から出水した河川流量が集中しやすい地形でありハザードが大きく、人口・資産が集中した中核都市であることから暴露も大きく、更に山田川および胸川の合流、礫洲による自然起源の脆弱性、3本の橋が加わることによる流下能力の低下に伴う人工起源の脆弱性が高い場所となっている。

図6.9は、山田川が球磨川に合流部する近傍で4名が溺死した地点の浸水状況を示す。

河川管理用道路が人吉橋に交差する地点では、橋桁下から道路までの高さ1.6m、特殊堤の高さ0.9mである。そのため、特殊堤天端から橋桁までの高さは僅か0.7mしかないことが分かる。橋桁の高さ1.6m、高欄1.0mであり、ゴミが高欄に引掛かれば高さ2.6m長さ200m相当の横断構造物として表面流の障害物となったことが予想される。大橋および水の手橋にも高欄にゴミが引掛かっていることが確認された。

人吉橋の直上流の右支川である山田川では、午前8時頃にはバックウォーターにより球磨川から山田川上流に遡上する流れ、10時頃には道路橋および鉄道橋が水没していることが熊本県の監視カメラの録画(球磨川鉄道橋地点)により確認出来た。

特に、大橋では高欄が漂流物により破壊されていること、また、水の手橋の直上流の右岸近傍に住み、被害を受けた方々からの聞き取り調査では水の手橋の主桁に流木が当たり始めたころから急激に特殊堤から越流氾濫が発生したとの証言を得た。



図 6.9 球磨川と山田川の合流部近傍 (4名溺死)

第4編

6.1.4 危機管理型水位計による水位ハイドログラフ

図 6.10 は人吉観測点(61km/137), 球磨川と川辺川の合流点近傍の柳瀬観測点(66km/400)および人吉大橋に設置されている危機管理型水位計(61km/512)における水位時系列を示す。柳瀬観測点では7月4日9時においてピーク水位 8.07m, 人吉大橋危機管理水位計では同日9時50分にピーク水位 7.25m を記録した。また, 7時30分から8時00分までの30分で0.9mの急激な水位上昇が発生している。越流氾濫は, 13時10分頃に終わっていることが分かる。

図 6.11 は, 球磨川の大橋地点および熊本県により球磨川合流点近傍の山田川に設置された危機管理型水位計を基にした越流水深である。なお, 堤防高さは, 計画堤防高を基準としているため実際の越流水深とは若干異なることが考えられる。

山田川の水位は, 7月4日午前7時30分までは球磨川の水位より若干高い値を示し, 7時50分~8時40分の間ではほぼ一定の値 1.2m を示し, その後11時まで欠測となり, 12時過ぎから急劇に低下し, 13時20分には越流氾濫が止まっていることが分かる。

記録上, 人吉観測地点における最高水位は昭和40年7月2日に5.05mであったが令和2年7月4日では7.25mに達し, 2.2m上回ったことが分かる。

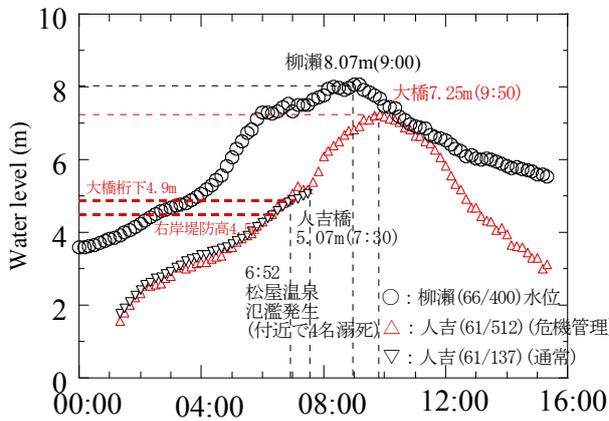


図 6.10 人吉における水位ハイドログラフ

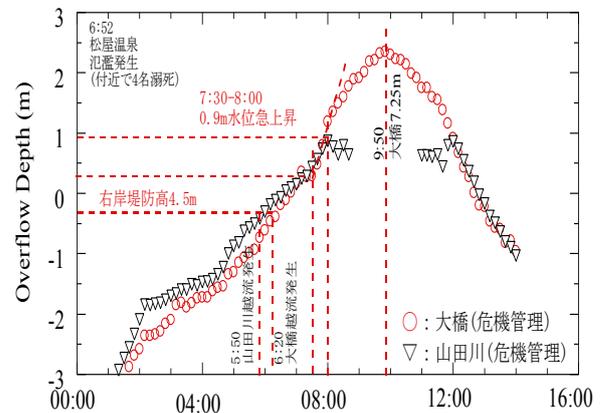


図 6.11 越流水深の時系列

6.2 人吉・球磨盆地の河道形状

図 6.12 は, 人吉・球磨盆地における平均河床高および堤防天端の縦断分布を示す。図 6.13 は, 河道満水状態における水深の縦断分布を示す。渡地区から柳瀬地区の間で平均河床勾配は, 1/550 であることが分かる。なお, 人吉・球磨盆地では, JR 橋梁の球磨川第二橋梁, 第三橋梁, 第4橋梁の流出3本, 道路橋では相良橋, 沖鶴橋, 天狗橋, 西瀬橋の流出4本であった。JR 橋梁は何れも十分なクリアランスが無かったこと, 道路橋もクリアランス不足であると同時に下流域に集中している。

平均河床高から堤防天端までの水深は, 52km/600~71km/00の間では縦断方向の平均値は 9.64m であるが, 河口から上流 61km~62km では 5.9m~7.2m 程度であり, 河道満水状態の水深が 3m 近く小さくなる事が分かる。この区間には, 中川原公園が存在するために流水断面積が小さくなり, 流下能力が低下すること予想される。

図 6.14 は, 2021年7月豪雨災害の前後における人吉橋~水の手橋の間における河床横断形状を示す。中川原公園を横断する河道断面 61km/400, 61km/600 であり, 61km/400 における滞筋部は右岸側で 97.0m, 左岸側で 98.2m の高さ, 中川公園の地表高は最大で 103.6m あることから平均的標高差は 6.0m, 61km/600 においても標高差は 6.0m であり, 水深相当の高低差がある。また, 災害前後の河床変動は, 大橋下流に

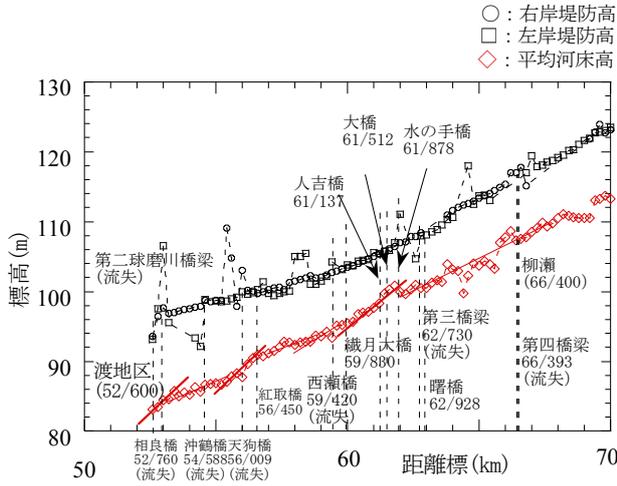


図 6.12 平均河床高の縦断変化

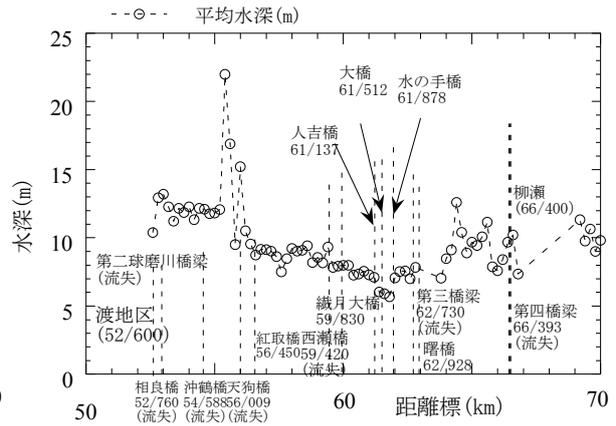


図 6.13 河道満水状態における水深

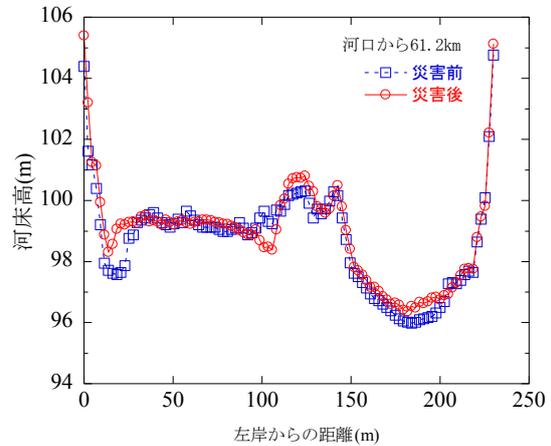
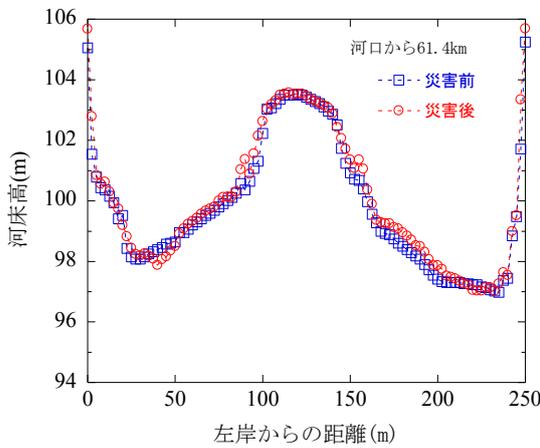
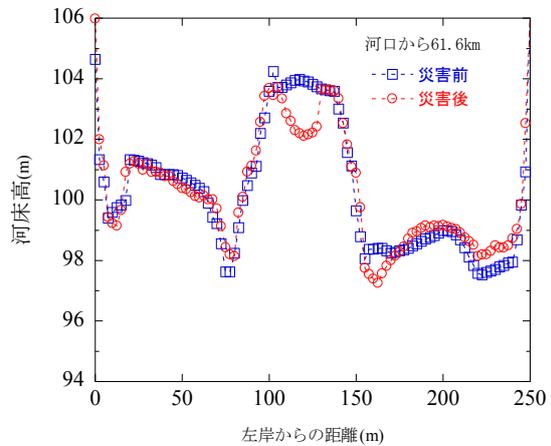
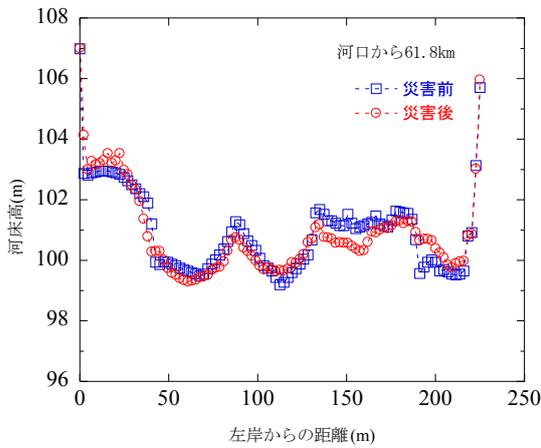


図 6.14 河道横断形状

における平均河床高は、61km/200 では 0.22m 上昇、61km/400 でも 0.22m 上昇した。

一方、大橋上流における平均河床高は、61km/600 では 0.03m 上昇、61km/800 でも 0.07m 低下した。人吉橋～大橋の間では、若干河床上昇する傾向があり、大橋上流では顕著な河床変動は無いことが分かる。局所的には、河岸付近で 1.6m 程度土砂の堆積が見られ、大橋直上流の 61km/600 では中川公園において 1.8m 程度の洗掘が生じたことが分かる。

6.3 中川原公園および橋梁が洪水流に与える影響

6.3.1 実験概要

洪水最盛期に人吉橋、大橋、水の手橋の3橋は水没した。また、中川原公園の現地調査から、中川公園および3つの橋梁は洪水時の水位を高め、球磨川右岸側の氾濫流を強めたことが示唆された。このため、人吉橋から水の手橋の間における洪水流を再現するために縮尺1/400で水理模型実験を実施した。なお、模型実験では既存の室内開水路を用いたため、両岸からの越流氾濫は発生させていない。右岸側支川の山田川および左岸側支川の胸川も再現されていない。このため、最盛期にはバックウォーターにより球磨川から山田川および胸川への逆流、両支川からの氾濫も無視した。また、中川原公園には樹木やトイレもあるが、これらも模型では省略した。本実験では、水没した中川原公園および3本の橋梁が洪水流の水位に与える影響を単純化した境界条件の下で検討した。

6.3.2 中川原公園および橋梁の模型

中川原公園は、ドローンを用いた地形測量を基に3Dプリンターにより模型を作成した。中川原公園を除いた河床地形は、計画粗度 $n=0.03$ のみを再現した平坦河床としている。また、3つの橋梁は現地調査により橋長、橋脚、橋桁、高欄を1/400で再現している。

図6.15および6.16は、中川原公園の地形および3Dプリンターによって作成した模型を示す。特に、中川原公園を横断する大橋では、川幅245mに対して橋脚は5本あり、中央の橋脚の支間長は約45mであり大橋地点では2径間の92mが中川公園により塞がられていた。このため、6径間の内の約2径間では流下能力を失うことになり、大橋地点では治水上弱点となることが予想される。

大橋から中川原公園への取付け道路を下った地点から目視した橋脚周辺では局所洗堀が発生していることが認められた。このことは、大橋直上流の61km/600における中川公園の局所洗堀1.8mとも対応している。また、中川原公園には代表径20~30cm相当の巨石が散在していた。

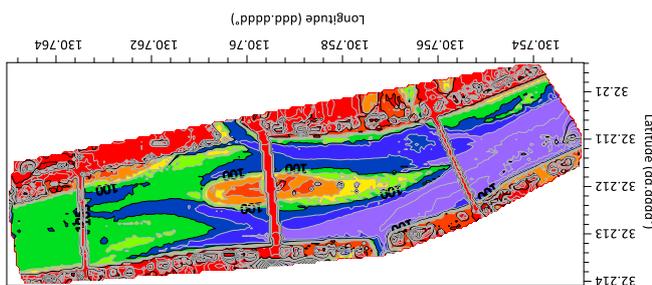


図 6.15 人吉市・中川原公園の地形



図 6.16 中川原公園の3Dプリンター

6.3.2 実験装置および方法

実験に使用した水路は、図6.17の様に長さ15m、幅60cm、高さ40cmの可変勾配型の循環式直線水路である。国土交通省九州地方整備局によれば人吉地点上流での氾濫がなく、さらに市房ダムが無かった場合に想定されるピーク流量は、概ね $8,000 \text{ m}^3/\text{s}$ であることが推定されている。本実験では流量を $8,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、参考流量として $6,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ の3種類を対象とした。流れは、常流であることから下流端の堰により人吉橋下流の200m位置において所定の流量に対する等流水深に設定した。

流速の計測には、非接触型の代表的な画像処理法であるPIV(Particle-Image Velocimetry)法を用い

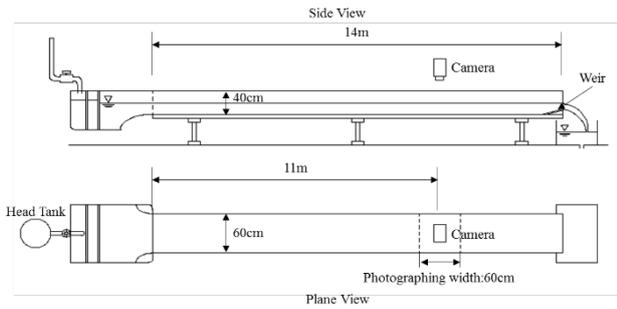


図 6.17 実験水路

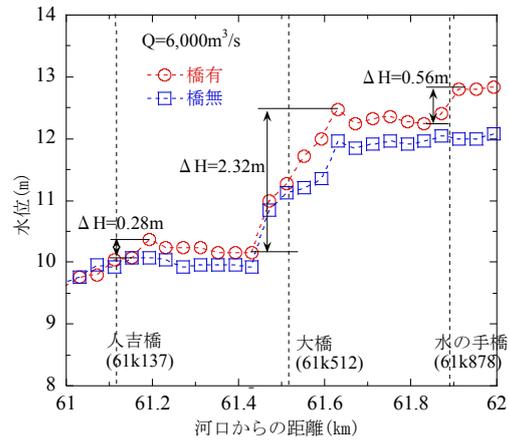


図 6.18 水位の縦断方向変化 (6,000 m³/s)

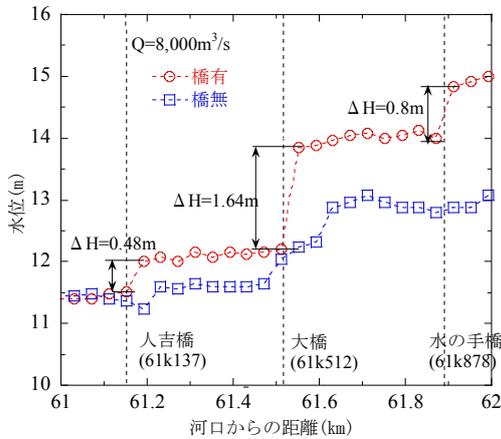


図 6.19 水位の縦断方向変化 (8,000 m³/s)

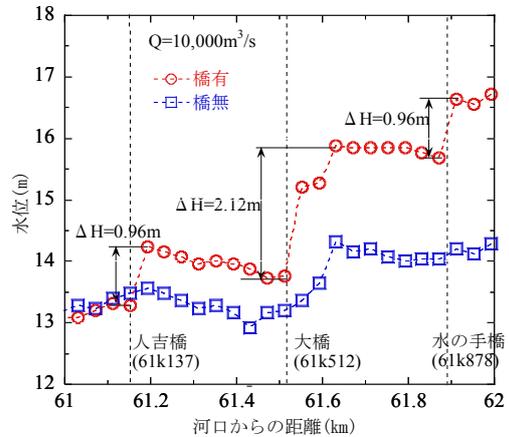


図 6.20 水位の縦断方向変化 (10,000 m³/s)

た. 勾配 1/300, 1/500 においては 125fps (frame per second), 1024×1024 (pixel) のモノクロビデオ画像として, 勾配 1/60, 1/100 においては 250fps, 1024×1024 (pixel) のモノクロビデオ画像としてコンピュータのハードディスクに記録され, PIV 法により画像処理を行った. 表面流速のトレーサーとして粒径 100 μm, 比重 1.02 のナイロン粒子を注入した. また, 水面下の主流方向, 横断方向および鉛直方向の流速は, I 型および L 型のセンサーを用いた電磁流速計により計測した. 水位は, ポイントゲージを用いて計測した.

座標系は, 大橋地点における右岸の河床を原点とし, 流下方向に x 軸, 横断方向に y 軸, 鉛直上方に z 軸を取る. x 軸は大橋の位置を原点にとり, y 軸は右岸を原点とした.

水位は, 大橋を基準に上流 480m, 下流 560m の区間において 40m おきに 26 測点を取り計測した. また, 水面下における流速の計測断面は, 中川原公園の先端部 x=-200m, 頂部 x=80m, 末端部 x=400m に, x=-60m, x=240m の 2 計測線を加えた計 5 計測断面とした. 各断面の計測位置は, 横断方向には 20m おきに 11 点, 鉛直方向には河床から z=4m, 6m, 8m である.

6.3.3 中川原公園および橋梁が水位に与える影響

図 6.18~6.20 は, 各種流量における縦断方向の水位変化を示す. 橋梁の水位への影響は, 流量 6,000 m³/s では, 表面流が橋桁に衝突していないことから橋脚のみの影響に対して, 流量 8,000 m³/s および 10,000 m³/s では, 表面流は全ての橋桁に衝突した.

流量 6,000 m³/s では, 橋梁が無い場合には人吉橋 61km/137 から 61km/400 の区間では水位の変化は若

第4編

干低下傾向を示すが顕著な変化は無いが、61km/400より上流方向に急激な水位上昇が見られ61.43kmから61.63kmの200m間で、2m程度の上昇が読み取れる。橋梁が有る場合には、橋梁が無い場合に較べて人吉橋～大橋の区間では大差はないが、大橋より上流では顕著な水位上昇が見られ、水の手橋より時直上流では、橋脚の影響により0.76m高くなることが認められる。

流量8,000 m³/sの水位は、橋梁が無い場合には流量6,000 m³/sの水位とは類似の変化傾向を持ち、人吉橋～大橋の区間では顕著な水位上昇は無く、大橋付近で上流方向に顕著な水位上昇が見られ、61.47kmから61.67kmの200m間で、1.44m程度の上昇が読み取れる。橋梁が有る場合には、橋梁が無い場合に較べて水位が人吉橋～大橋の区間では約0.5m高くなり、大橋より上流では大橋直上位置で1.6m、水の手橋直上位置で1.96mであることから、人吉橋、大橋および水の手橋の3橋梁により最大で2m近く水位を高め、特に大橋より上流でその影響は大きいことが分かる。

流量10,000 m³/sの水位は、橋梁が無い場合には流量6,000 m³/sおよび8,000 m³/sの水位とは大きく異なり、中川原公園の縦断形状に対して逆位相の関係を持ち人吉橋～大橋の区間では人吉橋近傍61.19km地点で最大値13.56m、61.43km地点で最小値12.92mを示し、大橋より上流61.63kmで最大値14.32m、これより上流では大きな変化は無いことが分かる。橋梁が有る場合には、橋梁が無い場合に較べて水位が人吉橋～大橋の区間では約0.8m高くなり、大橋直上流では61.63km位置で1.5m高く、水の手橋直上流61.91km位置で2.4m高くなる。

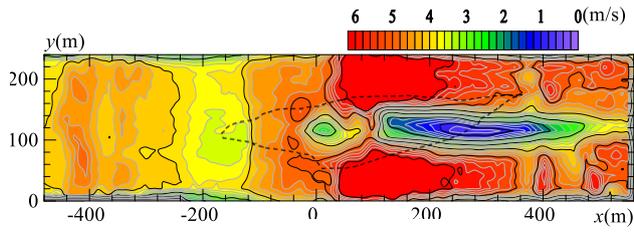
中川原公園は、大橋近傍より上流において急劇に水位を上昇させることが流量6,000 m³/s、8,000 m³/sおよび10,000 m³/sの全てにおいて認められた。特に、流量8,000 m³/sでは橋梁が無い場合には大橋上流で1.44m程度の水位上昇、更に橋桁が水没する場合には橋梁が無い場合に較べて、大橋直上位置で1.6m、水の手橋直上位置で1.96mであることが明らかにされた。なお、本実験では越流氾濫が無い条件下での結果であり、実際より大きくなる傾向がある。

6.3.4 中川原公園および橋梁が表面流速に与える影響

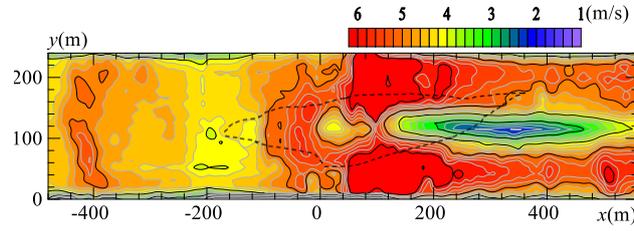
粒子画像流速計測法PIVから得られた流量6000 m³/s、8000 m³/sおよび10000 m³/sにおける河道内の主流速Uおよび二次流の横断方向成分Vのカラー・コンターを、各々、図6.21～6.24に示す。

主流速Uは橋梁がない場合には、いずれの流量でもx=40m～200mまでの区間で流速が6m/sを超える流速が現れている。この区間は中川原公園によって河道が狭くなっている区間でありこの区間で加速域になっていると考えられる。また、流量6000 m³/sおよび8000 m³/sでは、中川原公園上の120m<x<520m、80m<y<140mの領域で流速が1m/sから3m/sの低速の領域が見られる。流量10000 m³/sでは6000 m³/sや8000 m³/sほど顕著な低速域は見られないが、200m<x<480mの比較的狭い範囲で流速が2m/sから3m/sの低速域が存在している。橋梁がある場合では、橋梁がない場合に比べて流速が小さくなるが、40m<x<360mの区間において濤筋部で高速域が形成されている。また、橋梁がない場合と同じ領域で低速域も形成されている。橋梁がある場合は、トレーサーが橋脚や欄干にたまりデータの信頼性が低い区間がある。

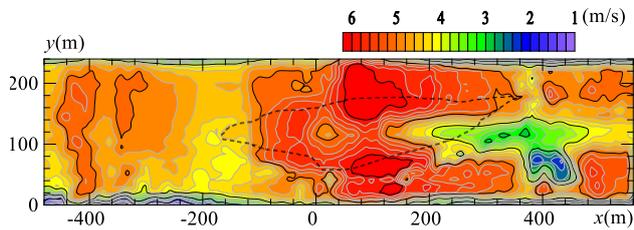
二次流の横断方向成分Vでは、いずれの流量においても橋梁がある場合とない場合にかかわらず、中川原公園上流側である-200m<x<0mの区間で右岸では右岸方向の流速が現れ、左岸では左岸方向の流速が現れている。このことからこの区間ではyが100mから120m付近で発散するような流れが生じていることが考えられる。一方、中川原公園下流側である200m<x<520mの区間では、0m<y<100mにおいて左岸方向の流速が現れ、100m<y<200mにおいて右岸方向の流速が発生している。このことからこの区間では100m<x<140mの区間で収束するような流れが生じていることが考えられる。



(a) 6,000 m³/s

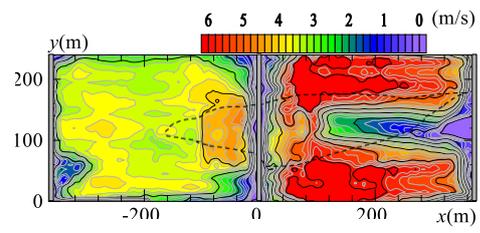


(b) 8,000 m³/s

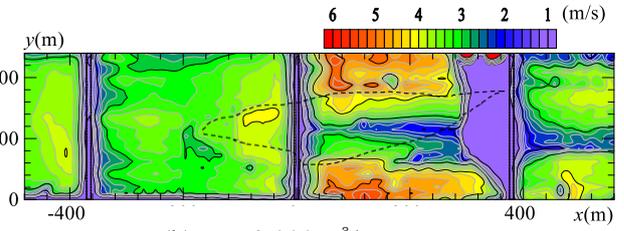


(c) 10,000 m³/s

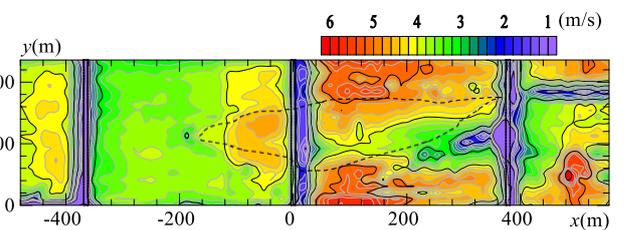
図 6.21 主流速 U のコンター (橋無)



(a) 6,000 m³/s

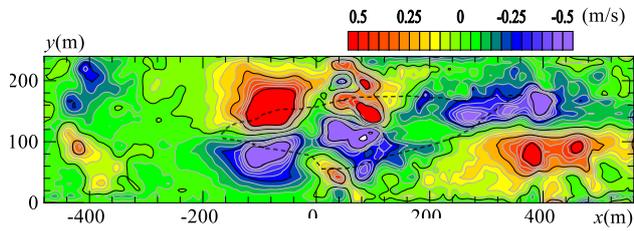


(b) 8,000 m³/s

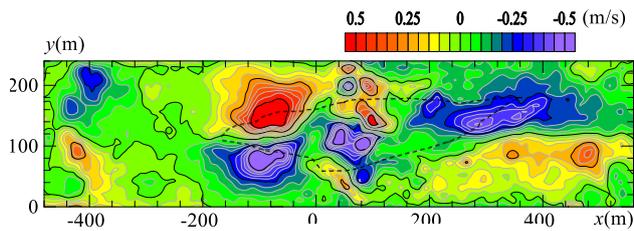


(c) 10,000 m³/s

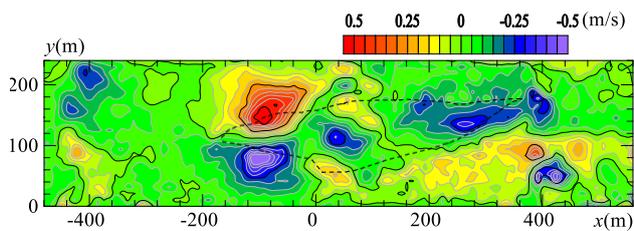
図 6.22 主流速 U のコンター (橋有)



(a) 6,000 m³/s

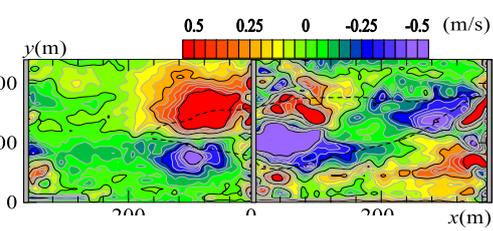


(b) 8,000 m³/s

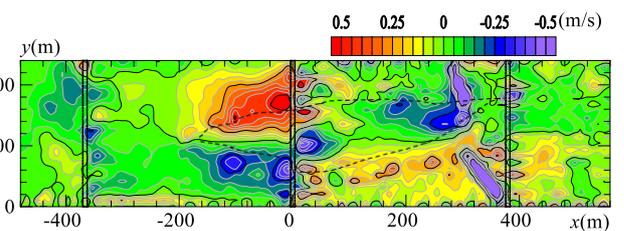


(c) 10,000 m³/s

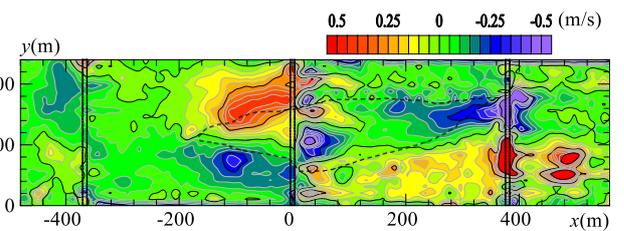
図 6.23 二次流 V のコンター (橋無)



(a) 6,000 m³/s



(b) 8,000 m³/s



(c) 10,000 m³/s

図 6.24 二次流 V のコンター (橋有)

第4編

6.3.5 表面流の解析による上昇・下降流の同定

表面流における連続条件から、

$$(\partial U)/\partial x = -((\partial V)/\partial y + (\partial W)/\partial z) \quad (1)$$

となる。水表面で $W = 0$ を仮定すれば、

$$\partial W/\partial z > 0 \quad \text{下降流} \quad (2)$$

$$\partial W/\partial z < 0 \quad \text{上昇流} \quad (3)$$

となる。

図 6.23 およびは 6.24, 各々, 表面流速の主流方向成分 U および横断方向成分 V の空間勾配から得られる式(1)の右辺を表している。表面流の解析によって得られた上昇流位置は朱色で下降流位置は青色で表現されている。橋梁がない場合には, 上昇流が顕著な場所は, $-200\text{m} < x < 100\text{m}$, $50\text{m} < y < 150\text{m}$ に当たる中川原公園の上流側, および $400\text{m} < x < 520\text{m}$ の区間では $0\text{m} < y < 100\text{m}$ および $140\text{m} < y < 240\text{m}$ に当たる河岸付近である。一方, 下降流は $160\text{m} < x < 400\text{m}$, $80\text{m} < y < 180\text{m}$ に当たる中川原公園の下流側である。

橋脚がある場合には, 上昇流が顕著な場所は, $-200\text{m} < x < 40\text{m}$, $50\text{m} < y < 150\text{m}$ に当たる中川原公園の上流側であることが分かる。

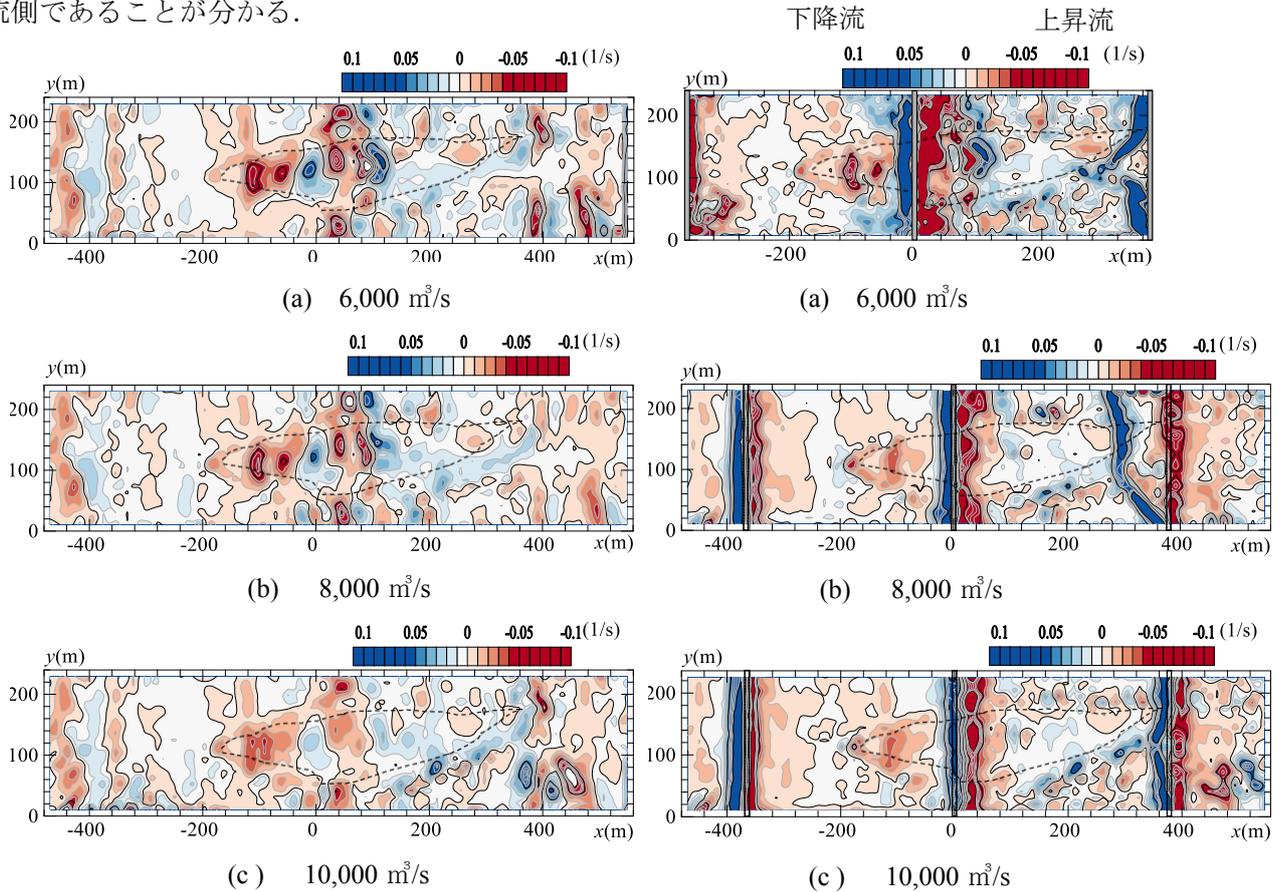


図 6.23 $\partial W/\partial z = -(\partial U/\partial x + \partial V/\partial y)$ (橋無)

図 6.24 $\partial W/\partial z = -(\partial U/\partial x + \partial V/\partial y)$ (橋有)

6.4 まとめ

本章では, 令和2年7月4日に発生した球磨川水害の人的・物的被害の実態を明らかにすると共に、

第4編

模型実験を通して中川原公園および橋梁が異常洪水流に与える影響について検討した。得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 令和2年7月球磨川水害では、人吉・球磨盆地の人的被害36名、遥拝堰から球磨村渡の間の山間狭窄部では、氾濫流によって溺死とした14名の場所を特定し、氾濫状況との関係を検討した。
- 2) 球磨川の氾濫状況を象徴する、1)球磨川と山田川の合流部で地表高の低い青井阿蘇神社の近傍、2)万江川合流部の左岸側堤内地、3)万江川合流点から球磨村渡地区までの区間で連続した蛇行部および4)八代市坂本地区における住家被害を考察した。
- 3) 災害前後において人吉橋～大橋の区間では若干河床上昇する傾向があり、大橋上流では顕著な河床変動は無いことが認められた。局所的には、河岸付近で1.6m程度土砂の堆積が見られ、大橋直上流の61km/600では中川公園において1.8m程度の洗堀が生じた。
- 4) 今次災害流量8,000 m³/sでは橋梁が無い場合には大橋上流で1.44mの水位上昇、更に橋桁が水没する場合には橋桁および橋脚の影響により、大橋直上位置で1.6m、水の手橋直上位置で1.96m水位上昇することが明らかにされた。なお、本実験では越流氾濫が無い条件下での結果であり、実際より大きくなる傾向がある。
- 5) 今次災害流量8,000 m³/sにおいて主流速は、橋梁が無い場合には中川原公園上で1m/s～3m/sの低速領域、滯筋部では6m/sを超える高速域を形成することが認められた。橋梁が有る場合には、橋梁の上流域で流速は大幅に低減する。
- 6) 二次流の横断方向成分から、表面流は-200m<x<0mに当たる大橋上流の中川原公園上では発散域、200m<x<400mに当たる大橋下流の中川原公園上では収束域となることが認められた。
- 7) 表面流の解析によって得られた上昇流位置は橋梁がない場合には、-200m<x<100m、50m<y<150mに当たる中川原公園の上流側、一方、下降流は160m<x<400m、80m<y<180mに当たる中川原公園の下流側である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州整備局八代河川国道事務所、熊本県土木部河川課から多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土地理院：令和2年7月豪雨に関する情報，<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/>
- 2) 内閣府：令和2年7月豪雨による被害状況等について
- 3) 国交省河川局（2006），球磨川水系の流域及び河川の概要．国交省，88pp.
- 4) 石垣泰輔，武藤裕則，Koji SHIONO：複断面河道流れの構造と抵抗予測，ながれ 29（2010）177 - 186
- 5) 福岡捷二・小俣 篤・加村大輔・平生昭二・岡田将治：複断面蛇行河道における洪水流と河床変動，土木学会論文集，621/II-47（1999）11-22.
- 6) Shiono, K. & Muto, Y.: Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, J. Fluid Mech., 376（1998）221-261.

第7章 球磨川からの洪水流が八代湾に及ぼした影響

熊本大学 辻本 剛三 (7.1, 7.2, 7.3, 7.5 節)
 神戸市立工業高等専門学校 柿木 哲哉 (7.4 節)

7.1 豪雨の概要

7月3日の夜に梅雨前線が九州地方を北上し、低気圧やその前線に向かって暖かい湿った空気が流れ込んだため、九州地方での大気が極めて不安定になり、7月3日から7月4日の2日間にかけて大雨となり、この2日間での雨量が7月の平均雨量を観測する雨量となった。図7.1に人吉での24時間雨量を示す。

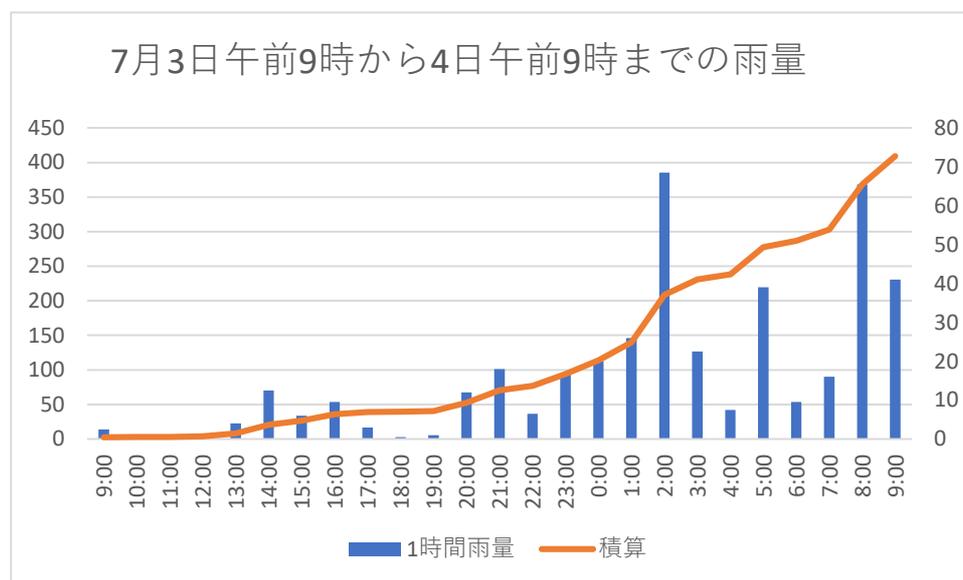


図7.1 降水量 (人吉)

この降雨により多量の雨量は球磨川に流れ込み、膨大な土砂や流木を含んだ状態で八代湾に流入した。国土交通省の調査によれば堆積土砂量は40万m³、10トントラック8万台を上回っていた。そのために、港や航路等では水深が1m程度浅くなり船舶や漁船の航行に影響が懸念されていた。

7.2 現地調査の概要

現地には豪直後の7月5日、7月23日、11月20日に球磨川河道域、7月14日、22日、30日、9月8日に出かけた。写真7.1は7月5日に撮影されたものであり、過去の浸水深が記録されているおり、今回の豪雨の規模が甚大であったことが解る。また、多数の流木等が市街地に散乱しており多量の流木が球磨川河道を通じて河口域に到達していることが予想された。

出水後10日余り経過後に、八代湾沿岸域を踏査し陸上からの目視により流木の状況を観測した。海上に浮遊している流木はほとんどなく、大半は写真7.2に示すように沿岸域に漂着をしていた。写真は同じ地点を7月14日、22日、30日、9月8日に撮影したものであり、中央に写っているプラスチックケースや流木は、1~3週間が経過しているにもかかわらず同じ場所に留まっていることが解る。



写真 7.1 人吉市街

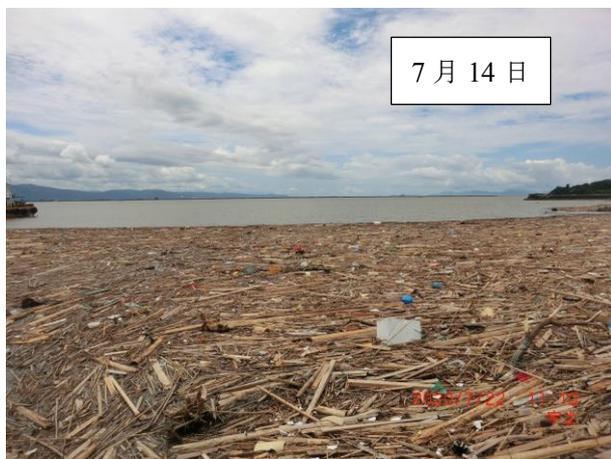


写真 7.2 八代湾奥部の流木

八代湾の潮位は3~4m程度あり、干潮時には流木が漂着している場所は干出するために、一端陸域に着底した流木は次の満潮時において浮遊するが、湾奥内の波浪等は極めて小さいこともあり、その場所に滞留したままになっている。

7.3 出水時の潮位と水位変化

前述のように球磨川から多量の流木が沿岸域に漂着し、実際に撤去するに要する時間は長期に及んでいる。長く滞留することで高波や高潮による2次災害となる懸念がある。実際に9月5日～6日かけて発生した台風は、当初極めて巨大な台風と予想され2次災害が懸念されていたが台風の経路がやや西側に逸れて、八代湾付近を通過し、干潮時の潮位であったことも幸いとなり大事至らなかった。

図7.2は国土交通省の水文水質データベースによる球磨川河口域の観測地点である。写真7.3は球磨川河口に設置されている金剛の水位計である。横石(12.77km)、萩原(6.06km)、金剛(1.07km)の7/3～7/6にかけての国土交通省の水位変化速報値を図7.3に示す。カッコ内の数値は河口または合流点からの距離である。

観測地点横石では7月4日の深夜3時に4m³の水位が1時間後の4時には8mに上昇し、5時間後の9時頃にピーク値に近い12mを示し、その後も徐々に水位が上昇しながら14時頃まで12mを超える水位が継続していた。その後は水が低下し、7月5日の早朝4時頃に4mの水位となった。萩原は、横石からわずか6km下流にあるため、時間遅れなく類似した水位変動を示している。金剛は海域に近いため水位変動は、潮位変化に対応しているが、7月4日の高潮位の時に流域はピークを迎えており、下げ潮時はピークが継続した時間と一致しており、潮位の低下量が小さくなっていることがわかる



図 7.2 球磨川河口付近水位観測地点

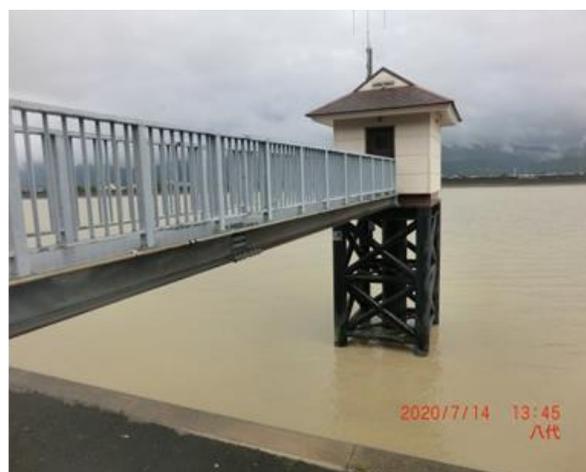


写真 7.3 水位観測地点金剛

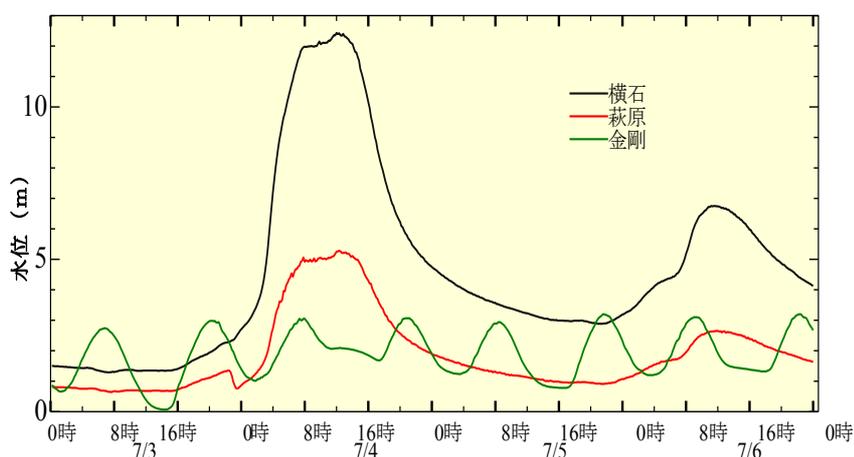


図 7.3 3観測地点の水位変化

第4編

図7.4に八代港(図7.2に参照)の7月1日~7月6日までの潮位変化と潮位偏差を示す(国土交通省ナウファスより)。高潮位と低潮位が洪水後はやや高くなっており、潮位偏差では変化が明確になっている。図7.2の水位からも明らかなように7月4日の8時~14時に水位がピークに達しており、その時の潮位は満潮から干潮の下げ潮時になっている。そのため、球磨川からの流出した流木等は、沖合まで運ばれていると考えられる。航空写真によれば7月4日16時には球磨川河口から直線距離で北西約10km先の戸馳島の若宮海水浴に沿って北上している流木群が撮影されている。

球磨川からの出水による潮位特性の変化を明確にするために、7月1日~7月3日と7月4日~7月6日の潮位をフーリエ変換した結果を図7.5に示す。図中の矢印のように洪水後は数時間周期の水位変動が生じている。

このように球磨川からの出水により流出した水塊は、潮位特性にも変動を生じさせ、さらには多量の流木を八代湾内に散乱させていることが明らかとなった。そこで豪雨災害で発生した流木等の漂着物が、どのようにして八代海内を移動し、湾奥に到達したのか、その移動過程や移動の要因を明らかにすること今後の防災・減災の観点からも重要となってくる。

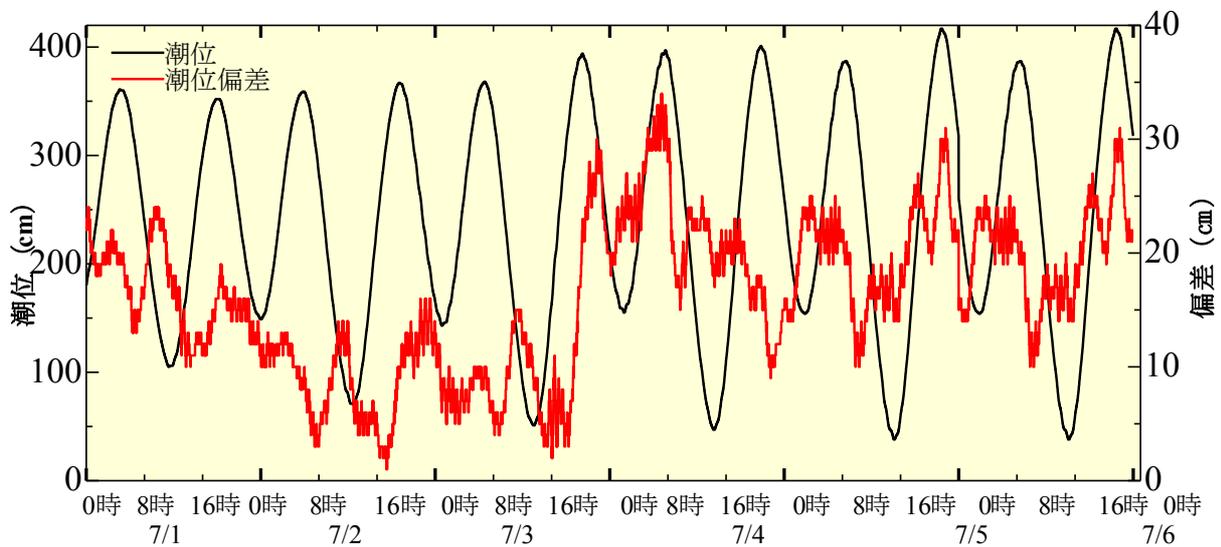


図7.4 八代港の潮位と潮位偏差

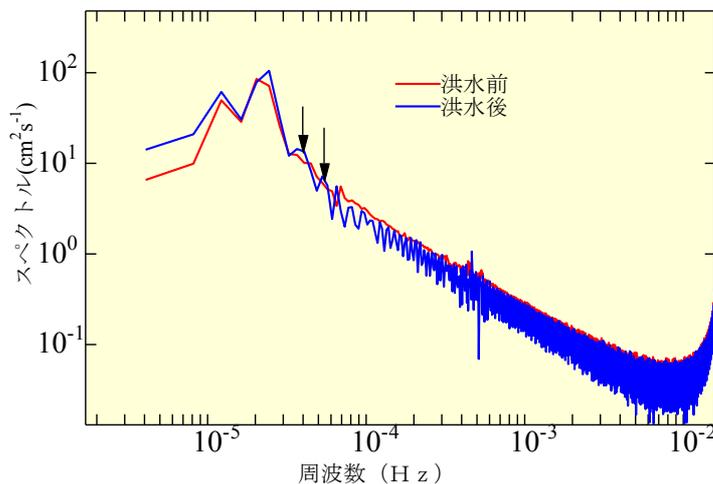


図7.5 洪水前後の潮位のスペクトル強度

7.4 流木の挙動

流木の挙動に関しては、流木を群として扱い細かな流体力等を考慮した事例がある(中川・高橋 2001) 本研究では、浅海流方程式により得られた潮流場に、球磨川水系から流入した流木等の物質が移流拡散方程式(1)に基づいて移動すると仮定し、有限差分法を用いて数値解析した。また、この豪雨災害後の数日は風も強く(最大瞬間風速が 18 m/s)、流出した漂流物の移動に風の影響も十分考えられることから、移流拡散方程式の移流項と拡散項に風の効果を、異方性を持たせながら追加した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (U + \alpha W_x) \frac{\partial C}{\partial x} + (V + \alpha W_y) \frac{\partial C}{\partial y} = k_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + q_{source} \quad (1)$$

図 7.6 は球磨川河口に位置する八代港における、潮位の観測結果と計算結果である。概ね一致しているのがわかる。八代海および有明海の他地点でも同様に比較し、一致することを確認した

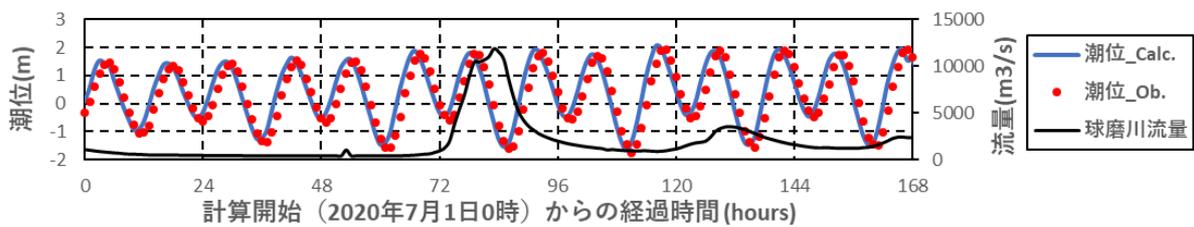


図 7.6 潮位の実測値(熊本県)と計算結果の比較

図 7.7 は移流拡散計算に用いる風速の実測値で、かつ、10 分値を 1 時間平均したものである。10 分値を 1 時間平均した理由は、計算の安定性を考慮したためである。計算中は 1 時間毎に風速値を更新した。観測期間中の風況は、豪雨の発生した 7 月 3 日～4 日以降に、風速が 3 倍程度高くなっている。また、風向は豪雨時の 7 月 3 日を除き、ほとんどが南よりの風で、八代海湾奥方向の風が卓越している。

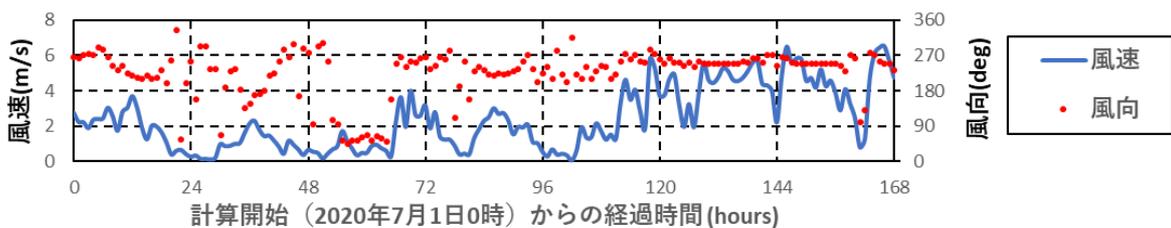


図 7.7 風向と風速の実測値(気象庁 HP)

計算領域は、図 7.8 に示す八代海と有明海南部で、南北 90 km、東西 80 km、メッシュ間隔は 200 m とした。計算期間は、豪雨災害の発生する前の 7 月 1 日午前 0 時から、7 月 8 日午前 0 時までの 7 日間(168 時間)とした。図 7.8 に示すベクトルは、計算期間中の潮汐残差流である。

八代海内の特徴は、全体的に湾南部(湾口)方向への流れが卓越し、特に湾中部から南部はその傾向が顕著である。湾北部(湾奥)周辺も、概して南に向かう流れが見られるが、沿岸部に広がる干潟の干出と水没に伴い、複雑な流況を呈する。このことから、八代海内での潮流による物質移動は、南下方向が予想されたが、実際には流木の多くは北上し湾奥部に着岸した。前述の通り、当時は風速が高く、風向が一定していたため、風の影響を考慮した計算を導入した。

図 7.9 は移流拡散計算の結果で、上下一対である。また、左から、(a) 風の効果なし、(b) 風の効果を

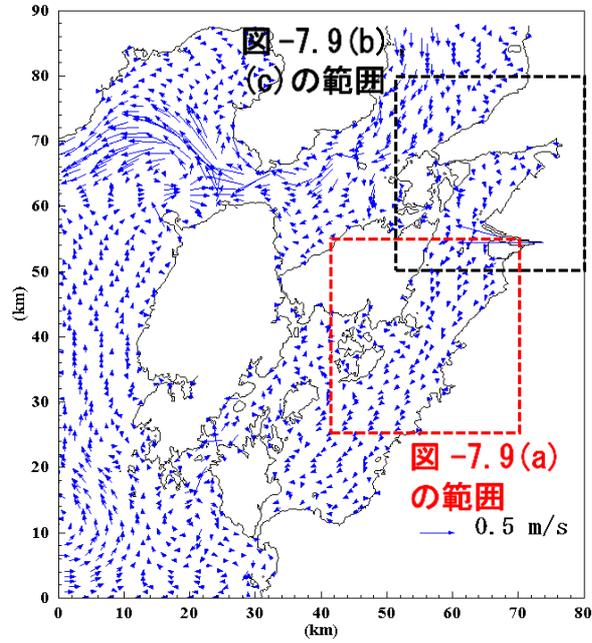


図 7.8 潮汐残差流（解析領域全体）

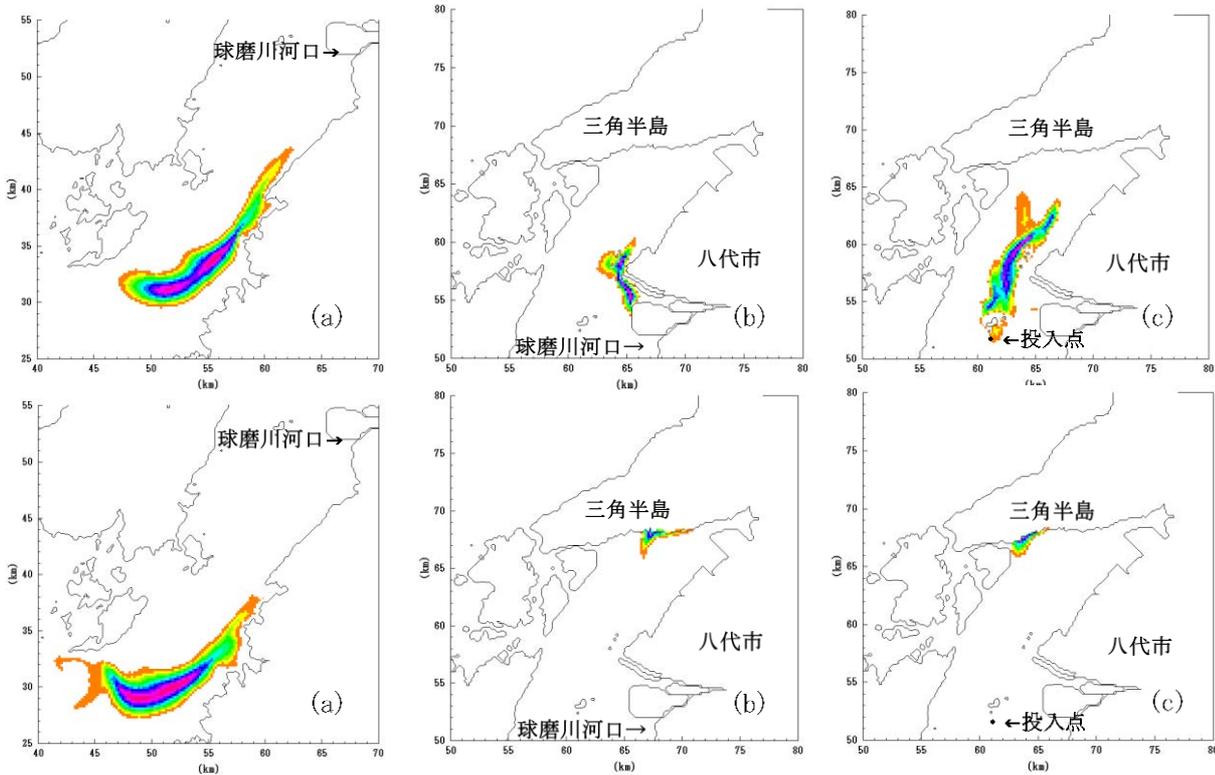


図 7.9 移流拡散の計算結果（左から，(a)，(b)，(c)とし，時間は上段から下段へ進む）

考慮し，かつ河道内で物質を投入したもの，(c) 風の効果を考慮し，物質を球磨川沖の湾軸上に投入したものである。(a)は，潮汐残差流に従い，湾口方向に移動した。(b)と(c)は湾奥方向に移動し，最終的に湾奥沿岸に到達した。(c)のケースを確認した理由は，干潮時には物質が滞筋を伝い，河口から離れたところまで移動し，その後，上げ潮によって湾軸上を遡上するのかどうか，また，それにより，拡散状況や，着岸地点が変わるかどうかを確認するためである。計算結果を見ると，沖側に投入することで，拡散の範囲が広くなり，到達地点も変わることがわかった。

第4編

7.5 今後の課題

今回の球磨川豪雨による出水は、八代湾に多大な影響を与えた。土砂や流木等のように短期間で目に見える現象もあるが、長期的に影響を及ぼすような生態系や水質環境については言及しておらず今後の課題の1つである。

参考文献

中川一，高橋保：大野川から別府湾に流出して流木群の挙動解析，水工学論文集，第45巻，pp.931-936

第8章 玖珠川流域の氾濫特性

高知工業高等専門学校 岡田将治

8.1 はじめに

筑後川支川の玖珠川では、7月7日の大分県日田市天瀬地区において、河川沿いの温泉街が浸水する被害を受けた。しかし、国土地理院の浸水推定図速報には日田市街までしか掲載されておらず、それより上流域の浸水被害状況が把握できなかったため、大分県玖珠町戸畑地区および日田市天瀬地区を対象に7月17日以降複数回の現地調査を実施し、UAV空撮画像を用いた地形測量(SfM)により詳細な地形を計測して浸水被害状況を把握した。さらに、RRIモデルに流出解析およびNays-2DFlood (iRIC Software)による氾濫解析を行って当該地区における被災流量の推定と氾濫被害に至る過程を明らかにした。

8.2 降雨状況および過去の出水時との比較

図8.1に玖珠川の流域図を示す。玖珠川は筑後川筑後川流域の最上流部に位置する支川で、大分県玖珠郡九重町、玖珠町および日田市を流れる。河川延長は56km、流域面積は529km²であり、日田市街地のの上流において大山川と合流して三隈川となる。ここでは、氾濫被害が発生した玖珠町戸畑地区と日田市天瀬地区を調査対象とした。両地点間の流下距離は約12kmである。

図8.2に気象庁解析雨量データから作成した2020年7月5日12時から9日12時までの総降雨量コンター図を示す。南西部の大山川上流域では900mmを超える雨量が記録されており、玖珠川流域では全域で500~600mm程度を記録している。大分県の雨量観測地点における総降雨量は、青野山617mm、町田543mmであった。特に、気象庁アメダスの玖珠雨量観測地点では、7月7日の日降水量が294mmと観測史上1位を記録し、前日7月6日についても181mmで観測史上8位となったことから、これまで経験したことがないような降雨が連日にわたって降ったことがわかる。



図 8.1 玖珠川の流域図

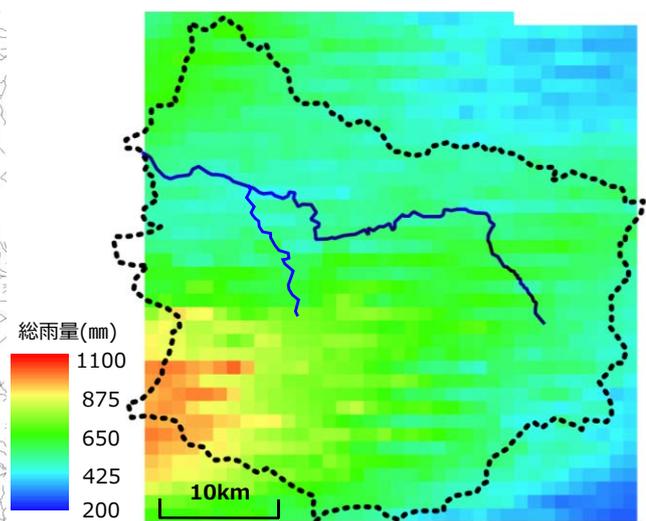


図 8.2 2020年7月5日12:00~7月9日12:00の期間の総降雨量(気象庁解析雨量)

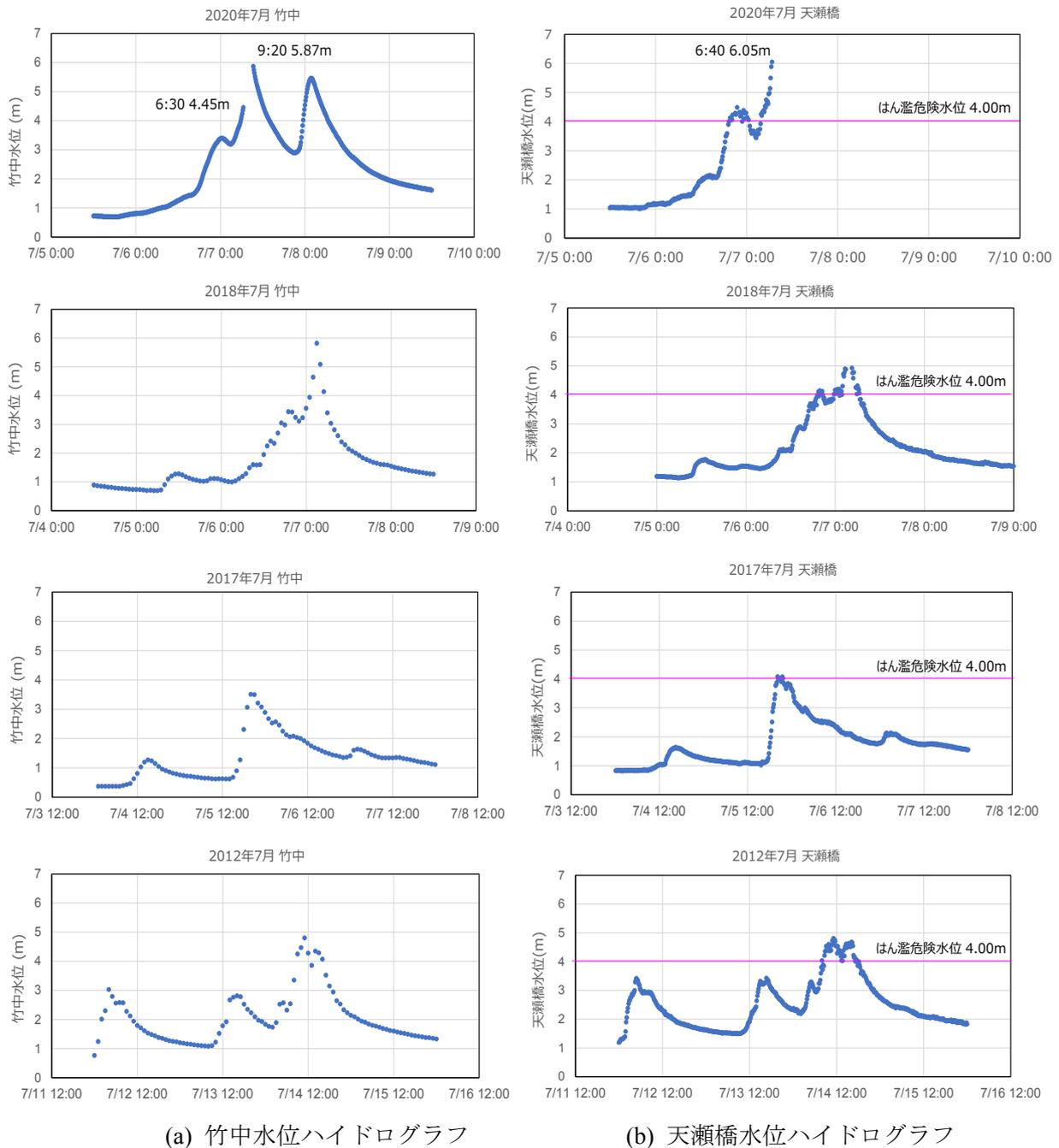


図 8.3 近年4回の出水時における竹中，天瀬橋の水位ハイドログラフ

図 8.3 に国が管理する竹中(玖珠町戸畑)と大分県が管理する天瀬橋(日田市天瀬)における水位ハイドログラフを示す。また、近年発生した豪雨発生時と比較するため、2018年(平成30年西日本豪雨)、2017年(平成29年7月九州北部豪雨)および2012年(平成24年7月九州北部豪雨)の水位ハイドログラフも合わせて示す。図より、竹中と天瀬地点は区間距離が約12kmと近いこと、洪水波形が類似していること、2012年から2018年までの計3回の出水の中では2017年出水が比較的小さく、2018年出水のピーク水位が最も大きかったこと、2020年出水は、それをさらに上回る規模であったことがわかる。特に、2020年出水では7月7日の朝方に竹中および天瀬橋水位観測所のピーク付近の水位が欠測となっており、天瀬橋においては2021年2月現在でも閉局となっている。

8.3 玖珠町戸畑地区の被害状況

図 8.4 に玖珠町戸畑地区付近の平面図を示す。この区間には国が管理する竹中水位観測所(大山川合流部から 24.8km 上流地点)がある。河川沿いには田畑が広がり、民家は川から少し離れた高台に多く建てられている。図 8.5 に UAV で上空から撮影した氾濫痕跡を示す。右岸側の竹中水位観測所の下流約 200m 区間において越流し、裏法肩の侵食が進行して破堤が発生しており、堤内地に土砂が堆積しているのがわかる。



図 8.4 玖珠町戸畑地区(竹中水位観測所)付近の平面図



図 8.5 玖珠町戸畑地区(竹中水位観測所)付近の氾濫痕跡 (7月17日:岡田撮影)

図 8.6 戸畑地区の痕跡水位

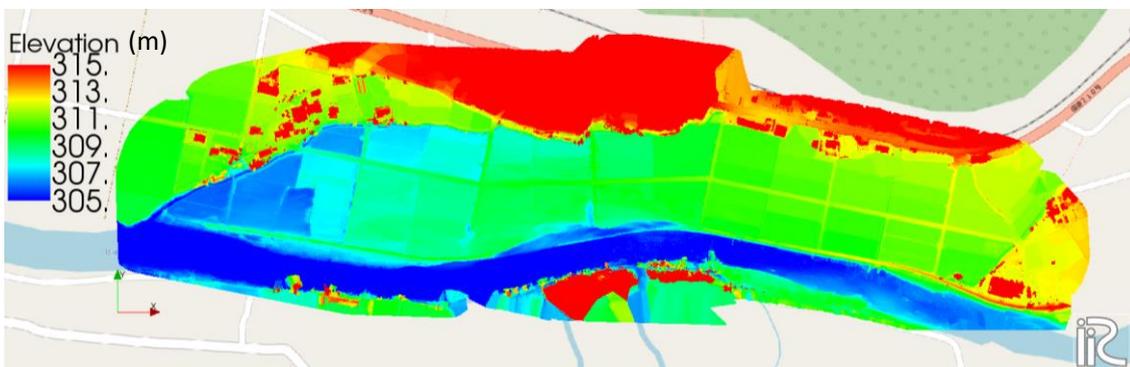


図 8.7 玖珠町戸畑地区(竹中水位観測所)付近の地表面高(DSM)コンター

第4編

近隣住民の方に洪水痕跡について聞き取りを行ったところ、**図 8.6**に示すように高台の住居に上る坂道の途中で7月7日と翌日8日の痕跡を詳細に記録されていた。RTK-GNSSを用いて標高の計測を行ったところ、それぞれ309.98mおよび309.42mであった。国土交通省水文水質DBによれば、竹中水位観測地点のゼロ点高が304.58mであることから、約600m下流側の地点においても水位標の読み値5.4mに相当する高さに洪水痕跡が残っている。

浸水した領域の地盤高を計測するために、DJI社のPhantom4-RTKを用いて72m上空(解像度2cm)から画像取得を行い、写真測量ソフトウェア(Pix4D Mapper)により三次元の点群データを得た。**図 8.7**に撮影した範囲の地表面高コンターを示す。河川沿いおよび右岸の田畑部には面的に標定点を設置しているが、**図**中央上部の標高が高い箇所には設定していないため、出力された標高の精度は高くない。

図より、右岸の破堤区間の地盤高が低くなっていること、右岸側の田畑の地盤高に着目すると、1400mの縦断距離に対して約6mの高低差があり、堤防を越水した水は田畑を流下して、標高が5m程度高くなる地形で堰き止められ、支川から再び河道に戻るような特徴を持っているのがわかる。

8.4 日田市天瀬地区の被害状況

図 8.8に日田市天瀬地区(天瀬橋水位観測所)付近の平面図を示す。**8.3**で示した玖珠町戸畑地区から約12km下流にある。約2kmの区間の河川沿いに温泉街があり、ホテルや飲食店が軒を連ねている。**図 8.9**に日田市天瀬地区のオルソ画像を示す。橋梁は下流側から新湯山橋、水位計が設置されている天瀬橋、宿泊施設(成天閣)の吊橋、新天ヶ瀬橋がある。上流にあった青いトラス橋の新天ヶ瀬橋は、ピーク水位付近と考えられる7月7日午前7時から7時30分の時間帯に約100m下流に流された。また、新天ヶ瀬橋の上流左岸の民家において、民家の女性が流されたと日田署に通報(7時50分頃)があった。

図 8.10に大分県から提供いただいたピーク水位直前の天瀬橋CCTVカメラ画像(7月7日6時、6時30分および7時)を示す。10分間隔で画像が取得されているが、**図**中の7時の画像が最後のもので、7時10分以降の画像は機器の故障により取得できていない。しかしながら、SNS上では7時以降のものと見られる天瀬橋に濁流が乗り越えている画像も確認されていることから、新天ヶ瀬橋が落橋したと言われている7時から7時30分の時間帯にピークとなったのではないかと推察される。

図 8.11に天瀬橋の水位標高さとRTK-GNSSで計測した標高を示す。中央部の天端高は197.85mであり、左岸詰めが194.90mであった。CCTVカメラの画像を確認すると、6時20分以降に水位が上昇して主桁下部に流れが衝突し始めている。この時刻の水位は5.50mであり、6時40分に6.05mを計測した後、欠測となっている。

図 8.12に日田市天瀬地区の地表面高(DSM)コンターを示す。Phantom4-RTKを用いて玖珠町戸畑地区で実施した写真測量と同じ条件で画像を取得し、三次元の点群データを得た。精度検証のために河川沿いで計測した地盤高データと比較した結果各地点において標高の偏差10cm以内の高い精度で出力されていることを確認している。**図**の右端から新湯山橋までの約1.1kmの縦断距離に対して、河川沿い道路の標高差は約5.5m、すなわち1/200であった。

図 8.13に主要地点の痕跡浸水深の状況を示す。各地点の位置は**図 8.12**に記載している。道路からの浸水深は、上流のあまがせ荘前で2.3m、山田屋前で1.5m、水光園玄関前および駐車場で1.1mであり、上流から下流に向かって浸水深が小さくなる傾向が確認できる。これに関しては、当該地区の浸水状況を調査された他のグループからも同様の結果が報告されている。



図 8.8 日田市天瀬地区(天瀬橋水位観測所)付近の平面図



図 8.9 日田市天瀬地区のオルソ画像と橋梁の位置



図 8.10 ピーク水位直前の天瀬橋 CCTV カメラ画像(大分県より提供)
(左側より 6時, 6時 30分, 7時の状況)



図 8.11 天瀬橋中央部と左岸部における水位標高さと標高

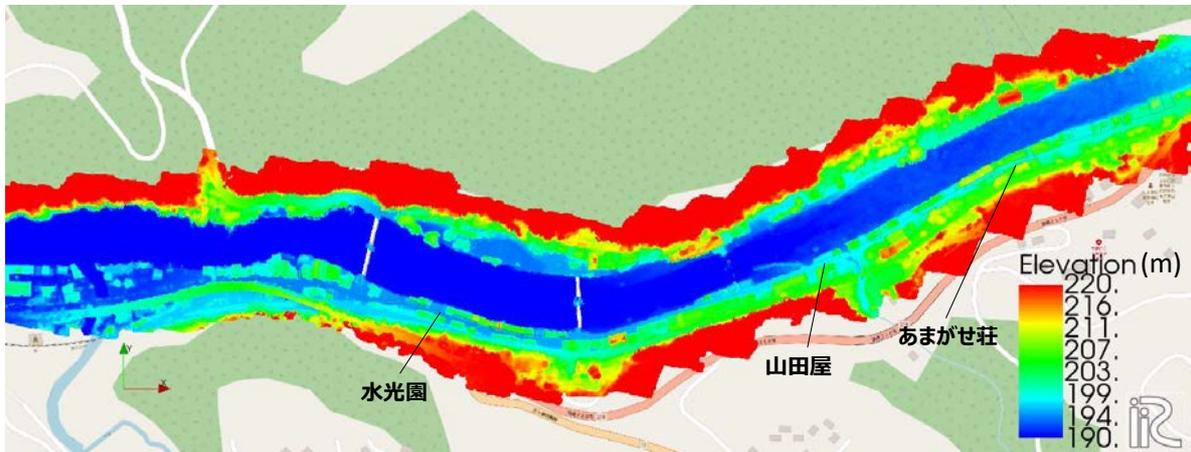


図 8.12 日田市天瀬地区の地表面高(DSM)コンター



図 8.13 痕跡浸水深 (左から水光園, 山田屋, あまがせ荘)

8.5. RRI モデルによる戸畑, 天瀬地区の流量ハイドログラフの推定

図 8.3 で示したように、2020 年 7 月出水では竹中および天瀬橋水位観測地点において、ピークの時間帯の水位データが得られていないため、洪水時の浸水状況を把握するために RRI モデルを用いて両地区の直上流地点における流量ハイドログラフを推定した。入力地形には USGS-HydroSHEDS の 3 秒(約 90m×90m)dem データ, 入力降雨には気象庁解析雨量(1km メッシュ)の 7 月 5 日 12 時から 7 月 9 日 12 時までのデータを用いた。使用範囲は南北が 57 メッシュ, 東西が 37 メッシュである。表 8.1 に RRI モデルに用いた計算条件を示す。ns はそれぞれ河道, 斜面の粗度係数, ka は透水係数である。なお, 用いたパラメータの組み合わせの妥当性については, 事前に両地点における UAV-SfM で得られた河道地形を用いて各時刻の水位が概ね再現できることで確認している。ただし, 本手法で

表 8.1 RRI モデルの計算条件

<i>ns_river</i>	<i>ns_slope</i>	Soil depth (m)	porosity	ka (m/s)
0.03	0.3	1.0	0.4	0.1

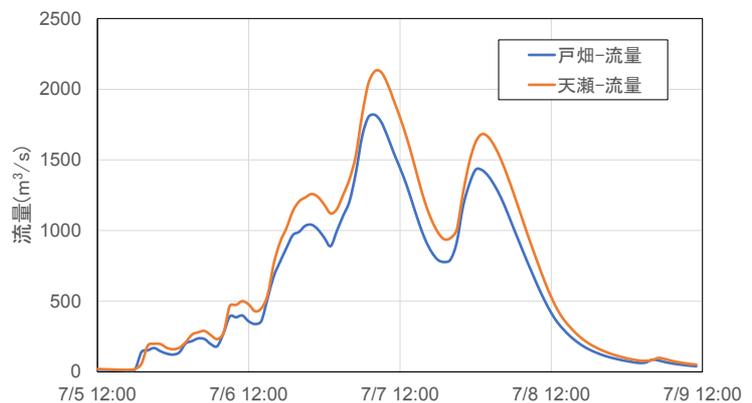


図 8.14 RRI モデルにより得られた戸畑および天瀬地区直上流における流量ハイドログラフ

第4編

は水面下の地形が計測できていないため、現時点では目視により平均的な水深および河床地形を設定している。したがって、今後詳細な検証により、各時刻の流量値を微修正する場合もある。

図 8.14 に RRI モデルにより出力された戸畑および天瀬地区の流量ハイドログラフを示す。上流の戸畑におけるピーク付近の流量は 6 時に $1667\text{m}^3/\text{s}$ 、7 時に $1804\text{m}^3/\text{s}$ 、8 時に $1818\text{m}^3/\text{s}$ であった。また、翌日深夜の 2 回目のピーク時は、7 月 8 日 0 時に $1430\text{m}^3/\text{s}$ 、7 月 8 日 1 時に $1428\text{m}^3/\text{s}$ であった。

天瀬においては、6 時に $2043\text{m}^3/\text{s}$ 、7 時に $2127\text{m}^3/\text{s}$ 、8 時に $2122\text{m}^3/\text{s}$ であり、新天ヶ瀬橋の落橋推定時刻や天瀬橋から越水が生じたと推定される 7 時から 8 時にかけてピークとなっている。また、翌日 7 月 8 日の 2 回目のピーク流量は 1 時に $1682\text{m}^3/\text{s}$ であった。

8.6 氾濫解析結果と考察

前章で RRI モデルを用いた流出解析により得られた流量ハイドログラフを上流端境界条件として、氾濫被害が行った戸畑地区および天瀬地区において氾濫解析を行った。また、支川からの流入についても考慮し、戸畑で 3 支川、天瀬で 1 支川に RRI モデルで出力された流量ハイドログラフを与えた。

戸畑地区では田畑が主要な土地利用であるため、解析格子サイズを 5m とし、粗度係数を一律 0.03 とした。また、空撮範囲外であった上流側には国土地理院 5m メッシュ標高データを追加した。破堤した区間の堤防天端高については、残存する上下流の堤防の天端高を参考に設定した。

天瀬地区では、河川沿いの狭い道路の流れを再現するために計算格子を 1.5m とし、粗度係数は岩が多く露出していることから 0.04 とした。また、1 回目のピークの時間帯に落橋した新天ヶ瀬橋はそのまま河道内に残した状態で計算を行っている。

8.6.1 玖珠町戸畑地区

図 8.15 に玖珠町戸畑地区における各時刻の水深と流速ベクトルの解析結果を示す。図 8.15 (a) は 7 月 6 日 17 時 10 分の流量 $800\text{m}^3/\text{s}$ 時の流況である。流量の増加とともに河道内の流れが直進性を増して水衝部となり、当該出水において破堤したこの地点から越流を始めている。また、解析区間の下流端付近の右岸にある支川では、本川からの背水が始まっている。図 8.15 (b) は 7 月 6 日 20 時の流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 時の流況である。この時間帯は越流した流れと下流右岸の支川から逆流した流れが混在する時間帯で、一旦流量が減少した後、再度増加した翌日 3 時 10 分の流況が図 8.15 (c) である。越流した水が右岸の田畑を流下する流速ベクトルは全て下流向きになっており、支川から本川に還流している。したがって、流量がこの値を超える時間帯から、右岸の堤内地は河道の一部となって氾濫水が流下するようになる。さらに、ピークの時間帯の図 8.15 (d) では、浸水範囲が拡大し、下流側の標高の低い区域の浸水深は 4m 程度まで上昇しており、川側の比較的標高の低い民家 1 軒が浸水被害を受けた。

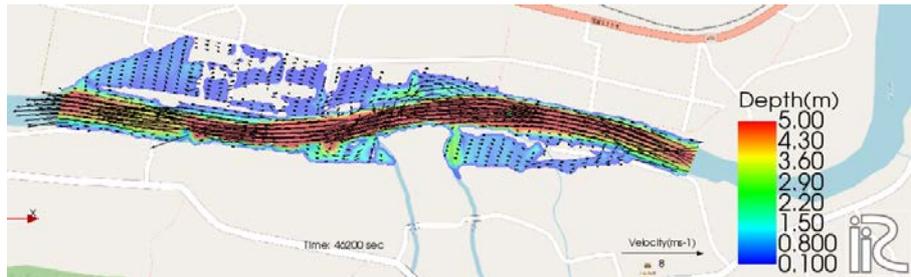
図 8.6 の洪水痕跡水位と同じ地点の解析結果の最大浸水位を比較した結果、 309.98m の実測値に対して 309.55m であり、若干低い概ね再現できている。

8.6.2 日田市天瀬地区

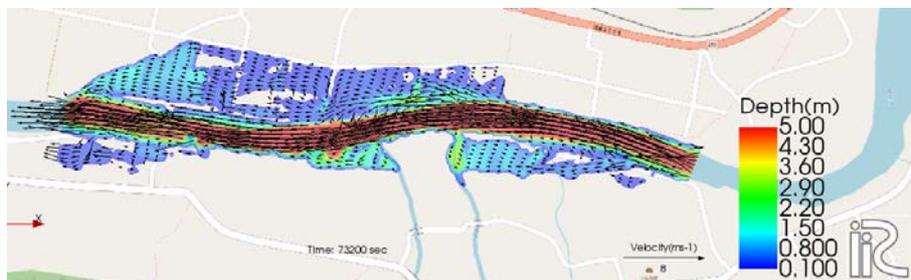
図 8.16 に日田市天瀬地区における各時刻の水深の解析結果を示す。図 8.16 (a) は、7 月 7 日 3 時の流況で、上流左岸にある駐車場等の川沿いに建物がない箇所から河川水が溢れ、道路が冠水し始めている。深夜でもあり、氾濫開始時刻に関する聞き取り調査を実施していないため、詳細は不明である。



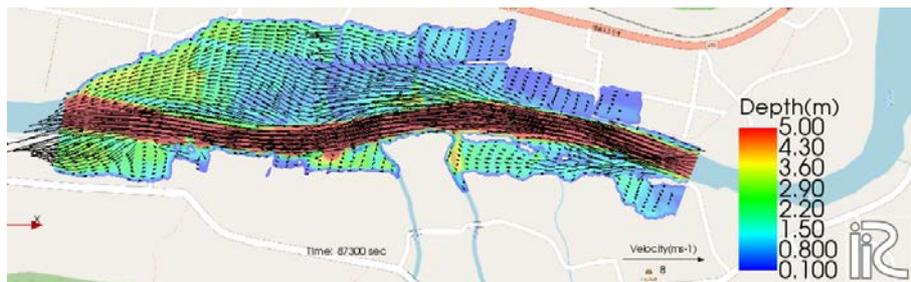
(a) 7/6 17:10 $Q=800\text{m}^3/\text{s}$



(b) 7/6 20:00 $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$



(c) 7/7 3:10 $Q=1150\text{m}^3/\text{s}$



(d) 7/7 7:30 $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$

図 8.15 玖珠町戸畑地区における氾濫解析結果

図 8.16 (b)には、ピークの時間帯の 7 時 30 分の状況を示す。図 8.13 に示した上流側のあまがせ荘および山田屋の付近の浸水深は、実測値と同程度であった。また、図 8.9 に示した天瀬地区で犠牲となった方が流された民家前の道路では浸水深が 2m を超えており、流速も毎秒 1m 以上となっている。この付近では山側斜面と川側に宿泊施設があり、氾濫した水が狭い道路に集中するため、高流速となりやすい地形特性となっている。一方、下流にある水光園付近の浸水深は実測値よりも若干小さく、SNS にひざ下程度の冠水状況が投稿されていた天ヶ瀬駅前道路では一部が冠水するのみである。これは図 8.10 に示した天瀬橋橋梁に堰き止められた水が左右岸に溢れて流下したと考えられ、本解析ではこれらの影響を考慮できていないため、左岸下流部の浸水状況の再現性が低くなっている。

しかしながら、UAV 空撮画像を用いた写真測量により詳細な地形を取得し、氾濫解析によって河川流況、川からの堤内地側への氾濫および河川沿いの幅員 4m 程度の狭い道路を流れる流況まで概ね再現できており、当該地区の氾濫被害の発生過程を概ね明らかにすることができた。



(a) 7/7 3:00 $Q=1254\text{m}^3/\text{s}$



(b) 7/7 7:30 $Q=2085\text{m}^3/\text{s}$

図 8.16 日田市天瀬地区における氾濫解析結果



図 8.17 玖珠川洪水浸水想定区域図(計画規模)



図 8.18 玖珠川メルヘン大橋

8.7 おわりに

第4編

筑後川上流域の玖珠川において2020年7月7日から8日に発生した浸水被害を対象に、現地調査を実施して氾濫被害状況を把握した。さらに、流出解析および氾濫解析を行ってこれらの地区の氾濫被害の発生過程を考察した。得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 玖珠川で2020年7月豪雨により発生したの洪水は、近年の2012年7月、2017年7月および2018年7月時よりも大きい規模であった。RRIモデルを用いた流出解析結果から、玖珠町戸畑および日田市天瀬における7月7日7時から8時の時間帯のピーク流量は、それぞれ $1800\text{m}^3/\text{s}$ 、 $2100\text{m}^3/\text{s}$ 程度であった。ただし、河川の水面下の地形が十分考慮された解析が実施できていないため、流量値は今後修正される可能性もある。
- 2) 玖珠町戸畑地区では、流量 $800\text{m}^3/\text{s}$ 程度から右岸側の田畑へ越流が起こった後、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度から下流側で還流されるため、現状ではそれ以上の流量規模の洪水に対しては遊水効果がほとんどない。
- 3) 日田市天瀬地区では、 $1250\text{m}^3/\text{s}$ 程度から道路への氾濫が確認され、水位の上昇により天瀬橋に衝突した水が左右岸から溢れ、下流側の浸水深を増加させた可能性が示唆された。

本調査は、玖珠川沿川で発生した氾濫被害のうち、主要な2地区のみで実施した。これらの地区以外にも、沿川の低い集落では浸水被害が発生した痕跡が多く確認された。一方で、**図 8.17** に示す計画規模の洪水($3500\text{m}^3/\text{s}$)の浸水想定区域図に対して、当該出水のピーク流量は天瀬地区においては約60%に相当する規模であった。さらに、**図 8.18** に示す玖珠町市街地を流れるメルヘン大橋付近では河川整備が進んでおり、当該出水においてもピーク水位ははん濫注意水位を0.4m下回る程度のものであった。今後さらに増加すると予想される洪水外力に対して、流域の上下流バランスも含めて治水対策を考えていくことが重要である。

謝辞

本調査の実施にあたり、大分県から玖珠川水位データおよび天瀬橋CCTVカメラデータを提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

第9章 内水氾濫発生機構とその対策

京都大学 川池 健司

9.1 はじめに

令和2年7月豪雨では、球磨川の洪水氾濫・土砂災害にとどまらず、各地で内水氾濫も発生した。球磨川で甚大な被害が発生した後の7月5日から7日にかけて、筑後川周辺でも線状降水帯が形成され記録的な豪雨となった。本章では、福岡県久留米市の下弓削川流域で発生した内水氾濫に着目し、その再現計算を行うとともに、数値解析により内水氾濫対策について検討を行った。

9.2 被害状況

9.2.1 大牟田市の内水氾濫

福岡県大牟田市では、7月5日の夜から降雨強度が強くなり、7日の夜まで断続的に強い雨が降り続いた。アメダスの大牟田地点では、日最大1時間降水量で74.0mmと観測史上4番目の記録となり、日降水量では、6日が388.5mmと最大値を更新し、7日も273.0mmと観測史上6番目の記録となった。この豪雨により、大牟田市内では各地で内水氾濫と市内河川からの溢水が発生した。とくに三川排水区では、三川ポンプ場の排水能力が降雨強度に追いつかず、浸水によりポンプ場内のすべてのポンプが停止した。三川排水区は、雨水が湛水しやすい凹地状の地形であったため、ポンプの停止によって内水氾濫の被害は甚大なものとなり、2名の死亡が確認された。

9.2.2 久留米市の内水氾濫

福岡県久留米市では、6月下旬から降雨強度が強くなり、6月27日には最大時間雨量92.5mmを記録した。その後も断続的に雨は降り続け、とくに7月5日の夜から7日の夜まで雨の強い状態が続いた。アメダスの久留米地点では、日最大1時間降水量は48.0mm、日降水量では6日が271.0mmと観測史上3番目、7日が199.5mmと9番目の記録となった。6日9:10から7日9:10までの24時間最大雨量は360.5mmと観測史上最大値を更新し、7月5日18時から11日4時までの総雨量は、772.0mmに達した。

久留米市内でも各地で内水氾濫が発生した。池町川・金丸川周辺、下弓削川周辺、山ノ井川周辺、巨瀬川周辺などで浸水が確認されている。久留米市内の浸水被害状況については、[図9.1](#) (久留米市, 2020) のように浸水状況の写真とともに市のウェブサイトにもまとめられている。

9.3 内水氾濫解析

本節では、久留米市の下弓削川流域で発生した内水氾濫の発生機構を検討するため、数値解析により再現計算を行う。さらに、浸水対策としてポンプを増設した場合の軽減効果について検討する。

9.3.1 解析モデル

下弓削川は、河川延長2.1km、流域面積5.0km²の福岡県管理の一級河川 ([図9.2](#)) で、筑後川30.8k地点に合流する。流域の南部は高良山にかかり、そこから北流した支川が下弓削川に流れ込んでいる。



図 9.1 久留米市内の浸水被害状況（久留米市，2020）



図 9.2 下弓削川（東合川1丁目付近（左）と東合川6丁目付近（右））



図 9.3 元村水門（左）と枝光排水機場（右）

第4編

筑後川への合流点付近には、元村水門と枝光排水機場（図 9.3）が設置されている。流域のほぼ中央を JR 久大本線が東西に通っており、また九州自動車道が南北に通る、久留米 IC が含まれる。国道 210 号線が流域北部の低平地を東西に通っており、この国道を中心として商業施設が多く立地するなど都市化が進展している。この流域北部の低平地を中心として、今回の豪雨によって甚大な内水氾濫が発生した。

9.3.1 解析モデル

本研究で用いたモデルは、地表面流のみを考慮した非構造格子による平面 2 次元解析モデル(川池ら, 2002) である。以下に、用いた基礎式を示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = r_e \tag{1}$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{gn^2u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{gn^2v\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \tag{3}$$

ここに、 h は水深、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速、 r_e は流出率を考慮した有効降雨、 z_b は地盤高、 n はマンニングの粗度係数、 g は重力加速度である。

下弓削川流域全体を対象として、約 4 万個の三角形非構造格子に分割した。下弓削川とその支川（井田川、中谷川、岩井川等）は、標高の低い連続した格子で表現した。久留米市では、側溝等の排水路によって雨水排水処理を行っているが、本モデルにはそれらの影響は反映させていない。標高は、国土地理院の 5m メッシュの標高データを用いた。現地調査での計測により、各河川の河床深さは下弓削川で 6.0m、中谷川と井田川で 4.0m、岩井川やそれ以外の河川で 3.0m と仮定し、周辺地盤高からこれらの河床深さを一律に引いた値を標高として与えた。流域南部の山地域には、ため池が点在しているが、ここでは簡単のため、その他河川と同様に周辺地盤高から一律に 3.0m 引いた値を標高として与えた。図 9.4 に、本研究で用いた解析格子の標高を示す。

解析の外力としては、アメダスの久留米地点での 10 分間降水量（図 9.5）を全域一様に与えた。簡単のため、流出率を一様に 0.4 としている。流域界からは、流入・流出とも考慮しない。水文水質データベースより得られた瀬ノ下と片ノ瀬の筑後川水位を内挿補間して、合流点での筑後川水位を推定し、下

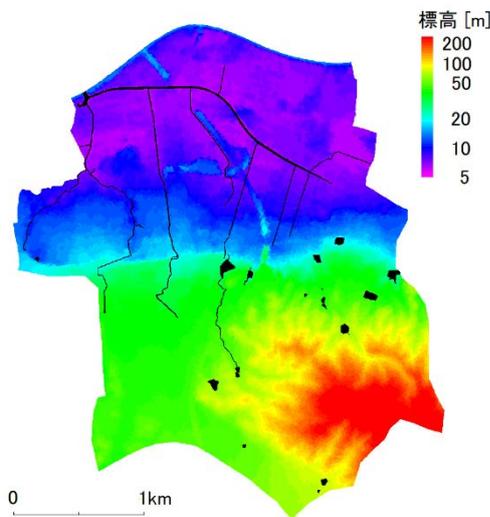


図 9.4 解析格子の標高

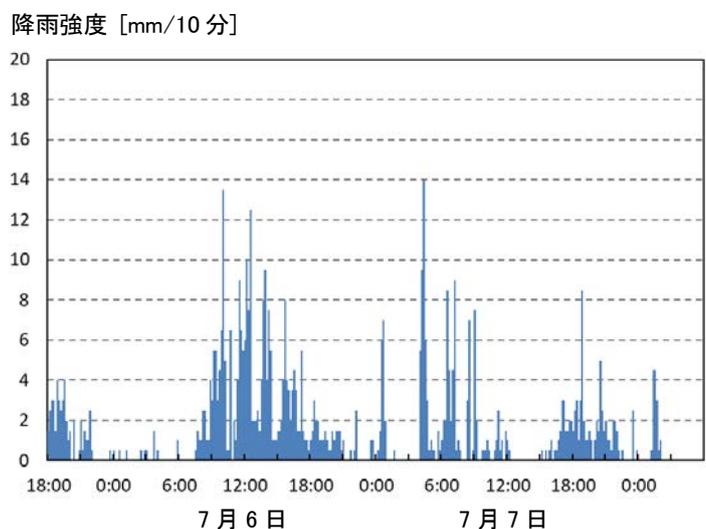


図 9.5 10 分間降水量（アメダス久留米地点）

第4編

弓削川の下流端でこの水位を与えた。ただし、6日午後3時34分から元村水門が閉鎖されたので、この時刻以降は筑後川水位を与えず閉境界とし、下弓削川の下流端の格子から枝光排水機場の排水能力(5.0m³/s×3台)に応じて排水するという条件に切り替えた。

解析は、5日午後6時から8日0時までの60時間とする。初期条件は、下弓削川等の河川、ため池も含めて全域でドライベッドとする。

9.3.2 解析結果

解析結果のうち、7月7日午前9時10分における浸水深を図9.6に示す。防災科学研究所が、それぞれ7日午前9時12分と7日午前9時34分におけるTwitterの周辺写真から推定した、下弓削川の左右岸の推定浸水深図を公表している(図9.7)(防災科研, 2020)。この推定浸水域と本解析結果の浸水域を比較すると、両者が良好に一致していることがわかる。

解析結果より、領域西部の住宅地や領域東部の水田地帯の標高の低い箇所において1mを越える浸水が見られるが、それ以外はおおむね1m以下の浸水となっている。しかし、浸水域のうちの半数を超えるかなりの地域では0.5mを越える浸水が発生している。浸水が発生しているのはほぼ下流の低平地に集中していることから、下弓削川流域の上流で降った雨水も谷筋から井田川、中谷川、岩井川などに集

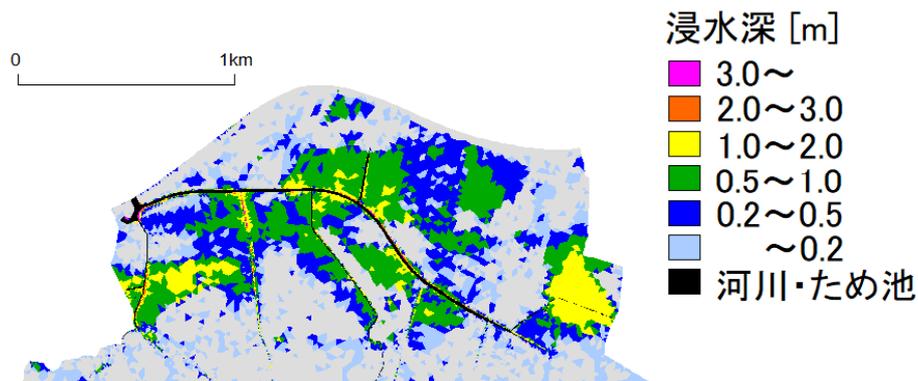


図9.6 7月7日午前9時10分における浸水深

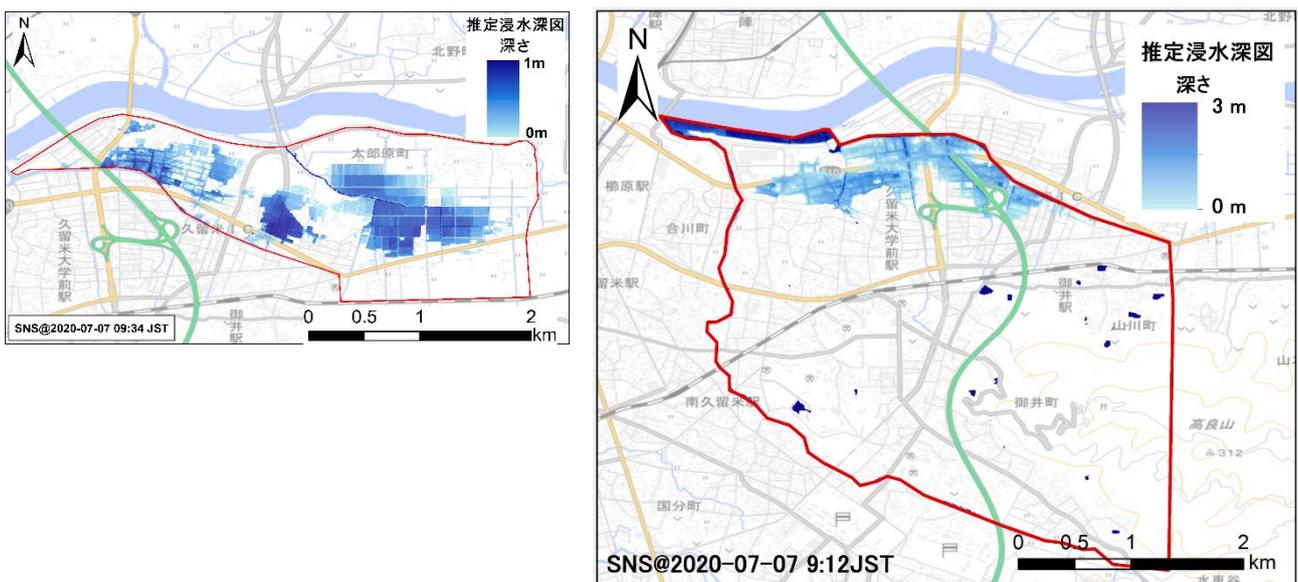


図9.7 防災科学研究所による推定浸水深図(防災科研, 2020)

(左: 7月7日午前9時34分、右: 7月7日午前9時12分のTwitter画像より推定)

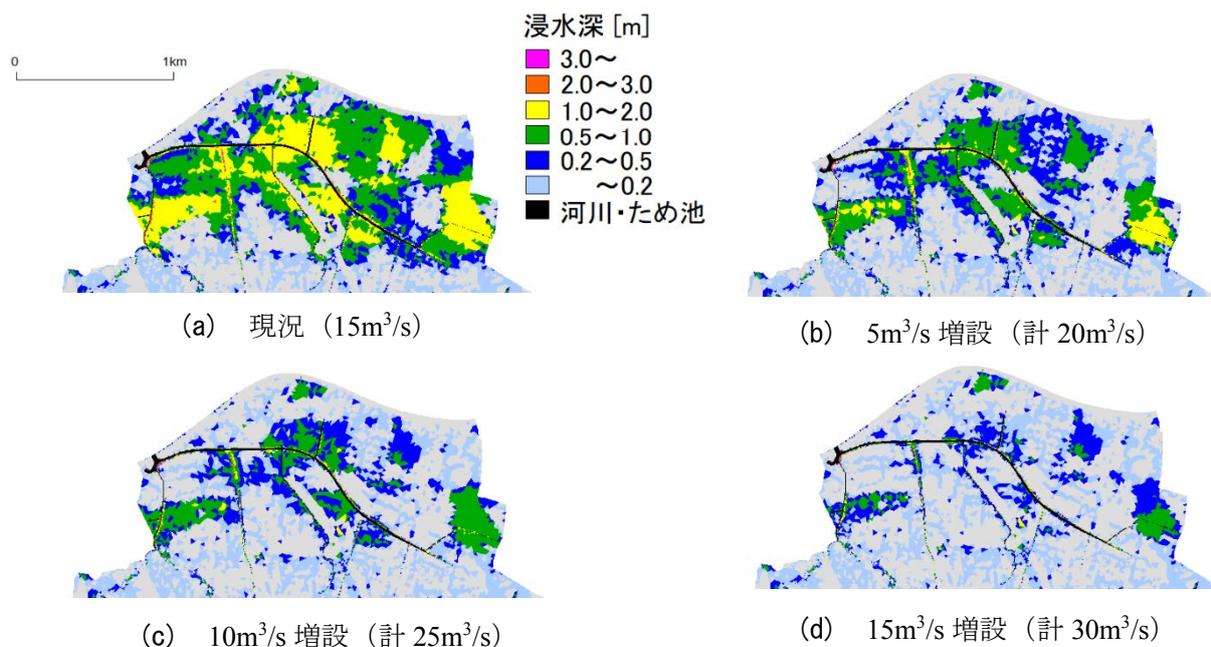


図 9.8 枝光排水機場のポンプ増設による最大浸水深の軽減効果

められ、下弓削川に合流するあたりで水位が上昇し、周辺に溢水したと考えられる。したがって、下弓削川の水位が高い状態が続いていたことによって、下流低平地の広範囲にわたって浸水が引き起こされたと考えられる。

9.3.3 枝光排水機場の増強による浸水軽減効果

下弓削川流域では、平成 30 年 7 月豪雨による浸水被害を受けて、久留米市、福岡県、国土交通省筑後川河川事務所が合符で下弓削川・江川総合内水対策計画を 2020 年 6 月に策定している。それによると、平成 30 年 7 月豪雨と同規模の降雨に対して床上浸水被害の軽減を図ることを目標として、枝光排水機場のポンプ増設が対策のうちの一つとして挙げられている。計画には、ポンプの増設予定地は記載されているものの、具体的な増設規模までは明記されていない。本研究では、現況 15m³/s の排水能力の増設規模を 5m³/s (計 20m³/s)、10m³/s (計 25m³/s)、15m³/s (計 30m³/s) と仮定して、令和 2 年 7 月豪雨の雨を与えた解析を行った。

解析結果のうち、計算時間中の最大浸水深を図 9.8 に示す。この結果より、現況では 1m 以上の浸水域が多くみられるものの、5m³/s の増設によりほとんど 1m 未満の浸水深となり、浸水域もかなり減少することがわかる。さらに 10m³/s の増設により 0.5m 以上の浸水域が減少し、15m³/s の増設によってそれがほとんどなくなることがわかる。今回の解析では、定量的な検証が不十分なため本解析結果は定性的なものとしてとらえる必要があるが、ポンプ増強は浸水軽減対策としては有効であり、数値解析によってその増設規模を検討する上で有用な結果が得られることがわかった。

9.4 おわりに

本研究では、地表面流のみを考慮した内水氾濫解析を行い、下弓削川流域の浸水状況の再現計算を試みた。その結果、下弓削川の水位上昇が浸水域の拡大に影響したことが推察された。枝光排水機場のポ

第4編

ンプ増設を仮定した解析では、ポンプを増設することで顕著に浸水深が軽減することがわかり、浸水軽減対策として有効であることがわかった。

今回は、土地利用や道路・建物などの影響や側溝等の排水システムの影響は考慮せずに解析を行った簡易なモデルを用いたため、これらの影響を考慮することでさらに詳細な浸水メカニズムを把握することができると考えられる。また、内水氾濫対策として枝光排水機場のポンプ増設のみを仮定したが、流出抑制対策として、流域の保水・貯留能力を向上させることを想定した検討を行うことで、各種貯留施設等の整備目標の設定にも役立つと考えられる。

参考文献

- 川池健司, 井上和也, 林 秀樹, 戸田圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10, 2002.
- 久留米市: 令和2年8月3日市長定例記者会見資料 (https://www.city.kurume.fukuoka.jp/1100keikaku/2030mayor/3010kishakaiken_19/files/20200803002.pdf), 2020.
- 久留米市・福岡県・国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所: 下弓削川・江川総合内水対策計画 (<https://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/r2sougounaisuikakeikaku.html>), 2020.
- 防災科学研究所 水・土砂防災研究部門: 2020年7月6日～7日九州北部における浸水について(速報) http://mizu.bosai.go.jp/key/R02_0707Shinsui, 2020.

第10章 土石流の流動特性とコロナ禍での土砂災害からの避難方法

京都大学 竹林洋史

10.1 はじめに

2020年7月に九州から中部地方で発生した豪雨によって954件の土砂災害が発生した（国土交通省，2020）。これは，1つの台風による土砂災害としては最大の発生件数であった2019年の台風19号による土砂災害の952件とほぼ同じ数の土砂災害発生件数であった。内訳は，土石流等が164件，地すべりが80件，がけ崩れが710件であり，死者17人，家屋の全壊が31棟，半壊が16棟であった（国土交通省，2020）。

八代海に近い熊本県南西部に位置している熊本県芦北町田川地区と津奈木町福浜地区（図10.1）では上述の豪雨によって，2020年7月4日の早朝に土石流が発生し，多く人的被害が発生した。CXレーダーから得られた九州南部の降雨強度の空間分布からわかるように（図10.2），7月4日午前4時の時点で東西に連なる降水帯によって両地区が覆われていることがわかる。7月4日午前4時の時点の両地区

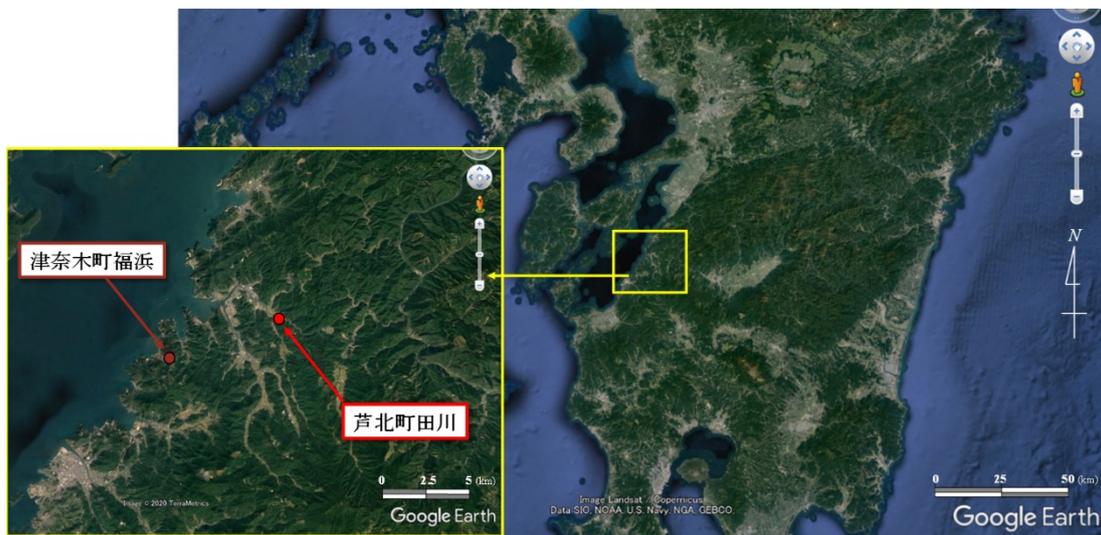


図10.1 解析対象地点

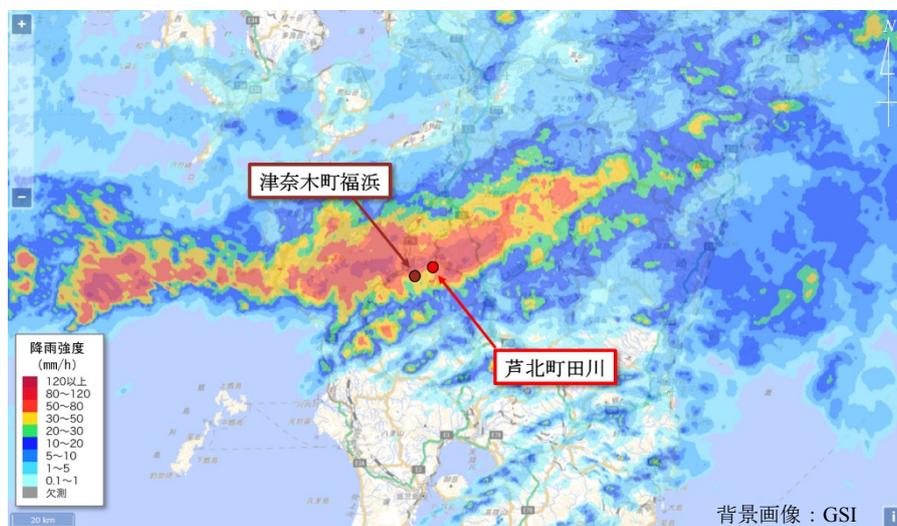


図10.2 CXレーダーから得られた九州南部の7月4日午前4時の降雨強度

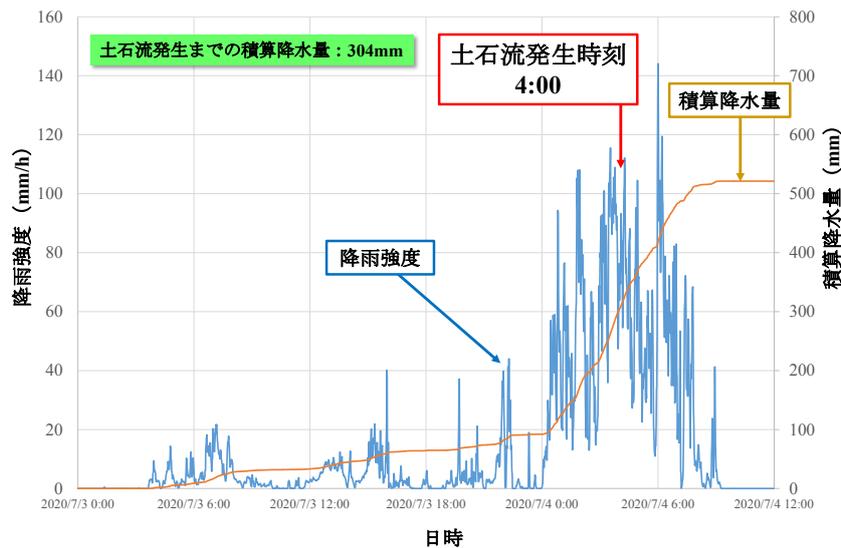


図 10.3 CX レーダーから得られた芦北町田川地区の降雨強度の時間変化

の時間換算の降雨強度は 50mm/h～80mm/h となっており、非常に強い雨が降っていたことがわかる。

本研究では、両地域で発生した土石流の流動特性について、現地調査及び二次元土石流数値シミュレーションにより検討した結果を報告する。また、数値シミュレーション結果をもとに、コロナ禍での土砂災害からの避難方法について検討を行う。

10.2 芦北町田川地区

10.2.1 降雨特性

図 10.3 に CX レーダーから得られた芦北町田川地区の土石流発生斜面の降雨強度の時間変化を示す。雨の降り始めは 7 月 3 日午前 4 時ぐらいであり、7 月 4 日午前 0 時まで断続的に雨が降り、午前 0 時以降、降雨強度が強くなり、時間換算の降雨強度が 100mm/h を超えた時間帯もあった。土石流が発生したのは図 10.2 に示した 7 月 4 日の午前 4 時ぐらいであり (ANNnewsCH, 2020)、降雨強度が強くなり始めて約 4 時間後であった。なお、降雨強度の最大値は土石流発生から 2 時間後の午前 6 時に発生しており、土石流発生後の避難と救助が非常に難しい状況であったことが推察される。CX レーダー雨量による土石流発生時点における降り始めからの累積雨量は 304mm であり、2018 年の西日本豪雨時の広島市安芸区矢野東 7 丁目の土石流発生時の累積雨量 168mm より多く、2019 年の佐賀水害時の佐賀市金立の土石流発生時の累積雨量 554mm よりも少ない値であった。

図 10.4 にリアルタイム土砂災害危険度評価システム (五十嵐ら, 2016) を使って得られた、土砂災害危険度の時空間的な変化を示す。図には、CX バンドレーダーで得られた降雨強度の空間分布も示している。4 日 1 時 10 分ごろから芦北町田川地区の土砂災害危険度が上昇しはじめ、土石流が発生した 4 時の 10 分前の 3 時 50 分には危険度ランクが最も高い値 5 となっており、本システムにおいても土砂災害の発生を予測できていることがわかる。土砂災害危険度が非常に高い状態は 7 時 30 分まで続き、その後は徐々に危険度が下がっていき、10 時ごろに土砂災害の危険度表示が消えている。

10.2.2 現地調査

図 10.5 (a) は、土石流が流れた斜面と土砂の氾濫域を UAV によって撮影したものである。崩壊した土砂は斜面を真っ直ぐ流下して赤丸で示した箇所が存在していた家屋や建物を破壊して農地に流れ込

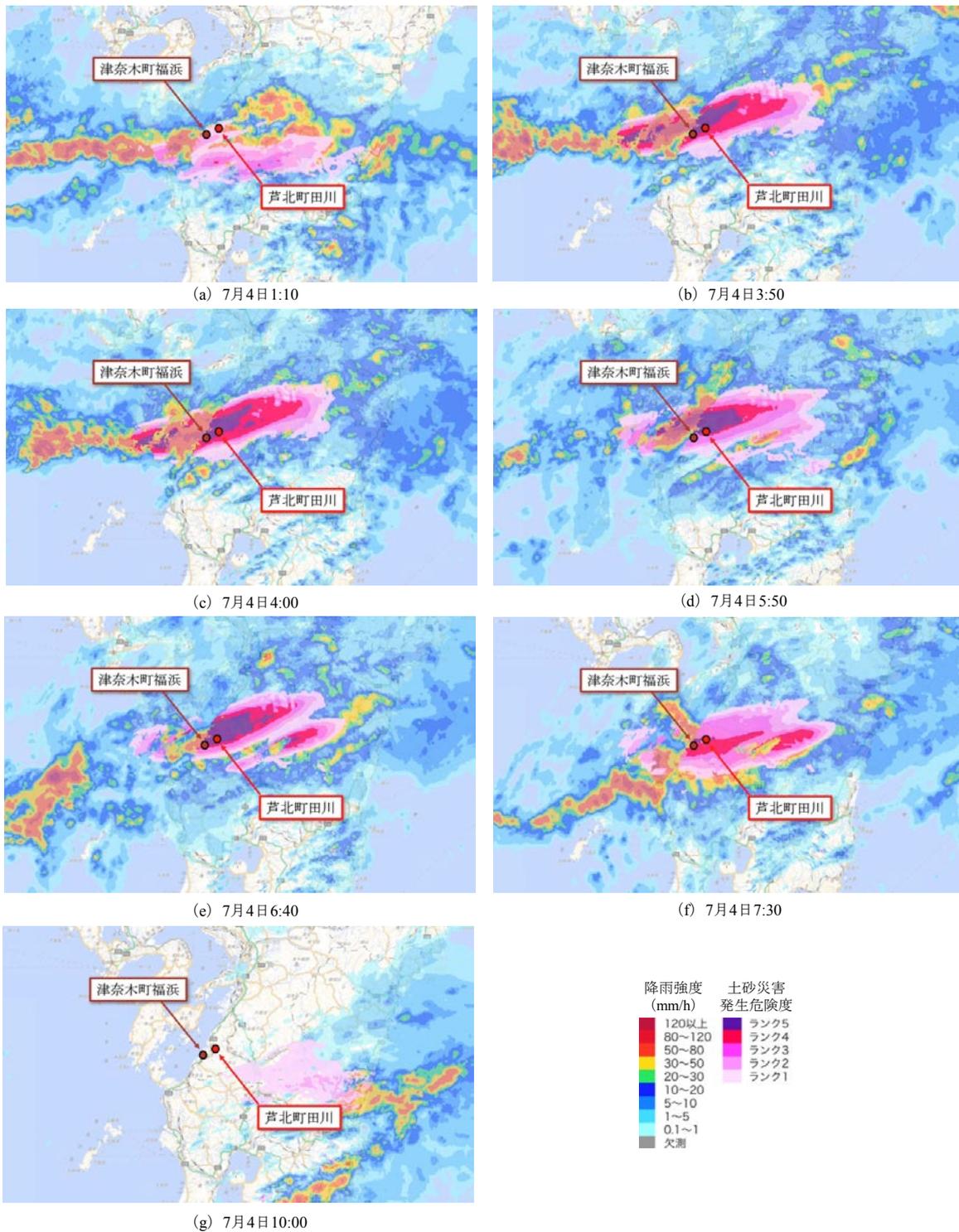


図 10.4 芦北町田川地区及び津奈木町福浜地区周辺の土砂災害危険度の時空間的な変化

んでいる。土砂は勾配が緩やかな農地に広がっており、土砂が流動化して土石流として流下・氾濫したと考えられる。

図 10.5 (c) は斜面西に位置する被災した家屋を示す。土石流が家屋に衝突して家屋が傾いているが、家屋の形状は維持している。被災時、この家屋の住民の一人は2階で就寝されていたが、特に大きな怪我は負っていない。しかし、すぐ東の赤丸で示した家屋に居た方は亡くなっている。図 10.5 (b) は全壊した家屋から約 40m、図 10.5 (c) の家屋からは約 30m 西に位置する家屋である。図に示すように、庭にわずかに土砂は流れ込んでいるが家屋の損傷は全くない。図 10.5 (e) は全壊した倉庫から約 30m 南西に位置する家屋を示している。この家屋の数 m のところまで土石流は流れてきているが、地盤が高



図 10.5 被災後の芦北町田川地区の様子

いことなどもあり、家屋に土石流は衝突していない。図 10.5 (d) は斜面下部に位置する道路地点における堆積土砂の断面である。堆積した土砂の厚さは約 1.6m となっている。土砂の平均粒径は 1cm 程度であり、比較的細かい。

10.2.3 土石流の数値シミュレーション

a) 基礎方程式

数値シミュレーションに用いた基礎方程式は、水と土砂の混合物を一つの流体として扱った一流体連続体モデルである平面二次元土石流モデル (Takebayashi and Fujita, 2020) によるものを用いる。構成則は江頭・伊藤 (2004) によるものを用いる。本解析モデルでは、細粒土砂が水と混合することによって液体として振る舞う相変化を考慮している。また、解析精度及び解析効率を高めるため、基礎方程式は一般座標系に変換したものを用いる。

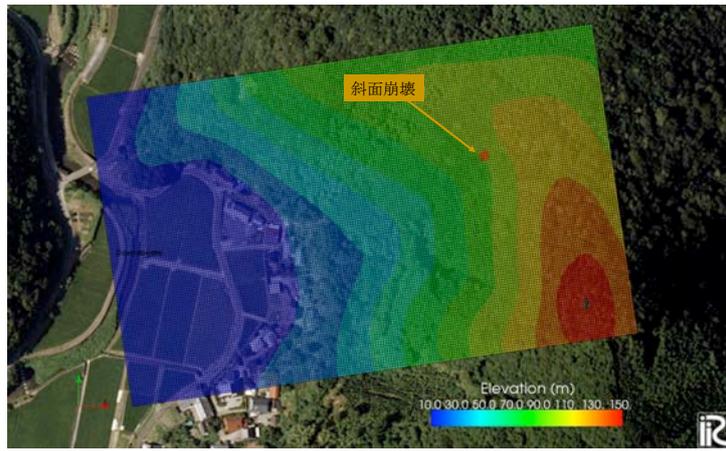


図 10.6 解析格子と斜面崩壊（芦北町田川地区，背景：GSI）

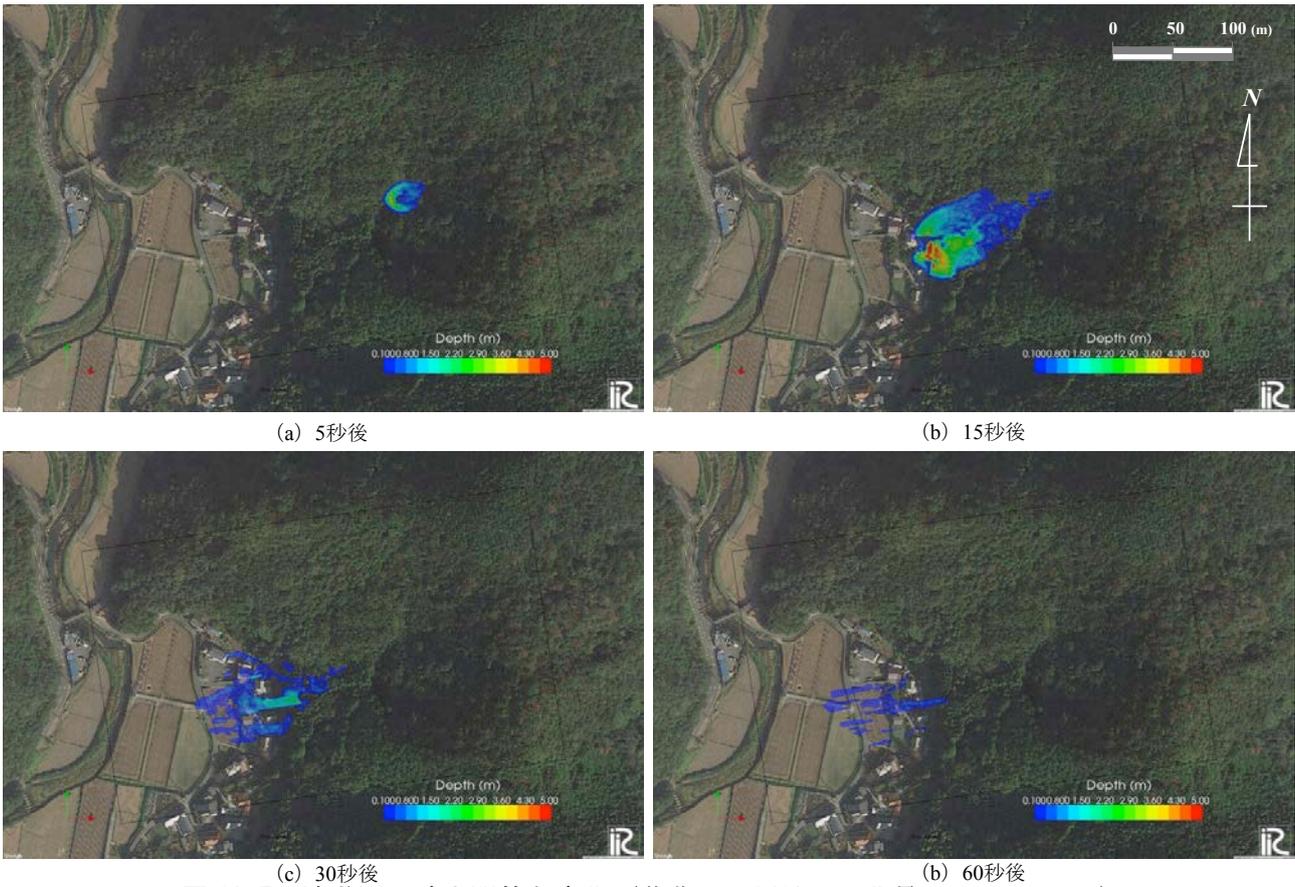


図 10.7 流動深の時空間的な変化（芦北町田川地区，背景：Google Earth）

b) 解析条件

図 10.6 に解析に用いた計算格子を示す。平均格子幅は 2m であり，格子総数は 23595 である（流下方向 195，横断方向 121）。斜面崩壊は，横断方向 8m，流下方向 8m，深さ 0.5m で発生したとし，崩壊した土砂は間隙水と混合してすぐに流体化すると仮定する。河床材料の平均粒径は 1cm，不安定土砂の厚さは 0.5m としている。

c) 解析結果

図 10.7 に数値シミュレーションによって得られた流動深の時空間的な変化を示す。芦北町田川地区の土石流は，発生から 15 秒で宅地に到達しており，土石流発生後の避難では間に合わないことがわかる。斜面の勾配は約 25 度と急勾配であり，数値シミュレーションによる土石流の平均速度も 12.7m/s（時速 46km）と土石流としては少し速い速度となっている。図 10.8 に数値シミュレーションによって得ら

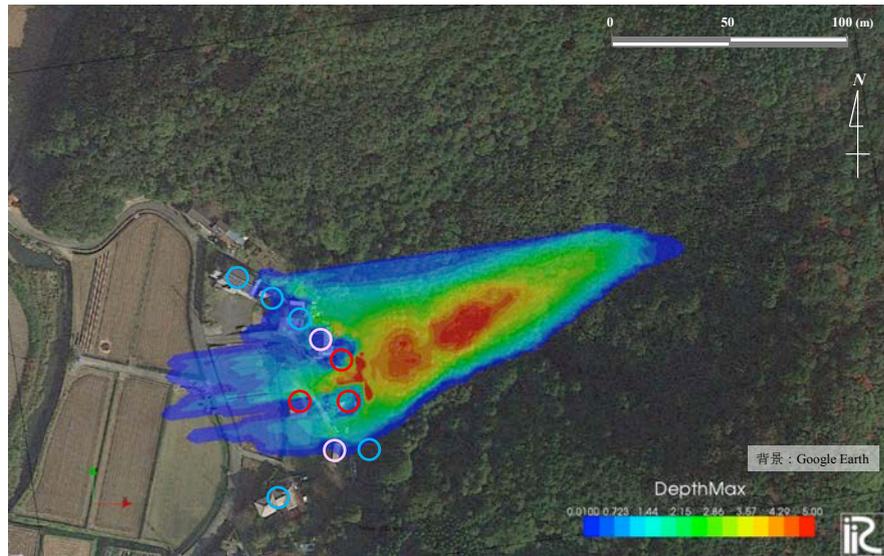


図 10.8 最大流動深の空間分布（芦北町田川地区，赤丸・ピンク丸・青丸は，それぞれ，全壊家屋・半壊家屋・損傷無しの家屋の位置を示す.）

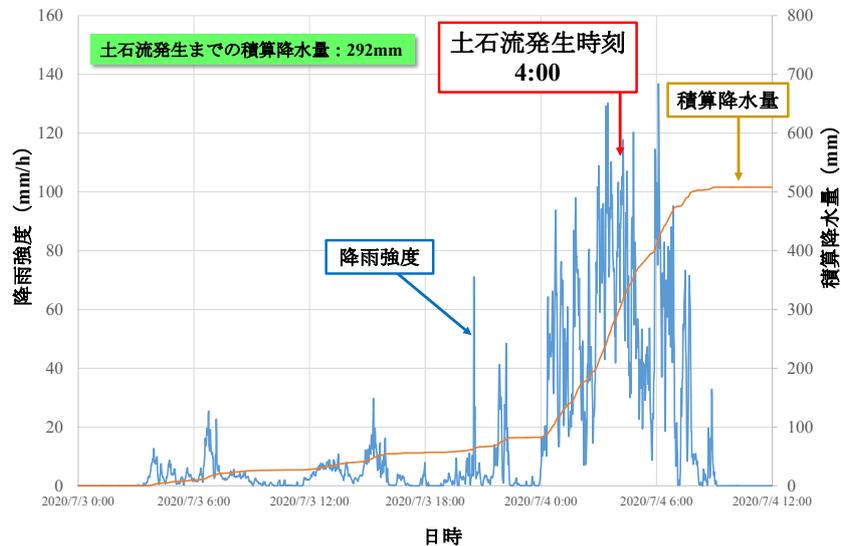


図 10.9 CX レーダーから得られた津奈木町福浜地区の降雨強度の時間変化

れた最大流動深の空間分布を示す。溪流の出口に二階建ての家屋が存在していたが，土石流によって全壊となった（ANNnewsCH, 2020）。また，すぐ隣の家屋も半壊～全壊の状態である。数値シミュレーションによると，倒壊した家屋に土石流が衝突した時の土石流の深さは2m～3mであり，家屋に衝突することによる迫り上がりにより，一時的に5m以上となっている。一方，現地調査の結果と同様に，全壊した家屋から数十m西，もしくは南の家屋周辺には土石流が到達していないか，到達していても流動深が浅い。これらのことは，土石流の流動特性を事前に把握できていれば，遠方の避難所まで行かなくてもわずか数十mの移動による避難で助かることがわかる。さらに，土石流が到達していても流動深が浅い場合は，二階への垂直避難で十分であることがわかる。

10.3 津奈木町福浜地区

10.3.1 降雨特性

図 10.9 に CX レーダーから得られた津奈木町福浜地区の土石流発生斜面の降雨強度の時間変化を示



図 10.10 被災後の津奈木町福浜地区の様子

す。芦北町田川地区と同様に、雨の降り始めは7月3日午前4時ぐらいであり、7月4日午前0時まで断続的に雨が降り、午前0時以降、降雨強度が大きくなり、時間換算の降雨強度が100mm/hを超えた時間帯もあった。土石流が発生したのは7月4日の午前4時ぐらいであり（ANNnewsCH, 2020）、降雨強度が強くなり始めて約4時間後であった。CXレーダー雨量による土石流発生時点における降り始めからの累積雨量は292mmであり、芦北町田川地区よりも若干少ない値となっている。

図 10.4 にリアルタイム土砂災害危険度評価システム（五十嵐ら，2016）を使って得られた、土砂災害危険度の時空間的な変化を示す。4日1時ごろから津奈木町福浜地区においても土砂災害危険度が上昇しはじめ、土石流が発生した4時には危険度が非常に高い値となっており、本システムにおいても土砂災害の発生を予測できていることがわかる。津奈木町福浜地区では、5時50分ごろに土砂災害危険度のランクが下がるが、再び6時40分ぐらいから土砂災害危険度が最高ランクとなり、危険な状態が7時30分ぐらいまで続き、10時ごろに土砂災害の危険度表示が消えている。

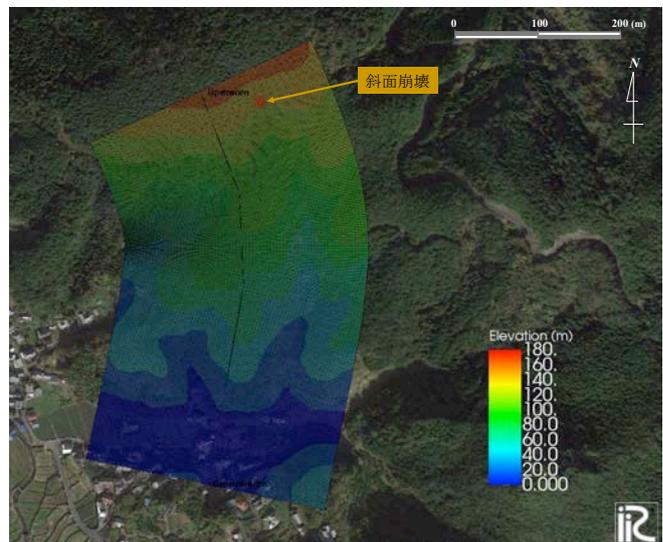


図 10.11 解析格子と斜面崩壊（津奈木町福浜地区）

10.3.2 現地調査

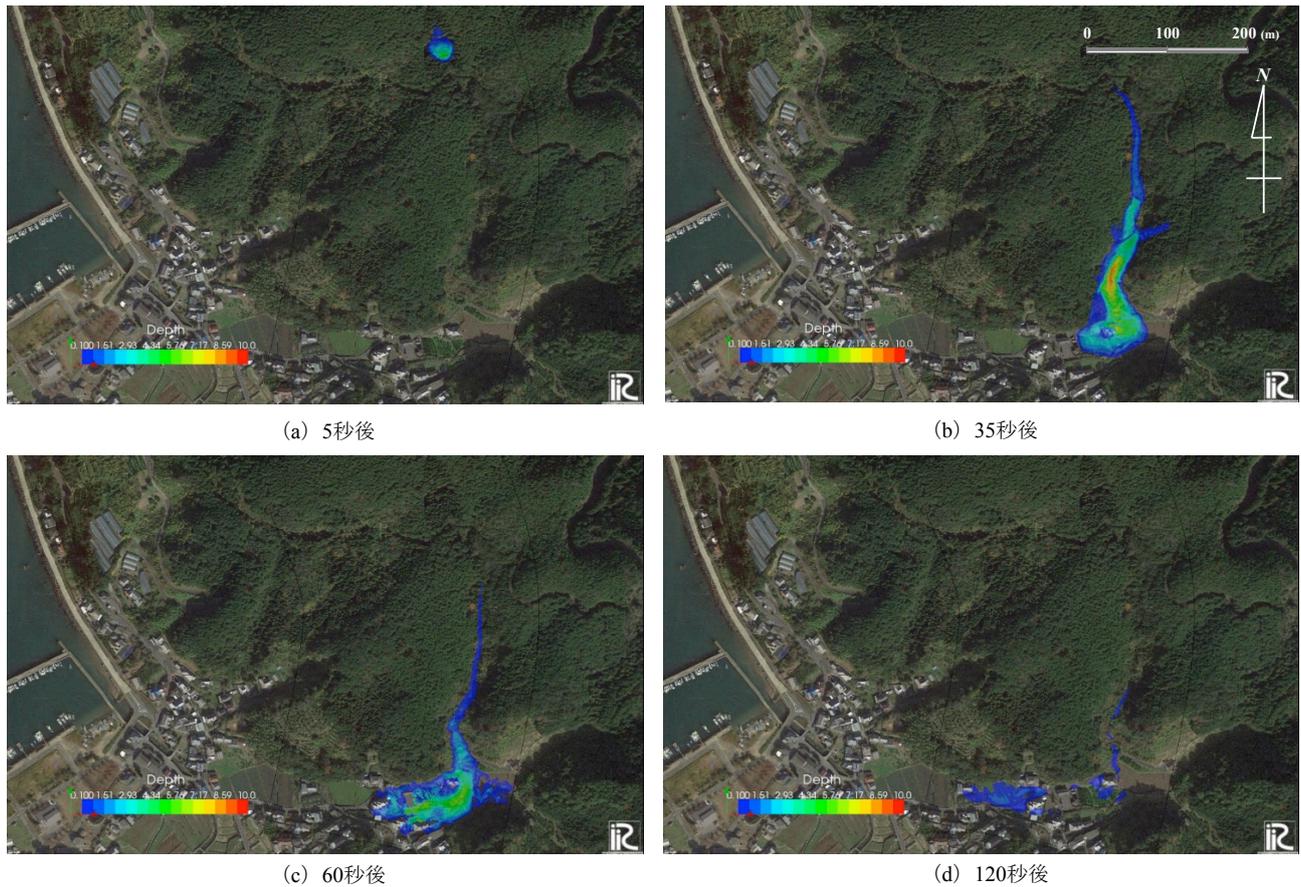


図 10.12 流動深の時空間的な変化（津奈木町福浜地区，背景：Google Earth）

図 10.10 (a) は，UAV によって土石流が流れた斜面と土砂の氾濫域を撮影したものである．崩壊した土砂は斜面を蛇行しながら南下して赤丸で示した箇所に存在していた家屋を破壊するとともに，南及び西の農地に流れ込んでいる．

図 10.10 (c) は全壊した家屋から約 30m 西に位置する被災した建物の様子を示す．建物が道路よりも低い場所に建てられており，土砂の堆積厚も約 1.8m と厚くなっている．また，すぐ西の倉庫も外壁が損傷している．しかし，これらの建物の 2 階はほとんど被災していない．図 10.10 (b) は図 10.10 (c) の建物に面する道路横の盛土の様子である．約 2m の高さの盛土上の植生が枯死しており，流動深が 2m ～3m 程度であった可能性を示している．図 10.10 (d) より，直径 1m 程度の岩も流出しているが，流出土砂の多くは比較的粒径の小さい土砂であることがわかる．

10.3.3 土石流の数値シミュレーション

a) 基礎方程式

数値シミュレーションに用いた基礎方程式は，芦北町田川地区の数値シミュレーションと同様に，水と土砂の混合物を一つの流体として扱った一流体連続体モデルである平面二次元土石流モデル（Takebayashi and Fujita, 2020）によるものを用いる．

b) 解析条件

図 10.11 に解析に用いた計算格子を示す．平均格子幅は 2m であり，格子総数は 38354 である（流下方向 254，横断方向 151）．斜面崩壊は山頂付近で発生したものと考え，横断方向 12m，流下方向 12m，深さ 0.75m で発生したとし，崩壊した土砂は間隙水と混合してすぐに流体化すると仮定する．河床材料

の平均粒径は1cm, 不安定土砂の厚さは0.8mとしている。

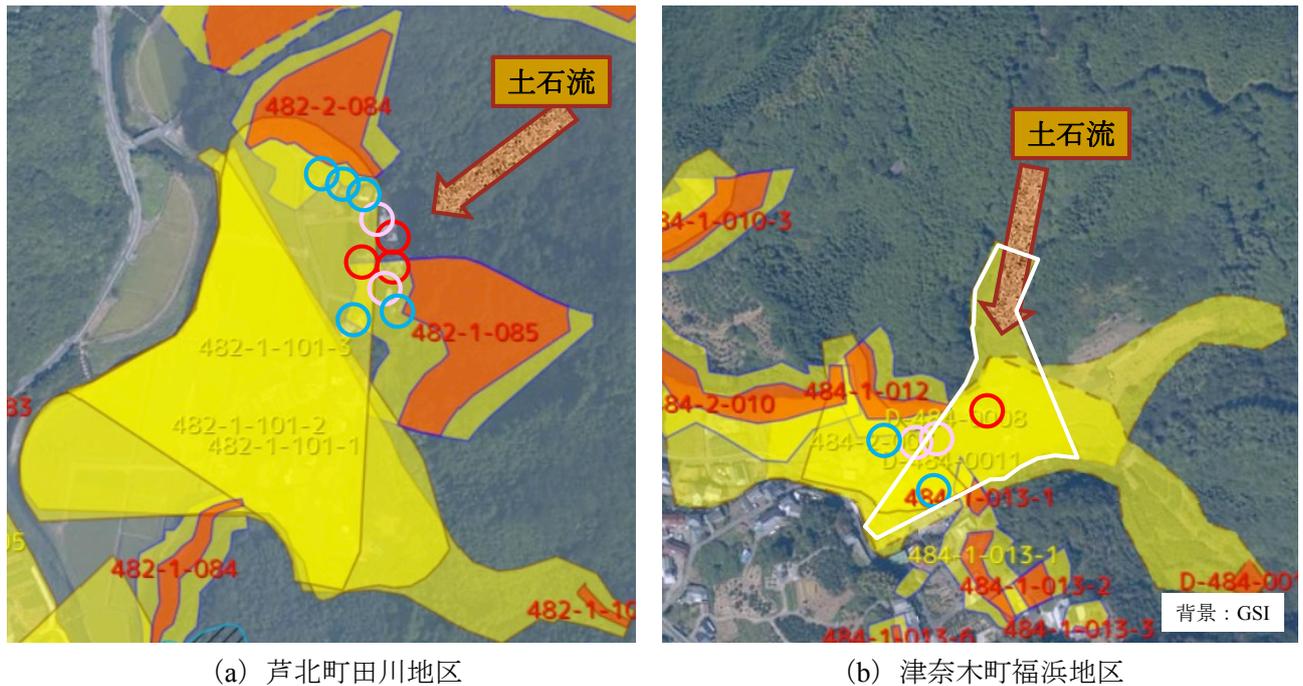


図 10.13 土砂災害警戒区域と被災家屋の場所（赤丸・ピンク丸・青丸は、それぞれ、全壊家屋・半壊家屋・損傷無しの家屋の位置を示す。）

c) 解析結果

図 10.12 に数値シミュレーションによって得られた流動深の時空間的な変化を示す。津奈木町福浜地区の土石流は、発生から 32 秒程度で宅地に到達しており、こちらも土石流発生後の避難は難しいと考えられる。斜面の平均勾配は 17 度であり、芦北町田川地区よりは緩勾配であるが、流動距離が長いことにより土石流が発達して速度が速くなり、斜面での土石流の平均速度は芦北町田川地区とほぼ同じ 13.4m/s（時速 48km）であった。津奈木町福浜地区についても溪流の出口に二階建ての家屋が存在していたが、土石流で全壊となっている（毎日新聞, 2020）。土石流が倒壊した家屋に衝突した時の土石流の深さは約 4m であり、迫り上がりを考えなくても 2 階に到達するほどの深さであった。一方、約 30m～40m 西の建物にも土石流は流れているが、数値シミュレーションによると、家屋周辺の土石流の最大深さは約 2m～3m であり、土石流の速度も遅く、家屋が破壊される可能性が低い。そのため、今回土石流が発生した溪流からの土石流に着目すると、わずか数十 m 西の建物であれば垂直避難で対応可能と考えられる。

10.4 コロナ禍での土砂災害からの避難

図 10.13 に芦北町田川地区と津奈木町福浜地区の土砂災害被災地周辺の土砂災害警戒区域を示す。土砂災害警戒区域は、人家などの保全対象がある場所に対して、都道府県が土砂災害の危険性が高い領域を調査・指定しているものである。指定対象地域が非常に多く存在するため、警戒区域内に存在する家屋や微地形などの形状は考慮せず、地図による地形情報のみで土砂災害警戒区域の範囲が決められている。一方、図 10.12 に示すように、土石流の流動深は土砂災害警戒区域の中でも空間的に分布している。これは、土砂災害警戒区域の中にも土砂がほとんど流れてこない場所や土砂が流れてきても流動深が浅く、危険な状態で流れてこない場所が存在することを示す。つまり、土砂災害による危険度が土砂災害

第4編

警戒区域の中でも空間的に分布しており、危険度の違いによって避難方法を選択できることを示す。例えば、**図 10.5 (b)** の家屋のように、土石流がほとんど流れてこない家屋の住民は避難行動そのものが不要である。また、土石流が流れてきても流動深が浅い場合は、2階への垂直避難で対応可能である。

コロナ禍では、避難所に多くの住民が避難して三密となることはできる限り避けたい。そのため、避難所に行かずに垂直避難や避難をしないという選択をできる住民が増えるとよい。また、**図 10.3** や**図 10.9** に示すように、土石流発生時は降雨強度が非常に強いので、避難所への避難行動が大きなリスクを伴うことになるため、避難所に行かずに垂直避難や避難をしないという選択をできる方がよい。洪水の氾濫現象などは、空間的に非常に広い範囲が水没し、数十 m 離れても同様な浸水被害が発生していることが多いが、個々の土石流現象による被災範囲は洪水氾濫に比べると非常に狭いので、芦北町田川地区や津奈木町福浜地区の土石流のように、わずか数十 m の違いによって被災リスクが大きく異なる。そのため、土砂災害警戒区域内の土砂災害危険度の空間的な変化を考慮することにより、三密を抑制するとともに実行しやすい避難方法の選択が可能となる。

10.6 まとめ

熊本県芦北町田川地区と津奈木町福浜地区で発生した土砂災害の現地調査を実施するとともに、土石流の数値シミュレーションを実施して土石流の流動特性を検討した。両地区ともに、溪流の出口に位置する家屋が全壊している一方で、数十 m 離れた家屋は半壊もしくは全く被害を受けていない状態であった。これは、溪流出口周辺に居住の住民は避難所や近くの安全な場所への避難が必要である一方、溪流出口から溪流に直角方向に数十 m でも離れば家屋の損傷は小さいため、垂直避難で対応可能であると考えられる。コロナ禍の中、避難所での三密を防ぐため、分散避難が求められている。また、豪雨中に遠い避難所に移動することは生命を危険にさらすことになる。そのため、土砂災害警戒区域内の土砂災害危険度の空間的な変化を考慮することにより、避難所に移動しない別の避難方法を選択することが可能となる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、熊本県芦北町田川地区の住民の方から被災時の状況について情報提供頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

ANNnewsCH : <https://www.youtube.com/watch?v=Z7WcfSM8uTY>, 2020.

江頭進治, 伊藤隆郭: 土石流の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門Web 会誌, Vol.12, No. 2, pp. 33-43, 2004.

五十嵐孝浩・竹林洋史・浜田裕貴・的場萌実・飛岡啓之・澤田悦史・平川了治: “生命の危険からの自発的回避”のための土砂災害危険情報サービスの構築, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_128 5-I_1290, 2016.

国土交通省: 令和2年7月豪雨による土砂災害発生状況(9月30日_18:00時点), 2020, https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2_07gouu_2009301800.pdf.

毎日新聞: <https://mainichi.jp/articles/20200705/k00/00m/040/082000c>, 2020.

Takebayashi H. and Fujita, M.: Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensio

第4編

nal Continuum Body Model, Geosciences, 10, 45, 2020.

第11章 まとめ

京都大学 竹林洋史

河川災害グループでは、各地の氾濫流の水深・流速の実態を現地調査及び衛星画像で把握するとともに、流下能力を大幅に上回る流量における河道、盆地および谷底平野での洪水流下特性を現地調査と数値シミュレーションで明らかにした。また、流域からの土砂・流木などの流出特性も現地調査と数値シミュレーションで明らかにした。さらに、これらの結果に基づいて計画規模を大幅に上回る豪雨及び洪水時における河川災害軽減策について検討した。河川災害グループによって得られた成果をまとめると、以下のようである。

- (1) PALSAR-2合成開口レーダ画像と数値標高モデル(DEM)を組み合わせて水深分布を推定する方法の迅速化・高精度化に資する検討を行った。既存の氾濫想定を利用することで、レーダ波の陰となる箇所を誤って水域として検出することを防ぎつつ、仮想水面の設定に有用なエリア分割を行うことができた。加えて、エリアごとの浸水域境界の標高分布の整理により、好適な水面高の推定が行える可能性が示された。また、民間の高解像度光学衛星コンステレーションによる日々の観測成果を利用し、発災前後の家屋の移動方向等の被災情報を整理した。
- (2) 支川からの流入も含めたピーク流量を、推定法、洪水追跡モデルおよび検証委員会の推定流量からまとめた。その結果、人吉下流の区間では $7,400\text{m}^3/\text{s}$ の流量が流れたと考えられる。
- (3) 胸川流域での洪水氾濫は本川合流部での堰上げによるものであるが、氾濫水は胸川と周辺の小河川によって速やかに排水される。大橋に設置された危機管理型水位計の情報は胸川流域の浸水リスクを把握する上で重要な情報であり、同観測の水位が 106.0m を超えると胸川で浸水が開始される。胸川では胸川水位観測所と大橋の危機管理型水位観測所が浸水リスクを判断する有用な情報になる。
- (4) 第3章で示した解析法は、流量の推定、洪水氾濫プロセスの推定に有用な解析手法であり、今後、同流域での水害リスクを把握する上で有用な手法であると考えられる。
- (5) 人的被害50名の中に、家屋流失による犠牲者7名と自宅2階で発見された2名が含まれている。これは、垂直避難が通用しなかった事例が多く発生したことを表しており、本豪雨災害の一つの特徴である。
- (6) 茶屋地区の家屋流失が目立ったのは、堤防沿いではなく鉄道と県道に挟まれた領域であった。また、河道の湾曲に起因した洪水流の遠心力によって流体力が大きくなる箇所が生じ、流体力が大きくなる箇所と家屋流失が集中した箇所は概ね一致していた。
- (7) 球磨川の球磨郡球磨村渡地区における氾濫流の挙動は流下型氾濫形態であった。
- (8) 人吉・球磨盆地の人的被害36名、遥拝堰から球磨村渡の間の山間狭窄部では、氾濫流によって溺死とした14名の場所を特定し、氾濫状況との関係を検討した。
- (9) 災害前後に人吉橋～大橋の区間では若干河床上昇する傾向があり、大橋上流では顕著な河床変動は無いことが認められた。局所的には、河岸付近で 1.6m 程度土砂の堆積が見られ、大橋直上流の $61\text{km}/600$ では中川公園において 1.8m 程度の洗堀が生じた。
- (10) 越流氾濫が無い条件における水路実験により、今次災害流量 $8,000\text{m}^3/\text{s}$ では橋梁が無い場合には大橋上流で 1.44m の水位上昇、更に橋桁が水没する場合には橋桁および橋脚の影響により、大橋直上位置で 1.6m 、水の手橋直上位置で 1.96m 水位上昇することが明らかにされた。

第4編

- (11) 二次流の横断方向成分から、表面流は $-200\text{m}<x<0\text{m}$ に当たる大橋上流の中川原公園上では発散域、 $200\text{m}<x<400\text{m}$ に当たる大橋下流の中川原公園上では収束域となることが認められた。また、表面流の解析によって得られた上昇流位置は橋梁がない場合には、 $-200\text{m}<x<100\text{m}$ 、 $50\text{m}<y<150\text{m}$ に当たる中川原公園の上流側、一方、下降流は $160\text{m}<x<400\text{m}$ 、 $80\text{m}<y<180\text{m}$ に当たる中川原公園の下流側である。
- (12) 八代湾に流入した流木は、海上に浮遊している流木はほとんどなく、多くは沿岸域に漂着していた。これは、八代湾の潮位は3~4m程度あり、干潮時には流木が漂着している場所は干出するとともに、湾奥内の波浪等は極めて小さいためである。
- (13) 八代海内の特徴は、全体的に湾南部（湾口）方向への流れが卓越し、特に湾中部から南部はその傾向が顕著である。湾北部（湾奥）周辺も、概して南に向かう流れが見られる。しかし、今次豪雨時は風速が速く、風向が湾奥方向で一定していたため、風の影響を受けて流木は湾奥に輸送された。
- (14) 玖珠川で2020年7月豪雨により発生したの洪水は、近年の2012年7月、2017年7月および2018年7月時よりも大きい規模であった。RRIモデルを用いた流出解析結果から、玖珠町戸畑および日田市天瀬における7月7日7時から8時の時間帯のピーク流量は、それぞれ $1800\text{m}^3/\text{s}$ 、 $2100\text{m}^3/\text{s}$ 程度であった（現時点での概算値であり、流量値は今後修正される可能性がある）。
- (15) 玖珠町戸畑地区では、流量 $800\text{m}^3/\text{s}$ 程度から右岸側の田畑へ越流が起こった後、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度から下流側で還流されるため、現状ではそれ以上の流量規模の洪水に対しては遊水効果がほとんどない。
- (16) 日田市天瀬地区では、 $1250\text{m}^3/\text{s}$ 程度から道路への氾濫が確認され、水位の上昇により天瀬橋に衝突した水が左右岸から溢れ、下流側の浸水深を増加させた可能性が示唆された。
- (17) 地表面流のみを考慮した内水氾濫解析を行い、下弓削川流域の浸水状況の再現計算を試みた。その結果、下弓削川の水位上昇が浸水域の拡大に影響したことが推察された。枝光排水機場のポンプ増設を仮定した解析では、ポンプを増設することで顕著に浸水深が軽減することがわかり、浸水軽減対策として有効であることがわかった。
- (18) 熊本県芦北町田川地区と津奈木町福浜地区ともに、溪流の出口に位置する家屋が全壊している一方で、数十m離れた家屋は半壊もしくは全く被害を受けていない状態であった。これは、溪流出口周辺に居住の住民は避難所や近くの安全な場所への避難が必要である一方、溪流出口から溪流に直角方向に数十mでも離れば家屋の損傷は小さいため、垂直避難で対応可能であると考えられる。
- (19) コロナ禍の中、避難所での三密を防ぐため、分散避難が求められている。また、豪雨中に遠い避難所に移動することは生命を危険にさらすことになる。そのため、土砂災害警戒区域内の土砂災害危険度の空間的な変化を考慮することにより、避難所に移動しない別の避難方法を選択することが可能となる。

第5編

構造物被害グループ

グループリーダー 熊本大学 松村 政秀

研究分担者 熊本大学 友清 衣利子
京都大学 西嶋 一欽
濱 武英

連携研究者 京都大学 鈴木 友志
中村 公人

第1章 構造物被害

熊本大学 松村政秀

令和2年7月豪雨により多数の人命が失われるとともに、土砂災害、河川氾濫、堤防の決壊による広範囲の浸水、橋梁流失などの甚大な構造物被害が生じた。球磨川だけでなく、その支流、芦北町や津奈木町など、構造物の被害は広範囲にわたっている。

そこで、この章では、住宅、農地、橋梁の各種構造物被害とその発生要因に関する調査結果をとりまとめ、今後の構造物のあり方を検討しようとしている。各章における具体的な調査内容はつぎのとおりである。

第2章では、芦北町や津奈木町を対象に、土砂災害に伴う住宅および人的被害に関する調査結果をまとめている。これは、土砂災害によって住宅の流出や倒壊などの損壊被害が多発したこと、死者の多くは土砂災害による犠牲者であったためであり、土砂災害警戒区域と土石災害リスクとの関連や、構造的な観点から土石流に対して耐える建物の実現性、土砂災害計画区域内の住民の生存確率を上げるための対策について検討している。

第3章では、球磨川上流域の農地の被災状況に関する調査結果をまとめている。これは、球磨・人吉や八代をはじめとして鹿本や阿蘇まで農林水産の被害は広域にわたった一方、球磨川上流部における農地被害が甚大であったためであり、山林から農地への土砂流入の原因を踏まえた農地利用のあり方を検討している。

第4章では上部構造が流失した橋梁のうち、8橋の被害状況に関する調査結果をまとめている。球磨川やその支流に沿う国道219号、県道、JR肥薩線などの交通インフラも広範囲な被災を受け、橋梁の流失・損傷メカニズムを踏まえた今後の橋梁のあり方を検討している。

第2章 熊本県芦北町と津奈木町の土砂災害による住宅被害分析

熊本大学 友清衣利子(2.1-2.4 節)

京都大学 西嶋一欽(2.5, 2.6 節)

2.1 土砂災害による被害の概要

令和2年7月豪雨により熊本県では球磨川流域で甚大な被害に注目が集まったが、熊本県芦北町と津奈木町では土砂災害によって住宅の被害が多発した。本章では、土砂災害に伴う住宅および人的被害について述べる。表2.1に芦北町と津奈木町の人的被害と住宅被害の件数を示す(熊本県危機管理防災課, 2020)。2町での死者は14名である。熊本県は死因や年齢等の情報を公開しており(熊本県災害対策本部, 2020)、14名のうち芦北町に居住する3名は水死であったが、11名は窒息死や圧死などの土砂災害によって亡くなっていた。また、死者のうち65歳未満は3名、65歳以上は11名で、比較的高齢の住民が犠牲になった。図2.1に土砂災害による住宅被害が把握できた位置を示す。津奈木町と芦北町の広い範囲に被災住宅はばらついていて、図2.1には豪雨時の浸水想定域を重ねて示す(国土地理院, 2020)。芦北町は佐敷川周辺で浸水による住宅被害が発生しており、表2.1に示した住宅被害の多くが浸水被害であると考えられるが、死者の多くは土砂災害による犠牲者であり、豪雨に伴う土砂災害での人的被害は無視できない。

表 2.1 芦北町津奈木町での被害件数

	人的被害		住宅被害		
	死者	行方不明者	全壊	半壊	一部破損
芦北町	11	1	72	910	559
津奈木町	3	0	4	12	89

2.2 土砂災害警戒区域と土砂流出範囲との関係

2.2.1 土砂災害警戒区域と被災住宅位置

わが国では、土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（通称：土砂災害防

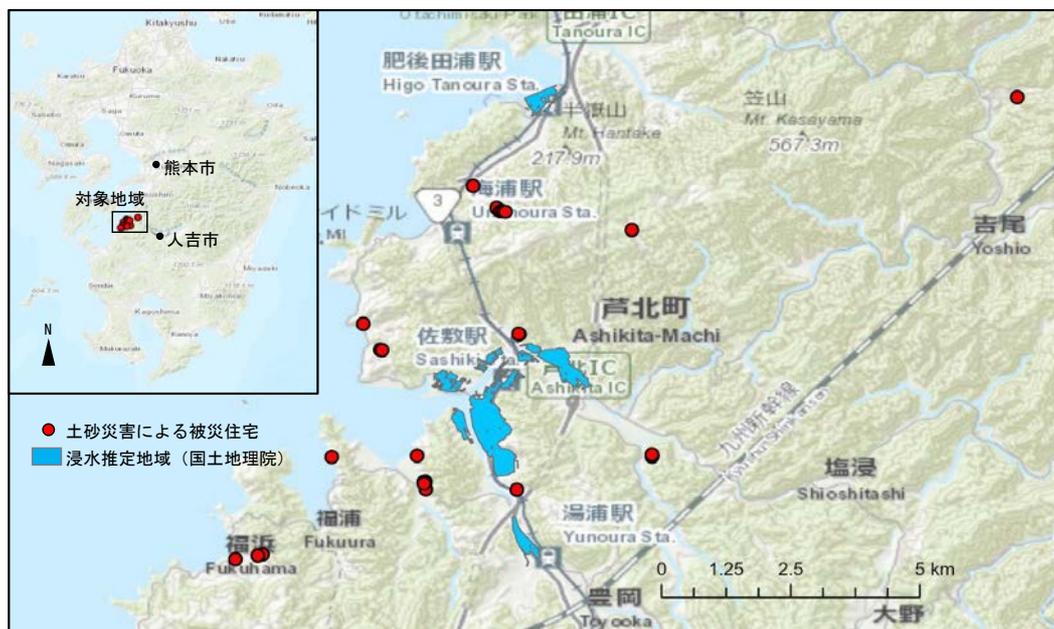


図 2.1 芦北町および津奈木町の土砂災害による被災住宅分布

止法) によって、土砂災害が発生するおそれがある区域を明らかにすることが定められている。熊本県で定められた土砂災害警戒区域(国交省, 2020)と7月豪雨で被災した住宅位置を重ねて図2.2に示す。土砂災害による被害が頻発した芦北町および津奈木町は、地形が非常に入り組んでおり、多くの地域が土砂災害警戒区域に指定されている。被災住宅のほとんどは土砂災害警戒区域(いわゆるイエローゾーン)に含まれていた。

土砂災害による住宅の被害は広い地域に分布しているが、建物被害に関する現地調査およびドローンによって上空からの土砂流出範囲の撮影を行った9ヵ所に着目する。図2.3に土砂災害警戒区域(イエローゾーン)および特別警戒区域(レッドゾーン)とドローンで撮影した写真から推定される土砂流出範囲を重ねて示す。それぞれの大まかな位置は図2.2中に(a)から(h)で示した。本章では、建物と人への影響に着目し、土砂災害の形態は論じないが、図2.3(b), (d), (e), (f)の北側は山頂部から沢に沿うように土砂が流れてきているように見える。一方、図2.3(a), (c), (f)の南側, (g), (h)では住宅背後の急斜面が崩壊したことによる被害のようである。

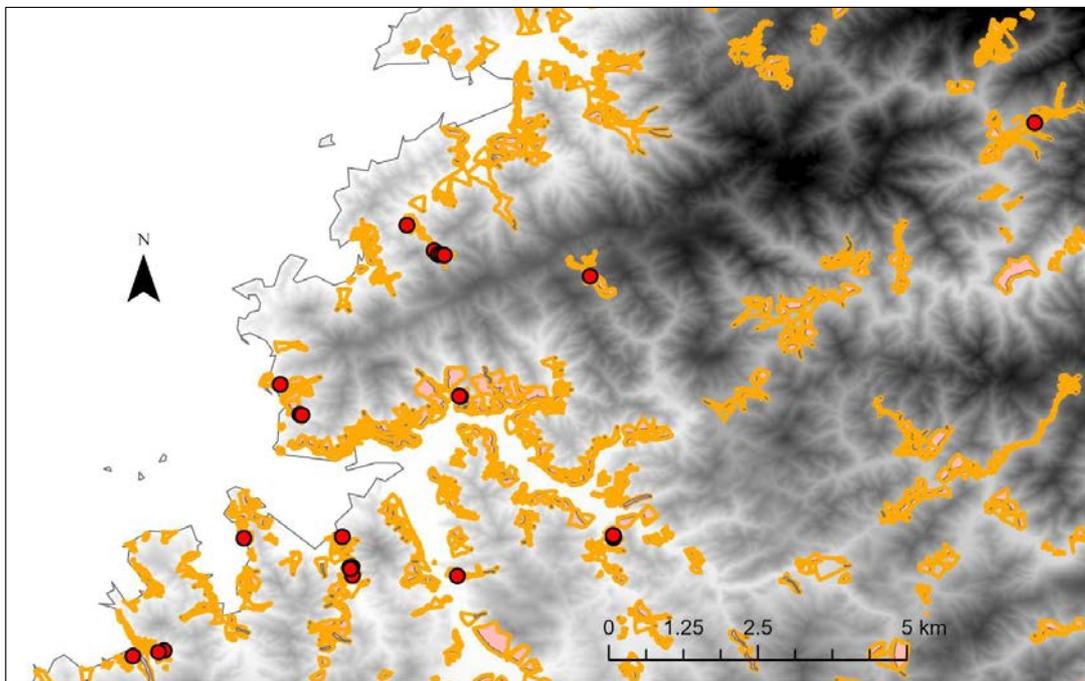


図2.2 芦北町と津奈木町の土砂災害警戒区域と被災住宅の分布

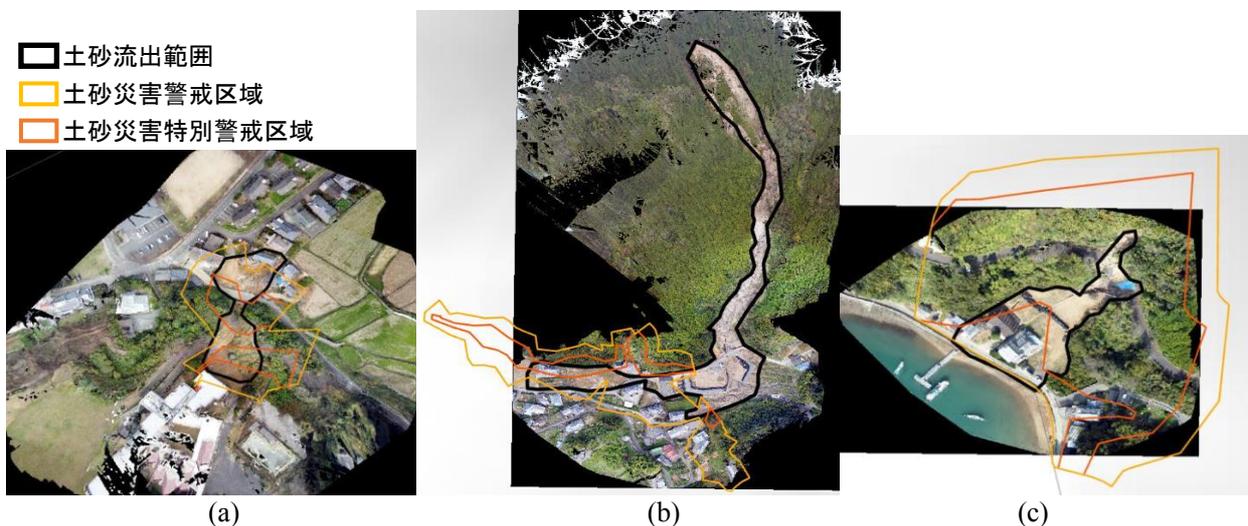


図2.3 土砂災害警戒区域と土砂流出範囲

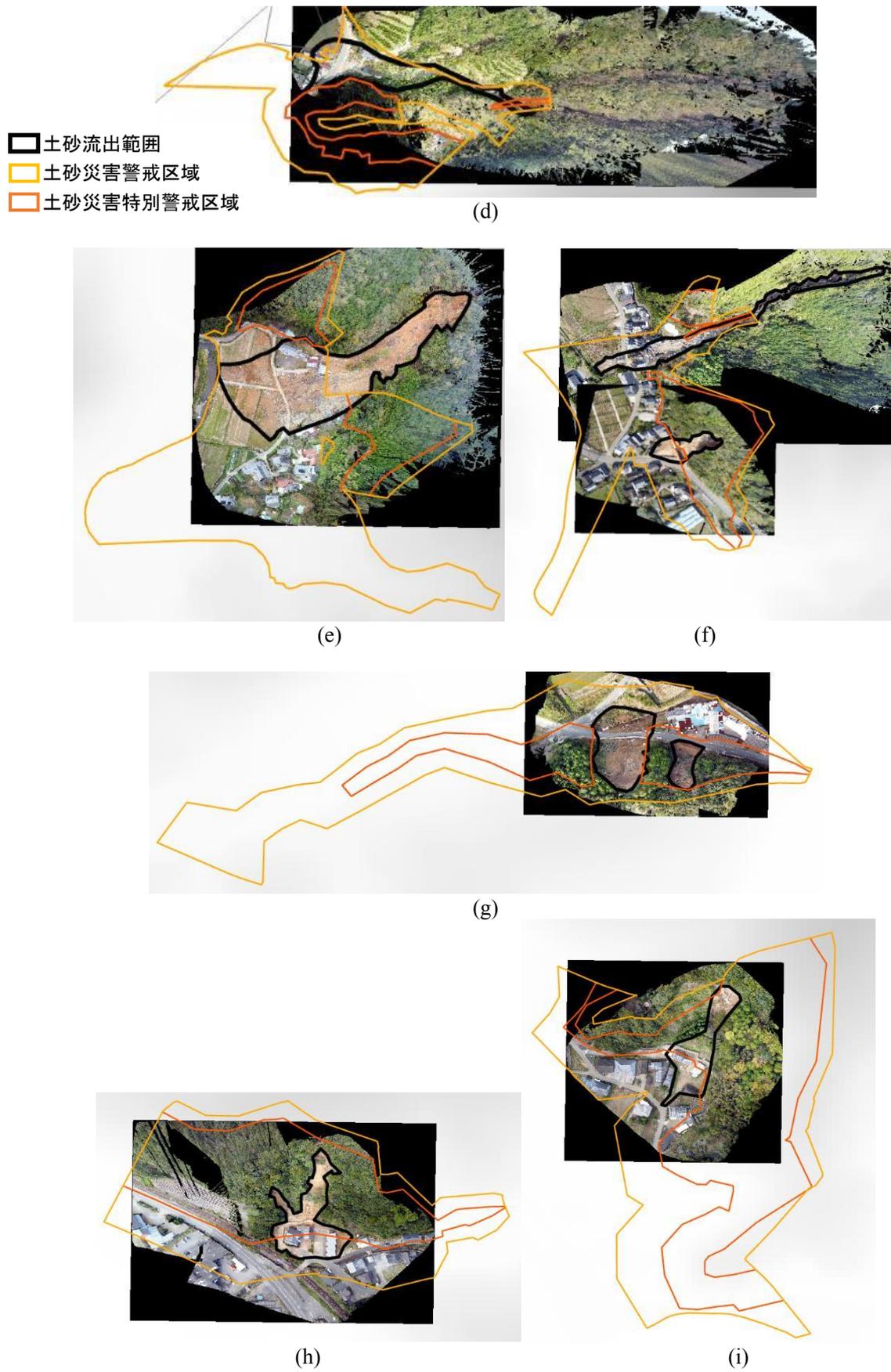


图 2.3 土砂災害警戒区域と土砂流出範囲

2.2.2 土砂災害警戒区域と土砂流出面積

図 2.3 に示した土砂災害警戒区域と土砂流出面積との対応を面積で比較する。土砂災害警戒区域の面積は国土数値情報に基づく。土砂流出面積はドローンによる撮影写真から目視によって求めた。図 2.3(a)から(i)に示す地域に対して、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）に含まれる土砂流出範囲を検討する。ここでは、土砂流出範囲が土砂災害警戒区域に含まれる場合を的中、土砂流出範囲が土砂災害警戒区域に含まれない場合を見逃し、土砂災害警戒区域ではあるが土砂が流出しなかった範囲を空振りとし、それぞれの割合を求めた。的中、見逃し、空振りの概念図を図 2.4 に示す。表 2.2 にそれぞれの地域での的中、空振り、見逃し面積を、図 2.5 にそれぞれの割合を示す。土砂流出範囲または土砂災害警戒区域となる領域を 1 として割合を求めた。

土砂災害警戒区域外に土砂が流出した見逃し面積は、区域(b)を除いてそれほど広くなく、ほとんどの地域で土砂災害の可能性が指摘されていた領域で、土砂災害が発生し空振り面積が広がっている。的中率はおおむね 10%程度で、土砂災害警戒区域の広さに対して実際の土砂流出範囲はそれほど広がらなかったことが分かる。土砂災害発生可能性のある地域を広く指定している現在の土砂災害警戒区域は、

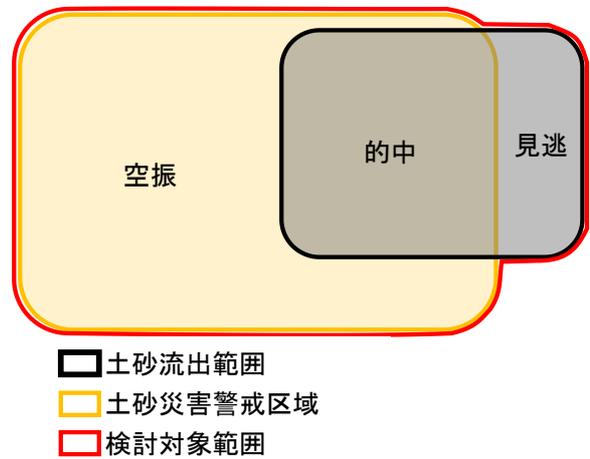


図 2.4 的中、見逃し、空振りの概念図

表 2.2 土砂災害警戒区域内外の土砂流出範囲面積

地域	的中面積(m ²) 土砂災害警戒区域内で 流出あり	空振り面積(m ²) 土砂災害警戒区域内で 流出なし	見逃し面積(m ²) 土砂災害警戒区域外で 流出あり
(a)	1696.3	1182.4	232.3
(b)	4199.3	18850.5	15142.7
(c)	2587.2	16041.0	70.3
(d)	5225.7	43002.1	608.7
(e)	9984.1	65316.2	6550.7
(f)	4964.0	45604.8	1756.3
(g)	3365.3	28304.6	0.0
(h)	3212.1	34555.9	0.0
(i)	2551.8	53054.9	0.0

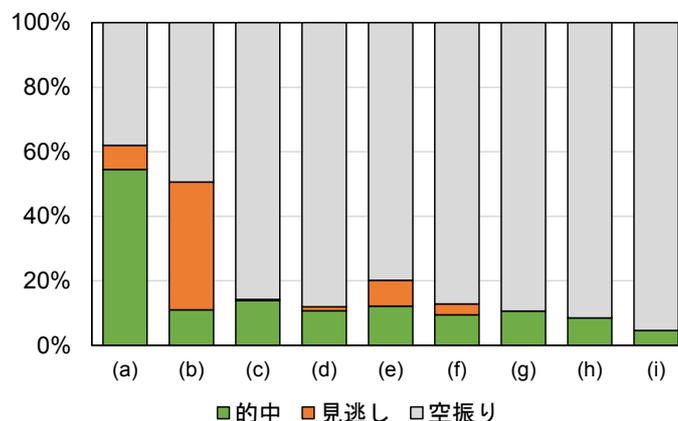


図 2.5 土砂災害警戒区域の面積に基づく的中率、見逃し率、空振り率

安全側の設定になっていると言えよう。

地域(b)は見逃し面積が広く、40%程度となった。図2.3(b)によれば、山頂付近から土砂の流出痕が残っており、溪流に沿って流下した大量の土砂によって住宅が押し流されていた。この地域での土砂災害警戒区域は山麓付近に設定されており、今回の豪雨では想定されていた土砂災害とは異なる事象が発生したと考えられる。

2.2.3 土砂災害警戒区域と土砂流出範囲内の建物の被害状況

土砂流出面積のみに着目すると建物の存在しない山地や溪流部が含まれるため、見逃し率や空振り率が過大に見積もられる。土砂災害警戒区域は、住民等の生命又は身体に危害が生ずるおそれがあることを基準に定められていることを勘案すると、警戒区域内と土砂流出地域内での建物棟数が重要になる。本項では、図2.3に示した地域に位置する建物とその被害状況に着目した。表2.3に土砂災害警戒区域内外の建物数を示し、その中、空振り、見逃しの割合を図2.6に示す。建物棟数に着目すると土砂流出範囲に含まれた建物的中率は20%程度であった。土砂災害警戒区域外であるにもかかわらず土砂の流出範囲に含まれた建物は1棟だけである。また、図2.7に土砂流出範囲に含まれた建物の被害程度別の棟数を示す。土砂によって完全に流出した建物や大きく損傷して継続使用が不可能な建物が多いが、補修をすれば継続使用が可能なものや、現在継続使用しているものも存在し、図2.6で的中と分類された建物すべてが土砂災害による顕著な被害を受けたわけではない。

表 2.3 土砂災害警戒区域内外の建物棟数

地域	的中建物(棟)	空振り建物(棟)	見逃し建物(棟)
	土砂災害警戒区域内で流出あり	土砂災害警戒区域内で流出なし	土砂災害警戒区域外で流出あり
(a)	5	7	0
(b)	7	16	1
(c)	3	6	0
(d)	8	31	0
(e)	8	15	0
(f)	9	25	0
(g)	0	8	0
(h)	3	22	0
(i)	5	42	0

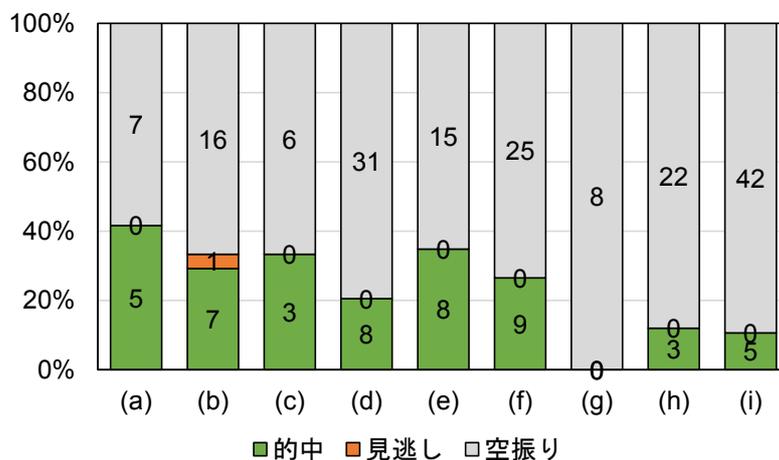


図 2.6 土砂災害警戒区域の建物棟数に基づく的中率、見逃し率、空振り率

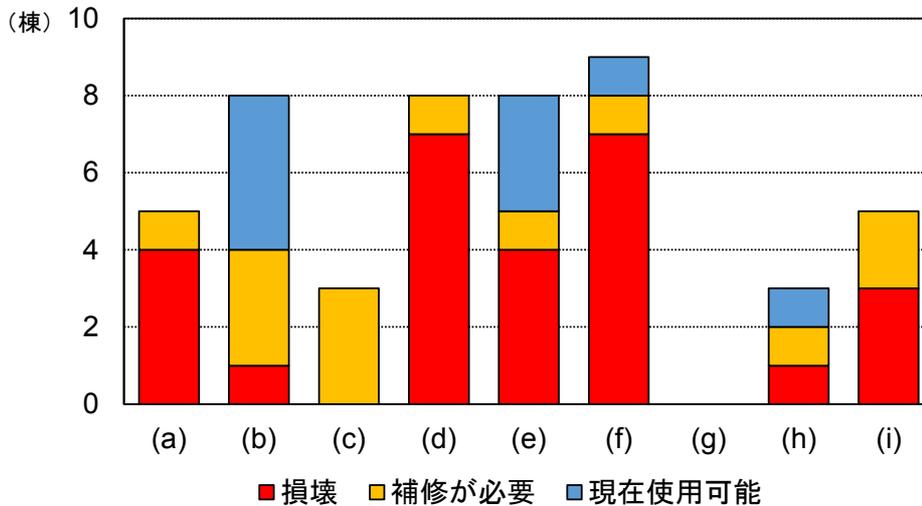


図 2.7 土砂流出範囲に含まれた建物の被害程度別の棟数

2.3 建物の損壊状況

写真 2.1 から写真 2.4 に被災建物の損壊状況を示す。建物被害を概観すると、完全に流出したもの、土砂流入側の一部が損壊したもの、土砂が流入したものの骨組は残存したもの等に分類される。損壊要因は土砂の流入によるものがほとんどであるが、隣接する建物が流されてきたことによって破損したものもいくつかあった。

写真 2.1(a)から(f)は建物が流出し、ほとんど原型をとどめなかったものである。写真 2.1(d)は土砂災害で建物が全壊した後、火災が発生したことも一因である。写真 2.1(f)はわずかに屋根部分の構造が残っているが、2階建ての居室部分はすべて押しつぶされて原形をとどめていない。

写真 2.2(a)から(h)は土砂の流入によって構造骨組が破損した建物である。後述するが、土砂災害によって開口部や壁面等が損傷しても骨組だけは残存するものも多い。構造骨組の損傷形態には、大きく二つのパターンがあるように見える。一つは土砂の流入で一階部分の柱や壁面が押し流されたため、二階部分は比較的健全に残存する層崩壊の形態である。写真 2.2(a)や(e),(g)などがそれにあたる。もう一つは、写真 2.2(b),(d),(h)などのように一部の壁面や柱が損壊したものの骨組が残存した場合である。土砂によって建物作用する荷重が不明なため、荷重と被害形態との関係を詳細に論じることはできないが、建物の一階部分すべてが流出するケースと骨組の一部が損傷するケースでは、作用する荷重や建物の強度が異なることが考えられる。

写真 2.3(a)から(i)には、土砂が流入したが構造骨組が残存した建物を示す。写真 2.3(a)から(d)は建物一階部分に土砂が流入し、埋没した。写真 2.3(a)は1階部分の土砂を撤去したため、壁面は流出しているが柱が残存していることが確認できる。写真 2.3(b)から(d)に示す建物は、土砂に埋没したままであるが、二階部分はほぼ健全な状態を保っていた。写真 2.3(e)から(i)に示す建物は、開口部から土砂が流入したものもあるが、壁面を含めて構造体が残存していた。室内は土砂で埋まっていたり、壁面は汚れていたりするが、構造体はほぼそのまま残っており、補修や清掃をすれば継続使用できる可能性がある。

写真 2.4(a)と(b)は隣接する建物が倒れかかってきたために損傷した事例である。土砂そのものによる被害ではないが、隣接する建物からの力で柱等の構造体が損傷しており、補修にはコストがかかると考えられる。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

写真 2.1 土砂によって流出した建物



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

写真 2.2 土砂によって構造骨組が損傷した建物



(g) (h)
写真 2.2 土砂によって構造骨組が損傷した建物



(a) (b)



(c) (d)
写真 2.3 土砂が流入したが構造骨組は残存した建物



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

写真 2.3 土砂が流入したが構造骨組は残存した建物

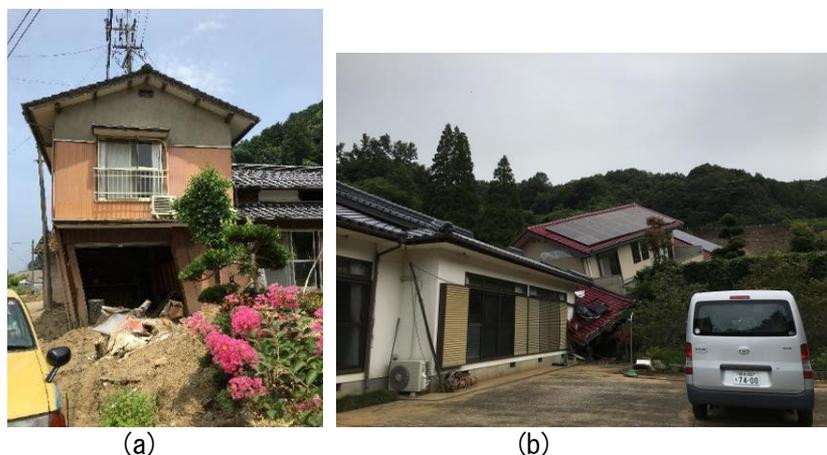


写真 2.4 隣接した建物の流出によって破損した建物

2.4 建物の被災状況と住民の安否

2.1 節に述べたように津奈木町と芦北町での土砂災害による犠牲者は 11 名に上る。図 2.8 に犠牲者の発生位置を示す。5 か所で死者が出ており、一つの土砂災害発生地域では 1~3 名が亡くなっている。いずれの地域でも死者が発生した住宅は、ほぼ流出または圧壊していた。

図 2.8 の(A)地区では、80 代の夫妻と息子 (50 代) の 3 名が犠牲となった。新聞報道 (朝日新聞, 2020) によれば、令和 2 年 7 月 4 日午前 5 時 40 分ごろに「家が土砂で流された」との通報があった。1 名は 7 月 4 日 9 時 30 分ごろ発見されたが、2 名は一時行方不明者となって遺体が発見されたのは、約一週間後の 7 月 11 日と 12 日であった。写真 2.1(a) が被災地の様子であるが、大量の土砂によって家屋ごと流されたと考えられる。図-2.8(B)地区では、1 階にいた 60 代の夫妻が犠牲となった。2 階にいた娘 (40 代) は近隣の住民に窓から救出されて無事であった。写真 2.1(f) が被災住宅の様子である。図 2.8(C)地区では、2 棟に住む 3 名が犠牲になった。新聞報道 (熊本日日新聞, 2020.7a) によれば、2 名は 60 代女性とその息子 (40 代) で、1 名は足の不自由な 90 代の女性であった。写真 2.1(b) にあった住宅はすべて流出しており、2 名の犠牲が出た。写真 2.2(e) に示す住宅では 1 階部分が圧壊しているが、この住宅で 1 名が死亡した。この住宅では、土砂が崩れる音で、女性の長男は隣家に避難して事なきを得た。犠牲となった足の不自由な女性の居室に最初に土砂が流入し、再度の土砂流入で住宅は倒壊したと報道されている (熊本日日新聞, 2020c)。図 2.8(D)地区で犠牲となったのは、70 代の夫妻である。被災後の様子は写真 2.1(d) に示す。土砂崩れによって住宅が倒壊した後、火災が発生したため、建物の痕跡はほとんど残っていない。火災が発生した要因は確認できていないが、被災者撮影の動画 (熊本日日新聞 YouTube, 2020) によれば、土砂崩れ発生時に被災住宅付近で白煙が確認されており、住宅倒壊時に何らかの要因で発火した可能性がある。別の報道 (熊本日日新聞, 2020b) によれば、この地域では 2000 年 8 月の豪雨の際にも土砂崩れが発生しており、今回犠牲となった住宅にはその時も土砂が流入していた。土砂災害警戒区域に指定されており、もともと土砂災害の危険度が高い地域であったと言えよう。図-2.8(E)地区では、夫妻が住宅の倒壊に巻き込まれ、60 代女性が犠牲となった。芦北町での聞き取りによれば、男性は倒壊した家屋から自力で這い出し助かっており、この住宅背面の斜面が崩壊し、住宅は圧壊していた。

その他の地域でも土砂の流入により多くの住宅が破損しているが、住民の生命は守られている。芦北町では、避難指示をアナウンスする際、①避難所に避難すること、②避難所に避難できない場合は、住宅の 2 階や山から離れた部屋に移動することを指示しており、2 階に避難していたために犠牲にならな

第5編

かった住民も多くいた。写真 2.2(g)や 2.3(a)は、住民が2階に避難して助かった住宅の被害形態である。前述のように1階にいた住民は死亡したが、2階にいた住民は助かった事例も複数あり、住宅2階への避難は有効であると言えよう。また、近所の声掛けで事前避難をしていた事例や土砂が崩れた気配を察知して近所に声掛けをし、地域全体で避難をしたために犠牲が出なかった例もあり、近隣住民同士の声掛けも重要であることが分かる。

2.5 まとめ

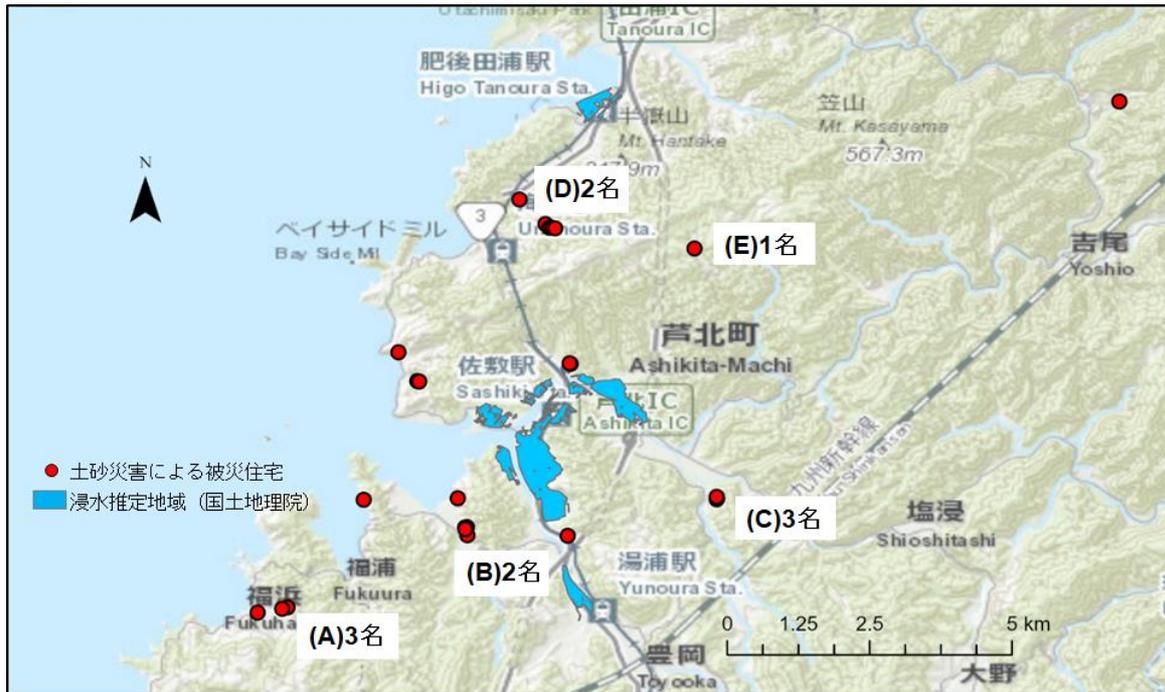


図 2.8 芦北町および津奈木町の被災住宅と死者の分布

今回調査を行った地域においては、土石流による被害を受けた住宅のうち約 50%が流出や倒壊などの損壊であった (2.2 節)。このことは、土石流による建物に対する被害の激烈さ、構造的な観点から土石流に対して耐える建物の実現性の難しさを示している。また、損壊した住宅数に対してその住宅で死亡事例が発生した割合は約 20%であり、極めて高い数字である (2.4 節)。一方で、2.2 節で分析した通り、今回調査を行った地域においては、土砂災害警戒区域外にも関わらず土石流による被害を受けた建物は 1 棟のみであり、一方で土砂災害警戒区域内であって被害を受けた建物は 220 棟中 48 棟 (約 22%) であったことから、土砂災害警戒区域は土石災害リスクが高いところ限定し、おおむね適切に設定されていたと言える。この事実、すなわち土砂災害計画区域でのリスクが真に高いことを周知することで、土砂災害計画区域内の住民に対してさらなる避難行動を促すことは可能と思われる。一方、避難が困難な住民あるいは避難のタイミングを逸した住民に対しては 2.4 節で述べたことを踏まえ、建築的な観点から、2階あるいは斜面とは反対側の居室が主たる生活の場となるような建築計画およびそのような場所への避難が可能になるような動線などを設計・改修時に考慮することで生存確率を上げる工夫が可能であると考えられる。

2.6 今後の課題

極めて大きな犠牲を払って得られたこれらの課題や教訓を安全で安心なまちや地域づくりに役立てていくためには、災害情報が風化する以前に緊急に学術調査に着手し、英知を集結して上記の課題の解明を行い、今後の豪雨時の防災・減災に資する技術や情報の迅速な提示が重要となる。一方、豪雨などの極端気象現象の性質が変容しつつあり、避難が困難な高齢者の割合が多くなるなど、社会構造も変容している現状を踏まえ、建築的な観点からも被害低減に資する対処法を平時から議論・検討する必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、芦北町総務課防災交通係および球磨村復旧復興課にはデータ提供等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 熊本県危機管理防災課：（報道資料）令和2年7月豪雨に関する被害状況について，
https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/life/74612_93284_misc.pdf, 2020.12.28.
- 熊本県災害対策本部：令和2年7月豪雨に係る災害対策本部会議（第13回），
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/109910.pdf>, 2020.7.15.
- 国土地理院：令和2年7月豪雨に関する情報，https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R2_kyusyu_heavyrain_jul.html,
2020.8.5参照.
- 国土交通省：国土数値情報（土砂災害警戒区域データ），https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v1_3.html, 2020.12.18参照.
- 朝日新聞：迫る濁流、屋根にしがみつき救助待つ豪雨ドキュメント，
<https://www.asahi.com/articles/ASN742HFNN74UEHF001.html>, 2020年7月4日 20時53分, 2021.2.8参照
- 熊本日日新聞：暮らし奪った土砂，令和2年7月6日付，全日版
- 熊本日日新聞：命奪う豪雨また襲った，令和2年7月11日付，全日版
- 熊本日日新聞：災禍「想定外」生死の境は…，令和2年7月18日付，全日版
- 熊本日日新聞YouTube：熊本豪雨被災者が記録した動画，<https://www.youtube.com/watch?v=7UdibHH94jM>,
2021.2.8参照



図 3.2 幸野溝用水路に堆積した土砂（熊本県農林水産部提供）



図 3.3 幸野溝用水路を流れる濁水（熊本県農林水産部提供）

3.2 今後の対策に対する提言

水田域の洪水緩和機能を強化させる取り組みの一つとして、「田んぼダム」と呼ばれる方法がある。これは排水柵に、たとえば内径5cmの孔が空いた落水量調整板（以下、調整板）を設置し、大きな降雨がある場合に水田から排水される量を抑制し、水田からのピーク流出量を軽減させることを目的としている。今回の豪雨災害を受けて、熊本県では積極的に流域治水に取り組む方針を打ち出しており、その一環として田んぼダムの導入が検討されている。ここでは、田んぼダムの効果について紹介する。田んぼダムは新潟県での取り組みが先進的であり、すでに吉川ら（2009a; 2009b）によってその洪水緩和機能の評価がなされている。また、流域上流部への実施例としては、奈良県大和川流域がある。奈良県においても過去の洪水の経験から流域治水の重要性が認識されており、田んぼダムが一部の地域で導入されている。以下に、大和川流域に位置する圃場において、田んぼダムの取り組みを行った場合の洪水緩和効果を水文観測と流出モデルによるシミュレーションによって定量化した方法とその結果を示す。

対象圃場の調整板と排水柵の構造は、圃場排水柵に調整板を垂直に設置する方式であり、この方式は、調整板とは別に、従来通り排水柵に堰板を設置することで、農家が湛水深を管理することができる（機能分離型）ため、農家は調整板に触れることなく通常の営農が可能である。調整板を設置した排水柵の断面構造（灌漑期間中）を下図に示す。排水柵の下方側面には塩ビパイプが設置されており、排水路へと通じている。排水柵上流側の水位が排水柵深さよりも低いとき、水田からの流出量はそのまま排水柵からの流出量となる。つまり、調整板はピーク流出量緩和機能を発揮しない。排水柵上流側の水位が排水柵の深さを超えるとき、水田と排水柵の水位が連動して動き、調整板はピーク流出量緩和機能を発揮する。なお、排水柵からの流出量は、排水柵と調整板の構造が潜りオリフィスとみなせるため、調整板の上下流側の水位を測定することで、その水位差から計算することができる。

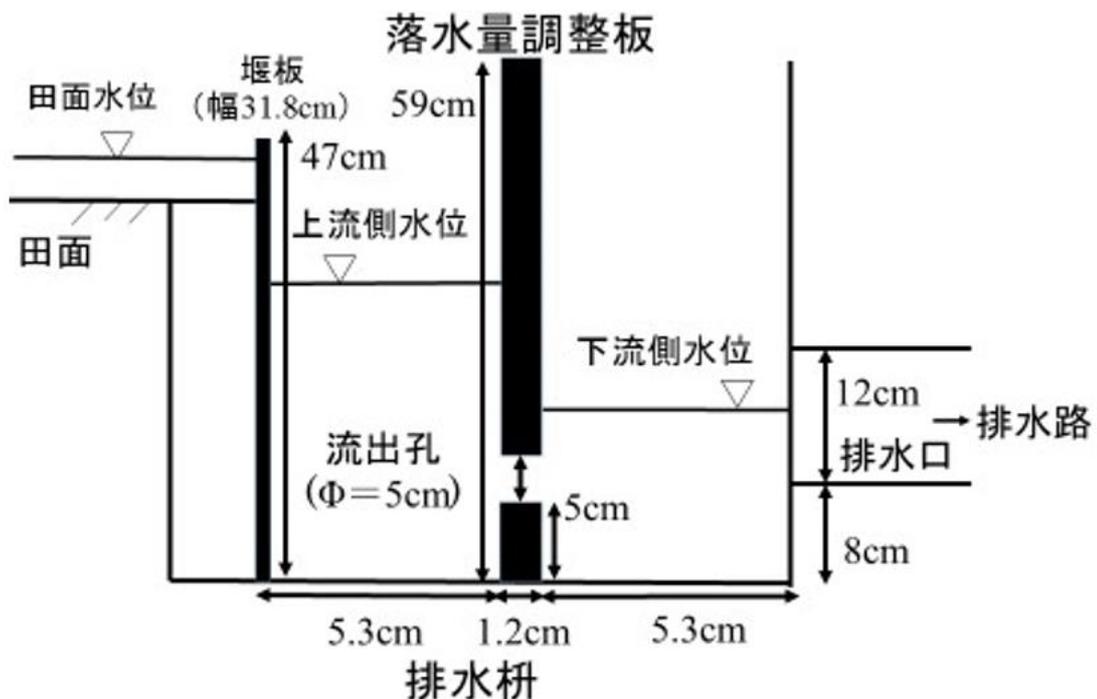


図 3.4 分離型田んぼダムの構造

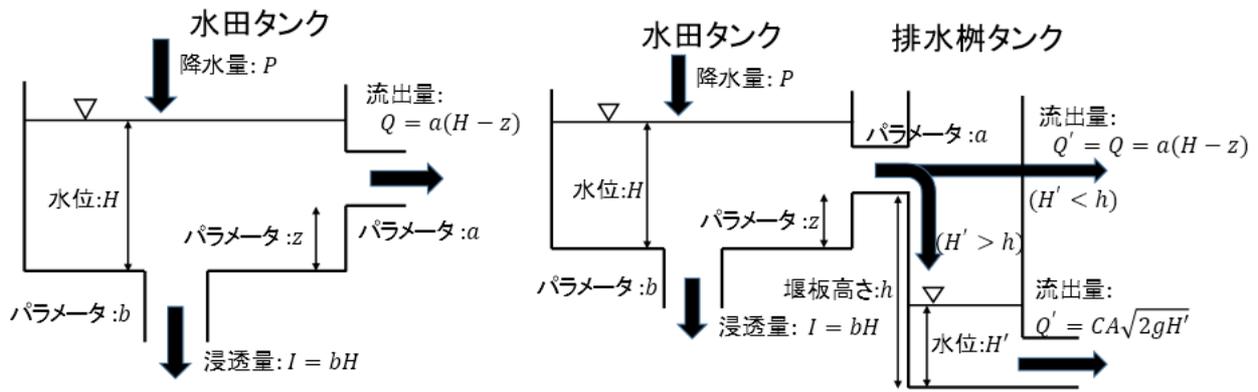


図 3.5 水田と分離型田んぼダムの概念図（左：非実施水田，右：実施水田）

田んぼダムの洪水緩和機能は、水収支に基づいた経時的な流出量および浸透量解析が可能である水田タンクモデルを用いて行うことができる。また、タンクモデルのパラメータ a 、 b および z は、実際に非灌漑期および灌漑期のそれぞれに観測された調整板の機能が發揮されていない期間における降水イベント時の流出量と水田タンクによる流出量が適合するように、SCE-UA 法 (Duan ら, 1992) などのパラメータ同定手法を用いて同定する。

非灌漑期および灌漑期において、田んぼダム実施水田と非実施水田からの降雨流出応答の違いを下図に示す。非灌漑期では、非実施水田からのピーク流出量 11.5 mm h^{-1} に対して、実施水田からのピーク流出量は 4.4 mm h^{-1} であり、約 61% のピーク流出量の緩和が見られた。灌漑期では、非実施水田からのピーク流出量は 8.7 mm h^{-1} に対して、実施水田からのピーク流出量は 5.4 mm h^{-1} であり、約 37% のピーク流出量の緩和が見られた。灌漑期では、降雨開始時の湛水深によって流出の様子が変化する。つまり、降雨前の貯留可能量の違いが非灌漑期と灌漑期のピーク流出量緩和率に違いとなった。

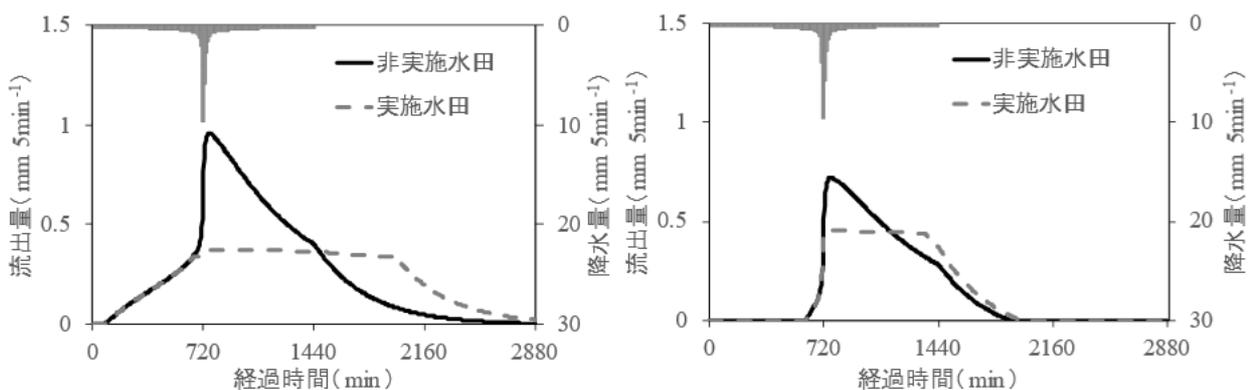


図 3.6 水田と田んぼダムの降雨流出応答の比較（左：非かんがい期，右：灌漑期）

また、確率降雨年とピーク流出緩和率の関係を下表に示す。下表では、奈良と新潟 (吉川ら, 2009a) の比較も示す。数値解析により、確率降雨年の増加とともにピーク流出量緩和率は増加することが示唆された。奈良県のピーク流出量緩和率は新潟県と比べて小さい傾向がみられたが、これは水田の流出特性や浸透特性および排水樹の寸法などによるものである。

表 3.1 確率降雨年と田んぼダムのピーク流出量緩和率

確率降雨年 (降雨規模)	ピーク流出量の緩和率	
	奈良県	新潟県
10年	53%	64%
50年	65%	74%
100年	68%	77%

以上より、球磨川上流域での田んぼダムの導入においては、各水田の流出特性に基づいて適切な排水柵や堰板形状を設定しなければならない。田んぼダムの本質的な機能は水田に降った降雨の流出を抑制することにあるが、上記のように、山間部から流入を受ける一部の水田には遊水地としての利用可能性があるため、実際に水田の洪水緩和を検討する上では、機能の調整が特に重要と考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、熊本県農林水産部からデータ提供等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. (1992) : Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Water Resource Research*, 28(4), 1015-1031.
- 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢眞一 (2009a) : 水田耕区における落水量調整板のピーク流出抑制機能の評価, *農業農村工学会論文集*, **261**, 31-39.
- 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢眞一 (2009b) : 田んぼダム実施流域における洪水緩和機能の効果, *農業農村工学会論文集*, **261**, 41-48.

第4章 球磨川流域における橋梁被害

熊本大学 松村政秀

4.1 橋梁被害概況

2020年7月4日未明から熊本県南部の一級河川・球磨川流域に降り続いた豪雨により、多数の人命が失われるとともに、河川氾濫、堤防の決壊による広範囲の浸水、土砂災害などの甚大な被害が発生した。球磨川やその支流に沿う国道219号、県道、JR肥薩線などの交通インフラも広範囲にわたり被災した。橋梁では、県管理の11橋、市町村管理の28橋の計39橋が被災し、このうち14橋（鋼橋は8橋）の上部構造が流失した。鉄道橋の被害も大きく3橋（いずれも鋼橋）が流失した。図4.1には被害橋梁の位置を示す。表4.1、表4.2には流失した橋梁、高欄破損した橋梁の、建設年、橋零、橋長、幅員、形式をそれぞれまとめている。

橋梁被害を概観すると、広幅員で比較的重量が大きな桁形式の橋梁で流失を免れた場合は高欄が破損し、幅員が狭く支承数が少ない橋梁では支承部の損壊により上部構造が流失し、数百メートル下流に流された場合も認められた。



図4.1 被害橋梁位置

表 4.1 流失橋梁の一覧

	建設年	橋齢(年)	橋長(m)	幅員(m)	形式	損傷	
1	深水橋	1966	54	154.9	4.2	ランガーアーチ橋	流失
2	坂本橋	1954	66	120.9	4.9	トラス橋	流失
3	鎌瀬橋	1955	65	113.2	6.1	ローゼアーチ橋	流失
4	神瀬橋	1934	86	112.2	5.5	RC+ 鈹桁橋	流失
6	相良橋	1935	85	132	6.3	トラス橋	流失
7	西瀬橋	1967	53	174	6.1	トラス橋	一部流失
10	麓橋	1967	53	21.9	4.8	鈹桁橋	流失
1	大瀬橋	1984	36	100	3.2	トラス橋	流失
2	松本橋	1984	36	90	3.2	PC橋	流失
3	沖鶴橋	1983	37	179.4	5	PC橋	流失
7	新村橋	1964	56	120	1.8	鋼吊橋	流失
10	永椎橋	1968	52	15.7	4.2	RC橋	流失
11	松舟橋	1935	85	9.5	4.6	RC橋	橋脚流失
13	下大野川4号橋			13.2	4.1	PC橋	橋脚流失
18	足算瀬橋	1932	88	54.3	5.4	PCT橋・鋼桁	一部流失
1	球磨川第一橋梁	1908	112	205.3		トラス橋	流失
2	球磨川第二橋梁	1908	112	179.7		トラス橋	流失
3	球磨川第四橋梁	1937	83	322		鋼橋	流失

表 4.2 高欄破損橋梁の一覧

	建設年	橋齢(年)	橋長(m)	幅員(m)	形式	損傷	
5	球磨橋	1997	23	120.4	11.8	鋼箱桁橋	高欄破損
9	行徳橋	1955	65	10.6	5.4	RC橋	高欄破損
5	人吉橋	1957	63	224.7	9	鈹桁橋	高欄破損
6	大橋	2008	12	270	16.8	PC橋	高欄破損
14	永野橋	1967	53	9.1	4.2	PC橋	高欄破損
15	才田代橋	1995	25	29.8	4	PC橋	高欄破損
17	淡島裏参道橋	1996	24	44	3.7	鈹桁橋	橋脚傾斜, 高欄破損
19	柚木川内橋	1963	57	38	4.4	PC橋	高欄破損

すり鉢状の盆地である人吉・球磨では降雨が集まりやすく、その下流の中流域の山間狭窄部では水位が上昇しやすい地形であり、同流域ではこの100年間に十数回の洪水被害が報告されているが、今回はそれらを上回る最大流量であったとの指摘もある。災害発生メカニズムや人的・物的被害の実態・解析や、復旧に向けた取り組みが進行中である。

今回の調査では、球磨川およびその支流を中心に、流失・損傷した全39橋のうち、6橋；八幡橋（八代市坂本町）、赤坂1号橋（山鹿市鹿央町）、牧良高橋、笹の平橋、上牧良橋（湯前町浅ヶ野）、土用木場橋（水上村湯山）を除く33橋を調査した。これらのうち、流失した16橋のうち8橋を取り上げ、被災状況を報告する。

4.2 主な橋梁被害

4.2.1 西瀬橋（にしぜばし）

西瀬橋（写真 4.1(a), 1967 年, 橋長 174.0m, 幅員 6.1m）は 4 連の鋼下路式トラス橋および側道橋（下流側）からなり, このうち第 3 径間が流失した. P2 橋脚上の固定支承では固定アンカーが破断（上流側）, 残存した支承には浮き上がり（写真 4.1(c), 下流側）が認められ, 上流からの流出流木等が桁や高欄に張り付き, P3 橋脚上の可動支承の損傷が先行して径間が流失したと推察される. 側道歩道橋の線支承（写真 4.1(d)）は, いずれも上流側のピンチプレートが上方に曲げられ, 下流側のボルトが破断した. 約 40m の 1 径間の流失であったことから, 組み立て式仮橋の架設（約 43 日間）により仮復旧（9 月 4 日）された.



(a) 被災前（橋梁台帳より）



(b)



(c) 道路橋 P2 橋脚下流側



(d) 側道歩道橋 P2 橋脚上流側

写真 4.1 西瀬橋の被害状況

4.2.2 相良橋（さがらばし）

相良橋（写真 4.2, 1934 年, 橋長 132.0m, 幅員 6.3m）は 2 連の曲弦ワーレントラス橋と鋼桁橋（左岸側）の 3 径間からなり, 第 2, 3 径間のトラス橋が流失した（写真 3.2(b), (c)）。2 径間の損傷過程は今後検討を要するが, A2 橋台の固定支承（写真 4.2(d), (e)）は上流側ではピンの取り付け位置, 下流側ではピンの下側で破断し, アンカーボルトの抜け出しも観察された. P1 橋脚の複数ローラー支承は下板が残存（写真 4.2(f)）し, 橋脚上にも固定支承の一部が残存しているようである.



(a) 被災前（橋梁台帳より）



(b) 右岸側から



(c) 左岸側から



(d) A2 橋台（右岸・上流側）



(e) A2 橋台（右岸・下流側）



(f) P1 橋脚（下流・可動側）

写真 4.2 相良橋の被害状況

4.2.3 坂本橋（さかもとばし）

坂本橋（写真 4.3, 1954 年, 橋長 121.0m, 幅員 4.9m）は 2 径間のトラス橋（側道部と車道部とも）が流失し、道路橋の上流側に設置された側道橋の橋脚が倒壊し、道路橋橋脚の上流側のコンクリート製変位制限構造が破損した（写真 4.3(b)）。道路橋 A2 橋台では複数ローラー支承の損傷、変位制限構造の破損（写真 4.3(c)）、側道橋では固定ピン支承の抜け出し（写真 4.3(d)）が認められた。側道橋が先行し、隣接する道路橋とともに流失したと考えられる。



(a) 損傷前（橋梁台帳より）



(b) 橋脚および A1 橋台



(c) A2 橋台（車道橋）



(d) A2 橋台（側道橋）

写真 4.3 坂本橋の被害状況

4.2.4 鎌瀬橋（かませばし）

鎌瀬橋（写真 4.4, 1954 年, 橋長 113.2m, 幅員 6.1m）では左岸側のローゼ式のアーチ橋と右岸側の 2 径間の鉸桁橋が流失した。橋台や橋脚は残存しているが、支承部（アーチ橋はピン支承, 鉸桁橋は線支承）や落橋防止ケーブルの破断やケーブル定着部の抜け落ち, コンクリート製変位制限構造の部分損傷など連結構造が損傷した（写真 4.4(b), (c)）。固定ピン支承のアンカー抜け出しによる脱落（写真 4.4(d)）も認められた。



(a) 被災前（橋梁台帳より）



(b) A1 橋台, P1 橋脚, P2 橋脚



(c) P1 橋脚, P2 橋脚と鉄桁橋



(d) 脱落した固定支承

写真 4.4 鎌瀬橋の被害状況

4.2.5 神瀬橋 (こうのせばし)

神瀬橋 (写真 4.5, 1934 年, 大正 15 年細則, 8t(T15), 橋長: 113.0 m, 最大支間 22.1 m, 幅員: 5.5 m) では, 2 径間連続 2 連 RC 桁+2 径間連続 2 連鋼桁すべてが流失した. 一部の橋脚はフーチングごと転倒し, 残存した橋脚では支承の破損, 下流側支承の脱落が確認できる (写真 4.5(b), (c)). 直線的な河川線形に位置する本橋梁では, 河川中央部の RC 桁ほど下流へ押し流されている (写真 4.5(e)).



(a) 被災前



(b) 橋脚の転倒



(c) 支承の破損・脱落



(d) RC 桁の流失

写真 4.5 神瀬橋の被害状況

4.2.6 松本橋（まつもとばし）

松本橋（写真 4.6, 1984 年, 橋長：90.0 m, 幅員：3.2 m）では、すべての PC 桁が流失し、橋脚天端下流側が破損している（写真 4.6(b)）。周辺護岸の破損は道路路面にまで至り、JR 球泉洞駅も大きく破損していることから、被害時の水位は橋梁を超える高さまで上昇していたと考えられる（写真 4.6(c), (d)）。



(a) 橋脚および天端の破損



(b) 流出した PC 桁



(c) 周辺護岸の被災



(d) JR 球泉洞駅の破損

写真 4.6 松本橋の被害状況

4.2.7 相良橋（さがらばし）

相良橋（写真 4.7, 1935 年, 大正 15 年細則, 12t(T15), 橋長：132.0 m, 最大支間 55m, 幅員：6.3 m）は 2 連の曲弦ワーレン・トラス橋が流失し、1 径間の左岸側アプローチの鋼桁橋は残存している（写真 4.7(b)）。他の橋梁に比べ、幅員が広く橋脚高さが低いこともあり、第 1 径間、第 2 径間の 2 連のトラス橋部分が流出し、中間橋脚上のそれぞれ、可動支承側および固定支承が先行して損壊し、河川中央側が先行して押し流された。約 50 m 下流側に漂着した第 2 径間は流出の際に回転し、大きく変形している（写真 4.7(c)）。また右岸橋台では、固定支承が破損（写真 4.7(d)）し、橋台の下流側護岸がえぐり取られていた。



(a) 被災前（橋梁台帳より）



(b) 残存した橋脚



(c) 流失した第2径間



(d) 右岸下流側の固定支承の破損

写真4.7 相良橋の被害状況

4.2.8 沖鶴橋（おきつるばし）

沖鶴橋（写真4.8，1983年，橋長：179.4m，幅員：5.0m）は建設年度が比較的新しいPC桁橋であったが全てのPC桁が流失した（写真4.8(a)，(b)）。橋桁に付設されていた水道管も同時に流失したため，最大で900戸が断水した。球磨川は本橋の上流約500mから下流に向けて右岸側に湾曲し，上流30m地点では左岸側から小規模の支流が合流しており，本橋周辺の痕跡最大水位は10m以上との報告もある。4つのPC桁のうち，両端の2つ（橋桁①及び④）は橋台を中心に下流側に滑り落ち，中央部は下流側に約50m（右岸側，橋桁②），100m（左岸側，橋桁③）の場所にそれぞれ上下反転した状態で漂着していた。高欄には流木の衝突痕や破損が認められた。右岸側2か所の橋脚上流側に半径3m深さ1m程のすり鉢状に洗堀し，橋脚下端に亀裂も認められた（写真4.8(c)）が，豪雨被害に因るものかは判断できていない。



(a) PC 桁の流失



(b)



(c) 橋脚基部の亀裂

写真 4.8 沖鶴橋の被害状況

4.3 まとめ

球磨川流域の記録的な豪雨に因る橋梁上部構造の流失は、それらに伴う交通の遮断を引き起こし、避難や救助、復旧などに著しい影響を及ぼした。ここでは、上部構造が流失した橋梁のうち、8 橋の被害状況の調査結果をとりまとめた。

橋台周辺に被害が生じた顕著な例として西瀬橋が挙げられるが、球磨川に架かる多くの被害橋梁で、損壊や移動など橋台本体の変状は認められなかった。結果として、上部構造と下部構造の連結部である支承部の損傷に着目することとなり、上流側では上陽力に、下流側では上陽力と水平力に対して支承部が抵抗できず支承や損壊したり、アンカーバーが抜け出したことにより、上部構造が流失した例が他の橋梁においても認められた。また、流速が早い箇所にも可動支承が設置されている場合、可動支承の損壊が先行して発生した事例も多く見られた。支流の小規模橋梁では、上流からの流出流木を橋梁部がせき止め、越流による橋梁周辺への被害や橋脚・橋本体の流失に繋がったと考えられる被災、洗掘による橋脚の傾倒などが見られた。

4.4 今後の対策に対する提言

多径間からなる鉄道橋やコンクリート系橋梁と異なり、鋼道路橋では橋脚や橋台の傾倒や転倒、流失は数少なかった。しかし、このことは下部構造が十分な耐力を有していたことと同義ではないため、単径間上部構造の連続化や支承部における損壊防止、確実な移動制限を実施することによる影響、例えば、上部構造の流失回避に対する有効性や損傷を受けた場合の早期復旧性については別途検討を要する。一方、上部構造が流失した場合であっても、多径間の橋脚が残存している場合には、残存橋脚を利用した仮橋の架設が比較的容易となることが考えられる。

また、表 4.3 に示すように、球磨川を渡河する橋梁の一部に着目すると、それらには水道、電気、通信などのライフラインが添架されていた。同表中では球磨橋が流失を免れたが、上部構造流失はライフラインの分断をも引き起こし、避難生活や迅速な復旧・回復の妨げとなった。このような付属物の添架情報は橋梁管理者では保有していないのが一般であり、危機管理の観点から橋梁付属物・添架物の台帳管理やその方法について検討を要する。また、側道橋や添架物、歩道を上流側に設けるのか下流側に設けるのかといった観点での検討も必要である。

さらに、計画高水に余裕量を加味して橋梁の設置位置を決定する場合に、さらなる越水を想定するかどうか、また越水を想定する場合の具体的な対策については今後議論が必要である。

今後の河川流域のインフラ整備や河川を横切る橋梁の計画・設計、災害に強い鋼橋の実現に向けた一助になれば幸甚である。

表 4.3 橋梁への付属物の添架

施設名	フリカナ	区分	路線名	事務所	市町村名	年度	橋長 (m)	幅員 (m)	河川	その他	占用条件 (名称)	緊急輸送路 指定
鎌瀬橋	(カマセハン)	国道	219	八代	八代市	1954	113.2	6.3	球磨川		NTTφ75 4本	一次
坂本橋	(サカトハン)	(主)	坂本人吉線	八代	八代市	1954	121	4.9	球磨川		側道橋:添架管(通信)3条	指定無し
深水橋	(フカミハン)	(一)	小鶴原女木線	八代	八代市	1966	156	4.8	球磨川		無	指定無し
神瀬橋	(コウノセハン)	(一)	球磨田浦線	芦北	芦北町	1934	113	5.5	球磨川		添架管(通信)3条	指定無し
球磨橋	(クマハン)	(一)	高沢一勝地線	球磨	球磨村	1997	120.4	11.8	球磨川		電力φ150×3本 NTT管φ75×4本 水道管φ150×1本	指定無し
相良橋	(サガラハン)	(一)	遠原渡線	球磨	球磨村	1935	131.9	7.4	球磨川		水道管1本 添架管(通信)×2本	指定無し

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局、八代復興出張所、熊本県土木部、八代市、球磨村、相良村、山江村にはデータ提供等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

第5章 まとめ

熊本大学 松村政秀

この章では、令和2年7月豪雨による、住宅、農地、橋梁の各種構造物被害とその発生要因に関する調査結果をとりまとめ、今後の構造物のあり方を検討した。

第2章では、土砂災害に伴う住宅および人的被害が発生した芦北町や津奈木町を調査対象とした。その結果、損壊した住宅数に対してその住宅で死亡事例が発生した割合が高く、土石流による建物被害が激烈であり、構造的な観点から土石流に対して耐える建物の実現が難しいことが改めて明らかとなった。一方、土砂災害警戒区域は土石災害リスクが高いところに適切に設定されており、土砂災害計画区域内の住民に対して避難行動を促すことは重要であり、避難のための動線を確認するなど建物の設計・改修時の配慮により生存確率の上昇に繋がる可能性なども示唆された。

第3章では、球磨川上流域の農地の被災状況を調査した。その結果、山林斜面や農地のり面の崩壊による濁流が用排水路を通じて土砂が農地に流れ込んだことが、甚大な農地被害に繋がったことが推察された。「田んぼダム」を用いるなど、山間部から流入を受ける水田を遊水地としての利用する、水田の洪水緩和を利用することも有効であることが示唆された。

第4章では上部構造が流失した8橋の橋梁被害をまとめた。その結果、橋の流失が交通だけでなく、水道・電気・ガスなどのライフラインの喪失にも繋がり、橋梁付属物・添架物の管理法について検討を要すること、水流が早い箇所の変位・損壊が、橋梁流失の起点となった可能性が認められ、流失回避に対する対策や損傷を受けた場合の早期復旧性、越水を想定した対策が必要であることなどが示唆された。

今回の構造物の被害状況調査は限られた範囲で実施に留まるが、構造物被害やその発生メカニズムの考察から貴重な課題や教訓・示唆を得ることができた。このような被害事例が示唆する課題や教訓は、構造物に被害低減や人命確保に直結する内容を多く含んでいる。引き続き、適切な情報の収集、迅速な学術調査の実施と、それらに基づく防災・減災に資する知見や技術、情報の提示など方策について議論・検討することが、今後の安全で安心なまちや地域づくりに必ずや生かされるものと考えている。

第6編

避難・避難所グループ

グループリーダー	熊本大学	柿本	竜治
研究分担者	長崎大学	吉田	護
	京都大学	畑山	満則
	熊本大学	竹内	裕希子
連携研究者	岐阜大学	高木	朗義
	北海道大学	杉浦	聡志
	熊本大学	福永	万里子
		大瀬良	俊二

第1章 概要

熊本大学 柿本 竜治

令和2年7月豪雨では、全国で死者・行方不明者85名を出す大規模な災害となった。特に4日未明から朝にかけての猛烈な雨が降った熊本県南部の人吉、球磨、芦北、八代では死者・行方不明者は65名と甚大な被害が発生しました。避難・避難所グループでは、熊本県南部を中心に避難情報等の発生状況、それに伴う住民の避難行動、またコロナ禍での避難生活といったについて現地ヒアリングとアンケート調査を行う。そのことにより、災害発生直前、発生時、発生後の各主体の今回の災害への対応状況の実態を明らかにすることを目的とし、以下の研究に取り組んだ。

第1章では、気象庁等による防災河川・気象情報と市町村による避難情報の制度的枠組みを踏まえて、令和2年7月豪雨時の防災河川・気象情報、避難情報の時空間的特徴に加えて、これらの情報の関係性を実際の発表、発令履歴に沿って明らかにする。防災河川・気象情報及び避難情報の制度的枠組みは、近年、頻繁にその制度改正がなされているが、両情報の特徴やそれらの関係性を運用実態の観点から明らかにした事例は少ない。令和2年7月豪雨時の実際の運用実態を整理、分析することを通じて、より望ましい自治体の避難情報発令に関する制度設計への示唆を得ることが可能となる。

災害時には、被災地の住民行動に関して様々な調査が行われる。しかしながら、多くの場合、対象となる災害における行動についての知見が得られるだけであり、これまでの災害での行動との比較などが行われることは少ない。当研究グループでは、このような現状を鑑み、標準的な災害調査の在り方について議論を重ねてきた。これまでの議論と過去の災害調査での調査分析から、今後の災害時の行動調査のひな型となりうる調査項目を提案し、平成30年7月豪雨災害、令和元年東日本台風と調査を重ねてきた。第2章では、令和2年7月豪雨で本調査を行い、平成30年7月豪雨災害、令和元年東日本台風と比較分析することで得られた知見について報告する。

第3章では、防護動機理論と状況認識理論に基づいて、令和2年7月豪雨時の八代市坂持村の住民の当日の避難行動を調査分析することを目的とする。自然災害リスクの認知が高くても、適切な防護行動を取らない自然災害リスク認知のパラドックスが存在する。リスク認知のパラドックスの存在は、避難遅れが頻繁に発生している豪雨時の避難行動を慎重な思考による行動として取り扱うことに疑問を投げ掛けるものである。現在の防災計画や避難情報の提供は、災害時の人々の避難行動は、慎重な思考による行動であることを前提としており、豪雨時の避難行動が、ヒューリスティックな意思決定に基づいて行われるのであれば、それに対応した処方箋が必要となり、その基礎資料を提供するものとなる。

第4章では、公共施設の被災・避難所課題分析として、令和2年7月豪雨被災地域の各自治体および学校と、被災した介護老人福祉施設の入所者を受け入れた熊本市老人福祉協議会にヒアリング調査を実施し、各団体における発災時および発災後の状況および課題を分析し今後の対応改善を目的とする。また、災害後孤立した芦北町大岩地区の住民にアンケート調査を実施し、災害時の避難行動を明らかにする。

第2章 防災河川・気象情報と避難情報の関係性

長崎大学 吉田 護

2.1 気象庁等による防災河川・気象情報と市町村による避難情報の制度的枠組み

2.1.1 気象庁等による防災河川・気象情報

気象庁は、自然災害の起こるおそれのある場合、気象注意報や気象警報を発表する。また、2013年8月より警報の発表基準をはるかに超える大雨等が予想され、重大な災害の起こるおそれが著しく高まっている場合に発表される「特別警報」の運用を開始している。その中で、今回のような豪雨災害と関連の深い情報として「大雨警報」や「大雨特別警報」がある。また、洪水の危険性を示す情報として、二以上の都府県の区域にわたる河川そのほかの流域面積が大きい河川で洪水により国民経済上重大な損害を生ずるおそれのある河川は、洪水予報河川として指定されており、気象庁は国土交通省や都道府県の機関と共同して「指定河川洪水予報：氾濫警戒情報、氾濫危険情報等」を発表する。さらに、土砂災害の危険性を示す情報として、命に危険を及ぼす土砂災害がいつ発生してもおかしくない状況となったときには、対象となる市町村を特定して警戒を呼びかける情報として、気象庁は都道府県と共同して「土砂災害警戒情報」を発表する。こうした気象庁が発表する防災河川・気象情報は、豪雨に伴う洪水や土砂災害のおそれの高まりや発生を自治体や住民に周知する役割を担っている。

なお、各予警報の発表基準については関連がある。はじめに「大雨警報」について、大雨警報には大雨警報（浸水害）と大雨警報（土砂災害）がある。それぞれ1km四方の表面雨量指数、土壌雨量指数による発表基準が定められており、それを満たした場合には二次細分区域（基本は市町村単位、一部分割）で大雨警報（浸水害）、大雨警報（土砂災害）を発表する。また、大雨警報（浸水害）、大雨警報（土砂災害）は1km格子の危険度分布を公開しており、それぞれ1時間先までの表面雨量指数、2時間先までの土壌雨量指数の予測値も活用して、5段階で危険度（極めて危険、非常に危険、警戒、注意、今後の情報等に留意）の空間分布を公開している（気象庁）。

続いて、指定河川洪水予報について、指定河川洪水予報には、国土交通省と共同で行うものと、都道府県と共同で行うものがあり、その発表過程は異なるが、市町村や住民に周知される情報の種類等は同一である。その洪水予報には、氾濫注意情報、氾濫警戒情報、氾濫危険情報、氾濫発生情報がある。水位観測所毎に、氾濫注意水位、避難判断水位、氾濫危険水位が事前に定めており、氾濫注意情報は、氾濫注意水位に到達し、さらに水位の上昇が見込まれるとき、氾濫警戒情報は、避難判断水位に到達し、さらに水位の上昇が見込まれるとき、あるいは水位予測に基づき氾濫危険水位に達すると見込まれたとき、氾濫危険情報は、氾濫危険水位に到達したとき、氾濫発生情報は、氾濫が発生したときに発表される。また、指定河川洪水予報の対象となっていない中小河川も含めた洪水のおそれを周知する情報として、洪水注意報、洪水警報がある。こちらは1km格子の流域雨量指数に基づく発表基準が定められており、気象庁はそれを満たした場合に二次細分区域に洪水注意報や洪水警報を発表する。また、洪水警報の危険度分布も公開しており、3時間先までの流域雨量指数の予測値も活用して、5段階で危険度（極めて危険、非常に危険、警戒、注意、今後の情報等に留意）の空間分布を公開している（気象庁）。

続いて、土砂災害警戒情報について、この情報は大雨警報（土砂災害）の発表後に発表される情報であり、約5kmの格子単位毎に、短期降雨量としての60分間積算雨量と長期雨量指標としての土壌雨量指数から、その発表基準が設定されている。大雨警報（土砂災害）の危険度分布とは、「非常に危険」が

第6編

出現したときには、その発表基準を満たし、土砂災害警戒情報が発表されるという関係にある。土砂災害警戒情報は市町村単位で発表されるため、大雨警報（土砂災害）の危険度分布を補足情報として活用することが推奨されている（気象庁）。

最後に、大雨特別警報について、大雨警報と同様に、大雨特別警報（浸水害）と大雨特別警報（土砂災害）がある。大雨特別警報（浸水害）、大雨特別警報（土砂災害）はともに、3時間降水量及び土壌雨量指数において、50年に一度の値以上となった5km格子がともに10格子以上まとまって出現（短時間指標）、または48時間降水量及び土壌雨量指数において50年に一度の値以上となった5km格子がともに50格子以上まとまって出現し（長時間指標）、かつ雨が降り続くと予想される地域で発表され、大雨警報（浸水害）または洪水の危険度分布（1km格子）で「極めて危険」が出現している市町村に対しては大雨特別警報（浸水害）が、大雨警報（土砂災害）の危険度分布（1km格子）で「極めて危険」が出現している市町村に対しては大雨特別警報（土砂災害）が発表される。大雨特別警報（浸水害）は、浸水害と洪水の両方の危険度が考慮されている（気象庁）。

以上、気象庁等が発表する豪雨災害に関連した防災河川・気象情報を概説した。これらは豪雨に伴う災害のおそれ及び発生を自治体や住民に周知する情報であり、自然現象であるハザードの脅威に対して社会が対応するための変換器の役割を果たす。本章では、その変換された情報がどのような時空間的特徴をもつのかについて、令和2年豪雨時の実際の発表履歴に沿って明らかにする。なお、近年の予測技術の進展、過去の降雨、災害データの蓄積などにより、各予警報の発表基準や指標は恒常的ではない。そのため、以下の分析はあくまで令和2年7月豪雨時の発表基準や指標に依拠するものである点は留意されたい。

2.1.2 市町村等による避難情報

市町村が災害のおそれがある場合に発令する情報には、「避難準備・高齢者等避難開始」、「避難勧告」、「避難指示（緊急）」、「災害発生情報」がある。「避難準備・高齢者等避難開始」は、避難に時間のかかる高齢者等の要配慮者は立退き避難をし、その他の人は立退き避難の準備をし、自発的に避難する目安となる情報である。「避難勧告」と「避難指示（緊急）」は、指定緊急避難場所等への立退き避難を基本とする避難行動をとり、災害が発生するおそれが極めて高い状況等で、指定緊急避難場所への立退き避難はかえって命に危険を及ぼしかねないと自ら判断する場合には、近隣の安全な場所への避難や建物内のより安全な部屋への移動等の緊急の避難をする目安となる情報である。「避難指示（緊急）」は、緊急的又は重ねて避難を促す場合に発令する、とされるが、避難行動指針は避難勧告と変わらない。「災害発生情報」は、既に災害が発生している状況であり、命を守るための最善の行動をとることを周知する情報である。市町村長が発令するこうした避難情報は、居住者等に対する強制力はないものの、市町村は災害発生のおそれの高まりの程度に応じて使い分けて発令すべきとされている（内閣府、2019）。また、市町村長は、関係機関からの情報や自ら収集した情報等により、的確に判断を行い、躊躇することなく発令し、速やかに居住者等に伝えなければならない、とされている。気象庁等が発表する防災河川・気象情報は発表基準や指標が明確であるのに対して、市町村による避難情報は、事前に発令基準の作成は責務とされるが、あくまでその発令権限は市町村長に付与されている。また、その発令対象区域を当該市町村内で限定することができるのも特徴である。本章では、こうした特徴をもつ避難情報が住民にとっての時間的、空間的特徴をもったのか、令和2年豪雨時の発令履歴に沿って明らかにする。

なお、避難情報の発令基準の設定は、各自治体に委ねられているものの、避難勧告等のガイドライン（内閣府、2019）では、防災河川・気象情報をその発令基準の一つに活用することが推奨されている。

表 2.1 警戒レベルと避難情報及び防災河川・気象情報

警戒 レベル	住民に行動を促す情報	住民が自ら行動をとる際の判断に参考となる情報 (警戒レベル相当情報)		
	避難情報等	洪水に関する情報		土砂災害に関する情報
		水位情報有	水位情報無	
警戒 レベル5	災害発生情報	氾濫発生情報	(大雨特別警報(浸水害))	
警戒 レベル4	避難勧告 避難指示(緊急)	氾濫危険情報	洪水警報の危険度分布(非常に危険)	土砂災害警戒情報 大雨警報(土砂災害)の危険度分布(非常に危険・極めて危険)
警戒 レベル3	避難準備・高齢者等避難開始	氾濫警戒情報	洪水警報 洪水警報の危険度分布(警戒)	大雨警報(土砂災害) 大雨警報(土砂災害)の危険度分布(警戒)
警戒 レベル2	洪水注意報 大雨注意報	氾濫注意情報	洪水警報の危険度分布(注意)	大雨警報(土砂災害)の危険度分布(注意)
警戒 レベル1	警報級の可能性			

(「避難勧告等に関するガイドライン①(避難行動・情報伝達編)」p.11表2を一部修正)

具体的には、洪水予報河川においては、避難判断水位に達した段階を避難準備・高齢者等避難開始の発令の基本とすること、氾濫危険水位に達した段階を避難勧告の発令基準の基本とすることが示されている。大雨特別警報(浸水害)は、氾濫の発生情報ではないことから災害発生情報の発令基準としては用いず、避難勧告等の対象区域の範囲が十分であるかどうか等を再度確認するために用いることが推奨されている。また、土砂災害については、大雨警報(土砂災害)の発表が避難準備・高齢者等避難開始の発令基準の一つになること、土砂災害警戒情報の発表を避難勧告の発令基準の基本とすることが示されている。大雨特別警報(土砂災害)は、土砂災害の発生情報ではないことから、災害発生情報の発令基準としては用いず、避難勧告等の対象区域の範囲が十分であるかどうか等を再度確認するために用いることを推奨されている。また、平成31年3月に「避難勧告等に関するガイドライン」が改定され、自治体が発令する避難情報や気象庁等が発表する防災河川・気象情報は5段階の警戒レベルを明記して情報提供する方針が示された。警戒レベルに応じた避難情報や防災河川・気象情報をまとめたものを表2.1に示す。住民がとるべき行動として、警戒レベル1:災害への心構えを高める、警戒レベル2:避難に備え自らの避難行動を確認、警戒レベル3:危険な場所から高齢者等は立退き避難、その他の人は立ち退き避難の準備をし、自発的に避難、警戒レベル4:指定緊急避難場所等への立退き避難を基本とし、災害が発生するおそれが極めて高い状況の場合は緊急避難、警戒レベル5:命を守るための最善の行動、が挙げられている。「警戒レベル」は、市町村が発令する避難情報等に付される数字であり、災害発生のおそれの高まりに応じて住民がとるべき行動と関連付けるものであり、「警戒レベル相当情報」は、気象庁、国土交通省、都道府県等が発表する情報に付されるもので、住民が主体的に避難行動等を判断するための参考となる状況情報として区別されている(政府広報オンライン)。

同レベル相当の防災河川・気象情報と避難情報が同一のタイミングになるわけではないが、特に、レベル3、レベル4に該当する避難情報である避難準備・高齢者等避難開始、避難勧告については、相当レ

第6編

ベルの防災河川・気象情報をそれぞれの発令基準の一つとして推奨されている点は留意する必要がある。同レベルにある避難情報と防災河川・気象情報の時間的、空間的関係性を明らかにすることは、今後の自治体による適正な避難情報発令に関する危機管理体制の構築、また住民の避難促進策を検討するうえで重要な知見と捉え、本章では、避難情報とその対応関係にある防災河川・気象情報の時間的、空間的関係性についても、令和2年7月豪雨の発令、発表履歴に沿ってその特徴を明らかにする。

2.2 防災気象情報の時空間的特徴

はじめに熊本県内のすべての市町村の大雨注意報、警報、特別警報及び土砂災害警戒情報の7月3日0時から7月13日0時までの対象者数の推移をそれぞれ図2.1に表す。なお、対象者数を推計するにあたっては2015年の国勢調査による人口データを用いた。当該機関において豪雨が顕著だった期間は二度あるが、大雨特別警報が発表されたのは、球磨川流域の市町村を対象として7月4日の早朝から正午に限られる。大雨警報等が続いた期間としては二度目の豪雨の際のほうが長い。本章では大雨特別警報が発表された一度目の豪雨の期間を分析対象とする。一度目の豪雨の期間における、大雨特別警報の対象となった球磨川流域の市町村（八代市、人吉市、芦北町、相良村、熊村、山江村）の大雨注意報、警報、特別警報及び土砂災害警戒情報の対象者数の推移を図2.2に示す。球磨川流域の市町村に限定したとき、大雨注意報、大雨警報、大雨特別警報の切り替わったタイミングはほぼ同一である。また、土砂災害警戒情報は7月3日の深夜から4日の正午過ぎにかけて発令されており、7月4日の早朝に大雨特別警報の対象となっている。また、球磨川は指定河川洪水予報の対象となる河川であり、指定河川洪水予報によって対象となった区域人口を推計、その警戒レベルに応じた対象人口の推移を図2.3に示す。7月4日の2時半頃から氾濫注意情報の対象となった住民がいるが、7月3日の3時過ぎに氾濫警戒情報対象者が増加していることがわかる。これは、氾濫注意情報を経ずに氾濫警戒情報の対象となった住民がいることを表しており、急激な水位の増加に伴い、突如として洪水の脅威が近づいたと認識した市町村や住民がいたことが示唆される。また、7月4日の3時半過ぎには氾濫危険情報に切り替わっていることから、球磨川流域の市町村では約1時間の間で氾濫注意情報から氾濫警戒情報、氾濫危険情報へと切り替わっていたことがわかる。氾濫危険情報が発表されたのちは、2時間以上その状態が継続され、午前6時前の球磨村渡地区の洪水発生に至っている。

今回の災害においては、大雨注意報から大雨警報までは9時間以上、大雨警報から大雨特別警報までは7時間以上の時間間隔があったことから、夜間という住民が情報取得しづらい要因はあるものの、その発表間隔そのものは、災害の脅威が近づいていることを周知するうえで十分な時間間隔があったものと考えられる。一方で、再述になるが、指定河川洪水予報については、一部の地域で氾濫注意情報がでずに氾濫警戒情報が発表されており、また、おおよそ1時間以内に氾濫注意情報から氾濫警戒情報、氾濫警戒情報から氾濫危険情報に切り替わったことから、自治体や住民は急激に洪水発生のおそれ近づいたという認識を形成させた情報となったことが推察される。こうした急激な指定河川洪水予報の警戒の程度の推移は、降雨状況や河川の流域特性によるところが大きいが、自治体や住民はこうした急激に洪水の脅威が近づく過程も起こりうることを想定して、事前の危機管理や避難行動を検討しておくことが求められる。また、堤防の建設や河川掘削等の社会基盤整備においては、こうした急激な水位上昇を軽減することも重要な視点であることは申し添えておきたい。

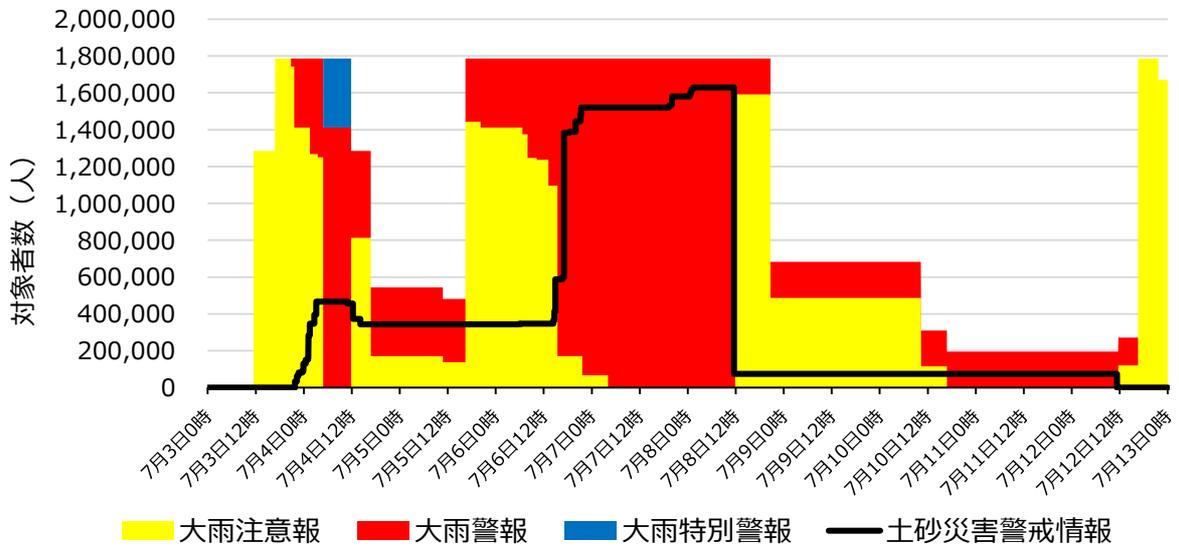


図 2.1 熊本県内の市町村の大雨警報及び土砂災害警戒情報の対象者数の推移

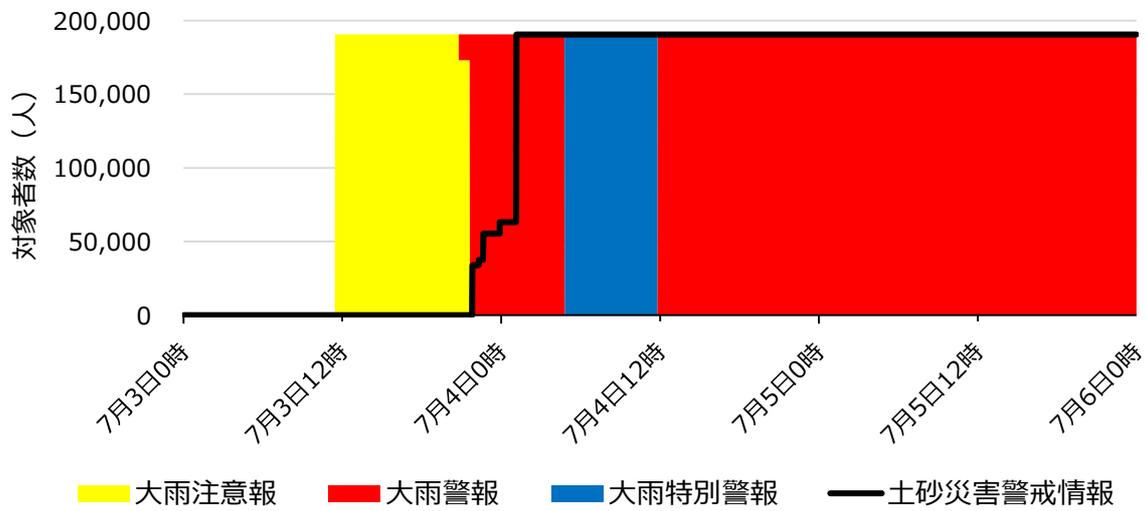


図 2.2 球磨川流域の市町村の大雨警報及び土砂災害警戒情報の対象者数の推移

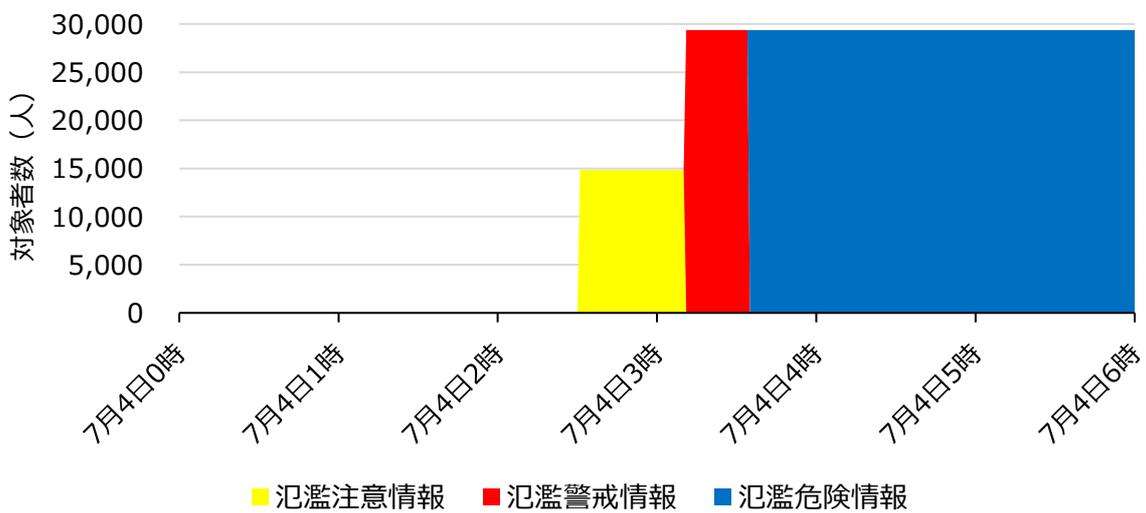


図 2.3 指定河川洪水予報の対象者数の推移

2.3 避難情報の時空間的特徴

球磨川流域の市町村による「避難準備・高齢者等避難開始」, 「避難勧告」, 「避難指示(緊急)」の発令対象者数の推移を図 2.4 に示す(図内ではそれぞれ, 避難準備, 避難勧告, 避難指示と記す)。対象者数については, 発令対象地区を特定し, 防災河川・気象情報の対象者数との整合性を確保するため, 2015 年国勢調査の人口データを用いてその発令対象人口を推計した。各市町村が発令時に公開した人口とは異なっている点をご留意頂きたい。その上で, 球磨村では7月3日の17時に「避難準備・高齢者等避難開始」が発令されており, 他の市町村と比較してかなり早い段階から住民に避難行動を呼び掛けていたことが分かった。一方で, ほかの市町村においては「避難準備・高齢者等避難開始」が発令されていなかったり, 発令されたとしても深夜になってからであったりした。続いて, 「避難勧告」については基本的には深夜に発令されており, 「避難指示(緊急)」は球磨村で3時30分, 人吉市で5時15分と明け方に発令されている。また, 7月4日3時30分頃に避難情報の対象者が減少しているのは芦北町が「避難勧告」から「災害発生情報」に切り替えたことによる。避難勧告等に関するガイドラインでは, 市町村は避難勧告等を夜間であっても躊躇なく発令することを推奨しており, 今回の災害で被害の大きかった自治体においてはその点は問題がなかったと考えられる。ただし, 八代市では6時40分に避難指示を発令しているが, ネットワーク障害のため未発信, 住民に情報が伝達されない事態が発生しており, 9時50分に県が代行入力して情報発信を行ったことが明らかとなっている(八代国道事務所, 2020)。頑健なネットワークシステム, 重層的な情報伝達システムの備えが必要である。

その上で, 図 2.5 に, 7月4日午前6時までの球磨川流域の市町村における避難情報の対象割合を示す。氾濫発生前の段階において, 人吉市や八代市, 山江村では地域を絞って避難情報を発令しているのに対し, 芦北町, 相良村, 球磨村では全域を対象にして避難情報を発令していた。結果として対象人口の割合は2割から3.5割程度に留まった。洪水だけでなく土砂災害の脅威も同時に迫っていたことから, この発令対象地域の設定については妥当であったものと考えられる。続いて, 図 2.6 に同時間までの「避難勧告」対象者の中で事前に「避難準備・高齢者等避難開始」の発令対象となった人口割合, 「避難指示(緊急)」対象者の中で事前に「避難準備・高齢者等避難開始」の発令対象となった人口割合, 「避難指示(緊急)」対象者の中で事前に「避難勧告」の対象となった人口割合, 最後に, 「避難指示(緊急)」対象者の中で, 事前に「避難勧告」が発令され, さらにその前に「避難準備・高齢者等避難開始」の対象となった人口割合を示す。「避難指示(緊急)」の対象者の中で, 事前に「避難勧告」が発令された住民の割合は9割を超えており, 緊急性を伝える「避難指示(緊急)」の活用方法については概ね妥当であったものと考えられる。一方で, 「避難勧告」や「避難指示(緊急)」の前に「避難準備・高齢者等避難開始」の対象となった住民の割合は決して高くない。これは「避難準備・高齢者等避難開始」の発令対象になることなく, 「避難勧告」または「避難指示(緊急)」を発令された住民が多くいることを示しており, 「避難準備・高齢者等避難開始」の活用が自治体によっては不十分であったことを示す結果といえる。自治体は, 高齢者等に対して, 早い段階から災害の危険性が迫っていることを周知し, 立退き避難を促すことが求められるが, この対応については不十分な実態があったことが示唆される。また, 「避難準備・高齢者等避難開始」, 「避難勧告」, 「避難指示(緊急)」のいずれか二つの対象となった住民の避難情報の発令間隔の平均値, 最大値, 最小値をまとめたものを表 2.2 に示す。平均間隔として各避難情報間の時間間隔は十分であったと考えられるが, 「避難準備・高齢者等避難開始」が発令されてから「避難勧告」が発令されるまで34分しかなかった住民もいることがわかった。すなわち, たとえ「避難準備・高齢者等避難開始」が発令されたとしても十分な避難準備及び高齢

者等が避難行動をとるに足る十分な時間がなかった住民もいることを示唆する結果であり、「避難準備・高齢者等避難開始」の発令基準やその発令タイミングは今後の検討課題である。

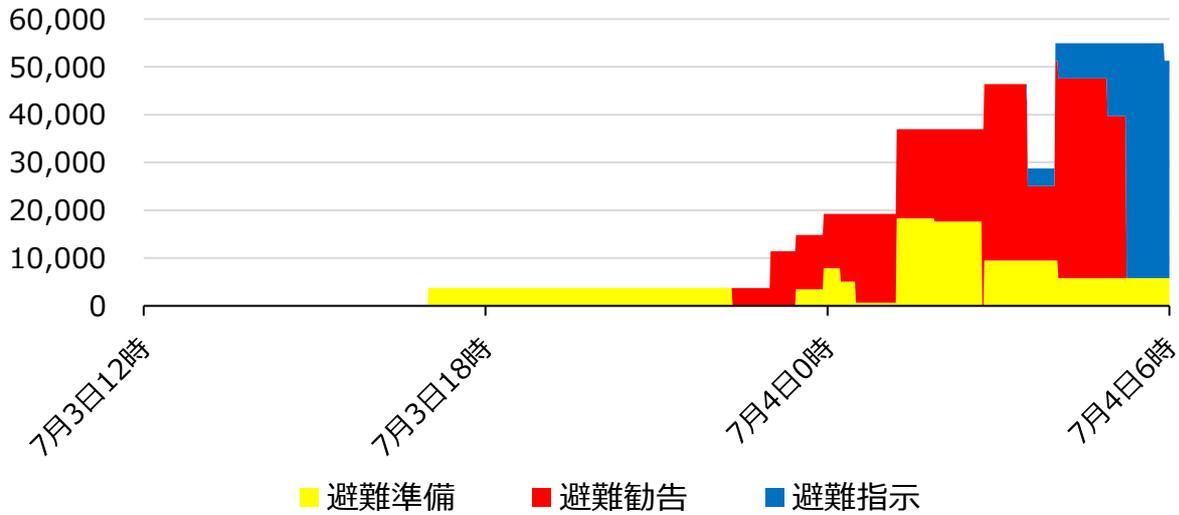


図 2.4 球磨川流域の市町村の避難情報の対象者数の推移

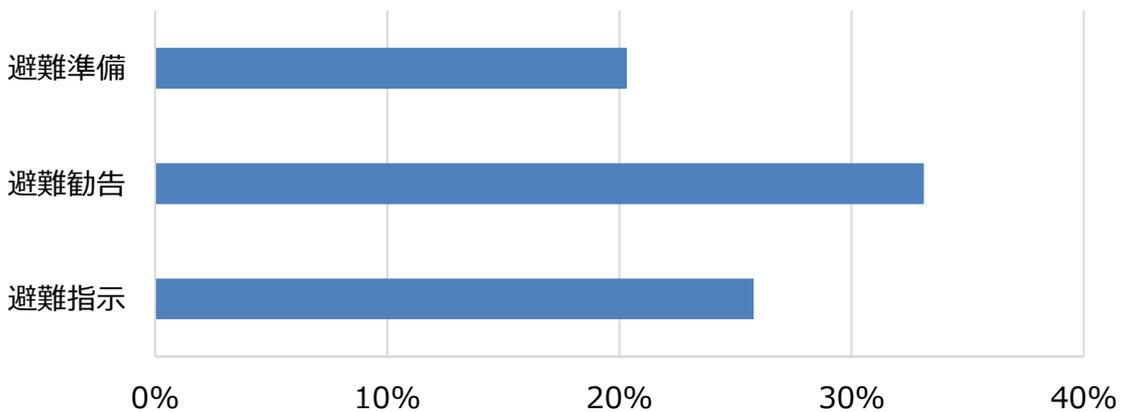


図 2.5 避難情報の対象人口の割合

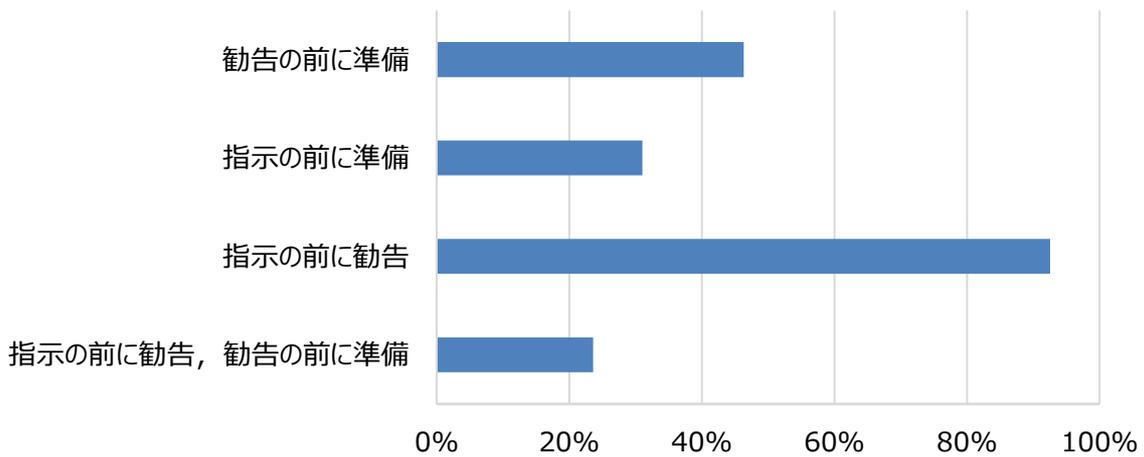


図 2.6 時間順序を考慮した避難情報の対象人口の割合

表 2.2 避難情報間の発令に関する時間間隔

	平均値	最大値	最小値
避難準備と避難勧告	107.60 min	320 min	34 min
避難準備と避難指示	332.55 min	630 min	78 min
避難勧告と避難指示	177.64 min	375 min	75 min

2.4 防災河川・気象情報と避難情報の関係性

最後に、防災河川・気象情報と避難情報の関係性について検証する。図 2.7 に基準となる防災河川・気象情報の対象者の中で、その発令時刻も踏まえた避難情報の対象人口の割合を示す。また、表 2.3 に対応する防災河川・気象情報の発表後には発令された避難情報との時間間隔の平均値、最大値、最小値を示す。

指定河川洪水予報の活用方法について、氾濫危険情報の対象人口の中で、約 8 割が「避難勧告」や「避難指示（緊急）」となっている。その多くは、氾濫危険情報の発表後に「避難勧告」や「避難指示（緊急）」が発令されており、氾濫危険情報の発表と「避難勧告」または「避難指示（緊急）」の発令の時間間隔の平均値は約 25 分であることから、氾濫危険情報がこれらの避難情報の基準として十分機能していたことが読み取れる。一方で、氾濫警戒情報は「避難準備・高齢者等避難開始」発令の基準とすることがガイドラインで示されているが、氾濫警戒情報の対象人口の中で「避難準備・高齢者等避難開始」の発令対象となった人口は 2 割に過ぎず、また、発表後に「避難準備・高齢者等避難開始」を発令した自治体はなかった。これは、氾濫警戒情報を「避難準備・高齢者等避難開始」の発令基準として十分活用できた自治体はなかったことを示している。先に述べた通り、球磨村では氾濫警戒情報が発表される前の 7 月 3 日 17 時に「避難準備・高齢者等避難開始」を発令している。明るい段階で深夜に豪雨災害の発生を想定して、高齢者等に避難を促している点は特筆すべき対応である。一方で、ほかの自治体においては氾濫警戒情報が「避難準備・高齢者等避難開始」の基準として活用しきれなかった点は今回の大きな検討課題といえる。続いて、土砂災害に関する防災気象情報について、大雨警報（土砂災害）は「避難準備・高齢者等避難開始」の発令基準の一つとして、土砂災害警戒情報は「避難勧告」の発令基準の基本として位置づけられている。避難情報の発令対象の人口割合は 2-3 割であり、避難情報は地域を限定して発令されている。ただし、大雨警報（土砂災害）が発表されてから「避難準備・高齢者等避難開始」が発令されるまで最大で 5 時間の時間間隔があった。洪水と同様に「避難準備・高齢者等避難開始」を発令するにあたって、土砂災害のおそれを伝える防災気象情報の活用方法は検討課題であることがわかる。さらに、土砂災害警戒情報が発表されてから「避難勧告」が発令されるまで最大で 6 時間以上の時間間隔があった。土砂災害警戒情報の発表と同時に避難勧告を発令している自治体もあることから、土砂災害警戒情報の活用方法は、自治体によって大きく異なっていたことがわかる。防災河川・気象情報は、避難情報の発令基準の一つの目安に過ぎないものの、警戒レベルに対応した避難情報の発令状況と、警戒相当レベルに対応した防災河川・気象情報の発表状況の乖離は、住民により複雑な避難行動に関する意思決定環境を生むことになる。住民に適切な避難行動を促進するための制度設計への示唆については、本事例に留まらない一貫した事例の蓄積が必要である。

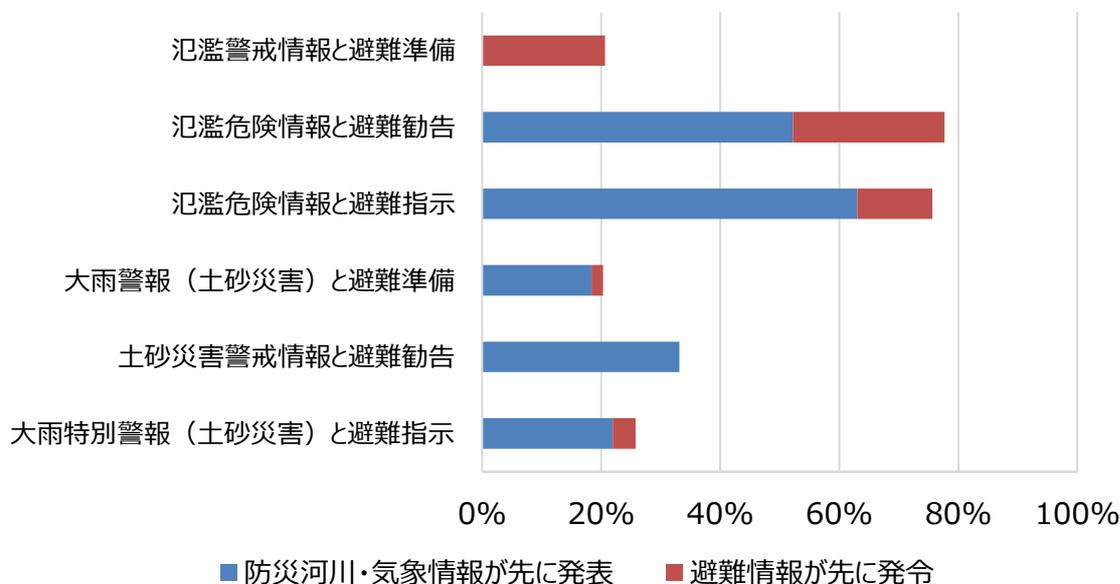


図 2.7 防災河川・気象情報の対象人口に占める避難情報の対象人口割合

表 2.3 防災河川・気象情報の発表後には発令された避難情報との時間間隔

	平均値	最大値	最小値
氾濫警戒情報と避難準備	—	—	—
氾濫危険情報と避難勧告・指示	25.02 min	28 min	25 min
大雨警報（土砂災害）と避難準備	243.93 min	306 min	108 min
土砂災害警戒情報と避難勧告	234.52 min	370 min	0 min
大雨特別警報（土砂災害）と避難指示	21.22 min	25 min	5 min

2.5 自治体の避難情報発令に関する危機管理上の課題

本章では、球磨川流域の市町村を対象として、令和2年7月豪雨の際の防災河川・気象情報と避難情報の時間的、空間的特徴、またそれらの関係性について明らかにした。指定河川洪水予報において、氾濫注意情報から氾濫警戒情報、氾濫危険情報までの推移が約1時間しか時間間隔がなかったことは、洪水の脅威が対象地域に急激に迫ったことを示す証左である。その上で、自治体による避難情報発令に関する課題は以下の3点にまとめられる。

1. 「避難準備・高齢者等避難開始」の発令が不十分であった。
2. 「避難準備・高齢者等避難開始」の発令基準として、防災河川・気象情報は十分活用されていなかった。
3. 土砂災害に対する「避難勧告」の発令基準の基本とされる土砂災害警戒情報は、自治体によってその活用方法にばらつきがあった。

急激な洪水の脅威の高まりに対して、適切な危機管理、災害対応をとるに足る時間的に余裕のある防災河川・気象情報及び避難情報の発表、発令基準及び制度的枠組みの検討が必要である。なお、防災河川・気象情報と避難情報に関する発表、発令に関する制度的枠組みは、今回の災害を踏まえて改正される見

第6編

込みであり、今回の検証はあくまで令和2年7月豪雨時の制度的枠組みに基づくものに他ならない。度々改正される制度的枠組みに対して、自治体の関連する担当職員まで浸透しきっていない実情もある。また、自治体によっては危機管理部局に十分な人材を配置できない場合もある。自治体が適切な危機管理を実施するためには、こうした課題の解消に寄与する自治体支援も必要である点は最後に申し添えた。

参考文献

内閣府（防災担当）：避難勧告等に関するガイドライン①（避難行動・情報伝達編），平成31年3月。

内閣府（防災担当）：避難勧告等に関するガイドライン②（発令基準・防災体制編），平成31年3月。

気象庁：警報の危険度分布，

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/bosai/riskmap.html>（2021年2月19日アクセス可）

気象庁：土砂災害警戒情報・大雨警報（土砂災害）の危険度分布，

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/bosai/doshakeikai.html>（2021年2月19日アクセス可）

気象庁：気象等に関する特別警報の指標（発表基準），

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tokubetsu-keiho/sanko/shihyou.pdf>（2021年2月19日アクセス可）

政府広報オンライン：「警戒レベル4」で危険な場所から全員避難！5段階の「警戒レベル」を確認しましょう

<https://www.gov-online.go.jp/useful/article/201906/2.html>（2021年2月19日アクセス可）

八代河川国道事務所：令和2年7月球磨川豪雨検証委員会，第2回説明資料，pp.112-127，令和2年10月。

第3章 避難者の行動と情報

京都大学 畑山 満則
岐阜大学 高木 朗義
北海道大学 杉浦 聡志
熊本大学 柿本 竜治

3.1 はじめに

2020年（令和2年）7月3日から31日にかけて、熊本県を中心に九州や中部地方など日本各地で発生した集中豪雨（2020年7月9日に気象庁が「令和2年7月豪雨」と命名）は、死者84名、行方不明者2名、全壊1,621棟、半壊4,504棟、一部破損3,503棟、床上浸水1,681棟、床下浸水5,290棟（2021年1月7日時点）という大規模な被害をもたらした。避難勧告等対象者数は約460万人、開設された避難所は約4000、避難者は約23,000人と報告されている（内閣府，2020）。災害救助法は、九州地方を中心に49市36町13村に適用され、平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風ほどではないものの、広域に大きな被害をもたらした。

災害時には、被災地の住民行動に関して様々な調査が行われる。しかしながら、多くの場合、対象となる災害における行動についての知見が得られるだけであり、これまでの災害での行動との比較などが行われることは少ない。土木計画学研究委員会減災システム研究小委員会（2015（平成27）年6月～2018（平成30）年6月）では、このような現状を鑑み、災害時の住民行動について、体系的な調査が必要と考え、これまで、標準的な災害調査の在り方について議論を重ねてきた。これまでの議論と過去の災害調査での調査分析から、今後の災害時の行動調査のひな型となりうる調査項目を提案し、平成30年7月豪雨災害、令和元年東日本台風と調査を重ねてきた（平成30年度科研費報告書，2019，令和元年度科研費報告書，2020）。本稿では、令和2年7月豪雨で本調査を行い、平成30年7月豪雨災害、令和元年東日本台風と比較分析することで得られた知見について報告する。

3.2 モバイル空間統計を用いた避難行動の分析

令和2年7月豪雨において、建物被害が熊本県で最も多く、災害による死者数が球磨村に次いで多かった人吉市の市街地浸水域周辺に関して、モバイル空間統計（NTTドコモ）を用い人口変化分析を試みた。分析は図3.1に示す水色領域の内側の500mメッシュで行ったが、本稿では、完全に浸水域に覆われた住宅地Aと商業地Bでの結果について示すこととする。人口動態の結果を図3.2に示す。この図において、水色の線が実際のデータを示している。赤線と赤い領域に関しては、過去データ（2020年1月1日から6月30日までの1時間ごとのデータ）を用いてARIMAモデルで推計した人口とその95%信頼区間を示している。浸水直前から直後では過去データから推定値の95%信頼区間から外れるものはほとんどない（商業地Bにおいては7月4日に下方に外れているが、これは被災の影響で商業活動が抑えられた結果と推測できる）。これは、災害発生前から発生直後では、大規模な立退き避難が行われていないことを指すと考えられる。また、同様の分析を、令和2年台風10号においても行ってみた。台風10号については、その勢力の大きさがメディアを通じて知らされていたことと、豪雨災害の2ヶ月語であったこともあり、避難勧告が出た後には帰宅行動が見られた。しかし、やはり大規模な立ち退き避難

は検出できなかった。このデータは、新型コロナウイルス感染拡大防止のための、観測データとして1時間ごとにリアルタイム情報を確認できるサービスが始まっており、今後はこの情報を用いたきめ細かな避難情報の提供につなげられることが期待される。

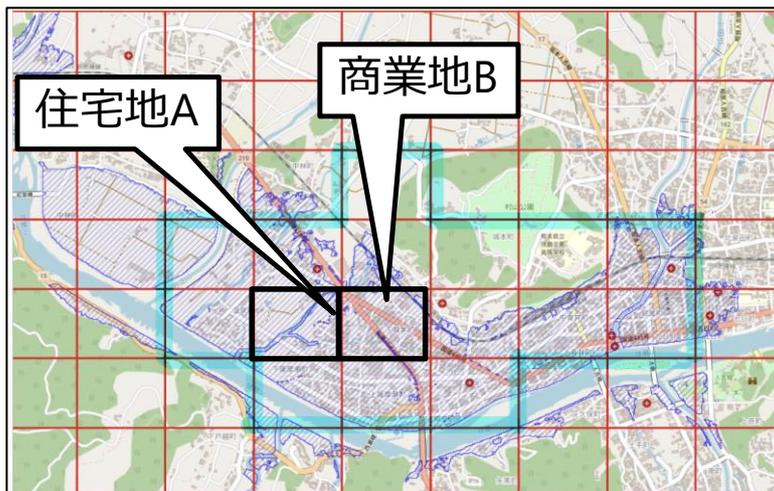


図 3.1 分析対象地域（熊本県人吉市市街地部）

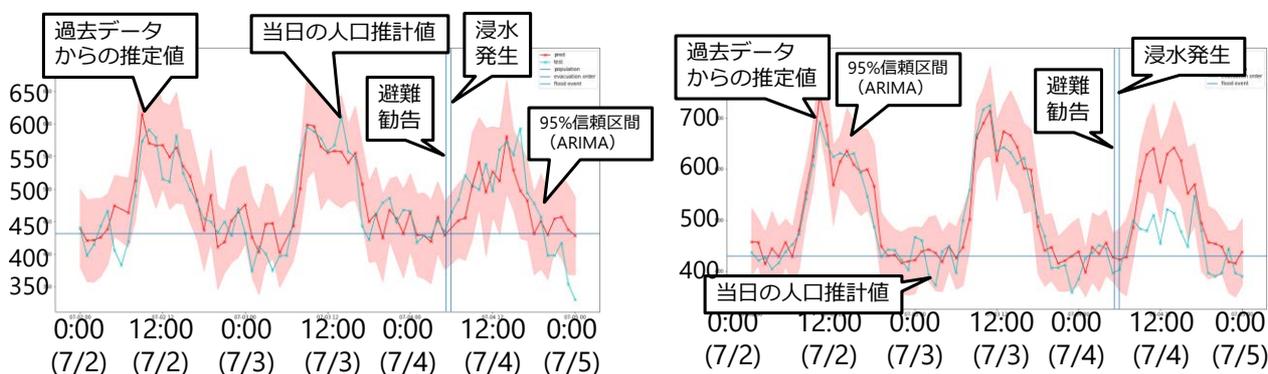


図 3.2 対象地域の人口変遷（7月2～4日）（左：住宅地A，右：商業地B）

3.3 避難者の行動に関する Web 調査の概要

3.3.1 調査票の設計と調査の実施

平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風での調査の経験をもとに一部修正した調査票を活用した。今回は、令和2年7月豪雨の後にこの豪雨災害での被害の大きかった九州地方に接近した令和2年台風10号での行動も合わせて調査することも目的として、調査項目は、フェイス情報、当日の避難行動、居住地付近のハザード、防災意識など51項目とし、Web調査として実施した。調査対象エリアは、令和2年7月豪雨、令和2年台風10号で避難者や被害が報告された福岡県、大分県、佐賀県、長崎県、熊本県、宮崎県、鹿児島県より選定した157市町村とした。これまでの調査と同様に、スクリーニング項目を設定し、令和2年7月豪雨、令和2年台風10号のどちらかで避難した人、避難情報を受け取った人、避難情報を受けていないが居住地が何らかの被害を受けた地区に住んでいた人を優先して調査対象とすることとしている。調査は、2020年2月上旬に行われ1054サンプルを回収した。

3.3.2 調査協力者の特徴

回収した1054サンプルに関する単純集計結果について示す。グループ1（令和2年7月豪雨，令和2年台風10号の両方で影響がなく避難しなかったグループ）315人（29.9%），グループ2（令和2年7月豪雨で避難したグループ）99人（9.4%），グループ3（令和2年台風10号で避難したグループ）103人（9.7%），グループ3（令和2年7月豪雨，令和2年台風10号の両方で被害，または避難情報発令区域に住んでいたが避難しなかったグループ）584人（55.4%）であった。回答者は，男性664人（63.0%），女性390人（37%），年齢は，30歳未満3.9%，30歳代10.6%，40歳代24.8%，50歳代27.3%，60歳代22.2%，70歳以上11.2%であった。都県別では福岡県454人，大分県92人，佐賀県53人，長崎県118人，熊本県139人，宮崎県74人，鹿児島県124人である（図3.3）。

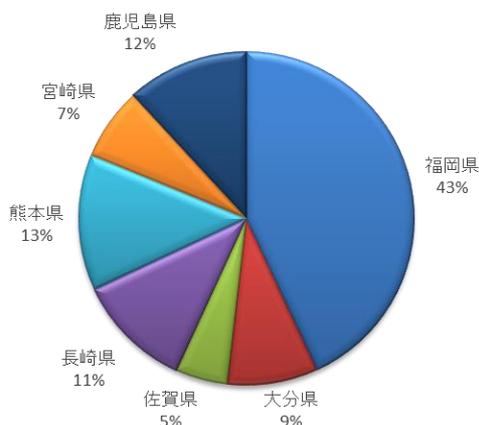


図 3.3 回答者の県別分布 (N=1054)

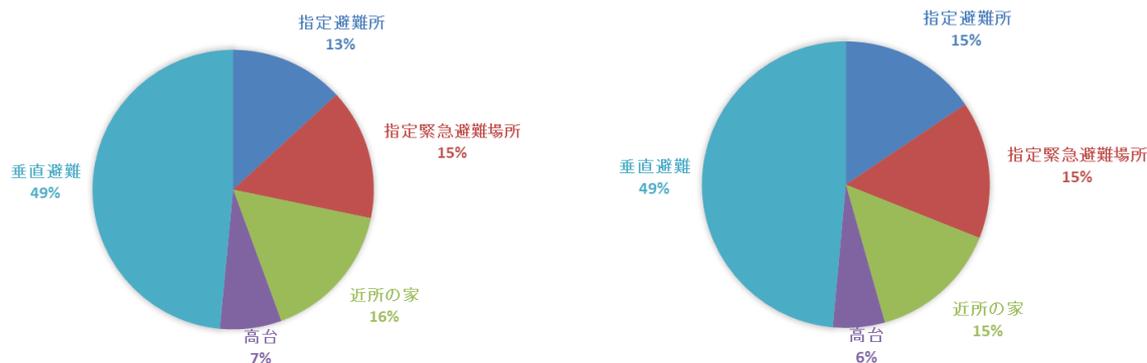


図 3.4 避難先の内訳（令和2年7月豪雨（右 N=99），令和2年台風10号（左 N=103））

グループ2の避難者の避難先としては，約3割が避難所，指定避難所であり，最も多いのは垂直避難で約5割であった（図3.4）。これは，令和元年東日本台風での調査とほぼ同じ結果である。

3.4 避難者の行動の特徴-「避難」と「非避難」を分ける要素に関する分析-

3.4.1 避難行動と避難情報

令和2年7月豪雨にて，「避難」もしくは「非避難」（避難情報を受けたり，周辺に被害があったりするにも関わらず避難しないこと）を決めた時に取得していた情報は，図3.5のようになった。グループ1は，避難する必要がなかった可能性が高いため，グループ1を除いたサンプルを用いて集計している。さらに，調査では，取得していた情報をすべて回答してもらっていたが，集計時には最も緊急性の高い

第6編

避難情報（避難指示(緊急)＞避難勧告＞避難準備・高齢者避難開始の順）を代表値として重複回答とならないように修正した。

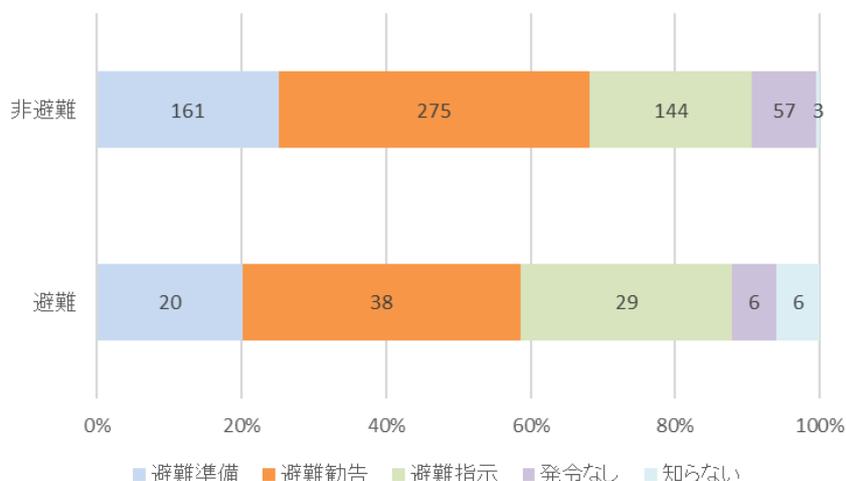


図 3.5 避難先の内訳 (N=739)

帰無仮説を「避難／非避難と避難指示（緊急）の取得は関連がない」「避難／非避難と避難勧告の取得は関連がない」「避難／非避難と避難準備・高齢者避難開始の取得は関連がない」とし、 χ^2 乗検定を行ったところ、有意水準 5%とした場合、どの帰無仮説も棄却されず、これらの避難情報は、避難には影響を与えないという結果となった。そこで、子供がいる世帯もしくは回答者が 60 歳以上で子供がいない世帯のみにサンプルを限定して、同様の帰無仮説に対して χ^2 乗検定を行った。この場合では、避難／非避難と避難指示（緊急）と関連についてのみ、帰無仮説が棄却された。この時のクロス集計表、期待度数の表と p 値を表 3.1 に示す。

表 3.1 避難／非避難と避難指示（緊急）（令和 2 年 7 月豪雨）（p 値：0.023, N=496）

クロス集計	避難指示未取得	避難指示取得	期待度数	避難指示未取得	避難指示取得
避難	43	23	避難	50.2983871	15.7016129
非避難	335	95	非避難	327.7016129	102.2983871

避難指示（緊急）のみが避難に有効である傾向は、平成 30 年 7 月豪雨、令和元年東日本台風時にも見られた傾向であるが、今回は、高齢者か子供がいる世帯という避難を積極的に行う世帯構成に限定した際にしかその差異が見られなかった。今回に関しては、新型コロナウイルスの蔓延により、避難行動に影響が出た可能性がある。

令和 2 年台風 10 号において、同様の帰無仮説の帰無仮説に対して χ^2 乗検定を行ったところ、避難／非避難と避難勧告との関連で帰無仮説が棄却された。この時のクロス集計表、期待度数の表と p 値を表 3.2 に示す。これは、令和 2 年 7 月豪雨の被害の記憶が残る時期であり、平成 30 年台風 21 号、令和元年房総半島台風、令和元年東日本台風といった近年の台風と同等の巨大台風であるという事前の報道から、従来よりも避難行動が早まったと捉えることができるであろう。幸いにも、令和 2 年台風 10 号は上陸することなく、勢力を落とし大きな被害をもたらさなかったが、もしも、強い勢力を保ったまま上陸していたとしても、タイムリーな避難を行っていた人が多かった可能性が高いことを示す結果と考えられる。

表 3.2 避難／非避難と避難勧告（令和2年台風10号）（p 値：0.028，N=496）

クロス集計	避難勧告未取得	避難勧告取得	期待度数	避難勧告未取得	避難勧告取得
避難	44	59	避難	54.35723951	48.64276049
非避難	346	290	非避難	335.6427605	300.3572395

3.4.2 避難行動と情報源

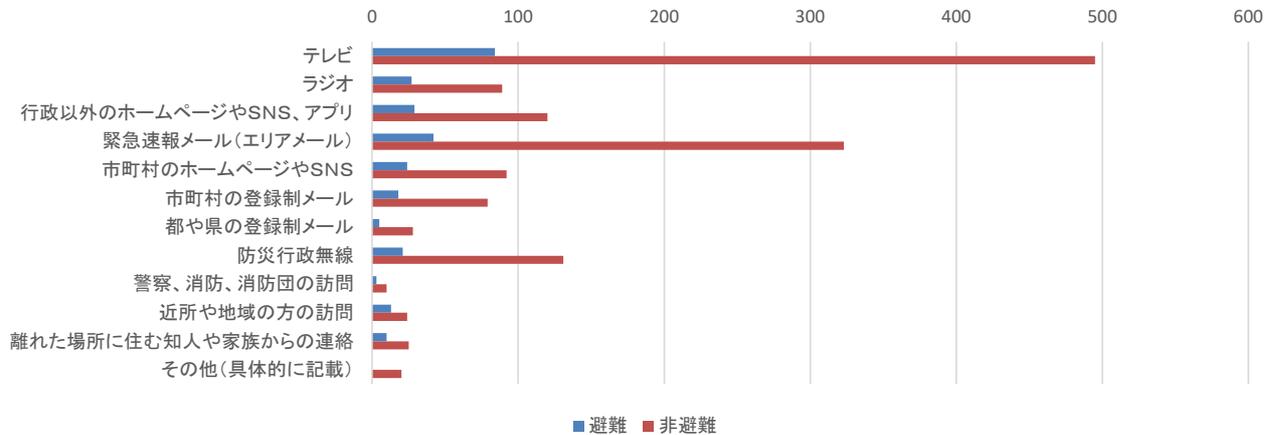


図 3.6 避難情報の取得媒体（N=739）

表 3.3 避難情報の取得媒体

設問概要	選択肢	全体(N=739)		
		避難(N=110)	非避難(N=629)	p値
避難情報の取得媒体	テレビ	84	495	0.70
	ラジオ	27	89	<0.01
	行政以外のホームページやSNS、アプリ	29	120	<0.01
	緊急速報メール(エリアメール)	42	323	0.01
	市町村のホームページやSNS	24	92	0.05
	市町村の登録制メール	18	79	0.26
	都や県の登録制メール	5	28	-
	防災行政無線	21	131	0.67
	警察、消防、消防団の訪問	3	10	-
	近所や地域の方の訪問	13	24	<0.01
	離れた場所に住む知人や家族からの連絡	10	25	<0.01

表 3.4 避難／非避難と緊急速報メール（p 値：0.013，N=739）

クロス集計	緊急メール未取得	緊急メール取得	期待度数	緊急メール未取得	緊急メール取得
避難	67	42	避難	55.09078591	53.90921409
非避難	306	323	非避難	317.9092141	311.0907859

避難情報を取得した媒体に関して、図 3.6、表 3.3 に示す。避難情報を取得した媒体は、「テレビ」や「緊急速報メール（エリアメール）」は比率が大きいものの、テレビについては避難者と非避難者の回答比率には有意な差がない。また、平成 30 年 7 月豪雨や令和元年東日本台風時には有意とならなかった「緊急速報メール」が有意となっているが、表 3.4 に示すように緊急速報メールを受け取ることは避難につながっていない。一方で「ラジオ」、「行政以外の SNS・アプリ」が 0.05 未満となっており、これらの情報媒体を利用する避難者の比率が高い。また、「近所や地域の方の訪問」、「離れた場所に住む知人や家族からの電話・メール」といった身近な人からの情報では避難する比率が高くなっていくのも過去の 2 つの調査に共通する点である。なお、令和元年東日本台風時には有効とされた「市町村の SNS や HP」、「警察・消防・消防団の訪問」は、サンプルが少なかつたため統計的有意性について検討できなかった。

3.4.3 避難行動と備え

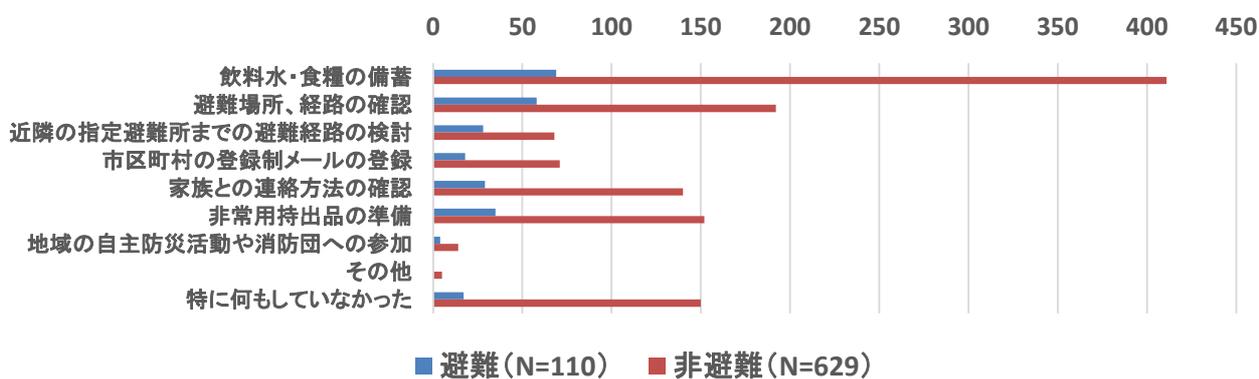


図 3.7 災害への備え (N=739)

表 3.5 災害への備え

設問概要	選択肢	全体 (N=739)		
		避難 (N=110)	非避難 (N=629)	p値
災害への備え状況	飲料水・食糧の備蓄	69	411	0.55
	避難場所、経路の確認	58	192	<0.01
	近隣の指定避難所までの避難経路の検討	28	68	<0.01
	市区町村の登録制メールの登録	18	71	0.12
	家族との連絡方法の確認	29	140	0.31
	非常用持出品の準備	35	152	0.08
	地域の自主防災活動や消防団への参加	4	14	-
	その他	0	5	-
	特に何もしていなかった	17	150	0.05

災害への備えについては「避難場所、経路の確認」、「近隣の指定避難場所までの避難経路の検討」ので避難者、非避難者の間で有意な差があった (図 3.7、表 3.5)。令和元年東日本台風での調査では有意

な差があった「飲料水・食料の備蓄」,「市区町村の登録制メールの登録」,「家族との連絡方法の確認」,「非常用持出品の準備」については,有意な差がない. また,「特に何もしていなかった」という回答も有意な差が出ていない. これは豪雨,台風災害が頻発する九州における特徴(良い意味も悪い意味も含む)といえるかもしれない.

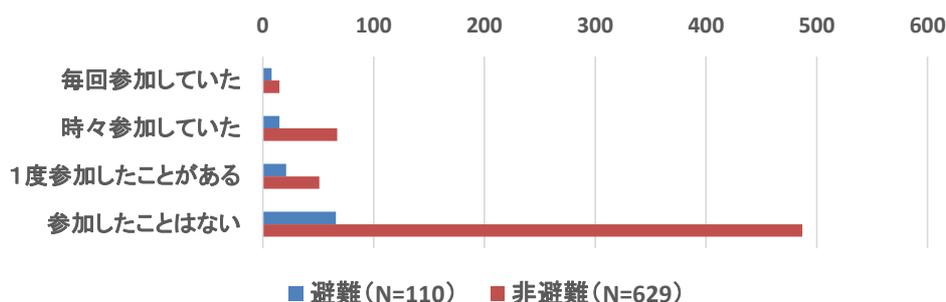


図 3.8 防災イベントへの参加状況 (N=739)

表 3.6 防災イベントへの参加状況

設問概要	選択肢	全体(N=739)		
		避難(N=110)	非避難(N=629)	p値
防災訓練や防災講演会への参加状況	毎回参加していた	8	15	<0.01
	時々参加していた	15	67	<0.01
	1度参加したことがある	21	51	<0.01
	参加したことはない	66	487	<0.01

防災訓練や防災講演会への参加状況では,「毎回参加していた」「時々参加していた」「1回参加したことがある」の回答で避難者が有意に高い比率となっており,「参加したことはない」の回答で非避難者が有意に高い比率となっている(図 3.8, 表 3.6). 例え1回であっても防災イベント等への参加は,避難行動の選択に正の影響を与えらる.

3.4.4 避難行動と近隣住民や地域コミュニティとの関係

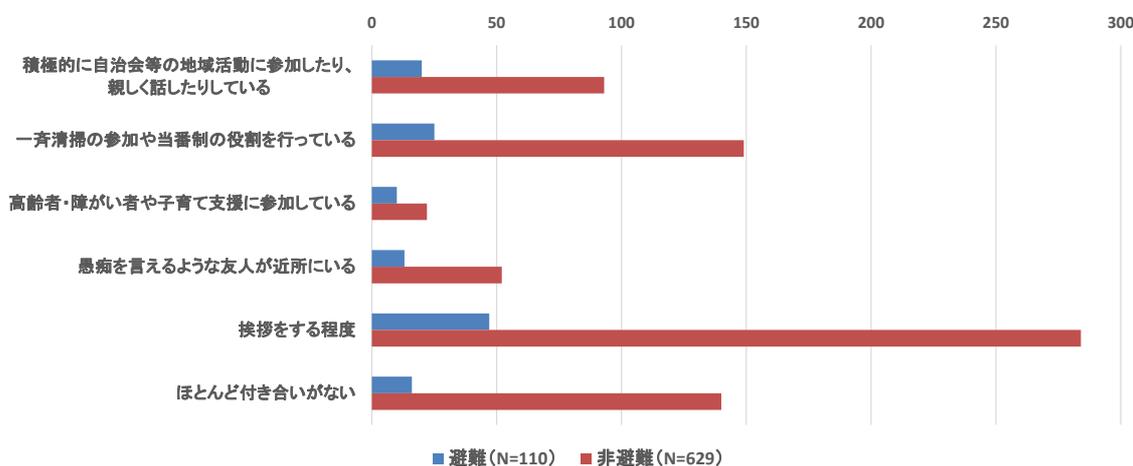


図 3.9 近隣住民や地域コミュニティとの関係 (N=729)

表 3.7 近隣住民や地域コミュニティとの関係

設問概要	選択肢	全体(N=739)		
		避難(N=110)	非避難(N=629)	p値
災害前の近所づきあい状況	積極的に自治会等の地域活動に参加したり、親しく話したりしている	20	93	0.34
	一斉清掃の参加や当番制の役割を行っている	25	149	0.86
	高齢者・障がい者や子育て支援に参加している	10	22	0.01*
	愚痴を言えるような友人が近所にいる	13	52	0.23
	挨拶をする程度	47	284	0.63
	ほとんど付き合いがない	16	140	0.07

* :期待度数が5以下のものがあつたため Fisher 正確確率検定のP値を示す。

災害前の近所づきあい状況に関する設問では、「高齢者・障がい者や子育て支援に参加している」のみが避難者と非避難者で有意な差があつた(図 3.9, 表 3.7)。過去の調査では、非避難と関係があつた「挨拶をする程度」、「ほとんど付き合いがない」を含めてその他の項目でも有意な差があつたが、今回の調査では有意な差は出なかつた。コミュニティとのつながりと避難行動の選択については地域性があると考えられる。

コミュニティ内の防災活動状況に関する設問(図 3.10, 表 3.8)についても、上記の近所づきたいに関する設問同様、過去の2回の調査では有意な差がみられた「自治会等の地域単位で防災に関する取り決めがある」、「防災に関する取り決めのため、数回会合がある」、「自治会等の地域単位で高齢者・障がい者などに関する取り決めがある」に関しても有意差が見られなかつた。非避難者が有意に関係していた「自治会等の地域単位で防災に関する取り決めがあるかどうか知らない」についても有意な差はなかつた。

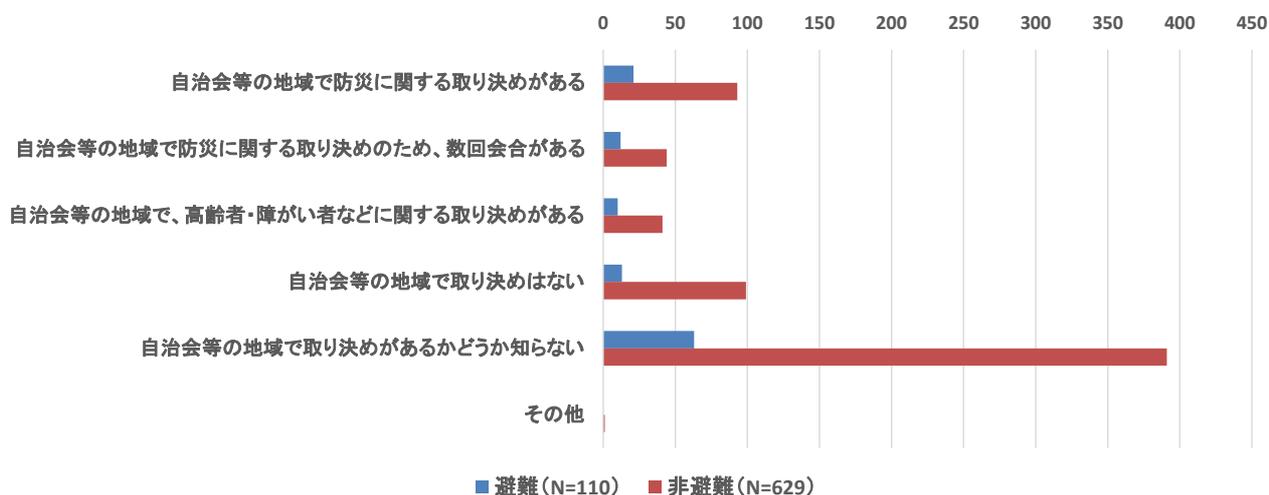


図 3.10 コミュニティ内の防災活動状況 (N=739)

表 3.8 コミュニティ内の防災活動状況

設問概要	選択肢	全体(N=739)		
		避難(N=110)	非避難(N=629)	p値
コミュニティ内の防災活動状況	自治会等の地域で防災に関する取り決めがある	21	93	0.23
	自治会等の地域で防災に関する取り決めのため、数回会合がある	12	44	0.14
	自治会等の地域で、高齢者・障がい者などに関する取り決めがある	10	41	0.31
	自治会等の地域で取り決めはない	13	99	0.29
	自治会等の地域で取り決めがあるかどうか知らない	63	391	0.33
	その他	0	1	-

3.4.5 避難行動と世帯構成

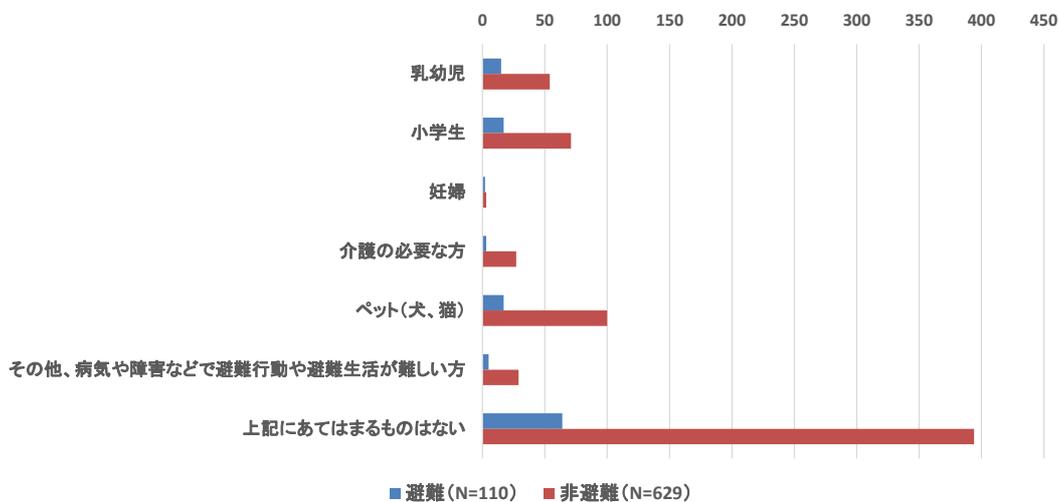


図 3.11 災害前の世帯構成 (ペットを含む) (N=739)

表 3.9 災害前の同居家族 (ペットを含む)

設問概要	選択肢	全体(N=739)		
		避難(N=110)	非避難(N=629)	p値
災害前の同居家族(ペットを含む)	乳幼児	15	54	0.09
	小学生	17	71	0.21
	妊婦	2	3	-
	介護の必要な方	3	27	-
	ペット(犬、猫)	17	100	0.91
	その他、病気や障害などで避難行動や避難生活が難しい方	5	29	0.97
	上記にあてはまるものはない	64	394	0.43

第6編

災害前の世帯構成について尋ねた設問でも、過去の調査で有意な差があった「乳幼児」、「小学生」、mについて有意な差は出なかった。「妊婦」、「介護の必要な方」を家族に含む世帯についてはサンプルが少なく統計的な分析はできなかった（図 3.11, 表 3.9）。ペットや避難行動や避難生活が困難な方を家族に含む世帯は、避難の意思決定に負の影響を与えると考えたが、これまでの調査同様2群の間に有意な差は見られなかった。また、「本設問にあてはまるものはない」と回答した世帯についても、有意な差は見られず、避難行動との相関は見られなかった。

3.4 まとめ

令和2年7月豪雨での被災者行動に関して、Web調査を行い、今回の災害における住民の行動について分析を行った。避難した人の特徴として、平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風と同様に、以下の傾向が示唆された。

- 行動を必要とすると思われる世帯（高齢者や子供がいる世帯）であっても避難勧告までの情報より、避難指示（緊急）の発表により行動する。
- 身近な人から寄せられた情報（地域の人への訪問や遠くにいる家族や知り合いからのメールや電話）により行動する
- テレビや緊急速報メールだけでなく、能動的に情報を取得する必要がある媒体（SNS、HP、ラジオ）からも情報を得ている
- 防災訓練や講演会等へ参加したり、災害への準備をしたりしている

しかし、平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風では見られた下記については、今回調査では同様の傾向はみられなかった。

- 家族に乳幼児、小学生、妊婦、要介護者がいる
- 平常時からコミュニティとのつながりが強い
- 防災や要支援者に関する取り組みがある自治会に参加している

3年連続して同様の調査を行い比較することで地域性が見えてきている。今後は、地域特性を踏まえた分析を行い、避難モデルの構築に寄与することを考えている。

参考文献

内閣府：令和2年7月豪雨による被害状況等について（最新版令和3年1月7日14:00）、
http://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/index.html, 2020.

平成30年度科学研究費補助金 特別研究促進費「平成30年7月豪雨による災害の総合研究」（課題番号：18K19951, 研究代表者：山本晴彦）報告書, 2019.

令和元年度科学研究費補助金 特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」（課題番号：19K24678, 研究代表者：二瓶 泰雄）報告書, 2020.

第4章 防護動機理論と状況認識理論に基づく避難行動分析

熊本大学 柿本 竜治

4.1 防護動機理論と状況認識の避難行動への適用

4.1.1 自然災害リスク認知のパラドックス

住民の避難行動について、内閣府及び消防庁が実施した各市町村に対するアンケート調査¹⁾では、避難訓練の実施や過去の災害経験など、防災意識の高い地域の住民はスムーズに避難できたとする一方で、避難勧告等を発令しても住民にそもそも避難しなければならないとの意識がない、といった回答や夜中の避難勧告等の発令で、雨が強く降っており、住民の避難行動に結びつかなかった、とする回答が多かったことが報告されている。また、住民を対象にしたアンケート調査について、岡山、広島、愛媛県の避難勧告が発令された市区町村を対象に実施したインターネット調査²⁾では、全体の23.4%が避難行動をとっていたが、町内組織・近隣・家族・友人の呼びかけられた住民のほうが避難行動を取っていたこと、年齢が高い住民ほど避難行動をとった人の割合は低く、自分は安全な所に住んでいると考えていること、また、危険性を伝える情報に接触していてもその危険性を想像できた人は半数に及ばなかったことなどが明らかにされている。また、広島市内の1,000名を対象にしたWEBアンケート³⁾において、避難行動を取った割合は3.6%に過ぎず、24.9%が避難しようとしたが避難しなかった、71.5%は避難する必要はないと考え、しなかったと回答しており、避難しなかった理由として、自分の家は大丈夫だと思っていた、避難する緊急性を感じなかった、近隣住民が避難していなかった、過去の経験から大きな被害はないと考えた、避難指示が出ていなかった、深夜の避難は危険と考えた、などの多様な理由が原因であったことが明らかにされている。

Wachingerら⁴⁾は、自然災害全般に関する論文を広範囲にレビューし、「自然災害に対するリスク認知が高くても、そのリスクへの防護行動を取らない」といった自然災害リスク認知のパラドックスの存在を示唆した。2012年阿蘇・大分、2013年伊豆大島、2014年広島市、2017年福岡県・大分県と毎年のように多数の死傷者を伴う豪雨が発生し、その脅威の認知は広まったかに思われた。2018年西日本豪雨では、これらの豪雨災害を教訓に、比較的早い段階で避難勧告等が発令されたが、再び広範囲で多くの犠牲者を出すこととなった。自然災害の脅威の認知と行動のギャップは、減災社会を構築する上で重要な課題であり、リスク認知と対処行動の関係は、災害対策の領域において改めて問い直されている。そのような中で2020年7月豪雨が発生し、再び多くの犠牲者を出すこととなった。

4.1.2 本研究の枠組み

リスク回避行動を促進する主要因に、事象が発生する確率と被害の甚大さに対する主観的判断（脅威評価）とその対策行動に対する効力感の知覚（対処評価）を挙げている理論に防護動機理論（PMT）がある⁵⁾。この理論では、脅威と対処手段の評価が、対処行動を生じさせているという合理性を前提としている。PMTは、健康リスクに関する行動分析のために開発されたものであり、その後、労働リスクや技術リスクなど他の分野でも幅広く応用され成功を収めている。また、近年は、自然災害対策にも応用されている⁶⁾。しかしながら、自然災害リスク認知のパラドックスの存在は、普段から避難意図の高い人は、豪雨時に避難するとの合理性の前提に疑問を投げ掛けるものである。

社会心理学や認知心理学の分野で、人間の情報処理を説明するための理論の一つに二重過程理論があ

る⁷⁾。二重過程理論は、「思考の負荷が低く、直観的、自動的であれば早く行動に結びつくシステム1」と「意識的思考を駆使し、負荷が高く、分析的で論理的なシステム2」という2つのシステムによって判断・意思決定がなされているというものである。二重過程理論では、認知資源と動機が十分なきシステムティック（システム2）に、どちらか一方でも不足するとヒューリスティック（システム1）に処理されることが示されている。自然災害のように、個々人がごくまれにしか直面しない事象の場合、経験不足、情報や周辺環境への状況認識の不完全さで、このシステムがうまく機能しなくなり、ヒューリスティックなシステム1が優先的に働くことが考えられる。

自然災害のように、個々人がごくまれにしか直面しない事象の場合、経験不足、情報や周辺環境への状況認識の不完全さで、ヒューリスティックな意思決定が優先的に働くことが考えられる。ヒューリスティックな意思決定モデルの1つに自然主義的意思決定（NDM）モデル⁸⁾がある。NDMモデルは、意思決定はケースバイケースであり、その時々で異なる可変的なものであるとの考えに基づいている。NDMの1つに Endsley が提起した状況認識理論がある⁹⁾。状況認識理論では、状況認識(SA)を3つのレベルに区分する。レベル1は、取り巻く環境の変化や状況を認知すること、レベル2は、レベル1で得られた情報等に基づいて、自分自身のおかれている状況を理解すること、レベル3は、レベル2の理解に基づいて今後生じる事態や変化を予測することとされ、この三つのレベルを経ることで適正な状況認識がされるとされる。

災害の脅威を高く認識し、また避難行動を災害から身を守る有効な対策と捉えていたとしても、SAが適切でなければ実際の避難行動にはつながらないだろう。豪雨時の避難遅れの一つの要因として、住民の災害対応にSAの失敗が推察される。災害時のSAの失敗には、人々の避難行動の意思決定のための災害情報や周辺環境に対する認知的な限界の存在があろう。現実の豪雨時の避難には、気象情報や避難情報に基づいて状況を合理的に判断し避難する人と周辺で災害が発生したり、避難を呼びかけられたりして否応なく避難する人の双方が存在するだろう。本研究では、前者を能動的避難者、後者を受動的避難者と捉える。受動的避難者は、災害発生に対するSAの失敗を経ながらも最終的には状況の認識が促されている。そこで、本研究では図4.1に示すようなPMTとNDMの双方を考慮した枠組みで豪雨時の住民の避難行動を調査分析する。

本研究でのPMTは、気象情報や避難情報といった災害情報等に基づく脅威評価、避難することの負担感（対処費用）、それと災害発生に対する否認や楽観する非防護反応により避難意図が形成され、それが避難に繋がるものとする。一方、NDMの視点からは、防災情報を取得しなかった人は、初期の状況認知に失敗しておりSAレベル1の失敗、情報を取得しても災害発生への適切な脅威評価が形成されなかった人は、自身がおかれている状況の全体像を理解することに失敗しておりSAレベル2の失敗、災害発生の脅威を高く評価しながら、避難意図が形成されなかった人は、脅威評価した事案について今後

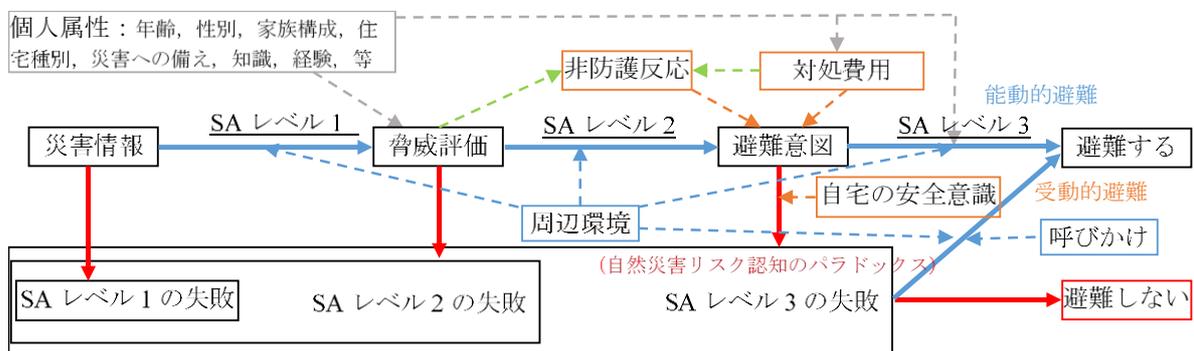


図4.1 PMTにSAの失敗を考慮した避難行動分析の枠組み

生じる事態や変化の予測に失敗しており、SA レベル3の失敗をしているとみなせるだろう。また、避難意図が高くても能動的避難をしていない人もSA レベル3の失敗を犯しているとみなせるだろう。これは、「自然災害に対するリスク認知が高くても、そのリスクへの防護行動を取らない」といった自然災害リスク認知のパラドックスの存在とも関連する。防護動機理論にSAの失敗を考慮することで、能動的小および受動的な避難決定状況の表現、それにどの段階で避難遅れの原因が発生したかを明確にすることが出来る。それにより、どの段階の状況認識を促すことが効率的に避難を促すことに繋がるか、また、具体的な方策の検討が可能となるだろう。

4.2 令和2年7月豪雨時の避難行動調査結果

4.2.1 対象地域とアンケート調査の概要

2020年7月豪雨では、熊本県を流れる球磨川の流域の市町村で大きな被害が発生した。本研究では、その流域にある図4.2に示す八代市坂本町を調査対象地域とする。坂本町(旧坂本村)は、2005年8月1日に、泉村、千丁町、鏡町、東陽村とともに八代市と対等合併し、八代市となる。坂本町は、最盛期には人口は18,000人を超えていたが、2019年9月時点で3,422人、高齢化率51.4%と過疎化高齢化が急速に進んでいる中山間地域である。2020年7月豪雨では、この坂本町では、全壊147棟、半壊160棟、死者・行方不明者5名の被害が発生した。2020年7月3、4日に出された気象情報・避難情報を表4.1に示す。

坂本町復興計画策定地区別懇談会が、2020年11月下旬から12月上旬にかけて坂本町の8地区(旧小学校区)の集会施設および2か所の仮設住宅の集会所で開催された。2020年7月豪雨時の避難行動アンケート調査は、その懇談会への参加者に対して実施した。調査の実施日、会場、および各会場での回収数を表4.1に示す。アンケート調査票の総回収数は、224件であった。アンケート回答者の男女比および年齢構成を図4.3に示す。回答者の男女比は、男性73%、女性27%と懇談会に世帯の代表者が出席

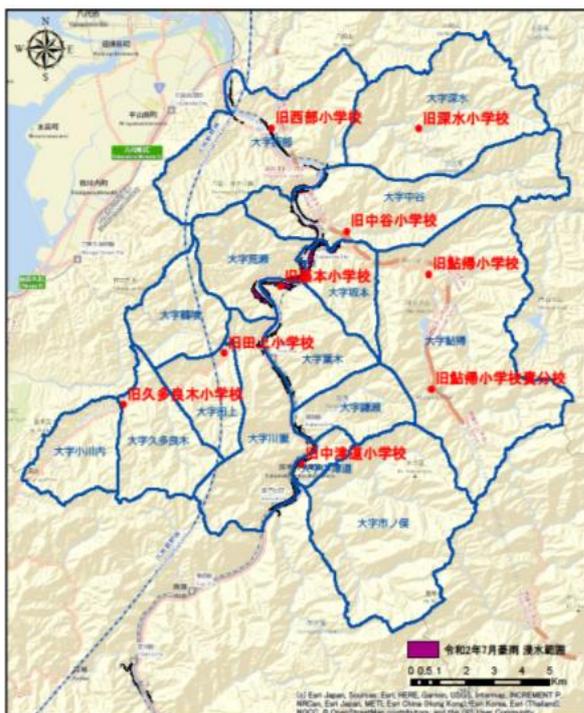


図4.2 坂本町と各地区

表4.1 気象情報・避難情報の時間推移

日 時		気象情報・避難情報
7月3日	11時28分	大雨注意報
	16時50分	洪水注意報
	21時39分	大雨警報(土砂)
7月4日	0時18分	洪水警報
	1時10分	土砂災害警戒情報
	2時45分	避難準備(泉町・坂本町・東陽町・二見校区)
	3時29分	大雨警報(浸水・土砂)
	4時50分	大雨特別警報(浸水・土砂)
	5時58分	氾濫発生情報(球磨村大字渡地先(右岸)付近で氾濫発生)
	9時50分	避難指示(全域)
	11時50分	大雨警報(土砂)
	17時38分	氾濫発生情報(人吉市中神町(右岸)付近で氾濫発生)

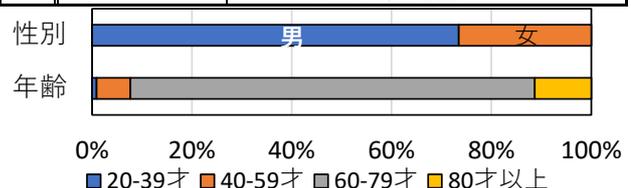


図4.3 アンケート回答者の性別・年齢構成

表 4.2 アンケート調査内容の概要

対象地域：八代市坂本町			
方法：各地区集会場および仮設住宅集会所にて直接記入およびヒアリング			
回収状況			
地区	実施日	実施場所	小計
鮎婦	10月31日	鮎婦社会教育センター	24
百済来	11月2日	久多良木地区多目的集会施設	21
中谷	10月30日	さかもと青少年センター	25
中津道	10月30日	中津道社会教育センター	33
深水	10月27日	深見生活改善センター	26
藤本	10月31日	藤本社会教育センター	31
田上	10月28日	田上社会教育センター	20
西部	10月31日	西部地区多目的集会施設	23
仮設（古閑中）	11月11日	八代市古閑中仮設団地	7
仮設（野球場）	11月4日	八代市市民球場仮設団地	14
計			224
アンケート内容			
個人・世帯属性	性別，年齢，世帯人数，居住年数，住居構造，所有形態，災害時要援護者の有無，等		
避難行動について	避難の有無・手段・場所・きっかけ，被害の程度，取得災害情報の種類・手段，等		
気象・避難情報と脅威・避難意図	災害情報の意味の理解，脅威評価，避難行動意図，等		
経験・備え	災害経験，災害への備えの状況，等		
避難の対処費用	避難は危険，避難は面倒，避難所は不自由等		
自己効力感	避難できる，避難することで身を守ることができる等		
非防護反応	災害は発生しない，被害を受けない，自宅は安全，災害は運命，ハード整備への信頼，等		
脅威評価・避難意識の時間的推移の調査内容			
下記の項目の時間的推移： 避難意識，脅威評価，河川氾濫や土砂災害の発生の認識，河川の確認と河川氾濫の発生の認識，周囲の避難状況，および避難の呼びかけ			

していることもあり，男性が高い割合を示した。また，回答者の年齢構成は，20-39歳が1%，40-59歳が7%，60-79歳が81%，80歳以上が11%であり，かなり高齢者に偏っている。

本研究では，対象地域の避難行動について，脅威評価，対処費用および非防護反応といった防護動機理論（PMT）に関わる内容と状況認識（SA）に関する内容についてアンケートを行っている。また，豪雨時の周辺環境に対する状況認識，避難意識や脅威評価の時間的推移についても同時に調査している。アンケート調査内容概要を表4.2に示す。

個人・世帯属性に関しては，回答者の性別，年齢，および世帯の人数，居住年数，住居構造，所有形態，災害時要援護者の有無等について質問している。また，過去の経験や災害への備えの状況等についても質問している。豪雨時の行動については，避難の有無，避難手段・場所，避難のきっかけ，被害の有無と程度，取得した災害情報の種類と手段等について質問している。

SAに関連した質問内容は，大雨情報，大雨特別警報，避難勧告，避難指示等の災害情報の意味の理解やその情報を聞いた際の災害発生への認識についてである。また，河川の様子や自宅まで濁流が迫っている状況，避難の呼びかけに対する災害発生への認識についても質問している。PMTの脅威評価に関連した質問は，SAに関連した質問内容の災害発生への認識についてと共有している。対処費用に関連した質問は，避難行動は面倒かや避難先は不自由に思うか等についてである。非防護反応に関連した質問は，災害発生や被害発生への楽観度合いや堤防等ハード整備への信頼等についてである。

豪雨時の周辺環境に対する状況認識，避難意識や脅威評価の時間的推移についての調査では，2020年7月3日16時30分から7月4日12時までの避難意識，脅威評価，河川氾濫や土砂災害の発生の認識，河川の

確認と河川氾濫の発生の認識，周囲の避難状況，および避難の呼びかけに関する意識，認識，行動を時系列で調査している。

4.2.2 アンケート調査結果の概要

気象情報や避難情報等の防災情報の取得状況を図4.4に示す。取得した防災情報で、もっとも多かったのは「大雨警報」(約71%)であり、次いで「大雨特別警報」(約69%)であった。避難を促す情報については、「避難勧告」が発令されたことについての認知が最も高く、約60%であった。これらの防災情報の下での避難状況を図4.5に示す。自宅での垂直避難を含め避難をしたと回答した人は約51%と半数以上の方が避難していた。回答者の約44%が何らかの被害を受けており、多くの住民に避難の必要性が高かったと思われる。被害の有無別の避難状況を見みると、被害があった人のうち約85%が避難しており、一方、被害がなかった人は約25%しか避難していなかった。このように被害の有無によって避難率に大きな差があり、被災が避難のきっかけとなっているようである。そこで、図4.6に避難のきっかけの回答状況を示す。最も多かったのは、「濁流が迫ってきた」の36件、次に多かったのは、「河川の目視」の33件であった。また、家族・親族からの避難の呼びかけ等、避難の呼びかけをきっかけとして、避難している方も多い。避難の呼びかけや自宅付近まで濁流が迫ってきたことをきっかけにした避難は、自発的な避難とは捉えがたい。「周辺地域で災害が発生したため」も含めて、人や周辺環境の変化により避難を迫られており、受動的に避難したと捉えられよう。一方、気象情報や避難情報から判断しての避難、すなわち能動的な避難行動を取った人はかなり少ないようである。

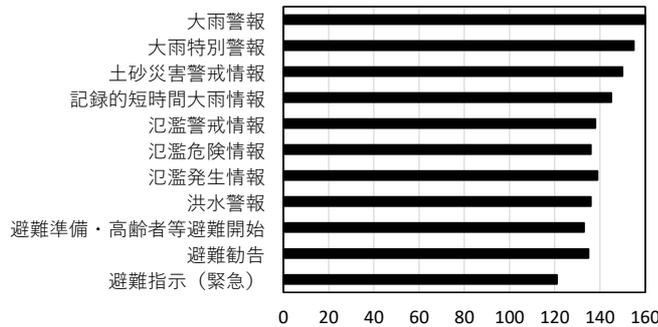


図4.4 防災情報の取得状況 (複数回答可)

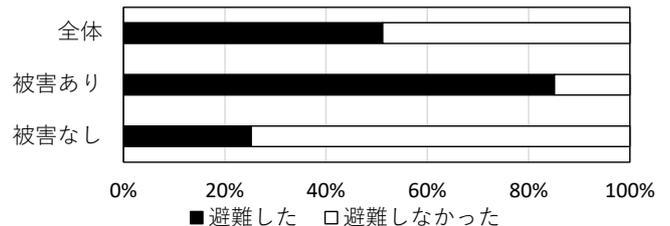


図4.5 避難状況

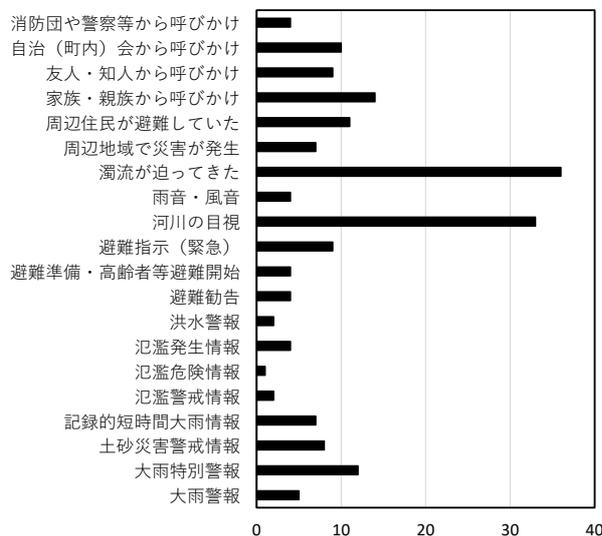


図4.6 避難のきっかけ (複数回答可)

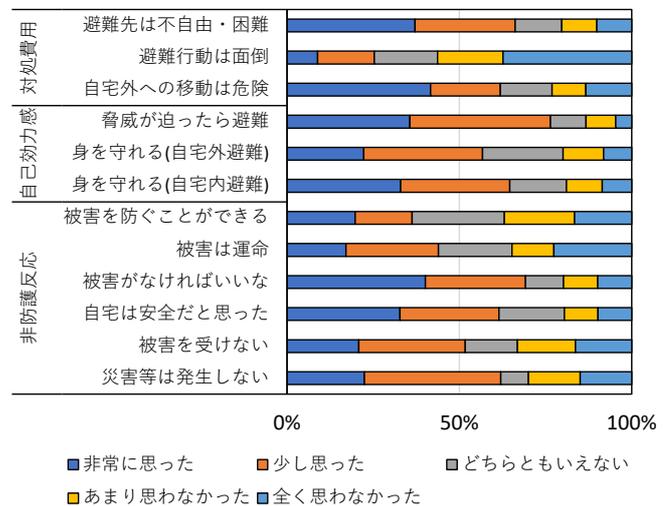


図4.7 避難への対処の負担感と非防護反応

図4.7に避難への対処の負担感、自己効力感と非防護反応に関する質問項目への回答状況を示す。まず、避難への対処の負担感について、「避難先での生活には不自由や困難が伴うと思ったか」の問いには約66%の人が、「避難行動をとることは面倒だと思ったか」の問いには約25%の人が、「自宅外への移動は危険だと思った」の問いには約62%の人が、「非常に思った」、「すこし思った」と回答している。次に自己効力感について、「災害の脅威が迫ったら避難しよう」の問いには約76%の人が、「自宅外に避難することによって身を守ることができる」の問いには約57%の人が、「自宅の2階など高いところに避難することによって身を守ることができる」の問いには約65%の人が、「とても思っていた」、「すこし思っていた」と回答している。非防護反応について、「堤防や砂防等によって被害を防ぐことができるか」の問いには約36%の人が、「被害は運命としてあきらめるか」の問いには約44%の人が、「被害がなければいいな」の問いには約69%の人が、「自宅は安全だと思ったか」の問いには約61%の人が、「被害を受けないだろう」の問いには約52%の人が、「被害は発生しないだろう」の問いには約63%の人が、「とても思っていた」、「すこし思っていた」と回答している。多くの人が、避難することや避難で身を守ることができると思っている一方で、避難に伴う煩わしさや災害への楽観性に依拠した非防護反応が見られた。

4.3 脅威評価と避難意思の時系列変化

4.3.1 状況認識の時間推移

本節では、7月豪雨時の周辺環境や脅威評価、避難意識の時間推移に関する調査項目のすべてに回答した150件のデータを用いて、避難行動意図の醸成過程を検証する。まず、災害発生への脅威評価や避難行動意図に影響するであろう7月4日0:00から10:00までの各時間帯の降雨状況や河川水位を図4.8に示す。なお、雨量データは、八代市坂本町の荒瀬の観測データであり、河川水位は、八代市坂本町西部の横石観測所のデータである。3:00から6:00に激しい雨が降り、その時間帯に河川水位が急激上昇していることが分かる。3:00過ぎには氾濫危険水位を超えており、この時点でかなり危険な状況となっている。また、6:00には計画高水位も超えており、球磨川流域の大部分で浸水被害が発生している。そのような状況に対して、災害発生への意識の時間推移を図4.9に示す。4:00ごろまでは、多くの方は就寝中であったが、起床して時間が経過するとともに災害の発生を確認した人や知った人が多くなっていることが分かる。しかしながら、外の状況に対して、災害発生の認識には、タイムラグが少し生じているようである。

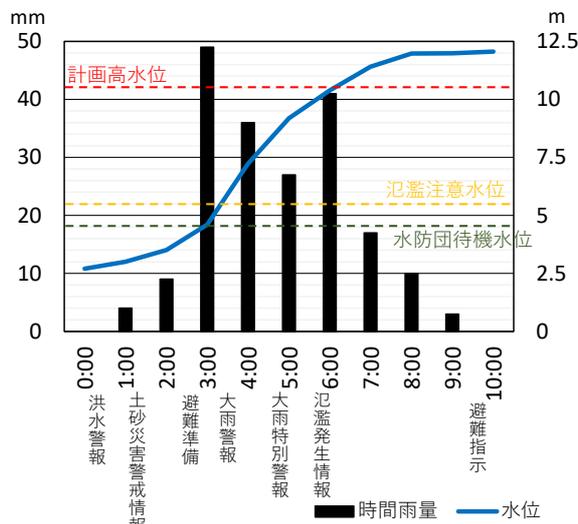


図4.8 降雨量と河川水位の時間推移

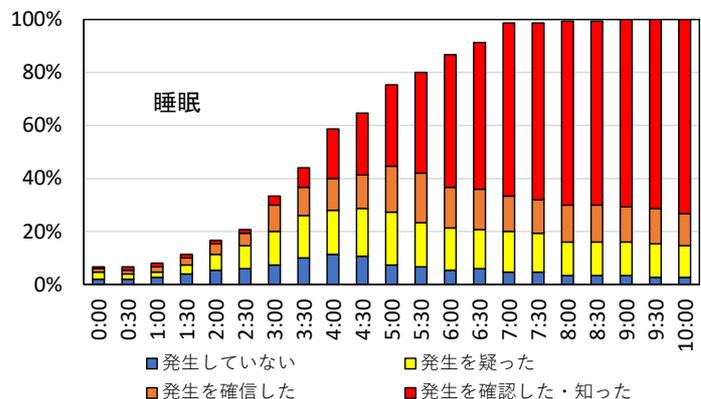


図4.9 災害発生意識の時間推移

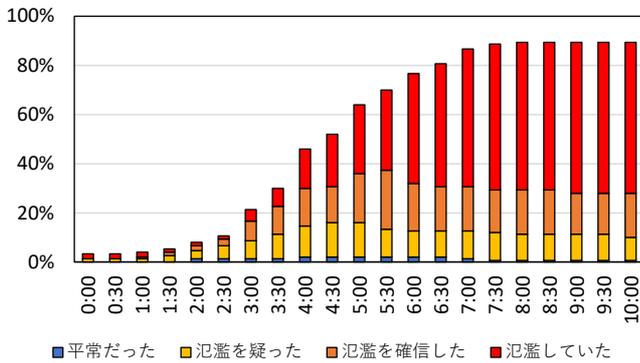


図4.10 河川氾濫意識の時間推移

河川の状態を確認し、河川氾濫への意識が各時間帯でどうだったかを図4.10に示す。起床後は、河川を確認した人の多くは、氾濫を疑った、もしくは確信したようである。また、6:00ごろから急激に河川が氾濫しているのを見た人が増えている。これは、図4.8の河川水位の時間推移の状況と一致している。一方、そのような河川状況認識に対し、周囲の人の避難状況認識も6:00頃から周囲の人が避難しているよだとの認識した人が増えているが、周囲の人が避難していると意識した人は、高々60%程度である。周囲の環境状況と周囲の人の避難状況への意識には少し乖離があるようである。次に、親族や友人、近所の人や消防団等から避難の呼びかけを受けた時間帯を図4.12に示す。誰からか避難の呼びかけを受けたのは、約半数の74人であり、また、それらの人々が呼びかけを受けた時間帯は、5:00~6:00の間が多かったようである。これも河川の水位状況に符合している。

以上のように降雨状況や河川水位の時間的な変化状況と災害発生への意識や河川氾濫に対する意識の時間的な変化は、概ね一致している。しかしながら、そのような周辺環境状況にも関わらず、河川氾濫への認識や災害発生への認識があまりなかった方も少なからずいた。そのような人は、周辺環境の状況を適切に認知おらず、SAレベル1の失敗を犯している可能性が高い。

4.3.2 脅威評価と避難意図の時間推移

自分自身へ災害が迫っていることに対する脅威評価の時間推移を図4.13に示す。早い時間帯から起きていた人の多くが、自分自身へ災害が迫っていると感じていたようである。7:00の時点で80%以上の回答者が、自分自身へ災害が迫っていると感じており、約60%の回答者は自分自身へ災害が迫っていると非常に思っていたと回答している。図4.14に示す避難意識と累積避難者の時間推移から読み取れるように、避難が必要かもしれない以上と思っていた回答者は、6:00時点で起きていた人の60%程度、7:00時点で65%程度であった。一方、実際に避難した人は6:00の時点で23%、7:00の時点で30%であった。

これらのことから自分自身へ災害が迫っていると感じる脅威評価に応じて、避難意思の形成や避難が行われている。しかしながら、33%の程度の人が最後まで避難しようと思わなかったと回答、また、避難した人は40%程度であり、自分自身に災害が迫っているとの認識があっても避難意思の促進や避難の実行に結びついていない人も多く存在している。

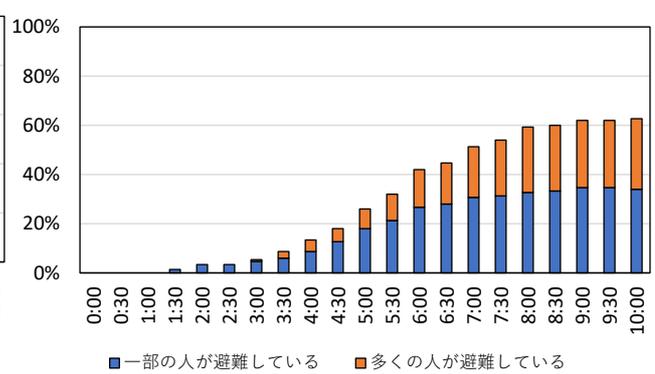


図4.11 周囲の避難状況に対する意識の時間推移

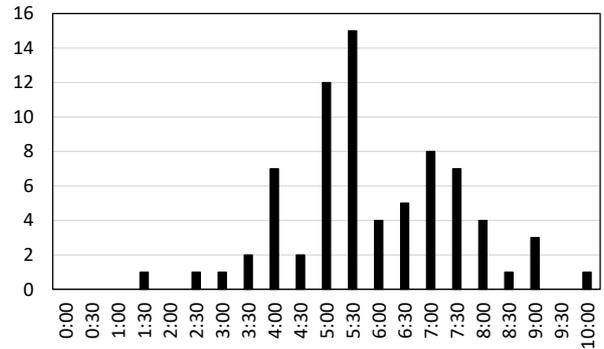


図4.12 避難の呼びかけのあった時間帯

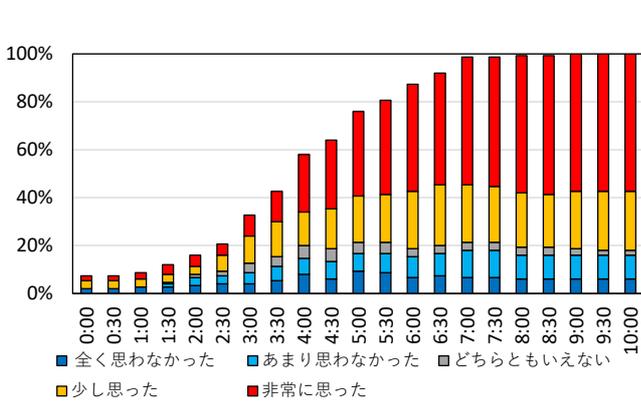


図4.13 脅威評価の時間推移

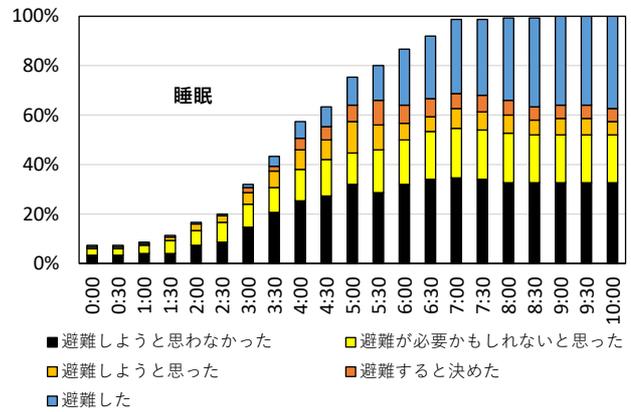


図4.14 避難意識と累積避難者の時間推移

4.4 豪雨時の避難と状況認識の失敗

4.4.1 脅威評価と状況認識の失敗

回答者の能動的小および受動的避難と豪雨時の脅威評価・避難意思の分布状況を図4.15に示す。3.2.2のアンケート調査結果の概要で触れたように自宅での垂直避難を含め避難をしたと回答した人は約51%であり、その避難者の約40%が能動的避難者であり、残りの約60%は呼びかけや周囲に災害が迫って否応なく避難した受動的避難者であった。災害が迫っている中、多くの人が避難していないか、受け身の避難であったかことが分かる。脅威評価は、90%以上の人が災害が迫っていると「とても思った」もしくは「すこし思った」と回答しており、災害発生を危惧していたことが分かる。一方で、10%弱の人は災害発生をあまり意識しておらず、しかも被害を受けている方もおり、SAレベル1もしくはレベル2の失敗をしているものと考えられる。避難行動をとろうと「とても思った」もしくは「少し思った」と回答しているのは約80%程度であり、避難意識は高かった。

次に脅威評価の大きさと避難状況の関係を図4.16に示す。災害発生の脅威評価の程度が「少し思った」から「とても思った」と高くなると避難率も高くなっている。しかしながら、災害が迫っていると「とても思った」と回答した人の中でも能動的避難者の割合は26%であり、脅威評価の程度が能動的避難の促進にはそれほど大きな影響は与えないようである。災害が迫っていると「とても思った」人でも40%弱の人が避難しておらず、ほとんどの地区で何らかの被害が発生したことを考え合わせると脅威評価した事象について今後生じる事態や変化の予測に失敗しており、これらの人はSAレベル2もしくはレベル3の失敗をしていると考えられる。

どのような要因が脅威評価に影響を与えていたかを分析するために脅威評価モデルを推定する。ここ

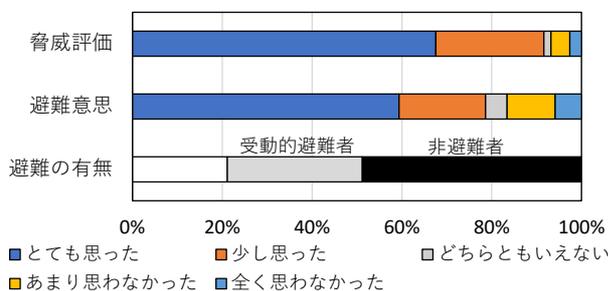


図4.15 避難状況と脅威評価・避難意図

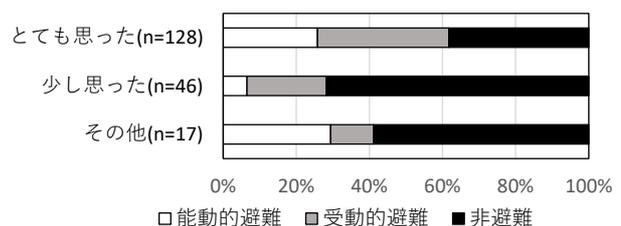


図4.16 脅威評価と避難状況の関係

第6編

で、脅威評価モデルは、災害が迫っていると「とても思った」、「少し思った」、「その他」の3段階をオーダード・プロビットモデルで表す。脅威評価は、災害発生の可能性を推測させる気象情報や避難情報、性別、年齢や災害経験等の個人特性、および住居種別や災害時要援護者の有無等の世帯特性により形成されるものとする。そこで、大雨情報、大雨特別警報等の気象情報の取得割合とそれらの理解度、避難勧告、避難指示等の避難情報の取得割合とそれらの理解度、性別ダミー、高齢者ダミー、災害時要援護者ダミー、建物ダミー、居住年数、災害経験ダミーを説明変数の候補とした。モデルのパラメータと脅威評価の閾値を同時に推定する際に閾値の1つを固定する必要があるが、本研究では、「すこし思った」の閾値を0とした。したがって、災害が迫っていると思った人は正值、どちらともいえないや思わなかった人は負値をとることになる。脅威評価モデルの推定結果を表4.3に示す。災害経験ダミー、気象情報の理解度、高避難情報の取得割合の3変数が有意水準5%で有意となった。推定結果から、過去に災害を経験している人や気象情報の理解度の高い人の脅威評価が高くなる傾向にある。一方、避難情報の取得割合のパラメータは負であり、避難情報の取得の多さが避難に繋がっていないことが分かる。明け方洪水が発生しており、結果として最後まで避難しなかった人が各種の避難情報を得ておりこのような推定結果になったものと考えられる。

SAの観点からは気象情報の取得割合が低い、すなわちSAレベル1の失敗や各種気象情報を取得していてもその意味が理解できなければ(SAレベル2の失敗)、適切な脅威評価が形成されないことが分かる。また、「すこし思った」と「とても思った」の閾値に1.044の差あり、過去に災害の経験がなければ、気象情報の理解度がかなり高くないと脅威評価が高まらないことも分かる。

SAの観点からは気象情報の取得割合が低い、すなわちSAレベル1の失敗や各種気象情報を取得していてもその意味が理解できなければ(SAレベル2の失敗)、適切な脅威評価が形成されないことが分かる。また、「すこし思った」と「とても思った」の閾値に1.044の差あり、過去に災害の経験がなければ、気象情報の理解度がかなり高くないと脅威評価が高まらないことも分かる。

4.4.2 避難意思と状況認識の失敗

避難意思の大きさと避難状況の関係を図4.16に示す。脅威評価の場合より避難意図程度と避難意思および避難実行の関係が明確に出ている。避難行動をとろうと「とても思った」と回答した人の72%が実際に避難しており、避難意思の高さが避難行動に結びついていることが分かる。しかしながら、この場合も避難者に占める能動的避難者の割合は28%であり、避難意思が高くても避難を促す外的圧力がないと避難に繋がっていないことが分かる。また、避難行動をとろうと「すこし思った」もしくは「とても思った」と回答した人でも40%は避難しておらず、避難意思が高まったからといって必ず避難するとは限らないことを示している。これは、「自然災害に対するリスク認知が高くても、そのリスクへの防護行動を取らない」といった自然災害リスク認知のパラドックスに合致するものである。また、避難意思が高くても避難しなかった人や受動的避難者は、地域で被害が発生したことを考えるとSAレベル3の失敗をしているとみなせる。

次に脅威評価と避難意思の関係を図4.18に示す。脅威評価の程度に応じて避難行動をとろうと「すこし思った」もしくは「とても思った」との回答割合が高くなっている。避難意思に脅威評価が影響していることが分かる一方で、その影響も限られていることも分かる。PMTの枠組みでは、避難意思の形成を阻害する要因として、図4.7に示した避難することに伴う対処費用や非防護反応などがある。対処費

表4.3 脅威評価モデルの推定結果

変数	推定値	t 値
災害経験ダミー	0.641	2.700**
気象情報の理解度	0.744	1.777*
避難情報の取得割合	-2.230	2.100**
定数項	2,659	2.620**
少し思ったの閾値	0	—
とても思ったの閾値	1.044	6.425**
尤度比	0.468	

*: 有意水準5%, **: 有意水準1%

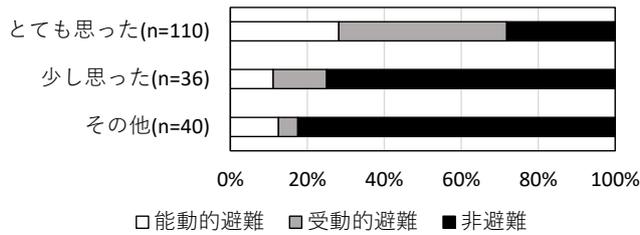


図4.17 避難意思と避難状況の関係

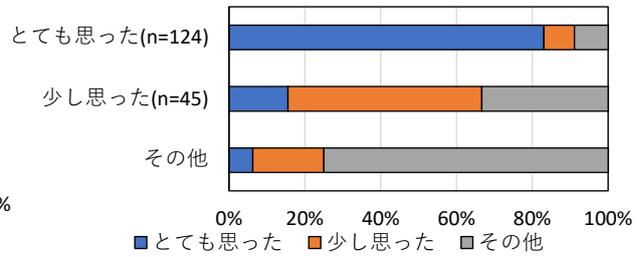


図4.18 脅威評価と避難意図の関係

用については、自宅外への移動は危険、避難は面倒、避難先は不自由の質問に、「少し思った」もしくは「とても思った」と回答した割合は、それぞれ62%、25%、66%であり、「自宅外への移動は危険」や「避難先は不自由である」と思っている人の割合が高かった。一方、災害等は発生しない、被害を受けない、自宅は安全だと思った、被害がなければいいな、被害は運命、公共事業は被害を防ぐことができるの質問に、「すこし思った」もしくは「とても思った」と回答した割合は、それぞれ62%、52%、62%、69%、44%、36%であり、多くの人々が非防護反応を示している。脅威評価が高くても非防護反応や対処費用が高ければ、避難意思は形成されにくいだろう。これらがSAレベル3の失敗を誘引している可能性がある。

そこで、非防護反応の項目や対処費用の項目が避難意思にどのような影響を与えていたかを分析するために避難意思モデルを推定する。ここで、避難意思モデルは、避難行動をとろうと「とても思った」、「少し思った」、「その他」の3段階のオーダード・プロビットモデルで表す。避難意思は、PMTの枠組みにしたがって形成されるとし、脅威評価、非防護反応の項目、対処費用および自己効力感の項目を説明変数の候補とする。避難路や避難所の確認、備蓄といった事前の災害への備えは、避難対処の負担感を緩和し、避難意図形成を促すであろう。また、多くの人々が呼びかけをきっかけに避難しており、呼びかけも避難意図の形成に影響していると考えられる。そのため、災害への備えの程度と呼びかけも説明変数の候補に加える。モデルを推定する際に閾値の1つを固定する必要がある、「すこし思った」の閾値を0とした。避難行動をとろうと思う人は正值、どちらともいえないや思わない人は負値になる。説明変数が有意水準10%以上で有意となった避難意思モデルの推定結果を表4.4に示す。脅威評価、対処費用の項目からは「自宅外への移動は危険」、自己効力感の項目から「2階への避難で身を守れる」が有意水準10%で有意となった。また、避難の呼びかけも有意となったが、非防護反応の項目で統計的に有意な項目はなかった。

パラメータの推定結果から脅威評価が高い人に呼びかけがあれば、避難意思が高くなることが分かる。アンケート調査では、2階への避難も垂直避難として回答してもらっているため、「自宅外への移動は危険」と感じていた方も避難を促す要因となっている。一方で、「2階への避難で身を守れる」のパラメータの符号が負であることから、そう思っている人の避難意思は高くないことが分かる。この結果から脅威評価を高めることだけでは避難意思を高めることが難しく、避難ではSAレベル3の失敗が起きやすいことが指摘できる。

4.4.3 避難行動の促進・阻害要因

本項では、前項までの分析を踏まえて脅威評価や避難意思、それらのモデル推定に用いた変数、および個人属性を説明変数として、避難するかしないかを決定する避難行動モデルをロジスティック回帰により推定する。避難行動モデルは、説明変数間の相関を考慮し、変数の組み合わせで4つのモデルを推定する。Model 1, 2には避難意図を含む、Model 3には脅威評価を含む、Model 4には双方含まないとする。

表4.4 避難意思モデルの推定結果

変数	推定値	t 値
脅威評価	0.783	5.635**
呼びかけ	0.770	2.799**
自宅外への移動は危険	0.136	1.744*
2階への避難で身を守る	-0.128	1.534
定数項	-2.744	3.967**
すこし思ったの閾値	0	—
とても思ったの閾値	0.974	6.023**
尤度比	0.532	

*: 有意水準5%, **: 有意水準1%

表4.5 避難行動モデルの推定結果

	Model1	Model2	Model3	Model4
避難意思	0.495**	0.737**	—	—
脅威評価	—	—	0.479*	—
被害の有無	2.428**	—	—	2.664**
災害経験	—	0.681**	0.999**	0.735
HMの確認の有無	-0.746	-0.0554	-0.615	-0.800*
定数項	-2.591**	-3.047**	-2.150*	-0.847*
AIC	185.15	224.26	241.24	190.36
寄与率	0.309	0.156	0.090	0.289

*: 有意水準5%, **: 有意水準1%

有意水準10%でパラメータが有意となったすべての推定結果を表4.5に示す。

Model 1では、避難促進要因の避難意思、被害の有無、HMの確認の有無が有意となった。被害の有無のパラメータが大きく、被災した人が避難していることが反映された推定結果となっている。一方、HMの確認の有無のパラメータの符号は負であり、HMを確認しながらも避難しなかった人がある程度存在し、HMの確認が避難の促進に繋がっていないことを示唆する。Model 2では、被災の有無に替えて過去の災害経験を説明変数としてモデル推定を行った。その結果、避難意思のパラメータはModel 1より大きくなっており、避難の意思決定への重みが相対的に高くなっている。Model 3では、避難意思に替えて脅威評価を説明変数としてモデル推定を行った。災害経験の重みが少し大きくなった。Model 4では、避難意図や脅威評価を介さないモデルを推定したところ、被害の有無、災害経験、およびHMの確認の有無が有意となった。

4つのモデルの中でAICが最も小さかったのはModel 1であった。これは、前節に示したように避難意図には脅威評価、非防護反応、対処費用の項目の情報も集約されており、また、図4.17に見られるようにその程度が避難の実行に大きく影響しているからであり、PMTのフレームが避難行動に適合性が高いと言えよう。

避難意図の形成の素は脅威評価であり、適切な脅威評価がなされるためには、気象情報の取得とその理解が必要であり、SAレベル1やレベル2の失敗を避けることが重要である。また、避難のきっかけに河川の目視があったように周辺状況の認識も重要であろう。脅威評価に加え呼びかけも避難意思を形成するのに大きな要素であり、呼びかけが加わらなければ避難意思は高まらず、避難確率も高まらない。したがって、呼びかけが避難のトリガーになっていることから分かる。一方、避難を阻害する要因はモデル分析からは明確に出来ななかったが、アンケート調査結果から避難に伴う煩わしさや災害への楽観性に依拠した非防護反応が考えられる。また、自宅外への移動は危険や2階へ避難することで身を守ることができる回答している人も多く、自宅の安心感に繋がっているようであり、これらも早めの避難を阻害する要因となっていたようである。

参考文献

- 1) 内閣府：平成30年7月豪雨における避難に関する市町村へのアンケート調査、
http://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_dosyaworking/pdf/dai2kai/sankosiry04.pdf
- 2) 環境防災総合政策研究機構：平成30年7月西日本豪雨災害アンケート調査結果速報（概要）、
https://mba.pu-hiroshima.ac.jp/pdf/h30/180801a_bousaipress.pdf

第6編

- 3) 県立広島大学大学院経営管理研究科防災マーケティング研究チーム：平成30年7月豪雨の避難意識と行動に関する調査, https://mba.pu-hiroshima.ac.jp/pdf/h30/180801a_bousaipress.pdf
- 4) Wachinger, G., Renn, O., Begg, C. and Kuhlicke, C. : The risk perception paradox—implications for governance and communication of natural hazards, *Risk Analysis*, Vol. 33, No. 6, pp. 1049-1065, 2013.
- 5) Rogers, R. W. : Cognitive and physiological processes in fear appeals and attitude change: A revised theory of protection motivation, *Social Psychophysiology* (B. L. Cacioppo & L. L. Petty Eds.), London, UK: Guilford, pp. 153–176, 1983.
- 6) Grothmann, T. and Reusswig, F.(2006) : People at risk of flooding: Why some residents take precautionary action while others do not, *Natural Hazards* 38, 101-120.
- 7) Evans, J. St. B. T., & Over, D. E.(1996) : Rationality and reasoning . Hove, UK: Psychology Press.
- 8) Zsombok, C. E. and Klein, C. : *Naturalistic Decision Making*, Lawrence Erlbaum Associate, 1996.
- 9) Endsley, M. R. and Garland, D. J. : *Situation Awareness Analysis and Measurement*, CRC Press, 2000.

第5章 公共施設の被災・避難所課題分析

熊本大学 竹内裕希子・福永万里子・大瀬良俊二

5.1 はじめに

本研究では、令和2年7月豪雨被災地域の各自治体および学校と、被災した介護老人福祉施設の入所者を受け入れた熊本市老人福祉協議会にヒアリング調査を実施し、各団体における発災時および発災後の状況および課題を分析し今後の対応改善を目的とした。また、災害後孤立した芦北町大岩地区の住民にアンケート調査を実施し、災害時の避難行動を明らかにした。

5.2 自治体ヒアリング調査

5.2.1 被災2自治体へのヒアリング調査

特に被害が甚大であった球磨川流域およびその支流沿いに位置している2自治体に対し、令和2年7月から8月にかけてヒアリング調査を実施した(表5.1)。ヒアリング内容は主に発災時の対応と避難所運営の状況、地域防災計画等の活用についてである。また、今回の災害で被害が著しかった4自治体の被害概要を表5.2に示す。

表5.1 ヒアリング調査概要

自治体名	人吉市	芦北町
実施日	令和2年7月20日	令和2年8月28日
ヒアリング場所	人吉市役所防災安全課・ 人吉市スポーツパレス(避難所)	芦北町役場・ 地域資源活用総合交流促進施設(避難所)

表5.2 被災4自治体の被害概要

自治体名	人吉市	芦北町	球磨村	八代市
人的被害 ¹⁾ (名)	死者20	死者11 行方不明者1	死者25	死者4 行方不明者1
住家被害 ¹⁾ (棟)	全壊900 半壊1,443	全壊72 半壊910	全壊332 半壊74	全壊147 半壊160
孤立集落 ²⁾	4集落	21集落	78集落	25集落
指定避難所 最大開設数	8 ³⁾ (7月9日時点)	9 (7月6日時点)	8 ⁴⁾ (7月9日時点)	21 ⁵⁾ (7月8日時点)

5.2.2 人吉市へのヒアリング調査結果

a) 被害の概要

人吉市中心部を流れる球磨川の堤防が決壊、氾濫し、中心市街地や市役所を含む広範囲で浸水被害が発生した。ヒアリング調査を実施した7月20日時点では避難所避難と在宅避難がほとんどであり、車中泊避難は少ないと考えている。

第6編

b) 発災前の避難所運営準備

5月に熊本県が新型コロナウイルスについて議論した内容を受け、人吉市では6月までに体温計やパーテーションなどを発注した。しかし、品薄により災害発生までに納品が間に合わなかった。発災後、国などからプッシュ型ですぐにパーテーション以外の物資が届いた。

c) 避難所の開設状況

人吉市全体の避難者は7月時点で1,100から1,200名程度であり、避難者が最も多い人吉スポーツパレスには400名程度の避難者が生活している。20箇所ある指定避難所のうち現在6箇所を開設しているが、今後再び豪雨となり一時避難者が増えた場合はさらに開設する予定である。

d) 避難所の運営状況

避難所運営は行政主体で行っており、避難所責任者の職員は「避難所の運営は本部主体で進めるため、住民はかかわり不要」と考えている。職員は「17:15→(翌日)1:00」、「1:00→8:30」、「8:30→17:15」の3交代で避難所運営をしている。

避難者運営の課題として、職員が通常業務を行うはずの時間に避難所運営にあたっているため、通常業務が圧迫されている。さらに、深夜交代があっても翌日は通常勤務をせざるを得えず、職員に負担が集中している。熊本県や熊本市の職員が支援に来ているが、災害廃棄物対策や罹災証明書発行にも人員が必要となり、交代職員が見つからない状況である。また、避難者が職員に過度に依存している状態が見受けられる。例えば、職員に即席麺の蓋を開けるよう依頼する事例があった。

e) 避難所初動運営キットの活用

避難所初動運営キットは受付内に設置されていたが利用された形跡は無かった（写真 2.1）。

f) 避難所の新型コロナウイルス対策

パーテーションで仕切ることによって飛沫飛散防止はできており、三密は避けられている状況だが、中が見えづらく避難者の健康状態を把握することが難しくなっている（写真 2.2）。



写真 5.1 避難所初動運営キット



写真 5.2 パーテーションで区切られた避難所

g) 他行政機関からの支援

経済産業省、総務省、国土交通省、自衛隊の動きが早く、物資はプッシュ型で次々と届いた。クーラーの設置など環境整備についても対応が早かった。

一方で、職員の中で災害対応に詳しい人がいなかったため人的支援が特に重要であった。7月4日に「避難所運営」、「物資」、「罹災証明」、「災害廃棄物」、「保健師派遣」の5項目について球磨地域振興局を通じて人材要請し、8日にはさらに「家屋被害認定」、「給水補給」を追加した7項目を要請した。災

第6編

害廃棄物は広島市，保健師派遣は国，それ以外は熊本市が担当となった。ただし，人材要請をする際，被災市町村応援職員確保システム（総務省）の県担当窓口が危機管理防災課から市町村課に突然変更となったため，一時的に対応に課題が生じた。

h) ボランティア

7月7日からボランティア依頼の受付を開始し，9日には依頼書を各避難所に設置した。依頼書は社会福祉協議会が回収するシステムになっている。

i) 災害廃棄物

廃棄物への対応が想定よりも大変であった。受け入れの準備が整う前に住民に押し切られ，受け入れ後の廃棄物の処理まで設計されないまま受け入れを初めてしまったことにより，課題が生じた。そのため，後に半日間仮置場を閉鎖して再度受け入れ態勢を整えた。

j) 計画およびシステムの活用の課題

受援計画とBCPは重要であると実感したが，災害対応工程管理システム（BOSS）も含め，確認する時間がなく，活用できなかった。

5.2.3 芦北町へのヒアリング調査結果

a) 被害の概要

町の中心部を流れる佐敷川が氾濫し，広範囲で浸水被害が発生した。山間部では土砂災害が発生し，道路が土砂で不通になったことにより孤立集落が21集落発生した。

b) 発災時の状況

7月3日は厳戒態勢を敷いていたが，豪雨と大潮の時期と重なったため想像以上の大災害となった。7月3日から開設した避難所には，役場の若手職員を中心に70名ほどで編成した消防団が張り付いて対応していた。7月4日3:31に「災害発生情報」を防災無線で発出し，以後計7回発出した。防災無線を住民に全戸無料配布しているが，起伏の激しい地形のため無線が入りづらく，情報が届かない地区もある。

c) 発災前の避難所運営準備

5月に避難所開設・運営マニュアルの新型コロナウイルス感染症編を作成し，非接触型の体温計などを事前に用意できていたため役立った。他にも，平成熊本地震以降から4年かけて徐々に備蓄していた食料や段ボールベット，間仕切りなどにより物資には困らなかった（写真5.3）。



写真5.3 避難所の物資配布スペース



写真5.4 体温計と消毒液が設置された受付

d) 避難所の運営状況

第6編

ヒアリングを実施した8月28日時点では日中は町村職員と芦北町役場職員1～2名、夜間は県職員と役場職員の1～2名で指定避難所を運営していた（写真5.4）。また、住民主体で運営した避難所があったが、町の避難所に指定してほしいとの要望があったため指定し、町職員を配置した。

避難所運営の際に発生した問題は、立入禁止にしているにもかかわらずマスコミが侵入してきたことである。

e) 避難所初動運営キットの活用

避難所初動運営キットは避難所に設置されており、発災以前から消毒液や体温計の追加が行われていた。発災時は避難所初動運営キットと職員が1名避難所に行くことで避難所対応が迅速に行うことができ、人員は配分に貢献していた。

f) 孤立集落への対応

発災後、21集落が孤立した。車両が通れないため、自衛隊と協力し、徒歩で物資を運ぶなどの支援を行った。中心部から遠い山間の集落は道路復旧の目途が立たなかったため、ヘリコプターで70名程が避難した。一方、孤立していても生活に困っていないなどの理由で避難せず留まる選択をした集落もあった。

g) 他行政機関からの支援

7月4日に熊本市、益城町、玉名市などから給水支援が入り、その後も応援職員が来た。宮崎県は7月9日から現在まで支援に来ている。これらの行政からの支援に加え、自衛隊、医療チーム（DMATなど）からの支援も大変助かった。また、高速道路が使用できたことで人吉球磨地方以外からの支援が入りやすかった。しかし、新型コロナウイルス感染拡大防止のため、県外の支援団体は基本的に信頼できると判断した団体のみ受け入れた。

h) 災害廃棄物

受け入れ当初はルール作りが上手くいかず、体制を一度再構築した。2週間ほどでスムーズに回り始めた。被災者に道沿いまで廃棄物を運んでもらい、そこで行政が回収する形をとった。

i) 計画およびシステムの活用の課題

地域防災計画やBCPなど確認すべきものが多く、どれに従ったらよいかわからない状態であった。また、受援計画は完成していなかった。BOSSシステム（災害対応工程管理システム）は完成していたが、まだ全体に浸透しておらず、使えなかった。マニュアルに記載のない事項（主に各課間の調整や情報共有）が難しく、計画段階で役割を細かく割り振っておくべきだったと反省している。その他に、役場職員の防災教育が必要だと感じた。

5.3 学校ヒアリング調査

5.3.1 被災した学校へのヒアリング調査

豪雨により校舎が被災した4校を対象に令和2年12月8日および9日にヒアリング調査を実施した。4校の児童数、職員数、被災児童・職員数、学校建物被害状況、安否確認方法、学校再開日、カウンセラーの訪問頻度、学校運営協議会の開催頻度、防災訓練の実施内容を表5.3に示す。

表5.3 ヒアリング対象学校の被災概要

	①球磨村立渡小学校	②芦北町立佐敷小学校	③芦北高校	④芦北支援学校
児童数 ※（ ）は災害後	78名（75名）	266名（264名）	213名（211名）	本校：49名（50名） 分教室：27名
職員数 ※（ ）は災害後	20名	31名（30名）	45名（46名）	本校：26名 分教室：10名

第6編

被災児童・職員数	児:56名 教:2名	児:4割弱 教:2名	児:29名 教:3名	児:8名 教:3名
学校建物被害	校舎1階が水没	校舎1階が浸水	校舎1階が浸水	本校:1階一部が浸水 分教室:1階が浸水
安否確認方法	・安心メール ・家庭訪問	・安心メール ・家庭訪問	・安心メール ・担任が直接連絡	・担任が直接連絡 ・安心メール
学校再開日	令和2年8月3日 ※一勝地小学校の空き教室と仮設校舎	令和2年7月22日 ※田浦小・中学校 令和2年10月12日 ※本校舎2階・仮設校舎	7月20日	7月20日
カウンセラー	毎週	毎週	毎週	—
学校運営協議会	例年5回程度開催	適宜開催	適宜開催	—
防災訓練	水防訓練, 防災教育	地震・津波, 火災, 水害, 不審者訓練	地震・津波, 火災訓練	地震・津波訓練

5.3.2 球磨村立渡小学校へのヒアリング調査結果

a) 児童と職員の被災状況

職員2人と児童56人（全体の約7割）が自宅の浸水被害に遭い、自宅に被害がなかった児童の中にも孤立集落に住んでおり、避難を余儀なくされた児童もいた。

図5.1は学校が児童の居場所を保護者にアンケートした結果である。発災から10日後の7月14日の時点では「その他（親戚、知人、借家、車中泊）」と回答した保護者が多かったが、8月19日には「その他」と回答した人は0人となり、「自宅」が23人と最も多かった。これは自宅のリフォームが完了したためだと考えられる。発災およそ3ヶ月後の調査では「仮設住宅」が最も多く42人となっている一方で「避難所」は0人となった。これは球磨村多目的広場仮設団地、さくらドーム仮設団地、グラウンド仮設団地が8月から10月にかけて入居可能となり、それに伴い10月31日に村内外3避難所が閉鎖されたためである。

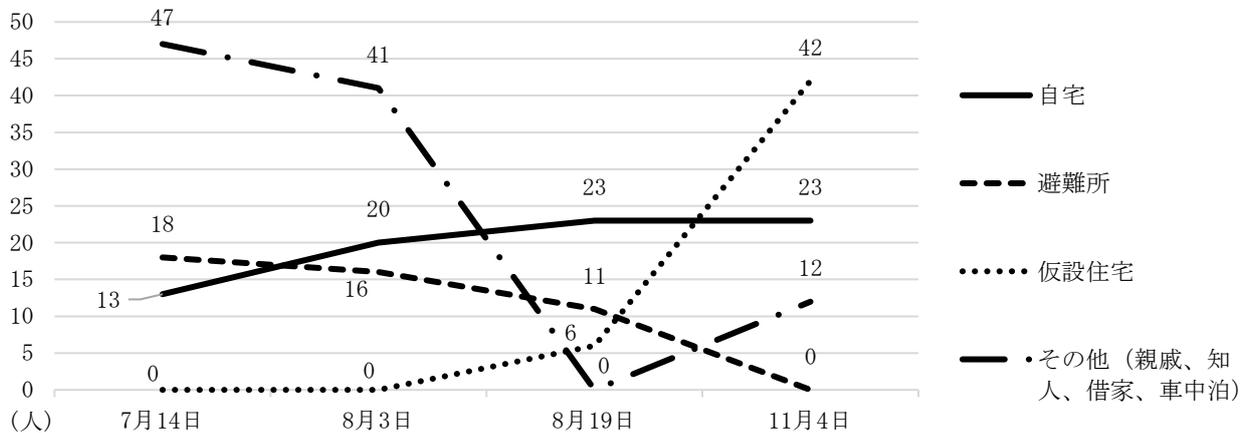


図5.1 児童の居住地の変化

b) 発災時の状況

校長および教頭は村外に居住していたため、豪雨の中、直接球磨村へ赴くことができなかったが、教頭は災害前から学校周辺の地域住民と交流があり、電話やLINEで浸水の状況を随時把握することができた。さらに、渡小学校の隣に位置する特別養護老人ホーム「千寿園」の上空からの様子が頻りに報道されていたため、校舎の様子も同時に把握することができた。

c) 安否確認

職員間ではLINEグループを作成し、7月4日から5日にかけて全員が登録し、随時情報を共有でき

第6編

るようにした一方で、児童との連絡は安心メールのアンケート機能を主に活用した。安心メールは受信者の開封の有無を発信者が確認できるシステムになっているため、開封していない家庭の児童には直接担当が電話で連絡した。全員の無事が確認できたのは発災3日後の7月7日であった。情報を一本化し、教頭がすべて把握できるようにしていた。

安心メールは入学後すぐに登録を促しているため、すべての保護者が登録しており、平常時から行事に関する情報の通知を行っていたため、災害時も障害なく活用することができた。アンケート機能は今回の災害で初めて活用し、被災程度や必要な物資を把握する際は大いに役立った。ただし、受信者からの返信メッセージ機能がついていなかったのが唯一使いにくい点であった。

d) 校舎の被害状況

1階部分が水没したため、発災2日後に校長らが訪れた時は運動場から校舎内部まで泥で歩きにくい状態であった(写真5.5)。さらに、鍵に泥が詰まっており、鍵を開けるのが困難な状態であった。指導要領や卒業証書などはすべて水に濡れていたため、職員がリレー形式で浸水していない2階に運び、できるだけ乾かした。その後、ボランティアにピンセットなどでめくりながら洗ってもらった。

e) 学校再開

7月20日に災害後初めて臨時会議を開き、人吉市にある熊本県の旧保健所で職員全員が集まった。10日間程度間借りし、その後、一勝地小学校に移動した。7月20日には保護者会も開催し、その場で8月3日から一勝地小学校で学校再開する旨を知らせた(写真5.6)。学校再開に向け、7月20日から27日にかけて一勝地小学校でイベントや学習会を開催した。多い時で20人程度が参加した。再開するまでは担当が学習課題などを直接避難所に届けていた。

一勝地小学校を間借りするにあたり、事前に職員の顔合わせを行った。2校は災害前から修学旅行などを合同で行っており、ある程度の交流はあった。現在、球磨中学校の運動場しか使用できないため、職員は兼務辞令を受けて2校一緒に体育の授業を行っている。仮設校舎の解消の見通しは立っておらず、当分は現在の状況が続くと考えられる。

学校再開当初は旧多良木高校の避難所から通っている児童が多かったため、授業開始の時間を遅らせていたが、現在は村内の仮設住宅に入居した児童が増えたことから通常授業ができています。



写真 5.5 被災した校舎



写真 5.6 一勝地小学校に設置した仮設校舎

f) 児童の心のケア

学校再開前に行った職員研修で、「児童から被災した時の話を無理矢理聞き出さないこと」を共通認識とすることを共有した。しかし、児童が自分から話してきた際はきちんと耳を傾けるようにしている。職員研修は2~3時間程度で養護教諭が指導した。今年は水泳の授業はしていない。また、担当は児童

第6編

の被害状況を把握しているため、適切な声かけができていると認識している。12月に実施した心のケアのアンケート調査では100%に近い児童が「学校が楽しい」と回答していたため、明るい授業や楽しい交流をすることが大切だと考えている。

g) 外部からの支援

学用品などの支援がありがたかった。児童に渡し、余った分は授業参観の時に保護者に持って行ってもらった。国と県からプリンターや電子黒板など、村から体操服や文具一式、業者から教科書や習字道具、ワークシートなどの支援を受けた。課題として、学習支援員が物資の仕分けなどに没頭してしまい、本来の業務である児童のサポートが難しくなっていたことが挙げられる。その他に、組み立てが必要な家具が届き、組み立てに時間を要してしまったことが多々あった。

人的支援としては、熊本県教育委員会の支援チームから養護教諭、スクールカウンセラー、主幹、事務所の総監が渡小学校に来た。人手が増え助かったが、スクールカウンセラーは毎回人が変わるため、途中から固定のカウンセラーに依頼した。

h) 防災訓練

毎年5月末から6月にかけて、避難訓練や水防訓練を実施している。また、球磨村が定めている12月第1日曜日の防災の日に合わせて、授業参観で防災学習を行っている。

訓練は防災主任主事が中心となって計画、実施をしている。ただし、今回の発災直後は情報の一本化のため、基本的には管理職がすべて対応した。

i) 地域との連携

今回の災害では地域住民とのつながりによって被害状況を随時知ることができたため、今後もつながりを大切にしていきたい。現在、安心メールの登録は保護者と職員のみであるが、今後は学校運営協議会や登校ボランティアなど地域住民にも登録してもらいたいと考えている。

5.3.3 芦北町立佐敷小学校へのヒアリング調査結果

a) 児童と職員の被災状況

4割弱の児童が自宅の床下または床上浸水の被害を受けた。現時点で仮設住宅から通学している児童が14名、自宅以外のその他の住宅から通学している児童が17名いる。教職員は2名が床上浸水の被害を受けた。

b) 発災時の状況

7月3日の23時すぎから雨の降り方が強くなった。国道3号線や小学校周辺の道路は豪雨により冠水し、翌朝も土砂が堆積していたため、校長は近くまで車で行きそこから徒歩で学校へ向かった。学校に着くとすでに3、4名の職員が駆けつけていた。

c) 安否確認

職員の安否確認はLINEグループを作成し、連絡した。児童の安否確認は主に安心メールを利用した。安心メールはほとんどの保護者が登録しており、していない保護者は個別に把握していたため、災害時でも対応することが出来た。ただし、安心メールの機能は発信側が情報を送ることしかできないため、往復のやり取りができないことが課題であった。また、町内の電波が不安定でメールが届かない世帯もあったため、役場が発表する人的被害などの情報も収集した。さらに、学校の電話は浸水により使用できなかったため、校長と教頭の個人の携帯番号を保護者に知らせた緊急時の連絡先とした。良かった点として、保護者間のつながりが強かったため、保護者同士の情報共有が早かったことが挙げられる。

数日間にわたる豪雨の後、道路通行の安全が確保できた7月8日から家庭訪問を実施した。安否確認

第6編

とともに現在の居住地確認，学習に必要な道具の流失確認をした。しかし，家に居ない場合はどこに行ったかが分からない場合もあった。

d) 校舎の被害状況

2階建てのうち，1階部分はすべて浸水した（写真5.7，写真5.8）。2週間程度は電気がつかず，トイレも使用できなかった。デザインを配慮した建物になっているため，通常は天井上にある配線が床下を通っており，すべて水没してしまった。予想よりも電気系統の被害が深刻であった。体育館は令和2年度中に工事を完了し，他の教室やグラウンド，プール，農園は優先順位をつけながら工事していく予定である。



写真 5.7 浸水被害を受けた職員室

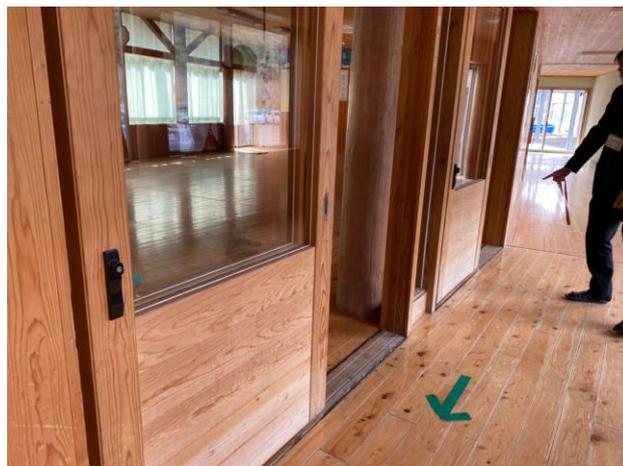


写真 5.8 浸水により変色したドア

e) 学校再開

できるだけ早く学校再開しようと7月5日から職員を集めて1週間程度，土砂の排出作業などの復旧作業を行った。近隣の学校からも職員が応援に来てくれた。しかし，木造校舎であるため，カビが生えてきたり，床板が反ってきたりした。その後，教育委員会から田浦小・中学校を使用するよう通達があったため，7月21日に児童へその旨を説明し，翌日から小学1～4年生が田浦中学校，小学5，6年生は田浦小学校を使用して授業を再開した。佐敷小学校から田浦小学校・中学校までは車で15分程度であり，スクールバス10台を使って移動した。校舎を間借りするにあたって，まず小中学校で休み時間が異なるため，配慮が必要となった。また，佐敷小学校の児童は授業が遅れていたため，体育よりも国語や算数などの授業を優先的に行っていた。一方で田浦小・中学校の児童は水泳や運動会などができていたため，児童に差を感じさせてしまった。

10月9日まで田浦小学校・中学校で授業を行い，翌日引っ越しをし，10月12日から佐敷小学校の本校2階と仮設校舎で授業を再開した。引っ越しにはPTAを中心に300名ほどが手伝いに駆け付けた。再開後，運動会の代わりに11月28日に「佐敷復興スポーツフェスタ」を行った。

f) 児童の心のケア

田浦小・中学校で授業を再開する前にスクールカウンセラーから職員へ児童の心のケアについて研修してもらった。また，田浦小・中学校にいるときは養護教諭を配置してもらった。現在は週1回の頻度でスクールカウンセラーが来ている。来ていることは学校ホームページで情報発信を行っている。相談内容は新規案件よりも継続案件が多い。

g) 外部からの支援

支援の呼びかけにより，ランドセルやノートなどの寄付が届いた。学生服や体操服，教科書，学習教

第6編

材などは業者から支援してもらった。学生服などが無い児童には担任を通して個別に必要な物やサイズなどを聞き取った。職員が使用するパソコンなどは芦北町から支給された。その他に、葦北郡PTA連合会からの物資や人的なサポートやロサンゼルス県人会からの多額の寄付が大変助かった。

一方で、多方面から大量に物資が届き、次第に物資が余っていった。職員も復旧で精一杯の中、物資を整理してお礼までするのが大変だった。また、7月末に田浦小・中学校へ移転し、電話が繋がらない状態だったため、支援物資が佐敷中学校に届いたこともあった。

h) 防災訓練

地震や火災、水害、引き渡し訓練などをこれまで行っていた。詳細には旧国道沿いの山まで登り、津波から逃げる訓練をしていた。しかし、地域との防災訓練はできていなかった。災害前までは、過去の経験から運動場まで浸水することは想定していたが、校舎まで浸水することは想定していなかった。主な訓練計画は防災主任が立てており、防災主任は芦北高校で開催される熊本県の防災コミュニティスクールにも参加している。

災害後、佐敷小学校に戻ってきてから職員で火災訓練を行った。仮設校舎と本校舎それぞれで火災が発生した場合を想定し、火災発生から避難後までの役割を決め実施した。今後、がけ崩れに対応した計画を作成する必要があると考えている。

i) 地域との連携

2年前に学校運営協議会を立ち上げ、実働的に活動していこうとしたときに新型コロナウイルスの感染が拡大し始め、集まるのが難しくなった。終息するまでは学校ホームページなどで情報発信を続けたいと考えている。学校運営協議会のメンバーには佐敷小学校に統合された旧3小学校(旧田川小学校、旧大尼田小学校、旧計石小学校)の地区住民や行政区長が入っており、適宜連携している。

学校に隣接する地区の区長ともつながりがあり、田浦小・中学校へ送迎や仮設校舎建設時の騒音について事前に説明した。災害前から校門前で地域住民と児童があいさつ運動を行っていたこともあってか、周辺住民から騒音などについての苦情などは寄せられなかった。

5.3.4 熊本県立芦北高校へのヒアリング調査結果

a) 生徒と職員の被災状況

罹災証明書を受け取った生徒は29人、祖父母が亡くなった生徒が1人いる。教職員は3人が床上浸水、数名が床下浸水、5人が車の水没被害に遭った。

b) 発災時の状況

校長は学校の近隣に住んでいるため、自宅2階から学校の浸水状況を観察していた。7月4日早朝4時くらいから水が増え始め、川が氾濫すると30分もかからないうちに道が歩けない状況になった。4日の10時くらいに水が引き、11時くらいに校長が学校の様子を見に行った。他の職員は他地区に住んでおり、道路状況が悪く、学校にたどり着くことができない状態だった。その後、近くの中継電波塔が故障したため、しばらく携帯電話が使えなかった。電波がつながる状態になっても、10日間程度は接続が悪かった。

c) 安否確認

安心・安全メールのアンケート機能を利用して安否と被害状況について確認した。電波の状況が悪く、佐敷に住んでいる生徒からは電波が繋がってからようやく返ってきた。そのような場合は担任が電話やLINEなどを使いながら、直接連絡を取って確認した。安心・安全メールは入学時に生徒と保護者が登録しており、今回のアンケートは生徒向けに配信したが、中には登録していない生徒もいた。平常時

第6編

は修学旅行のお知らせや台風接近時の連絡（休校連絡など）に使用している。



写真 5.9 床が盛り上がった教室

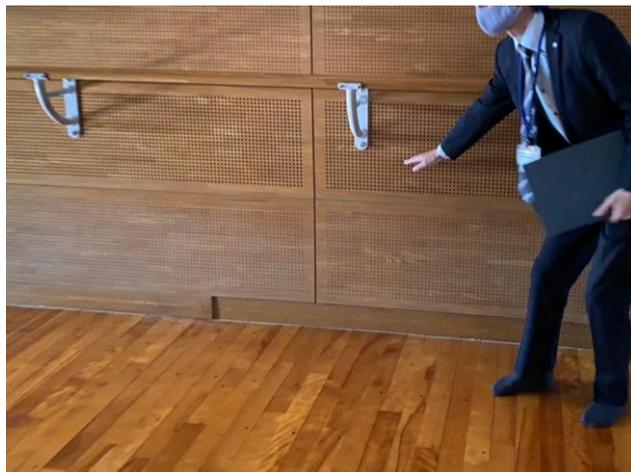


写真 5.10 体育館壁の浸水跡

d) 校舎の被害状況

校舎の1階に1年生の教室や実習室があり、すべて浸水により使用不可となった（写真 5.9）。体育館も浸水によってフローリング下に泥が入っており、健康被害も懸念されるため令和3年1月ごろから工事で修復する予定である（写真 5.10）。

e) 学校再開

7月6日に教職員が学校に集まったが、電気も水道も使えない状況だった。13日に「20日から学校が再開する」と通知が来たが、まだ水道が出ていない状態であり、重要な通学手段であるオレンジ鉄道も通っていない状況だったためどうすれば良いのかわからなかった。幸いにも14日に水道が出るようになり、通学手段も県の教育委員会と相談して代替バスを走らせて確保することができた。再開に向けて環境を整えられるように教職員や生徒、ボランティアで校内の掃除などを行った。新型コロナウイルスの影響でボランティアの人数が少なく、学校関係者の負担が大きくなってしまった。

7月20日に学校が再開したが、エアコンが使えるようになったのは8月4日だった。それまでは暑い中復旧作業をしており、教職員は特に体力的に厳しい状況があったため、土日は必ず休めるようにした。

f) 生徒の心のケア

学校再開した7月20日に緊急派遣で職員研修として教職員向けカウンセリングを行った。また、スクールカウンセラーは災害前1人だったが災害後は週2回2人に頻度を増やした。しかし、相談内容は災害に関することではなく、生活面や特別支援などについてが主である。そのため、被災した生徒には直接声をかけ、次の長期休暇に入る前に1度カウンセリングする予定である。

g) 外部からの支援

制服は業者から支援してもらい、教材関係は国庫補助の対象となったため教務が被災生徒に聞き取りし、総務省に報告して支援してもらった。真夏であったため、食料や水、お茶、衣類に加え扇風機なども届いた。事務職員が中心となってサイズ分けや配布を行った。しかし、古い雑巾やタオル、通学バッグなどが届き困ったことがある。また、仕分けに時間が取られることや色んな用途に使えることから、現金の支援が一番ありがたいと思った。他にも、重機を持ってボランティアに来てくれた方の存在が大変貴重であった。

h) 防災訓練

これまで火災と地震、津波の訓練は行っていたが、水害に対しての訓練は行っていなかった。津波に

第6編

対しては2階、3階程度の想定をしており、山手に避難する訓練をしていた。

今後、教職員の異動に伴い、今回の経験を研修などで毎年繰り返し伝えていかなくてはならないと考えている。現在、今回の水害の写真をまとめており、記録誌などの作成を検討している。

i) 地域との連携

指定避難所のため、3階の教室（総合学習室）を避難所として開放した。町が災害時に開設を指示しなくても地域の方は本校に避難したいという人が多いため、今後自主防災組織や区長の要請によって学校を自主避難所として開放できるようにしたいと考えている。

学校運営協議会は年2回開催しており、文化祭や体育祭などは地域の方が見に来られたり、参加したりする。

5.3.5 熊本県立芦北支援学校へのヒアリング調査結果

a) 芦北支援学校の概要

芦北支援学校は本校と佐敷分教室に分かれており、分教室は本校からおよそ車で5分の位置にあり、芦北高校の1階部分を使用している。分教室は高等部の生徒が通っている。

b) 児童・生徒と職員の被災状況

8人の児童が床上または床下浸水の被害を受けた。その他にも3人の児童の保護者が浸水被害により廃車した。職員は8人が床上や床下浸水、廃車などの被害を受けた。

c) 発災時の状況

校長や事務長は町外に居住しているため、町在住であり防災担当にもなっている学校職員から連絡を受けて対応した。防災担当の職員によると夜中から雨が降り続き、7月4日早朝4時には川の氾濫により車が水に浮かんでいた。その後も水かさが増していき、教頭に連絡した5時45分ごろには1階の屋根部分まで浸水していた。7時に満潮を過ぎると水かさが減り、10時ごろから消防が動き始めた。連絡を受けた校長や事務長、各学部主事はすぐに児童生徒の安否確認を開始した。

d) 安否確認

7月5日の夕方までには全員の安否が確認できたが、1名のみ7月8日ごろまで家庭訪問できない家庭があった。確認手段として、安心メールは利用しているが、登録率は100%ではないため、あくまで第一報の情報発信手段として使い、重ねて担任から直接連絡した。実際に声を聞き、状況を確認することも大切だと考えている。

e) 校舎の被害状況

本校は1階部分が裏山から流れてきた雨によって床上浸水した。泥をかき出したがカビが発生したため業者に洗浄と乾燥を依頼した。児童によってはカビなどが重大な健康被害を引き起こす場合もあるため消毒を徹底した。また、熊本地震の経験から物を高いところに置かないようにしていたことで、下に置いていたあらゆるものが水に濡れてしまった。

分教室は本校よりも床上浸水による被害が大きく、電気や水道、電話が10日間程度使用できなかった。分教室でも本校と同様に泥を出し、洗浄を行った。校舎が芦北高校と一体となっているため、共同で復旧作業を行った。

f) 学校再開

消毒や復旧作業が完了した7月20日から本校と分教室合わせて学校再開した。

g) 児童・生徒の心のケア

新型コロナウイルス感染拡大の影響で4月と5月が休校となり、6月ようやく学校再開できた矢先

第6編

の水害だったことから、特に分教室で精神が不安定になっている生徒が出てきている。これから長期的に見ていく必要があると考えており、職員にも注意するよう促している。

h) 外部からの支援

物やお金の寄付を受け入れるまでに様々な手続が必要で、時間がかかってしまった。また、学校は公的機関であり、水害などで被害を受けたら国の補助や県の予算で充当するべきであると考えている。そのため民間からの支援は受け入れられるものと受け入れられないものがあった。

困ったエピソードとして、タオルが大量に送られてきたため、置く場所がなく断らなければならなかったことがあった。これは他校でタオルが必要だという情報が広まり、どの学校も必要だと考えた支援者が送ったためだと考える。支援はありがたいが、復旧作業の進捗次第に必要な物は刻々と変わっていくため、それを考慮してもらいたい。

i) 防災訓練

本校にはくまもと芦北療育医療センター（以下、センター）が隣接しており、センターの子ども達が本校で教育を受けている状況である。本校で昨年度実施した避難訓練では津波を想定し、センターの外階段を使って垂直避難することを検討した（写真 5.11）。しかし、車椅子は重く運ぶのが困難であり、車椅子なしでは不安定で危険であることがわかった。その後、強靱なビニールを担架替わりに使える「トランスポートチェア」を購入した（写真 5.12）。今後活用できるようさらに検討を進める予定である。分教室は同敷地内にある芦北高校と避難訓練を行っている。

訓練の他に備蓄にも力を入れている。始業式のときに各家庭から3日分の備蓄品を持ってきてもらい、保健室前に備蓄している。長期休暇前に持ち帰り、入れ替えたものを新学期にまた持ってきてもらうようにしている。



写真 5.11 くまもと芦北療育医療センター外階段



写真 5.12 トランスポートチェア

j) 地域との連携

学校評議員会の会議を年間2回程度実施している。学校行事にも招き、子どもたちの様子や先生方との関わり方などを見てもらっている。また、防災会議にも参加しており、学校と区長、センター、近くの事業所の副施設長、近隣の佐敷中学校長と情報交換を図っている。

本校が位置する地域には高齢の方が多いため、災害時には地域に助けてもらうよりも助ける側になることを想定している。地域の方が避難してきたときのことも考えなければならない。

5.4 福祉施設ヒアリング調査

5.4.1 介護老人福祉施設被災者の避難受け入れ先へのヒアリング調査

豪雨により建物が被災した芦北町の特別養護老人ホーム「五松園」の入所者を受け入れた熊本市老人福祉協議会の事務局へ令和2年12月2日にヒアリング調査を実施した。ヒアリング内容は主に受け入れ先決定までの流れや受け入れ時の状況、受け入れにあたっての課題などである。

5.4.2 熊本市老人福祉協議会へのヒアリング調査

a) 老人福祉協議会について

熊本県内の施設に関わる老人福祉協議会として、「全国老人福祉施設協議会」、「熊本県老人福祉施設協議会（以下、県老施協）」、「熊本市老人福祉施設協議会（以下、市老施協）」があり、それぞれの協議会が高齢者福祉施設の質の向上のために各施設へ情報提供や連絡調整などを行っている。

b) 受け入れの経緯

7月3日の夜から降り続いた雨により、人吉・球磨地方の介護老人福祉施設でも浸水被害などが発生した。県老施協は熊本県と情報共有をし、被災施設の利用者の受け入れ等を検討していた。球磨村にあった被災施設は人吉市の病院等が中心に受け入れをすることになったが、芦北町の被災施設（五松園）の受け入れ先がなかったため、市老施協に登録している施設が受け入れることとなった。

受け入れの主な流れは、市老施協の事務局が受け入れ可能な施設に入所者を割り振り、受け入れ施設が入所者を芦北町まで迎えに行くであった。受け入れ期間はおよそ7月中旬から1ヶ月程度だった。受け入れ先の熊本市から五松園までも受け入れ施設が送迎した。受け入れ側と被災施設の対応を表5.1に示す。

c) 受け入れ時に工夫した点

入所者を割り振る際、一日でも早く入居者を五松園から避難させられるように、詳細な要望などはあえて考慮せず、迅速に割り振った。家族から「芦北町から熊本市は遠いため、受け入れ先に行かせたくない」などの要望が寄せられたが、家族への対応は五松園の施設長に一任した。

表5.4 利用者受け入れに伴う受け入れ側と被災施設の対応

	熊本市老人福祉協議会の対応	五松園（被災施設）
7月4日	※熊本県老人福祉協議会が熊本県と情報共有 ⇒施設入所者の救援が滞っている、千寿園や五松園の入所者の受け入れ先が必要との情報を得る 県老施協会長に連絡し、熊本県からの情報を共有	
7月5～6日	市老施協の施設で五松園の入所者を受け入れることが決定	熊本市内への避難について 家族へ事情を説明、説得
7月6～8日	事務局が全74施設にFAXを送り、受け入れ可否を確認	復旧作業をしながら入所者をケア
7月9～10日	70名全員の受け入れ先が決定	
7月10～14日	受け入れ施設が入所者を五松園へ迎えに行く	
7月14日～ 8月17日		復旧作業
8月17～31日	受け入れ施設が入所者を五松園へ送る	再開

第6編

d) 受け入れ時の課題

受け入れが可能な地域密着型特別養護老人ホームがあったが、地域密着型は介護保険制度上、基本的に他市町村の利用者を入所させることができないため受け入れを断念した施設があった。また、芦北町と熊本市で市町村をまたいだ避難となったために行政を通しての手続きが複雑になり、情報共有に滞りが生じた。

今回は受け入れ先が送迎を行ったが、受け入れ側の施設の負担が大きかった。行政側で介護タクシーなどを手配してもらえると負担を大幅に減らすことができたと考えられる。

受け入れ後について、1名だけ入所者を受け入れた施設があったが、2～3名単位で受け入れることによって入所者が孤立せず、不慣れな環境でも不安を和らげることができたと考える。五松園に戻る頃によく慣れ、ご飯の固さの好みなどがわかるようになった例もある。浸水によりカルテが濡れ、五松園の職員も復旧作業に追われている中で細かい情報まで把握することが難しかったことも一因である。

その他にも、分散避難先に支援物資などが届かなかつたため、分散避難先にも被災者に薬や靴などの物資が届く仕組みがあると良かった。

e) 福祉施設の防災体制の課題

各施設で避難確保計画を作成しているが、実効性のある計画を作成し、訓練で身に付けていくことが重要であると考えている。専門家などから客観的なアドバイスが欲しい。また、小規模な福祉施設だと夜間は一人で対応している場合が多く、災害時の対応が遅れてしまう。さらに、災害発生後も人手不足で復旧作業に時間がかかってしまうことが想定される。そのためにも事前に広域的な協定を結ぶ必要がある。広域的な連携に伴い、保険制度なども緊急時の特例を想定しておくべきである。

5.5 孤立集落となった芦北町大岩地区住民の避難行動

5.5.1 芦北町大岩地区

芦北町は熊本県南部に位置しており、大岩地区は芦北町役場がある中心部から約17km離れた北東の方向に位置している。大岩地区の人口は2015年時点で257人、115世帯、高齢化率は56.8%である。令和2年7月豪雨では芦北町で7月4日9時40分までに425.5mmの24時間降水量が観測され、21の集落が土砂災害などにより孤立し、大岩地区もその内の1集落であった。

5.5.2 アンケート調査の概要

孤立した大岩地区の住民の避難行動について明らかにするため、令和2年12月にアンケート調査を実施した。アンケート項目は回答者属性に関する26項目、令和2年7月豪雨に関する29項目、「発災時の避難行動計画」に関する4項目、移動手段などの生活の変化に関する14項目の合計73項目である。アンケート票は大岩地区の5地区に区長を通じて配布・回収を行った。回収率は57.6%であった。

5.5.3 アンケート調査の結果

a) 住民の被災内容

住民の被災内容は大規模半壊2件、半壊2件、一部損壊5件、床上浸水5件、床下浸水4件であった(図5.2)。また、田畑や水田の浸水被害が3件あった。人的被害はなかった。

b) ライフラインの被災状況

9割の回答者がガスの被害がなかったと答え、水道と電気も概ね3日以内に復旧していた。一方で半

第6編

数の人が電話を1週間以上使えない状態であった。(図4.3)

c) 発災時の避難行動

災害後、半数以上の回答者が大岩地区に留まり、20%が大岩地区外に避難していた(図4.4)。大岩地区に留まった理由は「家が無事だったから」や「被害がなかったから」という回答が多く、大岩地区外に避難した理由は「一人では不安だったから」や「ライフラインが途絶えたため」が挙げられた。

d) 災害後の困ったこと

災害後困ったことは、電話がつながらないが90%と最も多く、次に買い物に行けないが84%、医療を受けられないが48%、災害後の片付けができないが19%であった(図4.5)。

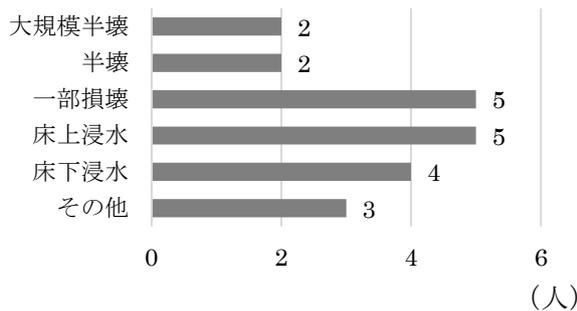


図 5.2 被災内容 (N=21)

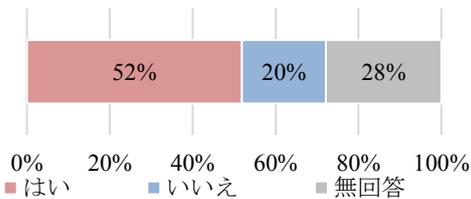


図 5.4 災害後集落に留まったか (N=79)

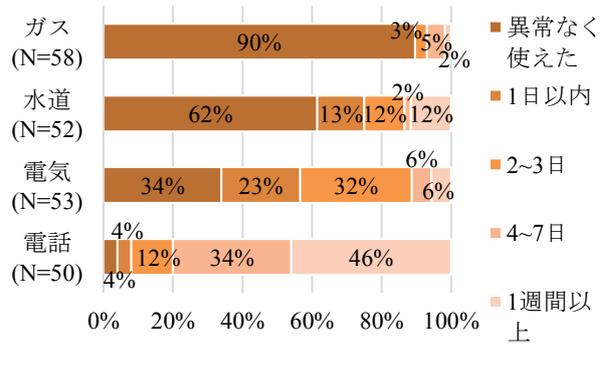


図 5.3 ライフラインの被災状況

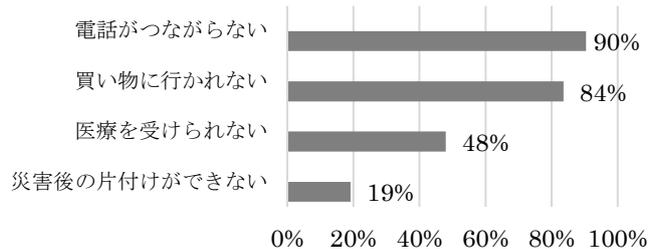


図 5.5 災害後困ったこと (複数回答) (N=74)

e) 孤立時の気持ち

孤立時の心境については「連絡が取れず心配」という回答が最も多く、身内との連絡が取れていない住民や災害情報がなく情報から孤立していた住民がいた。また、「今後どうなるか不安」や「薬が切れ時で心配」の意見もあった(図5.6)。

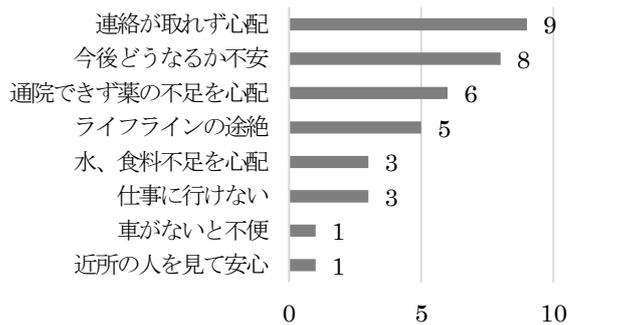


図 5.6 孤立時の気持ち (N=35) (人)

5.5.4 考察

今回のアンケート調査で回答者の約半数が集落に留まったと回答していることから、集落が孤立していてもガス、水道、電気などのライフラインが3日程度以内に復旧すれば留まる住民が多いことがわかった。ただし、電話の復旧に時間を要しており、安否確認や災害情報の取得に課題が発生したことが想定される。また、回答者の半数近くが災害後「医療を受けられず困った」と回答しており、健康に関するリスクが高まっていたことがわかる。

5.6 まとめ

人吉市と芦北町のヒアリング調査から、避難所運営が主に行政主体で行われていることがわかった。特に人吉市では職員に負担が集中していたことが明らかとなった。新型コロナウイルスへの対策について、芦北町は事前に備えができていた一方、人吉市では納品が間に合っていなかった。熊本地震の反省から開発された避難初動運営キットは芦北町では職員の避難所配置計画に活用されていたが、人吉市では使われていなかった。地震災害に比べ、災害廃棄物対応のタイミングが早く、体制を整えるのに時間を要し課題が発生した。熊本県が平成28年熊本地震後に導入を進める受援計画や災害対応工程管理システムは普及が十分でなく活用されていなかった。

学校へのヒアリング調査から、発災当時は児童が登校していない時間帯であり、児童の安否確認と学校の被災状況を把握することが急務であったことが明らかになった。児童の安否は主に安心メールで確認したが、受信者からの送信機能がないため情報が得にくいことが課題として挙げられた。ヒアリング調査した4校では7月下旬から8月上旬にかけて学校が再開されており、他校を間借りしている渡小学校では再開前に児童が慣れるよう間借り先でイベントや学習会を開催していた。また、3校では再開前にスクールカウンセラーから職員へ心のケアについての研修が行われており、その後もスクールカウンセラーが定期的に訪問していた。一方、支援物資については過剰な物資支援により児童へのサポートよりも物資管理に人手を要してしまった例もあった。

介護老人福祉施設入所者の受け入れについては、熊本県老協と熊本市老協の迅速な対応により五松園の入所者を熊本市内の各受け入れ施設へ避難させることができた。ただし、行政区をまたいだ避難であったために、介護保険制度の制限による煩雑な支払い手続きや情報共有の遅れが発生した。また、今回は老協の連携により受け入れ先が見つかったが、五松園のように提携先がない施設が被災した場合は受け入れ先を確保することが難しいため、事前に協定を結んでおく必要性が明らかになった。

芦北町大岩地区の住民調査では、集落孤立時に最も課題だったのは電話の不通による情報孤立と薬の不足が明らかになった。

5.7 今後の課題

自治体の災害対応について、事前の備蓄や避難所初動運営キットの設置など熊本地震からの反省が生かされている点があった一方で、熊本地震後に導入された受援計画や災害対応工程管理システムなどについては十分に活用されていなかった。今後、これらの計画やシステムを改善していく必要がある。

ヒアリング調査を実施した各学校では安否確認時に安心メールを活用していたが、これでは双方向のコミュニケーションが取れないため、安心メールの機能等を改善すべきである。また、支援物資についても物資整理により他業務に支障をきたすため、物資の種類や支援時期、組み立て不要の家具を送るなど考慮できる仕組みづくりが必要である。

災害時における介護老人福祉施設入所者の避難について、異なる市町村への避難を想定した制度が確立されておらず、受け入れ側の負担が重い状況にある。緊急時に対応できる制度の見直しと、他地域の施設が事前に協定を結ぶための制度の確立が求められる。

孤立集落に対しては情報孤立を防ぐために電話以外の防災無線やラジオ等による連絡手段の確保や、薬が必要な住民へ優先的に届けるための事前の情報共有システムの確立などを行うことが必要である。

第6編

謝辞

本研究を進めるにあたり、ヒアリング調査でご協力いただいた人吉市役所、芦北町役場、球磨村立渡小学校、芦北町立佐敷小学校、熊本県立芦北高校、熊本県立芦北支援学校、熊本市老人福祉協議会、芦北町大岩地区の皆様にご感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 「令和2年7月豪雨による被害状況等について（内閣府）」2021.01.07 作成
http://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/index.html（2021.02.17 閲覧）
- 2) 「令和2年7月豪雨に係る集落被災・復旧状況台帳（熊本県）」2020.8.11 作成
<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/206/50850.html>（2021.02.17 閲覧）
- 3) 人吉市公式ツイッター 2020.07.09 作成
<https://twitter.com/hitoyoshishi>（2021.02.17 閲覧）
- 4) 令和3年2月球磨村復興計画（案）
<https://www.kumamura.com/gyousei/wp-content/uploads/2021/02/cdf09d9ba611e209fb9805bac60493b5-1.pdf>（2021.02.17 閲覧）
- 5) 八代市第10回災害対策本部会議 2020.07.08 作成
http://www.city.yatsushiro.lg.jp/kiji00312929/3_12929_50887_up_zu2je00q.pdf（2021.02.17 閲覧）

第6章 まとめ

第1章の防災河川・気象情報と避難情報の関係性の分析からは下記のことが指摘された。令和2年7月豪雨では、指定河川洪水予報の対象地では、一部の地域で氾濫注意情報を経ずに氾濫警戒情報が発表され、また、氾濫注意情報から氾濫危険情報までおおよそ1時間でその推移が周知されたことが明らかとなった。また、「避難準備・高齢者等避難開始」の発令が不十分であったこと、「避難準備・高齢者等避難開始」の発令基準として、防災河川・気象情報は十分活用されていなかったこと、土砂災害に対する「避難勧告」の発令基準の基本とされる土砂災害警戒情報は、自治体によってその活用方法にばらつきがあったことが課題として明らかとなった。このことは、急激な洪水の脅威の高まりに対して、適切な危機管理、災害対応をとるに足る時間的に余裕のある防災河川・気象情報及び避難情報の発表、発令基準及び制度的枠組みの検討の必要性を示唆するものである。

第2章では、令和2年7月豪雨での被災者行動に関して、Web調査と分析を行った。避難した人の特徴として、平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風と同様に、避難指示（緊急）の発表により行動すること、身近な人から寄せられた情報により行動すること、テレビや緊急速報メールだけでなく、プル型媒体（SNS、HP、ラジオ）からも情報を得ていること、防災訓練や講演会等へ参加したり、災害への準備をしたりしていることがあることを明らかにした。また、家族に乳幼児、小学生、妊婦、要介護者がいること、平常時からコミュニティとのつながりが強いこと、防災や要支援者に取り組んでいる自治会に参加していることについては、地域特性があることを示唆した。

第3章の八代市坂本町の避難行動調査で、気象情報や避難情報の適切な状況認識から脅威評価を高め、非防護反応や対処費用を考慮しつつも高い避難意図を形成、それに基づいて避難する能動的避難者は避難者の40%弱に過ぎず、残りの避難者は呼びかけや災害の脅威が切迫したこと等をきっかけとする受動的避難者であったことが明らかになった。また、脅威評価モデル、避難意図モデルおよび避難行動モデルの推定結果から以下のことが分かった。避難意図の形成の素は脅威評価であり、適切な脅威評価がなされるためには、気象情報の取得とその理解が必要であり、状況認識レベル1やレベル2の失敗を避けることが重要である。避難のきっかけに河川の目視があったように周辺状況の認識も重要であろう。脅威評価に加え呼びかけも避難意思を形成するのに大きな要素であり、呼びかけが加わらなければ避難意思は高まらず、避難確率も高まらない。したがって、呼びかけが避難のトリガーになっていたことも分かった。一方、避難を阻害する要因はモデル分析からは明確に出来なかつたが、アンケート調査結果から避難に伴う煩わしさや災害への楽観性に依拠した非防護反応が考えられる。また、自宅外への移動は危険や2階へ避難することで身を守ることができるという回答している人も多く、自宅の安心感に繋がっているようであり、これらも早めの避難を阻害する要因となっていたようである。

第4章においては、人吉市と芦北町への調査から、「避難所運営は行政が行なった」、「芦北町は事前に新型コロナウイルス対策ができていた」、「避難初動運営キットは芦北町の避難所職員配置計画に貢献していた」、「地震災害に比べ災害廃棄物対応のタイミングが早く課題が発生した」、「受援計画や災害対応工程管理システムは活用されていなかった」が明らかになった。また、学校への調査から、「児童の安否確認と学校の被災状況を把握することが急務であった」、「過剰な物資支援により児童へのサポートよりも物資管理に人手を要した」が明らかになった。一方、介護老人福祉施設への調査から、「熊本県老協と熊本市老協の迅速な対応により入所者の受け入れができた」、「行政区をまたいだ避難のため、介護保険制度の制限による煩雑な支払い手続きや情報共有の遅れが発生した」が明らかになった。さら

第6編

に、芦北町大岩地区の住民調査では、「集落孤立時に最も課題だったのは電話の不通による情報孤立と薬の不足」が明らかになった。

第7編

今後に向けた提言

研究代表者 熊本大学 大本 照憲

第1章 今後の課題・今後に向けた提言

本研究では、令和2年7月豪雨によりもたらされた人的被害・物的被害状況及び発生メカニズムの全容を明らかにすることを目的として様々な調査・解析を行なった。ここでは、気象・水文、土砂・流木災害、河川災害、構造物被害、避難・避難所運営の観点から、現地調査、データ解析、数値シミュレーション、室内実験などを通じ調査・解析を多角的に推進した。本研究における調査・研究の結果により得られた今後の課題・今後に向けた提言を以下に纏めた。

気象・水文

- 1) 地球温暖化が着実に進行している状況を考えるとこれまでの考え方で豪雨対策は通用しなくなることが懸念され、温暖化影響を適切に考慮することで、今後の豪雨災害への備えを強化することが大事である。
- 2) 今後、豪雨の予報精度向上に役立てていくためには、どのような構造・環境場を持つメソ α 低気圧が豪雨を引き起こすのかを詳細に理解する必要がある。また、メソ α 低気圧がどの程度の精度で予測できるのかといった予測可能性の研究も必要である。
- 3) 豪雨の発生機構に関する詳細な解析を継続していく必要があり、また解析で得られた結果・知識を集積していく必要があると考えられる。さらには、観測技術の向上、観測網の高密度化・広域化、モデルの精度向上なども必要になると考えられる。

土砂・流木災害

- 4) 地盤災害及び流木災害の発生要因が、地形、地質、地盤条件、降雨条件やこれまで蓄積した災害履歴であるため、異分野が融合して災害発生予測の高度化を目指すべきである。
- 5) インフラの点検時においてはインフラ本体の状態に意識が集中しがちであるが、インフラに作用する外力は土砂であることから土砂の堆積状況についても定量的なデータを残すことを検討すべきと考える。
- 6) 地盤のより危険な状態に関する情報発信ができる仕組みを構築することはたいへん重要な課題と考える。
- 7) 流木災害については発生量データの精度が高くないことや発生したタイミングが不明確であることが多く、検証が困難である。リスク評価を合理的にかつ精度良く行うためにも基礎データの収集体制の確立が求められる。
- 8) 浸透流解析の技術水準を高めることや防災・減災に活かす観点からも、基準土層断面を設定し浸透解析に必要な各層の水分特性などを整備が重要である。

河川災害

- 9) 水工学・防災の分野としては、状況により最速で非常に広範囲の浸水状況を得られる合成開口レーダを巧く活用すべきである。
- 10) 危機管理型水位計の増設、防災・減災上重要なポイントへ設置するとともに、これらを利用した洪水氾濫解析の高度化が必要となる。
- 11) 国内に多く見られる複断面蛇行河道が氾濫流の流下にどのような影響をおよぼすかを検証し、有用

第7編

な治水対策を見いだすことが重要となる。

- 12) 今後さらに増加すると予想される洪水外力に対して、流域の上下流バランスも含めて治水対策を考えていくことが重要である。
- 13) 災害情報が風化する以前に緊急に学術調査に着手し、英知を集結して上記の課題の解明を行い、今後の豪雨時の防災・減災に資する技術や情報の迅速な提示が重要となる。

構造物被害

- 14) 豪雨などの極端気象現象の性質が変容しつつあり、避難が困難な高齢者の割合が多くなるなど社会構造も変容している現状を踏まえ、建築的な観点からも被害低減に資する対処法を平時から議論・検討する必要がある。
- 15) 田んぼダムを導入においては、各水田の流出特性に基づいて適切な排水柵や堰板形状を設定しなければならない。田んぼダムの本質的な機能は水田に降った降雨の流出を抑制することにあるが、山間部から流入を受ける一部の水田には遊水地としての利用可能性があるため、実際に水田の洪水緩和を検討する上では機能の調整が特に重要と考えられる。
- 16) 橋梁には水道、電気、通信などのライフラインが添架されているものがあるが、付属物の添架情報は橋梁管理者では保有していないのが一般であり、危機管理の観点から橋梁付属物・添架物の台帳管理やその方法について検討を要する。また、側道橋や添架物、歩道を上流側に設けるのか下流側に設けるのかといった観点での検討も必要である。
- 17) 単径間上部構造の連続化や支承部における損壊防止、確実な移動制限を実施することによる影響、例えば、上部構造の流失回避に対する有効性や損傷を受けた場合の早期復旧性については別途検討を要する。一方、上部構造が流失した場合であっても、多径間の橋脚が残存している場合には、残存橋脚を利用した仮橋の架設が比較的容易となることが考えられる。

避難・避難所

- 18) 急激な洪水の脅威の高まりに対して、適切な危機管理、災害対応をとるに足る時間的に余裕のある防災河川・気象情報及び避難情報の発表、発令基準及び制度的枠組みの検討が必要である。
- 19) 自治体の災害対応について、事前の備蓄や避難所初動運営キットの設置など熊本地震からの反省が生かされている点があった一方で、熊本地震後に導入された受援計画や災害対応工程管理システムなどについては十分に活用されておらず、今後これらの計画やシステムを改善していく必要がある。
- 20) ヒアリング調査を実施した各学校では安否確認時に安心メールを活用していたが、これでは双方向のコミュニケーションが取れないため、安心メールの機能等を改善すべきである。また、支援物資についても物資整理により他業務に支障をきたすため、物資の種類や支援時期、組み立て不要の家具を送るなど考慮できる仕組みづくりが必要である。
- 21) 災害時における介護老人福祉施設入所者の避難について、異なる市町村への避難を想定した制度が確立されておらず、受け入れ側の負担が重い状況にある。緊急時に対応できる制度の見直しと、他地域の施設が事前に協定を結ぶための制度の確立が求められる。
- 22) 孤立集落に対しては情報孤立を防ぐために電話以外の防災無線やラジオ等による連絡手段の確保や、薬が必要な住民へ優先的に届けるための事前の情報共有システムの確立などを行うことが必要である。

各グループにおいて得られた今後の課題・今後に向けた提言を統合すると、豪雨災害への防災・減災には各種予報精度の向上、及び地球温暖化の影響を考慮した将来の災害予測精度の向上が必要となる。そのためには、各種物理メカニズムの解明、各種データの観測・計測の高精度化・高密度化・詳細化、新たなデータの取得、数値シミュレーションモデルの高精度化、解析手法の開発・改良等が必須である。さらには、知見やデータの統合・整理、異分野融合による多角的解析・考察の推進も必要とされる。その上で、ハード及びソフト的対策を平時から災害を想定した準備していくことが重要となる。本研究を含めこれまでに産官学で尽力してきた事柄であるが、豪雨災害が高頻度化・激甚化する状況下において、対策のスピードを速めていくことが望まれる。

謝辞

本報は、令和2年度科学研究費助成事業・特別研究促進費「令和2年7月九州豪雨災害の総合調査・研究」（研究代表者：大本照憲、課題番号：20K2191600）の助成を受けて、今次豪雨災害における豪雨・水害発生メカニズム把握や人的・物的被害の解明のための調査研究を総合的に実施し、取りまとめました。本書が、多くの方の災害の理解を深め、今後の防災・減災に少しでも役立てば幸いです。調査に際しては、土木学会、日本気象学会、日本建築学会、地盤工学会などに所属する研究者・技術者・学生に多くの協力を得ました。また、現地調査実施や関連データの提供に対して、国土交通省九州地方整備局、国土交通省国土地理院、国土交通省気象庁、文部科学省（委託事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム：DIAS）、熊本県、大分県、人吉市、八代市、芦北町、球磨村、相良村、山江村などの関係機関、宇宙航空研究開発機構(JAXA)西日本衛星防災利用研究センター、欧州中期予報センター(ECMWF)、被災地の住民の皆さんにご協力いただきました。

最後に、本研究の着手・実施に関して、文科省地震防災研究課並びに京都大学防災研究所・渦岡良介教授及び釜井俊孝教授には、適切なお助言を頂きました。熊本大学河川環境研究室秘書・池田郁子氏には、多くの事務・取りまとめ作業をして頂きました。

ここに記して謝意を表します。