

平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害 調査報告書



2020 年 6 月

土木学会水工学委員会 2017 年九州北部豪雨災害調査団

まえがき

2017年7月5日、福岡県の朝倉市および大分県の日田市一带に線状降水帯が発生・停滞し、記録的な豪雨をもたらした。福岡県・大分県において死者・行方不明者41名の人的被害、多くの家屋の全半壊や床上浸水など甚大な被害が発生した。今回の豪雨は極めて規模の大きな降雨に伴って、おびただしい数の斜面崩壊が発生し、それに伴い大量に流木が発生し、多くの橋梁が流木により閉塞し、氾濫が拡大し大きな被害が拡大した。寺内ダムは大きな効果を発揮し、その他の人工構造物は一定の効果を発揮したものの、ため池の決壊や砂防ダム直下での被害などもみられ、その限界についても考えさせられる水害となった。

また、段波の発生や大規模な川幅の拡大なども起こり、大幅な地形変形が見られるなど、これまでの災害とは質の異なる災害となった。さらに、中小河川における災害であり、雨が降り始めてから被害が発生するまでの時間が短く、避難情報などの災害情報は届きにくく自助力、共助力の重要性が再認識された。

本報告書ではこのような、2017年北部九州豪雨の特徴的現象を記述するとともに、河川災害復旧手法について考察する。

土木学会水工学委員会 2017年九州北部豪雨災害調査団 団長 島谷幸宏

目次

第1章	豪雨災害の概要	
1. 1	九州北部豪雨災害の概要と本調査団について	1
1. 2	被害の概要	3
1. 3	古文書から見る過去の災害記録	13
第2章	平成29年7月九州北部豪雨の気象学的特徴	
2. 1	線状降水帯	15
2. 2	各種観測手法による降水分布の検証	17
2. 3	再現計算およびアンサンブル予測計算	22
第3章	流域毎の被災状況	
3. 1	佐田川流域	30
3. 2	桂川流域	39
3. 3	奈良ヶ谷川	44
3. 4	北川	48
3. 5	寒水川	54
3. 6	白木谷川	59
3. 7	赤谷川流域	64
3. 8	大肥川流域	70
3. 9	花月川	84
第4章	特徴的な現象	
4. 1	土砂崩壊	98
4. 2	流木	103
4. 3	ため池	110
4. 4	寺内ダムの防災効果	116
4. 5	各流域の特徴と災害影響因子の検討	120
4. 6	累加雨量による崩壊面積の推定	127
4. 7	段波現象について	132
第5章	行政の対応や住民の行動	
5. 1	累加雨量と通報数の関係	145
5. 2	基礎自治体における事前の備えと災害時対応	148
第6章	災害の特徴的現象からみる河川災害復旧手法の考察	155
6. 1	はじめに	161
6. 2	特徴的な現象	161
6. 3	時系列的被害・避難の状況	159
6. 4	復旧・復興に向けて	161
第7章	調査団からの提言、得られた教訓	165

謝辞

第1章 豪雨災害の概要

1. 1 平成 29 年 7 月九州北部豪雨の概要

平成 29 年(2017 年)7 月 5 日から 6 日にかけての豪雨は、福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市を中心に甚大な被害をもたらした(図 1.1)。この豪雨によって、甚大な河川災害を筑後川中流部右岸域にもたらした。被災した河川は、福岡県では佐田川、桂川、奈良ヶ谷川、北川、寒水川、白木谷川、赤谷川、大分県では、大肥川、花月川の各本・支川である。(図 1.2) また、土砂崩れや洪水が各地で発生し、物的・経済的損失に加えて人的被害甚大な被害が発生した。気象庁は、顕著な災害を起こした命名の条件として、顕著な被害(損壊家屋等 1,000 棟程度以上、浸水家屋 10,000 棟程度以上)が起きた場合としているが、今回の豪雨の被害は、その数字には達さなかったものの線状降水帯が局所的で集中的な長時間の特異な豪雨をもたらした点と教訓を伝承する観点から、平成 29 年 7 月 19 日に「平成 29 年 7 月九州北部豪雨」と命名した。また、内閣は、「激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する法律」に基づき、平成 29 年 7 月九州北部豪雨を激甚災害として指定することを、閣議決定した。

土木学会水工学委員会では、本豪雨災害に調査団を派遣することを決定し、島谷幸宏(九州大学教授) 団長を中心に表のメンバーにより調査を行ってきた。

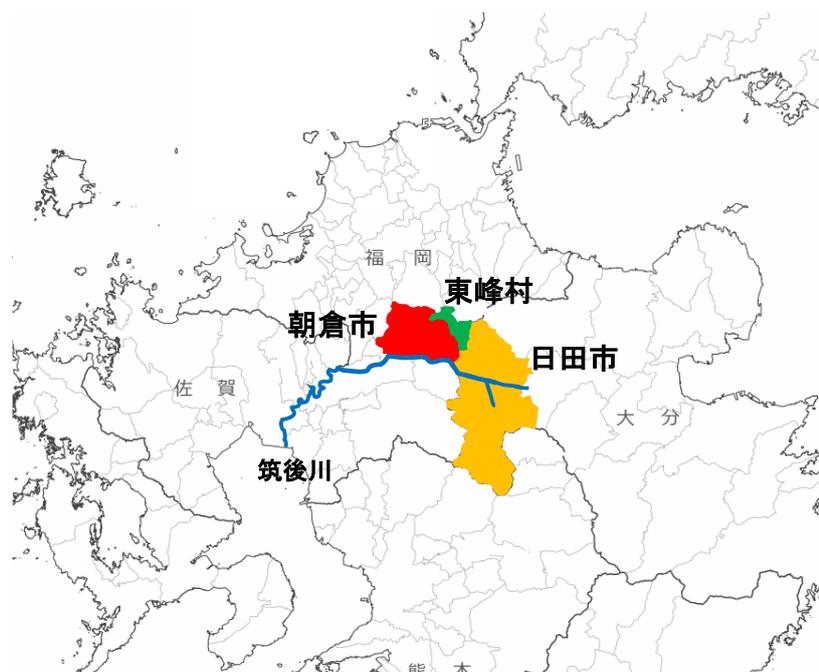


図 1.1 朝倉市、東峰村、日田市の位置

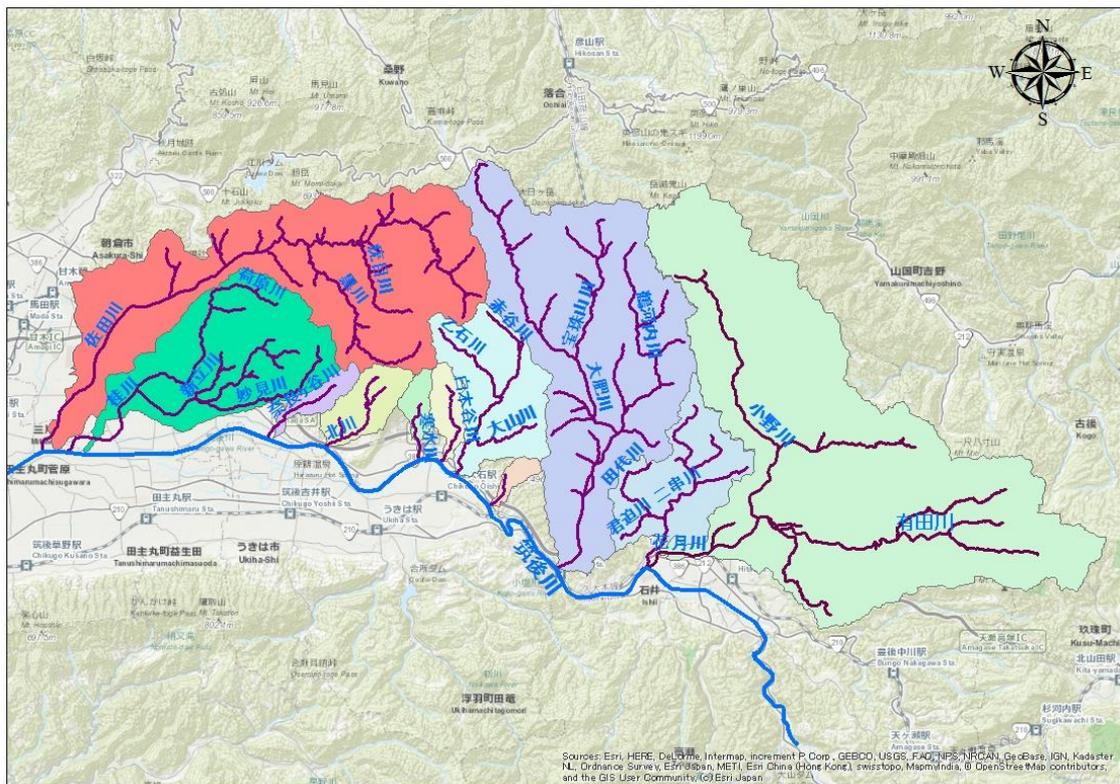


図 1.2 被災した主な河川の位置と流域

土木学会 2017 年九州北部豪雨災害調査団メンバー

団長: 島谷幸宏(九州大学) 幹事: 矢野真一郎(九州大学), 顧問: 小松利光(九州大学)
田井明, 清野聡子, 西山浩司, 林博徳, 寺村淳, 佐藤辰郎, 橋本晴行, 三谷泰浩, 塚原健一(九州大学)
大串浩一郎, 押川英夫(佐賀大学)
橋本彰博, 伊豫岡宏樹, 林義晃(福岡大学), 森山聡之(福岡工業大学)
大本照憲, 辻本剛, 皆川朋子, 石田圭(熊本大学), 神谷大介(琉球大学)
二瓶泰雄(東京理科大学), 赤松良久, 小室隆, 乾隆帝(山口大学)
山口弘誠(京都大学), 石田義明(北海道大学), 鶴崎賢一(群馬大学)
藤山秀章(河川財団), 永野博之(群馬高専)
竹本 進, 助川 直人, 劉 義涛, 中島 克人, 野頼 成嘉, 牧野 健太郎(建設環境研究所)
森川 浩, 黒田 兆次, 木梨 行宏(建設技術研究所), 福岡尚樹(西日本技術開発)
松下朋哉, 清水 純生, 萩原 崇, 川越 典子(日本工営), 峯浩二(日本ミクニヤ)

1. 2 被災状況について

この豪雨によって、甚大な河川災害を筑後川中流部右岸域にもたらした。被災した河川は、福岡県では佐田川、桂川、奈良ヶ谷川、北川、寒水川、白木谷川、赤谷川、大分県では、大肥川、花月川の各本・支川である。(図 1.2) また、土砂崩れや洪水が各地で発生し、物的・経済的損失に加えて人的被害甚大な被害が発生した。

気象庁は、顕著な災害を起こした命名の条件として、顕著な被害(損壊家屋等 1,000 棟程度以上、浸水家屋 10,000 棟程度以上)が起きた場合としている。今回の豪雨の被害は、その数字には達さなかったものの線状降水帯が局所的で集中的な長時間の特異な豪雨をもたらした点と教訓を伝承する観点から、平成 29 年 7 月 19 日に「平成 29 年 7 月九州北部豪雨」と命名した。

また、内閣は、「激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する法律」に基づき、平成 29 年 7 月九州北部豪雨を激甚災害として指定することを、閣議決定した。該当地域は、福岡県朝倉市、朝倉郡東峰村および田川郡添田町並びに大分県日田市の 4 市町村である。

表 1.1 県別家屋被害棟数(単位:棟)

	全壊	半壊	一部損壊	床上浸水	床下浸水	総数	非住家
福岡県 (H29年12月28日時点)	274	830	39	22	587	1,752	751
大分県 (H29年8月31日時点)	48	269	5	150	843	1,315	600

前述のように今回の豪雨災害においては、九州北部 2 県で多大な被害が発生した。今次災害において、死者 39 名、行方不明者 2 名であった。人的被害の詳細に関しては、第 2 章で詳しく述べるためここでは割愛する。

次に、表 1.2 に各県別の被災家屋数の一覧を示す。福岡県は全壊および半壊した住家の数が多いのに対して、大分県は床上浸水および床下浸水の被害を受けた住家の数が多いことがわかる。

表に平成 29 年 7 月九州北部豪雨と平成 24 年 7 月九州北部豪雨の住家における被害棟数の比較を示す。また、図 1.2 および図 1.3 に平成 29 年 7 月および平成 24 年 7 月の九州北部豪雨の住家被害内訳を示す。住家における被害棟数の総数が平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、3,067 棟であったのに対して、平成 24 年 7 月九州北部豪雨では平野部での河川の氾濫により広範囲に被害が及んだため 12,981 棟の被害があり、その差は約 10,000 棟になる。被害棟数が少なかったのは、多くの被災河川が谷底河川であり、氾濫域が限定的であったことや、住家の絶対数が少なかったことが考えられる。また、平成 29 年 7 月九州北部豪雨では全壊および半壊した住家が全体の 46%を占めたのに対して、平成 24 年 7 月九州北部豪雨では、17%であったことから、今回の平成 29 年九州北部豪雨では局所的な被害であり、全壊・半壊するほどの洪水流、土石流が起こった可能性が考えられる。

表 1.2 H29 年と H24 年の九州北部豪雨の住家被害棟数の比較（単位：棟）

	全壊	半壊	一部損壊	床上浸水	床下浸水	総数
H29年7月九州北部豪雨	322	1,099	44	172	1,430	3,067
H24年7月九州北部豪雨	280	1,918	248	2,691	7,844	12,981

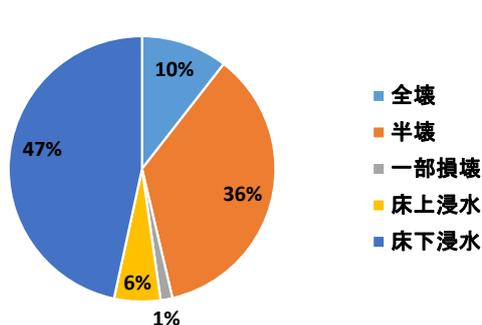


図 1.2 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における住家の被害内訳

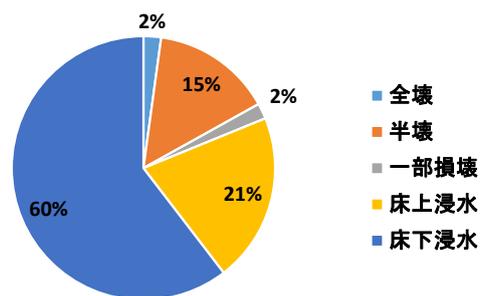


図 1.3 平成 24 年 7 月九州北部豪雨における住家の被害内訳

表 1.3 に各県別の被害総額を示す。2 県で総額 2240 億円を超えている。これは、平成 24 年 7 月九州北部豪雨の際の福岡県、熊本県、大分県及び佐賀県の 4 県における被害総額

(約 2000 億円) を上回る金額である。図 1.4 に平成 29 年 7 月九州北部豪雨と平成 24 年 7 月九州北部豪雨の被害額の比較を示す。平成 29 年において土木関係施設の被害額が平成 24 年を上回った一方、農林水産関係は平成 24 年が平成 29 年を上回っている。

表 1.3 平成 29 年九州北部豪雨による県別被害額 (単位：百万円)

	土木関係 施設	農林水産 関係	教育関係 施設	商工・その他	計
福岡県 (H29年8月20日現在)	108,100	69,100	4,200	12,700	194,100
大分県 (H29年8月22日現在)	19,787	9,101	73	1,009	29,970
				合計	224,070

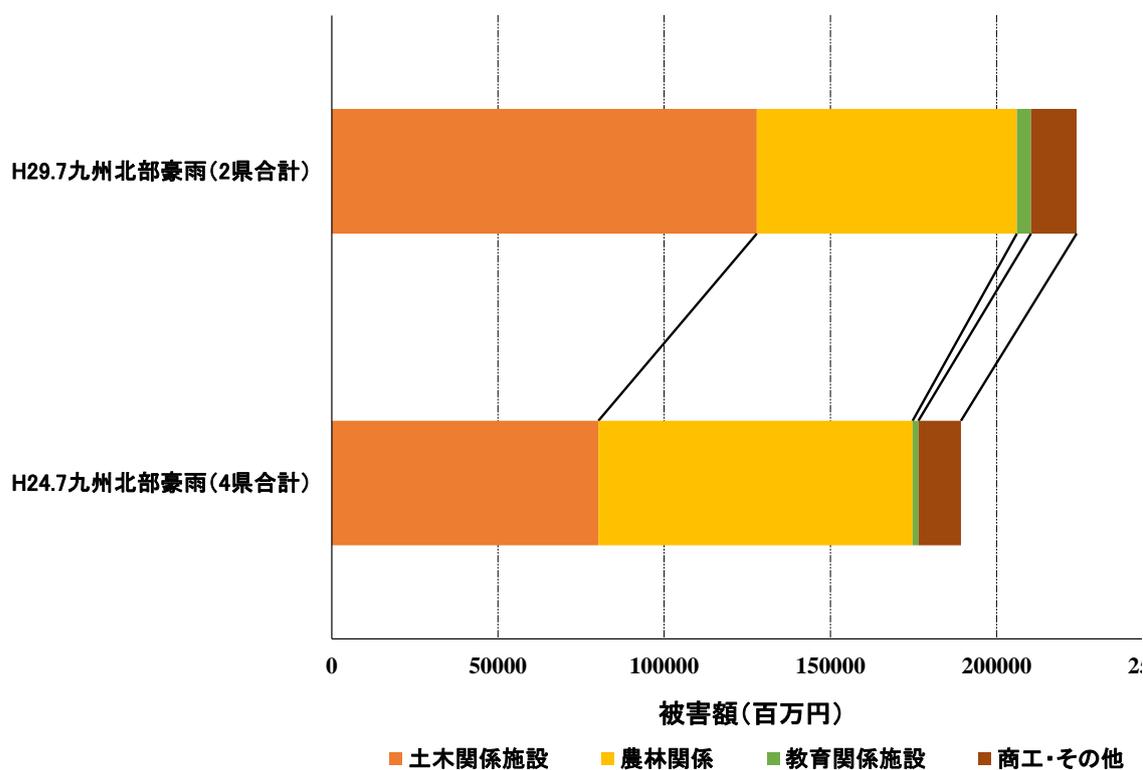


図 1.4 平成 29 年九州北部豪雨と平成 24 年九州北部豪雨の被害額の比較

1.2.1 人的被害の概要

今回の平成 29 年 7 月九州北部豪雨によって計 41 名の死者・行方不明者が発生した。表 1.4 に死者・行方不明者の発生状況を示す。市町村別内訳で見ると、福岡県朝倉市が 33 名の死者と 2 名の行方不明者、福岡県東峰村が 3 名の死者、大分県日田市が 3 名の死者であった。また、図 1.5 に死者行方不明者の発生分布図を示す。

表 1.4 死者・行方不明者の発生状況

福岡県	朝倉市	東峰村	小計
死者	33	3	36
行方不明者	2	0	2
大分県	日田市		小計
死者	3		3
行方不明者	0		0
		合計	41

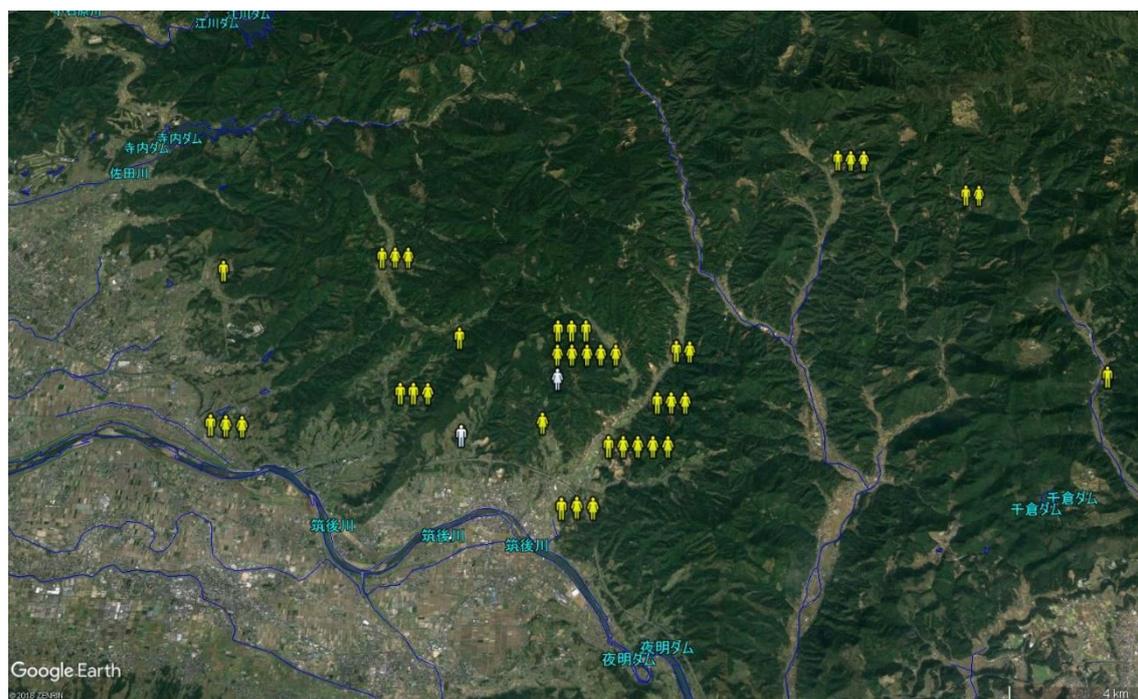


図 1.5 死者・行方不明者発生分布

1.2.2 人的被害の特徴

死者・行方不明者を河川別に見ると以下の表 1-5 のようである。乙石川、小河内川は赤谷川の支川であるため、赤谷川流域における死者・行方不明者合わせて 22 名にのぼる。図 1.6 に流域死者・行方不明者割合を示す。図 1.6 から分かるように赤谷川流域における死者・行方不明者の割合が 50%を超えている。

表 1-5 河川別死者・行方不明者

市町村	流域名	死者	行方不明者	計
朝倉市	赤谷川	10	0	10
	乙石川	8	1	9
	小河内川	3	0	3
	白木谷川	1	0	1
	寒水川	0	1	1
	北川	3	0	3
	奈良ヶ谷川	3	0	3
	黒川	4	0	4
	桂川	1	0	1
東峰村	宝珠山川	3	0	3
日田市	小野川	3	0	3
合計		39	2	41

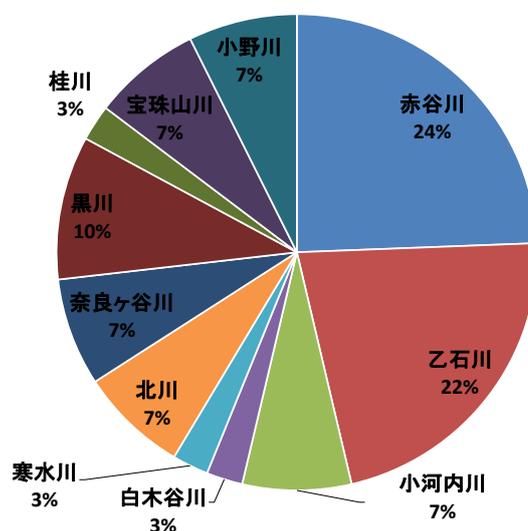


図 1-6 河川別死者行方不明者割合

1.2.3 死因の分析

以下の表 1-6 に福岡県における犠牲者の死因とその人数を平成 29 年 10 月 19 日時点で判明している 34 名分に関して示す。また、図 1.7 に各死因の割合を示す。

ここで、溺死と溺水吸引は、両者とも水が呼吸器系へ侵入し、肺に水がたまるなどして気道がふさがることにより引き起こされる窒息死の一種であるが、溺死は窒息してから 24 時間以内に死亡した場合を指し、溺水は窒息してから 24 時間以上生存していたものを指す。

表 1.6 福岡県における死者の死因とその人数

死因	人数
溺死	4
溺死の疑い	2
溺水吸引による窒息	6
砂泥吸引による窒息	13
泥水吸引による窒息	1
圧死	4
胸腹部圧迫による窒息	1
全身打撲による外傷性ショック	1
多発外傷による外傷性ショック	1
不詳	1
合計	34

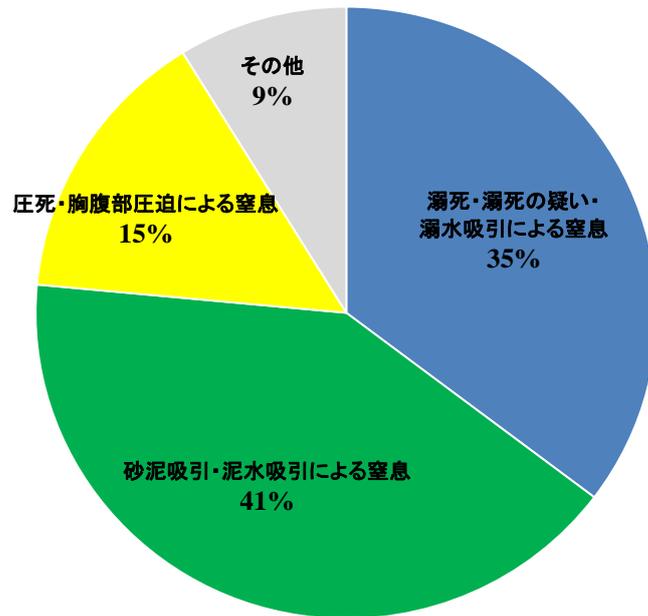


図 1.7 死因別割合 (34 名分)

図 1.7 によると、『溺死・溺死の疑い・溺水吸引による窒息』が死因すなわち水が死因となった事例は 35%であり、『砂泥吸引・泥水吸引による窒息』と『圧死・胸腹部圧迫による窒息』が死因すなわち、土砂が死因となった事例が合わせて 56%である。しかし、ここで、被災時に死者・行方不明者がいた場所を考慮して原因を考えてみると以下の図 2-4 のように洪水氾濫関連と土砂関連の 2 つに分類できる。ただし、死因判明分のみの被災原因をしめす。ここでは、被災場所が河川に近ければ洪水関連、明らかな土石流や土砂崩れであるとされているものは土砂関連としている。

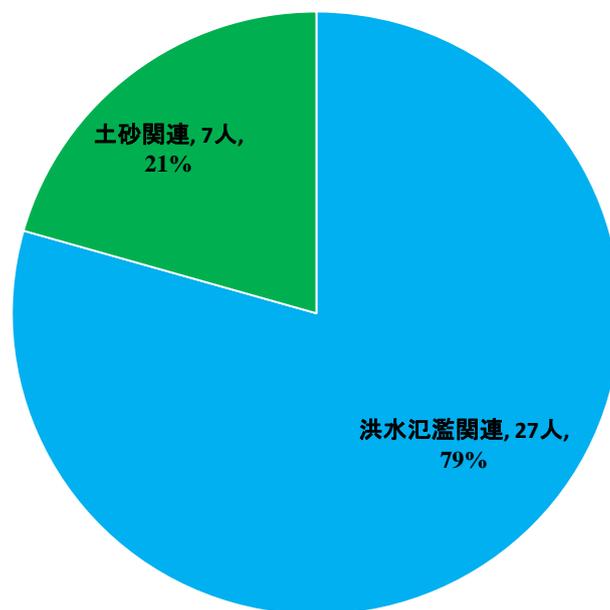


図 1.8 平成 29 年九州北部豪雨人的被害要因別分類（死因判明分）

図 1.8 から分かるように洪水氾濫関連の死者が約 80%であり、死因が土砂関連である人に関しても河川の近くにいたと推定される人も多い。河川に大量の土砂と水が流れ込んだことで被害を受けた可能性がある。

1.2.4 死者・行方不明者の被災時の状況

次に、平成 29 年 7 月九州北部豪雨における死者・行方不明者の被災時の状況を表 2.4 に示す。自宅待機が 30 名であり被災した人の大多数であり全体の約 75%であった。自宅待機をした方の中には、足が悪く自力では避難ができない人が複数名いた。また、身内から避難をするように勧められたにも関わらず、自宅から避難しなかった例もあった。亡くなられたかたの中には、避難を周囲の方に呼びかける中で被害に遭われた方や、消防団として避難活動中に被害に遭われた方もいた。

その一方で、避難が完了し避難所にいた人で、死亡したり行方不明になったりする人はいなかった。避難所には、大きな被害はなかったといえる。

表 1.7 死者・行方不明者の被災時の状況

状態	人数
自宅待機	30
避難中	5
避難以外の外出中	4
避難活動中	1
排水作業中	1

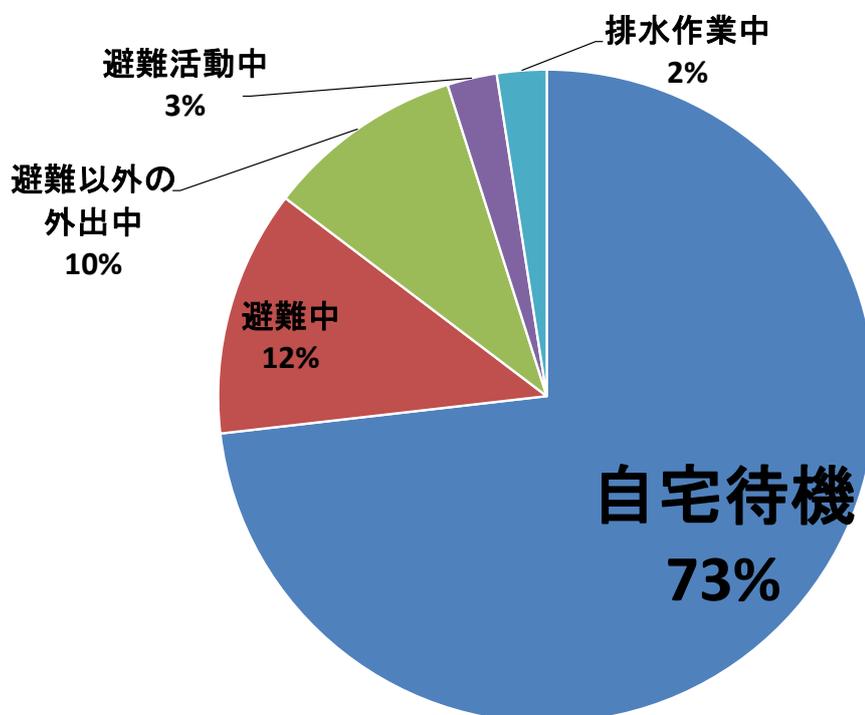


図 1.9 死者・行方不明者の被災状況別割合

1.2.6 死者・行方不明者の住家の状態

前述したように、平成 29 年 7 月九州北部豪雨において、全壊および半壊した住家が非常に多く合わせて 1,421 棟が被害を受けた。その内、朝倉市において全半壊した住家は、1,037 棟であった。そこで、死者・行方不明者の住家が被災後にどのような状況であったかを現地調査および新聞等によって調査した。すると、全壊または半壊した住家に住んでいた人数は 35 名で、住家が残っていたのは 6 名であった。住家が残っていた方は、帰宅中およびその方を迎えにいった方、避難中に洪水流に巻き込まれた方、避難活動をされていた方、畑を見に行かれた方、自宅に洪水流がたまっただけその水を抜こうとして鉄砲水に流されてしまった方であった。

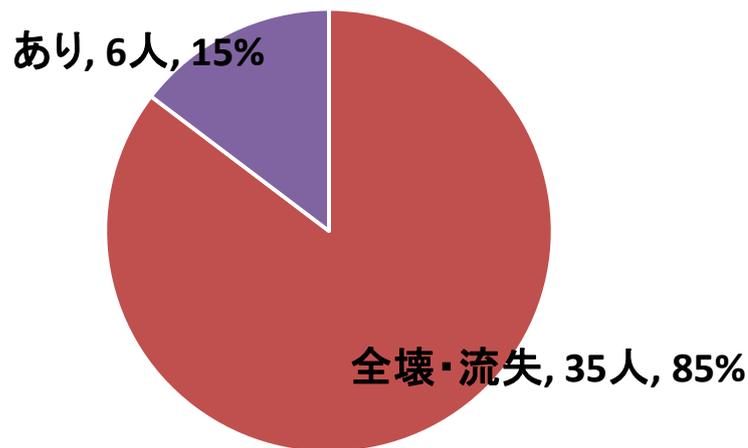


図 1.9 死者・行方不明者の住家の有無割合

1.2.7 死者・行方不明者年代別割合

図 1.12 に平成 29 年 7 月九州北部豪雨における死者・行方不明者の年代別割合を示す。また、図 1.13 に平成 24 年 7 月九州北部豪雨における死者・行方不明者の年代別割合を比較のために示す。平成 24 年において、60 代以上の被災者の割合が 70%であり、非常に多かったが、今回の平成 29 年 7 月九州北部豪雨においては、それを上回る 82%となった。ともに、災害弱者と考えられる高齢者の割合が最も多くなっている。平成 29 年および平成 24 年の両者とも中山間地域での被害が多い。そのため、この死者・行方不明者の割合は、中山間地域における被災の特徴であると考えられる。

次に、特に被害者の多かった朝倉市杷木地域に着目する。図 1-14 に平成 29 年 7 月九州

北部豪雨による朝倉市杷木地域における死者・行方不明者の年代別割合を示し、図 1-15 に朝倉市杷木の人口の年代別割合を示す。人口割合に関しては、年代別で偏りはないにもかかわらず、被害者の年代別割合は 60 代以上が 86%を占めている。60 歳以下の被害が少なかったのは、今回の豪雨が平日の夕方頃にかけて非常に強く降っており、生産年齢人口である年代が、仕事等で朝倉市杷木にいなかったためと考えられる。

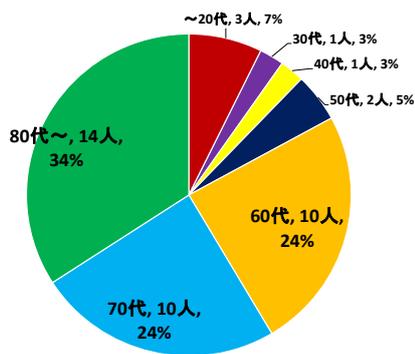


図 1.10 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における死者行方不明者の割合

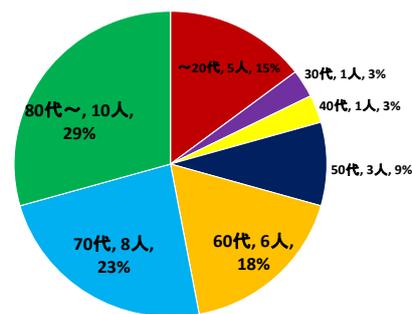


図 1.11 平成 24 年 7 月九州北部豪雨における死者行方不明者の割合

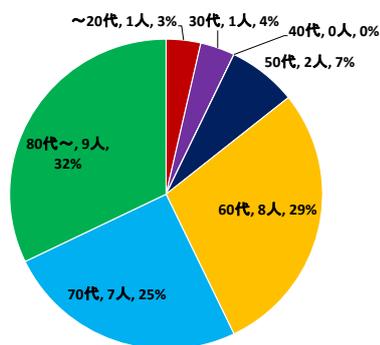


図 1.12 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における朝倉市杷木の死者行方不明者年代別割合

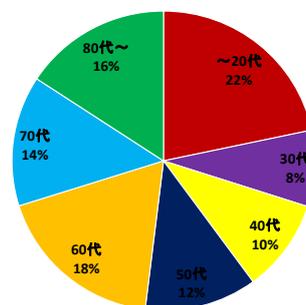


図 1.13 朝倉市杷木の年代別人口割合

1.3 古文書から見る過去の災害記録

朝倉地方の過去の災害を抽出するために、慶長19年(1614年)から慶応3年(1867年)の江戸時代、福岡県の筑前・筑後・筑豊地方、大分県の豊後地方北部、両県にまたがる豊前地方の気象災害・火災の記録を編纂した福岡県近世災異誌¹⁾を利用した。この編纂資料は、筑後地方の災害を詳しく記録した古文書や寺社、武家、庄屋などの地域の古文書を収集して編纂した貴重な災害資料で、筑後地方の災害について詳しく記載されている。筑後川流域は、江戸時代を通して多くの水害に見舞われてきた地域で、福岡県近世災異誌によると、享保5年(1720年)、享和2年(1802年)、天保9年(1838年)の3回、現在の朝倉市(甘木地区、朝倉地区、杷木地区)で大きな災害に見舞われた。その中で、享保5年の豪雨は江戸時代を通して最も甚大な災害を引き起こし、多くの古文書の記載がある。

享保5年新暦7月24～26日の豪雨で筑前・筑後地方で広範囲に大水害となった。その後飢饉を引き起こすほどの渇水に見舞われていることから、前線が北部九州をゆっくりと北上して梅雨明けするような梅雨末期の特徴だったと推測される。現在の福岡市(田島、鳥飼、川端、今泉、天神、薬院など)で水害が多発し、久留米藩領で1000名近くの死者が出た。最も被害が大きかった地域は、現在の久留米市からうきは市にかけての耳納山麓で、山汐(土石流発生)に伴って死者50名以上を出した。福岡県近世災異誌に引用されている医王山南淋寺縁起²⁾には、「六月二十一日大雨雷電山汐洪水所々山崩れ石流る」、「筑後一國中大破荒増傳聞甚恐怖」と記載されており、享保5年の豪雨では、土石流(山汐)、洪水を伴った甚大な災害になったことが記載されている。

その縁起には、享保5年の朝倉・杷木地区(現在の朝倉市中部・東部)の被災の様子が述べられている。「下郷には山田・古毛・田中・長湍その外何れも損失多し、上郷には白木・池田・松末・赤谷・志波・里城永々の荒所多く、その他も山辺川辺流れ、田地流れ、家も所々これある」と当時被災した地域(現在の朝倉市中部・東部)の地名が記載されており、平成29年7月九州北部豪雨で被災した地域と類似していることがわかった(図1-16)。また、桂川上流の南淋寺とその周辺も当時被災しており、「当寺も清水の上谷の頭吹き抜き指杵粗い崩し根牽にし、流れ落つる黒水飛泉の如く落来りて、井戸三つこれを埋む、客殿庭屋共流



図 1-16 南淋寺縁起に記載された享保5年(1720年)7月豪雨時の朝倉地域の被災地域。

水遺通し、清香庵の上山崩れ川岸洗い流し、前川の千人橋も終に洗い崩し、招集庵の谷路崩れ絶えたり、田畠共に撰ばず、永荒れの損亡甚だ多し」(原文:図1-*(c))と当時の被災の様

第2章 平成29年7月九州北部豪雨の気象学的特徴

2.1 線状降水帯

最近、日本のどこかで豪雨が発生するたびに、テレビやインターネットで線状降水帯という気象学の専門用語が注目されるようになってきた。その情報の中には、線状降水帯の発生が地球温暖化と関係しているかのような話題が散見し、誤った解釈を与えている側面がある。実際は、地球温暖化と関係なく、線状降水帯は太古の昔から存在し、豪雨を引き起こしてきた。一方、線状降水帯という言葉が広く知られるようになったことで、線状降水帯が豪雨災害を引き起こす可能性があるという知見に関して理解が進むことが期待される。

最近数年の豪雨を振り返ると、鬼怒川の氾濫で多くの被害を出した「平成27年9月関東・東北豪雨」、広島市郊外の住宅地を襲った土石流災害で多くの死者を出した「平成26年豪雨」、矢部川の氾濫、阿蘇市の土砂災害、熊本市の水害を引き起こした「平成24年7月九州北部豪雨」など、いずれも線状降水帯が関係した豪雨であった。そして、「平成29年7月九州北部豪雨」も線状降水帯の出現によって引き起こされ、福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市を中心に河川の氾濫、山腹崩壊、土石流、流木などで甚大な災害となり、多くの犠牲者を出すに至った。

線状降水帯は帯状に並んだ積乱雲の列で、インターネット上でリアルタイムに公開されている気象レーダーで見ると、帯状の強い降水域として視覚的に認識することができる。線状降水帯の厳密な定義はないが、帯状のバックビルディング降水系（back building）のような形態が一般的で、それは、風上側の先端で背の高い積乱雲が何度も発生し、風下側の地域

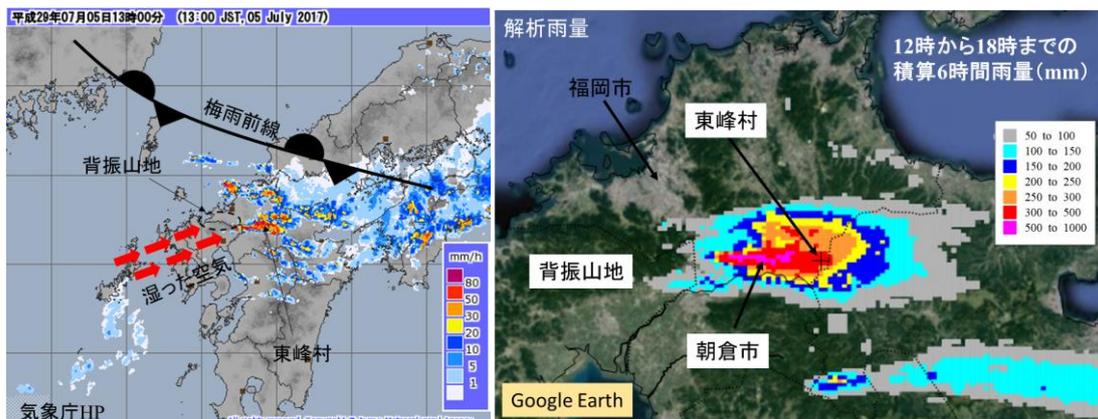


図-2.1 左図：2017年7月5日13時の気象レーダー画像に前線位置を記載した図
右図：積算6時間雨量（解析雨量）

に移動して、次々と豪雨をもたらす形態である。2017年7月5日、北部九州の北側の玄界灘に前線が停滞し、暖かく湿った空気が前線に向かって流れ込んでいた(図-2.1)。その暖湿空気が背振山地東側で上昇し、積乱雲が何度も繰り返し発生したり。また、2.3節に示されるように、背振山地の南北から流入した湿った空気の収束も線状降水帯持続の一要因と考えられる。さらに、北側上空の寒気の流入もあり、大気が著しく不安定となって積乱雲は高く発達した。背振山地東側で繰り返し発生した多くの積乱雲は上空の西風に乗って東に移動し、朝倉市、東峰村、日田市で集中的に豪雨をもたらし、線状降水帯は9時間以上も持続した(図-2.2)。その結果として、図-2.1の右図に示すように、狭い範囲で豪雨となり、朝倉市を中心に500mmを超える雨量を記録した。

一般に、線状降水帯は何時間も持続せず、少しずつ移動して同じ領域に止まらないことが多い。その場合は災害に繋がるような豪雨になることは少ない。一方、災害に繋がるケースは、図-2.2に示すように、豪雨域が同じ領域に停滞することである。その特徴は、気象庁のHPなどで公開されている気象レーダー画像(降水強度分布)の動画を見ることで視覚的に確認することができる。つまり、気象レーダーの動画を通して、自分の居住地域で豪雨域が停滞しつつある状況や、近隣の地域が既に豪雨に見舞われている状況に早く気付くことが可能である。(西山浩司)

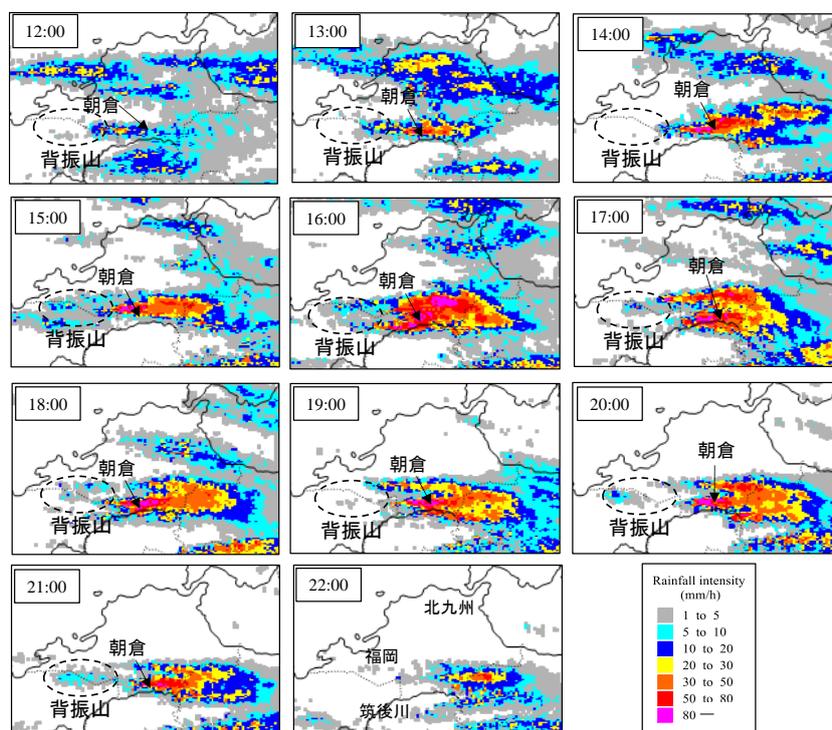


図-2.2 2017年7月5日12時~22時までの北部九州の気象庁レーダー(Cバンド)の積算1時間雨量

2.2 各種観測手法による降水分布の検証

2.2.1 福岡県朝倉市及び大分県日田市周辺における各種観測手法の降水分布

図-2.3, 2.4, 2.5, 2.6 に, 2017(平成29)年7月5日の福岡県朝倉市及び大分県日田市周

表-2.1 各種レーダにおける主な観測仕様.

	観測データの空間解像度	観測データの時間分解能	降水量推定式	地上雨量データによる補正の有無
気象庁レーダ・アメダス解析雨量	1km	30分	Z-R関係式	有
国土交通省Cバンドレーダ	1km	5分	Z-R関係式	有
国土交通省XバンドMPレーダ	250m	1分	Z-R関係式 K _{DP} -R関係式	無
国土交通省C&XバンドMPレーダ	250m	1分	Z-R関係式 K _{DP} -R関係式	無

辺における気象庁レーダ・アメダス解析雨量(以下, 解析雨量), 国土交通省 C バンドレーダ, X バンド MP レーダ(同, X-MP), C&X バンド MP レーダ(同, XRAIN)の日降水量分布を示す. ここで, 今回の解析に用いた C バンドレーダ及び X-MP, XRAIN は, いずれも合成処理データを用いており, 各種レーダの主な観測仕様を表-2.1 にまとめる.

図-2.3~2.6 を見ると, 日降水量が 300mm/day 以下の領域では, 各種レーダによる降水の空間分布に大きく異なるようなデータ特性は見られなかった. しかしながら, 日降水量が 300mm/day を超えると分布に違いが見られる. 特に, 降水量の多い領域(日降水量 600mm/day 以上, 分布図では紫色で示し, 以降高降水域と呼ぶ)に着目すると, 解析雨量(図-2.3)は最大 956mm/day であるのに対して, 他の3つのレーダではそれより小さな値となっている. また, 空間分布については C バンドレーダの高降水域(図中の紫色)が解析雨量に対して東側にずれていること, X-MP では高降水域が非常に狭い範囲に限られていることがわかる.

次にレーダ毎に見てみると, C バンドレーダ(図-2.4)は, 解析雨量とほぼ同様な観測仕様であるため(表-1 参照), よく似た降水分布ではあるものの, 詳細に見ると, 解析雨量では朝倉市西部から隣接する杷木市にかけて, 帯状に高降水域が広がっていたのに対して, C バンドレーダでは日田市北部の小野川流域でもその領域が認められた. 日降水量の最大値は解析雨量と C バンドレーダで約 100mm/day 異なっており, 地上雨量データによる補正值とその位置の問題が示唆される.

X-MP(図-2.5)を見ると, 高降水域が解析雨量よりも極めて狭く, 日降水量の最大値は約 350mm/day もの差があることがわかる. この要因については現在解析中であり, 今後明らかにしたいと考えている.

最後に, XRAIN(図-2.6)では, 高解像度・高観測頻度を有しているため, C バンドレーダより詳細な降水分布を示すことができているが, 日降水量の最大値は, X-MP と同様に解析雨量と比較して約 260mm/day 小さい.

菅岳レーダ(X BAND)

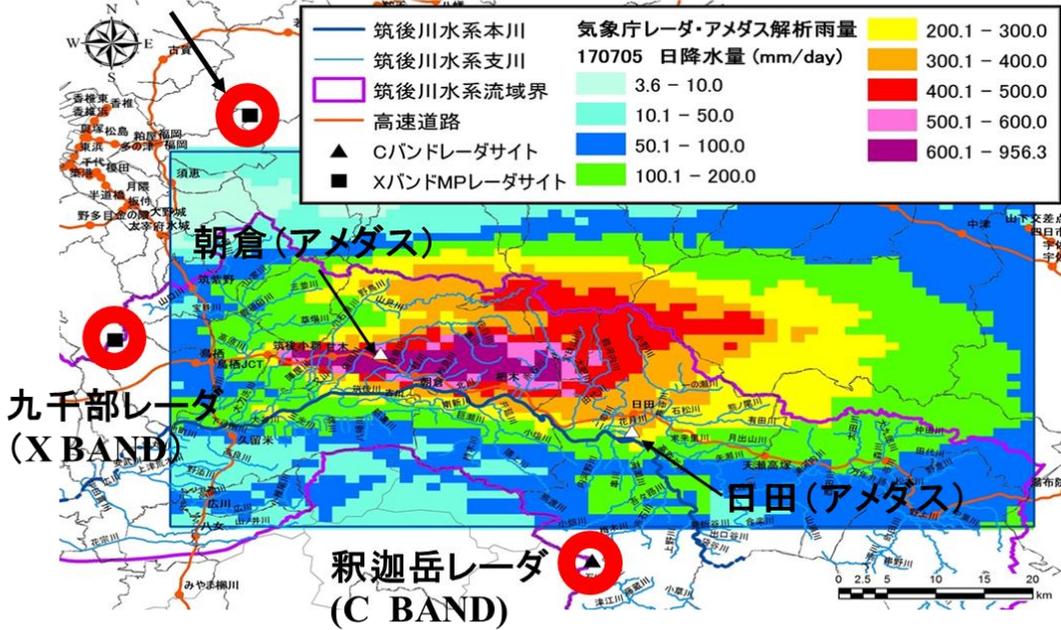


図-2.3 気象庁レーダ・アメダス解析雨量における日降水量の降水分布

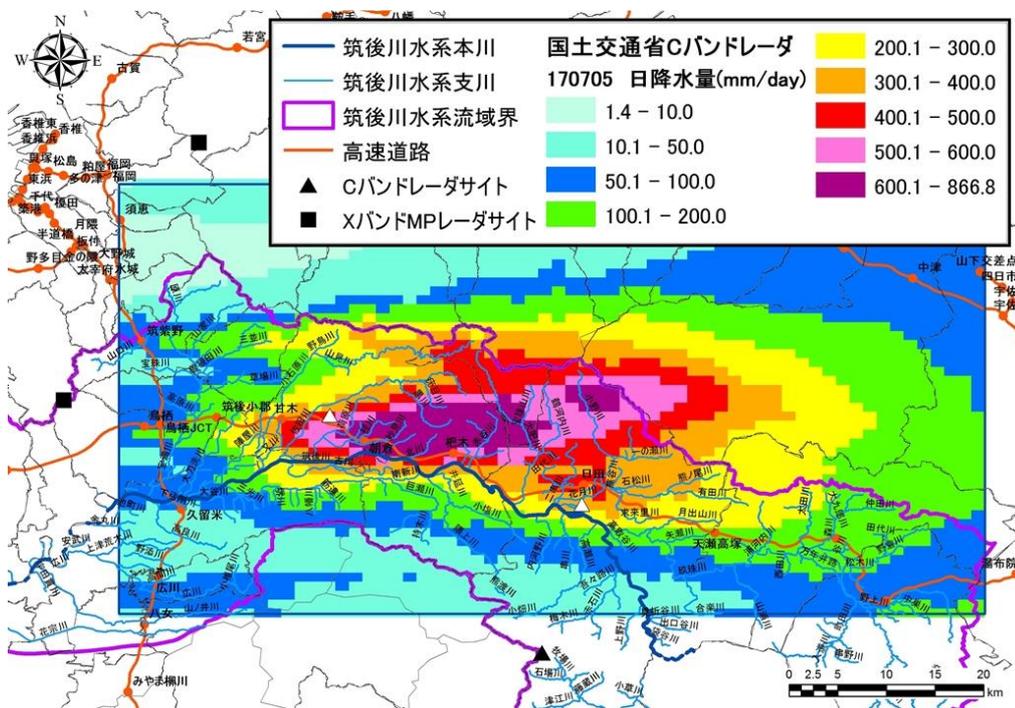


図-2.4 国土交通省Cバンドレーダにおける日降水量の降水分布

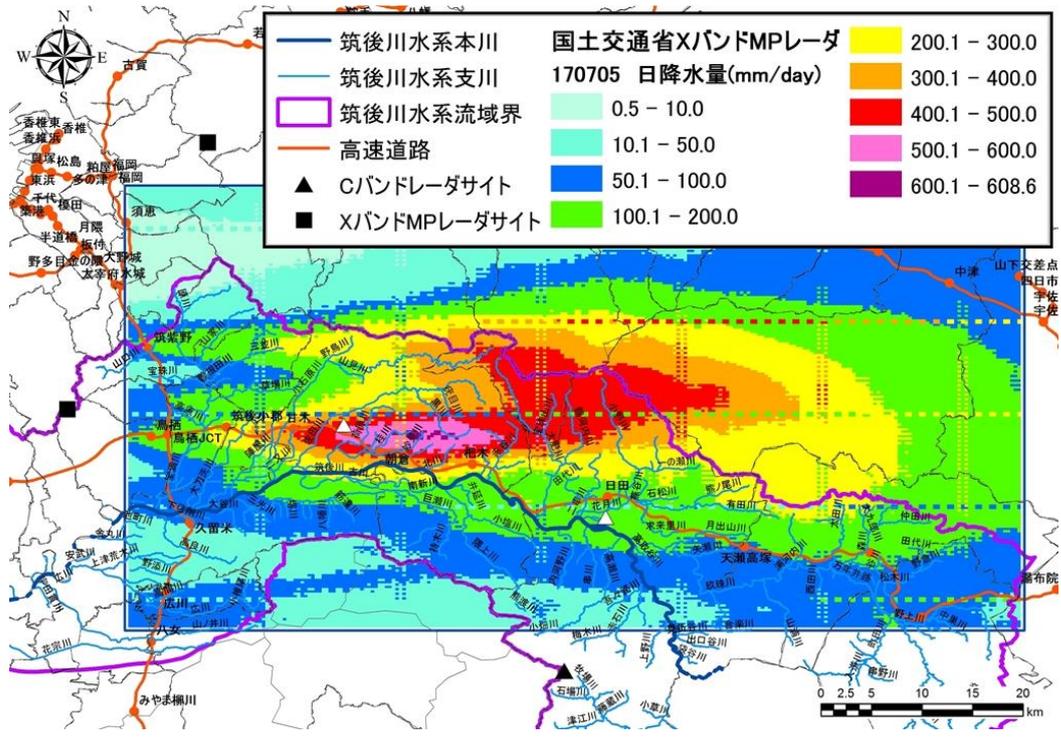


図-2.5 国土交通省 X バンド MP レーダにおける日降水量の降水分布

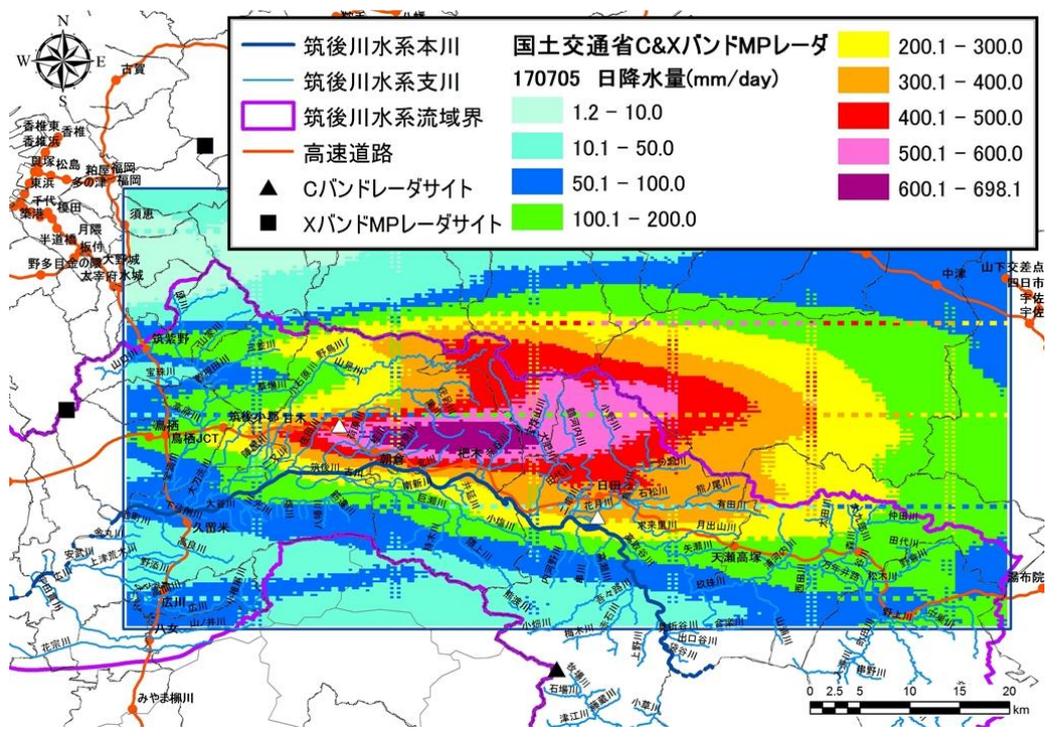


図-2.6 国土交通省 C&X バンド MP レーダにおける日降水量の降水分布

2.2.2 朝倉地点及び日田地点における各種降水量と解析雨量の差分値による時系列

前節で述べたように、解析雨量に対して他の 3 種類のレーダから得られた降水量は全て小さい値を示していた。そこで、各降水量の過小評価がいつから生じ始めたのかを明らかにするために、気象庁朝倉観測所と日田観測所の 2 箇所において解析雨量を基準とし、C バンドレーダ及び X-MP、XRAIN の降水量を差分した時系列を調べた。その結果を各観測所での地上雨量データとあわせて図-2.7、2.8 に示す。ここで解析条件として、各種レーダの降水データは、各観測所直上の降水データを抽出して比較した(以後、朝倉地点、日田地点とする)。また、各種レーダのデータ解像度が異なるため(表-2.1 参照)、既往研究²⁾に従って X-MP 及び XRAIN の降水データを解析雨量と同等サイズである 1km メッシュに再計算して検討した。さらに、両図とも縦軸が正の値をとる場合、各種レーダの降水量が解析雨量に対して過大評価となっていることを意味する。

図-2.7 より、朝倉地点では、強雨を伴い始めた 15 時以降において各種レーダとも解析雨量に対して過小評価になっていることがわかり、その後もその状態が継続していることがわかる。一方、図-2.8 の日田地点では、X-MP を除いた各種レーダにおいて解析雨量とほぼ同等であることがわかる。X-MP については、強雨を伴った降水時間帯以降で、過小評価が続いており、図-2.7 の朝倉地点と同様な観測特性であった。

過小評価の要因の一つとして、各レーダと雨雲の位置関係が降水量推定精度に大きく影響したと考えられる。まず朝倉地点上空では、発達かつ林立した雨雲と強雨により降水粒子が高密度状態であったと推測される。そのため、降水量推定手法が従来法である Z-R 関係式を用いる C バンドレーダ(釈迦岳レーダ)では、強雨時の降水量を精度良く推定することが困難であったことが考えられる。また X-MP(菅岳レーダ・九千部レーダ)では、その強雨域の後背地となったことで降水量推定精度が低下したことが推察される。一方、日田地点では図-2.4 の通り、C バンドレーダとの距離が短く、降水量を精度良く推定できる環境にあったと考えられる。しかしながら X-MP では、レーダと日田地点の間に、先述の朝倉地点上空の雨雲と降水空間が位置していたため、その後背地となる日田地点では降水量推定精度が低下したと推察される。両地点における X-MP の降水量推定精度低下は、約 6 年前に発災した平成 24 年 7 月九州北部豪雨でも指摘されている³⁾。従って、X-MP における降水量推定精度低下は、今回の事象に特化した問題ではないと言える。今後、何らかの対応が求められる。

以上のことより、今回の事象における各種レーダの降水データの利用に関しては、対象とする地域とレーダサイトの位置関係を確認の上、1 種類の観測データのみで判断することなく、様々な観測手法による降水データを把握した上で使い分けていく必要がある。

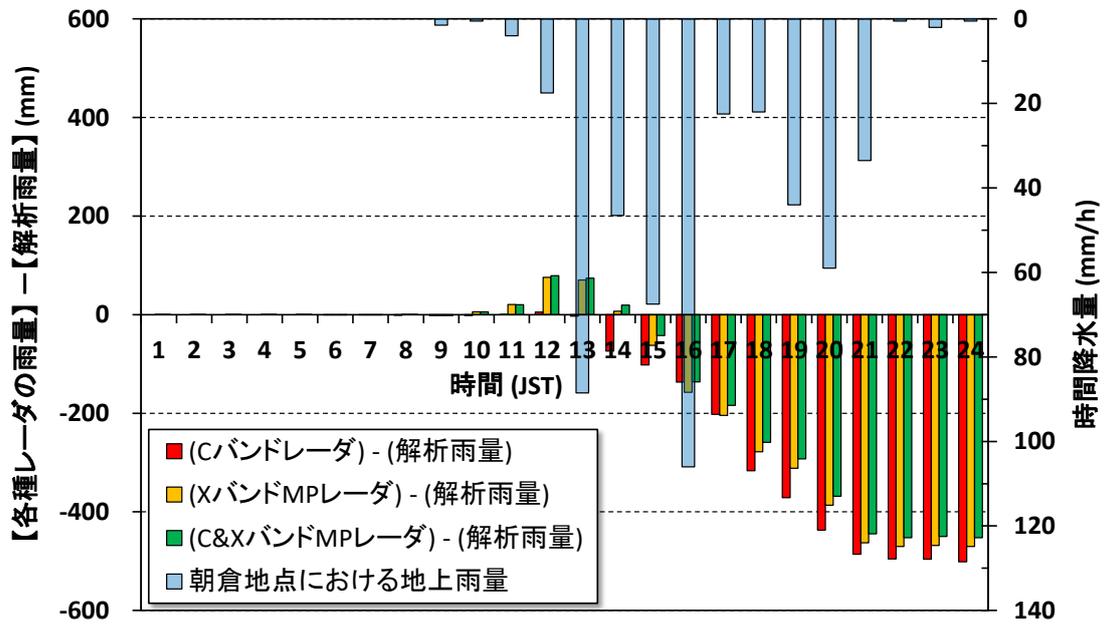


図-2.7 朝倉地点における解析雨量を基準とした各種レーダデータとの差分値による時系列

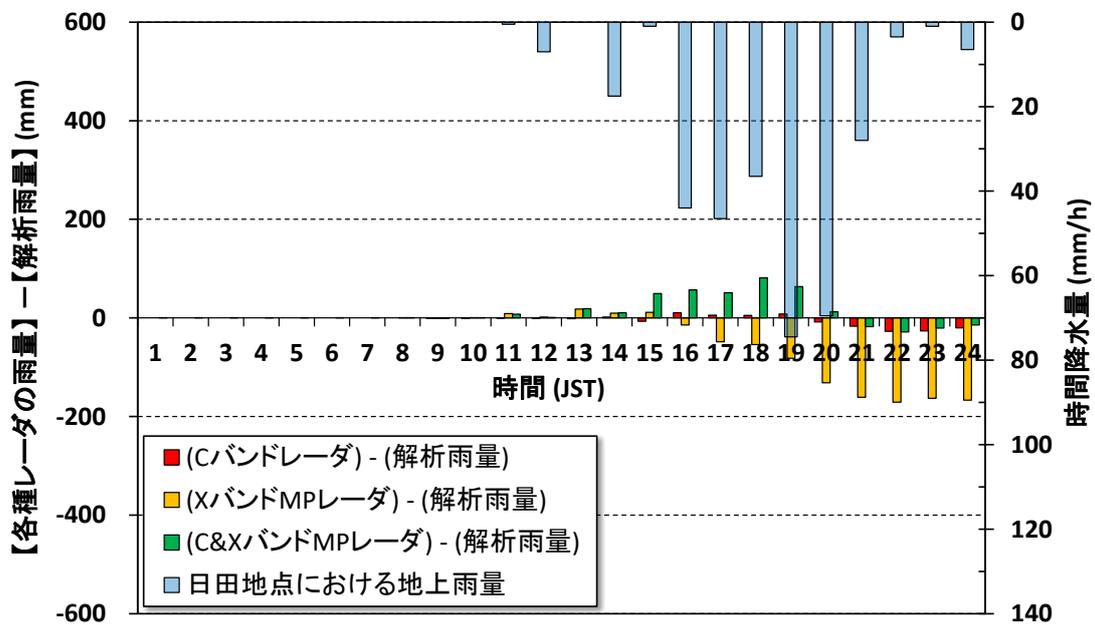


図-2.8 日田地点における解析雨量を基準と各種レーダデータとの差分値による時系列

2.2.3 まとめ

今回の降水現象を、各種レーダによる日降水量の降水分布で比較したところ、降水分布はおおむね同様であったが、日降水量の最大値は大きく異なる結果であった。その要因については、今後さらに詳細な解析が必要である。そのため、各種レーダによる降水データの利用に関しては、1種類の観測データに依存することなく、様々な観測手法による降水データを把握した上で使い分けていく必要がある。

謝辞

本検証で利用した降水データについて、解析雨量は気象庁福岡管区气象台、CバンドレーダとXRRAINは国土交通省九州地方整備局から、それぞれ提供していただいた。また、X-MPは、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)の下で、収集・提供されたものである。最後に、各種レーダの降水データの抽出に関して、(株)ケイディエムの永島健氏からサポートをいただいた。ここに記して謝意を表す。

(林義晃, 橋本彰博, 森山聡之)

2.3 再現計算およびアンサンブル予測計算

2.3.1 再現計算のモデル及び計算条件

本調査では、地域大気モデルとして(Weather Research and Forecasting model) WRFを用いる。地域大気モデルは入力データとして必要な大気解析データである NCEP FNL (National Centers for Environmental Prediction final analysis) から得る。NCEP FNLの水平解像度は25 kmであり、時間解像度は6時間である。

図-2.9に再現計算に用いる WRF の計算領域を示す。本再現計算では双方向にネストした4つの計算領域を用いる。計算領域の水平解像度は外側から、8100 m, 2700 m, 900 m, 300 mである。鉛直方向には、全計算領域とも58分割した。北九州における山地の標高は2000 m以下であり、地形効果をよりよく反映させるため、高度2000 m以下を20分割した。

標高データは WRF コミュニティーにより公開されているが水平解像度が高いもので1 km程度である。本再現計算で用いる計算領域の内側2つは水平解像度が1 km以下であるため、外側の計算領域には WRF コミュニティーが公開している標高データを用い、内側2つの計算領域には国土地理院の2次数値標高モデルデータにより置き換えた。また、WRFモデルの各パラメタリゼーションのスキームとして以下のものを採用した。雲微物理過程に Lin スキーム、積雲過程に Kain-Fritsch スキーム、惑星境界層モデルに Bougeault and Lacarrere を採用した。以上を用いて2017年7月3日9時から本豪雨の翌日2017年7月6日9時までを再現計算を行う。

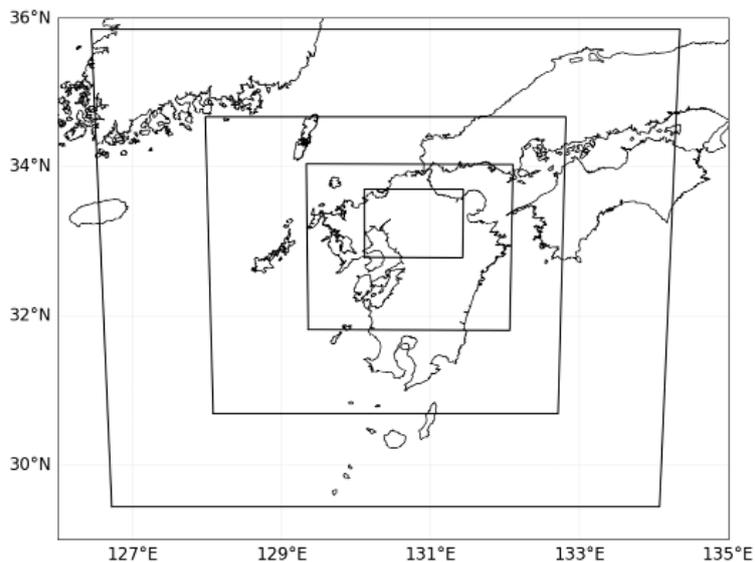


図-2.9 計算領域

2.3.2 再現計算の検証

図-2.10 に再現計算及び解析雨量による 2017 年 7 月 4-5 日の積算降水量の分布を示す。黒点は AMeDAS の朝倉観測所の位置を示す。ここで、再現計算の結果では 900 m の計算領域で得られた降水量分布の上に 300 m の計算領域での降水量分布を重ねて表示している。

図-2.10b に示すように、解析雨量では AMeDAS 朝倉観測所周辺から東側にかけて最も強い降水域が発生している。次に英彦山周辺から西にある峰部の標高が 1000 m 前後の山脈部分において強い降水を示している。そして、九重連山をおおよそ中心にして長く東西にわたり比較的強い降水量が示されている。一方、再現計算（図-2.10a）では、朝倉観測所周辺から東側にかけて最も強い降水域が得られ、解析雨量とは形状に違いがあるものの、英彦山から西にかけての降水域も含め良好な再現性を示している。これに対し、九重連山を中心

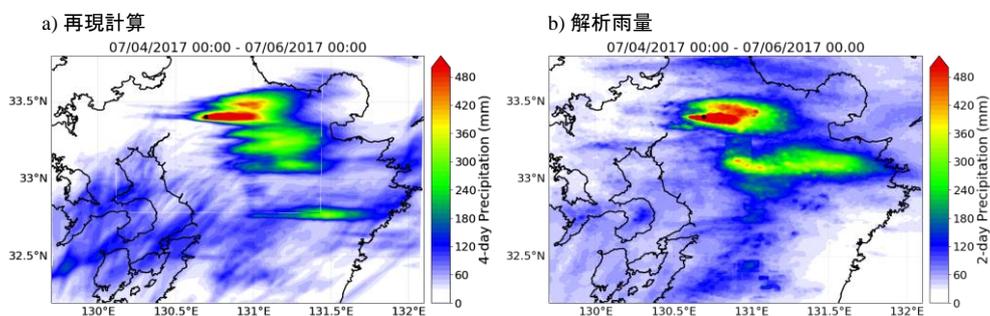


図-2.10 2017 年 7 月 4 日から 5 日の積算降水量分布。a) 再現計算結果，b) 解析雨量。黒点は朝倉観測所の位置を示す。

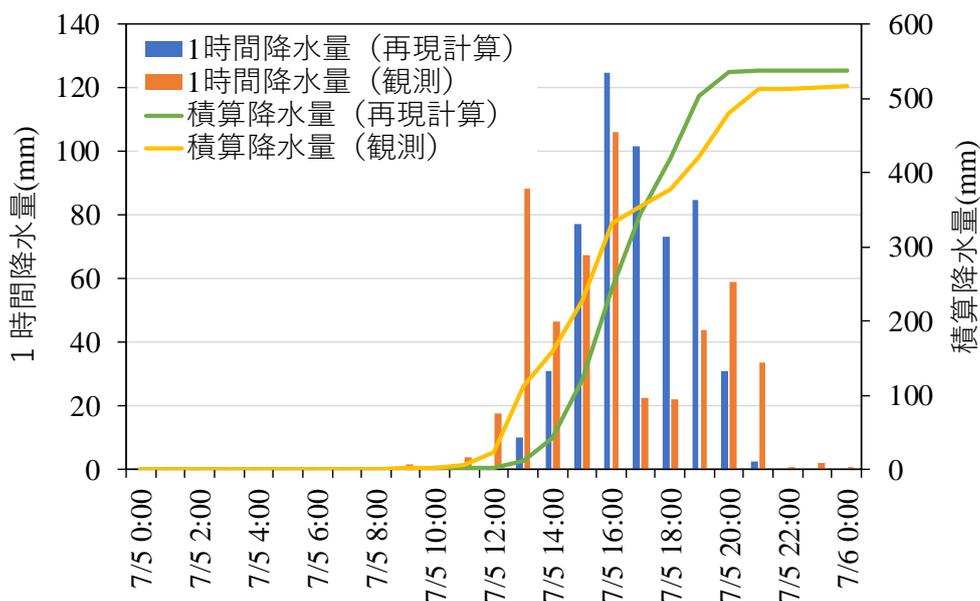


図-2.11 朝倉における再現計算及び観測データによる降水量

に東西に延びる降水領域は再現計算ではかなり過小評価されており，九重連山と英彦山の値で解析雨量にはない強めの降水分布を示している．この誤差は WRF のパラメタリゼーションオプションの選択を朝倉周辺の降水分布の再現性に注目したために生じた．しかしながら，本再現計算が朝倉周辺を対象にしていることを考慮すると，降水分布の再現性は良好であると言える．

次に，2017 年 7 月 5 日の AMeDAS 朝倉観測所における再現計算と観測データによる 1 時間水量及び積算降水量を図-2.11 示す．再現計算において降水は観測データとほぼ同時帯に生じている．特に最大 1 時間降水量が発生した時刻は観測データと再現計算で一致している．最大 1 時間降水量は観測データでは 106 mm であるのに対し，再現計算では 125 mm であった．一方で，7 月 5 日 14-16 時の 3 時間において観測データと再現計算の 1 時間降水量の値が比較的近いが他の時間ではずれが生じているが，24 時間積算降水量は，観測データでは 516 mm であるのに対し再現計算では 537 mm である．以上より，全体としては良好な再現結果が得られたと言える．

2.3.3 再現計算を元にした 3 次元大気場の解析

再現計算により得られた 3 次元大気場を解析することにより，平成 29 年 7 月九州北部豪雨の物理的要因について検討する．ここに，平成 29 年 7 月九州北部豪雨時において特徴的な結果が得られた高度 500 m における気温・風向及び 3 次元の大気中水分量（混合比）を図-2.12 に示す．

7 月 5 日午前から冷たい空気が日本海側から南下し，5 日 10 時に前線が九州北部に達し

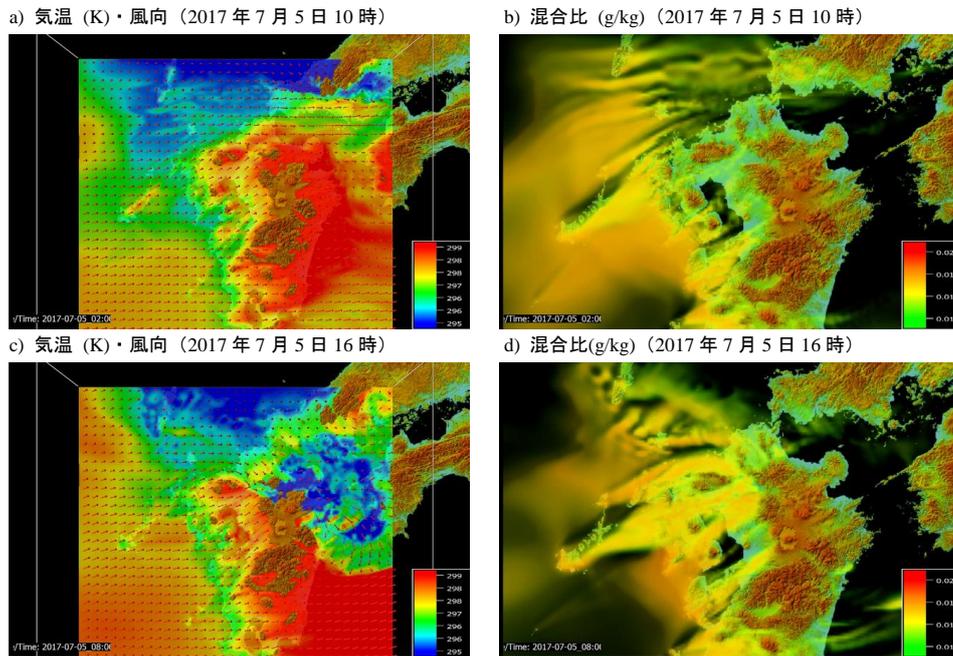


図-2.12 2017年7月5日10時及び16時における高度500mでの気温・風向（左側）及び混合比（右側）。（地形形状には国土地理院アナグリフを用いた。）

ている（図-2.12a）。16時には大きい温度勾配が朝倉付近を通り北西から南東に広がり停滞している（図-2.12c）。このことから、5日正午辺りに前線が朝倉付近に到達し、その後停滞したと考えられる。

次に、大気中水分（混合比）の流れと風向を見ると、7月5日の午前中に湿った空気が西風に運ばれ、5日10時ごろに九州に到達している（図-2.12b）。九州に到達した湿った空気は幾つかの経路を通り徐々に九州内に侵入し、その後複数の湿った空気の流れが朝倉周辺に収束している（図-2.12d）。詳しく見ると、まず南側から多良岳と雲仙岳の間で集積した高湿度の大気が朝倉周辺に向かっている。次に、五島列島付近で大気中水分が集積しており、それが多良岳の北側を通った後、筑後川に沿って脊振山の南側から朝倉周辺に流れ込んでいる。また、九州の北側を流れる湿った空気が脊振山を回り込み北側から朝倉に流れ込んでいる。気温分布の変遷とともに見ると、脊振山の北側を通る大気の流れは5日午前中に北東に向いていたが、前線の南下に伴い冷たい空気に押され5日正午付近から徐々に南に向きを変えている。そして、湿った空気がこの気流に乗り北側から脊振山を超えたところで南下し朝倉周辺に流れ込んでいる。

以上のことから、平成29年7月九州北部豪雨では、複数の経路からかつ南北から流れ込んだ高湿度の大気が朝倉周辺に収束し、一方で前線が収束地点付近に停滞していた。南北から流れ込んだ高湿度の大気が衝突したことに加え、収束した高湿度の大気が前線のために行き場を無くし上昇気流を誘発した。この上昇気流が朝倉周辺で次々に積乱雲を発達させ、

非常に強い降雨を朝倉周辺にもたらしたと考えられる。

2.3.4 アンサンブル予測計算

次に、再現計算ではなく、予測の観点から考察する。

豪雨予測をより防災的な側面から検討するには、複数の数値予報の集合であるアンサンブルから確からしい予報を得るアンサンブル予報が解決策の一つとして考えられる。このアンサンブル予報は全球モデルを用いて1週間や1ヶ月の中長期予報が運用されているが、メソスケールを表現するメソモデルや積乱雲などのより小さいスケールを表現できる局地モデルを対象としたアンサンブル予報については、十分な検討が行われていないのが現状である。そこで、朝倉地域における大雨の「見逃し」を軽減という考えのもと、豪雨が降り続いた期間である12:30から21:00までを初期値に関して摂動を与えたアンサンブル予測計算を行った。

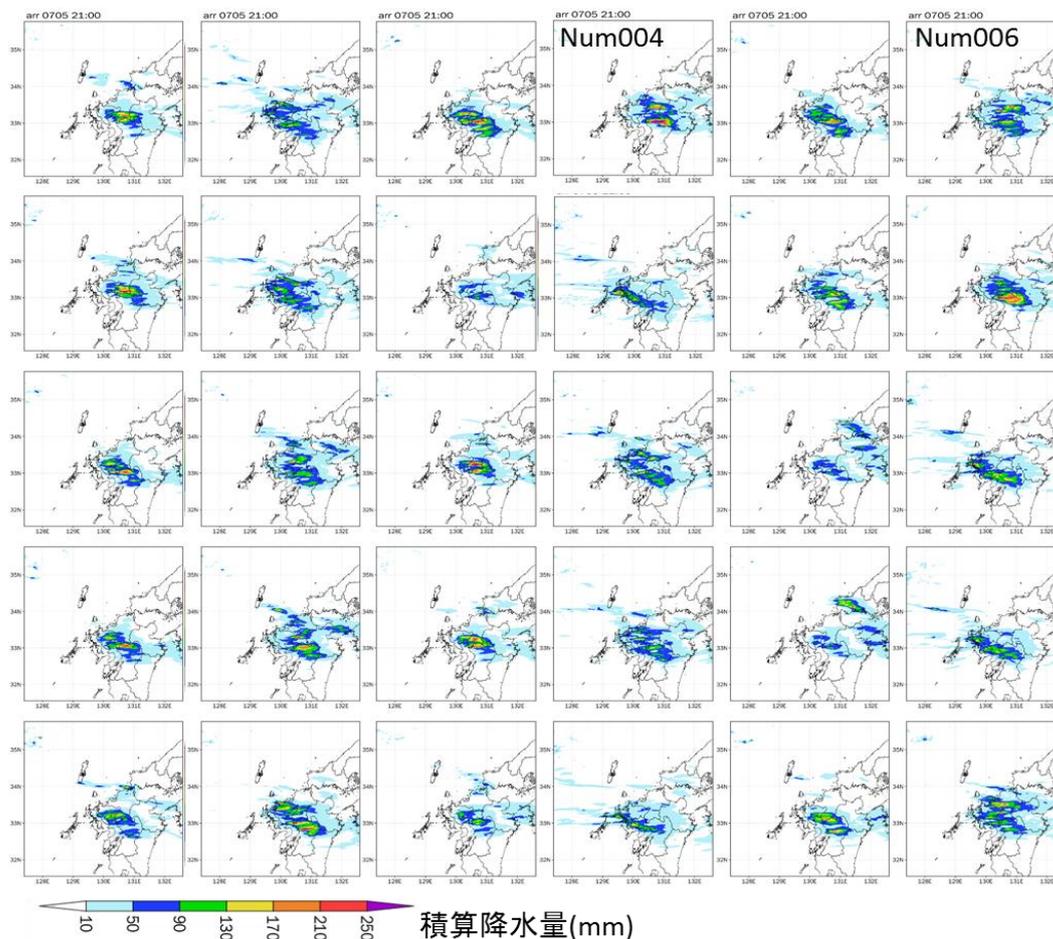


図-2.13 30 アンサンブルメンバーの8時間30分間(12:30~21:00)の予測積算降水量

数値予報モデル CReSS を用いて、初期時刻を5日12時、MSM 予測の水平風、気温、相

対湿度のデータを、海面水温は気象庁 NEAR-GOOS データをそれぞれ初期値、境界値に用いた。水平解像度は 1km、鉛直解像度は平均的に 250m とした。東シナ海から流入する下層の高相当温位域と中層の低温域が線状降水帯の発生・発達・維持の重要なトリガーの一つであるため、風上側の計算領域を広めに設定している。初期アンサンブル摂動生成手法は、BGM 法を用い、30 メンバー作成した。5 日 12:00 に BGM 法で作成した 30 メンバーを 5 日 21:00 まで予測した。

30 アンサンブルメンバー毎の 8 時間 30 分間の予測積算降水量を図-2.13 に示す。再現計算ではなく予測計算ということもあって、全メンバーともに過小予測であり、予測が困難な事例であったことがうかがえる。ただし、朝倉地域に線状の降水分布がみられるメンバーも複数あり、特に Num004 と Num006 はその形状をうまく予測していた。特に予測リードタイムが短い 12:30~15:00 の予測積算雨量に関しては良い再現性であった (図-2.14)。それらのメンバーでは、背振山地の北側と南側からそれぞれ水蒸気を含む気流が流れ込み収束を起こしていたメンバーであることから、このことが本事例の要因の一つとして考えられる。しかしながら、予測時間が 15:00 を超えてくると予測精度が低くなっていった。その理由として、やはり背振山地の北側と南側からの水蒸気の供給が継続しなかったことである。

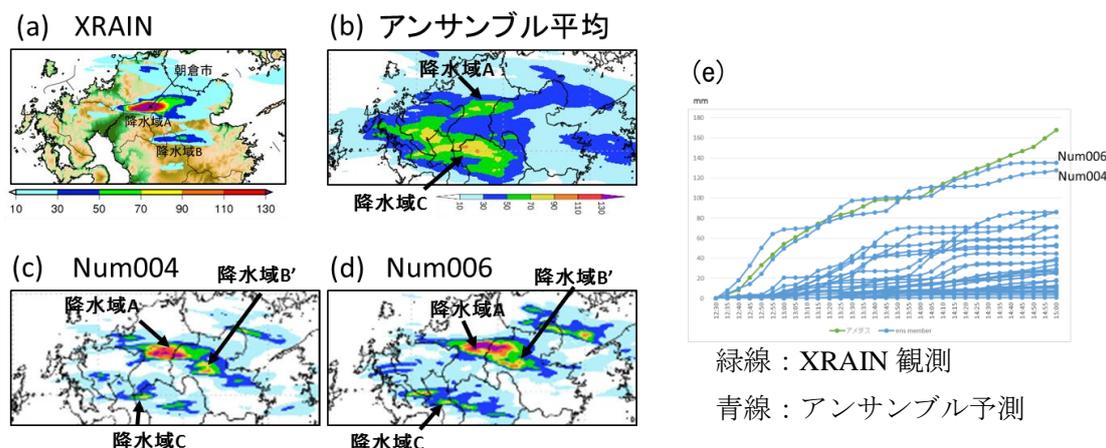


図-2.14 2 時間 30 分 (12:30~15:00) 積算降水量。 (a) XRAIN, (b) アンサンブル平均 (c) Num004, (d) Num006, および、(e) 積算雨量の時系列変化

最後に、将来への展望も含めて、降水予測に期待するところを整理する。

- ・ 大気上層の寒気と大気下層の水蒸気の流入を的確に予測する必要がある。特に九州地域の西側は海であって現状は観測データが限られている。今後、特に水蒸気は観測手段を含めて検討していくことが望まれる。
- ・ 降水予測技術もさらなる発展が必要である。モデル初期値にはノイズが含まれるため、今回提示したようなアンサンブル予測が必要であり、今後はアンサンブル平均値やばらつきといった統計量のみではなく、各メンバーそのものを活かすようなアンサンブル

ル計算の利用手法に関して、目的ベース（避難なのか、河川管理なのかなど）で検討していくことが望まれる。一方で、観測値のデータ同化も近年研究が進められている技術であり、特に気象レーダー観測は高分解能で雨雲の詳細構造を捉えられるため、短時間予測に大きく寄与すると考えられるため、今後詳細な検討が必要である。

- ・ 今回のような梅雨の線状降水帯事例では、大河川というよりも中小河川で災害が引き起こされる可能性が高い。中小河川では水位観測点などが極めて少なく、そのため降雨予測情報を減災に直結させる技術開発が必須である。

（石田 桂，山口弘誠）

参考文献：

- 4) 気象研究所：平成 29 年 7 月 5-6 日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について～上空寒気による不安定の強化と猛烈に発達した積乱雲による線状降水帯～，報道発表資料，8p，2017.
- 5) 中北英一，森元啓太郎，峠嘉哉：5km 解像度領域気候モデルを用いたゲリラ豪雨生起頻度の将来変化推定，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73, No.4, pp.I_133-I_138, 2017.
- 6) 森山聡之，中山比佐雄，平野宗夫：XRAIN を用いた平成 24 年九州北部豪雨の解析，水文・水資源学会 2013 年度研究発表会要旨集，pp.122-123, 2013.

第3章 流域毎の被災状況

3.1 佐田川（黒川，寺内ダム，道路被害を含む）

3.1.1 黒川・道路被害

高木村における人的被害 3名

道路被害による村落の孤立化

10月22～24日の第3回現地調査時においても，寺内ダム側の588号線も北川上流部へ下る79号線も関係者以外立ち入り禁止

・調査内容

A,B 2地点（588号線）における道路崩落被害調査

高木村の被害調査

・現地調査地点



図 3.1.1 寺内ダムと黒川流域の調査地域



図 3.1.2 調査地点拡大図

・ A 地点における道路崩落被害調査 ～黒川右岸の側岸浸食，道路基盤浸食 約 3.2m

現地は左にカーブした後の直線部であり，寺内ダムに向かってやや勾配がついている．図 3.1.3 の出水前の写真から，この地点の黒川はかなり河道が狭くなっていることが伺え，そこに大量の水が流れたことで非常に大きな流速が生じたものと考えられる．左岸の樹木における痕跡高は，右岸の 3.2m よりも低いため，最大水位は道路面までは達していないものと考えられる．その為，右岸の道路基盤底部の浸食による上部崩落と考えられる．図 3.4 の左側の道路崩落は，道路の殆どが崩落しており，図 3.1.5 の計測によれば崩落高さは 3m 強である．

復旧道路奥の斜路右側から河道が湾曲してくるが，斜路下部の右岸護岸は被害を受けずに残っている．その左岸側の林の中に痕跡物や土砂が大量に溜まっていること，A地点に入る手前の右湾曲部は左岸に岩が露出していることから，一度右に湾曲した後，左に湾曲してA地点に入る平水時の河道に比べ，出水時は直進性が高く，岩肌に見える右湾曲部で右に湾曲した後は，図 3.1.6 に矢印で示すようにほぼ直進してA地点に流れ込んだことが伺える．それによってA地点の右岸が水衝部となり，大きな河岸浸食を引き起こしたのと考えられる．

図 3.1.7 に，A 地点右岸の露出部を示す．道路基盤は一見固い岩のように見えるが，実はやや脆く，手で簡単に砕くことができる．その為，出水時の大きな流速でも比較的容易に浸食されたものと考えられる．

・ B 地点における道路崩落被害町 ～黒川右岸の側岸浸食，道路基盤浸食

図 3.1.8 に，出水前の B 地点の様子を示す．A 地点と同様に，右側奥に河道があるが，かなり河道が狭いことが推測される．ここに大量の水が流れ込んだことで，非常に大きな流速が発生したものと考えられる．B 地点はその上流部がやや広い場所となっており，ここで出水が一気に集約されて加速域になり，直線部でありながら非常に大きな河岸浸食が発生したものと考えられる．

B 地点も同様に，右岸の道路基盤の浸食による上部崩落と考えられる．左岸の林の痕跡物

高さは右岸の道路面よりも低いので、最大水位は道路面まで達していないものと考えられる。図 3.1.9 左側に見られるように道路下部の壁面工がそのまま下にずり落ちている。復旧道路面がやや高いので見にくいですが、壁面工自体は残っていて全体がずり落ちていることから、壁面工底部がとくに洗堀されたものと考えられる。

図 3.1.10 に、B 地点下流部の右岸を示すが、この場所では道路下部の壁面工が認められず、道路のほとんどが崩落している。崩落の様子も、上部がややせり出して残り、下部が激しく浸食され、道路上部奥の樹木は被害を受けていないことから、最大水位は道路面かそれ以下であり、道路面よりも下部で大きな流速が生じて浸食されたものと考えられる。

図 3.1.11 に壁面工の不連続部を示す。写真からわかるように、壁面工がある場所は上部道路がやや残っているが、途切れた後はほとんど残っていない。壁面工自体も残存している為、壁面工が道路保護にある程度有効であると考えられるが、残存部も全体がずり落ちた結果、上部道路の一部崩落を招いていることから、壁面工底部の洗堀に対する対策が求められる。



図 3.1.3 出水前の A 地点 (Google Street View から引用)



図 3.1.4 出水後の A 地点



図 3.1.5 道路面の崩落高さ



図 3.1.6 出水時の河道 (Google Map から引用)



図 3.1.7 A 地点右岸



図 3.1.8 出水前の B 地点 (Google Street View より引用)



図 3.1.9 出水後の B 地点



図 3.1.10 B 地点の道路基盤崩落



図 3.1.11 B 地点の道路基盤崩落

・ A, B 地点の総括

A, B 地点の問題は、道路基盤部の河岸浸食による上部崩落であり、北川上流域に下る道路も寸断されたことから、復旧道路が敷設されるまで長期間にわたって孤立集落が発生し

たことである。A、B 両地点とも直線部であるが、湾曲部よりも河岸浸食が激しいことも共通の特徴である。A 地点は出水の直進性による水衝部、B 地点は加速域となった為に大きな河岸浸食が生じたものと考えられる。こうした山間部の河川脇の道路はその基礎部の壁面工が重要であり、とくにその底部の浸食対策が求められる。

・高木村の被害調査

高木村では 3 人の人的被害があった。図 3.1.12～14 に、その被害があった場所を示す。図 3.1.12、13 に示すように、被災地の河川は非常に小規模であり、今回の水害の特徴である、小規模河川の急激な増水による被害であることがわかる。図からわかるように、平水時は水位が非常に低いものの、出水時は、被災状況からみて軒下程度まで水位が上がったことが伺え、その差は 2～3m 程度と考えられる。また、被災地はやや急勾配になっており、それだけの河川水が非常に大きな流速で家屋に衝突したものと考えられる。

こうした多くの小規模河川に有効な出水対策を施工することは非常に難しく、こうした地域ではハード的な対策よりも、避難場所・経路の確保と非難のタイミングの判断といったソフト的な対策の充実が求められる。(鵜崎賢一)



図 3.1.12 高木村被害状況①



図 3.1.13 高木村被害状況②



図 3.1.14 高木村被害状況③

3.2 桂川流域の被害の概要

平成 29 年 7 月 5 日に発生した豪雨は、24 時間降水量 894mm（福岡県北小路公民館雨量観測所）を記録し、福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市を中心に甚大な被害をもたらした。本豪雨災害では、河川ごとにその様態が大きく異なることも特徴のひとつであり、今後の復旧・復興を考えるためにも河川ごとに詳細な被災過程を明らかにしておく必要があると考えられる。本研究で注目する桂川流域でも、人的被害に加え、広範囲な浸水被害が生じた。本報では、桂川流域の被災状況調査を行った結果を報告する。

桂川は流域面積 45.4km²、流路延長 30.1km で下流端では筑後川に合流する河川である。

上流から妙見川、新立川、荷原川が順に合流し、蛇行しながら平野部を流れ下っており、治水地形分類では氾濫平野と自然堤防地帯からなる領域である。南部では堀川用水などいくつかの用水が東西方向に整備されている。基本的には自然堤防上に住宅地、氾濫平野に水田が分布している。

まず、多くの箇所では河川護岸への被害が生じた。桂川右岸に位置していた比良松中学校の一部の建物は侵食により大きな被害を受けた。次に、越水と 3ヶ所の破堤により溢れた洪水流は、上記の地形的な特徴により浸水面積 1,106ha と広範囲に到達した（国土交通省委員会資料）。住宅地の多くは自然堤防上に位置していたが、多数の家屋で浸水被害が生じた。また、氾濫流が水田横の道路を侵食している箇所が複数確認されており、氾濫流がある程度以上の速度を有していたことが推察される。図に痕跡水深の観測結果を示す。

領域 1, 2 とともに大部分の箇所で 0.5m～1.0m 程度の水深が生じており、自然堤防上でも床上浸水の被害が生じたことが分かる。実際に、桂川流域全体では床上浸水 401 戸、床下浸水 420 戸の被害が生じている。（国土交通省委員会資料）また、領域 2 の妙見川右岸では、一箇所 2m を越える浸水深が記録されている。この地区は高速道路、幹線道路と川に囲まれており、下流へは幹線道路の下を通る水路で排水する仕組みになっていたと考えられる。

図にこの水路を閉塞した場合の、シミュレーションを行った結果を示す。シミュレーションは iRIC を用いて行った。その結果、同地点の浸水深を概ね再現することが出来た。

このことより、妙見川が破堤し、その氾濫水と共に、流下した流木によりこの水路が閉塞し、結果的に幹線道路の高さ程度まで水位が上昇する結果となったことが分かった。

【桂川本川】

比良松中学校付近で一カ所破堤しておりそこから氾濫している。土砂による河道の埋塞は見受けられなかった。また、各支川が合流地点以降でも氾濫している。

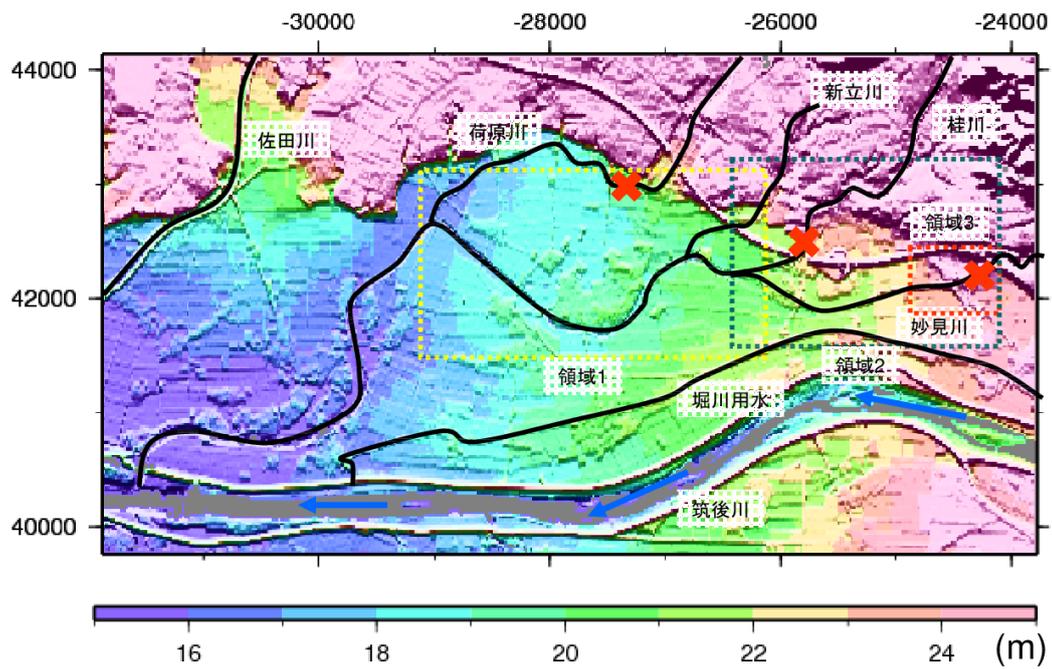


図 3.2.1 桂川流域の地形図



図 3.2.2 道路被害の状況

【妙見川】

桂川の支川である妙見川では、右岸側が 1 か所破堤していた。そこから住宅が数件集まった場所まで洪水流が流れてしまい、その場所で浸水被害がでた。特に、その住宅街の排水の役割を担っていたと思われる水路に流木がつまったことで、辺り一面がプールのようになり浸水の深さが大きくなったと考えられる。流速が出ていなかったため、住家の破壊はなかった。



図 3.2.3 妙見川の破堤地点



図 3.2.4 流木が堆積した箇所



図 3.2.5 災害時の破堤地点周辺の状態

【荷原川】

破堤が1地点で2箇所あり，左岸側で被害が大きくなった．地形的に勾配が小さく流速が出なかったとみられ，浸水被害があったものの，住家の破壊はなかった．



図 3.2.6 荷原川の破堤地点



図 3.2.7 破堤地点から氾濫流が流れた集落に向かって撮影

桂川流域は，自然堤防上でも床上浸水が発生していることなど水田のみならず住宅地にも大きな被害が生じた．また，流木により被害が拡大した地区もあり，復旧復興時には何らかの対策を講じる必要がある．（田井明）

3.3 奈良ケ谷川

3.3.1 奈良ケ谷川及び今次災害の概況

a) 奈良ケ谷川流域

奈良ケ谷川は福岡県朝倉市東部を北東から南西方向に流れ、流路長4.1km、流域面積3.8km²の山あいを流れる小河川である¹⁾。流域内には、農業用水の確保を目的として、山の神ため池と鎌塚ため池が存在している。また、下流には国道386号線が通り、この国道を中心に山田地区の集落が位置している。さらに下流の堀川用水には朝倉市の観光地として有名な“三連水車”が存在している。

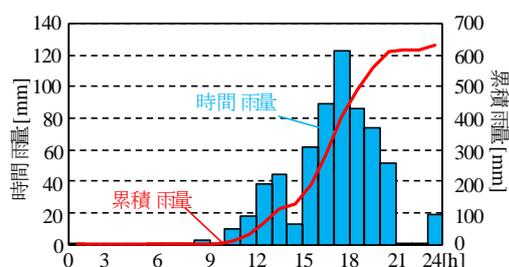


図 3.3.1 奈良ケ谷川における流域平均時間雨量と累積雨量の時間変化

b) 気象状況

今次豪雨災害における降雨状況として、奈良ケ谷川の流域平均雨量と累積雨量の時間変化を図3.3.1に示す。流域平均雨量の算定には、解析雨量（気象庁²⁾）を用い、奈良ケ谷川流域における雨量を抽出・平均したものである。累積雨量は2017年7月5日0時から求めたものである。これより、降雨は18時にピークとなり（122mm/h）、日雨量は634mmを記録した。

c) 被害状況

今次豪雨災害により、奈良ケ谷川流域では、甚大な被害が生じた。中でも、中流に位置する山の神ため池は決壊し、下流の山田地区では広範囲の洪水氾濫被害が発生し、多数の流木が散乱した。また、三連水車がある堀川用水は土砂と流木で埋まり、三連水車にも流木が大量に絡みついたため、動作が停止するという被害を受けた。

3.3.2 現地調査に基づく被害状況の把握

a) 現地調査の概要

今次災害の被害状況を把握するために、奈良ケ谷川流域における現地調査を発災1週間後の7/12から、7/20、8/2、9/11-12、の計4度にわたり実施した。現地調査では、洪水被害調査として、河道及び氾濫域の洪水痕跡調査、家屋調査を行った。また、同時に山の神ため池・鎌塚ため池の被災調査も行った。ため池被害に関する詳細は4.3に示す。

調査範囲は山の神ため池の上流から筑後川との合流点までの約2.5kmである。洪水痕跡調査では測点の緯度・経度・標高をVRS方式RTK-GNSS（Trimble社R4、R6）により測定した。家屋調査では、奈良ケ谷川沿いに位置する家屋の被害状況を一軒ずつ目視により判定した。判定の基準は、1) 流失（基礎部分の流失の有無も同時に判定）、2) 二階損壊、3) 一階損壊、4) 一階一部損壊、5) 浸水のみ、6) 被害無の6段階に設定した。



図 3.3.2 奈良ヶ川流域の被害状況

b) 流域全体の概況

奈良ヶ谷川流域における洪水被害状況を図3.3.2に示す。山の神ため池の決壊状況としては(同図(a))、ため池の洪水吐を含む堤体部分が決壊し、流失している様子が見て取れる。また、決壊後のため池内には流木が多数確認された。また、同図(b)に示す鎌塚ため池は洪水吐周辺が大きく侵食され、洪水吐下流水路が崩落・流失していたが、決壊には至らなかった。下流の山田地区や筑後川との合流点付近には、同図(c)、(d)のように大量の流木が堆積している様子が現地調査より確認された。

c) 家屋被害・痕跡水深状況



図 3.3.3 家屋被害状況

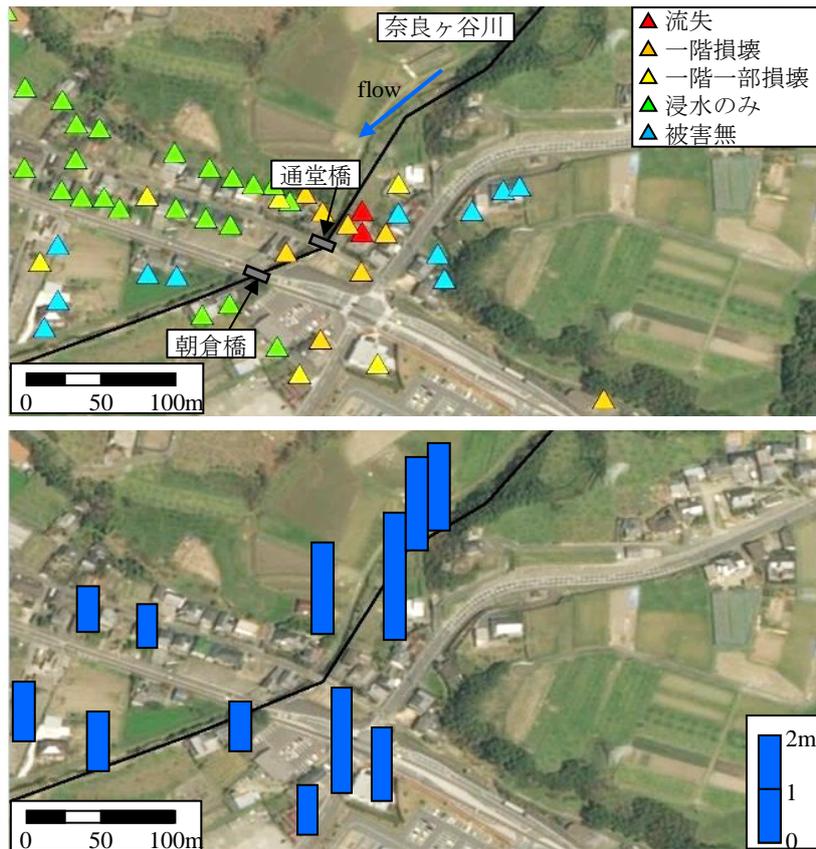


図 3.4 家屋被害（上）と浸水深（下）の空間分布

家屋被害分類（図3.3.3）に基づいて、奈良ヶ谷川下流域山田地区における家屋被害と痕跡浸水深の空間分布を図3.3.4に示す。この範囲では、河川沿いの狭い範囲に流失や一階

損壊などの家屋被害が集中しており、痕跡水深も河川に沿った場所で2m以上の地点が多数確認された。また、この地区では死者3名（2世帯）の被害が生じており、1軒は流失、もう1軒は一階損壊という家屋被害を受けていた。

3.3.3 まとめ

奈良ヶ谷川では、家屋・人的被害に関する現地調査より、決壊が生じなかった妙見川は浸水域が広いものの家屋の流失被害がなかったが、奈良ヶ谷川では局所的な範囲で家屋流失が発生しており、洪水インパクトは奈良ヶ谷川の方が大きかった。

参考文献：

- 1) 国土交通省九州地方整備局・福岡県：筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会（第1回）～平成29年7月九州北部豪雨～， http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/17090703siryo2.pdf, 2017.
- 2) 気象庁：解析雨量， <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/kaiseki.html>（閲覧日：平成29年9月21日）。

（二瓶泰雄・守屋博貴）

3.4 北川

3.4.1 北川及び今次災害の概況

a) 北川流域

北川は図 3.4.1 のように、福岡県朝倉市東部を北東から南西方向に流れ、流路長 4.5km、流域面積 6.6km² である¹⁾。北川右岸側には麻底良山、左岸側には米山が位置し、山あいを通る中小河川である。上流域の道目木地区には山の中を流れる沢が多く存在している。下流域の杷木志波地区には国道 386 号線が通り、下流の本陣橋、その上流約 460m 地点に神田橋が位置する。

b) 気象状況

今次豪雨災害における降雨状況として、北川の流域平均雨量と累積雨量の時間変化を図 3.4.2 に示す。流域平均雨量の算定には、解析雨量（気象庁²⁾）を用い、北川流域における雨量を抽出・平均したものである。累積雨量は 2017 年 7 月 5 日 0 時から求めたものである。これより、降雨は 15 時～21 時に集中し、18 時には 120mm/h、日雨量は 606mm の非常に強い降雨を記録した。

c) 被害状況

今次豪雨災害により、北川流域では大量の流木が上流の山間部より流失した。北川流域での総流木発生量は 27,616m³ と推定され、朝倉市全体の流木発生量の 13%であった³⁾。また、単位流域面積当たりの流木発生量は 4061m³/km² で、寒水川、奈良ヶ谷川に次ぐ 3 番目の大きさとなった³⁾。これに伴い、図 3.3 のように、北川下流域の杷木志波地区に大量の流木が流れ込み、下流域の本陣橋には大量の流木捕捉と河道閉塞、周囲の洪水氾濫が確認され、本陣橋直上流では大きな洪水被害が発生した。

今次豪雨災害の死者・行方不明者数は全体では 41 名である。このうち、朝倉市では 34 名であり、さらに北川流域では 4 名であった。この 4 名とも、北川上流域の道目木地区に集中していた。

3.4.2 現地調査に基づく被害状況の把握

a) 現地調査の概要

今次災害の被害状況を把握するために、北川流域及び周辺河川での現地調査を発災 1 週



図 3.4.1 北川流域



図 3.4.2 北川における流域平均時間雨量と累積雨量の時間変化 (2017/7/5)

間後の7/12から、7/19-20、9/12、の計3度実施した。現地調査では、河道及び氾濫域の洪水痕跡調査、家屋・橋梁被害調査、流木・土砂堆積状況調査等を行った。

調査範囲は上流の道目木地区から筑後川との合流点までの約3.5kmである。洪水痕跡調査は計64点、家屋被害調査は計190棟（住家・非住家含む）、橋梁被害調査は計7つの橋梁にて行った。この際、洪水痕跡調査では測点の緯度・経度・標高をVRS方式RTK-GNSS（Trimble社R4、R6）により測定した。家屋調査では、北川沿いに位置する家屋の被害状況を一軒ずつ目視により判定した。判定の基準は、1）流失（基礎部分の流失の有無も同時に判定）、2）二階損壊、3）一階損壊、4）一階一部損壊、5）浸水のみ、6）被害無の6段階に設定した。また新井出橋から本陣橋の区間（約1.7km）では、レーザースキャナー（VUX-1、RIEGL製）を搭載したUAV（SPIDER-eX、ルーチェサーチ株製）を用いた航空レーザー測量を行い、被災後の地盤高調査を行った。流木堆積状況については被災後の航空写真より本陣橋周辺を調べ、現地調査にて流木長や胸高直径を測定した。

b) 流域全体の概況

北川全体における洪水状況を把握するために、現地調査によって得られた被災後の地盤高と痕跡浸水深の縦断変化を図3.4.4に示す。図中には、航空写真により判読された被災前後の川幅の縦断変化も表示している。なお、地盤高や痕跡浸水深の一部は河道内も含まれるが、大部分は氾濫域である。まず地盤高データより、下流域では概ね1/70の勾配となっているが、上流域（合流点から3km）では1/25となっており、上～下流で急激に変化している。川幅は、被災前は上流域では3-7mであり、下流域では15-20mであった。被災後における氾濫域を含む川幅は最大146mと被災前と比べて大きく広がると共に、山あいの低地部分全体が河川となった様相を呈している。痕跡浸水深は最大で上流域では2-5m、下流域では2m程度となり、痕跡浸水深も縦断方向に大きな差が生じている。

c) 家屋被害・痕跡水深・土砂堆積状況

上流域（道目木地区）と下流域（神田橋から本陣橋）における家屋被害・洪水氾濫状況を

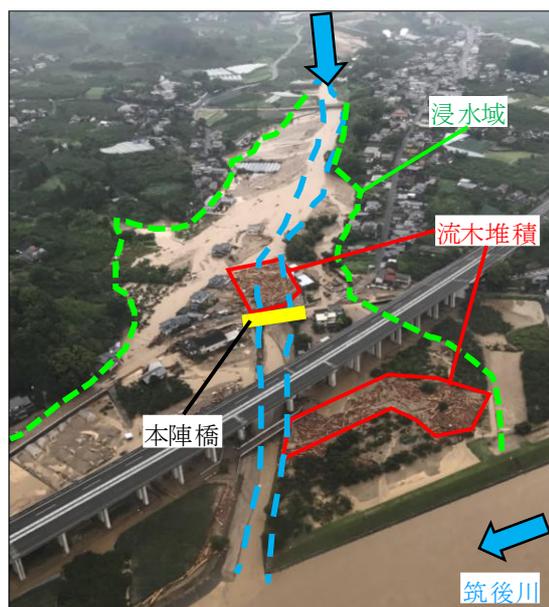


図3.4.3 北川下流域の流木堆積（2017年7月6日午後、九大・矢野教授撮影）

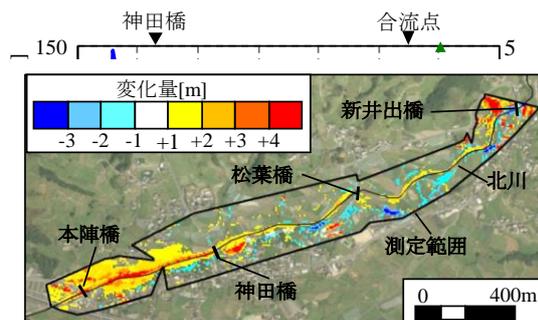


図3.4.6 UAVによる土砂堆積深マップ

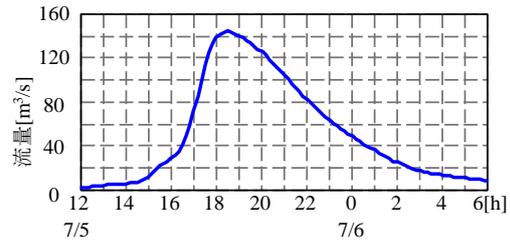
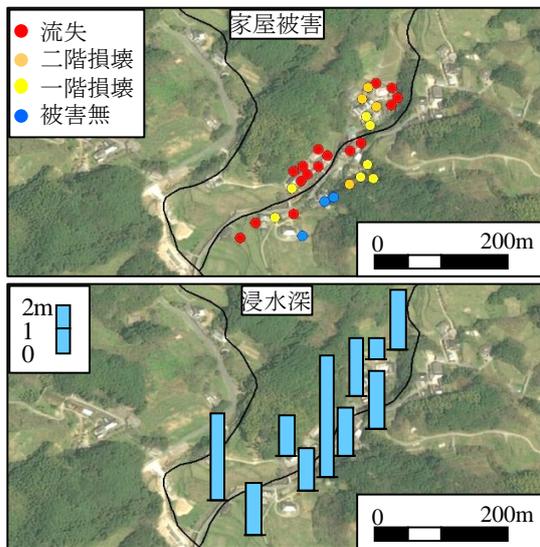
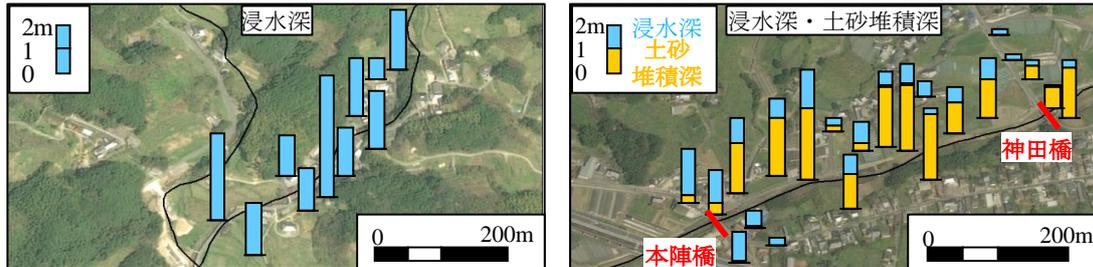


図 3.7 上流端流量



(a) 上流域 (道目木地区)

(b) 下流域 (神田橋から本陣橋)

図 3.4.5 家屋被害 (上) と浸水深・土砂堆積深 (下) の空間分布 (上流域は土砂堆積深を除外)

詳細に把握するために、家屋被害及び浸水深・土砂堆積深の空間マップを図 3.4.5 に示す。この土砂堆積深は、現地調査で得られた被災後の地盤高 (RTK-GNSS) と国土地理院・数値標高モデル (DEM, 下流域 5m, 上流域 10m メッシュ) の差で求めたが、上流域の解像度が粗すぎたため、ここでは下流域のみ表示する。まず、上流域では、流失が 16 棟と突出しており、これは道目木地区の全家屋数のおよそ半分であり、甚大な家屋被害が発生した。浸水深も概ね 2m を越えており、5m の浸水深を記録した地点近くの家屋も流失した。一方、下流域では、家屋被害は左岸よりも右岸側に集中しており、これは右岸の方が相対的に低地が広がっていたためである。また、本陣橋に近い家屋ほど被害が大きく、流失は 5 棟、一階損壊は 4 棟もあった。浸水深と土砂堆積深としては、全体的には土砂堆積深が 2m 程度、浸水深が 1m 程度であり、土砂堆積が顕著である。また、本陣橋付近の右岸・左岸側共に、相対的に浸水深が大きい (最大 1.7m)。これは、本陣橋付近では河道閉塞し新たな流路が形成され、流れが集中したためと考えられる。

UAV により得られた詳細な土砂堆積深マップを図 3.4.6 に示す。ここでは、UAV により計測された被災後の地盤高と被災前の DEM データの差を表示している。これより、河道を中心に測定範囲内全体で、土砂堆積深は正に大きいことが分かる。これらより測定範囲において算出された正味の土砂堆積量は約 22 万 m^3 となった。北川流域での土砂発生量は 66 万 m^3 となっており³⁾、この北川下流域に発生量全体の 1/3 が堆積したことが分かる。

3.4.3 平面二次元氾濫解析による土砂堆積・流木捕捉効果の検討

a) 数値計算の概要

北川下流域での洪水氾濫状況，土砂堆積，橋梁部の流木捕捉影響を調べるため，北川下流域における平面二次元場の洪水氾濫・河床変動解析と，その上流端流量算出のための降雨流出解析を行った．上流端流量算出には，降雨流出氾濫モデル（Rainfall-Runoff-Inundation モデル，以下 RRI モデル）⁴⁾ を用いた．RRI モデルにより得られる各メッシュの流量のうち，氾濫解析用計算領域の上流端のデータを抽出した．平面二次元計算では，iRIC Nays2DH⁵⁾ を用いて，流れと河床変動の解析を行う．計算対象範囲は，神田橋上流から筑後川との合流点までの流下方向に 800m，横断方向に 700m とした（図 3.1 中の白枠）．計算格子サイズは 5m で，地形データとして国土地理院・DEM（5m メッシュ）を使用した．本計算での境界条件としては，上流端には RRI モデルにより得られた流量の時系列変化を与え（図 3.4.7），下流端は等流条件とする．計算期間は発災した 2017/7/5 12:00～7/6 6:00 とする．本陣橋の河道閉塞が流木と土砂で生じていたことに注目して，Case1：水のみ，Case2：流木捕捉，Case3：土砂移動，Case4：土砂移動・流木捕捉の計 4 ケースを設定する．Case3，4 では，掃流砂を考慮した河床変動解析を実施し，河床材料の粒径は 0.3mm と設定した．また，この時の上流端の給砂条件は平衡流砂量の 2 倍を与えた．また，数値解析にて流木挙動を直接考慮することは困難であるため，流木捕捉状況を模した河道閉塞状況のある時刻に瞬間的に与える．すなわち，Case2，4 では図 3.4.3 を参考に実際に流木が捕捉された本陣橋上流の約 750m² の範囲を完全に河道閉塞されるよう設定した．流木捕捉に関しては，住民の聞き取りより 16～18 時に発生したと考えられ，ここでは，17 時に瞬時に捕捉されるとした．なお，流木捕捉を段階的に与える計算を予備的に実施したが，ピーク水位などは瞬時に与える場合と大差ないことが確認されている．

b) 計算結果と考察

図 3.4.8 は Case1 と Case4 における浸水深コンターの時間変化を示す．ここでは，流木捕捉直後の 7/5 17:10，流入流量のピークとなる 18:30，7/6 0:00 である．これより，17:00 頃より右岸側の浸水が始まり，Case4 では 17:10 にて右岸側にて氾濫域が急激に拡大した．Case1 では，18:30 に浸水深のピークを迎えるが，Case4 では，Case1 と比べて，氾濫域は広く浸水深は大きい．また 7/6 0:00 では，Case1 では洪水氾濫がほぼ解消されたが，Case4 ではピーク時とほぼ変わらぬ浸水範囲を継続した．

図 3.4.9 に現地調査で得られた痕跡水位と 4 ケースの計算値のピーク水位の縦断分布を示す．これより，Case4 では，計算領域上流側で痕跡水位と概ね一致しているが，本陣橋周辺では 1～1.5m 程度過小評価していることが分かる．これは，計算では土砂の堆積分布を正確に再現できていないことが原因だと考えられる．次に，土砂・流木の影響を図 3.9 と氾濫水量の時間変化（図 3.4.10）より検討する．図 3.4.9 より，Case4 は Case1 よりも全体的に 2m 程度水位が高く，中でも Case3 は計算領域上流側で，Case2 では本陣橋周辺で水位が上昇していることが確認できた．また，図 3.4.10 より Case2，4 とともに流木捕捉直後に氾濫水量は急上昇し，土砂を含む Case3，4 は氾濫が長期にわたり継続している様子が確認できた．以

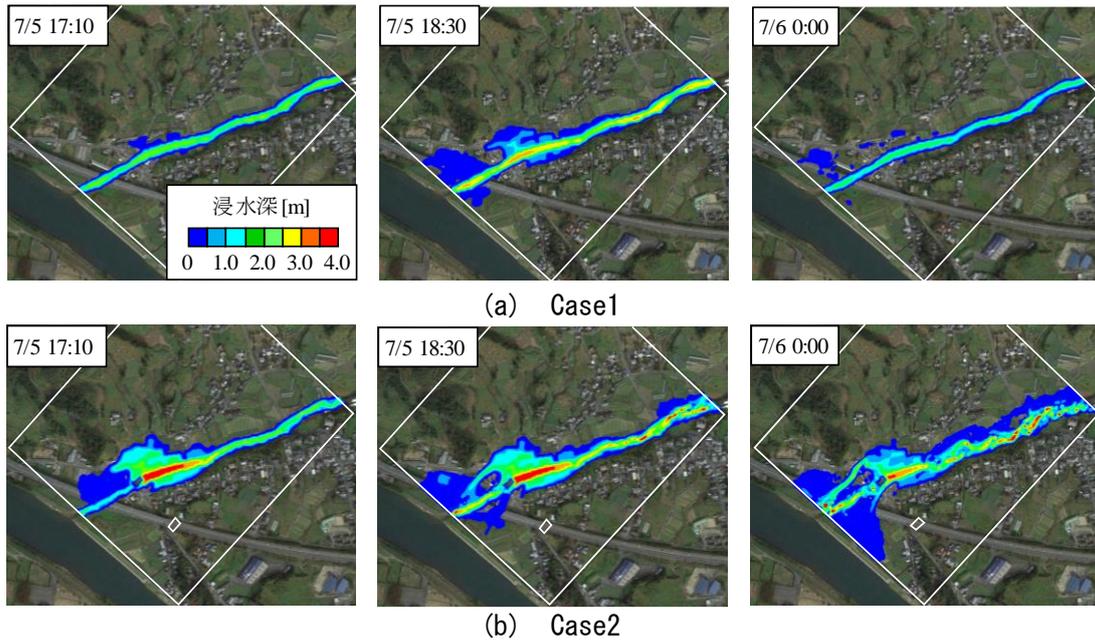


図 3.4.8 浸水深コンターの時間変化

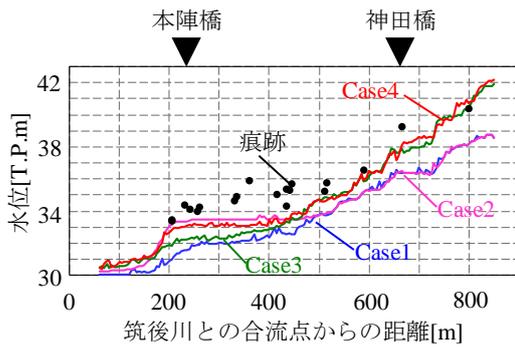


図 3.4.9 水位縦断変化

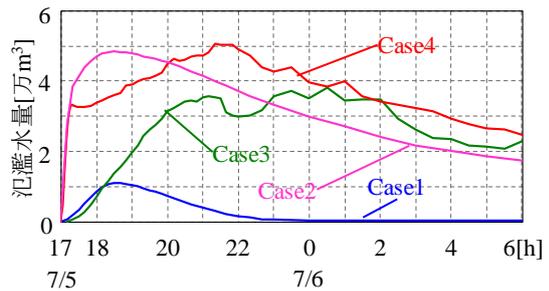


図 3.4.10 氾濫水量の時間変化

上より、土砂移動・堆積は計算領域の上流側の水位上昇と氾濫の長期化、流木捕捉は橋梁周辺の水位上昇と氾濫水量の急激な増加に大きく影響していたことが示された。

3.4.4 まとめ

- 1) 洪水・家屋被害に関する現地調査により、北川上流の道目木地区と下流の本陣橋周辺に被害が集中し、上流部では斜面崩壊と洪水、下流部では土砂移動と橋梁部の流木捕捉が主な氾濫要因であった。
- 2) 土砂移動・堆積は、河道全体の水位上昇、浸水時間の長期化に、流木捕捉は、橋周辺の水位急上昇、氾濫水量の大幅増加に大きく寄与し、洪水氾濫被害を助長させていたことが示された。

参考文献：

- 3) 国土交通省九州地方整備局・福岡県：筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会（第1回）～平成29年7月九州北部豪雨～、http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/17090703siryo2.pdf, 2017.

- 4) 気象庁：解析雨量，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/kaiseki.html>（閲覧日：平成 29 年 9 月 21 日）。
- 5) 国土交通省九州地方整備局・福岡県：筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会（第 1 回）～平成 29 年 7 月九州北部豪雨～，http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/17090703siryo2.pdf，2017。
- 6) 佐山敬洋，岩見洋一：降雨流失氾濫（RRI）モデルの開発と応用，土木技術資料，Vol56，No6，pp.18-21，2014。
- 7) iRIC Software Nays2DH Solver Manual：<http://i-ric.org/ja/download/get/yis28y>（閲覧日：平成 29 年 9 月 21 日）。

（二瓶泰雄・矢野真一郎・峯浩二）

3.5 寒水川の被災状況

3.5.1 寒水川の概要

筑後川水系に属する寒水川（図 3.5.1）は全長約 2.5km，流域面積約 3.7km²の規模の小さな河川であり，流入する支川は無い．寒水川流域内の表層地質は，花崗閃緑岩が流域の半分以上を占めており，下流部では砂や粘土が分布している．この花崗閃緑岩は風化するとマサ土と呼ばれる非常に脆い状態になることが知られている．

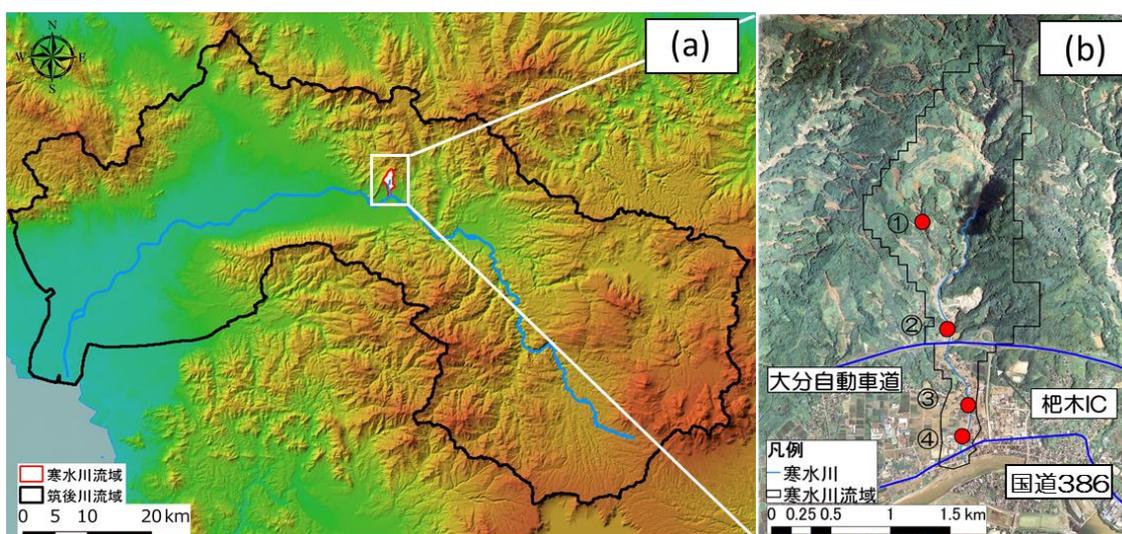


図 3.5.1 筑後川流域および寒水川流域の DEM
(a)：筑後川流域，(b)：寒水川流域内での撮影地点

3.5.2 調査および解析結果

a) 被害状況の現地調査

写真 3.5.1 には図 3.5.1 (b) 中の①，②，③，④において撮影した被害状況を示す．山間部では斜面が大規模に崩壊しており（写真 3.5.1①），大分自動車道の北側では 2 階建て住宅の 1 階部分が土砂に埋もれ（写真 3.5.1②），周辺には大量の流木が山積されていた．国道 386 号線から約 300m 北側の平野部では流木や瓦礫が橋に挟まっており，河道を閉塞している状況であった（写真 3.5.1③）．国道 386 号線と交差する手前では流木や瓦礫の混ざった細かい土砂が堆積していた（写真 3.5.1④）．

b) 空中写真による寒水川流域の土砂氾濫域の特定

空中写真は国土地理院が災害から 1 週間後の 2017 年 7 月 13 日に撮影した垂直写真（地上解像度 0.7m）1,141 枚を地理院 HP からダウンロード後，SfM ソフト（Agisoft 社製 Photoscan Pro）を用いてオルソ画像を作成した．作成したオルソ画像は ArcGIS 10.2 上で，寒水川流域内を対象に氾濫域，斜面崩壊発生箇所を目視判読により抽出した．



写真 3.5.1 寒水川の被害状況

(①：山間部の様子，②：土砂に埋もれた住宅，③：橋に捕捉された大量の流木，
④：最下流部での土砂の堆積と流木の様子)

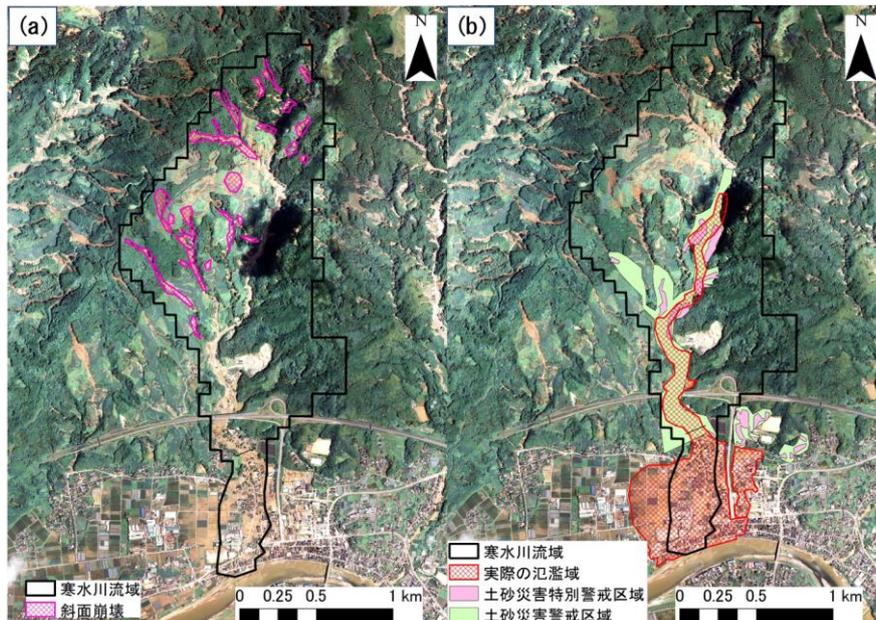


図 3.5.2 寒水川の斜面崩壊地と氾濫範囲

((a)：斜面崩壊地のみ，(b)：氾濫範囲と警戒区域)

図 3.5.2 にオルソ化した空中写真を用いた目視判読から得られた斜面崩壊が発生した箇所と、寒水川の氾濫範囲を示す。図中(a)にはピンクの網掛けで斜面崩壊地を示し、図中(b)では赤の網掛けで実際の氾濫範囲を土砂災害特別警戒区域と土砂災害警戒区域と併せて示す。寒水川流域上流部で斜面崩壊発生地は約 20 箇所存在していた。氾濫範囲は 1.13km² に広がり、流域内では約 0.45km² (流域内の約 12%) であった。寒水川下流部では谷から平野

部へと変わる地域までが土砂災害警戒区域に指定されていたが、実際は土砂災害警戒区域よりも下流側でも多くの土砂を含んだ水が氾濫し、筑後川との合流部地点近くまで被害が広がっていた。大分自動車道の北側 200m 地点は寒水川の蛇行部であり、現地調査時に大量の土砂が堆積していることを確認した。大分自動車道南側の下流域では谷地形から緩傾斜になったところで東西方向へ土砂が広がっていた。また、寒水川の東側には杷木 IC があり、IC までの自動車道が周囲に比べ高くなっており、堤防のような役割を果たしたことで東側への被害を軽減したと考えられる。

c) LP 搭載型 UAV による地形計測

寒水川流域内において LP(Laser Profiler)を搭載した UAV を用いて 2017 年 7 月 11 日に地形計測を行った。UAV はルーチェサーチ社製 SPIDER-LX8、搭載した LP は Riegl 社製の VUX-1 を使用し、高度 150m から計測した。計測範囲は国道 386 号より北側から約 2km の範囲を対象に計測を行った。計測した LP データは数値表層モデルの DSM (Digital Surface Model) であることから、植生や構造物を LP で取得したデータを処理するソフト Riprocess (RIEGL 社製)を用いてフィルタリングを行い解像度 10m の DEM (Digital Elevation Model) を作成した。次に災害前後の DEM から差分をとり、寒水川流域内での土砂の堆積・浸食厚と堆積・浸食箇所、さらには発生土砂量を、ArcGIS を用いて求めた。計算領域は、現地調査の結果から被害の大きかった筑後川との合流部から上流に約 1.6km、寒水川から東西方向に 100m の範囲を設定した。

図 3.5.3 に(a)堆積・浸食厚のコンター、(b)土砂の堆積・浸食箇所を示す。寒水川沿いの堆積浸食状況は、概ね実際の状況と一致した。特に大分自動車道北側 200m の堆積状況は現地調査、空中写真からも同様に土砂が堆積しており、その堆積厚は 2-3m に及んだ。下流部

では寒水川に沿って土砂が堆積しており、その厚さは概ね 1.2m 以上であった (図 3.5.3(a))。

図中(b)の赤は堆積、青は浸食箇所を表し、図に示した範囲内には 389,814m³ の土砂が堆積していた。筑後川右岸流域河川・砂

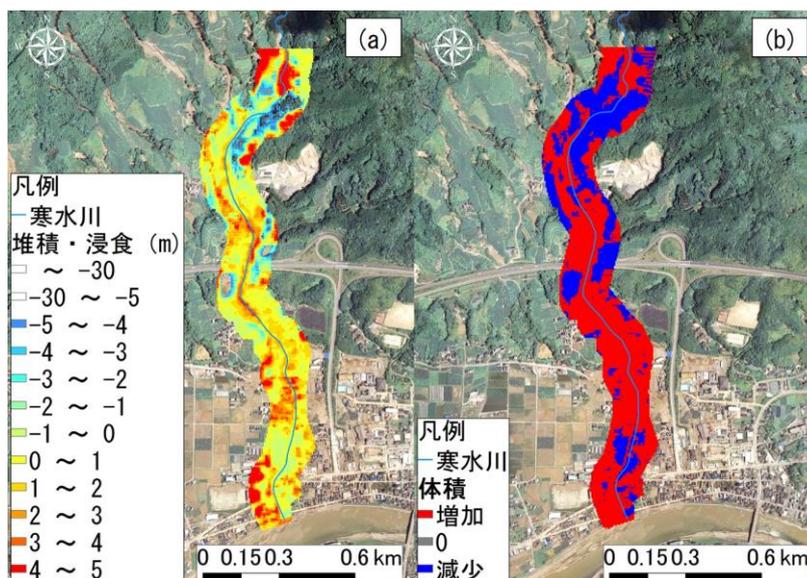


図 3.3.3 下流域における土砂の堆積・浸食状況
(a) : 堆積・浸食厚, (b) : 堆積・浸食箇所)

防復旧技術検討委員会によれば、寒水川では斜面崩壊により 55 万 m^3 の土砂が発生していたことが報告されている¹⁾。また、寒水川の単位流域面積 ($3.7km^2$) あたりの土砂発生量は 14.9 万 m^3/km^2 であり、他の被害のあった河川、例えば赤谷川 ($20.1km^2$, 14.4 万 m^3/km^2) や大肥川 ($7.6km^2$, 2.3 万 m^3/km^2) と比べても流域面積の割に土砂発生量が非常に多いことがわかる。これは寒水川流域を含む被災地域一帯の表層地質は花崗岩が風化した非常に脆いマサ土が分布しており、局所的に 500mm/day を超える豪雨が降ったことで通常の保水機能を超えて崩壊し、大量の土砂が流出したためと考えられる。

d) 氾濫シミュレーション

災害前後の地形データを用いて iRIC(International River Interface Cooperative)、ソルバーは Nays 2D Flood (ver. 5.0)により氾濫シミュレーションを行った。地形データは前項(c)で使用した災害前後の DEM を使用した。計算領域は図 3.5.5 中の白枠に示すように、X 方向に 1,500m、Y 方向に 1,370m を設定した。格子サイズは 5m とした。また、南北に伸びる杷木 IC と交差する 3 本の一般道にはそれぞれトンネルが設けられているため、水と土砂が抜けることを考え、トンネルを 3 箇所を設置して計算をした。上流端流量には、分布型降雨流出氾濫モデル (Rainfall-Runoff-Inundation モデル、以下 RRI モデル)²⁾の結果を用いた。RRI モデルによって予測した寒水川の流量は 14 時 20 分頃より急激に流量が増加し始め、最大流量は 18 時 50 分の $44.41m^3/s$ であった (図 3.5.4)。

図 3.5.5 に災害前および災害後の地形を用いた氾濫シミュレーションの結果を示す。災害前の地形を用いた場合には、河川水の氾濫は下流部左岸にとどまり、実際の氾濫域のように右岸側に広く氾濫する現象は再現できなかった。一方、災害後に計測した地形を用いた場合は下流部右岸においても広範囲に氾濫した。これは、災害後は中流域までは河道が完全に土砂に埋まっている状態であり、河川水が両岸に氾濫しやすかったためであると考えられる。災害後の地形を用いることにより、氾濫域の再現性は向上したものの、実際には洪水時に土砂が従来の河道を埋めながら、水・土砂が氾濫していたと考えられ、水だけでなく土砂氾濫を同時に扱うシミュレーションを行う必要がある。

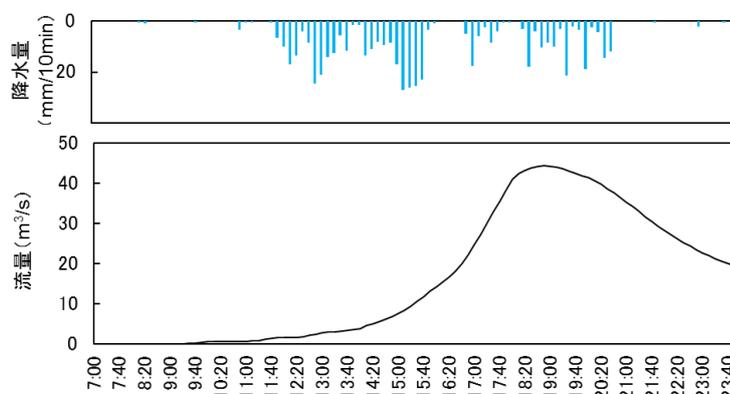


図 3.5.4 RRI モデルによる 7 月 5 日の寒水川の推定流量と朝倉観測所の 10 分間降水量

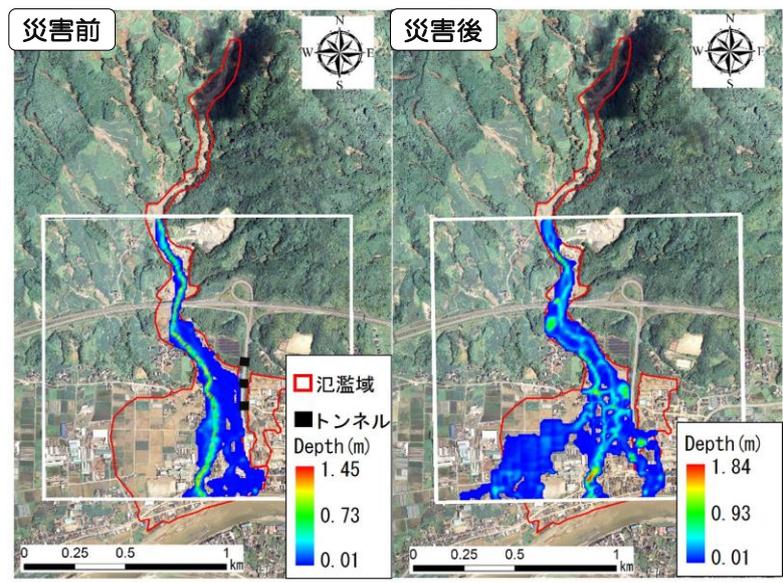


図 3.5.5 災害前後の DEM を用いた氾濫シミュレーション結果

3.5.3 まとめ

平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う寒水川の被災状況を現地調査、空中写真、LP 登載型 UAV を用いて検討するとともに、河川氾濫の再現シミュレーションを行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 寒水川では大量の水と土砂が河川に流入したため、土砂災害警戒区域より下流の平野部での水だけでなく土砂も氾濫する土砂氾濫が生じた。今後は大規模土砂氾濫を想定した平野部における土砂災害警戒区域等の設定も検討する必要があることが明らかとなった。
- 2) 河川氾濫シミュレーションでは、災害前の地形を用いた場合には下流部左岸側での氾濫に留まったが、災害後に計測した地形を用いた場合には下流部の右岸においても広範囲に氾濫する状況が再現できた。災害後の地形を用いることにより、氾濫域の再現性は向上したものの、実際には洪水時に土砂が従来の河道を埋めながら、水・土砂が氾濫をしていたと考えられ、水だけでなく土砂氾濫を同時に扱うシミュレーションを行う必要があることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会：筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会 報告書，2017.
- 2) 佐山敬洋，岩見洋一：降雨流出氾濫 (RRI) モデルの開発と応用，土木技術資料，Vol.56，No.6，pp18-21，2014.

(赤松良久)

3.6 白木谷川

白木谷川流域では上流で斜面崩壊が多数発生するとともに、その多くは土石流化して側岸を激しく侵食しながら流下した。その結果、大量の土砂と流木を下流に流出させ、河道閉塞・氾濫を引き起こした。この原因については次の2つが考えられる。

- ①下流域への平衡流砂量を超える過剰な土砂流出による土砂堆積
- ②下流域への大量の流木流出による橋梁の流木捕捉（河道閉塞）と土砂堆積

前者の場合は過剰な土砂流出が河道閉塞・氾濫を発生させたものと考え、後者の場合は大量の流木流出が河道閉塞・氾濫を引き起こしたものと考えている。著者らは、白木谷川の災害発生の原因について、災害直後の7、8月に現地踏査と河道状況の写真撮影、流木等の計測を実施するとともに、流出規模のシミュレーションを実施し考察したものである。

3.6.1 流域の概要

白木谷川は、筑後川中流域の右岸側に位置する流域面積 3.9km^2 、流路延長 2.5km の一級河川である。図 3.6.1 に流域図を、図 3.6.2 に主流路の縦断面図を示す。ここに勾配を基に河道を区間 I, II, III に区分した。標高 130m より上流（区間 I）は林地からなる溪流であり、それより下流の区間 II, III は田畑が広がる平地で、特に大分自動車道より下流は住宅街が分布している。河道形状は掘り込み河道で、河床からの比高差は 5m 程度、川幅は最下流の白木谷橋で 14m 、県道の前田橋で 11m となっており、小規模な河川である。流域内の地質は花崗岩、林地はスギ・ヒノキを主とした植林地である（国土数値情報ダウンロードサービス、2017）。

3.6.2 災害後の流域の状況

災害後の河道の状況は、住宅最遠点より上流（区間 I）と下流（区間 II, III）で異なっていた。写真 3.1 にその状況を示す。区間 I では侵食傾向にあり、土石流は既設の流路工を破壊し、さらに溪床を侵食しながら下流へ流出した。溪岸の侵食も著しく、元河道の幅以上に広い流下痕跡となった。一方、区間 II, III では、ほぼ全区間で堆積傾向にあった。特に県道前田橋までは元河道が埋没し、土砂や流木が河道外に広く氾濫して

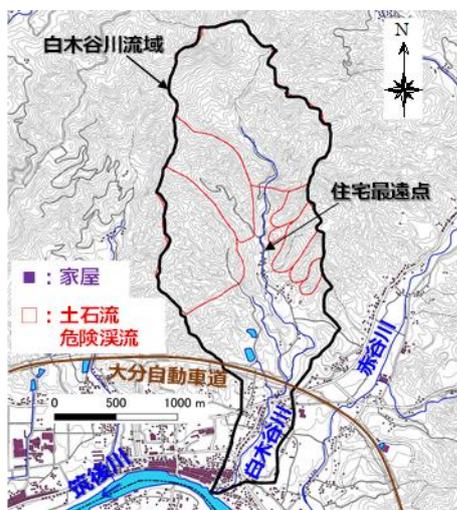


図 3.6.1 白木谷川流域図

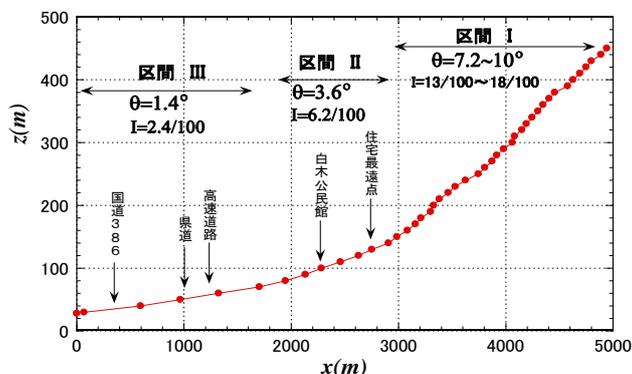


図 3.6.2 白木谷川縦断面図 (θ : 河道縦断方向傾斜)

いた。橋梁（白木谷橋，前田橋，高速道直下の白木谷川橋，永田橋）ではその上流側に群を形成して集中的に流木が捕捉され，さらにその上流に土砂が堆積していた。これはあたかも透過型砂防堰堤における堆積状況と同様であった（Hashimoto et al., 2016）。

a) 土砂の生産・流出・氾濫

図 3.6.3 に流域内の土砂生産状況を示す。同図は，国土地理院公表の正射画像から判読した。ここに，崩壊と溪岸侵食を区別することが困難であるため，崩壊と溪岸侵食を合わせて記載した。この図より，土砂生産が上流域で著しいことがわかる。図中の土砂生産域を图上計測した面積は約 0.31 km² であり，流域面積の約 8% を占める。流域内での平均崩壊深を 2.0m と仮定すれば，生産土砂量は「かさ」表示で約 62 万 m³ と推定される。正射画像からの判読では，白木谷川流域の東側で流下痕跡が途中で途切れるものが多く，それらは主流路



a. 溪流河道（区間 I，下流方向を望む）



b. 溪流出口（区間 II の上流，下流方向を望む）



c. 県道にかかる前田橋の上流側（区間 III）

写真 3.6.1 災害後の河道状況

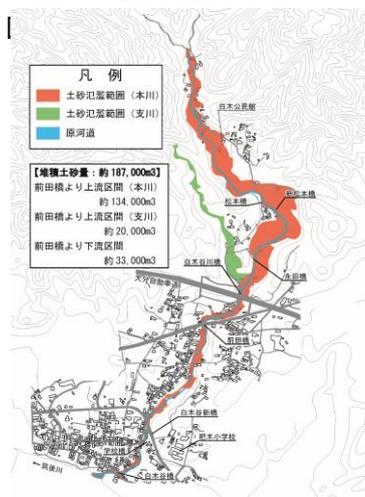
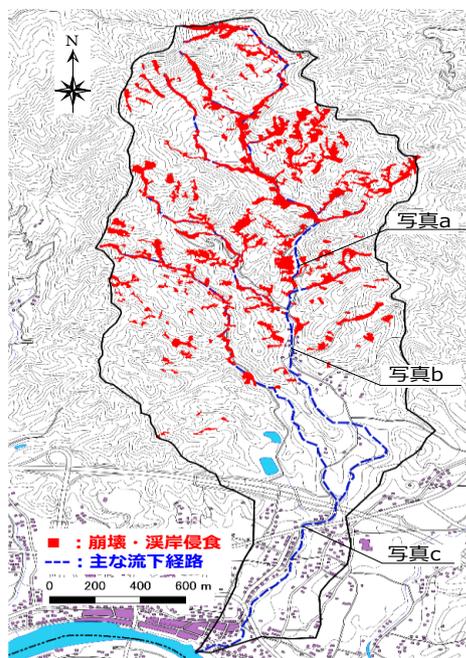


図 3.6.4 下流の土砂氾濫域（区間 II～III）

に到達する前に堆積し、流域内に今なお残存していることが推測される。

図 3.6.4 に正射画像および現地調査結果より作成した土砂氾濫範囲を示す。上流域で生産・流出した土砂は、谷の出口から下流域全体にわたって氾濫した。土砂堆積状況は、前田橋を境に異なっており、市街地が広がる前田橋より下流では、土砂氾濫は河道沿いの狭い範囲に限定された。これは、前田橋で流木による河道閉塞が確認されており、それより上流において大部分の土砂が堆積したためと考えられる。土砂氾濫範囲の図上計測値と現地調査の結果によると、溪流（区間 I）から下流域に流出・堆積した土砂量は約 17 万（支川からの氾濫土砂を合計すると 19 万） m^3 と見積もられる。もし、筑後川への土砂流出が無視されるほど少量であったならば、流域上流には今なお約 43 万 m^3 の土砂が残留していることとなる。

b) 流木の生産・流出・氾濫

上流の溪流において、2017 年 7 月と 8 月に側岸侵食が顕著な斜面の立木の調査を実施した。2箇所側岸斜面において、直径 5cm 以上の樹木を対象として 10m×10m 四方に存在する立木の本数、直径を測定した。その結果、立木の数密度 0.11 本/ m^2 、樹高約 30m、立木の直径約 21cm であった。

一方、土砂生産域の面積は 0.31 km^2 であり、そこに繁茂していた立木の本数は 34,000 本と評価される。土砂生産域の立木が崩壊や侵食により全て流木化したものと仮定すると、白木谷川流域で生産された流木の総量は「かさ」表示で約 17.5 万（実積表示で 3.5 万） m^3 となった。しかしながら、流木化せず倒木として残留した樹木も数多く観察された。

下流域に流出・氾濫した流木の堆積状況についても調査を行った。その結果、従来と同様に (Rusyda, et al., 2013 ; 楠窪ら, 2014), 次の 2つのタイプに大別された。

- ① 個別に単独で堆積した流木
- ② 群を形成して堆積した流木

後者はさらに 1) 橋梁の上流側に捕捉・堆積した流木と、2) 立ち木や田畑の段差などに捕捉・堆積した流木とに分けられた。

まず、群を形成して堆積した流木について写真計測により流木群量を評価すると、「かさ」表示で総計約 1 万 m^3 となった。

次に、2箇所の流木群を構成する流木や、単独で堆積した流木についてそれぞれ N=20 本抽出し、長さ L と直径 D を直接計測した。比較のため、上流の溪流に流下せず残留した倒木についても同様に測定した。その測定結果の頻度分布の 1 例を図 3.5 に示す。流木生産源付近に残留した倒木の平均長 L=19.6 m であった。一方、中流において堆積した単独流木の平均長 L=7.6 m、下流において群（2箇所）を形成した個々の流木の平均長 L=5.1 m、6.5 m であった。また、それらの直径は流木、倒木に無関係に D=19cm~24cm であった。以上の結果、流木は、流下の過程（大略の流下距離 2.5km）において、上流に残留した倒木の約 3 分の 1 まで長さを減少させたことが分かる。これは、立木が流木化し流下する過程において摩耗・破断した結果と考えられる。

3.6.3 流出規模のシミュレーション

崩壊は、溪流源頭部斜面における崩壊と河道に沿った斜面崩壊とに区別される。通常の崩壊はそのタイミングや土量の評価に大きな困難を伴うが、後者の中でも、溪流の側岸侵食に伴った崩壊土量は土石流の1次元数値シミュレーションに際してモデル化され簡便に評価されてきた (Takaoka et al., 2007)。このモデルは、さらに、側岸侵食に伴う立木の流木化を考慮した土石流の1次元数値シミュレーションに発展した (Nagano et al., 2013)。本節は、このモデルをもとに、白木谷川流域の、流木を伴った土石流についてシミュレーションを実施し、その流動特性、流出規模、災害 (土砂堆積) 発生の原因について考察した。

a) 流動モデル

シミュレーションは、白木谷川本川源頭部から筑後川との合流点までの区間を対象とした。源頭部から谷の出口までの区間 I を溪流区間とし、それから下流の区間 II, III を氾濫区間とした。溪流区間の流路は長方形断面とし、側岸は直立を保ったまま水平方向に侵食され、侵食土砂と立ち木は側方流入として即座に流れに取り込まれるものとした。流れの表層の流木・土砂・水混相流と主流層の土砂・水混相流の2層流としてモデル化した。基礎式等の詳細は紙面の都合上割愛し別の論文に譲る (永野ら, 2018)。なお、本モデルは源頭部における崩壊や、橋梁による流木捕捉を考慮していない。

b) 計算条件

降雨条件は、2017年7月5日に北小路公民館 (黒川) 観測所で記録された時間雨量とした。その対象時間は、2017年7月5日12時00分から18時00分までの6時間とした。流砂の平均粒径は $d=5\text{mm}$ 、流域からの雨水の流出係数 $f=0.8$ とした。ここでは、初期の段階を考え、溪流 (区間 I) は側岸と河床侵食を許容し、下流の区間 II, III は氾濫も側岸侵食も許容しない条件でシミュレーションを行った。ここに支川から本川への土砂流入は考慮した。

c) 結果と考察

シミュレーションの結果を図 3.6.6 に示す。溪流の上流では河道の縦侵食が、溪流の中下流では横侵食と土砂堆積が卓越し、最大で $B \approx 20\text{ m}$ まで河道幅を拡大させている。一方、溪流出口付近から下流の区間 II では堆砂が発生するが、区間 III では顕著な土砂堆積が発生していない。従って、区間 II の堆砂は平衡流砂量を超える過剰な土砂流出に起因していることが理解される。しかし、区間 III の土砂堆積は本シミュレーションでは再現できていない。また、ピーク時において、溪流の中流で流量 $Q \approx 30\text{m}^3/\text{s}$ 、流砂濃度 $C_T \approx 0.14$ 、溪流出口で $Q \approx 40\text{m}^3/\text{s}$ 、 $C_T \approx 0.16$ 、下流の前田橋で $Q \approx 105\text{m}^3/\text{s}$ 、 $C_T \approx 0.08$ となった。このことから、溪流 (区間 I) においては、流れは、土石流と洪水流の中間的な流動形態である高濃度浮流砂流あるいは掃流状集合流動として流下し (橋本, 2010)、溪流出口から下流 (区間 II, III)

では洪水流として流下したものと推定される。

シミュレーションをもとに溪流出口における流砂と流木の全流出量を求めるとそれぞれ 15 万 m^3 、0.6 万 m^3 と評価された。一方、3.6.2 節の調査結果はそれぞれ約 17 万 m^3 、1 万 m^3 (流木群) であり、流出土砂量の評価は概ね一致したが、流出流木量のシミュレーションは過小となった。シミュレーションに用いた流木条件など今後検討が必要である。

3.6.4 結論

第1章 区間 II における土砂堆積は上流からの平衡流砂量を超える過剰な土砂流出に起因し、区間 III における土砂堆積は橋梁 (白木谷橋, 前田橋など) による流木捕捉に起因したものと考えられることが分かった。

参考文献 :

- 1) Hashimoto, H., Hashimura, K., Nagano, H. and Maricar, F.: Experimental Investigation into Flow Behavior of Wood-Sediment-Water Mixture at a Grid Type of Open Check Dam, *Int. J. of Erosion Control Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp.188-193, 2016.
- 2) Nagano, H., Hashimoto, H. and Miyoshi, T.: One-dimensional model of landslide-induced debris flow with woody debris, *Proc. of the 35th IAHR World Congress*, CD-ROM, 2013.
- 3) Rusyda, M.I., Hashimoto, H., Ikematsu, S. & Sakada, K.: Characteristics of woody debris deposition during the Yabe River Flood in Yabe City, Japan: Northern Kyushu Flood Disaster in July, 2012. *Proc. of the 12th International Symposium on River Sedimentation*, pp.1989-1996, 2013.
- 4) Takaoka, H., Hashimoto, H. and Hikida, M.: Simulation of landslide-induced debris flow: the Atsumari debris flow disaster in Minamata City, Japan, *Proc. of the 4th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, pp.353-363, 2007.
- 5) 楠窪正和, 赤野久志, ムハマド イスラミ ルシダ, 池松伸也, 永野博之, 橋本晴行: 2013 年 7 月 島根県津和野町名賀川流域で発生した流木氾濫に関する調査, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.103-108, 2014.
- 6) 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (閲覧日 2017.7.21).
- 7) 永野博之, 福岡尚樹, 橋本晴行: 2017 年九州北部豪雨により発生した朝倉市白木谷川流域の流木・土砂・水混相流の流出規模に関する研究, 2018 (投稿予定).
- 8) 橋本晴行: 土砂の移動現象とそのメカニズム, *ながれ* 29, pp.193-202, 2010.

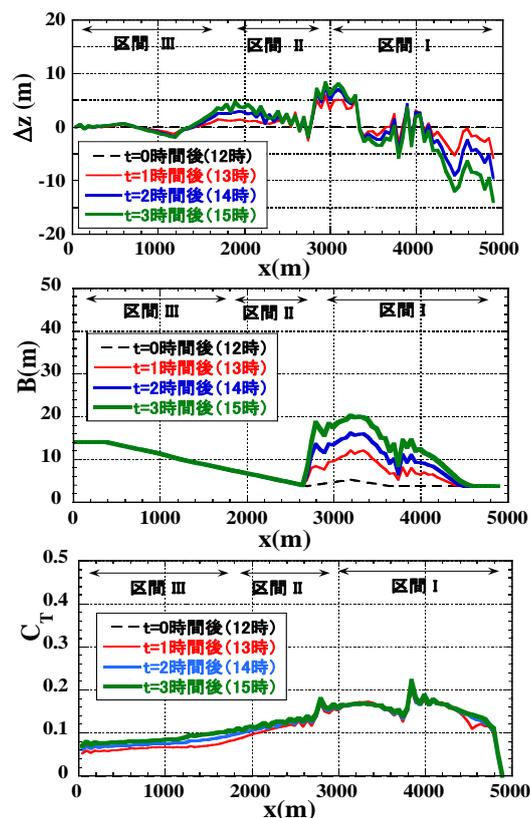


図 3.6 流出シミュレーション
 Δz =河床上昇高, B =河道幅, C_T =濃度

(橋本晴行, 永野博之, 福岡尚樹)

3.7 赤谷川

a) 赤谷川の流域・河道特性及び被害状況

赤谷川は、筑後川河口から 60km 地点の右支川であり、流域面積 19.9km²、河川延長約 9km の福岡県管理河川ある。赤谷川流域には主に花崗閃緑岩（風化が進行）、変成岩類が分布する。河床勾配（および川幅）は筑後川合流点から大分自動車道まで約 1/105（川幅約 30～20m）、同自動車道から乙石川直下流まで約 1/65（川幅約 15m）の急流河道であり約 200m 幅の谷底平野を蛇行しながら流下している。河川構造物としては堰・落差工・床止工が数多く設置されているほか、堤防は杷木林田の市街地の一部に概成しているほかは掘り込み河道方式で管理されている。河道の延長に対して橋梁が多いのも特徴で今回の出水で多くの流木が捕捉され、これが流れの阻害となり被害を拡大させた要因の 1 つと考えられる。杷木林田地区の現況流下能力は、九州地整・福岡県資料¹⁾によると鶴園橋付近で約 50m³/s（比流量 $q=2.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）であり極端に低い。

図 3.7.5 に赤谷川中下流部の被災状況を示す。図 3.7.5 に示すとおり、洪水前の河道（白線）は 30～15m 程度であったが、出水ピーク時は最大 200m 程度まで浸水域（青線）が広がったことが分かる。冒頭にも述べたとおり、杷木林田や真信等の地区では氾濫原に新たな流路が形成され、氾濫原上に流路網が形成されるような状況が認められた。

b) 数値解析

i) 流出計算による流量の推定

赤谷川（流域面積 $A=19.9\text{km}^2$ ）には、流域内に水位・流量観測地点が存在しなかったため、iRIC SRM⁴⁾を用いて流出計算を行った。SRM では、1 段タンク型貯留関数法、あるいは 2 段タンク型貯留関数法を使用する。両手法とも有効雨量を必要とせず観測降雨量から直接流量を計算する機能と再現計算時にモデルパラメータを最適化する機能を有する特徴がある。ただし、流量推定には対象河川の流出パラメータを設定する必要がある。そこで、図 3.7.6 に示す実測流入量を持つ近隣の寺内ダム（流域面積 $A=51.0\text{km}^2$ ）



図 3.8.5 赤谷川中下流部の被災状況
(航空写真は 7 月 8 日 国土地理院撮影)

と江川ダム（流域面積 $A=20.5\text{km}^2$ ）を対象に流出計算を行い、両ダムの洪水流量ヒドログラフを用いて再現検証を行い、それぞれの流出モデルパラメータを同定したものを適用して赤谷川の流量を推算することとした。

降雨データは、図 3.7.6 に示す C-X 合成雨量データ（国土交通省解析）を用い、250m メッシュ毎に 1 時間単位で累加し、流域平均雨量を作成した。流域平均化した時間最大雨量は、赤谷川流域では 1 時間、3 時間、24 時間 ごとに 88.6mm, 250.0mm, 606.8mm であった。寺内ダム流域では 1 時間、3 時間、24 時間ごと 76.8mm, 206.5mm, 430.1mm, 江川ダム流域では 83.5mm, 202.0mm, 365.5mm であった。比較すると、1~3 時間の短時間雨量は類似するが、24 時間雨量では赤谷川流域の方が両ダムより 2 割程度多いことが分かった。SRM による各ダムの再現流量諸元を表 3.7.1 に示す。誤差評価指数（Nash-Sutcliffe 係数, JPE, JRE, RMSE）で比較すると、江川ダム流域を対象に最適パラメータ化した 2 段タンク型方式の再現性が最も高い結果が得られた。これより、江川ダム最適パラメータを用いて赤谷川の流出計算を実施した。結果を図 3.7.7 に示す。図 3.7.7 より、ピーク流量が $428.8\text{m}^3/\text{s}$ （比流量 $q=21.5\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）のヒドログラフを得た。

ii) 解析条件

赤谷川の土砂移動を考慮した氾濫水理現象を検証するために数値解析による再現を行った。本出水では、河道内および氾濫原に堆積する土砂が、現地調査より類似する河床材料であったことから、河道と氾濫原を区別することなく移動床として平面二次元河床変動計算



図 3.7.6 C-X 合成雨量データ累積雨量分布と対象流域の関係（期間：7月5日0時~7月6日24時）

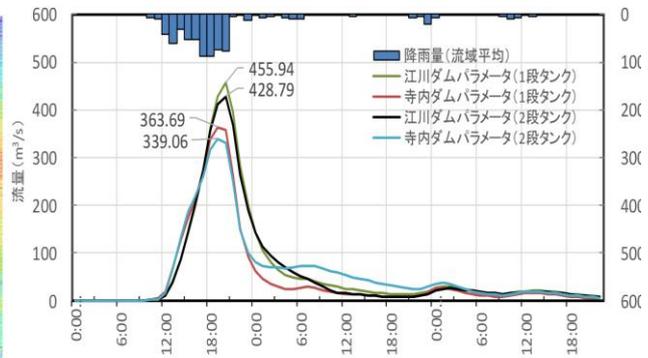


図 3.7.7 赤谷川流域の各ダム最適パラメータを用いた推算流量

表 3.7.1 寺内ダムと江川ダムの最適モデルパラメータと赤谷川の推算流量

流域名	流域面積 (km^2)	期間 (24hr)	総雨量 (流域平均) (mm)	実績 Q_p (m^3/s)	実績ヒドログラフ 再現時の最適パラメータ			減衰係数 (λ) 分離時定数 (T_c)	計算 Q_p (m^3/s)	誤差評価指数				赤谷川の推算流量 $A=19.9\text{km}^2$ $\Sigma R=606.8\text{mm}/24\text{hr}$		
					タンク型	C11	C12			C13	Nash ^{※1}	JPE ^{※2}	JRE ^{※2}	RMSE ^{※3}	推算 Q_p	再現性
寺内ダム	51.0	7/5 0:00 ~ 7/6 0:00	430.1	848.8	1段タンク	7.938	0.201	1.254	$\lambda=0.042$	604.99	0.91	0.29	0.58	45.69	363.69	
					2段タンク	6.597	0.341	1.504	$T_c=23.73$	653.33	0.88	0.23	0.70	51.28	339.06	
江川ダム	20.5	7/5 0:00 ~ 7/6 0:00	365.5	302.7	1段タンク	9.910	0.208	0.947	$\lambda=0.052$	263.45	0.96	0.13	0.37	12.16	455.94	
					2段タンク	8.799	0.288	1.182	$T_c=19.30$	266.85	0.98	0.12	0.29	11.08	428.79	○

※1 Nash-Sutcliffe 係数：0.7以上で再現性は高い ※2 ピーク流出相対誤差：0に近いほうが誤差は小さい ※3 ヒドロの相対誤差：小さいほうが精度が高い。

を実施した。計算には、iRIC Nays2DH⁵⁾ を用いた。計算領域は、筑後川合流地点から乙石川合流点直下流までの約 3km とした。計算に用いた地形データは、国土地理院公表の数値標高⁶⁾モデル 5m メッシュを用い、解析格子サイズは概ね 10m×10m とした。河床材料は 1.5mm の均一粒径とし、河道を含む氾濫原のマニング粗度係数は 0.030 とした。上流端の境界条件としては動的平衡条件で給砂量を与えた。計算では土砂は掃流形態で輸送されるもののみを扱い、浮遊砂は考慮していない。これは、現地調査にて取得した河床材料に比較的砂分が含まれていたこと、および北海道豪雨災害にて被災したペケレベツ川（流路勾配 1/55、川幅約 35m、平均粒径 90 mm）と同じ解析手法にて災害状況の違いを比較可能とするためである。その他、本計算では流木の影響は考慮していない。

c) 解析結果と考察

図 3.7.8 に赤谷川下流部の痕跡水位と解析水深との比較と、痕跡水位と解析水位との比較を示す。図 3.7.9 に、解析範囲全体の水深コンターを示す。図 3.7.8 より、解析水深および解析水位は痕跡水深および痕跡水位と概ね合致した。また、図 3.7.9～図 3.7.11 より、解析で得られた浸水範囲は、実測の浸水域（青線）と概ね合致した。また、杷木林田地区には大規模流量で谷底全体が氾濫原化して最短となる直線的な新しい流路が形成され、2-way 流路も再現されたことが分かる。これより、本計算では浮遊状態で輸送されるような細かな粒子や、流木による河道閉塞などは考慮していないものの、氾濫水理現象の概要を検討する

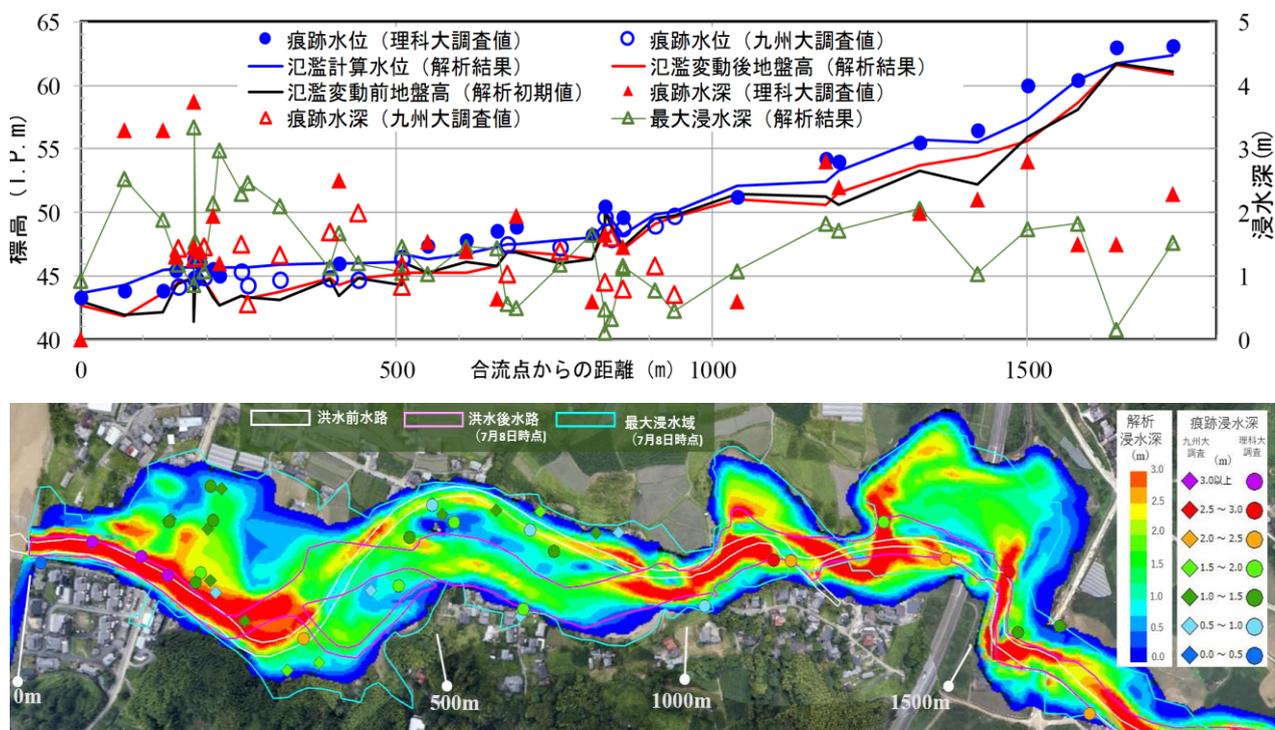


図 3.7.8 痕跡調査結果（九州大学と東京理科大学で実施）と氾濫解析結果との比較

上) 水位, 下) 水深の平面分布

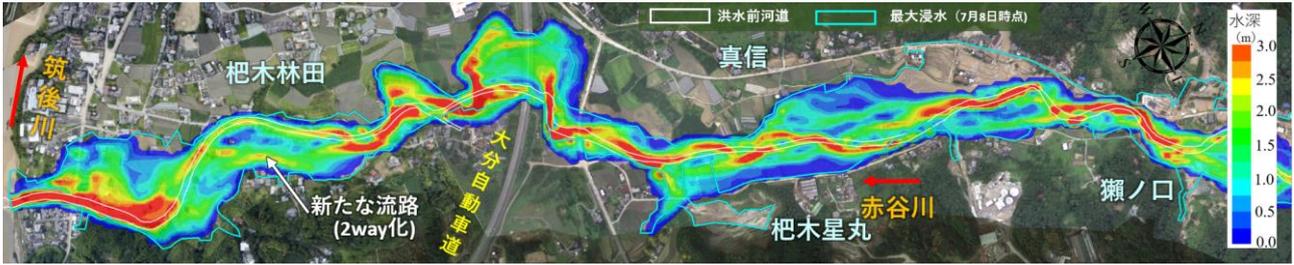


図 3.7.9 氾濫シミュレーションによる浸水深コンター (流量ピーク時)

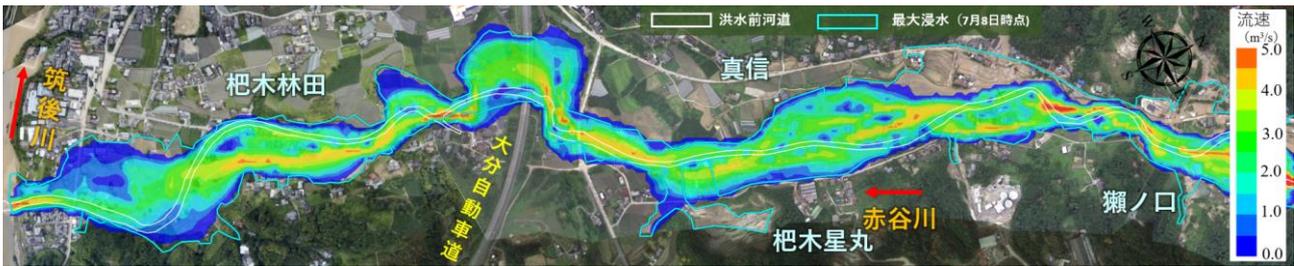


図 3.7.10 氾濫シミュレーションによる流速コンター (流量ピーク時)



図 3.7.11 氾濫シミュレーションによる河床変動高コンター (洪水終了時)

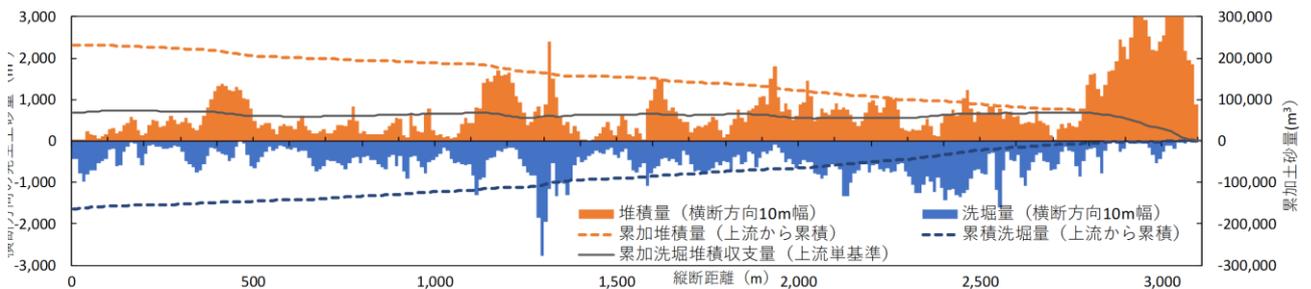


図 3.7.12 解析による土砂収支 (縦断方向に10m間隔で取得), オレンジが堆積, 青が浸食を示す。

にはある程度の精度があるものとする。

次に、図 3.7.12 に解析範囲内の土砂収支を示す。図 3.7.11 および図 3.7.12 より、以下のことが分かる。1) 対象区間では、土砂の堆積と浸食の両方が生じているが、収支を見ると堆積分の方が多いことが分かる。2) 図 3.12 の累積堆積量を見ると、おおよそ 23 万 m³ 程度の堆積が推察された。3) 図 3.7.11 から土砂の堆積が生じた場所を確認すると、大部分の河道と氾濫原の大半であったことが分かる。これは、想定以上の出水により大量の土砂が流入したため、河道が土砂で埋没し、大量の粒径の小さな土砂 (図 3.7.13) を含んだ水が氾濫原に流れ込んだためである。一方で、図 3.7.11 より土砂の浸食が生じた場所を確認す

ると、氾濫原の一部であることが分かる。これは、対象区間では出水により氾濫原内に新たな流路が形成されるとともに、それに伴い河岸浸食等が生じたためである。なお、この浸食箇所を図 3.5 に示す航空写真と比較すると、杷木林田地区や杷木星丸地区（図 3.7.11, 図 3.7.13）などの浸食箇所(b), 浸食箇所(c)と合致することが分かる。

このような氾濫原の流路変動を含んだ河道災害は、2016 年北海道豪雨災害においても多くの急流河川で確認され²⁾、想定以上の流量により大量の土砂が流出し、河道内に堆積した状況が報告されている。しかしながら、北海道豪災害の場合、土砂の堆積時には著しい流路の首振り蛇行が確認されたが、それに比べて今回の九州北部豪雨災害では比較的直線的な流れが確認され、流路の首振り蛇行は少ないようであった（図



図 3.7.13 赤谷川杷木星丸地区（ドローン映像；山口大学撮影）

3.7.11)。この違いの原因については現時点で詳細な考察は難しいが、最も大きな違いは河床材料の粒径や運搬されてきた土砂の粒度分布構成の違いに由来するのではないかと考えている。この点については、この後、流木阻害による影響も含めて詳細に検討を行う。

d) まとめ

2017 年の九州北部豪雨は、観測史上最大を記録するもので、過去に経験をしたことのない大洪水が筑後川中流右岸側の中小河川で発生した。本調査では赤谷川を対象に被害状況の整理を行い、土砂移動を伴う氾濫解析を行った。結果、赤谷川下流部の解析水深および解析水位は痕跡水深および痕跡水位と概ね合致したほか、中上流部の浸水範囲も概ね実績浸水域を再現した。対象区間の土砂の堆積と浸食の土砂収支では堆積分が卓越し約 23 万 m^3 程度の堆積が推察された。今回の出水により想定以上の流量により大量の土砂が流出し、河道内に堆積に新たな流路が形成されるとともに、それに伴い河岸浸食等の流路変動も解析で確認された。これらのことは 2016 年北海道豪雨災害の多くの急流河川でも同様に、堆積するなど類似する点はあるものの、北海道豪災害の場合は著しい流路の首振り蛇行が特徴であったが、今回の九州北部豪雨災害では比較的直線的な流れで流路の首振り蛇行は少なかった。今後は土砂の粒度分布構成の違いによる流路変動について検討する。

参考文献

- 3) 筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会（第 1 回）～平成 29 年 7 月九州北部豪雨～平成 29 年 9 月 7 日 九州地方整備局・福岡県。
- 4) 2016 年 8 月北海道豪雨災害報告書, 土木学会北海道豪雨災害調査団, 2017.
- 5) 久加朋子, 清水康行, 宮本具征, 剣持浩高, 酒谷賢治, 泉典洋, 山口里実, 岩崎理樹, 石田義明: 2016 年北海道豪雨災害におけるペケレベツ川の被災状況と流路変動特性の検証, 河川技術論文集, 第 23, 55-

60, 2017.

- 6) iRIC HP <http://i-ric.org/ja/software/?c=21> (最終閲覧日：2017年9月29日) .
- 7) iRIC HP <http://i-ric.org/ja/software/?c=18> (最終閲覧日：2017年9月29日) .
- 8) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス, <http://fgd.gsi.go.jp/download>.

(石田 義明)

3.8 大肥川流域

3.8.1 大肥川流域の被災状況

a) 平成 29 年九州北部豪雨災害

今回の平成 29 年九州北部豪雨では、筑後川右岸流域にある朝倉市北小路公民館で、9 時間に 774mm という驚異的な降雨を記録した。また解析雨量では 1000mm を越えた雨量が記録されている。そのため、同時多発的に山地斜面が崩壊し、洪水に加えて大量の土砂と流木が河道から溢れる事態となった。そして、この流木や土砂が橋梁部等での閉塞や河道埋塞を引き起こし、家屋の流出・損壊や人的被害を大きく拡大させる要因となった。洪水・流木・土砂の三重苦ともいえる今回の九州北部豪雨災害は、総降雨量や降雨強度が強くなると災害の様相が急激に変化してくることをまざまざと我々に見せつけた。我々がこれまで経験

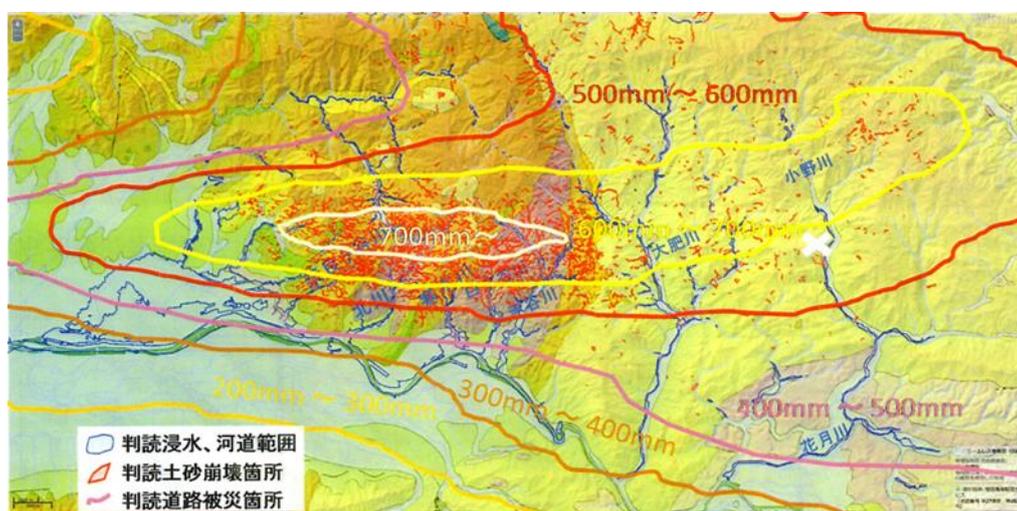
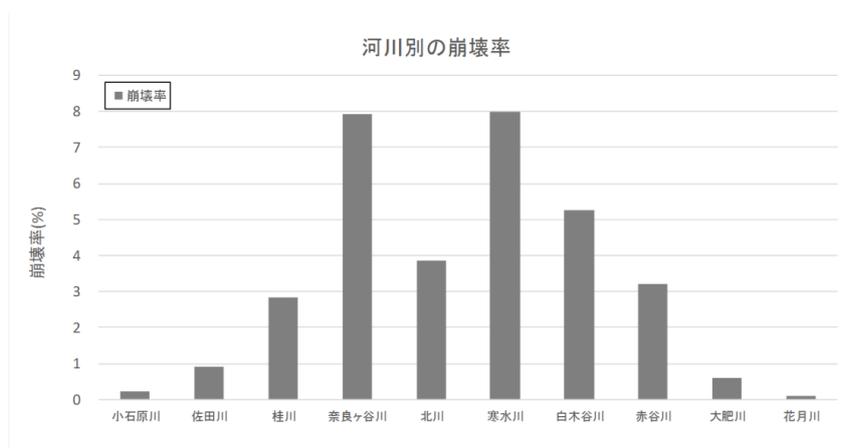


図 3.8.1 地質ならびに土砂崩壊箇所、累計雨量のコンター図（河川情報センター 越智 繁雄理事提供）



崩壊率は、「崩壊面積／地質面積」にて算定

図 3.8.2 河川別の崩壊率（国交省委員会資料）

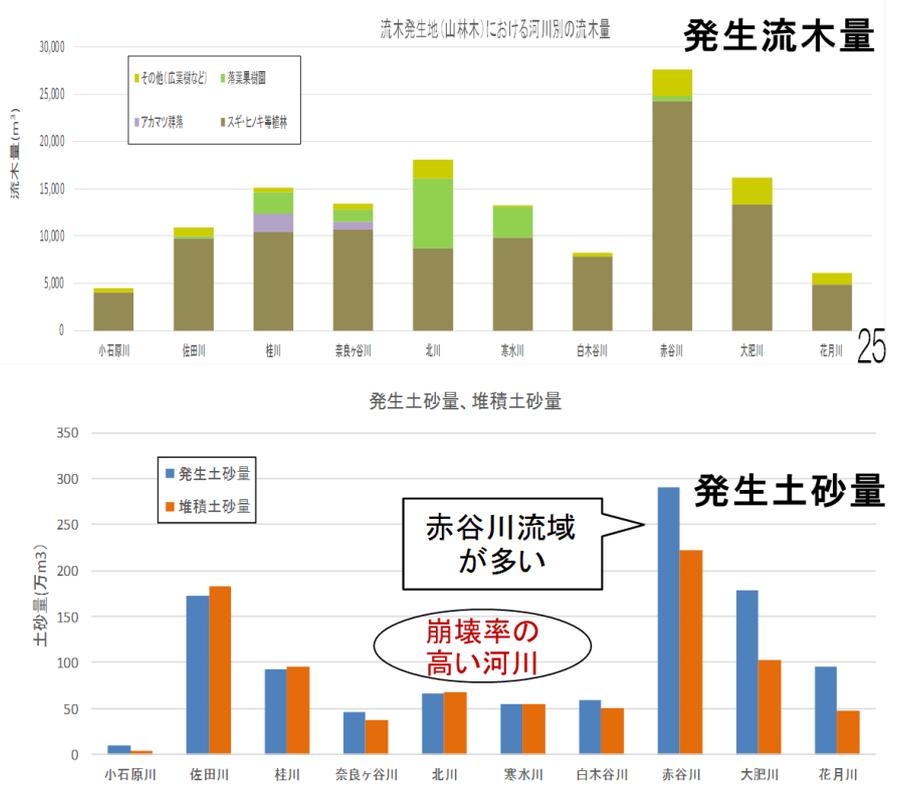


図 3.8.3 流域別の発生流木量(上)と発生土砂量(下)

してきた水害・土砂災害とは、全く次元の異なる新たな災害といっても過言ではない。まさに治水事業・砂防事業だけでなく地域計画・都市計画をも根幹から揺るがすターニングポイント（転換点）ともいえる大災害であった。今回の災害から我々は多くを学び今後にも備えなければならない。

図 3.8.1 に累積降雨量のコンター図を示す。奈良ヶ谷川、北川、寒水川、白木谷川の流域で大きな降雨量を記録しているが、赤谷川流域や大肥川の上流部でも 600~700mm の大きな降雨量を示している。図 3.8.2 に河川別の山地斜面の崩壊率を示す。図 3.8.1 と図 3.8.2 の比較から「大まかには累積降雨量の多い河川ほど崩壊率も高い」といえる。崩壊率では、赤谷川は奈良ヶ谷川・北川・寒水川・白木谷川などの小河川と較べて低く、大肥川は更に一段と低い。一方、図 3.8.3 に示された発生流木量、発生土砂量は赤谷川が最も多く、大肥川もほぼこれに次いで多くなっている。これは図 3.8.4 に示すように小河川の奈良ヶ谷川（流域面積：3.8 平方キロ）・北川（7.0 平方キロ）・寒水川（3.7 平方キロ）・白木谷川（3.9 平方キロ）に比べて赤谷川（20.1 平方キロ）、大肥川（77.6 平方キロ）は、河川の流域面積が大きいことで、両河川では集まって大量化した洪水・流木・土砂が下流に押し寄せている。また、図 3.8.5 よりばらつきはあるが、「発生流木量と発生土砂量はほぼ比例関係にある」といえる。

図 3.8.6 に国交省・福岡県が設置した「筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会」

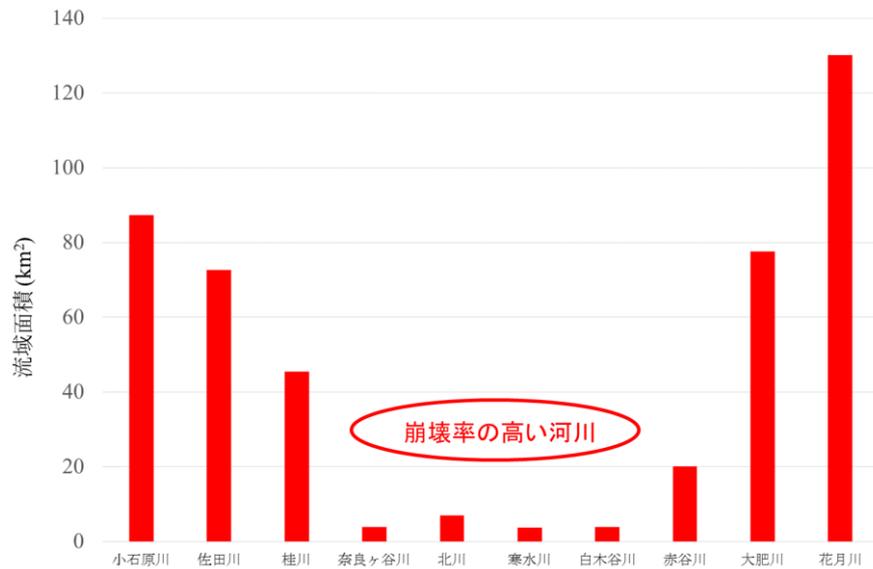


図 3.8.4 各河川の流域面積

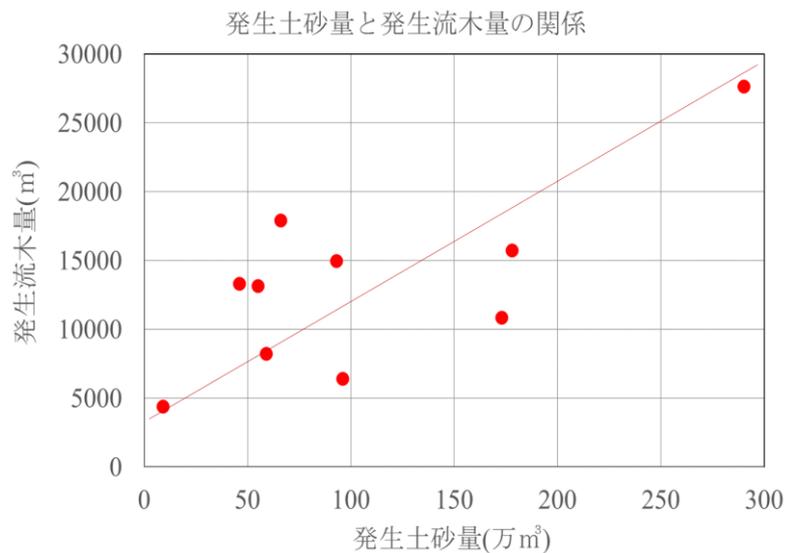


図 3.8.5 発生土砂量と発生流木量の関係

でまとめた流域の被害の特徴を、また図 3.7 に大分県がまとめた大肥川・花月川流域のさらに詳細な被害の特徴を示す。大まかには、桂川・花月川で洪水氾濫、大肥川の中・下流部分で流木・洪水災害、奈良ヶ谷川・北川・寒水川・白木谷川・赤谷川・黒川・大肥川の上流部で流木・土砂・洪水の三重複合災害となっている。

図 3.8 に示すように、降雨強度や総降雨量が大きくなると、流域の山地斜面や河川の許容力との関係から、単純な「洪水災害」から「流木・洪水災害」、さらには「流木・土砂・洪水が絡んだ複合災害」へと発展していく。ただ実際は、山地部から流木・土砂・洪水流が流れ込んできた時の受け皿となる河川の大きさにも被害の実態は依存する。大・中河川上流の

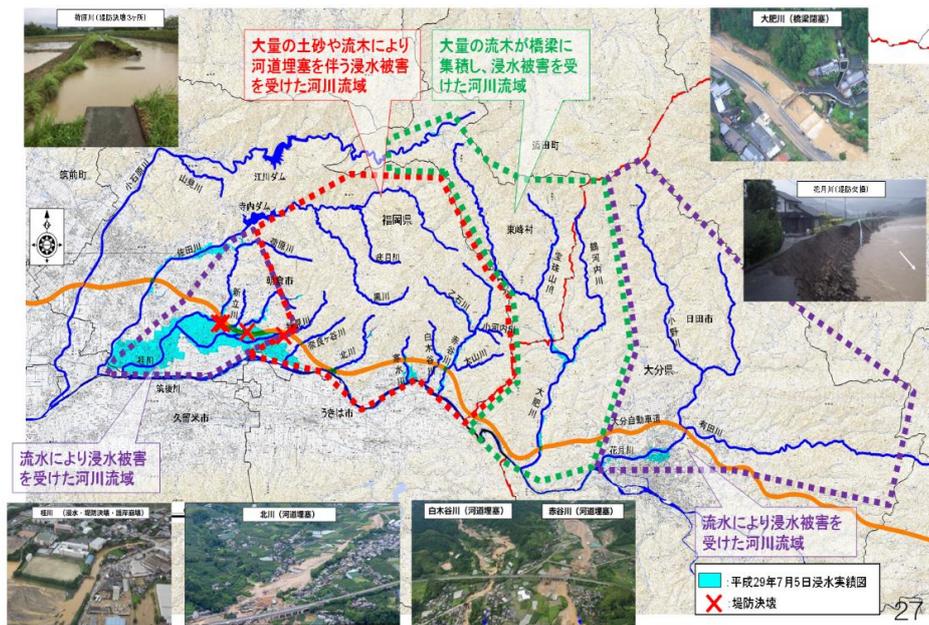


図 3. 8.6 筑後川右岸流域の被害の特徴（国交省委員会資料）



図 3. 8.7 災害の様相による分類図（大分県作成）

小河川部や元々流域面積の小さい奈良ヶ谷川・北川・寒水川・白木谷川などの小河川では、河道断面もまた架かっている橋も小さいため、橋梁部付近で巨石や流木により閉塞されやすく、河道も埋塞されやすい。河道の側岸も洪水や土石流により侵食され、流出土砂・流木量の生産をさらに増やすこととなる。

多少流域面積の大きい大肥川のような河川の中・下流部で河道断面や橋が多少大きくなってくると、巨石や土砂による橋梁部での閉塞は起こらなくなり、専ら流木による閉塞とな

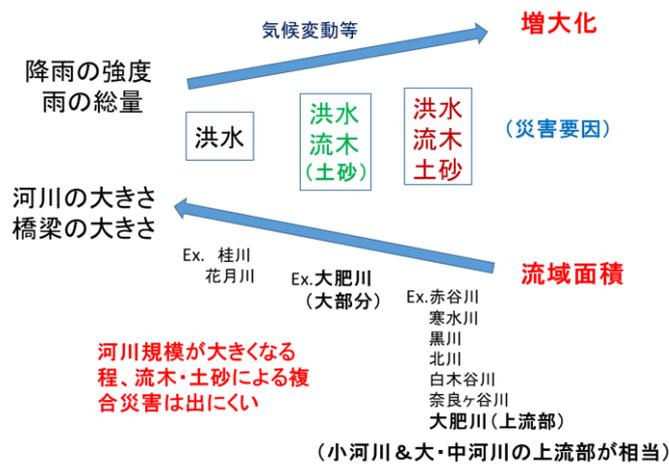


図 3.8.8 降雨の大きさ・強さと河川の規模による災害の様相の変化

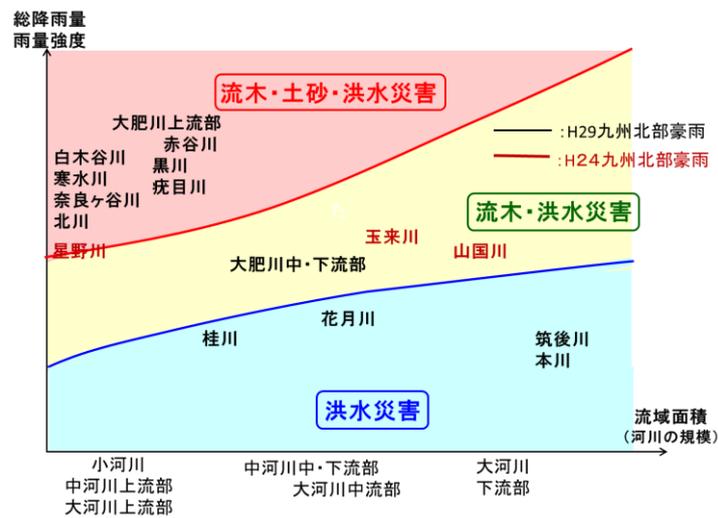


図 3.8.9 災害の形態・様相の分類

る。なお、河道断面が流木に比して大きい時は橋桁部分での流木の集積による部分閉塞が多くなり氾濫へとつながる。ただ、古い橋などで橋桁が低かったり、橋脚の間隔が狭かったりすると全面閉塞となって、洪水氾濫を引き起こし橋梁上流側の堤防の破堤や橋台背後の洗掘等の原因となる。降雨の大きさ・強さと河川の規模による災害の形態・様相の分類を図 3.9 に示す。また、山地河川における災害外力・抵抗力と災害の様相・特性の関係を模式的に図 3.10 に示す。気候変動で最大災害外力は今後益々増大していくものと思われる。流木・洪水災害はこれまでもしばしば見られたが、今回のような流木・土砂・洪水の三重複合災害はこれまであまり見られていなかったことから、現在は「河川・流水が発生土砂量を流し得る能力」と「最大災害外力」がクロスする『**転換点**』にあると考えられる。今後はさらに災害外力が増大していくことで、山地河川における「**流木・土砂・洪水による複合災害**」が増えてくるものと危惧される。

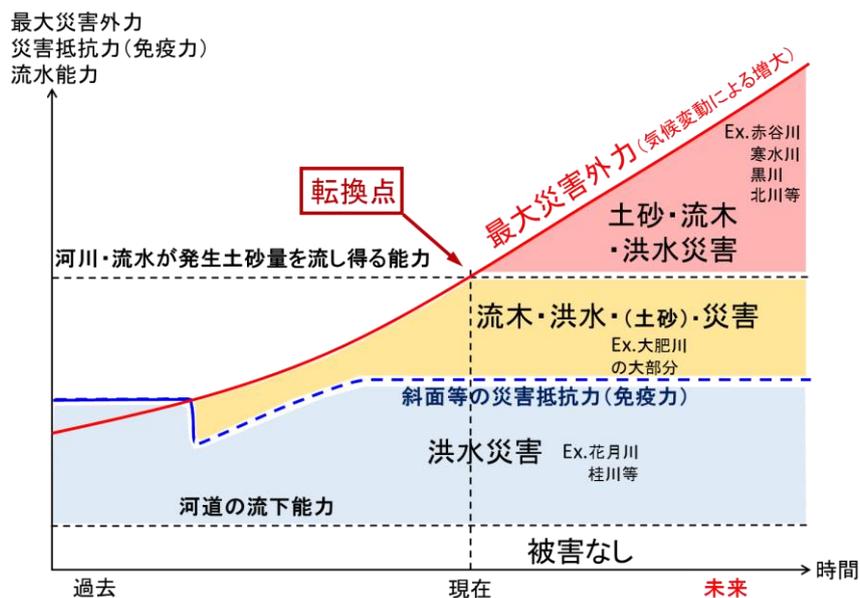


図 3.8.10 災害外力・抵抗力と災害の様相の関係（山地河川の場合）

b) 大肥川流域の特性と被災状況

大肥川（おおひがわ）は筑後川水系筑後川右岸の支流で、福岡県朝倉郡東峰村及び大分県日田市を流れる流域面積 77.6 平方キロの一級河川である。白石山に源を發し、概ね南流し、日田市西部を通過して JR 夜明駅付近で筑後川に合流する。福岡県内の河川部分は福岡県が、大分県内の河川部分は大分県が管理している。比較的大きな左岸側支川として宝珠山川、鶴河内川が流れ込んでいる（図 3.11）。この大肥川では、上流部で洪水・流木・土砂の 3 重複合災害、中・下流部で洪水・流木の 2 重複合災害を示し、今回の九州北部豪雨では、特徴的



図 3.8.11 大肥川流域



図 3.8.12 流木を含む土石流が人家を襲った宝珠山川支川本迫川流域の屋椎地区



図 3.8.13 流木により閉塞した山地小河川の橋梁

な災害の様相を示す河川となっている。

(1) 大肥川の上流部、支川の宝珠山川，鶴河内川の上流部（流木・土砂・洪水災害）

宝珠山川上流の本迫川では豪雨により大量の流木を含んだ土石流が発生し，小さな溪流から溢れ，屋椎地区の集落を襲って大きな被害をもたらした（図 3.8.12）。また，鶴河内川の上流の岩戸川でも小さな沢筋に大規模な土石流が発生し側岸を侵食しながら流下して，流出土砂や流木のボリュームを増やしている。このように大肥川全体としては，流木・洪水災害に分類されるが，上流部では川が小さいこともあって赤谷川流域と同じような流木・土砂・洪水による複合災害が起こっている。

図 3.8.13，図 3.8.14 に大肥川上流部の支川の小さな溪流河川に架かる橋で全面閉塞を起こした二つの例を示す。橋の下に潜り込んで閉塞の原因を調べたところ，一つは流木が主因，もう一つは巨石が原因となっていた。前者の場合，流木がきれいに立って並んでいた。理由は今のところ不明だが印象的な現象であった。

(2) 大肥川中・下流域（流木・洪水災害）

前述のように大肥川流域は山地斜面の崩壊率は大きくはなかったが，流域面積が他の河川と較べても大きいため，大肥川流域全体としてはかなり大きな洪水・流木・土砂の発生量となっている。ただ，中・下流部は河道断面はある程度大きく橋梁の橋桁も桁下高がある程度あるため巨石や土砂による閉塞はなく，流木による閉塞が見られた。図 3.8.15 に大肥川



図 3.8.14 巨石により閉塞した山地小河川の橋梁



図 3.8.15 橋梁に集積する流木（鶴河内川）

支川鶴河内川に架かる中崎橋，また図 3.8.16 に大肥川支川宝珠山川に架かる阿弥陀堂橋での流木による全面閉塞の様子を示す．行き場がなくなった洪水はそれぞれ左岸側に溢れ，堤防を決壊させて橋の横に新しい流路を形成している．図 3.8.17 に大肥川本川中流部の橋梁と支川宝珠山川に架かる阿弥陀堂橋での流木による閉塞状況と流木撤去後の同じアングルからの写真を比較して示す．大肥川本川の場合は，鉄道橋は桁下高が大きかったので問題なかったが，そのすぐ下流の道路橋が桁下高も小さく橋脚スパンも大きくなかったため全面閉塞を招いている．なお，大肥川本川の大部分や支川の宝珠山川，鶴河内川の各下流部では至る所で架かっている橋の橋桁に流木が集積して部分閉塞を起こしており，そのため流

れにくくなった洪水が両サイドに溢れ、側岸侵食を起し堤防を決壊させて田畑や人家に被害を及ぼしている（図 3.8.18, 図 3.8.19）.

(3) 土石流の直進性の脅威

今回の九州北部豪雨災害で改めて土石流が大規模化した時の脅威を再認識させられた. 2013年の伊豆大島災害では大規模化した土石流が小さな峰を越えて直進し、住宅地を襲って甚大な被害をもたらしたが、今回も同様の現象が見られた.

大肥川左支川宝珠山川に流れ込んでいる本迫川は小さな溪流河川であるが、大規模な土石流が発生して大量の土砂・流木と共に下流の屋椎地区を襲い、二人が亡くなるなど大きな被害を引き起こした（図 3.8.12）. さらに下流で宝珠山川とほぼ直角に合流しているが、その直前で土石流は JR 日田彦山線の鉄道橋を押し流し、鉄道を寸断しただけでなく宝珠山川への合流点の対岸の道路に乗り上げ、道路の両サイドの人家を押し流し一人が亡くなった（図 3.8.20, 図 3.8.21）. 人家の地盤は道路より少し高くなっており、通常は危険と判断しにくい場所であった.



図 3.16 大肥川支川宝珠山川阿弥陀堂橋への流木の集積（東峰村役場提供）



図 3.8.17 橋梁部での流木の集積による河道の閉塞（大肥川・宝珠山川）



図 3.8.18 大肥川に架かる大木橋（流木による部分閉塞と思われる）



図 3.8.19 大肥川に架かるひさげ橋（上流側で溢れている）



図 3.8.20 流木を含む土石流、土石流の直進性（九大田井明准教授作成）



図 3.8.21 土石流の直進性の脅威（九大田井明准教授作成）

また大肥川流域ではないが、佐田川上流の支川黒川に流れ込む小さな河川でも巨石を含む土石流が発生し、その土石流が河川の蛇行部を曲がりきれずに対岸を乗り越えて住宅を破壊し、3名の犠牲者を出すこととなった(図 3.8.22)。近年の災害の様相・特性の変化に応じたリスク評価法の確立が必要である。

(4) 流木・土砂・洪水による複合災害への対応

災害外力の増大によって発生する流木・土砂・洪水による複合災害への対応は容易ではない。発生した流木は出来るだけ山地部に留め、中・下流部の橋梁部での集積は極力抑制して下流にそのままスムーズに流下させることが望ましい。海まで流出するとそれはそれで海岸へ漂着した流木の処理や漁業・舟運への支障の問題等があるが、河道の閉塞による氾濫の方が人命の損失等被害がより甚大と思われる。

今回の九州北部豪雨では、一部の砂防堰堤で大量の土砂・流木の捕捉が見られ、砂防堰堤が山地部に土砂・流木を留めるための有効な手段の一つであることを示した。

また佐田川にある多目的ダムの寺内ダムでは、上流から流れ込んだ土砂・流木を 100% 捕捉し、洪水調節も適切に実施したため下流側の被害を未然に防ぐことができた。改めてダムが気候変動下の流木・土砂・洪水災害に対して極めて有効であることを示した。捕捉した土砂量は 120 万立米に及ぶ。また、図 3.8.23 に示すように多くの流木が捕捉されている。流

木は全てダム湖の上流側に集積しており、網場の上流側に集積する通常の状態とは異なっている。これは、①今回ダムからの放流量が少なかったこと、②大量の土砂を含んで密度が大きくなった洪水流がダム湖に流れ込んで来た、ことから流入水が図 3.24 に示すように密度流となってダムの底面に沿って流下したため大循環流が起り、水表面付近は上流側に向かう流れとなったため、ダム湖の上流端側に流木が集積するという結果になったものと思われる。

c) むすび

人類は今後地球温暖化の真直中を生きていかなければならない。まさに未知との遭遇である。しっかりした技術と共に先見性と想像力、他との連携が求められる。

平成29年7月の九州北部豪雨災害は、大きな転換点とも言えるものであった。災害の様相・性質が大きく変貌していく中で、対策もそれに応じて変わっていかざるをえない。

九州北部豪雨で被災した地域の復旧・復興は、まだ緒に就いたばかりである。今後、各被災自治体において復興計画を策定し、地域の方々の手によって長い年月をかけて地域の再生が進められていくことになる。

気候変動下の自然災害が今後人類にとって大きな脅威となってくる。復旧・復興段階でも災害のみに目を向けるのではなく、持続性を有するそれぞれの地域のための新しい枠組みを考え提案すべき時期にきているように思われる。社会のあり方そのものが問われていると言えよう。我々は、“束になって”この難題を克服しなければならない。人類の叡智が問われている。



図 3.8.22 土石流の直進性



図 3.8.23 寺内ダムで捕捉された流木

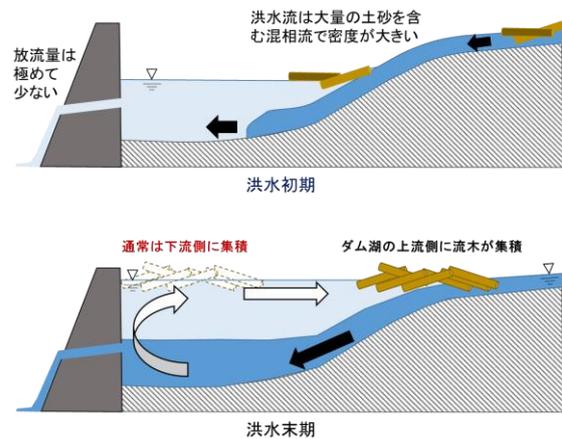


図 3.8.24 流木集積のメカニズム

3.8.2 新たなステージの水土砂災害から学ぶこと

a) 災害の特徴と被害の甚大化の要因

福岡・大分両県に甚大な被害をもたらした「平成 29 年 7 月九州北部豪雨」は、狭い範囲を襲った記録的な降雨で、山の斜面がほぼ同時多発的に崩壊し、そこに生えていた木々が流木となって土壌と共に流出した。大量の水と流木・土砂が山間部の支流に流れ込み、橋などの周辺で流木が集積して閉塞することで河道は土砂で埋塞され、両サイドに氾濫した洪水流は集落や田畑を襲い、40 名以上の死者・行方不明者を出すなど甚大な被害をもたらした。この豪雨は、洪水・流木・土砂による三重苦の複合災害という意味でターニングポイント（転換点）ともいふべき凄まじい豪雨災害であった。今後の気候変動下で、全国の山地小河川でこのような豪雨にみまわれるであろうことを我々は覚悟しなければならない。

自然界も人間社会も「災害免疫力」ともいふべき抵抗力・防災力を有している。自然界の山地部の斜面は、これまでに経験した降雨に耐えられない部分は既に全て崩れて耐えられる箇所だけが残るため、これまでと同等もしくはそれ以下の降雨に対して斜面崩壊等はほとんど起こらない。しかしながら、これまででなかったような豪雨に襲われると、災害免疫力を超えるため斜面は耐えられずに崩壊し、防災インフラの許容力以上の災害となって人間社会を襲うため、甚大な被害を引き起こすこととなる。また氾濫して堆積した土砂や流木は、災害後の復旧の大きな障壁となる。

このように災害外力が増大して防災力を凌駕するというのは、実は我々の想像以上に深刻で大変なことなのである。特に今回のように狭い地域に大きな外力が集中的に働く場合には防護することは極めて困難である。全ての地域の防災力を上げることは不可能だからである。

b) レジリエンスの強化のために

ではこの新たな状況にどう対応したら良いのであろうか。ある程度の被害は避けられないものとして、社会のレジリエンス（強靭さ、回復力）を高めることが必要である。対応策として以下のことが考えられる。

- (1) ハード、ソフト、ヒューマンウェアを総動員して、また自助・共助・公助が役割分担を確認して実行しながらも協働し、対策技術面でも既存の知識・新しい技術・インフラ等をフル稼働させて『**東になって**』かからなければ今後の災害に到底対抗しきれない。
- (2) 既存の防災インフラを 120%活用する（Wise use）ためには、組織の壁を越えた連携が必要である。例えば、国交省所管の治水ダムもしくは多目的ダムと農水省の利水ダム（灌漑ダム）等を連携運用することで、防災能力を大幅に拡大することができる。また、ダムは網場（アバ）などを用いると極めて有効な流木捕捉施設となるので、電力会社の発電ダムや農業用灌漑ダム（ため池）等も有効活用すべきである。現状では流木を捕捉すると処理費用を自己負担しなければならないため、発電ダムでは流木をそのまま下流に流している。下流の流木災害を防ぐために処理費用は国が負担してでも全てのダムでの流木の捕捉を義務付けるべきである。
- (3) 河川の横断構造物（橋や堰など）が大出水時に流木等の流下に対し障害となっているのは否定できない。したがって少なくとも新しく架橋する時は十分な桁下高や橋脚スパンが得られるように配慮すべきである。
- (4) 今回の豪雨ではため池の決壊による被害の拡大があった。想定外の事故を未然に防ぐためにも、ダム等の既存の大型インフラに大きな外力を加えた場合に何が起こるのか、**ストレステスト**を早急に実施し、事前に対策を講ずるべきである。
- (5) 今後強化する集中豪雨等に対し完全な防護は不可能なので、個々人の危機回避能力を高める自助・共助に頼らざるをえない。ただ、個々人が災害に対し高い意識を持ち続けるのは至難なので、お互いに励まし合い声を掛け合う組織が不可欠である。その意味で今後は自主防災組織などの「**共助**」がキーポイントとなってくる。
- (6) 人命の損失を防ぐのは不可欠であるが、命が助かっても家や財産をなくすと、特に高齢者は再建の意欲、生きる気力を無くす人が多い。被災者の経済面での救済措置が必要である。今は防災も不十分、被災者支援も不十分である。被災者の数は全国民から見ればごく一部である。皆で支えれば被災者支援は決して不可能ではない。日本に住む以上は誰でも被災者となりうるので、任意の災害保険の他に共済制度として車の自動車損害賠償責任保険のような一種の強制災害保険制度は如何だろうか。被災者が希望を失わないような救済措置が望まれる。
- (7) 今回の豪雨災害のように短時間に狭い領域に集中的に大雨が降ると、斜面崩壊や土石流、洪水氾濫も短時間の内に襲ってくるため、避難所までの水平避難が難しいケースが今後増えてくるものと思われる。緊急時には近所の人達の一時避難所として機能し、普段は通常の住宅として使われる**頑丈な RC 構造の家屋**に対し部分的な公的補助が行われるような制度が期待される。

(8) 災害に強い社会を築くためには、『共生の文化』、『励ましの文化』を育むことが欠かせない。そのためにも地域社会における人間のネットワークの構築が重要となる。

c) 今後の防災の取組みについて

国交省と福岡県が設置した「筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会」では、これまで河川・砂防行政では検討されてこなかった、河川事業と砂防事業の新たな連携方策の技術的な手法をまとめ上げた。このことは、今後の中小河川における激甚な洪水・土砂・流木災害に対して、河川・砂防の復旧・復興のための新たな技術的対応策を提案するものとして先駆的な取り組みとなっている。

なお、本技術検討委員会で検討を重ねるなかで、以下に示すような新たな技術的知見や研究成果の必要性が痛感された。

- ・二次元非定常モデルによる流れ・土砂・河床変動の解析検討，また河床変動解析における浮遊砂のモデル化
- ・自然の流れをもっと活用して土砂を流す技法の開発，伝統技術からも学ぶ新技術の開発
- ・灌漑用ため池や電力ダム，流水型ダム等における流木捕捉のための効率的な網場（アバ）の設置技術の開発
- ・今回の災害では，河川の橋梁等の横断構造物周辺で流木・土砂の集積による河道の閉塞・埋塞が起こった。これらの現象を避けるための新たな技術の開発
- ・今回の災害では，流木・土砂を含む流れが大規模化したこともあり，これらの流れは慣性力で直進化する傾向があるため，支川の合流点の対岸側や小河川の蛇行部の外側に建つ住宅が襲われ，尊い人命が失われた例がいくつか見られた。災害の様相・特性の変化に応じたリスク評価法の確立が必要

技術者・研究者，特に若い方々の奮起による新たな研究成果が期待される。

3.9 花月川

3.9.1 はじめに

平成 29 年 7 月 5 日から 6 日にかけて、記録的な大雨が九州北部地方を襲った。この大雨は、暖かく非常に湿った空気が対馬海峡付近に停滞していた梅雨前線に流れ込み、綿状降水帯が形成されたことにより発生したことが報告されている。福岡県朝倉市や大分県日田市等では 24 時間降水量の値が観測史上 1 位の記録を更新したほか、九州北部地方では 7 月 5 日から 7 月 6 日までの総降水量が多いところで 500 ミリを超え 7 月の月降水量平年値を超える大雨となり、気象庁によりこの豪雨は「平成 29 年 7 月九州北部豪雨」と命名された。この平成 29 年 7 月九州北部豪雨により、福岡県と大分県の両県、特に筑後川水系の河川に甚大な被害を発生させた。筑後川の支川である花月川では、堤防欠損、JR 久大本線の橋梁が流出したほか、その支川である小野川においては、大規模な斜面崩落が発生し河道閉塞が発生した。

また、花月川では、直近の災害として、2012 年 7 月 3 日ならびに 11 日から 14 日に九州北部を襲った平成 24 年 7 月九州北部豪雨がある。この時、花月川では堤防 2 カ所の決壊を含む多数の被害が発生し、13 か所で越水した。しかし平成 29 年 7 月九州北部豪雨における花月川では、平成 24 年 7 月九州北部豪雨で発生した堤防決壊のような重大な被害は発生していない。本研究では、花月川流域における雨量特性の検討および平成 29 年 7 月九州北部豪雨が花月川の河道に与えた影響について考察する。

3.9.2. 花月川流域における降水特性

a) 雨量, 水位, 流量特性

図-3.9.1 は、花月川の流域地形を示す。花月川は大分県日田市内を流れ、その源を日田市北部の見山と大将陣山の間に発し、最初南流した後、日田市街地に入ると次第に西向きに変え、筑後川に合流する、幹川流路延長 16.5km、流域面積 130.2km² の一級河川である。上流 5.4km 付近で有田川と合流し、上流 8.8km 付近で支川の小野川と合流する。その流域地形は、北側は支川の小野川の流域により福岡県との県境まで及び、東側は有田川の流域により玖珠町内まで伸びている。下流側は筑後川の合流部に近づくにつれて、流域は徐々に狭くなっていく。

図-3.9.2 は、各観測所における一時間雨量および、累積雨量の時系列を示す。日田市には国土交通省の観測所が小野川水域に 1 か所、花月川水域に 3 か所、有田川水域に 1 か所存在する。このうち花月川流域の花月観測所と有田川流域の横畑観測所では、欠測が多かったため、今回の検討には用いていない。また花月川流域をわずかに外れているが、気象庁が管理する日田特別地域気象観測所(AMeDAS)が JR 久大本線落橋現場の付近に存在する。

日田市街地中心部に当たる AMeDAS 日田観測所における最大降雨強度は 74.5mm/hr



図-3.9.1 花月川流域

7月5日18時から20時の3時間雨量180mm、24時間雨量は368.5mmを観測した。花月川の支川である小野川の降水量は、上宮山の頂上付近に位置する雨量観測所である、上宮山観測所で最大降雨強度83mm/hr、3時間雨量224mm、24時間雨量は581mmを観測した。ほかの4か所の観測所の雨量を比較すると上宮山では、7月5日の12時から7月6日の11時の24時間の積算雨量が約200mmほど多く、また1時間の最大雨量についても日田土木では71mm、尾当では65mmと上宮山の雨量の値は高くなっている。降水期間については日田市街地の観測所については15時ごろから1時間に30mmを超える激しい雨が降り始めているが上宮山については12時から21時にかけて激しい雨が降り続けている、また、どの観測所についても18時および19時にピークを迎えている。花月川水位観測所(上流3.3km地点)においては、5日19時40分にピーク水位4.53mの観測史上最高水位を記録しており、雨量のピークの時間と比較すると、1時間ほど遅れて最高水位に達していることがわかる。また、支川の小野川における大規模な斜面崩落は、6日10時頃に発生しており³⁾、この時の雨は、既に小康状態であることが分かる。

b) 降雨の確率評価

図-3.9.3はAMeDAS日田観測所における年最大日雨量、年最大1時間雨量、年最大2時間雨量、年最大3時間雨量、年最大6時間雨量、年最大12時間雨量の再現期間を示す。統計解析では、財団法人国土技術研究センターで公開されている水文統計ユーティリティを用いた。統計に用いたデータは、気象庁ホームページで公開された1942年から2016年の毎正時の時間雨量である。

比較的適合度の高いガンベル分布(Gumbel)、一般化極値分布(GEV)、対数ピアソンIII型分布(LogP3)、対数正規分布3母数クォンタイル法(LN3Q)、対数正規分布2母数(Slade I,積率法)(LN2LM)、対数正規分布2母数(Slade I,積率法)(LN2PM)の6種類の確率分布、および母数推定を行った。確率分布の適合度評価基準である標準最小二乗基準SLSC(Standard Least-Square Criterion)によれば、SLSC<0.04(相関係数COR>0.98)の条件を満足する必要がある。

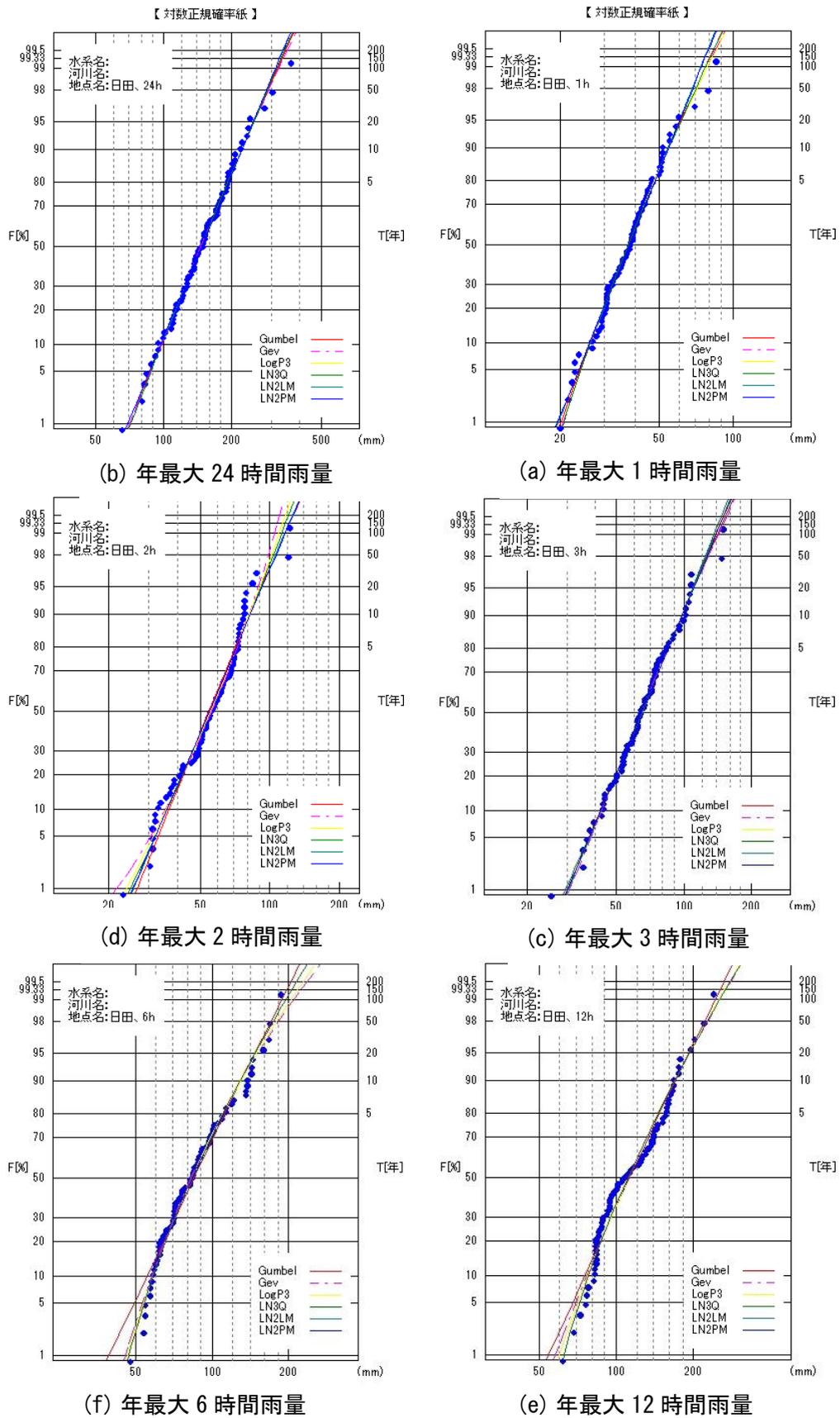


図-3.9.3 降雨継続時間に対する確率年 (AMeDAS 日田観測所)

表-3.9.1 確率分布と SLSC 及び相関係数

分布	母数推定法	SLSC	相関係数
ガンベル分布(Gumbel)	L積率法	0.029	0.991
一般化極値分布(Gev)	L積率法	0.026	0.992
対数ピアソンⅢ型分布(logP3)	積率法	0.022	0.992
3母数対数正規分布(Ln3Q)	Quantile法	0.023	0.991
対数正規分布2母数(Slade I,)(LN2LM)	L積率法	0.026	0.987
対数正規分布2母数(Slade I,)(LN2PM)	積率法	0.025	0.987

表-3.9.1 は年最大一時間雨量における各確率分布の SLSC と相関係数を示す。表より、SLSC については対数ピアソンⅢ型分布(LogP3)や対数正規分布3母数クオンタイル法(LN3Q)、対数正規分布2母数(Slade I,積率法)(LN2PM)が特に高い値を示しているが、相関係数については、対数ピアソンⅢ型分布(LogP3)と一般化極値分布(GEV)の二つが非常に高い値を示している。ほかの最大T時間雨量についても見たとき、GEVが全般的に最も適合度が高かったため、各年最大時間雨量の確率分布は一般極値分布(GEV)を用いて検討する。GEVによれば、年最大日雨量で130年、年最大1時間雨量で52年である。年最大2時間雨量では、GEVはSLSCの条件を満足せず、条件を満足するLogP3によれば、その再現期間は400年を超える。

図-3.9.4は、降雨継続時間における再現期間および累加雨量を示し、平成29年7月九州北部豪雨および比較のため平成24年7月九州北部豪雨を含む。再現期間は一般化極値分布を基に評価した。平成29年7月九州北部豪雨および平成24年7月九州北部豪雨の降水量はどちらも降雨継続時間が2時間において再現期間がピークを示すことが分かる。

降雨継続時間が1時間の場合を除けば平成29年7月九州北部豪雨の示す再現期間の方が平成24年7月九州北部豪雨よりも大きく、130年から220年の範囲を示す。また、平成29年7月九州北部豪雨における累加降水量は、降雨継続時間が6時間まで急な増加を示し、それ以降は緩やかな増加を示す一方で、平成24年7月九州北部豪雨における累加降水量は、降雨継続時間が4時間まで急な増加を示し、それ以降は緩やかな増加を示す。降雨継続時間が1時間の時を除けば、総じて平成29年7月九州北部豪雨の方が、累加降水量が大きいことが分かる。平成29年7月九州北部豪雨における降雨の再現期間および累加降水量は、平成24年7月九州北部豪雨における降雨の再現期間および累加降水量を上回っている。

それ故、平成29年7月九州北部豪雨における花月川では、平成24年7月九州北部豪雨に比べ規模の大きい出水が発生したことが分かる。

(c) 平成24年7月九州北部豪雨との比較

図-3.9.5で求めた再現期間より、平成29年7月九州北部豪雨の最大日雨量は369.5mm

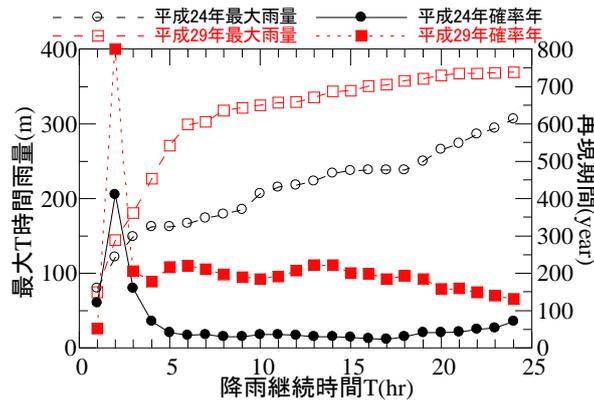


図-3.9.4 降雨継続時間における再現期間および最大雨量

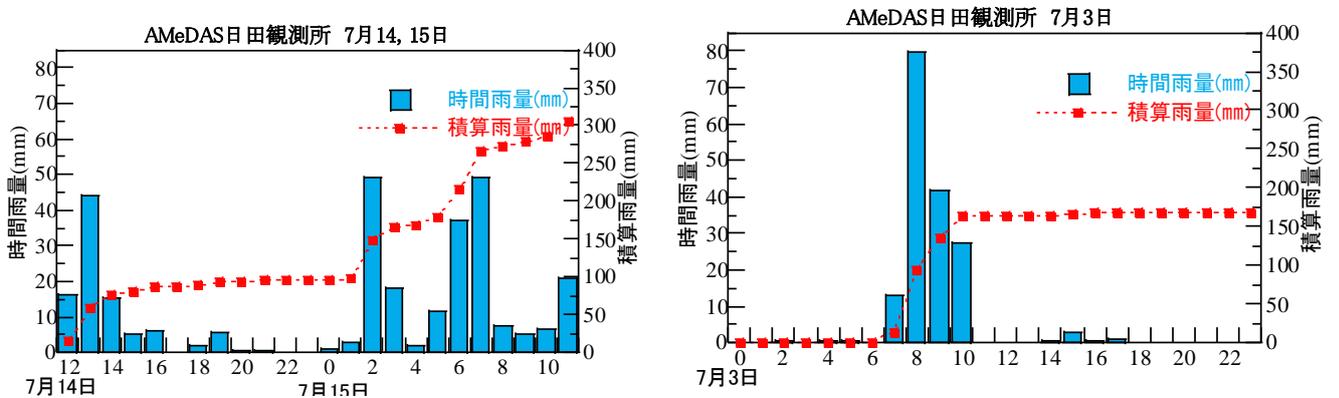


図-3.9.5 平成24年7月、AMeDAS日田観測所のハイドログラフ

で130年確率であるのに対し最大の再現期間を示す最大2時間雨量が144mmで800年確率となっている。同様に平成24年九州北部豪雨の最大日雨量は306mmで70年確率であるのに対し最大の再現期間を示す最大2時間雨量は121.5mmで410年確率となっている。

また平成24年7月九州北部豪雨の時の7月3日と7月14日12時から7月5日の12時までの1時間ごとの降水量と累加雨量を図-6に示す。平成24年7月九州北部豪雨では最大1時間雨量から最大6時間雨量については7月3日に観測されたが、最大7時間雨量から最大24時間雨量については7月13日12時から、7月14日12時に観測されたものである。図より平成29年7月九州北部豪雨の降雨特性は平成24の7月3日の降雨特性と似た、短期集中型の降雨形態であることがわかる。また最大日雨量を観測したのは7月13日から14日であるのに対し、最大1時間雨量を観測したのは7月3日であることから7月3日の豪雨は、短期間に集中したものであったことがわかる。

3.9.3. 災害の被害実態

表-3.9.2および表-3.9.3は、福岡県、および大分県の主な被害状況を示す³⁾。福岡県の主な被害箇所は朝倉市であり、大分県の主な被害箇所は日田市である。福岡県と大分県の被害状況を比較したとき、大分県は浸水被害が大きいが、建物の被害については全壊、半

壊の棟数ともに、福岡県の被害が大きく、また土砂災害の箇所についても、福岡県で多く

表-3.9.2 主な被害状況（福岡県 2017.9.26、大分県

	全壊 (棟)	半壊 (棟)	床上浸水 (棟)	床下浸水 (棟)	道路箇所 (箇所)	河川被害 (箇所)	土砂災害 (箇所)
福岡県	244	826	22	557	769	460	207
大分県	48	269	150	843	663	1382	45

表-3.9.3 被害額(福岡県 2017.8.20, 大分県 2017.8.22)

	農業 (億円)	林業 (億円)	道路 (億円)	河川 (億円)	砂防 (億円)	商工 (億円)	土砂災害 (億円)
福岡県	389	302	375	545	161	106	1941
大分県	60.4	30.5	40.3	143.9	13.5	7	299.8

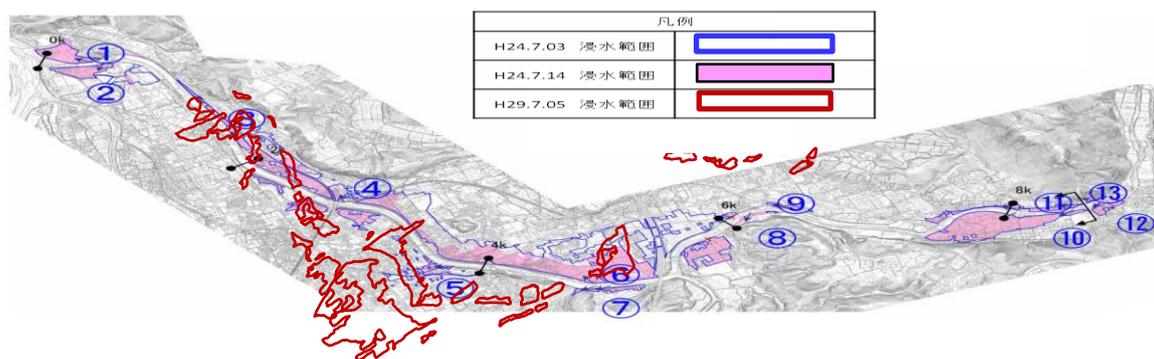


図-3.9.6 花月川流域の浸水範囲（出典：国土交通省）

発生していたことから、福岡県では土砂災害が、大分県では河川災害が主であったことが分かる。人的被害については、2018年1月17日現在福岡県で死者33名、行方不明者5名、負傷者10名、大分県では死者3名、負傷者6名であった。

花月川の流れる日田市については、大分県日田市（2017年8月22日付）によれば、死者3人、住家被害は床上浸水143棟、床下浸水781棟、被害総額は238.4億円、そのうち農林水産業関係63.8億円、土木建築関係169.6億円、教育関係7100万円に達した7)。

図-3.9.6は、平成24年7月、平成29年7月の花月川流域の浸水範囲を示す。図中の番号は平成24年7月3日の出水による越流箇所を示す。図より、上流4kmから上流6kmの右岸では平成29年については、平成24年ほどは4.37m²、平成29年7月5日のピーク水位は4.5m¹であることが分かっている。また平成24年の豪雨については、7月13日から7月15日に比べて、7月3日の豪雨のほうがより広い範囲で浸水していたことが分かる。

表-3.9.4は花月川における浸水被害状況を示す。平成24年7月九州北部豪雨では浸水面積は179.4ha、床上浸水戸数475、床下浸水戸数358であった(平成24年10月2日時点)

8). それに対して平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、浸水面積は 86ha、床下浸水戸数は 282,

表-3.9.4 花月川における浸水面積および浸水戸数

	浸水面積 (ha)	家屋浸水		計
		床上	床下	
H24.7	179.4	475	358	833



(1) 花月川橋梁落橋現場



(3) 髪永井堰の直下流の堤防



(2) 渡里橋直上流の堤防欠損

(4) 小野地区の土砂崩壊

(出典:国土交通

図-3.9.7 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における花月川の被害状況

床上浸水は 562 であった(平成 29 年 7 月 12 日時点).

図-3.9.7 に平成 29 年 7 月九州北部豪雨の主な被害箇所の状況を示す. 図-3.9.7 (1)は上流 2.7km 地点の JR 久大本線の落橋現場を示す. この現場は JR 日田駅と JR 光岡駅の間に位置し, 花月川を渡す橋梁である. 筑後川河川事務所により 7 月 5 日 20 時 45 分の時点で橋梁の流出が確認されている. また, 花月川橋梁の直上流の右岸では河岸浸食が生じている. 詳細については 3.9.4 節にて示す.

図-3.9.7 (3)は上流 6.4km 付近の河岸浸食を示す. 髪永井堰の直下流の右岸が, 約 100m に渡り河岸浸食が生じた. またこの現場の下流側の区間では平成 24 年 7 月九州北部豪雨で越流により堤防が決壊しており, 髪永井堰周辺では平成 24 年の豪雨の後に国土交通省により, 激甚災害対策特別緊急事業が行われていた区間である. 詳細については 3.9.5 節にて示す.

図-3.9.7(4)は花月川の支川である小野川の斜面崩壊の現場を示す。崩壊土砂量は約20万立米であり、小野川に堆の広い範囲での浸水は見られないが、上流3kmから上流4km地点の左岸については、平成29年では広い範囲で浸水していることが分かる。また上流3.38km地点の花月水位観測所では、平成24年7月14日のピーク水位は4.37m²、平成29年7月5日のピーク水位は4.5m¹)であることが分かっている。また平成24年の豪雨については、7月13日から7月15日に比べて、7月3日の豪雨のほうがより広い範囲で浸水していたことが分かる。

3.9.4 JR久大線近傍の砂州動態

図-13は、右岸から2017年7月8日に撮影された、花月川上流約2.7km地点に位置するJR久大本線の鉄橋である花月川橋梁の流出現場を示す。7月5日18時頃には川の水位は橋桁の高さまで及び、同日20時45分の時点では鉄橋の流出が確認されている。

なお、表中の橋脚No.は図中の番号に対応する。図より、花月川橋梁は5本の橋脚から成り立っている。5本の橋脚のうち最も左岸に位置する橋脚は高水敷にあり、右岸側の4本の橋脚については低水路内に位置する。図-13より、低水路内の橋脚のうち真ん中の3本(No.2~4)は橋脚の台座の部分で橋脚が折れているが、最も右岸に位置する橋脚(No.1)は、根元の部分から転倒していることがわかる。

図-3.9.8は花月川橋梁の諸量、及び花月川橋梁と渡里橋の概略図について示す。表は、花月川橋梁の橋脚の諸量について示す。特に橋脚の高さについては根入れ深さ諸元を示すため橋脚周辺の洗掘を考える上で重要である。No.1の橋脚はその直径、高さ、基礎幅がほかの橋脚より小さいことが分かる。低水路内の橋脚(No.1~4)を比較すると、No.1の橋脚の高さは、他の橋脚と比較して1m小さい。すなわち、No.1の橋脚は、河床高が同一であれば、他の橋脚と比較して、橋脚基礎の設置深さが浅くなる。

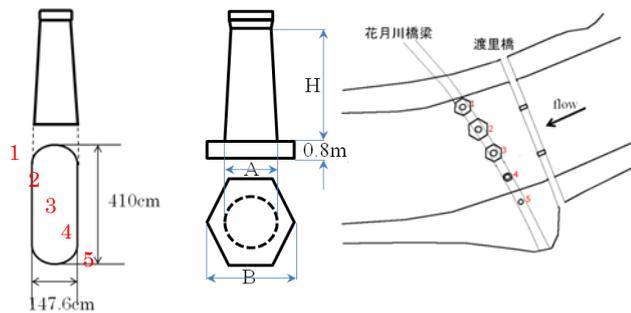
また、花月川橋梁が架かっている地点では、川幅は83.6mであることが分かっている。花月川の橋梁の幅は5本を合計すると約14.5mであり、河積阻害率は概算値として、約17.3%と算出することができる。現在の河川構造令では河積阻害率は5%以内である必要があり、花月川橋梁の橋脚は基準を大幅に超えている。河積阻害率が大きい場合、流速は速くなる



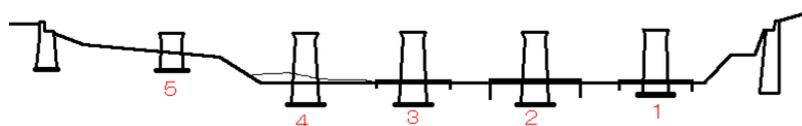
図-3.9.7 JR久大線・花月川橋梁落橋 2017年7月8日撮影

表-3.9.5 花月川橋梁 橋脚諸量

橋脚 No.	直径 A(m)	高さ H(m)	基礎幅 B (m)
1	2.95	6.0	4.22
2	3.08	7.0	4.36
3	3.08	7.0	4.36
4	3.08	7.0	4.36
5	2.58	3.0	3.0



(a) 花月川橋梁橋脚側面および平面図 (c) 渡里橋橋脚側面および平面図 (d) 位置平面図



(e) 花月川橋梁横断面図

図-3.9.8 花月川橋梁諸量および概略図

表-3.9.6 橋脚周辺の砂州変化

	2004/11/7	2009/12/8	2012/4/6	2012/8/3	2012/11/20	2014/10/19
河岸からの距離	14.6m	7.7m	11.04m	0m	0m	砂州なし
合流部からの距離	22.2m	20.2m	14.36m	85m	79.86m	
	2014/12/19	2015/12/9	2015/12/18	2016/12/25	2017/7/15	
河岸からの距離	砂州なし	砂州なし	砂州なし	0m	0m	
合流部からの距離				18.79m	100.2m	

傾向にある。そのため、花月川橋梁については橋脚部で流速が速くなっていたことが推測できる。

図-3.9.8 (f)は花月川直上流の渡里橋の概略図である。渡里橋は花月川橋梁と異なり、3径間の橋梁である。この地点の河川幅は76mであり、橋梁幅は2本合計で2.95である。河積阻害率は3.8%であり現在の河川構造令を十分に満たしている。

表-3.9.6は花月川橋梁の最も右岸の橋脚が位置する地点の河岸からの砂州の距離と、渡里川の合流部と砂州の上流端の距離を示している。表より、平成24年(2012年)7月の出水前では砂州は上流側に年々伸びていることから、この地点では湾曲している区間の内岸部であること、また直上流では右岸で渡里川が合流していることから、砂州が堆積しやすい箇所であったことが分かる。

図-3.9.9は、花月川橋梁周辺の航空写真である。花月川橋梁周辺では花月川は大きく湾曲している。最初に3.2km付近で上流側から見て左側に湾曲し、渡里橋を越えたあたりで

右側

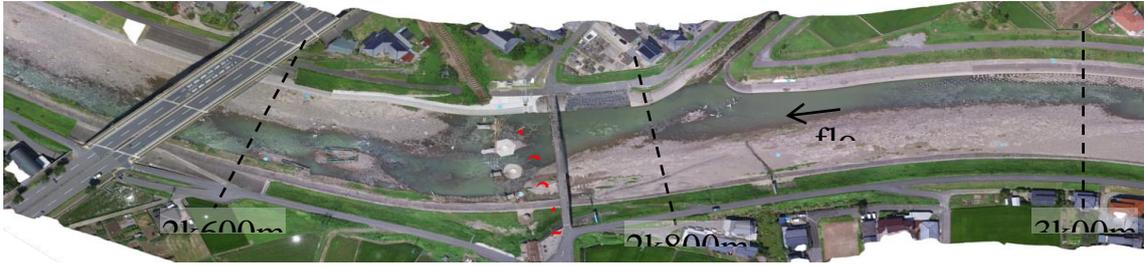


図-3.9.9 UAVにより撮影された航空写真（平成29年8月28日撮影）

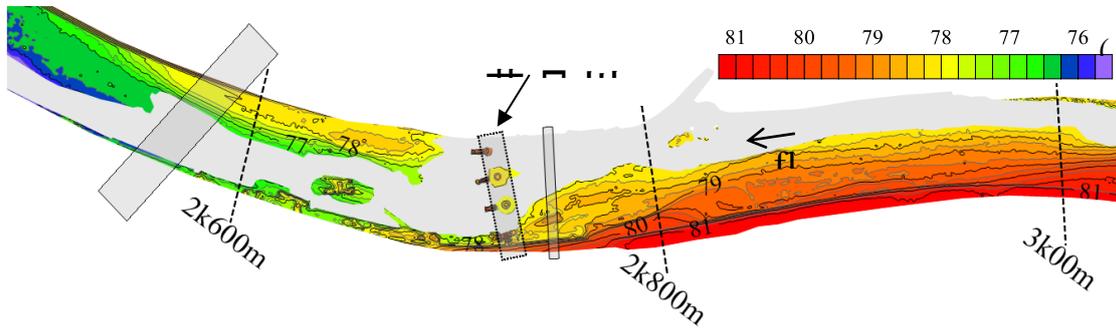


図-3.9.10 河道干出標高のカラーコンター

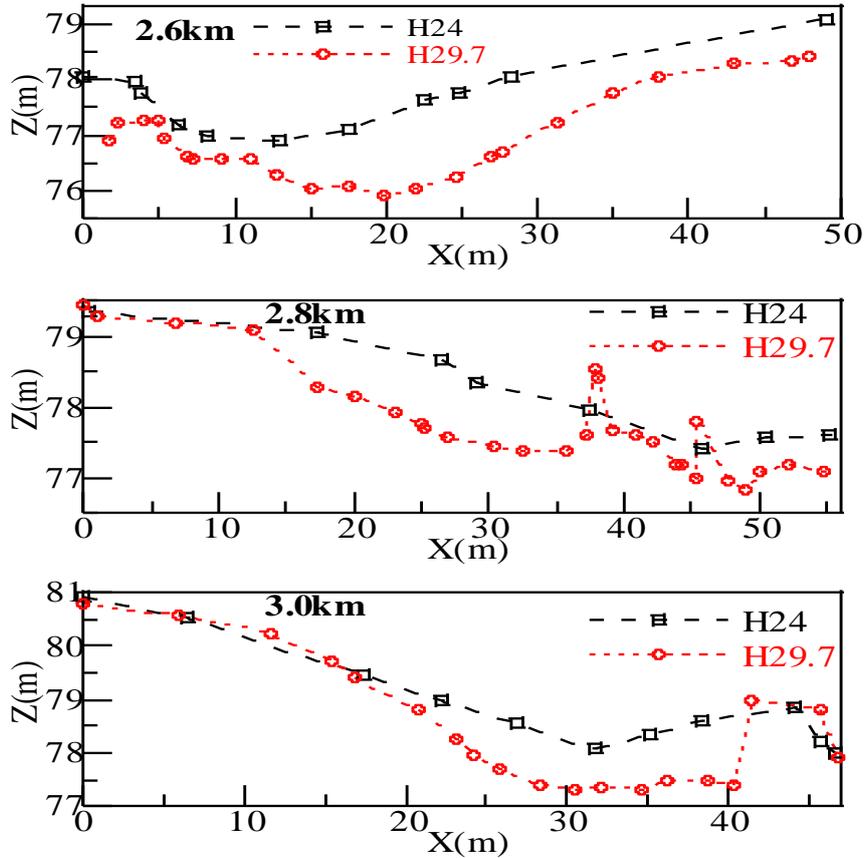
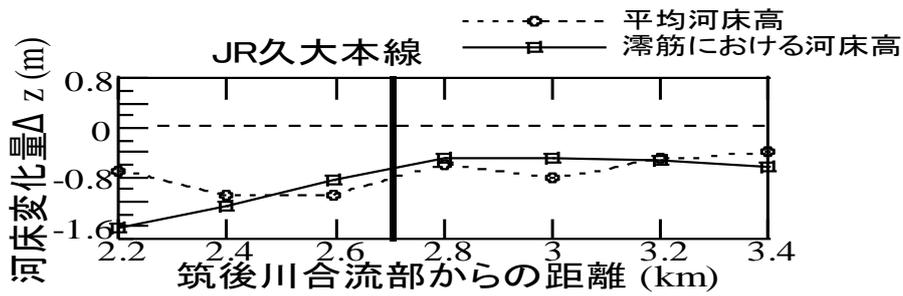


図-3.9.11 花月川橋梁近傍の河床横断面図
(2.6~3.0km 地点) (国土交通省資料提供)



$$\Delta z = z(\text{H29.7}) - z(\text{H24})$$

図-3.9.12 花月川河床変化量の流下方向変化



(a) 2012年4月6日

(b) 2012年8月3日



図-3.9.13 花月川橋梁周辺の航空写真 (Google earth)

(d) 2017年8月28日

に向きを変える。湾曲部の内岸側には砂州が堆積している。

図-3.9.10 は花月川橋梁付近の地盤高のカラーコンター図である。花月川橋梁の上流では左岸側に砂州が堆積していることが分かる。

図-3.9.11 は 2.6km 地点から 3.0km 地点の平成 21 年，平成 24 年，平成 29 年 7 月の河床横断図である。図-3.9.1 および 3.9.11 より花月川橋梁の上流では滞筋部は右岸側に寄っており，花月川橋梁を過ぎると，滞筋は左岸側に寄る。またこの区間は上流側から見て左側に湾曲しており，橋脚が位置する箇所はその末端部であることから，右岸側の橋脚が位置する箇所についても滞筋部であり，洪水流が高速で流れていたことが推測できる。

また図-3.9.12 は花月川橋梁周辺の，上流 3.4km 地点から上流 2.2km 地点の平均河床高の

変化量および濬筋の河床高の変化量を示し、平成24年7月九州北部豪雨後から平成29年7月九州北部豪雨後の差分である。図より、花月川橋梁周辺では平均河床高、および濬筋における河床高の双方において、河床が低下していることが分かる。また図-19の横断面図においても3か所とも平成21年から平成24年、平成24年から平成29年7月にかけて全体的に河床が低下していることが分かる。このことから花月川橋梁付近までは土砂が供給されておらず、洗堀が生じていたことが推測できる。

図-3.9.13は花月川橋梁周辺の航空写真であり、砂州の変遷について示したものである。図-3.9.13(a)は、2012年4月6日に撮影され、図中の赤破線は、図-3.9.13(b)の2012年8月3日における航空写真より得られた、砂州の範囲を重ね合わせたものである。図-3.9.13(a)より、2012年4月には右岸側に堆積している砂州は花月川橋梁の最も右岸側の橋脚まで伸びているが、2012年8月3日では砂州の面積が減少し、橋脚の位置には砂州がないことがわかる。この砂州は、2012年7月に発生した平成24年7月九州北部豪雨に伴う大規模出水により流出したと考えられ、砂州上流端は約70m下流側に移動した。これにより、No.1の橋脚周辺から砂州が消失したことが分かる。図-3.9.13(c)は、2016年12月25日に撮影されたものである、2016年12月25日においても同様に、No.1の橋脚周辺に砂州は確認できない。元々、No.1の橋脚周辺には砂州が存在したため、他の橋梁と比較して橋脚の高さが小さく設計されていたと考えられる。しかし、No.1の橋脚周辺の砂州が平成24年7月九州北部豪雨により流出し、これが2012年7月に発生した平成24年7月九州北部豪雨に伴う大規模出水により流出したと考えられ、砂州上流端はNo.1の橋脚の根入れ深さに影響を与えた。すなわち、No.1の橋脚は、根入れ深さが浅い状態で平成29年7月九州北部豪雨に伴う大規模出水に襲われた。出水時に、No.1の橋脚周辺の河床がさらに洗掘され、橋脚が転倒し、最終的には橋梁が流出したと推測される。

花月川橋梁が位置する区間については平成24年7月九州北部豪雨の被害を受けた後、国土交通省により激甚災害対策特別緊急事業により、コンクリートにより護岸が行われていた。通常の河川の場合、河岸と流水の間には摩擦が生じるため、河川の中央と比較して、水際部では流速は小さくなる。しかしコンクリート護岸の場合では、河岸と流水の間の摩擦は小さくなるため、河川の中央と比較して水際の流速は変わらなくなる。また図-21(d)は2017年8月28日に撮影されたものである。図-3.9.13(c)では、花月川の下流では、砂州は見られないが、図-3.9.13(d)では図-21(a)や図-21(b)の2012年の時と同様に右岸側に砂州が堆積している。このことより、平成29年7月九州北部豪雨の前後についても濬筋は橋梁の上流では右岸側、橋梁の下流では左岸側に安定していたことが考えられる。そのため、花月川橋梁が位置する区間については濬筋は平成29年7月九州北部豪雨の際についてもNo.1の橋脚周辺に位置しており、洪水時にはこの箇所に洪水流が高速で流れたことが推測できる。

3.9.5 考察

本論文では、平成 29 年 7 月九州北部豪雨の降雨特性、およびそれに伴った被害箇所、久大本線落橋現場の区間と髪永井堰直下流の堤防欠損現場について考察した。

平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、平成 24 年 7 月九州北部豪雨の時と同様に、非常に短い期間に集中して激しい雨となった。平成 29 年の降水量の再現期間について、確率分布の適合度評価基準である標準最小二乗基準(SLSC<0.04)を満たす分布の中で適合性の高い一般極値分布及び対数ピアソンⅢ型分布を基に評価した。その結果 AMeDAS 日田観測所における平成 29 年 7 月九州北部豪雨の降雨の再現期間は、最大 1 時間雨量で 52 年確率、最大 2 時間雨量で 400 年確率、最大日雨量で 130 年確率であり、特に最大 2 時間雨量について非常に激しい降雨量であった。

平成 24 年 7 月九州北部豪雨と比較すると、降雨継続期間が 1 時間の時のみ平成 24 年の豪雨時の再現期間のほうが長かったが、降雨継続期間 2 時間から 24 時間については平成 29 年 7 月九州北部豪雨の再現期間は何れの時間においても長く、ピークである 2 時間を過ぎた後の降雨継続期間においては、平成 24 年九州北部豪雨では 4 時間以降の再現期間は 100 年以下であるのに対し、平成 29 年 7 月九州北部豪雨では 130 年～220 年の範囲を示す。

JR 久大本線の鉄橋である花月川橋梁について、橋脚が位置していた地点の砂州について過去の形状と比較すると、平成 24 年 7 月九州北部豪雨以前までは最も右岸に位置する橋脚の場所には砂州が存在していたが、平成 24 年 7 月九州北部豪雨に伴う出水により砂州が流出した。

また最も右岸に位置する橋脚は他の橋脚と比較すると、高さが 1m 低く設計されており、橋脚の位置に砂州が存在していなかったことから、平成 29 年 7 月九州北部豪雨の際には橋脚の根入れ深さが非常に浅かったことが考えられる。橋脚の幅については、河川幅が 83.6m であるのに対し、橋脚の幅は 5 本合計で 14.5m であり、河積阻害率はおよそ 17.3%であり、現在の河川構造令の基準を大幅に超過している。そのため洪水流の範囲が狭くなり、流速が速くなっていたことが考えられる。

河床形状を比較すると平成 29 年 7 月九州北部豪雨の前後で、河床が低下しており、洗堀が生じていたことが分かり、また滞筋は花月川橋梁の上流では右岸側に寄っていることが分かり、花月川橋梁の橋脚の位置においては流速が速くなっていたことが考えられる根入れ深さが比較的浅かったこと、また河床が洗堀されていたため、橋脚が転倒し、橋梁が流出したと推測される。

3.9.6. おわりに

平成 29 年 7 月九州北部豪雨が花月川の河道に与えた影響について平成 24 年九州北部豪雨との比較を通して検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 降水量の再現期間は、適合度評価基準の最小二乗基準である SLSC<0.04 を満足し、適

合性の高い一般極値分布および対数ピアソン III 型分布を基に評価した。AMeDAS 日田観測所における平成 29 年 7 月九州北部豪雨の再現期間は、AMeDAS 日田観測所において年最大日雨量で 130 年、年最大 1 時間雨量で 52 年、年最大 2 時間雨量で 400 年相当であった。

- 2) 降雨継続時間と再現期間との関係から、AMeDAS 日田観測所において再現期間は、降雨継続時間が 2 時間で最大値約 400 年を示すことが認められた。また、平成 29 年 7 月九州北部豪雨の再現期間は、平成 24 年 7 月九州北部豪雨に較べて、降雨継続時間が 1 時間を除けば何れの時間においても大きく、降雨継続時間が 3 時間～24 時間では 130～220 年の範囲を示す。
- 3) JR 九州久大本線・花月川橋梁 (2.7km 付近) における最右岸側の橋脚 (H=6m) は、他の橋脚 (H=7m) よりも 1m 程短く設計されていた。理由として、2012 年 4 月 6 日の航空写真から右岸側橋脚周辺の砂州により河床高が高かったことが認められた。しかし、この右岸側橋脚周辺の砂州は、平成 24 年 7 月九州北部豪雨に伴う出水により流出した。従って、最右岸側の橋脚は、根入れ深さが浅い状態で平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う大規模出水に襲われたと予想された。出水時に、高速で洪水が橋脚周辺を流れ、河床が洗掘され、最右岸側の橋脚が転倒し、その結果、他の橋梁もせん断破壊され、最終的に橋梁が流出したことが推測された。

謝辞：本研究では、平成 29 年 7 月九州北部豪雨の災害実態について把握するために、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所からは河床データ、花月川の水位、流量データ、雨量データ、土砂量のデータを、また JR 九州からは花月川橋梁についてのデータを、大分県土木部河川課からは小野川土砂崩壊に関する資料を提供していただいた。また花月川の砂州の標高を測量するにあたり、熊本大学工学部技術部の吉永徹氏および上田誠氏には多大の協力を頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害に関する情報、平成 29 年 7 月九州北部豪雨出水概要
- 2) 国土交通省：梅雨前線に伴う平成 29 年 7 月 5 日の出水について
- 3) (公社) 地盤工学会先遣調査隊：平成 29 年 7 月九州北部豪雨における緊急災害報告
- 4) 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、土木学会、
- 5) 大分県 おおいた防災ポータル 「平成 29 年 7 月九州北部豪雨」に関する災害情報について(最終報)
- 6) 平成 24 年 7 月の九州北部における豪雨災害に対する 河川激甚災害対策特別緊急事業の実施について

(大本照憲)

第4章 特徴的な現象

4.1 土砂崩壊

4.1.1 地質概況

図 4.1.1 に産業技術総合研究所地質調査総合センターによる福岡県朝倉市周辺の地質図を示す。朝倉市周辺は、三郡変成岩類（砂質片岩、苦鉄質片岩、泥質片岩）、花崗閃緑岩および豊肥火山岩類（安山岩、凝灰角礫岩等）が広く分布しているが、土砂崩壊（斜面崩壊、土石流および河川の浸食を含めてここでは土砂崩壊と称する）が多かった地質は、泥質片岩と花崗閃緑岩であった。この地質図はあくまでも表層地質であるが、崩壊した斜面は、これらの地質に支配的であったと考えられる。これら岩石は、風化・変成・変質作用および断層などの影響により、材料特性が変化し、表層に近づくほど、風化が著しい。



図 4.1.1 朝倉市周辺の地質図

(産業技術総合研究所，地質調査総合センター，地質図 Navi より)

花崗閃緑岩は、写真 4.1.1 に示すように、堅硬な岩盤の状態から、多亀裂性の弱風化岩、鬼まさ、まさ土へと変化し、最終的には赤まさと呼ばれる粘性土へ風化変質する。赤谷川、白木谷川、北川では、この風化が著しく、厚い風化層が表面を覆っており、斜面崩壊のほとんどがこの風化した表層部分で発生している。

泥質片岩といった変成岩類も強固な岩盤の状態から、写真 4.1.2 に示すように多亀裂性の

弱風化岩，岩塊・礫状へと変化し，最終的には礫混じり粘性土して粘性土化していく。特徴的な点は，片理面を有しているため，斜面の崩壊は片理面に沿って発生し，斜面の傾斜方向とこの片理面との方向が重要となる。これらの崩壊は黒川，奈良ヶ谷川で確認できる。



新鮮・堅硬な花崗閃緑岩(乙石川)



亀裂が発達する花崗閃緑岩(乙石川)



風化して脆弱な花崗閃緑岩(北川)



玉葱状に風化する花崗閃緑岩(北川)

写真 4.1.1 花崗閃緑岩の変遷 (九州大学 笠間准教授提供)



比較的堅硬な泥質片岩(奈良ヶ谷川)



片理が発達する泥質片岩(奈良ヶ谷川)



風化が進んだ泥質片岩(奈良ヶ谷川)



著しく風化が進んだ泥質片岩(奈良ヶ谷川)

写真 4.1.2 泥質片岩の変遷 (九州大学 笠間准教授提供)

4.1.2 土砂崩壊の定量的分析

土砂崩壊がどの程度発生したかを評価するため、赤谷川、乙石川、白木谷川、寒水川、北川、奈良ヶ谷川流域を対象として土砂崩壊の定量的分析を行った。分析に際しては、以下のデータを使用した。

- (1) 土砂崩壊の判読に用いた航空写真：国土地理院と国土交通省九州地方整備局が発災後の7月13日に撮影したもの
- (2) 崩壊前および崩壊後地形分析に使用したレーザプロファイラデータ（LPデータ）：九州地方整備局と福岡県県土整備部砂防課によりそれぞれ平成29年1月と7月に計測したもの

土砂崩壊の判読に際しては、崩壊前後の航空写真を用いて目視判読を行った。図4.1.2に示すように、斜面崩壊が起こっている箇所を「崩壊域」、土石流となって河道などを通過したと考えられる箇所を「侵食・堆積域」とした。また、分析に用いたパラメータは図4.1.3に示すように、以下のように定義する。

- (1) 崩壊標高：斜面の標高の平均値
- (2) 崩壊高さ：斜面の最高標高と最低標高の差分
- (3) 平均傾斜角：斜面の傾斜角の平均値
- (4) 斜面の方向：斜面の最大傾斜の方向、北を0°とした時計回りの角度
- (5) 崩壊長：斜面の最大標高点と最小標高点間の距離の水平投影距離
- (6) 崩壊幅：斜面を長方形であると仮定し、崩壊面積を崩壊長で除したもの
- (7) 崩壊比：崩壊幅を崩壊長で除したもの
- (8) 平均崩壊深さと最大崩壊深さ：斜面の崩壊深さの平均値と最大値。
- (9) 崩壊面積：斜面を水平投影した面積
- (10) 崩壊土量：崩壊面積に崩壊深さの平均値を乗じたもの

「侵食・堆積域」では崩壊前後のLPデータの差をとり、正の部分の合計を侵食面積、負の部分の合計を堆積面積とする。侵食土量および堆積土量はLPデータの深さの平均値に侵食面積、堆積面積を乗じることで算出する。

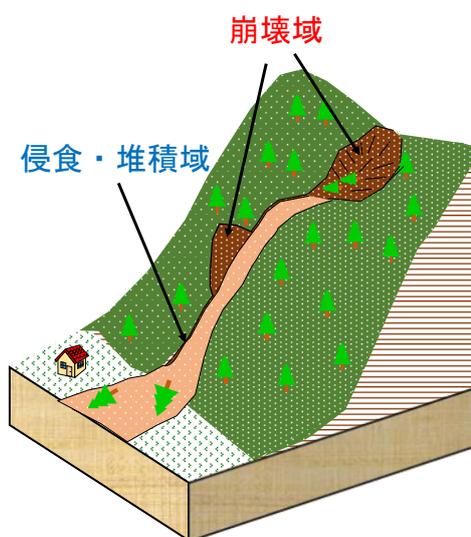


図 4.1.2 判読の基準の模式

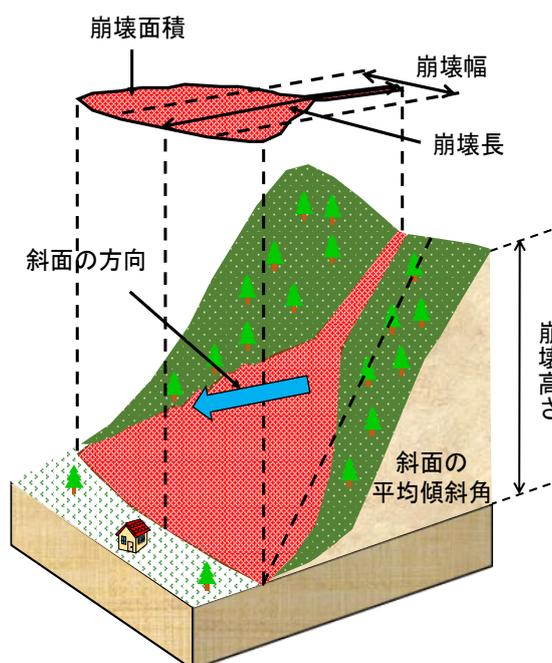


図 4.1.3 斜面のパラメー

判読結果を図 4.1.4 に示す。「崩壊域」を赤色で「侵食・堆積域」を青色で示す。なお、乙石川の合流点より上流を赤谷川上流部、下流を赤谷川下流部とし 2 流域に分けて、分析する。また、流域ごとに各パラメータを整理したものを表 4.1.1 に示す。各流域の崩壊数は奈良ヶ谷川で 373 箇所、北川で最も多い 675 箇所、寒水川で 252 箇所、白木谷川で 312 箇所、乙石川で 471 箇所、赤谷川下流部で 220 箇所、赤谷川上流部では 368 箇所であった。

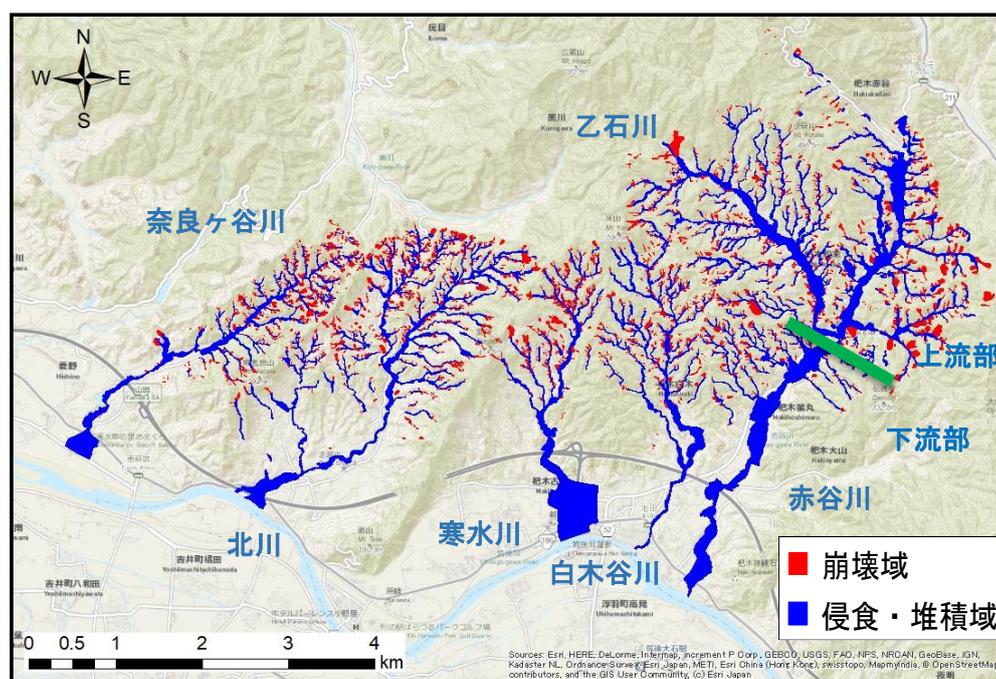


図 4.1.4 崩壊地判読結果

表 4.1.1 各流域の斜面パラメータ値

流域	崩壊数	平均崩壊標高(m)		平均崩壊高さ(m)		平均傾斜角(°)		平均値(m)	
		崩壊前	崩壊後	崩壊前	崩壊後	崩壊前	崩壊後	最大崩壊深さ	平均崩壊深さ
奈良ヶ谷川	373	203	202	24.5	24.0	35.1	35.5	3.2	0.82
北川	675	217	216	22.9	22.5	33.1	33.1	2.8	0.50
寒水川	252	300	299	26.8	27.4	35.0	37.3	4.6	1.26
白木谷川	312	272	271	24.4	23.9	34.5	34.8	3.5	0.78
乙石川	471	293	292	27.1	26.4	36.1	36.2	3.7	0.92
赤谷川下流部	220	183	183	20.2	19.6	34.8	34.4	2.7	0.57
赤谷川上流部	368	235	235	32.3	31.5	35.7	36.1	4.0	0.82

流域	平均崩壊長(m)	平均崩壊幅(m)	平均崩壊比	崩壊面積(万㎡)	流域面積(万㎡)	崩壊面積率(%)	崩壊土量(万㎡)	侵食土量(万㎡)	堆積土量(万㎡)
奈良ヶ谷川	33.9	15.9	0.55	24.8	322	7.7	25.5	13.7	22.2
北川	35.4	16.9	0.58	45.1	656	6.9	28.0	29.8	37.8
寒水川	38.3	16.8	0.56	18.6	360	5.2	27.4	19.1	30.5
白木谷川	35.7	15.4	0.53	19.2	375	5.1	18.5	19.6	30.4
乙石川	37.7	15.9	0.50	33.4	601	5.6	37.9	38.0	35.2
赤谷川下流部	28.5	14.0	0.57	10.0	394	2.5	6.4	8.3	47.6
赤谷川上流部	45.7	20.8	0.51	42.9	622	6.9	41.3	14.8	49.3

その他、特徴的な点を整理すると以下の通りである。

- 比較的狭い領域内の 2500 以上の箇所で崩壊が集中して発生している。
- 平均傾斜角が 35°程度であり、傾斜角としては、それほど大きな傾斜角とは考えられない。
- 崩壊深さの平均が 1m程度であり、最大崩壊深さもそれほど大きくなく、斜面崩壊のほとんどが表層崩壊である。
- 崩壊土量について流域面積にも依存するが赤谷川、乙石川において多くの崩壊が発生している。また、上流域の傾斜が急な北川、乙石川においては侵食土量が多い。

斜面崩壊の主たる要因は、雨量が非常に大きかったためであるが、降雨が集中して降った朝倉市周辺が地質学的に深層まで風化が進んだ地域であり、特に花崗閃緑岩のまさ土化が深度まで及んでいたこと、厚いまさ土層の上に多亀裂性の岩盤（安山岩など）があり、その層から常時下位のまさ土への地下水の供給があり、その結果、地層境界付近の地盤が非常に脆弱化していたことが地質的な素因として考えられる。

以上、今回の土砂崩壊の特徴をまとめると以下の通りである。

- (1) 表層流によるガリー侵食（降水による集約した水の流れによって地表面が削られる現象）が一挙に拡大したこと、特に花崗閃緑岩の深層風化部で崩壊が顕著であること
- (2) 上流部から中流域にかけては、崩壊土砂と流木による洗掘・侵食が顕著であり、特に溪流に沿う沢地形（凹地形）の至る所で表層崩壊やガリー侵食が生じていること
- (3) 河床洗掘や河岸侵食とそれに伴う表層崩壊が顕著であること
- (4) それら結果として家屋、道路、水路、ため池、砂防施設等の破壊が生じていること
- (5) 下流域では、大量の土砂と流木の堆積が発生し、川幅（通常の流路）ではなく谷幅全体が流路と化したこと

また、地質の違いに着目すると以下のような特徴が挙げられる。

- (1) 花崗閃緑岩地帯では、源頭部では崩壊深さが 10m 以上の規模の崩壊が発生したこと、河床洗掘・河岸侵食による表層崩壊が顕著であったこと、下流域へ大量の崩壊や洗掘による土砂（まさ土）の供給があったこと
- (2) 泥質片岩地帯では、片理面の角度によっては 30° 以上の急斜面においても多数の表層崩壊が発生したこと、不安定土砂が斜面上に残留していること、河床部の堆積土砂と風化土が流出したこと、河床が洗掘され比較的新鮮な岩盤が露出していること

(三谷泰浩)

4.2 流木

4.2.1 九州北部豪雨における流木の発生状況

平成 29 年 7 月九州北部豪雨による水害の大きな特徴の一つが大量の流木が発生し、谷底平野を流れる中小河川に土石流と一緒に流れて、被害を拡大させたことであった。河道を流下した流木は、比較的小さい橋梁に集積し、ダム化することで水の流下を阻害し、土砂の堆積を促進させ、橋梁下断面を閉塞した。それにより、橋梁そのものが埋没したり、破壊されたりしたものが多数見られた。また、流下できなくなった土砂と流木を含む洪水が河川からあふれ出て、周辺の道路や宅地・田畑に流入し、家屋などを破壊したり、土砂で埋没させたり、最悪の場合には流失させたりした（写真 4.2.1, 4.2.2）。

今次水害においては、線状降水帯が 6～9 時間程度停滞し長時間にわたり強い降雨が発生したために、同時多発的に斜面崩壊が発生した。そのため斜面上の森林から立木が流木化して流下した。国土地理院が公開した崩壊地の分布について、GIS 上に再整理したものを図 4.2.1 に示す。また、表 4.2.1 に被災河川毎に流木量や流出係数（流域面積あたりの流木量）などの情報をまとめたものを示す。ここで、流木量は国土交通省の推定値を示している。この推定値は、斜め航空写真から流木発生源を特定し、面積当たりの材積量を掛け合わせることで算出されている。その際、福岡県人工林収穫予測システム (<http://www.pref.fuku>



写真 4.2.1 北川下流域の流木に起因した氾濫 [2017/7/6 へりからの空撮]



写真 4.2.2 北川本陣橋上流での被災状況 [2017/7/8 撮影]

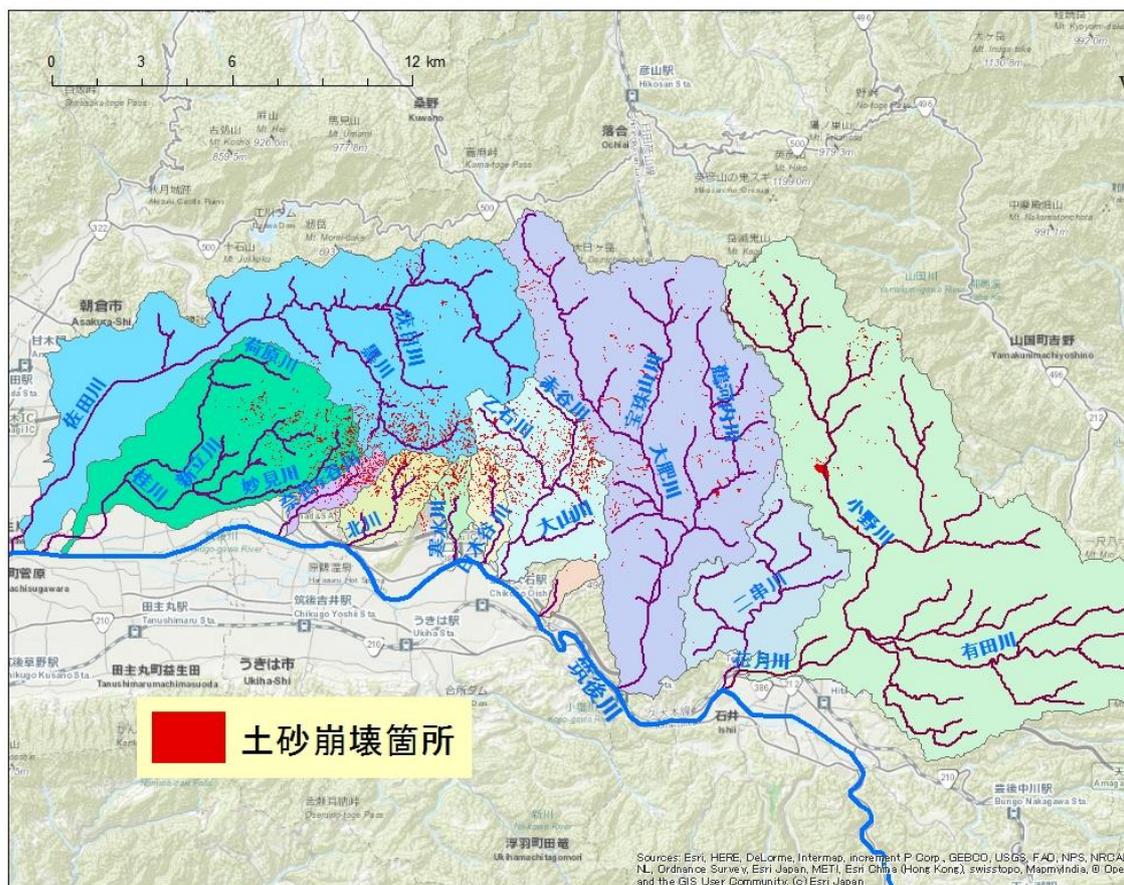


図 4.2.1 今次水害における斜面崩壊地の分布
 [原図（国土地理院，2017）を GIS 上に復元したもの]

表 4.2.1 各被災河川の流木関連情報

本川	流域面積 (km ²) ¹⁾	推定 流木量 (m ³) ¹⁾	山林から の流木量 (m ³) ¹⁾	流木発生 量中の山 林由来分 の割合 (%)	斜面崩壊 面積 (km ²) ²⁾	崩壊率 (%)	推定発生 土砂量 (万m ³) ¹⁾	推定堆積 土砂量 (万m ³) ¹⁾	流木 流出係数 (m ³ /km ²)	山林由来 流木 流出係数 (m ³ /km ²)	平均河 床勾配	地質 ¹⁾	被災形態 ¹⁾
小石原川	87.4	7,009	4,513	64.4			9	3	80	52	0.0124	変成岩	被災小
佐田川	72.7	19,010	10,886	57.3	1.35	1.86	173	182	261	150	0.0096	変成岩	流水
桂川	45.4	28,815	15,066	52.3	0.90	2.38	93	96	635	332	0.0027	変成岩	流水
奈良ヶ谷川	3.8	19,601	13,427	68.5	0.48	12.71	46	37	5,158	3,533	0.0354	変成岩	土砂+流木
北川	7.0	27,616	18,085	65.5	0.59	8.74	66	67	3,945	2,584	0.0389	花崗閃緑岩	土砂+流木
寒水川	3.7	22,660	13,244	58.4	0.29	7.73	55	55	6,124	3,579	0.0577	花崗閃緑岩	土砂+流木
白木谷川	3.9	12,520	8,225	65.7	0.35	9.67	59	50	3,210	2,109	0.0300	花崗閃緑岩	土砂+流木
赤谷川	20.1	39,230	27,581	70.3	1.36	6.77	290	222	1,952	1,372	0.0148	変成岩, 花崗閃緑岩	土砂+流木
大肥川	77.6	27,163	16,189	59.6	1.04	1.34	178	103	353	211	0.0108	火山岩	流木
花月川	130.2	6,753	6,108	90.4	0.39	0.30	96	47	52	47	0.0292	火山岩	流水

注: 1) 筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書(2017)より。2) 国土地理院HPより

oka.lg.jp/contents/sugi-yosoku.html)を用いて、樹齢 45 年を仮定した場合に推定される単位面積当たり材積量 54,900m³/km²を用いている。赤谷川・白木谷川・寒水（そうず）川・北川・奈良ヶ谷（ならがや）川の 5 河川が特に流木流出が顕著であることが分かる。また、桂川上流域や支川の妙見川，ならびに佐田川支川の黒川の流域でも崩壊が顕著であることが分か

る。流木の発生源としては、山林・溪畔林・河畔林・その他に分類されていたが、山林が大半を占めていた。

4.2.2 流木発生の要因分析

a) 被災河川全体の流木発生の要因分析

今次水害の特徴である流木の発生に関連する斜面崩壊についての要因分析については、国の委員会〔筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会(2017)〕においても行われている。その結果によると、傾斜角については崩壊斜面のうち9割以上が15°以上であった。また、斜面崩壊のリスクが高いと一般的に考えられている30°以上の斜面の割合は4割であった。降雨に対しては、1時間雨量が100mm、3時間雨量が250mm、6時間雨量が350mm、12時間雨量が400mm、ならびに24時間雨量が450mmを越えると斜面崩壊する面積が増える傾向にあるとされている。ここでは地上雨量計（気象庁アメダス、国土交通省、福岡県）のデータから面的な分布を内挿して、累加雨量が求められている。しかしながら、この分析では何時間雨量が斜面崩壊に効いていたのかが不明であった。

そこで、各河川流域において斜面崩壊発生に対して各要因がどのような関係性をもっているのかを改めて分析した。まず、前述の崩壊地データを用いて、各崩壊斜面の傾斜角を算定した。各溪流の傾斜角の代表値として、1つの溪流に含まれる崩壊した斜面のもつ最大傾斜角を求め、複数崩壊斜面が含まれる場合はその平均値を算出して分析に利用した。

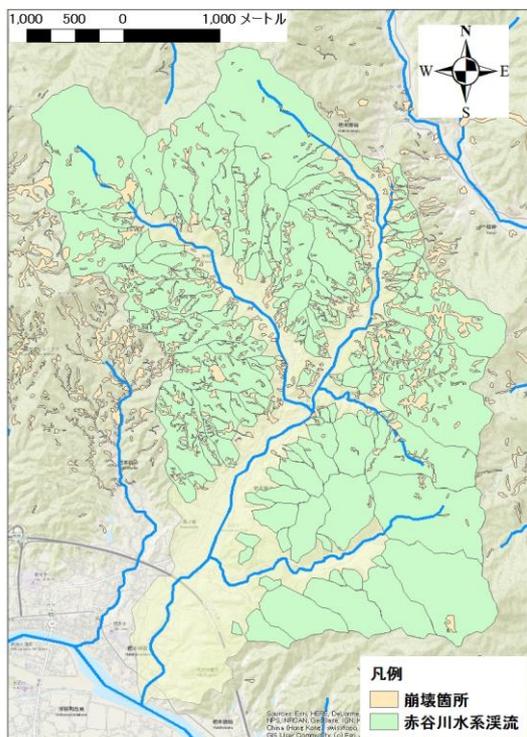


図 4.2.2 赤谷川流域の溪流と斜面崩壊地の分布

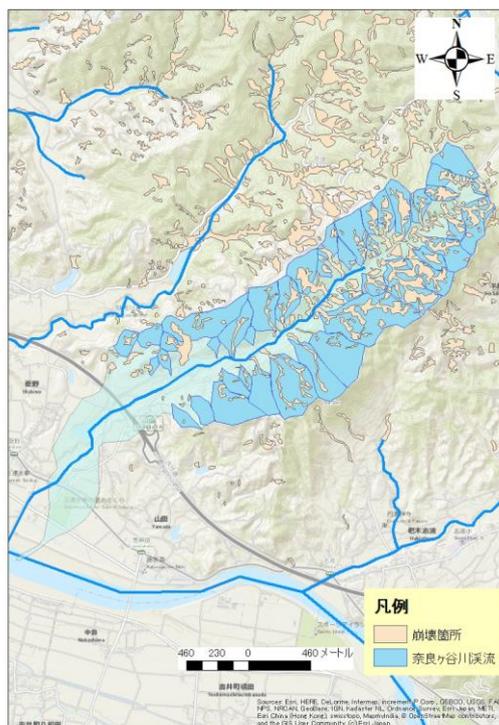


図 4.2.3 奈良ヶ谷川流域の溪流と斜面崩壊地の分布

また、各河川の流域を溪流に分割し、各溪流の面積に対する斜面崩壊面積の割合を斜面崩壊率と定義して算出した。一例として、**図 4.2.2**、**4.2.3** に赤谷川流域と奈良ヶ谷川流域における溪流分割と斜面崩壊地の分布を示す。溪流分割数については、赤谷川は 107、奈良ヶ谷川は 44 であった。

次に雨量に関しては、国土交通省の C-X レーダー合成雨量データ（2017 年 7 月 5 日の 24 時間分）を用いて、各メッシュ上の 1、3、6、12、24 時間最大累積雨量を算出した。地上雨量計の測定結果との比較を行い、C-X の方が過小評価されている傾向があるが、概ね降雨の状況を表現できており、今回の被災エリア全体の時空間的雨量分布を評価する上では信頼性があると判断して、以下の分析を行った。

図 4.2.4、**4.2.5** に一例として 3 時間、ならびに 6 時間最大累積雨量の空間分布図を示す。1 時間雨量では佐田川の寺内ダムがあるあたりに極大エリアが分布していた（図は省略）が、3 時間以降は流木発生量が多かった 5 河川（赤谷川～奈良ヶ谷川）と佐田川上流の黒川の流域へシフトしていた。

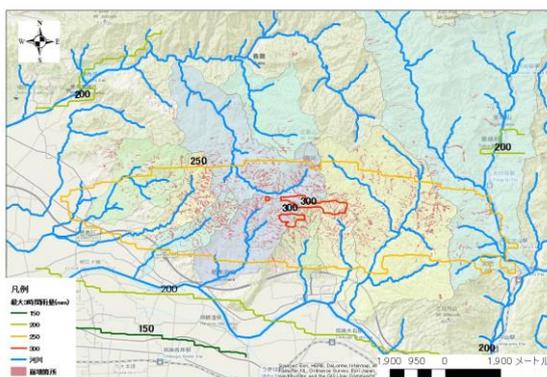


図 4.2.4 3 時間最大雨量

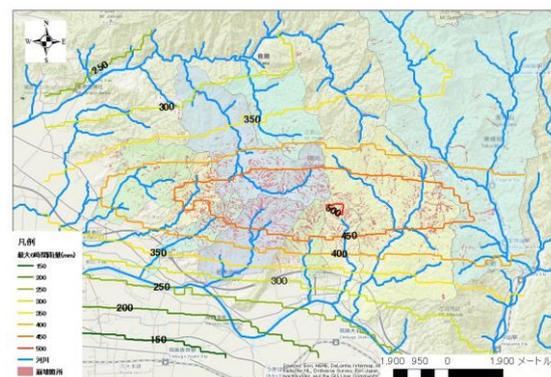


図 4.2.5 6 時間最大雨量

これらの情報をもとに、各溪流の斜面崩壊率に対する傾斜角と各時間の最大累積雨量についての重回帰分析を行った。分析においては、各変数を正規化して解析を行った。全変数を加味すると、雨量に対する偏回帰係数に負値が発生するなどの物理的に不合理な結果が得られたため、傾斜角と雨量 1 種の組み合わせの中でまとまりの良いものを選ぶと、傾斜角と 3 時間雨量、または 6 時間雨量との組み合わせとなった。なお、小石原川と花月川については崩壊面積が小さいため分析していない。また、桂川については本川上流域と支川の妙見川流域に分割し、佐田川については支川の黒川と疣目川の流域に分割している。また、赤谷川については全流域の他に、支川の乙石川のみを抽出した場合も分析した。加えて、対象とした全河川を一括した場合と、特に流木発生量が多かった上位 5 河川を一括した場合も分析している。**表 4.2.2** に重回帰分析結果の一覧を示す。全体的には決定係数 R^2 はあまり高

くないが、白木谷川、北川、奈良ヶ谷川、妙見川はやや高い値を示していた。

表 4.2.2 各河川の溪流毎の斜面崩壊率に対する傾斜角と
最大3時間・6時間雨量との重回帰分析結果

河川名	斜面崩壊を含む溪流数 (総溪流数)	傾斜角・3時間雨量		傾斜角・6時間雨量			
		R ²	係数	R ²	係数		
赤谷川*	75(107)	0.14	切片	0.00	0.22	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.28		崩壊地傾斜角	0.30
			3時間雨量	0.28		6時間雨量	0.39
寒水川*	23(35)	0.06	切片	0.00	0.05	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.03		崩壊地傾斜角	0.04
			3時間雨量	0.24		6時間雨量	0.21
白木谷川*	17(20)	0.59	切片	0.00	0.58	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.06		崩壊地傾斜角	0.03
			3時間雨量	0.74		6時間雨量	0.74
北川*	41(49)	0.39	切片	0.00	0.40	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.21		崩壊地傾斜角	0.22
			3時間雨量	0.52		6時間雨量	0.52
奈良ヶ谷川*	41(44)	0.41	切片	0.00	0.40	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.27		崩壊地傾斜角	0.28
			3時間雨量	0.45		6時間雨量	0.43
妙見川 (桂川支川)	28(35)	0.48	切片	0.00	0.59	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.48		崩壊地傾斜角	0.31
			3時間雨量	0.34		6時間雨量	0.55
桂川上流 (本川上流域)	38(51)	0.03	切片	0.00	0.00	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	-0.01		崩壊地傾斜角	0.02
			3時間雨量	-0.18		6時間雨量	-0.02
乙石川 (赤谷川支川)	18(31)	0.16	切片	0.04	0.16	切片	-0.01
			崩壊地傾斜角	0.00		崩壊地傾斜角	0.00
			3時間雨量	0.00		6時間雨量	0.00
黒川 (佐田川支川)	68(99)	0.10	切片	0.01	0.15	切片	0.02
			崩壊地傾斜角	0.08		崩壊地傾斜角	0.08
			3時間雨量	0.32		6時間雨量	0.39
疣目川 (佐田川支川)	9(54)	0.31	切片	0.00	0.26	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.45		崩壊地傾斜角	0.41
			3時間雨量	0.60		6時間雨量	0.53
大肥川	69(172)	0.14	切片	0.00	0.21	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.31		崩壊地傾斜角	0.34
			3時間雨量	0.31		6時間雨量	0.41
全河川	409(666)	0.24	切片	0.00	0.23	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.23		崩壊地傾斜角	0.19
			3時間雨量	0.46		6時間雨量	0.44
Top5 [*がついた 5河川]	197(252)	0.27	切片	0.00	0.19	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.28		崩壊地傾斜角	0.24
			3時間雨量	0.41		6時間雨量	0.31

桂川についてのみ偏回帰係数に負値が見られたが、その他の河川は全て正值であった。妙見川の3時間雨量の場合を除き、全ての河川において斜面傾斜角より雨量が効いているという結果を示した。森林がある斜面の崩壊は、雨量・地形（斜面傾斜角）・地質（表土と内部の構造）・森林の状況などが関係すると考えられるが、地質や森林の状況について定量的に評価するための情報が不足しており、これ以上の分析が現状では困難である。今後、不足する情報を定量的に評価し、より詳細な分析を行う必要がある。

b) 個別河川の流木発生 の 要因分析

今次水害においては、表 4.2.1 に示した 10 河川において流木の発生が見られた。ここでは、河川毎に流木発生状況や要因分析を行った結果について、被害の最も大きかった赤谷川、

ならびに溜め池の決壊による流木を含んだ洪水流による被害の発生した奈良ヶ谷川について報告する。

・赤谷川について

赤谷川流域について、矢野ら(2016)が提唱している流域の可能最大流木発生量に相当する流木発生ポテンシャルの概念を用いて、潜在的にどの程度の流木発生源を流域全体で持っていたのかを評価した。その際、矢野ら(2016)では傾斜角 30°以上の斜面を流木発生源として取り扱っていたが、今次水害における状況では表 4.2.3 に示すとおり、30°以上が 0.43km² (崩壊地全体の 31%)、20°以上が 0.93km² (68%)、10°以上が 1.27km² (93%) となっており、30°以下が 6 割を越えていた。そこで、流木発生ポテンシャルの評価においても、傾斜角を 30°以上、20°以上、10°以上の 3 ケースを設定して評価した。潜在的な流木発生源となる流木供給可能箇所内での今次水害の崩壊地面積を見ると傾斜角によらず 6~8%の割合で崩壊が発生していた。よって、10°以上を潜在的な発生源となり得る境界値として良い様である。

表 4.3 赤谷川流域の斜面崩壊状況と流木供給可能箇所の面積

傾斜角	30° 以上	20° 以上	10° 以上	合計
斜面崩壊地の面積(km ²)	0.43	0.93	1.27	1.36
流木供給可能箇所の面積(km ²)	2.75	9.05	16.36	
供給可能箇所内の崩壊地面積(km ²)	0.22	0.59	0.99	
流木発生ポテンシャル(m ³)	150,781	497,116	898,164	

・奈良ヶ谷川について

奈良ヶ谷川流域では、河道に沿って2つの溜池が直列に配置されており、山の神溜池(有効貯水量: 59,791m³)と鎌塚溜池(78,349m³)が河道上に直列で配置されていた。今次水害の際には、上流側の山の神溜池では、洪水吐を持つ堤防が満水位を超えて越水を起こし、コンクリート製のシュート部の両側の土堤部を洗掘して、決壊したとみられている[鈴木ら(2018)]。その際に、住民が携帯電話で撮影した写真から決壊する前に流木が溜池に流入していたことが分かっている。しかし、洪水吐に流木が集積して排水能力が下がったために越水が助長されたかどうかについては明確ではない。洪水吐の排水能力以上の流入があり、流木が流入していなくても越水が発生していたことは鈴木ら(2018)の解析から分かっているが、洪水吐の上に道路橋が設置されていたことから、流木が大量に流下した場合には橋梁下に集積しやすい構造であることから、影響を与えた可能性がある。矢野ら(2016)の方法で30°以上の傾斜を対象として流域全体の流木発生ポテンシャルを推定したところ、15,883m³となった。表 4.2.1 に示した山林からの流木量が 13,427m³と同程度であったことから、流木発生量が極めて大きかったことが理解される。

4.2.3 まとめ

今次の豪雨災害において発生した流木について、発生量が多くなった要因の分析を行った。その結果、斜面の傾斜角と最大6時間雨量によりある程度説明ができることが明らかと

なった。さらに、特徴的な災害が起こった2河川（赤谷川・奈良ヶ谷川）において、追加的な分析を実施した。赤谷川の事例より傾斜角 10°以上の斜面は潜在的な流木発生源となること、奈良ヶ谷川の事例より潜在的な最大流木発生量である流木発生ポテンシャルと比較して同規模の流出が起きており、極めて大規模な流出が生じたことを示した。

今次水害において従来の概念が変化するほどの強大な流木災害が発生したことから、今後の流木リスク対策における課題が以下の通り見出された。

i) 流木発生量の確率表示を可能にすること。あわせて、治水・砂防の確率の考え方の整合が必要。

ii) 河道上の流木災害リスクの評価法を確立し、その確率表示を可能にすること。

iii) 流木災害に対する多重防御となるハード・ソフト対策の提案とその評価を行うこと。流木災害にも L1・L2 の概念を組み込む必要がある。

加えて、流域圏（山地～河川～ダム～市街地～海）全体を見据えた流木災害への備えのあり方の議論を行政・市民・学を交えて始めることが必要な時期に来ていると考えられる。温暖化の進行を踏まえて、今後の流木リスクの増大へ備えることを始めなければならない。

（矢野真一郎）

参考文献

内田太郎，秋山浩一，石塚忠範：表層崩壊発生場所と発生降雨量の関係の予測，平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.130-131, 2011.

国土地理院：<https://saigai.gsi.go.jp/3/20170726handokuzu/handokuzu.png>, 2017. (2018 年 1 月時点)

鈴木健吾，篠原麻太郎，守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，五十川周，矢野真一郎，赤松良久：平成 29 年九州北部豪雨による福岡県朝倉市山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74, No.4, pp.I_1183-I_1188, 2018.

筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会：筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会報告書，2017.

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），Vol.72, No.4, pp.I_289-I_294, 2016.

4.3 ため池

4.3.1 はじめに

今次豪雨により、多数のため池被害が発生し、朝倉市では108のため池のうち47箇所も決壊もしくは一部損壊した¹⁾。被害があったため池のうち、奈良ヶ谷川に位置する山の神ため池は決壊し、その下流域の山田地区では広範囲の洪水氾濫被害が発生し、多数の流木が散乱した。ため池は全国に約20万箇所存在し、その7割は江戸時代以前に築造されている。ため池の役割としては、農業用水の確保に加えて、洪水調節や土砂流出防止、多様な生態系の生息・生育の場など多面的に機能を有している。自然災害によるため池被害は年平均で約620件（平成19～28年）であり、被災要因としては豪雨が約70%、地震が約30%となっている²⁾。豪雨によるため池被害としては、越流決壊の事例が多く報告されており^{3)・4)}、決壊による下流域への被害拡大が懸念される。一方、ため池による下流域の被害軽減例もあり、山口県に発生した2009年豪雨時にて長尾池（山口県防府市）は上流域で生じた土石流を受け止め下流域の減災効果を発揮した⁵⁾。本節では、平成29年九州北部豪雨により生じたため池の決壊状況と要因を明らかにする。ここでは、①朝倉市におけるため池の被災状況調査と、②ため池決壊状況に関する大型模型実験を実施した。

4.3.2 ため池被害状況

a) 調査サイトと調査方法

調査サイトを図4.3.1に示す。今次水害のため池被災状況の全体像を把握するために、朝倉市東部において、奈良ヶ谷川と妙見川に加えて、北川と寒水川の4河川流域における計12箇所のため池を対象とする。また、各河川共に3か所ずつ選定した。一方、洪水被害調査の対象河川は奈良ヶ谷川と妙見川であり、いずれも被害が集中した下流域からため池付近までを対象エリアとした。

現地調査日程は発災1週間後の2017/7/12を始めとして、7/19-20、8/1-2、9/11-12であり、こ

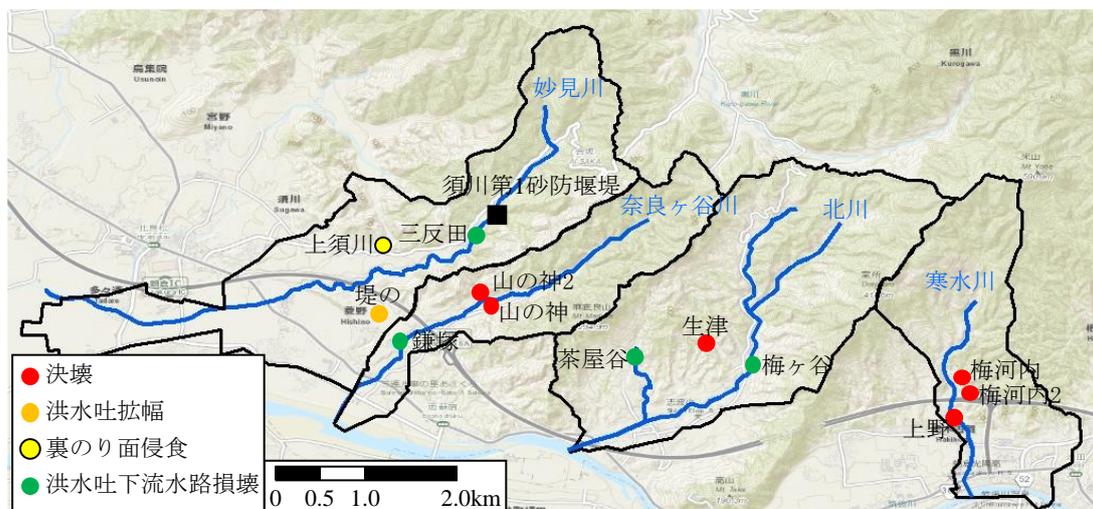


図 4.3.1 研究対象エリアとため池の被害状況マップ

れまで計4回の調査を行った。ため池被災調査では、堤体全体や洪水吐、その下流水路の被災状況を調べると共に、被災要因として越流の有無を調べた。越流が起きている場合には、堤体高さや痕跡水位・水深をVRS方式RTK-GNSS（Trimble社R4，R6）により計測した。奈良ヶ谷川に存在する山の神ため池とその下流の鎌塚ため池に関しては、堤体形状や洪水吐の形状、堤体周辺の洪水痕跡に関して、RTK-GNSSで測量した。さらに、山の神ため池に関しては、近隣住民が撮影した発災時の写真（2017/7/5 16:30頃～19:00頃）を用いて、写真中の水面位置を現地で特定して測量し、ため池における水位の時系列変化やため池の決壊時刻を求めた。合わせて、写真により流況や流木状況を把握した。

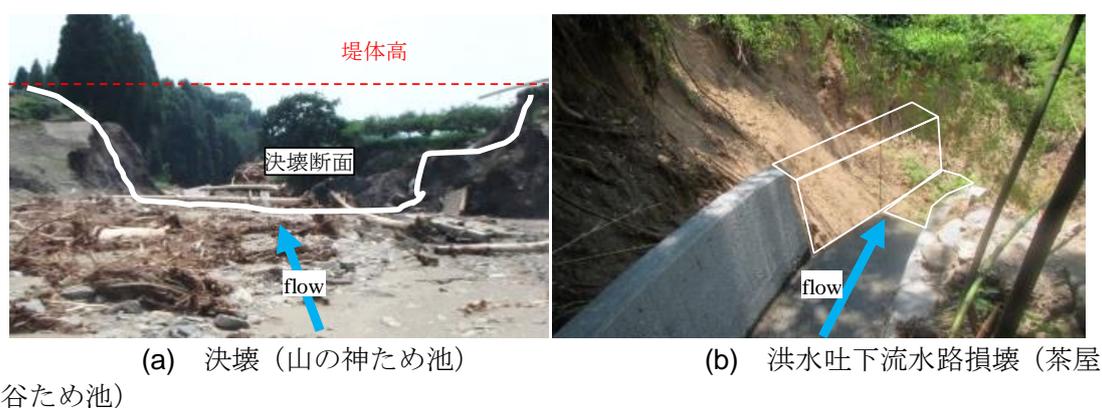


図 4.3.2 ため池被害の状況

a) 被害の全体像

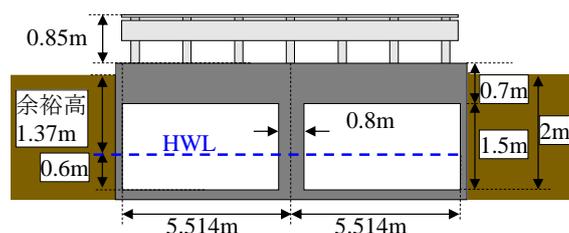
12か所のため池における被災状況を調べた結果、図4.3.2のように、堤体決壊、洪水吐の下流水路損壊、洪水吐の拡幅、裏のり面の侵食が見られた（後者二つは写真省略）。この被害分類に基づくため池の被災状況マップを図4.3.1に示す。これより、決壊は6か所（山の神、山の神2、生津、上野、梅河内、梅河内2）であり、洪水吐拡幅は1か所（堤の）、下流水路損壊4か所（鎌塚、三反田、茶屋谷、梅ヶ谷）、裏のり面侵食1か所（上須川）となっていた。決壊箇所のうち、越流の痕跡が明確に見られたのが生津ため池以外の5箇所であった。基本的には上流部からの河川水の越流痕跡であったが、梅河内・梅河内2ため池では近くを流れる寒水川からの越流が発生した⁶⁾。生津ため池では、堤体直下流の右岸側にて斜面崩壊が発生し、決壊は斜面崩壊の影響の可能性が示唆された。洪水吐拡幅が見られた堤のため池では、堤体天端までため池水位は上昇し、洪水吐の脇の土堤の部分が侵食された。下流水路損壊に関しては、洪水吐自体に目立った損壊はないが、その下流水路からあふれた水により、水路脇にて局所洗掘が発生し、より進行したところで水路の一部が流失したものと考えられる。この被害パターンでは、洪水の継続時間がより長かったり越流が発生したりすると、決壊に至った可能性が高く、この被害パターンが決壊に至る初期プロセスの一つと推察される。

ため池内の流木・土砂堆積状況や洪水吐の流木捕捉状況としては、決壊した山の神ため池では、土砂はほぼ堆積していないが大量の流木が残った。下流の鎌塚ため池では大量の土砂・流木が堆

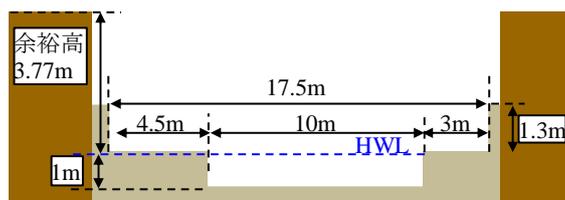
積し、洪水吐の一部に流木が捕捉されていたが決壊しなかった。妙見川の三反田ため池では、池内に流木や土砂が堆積したが、その量は相対的に少なく、かつ、洪水吐にはほとんど流木は捕捉されなかった。このように奈良ヶ谷川と妙見川本川のため池における流木捕捉状況が大きく異なった。この要因として、三反田ため池上流の須川第1砂防堰堤において、**図4.3**に示すように、大量の流木が捕捉された。この砂防堰堤では1.65万 m^3 の流木が捕捉され⁷⁾、これは流域発生量(3.3万 m^3)の半分に相当しており、砂防ダムにおける流木捕捉効果が顕著であったことが分かる。



図4.3.3 須川第1砂防堰堤における流木捕捉の様子



(a) 山の神ため池



(b) 鎌塚ため池

図4.3.4 洪水吐及び周辺堤体の横断面図

b) 山の神・鎌塚ため池の被害状況

奈良ヶ谷川の山の神・鎌塚ため池の決壊有無の要因を調べるために、洪水吐と周辺堤体の横断面図を**図4.4**に示す。ここでは、ため池台帳と現地測量により算出している。山の神ため池は、洪水吐中央の橋脚や天端道路上のガードレールなどの障害物がある。また、洪水吐クレスト面から堤防天端まで約2m(余裕高1.37m)であった。一方、鎌塚ため池では、洪水吐が2段式であり、最大幅は17.5m、高さ2.3m、洪水吐クレストから堤体天端まで4.77m(余裕高3.77m)もあった。このように、鎌塚ため池では洪水吐の上部に道路ではなく流

木が捕捉されにくい上、十分な余裕高があったため、決壊まで至らなかったものと推察される。図 4.3.5 は、住民が撮影した写真から得られた山の神ため池の水位の時間変化を示す。図中には、洪水吐の諸元も表示する。また、実測値に基づいて得られた近似曲線による水位変化の推定値も点線で示す。これより、16:30 には既に設計洪水位を越え、17:30 頃かそれ以降に堤体天端に到達したと思われる。17:30 時点では流木は少量のみ確認された。その後、18:16 に水位ピークとなり、大量の流木が漂流していた (図 4.3.6)。その直後に水位低下し、この時間で決壊したものと考えられる。その後、水位は 23 分間で 4m 以上と急激に低下しており、堤体形状の破壊が進行したものと推察される。これらより、堤体天端上の越流は長くて 40-50 分程度生じており、越流水深は最大 0.5m 程度であった。この越流水深はため池周囲の痕跡水深と概ね一致した。また、越流発生後に決壊しており、決壊の第一要因は越水であると考えられる。ただし、流木がどの程度決壊に影響を及ぼしたかは定かではない。決壊発生時間 (18:15-18:20 頃) と大量の流木漂着時間 (18:15 頃) はほぼ同時であり、この時点で流木が洪水吐にどの程度捕捉されていたかは不明である。

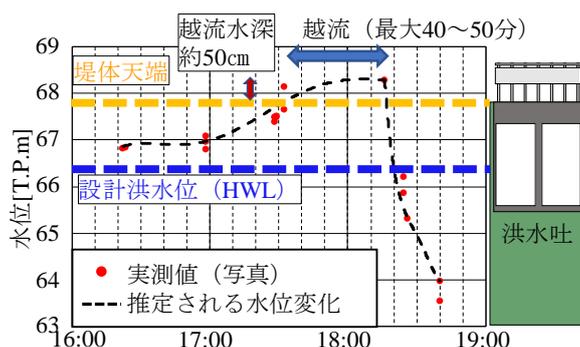


図 4.3.5 山の神ため池の水位変化と越流状況 (2017/7/5)



図 4.3.6 水位ピーク時の山の神ため池の様子 (7/5 18:16 住民撮影)

4.3.3 ため池決壊過程の大型模型実験

a) 実験方法

山の神ため池の越水決壊過程を把握するために、大型ため池模型の越水実験を行う。ここでは、東京理科大学所有の大型水平水路 (長さ 20m, 高さ 1.8m, 幅 1.0m) 内に、図 4.7 に示す高さ 1m のため池模型を設置する。模型の縮尺 λ は実物の 1/10 とし、ため池台帳に基づき高さ 1.0m, 表・裏のり面勾配を各々 1:2.7, 1:1.4 とした。

洪水吐に関しては、鉛直方向は図4.3.4(a)の1/10の寸法とした。一方、このスケール比では洪水吐の横幅は1.1mとする必要があるが、水路幅を上回るためここでは0.30mとした。洪水吐の下流水路も裏のり面に設置した。堤体土は砂質土の銕田砂（細粒分含有率11%）を用いた。流況としては、越流させる前に洪水吐の設計洪水位相当の流量を与え、その後、越流水深5cm（実スケール50cm）となる流量をセットした。

b) 実験結果

ため池の裏のり面の侵食状況や決壊過程を把握するために、デジタルビデオカメラにより撮影された裏のり面の画像を図4.3.9に示す。これより、越流開始時点（ $t=0s$ ）では、洪水吐下流水路から水があふれており、水路周囲にて洗掘が生じている。 $t=20s$ では、越流水の流下に伴い水路全体の局所洗掘が進行し、 $t=64s$ において下流水路がまとめて不安定化し流失した。さらに、 $t=104s$ では、洪水吐が形を残したまま流失し、上流水位が低下し始めた。堤体上流の水位が低下し始めた時間は $t=103s$ であり、その後の指数関数的な水位低下は、現地データと類似していた。本実験結果より、ため池堤体の決壊過程としては、越水前の下流水路脇の洗掘に加えて、越水による裏のり面全体の侵食により下流水路が流失、その後天端上の洪水吐が流失し、決壊に至ったものと考えられる。これは決壊までの1つのパターンであると考えられる。なお、本実験では、越流開始からの決壊までの時間は103sであった。現地の越流時間を40分（ $=2400s$ ）とすると、フルードの相似則から想定される模型スケールの決壊時間は750秒（ $=2400 * (1/\lambda)^{1/2}$ ）となり、本実験値と異なる。その要因として用いた堤体土が砂質土であり、越水に対して侵食されやすく、その侵食範囲も広がったものと考えられる。

4.3.4 ため池による防災・減災効果

前節で示した山の神ため池の決壊がクローズアップされた一方、多くのため池では決壊

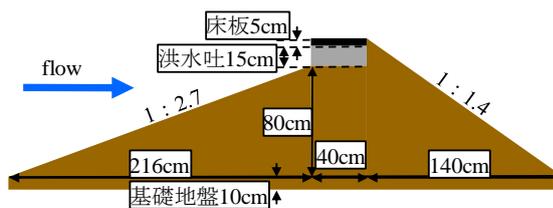


図4.3.8 大型模型実験におけるため池堤体の寸法

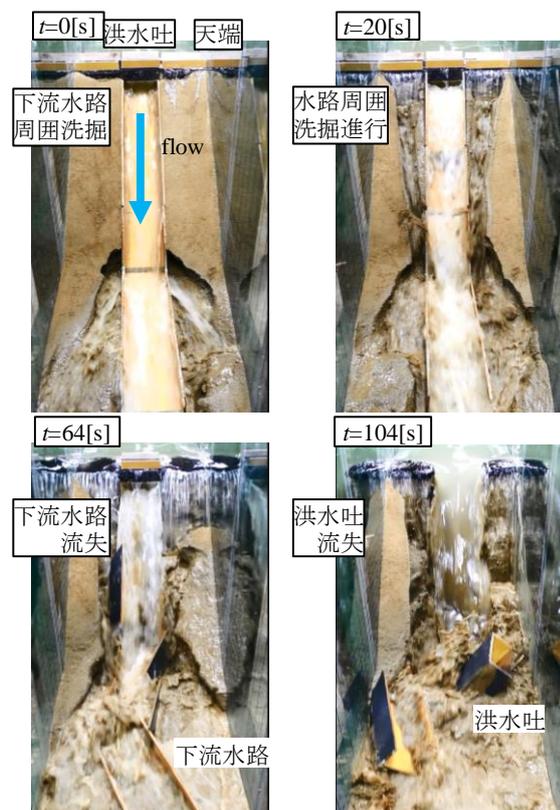


図4.9 ため池の裏のり面侵食・決壊過程（大型模型実験）

には至らずに上流から流れ込んだ土砂や流木を貯め込み、被災後は満砂状態となるため池が続出した。このため、ため池の下流域への土砂・流木輸送が、ため池によりくい止められたため、下流域の被害を大きく軽減したことに寄与したものと考えられる。ため池自体は、農業用水に用いる利水用として作られているが、流れ込んだ土砂や流木を貯め込み、下流域への土砂・流木輸送を削減したという点では、防災・減災効果に一定の寄与があったものと考えられる。このため、流域治水の観点から、利水用のため池を、治水対策として有効活用することは、今後の気候変動適応策としても極めて重要と考えられる。

4.3.5 まとめ

- (1) 山の神ため池は、越流を主要因とした決壊が発生し、越流時間は40-50分程度、越流水深は50cmであった。
- (2) 越水実験によるため池決壊過程は、下流水路からの溢水や堤体の越水による下流水路周囲や裏のり面全体が侵食され、下流水路・洪水吐が順々に流失し、決壊に至ったものと考えられる。

参考文献：

- 1) 農業協同組合新聞：【九州北部豪雨】農林水産被害288億円 福岡県（閲覧日：平成29年9月25日）。
- 2) 農林水産省：ため池の概要，http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_ameike/（閲覧日：平成29年9月21日）。
- 3) 河内義文，鈴木素之：2013年山口北部豪雨によるため池被害，基礎工，Vol.43，No.6，pp.94-96，2015。
- 4) 堀俊和，正田大輔，中里裕臣，鈴木尚登，渡辺博之，新保義剛：土石流が流入した場合のため池の安全性及び下流域に与える影響，基礎工，Vol.43，No.6，pp.101-104，2015。
- 5) 毛利栄征，有吉充：ため池の豪雨災害の特徴と復旧，基礎工，Vol.43，No.6，pp.35-38，2015。
- 6) 堀俊和，泉明良，正田大輔：平成29年7月九州北部豪雨での被災ため池に関する調査報告書，2017。
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の概要<速報版>Vol.6，http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf，2017（閲覧日：平成29年9月20日）。

（二瓶泰雄・矢野真一郎・守屋博貴）

なっていた。

図 4.4.2 に示すとおり今次水害においては、本豪雨が発生する前に少雨傾向が続いたため、ダムの防災操作前の貯水位が EL. 111.09m しかなく、約 20m 分の容量である約 1,170 万 m^3 を洪水調節に利用できる状況にあった。また、ピーク流量は 7 月 5 日 16:10 に約 888 m^3/s を記録しており、計画高水流量の約 3 倍という極端な洪水が発生した。

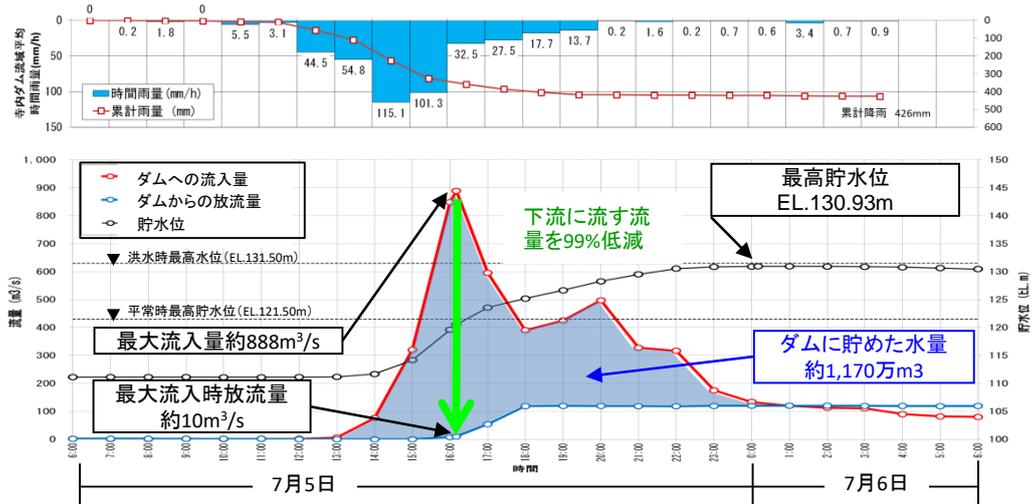


図 4.4.2 寺内ダムにおける時間雨量，流入・放流量，貯水位の記録
(2017 年 7 月 5 日 6 時～6 日 6 時。(独法) 水資源機構作成)

4.4.3 流木・土砂のカット

今次水害の特徴として、多数の斜面崩壊発生による大量の土砂と流木の発生があげられる。寺内ダムではそれら両方を完全にカットすることに成功した。

土砂については、約 120 万 m^3 がダム湖内に堆積したと測定されており、堆砂容量 200 万 m^3 の 60% (計画堆砂量の 60 年分) が今次水害において発生したことになる。うち、約 3.7 万 m^3 は洪水調節容量内に堆積したため、2018 年 1 月 19 日から土砂の撤去が開始されている。利水容量内の堆砂分の処理については利水権者との協議が進められている。

流木については、約 1 万 m^3 がダム湖に流入したと推定されている。通常は、年平均 120 m^3 程度の流出量であることから、80 倍以上の流出 (80 年以上分の流入) が一度に発生したといえる。今回、ダム湖に流入した流木はダム湖の上流側に捕捉されており (図 4.4.3)、堤体上流に設置されている網場にまでは達していなかった。このことは、大量の流木が網場に達した場合に想定される網場の損傷による流木の通過によって、放流設備への流木集積による機能不全の発生や、ダム下流への流出が免れたことになり、幸運なことであった。

4.4.4 発揮された防災効果と今後の課題

(独法) 水資源機構が試算したところ、寺内ダムが無かった場合に想定される佐田川下

寺内ダム貯水池上流側の流木及び土砂の流入状況 7月7日時点



撮影：国土交通省「はるかぜ号」

図 4.4.3 寺内ダムにおける流木捕捉状況（(独法) 水資源機構作成）

流域金丸橋地点の水位は 6.88m（実際より堤防が高く氾濫しない想定での水位）と見積もられている。今次水害での観測最高水位が 3.50m であったことから、3.88m の水位低減効果がダムにより発揮されたことになる。また、ダムが無かった場合の氾濫による浸水については、浸水面積約 1,500ha、浸水世帯数約 1,100 世帯と見積もられており、これらの被害が寺内ダムにより防ぐことができたといえる。

今回の水害では、渇水傾向であったため常時満水位より 10m 水位が低かったこと、ダム集水域においてピーク流入量を記録した以降に雨が小康状態となり、サーチャージ水位付近まで貯水位が上昇したもののただし書き操作にまで至らずに済んだこと、ならびに流木がダム湖上流域で停滞し網場に達しなかったために網場や放流施設などの損傷を免れたことという幸運な事態が重なったためにダムによる防災効果が最大限発揮できた。しかし、このことは寺内ダムで洪水前の事前放流を行うことの効果を示したことと同義であり、今後同規模の洪水が発生した場合に常に同様な効果を発揮できることを保証するものではない。今後の温暖化の進展による降雨規模の増大に対処するためにも、例えば、ダムの運用方法の改善、かさ上げや放流設備の改良などのダム再開発、ならびに事前放流が空振りした場合の利水容量の損失補填の方法などについて、技術的、制度的な対策を検討することが喫緊の課題としてあげられる。

（矢野真一郎）

参考文献

(独法) 水資源機構筑後川局：寺内ダムのポイント，2018.

(独法) 水資源機構朝倉総合事業所寺内ダム管理所：寺内ダム (H28.1 版)，2016.

4.5 各流域の特徴と災害影響因子の検討

4.5.1 各流域の特性の把握

平成29年7月の九州北部豪雨では、筑後川中流域右岸部で大きな災害となった。今回の災害は、死者・行方不明者41名、浸水や家屋の倒壊に加え、土砂流出、流木発生などによる被害の激甚化が特徴的である。筑後川右岸中流域の福岡県、大分県にまたがる10個の支川流域で発生した土砂・流木発生に対してどのような因子が影響したのかについて、流域毎にその特性を把握することとした。

図4.5.1に対象流域図、表4.5.1にそれらの流域面積を示す。



表 4.5.1 対象流域の流域面積

	流域面積(km ²)
1:花月川	128.16
2:大肥川	75.06
3:赤谷川	20.1
4:白木谷川	4.1
5:寒水川	3.7
6:北川	8.1
7:奈良ヶ谷川	5
8:桂川	38.8
9:佐田川	74.74
10:小石原川	91.04

図 4.5.1 九州北部豪雨の対象流域

国土地理院流域自然調査作業を元にした森林区分図をそれぞれ GIS で抽出したものを図4.5.2に示す。

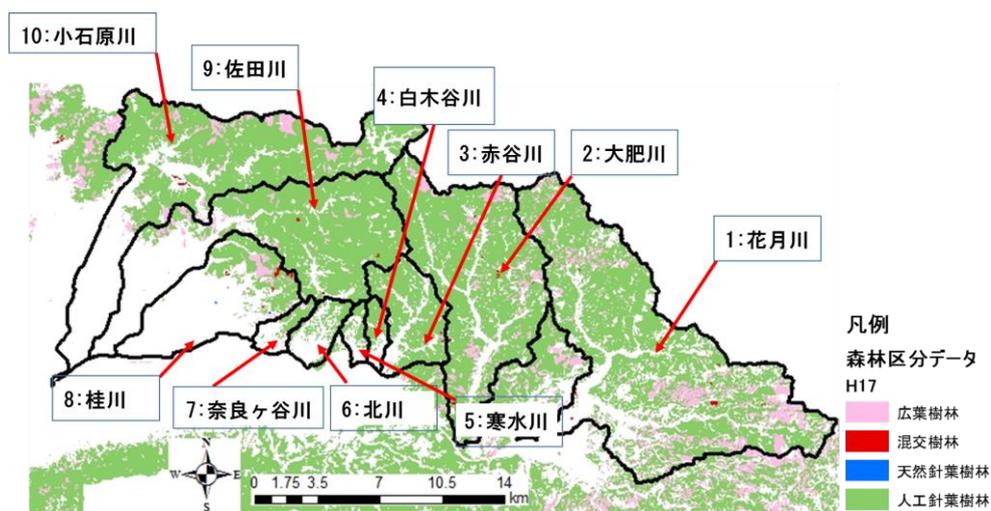


図 4.5.2 対象流域の森林区分図

対象流域の東部は森林の割合が高いのに対し、西部では人工構造物が多い。また、各流域で人

工針葉樹林の割合が圧倒的に高く、混交・天然樹林はほとんど存在しない。

次に国土政策局国土情報課の表層地質図を元に、対象流域の地質分類図を作成したものを図 4.5.3 に示す。花月川や大肥川といった東部流域は火山岩の割合が高く、逆に西部流域では変成岩、深成岩、未固結が多くを占めている。なお、変成岩では結晶片岩、深成岩では花崗閃緑岩がほとんどであることが分かった。結晶片岩は大きな圧力を受けると剥離する性質があり、花崗閃緑岩は風化しやすく崩壊が多発することがあると言われている。



図 4.5.3 対象流域の地質分類図

4.5.2 豪雨時の各流域の土砂発生・流木発生に対する影響因子の推定

筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会資料（九州地方整備局・福岡県）では、対象流域のそれぞれの河川流域の土砂発生量と流木発生量が推定されている。それらを各流域の流域面積で除して単位土砂発生量、単位流木発生量として見たのが表 4.5.2 である。単位土砂発生量では寒水川、赤谷川、白木谷川の順に大きい。一方、単位流木発生量で見ると、圧倒的に寒水川が大きく、次いで奈良ヶ谷川、北川の順に大きい。この単位土砂発生量と単位流木発生量を目的変数に設定し、それに影響を与えると考えられる森林の割合、森林区分、地質区分、雨量を説明変数として重回帰分析を行った。用いたデータを表 4.5.2 に示す。

表 4.5.2 各流域の単位土砂発生量・流木発生量と説明変数

	土砂発生量 (万 m ³ /km)	流木発生量 (m ³ /km)	森林の割合	広葉樹林	混合樹林	天然樹林	人工針葉樹林	火山岩	深成岩	変成岩	未固結	固結堆	平均総雨量 (mm)
赤谷川	14.43	1951.74	79%	2%	1%	0%	75%	16%	40%	30%	13%	0%	402.50
白木谷川	14.39	3053.66	62%	2%	0%	0%	61%	2%	57%	11%	30%	0%	446.70
寒水川	14.86	6124.32	49%	2%	0%	0%	46%	2%	58%	18%	21%	0%	585.69
北川	8.15	3409.38	44%	2%	0%	0%	42%	0%	47%	27%	25%	0%	586.00
奈良ヶ谷川	9.20	3920.20	41%	7%	0%	0%	34%	0%	0%	79%	21%	0%	586.00
桂川	2.40	742.65	28%	4%	1%	0%	23%	1%	0%	37%	62%	0%	580.50
佐田川	2.31	254.35	65%	4%	0%	0%	61%	6%	62%	1%	30%	0%	513.42
小石原川	0.10	76.99	65%	7%	0%	0%	58%	5%	54%	11%	30%	0%	423.43
大肥川	2.37	361.88	87%	10%	0%	0%	72%	88%	0%	0%	7%	0%	382.78
花月川	0.75	52.69	82%	13%	0%	0%	59%	92%	0%	0%	8%	0%	342.33

全ての流域のデータを元に重回帰分析を行った結果、単位土砂発生量に影響を及ぼしていると考えられるのは深成岩（花崗閃緑岩）、平均総雨量の順に大きく、単位流木発生量に影響を及ぼしていると考えられるものは、平均総雨量、深成岩（花崗閃緑岩）の順に大きいことが分かった。

一方、流域ごとの詳細な傾向を調べるため、実際に土砂が崩壊した箇所、流木が発生した箇所について、国土地理院が行った分析を元に（平成 29 年 7 月九州北部豪雨に関する情報）、それらを GIS 上でポリゴン化して局所的な説明変数（森林区分、地質区分、平均総雨量に加え、平均傾斜度を追加）に対する土砂発生、流木発生の関係を重回帰分析により調べた。その結果、土砂崩壊箇所への影響度が最も高かったものは、花月川、北川、奈良ヶ谷川、桂川で結晶片岩、大肥川、赤谷川で人工針葉樹林であった。一方、流木発生箇所に影響度の高かったものは、赤谷川、桂川、佐田川で結晶片岩、大肥川で火山岩であった。

次に、全ての流域を対象とした時の重回帰分析の影響度が高い順に花崗閃緑岩、森林割合、結晶片岩、人工針葉樹林、未固結という5つの要素に対して主成分分析を行った。その結果、第1主成分、第2主成分により散布図を描いたのが図 4.5.4 である。単位土砂発生量が多い流域のグループと

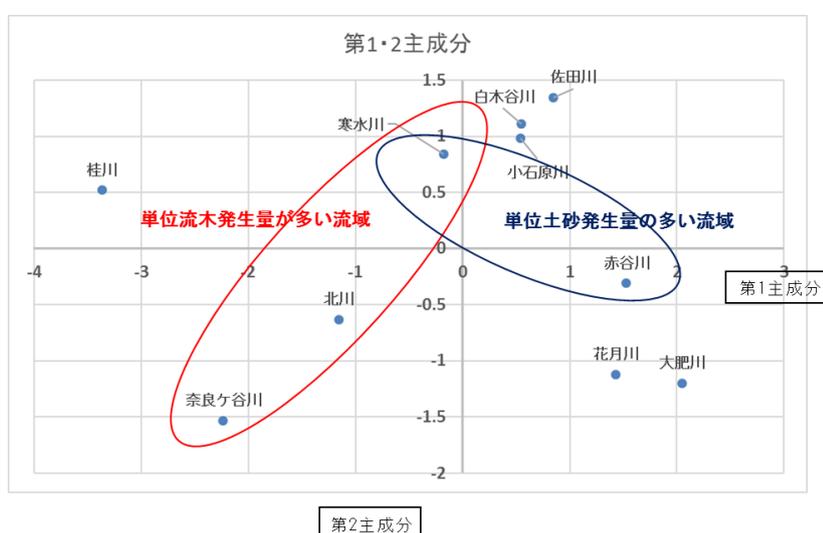


図 4.5.4 主成分分析による危険箇所のグループ分け

単位土砂発生量が多いグループに分類することが可能となった。主成分分析の結果、寒水川流域、白木谷川流域が両方のグループに属し、土砂・流木発生の危険度が高いと推定される。

4.5.3 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における雨量分布の処理方法の検討

北部豪雨における各流域の氾濫特性を明らかにするため、分布型流出モデルによる流出・氾濫過程のシミュレーションを行うこととした。使用したデータは当該流域の時間雨量、流域の土地利用分布、流域の地形や標高である。時間雨量については、ティーセン法、逆距離加重法による補間ならびにレーダー雨量分布データを用い、それぞれ異なる雨量分布処理による流域平均雨量を算出することによって比較を行った。比較検討を行った流域を図 4.5.5 に示す。これら 3 つの処理方法による各流域の総雨量を比較したのが、図 4.5.6 である。それぞれの雨量分布処理方法の特徴より、いずれの流域でもティーセン法、逆距離加重法、レーダー雨量分布の順に総雨量が大きいことが分かる。今回の北部豪雨においては、流

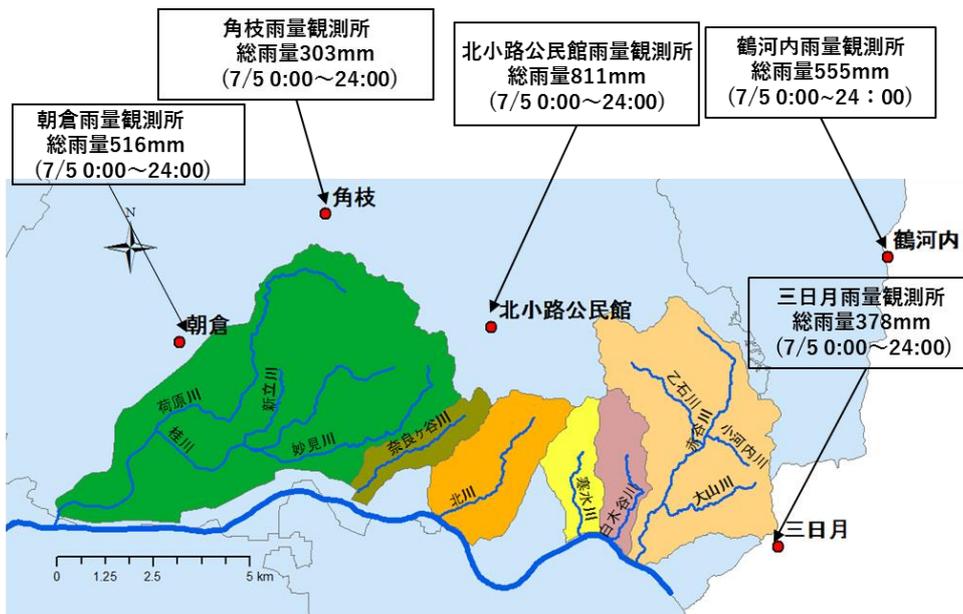


図 4.5.5 雨量分布処理方法検討の流域

域内に雨量観測所がほとんどなく、ティーセン法では流域の分割数が少ない流域が多く有り、総雨量算出において過大評価になっている可能性がある。一方、レーダー雨量分布においては 80mm 以上の降雨に対応していないことなどが原因と考えられる。

雨量分布処理ごとの総雨量

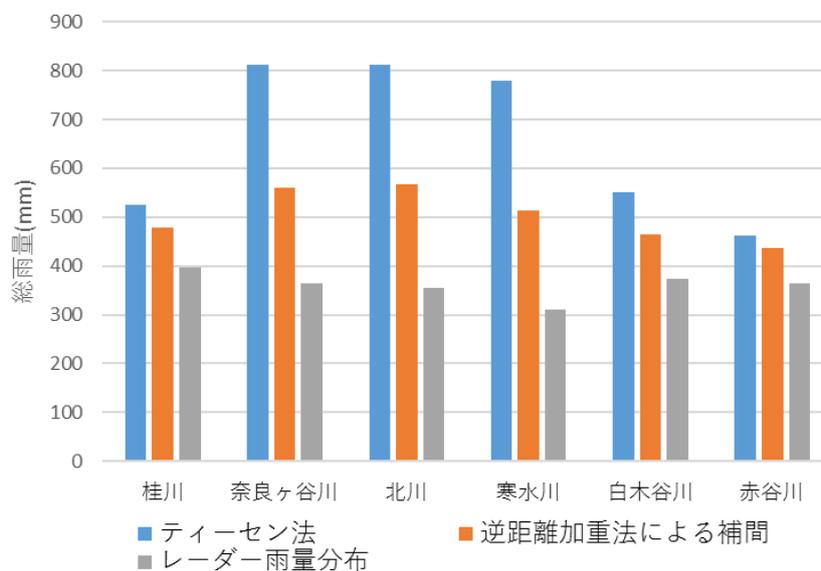


図 4.5.6 各流域における雨量分布処理方法による総雨量の違い

4.5.4 分布型流出モデルによる流出・氾濫過程のシミュレーション

前節で 3 種類の雨量分布処理方法による結果の違いを見たが、本検討ではその中の中間的な雨量が得られた逆距離加重法による補間により毎時刻の流域の雨量分布を時間的にも

内挿して与えることにより、分布型流出モデルにより当該流域（赤谷川、白木谷川、寒水川、北川、奈良ヶ谷川、桂川の各流域）の流出・氾濫シミュレーションを実施した。集中豪雨が発生した平成29年7月5日～6日の24時間をタイムステップ6分で計算し、分布型モデルにおいては表層モデルによる流れのみをdiffusive waveモデルで解析した。使用データとしては、標高データ、土地利用データと上記の補間された雨量データである。図4.5.7は、桂川流域における氾濫シミュレーション結果に浸水実績範囲（図中の黒線）を加えたものである。ほぼ浸水実績の再現ができていると思われる。

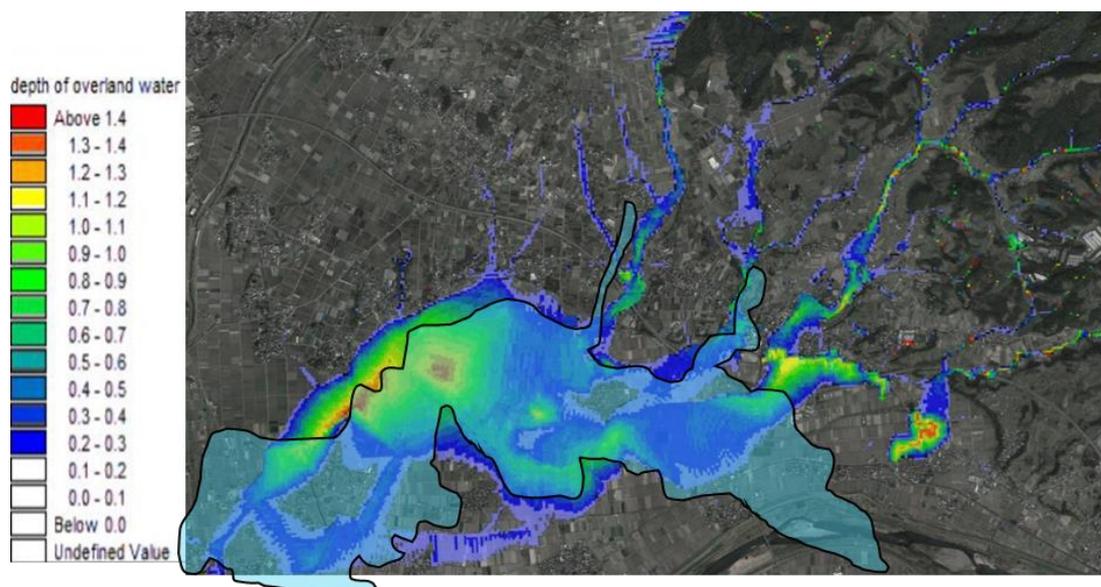


図 4.5.7 桂川流域における氾濫解析結果

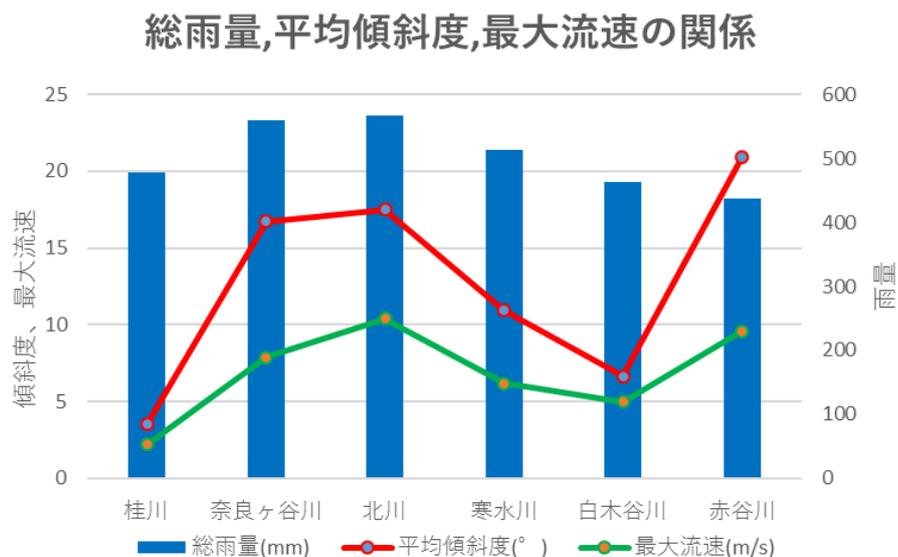


図 4.5.8 各流域の総雨量、平均傾斜度、最大流速の関係

その他の流域についても氾濫解析を実施した結果、以下のことが明らかとなった。すなわち、桂川流域では流域の平均傾斜度が緩やかで広範囲の氾濫が生じるが、赤谷川、北川、奈良ヶ谷川流域では平均傾斜度が大きく、地表流の広がり狭く河道に集中して流出することと、傾斜度と総雨量の関係で地表流の最大流速が決まってくることである。これらの結果をまとめたのが図 4.5.8 である。総雨量、平均傾斜度の関係で、北川で最も大きな地表流が発生していることが分かる。

4.5.5 結論

本研究では、平成 29 年 7 月九州北部豪雨における土砂・流木発生量に与えた影響因子を分析した。重回帰分析の結果、単位土砂発生量に対しては花崗閃緑岩、総雨量の順に影響し、単位流木発生量に対しては総雨量、花崗閃緑岩の順に影響を与えたと推定された。局所的な土砂崩壊箇所と流木発生箇所は、流域毎に異なる影響因子であることが示された。次に主成分分析を行った所、単位土砂発生量の多い流域と単位流木発生量の多い流域でグルーピングすることができ、その両方に含まれる寒水川流域、白木谷川流域などで両方の危険性が高いと推定された。

また、今回の九州北部豪雨における観測雨量データを用いて分布型流出モデルによる筑後川中流右岸域の氾濫シミュレーションを行い、各流域の氾濫特性を明らかにした。流域に降った総雨量、流域の平均傾斜度やその他の流域の地形により、それぞれ流れ方に違いが現れることが分かった。桂川では広域に緩やかに氾濫するのに対し、赤谷川、北川、奈良ヶ谷川などでは河道周辺に集中した流れ方となり、表層流速も大きくなることが分かった。

・参考文献：

- 1) 日本地理学会：電子ジャーナルテンプレート
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ejgeo/6/2/6_2_224/_pdf
- 2) 国交省九州地方整備局筑後川河川事務所：筑後川水系河川整備局【大臣管理区間】
平成 18 年 7 月 <http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/gaiyou/seibikeikaku/chikugo/index.html>
- 3) 九州地方整備局・福岡県：河川・砂防復旧技術検討委員会(第 1 回)
http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/17090703siryu2.pdf
- 4) 国交省九州地方整備局：平成 29 年 7 月九州北部豪雨出水概要
http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/bousai_joho/tecforce/H29hokubugou_data/H29hokubugou_uu_syussuigaiyou.pdf
- 5) 国土交通省砂防部平成 29 年 9 月：平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要
<速報版>vol.6 http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf
- 6) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス
<http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 7) 国土地理院:流域自然環境調査筑後川下流部成果品,平成 18 年 2 月

- 8) 国交省国土数値情報ダウンロードサービス -GIS ポータルサイト
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>
- 9) 国交省国土政策局：国土情報課
<http://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/download/index.html>
- 10) 国交省国土地理院：平成 29 年 7 月九州北部豪雨に関する情報
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_ooita-heavyrain.html
- 11) 国交省：土砂災害防止法の概要 <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf>
- 12) 産業技術総合研究所：地質調査総合センター地質調査の世界
<https://www.gsj.jp/geology/geomap/process-field/metamorphicrock.html>
- 13) 産業技術総合研究所：地質調査総合センター地質調査の世界
<https://gbank.gsj.jp/geowords/glossary/metamorphic.html>
- 14) 斜面防災対策技術協会
<http://www.jasdim.or.jp/gijutsu/ganseki/fujita/fujita.html>
- 15) 三田村宗樹・梅田隆之介：平成 29 年 7 月九州北部豪雨の土砂災害調査報告，大阪市立大学大学院理学研究科 <http://dlisv03.media.osaka-cu.ac.jp/contents/osakacu/kiyo/21890536-4-25.pdf>
- 16) 敖天其・竹内邦良・石平博：大河川の擬河道網作成における問題点およびその流出解析への影響，水工学論文集，Vol.45，pp139-144，2001.
- 17) 濱崎修・大八木豊・辻倉祐喜・河原能久：丸亀平野における水循環系の調査と解析，水工学論文集，Vol.50，pp265-270，2006.
- 18) 佐山敬洋・立川康人・寶馨：流出モデルの基準面積に関する研究，京都大学防災研究所年報，Vol.49，pp27-43，2006.
- 19) 国土交通省気象庁，気象レーダー観測の概要.
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>

(大串浩一郎)

4. 6 累加雨量による崩壊面積

4. 6. 1 はじめに

本項では, XRAIN による観測データの補正済データ (以下 X+C) を用いて, 土砂災害発生限界降雨や崩壊面積との関係について解析を試みたのでその結果を報告する. なお本項は, 森山ら (2018) の研究に準拠したものである.

4. 6. 2 崩壊発生条件

図 4. 6. 1 のような一様な斜面に浸透流が流れているとき底面におけるせん断力 τ は次式で表わされる.

$$t = \{SC_*D + r(1 - C_*)h\}g\sin q \quad (1)$$

ここに, C_* is the concentration of deposited material ($= 1 - \lambda$), σ と ρ はそれぞれ水と堆積物の密度, h は浸透流の深さ, D は堆積物の厚さ, g は重力加速度, and θ は斜面の角度である.

抵抗力は τ_L であり, 底面で以下のように表現される (平野ら, 1986).

$$t_L = c + (SD - rh)C_*g\cos q\tan f \quad (2)$$

崩壊限界は $\tau = \tau_L$ であるからその時の水深 H_c は下式で与えられる (例えば, 土木学会編: 土木工学ハンドブック上巻, 1974).

$$\frac{H_c}{D} = \frac{\frac{c}{rgD\cos q} + C_*(\tan f - \tan q)\frac{S}{r}}{\tan q + C_*(\tan f - \tan q)} \quad (3)$$

一方, 降雨による浸透流の水深 h は,

$$h = \frac{1}{l} \int_{t-T_s}^t r \cos q dt \quad (4)$$

$$x = \frac{k \sin q}{l} T_s \quad (5)$$

である. したがって降雨による斜面崩壊の限界は

$$H_c = \frac{1}{l} \int_{t-T_s}^t r \cos q dt \quad (6)$$

$$q \geq \frac{k \sin q}{l} T_s \quad (7)$$

上記 2 式より崩壊発生限界降雨は

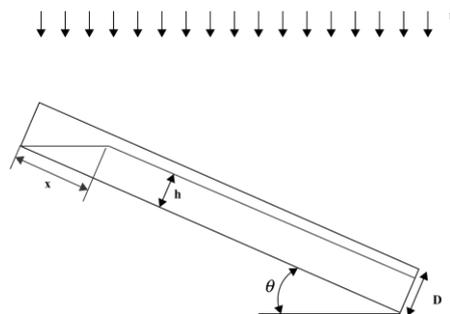


図 4. 6. 1 斜面の模式図

$$\int_{t-T_s}^t r \cos q dt \geq \frac{H_c k T}{\rho} \tan q = R_c \quad (8)$$

と表わすことができる。すなわち、 T 時間内の雨量が斜面に固有のある値 R_c を超えると斜面崩壊が発生することになる。

なお $h \geq D$ になると表面流が発生するが、その場合は土石流になると考えられている(平野ら,1986)。

4. 6. 3 崩壊面積率

式 (8) を崩壊面積の計算に適用する。斜面の発生限界値 R_c は流域内に分布しているので、その密度関数を $j(R_c)$ とすると、ある時刻における崩壊面積 Δa は下式のように表わされる。

$$\frac{Da}{A} = j(R_c) DR_c \quad (9)$$

したがって時刻 t までに崩壊した面積 $a(t)$ は上式を積分した下式となる。

$$\frac{a(t)}{A} = \int_0^{R_{Tmax}} \varphi(\eta) d\eta \quad (10)$$

ここに、 R_{Tmax} は時刻 t での最大 T 時間雨量である。密度関数 φ の分布関数 F は

$$F(X) = \int_{-\infty}^X \varphi(\eta) d\eta \quad (11)$$

であるから、崩壊面積率は R_c の分布関数に等しいということになる。すなわち

$$\frac{a(t)}{A} = F(R_{Tmax}) \quad (12)$$

上式において、 $F(X)$ の関数形を仮定するとパラメトリックモデルとして計算することができる。例えば $\varphi(\eta)$ を正規分布と仮定し、

$$F(R_{Tmax}) = \int_0^{R_{Tmax}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(R - R_{cm})^2\right] dR \quad (13)$$

とおくと、同定すべきパラメータは R_{cm} 及び σ の 2 個となる。

4. 5. 4 データ

a) レーダデータ

国土交通省九州地方整備局から入手した九州の C バンド MP 補正済 XRAIN データを用いた。観測期間は 5 日 7:00~6 日 23:59 の 1 分間隔データである。

b) 流域データ

国土地理院の流域メッシュを用いた。流域メッシュは 4 次メッシュであり、一辺が約 100m である。朝倉市・東峰村・日田市の北部に属する部分だけを切り出した。なお同データでは、同じ黒川流域に別の流域番号が割り当てられていたので、1 つの流域として扱うことにした。流域の数は 47、流域メッシュの数は 42,830 個となった。

c) 流域雨量の取り出し

流域データに対し、XRAIN は一辺が約 250m の 1/4 の 4 次メッシュであるため、位置に応

じてデータを配分した。配分は完全に流域メッシュにレーダメッシュが重なる場合はそのままとし、分割される場合は分割されるデータの値を平均して配分した。さらに、流域メッシュは完全な 100m 四方ではなく全ての流域メッシュがわずかに異なる値のため、流域平均雨量は、流域メッシュの面積に応じて加重平均を求めた。

d) 土砂崩壊地点の位置と面積

土砂崩壊地点の位置と面積は、国土地理院が公開した地図をトレースしシェープファイルに起こしたものを使用し、これを流域ごとに分けて、それぞれの流域における崩壊箇所数と崩壊面積を求めた。

e) X+C による累加雨量の計算

累加雨量は、平野ら(1986)の斜面要素集合モデルを用いると、水俣では3時間で 122mm が土石流発生限界降雨であったこと(森山ら, 2004) から、今回は3時間累加雨量を求め、さらに 100m 四方の流域メッシュごとに、3時間累加雨量の最大値を観測時間を通して計算し、最大値を迎えた時間も記録した。これらを流域ごとに分け流域ごとの最大値を求めた。

4.5.5 結果と考察

図 4.6.2 に X+C による 1 分間観測雨量強度の空間分布の例を、図 4.6.3 に同じく 3 時間累加雨量の例を、図 4.6.4 に 3 時間累加雨量最大値の流域最大値と崩壊地点の分布を示す。

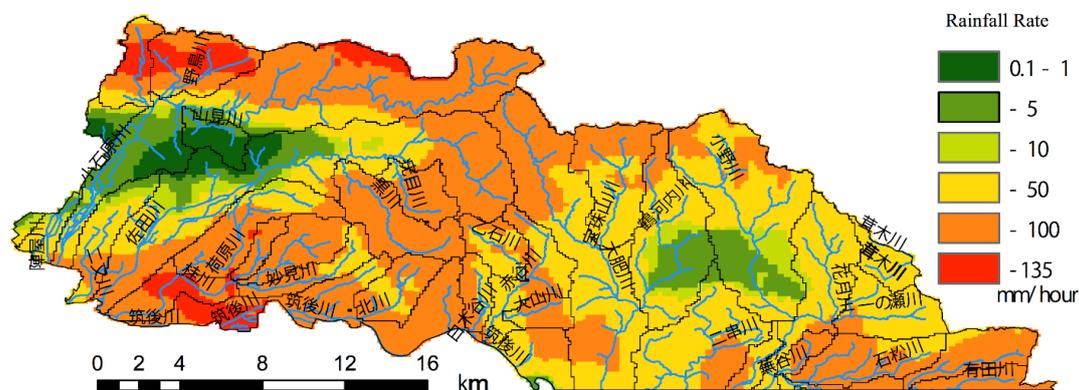


図 4.6.2 X+C による 1 分間観測の例 (15:38 5th July 2017 JST)

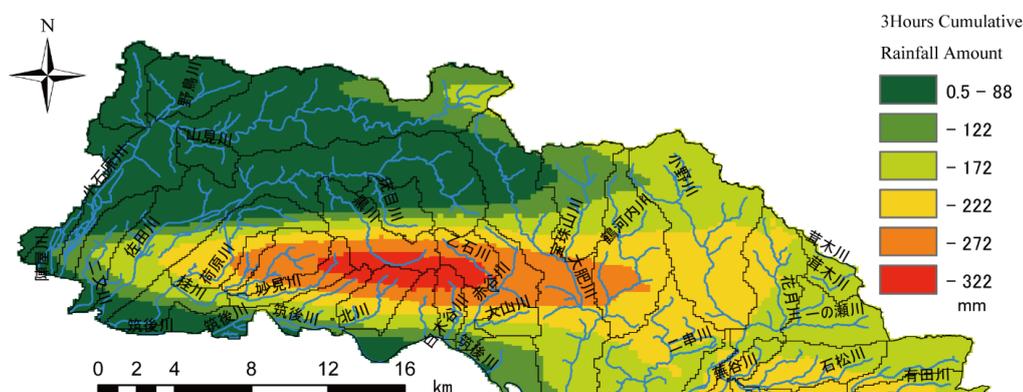


図 4.6.3 X+C による 3 時間累加雨量の例 (20:44 5th July 2017 LST)

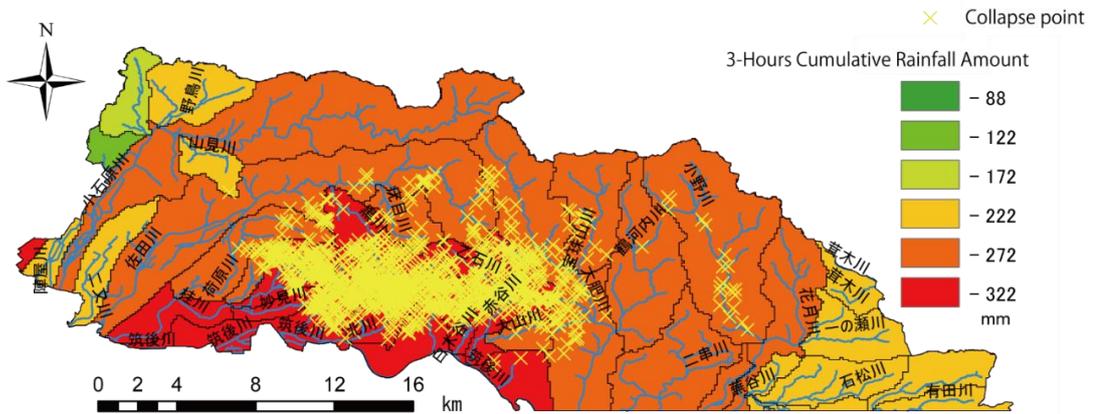


図 4.6.4 X+C による 3 時間累加雨量最大値の流域最大値と崩壊箇所の分布

式

乗誤差すなわち

$$\sum (計算値 - 実測値)^2 \rightarrow \text{minimum}$$

とする。

同定された R_{cm} と $\sigma(S_r)$ はそれぞれ $R_{cm}=396 \text{ mm}$ 及び $\sigma(S_r)=62 \text{ mm}$ である。これらの値を代入して計算した曲線と実測値を図 4.6.5 に示す。

図 4.6.5 では 180 分雨量が 300 mm を超えている 5 流域の中で筑後川の崩壊面積率だけがかけ離れて小さく、二乗誤差の合計の 4 割近くを占めている。そこで筑後川を除外して最小二乗法により R_{cm} と σ を求めるとそれぞれ $R_{cm}=383 \text{ mm}$ 及び $\sigma(S_r)=56 \text{ mm}$ となる。これらの値を使用した計算値と実測値をプロットすると図 4.6.6 が得られ、さらに精度が向上した。不確定要素が多い土砂災害と降水レーダにおいて、この程度の精度が雨のみから得られれば十分と思われる。

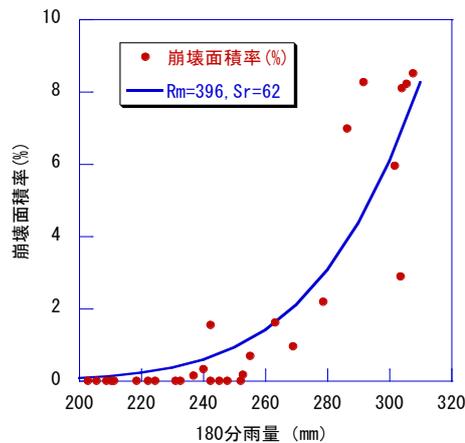


図 4.6.5 時間累加雨量最大値の流域最大値と崩壊面積率の関係 (筑後川を含む)

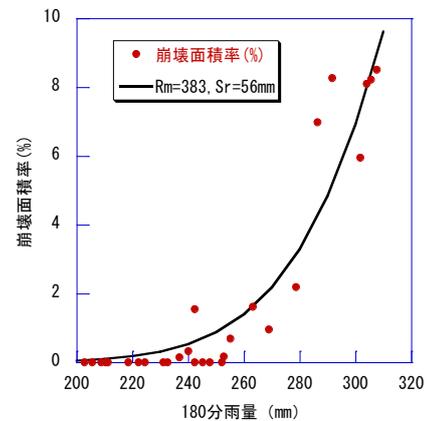


図 4.6.6 時間累加雨量最大値の流域最大値と崩壊面積率の関係 (筑後川を含まない)

4.5.6 まとめ

平野ら(1986)が80~90年代に行ってきた土砂災害発生予測は、「 T 時間内の雨量がある値 R_c を超えると斜面崩壊が発生する」とし、データより T と R_c を見つけることを主眼としていた。今回この考えを崩壊面積に拡張することにより、崩壊面積も T と R_c によって規定されることが示された。崩壊面積はそれに立木密度をかければ流木量になり(平野ら、2004)、また崩壊の深さをかければ流出土砂量になること(自然災害研究班、1990)(平野ら、1992)から、 T と R_c に σ というパラメータを1個加えるだけで災害の規模が予測できることが示された。これが他の多くの災害発生予測手法(例えば気象庁のタンクモデル、国交省の実効雨量など)にない特長すなわち理論的優位性であろう。

(森山聡之)

謝辞: 土砂崩壊地点のデータは国土地理院が公開した地図を九州大学の矢野らがトレースしたものを使用した。また、計算には国土交通省九州地方整備局から入手した九州のCバンドMP補正済XRAINデータ(X+C)を用いた。

参考文献

- Moriyama, T. and Hirano, M., Relationship between Maximum Three-Hour Cumulative Rainfall and Landslide Area, Proceedings of the 21st IAHR-APD Congress 2018, Yogyakarta, Indonesia, 2018, 投稿中
- 自然災害総合研究班: 1990年7月九州中北部豪雨による災害の調査研究(研究代表者平野宗夫), 突発災害調査研究成果 NoB-2-1, 1991
- 土木学会編, 土木工学ハンドブック上巻, 第5編土質力学, 技報堂, 1974.
- 平野・疋田・森山: 活火山流域における土石流の発生限界と流出規模の予測, 第30回水理講演会論文集, 1986
- 平野宗夫, 土石流の発生予測と流出解析, 土砂移動に関するシンポジウム論文集, 1992.5
- 平野宗夫, 土石流の発生とその予測, 土木学会論文集, No. 486/VII-22 pp1-7, 1994
- 平野宗夫, 原田民司郎, 疋田誠: 豪雨による流木生産量の流木生産量の推算法, 第2回土砂災害シンポジウム, 2004
- 森山聡之, 伊東修司, 岡谷和人: 土石流災害の予測と災害情報の伝達, 第59回土木学会全国大会講演概要集, CDROM版, 2004

4.7 段波現象

4.7.1 はじめに

a)背景

近年、我が国では温暖化に伴う降雨強度の増大が顕在化しており（国土交通省（2010））、毎年のように日本各地で豪雨災害が報告されている。特にゲリラ豪雨と称されるような、短時間で局所的に強い降雨が観測されるケースが増えており、流域面積の小さい中小河川における災害が多いのも特徴の一つである。降雨強度の増大は、単なる河道への流量増大のみならず、大規模な山腹崩壊やそれに伴う土砂や流木の大量流出を引き起こす。とりわけ、土砂や流木の流出は、河道閉塞、天然ダムの形成・決壊などに直結するため、被害を増大させる。温暖化に伴い、今後さらなる降雨強度の増大が懸念される中、豪雨災害への対応は喫緊の課題である。

平成29年7月5日、6日に福岡県、大分県を中心とした大雨が発生した。この豪雨は、時間雨量では福岡県松末小学校で137mm、総雨量では福岡県北小路公民館において894mm（7/5～7日）を記録するなど、朝倉市を中心に広い範囲で観測史上最大の降水量を記録した。この豪雨により、福岡県朝倉市、東峰村、添田町・大分県日田市を中心に甚大な被害を生じた。今次災害の中心地である筑後川中流域の右岸側には、流域面積が数平方キロメートル～20数平方キロメートル程度の中小河川が複数流入しており、それらの多くは、山地溪流から谷底平野や扇状地を形成しながら流下し、筑後川に流入する（図4.7.1）。今回その殆どの河川で山腹崩壊に伴う土砂や流木の大量流出、洪水氾濫が生じた。流出した土砂や流木は、山地溪流のみならず、下流の扇状地まで到達し被害を拡大した。この点は今次災害の大きな特徴である。その傾向は寒水川流域で顕著に見られた。寒水川は流域面積3.7km²の普通河川で、山地から低地平野に河川が流れ出るところに扇状地が形成されている。下流扇状地で39haもの大規模な氾濫が発生し、床上浸水147戸、全半壊43戸の甚大な被害を出した（朝倉市（2018））。災害前は川幅4～8m程度の河川が、扇状地部全体を氾濫し最大の氾濫幅は900m程度まで拡大した。この氾濫は段波に伴う大流量により発生した可能性があり、通常の河川水害とは大きく現象が異なるものである。このような段波現象は、今次災害被災地の他の河川でも起こっていたことが地域住民の証言から明らかとなっており、今次災害の被害を拡大させた大きな要因の一つと推測される。しかし、段波現象については、全国的に見ても直接その様子が確認された報告例が少なく、現象そのものや発生メカニズムについても不明な点が多い。朝倉地域の復興や、温暖化状況下における豪雨災害への防災上の観点からも、段波現象の解明とその対応策の考案は重要な課題である。

本研究は、平成29年7月九州北部豪雨災害被災地で発生した段波現象に着目し、地域住民への聞き取りや、災害後の現地調査、住民が撮影した画像の解析等を通して、その詳細について報告するものである。



図 4.7.1 平成 29 年九州北部豪雨における朝倉市の被災河川（土木学会調査団速報より）

b) 対象地域の概要と発災後の取り組み

本研究では平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う災害被害が特に甚大であった朝倉市を対象とする。朝倉市では、地域の力をより高めるために、第 1 次朝倉市総合計画の中で「自立：元気なコミュニティにより自立するまち」という基本構想を掲げ、「地域コミュニティ活動の推進」に取り組んでいる。平成 22 年度から、市内 17 地区で地域に根ざしたコミュニティ活動を進めている。今次豪雨では、特に、松末、杷木、久喜宮、志波、朝倉、高木、三奈木、蜷城の 8 地区で甚大な被害が生じた（朝倉市（2018））。今次災害の復旧・復興に関しても、上記の 8 つのコミュニティをベースとして、地区別復旧・復興推進協議会が立ち上げられ、事業が進められた。なお、本研究では、段波に関する証言が聞かれた久喜宮、松末、杷木、コミュニティを対象とし、それぞれのコミュニティを流れる寒水川、白木谷川、赤谷川、を対象とした（図 4.7.2）。

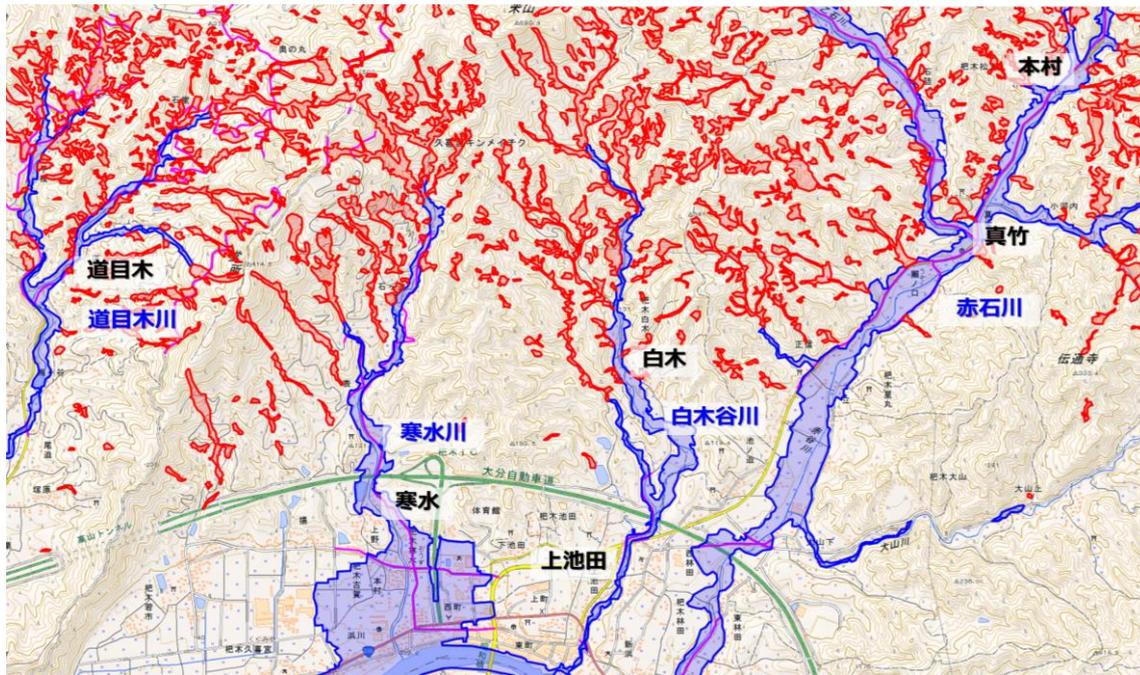


図 4.7.2 本研究の対象地（地理院地図に追記）

c) 段波に関する既往研究

“段波”とは、“静水面の一方を急に高めてエネルギーレベルを上げると、波は前面で崩れながら進行する。このように水面に不連続部ができそれが上流（または下流）に伝播する現象を段波 (bore) とよぶ”と定義される（たとえば池田（1999））。小規模河川においては、山地河川において生じる洪水や土石流が段波状を呈することが多く、山津波や鉄砲水等と呼ばれる。特に土砂崩壊と、天然ダム形成と崩壊によって生じる土石流対策は、治山・砂防研究の分野において重要な課題であり、その形成メカニズムや対応策について広く研究がおこなわれている（たとえば水山ほか（1985）、石川ほか（1992）、清水（2009））。一方で、人家が多くみられる谷底平野や扇状地まで、段波の被害が及んだ事例は管見の限り多くなく、2008年7月の都賀川（神戸市）における例が報告されている程度である（藤田（2009））。

4.7.2 研究方法

a) 集落会議の実施と聞き取り

朝倉市では、今時災害の復旧復興に対し、朝倉市復興計画の立案（平成30年3月）を行った（朝倉市（2018））。この復興計画立に対して15を超える集落で集落会議が開催された。なおここでいう集落とはコミュニティよりもさらに小さいまとまりのことを指す（例えば寒水地区等）。集落会議では九州大学の教職員や学生がファシリテーターとなり、大判印刷された被災後の航空写真、家や田畑の被害状況、被災時の様子、どのような形で集落を復興したいかについて、地図への書き込み、ポストイットを利用した全員からの意見の聴取を行い、それらをまとめ話し合いを行い、その結果は「復興新聞」として集落ごとに発行した。

結果的に、集落会議は災害の発生時間や発生場所、災害そのものの現象等を克明に理解・記録する枠組みとしても機能した。本研究における聞き取りは、このような集落会議の中で地元住民から得られた証言をまとめたものである。なお、集落会議は朝倉市復興計画が完成した後も、地域主体の復興事業を進めていくための話し合いの場として継続されており、平成30年5月現在、17集落においてのべ64回開催されている。

b) 得られた画像の分析に基づく段波現象の把握

集落会議における聞き取りを行う中で、段波現象と思われる証言と併せて、多くの画像（動画や写真）が住民から提供された。本節では、明らかに段波と思われる画像が確認された寒水川および白木谷川での事例について詳細に検証を行うこととする。なお、提供された画像の多くは携帯電話やスマートフォンで撮影されており、撮影時刻や撮影場所についても正確に照合しうることが可能であった。

撮影された動画については、仲野の手法に基づき流速の推定を行った。仲野らの手法には、動画中に写っている浮子の移動速度（移動距離／移動時間）について動画をコマ送りすることによって推定する手法と、水流が障害物に衝突した際に生じる堰上げ高さを計測し、エネルギー保存則から流速を逆算する手法とがある。ここでは、その両方について検証し、流速を推定した。

段波の流下断面については、撮影場所の平常時の状況写真と動画撮影時の状況写真とを照合し推定を行った。以上の方法で推定した流速と流下断面面積から、動画撮影時の段波の流量を算出した。

4.7.3 研究結果

a) 各河川における聞き取り結果

段波現象を想起させる証言が得られた河川は、寒水川（寒水地区）、白木谷川（白木地区・上池田地区）、赤谷川（本村地区、真竹地区）、道目木川（道目木地区）である。以下、表 4.7.1 に河川別に証言を列挙する。なお、各河川および各地区の位置関係は図 4.7.3 に示すとおりである。いずれの河川の証言においても、「水が一旦引いた。その後水量が瞬く間に増えた（赤谷川）」、「家の2階の高さほどの津波が押し寄せていた（寒水川上流）」、「いったん水が引いたが、その後、一気に土石流が流れてきた（寒水川下流）」、「材木が山のように流れてきた（白木谷川上流）」、「決壊し、一気に流木や土砂が流れ出た（白木谷川下流）」、「流木が詰まってできたダムが決壊して、一時的に流量が大きくなった（道目木川）」というような具体的な内容であり、段波を想起させるのに十分な表現となっている。特徴的な表現としては「泥水がゆっくりとアメーバのようににゅーんとやってくる感じだった」というような非常にリアリティのある証言も聞かれた。また、それぞれの流域で異なる集落の異なる住民から得られた証言が一致しており、時間や上下流の整合性もとれている点から考えても、これらの証言の信憑性は極めて高いものと思われる。各流域で段波が観測された時刻は、赤谷川

16 時頃, 寒水川 (18 時 20 分ごろと 19 時 20 分ごろの 2 回), 白木谷川 (上流 17 時 30 分頃, 下流 18 時頃), 道目木川 (17 時頃) となっており, 流域毎に異なっていることがわかる. 特に寒水川では少なくとも 2 回の段波が発生していると思われ, 氾濫被害を大きくした主要因の一つといえるだろう. 白木谷川については, 上下流に位置する 2 つの集落でそれぞれ段波と思われる証言が 30 分ほど間隔を空けて得られているが, これらが同一の段波であるかどうかについてはわかっていない.

表 4.7.1 各河川における集落毎の段波に関連する証言内容

河川名	集落名	証言内容
赤谷川	本村地区	A さん 「・・・時々川の様子を見ていたのだが 16 時頃に水が一旦ピタッと止まった. 溪流釣りを趣味としていたため, 水が止まったら危険ということが頭をよぎった. そのうち水量が瞬く間に増え, 自宅の横の田んぼまで乗り上げるようになった. 6 年前の豪雨より勢いが強いと感じたため, 避難を行うと決めた. (中略). 避難場所はあらかじめ松末地区で決めた高台にすると決めていたため〇〇さん宅に車で向かう. その際は道路に石や流木が転がり始めていた」
	真竹地区	B さん 「16 時頃水が一度だけ引いた」
寒水川	寒水地区	C さん 「18 時 7 分寒水川の水が駐車場まで来たため 2 階に垂直避難し, 18 時 19 分には, 溢れた水が電柱をなぎ倒していた (※動画あり. 次節参照). 19 時 21 分, 寒水川の水位が下がり河道内で流れる程度になり, その後上流の家の 2 階の高さほどの津波が押し寄せていた」 (※写真有. 次節参照)
		D さん 「・・・18 時頃急に土石流がやってきた. 来る前は, 泥水がゆっくりとアメーバのようににゅーんとやってくる感じだった. 土石流の丸太は家にもあたって大変な被害を受けた」
		E さん 「19:00 頃にいったん水が引いたが, その後, 一気に土石流が流れてきた. 19:30 頃には近づけないほどの土石流であった (※写真有. 次節参照)」
白木谷川	白木地区	F さん 「17:30 頃 川の方から材木が山のように流れてきた. 流れてきた水が山に当たって F' さん宅の方に向かって刎ねかえってきた。」
	上池田地区	G さん 「18 : 00 頃 高速道路下の橋に流木が立った状態で詰まっており, 橋の上 2m ぐらいまで水面が堰あげられていた→18 時頃決壊し, 一気に流木や土砂が流れ出た. 立ち往生していた車の中から, 決壊直前に親子連れの家族を救出した」 H さん 「18 時過ぎ, たくさんの流木と一緒に車が流れてきた. 一気に水位が上がり一瞬で氾濫が広がった。」 (※画像有. 次節参照)
道目木川	道目木地区	I さん 「17 時頃 流木が詰まってできたダムが決壊して一時的に流量が大きくなった」



図 4.7.3 段波に関する証言が得られた各河川・集落の位置 (●は証言があった地点を指し、丸中の英字は表 4.7.1 中の証言者と対応している／地理院地図に追記)

b) 住民により撮影された動画及び画像の分析

本節では、段波の映像が撮影された寒水川および白木谷川について結果を述べる。

寒水川で得られた映像

本節での解析に使用した映像 (動画) は、寒水川上流の図 4.7.3 中の C 地点において撮影された。撮影者は前節の証言でも紹介した C さんである。撮影された動画のキャプチャを図 4.7.4 に示す。動画は 18 時 19 分に撮影されており、瞬く間に水の勢いが増し、撮影を始めてから数秒で、電柱が段波によってなぎ倒される様子などが観測されている。C さんに動画の説明を受けた際に得られた証言を時系列に整理したものを表 4.7.2 に示す。証言や動画から、段波の勢いのすさまじさと、時間的にも非常に急な現象であったことがわかる。なお、証言から 2 回目の段波の規模が 1 回目比べて大きかったことが推測されるが、現時点ではこれ以上の情報は得られていない。



図 4.7.4 18時19分に撮影された寒水川における段波

表 4.7.2 動画撮影者（Cさん）による証言内容

時刻	寒水川の様子
17時30分頃	家の1階から洪水を見ていた。流木はほとんど見られなかった。
17時35分頃	どんどん水と流木が増えてきた
18時19分	川から水が溢れて流れており、たくさんの流木や土砂も一緒に流れてきた。目の前の電柱がなぎ倒された（図4.7.4の動画） →一回目の段波
19時21分	水が引いたので、一階において様子を見ると、川は土砂で埋まっていた。その後すごい音を立てながら、隣の家の2階ほどの高さの津波が流れてきた（図4.7.5）。岩と岩のぶつかる音がものすごく雷のようだった。1回目の段波よりもひどかった。隣の家に流木が突き刺さった。山津波は最低でも30分間くらいは続いた。8時頃まで家の前を、1m～2mの岩が流れていた。 →二回目の段波

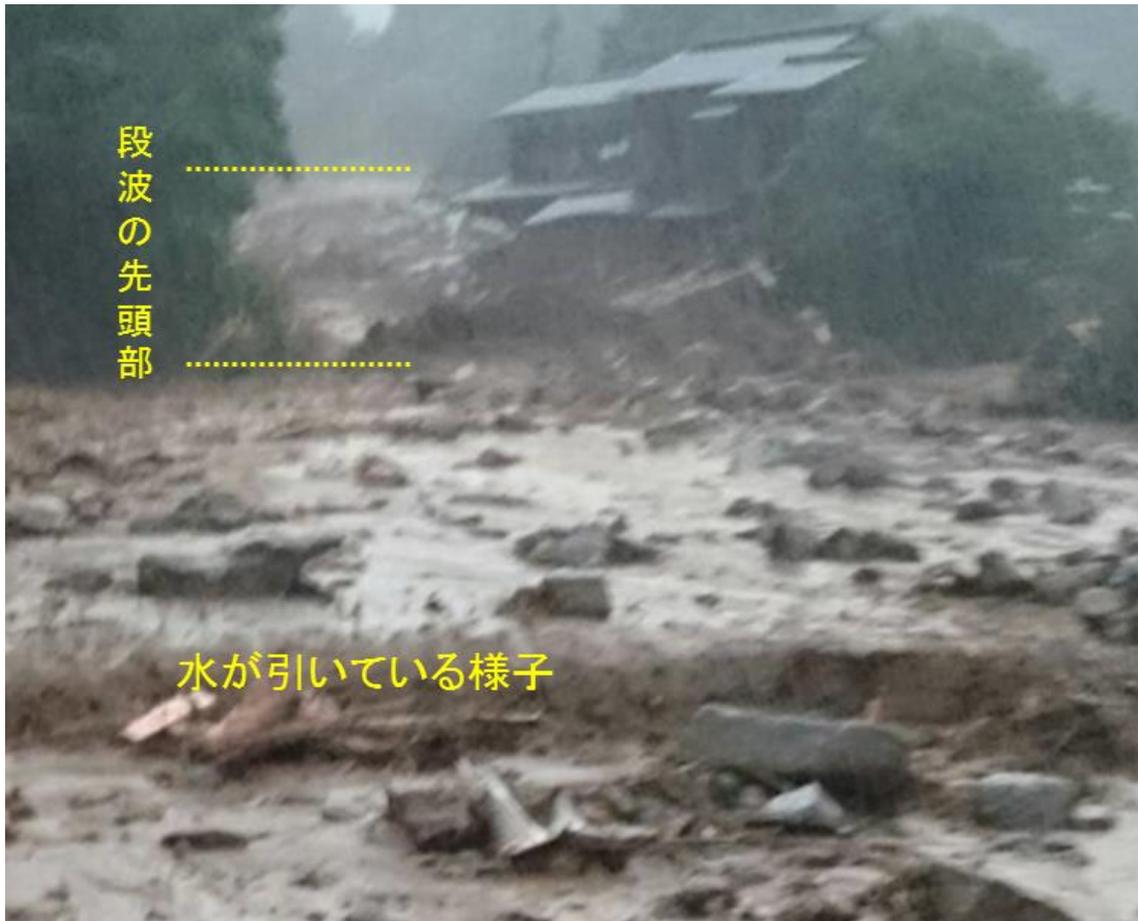


図 4.7.5 19 時 21 分に撮影された寒水川における段波（上流側を向いて撮影．水が引き、段波の先頭部が写る）

動画の分析に基づく段波現象の把握

図 4.7.4 の動画から、仲野ほか（2018）の手法に基づき、流心および水際部の流速を推定したところ、流心および左岸側（水衝部）の流速は概ね 10m/s 、右岸側（水裏部）の流速は概ね 5m/s であることが明らかとなった。災害後の現地測量や、Google マップのストリートビューで撮影されていた平常時の画像と、図 4.7.4 の動画とを比較することにより、段波流下時の水深や川幅を算出し、流下時の断面形を推定すると図 4.6 のようになる。さらに上記の流速と流下断面積とを乗じることによって、流量を求めた。その結果、7 月 5 日 18 時 19 分に寒水川で撮影された段波の推定流量は $247.5\text{m}^3/\text{s}$ となった。なお、この値はあくまでも推測値であり、流速や水深を算出する際の誤差を勘案すると、観測された段波の流量は $200\sim 280\text{m}^3/\text{s}$ 程度と幅を持たせて考えるのが妥当であると思われる。

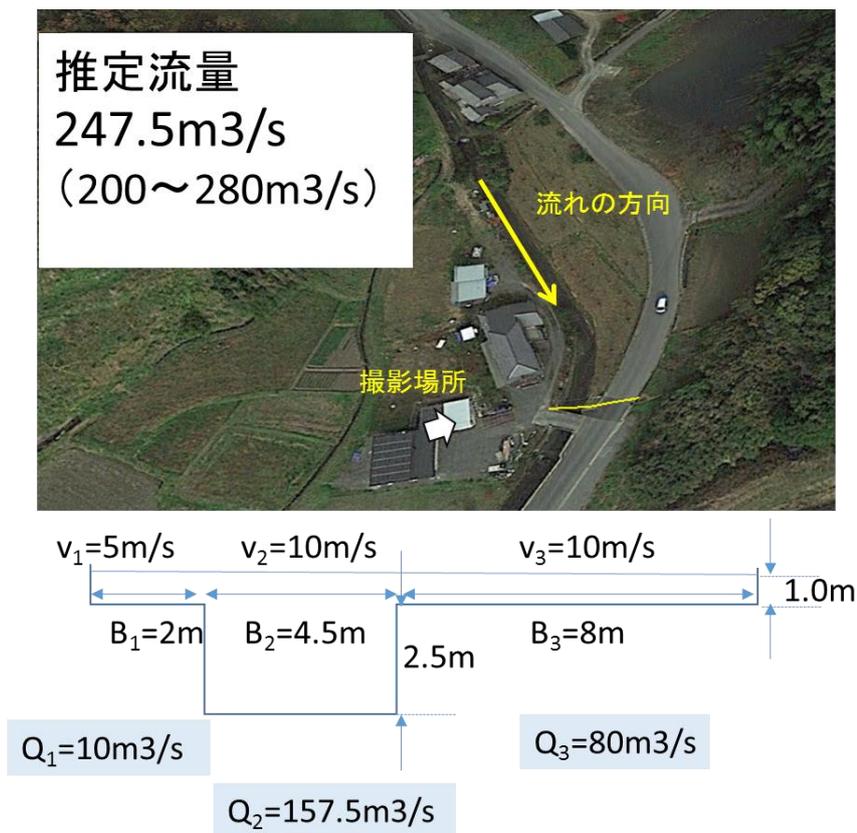


図 4.6 段波が撮影地点の航空写真と流下時の想定断面形

白木谷川で得られた映像

白木谷川下流のH地点(図4.7.3)において撮影された画像を図4.7.7に示す。撮影者は前節の証言者Hさんである。図4.7.7の左上写真の撮影時刻(18時10分32秒)にはまだ河道内に水が流れている様子が確認できる。その後わずか12秒間の間に水位が約2m上昇し(図4.7.7右上写真)、さらにその8秒後に自動車が流れ着くとともに、電柱が転倒する様子が映し出されている。さらに1分44秒後には、水位は撮影開始時より2.5m程度高い位置まで上昇し、向かいの家のガスボンベも転倒する様子が観測された。なお、洪水痕跡と比較したところ、図4.7.7の右下写真が撮影された時刻の水位とほぼ一致していることが確認された。このことから、白木谷川下流で引き起こされた洪水氾濫には、この時観測された段波が大きく影響していることがわかる。また、H地点より約500m上流のG地点において「18:00頃高速道路下の端に流木が立った状態で詰まっており、橋の上2mぐらいまで水面が堰あげられていた→18時頃決壊し、一気に流木や土砂が流れ出た」という証言がある(表4.7.1)ことから、H地点で観測された段波は、G地点における橋に補足された流木の決壊が引き起こしたものと推測される。なおG地点よりさらに500mほど上流のF地点においても、17:30頃に段波と思われる証言が聞かれていることから、G地点の流木の決壊はこの段波による可能性もある。そのため段波の根本的な発生原因は不明である。



図 4.7.7 18 時 10 分頃に撮影された白木谷川における段波

4.7.4 寒水川における氾濫現象に関する考察

a) 寒水川流域における氾濫シミュレーション

寒水川流域の被害メカニズムを検討するために数値実験を行った。数値実験には河川シミュレーションソフト iRIC の Nays2DFlood を用いた。上流端流量は、降雨を入力データとして流量を流域スケールで解析できる降雨流出氾濫モデル (RRI モデル) により算出した。降雨量は C-X 合成バンドによるレーダ解析雨量を用いた。地形データは基盤地図情報の数値標高モデルを用い、計算格子サイズは 5m メッシュとした。流量の算出結果を図 4.7.8 に、氾濫解析結果を図 4.7.9 に示す。上流端流量が RRI モデル推定流量の場合、ピーク流量は約 50m³/s であり、解析結果では、実際の氾濫範囲を再現出来なかった (図 4.7.9 黒塗り)。そこで、前節までの結果を勘案し、段波を仮定し、川の流れを 60 分間せき止めたハイドログラフを作成した (図 4.7.8 赤線)。その結果、氾濫域が実際の氾濫域に近づいた (図 4.7.9 赤塗り) ことから、せき止めおよびせき止めの崩壊により段波が発生したことで氾濫域が拡大した可能性が示唆された。

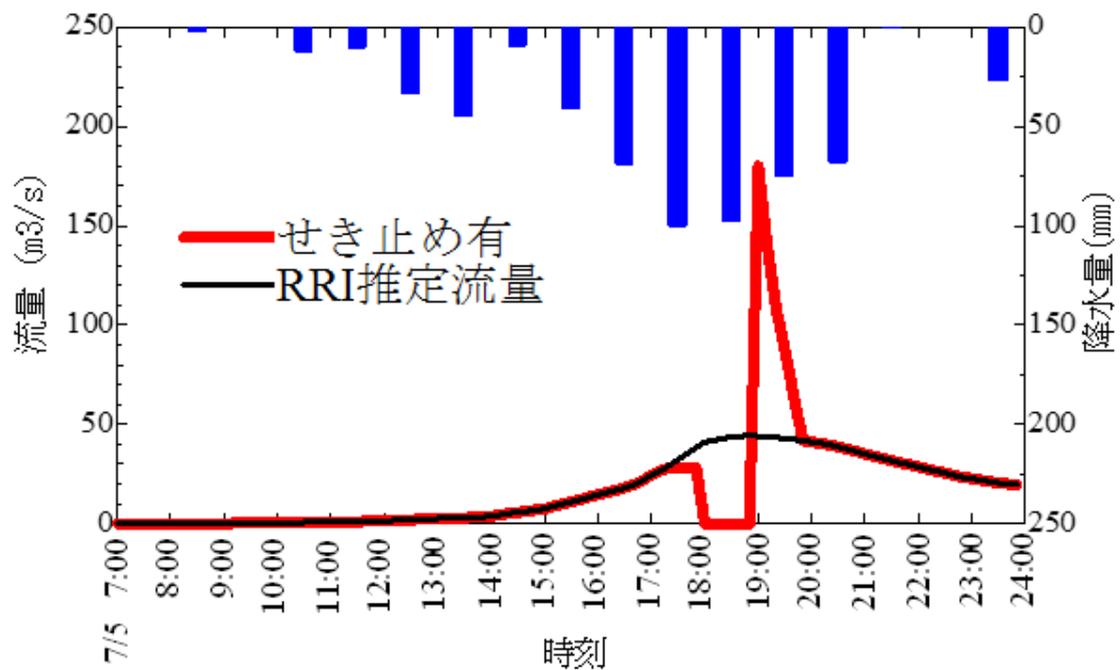


図 4.7.8 寒水川流域の降水量とシミュレーションに用いたハイドログラフ

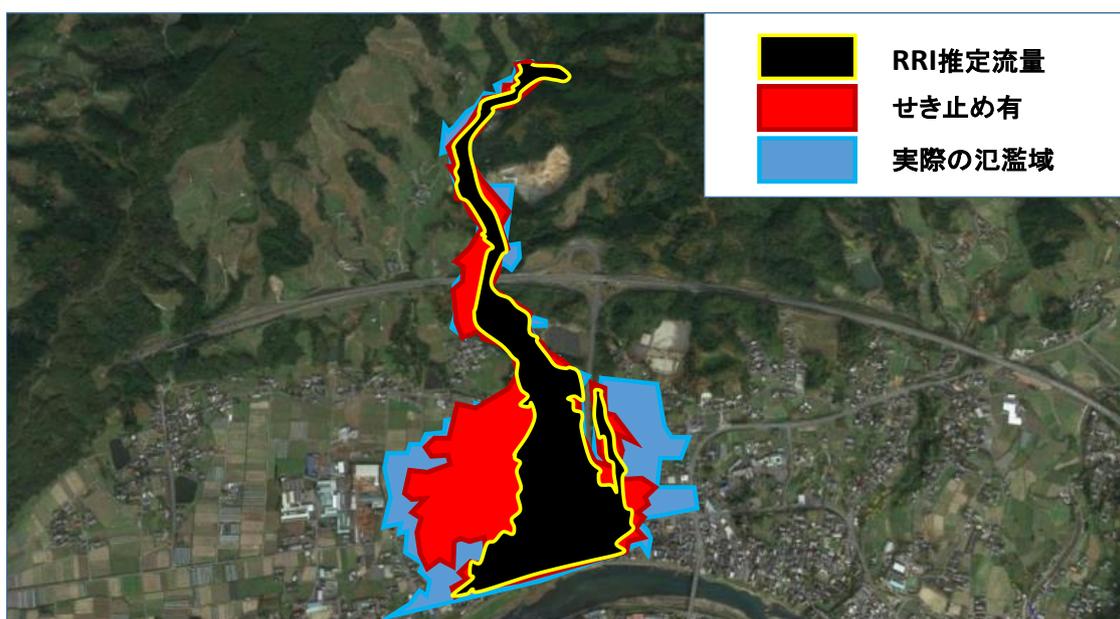


図 4.7.9 寒水川における氾濫域の比較（青：実際の氾濫域，黒：RRI 推定流量，赤：せき止めを考慮）

b) 寒水川流域の集落会議における聞き取り結果

寒水川流域で開催された集落会議（全 4 集落で、計 9 回、のべ 400 名程度参加）における聞き取り結果に基づき作成した氾濫流の流れを図 4.7.10 に示す。赤矢印が氾濫流の流れ、

黄色×印が流木の詰まった箇所を示す。住民からは、「一気に土石流が来た」という様な段波を想起させる証言のほかに、「橋に流木が詰まり、川の流れが変わった」等の橋梁の流木補足に関する証言も多数聞かれた（寒水浜川自治区（2018））。また、図 4.7.10 に示すように多くの流木が詰まった箇所があり、橋梁に流木がつまり河道閉塞を起こしたことも氾濫拡大の一因と思われる。以上より寒水川の氾濫は、段波に伴い大流量の水と共に大量の土砂や流木が一気に流下したことに加え、橋梁による流木補足等、数々の現象が複合的に起こることにより、被害を拡大したものと思われる。

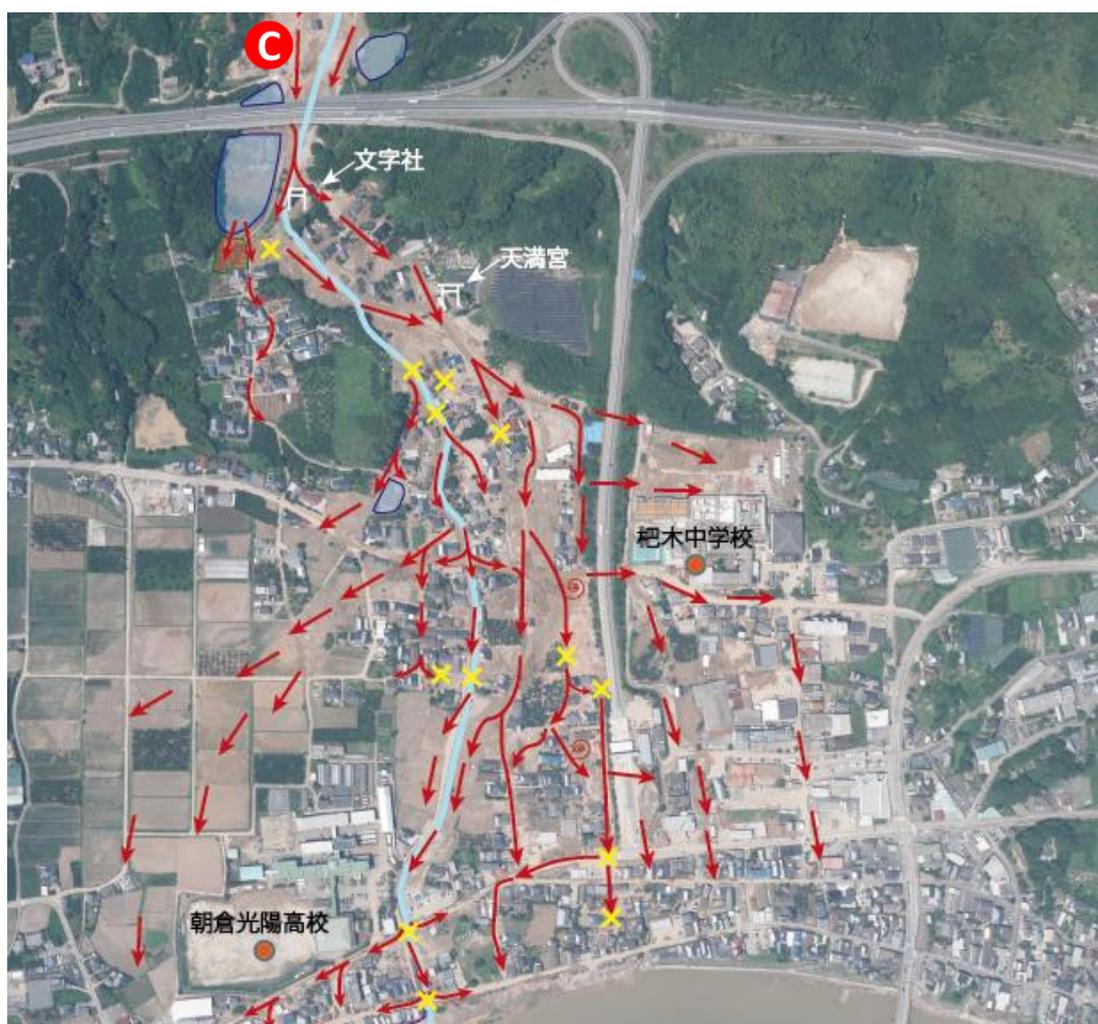


図 4.7.10 集落会議の聞き取り結果に基づく氾濫流の流れ
 (赤矢印が氾濫流，黄色×印は流木が詰まった箇所)

c) 寒水川における復興計画の考え方と今後の課題

上記の聞き取り結果やシミュレーション結果を勘案すると、段波は寒水川流域の洪水被害を拡大した主要因の一つと思われる。したがって、寒水川における復興計画を考える上で、段波現象への対策を考えることは極めて重要である。しかし、現状の河道計画立案手法では、

計画対象流量を考える際に、段波については考慮されていないので、どのように復興計画（河道計画）に段波対策を位置付けるかが今後の大きな課題である。また、本論により段波の存在とその発生時刻や概ねの規模については明らかになったが、段波の発生源や発生メカニズムについては現時点では不明であり、今後の調査研究課題である。

4.7.5 結論

本研究の結論は以下のとおりである。

- ・ 住民への聞き取り調査の結果、平成 29 年九州北部豪雨災害の被災地では少なくとも 4 つの河川において洪水段波が発生していたことが明らかとなった。
- ・ 段波が観測された詳細な場所、発生時刻、発生当時の河川の様子についても明らかとなった。
- ・ 寒水川における住民が撮影した動画をもとに段波の流速・流量について推定した結果、その流速は概ね 10m/s、流量は約 250m³/s であった。
- ・ 寒水川で観測された段波の推定流量は、RRI 流出計算により見積もられる流量の 4 倍以上であった。
- ・ 災害時に住民の撮影した映像が重要な科学的データとなり得ることを示した。

(林博徳, 田井明)

謝辞: 本研究で用いた画像データは、多くの朝倉市在住の市民の方々に提供いただきました。本研究は河川基金、九州大学総長裁量経費の支援を受けています。

参考文献

- 9) 平成 21 年度国土交通白書, 国土交通省, 2010
- 10) 朝倉市復興計画, 朝倉市, 2018.3,
<http://www.city.asakura.lg.jp/www/contents/1521437490111/files/02.pdf>
- 11) 池田駿介: 詳述水理学, p109, 技法堂出版, 1999
- 12) 水山高久, 大場章, 万膳英彦: 土石流発生に伴う流木の生産, 流出事例と対策, 新砂防, vol.38, No.1(138), pp.1-6, 1985
- 13) 石川芳治, 井良沢道也, 匡尚富: 天然ダムの決壊による洪水流下の予測と対策, 新砂防, vol.45, No.1(180), pp.14-23, 1992
- 14) 清水収: 山地流域における流木天然ダムの形成・破壊と 1 流域の流出課程, 砂防学会誌, vol.62, No.3, pp.3-13, 2009
- 15) 藤田一郎: 都賀川水難事故に対する土木学会調査団の調査報告, 河川, vol.65(5), pp.27-31, 2009
- 16) 仲野健太郎, 林博徳, 島谷幸宏: 住民撮影動画を利用した洪水流速推定法, 土木学会論文集(水工学), vol.63, 査読審査中, 2018
- 17) 寒水浜川自治区: 浜川復興新聞第 1 号, 2018.1.25

5. 5 累加雨量と災害通報数との関係

5. 5.1 はじめに

本項では, XRAIN による観測データの補正済データ (以下 X+C) を用いて, 災害との関係について調査したのでその結果を報告する. なお本項は, 森山ら (2018) の研究に準拠したものである.

5. 5.2 データと方法

4. 5. 4 に示したように, 100m 四方の流域メッシュごとに, 3 時間累加雨量の最大値を観測時間を通して計算し, 最大値を迎えた時間も記録した. これを, 朝倉市災害対策本部に寄せられた災害通報数や土砂災害による死者が発生した推定時刻との関係を比較する.

5. 5.3 結果と考察

前項の計算結果から図 5.1 のような分布が得られた. 度数はメッシュの数である. 14 時 30 分と 16 時 30 分にピークが見られる.

図 5.2 に朝倉市災害対策本部が受けた通報件数を示す. 図 5.1 と比較すると 3 時間累加雨量の最大値を記録してから 30~60 分の遅れで災害が発生して通報されているようである.

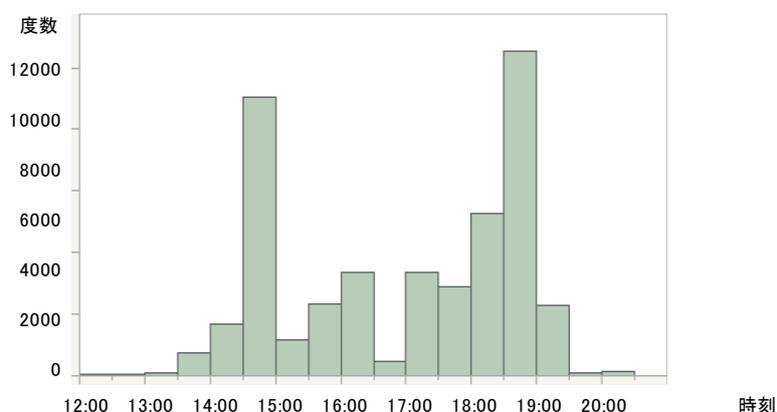


図 5.1.1 3 時間累加雨量最大値を記録した時刻の分布

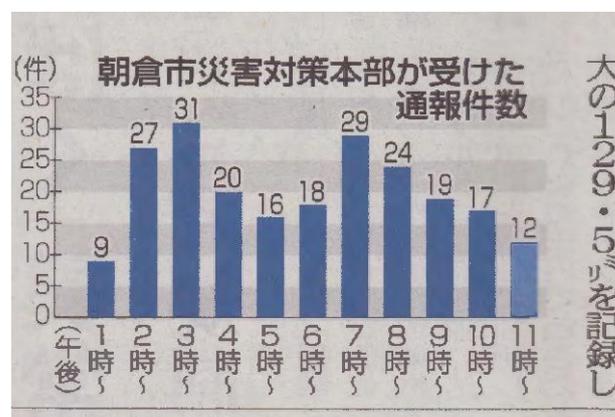


図 5.1.2 7 月 5 日に朝倉市災害対策本部が受けた通報件数 (西日本新聞 2017.8.3 朝刊)

図 5.1.3 に死者・行方不明者の推定発生時間帯を示す。この図では1時間降水量と比較しているが、その関係は明瞭では無い。しかし、3時間雨量の場合には18時におけるピークとの関係が明瞭である

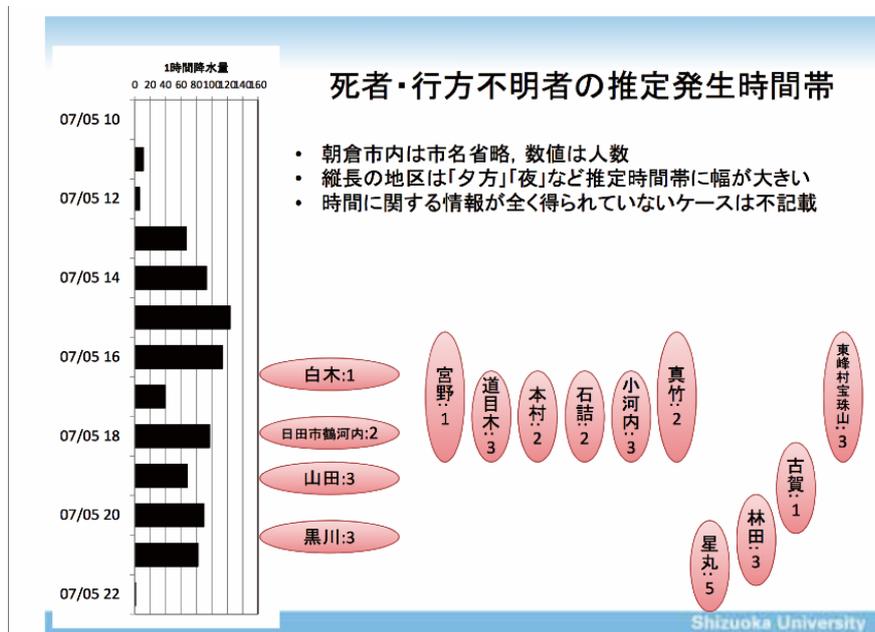


図 5.1.3 死者・行方不明者の推定発生時間帯 (牛山 2017)

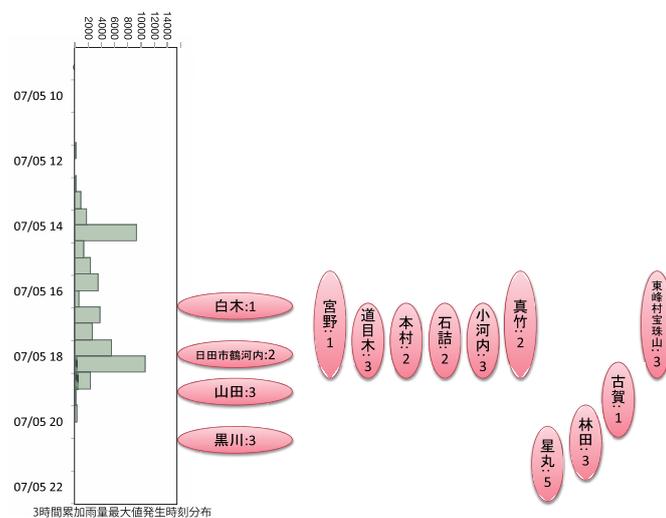


図 5.1.4 3 時間累加雨量最大値の記録時刻と死者・行方不明者の推定発生時間帯との関係

5.1.6 まとめ

3時間累加雨量の最大値と土砂災害発生との相関は高そうである。しかし、流域の到達時間(=R_c)が3時間とは限らないため、今後はこれを求める必要がある。

(森山聡之)

謝辞

朝倉市災害対策本部が受けた通報件数は西日本新聞記事に拠った。記して謝意を表す。

参考文献

牛山素行, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による人的被害発生状況・発生場所の特徴(速報) 、
2017/08/24 日本気象協会現地調査速報会スライド, 2017

森山聡之, 牛山素行, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における累加雨量と災害発生の関係について, 平成 29 年度 西部地区部会・研究発表会予稿集, 2018

5.2 基礎自治体における事前の備えと災害時対応

5.2.1 2012年と2017年の豪雨災害の比較

今回の被災地は2012年7月にも豪雨災害を経験している。降水量を図5.2.1に示す。朝倉市においては、2012年の降水量はピークでも40mm程度であり、被害も2017年に比べると小さい。日田市においては、ピークの時間降水量はあまり変わらないが、日降水量は366mmを記録し、前回の約2倍となった。死者および住家被害ともに2012年より2017年水害の方が多くなっている。今回の災害後、朝倉市でヒアリングを行った時、防災担当者が前回とよく比較されるが比にならないと言われており、実被害および担当者の感覚としても、朝倉市においては今回の被害が非常に大きいことがわかる。

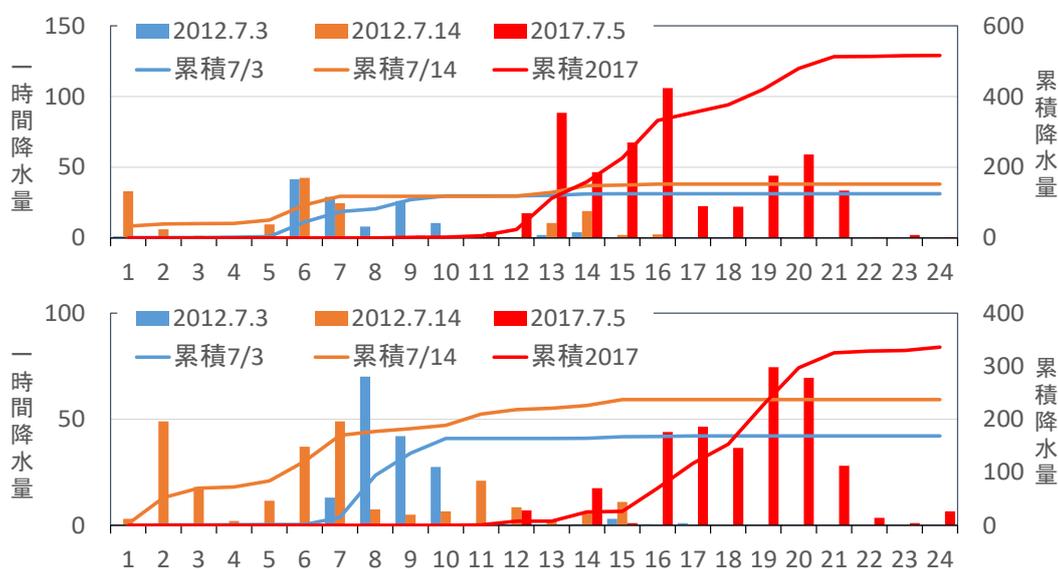


図 5.2.1 2012年と2017年水害の降水量比較（上：朝倉，下：日田）

5.2.2 朝倉市における今回の災害までの備え

a) 行政対応について

朝倉市では平成24年7・8月豪雨災害に係る報告書を取りまとめている。これには気象と被害の状況、体制と避難の状況、課題・問題と対策、について記されており、資料編を除くと全12頁である。課題・問題の主な内容について表5.2.1に示す。2012年水害までに整備されていた防災関係のマニュアル等が機能しなかったこと、電話が集中して本部機能に支障をきたした事、自主防災組織が機能しなかったこと、要配慮者支援についても計画

が機能しなかったことが指摘されていた。

2012年の水害を受けた地域防災計画や各種マニュアルの改訂は行われていないが、佐田川の防災関連の水位の変更に伴い、避難勧告の基準が改訂されている。避難勧告の基準は流域雨量を総合的に判断することとなっている。

表 5.2.1 朝倉市における主な課題・問題と対策

	問題点	課題	対応
災害 対策 本部 の 体制・ 機能	人員不足・横断的連携不足	防災計画・マニュアル見直し	実効性の高いマニュアル
	迅速・長期対応不能		罹災証明等、災害事務処理の効率化
	災害事務に支障	本部機能強化	人員配置・連携体制の再検討
	災対本部人員・電話・空間不足		窓口の明確化
電話・マスコミ・相談対応のため災対本部業務に支障			
	災害対応窓口不明確		
	職員との連絡	迅速な初動体制の確立	職員研修・訓練
地域 防災 力	自主防災組織が機能しない	地域防災力の強化	自主防災組織育成支援
	住民意識が高まっていない		啓発活動⇒防災意識・判断能力の向上
要配 慮者	要配慮者支援が機能しない	支援体制づくり	自主防災組織・民生委員等との連携

b) 自主防災組織

コミュニティ協議会と同じ範囲において、自主防災組織を設立しており、組織率は100%である。組織は17あり、旧朝倉町1、旧甘木市11（旧小学校区別）、旧杷木町4（現小学校区別）および新興住宅地である美奈宜の杜1となっている。旧朝倉町がかなり大きな範囲を対象としており、自主防災というコミュニティでの共助という観点からは懸念される点もある。

また、2012年水害での課題でもあった自主防災組織の機能強化、地域防災力の向上について、各コミュニティ協議会を中心に、地域の役員等と図1.2に示すような自主防災マップを作成している。この中には指定避難所だけでなく、中山間地域など指定避難所まで遠い場合は自主避難所を指定するなどの工夫がなされている。

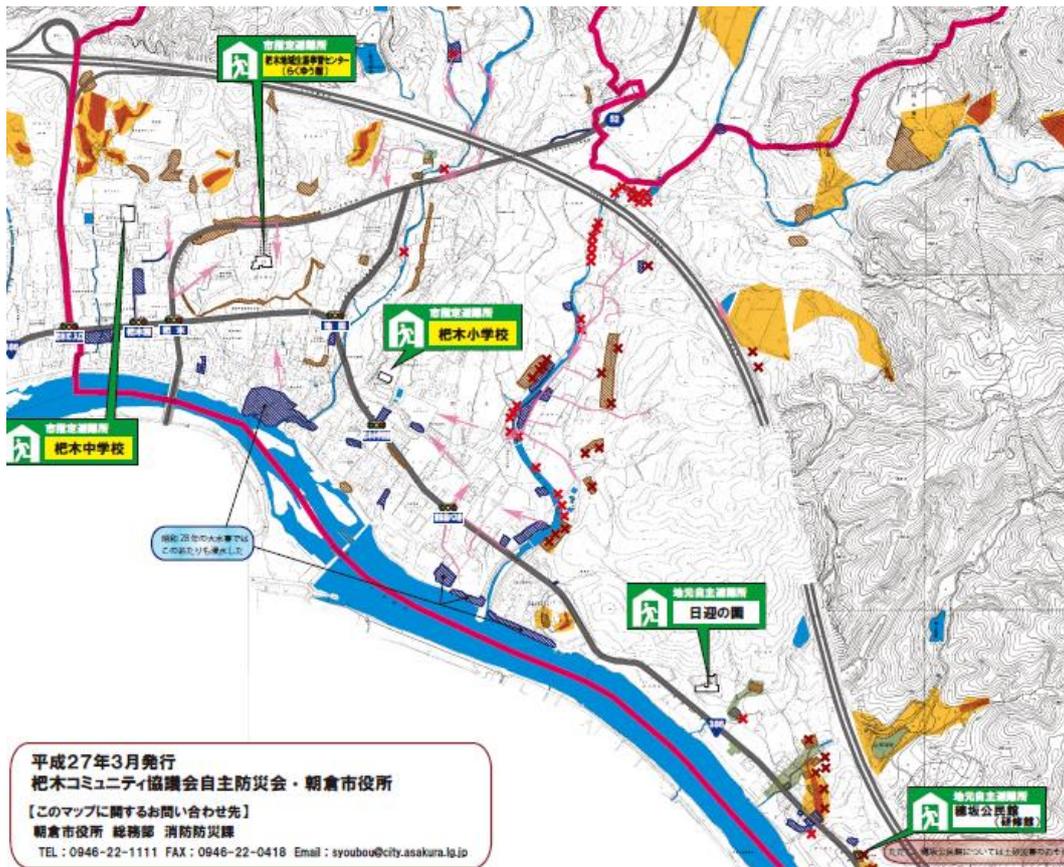


図 5.2.2 自主防災マップの例

5.2.3 日田市における今回の災害までの備え

a) 行政対応について

日田市において 2012 年水害は 7 月 3 日を中心とした水害と 7 月 14 日の水害とがある。これら 2012 年の水害を「平成 24 年九州北部豪雨等による災害の記録」として取りまとめている。これは、1.九州北部豪雨等の概要、2.被害の状況、3.災害対策本部の設置・運営、4.避難措置及び避難所の運営等、5.情報の収集及び広報活動、6.関連機関の支援・応援活動、7.ボランティア活動、8.被災者等の再建支援、9.補正予算、10.その他、の 10 章で構成されている。これには図 5.2.4 のような詳細な被害の状況に加え、図 5.2.4 に示す災害対応の時系列、孤立集落の状況やその支援、図 5.2.5 の食糧の配布状況などまで記されている。さらに、ボランティア対応において物資が供給過多になったこと、ニーズのダブリなどの課題まで示されていた。この報告書の特徴として、防災部局だけの報告ではなく、上下水道・林業・農業・文化財・学校等、各部署における被害や課題整理がなされている事である。

上記のような課題整理を行った上で、資機材購入や訓練補助・出前講座等の自主防災組織を支援するとともに、各自主防災組織に防災士を複数名程度配置することを目標とした資格取得支援を行っている。

7月3日の豪雨では、筑後川水系花月川の花月川水位観測所で「はん濫危険水位」を超え、花月川では堤防が2箇所決壊、13箇所から洪水流が越水しました。日田市街部を含む花月川沿川の地区では多数の家屋浸水等が発生し、花月川の堤防や護岸が崩壊するなど甚大な被害が発生しました。

さらに、7月14日の豪雨でも再び花月川の堤防から洪水流が越水し、3日に引き続き家屋浸水等や堤防護岸等の施設被害が発生しました。

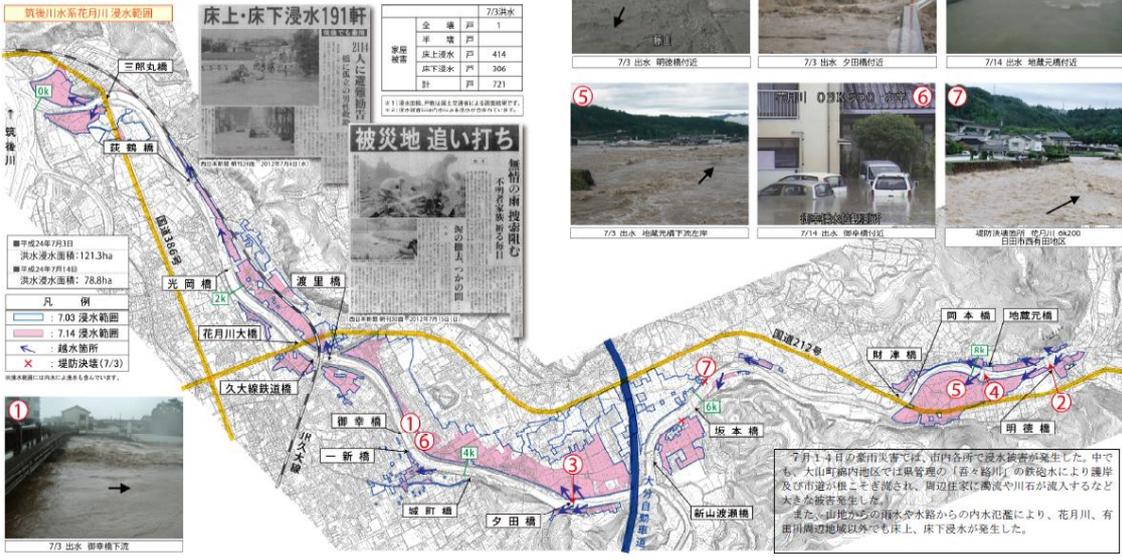


図 5.2.3 被災状況

〔防災ヘリ運行履歴〕

7月15日（日）物資輸送

10：05（TDK着陸）	10：07～10：31（投入地点等打合せ）	
10：36（熊ノ尾1回目離陸）	11：06（熊ノ尾2回目離陸）	
11：34（緑町1回目離陸）	12：16（緑町2回目離陸）	
12：26（柚木1回目離陸）	13：05（柚木2回目）	13：27（柚木3回目）
14：26（柚木4回目）	15：54（柚木5回目）	

16：27（防災航空隊基地へ帰還）

※燃料補給4回 800ℓ

7月16日（月）救助

12：27（TDK到着）		
12：28（柚木本村へ離陸）	12：33（柚木上空）	12：53（TDK着陸1人目救助）
12：54（柚木本村へ離陸）	12：57（柚木上空）	13：11（TDK着陸2人目救助）

（日田市災害対策本部から2名追加救助の依頼 13：05）
（柚木上空） 12：53（TDK着陸1人救助）

13：35（柚木本村へ離陸）	13：38（柚木上空）	13：56（TDK着陸2人救助）
----------------	-------------	------------------

14：11（防災航空隊基地へ帰還）

※燃料補給有り

※救助者4人（福祉施設&病院へ収容）

図 5.2.4 対応の時系列

平成24年度九州北部豪雨等 避難所給食状況

	パン		飲料水(500ml)		飲料水(2ℓ)		弁当		みそ汁		米		缶詰		レトルト食品		その他(食料)		その他(食料以外)		合計	
	個数	金額	本数	金額	本数	金額	個数	金額	個数	金額	個数	金額	個数	金額	個数	金額	個数	金額	個数	金額		
7月13日 金	200	21,600																			21,600	
	350	36,103	160	15,894	140	15,656															67,653	
	570	70,251	480	48,000					540	11,736	50	20,080	540	62,297			お茶(2袋)	1,596	紙コップ(340)	2,036	218,876	
合計	1,120	127,954	640	63,894	140	15,656	0	0	540	11,736	50	20,080	540	62,297	0	0	0	1,596	0	4,916	308,129	
7月14日 土	30	3,600	720	70,560	102	11,796													紙コップ(15)	2,622	88,578	
	230	27,200	250	25,300																	52,500	
	431	53,102	456	39,648																	92,750	
	238	21,152																			21,152	
	170	20,000																			20,000	
	160	15,098																			15,098	
	243	0	120	0																	0	
	2,049	279,534	4,584	458,400	600	120,000	2,587	413,920	160	7,238	75	28,840	50	9,124			お茶(2袋)	1,596	紙皿(94)	1,400	紙コップ(100)	334
合計	3,551	419,686	6,130	593,908	702	131,796	2,587	413,920	160	7,238	75	28,840	50	9,124	0	0	0	1,596	0	13,781	1,619,689	
7月15日 日													300	44,610	150	13,600					58,210	
	1,000	114,400	144	14,400			100	35,000	87	1,804	55	20,080	107	21,180	10	1,411			お茶(2袋)(14)	5,630	214,889	
合計	1,000	114,400	144	14,400	0	0	100	35,000	87	1,804	55	20,080	407	65,790	160	15,011	0	6,614	0	0	273,099	
7月16日 月	360	48,623																			48,623	
合計	360	48,623	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48,623	
7月18日 水																						
									240	31,920			300	35,400	300	29,852			お茶(2袋)	2,980		
																			紙皿(294)	30,631		
																			紙コップ(24)	634		
合計	0	0	0	0	0	0	0	240	31,920	0	0	300	35,400	300	29,852	0	0	0	34,891	0	0	132,063
総計	9,256	1,082,271	9,854	952,324	842	147,452	3,489	606,120	1,367	76,258	180	68,800	1,297	172,611	460	44,863	0	56,697	0	32,184	3,219,580	

図 5.2.5 支援食糧の配布状況まとめ

b) 自主防災組織

市内に全 258 団体が結成されており、組織率は 100%となっている。全ての組織に防災士を配置することを目標とし、現在は市内に約 400 名の防災士がいる。資格取得支援は大分県の事業として行っている。さらに、防災士取得後のフォローアップ研修を年に 3 回実施し、継続的な防災教育の体制が構築されていると思われる。また、河川パトロールにも自主防災組織が参加するとともに、避難行動要配慮者対応も自主防災組織が中心となっている。避難行動要支援者登録は約 2000 名おり、人口規模に対しては多くなっていると思われる。また、避難勧告等の発令タイミングは流域雨量指数等を用いるとともに、市が大肥川や有田地区等に設置した監視カメラの映像も見ながら判断をしている。また、2012 年災害をビデオとして再編集し、防災教育に活用していた。

また、2017 年の水害前に、要配慮者避難支援の訓練も実施しており、福祉避難所の活用方法について行政との意見交換なども実施されていた。

5.2.4 東峰村における今回の災害までの備え

これまで避難勧告を発令したことはなく、今回が初めての経験であった。過疎・高齢化が進行していることもあり、避難行動要支援者支援については、15 の行政区を中心に自主防災組織を結成し、その中で支援を実施している。梅雨時期の前には各地区で防災会議を実施するとともに、日田・朝倉・久留米へ仕事に行く人が多いため、平日昼間の支援計画を策定

している地区もある。避難訓練も年 1 回実施しており、訓練の課題を踏まえて次年度に改善するといった PDCA サイクルに基づいて行われている。避難所の指定やハザードマップの公開は行われているが、他の中山間地域と同様に居住地区の殆どが土砂災害のハザードにさらされており、どこへ避難すべきか難しい問題となっている。

5.2.5 災害時の対応と今後の課題

(a) 朝倉市

災害当日は 14 時ごろから電話が鳴りっぱなしであった。対応を難しくさせた要因の 1 つに電話対応があるとともに、市内の東西で雨量の状況が全く異なっていたことも防災行政の判断を困難にさせた。自主防災組織については、積極的に避難支援を行っていたと報告されている。例えば、多くの家庭に電話をかけて避難を促したり、実際に避難所への誘導を行ったりしていた。また、大きな被害がでた松末地区においては、当初はコミュニティセンター事務局にいたが、河川の状況を見て危険性を感じ、小学校 3 階へ移動するなど、適切な判断が行われていた。一方で、避難を促しても避難しななお方がいること、その方の中には自宅被災のために亡くなられた人もいる。この状況から、自主防災組織長が心を深く痛めている方も存在している。

今後の課題としては、筑後川の支流に水位計を設置しなければ状況が把握できないこと、避難所を長期間開設したが、その運営を行政で対応することは困難であり、自主防災組織等へ早期に引き継ぐことなどが挙げられた。また、今回の豪雨のような状況では要支援者情報の活用は間に合わなかったことも指摘された。

2017 年災害の検証はこれから行われるであろうが、この災害での課題は 2012 年災害で課題になったこともいくつか存在している。このことを踏まえ、課題に対しての取り組みを行う事の重要性が改めて確認されたと言えよう。

(b) 東峰村

今回の災害で初めて避難勧告を発令した。最大避難者数は 630 名であった。被災後の状況把握は固定電話が普通であったものの、住民から役場職員への携帯電話への連絡、歩いて役場へ訪れる住民がいたことなど、役場と住民との身近な関係が活かされた事例もあった。また、宝珠の郷でデイサービス等を行っており、高齢者等の避難を受け入れたものの、駐車場まで土砂が流れ込み危険な状況になった。避難所運営は、2 日間は役場職員が対応したが、その後は自主防災組織を中心に住民で対応を行った。また、救援物資も地元商工会が自ら持参するなど、村社会ならではの助け合いが多く観察された。

(c) 日田市

ここでは防災担当の対応だけでなく、住民・行政を含め多くの関係者が対応していた。例えば、要配慮者対応においては、保健師や市のケアマネージャー等が率先して福祉施設にシ

ョートステイさせるという対応が行われた。また、避難勧告前に自主防災組織が本部を立ち上げ、避難誘導を開始していた地域も存在していた。

特に吹上地区においては、5年前の被災経験を踏まえ多くの活動が行われている。5年前にも既に自主防災組織は結成されていたが機能しないことが分かった。これを踏まえ、組織体制を見直し、平日昼間の住民属性を考慮した要配慮者支援、要配慮者1名に対して支援者を複数名配置、避難経路・避難場所の見直しなどが行われていた。さらに、避難勧告は1つの防災情報であり、雨量・水位などの情報を基に自ら判断を行っていた。避難勧告が出なくても危険だと判断すればすぐに避難を開始するとのことであった。さらに、大雨警報が解除された後、帰宅しようとした住民がいたが、堤防決壊の恐れがある事を確認したため、帰宅させないなどの対応も取られていた。

日田市においては2012年災害を受け、数多くの課題に対して行政および地域で取り組みを実施してきた。防災の取り組みに完全はないが、その取り組み結果が2017年災害にはいかされたとうようである。災害は被害ばかりに注目が行きがちであるが、要配慮者支援や自主防災組織の取り組みが機能した事例があったことを報告しておく。

5.2.6 まとめと今後の課題

日田市の防災の取り組み、特に吹上地区における自主防災の取り組みは全国有数のレベルだと思われる。これには地域の祭りなど、地縁を強くする仕組みが下敷きになっていることを自治会長兼防災組織長も認識していた。また、朝倉市・日田市においては水位計の設置、精度の良い雨量予測に関するニーズが挙げられた。

当たり前のことではあるが、被害経験を受けてあげられた課題、そしてその改善策として取り上げた事項については、行政および地域として取り組んでいくことの重要性が改めて示された。

(神谷大介)

6. 災害の特徴的現象からみる河川災害復旧手法の考察

6.1 はじめに

2017年7月5日、福岡県の朝倉市および大分県の日田市一帯に線状降水帯が発生・停滞し、記録的な豪雨をもたらした。福岡県・大分県において死者・行方不明者41名の人的被害、多くの家屋の全半壊や床上浸水など甚大な被害が発生した。今回の豪雨は極めて規模の大きな降雨に伴って、おびただしい数の斜面崩壊が発生し、それに伴い大量に流木が発生し、多くの橋梁が流木により閉塞し、氾濫が拡大し大きな被害が拡大した。寺内ダムは大きな効果を発揮し、その他の人工構造物は一定の効果を発揮したものの、ため池の決壊や砂防ダム直下での被害などもみられ、その限界についても考えさせられる水害となった。

また、段波の発生や大規模な川幅の拡大なども起こり、大幅な地形変形が見られるなど、これまでの災害とは質の異なる災害となった。さらに、中小河川における災害であり、雨が降り始めてから被害が発生するまでの時間が短く、避難情報などの災害情報は届きにくく自助力、共助力の重要性が再認識された。本論文ではこのような、2017年北部九州豪雨の特徴的現象を記述するとともに、河川災害復旧手法について考察する。

6.2. 特徴的な現象

6.2.1 治水地形と災害現象の明瞭な対応

被害地域は筑後川右岸中流域に限定されており、おおむね西は福岡県朝倉市の佐田川、桂川から東峰村の大肥川、大分県日田市の小野川までの範囲である。

この領域は古代から発展した地域であり歴史が極めて古いのが特徴である。平地には著名な3連水車があり

また斉明天皇の朝倉橘広庭宮（西暦661年）がおかれた地域で古代の中心地のひとつである。被害の大きかった支流の上流域は英彦山の修験で栄えた結界域の一部で、その成立は中世以前にさかのぼる。これらの地域は長い歴史を持っており災害頻発地域ではないと推定している（後述）。高速道路を利用すれば福岡市内から1時間以内の近郊農業地域である。現在も柿の生産などで有名な豊かな地区である。

被害地の西端に当たる佐田川流域では、上流域では豪雨に見舞われ甚大な被害を被ったが、寺内ダムの下流は大きな被害は発生しておらずダムが被害軽減に大きく貢献した。

今回の災害は河川地形と明瞭な対応が認められるが、特に扇状地地形、谷底平野地形では、被災の規模が非常に大きく、地形がリセットされたような大きな地形変形が観察されている。

この地区の地形を概観すると、筑後川中流低地、氾濫低地の山際に見られる更新世に形成された扇状地が台地になった朝倉扇状地群、支流の出口に形成されている小規模な扇状地、筑後川支流の上流の山地に形成された谷底平野などから形成されている。

氾濫低地では、筑後川の桂川などの下流部の筑後川自然堤防地帯が大きな被害を受けた。

今回の災害では 3 カ所で破堤し、後背湿地である水田を氾濫流が流下し、広い範囲で浸水し、自然堤防上に立地する家屋にも被害をもたらした。浸水世帯は 800 戸、浸水面積は 1000ha を超えている。ただし、本流筑後川からの氾濫は見られなかったため、自然堤防の新たな形成や自然堤防の浸食などの大規模な地形変形は発生しておらず、あくまでも支流の氾濫現象である。

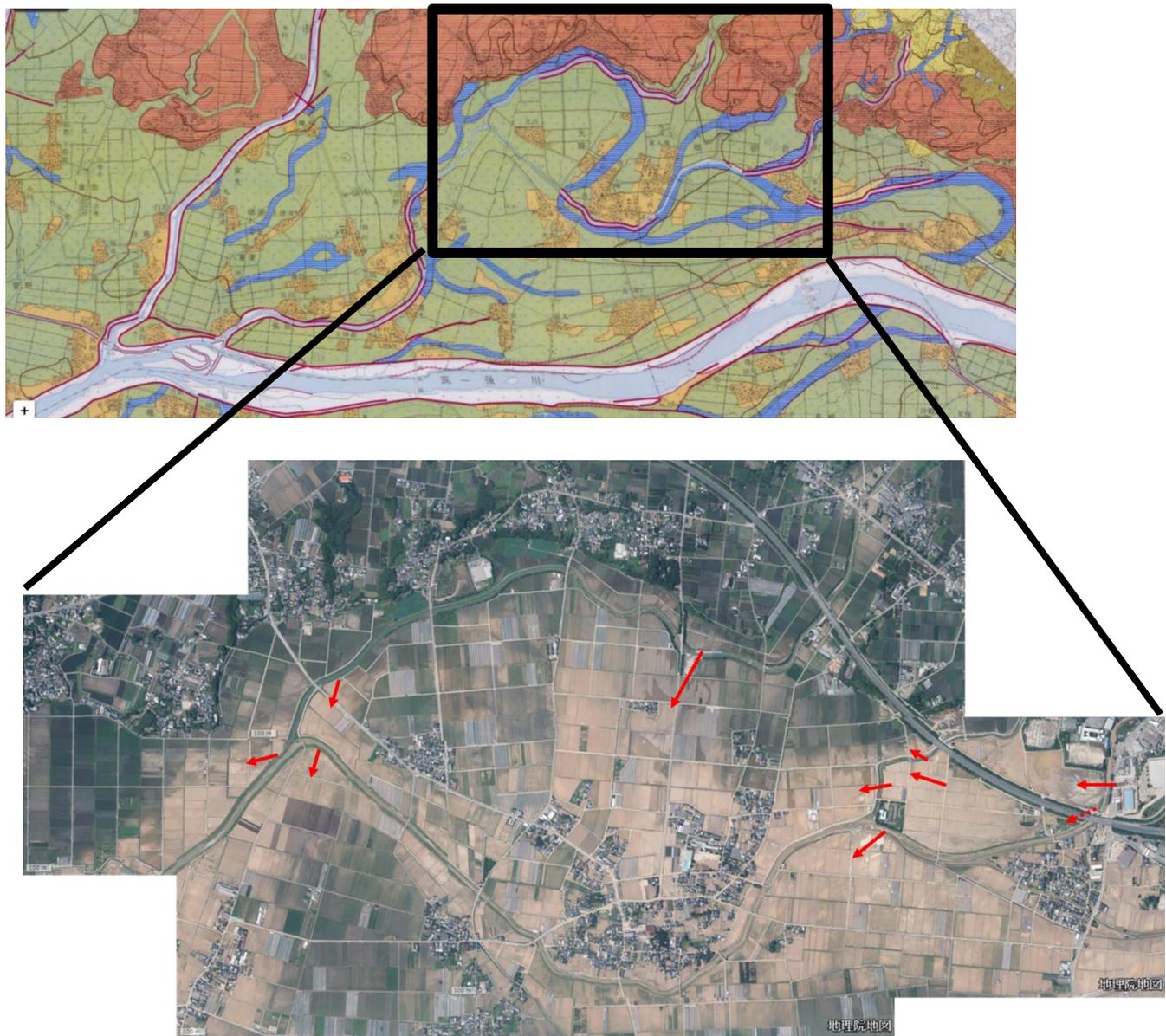


図 6-14 氾濫低地の氾濫現象

扇状地部の氾濫としては、寒水川の氾濫が特徴的である。流域面積 3.7 km² と小さな普通河川であるが、山地から低地に河川が流れ出すところに扇状地が形成されている。下流扇状地で 39ha もの大規模な氾濫が発生し、床上浸水 147 戸、全半壊 43 戸の被害を出した。川幅 4m 程度の河川であったが、扇状地全体を氾濫し最大の氾濫幅は 500m 程度まで拡大した。



図 6-2 国土地理院の氾濫域



図 6-3 治水地形分類図

この氾濫は段波による大流量により発生した可能性があり、今回のような極端災害においては、扇状地地形が形成された状況を彷彿とさせる大規模災害である。

山間部河川、谷底平野河川である黒川、北川、白木谷川、赤谷川などの被害も甚大である。山地の土砂崩壊、それに伴う流木の流出、上流河道の大規模な浸食および砂の堆積、橋梁への流木の閉塞とそこからの氾濫など、元の地形が分からないほどの甚大な被害が発生している特に上流地質に花崗閃緑岩を持つ河川では、浸食堆積域の大幅な拡大が発生した。7m の川幅の河川が 140m にまで広がった場所もある。被災した住民のほとんどが自宅における河川氾濫による被害であるというのも特徴である。赤谷川水系では 373 世帯中、全壊 99 戸、半壊 37 戸と世帯の約半数が全半壊となった。

6.2.2 土砂災害と流木災害

今回の災害の特徴の一つは大量の土砂崩壊とそれに伴う流木の発生である。国土交通省の調査によると「今回の豪雨による筑後川右岸流域の斜面の崩壊面積（発生域）は 4.44 km²、発生土砂量 1,065 m³ に及び 12 時間雨量が 400mm を超過する範囲に崩壊地が集中している傾向がみられた。地質別にみると、深成岩（花崗閃緑岩）や変成岩を主体とする地域で崩壊が多く発生している。」1)「流木は筑後川右岸流域で約 21 万 m³ 発生したと推計された。」1)とされている。

元福岡県の林業試験所に所属し、現在、福岡県林業技術者連絡会に所属する福島は朝倉市、東峰村の平均林齢は 62 年、1 本の重さは約 1 ton、林地では 1ha およそ 1000 本と推定している 2)。国土交通省の推定では、林齢を 45 年とし、1ha あたりの材積量（幹のみの重さ）549 m³ を用いている。この値は福島に比べて、約 1/2 倍程度低い値になっており、実際には国土交通省の値よりも大きくなっていった可能性は否定できない。いずれにしても大量の流木が流出している。

6.2.3 段波現象

今回の災害ではいくつかの支流で段波現象が観察され大きな被害が発生している。住民が撮影した映像から確実に確認されているのが寒水川と白木谷川である。寒水川を例にとると、前述したとおり流域面積 3.7 km²の普通河川であるが、下流扇状地で大規模な氾濫が発生し、大きな被害が発生した。被災した住民が撮影した扇状地先端付近の動画を分析したところ、 $Q=250 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、通常の洪水流量とは考えられない値である。「川の水が一旦減少した後に一気に水と流木が流れてきた」という証言、および段波状の静止画も撮影されていることから、段波現象が発生し、洪水流量の数倍の流量が流下し、氾濫が発生した可能性が高い。



図 6-4 観察され段波

同様の現象は、小河内川、赤谷川、白木谷川、百目木川で目撃されている。降雨強度が強く、多量の土砂流棒が発生した場合、中小河川洪水では頻繁に段波が起きている可能性が示唆される。段波現象によって現象が発生しているのならば、災害復旧及び防災対策の対象流量は大幅に増加するためその方法論については考え直さなければならない。段波の原因、段波の規模などについてはさらなる調査が必要である。

同様の現象は、小河内川、赤谷川、白木谷川、百目木川で目撃されている。降雨強度が強く、多量の土砂流棒が発生した場合、中小河川洪水では頻繁に段波が起きている可能性が示唆される。段波現象によって現象が発生しているのならば、災害復旧及び防災対策の対象流量は大幅に増加す

6.2.4 川幅の拡大

今回の災害では、通常の川幅に比して氾濫流の流下範囲（洪水後の川幅）が大幅に拡大していることが特徴である。北村は地理院地図の計測機能を用いて、平成 29 年 7 月九州北部豪雨で被害を受けた河川の洪水前と洪水後の川幅を簡易的に計測した。洪水前については「空中写真・衛星画像全国最新写真（シームレス）」を、洪水後については「平成 29 年 7 月九州北部豪雨正射画像統合版」を使用し、50m 間隔で 50 地点の洪水前の川幅と洪水後の川幅（浸食及び土砂の堆積が確認できる範囲）を計測している。

この結果を見ると（表 1）、いずれの河川も川幅は拡大しているが、特に川幅の拡大率が大きな河川は花崗閃緑岩地帯を流下する河川である。その平均の川幅拡大率は 10 倍程度にもなっており、この川幅拡大が被害を大きくした。

この川幅拡大は浸食現象と堆積現象の両者があいまって生じたものである。高田は豪雨災害の発生直後、ドローンを用いた空撮を行い、オルソ画像を取得した。そこから 1 m 格子の DSM データを取得し、RTK で測量したデータを使って補正したデータを出水前の DEM データと比較することで、出水前後の川幅の変化、河床の変化、河床勾配の変化、土砂の

浸食量と堆積量を測定した。

乙石川の結果を図に示す。暖色系が堆積，冷色系が浸食を示している。洪水前の河道は掘り込み河道であったため堆積量が大きくなり，図上では濃い赤のラインで読み取ることが出来る。上流端は山腹の崩壊により大きな堆積域となっているが，それより下流から B 地点までが浸食が卓越する区間，B 地点より下流は堆積が卓越する区間となっている。A 地点付近は中村集落の中心部で住宅が連担していた地点であり，河道浸食により大きな被害を受けた。また C 地点は堆積域であるが旧河道から 100m 程度離れた左岸の高位にあった宅地まで浸食がおよび被害が発生している。川幅が 10m 未満の河川において 100m もの侵食はこれまであまり例がない現象であり，この川幅拡大が大きな被害をもたらしているため，その原因の究明と防御方法の確立が必要である。川幅拡大の要因として，地盤材料に大量の砂が含まれていること，大量の砂の流出による堆積によって川幅が拡大される際に浸食現象がさらに起こった可能性があることなどが関係していると考えているが研究が必要である。

表 6-8 洪水前後の川幅の変化

河川	地質	川幅平均値(m)		倍率
		洪水前	洪水後	
宝珠山川	安山岩	12.5	26.9	2.1
妙見川	苦鉄質片岩	10.0	40.1	4.0
奈良ヶ谷川	泥質片岩	7.3	31.6	4.3
北川	上中流: 泥質片岩 中下流: 花崗閃緑岩	11.1	39.6	3.6
寒水川	上中流: 泥質片岩 中下流: 花崗閃緑岩	5.4	54.6	10.2
白木谷川	上流: 泥質片岩 中下流: 花崗閃緑岩	6.3	58.3	9.2
乙石川	上流: 泥質片岩 中下流: 花崗閃緑岩	8.9	88.4	10.0
赤谷川	上流: 泥質片岩 中下流: 花崗閃緑岩	7.0	75.4	10.7

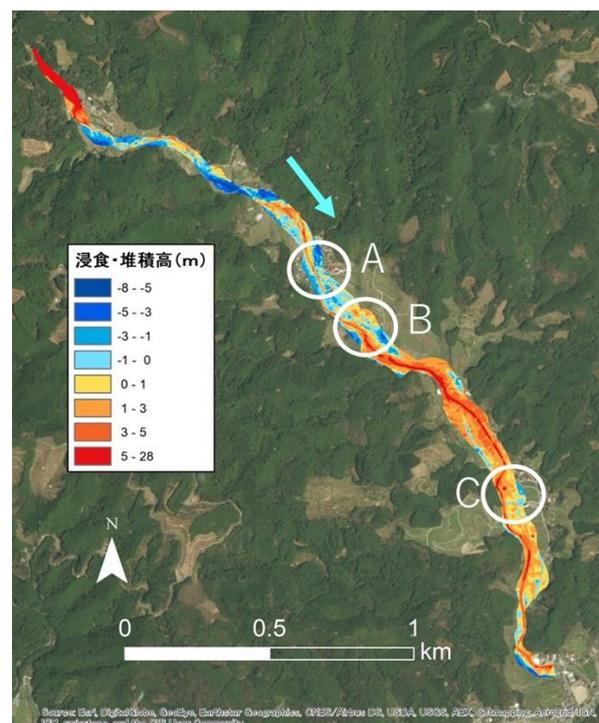


図 5 乙石川の他責浸食状況
寒色：浸食、暖色：堆積

6.3 時系列的被害・避難の状況

避難情報等の時系列を見てみる。大雨洪水警報が 13:14，土砂災害警戒情報が 14:10，災害対策本部の設立が 14:15，最も被害が大きかった赤谷川の松末（ますえ）地区への避難勧告は 14:26，避難指示は 16:20 である。

聞き取り調査による被災地の被害状況の時系列を示す。甚大な被害を被った松末地区の乙石川では避難勧告が出た直後の14:46に撮影された写真にはすでに道路が決壊し、通行不能になっている様子が映っている。避難勧告とほぼ同時刻である。同じ松末コミュニティの本村地区での聞き取りによると、沢から氾濫が始まるのが14:00~15:00ごろ、16:00頃には赤谷川の水が一旦減少し、その後一気に濁流が押し寄せ本流の氾濫が始まっている。

避難情報は届いていたのだろうか？本村地区を対象に聞き取りを行った。防災無線の避難準備情報(14:15)の放送が聞き取れた人数は11人中2人で、電線の不具合のためかそれ以降、防災無線は機能しなくなり避難勧告などの放送は届いていない。

他の地区の情報も集約すると、最初に被害が発生し始めたのが14:00過ぎで、河川の氾濫が始まったのが17:00から18:00ごろ、洪水が最も激しかったのが18:00から19:00頃であり、中小河川における災害発生の早さと非難情報伝達の難しさを考えさせられる。

それでは避難はどのようにして行われたのだろうか？今回被災した地区は5年前の北部九州豪雨において、今回ほど被害は大きくなかったが被災した地域である。そのため、避難訓練が行われ、自主防災マップが整備されていた。坂田5)が調査した赤谷川の本村地区を対象にその実態を見てみたい。本村地区の人口は70名、被災時に地区に居た人は42名、28名が通学や仕事などで集落外にでていた。これが平日昼間の実態であろう。残っていた42名のうち70代以上が23名と高齢者が多いことには注意する必要がある。

図に自主防災マップを示すが、あらかじめ指摘されていた16カ所危険場所のうち15カ所が被災した。そしてあらかじめ指定していた自主避難所には発災当日4名の方が避難し、翌日には20名の方が宿泊され有効に機能した。そのほかの2戸にも集落内の住民が移動し避難した。

時系列を見ると、14:00から15:00の間に高齢者1名を自主避難所に移動させている。この時間帯に2名の方が集落外への避難を試みるが途中であきらめて自宅に戻ってから、土砂災害に遭遇している。15:00から16:00の間に3名が集落外へ避難している。16:00~17:00、2名の方が集落外への避難を試みるが途中で流されている。以上のように域外への避難ができたのは16:00頃までであり、松末地区に避難指示が出た時刻には公的な避難所にはすでに移動できなくなっていた。これらを集約すると、集落外への水平避難が5名、集落内の水平非難が11名、自宅への避難が26名となっている。

これらをまとめると以下ようになる。

地元自主避難所を集落内の高台にある民家2軒としている理由としては、①災害時は、市が指定する避難所までの道が危険になる可能性がある、②本村公民館の立地が危険と地区で判断したためである。

自主防災マップ作成後は各家庭にマップを配布し、集落の常会で周知しており、防災訓練は集落単位ではなく、松末コミュニティで行っていた。あらかじめ要支援者等は決めず、その場にいる人が臨機応変に動くことにしていた。区長は毎月広報誌や市政だよりを配っていたため、具合の悪い人、足が悪い人などは把握していた。

被災時の共助を整理すると 15 時ごろ 6 名が用水路の水を止める土嚢積み、15 時過ぎに A が B に「家に来ないかと誘い」、17 時ごろ C は A に「避難してもよいか」と連絡し、22 時過ぎに D 家族が被災した自宅から住民の人に助けられ、E、F は一緒に 1 晩家の小屋で過ごし、G は翌日、住民の人に助けられるなど多くの共助が見られた。

また、本村集落が孤立して、全員が救出されるのが 7 日であり、2 日間孤立状態で生活を送った。その間、集落の住民同士が助け合っている。

表 6-2 避難情報時系列

	朝倉市の対応
13時14分	大雨洪水警報
14時10分	土砂災害警戒情報
14時15分	避難準備情報
14時26分	避難勧告（全域）
15時30分	避難指示（5地区・平野部）
16時20分	避難指示（1地区・松末）
17時25分	避難指示（1地区・志波）
17時51分	大雨特別警報
18時7分	避難指示（2地区・甘木、馬田）
19時10分	避難指示（全地域）

その状況を記述すると、被災前は 10 世帯が簡易水道を、15 世帯程度が井戸水を使用していたが水道は使用できなくなり、さらに、井戸水も水が濁るなどの理由で 2 箇所しか機能しなくなる。災害時は J 宅の井戸水と個人でポリタンクにためていた水を使用して生活をした。

5 日の 14 時から 15 時の間に各世帯で停電が起こった。集落内の 3 台の発電型発電機を使用して電気を補った。テレビと井戸水の汲み上げポンプ・携帯の充電に利用された。炊事中の女性たちはテレビを見て初めて自分たち

が置かれている状況を知った。炊き出しは、プロパンガスと井戸水が使用できた宅で行われた。

6 日の夜は自主避難所に 20 人近くが集まった。集落内の有志女性により、ガスと井戸水を使用して、炊事が行われた。6 日は朝昼晩の食事が用意され、ごはん、味噌汁、アジやポテトサラダなどが作られた。食材は各家庭、畑からも持ち寄られた。料理は各家庭に配られ食器は洗いものを出さないように紙コップ、紙皿が使用された。

災害時は半数が 70 代以上であり、足が悪い人、けがをした人、体調が悪い人に対して看護師が世話をし、面倒を見ていた。6 日に初めて救出に来たヘリコプターには要支援者を優先的に乗せるような配慮がなされた。

災害までの発生時間が短い中小河川の災害でかつ集落が孤立したことから、災害情報などの公助は届きにくかったが、自助、共助は 5 年前の災害の経験もあり、事前の自主防災マップなどの備えもあり極めて有効に働いた。いわゆる極めて災害レジリエンスの高い地域であったことが分かる。また、中山間地における大水害時には集落外避難はすぐに困難となるため、集落内に水、燃料、電気、水洗でないトイレなどが自立した避難施設が重要であることが分かる。

6.4 復旧・復興に向けて

6.4.1 段波や川幅拡大にどう対処するか？

気象庁6)によると2017年北部九州豪雨の解析雨量は朝倉市で、3時間降水量は約400mm、24時間降水量は約1000mmとされており、想定最大規模降雨に近い豪雨であったことが推定されている。

社会資本整備審議会7)は「気候変動による外力の増大とそれにもなう水災害の激甚化や発生頻度の増加、局地的かつ短時間の大雨による水災害、さらには極めて大きな外力による大規模な水災害など、様々な事象を想定し対策を進めていくことが必要である。」とし、比較的発生頻度の高い外力に対しては、「これまで進めてきている堤防や洪水調節施設、下水道、砂防堰堤、水資源開発施設等の整備を引き続き着実に進めることが重要である。」とし、極めて大きな外力に対しては「最悪の事態を想定し、国、地方公共団体、公益事業者、企業等が、主体的にかつ広域的に連携して、ソフト対策に重点を置いて対応することにより、一人でも多くの命を守り、社会経済の壊滅的な被害を回避することを目指すべきである。」としている。

いわゆるレベル1に対しては、これまでの整備の継続を、レベル2に対してはソフト対策に重点を置くことを提言している。参考資料を見ると土地利用状況を考慮した治水対策として輪中堤などのハード対策によってレベル1を超える洪水への対処も念頭におかれているが、主流化されるまでには至っていない。

筑後川右岸河川砂防復旧技術検討委員会はこの答申に基づいて、復旧の基本方針として(1)一定規模の降雨への対応(河道対策、砂防堰堤等でレベル1対応と呼ぶ)(2)今回の災害と同規模以上のレベルへの対応(自治体等と一体となった対策や避難対策の構築)としている(レベル2対応と呼ぶ)。一定規模とは砂防施設に関しては1/100、河川に関しては1/30あるいは1/50とされている。

以上のようにレベル1を超える水害に対して、有効なハード対策が十分に検討されている現状にはないが、今回発生した段波や大幅な川幅拡大はレベル1対応では防ぐことが出来ない。また被災地住民はレベル2相当の災害で被災しているにもかかわらず、今次洪水の6割程度の流量へのハード対応という説明では納得は難しい。

それではどのような方策が考えうるのであろうか？筆者は道路などのライフラインの確保はレベル1で行い、住宅の被災はレベル2程度まで抑制する(ハード対策も込みで)というレベルを分けた対策が重要と考えている。

今回被災を受けた中山間地では河川沿いに住宅が連担しているわけではなく、居住地は集落の中心に集中していることが多い。これらの状況を鑑み、河川を線的に安全度を高めるのではなく、集落のみを水害防備林や水刎ね(大型の水制)、氾濫戻しのための霞堤、農地への浸食防止帯の設置などによって川幅拡大や段波から集落を守る集落防災の考え方が有効と考えている。

集落防災の手法は残土処理、農地復旧や宅地復旧など農地づくりや街づくりと同時にを行うことにより、コストは抑制できるものと考えている。

6.4.2 自助・共助

中小河川特では、雨が降り出してから災害が発生するまでの時間が短いため、災害情報をすべての人に届けることは現在の技術では困難である。災害情報を届けるための新技術の開発努力は継続すべきであるが、現状では情報が届かないことを前提に防災を考える必要がある。

今回災害が起きた場所は 5 年前にも災害に遭っており、防災意識の高い地域である。自主防災マップが作られ避難訓練も行われていた。それにもかかわらず大きな人的被害が発生したことから考えるとレベル 2 の災害に対してはソフト対策だけでは十分ではなく、前節で述べたハード施設も考える必要がある。さらに、集落が孤立することを前提に、集落内の安全な場所に、電気、熱、水、トイレ、食料が数日間自立できる避難拠点が必要である。

被災地は地域の人と人の信頼関係、人間関係が良好で社会関係資本の厚みがある地域である。そのために災害時に共助が有効に発揮された。共助の基本はこの社会関係資本にあり、それは日常的な人と人の関係性の中から生まれるものであり、その蓄積が課題である。

6.4.3 集落を単位とした復興

朝倉市では復興計画の立案にあたり、災害復旧・復興推進本部、朝倉市復興計画策定委員会、地区別復興復旧協議会を設立し復興計画を立案した。地域の意見を吸い上げるために 8 つの地区別復興復旧協議会が設けられた。ここでの地区は複数の集落の集合体でコミュニティと呼ばれている。たとえば松末コミュニティは 11 の集落の集合体で、それぞれの集落は 8 から 30 世帯の規模である。地区別復興復旧協議会には 1 つの集落からは 2 名が委員が選出し実施された。

地区別復興復旧協議会の場で、「選出委員だけで集落の人々の意見全てを代弁することはできないため、個々の集落の意見を幅広く把握し、復興計画へと反映させることは難しいのではないか」という意見が出されたため、順次集落会議が開催されることとなった。集落会議では、九州大学の教員等がファシリテーターとなり、大判印刷された被災後の航空写真(朝倉市提供)を囲んで、家や田畑の被害状況、被災時の様子、どのような形で集落を復興したかについて、地図への書き込み、ポストイットを利用した全員からの意見の聴取を行い、それらをまとめ話し合いを行った。その結果は「復興新聞」として集落ごとに発行した。作成は九州大学の学生及び教員、発行は各行政区となっている。会議の概要、行政からの復旧工事の進捗状況、話し合いで出た主な意見等を新聞形式でまとめた。裏面には、被災後の空中写真に、災害発生時のタイムライン、土砂災害等の発生箇所、住民の希望する河川・道路の線形や団地造成の希望地などの復興後の集落の将来像を「住民案」としてまとめている。集落会議は災害の発生時間や発生場所などが克明に理解でき、それぞれの地域の復興にとって何が障害で、どのように突破すればよいのか、集落の住民の思いや希望についても把握できる。最初は落胆していた人も集落の人と話し合う中で希望が芽生えていく。このように集落会議は災害状況の把握、復興時の課題抽出、集落の意向などの把握に極めて

効果的であった。人が密に関係性をもって暮らしている範囲は集落であり、集落を単位とした話し合いは復興の基本なため、今後、災害復旧時に集落会議や集落を単位とした復興が社会に定着することが望まれる。

参考文献

- 1) 筑後川右岸河川砂防復旧技術検討委員会，筑後川右岸河川砂防復旧技術検討委員会 報告書,2017.
- 2) 福島敏彦，九州北部豪雨災害，私信，2017.
- 3) 北村圭太，二極化した河床材料を有する上流域の浸食拡大機構に関する水路実験，九州大学工学部卒業論文，2017.
- 4) 高田浩志，平成29年7月九州北部豪雨による河道の変化についてー地質に着目しながらー，九州大学工学部卒業論文，2017.
- 5) 坂田知謙，九州北部豪雨災害時の避難行動と被災時のレジリエンスに関する研究，九州大学工学部修士論文，2017.
- 6) 気象庁，平成27年7月九州方区部豪雨について，https://www.jma.go.jp/jma/press/1707/19a/20170719_sankou.pdf#search=%27%E8%A7%A3%E6%9E%90%E9%9B%A8%E9%87%8F+%E5%8C%97%E9%83%A8%E4%B9%9D%E5%B7%9E%E8%B1%AA%E9%9B%A8%27，2017
- 7) 社会資本整備審議会，水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し，減災に取り組む社会へ～答申，2017.

(島谷幸宏)

土木学会 2017 年九州北部豪雨災害調査団

調査結果から得られた提言

平成 29 年 7 月 5 日から 6 日にかけて福岡県朝倉市，東峰村，添田町，大分県日田市に停滞した線状降水帯によって甚大な水害が発生した。土木学会水工学委員会は土木学会 2017 年九州北部豪雨災害調査団を結成し，水害の要因の解明や今後の対策に資する調査を実施した。平成 29 年 9 月には災害復旧・復興に対する 1 次提言を行ったが，調査の結果がまとまったため，その結果から得られた知見に基づき，今回の災害からの復興および今後の他の災害対応に対して提言を行うものである。関係機関はこの学術的知見を参考に復旧・復興および災害対策にあたっていただければ幸いである

【今回の災害の特徴と調査により得られた知見の概要】

1) 被災地の地理と過去の洪水履歴

被害地域は筑後川右岸中流域に限定されており，概ね西は福岡県朝倉市の佐田川，桂川から，東は東峰村の大肥川，大分県日田市の小野川・花月川までの範囲である。

この領域は古代から発展した地域であり歴史が極めて古いのが特徴である。平地には著名な 3 連水車があり，福岡都市圏の近郊農業地帯，観光地として発展している。高速道路を利用すれば福岡市内や福岡空港から 1 時間以内と便利な場所である。

また斉明天皇の朝倉橋広庭宮（西暦 661 年）がおかれた地域で古代の中心地のひとつである。被害の大きかった支流の上流域は英彦山の修験で栄えた結界域の一部で，その成立は中世以前にさかのぼる。

筑後川中流域を対象に「福岡県近世災異誌」，「福岡縣災異誌」などに基づき，近世から現代にいたる高潮を除く水害死者数の経年変化をみると，今回の水害の被害は歴史資料が残る約 350 年間で死者数歴代 4 位の甚大な災害であった。なお享保水害が今回と類似の中小河川の土砂災害によるものであるが，発生した地域は筑後川対岸の耳納山地を水源として持つ河川である。筑後川右岸に限ると今回の災害は記録史上最大の死者数を記録し，大変稀な災害であったことが分かる。

以上のように今回災害に見舞われた地域は古代から発展した地域であり，災害頻発地帯では決してない。

2) 気象・降雨

2017 年 7 月 5 日，九州北部の北側の玄界灘に前線が停滞し，暖かく湿った空気が前線に向かって流れ込んでいた。その暖湿空気が背振山地東側で上昇し，積乱雲が何度も繰り返して発生した。また，背振山地の南北から流入した湿った空気の収束も線状降水帯持続の一要因と考えられる。さらに，北側上空の寒気の流入もあり，大気が著しく不安定となって積乱雲

は高く発達した。背振山地東側で繰り返し発生した多くの積乱雲は上空の西風に乗って東に移動し、朝倉市、東峰村、日田市で集中的に豪雨をもたらし、線状降水帯は9時間以上も持続した。その結果として、狭い範囲で豪雨となり、福岡県北小路公民館において総降水量で894mmを記録するなど朝倉市を中心に広い範囲で観測史上最大の降水量を記録した。

3) 被害の状況

今回の豪雨災害においては、九州北部2県で多大な被害が発生した。今次災害においての人的な被害は、平成30年5月現在で死者40名、行方不明者2名（関連死1名を含む）であった。被災の特徴としては自宅待機中に被災された例が全体の75%を占めていた。河川別の死者・行方不明者数は赤谷川流域で最も多く死者・行方不明者合わせて22名にのぼった。住家における被害棟数の総数は約3,000棟であったのに対して、平成24年7月九州北部豪雨では約13,000棟の被害であった。被害棟数が少なかったのは、多くの被災河川が谷底河川であり、氾濫域が限定的であったことなどが考えられる。一方、平成24年7月九州北部豪雨では、全壊および半壊した住家が被害家屋全体の17%であったのに対して、今時災害では46%を占めた。さらに土砂流入による果樹園や水田への土砂流入による被害など農業への被害も甚大であった。

構造物に関しては花月川でのJR久大本線の橋梁流出のほか、多くの川で流木が橋梁へ堆積することによる橋梁の破壊や河道閉塞が発生した。川沿いの山間地の道路や平地でも水田沿いの道路は甚大な被害を受け、多くの孤立地域が生じた。ため池やダム、砂防ダムにより洪水流や土砂・流木がストックされ下流の被害を軽減した流域があった。一方、奈良ヶ谷川流域の山の神ため池は決壊し、下流の山田地区では広範囲の洪水氾濫被害が発生し、多数の流木が散乱したケースもあった。

4) 治水地形と災害現象の明瞭な対応

被害を被った筑後川中流右岸地帯の地形を概観すると、筑後川中流低地、氾濫低地の山際に見られる更新世に形成された扇状地が台地になった朝倉扇状台地群、支流の出口に形成されている小規模な扇状地、筑後川支流の上流の山地に形成された谷底平野などから形成されている。

氾濫低地では、筑後川右支川・桂川などの下流部の筑後川自然堤防地帯が大きな被害を受けた。今回の災害では桂川、荷原川、妙見川、新立川の随所で破堤・越水が生じ、後背湿地である水田を氾濫流が流下し、広い範囲で浸水し、自然堤防上に立地する家屋にも床上浸水被害をもたらした。浸水世帯は800戸、浸水面積は1000haを超えている。ただし、本流筑後川からの氾濫は見られなかったため、自然堤防の新たな形成や自然堤防の浸食などの大規模な地形変形は発生しておらず、あくまでも支流の氾濫現象である。

扇状地部の氾濫としては、寒水川の氾濫が特徴的である。流域面積 3.7 km²と小さな普通河川であるが、山地から低地に河川が流れ出すところに扇状地が形成されている。下流扇状地で 39ha もの大規模な氾濫が発生し、床上浸水 147 戸、全半壊 43 戸の被害を出した。川幅 4m 程度の河川であったが、扇状地部全体を氾濫し最大の氾濫幅は 500m 程度まで拡大した。この氾濫は段波に伴う大流量により発生した可能性があり、今回のような極端災害においては、扇状地地形が形成された状況を彷彿とさせる大規模災害である。

山間部河川、谷底平野河川である黒川、北川、白木谷川、赤谷川などの被害も甚大である。山地の土砂崩壊、それに伴う流木の流出、上流河道の大規模な浸食および土砂の堆積、流木の橋梁への閉塞とそこからの氾濫など、元の地形が分からないほどの甚大な被害が発生している。特に上流域の地質に花崗閃緑岩を持つ河川では、浸食堆積域の大幅な拡大が発生した。7m の川幅の河川が 140m にまで広がった場所もある。被災死した住民のほとんどが自宅における河川氾濫による被害であるというのも特徴である。赤谷川水系では 373 世帯中、全壊 99 戸、半壊 37 戸と世帯の約 1/3 が全半壊となった。

5) 土砂災害と流木災害

今回の災害の特徴の一つは大量の土砂崩壊とそれに伴う流木の発生である。国土交通省の調査によると「今回の豪雨による筑後川右岸流域の斜面の崩壊面積（発生域）は 4.44 km²、発生土砂量 1,065 万 m³に及び 12 時間雨量が 400mm を超過する範囲に崩壊地が集中している傾向がみられた。地質別にみると、深成岩（花崗閃緑岩）や変成岩を主体とする地域で崩壊が多く発生している。」「流木は筑後川右岸流域で約 21 万 m³発生したと推計された。」とされている。

大量の土砂と流木は河川を流下し、被害を拡大する要因となった。流木は橋梁閉塞の主因となり、氾濫流の拡大を招いた。大量に流出した土砂は河道のせき止めや谷底平野や扇状地に大量の土砂の堆積を生じさせた。

6) 段波現象

今回の災害ではいくつかの支流で段波現象が観察され大きな被害が発生している。

住民が撮影した映像から確実に段波が確認されているのが寒水川と白木谷川である。寒水川を例にとると、流域面積 3.7 km²の普通河川であるが、下流扇状地で大規模な氾濫が発生し、大きな被害が発生した。被災した住民が撮影した動画の分析結果から、流量 $Q=200\sim 250$ m³/s 程度となり、流出計算流量（RRI 流量）の数倍の値となっている。同様の現象は、小河内川、赤谷川、白木谷川、百目木川で目撃されている。降雨強度が強く、多量の土砂崩壊が発生した場合、中小河川洪水ではしばしば段波が起きている可能性が示唆される。段波の原因、段波の規模、段波を防ぐ方法などについては、今回の調査では十分に明らかにできておらず、さらなる研究が必要である。

7) 川幅の拡大

今回の災害では、通常の川幅に比して氾濫流の流下範囲（洪水後の川幅）が大幅に拡大していることが特徴である。地質によって川幅の拡大率は異なるが、特に花崗閃緑岩地帯を流下する河川で顕著である。その平均の川幅拡大率は10倍程度にもなっており、この川幅拡大が被害を大きくした。川幅の拡大は大量の砂の流出による土砂堆積と耐浸食強度の弱い河岸あるいは地盤の浸食によって川幅が拡大される際に浸食現象の両者が同時に起こった可能性があるが、さらに研究が必要である。

8) 避難の状況

避難情報等の時系列を見てみると、大雨洪水警報が13:14、土砂災害警戒情報が14:10、災害対策本部の設置が14:15、最も被害が大きかった赤谷川の松末（ますえ）地区への避難勧告は14:26、避難指示は16:20である。地区によって被害が発生した時刻が数時間異なるが、被災地区の情報を集約すると、最初に被害が発生し始めたのが赤谷川の上流域で14:00過ぎには道路が決壊し、16:00ごろには河川の氾濫が始まっている。洪水が最も激しかったのが18:00から19:00頃である。特に上流域では14:00過ぎには停電などが起こり、避難情報はほとんど届いていない。今回被災した地区は5年前の2012年九州北部豪雨において、今回ほど被害は大きくなかったが被災した地域である。そのため、避難訓練が行われ、自主防災マップも整備されていたが、それにもかかわらず、避難情報は十分に届かなかった。

発災時の共助については朝倉市杷木の本村集落での状況の調査によりお互いの声掛け、被災時の助け合い、自主避難所への避難、発災直後の炊き出し、負傷者等への看護などが行われ、質の高い共助が行われたことが明らかになっている。

災害までの発生時間が短い中小河川の災害でかつ集落が孤立したことから、災害情報などの公助は届きにくかったが、自助、共助は5年前の災害の経験もあり、事前の自主防災マップなどの備えもあり、自主避難所への避難、被災直後の助け合いなどが有効に働いた。いわゆる極めて災害レジリエンスの高い地域であったことが分かる。また、中山間地における大水害時には集落外避難はすぐに困難となるため、集落内に水、燃料、電気、水洗でないトイレなどが自立した避難施設が重要であることも明らかとなった。

9) 集落会議

今回の災害の復興計画の立案に対して、朝倉市では15を超える集落で集落会議が開催された。この集落会議には九州大学の教員等がファシリテーターとなり、大判印刷された被災後の航空写真、家や田畑の被害状況、被災時の様子、どのような形で集落を復興したいかに

ついて、地図への書き込み、ポストイットを利用した全員からの意見の聴取を行い、それらをまとめ話し合いを行い、その結果は「復興新聞」として集落ごとに発行した。

集落会議は災害の発生時間や発生場所などが克明に理解でき、それぞれの地域の復興にとって何が障害で、どのように突破すればよいのか、集落の住民の思いや希望についても把握できる。最初は落胆していた人も集落の人と話し合う中で希望が芽生えていく。このように集落会議は災害状況の把握、復興時の課題抽出、集落の意向などの把握に極めて効果的であった。

また、平成30年5月現在、14カ所で復興新聞を発行しているが、そのうち10カ所において「ホテルが戻ってほしい」「子供が川で遊べるようにしてほしい。」「美しい風景を戻してほしい」など復旧時に環境に配慮してほしいという意見が出されている。

さらに、集落会議で住民から提供された写真や動画が、今回の災害の状況を把握するための貴重な資料となった。例えば、洪水時の流速や流量についても住民から提供された動画によってある程度の精度で推測が可能であった。前述の段波現象についても住民が撮影した画像によって初めてその様子が明らかとなった。

提言

以上のような調査の結果に鑑み、今後の災害復旧或いは防災に対する提言は以下のとおりである。

1) 持続的な復興のための住民参加のプロセスと集落会議の重要性

農地・住宅地・道路などが広範囲に被災した場合、単なる河川の復旧にとどまらず持続的な地域の復興という視点が重要である。集落を単位とした話し合いでは、防災の視点だけではなく農業や暮らし、環境など幅広い視点から意見が交換されている。各コミュニティを単位とした話し合いは重要であり、地域の意向、地域の将来像を反映した復旧復興計画を行う必要がある。コミュニティの単位は日常的に相互に接している集落を単位とすることが望ましい。その際、住民に寄り添った専門家がファシリテーターやアドバイザーとして関係することが重要である。

大規模災害の復興にあたっては集落会議を今後の復興プロセスのシステムに落とし込むことが重要である。

2) 順応的管理のためのガバナンス

災害発生直後の非常時の状態から、時間の経過とともに人々の意識も変化し日常に戻っていく。時間が経過するに従って、人々の復興・復旧に対して求めるものも変化する。したがって、復興計画は人々の意識の変化に対応して順応的に行われることが必要であり、途中で計画を変更できる仕組みを当初から構築しておく必要がある。

3) 複合計画

河川や道路などの復興にあたっては単にその事業完結型の復興にとどまらず、地域の持続的な将来を見据えた土地利用、生業と河川復旧、道路計画を複合させた計画の立案が必要である。

4) 想定最大規模程度の降雨への河川整備・復旧のあり方

気象庁によると 2017 年九州北部豪雨の解析雨量は朝倉市で、3 時間降水量は約 400mm、

24 時間降水量は約 1000mm とされており、想定最大規模降雨に近い豪雨であったことが推定されている。そのため、今回は通常の水害の延長線上ではなく、最大規模降雨に伴って夥しい箇所の土砂崩壊、それに伴う流木の発生、川幅の大幅な拡大、下流域でも見られた段波現象など、水害と土砂災害、流木災害が同時・多発的に発生した災害現象であった。今回の被災地は 5 年前にも水害を蒙った地域であるがその時には死者はなく、今回の災害では多くの尊い命が奪われており、死者を伴う災害をどう防御するのかは大きな課題である。

社会資本整備審議会は「気候変動による外力の増大とそれにもなう水災害の激甚化や発生頻度の増加、局地的かつ短時間の大雨による水災害、さらには極めて大きな外力による大規模な水災害など、様々な事象を想定し対策を進めていくことが必要である。」とし、比較的発生頻度の高い外力に対しては、「これまで進めてきている堤防や洪水調節施設、下水道、砂防堰堤、水資源開発施設等の整備を引き続き 着実に進めることが重要である。」とし、極めて大きな外力に対しては「最悪の事態を想定し、国、地方公共団体、公益事業者、企業等が、主体的にかつ広域的に連携して、ソフト対策に重点を置いて対応することにより、一人でも多くの命を守り、社会経済の壊滅的な被害を回避することを目指すべきである。」としている。

いわゆるレベル 1 に対しては、これまでの整備の継続を、レベル 2 に対してはソフト対策に重点を置くことを提言している。

筑後川右岸河川砂防復旧技術検討委員会はこの答申に基づいて、復旧の基本方針として (1) 一定規模の降雨への対応、(2) 今回の災害と同規模以上の降雨への対応に分けてその考え方を示している。

(1) については山地部における土砂・流木の流出を防止するための砂防堰堤等の整備、河川上流における河道に流入した土砂・流木を捕捉するための貯留施設の整備、洪水・土砂を下流まで円滑に流すための河道の改修・河道形状の工夫により、土砂・流木を伴う洪水氾濫を防止する。(2) については、地域と一体となって、さらに安全性を高めるためのソフト対策、まちづくりの検討を実施する。一定規模とは砂防施設に関しては 1/100、河川に関しては 1/30 あるいは 1/50 である。

以上のようにレベル 1 についてはハード対策が、レベル 2 に対してはソフト対策を中心とし、ハード対策としては痕跡より高い場所への住宅地の構築を念頭に置いている。

現状ではレベル 1 を超える水害に対して、河川対策としてのハード対策が実施される状況にはないが、今回発生した段波や大幅な川幅拡大などの死者を伴う災害はレベル 1 対応のハード対策では防ぐことが出来ず、またソフト対策も十分に機能していなかった状況から考えると、レベル 2 相当の洪水に対しても、何らかのハード対策を施し、少しでも避難の時間を稼ぐ対策や被害を減らすための対策が必要であると考えられる。また被災地住民はレベル 2 相当の災害で被災しているにもかかわらず、今次洪水の 6 割程度の流量のレベル 1 対応のハード対応という説明では納得は難しい。

今回被災を受けた中山間地では河川沿いに住宅が連担しているわけではなく、居住地は

集落の中心に集中している。これらの状況を鑑み、レベル 2 対応の減災対策として、中山間地では集落のみを水害防備林や水刴ね（大型の水制）、氾濫戻しのための霞堤などによって防御する、集落防災の考え方が有効と考えている。

今般の災害復旧にあたっては残土処理、農地復旧や宅地復旧など農地づくりや街づくりと同時に集落防災を行うことには、場所によっては可能であるし、コストも抑制できるものと考えている。また、全国の中山間地谷部においても可能最大降雨により被害を予測し、集落防災の手法の有効性について検討することが重要である。

5) 河川や周辺の状況を踏まえた個々の計画

1 次提言において、河川によって上流の地質、下流の地形、周辺の土地利用などが異なるため土砂崩壊の状況、土砂の流出の状況、氾濫形態、家屋の被災形態などが大きく異なり、そのため、それぞれの河川の特徴に沿った個別の計画を立案することの重要性を指摘した。調査が進むにつれ、地理的な区分、地質の差異、家屋の立地や地形などにより被害状況が異なることがさらに明らかになり、狭い範囲の災害であっても河川の災害には個別性があり、それを踏まえた災害復旧が重要であることが示された。

6) 土砂・流木対策

赤谷川、乙石川、白木谷川では山腹崩壊、土石流、河道の浸食により大量の砂が流出し、河谷平野に堆積している。同規模の降雨があった場合には同程度の土砂流出があり、上流で抑止できる保証がないことを前提に計画を立案する必要がある。また、今後数年間は土砂流出量が多いことが予測されるため、河道内に土砂を堆積させるための構造物を設置せず（河川内には土砂を貯留するための横断工作物を設置しないことが原則である。）下流に流下させる。また堆積した砂を流水の力により緩やかに流下させ、河道や地盤を低下させ、再堆積空間を形成するという観点が重要である。これは変動を考慮した河道計画であり、変動を許容するために川幅の確保が必須である。一方、その後は急速に土砂供給量が減少することが予想され、横断工作物を設置すると、下流の河床が急激に低下するなどの現象が発生することが予見されるため、これらの土砂供給量の変動に対応できる河川空間の確保が重要である。

さらに、今回の水害では、我が国で過去に記録されたものと比べて最大 20 倍の流出率を記録した流木発生が起こった。流木は河道を流下あるいは氾濫した際に被害を生み出すことから、極力、発生源に近いところで流出を抑制することを基本に対策を考える必要がある。人家への被害が想定される谷筋の特定とその谷筋の大径樹木の伐採あるいは流木止めなどの対策、林業の振興に基づく適切な森林管理、発生源における透過型砂防えん堤の充実、河道に流出した流木を捕捉可能とする施設の充実、河道にため池がある場合にはそれを活用した流木流下抑制技術の開発、橋梁の改修による集積リスクの軽減、海域まで到達した流木処理に関する費用分担システムの検討、回収した流木の再利用技術の開発、など流域圏を一

貫した流木対策の議論を始める必要がある。

7) 環境との統合計画

未曾有の災害となったにもかかわらず、「ホテルが舞う河川に戻してほしい」「子供たちが遊べる川に戻してほしい」など環境に配慮した復旧への希望を多くの集落で聞いた。特に中山間地は美しい自然とともに地域が存立しており、今後の地域づくりにおいても自然資源を活用することが重要であることを考えると、治水と環境が統合された復旧・復興が行われることが重要である。

8) ため池

今回の災害では、奈良ヶ谷川のため池の決壊、ため池堤防の一部損壊、ため池による流木や土砂の貯留による下流への被害を軽減などため池の治水上の機能が大きな話題となった。ため池は農業施設であり治水的な機能評価がされていないため池がほとんどである。今後の豪雨対策を考えると、ため池の治水的な機能や安全性を評価し、治水上の安全性を確保するための手法・制度・予算措置などを講じる必要がある。さらに、超過洪水に対しては、余裕高の十分な確保のみならず、洪水吐上部をオープンにする、あるいは管理用道路のクリアランスを十分にとるなどの手法で、流木による閉塞を防ぎ、ため池内の水位上昇を防ぐための構造への配慮が必要である。

8) 道路， 橋梁

溪流沿いの道路が被災し、孤立する集落が多くみられた。溪流沿いの道路においては、河川との比高差を調査し、超過洪水時に道路が浸水し河川の一部になるとときには道路が河道の一部となることを念頭に洪水時にも破壊されない構造とすることが望まれる。

また橋梁に関しては幹線道路の橋梁は超過洪水時にも流木の阻害を起こさない高さやスパンの検討が重要である。生活道路の橋梁は洪水時の流木による閉塞を防ぐために沈下橋の設置などの声も聞かれるが、それらに関する知見は十分ではなく、研究が必要である。

9) ソフト対策

小さな支流の場合、降雨開始から洪水到達までの時間が短いために、避難勧告、避難指示が間に合わないことがあるため、コミュニティを単位とした防災計画、防災体制の確立が重要である。災害が発生する時間によっては、その場のコミュニティ構成員が異なるため、時間や曜日を考慮したきめ細かい体制の確立が重要である。

今回の被災地区は 5 年前にも災害を受けた地区であり、災害意識は高かったにもかかわらず災害情報が十分に届いていない事実は重く受け止める必要がある。中小河川では降雨

予測がなされてから、発災するまでの時間が極めて短く、避難情報を届けることが困難であることが前提である。住民への避難を確実にするためには、エリアを絞ったピンポイントでの災害情報を示す必要があるし、空振りを避ける確度の高い災害情報が重要であり、そのための技術の開発の努力を継続すべきである。しかし、現状の技術ではエリアを絞った、確度の高い予測は困難であることを前提に自助・共助を主とした避難を考える必要がある。

また、中山間地の災害では集落が孤立することを前提に、集落内の安全な場所に、電気、熱、水、トイレ、食料が数日間自立できる避難拠点が必要である。

今回の被災地は地域の人と人の信頼関係、人間関係が良好で社会関係資本の厚みがある地域である。そのために災害時に共助が有効に発揮された。共助の基本はこの社会関係資本にあり、それは日常的な人と人の関係性の中から生まれるものであり、その蓄積が課題である。

謝辞

本調査を遂行するにあたり，下記の機関や関係者にデータ提供や現地調査などで多大な協力を得た．

国土交通省九州地方整備局
福岡県
大分県
朝倉市
日田市
東峰村
（独法）水資源機構
医王山南淋寺住職 新野晨祥 様

また，土木学会水工学委員会 2017 年九州北部豪雨災害調査団に対して，河川財団から財政的支援を頂いた．

ここに記して感謝の意を表します．

最後に本研究を遂行するにあたり，被災直後に現地で多くの調査を実施しました．被災後にも関わらず調査を受け入れ，さらには有益な情報提供を頂いた地域住民の方々に深く感謝を申し上げます．