

応用生態工学会
平成 29 年 7 月九州北部豪雨調査団
報告書

平成 30 年 9 月

目次

応用生態工学会 平成 29 年 7 月九州北部豪雨調査団 報告書	1
調査団員および執筆者	5
1 章 はじめに	6
2 章 集落会議と地域のための復旧・復興にむけて	7
2.1 歴史的に見た被害の状況	7
2.1.1 調査方法と範囲と資料の位置づけ	7
2.1.2 筑後川中流域の水害史	7
2.1.3 平成 29 年 7 月九州北部豪雨と歴史災害	9
2.1.4 結論	10
2.2 集落会議	11
2.2.1 概要	11
2.2.2 集落会議開催までの経緯	11
2.2.3 集落会議の目的	12
2.2.4 集落会議の進め方	12
2.2.5 集落会議で話し合われたこと	12
2.2.6 復興新聞の発行	14
2.2.8 まとめ	15
3 章 河川で発生した事象と河道計画について	16
3.1 河川で発生した事象	16
3.1.1 地形による氾濫形態の差異	16
3.1.2 桂川、荷原川（自然堤防地帯）	17
3.1.3 寒水川（扇状地河川）	21
3.1.4 白木谷川（谷底平野河川）	30
3.1.5 赤谷川	33
3.1.6 野鳥川の伝統的河川構造物の治水機能とその被災状況（林博徳）	42
3.2 地質に着目した低頻度大洪水後の河道変化の比較—妙見川、白木谷川、本迫川の事例—	48
3.2.1 はじめに	48
3.2.2 方法	48
3.2.3 結果と考察	50
3.2.4 まとめ	60
3.3 花月川藤山地区の河道拡幅による土砂ストック効果に対する考察	61
3.3.1 はじめに	61
3.3.2 花月川の被災状況	61
3.3.3 藤山地区の土砂ストック効果	64
3.3.4 今後の課題	68
3.4 土砂動態を考慮した河道計画に関する考察	70
3.4.1 河道計画への取り組み方針	70
3.4.2 現状分析	70

3.4.3 河道計画に関する提案	77
4 章 被災後の河川環境と多自然川づくり	81
4.1 災害後の河川環境の状況調査	81
4.1.1 はじめに	81
4.1.2 方法	81
4.1.3 結果と考察	81
4.1.4 まとめ	83
4.2 土石流が発生した溪流の河道内環境特性と底生動物の初期的状況	85
4.2.1 はじめに	85
4.2.2 方法	85
4.2.3 結果と考察	86
4.2.4 まとめと課題	89
4.3 被災河川における魚類の生息状況	90
4.3.1 調査方法	90
4.3.2 結果・考察	90
4.3.3 まとめ	91
4.4 筑後川水系内の淡水魚類の潜在分布モデルの構築と災害地域内の魚類相の推定	95
4.4.1 はじめに	95
4.4.2 方法	95
4.4.3 結果と考察	96
4.5 多自然川づくりとモニタリングについて	100
4.5.1 はじめに	100
4.5.2 方法	100
4.5.3 結果	100
5 章 斜面崩壊地の特徴と植生被害等の状況	104
5.1 被災地の植生の特徴	104
5.2 被災地の地形・地質の特徴	107
5.2.1 累積降水量の多かったエリアと山地地形との関係	107
5.2.2 山地の地形・地質及び土壌	107
5.2.3 平野の地形・地質及び土壌	109
5.2.4 崩壊地分布の特徴	110
5.2.5 崩壊発生過程についての考察（表面流出と地下浸透）	111
5.3 斜面崩壊地の特徴と植生被害等の状況	114
5.3.1 植生の被害状況の概要	114
5.3.2 斜面崩壊要因分析	115
5.3.3 土砂崩壊地と地形・植生の関係について	121
5.3.4 現地で確認した特徴的な事象等	135
5.4 植生の保全と復元	140
5.4.1 残存する広葉樹林の保全	140
5.4.2 土砂災害防止機能、経済性等を有する森林づくり	141

5.4.3 緑化.....	149
「持続的で豊かな暮らしと環境を再生するための緊急提言」	150

調査団員及び執筆担当

			執筆担当
団長	島谷幸宏	九州大学大学院工学研究院	1, 2.2, 3.1.1, 3.1.4, 3.1.5
副団長	萱場祐一	土木研究所	1
	皆川朋子	熊本大学大学院先端科学研究部社会基盤環境部門	1, 5.3.2
団員	青木卓也	建設環境研究所	3.3
(五十音順)	井出淳一郎	九州大学	4.1
	伊豫岡宏樹	福岡大学工学部社会デザイン工学科	
	一柳英隆	熊本大学大学院先端科学研究部	4.2
	今村史子	日本工営株式会社中央研究所	5.1, 5.3.1, 5.3.4, 5.4
	和泉大作	建設技術研究所	
	大槻順朗	土木研究所	
	鬼倉徳雄	九州大学	4.4, 4.5
	沖津二郎	応用地質(株)	5.1, 5.3.1, 5.3.4, 5.4
	鹿野雄一	九州大学大学院環境社会部門	4.3
	笠原玉青	九州大学	4.1
	神尾重雄	元(株) ニュージェック	5.2
	北村永晴	応用地質(株)	
	佐藤辰郎	九州大学	3.2
	齋藤 剛	西日本技術開発	
	酒井奈美	西日本技術開発	
	杉本博幸	いであ株式会社	
	助川直人	建設環境研究所	3.3
	鈴木太郎	建設技術研究所	
	清野聡子	九州大学	
	田中亜季	熊本大学先端科学研究部	
	竹本 進	建設環境研究所	3.3
	竹内えり子	建設技術研究所	
	寺村 淳	九州大学	2.1, 3.1.2
	遠山貴之	八千代エンジニアリング株式会社	5.3.3
	中原良一	いであ株式会社	5.1, 5.3.1, 5.3.4, 5.4
	中山 尚	建設環境研究所	3.3
	西廣淳	東邦大学	
	林 博徳	九州大学	3.1.3, 3.1.6
	堀江克也	いであ株式会社	
	細野典明	いであ株式会社	3.4
	宮島泰志	建設技術研究所	
	森山聡之	福岡工業大学	
	吉原哲	八千代エンジニアリング株式会社	5.3.3

1 章 はじめに

平成 29 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、午後から降り出した降雨は正午過ぎから猛烈な雨となった。福岡管区気象台は午後 13:14 大雨警報を発令したが、朝倉観測所ではすでに 1 時間に 100mm 近い雨が降っていた。その後、朝倉観測所の最大 1 時間降水量は 129mm に、山間部の黒川地区ではさらに猛烈で約 9 時間に約 800mm というすさまじい雨量が観測された。この豪雨により、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となった。豪雨を蒙った中小河川が形成した谷底平野部は谷全体に浸食あるいは堆積現象が見られ、風景が一変するほどの地形変形が発生した。寺内ダムは大きな効果を発揮したが、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た。また土砂崩壊により大量の流木が発生させた人工林が中心の森林の在り方についても議論される災害となった。河川生態系も大規模かく乱により壊滅的な影響を受けた。

このような災害発生に当たり、応用生態工学会では理事会・幹事会の災害対応班により先遣隊が派遣され、団長は島谷幸宏（九州大学）、副団長は萱場祐一（土木研究所）、皆川朋子（熊本大学）とし、生態学、河川工学、地形学など、様々な分野の会員が集まり、総勢 43 名からなる災害調査団を結成した。平成 29 年 7 月北部九州豪雨調査団は応用生態工学会が災害調査団の派遣のプロセスが設定し、それにのっとって行われた初めての調査団である。

本調査団の目的は①大規模災害を引き起こした自然的インパクトが生態系、地域社会に及ぼす影響を広域のかつ中長期的視点から評価する。②「人と生物の共存」、「生物多様性の保全」、「健全な生態系の持続性」といった従来の視点に加えて、今後の学会の発展の方向軸として「健全な生態系を持続的な国土管理に活用する」という視点を位置づけ、グリーンインフラの活用、Eco-DRR を踏まえた復旧となるよう提言を行う。③①の目標の達成、②の提言の反映の程度を、今後評価するための調査とする（災害後の中期的モニタリング）。の 3 点である。

本調査報告書は今回の災害にあたって調査団が行った緊急提言に沿って記述したものである。

今回の調査は河川整備基金からの助成を受け行ったものであり、その支援に心より感謝するものである。

2 章 集落会議と地域のための復旧・復興にむけて

2.1 歴史的に見た被害の状況

2017 年 7 月 5 日に発生した平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、特に筑後川中流域の右岸側の山間部から支川の流域において多大な被害が発生した。この豪雨は筑後川右岸域で地域社会や自然環境に対して非常に大きなインパクトを与えた。今回の被災地では 5 年前にも平成 24 年 7 月九州北部豪雨による被害が発生しており、地域の中では今後の豪雨の再来に対する不安も見られる。

そこで平成 29 年 7 月九州北部豪雨が、歴史上どのような位置づけにあるかを歴史資料から検証する。

2.1.1 調査方法と範囲と資料の位置づけ

筑後川中流域の災害史を歴史資料から抽出した。筑後川中流域には、過去の災害資料を整理した「災異誌」が 2 種類ある。2 つの「災異誌」は、昭和 11 年に福岡測候所によってまとめられた「福岡縣災異誌」と、平成 4 年に立石晁によってまとめられた「福岡県近世災異誌」である^{1) 2)}。ここでは、対象範囲の資料が充実している「福岡県近世災異誌」を中心に不足分を他の資料で補足する。福岡県近世災異誌は、藩の統計記録などの古文書から災害に関わる内容を直接的に抽出した資料であり、一次資料とほぼ同等の性質を持つと言える。

対象範囲は、筑後川中流域に接する筑後国久留米藩、筑前国秋月藩、福岡藩の中の内、上座郡・下座郡・御井郡・御原郡・夜須郡の一部、左岸側を生葉郡・竹野郡・三潴郡の一部を対象範囲とする。これは現在のうきは市・久留米市、朝倉市、東峰村、大刀洗町に相当する。

古文書に記録されている災害資料の内容は多彩で、資料によって記載方法や範囲は異なる。本論では災害の状況を整理・比較するためこれらの情報を抽出する必要がある。古文書に多く記載されているものは損益石高・田畑の損害範囲・家屋被害・堤防被害・倒木・堤防被害・土砂崩れ・人的被害・牛馬被害があるが、損益石高等は、他の災害との比較が曖昧で定量化が難しい。一方で、人的被害・牛馬の被害は、場所が曖昧な例があるものの詳細な記録があり、定量的資料として精度が高いと考えられる。以上のことから、本論では災害の指標として死者数を用い、災害規模を検証することとした。

2.1.2 筑後川中流域の水害史

福岡県近世災異誌を中心とした資料において、筑後川中流域の近世以降の死者の発生した災害は表 2.2.1 の通りであった。江戸時代以降の対象区域内で平成 29 年度豪雨を含め 38 件の事例が見受けられた。

筑後川中流域で、近世以降最大の死者数の発生した災害は、享保の大飢饉で、西日本を中心に大きな被害が出た災害でもあった。筑後川中流域でも大きな被害が出ているが、上座・下座郡は他に比べ被害が少なかったという記載があり、いかに大きな飢饉であったかが垣間見える。

また、次に死者数の多い文政 11(1828)年の災害は、筑前秋月・上座でも 24 人の死者が発生しているが、筑後久留米藩の筑後川下流域で高潮の被害が発生し、多数の死者が出ている。高潮被害は今回の対象地域では久留米藩の下流の一部のみで発生するが、近隣の柳川藩や筑前福岡藩、豊前小倉藩など海岸沿いの地域では非常に多くの人的被害が発生している。

水害で人的被害が出た事例は他の災害と比較し件数的に圧倒的に多い。海の災害である高潮を除き、台風と突風を分類しづらい大風も水害とすると人的被害が 28 件も発生している。

表2.2.1 筑後川中流域の近世以降の災害史³⁾より引用

年号	西暦	月日 (西暦)	災害	範囲	死者・行方不明者					概要	崩(山・山 谷など)
					秋月・ 上座	筑後	筑後川中 流域	男	女		
延宝1年	1673年		洪水			多	多			筑後等でも被害・豊前山々崩	
天和3年	1683年	7月10日	洪水	秋月	1	2	3	3	0	秋月近辺で洪水・男3	
元禄11年	1698年	7～10月	痢病	秋月	多		多			毎日2人以上死者	
元禄15年	1702年	9/20・ 6/15	大風洪水	秋月・筑後		3	3			ため池破壊・床上浸水・土手破壊・竜巻 筑後死者(柳川)	
正徳5年	1715年		大風	筑後		4	4			柳川?	
享保4年	1719年	7/6・9/8・ 9/28	洪水	秋月		1	1			柿木田土手切れ2回の大風雨のち虫付き 川筋土手崩れ	
享保5年	1720年	7月26日	享保の大洪水	秋月・筑後	0	63	63			50年来の大雨、夜須郡、下座郡被害多数 耳納山系山崩れ多数 山田・古毛・田中・長瀬・白木・池田・松末・ 赤谷・志波・里城永々の荒所多く	7,737
享保17年	1732年		大飢饉	全体	多					餓民1万1千人(筑前)、佐与村のみの餓死 者70人余り、筑後領内100人余りなど 牛馬病死多数 上座・下座は比較的被害軽微	
享保18年	1733年		大飢饉	全体	1900	11,198	13098	1654	857	秋月領 生子499(男296・女213)例年550程度 死人2511(男1654・女857)例年600程度 人数22670(男12912・女9757)	
享保20年	1735年	9月3日	大風	筑後		2	2				
宝歴5年	1755年	9月29日	大風	秋月	9		9			馬田村・依井村平田村大庭村など死者あ り・火災発生	
宝歴8年	1758年	4月12日	大雨洪水	秋月	1		1	1	0		2228
明和4年	1767年	7月2日	大水	筑後		16	16	12	4	牛5・馬48	3
安永5年	1776年	7月9日	洪水	秋月・筑後	1	2	3	1	0	秋月・佐田山々崩し 4/13山抜けあり 流木31本	1693
寛政4年	1792年	7月8日	大雨洪水・旱魃・ 虫付き	秋月	1		1	1	0		15
寛政4年	1792年	9月9日	大雨洪水	筑後		1	1	1	0		
寛政8年	1796年		洪水	筑後		4	4	4	0		539
文化13年	1816年	7月13日	大雨洪水	筑後		1	1	1	0	流失木20本・夫婦石町家土間まで水揚げり	10
文政11年	1828年	9月17日	大風・大風雨・高 汐	秋月・筑後	24	108	132			風台風か、家屋倒壊多数 高潮被害大(船900隻等)特に柳川藩	
嘉永3年	1850年	8月18日	大風	秋月・筑後	0	4	4			足軽郡町居家	
嘉永6年	1853年	6月24日	大雨洪水旱魃	秋月	2		2			水喧嘩で1名死	130
安政1年	1854年	7月	霧雨洪水	秋月	9		9				885
安政5年	1858年		大風・コレラ	秋月	20		20			長谷山村内20あまり死す	
文久2年	1862年		麻疹	秋月	45以上		45以上			この年のほかには重かった はしかにより田畑荒れる 各地で死者・長崎発	
文久2年	1862年		コレラ	秋月	30		30			長崎発	
慶応3年	1867年	7月14日	洪水	秋月	2		2				
明治22年	1889年		洪水	日田・中流 域	23	29	52			日田でも18人	
明治35年	1902年	8月25日	落雷	朝倉	3	1	4			杷木穂坂で12師団見物人が隣の松に落雷 3人支・3人氣絶	
明治39年	1906年	6月下旬	出水	筑後川		3	3			筑後・矢部で氾濫	76
昭和2年	1927年		旋風	筑後		1	1				
昭和5年	1930年	7月18日	洪水	全域		1	1			台風	
昭和5年	1930年	8月10日	洪水	全域	1		1			台風	
昭和6年	1931年	4月5日	旋風	朝倉	4		4				
昭和10年	1935年	6月	大雨長雨	筑後川中流 域	2	1	3				
昭和11年	1936年		流行性感冒		2	2	4				
昭和28年	1953年	6月25日	28水害	全体	19	20	39			最大級:全体で147人死者、県内ではうきは 三井朝倉久留米三瀬で死者行方不明者41 人 死者:浮羽7朝倉15・三井8・久留米5行方 不明朝倉4	
平成24年	2012年	7月13日	九州北部豪雨	広域	1	1	2			死者朝倉1うきは1 熊本、福岡、大分の3県で死者計30人、行 方不明者2人	
平成29年	2017年	7月5日	九州北部豪雨	朝倉・東峰	38		38			死者・行方不明者41名うち朝倉35名・東峰 村3人	多数

*明治以降は筑後川50年史より捕捉⁴⁾

水害で最大の被害が発生したのは享保5(1720)年の享保の大洪水で63人の死者が出ている。この洪水は御国洪水ともいわれ筑後川中流域を代表する洪水で、各地の古文書に記録が残り、その後の洪水の指標とされてきた。各地の文書にはこれ以降「享保以来の大洪水」「享保の水位に迫る」などの記録が多数ある。

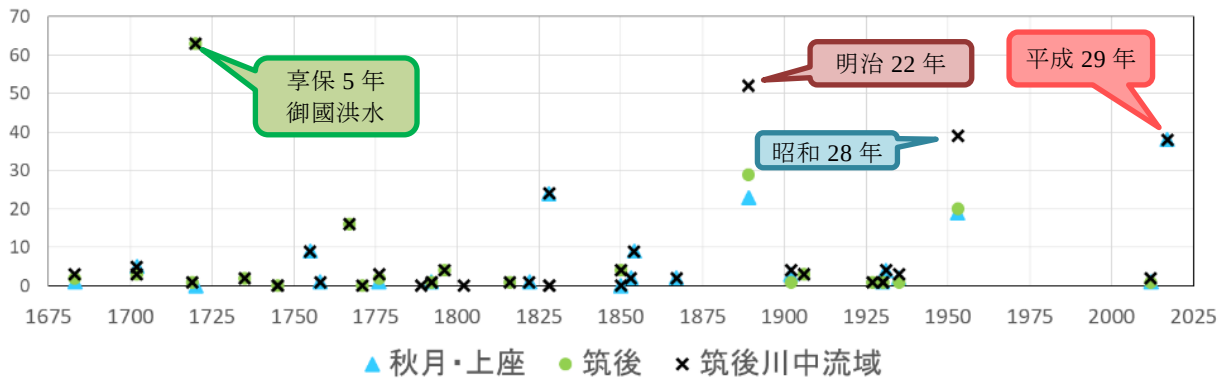


図 2.1.1 筑後川中流域における近世以降の人的被害の経年変化

享保の御國洪水は筑後川中流域で大規模な被害を発生させたが、死者は筑後地方にのみ発生している。筑後川中流域の左岸側である筑後地方の生葉・竹野の地域は筑後川に並行するように耳納山系があり、耳納山系は土砂崩れが頻発する地帯でもある。享保の大水害の際、特に耳納山系で土砂崩れ多発し、筑後地方に甚大な被害を発生させた。土砂崩れの数は7,737ヶ所と記録されており、耳納山系でも最大の土砂災害であった。この影響によって筑後地方で死者数が大きくなったとみられる。

一方で右岸側の上座・下座郡でも、各所で山崩れが発生したなどの記録がみられる。朝倉市宮野に古くよりある医王山南淋寺の古文書「医王山南林寺縁起」には「大雨雷電山汐洪水所々山崩れ石流れ・・・下郷には山田・古毛・田中・長淵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・・・あえて人馬の失なし」と記録されている。享保の大洪水以降5年ほど、不作や旱魃が続き、飢饉となっていたことからこの水害の大きさが垣間見られる。しかしながら、左岸で大きな人的被害が見られたことに対して右岸側では人馬の失なしとされていて、人的被害の実態は左右岸で大きく異なった。

明治22年の水害は享保に次ぐ死者数があり、左岸筑後だけでなく右岸側でも人的被害が出ている。

筑後川流域で最も有名な洪水は昭和28年に発生した大洪水で、筑後川流域だけでなく、熊本・佐賀・大分などでも非常に大きな被害が発生し、死者行方不明者数は延1,001人にのぼる。

筑後川流域でも全体で147人の死者が出ており、中流域では52人の死者が発生し、筑後川両岸で人的被害が発生した。筑後川本川が各地で大きく破堤氾濫しただけでなく、桂川・佐田川・小石原川・巨瀬川など支流もいずれも氾濫している。

昭和28(1953)年の水害以降、平成24(2012)年の九州北部豪雨まで、筑後川中流域では人的被害が発生した水害は見受けられない。

また、これらの大規模な水害以外の死者数は、一件10名以上になることは稀で、ほとんどが3～4名以内となっている。つまり、筑後川中流域において、通常の水害は、頻度は高いが人的被害は非常に少なく、稀に大規模な水害が発生すると言える。加え、図2.1.1を見ると、筑後川中流域全体の被災者数と左右岸どちらかのみの被害が重なっており、筑後川中流域の水害は左右岸どちらかのみに発生しやすい傾向にあると言える。

2.1.3 平成29年7月九州北部豪雨と歴史災害

平成29年7月九州北部豪雨の被害の特徴は、局所短時間での強烈な豪雨とそれによって発生した無数の土砂崩れに起因する土砂流出と流木であったと言える。また、被害は筑後川右岸域に集中しており、左岸側では一切被害が発生しなかった。死者・行方不明者41人のうち22名が赤谷川流域で被災し、他の河川

でも山間部での人的被害が多かった⁴⁾。

平成 29 年 7 月九州北部豪雨と同様に、右岸山間部のみで強烈な降雨による土砂償が多発する、今回規模の大きな水害の発生は福岡県近世災異誌からは明確には見いだせなかった。

右岸域で土砂崩れの多かった例は宝暦(1758)年の水害で 2、228 ヶ所などがみられる。次いで安永(1776)年 1、693 ヶ所があり、いずれも死者が出ている。これ以外にも嘉永 3(1850)年 3、680 ヶ所、文政 11(1828)年 1、233 ヶ所など死者が出なくとも土砂災害が多発した例もみられる。

さらに享保の大水害では耳納山系において 7、737 ヶ所の崩れが生じている。享保の大水害では、平成 29 年の水害とは逆で右岸域では人的被害が出ていなかった。一方で、前述の南林寺の文書に記載されている右岸域の集落は今回の災害で何らかの被害が出た地域と一致する。ただし、人的被害はなかったと明記されている。

表 2.1.1 を見ても、土砂崩れの数が多くても人的被害の少ない事例も見られ、土砂災害の規模と人的被害の大きさに明確な関係性は認められない。

この様に、近世以降の災害資料からは、平成 29 年 7 月九州北部豪雨と特徴が部分的に類似する事例は何件も見られるものの、同様の被害状況を示す事例は見いだせなかった。

ただし、筑前国続風土記にある「大膳くずれ」の伝説は、1600 年代前半に杷木付近を治める代官であった大山大膳が大亀を退治したところ、急な大雨となり北川水系の道目木で土砂崩れが発生し、対岸ではほとんど雨が降っていなかったと描写されており、規模は小さいながらも類似する事例と言える⁵⁾。

なお、図-1 の水害による人的被害の経年変化をみると、今回の水害の被害が大きかったこと、1950 年ごろ以降、死者数 20 名以下の水害は激減しているが、それ以上の規模の水害は歴史的に見て減っているようには見えないことがわかる。

2.1.4 結論

筑後川は暴れ川として名高く、明治期にも早くから国の治水事業が実施されたこともあり、水害リスクの非常に高い河川であると一般的には知られていた。しかしながら、今回、過去の災害史を紐解いた結果、筑後川中流域においては、水害は他の災害と比較して頻発するものの、死者数は少ないことが判明した。

特に筑後川中流右岸域は、大きな水害が発生した記録が歴史的に非常に少なく、平成29年7月九州北部豪雨は、筑後川中流右岸域において人的被害においては近世以降最大の水害であった。

つまり、筑後川中流域において、通常の水害は小さいが頻発する現象であると言える。ただし、享保の大水害や今回の水害のような大きな災害リスクも内包しており、安易に水害リスクを軽視することはできない。

参考文献

- 1) 福岡測候所：福岡縣災異誌、1936.
- 2) 立石 晁：福岡県近世災異誌、福岡県近世災異誌刊行会、1992.
- 3) 「筑後川中流域における近世以降の災害リスクと平成29年7月九州北部豪雨」 寺村 淳・島谷幸宏、土木学会土木史研究会、土木史研究講演集Vol. 38、2018年6月.
- 4) 建設省九州地方建設局筑後川工事事務所：筑後川五十年史、1976.
- 5) 貝原益軒：筑前国続風土記 卷之十一.

2.2 集落会議

2.2.1 概要

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。この復興計画立案に対して 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（例えば本村地区等）。集落会議では、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等について、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。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 65 回（応用生態工学会調査団が参加した集落会議）開催されている。

2.2.2 集落会議開催までの経緯

朝倉市では、復興計画の策定にあたり、被害の甚大な地区 8 地区で、「地区別復旧・復興推進協議会」を開催し、地区ごとに意見・要望を把握する体制を確立した。しかしながら、住民一人ひとりでの意見を把握・反映させることについては、この仕組みだけでは困難な状況であった。そのため、被災地ではより細かなまとまり（＝集落単位）での話し合いの場が求められていた。なお、当該地では、災害前から約 10～30 世帯ほどからなる集落を一つ単位とした会合が開催されており、地域の行事や決め事などについては集落会議によって決定される仕組みとなっていた。

一方、応用生態工学会の調査団委員が複数名在席する九州大学では、H29 年 7 月九州北部豪雨災害に対して、「H29 年 7 月九州北部豪雨災害 調査・復旧・復興支援団：団長三谷泰浩教授（現在は、九州大学災害復興支援団と改名）」を立ち上げ、被災地に寄り添った支援活動に取り組んでいた。また、応用生態工学会調査団長島谷幸宏教授（九州大学）では、今次災害前から杷木朝倉地区における小水力発電を活用した地域づくり支援や、H24 年 7 月九州北部豪雨災害における災害ボランティアと復興支援に取り組んでおり、特に東林田集落や白木集落とは綿密な連携関係にあった。

このような状況の中で、被災後の平成 29 年 7 月末に東林田地区から集落会議における支援の要請を島谷研究室が受けて、会議に参加したことが本論で言う集落会議（＝各集落をベースとした災害復興のための会合）の発端である。その後、島谷団長が「被害が甚大だった地域（主に杷木地区）を対象にすべての集落で、復興へ向けた集落会議を実践しよう」と方針を示したことが、現在計 17 集落での集落会議の実践活動につながっている。また、応用生態工学会調査団では、「持続的で豊かな暮らしと環境を再生するための緊急提言」において、冒頭に「1. 地域との協働による地域のための復旧・復興」を掲げ、「地域の意向、地域の将来像（ビジョン）を反映し、地域のための復旧・復興計画を地域住民と協働で立案することが最も重要である」と述べている。本集落会議の取り組みは、以上のような背景のもと実践されているものである。なお、集落会議の位置づけは以下の図 2.2.1 のようになっている。

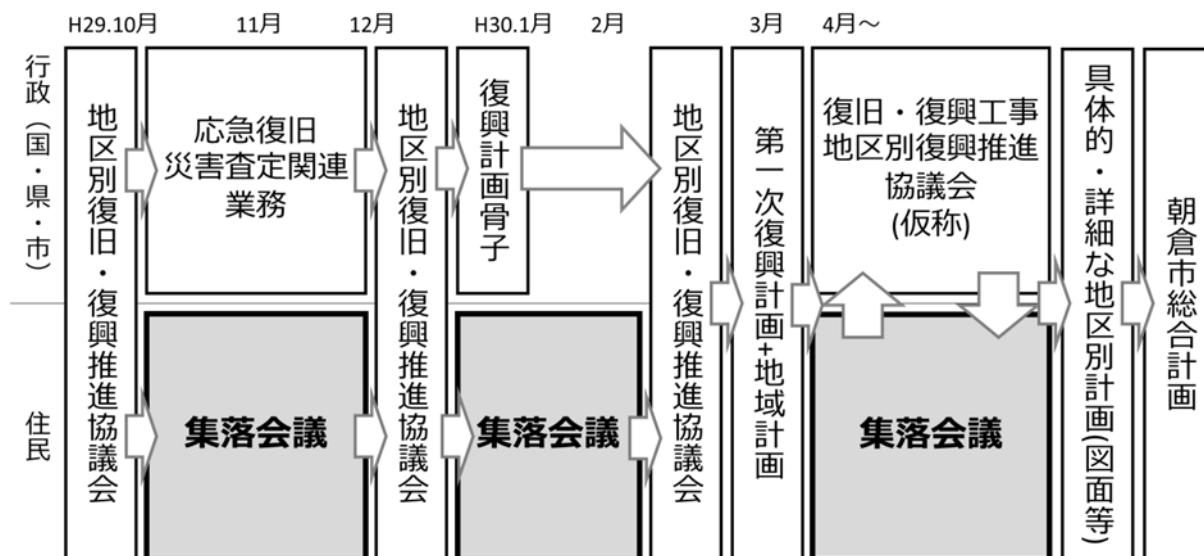


図 2.2.1 集落会議の位置づけ

2.2.3 集落会議の目的

集落会議開催の目的は、当初は復興計画に住民個々人の思いを反映させることであったが、回数を重ねていくうちに以下の3つ程度の目的（機能）があるように思われた。①地域住民個々人の思いを復興計画に反映すること、②災害時に起こった事象を詳しく明らかにすること、③地元住民同士が顔を合わせる場を設け情報交流をすること、の3点である。

2.2.4 集落会議の進め方

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を囲んで話し合いを行った。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うワークショップ形式で進められた。出された意見や話し合われた内容については、地図上に掲載するなどして整理し、取りまとめた。話し合われた内容については、「復興新聞」として集落ごとに発行した。

2.2.5 集落会議で話し合われたこと

集落会議では、主に(1)被災時の状況に関すること、(2)復興計画に関すること、(3)各集落の現状についての情報交流、3つの点において議論がなされた。

(1)被災時の状況に関することについて

災害時の状況については、“どこから水が溢れたか？”、“洪水の氾濫流がいつ、どこを、どういうふうに流れたか？”、“家や田畑の被害状況は？”、“どこの山が崩れたか？”、“いつ、どこへ、どのように避難したか？”など様々な視点から意見を出し合い、すべての情報を参加者で共有した。特に時系列や、具体的な現象、現象が起こった場所などについても詳細に聞き取り・共有を行った。得られた情報は全て地図上に整理し、災害時の状況に関する情報を可能な限り詳細に記録し共有した。その結果、災害の事象・場所・時間が克明に把握でき、地域における危険箇所、手当が必要な箇所なども正確に整理できた。さらに、この議論の中で多くの住民がスマートフォン等で災害時の映像を記録している

ことが明らかになり、提供いただいた映像から洪水時の河道の様子や災害の様子が詳細に明らかとなった。

(2)復興計画に関することについて

復興計画については、“どんな地域にしたいか？どんな川にしたいか？”、“川幅をどうする？”、“地域への思い”、“昔はどうだったか？”、“地域の歴史・文化”、“大切にしたい自然環境”、“こどもたち、次世代への思い”、“現在困っていること”等について意見交換を行い、情報・意見によっては地図上に復興計画への意見として整理した。さらに、議論が進んだ集落においては、平成 30 年 9 月現在、図面や模型を作成し、具体的な地域の復興ビジョンを行政に向けて提案している段階である。

(3)各集落の現状について

各集落については、住民同士の情報交流が主な内容である。被害の大きかった集落では、親類の家に避難している家族や仮設住宅やみなし仮設住宅などに、住民らが散り散りになっている場合が少なくない。そのため、概ね月に一回開催される集落会議が貴重な情報交流の場として機能している。



図 2.2.2 集落会議の様子（地図や模型を囲んで議論）

2.2.6 復興新聞の発行

集落会議で話し合われた内容や、出された意見については、復興新聞という形でまとめ、集落ごとに発行した。復興新聞の内容は、一面に合意事項や出された意見等議事録的な内容を掲載し、二面（裏面）には地図に意見や災害時の情報を掲載している。土砂崩れの箇所や洪水時の流路なども詳細に掲載されており、ハザードマップとしての機能も有する。

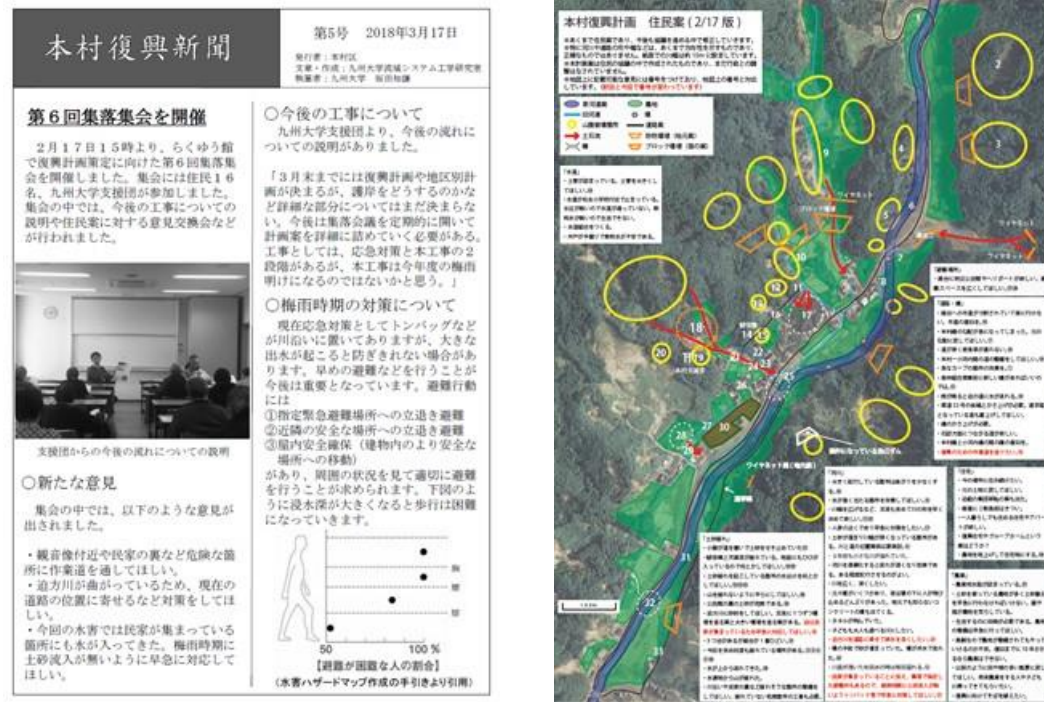


図 2.2.3 復興新聞（左：話し合いの内容が掲載された一面、右：意見や災害時時の情報が地図上に示された二面）

2.2.7 集落会議で得られた災害情報

上述の通り、集落会議では災害時の状況や災害箇所についての話し合いが行われた。その中で、多くの住民がスマートフォンやデジタルカメラで災害時の状況を映像で記録していたことが明らかとなった。中には、洪水時の流況を克明に記録されたものもあり、それらによって洪水時流速や水深、流量などの水文学的データや、段波や土石流といった一般に観測困難な水理現象などについての情報が得られた。



図 2.2.4 住民によって撮影された段波

2.2.8 まとめ

本論では、集落会議の取り組みについて紹介した。以下に主要な成果をしめす。

- ・ 地域の思いを正確に復興計画へ反映するためのプロセスとして機能しつつある
- ・ 災害の発生時間や発生場所などが克明に理解でき、かつ住民間でそれを共有できた
- ・ 住民が撮影した画像や聞き取りによって得られた情報は、洪水時の現象を解明する上で貴重な資料となった
- ・ それぞれ地域の復興への課題抽出、集落の住民の思いや希望についても把握できた

3 章 河川で発生した事象と河道計画について

3.1 河川で発生した事象

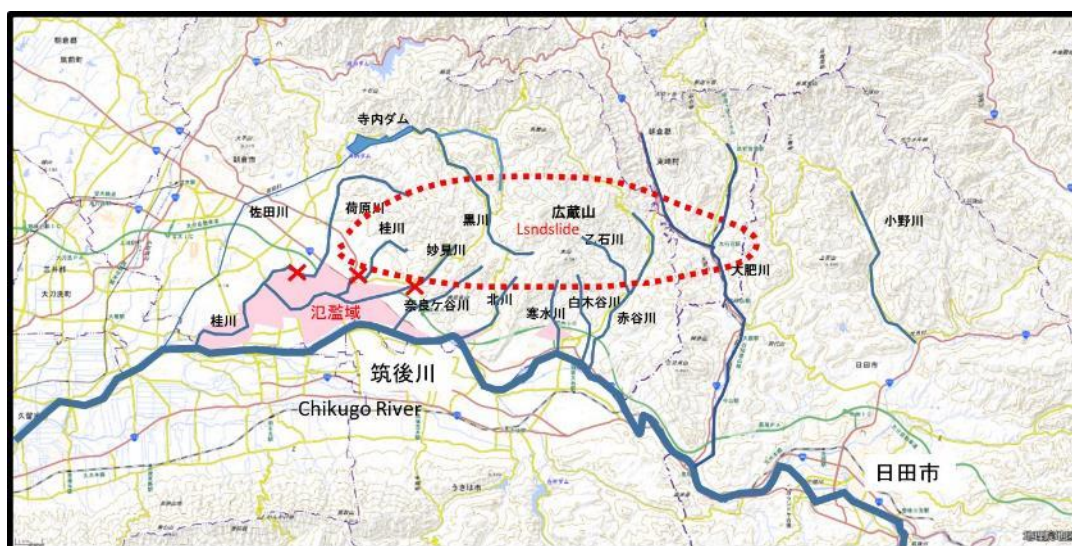


図 3.1.1 災害の位置図 ×は破堤地点，…は斜面崩壊が多発した範囲

3.1.1 地形による氾濫形態の差異

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。

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，地形が地形形成時の状況に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．

以下に，地形別の災害の特徴を列挙する．

筑後川の中流右岸側は自然堤防地帯となっている．国土地理院の治水地形分類図によると，かつての筑後川の旧河道が現在の中小河川となっており、その周辺に薄いオレンジで示す自然堤防が形成されている．ほとんどの住宅はこの自然堤防上にある．一方、後背湿地の大部分は水田として利用されている．この氾濫低地では，桂川などの自然堤防地帯が大きな被害を受けた．今回の災害においては地図上に示した×の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は発生しておらず，あくまでも支流の氾濫現象である．



図 3.1.1.1 筑後川中流右岸の自然堤防地帯の治水地形分類図

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、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。

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



図 3.1.1.2 国土地理院の氾濫範囲

左から寒水川、白木谷川、赤谷川、扇状地を流下する寒水川は拡散的氾濫、白木谷川、赤谷川は谷地形の範囲での氾濫になっている。

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

3.1.2 桂川、荷原川（自然堤防地帯）

筑後川中流域の右岸において、山田堰より下流は沖積平野が形成されていく。そのため、桂川流域の荷原川から妙見川を中心として、広い範囲で氾濫原の洪水が発生した。桂川流域付近は、山と筑後川が次第に離れていき、その間に台地が形成されていた。これを長い年月をかけ筑後川が削り、河岸段丘が形成されており、台地と氾濫原に二分されている。今回の洪水では、氾濫原で広範囲の浸水が見られた。

（１）桂川流域氾濫原地帯の全体像

桂川は荷原川・新立川・妙見川などの複数の河川が氾濫原で合流する。この様に平野部で他の河川と合流する支川は、筑後川中流域右岸側では桂川以外にみられない。現河道の一部は筑後川の旧河道であったとみられる。また、桂川自体も、かつては現河道を流れていなかった時代がある。今次災害では、特に桂川や新谷川の合流点より、荷原川合流点までの右岸域を中心に広範囲で浸水被害が発生した。

これらの地域には複数の集落が形成されており、それらの集落の多くが筑前国続風土記や古絵図などにも記載されている。また、この様な古い集落は自然堤防上に形成され、且つこれらの一部の集落では、さらに宅地の嵩上げを行い、浸水被害の軽減のための処理を行っている。実際に図 3.1.1 の古毛や田中集落では、周辺の田畑は浸水したが、家屋のほとんどに被害は出ていない。一方で今次災害では古い集落でも浸水した事例も多い。これについては、それぞれ理由が異なるため後述する。

つまり、桂川流域では、本来、集落が自然堤防上に形成され、水害リスクを軽減する工夫があったにもかかわらず、広い範囲で浸水し、一部の自然堤防上の集落も床上・床下浸水の被害が発生した。

一方で他の河川に多く見られた流木は、氾濫原地帯ではその数を大きく減らしており、他の河川で見られたような流木の山や流木が橋に詰まるなどの現象はみられなかった。

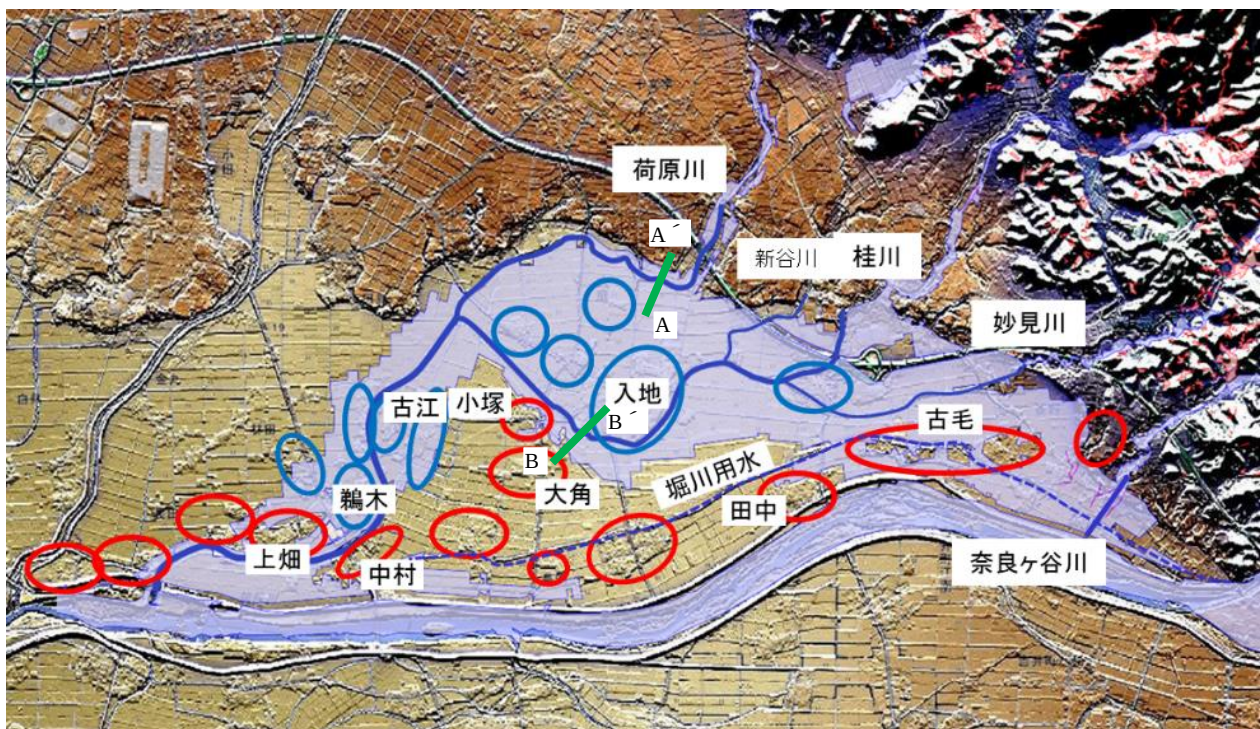


図 3.1.2.1 桂川流域の浸水と集落(カシミール 3D より加工)¹⁾

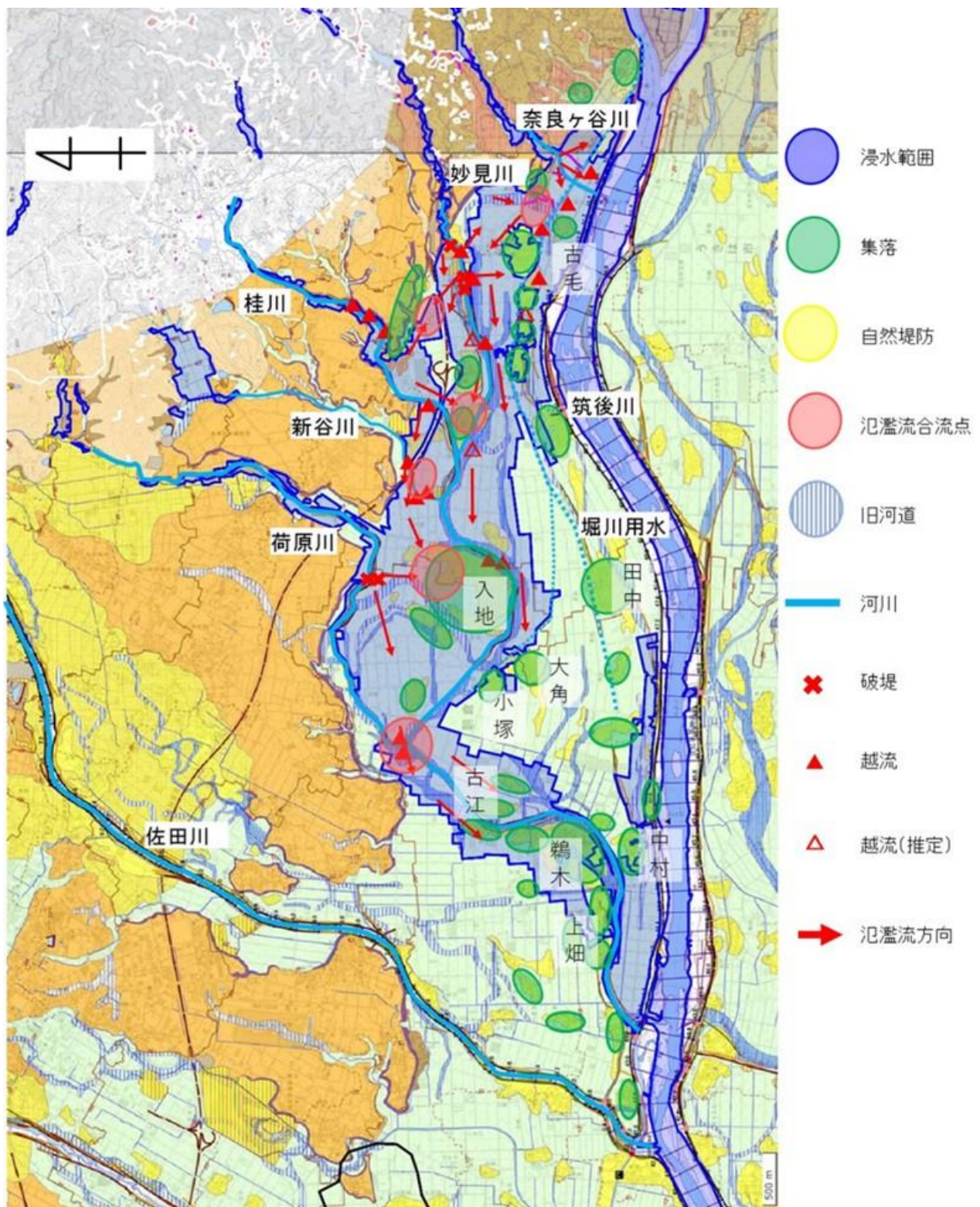


図 3.1.2.2 治水地形分類図上にみる氾濫流の流れ²⁾

氾濫痕跡から氾濫流の流れたと方向を見ると、図 3.1.2 の様な方向に氾濫流が流れた。これによると、奈良ヶ谷川の氾濫流は堀川用水を伝い古毛地区や田中地区の田畑を湛水させている。また、桂川と妙見川の氾濫流は段丘下を広がり、中間点付近で合流した。桂川と新立川の間には、それぞれの河川から氾濫が見られ、これらが合流したうえで、再び新立川を越え、入地集落方面へ氾濫した。この氾濫流は荷原川から

の氾濫も合わせ、桂川・荷原川の間を広く湛水し各集落で床下・床上浸水の被害が多数発生した。

（２）荷原川

荷原川は台地から氾濫原に出た場所で急激に右に進路を変え、段丘沿いを流れ、桂川と合流する。荷原川では同位置の両岸が破堤した箇所が見られた。氾濫範囲は、右岸側は段丘と河道の間の僅かな範囲のみに限られたが、左岸側は広範囲に氾濫・浸水が見られ、新立川・桂川からの氾濫と合わせ、荷原川・桂川間の広範囲が浸水した。荷原川は平野に出た直後は天井川となっている。右岸側への氾濫は限定的で宅地もなく、被害が少ないが、左岸側への氾濫は平野部へ溢れ、川に氾濫流が戻ってこない。このため、荷原川の氾濫は左岸側へ氾濫すると被害が大きくなる性格を持つ。

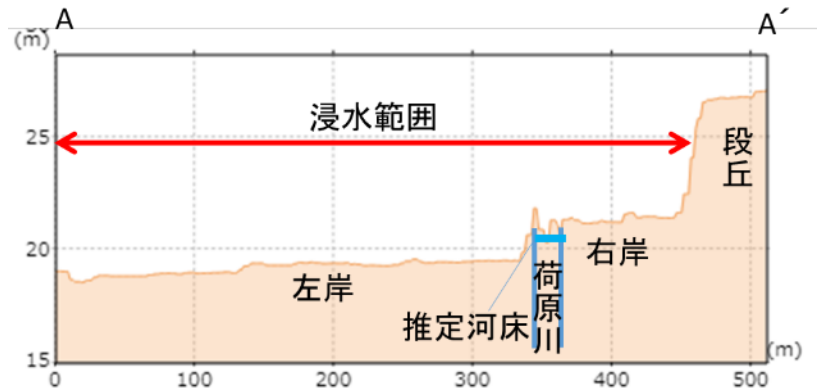


図 3.1.2.3 荷原川横断面 (A-A')³⁾

（３）桂川中流域（合流地帯）

桂川の中流域は荷原川・新立川・妙見川が合流する。これらの河川は、桂川本川も含め、合流点より上流の各地で越流し、荷原川・妙見川では破堤も見られた。桂川の中流域及びその支川の中流域では、非常に多くの越流が確認され、現河道の河積を大きく上回る流量の洪水が流れたことを示唆している。

また、桂川中流域では、右岸側への氾濫が広く浸水地帯があることに対して、左岸側は限定的である。特に入地と大角・小塚地先付近では、右岸側の入地は集落全体が床上・床下浸水したことに

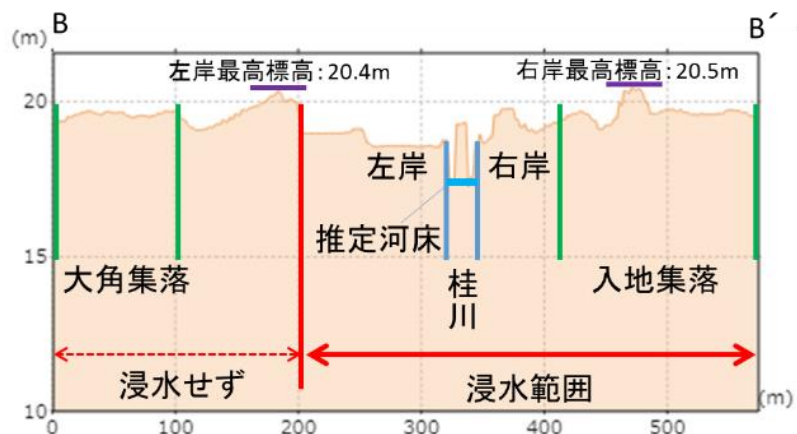


図 3.1.2.4 桂川中流域横断面図 (B-B')⁴⁾

して、左岸側は限定的である。特に入地と大角・小塚地先付近では、右岸側の入地は集落全体が床上・床下浸水したことに對して、左岸側では一切宅地に被害が出なかった。図 3.1.4 に示すこの地域の横断面(図 3.1.1 の B-B') を見ても、右岸側の集落と左岸側の集落では標高に大きな違いはない。標高に違いがないにもかかわらず右岸側でのみ広く浸水した。

これは、桂川が入地地先で溢れず、逆側から氾濫流が押し寄せたことと、入地と大角・小塚間の桂川周辺の窪地は、桂川右岸側で大きく氾濫した洪水を十分受け止め下流に流せる河積を持っているということができる。

（４）桂川下流域(蜷城地区)

荷原川を合流し筑後川に流れ込むまでの桂川下流域では河道内に収まりきらなかった氾濫流が左右に溢れ、最下流では左岸と筑後川の間を田畑が水に浸かった。

蟠城地区は、江戸時代より筑後川と支川の合流処理に悩み、加え、床島用水の取水施設（恵利堰・床島堰・佐田堰）が築造されたことにより、より排水が困難になってきた歴史がある。そのため、浸水頻度は高く、内水氾濫によって、これまでも度々田畑が水に浸かってきた。

しかし、これより下流の筑後川近隣では、自然堤防上の集落形成に加え、宅地の嵩上げが顕著で、歴史的に浸水頻度の高い氾濫原での生活の工夫がみられ、特徴的な景観を形成している。

一方で、桂川の流路自体が歴史的に度々動いていた可能性も古絵図の比較などで示唆される。今回床上浸水の多かった桂川左岸に位置する古江集落は、古絵図によっては桂川の右岸に描かれているものもあり、同様に、中村集落なども現在の河道との位置関係と異なる場所に描かれていることもある。これらの地図の精度が不明瞭なため、判断しづらい部分はあるが、河道の位置が不安定であったことが示唆される。

参考文献

- 6) 地理院地図を参照、カシミール3Dで地形図を加工.
- 7) 地理院地図から治水地形分類図を引用、加工.
- 8) 地理院地図より作成
- 9) 地理院地図より作成

3.1.3 寒水川（扇状地河川）

寒水川は筑後川の1次支川で流域面積は3.7 km²の小河川である。流域面積は小さいが氾濫面積39ha、死者1名、全壊26戸、半壊17戸と非常に大きな被害が発生した。国土交通省の推定によると55万m³の土砂が発生している。

3.1.3 寒水川（林博徳）

（1）はじめに

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3.1.1）。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3.7 km²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。

本論では、平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害被災地の寒水川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。

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。本論で対象とする寒水川は、久喜宮コミュニティを流域に持つ（図 3.1.2）。



図3.1.1 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）

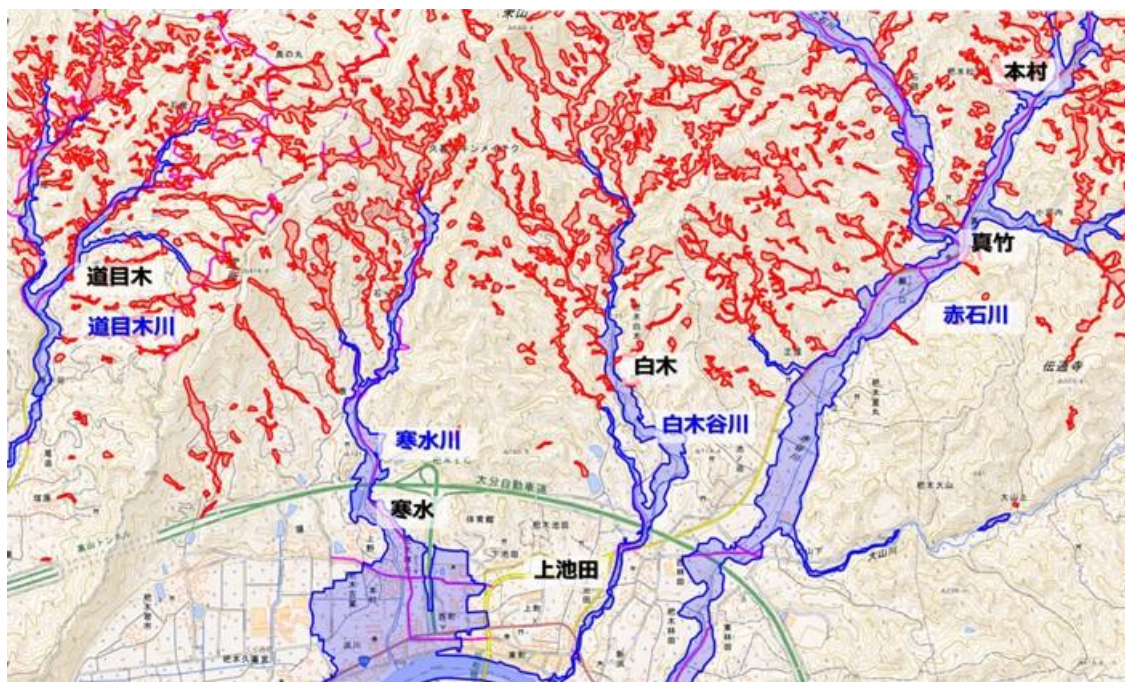


図 3.1.2 本研究の対象地（地理院地図に追記）

(2)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、天然ダムの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））．

(3)調査方法

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、仲野ほか（2018）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)調査結果

a) 集落会議での聞き取り結果

段波現象を想起させる証言が得られた結果を以下、表 3.1.1 に列挙する。証言内容は、「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）」、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、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。段波が観測された時刻は、18 時 20 分ごろと 19 時 20 分ごろの 2 回となっている。したがって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

表 3.1.1 集落会議での段波に関連する証言内容

河川名	集落名	証言内容
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）」



図 3.1.3 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 3.1.1 中の証言者に対応している／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

本節での解析に使用した映像（動画）は、寒水川上流の図 3.1.3 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 3.1.4 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 3.1.2 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 3.1.4 18 時 19 分に撮影された寒水川における段波

表 3.1.2 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 3.1.4 の動画） →一回目の段波
19 時 21 分	水が引いたので、一階におりて様子を見ると、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 3.1.5）。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

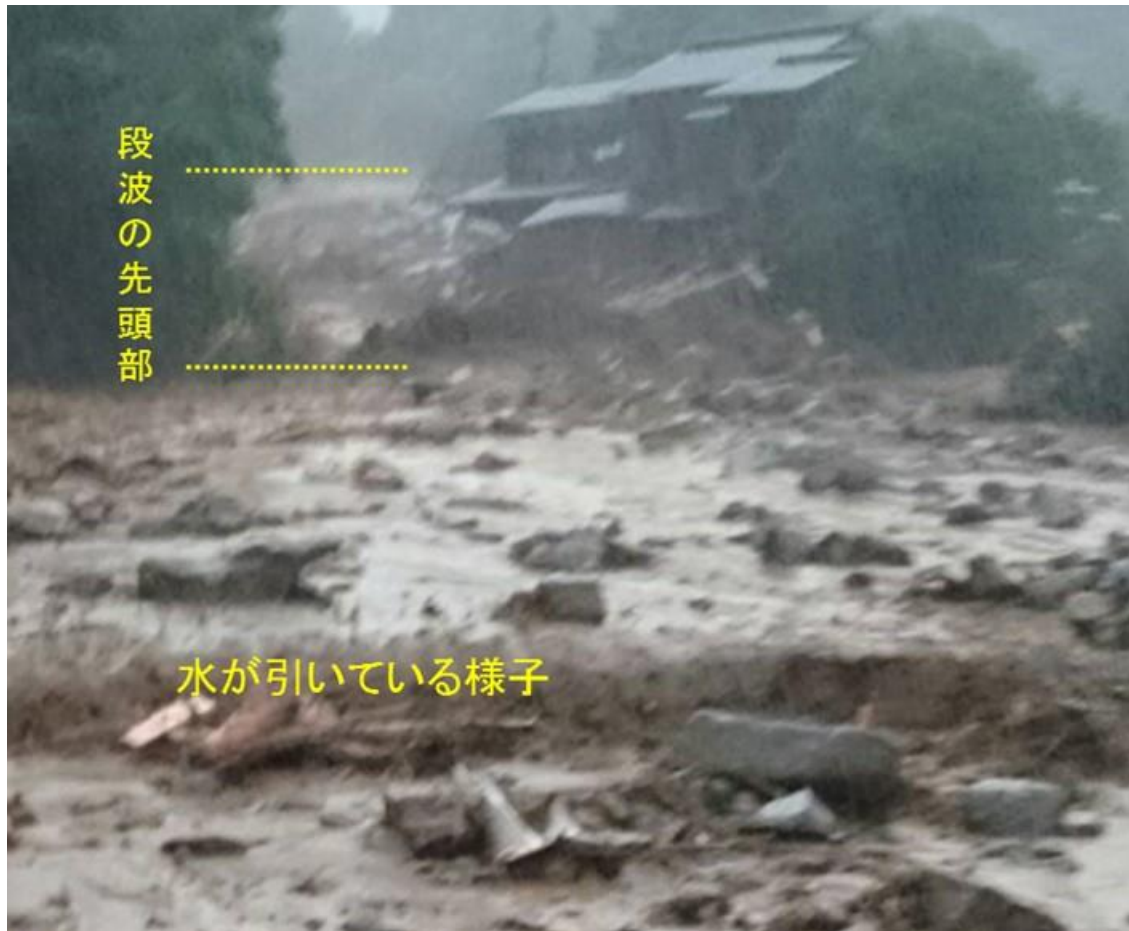


図 3.1.5 19 時 21 分に撮影された寒水川における段波（上流側を向いて撮影．水が引き，段波の先頭部が写る）

(c) 動画の分析に基づく段波現象の把握

図 3.1.4 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 3.1.4 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 3.1.6 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．

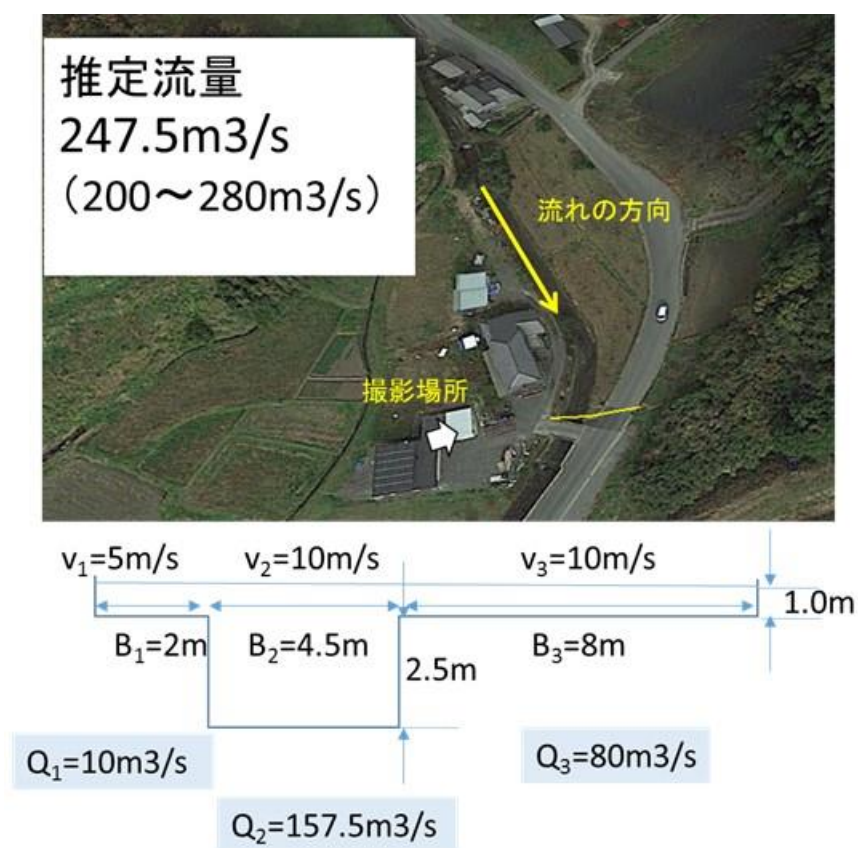


図 3.1.6 段波が撮影地点の航空写真と流下時の想定断面形

(5)寒水川流域の集落会議における聞き取り結果に基づく考察

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 3.1.7 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 3.1.10 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。

(6)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。

(7)結論

本論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、寒水川における氾濫現象が詳細に明らかになった。特に洪水段波が発生していたことが明らかとなった。
- ・ 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。
- ・ 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。

謝辞：本調査は、多くの市民の方々の協力のおかげでまとめることができました。

参考文献

- 1) 平成 21 年度国土交通白書，国土交通省，2010
- 2) 朝倉市復興計画，朝倉市，2018.3，<http://www.city.asakura.lg.jp/www/contents/1521437490111/files/02.pdf>
- 3) 池田駿介：詳述水理学，p109，技法堂出版，1999
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 清水収：山地流域における流木天然ダムの形成・破壊と 1 流木の流出課程，砂防学会誌，vol.62，No.3，pp.3-13，2009
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 寒水浜川自治区：浜川復興新聞第 1 号，2018.1.25

3.1.4 白木谷川（谷底平野河川）

白木谷川は筑後川の 1 次支川で流域面積は 3.9 km²の小河川である。流域面積での、死者 1 名、全壊 8 戸と大きな被害が発生した。国土交通省の推定によると 59 万 m³の土砂が発生している。

(1) 杷木白木区住民へのヒアリング調査結果

形式は非定型，2017 年 12 月 12 日，13 日，14 日，19 日，20 日，2018 年 1 月 26 日，27 日の日程で，杷木白木区全 29 戸中 14 戸 17 名に行った。訪問ヒアリングを集落内 8 戸，集落外 5 戸，電話ヒアリングを集落外 1 戸に行った。

① 被災時の状況について

7 月 5 日の災害の状況について，住民の証言から時系列，被災状況の地図を作成した。杷木白木区は上組，中組，下組と 3 つの隣組に分かれており，被害の大きかった上組，中組を中心にまとめた。

	上組	中組	下組
7月5日14:30	H24よりちょっと多いくらいの雨。空は真っ黒で夕闇の様。		
15:00	雷がすごかった。川を見に行くと水が真っ黒になっていた。オフトーク(防災行政無線の戸別受信機)は鳴っていなかった。大きな石の流れてくる音。水位が一瞬下がった。Aさん夫婦逃げる準備をして待機。	雨はそこまでひどく感じず、橋なども通れる状態だった。	
15:30	雷が落ちて停電になった。		
16:00	Bさん、避難した。 16:50 Cさん(自宅)からDさん(集落外の仕事場)に電話があった。川が増水して、橋を通れないから帰らない方がいい、という内容だった。	道路に水は流れていなかった。	
17:00	Cさんとの電話が切れた。この時、Cさんの家が流された。 Aさん夫婦、避難を開始した。 Aさん、公民館上流側の橋に流木が詰まり、濁流がぶつかって跳ねるのがバックミラーに見えた。 上から津波のように一気に土砂が来た。 風があまりないのに木が揺れていた。	格納庫横から下る道路から橋の方に水が川のように流れていた。 雨がひどくなり、側溝から水があふれだした。 Fさん、仕事から帰宅した。 道路に10~20cmほど水が流れた。 公民館上の橋に流木が引っかかって、水が吹き上げていた。 17:20 デイサービスからGさん母が送られてきた、その時は辛うじて下組から中組へと上がる橋を通れたが帰ることができなくなった。	
17:30		側溝が濁流のようになっていた。Hさん宅に水が上がってきた。 Iさん、自宅へ帰ろうとしたが、格納庫から下ったところを車が通れないような状態だったため、危険な場所を迂回しながら歩いて帰宅した。 中組と下組の間の橋の上まで濁流、流木が流れていた。 Iさん宅前の小沢が大氾濫していた。 Jさん宅玄関まで水が来ていた。 川から材木が山のように流れてきた。水が山に当たってFさん宅の方に向かって勿ねかえってきた。	中組と下組の間の橋に流木が引っかかり、田んぼと道路に濁流が溢れた。 土砂と流木の堆積で下組あたりの道路より川が高くなり、道路の方に泥水が流れてきた。
18:00	Eさん空き家の屋根が流れて来て、家にもぶつかった。家の中に濁流が入ってきたため、家の中を流されるがなんとか2階に避難した。川の流れが徐々にひどくなった。E夫婦、隣家の住人に助けられる。D宅はまだあった。	KさんからFさんに電話があり、Kさん宅に避難した。	
21:00		この時間までがひどかった。濁流が2mくらいの高さで流れてきていた	
7月6日	E宅の1階半分が柱も含め全部なくなっていた。D宅が基礎から流されていた。C宅が裏山に押し付けられるような形で潰れていた。公民館まで降りた。一面川になっており、道路も崩れた斜面の土砂によって塞がっていたため、田んぼの畦道を通った。昼過ぎに消防団と自衛隊が上がってきた。具合の悪い1名はヘリで、上組中組の10~15名は徒歩で星丸線から避難した。	01:00 格納庫から下ったあたりの水量はかなり減っていた。 09:00 Hさん宅の周りは土砂が1mほど堆積していた Hさん、公民館に行くと7~8人避難していた。	自衛隊が上がってきて、下組の10人くらいで一緒に上池田へと抜ける道から避難した。

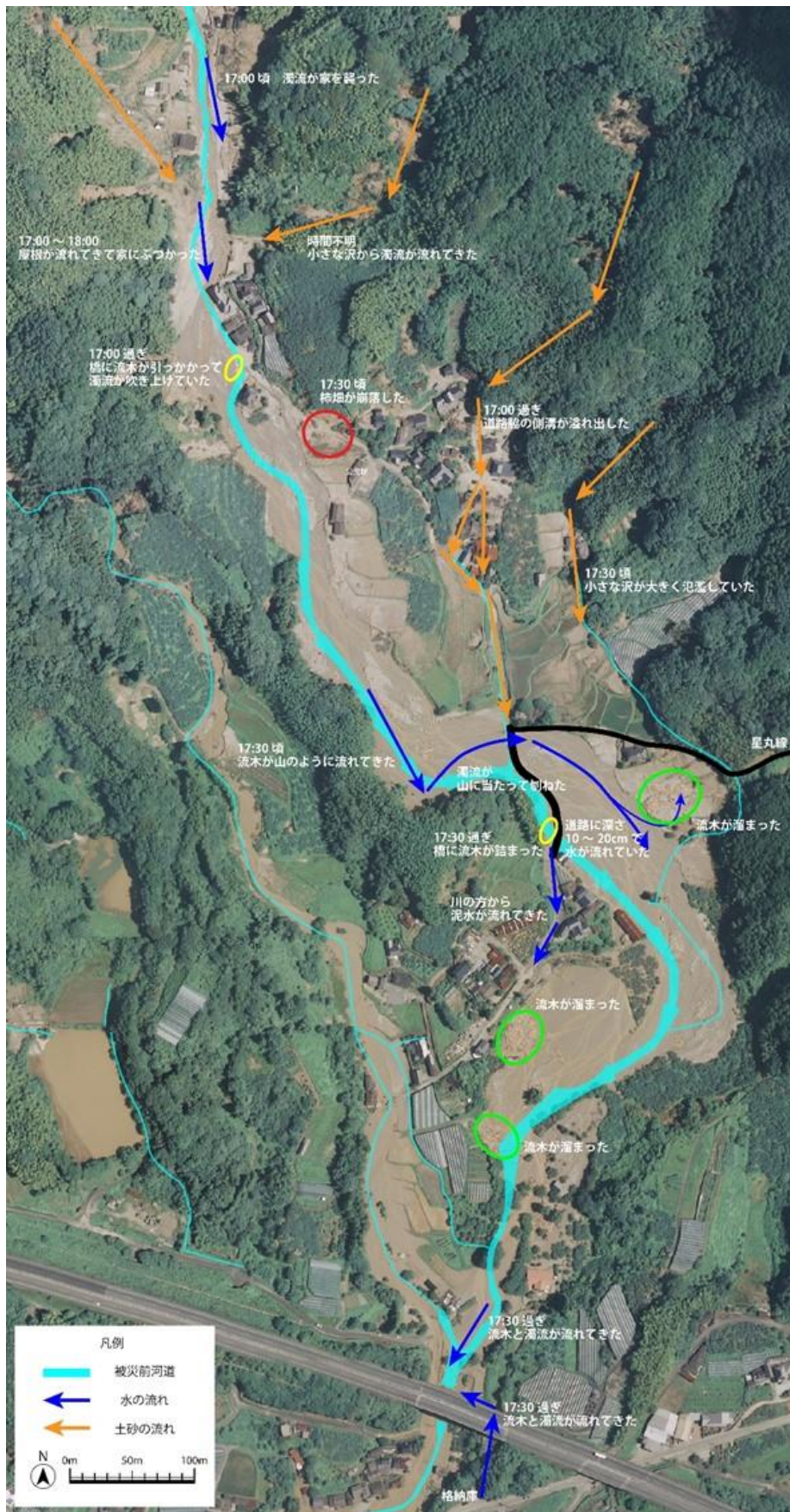


図 3.1.4.1 白木地区の氾濫状況

白木地区では 16 時ごろより氾濫が始まり、17 時ごろ大量の流木を伴う土石流災害が発生したものと想

像される。21 時ごろまで氾濫しており、実に 5 時間もの間、大氾濫に住民は見舞われ、相互に助け合いが行われた。

3.1.5 赤谷川

赤谷川は朝倉市の松末地区、杷木地区を流れる流域面積 20.1 km²、流路延長 15 km の筑後川の 1 次支川である。赤谷川流域は今回の災害で最も多くの被害が発生した流域である。松末地区および東林田地区 373 世帯のうち、99 世帯が全壊、37 世帯が半壊と約 36% の家屋が大きな被害を受けている。また死者 22 名と今回の災害では最も大きな被害を受けた支流である。山地の崩壊面積は 0.63 km² と推定されており、流域の約 3% が崩壊し、流木および大規模な土砂流出が見られた。

(1) 乙石川

支川の乙石川は谷底平野が浸食と堆積により大きな被害を受けた。住民からの聞き取りによる、災害の時系列を表に示した。雨が降り始めたのが 12 時ごろで、14 時ごろにはすでに道路が寸断されている。16 時ごろより河川の氾濫が始まり 16 時半ごろには、石詰集落で中村集落の住宅の流下目撃されている。



石詰 14:46



石詰 16:23

図 3.1.5.1 乙石川の災害時の住民が撮影した写真

表 3.1.5.1 乙石川の災害時系列

乙石川(中村、石詰)	災害
11:30~12:00	
12:00~12:30	12時くらいから雨が降り始めたそこから2時間でどんどん降り出した
12:30~13:00	
13:00~13:30	
13:30~14:00	
14:00~14:30	(14時頃)道が決壊していた(中村) (14時8分)中村の基地局が使えなくなる
14:30~15:00	(15時前)雨が小康状態になる。川はまだ溢れていない(石詰)
15:00~15:30	
15:30~16:00	
16:00~16:30	(16時5分)川が溢れだした(石詰)
16:30~17:00	(16時30分)中村区の家が流れてくる(石詰)
17:00~17:30	(17時0分)大型車両が家の裏からの鉄砲水で家に引っつく(石詰)
17:30~18:00	
18:00~18:30	(18時30分)田んぼが滝のようになる(石詰)
18:30~19:00	



図 3.1.5.2 赤谷川集落図

赤い点は全半壊家屋

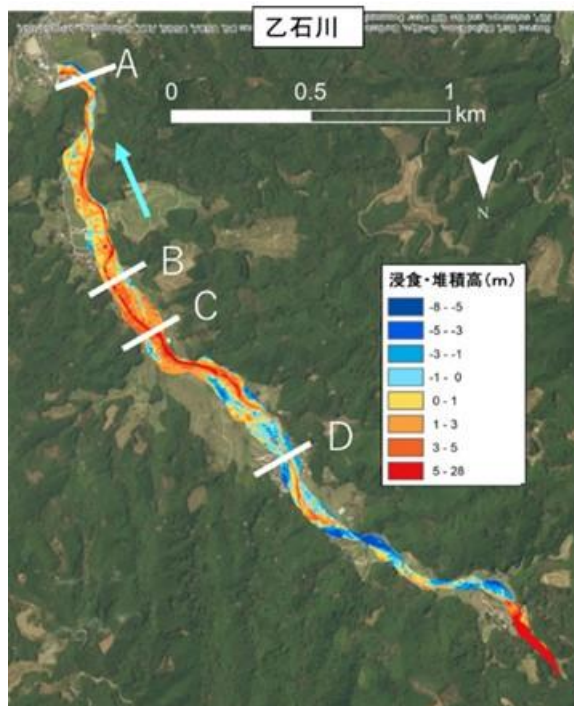


図 3.1.5.3 乙石川の堆積・浸食状況

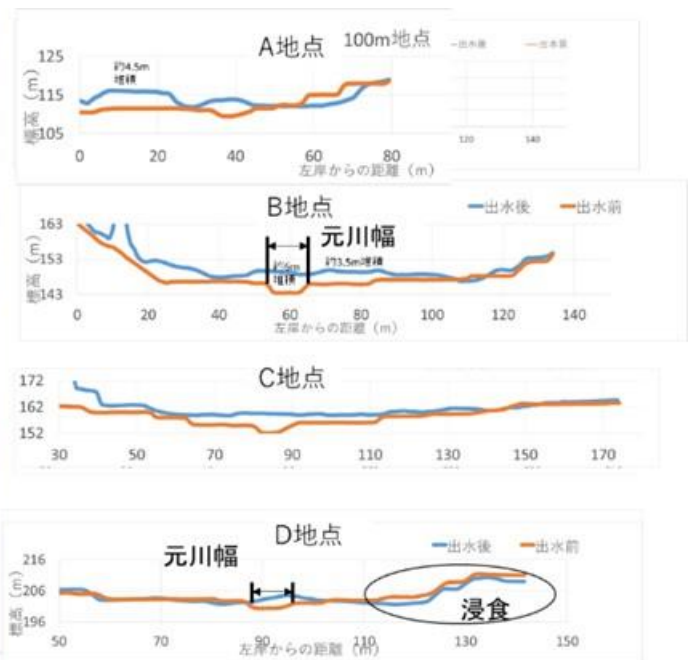


図 3.1.5.4 乙石川の横断地形の変化

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1m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。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。その結果を図3.1.5.3および図3.1.5.4に示した。

図の暖色系が堆積、寒色系が浸食を示している。乙石川では最上流部は大規模な山腹崩壊による堆積域

、それから赤谷川との合流点までの中間地点の上流が浸食域、下流側が堆積域になっている。河道の浸食堆積はほぼ谷幅全域に広がっている。最上流の乙石集落にある巨大な岩塊である「乙石」は水害で下流に移動し、また創建 1563 年の高木神社も創建後初めて流出した。

D 地点は浸食が卓越する領域であるが、元河道付近は堆積域となっているが、かなり川から離れた右岸側では浸食が派生している。B、C 地点は谷幅が広くほぼ堆積域となっているが、元の川幅と比べ 100m に及ぶ範囲が浸食堆積域となっている。堆積深は 4 m を超えるところもある。最下流の A 地点は右岸側の棚田が大きく浸食されている。流入するほぼすべての沢筋では崩壊が発生している。

（２）小河内川

赤谷川の左支川的小河内川に位置する小河内集落は、今回の災害で上流からの土石流等により壊滅的な被害を受けた。上流の砂防ダムを乗り越えて土石流が人家を襲い人命に被害を出している。また、流木で天然ダムが形成されそれが決壊されるのが目撃されている。河床も大幅に上昇している。

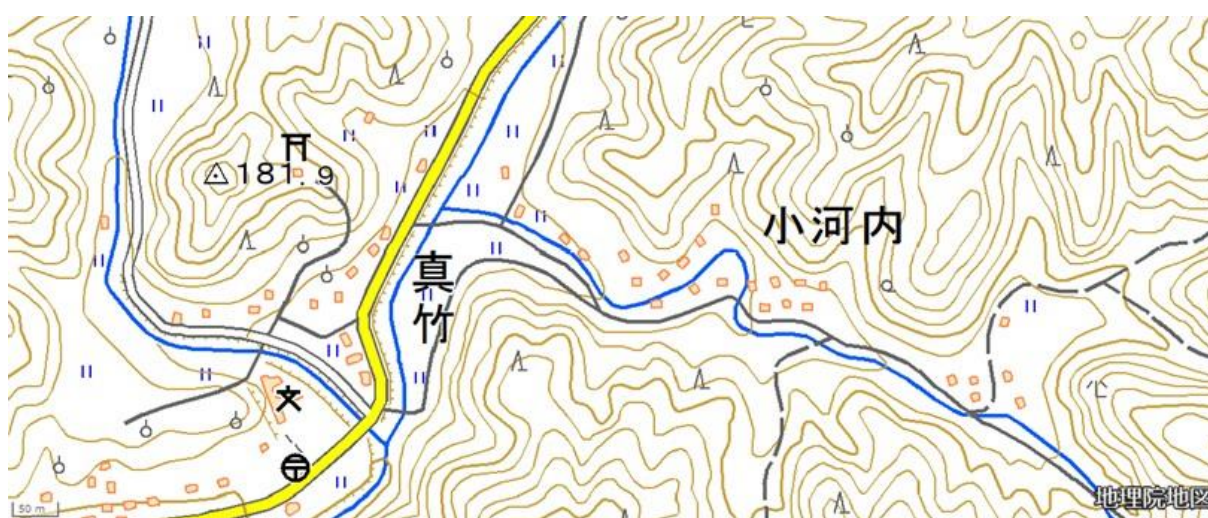


図 3.1.5.3 国土地位院地図 避難前には多くの家屋がある

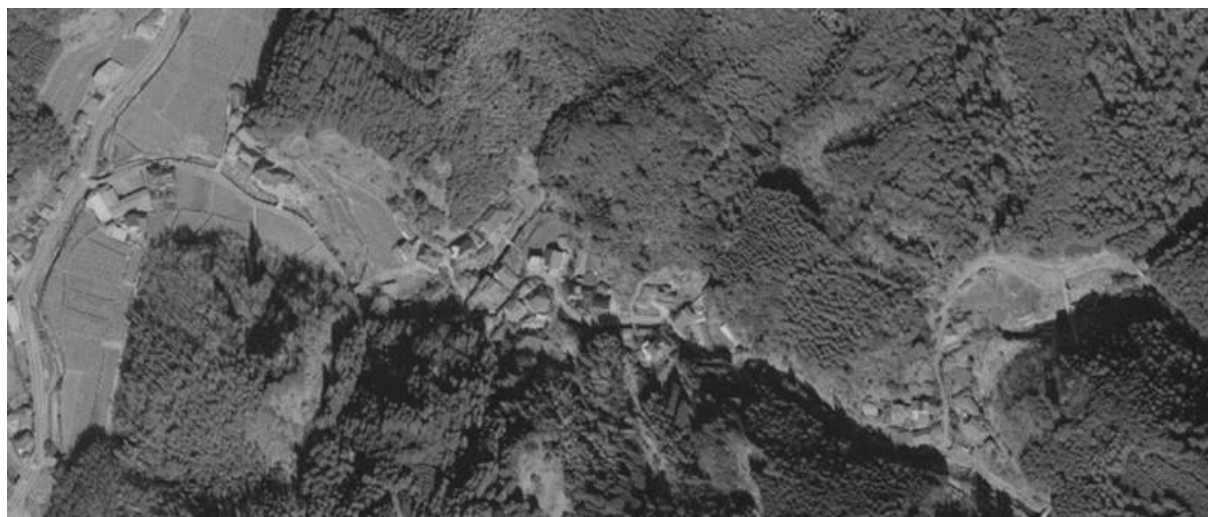


図 3.1.5.4 被害前の空中写真



図 3.1.5.5 被害後の空中写真 上流部の家屋は見られず、谷全体が河川となっている



図 3.1.5.6 図 3.1.5.5 の右側に見える砂防ダムを土石流は乗り越えた



図 3.1.5.7 砂防ダム下流の住宅は被害を受け死者が出た



図 3.1.5.8 復興新聞の記述 洪水時に渦を巻いたり、流木でダムができたことが示されている

(3) 赤谷川（本村集落）

本村集落は赤谷川に乙石川、小河内川が合流する地点よりさらに上流の集落である。この集落の人口は70名であるが発災時は42名の人が集落に留まっていた。50代以下の人口は26名であるが、発災時は7名しかおらず、高齢者での災害対応となった。

この集落の下流の乙石川との合流地点が氾濫した場合、公設避難所に行くことができず集落は孤立する。

この集落では、集落孤立を前提に地元の民家 2 軒を自主避難所として設定していた。そういう意味では災害に対する意識は高い地区と言えるが、今回の災害に対して、雨が降り始めてから被害が発生するまでの時間が短かったため、事前避難は十分とは言えなかった。

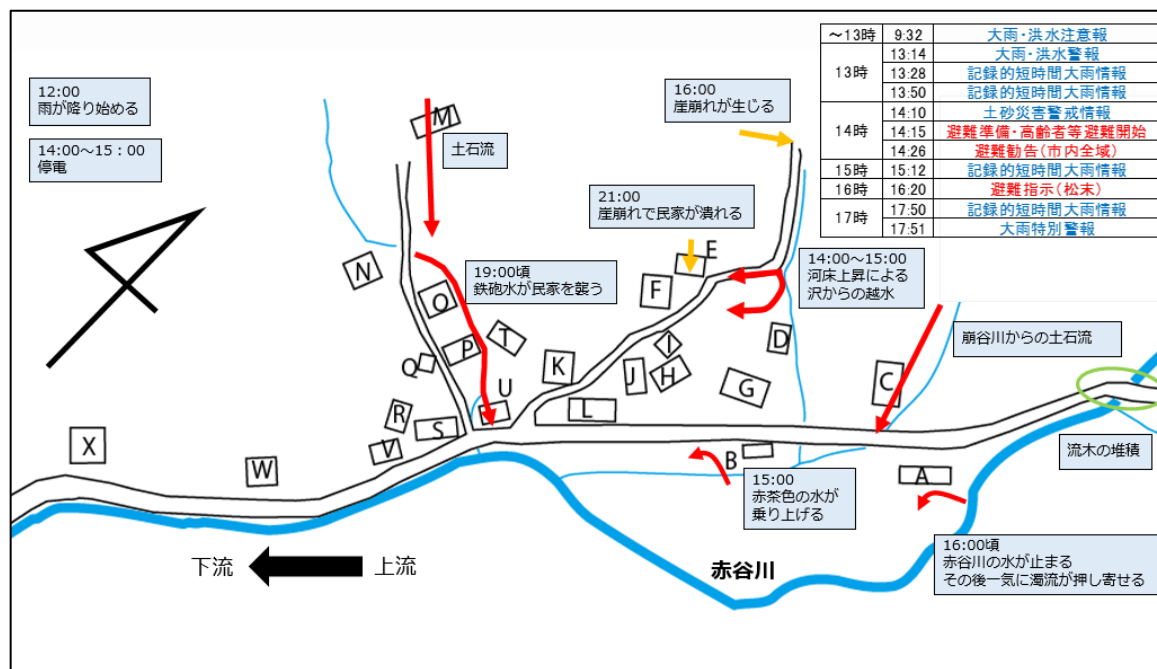


図 3.1.5.9 災害時のタイムライン

図 3.1.5.9 に災害時のタイムラインを、表 3.1.5.2 に避難状況をまとめたが、12 時ごろ雨が降り始め、14 時 15 分に避難準備情報、その 11 分後に避難勧告が出ている。住民へのヒアリングによると避難準備情報までは防災無線が鳴ったがその後停電したため、それ以降の情報は届いていない。それぞれ自己の判断により避難している。

表 3.1.5.2 避難状況

番号	時刻	集落内の状況
[1]	5日 9時32分	大雨・洪水注意報が出される。
[2]	11時～12時	雨が降り始めた。
[3]	13時14分	大雨・洪水警報が出される。
[4]	13時28分	記録的短時間大雨情報が出される。
[5]	13時50分	記録的短時間大雨情報が出される。
[6]	14時過ぎ	Dさん宅の裏の用水路に砂が溜まり、水が溢れだす。道にも水が流れ始めたため、F1さんが土のう袋をもらいに市役所の杷木支所に向かう。
[7]	14時10分	土砂災害警戒情報が出される。
[8]	14時13分	迫の道がすでに川のようにになっている。
[9]	14時15分	避難準備・高齢者等避難開始が出されるも、以降防災無線が機能しなくなる。
[10]	14時26分	避難勧告(市内全域)が出される。
[11]	14時半過ぎ	A2さんが高齢である母A1さんを高台にある民家のGさん宅に避難させた。
[12]	14時～15時	各家庭で停電が起き始めた。
[13]	14時～15時	C1さんとC2さんが県道を下るも、松末小学校付近で警察に止められ自宅に引き返す
[14]	15時頃	小川が茶色になり、田んぼに乗り上げる。それを見たH1さんは家族を迎えに県道を下る。
[15]	15時頃	F1さんが小学校付近で警察に止められるも構わず帰宅。森林組合付近で水が溢れており、トラックの足元から水が入ってくる。その後、D2さん、F1さん、I1さん、J1さん、K2さん、T3さんと用水路の水を止めるため土嚢積みを行う。
[16]	15時過ぎ	S2さんがM1さんに「家に来ないか」と連絡するも、「まだ大丈夫」と返答。
[17]	15時12分	記録的短時間大雨情報が出される。
[18]	15時半過ぎ	S2さんが迫の坂を上ろうとするも水の勢いが強すぎて上れない。
[19]	16時頃	B2さんの車が県道を下っていくのが目撃される。
[20]	16時頃	F1さん含む3、4人で水防活動中、数m先のがけが崩れる。
[21]	16時頃	U1さんが家族を迎えに松末小学校に向かうも警察に止められ帰宅。
[22]	16時頃	赤谷川の水がピタッと止まり、その後一気に濁流が押し寄せる。それを見たA2さん
[23]		さんとA3さんは高台の民家Hさん宅の車庫に車で避難。
[24]	16時20分	避難指示(松末)が出される。
[25]	17時頃	R2さんがSさん宅に「避難してもいいか」と連絡。その後避難。
[26]	17時頃	V1さんとV5さんが大きな石をのきしながら車で県道を下る。その後、松末小学校付近で車ごと濁流に飲み込まれる。
[27]	17時50分	記録的短時間大雨情報が出される。
[28]	17時51分	大雨特別警報が出される。
[29]	18時19分	田んぼは滝のようになり、川と一体になっている。
[30]	19時頃	U1さんとU2さんが家の裏からの鉄砲水に襲われる。そこから2時間ぐらいポールにつかまり水流に耐える。
[31]	21時頃	Gさん宅に避難していたL1さんが自宅待機のL2さんを迎えに行こうとするが、A3さんに止められる。
[32]	21時過ぎ	E1さんとE2さんが裏山からのがけ崩れに遭う。
[33]	22時頃	E1さんとE2さんが2階の出窓から助け出される。
[34]	6日 午前中	P1さんが警察におんぶされSさん宅に避難。
[35]	午前中	土砂災害に見舞われ、孤立していたM1さんが住民によって助け出される。

図 3.1.5.9 に本村地区の復興新聞を示したが、集落は赤谷川の右岸側にあるが、その裏側の山の各沢が崩壊し、また河川も何カ所かで氾濫しており、山と川からの災害となった。

住民への聞き取り調査によると、災害当日の避難状況は自宅待機 28 名、集落内での避難 9 名、集落外への避難 5 名となっており、集落外避難を試みた 5 名のうち 2 名が亡くなっており、集落外避難が危険であることが分かる。

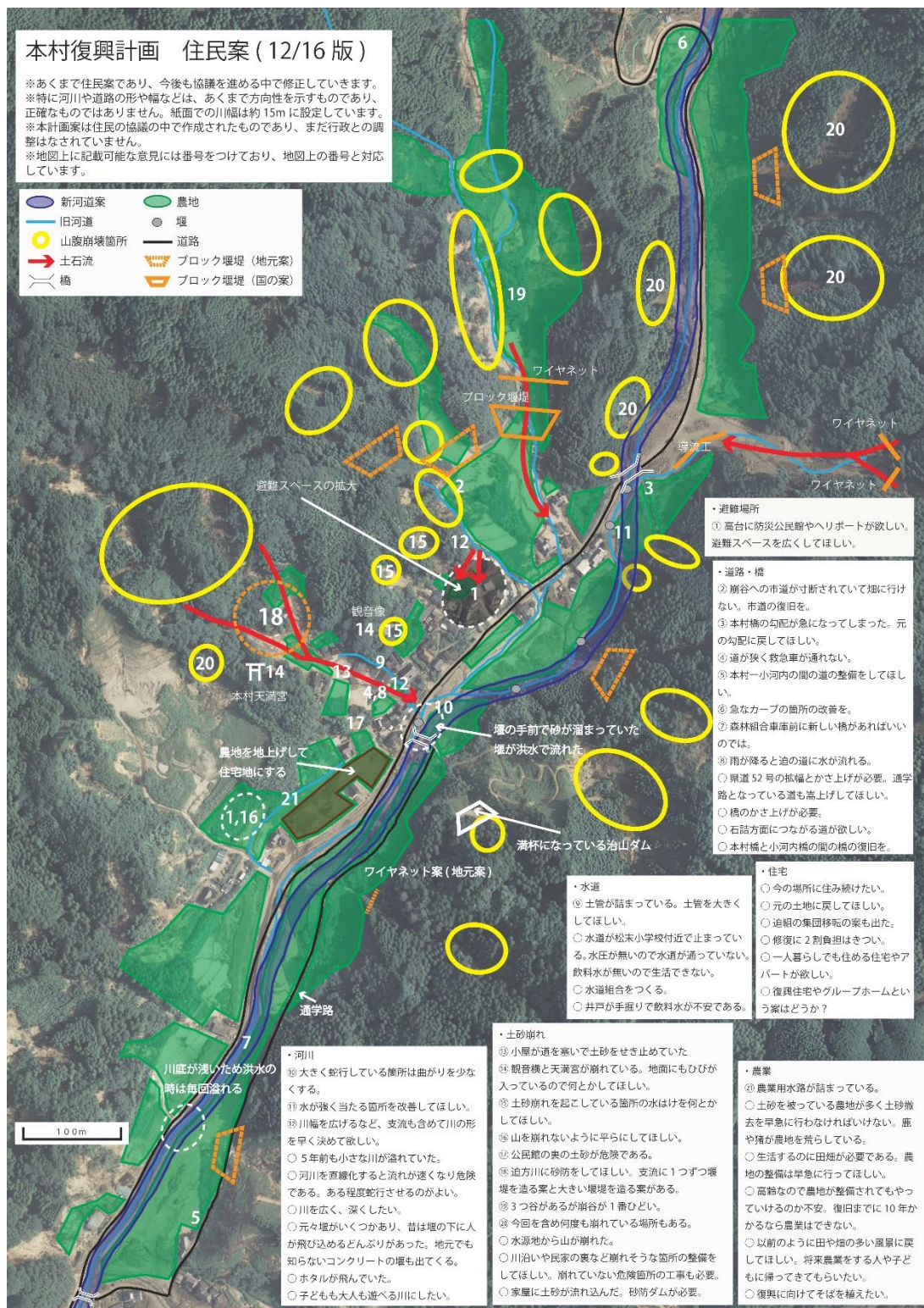


図 3.1.5.9 本村地区 復興新聞

(4) 赤谷川 (東林田)

東林田集落は赤谷川の最下流の集落である。この地区では流路が変更し、さらに川幅が拡大し大きな被害が発生した。

今回の災害では公的な水位情報などは無いが、住民から多くの写真や動画情報が提供され、災害時の状

況がある程度明らかになっている。下記の災害時系列も Line などの情報から書き起こしているため、時間もかなり正確である。東林田地区の被害は 17:00 以降であり、上流よりも災害発生の時間は後になる。

表 3.1.5.3 東林田地区の災害時系列

時系列（時間）	
昼過ぎ	松末で命の危険を感じる雨が降った。
13:00 過ぎ	晴れているのに増水していた。
14:00	流木はまだ引っかかっていない。 彦山では雨が激しかった。木が倒れていたが、川の水はさほど多くなかった。
15:00	川の水が引いた。
15:30	再び雨が降り出した。
15:50 頃	停電した。そのとき消防団が巡回していた。
16:00 前	川口橋に出たら水の量が多く、橋に溢れた。雨はそんなに降っていなかった。流木はまだ流れていなかった。
16:00	区長から避難連絡があった。
16:11	川が溢れた。橋の部分は危ないので自転車を押して歩いた。
17:00	家を出て避難。濁流が来て、すぐ逃げた。土砂降りで雷が鳴っていた。
17:30	橋で水が溢れていたが、何とか渡った。
18:30 過ぎ	水田から水が溢れていた。流木が流れ始めた。流木が引っ掛かり、一瞬にして決壊した。西側に水が回って、小屋が流れた。

図 3.1.5.10 に流路の変化を見ているが、流路が変更し、川幅も拡大していることが分かる。明治 22 年の水害の時に流路が変更した以来の流路変更である。最下流部であるが流速は 5m/s を超えており、いくつかの家屋が流出している。

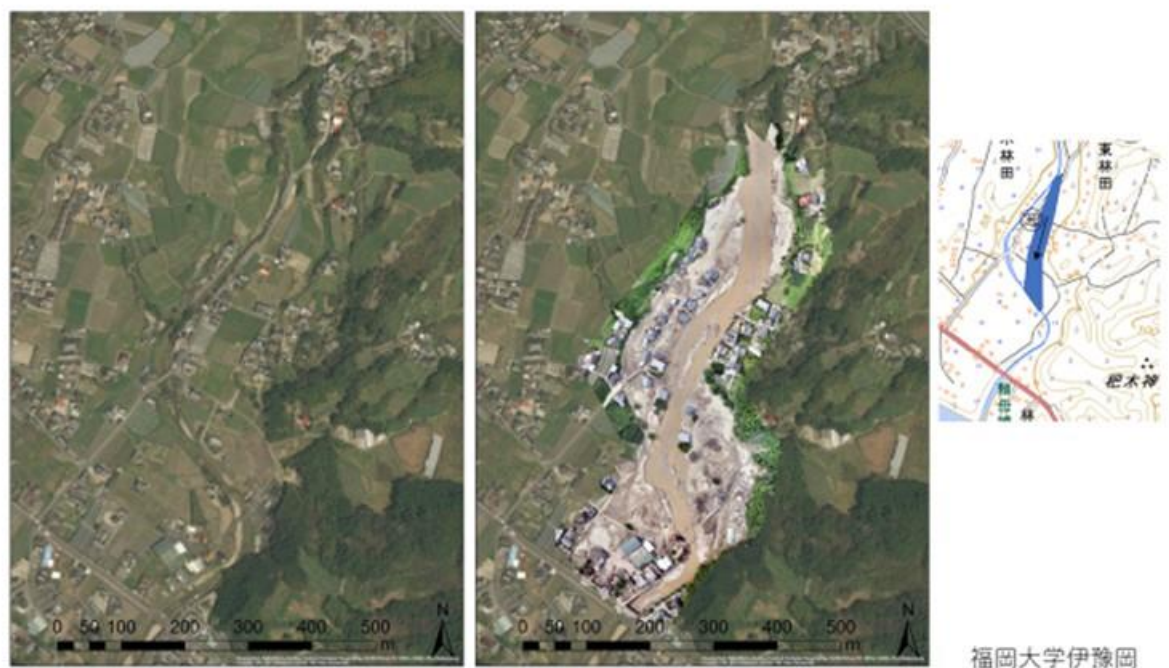


図 3.1.5.10 東林田周辺の洪水前後の河道の変化

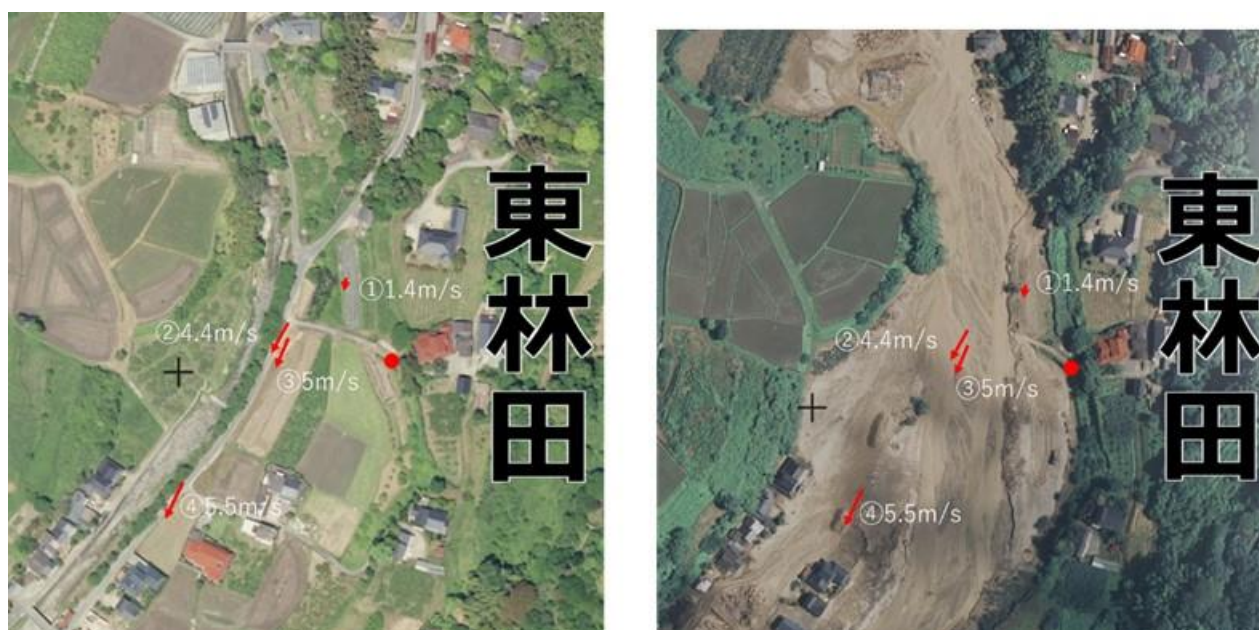


図 3.1.5.11 動画から逆算した洪水時の流速（左が洪水前の、右が洪水後の写真に示した）

3.1.6 野鳥川の伝統的河川構造物の治水機能とその被災状況（林博徳）

(1) はじめに

対象地は福岡県朝倉市を流れる一級河川筑後川流域の支川の野鳥川である（図3.1.1）。野鳥川が流れ

る朝倉市秋月は、古処山の麓に位置しており、平成10年4月17日に伝統的建造物群保存地区に指定された城下町である。全国で唯一、城下町全体が国の重要伝統的建造物群保存地区に選定されている。

野鳥川には、眼鏡橋はじめとした江戸時代につくられた石造りの構造物が数多く残されている。本研究の対象とする空石積み護床工や、空石積み護岸など河川内にも伝統的河川構造物が数多く現存している。これらの構造物は歴史・文化的な価値を有するだけでなく、河道を制御し災害を防ぐ治水機能も有するものと推測される。本研究では、平成29年7月九州北部豪雨災害時に撮影された動画や災害直後の現地調査に基づき、伝統的河川構造物の有する治水機能について検証した結果について報告する。さらに、一部の伝統構造物については、今次災害で被災したため、その内部構造について把握する機会を得たので、その結果についても併せて報告する。



図 3.1.6.1 研究対象地 朝倉市秋月の野鳥川

(2) 野鳥川の伝統的河川構造物（石造り護床工）の分布状況

野鳥川の最下流（小石原川の合流点）から延長 2km 上流の区間に存在する護床工の分布を図 3.1.2 に示す。今回対象とした延長 2km 区間には、全 17 個の護床工が存在した。各地点を下流から順に No. 1～17 とした。その 17 地点の護床工を、その構造に基づき、野鳥川の伝統的な工法の空石積みタイプ（TypeA＝本調査の対象）、伝統的な工法を模倣した練積みタイプ（TypeB）、従来のコンクリートタイプ（TypeC）の 3 つのタイプに分けた（図 3.1.3）。TypeA は No. 7, 11, 15, 17 で、TypeB は No. 3, 4, 6, 9, 10, 13, 14 で、TypeC は No. 1, 2, 5, 8, 12, 16 である。TypeA は 4 地点で、TypeB は 7 地点、TypeC は 6 地点であった。地元住民への聞き取りによると、過去数十年のうちに多くの石造り護床工が、改修によってコンクリートタイプや練積みタイプの護床工への姿を変えているとのことであった。

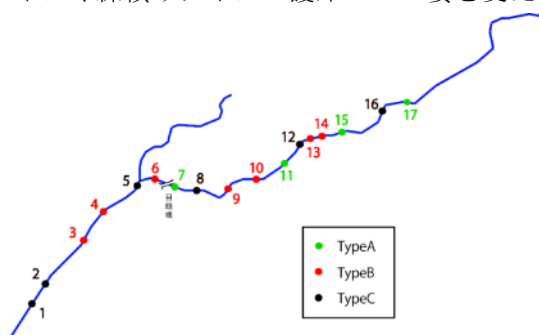


図 3.1.6.2 野鳥川の伝統的河川構造物の分布



図 3.1.3 護床工のタイプ分類

(3) 石積み式護床工の構造

空石積み護床工の縦断構造

続いて図 3.1.4, 図 3.1.5, 図 3.1.6 にそれぞれ No.7, No.11, No.15 の石造り護床工の詳細な縦断図を示す. 図のプロットは現地で測量した地点を表しているが, オレンジ色の点は, 護床工で河床に使われている石が他の石よりも明らかに大きい場合に, その位置を記録した点である. つまり, 巨石の位置を表している. 詳細については次節で述べる. 黒色の点は, 護床工に使われていた縁切りで横断的に配置されていた木の位置を表している. No.7 の勾配はおおむね 1/8, No.11 の護床工は, 平成 29 年 7 月の九州北部豪雨の際に被災し, 一部が流失してしまっていた. 被災区間を除くと勾配が 1/14 と 1/10 であった. No.15 の護床工は下流からはじめに勾配 1/10 の区間, 途中に 5m 程度 1/30 の勾配の区間があり, それより上流は 1/10 の勾配がつけられている. またいずれの護床工においても下流側は 1/50 以下の比較的緩やかな河床勾配の区間にすりついている.

空石積み護床工の石の積み方 (表層の構造)

TypeA の護床工の表層部の石の積み方について述べる. 表層に石積み中使用されている石材の粒径は, 1m 程度の巨石を中心とし, 0.6m~2.5m 程度であった. 護床工の下流端は直径 1.5m~2.5m 程度と最も大きな石が使われていた. その他では護岸との接点 (両そで部) および上流端についても, 直径が 1.0m~1.5m 程度の粒径の大きいものが使われていた. さらに, 図 3.1.4~3.1.6 に示した測量結果に示した通り, 勾配の変化点にも 1.0~1.5m 程度の大きな石が用いられていた. それ以外の石は 0.6~1.0m 程度の石が使用されていた. 石は表面がほぼ水平になるように積まれており (図 3.1.7), 5cm~10cm 程度の段差がつけられていた (表 3.1.1). これは, 粗度を高めることにより洪水時の流速を低減する効果と, 平常時の流れが射流にならないようにする効果があると考えられる.

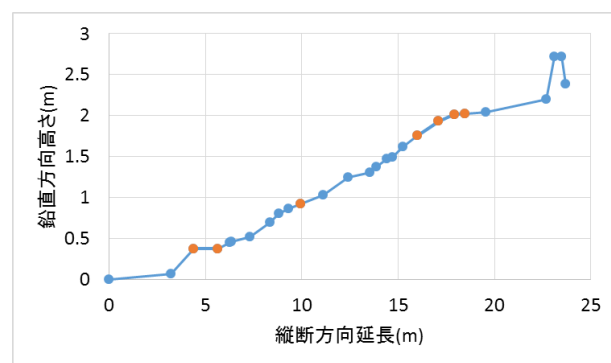


図 3.1.6.3 No. 7 護床工詳細縦断図

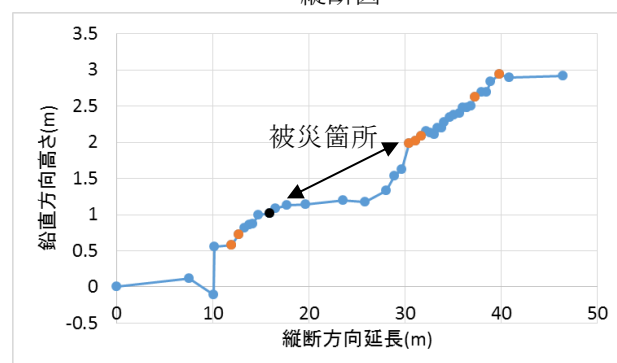


図 3.1.6.4 No. 11 護床工詳細縦断図

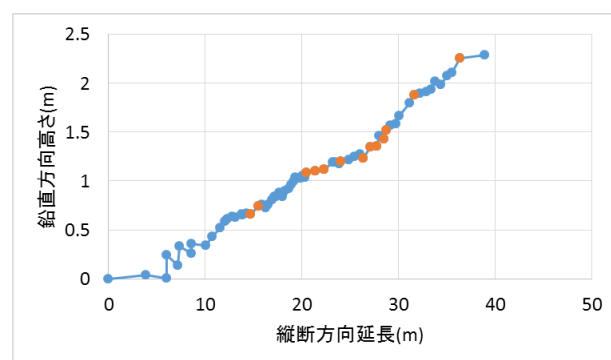


図 3.1.6.5 No. 15 護床工詳細縦断図

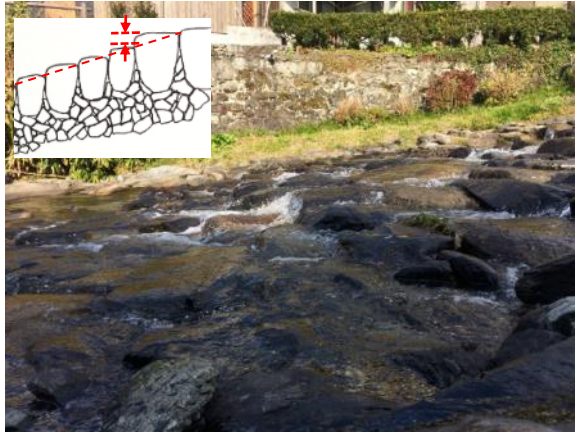


図 3.1.6.6 石の表面が水平な積み方

表 3.1.1 石の段差の平均落差

堰番号	平均落差 (m)
No. 7	0.064
No. 11	0.074
No. 15	0.053
全体平均	0.064

空石積み護床工の石の積み方（内部の構造）

今次災害で被災した No.11 の護床工について、内部構造を調査した結果について報告する（図 3.1.8, 図 3.1.9）。まず表層の石については前節でも述べたとおり、1m 程度の巨石を中心とし、0.6m～2.5m 程度の石が使用されていた。深さは石によって差異はあるものの、最低 80 cm 程度は確保されていた。その下には、 $\phi 10\sim 50\text{cm}$ 程度の石が厚さ 20 cm 程度にわたって敷き詰められていた。これらの石は、表層の巨石を安定させる機能や、さらに下層の石の吸出しを防ぐ役割を有すると思われる。さらに下層には、 $\phi 5\sim 20\text{cm}$ 程度の礫と砂からなる混合粒径の層が確認された。この層の厚さや、裏込め材として人為的に導入されたものなのか元々の河床なのかは不明である。また護床工の下からは絶えず伏流水が湧出しており間隙水が豊富であることが伺えた。護岸の石積みについては、築石には短径 30～40cm×中径 40～50cm 程度×長径（控え長）70 cm 程度の石材が使用されていた。築石の大きさは下層ほど大きく、根石は特に大きいものを使用されていた（長径 100cm 程度）根入れの深さは 100cm 程度であった。裏込め材には $\phi 5\sim 30\text{cm}$ 程度の混合粒径が使用されており、裏込め厚さは 1.0m 程度であった。また裏込め材の間には粘土が充填されていた。なお、護床工と護岸とは、構造上は縁が切られており、お互いが自立できる構造となっていた。

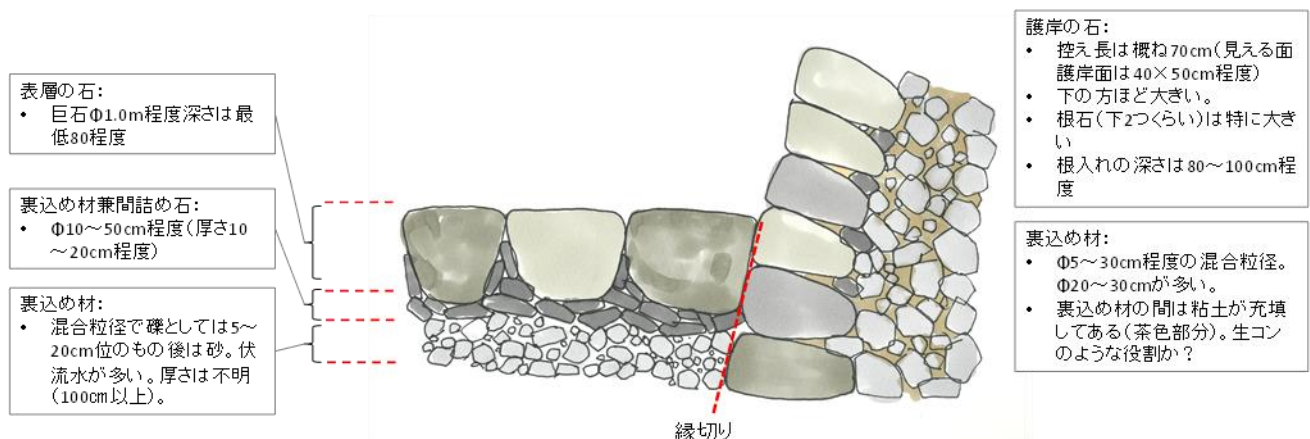


図 3.1.6.7 護床工及び護岸の内部構造の模式図



図 3.1.9 護床工および護岸の内部構造調査の様子

(4) 平成29年7月九州北部豪雨災害時の水の流れに見る護床工の治水機能

平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害時に撮影された画像（図 3.1.10 ※元データは動画）をもとに、空石積み護床工近傍の流況を確認し、平水時の画像（図 3.1.11）との比較により、その治水機能について考察を行った。対象は No.7 の護床工である。なお、本護床工は河道が右曲りの水衝部に位置し、堰としての機能も兼ねている。動画をもとに想定した洪水時の水の流れを図 3.1.12 に示す。最も大きな特徴としては、勾配の変化点において跳水が発生している点である。また、勾配の変化点の下流には水制（荒籠）が設けられており、下流側の橋梁（眼鏡橋）に洪水流が直撃しないように配慮されたものと思われる。また水制によって生じた二次流が逆流して、洪水流にぶつかるようになっており、洪水流の勢いを削ぐ機能も有するものと思われる。また、護床工の表面では水の流れは射流であるものの、常に乱れて流れて（小さな跳水）おり、減勢機能を有するものと推測された。なお、護床工（堰）の天端は限界流であることから、その水深をもとに撮影時の流量を算出すると概ね $60\text{m}^3/\text{s}$ 程度であると思われる。



図 3.1.10 洪水時の様子



図 3.1.11 平水時の様子に洪水時の水面形を追記

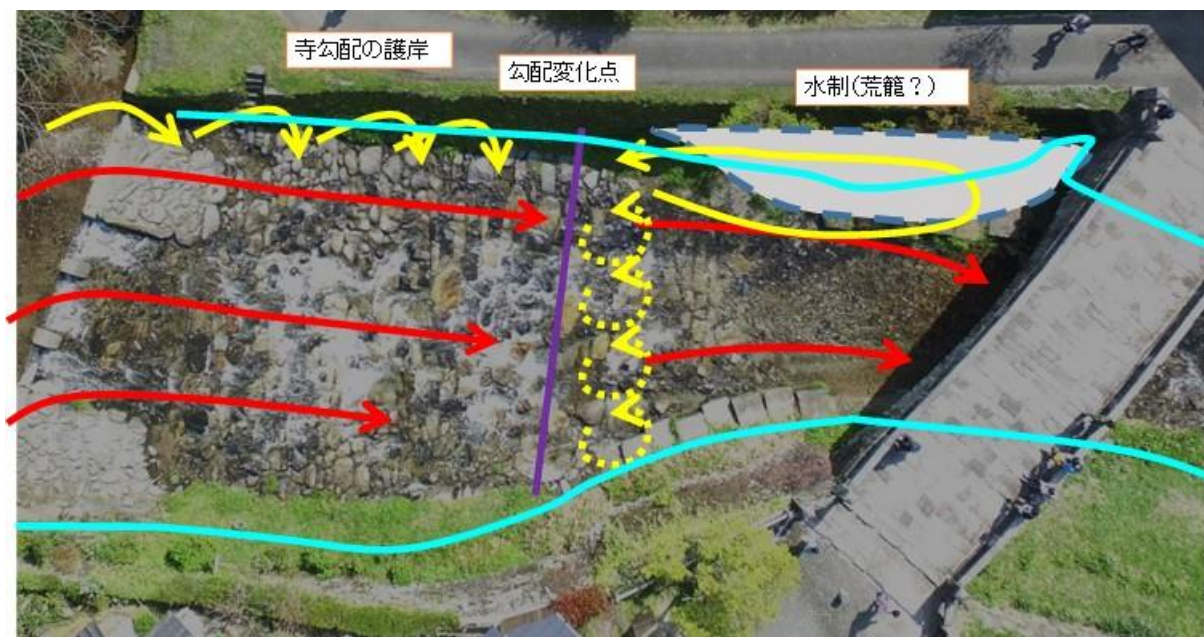


図 3. 1. 12 洪水時の水の流れ

3.2 地質に着目した低頻度大洪水後の河道変化の比較—妙見川、白木谷川、本迫川の事例—

3.2.1 はじめに

平成29年7月九州北部豪雨では筑後川に流入する中小河川において大きな被害が発生した。数百年に一度という豪雨により発生した山地の崩壊、土石流、土砂の侵食・堆積、流木の集積等により河道内だけでなく周辺地形が大きく改変された。これまで低頻度大洪水時の河道の変化については、稀な事象を対象とするため研究事例が少なく、知見が限られているのが現状である。栃木県北部を流れる那珂川上流支川の余笹川では、平成10年に発生した豪雨により川幅拡大や新流路の形成が発生した(中川ら 2000、上野 2004)。伊藤ら(2001)は、余笹川の新流路が侵食されやすい火山灰の堆積砂が堆積した沖積地側に形成される傾向があること等を報告している。

このような大規模の河道変動には上流の山域や沖積地を構成する地質が強く影響すると考えられる。地質と山地崩壊に関しては地すべりの分布が基盤岩の岩質と密接に関係していること等の知見があるが(藤田 1990)、地質と河道の形状や変動の関係に関して調べた研究はほとんどない。そこで、筆者らは地質の違いに着目しながら、大規模出水による河道の変動について河川毎にどのような違いがあるのかを調査した。

3.2.2 方法

1) 被災地域の地質の概要

被災地周辺に分布する地質は、変成岩類、花崗岩類および火山岩類の3つに大別される(矢田2018)。本地域の変成岩類は三郡変成岩に属し(日本の地質「九州地方」編集委員会 1992)、泥質片岩を主体とし、砂質片岩や少量の緑色片岩を伴う。全般に花崗岩類の貫入によるホルンフェルス化が見られ、相対的に花崗岩分布域よりも急峻な地形を形成している(矢田 2018)。風化の形態としては、新鮮な岩盤の状態から、多亀裂性の弱風化岩、岩塊・礫状へと変化し、礫混じり粘性土として存在するなど多様な形態で存在している(安福ら 2018)。朝倉市杷木地域の花崗岩類は、中生代白亜紀の添田花崗閃緑岩と呼ばれ(日本の地質「九州地方」編集委員会 1992)、黒雲母角閃石花崗閃緑岩を主体とする(矢田 2018)。この地域の花崗閃緑岩類の風化の形態としては、新鮮な岩盤の状態から、多亀裂性の弱風化岩、砂質系マサ土が一般的であるが、節理面沿いに風化が進み玉石状に岩芯が残留している部分(通称コアストーン)や表層部では赤マサと呼ばれるように粘土化している場合も存在する(安福ら 2018)。火山岩類は主に福岡県・大分県の県境付近を流れる大肥川以東に広く分布し、新生代新第三紀から第四紀更新世に噴出したものである(矢田 2018)。それらは主に、種々の溶岩や凝灰岩、凝灰角礫岩で構成されている。

2) 対象河川

対象河川は福岡県朝倉市妙見川、白木谷川、東峰村大肥川(宝珠山川)の2次支川である本迫川である(図3.2.1)。各河川の地質は、妙見川は泥質片岩、白木谷川は上流部が三郡変成岩と一部に安山岩、下流部が花崗閃緑岩、本迫川は安山岩である。調査を行った区間の河床勾配は妙見川、白木谷川下流は約5%で、本迫川、白木谷川上流は勾配は約10%であった。各河川近傍の雨量観測所の雨量データを用いて合理式により各河川のピーク流量を推定した結果を表3.2.1に示す。なお、松末小学校雨量観測所(朝倉市杷木)では、2017年7月5日17時より1時間雨量137 mmを記録した後、被災により18時からの記録が欠測した。レーダー雨量等の解析結果より18時以降は雨量の減少傾向にあったため、本稿では137 mm/hrを白木谷川のピーク雨量

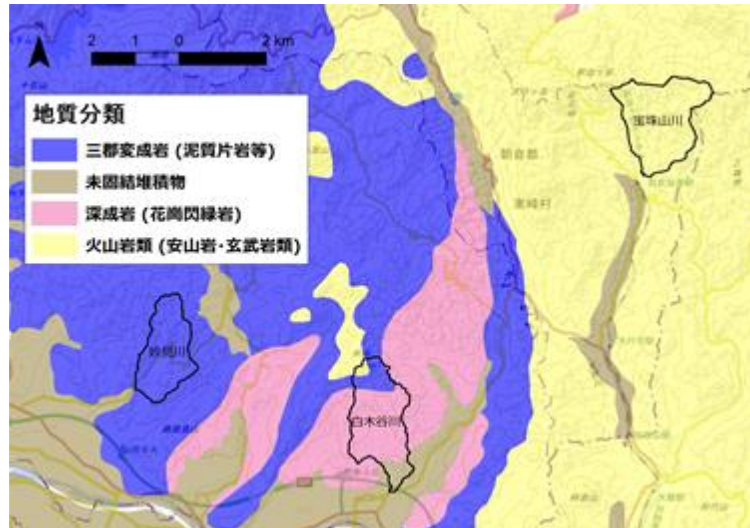


図 3.2.1. 調査対象河川の集水域と表層地質（地質の分布は国土数値情報より）。

表 3.2.1. 調査対象河川の推定と表層地質。流出係数は、「河川砂防技術基準 計画編」内の地目別流出係数の値を参考に、水田を 0.7, その他の農用地を 0.6, 森林・荒地を 0.7, 建物用地を 0.7 とし、面積加重平均により計算。洪水到達時間はルチハ式と土研式の平均値。

河川	調査区間 最下流の 集水面積 (Km ²)	流出 係数	洪水到 達時間 (min)	ピーク雨量 (mm/hr) 近傍観測所	推定ピーク 流量 Q(m ³ /s)	推定比流量 q(m ³ /s/km ²)
妙見川	2.19	0.69	45	124 北小路公民館	52	23.8
白木谷川	2.91	0.69	53	137 松末小	76	26.3
本迫川	3.17	0.70	47	78 鶴河内	48	15.2

として採用した。本迫川では降雨がやや少なく、ピークの比流量が15.2 m³/s/km²であるが、他の河川は20 m³/s/km²を超えていた（白木谷川：26.3、妙見川：23.8 m³/s/km²）。

3) 調査方法

豪雨災害の発生直後の2017年7月から8月にかけて、各対象河川においてUAVを用いた空中写真測量を実施した。UAV（DJI社製Phantom 3 Professional）により、出水後の河川の空中写真を撮影した。撮影した区間長は、妙見川で1,500 m、白木谷川で2,200 m、本迫川で1,500 mである。各調査区間に約10～15点のGCPを設け、RTK-GPSにより位置座標を取得した。取得した空中写真とGCP位置座標を用いて、SfM（Structure from Motion）解析を行い、地表面標高DSM（Digital Surface Model）とオルソ画像を取得した。得られたDSMは、オルソ画像より推定した洪水流下範囲で切り抜き、流木が多数ジャムした部分は除去する補正処理を行った。その後、出水前に福岡県県土整備部により2017年1月にLP（Laser Profiler）により取得された1mメッシュのDEM（Digital Elevation Model）との差分をとり、出水前後の川幅や河床高の変化、土砂の

浸食量と堆積量を算定した。また、2017年7月に国土交通省により取得されたLPデータを用いて、事前事後のDEMデータの差分から流域からの河道への土砂供給量を推定した。この際、50cm以上地盤高が変化した場所のみ抽出した。出水後の川幅については、調査区間の下流端から100m毎に河道横断方向にGISソフトウェア上で直線を引き、洪水流下範囲内の直線長を川幅として算出した。出水前の川幅は、同じ場所の川幅をDEMおよびGoogle Earthの画像等より判別し、計測した。河床高の変化は、出水前後の地形データを用いて、下流端から100m毎の設けた横断線の最低標高点を最深河床高として求めた。土砂の侵食量、堆積量に関しては、100m区間毎に出水後の河道内DSMデータから出水前のDEMデータを差し引きすることで算出した。これらの解析にはPhotoScan Professional (Agisoft 社製) およびArcGIS 10.5 (ESRI社製) を用いた。

河床に堆積した土砂の特性を比較するため、UAV調査と合わせて河床材料調査を行った。調査地点はそれぞれ妙見川で3地点、白木谷川で4地点、本迫川で5地点である。各調査地点では滞筋部と河岸の土砂堆積部を分けて、それぞれ線格子法により1mピッチで50個ずつ河床材料を採取し、礫の短径、中径、長径を計測した。2mm以下の粒径については砂、0.075mm以下の粒径は泥として記録した。白木谷川については滞筋部と河岸の土砂堆積部で粒度分布に差がなかったため、滞筋部のみ調査した。

3.2.3 結果と考察

1) 妙見川の河道変化

図3.2.2に妙見川の土砂の堆積・侵食の状況を示すマップと災害後の景観写真を示す。妙見川の流域では谷筋を中心として、多数の斜面崩壊が発生していた（図3.2.2a）。これらは比較的薄い表層風化帯の崩落を主とするが、一部は断層破碎帯に沿った崩落や初生的な岩盤地すべりである（西山ほか 2018）。調査区間内には3基の砂防ダムが存在した。最も下流の砂防ダム（須川第一砂防堰堤）では2017年7月以前の堆砂量がそれほど多くなかったこともあり、大量の土砂・流木が補足されていた（図3.2.2c）。国交省の資料（国交省 ○○）によると、空隙込みで16,500m³の流木捕捉量であった。しかしながら、残りの2基の砂防ダムについては、ひとつは全損もしくは多量の土砂により埋没してしまっていた。

妙見川の調査区間の下流には、ため池が存在する（図3.2.2a）。隣を流れる奈良ヶ谷川ではため池が決壊し、大きな被害が発生したが、妙見川のため池は壊れることなく、洪水時に土砂や流木を貯留した。ため池の湛水域には流木が立つように堆積し、湛水域上流にも多くの流木が集積していた（図3.2.2d）。土砂も数mにわたって堆積し、ため池が下流への負荷を軽減したと考えられる。

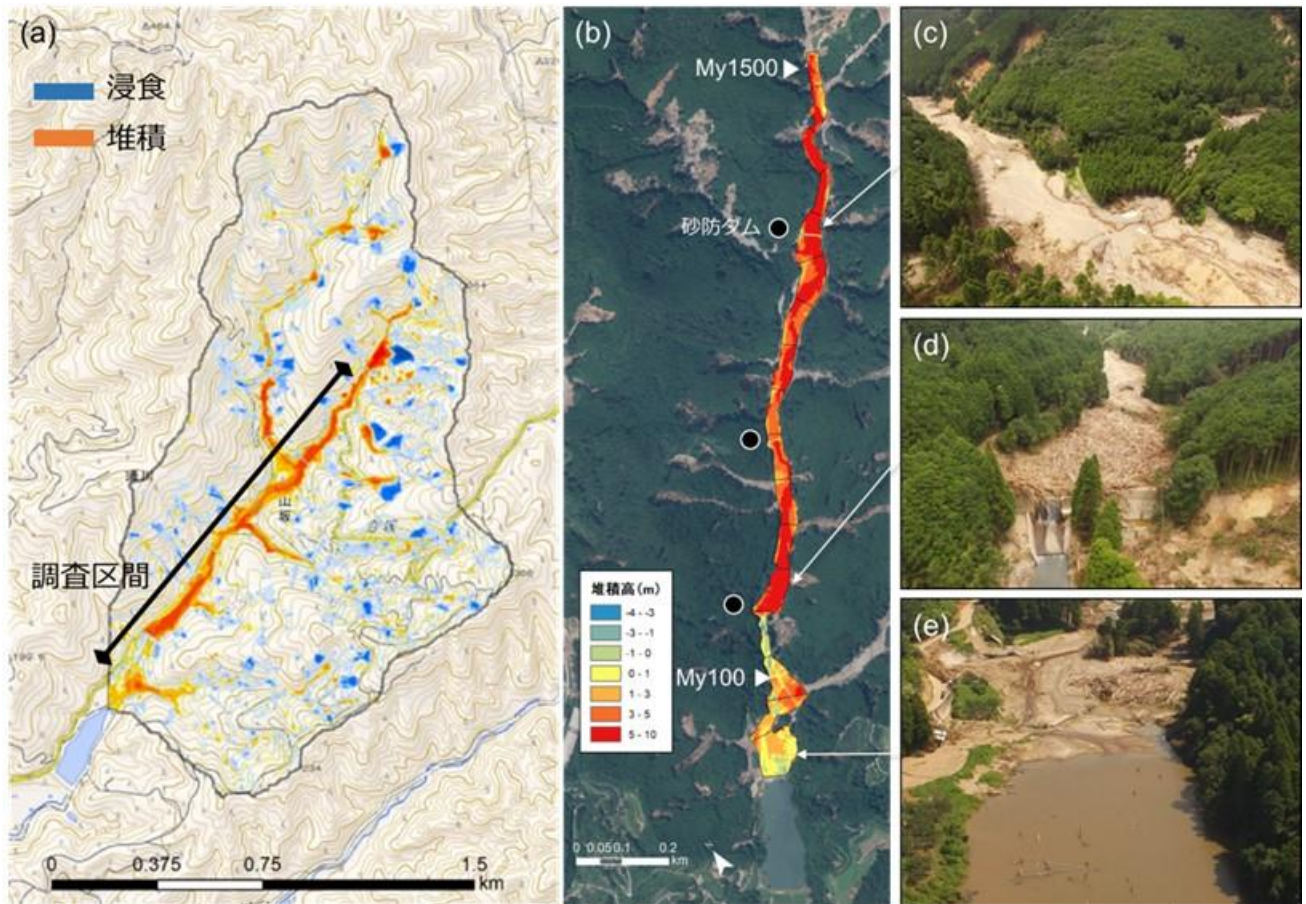


図 3.2.2. 妙見川の土砂の堆積・侵食状況。(a)対象流域の斜面崩壊の分布。(b)調査対象河道の侵食堆積状況。●は砂防ダムの位置を示す。(c)大きな左支川との合流部。直上流にあり、倒壊した砂防ダムの一部が見える。(d)大量の流木・土砂を補足した須川第一砂防堰堤。(e)調査区間下流のため池。ここでも大量の流木の集積が見られた。

妙見川における災害前後の河床縦断面図および勾配変化を図3.2.3に、調査区間の水理諸元、河道変化状況を100m区間ごとにまとめたものを表3.2.2に示す。妙見川は、調査区間のほとんどが堆積傾向にあった。河床勾配が15%を超える急勾配な区間から堆積が始まっており、急峻な勾配でも土砂が堆積していた。これらは直線的に流れる本川に対して、河岸の斜面崩壊や崩壊の激しい支川から大量の土砂が供給され、砂防ダムにより土砂堆積が促進されたためと考えられる。河床の縦断面形は、最下流の須川第一砂防堰堤を起点に6m程度上方に平行移動するように変化した。勾配の変化点についても変わりなかった。土砂の堆積量は100m当たり平均1.6万 m^3 、区間全体では23.4万 m^3 であり、谷底が大量の土砂で埋没していた。川幅は平均で4倍程度、谷幅一杯まで拡大した。谷底部の侵食は見られず、川幅の拡大は土砂の堆積により発生していた。河床の上昇も著しく、最深河床高を比較すると平均5.9mの上昇であった。特にMy1100区間で堆積量が急激に増加する。この区間では元の河道は完全に埋没し、川幅は5倍以上拡大、最深河床高は10m以上上昇、100m区間で2.9万 m^3 の土砂が堆積していた。この区間では比較的大きな支流が直角に合流するため、土砂濃度や勾配の急変、乱流により、土砂堆積が促進されたと考えられる。

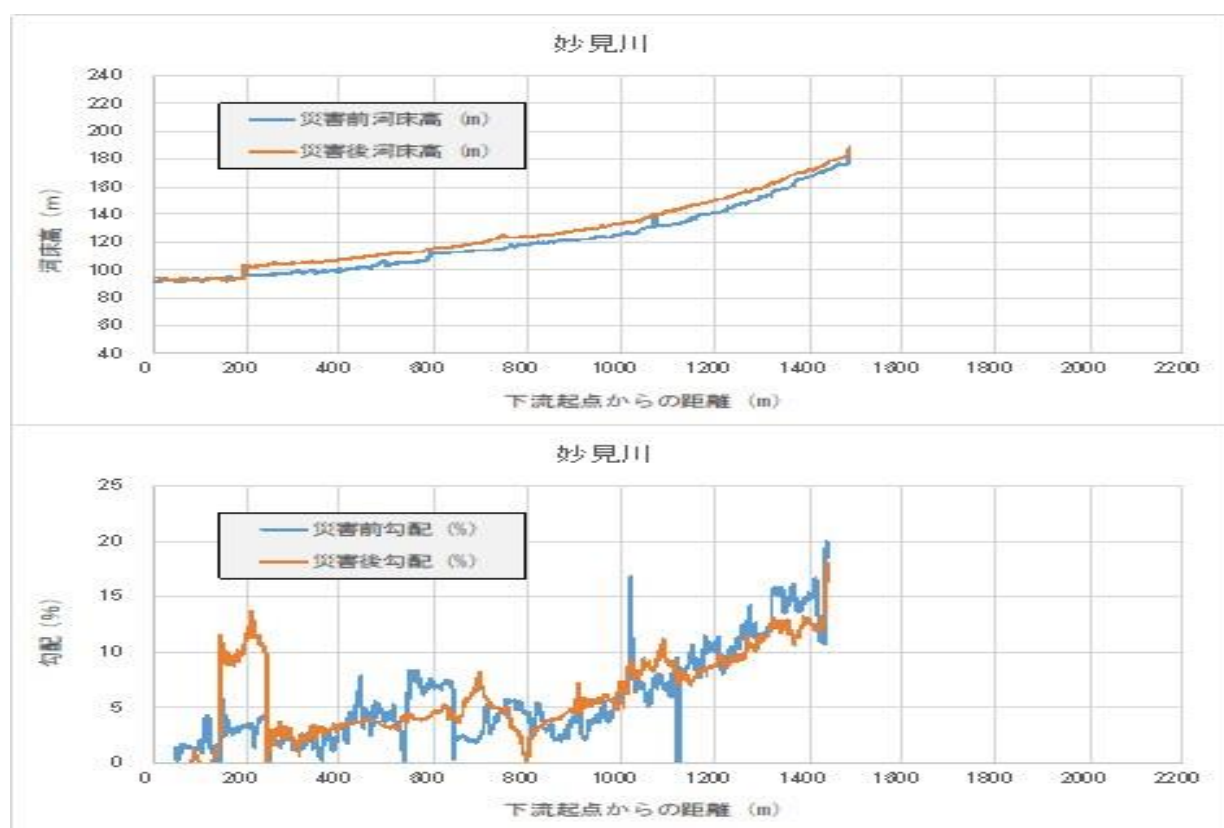


図 3.2.3. 妙見川の災害前後の河床縦断図と勾配。下流の起点は My100 区間の下流端。

表 3.2.2. 水理諸元と河道の変化状況。河床勾配は出水後のデータ。推定摩擦速度の算出はピーク流量、出水後の河床勾配を用いて算出し、出水前川幅から求めた水深を用いたものを上限値、出水後川幅のものを下限値とした。出水前後の河床高の差は、100m 区間の上流端と下流端の最深河床高を出水前後で差分を取り、平均して算出。

区間名	推定 ピーク流量 (m^3/s)	河床勾配 (%)	出水前 川幅 (m)	出水後 川幅 (m)	推定摩擦 速度上限値 (m/s)	推定摩擦 速度下限値 (m/s)	出水前後の 河床高の差 (m)	各区間への 土砂流入量 (万m^3)	各区間の 土砂堆積量 (万m^3)
My1500	4	14.4	11.5	23.1	0.40	0.33	2.9	6	0.7
My1400	4	10.9	12.1	20.6	0.37	0.32	5.5	8	1.1
My1300	8	10.4	9.0	21.0	0.47	0.37	8.3	10	1.7
My1200	8	8.8	8.3	27.7	0.47	0.32	9.6	8	1.6
My1100	24	9.8	8.3	43.4	0.66	0.40	10.4	16	2.9
My1000	25	4.6	6.2	50.1	0.57	0.30	6.3	14	2.6
My900	26	4.0	5.0	37.8	0.58	0.32	6.1	11	1.6
My800	27	4.5	6.4	30.8	0.57	0.35	6.2	22	1.8
My700	36	4.0	8.4	29.0	0.55	0.38	5.5	21	1.0
My600	38	4.8	7.2	32.2	0.62	0.40	3.7	20	1.2
My500	38	3.2	7.7	36.9	0.53	0.33	7.5	21	1.7
My400	39	2.8	8.7	33.3	0.49	0.33	7.1	20	1.8
My300	42	4.9	8.5	40.4	0.61	0.39	6.4	18	2.6
My200	43	6.9	7.1	34.5	0.73	0.46	3.6	16	0.1
My100	46	1.7	5.3	52.2	0.50	0.25	0.2	15	1.0
平均	-	6.4	8.0	34.2	0.54	0.35	5.9	15.0	1.6
合計	-	-	-	-	-	-	-	-	23.4

2)白木谷川の河道変化

図3.2.3に白木谷川の土砂の堆積・侵食の状況を示すマップと災害後の景観写真を示す。白木谷川は流域の80%程度が花崗閃緑岩であるが、上流部に行くにつれて、泥質片岩、安山岩が見られるようになる（安福ほか 2018）。源頭部では地質の境界面にて斜面崩壊が発生しているが、下部に存在する花崗閃緑岩が深層風化のため、マサ土化しており、白木谷川流域の発生土砂はマサ土の供給であった。源頭部での比較的大きな崩壊に加え、調査区間に至るまで河道・河岸の侵食が顕著である（図3.2.4ab）。

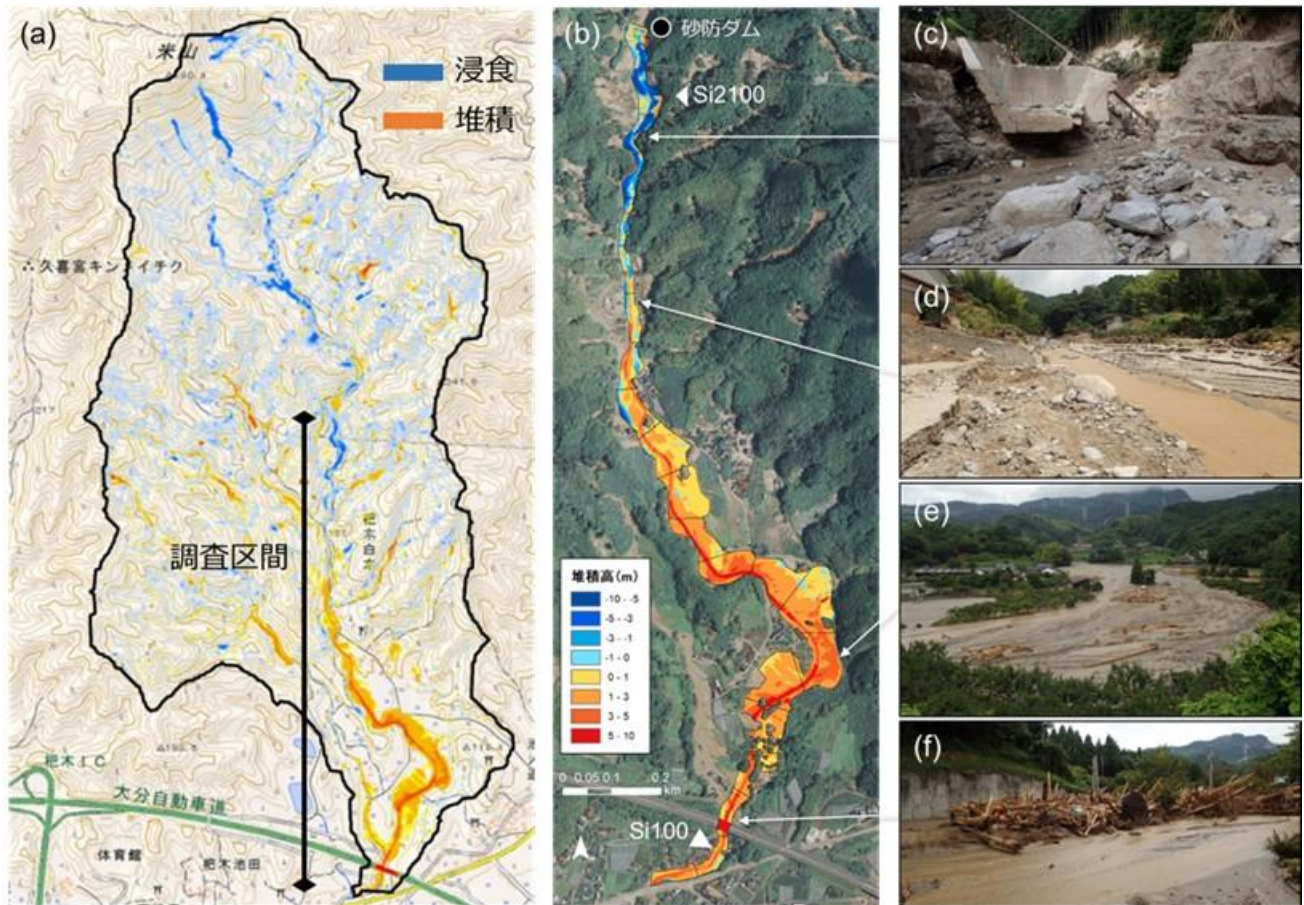


図 3.2.4. 白木谷川の土砂の堆積・侵食状況。(a)対象流域の斜面崩壊の分布。(b)調査対象河道の侵食堆積状況。●は砂防ダムの位置を示す。(c)流路工の脇を、岩盤を彫り込むように侵食。(d)河道には土砂（コアストーンおよびマサ土）が堆積し、河道外の土地を激しく侵食。(e)大量の土砂（マサ土）堆積。(f)橋脚に詰まった大量の流木。

白木谷川における災害前後の河床縦断面図および勾配変化を図3.2.5に、調査区間の水理諸元、河道変化状況を100m区間ごとにまとめたものを表3.2.3に示す。今回の出水により、白木谷川の縦断面形に変化が見られた。上流部は侵食により河床が低下し、出水前より緩勾配となった。下流部では土砂の堆積により河床が4～5m上昇したものの、妙見川と同様に元の河床が平行移動したような縦断面形となった。

上流から供給された土砂は、調査区間の最上流に存在する砂防ダムで土砂が一部貯留されたものの、48万 m^3 の土砂が砂防ダム下流へと流下したものと推定された（表3.2.3）。砂防ダムの直下流では河道・河岸侵食の傾向は続いていた（図3.2.4c）。砂防ダムの下流はコンクリート三面張の流路工が整備されていたものの、流路工の外側を水が走り、場所によっては10mを超す侵食深が確認された（最深部の比較では3.5m河

床低下、表3.2.3)。侵食部は花崗閃緑岩の岩盤が露岩していたが、風化が激しく脆い状態であったため、洪水流は岩盤上の堆積土砂を押し流すだけでなく、岩盤も深く削り込んでいた。この付近の川幅は2～3倍程度に拡大しており、主に溪岸の侵食によるものであった。それに伴い、斜面崩壊も発生しており、溪岸からの土砂も供給された。その後、比較的大きな左俣支川が合流する付近（下流起点から1600m上流付近、Si1600～Si1700区間）で河床勾配が減少し、それより下流は堆積の傾向へと変化していく。調査区間上流端から勾配変化点までの約400mの区間（Si1700～Si2000）からは約2万m³の土砂（堆積・侵食を差し引きした純生産量）が生産・供給されたものと推定された。

勾配変化点からは徐々に谷幅も拡がりはじめ、元々の河道部には土砂の堆積が見られるものの、河道外の土地の侵食が激しく、家屋の被害が甚大であった（図3.2.4d）。川幅は2～5倍程度拡大しており、河道への堆積と流水による河道外の沖積土層の侵食が相まって、川幅が拡大してものと推測される。

下流に行くに連れて、谷幅が拡がり、堆積の傾向が強まっていく（図3.2.4e）。川幅が広く、蛇行している区間では、最深部河床高が5m程度上昇し、100m当たり最大2.4万m³の土砂が堆積した。最も堆積が顕著であったSi500～Si900区間では、55～90mの大幅な流路の拡大が発生し、これは元の川幅の7～10倍にのぼる。調査区間全体としては13.5万m³の土砂が堆積したものと推定された。河川の橋脚には大量の流木が集積している状況が散見され（図3.2.4f）、こういった流木のスタックが河川を堰き止め、土砂の堆積を促進、河道外への洪水氾濫、流路幅の著しい拡大を助長したものと推測された。

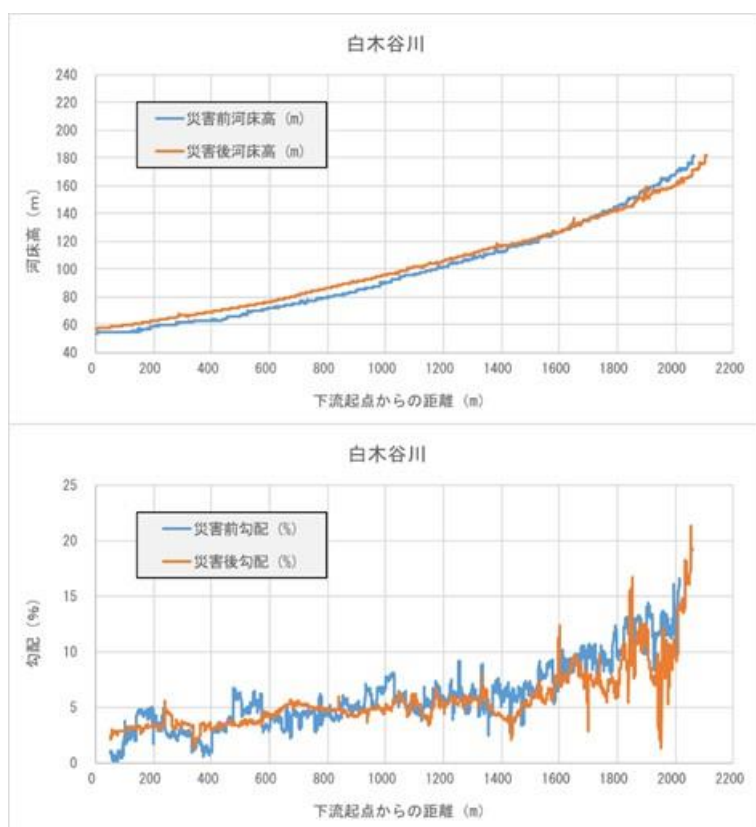


図 3.2.5. 白木谷川の災害前後の河床縦断図と勾配。下流の起点は Si100 区間の下流端。

表 3.2.3. 水理諸元と河道の変化状況。各パラメータの算出方法は表 3.2.2. と同様。

区間名	推定 ピーク流量 (m ³ /s)	河床勾配 (%)	出水前 川幅 (m)	出水後 川幅 (m)	推定摩擦 速度上限値 (m/s)	推定摩擦 速度下限値 (m/s)	出水前後の 河床高の差 (m)	各区間への 土砂流入量 (万m ³)	各区間の 土砂堆積量 (万m ³)
Si2000	29	11.0	5.4	29.7	0.83	0.50	3.5	48	-0.9
Si1900	29	8.0	5.0	25.6	0.77	0.47	2.8	51	-0.6
Si1800	30	7.3	7.0	18.2	0.68	0.51	1.7	53	-0.4
Si1700	31	7.3	8.0	16.5	0.65	0.52	0.1	54	-0.1
Si1600	32	6.9	7.4	15.5	0.67	0.53	0.5	62	0.0
Si1500	43	4.5	7.0	19.4	0.63	0.47	1.6	63	0.1
Si1400	44	5.6	6.2	29.2	0.72	0.45	2.9	62	0.3
Si1300	47	5.3	6.8	48.4	0.70	0.39	2.9	62	0.4
Si1200	47	5.6	7.0	65.5	0.71	0.36	4.6	64	0.8
Si1100	48	5.1	7.2	71.8	0.68	0.34	3.1	63	0.9
Si1000	48	4.8	7.6	70.0	0.66	0.34	5.5	62	1.2
Si900	48	4.1	8.1	54.0	0.61	0.35	5.6	61	1.9
Si800	51	5.3	9.0	75.8	0.66	0.35	5.7	59	1.5
Si700	52	3.4	9.6	100.7	0.55	0.27	4.8	58	1.7
Si600	52	4.5	10.2	85.5	0.60	0.32	4.5	56	2.4
Si500	56	2.6	13.4	89.4	0.47	0.27	5.8	54	1.9
Si400	57	3.4	19.0	79.5	0.46	0.30	6.2	52	1.0
Si300	57	2.9	17.8	51.0	0.45	0.33	3.9	50	0.6
Si200	76	3.3	23.3	28.1	0.47	0.45	3.7	49	0.5
Si100	77	2.3	19.8	20.1	0.43	0.43	4.9	55	0.4
平均	-	5.2	10.2	49.7	0.62	0.40	2.9	56.9	0.7
合計					-				13.5

3)本迫川の河道変化

図3.2.6に本迫川の土砂の堆積・侵食の状況を示すマップと災害後の景観写真を示す。本迫川は全域が火山岩（安山岩）の地質の河川である。今回の豪雨では、大肥川以東では比較的雨量が少なかった。雨量の影響か、比較的新しい岩質であるためかは明らかにすることは出来ないが、流域全体として崩壊箇所は妙見川、白木谷川と比較すると少ない（図3.2.4a）。調査区間の最上流部には砂防ダムが存在し、左俣支川の源頭部から連続的な崩壊、崩積土のフラッシュにより発生した土砂を堆砂した。その下流は勾配が急であることも影響し、侵食の傾向が強かった（図3.2.4b）。河道は直線的であるが、侵食により形成された滞筋は蛇行しており、交互砂州のように侵食部と堆積部が共存する形態であったことが興味深い（図3.2.4c）。

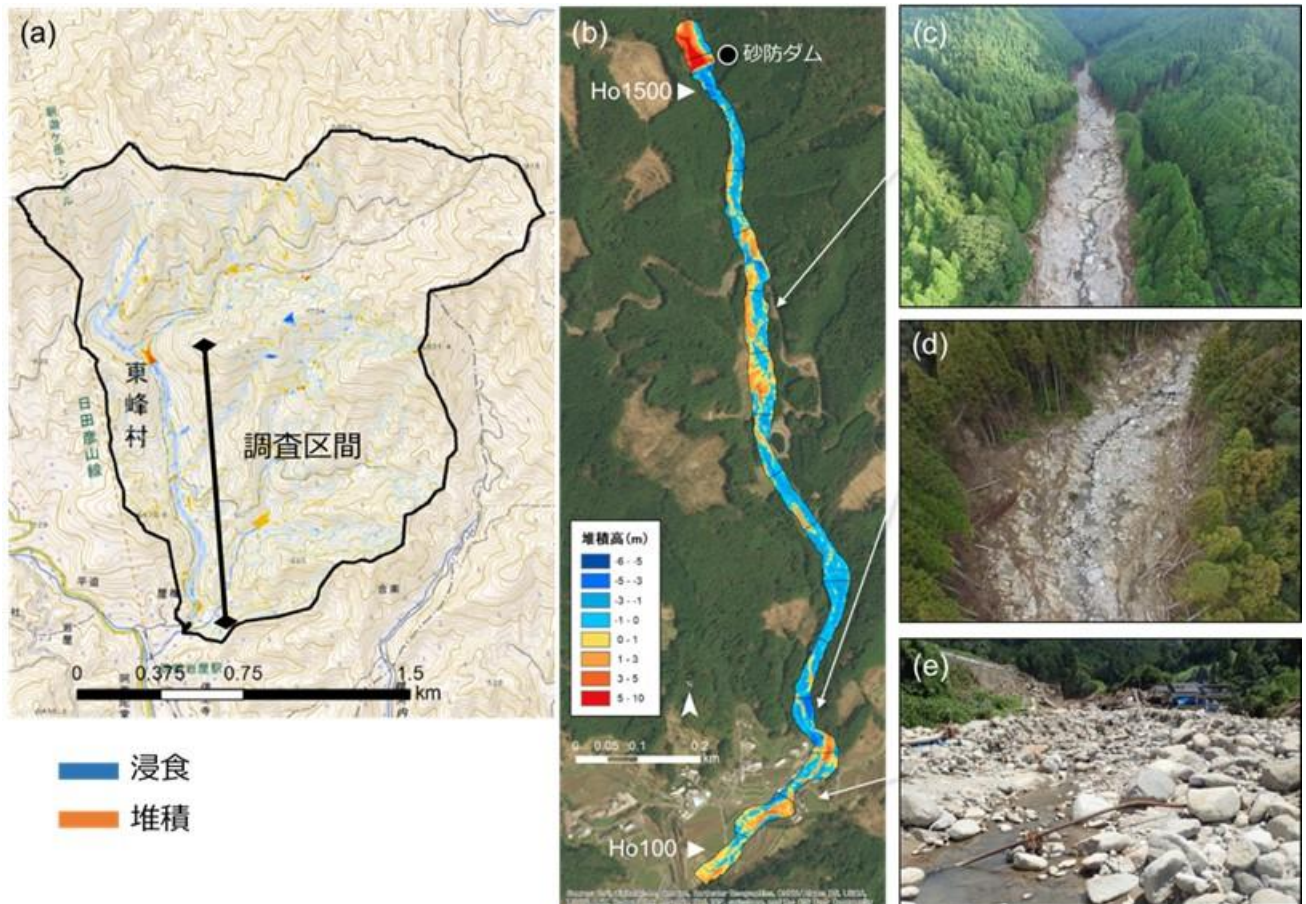


図 3.2.6. 本迫川の土砂の堆積・侵食状況。(a)対象流域の斜面崩壊の分布。(b)調査対象河道の侵食堆積状況。●は砂防ダムの位置を示す。(c)直線的な河道内にて滞筋が蛇行。露岩している箇所も多い。(d)湾曲部に露岩する安山岩の岩盤。(e)巨石を多く含む土砂堆積物。

本迫川における災害前後の河床縦断面図および勾配変化を図3.2.7に、調査区間の水理諸元、河道変化状況を100m区間ごとにまとめたものを表3.2.4に示す。本迫川の縦断面形は災害前後でほとんど変化がなかった。目立った勾配の変化点も見られず、直線的な縦断面形であった。上流から下流まで随所に岩盤の露出が見られ、岩盤によって河床洗掘が制限されること、急勾配が続くことによって土砂堆積が抑制されることが直線的な縦断面形の形成に関係しているのではないかと考えられる。河道全体では土砂の堆積ではなく侵食が卓越しており、土砂の侵食量は100m当たり平均0.1万 m^3 、調査区間全体では1.1万 m^3 であった。

Ho1000区間付近では土砂の堆積が確認されたが、これは河道を道路が横断しており、それらが堰堤の効果を発揮したものと思われる。この区間は露岩が著しく、岩盤による河床の洗掘が制限されたことも道路が流されずに残ったことに影響していると考えられる。Ho1000区間より下流についても引き続き、侵食傾向であった。水流の当たる湾曲部の外岸部は多少洗掘されたものの、溪岸斜面の根を洗掘することによる斜面崩壊を発生させるには至らず、河岸斜面からの土砂の流入は少なかった。本迫川の河道はU字状の比較的フレッシュな岩盤の上に土砂が堆積して構成されており、岩盤による制約により溪岸斜面の崩壊が抑制されたと考えられる。上流区間からは8万 m^3 程度の土砂が流入していると推定されたが、それらは堆積することなく、逆に河床から土砂が追加されながら調査区間下流へと流下したものと考えられる。多くの土砂が流れ込みながら堆積量が少なかった原因としては、河道全体として10%を越える急勾配河道であることが最たる理由として考えられるが、上流では深層の崩壊が発生しておらず、表層の細粒土砂が多く供給された

可能性が挙げられる。供給された土砂は多くは浮遊砂として流下していったのではないかと。河道への土砂供給量はボリュームだけでなく、崩壊部土層の間隙、崩壊深さ、こういった土砂が供給されたのかといった質（粒度分布）についても考慮しなければならない。今後、追加調査を行う予定である。

谷の出口に至ると谷幅が広がり、勾配が緩くなると土砂の堆積が見られた。砂は少なく、1mを超す巨石が多かった。土石流の堆積域となり、この周辺の人家の被害は著しく、宝珠山川との合流点对岸にまで及んだ。

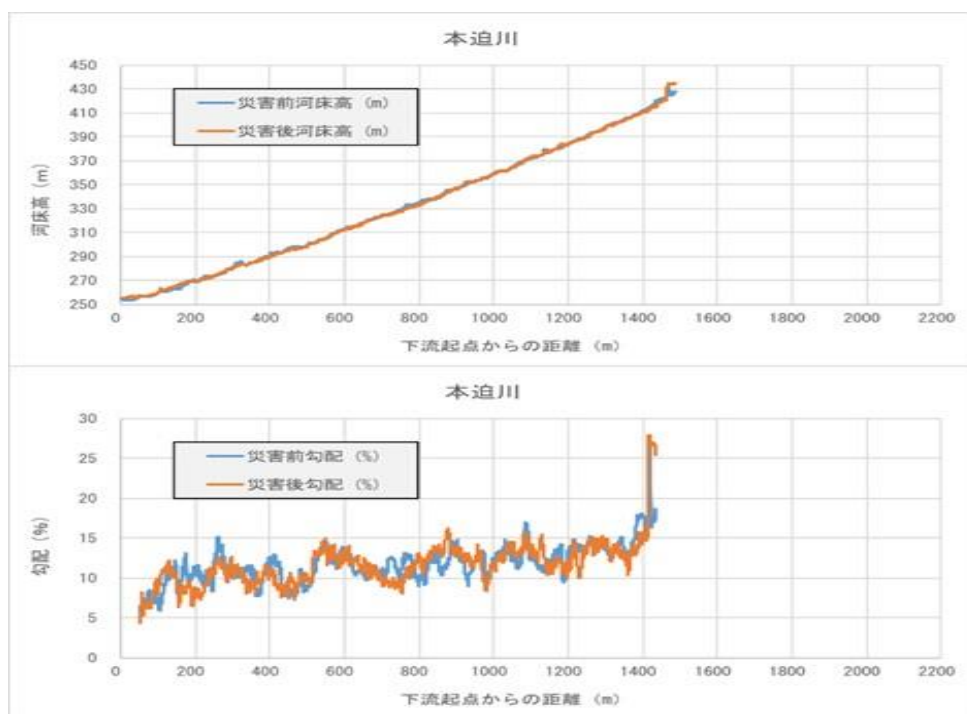


図 3.2.7. 本迫川の災害前後の河床縦断図と勾配。下流の起点は Ho100 区間の下流端。

表 3.2.4. 水理諸元と河道の変化状況。各パラメータの算出方法は表 3.2.2. と同様。

区間名	推定 ピーク流量 (m^3/s)	河床勾配 (%)	出水前 川幅 (m)	出水後 川幅 (m)	推定摩擦 速度上限値 (m/s)	推定摩擦 速度下限値 (m/s)	出水前後の 河床高の差 (m)	各区間への 土砂流入量 (万m^3)	各区間の 土砂堆積量 (万m^3)
Ho1500	15	8.0	28.2	30.5	0.37	0.36	7.8	8	0.1
Ho1400	15	13.3	10.3	22.0	0.60	0.48	-0.3	8	2.2
Ho1300	16	13.7	9.7	29.1	0.63	0.45	0.3	9	2.1
Ho1200	16	12.2	7.6	28.9	0.65	0.44	0.2	9	0.0
Ho1100	17	12.2	7.7	29.6	0.66	0.44	-0.3	10	0.1
Ho1000	18	14.0	8.1	33.3	0.70	0.46	0.6	10	0.1
Ho900	18	11.7	7.0	30.2	0.68	0.44	0.7	12	2.1
Ho800	19	10.5	6.2	26.7	0.69	0.45	-0.8	12	2.2
Ho700	22	11.1	6.4	34.9	0.73	0.44	-0.4	13	3.3
Ho600	23	12.9	7.9	31.1	0.73	0.48	-0.9	14	3.3
Ho500	23	9.4	9.6	28.3	0.62	0.48	-0.7	14	2.2
Ho400	23	8.9	9.4	36.1	0.62	0.41	-0.3	14	3.3
Ho300	24	10.8	9.7	36.8	0.65	0.44	2.1	14	0.0
Ho200	39	8.8	9.7	27.2	0.71	0.52	0.3	14	0.1
Ho100	39	5.6	9.6	26.6	0.60	0.45	0.1	14	0.1
平均	-	10.9	9.8	29.7	0.64	0.45	0.6	11.6	-0.1
合計	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.1

4) 侵食堆積傾向の河川による違い

ここでは土砂の堆積・侵食現象について、各河川の傾向を比較する。

侵食区間については、勾配および摩擦速度が同程度であった白木谷川上流区間と本迫川を対象とする。白木谷川では勾配7%以上の区間で河床低下が顕著で、局所的に5～10mにわたり河床が低下している場所も存在した。この地域の花崗閃緑岩は強度に風化・マサ化している。侵食が卓越する区間では表層の堆積土砂を侵食するのみならず、脆くなった基盤岩を彫り込むように侵食したため、非常に侵食量が多かった（図3.2.8）。本迫川については、同程度の掃流力が河床にかかったと推定されたが、局所的な深掘れは見られず、全体的に数十cmから数mの河床低下が河道全体に広がる傾向にあった。本迫川は比較的フレッシュな安山岩地盤を流れるため、基盤岩を彫り込むことなく河床低下が少なかったと考えられる。地質や風化の程度によって、侵食の程度に大きな差があることが確認された。

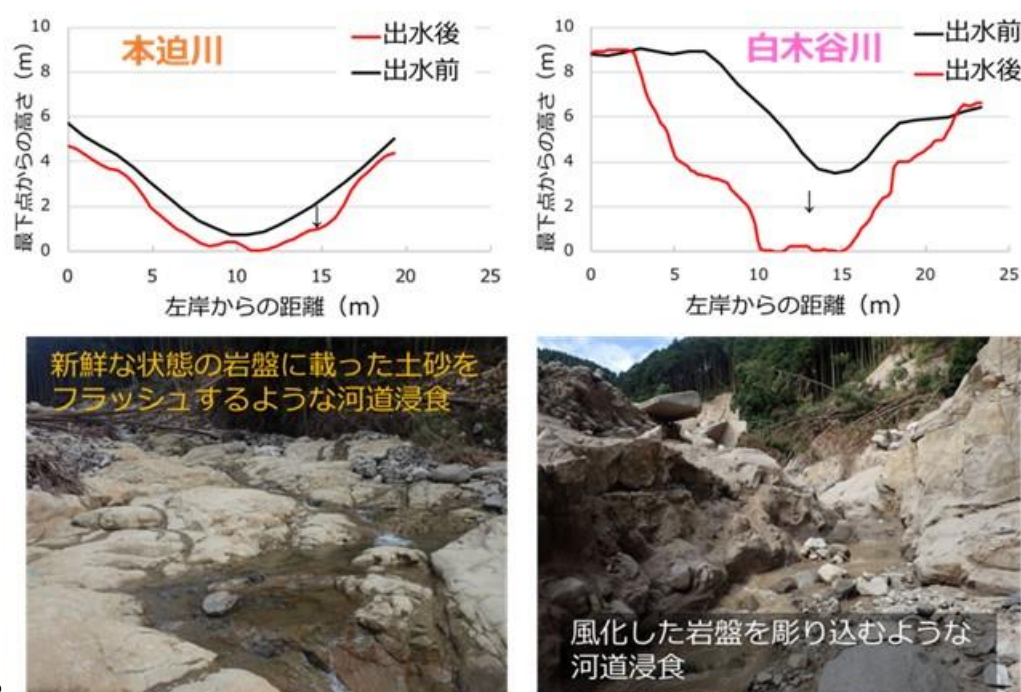


図 3.2.8 本迫川、白

木谷川の侵食区間の横断図と現地写真。

土砂堆積については、妙見川と白木谷川を比較する。これらの河川については堆積形態に違いが見られた。白木谷川については比較的、谷が開けており、川幅が拡大し、広く薄く堆積する傾向が見られた（図3.2.9）。逆に妙見川では谷が狭く、狭い範囲に厚く土砂が堆積していた。今回の調査では谷形状の違いについて議論できるデータはないが、妙見川ではホルンフェルス化した硬い岩質の泥質片岩が確認されており、風化の進みやすい花崗閃緑岩の白木谷川と比べて、急峻な谷形状となっているのかもしれない。災害後の妙見川では、須川第一砂防堰堤上流の土砂が大量に堆積した区間では多くの水が伏流状態にあった。地表に水が表出する場所では、茶褐色の沈殿物（酸化鉄と思われる）が多く散見された。土砂の堆積状況は、伏流水・地下水の流動、および水質変化に大きく影響を与えられとされる。

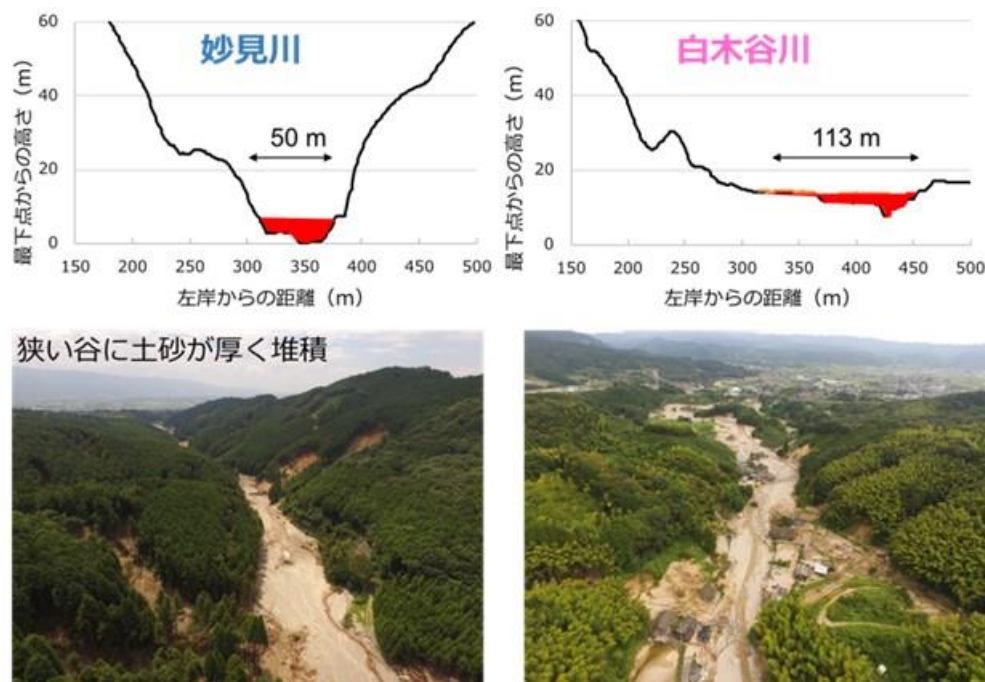


図 3.2.9. 妙見川、白木谷川の堆積区間の横断面図と現地写真。

5) 堆積土砂の違い

災害直後に各河川で取得した粒径加積曲線を図3.2.10に示す。図には九州中北部の20溪流（勾配1/10～1/50程度、花崗岩7河川、泥質片岩6河川、安山岩7河川。以下、対照河川とする。）で取得した粒径加積曲線を細線で併記してある。地質によって堆積土砂の粒度分布は明瞭に異なっていた。白木谷川では風化したマサが稼働に供給されたこともあり、河床がほとんど砂で覆われていた。妙見川は中礫が多く、場所による差が小さかった。本迫川では巨礫が多い傾向にあり、場所による粒度分布の違いが大きかった。

近年土石流等が発生しておらず、ある程度安定状態にあると考えられる対照河川と比較すると、河道の安定度をある程度評価できるのではないかと考えられる。妙見川および白木谷川は対照河川と比較すると細粒分が多く堆積しており、今後大きく河道が変化していくことが予想される。特に溪流で特徴的なStep-Pool構造の骨格となるD90粒径が対照河川とどの程度近づいたかに注目すると良いだろう。この2河川は上流域にも今回の洪水で調査区間まで流出しなかった土砂も多く存在しており、土砂の供給がいつまで続くのかを評価する必要がある。粒度分布の比較では、いつまで土砂の供給が続くかは予測出来ないが、定性的に土砂供給が止まり、安定状態に入ったことの判断に使えるのではないかと考えられる。一方、本迫川では対照河川とかなり類似した粒度分布の地点も存在し、河川の安定度は他の2河川と比較すると高いものと考えられる。本迫川では土砂の侵食が卓越していたこと、元々巨石が供給しやすい地質であったことが大きな理由であろうと考えられる。

堆積土砂の質（粒度分布）は、今後の河川計画を立てる上で最も重要な要素であると共に、生物のハビタットに直接的に影響を与えるものである。地質による粒度分布の違いを反映した、河川の土砂輸送や生物の生息状況に関する知見はまだまだ不十分であり、本研究サイトで継続的にデータを収集していくことが重要であろう。

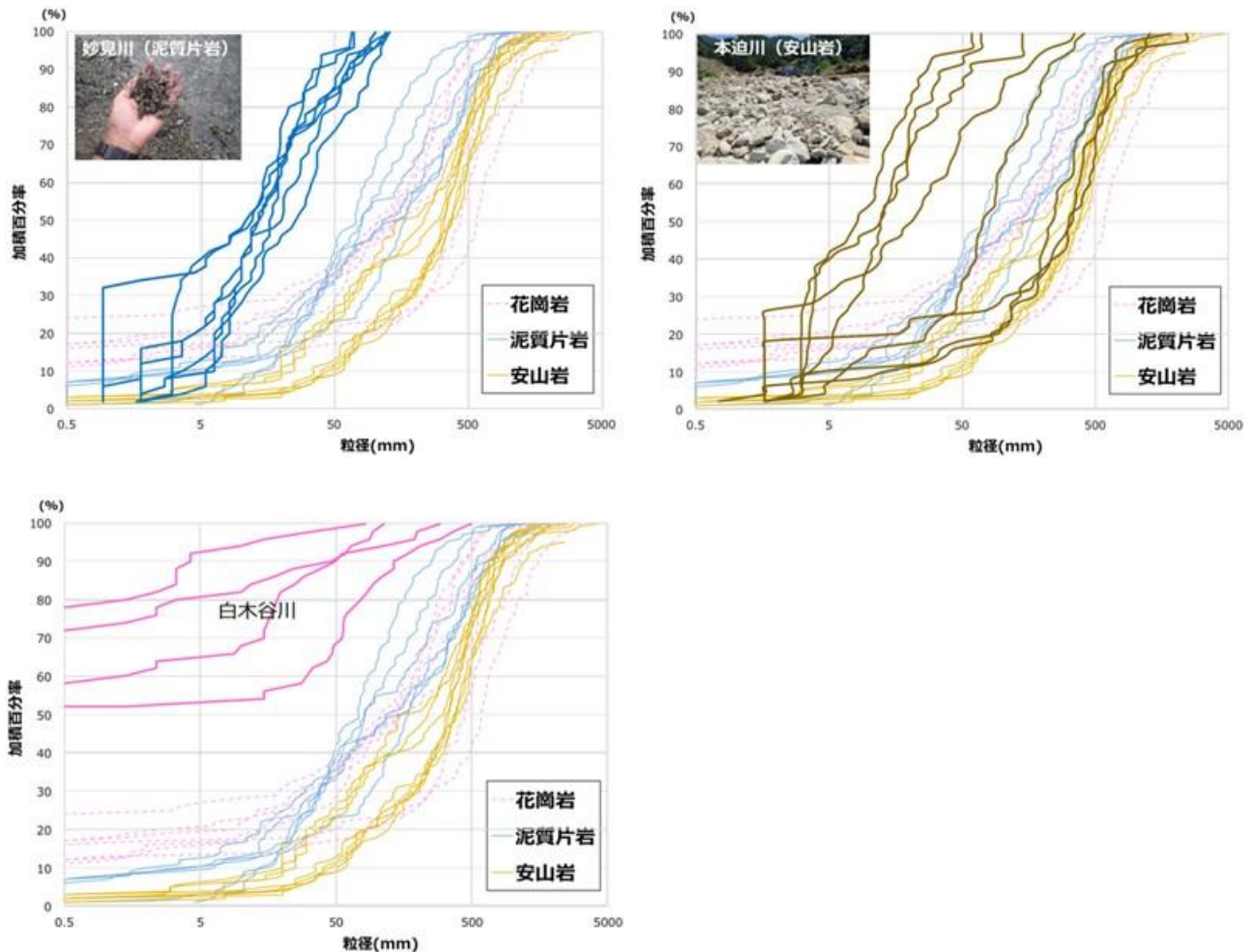


図 3.2.10. 妙見川、白木谷川、本迫川の粒径加積曲線（太線）。各図の細線は九州中北部 20 溪流で取得した粒径加積曲線。

3.2.4 まとめ

本研究では、平成29年7月九州北部豪雨により発生した大規模出水について、地質の異なる3河川を対象に、河道変動にどのような違いがあるのかを調査した。泥質片岩の妙見川では、谷幅の狭い谷底に大量の土砂が供給され、厚く土砂が堆積していた。河床勾配が15%を超える急勾配な区間から堆積が始まっており、急峻な勾配でも土砂が堆積していた。河床の縦断形は、最下流の須川第一砂防堰堤を起点に6m程度上方に平行移動するように変化した。厚く堆積した土砂により多くの水は伏流状態にあり、酸化鉄と考える赤褐色沈殿物も散見された。花崗閃緑岩の白木谷川では、勾配が7%を越える区間において、風化した岩盤を洗掘するように数mから最大10mに達する大規模な河床低下が発生し、河道からも大量の土砂が供給されていた。供給された土砂は元々の河道部を埋没させ、幅の広い谷底に氾濫流が拡がり、大規模な川幅拡大が発生していた。それには橋脚に引っ掛かった流木も影響したものと考えられる。安山岩の本迫川では、ほとんどの区間が勾配7%を超え、上流から下流まで侵食傾向にあった。随所にフレッシュな状態の岩盤が露出しており、岩盤によって河床洗掘が制限されたため、河床低下や溪岸侵食、それに伴う斜面崩壊が抑制されたものと推測された。堆積した土砂は調査河川毎に明瞭に異なっていた。比較的安定状態にある九州中北部の溪流と比較すると、特に白木谷川の河道が今後大きく変動するものと予想された。

3.3 花月川藤山地区の河道拡幅による土砂ストック効果に対する考察

3.3.1 はじめに

筑後川水系花月川は、筑後川水系の上流域に位置し、水郷日田を流下する一級河川である。花月川は、平成24年7月の九州北部豪雨による被災を受け、激甚災害特別緊急事業に認定、河川改修が実施されているところであったが、その最中、平成29年7月の九州北部豪雨により、花月川は再び出水を受けた。河川改修等の実施による流下能力向上等により、越水や浸食等の被害は小さかったが、上流の土砂災害の発生により大量の流木が流下し、JR橋の流出等、再び大きな被害が発生した。

花月川藤山地区は、平成24年7月出水により越水し、大きな被害が発生した区間であるが、その経験を活かし、流下能力の向上並びに土砂ストックとしての効果を発揮できるよう、河道を大きく拡幅した区間である。

本レポートは、藤山地区の河道拡幅による土砂ストックの効果について考察するものである。

3.3.2 花月川の被災状況

1) 平成24年7月出水による被災状況

梅雨前線がもたらした豪雨により、筑後川水系花月川の花月水位観測所（基準地点）において、観測史上最高の水位（当時）を記録する出水が生じ、甚大な被害が発生した。

花月水位観測所において、約2時間にわたってはん濫危険水位を突破し、2ヵ所で堤防が決壊したほか、河川の至るところで越水・溢水し、日田市街地など全川にわたって浸水被害が発生し、7月3日出水においては835戸の家屋・事業所等が浸水した。

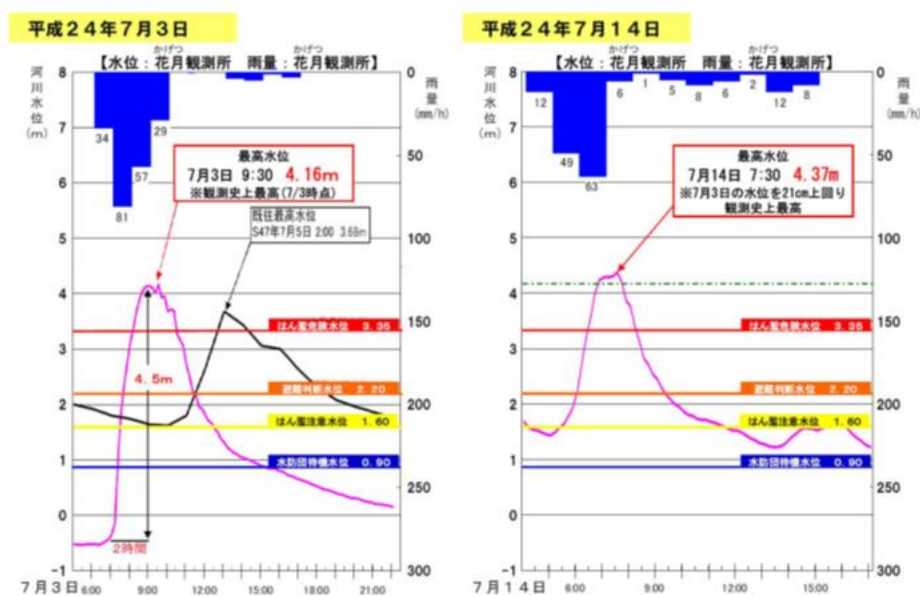


図 3.3.1 花月観測所における水位の状況（平成24年7月3日、14日）国土交通省



図3.3.2 花月川洪水範囲（平成24年7月3日，14日）国土交通省

2) 平成 29 年 7 月出水による被災状況

梅雨前線に伴い，7 月 5 日の昼頃から夜にかけて九州北部の福岡県から大分県にかけて強い雨域がかかり，短時間に記録的な雨量を観測し，朝倉市から日田市北部において観測史上最大の降雨を記録した．平成 24 年 7 月出水時の時と比べると，日田雨量観測所の累加雨量（H24.7 出水時 243mm）は約 2 倍近くの 462mm となった．また，6 時間雨量も 299mm を記録し，平成 24 年 7 月 3 日の降雨量 6 時間 163mm を超える雨量を記録した．

また，花月水位観測所における水位は，観測史上最高水位を記録した平成 24 年 7 月 14 日を越え，最高水位を更新した．

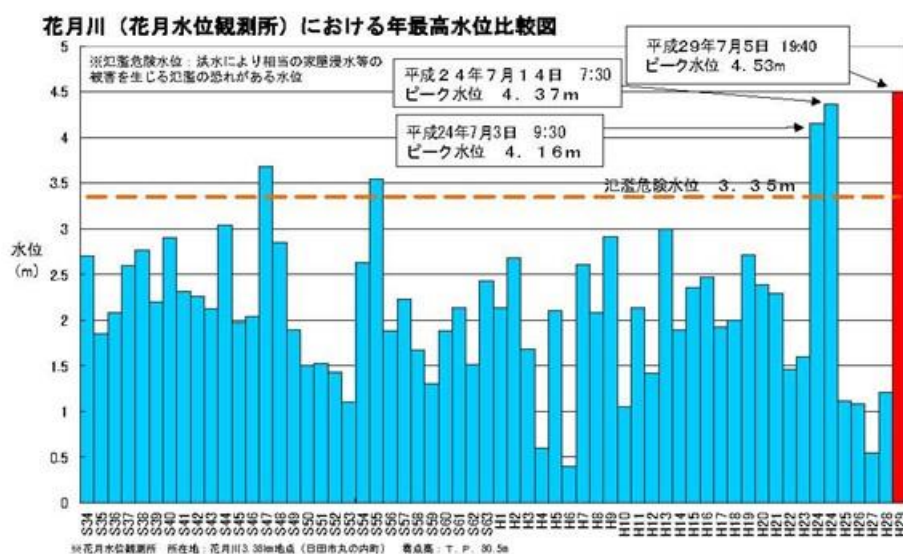


図 3.3.3 花月水位観測所における年最高水位の推移 国土交通省

花月川の出水により、越水が発生し、堤防決壊は免れたものの、内水または外水による家屋浸水 844 戸、浸水面積 86ha の浸水被害が発生した。

平成 24 年 7 月出水と比較すると、降雨量が 1.6 倍だったにも関わらず、浸水面積及び被害家屋（床上浸水）は、約 3 割減となっており、平成 24 年 7 月出水による激特事業の効果が発揮されたものと考えられる。

表 3.3.1 平成 24 年 7 月出水と平成 29 年 7 月出水の比較

国管理区間の被害状況			H24. 7. 3 出水	H29. 7. 5 出水
浸水区域面積	ha		121. 3	86
家屋被害	床上浸水	戸	414	282
	床下浸水	戸	306	562

浸水区域の範囲を見ると、花月川上流域の藤山地区や坂本地区等では浸水範囲が大きく軽減されたと考えられるが、豆田地区（左岸）周辺においては越水等による浸水範囲が拡大したと考えられる。

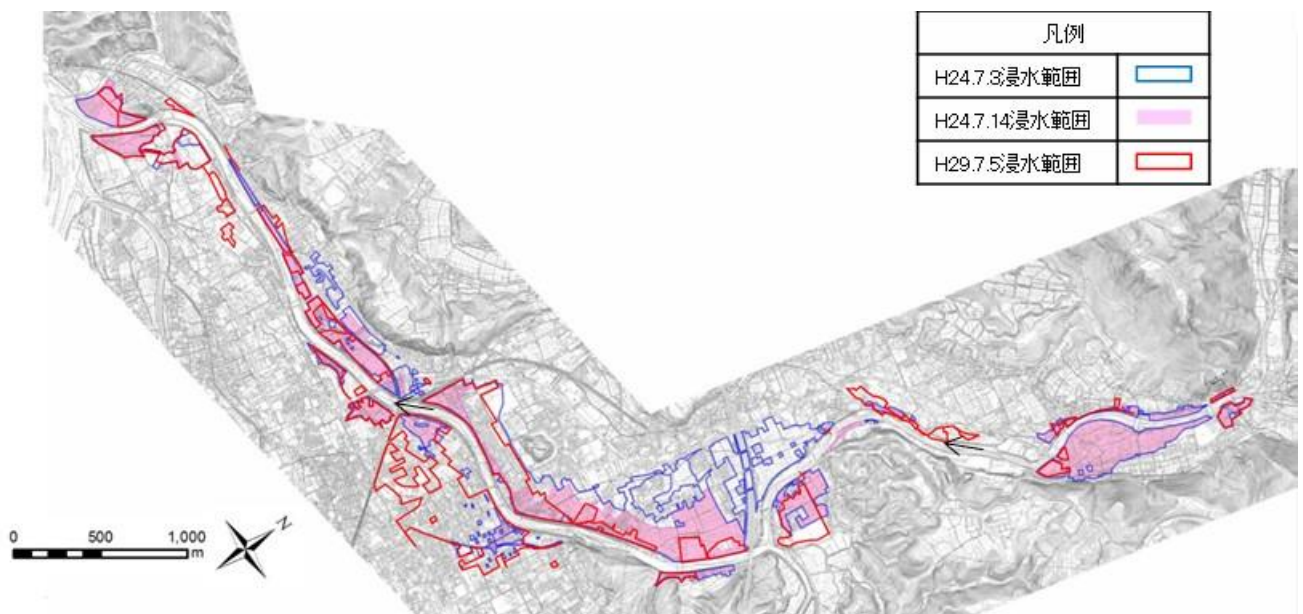


図 3.3.4 花月川浸水範囲（平成 24 年 7 月 3 日，14 日，平成 29 年 7 月 5 日）国土交通省

3.3.3 藤山地区の土砂ストック効果

1) 藤山地区の経緯

① 平成24年7月出水による被災状況

藤山地区（7k400～8k600 付近）においては，4 か所からの越水が発生しており，広範囲に浸水するとともに，護岸崩壊及び大量の土砂が堆積した．地藏元橋下流で左岸側に大きく越水し，広範囲に被害が発生した．

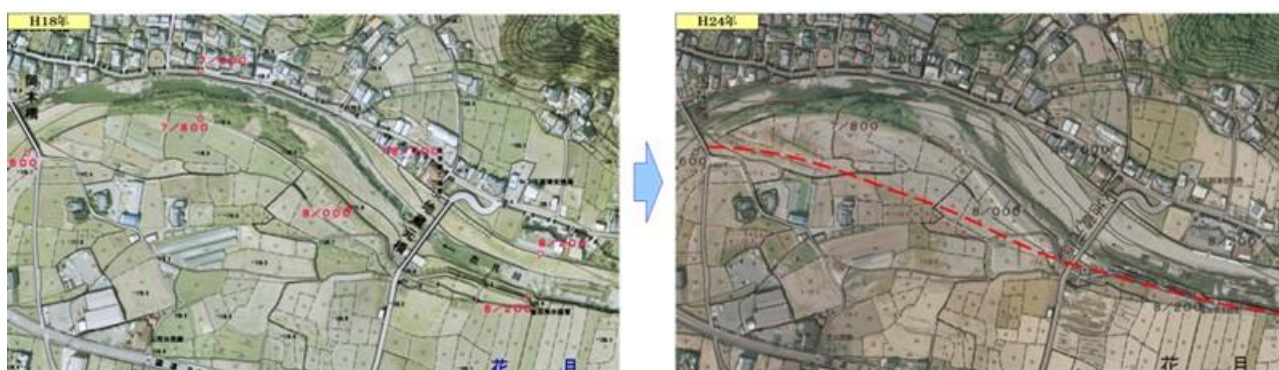


図 3.3.5 平成 18 年と平成 24 年（出水後）の航空写真に見る変化



3.3.6 平成 24 年 7 月 3 日出水時の藤山地区

2) 激特事業による藤山地区の整備プランの検討

藤山地区において、特に岡本橋（7k600 付近）～地藏元橋（8k100 付近）区間について、過去の河道状況を見ると、昭和 47 年から平成 24 年 7 月出水前までは、若干の滞筋の変化はみられるものの、河道の大きな変化は見られない。平成 24 年 7 月出水によるインパクトの大きさを物語っていた。



昭和 47 年撮影



平成 7 年撮影



昭和 53 年撮影



平成 24 年撮影

図 3.3.7 藤山地区の河道変遷

藤山地区においては、大きく河道拡幅することとなった。藤山地区は、河床は礫河床であり、一部岩の露出が見られたが、滞筋を活かして、土砂ストック機能として、広い河川敷を有する区間となった。藤山地区においては、林 博徳助教（九州大学大学院工学研究院），地域の小中学校の教諭等による懇談会が開催され、形成される礫河原は、鳥類等の生息場やアカササゲ等の重要植物等の保全の場となるとともに、地域の小中学校等の環境学習の場として活用されることが検討された。

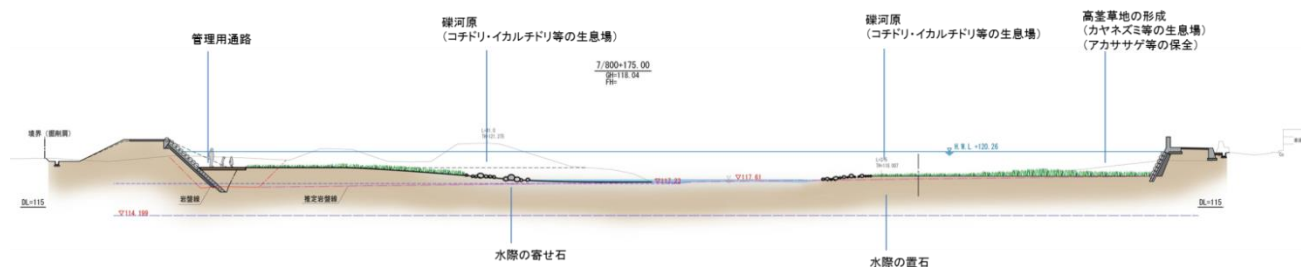


図 3.3.8 藤山地区の整備プラン横断イメージ

3) 藤山地区の平成 29 年 7 月出水による被災状況

藤山地区では、平成 29 年 7 月出水では越水による浸水が発生したが、平成 24 年 7 月出水と比較すると、大きく被害が軽減された。河道拡幅により流速が低下し、結果、土砂堆積が顕著に見られた。また、若干ではあるが流木を捕捉している状況が見られた。



図 3.3.9 藤山地区の河道状況（左：平成 26 年施工後，右：平成 29 年 7 月 7 日）

4) 調査方法

藤山地区（岡本橋～地藏元橋区間）においては、平成 29 年 7 月の出水により大量の土砂が堆積し、流木もストックされていた。藤山地区は、引堤し河道を大きく広げたことにより、河道内の土砂の堆積が促進されたものと推察される。

そこで、平成 24 年 7 月出水後の計画河道断面と平成 29 年 7 月出水後の定期横断の比較から堆積土砂量を算出し、土砂ストック効果を推定した。

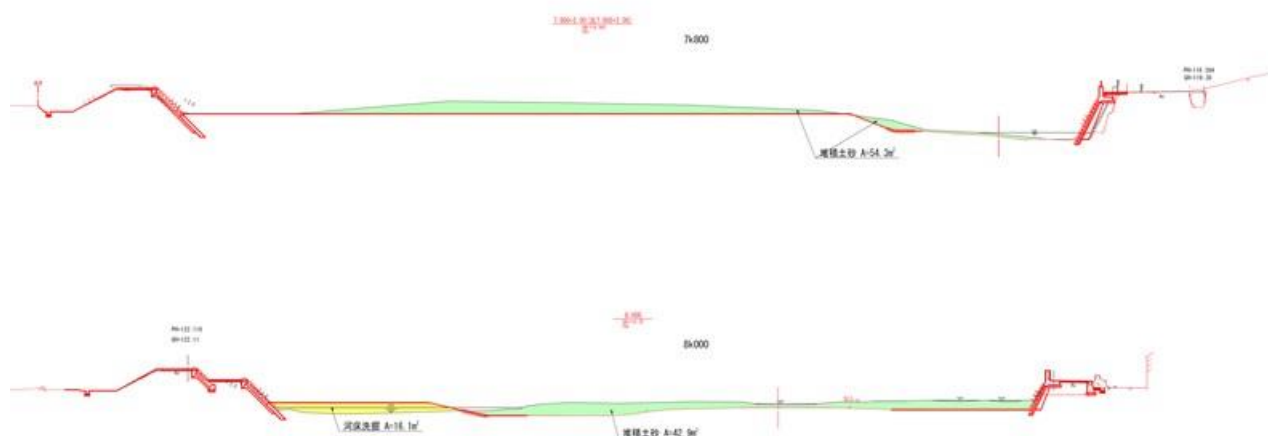


図 3.3.10 平成 24 年と平成 29 年の定期横断測量の重ね図

5) 調査結果・考察

藤山地区においては、風呂元井堰（7k500）より上流側の約 1 km 区間（8k400）において、概ね 2 万 3 千 m^3 の土砂が堆積したことが算出された。特に河道を大きく拡幅した 7k600～8k200 区間においては、顕著に堆積が見られ、河道拡幅による土砂ストック効果が得られたものと考えられる。

表 3.3.2 堆積土砂量の算出

距離標	堆積土砂			備考
	断面積 (m^2)	平均断面積 (m^2)	立積 (m^3)	
7k500	0.0	—	—	風呂元井堰
7k600	0.0	0.00	0.0	
7k800	48.2	24.10	4820.0	
8k000	41.2	44.70	8940.0	
8k200	22.3	31.75	6350.0	
8k400	2.9	12.60	2520.0	
合計			22630.0	

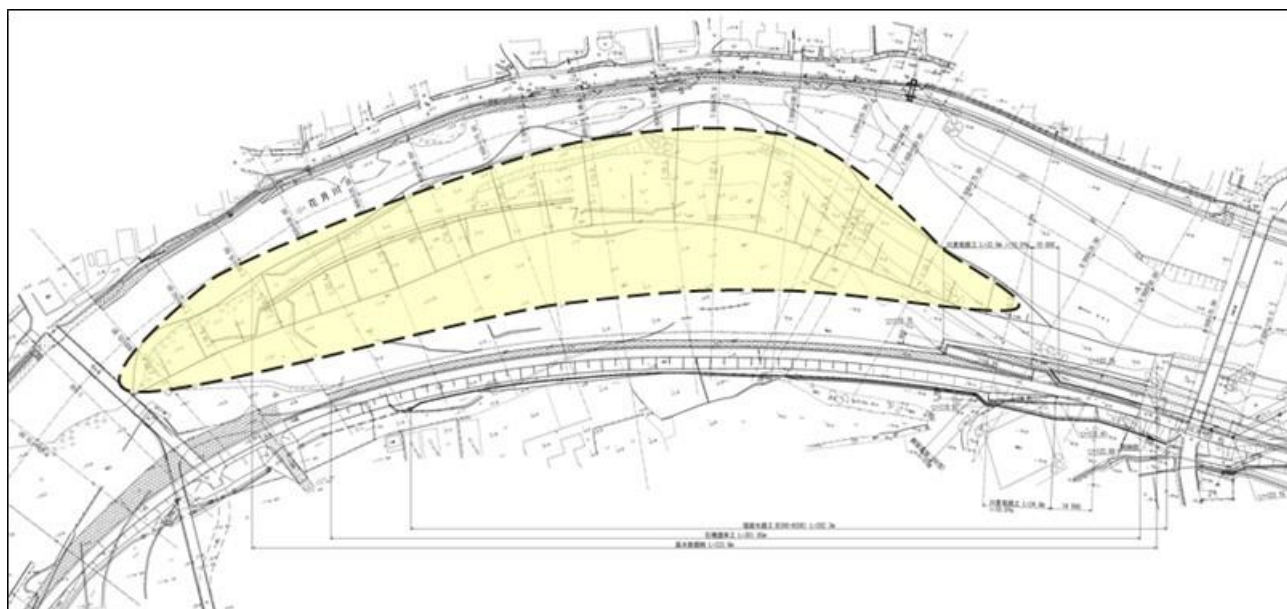


図 3.3.11 平成 29 年 7 月出水による顕著な土砂堆積の範囲

また、同等規模の出水が生じた場合、流速が 5m/s を超えることが想定され、特に右岸側については流水が集中することが推察され、越水等が発生したものと考えられる。

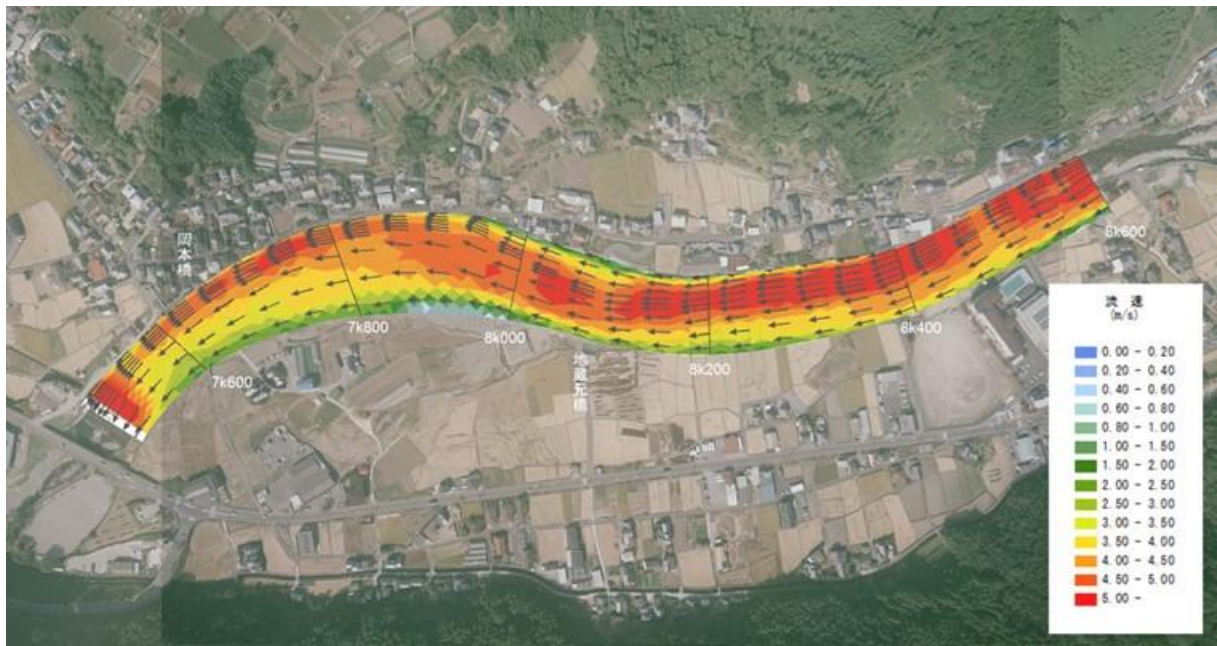


図 3.3.12 平成 29 年 7 月出水同等規模の流量時の流速分布の推定

その他にも、筑後川本川との合流点付近（0k000～2k000），有田川との合流点付近（5k000～6k000）においても、土砂が顕著に堆積した．また、豆田地区（3k000～3k800）区間においては、流れの内側に土砂堆積が見られた．

藤山地区における土砂ストック効果がなければ、上記 3 カ所については、さらなる土砂堆積が発生した可能性もあるものと想定される．

一方、花月川全体でみると、藤山地区及び上記 3 カ所以外の区間はほとんどで河床が低下しており、土砂堆積量より掘削量の方が上回る結果となった．

当然ながら、これらの土砂バランスについては、出水の流量や流速に左右されることとなるが、これまでの花月川の出水状況を見ると、平成 24 年 7 月出水、平成 29 年 7 月出水、平成 30 年 7 月出水と連続して大きな洪水が発生しており、同規模の洪水が今後も発生する可能性があり、今後も藤山地区では、土砂堆積が継続的に発生するものと考えられる．

3.3.4 今後の課題

1) 現在の状況

平成29年7月出水後、堆積土砂の撤去が実施されたが、平成30年7月出水により、再度、藤山地区は土砂堆積が発生した．土砂堆積により滞筋は大きく変化し、従来の瀬・淵の状況が一変した．

広い礫河原が形成され、平常時の水量は小さいため、一度、土砂が堆積すると、滞筋が変化し、河川環境は大きく攪乱を受けることとなる区間であることを、改めて認識させられる．



図 3.3.13 平成 30 年 7 月の藤山地区の状況

2) 土砂ストックの対応

近年の雨の降り方の変化により、短期間に大きな降雨が発生することにより、山間部からの土砂の運搬・堆積が生じるものと想定される。そのため、大きく土砂堆積が生じた場合は、次の出水に備えて、土砂撤去を行っていく必要があると考えられるが、藤山地区の河川空間は、出水及び土砂によるインパクトが大きく、河川環境の創出・保全とのバランスを改めて方向付けすることが重要と考えられる。

また発生した土砂の処分についても大きな問題となるが、分級してストックすることで、石材の供給源として活用できると考えられる。

謝辞：本レポートで用いた各種データ等は、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所のデータを使用させて頂いたものである。関係者の皆様に敬意を表すとともに深く感謝の意を表します。

引用文献

九州地方整備局 記者発表記事. 平成 24 年 7 月 3 日からの梅雨前線豪雨による被害と九州地方整備局の対応 (http://www.qsr.mlit.go.jp/bousai_joho/saigai_news/pdf/h24/20120731_01.pdf)

筑後川河川事務所 記者発表記事. 平成 24 年 7 月 13～14 日出水 筑後川・矢部川・嘉瀬川流域の状況について (http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/old/jimusyo/h24/240714syussui.pdf)

筑後川河川事務所 記者発表記事. 平成 29 年 7 月九州北部豪雨の概要 速報版

(http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/newstopics_files/20170728-3h2907gaiyou.pdf)

3.4 土砂動態を考慮した河道計画に関する考察

3.4.1 河道計画への取り組み方針

平成29年九州北部豪雨災害では大量に流出した土砂が、河道ならびに沿川までも埋め尽くし、沿川家屋に壊滅的な被害が発生し、さらに、筑後川本川にも大量の土砂を堆積させたことにある。現在も土砂は流出を続け緊急的な復旧を困難にさせただけでなく、大雨によりさらに大量の土砂を生産し続けることが想定される。

今後の同一規模の外力に対する被害を軽減するためには、今回の豪雨で発生した現象を再確認し、原因分析を踏まえて、河道計画を立案することが重要である。

本節では、特徴的な事象を示した花崗岩流域を代表として着目して、以下の手順により河川計画への徳見方針をとりまとめた。

■どのような現象が生じたのか？

- ・大量のマサ土と大量の流木が流出した
- ・大量の土砂供給により河道が埋没（河道閉塞）し、堤内地まで土砂に埋没した
- ・巨礫が溪床勾配の緩い下流へ輸送された
- ・多くの家屋が土砂により埋没し、家屋を倒壊した

■現象ほどどのように生じたのか（要因分析）

- ・大量の土砂流出が引き起こした現象は何だったのか
- ・河道閉塞・堤内地の土砂埋没はどのように生じたのか（プロセスの想定）
- ・土砂流出を加速させた要因は何だったのか？

■大量の土砂流出を含む流域での対策の在り方はどうすればよいのか？

- ・河道計画
- ・土砂流出抑制

3.4.2 現状分析

(1) 高濃度流れの特性

1) 花崗岩の特性

土砂生産にかかわる花崗岩の特性は、文献¹⁾からまとめると以下のとおりである。

【概要】

- ・深成岩で主成分が石英と長石、他黒雲母等で構成される。
- ・有色鉱物＜約30%が花崗岩、有色鉱物＞約30%が閃緑岩となる
- ・花崗閃緑岩＝花崗岩と閃緑岩の中間のもので、朝倉地域での花崗岩はこれにあたる。
- ・一般に、平均密度 2.75 g/cm^3 （ $1.74\sim 2.80\text{ g/cm}^3$ ）で標準的な土砂 2.65 g/cm^3 とほぼ同程度である。
- ・多孔質である

【風化】

- ・温度差により結晶粒子間の結合が弱く、風化しやすい風化の進行し、マサ土となる。

- ・マサ土はシルト～砂で構成。湿潤時は粘着力が高いが、湿潤状態が高まると粘着力が一気に低下する。

【河床材料】

- ・河床材料はシルト～砂で、礫は無く、巨石として存在。

【洪水流出特性】

- ・多孔質のため、浸透しやすく、中間流出となりやすい。
- ・中間流出と表面流出の合成により、ピークがシャープになりやすい。

(※花崗岩流域では貯留関数の定数が、 $Rsa=300mm$ 程度、 $p=1/3$ が多い²⁾³⁾)

以上の花崗岩の特性から、洪水所の洪水・土砂流出の流出特性は以下のとおりである。

【洪水時の洪水・土砂の流出特性】

- ・風化花崗岩は大量の降雨で斜面崩壊しやすい
- ・斜面崩壊で大量の土砂を流出
- ・粒度分布は細粒分が多いため洪水流は高濃度の土砂流になる
- ・洪水が尖鋭化しやすい

2) 高濃度流れの土砂混入率～密度～水圧

高濃度の土砂を含む洪水の特性である密度、水圧を算定するため、土砂混入率を想定する。

洪水に含まれる土砂混入率については、河川砂防技術基準・計画編（国土交通省）の砂防施設の流路工の土砂混入率として、以下が提案されている。

- ・砂防工事が施行中・・・15%
- ・砂防工事が施行済み・・・10%

また、桜島野尻川で観測された洪水に含まれる土砂の混入率は35～72%であった⁴⁾。

ここで、現地観測は実施されていないこと、細砂のマサ土は砂防での土砂流出制御が困難なことから、河川砂防技術基準で示される混入率より高く、土石流よりも低いものと考え、洪水には30%程度の土砂が混入するものと仮定し、高濃度の土砂を含む洪水流の特性を算定する。

土砂を含む洪水の密度は、次式による。

$\rho_d = \rho \cdot (1.0 - p) + \sigma \cdot p$ (式3, 4, 1) ここに、 ρ ：水の密度(=1.0 g/cm³)、 ρ_d ：土砂を含む洪水の密度、 σ ：砂の密度(=2.65 g/cm³土砂の標準値を採用)、 p ：土砂混入率。

上式に、洪水の土砂混入率を30%程度とすると、土砂を含む洪水の密度、 $\rho_d=1.5$ g/cm³となり、清水の1.5倍の密度となる。

また、水圧は密度に比例することから、同一の水深での水圧は清水の1.5倍となる。水圧と連動して浮力も同様に清水の1.5倍となる。

このことから、水圧と浮力増加を考慮した施設計画が重要となる。

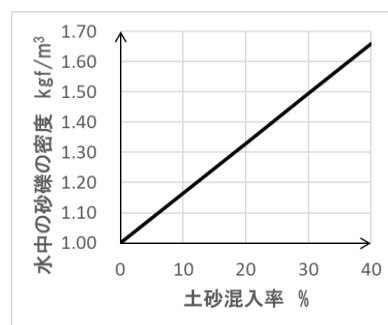


図3.4.1 土砂混入率と水中の砂礫の密度

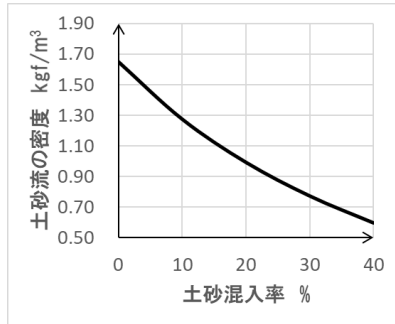


図3.4.2 土砂混入率～土砂流の密度

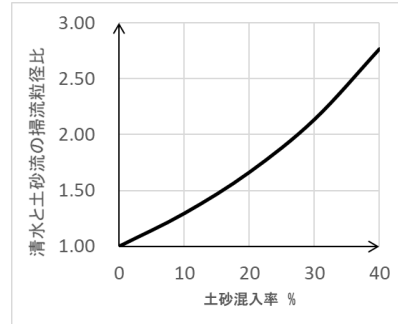


図 3.4.3 土砂混入率～清水と土砂流の掃流粒径比

3) 限界掃流力

図3.4.4において、砂粒の移動限界は以下のとおりである。

$$F = R \quad (\text{式3.4.2})$$

$$\frac{F}{R} = 1 \rightarrow \frac{C_d \alpha_1 d^2 \rho v^2 / 2}{\mu \alpha_3 (\sigma - \rho) g d^3} = 1 \rightarrow \frac{\rho}{\sigma - \rho} \cdot \frac{v^2}{g d} \cdot \frac{C_d \alpha_1}{2 \mu \alpha_3} = 1$$

ここに、 σ : 砂礫の密度(2.65)、 ρ : 水の密度(1.0)、 μ : 摩擦係数、砂の水中比重 $S = (\sigma - \rho) / \rho$ 、 g : 重力加速度、 d : 粒径、砂粒に働く流速を摩擦速度 u_* とすると、

$$\frac{\rho}{\sigma - \rho} \cdot \frac{v^2}{g d} = \frac{g R I}{S g d}$$

また、 $\frac{C_d \alpha_1}{2 \mu \alpha_3}$ は形状にかかわる係数であるため、土砂流の濃度に影響されないと考えると、高濃度土砂

流においてもシールズの無次元掃流力を(式3.4.3)を適用できるものとする。

$$g R I / S g d \approx 0.05 \quad (\text{式3.4.3})$$

ここに、 R : 径深、 I : 動水勾配、 σ : 砂礫の密度(2.65 g/cm³)、 ρ : 水の密度(1.0 g/cm³)、 S : 水中の砂礫の密度(= $(\sigma - \rho) / \rho$)、 g : 重力加速度、 d : 粒径。

(式3.4.3)に、 $R I g$ を固定として、清水中の S 、含水率30% (土砂流の密度 $\rho' = 1.50$) の土砂流中の S' から、清水中の限界粒径 d と土砂流中の粒径 d' の関係を求める。

$$\frac{S}{S'} = \frac{\frac{\sigma - \rho}{\rho}}{\frac{\sigma - \rho'}{\rho'}} d = \frac{\frac{2.65 - 1.0}{1.0}}{\frac{2.65 - 1.5}{1.5}} d = \frac{1.65}{0.77} d = 2.14 d$$

結果、含水率30%の土砂流中の限界粒径は、清水中の限界粒径の約2倍の粒径の砂礫が流下すると考えられる。

4) 限界浮遊粒径

土砂流の浮遊限界粒径をRubeyの浮遊砂の沈降速度式より求める。

$$w_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d + \frac{36 \vartheta^2}{d} - \frac{6 \vartheta}{d}} \quad (\text{式3.4.4})$$

ここに、 w_0 : 沈降速度、 σ : 砂礫の密度(2.65)、 ρ : 流水の密度、 g : 重力加速度、 d : 浮遊砂の粒径、 ϑ : 動粘性係数。

上式の動粘性係数にかかわる項を無視して簡略化すると次式となる。

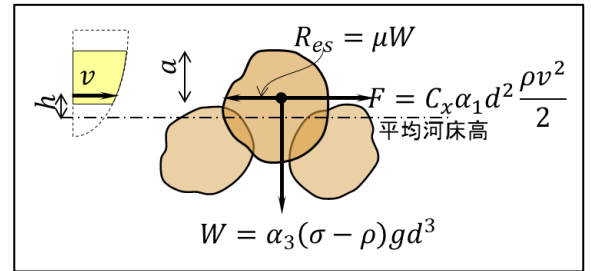


図 3.4.4 河床材料に働く流体力と抵抗模式図

$$w_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d} \quad (\text{式3.4.5})$$

浮遊条件は以下の通り

$$\frac{w_0}{u_*} < 1, u_* = \sqrt{ghI} \quad (\text{式3.4.6})$$

$$\frac{w_0}{u_*} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d}}{\sqrt{ghI}} = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) d}{3 h I}} < 1 \quad (\text{式3.4.7})$$

$$\frac{w_0^2}{u_*^2} = \frac{2 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) d}{3 h I} < 1 \quad (\text{式3.4.8})$$

$$d = \frac{3}{2} \frac{h I}{\frac{\sigma}{\rho} - 1} \quad (\text{式3.4.9})$$

上式で、 u_* ：摩擦速度、 h ：水深、 I ：動水勾配。

$h=3.0m$ 、 $I=1/20$ としたときの浮遊限界の土粒子の粒径を清水と土砂流で比較する。

清水の場合 $\rho = 1.0$

$$d = \frac{3}{2} \frac{3.0 \times 1/20}{\frac{2.65}{1.0} - 1} = 1.5 \frac{0.15}{1.65} = 0.136m$$

土砂流の場合 $\rho = 1.5$

$$d' = 1.5 \frac{0.15}{\frac{2.65}{1.5} - 1} = 1.5 \frac{0.15}{0.76} = 0.296m$$

この結果から、高濃度土砂流では、2倍以上の粒径の材料が浮遊することとなり、さらに高濃度化が進行する。

(2) 流木と土砂流の流下特性

1) 流木の流下特性

流木の流下特性を文献並びに他事例から推察する。

【流木の諸元】

- ・ 樹種：スギまたはヒノキを対象とする
- ・ 流木寸法
 - ・ 伐木時期の立木の高さは10～30m、胸高直径で20～30cm
 - ・ 立木長と流木長の比：40%～60%（出典：「土石流に伴う流木による災害とその防止軽減対策に関する考察」水原邦夫（水利科学、No. 552, 2016） → 流木の長さ： $L \approx 10m$ （4～18m）、直径 $D \approx 0.3m$

【流木の平面的挙動】

流木の平面的挙動については、「流木対策-実務入門」（「国際防災学会インタープリメント」において、ヨーロッパアルプス周辺地域における防災を目的としたハンドブック）に図3.4.4の様に示されている

流木の移動は概ね速度分布に依存している（Mazzorana, 2007）

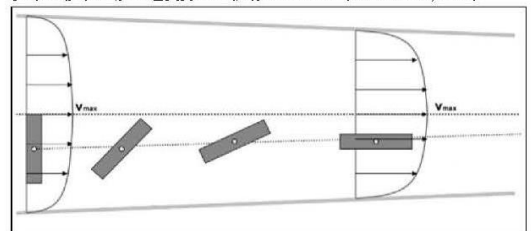


図 3.4.5 流木の平面的挙動（出典：流木対策）

これによれば、「個々の流木は、最大水位かつ流速が速い時は通常、流れる方向に向かってまっすぐ流れる。平面的な流速分布をみると、流木は、流速が大きい流路の中央部を流下する。流木が溪岸に近づくと、（一般的には河道の曲率と溪岸の突出部によって）水平回転を起こす可能性がある。」としている。

【流木の縦断的挙動の想定】

跳水やうねりの水面の凹部では、流木等の浮遊物が縦断的な回転挙動を見せることがある。

H30西日本豪雨災害において、榎川（広島県府中市）土石流発生時に流木が橋梁通過前に流木が起立する現象があった。リバーカヤックでは、波やうねりの凹部に端部を差し込み起立しバランスだけでとどまることができることから、流木においても同様に波やうねりの凹部突入した流木が起立することがあるものと想定される。

なお、激流における流木の縦断的挙動については、今後の研究課題である

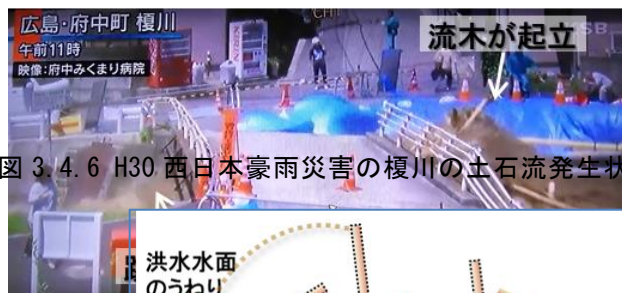
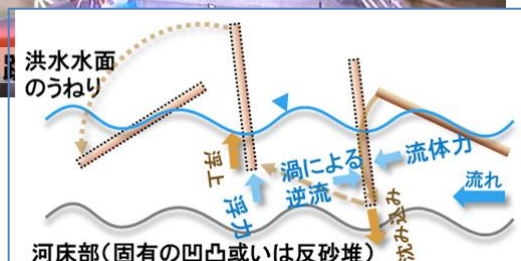


図 3.4.6 H30 西日本豪雨災害の榎川の土石流発生状況



2) 土砂流の破壊力

土砂流の破壊力として、流水中の物体に作用する力（静止から移動）ならびにこれによるモーメントで清水時と比較する。

【条件】

- 土砂流は土砂混入率30%を想定 密度 $\rho_s = 1.5 \text{ t/m}^3$
- 流木 樹種：スギまたはヒノキ、流木長： $L_D = 10\text{m}$ 、流木径： $D_D = 0.3\text{m}$ 、流木の密度： $\rho_D = 1.0\text{t/m}^3$ （木材工業ハンドブックでは生木で0.7～0.8。流木は水没するものもあることから、安全側で設定）、流木の集積条件： $n=1\text{本/単位幅}(B=1.0\text{m})$
- 表面流速： $v_s = v/0.85 \text{ m/sec}$ （平均流速の補正※出典「流量観測高度化マニュアル」土木研究所）
- 抗力係数： $C_d = 1.0$ に想定
- 作用位置：流水は静水圧の作用位置と考えて基面から水深 h の60%の高さに作用※参考：道路橋示方書・共通編。流木は水面位置で作用するものとした。

【作用する力】（図3.4.8のA-A面で流れが遮断されると想定） $F = \frac{1}{2}m \cdot v^2$ （式3.4.10）

- 清水時の流体力 $F_w = \frac{1}{2}\rho C_d B h v^2 = \frac{1}{2} \times 1.0 \times 1.0 \times h v^2 = 0.5 h v^2$ ($h = 3.0\text{m} \rightarrow F_w = 1.5 v^2$)
- 土砂流の流体力 $F_s = \frac{1}{2}\rho_s C_d B h v^2 = \frac{1}{2} \times 1.5 \times 1.0 \times h v^2 = 0.75 h v^2$ ($h = 3.0\text{m} \rightarrow F_s = 2.25 v^2$)
- 流木の流下力 $F_D = \frac{1}{2}\rho_D \left(\frac{\pi}{4} D_D^2 L_D\right) v_U^2 = \frac{1.0}{2} \left(\frac{\pi}{4} 0.3^2 \times 10\right) \times \left(\frac{v}{0.85}\right)^2 = 0.49 v^2$
- 流木を含む土砂流の流体力 $F_{S+D} = F_s + F_D = (0.75h + 0.49)v^2$ ($h = 3.0\text{m} \rightarrow F_{S+D} = 2.74 v^2$)

【河床からのモーメント】 $M = Fl$ （式3.4.11）

- 清水時のモーメント $M_w = F_w \cdot 0.6h = 0.5 h v^2 \cdot 0.6h = 0.30 h^2 v^2$ ($h = 3.0\text{m} \rightarrow M_w = 2.7 v^2$)
- 土砂流のモーメント $M_s = F_s \cdot 0.6h = 0.75 h v^2 \cdot 0.6h = 0.45 h^2 v^2$ ($h = 3.0\text{m} \rightarrow M_s = 4.1 v^2$)
- 流木を含む土砂流のモーメント

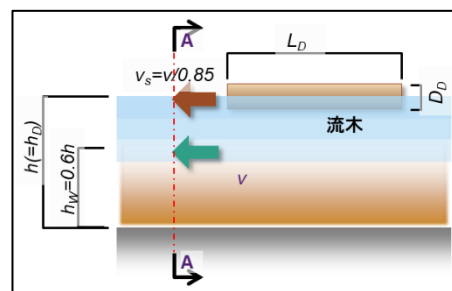


図 3.4.8 土砂流と流木による外力模式図

$$M_{S+D} = F_S \cdot \frac{1}{3}h + F_D \cdot h = 0.45h^2v^2 + 0.49hv^2 \times h = 0.94h^2v^2 \quad (h = 3.0m \rightarrow M_{S+D} = 8.5v^2)$$

この結果、土砂流は清水の1.5倍の力が作用し、流木を含む土砂流は水深3mで清水の1.8倍の力が作用する。単位面積あたりでは、流木は清水の13倍もの力が作用する。

また、モーメントで見ると土砂流は清水の1.5倍のモーメントが作用し、流木を含む土砂流は水深3mで清水の3倍のモーメントが作用する。

さらに、30cmの礫が土砂流に含まれて、浮遊しながら流下することがあるなど、土砂流の破壊力が極めて大きく、これに流木が加わることで、破壊力はさらに高まると考えられる。

3) 土砂流と流木が及ぼす現象まとめ

土砂流と流木が及ぼす現象として、浮力増加による浮遊砂沈降速度の低減と浮上粒径増による高濃度化、大量の流木を含むことによる水圧上昇による外力増加、高濃度化による流木流下距離の増加がもたらす流木危険領等の現象が生ずることが想定される。

(3) 河道閉塞

河道閉塞には幾つかのパターンがあると推定されるが、橋梁部の流木捕足をきっかけとした閉塞は今次洪水においても典型的な閉塞現象の一つと考えられる。橋梁部の流木捕捉状況や前項までの土砂流による巨石の運搬特性から、河道閉塞のプロセスは、以下の通りと推察される。

【河道閉塞のプロセス】

- ① 洪水流の流下（掃流砂を含む高濃度土砂流の流下、流木流下）
- ② 橋桁での流木捕捉（橋梁部の断面縮小、巨礫や土砂の停止）
- ② 河道閉塞（橋桁で流木と土砂を捕捉、土砂堆積で橋梁上流で河床を上昇、洪水が氾濫原を流下）
- ③ 土砂流氾濫（橋梁部での階段状の堆積で氾濫原への土砂流の流下）→平坦化（平常時の細砂流出により平衡河床となって河床を上昇）

河道閉塞のプロセスについては、今後の研究課題である。

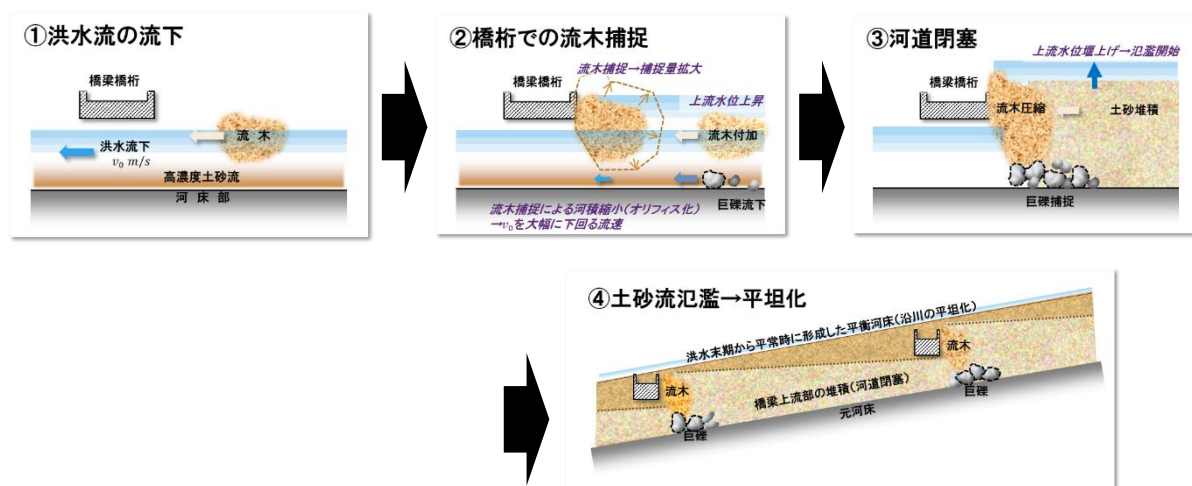


図3.4.9 河道閉塞のプロセスの想定

(4) 流れによる斜面崩壊

1) 花月川支川小野川での大規模崩壊発生の一要因

斜面崩壊と河川の洪水流下との関係について、九州北部豪雨で発生した花月川支川小野川で生じた大規模斜面崩壊を例にその関係を把握する。

小野川周辺は豪雨ではあったが、斜面崩壊箇所は点在しているだけで他の地点では大規模斜面崩壊発生はなかった。また、この発生要因は斜面内部の間隙水圧の上昇だけでは説明できない特異な事例であったと推察された。被災前の地形を確認すると、当該地区はかつての斜面崩壊跡地であり、斜面崩壊後の土砂が堆積し（崖錐）、河川の流路を変更している。この崖錐上に植林があり、低い河岸には護岸が築造されていた。

このことから、以下に被災要因を想定した。

- (ア) 航空写真被災前後の比較から、勢いを増した洪水が斜面下の湾曲部を流下する際に、直進して崖錐を侵食した。
- (イ) 崖錐によって支えられていた斜面が降雨により不安定化し、斜面基部の流失により一気に安定を失い、崩落して対岸まで土砂を堆積させたものと考えられる。

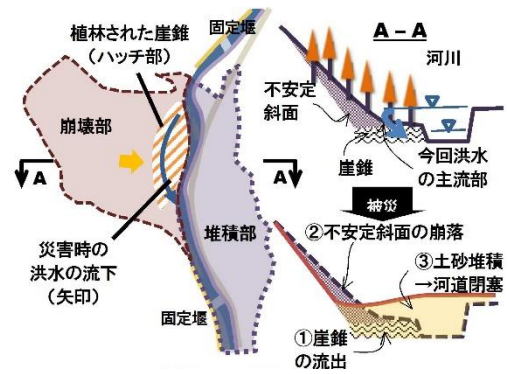


図3.4.10 被災要因分析図（小野川）

2) 朝倉地区の斜面崩壊多発の一要因

調査報告⁵⁾によれば、流木の発生源としては、溪畔林と河畔林で34%を占めている。流木発生と斜面崩壊が連動することから河川及び溪流沿いの斜面崩壊が全体1/3を占めている。

これらの斜面崩壊の発生要因としては、豪雨によって不安定化した斜面土塊の基部が、洪水或いは土石流による河岸侵食を引き金として崩壊したものと考えられる。

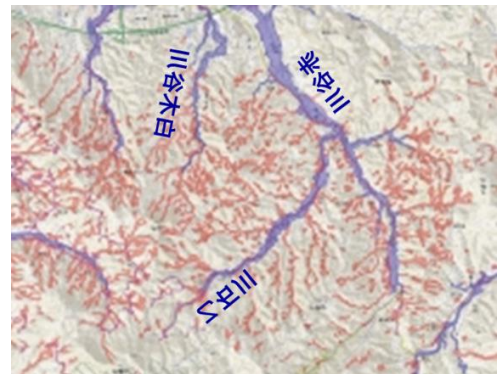


図3.4.11 崩壊斜面位置図（国土地理院）

(5) 氾濫原拡大・斜面崩壊誘発

被災直後の現地状況ならびに被災直後の航空写真等から、河道閉塞後、氾濫域が拡大し、斜面崩壊を誘発したプロセスを想定した。以下にプロセスを説明する。

- (ア) 河道埋塞後に溢水した洪水流は氾濫域を拡大、掃流力が低下し土砂を堆積させながら平坦な氾濫原を形成した。
- (イ) 氾濫原を新たな河道とした流れは、砂州（交互砂州、部分的に複列）を形成し、蛇行し、変曲点で水衝部となって河岸を侵食

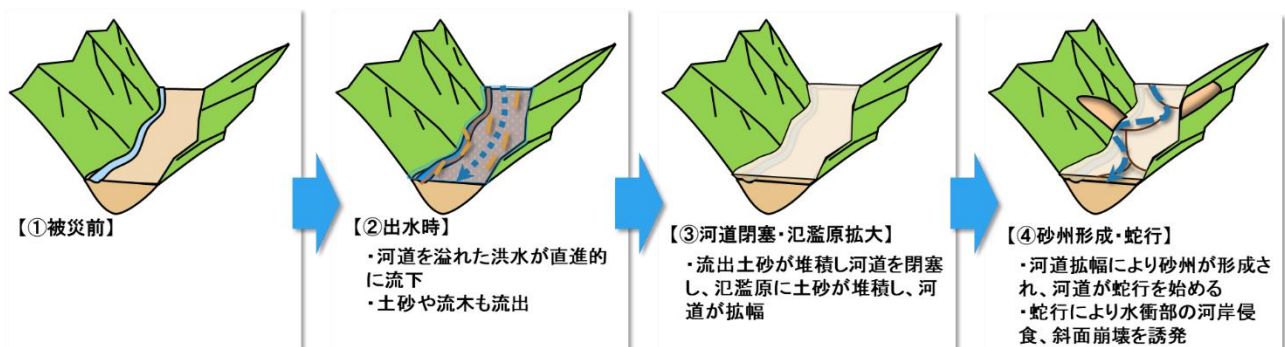


図3.4.12 土砂堆積の想定されるプロセス

(6) 洪水流出特性

1) 洪水流出特性

花崗岩流域の流出特性は、一般的に洪水がシャープとなる傾向にある。このため、多くの河川の流出解析（貯留関数）モデルにリザーブ定数（ $P=1/3$ ）がもちいられている。実際には、表面流出が層流となることはないため、表面流と中間流出との同時合流を表現するためにリザーブ定数を用いている。

中間流出が増大しやすい特性のため、鉄砲水的出水になりやすく、斜面内に間隙水圧が高まり、斜面崩壊を引き起こしやすい特性である。

2) 流下形態

杷木地区周辺の河川は急流で、洪水時の流速は 10m/sec 近くに達し、射流が発生して河床波は反砂堆が発生・移動、水面は大きくうねりを発生させていたと想定される。

表3.4.1 朝倉市杷木地区の主要河川の河川特性

河川	特性評価区間	河川幅	護岸高	河床勾配	流路形態
赤石谷川	乙石川合流点付近	15～10m	2～3m	1/50（約 1° ）	山際を流路とし、蛇行
乙石川	下流端～2km付近	10～3m	2～3m	1/20（約 3° ）	
白木谷川	下流端～2km付近	10～5m	2～3m	1/25（約 2° ）	

また、河岸侵食、斜面崩壊ならびに支川溪流の土石流によって急激に供給された土砂の河道

への流入は、天然ダム形成・決壊、段波等の発生要因になったものと想定される。

(7) 現状分析まとめ

花崗岩流域である杷木地区に長時間豪雨が継続したことで、洪水・土砂・流木の複合によって生じた様々な現象により、被害を拡大させたものである。

現状分析をまとめると以下のとおりである。

- ・記録的豪雨と風化花崗岩流域の特性により洪水を尖鋭化
- ・斜面崩壊、土石流の多発し、大量の土砂と流木を流出
- ・洪水は、高濃度の土砂流となって、巨石を輸送
- ・流木と土砂により河道を埋設し、洪水は直進し、沿川にも土砂を堆積させた
- ・沿川堆積した土砂に洪水が蛇行し、河岸侵食により斜面崩壊を誘発し、氾濫原を拡大させた
- ・洪水に土砂と流木が加わることで、洪水は凶器化し、沿川集落に多大な被害を発生させた

3.4.3 河道計画に関する提案

土砂流出を考慮した河道計画を考えるにあたり、考慮すべき事項を整理し、環境、利用面等から総合的に河道計画案を立案することが大切である。

(1) 河道計画立案に当たり考慮とすべき事項

被災した斜面は多く、砂防ダムのみで土砂流出を抑制することは困難なことから、土砂流出は継続することを前提とする。ただし、長期的にみると供給される土砂量は次第に減少していくことが想定されるため、河道計画の立案に当たっては、土砂供給量の変動することを与条件とし、過度な浸食・堆積現象を抑

制することを考慮すべきである。

また、北部九州豪雨の生起性が特異とは考えにくいことから、今回の豪雨の再来は十分に想定しておくことも重要である。その際には、大量の土砂や流木が流下する可能性があるため、超過洪水時の河道閉塞による土砂堆積が生じても被害が拡大しない工夫が必要となる。例えば、河道閉塞の要因の一つと考えられる橋梁等の横過部においては、巨石・礫や流木、塵芥が円滑に流下できる仕組みとするとともに、閉塞・溢流した場合においても、洪水流が河道に戻る工夫が必要である。また、このための方策としてEco-DRRの活用を図り、樹林帯による超過洪水時の流木・土砂の補足も積極的に導入する。

(2) 河道計画

1) 河道計画の基本的考え方

河道計画の立案に当たっては、①流域・河川の特性を踏まえること、②多自然川づくりを基本とすること、③総合土砂管理の視点を踏まえること、④縦断方向の連続性を確保すること、が大切となる。ここでは、特に、②③④の視点も踏まえ、特に、今次洪水における土砂・流木の流出を念頭に置いた河道計画の基本的考え方を縦断、横断、法線について整理する。河岸防御施設についても計画の考え方に触れる。

2) 縦断計画

縦断形状の考え方としては、堤内地の地形勾配、法線形状、横断形状を考慮した設定する必要がある。縦断形状の設定に当たっては、以下がポイントとなる。

- ・高流速および水位変動の抑制のために常流もしくは常流に使い流れて流下させることが望ましい。
- ・土砂堆積、河床の洗堀が生じにくい形状とすることが望ましい。

ただし、高速流等の抑制のため落差工を設置すると連続性を確保できなくなるため、落差工の落差（設置嘉数）や構造を慎重に検討する必要がある。また、土砂供給量には変動幅が大きいことが予想されることから、河道内に土砂堆積させる空間を配置するとともに（横断計画参照）、河床勾配の変化点においては土砂堆積の可能性について河床変動計算等により十分検討を行い必要がある。また、土砂供給量が減少した場合には、河床が低下する可能性もあることから、巨石等を活用した帯工の設置の検討が必要である。

3) 横断計画

横断計画では、整備計画等の目標流量を流下させる河道部（低水路部）と今次洪水クラスを含む超過洪水の溢水・流下を許容する堤内地領域（高水部）を有する複断面的谷底形状とすることが望ましい。また、高水部は土砂混入を考慮した被災流量を流下させることを念頭に置く。

ここで、低水路部の川幅と川の深さ（河床から河岸法肩）の設定は、洪水時の掃流力を支配し、河床に形成される地形（step-pool構造の形成と破壊、瀬・淵構造の形成）はもちろん、流送可能土砂量への影響を介して河床の安定性の支配要因となるので特段の注意が必要である。特に、まさ土の堆積層があり新たな河道の河床部分の粒度分布の細粒化が進んでいる場合には、河床高が変動しやすく、容易にstep-pool構造の形成が進まない可能性がある。河床低対策とstep-pool構造の形成促進のために、巨石群の設置等も検討する必要がある。また、川の深さは、川の利用（突発的な出水から河川利用者の安全も含む）にも影響を及ぼすことも考慮する。

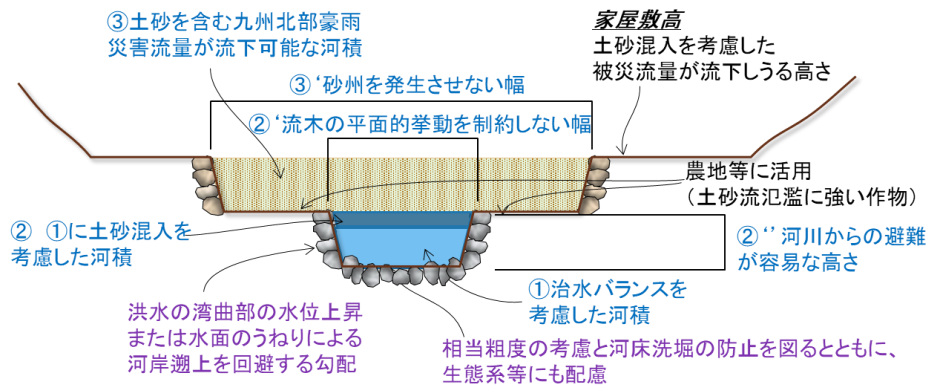


図3.4.13 横断計画イメージ

4) 平面計画

平面計画については河道部および超過洪水時に河道となる高水部について検討する必要がある。高水部については土地利用を考慮し、かつ、過度な湾曲を避けることが大切である。また、法線が山地斜面に近接すると、斜面下部の浸食し斜面崩壊を誘発する可能性があること、崩落した土砂が高水部・河道部を埋塞する可能性があるため、一定のバッファ域を確保して法線を設定することが必要である。また、土砂流出量や洪水量の大きな支流は本流の線形に影響を与えるため、支流の影響を考慮した平面計の設定が重要である。

河道部については、過度な湾曲は避け、洪水流の直進性を考慮することを基本としつつも、湾曲させる箇所では減勢効果を期待して急湾曲とし、外岸側の水位上昇と溢水に備え、河岸防御を強固にするとともに、溢水に備えて外岸川に樹林帯や拡幅区間を設置することが必要である。特に、山地斜面に近接する外岸部は、河岸侵食の進行が斜面崩壊を引き起こすので注意が必要である。

5) 河岸防御施設

河岸防御を考えるにあたっては、川幅、河道法線との整合を図りつつ河岸形状（法勾配等）を設定し、その上で護岸工等の設置を考えることが大切である。

射流域における激しい水位変動に備えて HWL まででなく、法肩から天端も含めて護岸および保護工を設置すべきかを検討する。特に、湾曲部においては水衝部での水位上昇・溢水に備えて河岸高を高くし、天端保護を行うことが必要になる。法覆工の素材・構造としては、粗度、強度、維持管理（補修性）面はもちろん、自然環境や景観の保全も踏まえ選定する。特に、自然環境については、水際だけでなく、河岸法面部の生物の生息、移動に配慮することも大切である。安定性にかかわる外力条件としては、水位条件（高水位時、水位低下時）、水圧（間隙水圧、揚圧力、高流水による負圧）、土圧はもちろん、高水部から低水部への落水時生ずる外力にも留意する。

(3) 横過施設

1) 橋梁及び取付道路

河道閉塞の重要な施設である河川の横過橋梁は、流木や塵芥を捕捉しにくい構造とする。閉塞した場合においても、溢水した洪水流が高水部を長距離にわたり流下せず、氾濫流を速やかに河道に戻すような構造鬱・樹林帯を導入することも大切である。橋梁取り付け道路は、盛土のような氾濫原の流下を妨げる構造としないことが大切である。架橋位置については、堰や落差工直・下流では跳水が発生するため橋梁はこの近傍には設けない。

2) 落差工及び堰、帯工

落差工・堰については、洪水流の減勢効果と河床勾配緩和に有効であるが、設置にあたっては、自然のステップ形状や伝統的な堰の構造を参考に落差部の洪水を減勢させる効果、落差部で洪水を溢れさせない構造、パイピングへの対応、魚類の遡上・降下に配慮する必要がある。また、帯工については、帯工下流の河床が低下しても落差が生じない構造とし、景観・自然環境に十分配慮する。

(4) Eco-DRR

ここまで述べた改修方法は、自然の営力を十分に考慮し、自然の形態を基本とし復旧・改修するという概念・方法論からすればEco-DRRの一部と考えてよい。さらに、Eco-DRRの概念で重要な暴露回避は危険度の少ない地区への家屋の配置という概念で包含されている。ここでは、Eco-DRRとして樹林帯の活用について言及する。樹林帯は平成9年の河川法改正で追加された河川施設であり、河川管理施設として設置しうる。

河川沿いで発生した流木は、全体の6%（国道交通省調査報告前出）と少ないこと、流体力への対応もある程度の胸高直径であれば対応可能であることから、樹林帯の活用性は高い。

樹林帯の治水機能としては、スクリーン機能（氾濫原のデブリの捕捉）・フィルター機能（土砂流の氾濫原流入の削減）、流速低減機能、浸食防止機能などがあげられる。また、環境的な機能としては、景観の向上、生物の生息場の提供、資材や食料の供給などの機能があげられる。

今回の災害に対して活用可能な樹林帯は上流部では湾曲部外岸側の越流洪水対策、寒水川の扇状地部で発生した段波対策としての縦断的な樹林帯、下流部におけるスクリーン機能、フィルター機能を活用した樹林帯などが考えられる。過去には竹、ハゼ、クス、エノキなどが植生されたが、材の利用と外力を考え、今日的な視点からの樹種の選定と維持管理システムが重要である。

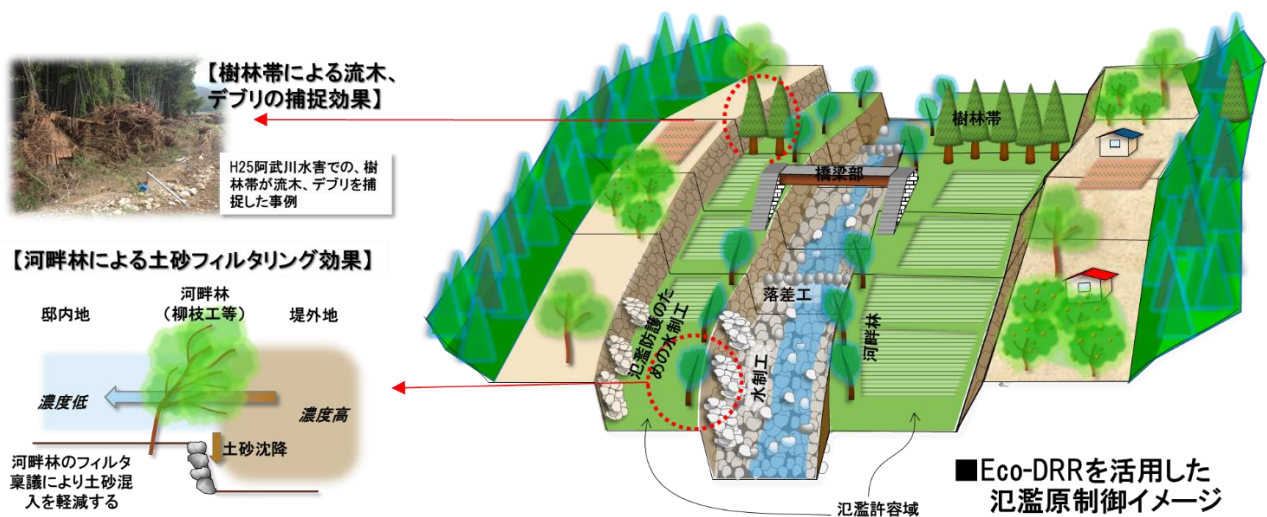


図3.4.14 Eco-DRR活用イメージ

参考文献

- 1) チームG(編集)、2014：岩石図鑑
- 2) 建設省河川局(監修)、1986：二訂 建設省河川砂防技術基準(案)調査編、P132
- 3) 木村俊晃、1978：貯留閘数法の最近の進歩、第22回水理講演会論文集
- 4) 高橋保、2004：土石流の気候と対策(近未来社)、P30
- 5) 九州地方整備局記者発表、2017/7/28：平成29年7月九州北部豪雨に伴う流木発生量（速報値）について

4 章 被災後の河川環境と多自然川づくり

4.1 災害後の河川環境の状況調査

4.1.1 はじめに

平成29年7月九州北部豪雨は朝倉市の山地河川に甚大な被害をもたらした。災害後の河川環境の変動を把握するために、白木谷川（花崗岩）、妙見川（泥質片岩）、岩屋川（安山岩）に調査地を設け、2017年9月（予備調査）、11月、2018年3月に調査を行った。河川の地質、特に栄養塩は、地質や崩壊地面積の影響を受けることが報告されており¹⁾²⁾、地質の異なる3つの流域を対象とし、斜面崩壊の影響や地質による影響を考察するために、流量、浮遊砂濃度（SS）、電気伝導度、陽イオン（Na, K, Mg, Ca）、陰イオン（Cl, SO₄, NO₃）、粒状有機物（POM）、溶存有機態炭素（DOC）、透水係数を測定し、時間的変動、本流と支流間の比較、河川間の比較を行った。

4.1.2 方法

調査は、白木谷川の本流と支流に1地点ずつ、妙見川の本流と支流に1地点ずつ、岩屋川の本流に1地点の合計5地点で行った。調査は、前の降雨から3日以上経っている平水時に実施した。河川流出量については、本流では断面流速法を用いて算出し、支流においては水深が浅く断面形状も複雑であるために希釈法を用いた。河床の透水係数は、深さ20–30cmにスロットが位置するようにパイプを設置し、変水位法を用いて1地点につき3か所で計測した。岩屋川では、透水係数や間隙水のサンプリングは行わなかった。また、現場においてpHメーター、ECメーターを用いてpHと電気伝導度、水温を計測した。

河川水と間隙水（深さ20cm）のサンプルを各調査地点で採取し、冷温状態を保ちながら実験室に持ち帰った。サンプルはろ紙（Whatman GF/F）を用いてろ過後、ろ紙上に残った残渣を105℃で24時間乾燥させ、その重さを計測し、SS濃度を算出した。また、ろ紙上の残渣を、マッフル炉を用いて550℃で3時間熱し、その後、残渣の重さを計測し、浮遊砂の有機物含量（OM率）を算出した。ろ過で得られたろ液を用いて陽イオンおよび陰イオンを、イオンクロマトグラフを用いて分析した。

4.1.3 結果と考察

(1) 河川流量

2017年11月と2018年3月の流量を比較すると、白木谷川と妙見川では、本流・支流ともに流量が減少していた。一方、岩屋川では流量の変動はみられなかった（図4.1.1）。

白木谷川と妙見川の調査地点では、災害時に堆積した土砂層が厚く、人工的掘削や出水により流路が動いて、まだ安定していない状態である。一方、岩屋川は災害時に堆積した土砂層は見られず、巨礫が多く、調査期間中に流路の変動はなかった。白木谷川と妙見川は、もともと

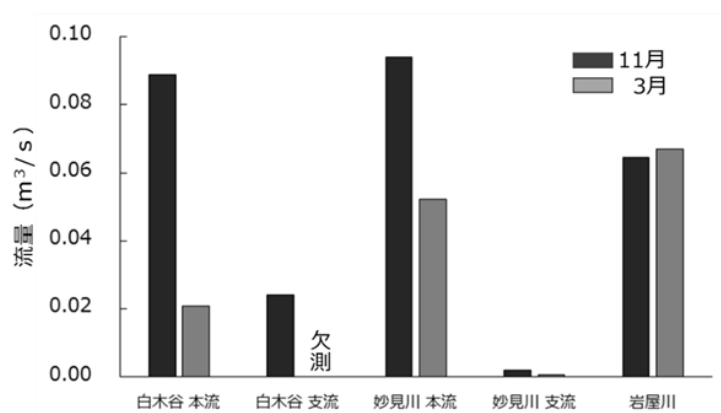


図 4.1.1 2017 年 11 月と 2018 年 3 月に測定した調査地点での河川流量

基底流量が季節性を持ち、岩屋川は安定している可能性もあるが、谷での土砂堆積量や流路の安定性が基

底流量の変動に影響している可能性もある。

(2) 浮遊砂量 (SS) 濃度

白木谷本流の3月、妙見本流の9月には、調査地点より上流で、流路内での重機を用いた作業が行われていたため、SS濃度が特に高くなった(図4.1.2)。白木谷川は、他の2河川に比べるとSS濃度が高い傾向にあり、支流においては上流での工事が実施されていないにも関わらず、本流よりも高い濃度を示した。支流は浅く幅広い流路横断面を持っていることが影響していると考えられた。濃度は高いが工事の影響を受けていない白木谷支流が、経時的な濃度減少を示しており、安定に向かっていることが示唆された。妙見川と岩屋川ではSS濃度が低く、経時の変化も少ないため、すでに安定していると考えられた(図4.1.2)。

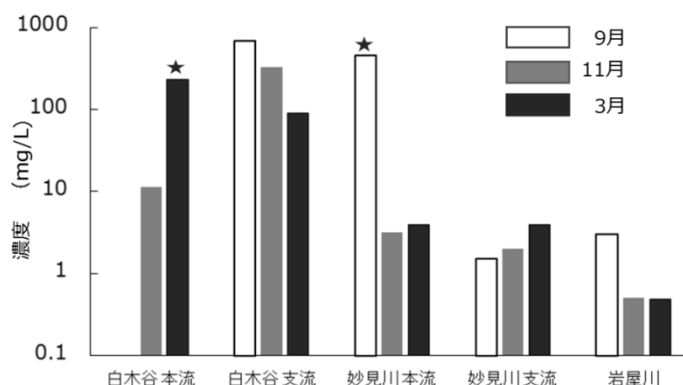


図 4.1.2. 2017 年 9 月、11 月と 2018 年 3 月に測定した調査地点での河川水の SS(mg/L). 星印は、調査時に直上流で工事が行われていた。縦軸は対数軸を示す。

間隙水は、11月と3月の調査でのみサンプリングを行った。間隙水は河川水に比べてSS濃度が高く、11月には白木谷支流を除いて、1桁以上高かった。3月のサンプリングでは、間隙水のSS濃度もすべての調査地点で下がり、河川水より高い傾向は保たれていたが、数倍程度であった。

(3) 浮遊砂の有機物含有量 (OM)

白木谷支流に着目すると時間の経過とともにSSに含まれるOM量が減少している傾向がある(図4.1.3a)。また、SS濃度が高くなるとOM率(%)は減る傾向にあり(図4.1.3b)、SS流出量が増えると無機物質の流出量が多くなることが示唆された。SS濃度が低い妙見川と岩屋川においては、OM率が高い傾向にあった。比較的SS濃度が安定していた妙見支流をみると、OM率は経時的に下がっている傾向もみられた。

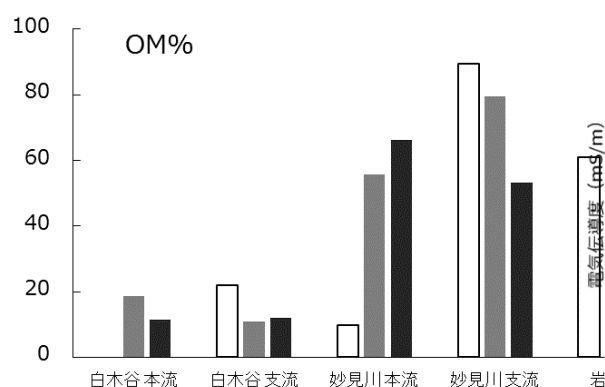


図 4.1.3 (a). 2017 年 9 月、11 月と 2018 年 3 月にサンプリングした河川に含まれた SS の有機物含有量 (9

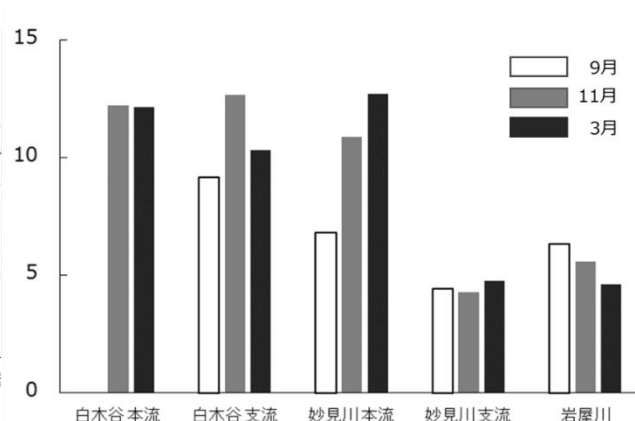


図 4.1.4. 2017 年 9 月、11 月と 2018 年 3 月に測定した河川水の電気伝導度(mS/m).

間隙水のOM率は約10%で河川水よりも低く、河川間を比べると本流・支流ともに白木谷川の方が高かった。SS濃度も白木谷の方が高く、図4.1.3bのような関係はみられなかった。また、どの調査地点におい

ても、11月に比べると3月の方がOM率が高い傾向にあった。

(4) 電気伝導度 (EC)

河川水のECは、3回の調査で値がばらついた調査地もあり、継時的、河川による傾向はみられなかった(図4.1.4)。妙見川では本流に比べて、支流のECが低い傾向がみられた。

間隙水のECは3月の未測定を行った。白木谷の間隙水のEC濃度が河川水に比べて高かったが、それ以外の地点では河川水と間隙水に違いはみられなかった。

(5) 硝酸態窒素濃度

硝酸態窒素濃度は、すべての調査地点において森林河川としては高い濃度をしめした(図4.1.5)。特に白木谷本流と妙見支流、次いで岩屋川で高い傾向がみられた。経時的にみると、11月より3月の硝酸態窒素濃度が低い地点が多く、栄養塩流出という観点からは安定に向かっていることが示唆された。ただし、これらのサンプリングは平水時のみ行われており、出水時の硝酸態窒素濃度はわからない。

間隙水の硝酸態窒素濃度は、妙見支流の3月を除いて、河川水よりも低かった。

(6) 透水係数

河床20cmの深さで、変水位(falling head)法を使って3月に測定した。白木谷川・妙見川ともに、本流に比べて、支流の透水係数が低かった(図4.1.6)。測定はしていないが、河床材料は支流と本流で明らかな違いはみられなかった。災害時に、本流の流量増加は支流に比べて大きく、河床かく乱深度も大きい。その際、細粒土砂が流され、本流の河床では比較的高い透水係数となったと推察される。一方、支流は上流から流れてきた土砂が堆積したまま、その後のかく乱が小さかったと考えられる。

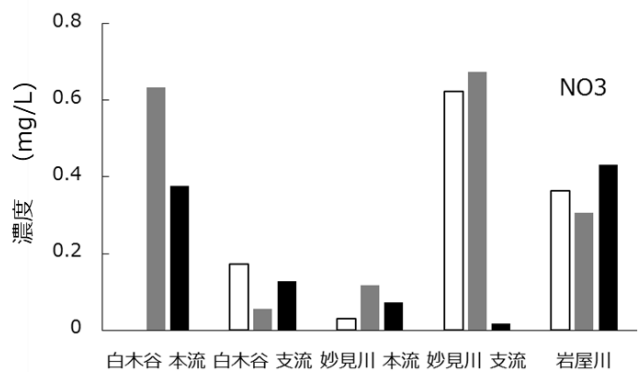


図 4.1.5. 2017 年 9 月、11 月と 2018 年 3 月に測定した河川水の硝酸態窒素濃度(mg/L)。

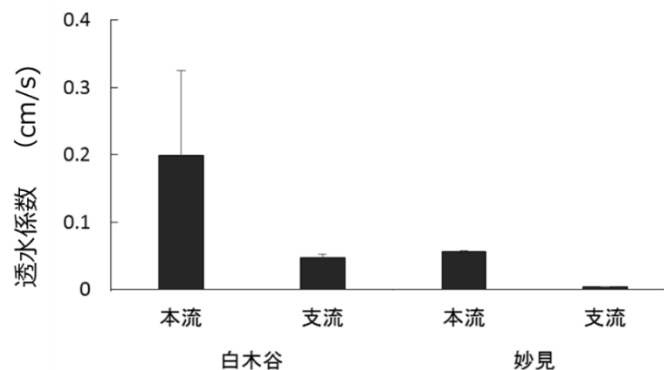


図 4.1.6. 3 月 15 日に測定した透水係数。Error bar は標準偏差 (n=2~3)。

4.1.4 まとめ

これら2017年9月から2018年3月に行った3回の調査の結果から、調査対象とした災害を受けた河川の環境は経時的に変化していることが示唆された。SS濃度や硝酸態窒素濃度をみると、全体的には河川の水質環境は安定に向かっていることが考えられるが、河川(地質)やサイズ(本流・支流)によるばらつきが多かった。地質間の流量の変化の違いや、異なる河川サイズ間の透水係数の違いから、地質や河川サイズによる影響が示唆されるが、これらを考察するには、継続した調査が必要である。

参考文献

1) 永礼英明, 藤井滋穂, 宗宮功, 芹澤佐和子, 2003, 森林河川水質と集水域内地質・植生との関係の評価,

環境工学研究論文集40:501-506

- 2) 福島武彦, 松重一夫、1995, 山林河川における流出特性と水質の関係について, 水環境学会誌 18(11): 909-916

4.2 土石流が発生した溪流の河道内環境特性と底生動物の初期的状況

4.2.1 はじめに

土石流が発生した溪流では、生息基盤となる河床材料が移動するため、そこに生息する底生動物は壊滅的な影響を受ける(Lamberti et al. 1991; Kiffney et al. 2004; Snyder & Johnson 2006). その後、他所からの移入・定着により底生動物群集が再構成されるが、溪流のステップ・プール構造の消失等、河川内の物理特性が大きく改変されるため、定着は影響を受ける(たとえば、Benda et al. 2003; Gimi et al. 2003). 長期的に見た場合には、河道への土砂供給と滞留土砂の移動が、その場所や下流域での河道内のハビタット異質性を増すことで、河川生物の多様性を維持する要因にもなりうる(Benda et al. 2003; Bibly et al. 2003).

溪流河道に滞留する土砂の特性は表層地質の影響を受けるために(たとえば、田代・辻本 2015), 土石流時の河道内の土砂移動も、その後の河道内物理特性の変化も、地質によって異なると考えられる. 2017年7月に筑後川流域で発生した九州北部豪雨では、複数の溪流で土石流が発生した. 今回の土石流は複数の地質(花崗岩(花崗閃緑岩を含む), 変成岩(泥質片岩), 安山岩)に渡っており、地質が異なる河川間で、土石流後の河道内物理特性の状況も異なると考えられる.

一方、生物の特性によっても、土石流後の溪流への移入パターンは、様々であると考えられる. 生物によっては、土石流発生時に生活上陸上にいたものが河川へ回帰する場合もある. 生活史の中で飛翔するフェーズをもつ生物の場合には飛翔による他の溪流からの飛翔移入もあるものの、陸上・空中に出ない生物の場合には、土石流が起こらなかった接続する細流や下流の影響が及ばなかった地点からの水を伝っての移入に限られる. 土石流後の初期的な変化としては、このような生物の移入パターンと先に述べたハビタットの状況が影響すると考えられる.

今回の九州北部豪雨は、数百年発生がなかった規模と考えられる. 今回の豪雨が、河川性生物にとって過去の同規模の豪雨と異なる面があるとする、河川が人為的に改変された後の豪雨であることである. 溪流性生物は陸や物理特性が違ふより大きな規模の河川によって隔離されるだけでなく、人工的な横断工作物によっても移動を阻害されることになる. また、供給源の質や量の配置が人為影響により変化している可能性もある.

我々は、上記を考慮しつつ、土石流が発生した溪流において、ハビタットの状況の変化と、底生動物群集の変化について調査を開始している. ここでは、まず地質ごとに土石流が発生した溪流の河道内物理特性を記載する. また、底生動物の侵入・定着について、サワガニ*Geothelphusa dehaani*を中心とした調査と、その他の断片的な観察の結果を基に延べ、今後の河川生態系モニタリングについて議論する.

4.2.2 方法

調査地

白木谷川流域(花崗岩), 乙谷川流域(花崗岩), 妙見川(変成岩), 宝珠山川(安山岩)の流域内の集水面積4km²以下の地点に調査地を設定した(表4.2.1). 調査地は、それぞれ、土石流発生前の

河床と比較して、河床が低下したところ(浸食)および上昇したところ(堆積)に配置した. また、周辺の土石流が起こらなかった河川において、対照として花崗岩2地点、変成岩2地点、安山岩2地点を設定し

表 4.2.1 調査地一覧

調査地 記号	河川	集水域 地質	記載
花C1	(名称不詳)	花崗岩	比較対照(土石流なし)
花C2	(名称不詳)	花崗岩	比較対照(土石流なし)
花I1	白木谷川	花崗岩	土石流(堆積部)
花I2	白木谷川	花崗岩	土石流(浸食部)
花I3	白木谷川支流	花崗岩	土石流(堆積部)
花I4	白木谷川支流	花崗岩	土石流(堆積部)
花I5	乙石川(支流)	花崗岩	土石流(浸食部)
変C1	下横山川	泥質片岩	比較対照(土石流なし)
変C2	(名称不詳)	泥質片岩	比較対照(土石流なし)
変I1	妙見川支流	泥質片岩	土石流(浸食部)
変I2	妙見川支流	泥質片岩	土石流(浸食・堆積移行部)
変I3	妙見川支流	泥質片岩	土石流(堆積部)
安C1	巨瀬川	安山岩	比較対照(土石流なし)
安C2	小塩川	安山岩	比較対照(土石流なし)
安I1	本迫川(宝珠山川支流)	安山岩	土石流(浸食部)
安I2	本迫川(宝珠山川支流)	安山岩	土石流(浸食部)
安I3	本迫川(宝珠山川支流)	安山岩	土石流(浸食部)

た。

ハビタットの物理特性

2018年3月23-29日に調査を行った。各調査地点の上下流方向に200mの調査区を設定し、区間内の水域部に30個のコドラート(1m×1m)をランダムに置いた。コドラートの中心の水深と流速(6割水深)を測定し、河床材の粒径区分ごとの被覆割合を記録した。粒径区分は、砂(<2mm)、細礫(2-4mm)、中礫(4-64mm)、大礫(64-256mm)、巨礫(256mm<)、および岩盤とした。

底生動物の生息状況

2017年8月18日および9月14日に調査地・花I3で、10月27日に調査地・花I2、花I3、変I1、変I3において、底生動物のを見つけ取りおよびDフレームネットを使用したキックサンプリングにより断片的な底生動物の観察を行った。2018年3月23-29日には、全調査地においてキックサンプリングにより断片的な観察を行った。この2018年3月のキックサンプリングは、各調査地においてハビタットの物理特性を記録したコドラート30カ所付近で各20秒ずつ行い(合計600秒、目合い0.25mm)、調査地ごとの努力量を一定にした。採集した底生動物は、70%のエタノールで固定した後、同定した。同定は、できる限り下位分類階級まで行った。ただし、ユスリカについては、科でとどめた。

2017年8月18日には調査地・花I3で河床を歩き回るサワガニについて、性別、雌では卵または仔の存在を確認した。9月14-30日には、調査地・花I3および花C1において、歩いているサワガニまたは川岸の石をめくりその下にいるサワガニを採集し、甲幅を1mm単位で計測した。10mm以上の個体は雌雄および雌では卵または仔の存在を記録した。10月20日には、調査地・花C1(対照)、花I2(浸食)、花I3(堆積)、変C2(対照)、変I1(浸食)、変I3(堆積)において、サワガニのを見つけ取りと、Dフレームネットによる採集を行った。を見つけ取りは、対照地点20分、土石流地点60分の時間に、歩いているサワガニまたは川岸の石をめくりその下にいるサワガニを採集した。サワガニの小型個体はおもに瀬の間隙に多いために(池上龍ほか未発表データ)、比較的流速の速い部分において、Dフレームネットを用いたキックサンプリングを行った。これは、対照地点では3地点、土石流地点では30地点で、各20秒行った。採集したサワガニは、甲幅を1mm単位で計測した。10mm以上の個体は雌雄を腹部の幅を見て確認し、腹部の卵または仔の存在を記録した。

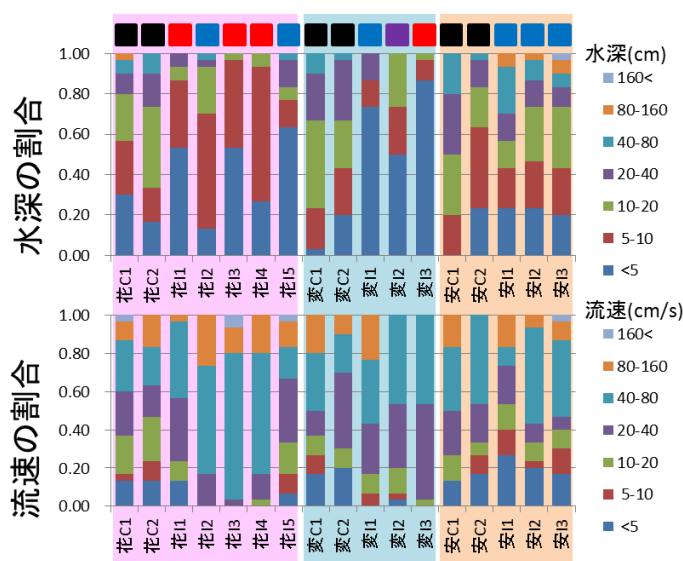


図 4.2.1 各調査地点における水深・流速のポイント数割合。上の色印は、黒：対照：赤：堆積，青：浸食，紫：堆積・浸食移行を示す。

4.2.3 結果と考察

河道内物理特性

土石流が発生した溪流は、土石流は発生していない溪流(対照)と比較して、異なった特性を示した。

花崗岩では、水深が浅く（図 4.2.1 上），流速が速く（図 4.2.1 下）比較的均質となった．その傾向は，とくに堆積部で強かった．浸食部では岩盤が露出し（図 4.2.2 上），そのために，岩盤の形状に応じて，堆積部と比較すると流速が遅い場所が形成される傾向があった．また，表面の 50%以上が 4mm 以下の細粒河床材で占められた．

変成岩は，もともと花崗岩と比較すると（対照どうしの比較），砂・細礫が少ない傾向がある（図 4.2.2 下）．土石流後，堆積傾向にあるところでは，花崗岩と同様，水深が浅く（図 4.2.1 上），流速が速く（図 4.2.1）比較的均質となった．砂・細礫の割合は対照と比較すると高くなるものの，花崗岩よりは低く 30%程度であり，中礫の被覆割合が増加した（図 4.2.2 下）．浸食部では，岩盤が露出した（図 4.2.2 上）．

安山岩（浸食）は，岩盤が露出した地点が存在したが（図 4.2.2 上），河床材比率は，対照と類似し（図 4.2.2 下），水深や流速の異質性もあり，緩流部も存在した（図 4.2.1）．安山岩は，他の地質と比較して，土石流後の改変が大きくないように思われるが，地質の影響かどうかの判断は慎重であってもよいだろう．宝珠山川周辺は，他の調査河川と比較して斜面の土砂崩壊が少ない（たとえば，国土地理院，2017）．斜面の崩壊が他河川と同程度おこっていたとすると，もう少し細粒分が増えるなどの現象が起こったかもしれない．

サワガニおよびその他河川生物の確認状況

豪雨から 1 ヶ月後の 2017 年 8 月には，調査地・花 I3 において，河床を歩き回るサワガニが観察された．これらの個体は，ほとんどが雌で卵を抱いていた．9 月の，花 I3（土石流溪流）および花 C1（対照）のサワガニの年齢群の割合を図 4.2.3 に示す．花 C1 におけるサワガニ幼体の甲幅は，4-5mm，8-9mm，11-13mm にピークがあった．これは，それぞれ，その年生まれ

（0+），前年生まれ（1+），前々年生まれ（2+）であると考えられる（荒木・松浦，1995 参照）．図 4.2.3 では，成体については雌雄別に示しているが，土石流が発生した溪流では，成体とくに雌の比率が高かった．春に産卵したサワガニの雌は，卵を抱き，孵化まで陸上（林床）で過ごす（一柳英隆未発表データ）．孵化間近になると川に来て，仔ガニを放す（おもに 8 月をピークとするものの 12 月くらいまで観察されることがある）．7 月の豪雨時には，陸上におり，流出を免れた個体が 8 月以降，河川に出現したものと思われる．成体の雄は，7 月には一部個体が陸にいてるものと思われるが，それも徐々に河川に現れると思われる．2017 年 9 月時には，すでに雄個体も観察されてお

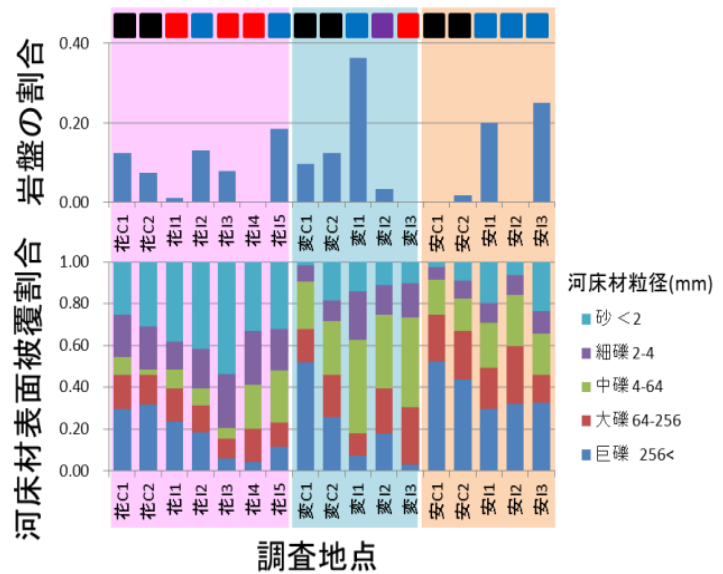


図 4.2.2 各調査地点における岩盤（上）と河床堆積土砂中の粒径カテゴリー（下）の割合．上の色印は，図 4.2.1 と同様である．

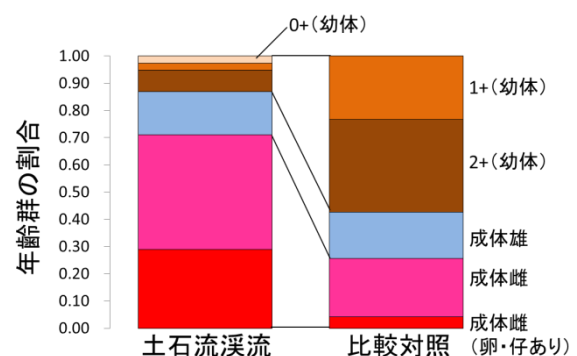


図 4.2.3 調査地・花 I3（土石流溪流）および花 C1（対照）の 9 月調査時における年齢群（サイズ群）および雌雄の割合

り，10月や翌年（2018年）3月には，雄と雌とには大きな個体数差は認められなかった。

サワガニの幼体，とくに0+および1+は溪流の瀬で多く観察される（池上龍ほか未発表データ）．また，これらのサイズの個体はほとんど陸上で過ごさない（小林・Vazquez-Archdale 2017）．花崗岩・変成岩の土石流発生溪流で1+個体がまったく確認されないのは（図4.2.4中），このサイズの個体がすべて水中にあり，土石流で流失し，陸上からの個体の移入がないことを示している。

土石流発生溪流では，花崗岩でも変成岩でも成体が見つかるために（図4.2.4右），抱卵した雌による仔ガニの放出は起こっていると思われるが，10月には，0+個体の密度はあまり高くなかった（図4.2.4右）．とくに花崗岩では，0+個体はまったく捕獲されず，生まれた仔ガニは定着できなかったものと考えられる．土石流後の花崗岩の溪流は，砂に覆われ，幼体が隠れる場所が存在しないことが大きな要因であろう．

花崗岩・変成岩の土石流発生溪流での8月の断片的な観察で確認された河川性生物は，サワガニが多く，その他の流水性生物はまったく確認できなかった．本来止水に生息するナミアメンボ *Aquarius paludum* やハイロゲンゴロウ *Eretes sticticus* が止水部で観察されたのみであった．10月になると，ハリガネムシ類が確認された．また，川岸の砂の堆積部では，クロコウスバカゲロウ *Myrmeleon bore* の幼虫が確認された．ハリガネムシ類は，豪雨がかった7月には陸上昆虫の体内にあり，クロコウスバカゲロウは成虫で陸上にいる時期に合致する．サワガニとあわ

せて考えると，土石流後の溪流へのもっとも初期の移入は，生活史上，河川を離れていた種が重要な役割を果たすと考えられる．

2018年3月には，すべての地点で底生動物が確認された．各地点で確認できた底生動物のタクサ数を図4.2.5に示した．土石流が起こった河川における確認タクサ数は，安山岩でもっとも多かった．安山岩で確認タクサ数が多いことは，図4.2.1で示したとおり，水深や流速の異質性があり緩流部も存在すること，近隣に土石流を受けていない河川も存在し，そこからの移入があることによると思われる．一方で，花崗岩の河川は，他の地質の河川と比較して最も少なかった．花崗岩は，環境の均質性が高いことや，細かな河床材が多いこと（さらにそれらが常に動いている）が要因であろう．

土石流発生溪流後の底生動物調査において，花崗岩，変成岩では特定のタクサのみが確認された．個体数が多いものは，ユスリカ科とシロハラコカゲロウ *Baetis thermicus*，ブユ類であった．小型で年多化のこれらの種は，移入が早いのかもしれない．また，造網性トビ

ケラ類であるシマトビケラ類が多くて確認されることにも触れておきたい．造網性トビケラ類は，攪乱後遷移していく中で比較的遅くに現存量が大きくなるグループとされるものの（津田 1962），今回は

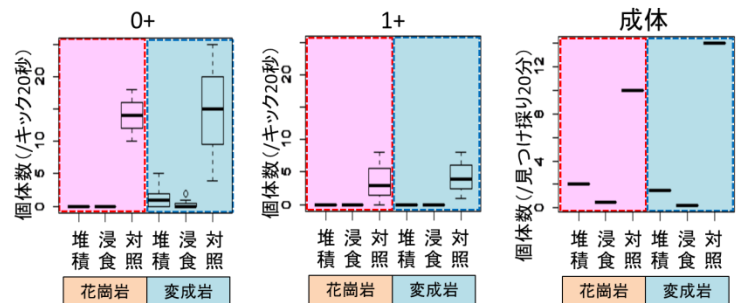


図 4.2.4 サワガニの密度の年齢群ごとの密度の比較．花崗岩堆積は調査地・花 I3，浸食は花 I2，対照は花 C1，変成岩堆積は，調査地・変 I3，浸食は変 I1，対照は変 C2．

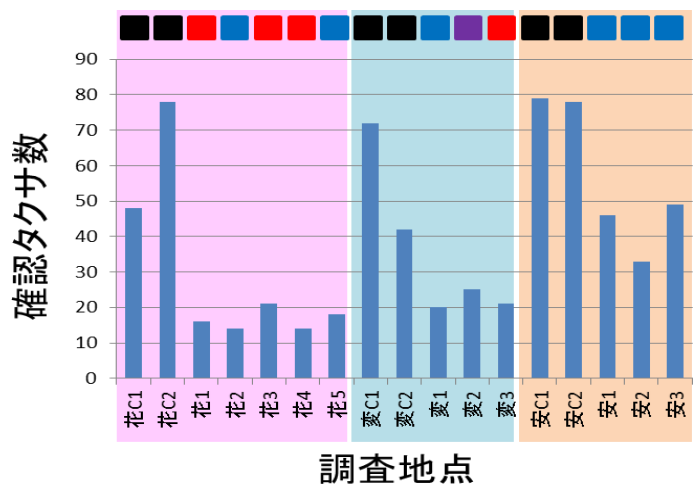


図 4.2.5 各調査地点における底生動物の確認タクサ数．上の色印は，図 4.2.1 と同様である．

比較的早い段階から確認された。現地での観察では、とくに變成岩にみられる石表面の段になったところに網巢を作っていることが観察された。礫間ではなく、礫表面に造る場合には、安定性はあまり関係ないのかもしれない。また、2018年3月時点では、サワガニの個体数は、花崗岩と變成岩で違いが認められなかった。變成岩は、表面状は細砂がそれほど多くないが（図 4.2.2 下）、その下の層はかなり細かな材料（泥）が多く、間隙が固められていた。これらの間隙がないことが間隙性底生動物の定着を少なくする要因であろう。

4.2.4 まとめと課題

土石流が発生した溪流では、河川区間内における水深・流速の均質化（と緩流部の消失）と、河床細粒分の増加が確認され、またその状態は地質により違いがあった。河川性生物の再侵入は、生活史特性や分散特性、生活型により相違があり、定着には地質の違いが影響していると考えられた（安山岩で早く、花崗岩で遅い）。

生物の移動性には、様々な要因が関連する。溪流性の生物にとって、ごくまれに起こる土石流も長期の中では起こりうる事象であり、溪流に生息する生物はの中で進化してきたはずである。しかし、たとえば、良い生息地が隔離されれば、分散する個体は移出し、近隣から移入が少ない（あるいはない）ために遺伝的に分散する性質を持っている個体は減少する。そのため、溪流の良い生息地が散在し、多様性が高い溪流が（人為的な改変により）少なくなっているなら、地域の個体群における移動分散能力全体が低下し、それが土石流溪流への再侵入を遅らす原因になるかもしれない。また、もともと平坦地や本流により物理的に隔離されている上、様々な人工物がバリアになるなら、回復は遅れたり、回復しなかったりするだろう。定着には、河川のハビタットの状況が影響するので、それらとともに河川性生物の回復をモニタリングし、生物相の回復の過程を人為的に阻害しているようであるなら、状況によって補償する手段を考えるべきかもしれない。

■引用参考文献

- 荒木晶・松浦修平（1995）サワガニの成長。九州大学農学部学芸雑誌 49: 125-132.
- Bilby R.E., Reeves G.H. & Dolloff C.A. (2003) Sources of variability in aquatic ecosystems: factors controlling biotic production and diversity. *In*: Strategies for Restoring River Ecosystems: Sources of Variability and Uncertainty in Natural and Managed Systems (eds. Wissmar R.C. & Bisson P.A.). pp.129-146. American Fisheries Society, Bethesda, MD.
- Benda L., Veldhuisen C. & Black J. 2003. Debris flows as agents of morphological heterogeneity at low-order confluences, Olympic Mountains, Washington. Geological Society of America Bulletin 115: 1110-1121.
- Gomi T., Sidle R.C., Woodsmith R.D. & Bryant M.D. (2003) Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. *Geomorphology* 51: 225-242.
- Kiffney P.M., Volk C.L., Beechie T.J., Murray G.L., Pess G.R. & Edmonds R.L. (2004) A high-sensitivity disturbance event alters community and ecosystem properties in West Twin Creek, Olympic National Park, Washington, USA. *American Midland Naturalist* 152: 286-303.
- 小林哲・Vazquez-Archdale M. (2017) サワガニの生活史を土壌動物と河川生態学の観点から見直す試み。日本生態学会第64回全国大会講演要旨 <http://www.esj.ne.jp/meeting/abst/64/P2-C-108.html> (2018年9月10日確認)
- 国土地理院（2017）平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図。

<https://saigai.gsi.go.jp/3/20170726handokuzu/handokuzu.png> (2018 年 9 月 10 日確認)

Lamberti G.A., Gregory S.T., Ashkenas L.R., Wildman R.C. & Moore K.M.S. (1991) Stream ecosystem recovery following a catastrophic debris flow. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48: 196-208.

Snyder C.D. & Johnson Z.B. (2006) Macroinvertebrate assemblage recovery following a catastrophic flood and debris flows in an Appalachian mountain stream. *Journal of the North American Benthological Society* 25: 825-840.

田代喬・辻本哲郎 (2015) 流域地質からみた河床材料と底生動物. *応用生態工学* 18:35-45.

津田松苗 (編) (1962) 水生昆虫学. 北隆館, 東京.

4.3 被災河川における魚類の生息状況

災害によって、河川に生息する魚類も大きな影響を受けたと考えられる。また、今後の復興においての多自然川づくりにおいては、魚類に代表される河川生態系を考慮した実施が望まれる。ここでは、災害後の被災河川における魚類の生息状況について調査した結果を報告する。

4.3.1 調査方法

魚類の生息状況についての調査は2つの方法を用いた。1つは直接捕獲や目視によるカウント調査で、もう1つは採水による環境DNA調査とした。

(1) 直接捕獲・目視によるカウント調査

図 4.3.1 で示す 8 地点にて、2017 年 7 月～12 月に、電気ショッカーにより魚類相の調査を行った。ただし、佐田川については、水深が深く電気ショッカーによる調査が行えなかったため、潜水により目視確認を行った。調査範囲はいずれも 300m～2km ほどの範囲で、20 分～90 分ほどの時間を要した。

(2) 採水による環境DNA調査

図 4.3.2 で示す 17 地点にて、2017 年 12 月に採水を行い、いわゆる環境 DNA による調査を行った。採水は各地点で 500ml 前後とした。

4.3.2 結果・考察

(1) 直接捕獲・目視によるカウント調査

各調査地点における確認魚種と個体数を表 4.3.2.1 に示す。黒川源流は土砂が堆積・流出した状況であったが、かろうじてタカハヤを 1 個体確認した。佐田川は、見た目上は被災の痕跡は少なく、実際にタカハヤ、カワヨシノボリ、カワムツの確認があった。妙見谷東俣は著しく土砂が堆積し、流れる水もほとんどが伏流しているような状況であり、魚類の確認はなかった。白木谷西股は、砂の堆積が激しく、魚類の確認はなかった。白木谷西股下流もやはり砂の堆積が著しかったが、カワヨシノボリを 1 個体確認した。乙石川は被災が激しい上、復旧工事により水も濁り、魚類の確認はなかった。境谷川は、景観上被災の痕跡はあまりなく、実際に、タカハヤ、カワヨシノボリ、ドンコ、カワムツの 4 種を確認した。岩屋川は被災の痕跡が残るものの、大石や巨岩が多く、魚の逃げ場や生息場が確保されたためか、タカハヤ、カワヨシノボリ、ドンコ、カワムツの 3 種を確認できた。

(2) 採水による環境DNA調査

各採水地点におけるDNA検出魚種を表 4.3.2.2 に示す。黒川・佐田川流域（A～E）では、おもにタカハヤ、ヨシノボリ類、ドンコ、カワムツの検出があった。また、下流のダムから遡上してきたと思われるコイの検出もあった。妙見谷流域（F～G）では河川での検出はなかったが、ため池に多くの止水性の魚種が生息していることが示唆された。白木谷流域（H～I）では魚種の検出は一切なかった。赤谷流域（J～L）では、タカハヤの検出があったのみであった。筑後川本流（M）では、本流に生息するとされる数多くの魚種の検出があった。境谷川（N）は、小河川に一般的なタカハヤ、ヨシノボリ類などの検出があった。大肥川水系（O～Q）でもやはり中規模～小河川に典型的な魚種の検出があった。いずれも直接捕獲・目視によるカウント調査と齟齬はなかった。

4.3.3 まとめ

被災河川では、魚類も大きな影響を受けたことが示唆された。特に、白木谷～赤谷流域は激しく、せいぜいタカハヤやカワヨシノボリが数匹～数十匹のレベルで生残しているだけと考えられる。また、妙見谷のため池で多くの止水性魚種が確認されたことから、ため池で生息する魚種は、河川の河道で生息する魚種に比べると影響を比較的受けにくかったと考えられる。

今後は、生残した個体の繁殖や、筑後川本流からの移入などにより魚類相が徐々に復活することが予想される。しかし、河川工事が恒常的に行われている場所や高い堰などの遡上障害がある場所では、復活が遅れると考えられる。

全般に、直接捕獲・目視によるカウント調査と環境DNA調査に齟齬はなかった。環境DNA調査のメリットとしてはため池や筑後川本流など直接調査が行えないような場所でも魚類相をひろえたことがある。ただしデメリットとしては、費用と時間がかかることが挙げられる。またヨシノボリ類を区別できなかったり、ヌマチチブをチチブとして検出するなど、同定の解像度に多少の問題が見られた。



図 4.3.1.1 採捕および潜水目視によって調査を行った範囲

表 4.3.2.2 各採水地点における DNA 検出魚種

採水地点	DNAを検出した魚種
A 黒川源流	タカハヤ
B 黒川下流	なし
C 佐田川下流	タカハヤ, ヨシノボリ類, ドンコ, コイ
D 疣目川下流	タカハヤ, ヨシノボリ類
E 佐田川	タカハヤ, ヨシノボリ類, カワムツ
F 妙見谷ため池	タカハヤ, ドンコ, ウグイ, コイ, ニゴイ, ギンブナ, ゲンゴロウブナ
G 妙見谷	なし
H 白木谷西又	なし
I 白木谷東俣	なし
J 乙石川	なし
K 赤谷川中流	タカハヤ
L 赤谷川下流	なし
M 筑後川本流	ウブナ, オイカワ, ニホンウナギ, ムギツク, イトモロコ, コウライモロコ, ヌマチチブ, ゼゼラ, サツキマス, ニジマス, ナマズ, アユ, ギギ
N 堺谷川	タカハヤ, ヨシノボリ類, ドンコ, カワムツ
O 大肥川	タカハヤ, ヨシノボリ類, ドンコ, カワムツ, コイ, ギンブナ, ゲンゴロウブナ, オイカワ, ニホンウナギ, ムギツク, イトモロコ, ナマズ
P 宝珠山川	タカハヤ, ヨシノボリ類, ドンコ, カワムツ, コイ, ギンブナ, ムギツク
Q 岩屋川	タカハヤ, ヨシノボリ類, カワムツ

4.4 筑後川水系内の淡水魚類の潜在分布モデルの構築と災害地域内の魚類相の推定

4.4.1 はじめに

平成29年7月九州北部豪雨（気象庁 2017）は、福岡県朝倉市・東峰村および大分県日田市にかけて山地・丘陵地での斜面崩壊、谷沿いでの土石流および河川氾濫など、甚大な被害をもたらした（伊永・宮野 2017；三田村・梅田 2017）。特に被害の大きかった朝倉市では、幾つかの河川が土砂で埋まり、魚類が生息できる状況には見えなかった。河川の災害復旧と今後の整備計画を検討するにあたり、災害前の魚類相はどうだったのかが、必要不可欠な情報であるが、災害地域の既知の魚類相データはごくわずかであった。そこで、著者らは、既知の筑後川流域内の淡水魚類相データおよび地理情報システム（GIS）データを使って、同流域内での各種の分布モデルを構築し、被災地周辺のGISデータを外挿することで、対象河川の潜在的な魚類相を推定した。

4.4.2 方法

九州大学大学院生物資源環境科学府附属水産実験所が所有する九州淡水魚類相非公開データベース（<http://www.agr.kyushu-u.ac.jp/lab/jikkensho/access.html>）に保存されている筑後川流域の魚類相データから 361 地点分を抜き出して使用した。また、郷土日田の自然調査会による調査報告 WEB 公開データである小野川・花月川水系の魚相（<http://www.hita.ne.jp/~city/sizenok/ftka/kall.htm>）および日田市南部地域の淡水魚相（<http://www.hita.ne.jp/~city/sizenok/ftnan/nan9.htm>）から 32 地点分のデータを抽出して使用した。これらのデータは 3 次メッシュスケールに再整理された（284 メッシュ、図 4.4.1a）。解析対象魚種は、筑後川水系に生息する在来純淡水魚に水産有用種のアユとニホンウナギを加えた 34 種とした。出現メッシュ数が少なかったヒナモロコ、カワバタモロコ、ニゴイ、一部のデータがヨシノボリ類として取りまとめられているカワヨシノボリについては解析から除外した。

使用した GIS データは、3 次メッシュ内の平均標高および平均傾斜度（平成 23 年度版標高・傾斜度 3 次メッシュデータ）、同じく 3 次メッシュ内の水田、森林、都市用地（宅地と道路の合計）、水面面積（平成 26 年度版土地利用 3 次メッシュ）、3 次メッシュ内の河川総延長（平成 19 年度版河川データを GIS ソフトで計算）で、いずれも GIS ホームページ（国土交通省 2017）よりダウンロードした。その他、3 次メッシュ内の平均的な水面幅をイメージして、水面面積/河川総延長を計算した。

各種の分布モデルには、変数増減法に基づく二項ロジスティック回帰分析を使った。各種の在/不在(1/0)を応答変数、GIS データを説明変数とし、土地利用を除く 5 変数には 2 乗項も設定した。モデルが構築できた場合、ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線分析を実施して、モデルの精度を検証し、AUC で 0.7 を超えた種のみ、魚類相推定を行った。また、カットオフ値 (COV) を基準として、COV 以上を生息の可能性が高い、 $1/2 \times \text{COV}$ から COV までを生息の可能性が中程度、 $1/2 \times \text{COV}$ 未満を生息の可能性が低いと判断した。

構築できたモデルに、朝倉市内および東峰村内の 25 河川(図 4.4.1b)の流域に該当する 3 次メッシュの GIS データを外挿して、各河川の潜在的な魚類相を推定するとともに、先の生息の可能性の高低に 0 から 2 の変数を与えて、Bray-Curties 指数に基づく群平均法によるクラスター分析を実施して、河川を類型

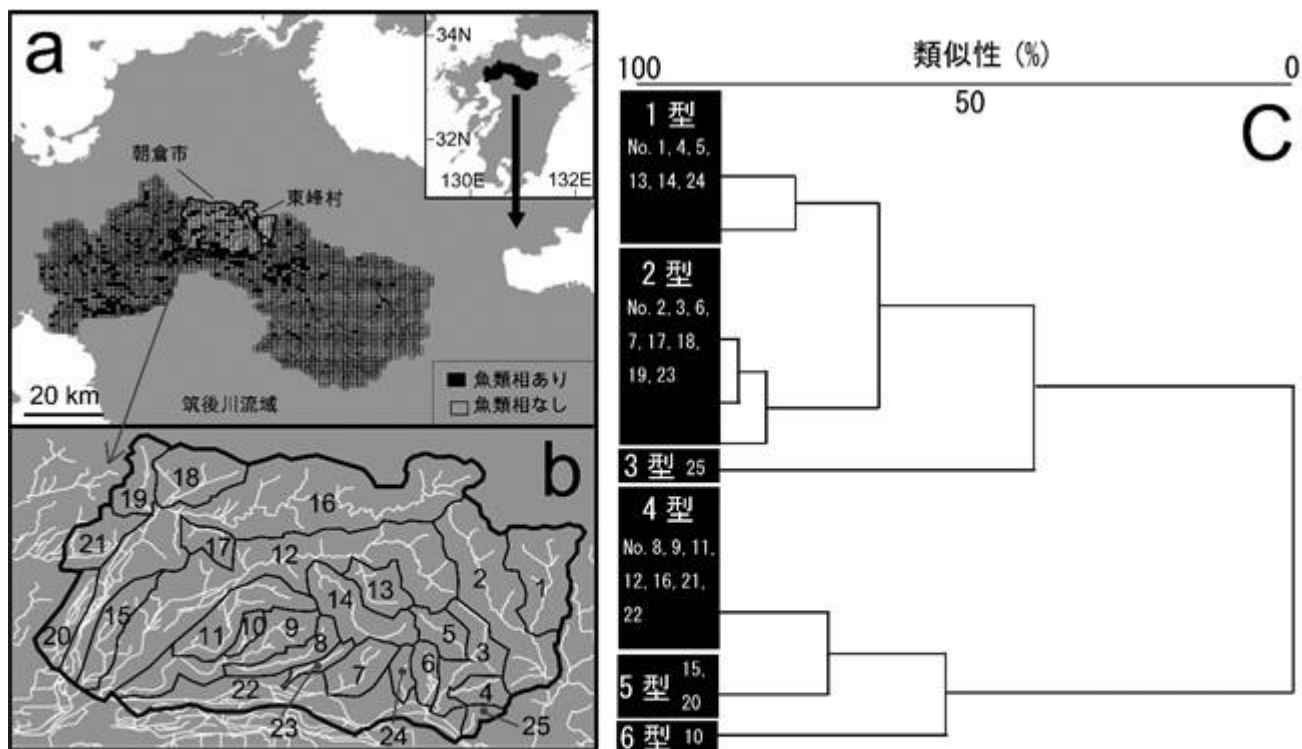


図 4.4.1. 淡水魚類の潜在的分布モデルの構築に使用した筑後川流域内の魚類相データを伴う 3 次メッシュ (a)、朝倉市と東峰村内の河川 (b) および潜在分布モデルで推定された魚類相の類似性 (c)。1) 宝珠山川、2) 大肥川、3) 赤谷川、4) 大山川、5) 乙石川、6) 白木谷川、7) 北川、8) 妙見川、9) 桂川、10) 新立川、11) 荷原川、12) 佐田川、13) 疣目川、14) 黒川、15) 二又川、16) 小石原川、17) 山見川、18) 野鳥川、19) 甘水川、20) 陣屋川、21) 草場川、22) 筑後川、23) 奈良ヶ谷川、24) 寒水川、25) 堺谷川

化した。その後、タイプごとに推定魚類相の特徴を整理するとともに、魚類への配慮事項をそれぞれ考察した。使用したソフトウェアを以下に付記する。

Quantum GIS 2.18.11 (<https://www.qgis.org/ja/site/forusers/download.html>)

EXCEL 統計 2015 (SSRI、東京)

PCORD ver. 5 (MjM Software Design、Oregon)

4.4.3 結果と考察

モデルが構築できた種を表 4.4.1 に示す。AUC が 0.7 を超えるモデルが構築できたのは 32 種で、その値が 0.7 未満であったコイとナマズは魚類相推定の対象から外した。モデルの精度が確認された 32 種について、対象地域での生息の可能性を推定したところ、カワムツがすべての河川において高い生息の可能性を示し、タカハヤ、ムギツク、ドンコがそれに続いた。絶滅危惧種では、ニホンウナギ、ヤマトシマドジョウ、アカザで高い生息の可能性を伴う河川数が 20 を超え、ゼゼラとツチフキでその数が 5 未満となった。また、河川性に比べ、氾濫原性の魚種の方が、河川数が少ない傾向を示した。

出現の可能性を変数 (低 : 0、中 : 1、高 : 2) として、クラスター分析を行ったところ、朝倉市、東峰村内を流れる河川は、概ね 6 区分された (図 4.4.1c)。区分ごとに推定される魚類相 (表 4.4.2) を解説するとともに、推定魚類相から見た河川生態系への配慮事項を提案する。

表 4.4.1. モデルの精度 (AUC) と潜在分布の可能性 (出現河川数)

種名(標準和名)	AUC	潜在分布する河川数			RDB (2015)	種名(標準和名)	AUC	潜在分布する河川数			RDB (2015)
		高	中	低				高	中	低	
1. 河川性魚類						2. 氾濫原性魚類					
スナヤツメ	0.796	16	4	5	VU	ギンブナ	0.823	11	9	5	
ニホンウナギ	0.810	21	3	1	EN	アブラボテ	0.821	12	3	10	NT
オイカワ	0.794	18	7	0		ヤリタナゴ	0.867	7	3	15	NT
カワムツ	0.817	25	0	0		セボシタビラ	0.779	9	1	15	CR
タカハヤ	0.907	23	1	1		ニッポンバラタナゴ	0.882	9	1	15	CR
ウグイ	0.787	17	5	3		カゼトゲタナゴ	0.889	10	0	15	EN
カワヒガイ	0.846	10	0	15	NT	カネヒラ	0.866	10	0	15	
ムギツク	0.739	23	2	0		ヌマムツ	0.822	6	3	16	
カマツカ	0.761	21	4	0		モツゴ	0.945	5	3	17	
イトモロコ	0.763	15	6	4		ゼゼラ	0.920	4	3	18	VU
ヤマトシマドジョウ	0.762	21	4	0	VU	ツチフキ	0.945	1	3	21	EN
アリアケギバチ	0.769	11	7	7	VU	ドジョウ	0.772	13	8	4	
アカザ	0.842	21	3	1	VU	アリアケスジシマドジョウ	0.858	8	2	15	EN
アユ	0.746	19	4	2		ドンコ	0.735	23	2	0	
ヤマメ	0.894	17	3	5		ミナミメダカ	0.876	10	0	15	VU
カジカ	0.888	18	4	3	NT	コイ	0.679	精度不足で推定を行わず ²			
オヤニラミ	0.708	19	6	0	EN	ナマズ	0.692	精度不足で推定を行わず ²			

1 型（宝珠山川、大山川、乙石川、疣目川、黒川、寒水川）：上流から中流域に生息する河川性魚類で構成される（渓流域のヤマメ、上中流域のタカハヤ、カワムツ、ウグイ、ムギツク、カマツカ、アユ、ウナギ、カジカおよび絶滅危惧種のアカザ、ヤマトシマドジョウおよびスナヤツメ）。下流の魚や氾濫原性の魚の生息の可能性は低い（高い出現の可能性を示した河川性魚種数：10.5±1.5、氾濫原性魚種数：0.7±0.5、平均±標準偏差）。これらの河川では、溪流から上流域においてステップ & プールと溪畔林や河畔林の再生、中流域では瀬淵構造の再生が推定された魚類の生息を可能とするだろう。河床間隙を好むアカザへの配慮として、大きい出水時には河床が動くことを想定した河道設計も必要である。また、生態があまり知られていないスナヤツメへの最低限の配慮として、河川敷から水域への横断方向の連続性は確保すべきである。

2 型（大肥川、赤谷川、白木谷川、山見川、野鳥川、甘水川、奈良ヶ谷川）：主に上流から中流域に生息する河川性魚類で構成され、1 型の魚類相に似るが、下流の一部の魚の生息の可能性を含む（河川性：13.5±1.6、氾濫原性：1.9±1.1）。氾濫原性の魚類の生息の可能性は低い。したがって、1 型の配慮事項に加えて、中流域の中でもやや下流に生息する魚種まで対象を広げる必要がある。特に、絶滅危惧種のオヤニラミに対する配慮が必要であり、中流域の瀬淵構造にツルヨシなどが繁茂できる砂州が存在することが必須である。

3 型（堺谷川）：上流から中流域に生息する河川性魚類の数種で構成される。氾濫性の魚種はドンコのみ高い出現の可能性がある（河川性：6、氾濫原性：1）。河川規模が小さく、1 型、2 型の魚種のうち数種が欠落する可能性を伴う河川であり、河川規模を勘案しながら、2 型で行った配慮事項を、可能な限り、実施することが望ましい。

4 型（妙見川、桂川、荷原川、佐田川、小石原川、草場川、筑後川）：低標高を好むゼゼラ、ツチフキの生息確率がやや低いものの、筑後川水系内の大半の魚種が生息する可能性がある（河川性：16.0±1.4、氾

表 4.4.2. 潜在的魚類相のタイプ別出現の可能性（高い潜在分布を持つ河川数／各タイプの河川数）

種名(標準和名)	1型	2型	3型	4型	5型	6型	種名(標準和名)	1型	2型	3型	4型	5型	6型
1. 河川性魚類							2. 氾濫原性魚類						
スナヤツメ	◎	◎	△	◎	◎	○	ギンブナ	○	○	○	◎	◎	◎
ニホンウナギ	◎	◎	◎	◎	○	◎	アブラボテ	△	○	△	◎	◎	◎
オイカワ	○	◎	○	◎	◎	◎	ヤリタナゴ	△	△	△	◎	◎	○
カワムツ	◎	◎	◎	◎	◎	◎	セボシタビラ	△	△	△	◎	◎	○
タカハヤ	◎	◎	◎	◎	○	◎	ニホッパラタゴ	△	△	△	◎	◎	○
ウグイ	◎	◎	○	◎	△	△	カゼトゲタナゴ	△	△	△	◎	◎	◎
カワヒガイ	△	△	△	◎	◎	◎	カネヒラ	△	△	△	◎	◎	◎
ムギツク	◎	◎	○	◎	◎	◎	ヌマムツ	△	△	△	◎	◎	○
カマツカ	◎	◎	○	◎	◎	◎	モツゴ	△	△	△	◎	○	△
イトモロコ	○	◎	○	◎	◎	◎	ゼゼラ	△	△	△	○	○	△
ヤマトシマドジョウ	◎	◎	◎	◎	○	○	ツチフキ	△	△	△	○	○	△
アリアギバチ	△	○	△	◎	◎	○	ドジョウ	○	◎	△	◎	◎	○
アカザ	◎	◎	○	◎	○	○	アリアギシマドジョウ	△	△	△	◎	◎	○
アユ	◎	◎	◎	◎	○	△	ドンコ	◎	◎	◎	◎	◎	◎
ヤマメ	◎	◎	△	◎	△	△	メダカ	△	△	△	◎	◎	◎
カジカ	◎	◎	○	◎	△	△	(◎50%以上, ○50%未満, △高い潜在分布の河川数0)						
オヤニラミ	○	◎	◎	◎	◎	○							

濫原性：12.3±1.8）。4型については、先に述べた溪流～中流域までの配慮に加えて、下流域、氾濫原水域への配慮も必要である。河道内氾濫原の創造、農業用水路等との連続性の確保、湿地として機能する遊水地の設置など、河道内外に目を向けた配慮を検討する必要がある。カワヒガイやタナゴ類など、産卵母貝の生息の有無に左右される絶滅危惧種も生息できるように、イシガイ科の二枚貝が生息できる環境づくりが必要不可欠である。

5型（二又川、陣屋川）：河川上流域に生息する魚を除き、筑後川水系内の大半の魚種が生息する（河川性：9.0、氾濫原性：13.0±1.4）。河川の中流から下流および氾濫原水域に関する配慮を行わなければならない。2型、4型の配慮事項を確認いただきたい。

6型（新立川）：5型の魚類相のうち、氾濫原性魚種の一部が欠落する可能性が高い（河川性：8、氾濫原性：6）。ただし、カワヒガイやカゼトゲタナゴ、アブラボテなど、産卵母貝の生息の必要性を伴う魚種も生息する可能性が高いので、4型と同様、二枚貝の生息の場について検討する必要がある。

今回の災害で、幾つかの河川は土砂で埋まり、そこに生息した魚類は壊滅的状态となり、そのような河川の生態系はリセットされたといっても過言ではないだろう。しかしながら、生物学的に見れば、河川の生態系はこれまで幾度となく自然災害による壊滅的な打撃を受け、その後、時間の経過とともに回復することを繰り返してきたはずである。それ故に、長期的な生態系の回復のプロセスを受け入れ、継続的で長期にわたるモニタリングを行うことが重要だろう。ただし、壊滅的な河川で、その環境が復旧しても、近隣からの魚類の再加入が不可欠である。生態系の回復プロセスを確認しながら、回復の期待が薄い河川では、専門家と議論しながら、放流などで手助けを行う必要があるかもしれない。また、水域ネットワークが横断構造物等で十分に機能しない場合も同様であろう。

伊永 勉・宮野道雄(2017) 平成 29 年(2017 年)7 月九州北部豪雨災害と対策の現状. 都市防災研究論文集
4:33-39.

気象庁(2017) 平成 29 年 7 月 5 日から 6 日に九州北部地方で発生した豪雨の命名について
(http://www.jma.go.jp/jma/press/1707/19a/20170719_gouumeimei.pdf、平成 29 年 3 月 9 日閲覧)

三田村宗樹・梅田隆之介(2017) 平成 29 年 7 月九州北部豪雨の土砂災害調査報告. 都市防災研究論文集
4:25-32.

4.5 多自然川づくりとモニタリングについて

4.5.1 はじめに

平成29年7月九州北部豪雨（気象庁 2017）のあと、被害河川の魚類については現地調査と環境DNAを使った現状把握が行われ（4.3参照）、また被害の大きかった朝倉市・東峰村を流れる河川の潜在的魚類相の推定（4.4参照）がなされた。ここでは、それらのデータを重ねあわせ、負の影響を受けた可能性が高い魚種を推定するとともに、河川の復旧の目標種を提案したい。また、土砂災害等の影響が及ばなかったものの、浸水被害等を受けた平野部の魚類相に関する報告および多自然川づくりの必要性に関して言及したい。

4.5.2 方法

4.3章で報告された調査箇所のうち、環境DNAの精度検証的に行われた筑後川本流のM地点を除いた17地点を解析対象とした。各地点に該当する3次メッシュコードを抜き出し、4.4章で構築された潜在分布モデルによる各メッシュの推定結果を抽出した。推定結果が高い潜在分布に該当する数を魚種ごとにカウントし、その数が全地点数に対して30%を超えた魚種について、4.3章で示した実測の在、不在を確認した。

平野部の魚類相については、九州大学水産実験所が保有する九州淡水魚類相データベースの中で、かつて希少種の分布が確認された地点のうち、特に重要と思われる10箇所（農業用水路と小河川）について、2017年秋に投網・さで網を使って調査を行い、その結果を取りまとめた。

4.5.3 結果

調査対象地点の中で分布した可能性が高い魚種と被災後の調査結果（在／不在）を図4.5.1に示した。17地点中16地点が高い潜在的分布の可能性を持つと判断されたのは、タカハヤ、カワムツで、ムギツク（14地点）がそれに続いた。絶滅危惧種では、ヤマトシマドジョウが13地点、ウナギとオヤニラミが11地点、アカザが10地点、スナヤツメが8地点、カジカが7地点であった。実測の在／不在から判断すると、被災河川での影響が比較的小さかったのがタカハヤ（欠落は5地点のみ）で、カワムツやドンコでさえも半数以上が欠落となった。

典型的な希少魚種について、モデルによる推定値と実測の在／不在を地図化した

（図4.5.2）。アカザについては被災河川の実測調査では不在であるが、そのほとんどの地点が潜在的な分布の可能性が高いことが分かる。また、九大の分布データベースの在データが大肥川に多くあり、かつ今回の調査による不在地点がそのかつての在データに挟まれていることが分かる。カジカとオヤニラミについては、アカザに比べると潜在的な分布の数がやや劣るものの、推定された生息地のうちの幾つかが今回の災害で失われた可能性を否定できない。

典型的な普通種として、図4.5.3にタカハヤ、カワムツ、ムギツクを示したが、影響が小さかったタカ

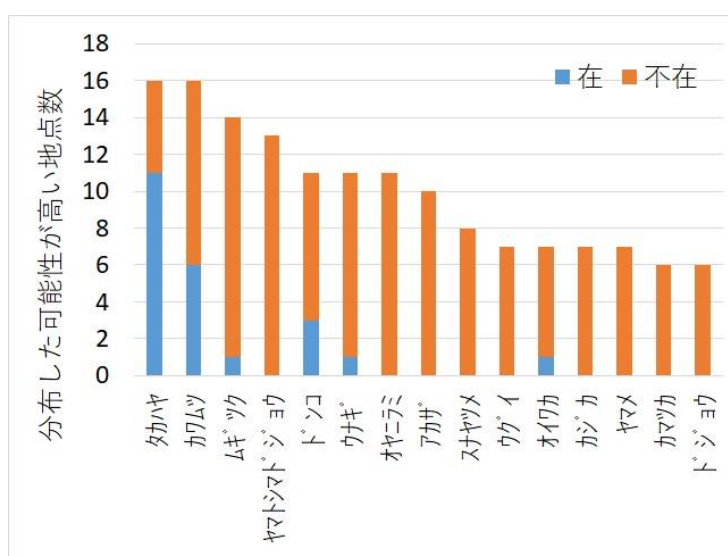


図 4.5.1 野外調査を行った 17 地点における各種の潜在的な分布の可能性および各種の実測の在／不在

ハヤにおいても特に大きな被害を受けた数河川において、負の影響を受けた可能性が高いことを理解できる。また、カワムツについても被災河川においての欠落が明瞭である。ムギツクについては、他の種に比べると潜在的な在のエリアが少ないものの、被災河川の幾つかは潜在的に分布した可能性が高いため、やはり今回の災害で負の影響を受けたものと推察される。

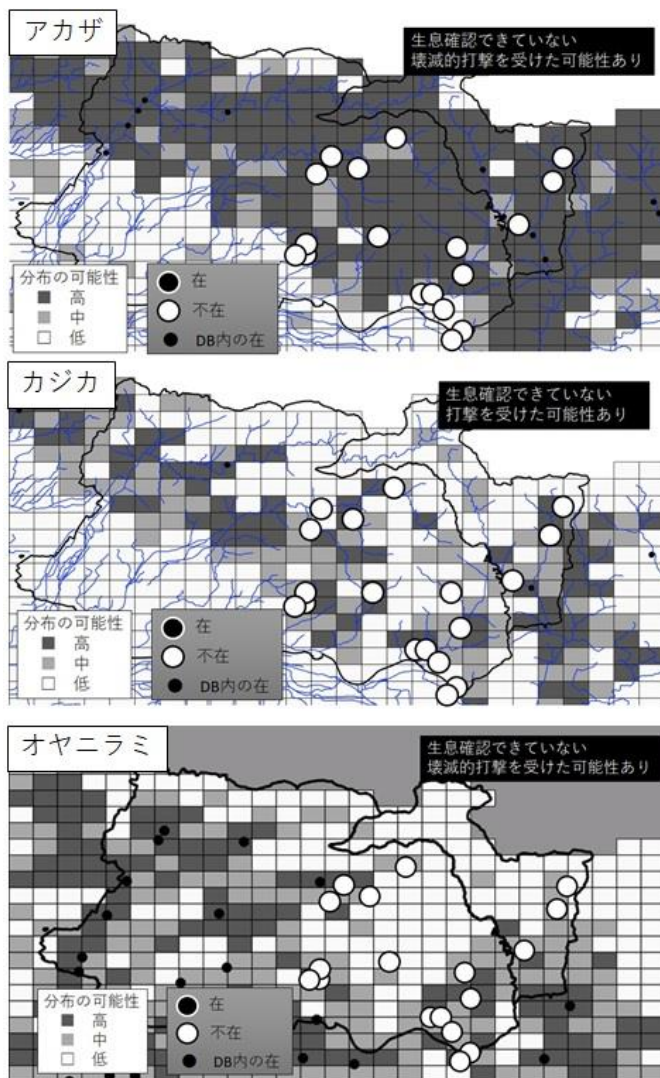


図 4.5.2 希少3種の潜在分布と実際の在／不在.

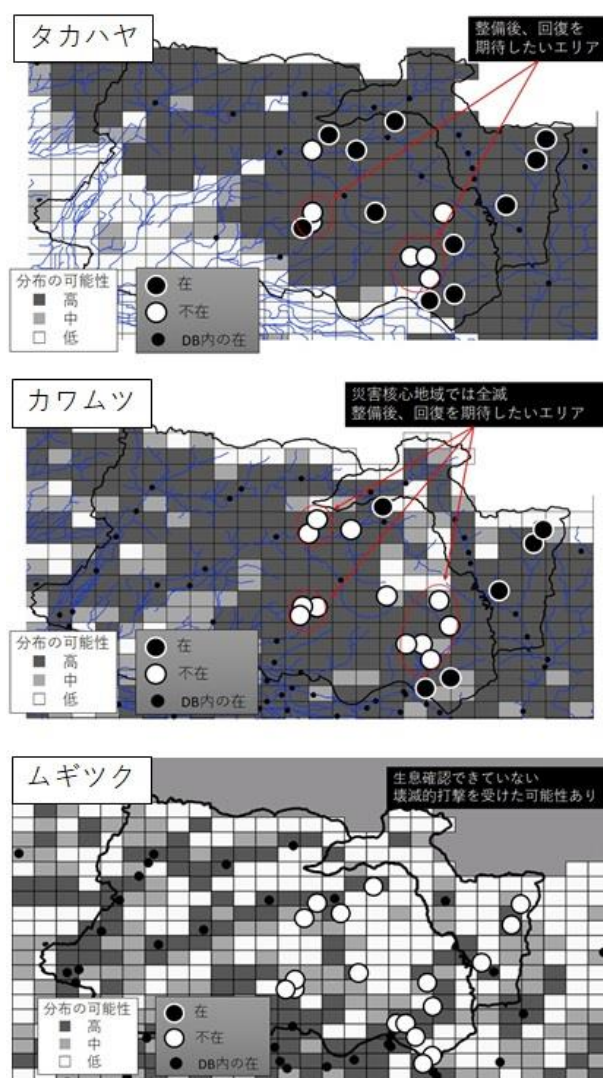


図 4.5.3 普通種の潜在分布と実際の在／不在.

次に、平野部で浸水被害が発生したエリアを含めた農業用水路、小河川における調査結果を図4.5.4に示す。希少種保護の観点から、どの地点で何がどの程度採集されたかは記述しないが、全10地点で調査を

行い、在来タナゴ類5種を含む絶滅・準絶滅危惧種が9種採集された。特に、セボシタビラが採集された河川については、上流域が被災したことから今後改修工事が下流に及ぶ可能性があり、多自然川づくりを含めた改修計画の検討が必要である。

(4) 考察

土砂災害等の被災を受けた河川上流域の調査結果と分布モデルで推定した潜在的な分布域の重ね合わせは、被災河川における長期的な生態系の回復を確認する上で、有益な情報を与えている。例えば、最も影響が小さかったタカハヤさえ姿を消した可能性が高い白木谷川や妙見川の上流は、生態系回復

のプロセスの中で最初のターゲットがタカハヤとなるだろう。また、カワムツやムギツクなどの普通種の欠落が確認された河川についても、最初の回復の指標は、それらの普通種にするのが妥当であろう。これらの魚種は遊泳魚であるため、分布拡散力に優れており、近隣に生息地があれば、早期の復帰が望める魚種であろう。希少魚種の中で、対象地域から姿を消してしまった可能性が高いヤマトシマドジョウ、アカザ、スナヤツメ、カジカについては底生魚であるため、生態系が回復するプロセスの中では遅れて回復する可能性が高い魚種と位置付けられる。長期モニタリングを行い、その復帰をしっかりと追跡し、場合によっては筑後川水系内の近隣の他の生息地からの移植等も視野に入れておく和良好的だろう。オヤニラミについては遊泳性であるが、水際植生の回復が繁殖のカギを握るため、先の普通種に比べ、復帰はやや遅れるものと類推される。いずれにせよ、それらの復帰の有無を長期的に調べていく必要がある。そして、河川環境の復旧や改修の際、4.3 で述べたような様々な魚種への配慮を実施することが、これらの魚種の復帰を早めることにつながることを念頭に置きたい。

平野部の小河川については、希少種保護（特に、インターネットで売買されるセボシタビラなどへの配慮）の観点から、大々的にその生息地を示さないが、タナゴ5種を含む絶滅危惧種の宝庫であり、その保全的価値が大きいことが確認された。一方、今回の災害を受けて、それらの河川の改修が生息地に及ぶ可能性が高いことが明らかとなった。そのため、該当する河川においては、慎重な改修計画の立案と多自然川づくりの実施が必要である。平成30年4月より、応用生態工学会災害調査団の数名と河川管理者が連携し、複数回の協議を行い、単なる拡幅ではなく、ターゲットとなる希少なタナゴ類の生息環境を可能な限り改変せずに、治水安全度を上げるための多自然川づくりプランを立案中であることを申し添えたい。

最後に、河川の普及・改修に当たっては、本章の各節で書かれた配慮事項等を参考にしながら多自然川づくりを実践していただきたい。また、各説に記述されたモニタリングの必要性等も参考にしていきたい。

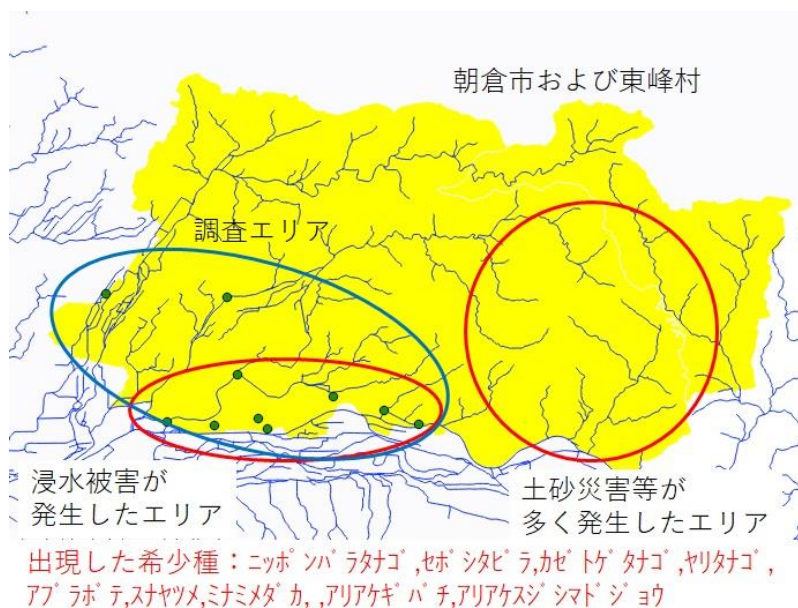


図 4.5.4 平野部での魚類調査エリアと出現した希少魚類リスト

九州大学水産実験所(2017) 九州州淡水魚類相データベース&平地の魚類の潜在的魚類相
(<http://www.agr.kyushu-u.ac.jp>)

5 章 斜面崩壊地の特徴と植生被害等の状況

5.1 被災地の植生の特徴

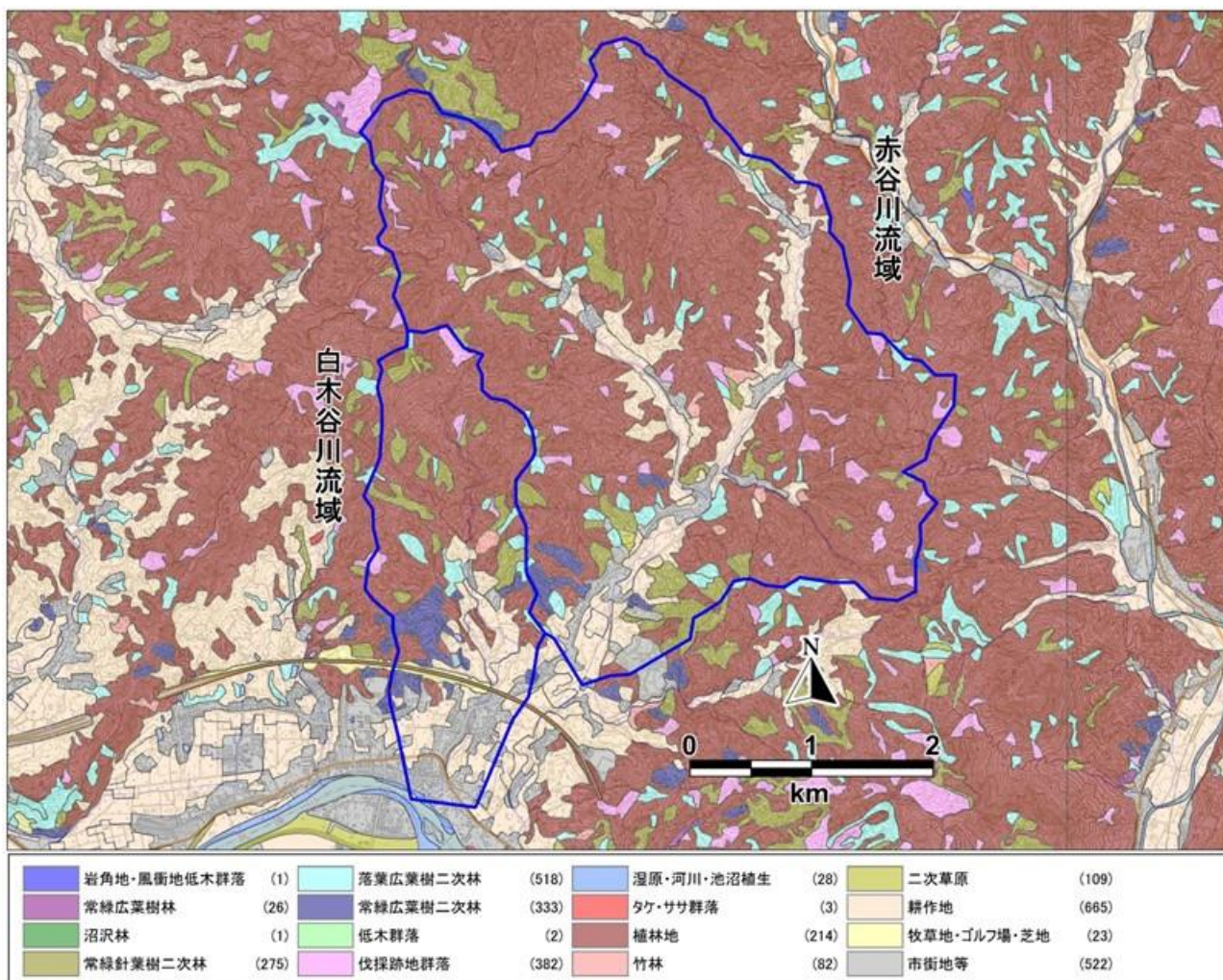
気象庁の朝倉観測所の10ヶ年平均(2008年～2017年)の気温、降水量等を表5.1.1に示す。朝倉観測所における年平均気温は15.4℃である。年降水量は2,056mmで、我が国の平均降水量1,718mm(1971年～2000年の平均値)を約300mm上回っている。朝倉観測所の日平均気温を用いて吉良の温量指数を算出すると、暖かさの指数125.4、寒さの指数1.1となり、温量指数からみると被災地周辺は照葉樹林帯に該当する地域である。

被災地の被災前の現存植生図を図5.1.1に示す。被災地は、河川沿いは水田、果樹園といった耕作地とし利用されている。一方、山地は全てが二次林で、植林地が広く分布し、所々にアカマツ群落、コナラ群落、シイ・カシ二次林、竹林が分布する。

朝倉市では冬に霜が降りることもある(JA筑前あさくら朝倉支店への聞き取り)。霜が形成されるための条件の一つとして地表温度0℃以下がある。朝倉市における地表温度のデータは不明であるが、朝倉観測所では最低気温が0℃以下になる日が10ヶ年平均で年間約46日あり、このうち複数日で、地表温度0℃以下等の条件により、地表において、凍上が発生している可能性がある。凍上の融解は花崗岩の風化に影響するとされるため、被災地においても崩壊地の凍上・融解に伴う風化促進が崩壊地における植生の定着や発達に影響を及ぼす可能性がある。しかし、凍上発生日数は限定されると推定されるため、植生発達を阻害するほどではないと考えられる。

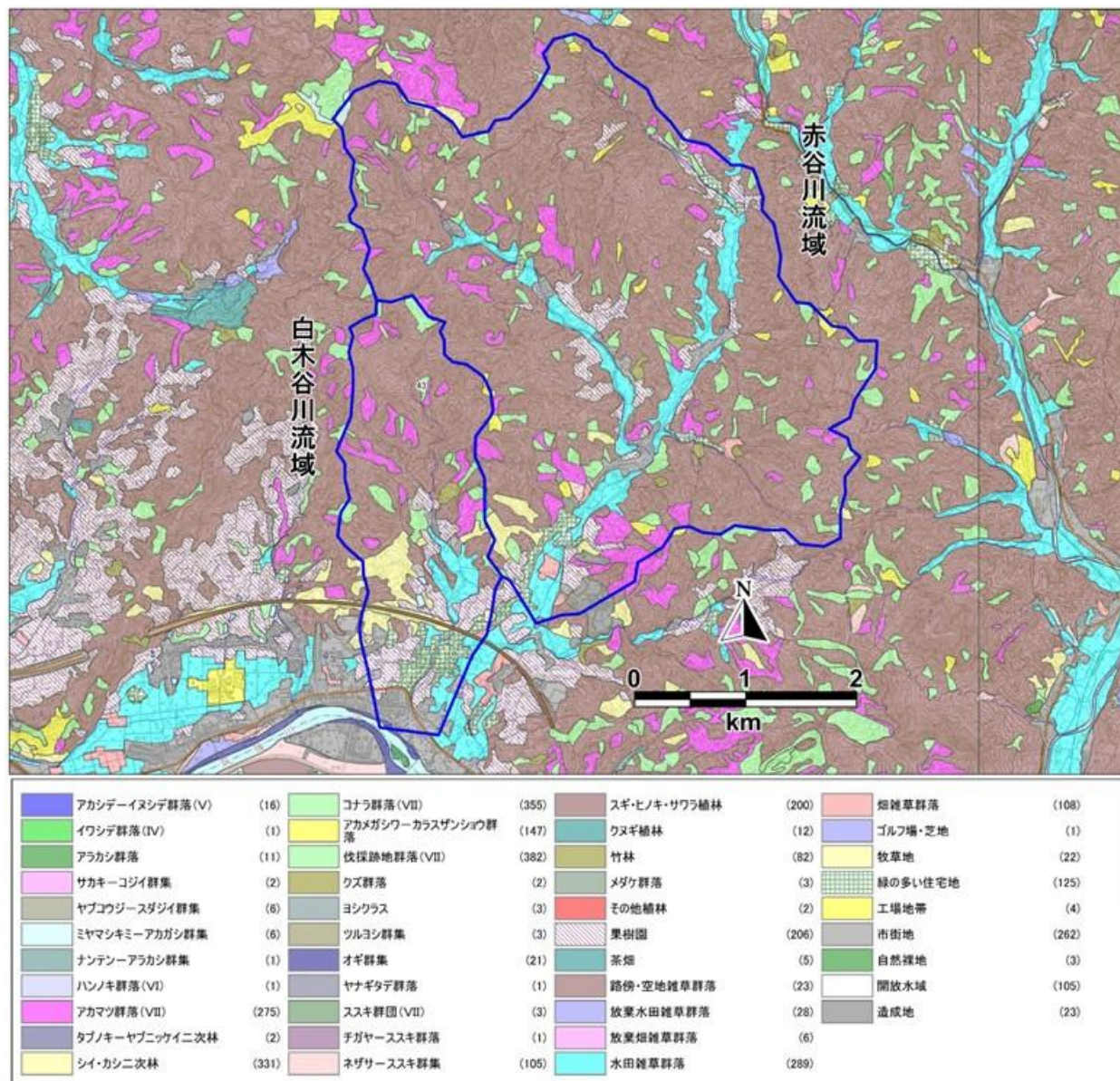
表 5.1.1 朝倉市の気象

気象庁:朝倉観測所														
年	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	備考
10ヶ年平均 (2008～ 2017年)	平均気温(日最高)℃	9.5	11.4	15.3	20.9	26.0	27.8	32.1	33.2	29.3	24.2	17.6	11.3	—
	平均気温(日最低)℃	-0.1	1.0	3.8	8.3	13.2	18.7	23.3	23.4	19.2	13.3	7.1	1.7	—
	月最低気温℃	-4.8	-3.6	-2.6	2.2	7.2	12.9	19.2	19.2	14.0	7.0	0.2	-3.4	—
	最低気温0℃以下日数	17.5	12.3	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	10.5	45.9 年
	平均気温(日平均)℃	3.9	5.2	8.8	14.0	18.8	22.2	26.8	27.1	23.1	17.7	11.2	5.6	15.4 年平均
	温量指数(暖かさ)		0.2	3.8	9.0	13.8	17.2	21.8	22.1	18.1	12.7	6.2	0.6	125.4 年
	温量指数(寒さ)	1.1												1.1 年
	月降水量mm	60.2	90.7	110.8	144.4	144.3	357.0	425.0	249.0	168.0	134.7	96.3	76.3	2056.4 年
出典:気象庁 過去の気象データ														



注)「環境省自然環境局生物多様性センター植生調査(1/25,000縮尺)第6-7回現存植生」を基に作成。

図5.1.1(1) 被災地の現存植生(植生大区分)



注)「環境省自然環境局生物多様性センター植生調査(1/25,000縮尺)第6-7回現存植生」を基に作成。

図5. 1. 1 (2) 被災地の現存植生(現存植生図)

5.2 被災地の地形・地質の特徴

5.2.1 累積降水量の多かったエリアと山地地形との関係

今回の豪雨災害の中でも特に降水量が多かった総降水量 600 mm以上のエリアは、主に三郡変成岩と花崗閃緑岩が分布する小起伏山地（標高 200m～400m）に相当する。そのエリアの西の端は佐田川下流左岸側、稻荷原川右岸側に分布する中位段丘上でほぼ国道 368 号十文字付近に相当する。またその東端は乙石川流域や隣接する赤谷川上流域に相当する。このエリアは、長さ約 12km、最大幅 4km の範囲で荷原川、桂川、奈良ヶ谷川、北川、寒水川、白木谷川、黒川、赤谷川の上流域及び乙石川流域に相当する。

また上記ほどではないが降水量の増加が大きい（降水量コンターが凸型）エリアは、玄界灘に流出する河川と有明海に流出する筑後川との分水界を形成する大起伏山地（標高 600m 以上）古処一馬見山列に沿っており、東へ行くほど総降水量コンターは 350 mmから 500 mmまで増加している。小石原川最上流部の谷底平野でも総降水量は 500 mmから 550 mmランクに達している。

大肥川以東については彦山川水系の深倉川最上流から岳滅鬼峠から約 1km 東北東の分水界ピーク（EL. 1010m）を結ぶ線より以南、また大肥川上流と彦山川流域との分水界に位置する大日岳 829m の北西方向約 2.5km のピーク 675m と大肥川流域と宝珠山川流域界に位置する台山 725m、城ヶ迫 545m などを結ぶ線の以東、また堂床山 466m、上宮山 644m の間の鶴河内川狭窄部より以北の範囲では総降水量が 550 mmから 600 mmの降水量が広く分布する。またこの中の一部小野川最上流部には累積降水量 600 mm以上のエリアが存在する。

5.2.2 山地の地形・地質及び土壌

調査対象の地域の山地には次のような岩石や地層（地質）が分布する。その分布や斜面安定性に関連する特徴について紹介する。

（１）三郡変成岩類（中生代三畳紀～ジュラ紀）：

高圧型の広域変成岩であり、泥質片岩が卓越するが、ほかに砂質片岩、苦鉄質片岩、石灰質片岩を伴う。調査地域西側に広く分布する。広域変成岩の岩石組織は、扁平な形状の変成鉱物が一定方向に並ぶため片状に割れやすい性質（片理）を持つが、後に花崗閃緑岩マグマなどの貫入の影響を受け、特に花崗閃緑岩の縁辺部ではこの時の熱の影響で再結晶化が進み、ホルンフェルスといわれる、浸食に強い塊状の岩石に変化している。北川流域の東西に分布する、堂所（標高 414m）から高山（標高 190m）に続く東側の尾根列および麻底良山（標高 294m）に続く NNE－SSW 方向に延びる西側の尾根列は、ホルンフェルス化して硬くなった三郡変成岩より構成され、風化しやすく標高の低い、花崗閃緑岩よりなる山体を囲んでいる。この地形の一部は耶馬日田英彦山国定公園の一部（普通地域）として上流側の筑後川沿岸と共に指定（1950）されている。

その一方、三郡変成岩のほとんどの原岩は泥岩であり、山地斜面上部や尾根部では風化により粘土化しやすい。片理面が、山腹斜面に対し流れ盤となり、かつ岩盤内部で破碎部などの水みちに沿い選択的風化が進み、粘土化した薄層を持つようになると山腹斜面は豪雨時に不安定になりやすい。また地山内部で差し目の片理構造であっても、片理面など割れ目沿いの風化と緩みにより表層で岩盤クリープ現象が進行していれば、流れ盤形状の弱層が形成される場合もある。不安定な斜面の末端部には崖錐堆積物が発達する。

（２）安山岩溶岩～火砕岩（新生代新第三紀）：

小石原川最上流部付近から東側の標高の高い釈迦岳、岳滅鬼山などの山稜部、さらに流域界を越えた東側の彦山川流域にかけては三郡変成岩や花崗閃緑岩などの基盤を新第三紀の安山岩溶岩～火砕岩が覆って

いる。その流域界付近の不整合面標高は、470m、490m、500m と北東側に向かうほど大きく、また南に向かうほど（350m）小さくなる傾向がみられる。西側の三郡変成岩との境界については、ほぼ大肥川上流部の河床沿った分布を示すが、朝倉市と東峰村の境界であり、大肥川上流部と赤谷川上流部の境界でもある中山峠以南は、赤谷川下流部左支川、大山川源流部となる針目山中腹の 200m 地点を経て、夜明ダム下流 2km 地点の筑後川河岸へと連続する。大肥川上流及び赤谷川上流域及び赤谷川左支川の大山川源流部の東側は日田盆地周辺の山地から英彦山にかけて広いエリアが安山岩溶岩～火砕岩（新生代新第三紀）に覆われる。釈迦岳南側斜面、岳滅鬼山に続く尾根、英彦山及び彦川源流部は耶馬日田英彦山国定公園に指定されている。

このエリアの中にはまたいくつかの独立峰が分布する。赤谷川左支川である大山川源流と大肥川下流部の流域界には針目山（489m）や畦倉山（474m）、また赤谷川上流と大肥川中流部の流域界で、土師山（455m）、大肥川上流と宝珠山川との間には城ヶ迫（545m）、台山（725m）、鶴河内川中流には堂床山（466m）、小野川との流域界付近には上宮山（644m）、小野川上流には高塚山（620m）、仏来ノ山（790m）などの独立峰である。この中には、水平な硬岩層に覆われ周囲の一部が急崖で囲まれたテーブル状の高地を示すメサ地形、あるいはメサが開析され、頂面が小さく孤立丘となったビュート地形に該当するものも含まれる。硬く、透水性の大きい硬岩層の山頂部での存在はキャップロック構造を形成するため、周辺斜面の安定性にも影響する。また北松型地滑りの原因となる場合もある。これらの新生代新第三紀に形成された安山岩溶岩～火砕岩は地層としてさらに以下のように区分される。下位より山国累層、北坂本累層、英彦山火山岩類である。山国累層、北坂本累層（中新世～鮮新世）は角礫凝灰岩など主に火砕岩から構成される。

一方、英彦山火山岩類は安山岩質溶岩から構成され、透水性は大きいと考えられる。

三郡変成岩分布域の小起伏山地でも、山頂部に取り残された新第三紀の安山岩類が分布する。広蔵山（標高 703m）から米山（標高 590m）にかけて南北に延びる尾根（英彦山火山岩類）や疣目川と佐田川の流域界の独立峰である鳥屋山（北坂本累層、標高 645m）などがこれに該当する。米山は乙石川、黒川、寒水川、白木谷川の流域界ともなっている。広蔵山周辺の不整合標高は約 580m、連続する米山周辺については約 500m である。急傾斜斜面の末端には転石などからなる崖錐斜面が発達する。

（３）花崗閃緑岩（中生代後期白亜紀）：

二つの NE 方向に延びたレンズ状の中規模貫入岩体が分布する。一つは赤谷川上流、乙石川、赤谷川下流、白木谷川、寒水川最下流部にかけて分布する岩体と北川流域を中心に分布する岩体とがある。花崗閃緑岩と花崗岩の岩石組織を比べると同じような等粒状の組織を示し、両者は花崗岩類として取り扱われることも多い。造岩鉱物組成から見ると、花崗閃緑岩には風化に強い抵抗力を持つ石英やカリ長石の割合が少なく、風化反応により溶脱物質を生じやすい斜長石や黒雲母あるいは角閃石の含有割合が高い。花崗閃緑岩を含む花崗岩類の風化では、結晶粒界に沿って溶脱や粘土化が進むため、結晶粒子同志の結合が緩みやすい。その結果としてマサといわれる砂質の風化物を生じる。マサ化した強風化層の更に深部にはマサと未風化の丸みを帯びた岩塊が共存する領域が存在する。この未風化の岩塊は風化残留核岩（コアストーン）と呼ばれる。花崗閃緑岩のコアストーンは花崗岩のそれよりも小型のことが多い傾向がある。斜面の末端には過去のがけ崩れによる崩落堆積物が見られることがある。

（４）山間の谷底平野を構成する沖積層（河床堆積物）

小石原川、佐田川の中流部には幅の広い谷底平野が発達する。小起伏山地の谷底平野については、産総研シームレス地質図では、荷原川上流部、桂川上流部、赤谷川中流、また佐田川上流左支川の黒川上流部が

記載されている。しかしより小規模な谷底平野は妙見川下流部、奈良ヶ谷川下流部、北川、寒水川下流部、白木谷川下流、乙石川中下流部にもみられる。

源流に大起伏山地を持つ河川では、大肥川中下流部、その左支川である宝珠山川中下流部、鶴河内川下流部並びに小野川中下流部に細長く谷底平野が発達する。大肥川の谷底平野は筑後川（三隈川）合流点まで発達するが、筑後川はこの区間で山間狭窄部を流下するためか、筑後川自体には谷底平野は見られない。合流点下流の狭窄部についても国定公園に指定されている。小野川についても花月川合流点まで谷底平野が発達している。谷底平野は過去に起きた洪水などの堆積物であり、その粒度は河床勾配や流域山地の地質、風化の程度などを反映し、さまざまである。

また山地や丘陵との間には同様に過去の地滑り活動による押し出しの末端部あるいは土石流の跡などが存在することがある。

（５）局所的に分布する堆積岩や貫入岩体

- ①非海成～汽水成砂岩、泥岩（新生代古第三紀）：大肥川上流部から大肥中流部と赤谷川上流部の流域界にかけて断片的に分布。
- ②花崗閃緑岩（中生代前期白亜紀）：小石原川の北側（流域外）に分布する大規模岩体の SE 方向への派生部分。
- ③花崗岩（中生代後期白亜紀）：三郡変成岩中の SE 方向の小規模な貫入岩体、大肥川河床や佐田川上流部などに分布
- ④斑レイ岩（中生代前期白亜紀）：三郡変成岩中の SE 方向の小規模な貫入岩体標高 747m 白石山（小石原川、大肥川、佐田川の流域界）東側斜面の一部に露出

（６）山地の土壌

土地条件図によれば山地の地形に応じて次のような土壌が分布する。

大起伏山地～中起伏山地：褐色森林土壌 谷部では湿性褐色森林土壌

小起伏山地：褐色森林土壌、黄褐色森林土壌

山ろく地：赤色土

谷底平野：粗粒褐色低地土壌

土壌は、天然の廃棄物処分場であり、岩石風化の残留物質などの母材と腐植質の混合物である。土壌中の有機物含有量は、落葉あるいは倒木などの生物遺骸供給量とバクテリアによる分解速度との割合で決まる。分解速度は地中温度に依存し、温度が高いほど分解速度は速い。熱帯地方の土壌には分解速度が速いため、有機物含有量は少ない。そして分解生成物である二酸化炭素を多く含む。熱帯地方の土壌空隙中の炭酸ガス濃度は数％に及ぶといわれる。土壌中のバクテリアには多種多様の種類が含まれること、水の集まりやすさ、抜けやすさ、地中温度などがそれぞれ異なることなどの理由で、同じ地域でも多様なタイプの土壌が存在する。

5.2.3 平野の地形・地質及び土壌

この地域の平野は筑後川の支川に沿って発達する河岸段丘などの台地、その台地を開析する谷底平野、並びに筑後川の氾濫堆積物が作る低地からなる。台地を構成する地質には段丘堆積物（更新世後期の河川堆積物）だけではなく、広域に分布する阿蘇の火砕流堆積物（Aso-IV、更新世後期）もある。特に日田盆地内には、阿蘇の火砕流堆積物（Aso-IV）よりなる火砕流台地が広く分布している。日田盆地より西側で

は火砕流台地の分布はかなり少なく、桂川、妙見川、奈良ヶ谷川の開析する朝倉 IC 東側の長さ 3km ほどの台地及び赤谷川と白木谷川の間の東西方向に延びる幅 300m ほどの台地に見られる程度である。

中位と低位の 2 種の段丘は、流域面積の比較的大きい小石原川、佐田川に沿って分布する。これら段丘を広く開析した谷底平野を伴うが、この谷底平野は扇状地性のものといわれる。

佐田川より上流側の荷原川、桂川、妙見川、北川、白木谷川、赤谷川の最下流部に小規模な中位段丘を伴う。これらの段丘と筑後川や筑後川の作る沖積低地と接する場所は比高が 2.5m 程度から 10m 以下の崖地形となっているので、このような場所も豪雨に見舞われるとがけ崩れの危険性がある。

筑後川の氾濫堆積物が作る低地には泥質の氾濫原堆積物と砂質の自然堤防が分布する。自然堤防に沿っては集落が発達することが多い。また都市化の進展に伴い平野部では様々な用途の土地利用が行われている。

平野の土壌は堆積土砂などの母材と腐植質の混合物である。土壌中の有機物含有量は、基本的には落葉あるいは倒木などの生物遺骸供給量とバクテリアによる分解速度との割合で決まる。平野では地形に応じ、次のような土壌が分布する。

台地：黒ぼく土～黒ぼく質土壌

扇状地：褐色低地土壌

氾濫原平野：筑後川沿いに細粒灰色低地土壌

自然堤防：褐色低地土壌

氾濫原と台地に挟まれた水はけの悪い箇所：細粒グライ土壌

5.2.4 崩壊地分布の特徴

ここでは崩壊地分布の特徴を西部の(1)小起伏山地と(2)東部の大起伏山地にかけて述べる。

(1)小起伏山地では、累積降水量の最も集中したエリアは崩壊密度が高いエリアとはほぼ一致している。このエリアでは泥質片岩優勢の三郡変成岩と花崗閃緑岩が主に分布する。ここでは崩壊規模と地質との関係を整理する。

日本応用地質学会調査団のレポートによれば調査地域全体での地滑り・崩壊の発生状況を調査している。そこではまず国土地理院による被害状況判読図では小起伏山地の降雨量の特に大きかった地域を中心に数千にも及ぶと思われる土砂崩壊地が示されている。その中から比較的規模の大きな 191 (崩壊面積では 560m² 以上)の地滑り・崩壊地を抽出し(1次抽出)、崩壊面積と地質別に整理を行っている。(1次検討)

(西村、高見、松澤)これによると小起伏山地に分布する三郡変成岩での最大崩壊面積は乙石川上流部の崩壊で約 22,000m²、同じ小起伏山地の花崗閃緑岩での最大崩壊面積は白木谷川中流部での崩壊で約 7,100m² である。

一方規模の大きな崩壊個所数の地質別のシェアーを見ると三郡変成岩類分布域が合計 142 か所、それに対し花崗閃緑岩分布域では 23 か所となっている。三郡変成岩分布域には数は少ないが大起伏山地での崩壊データ(13 か所)も含まれるので、このデータを除くとその比は 5.6 : 1 となる。

一方小起伏山地内での三郡変成岩と花崗閃緑岩との露出面積を比較するとおおむね 6 : 4 程度で 1.5 : 1 の割合となる。この両者を比較すると明らかに単位面積当たりで補正しても三郡変成岩類で比較的規模の大きな崩壊や地滑りの割合が多いことを示している。

上記の検討では除外された小規模な崩壊は小起伏山地内で数多く発生しており、そのほとんどが表層崩壊と考えられる。すべての規模について地質別の崩壊規模出現頻度を取れば、花崗閃緑岩より三郡変成岩類のほうが崩壊規模の大きな領域にまで達していることが推察される。

日本応用地質学会調査団のレポートでは2次検討として崩壊面積 5,000m² 以上の 50 か所について空中写真の実態判読を行い崩壊タイプの区分を行っている。この中で、花崗閃緑岩分布域で生じた崩壊が 6 事例あり、そのうち 5 事例が表層流出タイプに属するといわれる。

(2) 起伏量が大きい、大肥川以東の新第三紀火山岩類分布域で総降水量が多くなっているエリアは、前述の 1. で述べた通りで宝珠山川上流、鶴河内川上流、小野川上流および彦山川上流にまたがっている。

一方崩壊地の分布は、上記以外の地域でも大規模な崩壊・地滑りが起きたり、崩壊密度が高いエリアがあったりと降水量分布と崩壊密度や崩壊箇所が必ずしも一致しない。これは豪雨に対する山腹斜面の変動応答性が 1) の小起伏山地と異なっていることを示している。例えば、大日岳、釈迦岳を挟む彦山川、宝珠山川上流域では降水量レベルが共に、550 mmから 600 mmに達しているが、崩壊発生密度は彦山川流域に偏っているように見える。

この地域の地質は産総研シームレス地質図では新第三紀火山岩類として取り扱われるが、地層をより細かく区分したデータからは、鮮新世の英彦山火山岩類とその下位の北坂本累層に区分されている。大日岳、釈迦岳をつなぐ尾根線に沿った高標高部に英彦山火山岩類が分布し、その下位標高に北坂本累層が見られる。その両者の関係がキャップロック構造を作っている。それらの地質や岩相から見て英彦山火山岩類は水を透しやすく、両者の不整合面が仮に北側に傾斜していれば、いったん英彦山火山岩類の中に浸透した水は彦川流域に流出しやすいことになる。両者の崩壊発生密度の違いはこのような水理地質構造にも影響されている可能性がある。(西村、高見、松澤)の2次検討によれば箇所番号 22 で起きた崩壊はキャップロック型に区分されている。

大肥川上流と宝珠山川流域界にある独立峰、台山及び城ヶ迫は北坂本累層の上に載る英彦山火山岩類で構成される。城ヶ迫の尾根延長部では大肥川側の斜面で崩壊が発生しているがキャップロック型に区分されている。(箇所番号 176, 177) 大肥川中流部、鶴河内川下流部、小野川下流部では降水量は上流と比べると低い、350 mmから 500 mmレベルに入る。これらの地域は英彦山火山岩類で構成されるが上流域に比べむしろ崩壊密度は高い。また大肥川中流と小野川下流についてはいずれも右岸側の斜面や溪流で崩壊密度が高くなっている。

5.2.5 崩壊発生過程についての考察(表面流出と地下浸透)

(1) 起伏山地 花崗閃緑岩地域のケース

今回の豪雨でも時間雨量 60 mmを越えるような雨量強度の大きいピークが何度も発生しており、地下浸透が起きる前に表面流出がまず起きたことが考えられる。斜面末端部には、崖錐、崩落堆積物、また斜面全体にも土壌など表面浸食に弱い地質が存在する。また河川や溪流の流量が増大すると斜面基部に接する水衝部に崖錐、崩落堆積物あるいは強風化層があればこれらも容易に浸食除去されやすい。(抑え盛土の除去効果)これらの表面浸食の結果、河川の水の色は茶色に濁った濁水になる。

一方降雨の継続は、浸潤前線を斜面内部に対し前進させる。このため土壌層直下の強風化層の間隙水圧は上昇し、強度の小さい強風化層(斜面沿いのマサ化の進んだ層)の不安定化が進む。この斜面には主に強風化層で根系が発達するスギやヒノキの植林が多く、浸潤前線が強風化層の下部まで進行すると、根系のアンカー効果は低減する。

斜面全体の安定性を見ると斜面下部の弱い地質の浸食、比較的強度の小さい強風化層の間隙水圧増加などが重なり表層崩壊が起きたと考えられる。現地調査の結果では、崩落面の弱風化岩の表面には亀裂などに沿ってパイピングホール跡が見受けられる。これは崩壊部分より上方の斜面から供給された地下水が崩壊後には効率よく排水され、間隙水圧の面では上部斜面の安定化を意味する。もし、仮にこのような上方

からの地下水供給が早期（崩落以前）に起きると浸潤前線の前進と共に斜面の安定性を大幅に低下させる方向に寄与したかと思われる。

前述のように河川や溪流に接する水衝部に崖錐、崩落堆積物あるいは強風化層があればこれらも容易に浸食除去されやすいことは、河川や溪流の流量が増大するとそこに植林されていた樹木も押し流されたことを意味する。このことは上流で発生した流木をそこで捕捉できる“樹木群によるピア効果”が無くなったことを意味する。

（２）小起伏山地 三郡変成岩地域のケース

三郡変成岩地域においても無数の表層崩壊を生じており、斜面下部の弱い地質や強風化層（この場合風化残留物質は粘土質）の崩落への寄与も同様に起きたと推察される。しかしながら 5.2.4(1) で述べたように三郡変成岩地域では崩落面の深度が深く、規模の大きな崩壊や地滑りも同時に生じている。これは元来地滑り地形を示す斜面が存在したこと 5.2.2(1) で述べたようにホルンフェルス化などの影響で表層からの風化より、岩盤内部の傷の劣化が進みやすかったこと、北川流域を見ても崩落斜面の山地高度が花崗閃緑岩分布域より三郡変成岩地域が高く、岩盤内部の地下水供給による間隙水圧上昇が花崗閃緑岩より大きくなりやすい傾向にあったことなどが関係するかもしれない。

片理、節理、断層など潜在的な割れ目の連続性など本来の傷に対し、風化や緩みが強度や透水性に影響して、岩盤内部での傷の劣化が進行し、弱面や弱層を形成する原因となる。

地滑りなど斜面の安定性を検討するには、岩盤内部での間隙水圧の上昇と岩盤内部の弱面や弱層の連続性との関係性にも注目する必要がある。

地滑りの兆候を示す地形として頭部の滑落崖や凹地また端部では押出地形がある。また地滑りの前段階ともいえる緩み地形にも等高線の乱れがあり、地滑り地への降水が地下浸透をしやすいのはもちろん、上方斜面からの表流水も catch しやすい。地滑りの兆候を全く示さない斜面では、上方斜面からの水の供給は浸透水だけとなるのでもし岩盤内部の傷が原因で崩落や地滑りが発生する場合は豪雨の後期あるいは豪雨後に発生時期がずれ込む可能性もある。

片理面に沿いに弱層が流れ盤として存在すると、力学的に連続するすべり面を形成しやすく、また同時に流れ盤の上盤側は蓋としても機能するため、上部斜面内部から供給された地下水の逃げ場がなく、弱層に沿って間隙水圧が上昇しやすく、斜面の安定性が損なわれやすい。

日本応用地質学会豪雨調査団報告書の中で、奈良ヶ谷川流域での崩壊特性を調べた結果、流れ盤斜面では規模の大きい崩壊や地滑りの発生頻度が対岸の受盤となる斜面と比較し、高いことが報告されている。

乙石川上流部では最も規模の大きい（崩壊面積 22,000m²）地滑りが生じた、もともと地滑り地形を示した斜面が再活動したもので、ここでの崩落土砂は対岸にまで及び、天然ダム（土砂ダム）形成の可能性が指摘されている。もしそうであれば天然ダムの決壊は下流の溪岸崩壊を助長した可能性が大きい。

（３）大起伏山地 新第三紀火山岩地域のケース

この地域では累積降水量と崩壊密度の高いエリアは一致していない。

比較的新しい地質であり、地殻内部で生じた断層などの岩盤内部の古傷が少ない。

急峻な地形のため、強風化層は発達しない。また崖錐堆積物、溪流にたまった礫などは土石流の供給源となりやすい。

山地斜面の高度差が大きく、岩盤内部の地下水供給による間隙水圧上昇が大きい値になりやすい。特に山頂部に分布し、キャップロック構造を形成する英彦山火山岩類は主に溶岩流から構成され、地下水供給能力が大きいなどの特徴がある。

累積降水量が大きくとも岩盤内部の強度が大きな場合、すでに生産され崖錐や溪流にたまっている礫など粒径の大きな堆積物が発生源となった土石流の発生を除くと新たな崩壊は発生しにくく、岩盤内部の強度、透水性が小さい箇所を選択的に崩落や地滑りが発生したと考えられる。

参考文献

土地分類図福岡県（昭和 45 年）：国土庁土地局国土調査課、（財）日本地図センター発行
土地分類図大分県（昭和 47 年）：国土庁土地局国土調査課、（財）日本地図センター発行
地形学辞典（1981）：町田、井口、貝塚、佐藤、榎根、小野 編集 二宮書店
シームレス地質図：産業技術総合研究所
「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」：国土地理院
2017 年九州北部豪雨災害調査団報告書：（一社）日本応用地質学会

5.3 斜面崩壊地の特徴と植生被害等の状況

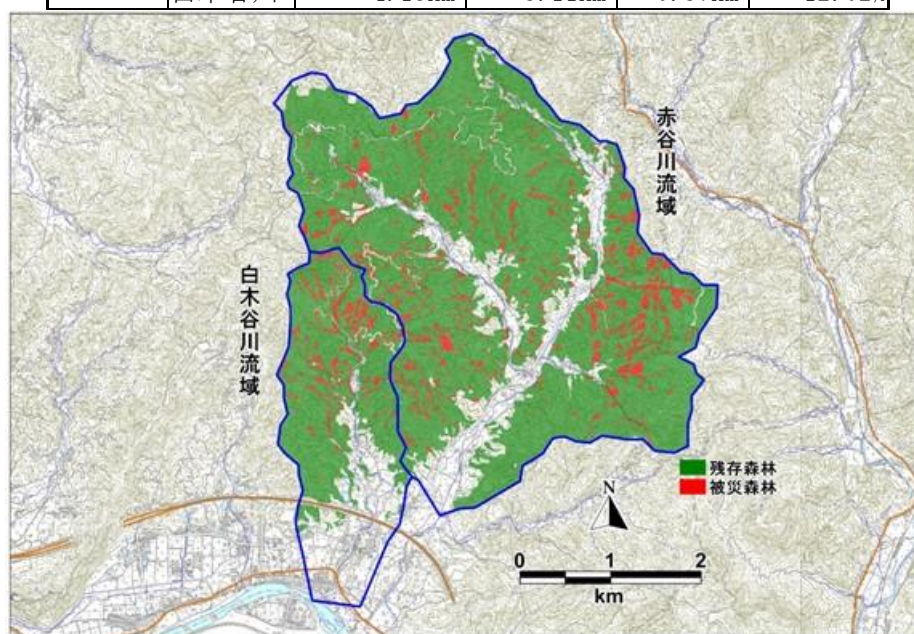
5.3.1 植生の被害状況の概要

赤谷川流域と白木谷川流域の土砂崩壊に伴う森林の被害範囲と被害面積を表5.3.1.1、図5.3.1.1に示す。平成29年7月九州北部豪雨に伴う土砂崩壊により被害(流亡)を受けた森林の面積は、赤谷川流域で1.30km²、白木谷川流域で0.37km²であった。各流域ともに、被害を受けた森林面積の割合は10%前後であった。

被害森林の植生タイプを図5.3.1.2に示す。被害を受けた森林の植生タイプについて、赤谷川流域、白木谷川流域ともに、スギ林の割合が最も高く、次いでヒノキ林であった。なお、植生被害の詳細については、次項に示す。

表5.3.1.1 森林の被害面積等

流域		流域面積	森林面積		被害割合
			被災前	被災	
福岡県	赤谷川	14.63km ²	13.35km ²	1.30km ²	9.80%
	白木谷川	4.13km ²	3.11km ²	0.37km ²	12.02%



注)森林分布は、福岡県森林簿データに基づく。

被災箇所(崩壊地)は、国土地理院「平成29年7月北九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」より識別。

図5.3.1.1 森林の被害状況

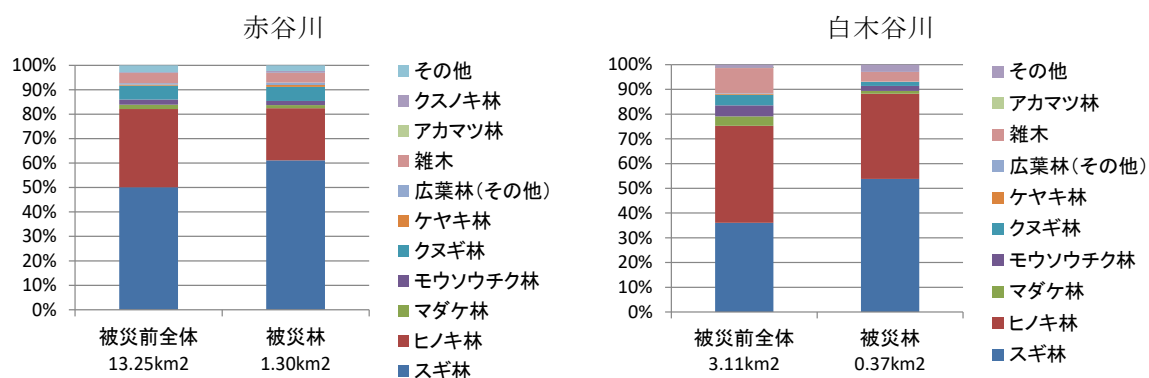


図5.3.1.2 被害森林の植生タイプ

5.3.2 斜面崩壊要因分析

(1) はじめに

本災害では、福岡県朝倉市の山間部を中心に斜面崩壊が集中的に発生し、下流域へ多量の土砂と流木が供給され、甚大な被害が発生した（写真 5.3.2.1）。

本報告では、本災害で発生した斜面崩壊を対象に、斜面植生を含め斜面崩壊に対する要因について多変量解析を用いて定量的に評価することを目的とする。斜面崩壊の要因分析に関しては、崩壊の有無と地質、斜面勾配、植生などの各要因との関係を統計的に処理する方法と、安全率などを用いて土中の力学的挙動を解析していく手法があるが、本研究では前者の方法によって解析することとする。既往研究においては、解析単位をメッシュとしている研究が多くみられるが、斜面全体の地形量を把握する必要性が指摘されている（佐藤ほか 2013；濱崎ほか 2015）。そのため本報告では、地形を考慮した解析単位として稜線と谷線に囲まれた斜面ユニット（周ほか 2005）を設定し分析した。

(2) 対象地の概要

対象地は、地理的には福岡県の中央部に位置し、対象地の南側を筑後川が流れている。村上・安田（2018）の知見を参考に、上流域が12時間累積雨量500mm以上の範囲に含まれる筑後川支流の桂川、妙見川、黒川、奈良ヶ谷川、北川、寒水川、白木谷川、乙石川、赤谷川、大山川の10河川の流域を対象地とした（図 5.3.2.1）。対象地の総面積は70.70km²であり、最大標高は690.8m、最小標高は22.4mである。地質は、20万分の1日本シームレス地質図（国土交通省）から判読すると、砂質準片岩と緑色岩等からなる変成岩が43.0%、花崗閃緑岩からなる深成岩が24.6%、砂や粘土が堆積した未固結が25.9%、輝石安山岩・角閃安山岩と凝灰角礫岩からなる火山性が6.5%を占めていた。対象地域は林業が古くから盛んな地域であり、スギ(*Cryptomeria japonica*)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)の生産量が高いことが特徴である。福岡県の森林簿から対象地に自生している樹種面積を判読すると、ヒノキ44.1%、スギ38.9%を含む針葉樹林は全体の94.5%、雑木林やクヌギ(*Quercus acutissima*)などの広葉樹林は11.4%、モウソウチク(*Phyllostachys edulis*)やマダケ(*Phyllostachys*



写真 5.3.2.1 多数の山地斜面崩壊の発生（上）及び下流に流下した流木・土砂（下：白木谷川）



図 5.3.2.1 分析対象流域（黒線内部）

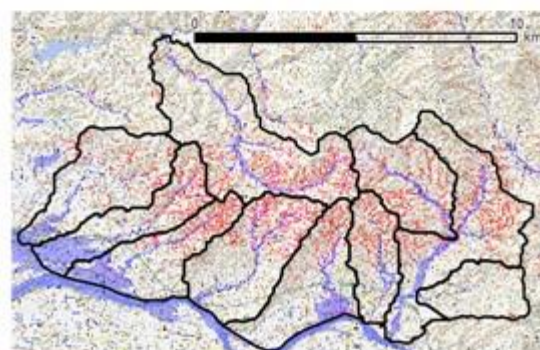


図 5.3.2.2 平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図（国土地理院）
※赤領域が斜面崩壊地

bambusoides)などの竹林は3.9%であった。年齢級（林齢を5年毎に区分したもの）は、ヒノキ、スギともに11～12年齢級、すなわち51～60年生のものが多かった（図5.3.2.3）。

（3）解析方法

表層崩壊を対象に、斜面崩壊の要因を分析するために、応答変数を解析対象とした斜面崩壊地（919データ）と斜面崩壊が発生しなかったSU（52,955データ）の2値データ、説明変数を傾斜、方角、集水面積、表層地質、樹種・樹齢、1時間最大雨量とした一般化線形モデル（GLM、generalized linear model、確率分布:二項分布、リンク関数:logit）を構築した。斜面傾斜は、国土地理院が発行する標高データを用いて、メッシュ毎に斜面傾斜のラスターデータを作成し、斜面傾斜の平均値を用いた。斜面方角は標高データを用いてメッシュ毎に斜面方角のラスターデータを作成し、斜面方角を度数によって8方位（0度以上22.5度未満を北、22.5度以上67.5度未満を北東、67.5度以上112.5度未満を東、112.5度以上157.5度未満を南東、157.5度以上202.5度未満を南、202.5度以上247.5度未満を南西、247.5度以上292.5度未満を西、292.5度以上337.5度未満を北西、337.5度以上360度以下を北）に分類し用いた。起伏量は、最小標高と最大標高の差とした。集水面積の算出には累積流量を算出する手順と同様に行い、解析には集水面積の平均値を用いた。地質データは、国土交通省国土交通課が発行する20万分の1日本シームレス地質図を参照し、地質分類は変成岩、火山性、深成岩、未固結の4つに区分し、面積が最大となる優占地質を用いた。樹種・樹齢（以下、植生とする）データの作成には福岡県の森林簿を用い、森林簿データがない領域は環境省自然環境局が発行する自然環境保全基礎GISデータで補完し、スギ、ヒノキ、その他針葉樹林、広葉樹林、竹林、その他土地利用の6項目に分類し用いた。スギとヒノキに関しては、林齢が1～10年生を幼齡林、11～25年生を若齡林1、26～40年生を若齡林2、41～60年生を壮齡林、61年生以上を老齡林として樹齢を区分した。

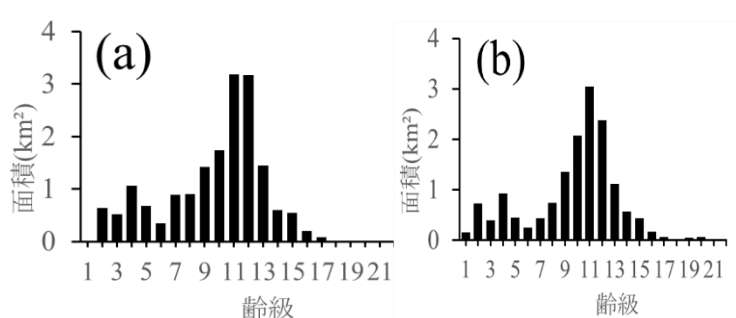


図5.3.2.5 ヒノキ(a)及びスギ(b)の年齢別面積

生しなかったSU（52,955データ）の2値データ、説明変数を傾斜、方角、集水面積、表層地質、樹種・樹齢、1時間最大雨量とした一般化線形モデル（GLM、generalized linear model、確率分布:二項分布、リンク関数:logit）を構築した。斜面傾斜は、国土地理院が発行する標高データを用いて、メッシュ毎に斜面傾斜のラスターデータを作成し、斜面傾斜の平均値を用いた。斜面方角は標高データを用いてメッシュ毎に斜面方角のラスターデータを作成し、斜面方角を度数によって8方位（0度以上22.5度未満を北、22.5度以上67.5度未満を北東、67.5度以上112.5度未満を東、112.5度以上157.5度未満を南東、157.5度以上202.5度未満を南、202.5度以上247.5度未満を南西、247.5度以上292.5度未満を西、292.5度以上337.5度未満を北西、337.5度以上360度以下を北）に分類し用いた。起伏量は、最小標高と最大標高の差とした。集水面積の算出には累積流量を算出する手順と同様に行い、解析には集水面積の平均値を用いた。地質データは、国土交通省国土交通課が発行する20万分の1日本シームレス地質図を参照し、地質分類は変成岩、火山性、深成岩、未固結の4つに区分し、面積が最大となる優占地質を用いた。樹種・樹齢（以下、植生とする）データの作成には福岡県の森林簿を用い、森林簿データがない領域は環境省自然環境局が発行する自然環境保全基礎GISデータで補完し、スギ、ヒノキ、その他針葉樹林、広葉樹林、竹林、その他土地利用の6項目に分類し用いた。スギとヒノキに関しては、林齢が1～10年生を幼齡林、11～25年生を若齡林1、26～40年生を若齡林2、41～60年生を壮齡林、61年生以上を老齡林として樹齢を区分した。

説明変数に関しては、多重共線性を確認するため、Pearson の相関係数を算出した結果、傾斜と起伏量の間に相関係数が 0.6 以上の高い値が示されたため、斜面崩壊発生に最も重要な説明変数である傾斜を採用し、起伏量を説明変数から除外した。また、1 時間最大雨量と 1.5 時間短期実効雨量については高い相関はみられなかったものの、同じ誘因としての説明変数であるため、1 つずつ説明変数に組み込みながら解析を行った。カテゴリー変数である方角は北を基準とし、地質と植生はそれぞれ分布面積が最大となる変成岩とヒノキ壮齡林を基準とした。

最もモデルへの適合度が高い説明変数の組み合わせに関しては赤池情報量基準（AIC: Akaike's information criterion）を基準とし、最も AIC が小さくなる説明変数の組み合わせを採用した。作成したモデルの精度を検証するために、AUC（AUC:area under the curve）を算出した。AUC は ROC（Receiver operating characteristic）曲線下部の面積で表される。AUC が 0.7 以上であればそのモデルの目的変数を良く説明していると考えことができ、0.5 未満では説明力はないと判断される（Pearce&Ferrier 2000）。なお、斜面崩壊地、非斜面崩壊の設定は以下のとおり行った。

a. 斜面崩壊地

斜面崩壊の抽出には、国土地理院による「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」を用いた（図 5.3.2.2）。斜面崩壊域は崩壊源、移動域、堆積域の 3 つの領域から構成され（古谷 1986）、図 5.3.2.2 の土砂崩壊地領域にはこれら 3 つの領域が混在している。そのため、災害が発生する前後の航空レーザ測

量（Light Detection and Ranging: LiDAR あるいは Laser Profiler: LP）による DEM データ（災害前の LP データ（平成 29 年 1 月撮影、日本測量調査技術協会 2017）、及び災害後の DEM データ（平成 29 年 7 月撮影、日本測量調査技術協会 2017）を用いて、災害前後の標高の差分値を GIS により算出して浸食域を特定し、土砂の攪乱状況を判別できる空中写真を重ね合わせるにより、斜面崩壊地を判読した（1370 箇所（図 5.3.2.4）。このうち、最大崩壊深が 10m 以上の深層崩壊地 41 箇所（図 5.3.2.5）、及び 2 次谷以上の集水域に存在する斜面崩壊地における溪流溪岸侵食型崩壊地 409 箇所を分析対象から除外した（解析対象表層崩壊地 919 箇所）。

b. 非斜面崩壊地

斜面ユニット（Slope Unit、以下SUとする）は、周ほか（2005）の定義に倣い、DEM（Digital Elevation Model）を用いて作成される稜線（以下、尾根線とする）と谷線で囲まれた範囲とした。SUの作成は、周ほか（2005）、Sun et al.（2019）を参考にして行った。解析にはGISのSpatial Analystツールの水文解析を用いた。斜面崩壊が発生しなかったSUを52,955箇所抽出した。

（4）結果及び考察

ベストモデルは、素因として傾斜、集水面積、表層地質、樹種・樹齢、誘因として1時間最大雨量が選択された（表5.3.2.1）。モデルの精度を表すAUCの値は0.723であり、0.7を超えているため、応答変数を良く説明していると判断された。斜面崩壊に正に寄与する有意な説明変数として、傾斜（ $z = 17.009$ 、 $P < 0.05$ ）、植生のスギ幼齢林（ $z = 5.995$ 、 $P < 0.05$ ）、スギ若齢林2（ $z = 1.967$ 、 $P < 0.05$ ）、スギ壮齢林（ $z = 9.139$ 、 $P < 0.05$ ）、ヒノキ若齢林2（ $z = 4.682$ 、 $P < 0.05$ ）、その他針葉樹林（ $z = 0.697$ 、 $P < 0.05$ ）、広葉樹林（ $z = 2.013$ 、 $P < 0.05$ ）、1時間最大雨量（ $z = 12.731$ 、 $P < 0.05$ ）が選択された。一方、斜面崩壊に負に寄与する有意な説明変数として、集水面積（ $z = -5.655$ 、 $P < 0.05$ ）、表層地質の未固結（ $z = -3.761$ 、 $P < 0.05$ ）が選択された。

傾斜については、傾斜が大きくなるほど、崩壊に正に寄与し、20度を超えると崩壊確率が0.01を超えることが示された。既往研究においても、傾斜が20度を超えると崩壊しやすいことが明らかにされており（大林ほか 1990）、本解析の結果は、それを支持するものであった。また、推定された崩壊確率の妥当性を検討するため、崩壊地レイヤと傾斜レイヤを重ね合わせることで、傾斜ごとに崩壊面積率を算出した。その結果、傾斜15度から20度では崩壊面積率が0.02となり、傾斜の応答変数とほぼ一致する結果が得られ、妥当性を確認することができた。

集水面積は、集水面積が大きくなるほど斜面崩壊に負に寄与することが示された。豪雨による斜面崩壊では、集水面積が大きい谷地形で崩壊が多発しやすいが（沖村 1983）、本災害においては、0次谷で崩壊が多発したことが報告されている（林野庁 2017）。本解析の結果は、集水面積が小さくなるほど、崩壊確率が高くなる、つまり、集水面積が小さく、明確な谷地形への発達段階である0次谷で崩壊しやすいこと

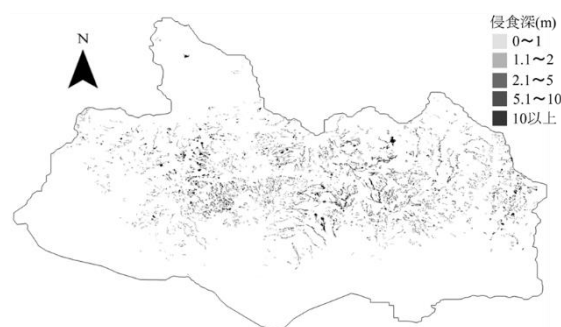


図 5.3.2.4 差分解析による土砂崩壊地の侵食深の分布図

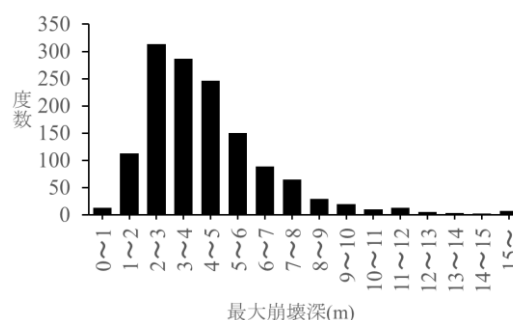


図 5.3.2.5 最大崩壊深のヒストグラム

を示唆しており、既往の報告を定量的に支持するものとなった。

地質は、未固結が深成岩、変成岩、火山性と比較して崩壊しにくいという結果が得られた。火山性である安山岩と凝灰角礫岩は、地質構造によりキャップロック構造（上部：節理が発達する安山岩溶岩、下部：難浸透性の凝灰角礫岩）を伴うことがあり、被災地もキャップロック構造が斜面崩壊発生の要因となったことが報告されている（松澤 2018）。また、深成岩である花崗閃緑岩はマサ土化していたことが確認されている（山本ほか 2018）。マサ土は降雨に対して強度が非常に弱くなるため（八木 1990）、崩壊が多発したと考えられた。変成岩である結晶片岩は、断層砕波帯を有していることがあり、これにより崩壊が多発することが示されている（林 2008）。被災地でも、断層砕波帯に起因した崩壊が存在しており（山本ほか 2018）、崩壊の発生に影響を与えたと考えられた。

植生に関しては、多くの既往研究で樹齢が増加することで抑制機能が働くことを示しているが（例えば、阿部 1997; 小山内ほか 2011）、スギの抑制機能は、樹齢が30年生を超えると頭打ちになることが報告されている（掛谷ほか 2016）。本研究では、スギにお

いては若齢林2（26年生～40年生）以上になると幼齢林より崩壊しにくいことが示された。しかし、若齢林2と壮齢林、老齢林間で有意差が検出されなかったことから、26年生以上になると抑制機能が頭打ちになる可能性が示唆され、既往研究を支持する結果が得られた。一方で、ヒノキの崩壊確率はスギほど樹齢による違いが見られなかった。根系の引き抜き抵抗力の樹齢による増加率は、ヒノキはスギほど大きくないことが示されている（田中 1997）。また、ヒノキの根系は、水平分布が集中型であり、分岐也多岐にわたる（刈住 2010）。そのため、ヒノキでは幼齢林でもある程度の抑制機能が働いた可能性が示唆された。これらの根系の力学的強度や構造の違いが、ヒノキとスギで異なる傾向をもたらしただと考えられた。しかし、刈住（2010）の根系構造は水平面での議論であり、根系の構造や分布は斜面傾斜により変化することが知られている（福永 2006；茅島・佐々木 2010）。そのため、斜面における根系構造と抑制機能を議論するためには、今後より詳細な知見を得ていく必要があるだろう。

雨量は、1時間最大雨量が100mmを超えると崩壊確率は0.006を超え、150mmを超えると、崩壊確率は0.02を超え大きく上昇することが示された。今後、気候変動によって予想される降雨の変化倍率は、対象地の九州北西部では、1.4倍であることが示されている。今後の気候変動により降雨の倍率が変化した場合、崩

表 5.3.2.1 GLM により選択された説明変数

説明変数		回帰係数	標準偏差	z 値	P 値
(Intercept)		-10.046	0.362	-27.730	<0.05
傾斜		0.088	0.005	17.009	<0.05
方角	東	0.253	0.176	1.438	0.150
	北東	0.112	0.187	0.600	0.549
	北西	-0.293	0.184	-1.592	0.111
	南	-0.078	0.158	-0.492	0.623
	南東	0.189	0.159	1.192	0.233
	南西	-0.150	0.164	-0.914	0.361
	西	-0.004	0.172	-0.023	0.982
集水面積		-0.010	0.002	-5.655	<0.05
表層地質	火山性	0.013	0.145	0.087	0.930
	深成岩	0.120	0.077	1.556	0.120
	未固結	-1.352	0.359	-3.761	<0.05
植生	スギ幼齢林	1.036	0.173	5.995	<0.05
	スギ若齢林 1	0.165	0.249	0.665	0.506
	スギ若齢林 2	0.247	0.125	1.967	<0.05
	スギ壮齢林	1.492	0.163	9.139	<0.05
	スギ老齢林	0.102	0.166	0.613	0.540
	ヒノキ幼齢林	-0.266	0.168	-1.581	0.114
	ヒノキ若齢林 1	0.219	0.141	1.554	0.120
	ヒノキ若齢林 2	0.732	0.156	4.682	<0.05
	ヒノキ老齢林	0.317	0.172	1.846	0.065
	その他針葉樹林	0.697	0.264	2.641	<0.05
	広葉樹林	0.284	0.141	2.013	<0.05
	竹林	0.011	0.150	0.070	0.944
	その他土地利用	0.155	0.240	0.648	0.517
1 時間最大雨量		0.022	0.002	12.731	<0.05
1.5 時間短期実効		-	-	-	-

壊確率は0.02に上昇することが本解析結果から推定され、土砂災害に対する早急な対策が必要であることが再確認された。

本解析では崩壊歴に関するデータは得られなかったため、説明要因から除外した。しかし、対象地の一部が、約200年前の享保五年の大雨災害で被災した地域と一致していることが報告されている（加納ほか2018）。また、斜面崩壊の発生頻度は、崩壊予備物質としての土層の成長速度の違いにより異なり、対象地に分布していた花崗岩類地質における斜面崩壊の発生頻度は、10～100年単位であることが示されており（西山・若月 2015）、約200年前に発生した災害と時間スケールが一致している。そのため、対象地においても、崩壊予備物質として土層が十分に発達した状態で、豪雨によって誘因の影響が高まったことにより崩壊が多発したと考えられる。今後は、崩壊歴や土層厚の面的かつ定量的なデータを用いることで斜面崩壊の発生要因をより詳細に議論することが必要である。

（５）まとめ

本報告では、斜面ユニットを解析単位として、斜面崩壊の有無を応答変数、傾斜、方角、集水面積、表層地質、植生、1時間最大雨量を説明変数とした一般化線形モデル（GLM）を構築することにより、斜面崩壊の要因分析を行った。その結果、斜面崩壊に正に寄与する要因として傾斜、1時間最大雨量、斜面崩壊に負に寄与する要因として集水面積が選択された。また、表層地質に関しては未固結が變成岩、深成岩、火山性より崩壊しにくいこと、植生に関しては、スギ幼齢林はスギ壮齢林、ヒノキ壮齢林、広葉樹林より崩壊しやすいことが明らかになった。今後これらの知見を踏まえ、減災、林業、生物多様性等の様々な知見から持続可能な社会を実現するための検討を行うことが必要である。また、災害リスクの低減に関しては、山地斜面の崩壊リスクのみでなく、居住地等の防災上重要な場所における災害が最小化され等、下流へのリスク評価を含めた適切な土地利用のあり方を検討する必要があると考えられる。

引用文献

- 阿部和時（1997）樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の 評価方法に関する研究．森林総研研報**373**:105-181.
- 福永健司（2006）斜面における樹木の根系分布．日本緑化工学会誌．**31**:338-345.
- 林拙郎（2008）自然環境保全のための保全砂防学入門-土砂災害の予知と防災-．電気書院
- 国土交通省国土交通課：20 万分の 1 日本シームレス地質図，
http://nrbwww.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landc-classification/download_2001
G 空間情報センター：https://www.geospatial.jp/gp_front/
- 掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣 逸朗・阿部和時（2016）スギ林分の間伐が根系生長と表崩壊防止機能に与える影響．日本緑化工学会誌**42**:299-307.
- 茅島信行・佐々木重行（2010）斜面傾斜地における根系分布の偏りがスギの引き倒し試験に与える影響．森林立地学会誌**52**: 49-55.
- 荻住昇（2010）最新 樹木根系図説 総論．誠文堂新光社．東京．
- 小山内信智・桂真也・富田陽子・小川紀一郎・中田慎（2011）森林の崩壊抑制効果を反映した生産土砂量の推定に向けた一考察 -豪雨災害時の崩壊面積率の解析-砂防学会誌**63**（5）:22-32.
- 村上亘・安田幸生（2018）2017年7月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について．森林総合研究所研究報告**17**: 111-115.
- 西山賢一・若月強（2015）日本の山地斜面における豪雨に起因した斜面崩壊・土石流の発生頻度．応用

地質**55**:325-333.

沖村孝 (1983) 地形要因を利用した豪雨による山腹崩壊発生位置の予知システムについて. 土木学会論文報告書**338**:131-138.

大林成行・小島尚人・笠博義 (1990) 斜面崩壊予測を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実利用化について. 土木学会論文集**415**:71-80.

林野庁 (2017) 「流木災害等に対する治山対策検討チーム」 中間取りまとめ (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/tisan/171102.html>, 2019年7月30日確認)

佐藤創・石丸聡・川上源太郎・菅野正人・長坂晶子・阿部友幸・対馬俊之・田近淳 (2013) 2003年台風10号による北海道日高地方厚別川流域における斜面崩壊要因. 砂防学会誌**66**:40-47.

周国云・江崎哲郎・謝謨文・佐々木靖人 (2005) GISを用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出する方法の開発と適用. 日本応用地質学会 **46**:28-37.

Sun X., Chen J., Han X., Bao Y., Zhan J. Peng W. (2019) Application of a GIS-based slope unit method for landslide susceptibility mapping along the rapidly uplifting section of the upper Jinsha River, South-Western China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment: 1-17

田中貴宏・三笠友洋・内平隆之・山崎義人・重村力 (2014) GISを活用した谷戸の基礎的単位の抽出手法に関する研究-横浜市を事例に-. 日本建築学会計画系論文集**79**:933-938.

八木則男・矢田部龍一・榎明潔 (1990) 降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量. 土木学会論文集**418**: 65-73.

濱崎英作・檜垣大助・林一成 (2015) GISに基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動解析と過誤確率分析法-2008年岩手・宮城内陸地震での事例研究-. 日本地すべり学会**52**:51-59.

山本茂雄・矢田純・肘井敬明・矢野健二 (2018) 乙石川沿いで発生した斜面崩壊の分類と特徴、及び水文地質背景. 2017年九州北部豪雨災害調査団報告書. 日本応用地質学会:43-52.

5.3.3 土砂崩壊地と地形・植生の関係について

(1) 方法

①検討範囲の設定

検討範囲は、降雨量が多く土砂崩壊が多発した流域のうち、森林に該当する領域を対象に設定した。具体的には、赤谷川、乙石川、白木谷川、寒水川、北川、奈良ヶ谷川、妙見川、桂川、新立川、黒川の各流域内のうち、国土数値情報により「森林地域」として指定された領域とした。

崩壊地は、国土地理院が公表する「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」より、画像処理ソフトにて土砂崩壊地をポリゴンとして抽出し、ESRI社ArcGIS 4.1にてジオリファレンス機能を用いて座標付けを行った。



図5.3.3.1 検討対象範囲及び土砂崩壊地の分布

②土砂崩壊地と地形との関係性

国土地理院が公表する 10m 数値標高モデルを利用して、土砂崩壊地と地形条件との関係性について検討を行った。

土砂崩壊地の最小面積が 400m² 程度であったことから、検討対象範囲をカバーする 20m 角セルを整備し、セル内の最大傾斜度、断面曲率、平面曲率を ArcGIS の Spatial Analyst 機能を用いて算出した。

曲率は、曲線や曲面の曲がり具合を表す量であり、斜面地形の凹凸の指標として砂防分野等で適用例が多く自セルを中心とした周囲の DEM データを基に算出される。図 5.3.3.2 のとおり、斜面の断面形状を示す断面曲率と、平面形状を示す平面曲率の組み合わせで表現される。断面曲率は、侵食や堆積につながる流れの加速と減速に関わる指標で、負の値は斜面が上方向に凸状であることを、正の値は斜面が上方向に凹状であることを、ゼロは斜面が直線であることを示す。平面曲率は、流れの収束と分岐に関わる指標で、正の値は斜面が横方向に凸状であることを、負の値は斜面が横方向に凹状であることを、ゼロは斜面

が直線であることを示す。この断面曲率と平面曲率の組み合わせにより、斜面の形状は表 5.3.3.1 及び図 5.3.2.3 に示す 9 つに分類され、丘陵地では「凸型尾根型」または「凹型谷型」に分類されることが多い。

土砂崩壊地と地形との関係性の検討は、土砂崩壊が発生したセル群と検討範囲全体での傾斜度の分布の比較及び斜面分類の構成状況の比較により行った。さらに、各々の斜面分類について、土砂崩壊が発生したセル群または検討範囲全体に占める構成割合を基に、以下に示す「Jacobs の選択度指数D」を算出した。この指数は-1 から 1 の間をとり、正の場合は土砂崩壊がその斜面分類に偏って分布し、負の場合は避けて分布することを示す。また、±1 に近づくほどその傾向が強いことを示す。

$$\text{選択度指数 } D = (r - p) / (r + p - 2r \cdot p)$$

$0 < D \leq 1$: 値が大きいほど、土砂崩壊がその斜面分類に偏って分布

$D = 0$: 土砂崩壊とその斜面分類間の関連性は無い（一様に分布）

$-1 \leq D < 0$: 値が小さいほど、土砂崩壊がその斜面分類を避けて分布

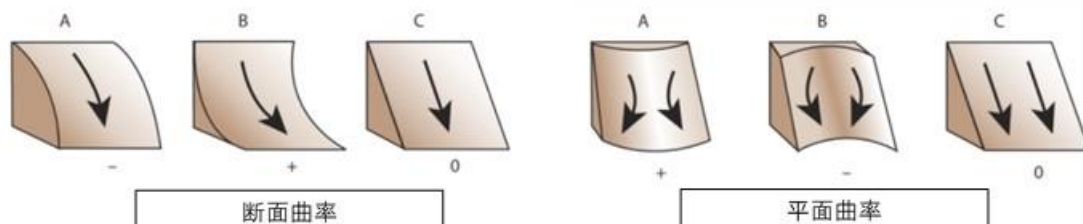
ただし、

p（全体率）：検討範囲全体のセルにおける各斜面分類の構成割合

（例：検討範囲全体のセル数をa、その中で特定の斜面分類のセル数をbとすると、 $p = b / a$ ）

r（利用率）：土砂崩壊が発生したセル群における各斜面分類の構成割合

（例：土砂崩壊が発生したセル数をc、その中で特定の斜面分類のセル数をdとすると、 $r = d / c$ ）



出典：Environmental Systems Research Institute, Inc. (2017)

図 5.3.3.2 断面曲率及び平面曲率

表 5.3.3.1 断面曲率及び平面曲率による斜面分類

斜面分類		平面曲率		
		0※	正	負
断面曲率	0※	等斉直線	等斉尾根型	等斉谷型
	負	凸型直線	凸型尾根型	凸型谷型
	正	凹型直線	凹型尾根型	凹型谷型

※「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書（案）平成 28 年 3 月 林野庁」を参考に 0.05 以上を正值、-0.05 以下を負値、-0.05 超 0.05 未満を 0 として扱った。

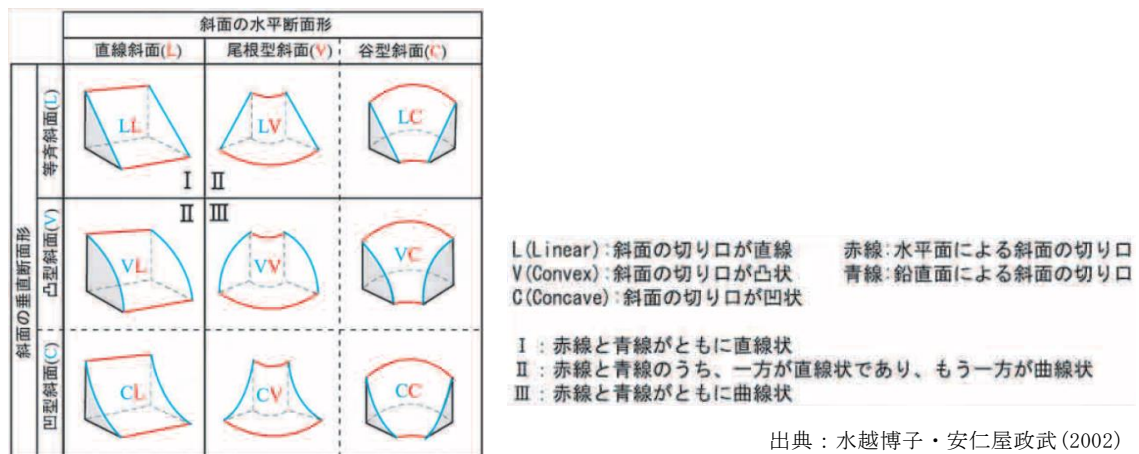


図 5.3.3.3 断面曲率及び平面曲率による斜面分類

③ 土砂崩壊地と地質との関係性

土砂崩壊地と地質との関係性について、(独)産業技術総合研究所の20万分の1シームレス地質図を利用し、地形条件と同様の手法で、土砂崩壊地内と検討範囲全体での地質の構成割合の比較を行った。

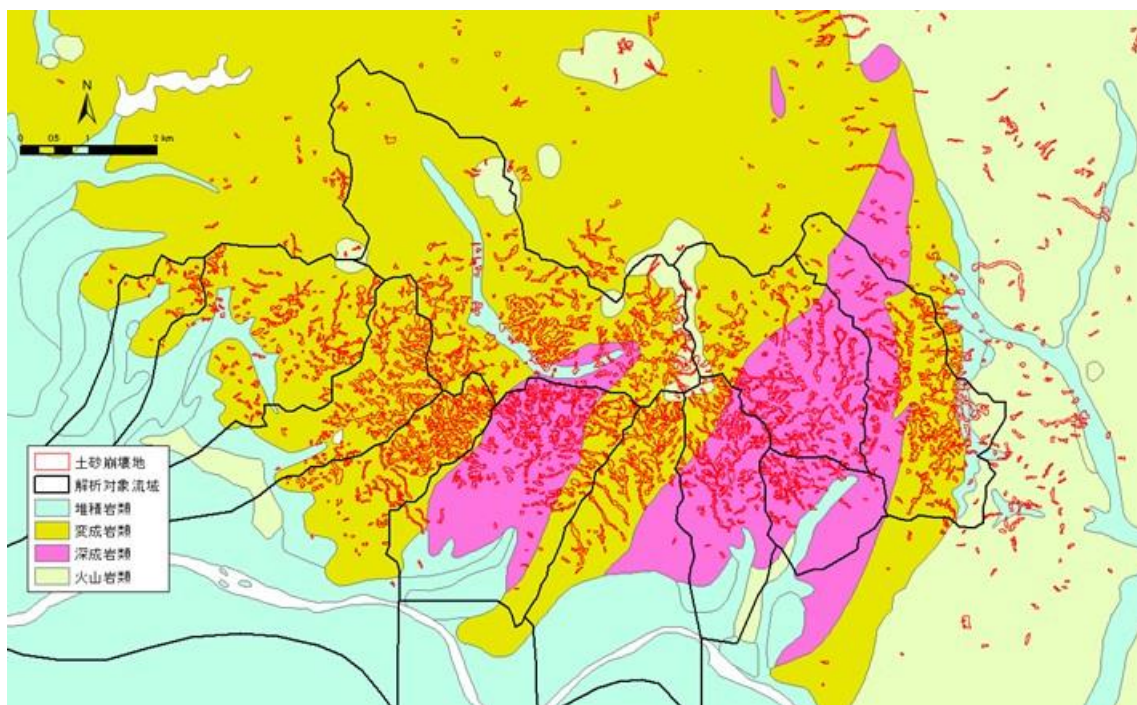


図5.3.3.4 検討対象範囲の地質構成

④ 土砂崩壊地と植生との関係性

土砂崩壊地と植生との関係性について、福岡県より提供を受けた森林GISデータが整備された領域(朝倉市及び東峰村のうち国有林以外の森林)を対象とし、地形条件と同様の手法で、土砂崩壊地内と検討範囲全体での樹種または齢級区分の構成割合の比較を行った。

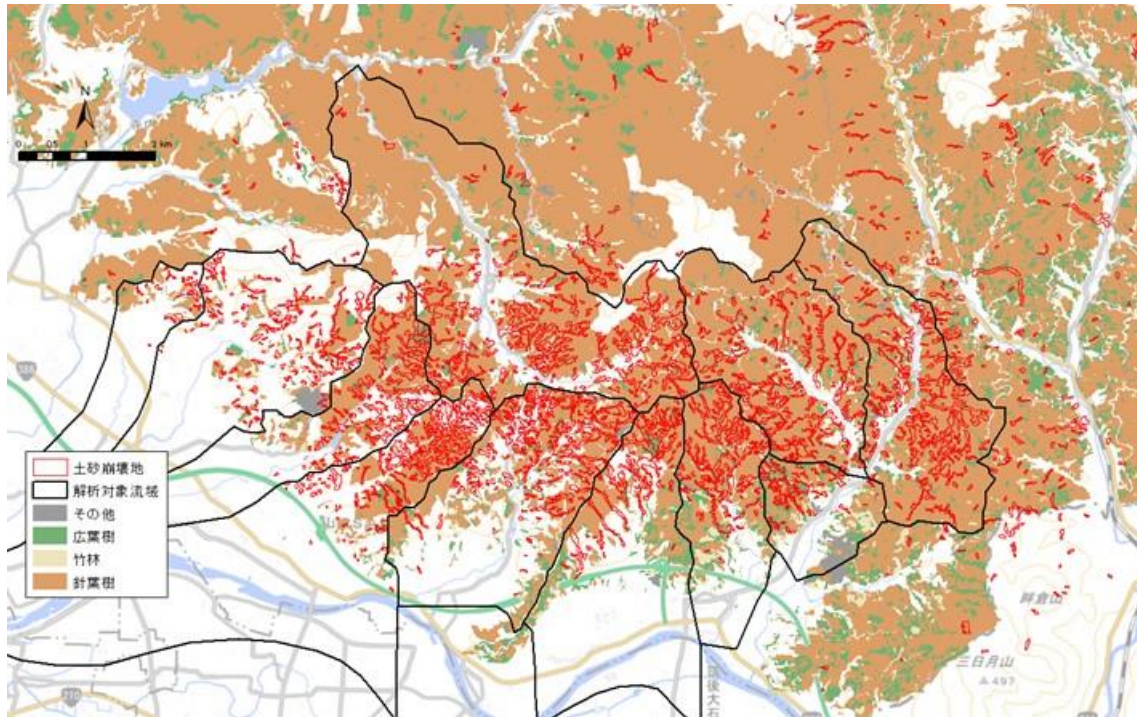


図5.3.3.5 検討対象範囲の樹種構成

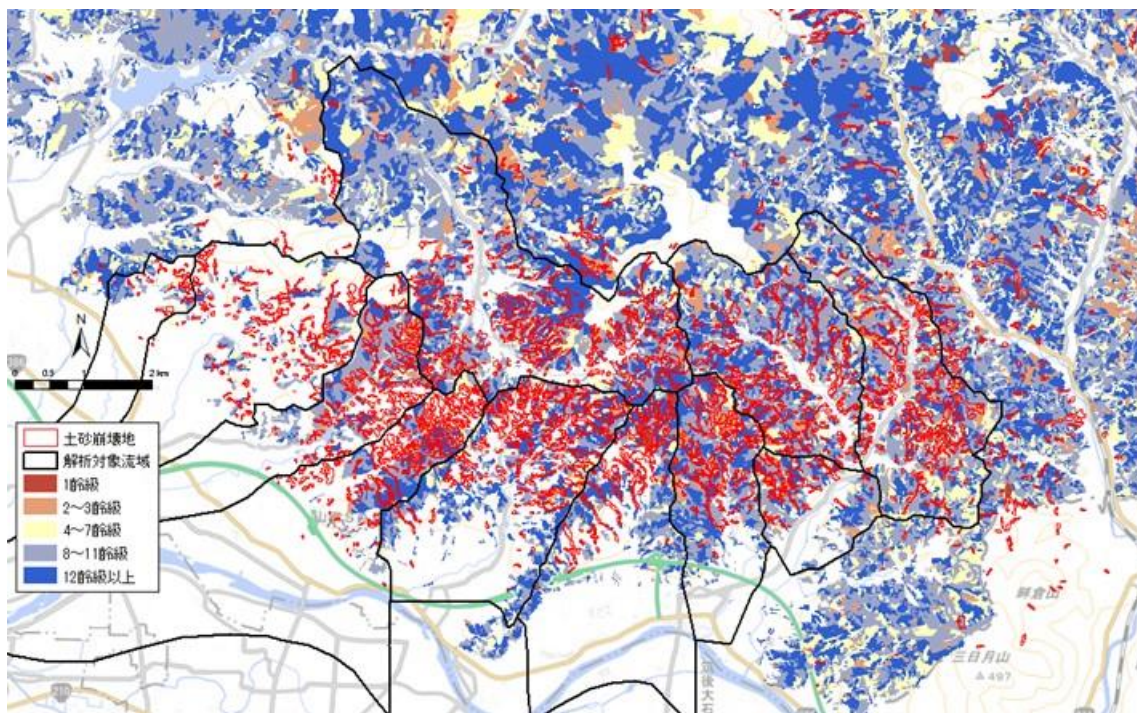


図5.3.3.6 検討対象範囲の齢級区分構成

(2) 結果

① 土砂崩壊地と地形との関係性

傾斜度、断面曲率、平面曲率について、土砂崩壊地を含むセルと含まないセルの比較を表5.3.3.2に示す。

いずれも数値の分布に明瞭な差は認められなかったが、断面曲率については、崩壊ありでは凹型斜面に、崩壊なしでは凸型斜面に区分されるものが多く、平面曲率については、崩壊ありでは谷型斜面に、崩壊なしでは尾根型斜面に区分されるものが多かった。

表5.3.3.2 崩壊の有無と地形データの分布比較

項 目	傾斜度		断面曲率		平面曲率	
	崩壊あり	崩壊なし	崩壊あり	崩壊なし	崩壊あり	崩壊なし
平均値	29.3	28.0	0.40 [凹型]	-0.11 [凸型]	-0.33 [谷型]	0.18 [尾根型]
中央値	29.9	28.4	0.39 [凹型]	-0.09 [凸型]	-0.20 [谷型]	0.25 [尾根型]
最大値	52.9	63.8	8.64 [凹型]	8.81 [凹型]	6.35 [尾根型]	7.49 [尾根型]
最小値	2.7	0.6	-7.37 [凸型]	-8.26 [凸型]	-6.30 [谷型]	-6.36 [谷型]
標準偏差	7.6	8.0	1.44	1.34	1.53	1.42

※断面曲率：0.05 以上で凹型、-0.05 以下で凸型斜面、平面曲率：0.05 以上で尾根型、-0.05 以下で谷型斜面

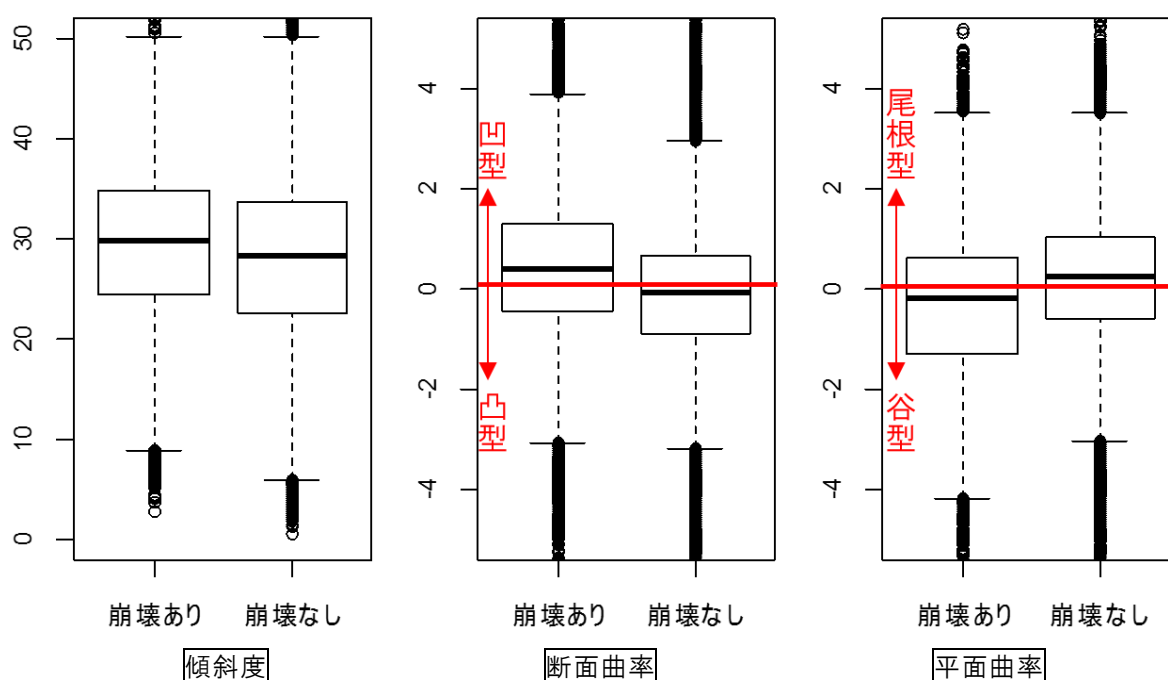


図5.3.3.7 崩壊の有無と地形データ

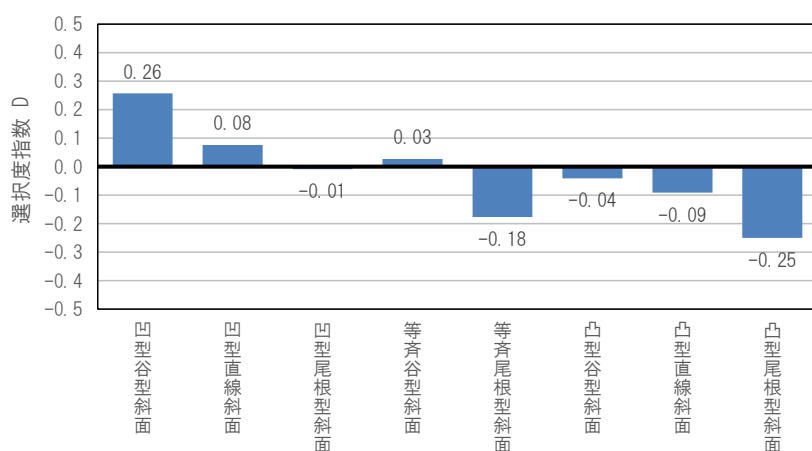
断面曲率と平面曲率の組み合わせより斜面を9つに分類し、土砂崩壊地及び検討範囲全体での構成状況を比較した結果を表5.3.3.3に示す。検討範囲全体では「凹型谷型斜面」と「凸型尾根型斜面」の占める割合が高く、ほぼ同様の構成割合となった一方で、土砂崩壊地では凹型谷型斜面の構成割合が高い傾向が認められた。

また、土砂崩壊が発生したセル群と検討範囲全体での、それぞれの斜面分類の構成割合からJacobsの選択度指数Dを算出した結果を図5.3.3.8に示す。前述したとおり、選択度指数は-1から1の間をとる指数であり、正の場合はその斜面分類に偏って分布し、負の場合は避けて分布することを示す。また、±1に近づ

くほどその傾向が強いことを示す。算出の結果、土砂崩壊は0次谷等の「凹型谷型斜面」に偏って発生し、「凸型尾根型斜面」では発生しにくい傾向が認められた。

表5.3.3.3 土砂崩壊地及び検討範囲全体での斜面分類の構成状況

項 目		凹型 谷型 斜面	凹型 直線 斜面	凹型 尾根型 斜面	等斉 谷型 斜面	等斉 直線 斜面	等斉 尾根型 斜面	凸型 谷型 斜面	凸型 直線 斜面	凸型 尾根型 斜面
崩 壊 地	セル数	9,918	468	3,603	340	23	351	2,304	271	5,608
	割合 %	43.3%	2.0%	15.7%	1.5%	0.1%	1.5%	10.1%	1.2%	24.5%
検討範囲 全 体	セル数	27,416	1,551	14,069	1240	146	1,916	9,545	1,249	30,909
	割合 %	31.1%	1.8%	16.0%	1.4%	0.2%	2.2%	10.8%	1.4%	35.1%



注：検討範囲全体での構成割合が1%未満の斜面分類は表示していない。

図 5.3.3.8 土砂崩壊地の斜面分類の選択度指数

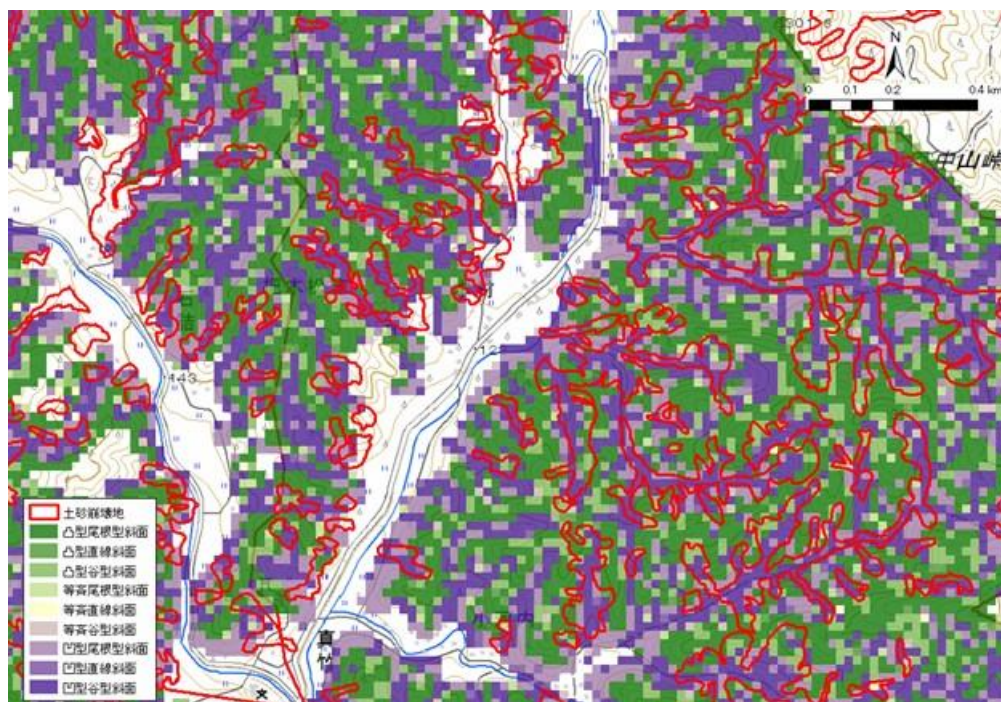


図 5.3.3.9 斜面分類と土砂崩壊地の分布状況（赤谷川・乙石川合流点付近の例）

② 土砂崩壊地と地質との関係性

土砂崩壊地及び検討範囲全体の地質構成を比較した結果を表5.3.3.4に示す。検討範囲全体では三郡周防帯に属する「変成岩類」が6割超、花こう閃緑岩等の「深成岩類」が3割弱を占め、土砂崩壊地においてもほぼ同様の構成割合を示した。

土砂崩壊地と検討範囲全体での、それぞれの地質別面積割合からJacobsの選択度指数を算出した結果を図5.3.3.10に示す。火山岩類で負の値を示し土砂崩壊が発生しにくい傾向は認められたが、主要な構成地質である変成岩類と深成岩類では明瞭な傾向は認められなかった。

表5.3.3.4 土砂崩壊地及び検討範囲全体での地質構成状況

項 目		堆積岩類	火山岩類	変成岩類	深成岩類	その他
崩 壊 地	面積 ha	16.6	17.6	392.1	180.2	0.0
	割合 %	2.7%	2.9%	64.6%	29.7%	0.0%
検討範囲 全 体	面積 ha	90.1	210.9	2,493.7	1,108.4	0.6
	割合 %	2.3%	5.4%	63.9%	28.4%	0.0%

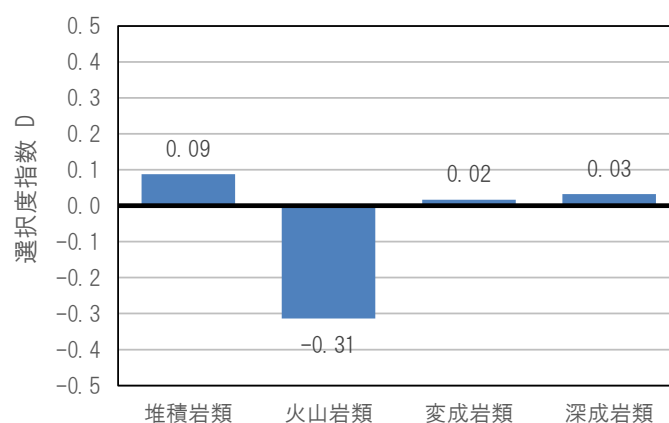


図 5.3.3.10 土砂崩壊地の地質の選択度指数

③土砂崩壊地と植生との関係性

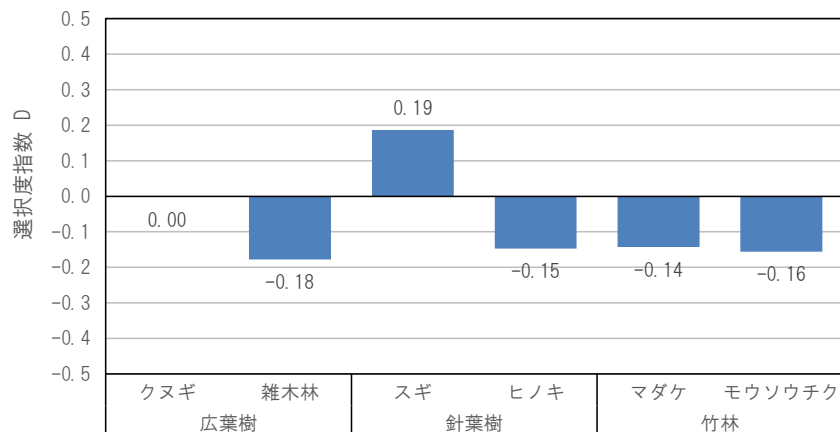
・ 樹種

土砂崩壊地及び検討範囲全体の樹種構成を比較した結果を表5.3.2.5に示す。検討範囲全体ではスギ及びヒノキの人工林が8割超を占め、土砂崩壊地においても両樹種で同様の割合を占めた。

土砂崩壊地と検討範囲全体での、それぞれの樹種別面積割合からJacobsの選択度指数を算出した結果を図5.3.3.11に示す。スギでやや崩壊が発生しやすく、雑木林でやや発生しにくい傾向が認められた。

表5.3.3.5 土砂崩壊地及び検討範囲全体での樹種構成状況

項 目		広葉樹				針葉樹			竹林		
		クヌギ	ケヤキ	雑木林	その他	スギ	ヒノキ	その他	マダケ	モウソウチク	その他
崩 壊 地	面積 ha	19.4	2.8	18.0	8.9	229.9	192.0	5.2	4.4	6.5	0.1
	割合 %	4.0%	0.6%	3.7%	1.8%	47.2%	39.4%	1.1%	0.9%	1.3%	0.0%
検討範囲 全 体	面積 ha	166.4	19.1	216.8	33.4	1,583.2	1,945.1	78.0	49.7	75.3	1.0
	割合 %	4.0%	0.5%	5.2%	0.8%	38.0%	46.7%	1.9%	1.2%	1.8%	0.0%



注：検討範囲全体での構成割合が1%未満の樹種は表示していない。

図 5.3.3.11 土砂崩壊地の樹種の選択度指数

・ 齢級区分

土砂崩壊地及び検討範囲全体の齢級区分の構成を比較した結果を表5.3.3.6に示す。解析範囲全体では針葉樹の8齢級以上（樹齢36年以上）の壮齢林が7割以上を占めていた。一方で土砂崩壊地では1～3齢級の幼齢林の構成割合が解析範囲全体よりも高い傾向が認められた。

土砂崩壊地と解析範囲全体での、齢級区分別の面積割合からJacobsの選択度指数を算出した結果を図5.3.3.12に示す。土砂崩壊地は、広葉樹・針葉樹ともに、幼齢林で正の値を示し崩壊地が偏って分布する傾向が認められた。一方で、広葉樹の壮齢林では負の値を示し、崩壊が発生しにくい傾向が認められた。また、針葉樹の壮齢林では明瞭な傾向は認められず、今回の豪雨においては土砂崩壊を防止する効果は限定的と考えられた。

表5.3.3.6 土砂崩壊地及び検討範囲全体での齢級区分構成状況

項 目		広葉樹				針葉樹			
		1～3 齢級	4～7 齢級	8～11 齢級	12 齢級 以上	1～3 齢級	4～7 齢級	8～11 齢級	12 齢級 以上
崩 壊 地	面積 ha	21.2	8.0	11.1	8.8	57.0	56.3	164.5	147.5
	割合 %	4.5%	1.7%	2.3%	1.9%	12.0%	11.9%	34.7%	31.1%
検討範囲 全 体	面積 ha	101.8	82.8	126.8	124.6	291.9	551.6	1,524.7	1,218.7
	割合 %	2.5%	2.1%	3.2%	3.1%	7.3%	13.7%	37.9%	30.3%

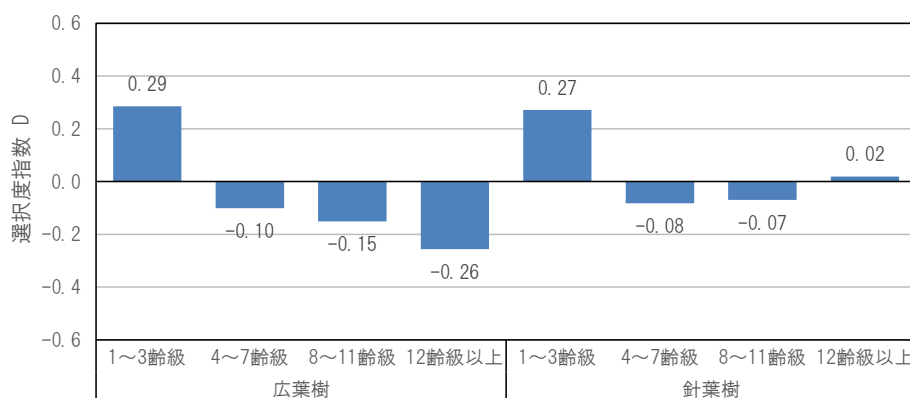


図 5.3.3.12 土砂崩壊地の齢級区分の選択度指数

（３）考察

土砂崩壊地と地形・植生との関係を個別に分析した結果、以下の傾向が認められた。

- 土砂崩壊は、斜面が断面形・平面形ともに凹型を示す 0 次谷等の「凹型谷型斜面」に偏って発生した一方、断面形・平面形ともに凸型を示す「凸型尾根型斜面」では発生しにくい傾向が認められた。
- 土砂崩壊は、樹齢が若い幼齢林に偏って発生する傾向が認められた。また、広葉樹林の壮齢林では崩壊が発生しにくい傾向が認められたが、針葉樹林の壮齢林では樹齢を重ねた林分であっても、今回の豪雨においては土砂崩壊を防止する効果は限定的と考えられた。

ここで、地形条件とそこに成立する植生、及び土砂崩壊の有無との相互の関連性について把握するため、土砂崩壊が起こりやすいと推定された「凹型谷型斜面」と、土砂崩壊が起こりにくいと推定された「凸型尾根型斜面」の 2 つの斜面分類に注目し、各斜面分類の特徴について分析した。

なお、斜面分類は曲率を基に 20m セル単位で行っているため、今後示す図表の植生データは、セル内の最大面積を占める代表植生を当該セルの植生として扱い、そのセル数を集計したものである。

③ 斜面分類・傾斜度・崩壊有無の関係

凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面の平均的な傾斜度を表 5.3.3.6 に示す。平均傾斜度はいずれの斜面分類も 24 度程度で、明瞭な差は認められない。崩壊の有無に着目すると、凸型尾根型斜面で崩壊したセルの平均傾斜度（26.7°）は、崩壊していないセルの平均傾斜度（23.9°）と比較するとやや大きく、3° 弱（5% 勾配程度）の差が認められた。

なお、既往知見（藤堂ら 2011）では、山腹崩壊と地形（斜面勾配）との関係が認められ、森林植生の有無を問わず勾配別の崩壊面積は 30～45° の範囲が顕著であった一方、斜面勾配が 15° 未満の有林地では崩壊が起こりにくかったという報告もある。

表 5.3.3.6 斜面分類毎の傾斜度の状況

斜面分類		平均傾斜度	標準偏差
凹型谷型斜面 (崩壊しやすい)	(全体)	24.0	8.0
	崩壊なしセル	24.2	8.1
	崩壊ありセル	23.8	7.8
凸型尾根型斜面 (崩壊しにくい)	(全体)	24.4	8.0
	崩壊なしセル	23.9	8.0
	崩壊ありセル	26.7	7.6

④ 斜面分類・植生・崩壊有無の関係

基本情報として、凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面の樹種の構成状況を図 5.3.3.13 に、樹種別年齢区分の構成状況を図 5.3.3.14 に示す。

樹種については、針葉樹の樹種構成に明瞭な違いが認められ、崩壊しやすい凹型谷型斜面にはスギが多く、崩壊しにくい凸型尾根型斜面にはヒノキが多かった。これは耐乾性についての生態特性とも一致しており、植林の際に意図的に植え分けられたものと考えられる。

年齢区分については、斜面分類の間での明瞭な違いは認められなかった。共通した傾向として、針葉樹は 8 年齢級以上（樹齢 36 年以上）の壮齢林の割合が高かった。

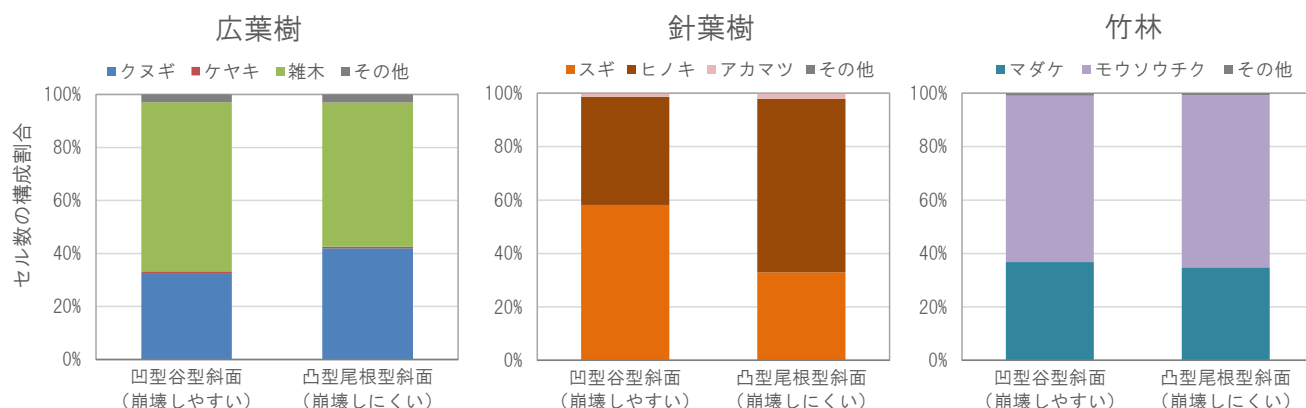


図 5.3.3.13 斜面分類毎の植生の構成状況

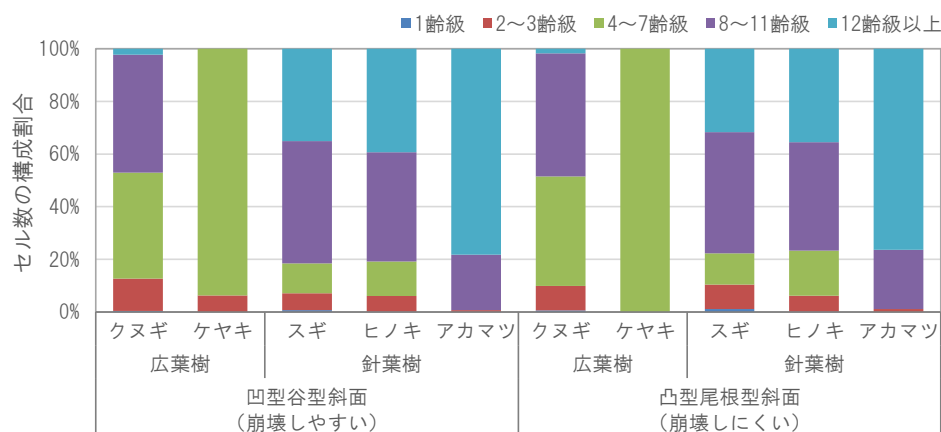


図 5.3.3.14 斜面分類毎の樹種別年齢区分の構成状況

続いて、各斜面分類における樹種と崩壊有無の関係を図 5.3.3.15 に示す。

崩壊しやすい凹型谷型斜面では、ケヤキやアカマツから成る林分の崩壊割合（赤枠）は、スギやヒノキから成る林分の崩壊割合（橙枠）よりも小さい傾向が認められ、被災地でも実際に崩壊斜面にケヤキが残存している状況が確認されている。図 5.3.3.16 には、朝倉市黒川地先の様子を示しているが、畑地を除く周囲の林分（スギやヒノキ）はほとんど崩壊しているのに対し、まとまったケヤキ林は崩壊を免れている様子がうかがえる。

崩壊しにくい凸型尾根型斜面では、凹型谷型斜面と同様に、スギやヒノキから成る林分の方が他の樹種よりも崩壊割合が高い傾向が認められた（紫枠）。

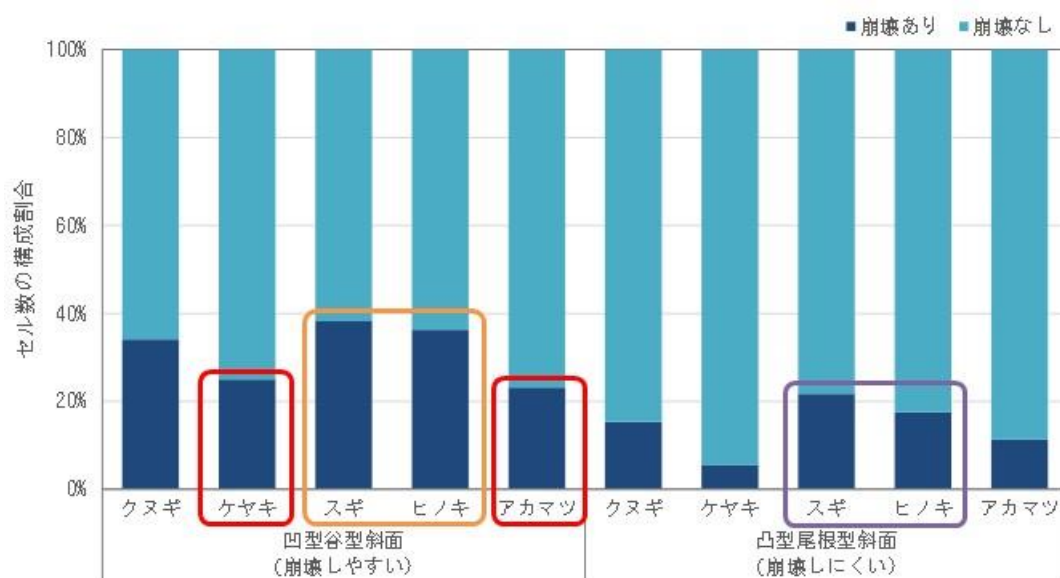


図 5.3.3.15 樹種と崩壊の有無の関係

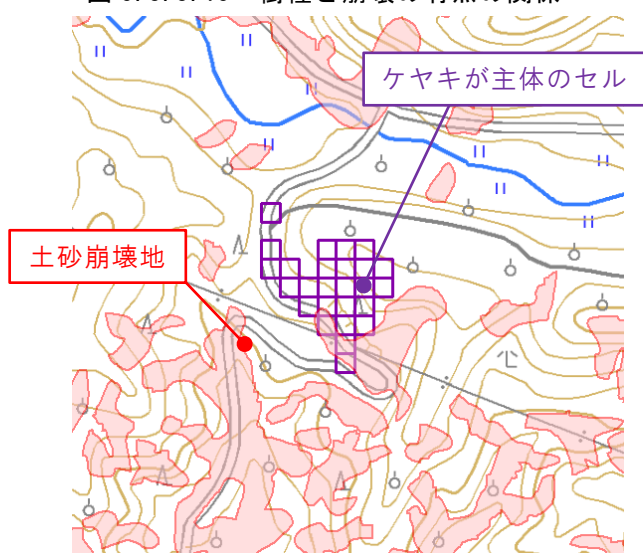


図 5.3.3.16 土砂崩壊を免れたケヤキ林の例（朝倉市黒川地先）

最後に、各斜面分類における樹種別齢級区分と崩壊有無の関係を図 5.3.3.17 に示す。全体の傾向として、すべての樹種について凹型谷型斜面の方が凸型尾根型斜面よりも崩壊した林分の割合が多いことは先に述べたとおりである。

このうち、針葉樹のスギ林では、両斜面共通の傾向として、4～7 齢級を境に若齢になるほど崩壊したセルの割合が高くなる一方、それ以上齢級区分が進んでも崩壊割合は横ばいとなり、崩壊割合が小さくなるような傾向は認められなかった（赤矢印）。このように、林齢が進むと崩壊抑止力が頭打ちして横ばいとなる傾向は、図 5.3.3.18 に示す既往知見とも一致している。

同じ針葉樹のヒノキ林では、齢級区分と崩壊有無の構成割合の間に明瞭な傾向は認められなかった。

一方で、広葉樹のクヌギ林では、崩壊しやすい凹型谷型斜面において、齢級区分が進んだ林分ほど崩壊割合が小さくなる傾向が認められた（黒矢印）。

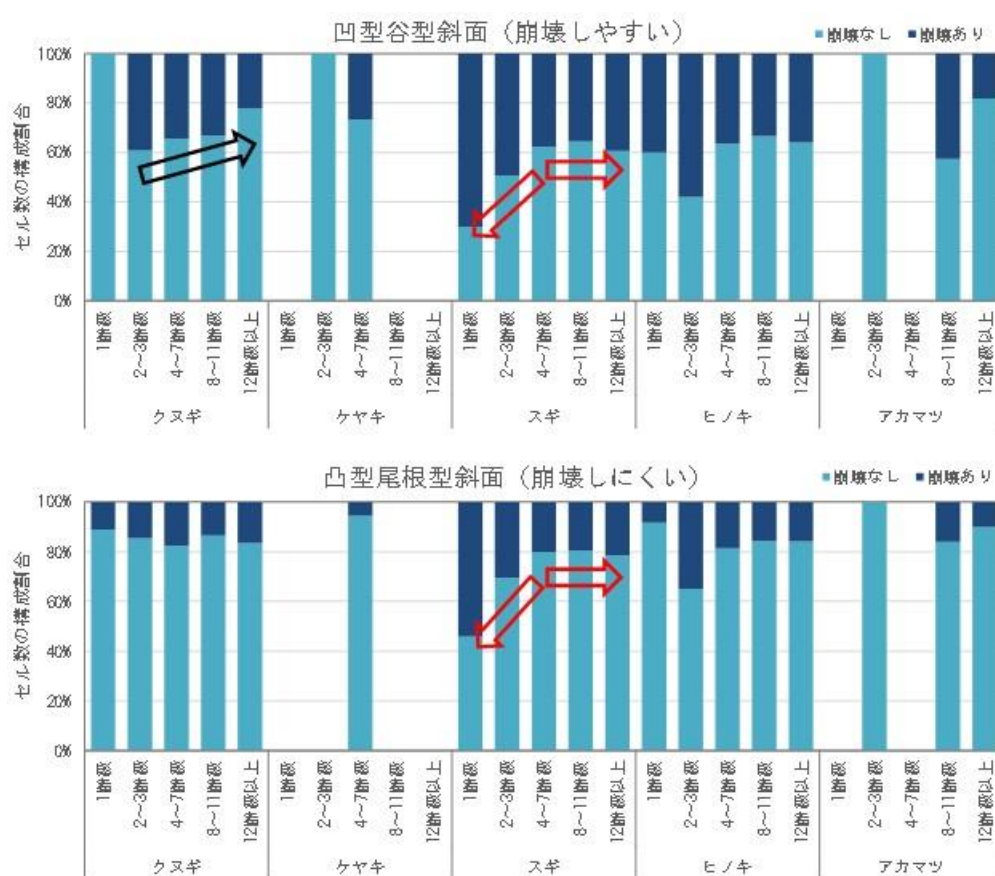


図 5.3.3.17 樹種別齢級区分と崩壊の有無の関係

スギ

地域 北関東・阿武隈地方スギ収獲表(地位 2)

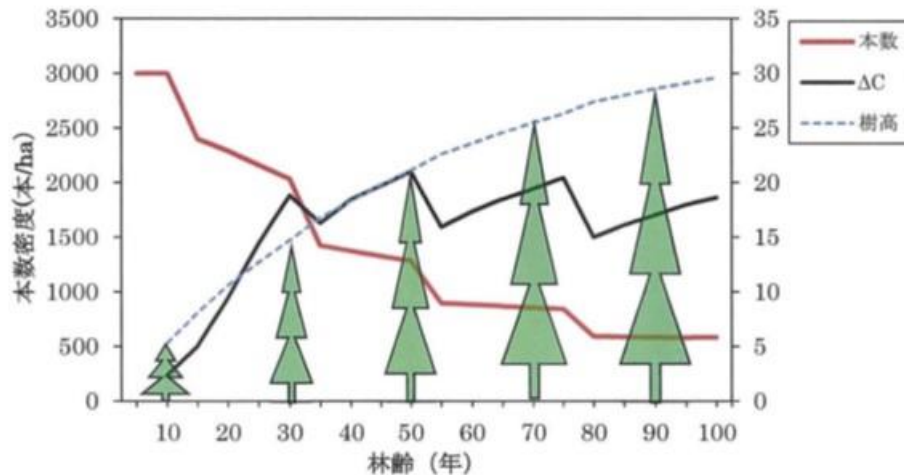
初期植栽 3000 本/ha

間伐 15 年生 本数 20%伐 (下層間伐)

35 年生 本数 30%伐 (下層間伐)

55 年生 本数 30%伐 (下層間伐)

80 年生 本数 30%伐 (下層間伐)



林齢(年)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
本数密度	—	2291	2034	1374	1286	885	859	593	586	583
樹高(m)	5.3	10.6	14.7	18.3	21.1	23.6	25.5	27.4	28.6	29.6
胸高直径(cm)	7.7	14	18.7	22.6	24.4	27.6	29.1	32.1	33.7	34.8
収量比数	0.44	0.68	0.8	0.78	0.83	0.76	0.79	0.71	0.72	0.74
相対幹距比(%)	34	20	15	15	13	14	13	15	14	14
断面積合計 [m ² /ha]	14.0	35.2	55.8	55.1	60.1	52.9	57.1	48.0	52.2	55.4
崩壊防止力 ΔC (kN/cm ²)	2.4	9.4	18.8	18.4	21.0	17.4	19.5	15.0	17.0	18.6

出典：林野庁森林整備部整備課間伐林対策室(2015)

図 5.3.3.18 スギの林齢と崩壊抑止力 (ΔC) の関係

現地では、土砂の崩壊面が樹木の根が張った土壌層よりも深い風化した基岩層から発生している様子を確認したことから、今回のような集中豪雨では降雨が集中しやすい凹型谷型の形状を示す斜面に崩壊が集中するなど地形条件の影響が大きかったものと推察されるが、その中でも、ケヤキやアカマツの方がスギやヒノキよりも崩壊割合が低い傾向や、クスギでは齢級区分が進むほど崩壊割合が低くなる傾向が認められたことから、溪畔林の広葉樹林は可能な限り存置させることや、針葉樹植林については可能な範囲で針広混交林化を促進する方策を検討していくことが望まれる。

引用文献

林野庁（2016） 流木災害対策に必要な森林を抽出する手法 手引書（案）.

Environmental Systems Research Institute, Inc.（2017） 曲率関数-ヘルプ | ArcGIS for Desktop
（ <http://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>, 平成 29 年 12 月 26 日閲覧）.

水越博子・安仁屋政武（2002） 数値等高線データを用いた斜面計測手法 国土地理院時報 **99**:77-84.

Jacobs, J.（1974） Quantitative measurement of food selection: a modification of the forage ratio and ivlev's electivity index. *Oecologia*, 14:413-417.

藤堂千景・山瀬敬太郎・林一郎（2011） シリーズ「近年の土砂災害」—2009 年兵庫県播磨北西部・但馬南部地域で発生した土砂災害— 水利科学 **319**: 130-145.

林野庁 森林整備部 整備課 間伐林対策室（2015） 土砂流出防止機能の高い森林づくり指針.

5.3.4 現地で確認した特徴的な事象等

現地では、スギ林による土砂・流木の流下抑制事例や、ケヤキが崩壊斜面に残置している事例を確認した。森林による土砂災害防止機能は、大きく2種類に分類され、根系の引抜き抵抗による崩壊防止機能と、流下している土砂を立木が抑止する土砂捕捉機能とされる。今回の災害で、森林が両機能を発現した事例を現地確認したため、以下にその概要を示す。

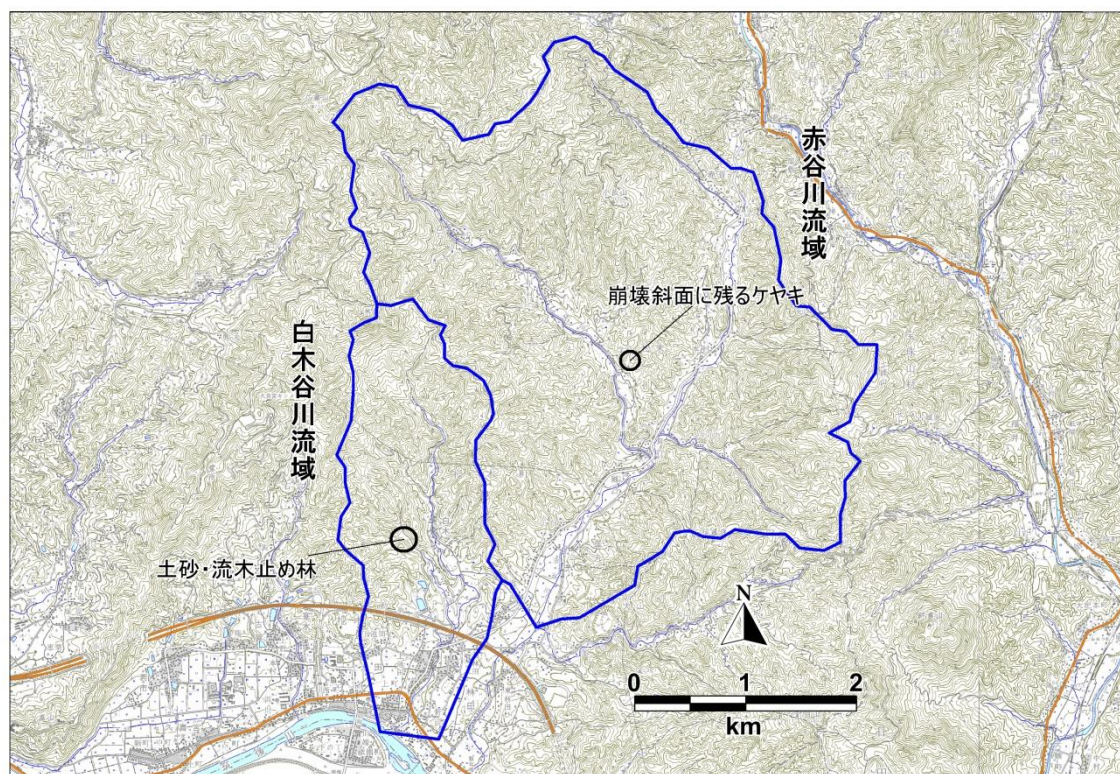
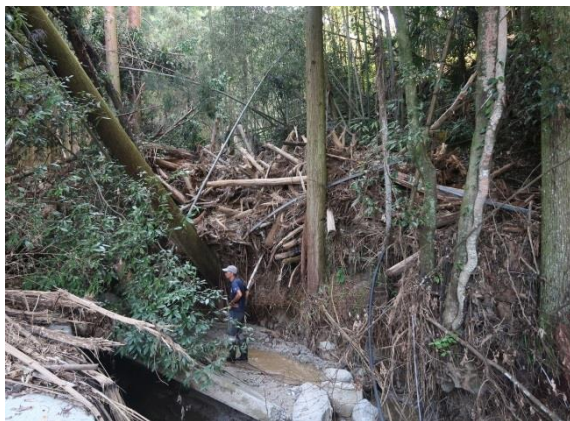


図5.3.4.1 特徴的な事象を確認した場所

(1) 土砂・流木止め林(土砂補足)

白木谷川支川で、スギ林が土砂や流木の流下を抑制している事例を確認した(写真5.3.4.1参照)。土砂の堆砂厚は約2.3mであった。同様な土砂・流木止め機能を発現したと推定される林分は、空中写真判読でも、複数個所で確認された(写真5.3.4.2参照)。土砂災害において、沢沿いの樹林が土砂や流木の流下を抑制した事例は、平成26年8月豪雨による広島市の土砂災害でも確認されている。

スギ林で毎木調査した結果を表5.3.4.1に示す。当該林でスギ林の平均樹高は25mで、胸高直径は36.5cmであった。福岡県森林簿によると、このスギ林の林齢は約60年生である。当該箇所周辺では、根系が3m以深に達するスギを確認した。当該箇所は平坦な凹状地で、根系が発達できる土壌が厚く堆積していたため、根系が深くまで発達できたと考えられる。平坦な凹状地で、樹木の根系が深くまでは発達できる場所では、樹木(樹幹支持力)による土砂・流木の流下の抑制効果(補足)も期待できる事例といえる。



土砂・流木止め林(その1)
下流から上流の風景 2017/8/18



土砂・流木止め林(その1)
堆砂状況 2017/11/14



土砂・流木止め林(その1)
堆砂状況 2017/11/14



土砂・流木止め林(その2)
堆砂状況 2017/11/14



土砂・流木止め林(その1)脇での根系発達状況
左:ヒノキ 右:スギ 2017/11/14



土砂・流木止め林(その1)脇での根系発達状況

左:ヒノキ 右:スギ 2017/11/14

写真5.3.4.1 砂止め林と根系の発達状況



注)写真は、国土地理院「平成29年7月九州北部豪雨に関する情報」の正射写真7月13日を使用。

写真5.3.4.2 空中写真判読による土砂・流木止め林

表5.3.4.1 土砂・流木止め林の概要

樹種・本数	スギ 29 本, ヒノキ 1 本
胸高直径	平均 36.5cm, 最大 55.3cm, 最小 15.0cm
樹高	平均 25m, 最大 32m, 最小 14m
立木密度	369 本/ha(調査面積 813m ²)
土壌層厚	3m以上(沢沿いの平坦地での値)

(2) 崩壊斜面に残るケヤキ(根系支持力による崩壊防止機能)

崩壊斜面で、ケヤキの大径木が、倒木せず、単木で残っている状況が確認された(写真5.2.5.5参照)。

このケヤキでは、長い直根や網状の細根が発達しており、根系による表土の緊縛力が高く残存した可能性がある。ケヤキは、根系の支持力が高い種とされる(「樹木根系図説」(刈住昇, 1987))。崩壊斜面の植生回復を試みる場合、ケヤキのような根系の支持力の高い在来種を活用は有効と考えられる。



崩壊斜面に残るケヤキ(樹冠が茶色い木)
2017/11/13



ケヤキの近景
2017/11/12



ケヤキの根系
2017/11/13



ケヤキの根系
2017/11/12

写真5.3.4.3 崩壊地に残るケヤキ

(3) 崩壊地への植生侵入

白木谷川流域では、今回の災害前に形成された崩壊地で、自然に、植生が侵入・定着したと推定される場所を確認した(写真5.3.4.5参照)。

当該箇所では植生調査(コドラート調査)を行った結果、アラカシ、ヤシャブシ、ヌルデ、ウツギ、ススキ、ヨモギ、メドハギ等、緑化によく活用される種の生育が確認された。崩壊地等の緑化に当たっては、このような自然に侵入・定着している種を調査し、候補種として検討することが望まれる。



斜面の崩壊地に成立していた植生 2017/11/13

低木林

草地



コドラート調査結果

階層	被度・群度	種名
低木層	2・2	アラカシ
	2・2	クズ
	1・2	ヒノキ
	1・1	ヤシャブシ
	1・1	クマノミズキ
	+・2	アカメガシワ
	+	クスノキ
	+	ヌルデ
草本層	3・3	ススキ
	2・2	メダケ
	+	セイタカアワダチソウ(帰化)
	+	ウツギ
	+	マルバウツギ

コドラート調査結果

階層	被度・群度	種名
草本層	4・4	ススキ
	2・2	メリケンカルカヤ(帰化)
	1・1	セイタカアワダチソウ(帰化)
	1・1	ウツギ
	1・1	ホシダ
	1・1	イタドリ
	+	イチイガシ
	+	ヨモギ
	+	サルトリイバラ
	+	イヌザンショウ
	+	ヒヨドリバナ
	+	ミツバツチグリ
	+	ヒメワラビ
	+	ホラシノブ
	+	ヒノキ
	+	メドハギ
	+	チャノキ

※赤字：緑化候補種

写真5.3.4.4 崩壊地に成立する植生(白木谷川流域)

5.4 植生の保全と復元

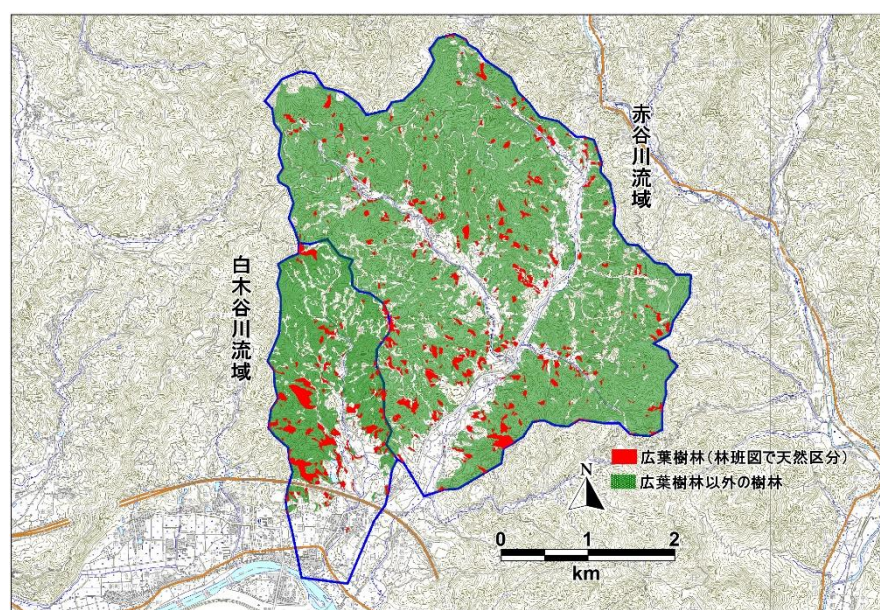
5.4.1 残存する広葉樹林の保全

今回の豪雨災害では、表層崩壊により植生の成立基盤となる表層自体が流出しており、本来、表土中にある種子が存在しないことから、周辺からの供給に頼ることになる。

特に、日田地域を中心に被災地域は国内有数の林産地でスギ・ヒノキの人工林率が元々高く、前生林の植物相が貧弱なため周囲から自然供給される樹種自体が豊富ではない。遷移初期の先駆性樹種の侵入など遷移が進行した段階においても多様な樹種により構成される広葉樹林(天然林、二次林)となるには限界があり、種の多様性が低い森林形成に留まることになる。また、長島ら(2011)は、放棄地の近隣に常緑広葉樹林が存在するなど常緑樹の種子供給可能性が高い場合は、徐々に下層に常緑樹が侵入し、放棄後10～15年で先駆性樹種と常緑樹が混交するようになるが、放棄面積が5ha以上と非常に大きい場合は、初期に回復する先駆性樹種の植被率も少ない傾向にあると報告している。

これらのことから、多様な種子の供給源となる現存している広葉樹林は、将来の植生回復、地域生態系の回復の観点から貴重なシードバンクとして機能するものであり、現存する広葉樹林(約171ha)を適切に保全していくことが重要である。

白木谷川・赤谷川流域における広葉樹林の分布は、図5.4.1.1～2に示すとおりである。



注)福岡県森林簿データを基に作成。広葉樹林には、落葉樹林・常緑樹林を含む。

図5.4.1.1 白木谷川・赤谷川流域で現存する広葉樹林(流出被害を受けていない広葉樹林)

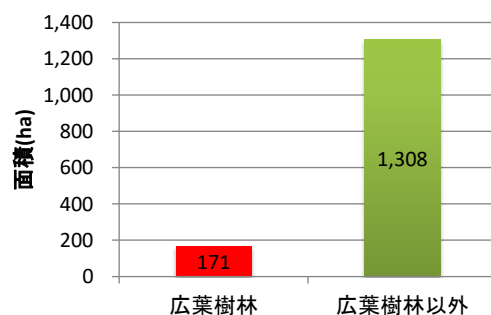


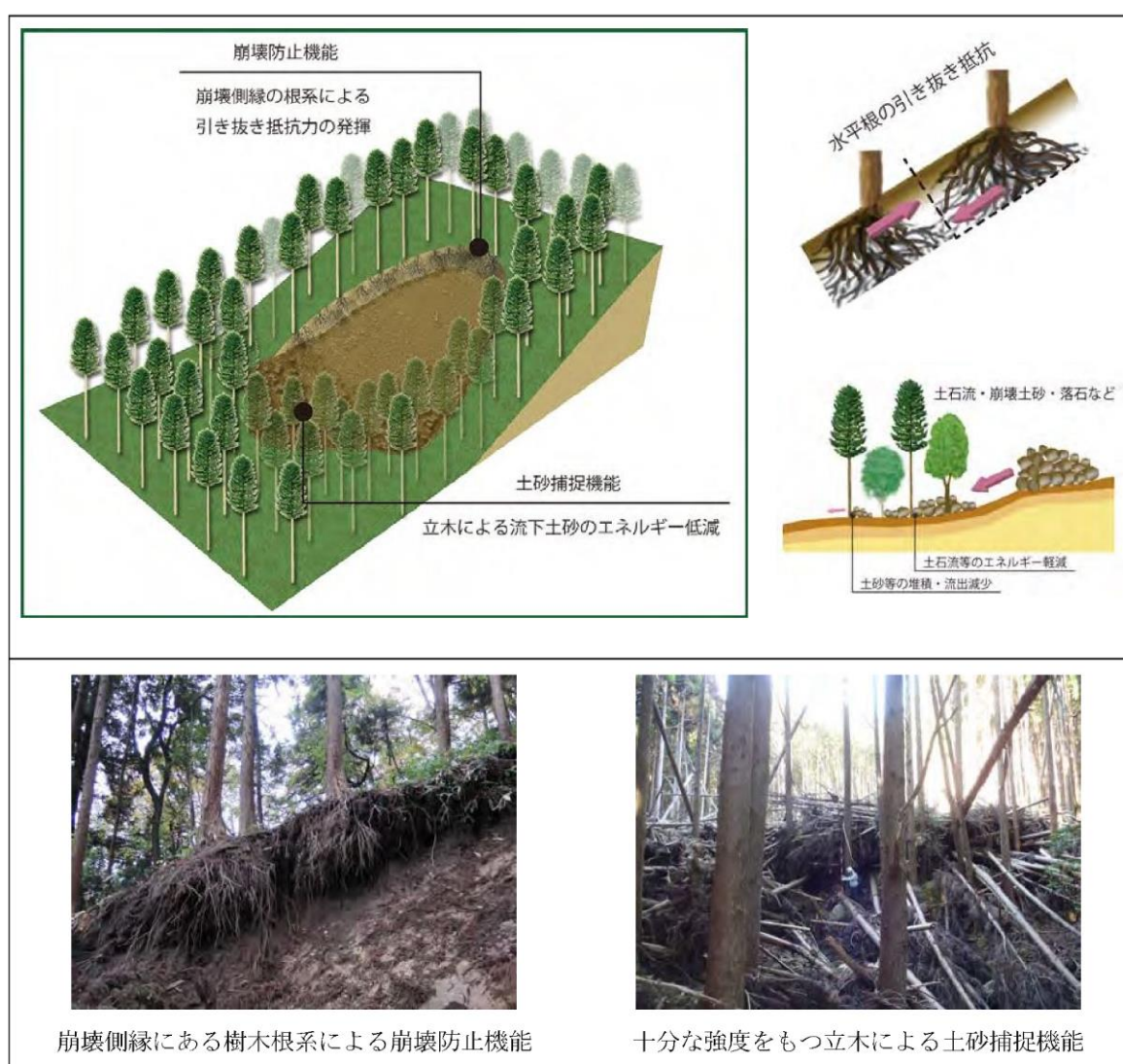
図5.4.1.2 白木谷川・赤谷川流域で現存する広葉樹林の面積

5.4.2 土砂災害防止機能、経済性等を有する森林づくり

今回の豪雨災害では、比較的に間伐など手入れされているスギ・ヒノキの林分も成立基盤ごと流出している。森林の崩壊防止機能には限界はあるものの、根系支持力の強い種による育林、適切な間伐の実施等の森林整備により、その効果を高めることは可能である。このことから、今後も局所的な豪雨により表層崩壊が発生することも想定し、崩壊後の早期の植生回復と防災力の向上を図る観点からの針・広混交林化促進など、グリーンインフラとしての森づくりが求められる。

(1)土砂災害防止機能を考慮した森づくり

森林による土砂災害防止機能は、大きく2種類に分類され、根系の引き抜き抵抗による崩壊防止機能と、流下している土砂を立木が抑止する土砂捕捉機能とされる。災害復旧における森林整備においては、これらの機能を考慮した取り組みが不可欠と考えられる。



注) 図の出典:土砂流出防止機能の高い森林づくり指針(2015)編. 林野庁
図5.4.2.1 森林の二つの機能(崩壊防止機能・土砂捕捉機能)

1) 土砂災害防止機能が高いと想定される樹種を活用した森林育成

現状のスギ・ヒノキ人工林では、土の粘着力がほとんどの花崗岩マサ土地帯では、粘着力増強分としての根系は特に大きな役割を持っており花崗岩地帯での皆伐は避ける(北原, 2010)。また、非皆伐施業として間伐を段階的に行い、幹の肥大成長と強靱な根系形成を促し、現状の人工林が有している土壌保持力・緊縛力を活用しつつ、広葉樹の自然な侵入と地域系統有用樹の補植や植栽による多様な樹木がもたらす複雑な林内の階層構造と根系層の発達による表面浸食(表土流出)の防止と土砂流の減衰など土砂補足機能の効果発現を期待する。

北原(2010)が実施した多数の根の引抜き試験の結果(根系断面直径10mmの引き抜き抵抗[N])では、樹種別に大まかにいえば、スギ、ヒノキと広葉樹のケヤキとナラ類は強く、アカマツとカラマツはやや弱い傾向にあるとしており、被災地にみられる多くのスギ(700～1300[N])、ヒノキ(800～1100[N])の人工林や、斜面に生育しているケヤキ(2500[N])、コナラ(1000[N])などの広葉樹は、健全な根系の発達により防災力を有する樹種と言える。

被災地周辺における森林育成で活用が期待される代表樹種としては、表5.4.2.1のような樹種が想定される。この種は現地確認した種であるとともに、コンテナ苗などの生産がされており、入手が比較的に容易な樹種である。

表5.4.2.1 被災地での森林育成で活用が期待される樹種の根系支持力等

樹種	形態	分布	根系支持力	耐瘦地性	耐乾性	耐湿性	生長
ケヤキ	落葉広葉樹	北海道～九州	大	△	△	○	普通
スギ	常緑針葉樹	北海道～九州	大	△	△	○	早い
ヒノキ	常緑針葉樹	北海道～九州	小	○	◎	△	早い
アカマツ	常緑針葉樹	北海道～九州	大	◎	◎	×	早い
ツブラジイ	常緑広葉樹	関東・北陸～九州	大	△	○	○	普通
クヌギ	落葉広葉樹	北海道～九州	極大	△	○	○	早い
アラカシ	常緑広葉樹	東北南部～九州	大	△	○	△	普通
コナラ	落葉広葉樹	北海道～九州	大	○	◎	○	普通
アベマキ	落葉広葉樹	東北中部～九州北部	極大	○	○	○	早い
エノキ	落葉広葉樹	北海道～沖縄	大	○	○	○	普通

注)◎:強い ○:やや強い △:やや弱い ×:弱い

分布:全国の植生誌を基に記載

根系支持力:樹木根系図説(荏住昇,1987)を基に記載

耐性・生長文献:自然をつくる植物ガイド(難波宣士, 1993)を基に記載

2) 山腹崩壊地内の生育条件・防災機能に応じた森林復元

山腹崩壊地では、生育条件に応じた防災機能を考慮した樹種の選定も必要となる。尾根部や0次谷といった土石流発生域(斜面勾配の目安 30° 以上¹⁾)では、相対的に表土が薄い場所で土石流が発生を少しでも抑制するために、土壌緊縛力を有する樹種を活用した森林育成が望ましい。一方、山腹斜面や斜面下部は、土石流の移送域(斜面勾配の目安 $10\sim 30^{\circ}$)や堆積域(斜面勾配の目安 10° 以下)となるため、根系の発達とともに、土砂を補足する樹幹の支持力大きな森林育成が望ましい。山腹崩壊地内の生育条件を踏まえた森林復元のイメージを、図5.4.2.2に示す。

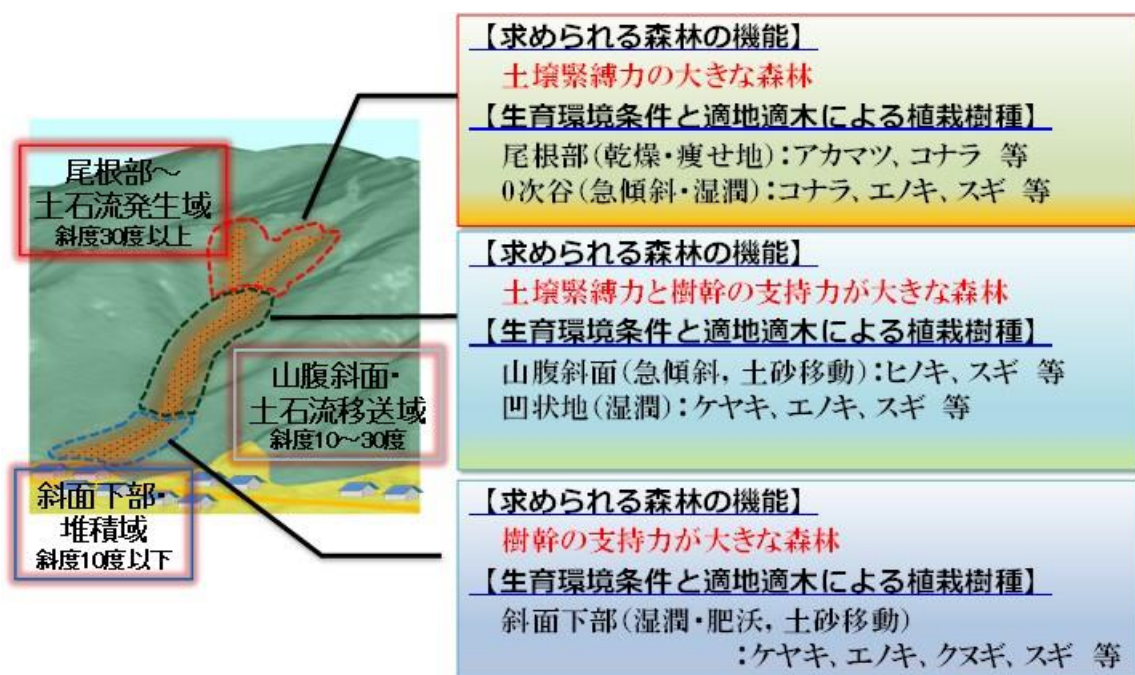


図 5.4.2.2 山腹崩壊地内の生育条件・防災機能に応じた森林復元イメージ

3) 適期における間伐・伐採等(森林管理)

森林については、間伐等の森林整備で根系の十分な発達を促すことにより、根系による土壌緊縛力が高まり、森林による表層の崩壊防止機能が向上するとされる。ヒノキ人工林での研究事例では、林がうっ閉前後の適期に間伐すると、一時的には根系による粘着力(抵抗力)が低下するものの、残存木根系の伸長により伐採後5年後程度で元の状態に戻るとともに、以降は根系による粘着力はさらに増加するとされる(北原, 2010)(但し、列状間伐のように、弱部を連続させない配慮が必要)。地域の森林の崩壊防止機能を高めるために、今後は適期における間伐といった適切な森林管理を推進していくことが望まれる。

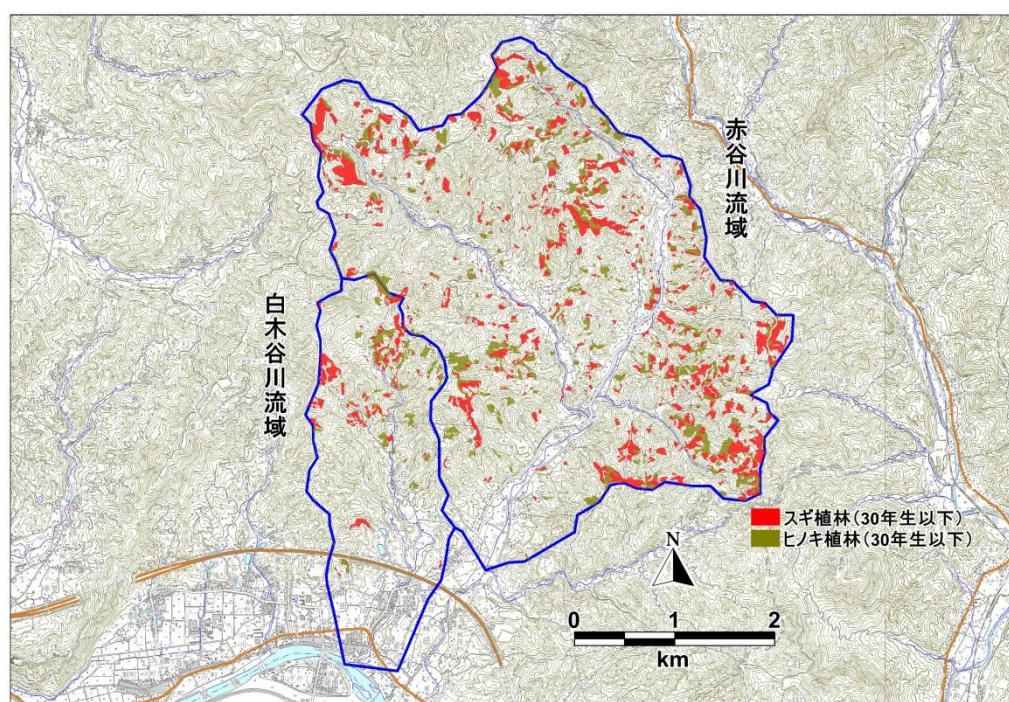
スギ植林、ヒノキ植林の施業モデルを用いた根系による崩壊抑止力の計算結果では、スギ・ヒノキともに、根系による崩壊抑止力は林齢約30年までは上昇し、林齢30年を超えると概ね一定となる(林野庁森林整備部整備課間伐林対策室, 2015)。このため、根系による崩壊抑止力が相対的に弱いスギ・ヒノキの林齢約30年以下の林分について、優先的に適切な森林管理を行い、流域全体の根系による崩壊抑止力を少し

¹⁾ 斜面勾配の目安は、土砂流出防止機能の高い森林づくり指針(林野庁森林整備部整備課間伐林対策室, 2015年)を参考にした。

でも高める取り組みも有効である。なお、赤谷川・白木谷川流域でみると、林齢30年以下のスギ・ヒノキ植林の分布は図5.4.2.3に示すとおりであり、面積は2.44km²となり、流出被害を免れたスギ・ヒノキ植林（10.96km²）の約22%である。

また、甚大な豪雨により、臨界条件を超え、根系より深い剪断断面で崩壊した場合、斜面表層土砂は樹木を巻き込んで崩落するため崩壊規模の増大につながる。このため、崩壊リスクの高い人工林斜面においては、危険要素である樹木を崩壊が発生する前に収穫するという視点も重要である。特に、林下に雑木・灌木類が茂生していない老壮齢林では雨水が地中に浸透しやすい。表層崩壊は雨水による土層の重量増加や飽和に伴う浮力の発生等が関係して発生するため、林床に雑木・灌木類が茂生していない老壮齢林では表層崩壊が発生しやすい場合もある（川口，1987）。また、昭和34年の山梨水害においては、VI齢級（30年生）以上の老壮齢林地で崩壊が多く、これは強風（30m/s以上）に伴う老齢木の風倒に起因する崩壊があったことも原因の一つとされる（川口，1987）。このため、居住地等の防災上重要な場所は、居住地等の安全性を確保した上で、輪伐期を短くし、流木の発生と崩壊規模の増大を防止する視点も含め管理方法を検討することも必要である。

この他、崩壊リスクの高い斜面においては、「小面積皆伐を実施することにより小規模表層崩壊を促し、危険要素となる表層土砂を大規模豪雨災害前にあらかじめ除去する」、「流木被害の低減のために、大きな表層崩壊が発生する可能性がある地形成長点（遷急点）直下の谷筋の高木をあらかじめ除去する、又は谷筋を植林地として活用しない」といった視点も含め管理方法を検討することも必要と考えられる。



注)福岡県森林簿データを基に作成。

図5.4.2.3 白木谷川・赤谷川流域で残存している林齢30年以下のスギ・ヒノキ植林の分布

(2)経済性等を考慮した森づくり

1) 経済性を有する森林の育成

崩壊防止機能や土砂補足機能がある森林を形成するためには、被災地に広くみられるスギ・ヒノキ人工林を段階的に落葉広葉樹林が混生する針・広混交林に転換を図ることが望ましいが、混交林形成には長い年月を必要とすることから木材生産面からも混生する広葉樹に経済的に価値を持つことが肝要となる。

大分県で平成3年(1992)に発生した台風19号による森林被害と森林復旧対策をまとめた報告(大分県水産林務部, 1993)の中で、種の多様性が高く経済的価値を持った森林を育成するために有用広葉樹20種が提案されている(表5.4.2.2参照)。これら地域特性に適応した有用広葉樹について、土砂災害に強い森林形成につながる根系支持力も考慮しながら混生することで、経済性も有する針・広混交林の転換を図ることが持続した育成につながると考える。

表5.4.2.2 有用広葉樹造林樹種の特性一覧表

樹種	主な森林帯	樹木の形態	育成地の特性	水分環境特性	耐陰性	耐風性	萌芽性	成長特性	根系支持力	根系垂直分布	用途	備考
イタヤカエデ	温	落葉高木	山腹斜面下部～谷側の凹地形、やや湿気のある肥沃地	適潤～弱湿性	中	大	大	やや遅	中	浅根型	建築、装飾、器具、船舶、楽器、機械、車両	
イチイガシ	暖	常緑大高木	山腹斜面下部～谷側の凹地形、肥沃地	適潤性	中	大	大	中	きわめて大	深根型	器具、車両、機械、建築、器具柄、ろ材、かんな台	ヒノキとの針広混交林、既往造林地あり
イヌエンジュ	温	落葉小高木	やや湿性の適潤肥沃深土	適潤性	小	中	大	やや早	中	中間型	建築、器具、楽器、彫刻	
キハダ	温	落葉高木	山腹斜面～谷側、疎開する森林内、やや湿気のある肥沃地	弱乾～弱湿性	小	大	小	早	小	深根型	家具、指物、ろくろ細工、器具、樹皮から胃腸薬、黄色の染料	既往造林地多い
クスノキ	暖	常緑高木	山腹斜面下部～谷側、向陽肥沃地	適潤性	小	中	大	やや早	中	中間型	家具、建築、器具、船舶、彫刻、装飾、楽器	ヒノキとの針広混交林、既往造林地
クスギ	暖～温	落葉中高木	山腹斜面中部～下部	適潤性	小	大	大	早	きわめて大	浅根型	シイタケほだ木、器具、車両、枕木	既往造林地多い
クリ	暖～温	落葉高木	山腹斜面～尾根、適潤で土層の深い軽鬆な土地、乾燥にも耐える	適潤～乾性	小	大	大	早	中	深根型	枕木、建築(土台、装飾材)、家具、土木車両、器具、船舶、ろくろ細工	
ケヤキ	暖～温	落葉大高木	山腹斜面下部、谷側～凹地形、肥沃な深層土	適潤性	中	大	小	中	大	浅根型	建築(神社、仏閣)、器具、船舶、車両、彫刻、つき板、ろくろ細工、家具	既往造林地多い
シオジ	温	落葉大高木	山腹斜面下部、疎開する森林内、やや湿気のある肥沃地	弱湿性	中	中	小	中	大	深根型	家具、合板、床柱、装飾、家具、指物、運動具、楽器、機械	
シラカシ	暖	常緑大高木	適潤な肥沃土、谷沿い斜面、台地面	適潤性	大	中	中～大	早	大	中間型	器具、車両、機械、建築、器具柄、ろ材、かんな台	既往造林樹種
センダン	暖～温	落葉高木	向陽斜面、乾燥する尾根	適潤性～やや乾性	小	中	大	早	小	中間型	家具、器具、寄木細工、彫刻、下駄、ケヤキ・クリの模擬材	近年造林開始
タブノキ	暖～温	常緑高木	海岸風衝地、緩斜地～凹地形、肥沃な深層土	適潤性	大	中	大	早	大	中間型	建築(内装、床板)、器具、枕木、合板、船舶、彫刻、楽器	近年造林開始
ハリギリ	温	落葉大高木	やや水湿に富む凹地形～緩斜面、疎開する森林内、土層の深い肥沃地	やや湿性	小	大	大	やや早	小	深根型	建築、家具、合板、車両、指物、船舶、器具、彫刻、下駄	
ホオノキ	温	落葉中高木	山腹斜面、谷側の緩斜地、適潤で肥沃な深層土	適潤性	小	中	大	早	中	中間型	建築(装飾)、運動具、機械、箱、家具、器具、彫刻、定規、鉛筆	既往造林地あり
ミズナラ	温	落葉大高木	山腹上昇斜面～緩斜地、やや水湿をおびる深層土	乾性～弱乾性	小	大	大	やや早	大	深根型	家具、器具、建築(床板)、合板、車両、船舶、桶、樽、運動具、洋酒樽	
ミズメ	温	落葉大高木	凹地形～緩斜面、適潤な向陽地、伐跡地等の疎開林地	適潤性	小	大	小	やや遅	大	浅根型	家具、建築(敷居)、靴木型、盆、指物、楽器、漆器	
ヤマグワ	暖～温	落葉高木	適潤またはやや湿気のある谷あい、またはこれに対する斜面などの肥沃な深層土		中	大	大	やや早	大	中間型	建築(床柱、床板)、合板、家具、指物、漆器、彫刻、楽器	ケヤキとの混交林、近年造林開始
ヤマザクラ	暖～温	落葉高木	適潤またはやや乾燥する肥沃な深層土、向陽の尾根筋またはこれに接する斜面	弱乾性	小	大	大	早	中	浅根型	建築(柱、天井板、床板)、家具、指物、楽器、彫刻、ろくろ細工	
ヤマトアオダモ(ツクシトネリコ)	暖～温	落葉高木	適潤で肥沃な土地の深い溪側	適潤性	小	中	—	やや遅	—	—	家具、楽器、合板、車両、土木、建築、運動具、機械	
ユリノキ	暖～温	落葉大高木	肥沃な谷間に多く自生、せき悪地でなければ土地を選ばず、乾燥地には不向き	適潤性	中	中	大	早	中	深根型	合板、内部造作、楽器外装、建具、家具	アメリカ東部原産

注) 「大分県森林被害復旧総合対策検討委員会報告書」(大分県林業水産部, 1993)を基に作成。根系支持力・根系垂直分布は、「樹木根系図説」(刈住昇, 1987)より引用。

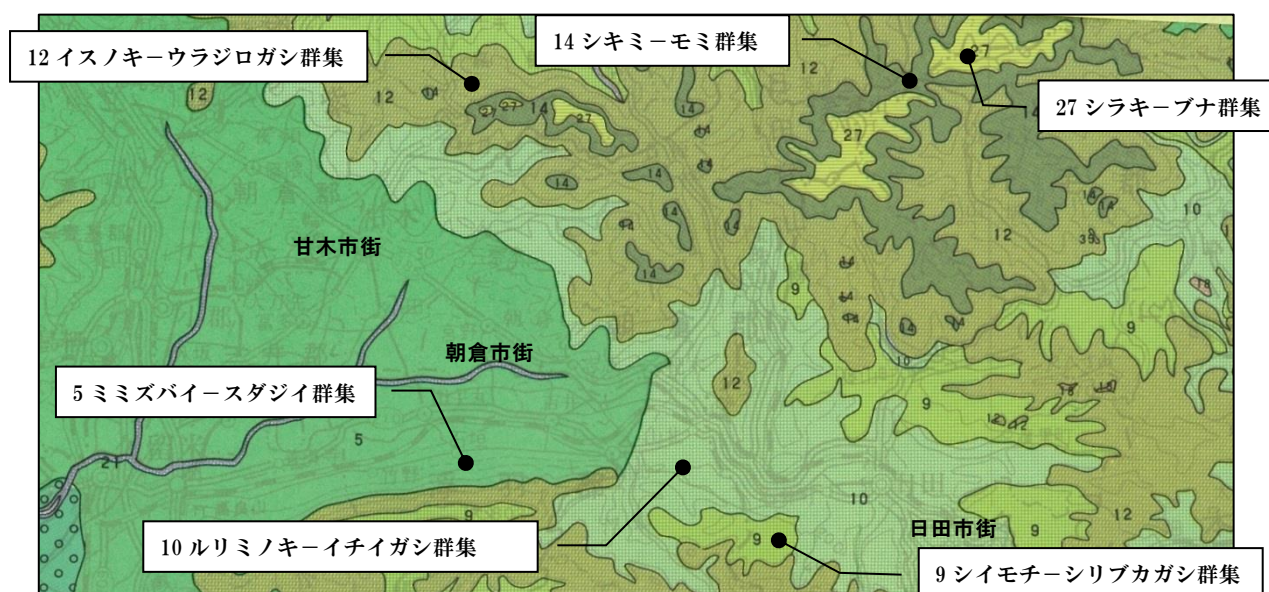
2) 地域の生態系(潜在自然植生)を考慮した植栽樹種の選定

被災地域は「耶馬日田彦山国定公園」に隣接または指定されており(図5.4.2.3参照)、特に地域生態系に配慮した樹種の選定も重要な視点となる。また、被災地の潜在自然植生は、ルリミノキーイチイガシ群集、イスノキーウラジロガシ群集の常緑広葉樹林が主であり、その主要構成種には常緑のイチイガシ、シラカシ、シリブカガシ、ウラジロガシ、ツクバネガシ、アカガシなどのカシ類や、ツブラジイなどシイ類などである。よって、地域生態系に配慮した適正な樹種として、潜在的な自然植生を構成する常緑広葉樹を主体に選定することが望ましい。

また、景観面などから落葉樹を選定する場合には、これら潜在自然植生に対応する二次林構成種である夏緑(落葉)広葉樹の中から選定することが望ましい。



図5.4.2.4 被災地周辺における国定公園の分布



注)日本植生誌 九州 宮脇 昭編(1981)より引用、一部加筆。

図5.4.2.5 潜在自然植生図

5.4.3 緑化

防災の観点から表層崩壊を早期に止める必要がある場所では、発芽・定着率や成長速度の面で優れた植物による緑化が効果的である。凍上による表土流出の発生は低い可能性があるが、凍上が発生する場合も考慮して、秋季のうちに緑化が不可欠な場所を選定し、緑化工の準備を整える必要がある。

なお導入する植物種の選定では、定着率・成長速度・根張りといった侵食防止機能だけでなく、種子等が流域・周辺域に分散して生じる生態系へのリスクを考慮して選定することが重要であり、侵入性の高い外来植物を避けることなどの配慮が有効である。

表層崩壊の防止が緊急には求められない場所では、土砂の供給機能の維持や、将来の地域の資源となる生物多様性の保全を重視し、自然に任せて変化をモニタリングする、あるいは自然な植生回復を促進する簡便な工法を検討するなどの対応が有効である。

引用文献

大分県林業水産部（1993）大分県森林被害復旧総合対策検討委員会報告書. 178-183.

過去の気象データ（朝倉観測所），気象庁.

川口武雄（1987）森林の公益機能解説シリーズ6 森林の土砂崩壊防止機能，日本治山治水協会.

刈住昇（1987）樹木根系図説，誠文堂新光社.

北原曜（2010）森林根系の崩壊防止機能．水利科学No. 311，11-37.

植生調査（1/25,000縮尺）第6-7回現存植生，環境省自然環境局生物多様性センター.

長島啓子・大本健司・吉田茂二郎（2011）九州地方における再造林放棄地の植生回復パターンとその要因．日林誌93，300.

福岡県森林簿，福岡県農林水産部.

平成29年7月九州北部豪雨に関する情報（正射写真7月13日），国土地理院.

宮脇 昭編（1981）日本植生誌 九州，至文堂.

林野庁森林整備部整備課間伐林対策室（2015年）土砂流出防止機能の高い森林づくり指針

「持続的で豊かな暮らしと環境を再生するための緊急提言」

本提言は 2017 年 7 月に発生した九州北部豪雨災害からの復旧・復興にあたり、「持続的で豊かな暮らしと環境を再生する」ための、基本的な考え方について調査団員が議論した結果に基づき作成したものである。関係機関、関係技術者は、本提言を参考に復旧・復興に当たられることを願うものである。

■復旧・復興の基本的考え方

1. 地域との協働による地域のための復旧・復興

- ・地域の意向、地域の将来像（ビジョン）を反映し、地域のための復旧・復興計画を地域住民と協働で立案することが最も重要である。

2. 多面的な観点・総合的視点からの空間デザイン

- ・持続的で豊かな地域を再生するためには、防災のみならず、日々の地域の暮らし、歴史・文化、生態系、景観、災害に対するレジリエンスなど、多面的な観点から空間デザインを行うことが必要である。
- ・河川、道路、斜面や居住地などの計画は、持続的な地域とくらしを見据え、総合的・統合的な視点にたった立案が必要である。

3. 生態系や地域知を活用した安全で持続可能な地域の形成

- ・グリーンインフラや Eco-DRR（生態系を活用した防災減災）など新しい概念の導入を検討することが重要である。生態系は防災・減災機能を含む多面的な価値を有しており、グリーンインフラや Eco-DRR の活用によって持続可能な地域を形成することが可能となる。またそれらは地域知、伝統知に基づいていることが多く、これらを掘り起こし、活用することにより、地域の個性や歴史的な価値の継承、持続可能性などの視点が加えられる点は地域の復興にとって重要である。
- ・災害発生ポテンシャルが高い箇所をできる限り回避する土地利用（＝「暴露の回避」）という視点が重要である。

4. 順応的に復旧・復興できるプロセス

- ・土砂移動や生物の応答など大災害後の自然現象の予測の不確実性に鑑み、土砂、斜面や地形、植生の動態、生物の移入などのモニタリングを行いながら、順応的に対策を講じることができるプロセスの導入が必要である。
- ・住民の意識の変化に対しても、順応的に対応できる仕組みを構築すべきである。

■河川計画の考え方

5. 流域・河川の特性を踏まえた河川計画の立案

- ・流域の地質・地形、周辺の土地利用などによって、氾濫形態や被災形態などは大きく異なるため、画一的な河道計画ではなく、それぞれの流域や河川の特性に応じた計画を立案することが必要である。

6. 多自然川づくり

- ・多自然川づくりは川づくりの基本であり、河川計画立案の当初から環境を十分に織り込んだ計画とすること。
- ・対象河川・対象流程別に出現する可能性のある生物を保全復元目標とし、目標とする生物の生息環境・生活史を勘案し、生息に必要な空間を計画・整備することが必要である。上流域ではカジカ、アカザ、ヤマメ、ホタルなどが、中下流域ではアユ、ウナギ、オヤニラミ、タナゴ類、シマドジョウ類などが目標種として想定される。また、人の河川の利用に配慮し階段などを適宜設置するとともに、景観にも配慮することが重要である。
- ・「中小河川に関する河道計画の技術基準」及び「美しい山河を守る災害復旧方針」を遵守すること。

7. 土砂管理と大規模横断工作物

- ・山地から河川、沿岸域まで連続する流砂系を適切に管理・保全するという総合土砂管理の視点が重要である。今後、崩壊土砂および堆積土砂の輸送による河床上昇とその後の排出過程は数年で起こると思われるため、自然が調節するのを待つ必要がある。
- ・大規模横断工作物は、当面続く多量の土砂供給により河床材料とは異なる細粒の土砂をため込み、縦断方向の土砂や流水の連続性、生物・生態系に大きな影響を及ぼすため、どうしても設置しなければならない場合も透過型の工作物を検討すること。

■崩壊斜面の復旧について

8. 山地災害防止機能の高い植生の復元・管理

- ・林地の崩壊により大量の流木が災害を増大させた。甚大な豪雨により、臨界条件を超えた場合、樹木荷重は崩壊方向に働き崩壊規模の増大につながるため、崩壊リスクの高い人工林斜面においては、危険要素である樹木を予め除去するという視点が重要である。居住地等の防災上重要な場所は、短い輪伐期によって木材生産し、流木の発生と破壊規模の増大を防ぐべきである。皆伐に伴い小規模表層崩壊の発生する可能性は高まるが、危険要素の表層土砂を大規模豪雨災害前に小規模崩壊によってあらかじめ除去しているとみなし許容すべきである。
- ・崩壊地の植生復元は、土石流の発生源・移送域などの場所の違い、崩壊地の地形・地質、植栽種の根系支持力・土壌緊縛力等の特徴を踏まえ、復元・管理方法を検討することが必要である。
- ・複層林は表面侵食が抑制され生物の多様性も高まるため、被災してない山腹斜面や溪畔林の広葉樹林は可能な限り残置させ、針葉樹植林については可能な範囲で針広混交林化を促進する方策を検討することが望まれる。

9. 緑化・植栽工について

- ・防災の観点から表層崩壊を早期に止める必要がある場所では、発芽・定着率や成長速度の面で優れた植物による緑化が効果的である。特に凍上による表土流出が懸念されるため、秋季のうちに緑化が不可欠な場所を選定し、緑化工の準備を整える必要がある。なお導入する植物種の選定では、定着率・成長速度・根張りといった侵食防止機能だけでなく、種子等が流域・周辺域に分散して生じる生態系へのリスクを考慮して選定することが重要であり、侵入性の高い外来植物を避けることなどの配慮が有効である。

・表層崩壊の防止が緊急には求められない場所では、土砂の供給機能の維持や、将来の地域の資源となる生物多様性の保全を重視し、自然に任せて変化をモニタリングする、あるいは自然な植生回復を促進する簡便な工法を検討するなどの対応が有効である。

2017 年 9 月 13 日

