

大震度直下型地震による河川への影響の総合的調査研究報告書



2017年3月

研究代表者：大本照憲（熊本大学）

（平成28年度京都大学防災研究所特別緊急共同研究・研究代表者）

（土木学会水工学委員会熊本地震災害調査団・団長）

大震度直下型地震による河川への影響の総合的調査研究報告書

2017年3月

研究代表者：大本照憲（熊本大学）

（平成28年度京都大学防災研究所特別緊急共同研究・研究代表者）

（土木学会水工学委員会熊本地震災害調査団・団長）

はじめに

2016年4月14日21時26分および4月16日未明に熊本県熊本地方に発生した震度7の2回の地震は、人的被害では直接死者数50名、物的被害では住宅の全壊・半壊・一部損壊17万5698棟（H28年9月16日付朝日新聞）、内閣府によって試算された住宅・企業の生産設備、道路など資本ストックの被害額は約2兆4千億～4兆6千億円であった。平成29年2月14日の報道によれば関連死は144名に及んでいる。

出水期までに若干の時間的余裕があったことが幸いし、国土交通省および熊本県土木部は河川管理施設の緊急点検を行い、被害の大きい箇所に対しては緊急復旧工事を実施した。出水前に堤体の損傷が大きい箇所数は、国土交通省171箇所、熊本県350箇所、市長村170箇所であり、平成28年6月上旬に応急処置が完了したのは、国土交通省100%、熊本県20%、市町村10%であった。

国土交通省および熊本県では、河川堤防に対する緊急復旧工事を実施すると共に、河川の監視体制に加えて、堤防の損傷および白川の河床上昇により治水安全度が低下したことに対して水防警報および洪水予報の基準水位の暫定的引き下げを実施しソフト対策の強化を図った。これらの対策が功を奏し、堤防は可成り脆弱なものであったが幸いにも大規模な複合災害は避けられ、河川災害による人的被害としての死者は無く、白川および緑川水系では木山川の破堤氾濫による物的被害に止まった。

土木学会では水工学委員会を中心として平成28年熊本地震が白川および緑川水系の安全度に与える影響を明らかにするために緊急調査団を編成し、地震によって発生した堤防の破壊や斜面崩壊による土砂の河川への流入など、大規模な水害・土砂災害を発生させる可能性のある現象を中心に調査すると共に直下型地震による河川災害や土砂災害の対策に向けての提言を行うこととした。調査団は、河川工学、地盤工学、河川生態系を専門とする合計11名で構成した。また、本調査は京都大学防災研究所の平成28年度特別緊急共同研究として採択いただき、調査団メンバーに1名を加えた12名で調査チームを結成した。

本報告書は、1章で熊本地震について、2章で熊本地震後の気象、3章で河川災害、4章で河川堤防被害の実態、5章で白川の土砂流出の実態、6章で流木災害への地震の影響、7章で水力発電施設への地震の影響、8章で総括を行い、今後の河川災害や土砂災害対策への提言を取り纏める。本報告書が今後の防災・減災に役立てば幸甚である。

最後に、熊本地震によって亡くなられた方々に対してご冥福をお祈りすると共に、被害に遭われた方々の一刻も早い普段の生活が戻ることを願っている。また、全国から熊本地震で被災された方々に対する暖かい支援に改めて日本人の優しさを強く実感した。

平成29年2月27日

研究代表者(土木学会熊本地震河川災害調査団長)

大本 照憲

目次

はじめに	……………i
目次	……………ii
第1章 熊本地震の概要	
1.1 熊本地震とは	……………1
1.2 熊本地震による被災状況について	……………3
1.3 調査チーム結成の経緯	……………8
第2章 熊本地震後の気象条件など	
2.1 降雨の状況について	……………12
2.2 白川・緑川流域の河川水位について	……………16
第3章 河川災害の実態	
3.1 2016年4月熊本地震と河川災害	……………19
3.2 堤内地の液状化と旧河道	……………20
3.3 堤体の損傷	……………25
3.3.1 白川および緑川の堤体損傷	……………25
3.3.2 木山川の堤体損傷	……………27
3.4 木山川の破堤氾濫	……………28
3.5 秋津川および木山川の河川改修史	……………30
3.6 まとめ	……………31
第4章 河川堤防被害の実態	
4.1 はじめに	……………33
4.2 堤防被害の実態	……………34
4.2.1 国管理河川堤防の被害調査	……………34
4.2.2 県管理河川堤防の被害調査	……………42
4.3 地震による堤防被災後の豪雨災害	……………46
4.3.1 6月20日豪雨災害後の木山川の複合災害調査	……………46
4.3.2 天端上土嚢周囲の局所洗堀現象の浸透実験	……………48
4.4 まとめ	……………49
第5章 白川の土砂流出の実態	
5.1 斜面からの土砂生産	……………51
5.1.1 概要	……………51
5.1.2 山王谷川の土砂流出	……………52
5.1.3 まとめ	……………62
5.2 白川における土砂動態	……………64

5.2.1 調査概要	64
5.2.2 震災後の白川流域での SS 空間分布	64
5.2.3 堆積土砂および浮遊砂の粒度分布	66
5.2.4 濁度連続モニタリングによる土砂フラックスの算出	67
5.2.5 まとめ	68
5.3 白川河口干潟への影響	69
5.3.1 調査の動機	69
5.3.2 土砂・流木の流入・堆積状況の現地観測	71
5.3.3 アサリへの影響調査	77
5.3.4 まとめ	78
第 6 章 流木災害への地震の影響	
6.1 熊本地震とその後の出水による流木の発生状況	80
6.2 白川水系における一般的な流木リスクの推定	83
6.3 白川水系における熊本地震による流木発生量の推定	85
6.4 まとめ	87
第 7 章 水力発電施設への地震の影響	
7.1 はじめに	89
7.2 多発した土砂崩壊とその水系への影響	90
7.3 水力発電設備被災に関する既往事例の分析	92
7.4 熊本地震による水力発電施設被災	94
7.5 おわりに	99
第 8 章 総括	
8.1 各調査のまとめ	104
8.2 今後の大規模地震における河川災害への影響に対する適応について	106

第1章 熊本地震の概要

1.1 熊本地震とは

まず、地震の概要と被害の全般について、以下に記述する。2016年4月14日の21時26分に前震となるM6.5、最大震度7を観測する直下型地震が熊本県熊本地方で発生した。その後、その余震とみられていた震度5弱から6強の強い地震が6回発生する。そして、後に本震と称されるM7.3、最大震度7の最大規模の地震が同年4月16日の深夜1時25分と同じく熊本地方を襲った。

地震の種類は、前震は「日奈久断層帯（高野一白旗（しらはた）区間）」で約11kmの震源の深さで発生し、南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型と分類された〔気象庁(2016)〕。一方、本震は、前震と同様に南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で、「布田川断層帯（布田川区間）」付近で発生し、震源の深さは12kmであった〔気象庁(2016)〕。

気象庁は、2016年4月14日21時26分以降に発生した熊本県を中心とする一連の地震活動を、「平成28年(2016年)熊本地震」と命名した。

前震発生以降、2017年2月までに震度5弱以上を観測する地震が計24回発生している(表1.1)。主な震源地(震央)は、熊本県熊本地方、阿蘇地方、大分県中部地方であった(図1.1)。また、震度1以上の発生回数は、2017年1月末までで4,241回を数えている〔気象庁(2017)〕。

国の地震調査研究推進本部地震調査委員会(2013)は、日奈久断層帯（高野一白旗区間）の将来の活動について、活動時にはM6.8程度の地震が発生し、右横ずれを主体として2m程度のずれが生じる可能性があると指摘していた。また、30年以内の地震発生確率は不明とされていた。一方、布田川断層帯（布田川区間）については、活動時にはM7.0程度の地震が発生し、右横ずれを主体として2m程度のずれが生じる可能性がある」と推定していた。30年以内の地震発生確率は0～0.9%と我が国の活断層ではやや高い確率に評価されていた。

表 1.1 最大震度 5 弱以上の地震の発生状況 (2016 年 4 月～2017 年 2 月)

No.	発生日時	震央地名	深さ (km)	マグニチ ュード	最大震 度	備 考
1	4 月 14 日 21 時 26 分	熊本県熊本地方	11	6.5	7(前震)	震源地:N32° 44.5', E130° 48.5
2	4 月 14 日 22 時 07 分	熊本県熊本地方	8	5.8	6 弱	
3	4 月 14 日 22 時 38 分	熊本県熊本地方	11	5.0	5 弱	
4	4 月 14 日 23 時 43 分	熊本県熊本地方	14	5.1	5 弱	
5	4 月 15 日 00 時 03 分	熊本県熊本地方	7	6.4	6 強	
6	4 月 15 日 00 時 06 分	熊本県熊本地方	11	5.0	5 強	
7	4 月 15 日 01 時 53 分	熊本県熊本地方	12	4.8	5 弱	
8	4 月 16 日 01 時 25 分	熊本県熊本地方	12	7.3	7(本震)	震源地:N32° 45.2', E130° 45.7''
9	4 月 16 日 01 時 44 分	熊本県熊本地方	15	5.4	5 弱	
10	4 月 16 日 01 時 45 分	熊本県熊本地方	11	5.9	6 弱	
11	4 月 16 日 03 時 03 分	熊本県阿蘇地方	7	5.9	5 強	
12	4 月 16 日 03 時 09 分	熊本県阿蘇地方	10	4.2	5 弱	
13	4 月 16 日 03 時 55 分	熊本県阿蘇地方	11	5.8	6 強	
14	4 月 16 日 07 時 11 分	大分県中部	6	5.4	5 弱	
15	4 月 16 日 07 時 23 分	熊本県熊本地方	12	4.8	5 弱	
16	4 月 16 日 09 時 48 分	熊本県熊本地方	16	5.4	6 弱	
17	4 月 16 日 09 時 50 分	熊本県熊本地方	15	4.5	5 弱	
18	4 月 16 日 16 時 02 分	熊本県熊本地方	12	5.4	5 弱	
19	4 月 18 日 20 時 41 分	熊本県阿蘇地方	9	5.8	5 強	
20	4 月 19 日 17 時 52 分	熊本県熊本地方	10	5.5	5 強	
21	4 月 19 日 20 時 47 分	熊本県熊本地方	11	5.0	5 弱	
22	4 月 29 日 15 時 09 分	大分県中部	7	4.5	5 強	
23	6 月 12 日 22 時 08 分	熊本県熊本地方	7	4.3	5 弱	
24	8 月 31 日 19 時 46 分	熊本県熊本地方	13	5.2	5 弱	

「平成28年（2016年）熊本地震」
 熊本県から大分県にかけての地震活動の状況（2017年2月6日12時30分現在）

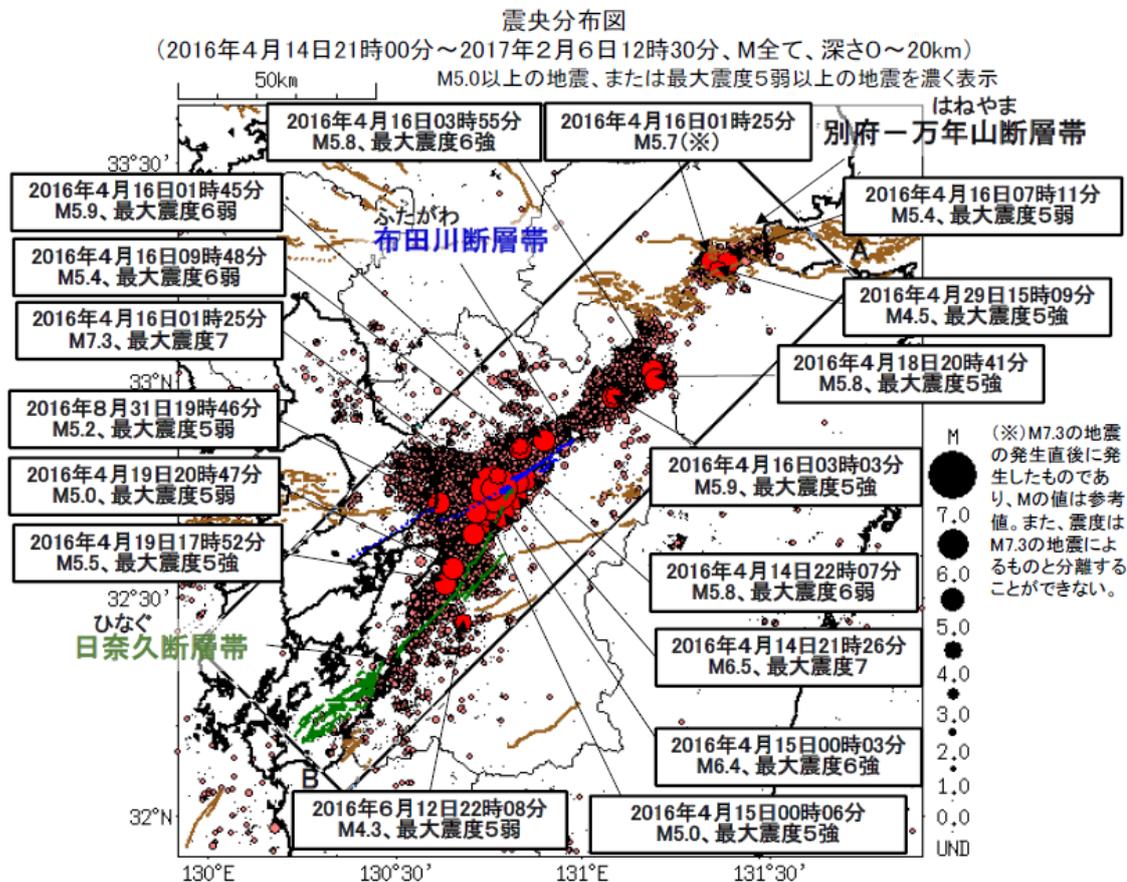


図 1.1 熊本地震の震央分布（2016年4月14日～2017年2月6日、深さ0～20km）

[出典：気象庁「震央分布図及び時空間分布図」

http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/kouiki.pdf

(2017年2月現在)]

1.2 熊本地震による被災状況について

1.2.1 被害について

熊本地震による被害状況について説明する。まず、人的被害については、災害による直接的な死者数は50名〔国立天文台(2016)〕であり、それらの多くは倒壊した住宅の下敷き（写真1.1）になったり、土砂崩れに巻き込まれたりして死亡していた。また、地震に関係したいわゆる関連死については、2017年2月10日現在で熊本県内が144名（ただし、市町村において災害弔慰金法に基づき災害が原因で死亡と認められた数）、同年2月17日現在

で大分県内（由布市）において3名が認められた。さらに、6月19日から25日までの豪雨による被害者のうち、熊本地震との関連が認められた死者数は5名となっており、直接死者と関連死者を合計した数は202名に上っている〔熊本県(2017b), 西日本新聞(2017)〕。加えて、負傷者数は熊本県内が2,646名（うち、3名は2016年6月の水害で発生し熊本地震との関連が認められた数である）〔2017年2月9日現在. 熊本県(2017a)〕、大分県内が27名であった〔2016年9月27日現在. 大分県(2016)〕。



写真 1.1 崩壊した家屋（白川下流域）

次に、物的被害について説明する。まず、住家の全壊については熊本県内で8,399棟（加えて、6月の水害で発生し地震との関連が認められたものが14棟）〔2017年2月9日現在. 熊本県(2017a)〕、大分県内で9棟〔2016年9月27日現在. 大分県(2016)〕となっている。また、熊本県内で住家の半壊が32,822棟（加えて、6月水害時の110棟）、一部破損が141,199棟（加えて、6月水害時の9棟）〔2017年2月9日現在. 熊本県(2017a)〕、大分県内で半壊202棟、一部損壊7,239棟〔2016年9月27日現在. 大分県(2016)〕の損害を被った。

さらに、熊本県内では熊本城や阿蘇神社など歴史的な建築物の被害も随所に見られた（写真 1.2, 1.3）。また、宇土市役所庁舎など公的施設の損壊も多数発生し、役所の機能を移転せざるを得ない市町村も見られた。被害額については、種々の統計があるが、西日本新聞(2016)が地震発生半年後（2016年10月14日）にまとめたデータでは、3兆7945億円と推計されている。この金額は、阪神大震災の9兆9268億円、東日本大震災の16兆9000億円に継ぎ大きな金額であった。

公共土木施設の被害については、熊本県内で約1902億円〔2016年5月16日現在, 西日本新聞(2016)〕と推計されていた。その後、国により熊本県内の県・市町村管理分について



写真 1.2 熊本城櫓の崩壊



写真 1.3 阿蘇神社の崩壊

合計で約 1000 億円と査定された [2017 年 1 月 20 日現在, 熊本県(2017)]。農林水産関連の被害額は, 熊本県内で約 1,345 億円であった [2016 年 5 月 16 日現在, 西日本新聞(2016)]。

本報告書は, 熊本地震に起因する河川災害に関連した事項のみを取り扱うものである。よって, 地震によって発生した水・土砂災害に関連する災害状況について, 以下に概略を述べる。

まず, 土砂災害は, 主に阿蘇山, 及び外輪山にわたり大規模な斜面崩壊, 地滑り, 土石流が多数発生し, 緩やかな斜面でも崩壊が確認できた。それらの被害状況は, 特に南阿蘇村付近に集中しており, 阿蘇大橋 (熊本県南阿蘇村 国道 325 号) の崩落のような大規模な土砂災害も発生した。国土交通省(2016a)によると, 熊本県・大分県の約 190 ヶ所で土砂災害が確認され, 震災以後の土砂災害による人的被害は, 死者 15 名 (6 月豪雨の土砂災害関連死 5 名を含む) であった。

河川やその関連施設における被災状況は, 河川堤防の亀裂・地割れ (写真 1.4), 河川敷の液状化や亀裂・段差の発生 (写真 1.5) などの変状が発生した。一級河川の直轄区間では, 緑川水系の 127 箇所において堤防天端の亀裂・陥落, 堤体の沈下, 堤体の滑り崩壊, 特殊堤の損傷などが確認された。特に変状が大きかった 11 箇所については緊急復旧工事が行われた。また, 白川水系でも 44 箇所, 菊池川で 1 箇所の被災が確認された [国土交通省(2016b)]。これらは全て応急対策が施された。

一方で, 県管理・熊本市管理区間については, 大分県で 1 箇所, 熊本県で 318 箇所, 熊本市で 3 箇所の変状が認められた。これらも応急対策が全て施された [国土交通省(2016b)]。

ダムについても, 地震発生後の 4 月 14 日から 6 月 13 日に点検が行われ, 5 つのダム (国管理 : 4, 利水 : 1) で小規模な被災が認められた。しかし, それらは管理上問題になるものでなく, 応急対策が施された [国土交通省(2016b)]。



写真 1.4 堤防道路のクラック(緑川)



写真 1.5 堤内地に発生した段差(白川)

1.2.2 震災後の復旧状況や2次災害など

震災後の水・土砂関連の災害復旧の状況や被災施設に関連した2次災害についてまとめる。国管理の白川・緑川の被災堤防の復旧工事については、発災直後に24時間体制で緊急復旧工事が開始され、全国からTEC-FORCE(緊急災害対策派遣隊)などの支援を受けて、5月上旬には、緑川水系の大きな変状の見られた堤防11箇所の応急処置を完了した。同じ時期に「緑川・白川堤防調査委員会」が設置され、予測される梅雨大雨に対して、緊急的なハード・ソフト対策が提案された。例えば、洪水予報の基準水位の弾力的な運用(基準水位を1ランク引き下げた)などが実施された。また、調査委員会では、本格復旧工事の工法も検討された。

第2章でも詳細を説明するが、2016年6月20~21日に発生した九州地方の豪雨では、熊本県甲佐町、宇土市で過去最高のそれぞれ1時間当り150mmと122mmの豪雨を記録した。うち、甲佐町の記録は気象庁の歴代4位タイとなっている。気象庁は両地域などで記録の短時間大雨情報を発表した。地震で地盤が緩んでいた地域で土砂崩れが発生し、熊本市内、宇土市、甲佐町、ならびに上天草市大矢野町で計6名が死亡した。また、熊本県益城町の木山川で堤防の一部決壊が発生した。[西日本新聞(2016a)]

木山川の堤防決壊は、地震によって河川堤防が沈下していたこと[中央開発株式会社(2016)]が一因と考えられる。梅雨が明けた7月以降に本格的な復旧工事が開始され、主要3河川の172の被災箇所での取り組み、11月中旬には、その復旧状況の報告や、復旧工法の妥当性を検証が行われた。なお、これらの時系列イベントは表1.2にまとめた。

また、熊本県管理の河川における被災状況は、護岸・堤防において13水系44河川の185箇所で亀裂・破損等の被害が確認された(2016年5月2日現在)。うち、5月上旬までに9

水系 20 河川の 30 箇所 の 応急復旧工事が完了した。出水期に入る 5 月 31 日までに、10 水系 34 河川の 66 箇所 の被害護岸・堤防の 応急対策工事が完了し、その後、本格復旧工事を開始した。6 月 1 日より、河川管理体制の強化のために、国・県・市の関係機関の連携が計られ、水防警報基準水位を通常より下げる措置の暫定運用が白川・緑川水系、ならびに大鞘川水系に適用された。さらに、6 月 19～21 日に発生した梅雨前線による豪雨で被災した河川施設の 応急対策を早急に行い、7 月上旬までに河川に流れ出た流木の除去を実施した。その後、熊本地震との直接的な関係はないが、7 月 6～14 日の梅雨前線による豪雨、ならびに 9 月 19～20 日の台風 16 号による豪雨に関する対応として、前者は県管理ダムのうち 5 ダム（市房ダム・氷川ダム・石打ダム・亀川ダム・上津浦ダム）で、後者は市房ダムでそれぞれ洪水調整を行い、下流河川水位を低下させた。〔熊本県(2016b)〕

表 1.2 河川に関する被災、及び対策の経緯〔国土交通省九州地方整備局記者発表から抜粋。

URL. <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/> (2017 年 2 月現在)]

日にち	イベント	河川施設の被害 (直轄区間)	具体的な河川水害 対策など	備考
4 月 14 日	前震-震度 7	初動調査で白川水系 32 箇所, 緑川水系で		
4 月 16 日	本震-震度 7	105 箇所, 菊池川水系 で 1 箇所の被害を確認		
4 月 17 日	緑川水系堤防の緊急 復旧工事の開始		全国 TEC-FORCE が被災地へ集結	4/15 に既に着手した堤防あり
4 月 18 日 19 日	ダム被災状況の調査 (専門家の派遣)		地藏原ダム (大分県九重町), 緑川ダム(熊本県美里町) への現地調査を実施	
4 月 27 日	白川橋の損傷調査		専門家を派遣して現地調査を実施	6/26 白川橋の復旧工事が完了 (開通)
4 月 29 日	緑川・白川等の被災・ 復旧状況の報告	最終的に主要 3 河川 で 172 箇所の堤防被害を確認 (緑川水系 で大きな変状の堤防 11 箇所を含む)		172 箇所の内訳は, 白川 44 箇所, 緑川 127 箇所, 菊池川 1 箇所
4 月 30 日	緊急復旧工事の進捗 状況の報告			緑川水系緊急復旧工事-2 箇所完了
5 月 6 日	緑川・白川堤防調査委 員会第 1 回開催		地質・河川工学の専門家が本格復旧工法を検討	梅雨対策のために最大限のハード・ソフト対策を実施
5 月 9 日	緊急復旧工事の報告		緑川水系で大きな変状の堤防 11 箇所の緊急復旧が完了	
5 月 18 日	洪水予報の基準水位 の一時的改訂		早期警戒体制の構築のため基準水位を 1 ランク引き下げて運用	

5月31日	梅雨・台風に備えた緊急対応（水害対策）		排水ポンプ車配備，熊本県に計6台導入	10月末まで継続予定
6月3日	緑川ダムの洪水対策の一時的改訂		ダムの洪水調節容量の増強，大放流量の引き下げ	
6月9日	河道内流木の捕捉対策		立野地区の河川内の道路復旧と流木捕捉用の鋼製牛柵水制を設置	
6月10日	緑川・白川堤防調査委員会第2回開催		本格復旧工法の報告・確認；地震外力と地盤沈下の検討	
6月17日	白川水系における河川管理体制の強化		堤防の一部（パラペット）の嵩上げ実施	堤防が沈下した十禅寺・蓮台寺地区で復旧工事完了
6月20日 21日	緑川水系で河川氾濫危険の発生	緑川・白川の大規模な河川施設の被害発生なし	6/19からの豪雨対策として，排水ポンプ車の投入と緑川ダムの水位と放流量の調整，及びリエゾンの派遣を実施	熊本県内に豪雨が発生（益城・宇土で冠水，土砂崩れで6名死亡）
6月22日	白川水系橋梁に堆積した流木除去の開始		明午橋（熊本市中央区）に堆積した流木を除去；大甲橋（熊本市中央区）は6/30に実施	明午橋は6/23に除去完了
6月27日	大雨による緑川ダムの洪水操作の実施		緑川ダムの放流量の低減（26%減）を実施	
6月28日	緑川・白川の河川堤防などの本復旧の開始	本格復旧が必要な河川堤防は，緑川水系40箇所，白川水系12箇所，ダムは2箇所を確定	堤防・ダムの本格的な修繕に加えて河道内堆積土砂の撤収を実施	国費（約100億円）を投入
7月6日	有明海に流出した流木の対策		梅雨の降雨で有明海へ流出した流木回収を実施	海洋環境整備船「海輝」「海煌」を利用
7月7日	白川水系の橋梁に堆積した流木の対策		明午橋など主要4橋梁の流木除去を実施	他の橋梁は7月末までに完了
11月14日	緑川・白川堤防調査委員会（第3回）開催		復旧工事の堤防開削状況の現地調査，及び対策工法の妥当性を検証	今後のソフト対策も報告
11月25日	白川水系の堆積土砂と流木等撤去の現状の報告		堆積土砂の撤去は12万m ³ ，流木の撤去は8千空m ³ （白川河道），及び1.9万空m ³ （有明海）	

TEC-FORCE = 緊急災害対策派遣隊；リエゾン = 災害対策現地情報連絡員

1.3 調査チーム結成の経緯

熊本地震発生直後，阿蘇大橋や立野地区の大規模土砂崩壊に伴う白川への土砂流出や，白川・緑川水系での堤防等の河川構造物被害などが発生し，九州地区の水工学関係者の間で調査チームの結成について議論したが，当初は河川の氾濫などの水害が発生しておらず，

各研究者の自主的な調査に任せる形を取っていた。その後、梅雨期における地震の影響から発生する水害の可能性を鑑みて、調査チーム結成の必要性が高まった。

そこで、土木学会水工学委員会の水害対策小委員会と協議し、2016年5月に同委員会として熊本地震に対する水工学的な調査団の結成が正式に決まった。また、京都大学防災研究所により、熊本地震に関して平成28年度特別緊急共同研究の募集があり、調査団メンバーに倉上氏を加えた調査チーム(表1.3)を構成して、研究課題を「**大震度直下型地震による河川への影響の総合的調査研究**」として申請した。研究目的として、震度7クラスの直下型地震がもたらす河川の安全性などへの影響について詳細に調査し、今後予想されている首都直下地震などにおける河川災害リスクの低減へ活かすための知見を蓄積することをあげた。そこで、熊本地震に伴う河川などへの影響を包括的に調査し、今後の施策に反映させるための基礎データとなる報告を行うための調査計画を以下の通りに立案し、各メンバーが分担した。

1. 河川全体の治水安全度低下について(担当: 大本・平川)

今回の地震に伴う、白川・緑川、ならびに二級河川の河川安全度への影響を河川全体の総合的調査結果から評価し、ハード・ソフトの両面から大規模地震発生後の対応方針立案における課題抽出を行う。

2. 河川堤防の安全性低下について(担当: 二瓶・石蔵・倉上)

地震により発生した堤防基礎地盤の液状化や堤体の変状などの発生メカニズムを地盤力学的解析により検討する。

3. 上流域斜面崩壊に起因する土砂流出がもたらす河川安全度の低下について(担当: 竹林・赤松)

白川上流域の流出土量から土砂流出解析を、またドローンを利用した河川地形測量を実施し、洪水リスクへの影響を調査する。

4. 上流森林域の崩壊に起因する流木災害リスクについて(担当: 矢野・木村)

河道、ならびに斜面上に残存する倒木量の調査、ならびに大規模出水が発生した際の流木災害リスク評価を白川流域について行う。

5. 地震による水力発電所被災メカニズムについて(担当: 田代)

今回被災した黒川第一水力発電所を中心に、被災状況の調査を行い、地震に対する水力発電施設の脆弱性について評価する。

6. 河口干潟の土砂堆積に伴う地形変形と生態系への影響(担当: 田井・小森田・赤松)

白川の河口干潟を中心に深浅測量やドローンによる測量を行い、河口干潟域の地形変形と地震に起因する堆積物による干潟生態系(主に、アサリなどの二枚貝)への影響評価を行う。

その結果、採択していただき本格的な調査を行うことができた次第である。改めて、採択いただいた京都大学防災研究所に感謝したい。

本報告書は、緊急共同研究の成果をとりまとめたものであり、かつ、水工学委員会の調査団報告書としても広く学会内外で活用していただくことを目的に編纂した。調査は主に地震発生直後から個別にスタートしていたものもあるが、半年強の短い期間での成果であることから、必ずしも完全な形で全ての項目の調査が完了していない部分もある。今後、より詳細な調査研究を進めることで、学術論文等としても発表していくことになるので、そちらについても関心を持っていただけると幸いである。

表 1.3 調査チームのメンバー構成

氏名	所属・職名 (平成 29 年 2 月現在)	分担	土木学会調査 団での役割
研究代表者： 大本 照憲	熊本大学大学院自然科学研究科・教授	研究総括，河川安全度評価	団長
矢野 真一郎	九州大学大学院工学研究院・教授	流木災害リスク解析	幹事
二瓶 泰雄	東京理科大学理工学部・教授	河川堤防の被災	団員
竹林 洋史	京都大学防災研究所・准教授	土砂流出解析	団員
赤松 良久	山口大学大学院創成科学研究科・准教授	河道地形変動解析，河口干潟 地形変化と生態系影響評価	団員
田代 喬	名古屋大学減災連携研究センター・准教授	水力発電所被災調査	団員
平川 隆一	前橋工科大学工学部・准教授	河川安全度評価	団員
田井 明	九州大学大学院工学研究院・准教授	河口干潟地形変化と生態系 影響評価	団員
石蔵 良平	九州大学大学院工学研究院・助教	河川堤防の被災	団員
小森田 智大	熊本県立大学環境共生学部・助教	河口干潟地形変化と生態系 影響評価	特別団員
木村 延明	九州大学大学院工学研究院・特任助教	流木災害リスク解析	団員
倉上 由貴	東京理科大・博士課程 2 年 (日本学術振興会特別研究員 DC2)	河川堤防の被災	

参考文献：

- 1) 大分県：平成 28 年 4 月 16 日以降に発生した地震に伴う災害情報について（第 87 報），
URL. http://www.pref.oita.jp/uploaded/life/1043297_1327287_misc.pdf（2017 年 2 月現在），
2016.
- 2) 気象庁：平成 28 年(2016 年)熊本地震の評価，URL.
http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf（2017 年 2 月現在），
2016.
- 3) 気象庁：「平成 28 年(2016 年)熊本地震」の震度 1 以上の最大震度別地震回数表，URL.
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/yoshin_kako.pdf（2017 年 2 月現在），
2017.

- 4) 熊本県：（報道資料）平成 28 年熊本地震等により被災した公共土木施設の災害査定が完了しました。 URL.
http://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=18104&sub_id=1&flid=91337 (2017 年 2 月現在), 2016a.
- 5) 熊本県：熊本県 HP. 河川・道路・砂防に関する記事, URL.
http://www.pref.kumamoto.jp/hpkiji/pub/List.aspx?c_id=3&class_set_id=16&class_id=6497 (2017 年 2 月現在), 2016b.
- 6) 熊本県：平成 28(2016)年熊本地震等に係る被害状況について【第 215 報】， URL.
http://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=15459&sub_id=209&flid=95409 (2017 年 2 月現在), 2017a.
- 7) 熊本県：平成 28(2016)年熊本地震等に係る被害状況について【第 216 報】， URL.
http://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=15459&sub_id=209&flid=95410 (2017 年 2 月現在), 2017b.
- 8) 熊本県：平成 28 年熊本地震 公共土木施設の被災状況について【被害概要版 河川編】， URL. http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_18527.html (2017 年 2 月現在), 2017c.
- 9) 国土交通省：平成 28 年度熊本地震による土砂災害の概要， URL.
www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160914_gaiyou_sokuhou.pdf (2017 年 2 月現在), 2016a.
- 10) 国土交通省：熊本県熊本地方を震源とする地震について(第 51 報)， URL.
<http://www.mlit.go.jp/common/001155671.pdf> (2017 年 2 月現在), 2016b.
- 11) 国立天文台（編）：理科年表 2017，丸善，2016.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：九州地域の活断層の長期評価， URL.
http://jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_11.pdf (2017 年 2 月現在), 2013.
- 13) 中央開発株式会社：熊本地震現地調査結果「速報」報告書， URL.
www.ckcnet.co.jp/pdf/kumamoto_0427.pdf (2017 年 2 月現在), 2016.
- 14) 西日本新聞：2016 年 6 月 22 日朝刊， 2016a.
- 15) 西日本新聞：2016 年 10 月 14 日朝刊， 2016b.

(矢野真一郎・木村延明)

第2章 熊本地震後の気象条件など

2.1 降雨の状況について

2016年の出水期前である4月中旬に発生した熊本地震では、地盤沈下や河川堤防の亀裂の発生などが確認された。これらの変状は、地震発生後に訪れる出水期において水災害を引き起こす要因になりうると考えられた。したがって、国土交通省と地元の自治体では、6月の出水期前に豪雨災害での地震の影響を最小限に食い止めるために、緊急復旧工事を実施した。また、梅雨が明けた7月以降には、本格復旧も開始された。[国土交通省(2016)]

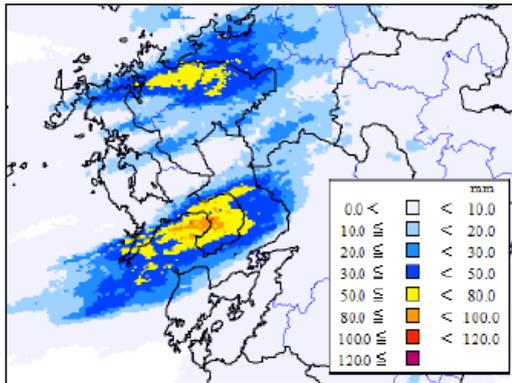
地震後の降雨イベントについて、以下に説明する。まず、2016年で最も大きな出水が発生したのが、梅雨前線性豪雨である6月20～21日に九州で発生した大雨であった。気象庁(2016)によると、九州地方の7地点で1時間降水量、5地点で3時間降水量が観測史上最大を記録した(表2.1)。解析雨量図(図2.1)によると、6月20日から21日未明に、熊本地震の影響を受けた地域に強い雨が降ったことが分かる。さらに、6月30日までの総降水量分布(図2.2)において、白川流域である阿蘇地方に1000ミリの降雨があったことが分かる。

表2.1 観測史上1位を記録した九州地方の観測地点 [気象庁(2016)]

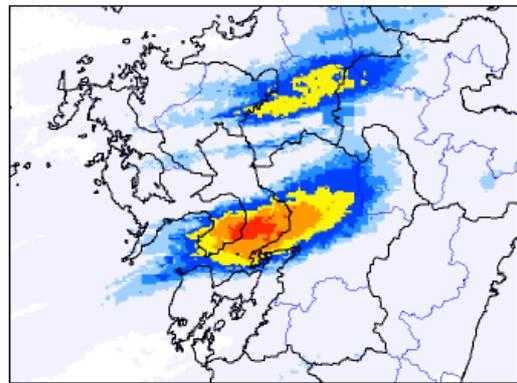
最大1時間降水量					
都道府県	市町村	地点	最大1時間降水量(mm)	月日時分	備考
長崎	島原市	島原	97.0	6/20 22:31	
熊本	熊本市	熊本	94.0	6/20 23:04	
熊本	宇土市	宇土	122.0	6/20 23:27	
熊本	宇城市	三角	104.0	6/20 23:48	
熊本	上益城郡甲佐町	甲佐	150.0	6/21 00:19	全国で史上4位
宮崎	西臼杵郡五ヶ瀬	鞍岡	97.5	6/21 01:00	
宮崎	小林市	野尻	72.0	6/21 04:15	
最大3時間降水量					
長崎	島原市	島原	146.5	6/21 00:10	
熊本	上益城郡益城町	益城	157.0	6/21 00:40	
熊本	宇土市	宇土	174.5	6/20 24:00	
熊本	宇城市	三角	141.5	6/21 00:10	
熊本	上益城郡甲佐町	甲佐	197.0	6/21 00:50	

1時間降水量（解析雨量）

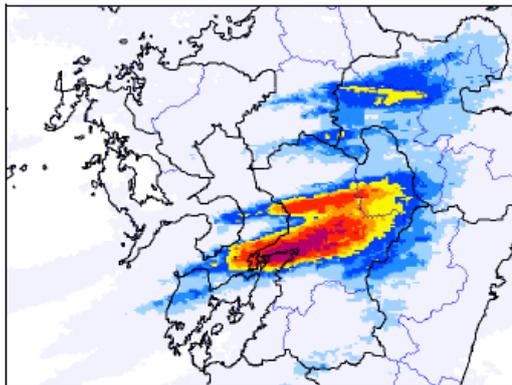
6月20日21時～22時



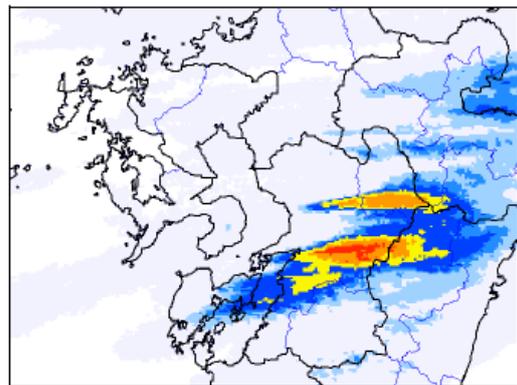
6月20日22時～23時



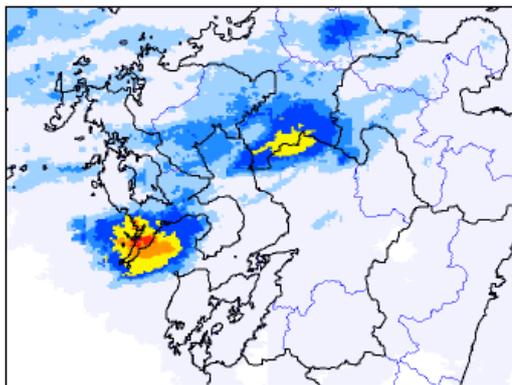
6月20日23時～21日00時



6月21日00時～01時



6月22日05時～06時



6月22日06時～07時

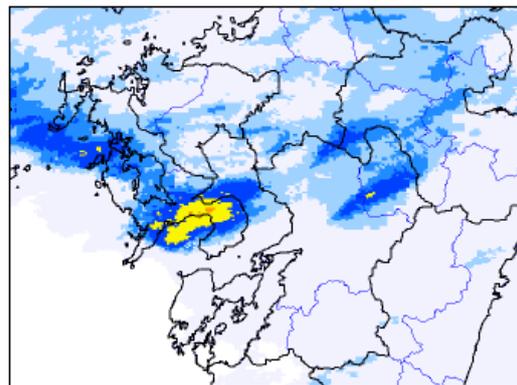


図 2.1 2016年6月20日から22日までの九州地方の解析雨量（1時間雨量）分布図
[気象庁(2016)より]

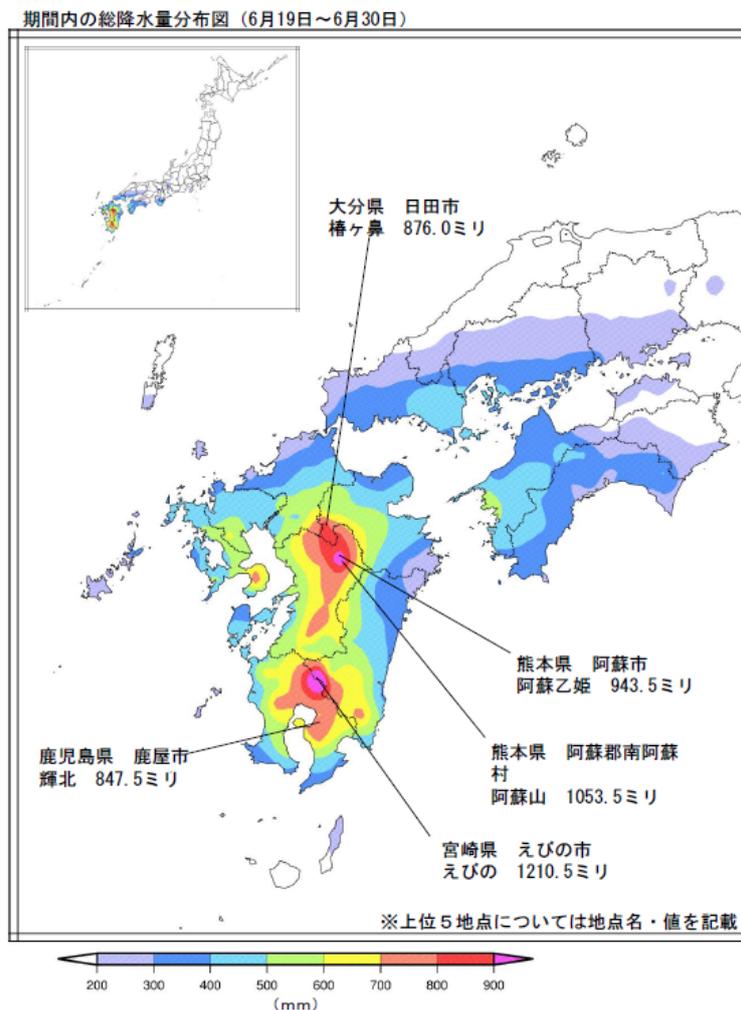


図 2.2 2016年6月19日から30日までの九州地方の総降水量分布図
[気象庁(2016)より]

次に、国土交通省水文・水質データベースから、熊本地震の発生以降2016年12月までの白川、及び緑川流域内の雨量観測所（熊本、湯ノ谷、島木、緑川ダム（図 2.3））における日雨量の時系列をそれぞれ図 2.4～図 2.7に示す。いずれの地点でも、6月20～21日の降雨が最大であった。その他、梅雨期内で豪雨（時間降雨 50mm 前後）が数回程度発生している。

台風期では、九州に上陸または接近した台風として、9月3～5日の台風12号、9月19～20日の台風16号、ならびに10月4～5日の台風18号などがあった。しかし、いずれも小規模な降雨量（時間降雨 20～40mm）がもたらされた程度であった。

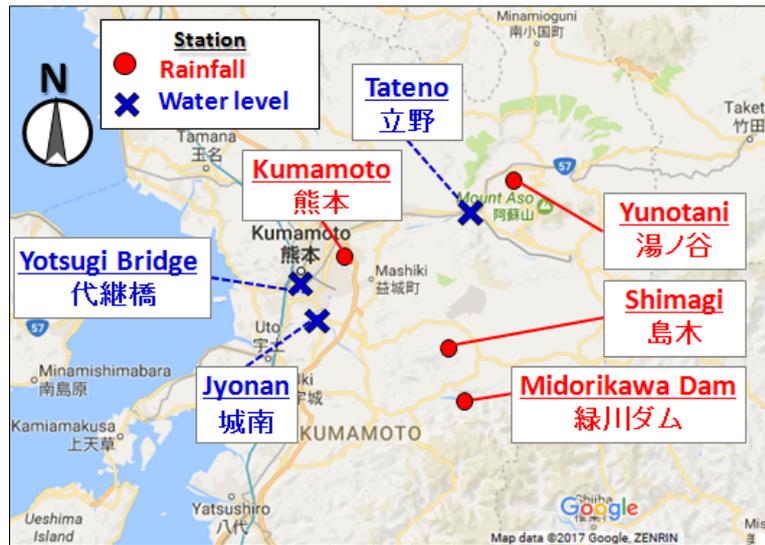


図 2.3 白川・緑川流域の参照観測点 (赤：雨量観測所，青：水位観測所)。

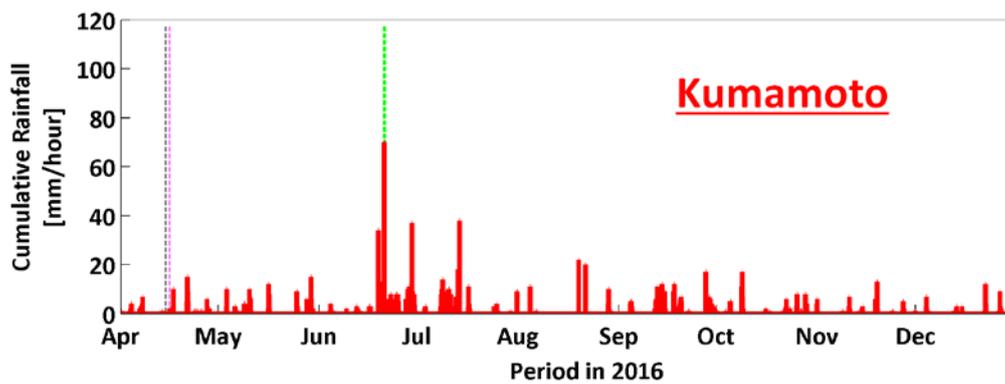


図 2.4 熊本観測所（白川水系）におけるハイレトグラフ（時間雨量）
 期間：2016年4月～12月
 (図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6月21日豪雨（緑）をそれぞれ示す.)

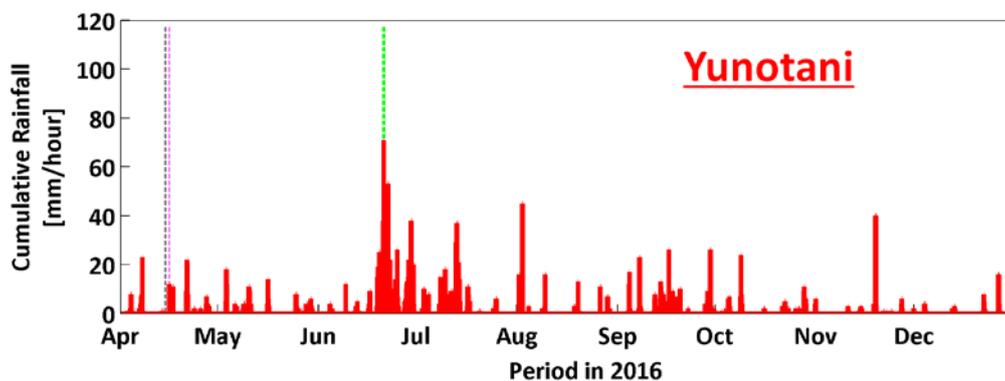


図 2.5 湯ノ谷観測所（白川水系）におけるハイレトグラフ（時間雨量）
 期間：2016年4月～12月
 (図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6月21日豪雨（緑）をそれぞれ示す.)

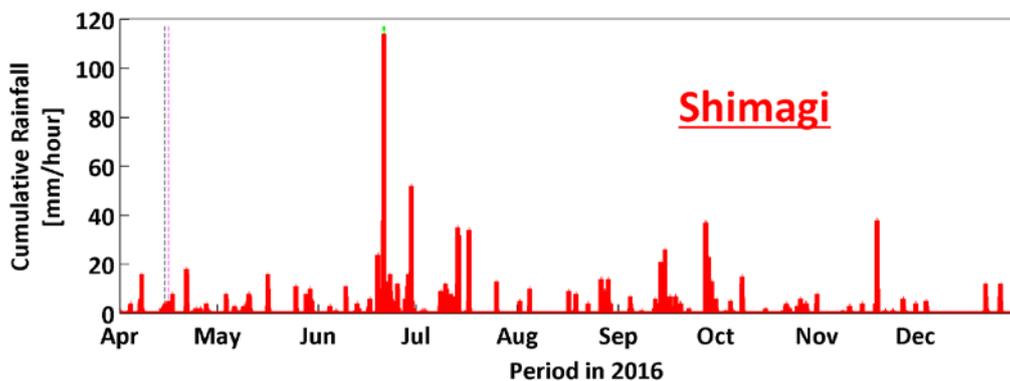


図 2.6 島木観測所（緑川水系）におけるハイトグラフ（時間雨量）
 期間：2016年4月～12月
 （図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6月21日豪雨（緑）をそれぞれ示す。

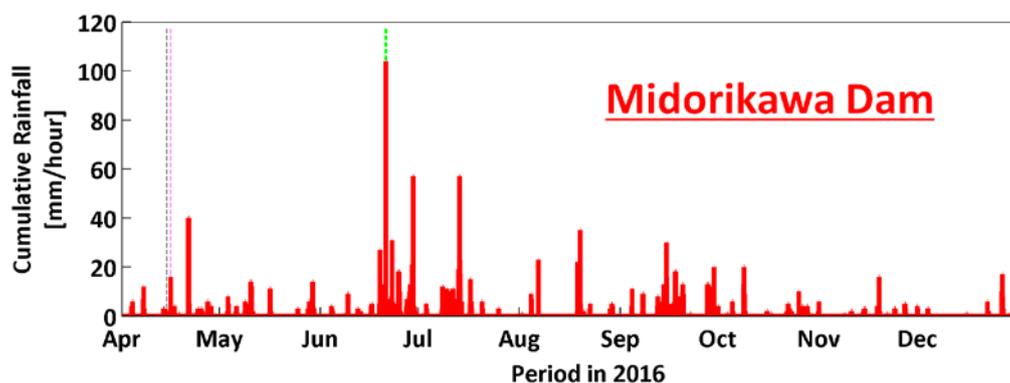


図 2.7 緑川ダム観測所（緑川水系）におけるハイトグラフ（時間雨量）
 期間：2016年4月～12月
 （図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6月21日豪雨（緑）をそれぞれ示す。

2.2 白川・緑川流域の河川水位について

熊本地震により河川構造物等に被害の出た白川と緑川について、国土交通省水文・水質データベースから代表的な水位観測所における水位を、前節の雨量と同様に2016年12月まで調べた。参照した観測所は、図 2.3 に示したとおり白川が代継橋と立野、緑川が城南である。各観測所での水位時系列を図 2.8～図 2.10 に示す。まず、白川の2地点について、地震発生直後から低水位が30～50cm程度上昇しているのが分かる。これは、地震（前震・本震）により発生した土砂崩壊により流出した土砂が河道内に堆積し、河床面を上昇させたことに起因している可能性がある。一方、緑川ではそれは見られていない。さらに、6月19～21日に発生した豪雨に起因して、白川の立野で3m、同代継橋で4m程度、緑川の城南で約4mの水位上昇がみられた。さらに代継橋では、その後の低水位が70cm程度上昇しているのが確認できる。これは、地震等で流出した土砂が下流まで一気に流下し、堆積した

ことを物語っている。実際に、代継橋地点の状況（写真 2.1）を見ると、被災前に見られた護岸沿いの遊歩道が水没していた。

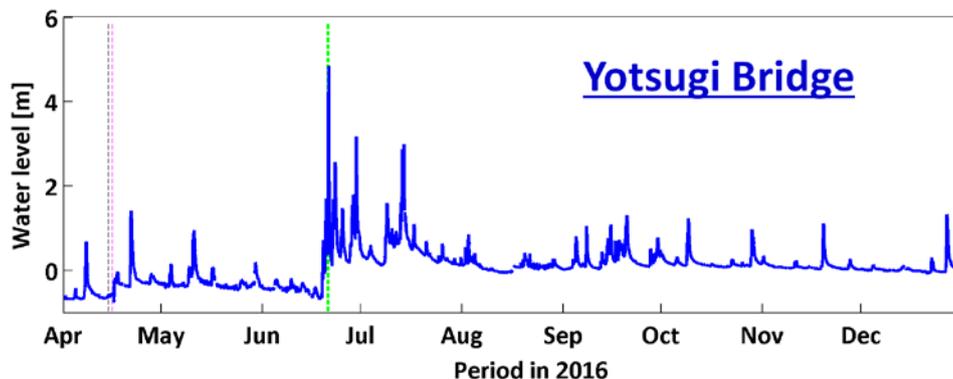


図 2.8 代継橋観測所（白川水系）における時系列の水位データ（1 時間毎）
 期間：2016 年 4 月～12 月
 （図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6 月 21 日豪雨（緑）をそれぞれ示す。）

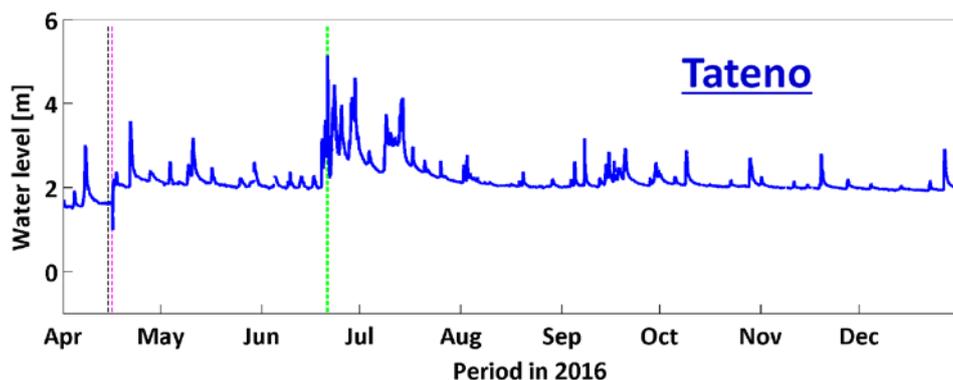


図 2.9 立野観測所（白川水系）における時系列の水位データ（1 時間毎）
 期間：2016 年 4 月～12 月
 （図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6 月 21 日豪雨（緑）をそれぞれ示す。）

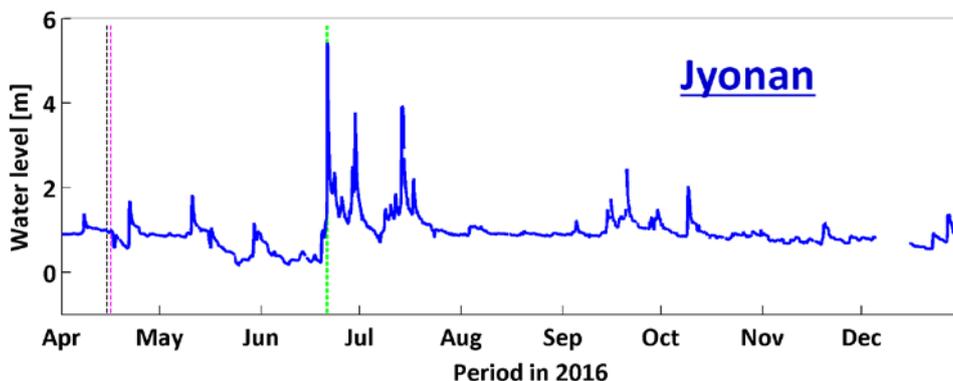


図 2.10 城南観測所（緑川水系）における時系列の水位データ（1 時間毎）
 期間：2016 年 4 月～12 月
 （図中の点線は、前震（黒）、本震（ピンク）、6 月 21 日豪雨（緑）をそれぞれ示す。）

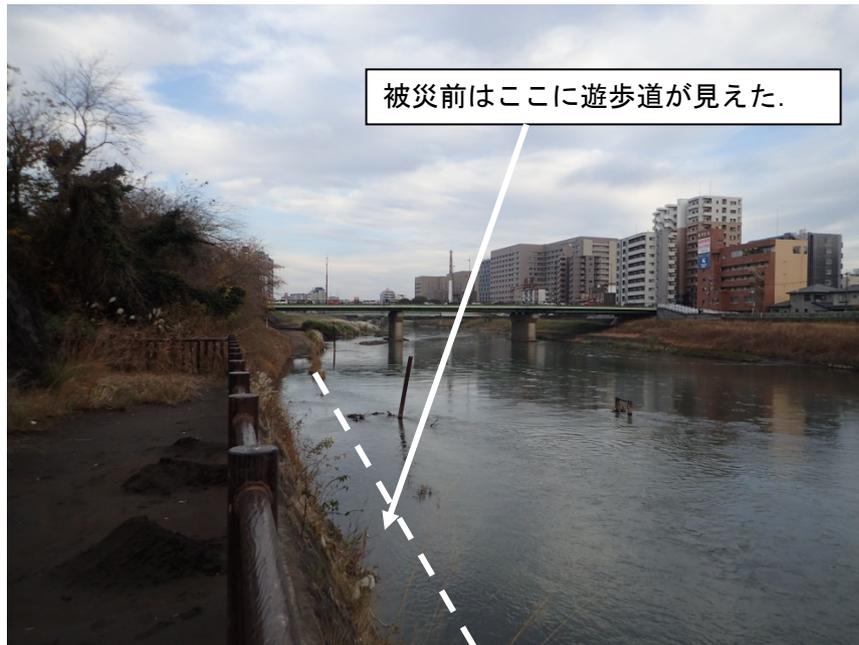


写真 2.1 代継橋観測所（白川水系）における状況（2016 年 12 月撮影）

そして、7 月 6～14 日の梅雨前線停滞による豪雨でも、約 2m の水位上昇が確認された。本報告書執筆時点において、流量値は公表されていないが、土砂堆積による断面変化が想定されることから、H-Q 式の適用には注意が必要になると推測される。

参考文献：

- 1) 国土交通省：記者発表，URL. <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/>（2017 年 2 月現在），2016.
- 2) 気象庁：梅雨前線による大雨 平成 28(2016)年 6 月 19 日～6 月 30 日，URL. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2016/20160705/jyun_sokuji20160619-30.pdf（2017 年 2 月現在），2016.

（木村延明・矢野真一郎）

第3章 河川災害の実態

3.1 2016年4月熊本地震と河川災害

2016年4月14日および4月16日の2度にわたり熊本県益城町においては震度7、熊本市では震度6強および6弱の直下型地震に見舞われた。このため、国直轄の白川水系および緑川水系、さらには熊本県の管理河川である秋津川、木山川および矢形川では堤防に大きな損傷を受けた。出水期までに若干の時間的余裕が在ったことが幸いし、国土交通省および熊本県は河川管理施設の緊急点検を行い、被害の大きい箇所に対しては緊急復旧工事を実施した。出水前に堤体の損傷が大きい箇所数は、国土交通省171箇所、熊本県350箇所、市長村170箇所であり、平成28年6月上旬に応急処置が完了したのは、国土交通省100%、熊本県20%、市町村10%であった。

国土交通省および熊本県では、河川堤防に対する緊急復旧工事を実施すると共に、河川の監視体制に加えて、堤防の損傷および白川の河床上昇により治水安全度が低下したことに対して水防警報および洪水予報の基準水位の暫定的引き下げを実施しソフト対策の強化を図った。

これらの対策が功を奏し、幸いにも河川災害による人的被害としての死者は無く、後述する木山川の破堤氾濫による物的被害が挙げられる。なお、熊本地震による堤防の被害額は以下の通りである。

国土交通省熊本河川国道事務所のまとめ

国直轄河川の被害総額：70億円（河床上昇に対する土砂撤去費用は含まれていない）

熊本地震によって影響を受けた国直轄区間の河川堤防の被害額

白川：20億円、緑川本川：36億円、御船川：10億円、加勢川：4億円

熊本県土木部のまとめ

平成28年熊本地震及び豪雨災害について

公共土木施設災害（県河川）地震災害＋豪雨災害 県管理河川 637箇所 229億円

- ・緑川水系 282箇所（県河川被害箇所数の44%）138億円（県河川被害額の60%）
- ・緑川水系のうち、木山川、秋津川、矢形川の3川で53箇所
県河川被害箇所数の8.3% 97億円（県河川被害額の42%）
- ・白川水系で107箇所（県河川被害箇所数の17%）47億円（県河川被害額の21%）
- ・緑川、白川水系以外 248箇所（県河川被害箇所数の39%）44億円（県河川被害額の19%）

注)

①震源及び活断層に近い、緑川、白川水系の被害が大きい。

②特に、加勢川上流3川だけで、県河川被害額の4割程度を占める。

（なお、被害が河川の縦断方向に連続していたことから、1箇所あたりの復旧延長が長くなったため箇所数は比較的少ない。）

3.2 堤内地の液状化と旧河道

図 3.1 は、国土地理院による熊本平野および活断層を示す。図 3.2 および図 3.3 は、地盤工学会平成 28 年熊本地震地盤調査団液状化班¹⁾による堤内地の液状化した場所を示す。現地調査および空中写真判読から熊本平野では広範囲に液状化集中地帯が確認出来る。

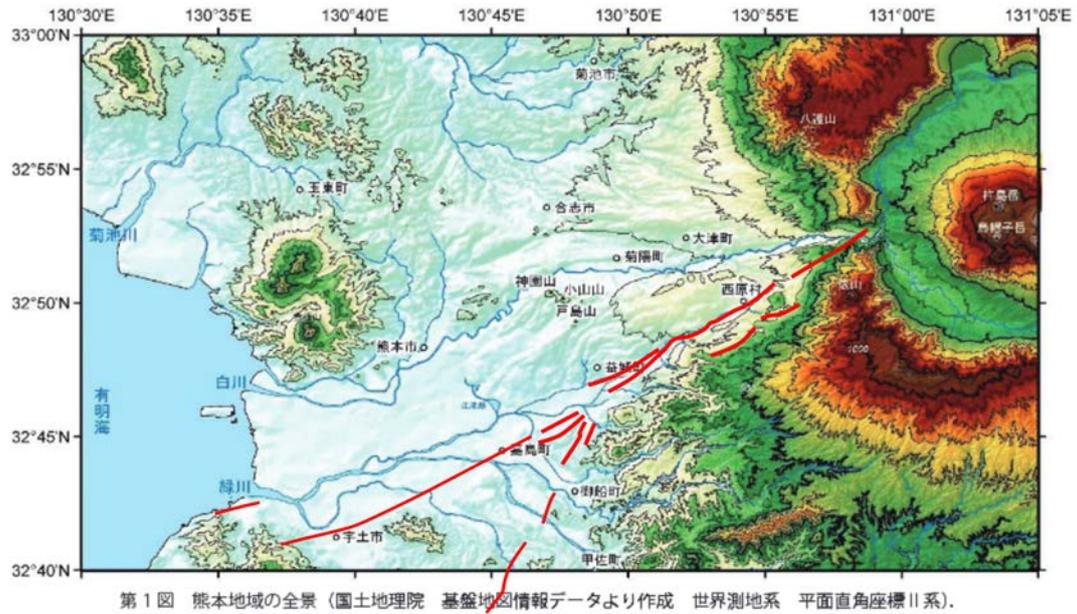


図 3.1 熊本平野と熊本地震 (出典：国土地理院)



図 3.2 堤内地の液状化

(出典：地盤工学会 H28 年熊本地震災害調査団)

図 3.3 带状の地盤変状

(出典：地盤工学会 H28 年熊本地震災害調査団)

ところで熊本平野は、白川と緑川の氾濫土砂によって形成された沖積平野であり、熊本

市の上水の 100%が地下水で賄われていることから分かる様に、地下水の豊かな場でもある。また、白川は、幹川流路延長 74km、流域面積 480km² であり、阿蘇火山のカルデラは流域面の 8 割を占め、北側である阿蘇谷を流れる黒川と南側の南郷谷を流れる白川が南阿蘇村河陽で合流し、急流の多い上中流域を抜けると熊本市を貫流し、有明海に注ぐ一級河川である。その特徴は出水に伴って大量の土砂が排出されることで、1953 年（昭和 28 年）6 月 26 日の白川水害では市街地に大量の泥（新規火山灰ヨナ）が流入したことで知られている。

一方の緑川は、阿蘇外輪山の南側に位置する熊本県上益城郡清和村の三方山（標高 1,578m）を水源とし、流域面積 1,100km²（山地 793km²、平地 307km²）、幹川流路延長 76km の一級河川である。上流域では河床勾配 1/250 で高峻な山岳地帯を流下し、中流域では 1/600～1/1000、下流域では 1/2500～1/3000 の勾配を有し、右支川の御船川、加勢川、天明新川および左支川の津留川（旧名：佐俣川）、浜戸川と合流して有明海に注ぐ一級河川である。



図 3.4 慶長国絵図(1605)

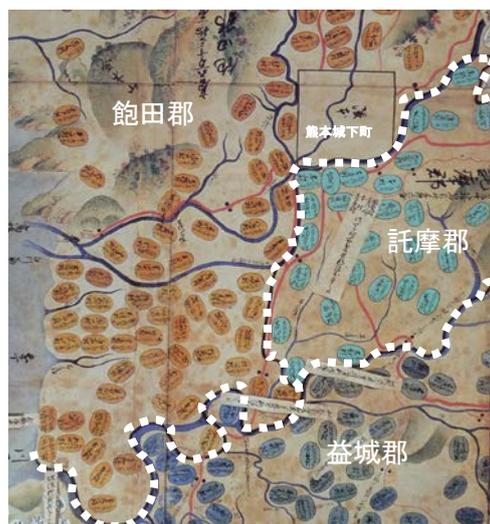


図 3.5 正保国絵図(1644)

小出博は、「日本の河川-自然史と社会史-」（1972）の中で白川と緑川の河道について「・・・白川は緑川とともに、熊本平野の北側と南側を平行して東西に流れている。・・・1つの共通した平野の中を並行して別々に流れる河川は、西南日本では熊本平野の白川と緑川だけである。」と記し、更に続けて、

「・・・現在の白川の流路は地形的にいかにも不自然な流れである。ことに平田町（蓮台寺）で直角に曲がり、南流から西流に変わるあたりで、このことが強く感ぜられ、この流路が自然にできたものかどうか疑問を抱かせる。しかしこれは疑問に止まって、それ以上の進展はいまのところ望めない。」と述べている。

著者らは、古文書や絵図の文献調査に加えてレーザ・プロファイラーのデータを基に地形解析を実施し、白川、坪井川および井芹川の旧河道を検討した²⁾。

図 3.4 は 1605 年に徳川幕府の命により加藤家に作らせた「慶長国絵図」³⁾の一部である。この絵図には、熊本城、郡名、郡高、田方面積、畠方面積を朱書している。また、国堺は黄土色、郡堺薄紫色に近い。図より、白川は本庄付近で大きく北に湾曲し、その頂部で坪井川に合流後、本山付近で現在の河道に戻る。

井芹川は熊本城の西側を通り、古町のあたりで大きく西に曲がり、高橋方面へ流れている。現在の河道と大きく異なる点は白川が北に蛇行して熊本城に迫り、その直南、現在の熊本市付近で坪井川と合流して流れていること、井芹川が現在の花岡山の西側では無く、東側を通る河道となっていることである。

図 3.5 は、幕府が正保元年（1644 年）に加藤氏に代わって細川氏に作成を命じた「正保国絵図」³⁾の一部である。図中には、郡界を白色の波線で示し、郡名を記している。

図 3.4 の「慶長国絵図」に比べ、図 3.5 の「正保国絵図」では熊本城付近にあった白川の蛇行は見られなくなっており、直線化されていることが分かる。また、図 3.4 および図 3.5 に共通する蓮台寺から川尻に南下する郡界は、小出博により指摘された蓮台寺で直角に曲がり、南流から西流に変わる不自然な流れと対応している。



図 3.6 「熊本城城下絵図」（1819 年以前）

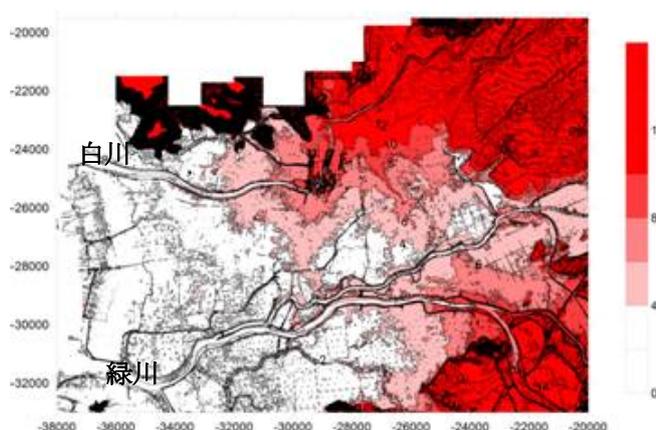


図 3.7 熊本平野の地形高

郡界は、川を郡境とする場合が多く、白川の旧河道は蓮台寺から川尻に向かって南流し川尻で緑川に合流していた可能性を有している。この様に解釈すれば川尻の地名は白川の末端を意味することが窺われる。この点については、さらにレーザ・プロファイラーのデータを地形解析した。

図 3.6 は、「熊本城下絵図」（1819 年以前）³⁾の一部を示したもので、熊本城下における街路、武家屋敷、寺社、町屋の配置状況を概括的に知ることが出来る。図中の波線は、後述のレーザ・プロファイラーのデータから地形高の低い部分を白川旧河道と見立て、図中に落とした線である。図の波線上では、田圃や川掘りがある。

なお、富田⁴⁾は、「慶長国絵図」と郡界を基に、熊本城周辺で大きく湾曲した白川旧河道を推定しており、レーザ・プロファイラーから推定された図中の波線に近い形状であるこ

とが認められた。

図 3.7 は熊本平野の等高線をメートル単位で示す。平野の北側に白川，南側に緑川が東から西に向かって流れている。地形高は，全般的に北東から南西に向かって低くなっており，地形は大まかに東西方向で 1/600，南北方向に 1/400 の勾配である。

図 3.8 は白川が南流から西流に急激に向きを変える蓮台寺から川尻の間の等高線を示す。白川は洪水時には阿蘇の新規火山灰“ヨナ”を大量に含んで（昭和 28 年 6 月 26 日水害では試算された体積土砂濃度 10%）流下し，下流域は氾濫土砂によって自然堤防が形成されるために天井川と成りやすく，堤防周辺で地形が高く，堤防から離れるに従って低くなる傾向がある。

図より地形は蓮台寺付近で高く川尻に向かって低くなることが読み取れる。また蓮台寺付近を起点とすれば，東西方向の勾配が約 1/750 であるに対して，南北方向の勾配が約 1/350 であることから南北方向の地形勾配が大きい。また，図中の波線は「正保国絵図」の郡界を示す。図中の郡界線は，地形高の峰部に当たることが分かる。白川の右岸は飽田郡，左岸側は託摩郡であり，緑川の左岸側は益城郡と考えれば，川は郡界として利用されていた可能性が高い。また，菊池川の高瀬と緑川の川尻は近世においては肥後における代表的な年貢米等の物資集積港であった。川尻の地名は，緑川との位置関係から不自然であり白川の末端から名付けられたことが想像される。

図 3.9 は現在の熊本市の中心市街地の地形高を示す。図中の波線は「慶長国絵図」から白川が本庄付近で大きく北に湾曲し，その頂部で坪井川に合流後，本山付近で現在の河道に接続していることを参考に，地形高の低い箇所から旧流路を推定したものである。また，この河道湾曲部を図 3.6 の「熊本城下絵図」にプロットしたのが図中の波線である。図より大きく湾曲した波線上の旧流路に着目すれば，現在の熊本市役所付近で最も地形高が低

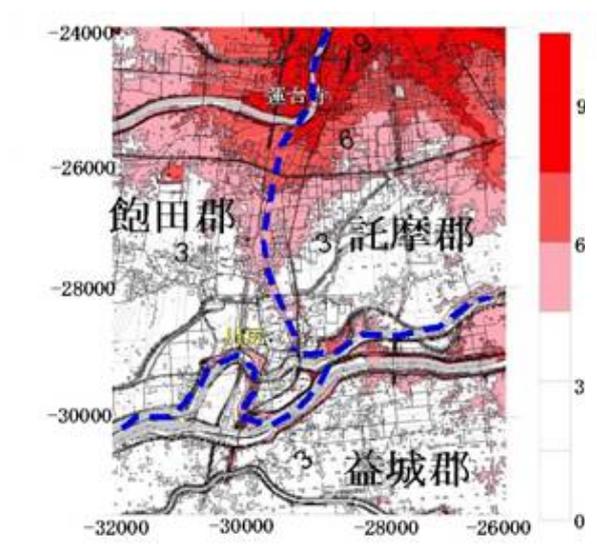


図 3.8 旧流路と地形高

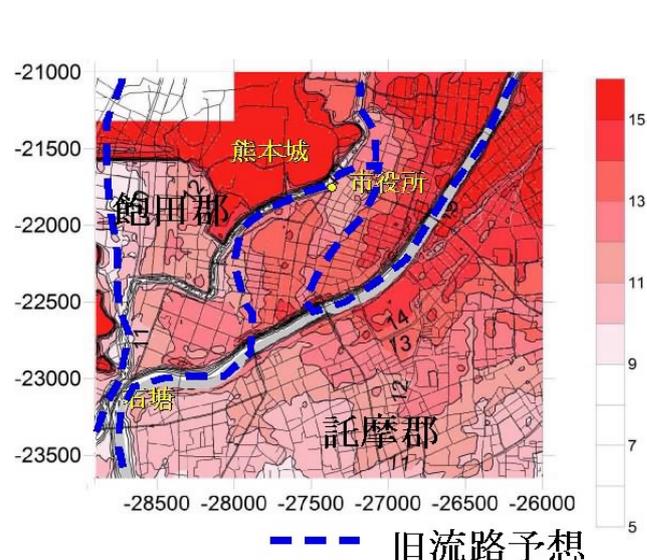


図 3.9 旧流路と地形高

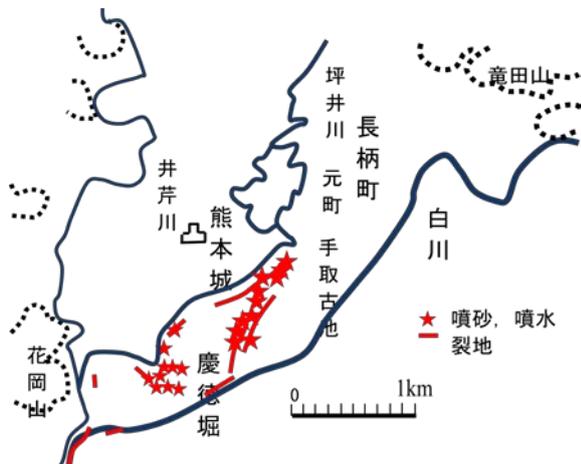


図 3.10 熊本地震(1889 年)における
熊本市旧城下町の液状化

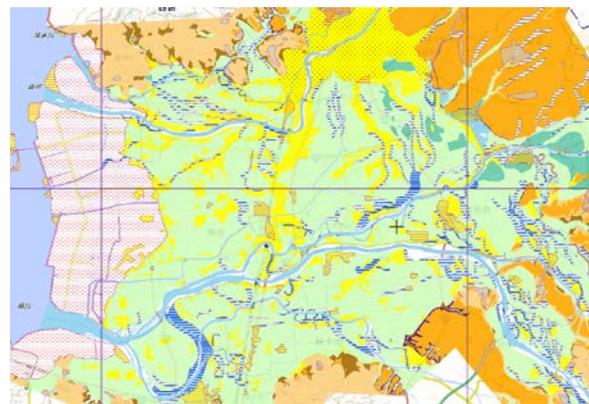


図 3.11 治水地形分類図(H19 年度)
黄色のハッチング：微高地（自然堤防）

く、白川と坪井川が合流していた可能性が高く、さらに図 3.6 の「熊本城下絵図」からその上流側では田圃が、さらにその下流側では川掘りが見出される。上記より、白川の旧流路は、図 3.9 の波線で示された可能性が高く、清正時代にこの湾曲部の括れ部分を短絡させたものと解釈出来る。

図 3.3 に示された白川の蓮台寺地先から緑川の川尻地先に亘る幅 50-100m、長さ 5km に及ぶ帯状の液状化集中地帯と図 3.8 に示された白川の旧流路とはほぼ一致することが認められる。帯状の液状化集中地帯から白川が旧河道では蓮台寺付近から南流し川尻付近で緑川に合流していた可能性が更に高まったことが窺える。

一方、図 3.9 で予想した熊本市中心市街地における旧河道には液状化は見出されていない。しかし、明治 22 年(1889 年)熊本地震⁵⁾においては熊本市旧城下町で噴砂、噴水、裂地で表された液状化地帯図 3.10 と図 3.9 で予想した熊本市中心市街地における旧河道とは一致することが分かる。

図 3.11 は平成 19 年度版の治水地形分類図である、帯状の液状化集中地帯は微高地（自然堤防）とはあるが、旧河道とは認識されていないことが分かる。

活断層近傍において旧河道の可能性のある地域では液状化の発生する可能性が高いことを周知することが必要であることを教訓として得られた。

3.3 堤体の損傷

3.3.1 白川および緑川の堤体損傷

図 3.12 および図 3.13 は、各々、広域地盤沈下量を除いた白川および緑川の堤防沈下量を示す。図 3.12 から白川においては河口上流 0 km-10km の区間で沈下が大きく、特に白川右岸・新地地区の河口上流 0km-2km および白川右岸・蓮台寺、白川左岸・十禅寺地区の河口上流 8.6km-8.8km の区間で特に顕著であり、各区間では河口より 0.2km 上流の左右岸堤防で最大沈下量 50cm、河口より 8.6km 上流の右岸堤防で最大沈下量 64cm である。堤防の沈下量が大きい場所では明瞭な噴砂丘が確認され、堤体下部で液状化が発生したことが分かる。

なお、国土交通省では緊急復旧箇所は土堤区間の堤防沈下量が 50cm 以上、特殊堤区間の堤防沈下量 20cm 以上としている。前者は液状化によって堤防法面のはらみ出し、堤防全体の緩みが大きくなり、後者は液状化とコンクリート構造物の変状が発生し、堤防機能が損なわれるとの判断からである。

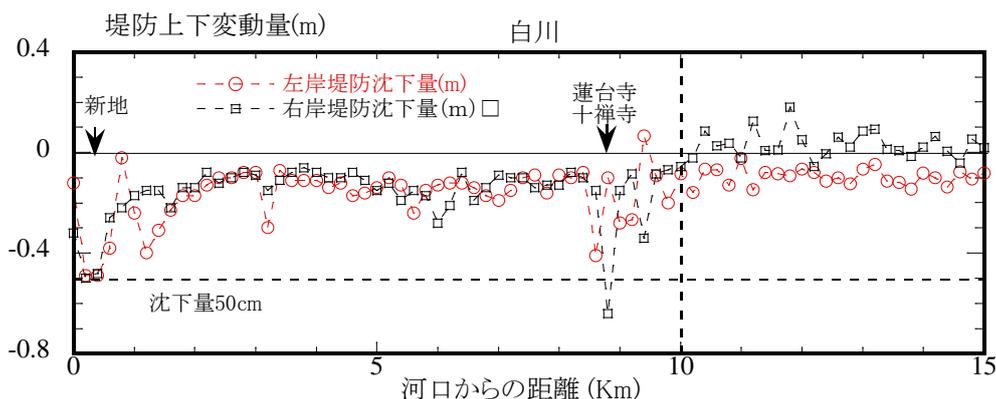


図 3.12 白川の堤防沈下量の流下方向変化

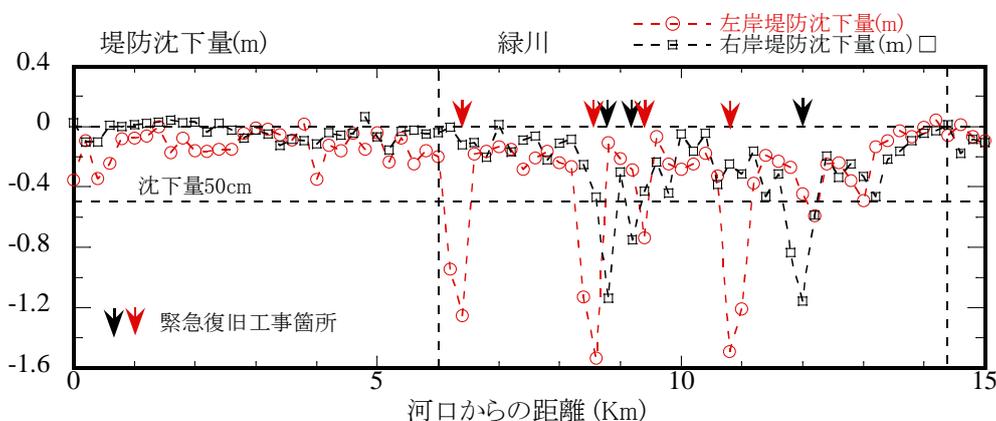


図 3.13 緑川の堤防沈下量の流下方向変化

緑川・白川堤防調査委員会資料によれば堤防の土質調査から河口より 10km 上流では盛土直下の基礎地盤 As 層は砂質土層厚さが平均 20m で地下水位も相対的に低く、N 値も比較的大きいことから堤防沈下量が低くなったことが指摘されている。また、新地地区は人工的な埋め立て地であり、蓮台寺および十禅寺地区は白川旧河道の上流端に当たり基礎地盤が相対的に緩い地盤であったことが考えられる。

一方、図 3.13 から緑川の堤防沈下量は白川に較べて遙かに大きく、河口上流 6km-14.4km の区間で顕著であることが認められる。この区間で 50cm 以上の堤防沈下量は、左岸では 4 箇所あり、河口上流 6km-6.6km の区間では 6.4km 位置で最大沈下量 1.25m、8.2km-8.8km の区間では 8.6km 位置で最大沈下量 1.53m、9.2km-9.8km の区間では 9.4km 位置で最大沈下量 0.73m、10.6km-11.2km の区間では 10.8km 位置で最大沈下量 1.49m、河口上流 12km-12.4km の区間では 12.2km 位置で最大沈下量 0.59m である。

右岸では 50cm 以上の堤防沈下量は 3 箇所あり、河口上流 8.4km-9.0km の区間では 8.8km 位置で最大沈下量 1.14m、9.0km-9.6km の区間では 9.2km 位置で最大沈下量 0.75m、11.6km-12.4km の区間では 12.0km 位置で最大沈下量 1.15m である。

国土交通省堤防調査委員会の報告書によれば、ボーリング調査により大規模縦断亀裂箇所の特徴として 1) 堤体材料が砂質土、2) 堤体下部が地下水位以下で飽和土、3) 同位置の細粒土砂含有率 F_c が 35% 以下であることが挙げられた。また、堤防沈下量が比較的小さい河口から 0km-6km 区間の緑川下流域の堤体は、粒径が比較的小さい粘性土で構成されていた。更に、河口より上流 16km 以上の領域では、堤防は砂質土層ではあるが、直下の基盤が砂礫層であったために堤防下部で飽和状態になりにくく相対的に液状化の可能性小さくなったと指摘されている。

緑川の左右岸での堤防の損傷を比較すれば、堤防の損傷箇所数は左岸で 36 箇所、右岸で 31 箇所、その内の縦断亀裂は左岸では 25 箇所、右岸では 10 箇所であり、左岸では縦断亀裂、右岸では横断亀裂が卓越していた。また、縦断亀裂の累加距離は、左岸で 7.53km、右岸では 5.34km に達し、緊急復旧箇所数は左岸で 7 箇所、右岸で 3 箇所であり、堤防の損傷レベルは相対的に右岸に較べて左岸で大きいことが認められた。

地震外力として国土交通省熊本河川国道事務所が管理する堤防近傍における加速度計によれば河口より 6.2km 上流の緑川右岸の美登里観測所で $PGA412.6gal$ 、河口より 9.2km 上流の緑川右岸の加勢川水門で $PGA425.9gal$ であり、両者で大きな差違は無い。

図 3.14 に示す桑鶴の轡塘は、御船川と緑川との合流点に築造された堤防であり、右岸側の堤防は大名塘とも呼ばれている⁶⁾。轡塘で囲まれた河道内の遊水効果を見積もるために、「籐公遺業記」の付図に較べてより詳細な江戸末期の作とされる肥後藩絵図⁷⁾、国土交通省熊本工事事務所所蔵の航空写真および縮尺 1/1000 の地図を基に算出した遊水地面積は 106ha であった。堤防高を約 3m に見積もれば、貯水容量は 318 万 m^3 となる。最大貯水量 4,600 万 m^3 、満水時の水面面積 1.81 km^2 、150 年確率の洪水に対するピークカット流量 650 m^3/s である緑川ダムとの比較から分かるように、轡塘内の遊水地による洪水流量の低減効果に

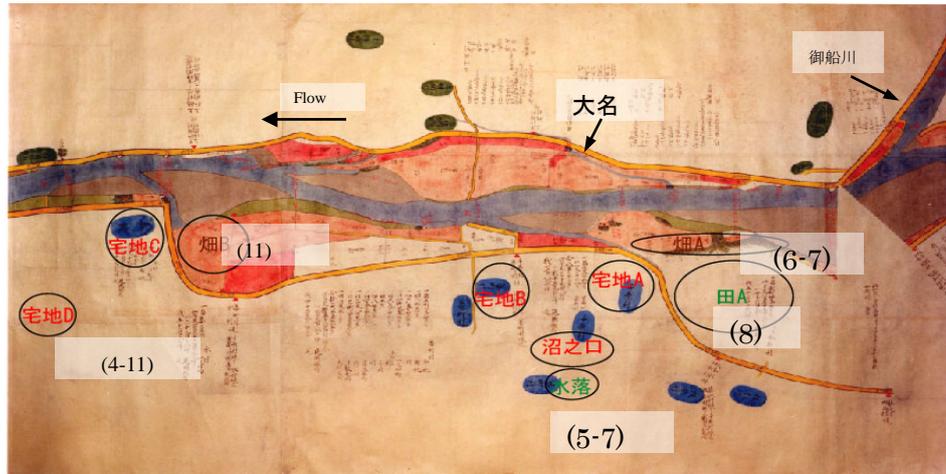


図 3.14 肥後藩絵図(江戸時代後期)にみられる桑鶴の轡塘

大きな期待は持てないことが予想される。

肥後藩絵図においては、轡塘の左岸本堤は連続堤として示されておらず、この一帯は現在の航空写真および現地踏査においても堤防の形跡が見当たらない。

そこで、前節において乗越堤からの距離と土地の等級に高い相関のあることが認められたことから、現存する最古の堤内地の等級⁸⁾ および地盤高、宅地の嵩上げ⁹⁾を調査し、桑鶴の轡塘の機能について検討した。なお、等級の数値が小さいほど土地の生産性が高いことを意味する。その結果、緑川の合流点左岸側における高水敷の上流部では高水敷に開発された水田の等級は8であり、その周辺の堤内地では等級5~7であることから、顕著な差は見られない。さらに、その下流側の堤内地では等級4~11の範囲で分布している。このことから、轡塘は、その欠落部から堤内地に洪水流が導かれ、超過洪水対策として機能した可能性の高いことが予想される。

このため、右岸側の大名塘に較べて左岸側では越流を許容する上で左岸側は右岸側に較べて堤防は弱く造られていたことが予想される。

3.3.2 木山川の堤体損傷

図 3.15 は、緑川の右支川の上流側に位置する支々川である木山川の堤防沈下量の流下方向変化を示す。木山川は、加勢川との接続点より 12.5km 上流において北側の秋津川および南側の矢形川が合流する。堤防被災高は堤防沈下量と広域地盤沈下量の和である。平均堤防沈下量は、左岸で 29cm、右岸で 25cm、被災高は左岸で 78cm、右岸で 75cm であり、左右岸で堤防沈下量に極端な差違は無いが、若干左岸側で損傷が大きい。また、軽微な損傷であった橋梁がある場所では堤防沈下量および被災高はゼロに近く液状化の影響を受けていないことが分かる。秋津川では平均堤防沈下量は、左岸で 38cm、右岸で 54cm、被災高は左岸で 71cm、右岸で 88cm であり、右岸側で堤防沈下量および被災高は大きい。

矢形川では平均堤防沈下量は、左岸で 5cm、右岸で 10cm、被災高は左岸で 4cm、右岸で

3cm であり、相対的に堤防沈下量および被災高は小さく、左右岸で変化は無い。

表 3-1 は、木山川、秋津川および矢形川の縦断亀裂の累加距離および縦断亀裂の発生割合を示す。縦断亀裂の発生割合は、木山川では左岸 70%，右岸 60%，秋津川では左岸 56%，右岸 49%，矢形川では左岸 16%，右岸 17% である。

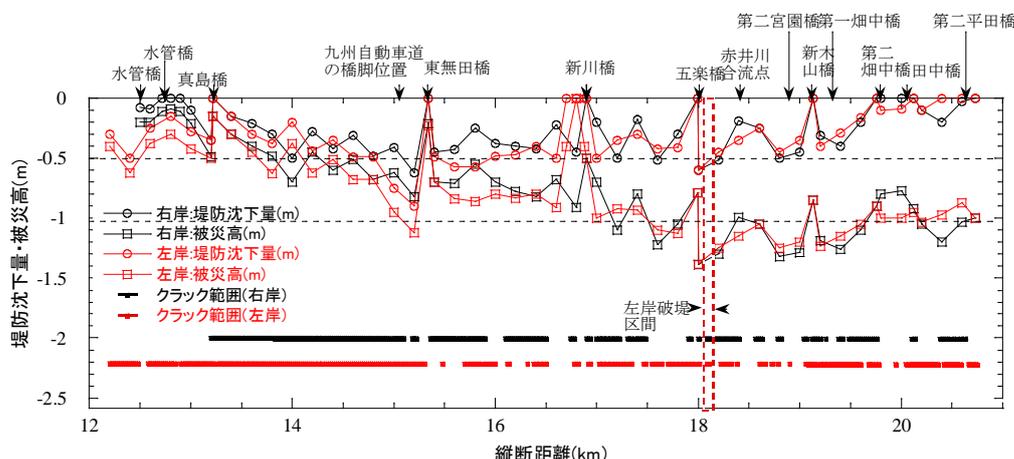


図 3.15 木山川の堤防沈下量の流下方向変化

表 3.1 木山川水系の堤体損傷

		縦断亀裂 累加距離 (km)	堤防総延長 (km)	縦断亀裂 発生率 (%)	地震前 堤頂高 (m)	地震前 堤頂高 (m)	堤頂高 位置 (km)
木山川	右岸	49	823	59.5	7.6	7.29	13.4
	左岸	598	853	70.1	7.6	7.29	
秋津川	右岸	292	6	48.7	8.4	6.86	0.6
	左岸	337	6	56.2	7.9	6.9	
矢形川	右岸	1.4	8.2	17.1	8.64	8.0	0.6
	左岸	1.3	8.2	15.9	8.65	8.11	

3.4 木山川の破堤氾濫

2016年6月21日未明、緑川水系の支川である木山川と赤井川の合流点より200m下流の左岸において越流破堤した。

図 3.16 は 6 月 21 日午後 1 時 32 分における木山川氾濫の様子を示す。図 3.17 は堤内地の氾濫状況を示す。図 3.18 に木山川赤井観測所における水位ハイドログラフを示す。20 日の 22 時ごろより水位が急激に増加し、20 日 0 時には氾濫危険水位の 4.13m を大きく超過していることが分かる。図 3.19 に 6 月 23 日 17 時における熊本県による復旧工事の様子を示す。破堤規模は、流下方向におよそ 50m、決壊部の深さは約 2m であった。被害状況として田植えを終えた水田の物的被害は大きいものの、木山川左岸側の堤内地では民家は少なく、その民家も盛土しているため、全般的に被害は比較的少ない。右岸ではアスファルトで舗

装されているのに対して、左岸は土堤であり 2016 年熊本地震による堤体の損傷が左岸側で大きいことから、破堤の一因であったとも考えられる。

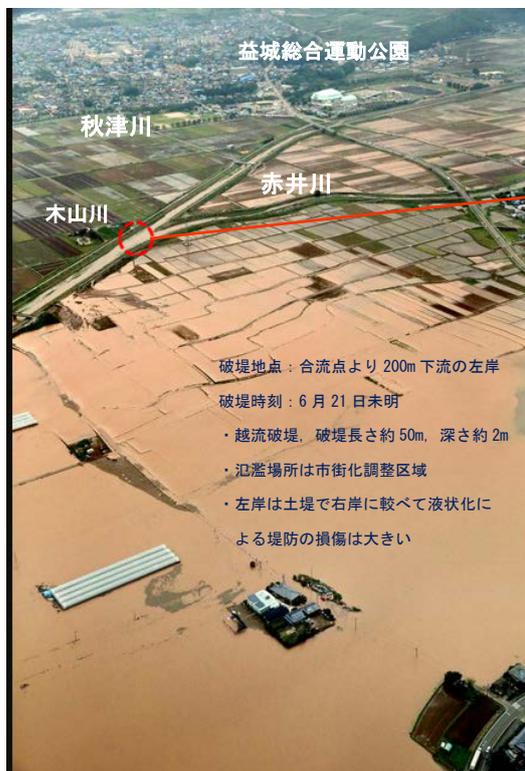


図 3.16 木山川氾濫 2016. 6. 21
13 時 32 分（出典：朝日新聞）



図 3.17 氾濫後の堤内地 2016. 6. 23 17 時頃

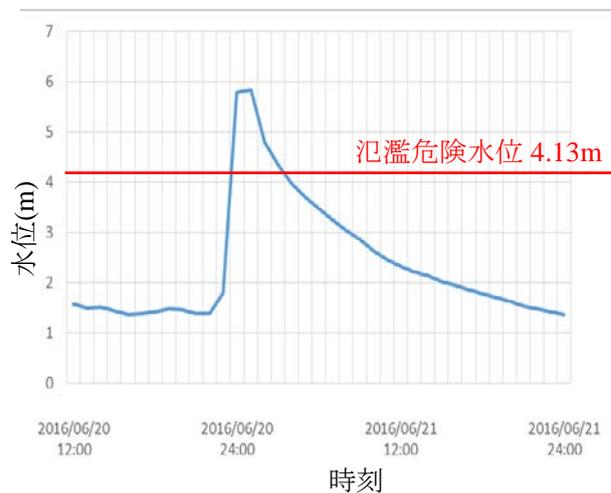


図 3.18 木山川水位ハイドログラフ
（赤井観測所）



図 3.19 木山川左岸破堤の復旧（6 月 23 日 17 時）

3.5 秋津川および木山川の河川改修史

国土地理院によって作成された、昭和 23 年および 42 年の地図をそれぞれ図 3.20 および図 3.21 に示す。図中の青線は緑川の支川である秋津川、木山川および矢形川を表している。両者の地図を比較すれば、木山川は付替えられ大幅な改変が加えられていることが分かる。昭和 42 年には、旧木山川は秋津川に名称変更されその最上流端は益城総合運動公園となっている。また、益城運動公園より上流域は旧赤井川に付替えられ、名称を木山川に名称変更している。昭和 53 年の地図では矢形川が改修され蛇行がショートカットされていることが認められた。

改修目的は、住宅密集地である現在の秋津川右岸側の洪水氾濫の危険性を低下させるためであると同時に、三川合流後の緑川支川である加勢川の治水安全度を改善するために木山川での氾濫を想定したことが分かる。木山川の堤防高さを相対的に低くし、更に、木山川の両岸の氾濫場所は市街化調整区域に設定している。現在の総合治水、流域治水の考えは昭和 42 年以前の河川改修では既に適応していたことが窺える。

なお、秋津川では合流点より上流 4.5km 地点において堤頂が、地震前と後で右岸では 8.40m から 6.89m、左岸では 7.90m から 6.90m に変化した。堤防沈下量は右岸側で 1.51m、左岸側で 1.0m である。地震前には右岸堤防は左岸堤防に対して 50cm 高くしていたが、堤防沈下により堤頂に変化は無くなった。ほぼ同位置における木山川 13.4km 位置においては堤頂が、地震前と地震後で右岸では 7.60m から 7.29m、左岸では 7.60m から 7.29m に変化した。堤防沈下量は右岸側で 0.31m、左岸側で 0.31m である。矢形川では合流点より上流 0.6km 地点において堤頂が、地震前と後で右岸では 8.64m から 8.0m、左岸では 8.65m から 8.11m に変化した。堤防沈下量は右岸側で 0.64m、左岸側で 0.54m である。

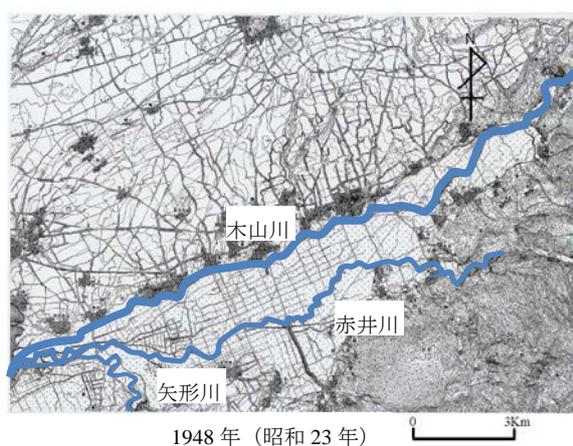


図 3.20 木山川・赤井川の旧河道



図 3.21 秋津川・木山川の河道

3.6 まとめ

本章では、熊本地震と河川災害との関係について時間スケールを大きく取り、治水史的視点より考察した。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) 白川の蓮台寺地先から緑川の川尻地先に亘る幅 50-100m, 長さ 5km に及ぶ帯状の液状化集中地帯と白川の旧河道とはほぼ一致することが認められる。帯状の液状化集中地帯から白川が旧河道では蓮台寺付近から南流し川尻付近で緑川に合流していた可能性が更に高まった。
- 2) 白川右岸・蓮台寺, 白川左岸・十禅寺地区の河口上流 8.6km-8.8km の区間で特に顕著であり, 河口より 8.6km 上流の右岸堤防で最大沈下量 64cm である。堤防の沈下量が大きい場所では明瞭な噴砂丘が確認され, 堤体下部で液状化が発生したことが分かる。蓮台寺および十禅寺地区は白川旧河道の上流端に当たり基礎地盤が相対的に緩い地盤であったことが考えられる。
- 3) 緑川の左右岸での堤防の損傷を河口上流 6km-14.4km の区間で比較すれば, 堤防の損傷レベルは相対的に右岸に較べて左岸で大きいことが認められた。この原因として約 400 年前の緑川と御船川の合流点処理（桑鶴の轡塘）として, 右岸側の大名塘に較べて左岸側では越流を許容する上で左岸側は右岸側に較べて堤防は弱く造られていたことが予想される。
- 4) 縦断亀裂の発生割合は, 木山川では左岸 70%, 右岸 60%, 秋津川では左岸 56%, 右岸 49%, 矢形川では左岸 16%, 右岸 17% であった。木山川においては軽微な損傷であった橋梁がある場所では堤防沈下量および被災高はゼロに近く, 液状化の影響が小さいことが認められた。
- 5) 2016 年 6 月 21 日未明, 緑川水系の支川である木山川と赤井川の合流点より 200m 下流の左岸において越流破堤した。右岸では堤頂がアスファルトで舗装されているのに対して, 左岸は土堤であり 2016 年熊本地震による堤体の損傷が左岸側で大きいことから, 破堤の一因であったことが示唆される。
- 6) 住宅密集地である秋津川右岸側の洪水氾濫の危険性を低下させると共に, 三川合流後の緑川支川である加勢川の治水安全度を改善するために木山川の堤防高さを相対的に低くし, 更に, 木山川の両岸の氾濫場所は市街化調整区域に設定している。現在の総合治水, 流域治水の考えは昭和 42 年以前の河川改修で既に実践していたことが認められる。

謝辞

本調査・研究を遂行する上で, 国土交通省熊本河川事務所および熊本県土木部河川課から堤防の液状化について貴重なデータを提供して頂いた。ここに記して, 深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 村上悟, 永瀬英生:平成 28 年熊本地震による熊本平野で生じた液状化とその被害について(速報), 地盤工学会平成 28 年熊本地震地盤災害調査団液状化班報告, 2016.5.11
- 2) 大本照憲, 富本和也, 澤田誠一:加藤清正による流水制御法「白川の石塘」の機能評価, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.415-420, 2010.
- 3) 熊本市:新熊本市史(別編第 1 巻絵図・地図), 2003.
- 4) 富田紘一:熊本の三河川と城下町の形成, くまもと市史研究, 第 11 号, pp.1-20, 2003.
- 5) 宮崎雅徳, 尻無濱昭三:地盤災害から見た熊本地震(1889 年)の再評価, 日本建築学会中国・九州支部研究報告 8 号, 1990.
- 6) 鹿子木量平維善:「藤公遺業記」, 1832 (『肥後文献叢書第二巻』所収, pp.149-154, 隆文館発行, 1909)
- 7) 肥後藩絵図:江戸後期(熊本県立図書館所蔵).
- 8) 地引検地帳, 1885(城南町歴史民族資料館蔵).
- 9) 緑川南部地区県営圃場整備事業一般計画平面図, 1965(城南町建設課蔵)

(大本照憲・平川隆一)

第4章 河川堤防被害の実態

4.1 はじめに

2016年熊本地震では、4月14日に熊本県熊本地方の深さ11kmを震源とするマグニチュード(M)6.5の前震と、その二日後(同月16日)に同地方の深さ12kmでM7.3の本震が発生した。この2回の地震共に、熊本県益城町等で最大震度7を観測した¹⁾。地震動状況としては、前震ではKiK-net 益城観測点にて1580[gal]、本震では熊本県大津町の自治体震度観測点にて1791[gal]の非常に大きな加速度を観測した¹⁾。地震動のスペクトル分析から、周期0.1~1.0sにピークを持つL2地震に相当する地震である²⁾。

図4.1に4月16日に発生した本震時の震度分布と河川位置を示す。本震時は対象とする河川全域が概ね震度6もしくは震度7の震度分布域に位置していたことが分かる。特に、被害の大きかった益城町付近を流れる秋津川・木山川(いずれも県管理)においては、震度7を観測している。

このような強震動に伴って、家屋に加えて、堤防・道路等の様々な社会インフラが大きな被害を受けた。特に河川堤防に関しては、表4.1に示すように、緑川水系で127箇所、白川で44箇所であり、県管理河川を含めると全部で494箇所の堤防被害が発生した³⁾。発

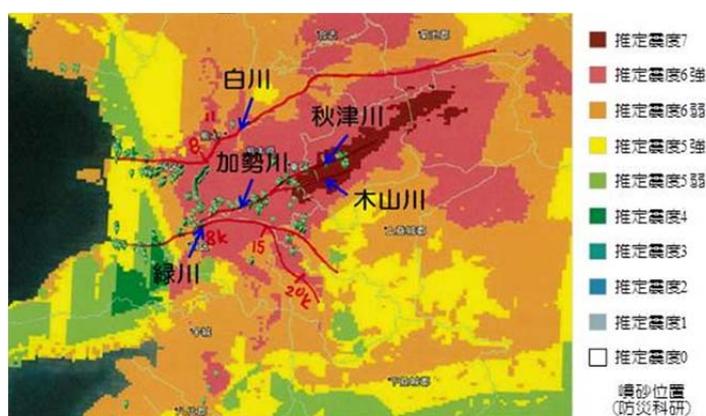


図4.1 河川位置と本震時の震度分布(防災科研データに河川位置を加筆)

表4.1 2016年熊本地震時の河川堤防の被害状況(平成28年5月2日現在)³⁾

	水系	河川数	被害箇所数
国管理河川	緑川	4	127
	白川	1	44
	菊池川	1	1
県・政令市管理河川	熊本県	44	318
	熊本市	3	3
	大分県	1	1
	合計		494

生じた堤防変状としては、天端の縦断・横断クラックや堤体の沈下（段差）が大半を占め、一部で堤体のすべり崩壊も見られた。発災直後より応急復旧工事がなされ、国管理河川では、比較的変状の小さな箇所ではセメントミルク等によるひび割れの補修を⁴⁾、変状の大きい箇所では切返し工法等³⁾がそれぞれ実施された。また、県管理河川では、堤体の沈下箇所にて大型土嚢が積まれた。

熊本地震発災から約2ヶ月経った6月20日から九州全体で強い雨が降り、熊本県を中心に100mmを越える猛烈な雨が降り、甲佐アメダス観測所では1時間に150mmの猛烈な雨（全国史上4位）を記録した⁵⁾（以下、6月20日豪雨と称す）。この記録的短時間大雨により、緑川水系木山川の堤防決壊が発生した。この木山川では、熊本地震により堤体が沈下したため、その応急対策として堤防天端に土嚢が設置されていたが、6月20日の大雨により、土嚢を越水するほどの洪水が発生し、決壊に至った。このように、木山川では、地震・洪水複合災害が発生したことになる。

過去の複合災害例として、1948年福井地震とその後の豪雨災害（九頭竜川、足羽川）⁶⁾が挙げられる程度であり、発生頻度は多くない。ただし、首都圏の大河川で地震・洪水複合災害が発生すれば甚大な被害が生じることから、今回の木山川の事例を取りまとめる意義は極めて高い。

本章では、現地調査で得られた国管理河川堤防の被害状況を示すとともに、白川・緑川については、地形・地質情報を用いた被災要因の分析を行う。また県管理河川堤防については、木山川で生じた熊本地震とその後の洪水による複合災害の実態や洪水氾濫メカニズムの検討を行うことを目的とする。具体的には、①木山川を含む緑川水系における地震時の堤防被害調査、②6月20日豪雨による木山川の堤防被害・洪水氾濫調査、という二つの現地調査を実施した。また、②の調査時には、天端に置かれた土嚢と土嚢の間にて特徴的な洗掘が生じ、それが洪水氾濫を助長した可能性が考えられたため、③として、土嚢を置いた天端の浸透実験を実スケールで行い、パイピングや土嚢周囲の洗掘状況を検討した。

4.2 堤防被害の実態

4.2.1 国管理河川堤防の被害調査

国管理河川堤防及び河川構造物（樋管・樋門）の被害の規模や状況について調査を実施した。図4.2に、国管理河川である白川および緑川の調査実施箇所を示す。ここでは、河川構造物の典型的な被害状況を事例的に報告する。

a) 白川水系の被害状況と特徴

白川3k000右岸付近の高水敷を調査した。図4.3および図4.4に被災状況と周辺地質図⁷⁾の概要を示す。地質図より、表層には、シルト主体の砂層が薄く分布しており、以深は砂質土が5m程度分布している。当該箇所では、写真に示されるような噴砂が確認された。これは、地震動の作用によって高水敷下層の砂質土が液状化したものと推察される。噴砂の



図 4.2 調査箇所の概要（国土地理院地図に加筆）

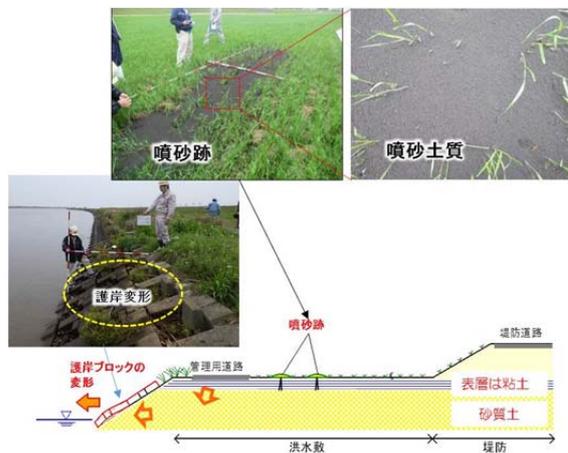


図 4.3 被害の概要（白川 3k000）

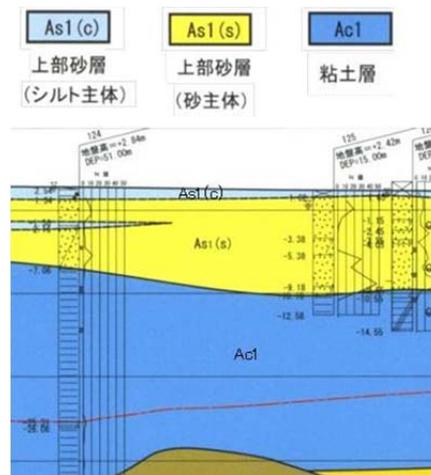


図 4.4 周辺地質図²⁾（白川 3k000）

土質は黒みがかっており、火山灰質の細砂であることが考えられる。なお、護岸ブロックには、はらみ出し等の変形が発生していた。

b) 緑川の被害状況と特徴

緊急災害復旧箇所（本震後）に指定された緑川中流域右岸の野田地先（8k800）を調査した。当該地区の堤防被害の特徴として、堤内側への堤体法面のはらみ出しによって、堤体と近隣施設が接触する被害が発生した（図 4.5）。当該地域の河川堤防直下には、表層に層厚が3～6mのAs1(c)層、6～8mのAs1(s)層が堆積し、その下にAc1層が10m以上堆積する地盤構成となっている（図 4.6）。被災の詳細を、図 4.7 に示す。堤防天端においては、盛土の縦断方向および横断方向に、クラックや段差等の大変形が生じた。また、堤内側の堤体法尻付近においては、周辺道路のマンホールで液状化に伴う抜上りや、坂路下での噴砂が確認された。堤防天端（道路）の陥没は、基礎地盤(砂質土)の液状化に伴う噴砂等の影響で発生した可能性がある。また、堤体法面のはらみ出しは、液状化に加え、地震動の慣性力が水平方向にも加わり、生じた可能性がある。地震荷重や基礎地盤の液状化が、堤防被



図 4.5 堤内側法面のはらみ出し

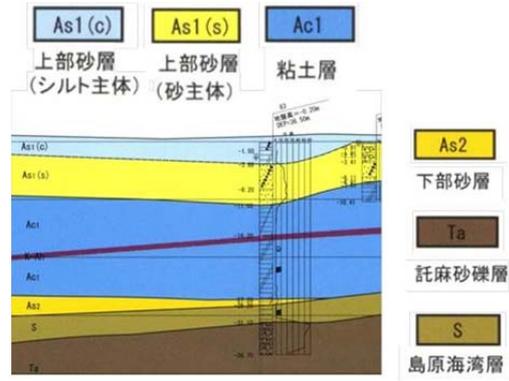


図 4.6 周辺地質図²⁾(緑川 8k800 右岸)

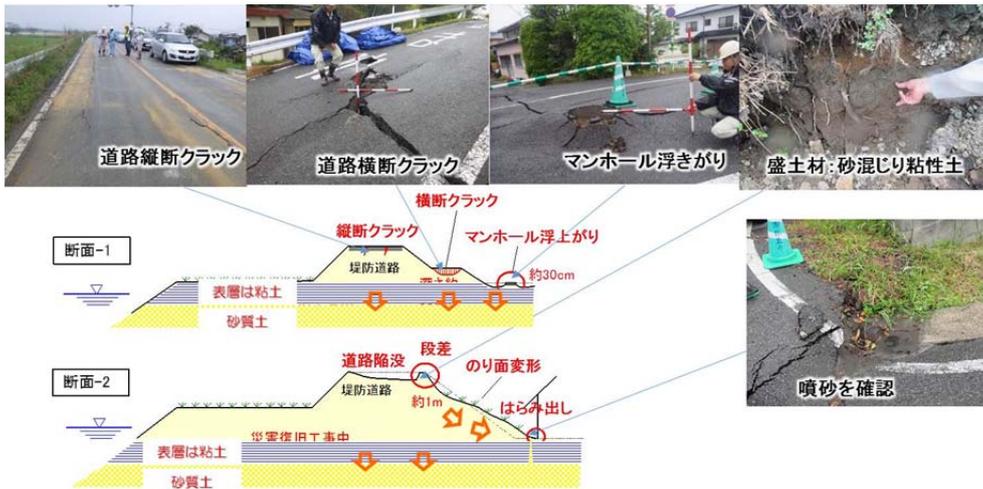


図 4.7 被災状況の概要 (緑川 8k800 右岸) (図の提供: 日本地研 田中氏)

害の誘因になっていることが推察された。このことから、後述するように堤防被災と地盤構成との関係について分析した。

緑川左岸の富合町釈迦堂地先 (9k400) では、川表の高水敷で、地震による亀裂と噴砂が発生した (図 4.8)。当該地区では、天端が 1m 程度沈下し、川表の堤体法面には縦断亀裂の発生が報告されている。白川・緑川水系の堤防においては、現地調査によって、少なくとも 5 箇所以上の噴砂跡を確認するとともに、20 箇所以上の噴砂跡の報告がなされている²⁾。図 4.9 に、緑川河口から御船川にかけての東西方向の地質断面図 (図 4.2, a-a'断面) を示す⁷⁾。図に示されるように堤体直下の浅い地盤には、沖積砂層が広域に堆積している。このことから、前震から本震にかけて、基礎地盤の液状化によって、河川堤防被害が拡大したことが推察される。



図 4.8 高水敷における噴砂跡
(緑川 9k400 左岸)



図 4.10 天端の段差亀裂（縦断方向）
(緑川 12k200 右岸)

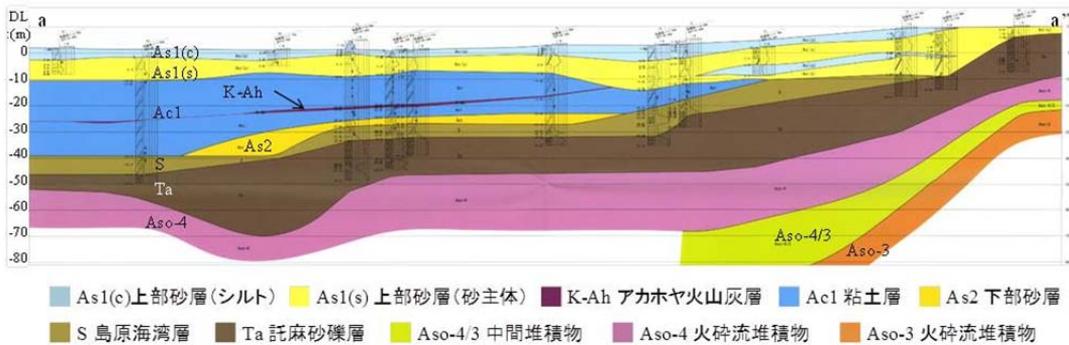


図 4.9 緑川水系における地質断面図 (a-a' 断面) (熊本地質業協会, 2003)

また、1995 年の兵庫県南部地震において、ポートアイランドで発生した地表面沈下には、表層部の埋立土層の液状化に起因した沈下に加え、埋立土層直下の沖積粘土層での過剰間隙水圧消散に伴う時間遅れの沈下も含まれていたことが指摘されている⁸⁾。図中に示されるように、緑川下流域から中流域にかけては、沖積砂層 (As1) 直下に、10m から 30m 程度の沖積粘土層 (Ac1) が広域に堆積している。河川堤防を本復旧するにあたっては、サンプリング等の地盤調査を実施し、地震後の時間遅れを伴う沈下についても併せて検討する必要があると考える。

緊急災害復旧箇所 (本震後) に指定された緑川中流域右岸の嘉島町下仲間地先 (12k200) を調査した。当該地域の河川堤防直下には、6~8m の砂層が堆積している。河川堤防には、縦断亀裂が発生しており、盛土天端では最大で 30cm 程度の沈下 (図 4.10) が発生した。2011 年の東北地方太平洋沖地震では、河川堤防の崩壊パターンが調査されており、堤防の崩壊は地盤構成や地震動の違いに依存することが報告されている⁹⁾。

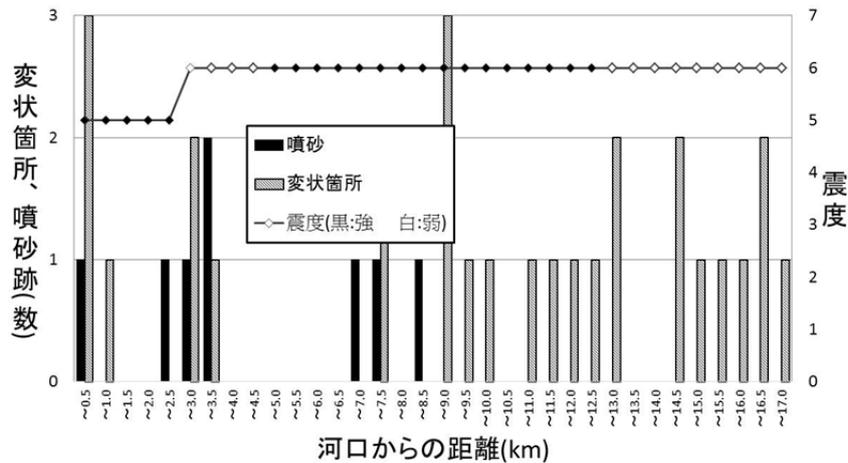


図 4.11 変状箇所、噴砂跡と深度の関係（白川右岸）

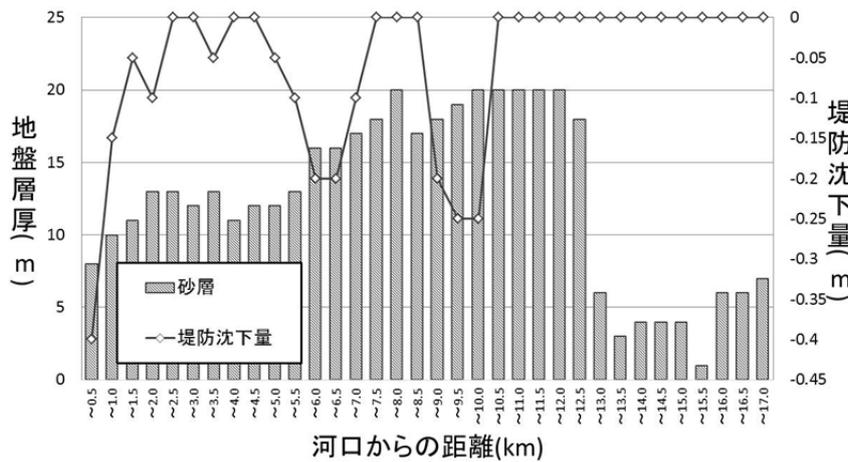


図 4.12 堤防沈下量と基礎地盤層厚の関係（白川右岸）

c) 堤防の被災要因分析

熊本地震における河川堤防の被災要因を分析するため、河川地質縦断図、堤体縦断測量データ¹⁰⁾、変状箇所や既設対策情報、治水地形分類図、推定震度分布等の情報を入手し、堤防被災の情報整理を行った。ここでは、被害の大きかった白川、緑川中下流域の被災要因の分析結果について示す。

白川右岸の堤体変状箇所および噴砂跡と本震時の震度分布の関係を図 4.11 に、堤防沈下量と基礎地盤の層厚との関係を図 4.12 に示す。堤防沈下量は区間ごとの最大沈下量とし、地盤層厚は区間の平均値とした。河口からの距離が~0.5km、5.5~6.5km、8.5~10.0km の区間において堤防沈下量が大きくなっている。5.5~6.5km、8.5~10.0km の区間では基礎地盤の砂層厚が 15m~20m と大きく、基礎地盤の液状化が沈下の一因となっている可能性が考えられる。河口付近の~0.5km 区間では、基礎地盤の砂層厚が比較的小さいにもかかわらず、大きな沈下が確認されている。微地形区分では、当該地域は、干拓地・埋立地となっており緩

く砂質土が堆積した埋立地の液状化が原因と考えられる。河口から 12.5km より上流の区間では、砂層厚が 5m 前後と比較的小さく、沈下もほとんど見られなかった。

白川左岸の堤体変状箇所および噴砂跡と本震時の震度分布の関係を図 4.13 に、堤防沈下量と基礎地盤の層厚との関係を図 4.14 に示す。河口からの距離が~0.5km, 8.5~9.5km の区間において堤防沈下量が大きくなっている。8.5~9.5km の区間では、砂層厚が 20m 以上もあり、沈下の要因として考えられる。また河口付近の~0.5km 区間においては、右岸と同様に、微地形区分図では埋立地となっており、地形的な問題が沈下に影響を及ぼした可能性がある。また、干拓地、埋立地、旧河道の区間において、図 4.13 に示す噴砂の被害が発生していた。

緑川右岸中下流 (0k~15k) の堤体変状箇所および噴砂跡と本震時の震度との関係を図 4.15 に整理した。堤体変状や緊急復旧を要する大きな堤防被災は、震度 6 強の範囲に分布

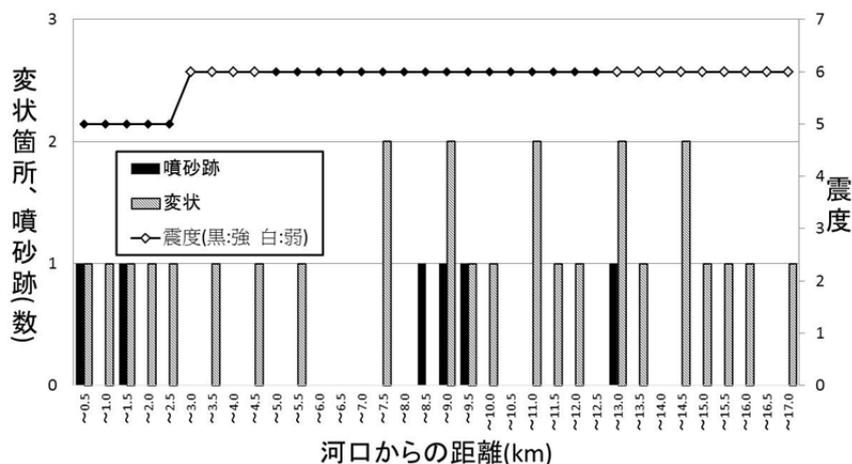


図 4.13 変状箇所、噴砂跡と深度の関係 (白川右岸)

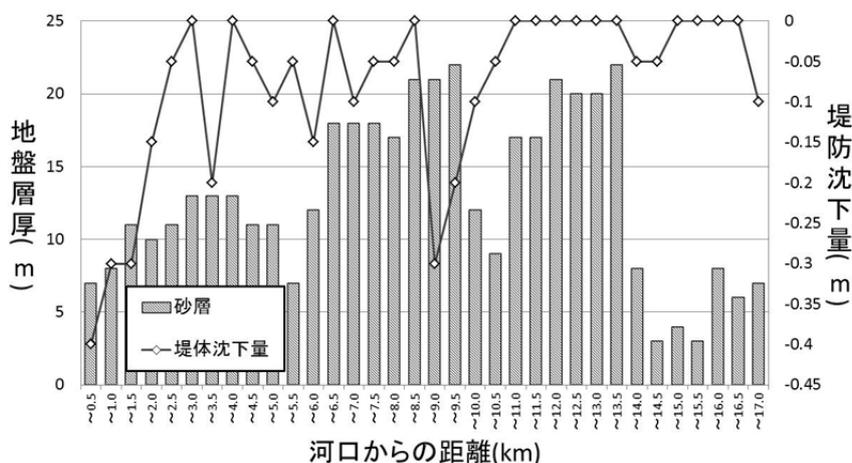


図 4.14 堤防沈下量と基礎地盤層厚の関係 (白川右岸)

している。盛土直下には、粘土層が1~5m程度堆積していた。堤防沈下量と基礎地盤の砂層および火山灰質層厚との関係を図4.16に整理した。堤防沈下量は区間(500m)ごとの最大沈下量とし、地盤層厚は区間の平均値を表示した。0k~3k付近では、震度5の範囲に分布しているが、堤防沈下量や堤体変状が抑制されている。当該地域では、事前に、築堤時の引き込み沈下やすべり破壊防止対策として鋼矢板等の対策工が実施されており、被害の軽減に効果があったものと推察される。8k~10k付近の一部区間では、堤体の変状や堤体付近での液状化の発生が確認されており、堤防沈下量も大きくなっている。これは、堤体下には砂層が8m~13m、火山灰質層が6~8m程度堆積していることから、基礎地盤の液状化によって堤体被害が拡大した可能性を示している。熊本阿蘇由来の火山灰質層の液状化強度等については、今後詳細に検討していく必要がある。

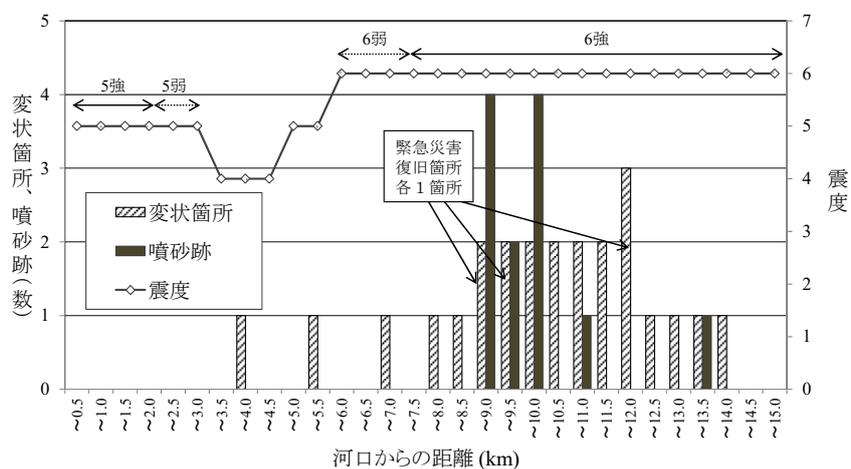


図 4.15 変状箇所、噴砂跡と深度の関係（緑川右岸 0k~15k）

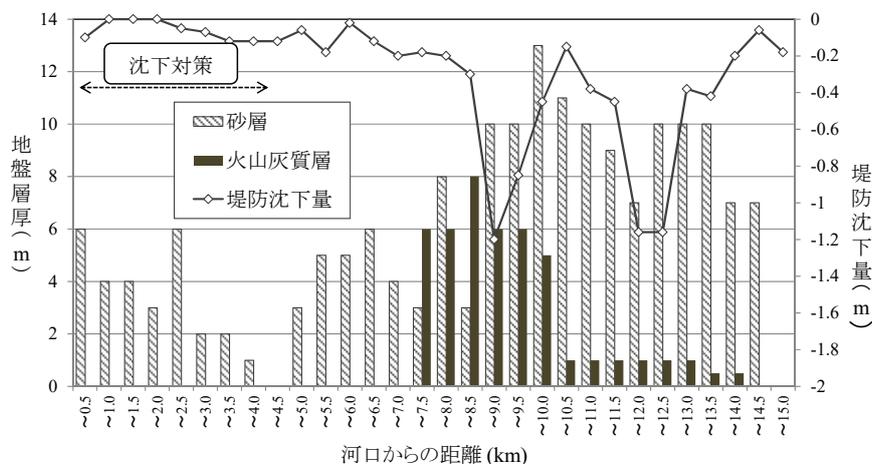


図 4.16 堤防沈下量と基礎地盤層厚の関係（緑川右岸 0k~15k）

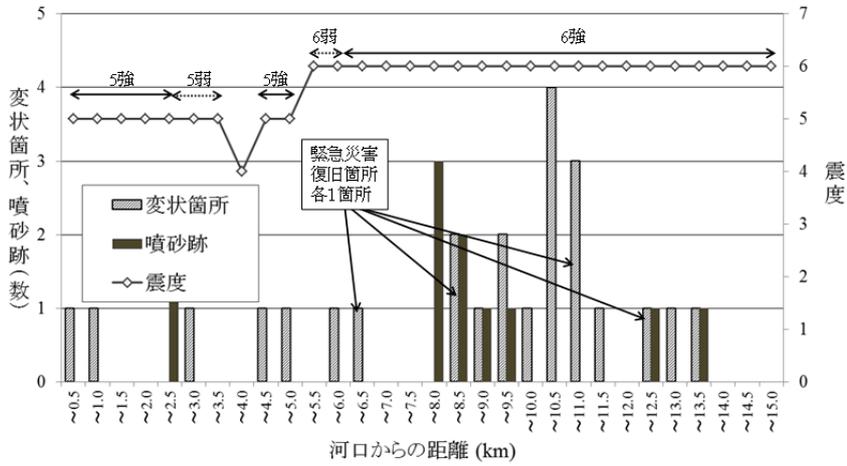


図 4.17 変状箇所，噴砂跡と深度の関係（緑川左岸 0k～15k）

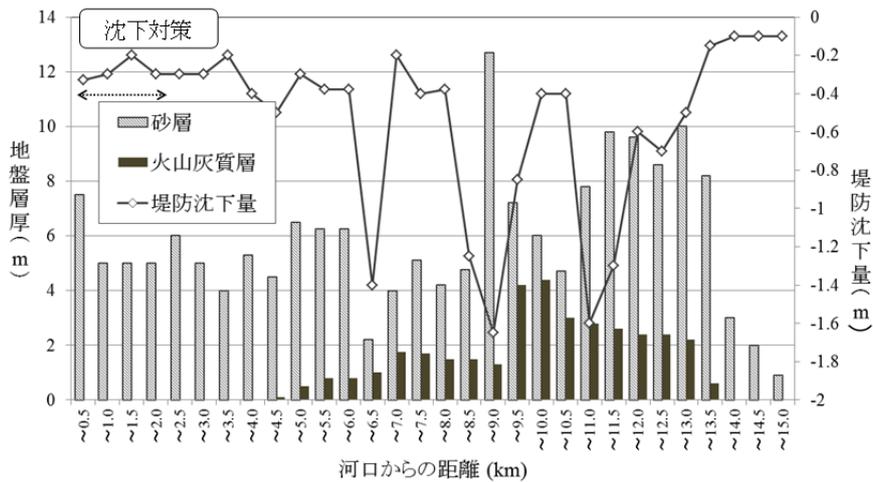


図 4.18 堤防沈下量と基礎地盤層厚の関係（緑川左岸 0k～15k）

緑川左岸中下流（0k～15k）の堤体変状箇所および噴砂跡と本震時の震度との関係を図 4.17 に、堤防沈下量と基礎地盤の砂層および火山灰質層厚との関係を図 4.18 に整理した。緊急復旧を要する大きな堤防被災は、震度 6 強の範囲に分布していたことが確認できる（図 4.17）。微地形区分を確認したところ、震度 6 強に見舞われた範囲の中で、自然堤防区間（6k500～8k000）では堤防被災は相対的に被害が小さかった。また被災の程度が大きい区間（8k000～13k000）では、微地形区分として氾濫平野、旧河道、自然堤防が入り混じっていることが確認された。旧河道および浜戸川との合流部付近で噴砂が発生している傾向にある。堤防沈下量が大きな被災箇所では、基礎地盤の砂層および火山灰層厚が他区間と比較して相対的に厚くなっている。微地形や地盤構成と堤防被災との密接な関連性が窺える。

4.2.2 県管理河川堤防の被害調査

a) 2016年熊本地震の発生状況

今次地震の震央は、**図 4.19** に示すように、前震は日奈久断層帯、本震は布田川断層帯の近くに位置しており、両断層帯がそれぞれ活動したものと考えられる。地表地震断層としては、日奈久断層帯では約 6km、布田川断層帯では約 28km にわたりそれぞれ現れており、益城町堂園付近（**図 4.19** 中③地点そば）では最大 2.2m の横ずれ変位が見つかった¹⁾。これらの断層上を緑川水系の多くの河川が横切っており、後述の被害と関係している。本震の最大加速度も同図中に示す。これより、緑川水系の周囲では最大約 900[gal]、最小約 500[gal] であり、非常に強い振動が生じていたことが分かる。

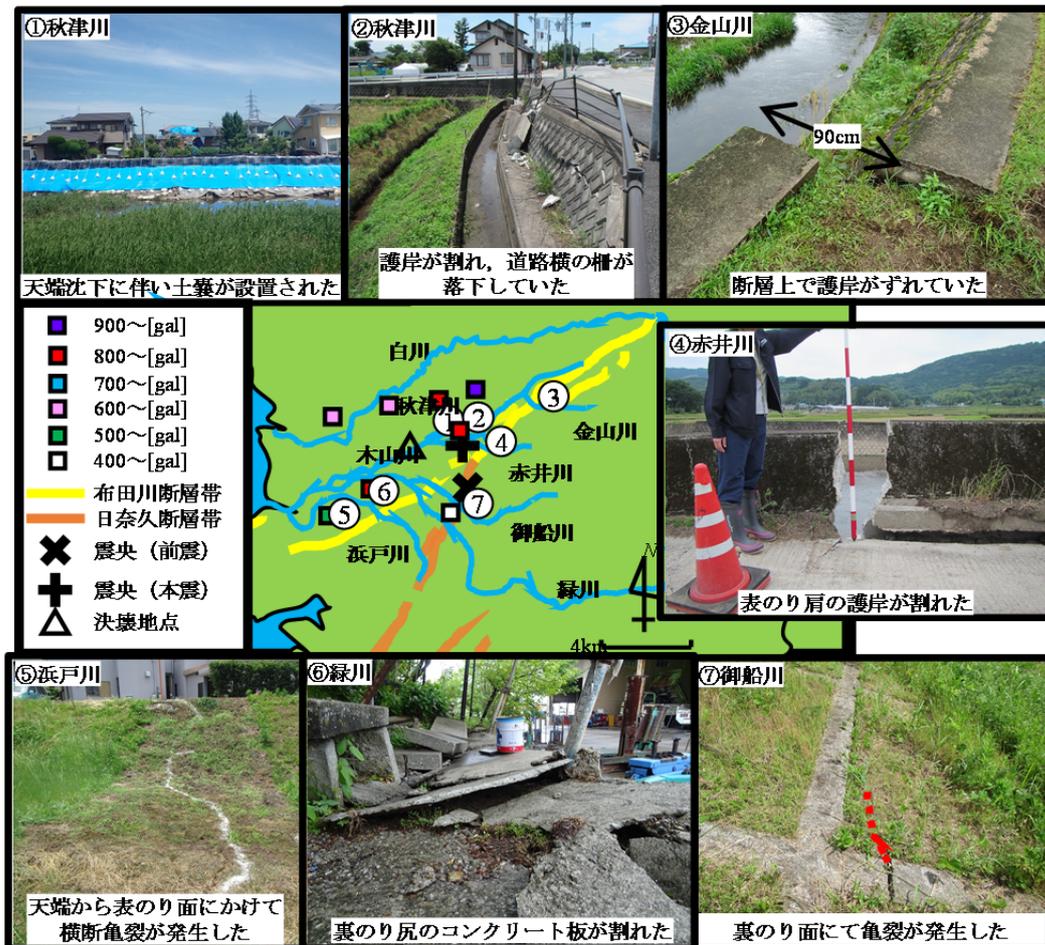


図 4.19 今次地震の発生状況と堤防被災状況（日奈久・布田川断層帯の位置を実線で、周辺地盤の最大加速度（本震，合成値）を四角印で示す。また、写真内の丸数字は地図上の観測地点と対応している）

表 4.2 堤防被害の調査結果

河川名	写真番号	堤防被災状況	堤体断面形		
			堤体高[m]	天端幅[m]	のり面勾配
秋津川	①	右岸：堤防沈下，高さ1mの土嚢設置．	2.75	9.41	2.3割（表）
		左岸：表のり面にて法すべり，噴砂跡有．			
	②	左岸：表・裏のり面コンクリート護岸が一部破損多数．	1.97	11.34	0.9割（裏）
金山川	③	左岸・右岸：護岸に段差が発生（横90cm，縦40cm）．天端も大きく破損．河川を挟んで地表断層を確認．	3.11	0.94	0.8割（表）
赤井川	④	左右岸：護岸に段差発生（横40cm，縦9cm）．天端に縦断亀裂があり，大きく破損．	2.6		0.4割（表）
浜戸川	⑤	左岸：天端・表のり面に縦断・横断亀裂．噴砂跡有．	3.14	4.6	2.3割（表）
緑川	⑥	左岸10.8k：裏のり尻のコンクリ板が破損．裏のり側がはらみだしている模様．			
御船川	⑦	右岸3.8k：表のり面・天端に縦断・横断亀裂多数．裏のり面にて法すべり発生．	3.81	20.53	5.0割（表）

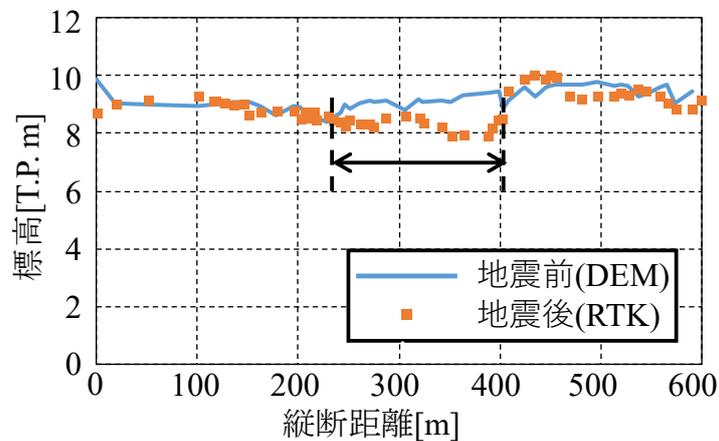


図 4.20 地震前後における堤防天端高の縦断分布の比較（秋津川右岸を対象とし，惣領橋を原点とする．地震前は国土地理院の DEM，地震後は著者らによる RTK-GNSS の実測値）

b) 堤防被災調査

地震時の堤防被災状況を把握するために，発災から約 10 日後の 2016/4/27 と約 1 ヶ月後の 5/18-19 の 2 回にわたり現地調査を行った．広域にわたる堤防被害が生じたものを網羅的に計測することは困難であるので，事前に被害情報を得たところを中心にスポット的に観測した．調査対象河川は図 4.19 に示すように，緑川水系の緑川とその支川の浜戸川，木山川，御船川及び木山川に合流する金山川，赤井川，秋津川である．白川でも調査を行ったが，紙面の都合上省略する．

調査内容は，堤防の変状（縦断・横断亀裂，段差・沈下，法すべりなど）を確認することが主である．合わせて，2 回目の調査時には，大きな変状が見られた箇所では，堤体断面形の測量を VRS 方式 RTK-GNSS（Trimble 社 R4 および R6）を用いて行った．以下の結果としては，県管理区間を中心に記述する．

図 4.19 は観測時に撮影された代表的な堤防被災状況の写真を示す．各地点及びその周辺

域における被害状況，堤体断面形を詳細にまとめたものを表 4.2 に示す．まず，断層上に位置した金山川や赤井川では，堤防護岸が割れたり，0.9m もずれる等大きな被害が発生した．金山川では周囲に地表断層も確認された．同様に断層傍の浜戸川や御船川においても，縦横断亀裂が天端のみならず表のり面でも確認された．また，緑川 10.8k 左岸では，裏のり尻におけるコンクリート板が割れていた．別の場所でも，堤防のり面及びのり尻におけるコンクリート製被覆工が破損していることを確認した．

図 4.19 の範囲内で最も大きな加速度 (904[gal]) を記録した観測地点傍を流れる秋津川では，緑川等と同様に，裏のり面が破損し，道路脇の柵が落下した．また，秋津川右岸側では高さ約 1m の土嚢が天端に置かれると共に，表のり面がブルーシートで覆われていた．これは，堤防の沈下や表のりすべりが発生したものと考えられる¹⁰⁾．そこで，地震前後における秋津川の堤防天端高の縦断変化を図 4.20 に示す．ここでは，秋津川右岸側の天端高を対象とし，惣領橋 (N32.7794°, E130.8022°) を原点として縦断距離を示す (正は下流方向)．また，標高データとしては，地震前は国土地理院が公開する DEM データ，地震後は 2016 年 5 月 18 日に計測された RTK-GNSS によるデータである．なお，DEM データ (5m メッシュ) の高さの精度としては，標高偏差が 0.3m 以内となっていることに注意されたい¹¹⁾．こ



図 4.21 益城町と県管理河川堤防の位置
(国土地理院の電子地形図に加筆)



図 4.22 自噴管等の破損によるブロック擁壁の隙間から溢れる湧水

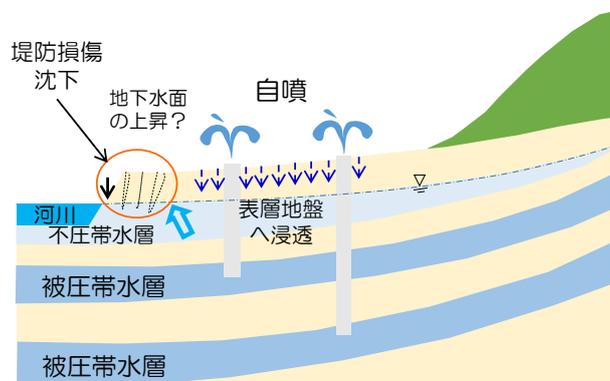


図 4.23 秋津川河川堤防 (右岸) の復旧の問題点

れより、図中矢印の約 200m の区間にわたり、0.5～1m 程度の沈下が発生していることが分かる。また、秋津川左岸側は液状化の発生箇所も見られた。今次地震による広域的な地盤沈下は 20cm 程度であったので¹²⁾、周辺地盤よりも堤防のほうが沈下が大きかったことが秋津川でも確認された。

c) 秋津川右岸の被害状況と復旧課題

7/2 および 9/2 に益城町福富地区の家屋被災状況や河川堤防の被害状況を調査した（図 4.21）。福富地区は、家屋被害が甚大だった地域の一つである。また、当該地区は、湧水が豊富な地域であり、住民の話によると、地下 40m および 70m 程度の位置に被圧帯水層があり、そこから自噴（被圧地下水頭：GL+3m 程度）させ、地下水の利用が行われていた。

地震動によって地下水利用に使用していた自噴管群が破損しており、表層地盤への地下水の漏出が発生している。図 4.22 は、自噴管破損に伴い、ブロック擁壁の隙間から湧水が溢れる状況を示した写真である。図 4.23 は秋津川河川堤防（右岸）の復旧で想定される問題点のイメージを図示したものである。河川堤防付近の地下水位が、従来の地下水位より高くなっていることが報告されている¹³⁾。これは、近隣家屋で利用されていた地下水（湧水）が表層地盤に浸透し、地下水位が上昇したためである。平成 29 年度より、本復旧の実施が検討されており、河川堤防では堤体内の亀裂等の損傷箇所を一度掘削し締固めなおす「切返し工法」での対応が予定されている。現在、耐候性土のうの設置による応急復旧が実施されているが、当該地区は、堤体自体の沈下やクラックなどの損傷に加え、広域地盤沈下が発生している。治水的機能や流下能力を早期に回復するため、堤防高を高くする、いわゆる嵩上げが必要となる。近隣住宅の有無に応じて、堤防道路との段差解消を目的として、堤体高さを盛土のみ、もしくはパラペットと併用することでの嵩上げが実施予定である。切返し工法を実施するためには、地下水位の上昇による長期的な堤防の湿潤化を防ぐ必要があり、近隣住宅に影響がないように官民境界に仮設の矢板、地盤改良などで側方流動を抑止対策が行われている。また、集水区間にかま揚孔を設け、排水ポンプによる地下水の河川への流出が行われている。

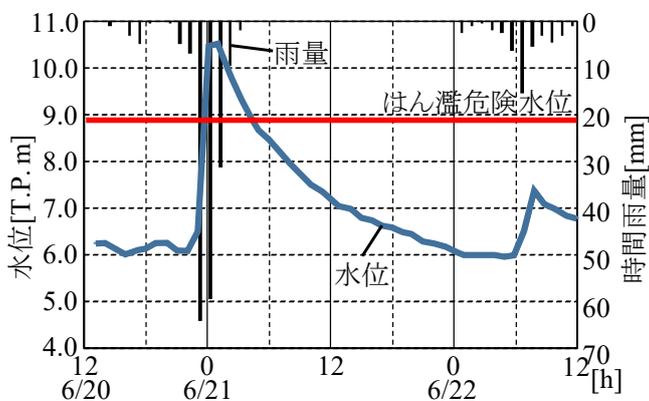


図 4.24 6 月 20 日豪雨の時間雨量（益城アメダス観測所）と水位（赤井水位観測所）の時系列変化

4.3 地震による堤防被災後の豪雨災害

4.3.1 6月20日豪雨災害後の木山川の複合災害調査

a) 6月20日豪雨災害の発生状況

2016年の6月20日豪雨における気象・河川水位状況を見るために、時間雨量（益城アメダス観測所）と木山川水位（赤井水位観測所）の時間変化を図4.24に示す。これより、6月20日深夜から時間雨量50mmを越える雨が2時間継続し、わずか6時間で177mmの短時間豪雨が発生した。この豪雨に伴って、6月20日23時過ぎに木山川の水位は上昇し、21日0時にははん濫危険水位を大幅に越えて10.5[T.Pm]に達した。この1時間で4.5mの水位上昇が見られた。1時でも時間雨量は31mmが観測されたが、水位上昇は止まり1時の水位

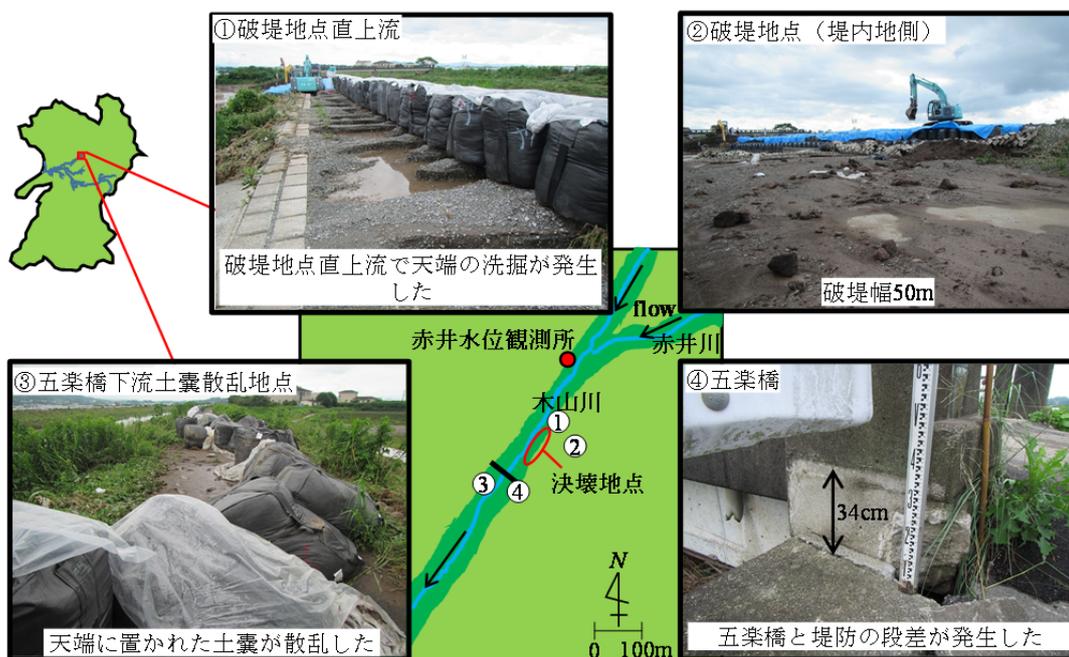


図 4.25 木山川破堤地点周辺での被災状況

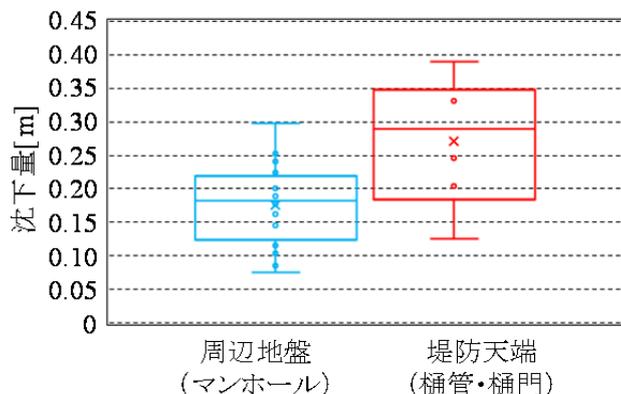


図 4.26 木山川の堤防天端と周辺地盤における沈下量比較

も 10.5[T.P.m]であった。木山川では地震被害による沈下被害を受け、2016 年熊本地震後に土嚢が天端に置かれていたが、この豪雨を受けて木山川 5.4km 左岸側が堤防決壊し、決壊幅はおよそ 50m に達した（図 4.19△地点、図 4.25 赤丸）。決壊地点は、赤井川合流地点から下流 200m、五楽橋より上流 60m に位置する。

b) 現地調査

木山川での堤防決壊と地震被害という複合災害の発生状況を把握するために、発災から 3 日後（2016/6/23）と約 1 ヶ月後（7/21）に現地調査を行った。本調査では、木山川破堤地点とその上下流における豪雨・地震による堤防被害及び洪水痕跡水位を調査した。また、RTK-GNSS による測量も行い、堤防や周辺地盤の沈下量を計測した。

図 4.25 は、木山川破堤地点周辺における豪雨・地震災害の発生状況を示す。木山川では高さ 1m の土嚢が並べられると共に、土嚢の川側ではビニールシートでカバーされ、河川水が堤外側に入る隙間はほぼ無いことを確認した。しかしながら、地点①では土嚢と土嚢の隙間が局所洗掘されており、一種のパイピングが起こったものと推察される。この洗掘場所の深さは 0.13~0.20m、長さ 1~2m と非常に大きく、堤防天端の裏のり肩に達するものも

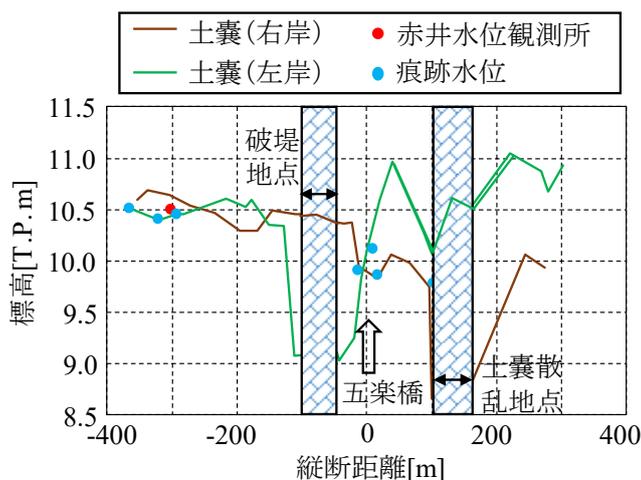


図 4.27 木山川における痕跡水位と堤防天端上の土嚢高の縦断分布（五楽橋を原点として縦断距離を計算し、下流向きを正とする）

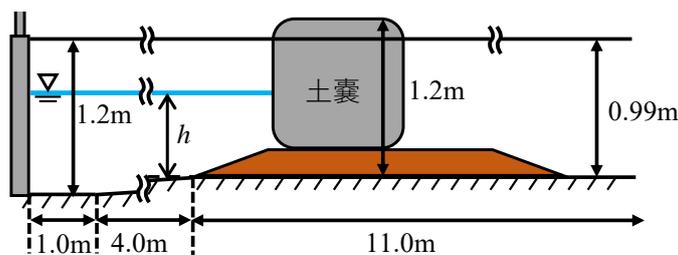


図 4.28 土嚢実験で用いた実験水路の概要

あった。この堤防天端における土嚢周囲の局所洗掘は、堤防決壊地点そばのみならず、広い範囲の地点で確認された。また、地点③では天端に置かれた土嚢が不安定化して散乱しており、越水が確認されたが、堤防裏のり面上の侵食は見られなかった。地点④では五楽橋の橋げたと天端に段差 34cm が発生しており、堤防沈下が発生したものと考えられる。

沈下状況を定量的に検討するために、木山川堤防における樋管・樋門の段差（データ数 $n=6$ ）及び木山川周辺の道路でのマンホールの浮き上がり（ $n=18$ ）の結果をまとめたものを図 4.26 に示す。ここでは、各データの平均値と最大・最小値が示されている。これより、周辺地盤（マンホール）では沈下量の平均値は 0.18m、最大値は 0.30m であった。一方、堤防沈下量（樋管・樋門の段差）の平均・最大値はそれぞれ 0.27m、0.39m であった。このように、木山川堤防でも周辺地盤よりも 0.1m 程度の沈下が発生したものと考えられる。

木山川破堤地点の上下流部における痕跡水位と堤防天端上の土嚢高の縦断分布を図 4.27 に示す。ここでは、土嚢高は、地震後の堤防天端高に土嚢の高さ（約 1m）を加えたものである。また、赤井水位観測所の最高水位も表示している。これより、洪水痕跡は天端の土嚢高すれすれに達しており、地震後の天端高が低い箇所の土嚢では越水が発生したものと考えられる。決壊箇所の堤防天端高も

9.0[T.P.m]程度と周囲と比べて低かったため、越水した可能性が高い。そのため、決壊要因として越水が第一に考えられるが、図 4.25 に示すように土嚢周囲の局所洗掘により土嚢が不安定化し、それが越水を助長した可能性も考えられる。次章では、天端に置かれた土嚢周囲の局所洗掘に関する浸透実験を行った結果を示す。

4.3.2 天端上土嚢周囲の局所洗掘現象の浸透実験

a) 実験概要

本実験では、図 4.28 に示すように、東京理科大学水理研究室所有の大型造波水路（長さ 36m、幅 1m、高さ 1.2m）に、現地で用いられている土嚢（高さ 1m、直径 1m）を設置し、片側に水を貯めて浸透実験を行う。その際、天端上での土嚢の局所洗掘を考慮するため、現地での最大洗掘状況に基づき、厚さ 0.2m、長さ 2.0m の天端を設けた。この天端材料としては、

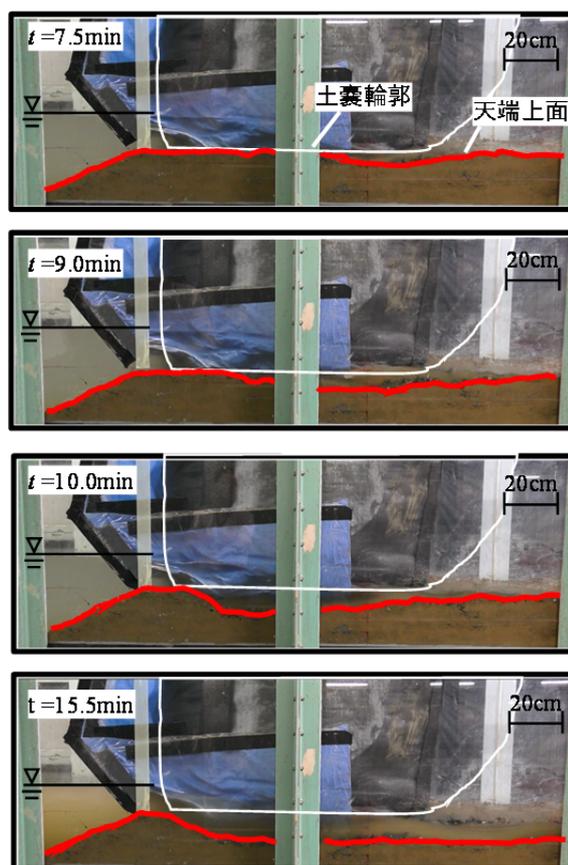


図 4.29 側面から撮影した土嚢周囲の洗掘の様子（ t は水位が天端に到達してからの時間を示す。図中白線と赤線は側面ガラス上の土嚢輪郭と天端上面を示す）

木山川破堤地点周辺を参考にして、碎石（13-20）・碎石（5-13）・鉢田砂をそれぞれ4：1：5の割合で配合した。土嚢袋は、現地に設置されている前田工織(株)製のツートンバックを使用した。幅1mの水路中央部に直径1mの土嚢を置くと壁面付近で隙間が生まれるため、表のり側にビニールシートを巻いて隙間が発生しないようにした。堤外側の水位は、実験当初、天端高からの水位 h を0.5mで一定にする予定であった。しかしながら、給水途中に天端内の浸透量が多く一定水位を保つことはできず、実験中では概ね $h=0.2\sim 0.3\text{m}$ となり、本実験中の水位上昇速度は概ね $0.02\text{m}/\text{min}$ となった。また、実験中に側面・上面からのビデオ撮影をした。

b) 実験結果

土嚢周囲の洗掘状況を把握するために、水路側面から撮影されたスナップショットを図4.29に示す。水位が天端に到達してからの時間 $t=7.5, 9.0, 10.0, 15.5\text{min}$ における結果を例示する。これより、 $t=7.5\text{min}$ では、土嚢下流部から洗掘が開始し、 $t=9.0\text{min}$ には洗掘範囲が上・下流に広がり、この時点での最大洗掘深は5cmであった。次に、 $t=10.0\text{min}$ には洗掘範囲がさらに上流側に広がり、最終的に、 $t=15.5\text{min}$ では洗掘孔が土嚢直下を貫通して一種のパイピングが生じ、洗掘深は11cmに達した。このように、浸透のみでパイピングによる土嚢下の洗掘現象が発生しており、現地条件でも十分生じたものと推察される。なお、現地では土嚢間の直下で局所洗掘が生じたが、本実験では土嚢と水路壁面間を土嚢間として与えた。そのため、壁面摩擦の影響により土嚢直下の流速の減少やそれに伴う洗掘範囲の減少が見られた可能性があり、土嚢間の再現実験を行うことは、今後の課題である。

4.4 まとめ

- 1) 国管理の河川堤防について、白川・緑川を対象として、地形・地質情報等に基づく被災要因分析を行った。その結果、河川流域の微地形や地盤構成と堤防被災との密接な関連性が窺えた。特徴的な点として、緑川中下流域の沈下被害が大きかった堤防では、基礎地盤の砂層や火山灰層厚が相対的に大きい傾向があった。また、微地形区分が干拓地・埋立地等の白川河口や微地形区分が入り混じった緑川中流域では、堤防沈下量や液状化被害が確認された。今後、熊本地震で被害のあった他河川の堤防について被災程度別の比較分析を進め、より一般性のある堤防危険箇所の抽出方法を提案する予定である。
- 2) 2016年熊本地震では、堤防の天端・表のり面の縦・横断亀裂や天端沈下が秋津川や木山川のような県管理区間でも広範囲に生じていた。また、秋津川右岸では、被圧水が表層に湧出・浸透することによる地下水位上昇の問題が発生していた。治水的機能や流下能力を早期に回復させるため、堤体嵩上げが重要となる。地下水位を低下させる必要があり、掘削施工及び長期的な堤防の湿潤化を防ぐ観点での水処理が実務上の課題となっている。
- 3) 木山川では、地震による天端沈下（10cm程度）と豪雨による堤防決壊・洪水氾濫が生

じるという複合災害が発生した。そこでは、沈下対策に設置された土嚢上の越流が決壊の主要因であることに加え、土嚢直下のパイピングによる土嚢の不安定化が決壊を助長した可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 気象庁地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成 28 年（2016 年）熊本地震の評価，http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 2) 国交省九州地方整備局 緑川・白川堤防調査委員会：第一回緑川・白川堤防調査委員会資料，<http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160512/data/siryo3.pdf>（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 3) 国交省：熊本県熊本地方を震源とする地震について（第 28 報），平成 28 年 5 月 2 日 9 時作成，<http://www.mlit.go.jp/common/001130271.pdf>（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 4) 国交省九州地方整備局：緑川・白川等の復旧状況について【第 3 報】，http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/data_file/1463547818.pdf（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 5) 内閣府：6 月 20 日からの西日本の大雨に係る被害状況等について，平成 28 年 8 月 1 日現在，http://www.bousai.go.jp/updates/h28tuyu/pdf/h280620ooame_05.pdf（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 6) 内閣府：災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1948 福井地震，<http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1948-fukuiJISHIN/>（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 7) 熊本県地質調査業協会，熊本市周辺地盤図，2003 年。
- 8) 松田博：粘土層の地震後沈下過程の推定，土木学会論文集，No.568/III-39,pp.41-48,1997.
- 9) Oka, F., Tsai, P., Kimoto, S., Kato, R.: Damage patterns of river embankments due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and a numerical modeling of the deformation of river embankments with a clayey subsoil layer, Soils and Foundations, Vol.52, No.5,pp.890-909,2012.
- 10) 国交省九州地方整備局 緑川・白川堤防調査委員会：第二回緑川・白川堤防調査委員会資料，<http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160623/siryo.pdf>（閲覧日：H28 年 9 月 21 日）。
- 11) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/kiban/faq.html#3-3>（閲覧日：H28 年 11 月 17 日）。
- 12) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/common/000142434.pdf>（閲覧日：H28 年 9 月 28 日）。
- 13) 熊本県土木部：H28 熊本地震資料，緑川支流木山川等の堤防復旧に対する考え方について

(二瓶泰雄，倉上由貴，石藏良平)

第5章 白川の土砂流出の実態

5.1 斜面からの土砂生産

5.1.1 概要

2016（平成28）年4月14日と16日に九州中部で発生した地震により、熊本を中心とした広い範囲で斜面崩壊が発生した。特に、本震である4月16日の地震によって非常に多くの斜面崩壊が阿蘇地域を中心に発生した。地震発生直後に河道に流入した土砂量は、約100万 m^3 と見積もられており、その内の約半分の50万 m^3 が阿蘇大橋西の斜面崩壊によるものである¹⁾。崩壊した土砂の中には、豪雨中に発生した崩壊では無いにも係わらず、流動化して土石流・泥流となり下流域に伝播し、土砂災害を発生させたものもある。

図5.1に阿蘇外輪山内側斜面の崩壊の様子を示す。崩壊した土砂の中には、斜面の途中で停止・堆積していることがわかる。また、豪雨時の斜面崩壊とは異なり、谷だけで無く、尾根においても多くの斜面崩壊が発生していることがわかる。斜面崩壊による崩土の中で、尾根で発生し、土砂の粒径が大きく、斜面途中で留まって河川・渓流域まで到達していないものは、今後の降雨によって河道まで流れて白川の土砂流出に影響を与えることは少なくとも短期的には発生しないと考えられる。斜面崩壊発生時に河川・渓流域まで到達したもの、また、斜面の途中で留まっているが、水が集まりやすい場所に位置している崩土は、今後の雨によって白川に流入する可能性があるため、注意が必要である。



図5.1 2016年4月の地震により発生した阿蘇外輪山内側斜面の崩壊

5.1.2 山王谷川の土砂流出

a) 山王谷川の概要

山王谷川は、阿蘇カルデラ内の烏帽子岳の西側斜面を西に流れる溪流である（図 5.2）。流域内の表土は図 5.3 に示すような黒色の細粒土砂で覆われている。図 5.4 に示すように

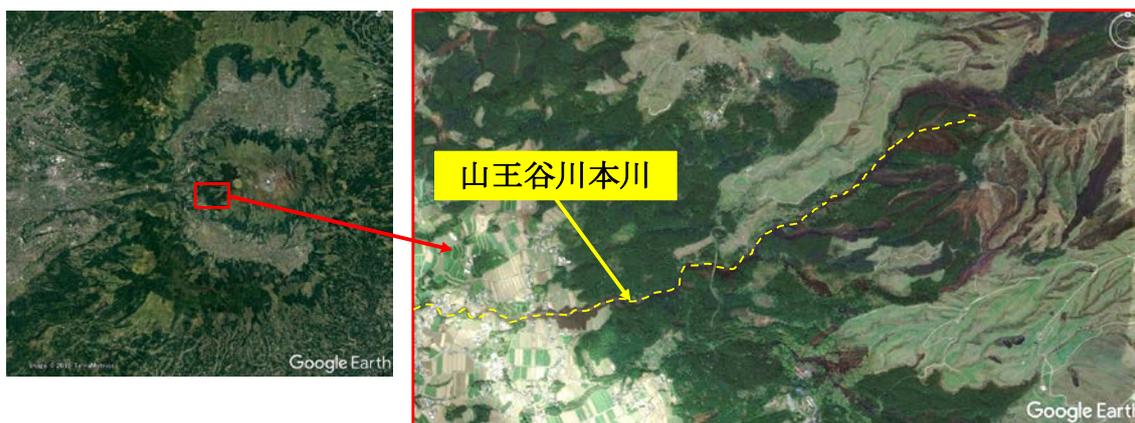


図 5.2 山王谷川流域の場所



図 5.3 黒色の細粒土砂



図 5.4 薄い表層の黒色土



図 5.5 被災前（2016年4月15日）の山王谷川流域の様子



図 5.6 流域内の砂防ダム



図 5.7 被災した家屋



図 5.8 家屋を破壊した黒色の細粒土



(a) 2016年6月7日



(b) 2016年4月26日

図 5.9 被災した家屋直上流の橋梁

細粒土砂層の厚さは非常に薄く、多くの場所で1mに満たない厚さである。図 5.5 に Google Earth による被災前（2016年4月15日）の流域の写真を示す。図 5.2 と比べると、地震によって非常に多くの斜面崩壊が発生していることがわかる。これらの斜面崩壊の多くは4月16日の本震時に発生したと考えられ、ほぼ同時刻に急激な土砂が生産され溪流に流れ込んだことが推察される。

本溪流は、以前から土砂の生産が活発だったようであり、図 5.6 に示すように、溪流内

には多くの砂防ダムが建設されている。

b) 山王谷川の土石流災害の現地調査

4月16日の本震時に発生した斜面崩壊により、下流の宅地まで到達する土石流が発生した。図5.7は、土砂氾濫域下流端付近の家屋の被災状況である。河道内には、直径数十cm～数mの巨礫が存在するが、河道から氾濫して家屋に流れ込んだ土砂は、図5.3に示した地盤表面を薄く覆っている黒色の細粒土砂であった(図5.8)。図5.9(a)に図5.7に示した家屋の直上流に位置する橋梁の被災後の様子を示す。また、図5.9(b)に被災直後(2016年4月25日)の橋梁の様子を示す。被災直後の写真からわかるように、橋梁には直径2m～3m程度の2つの巨礫が引っかかっており、これらの巨礫によって河道が閉塞され、土砂の氾濫が助長されたことが推定される。図5.10は、図5.9の橋梁の左岸側の様子である。土石流も河川流と同様に、橋梁周辺で迂回流として流下し、河岸が浸食されていることがわかる。

図5.11は、被災直後(2016年4月20日)の氾濫域上流部である。氾濫した土砂及び河道内の土砂は、黒色の細粒土砂であることがわかる。しかし、図5.12に示すように、河道内の細粒土砂の下は数十cm～数mの巨礫であることがわかる。

図5.13は、氾濫域上流端に位置している砂防ダムである。ダム内には、非常に多くの流



図 5.10 迂回流による河岸の浸食



図 5.11 被災直後の氾濫域上流部



図 5.12 河道内に残された巨礫



図 5.13 氾濫域上流端の砂防ダム



図 5.14 破壊された砂防ダム右岸側の袖部

木が堆積していることがわかる。図 5.4 に示すように、表土の崩壊・浸食厚さは非常に薄い、図 5.2 に示すように、崩壊・浸食面積が非常に広いため、多くの流木が生産されたと考えられる。本砂防ダムにより、流域からの総流出土砂量(約41,000m³)の半分(約20,000m³)がダム上流域に堆積したとのことである²⁾。また、砂防ダム右岸側の袖部が破壊されており、図 5.14 に示すように、下流の左岸側まで流れていた。

c) 山王谷川の土石流の数値シミュレーション

山王谷川の土石流は、地震によって発生した斜面崩壊が土石流化したものと考えられる。そのため、非常に多くの崩壊が同時に発生し、それらが合流しながら流れてきたと考えられる。ここでは、山王谷川を対象として複数の斜面崩壊を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、山王谷川で発生した土石流の流動特性を検討する。

実施した土石流の数値シミュレーションは、平面二次元の数値シミュレーションである。解析に用いた基礎方程式を以下に示す。

水及び土砂の混合物の質量保存則は以下のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (5.1)$$

ここに、 t は時間、 h は泥流の流動深である。 u と v は x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の堆積濃度、 E は河床の浸食速度であり、以下の式を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (5.2)$$

ここに、 θ は流動方向の河床勾配であり、以下の関係がある。

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5.3)$$

ここに、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配である。 θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 \bar{c} に関する流動方向の平衡河床勾配であり、水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考えると、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho-1)\bar{c}}{(\sigma/\rho-1)\bar{c}+1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (5.4)$$

ここに、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。

流体中の土砂の質量保存則は以下のものである。

$$\frac{\partial \bar{c} h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c} h u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c} h v}{\partial y} = p_c E \quad (\text{浸食}) \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_c}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}_c h u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}_c h v}{\partial y} = E \quad (\text{堆積}) \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_f (1-\bar{c}_c) h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}_f (1-\bar{c}_c) h u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}_f (1-\bar{c}_c) h v}{\partial y} = p_f E \quad (\text{浸食}) \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_f (1-\bar{c}_c) h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}_f (1-\bar{c}_c) h u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}_f (1-\bar{c}_c) h v}{\partial y} = \frac{1-c_*}{c_*} c_f E \quad (\text{堆積}) \quad (5.8)$$

ここに、 \bar{c}_c は固体として振る舞う土砂の鉛直平均濃度、 \bar{c}_f は流体として振る舞う土砂の鉛直平均濃度、 p_c は固体として振る舞う土砂の地盤内の存在率、 p_f は流体として振る舞う土砂の地盤内の存在率である。

運動量保存則は以下のものである。

$$\frac{\partial h u}{\partial t} + \frac{\partial h u u}{\partial x} + \frac{\partial h u v}{\partial y} = -g h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial h v}{\partial t} + \frac{\partial h u v}{\partial x} + \frac{\partial h v v}{\partial y} = -g h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (5.10)$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位である。 P は圧力であり、静水圧近似を用いる。 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (5.11)$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度である。 τ_{bx} と τ_{by} は x と y 方向における掃流力成分であり、以下のものである。

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5.12)$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5.13)$$

τ_y は降伏応力であり、本解析では以下の関係を用いる。

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{n}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h_s \cos \theta \tan \phi_s \quad (5.14)$$

f_b は抵抗係数であり，本解析では以下の関係を用いる．

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1-\bar{c})^{\frac{4}{3}}}{\bar{c}^{\frac{4}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) \bar{c}^{-\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} \quad (5.15)$$

$$f_b = \frac{C_{mu}}{8} \alpha^2 \left(1 - \frac{h_s}{h} \right) \quad \alpha = 0.37 \quad (5.16)$$

ここに， $k_f=0.16$ ， $k_d=0.0828$ ， e は粒子の反発係数， d は土砂の平均粒径である．河床位方程式は以下のものである．

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_s} \quad (5.17)$$

図 5.15 に解析に用いた地形データのコンター図を示す．地形データは国土交通省九州地方整備局により，被災前に測定されたものであり，平面的に 1m の解像度の DEM データである．流域が比較的広いので，本解析では 10m メッシュを用いた．図 5.16 に解析で想定した斜面崩壊発生場所を示す．斜面崩壊発生場所は解析条件によって異なっており，これら全ての崩壊が同時に発生した場合や個別の発生した場合などの解析を実施した．解析は，Case1～Case4 の 4 つの条件で実施した．Case1 では全ての崩壊が同時に発生したものとして解析を行った．Case2 では大規模な二カ所の崩壊の一つである西側斜面の一カ所のみが崩壊した場合である．Case3 はもう一つの大規模崩壊が発生した北側斜面の一カ所のみが崩壊した場合である．Case4 は，細粒土砂の相変化を無視した解析である．

図 5.17 に，2016 年 4 月の南阿蘇の日降水量を示す．図に示すように，土砂災害が発生した 4 月 16 日はわずかに雨が降っているが，降水量としては小さい．比較的まとまった雨が降ったのは，9 日前の 4 月 7 日である．しかし，現地の地盤状況から，表層の細粒土砂は静止体積濃度が 0.3～0.4 程度と非常に小さい値であるとともに保水性が高いため，本解析では，静止体積濃度として 0.4 を用いるとともに，間隙は水で満たされた飽和条件を用いる．

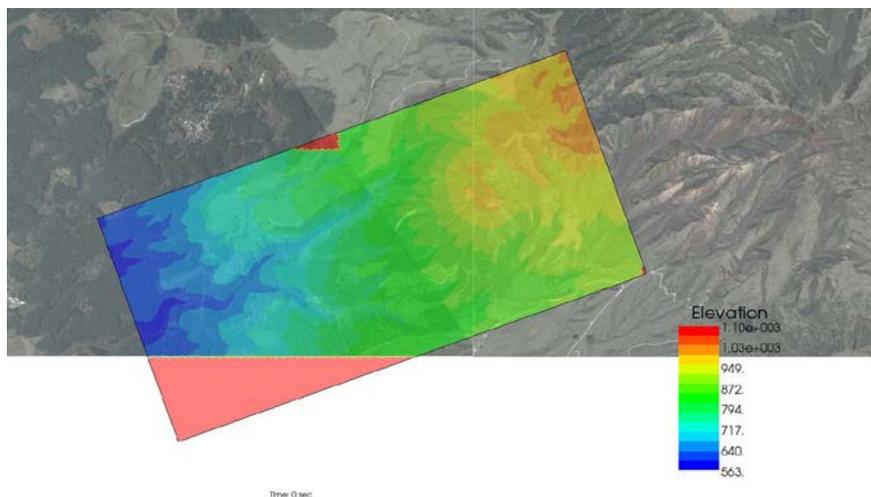


図 5.15 解析に用いた地形データ

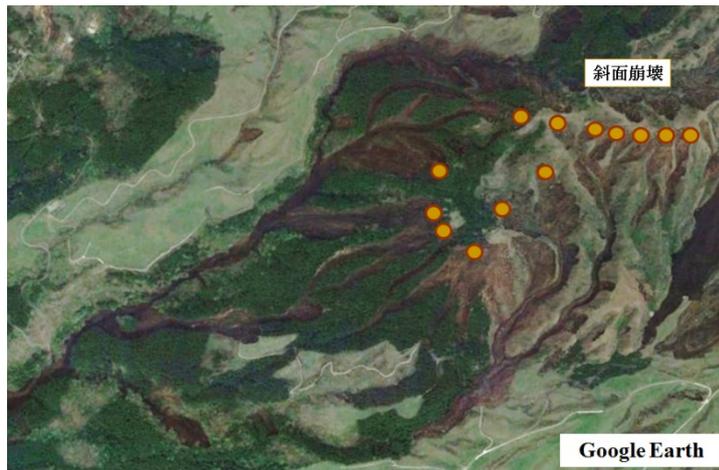


図 5.16 解析で想定した斜面崩壊発生場所

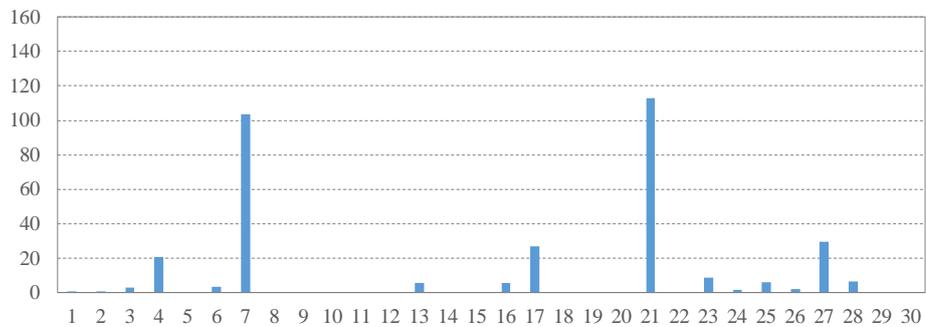


図 5.17 2016 年 4 月の南阿蘇の日降水量（気象庁）

図 5.18 に全ての崩壊が同時に発生した Case1 の流動深さの時間的な変化を示す。図に示すように、北側及び西側斜面で発生した土石流が時間とともに下流に流下しながら合流し、最終的に下流域へ流れていく過程が再現できている。また、西側及び南側斜面で発生した土石流は実現象と同様に、途中の斜面で堆積して下流まで流下しなかった。図 5.19 に Case1 の浸食・堆積深さの時間的な変化を示す。途中、勾配の緩い区間もあるため、土石流によって輸送された土砂が堆積する区間もあり、土石流は発達と減衰を繰り返しながら下流に到達している。本計算により、表層の細粒土砂は静止体積濃度が小さいとともに保水性が高いため、降雨が無くても崩壊土砂が流動化して土石流を形成し、下流に伝播した可能性が示された。

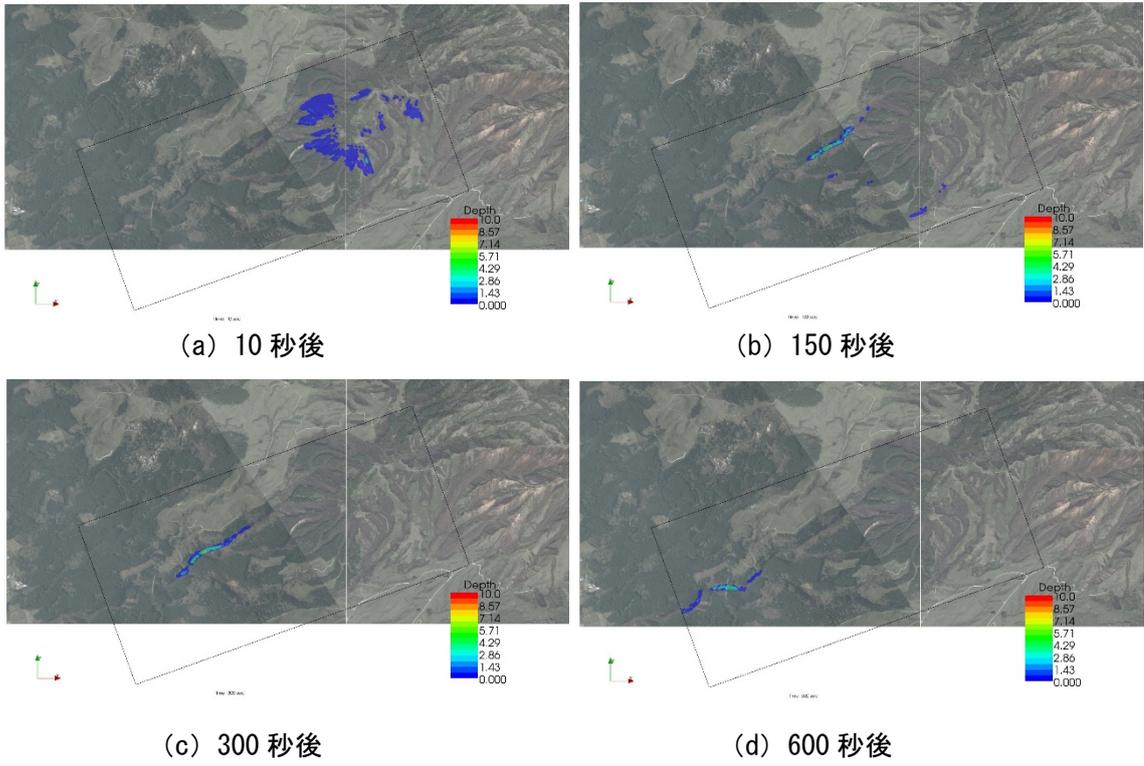


図 5.18 Case1（全ての崩壊が同時に発生，細粒土砂相変化）の流動深

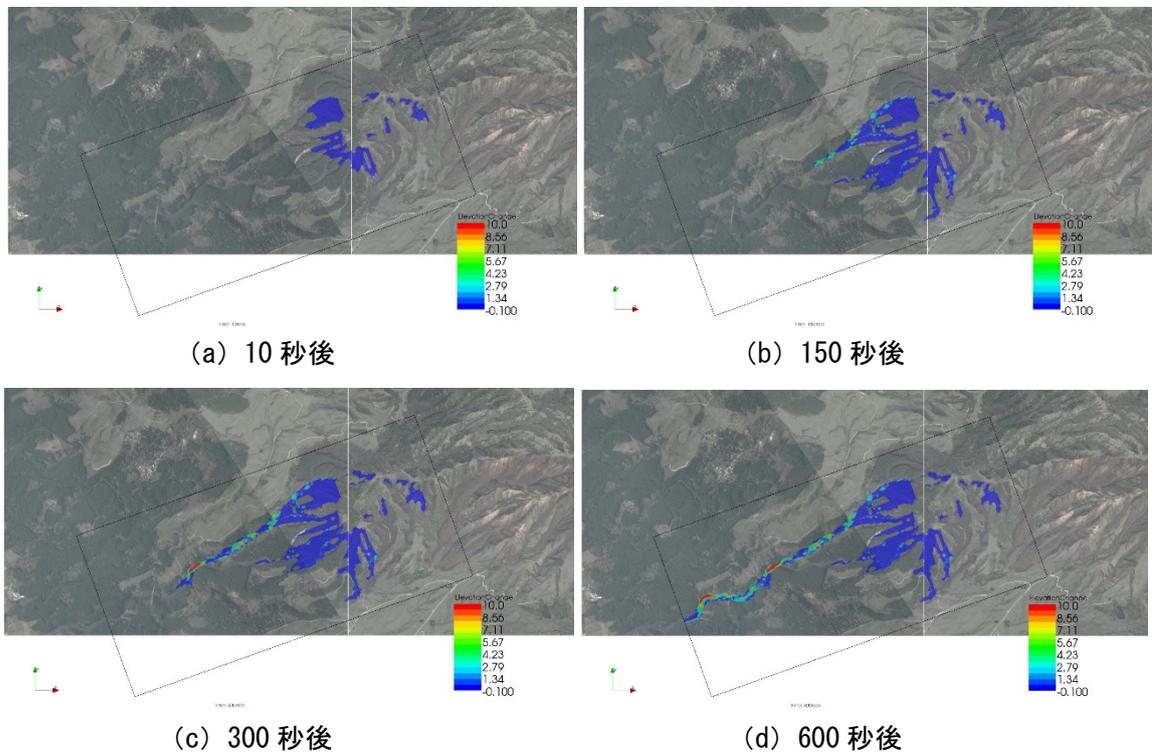


図 5.19 Case1（全ての崩壊が同時に発生，細粒土砂相変化）の浸食・堆積深さ

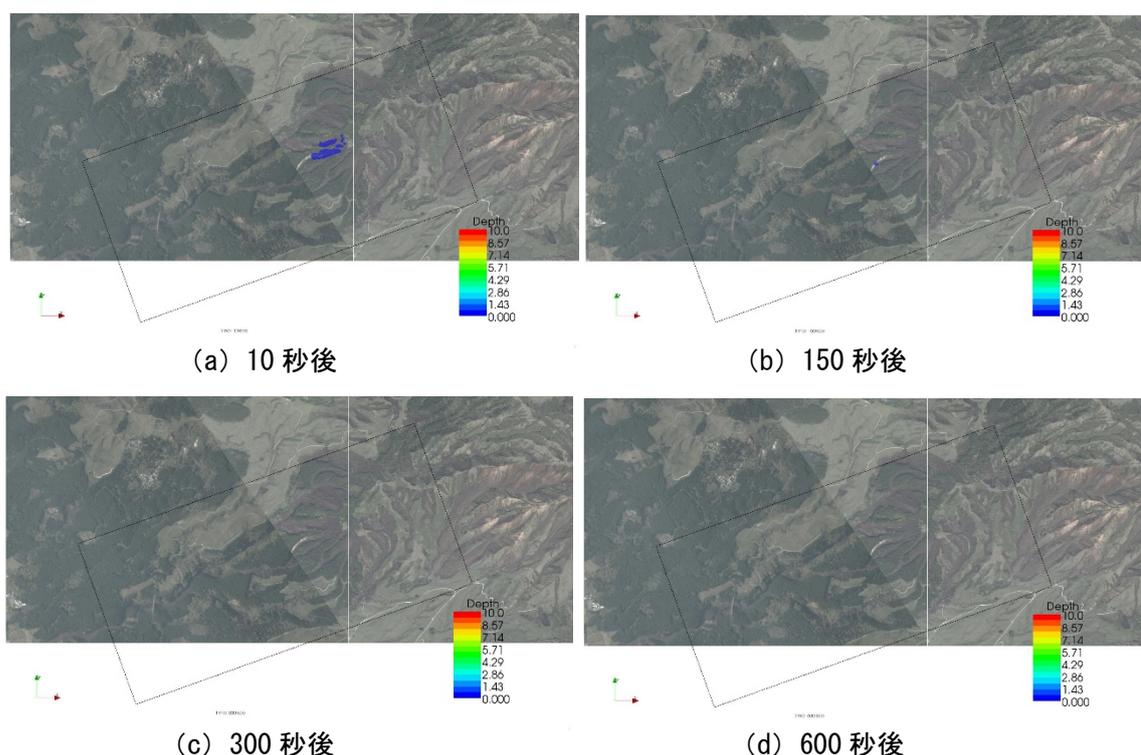


図 5.20 Case2 (西側斜面の崩壊のみが発生, 細粒土砂相変化) の流動深

図 5.20 に西側斜面の崩壊のみが発生したと仮定した Case2 の流動深さの時間的な変化を示す。図に示すように、西側斜面の崩壊のみでは土石流が途中で停止してしまい、下流まで土石流が到達しないことがわかる。なお、本解析では浸透流の流出に起因した水の表面流は考慮していない。図 5.21 (a) に示すように、本溪流の下流域では表面流が常に存在することが確認されており、これらを考慮することにより土石流が下流に到達する可能性もある。図 5.21 (b) は、解析で考慮した斜面崩壊地周辺の山王谷川の様子であり、2017 年 2 月 7 日に撮影された写真である。2 日前の 2 月 5 日に日降水量 38.5mm が南阿蘇観測所で観測されているが、図 5.21 (b) に示すように、斜面崩壊地周辺では平時には表面流が発生していない。そのため、浸透流の流出に起因した水の表面流は考慮しても、西側斜面の崩壊のみでは下流に土石流が到達しない可能性が高いと考えられる。

図 5.22 に北側斜面の崩壊のみが発生したと仮定した Case3 の流動深さの時間的な変化を示す。Case3 の流動深は Case1 よりも小さいが、Case 2 とは異なり、途中で止まることは無く下流まで流出した。これは、Case2 よりも浸食面積が広く、上流域で比較的大きな土石流となって下流の緩勾配域に流れ込んだためと考えられる。本地震によって土石流が宅地まで流下したのは、北斜面による崩壊の発生が一つの原因と考えられる。

図 5.23 に全ての崩壊が同時に発生させ、細粒土砂の相変化を考慮しなかった Case4 の流動深さの時間的な変化を示す。図に示すように、土石流は途中で堆積し、下流まで到達しなかった。これは、細粒土砂の相変化が土石流の流動に強い影響を与えることを示すと

もに、この度の山王谷川の土石流現象において、細粒土砂の相変化が実際に発生している可能性を示している。

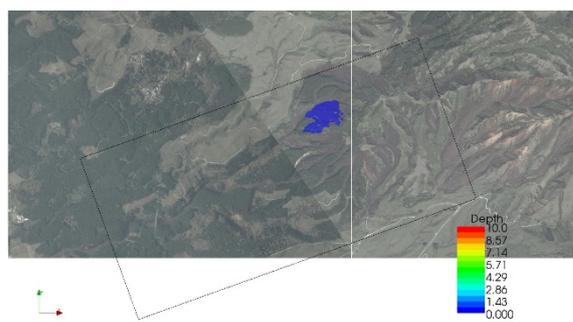


(a) 平成長野大橋付近の山王谷川



(b) 崩壊地付近の山王谷川

図 5.21 山王谷川内の表面流の様子



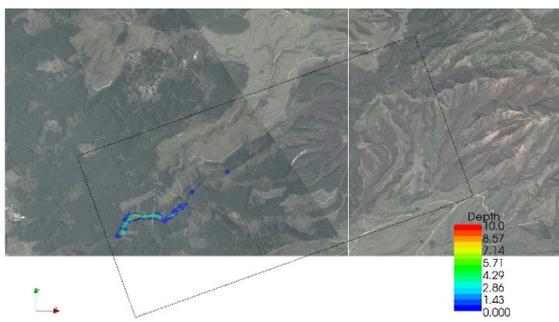
(a) 10 秒後



(b) 150 秒後



(c) 300 秒後



(d) 600 秒後

図 5.22 Case3 (北側斜面の崩壊のみが発生, 細粒土砂相変化) の流動深

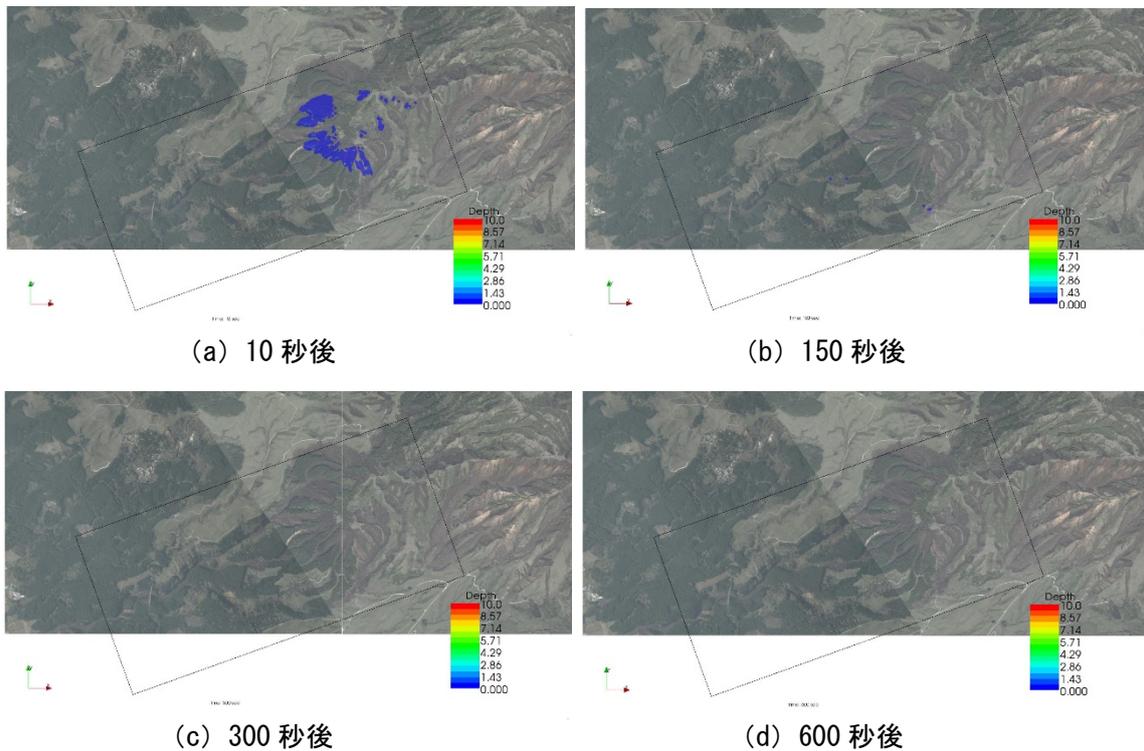


図 5.23 Case4（全ての崩壊が同時に発生，細粒土砂相変化無し）の流動深

5.1.3 まとめ

2016（平成 28）年 4 月 14 日と 16 日に九州中部で発生した地震により，熊本を中心とした広い範囲で斜面崩壊が発生した．特に，本震である 4 月 16 日の地震によって非常に多くの斜面崩壊が阿蘇地域を中心に発生した．崩壊した土砂の中には，豪雨中に発生した崩壊では無いにも関わらず，流動化して土石流・泥流となり下流域に伝播し，土砂災害を発生させたものもあった．また，豪雨時の斜面崩壊とは異なり，谷だけで無く，尾根においても多くの斜面崩壊が発生していた．崩壊した土砂の中には，斜面の途中で停止・堆積しているものが多く存在した．これらの土砂の内，水が集まりやすい場所に位置している崩土は，今後の雨によって白川に流入する可能性があるため，注意が必要である．

山王谷川で発生した土石流を対象として，現地調査を実施するとともに，平面二次元の土石流解析を実施した．山王谷川で発生した土石流による氾濫土砂は黒色の細粒土砂が主であり，それらによって家屋が倒壊した．しかし，河道内には直径数十 cm～数 m の巨礫が流れていたようであり，家屋直上流の橋梁に直径 2m～3m 程度の 2 つの巨礫が引っかかり，氾濫を助長していた．

数値シミュレーションの結果によると，北側及び西側斜面で発生した土石流が時間とともに下流に流下しながら合流し，最終的に下流域へ流れていく過程が再現できた．表層の細粒土砂は静止体積濃度が小さいとともに保水性が高いため，降雨が無くても崩壊土砂が

流動化して土石流を形成し、下流に伝播した可能性が示された。また、細粒土砂の相変化を考慮しなかったシミュレーションでは、土石流は途中で堆積し、下流まで到達しなかった。これは、細粒土砂の相変化が土石流の流動に強い影響を与えることを示すとともに、山王谷川の土石流現象において、細粒土砂の相変化が実際に発生している可能性を示している。

参考文献(5.1節分)：

- 1) 国道交通省九州地方整備局, <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiryous3>.
- 2) 国土交通省砂防部 http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160914_gaiyou_sokuhou.pdf.

(竹林洋史)

5.2 白川における土砂動態

5.2.1 調査概要

2016年4月14日および4月16日に熊本県熊本地方を震央とする2回の地震によって、阿蘇地域を中心に多くの斜面崩壊が発生した。熊本県中北部を流れる一級河川白川流域では、この斜面崩壊により大量の土砂が河川内に流入した。この影響で、白川では震災後も長期間にわたって濁度の高い状態が続いており、河口域で養殖されているアサリが窒息するなどの被害が生じている¹⁾。そこで、熊本地震後の白川における土砂動態を把握することを目的とした調査を実施した。

白川流域の12地点（図5.24）において、2016年7月1日、7月2日、8月24日、9月17日、10月29日、11月24日、12月25日、2017年1月24日の計8回の広域採水調査を行った。採水したサンプルは研究室に持ち帰り、SS（Suspended Solids：浮遊物質量）および粒度分布の測定を行った。また、2016年12月25日にはSt.5、St.8、St.9、St.11以外の調査地点にて採取した河床に堆積した土砂の粒度分布も測定した。これらの広域採水調査に加えて、St.4に濁度計を設置し、2016年6月17日から30分毎に濁度を連続的に測定している。また、2016年6月21日の降雨時にはSt.4において約1時間間隔の連続採水を行い、SSと濁度の関係式を作成した。

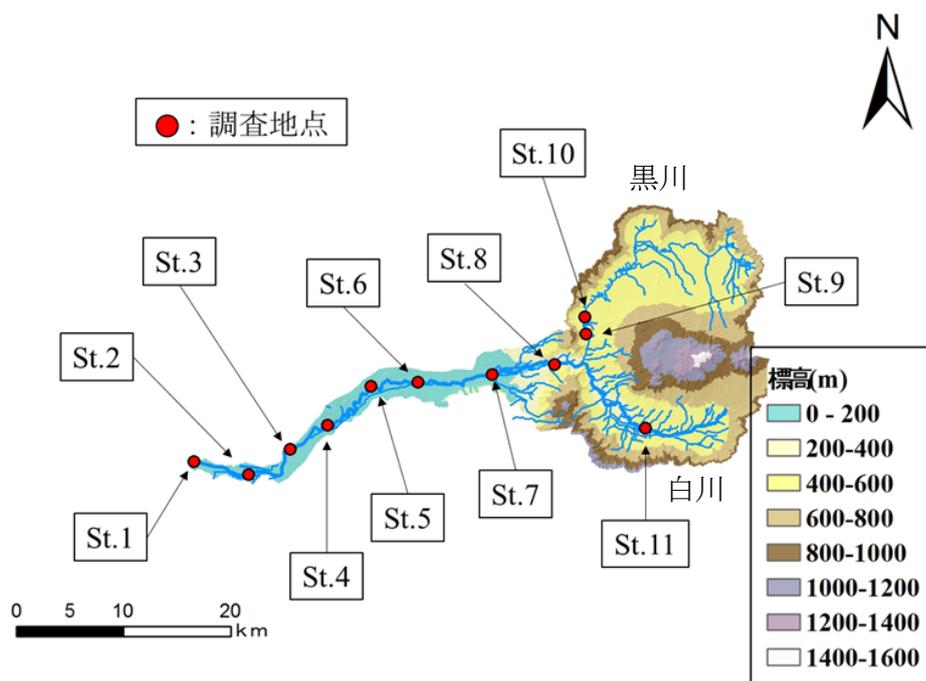


図5.24 白川流域及びその調査地点

5.2.2 震災後の白川流域でのSS空間分布

震災後の2016年7月1日～2017年1月24日にかけてのSS空間分布を図5.25に示す。また、期間中の代継橋観測所（St.4）における流量と調査日の日平均流量を図5.26に示す。なお、流

量は九州地方整備局より提供されて水位データを用いて、過去のH-Q式から算定した暫定値である。H-Q式は2012年6月～2013年1月の水文・水質データベースの代継橋観測所の流量、水位データを使用して作成した。7月1日と7月2日の下流域のSSは、日平均流量が小さいにも関わらず、高い数値を示した。これは6月後半の豪雨により南阿蘇村立野地区(St.8付近)で斜面崩壊があり河川に土砂が流入し²⁾、その後に降雨による流量の増加があり、河川内に多量の土砂が供給されたため、7月上旬までその影響でSSは高い数値を示したと考えられる。また、11月24日までは、下流域のSt.1~St.4においてSSが中上流域よりも高い数値を示す傾向があり、河道内に多くの粒径の細かい土砂が蓄積されており、流量増加時に巻き上げられて浮遊砂として流下していることが推察される。さらに、上流域に着目すると、合流部より上流の白川St.11では、SSは全期間でほかの地点に比べて低い値を示している。

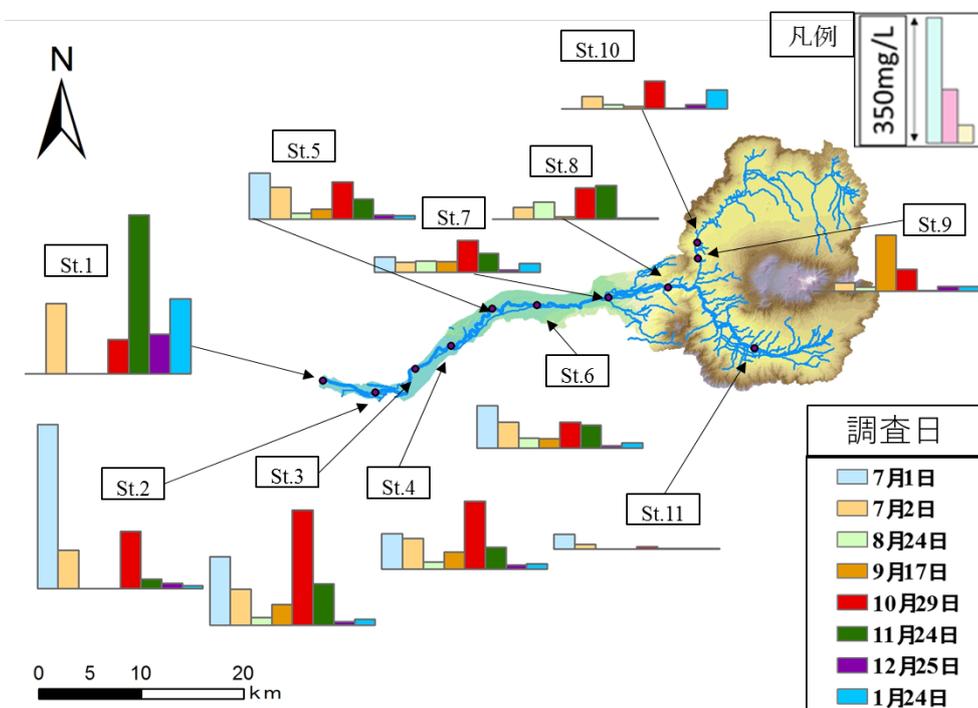


図 5.25 白川流域での SS 空間分布

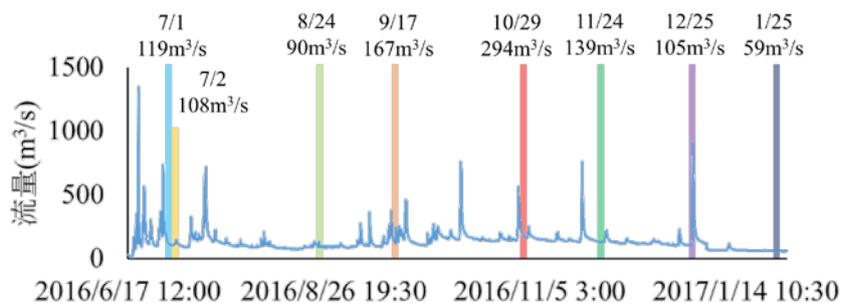


図 5.26 調査期間中の流量と調査日の日平均流量

5.2.3 堆積土砂および浮遊砂の粒度分布

図 5.27 に 2016 年 12 月 25 日時点での河床堆積土砂の中央粒径と白川の河床勾配の縦断変化を示す。河口域に近い St.1 では堆積土砂の粒径が極めて小さい。また、上流の黒川の St.10 においても、St.2,4 と同程度の細かい粒径の土砂が堆積しており、今後もこれらの土砂が流量増加時に下流に徐々に流出する可能性がある。

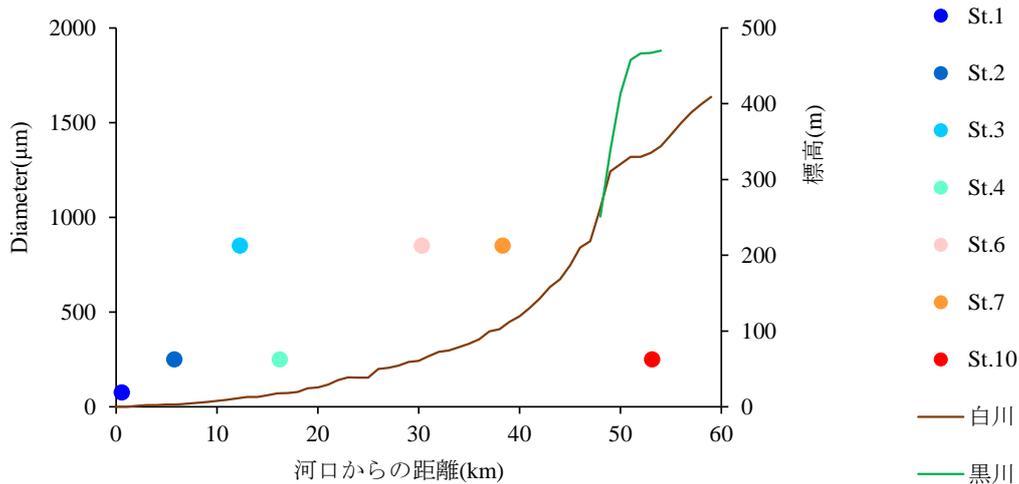


図 5.27 河床堆積土砂の中央粒径と白川の河床勾配の縦断分布

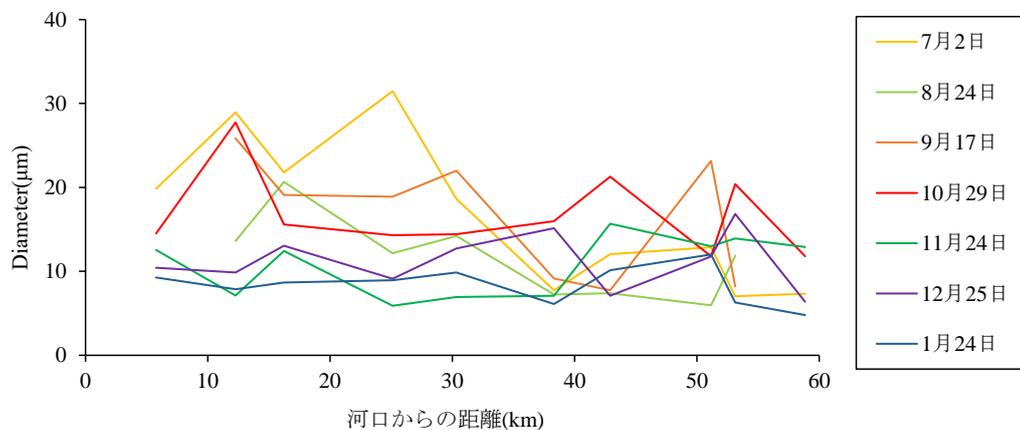


図 5.28 浮遊砂の中央粒径の縦断分布

図 5.28 に各調査日の浮遊砂の粒度分布から得られた中央粒径を示す。この結果から 7 月 2 日から 10 月 29 日までは流下に伴って粒径が大きくなる傾向があった。一般的に小さい粒径は下流域の緩流部に多いが 7 月 2 日から 10 月 29 日までは下流域の粒径が大きい。原因としては 6 月後半に発生した土砂崩れ²⁾によって流入した土砂が豪雨の影響によって流下したため粒径が大きくなり、その影響が 10 月 29 日まで続いたと考えられる。また、11 月 24

日から1月24日間は徐々に地点毎の変化は小さくなっていることがわかる。

5.2.4 濁度連続モニタリングによる土砂フラックスの算出

連続採水によるSS調査と濁度計による濁度連続モニタリングから、SS-濁度の換算式を作成した。図5.29にSt.4の濁度から換算式を用いて算出したSSと流量の時系列変化を示す。また、図5.30に両者の関係を示す。この結果からSSと流量の相関は弱いことがわかる。これは熊本地震によって流入した細かい粒径の土砂が河道内に蓄積されており、降雨による小規模な流量増加時にも堆積土砂の巻き上げにより、SSが高くなるためであると考えられる。

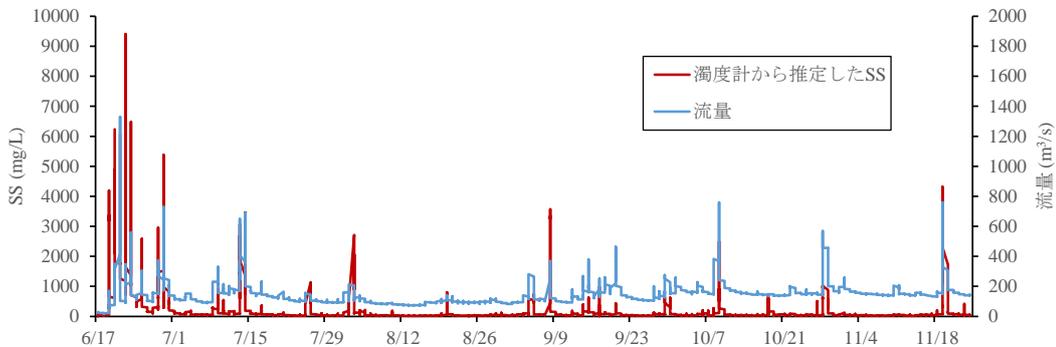


図 5.29 St. 4 における SS および流量の時系列変化

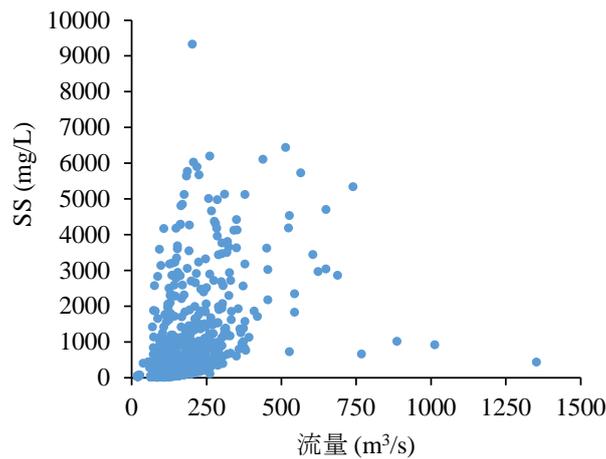


図 5.30 SS と流量の関係

次に、2016年6月17日から12月9日の間にSt.4を通過した各期間の土砂流出量を算出

した結果を図 5.31 に示す。St.4 から下流に供給された調査期間中（約半年）の浮遊砂の総量は約 174.3 万 ton となる。震災前の 2001 年 5 月 10 日～2002 年 5 月 9 日（1 年間）の土砂流出量は約 10 万 ton³⁾であり、熊本地震によって大量の土砂が河道内に供給されたことがわかる。なお、阿蘇大橋付近での崩壊土砂体積は約 50 万 m³であり⁴⁾、重量に換算すると 85 万 ton である。このことから、熊本地震による河川内への土砂流入の影響で、2016 年 6 月 17 日から 12 月 9 日にかけて下流域への大量の土砂供給が起こっており、白川の河川・河口域の河床形状や生物環境にも大きな影響を与えていることが推察される。

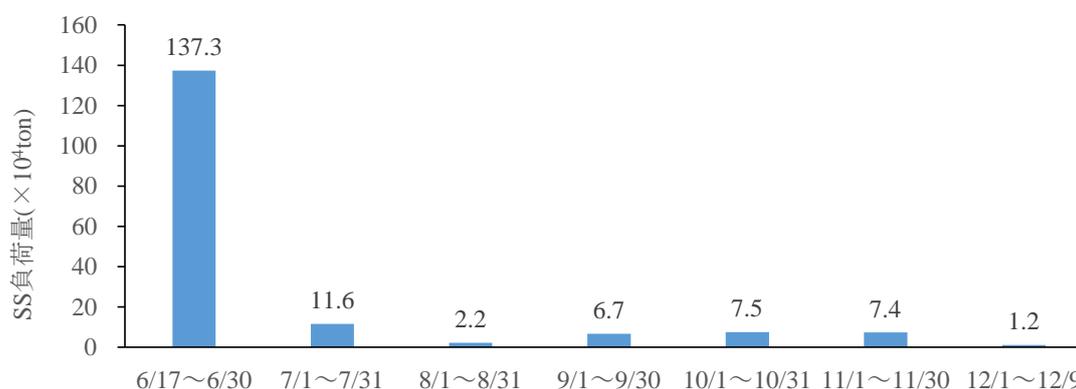


図 5.31 St. 4 を通過した各期間の土砂流出量

5.2.5 まとめ

本研究では熊本地震後の白川における土砂動態の把握するために、震災後の河道内の濁度および SS の連続モニタリングを実施した。その結果、熊本地震による大量の土砂流入により、白川では長期間 SS が高い状態が続いており、特に下流域でその傾向が顕著であることが明らかとなった。また、2016 年 6 月 17 日から 12 月 9 日にかけて下流域へ大量の土砂供給が起こっており、白川の河川・河口域の河床形状や生物環境に大きな影響を与えていることが推察される。

参考文献(5.2 節分)：

- 1) 農林水産省：熊本地震の農林水産関係被害の状況
- 2) 熊本県：地震後の大雨被害
- 3) 山本浩一，横山勝英，森下和志，高島創太郎，河野史郎，末次忠志：白川河口域における土砂・栄養塩収支，河川技術論文集，Vol.11, pp.53-58, 2005.
- 4) 国土交通省九州地方整備局，<http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiryous3>.

(赤松良久)

5.3 白川河口干潟への影響

5.3.1 調査の動機

熊本地震により、震源地である熊本県熊本地方を中心に甚大な被害が生じた。その中で、白川流域では土砂崩れが多発した（図 5.32）。これらの土砂崩れにより多量の土砂・流木が河道に流入した。これらの河道に流入した多量の土砂・流木は、下流へ流され、河道や図 5.33 に示す白川河口干潟へと堆積したと考えられる。

図 5.34 に示す白川河口干潟は、白川河口から沖合方向に 2km を超える干潟であり、河口尻の干潟面積(坪井川・白川の両滞筋間)は 6km²である。干潮時は白川北部に位置する坪井川河口から白川南部に位置する緑川河口までの周辺河口域が一体となる広大な干潟となるため、「白川・緑川干潟域」とも呼ばれる（日本野鳥の会 WEB より）。また、この河口域はアサリ漁業やノリ養殖が盛んな地域でもあり、ノリ養殖に関しては、白川河口域で熊本県全体の 4 分の 1 に当たる量が生産されており、水産上大変重要な場所である。

このような白川河口干潟への土砂の堆積は、平成 24 年九州北部豪雨時にも生じており、その際、河川から流出した土砂の堆積により干潟が埋没し、アサリが死滅するなどの漁業被害が発生した。大水害後の平成 24 年 9 月に熊本県が実施した調査では、最大堆積厚 50cm、堆積面積 8.44km²、堆積土量 2,489,100m³に達しており、アサリが生息できない状態であったことが確認されている（阿部，2014）。今回の地震による土砂の河道への流入・干潟への堆積も平成 24 年九州北部豪雨と同様なプロセスにより干潟生態系や水産業に被害をもたらすことが予測された。そこで、本節では、熊本地震に起因する白川河口干潟への土砂堆積の影響に関する調査結果を報告する。



図 5.32 白川河岸付近での土砂崩壊（立野，2016 年 7 月 21 日）



図 5.33 白川河口の位置 (画像は GoogleMAP)



図 5.34 白川河口干潟の全景

5.3.2 土砂・流木の流入・堆積状況の現地観測

現地観測は地震発生直後の河口干潟の状況を把握するために2016年5月18, 23, 24日に、出水による影響を調査するために同年7月20日に、その後の動態を調査するために2017年1月17日に実施した(図5.35)。主な調査内容は地盤高測量、底質の粒度分析、アサリへの影響調査である。図5.36に観測点の配置を示す。

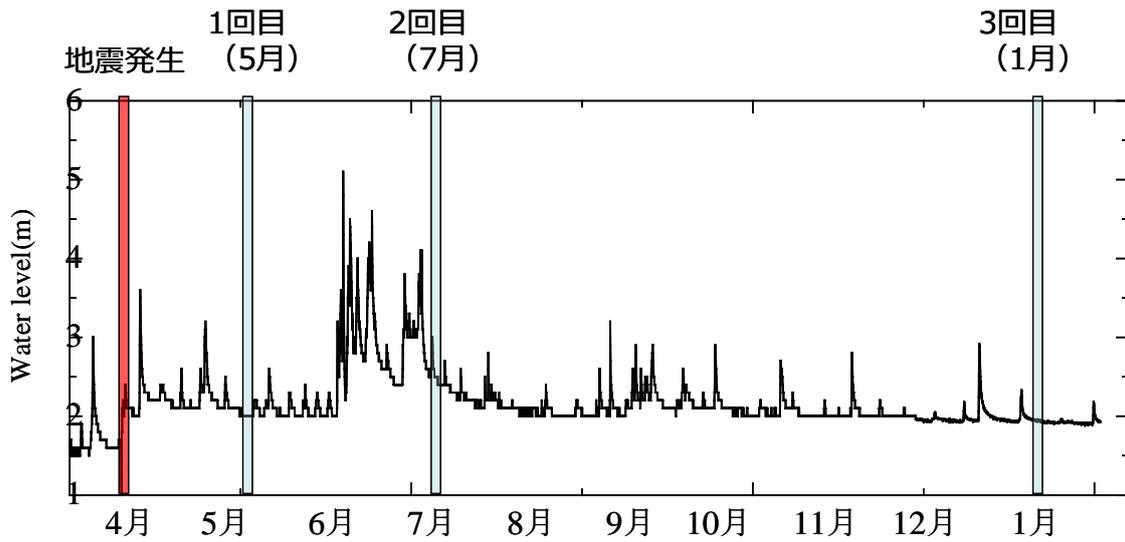


図 5.35 白川の水位変化と観測タイミング(代継橋, 水文水質データベース暫定値より)



図 5.36 観測点の配置(背景画像は GoogleMAP)

本項では、堆積状況調査、地盤高測量ならびに粒度分析の結果について時系列に沿って述べる。

a) 地震発生梅雨前まで

地震発生直後からウォッシュロードや小規模の出水による浮遊砂の輸送により、地元で赤土と呼ばれる阿蘇起源の細粒分の多い土砂の堆積が生じたと考えられる(図 5. 37)。また、流木も大量に流入したことが確認されている(図 5. 38)。さらに次項で述べるがこの時点でアサリへの影響も既に確認されている。



図 5. 37 干潟面に堆積した赤土の状況 (2016 年 5 月 18 日)



図 5. 38 干潟面から回収された流木の状況 (2016 年 5 月 23 日)

次に、5月23日に採取した底泥コアサンプルを示す。図5.39(a)に赤土の堆積が見られない通常の干潟面と考えられる地点で採取したもの、図5.39(b)に赤土の堆積が確認された地点のコアサンプルをそれぞれ示す。図5.39(b)の表層10cmほどの赤みがかった土砂が赤土である。



(a) 赤土の堆積がない地点



(b) 表層に赤土が堆積した地点

図 5.39 干潟上で採取した底泥コアサンプル (2016年5月24日)

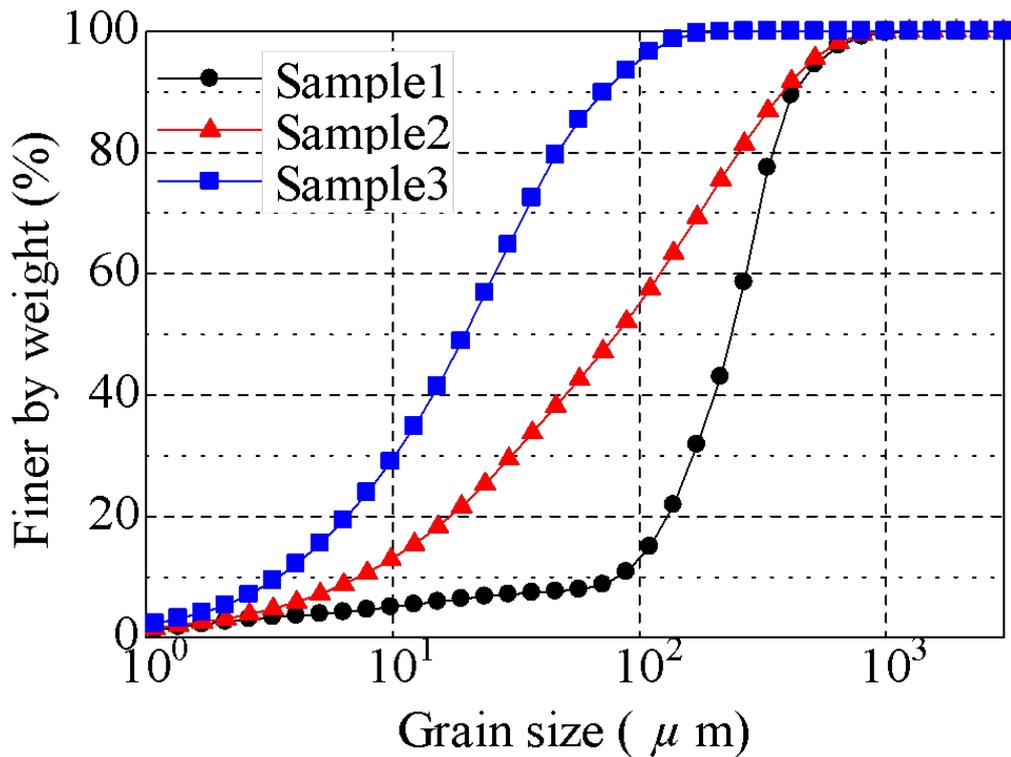


図 5.40 粒度分析結果 (Sample1:通常の干潟面の土, Sample2:干潟上の赤土, Sample3:立野の土砂崩れ現場で採取した土)

このサンプルの粒度分析結果を図 5.40 に示す。図 5.40 には、立野の土砂崩れ現場で採取した土の粒度分布も併せて示す。まず、赤土と呼ばれる立野付近の土砂(Sample3)は $D_{50}=20\mu\text{m}$, $D_{90}=72\mu\text{m}$ であり、シルト・粘土で構成される土砂であり、これが所謂赤土の粒度であると考えられる。また、堆積した土砂(Sample2)は中央粒径が $D_{50}=90\mu\text{m}$ であり、通常の干潟面の土に比べ細粒分が多く、赤土と呼ばれる阿蘇起源の土砂と通常の干潟面の土が混合した粒度であることがわかる。以上より、ウォッシュロードならびに 4 月 21 日、5 月 10 日の小規模出水で、阿蘇起源の赤土が河口干潟に堆積したと考えられる。

b) 梅雨期直後

図 5.35 より、6 月上旬から 7 月中旬にかけて大規模な出水が多数発生した。主な出水は、6 月 21 日頃、6 月 29 日頃、7 月 13 日頃の 3 回で国土交通省の測定 (代継橋: 暫定値) によると、それぞれ 6 月 21 日 2:40 頃に約 $1,600\text{m}^3/\text{s}$ 、6 月 29 日 13:50 頃に約 $940\text{m}^3/\text{s}$ 、7 月 13 日 18:50 頃に約 $910\text{m}^3/\text{s}$ の流量が観測されている。この影響により大量の土砂・流木が河口干潟に流入したと考えられる。

ここで、5 月、7 月、1 月に実施した地盤高測定の結果について述べる。地盤高は RTK-GNSS(Trimble NetR9/ニコントリプル社製)により実施した。結果を図 5.41 に示す。

ここで、5 月は図 5.36 に示すように設定した 3 測線のデータを得ることが出来たが、7 月は測線 1 の途中で赤土の堆積により移動が困難になりやむなく途中で測量を中止した。

よって、5月と7月の地盤高の定量的な比較は測線1の途中まででしか行えない。図5.36より、7月は5月より5cmから40cm地盤高が高くなっていることが分かる。この上昇分は赤土の堆積によるものである。このような堆積は測量結果にはないが干潟全域でこのような赤土の堆積が生じていたと考えられる。

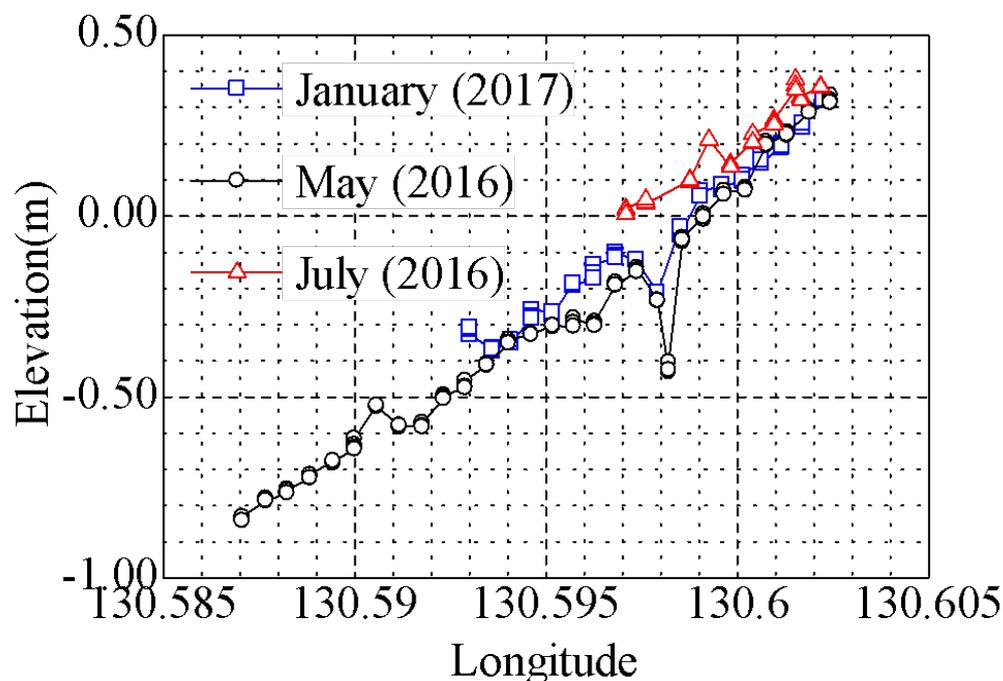


図 5.41 5月,7月,1月の測線1での地盤高の比較

c) 冬季

図5.35より、梅雨期以降は小規模な出水を繰り返していることが分かるが、梅雨期に生じたような大規模な出水は生じていないことが分かる。1月に実施した地盤高測量の測線1の結果を図5.41に示す。図5.42~図5.45に測線2と測線3における5月と1月の地盤高を沖側(130.593E~130.596E)と岸側(130.596E~130.604E)に分けて示す。これらより測線2の沖側において1月は全体的に上昇傾向にあり、最大で上昇していた地点では約30cmであることがわかった。次に、測線2の岸側において1月は5月の地盤高と同程度の堆積量であることがわかる。さらに、測線3の沖側においても測線2と同様に全体的に上昇傾向にあり、最大で上昇していた地点では約15cmであることがわかった。最後に、測線3の岸側においても測線2と同様に5月の地盤高と同程度の堆積量であった。

以上のように1月に赤土の堆積量が減少した理由として、冬季波浪による流出の他、小島漁協によって実施された赤土除去作業や熊本県により実施された干潟面上での滞筋の掘削などが(図5.46)挙げられる。

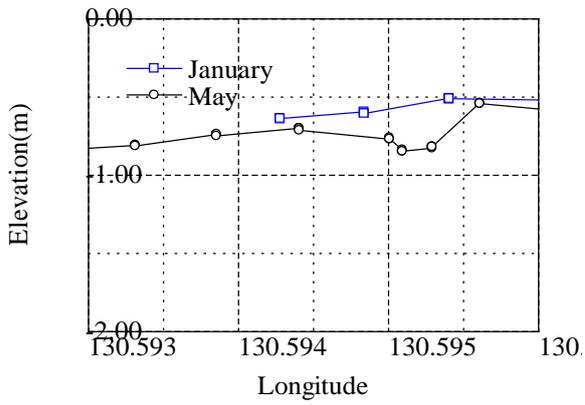


図 5.42 沖側(測線 2)

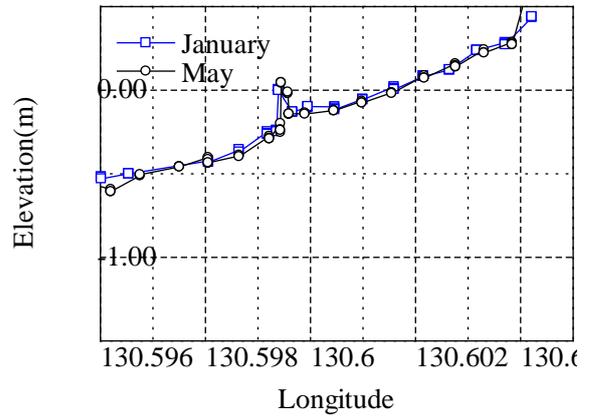


図 5.43 岸側(測線 2)

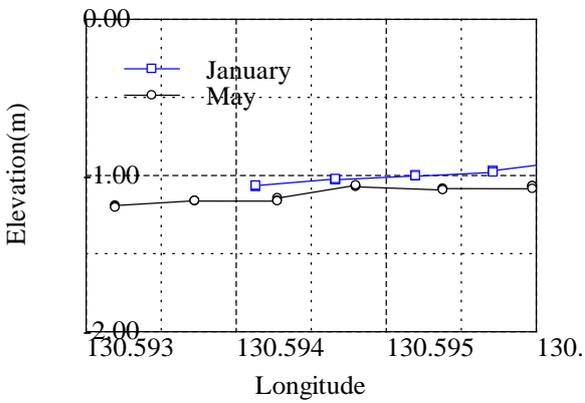


図 5.44 沖側(測線 3)

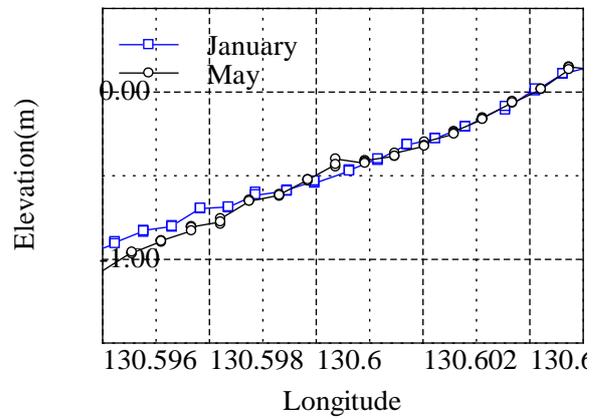


図 5.45 岸側(測線 3)



図 5.46 干潟上に人工的に造成された滞筋(2017年1月17日)

5.3.3 アサリへの影響調査

a) 調査方法

2016年5月3日から8月23日にかけて、計10回の観測を4地点においてアサリの定量調査と堆積物調査を実施した。アサリの定量調査については、1辺が25 cmの方形枠で2回分採取し、目合い1 mmのふるいを用いてふるい、残差をビニール袋に入れ、最終濃度が10 %になるよう、ホルマリンで固定した。また、アサリの肥満度測定用の試料として、調査地において殻長30 mm程度のアサリ成貝を30個体程度採取し、持ち帰った。

堆積物の調査は、浮泥層厚と酸揮発性硫化物（AVS）の定量を行った。本研究では、定規を堆積物表層からそっと差し込み、力をかけずに挿入できる深さを、浮泥層厚とした。AVS用試料については、表層約3 cmを採取し、密閉式容器に入れ、クーラーボックスに保存した。

持ち帰った試料について、アサリの定量調査用試料については、残渣物を改めて水道水で洗浄し、1 mm目合いのふるいでふるった後、ソーティング後、計数した。肥満度については、持ち帰った後、1晩ろ過海水中で胃内容を排泄させた後、軟体部をきれいに分取し、重量を測定した。肥満度は、以下の式で定義した。

$$\text{肥満度} = \text{軟体部湿重量} / (\text{殻長} \times \text{殻高} \times \text{殻幅}) \quad (5.18)$$

ここで、軟体部湿重量の単位はg、計測した長さの単位は全てmmである。

AVS測定用のサンプルは約1.5 gを取り分け、反応管内に蒸留水と共に流し込んだ。次に、反応管にガステック検知管を装着し、50 %硫酸を約2 ml反応管内に添加し、サンプルの堆積物と反応させた。発生した硫化水素ガスをガステック用吸引管で吸引し、検知管の変色範囲先端部の数値を読み取った。その後、サンプルの含水率からAVS含量を算出した。

b) 結果

本稿ではサンプル処理の都合上、震災直後となる5月3日から6月6日までの結果を示す。調査を開始した段階から、Sta. 1-3においては浮泥層厚が3-5 cmであり、その後も多少の変動はしながらも6月6日にかけて4-6 cmと横ばいであった。これに対して、Sta. 4においては調査期間を通して0-2 cmと顕著な浮泥の堆積を示さなかった(図 5.47(a))。AVSについては、Sta. 1の5月11日において0.37 mg g⁻¹と極めて高い値を記録したものの、それ以外の場合では0.005-0.081 mg g⁻¹と顕著な時空間変動は示さなかった(図 5.47(b))。

調査開始時において、アサリの密度は全地点において176 - 432 inds. m⁻²であった(図 5.48(a))。5月11日には、Sta. 1と3においては上昇傾向を示したものの、その後は全ての調査地点において密度が低下し、5月25日には96-128 inds. m⁻²に至った。同時に測定した肥満度については、調査開始時の20.0-21.1から5月18日の18.5-19.3へと低下する傾向を示し、その後は横ばいであった(図 5.48(b))。

堆積物の組成については、Sta. 1-3とSta. 4において浮泥層厚にのみ顕著な違いがあった

ものの、全ての調査地点においてアサリの密度は低下することとなった。アサリの生息密度を低下させた要因を明らかにするためには、単純な土砂流入以外の要因についても考慮する必要があると言える。

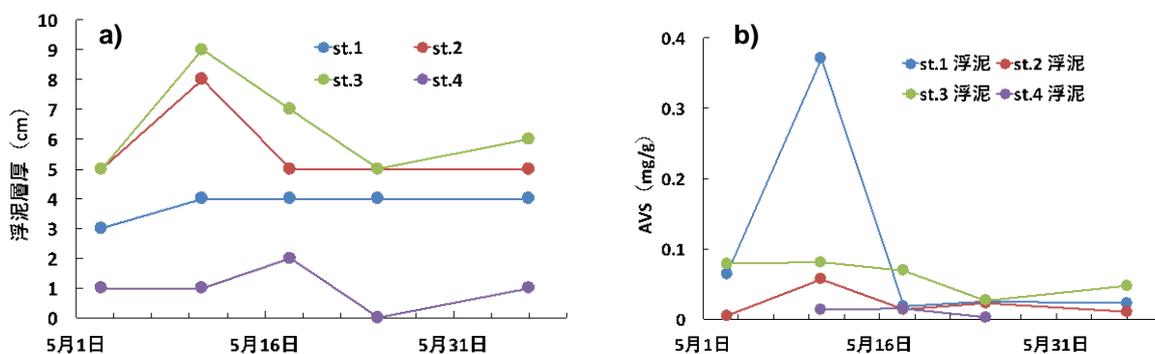


図 5.47 堆積物の (a) 浮泥層厚と (b) 酸揮発性硫化物 (AVS) の時系列変化

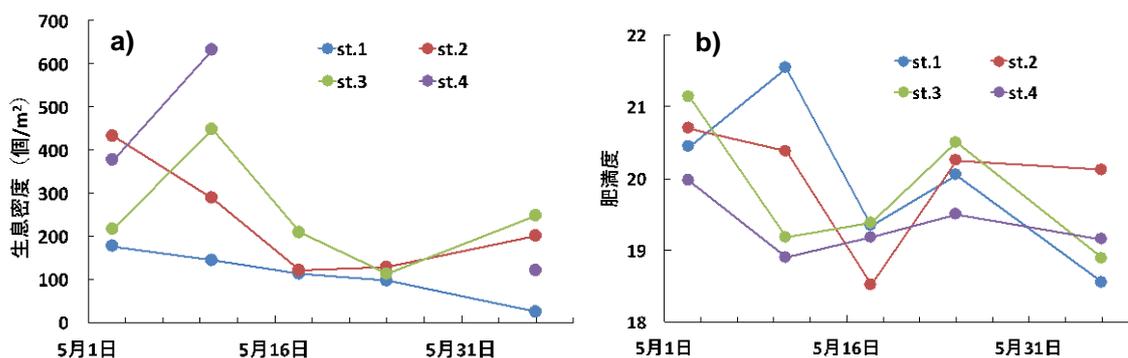


図 5.48 アサリの (a) 生息密度と (b) 肥満度の時系列変化

5.3.4 まとめ

熊本地震に起因して河道内に流入した土砂は降雨・出水期の影響を受けて大量に河口干潟へ流入・堆積し、生態系に影響を与えたことが分かった。また、地震により崩壊した土砂が上流部に残存していると考えられるため、来シーズン以降の出水においても河口干潟へ流入し生態系へ悪影響を及ぼすことが懸念される。喫緊の課題としては干潟上で行われている赤土排出対策のより効果的な実行方法を検証することが必要である。また、平成 24 年九州北部豪雨のように近年激化している豪雨災害でも将来同様の被害が生じていくことが予測される。今後のこのような被害を軽減していくために上流中流下流から海域までを含めた流域全体の土砂・流木の対策・管理体制の構築をいかに行うかが喫緊の課題である。

謝辞：

本節をまとめるにあたり，小島漁業協同組合代表理事組合長吉本勢治氏，田崎克氏，熊本県水産研究センター浅海干潟研究部内川純一氏，阿部慎一郎氏にはデータ提供を始め多くのご協力を頂きました。また，熊本県土木部河川港湾局，農林水産部漁港漁場整備課ならびに国土交通省九州地方整備局から有益なご助言やデータ提供を受けました。また，九州大学大学院修士2年森本陽介君，吉武竜馬君，学部4年生服部敬太郎君には現地調査に多大なるご協力を頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献(5.3節分)：

1) 日本野鳥の会：

<https://www.wbsj.org/nature/hogo/others/iba/search/sites/kyusyu/144-shirakawa.htm>

2) 阿部慎一郎：平成24年熊本広域大水害により河口域干潟漁場に堆積した土砂への対応，第13回全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集，pp.38-42，2014.

3) 水文水質データベース：<http://www1.river.go.jp/>

(田井明・小森田智大)

第6章 流木災害への地震の影響

6.1 熊本地震とその後の出水による流木の発生状況

国土交通省九州地方整備局によると、地震発生以降における2016年10月初旬までの白川（直轄区間）での累計の流木回収量については、**図 6.1** に示すような状況であった。地震後から梅雨期に入るまでは最も土砂流出が大きかった立野地区での回収が多かった。

5月31日の段階で九州地方整備局と熊本県は、白川水系の河川管理体制の強化を始めた。流木については、直轄区間で河川巡視（1回/2日）と監視カメラ（20台）により監視し、撤去を随時行える体制を作った。県管理区間も同様に、河川巡視（1回/2日）と監視カメラ（7台）により監視した。〔九州地方整備局(2016a)〕

第2章でも触れたとおり、6月20～21日の出水により流下したと推測される流木が直轄区間に大量に集積したと推測される。実際に、白川の明午橋（直轄区間、13k800付近、**写真 6.1**）には流木が集積したため6月22日に緊急撤去作業が24時間体制で行われ、23日までに約300空 m^3 の撤去を完了した。県管理区間の吉原橋では、6月23日までに約50空 m^3 が撤去完了した。〔熊本河川国道事務所(2016a,b)、九州地方整備局(2016b)〕さらに、大甲橋（13k200付近、**写真 6.2**）にも集積が見られ、6月30日に撤去作業が行われている〔熊本河川国道事務所(2016c)〕。なお、白川での期間内の総回収量は、**図 6.2** に示す橋梁で約8,000空 m^3 と見積もられている〔九州地方整備局(2016d)〕。

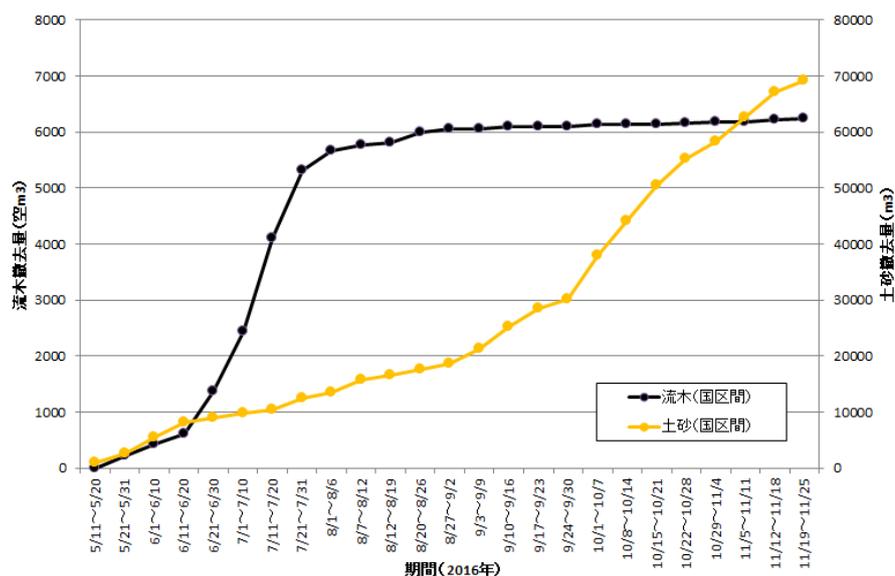


図 6.1 熊本地震発生後の白川での流木・土砂の累積撤去量（2016年，期間毎）
〔九州地方整備局河川管理課調べ〕



写真 6.1 明午橋での流木集積状況 (2016年6月21日) [熊本河川国道事務所(2016a)]



写真 6.2 大甲橋での流木集積状況 (2016年6月) [熊本河川国道事務所(2016c)]

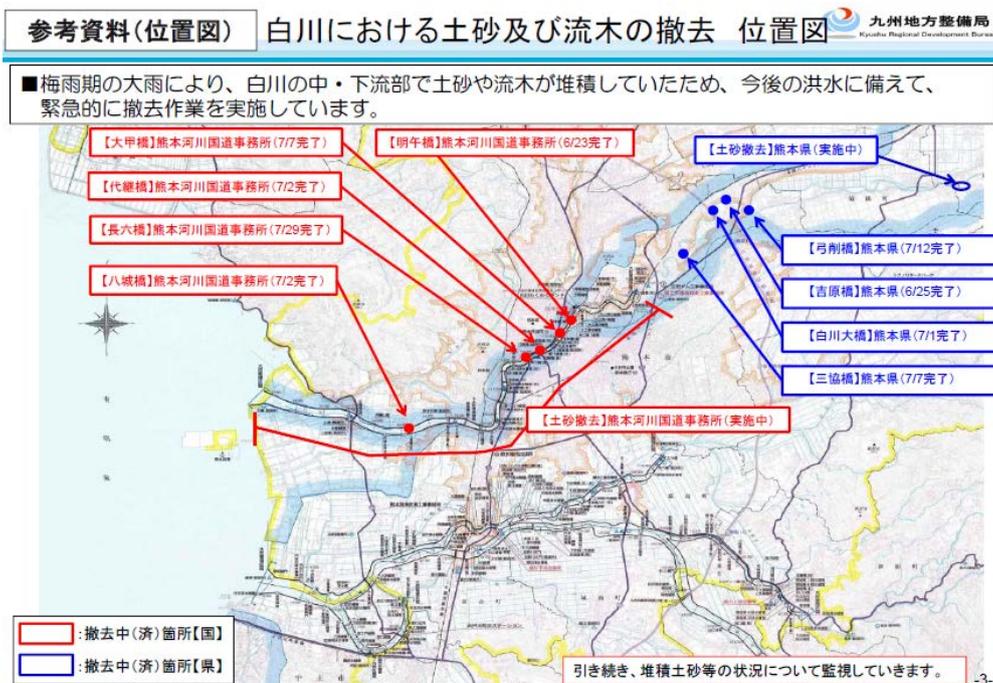


図 6.2 白川の流木撤去状況 (2016年8月) [九州地方整備局(2016c)]

一方、白川は有明海に流れ込むが、途中の橋梁等で捕捉されなかった流木は有明海まで流出することになる。九州地方整備局では、有明海や八代海へ流出した流木等の漂流ゴミを海洋環境整備船「海輝」・「海煌」が回収している。熊本地震後の有明海における両船の流木回収量データをまとめたものが図 6.3 である。白川での撤去状況と同様に、6 月 20～21 日の出水に起因して流出したと推測される流木の回収量が急激に増加しているのが分かる。期間内の総回収量は 212m³と見積もられている。平成 24 年 7 月九州北部豪雨における有明海での流木回収量は 513m³であった〔九州地方整備局調べ〕ことから、今回は白川のみで多数の河川から流出した九州北部豪雨の 4 割程度の流出量があったと見込まれる。また、県管理港湾（熊本港、百貫高など）や県管理海岸での回収量は約 19,000 空 m³に上っている〔九州地方整備局(2016d)〕。

このように、熊本地震とその後の出水により白川水系では流木の流出が起きていることが確認できた。本章では、熊本地震により流木リスクがどの程度影響を受けたのかについて、以下で可能な限り推定することを試みる。

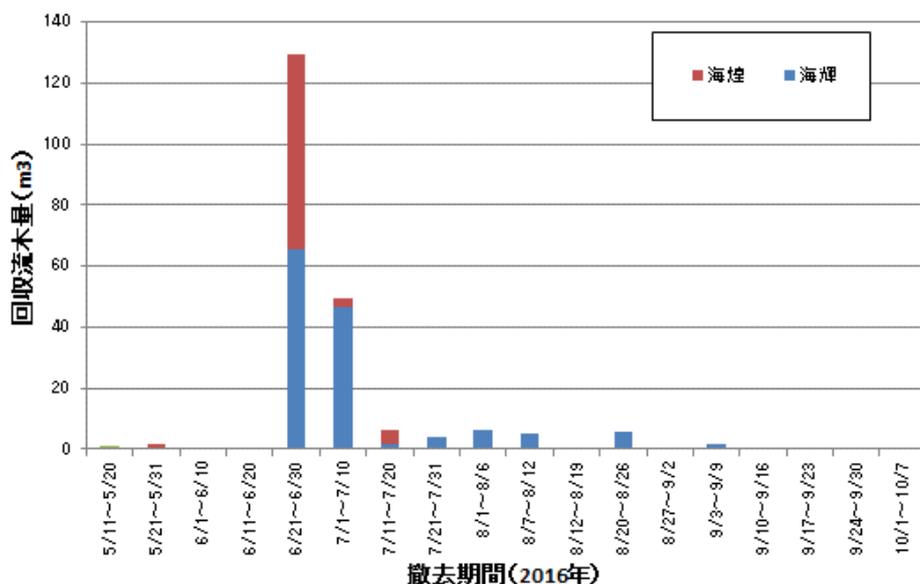


図 6.3 熊本地震発生後の有明海での流木撤去量（2016 年，期間毎）
〔九州地方整備局港湾空港部調べ〕

6.2 白川水系における一般的な流木リスクの推定

熊本地震に起因する流木発生量を議論する前に、一般的な豪雨で発生する斜面崩壊を起源として発生しうる最大流木量に相当する流木発生ポテンシャルを、矢野ら(2016)による評価法を白川流域（図 6.4）に適用して推定を試みた。白川の流域面積は 480km²、幹川延長は 74km である。

ここでは、評価法の詳細は述べないが、樹林分布、各斜面の最大勾配、各斜面と河道との距離、ならびに各斜面の面積の情報から GIS 上で計算して流木の供給可能箇所（図 6.5）を抜き出し、河道上の任意地点上（ここでは、流域内の全橋梁 617 地点のうち地震で調査



図 6.4 白川流域



図 6.5 白川流域における流木供給可能箇所

できないものとクリアランスが明らかに大きく流木の集積による影響が発生しないものを除いた 549 橋梁を対象とした) における流木発生ポテンシャルを算出した (図 6.6). 白川下流端位置における流木発生ポテンシャルは約 8,140m³ と見積もられた. また, その情報を用いて, 対象橋梁の諸元を現地踏査で測定し, 各橋梁への相対的な集積リスク (矢野ら(2016)の評価法における定数 $k=10$ の場合) を評価した (図 6.7). 図 6.2 で示された流木撤去が行われた橋梁のうち, 弓削橋, 吉原橋, 明午橋が高く評価されている. また, 上位 2 位に位置している森橋では現地踏査の時点で流木の小規模な集積が確認された (写真 6.3).

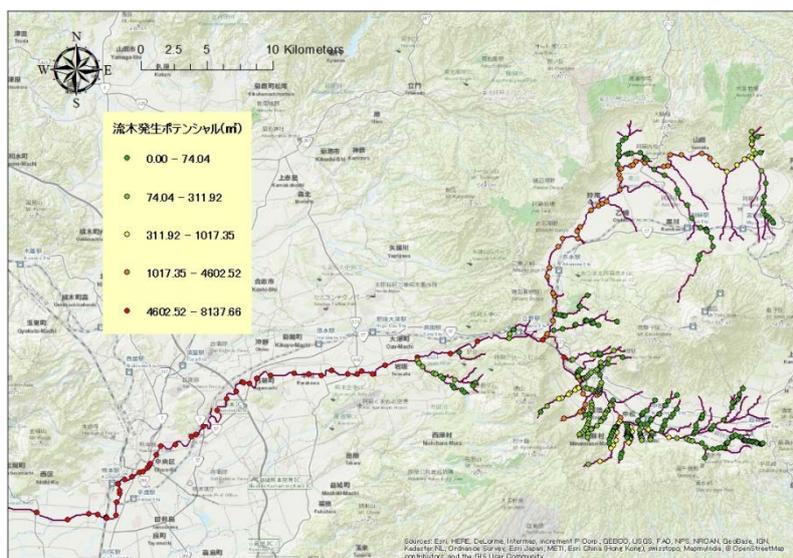


図 6.6 白川流域における流木発生ポテンシャルの分布

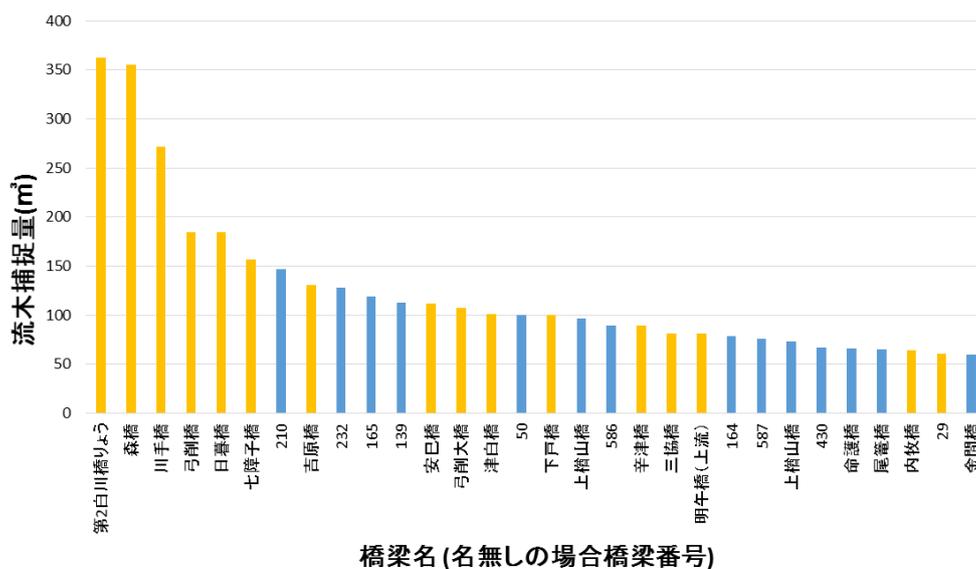


図 6.7 白川流域の橋梁における相対的な流木捕捉量分布

(上位 30 橋梁. 白川本川上で, 立野より下流に位置する橋梁を黄色で示す.)



写真 6.3 森橋における流木集積（2016 年 10 月撮影）

6.3 白川水系における熊本地震による流木発生量の推定

次に、今回の地震に起因して崩落した斜面について調べた。当初、地震前後で測定された LP データを入手し、崩落土量を推定することで流木発生量の推定を試みたが、森林の LP データにおける樹高の推定が困難であったため、次の方法で崩壊箇所の特定を行った。国際航業株式会社が HP で公開している航空写真から得られた熊本地震による斜面崩壊箇所図(2016年4月21日現在の情報。URL: http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201604_kumamoto/index.html (2017年2月現在))を GIS 上に読み込み(図 6.8)、6.2 で整理した森林情報と斜面位置と河道との関係を考慮し、流木供給可能箇所を特定した(図 6.9)。阿蘇地方の白川流域において、斜面位置と河道との距離が比較的離れている箇所が多く、かなりの面積が流木供給可能箇所から除外された。具体的には、地震による斜面崩壊箇所の総面積が 1.58km^2 であったのに対して、それらのうち流木供給が可能な箇所の総面積が 0.27km^2 となり、17.3%しかなかった。

地震崩壊箇所から得られた流木供給可能箇所の分布(図 6.9)と、6.2 で得られた一般的な豪雨により流木が供給可能な箇所の分布(図 6.6)をオーバーラップし、重ならない箇所を抜き出した(図 6.10)。その結果、地震の影響のみによる発生箇所の総面積が 0.15km^2 、であり地震により流木が供給可能な面積の約 55%であった。また、それらから得られた白川下流端位置における推定流木発生量はそれぞれ 202m^3 と 110m^3 と見積もられ、面積比と同じ 55%が今回の地震により上乘せされた流木量と見積もられた。ちなみに、地震で崩壊した箇所全体から流木が供給された場合の推定流木発生量は 310m^3 であった。

今回推定された流木発生量は、斜面から流出する量を推定したものであるが、6.1 で紹介

している行政により撤去された流木量である（橋梁撤去分）8,000 空 m³+（有明海上回収分）212 空 m³+（有明海海岸・港湾回収分）19,000 空 m³=約 27,200 空 m³よりかなり小さい量となっている。これは、いくつかの原因が考えられる。一つは、6月の出水により新たに発生した斜面崩壊が想定されること。また、過去の倒木・間伐材などの流出が出水時に発生した可能性があること。さらに、白川の河畔林の崩壊に起因した流木流出が見込まれること、などがあげられる。今回、これらの可能性ある部分については調査が出来なかったもので、これらについては今後引き続き調査し、改めて報告する機会を得たい。



図 6.8 白川流域における熊本地震による斜面崩壊箇所の分布 [国際航業調べ]



図 6.9 白川流域における熊本地震による流木発生可能箇所の分布



図 6.10 白川流域における熊本地震のみの影響により流木が発生したと推測される箇所の分布

6.4 まとめ

白川流域における熊本地震に係る流木発生に関する情報をとりまとめた。白川流域における流木発生ポテンシャルの評価を行い、各橋梁の相対的な流木捕捉量の評価を試みた。その結果、実際の被災状況と定性的には類似の評価結果を得ることができた。

さらに、熊本地震による斜面崩壊箇所から地震の影響により上乘せされたと見込まれる流木発生量を評価した。これより、地震により流木リスクの上乗せが発生していたと見積もられた。

ただし、今回の評価においては情報不足の面もあり、実際の回収量と比べて少ない流木発生量となっていた。今後は、これらの違いの原因を特定し、地震に起因する流木発生リスクの評価を行い、直下型地震による流木発生への対応についても検討したい。

謝辞：

熊本地震に起因した流木災害リスクを調査するにあたり、国土交通省九州地方整備局河川管理課、同局熊本河川国道事務所、熊本県土木部砂防課には、災害後にもかかわらず早くデータ等の提供をいただいた。また、一般的な流木災害リスクの判定において必要なデータについては、熊本県農林水産部にデータの提供をいただいた。本章で取り扱った調査については、九州大学工学部環境流体力学研究室の土橋将太君（修士2年）、富田浩平君（修士1年）、楊東さん（修士1年）、竹村大君（学部4年）、松野下平君（学部4年）に協力い

ただいた。ここに記し、感謝の意を表する。

参考文献：

- 1) 国土交通省熊本河川国道事務所：白川の明午橋等に堆積している流木の撤去に着手, URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/kumamoto/newsttopics_files/k160623_01.pdf (2017年2月現在), 2016a.
- 2) 国土交通省熊本河川国道事務所：白川の明午橋等に堆積していた流木の撤去作業が完了, URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/kumamoto/newsttopics_files/k160623_04.pdf (2017年2月現在), 2016b.
- 3) 国土交通省熊本河川国道事務所：白川の大甲橋に堆積している流木の撤去に着手します!, URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/data_file/1467286376.pdf (2017年2月現在), 2016c.
- 4) 国土交通省九州地方整備局：白川水系における河川管理体制の強化について, URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/kumamoto/newsttopics_files/k160531.pdf (2017年2月現在), 2016a.
- 5) 国土交通省九州地方整備局：白川水系における河川管理体制の強化について(第4報), URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/kumamoto/newsttopics_files/k160624_02.pdf (2017年2月現在), 2016b.
- 6) 国土交通省九州地方整備局：白川水系における河川管理体制の強化・有明海等の流木等の撤去の取組について(第5報), URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/data_file/1470728879.pdf (2017年2月現在), 2016c.
- 7) 国土交通省九州地方整備局：白川水系における河川管理体制の強化・有明海等の流木等の撤去の取組について(第6報), URL. http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/data_file/1480467585.pdf (2017年2月現在), 2016d.
- 8) 矢野真一郎, 土橋将太, 堂菌俊多, 笠間清伸, 北隆範：流木発生ポテンシャルの概念に基づく花月川の橋梁における流木災害リスク評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_289-I_294, 2016.

(矢野真一郎・木村延明)

第7章 水力発電施設への地震の影響

7.1 はじめに

熊本県熊本地方において2016年4月14日21時26分以降に発生した一連の地震により、河川やため池などの水系に沿って存在する土木構造物においても被害が生じた。特に、阿蘇カルデラに端を発し、火山砕屑物が地表に厚く堆積する白川水系の上中流域では、土砂崩壊が多発して多くの犠牲者が生じる事態となり、水力発電施設に大きな被害を及ぼしたほか、河川へ流入した土砂が河道を閉塞し、河積を阻害するなど、洪水による二次被害のリスクをも高める事態ともなった。

本報では、国土交通省、通商産業省などの所轄官公庁や九州電力が発表した資料をもとに、今回の地震に伴う土砂崩壊が水系に及ぼした影響を水位観測記録（国土交通省、<http://www1.river.go.jp/>）から概観するとともに、水力発電施設の自然災害による被災に関する既往論文、資料をレビューした後、熊本地震で発生した水力発電施設被災の状況について分析、考察する。

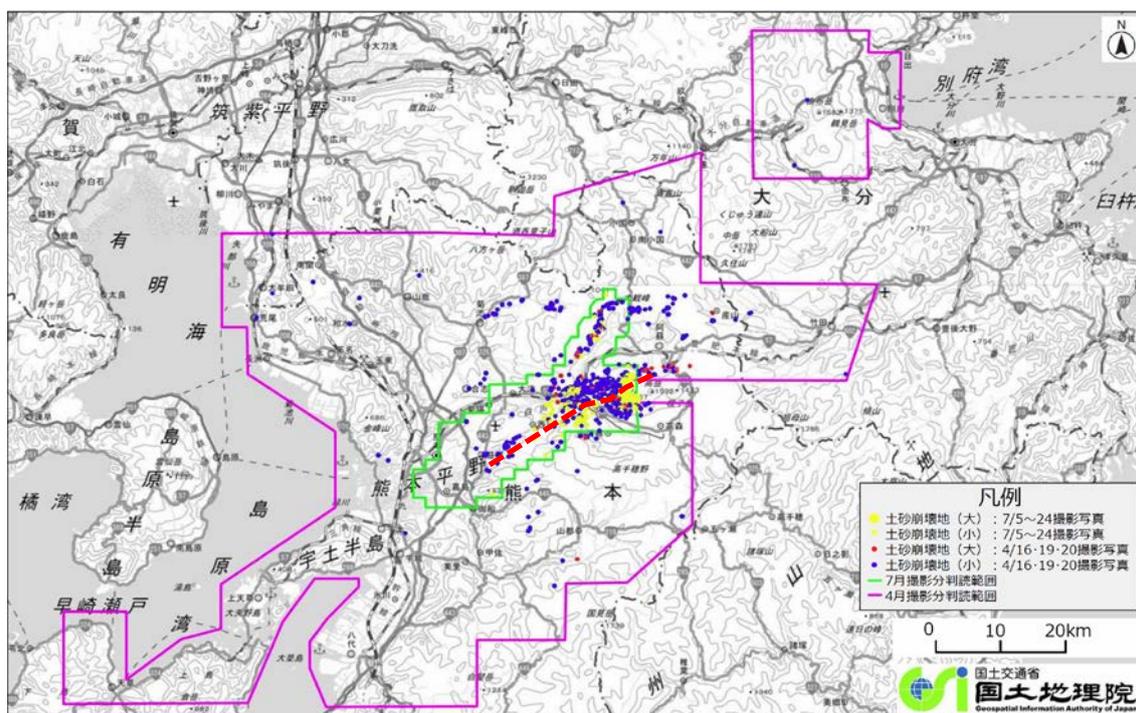


図 7.1 航空写真判読による土砂崩壊地分布図（国土交通省国土地理院（2016a）に加筆）
（赤破線は、地震調査研究推進本部を参考に活断層帯の一部（布田川断層帯布田川区間）
を表示。土砂崩壊地（大）は約 1 ha 以上、土砂崩壊地（小）は約 1 ha 未満の規模。）

7.2 多発した土砂崩壊とその水系への影響

国土交通省水管理・国土保全局砂防部（2016c）によれば、熊本地震で発生した土砂災害は熊本県ほか九州 5 県で 190 件に及び、その内訳は土石流等 57 件、地すべり 10 件、がけ崩れ 123 件であった。また、人的被害（死者 10 名、2016 年 6 月の梅雨前線豪雨による犠牲者含まず）は、崩壊地が密集した南阿蘇村で生じており、阿蘇山のカルデラ内の火の鳥温泉地区で 2 名、高野台地区で 5 名、黒川合流後の白川に流入する立野川地区で 2 名、阿蘇大橋地区で 1 名の内訳となっている。今回の土砂災害については、大規模な斜面崩壊、緩傾斜地の崩壊、土石流、がけ崩れなど、多様な土砂移動現象によって特徴づけられている（国土交通省水管理・国土保全局砂防部、2016c）。

図 7.1 には、国土交通省国土地理院（2016a）がまとめた熊本地震で発生した土砂崩壊の分布図を示す。ここでの土砂崩壊は航空写真判読によっていることから、土石流、地すべり、がけ崩れなどの違いを考慮していない。同図に併記した赤破線は、今回の地震の震源の一つであった布田川断層帯布田川区間を示すが、土砂崩壊地の多くは白川上中流域に集中し、この活断層帯に沿って出現していた。このことから、多くの土砂崩壊地が活断層の上層に厚く堆積した火山砕屑物（ヨナと呼ばれる）が崩れたことによるものと考えられる。

数ある土砂崩壊地の最大のもの、阿蘇カルデラへの玄関口であった国道 57 号線の阿蘇大橋（南阿蘇村）周辺に位置した（国土交通省水管理・国土保全局砂防部、2016a）。この地区の土砂崩壊は、一時的に白川の河道閉塞を引き起こしたものと推察されている（国土交通省、2016）。そこで、図 7.2 には、地震が発生した 2016 年 4 月における白川の水位と雨量の時間変化を示す。ここで作図に用いたデータは、全て水文水質データベース（国土交通省）から入手したもので、順流区間に位置する代継橋（河口から 12.15 km）、子飼橋（同 14.5 km）、陣内（同 36.05 km）、立野（同 45.15 km）、妙見橋（同 49.26 km）の各水位観測所の速報値をもとに、便宜的に 1 枚の図面に併記できるように調整した相対高さを表す。なお、図中には、各水位観測所の参照データとなっている湯ノ谷観測所（南阿蘇村長野地区）の時間

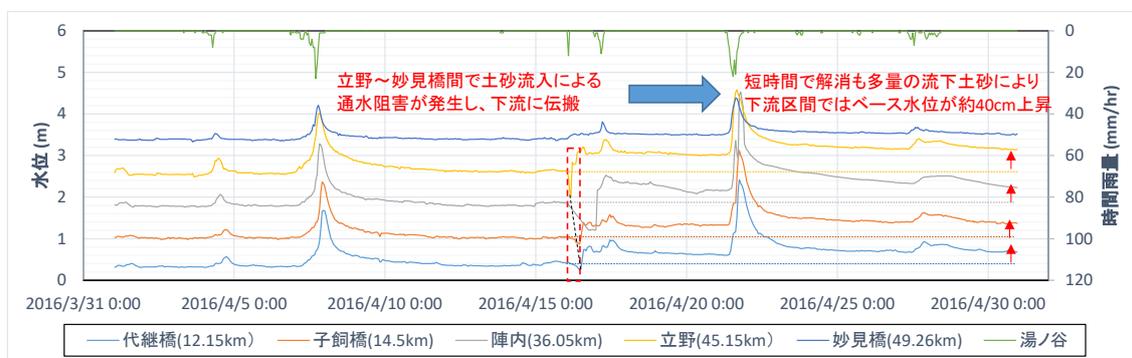


図 7.2 2016 年 4 月における白川 5 地点の水位の時間変化と湯ノ谷地点における時間雨量
（国土交通省水文水質データベースより作成）

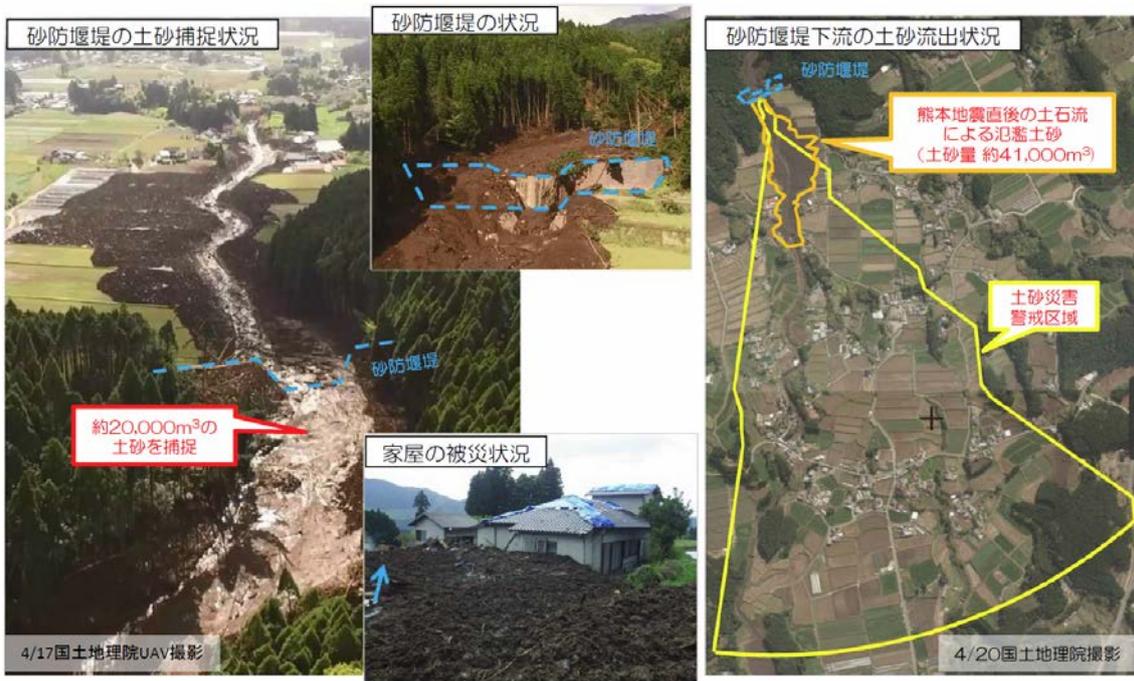


図 7.3 崩壊土砂が土石流化して下流まで流出した事例（白川上流・山王谷川地区）
 （出典：国土交通省水管理・国土保全局砂防部，2016c）

雨量を併記した。図中にマークした急激かつ不自然な水位の変化は、前記した崩壊土砂の流入に伴って生じた河道閉塞とその後の自然解消を反映したものと推察される。土砂崩壊地点に近い立野地点と、その下流地点の水位変化から、益城町、西原村で震度 7 が記録された本震発生（図中では 4 月 16 日午前 2 時）以降、水位の急変が時間遅れを伴って下流へ伝播した様子が確認できる。河道閉塞や天然ダムとその決壊は、蓄えた位置エネルギーを土石流という形で一気に解放することから、従来、被害が激甚化する要因になってきた。この時点の前後における水位の挙動を見るに、地震後の多量の崩壊土砂の流入は河床上昇を引き起こし（国土交通省九州地方整備局・熊本県土木部，2016），各地点の水位の基底値を 40～60cm 程度上昇させた可能性が推察された。今回の立野地区では、天然ダム決壊に至る前の段階で河道閉塞が自然解消されたことは不幸中の幸いであったが、上流の山王谷川地区では、地震で崩壊した土砂が小規模ながら降雨（4 月 21 日）によって土石流化し、2 棟の家屋が全壊した事例が報告されている（国土交通省水管理・国土保全局砂防部，2016c，図 7.3）。なお、地震後の出水期にも、土砂災害が 65 件（土石流等：17 件，がけ崩れ：48 件）発生し、死者 5 名に及ぶ被害が生じた。これらは地震による地盤の改変が素因、豪雨が誘因となって生じた可能性があり、今後しばらくは監視が必要な状況と言えよう。なお、この際、白川水系を始めとする 11 河川では、水防警報、洪水予報の基準水位が引き下げられるなどの早期警戒体制が構築され、河川内の堆積土砂の除去が緊急的に実施された。その効果もあって、下流域の市街地での大きな浸水被害が無かったことは特筆に値する。

7.3 水力発電設備被災に関する既往事例の分析

水力を含む発電設備の事故・災害は、経済産業省（旧：原子力安全・保安院，現：商務流通保安グループ）に報告され、毎年発行の電気保安統計に集約されている。図 7.4 には、インターネット上で参照可能な 3 ヶ年分の電気保安統計（経済産業省原子力安全・保安院電力安全課，2002；2006；経済産業省商務流通保安グループ電力安全課・独立行政法人製品評価技術基盤機構，2016）から作成した，水力発電施設の発生事故件数と事故率（件数/100 万 kW）を示す。なお，平成 14 年度以前の電気保安統計（経済産業省原子力安全・保安院電力安全課，2002；2004）には，事故原因（設備不備，保守不備，自然現象，故意・過失，その他）の内訳が記載されていることから，そこから 10 年間遡った期間における水力発電施設の原因別事故率とその設備量を図 7.5 に示す。ここで，図 7.4 の事故率と図 7.5 におけるその合計値は本来一致すべきだが，経済産業省原子力安全・保安院電力安全課（2006）が指摘するように，データ様式の変更に起因する不整合が 1998～2002 年に見られた。

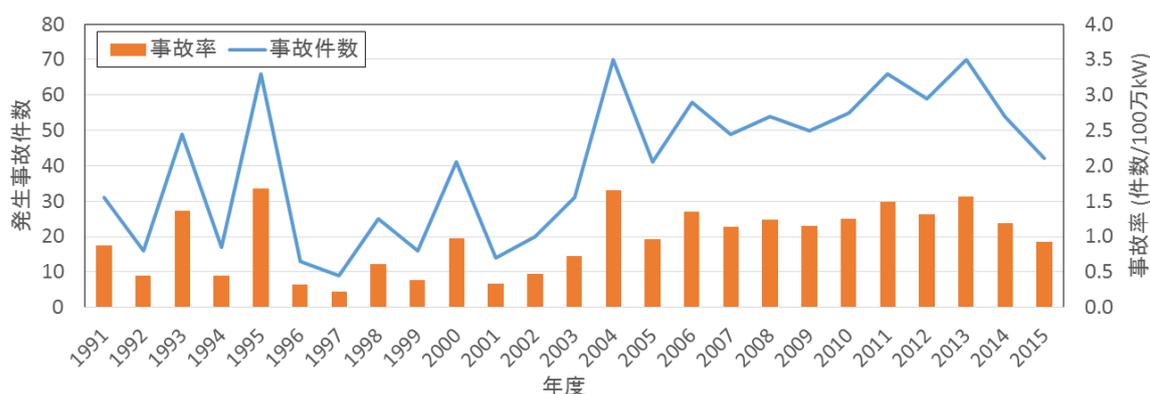


図 7.4 最近 25 年間における水力発電施設の事故件数，事故率の経年変化
 （データ出典：経済産業省原子力安全・保安院電力安全課，2002；2006；経済産業省商務流通保安グループ電力安全課・独立行政法人製品評価技術基盤機構，2016）

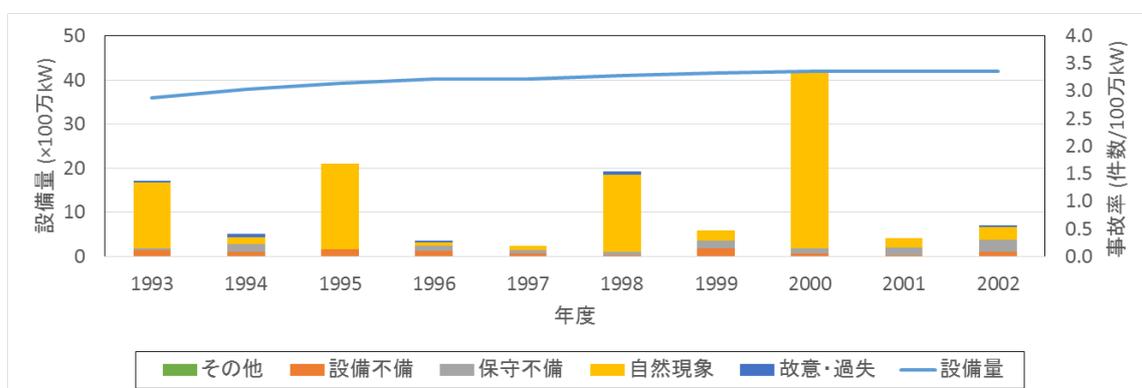


図 7.5 過去 10 年間における水力発電施設の原因別事故率と設備量の経年変化
 （データ出典：経済産業省原子力安全・保安院電力安全課，2004）

水力発電施設に関しては、事故率の高い年の原因の多くが自然現象であることから（図 7.5）、発生した事故の多くは自然災害に起因するものと考えられた。両図の対象とした 1991 年以降、前線や台風に伴う水害・土砂災害は枚挙に暇がないが、国土交通省水管理・国土保全局河川計画課（2016）において全国的に水害被害額の大きな年（1991, 1998~2000, 2004, 2011 年）には、水力発電施設の事故件数も多くなる傾向が見受けられた。一方、これに該当せず事故が多かったケースに関しては、1993 年度には九州南部で豪雨に伴う土砂災害が頻発したこと、1995 年度には梅雨前線に伴う広域的な豪雨により、信越地方では河川からの洪水流が氾濫し、土砂災害が頻発したことが影響した可能性があると考えられる。水力発電施設の災害事例を収集し分析した梶谷ら（2011）は、2000 年 9 月の東海豪雨によって被災した設備の多さを指摘し、経済産業省商務情報政策局商務流通保安グループ電力安全課（2014a）は、2011 年 7 月の新潟・福島豪雨による阿賀野川水系の水力発電施設の被害状況をまとめている。これらの報告は、集中豪雨が水力発電施設の主たる被害要因であることを示すもので、今回の整理を裏付ける結果と言えよう。

ところで、安福・中村（1985）は、水力発電所における大規模災害の事例として、1983 年 9 月の大洪水と 1984 年 9 月の長野県西部地震が相次いで作用した、木曾川水系王滝川の被災状況を紹介している。ここでの大洪水は木曾川における既往最大級のもので多くの発電所を浸水させたほか、直下型地震で発生した「御嶽崩れ」は約 3,600 万 m^3 もの土砂を流出し、取水・導水施設が張り巡らされた支川の谷を 30~40 m もの厚さで埋め尽くし、甚大な被害を生むこととなった（田代，2016）。この現場では、洪水、地震といった二大自然災害が連続して襲来したが、幸いにも地震動がダム の 堤体を損傷させたり、貯水池周辺の地山が地すべりを起こしたりすることは無かった。また、2011 年 3 月の東日本大震災においても、水力発電施設について深刻な被害は認められなかった（総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会，2012）。しかしながら、強震動によってダムが決壊したり、大量の土塊が湛水域に流入する際に生じる段波がダムを越流したりする可能性は否定できず、こうした事象が発現するとさらに被害が激化するものと考えられる。以上に鑑み、（熊本地震以前の）水力発電設備の自然災害対策は主としてダムを対象とし、(1) L2 強震動に対するダムの耐性、(2) 集中豪雨に伴う洪水流に対する耐性、(3) 大規模地滑りに対する耐性について検討されていた（経済産業省商務情報政策局商務流通保安グループ電力安全課，2014a；2014b；電気事業連合会・電源開発株式会社，2014；電気設備自然災害等対策ワーキンググループ，2014）ものと考えられる。このうち、(1)については、「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」（経済産業省原子力安全・保安院，2012；柏柳ら，2012）が策定される一方、ダム の 地震動に対する耐力等を評価する取り組みを支援する「再生可能エネルギー発電設備耐力調査費補助金」（経済産業省商務情報政策局商務流通保安グループ電力安全課，2014a）制度が導入されるなど、実効性を高めるべく施策が展開されている。一方、(2)、(3)については、電気設備事業連合会・電源開発株式会社（2014）により、各貯水池で 200 年確率洪水流量を新たに推定したうえで、ダムから安全に流し得るかの数値的

検討や貯水池周辺の地山を監視中の既設ダムにおける情報収集・分析が実施されている。ただし、これらの活動を担ってきた、(経済産業省産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会)電気設備自然災害等対策ワーキンググループでは、熊本地震の被災状況分析(7.4で後述)を優先している現状が見受けられる。今後はその成果も踏まえた検討が進むと思われるが、「河川構造物の耐震性能照査指針」(国土交通省水管理・国土保全局治水課, 2012)や「貯水池周辺の地すべり調査と対策に関する技術指針(案)」(国土交通省河川局治水課, 2009)などの既往知見を参照しながら、設備損壊を可能な限り低減する取り組みを効率的に進める必要があると考えられる。さらに、万一、水力発電施設が損壊した場合に備えて、損壊リスクの分析・評価を適切に進めることにより(梶谷ら, 2011; 東電設計, 2015)、社会的影響を制御しながら早期に復旧・復興していく計画(例えば, 土居ら, 2013)を予め策定しておくことが望まれる。

7.4 熊本地震による水力発電施設被災

本節では、九州電力(2016a; 2016b; 2016c)、九州電力熊本支社(2016)と黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会(2016)をもとに、九州電力の所有する水力発電施設を対象として熊本地震による被災状況を考察する。熊本地震においては、4月14日21時26分に発生した前震(益城町で震度7)では発電所の設備被害は確認されなかったが、同16日1時25分に発生した本震(益城町、西原村で震度7)の影響により、発電所9カ所で被害が発生した(九州電力, 2016a; 2016b)。表7.1には、九州電力(2016b)の資料から、前震以降の一連の地震において震度5弱以上の強震動を受けた水力発電所数と、地震により被災した発電所数を合わせて示す。表より、合わせて68もの発電所(九州電力の所有する水力発電所数の約48%)に強震動が作用し、そのうち、震度5強以上が作用した9発電所(13.2%)で被害が生じたことが分かる。なお、被害を受けた設備は12カ所におよび、その内訳は、堤体天端が一部沈下したダムで1カ所のほか、導水路で6カ所、水槽、水圧管路で各1カ所であった(九州電力, 2016b)。ダム堤体の沈下は安全性に大きな影響及ぼすものでは無く、この他の被害は地震に伴って発生した崩壊による地形変化や土砂移動が原因と考えられる。7.2で前記したように、土砂崩壊は南阿蘇村を流れる白川水系の周辺に集中したが、最も被害の大きかったのは、震度6強の地震動が作用したとみられる、黒川第一発電所(導水路埋没、水槽一部破損、図7.6)であった。

表7.1 熊本地震により強震動を受けた水力発電所とその被災状況(出典:九州電力, 2016b)

震度	5弱	5強	6弱	6強	7	計
被災発電所数	0	4	3	2	0	9
発電所数	20	24	21	3	0	68



図 7.6 黒川第一発電所の各施設

(上段：取水堰（左 5/30，右 11/25 撮影），下段左：導水路と沈砂池，同右：水圧管路）

水力発電所データベース（電力土木技術協会，<http://www.jepoc.or.jp/hydro/>）によると，黒川第一発電所は 1914 年に運転を開始した施設で，上流の黒川に設置された黒川第一取水堰（流域面積 197.8 km²）から取水した水（最大 20.30 m³/s）を，244.9 m の有効落差で白川に放流する，調整池－水路式の発電所（最大出力 42,200 kW）である．白川の流域面積 480 km² に対し（国土交通省九州地方整備局・熊本県，2002），その約 4 割の流域から集水していることに加え，発電最大使用水量を流域面積で除す「取水比流量」（田代ら，2017）は 0.103 m³/s/km² で，この地域の湧水比流量（約 0.02 m³/s/km²，虫明，1978）と比べても断然大きい．1985 年に現在の取水量，発電出力を有するよう再開発されて以降（津城ら，1986），周辺に南阿蘇村湧水群を有する地域性を加味しても非常に高度な水利用を行っていると言える．

熊本地震では，4 月 16 日の本震後に発生した，阿蘇大橋地区と立野川地区の 2 ヲ所の大規模斜面崩壊（国土交通省水管理・国土保全局砂防部，2016a；2016b）が黒川第一発電所に

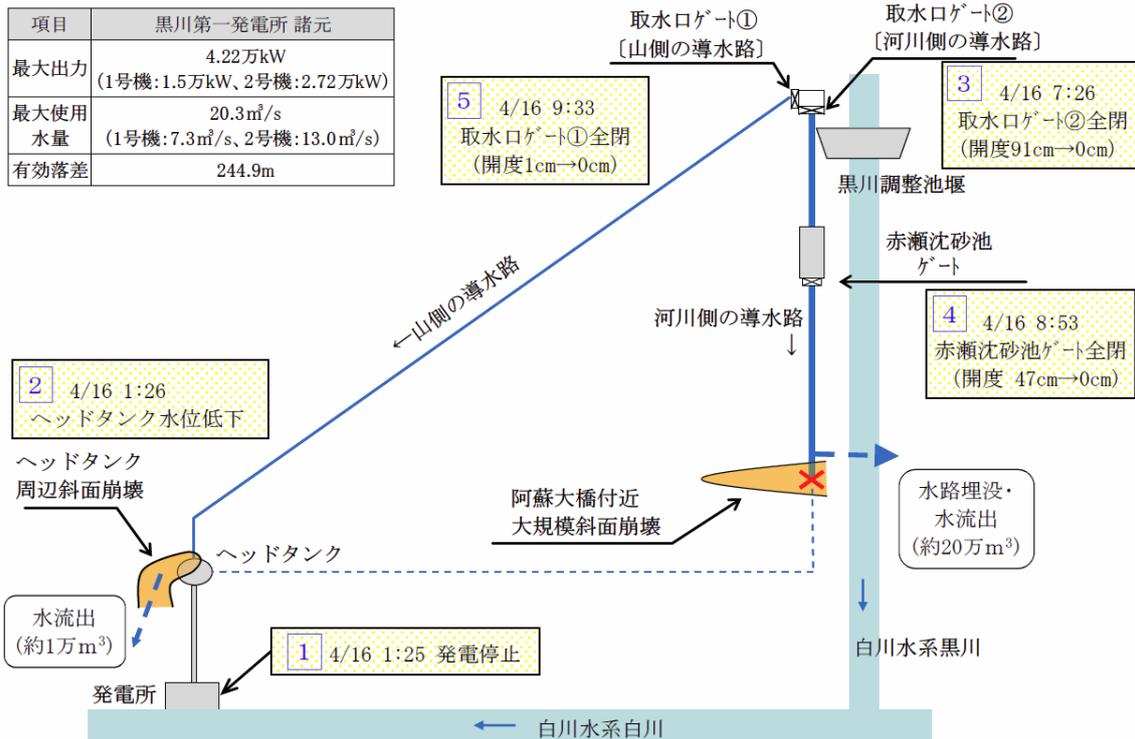


図 7.7 黒川第一発電所の概略図と施設損壊と対応の経緯
(出典：黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会，2016)



図 7.8 熊本地震前後の黒川第一発電所ヘッドタンク周辺における景観の変化
(左 4/15 時点：Google earth 提供，右 5/31 時点：防災科学技術研究所提供)

被害を及ぼした。図 7.7 には、黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会（2016）によりまとめられた、各種発電施設の損壊と対応の経緯を示す。特に、ヘッドタンク（水槽）周辺の立野川地区では、地すべりによって大きく地形が改変して導水路や水槽などの設備が損壊し、発電用水が周辺の崩壊土砂とともに下方に位置する南阿蘇村新所区に流入することによって、死者 2 名が発生する事態となった（国土交通省水管理・国土保全局砂防部，2016b；2016c）。図 7.8 には発災前後におけるヘッドタンク周辺の斜め写真を、図 7.9

には、発災前後における黒川第一発電所周辺の空中写真（地理院地図：で作成）を示す。

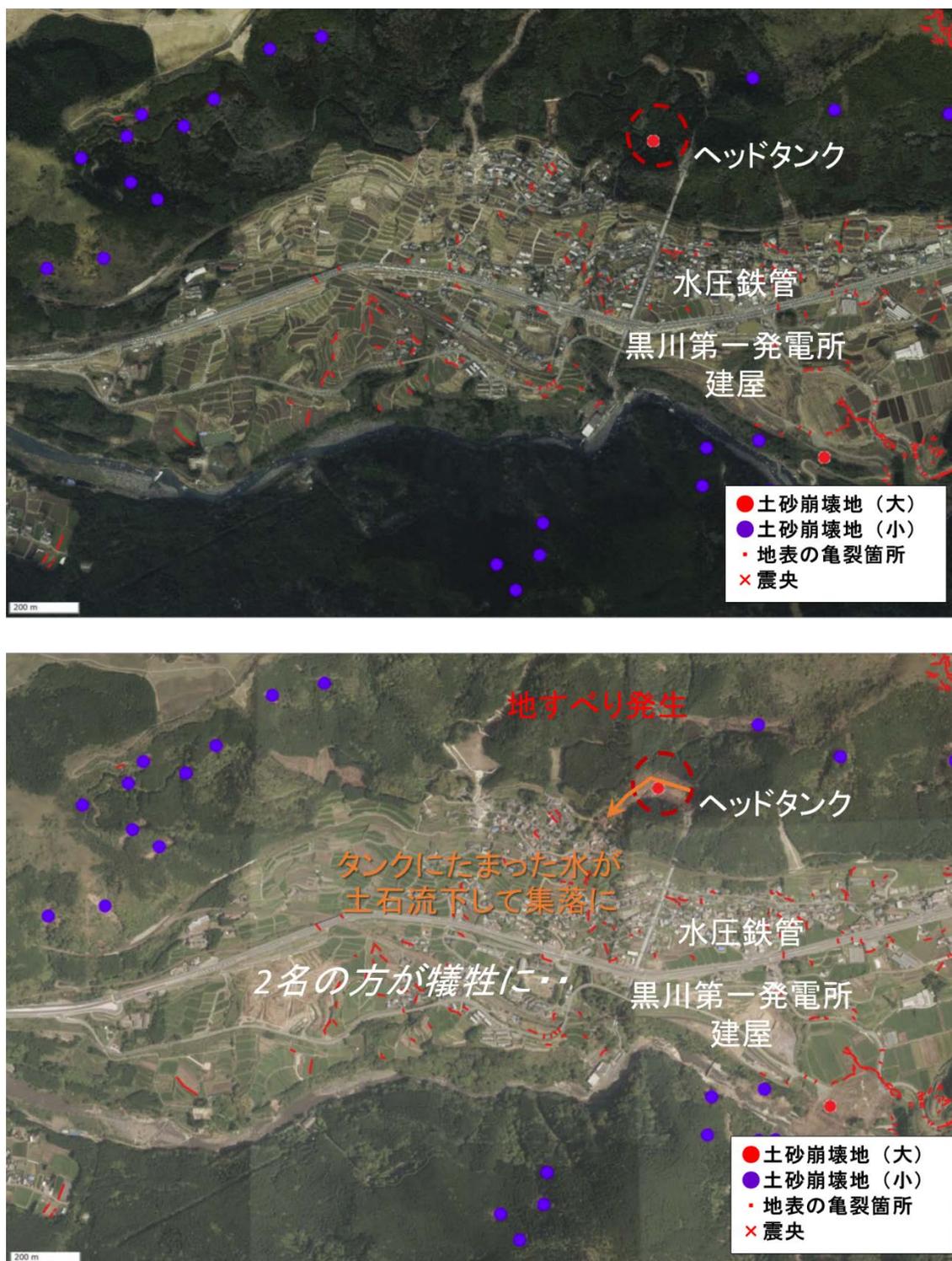


図 7.9 熊本地震前後の黒川第一発電所周辺における空中写真（出典：地理院地図～空中写真，平成 28 年熊本地震土砂崩壊地，地表の亀裂，震央を表示）

（上：簡易空中写真（地震前），下：平成 28 年熊本地震西原 2 地区正射画像（4/20））

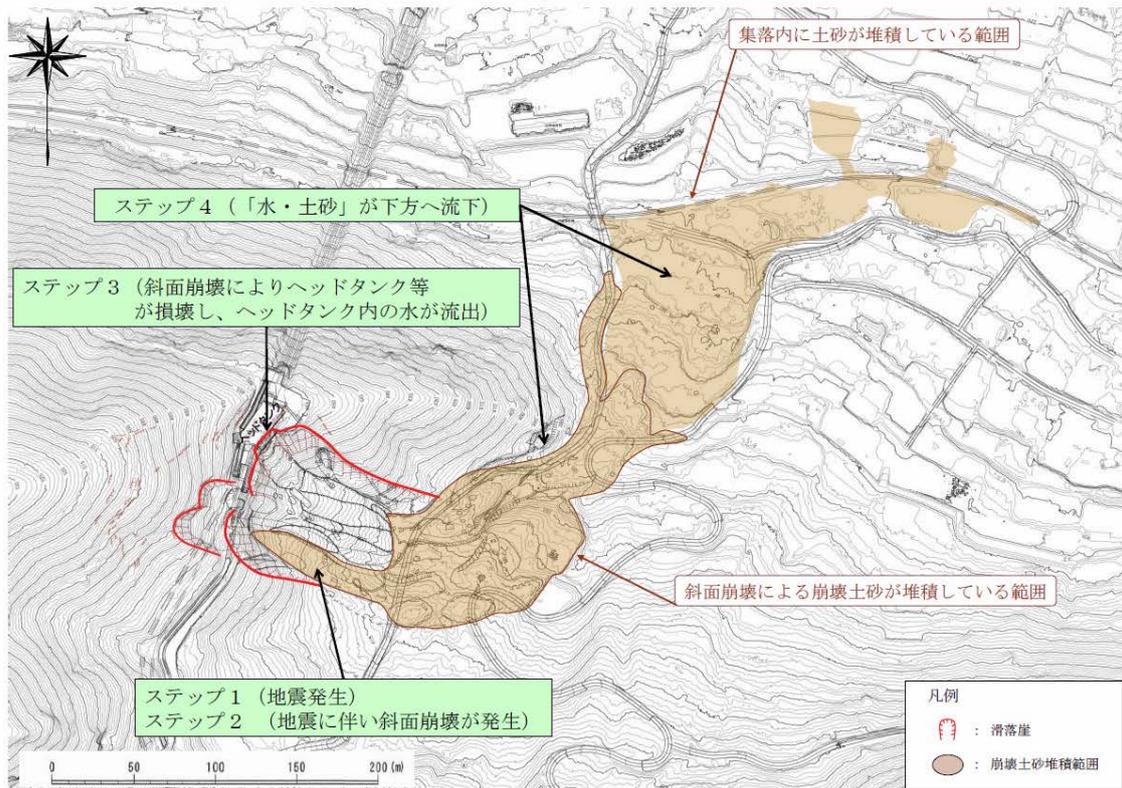
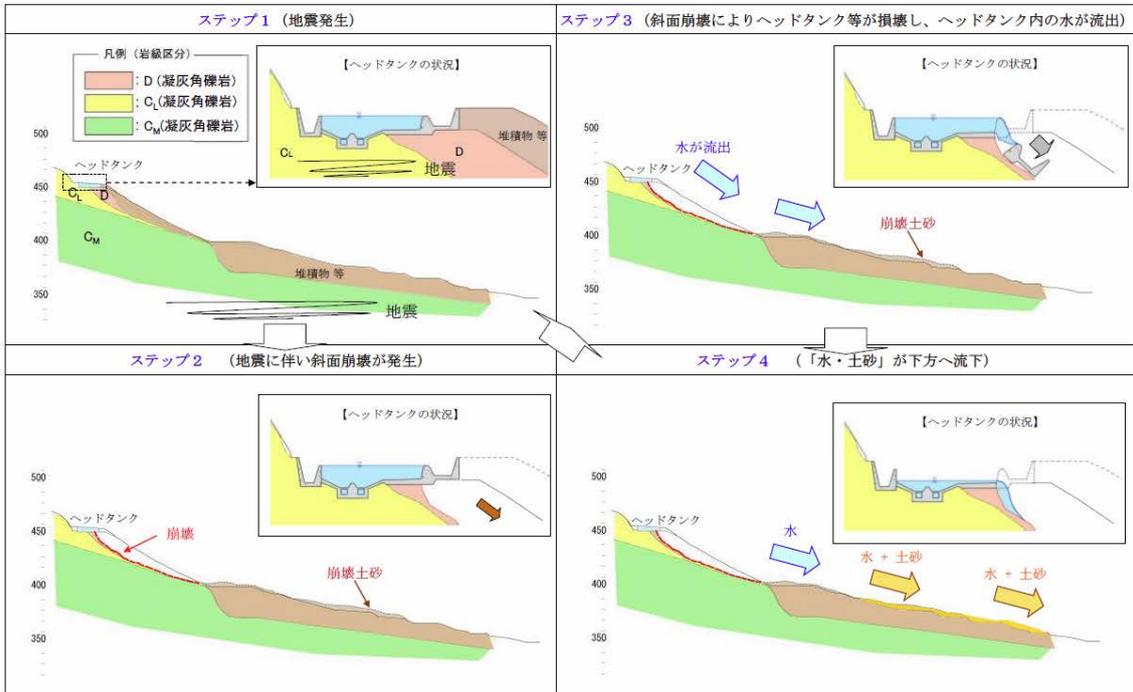


図 7.10 黒川第一発電所ヘッドタンク周辺で生じた斜面崩壊と土砂流出のメカニズム
 (出典：黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会，2016)

各施設の損壊状況と被災後に行った堰や導水路のゲート操作の実績から、損壊したヘッ

ドタンクからの水流出は約 1 万 m³, 阿蘇大橋付近から黒川への水流出は約 20 万 m³ と算定されている (図 7.7, 黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会, 2016)。また, ヘッドタンク周辺における, 地質調査, 構造物調査, 土砂到達状況調査から, 崩壊土砂は地震の影響で表層側の岩盤部に割れ目の開口による緩みが発生して岩盤部が崩壊したことによるものと推定されている (黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会, 2016)。

以上を踏まえ, ヘッドタンク周辺で生じた斜面崩壊と土砂流出のメカニズムを概略的に整理すると, ①地震の揺れにより岩盤を巻き込んで大規模な斜面崩壊が発生し, ②斜面に崩壊により基礎地盤が失われたヘッドタンク等の設備が損壊, 発電用水が流出し, ③流出水が斜面に堆積している崩壊土砂を巻き込み, 下方に流下させ, ④流下した水及び土砂が集落に流入したことが明らかになった (図 7.10, 黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会, 2016)。この一連の現象はわずか数分間で生じたもの (新所地区住民からの聞き取り調査による) であることから, 事前に想定し, 直前に察知できていない限り, 回避するのは極めて難しかったものと推察される。

水力発電設備の自然災害対応に関し, 電気設備自然災害等対策ワーキンググループでは, 貯水池周辺の地山の地すべりに注意していた一方, 高所に設置された水槽の被災については対象としていなかった (経済産業省商務情報政策局商務流通保安グループ電力安全課, 2014a ; 2014b)。また, ヘッドタンク周辺で地すべりを起こした地山は, 電力会社 (この場合, 九州電力) が所有する土地では無く, その一部しか土砂災害警戒地域に指定されていなかった (国土交通省水管理・国土保全局砂防部, 2016b)。前者は奇しくも, 電気事業連合会・電源開発株式会社 (2014) が地すべり危険箇所を監視, 対策を行っていく際の課題として指摘していたことでもあり, 施設損壊シナリオの再構築とともに監視体制の構築に向けた地域連携が必要と考えられる。

7.5 おわりに

本稿では, 熊本地震で生じた水力発電所の被災状況の解明を目的とし, 今回の地震の大きな特徴で水力発電施設の損壊要因ともなった土砂崩壊状況を概観するとともに, 水力発電施設被災に関する既往事例をレビューしたうえで, 今回の地震によって生じた水力発電施設被災の実態を各種の調査報告事例を用いて整理, 分析した。

熊本地震における水力発電所被災については, 黒川第一発電所で生じた現象が最も重大な事例であり, 発電所近傍の高所に存在する水槽が周辺地形の地すべりに引きずられて損壊した結果, 周辺の土石を巻き込んで多量の水とともに麓の集落に流入したことにより生じたものであることが明らかになった。こうした発災過程は, 経済産業省内 (産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会) の電気設備自然災害等対策ワーキンググループにおける議論の中では, 陽的には想定されていなかったことから, 今後の新たな検討課題とすべ

きものと考えられる。一般に、水力発電施設は人里から離れた急峻な山間地に立地していることが多いが、今回のケースでは発電所近傍に集落があったことが素因と言える。逡巡するまでも無く、位置エネルギーを蓄えて高所に存在する水槽内の多量の水が一時期に流出した際に周辺に及ぼすエネルギーは、自然現象として生じる土石流のそれに匹敵することは明らかである。水力発電所近傍に集落が存在する地域では、高所に多量の水を蓄えた水槽があるということを認識したうえで、地震や豪雨発生時に生じ得る水流出といった事態を想定し、海溝型地震で沿岸部に襲来する津波などと同様に、前震発生時などに事前避難などの対処ができていれば、被害を軽減できたかも知れない。

水力発電施設は取水などによる生態系影響の問題を抱えつつも（例えば、田代ら、2017）、その多くは周辺地域の電力供給に長年寄与してきたインフラであり、今後も地域環境と調和しながら存続維持することが求められている。黒川第一発電所設備損壊事象に関わる技術検討会（2016）でも指摘があったように、今回の被災事例を踏まえ、地域におけるリスクコミュニケーションの重要性を再提起して本稿の結びとしたい。

謝辞

本研究は、平成 28 年度京都大学防災研究所特別緊急共同研究「大震度直下型地震による河川への影響の総合的調査研究（代表：大本照憲・熊本大学教授）」の一環として実施した。

参考文献：

- 1) 柏柳正之、有賀茂、中山義紀：調査事業「発電設備耐震性能調査」の報告（第 1 回）水力発電設備の耐震性能照査マニュアルの概要、電力土木、No.361, pp.68-72, 2012.
- 2) 梶谷義雄、山本広祐、豊田康嗣、中島正人：水力発電施設に関わる災害事例の収集と溢水被害に伴う社会的影響評価法の検討、土木学会論文集 F4（建設マネジメント）、Vol.67, No.1, pp.1-13, 2011.
- 3) 九州電力株式会社：「平成 28 年熊本地震」における電力設備被害状況について、土木学会西部支部「2016 年熊本地震」地震被害調査報告会～緊急災害調査と応急復旧の取り組み～（2016.5.31 開催）、<http://committees.jsce.or.jp/report/node/117>, 2016a.
- 4) 九州電力株式会社：電気設備被害の状況分析と地震対応の評価について、産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ（第 9 回、2016.7.29 開催）、経済産業省、
http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/denki_setsubi_wg/pdf/009_02_00.pdf, 2016b.
- 5) 九州電力株式会社 c：水力発電設備の設備損壊事象について、産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ（第 10 回、2016.12.7 開催）、経済産業省、

- http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_zen/denki_setsubi_wg/pdf/010_01_00.pdf, 2016c.
- 6) 九州電力(株)熊本支社：黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会資料（概要版），黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会（第3回，2016.9.26実施），九州電力(株)熊本支社，<http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0058/1437/9rx3na74.pdf>，2016.
 - 7) 黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会：黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会報告書，九州電力(株)熊本支社，<http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0060/1176/5flp61h18o.pdf>，2016.
 - 8) 経済産業省原子力安全・保安院：発電設備耐震性能調査報告書 平成21-23年度，2012.
 - 9) 経済産業省原子力安全・保安院電力安全課：平成12年度電気保安統計，http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/12hoan-tokei.html，2002.
 - 10) 経済産業省原子力安全・保安院電力安全課：平成14年度電気保安統計，http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/14hoan-tokei.html，2004.
 - 11) 経済産業省原子力安全・保安院電力安全課：平成18年度電気保安統計，http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/18hoan-tokei.html，2006.
 - 12) 経済産業省商務情報政策局商務流通保安グループ電力安全課：水力発電設備についての検討に係る考え方，産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ（第2回，2014.2.18開催），経済産業省，http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_zen/denki_setsubi_wg/pdf/002_05_00.pdf，2014a.
 - 13) 経済産業省商務情報政策局商務流通保安グループ電力安全課：水力発電設備に係る検討の考え方（洪水、地滑り、等），産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ（第5回，2014.5.14開催），経済産業省，http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_zen/denki_setsubi_wg/pdf/005_06_01.pdf，2014b.
 - 14) 経済産業省商務流通保安グループ電力安全課，独立行政法人製品評価技術基盤機構：平成27年度電気保安統計，http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/27hoan-tokei.pdf，2016.
 - 15) 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>.
 - 16) 国土交通省：熊本県熊本地方を震源とする地震について（第2報，2016.4.16作成），<http://www.mlit.go.jp/common/001127910.pdf>，2016.

- 17) 国土交通省河川局治水課：貯水池周辺の地すべり調査と対策に関する技術指針（案）・同解説， http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam2/pdf/tyosuitigijukaisetu.pdf， 2009.
- 18) 国土交通省九州地方整備局， 熊本県：白川水系河川整備計画， 2002.
- 19) 国土交通省九州地方整備局， 熊本県土木部：白川水系における河川管理体制の強化について（第2報）， http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/data_file/1465564871.pdf.
- 20) 国土交通省国土地理院：地理院地図 簡易空中写真（2004年～， 2014.2.18公開開始）， <http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html#airphoto>， 2014.
- 21) 国土交通省国土地理院：平成28年熊本地震・空から見た（航空写真判読による）土砂崩壊地分布図， <http://www.gsi.go.jp/common/000143473.pdf>， 2016a.
- 22) 国土交通省国土地理院：空から見た（航空写真判読による）布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図（2016.10.3）， <http://www.gsi.go.jp/common/000145493.pdf>， 2016b.
- 23) 国土交通省国土地理院：地理院地図 平成28年熊本地震 西原2地区 正射画像（2016年4月20日撮影）， http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html#20160414kumamoto_0420dol01， 2016c.
- 24) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課：平成26年版水害統計， http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?_toGL08020101_， 2016.
- 25) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：熊本県阿蘇郡南阿蘇村における砂防災害関連緊急事業の実施について（2016.4.30時点）， http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160430_tyoku_saikansabou.pdf， 2016a.
- 26) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：熊本県阿蘇郡南阿蘇村における災害関連緊急砂防事業の実施について【立野川1】（2016.5.24時点）， http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160524_tatenokawa1_saikansabo.pdf， 2016b.
- 27) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平成28年熊本地震による土砂災害の概要（2016.9.14時点）， http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160914_gaiyou_sokuhou.pdf， 2016c.
- 28) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説， http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/wf_environment/structure/index3.html， 2012.
- 29) 地震調査研究推進本部：布田川断層帯・日奈久断層帯， 文部科学省研究開発局地震・防災研究課， http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/katsudanso/f093_futagawa_hinagu.htm.
- 30) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会：電気設備地震対策ワーキンググループ報告書， 経済産業省， http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/shingikai/120/8/houkokusho.pdf， 2012.
- 31) 田代喬：御嶽山麓を流れる木曾川水系王滝川の水環境：自然災害と水資源開発の影響， 陸の水， Vol.74， pp.5-11， 2016.

- 32) 田代喬, 松谷隆祐, 戸田祐嗣: 夏季から冬季の溶存酸素濃度の変化からみた流込み式発電を有する山地溪流の代謝動態, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, 2017 (印刷中) .
- 33) 津城正, 村上和義, 柏木雄二: 黒川第一発電所増設工事概要, 電力土木, No.200, pp.95-104, 1986.
- 34) 電気事業連合会, 電源開発株式会社: 水力発電設備 (ダム) の検討結果 (集中豪雨・地滑り) について, 産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会気設備自然災害等対策ワーキンググループ (第 5 回, 2014.5.14 開催), http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/denki_setsubi_wg/pdf/005_07_01.pdf, 2014.
- 35) 電気設備自然災害等対策ワーキンググループ: 産業構造審議会保安分科会電力安全小委員会電気設備自然災害等対策ワーキンググループ中間報告書, 経済産業省, http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/denki_setsubi_wg/pdf/report01_01.pdf, 2014.
- 36) 電力土木技術協会: 水力発電所データベース, <http://www.jepoc.or.jp/hydro/>.
- 37) 土居賢彦, 静間俊郎, 中村孝明: 調整値の Buffer 効果を考慮した水力発電水路施設の復旧過程に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.505-515, 2013.
- 38) 東電設計株式会社: 平成 26 年度災害に強い電気設備検討調査 (水力発電設備に係る自然災害等影響調査 (外的事象等)) 報告書, http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/001057.pdf, 2015.
- 39) 虫明功臣: 流出現象の地域性をどうみるか. 河川水文学, 高橋裕編集, p.141-179, 共立出版, 東京, 1978.
- 40) 安福滋, 中村幾雄: 水力発電所における大規模災害とその被害復旧例, 電力土木, No.199, pp.41-49, 1985.

(田代 喬)

第8章 総括

8.1 各調査のまとめ

本調査研究では、2016年4月に発生した熊本地震により影響が見られた白川・緑川水系に関して、河川災害への地震の影響を評価することを試みた。その結果、以下のような結果を得た。

1. 河川全体の治水安全度低下について（第3章）：

白川の蓮台寺地先から緑川の川尻地先に亘る幅 50-100m、長さ 5km に及ぶ帯状の液状化集中地帯と白川の旧河道とはほぼ一致することが認められた。帯状の液状化集中地帯から白川が旧河道では蓮台寺付近から南流し川尻付近で緑川に合流していた可能性が更に高まった。

堤防の沈下量が大きい場所では明瞭な噴砂丘が確認され、堤体下部で液状化が発生したことが分かった。蓮台寺および十禅寺地区は白川旧河道の上流端に当たり基礎地盤が相対的に緩い地盤であったことが考えられる。

緑川の堤防損傷レベルは相対的に右岸に較べて左岸で大きいことが認められた（河口上流 6km-14.4km の区間）。この原因として約 400 年前の緑川と御船川の合流点処理（桑鶴の轡塘）として、右岸側の大名塘に較べて左岸側では越流を許容する上で左岸側は右岸側に較べて堤防は弱く造られていたことが予想される。

縦断亀裂の発生割合は、木山川では左岸 70%、右岸 60%、秋津川では左岸 56%、右岸 49%、矢形川では左岸 16%、右岸 17%であった。木山川においては軽微な損傷であった橋梁がある場所では堤防沈下量および被災高はゼロに近く、液状化の影響が小さいことが認められた。

木山川と赤井川の合流点付近の左岸において越流破堤した。右岸は堤頂がアスファルト舗装に対して、左岸は土堤であり、地震による堤体の損傷が左岸側で大きいことが破堤の一因であったことが示唆された。

住宅密集地である秋津川右岸側の洪水氾濫の危険性を低下させると共に、三川合流後の緑川支川である加勢川の治水安全度を改善するために木山川の堤防高さを相対的に低くし、さらに、木山川の両岸の氾濫場所は市街化調整区域に設定されている。現在の総合治水、流域治水の考えは昭和 42 年以前の河川改修で既に実践されていたことが認められた。

2. 河川堤防の安全性低下について（第4章）

白川・緑川の国管理の河川堤防について、地形・地質情報等に基づく被災要因分析を行った結果、河川流域の微地形や地盤構成と堤防被災との密接な関連性が窺えた。特徴的な

点として、緑川中下流域の沈下被害が大きかった堤防では、基礎地盤の砂層や火山灰層厚が相対的に大きい傾向があった。また、微地形区分が干拓地・埋立地等の白川河口や微地形区分が入り混じった緑川中流域では、堤防沈下量や液状化被害が確認された。

熊本地震では、堤防の天端・表のり面の縦・横断亀裂や天端沈下が秋津川や木山川のような県管理区間でも広範囲に生じていた。また、秋津川右岸では、被圧水が表層に湧出・浸透することによる地下水位上昇の問題が発生していた。治水機能や流下能力を早期に回復させるためには、堤体嵩上げが重要となる。また、地下水位を低下させる必要があり、掘削施工及び長期的な堤防の湿潤化を防ぐ観点での水処理が実務上の課題である。

木山川では、地震による天端沈下（10cm 程度）と豪雨による堤防決壊・洪水氾濫が生じるという複合災害が発生した。ここでは、沈下対策に設置された土嚢上の越流が決壊の主要因であることに加え、土嚢直下のパイピングによる土嚢の不安定化が決壊を助長した可能性が示唆された。

3. 上流域斜面崩壊に起因する土砂流出がもたらす河川安全度の低下について（第5章 5.1～2）

熊本地震により、熊本を中心とした広い範囲で斜面崩壊が発生した。特に、本震によって非常に多くの斜面崩壊が阿蘇地域を中心に発生した。崩壊した土砂の中には、豪雨中に発生した崩壊ではないにも係わらず、流動化して土石流・泥流となり下流域に伝播し、土砂災害を発生させたものもあった。また、豪雨時の斜面崩壊とは異なり、谷だけで無く、尾根においても多くの斜面崩壊が発生していた。崩壊した土砂の中には、斜面の途中で停止・堆積しているものが多く存在した。これらの土砂の内、水が集まりやすい場所に位置している崩土は、今後の雨によって白川に流入する可能性があるため、継続的な注意が必要である。

山王谷川で発生した土石流を対象とした現地調査と平面二次元土石流解析を行った。調査の結果、土石流による氾濫土砂は黒色の細粒土砂が主であり、それらによって家屋が倒壊したこと、河道内に直径数十 cm～数 m の巨礫が流れて家屋直上流の橋梁に直径 2m～3m 程度の 2 つの巨礫が引っかかり、氾濫を助長しことが分かった。数値解析結果によると、北側及び西側斜面で発生した土石流が時間とともに下流に流下しながら合流し、最終的に下流域へ流れていく過程が再現できた。表層の細粒土砂は静止体積濃度が小さいとともに保水性が高いため、降雨が無くても崩壊土砂が流動化して土石流を形成し、下流に伝播した可能性が示された。また、細粒土砂の相変化を考慮しなかったシミュレーションでは、土石流は途中で堆積し、下流まで到達しなかった。これは、細粒土砂の相変化が土石流の流動に強い影響を与えることを示すとともに、山王谷川の土石流現象において、細粒土砂の相変化が実際に発生している可能性を示している。

熊本地震後の白川における土砂動態の把握するために、震災後の河道内の濁度および SS の連続モニタリングを実施した結果、地震による大量の土砂流入により、白川では長期間

SS が高い状態が続いており、特に下流域でその傾向が顕著であることが明らかとなった。また、2016年6月17日から12月9日にかけて下流域へ大量の土砂供給が起こっており、白川の河川・河口域の河床形状や生物環境に大きな影響を与えていることが推察された。

4. 河口干潟の土砂堆積に伴う地形変形と生態系への影響（第5章 5. 3）

熊本地震に起因して白川に流入した土砂は降雨・出水期の影響を受けて大量に河口干潟へ流入・堆積し、生態系に影響を与えた。また、地震により崩壊した土砂が上流部に残存していると考えられるため、2017年度以降の出水においても河口干潟へ流入し継続的に生態系へ悪影響を及ぼすことが懸念される。

喫緊の課題としては、干潟上で行われている赤土排出対策のより効果的な実行方法を検証することが必要である。また、平成24年九州北部豪雨のように近年激化している豪雨災害でも将来同様の被害が生じることも予測される。今後の同種の被害を軽減していくために、上流から海域まで一貫した流域全体の土砂管理体制の構築を行うことが求められる。

5. 上流森林域の崩壊に起因する流木災害リスクについて（第6章）

白川流域における熊本地震に係る流木発生に関する情報をとりまとめた。さらに、白川流域における流木発生ポテンシャルの評価を行い、各橋梁での相対的な流木捕捉量の評価を試みた。その結果、実際の被災状況と定性的に類似の評価結果を得た。

さらに、熊本地震による斜面崩壊箇所から地震の影響により上乘せされたと見込まれる流木発生量を評価した。これより、地震により流木リスクの上乗せが発生していたと見積もられた。ただし、実際の回収量と比べてかなり少ない流木発生量となっていたため、この違いの原因を特定し、地震に起因する流木発生リスクの評価を行い、直下型地震による流木発生への対応についての検討が今後必要である。

6. 地震による水力発電所被災メカニズムについて（第7章）

熊本地震における水力発電所被災については、黒川第一発電所で生じた現象が最も重大な事例であり、発電所近傍の高所に存在する水槽が周辺地形の地すべりに引きずられて損壊した結果、周辺の土石を巻き込んで多量の水とともに麓の集落に流入したことにより生じたものであることが明らかになった。一般に、水力発電施設は急峻な山間地で人里から離れた場所に存在していることが多いが、今回のケースでは発電所近傍に集落があったことが素因と言える。水力発電所近傍に集落が存在する地域では、地震や豪雨発生時に生じ得る水流出といった事態を想定し、海溝型地震で沿岸部に襲来する津波などと同様に、前震発生時などに事前避難などの対処ができていれば、被害を軽減できた可能性もある。水力発電施設は取水などによる生態系影響の問題を抱えつつも、その多くは周辺地域の電力供給に長年寄与してきたインフラであり、今後も地域環境と調和しながら存続維持することが求められている。地域におけるリスクコミュニケーションの重要性を再認識した。

8.2 今後の大規模地震における河川災害への影響に対する適応策の提言

最後に本調査研究で得られた結果を踏まえ、今後の河川管理における地震に対する備えとして、以下のような対策を提言して、結びとする。

1) 河川堤防の耐震化技術の確立

東日本大震災時も河川堤防の被災が見られ、耐震化の必要が唱えられているが、まだ技術の確立の段階までには至っていないのが現状である。国を中心に、これに関する研究予算の確保を行い、重点課題として技術の開発を推進すべきである。加えて、旧河道などの情報を加味した堤防の地震に対する脆弱性についての調査を実施し、対応の必要性についての優先順位付けも必要と考えられる。

2) 自治体管理区間における河川施設被害時の緊急対応への備えの充実

国管理区間と較べると緊急対応への備えについては、人員・予算・資材など全ての点で劣る部分が自治体管理区間では見受けられる。単一の自治体で全ての準備を行うことには限界があるため、国を中心に重要河川を共有する自治体間の防災連合体を組織し対応することが望まれる。

3) 地震・洪水複合災害のリスク評価技術及び対策技術の確立

今次災害では、4月に本震が発生し、その2か月後に豪雨（6月20日豪雨）が発生した。緑川水系木山川では、地震で堤防沈下が見られたところで、越水を主要因とする堤防決壊と洪水氾濫が発生しており、一種の地震・洪水複合災害が発生した。本来、堤防の設計では、洪水（侵食、浸透）と地震は別々の外力として考えられ、同時発災のリスクは小さいと考えられているが、近年の豪雨発生頻度の増加や地震活動の活発化を踏まえると、地震・洪水複合災害に対する備えをすべきである。そのためには、まず、複合災害のリスク評価技術を確立することが急務の課題である。また、1)の耐震技術を踏まえて、複合災害への対策技術の確立が今後必要となる。

4) 上流で大量の土砂生産が発生した場合の、流下能力確保のための技術の確立

地震発生から2ヶ月程度後である2016年6月に今回の出水期で最大の出水が発生した。これにより、大量の土砂が白川下流へ流下し、河道内や河口干潟上へ堆積したことが明らかとなった。白川河道上では1m未満程度の河床上昇が見られており、流下能力の大幅な低下が発生したと推測される。幸いに、平成24年の九州北部豪雨規模の出水は発生しなかったため、本川上での氾濫発生にまでは至らなかったが、今後も上流域に堆積した土砂の流下が継続することや、今後の出水期において大規模出水が発生する可能性があるため、大量な土砂輸送による広範囲の河道流下能力低下に短期間で対応する技術の開発が望まれる。

また、出水期に大規模地震が発生した最悪のケースを想定した体制づくりも求められる。

5) 河口干潟に大量に土砂が堆積した場合の対策技術の確立

白川河口干潟では平成 24 年 7 月九州北部豪雨でも同種の土砂堆積によるアサリ漁場の被害が発生し、正常化するまで 3~4 年が必要であった。この影響期間を短くするための技術が必要である。

6) 豪雨災害以外の斜面崩壊への流木対策技術の確立

地震による斜面崩壊は、豪雨によるものと較べて緩斜面でも発生したり、尾根で発生したりするなどの特徴がある。このことは、流木対策施設を含む砂防施設が設置されていないことを意味しており、発生源対策を取りにくい。この部分の流木発生量に対する対策は、豪雨起源の流木対策の一環として河道内で対応することが求められると考えられる。地震での上乗せ分も考慮した流域一貫の流木リスク評価法の確立と対策の検討が必要である。

7) 水力発電施設の脆弱性を考慮した適切な事前防災のあり方の確立

水力発電施設が元来有している災害への脆弱性は、15 箇所の施設が被災した平成 24 年 7 月九州北部豪雨でも指摘されているが¹⁾、水害や地震時に対して適切な避難情報の発信を行うための体制づくりや、周辺住民への災害リスクの丁寧な説明も求められる。クリーンエネルギー源である水力発電は今後も持続的に活かすべき施設であり、地元との共存への方法として適切な事前防災のあり方を検討すべきである。

以上、いくつかの提言を示した。無論、今回の地震では地域特性に起因する被害もあるため、今回の教訓が一律にどの河川でも適用できるものではない。しかし、地震国である我が国では今後も大規模地震や直下型地震の発生が想定されている。そのため、今回の知見を河川管理者が自身の管理する河川に当てはめ、リスクの有無を検討する材料にしてもらえば良いと考えられる。今後も引き続き起こると想定される大規模地震において、河川災害が地震により助長されることを少しでも軽減するために、本報告が役立てば幸いである。

参考文献：

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

(大本照憲・矢野真一郎・二瓶泰雄)