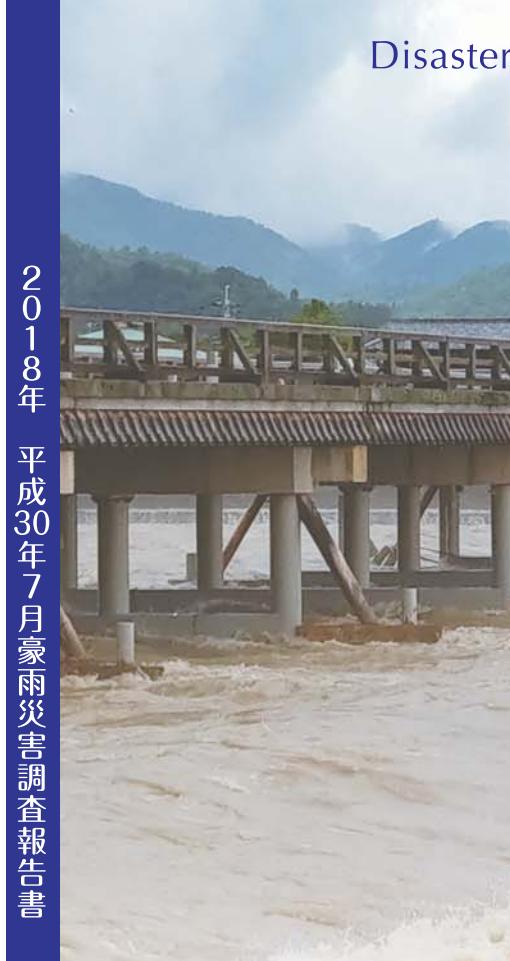




2018年 平成30年7月豪雨 災害調査報告書



平成31年3月 京都大学
防災研究所



平成30年7月豪雨：倉敷市真備町の浸水被害（国土交通省）

平成31年3月
京都大学 防災研究所



気象・水文

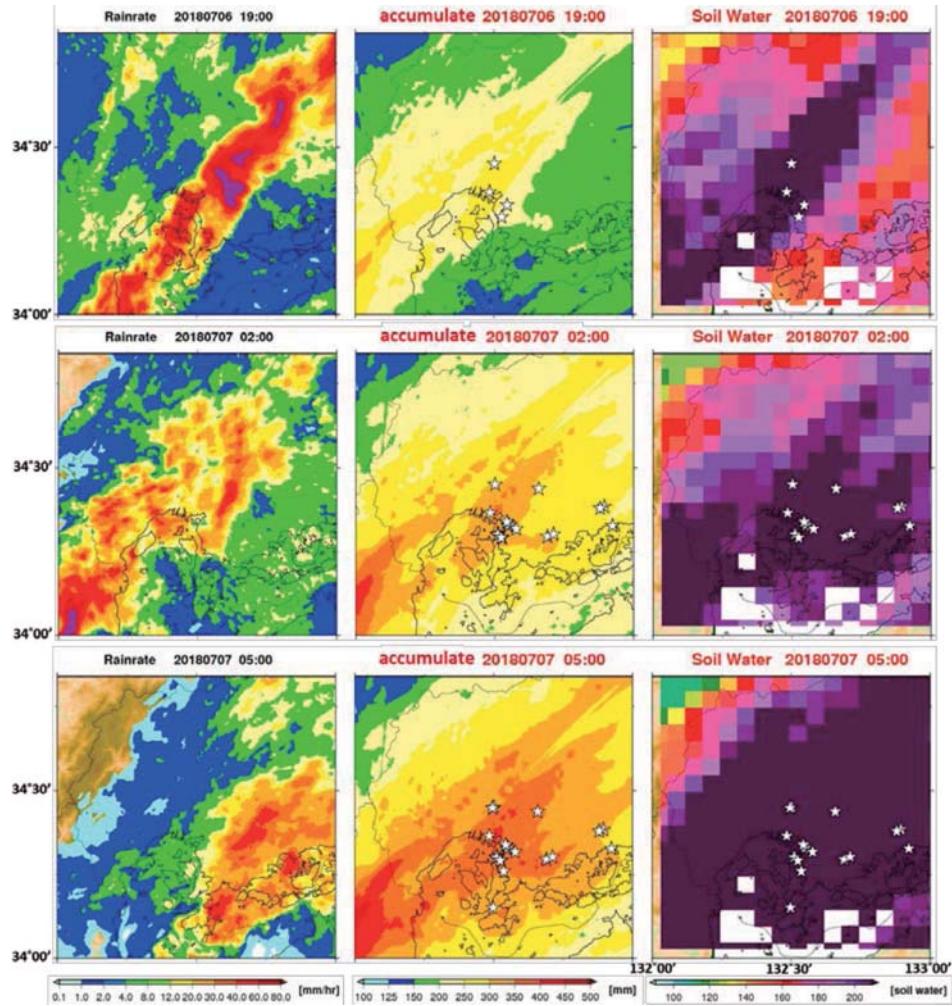


図 2.2 (左) 降雨強度, (中) 7月5日00時からの積算雨量, (右) 土壤雨量指数.

積算雨量と土壤雨量指数について、星印は土砂災害発生場所を示し、図の
タイトルが赤字であるのは土砂災害があったおよその時刻であることを意
味している。

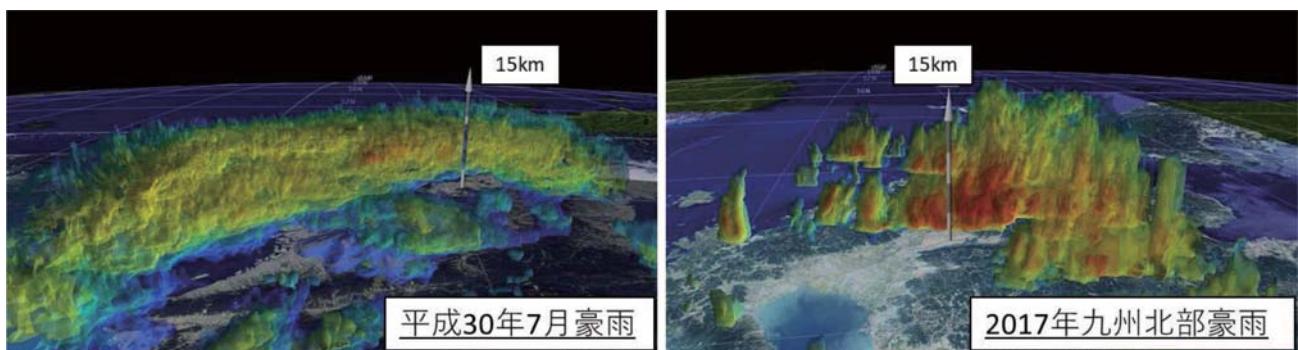


図 2.3 X バンド MP レーダーから作成した (左) 平成 30 年 7 月豪雨と (右) 平成 29 年九州北部豪雨のレーダー反射強度の立体図.

地表変動

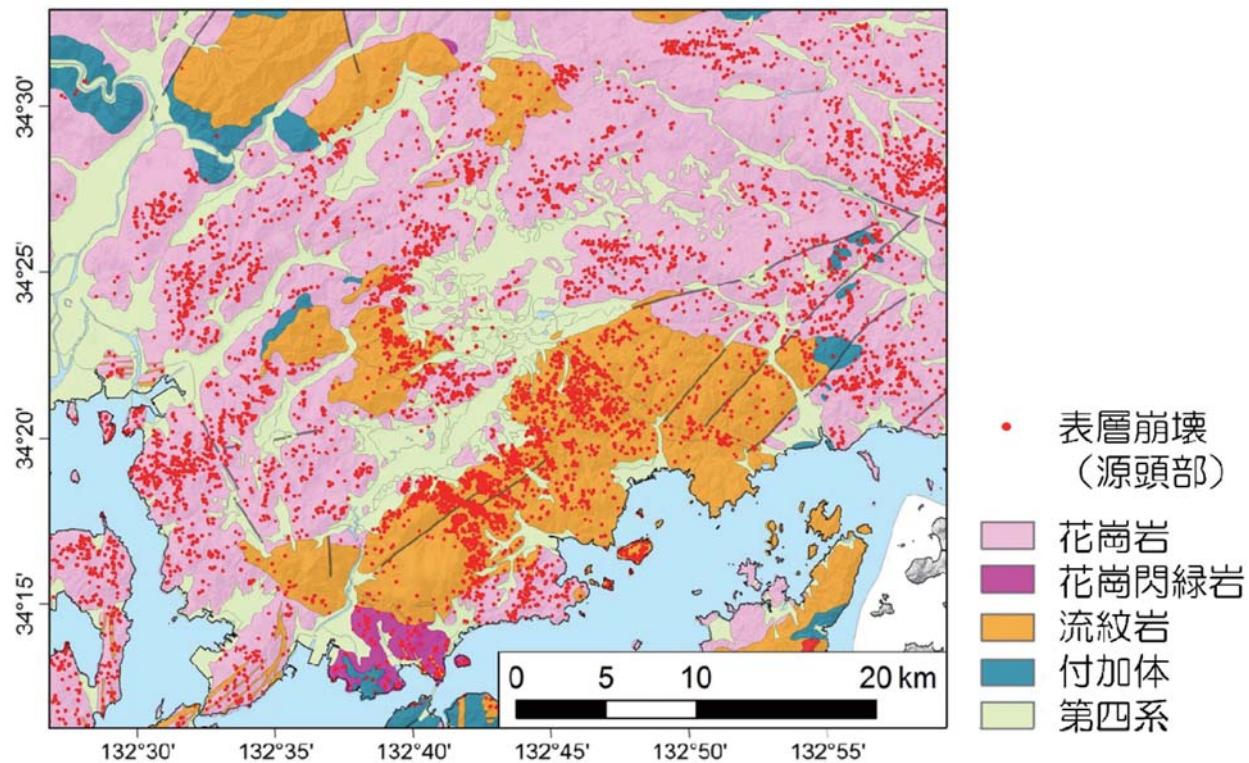
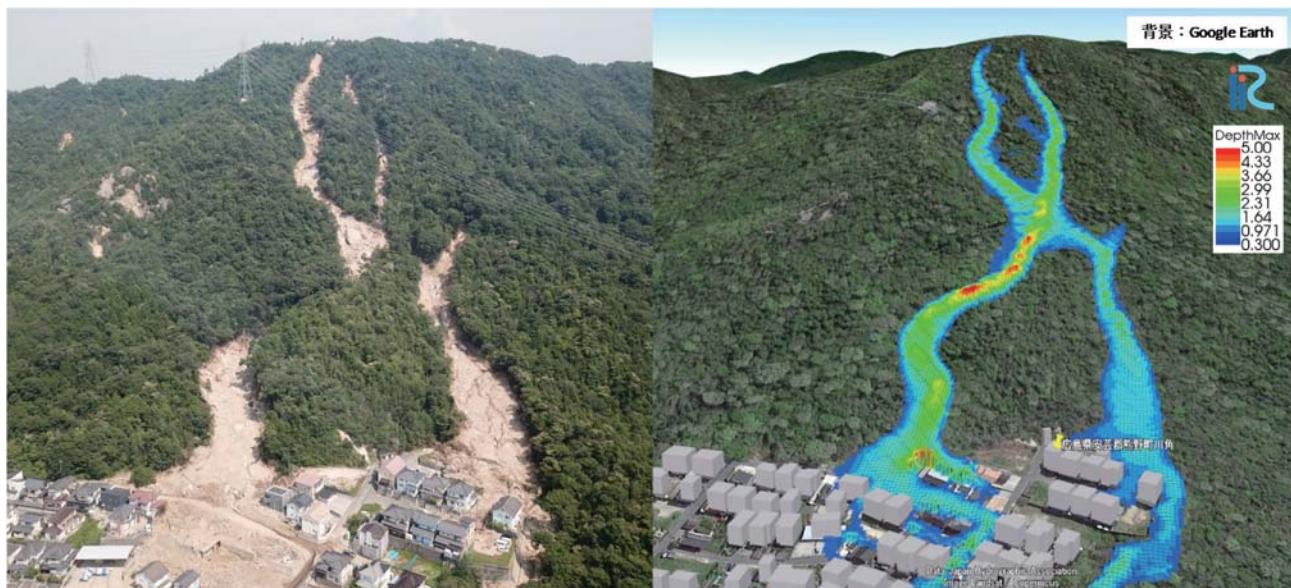


図2. 広島沿岸部における地質と崩壊源の分布。地質は20万分の1シームレス地質図による。



(a) 斜面上の土石流の流下経路

(b) 数値シミュレーションによる土石流の最大流動深

図-2 斜面上の土石流の流下経路と数値シミュレーションによる土石流の最大流動深の比較（単位：m）

治水



防災操作中の日吉ダム

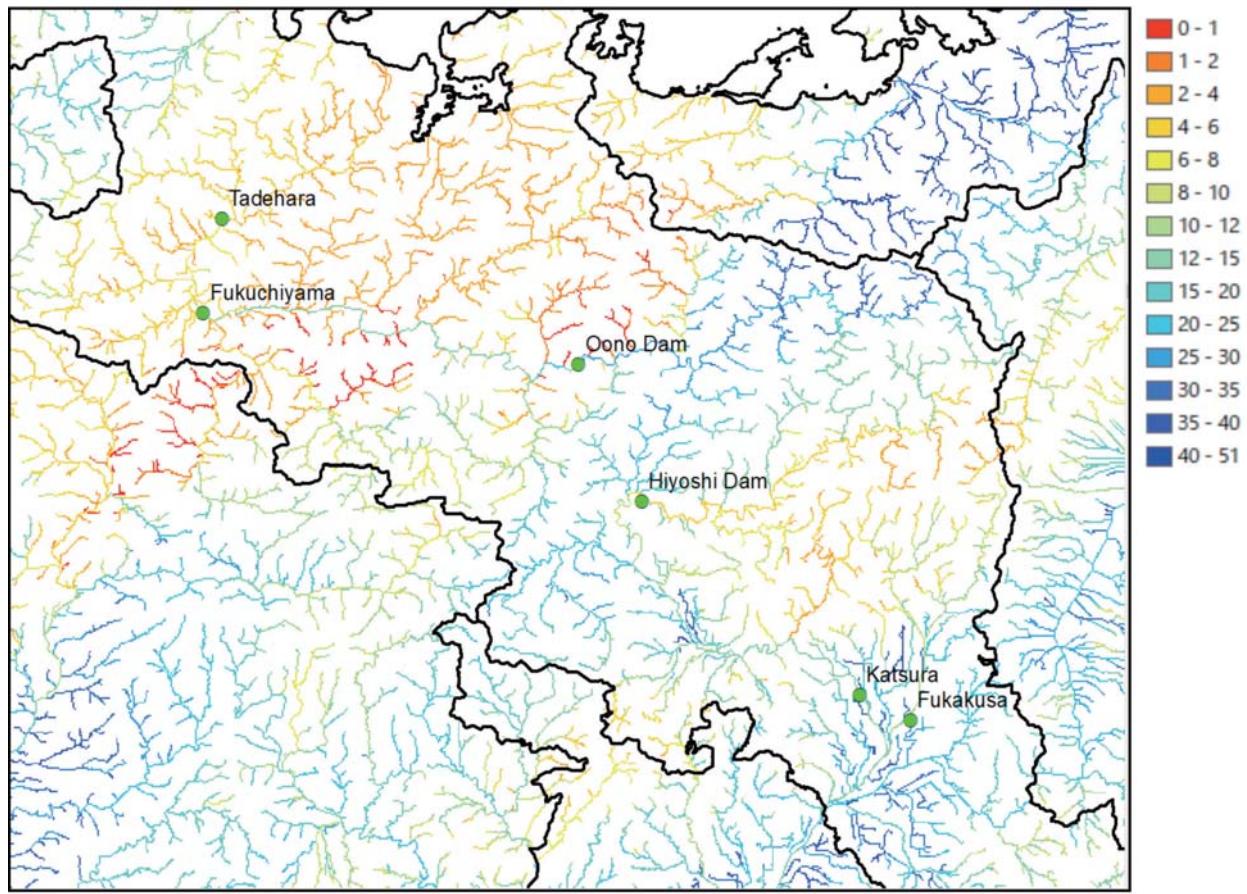


淀川水系桂川支流の曾我谷川および西側水田における氾濫



蓼原川樋門等の閉鎖により浸水した福知山市蓼原地区・河守地区の住宅地

情報・避難・災害対応



実績流量に対するアンサンブル順位の空間分布



被災事例（F 事例・C 事例）の中で見過ごされる災害ポテンシャル事例（P 事例）

左図（F 事例）：岡山県倉敷市真備町、右図（P 事例）：京都府京都市伏見区

平成 30 年 7 月豪雨災害調査報告書

目 次

はじめに	1
中川 一	
平成 30 年 7 月豪雨災害に対する京都大学防災研究所の活動	3
牧 紀男	
気象・水文	5
はじめに	
石川 裕彦	
気象レーダー等から読める豪雨の特徴とその将来頻度変化の解析	5
中北 英一、山口 弘誠、小坂田 ゆかり	
豪雨発生の環境条件のメソ気象解析	10
竹見 哲也	
台風第 7 号の影響	14
榎本 剛	
総観場の予測可能性	18
吉田 聰	
西日本全体を対象とした降雨流出解析	22
佐山 敬洋	
木製可動型水流減勢工の効果に関する基礎的実験	27
平石 哲也	
総括と将来への提言	30
中北 英一	

地表変動

平成 30 年西日本豪雨による地表変動災害 ······ 31

千木良 雅弘、松四 雄騎、竹林 洋史、橋本 学、山崎 新太郎、王 功輝

広島地域における地質・地形・降水と表層崩壊の分布対応 ······ 33

松四 雄騎

2018 年 7 月に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流の流動特性 ······ 42

竹林 洋史、藤田 正治

地質と崩壊メカニズム（広島地域） ······ 48

千木良 雅弘

衛星合成開口レーダーを用いた地表面変動の把握 ······ 54

橋本 学

愛媛県宇和島市周辺における岩盤崩壊の発生場 ······ 61

山崎 新太郎

宍粟市の斜面崩壊と福山市のため池決壊 ······ 67

王 功輝、常 承睿、松浦 純生、末峯 章

治水

降雨極値統計解析 ······ 73

田中 茂信

ダムの洪水調節操作と今後の課題 ······ 78

角 哲也、竹門 康弘、野原 大督

由良川支川における氾濫災害の現地調査と再現計算 ······ 84

川池 健司、Herman Musumari、中川 一

情報・避難・災害対応

豪雨災害について考えるための FACP モデル ······ 91
矢守 克也、竹之内 健介、大西 正光、佐山 敬洋、本間 基寛

アンサンブル予測を利用した平成 30 年 7 月豪雨のポテンシャル評価 ····· 93
本間 基寛、佐山 敬洋、竹之内 健介、大西 正光、矢守 克也

平成 30 年 7 月豪雨における洪水の潜在性評価に向けた
広域アンサンブル流出解析 ······ 96
佐山 敬洋、本間 基寛、竹之内 健介、大西 正光、矢守 克也

京都市伏見区下鳥羽地区における水害ポテンシャルに対する意識調査 ····· 99
竹之内 健介、大西 正光、佐山 敬洋、本間 基寛、矢守 克也

はじめに

平成 30 年は、日本漢字能力検定協会がその年の世相を表す漢字として「災」という漢字を選んだように、白根山の噴火災害、豪雪災害、大阪府北部地震、西日本豪雨災害、猛暑による災害、台風 21 号による強風高潮災害、北海道胆振東部地震と、災害が多発した年であった。その中でも、6 月末から 7 月初旬にかけて梅雨前線と台風 7 号の影響により西日本一帯で集中豪雨が発生して愛媛県、広島県、岡山県等で生じた水害は最も激甚であった。数十年に一度の重大な災害が予想されるときに出される「大雨特別警報」が 7 月 6 日から 8 日にかけて長崎、佐賀、福岡、広島、岡山、鳥取、愛媛、高知、兵庫、京都、岐阜の 11 府県に出されるなど、平成 25 年に同特別警報の運用が始まって以来、一連の豪雨でこれだけ多くの府県に出されるのは今回が初めてのことであり、近年まれにみる大水害となった。気象庁はこの一連の豪雨を「平成 30 年 7 月豪雨」と命名した。

この一連の豪雨による水害で 220 人以上の方が亡くなられた。一連の水害で死者数が 100 人を超えるのは 1983 年に発生した山陰豪雨災害の 112 人以来のこと、平成年間では水害による最悪の死者数となった。また、被害額が 1 兆 940 億円にも上り、水害では過去最大の被害額となった。このような水害が私たちが防災研究所で研究をしている時代に生じたことに何か因縁を感じる。まだまだ研究が足らない、もっと精進して研究しなさいといったメッセージ性すら感じてしまう。今後の防災・減災を図る上で、私たちは何を研究する必要があるのか、この水害を通してしっかりと分析し、取り組んでいく必要がある。そこで、昨年度の九州北部豪雨災害の取り組みに引き続き、今回の水害に対しても、防災研究所の関連分野の総力を挙げて取り組むこととなった。

昨年 3 月に「2017 年九州北部豪雨災害調査報告書」を発行した際に、想定し得る最大規模の外力が生じるようなときにはどのような現象が生じるのかを理解したうえで、適切な避難などのソフト対策が取られることが望まれるとその報告書の「はじめに」に記した。今年も昨年に引き続き記録に残る今回のようない水害が生じるとは誰も夢にも思わなかつたのではないだろうか。そして、今回の水害でもまた、「線状降水帯の形成」、「情報・伝達」、「洪水ハザードマップ」、「避難」等が大きな話題となつた。

そこで、今回も 1) 気象・水文、2) 地表変動、3) 治水、4) 情報・避難・災害対応といった総合的な観点からの調査・研究を行うための研究組織を構成し、水害調査の実施と調査結果の取りまとめを行つたので、ここに報告する次第である。本調査報告書が今後の防災減災に少しでも役立つことを祈念する次第である。

平成 31 年 3 月 11 日
京都大学防災研究所長 中川一

平成 30 年 7 月豪雨災害に対する京都大学防災研究所の活動

牧 紀男¹

¹京都大学防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail:maki.norio.8v@kyoto-u.ac.jp

2018 年 6 月末から 7 月始めに発生したを西日本を中心とする豪雨災害について京都大学防災研究所が実施した調査・研究活動の概要と、今後の研究課題についての概要をとりまとめる。

Key Words: Evacuation, Disaster Management, Future Research Topics

1. 被害の概要

前線と台風 7 号の影響により 2018 年 6 月 28 日～7 月 8 日にかけて西日本において豪雨による災害が発生した。この豪雨は気象庁により「平成 30 年 7 月豪雨」と名付けられた。この災害による全国での死者・行方不明者は 237 名¹⁾にのぼるが、特に岡山県（66 名）、広島県（115 名）、愛媛県（31 名）における被害が大きくなっている。近年に発生した水害の中では最大規模の災害となっている。（2014 年 8 月 19 日豪雨災害（広島での土砂災害）死者 77 名²⁾（関連死含む）、2013 年台風 26 号（伊豆大島での土砂災害）死者・行方不明者 43 名（全国）（伊豆大島 39 人）³⁾、2017 年 7 月九州北部豪雨災害死者・行方不明者 44 名⁴⁾）。

京都大学防災研究所では「平成 30 年 7 月豪雨災」について防災研究所の総力をあげて調査・研究を行うこととした。研究の目的は、今後 30～50 年先の防災・減災を見据え、今回の水害の課題、今後必要な研究について防災研究所の総力をあげて検討を行うことである。

2. 研究の取り組み

（1）研究チーム

平成 30 年 7 月豪雨災害について 1) 気象・水文、2) 地表変動、3) 治水、4) 情報・避難・災害対応（矢守）といった総合的な観点からの調査・研究を行うための研究組織の構成を行った。研究チームの構成は表 1 の通りである。

表 1 研究チームの構成

研究リーダー	
1) 気象・水文	石川裕彦（気象・水象災害研究部門），
2) 地表変動	千木良雅弘（地盤災害研究部門）
3) 治水、	角哲也（水資源環境研究センター）
4) 情報・避難・災害対応	矢守克也（巨大災害研究センター）
研究調整	牧紀男（副所長、社会防災研究部門）<総括>、竹林洋史、川池健司（流域災害研究センター）<幹事>

（2）中間報告会

2018 年 12 月 20 日に京都大学きはだホールにおいて中間報告会を開催した。出席者は防災研究所の研究者、外部からの参加者を含め 65 人であった。

中間報告会のプログラムは以下の通りである。

司会：竹林洋史

14 時～14 時 40 分 情報・避難・災害対応 矢守克也・竹之内健介

14 時 40 分～15 時 10 分 気象・水文 竹見哲也

15 時 10 分～15 時 50 分 地表変動 千木良雅弘

15 時 50 分～16 時 30 分 治水 角哲也

16 時 30 分～17 時 全体議論 司会：川池健司

(3) 防災研究所研究発表会での報告

最終報告会は防災研究所研究発表講演会（2019年2月19–20日）において、西日本豪雨・台風21号についての報告が2月19日14:15～17:00きはだホールで開催された。

最終報告会のプログラムは以下の通りである（○は発表者）

14:15 局地スケールでの豪雨・暴風の数値解析：平成30年7月豪雨と台風21号 ○竹見哲也・吉田敏哉・山崎聖太・長谷健太郎

14:30 平成30年7月豪雨に対する台風第7号の予想進路の影響 ○榎本剛

14:45 2018年7月豪雨の異常さと地球温暖化による影響評価 ○小坂田ゆかり・中北英一

15:00 2018年7月豪雨の総観場予測可能性 ○吉田聰

15:15 西日本全体を対象にした平成30年7月豪雨の降雨流出解析 ○佐山敬洋・近者敦彦・寶馨・角哲也

15:45 2018年7月に広島市安芸区矢野東で発生した土砂災害の特徴 ○竹林洋史・藤田正治

16:00 西日本豪雨における宍粟市の流木被害 ○岡本隆明・山上路生・角哲也・佐山敬洋

16:15 Influence of Gates Closure on the Flood Inundation Scale of July 2018 in Oe Town. ○Herman MUSUMARI・Hajime NAKAGAWA ・ Kenji KAWAIKE ・ Rocky TALCHABHADEL

16:30 亀岡盆地の氾濫解析に基づく日吉ダムの治水操作手法の検討 ○竹門康弘・岩本麻紀・野原大督・角哲也

16:45 平成30年7月豪雨災害を踏まえた超過洪水時のダム治水操作手法の検討 ○野原大督・竹門康弘・角哲也

3. 今後の課題

「平成29年九州北部豪雨」では、これまで経験したことが無いような強度の降雨により被害が発生したが、「平成30年7月豪雨」は梅雨期にしばしば発生する降雨であったが広範囲での長く続く降雨により、多くの人的被害もふくむ被害が発生した。以下、報告会等で知り得た調査・研究の成果を踏まえ筆者が今後必要であると考える研究課題をとりまとめることとする。

- ・高齢者の命を守る防災対策のあり方（垂直避難できない人の命をどう守るのか）
- ・繰り返される土砂災害による人的被害の軽減対策
- ・土砂災害警戒区域内でのセカンドチョイスの避難場所の確保可能性の検討
- ・ダムの防災効果と操作についての住民の正しい知識と認識の醸成
- ・過去の経験・公開ハザード情報を活用したコミュニティでの避難対策のあり方

参考文献

- 1) 消防庁応急対策室、平成30年7月豪雨及び台風第12号による被害状況及び消防機関等の対応状況（第59報）、平成31年1月9日（水）16時00分
- 2) 消防庁応急対策室、8月19日からの大雨等による広島県における被害状況 及び消防の活動等について（第47報）、平成28年6月24日15時30分
- 3) 消防庁応急対策室、平成25年台風第26号による被害状況等について（第37報）、平成26年1月15日10時00分
- 4) 消防庁応急対策室、平成29年6月30日からの梅雨前線に伴う大雨及び台風第3号の被害状況及び消防機関等の対応状況等について（第75報）、平成30年2月22日16時00分

Summary of the Research Activities by DPRI, Kyoto University

Norio MAKI

This is the summary of research activities by Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University responding to the 2018 western Japan heavy rain fall.

氣象・水文

気象・水文

榎本剛¹・石川裕彦²・竹見哲也²・中北英一³・山口弘誠³・小坂田ゆかり³・
平石哲也⁴・吉田聰⁵・佐山敬洋⁶

- ¹ 気象水象災害研究部門 災害気候分野
² 気象水象災害研究部門 暴風雨・気象環境分野
³ 気象水象災害研究部門 水文気象分野
⁴ 流域災害研究センター 沿岸域土砂環境研究領域
⁵ 流域災害研究センター 流域圈観測研究領域
⁶ 社会防災研究部門 防災技術政策研究分野

Key Words: atmospheric radar, numerical simulation, psued-stational rainband

1. はじめに（石川）

気象・水文の観点からの研究を本項にまとめる。第2章は、レーダー観測に基づき全体像と特徴を記述する。また、温暖化影響に関して考察する。第3章では、大気安定度の指標を用いて豪雨発生の背景となるメソスケールの環境要因を調べた結果を示す。第4章では今回の豪雨に先行した台風7号の影響を考察した。第5章では気象庁アンサンブル予報結果を解析し、本事例がどの程度予測可能であったかを調べた結果をまとめた。

第6章では、西日本全体を計算領域とする分布型流出モデルを用いた流出解析の結果をまとめた。さらに、第7章には、洪水抑止の一方策ともなりうる技術として、木製可動型水流減勢工に関する研究を収録した。

2. 気象レーダー等から読める豪雨の特徴とその将来頻度変化の解析（中北・山口・小坂田）

2.1 まえがき

平成30年7月豪雨では、図2.1に示すように、長期間に広い範囲で非常に多くの総雨量がもたらされ、西日本を中心に死者224名^①という、平成に入って最大の死者数となる甚大で痛ましい人的被害が発生した。平成29年にも短時間かつ局所的な九州北部豪雨による甚大な被害が発生しており、近年、地球温暖化の影響が出始めているのではないかと感じるような、今までの常識が通用しない豪雨災害が頻発している。地球温暖化に対して後悔しない適応をするため、現象の理解を進めるとともに、災害からの教訓、そして将来予測の共有がますます重要になってくるだろう。

本稿では、国土交通省のXバンド偏波ドップラーレーダー（以下、XバンドMPレーダーと記す）及び既出のCX合成雨量情報を用いて、本豪雨で引き起こされた災害の特徴をまとめる。また、XバンドMPレーダーの3次元情報を用いて雲特性を解析するとともに、気候モデル出力を用いて地球温暖化の影響評価について解析を行った。気候モデルの詳細については後述する。

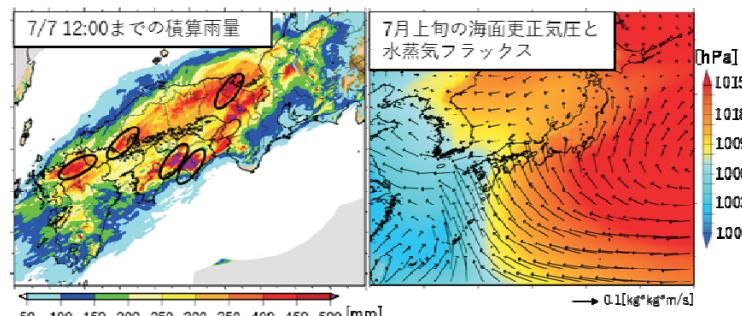


図2.1 (左) 国土交通省のXバンド偏波及びCバンド偏波ドップラーレーダーの合成雨量による7月7日12時までの60時間積算雨量と(右)メソ客観解析データMSMの7月上旬の海面更正気圧(色)と水蒸気フラックス(矢印)。

2.2 気象レーダーから読み取れる災害の特徴及び雲の特性

(1) 災害の特徴

平成 30 年 7 月豪雨の大きな特徴はやはり、非常に広域で長時間に渡って雨が降り続いたことである。豪雨期間中を通して、それほど強くない雨域が広域を覆い、典型的なバックビルディング型梅雨豪雨のような局所的豪雨は見られなかった。こうした豪雨により、岡山県真備町などにおける浸水や広島県の安佐北区や呉市などにおける土砂災害など、多くの災害が発生した。図 2.2 に、左から、広島県の呉市及び安佐北区付近における降雨強度、7 月 5 日 00 時からの積算雨量、土壤雨量指数を示す。上段から 6 日 19 時、7 日 02 時、7 日 05 時の図である。図中の白い星印は土砂災害があった場所を表しており、積算雨量と土壤雨量指数の赤字のタイトルは、土砂災害が発生したおよその時刻であることを示している。降雨強度と積算雨量の図は CX 合成雨量から作成し、土壤雨量指数及び土砂災害の発生場所・時刻の情報は国土交通

省砂防部からご提供いただいた。

図 2.2 からわかるように、各時点では、これまで降り続いた長雨によりかなりの積算雨量となっている。そこへ再び、必ずしも強くない線状降水帯が何度も押し寄せ、1 波、2 波、3 波、4 波と通過していった。その度に、既に満身創痍であった多くの山腹斜面において次々と土砂災害が発生した。そして、図 2.2 の下段に示す 7 日 05 時は豪雨の終わりかけの時刻であるが、この最後に移動していった線状降水帯が、トンカチで連打するかの如く多くの地点で土砂災害を起こしていった。

山腹斜面だけでなく、河川流域やダム貯水池においても水が満杯になっており、それ以上少しでも豪雨があると土石流や斜面崩壊が生じたり、河川流域の山々から既に満杯の川やダム貯水池に雨水が流出したりするような状態であった。すなわち、耐えうる限界にあった。そして、その上で加えて豪雨が押し寄せた。トンカチ役となった、そう強くない豪雨の 1 波、2 波の影響を評価するには、今後より、レーダー等を用いた短時間降雨予測の強化やその利用の促進を図る必要があるだろう。

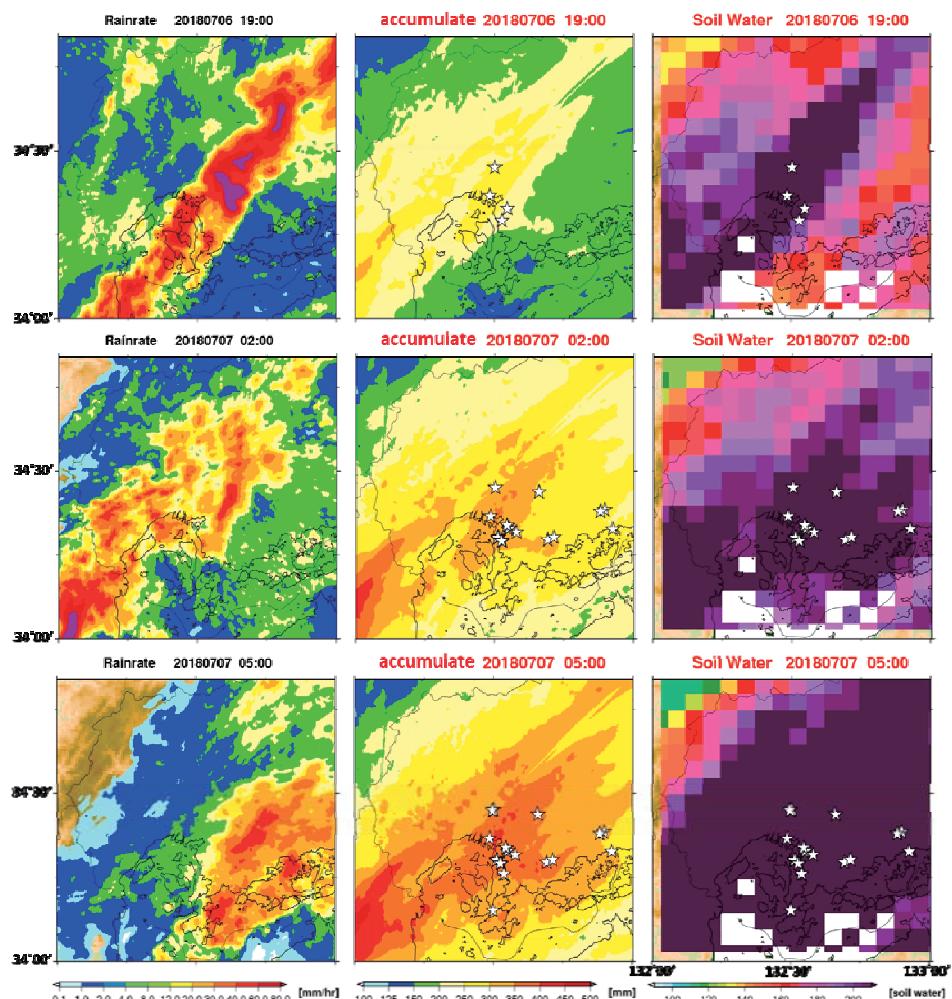


図 2.2 (左) 降雨強度、(中) 7 月 5 日 00 時からの積算雨量、(右) 土壤雨量指数。積算雨量と土壤雨量指数について、星印は土砂災害発生場所を示し、図のタイトルが赤字であるのは土砂災害があったおよその時刻であることを意味している。

(2) 3次元雲情報の特徴

次に、Xバンド MP レーダーの三次元情報を用いて雲情報を解析した。図 2.3 に、Xバンド MP レーダーから作成した平成 30 年 7 月豪雨時の近畿地方におけるレーダー反射強度の立体図を示す。図の左に平成 30 年 7 月豪雨、右に比較として、典型的なバックビルディング型梅雨豪雨であった平成 29 年九州北部豪雨の図を示す。

図 2.3 からわかるように、平成 30 年 7 月豪雨は、典型的な線状対流系であった九州北部豪雨と比較して雲の高さが低い。このことは、川野・鈴木・川村²⁾によって 2018 年日本気象学会秋季大会で報告された、「平成 30 年 7 月豪雨時には雷がほとんどなかった」という結果と対応するものである。こうした雲の特性においても、平成 30 年 7 月豪雨は典型的な線状対流系とは異なっていたと言える。

2.3 地球温暖化の影響評価について

(1) 使用データ

地球温暖化の影響評価には、文部科学省創生プログラムで気象庁気象研究所によって計算された 5km 解像度の非静力学領域気候モデル NHRCM05、及び大量アンサンブルデータである d4PDF_NHRCM20（以下、d4PDF20 と記す）を用いた。NHRCM05 の将来気候は全球平均気

温 4 度上昇シナリオである RCP8.5 に基づき計算され、海面水温 (SST) アンサンブルが 4 本（以下、c0-c3 と記す）が出力されている。d4PDF20 の将来気候は全球平均気温 4 度上昇定常状態で計算されており、同じく SST アンサンブルとして現在気候 50 本、将来気候 90 本の大量アンサンブルが出力されている³⁾。また、平成 30 年 7 月豪雨を含め、過去に実際発生した梅雨豪雨の解析には CX 合成雨量、及び気象庁のメソ客観解析データ MSM を用いた。

(2) 解析結果

・発生頻度

Osakada and Nakakita⁴⁾は、NHRCM05 の 6~8 月における降雨出力からメソ β スケールの梅雨豪雨を抽出し、その発生頻度を解析している。結果を図 2.4 に示す。

図 2.4 が示すように、メソ β スケールの梅雨豪雨は日本のほとんど地域で増加傾向にある。この傾向は、近年の梅雨豪雨の頻発と矛盾していない。しかし、この結果はあくまで、平成 29 年九州北部豪雨のように、梅雨期に発生するメソ β スケールの豪雨が増加することを示している。必ずしも、今回の平成 30 年西日本豪雨のように、広域かつ長時間持続する豪雨をカウントしたものではないことに注意が必要である。

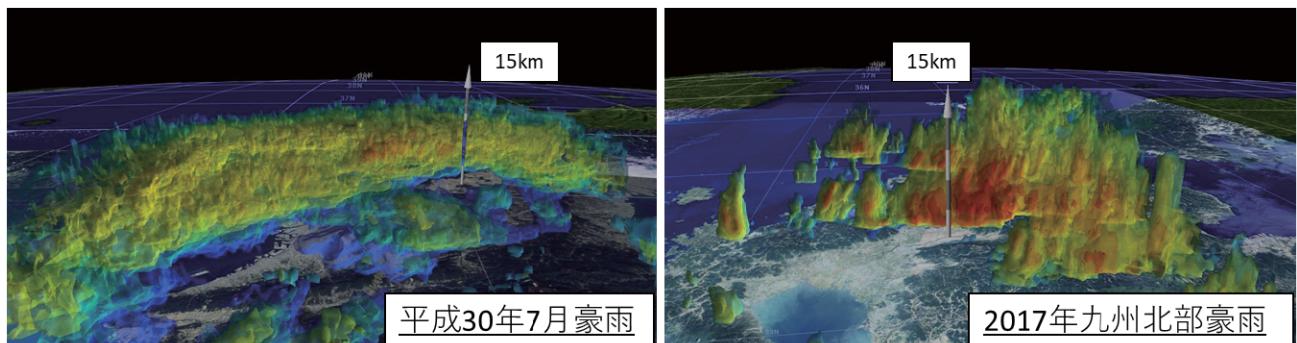


図 2.3 X バンド MP レーダーから作成した（左）平成 30 年 7 月豪雨と（右）平成 29 年九州北部豪雨のレーダー反射強度の立体図。

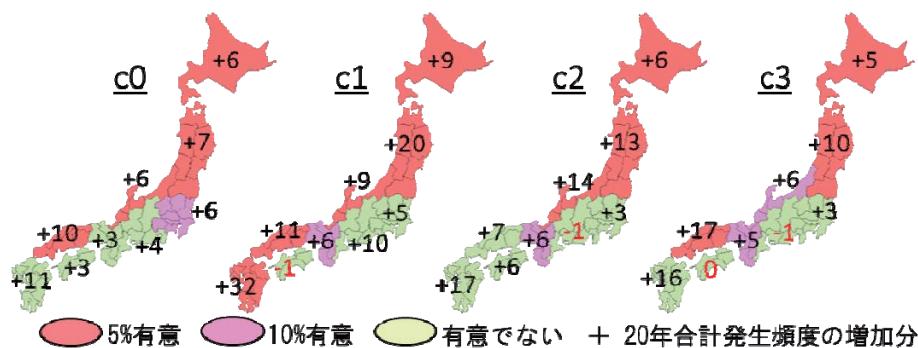


図 2.4 梅雨豪雨発生頻度の将来変化⁴⁾。

・積算雨量

小坂田・中北⁵⁾は、NHRCM05 から抽出された梅雨豪雨事例⁴⁾を用いて、50mm/h 以上の強雨継続時間当たりの積算雨量が将来増加することを示している。平成 30 年 7 月豪雨の中で、NHRCM05 からの梅雨豪雨抽出基準⁴⁾に当てはまる事例（図 2.1 左の黒枠内で囲んだ事例）について、同様に強雨継続時間と積算雨量を算出した。

図 2.5 に結果を示す。青△が NHRCM05 の現在、赤○が将来で発生した梅雨豪雨、□が過去に発生した梅雨豪雨を表す。平成 30 年 7 月豪雨は黒□で、平成 29 年九州北部豪雨はピンクの□で示している。平成 29 年九州北部豪雨と比較して、平成 30 年 7 月豪雨は現在の分布の中でも積算雨量が少ない。すなわちメソ β スケールの梅雨豪雨としては、平成 30 年 7 月豪雨は、現在気候においても極端ではなかった。そのため、本豪雨の異常さはより大規模な場からその特徴を捉える必要があるだろう。

・水蒸気量

そこで次に、日本域に流入した水蒸気量の解析結果に

ついて述べる。北緯 30°上の東経 128~138°間で水蒸気フラックスの南北成分、東経 127.8°上の北緯 30~33°間で東西成分を、北及び東を正として合計し、水蒸気フラックス量 F と定義した。今回は、数日わたって持続した平成 30 年 7 月豪雨の特徴を踏まえ、3 日間合計の F を解析した。d4PDF20 の 6~8 月のデータから算出した 3 日間合計 F の相対頻度分布を図 2.6 に示す。

平成 30 年 7 月豪雨発生時の水蒸気流入量は、現在気候では分布の裾野に位置しており、非常に稀な量の水蒸気が日本域に流入していたことを確認した。平成 29 年九州北部豪雨発生時や、平成 30 年 7 月豪雨と類似性の高い 1972 年豪雨発生時と比較しても、その大きさは突出している。時間空間スケールが平成 30 年 7 月豪雨より小さい平成 29 年九州北部豪雨の特徴を踏まえ、日平均 F を比較しても、平成 30 年 7 月豪雨時の水蒸気流入量は突出していた（図省略）。また、将来気候でも極端な水蒸気量であるが、将来では同程度の水蒸気量が流入する頻度が増加することも見て取れる。

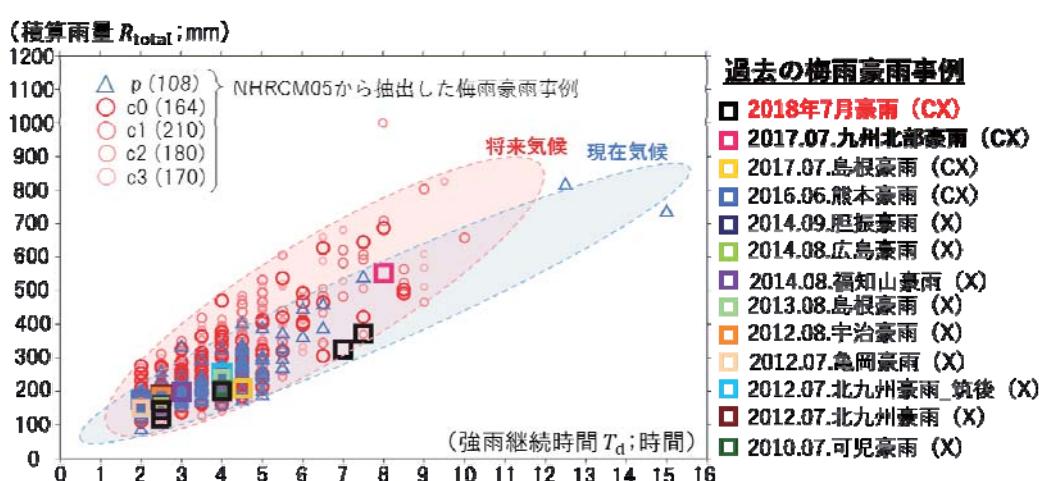


図 2.5 強雨継続時間と積算雨量の将来変化。

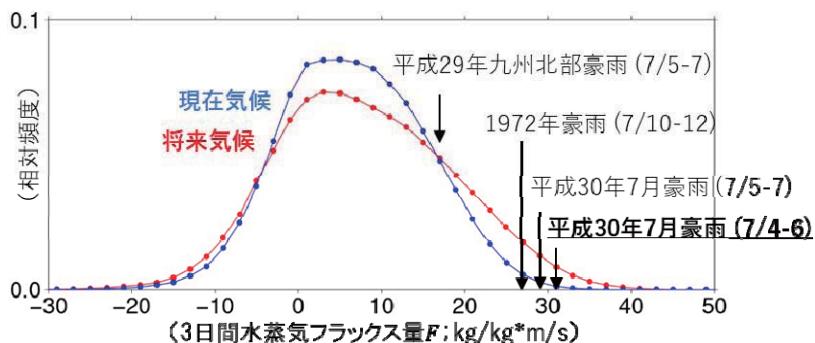


図 2.6 d4PDF20 から算出した 3 日間合計水蒸気フラックス量の相対頻度分布。1972 年豪雨は JRA55、その他の過去事例は MSM から値を算出した。

・大気場パターン

最後に、平成 30 年 7 月豪雨発生時の大気場パターンに関する解析について述べる。

大気場パターンに関しては、d4PDF20 の 10 日平均値の海面更正気圧及び水蒸気フラックスをクラスター分類し、図 2.1 右に示す平成 30 年 7 月豪雨発生時の 10 日平均値大気場と類似度の高いクラスターの将来変化を解析した。その結果、平成 30 年 7 月豪雨発生時の大気場パターンは、将来気候において増加する傾向は見られなかった。しかし、大気場パターンの将来変化に関してはより精査が必要であり、再現期間など定量的な値の算出も含めて、今後の課題とする。

5. まとめ

平成 30 年 7 月豪雨の特徴を大枠でまとめる。

1. 梅雨豪としては珍しく、背の高くない雲によって、長期間に広い範囲でたくさんの総雨量がもたらされた。
2. それにより、満身創痍になっていた多くの山腹斜面・河川流域・ダム貯水池で、通り過ぎて行ったそう強くない豪雨の一波二波が、トンカチのごとく土砂崩壊、洪水、ダムの小貯水池からの緊急放流をもたらした。
3. そのため、情報伝達、避難に関しても多くの観点をもたらした。

災害をもたらすトンカチ役となったそう強くない豪雨の影響を評価するには、本稿で用いた X バンド MP レーダーのような気象レーダ等を用い、短時間降雨予測の強化とその利用をますます促進していく必要があるだろう。

また、地球温暖化による将来変化との関係を以下にまとめる。

1. 典型的な線状降水帯型の梅雨豪雨の頻度は将来増加する。これまでほとんど梅雨豪雨が発生していないかった地域でも生起する。そして、同じ強雨の継続時間内でも、その時間内での強雨総雨量は増大する。
2. しかし、平成 30 年 7 月豪雨のように停滞する大気のパターンは、将来気候において増加する兆候は見られていない。
3. 平成 30 年 7 月豪雨発生時の流入水蒸気量は、現在気候ではほとんど最大レベルの流入量であった。

また、将来気候でも珍しく多い範疇であるが、現在気候と比較するとその頻度は増加する。そのため、将来気候において総降雨量が増加することに対する対策が必要になる。

将来、典型的な梅雨豪雨は将来気候でより頻繁に、より強力に、そしてこれまで未経験に地域にも生起し始める。また平成 30 年 7 月豪雨のような広域かつ長時間の豪雨についても、水蒸気量の増加によって総降雨量は増大する危険性がある。

こうした変化をもたらす地球温暖化に対して後悔しない適応をするためにも、気候変動将来予測を軸にした適応が必要である。さらに、治水の基礎体力の増強、自助・共助としての防災力の増強も喫緊の課題である。上記の対策は多くの時間を要する上に、昨今の豪雨頻発を受け、じわじわとでも地球温暖化の進行速度の方が早いように感じられる。後悔しないため、早急かつ計画的な対応が求められる。災害からの教訓を蓄積し、将来予測を隅々まで共有し、どういう優先順位をもって適応していくか、考える時に来ているだろう。そして、水工学・土木工学・気象学の中で、またこれらの融合の中で、“研究”として抜けているものはないかを探し、埋めていくことが重要である。

参考文献

- 1) 内閣府 (2018) : 平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について.
- 2) 川野哲也・鈴木賢士・川村隆一 (2018) : 平成 29 年 7 月九州北部豪雨をもたらした線状降水帯の発電特性、日本気象学会秋季大会.
- 3) Mizuta, R., A. Murata, et. al., (2016): Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 98, pp. 1383-1398.
- 4) Osakada, Y. and E. Nakakita (2018): Future change of occurrence frequency of Baiu heavy rainfall and its linked atmospheric patterns by multiscale analysis, *SOLA*, vol. 14, pp. 79-85, doi:10.2151/sola.2018-014.
- 5) 小坂田ゆかり・中北英一 (2018) : 領域気候モデルによる梅雨豪雨継続時間と積算雨量の将来変化予測と過去の事例を用いた検証、土木学会論文集 B1 (水工学) , vol. 74 (5), pp. I_25-I_30.

3.豪雨発生の環境条件のメソ気象解析（竹見）

3.1. はじめに

平成 30 年 7 月豪雨では、200 名を超える方が犠牲となり、平成に入ってからの風水害で最悪の犠牲者を出した事象となった。台風 7 号の通過後、北海道、中部地方、近畿地方、中国地方、四国地方、九州地方の広域で豪雨が発生し、各地で甚大な被害が発生した。気象庁による調査⁹⁾によれば、降水の観測史上 1 位を更新した地点数は、最大 1 時間降水量では 14 地点、最大 3 時間降水量では 16 地点、最大 6 時間降水量では 31 地点であるのに対し、積算時間が長くなった場合、すなわち最大 24 時間降水量では 77 地点、最大 48 時間降水量では 125 地点、最大 72 時間降水量では 123 地点と格段に多いことがわかる。長時間での大雨が全国的に広く発生したことが、平成 30 年 7 月豪雨の特徴であると言える。

今回の豪雨の 1 年ほど前には、九州北部で豪雨が発生（平成 29 年 7 月九州北部豪雨）し、九州北部で大きな災害が生じた。この九州北部豪雨では、「線状降水帯」と呼ばれる積乱雲が線状に組織化したメソ対流系が停滞し、長時間持続したこと、6 時間以上にも及んで豪雨が発生したことで災害に至った。ただし、大雨の発生地域は九州北部を中心とした限られた範囲であった。それに対し、平成 30 年 7 月豪雨では、日本全国の広域で豪雨が発生し、他地点で長時間の降水の記録が更新されことが特異であった。

このような豪雨事象が、どのような気象状況で発生したのか、なぜ全国の広い範囲で大雨が発生したのか、といった点を明らかにすることは、豪雨の発生機構を理解する上で重要なことである。そこで本研究では、客観解析データを使って、平成 30 年 7 月豪雨の発生した環境条件を明らかにすることを目的とする。

3.2. 使用データ

本研究では、降水の観測値として気象庁合成レーダーのデータを用いた。合成レーダーデータは、全国 20 台の気象庁気象レーダーにより観測された降水強度値であり、10 分間隔で取得されるものである。地上雨量観測での補正はされていないことに注意が必要である。

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

定には、Unuma and Takemi (2016a)²⁾に従った。
なお、時刻はすべて日本標準時刻とした。

3.3 解析結果

(1) 降水の実態と停滞性降水系

図 3.1 に合成レーダーによる全国の 2018 年 7 月 5 日から 7 日までの 3 日間の積算降水量の分布を示す。この 3 日間で、中部地方から九州地方にかけての広域で大雨が発生していることがわかる。また、図 3.2 には、合成レーダーデータから算出した最大 24 時間降水量の分布を示す。図 3.1 と同様に、中部地方から九州地方にかけて、豪雨が起っている様子が見て取れる。

図 3.3 は、Unuma and Takemi (2016a)²⁾による準停滞性降水系の発生地域の分布を示したものである。この図に示したのは、2005 から 2012 年の 8 年間の暖候期（5~10 月）の期間を対象として、合成レーダーデータから停滞性降水系の発生頻度が高い地域には、中部地方内陸部、近畿地方、中国地方、四国地方、九州地方があることがわかる。これらの地域は、図 3.1 に示

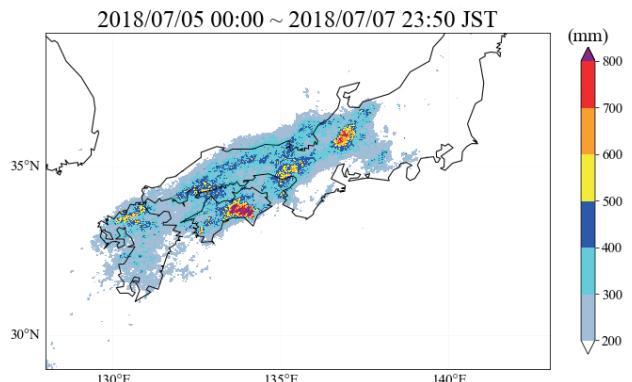


図 3.1 合成レーダーによる 2018 年 7 月 5 日 00:00 から 7 日 23:50 の積算降水量

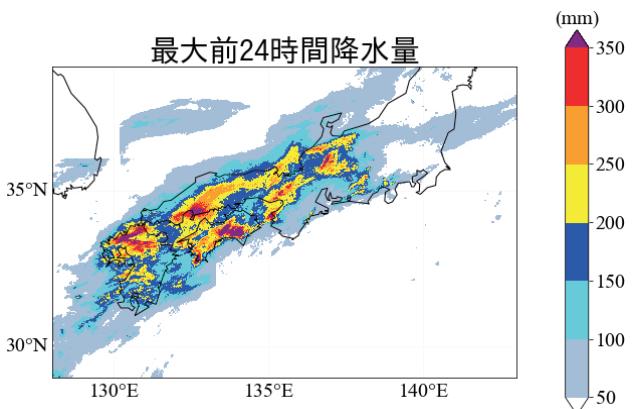


図 3.2 合成レーダーによる最大 24 時間降水量の分布

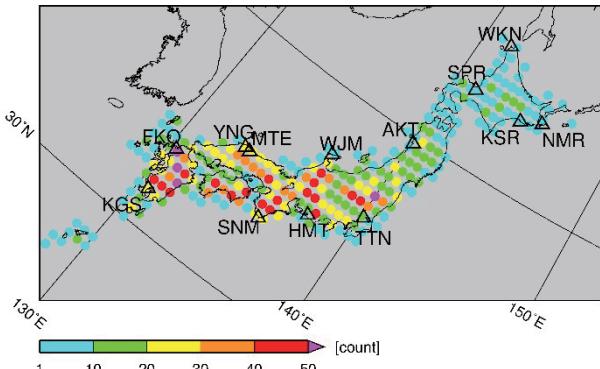


図 3.3 Unuma and Takemi (2016a)²⁾の 2008～2012 年暖候期の統計による準停滞性降水系の発生頻度

す大雨の発生地域とよく一致しており、平成 30 年 7 月豪雨の発生地域は、停滞性降水系がそもそも発生しやすい地域であったと言える。言い換えると、気候学的に見て停滞性降水系の発生しやすい地域で、平成 30 年 7 月豪雨を引き起こした降水系が発達したのである。今回の豪雨事例では、Unuma and Takemi (2016a)と同様の準停滞性降水系の抽出はしていないが、今後は合成レーダーデータから停滞性の降水系を抽出し、その全国分布を把握することが必要である。

(2) メソスケール環境条件の解析

7 月 5 日 00:00 から 8 日 00:00 までの期間で平均した MSM 解析値による大気場を見ていくこととする。環境条件の診断には、積乱雲の発達の度合いを示すための指標を用いる。これらの指標は、Unuma and Takemi (2016a)²⁾で使用されたものであり、平成 30 年 7 月豪雨の環境条件を気候学的な環境条件と比較する上で有用である。

まず、対流の発達ポテンシャルを評価する指標として、K Index と CAPE (Convective Available Potential Energy)を用いた。K Index (KI)とは、次式で定義される指標である。

$$KI = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$$

ここで、 T_{850} は 850 hPa での気温、 T_{500} は 500 hPa での気温、 T_{700} は 700 hPa での気温、 Td_{850} は 850 hPa での露点温度、 Td_{700} は 700 hPa での露点温度である。この式から K Index は、対流圈下層の気温減率、下層の湿度、中層の乾燥度を組み合わせた指標であることがわかる。

図 3.4 にこれら指標の分布を示す。K Index から、積乱雲の発達ポテンシャルが高い地域（数値が 35 以上の場合）が、東シナ海上から九州・四国・中国・近畿・中部の各地方に集中するように南西から北東に伸びている様子が見て取れる。一方、CAPE については、南ほど数値が高くなるというように、緯度方向の変化が顕著であり、豪雨域に局在化して数値が高くなるといった傾向は表れない。

K Index により豪雨域に対応した不安定領域を特定できるので、K Index に関する気温減率と水蒸気量を次に調べる。図 3.5 に、対流圈下層での気温減率と可降水量を示す。気温減率は、南にいくほど大きくなるというように緯度方向の変化が卓越し、豪雨域との対応は認め

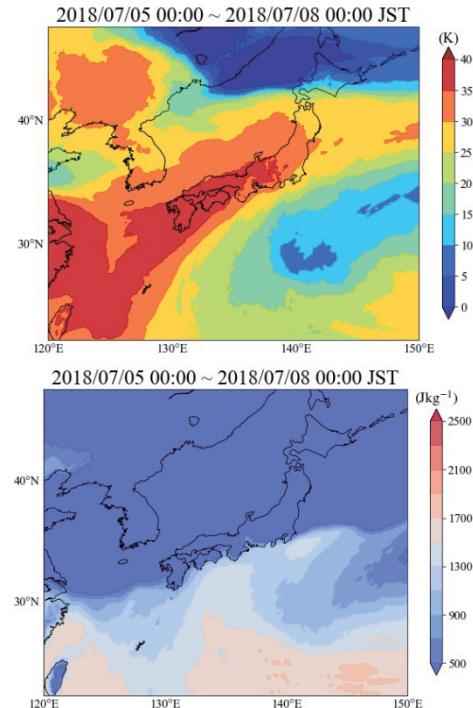


図 3.4 K Index (上) および CAPE (下) の時間平均場

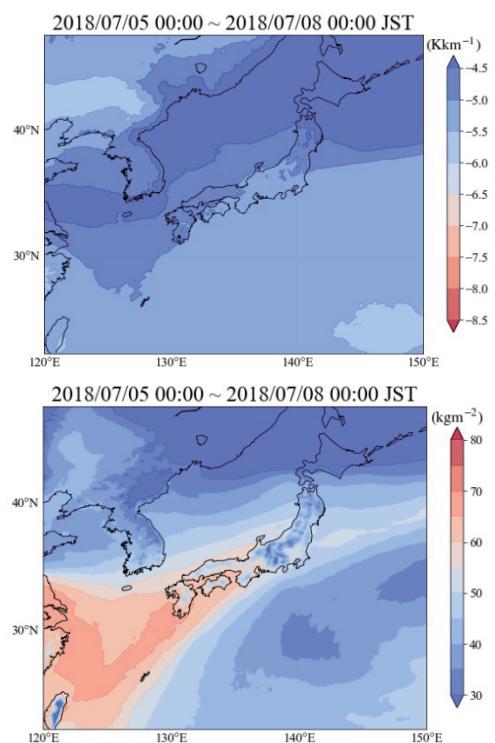


図 3.5 気温減率 (上) および可降水量 (下) の時間平均場

られない。一方、可降水量は、大きな数値が東シナ海から西日本に筋状に伸びている様子がわかる。この高可降水量の日本列島上の領域が豪雨域とよく対応している。

7月5日00:00から8日00:00の間の可降水量の最大値の分布を図3.6に示す。最大値の分布も、図3.5の平均値と同様の分布パターンを示している。その数値は、70～80である。Unuma and Takemi (2016a)の統計によれば、準停滞性降水系の環境の可降水量は、60程度が最頻値であり、70を超えた場合はかなり頻度が少なく、80を超えるのは極めて稀であることがわかっている。この統計に比べると、図3.6で示される可降水量は、極めて大きな量であると言える。

このような大量の可降水量は、大気の相対湿度が極めて高いことが要因の一つである。大気下層は常時湿度が高いため、可降水量の大小は中上層の湿度の高低に依存するものと考えられる。そこで、中上層の700 hPaから300 hPaの層で鉛直平均した相対湿度を算出し、その時間平均場を求めた。図3.7に、この層平均・時間平均の相対湿度場を示す。豪雨の発生地域では、平均した相対湿度が85%を超えていていることがわかる。中上層で平均した相対湿度がこのように極めて高い数値を示すのは、ひとつには積乱雲が発生していることで湿度が高まったという結果として表れるものだと言えるが、一方で、東シナ海から伸びる高い水蒸気量の気塊群が豪雨の環境場を形成していると考えられる。よって、中上層の高湿度条件は、豪雨発生の必要条件の一つであると考えられる。

最後に、停滞性降水系が線状であるかどうかを診断する指標であるバルクリチャードソン数を調べた（図3.8）。Unuma and Takemi (2016b)³⁾によると、停滞性降水系が線状であるか円形状であるかを分ける有意な指標としてバルクリチャードソン数を挙げた。彼らの統計解析によれば、バルクリチャードソン数は、線状の場合に32.8、円形状の場合に47.8であった。線状の場合の値は、米国中西部のスコールライン⁴⁾のうちバックビルディング型の場合の数値と同程度である。

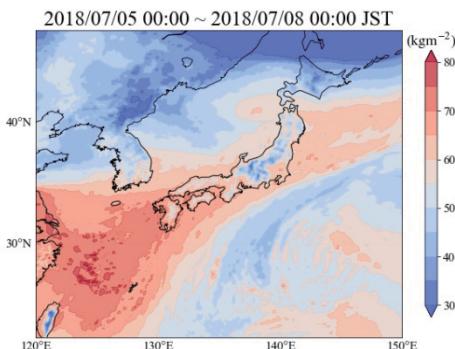


図3.6 可降水量の7月5日00:00から8日00:00の間の最大値の分布

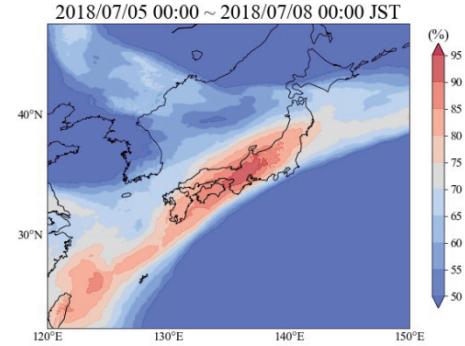


図3.7 700～300 hPaの鉛直層平均かつ時間平均した相対湿度場

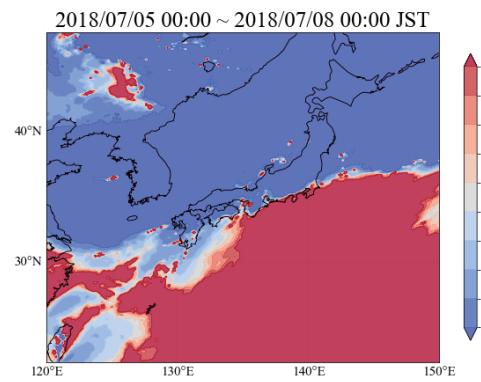


図3.8 バルクリチャードソン数の時間平均場

3.4 まとめ

本研究では、メソモデル (MSM) の3時間間隔の解析値を用いて、大気の不安定度および鉛直シアーアーに係わる条件を調べた。不安定度の指標である K Index が、西日本の豪雨域において非常に不安定な状況を示していた。CAPE や気温減率からは特別に不安定な状況を見出せなかつたものの、一方水蒸気量には顕著な特徴が見られた。可降水量は、平均で 60 mm 以上・最大で 70 mm 台と大きな値を示した。中層 (700–300 hPa) で平均した相対湿度が高い状況が持続していた。また、適度な鉛直シアーアーの存在により、線状の降水系が発達しやすい状況となっていた。

本研究では停滞性降水系の抽出には至っていないため、今後はその抽出作業を実施する必要がある。抽出された停滞性降水系の特徴と環境条件とを比較することによって、大都市での暴風リスクをハザード情報として活かすことが大切であろう。

参考文献

- 1) 気象庁：平成 30 年 7 月豪雨（前線及び台風第 7 号による大雨等），平成 30 年 7 月 13 日，53 pp., 2018.
- 2) Unuma, T. and Takemi, T.: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 142, pp. 1232-1249, 2016a.
- 3) Unuma, T. and Takemi, T.; A role of environmental shear on the organization mode of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *SOLA*, Vol. 12, pp. 111-115, 2016b.
- 4) Bluestein, H. B. and Jain, M.H.: Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.* Vol. 42, pp. 1711-1732, 1985.

4. 台風第7号の影響（榎本）

「平成30年7月豪雨」（以下、西日本豪雨）の要因については、異常気象分析検討会（著者は部会員）で検討され、気象庁が報道資料として発表している¹⁾。この資料では、豪雨の要因として、

- 西日本における暖湿流の持続的な合流
- 梅雨前線の停滞・強化に伴う持続的な上昇流形成
- 局地的な線状降水帯の形成²⁾

が指摘されている。豪雨は梅雨前線上を東進した気圧の谷に伴って豪雨に伴い、上記に指摘されている現象が発生したことにより生じている。

また、災害の規模が大きくなった要因として、梅雨前線に伴う降水に加えて、それに先行する台風による先行雨量が重要であると考えられる。さらに、台風が通過することにより梅雨前線が強化されやすくなった可能性も考えられる。

そこで本章では、台風が梅雨前線の強化に果たす役割について調べる。特に、総観規模（数千km）の場に着目して、豪雨のメカニズムと予測可能性について、全球現業数値予報モデルを用いた予報実験を行い、観測や再解析データと比較しながら検討する。

以下、西日本豪雨の特徴とそれに先行する台風の概要について述べた後、予報実験の設定、実験結果について示す。最後の節で解析・実験の結果についてまとめる。

（1）はじめに

西日本豪雨の特徴は、降水が広い範囲に広がり数日間持続したことである。図4.1aに7月5～7日の3日間積算した気象庁合成レーダーに基づく降水量を示す。3日積算降水量200mm超の降水帯が西日本を東西に伸びているが、九州北部、四国、中国、近畿、中部地方に400mmを超えるような領域が点在している。降水が一般的に局地的な豪雨は線状降水帯などメソ（100km以下）スケールのメカニズムによりもたらされることが多いが、本事例ではそれに加えて総観スケールの流れ場が重要であると考えられる。

気象庁ベストトラックデータによると、台風第7号（Prapiroon、タイの雨の神）は、6月29日00UTCに130.3E, 19.8Nで発生した（図4.2太実線）。東シナ海を北上、九州の西で北東に進路を変え、7月3日12UTCに対馬海峡（129.6E, 34.4N）を通過し、日本海を北東進した後、7月4日06UTCに松前半島付近（134.8E, 39.6N）で消滅した。従って、西日本豪雨発生時には既に消滅しているが、直前に接近していた。

台風の進路予想は、6月29日12UTCからの予報では朝鮮半島上陸だったものが30日12UTCからの予報では日本海通過に更新されている。進路が異なる予報を比較

し、台風が果たす役割について検討する。

（2）データと実験設定

ここでは、解析に用いたデータと予報実験の設定について記述する。

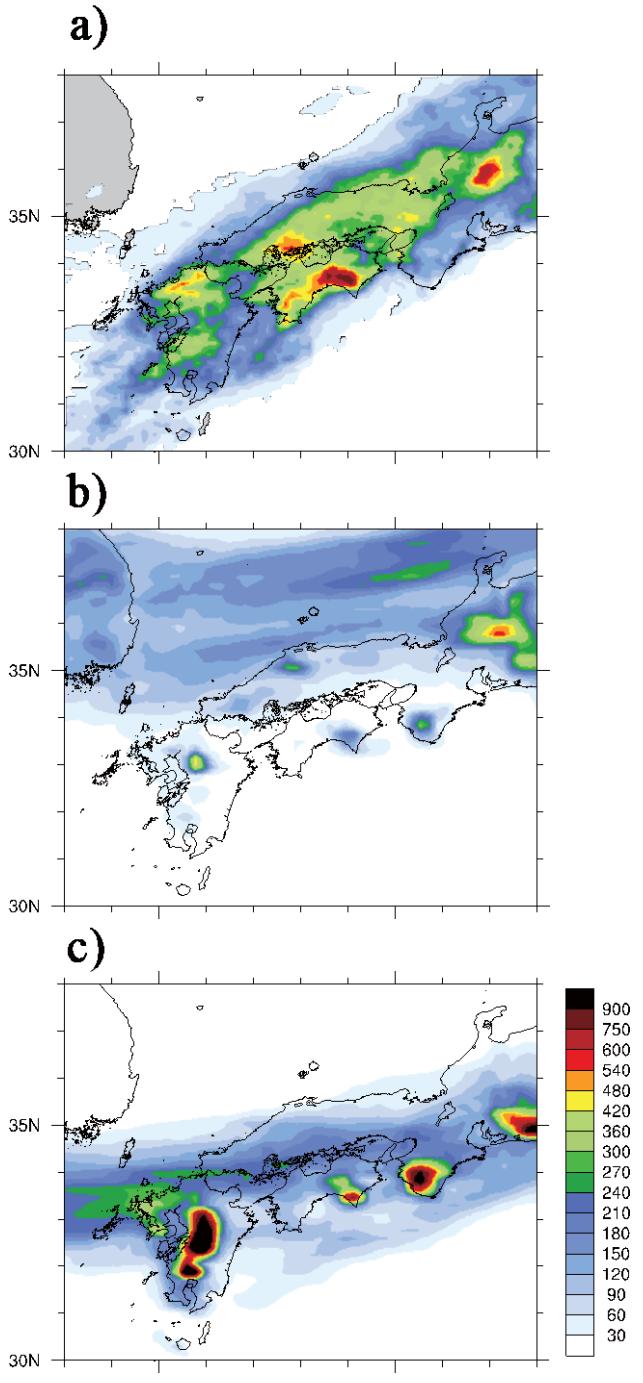


図4.1 2018年7月5～7日の3日間積算降水量mm。a) 気象庁全国合成レーダー、初期時刻2018年6月28日 b) 28日、c) 29日12UTCからの予報実験

a) データ

降水量データには気象庁全国合成レーダー、台風のデータは気象庁ベストトラック、大気循環場のデータには気象庁 55 年再解析 (JRA-55)²⁾ を用いた。全国合成レーダーは毎日 00:10 から 10 分間値を翌日の 00:00 までの値を平均し、日平均値とした。ベストトラックは予報実験の出力に合わせて 6 時間毎の値に間引いた。JRA-55 は等圧面 6 時間毎の値と毎日 00, 06, 12, 18 UTC の 4 つの時刻を平均して作成した日平均データを用いた。

b) 実験設定

予報実験に用いた大気循環モデルは、欧州中期予報センター (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) の現業数値予報モデル IFS (Integrated Forecast System) からデータ同化システムを取り除き、コミュニティ版とした OpenIFS のバージョン Cy40r1v2 で、2013 年 11 月から 2015 年 5 月まで現業で用いられていたものに対応する。解像度は TL1023L60 (水平切断波数 1023, 鉛直 60 層) で水平解像度は約 20 km である。台風や豪雨の予測可能性について調べるため、初期時刻を 6 月 28 日 12 UTC から 7 月 3 日 12 UTC まで、12 時間毎の初期値から 7 月 8 日 12 UTC まで時間積分した。初期値は ECMWF から現業解析を入手した。波浪モデルを結合した実験も行ったが、台風進路に大きな影響は認められなかつたので、今回は波浪なしの結果について示す。

(3) 結果

本節では、西日本豪雨や台風の再現性について予報実験の結果を示す。豪雨のメカニズムや予測可能性について検討するため、暖湿流の流入や鉛直流の強制について予報値を解析値と比較する。特に豪雨と台風進路の予想ができなかった 6 月 29 日 12 UTC からの予報と予想できた 30 日 12 UTC からの予報とを比較する。

a) 積算降水量

図 4.1b, c に 6 月 29 日 12 UTC からの予報と 30 日 12 UTC からの予報における 7 月 5~7 日の 3 日間積算降水量を示す。

6 月 29 日 12 UTC からの予報 (図 4.1b) では、降水帯は朝鮮半島から日本海を東西に伸びており、九州北部、山陰、四国南東部、紀伊半島南西部、中部地方に局所的に降水量が大きい地域が見られるものの、西日本のほとんどどの地域では降水量は 100 mm 以下である。これに対し、6 月 30 日 12 UTC からの予報 (図 4.1c) では、レーダー観測ほど多くはないが、降水帯は日本列島に沿って形成され、西日本で顕著に降水量が増加している。九州北部、四国南東部、紀伊半島南西部、中部地方太平洋岸に 600 mm を超える豪雨が予想されている。レーダーに

は紀伊半島南西部の極大は見られず、西日本全体の降水量は過少に予想されているものの、前日からの予報と比較して、レーダー観測に近づいている。紀伊半島南西部の極大は 7 月 3 日 12 UTC からの予報では顕著に弱くなるが、西日本全体の降水の過少傾向は 7 月 1, 2 日を初期時刻とした予報にも見られる。

b) 台風の進路

図 4.2 に台風の予想進路を示す。初期時刻 6 月 28 日 12 UTC からの予報では台風は華南に上陸し、消滅している。29 日 00 UTC と 12 UTC, 30 日 00 UTC からの予報では、朝鮮半島北部に上陸している。いずれもベストトラックと比べて、経路は西ないし北西にずれている。初期時刻 6 月 30 日 12 UTC からの予報では、朝鮮半島南部に上陸し、2~3 度程度北西バイアスが残るもの、台風は日本海を北東進し観測の消滅位置に近い北東北の西岸で消滅している。以降の初期時刻では、対馬海峡を通過するベストトラックにはほぼ沿ったもの進路が予想されている。

図 4.2 の円の大きさから分かるように、進路が西または北にずれた予想においては、台風が十分に発達していなかった。

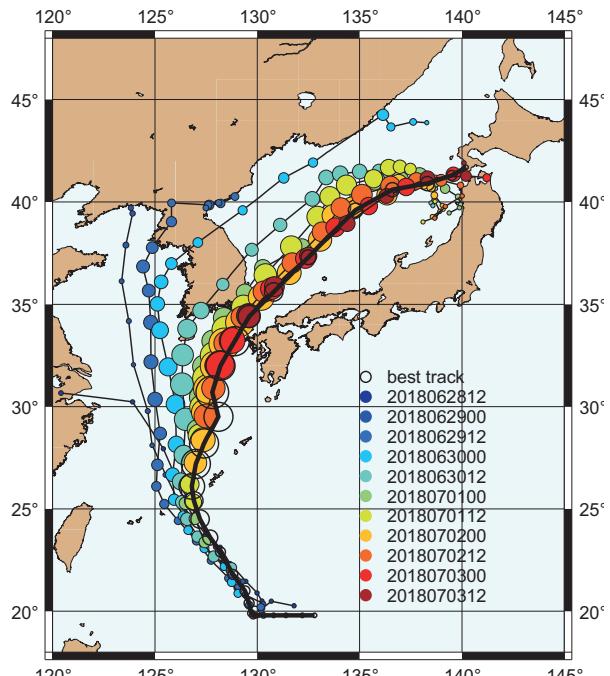


図 4.2 2018 年台風第 7 号の進路。太実線はベストトラック、その他は初期時刻を 2018 年 6 月 28 日 12 UTC から 7 月 3 日 12 UTC まで 12 時間間隔にして行った予報実験から作成。円が大きいほど中心気圧が低いことを示す。

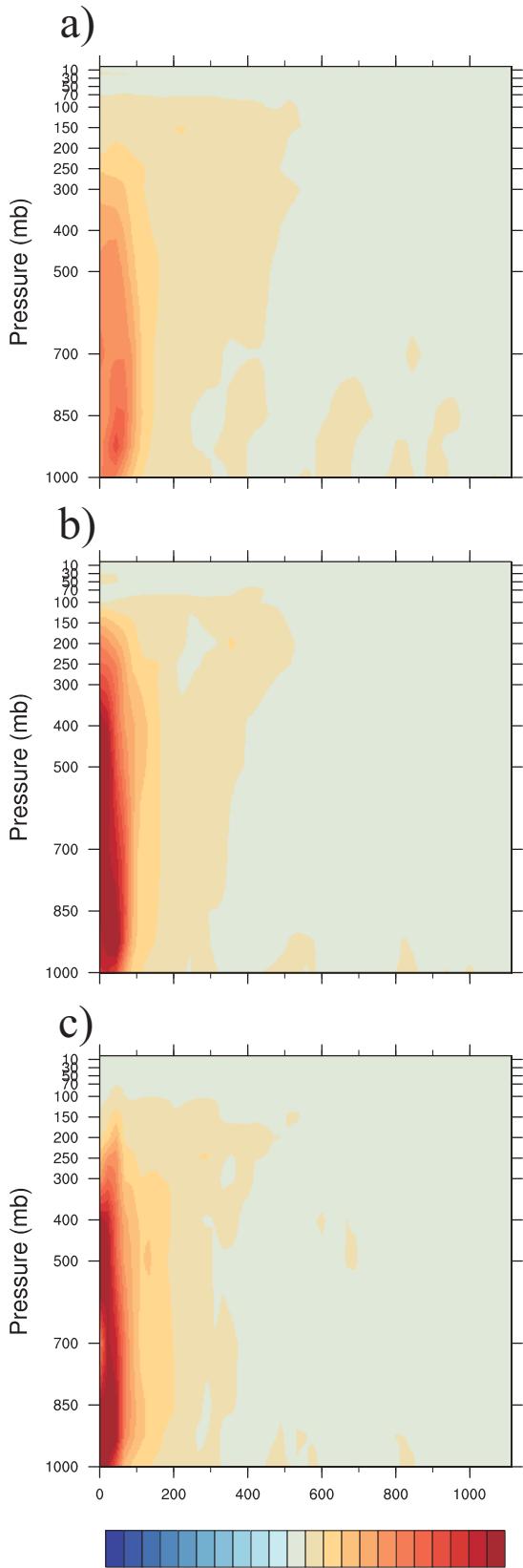


図 4.3 2018年7月2日12UTCにおける軸対称渦度 ($\times 10^{-4} \text{s}^{-1}$) の水平鉛直断面図。a) 6月29日, b) 30日12UTCからの予報実験と c) ECMWF 解析値。縦軸は気圧 hPa, 横軸は中心からの距離 km

進路の誤差の要因を調べるために、転向前の最盛期、7月2日12UTCにおいて渦の構造を比較する。ベストトラックによると、台風は128.1E, 29.5Nにあり、中心示度965 hPaに達していた。ECMWF解析値では、中心は127.5, 29.5E, 972.4 hPaであった。初期時刻6月29日12UTCからの3日間予報では、124.8E, 32.2Nと西北西に433.8 kmの誤差があり、986.1 hPaと解析値よりも約14 hPa弱い。初期時刻6月30日12UTCからの2日間予報では、126.3E, 31.1Nで西北西に245.8 kmの誤差があるが、973.6 hPaとほぼ解析値の強度を予想している。

図4.3に軸対称渦度の断面図を示す。正の渦度は反時計回りで、値が大きいほど渦が強いことを表す。台風の渦は最大接線風速半径の中心から約100 kmまでのところに集中している。中心から100 kmまで一様な渦度 $6 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ のランキン渦で近似すると、中心から100 kmにおいて風速は 30 ms^{-1} に達する。渦度 $6 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の等価線は、6月29日12UTCからの予報(図4.3a)では700 hPa以下に留まるのに対し、6月30日12UTCからの予報(図4.3b)では解析値(図4.3c)同様に対流圈上部250 hPa付近に到達している。渦が上空まで発達すると、偏西風の影響を受ける。そのため、渦が弱い6月29日12UTCからの予報では、東に転向せず北進を続けたと考えられる。

c)暖湿流

図4.4に台風が日本海に観測された7月4日12UTCにおける925 hPa面における相当温位を示す。相当温位は値が大きいほど暖かくて湿っていることを表す。再解析でも、予報でも華南に370 Kを超える高い相当温位の領域が広がっているが、日本付近への張り出し方が異なっている。再解析や6月30日12UTCからの予報(図4.4a, c)では高相当温位の空気が日本列島に沿って流入し、台風に伴う南西風によって東側から中心部に取り込まれている。台風が日本海にあることにより、太平洋高気圧との間の気圧傾度が高くなり、南西風が強化されていることが分かる。大陸からの高相当温位の空気の流入はこの南西風によるものと考えられる。これに対し、6月29日12UTCからの予報では、台風は朝鮮半島北部に上陸後衰弱したため、気圧傾度は日本列島よりも北西で強化され、大陸からの高相当温位の空気は日本海に向けて流入している。

d)前線形成

図4.4a, cの高度場の等価線を西日本域に着目してみると、南西から北東に進むに連れて間隔が狭まり気圧傾度が増すことを示している。このような場は合流場で前線が強化され、上昇流が誘導されることを示唆している。

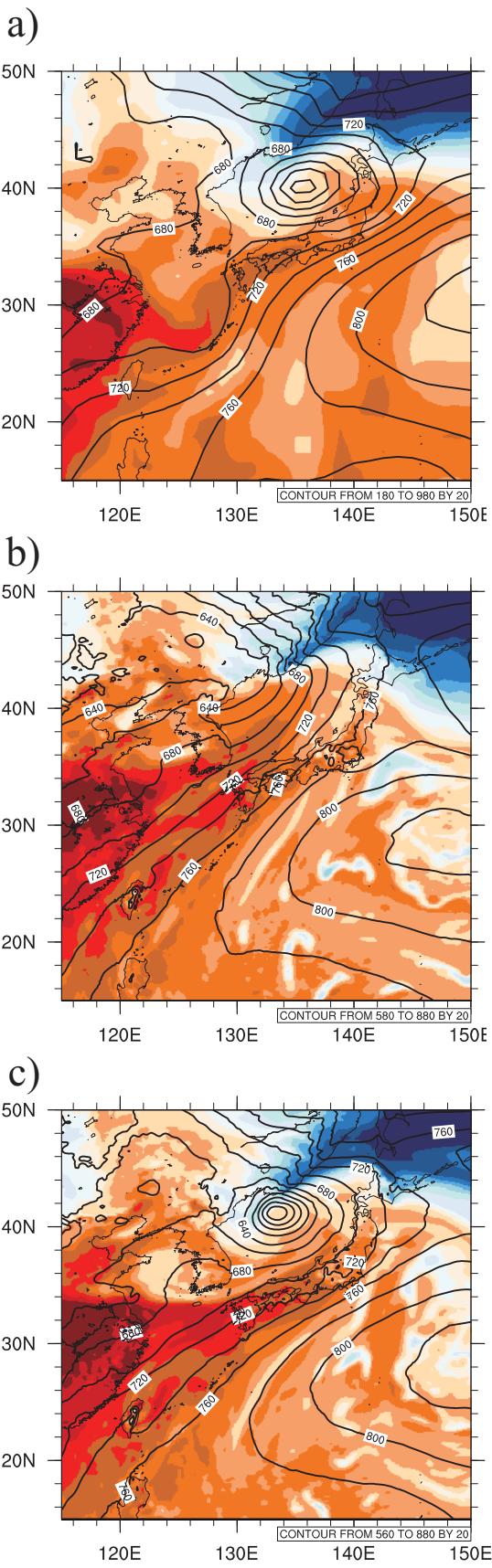


図 4.4 2018 年 7 月 4 日 12 UTC における 925 hPa 相当温位. a) JRA-55 再解析, b) 6 月 29 日, c) 30 日 12 UTC からの予報実験

(4)まとめ

総観規模場に着目して、台風第 7 号の西日本豪雨に対する影響について調べるために、現業数値予報モデルを用いて異なる初期時刻からの予報実験を行った。2018 年 6 月 29 日 12 UTC からの予報では、台風は十分に発達せず、朝鮮半島北部に上陸して弱まり、西日本豪雨は発生しなかった。6 月 30 日 12 UTC からの予報では、台風は対流圈上部まで発達し、ベストトラックに準じた日本海を北東進する進路をとり、量や極大の位置には必ずしも一致しないが、西日本でまとまった降水が予想された。予報実験と再解析を分析した結果、台風は日本海において太平洋高気圧との間の気圧傾度を高め、西日本で合流場を形成したため、前線が強化され上昇流を誘導していたことが示唆された。

これら二つの初期時刻からの予報実験は、通常「外れた」予報と「当たった」予報で予報期間が短くなるについて当たるようになるのは当然と考えられる。しかし、6 月 30 日 12 UTC における差はごくわずかであり、どちらも実現し得たとも考えられる。すなわち、台風が朝鮮半島に上陸し日本海を進まず、西日本豪雨は発生していないかった可能性もありうる。一方 6 月 29 日 12 UTC からの予報においては、もし台風がより強ければ豪雨が生じるという可能性を想定しなければならない。全球大気大循環モデルでの熱帯低気圧は水平解像度の不足などが原因で実際よりも弱く予想されることが少なくない。予報官が必要と判断したときに、渦位逆転法を用いて初期場を改変したシナリオ予測を行うことは、想定の幅を広げリードタイムを十分にとるために有意義であると考える。

謝辞：気象庁全国合成レーダー雨量は京都大学生存圏研究所グローバル大気観測データのアーカイブから取得した。利用したデータセットは気象庁による JRA-55 長期再解析プロジェクトにより提供されたものである。本研究は JSPS 科研費 JP26282111 の助成を受けた。ECMWF 解析値は Glenn Carver 氏提供。

参考文献

- 1) 気象庁, 「平成 30 年 7 月豪雨」及び 7 月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について. 気象庁報道発表 2018 年 8 月 10 日, 2018.
- 2) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, and K. Takahashi, K.: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics, J. Meteor. Soc., Japan, Vol.93, No.1, 2015.
- 3) Tsuguti, H., Seino, N., Kawase, H., Imada, Y., Nakaegawa, T., and Takayabu, I., Meteorological overview and mesoscale characteristics of heavy rain event of July 2018 in Japan, Landslides, 2018, doi: 10.1007/s10346-018-1098-6.

5. 総観場の予測可能性（吉田）

(1) はじめに

平成 30 年 7 月豪雨は豪雨発生前の 7 月 5 日 14 時に「西日本と東日本における 8 日頃にかけての大暴雨について」という気象庁の報道発表¹⁾があり、実際の雨も 8 日まで持続した。本章では、気象庁週間アンサンブル予報データを用いて、この豪雨の始まりと持続に関する総観場の予測を左右した要因について解析した。

(2) データ

使用したデータは京都大学生存圏研究所にアーカイブされている気象庁週間アンサンブル予報 GPV データである。出力の時空間解像度は日本付近が水平解像度 1.25° で 6 時間毎、全球データが 2.5° で 12 時間毎、初期値は 00UTC、12UTC で 27 のアンサンブルメンバーがあり、予報時間は 11 日間である。予報精度評価のため、気象庁長期再解析データ JRA-55²⁾を比較データとして用いた。

(2) 解析手法

本解析では、梅雨前線の形成に重要な対流圈中層ジェットと対流圈下層の水蒸気流入の位置を解析対象とした³⁾。ここでは中層ジェットの指標として 500hPa 面の西風、下層の水蒸気流入の指標として 925hPa 面の北向き水蒸気フラックスを用いた。水蒸気フラックスに関しては、各緯度における東西極大位置を指標として、降水帯位置の予測可能性を解析した。

(3) 結果

JRA55-TADY500, QUV925, AVE(00Z05JUL2018-00Z08JUL2018)

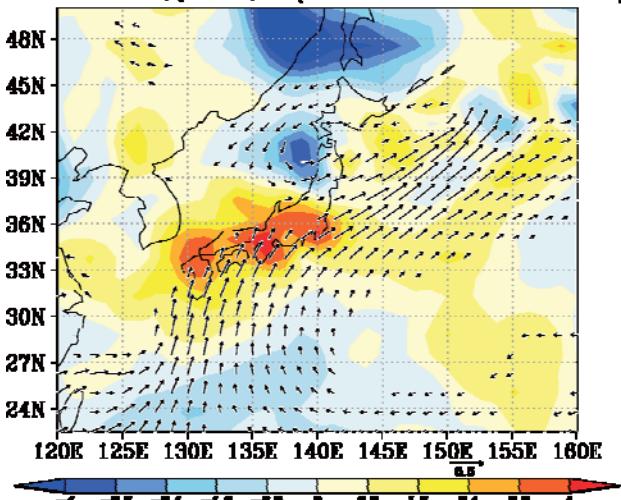


図 5.1 JRA-55 での 7 月 6 日 00UTC から 8 日 00UTC で平均した 500hPa 温度移流（陰影）と 925hPa 水平水蒸気フラックス（矢印）。

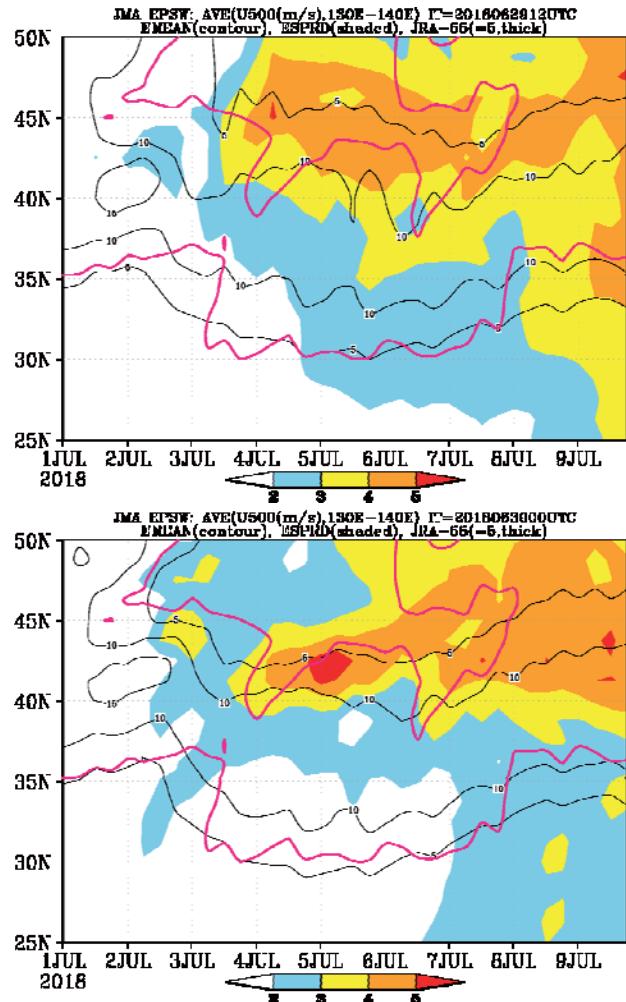


図 5.2 アンサンブル予報での 500hPa 西風のアンサンブル平均（黒線）とアンサンブルスプレッド（陰影）と JRA-55 での 5 m/s 等值線（紫線）。（上）6 月 29 日 12UTC 初期値、（下）7 月 1 日 00UTC 初期値。

図 5.1 は JRA-55 による豪雨期間中で平均した 500hPa 面での温度移流と 925hPa 面の水蒸気フラックスである。西日本には力学的に上昇流を強制する暖気移流とそこに南から流れ込む水蒸気フラックスが形成され、典型的な梅雨前線降水帯であった。そこでまず、上層の温度移流をもたらす西風ジェットの予測可能性について調査した。図 5.2 は東経 130 度から 140 度で平均した 500hPa 西風の緯度・時間断面（7 月 1 日 00UTC～9 日 18UTC）である。6 月 29 日 12UTC 初期値からのアンサンブル予測（図 5.2 上）では、アンサンブル平均で豪雨期間を通して、JRA-55 の解析値より北よりにジェットが予測され、北緯 40 度以北でアンサンブルスプレッドが大きくなっていた。これはこの時点での西風予測の不確定性が大きかったことを示す。しかし、1 日半後の 7 月 1 日 00UTC 初期値のアンサンブル予測では、7 月 4 日から 5 日にかけてのジェットの南下が予測できており、アンサンブルスプレッドの大きい領域もジェットの北端のみに限定されてい

た。これから豪雨発生期の西風ジェットは7月1日00UTCの時点では予測可能であることがわかる。しかしながら、豪雨が終わった8日頃のジェットは北にシフトした解析値と違って同じ緯度に持続し、アンサンブルスプレッドも大きい。この傾向は7月3日12UTC初期値になると解析値で6日頃から北緯45度から50度に現れるもう一つのジェットとその後のジェットの北偏が予測されてくる。以上の結果は、豪雨の終息時期については7月4日00UTCまで予測が難しかったことを示している。

次に、下層の水蒸気フラックスの予測可能性について述べる。図5.4は豪雨発生時の7月5日00UTCにおける925hPa水蒸気フラックスの各緯度における最大位置をアンサンブルメンバー毎に抽出した頻度分布である。6月30日12UTC初期値ではすべてのメンバーが東シナ海への水蒸気流入を予測しており、西日本への流入は予測できていなかった。西日本への流入は7月1日12UTCで初めてアンサンブル予測に現れた。

この水蒸気フラックス予測の東西変動には台風7号が関わっていた。図5.5は7月1日12UTCの海面気圧であ

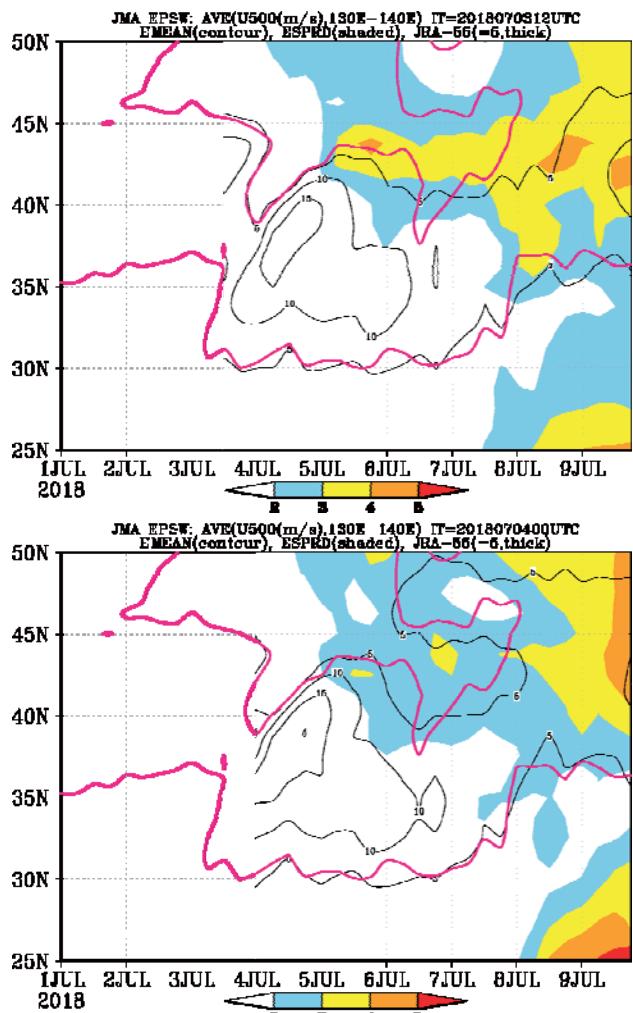


図5.3 図5.2と同じ。ただし(上)7月3日12UTC初期値、(下)4日00UTC初期値。

る。6月30日12UTC初期値の予測では、この時点の台風7号は西よりに予測され、7月1日00UTCの初期値に解析された中心位置と気圧を予測しているメンバーはいなかった。さらに北緯27度から33度で平均した925hPa

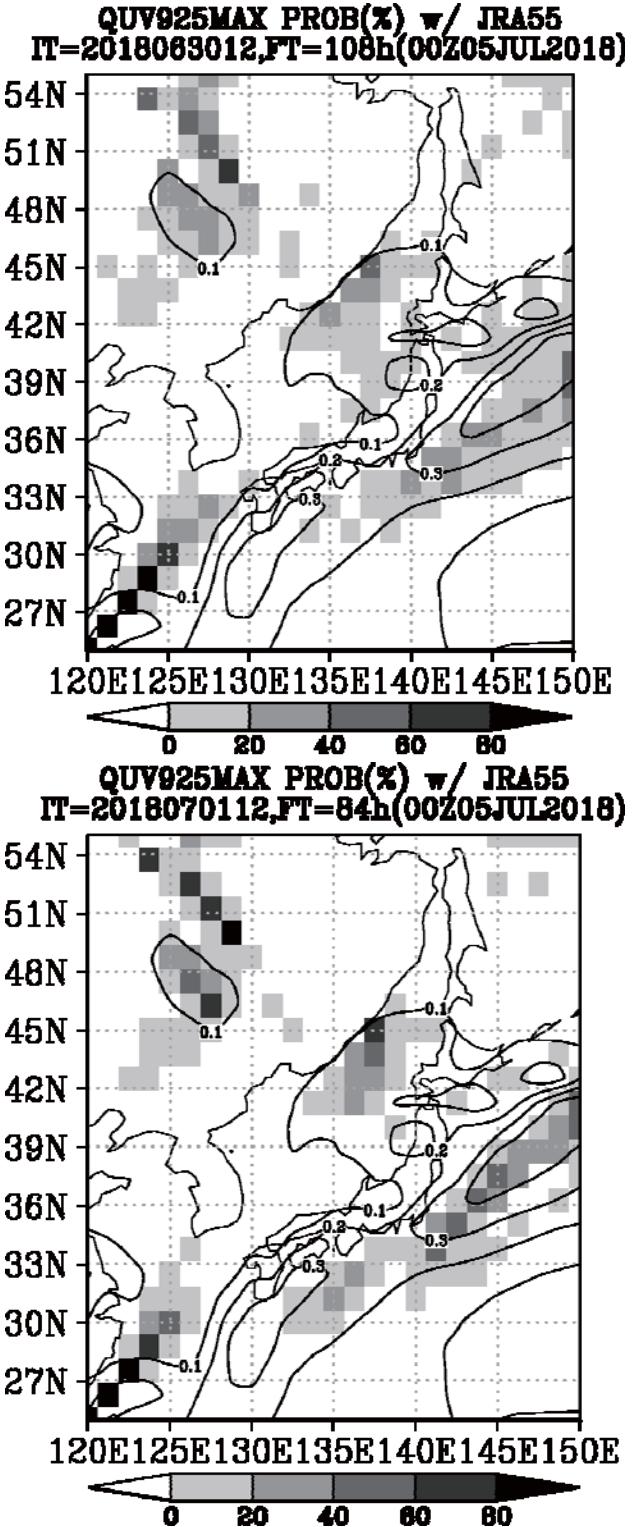


図5.4 7月5日00UTCでの925hPa水蒸気フラックス東西最大軸頻度分布(陰影)とJRA-55解析値(黒線)。(上)6月30日12UTC初期値、(下)7月1日12UTC初期値。

面の北向き水蒸気フラックスの経度-時間断面を解析すると、6月30日12UTC初期値では、豪雨期間中、水蒸気フラックスの中心は東シナ海に当たる東経125度付近に予測されていた（図5.6）。つまり、台風の北上に伴って西日本に流れ込む水蒸気フラックスが予測できていなかった。7月1日12UTC初期になると、130度以東の西日本に流れ込む予報に変化した。しかし5日以降のアンサンブルスプレッドは東シナ海上で大きく、この時点での豪雨の持続性についての予測は難しいことがわかる。この西側に水蒸気フラックスが流れ込む予測バイアスは豪雨の終息期まで続いた。図5.6は7月2日12UTCと3日12UTCを初期値とした水蒸気フラックス予測である。2日12UTC初期値では5日以降、東シナ海にも水蒸気が流れ込む予測があり、スプレッドも大きくなっている。3日12UTC初期値になって初めて8日頃まで西日本に水蒸気が流れ込み続ける予報の確実性が高まっていた。

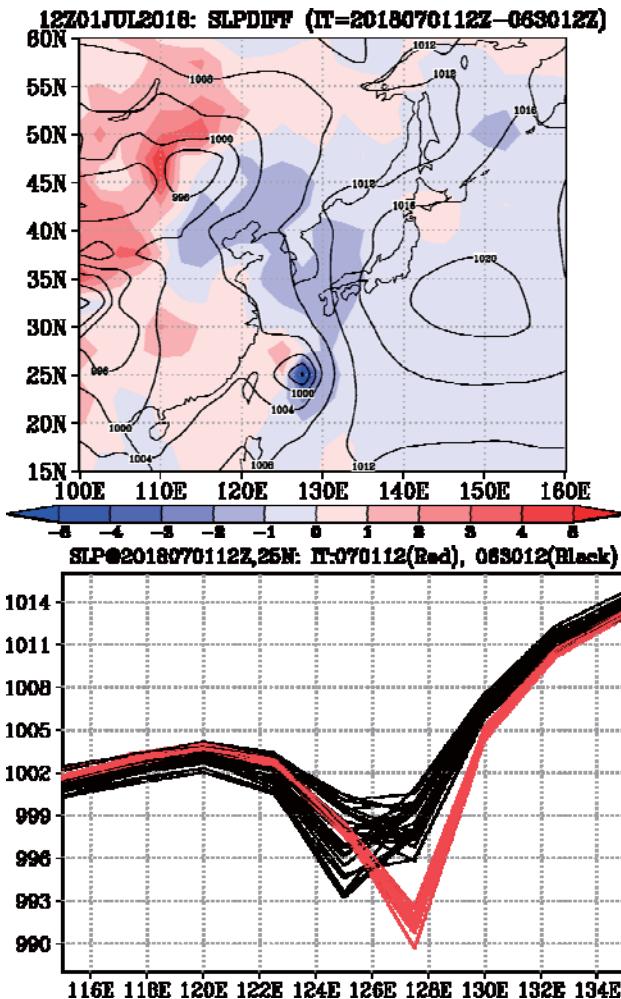


図 5.5 7月1日12UTCの海面気圧。
(上) 1日12UTC初期値(黒線), 6月30
日12UTC初期値との差(陰影), (下)
北緯25度の6月30日12UTC初期値(黒
線)と7月1日12UTC初期値(赤線)の各
メンバーメンバー。

この終息期の水蒸気フラックス予測には西風ジェットユーラシア大陸上から伝搬してくるトラフリッジが重要であった。図5.7は豪雨終息期の予測ができた7月3日00UTC初期値とできなかつた2日12UTC初期値の300hPa面ジオポテンシャル高度の差の時間変化である。初期時刻7月3日00UTCの予測では初期値の時点で東経95度、北緯43度付近にリッジが現れ、増幅しながら8日00UTCには朝鮮半島の北側に位置している。この上空のリッジが東シナ海地表付近に高気圧偏差を形成し、水蒸気の西傾を抑制していた。

(4) まとめ

本章では、平成30年7月豪雨をもたらした総観場の予測可能性について、気象庁週間アンサンブル予報データを用いて解析した。豪雨の初期では、対流圈中層ジェット、対流圈下層水蒸気フラックスとともに7月1日頃には予測の確実性が高かった。しかしこの時点での、豪雨

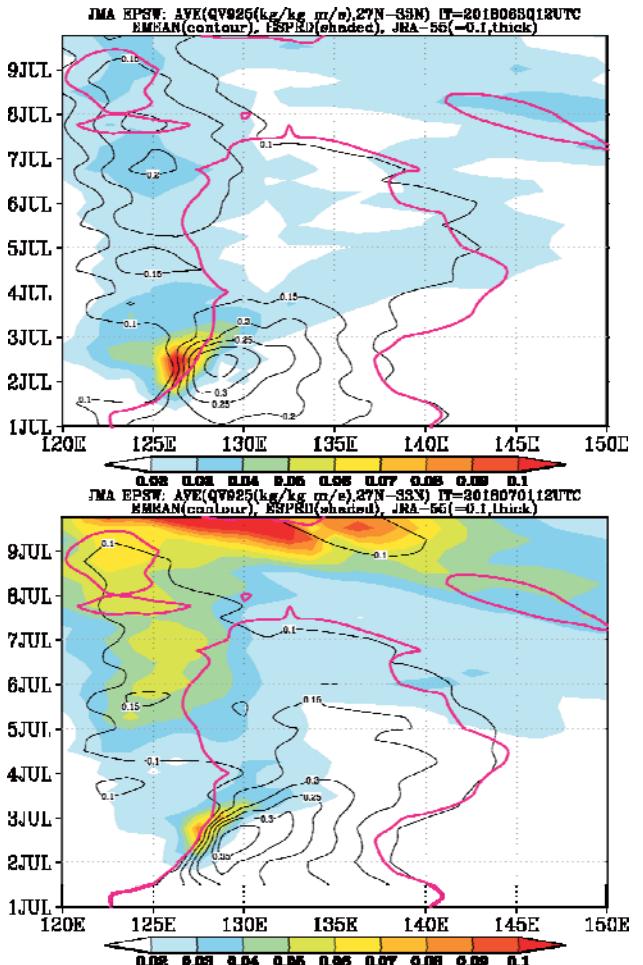


図 5.6 北緯27~33度で平均した925hPa面
北向き水蒸気フラックスの時系列。アンサ
ンブル平均(黒線)、アンサンブルスプレ
ッド(陰影)、JRA-55 解析値で0.1の等值
線(紫線)。(上) 6月30日12UTC初期
値、(下) 7月1日12UTC初期値。

の持続と終息時期については、バイアスと不確実性が大きく、中層ジェットが7月4日、水蒸気フラックスは7月3日まで予測精度が低かった。特に水蒸気フラックスについては、台風7号の発達とユーラシア大陸上からのリッジの伝搬が関係しており、予測を難しくしていた。今回の解析により、予測可能性を左右する要因が複数見つかったが、これをどのように今後の予測精度の向上に結び付けるかが今後の課題である。また、総観場が数日前から予測可能であっても、実際の災害につながるメソスケールの降水帯予測はより予測可能な時間スケールが短い。総観場予測とメソスケール予測、実際の避難までをどのようにつなげるかが防災上重要となってくる。

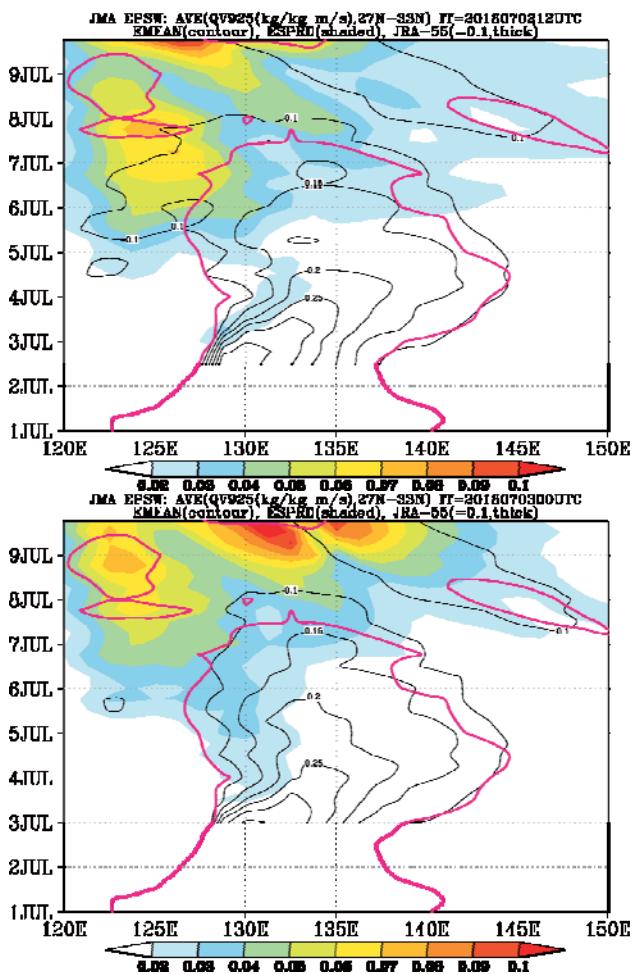


図 5.7 北緯 27 度から 33 度で平均した 925hPa 北向き水蒸気フラックスの時系列。アンサンブル平均（黒線）、アンサンブルスプレッド（陰影）、JRA-55 解析値（紫線）。(上) 7 月 2 日 00UTC 初期値、(下) 7 月 3 日 00UTC 初期値。

参考文献

- 1) 気象庁, 西日本と東日本における8日頃にかけての大雪について. 気象庁報道発表 2018年7月5日, 2018.
- 2) Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- 3) Sampe, T., and S.-P. Xie, 2010: Large-Scale Dynamics of the Meiyu-Baiu Rainband: Environmental Forcing by the Westerly Jet. *J. Clim.*, **23**, 113–134, doi:10.1175/2009JCLI3128.1.

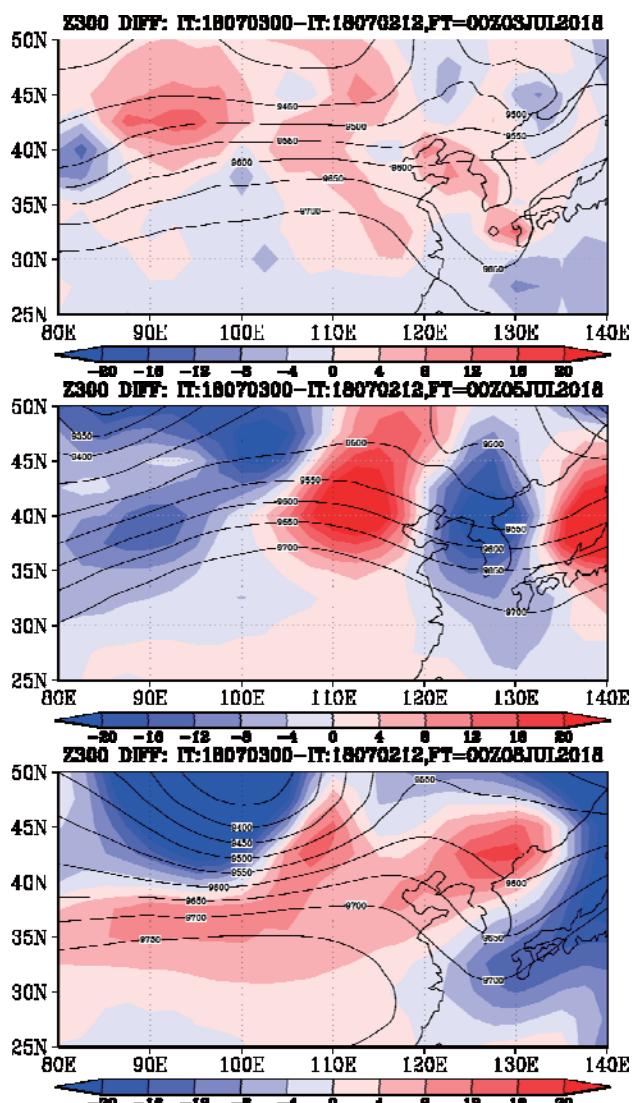


図 5.8 300hPa ジオポテンシャル高度のアンサンブル平均. 7 月 3 日 00UTC 初期値（黒線）と 7 月 2 日 12UTC 初期値との差（陰影）(上) 予報時刻 3 日 00UTC、(中) 5 日 00UTC、(下) 8 日 00UTC.

6. 西日本全体を対象とした降雨流出解析（佐山）

(1) はじめに

平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）では、7 月 4 日から 8 日にかけて停滞した梅雨前線が、長時間に渡って広域に豪雨をもたらし、西日本各地で水・土砂災害が発生した。高梁川水系の小田川で 2カ所の堤防が決壊したほか、愛媛県肱川を含む多数の河川で浸水被害が発生した。また都道府県管理の河川でも計 35 箇所で堤防が決壊するなど、多くの河川災害が発生した¹⁾。

今次の洪水災害の特徴は、被害が西日本全体で広域にわたること、また長時間の豪雨によって大河川の流量が増大しているうえに 7 月 7 日の集中豪雨によって多くの中小河川で浸水被害が発生したことなどが挙げられる。現行の洪水予測や既往の流出解析は流域単位を対象にすることが一般的であるが、西日本豪雨による降雨流出特性を把握するためには、特定の流域に限定せず、西日本全体を統一的な枠組みで解析し、俯瞰的に議論することが重要である。特に、今回のような広域・長時間にわたる豪雨によって、どのような規模や特徴を有する河川流域において災害が発生する傾向にあるかを、流域水文学の観点から明らかにすることは、災害事象の理解と今後の洪水対策を検討するうえで意義があると考える。

このような背景のもと、本報では筆者らが開発を進めてきた分布型の降雨流出氾濫モデル(RRI モデル)²⁾を西日本全体に適用し、ダム流入量で RRI モデルの再現性を検証するとともに、府県別に流域スケールと比流量との関係を計算して、今回の洪水の特性を明らかにする。

(2) 解析条件

近畿・中国・四国・九州地方を含む西日本全体を対象に、日本域表面流向マップ³⁾を活用して RRI モデルを適用する。同マップデータは国土地理院の数値標高情報をもとに河道や水域の位置情報を反映して日本全体で表面流向を定めたデータである。空間解像度 1 sec でデータを整備しているが、本解析では 5 秒(約 128 m × 154m)に低解像度化して RRI モデルを適用する。

モデルに入力する降雨情報は、C バンドレーダと X バンドレーダを合成した CX 合成雨量(以下、XRAIN)と、レーダ雨量と地上雨量を合成した気象庁の解析雨量を用いる。解析計算期間は 2018 年 7 月 5 日 0 時から 7 月 9 日 0 時までとする。RRI モデルは、パラメータの設定により鉛直浸透流や地下水流など様々な水文過程を表現できる。しかし、現状では、日本全国を対象としたモデルのパラメータ同定法が明らかでないため、本研究ではパラメータのチューニングは行わず、対象領域一様を仮定し

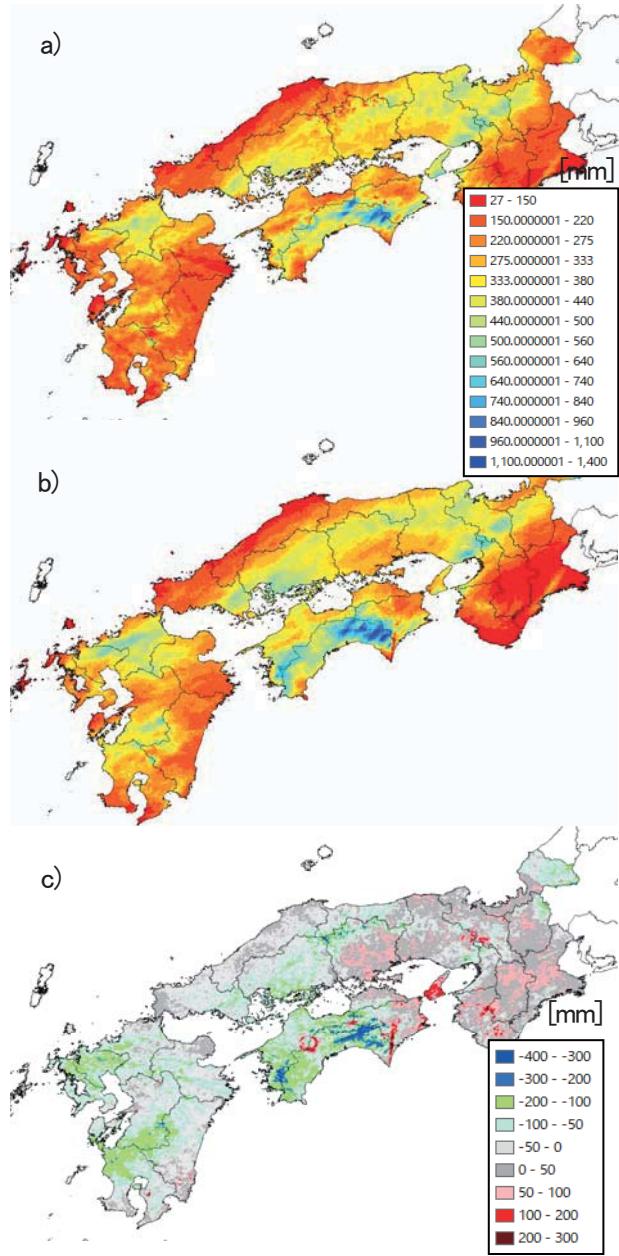


図-6.1 2018 年 7 月 5 日 0 時から 7 月 9 日 0 時までの積算雨量分布: a) XRAIN (CX 合成)、b) 解析雨量、c) 両者の差分(XRAIN - 解析雨量)

て設定した。パラメータの選択にあたっては、計算流量を過小評価しないように留意して、土層厚を 1 m に設定し、土層中の飽和側方流と地表面流が主な流出起源となるようにモデル構造とパラメータセットを選択した。

(3) 結果と考察

a) 流出計算結果の検証

図-6.1 に本解析で入力した降雨(XRAIN と解析雨量)の積算降水量を示す。両者の分布から、特に高知県などで降水量が多くなっていることが分かる。図-6.1c)は両者

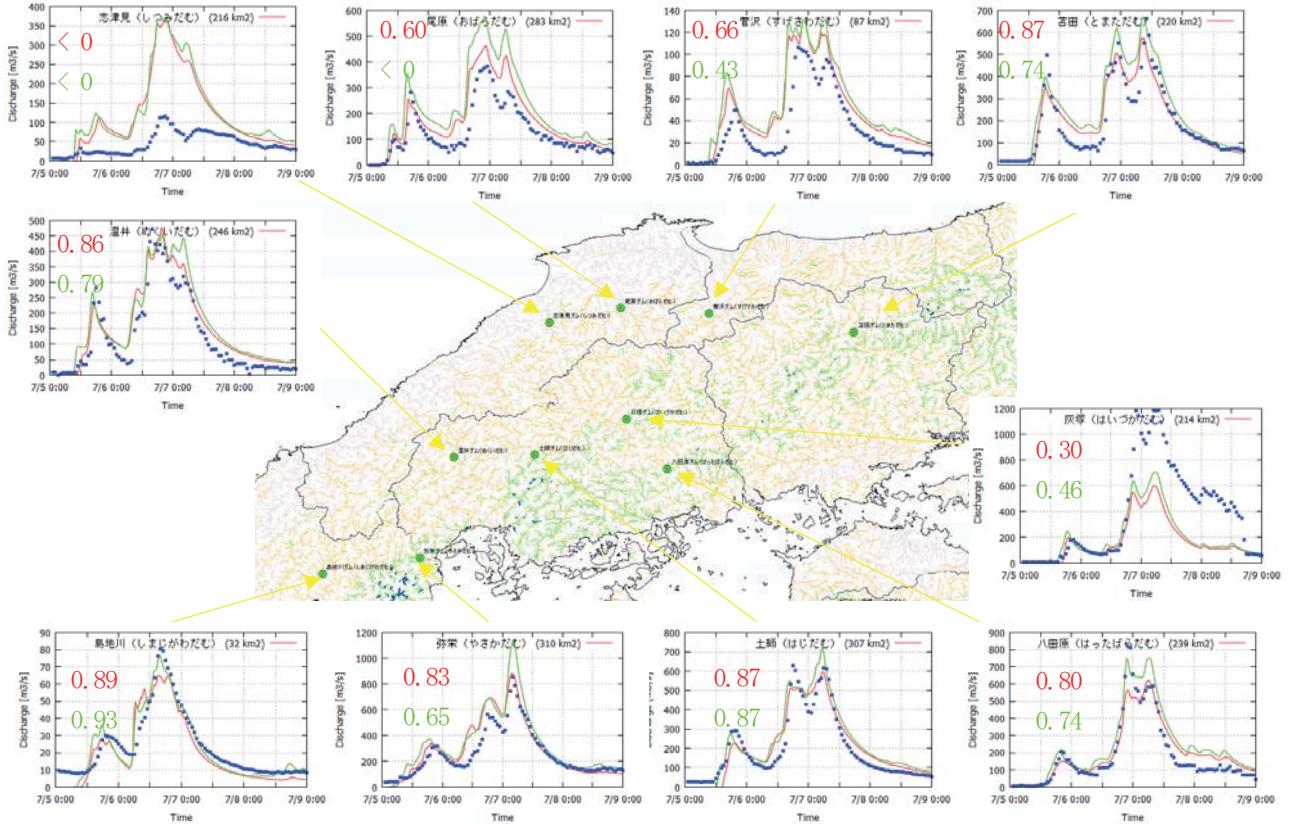


図-6.2 CX 合成雨量(赤)、解析雨量(緑)を入力した場合の計算ダム流入量と観測量の比較

の差分(XRAIN-解析雨量)の空間分布を示しており、特に四国や九州など一部の領域で XRAIN が解析雨量に比べて過小評価傾向がみられる。

両者の時空間分布を RRI モデルに入力し、中小河川を含めた西日本全体の河川流量を推定した。図 6.2. は、水文水質データベースに登録されている国土交通省もしくは水資源機構が管理するダム流入量と当該地点の計算流量を比較した結果を示している。紙面の都合上、ここでは中国地方の結果のみを示す。ハイドログラフの赤線は CX 合成雨量を入力した場合、緑線はレーダー解析雨量を入力した場合の流出計算結果である。同色で示した図中の数字はハイドログラフの再現性を表す Nash 指標である。背景地図はピーク比流量(ピーク流量を当該集水面で除して基準化した流量)を示し、色の凡例は図-6.3 を参照のこと。この結果から、中国地方内で相対的にピーク比流量の小さい島根県や鳥取県西部(志津見ダム、尾原ダム、菅沢ダム)においてモデルが過大評価傾向を示している。上述のように、ピーク流量を過小評価しないようにパラメータ設定をしているため、特に流量の小さい領域で降雨を流域が貯留する効果を十分に表現できていないため、モデルが過大評価となる。今回の解析では、このほか近畿地方南部でも同様の傾向が見られた。一方、それ以外の場所では概ね Nash 指標が 0.8 程度と良

好な再現性を得た(灰塚ダムの誤差原因は現在確認中)。

本モデルを用いて計算した西日本全体のピーク比流量分布を図-6.3 に示す。この推定結果によれば、今回の災害で被害の大きかった岡山県や愛媛県では必ずしも比流量が顕著に大きいことはなく、高知県や福岡県などでその値が大きくなっている。すなわち、西日本全体を俯瞰してみた際には、ピーク比流量の大きさと河川災害の発生傾向とは直接関係しておらず、河川の流下能力の違いや整備水準等に強く影響される事が改めて示唆された。ただし、例えば図-6.3 の京都府に着目した場合、今回被害を受けた由良川支川や宍粟市の高野川で周囲に比べてピーク比流量が相対的に大きくなっていることが分かる。

b) 府県別・流域面積別の平均比流量時系列

雨の降り方と河川流量の変化を俯瞰的に把握するため、以下では集水面積に応じて小・中・大河川に河道区分を分類したうえで、府県毎に平均比流量を計算した。本研究では便宜上、小河川の流域面積を 10~100 km²、中河川を 100~500 km²、大河川を 500~1,000 km² と定めた。

図-6.4 の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 近畿地方の大坂、奈良、和歌山は 7 月 6 日に比流量が最大に達するのに対し、西日本の多くの府県では 7 月 7 日の午前中にピーク比流量が集中する。

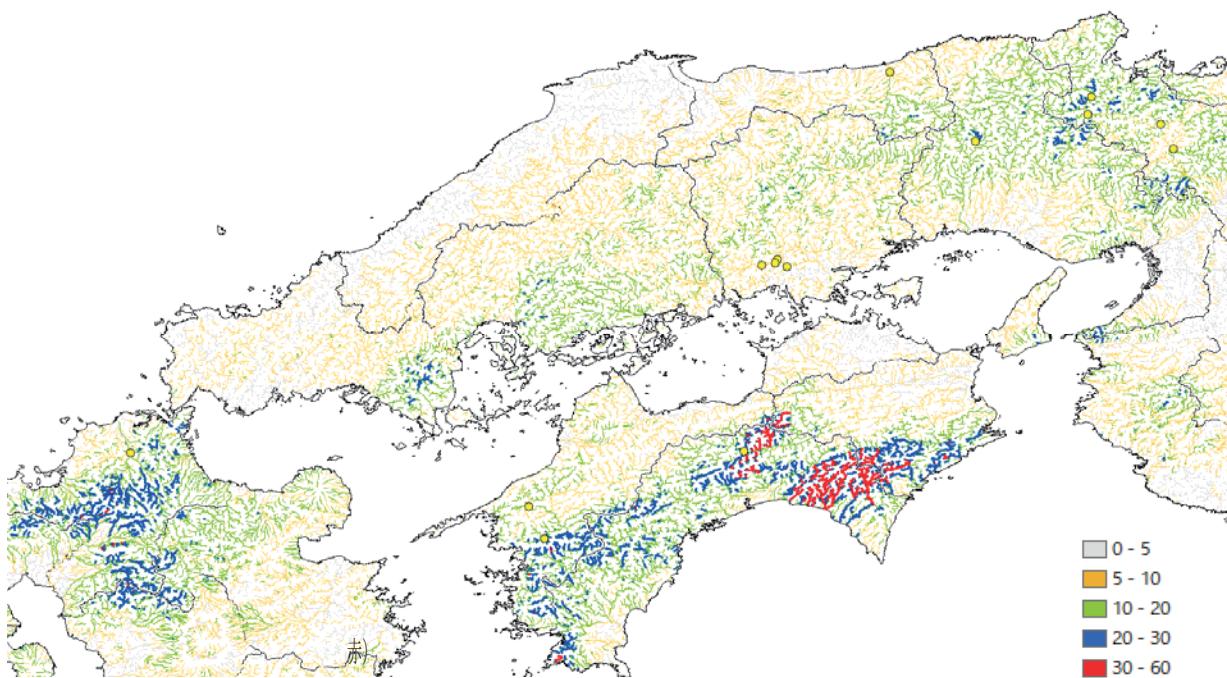


図-6.3 推定ピーク比流量の空間分布（XRAIN を入力した場合）

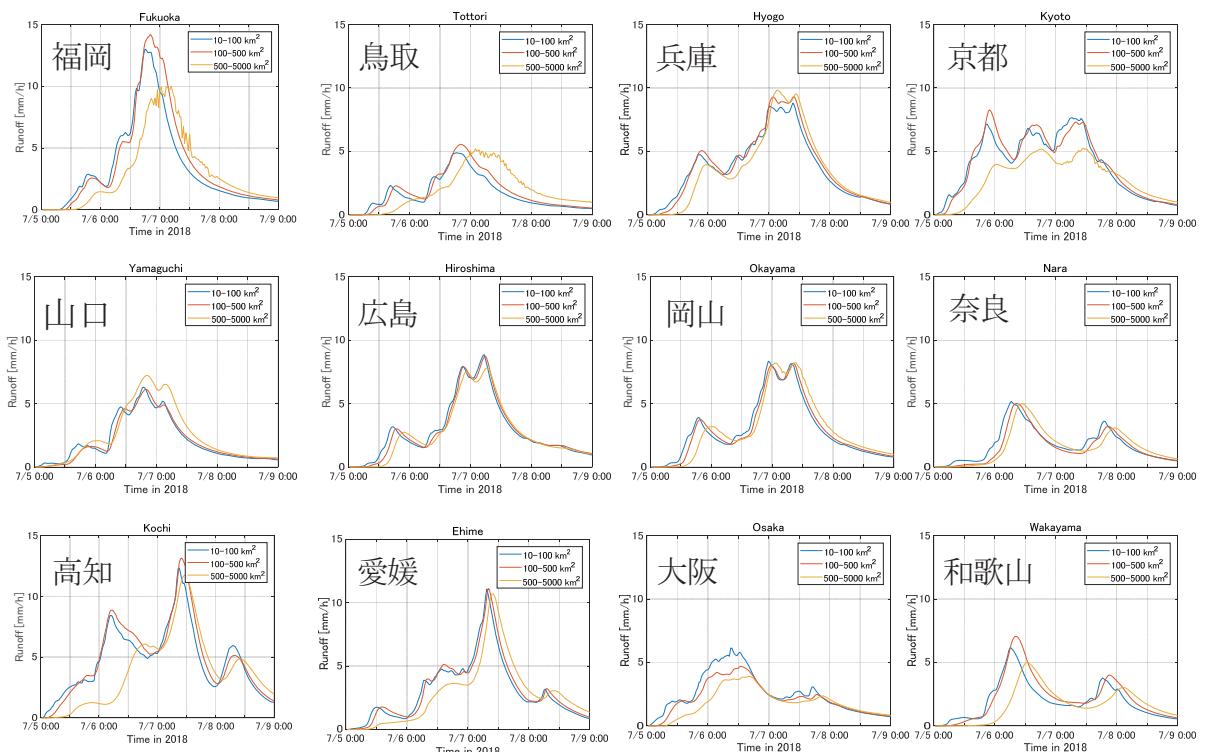


図-6.4 府県別・集水面積別の平均比流量時系列

- 2) 京都は7月6日から7日にかけて特に小・中河川でピーク比流量が約5 mm/hを超えるような状態が継続しており、大河川も比流量の高い状態が約二日間継続する。
- 3) 今回甚大な被害が発生した岡山、広島、愛媛は小・中・大河川とともに概ね同じようなタイミングでピーク比

流量が増加しており、8~10 mm/hに達している。

- 4) 推定ピーク比流量が最も大きかったのは、福岡と高知の中河川であり、約13 mm/hに達している。

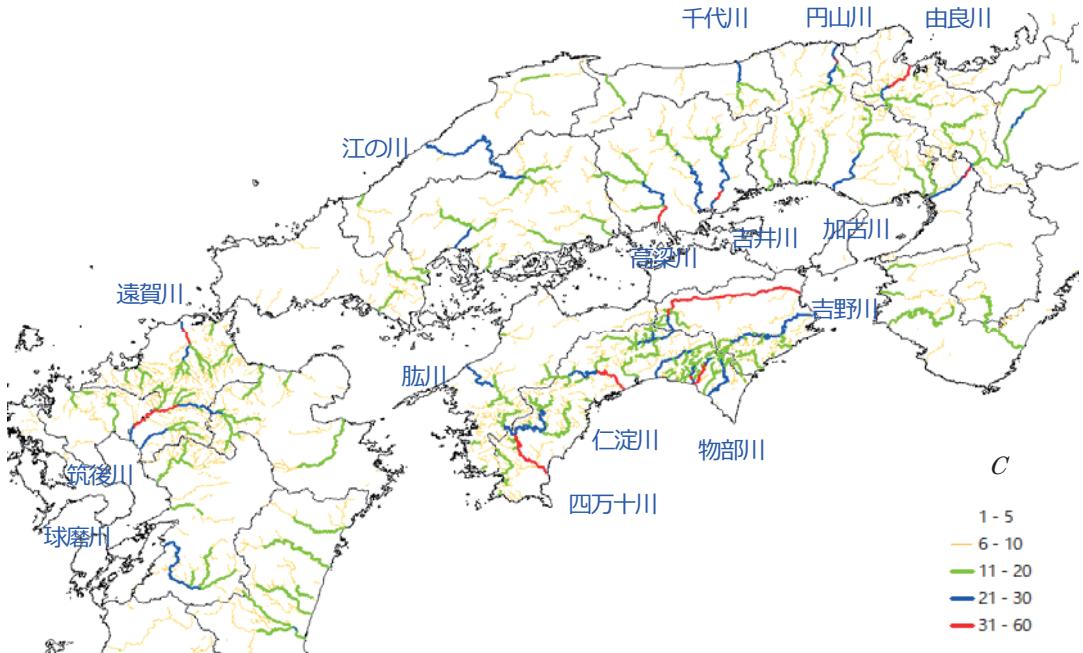


図-6.6 推定ピーク比流量から逆算した地域係数 C

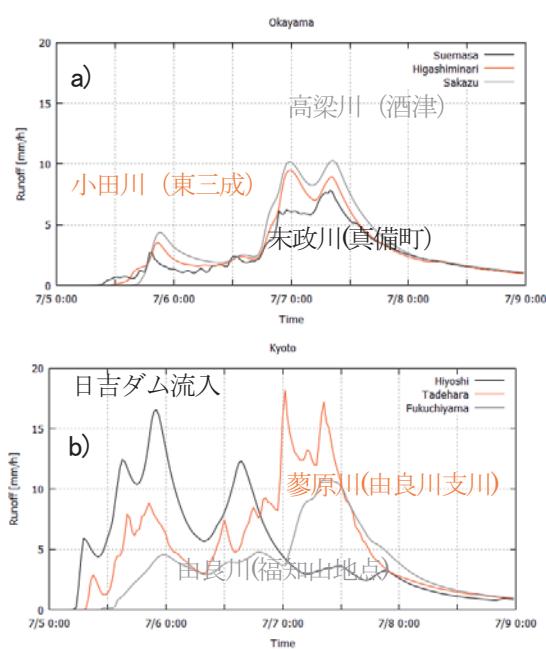


図-6.5 小田川、桂川、由良川の推定比流量

図-6.5 a)は倉敷市真備町に洪水被害をもたらした小田川の比流量であり、小田川(東三成地点)で約 10 mm/h、小田川の支川である末政川で約 8mm/h となっている。この比流量は、今回の岡山県における小・中河川の比流量に比べて極端に大きな値ではなく、同県の平均に近い値といえる。7月 7 日午前の時点では小田川が流入する高梁川下流部でも比流量が約 10 mm/h 程度まで上昇しており、下流本川の水位が上昇していく流入を抑制しているという報告などと整合的である。

図-6.5 b)は由良川とその支川である蓼原川との比流量を示す。今回の水害では由良川本川は大規模な氾濫被害にならなかつたものの、蓼原川など由良川支川からの流出で本川沿いの集落が浸水被害を受けている。蓼原川の推定比流量は、7月 7 日 0 時頃にピークを迎える、最大比流量は約 18 mm/h と推定される。図-6.5 b)の結果は、日吉ダムにおいても比流量が約 18 mm/h 程度まで上昇し、7月 5 日のうちにピークに達しており、7月 7 日には流出の増大は見られない。

c) クリーガ係数を用いた比流量の比較

比流量は流域面積が大きくなると相対的に小さくなる傾向にある。その影響を可能な限り排除して流域間や上下流間の流量を比較するため、クリーガ曲線（式(1))⁴を参考に、各河道断面の推定ピーク比流量 q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) とその集水面積 $A(\text{km}^2)$ から、地域係数 C を逆算した。

$$q = CA^{(A^{-0.008}-1)} \quad (1)$$

図-6.6 に C の空間分布を示す。クリーガ曲線は、本来地域毎に C の値を定めて最大比流量を(1)式で推定する。一方、本解析では、最大比流量と流域面積の関係を同式から参照することとし、 C の空間分布を可視化した。図中には、 C の値が 21 を超えるような流域で河川名を示している。ピーク比流量を直接示した図-6.3 に比べると、今回の洪水で河川災害が発生した箇所により近くはなっているものの、 C の値と災害の発生場所とは完全に対応していない。降雨情報から災害が発生し得る河川を推定するという当初目標を達成するためには、河道流下能力や水文特性の地域性を的確に反映する必要がある。

(4). おわりに

本研究では、西日本豪雨時の河川流量を広域一体的に推定するための分布型モデルを構築した。パラメータは流域一様で単純化して設定したものの、特に流出量の多い流域では概ね良好な再現性を確認した。構築したモデルを使って、ピーク比流量等の空間分布を可視化するとともに、集水面積に応じて河道区分を小・中・大河川に別けて、府県毎に比流量の時間変化を分析した。その結果、例えば京都府では、7月5日午後から7日午前にかけて流量の高い状態が続いていることが分かった。一方、岡山県や広島県では、7/7未明から午前中にかけて流量が急増していた。同地域では小、中、大河川が概ね同じタイミングで増加しており、その平均比流量は約8mm/hにまで達した。

本解析は、西日本豪雨を対象に、降雨の分布情報から西日本全体を俯瞰して河川災害の発生し得る河川を特定し得るか、という視点から取り組んだ。今回、はじめて中小河川を含めた広域かつ詳細なモデリングが実現したもの、河道流下能力や水文特性の地域特性を的確に把握して、モデルに反映することが、上記の目標を達成するうえで重要である。

参考文献

- 1) 国交省：平成30年7月豪雨における被害等の概要，
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasembunka-kai/shouinkai/daikibokouikigouu/1/pdf/daikibokouikigouu_01_s2.pdf (Accessed: Feb. 2018), 2018.
- 2) Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka, Kazuhiko Fukami, Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, 57(2), pp. 298-312, 2012.
- 3) 山崎 大, 富樫 洋佳, 竹島 淩, 佐山 敬洋: 日本全域高解像度の表面流向データ整備, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 75, No. 4, I 163,-I_168, 2018.
- 4) 角屋 瞳, 永井明博: 洪水比流量曲線へのアプローチ, 京都大学防災研究所年報, 22, B-2, pp. 195-208, 1979.

7. 木製可動型水流減勢工の効果に関する基礎的実験（平石）

1 緒言

昨年の12月22日にインドネシア国ジャワ島西部を襲った津波は沖合のクラカトワ火山噴火を起因とする海底地すべりによって生じたと考えられており、450名以上の人命と多くの沿岸家屋をなくしている。また、わが国では、2011年3月11日の東日本大震災において北海道から関東地方の太平洋岸において広範囲に津波が来襲し、18000名を超える多くの人命が津波によって失われた。このような津波の来襲に対してはハードウェアとソフトウェアを組み合わせた様々な対策が提案されており、そのなかでも早期警報システムとして一部が実施されているものもある。また、沖合防波堤も多大なコストが必要であるが、津波のエネルギー減殺と到達時間の遅延効果に有効であることが判明している。

ただし、早期警報システムは初期のコストだけでなくメンテナンスにも費用が必要であり、長期的な費用負担の仕組みが重要である。大型の防波堤は莫大な建設コストを要し、建設期間も数十年単位になってしまう。そこで、安価で短期間で設置でき、完璧ではないものの津波のエネルギーを減殺できる簡単な木製の可動型津波減勢工を提案した。材料は、FRP（繊維強化型プラスチック）などの高価な資材が使えない東南アジア諸国でも活用できるように木製とした。また、平時は海岸の地表面に倒伏しており、津波来襲時や洪水時に立ち上がって減勢効果を発揮することにより、景観や海岸の利用にも支障を及ぼさない可動型構造とした。この防波堤は、津波で生じる水流に対して自動的に立ち上がるるので、写真-7.1に示す2018年西日本豪雨災害の洪水流に対しても有効であると考える。

本研究で対象とした可動型の木製防潮堤は陸上設置式であるため、津波が週上して陸上域に流れが来ると可動型防潮堤の先端部に浮力が作用し、軸体が起立する仕組みである。洪水による氾濫水は津波と同様の水流圧力



写真-7.1 西日本豪雨による被災例（広島県呉市）

となり軸体を起立させることができる。

2 実験の内容

（1）実験模型

図-7.1に木製可動型津波減勢工のイメージを示す。一つのユニットは、3枚の木製パネルと2本の支持杭からなっている。3枚のパネルは1枚ずつ紐で連結されており、またピアノ線で支持杭に軽く結ばれていて、上下の運動が可能である。実験では、初期の形状として3枚をたたんで陸上部へ設置し、沖合より津波（洪水流）を作用させた。

試験的な実験の結果、2番目のパネルをパネル間にクサビを入れて少し浮かして設置することにより、初期浮力を与えることができ、スムーズに起立させることができることが判明した。

（2）実験条件

実験は、宇治川オープンラボラトリの津波再現装置を用いて行った。図-7.2に示すように津波を孤立波で模擬し、波高を15、25、35cmと変化させて作用させ、構造物（減勢工）の沖合と岸側で波高を測定し、波高の変化を測った。さらに比較のために、可動型減勢工（写真-7.2）と立ち上がった状態で固定した場合（写真-7.3）および水路を板で仕切り完全に遮蔽した場合（防波堤）との比較も行った。そして、減勢工による減勢率は、水

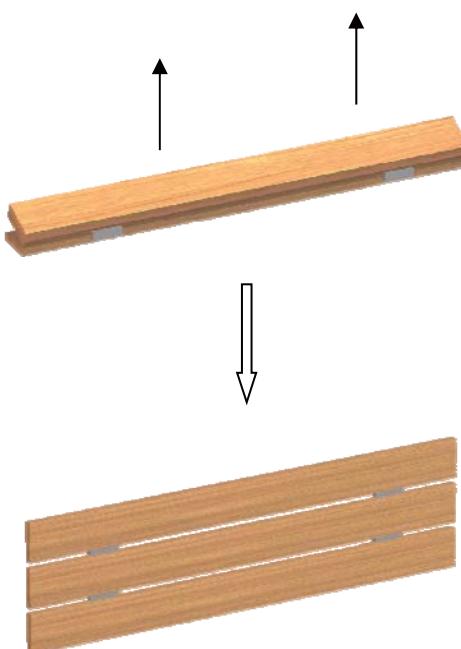


図-7.1 木製可動型津波減勢工のイメージ

槽斜面による波高低減も考慮して、沖側と岸側での測定波高の差から求めた。なお、初期の水面が陸上部でも 5 cmあるのは可動型減勢工の取り付け架台が 5 cmの厚みを有しているためである。

3 実験結果

まず、目視とビデオ撮影を行って、可動型木製減勢工が津波や洪水流来襲時に確実に起立するかを確認した。確認の結果、波高 15、25、35 cmのすべてのケースにおいて可動型木製減勢工は流れが作用することによって立ち上がり、防潮壁体として機能することを確認した。以下に防潮壁体の水位低減効率に対する計算式を示す¹⁾。

$$\begin{aligned} \text{津波低減効率} &= \frac{\text{(防波堤による波高低下)}}{\text{(岸前波高) - (基礎マウンドによる波高低下)}} \\ &= \frac{\text{(岸前波高) - (基礎マウンドによる波高低下) - (扉波高)}}{\text{(岸前波高) - (基礎マウンドによる波高低下)}} \end{aligned}$$

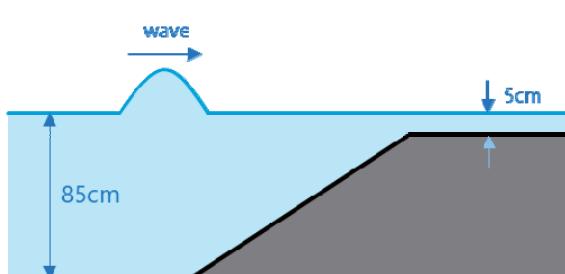


図-7.3 に実験の結果を示す。図では左から 3 組の波高減衰率の結果を示し、それぞれ波高 15 cm、25 cmおよび 35 cmの場合に相当する。

図に示すように減衰率は、波高が小さく越流現象が見られない時は、可動型減勢工の効果は大きく、稼働させた場合でも、60%あった。波高が大きくなると、減衰工を乗り越える水量が多くなるため減衰率は小さくなる。同じ波高においては、隙間のない防波堤、固定式、可動型の順に減衰率は大きい。

実験では、木製ボードを支えるピア（杭）の設計も重要な要素である。本実験ではピアに波圧計を設置しており、今後、作用波圧の特性についても検討していくつもりである。また、門式やいかだ式など新しい構造の減勢工についても検討し、現地の植生や地形条件に応じた製作が可能となるように提案をしていくべきである。

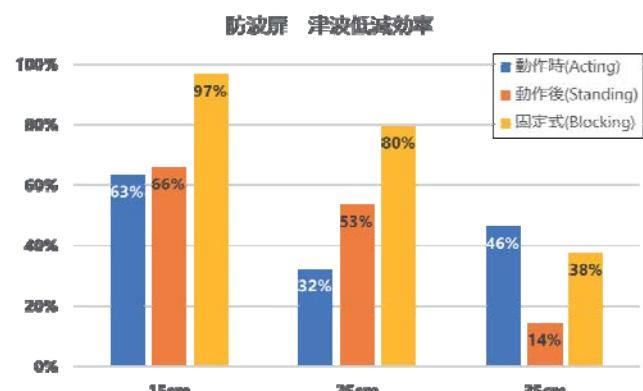


図-7.3 各種構造物の津波減衰効率
(青：可動型減勢工、橙：固定式、黄色：防波堤)

4 まとめと課題

本実験報告では、新しく開発した木製可動型津波減衰工の効果を検討した。その結果、防波堤は津波来襲時に折りたたまれた状態から浮力によって立ち上がり、最大で 60%の波高減衰効果を有することが判明した。

また、実験結果の章で述べたように門型やいかだ型などの異なるタイプの可動型減衰工についても検討しており、図-7.4 に門型のイメージ図を示す。これは水流により開いていた木製門が閉まるもので、最初の水流は通過するが持続的に止水機能が発揮できることが特徴である。図-7.5 にいかだ型の可動式減衰工を示す。これは、小型船着き場の開口部等に設置しておき強い流れに対して抵抗するもので、材料は竹である。

図-7.6 および図-7.7 に門型およびいかだ型減衰工の減衰効果を示す。最初に示した可動型を“防波扉”と名付けると、門型およびいかだ型は減衰効果に関しては防波扉に比べると小さくなる。ただし、それぞれが、後続の流

れを遮蔽できる（門型）、材料が竹材で最も安価で衝突しても危険性が小さい（いかだ型）という長所を有しており、外力の条件や使用する地形条件で、より適切な形態を選ぶことによって効果的な水流抑制が可能となる。

参考文献

- 1) 浜田英外, 藤田慶彦、平石哲也：自動式木製津波低減設備の実験, 自然災害科学、Vol.22, No.2, pp.141-153, 2016.

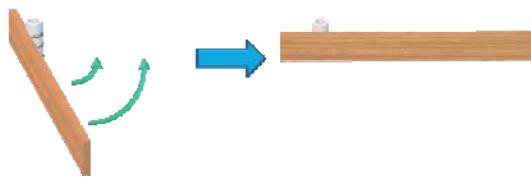


図-7.4 門式減勢工のイメージ図

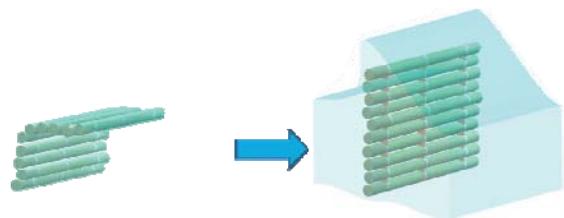


図-7.5 いかだ型減勢工のイメージ図

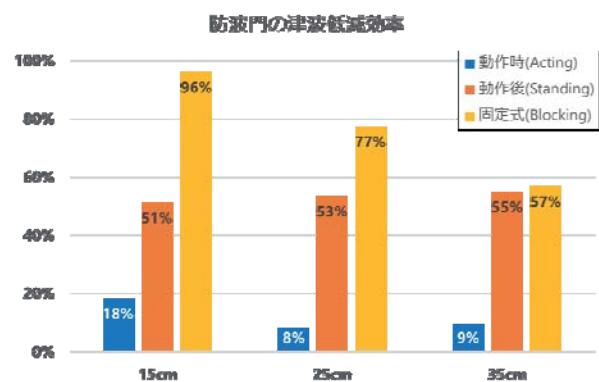


図-7.6 門型減勢工の津波減勢効果

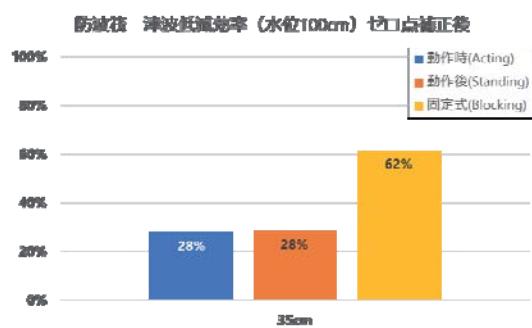


図-7.7 いかだ型減勢工の津波減勢効果

8. 総括と将来への提言（中北）

平成 30 年 7 月豪雨の特徴を大枠でまとめると以下となる。

1. 梅雨豪雨としては珍しく背の低い雲により、長期間に広い範囲でたくさんの総雨量がもたらされた。
2. 満身創痍になっていた多くの山腹斜面・河川流域・ダム貯水池で、再び押し寄せたそう強くない豪雨の一波二波が、トンカチのごとく土砂崩壊、洪水、ダムの小貯水池からの緊急放流をもたらした。
3. そのため、情報伝達、避難に關しても多くの視点をもたらした。

また、地球温暖化による将来変化との関係を以下にまとめる。

1. 典型的な線状降水帯型の梅雨豪雨の頻度は将来増加する。これまで梅雨豪雨が発生していなかった地域でも生起する。そして、同じ強雨の継続時間内でも、その時間内での強雨総雨量は増大する。
2. 一方、平成 30 年 7 月豪雨のように停滞する大気パターンは、将来増加する兆候は見られていない。
3. 平成 30 年 7 月豪雨発生時の流入水蒸気量は、現在気候ではほとんど最大レベルの流入量であった。また、将来気候でも珍しく多い範疇であるが、現在気候と比較するとその頻度は増加する。

将来、典型的な梅雨豪雨は将来気候でより頻繁に、より強力に、そしてこれまで未経験に地域にも生起し始める。また平成 30 年 7 月豪雨のような広域かつ長時間の豪雨についても、水蒸気量の増加によって総降雨量は増大する危険性がある。災害をもたらすトンカチ役となったそう強くない豪雨の影響を評価するには、X バンド MP レーダーのような気象レーダー等を用い、短時間降雨予測の強化とその利用を促進していく必要があるだろう。

地球温暖化に対しても、後悔しない適応をするため気候変動将来予測を軸にした適応が必要である。さらに、治水の基礎体力の増強、自助・共助としての防災力の増強も喫緊の課題である。上記の対策は多くの時間を要する上、昨今の豪雨頻発を受け、じわじわとでも地球温暖化の進行速度の方が早いように感じられる。後悔しないため、早急かつ計画的な対応が求められる。災害からの教訓を蓄積し、将来予測を隅々まで共有し、どの優先順位で適応するか、考える時に来ている。そして水工学・土木工学・気象学の中で、またこれら融合の中で、“研究”として抜けている部分を埋めていくことが重要である。

地表変動

平成 30 年西日本豪雨による地表変動災害

千木良雅弘¹・松四雄騎²・竹林洋史³・橋本学⁴・山崎新太郎⁵・王 功輝⁶

¹⁻⁶京都大学防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄官有地）

E-mail: 1: chigira@slope.dpri.kyoto-u.ac.jp

2: matsushi@slope.dpri.kyoto-u.ac.jp

3: takebayashi.hiroshi.6s@kyoto-u.ac.jp

4: Hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

5: yamasaki.shintaro.3m@kyoto-u.ac.jp

平成 30 年 7 月豪雨によって、西日本を中心に全国的に広い範囲で土砂災害や河川の氾濫および浸水害などが発生し、甚大な被害をもたらした。本報告では、斜面崩壊、地すべり、土石流といった地表変動による災害を調査し、その実態を明らかにし、現状での研究の問題点、さらに、今後の研究の在り方についてとりまとめた。

Key Words: rainstorm, landslide, debris flow, SAR, West Japan torrential rain, granite, rhyolite, weathering

1. はじめに

平成 30 年 6 月 28 日から 7 月 8 日にかけて、西日本を中心に中部地方や北海道など全国的に広い範囲で集中豪雨が発生した。これにより、多くの地域において、土砂災害や河川の氾濫および浸水害が発生し、死者数が 200 人を超える甚大な災害となった。筆者らは、地すべり・斜面崩壊・土石流について、その実態、発生メカニズム、モデリング、広域災害把握に関する研究を進めてきた。ここでは、それらの結果をまとめ、今後の研究や災害低減方法について提言する。

本報告は、以下の構成になっている。

2. 広島地域における地質・地形・降水と表層崩壊の分布対応（松四雄騎）
3. 2018 年 7 月に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流の流動特性（竹林洋史・藤田正治）
4. 地質と崩壊メカニズム（広島地域）（千木良雅弘）
5. 衛星合成開口レーダーを用いた地表面変動の把握（橋本学）
6. 愛媛県宇和島市周辺における岩盤崩壊の発生場（山崎新太郎）
7. 宍粟市の斜面崩壊と福山市のため池決壊（王 功輝・常 承睿・松浦 純生・末峯 章）

2. 全体の概要と提言

地すべり、斜面崩壊は、大きくみると、広島地域と宇和島地域で著しかった。広島地域では、風化した花崗岩と流紋岩地域で数多く発生した。判読範囲内ののみでも花崗岩領域で 4033 か所、流紋岩領域で 2409 か所の崩壊が発生した。崩壊を発生させた降雨についてみると、流紋岩地域では 3 時間最大降雨量が 80 mm を越えた地域で多数の崩壊が発生した。花崗岩地域で特に被害の大きかったのは、花崗岩が球状風化して大岩塊が形成され、その間を埋めるマサが侵食されて大岩塊が崩壊した場合であった。流紋岩地域では、高標高部で著しく風化した岩石の土層が崩壊し、透水性の悪いと推定される斜面上を土石流として流下した。宇和島地域では、強く風化した砂岩主体で泥岩を伴う地層に斜面崩壊が発生した。特に 1m にも満たない土層の崩壊が著しかったが、数 m と比較的深い岩盤の崩壊も発生した。これらは、岩石が強く風化していたことと、ローモンタイトと呼ばれる風化しやすい鉱物脈が多く含まれていたことも一因であった。これらの鉱物の分布や著しい岩石風化を示す低起伏の地形が危険地域の指標となりうる。

1999 年の広島豪雨災害以来、土壤雨量指數が土砂災害警戒情報に用いられてきたが、地

盤の中は1種類のモデルを用いて計算されてきた。しかしながら、風化帯の構造は岩石に応じて特徴的なものなので、それらを類型化し、地下水浸透の精緻な予測を行うことによって、土砂災害警報を高度化させることを検討する時期にあると考えられる。

花崗岩地域で甚大な被害の発生した川角地区で土石流の調査と数値シミュレーションを行った結果、土石流は崩壊発生の後わずか50秒で宅地に到達したと推定され、豪雨中に避難することのむずかしさがわかる。土砂災害警戒区域内には土砂が流れこない領域も多いため、そのような場所をシミュレーションによって特定しておくことは重要である。

今回の様に広域的な豪雨災害の場合、広域的な災害の実態を緊急に把握する必要があり、衛星を使用したSAR解析は有力なツールである。それを適用した結果、一部の地域ではコヒーレンス変化によって地表形状が変化したことが認められたが、認められない地域もあり、次期先進レーダー衛星の利用も含めて今後の高度化が必要である。

今回の豪雨災害では、深層崩壊の発生は極めて限定的であり、それが発生しやすい地質・地形条件がそろっていなかつたように思われる。兵庫県宍粟氏で発生したものは、事前にクリープ変形していたようであり、従来指摘されてきたように、地形から危険地域として抽出できた可能性がある。また、ため池の安定性は、その上流側からの土砂の流入も考慮しておく必要があることがわかった。



図1 東広島市黒瀬町の流紋岩の崩壊・土石流状況

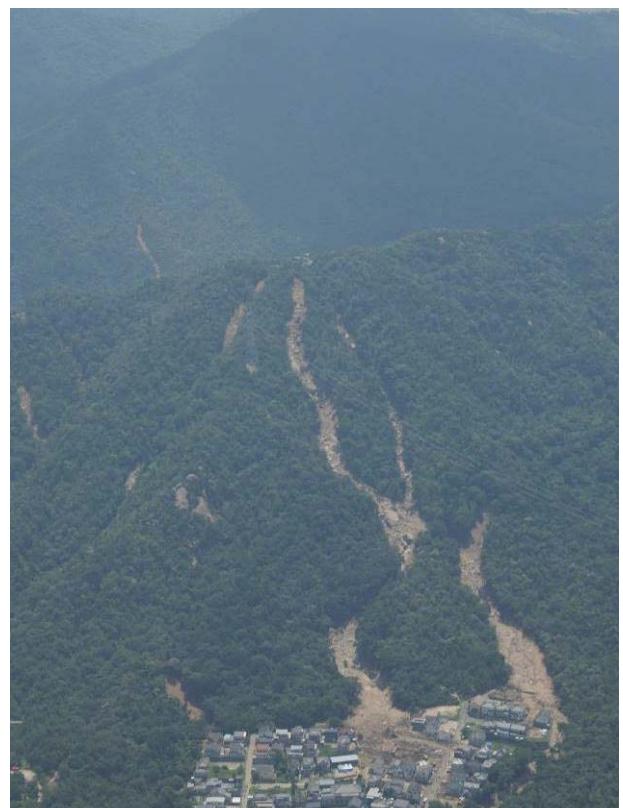


図2 安芸郡熊野町川角地区的崩壊・土石流

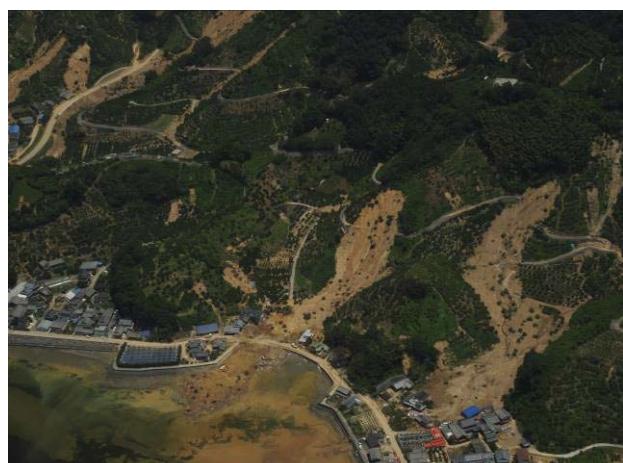


図3 宇和島市畔屋地区的岩盤崩壊の状況

広島地域における地質・地形・降水と表層崩壊の分布対応

松四 雄騎¹

¹京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 山地災害環境研究分野

E-mail: matsushi@slope.dpri.kyoto-u.ac.jp

広島地方を対象に、崩壊源の分布について、降雨、地質および地形の条件に着目して整理した。広島沿岸部では2018年7月3日から7日にかけての5日間で300mm以上の降水があり、数千か所で土砂移動が生じた。総雨量と崩壊源の空間的な分布はおおむね対応しているが、崩壊源密度は総降水量と単純に相関するわけではなく、地質、地形、および降水強度と関連している。地質は主として花崗岩と流紋岩で構成されており、このいづれにおいても、3時間最大雨量が80mmを超えると崩壊発生数が急増する。花崗岩と流紋岩では、流紋岩の方が閾値が明瞭である。崩壊源となった斜面は傾斜が15°-35°で平板型の斜面での崩壊が多い。斜面の勾配に依存した降雨閾値の差異は認められなかった。流域災害に対する減災の実現には、ハザードおよびリスクの時空間変化をリアルタイムで精緻に計算し、地域社会に定量的な情報を提供して、どのような危機が自身に迫っているのかを適時に、正確に、認識させることのできる仕組みが必要である。これは、極端気象災害に直面する地域社会の核心的な減災ニーズであり、分野横断的な研究者組織による学際的体制と複合融合的な研究アプローチをもって、はじめて実践的な解決を見出すことができるだろう。近い未来に、具体的なテストフィールドにおけるチャレンジを通じて、こうしたリアルタイム災害モニタリングシステムが構築・提供されてゆくことが期待される。

Key Words: shallow landslide, debris flow, granite, rhyolite, rainfall threshold

今回の豪雨では、中国地方の広い範囲で線状降水帯が複数箇所に形成され、表層崩壊および土石流による土砂災害が同時多発的に発生した。ここでは、発災場の中心となった広島地方を対象に、土砂移動現象の源頭部の分布について、地形、降雨、および地質条件に着目して整理する。土砂移動現象の源頭部には、平板型の表層崩壊のほか、掃流および湧出による渓流内での土砂移動開始点を含む。ここでは、これを崩壊源と呼ぶことにする。解析に使用した崩壊源のインベントリは、広島大学（地理学グループ）がマッピングし、日本地理学会の災害報告として公開したデータをベースに、必要に応じて加筆したもの用いている。

図1は、広島沿岸部における2018年7月3日から7日にかけての5日間の総降水量と崩壊源の分布を示している。今回の豪雨では、この領域全体に300mm以上の降水があり、数千か所で土砂移動が生じた。降水は、南西からの水蒸気輸送によって生じ、風向に沿って延びる一連の低地と山地あるいは、地形的な高所の風背側で顕著な雨域が形成された。総雨量と崩壊源の空間的な分布はおおむね対応しているが、崩壊源密度は総降水量と単純

に相関するわけではなく、地質、地形、および降水強度と関連している。

図2は、崩壊源と地質の分布の対応を示している。解析対象領域の主たる地質は、白亜紀の花崗岩および流紋岩であり、両者ともこの地方の基盤を構成する代表的な地質体であるといえる。付加体や花崗閃緑岩の占める割合は全体に対して小さく、また、崩壊の発生も顕著でない。今回の豪雨では、花崗岩と流紋岩のいづれでも、多くの崩壊が発生した。解析対象内でマッピングされた崩壊源の数は、花崗岩領域で4033か所、流紋岩領域で2409か所である。崩壊源の密度は、同じ地質の中でも空間的な発生数に偏りがあるため、単純には計算できないが、流紋岩体からなる山地の一部で、相対的に崩壊密度が高い領域が出現した。

図3に崩壊源の分布と斜面勾配の対応を示す。地質毎の地形的特性として、花崗岩を基盤とする山地の方が細かく開析されて小起伏丘陵となっているのに対し、流紋岩からなる山地は、低地との比高が大きな山塊状の地形を呈し、山稜域に緩傾斜の侵食小起伏面がみられる場合が多い。これは、花崗岩と流紋岩の風化帯および流

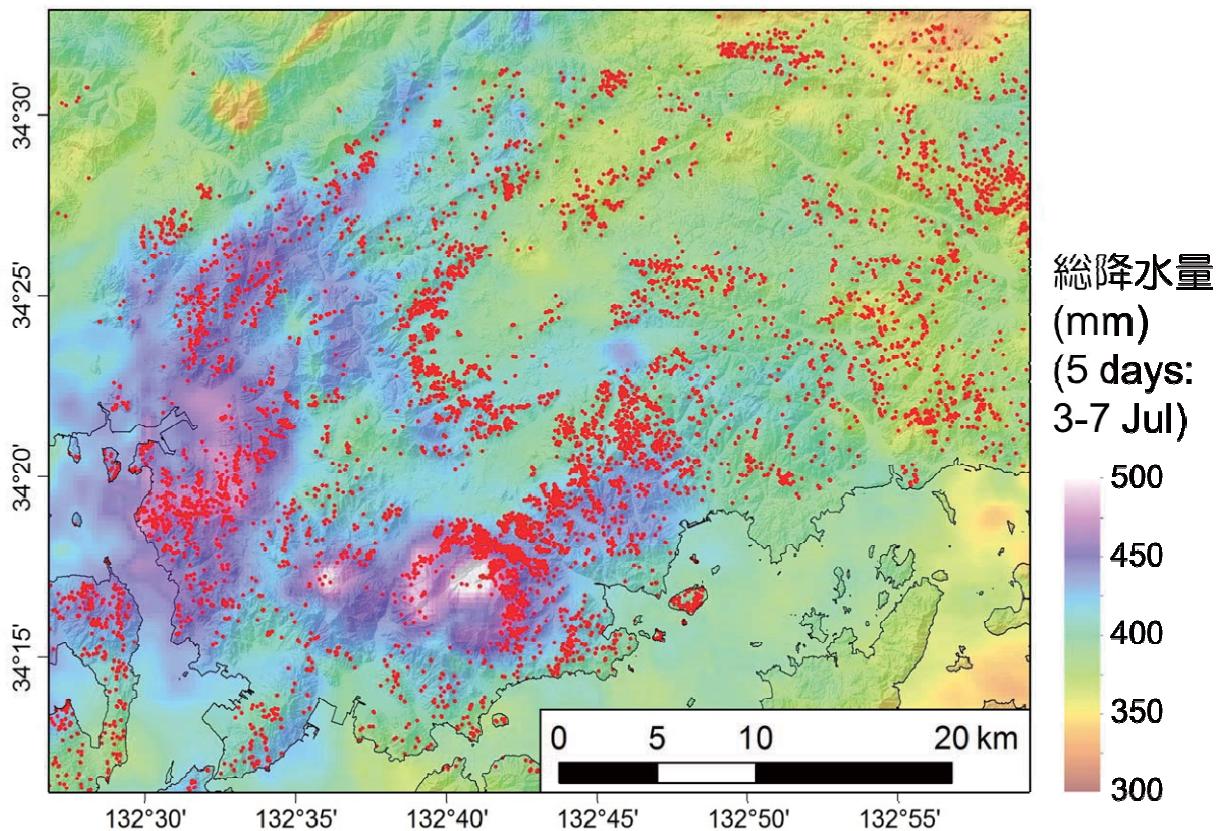


図1.広島沿岸部における総降水量（背景色）と崩壊源（赤点）の分布。降水データはXRAINによる。

域地形の発達特性によるものと考えられる。すなわち、基本的に花崗岩の方が、岩石としての構造からみて深部まで風化を受けやすく、また、新鮮岩盤が露出した条件下での風化速度も速いものと推測される。その結果、花崗岩の流域は侵食基準面の低下に従って山間の小河川が速やかに下刻し、斜面はそれに追随するように侵食される。一方、流紋岩山地では河床を構成する岩盤の風化が進行しにくいために下刻が進まず、侵食に伴って斜面が急勾配となる場所は山体の縁辺部や節理沿いに限られている。

斜面崩壊の発生場も、こうした岩質毎の地形特性に規定されているようである。花崗岩の山地では多くの崩壊源が流域の源頭部に位置し、稜線付近から土砂移動が生じているのに対し、流紋岩の山地では山稜部の小起伏面上に崩壊源はみられず、流域内の遷急線の直下を起点として土砂移動が生じている場合が多い。こうした崩壊源の位置に関する特徴は、各地質を基盤とする斜面での風化帶の発達状態とそれに制約された斜面水文過程に規定されているのではないかと考えられる。この仮説は、今後の継続的な地盤構造調査や水文観測などによって検証されるべきであろう。

崩壊源となった斜面の地形に着目すると、花崗岩と流紋岩でそれほど大きな差異はみられない。10 m メッシュの基盤地図情報に基づく地形解析によれば、いずれの地質でも崩壊した斜面の傾斜角は、25–30° を最頻値として 15–35° の範囲にその大部分が入る分布をもつ（図 4A）。また局所的な曲率も、0 付近に最頻値をもち、平板型の斜面で多くの崩壊が発生している（図 4B）。一般に、崩壊源の地形量が類似していることは、斜面構成物の力学的な特性や崩壊に至る機構が類似していることを示唆しているが、結論を出すには、今後より詳細な調査が必要である。発災前後の航空レーザー測量で得られた高解像度・高精度の地形モデルを分析することで、より精密な地形情報の解析を行うべきであるし、各地質の斜面で採取した試料の土質試験に基づく物性の比較も重要であろう。

次に、崩壊源における降水の強度について、地質毎の比較を行う。花崗岩と流紋岩の崩壊源の位置に供給された降水について、X バンド MP レーダに基づく 10 分雨量を任意の時間数で積算し、その最大値を求めた。図 5 は、崩壊源において観測された 1, 3, 6, 14 時間最大雨量について出現頻度を示したものである。この

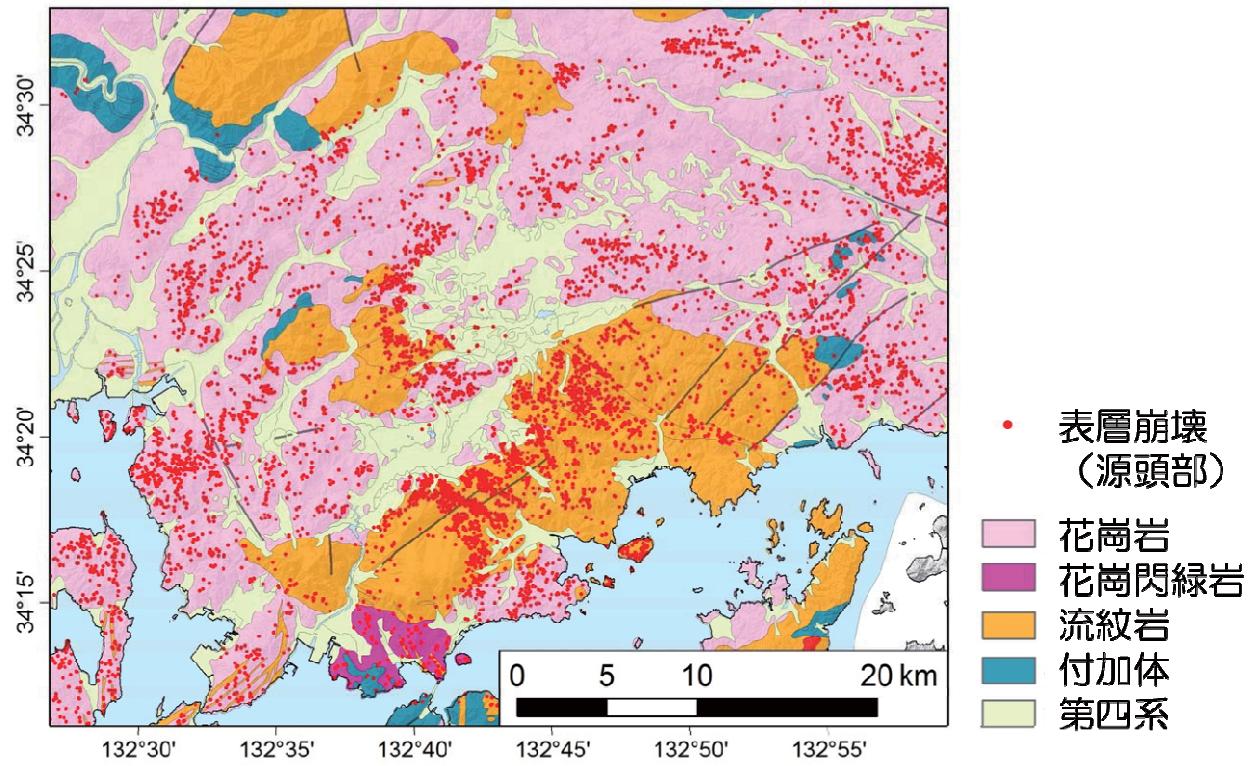


図2.広島沿岸部における地質と崩壊源の分布. 地質は20万分の1シームレス地質図による.

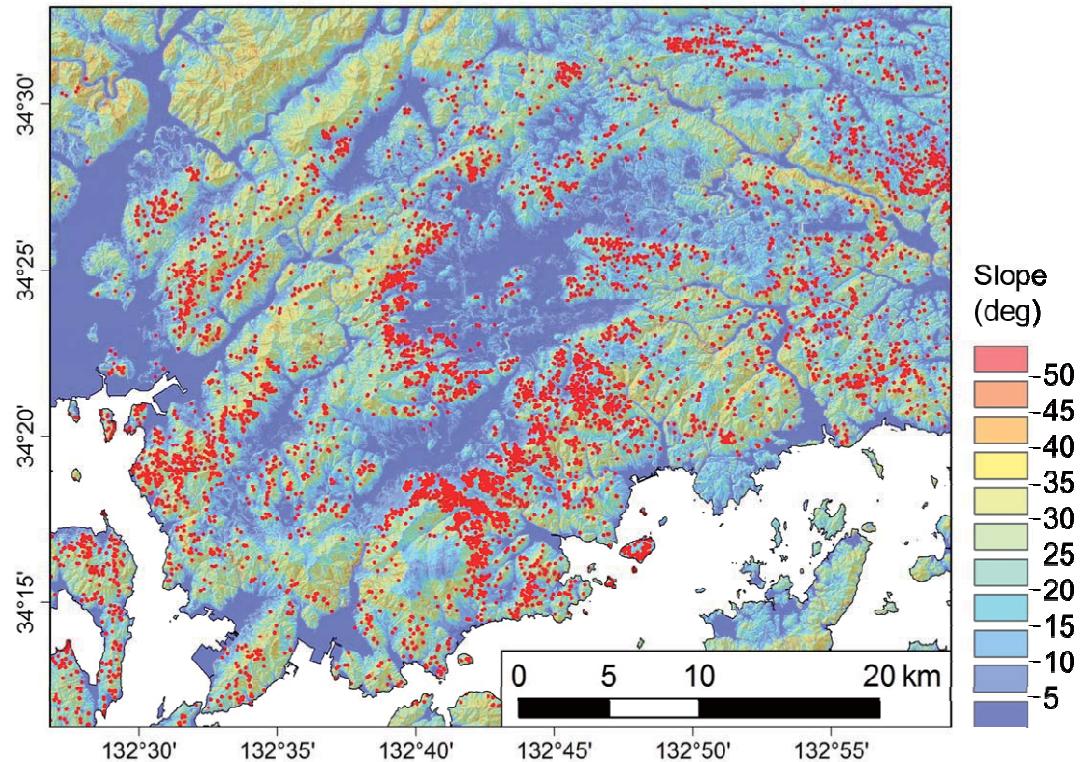


図3.広島沿岸部における地形（斜面傾斜）と崩壊源（赤点）の分布. 地形は10mメッシュ基盤地図情報.

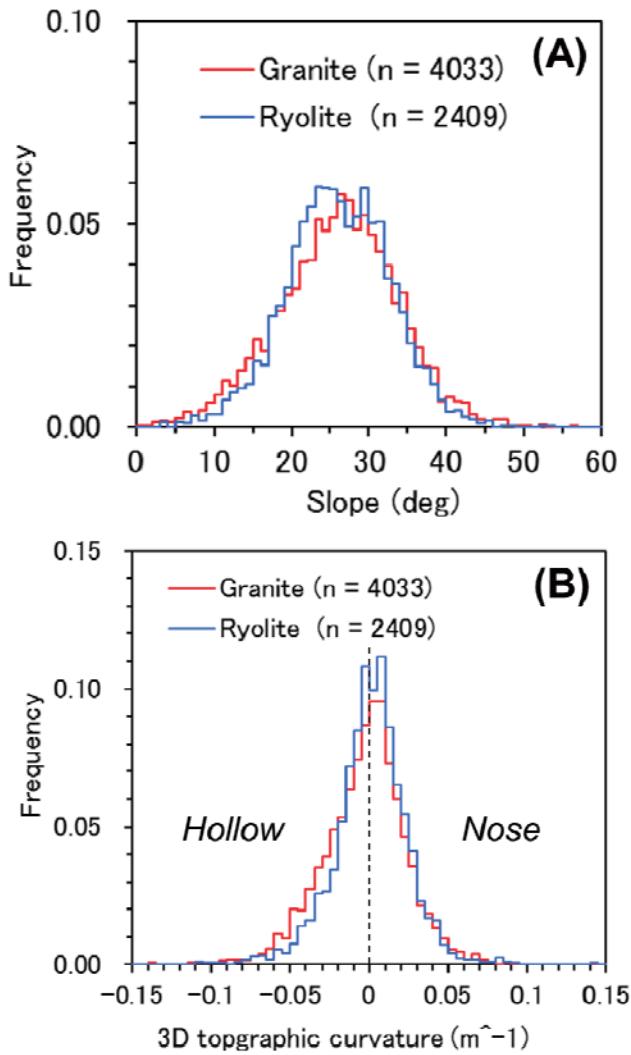


図 4. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする斜面の崩壊源における勾配 (A) と地形曲率 (B) .

ヒストグラムにおいて、数値が小さい側の形状が鋭く切り立っているほど、その継続時間での降水強度について崩壊に対する閾値が明瞭であることを意味する。図 5をみると、花崗岩と流紋岩のいずれにおいても、1 時間以下や 12 時間以上といったごく短期あるいは長い時間スケールでの最大雨量では、崩壊をもたらす閾値は明瞭でない。一方、3 時間最大雨量をみると、80 mm を超えると崩壊数が急増するのがわかる。花崗岩と流紋岩では、流紋岩の方が閾値が明瞭である。

ただし、このヒストグラムの形状は、そもそも各地質地域にどのような降水がもたらされたのかに依存する。そこで、3 時間最大降水量について、両地質に降った雨のヒストグラムとの比較を行った (図 6)。ここでは、この母集団としての降水出現頻度は、X バンド MP レーダの空間解像度である 250 m 四方の各メッシュのデータを用い、崩壊源における降水は、その点の周囲 4 方に位

置する 250 m メッシュの値を内挿補完して用いている。図 6A をみると、今回の降雨イベントにおける 3 時間最大雨量は、花崗岩域では 50- 140 mm、流紋岩域では 50- 110 mm の範囲に分布している。花崗岩の崩壊源に降った雨は、この母集団の分布と、大きくは変わらないようみえる (図 6B)。一方、流紋岩の崩壊源での雨は、母集団の分布に比べて 80 mm/3h 以下の分布がほぼ無く、80 mm/3h 付近を境界にして急増する特徴を有する。この雨量を閾値として、土砂移動が急増することを意味している。

こうした崩壊に対する降雨閾値の特性は、地質毎の土砂移動発生機構の際を反映しているかもしれない。図 6 のヒストグラムをみるとかぎりでは、花崗岩斜面のほうがより少ない雨でも土砂移動が発生するケースがあることが示唆される。これは、降雨浸透を主たる原因とする表層崩壊のほか、集水に伴う掃流や湧出に伴う土砂移動現象が発生しやすいことによるのかもしれない。ただし、写真測量に基づく 10 m メッシュ程度の空間解像度では、崩壊源の局所的な地形には地質による差異が無いように見える (図 4) ので、現地での多数の崩壊源の形態観察などによる確認が必要である。

3 時間最大雨量と崩壊源の空間的な分布をみると、南西- 北東方向に帯状に分布域が伸びる平面的な特徴がよく一致している (図 7)。ただし、当然ながら崩壊が発生するかどうかは地形 (特に勾配, cf 図 3) にも依存するため、降水が十分であっても崩壊源が分布しない場所がある。また、地質分布 (図 2) に照らしてみると、花崗岩を基盤とする場所に関しては、主として北東部において 3 時間最大降水量が小さい条件においても崩壊源がまばらに分布している。これらの場所では、より短い、あるいは長い時間スケールでの降水が効いているか、たとえ降雨強度が小さくとも、集水によって土砂移動が発生しうる状態になっていた可能性がある。

一般に、流紋岩には冷却亀裂などが多く存在し、基盤岩の貯水容量が大きいと推測できる。そのため、土砂移動が生じるには、強い降水浸透による表層崩壊の発生が必要条件となっているのではないかと推察される。一方、花崗岩は、節理もあるものの、風化フロント以深では、岩盤の水貯留量は大きくない。また、風化生成物の透水性も一般に高い。よって、十分な降水があれば、地形に従う側方流動による集水が顕著に生じ、飽和地表流や湧出水によるガリー状の侵食が発生することが多いのではないかと推察される。土砂移動現象に対する警戒のためには降雨閾値を設定する際には、まずはこうした基盤岩の性状に依存した、流域内での現象の多様性に注意すべきであろう。

次に、斜面の地形的な条件ごとに、土砂移動を発生させる降雨閾値に差異があるかどうかを検証してみる。

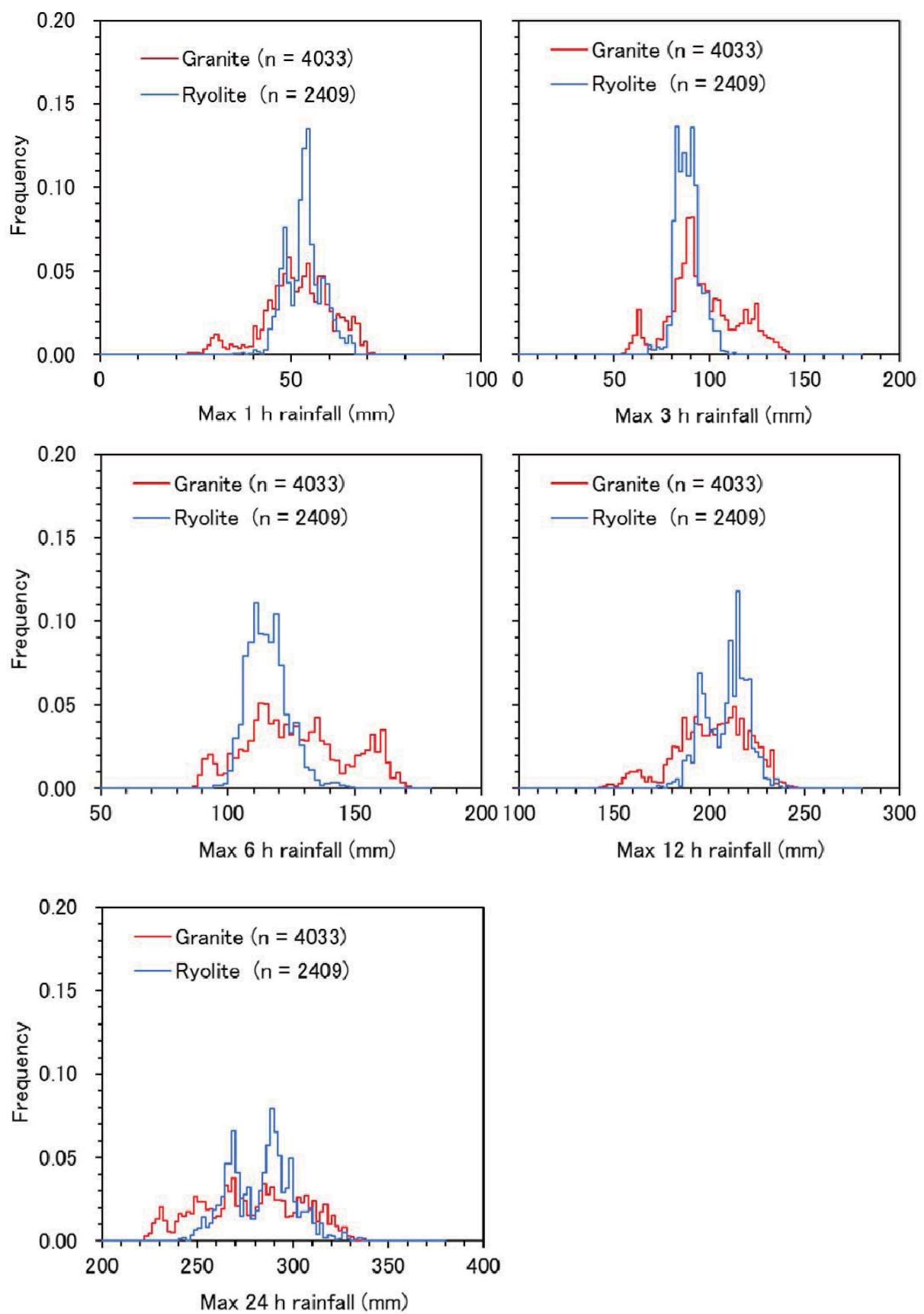


図5.花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする斜面の崩壊源に供給された任意時間最大降水量の出現頻度分布。

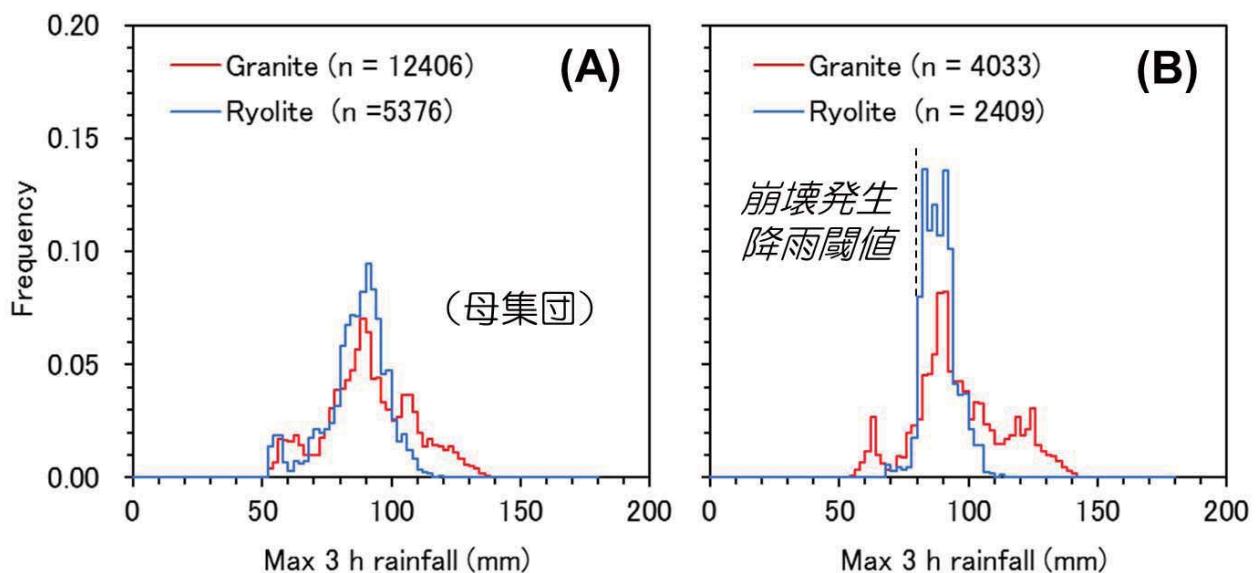


図6. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする山地全体（A）あるいは、その中の崩壊源（B）に供給された任意時間最大降水量の出現頻度分布。

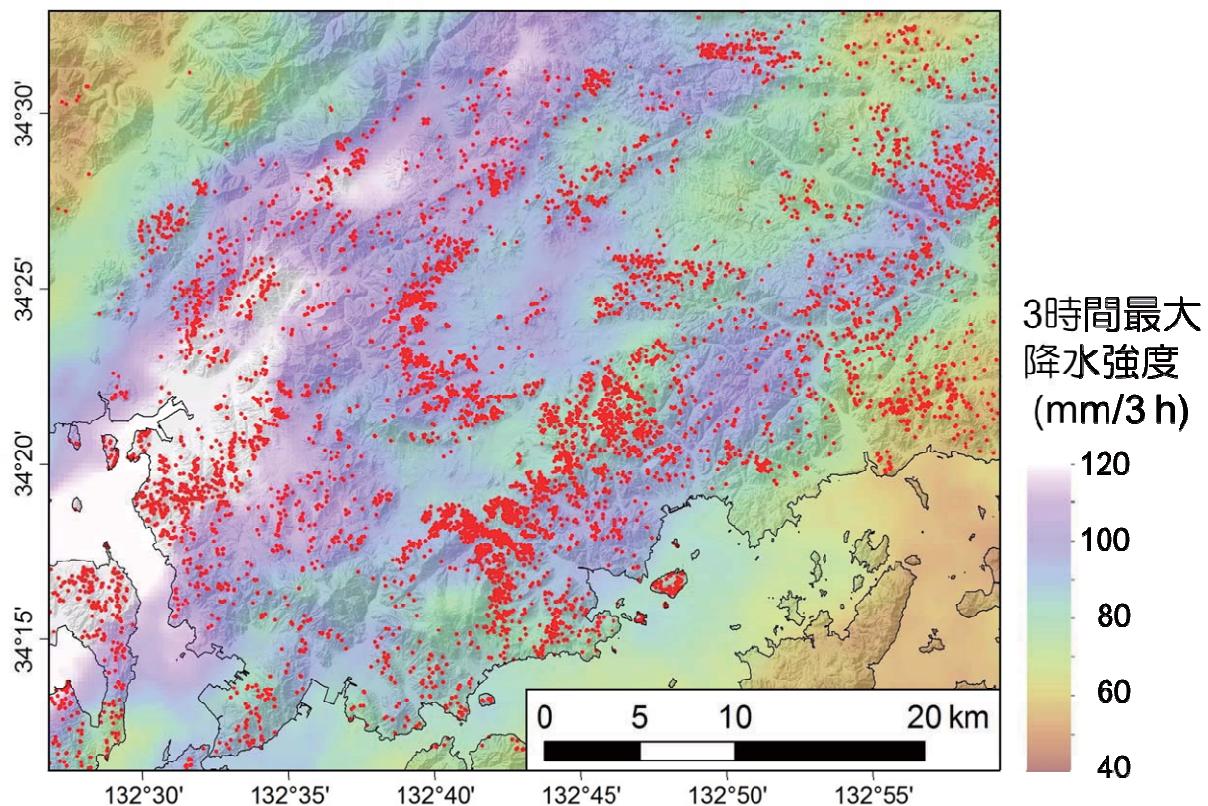


図7. 広島沿岸部における3時間最大降水量（背景色）と崩壊源（赤点）の分布

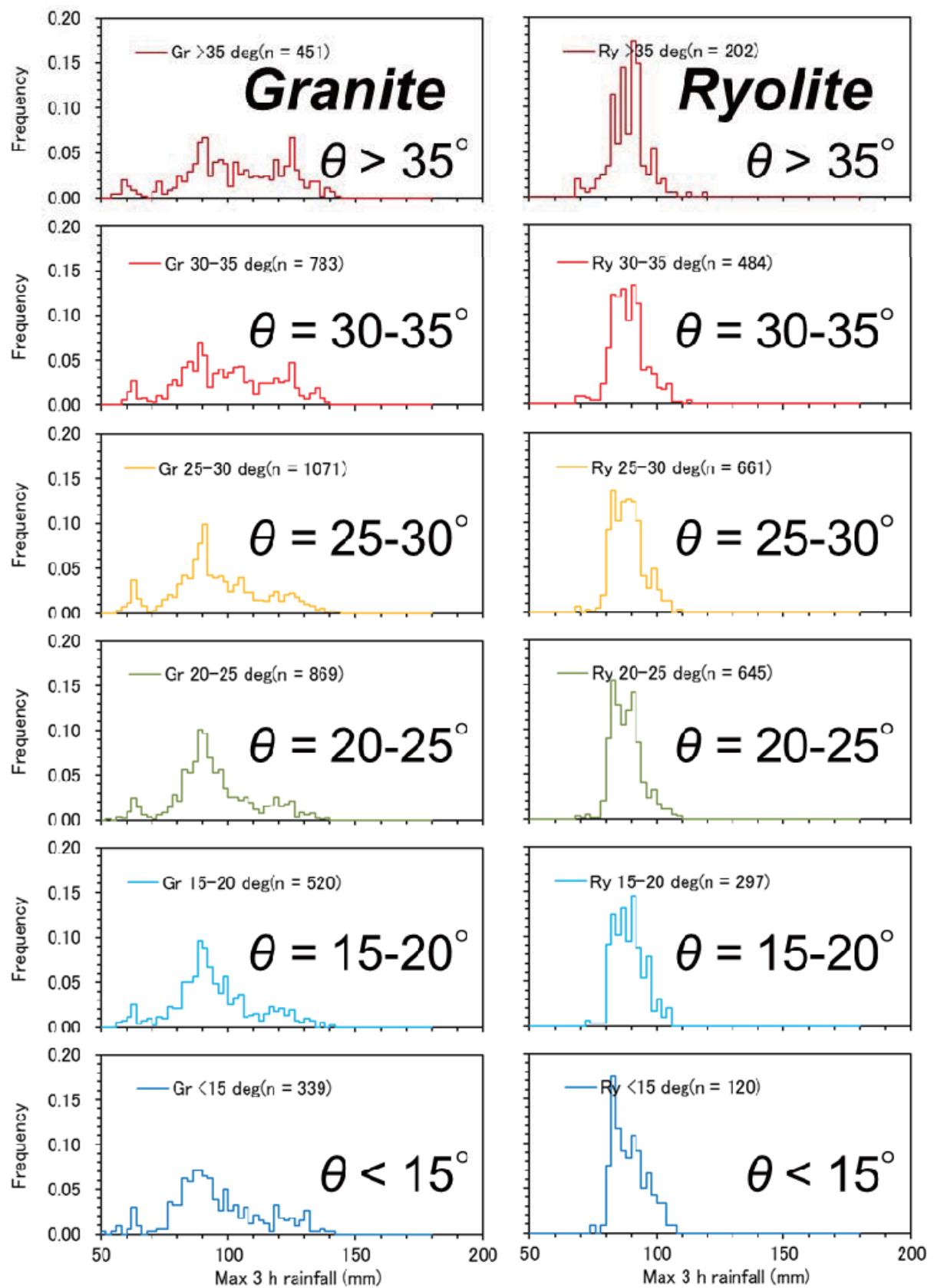


図 8. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする斜面において、傾斜角の異なる崩壊源に供給された 3 時間最大降水量の出現頻度分布。

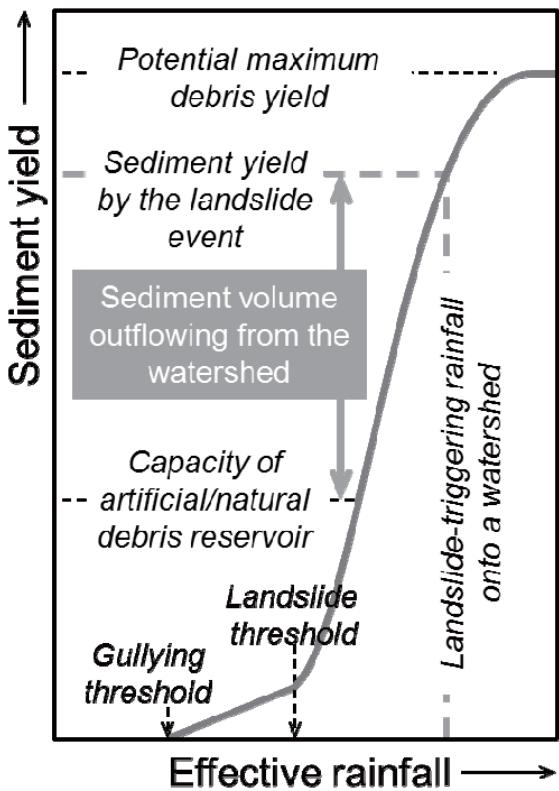


図 9. 流域における降水入力の応答としての土砂生産および土砂流出の概念図。

図 8 は崩壊源となった斜面の傾斜ごとに、そこにもたらされた雨の 3 時間最大降水量のヒストグラムを示したものである。これをみると、斜面勾配が小さくなるほど、土砂移動のための降雨閾値はより明瞭になる傾向は認められるものの、値それ自体が変化するようにはみえない。勾配が大きい場所ほど、より小さい強度の雨でも土砂移動を生じるように予想されるが現実には、そう単純な対応関係とはなっていないようである。これは、先に述べたように土砂移動の機構が多様であり、斜面勾配のみに依存して、崩壊が生じるわけではないことを反映したものと考えられる。流域内で生じる土砂移動に対する降雨閾値の精緻な推定には、崩壊源となる場の集水面積や崩壊予備物質の厚み、あるいは斜面構成物の水理性や可動性（静的・動的な強度特性）を考慮したモデリングが必要となるであろう。

以下に、降水と流域からの土砂流出の関係について、概念的にまとめる。図 9 に示すように、降雨の入力に対する応答としての土砂移動現象の発生と、流域からの土砂流出は、いくつかの閾値をもち、非線形的なふるまいをもつ。まず、地形変化に効果的な時間スケールにおける降水量（有効降雨）が十分に小さければ、土砂移動は

生じない。流域の集水機能が高く、可動性の高い土砂が渓床に存在する花崗岩渓流のような場合、有効降雨が小さくとも、ガリー状の侵食が生じる可能性がある。ただし、この時の生産土砂量はそれほど大きくはならない。さらに有効降雨が増えて表層崩壊発生の閾値を超えると、流域内の斜面で土層の滑落が群発し、流動化した崩土が渓床堆積物を巻き込んで土石流化し、生産土砂量は急増する。今回の豪雨のような場合では、この土砂量は、流域内の自然な地形あるいは砂防ダム等の人工構造物による貯留容量を超え、流域外へと多量の土砂が流出することになる（図 9）。ただし、流域内の崩壊予備物質は有限であり、土砂生産の上限はこれに規定される。近い過去に、多くの土砂移動が生じた流域は免疫性を獲得し、降水量が増出しても、土砂の生産量は抑制される。流域内での土砂生産の量を精緻に見積もるために、斜面における崩壊予備物質の空間分布をモデル化し、どれほどの雨が降れば、どこでどれほどの量の物質が、不安定化するのかを定量的に見積もる必要がある。また、流域外への土砂流出に関して、その量と影響範囲を評価するためには、斜面や渓床で生産された土砂の移動過程についてのモデルとのカップリングも必要である。

今回の西日本豪雨災害により、局所的な強雨をもたらす線状降水帯が、短い期間に広域の複数箇所で形成され、地質・地形の異なる場の条件において、多様な土砂災害が同時多発的に発生する懸念が現実のものとなった。人為的な気候変化が継続する近年の状況では、近い未来に同様の極端大気現象が再び生じる可能性は十分にある。今災害の経験を活かして、そのような事象に対応できるリアルタイムでの動的ハザードマッピングの方法を確立し、人的被害や社会的インフラ損失の軽減をはかることが急務である。

流域内での土砂移動現象は、その原因毎に発生に至る降雨閾値や、場所とタイミングおよび規模が異なる。それゆえ、警戒・避難のための指針も場の条件に依存して異なるものとなる。ハザード評価においては、土砂移動のタイプごとに発生機構が解明され、モデル化されていることが望ましい。これには、流域内で生じる地形および水文的な過程に対する深い理解が必要であり、今後も実証的な研究を継続的に、着実に進めてゆくことが重要である。

また、近年の災害で人的被害が拡大した要因として、地域住民が、適時に避難行動をとらなかったことが挙げられる。これは、地方行政やメディアを通じて発信される災害関連情報の精度が十分でないことと、その意味や重大性を、受け手側が把握できていないことによる。減災の実現には、ハザードおよびリスクの時空間変化をリアルタイムで精緻に計算し、地域社会に定量的な情報を提供して、どのような危機が自身に迫っているの

かを適時に、正確に、認識させることのできる仕組みが必要である。

豪雨による流域災害を予測し減災を実現するためには、まず地盤への降水浸透に伴い、山地流域内のどの斜面が、どのような拡がりと厚みをもって不安定化しているのか、ハザードの時空間的な変化を定量的に評価することが重要である。また、崩壊源で滑動を開始した崩土がどこまで流下するのかについても、地形学的あるいは河川工学的に予測することが望ましい。これにより、背後に土砂の給源となる山地流域をもつ山麓居住地において、どこが、いつ、どれほど危険なのかを地図上に表示することができる。これは、極端気象災害に直面する地域社会の核心的な減災ニーズであり、分野横断的な研究

者組織による学際的体制と複合融合的な研究アプローチをもって、はじめて実践的な解決を見出すことができるだろう。現時点では、研究機関が地域社会に直接情報を提供することは、法的上の理由でできない。しかし防災の主流化が進み、地方行政体と学術研究機関との有機的連携が強化されると予想される近い将来において、こうしたリアルタイム災害モニタリングシステムはデファクトスタンダードとして社会に受け入れられ、地域個別の状況に合わせてブラッシュアップされてゆくだろう。近い未来のチャレンジにより、具体的なテストフィールドにおいて、そのプロトタイプが構築・提供されてゆくことが期待される。

2018年7月に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流の流動特性

竹林 洋史¹・藤田 正治²

¹正会員 博士（工学）京都大学准教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）
E-mail:takebayashi.hiroshi.6s@kyoto-u.ac.jp

²正会員 工学博士 京都大学教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）
E-mail:fujita.masaharu.5x@kyoto-u.ac.jp

広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流について、現地調査と数値シミュレーションを実施し、宅地における土石流の氾濫特性と土砂災害警戒区域との関係を検討した。現地調査により、斜面の三ヵ所から土石流が発生し、合流・分派した渓流を土石流が流下し、北側の渓流から宅地に流れ込んだ土石流によつて多くの被害が発生したことが明らかとなった。流出した土砂は、粒径の細かい真砂土から直径数mの花崗岩も含まれ、粒度が非常に広いことが明らかとなった。数値シミュレーションにより、山頂付近の崩壊発生から北側の渓流の出口付近の家屋に土石流が到達するまでわずか50秒程度となっており、斜面における土石流の平均的な速度は約9m/sであり、宅地内を数10cm～3m程度の深さで流下・氾濫し、多くの家屋が全壊・半壊した。土砂災害警戒区域内には土砂が流れてこない領域も多いことと豪雨中に避難のために長い距離の移動が困難であることを考えると、土石流が流れてこない領域への避難は、生存確率を大きく上昇させることが期待されることが示された。

Key Words: Debris flow, Hiroshima, Numerical analysis, Sediment disaster, Evacuation

1. はじめに

2018（平成30）年7月6日と7日に中国・四国地方を中心として、九州北部から中部地方の広い範囲で多くの

雨が降った。広島県においても広島市や呉市など県南部を中心に長時間雨が降り続けるとともに、南西から北東方向に線状降水帯が形成され、降雨強度の強い雨が観測された。その結果、非常に多くの斜面崩壊および土石流

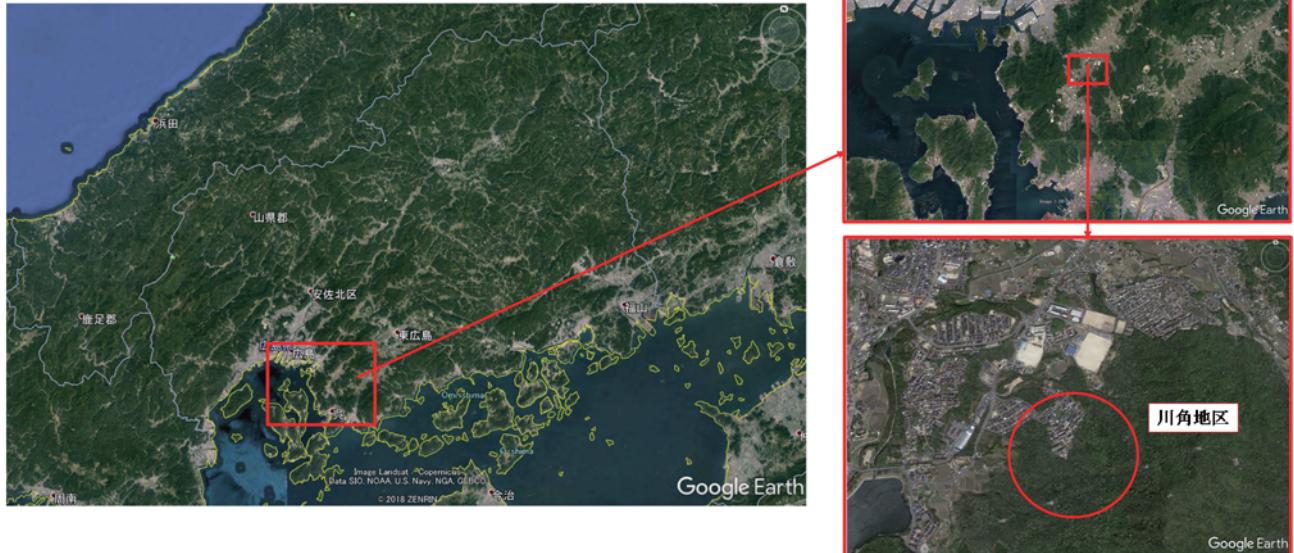


図-1 広島県安芸郡熊野町川角の場所



(a) 斜面上の土石流の流下経路
図-2 斜面上の土石流の流下経路と数値シミュレーションによる土石流の最大流動深
(b) 数値シミュレーションによる土石流の最大流動深の比較（単位：m）



図-3 土石流による浸食・堆積の様子

が発生し、甚大な被害が発生した。広島市では、わずか4年前の2014年8月にも多くの斜面崩壊および土石流による土砂災害が発生している。そのため広島では、土砂災害警戒区域の指定が2014年以降に急速に進むとともに、土石流による流出土砂量の推定方法が変更されるなど、様々な対策が進められているところであった。

本報告では、広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流について実施した現地調査の結果を報告するとともに、土石流の数値シミュレーションを実施し、宅地における土石流の氾濫特性と土砂災害警戒区域との関係を検討した結果を報告する。

2. 広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流

(1) 対象地域の概要

広島県安芸郡熊野町川角地区は、図-1のように、広島市と呉市の境界付近の海から8kmほどの内陸に位置している三石山（みついわやま）の北西斜面の下に広がる宅地である。「三石山」と呼ばれているように、山頂付近や斜面には、球状風化した直径数mの巨礫が点在している。山頂から宅地までの斜面は25°程度の急斜面であるが、宅地内は5°程度と斜面部よりも緩やかとなっている。

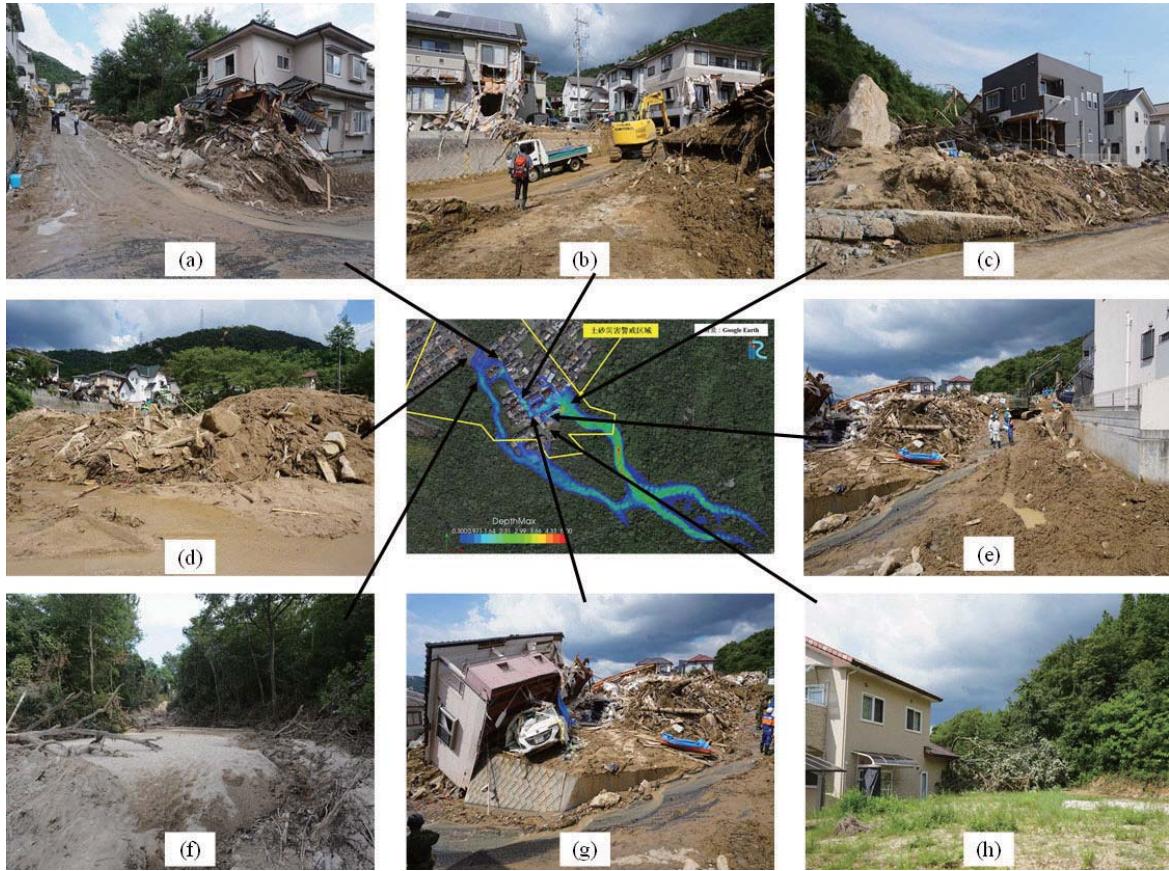


図-4 土石流による浸食・堆積の様子

(2) 現地調査

図-2 (a) に被災後の斜面の様子を示す (図-2 (b) は数値シミュレーションによって得られた最大流動深の分布であり、後述する)。図より、山頂付近の二カ所と中腹付近の一カ所から土石流が発生していることがわかる。山頂付近の二カ所から発生した土石流が流れた渓流は、中腹付近で合流するとともに分派し、二つの渓流に分かれてから宅地に流れ込んでいる。二つの分派している渓流の内、南側（写真では右側）の渓流では前述の中腹付近で発生した土石流も流れ込んでいる。

図-3と図-4に、現地調査時の様子を示す。図-3 (d) と (e) からも山頂付近の二カ所から発生した土石流が流れた渓流が中腹付近で合流・分派していることがわかる。また、二つの渓流の合流点付近には直径数mの粒径の大きい岩が存在することもわかる。図-3 (c) に示すように、北側の渓流から宅地に流れ込んだ土石流は、宅地に入り始めた地点では既に堆積傾向となっている。直径数mの粒径の大きい岩とともに、粒径の小さい真砂土が多く堆積しており、粒度が広いことがわかる。図-3 (a) と (b) は南側の渓流の様子である。図-3 (a) に示すように、南側の渓流を流下した土石流は、宅地の南側を流下している。宅地の南端から土砂が宅地に流入しているが、その量は比較的少なく、家屋の破壊などは見られない。また、渓流内に堆積している土砂は非常に細かく、

真砂土で構成されている。

図-4 (a) は、宅地内の地盤勾配方向に沿って建設された北西方向に伸びる道路の下端から道路の様子を撮影したものである。北側の渓流から宅地に流入した土石流の主流は、この道路を流下している。図-4 (d) は、図-4 (a) で示した道路から流れてきた土石流の堆積物である。直径数mの粒径の大きい岩とともに、粒径の小さい真砂土も多く堆積していることがわかる。さらに、流木も含まれている。図-4 (f) は、南側の渓流の下流端付近の様子であり、図-3 (a) で説明したように、渓流内に堆積している土砂は非常に細かく、真砂土で構成されている。図-4 (b) は、図-4 (a) で示した道路の途中の様子であり、道路沿いの家屋の一階の一部が被災していることがわかる。図-4 (c) に示すように、北側の渓流から宅地に流れ込んだ土石流は、渓流出口から北西に広がる家屋を破壊するとともに、その主流は、図-4 (e) で示す南東方向に伸びる道路に沿って流れている図-4 (a) で示した道路と図-4 (e) で示した道路が交わる場所の様子を示したもののが図-4 (g) である。図-4 (g) に示されている家屋は、一階は形状が全くわからないほど破壊されている。しかし、二階は転倒しているものの、それほど大きな損傷を受けていないように見える。図-4 (b) も同様に、一階は損傷しているが、二階の損傷は比較的軽度であることがわかる。これは、土石流の流動

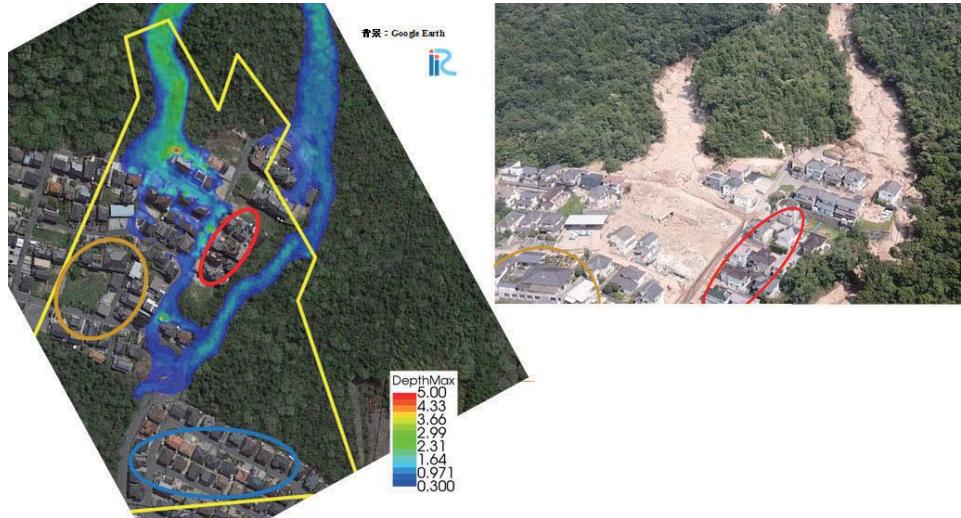


図-5 数値シミュレーションによって得られた宅地の最大流動深の空間的な分布と宅地の土砂の氾濫の様子（単位：m）

深が二階を直撃するほどの深さでは無いことを示すものである。

図-4 (h) は、南北の二つの渓流に挟まれた領域であるが、図-4 (e) で示す南東方向に伸びる道路よりも地盤が高い位置にある。その結果、敷地内に土石流は流れ込んで樹木は倒れているが、家屋を全壊するほどの勢いでは土石流が流れていなことがわかる。

3. 数値シミュレーションの概要

(1) モデルの概要

本解析では、粗粒土砂の構成則に江頭らのモデル¹⁾を用い、細粒土砂が水と混合することにより水と土砂の混合物として液相のように振る舞う相変化と層流域上に乱流域を考慮した平面二次元土石流モデル^{2,3,4)}を用いる。従来の土石流の数値シミュレーションは、上流域は一次元モデルを用い、下流の土石流堆積域に平面二次元モデルを適用することが多い⁵⁾。しかし、このようなモデルでは支川からの土石流の扱いが別途必要となる。また、熊野町川角の中腹部で見られるような土石流の分派現象を取り扱うのが非常に困難である。さらに、土石流の流動幅の時間的な変化の評価が困難となる。そこで、本解析では全解析区間に平面二次元土石流モデルを適用した。

(2) 解析条件

地形データは国土地理院により被災前に測定されたものであり、平面的に5mの解像度のDEMデータである。解析格子は、道路上を流れる土石流を表現するとともに家屋の形状を表現するため、2m×2m の比較的細かい正方形格子を用いる。土石流は実現象に即して斜面崩壊を発端として発生するものとした。そのため、本解析の境界条件は流体化した水と土砂の混合物が初期に斜面に存在するというものであり、土石流の流量などを上流から

与えていない。表層崩壊は、山頂付近にニカ所、中腹付近に一カ所の合計三カ所を考慮する。表層崩壊の場所は、被災後の調査によって判断された崩壊地とした。これら三カ所の斜面崩壊の発生時刻の関係は不明であるため、本解析ではこれら三カ所の斜面崩壊が同時に発生したと仮定している。なお、下流域での土石流の規模は土石流の流動過程で渓床や河岸などを浸食して取り込んだ土砂と水の量で決定されるため、本土石流のように土石流の流動距離が長い場合は斜面崩壊の大きさは土石流の規模に影響を与えない⁶⁾。宅地の中の家屋は、高さ 8m の非浸食域とした。現地調査により、宅地内の道路のアスファルトが大きく浸食・流出した場所は見られなかったことと、宅地内の地盤勾配が緩やかで堆積が卓越することから、宅地内の地盤は非浸食とした。

4. 結果と考察

図-2 (b) に数値シミュレーションによって得られた最大流動深の空間的な分布を Google Earth に出力し、鳥瞰図として表示したものを示す。現地調査によって得られた被災後の斜面の様子を示す図-2 (a) と比較すると、土石流による斜面の浸食域と数値シミュレーションによる土石流の流動域が良く一致していることがわかる。図-5に数値シミュレーションによって得られた宅地における最大流動深の空間的な分布と現地調査によって得られた被災後の宅地の土砂の氾濫の様子を比較したものを示す。北側の渓流が宅地に流れ込んだ地点の下流の宅地は、数値シミュレーションでも流動深が深くなっていることがわかる。また、現地で土砂が氾濫している範囲は、数値シミュレーションで土石流が流動した範囲とよく一致していることがわかる。さらに、図-3 (b) と (g) に示す家屋の一階が被災した領域の土石流の深さは最大で 2.00m、2.56m とそれぞれなっており、一階のみが大きく

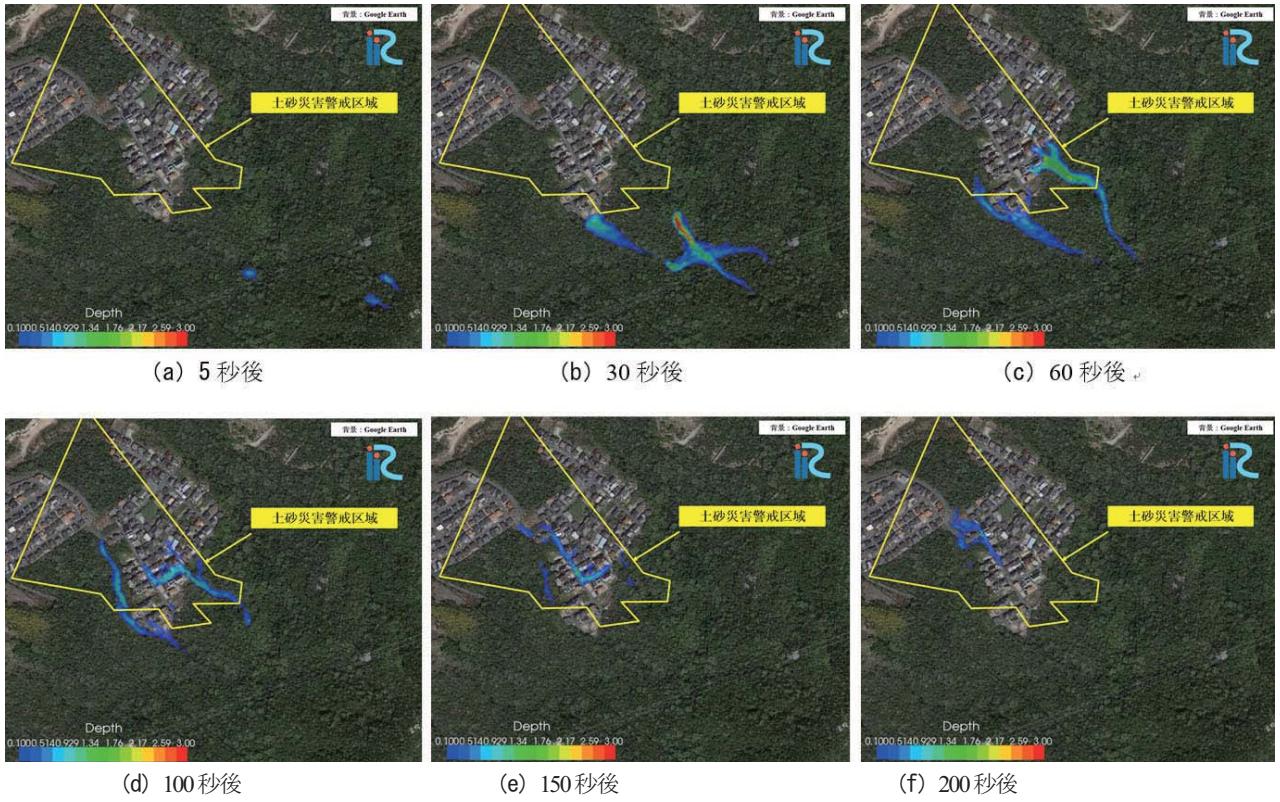


図-6 広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流数値シミュレーションによる土石流の流動深（単位：m）

被災していることと一致している。これらの結果より、本数値シミュレーションによる土石流の流動・氾濫特性は、現地の土石流の流動・氾濫特性をかなり良く表現できていると考えられる。

図-6に土石流の深さの時空間的な変化を示す。山頂付近から発生した二つの土石流は、別々の渓流を流下し、斜面中腹付近で合流するとともに、南と北の二つの渓流に分派して流れている。南側の渓流は、もう一つの中腹付近で発生した斜面崩壊による土石流が流下した渓流と同一である。一方、数値シミュレーションにおいても、多くの家屋を破壊した土石流は北側の渓流からの土石流であることがわかる。図-7に示す土石流警戒区域も北側の渓流からの土石流を想定したものが主となっている。数値シミュレーションによると、山頂付近の崩壊発生から北側の渓流の出口付近の家屋に土石流が到達するまでわずか50秒程度となっており、斜面における土石流の平均的な速度は、約9m/s（時速約32km）である。山頂付近の崩壊による土石流が宅地に到達した時点の土石流の深さは約2mで、宅地に衝突した時に3m以上となっている。

宅地内には建設中の家屋も存在し、図-3に示すように、新しい家屋も多く見られ、比較的新しい宅地であることがわかる。土砂災害警戒区域内の住民によると、住民の多くは自身の住居が土砂災害警戒区域内に存在することは把握されていただろうとのことであり、土砂災害の危険性が高いことは住民にある程度認識されていたと考え

られる。土砂災害警戒区域は、土石流などのような危険な状態で土砂が流出・氾濫する急傾斜地において、人家などの守るべき対象がある場所に対して設定されるものであり、土石流が氾濫を開始する点を起点として扇形の氾濫域を想定し、地盤の勾配が 2° よりも急な領域に対して設定される。このような設定方法は、地形の情報が主となって設定できるため、比較的短時間で警戒区域を設定することが可能である。そのため、土砂災害の危険性が高い地域が全国に非常に多いことを考えると、このような土砂災害警戒区域の設定方法は有効な方法と考えられる。しかし、図-5に示すように、実際の土石流は土石流氾濫開始地点を起点にして扇形に氾濫するのではなく、地表に建設されている家屋や道路などの構造物の影響を受けて氾濫・堆積する。そのため、土砂災害警戒区域内にも土石流が危険な状態で流れてこない領域が多く存在する。図-5に赤色・茶色・青色の楕円で囲まれた領域のように、熊野町川角においても、土石流がほとんど流れていない領域が存在する。一方、土石流が流出する渓流が隣接していることは非常に多く、2014年8月に大規模な土石流が複数発生した広島市安佐南区八木・緑井地区の土砂災害警戒区域などは、土砂災害警戒区域が二重・三重に重なっている。このような状態となると、土砂災害警戒区域外への避難は移動距離が長くなり、豪雨中に避難をすることは困難となる。そのため、豪雨中の土砂災害からの避難や土石流発生後の避難を考えると、土砂災害警戒区域内の土石流が流れてこない領域への避

難が有効となる。本数値シミュレーションによって土石流が流れてこない領域が、対象の宅地においてどのような規模の土石流が発生しても土砂が流れてこないわけではないが、セカンドチョイスの一次避難場所として非常に有効と考へることができる。また、図-3に示したように、一階が被災していても二階に大きな損傷を受けていない家屋が多く見られる。熊野町川角と同じ2018年7月6日に被災した広島市安佐北区口田南三丁目の家屋では、一階に居た方が亡くなっているが、同じ家で二階に居た方は助かっている。このようなことを考へると、豪雨中に遠方まで避難することが困難な場合、二階に避難することにより、生存確率が大きく上昇することが期待される。

前述の通り、対象地域の土砂災害警戒区域の設定に南側の渓流からの土石流は対象となっていない。南側の渓流からの土石流も宅地に流れ込んでいるが、ちょうど、まだ家屋が建設されていない領域であったことと宅地の南側を流れる渓流の本川が、図-3 (b) に示すように、宅地よりも数メートル低い場所を流れており、土砂の多くが宅地を逸れて流下した。さらに、図-4 (f) に示す渓流の出口付近は、勾配が非常に緩やかであり、土石流として流れてきた土砂が急速に堆積し、下流の地区で広く氾濫しなかつたため、被害はそれほど大きなものとならなかつた。通常の土砂災害警戒区域の設定ではこのような土石流の分派現象は考慮されていないが、数値シミュレーションを実施することにより、分派現象による土石流危険箇所の抽出が可能であることがわかる。さらに、北側の渓流からの土砂の流出量については、分派によって小さくなっていると考えられる。そのため、土砂災害対策を考える上で重要な数値となる土石流の氾濫範囲、流出土砂量などの推定においても数値シミュレーションによる評価が非常に有効であることがわかる。

5. 結論

広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流について、現地調査と数値シミュレーションを実施し、宅地における

土石流の氾濫特性と土砂災害警戒区域との関係を検討した。現地調査により、斜面の三ヵ所から土石流が発生し、合流・分派した渓流を土石流が流下し、北側の渓流から宅地に流れ込んだ土石流によって多くの被害が発生したことが明らかとなった。流出した土砂は、粒径の細かい真砂土から直径数mの花崗岩も含まれ、粒度が非常に広いことが明らかとなった。数値シミュレーションにより、山頂付近の崩壊発生から北側の渓流の出口付近の家屋に土石流が到達するまでわずか50秒程度となっており、斜面における土石流の平均的な速度は約9m/sであり、宅地内を数10cm~3m程度の深さで流下・氾濫し、多くの家屋が全壊・半壊した。土砂災害警戒区域内には土砂が流れてこない領域も多いことと豪雨中に避難のために長い距離の移動が困難であることを考へると、土石流が流れてこない領域への避難は、生存確率を大きく上昇させることが期待されることが示された。

参考文献

- 1) 江頭進治、伊藤隆郭：土石流の数値シミュレーション、日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌、Vol. 12, No. 2, pp.33-43, 2004.
- 2) 竹林洋史：広島市で発生した土石流の数値シミュレーションの事例と対策、地盤工学会誌、Vol.64, No.4, pp12-15, 2016.
- 3) 江頭進治、佐藤隆宏、千代敬三：砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響、京都大学防災研究所年報、No.37, B-2, pp.359-360, 1994.
- 4) 竹林洋史、江頭進治、藤田正治：2013年10月に伊豆大島で発生した泥流の平面二次元解析、河川技術論文集、Vol.20, pp.391-396, 2014.
- 5) 和田孝志、里深好文、水山高久：土石流計算における1次元・2次元シミュレーションモデルの結合、砂防学会誌、Vol. 61, No. 2, pp.36-40, 2008.
- 6) 江頭進治・宮本邦明・竹林洋史：崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構、砂防学会誌、第68巻、第5号(通巻322号), pp.38-42, 2016.

FLOW CHARACTERISTICS OF DEBRIS FLOW WHICH WAS HAPPENED IN KUMANO, HIROSHIMA IN JULY, 2018

Hiroshi TAKEBAYASHI and Masaharu FUJITA

Field observation and numerical analysis were performed for the debris flow which was happened in Kumano, Hiroshima in July, 2018. Three debris flows were happened and the debris flow from the north valley attacked the residential area and damaged many houses. The debris flow composes of wide graded sediment. The results of the numerical analysis show that the debris flow approached at the residential area in 50 sec. and the average speed on the slope is 9m/s. The information of the inundation area and the debris flow depth can be used to consider the evacuation method in case which people cannot evacuate in long distance during the heavy rain.

地質と崩壊メカニズム（広島地域）

千木良雅弘¹

¹京都大学防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄官有地）
E-mail:chigira@slope.dpri.kyoto-u.ac.jp

要旨：西日本豪雨災害によって多数発生した斜面崩壊の内、広島地域の斜面崩壊の地質的原因について調査した。斜面崩壊の多くは、花崗岩地域と流紋岩地域に発生した。両地域ともに岩石の風化形態に強く規制されたものであることがわかった。花崗岩の風化形態としては、マイクロシーティングの発達するものと球状風化とがあり、広島に一般的に分布する花崗岩はマイクロシーティングを伴って風化し、球状風化はあまり一般的には認められない。しかしながら、今回甚大な被害を発生させた個所では、球状風化が認められ、その結果形成された巨大なコアストンが土石流に含まれ、強い破壊力を発揮した。崩壊源の観察によれば、コアストンの間のマサが流出して、結果的にコアストンが不安定になって崩壊したものとみられる。流紋岩地域では、高標高部で強く風化して赤味を帯びた岩石の上の土層が崩壊し、土石流となって流下した。風化に伴ってハロイサイトが形成され、それが割れ目に沈殿して割れ目を閉塞していることが認められたことから、表層部の透水性が低下していて、土層が急激に飽和して崩壊が発生したものと考えられる。また、土石流の流路には古い土石流堆積物が認められたが、その基質部分はやはり強く風化して粘土化し、水の深部浸透を妨げていたと考えられる。一方で、斜面表面は硬い岩片に覆われているため、表面侵食はあまり進まず、平面的な斜面表面となっていたと推定される。このような条件の斜面を土石流が流下したため、大量の出水があったものと推定される。

Key Words: landslide, rainstorm, granite, rhyolite, weathering

(1) はじめに

第2章で述べられたように、降雨によって花崗岩地域と流紋岩地域とで多数の崩壊が発生した。筆者らは、広島県の次の個所について現地調査を行った。

花崗岩地域：広島市安芸区矢野東、安芸郡熊野町川角地区

流紋岩地域：東広島市黒瀬町、呉市安浦、
その結果、いずれの個所でも斜面崩壊は岩石の風化様式を強く反映していることが明らかになった。

(2) 花崗岩地域

安芸郡熊野町川角地区

ここでは、比高約 200m の山稜の尾根線直下と途中から崩壊が発生し、土石流となって下方の住宅地を襲った（図1）。土石流には最大差し渡し 14m の大ブロックも含まれ、それは谷の途中で引っかかるように停止していた。また、住宅地にまで至った土石流には丸みを帯びた大岩塊が含まれていた（図2）。



図1 安芸郡熊野町川角地区の崩壊・土石流。挿入写真は崩壊源の直上にある岩塔。これと同様の岩塔は、写真左手中央部にも認められる。



図2 川角地区の崩壊の流路の中間部に残存する大岩塊。



図3 崩壊地上部に認められた花崗岩の岩柱と、節理に沿う岩のずり下がり。

崩壊源には、花崗岩の風化に取り残された岩塔がマサに囲まれるような構造が認められた。そして、一部にはこの岩柱が斜面下方にずり下がる様子（図3）や、マサの部分が地中侵食を受けて空洞になっている様子が認められた。これらのことから、この崩壊・土石流は、岩柱の間を埋めるマサが侵食され、不安定になった岩柱の崩壊に始まったことがわかる。前述した巨大な岩塊もこのような岩柱の一つである。中腹部の崩壊源では、球状風化ではなく、もう一つの風化形態であるマイクロシーティングの発達した花崗岩表層部の土層が崩壊したものであるが、その流路には球状風化した花崗斑岩の露出も見られ、そのコアストンも土石流に参加している。沢の上部で大岩塊が残存している部分の斜面傾斜は約35度で、未だに不安定な状態にある。

安芸区矢野東地区

ここでも、川角地区と同様に、花崗岩の球状風化によって形成されたコアストンが土石流に含まれ、それが家屋を破壊しており、土石流の破壊力を増大していたとみられる。崩壊源には、やはり、マサに取り囲まれた岩

柱やコアストンが認められ、ここでも、マサの地中侵食によって岩塊が不安定となり、崩壊が発生したと判断される。



図4 矢野東地区で家屋を襲った花崗岩のコアストン

花崗岩の風化形態と崩壊メカニズム

花崗岩の典型的な風化形態としては、ここに述べた球状風化とマイクロシーティングがあり、広島の花崗岩の風化では一般的にはマイクロシーティングが卓越しており（千木良、2002；藤田・横山、2009）、球状風化の発達は局所的である。1999年や2014年の広島豪雨災害の時に崩壊したのは、マイクロシーティングの発達した風化花崗岩であった。どのような花崗岩が球状風化するのかについては、未だ明確にはなっていないが、柱状節理の発達する花崗岩である可能性が指摘されている

(Hirata and Chigira, 2016)。花崗岩に柱状節理がある場合があることは、従来注目されていないが、かなり一般的に認められるものであることがわかつてきた。（千木良、2018）。川角地区や矢野東地区に認められた岩塔や岩柱は形態的にみて、柱状節理に囲まれた岩塊である。このような岩塊は風化によって表面からマサとなり、球状の岩塊となっていく。いずれにしても、川角地区の山稜に認められたような岩塔が認められる場合は、その下の花崗岩が球状風化し、豪雨によって今回と同様の現象が起こりうることを示唆していると言えよう。

このように球状風化した花崗岩の崩壊メカニズムを模式的に図5に示す。2017年の九州北部豪雨災害時に多発した花崗閃緑岩の崩壊は、球状風化してコアストンの残存する部分の崩壊と、コアストンも失われた部分でマサが深くまで崩壊した部分とがあった。それに対して、今回のは、高標高部にあったであろうマサは失われた斜面で崩壊が発生した。このようにマサの抜け出しによって生じる崩壊は、地中侵食がある程度進んだ段階で生ずると考えられるので、表層崩壊とは言え、降雨強度のピークの時に生ずるとは限らず、それに遅れて生ずる場合もあると考えられる。

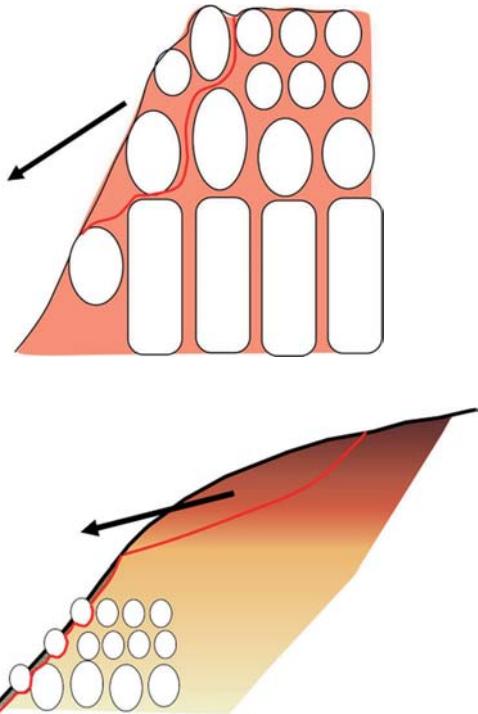


図 5 球状風化した花崗岩類の崩壊模式図。上は今回の川角地区や矢野東地区の崩壊。下は、2017年九州北部豪雨災害で発生した崩壊模式図。花崗岩類は、高標高部に強く風化して形成されたマサが残されている場合が多く、下図では、その崩壊と低標高部のコアストンとマサとの崩壊の両方が起こったことを示している。それに対して、上図では、岩塔の上に存在したであろうマサはすでに取り去られている。



図 6 流紋岩地域の崩壊状況（広島国際大学裏）。6, 7, 8 の番号は崩壊調査個所。



図 7 崩壊源の状況の例。図 6 の崩壊源 6. 崩壊地内には水が勢いよく噴出した痕跡が残されている。



図 8 崩壊源の鉛直掘削断面。流紋岩は赤色に風化している。崩壊源 8。

崩壊の深さはいずれも 1m に満たなかった。図 8 に崩壊源での掘削断面を示す。赤く発色しているのは斜長石である。X 線分析の結果、風化鉱物としてハロイサイトが検出された。この風化岩の透水試験の結果、透水係数は $10^3 \sim 10^4 \text{ cm/s}$ であった。 10^3 cm/s は、3 時間雨量にすると 100 mm 相当である。

呉市安浦町中畑の崩壊地の崩壊源を掘削した結果、風化岩の割れ目を粘土鉱物が閉塞している様子が確認された（図 9）。これは、厚さ 1 cm 程度に沈積したハロイサイト層であった（図 10）。流紋岩が風化して溶出したアルミニウムとシリカが結合して沈殿したものと考えら

れる。



図 9 風化した流紋岩の節理を埋めるハロイサイト脈。

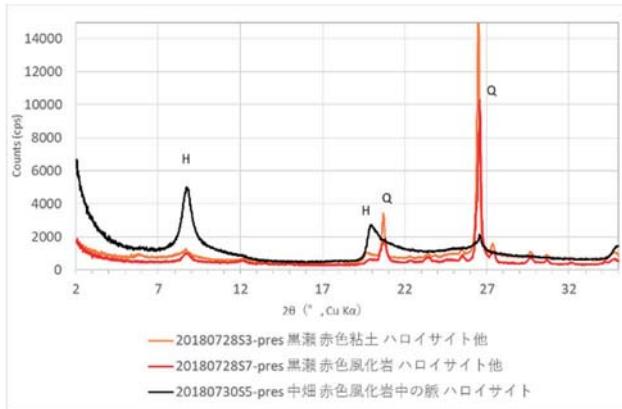


図 10 粘土鉱物の X 線回折プロファイル。黒瀬赤色粘土は、土石流堆積物の基質；黒瀬赤色風化岩は崩壊源 8 の風化岩；中畑赤色風化岩中の脈は図 9 に示したもの。脈はほぼ純粋なハロイサイトからなる。

土石流の流下経路には古い土石流の堆積物があり、その上を今回の土石流が移動した。土石流の映像を見ると、土石に比べて水量が多く、まるで洪水のように見受けられた。崩壊 6 と 7 の移動経路では、古い土石流堆積物の断面が認められた。それによれば、古い土石流堆積物では基質が粘土化しており、全体の透水係数が著しく低いと推定される（図 11）。この粘土は、X線分析の結果によればハロイサイトと同定された（図 10）。



図 11 新しい土石流堆積物（左）と古い土石流堆積物（右）。古い土石流堆積物では、基質が粘土化している。

一方、新しい土石流堆積物の基質は粘土混じりの砂質で（図 11）透水性は相対的にかなり高いと推定される。このように、土石流の移動経路の地盤は、下位に透水性の低い堆積物があり、その表層部を透水性の高い堆積物が覆うような構造をしている。そのため、水は下方にはしつこく表流水が生じやすい。しかしながら、表層部は硬質の岩片によって保護されているため、侵食に対する抵抗性が強いと考えられる。このような条件によって、洪水のような土石流が生じたものと思われる。

土石流堆積物には、最大径 30 cm程度の丸い流紋岩礫が大量に含まれていた（図 12）。これは、一見河床礫のようにも見えるが、実際には、流紋岩が球状風化したものであることが風化断面に見て取ることができる（図 13）。新鮮な流紋岩の露頭はあまり広く露出していないが、図 6 の広島国際大学の裏側の山の反対側の沢で見られ、そこでは柱状節理が発達していた。おそらく柱状節理に関係して球状風化が進んだものと考えられる。ただし、この柱状節理によってできた石柱は直径数 10 cm以下と細いため、川角地区のような巨大なコアストンは形成されていない。



図12 古い土石流堆積物とそれを覆う今回の土石流堆積物。



図13 流紋岩の球状風化

(4) まとめと今後への提言

西日本豪雨災害によって広島地区に発生した斜面崩壊・土石流は、基盤の岩石の風化状況を強く反映したものであった。花崗岩地域で発生したもので、家屋に著しい被害を及ぼしたものには球状風化した花崗岩で、そのコアストンの破壊力が著しかったことが注目される。1999年の広島豪雨災害の時には、土石流には大岩塊はそれほど含まれず、土砂と流木による被害が大きかった。一方2014年の広島豪雨災害の時にはシーティング節理と高角節理によって分離された大岩塊が土石流の流路で巻き込まれて被害を拡大した。一方の今回では、球状風化によって形成されたマサが地中侵食によって抜け出し、コアストンや石柱が不安定になり崩壊し、下流に流出した。このように風化花崗岩の降雨による崩壊・土石流も、風化的形態によってかなり様相を変える点に留意しておく必要がある。

流紋岩地域で降雨による崩壊が多発した例はあまり知られていない。2010年7月の広島県庄原地区のものが知られているが、この場合には、強風化した流紋岩の崩壊ではなく、凹部に堆積していた硬質の流紋岩片集積部を土が覆っていた部分で崩壊が多発したものであった。そのため、崩壊に至るまでの降雨量や崩壊・土石流の挙動

は今回のものとは異なっていたと考えられる。

図13には、西日本の地質図を示すが、広島の被災地に分布するのと同様の白亜紀の花崗岩類と流紋岩類は広く分布している。つまり、このような地域に今回と同様の降雨が降れば、他の地域でも同様の災害が起こり得ると考えておくべきである。それに備えるためには、岩石の風化帯構造を知り、ある程度広い範囲を区域分けして、降雨に対する応答を評価していくことが必要であると考える。

花崗岩の場合には、この中に球状風化するものとマイクロシーティングを生じるものとがあり、また、風化の程度も場所によって異なるが、ある程度地図上で分類することが可能であると考えられる。また、流紋岩の風化程度もマッピングすることが可能である。このような岩石の種類と特徴的な風化帯構造によって地質を分類することが必要である。

現在行われている土壤雨量指数による土砂災害警戒情報は、非常に高度化したものではあるが、最大の欠点は地中のモデルが1種類でブラックボックス化していることである。今回の西日本豪雨災害による経験は、地中のモデルを複数設定することが必要であることを示している。ただ、すべての地質ごとに設定する必要はなく、風化帯構造の共通するような岩石は1つのカテゴリとすることによって、煩雑さを回避できるものと考えられる。

謝辞

京都大学防災研究所における突発災害調査関わる研究経費および、科学研究費・特別研究促進費「平成30年7月豪雨による災害の総合研究（代表：山本晴彦）」の支援を受けた。松四雄騎氏には降雨などについて議論していただきいた。また、現地調査においては、荒井紀之、平田康彦、益子将和の諸氏の協力を受けた。

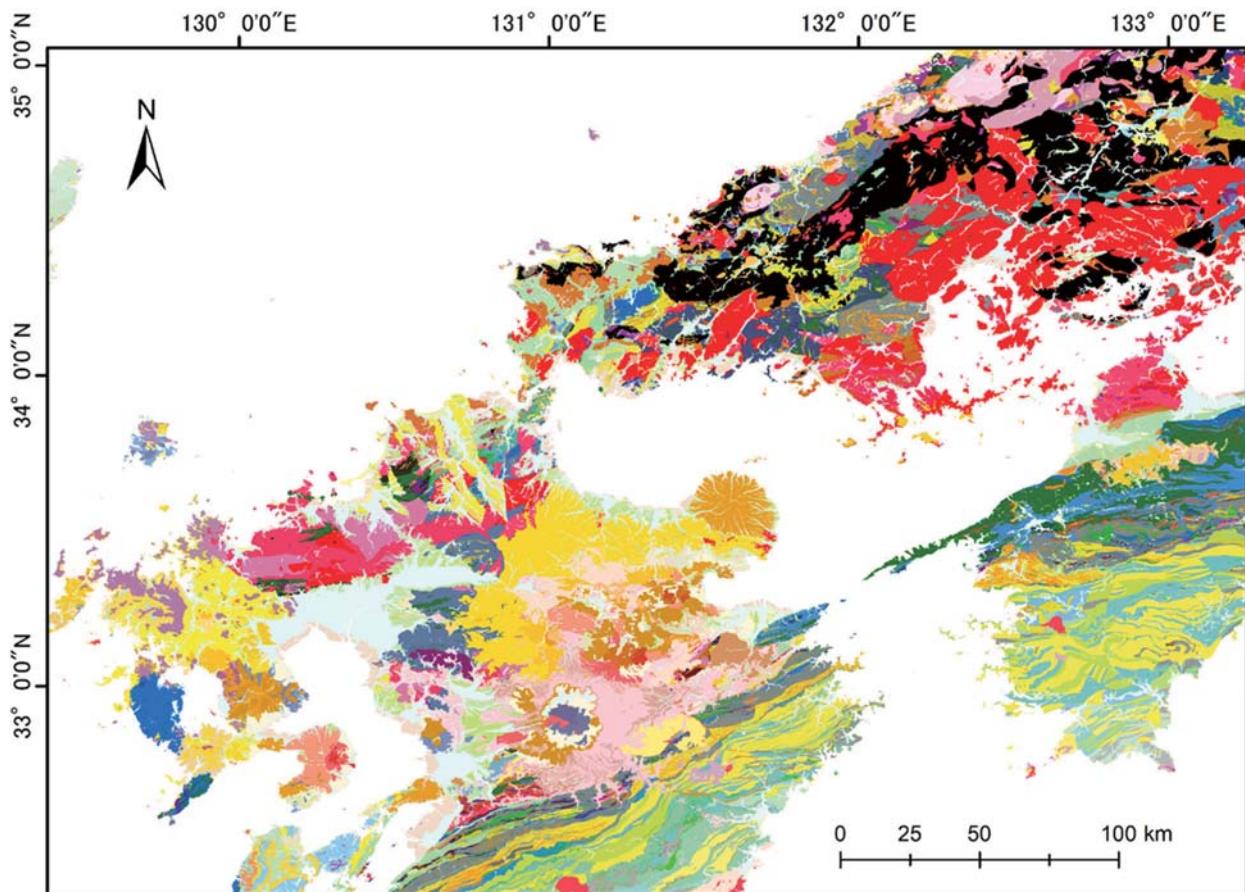


図14 西日本の地質図（シームレス地質図による）。赤は白亜紀の花崗岩類、黒は白亜紀の流紋岩類を示す。

引用文献

- 千木良雅弘. 2002. 群発する崩壊－花崗岩と火碎流－. 近未来社, 名古屋.
- Hirata, Y. & Chigira, M. 2016. 柱状節理に囲まれた花崗斑岩の物性構造 日本地球惑星科学連合大会 2016, 幕張, S-VC45-46.
- 千木良雅弘. 2018. 災害地質学ノート. 近未来社, 名古屋.
- 東元定雄, 松浦浩久, 水野清秀 & 川田清雄. 1985. 5万分の1 地質図幅「呉」 説明書. 地質調査所.
- 藤田勝代 & 横山俊治. 2009. 香川県小豆島の花崗岩のラミネーションシーティングと小豆島石をたずねて. 地質学雑誌, 115, 89-107.

衛星合成開口レーダーを用いた 地表面変動の把握

橋本 学¹

¹京都大学教授 防災研究所・地震予知研究センター（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail:hashimoto.manabu.7e@kyoto-u.ac.jp

2018年西日本豪雨で生じた広島地方の地表面変動を、人工衛星搭載合成開口レーダーにより検出を試みた。宇宙航空研究開発機構のALOS-2画像を干渉解析し、地表面変動とコヒーレンス変化、及び、加色混合法による強度変化の抽出を行った。ALOS-2の広域観測モードによる観測は発災直後になされたもの、空間分解能が大きいため、顕著な変化を検出できなかった。一方、ALOS-2の高分解能モードの観測で、東広島市～呉市境界の野呂山山麓に複数の強度変化を検出した。災害を挟む画像のペアにおいてコヒーレンスの低下が認められたが、山間部など災害前からコヒーレンスの低いところでは、必ずしも強度変化と一致しない。航空写真判読結果との比較では、今回の災害に伴う斜面崩壊等の地表変動の検出には、コヒーレンス変化よりも強度変化の方が適していたと考えられる。

Key Words: SAR, surface movement, color composite image, coherence change, West Japan torrential rain

1. はじめに

西日本豪雨に伴って、各地で多数の地すべりや斜面崩壊が発生し、大きな被害をもたらした。豪雨や地震災害発生時の対応には被災地域の即時把握が必要であるが、人員・機材の不足や天候不良のために、困難なことが多い。これを補う手段として人工衛星搭載合成開口レーダーによる観測が期待されている。

宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）などの各国の宇宙機関はだいち2号（ALOS-2）など合成開口レーダーを搭載した地球観測衛星を運用しており、大規模災害発生時には緊急観測を実施して、行政の災害対応にデータないしは解析結果を提供している¹⁾。人工衛星搭載合成開口レーダーは天候に左右されず、地表面を幅数10kmから400kmを超える範囲で観測することができる利点がある。その一方、衛星が適切な観測軌道に再来するまで数日間待たなければならない、という欠点がある。この問題に対しては、ALOS-2は観測方向を変更することで対処しているが、発災直後2～3日中に適切な観測がなされる確率は必ずしも高くない。

SARデータは、衛星から射出した電波が地表面や構造物、あるいは使用する電波の波長によっては樹木の樹冠などで散乱された後方散乱波の振幅（強度）と位相からなる。一般にSAR画像として紹介されるのは、強度で

あり、被害地域の把握にはまず強度の変化を見ることが多い。例えば、発災前森林であったところが、斜面崩壊により裸地となると強度が増加することが多い。また、洪水・津波などにより陸域に湛水すると強度が大きく低下する。これらのことから被災地域を検出することが期待される。

一方、位相は衛星と地表面間の距離の情報と散乱特性の情報を含んでいる。発災前後の距離の変化から地表面変動を検出することが可能であり、これまで多くの研究例がある。しかし、この干渉法と呼ばれる手法は、変位勾配が大きいところでは全く情報が得られなくなる欠点があり、今回対象とするような災害には適用できない。これに対して、2回の観測の散乱波の位相の類似性（コヒーレンス）を見ることで、地表面の変動の有無を知ることが出来る。このコヒーレンス変化検出手法も地震に伴う構造物被害²⁾や液状化による被災地域³⁾の把握などに用いられている。

我々は、2017年九州北部豪雨に際して、ALOS-2画像を用いて、地すべりや斜面崩壊等の検出を試みた。今回、強度変化とコヒーレンス変化の2つの手法を広島市～呉市～東広島市周辺に適用し、その適用可能性について検討する。

2. 観測データと解析方法

(1) ALOS-2 画像

表 1 に本解析で使用した ALOS-2 画像の情報を示す。JAXA は、発災直後に複数の軌道から観測を実施したが、ここではコヒーレンス変化の検出を行うために、発災前に複数回の観測が行われている高分解能モード (Strip-map mode) の画像のペアを用いた。いずれも右方向に電波を射出する観測で、南行 (北行) 軌道の場合は東南東 (西南西) 上空から見た画像となっている。また、広域観測モード (ScanSAR mode) の活用可能性を議論するために、広域観測モードのペアも 1 組解析した。この観測は左方向の観測であるので、南行軌道からではあるが、西北西上空から見た画像となっていることに留意されたい。

一般に ALOS-2 による繰り返し観測は、右方向の観測で 30~40° 前後の入射角で行われており、左方向の観測は頻度が低い。宇宙航空研究開発機構から公開されている画像は、発災直後に実施された観測のため、左方向や高入射角の観測である。それぞれ頻度が低いため、コヒーレンスの変化を見るのに適した観測を選んだ。

(2) 解析手法

解析には Gamma Remote Sensing 社製 Gamma® ソフトウェアを使用した。飛田幹男氏と小澤拓氏が国土地理院 10m メッシュ・デジタル標高データを権円体高に編集した DEM をもじいて、一般的な 2 パス干渉法を適用した。干渉処理中に位置合わせされた強度画像を加色混合法で処理し、強度変化を抽出した。具体的には、最初の観測による強度画像を赤、2 回目に観測強度画像を水色 (緑+青) のチャネルに適用して RGB 合成した。コヒーレンスは、Gamma® の cc_wave 関数を用いて計算した。なお、干渉処理およびコヒーレンス等の詳細に関しては、地震調査委員会⁴⁾を参照されたい。

コヒーレンスは、地表面の状態の変化の検出に適しているが、解析ペアの軌道間距離や期間、さらには地形などに大きく左右される。このため、災害前にコヒーレンスが低いところでは、変化の検出が難しくなる。このため、Watanabe et al.(2016)²⁾にならい、災害前のコヒーレンスが 0.2 以下の領域は除いた。また、単純にコヒーレンスの差を取るのではなく、Watanabe et al.(2016)などによく利用されている、(1)式の相対コヒーレンス変化を用いる。

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_{pre} - \gamma_{co}}{\gamma_{pre} + \gamma_{co}} \quad (1)$$

ここで、 γ_{pre} および γ_{co} は、それぞれ災害前のペアのコヒーレンスと発災時を挟んだペアのコヒーレンスである。災害前のコヒーレンスは複数のペアがある北行軌道

表-1 解析に使用した画像ペアの情報

パス	軌道	方向	入射角	観測日 1	観測日 2	軌道間距離 (m)
P22	南	左	57°	2018/07/02	2018/07/16	75
				2017/11/22	2018/6/20	226
				2018/6/20	2018/8/29	-179
P129	北	右	36°	2017/5/27	2018/1/20	-83
				2017/5/27	2018/7/21	4
				2018/1/20	2018/3/17	97
				2018/3/17	2018/7/21	86

(a)



(b)



図-1. 強度画像の例。呉市～東広島市境界付近野呂山北麓の ALOS-2 強度画像。 (a) 2018 年 3 月 17 日、(b) 2018 年 7 月 21 日。 Google Earth により地理情報と重ね合わせた。

(P129) については 2017 年 5 月と 2018 年 1 月のペアと 2018 年 1 月と 3 月のペアのコヒーレンスの平均を、南行軌道 (P22) については 2017 年 11 月と 2018 年 6 月のペアのコヒーレンスを用いた。

3. 強度変化

図-1 に強度画像の例を示す。呉市と東広島市境界付近野呂山北麓の ALOS-2 強度画像である。河川や池、水田、ゴルフ場などは散乱波の強度が低いため、黒く見える。一方、植生の多い山地部では斜度により灰色から白色に表現される。この画像は北行軌道から得られたものであるため、西向きの斜面が明るく、東向きの斜面が暗

くなる。画面中央部の山頂から北東に伸びる谷筋が7月の画像では顕著であるが、3月の画像では明瞭ではない。図-2に、加色混合法による結果を示す。図-2(a)は、図-1に示す北行軌道のペアである。水色に着色されたところが、発災後に強度が増加したところである。平野部に斑点状に見られる水色の領域は、水田や畑の水位や

土壤水分の変化によるものと考えられる。図-1で見られた野呂山北麓には水色の曲線が認められ、地表面が大きく変化したと考えられる。一方、呉市の北隣の坂町でも大きな土砂災害が発生しているが、この画像では、その明瞭な痕跡は認められない。

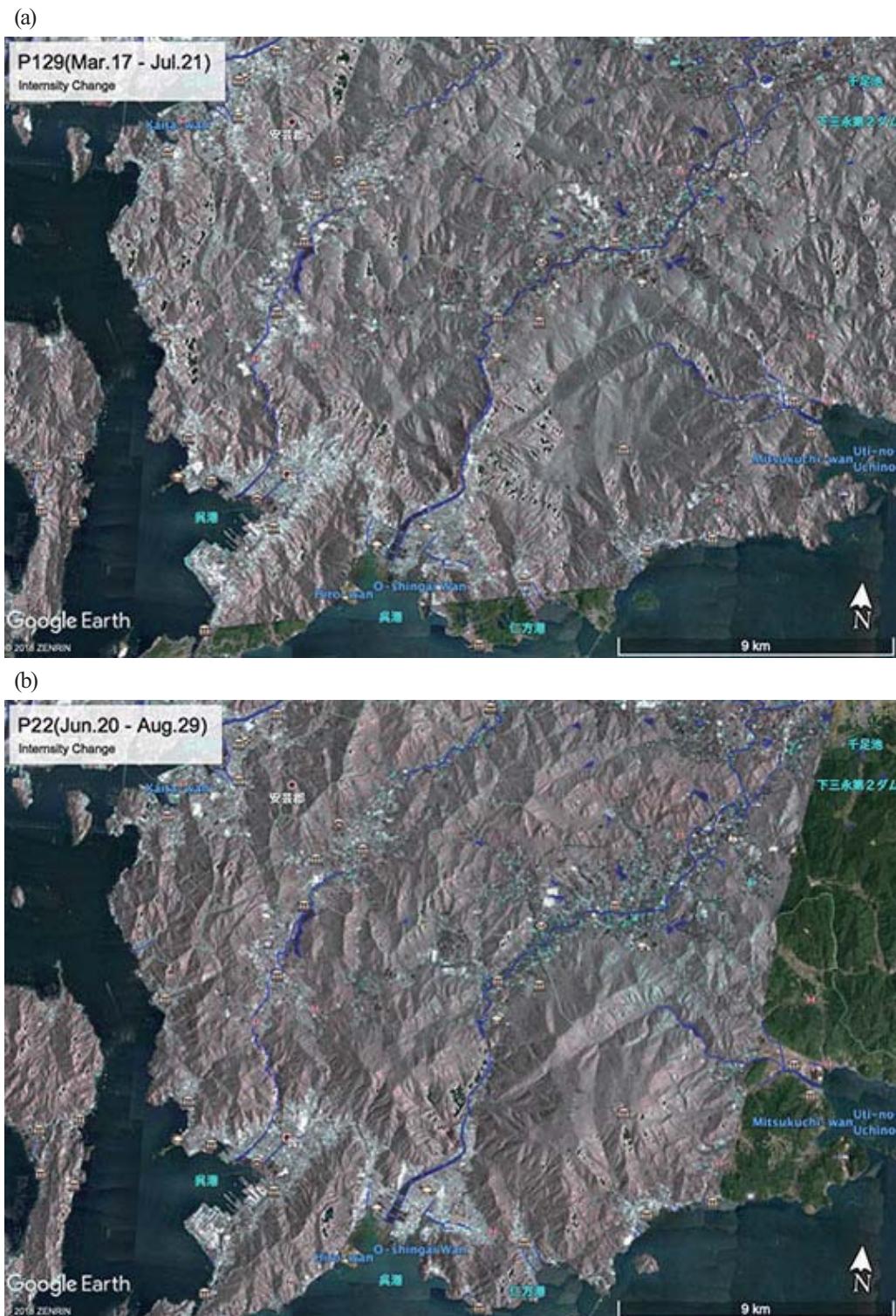


図-2. 加色混合法による強度変化の抽出結果。Google Earthにて地理情報と重ね合わせた。(a) 北行軌道 P122 の 2018 年 3 月と 7 月のペア。(b) 南行軌道 P22 の 2018 年 6 月と 8 月のペア。

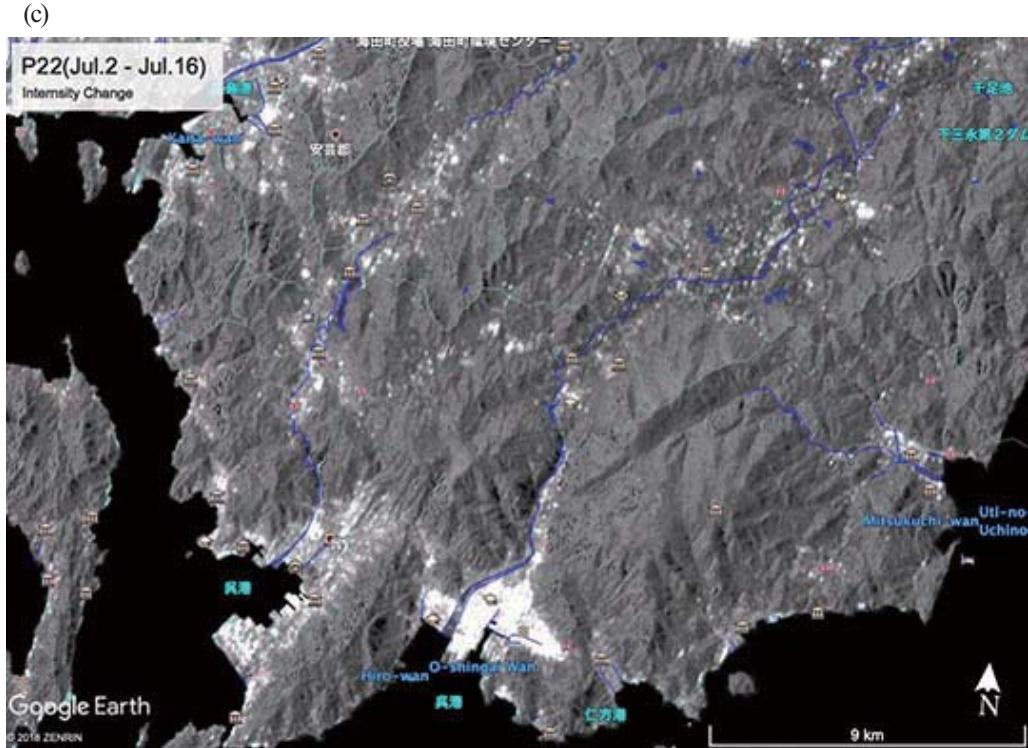


図-2 (続き) . (c)南行軌道 P22 の広域観測モードの 2018 年 7 月 2 日と 16 日のペア.

図-2(b) は南行軌道 P22 の 2018 年 6 月 20 日と 8 月 29 日のペアである。図-2(a) と同様に、野呂山北麓に水色の領域が認められ、大きな地表面の変化があったことがわかる。この画像の方が北行軌道のものより明瞭で、かつ検出された変動域が多い。これは、電波の射出方向と斜面の向きの関係で検出可能性が変化するためと考えられる。なお、この画像においても、坂町周辺の変化は認められない。

図-2(c) は、広域観測モードのペアの強度画像の加色混合結果である。この画像においては、顕著な変化は認められない。SARにおいてはかなり大きい入射角 (57°) が用いられていることが一つの要因と考えられる。また、広域観測モードは空間分解能が約 100 m とされており、高分解能モードにくらべて大きく劣ることも影響しているのかもしれない。

4. コヒーレンス変化

図-3 に、高分解能モードの画像ペアのコヒーレンスを示す。図-3(a) および(c) に明らかのように、災害前でも山地においてコヒーレンスが低い。特に広島市の北東部

や呉市の北側の山地は 0.4 以下のコヒーレンスとなっている。これらの地域は、災害を挟むペアでも同様に低コヒーレンスであり、災害を挟むペアのみで被害の有無を検出するのは適切ではないことがわかる。特に、南行軌道 P22 の画像は、軌道間距離がいずれのペアでも 200 m 前後であり、これがコヒーレンスを低下させる要因であると考えられる。一方、北行軌道 P129 の画像は、軌道間距離が 100 m 以下で、全体的にコヒーレンスが高い。災害前のペア図-3(c) と災害を挟むペア図-3(d) を比べると、災害を挟むペアにコヒーレンスが低い領域が増えているように見える。

図-4 は、(1)式の $\Delta\gamma$ を図示したものである。なお、災害前のペアにおいてコヒーレンスが 0.2 以下の領域はマスクしている。図-4(a) と (b) ともに全体が正の値になっており、画像全体ではコヒーレンスが低下したことがわかる。 $\Delta\gamma$ が 0.6 以上の変化を示した領域も散見されるが、平野部のものは、前記の通り河川や水田等である。山間部で $\Delta\gamma$ が 0.6 以上の領域が見られるが、その多くは災害前のコヒーレンスが低い領域である。特に南行軌道 P22 では、この傾向が顕著である。一方、強度画像で認められた野呂山北麓の変化は顕著でない。

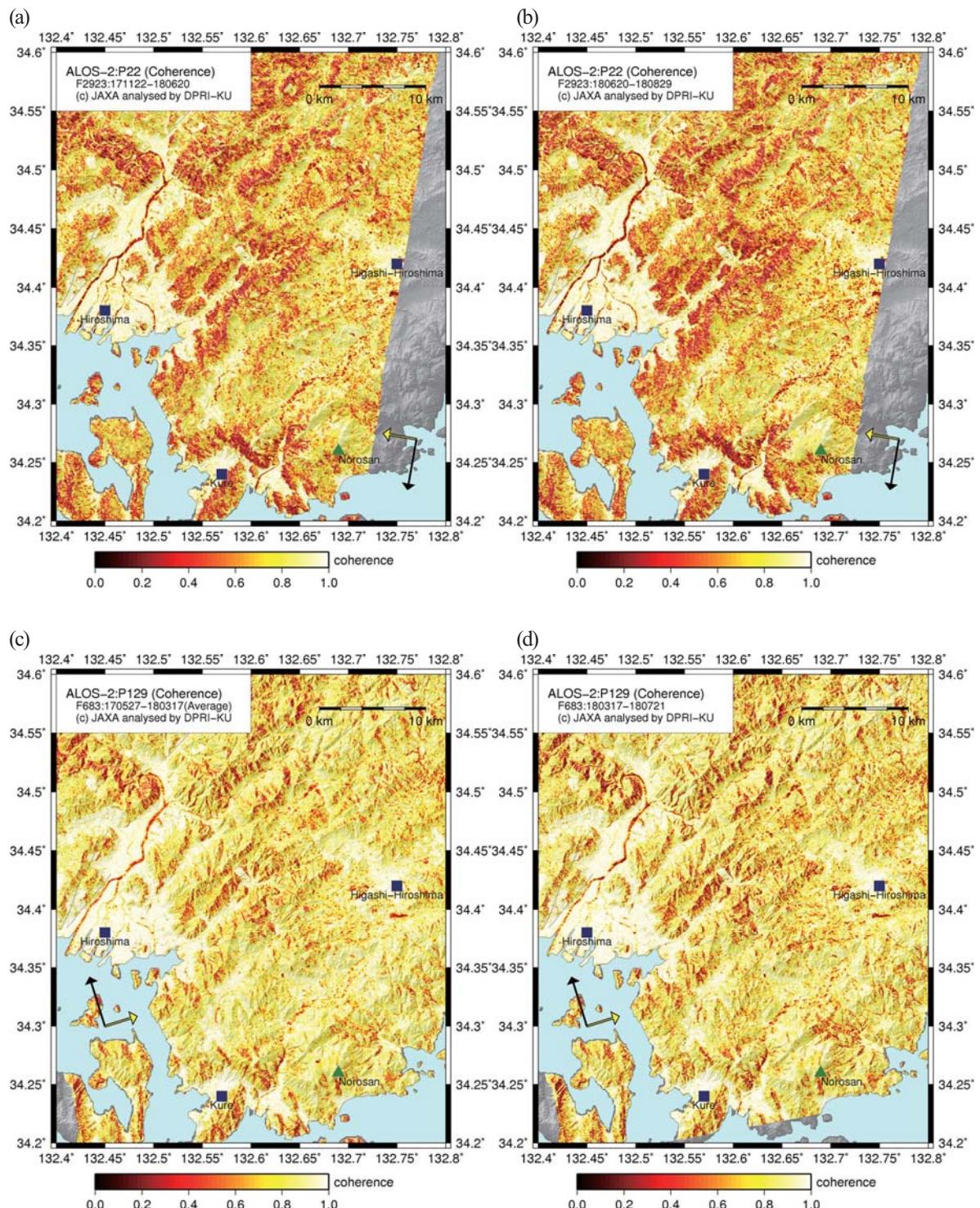


図-3. 高分解能モードの災害前と発災時を挟むペアのコヒーレンス. (a) 南行軌道 (P22) の 2 ペア (2017 年 11 月–2018 年 1 月と 2018 年 1 月と 6 月) の平均. (b) P22 の 2018 年 6 月と 8 月のペア. (c) 北行軌道 (P129) の災害前のペア (2017 年 5 月と 2018 年 3 月). (d) P129 の 2018 年 3 月と 7 月のペア.

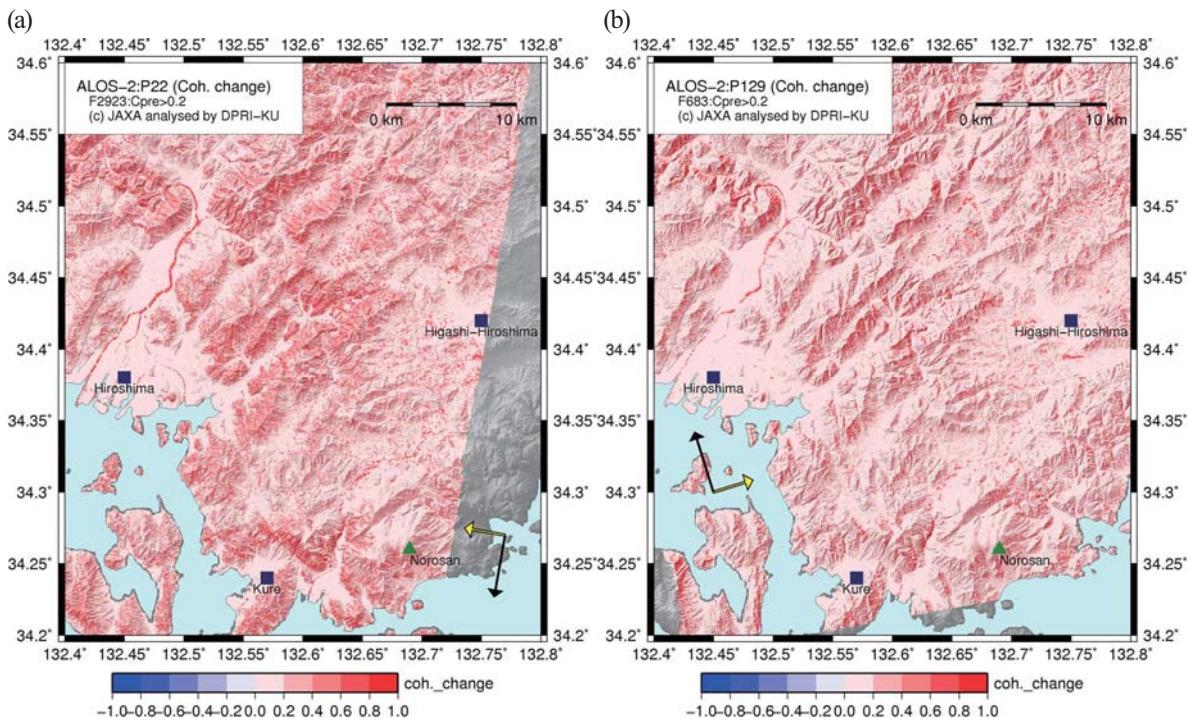


図-4. コヒーレンス変化. 災害前のペアのコヒーレンスが 0.2 以上の領域の Δy . (a) 南行軌道 (P22) . (b) 北行軌道 (P129) .

5 議論

西日本豪雨前後の ALOS-2 画像を解析し、地表面変動域を検出する手法として広く用いられている、強度変化の加色混合法とコヒーレンス変化を適用し、斜面崩壊や地すべり等の検出を試みた。結果として、呉市と東広島市境界の野呂山北麓に強度の変化が認められた。

図-5 に国土地理院による航空写真判読から得られた崩壊地等の分布を示す⁵⁾。これによると、広島市から東広島市に至る領域のほぼ全域において崩壊が検出されている。今回の ALOS-2 の解析ではこれほどの強度やコヒーレンスの変化領域が検出されなかった。この原因としては、いくつかの理由が考えられる。まず、SARの場合、斜め上空からの観測であることから、斜面の向きによって電波の入射角が変わり、場合によってはシャドーになって散乱波が得られないケースもある。また、山間部は植生に覆われていることが多いことから、災害前も強度やコヒーレンスが必ずしも高くない。特にコヒーレンスは図-3 に示すように、衛星の軌道間距離に影響される。また、植生の季節変化（広葉樹の落葉など）にも影響される。これらを低減するためには、時間間隔が短く、かつ軌道間距離も短い観測が求められる。

図-3 からも明らかなように、コヒーレンス変化を活用するためには、災害前のコヒーレンスの情報を蓄積しておく必要がある。このためには、同じ軌道から同じ入射角で定期的に観測が繰り返されることが前提となる。

しかし、ALOS-2 は緊急時には入射角を変更して観測することができるが、必ずしも災害前の観測から短時間である保証はない。また、多方面で緊急観測が行われており、そのためのリカバリー観測などが実施されることから、高分解能モードの観測が、不定期になっているケースが散見される。この欠点を克服するためには、広域観測モードを繰り返すことが考えられる。これにより 14 日の災害間隔でデータが得られるが、空間分解能が高くないため、図-2 に見られるように、必ずしもよい結果が得られない。

欧州宇宙機関が運用している Sentinel-1 は 2 機の衛星を運用することにより、最短で 6 日の再来間隔を達成している。しかし、C バンドのレーダーであることから、山間部でのコヒーレンスが低いケースが多い。実際、今回の災害に際しても画像解析を行ったが顕著な変化は得られなかった。

以上より、複数の L バンド SAR 搭載の衛星の運用、または、広域観測モードでかつ空間分解能が高い観測が必要と考える。JAXA が開発中の次期先進レーダー衛星 ALOS-4 は、広域観測かつ高分解能の観測が可能なレーダーの搭載を予定している⁶⁾。この衛星の運用により、日本域では 2 週間に 1 回の頻度で最大観測幅 200 km、かつ空間分解能 3~10m の観測が可能となる。ALOS-4 に期待するところが大きい。

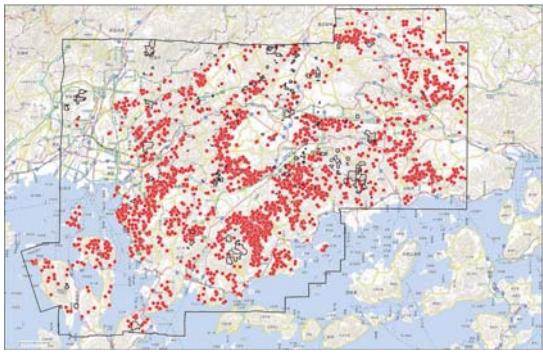


図-5. 国土地理院による航空写真判読から推定された崩壊地の分布⁵⁾

6. 結論

西日本豪雨前後の ALOS-2 画像を解析し、広島市～呉市～東広島市の領域で、斜面崩壊等の検出を試みた。強度画像の加色混合法とコヒーレンス変化の計算を行ったところ、強度変化画像中の呉市～東広島市境界の野呂山山麓において変化を検出した。これは航空写真判読結果とも整合する。しかし、その他の地域では顕著な変化が認められなかつた。コヒーレンス変化では山地の災害前のコヒーレンスが低いことから、斜面崩壊に伴うと考えられる明瞭な変化は見られなかつた。また、広域観測モードでは強度変化においても変化の検出はできなかつた。

上記の結果は、衛星の観測頻度や軌道間距離等衛星の問題や山地の傾斜や植生の季節変化などの要因が考えられる。これらの問題に対処するべく、JAXA が高頻度・高空間分解能の広域観測が可能な次期先進レーダー衛星が開発中であり、これに期待したい。

謝辞：本解析で使用したALOS-2画像は、ALOS-2 Research Announcement2（代表者：橋本学（P3052002））にて、JAXAより提供されたものです。国土地理院10mメッシュの橢円体高デジタル・モデルは東京大学地震研究所共同利用特定共同研究「SARを用いた多角的な地殻・地表変動研究」（課題番号2018-B-02、研究代表者：高田陽一郎北海道大学准教授）において提供されました。関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター、「だいち 2 号」による平成 30 年 7 月豪雨の観測結果について，https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jdis_pal2_heavyrain_westernjapan_20180711.htm (2019 年 2 月 10 日アクセス) .
- 2) Watanabe, M., R. B. Thapa, T. Ohsumi, H. Fujiwara, C. Yonezawa, N. Tomii, and S. Suzuki: Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2, *Earth Planets Space*, Vol. 68, No.131, doi:10.1186/s40623-016-0513-2, 2016.
- 3) 小林知勝・飛田幹男・小荒井衛・乙井康成・中埜貴元, 干渉 SAR のコヒーレンス変化から見る平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う液状化地域, 国土地理院時報, 122 卷, 143–151, 2011.
- 4) 地震調査委員会, 「合成開口レーダーによる地震活動に関する地殻変動観測手法」報告書, https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/main_eisei/, 2011 (2019 年 2 月 10 日アクセス) .
- 5) 国土地理院, 平成 30 年 7 月豪雨に関する情報 4. 崩壊地等の分布図, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAII/H30.taihuu7gou.html#5>, 2018 (2019 年 2 月 10 日アクセス) .
- 6) 宇宙航空研究開発機構, 先進レーダー衛星 ALOS-4, http://www.jaxa.jp/projects/sat/atos4/index_j.html , (2019 年 2 月 10 日アクセス) .

(2019.2.10 受付)

DETECTION OF SURFACE MOVEMENTS WITH SATELLITE-BORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR

Manabu HASHIMOTO

We analyzed ALOS-2/PALSAR-2 images acquired before and after the torrential rain in the Hiroshima area, western Japan in July, 2018 to detect locations of slope failures or landslides. We produced color composites of intensity images and computed change in coherence. ScanSAR images that was acquired right after the disaster did not detect significant changes in intensity possibly due to their coarse spatial resolution. On the other hand, strip-map mode images revealed several spots of change in intensity on the northern flank of the Mt. Norosan at the boundary of the Kure and Higashi-Hiroshima cities. Although we recognized decrease of coherence for the pair of images spanning the disaster, those were not necessarily consistent with intensity changes in mountainous areas. Comparing the present results with those deduced from areal photos, we consider that intensity changes are more suitable for the detection of surface changes than coherence changes in this disaster.

愛媛県宇和島市周辺における岩盤崩壊の発生場

山崎 新太郎

京都大学防災研究所徳島地すべり観測所 (〒778-0020 徳島県三好市池田町州津藤ノ井 492-1)
E-mail:yamasaki.shintaro.3m@kyoto-u.ac.jp

西日本全域に被害をもたらした「平成 30 年 7 月豪雨」は宇和島市および西予市の法華津湾周辺において岩盤崩壊を多発させた。本報告では岩盤崩壊の特徴を報告する。岩盤崩壊は低起伏の地形上で発生し比較的小規模であった。滑落崖はいずれも風化が認められ、斜面を切断する分離面と高密度の亀裂があった。さらに脆弱な鉱物脈と断層による破碎も認められた。これらの特徴のために岩盤崩壊が発生した斜面では微視的にも巨視的にも強度が低下していた。さらに、低強度の岩盤では重力変形が進行し、大量の降水の流入経路が崩壊前に斜面に形成されていたと考えられる。岩盤崩壊の危険性の予測のためには、斜面内部の風化状態とその範囲を評価することが重要である。また、岩盤風化の観点から斜面の危険性を評価する方法の開発も必要である。

Key Words: rock mass failure, landslide, sandstone, weathering, Shimanto belt

1. はじめに

平成 30 年 6 月 28 日から 7 月 8 日にかけて西日本全域に被害をもたらした台風 7 号及び梅雨前線による「平成 30 年 7 月豪雨」¹⁾は四国地方においても大きな被害をもたらした。この雨による斜面崩壊、そしてそれに伴う災害は、四国北部瀬戸内海側、四国山地中央部などを含めて四国各地で発生しているが、本報告で取り上げる四国西南部の宇和島市周辺は他地域と比較して特に斜面崩壊が集中して発生し、被害も甚大であったために注目を集めた。

尚、降雨状況は四国地方では 7 月 5 日から 8 日にかけて降雨が集中し、7 月 5 日 00 時～8 日 24 時までの総降雨量は高知県香美市繁藤で 984 mm に達するなど、四国山地中央部での降雨がこの期間中も最大であった。一方で、宇和島市周辺の総降雨量は西予市宇和観測点で 539.5 mm、宇和島市宇和島観測点で 374.0 mm（欠測を含む）

となっており²⁾、最大の四国山地中央部と比較すると半分程度であった（図 1）。

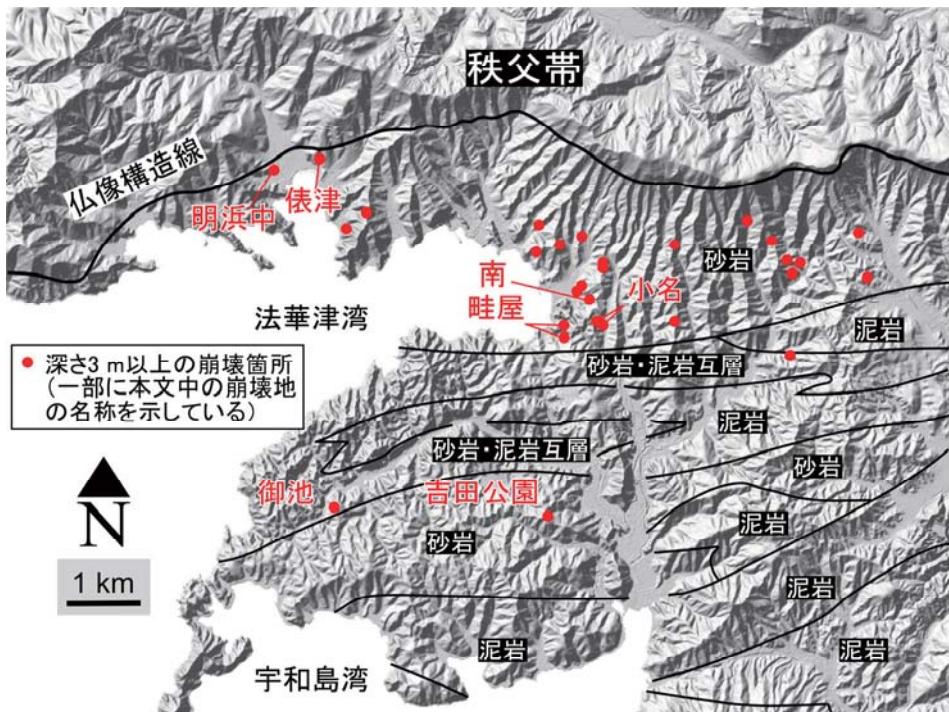
この宇和島市周辺では、特に柑橘類を中心とする果樹園を中心に表層崩壊も多発しているが、本報告では宇和島市周辺、特に岩盤崩壊が多発した宇和島市吉田町および西予市明浜町が位置する法華津湾周辺の岩盤崩壊に注目してその発生場の地質状況を中心に報告する。

尚、本報告中の「岩盤崩壊」とは斜面下の岩盤中の地質構造に起因すると考えられる崩壊であり、概ね崩壊深が 3 m 以上のものである。当地域で発生した表層崩壊はその崩壊深度が 1 m 未満であり岩盤崩壊とは明確に区分可能である。この「岩盤崩壊」は「深層崩壊」^{3,4)}と呼ぶことも可能と考えられるが、調査対象地域の「岩盤崩壊」を「深層崩壊」の典型例とされる 2011 年の台風 12 号によって紀伊半島各地で発生した事例と比較した場合、その規模は明らかに小さい。そのため本呼称を用いた。

筆者は災害直後に宇和島市周辺を訪れて調査を行って



図-1 調査範囲、気象観測点の位置および四国南西部の仮想構造線周辺における地質と地形



おり、別に報告⁵⁾しているのでそれも参照頂きたい。

2. 地質・地形概要

岩盤崩壊が多発した法華津湾周辺地域は四国西方の宇和海に面する地域であり、典型的なリアス式海岸が発達する地域にある。法華津湾沿岸から北に約 2 km に標高 500-600 m の東西に伸びる山稜があり、これに沿って、ジュラ紀付加コンプレックスである秩父帶（三宝山帶）と白亜紀付加コンプレックスである四万十帶北帶を区分する大規模な衝上断層である仏像構造線が位置する⁶⁾。さらに法華津湾と宇和島湾に南北に挟まれて吉田半島があり、法華津湾周辺および吉田半島周辺は砂岩、泥岩、およびそれらの互層が分布する^{7,8)}（図-2）。寺岡ほか⁸⁾や君波の記述⁹⁾によれば、法華津湾周辺には砂岩と泥岩が分布し、ローモンタイト一方解石一石英の網状脈を伴うとされる。後述する南の崩壊地近傍（吉田町白浦）で筆者らが採取した岩石にも多量の脆い白色鉱物脈が認められた（図-3）。筆者の鏡下観察および、山形大学の八木浩司氏およびパシフィックコンサルタンツの松澤真氏の分析結果も総合すると白色鉱物脈の大部分はローモンタイトである。ローモンタイト脈は網状にほぼランダムに岩石中に分布しており、地下深部で破碎されて形成された間隙中にその微細結晶が析出したものと考えられる（図-3B）。ローモンタイト脈は岩石の強度を低下させており、脈に沿って岩石が手で割れる場合が頻繁にあった。なお、ローモンタイトは沸石の一種（和名：濁沸石）であり、脱水による体積変化や粉末化の著しい鉱物

とされる⁹⁾。また当地域の地質構造は頻繁に層理面の姿勢が変化し、連続性に乏しい場合が多い。

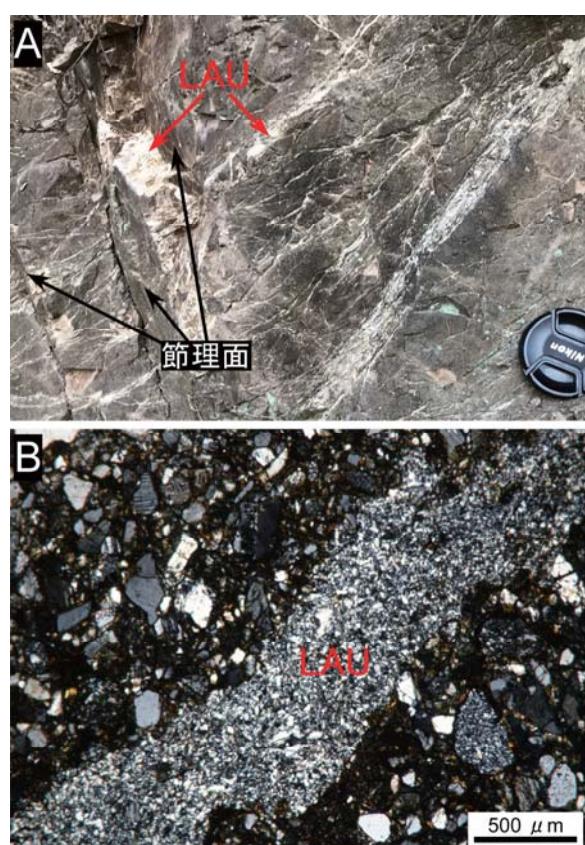


図-3 (A) 吉田町白浦におけるローモンタイト脈とそれらを切断する節理面を示す露頭、レンズキャップの径は 7.5 cm (B) ローモンタイト脈 (LAU) とそれを含む砂岩の薄片写真 (クロスニコル)

法華津湾周辺から吉田半島の北側の大部分を含む地域は、秩父帯分布域や仏像構造線から南に大きく離れた四万十帯の他地域に比べて起伏の小さい地域である。このような相対的に低起伏な地形を持つ地域は一部不連続ではあるものの四国を東西に横断して、南北に 2-5 km の幅で分布している（図-1）。また、法華津湾周辺と同様に仏像構造線南側には、それに接して砂岩層が広く分布し、ローモンタイト脈が頻出する。君波ほかの記述⁹によれば、仏像構造線付近で四万十帯を構成する高知県津野町周辺の新莊川層群新土居層や徳島県那賀町周辺の成瀬層にもローモンタイト脈を含む岩相が確認されている。これらの岩相と低起伏地域との直接的な関係は未確認であるが、低起伏地域は共通するプロセスで形成されている可能性があり、今後検討が必要であろう。

3. 崩壊発生場の分布

宇和島市及び西予市南部を含む図-2 の図示範囲における岩盤崩壊の発生数は、仏像構造線のすぐ南側から法華津湾周辺に特に多い。秩父帯では筆者の実地踏査では十分確認できていないが、国土地理院が提供する地理院地図から閲覧可能な空撮写真によると、秩父帯側では崩壊の分布は散発的で発生数が明らかに少ない。また、法華津湾から南側に離れ、吉田半島の中央部では表層崩壊は多いものの岩盤崩壊は少ない。表層崩壊の発生の有無に関してはの植生の影響も十分あると考えられるため、

岩盤崩壊とは分けて考える必要があるが、少なくとも吉田半島全域で広く表層崩壊をもたらす降雨があったことは確実である。それにも関わらず岩盤崩壊が法華津湾周辺に集中している。これには、降雨が局所的に集中していた可能性と特異な岩盤崩壊を発生させやすい地質・地形条件があつた可能性の 2 つが考えられる。後者に関しては比較検討可能な十分な論拠があるとは言いたいが、前者の降雨に関しては、仏像構造線に平行な標高 500-600 m の山地が法華津湾周辺に地形性降雨をもたらしていた可能性がある。実際に、7月 5 日から 8 日に亘って南西から北東に線状降水帯が分布していた状況が確認されており²、広域的には山地の南斜面で大きな降雨が生じていた。また宇和島市周辺では北向き斜面に崩壊が少ないという指摘¹⁰もある。しかし、秩父帯に属する宇和観測点の東西の山地の南斜面も同様に地形性降雨が生じていると思われるが崩壊の分布密度は法華津湾に比べて小さいため、法華津湾周辺が岩盤崩壊を起こしやすい地質・地形条件を備えていた可能性も十分考えられる。

4. 岩盤崩壊発生場の特徴

表 1 に筆者が調査を行った岩盤崩壊の例を示す。この表に挙げた例は平成 30 年 7 月豪雨で発生した法華津湾および吉田半島の周辺の全岩盤崩壊において、それらの最大幅の第 1~3 位を含んでいる。さらに残りの崩壊地は筆者によって十分な調査が行えた場所である。

表-1 筆者が調査を行った岩盤崩壊の例とそれらの調査結果

箇所名	俵津	明浜中	小名（西）	小名（東）	南	畦屋（北）	畦屋（南）	御池	吉田公園
主要地質	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	泥岩
最大幅（m）	8	47	35	18	68	39	36	22	81
最大崩壊深（m）	6	10以上	3	3	15以上	10以上	5	3	15以上
最大落下距離（m）	17	27	26	27	115	61以上	53	70	164
地形	尾根	尾根	平滑	平滑	浅い谷	谷	浅い谷	平滑	谷
層理面と斜面の姿勢	流れ盤	流れ盤	受け盤？	受け盤	流れ盤？	直立	流れ盤	受け盤	流れ盤
風化状況	風化	風化	強風化	強風化	風化	強風化	強風化	風化	風化
その他特徴	高密度割れ目	○	○	○	○	○	○	○	○
	ローモンタイト脈				○	○	○		
	斜面を縦断・横断する大規模分離面	○	○	○	○	○	○	○	○
	断層の関連する変形および断層物質	○	△		○		○		
	重力変形による座屈			○		○			○
備考	表層崩壊も伴うが計測値は岩盤崩壊部分のみ、地層が層面すべり断層で変形	滑落崖を断層ガウジを伴う断層が切斷（すべり面上では未発見）		断層の可能性がある分離面が存在（暗色物質脈の付着）	崩壊後に泥流化	崩壊後に泥流化して堆積物が海底に到達し、大被害が生じた	断層の可能性がある分離面が存在（暗色物質脈の付着）	表層崩壊も伴うが、計測値は岩盤崩壊部分のみ	



図-4 岩盤崩壊の例と大規模分離面



図-5 吉田町畦屋（北）における泥流化した崩壊

岩盤崩壊の規模の点から見れば、泥岩地域では最大でも幅約 80 m、崩壊深 15 m 程度であり、落差は約 160 m である。また、砂岩地域では、最大で幅約 70 m、崩壊深 15 m であり、落差は 115 m である。これらの崩壊の大きさは崩壊した斜面のスケールによるものであり当地の低起伏の地形を反映したものであると思われる。

岩盤崩壊の発生場の地形としては谷地形である場合もあるが、尾根部や平滑な斜面で発生している場合も多かった。また尾根の頂部と崩壊の頂点が近接しているか、崩壊が尾根と一緒に崩落している状況も認められた（図-4）。崩壊前の地形上に谷が認められない尾根地形の崩壊では、地形表面による降水の集中的な流入がほとん

んど起こらず、降水が直接岩盤内部に浸透したと考えられる。岩盤内部への降水の流入経路の存在が示唆される。

層理面と斜面の関係に関しては、流れ盤と受け盤いずれの斜面でも発生しているが、最大規模の吉田公園の崩壊等では泥岩中の層理面に沿って上方の岩盤がすべり、座屈変形が認められる状況もあった。一方で、砂岩地域では、多くの場合、幅数 m 以上の厚い単層を形成して存在しており、また層理面に沿ったすべりを観察箇所で識別することはできなかった。

風化状況に関しては、崩壊後に残された露頭では深部まで風化が及んでいる状況が観察できた。砂岩は白色系に変化、または黄褐色系に酸化している状況が頻繁に観察できた。風化は滑落崖や崩壊岩屑の強度低下ももたらしていたが、岩石の粒子が砂や泥にまで分離を起こす程度までの「強風化」の状態となっている崩壊堆積物も一部で認められた。特に吉田町畦屋や小名周辺の崩壊では、強風化した砂岩が崩壊後に泥流化したとみられ、畦屋（北）の崩壊では、下方の家屋を一掃して海底に到達した。その結果、多数の死傷者を発生させた（図-5）。

その他の特徴として、表1には、高密度割れ目の存在、ローモンタイト脈の存在、節理・断層などの斜面を縦断・横断する大規模分離面の存在、断層の関連する変形および断層ガウジなどの断層物質の存在、重力変形の結果として生じた座屈の存在の各点で整理した結果を示している。

高密度割れ目は当該地域の砂岩、泥岩のいずれにも観察でき、岩石中に数 cm 以下の間隔で存在する割れ目である。割れ目の姿勢に系統性が認められない場合も多いが、砂岩に板状の節理を形成している場合もあり、板状に分離した岩石が重力によって座屈変形している場合も認められた（図-6A）。

斜面を切断する大規模な分離面はいずれの岩盤崩壊でも認められ、鉛直方向に発達したものは岩盤崩壊の滑落崖となり（図-4），分離面が斜面に斜行する場合はすべり面となっている場合もあった。この分離面の中には暗色の細粒の岩脈・または鉱物脈が付着している場合もあり（図-6B），現時点では確認できていないが、これは断層物質の可能性がある。この暗色物質は断層ガウジや、断層による岩盤の変形と共に 3 箇所で発見されている。また、分離面の中には岩盤崩壊の発生前に既に開口していたと考えられるものもあり、落下した有機物が起源と思われる亜炭によって充填されている場合もあった（図-6B）。

前述したローモンタイト脈は畦屋と南など法華津湾奥の崩壊の滑落崖や崩壊物質中に発見された。ただし、ローモンタイト脈は高密度割れ目やその他の節理、大規模分離面によって切断されている場合が多い（図-3）。

岩盤崩壊の共通点としては、表1に示すように、規模

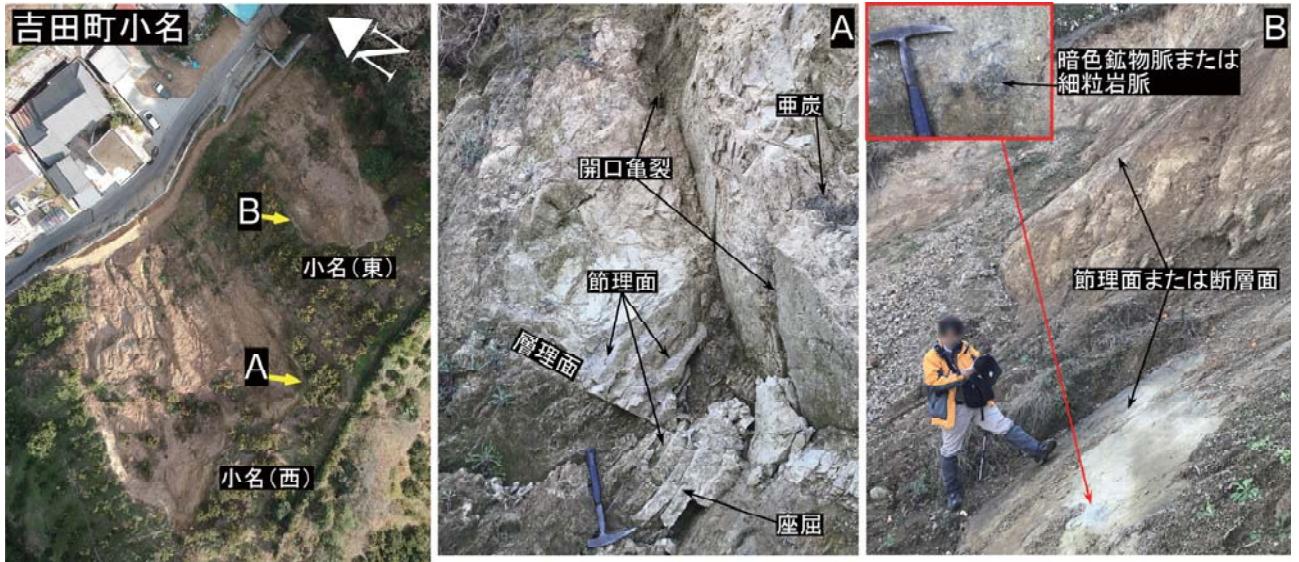


図-6 吉田町小名における小規模岩盤崩壊と崩壊地に出現した地質構造

が小さい、岩盤中に高密度に亀裂が存在する、風化している、斜面を切断する分離面が存在するなどが挙げられる。

5.まとめと今後の提言

平成30年7月豪雨によって宇和島市周辺には斜面崩壊が多発したが、岩盤崩壊は宇和島市吉田町および西予市明浜町のある法華津湾周辺に集中していた。この地域は四万十帯北帯に属する砂岩・泥岩の分布地域であった。地質調査の結果、当地域には斜面を縦断・横断する分離面が頻出し、それらが岩盤崩壊の滑落崖やすべり面を形成していた。滑落崖に露出した露頭には数cm間隔の高密度で亀裂が観察され、ローモンタイトなどの脆弱鉱物脈を含む場合があった。そして断層などによる変形も認められた。そして、深部まで風化が進行していた。以上のため岩盤崩壊を発生させる前の斜面は、微視的にも巨視的にも強度が低下していたと考えられる。

強度が低下した斜面岩盤では、当地のように起伏が小さく比高差が小さい場合においても、重力変形によるゆるみが進行したと考えられる。その結果、分離面や亀裂は一層拡大して開口し大量の降水の流入経路が形成された。そして大量の降水の岩盤への浸透が崩壊を発生させたと考えられる。さらに、強く風化した砂岩の岩盤では、崩壊後に岩石が粒子化して泥流化し、高速で流下したことで被害が拡大した。岩盤の風化は岩盤崩壊の発生場を決定するだけで無く、被害を拡大させたと考えられる。

法華津湾周辺における岩盤崩壊とその危険性を予測する上において、以上に述べた岩盤崩壊の状況から考えられるのは、斜面内部の風化範囲とその程度を調査していくれば、その危険性が予見できた可能性がある点と思われ

る。亀裂や脆弱鉱物脈の存在は大気・水と岩石の反応による化学風化と密接に関連しており、さらに風化によって広範囲で岩盤強度が低下していた。滑落崖やすべり面を形成する斜面内部の大規模分離面の存在を直接予測することは困難であるが、大規模分離面はそれ自体によっても斜面深部までの風化を促進していると考えられ、風化範囲の予測は大規模分離面の頻出箇所の予測にもつながる可能性がある。

斜面内部の風化の範囲・強度の調査はボーリング調査および物理探査等によって現在でもある程度可能である。住宅に近接する斜面や過去に小規模な岩盤崩壊のあった地域を中心に、網羅的に斜面内部の風化状況を定性的・定量的に評価し、さらにその風化状態の評価を斜面と民家との距離、斜面の高さなどの評価と関連させて岩盤崩壊の危険性を評価する方法の開発が必要であろう。

低起伏の地域が四国に東西に帶状に分布していることを述べたが、このような低起伏の地域は侵食抵抗性が比較的小さい地域と考えられる。すなわち、崩壊等の侵食イベントが頻発している可能性がある。実際に法華津湾周辺では過去の岩盤崩壊の痕跡が今回の崩壊の近傍に認められる場合もあった⁵⁾。これは岩盤崩壊が繰り返し発生していることを示唆している。同様の地質的特徴（岩相・風化特性）を持つ地域がないか、前述した「低起伏域」を中心に調査することも今後必要である。

謝辞

本研究においては、京都大学防災研究所における突発災害調査関わる研究経費および、科学研究費・特別研究促進費「平成30年7月豪雨による災害の総合研究（代表：山本晴彦）」の支援を受けた。また本報告は京都大学防災研究所の竹林洋史氏との共同研究の成果である。

有限会社風水土の永田秀尚氏、国際航業株式会社の廣田清治氏、徳島大学の西山賢一氏、山形大学の八木浩司氏には現地調査に同行して頂き現地で議論を行った。特に本報告の表1は永田氏の作成した表から着想を得て作成したものである。京都大学防災研究所の釜井俊孝氏、千木良雅弘氏、荒井紀之氏、パシフィックコンサルタンツ株式会社松澤真氏には参考写真やデータの提供、助言を頂いた。特に、千木良雅弘氏の航空調査結果¹⁰⁾および写真データを活用させていただいた。また、徳島大学村田明広氏には四五十帯やローモンタイトの分布に関して助言を頂いた。以上の方々に感謝申し上げる次第です。

参考文献

- 1) 気象庁：平成30年7月豪雨について，
http://www.jma.go.jp/jma/press/1807/09b/20180709_sankou.pdf, 2018.2.9閲覧。
- 2) 松山地方気象台：平成30年7月5日から8日にかけての梅雨前線による大雨について（愛媛県の気象速報）平成30年7月9日17時現在, <https://www.jma-net.go.jp/matsuyama/saigai/H30/sokuho20180709.pdf>, 2018.2.9閲覧。
- 3) 国土交通省：深層崩壊の特徴,
<http://www.mlit.go.jp/common/001236414.pdf>, 2018.2.9閲覧。
- 4) 千木良雅弘：深層崩壊の場所の予測と今後の研究展開について,応用地質,56卷5号 pp.200-209, 2015.
- 5) 山崎新太郎：平成30年7月豪雨災害における愛媛県今治市伯方・大島地域および宇和島市吉田地域における斜面災害の調査速報, http://landslide.dpri.kyoto-u.ac.jp/report/2018/20180729_shikoku.pdf, 2018.2.9閲覧.
- 6) 日本地質学会「四国地方」編集委員会：日本地方地質誌7, 四国地方, p. 708, 朝倉書店, 2016.
- 7) 産総研地質調査総合センター：20万分の1日本シームレス地質図V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>, 2018.2.9閲覧.
- 8) 寺岡易司・池田幸雄・鹿島愛彦：地域地質研究報告, 5万分の1地質図幅, 宇和島地域の地質, 地質調査所, 1986.
- 9) 丸章夫・柳田力：岩石鉱物学・地質学的にみた骨材の選択, コンクリート工学, 19卷11号, pp.85-89, 1981.
- 10) 千木良雅弘：2018年西日本豪雨災害による斜面崩壊について, http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster_reports/20180706W-Japan/20180722_w_japan.pdf, 2018.2.9閲覧.

GEOLOGIC CHARACTERISTICS OF ROCK MASS FAILURES CAUSED BY THE HEAVY RAIN EVENT OF JULY 2018 IN UWAJIMA, EHIME

Shintaro YAMASAKI

The heavy rain event of July 2018 caused many rock mass failures around Hokezu bay area in Uwajima city and Seiyo city, Ehime. This paper reports geologic characteristics of those failures. The rock mass failures are relatively small, because they occur on relatively low relief topography. The scarps of failures are weathered, and have dense cracks and separating planes cutting slope or mountain flanks. Webby weak mineral veins and fault fractures are found at some failure sites. These characteristics have lowered strength of the rock mass microscopically and macroscopically in the area. Because of the low strength, gravitational deformation probably proceeds in small slope, and it forms flow path to penetrate with abundant rain water in the slope before collapse. To evaluate the dangerousness of rock mass failure, evaluating condition and extent of rock weathering inside slope is important. It is necessary to develop the methodology to evaluate the slope dangerousness from the view point of rock weathering.

宍粟市の斜面崩壊と福山市そのため池決壊

王 功輝¹・常 承睿²・松浦 純生³・末峯 章⁴

¹ 京都大学防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄官有地）
E-mail:wanggh@landslide.dpri.kyoto-u.ac.jp

² 京都大学大学院理学研究科（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄官有地）
E-mail: chang.chengrui.48n@st.kyoto-u.ac.jp

³ 京都大学防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄官有地）
E-mail: matsu03@scs.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴ 国土防災技術株式会社
E-mail: a.suemine@gmail.com

平成30年7月豪雨によって、西日本を中心に全国的に広い範囲で土砂災害や河川の氾濫および浸水害などが発生し、甚大な被害をもたらした。これらの豪雨による土砂災害の発生機構を解明するため、災害直後に広島県や岡山県および兵庫県において発生した数多くの土砂災害に対する現地調査を実施した。ここでは、宍粟市公文地域で発生した斜面崩壊および福山市で発生したため池の決壊に対する調査結果を報告する。公文の斜面崩壊は、流紋岩地域で発生したものであり、崩壊前に斜面において顕著なクリープ変形が発生したことが分かった。また、福山のため池の決壊は、沢の源頭部に作られた盛土グループの斜面において斜面崩壊が発生し、崩壊した土砂が連鎖的に下流側のため池の決壊を引き起こしたと考えられる。

Key Words: landslide, creep behavior, rainfall, failure of landfill, cascade failure of irrigation ponds

1. はじめに

平成30年6月28日から7月8日にかけて、西日本を中心に中部地方や北海道など全国的に広い範囲で集中豪雨が発生した。これにより、多くの地域において、土砂災害や河川の氾濫および浸水害が発生し、死者数が200人を超える甚大な災害となった。災害直後に、著者らが中国や近畿地方などの地域で発生した複数の土砂災害に対する現地調査を実施したので、ここで兵庫県宍粟市公文地域で発生した斜面崩壊および広島県福山市駅家町で発生したため池の決壊に対する調査結果を報告する。

2. 宍粟市の斜面崩壊

平成30年7月の豪雨によって、宍粟市一宮町公文地区において、斜面崩壊が発生した（写真-1, 写真-2）。斜面崩壊の正確な発生時刻は不明であるが、地元住民の証言によると、7月7日の早朝に発生したと推測される。

(1) 地質・地形

図-1は国土地理院による当地区の地形図である。今

回の斜面崩壊の源頭部および崩土の堆積範囲を図中に赤線で示す。この崩壊は、二つの谷に挟まれている斜面において発生した。崩壊の滑落崖は約480mの等高線附近に位置し、崩壊土砂の末端は410mの等高線附近に達し、斜面下部にある民家や田畠が被災した。レーザー距離計で求めた斜面崩壊の比高は約72mである。崩壊の滑落崖から末端までの距離（約160m）から計算すると、崩壊の見掛け摩擦角度（ $\arctan(70/160)$ ）は約23.6度となる。

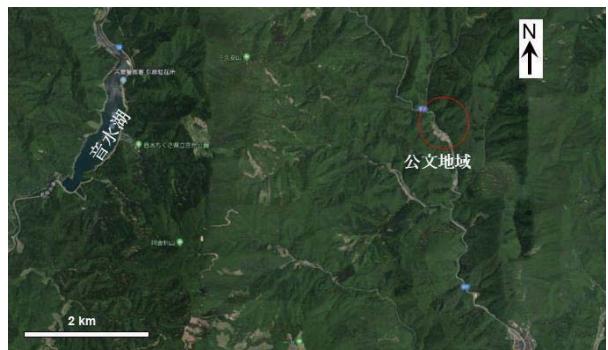


写真-1 斜面崩壊の発生場所(google earth より)

崩壊斜面の脚部附近の幅は約46mで、中腹付近の幅は約57mであった。また、崩壊斜面の右側の側面から

崩壊土砂の土層厚は5~7m、崩壊源頭部の斜面長は約60m程度であった。したがって、移動土層は約3万立米弱と推測される。



写真2 宍粟市一宮町公文地区の斜面崩壊
(2018年7月14日撮影)



図-1 斜面崩壊地および周辺地形図。赤線：斜面崩壊および崩土堆積区域（国土地理院電子国土Webに加筆）

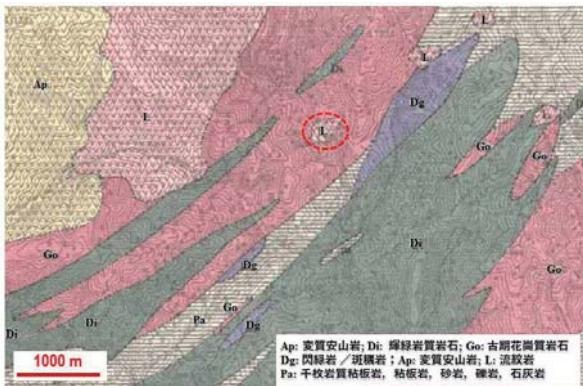


図-2：崩壊地域の地質図（産業総合技術研究所より加筆）

産業総合技術研究所の地質図Naviによると、斜面崩壊が発生した地域には流紋岩が分布している（図-2）。崩壊の源頭部には、大量の崩壊土砂が堆積しており（写真-3）。その中に、～10cmぐらいの礫が散見されるが、殆どは、完全に風化してできた真砂土である。また、崩壊斜面の中腹付近から湧水が確認され、崩壊地底面の両側から流下している。崩壊土塊の下位にある堅固な基盤岩が露出している。源頭部には平滑なすべり面が露出して、その上に薄いすべり面粘土層が附着している（写真-4）。滑落崖の背後斜面においては、斜面崩壊に伴うクラックなどの形成は認められなかったが、急斜面の形成

により、背後斜面の安定性が低下しているものと思われる。



写真3 源頭部に堆積している崩土



写真4 源頭部に露出したすべり面

(2) 斜面崩壊発生・運動

2015年4月2日のGoogle earth写真によると、枝葉の成長前の時期になるために、地表状況が明瞭に伺えることができる（写真-5）。この写真より、赤い矢印で示す箇所は、今回発生した斜面崩壊の滑落崖の位置になる。これらの矢印で示す箇所の周辺は、凹地地形を呈しており、一方、下部は、二つの沢地形が認められる。すなわち、斜面崩壊が発生する前の長い間にこの斜面では、クリープ的な変形が発生しており、斜面が不安定状態であったことが想定される。源頭部に露出したすべり面から採取した土試料に対するせん断実験は現在進行中であるが、粒径分布および粘土成分を分析した結果、土試料には僅かなカオリンライトを含んでいることが分かった（図-3）。カオリンライト質粘土において、そのせん断強度はせん断速度の増加に伴って大きくなる傾向があるので、今回の豪雨によって大量の地下水が流入することにより、すべり面に載荷する有効垂直応力が継続的に低下し、地すべり土塊のクリープ変形→加速運動→崩壊の発生といった過程が発生することができた推察される。また、地すべり土塊から採取した試料に対する飽和非排水せん断実験を実施した結果（図-4）から、斜面崩壊が発生した後に、飽和土層において、崩土の運動に伴って、更なる高い水圧が発生し、崩壊土砂を流動化させたと考えられ

る。以上により、崩壊土砂が斜面の真下にある緩い斜面や畑を流下し、住宅を潰した後に、広い範囲で堆積物を広げたものと推察される。



写真-5 斜面崩壊発生前の斜面状況 (2015年4月2日)
(Google earthより)

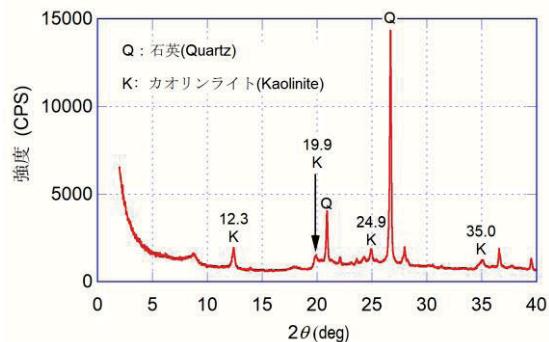


図-3 源頭部のすべり面粘土X線分析結果

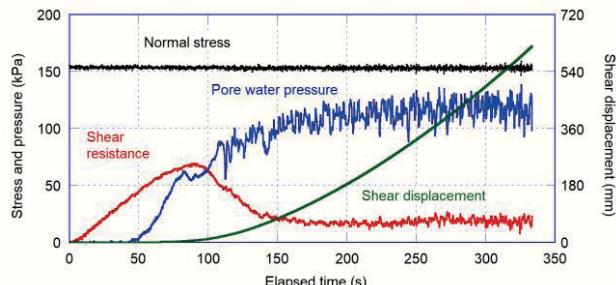


図-4 地すべり土塊から採取した試料に対する飽和非排水せん断実験結果



写真-6 斜面崩壊発生前の周辺斜面状況 (2015年4月2日)
(Google earthより)

写真-6には、斜面崩壊地周辺の様子を示す。図-1と写真-6から、崩壊斜面に隣接する南側の斜面においては、過去に大きな斜面崩壊が発生したことが推測される。丘陵地や山地の扇状地において、古くから存在している集落では、住宅を建設する時には、一般的（経験的）にできるだけ土石流災害の恐れがある渓流の出口を避けて計画されていると推測されるが、今回の土砂災害は、山地における住宅の建設場所の選定に対しては新たな問題を提起したと考えている。

3. 福山市そのため池決壊

(1) 災害の概略

7月7日午後7時前に、広島県福山市駅家町向永谷地区の沢にあるため池が決壊し、沢から大量な土砂や水が流下し、沢の下流側にある住宅を直撃した（写真-7）。これにより、住宅が大きな被害を受けただけではなく、住宅に住む幼児が流され、死亡したといった大惨事となつた。写真-8(a)は住宅の被災状況、写真-8(b)は田圃に大量の土砂が堆積している状況である。

災害前のGoogle earth画像および電子国土地図によると、この沢の上流側には2基のため池が作られており、ため池の上流側にはまたグラウンドがある（写真-7と図-5）。下流側にある池（勝負迫下池）の貯水量は約3200立米であり、上流側の池（勝負迫上池）の貯水量は約800立米であった（毎日新聞、2018）。勝負迫上池から約50m離れた上流側に駐車場およびグラウンドがあった。このグラウンドは1978年ごろに子供用の運動場として作られたものであり、駐車場はその後に整備されたものであった（山陽新聞、2019）。今回の崩壊の殆どは、駐車場の部分であり、グラウンドの一部が崩落したと推察される。



写真-7 ため池決壊前の写真 (Google earth, photo of April 17, 2015)
および決壊後の氾濫区域。



写真-8 被災状況。 (a) 家屋の被災状況および散見されるコンクリートブロック； (b) 田圃における土砂堆積状況



図-5 ため池および造成グラウンド周辺の地形図

(2) ため池の決壊

決壊の原因としては、造成されたグラウンドの斜面において発生した崩壊が考えられる。写真-9は、グラウンドの下流側から見た斜面崩壊の様子である。連日の豪雨によって、駐車場およびグラント内において、地下水位が上昇して斜面が不安定化となり、崩壊が発生したと思われる。造成時に駐車場やグラウンド内における排水対策がどのようにされたかは不明であるが、調査時には、崩壊斜面の底部からまた湧水があり、湧水の周辺には局所的な崩壊が発生していることが確認された。すなわち、グラウンドの土層内における速やかな排水は出来ていないことが推察される。



写真-9 グラウンドの下流側から見た様子を示す。末端から湧水が出ている。

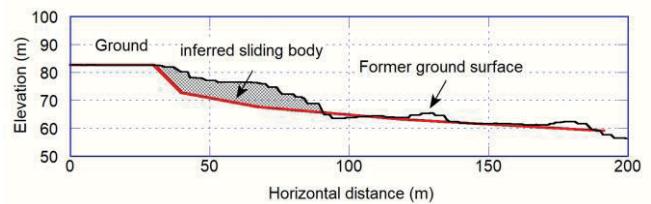


図-6 沢の源頭部における断面図および推測した地すべり土塊

レーザー距離測定機を用いて、グラウンドから沢の下流側への縦断面を概略的に測定した。その結果を図-6に示す。崩壊した斜面は、崩壊前の地形図を参考に推測した。崩壊後の滑落崖の傾斜は約45度である。グラウンドの表面には複数の開口クラック（写真-10）が形成されているため、二次的な斜面崩壊が発生する可能性が高いと考えられる。



写真-10 グラウンドの表面に形成された開口クラック

降雨時におけるため池の決壊は、一般的にため池の堤体における浸透流破壊や越流浸食・決壊といった過程が考えられている。現地では、連日の豪雨により、2基のため池は既に満水に近い状態にいると推測される。また、上述のように、ため池の上流側の駐車場およびグラウンドで法面の崩壊が発生していた。崩壊土砂（主体は真砂

土)が、下流側のため池に流れ込んで、ため池を順次に決壊させたと推察される。上流側のため池の堤体は、その殆どが流下したため、流れ込んだ土砂の衝突により、堤体が決壊したと考えられる。また、駐車場やグランドの造成に使用されたコンクリートブロックが崩壊土砂とともに流下し、崩土の破壊力を大きく増大させたと推察される。写真-11には、駐車場の末端に敷かれたコンクリートブロックを示す。



写真-11 沢の左側にある崩壊した駐車場の残存部およびコンクリートブロック



写真-12 下流のため池堤体（右側）における小さい破壊及び上流から流下して堆積したコンクリートブロック



写真-13 下流のため池堤体（左側）における大きな破壊により露出した堤体の内部構造

一方、下流側のため池では、堤体の一部が決壊された（写真-12、写真-13）。満水に近い状態と考えられるため池において、上流からの土砂や水が流入すると、急激な水位上昇や越流が発生し、ダム堤体が決壊したと推察される。

(3) 決壊したため池における危機管理

今回のため池決壊の直接な原因として、沢の源頭部にある駐車場およびグラウンド斜面における崩壊が挙げられるが、造成した土構造物の豪雨時や地震時に関する安定性評価が適切に実施されていないことは否定できない。また、広島県が発表している「災害ポータルひろしま」によると、増設したグランド区域が、周辺に急斜面があるため、急傾斜地特別警戒区域として指定されているが、下流側のため池や住宅地付近の区域は、土砂災害の危険地域に入っていないことが分かった（図-7）。すなわち、増設した土構造物における崩壊およびそれによる被害予測が実施されなかった。さらに、決壊した二つのため池は、決壊すれば人家に大きな影響を及ぼす「防災重点ため池」の基準に当てはまるが、広島県の指定から漏れていたことが指摘されている（山陽新聞、2019）。

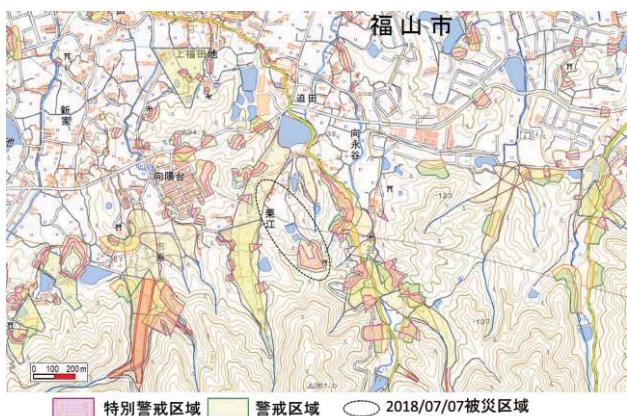


図-7 被災地域の土砂災害警戒区域・特別警戒区域図

4. まとめ

上記の調査結果を纏めると、以下になる。

1. 宍粟市公文地域において発生した斜面崩壊は、強風化した流紋岩斜面において発生したものであり、崩壊前の斜面においてクリープ変形が発生しており、不安定状態にいることがわかった。こういった地形的な特徴を抽出することが、同じく流紋岩地域の斜面崩壊発生場の予測高度化に貢献

2. 福山市駅家町向永谷におけるため池決壊の直接な原因として、沢の源頭部に増設した駐車場およびグランドにおける崩壊が挙げられる。しかし、地震や豪雨時において、造成されたこういった土構造物の安定性評価が適切に実施されていないことが推察される。また、これ

ら二つのため池に対して、適切な危機管理がされていなかったことも分かった。さらに、国や地域により推進されている土砂災害警戒区域・特別警戒区域図の精度向上化は急務であることが分かった。

3. 平成30年7月の豪雨は異常気象をもたらした現象だと想われている。将来的には、日本の降雨は、強雨の発生頻度や総雨量が増加する傾向にある。また、巨大地震の発生確率も高くなっている。即ち、降雨や地震による複合災害の発生危険度も極めた高い。これにより、今までと異なる場所や規模および被災範囲での土砂災害の発生を助長する。こういった土砂災害の防止及び軽減には、山地斜面に対する高精度計測を行い、地形変動情報や地質および土質特性などの基盤データを整備し、斜面災害の発生機構を究明した上で、より精度の高い土砂災害予知・軽減手法の開発が不可欠である。

謝辞：本災害により犠牲となった方々のご冥福をお祈りするとともに、被害を受けられた皆様にお見舞い申し上

げます。そして、一日も早い復興をお祈りいたします。本報告では、国土地理院による地理院地図を用いました。宍粟市の崩壊に対する現地調査には、神戸大学・芥川真一教授、株式会社ダイヤコンサルタント・鏡原聖史様、中央復建コンサルタンツ株式会社・金村和生様および京都大学大学院工学研究科・北岡貴文助教に、粘土鉱物のX線分析に京都大学防災研究所荒井研究員に、ご協力を頂きました。斜面崩壊地域の土地利用や地形特徴などについて、富山県立大学の古谷元准教授に議論を頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 毎日新聞：西日本豪雨 決壊ため池、防災指定外
福山市、国指摘後も（2018年7月16日）
(<https://mainichi.jp/articles/20180716/k00/00m/040/140000c>)
- 2) 山陽新聞：地下へ大量雨水、のり面緩み崩落 福山
市が豪雨災害の調査結果公表（2019年01月25日）。
(<http://www.sanyonews.jp/article/858632/>?rct=bingo/?clip&s=)

A SLOPE FAILURE IN SHISOUSHI OF HYOGO PREFECTURE AND CASCADE FAILURE OF RIIGATION TANKS IN FUKUYAMA CITY OF HIROSHIMA PREFECTURE

Gonghui WANG, Chengrui CHANG, Sumio MATSUURA and Akira SUEMINE

From late June to mid-July, 2018, successive heavy rainfall hit a wide area of southwestern Japan, resulting in widespread sediment-related disasters and devastating floods. After the rainfall, we performed reconnaissance investigation on some disasters, and in this report we introduced one landslide occurring in Koubun area of Shisoshi, Hyogo Prefecture, and a cascading failure of irrigation ponds in Fukuyama, Hiroshima prefecture. We found that the slope where landslide in Kubun area occurred presented creep deformation such that the landslide boundary could be clearly identified before the landslide occurrence. This suggests the importance of using similar precursor to predict the potential landslide areas. The failures of ponds in Fukuyama resulted in the slope failure occurring on landfill that was constructed on the most upstream of the valley as sports yard. The failure of these ponds revealed the problems in the management of ponds and also the risk of this kind of landfill in the upper stream of a valley.

治 水

降雨極値統計解析

田中茂信¹

¹ 正会員 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

E-mail: tanaka.shigenobu.4m@kyoto-u.ac.jp

本稿は 2018 年西日本豪雨と呼ばれている豪雨の降雨極値について、時系列変化と頻度について解析した結果を報告するものである。記録的な豪雨となった日吉ダム流域の降雨極値について調べるとともに、淀川水系の主要 6 地点上流の流域面積雨量について頻度解析を行う。また、西日本一帯の本豪雨での記録更新状況を調べるとともに、Aphrodite によるグリッド降水量を用いて広域的な極値の発生状況についても調べる。その結果、今回の豪雨で日吉ダム流域の 36~48 時間あるいは 2 日および 3 日降水量がこれまでの記録を大きく更新したこと、この 2 日降水量は再現期間が 160~170 年であること、48 時間および 72 時間降水量について 106 地点で記録を更新したこと、それぞれの地域で経験したことのない豪雨となり洪水災害・土砂災害を多くの場所で引き起こした。一部には災害前の豪雨履歴が周囲に比べて小さい地域が被災している例も見られ、外力設定にあたり広域的な観点からの頻度解析が必要であることが示された。

Key Words: statistical analysis, extreme rainfall, record breaking, Aphrodite grid rainfall

1. 背景と目的

平成 30 年 7 月の西日本豪雨災害では、西日本の広い範囲で洪水災害、土砂災害が発生した。平成 31 年 1 月 9 日発表の内閣府の被害状況に関する資料¹⁾によると、死者 237 名、行方不明 8 名である。1 災害での犠牲者数が 1984 年以降しばらく 100 人未満であったが、本災害では 200 人を上回る犠牲者となった。この間、2000 年の東海豪雨、2011 年の紀伊半島豪雨、2014 年の広島県での土砂災害、2015 年の関東・東北豪雨、2017 年九州北部豪雨など記録的な豪雨が発生し、多くの人命が犠牲となった。2014 年には広島市安佐南区の八木地区で 52 名と狭い範囲で多くの犠牲者を出したものもある²⁾。

本稿は今回の洪水・土砂災害をもたらした豪雨の極値について時系列変化と頻度について解析を行う。具体的

には、日吉ダム流域平均降水量、淀川水系主要地点上流流域面積降水量および西日本域における今般豪雨の特徴について考察する。

2. 淀川水系の降雨極値の解析

はじめに近畿地方整備局から提供された水資源機構が管理する日吉ダム流域平均年最大降水量の時系列変化を見た上で確率評価を行う。

図-1 (左) は 1952 年以降の日降水量をもとに 2 日および 3 日降水量の年最大値の推移を示したものである。至近 10 年間の増加傾向は著しくみえるが、全期間を対象にした MannKendall テストでは有意水準 5% で有意な増加傾向とは判断されない。次に、時刻雨量が整理されている 1997 年以降の資料を用いて、6, 12, 18, 24, 36,

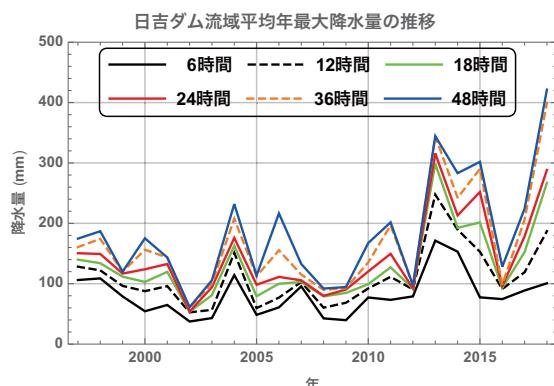
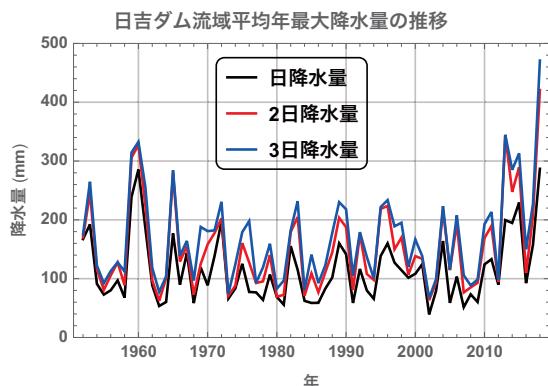


図-1 日吉ダム流域平均年最大降水量の推移 (左 : 日降水量ベース, 右 : 時刻降水量ベース)

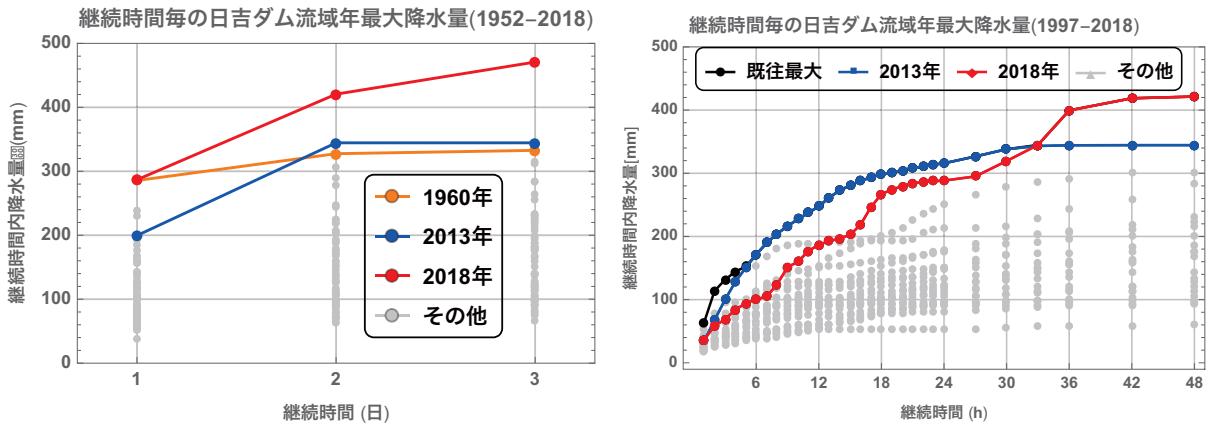


図-2 日吉ダム流域降雨継続時間別年最大降水量 (左: 日降水量ベース (1952~2018) , (右: 時刻降水量ベース (1997~2018))

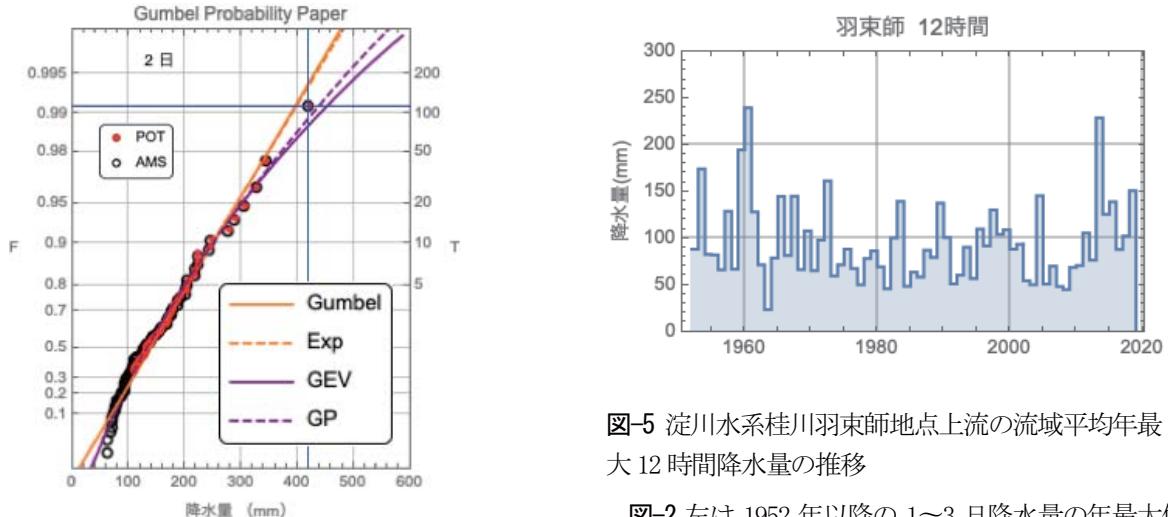


図-3 年最大2日降水量の確率プロットと極値分布Fitting
2018年イベントをクロスヘアで示している。POTの閾値は
108mmを採用している。

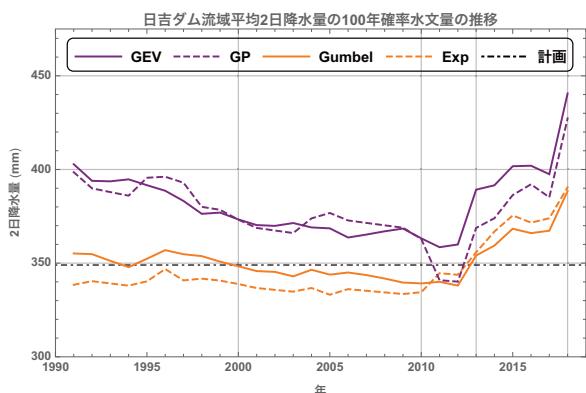


図-4 観測期間が伸びたことによる2日降水量のAMSと
POTによる100年確率水文量の推移
1952年から横軸の年までの資料により推定される
100年確率2日降水量を示している。

48時間の流域平均年最大降水量の時系列変化を見たものが図-1(右)である。こちらも同様に近年増加傾向にあるように見えるが、増加傾向は有意ではない。

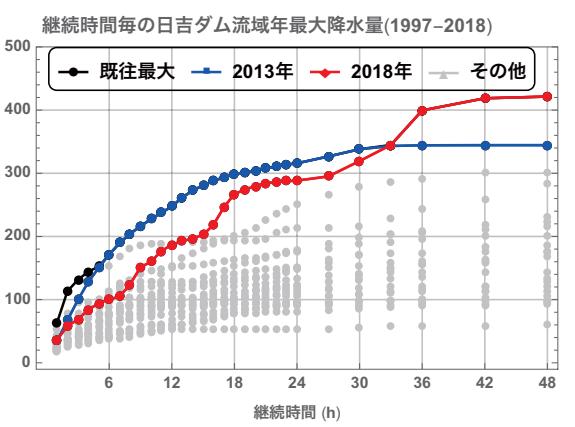


図-5 淀川水系桂川羽束師地点上流の流域平均年最大12時間降水量の推移

図-2 左は 1952 年以降の 1~3 日降水量の年最大値を示したもので、特記される 1960 年、2013 年および 2018 年をそれぞれ橙色、青色および赤色で示している。日降水量は 1960 年と 2018 年が同程度であり、2 日と 3 日は 2018 年が既往最大であり、それぞれ、2013 年の記録を 76mm および 126mm 上回っている。図-2 右は 1997 年以降の 1~48 時間降水量の年最大値である。36, 42, 48 時間に 2018 年豪雨がそれまでの記録である 2013 年の値をそれぞれ 55, 74, 77mm 上回っている。

図-3 は日吉ダムの計画で用いられている 2 日降水量の年最大値(AMS)と閾値超過資料(POT)およびそれぞれに極値分布を当てはめたものを合わせて示したものである。閾値は 2013 年台風 18 号時の検討と同様に標本平均超過閾値を描いて、108mm としている。クロスヘアで示した 2018 年西日本豪雨での事象は Gumbel 分布で 170 年、指數分布で 160 年に 1 度の事象と判断される。

図-4 は観測期間の変化に伴う 100 年確率水文量の変化を示したものである。2013 年までは指數分布が最も安定的である。2013 年以降はどの分布によても 100 年確率 2 日降水量は計画を超えており、中でも 2018 年イベントを含む場合、2017 年までの確率水文量に比べ、15~40mm 大きくなっている。

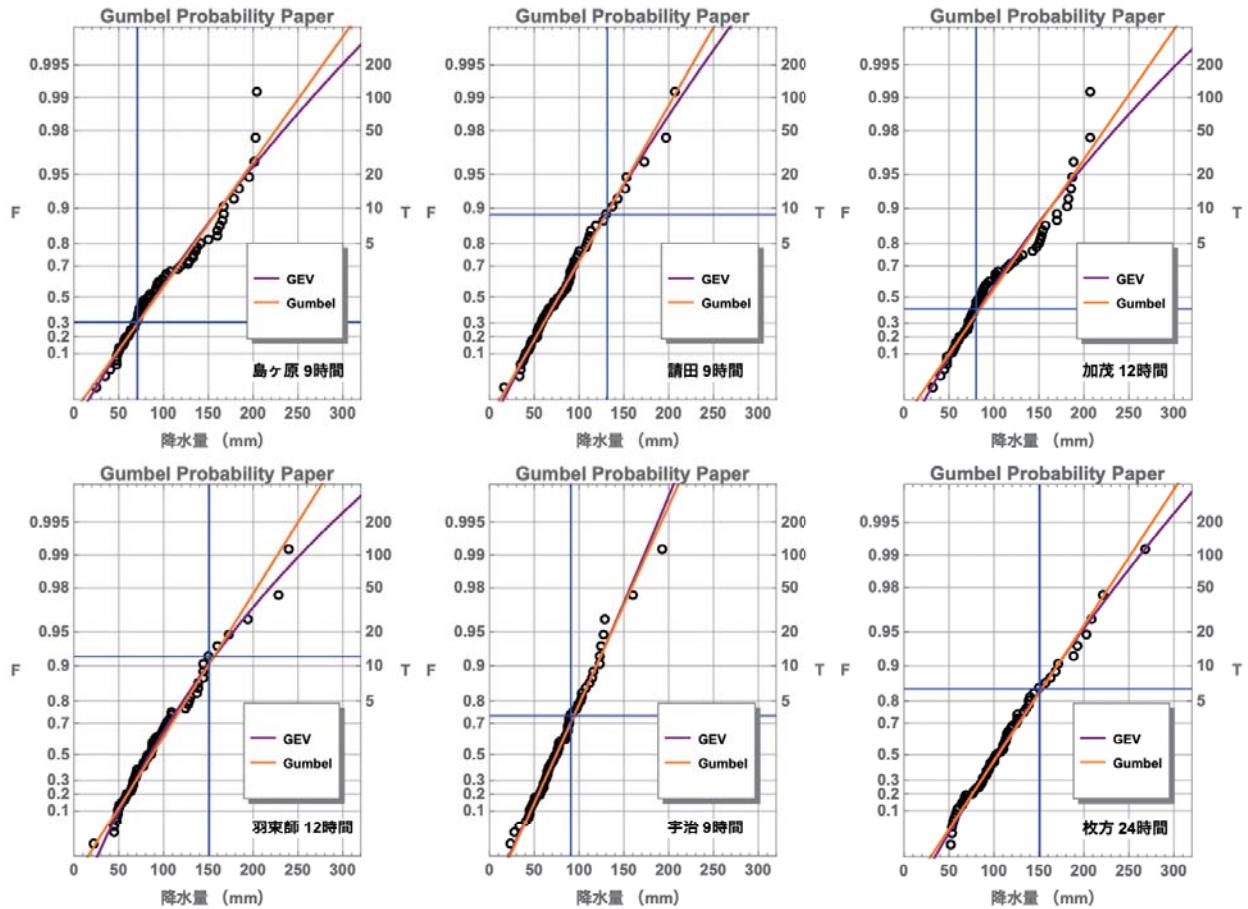


図-6 淀川水系主要6地点上流流域平均年最大降水量の確率プロット

次に、近畿地方整備局から頂いた淀川水系の主要地点に関する降水量についてみる。図-5は日吉ダムの下流に位置する羽束師地点上流の流域平均12時間降水量の時系列をみる。2018年の豪雨は歴代6位であり、それほど大きなものでないことがわかる。また、明確な増減傾向はみられない。図-6は淀川水系主要6地点の年最大値の確率プロットである。図中のクロスヘアは2018

年の値を示している。支川桂川の主要地点である請田と羽束師のみ再現期間がほぼ10年となっているが、他の地点では数年に1度の事象であることがわかる。

地点上流流域面積は、日吉ダム地点で 290km^2 、その下流に位置する羽束師では $1,078\text{km}^2$ であり、前者が2日雨量、後者が12時間雨量で整理されている。日吉ダムが計画を超える降雨に見舞われたにもかかわらず、下流河道では幸いにもそれほど大きな洪水とならなかった。

3. 西日本の降雨極値

図-7は全国のAMeDAS降水量観測地点のうち1,3,6,12,24,48および72時間降水量について、西日本豪雨で既往最大を更新³⁾した地点数を整理して示したものである。なお、この図では観測期間が10年未満のものは除いている。48時間と72時間の箇所数はそれぞれ126箇所および124箇所である。また、図-8は48時間と72時間降水量ともに既往最大を更新した106地点のうち、本州中央部から九州までの範囲について示したものである。なお、広範な地点で既往の記録を更新してはいるが、我が国のトップ20の日降水量記録⁴⁾には今回の豪雨のもの

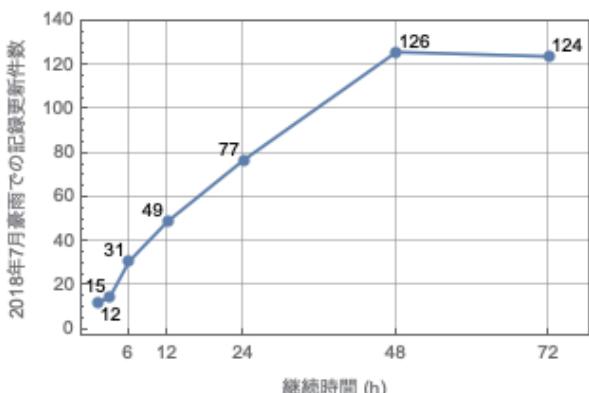


図-7 全国のAMeDAS降水量観測地点のうち1,3,6,12,24,48および72時間降水量について、西日本豪雨で既往最大を更新した地点数



図-8 48 時間降水量と 72 時間降水量ともに既往最大を更新した 106 地点の分布

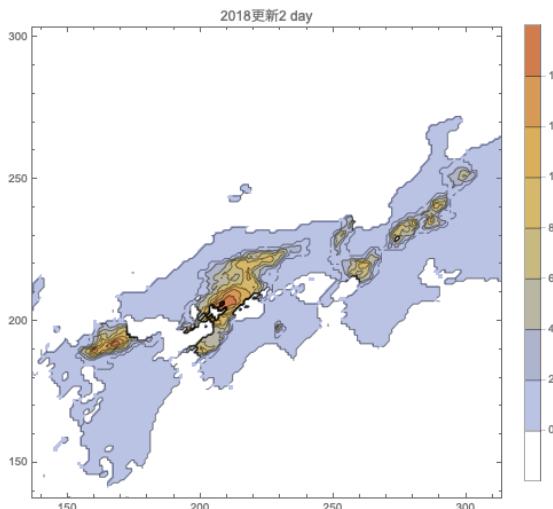


図-9 2018 年西日本豪雨による 2 日降水量の記録更新状況

は見られない。図-9 は 1977 年以降の AMeDAS 降水量を用いて作成された Aphrodite の 0.05 度グリッド降水量⁵⁾で見た、2018 年西日本豪雨により 2 日降水量の記録が更新されたグリッドのコンター図である。広島県東部から岡山県西部にかけての範囲と九州北部で 2017 年までの記録を大きく更新していることがわかる。これ以外に桂川流域を中心とする範囲、滋賀県北東部から福井・岐阜県境を中心とする範囲、由良川下流左岸から丹後半島にかけておよび四国の肱川流域を中心とする範囲などで記録が更新されている。図-10 は 2017 年までの 2 日降水量の最大値のコンターマップであり、広島県東部を中心に 200mm 未満の地域が広がっていることがわかる。図-11 は 2018 年 7 月末までの資料で作成した同様のコンターマップであり、広島県東部を中心とする既往最大値の小さい地域はなくなっている。日雨量のコンター図と比べ

てみたが、2 日降水量ほどは災害発生箇所との対応は良くなかった。図-11 の範囲では、能登半島の付け根付近と長野県北部が既往最大値の小さい地域として残ってい

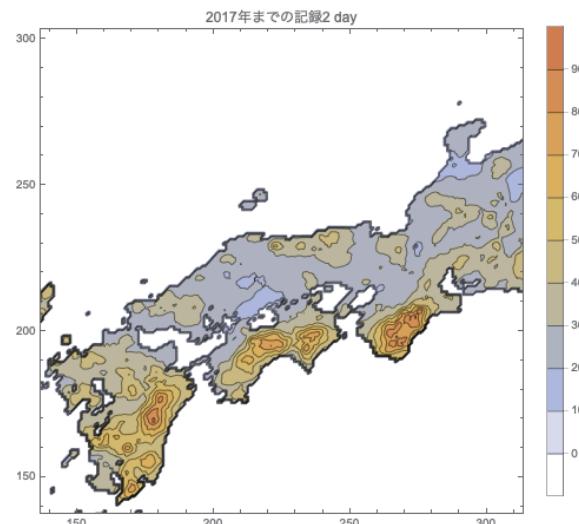


図-10 2017 年までの 2 日降水量の最大値の分布

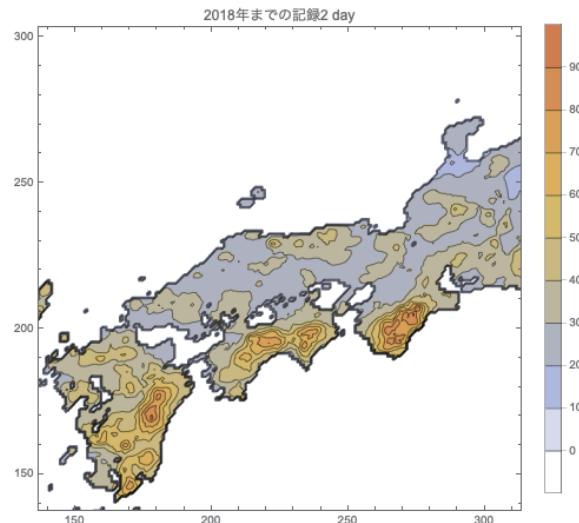


図-11 2018 年までの 2 日降水量の最大値の分布

る。これらの地域では周辺と同程度の大雨への構えが必要であろう。

6.まとめ

淀川水系の日吉ダム、主要地点および西日本の広域での降水量の極値について時系列変化および頻度、空間分布を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 日吉ダム地点上流流域平均降水量は 36~48 時間あるいは 2 日および 3 日降水量がこれまでの記録を大きく更新した。この 2 日降水量は再現期間が 160~170 年と推定された。

(2) 広域的な検討から、それぞれの地域で経験したことのない豪雨となり洪水災害・土砂災害を引き起こしたがわかった。一部地域には災害前の既往最大豪雨が周囲に比べて小さい地域があり、その部分が被災している例も見られた。外力設定にあたり広域的な観点からの頻度解析が必要であることが示唆された。

今回の豪雨は、広い範囲で既往の豪雨記録を更新する未曾有の災害外力であったが、全国の記録と比較するとそれほど大きいものではない。九州北部豪雨災害の報告書⁶⁾でも触れたが、気象庁のWebにある日降水量のランキングの20位は626 mmであり、トップ20は2011年よりこれまで更新されていない。しかしながら、2011年以降も毎年のように洪水災害や土砂災害があちこちで発生している。今回の災害は日降水量の分布より2日降水量の分布の方が災害発生場所の分布によく対応している。色々な継続時間での災害が発生していることから、継続時間毎の記録の分布がわかる地図の整備が望まれる。災害対策のためのハード整備が追いついていない現状では人命優先のソフト対策は重要ではあるが、外力の変動と社会構造を踏まえると、ハード整備の重要性はますます高まっている。

参考文献

- 1) 内閣府：平成30年7月豪雨による被害状況等について，http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/310109_1700_h30typhoon7_01.pdf, 2019.2.10閲覧。
- 2) 内閣府：8月19日からの大雨による広島県の被害状況等について，<http://www.bousai.go.jp/updates/h260819ooame/pdf/h260819ooame38.pdf>, 2019.2.10閲覧。
- 3) 気象庁：毎日の観測史上1位の値 更新状況，http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/rank_update/index.html, 2018.7.16閲覧。
- 4) 気象庁：歴代全国ランクイング，[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rank-all.php?prec_no=&block_no=&year=&month=&day=&view="](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rank-all.php?prec_no=&block_no=&year=&month=&day=&view=), 2019.2.14閲覧。
- 5) APHRO_JP_V1207(ただし2016-2018については未公開)，<http://aphrodite.st.hirosaki-u.ac.jp/japanese/index.html>
- 6) 京都大学防災研究所：2017年九州北部豪雨災害調査報告書，http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/publication/other/20180330_kyusyu.pdf, 2018.

謝辞

本調査を実施するにあたり、近畿地方整備局より淀川水系の降雨資料および水資源機構が管理する日吉ダムの降雨資料を提供いただいた。ここにご協力いただいた関係者各位に謝意を表する。

STATISTICAL ANALYSIS OF EXTREME RAINFALL

Shigenobu TANAKA

This article reports trend and frequency analysis of extreme rainfall for the 2018 Western Japan torrential rainfall disaster. First, the catchment averaged rainfall at Hiyoshi dam is investigated and that of 36-48 hours rainfall and 2-3 day rainfall at this event exceeded greatly the past records. Return period of two-day rainfall of that is estimated 160-170 years. Next, the catchment averaged rainfalls at six principal point in the Yodo river basin are examined but the return period of each point is small. Finally, situation of record breaking over the western Japan area is examined with the AMeDAS rainfall record and Aphrodite grid rainfall product and it shows that unprecedented rainfall which caused flood and debris disasters took place in many places. Some of them have not experienced such large rainfall before. This suggests it is important to conduct frequency analysis over wide area not with small area when setting design hazard.

ダムの洪水調節操作と今後の課題

角 哲也¹・竹門 康弘²・野原 大督³

¹附属水資源環境研究センター教授（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

²附属水資源環境研究センター准教授（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

³附属水資源環境研究センター助教（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

平成 30 年 7 月豪雨災害では、西日本を中心とした広い地域で長時間にわたる豪雨が発生し、各地で記録的な出水が発生した。ダム貯水池の洪水調節操作によって下流河川の水位低減に大きく貢献した流域があつた一方で、長引く洪水調節によりダムの洪水調節容量が満水となる見込みとなり、やむを得ずダムが異常洪水時防災操作を実施した流域もあつた。本稿では、当該豪雨災害におけるダム治水操作の実施状況を概観し、その効果と課題を分析するとともに、今後の大規模な出水に向けたこれら課題への対応策の方向性を述べる。

Key Words: *flood control operation, torrential rainfall in July 2018, emergency spillway gate operation, preliminary release, dam upgrading under operation*

1. はじめに

活発な前線の停滞と台風から変わった温帯低気圧などの影響により、平成 30 年 6 月 28 日から 7 月 8 日にかけて、西日本を中心とした広い範囲で大雨となった。特に、7 月 5 日から 7 月 8 日にかけて前線が停滞した西日本やその周辺では記録的な大雨となり、大規模な出水に伴う河川氾濫や浸水が各地で発生した。治水用ダム貯水池が建設されている河川流域の多くでは、ダムの洪水調節操作が下流河川の水位の低減、浸水被害の軽減に貢献した。一方、記録的な出水により、洪水調節容量が満水の見込みとなつたことから、ダムが異常洪水時防災操作を実施し、出水期間中にダムの洪水調節機能が失われることになった流域が出るなど、大規模出水時におけるダム防災操作の課題も顕わになつた。

本稿では、平成 30 年 7 月豪雨災害におけるダム治水操作の実施状況を概観しながら、大規模出水時におけるダム治水操作の効果と課題を考察し、これらの課題を克服するための今後の対応策の方向性を論じる。

2. 平成 30 年 7 月豪雨時のダム治水操作の状況

(1) 出水の状況

平成 30 年 6 月 29 日に日本の南で発生した台風 7 号は、

東シナ海を北上したのち、7 月 4 日に日本海で温帯低気圧に変わつた。当時日本海から北日本にわたつて停滞していた前線は、7 月 4 日に北海道付近に北上した後、7 月 5 日には西日本付近に南下し、その後 7 月 8 日頃まで停滞した。前線や台風 7 号の影響により、日本付近には暖かく湿つた空気が流入し、合わせて 11 府県に大雨特別警報が発表されたほか、全国の 120 地点を超える気象庁アメダス観測地点において最大 48 時間降水量および最大 72 時間降水量の記録を更新するなど、西日本を中心とした広い範囲で記録的な豪雨が生じた¹⁾。

こうした中で、多くの河川流域において、ダム貯水池による洪水調節操作が実施された。国土交通省所管のダムについては、全国の 558 基のダムのうち、およそ 4 割にあたる 213 基のダムで防災操作（洪水調節）を実施し²⁾、中には下流河川における浸水被害の防止・軽減に大きく貢献したものもある。その一方で、洪水調節を実施したダムのうち、8 基のダムについては、長期間にわたる豪雨により、洪水調節容量を使い切ることが見込まれたことから、異常洪水時防災操作に移行し、出水の最中に流入量と同程度の放流を行うことを余儀なくされた。表-1 にこれらの 8 ダムによる異常洪水時防災操作の概要を示す。ほとんどのダムでは、洪水調節容量使用率が 9 割以上となっており、うち 5 ダムでは洪水調節容量を全て使い切つてゐる。当然ではあるが、いずれのダムにおいても最大放流量は最大流入量を下回つてゐる。最大流

表-1 平成30年7月豪雨におけるダムの異常洪水時防災操作の状況（参考資料³⁾の数値を基に作成）

ダム	水系	流入波形タイプ	最大流入量 $Q_{\max} [\text{m}^3/\text{s}]$	最大放流量 $R_{\max} [\text{m}^3/\text{s}]$	放流率 R_{\max}/Q_{\max}	異常洪水時防災操作開始の時期	洪水調節容量使用率
野村	肱川	一山・後期集中	1942	1797	0.93	ピーク前	10割以上
鹿野川	肱川	一山・後期集中	3800	3742	0.98	ピーク前	10割以上
岩屋	木曽川	複数ピーク	1340	945	0.71	最終ピーク時	9割以上
一庫	淀川	複数ピーク	626	332	0.53	最終ピーク後	9割以上
日吉	淀川	複数ピーク	1258	907	0.72	最大ピーク後	10割以上
引原	揖保川	複数ピーク	285	135	0.47	最終ピーク後	8割以上
河本	高梁川	複数ピーク	877	747	0.85	最大ピーク後	10割以上
野呂川	野呂川	複数ピーク	187	178	0.95	最大ピーク前	10割以上

入量 Q_{\max} を最大放流量 R_{\max} で除した Q_{\max}/R_{\max} を放流率と呼ぶことになると、一庫、引原両ダムにおいては放流率が 0.5 程度で、最大流入量に対して最大放流量を概ね半減させている。これらのダムでは、流入量の最後のピーク後に異常洪水時防災操作に移行しており、全てのピークで洪水調節を行っていることから、下流にとっての大きな治水効果があったことがうかがえる。

一方、流入量の最終ピーク前に異常洪水時防災操作に移行したダムでは放流率が高くなっている。このうち、複数の流入ピークのうち最大のピーク後に異常洪水時防災操作を実施した日吉、河本各ダムでは、ダムが無い場合と比べて最大放流量をそれぞれ 28%, 15% 低減し、一定の治水効果が見られる。（ただし、日吉ダムでは流入量の最大ピーク時に通常の洪水調節操作を継続しており、相当な放流調節を行っている。）しかし、流入量の最大ピーク前に同操作に移行したダム（野村、鹿野川、野呂川）にあっては、放流率がいずれも 0.9 を超えており、ダムが無い状態と比べた最大放流量の低減割合が 2~7% となるなど、最大ピーク時に大きな洪水調節効果が得られない結果となった。

ダム流入波形で見ると、後期集中型の強いピークを持つ一山波形と、長期間におよぶ複数ピークから構成される波形との 2 種に大別できる。以下では、前者の事例として肱川水系野村ダム、後者の例として淀川水系日吉ダムでの防災操作事例について検討する（図-1、図-2 参照、ただし、それぞれ国土交通省の水文水質データベースの時間データを元に作図しているため、最大流入量や最大放流量の値が 10 分データと異なる）。

(2) 艰川水系野村ダムの状況

肱川水系の野村ダムは有効貯水量 1270 万 m^3 、うち洪水期の洪水調節容量 350 万 m^3 の多目的ダムである。野村ダムの計画高水流量は 1300 m^3/s で、これに対する計画最大放流量は 1000 m^3/s だが、下流河道の疎通能力が小さいため、下流自治体からの要請を踏まえて、放流を大幅に制限する洪水調節方式が暫定的に採用されている。すなわち、流入量が 300 m^3/s を超えた時点から洪水調節

容量の約 4 割に相当する EL167.8m の貯水位に達するまで放流量を 300 m^3/s の一定とし、EL167.8m に貯水位が達した後は放流を 400 m^3/s まで速やかに上げたのち、ダム流入量が最大となる時までゲート開度を保つ方式である。流域面積（168 km^2 ）に対する洪水調節容量も大きくはなく、相当雨量（洪水調節容量を流域面積で除した値）は約 21mm 程度である。これらのことから、出水規模が大きくなると洪水調節のための空き容量が少くなりやすい構造となっている。

今般の豪雨時には、これを補完するため、事前放流により追加で 350 万 m^3 の空き容量を確保しており、迎洪水時には合計で 600 万 m^3 の空き容量が確保されていた。しかし、実際には計画規模（1/100）の 365 mm を大きく上回る 421 mm の 48 時間雨量を記録し、降雨最後期に時間雨量 25~50 mm の強雨が 6 時間にわたって降るなどの悪条件も重なり、流入量がピーク（1942 m^3/s 、計画高水流量の 1.49 倍）に達するより前に、異常洪水時防災操作に移行することとなった（図-1 も参考）。このため、流入量ピーク時に十分な洪水調節効果を引き出すことはできず、最大放流量は 1797 m^3/s （計画最大放流量の 1.8 倍）となり、また、ピーク直前の摺り付け操作のため、急激な放流の増加が生じる結果となった。これに伴う氾濫により、残念ながら野村ダム下流において 5 名、また同様の操作を行った鹿野川ダム下流において 4 名の人的被害が生じている。ただし、異常洪水時防災操作に移行するまでの間、放流量を無害レベルに抑えていることから、下流の氾濫が始まるとされる流量に達するまでの時間を遅らせることには成功している。

(3) 桂川水系日吉ダムの状況

淀川水系日吉ダムは、支川の桂川上流に設置された有効貯水量 5800 万 m^3 、うち洪水期の洪水調節容量が 4200 万 m^3 の多目的ダムである。日吉ダムの洪水調節は、基本計画では計画高水流量 2200 m^3/s のうち最大 500 m^3/s の放流を行うよう計画されているが、こちらも下流河道の整備状況を踏まえ、現時点の規則では、最大 1510 m^3/s

の流入量に対して $150 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流を行うよう、暫定的に運用されている。

平成 30 年 7 月豪雨では、日吉ダムを含む桂川流域では、複数のピークを持った長期間にわたる大雨に見舞われた（図-2）。日吉ダム上流域における総雨量は 492 mm に達し、最大 48 時間雨量は 420 mm を超え、ダムの計画雨量 349 mm を超過する記録的な豪雨となった。流入量の大きなピークは 3 回現れ、そのうち最初の 2 回のピークでは、 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流を実施し、最大のピークとなった 2 度目のピーク時（最大流入量 $1258 \text{ m}^3/\text{s}$ ）には、ダム地点からの流下水量を約 9 割低減するなど、大きな洪水調節効果を発揮した。しかし、その後、ダムの空き容量が無くなる見通しとなつたため、2 度目のピークの終わり頃に異常洪水時防災操作に移行した。そのため、その後に発生した流入量の 3 度目のピーク時には、ほとんど洪水調節が行えない状態となつた。幸い、残流域からの流出のピークが洪水調節を行っていた 2 度目の流入量のピーク頃であり、3 度目の流入量ピーク時における残流域からの流出が比較的小さく⁴⁾、異常洪水時防災操作実施中の下流地点の水位は、2 度目のピーク時の水位と同水準となつたため、結果として効果的にダムを運用した形となつた。ただし、最後のピーク時における降雨がもう少し強かつたり、あるいは最後にもう一度まとまつた降雨が生じたりした場合には、ダムに空き容量の無い状態で流入量の最大ピークを迎えていた可能性があり、この点はよく吟味することが必要である。

3. ダム洪水調節操作の課題と対応策の方向性

以上の事例を踏まえた上で、特に大規模出水時における現状のダム洪水調節操作の課題と、その対応策の方向性について述べたい。

(1) 治水機能の再評価

今般の豪雨災害では、ダムが持つ洪水調節機能が決して無限ではないことが改めて浮き彫りになった。その意味で、ダムが持つ治水機能を再度適切に評価することが重要であると考えられる。まず、ダムの洪水調節容量が集水面積に照らして十分かどうかという点である。図-3 に、2014～2018 年に異常洪水時防災操作を実施したダムの相当雨量とその時の実績総雨量との関係を示す。グラフ上で実績総雨量が相当雨量の 2 倍、4 倍、8 倍となる点をそれぞれ直線で結んで併記している。平成 30 年 7 月豪雨で異常洪水時防災操作を実施したダムのうち、野村ダム、鹿野川ダムを含む 4 基のダムについては、相当雨量に対する実績雨量の比が 8 倍以上となっている。既往研究⁵⁾により、この比が 4 倍以上になるとダムの洪水

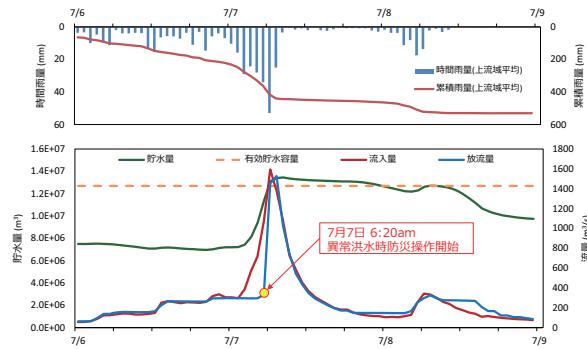


図-1 野村ダムの洪水調節操作実績（毎時データより作成）

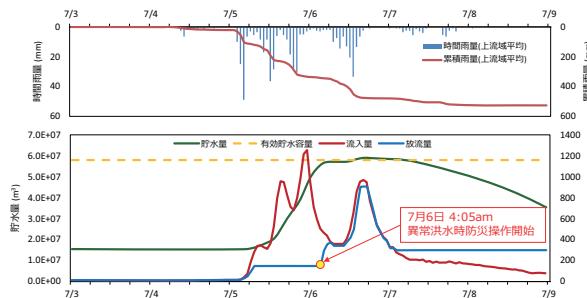


図-2 日吉ダムの洪水調節操作実績（毎時データより作成）

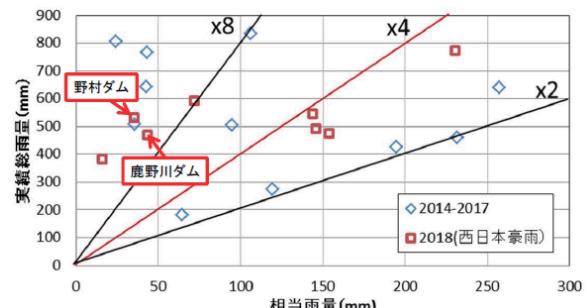


図-3 異常洪水時防災操作を実施したダムの相当雨量と実績雨量の関係

調節容量が不足していることが示されており、同比が 8 倍以上というのはそもそも相当雨量が極めて小さい。ダムによる洪水調節効果を十分発揮させるためには、集水面積に見合うだけの洪水調節容量が得られるよう、今後状況を改善すべきであると考えらえる。特に前線性の降雨を主に経験してきている流域では、今後気候変動等の影響に伴い外力が増大する可能性が懸念されることから、ダムの貯留能力が不足するところにあっては、まずはこれを向上させることが重要である。

なお、「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会」²⁾では、図-3 のような整理を参考に、今回異常洪水時防災操作を行ったダムを含む全国の国土交通省所管ダムが図-4、図-5 のように整理された。これにより、洪水調節容量を流域換算した相当雨量を用いた全国のダムの相対比較と、実績雨量に対する容量不足度が明確に示された。

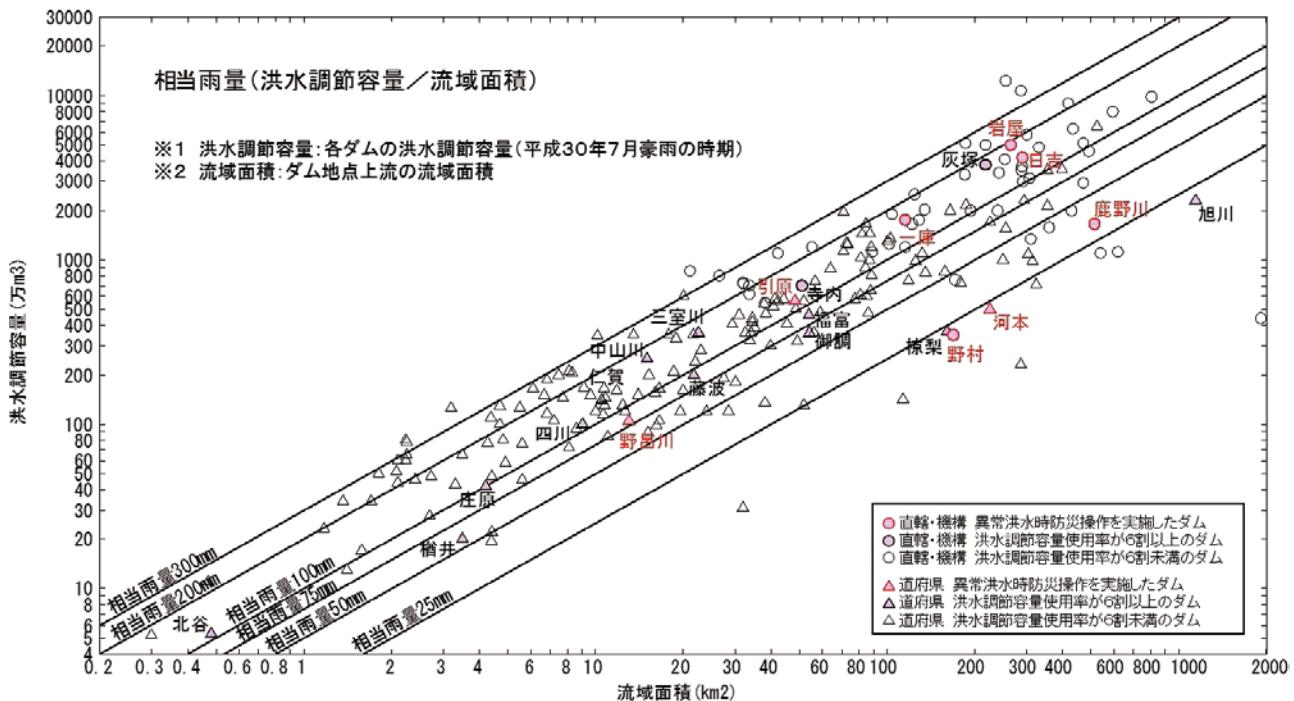


図4 國土交通省所管ダムの流域面積、洪水調節容量および相当雨量の関係²⁾

なお、今回の豪雨災害では、下流河川の整備が進んでいないなどの理由から、中小洪水を対象としてダム洪水調節操作を実施していたダムに多くの課題が生じている。このような操作を計画すると、洪水初期にダム容量を使いてしまい、大洪水時には洪水後期においてダム容量が不足する事態が増加する（異常洪水時防災操作の増加）。従って、暫定的な洪水調節ルールに基づいて運用されているダムにおいては、ダム容量が有限であることに鑑み、どの規模の洪水を対象の主眼とすべきか、ダムからの放流量を多少増やして大規模洪水に少しでも備えることができないか、流域全体での議論を再度行うことが重要である。なお、下流河川の疎通能力が低ければ、ダムの機能は半減してしまうので、ダムの機能向上のために河道整備など流域全体での対応が不可欠となる。

他方で、異常洪水時防災操作を実施したダムにおいても、下流河川の水位上昇を遅らせることで、自治体・住民などによる危機対応の時間を稼ぐことに貢献したほか、流木等の捕捉によって下流の水位上昇リスクを軽減した点など、ダムが持つ多面的な治水機能を評価することも重要であろう。

(2) ハード対策

ダムの洪水調節機能向上のためのハード対策としては、ダム再生（再開発）が重要である。ダムの嵩上げなどによる治水容量の強化、鹿野川ダムや天ヶ瀬ダムで設置が進められている洪水吐トンネルや鶴田ダムや長安口ダムで実施されている堤体開削などによる放流能力の向上が

重要な方策として考えられる。合わせて治水・利水間の容量再編や、休止されていた新設ダムの再開や新規ダムの必要性の議論も十分に検討する必要がある。

(3) ソフト対策

ハード対策により洪水調節能力を物理的に向上させる他に、実時間での降雨・流出予測を活用した事前放流操作の強化などが機動的にダムの治水機能を増大させる方法として挙げられる⁶⁾。予測情報の活用が不可欠であるため、降雨・流出予測精度の向上が鍵となる。近年、予測の不確実性を把握することができるアンサンブル予測情報を用いた事前放流の検討^{7,8)}も進んでおり、さらなる研究が期待されるところである。ただし、事前放流により貯水位を低下させても、低い貯水位でもまとまった量の放流ができるような設備が無ければ、結局洪水初期で十分に放流ができずに貯留してしまう。その意味でも、ハード対策として挙げた放流能力の向上は不可欠である。

(4) 異常洪水時防災操作を意識した情報伝達

今般の豪雨災害では、ダムの状態に関する情報がダム管理者から提供されても、事態の深刻性が自治体や住民に十分に伝わらない、あるいは伝わるのが遅れる、さらには伝わっても避難行動に結びついていないケースが見られた。そのため、それぞれのダムで情報伝達方法の現状を点検し、改善を早急に進める必要があると考えられる。特に、ダム管理者から、下流自治体を経て住民まで伝わるまでの情報伝達の流れの確実化・迅速化が求めら

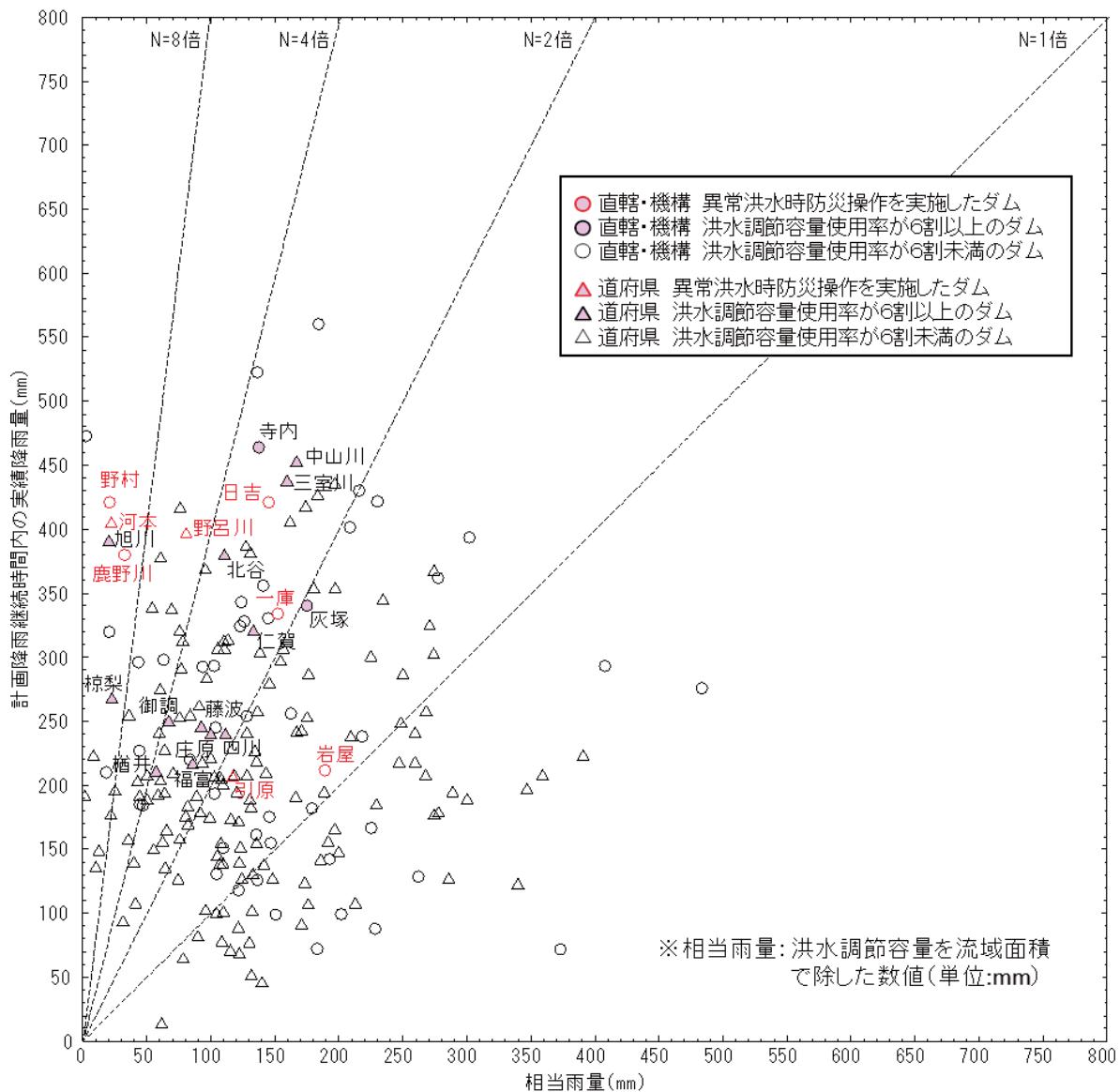


図-5 国土交通省所管ダムの相当雨量および計画降雨継続時間内の実績雨量の関係²⁾

れる。

ダム管理者による放流警報（サイレン、スピーカなど）に関しては、河川内の立ち入り者に対する警報に重点が置かれて、河道外の住居側に対して聞き取りにくい構造になっている場合（従来、苦情があつて意図的に住居側に聞こえにくくなっている場合あり）があつたり、ダムからの放流開始と、異常洪水防災操作開始が同じ警報モードになっており、危機感が伝わらなかつたりしたことが課題とされている。また、ダム直下流の河道区間に浸水想定（ハザードマップ）が設定されていない場合もあり、早期の整備が求められる。

さらには、避難に時間要する要介護施設などの施設管理者などに、クリティカルな情報をいかに的確に伝えるかが重要である。野村ダム下流のグループホームでは、自宅で防災無線の呼びかけを聞いた施設事務局長が、宿直担当者に急遽連絡を入れて入居者を避難させた結果、

放流開始直前に避難させることに成功したとの報告が行われている。

このように、今回の豪雨災害においては、特に、ダムの状態に関する情報提供について多くの課題が顕在化した。これに対しては、水害時の危機管理はダム管理者にすべてを任せのではなく、下流住民を含めて皆で行うものであるとの認識を高める工夫が必要である。特にダム現有治水能力を上回る超過洪水時に、どのような状況が起こり得るのか、あらかじめ想定した上で、防災訓練のような形で感覚を共有しておくことが重要である。

4. おわりに

本稿では、平成30年7月豪雨災害におけるダム治水操作の実施状況を概観しながら、大規模出水時における

ダム治水操作の効果と課題を考察しつつ、これらの課題を克服するための今後の対応策の方向性を述べた。なお、今後の対応策の方向性については、「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会」²⁾による提言にも記載されているので、合わせて参照されたい。

謝辞：本稿を取りまとめるにあたり、国土交通省河川環境課流水管理室より異常洪水時防災操作に関するデータの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁：平成30年7月豪雨（前線及び台風第7号による大雨等），2018.
- 2) 異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会：異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて（提言），2018，http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chousetsu_kentoukai/index.html. (2019年1月30日確認)
- 3) 異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会：異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて～「異常洪水の頻発化に備えたダ

ムの洪水調節機能に関する検討会」の提言～（参考資料），2018.

- 4) 角哲也：ダムの洪水調節効果と異常洪水時防災操作の課題、西日本豪雨災害の緊急報告会（日本学術会議公開シンポジウム・防災学術連携体緊急報告会）講演資料，2018.
- 5) 倉橋実、永谷言、川村育男、角哲也：超過洪水に対する既設ダムの治水機能評価と機能向上に向けた再開発手法の検討、土木学会論文集B1(水工学), 74(4), I_1357-I_1362, 2018.
- 6) 三石真也、尾関敏久、角哲也：WRFによる降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性検討、水文・水資源学会誌, Vol.24, No.2, 110-120, 2011.
- 7) 木谷和大、道広有理、野原大督、角哲也：ECMWFアンサンブル予測雨量の予測特性及びダム運用への活用に関する基礎的検討、土木学会論文集B1(水工学), 74(5), I_1321-I_1326, 2018.
- 8) Inomata, H., Kawasaki, M. and Kudo, S.: Quantification of the risks on dam preliminary release based on ensemble rainfall forecasts and determination of operation, J. Disaster Res., Vol.13, No.4, pp.637-649, 2018.

(2019.2.12受付)

DAM OPERATION FOR FLOOD CONTROL — CHALLENGES AND SOLUTIONS

Tetsuya SUMI, Yasuhiro TAKEMON and Daisuke NOHARA

In the torrential rain disaster in July 2018, heavy rain over a long period occurred in a wide area mainly in western Japan, and recorded floods occurred in various places. There was a catchment basin greatly contributing to the reduction of the flood water level of the downstream river by the flood control operation of the dam reservoir. Meanwhile, due to prolonged flood control, the flood control capacity of the dam is expected to be full, and some dams carried out the emergency spillway gate operation at the time of extreme flooding. In this paper, we outline the implementation status of the dam flood control operation in the heavy rain disaster, analyze the effect and problem, and describe the direction of countermeasures for these problems for large-scale flooding in the future.

由良川支川における氾濫災害の現地調査と再現計算

川池 健司¹・Herman Musumari²・中川 一³

¹ 京都大学准教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）
E-mail:kawaike.kenji.5n@kyoto-u.ac.jp

² 京都大学大学院学生 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail:hermusumari@gmail.com

³ 京都大学教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）
E-mail:nakagawa@uh31.dpri.kyoto-u.ac.jp

平成 30 年 7 月豪雨において、由良川の支川では樋門の閉鎖による氾濫が相次いだ。現地調査の結果、住宅地では浸水痕跡が最大で 2.7m に達する箇所が見られ、氾濫形態としては支川周辺の標高の低い箇所に浸水位がほぼ水平に湛水していたと予想される。数値解析の結果からは、由良川の水位上昇にしたがって、何らかのタイミングで樋門が閉鎖され、行き場を失った支川の洪水が周囲に氾濫したメカニズムが確認された。由良川の洪水位が支川下流端の水位を上回ったタイミングで樋門を閉鎖した解析を行ったところ、各地点の浸水深を精度よく再現することができた。この場合、樋門閉鎖直後の支川下流端の水位は由良川水位を大きく上回っており、水深の高い状態が長時間継続する結果になったことから、樋門を閉鎖するタイミングを遅らせていれば、最大浸水深を軽減することができた可能性も示唆された。

Key Words: inundation, field survey, numerical simulation, gate operation

1. はじめに

2018 年 6 月下旬から 7 月上旬にかけておもに西日本で発生した「平成 30 年 7 月豪雨」は各地に甚大な被害をもたらし、200 名を超える人的被害に達した。とくに、岡山県倉敷市真備町の浸水被害や、広島県内の土砂災害、愛媛県内の土砂災害や肱川水系のダムの異常洪水時防災操作などが注目を集めた。京都府を流れる由良川流域においても 7 月 5 日ごろから降雨量が増大し、由良川の水位が上昇し始め、由良川に流入する支川の周辺で浸水被害が発生した。

由良川本川はこれまでたびたび氾濫を引き起こし、沿川に甚大な被害をもたらしてきたため、由良川の両岸には越水を防止するための堤防が建設されてきた。支川が由良川本川に流入する箇所の多くは樋門が設置され、由良川の水位が上昇した際の逆流を防止するようになっている。しかし、今回浸水被害が発生した蓼原（たでわら）川のように、樋門は設置されているものの排水機場が設置されていないため、支川流域に降った降雨が排水されずに溢れて浸水を起こした河川が少なくない。

本研究では、蓼原川周辺における氾濫災害の状況を調

査した結果を報告するとともに、氾濫状況を数値解析によって再現し、樋門の操作による浸水状況への影響を検討することを試みる。

2. 蓼原川周辺の現地調査

(1) 蓼原川周辺の概要

蓼原川は、流域面積が約 3.2km²、流路延長 1.3km の由良川の左支川であり、京都府が管理する一級河川である。由良川との合流点には樋門が設置されているものの、排水機場は設置されていない。

(2) 現地調査

災害発生から 2 週間余りが経過した 7 月 22 日に、浸水被害の発生機構の確認と浸水痕跡等を記録すること目的として、蓼原川周辺の現地調査を行った。

図-1に浸水痕跡を計測した地点を、表-1にその浸水痕跡深を示す。表-1には、該当地点の国土地理院発行の基盤地図情報 標高モデル（5m）の値と、それから推定される浸水位をあわせて示す。



図-1 浸水痕跡の計測地点

表-1 各地点の浸水痕跡深
(地点番号は図-1の丸数字に対応)

地点	浸水痕跡深	5m DEM	推定浸水位
1	1.6m	12.5 m	14.1 m
2	2.3 m	11.8 m	14.1 m
3	1.7 m	12.3 m	14.0 m
4	2.6 m	11.4 m	14.0 m
5	1.6m	12.4 m	14.0 m
6	2.2 m	11.8 m	14.0 m
7	1.8 m	12.1 m	13.9 m
8	1.4 m	12.8 m	14.2 m
9	2.1 m	12.0 m	14.1 m
10	2.3 m	12.0 m	14.3 m
11	2.2 m	11.8 m	14.0 m
12	2.3 m	11.7 m	14.0 m
13	2.5 m	11.5 m	14.0 m
14	2.6 m	11.4 m	14.0 m
15	2.7 m	11.1 m	13.8 m
16	1.5 m	12.5 m	14.0 m

浸水域は、蓼原川、公手（くで）川、大谷川周辺からあふれた氾濫水により、由良川に沿った標高の低い住宅地ならびに京都丹後鉄道の軌道の南東側の水田地域に広がっている。住宅地で最も浸水深が大きかったところは2.7mに達しており、住宅の1階部分が水没していた（図-2）。国土地理院の基盤地図情報標高モデル（5m）の値と浸水痕跡深を加えた推定浸水位はおよそ14.0m前後



図-2 2.7mの浸水痕跡が見られた住宅



図-3 蓼原川樋門

となり、氾濫水は水位がほぼ水平な状態で湛水していたことがわかる。蓼原川、公手川、大谷川がそれぞれ由良川、宮川に合流する地点においては、樋門（図-3）はあ

るものの排水施設がないため、行き場を失った支川洪水があふれて氾濫したものと予想される。ただし、宮川より東側については、上野川が由良川堤防を通り抜けるカルバートに樋門がなく、由良川の水位上昇に伴い由良川の洪水がそのまま堤内地にあふれて浸水したものと考えられる。

3. 蓼原川周辺の氾濫現象の数値解析モデル

本節では、数値解析により、蓼原川とその周辺で発生した氾濫現象の再現計算を試みる。用いたモデルは、著者ら¹⁾と同様に、対象領域を上流部と下流部に分割し、上流部での流出解析ならびに洪水解析により洪水流量を解析し、それを境界条件として下流部の平面2次元氾濫解析を行うモデルである。ただし、本解析では土砂の流出・堆積は考慮しない。解析対象範囲は、上流部は蓼原川、公手川、大谷川の各流域、ならびに下流部は由良川堤防と宮川堤防に囲まれた範囲とする（図4）。

(1) モデルの概要

a) 上流部のモデル

上流部では、河道を抽出し、その河道区間をもとに斜面を流域分割する。斜面では、kinematic waveモデルにより流出流量を計算し、それを横流入として河道内の洪水流量を計算し、最終的に下流端における洪水流量の時間変化を出力する。

上流部の流出解析において用いた基礎式は下記のとおりである。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$q_s = \alpha_s h_s^m \quad (2)$$

ここに、 h_s ：斜面の水深、 q_s ：斜面上の単位幅流量、 r ：降雨強度、 α_s 、 m ：それぞれ係数で $\alpha_s = \sqrt{\sin \theta_s}/N_s$ 、 $m = 5/3$ であり、 θ_s ：斜面の勾配、 N_s ：斜面の等価粗度である。

河道の洪水流解析で用いた基礎式は、下記のとおりである。

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = q_s \quad (3)$$

$$q_r = \alpha_r h_r^m \quad (4)$$

ここに、 h_r ：河道の水深、 q_r ：河道の単位幅流量、 $\alpha_r = \sqrt{\sin \theta_r}/N_r$ であり、 θ_r ：河道の勾配、 N_r ：河道の等価粗度である。

図4に、上流部において用いた河道と分割した斜面を示す。ここでは、国土地理院の基盤地図情報標高モ



図4 上流部の流域分割と氾濫解析対象エリア

ル（5m）を用いて流域分割した。蓼原川、公手川、大谷川の各下流端で得られた洪水流量を、下流部の平面2次元氾濫解析の流入境界条件として与える。

b) 下流部のモデル

下流部では、蓼原川などの河道部分を含めた対象領域を三角形非構造格子に分割する。下流部の氾濫解析に用いた基礎式は下記のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \quad (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (7)$$

ここに、 u, v : x, y 方向の氾濫流の流速、 $M (=uh), N (=vh)$: x, y 方向の氾濫流の流量フラックス、 z_b : 地表面の標高、 τ_{bx}, τ_{by} : x, y 方向の底面せん断応力、 ρ : 泛濫水の密度、 g : 重力加速度である。 τ_{bx}, τ_{by} は、マニング則を用いて、それぞれ下記のように表される。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (8)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (9)$$

ここに、 n : マニングの粗度係数である。

図4に示す範囲を対象として、三角形非構造格子に分割した。格子分割の際には、蓼原川、公手川、大谷川の河道のほか、国道175号線と京都丹後鉄道の軌道が周囲よりも高い連続盛土構造物となっているため、境界を抽出して考慮した。この各解析格子に、国土地理院の基盤地図情報標高モデル（5m）を用いて標高を与える。なお、河床高は現地調査で簡易に計測した掘り込み深さとして、蓼原川は周辺地盤より1m（蓼原橋より上流）または3m（蓼原橋より下流）、公手川ならびに大谷川は周辺地盤より1m低い標高を各河川格子に与えた。国道175号線と京都丹後鉄道の軌道の標高は、国土地理院の

基盤地図情報標高モデル（5m）の値をそのまま与えるが、河川が盛土を横断する際は河川の標高を反映し、ボックスカルバートなどはここでは考慮しないこととする。

(2) 解析条件

今回の浸水の主要な原因是、各支川下流端にある樋門の閉鎖である。しかし、それぞれの樋門がどのタイミングで閉鎖されたのかに関するデータは公表されていないため、樋門の開閉状態を仮定する必要がある。そこで本研究では、以下の3ケースの解析を行った。

- ケース 1：樋門がつねに開いている。ただし、由良川および宮川の水位は十分に低く、蓼原川、公手川、大谷川の洪水はマニングの等流公式に従い下流端から領域外に流出すると仮定。
- ケース 2：樋門がつねに閉鎖している。
- ケース 3：樋門が開いた状態から始まり、由良川の水位が蓼原川水位を越えた時刻に3ヶ所の樋門を同時に閉鎖し、計算終了時刻まで閉鎖したままとする。

なお由良川の水位の時間変化は、国土交通省の水文水質データベースから得た天津上と波美の水位を距離に応じて線形補間して求める。

4. 沼澤現象の数値解析結果と考察

(1) 流出解析結果

図-5に、解析に用いた降雨のハイエトグラフと、上流部の流出解析による蓼原川、公手川、大谷川の洪水流量のハイドログラフを示す。降雨強度には、アメダスの坂浦地点の10分ごとの値を用いる。また、計算開始時刻は7月6日の午前8時である。7月6日以降、降雨はいくつかのピークがみられるが、いずれの河川においても7月7日0時ごろの降雨によって突出した流量のピークが現れている。3河川の流域面積に応じて、蓼原川のピーク流量は約36m³/s、公手川と大谷川はほぼ同じで6m³/s

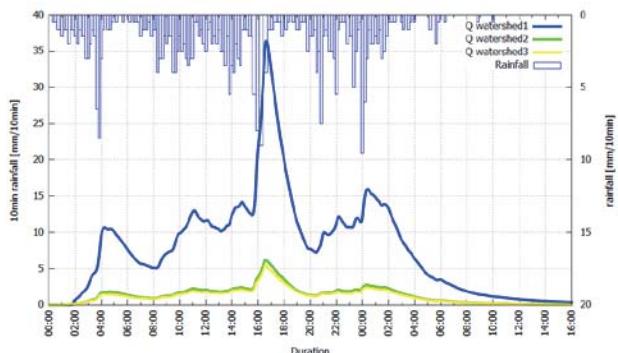


図-5 解析に用いた降雨のハイエトグラフと
蓼原川、公手川、大谷川の洪水流量ハイドログラフ

程度であった。この洪水流量ハイドログラフを境界条件として、下流部の氾濫解析を行った。

(2) ケース 1（樋門が開いている場合）

ケース1の結果、最大浸水深を図-6に示す。各河川の流下能力が不足しており周辺に洪水があふれているものの、浸水深は0.75m未満となっている。とくに京都丹後鉄道の軌道より北西側の浸水は、ボックスカルバートを考慮すれば南東側の水田地帯に流下して浸水が軽減されると考えられる。蓼原川の両岸と大谷川周辺の京都丹後鉄道の軌道より北西側の浸水域を除けば、浸水域はいずれも水田地帯であり、壊滅的な浸水深には至っていない。このことから、この領域に降った降雨はややまとまった量ではあったが、それ自体で甚大な浸水被害を引き起こすものではなく、由良川の水位が十分に低く樋門を開鎖していなければ大きな被害には至っていなかつたことを示している。

(3) ケース 2（樋門が閉鎖している場合）

ケース2の最大浸水深を図-7に示す。計算開始から樋門が閉鎖されているため、各河川の洪水がすべて領域内に貯留される結果となり、浸水深がかなり大きくなっている。京都丹後鉄道軌道の南東側の水田地帯で浸水深が4m程度に達しているほか、山際近くの標高の高い市街地にまで浸水域が及んでいる。第2節で述べた現地調査の対象範囲であった蓼原川両岸の住宅地の浸水深は2m程度、蓼原川と公手川の間にある住宅地の浸水深は3m程度となっている。これらの浸水深は、表-1に示した実測の浸水深よりも明らかに大きい値となっている。このことから、実際の樋門操作は、降雨の降り始めである7月6日8時の時点から閉鎖されていたのではなく、支川からの初期の洪水は由良川に排水され、由良川水位の上昇にしたがって何らかのタイミングで樋門が閉鎖された

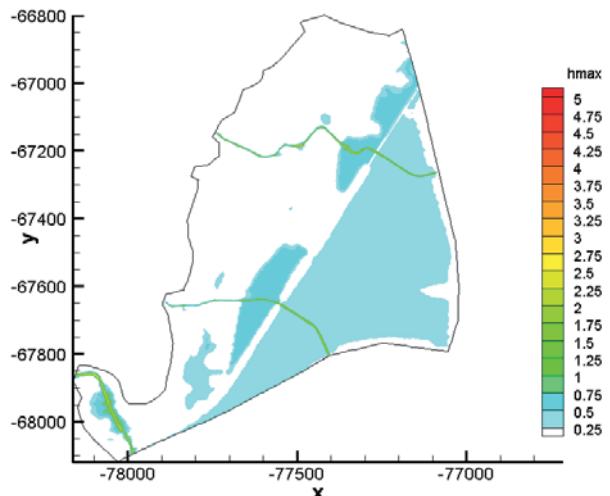


図-6 樋門が開いている場合の最大浸水深

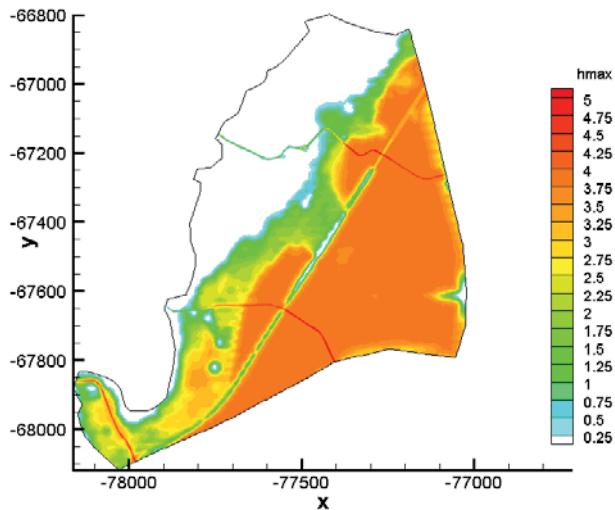


図-7 樋門が閉鎖している場合の最大浸水深

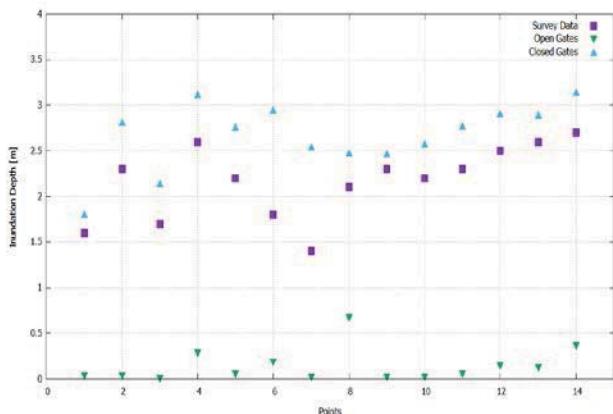


図-8 実測浸水深とケース 1,2 の最大浸水深との比較

と予想される。

図-8 に、現地調査による実測浸水深とケース 1 とケース 2 の最大浸水深との比較を示す。これより、実測浸水深と比較して、ケース 1 ではほとんど浸水が現れず、ケース 2 では過大評価となっていることがわかる。

(4) ケース 3 (樋門が由良川水位に応じて閉鎖する場合)

蓼原川が合流する地点における由良川の線形補間洪水位と、ケース 1 における蓼原川の下流端格子における水位との比較を図-9 に示す。計算開始後は蓼原川の下流端格子の水位が高い状態が続くものの、計算開始 12 時間後に由良川の線形補間洪水位が上回る。降雨の空間分布は一様ではないものの、集水域の小さい蓼原川は降雨のピークに対する応答が早く、降雨ピークの直後に水位のピークが現れるが、流域面積が比較的大きい由良川はそれよりさらに 10 時間ほど遅れて水位のピークが現れていることがわかる。ケース 3 では、樋門が開いている間はケース 1 と同様に等流公式に従って蓼原川洪水を流出させるが、由良川の洪水位が蓼原川水位を上回った計算開始 12 時間後に 3ヶ所の樋門が同時に閉鎖されたと仮

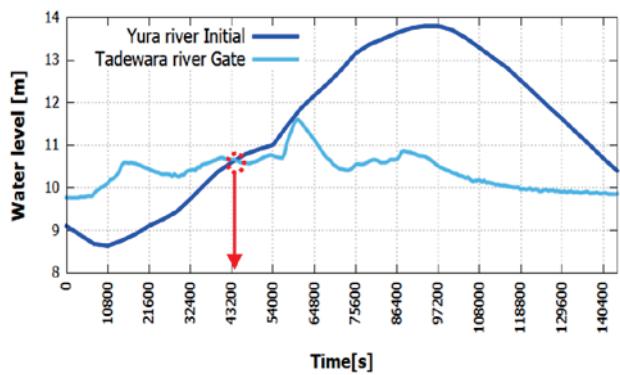


図-9 蓼原川下流端水位と由良川洪水位の比較
(赤丸の時刻が樋門閉鎖のタイミングを示す)

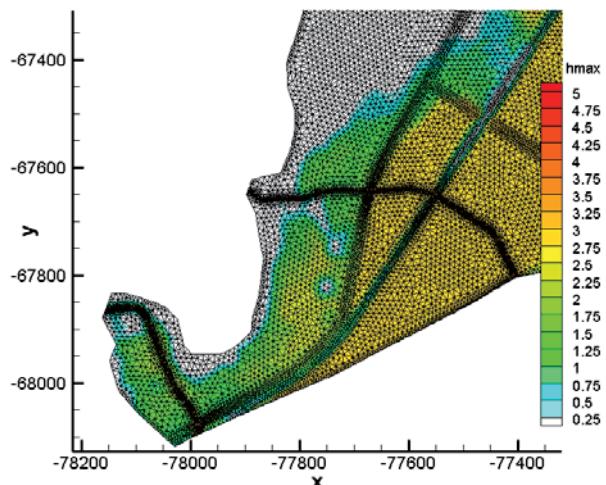


図-10 由良川水位に応じて樋門を閉鎖した場合の最大浸水深

定して、蓼原川の洪水が排水されなくなる条件で計算を行った。なお、一度閉鎖した樋門は計算終了時刻まで閉鎖されたままとする。

図-10 に、領域南西部の蓼原川および公手川周辺におけるケース 3 の最大浸水深を示す。ケース 2 と比較して浸水域がやや狭くなり、浸水深は全体的に減少していることがわかる。蓼原川と公手川の間の住宅地の浸水深は最大で 2.5m 程度となっている。実測の浸水深とケース 3 の最大浸水深との比較を図-11 に示す。これによると、ケース 3 では浸水深の傾向がよく再現できており、精度よく再現できている地点があるものの、多くの地点において実測浸水深よりも一律に 10~30cm 程度小さい結果となっている。したがって、実際の樋門は図-9 に示す計算開始 12 時間後よりもやや早いタイミングで閉鎖されていたと考えられる。

図-12 は、蓼原川の下流端格子の水深の時間変化を示している。樋門が閉鎖される時刻までは、ケース 1 とケース 3 の水深は同じ値で推移するが、樋門が閉鎖されるとケース 3 の水深は瞬時に上昇し、それ以降は高い水深が長時間継続することになる。とくに樋門閉鎖直後の時

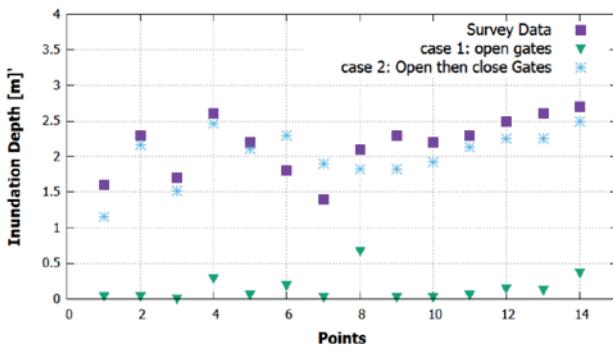


図-11 実測浸水深とケース3の最大浸水深との比較

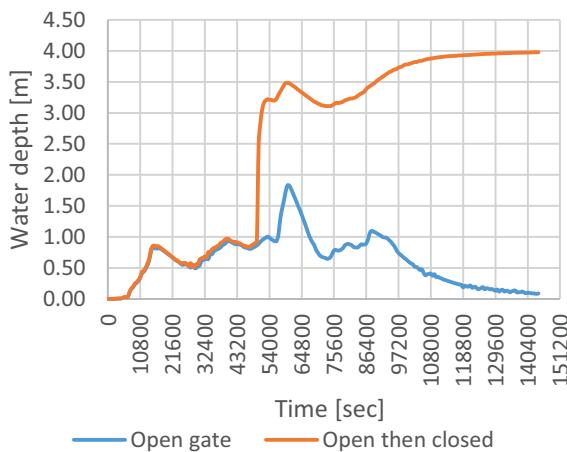


図-12 ケース1とケース3における蓼原川下流端格子の水深

間帯は、蓼原川下流端格子の水位が由良川の洪水位を上回っており、その後に蓼原川洪水のピークの時間帯を迎えることからも蓼原川周辺の浸水を急激に増大させる原因になったとも考えられる。つまり、蓼原川洪水のピークが経過した後など、樋門閉鎖のタイミングをもう少し遅らせていれば、由良川洪水の堤内地への逆流は発生するものの堤内地の水位上昇は緩やかに起こると予想され、

結果的には最大浸水深がちいさくなっていた可能性も考えられる。

将来的に降雨の予測精度が向上し、あらゆる支川からの洪水流出予測をリアルタイムで追跡することが可能になれば、最適な樋門閉鎖のタイミングを判断することも技術的に可能になると期待される。

5. おわりに

本研究では、7月豪雨で甚大な浸水被害が発生した由良川支川に着目し、現地調査と数値解析によって被害の発生機構を明らかにした。

現地調査では、各支川が由良川に合流する地点の樋門の設置状況を調査し、周囲の浸水痕跡深を計測して浸水状況を調べた。その結果、住宅地の中には最大で3m近い浸水被害に見舞われた地点もあることなどがわかった。

樋門の閉鎖のタイミングを仮定した数値解析では、由良川の水位上昇に伴って何らかのタイミングで樋門が閉鎖されたため、支川の洪水が行き場を失い浸水被害が生じたことが明らかになった。解析結果と浸水痕跡深の比較から、実際には由良川水位が支川の水位を上回ったのとほぼ同時刻に樋門が閉鎖されたことがわかったが、樋門の運用の仕方によっては最大浸水深を軽減できた可能性も示唆された。

参考文献

- 1) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 中井 勉: 流出土砂が急傾斜都市氾濫解析に及ぼす影響, 水工学論文集, 第45巻, pp.883-888, 2001.

FIELD SURVEY AND NUMERICAL SIMULATION OF FLOOD INUNDATION FROM TRIBUTARIES OF YURA RIVER

Kenji KAWAIKE, Herman MUSUMARI and Hajime NAKAGAWA

Severe inundation occurred around tributaries of Yura river due to the gate closures at the event of Heavy Rainfall in July 2018. We conducted a field survey and found the maximum inundation depth of 2.7 m in the residential area. From the measurement of the inundation depth, it is supposed that the inundation water was stored in low-elevation areas with a horizontal water level. From the numerical simulation, inundation occurred in such a way that the gate was closed along with the water level rise of Yura river, and the flood water of the tributaries had lost the outlet and inundated in low-elevation areas. If the gate was closed at the moment when the water level of Yura river exceeded the water level of the tributary, the simulated depth agreed well with the measured depth at each point. However, in this case, the water level of the tributary suddenly increases and keeps high for a long time, which implies the possibility of decrease of the maximum inundation depth with a late closure of the gate.

情報・避難・災害対応

豪雨災害について考えるための FACP モデル

矢守 克也¹・竹之内 健介²・大西 正光³・佐山 敬洋⁴・本間 基寛⁵

¹京都大学教授 防災研究所 大災害研究センター（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail:yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

²京都大学特定准教授 防災研究所 気象・水象災害研究部門（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail:takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

³京都大学准教授 防災研究所 大災害研究センター（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp

⁴京都大学准教授 防災研究所 社会防災研究部門（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: sayama.takahiro.3u@kyoto-u.ac.jp

⁵京都大学特任助教 防災研究所 気象・水象災害研究部門（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: honnam@jwa.or.jp

豪雨災害については、これまで、多くの被害を出した事例に研究が集中してきた。しかし、今後の防災・減災対策を考えれば、その他の事例にも注目を向ける必要がある。本研究では、この目的のために、まず、豪雨災害の事例を4つのタイプ—「致命的（Fatal）」「死活的（Critical）」「潜在的（Potential）」「偶発的（Accidental）」—に大別するためのFACPモデルを提示した（表1）。その上で、今後注目すべきは、災害現象が顕在化せず人的被害も生じなかつたが、「致命的」や「死活的」と同等の災害現象の発生が十分に考えられた「潜在的」な事例であることを指摘した。最後に、アンサンブル予測等を活用して、「潜在的」な事例を客観的かつ定量的に同定するための試みの概要について紹介した。

Key Words: FACP model, flood disaster, potential case, ensemble prediction

1. FACP モデル

表1に示したFACPモデルは、豪雨災害の事例を分類するために考案したモデルである。また、図1は、一定期間内に生じる複数の豪雨災害をFACPモデルの観点から時系列で位置づけた模式図である。

表1 豪雨災害について考えるためのFACPモデル

災害現象が顕在化 大規模な浸水、土砂災害などが発生		災害現象が顕在化せず 左のような事態には至らず
人の 被 害 あり	<p>【フェイタル=FATAL】 「致命的な、破壊的な」</p> <ul style="list-style-type: none">西日本豪雨（2018年）における倉敷市真備町、吳市などもちろん重要。牛山素行氏（静岡大学教授）の犠牲者調査などただし、ここに世間の目（研究、報道）が集中するくらいも。	<p>【アクシデント=ACCIDENTAL】 「偶発的、不慮の」</p> <ul style="list-style-type: none">都賀川事故（2008年）、玄倉川事故（1999年）など該当するケースは少ないはず。他に、田畑、用水路の点検中の犠牲などのケースも該当？
人の 被 害 なし	<p>【クリティカル=CITICAL】 「死活的な、決定的な」</p> <ul style="list-style-type: none">九州北部豪雨（2017年）における朝倉市平陵地区、西日本豪雨における京丹波町上乙見地区などいわゆる「成功事例」。ただし、偶然の要素が併存し、それが生死（死活）を決定づけている場合も。当事者が自覚している「ヒヤリハット」。	<p>【ポテンシャル=POTENTIAL】 「潜在的な、隠に隠れた」</p> <ul style="list-style-type: none">西日本豪雨や2013年台風18号（史上初の特別警報）における京都府桂川下流域ほか次の災害で「フェイタル」になりかねない潜在的予備軍一部の行政担当者、専門家などを除いて「ヒヤリハット」などの意識（自覚）がない点が課題

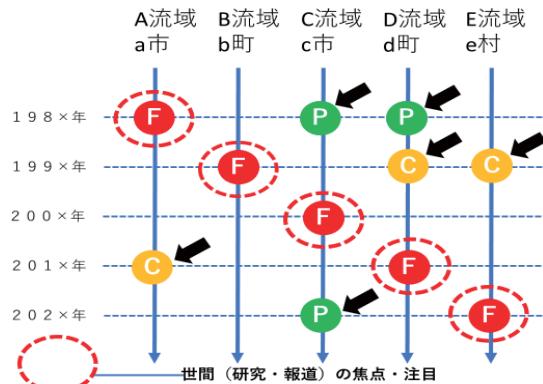


図1 豪雨災害群をFACPモデルの観点から定位した模式図

「致命的（F）」な事例は、災害現象が顕在化し、人的被害が生じた事例（地区）のことである。従来の防災研究の多くは、このタイプに（のみ）注意を向けてきた。「死活的（C）」な事例は、「致命的（F）」と同等の災害現象が顕在化したもの、人的被害が生じなかつた事例（地区）のことである。この種の事例は、通常、「致命的（F）」よりも注目されない。しかし、減災のためのヒントをより直接的な形で含むことが多いことを

考えれば、きわめて重要である。ここで、死活（生死）を決定づけた要因を、何らかの意図的な選択や判断の中に求めようとするのが、いわゆる「成功事例」分析であるが、偶発的な要素の介在も見逃せない。また、避難当事者が、多くの場合、それが「ヒヤリハット」であったと自覚・意識している点も、このタイプの特徴である。

「潜在的（P）」な事例は、災害現象が顕在化せず、人的被害も生じなかつたが、「致命的」や「死活的」と同等の災害現象の発生が十分に考えられた事例（地区）である。しかし、この事実は、専門家やごく一部の住民を除いてほとんど自覚・意識されていない。上で用いた「ヒヤリハット」を使って表現すれば、「ヒヤリハット」にすらなっていない点に特徴がある。

「偶発的（A）」は、災害現象が顕在化しなかつたにもかかわらず、人的被害が生じた事例（地区）である。たとえば、川の様子を（あえて）見に行った人があやまって（氾濫を起こしているわけではない）河川に転落して犠牲になるような場合である。

「偶発的」は、他のタイプに比べて該当例が圧倒的に少ないので、ここでは割愛し、議論を「致命的」、「死活的」、「潜在的」の3つのタイプに絞り、中でも、從来重視されてこなかつたが、防災・減災対策上、今後、十分に検討すべき「潜在的」に注目する。

2. 「潜在的」な事例の重要性とその同定

たとえば、2013年台風18号の際、京都市内の桂川は危機的な状況にあつた。流域全体での巧みなダム操作と水防団の土嚢積みなどの草の根の努力とが噛み合つて、辛うじて大難は逃れた。問題なのは、一部の専門家を除いて、この事実が知られていないことである。こうした事例こそ、次に「致命的」な事例になりかねない潜在的予備軍なのにである。

どうしてこうなるのか。「致命的」では多くの犠牲者が出ているため、「死活的」も一種の成功事例だから、大きな関心が向けられる。他方、「潜在的」では、幸い

なことに犠牲者は出でていないし、そもそも災害現象が顕在化していない。だから、それは、多くの場合、スルーされてしまう。時間を逆転させて表現すれば、こうなる。たとえば、真備町や広島市安芸区でも、あのようなことが起る前に、「潜在的」にそうなっていた歴史、辛うじて難を逃れていたケースがあったはずだ。しかし、私たちは、そのときに「致命的」になっていた別の事例に気をとられて、そこに注意を払つてこなかつたのだ。

筆者らの研究チームの取り組みは、まずは、ここで言う「潜在的」な事例を、より客観的かつ定量的に同定しようとする試みである。「可能性がある」だけであれば、無数の「潜在的」事例を指摘できる。「この豪雨事例では、この地域で特にポテンシャルが高かった」と限定できなければ、実践的な知見にならない。

分析対象としたのは、2018年7月の西日本豪雨である。第1に、大きな被害を実際に出した地域（「致命的」）を参照点として設定した上で、そうした地域と同等の降雨が十分にあり得た地域を、アンサンブル予測の結果から推定した¹⁾。第2に、そうした地域に、実際に降った雨量よりも多い、しかしアンサンブル予測の結果に基づけば、十分に蓋然性の高い雨を降らせたときの河川流出量を推定し、氾濫の可能性を精査した²⁾。さらに、氾濫の可能性があつた地区で、地域住民を対象としたアンケート調査を実施し、災害発生の可能性（ポテンシャル）に対する住民の意識について調査した³⁾。

参考文献

- 1) 本間基寛他, アンサンブル予測を利用した平成30年7月豪雨のポテンシャル評価, 京都大学防災研究所平成30年7月豪雨調査研究報告書, 2018.
- 2) 佐山敬洋他, 平成30年7月豪雨における洪水の潜在性評価に向けた広域アンサンブル流出解析, 京都大学防災研究所平成30年7月豪雨調査研究報告書, 2018.
- 3) 竹之内健介他, 京都市伏見区下鳥羽地区における水害ポテンシャルに対する意識調査, 京都大学防災研究所平成30年7月豪雨調査研究報告書, 2018.

(2019.2.12受付)

“FACP MODEL” TO BRING MORE ATTENTION TO POTENTIAL FLOOD DISASTER CASES LATENT UNDER OVERTLY DAMAGED CASES

Katsuya YAMORI, Kensuke TAKENOUCHI, Masamitsu OHNISHI,
Takahiro SAYAMA, and Motohiro HONMA

We proposed “FACP Model” for classifying flood disaster cases into 4 types, including “potential cases” with minor damages, which, however, have high potential to be suffered more severely. “Potential case” is worth being investigated more thoroughly, rather than “fatal cases,” in which we found more casualties, because a “potential case” is a candidate for the next “fatal case.” This study outlines how we can identify “potential cases” by using ensemble prediction of heavy rain fall, river run-off prediction, and local inhabitants’ awareness for potentiality of river flooding.

アンサンブル予測を利用した 平成 30 年 7 月豪雨のポテンシャル評価

本間 基寛¹・佐山 敬洋²・竹之内 健介³・大西 正光⁴・矢守 克也⁵

¹ 京都大学特任助教 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: honmam@jwa.or.jp

² 京都大学准教授 防災研究所 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: sayama.takahiro.3u@kyoto-u.ac.jp

³ 京都大学特定准教授 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

⁴ 京都大学准教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp

⁵ 京都大学教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

平成 30 年 7 月豪雨では西日本を中心に広域で甚大な被害が発生したが、災害現象が顕在化しなかった地域においても記録的な大雨が降ることで同様の被害が発生した可能性が十分に考えられる。本研究では、当時のアンサンブル降雨予測状況を検証して、豪雨災害の蓋然性や潜在性の評価を行った。その結果、広域かつ同時多発的に土砂災害や河川氾濫が発生した中国・四国地方では、豪雨の前々日夜には過去 10 年間の最大値を大きく超える豪雨となる蓋然性が極めて高かったとともに、近畿地方においても記録的な大雨となり被害発生の潜在性が十分にあったことを示した。

Key Words: ensemble forecast, potential evaluation, provability evaluation, FACP model

1. 降雨予測から見た FACP モデル

矢守ら¹⁾が提唱する「FACP モデル」では、災害現象が顕在化せず、人的被害も生じなかつたが、「致命的 (Fatal)」や「死活的 (Critical)」と同等の災害現象の発生が十分に考えられた事例を「潜在的 (Potential)」と位置付けている。

これまでの災害研究や災害報道では、災害現象が顕在化した地域での人的被害の有 (F) 無 (C) やその要因の分析に科学的及び社会的な関心が向けられるものの、災害現象が顕在化しなかつた「潜在的 (P)」地域では多くの場合において「何事もなかつた」かのように時が経過してしまい、その時の防災対応行動について振り返りがなされない。本来であれば、この潜在的事例を教訓に次に起こるであろう致命的事例に備えた対応を行わなければならぬが、潜在的事例の当事者にはそのような意識がないのが現状であろう。

一方で、豪雨災害を例にとった場合、どのような降雨が潜在的事例であったのかを同定するためには、降雨の実況・予測状況やそれらに伴う防災気象情報、河川水位

等の状況を精査する必要がある。複数の数値予報結果を統計処理し、そこから有用な予測情報を得るアンサンブル予報を活用することで、災害現象が顕在し得るような降雨の潜在性、蓋然性を客観的、定量的に表現することが可能である。

本研究では、西日本を中心に広域で甚大な被害が発生した平成 30 年 7 月豪雨を対象に、当時のアンサンブル降雨予測状況を検証し、豪雨災害の蓋然性をどの程度提示することができていたのか、また実際には災害現象が顕在化しなかつた地域ではどの程度の「潜在性」があつたのかを示す。

2. 高解像度アンサンブル雨量予測情報

本研究では、ECMWF (欧州中期予報センター) のアンサンブル降雨予測データ 51 メンバ (25km メッシュ、3 時間単位) を元に、本間ら²⁾が開発した統計的ダウンスケーリング手法によって 1km メッシュ化した高解像度アンサンブル雨量予測情報を利用した。

3 平成 30 年 7 月豪雨の蓋然性・潜在性評価

(1) 平成 30 年 7 月豪雨の状況

平成 30 年 7 月豪雨では、西日本を中心に広範囲で長時間にわたる記録的大雨となり、とりわけ広島県、岡山県、愛媛県では土砂災害や河川の氾濫による甚大な被害が発生した。

中国・四国地方と近畿地方での平成 30 年 7 月 4 日 21 時～7 日 21 時のレーダー解析雨量 72 時間積算値を図-1 及び図-2 の左図にそれぞれ示す。四国の高知県・徳島県境付近で 1,500 mm 超の大雨となっている。また、同時間帯の 72 時間積算値についてレーダー解析雨量 72 時間積算値の既往最大値（レーダー解析雨量が 1 km メッシュ化された平成 18 年 5 月以降の最大値）との比率を図-1 及び図-2 の中図にそれぞれ示す。甚大な被害が発生した広島県、岡山県、愛媛県では、72 時間積算値の値そのものは多雨地域の高知県、徳島県に比べて小さいが、既往最大比は広い範囲で 150% 超となっており、これらの地域としては記録的な降雨となったことがわかる。

(2) 平成 30 年 7 月豪雨のアンサンブル予測結果

7 月 4 日 21 時初期値アンサンブル予測での中国・四国地方と近畿地方の既往最大超過確率を図-1 及び図-2 の右図にそれぞれ示す。

図-1 右図に示すように、広島県、岡山県、高知県では、アンサンブル雨量予測において 72 時間積算値が既往最大を超過しているメンバ数の割合（超過確率）が 80% 超となっている地域がみられる。このことからも、甚大な被害が発生した 7 月 6 日夜の前々日の時点では、ここ 10 年間では最大の大雨となる蓋然性が極めて高いことが予測できていたといえる。

一方、図-2 右図に示すように、近畿地方北部においてもアンサンブル雨量予測 72 時間積算値が既往最大を超過する確率が 50% 以上の地点が広く広がっており、京都府において多くの地点で既往最大超過確率 30% 以上となっている。図-2 中図を見ると、桂川の流域である京都府内では、既往最大値を超過する 72 時間雨量となっているところがあることがわかる。今次豪雨において、桂川流域では日吉ダムによる洪水調節の効果もあって河川氾濫の発生を回避することができたが、甚大な浸水被害が発生する可能性（潜在性、ポテンシャル）が十分にあったと言える。

表-1 及び表-2 に、中国・四国地方と近畿地方でのアンサンブル雨量予測 72 時間積算値の既往最大超過確率区分別の当該メッシュ数と実績値での超過割合を示す。例えば、超過確率が 60-80% の区分では、そのように予測されたメッシュのうち実際に 60-80% の割合で既往最大を超過することが期待されることから、「実績値での超

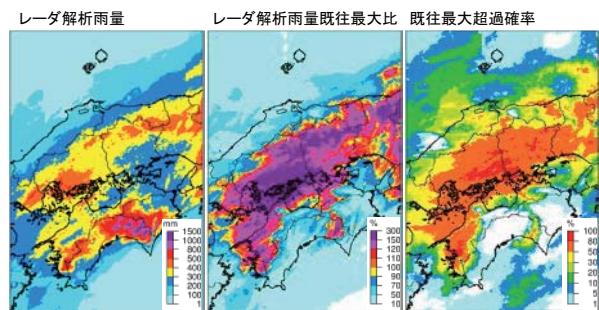


図-1 中国・四国地方でのレーダー解析雨量 72 時間雨量（4 日 21 時～7 日 21 時、左図）と既往最大比（中図）、4 日 21 時初期値アンサンブル予測での既往最大超過確率（右図）

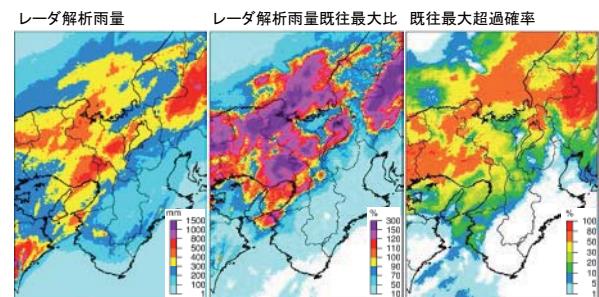


図-2 近畿地方でのレーダー解析雨量 72 時間雨量（4 日 21 時～7 日 21 時、左図）と既往最大比（中図）、4 日 21 時初期値アンサンブル予測での既往最大超過確率（右図）

表-1 中国・四国地方でのアンサンブル雨量予測 72 時間積算値の既往最大超過確率区分別の当該メッシュ数と実績値での超過割合

超過確率区分 (%)	(A)超過確率区分該当メッシュ数	(B)閾値超過メッシュ数	実績値での超過割合 (B)/(A)	超過確率区分該当メッシュ割合 (A(%))
0.0- 20.0:	85767	1152	1.3	60.1%
20.0- 40.0:	20022	4382	21.9	14.0%
40.0- 60.0:	16804	11969	71.2	11.8%
60.0- 80.0:	17237	16766	97.3	12.1%
80.0-100.0:	2970	2963	99.8	2.1%

表-2 近畿地方でのアンサンブル雨量予測 72 時間積算値の既往最大超過確率区分別の当該メッシュ数と実績値での超過割合

超過確率区分 (%)	(A)超過確率区分該当メッシュ数	(B)閾値超過メッシュ数	実績値での超過割合 (B)/(A)	超過確率区分該当メッシュ割合 (A(%))
0.0- 20.0:	59160	1209	2.0	58.7%
20.0- 40.0:	15182	6802	44.8	15.1%
40.0- 60.0:	15482	10769	69.6	15.4%
60.0- 80.0:	8157	6638	81.4	8.1%
80.0-100.0:	2819	2561	90.8	2.8%

過割合(B)/(A)」はこの区分内の値になることが望ましい。中国・四国地方、近畿地方ともに、多くの超過確率

区分で実績値での超過割合が区分内あるいはその前後の値になっており、概ね予測どおりの結果となったことが示唆される。

4 まとめと今後の展望

本研究では、平成 30 年 7 月豪雨でのアンサンブル降雨予測状況を検証し、記録的豪雨の蓋然性及び潜在性の評価を行った。その結果、広域かつ同時多発的に土砂災害や河川氾濫が発生した中国・四国地方では、豪雨の前々日夜には過去 10 年間の最大値を大きく超える豪雨となる蓋然性が極めて高いことを示していたとともに、近畿地方においても記録的な大雨となり大規模な浸水被害発生の潜在性が十分にあったことを示すことができた。

今後は、他のエリアや降雨継続時間についても検証するとともに、今次豪雨以外の豪雨事例についても検証を

行い、豪雨発生の潜在性の特性や潜在性を提示することが不得意な現象などについて調査を進める予定である。

参考文献

- 1) 矢守克也、竹之内健介、大西正光、佐山敬洋、本間基寛：豪雨災害について考えるための FACP モデル、京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査研究報告書、2019.
- 2) 本間基寛、増田有俊、道広有理：統計的ダウンスケーリング手法を用いた高解像度アンサンブル雨量予測情報の開発、第 35 回日本自然災害学会講演概要集、pp.45-46、2016.

POTENTIAL EVALUATION OF HEAVY RAIN IN JULY 2019 USING ENSEMBLE FORECAST

Motohiro HONMA, Takahiro SAYAMA, Kensuke TAKENOUCHI, Masamitsu OHNISHI and Katsuya YAMORI

In the heavy rain in July 2018, a great damage occurred in the wide area mainly in western Japan, but even in the area where the disaster phenomenon did not become apparent, there was a possibility that the similar damage occurred. In this study, we examined the ensemble precipitation prediction at that time, and evaluated the probability and potentiality of heavy rainfall disaster. As a result, it was shown that the probability that heavy rain will be greatly exceeded the maximum value of the past 10 years was extremely high in Chugoku-Shikoku district, and that the potential of heavy rainfall and disaster was enough high in Kinki district.

平成 30 年 7 月豪雨における洪水の潜在性評価 に向けた広域アンサンブル流出解析

佐山 敬洋¹・本間 基寛²・竹之内 健介³・大西 正光⁴・矢守 克也⁵

¹ 京都大学准教授 防災研究所 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: sayama.takahiro.3u@kyoto-u.ac.jp

² 京都大学特任助教 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: honnam@jwa.or.jp

³ 京都大学特定准教授 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

⁴ 京都大学准教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp

⁵ 京都大学教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

平成 30 年 7 月豪雨時の近畿地方は、7 月 5 日から断続的に大雨が降ったものの、一部の地域を除いては大規模な浸水被害を免れた。ただし、もし雨域がずれていたり、降雨が継続していれば、近畿地方でも大災害に至った可能性がある。本報は、このような状況を豪雨災害の潜在的な事例と位置付けたうえで、アンサンブル雨量予測情報と広域の分布型水文モデルを用いて、洪水流出の潜在性について議論した。流出解析の結果、由良川支川など今回災害が発生した中小河川では 51 アンサンブルのうち 1~2 位に相当する程度の流量に達していた。一方、京都市を流れる桂川や鴨川ではその順位が 12~13 位に留まっていた。またその順位が仮に由良川支川と同程度になった場合には、実績の推定ピーク流量よりも 2 倍程度大きくなることが示唆された。

Key Words: ensemble flood forecasting, RRI Model, flood potential, FACP model

1. 洪水の潜在性について

平成 30 年 7 月豪雨では、停滞した梅雨前線の影響で、長時間にわたって広域で豪雨が継続し、西日本各地で洪水災害が発生した。岡山県小田川や愛媛県肱川のように大規模な浸水被害が発生し、報道等でも大きく取り上げられた地域がある一方、京都府由良川支川のように中小河川の洪水によって周辺地区に深刻な被害をもたらした事例も数多く発生した。さらに、今回、辛うじて被害に遭わなかつたものの、雨域が少しずれていたり、もう数時間雨が降り続いたら洪水災害になった地域も数多く存在したはずである。

今次の豪雨災害のように、広域かつ長時間にわたって豪雨が降り続いた場合、とどめの集中豪雨が降った地域では浸水被害が発生し、そうでなかつた地域では浸水が発生しないことが多い。災害現象が顕在化せずに人的被害も発生しなかつた場合、一部の行政担当者や専門家を除いて、災害の危険性があつたことすら認識する機会が

ほとんど無い¹⁾。災害になってから対策を講じるのではなく、被害を免れた地域でも、どういった状況になり得たのかを検証し、次の災害に備えることが防災・減災の基本となる。矢守ら²⁾は、このような事例を豪雨災害の潜在的 (Potential) 事例として、その他、致命的 (Fatal)、偶発的 (Accidental)、死活的 (Critical) を含む FACP モデルを提唱し、潜在的事例にも目を向けるべきであること、それらを定量化することの重要性を訴えている。

顕在化していない洪水現象を客観的に評価するアプローチとして、実際に起きた降雨場を多数生成し、アンサンブルの洪水流出解析を実行する方法が考えられる。本間ら³⁾は、ECMWF (欧洲中期予報センター) によるアンサンブル雨量予測情報をもとに、各予報メッシュで既往最大を上回る確率を計算することによって、今回の豪雨災害の潜在性を評価している。本報は、本間らが統計的にダウントスケールした雨量予測情報を広域の分布型流出モデルに入力し、中小河川を含めて、実績流量の推定結果⁴⁾と予測結果とを比較する。そのうえで 51 の予

測メンバーに対して、実績流量が概ね何位に相当していたかに着目して、より順位の高い洪水も生じ得たという観点から、洪水の潜在性について議論する。

2. 広域アンサンブル流出解析

本報で用いたアンサンブル雨量予測は、毎日 21 時 (JST) に更新され、空間解像度 25 km, 3 時間単位で、最大 15 日のリードタイムを有する。本間ら³⁾はこれを 1 km 空間解像度にダウンスケールしている。以下では 2018 年 7 月 5 日 21 時に予報された結果をもとに解析を行う。

流出解析は、近畿地方全域を対象とし、空間解像度 5 秒 (約 150 m) で構築した RRI モデル⁴⁾を用いる。図-1 は京都府の日吉ダムの実績推定流量（解析雨量を入力した推定流量）と予測流量を比較している。この結果、No. 32 のメンバーが実績に近いことが分かる。7 月 6 日 0 時のピーク流量が低減した同日 16 時以降のピーク流量に着目すると、実績流量はアンサンブル予測の 4～5 位に相当していたことが分かる。一方、図-2 に示す鴨川（深草地点）では、実績のピーク流量は 600 m³/s 程度に留まり、その順位も 12～13 位であった。1～2 位の予測では 1,200 m³/s を超えるようなピーク流量が推定され、その場合は鴨川の洪水被害も懸念される。

図-3 は横軸にアンサンブル順位を、縦軸にピーク流量を示して、主要な地点における予測流量（実線：左軸、点線：右軸）と実績（マーカー）の関係を示している。図の軸の関係で由良川支川の蓼原川の流量変化は識別できないうが、今回近畿地方で被害を受けた蓼原川では 2～3 位と相対的に順位が高くなっている。そのことは図-4 に示すアンサンブル順位の空間分布でも確認できる。この図から、日吉ダム流域は周囲に比べると順位が高いこと、由良川下流部の支川でそれより順位が高いこと、桂川下流や鴨川で順位が周辺地域に比べて相対的に低いことなどが分かる。

図-5 はアンサンブル順位 5 位のピーク比流量（流量を集水面積で除した値）の分布を示す。この結果、兵庫県から京都府にかけて概ね一様にピーク比流量が大きく、近畿地方南部で相対的に比流量が小さくなっている。アンサンブル順位の生起確率は、今後データを蓄積して検証が必要である。今回の事例でいえば、特に中小河川で 1～2 位の順位に相当する場所も多く、図-1 や図-2 に示したアンサンブル順位の高い推定流量も生じ得たと考えることができる。

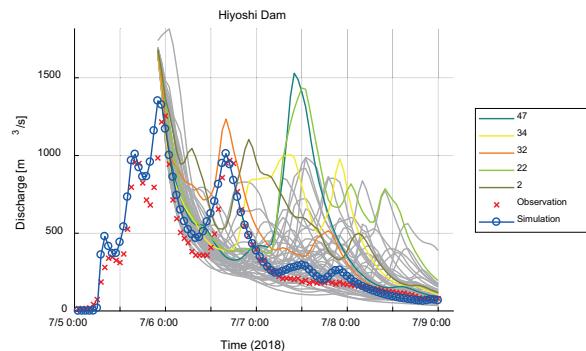


図-1 日吉ダムにおけるアンサンブル流出解析結果

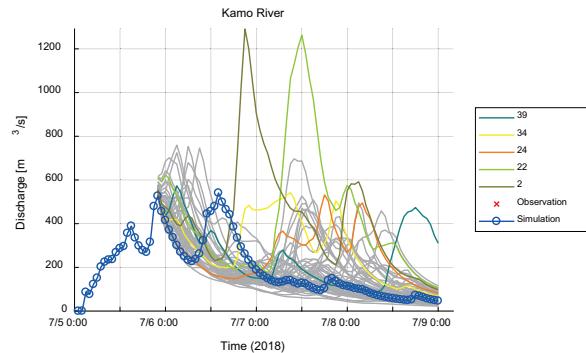


図-2 鴨川（深草地点）におけるアンサンブル流出解析結果

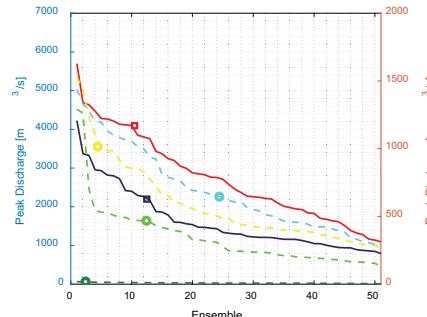


図-3 アンサンブル解析の順位とピーク流量との関係



図-4 実績流量に対するアンサンブル順位の空間分布：実績のピーク比流量に応じて 1 位から 51 位まで色分けしている。

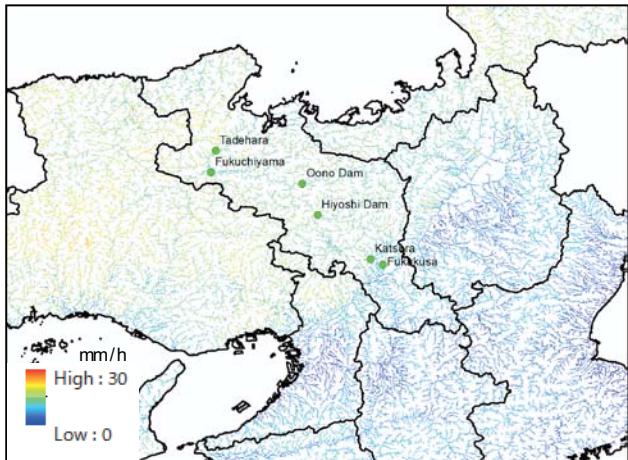


図-5 アンサンブル順位 5 位のピーク比流量分布

4 まとめ

本報は、平成 30 年 7 月豪雨における洪水の潜在性を評価することを目的として、近畿地方全域に適用した分布型流出モデルに 51 メンバーのアンサンブル予測雨量を入力して流出解析を行った。その結果、由良川支川のように今回被害が発生した地域では、アンサンブル予測の 1~2 位の順位に実績流量が相当していることが分かった。一方、京都市を流れる鴨川のように、周囲に比べると相対的にその順位が低いものの、降雨の状況によってはピーク流量が倍増しそる事例も確認された。

本報で示したアプローチは、既に起こった事象を振り返り、実績の推定流量と予測を比較しているという点を除いては、アンサンブルの洪水予測と本質的に同じ解析手順である。ただし、現行のアンサンブル洪水予測は、

予測の平均値とばらつきを推定することに主眼があるのに対し、今回の考え方は、各メンバーの予測はそれぞれ実際に生じ得る現象とみなして議論している。そのため、異なる予測情報を用いれば、推定される洪水の潜在性も変化するという根本的な課題がある。その背景には、自然現象のゆらぎにともなう本質的な不確実性と、モデリングによる不確実性とが不可分であることが原因にある。本来、洪水の潜在性を評価する目的では、前者のみを対象にすることが望ましい。その観点からは、本検討に用いるべき雨量情報は必ずしも予測モードである必要は無く、再解析データの力学的ダウンスケール情報なども活用できる可能性がある。

参考文献

- 1) 竹之内健介、大西正光、佐山敬洋、本間基寛、矢守克也：京都市伏見区下鳥羽地区における水害ポテンシャルに対する意識調査、京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査研究報告書、2019.
- 2) 矢守克也、竹之内健介、大西正光、佐山敬洋、本間基寛：豪雨災害について考えるための FACP モデル、京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査研究報告書、2019.
- 3) 本間基寛、佐山敬洋、竹之内健介、大西正光、矢守克也：アンサンブル予測を利用した平成 30 年 7 月豪雨のポテンシャル評価、京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査研究報告書、2019.
- 4) 佐山敬洋：西日本全体を対象とした降雨流出解析、京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査研究報告書、2019.

EVALUATION OF FLOOD POTENTIAL DURING HEAVY RAINFALL IN JULY 2018 BASED ON ENSEMBLE FLOOD ANALYSIS

Takahiro SAYAMA, Motohiro HONMA, Kensuke TAKENOUCHI,
Masamitsu OHNISHI and Katsuya YAMORI

Heavy rainfall in July 2018 caused severe flood damages in many parts of western Japan. Except for some areas, crucial flooding did not occur in Kinki region. However, the disaster could be realized if rainfall areas were slightly shifted or it continued some more time. Such a situation is recognized as a flood potential and evaluated based on ensemble rainfall forecasting with a distributed rainfall-runoff model applied to the entire Kinki region. As a result, the tributaries of the Yura River reached to 1-2 ranking among 51 ensemble members in terms of their peak discharges. On the other hand, the Katsura and the Kamo rivers in Kyoto stayed around 12-13 ranking. If these rivers also experienced the 1-2 ranking, the flood discharges could be more than doubled compared to the actual situations in these rivers.

京都市伏見区下鳥羽地区における 水害ポテンシャルに対する意識調査

竹之内 健介¹・大西 正光²・佐山 敬洋³・本間 基寛⁴・矢守 克也⁵

¹京都大学特定准教授 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

²京都大学准教授 防災研究所 地震予知研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp

³京都大学准教授 防災研究所 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: sayama.takahiro.3u@kyoto-u.ac.jp

⁴京都大学特任助教 防災研究所 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: honmam@jwa.or.jp

⁵京都大学教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

平成 30 年 7 月豪雨では、西日本の各地で甚大な被害が発生する一方、降雨分布がずれていた場合、他の地区においても同様の被害が生じていた可能性も高い。このような災害発生の可能性が高かった中で結果的に被害を免れた地区を災害発生のポテンシャルが高かった地区とみなし、このような地区において、平成 30 年 7 月豪雨の際に水害の発生がどのように認識されていたのか調査を実施した。調査は、平成 25 年台風 18 号で鴨川の越水被害を受けた京都市伏見区下鳥羽地区の住民を対象とし、その結果を基に、災害ポテンシャルの認識やその状況の認識による効果を確認した。被害がなかったことを良しとせず、災害ポテンシャルが高かった事実を認識することにより、今後の災害対応を考えた際に、どのような意義があるのかをアンケート調査を通して考察する。

Key Words: *disaster potential, disaster awareness, disaster case model*

1. 住民視点から見た FACP モデル

FACP モデル¹⁾は、災害の発生地域における人的被害の有 (F) 無 (C) に焦点が置かれるがちな現在の災害後の社会意識において、災害の発生ポテンシャルがあつたが今回災害は発生しなかった (P) にも焦点を当てることで、次の災害発生地になり得る地区において災害ポテンシャルを考えることの重要性を示唆するものである。

本研究では、この災害ポテンシャルが存在したが結果的に災害が発生しなかった事例（以下、P 事例）を、住民視点から評価する。具体的には、京都市伏見区下鳥羽地区を対象に、アンケート調査を行い、その結果から住民の災害ポテンシャルの認識状況と P 事例であることを認識することの意義について評価を行う。

2. 住民の水害ポテンシャル意識調査

調査対象である京都市伏見区下鳥羽地区は、鴨川や桂川の東側に位置し、地区のほとんどが洪水浸水想定区域内にあり、実際に 2015 年台風 18 号により越水被害が生じた地区である。平成 30 年 7 月豪雨の際は、越水などの被害はなかつたものの、洪水浸水想定区域に対し避難勧告および避難指示が発令されていた。また、アンサンブル予測の結果から、既往最大を超える豪雨の可能性（大雨ポテンシャル）や鴨川の氾濫の可能性（洪水ポテンシャル）があつたことも指摘されている^{2,3)}。

調査は、下鳥羽自治会連合会の協力の下、地区の自治会員（21 自治会 1,769 世帯、加入率約 47%）を対象に 2018 年 12 月 8 日～同月 26 日にかけて、回覧板による配布と各自治会長による回収にて実施した。回収数は 599（回答率約 34%）である。アンケート項目は大きく、①平成 30 年 7 月豪雨時の意識や対応、②災害ポテンシャルの指摘による変化、③河川氾濫に対する日常の意識、④水害への備えと地域の取組で構成されている。

3. 災害ポテンシャルの認識と P 事例の認識効果

まず平成 30 年 7 月豪雨当時の桂川・鴨川の氾濫可能性の認識状況を確認した結果、約 76% の回答者が危険性について認識していた。また豪雨後、氾濫の危険について約 78% が再考していた。このことから、本事例において、対象地区の多くの住民が災害ポテンシャルを認識していたと言える。実際の対応行動として、避難行動については、垂直避難を含め何らかの避難行動を取った回答者は約 22% であったが、当時の対応を約 86% の住民が肯定的に自己評価していた。しかしながら、P 事例を指摘した後では、約 56% が避難意向を示し、当時の対応を肯定的に自己評価する割合は 67% に減少した。図-1 にその変化状況を示す。このことから、氾濫の危険を認識しているものの、それが現実的なものとして捉えていない住民が一定数存在していたことが伺える。

またアンケート結果を基に、調査項目との関係を確認した。災害ポテンシャルの認識については、水害経験の有無が有意に影響を与えており、水害経験のある住民は特に氾濫の可能性を意識する傾向にあった。豪雨当時と P 事例指摘後の自身の対応行動評価の変化の有無については、特に調査項目からは有意な差は確認されなかった。一方、豪雨当時の避難行動と P 事例を指摘した後の避難意向の間の変化については、居住年数が短い住民（居住年数 5 年未満）、豪雨当時や P 事例指摘後に自身の行動を不適切と考えた住民（当時不適切・P 事例指摘後不適切）などが、避難意向ありに変化を示していた（図-2）。

4. まとめ

本研究では、FCAP モデルの考え方を基に、住民視点から災害ポテンシャルの認識状況や P 事例であったことを示すことによる変化を、京都市伏見区下鳥羽地区の住民アンケートの調査結果を基に確認した。結果、災害ポテンシャルの認識が高い一方で、P 事例であったことを指摘することにより、住民の中で自己反省が促される可能性も確認された。今後、さらなる分析と他地域との比

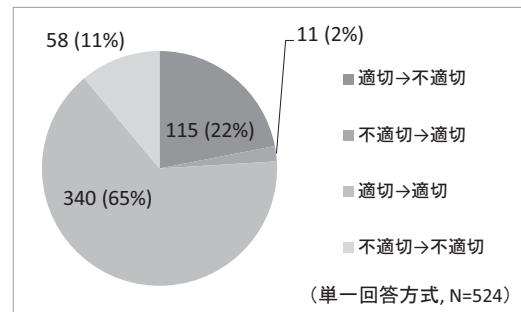


図-1 豪雨当時と P 事例指摘後の対応行動評価の変化

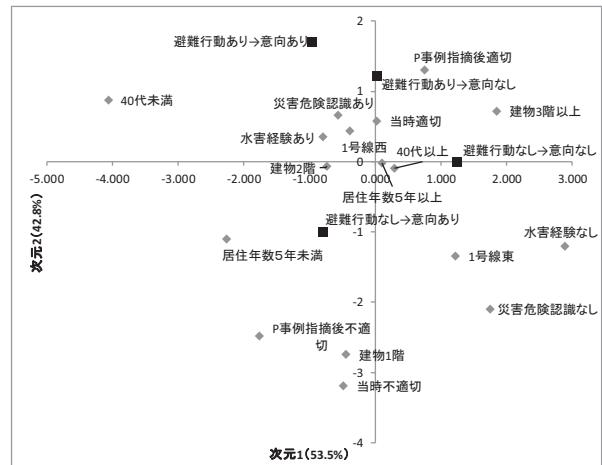


図-2 豪雨当時の避難行動の有無と P 事例指摘後の避難行動意向の変化と調査項目の対応分析の結果

較等を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 矢守克也, 竹之内健介, 大西正光, 佐山敬洋, 本間基寛 : 豪雨災害について考えるための FCAP モデル, 京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査報告書, 2018.
- 2) 本間基寛, 佐山敬洋, 竹之内健介, 大西正光, 矢守克也 : アンサンブル予測を利用した平成 30 年 7 月豪雨のポテンシャル評価, 京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査報告書, 2018.
- 3) 佐山敬洋他, 平成 30 年 7 月豪雨における洪水の潜在性評価に向けた広域アンサンブル流出解析 : 京都大学防災研究所平成 30 年 7 月豪雨調査研究報告書, 2018.

RESIDENTS' AWARENESS SURVEY ON WATER-RELATED DISASTER POTENTIAL IN SHIMOTOBIA COMMUNITY IN KYOTO, JAPAN

Kensuke TAKENOUCHI, Masamitsu Onishi, Takahiro SAYAMA,
Motohiro HONMA, Katsuya YAMORI

Continuous heavy rainfall in July in 2018 caused huge damages in various areas. However, rainfall distribution moved little, another damages can have happened in other areas. Based on such a situation, we had a survey on residents' awareness on disaster potential in this heavy rainfall in Shimotoba community in Kyoto, Japan. From a result, we considered importance of checking disaster potential by residents themselves in non-damaged areas.

平成 30 年 7 月豪雨災害調査報告書

2019年 3 月 29 日発行

編集発行 京都大学防災研究所
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
Tel. (0774)38-4011 Fax. (0774)38-4010

印 刷 有限会社 レイ・プリンティング
〒602-8497 京都市上京区戌亥町 121
Tel. (075)417-5251 Fax. (075)417-5261

収録論文の著作権は各著者又は原掲載誌の発行者が有しております