



2017年 九州北部豪雨災害 調査報告書



2017年九州北部豪雨災害調査報告書

目次

| | |
|---------------------------------|-------------|
| はじめに |1 |
| | 中川 一 |
| 2017年7月九州北部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 |
| 気象レーダーを用いた豪雨解析 |6 |
| | 中北 英一、山口 弘誠 |
| 数値モデルによる豪雨現象の再現性 |10 |
| | 竹見 哲也 |
| 過去事例との比較 |16 |
| | 向川 均、竹見 哲也 |
| 平成29年7月九州北部豪雨の温暖化影響評価 |20 |
| | 竹見 哲也 |
| おわりに |22 |
| | 中北 英一 |
| 地表変動 | |
| 概要 |25 |
| | 千木良 雅弘 |
| 斜面崩壊と地質 |26 |
| | 千木良 雅弘 |
| 崩壊発生の水文地形過程 |33 |
| | 松四 雄騎 |

| | | |
|--|---------|------------------|
| 崩壊発生機構の数値解析 |40 | 堤 大三 |
| 小野地区地すべりの発生・運動機構および二次災害 |46 | 王 功輝、土井 一生、釜井 俊孝 |
| 山地斜面の植生と崩壊発生の関係 |49 | 松浦 純生 |
| 地震計記録による地表変動の検出： 日田市小野地区における斜面崩壊の例 |52 | 土井 一生 |
| 衛星データによる地表変動の検出 |54 | 橋本 学 |
| 現代住宅と林業の衰退 —花粉症と流木の起源— |59 | 釜井 俊孝 |
| まとめと今後の課題 |61 | 千木良 雅弘 |
| 治水 | | |
| 治水面から見た被害の概要と着目点 |63 | 角 哲也 |
| 朝倉市赤谷川流域を対象とした平成 29 年九州北部豪雨における斜面崩 壊と洪水の統合解析 |68 | 藤田 正治、山野井一輝 |
| 降雨の極値統計と流出・氾濫現象の現地調査及びモデリング |72 | 田中 茂信、佐山 敬洋 |
| 2017 年 7 月の九州北部豪雨での土石流による土砂生産特性と河岸・河床 変動による被災 |80 | 竹林 洋史 |

| | | |
|--------------------------------------|----------|--|
| 桂川流域における土砂・氾濫災害の現地調査と再現計算 |86 | 川池 健司、山田 祐樹、中川 一 |
| 寺内ダムの流木捕捉量の把握と下流河道の洪水被害軽減効果の評価 |92 | 角 哲也、鈴木 湧久、小木曾 友輔、小林 草平、竹門 康弘、Sameh KANTOUSH |
| 情報・避難・災害対応 | | |
| 避難のためのマイスイッチ・地域スイッチ |99 | 矢守 克也、竹之内 健介、加納 靖之 |
| 住民行動の時系列分析を通じた災害情報のあり方に関する考察 |103 | |
| ー地域防災と災害情報の新たな連携ー | | 竹之内 健介、加納 靖之、矢守 克也 |
| ハザードマップへの歴史災害地点の重ね合わせ |109 | |
| ー災害史と地域防災の新たな連携ー | | 加納 靖之、竹之内 健介、矢守 克也 |
| 今後の未経験・想定外災害に対する「三本の矢」による地域の水害対策への提言 |115 | 竹之内 健介、加納 靖之、矢守 克也 |
| AI・IT 技術 | | |
| 先端的な情報技術の災害対応へ適用に関する考察 |119 | 畑山 満則 |

はじめに

平成 29 年 7 月 5 日から 6 日にかけて、福岡県朝倉市や大分県日田市では、梅雨前線や台風 3 号の影響により、線状降水帯が形成されて豪雨が継続し、朝倉市黒川では最大 24 時間降雨量が 829mm（7 月 5 日午前 8 時～7 月 6 日午前 8 時）、最大 1 時間降雨量は 124mm（7 月 5 日 14 時～15 時）となるなど、記録的な豪雨となった¹⁾。この豪雨により、赤谷川や奈良ヶ谷川など、筑後川の多くの右支川の流域では、斜面崩壊や河床・河岸侵食により生産された多量の土砂や流木が洪水とともに流下し、河道が土砂と流木で埋まり、多くの家屋が被災した。この水害で福岡県では 34 名が死亡、4 名が行方不明、大分県では 3 名が死亡、全壊家屋はそれぞれの県で 240 戸と 48 戸、半壊家屋はそれぞれ 810 戸と 269 戸、一部損壊は 39 戸と 5 戸、床上浸水は 23 戸と 150 戸、床下浸水が 540 戸と 843 戸という大災害となった²⁾。

今回の豪雨災害は、豪雨、洪水・土砂災害、避難、孤立集落、災害全容把握の困難等といったいわば典型的な水害の様相を呈し、最近発生している山麓部や中山間地での水害の特徴がよく表れているといえよう。例えば、平成 23 年 9 月の紀伊半島大水害での那智川の災害、小規模で大きな災害にはならなかったが平成 24 年の京都府南部地域豪雨災害での宇治市山麓部での災害、そして平成 28 年台風 10 号により被災した岩手県小本川流域での災害などである。これらの水害には 3 つの大きな特徴がある。1 つ目は河道には洪水だけでなく、土砂や流木が多量に流下・堆積し、河床が上昇したために洪水、流木、土砂が河道から溢れ、人的・物的被害を助長したこと、2 つ目は主に国（国土交通省）の管理区間ではない河川で現象が生じていることである。これは水害が発生しやすいけれども国の管理区間ではないので財政的なこともありこれまで抜本的には改善されず災害が繰り返されてきたとあってよいであろう。3 つ目は洪水ハザードマップや土砂災害ハザードマップあるいは自主防災マップ等が準備されていても洪水のみを対象としたマップであったり、土石流の警戒区域・特別警戒区域を示したマップであったり、個別現象に対するハザードを表示したマップしか準備されていない場合が大半であることである。なお、朝倉市では今回の災害で大きな被害が出た桂川や赤谷川は洪水予報河川でも水位周知河川でもなかったために、水防法の適用を受けず洪水ハザードマップは準備されておらず、水害や土砂災害を対象とした自主防災マップが地域住民との協働で作成・公表されていた³⁾。

さて、想定し得る最大規模の外力が生じたときにはもはやハード対策では対応しきれず、避難等のソフト対策により、家屋等の財産の被災は逃れられないが、人の命は守ることができよう。そのために洪水ハザードマップや土砂災害（土石流、地すべり、急傾斜地などの）ハザードマップ、自主防災マップなどが準備されている。災害現象のメカニズム

が解明され、それぞれ個別現象に対するハザードマップが準備されても、今回のような一連の現象が生じる危険性があることを示したハザードマップはまだ見当たらない。今後、このようなマップが示され、行政や地域住民が、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、適切な避難対応がとられることが望まれる。

そこで、今回の水害では何が課題で、今後どのような研究が重要で、それによって何ができるのかを防災研究所の関連研究分野の総力を結集して取り組むことにした。単なる災害現象の検証だけでなく、今後30～50年後にいかなる人の命も守られるような社会が、そして、レジリエントな社会が構築されて社会が正常に機能し、生活や産業が守られるような世の中を構築するためには、どのような研究が必要か、どのような対策や制度が必要か等についての提案を行うことを目指してこの災害調査に臨んだ。この報告書にはこのような思いが託されているものの、時間的制約もあり、十分には上記の目的を果たせていないが、その一部でもお伝えできれば幸いである。

2018年3月

京都大学防災研究所長
中川 一

- 1) http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf (平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の概要<速報版>Vol.6).
- 2) http://www.fdma.go.jp/ugoki/h2911/2911_04.pdf (消防庁：消防の動き，11月号，2017年 pp.4-8).
- 3) 朝倉市ホームページ：<http://www.city.asakura.lg.jp/www/contents/1332397590637/index.html>

2017年7月九州北部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

2017年6月末から7月始めに発生した九州北部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

梅雨前線と台風3号の影響により2017年6月30日～7月5日にかけて九州北部を中心とする局地的に豪雨による災害が発生した。この災害は、一般的には「平成29年7月九州北部豪雨災害」と呼ばれる。この災害による全国での死者・行方不明者44名¹⁾にのぼるが、特に福岡県（朝倉市36名・東峰町3名）における被害が大きく39名となっている。近年発生した水害の中では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⁾に続く規模の人的被害が発生している。

この災害では、豪雨による洪水・土砂災害の発生、適切な避難が行われない、人的被害の発生、集落の孤立、被害の全体像の把握に時間がかかるといったことが課題となった。しかし、こういった問題は、過去の水害においても何度も発生してきており、これまでも指摘されてきたことである。なぜ過去の教訓継承され・活かされないのか、なぜ防災研究の成果が十分に活かされないのか、ということについて検討することが、今後の防災研究においては重要である。こういった背景を踏まえ京都大学防災研究所では、中川一所長のリーダーシップのもと「平成29年7月九州北部豪雨災害」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、以下の通りである。今後30～50年先の防災・減災を見据えたときに、今回の「平成29年7月九州北部豪雨災害」では何が課題で、今後どのような研究が重要で、それによって何ができるのか、そのことについて、防災研の総力を結集して提案を行う。単なる災害現象の検証だけでなく、今後30～50年先に人の命が守られ、社会が正常に機能し、生活・産業が守られる

世の中を構築するためには、どのような研究、制度、対策が必要か、そしてその実現のために防災研が今後どのように活動するのかを考える。

2. 研究の取り組み

(1) 研究チーム

平成29年7月九州北部豪雨災害について、1)降雨の状況（気象・水文）、2)豪雨に伴う土砂の流出・斜面崩壊の状況（地表変動）、3)河川の状況（治水）、4)災害情報の伝達・避難の状況（情報・避難・災害対応）、さらには5)最新の情報技術の利用状況（AIやIT技術）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） |
| 5) AIやIT技術 | 畑山満則（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

2017年11月30日に京都大学宇治キャンパス 連携研究棟 3階 大セミナー室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52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。

- 14時00分-14時05分 開会挨拶：所長 中川 一
14時05分-14時10分 調査全体像：副所長 牧 紀男
14時10分-14時40分 (気象・水文) 「九州北部豪雨の特徴」 石川 裕彦
14時40分-15時10分 (地形変動) 「地表変動」 釜井 俊孝
15時10分-15時40分 (治水) 「九州北部豪雨による水・土砂・流木の氾濫」 竹林 洋史
16時00分-16時30分 (情報・避難・災害対応) 「地域の災害対応を支える防災文化の今」 竹之内 健介
16時30分-17時00分 (AI・IT技術) 「先端的な情報技術の災害対応への適用に関する考察」 畑山 満則
17時00分-17時30分 (全体ディスカッション) 進行：牧 紀男、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(2018年2月20-21日)において、オーガナイズドセッションとして2月20日13:30~15:00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)。

- 13時30分-13時45分「平成29年九州北部豪雨の高分解能数値シミュレーション」○竹見哲也
13時45分-14時00分「融解層高度以上の降水粒子の同化による線状降水帯の予測及び支配スケールの解析」山口弘誠・○堀池洋祐・中北英一
14時00分-14時15分「2017年九州北部豪雨災害を対象にしたMMSによる浸水痕跡調査と降雨流出氾濫解析」○佐山敬洋・松本紘治・桑野裕士・寶馨

14時15分-14時30分「朝倉市赤谷川流域を対象とした平成29年九州北部豪雨における斜面崩壊と洪水の統合解析」○山野井一輝・鈴木豪太・藤田正治

14時30分-14時45分「寺内ダムの流木捕捉量の把握と下流河道の洪水被害軽減効果の評価」○角哲也・鈴木湧久・小木曾友輔・小林草平・竹門康弘・Sameh KANTOUSH

14時45分-15時00分「災害時における住民行動の時系列分析を通じた災害情報のあり方に関する考察」○竹之内健介・加納靖之・矢守克也

3. 今後の課題

「2014年九州北部豪雨災害」では、過去に例を見ない強度の降雨により多くの斜面崩壊が発生し、土砂流出による河床上昇、さらに洪水が発生し、多くの人的被害が発生した。また流木災害、ため池の決壊も課題となった。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する研究課題を上げることとする。

- ・過去に例を見ない強度の降雨を踏まえた防災対策のあり方
- ・地質を反映したより精緻な土砂災害ハザードマップの可能性
- ・土砂による河床上昇による被害の想定・対策
- ・流木災害対策
- ・過去の経験・公開ハザード情報を活用したコミュニティーでの避難対策のあり方
- ・人的被害を軽減するための中小河川、土砂災害の防災対策のあり方

参考文献

- 1) 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
- 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

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 2017 flooding and land slide disaster at the northern Kyusyu area.

气象·水文

気象・水文

向川 均¹・石川 裕彦²・竹見 哲也²・中北 英一³・山口 弘誠³

- ¹ 気象水象災害研究部門 災害気候研究分野
² 気象水象災害研究部門 暴風雨気象環境研究分野
³ 気象水象災害研究部門 水文気象災害研究分野

Key Words: atmospheric radar, numerical simulation, rainband

1. はじめに

石川 裕彦

気象水象災害研究部門では、災害発生の原因となる気象外力、とりわけ降水現象の解明を担当した。そして、①レーダー雨量解析とメカニズム解析、②過去豪雨事例との比較及びメソ気象モデルによる再現性や豪雨要因の調査、③豪雨発生期における東アジア域での大気循環場の特徴及びその予測可能性、をテーマに研究を進めた。

第2章では、国土交通省のレーダー観測網であるXRAINデータを解析し、総雨量分布はもとより、降雨の刻々の変化を明らかにした結果を示す。

第3章では、計算シミュレーションでどこまで現象を再現できるかに挑戦した。最も細密なメッシュ間隔を166 mとした超高分解能シミュレーションにより、地形の細かな起伏や積乱雲の内部構造を詳細に表現する再現計算を試みた。この高分解能シミュレーションにより、停滞する線状降水系を再現し、福岡県の豪雨発生地域で500 mm程度の総雨量を再現することができた。

第4章では、過去の降水事例との比較を行った。前半では、過去の準停滞性線状降水系の発生事例の統計的研究結果を参照し、今回事例の特徴を議論する。後半では、豪雨発生の背景となる総観規模スケールの気象場に着目し、豪雨発生地域の風上側に当たる九州西側の海域を対象に、大量の水蒸気を輸送する下層の暖湿な南西風と、豪雨発生のトリガーとなる中層の寒気との関係を、過去60年間の再解析データを用いて調べた。

第5章では、発展研究として、今回の集中豪雨が温暖化した環境下で発生した場合を想定した擬似温暖化実験を実施した結果を記載する。

最後に、将来に向けた研究項目、未来像に言及した。

2. 気象レーダーを用いた豪雨解析

中北 英一・山口 弘誠

近年増加する集中豪雨や局所的な大雨による水害や土砂災害等に対して、適切な施設管理や防災活動等に役立てるために、2010年以降Xバンド偏波ドップラーレーダーのネットワーク観測によるレーダ雨量情報が国土交通省から提供されている。さらに2016年7月からは配信エリアが大幅に拡大されていて、通称XRRAIN(eXtended Radar Information Network)と呼ばれている。九州エリアにおいても図-2-1に示すように7機のレーダーが配備されている。また、XRRAINに加えて、従来より日本全国に配備されているCバンドレーダーに関して、九州北部エリアをカバーする釈迦岳レーダーも近年偏波機能を持つレーダーに更新されている。偏波機能を有するレーダーは、受信強度に加えて、偏波間位相差変化率という観測パラメータを測ることができ、この観測パラメータは雨滴粒径の情報を含んでいることから、高精度に雨量を推定することが可能である。

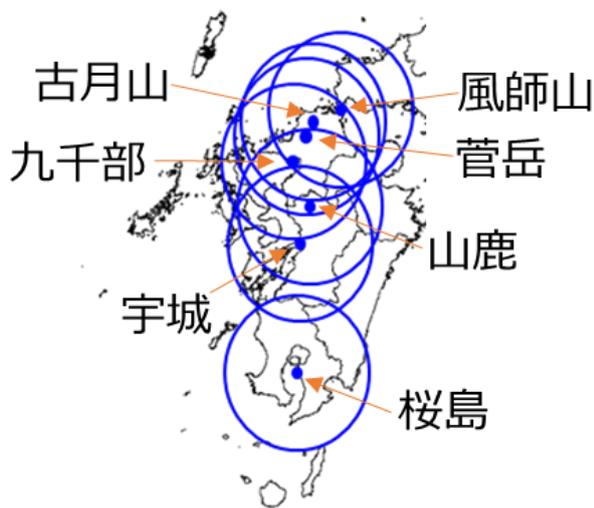


図-2-1 九州地方におけるXRRAINの配置図

また、本事例では地形の影響も大きいので、図-2-2に九州北部地域の標高地形図を示す。朝倉市は福岡県の中南部である筑後地域に位置しており、脊振山地と三郡山地の間に存在している。脊振山地は福岡県と佐賀県の県境にまたがる山地であり、標高800mから1000m程度の山が多い。三郡山地は全長60kmで標高700mから900m程度の山が多い。脊振山地の南側には標高の低い平野が広がっており、有明海に面している。

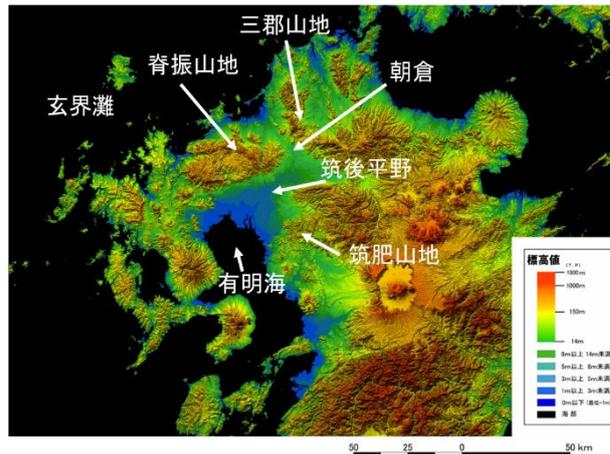


図-2-2 九州北部地域の地形。国土地理院デジタル標高地形図を加工して作製。

さて、図-2-3にXRRAIN観測から得られた2017年7月5日における地上降水強度と3次元レーダー反射強度を示す。12時頃から朝倉市において東西方向に延びる線状の強雨域が観測され始めて、図に示すように21時頃まで継続していた。線状降水帯とは、一般的に5~10個程度の積乱雲が線状に連なって発生しており、本事例においても同様の傾向が見られた。線状降水帯の先端部分は脊振山地の東側で見られ、末端部分は朝倉市や日田市まで連なっていた。一つ一つの線状降水帯の寿命はおよそ数時間程度であったが、次々と新たな線状降水帯が形成され、トータルで21時頃まで継続していたことがわかった。特に、14時~20時頃においては、2つの線状降水帯が南北に並んで形成されており、その両者の末端部分が共に朝倉市や日田市で合流していたこともあり、そのエリアで豪雨がもたらされたと考えられる。例えば、14時頃から線状降水帯が朝倉市周辺に2本存在しており、北に発生した線状降水帯Aが南下しながら南に存在していた線状降水帯Bと併合して、15時には一本の線状降水帯Cが形成された。その後、脊振山地の異なる地点から線状降水帯Dと線状降水帯Eが発生していたことがわかった。その線状降水帯が併合や分裂を繰り返しながらも常に朝倉地点に降雨域が停滞していたため、朝倉地点に長時間雨が降り続き甚大な被害が発生した。また、積乱雲の雲頂高度を調べると時には15km以上を記録しており、非常に対流活動が活発であったと考えられる。

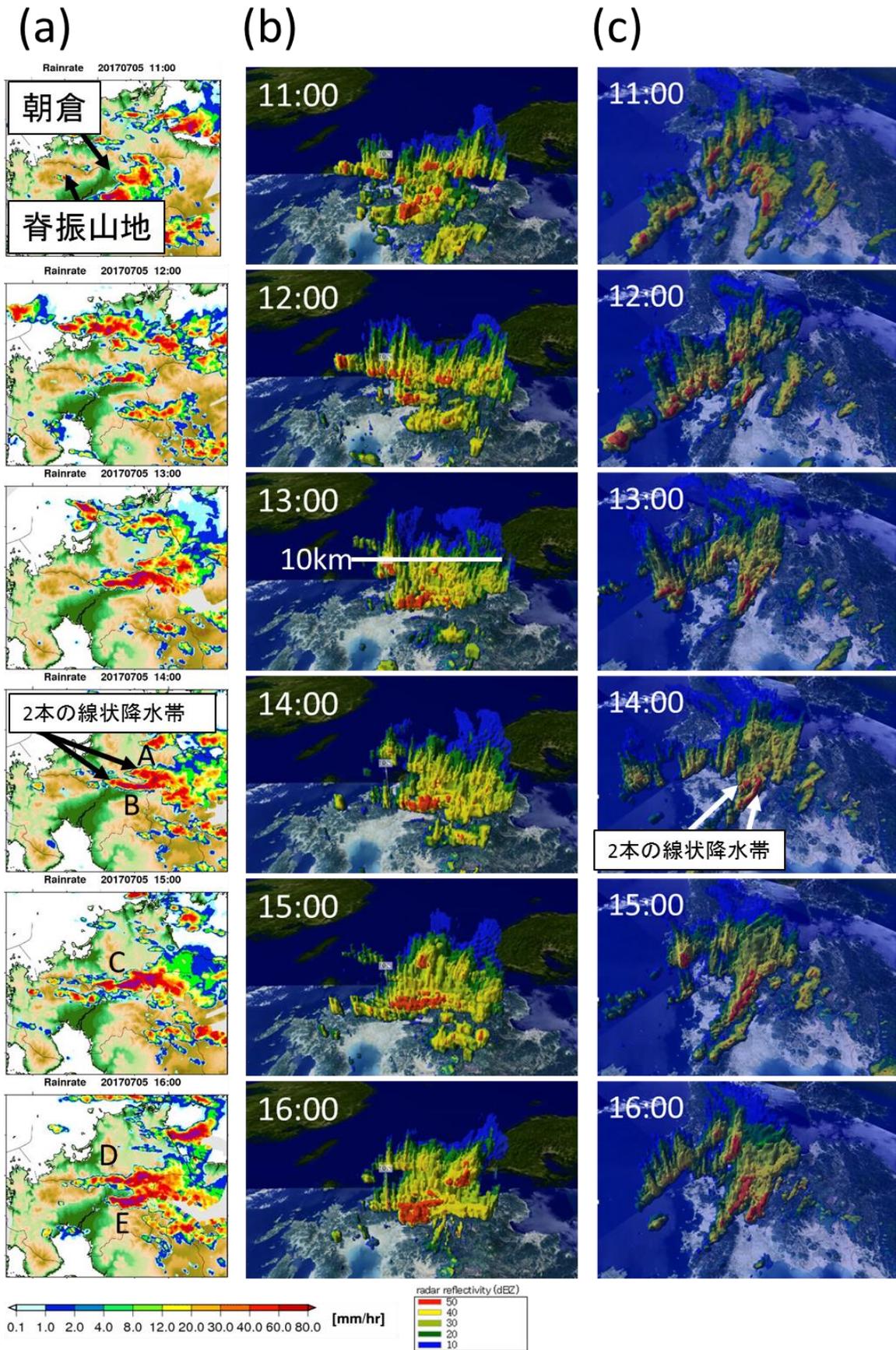


図-2-3 (前半) 11時～16時における XRAINによる (a)地上降水強度, (b)レーダー反射強度の3次元分布 (南側からの視点), (c)レーダー反射強度の3次元分布 (西側からの視点)

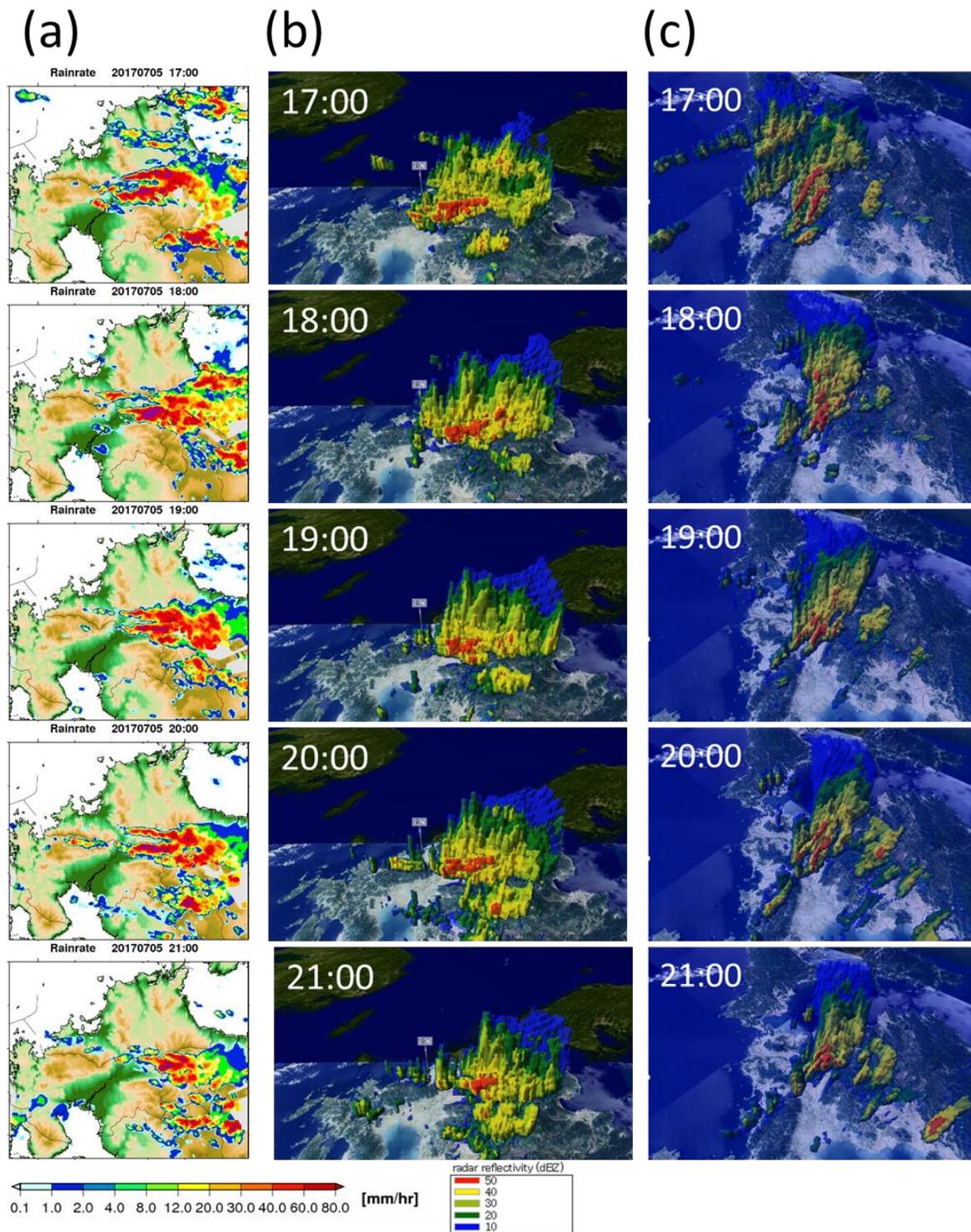


図-2-3 (後半) 図-3の続き (17時~21時まで)

国土交通省では XRAIN と Cバンドレーダーの合成雨量（以降、C-X合成雨量）というプロダクトを2017年より作成しており、XRAIN との比較を行う。図-2-4 に17時における XRAIN と C-X 合成雨量をそれぞれ示す。いずれも偏波情報を使っているためにほとんど強度に違いは無いように見えるものの、南側の線状降水帯でわずかに強度や降雨エリアが異なっていた。XRAIN の降雨強度算定手法は基本的には降雨による電波減衰によらない手法が用いられていることがメリットであるが、本事例においては、減衰量が極めて大きく完全に電波が消散してしまったエリアがあった（2本の線状降水帯の内、南側にある線状降水帯の東側領域）。このエリアにおいて XRAIN と C-X 合成雨量に差が見られていた。XRAIN では電波が消散しきって測れていないため、C-X 合成雨量の方が精度が高いと考えられる。

図-2-5 に7月5日4時～21時までのレーダー解析による積算雨量分布を示す。図-2-5(a)には300mm以上のエリアを色づけている。総雨量として700mmを超えるエリアがあり、梅雨期の集中豪雨としては極めて積算雨量の大きな事例であったと言える。北緯33度24分付近に東西方向に延びるラインと、北緯33度30分付近

から少し右肩下がりで東西方向に延びるラインの2つのラインを確認することができ、前述した2本の線状降水帯が存在していたことを示唆している。図-2-5(b)には国土地理院発表の土砂崩壊エリアを赤色で示しており、雨量が650mm以上のエリアと非常によく対応していることが確認できる。

以上、気象レーダーを用いた解析から明らかになった主な事項は下記の通りである。

- ・ 7月5日の12時～21時頃にかけて、複数の線状降水帯が発生していた。時折、2本の線状降水帯が南北に並んで形成されており、両者の末端部分が朝倉市・日田市で合流しており、豪雨をもたらした。
- ・ 国土交通省のレーダープロダクトである XRAIN と C-X合成雨量を比較した結果、電波が完全に消散してしまうほどの強雨があった本事例においては、C-X合成雨量が高い精度であったと考えられる。
- ・ 7月5日の4時～21時の積算雨量は700mmを超えたエリアがあり、梅雨の集中豪雨としては極めて特異な事例であった。
- ・ 朝倉市の土砂崩壊エリアは積算雨量650mm以上のエリアとよく対応していた。

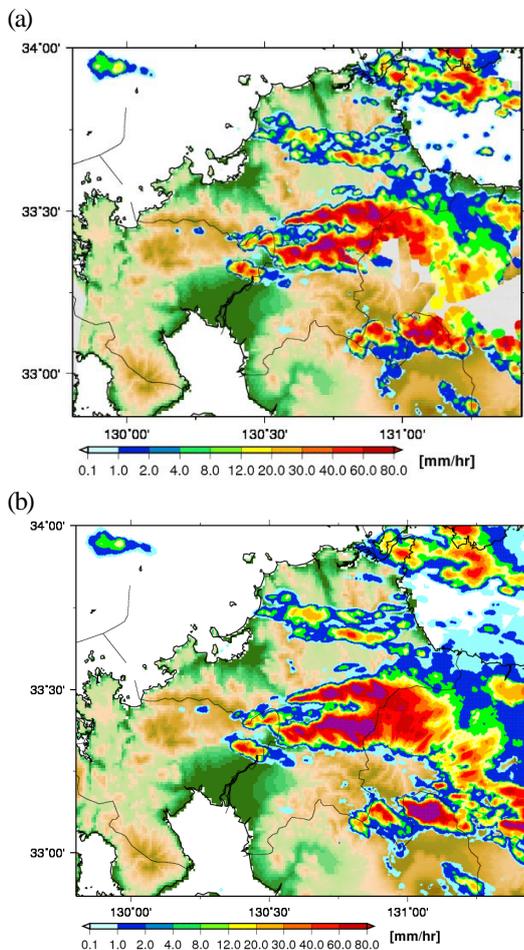


図-2-4 17:00における XRAIN と C-X 合成の降雨強度の比較。
(a) XRAIN, (b) C-X 合成。

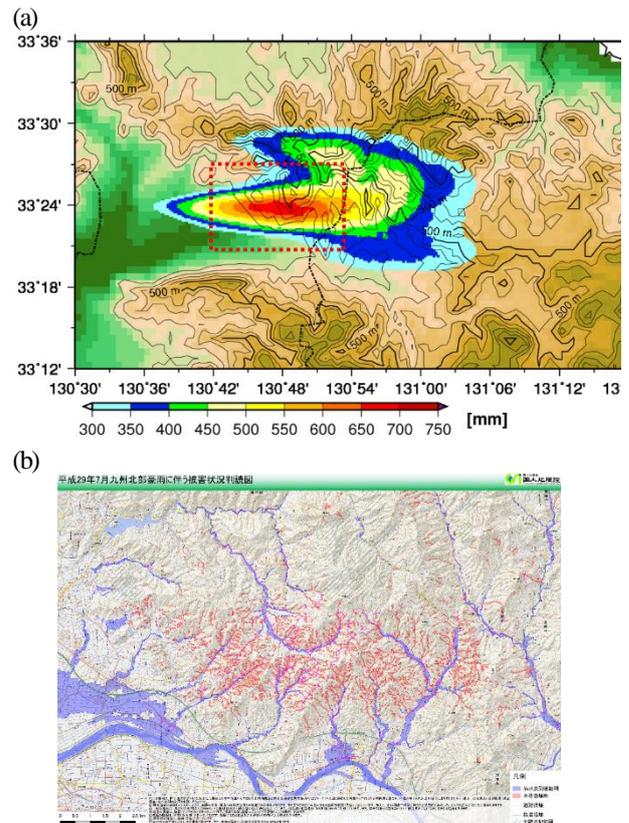


図-2-5 (a)7月5日4時～21時までのレーダー解析による積算雨量分布、(b)国土地理院発表の朝倉エリアにおける斜面崩壊エリア。(a)の赤色点線で囲った領域が(b)の領域と対応している。

3. 数値モデルによる豪雨現象の再現性

竹見 哲也

(1) はじめに

今回の九州北部で発生した豪雨災害では、九州北部のアメダス観測によれば、時間雨量が最大 129.5 mm (朝倉地点)、3時間雨量が最大 261.0 mm (朝倉)、24時間雨量が最大 545.5 mm (朝倉) を記録する集中豪雨が発生した。こういった豪雨による災害を定量的に評価するためには、可能な限り定量的に正確な雨量情報を入力とする河川流出や土砂流出の評価が求められる。定量的な気象情報が災害影響の評価には極めて重要である^{1),2),3)}。宮脇ら⁴⁾は、伊勢湾台風時の淀川流域圏での豪雨による淀川での水害影響評価のため、様々な経路を取る仮想台風による降水データを用い、淀川の流出計算を行った。流出量は台風の経路によって大きく変化し、実際の伊勢湾台風の経路に近い場合に最も流出量が多くなることを示した。

今回の九州北部豪雨による災害影響を評価するためには、雨量の定量的な表現が大事である。一方、気象予報における雨量の定量予測はまだ発展途上であり、気象予報モデルによる豪雨の再現は多くの課題が残されている。九州北部豪雨のような極端な雨量は気象モデルで定量的に再現できるものなのか、再現できたとすればそれほどの雨量はどのような物理過程で生じるのか、といった点が研究としてチャレンジングである。本研究では、こういった点について領域気象モデルを用いた高分解能数値実験により明らかにする。洪水や土砂災害の発生を的確に把握するためには、雨量の定量評価が重要であることから、本研究では、災害影響評価に資するため豪雨の定量的な表現性を調べることを主眼とする。

(2) 気象モデルによる数値実験

a) 数値モデルの設定

本研究で用いた数値モデルは、Weather Research and Forecasting (WRF)モデル (Advanced Research WRF; ARW)⁵⁾ バージョン 3.6.1 である。平成 29 年 7 月九州北部豪雨という実事例を対象としたシミュレーションをするため、WRF の物理過程 (接地層フラックス、境界層混合、雲微物理、大気放射、陸面過程) を設定した。

本研究ではネスティング機能を用いることにより、最も外側の低解像度領域の空間格子間隔を 4.5 km とし、この計算領域から注目する九州北部まで分解能を上げていった。低解像度領域でも解像度を 4.5 km とすることによって、積雲パラメタリゼーションの使用を回避した。積雲パラメタリゼーションを使用しないことで、対流活動が陽に表現されることになる。4.5 km という格子幅は、積雲パラメタリゼーションの有無を判断するにはマージ

ナルではあるものの、Weisman et al.⁶⁾ は 4 km 程度の格子幅ならば非静力学のダイナミクスを表現することが可能であることを示した。本研究では、梅雨前線という総観規模の強制力が作用するという環境場の条件は 4.5 km 格子幅でも十分に表現可能であると判断し、積雲パラメタリゼーションは使用しないこととした。

計算領域は、4 段階ネスティングにより、第 1 領域 (Domain 1) から第 4 領域 (Domain 4) まで設定した。Domain 1 は日本列島の本州以南・朝鮮半島・東シナ海などを含む領域 2025 km×2025 km を 4.5 km 格子でカバーし、第 2 領域 (Domain 2) は九州をカバーする 450 km×450 km を 1.5 km 格子で、第 3 領域 (Domain 3) は九州北部および山口県をカバーする 220 km×200 km を 500 m 格子で、最も内側の Domain 4 は九州北部豪雨が発生した地域周辺をカバーする 100 km×100 km を 167 m 格子で解像するように設定した。次の節で計算領域と地形表現について詳述する。

b) 数値実験の考え方と設定

豪雨など積乱雲活動が関与する極端現象を気象モデルにより定量的に再現するためには、対流に伴う運動を十分に解像することが重要である。Weisman et al.⁶⁾ は、非静力学過程が本質的な対流の組織構造を表現するためには、4 km 程度の解像度が必要であることを示した。これは力学過程から理論的考察に基づき提案した考え方であり、明快な概念である。一方、気象モデルでは、様々な物理過程が複雑に相互作用するため、数値計算上の安定性基準のみでは判定できない数値的なノイズが発生しうる。そのため気象モデルには、乱流混合といった物理的な混合効果に加え、数値的な人工粘性も付加され、計算安定性が確保されている。しかし、この人工粘性は格子スケールの変動を物理的であるかどうかに関わらず減衰させるため⁷⁾、気象モデルの実質的な分解能は格子幅の 6 倍程度とされている⁸⁾。したがって、従来「雲解像シミュレーション」として称されてきた 1 km オーダーの格子幅では、実際には対流現象を十分に解像することが困難である。

また、豪雨などの極端現象を定量的に表現するには、日本のような複雑地形を有する場合には、複雑な地形をできるだけ精緻に表現することが必要不可欠である^{9),10)}。Oku et al.¹⁰⁾ は、2004 年台風 18 号による強風の気象モデルによる再現性を評価するため、WRF モデルと気象庁非静力学モデル NHM とによる極値の再現性を比較した。同じ 1 km の計算格子幅で実施したシミュレーションを比較したところ、同じ 1 km であっても、WRF のほうが強風がより強く再現されることが分かった。これは、NHM の場合には計算の安定化のため急峻な斜面をなだらかにする地形の起伏に対するフィルターがあり、地形

の表現性が異なるためである。このことから、急峻な斜面など地形の複雑さをより正確に気象モデルで表現することが、極端現象の再現のためには必要であることが分かる。

以上の考察から、本研究では、オーダー100 m の格子幅での高解像度数値シミュレーションをすることにより、九州北部豪雨の定量的な再現を試みる。100 m オーダーの格子幅での計算領域 Domain 3 および 4 での詳細地形を気象モデルで作成するため、国土地理院 50 m メッシュ数値地図の DEM データを用いた。一方、1 km オーダーの格子幅での計算領域 Domain 1 および 2 での地形作成には、全球 30 秒メッシュ値の GTOPO30 を用いた。図-3-1 から図-3-4 に Domain 1 から 4 でのモデル地形を示す。この地形を用いたシミュレーションをコントロール実験とする。

次に、地形を精緻に表現することによる豪雨の定量的な再現性への効果を把握するため、コントロール実験の対照実験として、Domain 3 および 4 でも GTOPO30 を使ってモデル地形を作成した場合についても調べる。GTOPO30 の空間解像度が 1 km 弱であるため、Domain 3 と 4 での地形はおおよそ 1 km 間隔のデータからそれぞれの格子幅 500 m および 167 m に補間して作成した。GTOPO30 により作成したモデル地形を図-3-5 および図-3-6 に示す。この場合のシミュレーションを地形感度実験とする。図-3-5 と図-3-6 の地形を国土地理院 50 m メッシュ値から作成した地形と比べると、尾根や谷筋・川筋など地形の微細な構造は、50 m メッシュ値から作成した場合のほうがより精緻に表現されていることが分かる。一方、GTOPO30 から補間することで Domain 3 と 4 の地形を作成してしまうと、1 km 未満の空間スケールの微細地形はそもそも表現しえない。

以上のコントロール実験および地形感度実験を実施する。WRF モデルの初期値・境界値に用いる気象データとして、気象庁メソスケールモデル (MSM) 解析値および米国環境予測センター (NCEP) 最終解析値 (Final

Analysis) を用いた。ともに 6 時間間隔のデータを利用する。本研究では、各時刻の解析値 (予報モデルの初期値) のみを用いることとする。そのため、本研究での数値シミュレーションは、予報計算とは異なる。計算の初期時刻は、コントロール実験・地形感度実験ともに 2017 年 7 月 4 日 9 時 (日本時間、以下同様) とした。

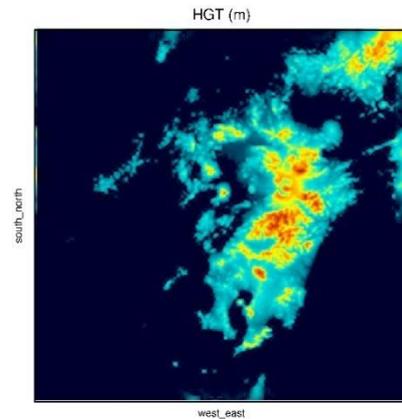


図-3-2 コントロール実験での Domain 2 の地形

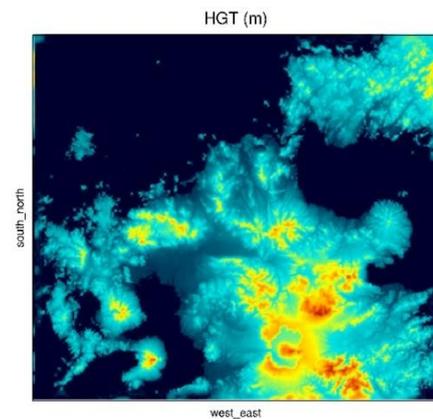


図-3-3 コントロール実験での Domain 3 の地形

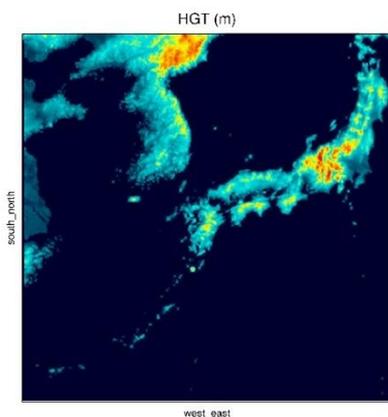


図-3-1 コントロール実験での Domain 1 の地形

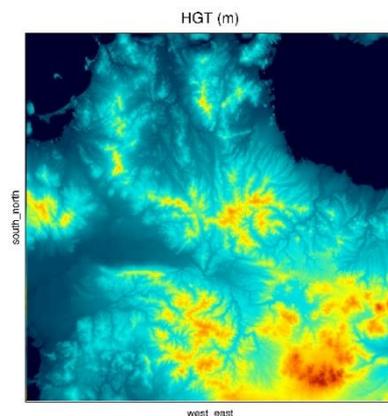


図-3-4 コントロール実験での Domain 3 の地形

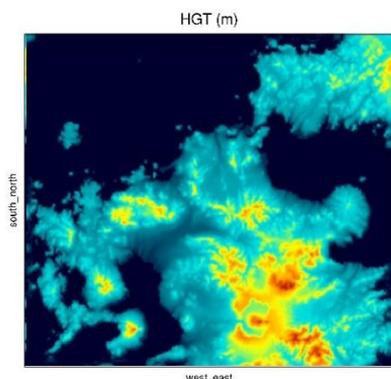


図-3-5 地形感度実験での Domain3 の地形

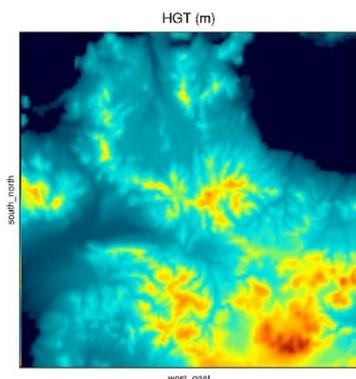


図-3-6 地形感度実験での Domain4 の地形

(3) 数値実験の結果

最初に、コントロール実験により再現された線状の停滞性降水系の振る舞いを図-3-7 に示す。ここでは、2017年7月5日13時から18時までの1時間間隔での数値実験結果を示している。また、図-3-8 に気象庁による解析雨量を示す。モデル計算値は、レーダー観測値による降水強度表現と同様とするため、高度2 kmでの降水粒子の混合比をレーダー反射強度に換算することにより示した。なお、観測値である解析雨量は、各時刻の前1時間の積算降水量に対応することに留意する必要がある。また、モデル計算値と解析雨量とで表示する領域が異なる。コントロール実験の結果を見ると、福岡県南部地域で線状の降水系が東西に伸び、それが図中の期間中に停滞する様子が再現されていることが分かる。対応する時刻の解析雨量と比べると、コントロール実験は、実際に観測された降水系の停滞性と持続性を良好に再現していると言える。メソ降水系の発達の時間推移と空間分布がこのように良く再現されたことで、雨量の定量的な表現も良好であるものと考えられる。

次に、コントロール実験により得られた積算雨量を見てもみる。計算開始時刻から2017年7月7日9時までの積算雨量をコントロール実験および解析雨量について図-3-9 に示す。観測された積算雨量と似たような空間パターンを数値実験は良く再現していることが分かる。定量的に見ると、数値実験では積算雨量がピークで500 mm

程度であるのに対し、解析雨量では1000 mmを超える値を示している。解析雨量は、レーダー計測値を地上での雨量計により補正して空間的にマッピングしたものであるが、雨量計がない場所ではレーダーによる推定値を表すことになる。そのため、解析雨量の1000 mm超という数値が実際に観測されたかどうかは分からないため、数値実験の結果が定量的な再現と言うにはほど遠いというわけではないであろう。朝倉アメダス地点の雨量と比べれば、数値実験の結果は定量的にも良いものだと評価してよい。

以上のコントロール実験の結果を地形感度実験と比べてみる。図-3-10 に、地形感度実験で得られた積算雨量分布を図-3-9 と同様に示す。図-3-10 から、九州北部豪雨が発生した福岡県南部の地域において、積算雨量が300 mmを超える場所があることが分かり、降水が局地的に集中する様子は地形感度実験でも再現されていると言える。しかし、図-3-10 の結果を図-3-9 と比べると、福岡県南部地域での降水は定量的には地形感度実験のほうが少ないことが分かる。すなわち、地形感度実験では、線状降水系が再現されるものの、その停滞性は弱く、降水強度も弱いのである。コントロール実験と地形感度実験では、Domain 3 と Domain 4 でのモデル地形のみが違うだけであり、それ以外の WRF モデルの設定はすべて同一としている。したがって、図-3-9 と図-3-10 で示される積算雨量の違いは、地形の微細な起伏を精緻に表現するか否かによって現れたものと考えられる。

図-3-11 にコントロール実験および地形感度実験それぞれの Domain 4 で得られた格子点別の期間積算雨量と降水強度の頻度分布を示す。積算雨量で見ると、両実験でどちらかが系統的に雨量が多いという傾向は認められない。Domain 4 の領域サイズは両実験で同じであるため、このことは両実験での水蒸気収束や降水を含めた水収支は全体で評価すれば大きな違いはないことを示唆している。一方、降水強度のほうは、時間雨量90 mmを超える強い極値側においてコントロール実験での頻度が高くなっていることを示している。

図-3-11 で見られた実験別の降水特性の違いを環境条件の違いから調べてみる。図-3-12 は、両実験での Domain 4 における全格子点の時系列データから対流有効位置エネルギー (CAPE) および対流抑制 (CIN) の頻度分布を示す。CAPE については両実験間でいずれかが大きいという顕著な傾向は見られない。しかし CIN については、数値が50程度以上になると、コントロール実験の場合のほうが低頻度となることが見てとれる。つまり、対流活動を抑制する効果が、コントロール実験の場合に軽減する傾向にあることを示している。

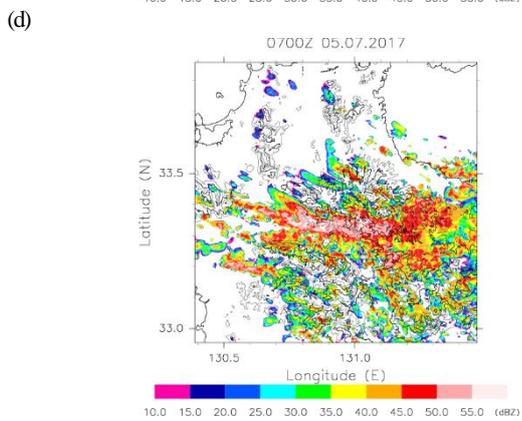
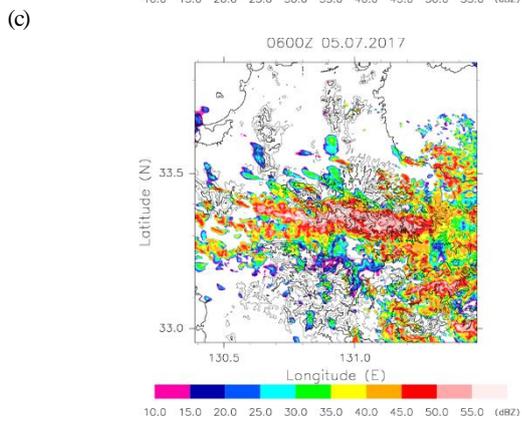
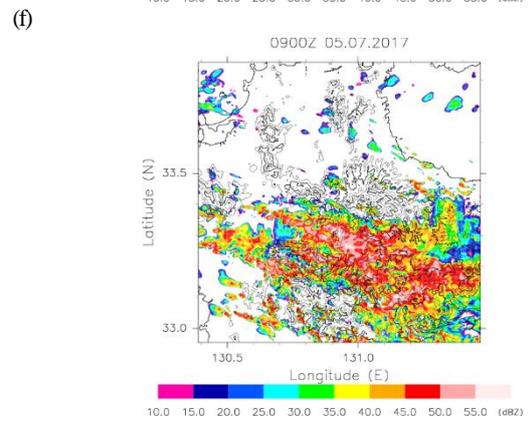
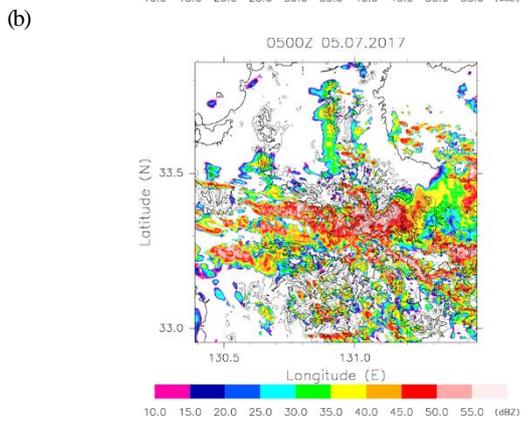
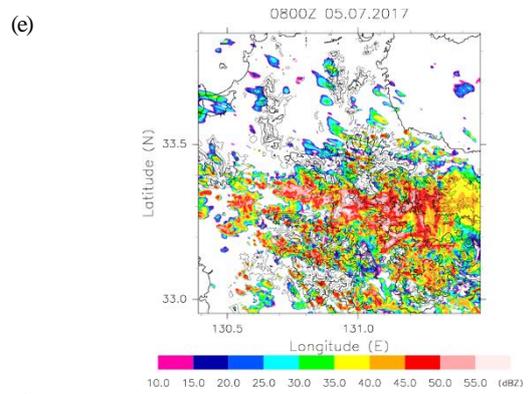
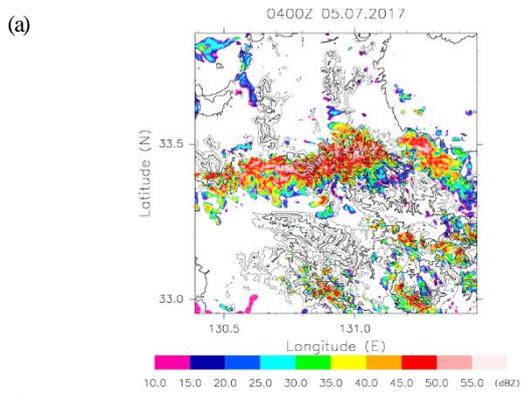


図-3-7 コントロール実験による降水分布. 2017年7月5日
(a)13時, (b)14時, (c)15時, (d)16時, (e)17時, (f)18時の数値

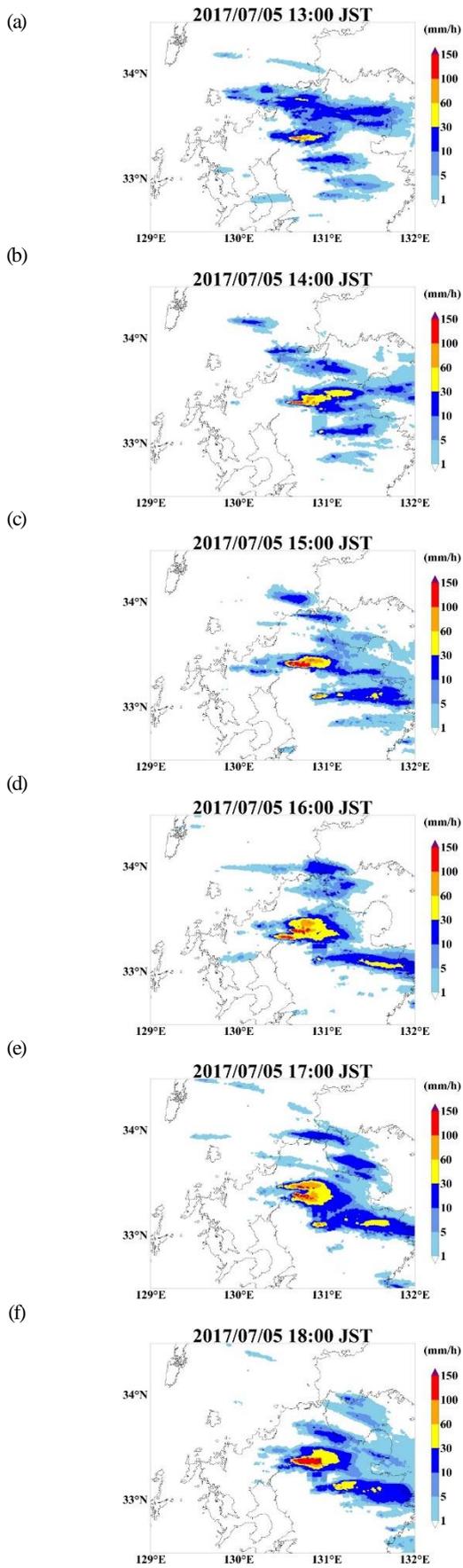


図-3-8 気象庁解析雨量データによる降水分布。
2017年7月5日(a)13時, (b)14時, (c)15時, (d)16時,
(e)17時, (f)18時。

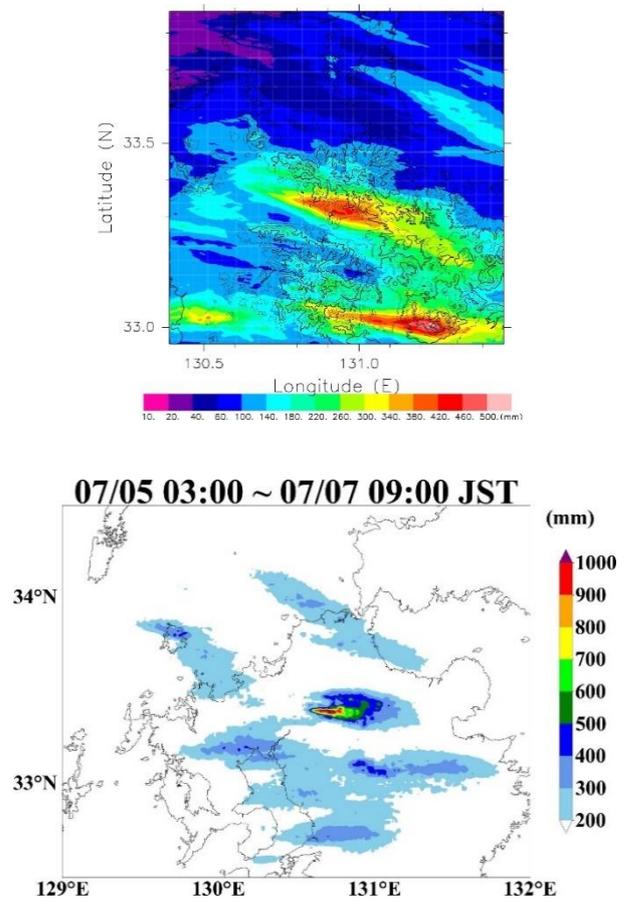


図-3-9 気積算雨量分布。(上)コントロール実験,
(下)解析雨量

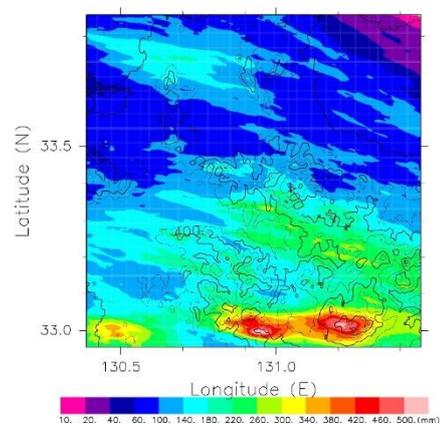


図-3-10 地形感度実験による期間積算雨量

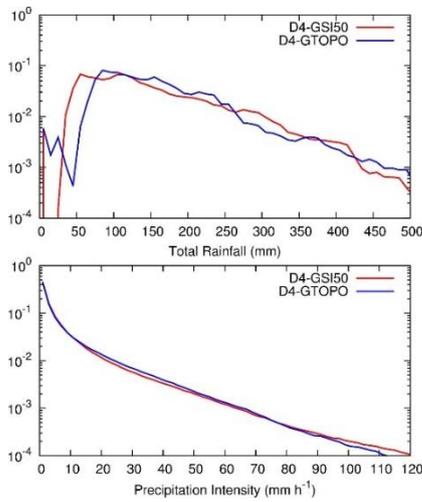


図-3-11 コントロール実験(赤実線)と地形感度実験(青実線)で得られた Domain 4 での格子点別の積算雨量 (上) と降水強度 (下) の頻度分布

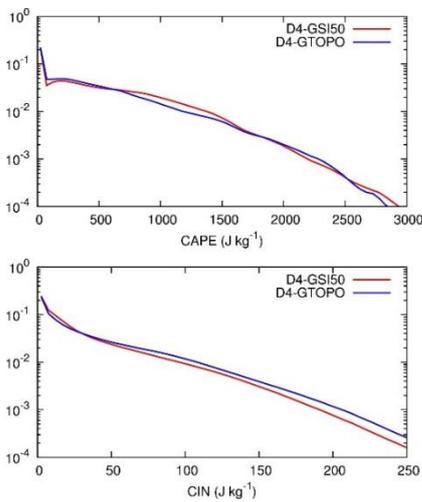


図-3-12 コントロール実験(赤実線)と地形感度実験(青実線)による Domain 4 での CAPE (上) および CIN (下) の頻度分布

(4) まとめ

水平格子幅 167 m という高解像度数値シミュレーションを行い、線状降水系の停滞性と持続性を再現することができ、福岡県南部地域で 500 mm を超える雨量を再現することができた。100 m オーダーの格子幅を設定することで、対流運動を十分に解像することができ、かつ複雑地形の微細構造を気象モデルに再現することができた。この二点が雨量の定量的な再現に繋がったものと考えられる。

同じ解像度でも用いる地形データの分解能が不十分だと地形の微細性が表現されず、相対的に滑らかな地形になってしまう。地形表現の感度を調べる対照実験から、微細地形を精緻に表現することが、線状降水系の停滞性と持続性の再現には必要であると言え、結果として豪雨の極値の再現に必要なことがわかった。このような豪雨の定量表現により、災害影響の評価が可能となると言える。

以上のことから、高解像度シミュレーションする場合には、単に格子幅を細密にして対流運動を詳細に分解するだけでは十分ではなく、地形の微細性をも精緻に再現することが大事であると言える。

本実験で再現された雨量は、解析雨量に比べてかなりの過少評価であった。解析雨量の妥当性の問題もあるとは言え、より正確に雨量を再現することが求められる。このためには、積乱雲内の降水粒子の生成過程や乱流過程など微細規模の物理過程の理解に基づく的確なモデリングが必要だと考えられる。

4. 過去事例との比較

向川 均・竹見 哲也

(1) 日本における停滞性降水系と平成 29 年 7 月九州北部豪雨

日本の暖候期には、梅雨前線や台風の活動により、しばしば集中豪雨が発生し、ときには甚大な災害に至る。とりわけ梅雨期には、前線の停滞性が高いため、前線活動に伴う降水系も停滞する傾向にある。また、これら停滞性の降水系は線状に組織化することが多く、線状降水帯と呼ばれる¹¹⁾。

線状降水帯の組織化のメカニズムや豪雨の発生機構は、これまで主に事例解析による研究がなされてきた。事例解析によって個別事象の詳細な物理機構を理解することができるが、それらを一般化するには事例を多数積み重ねることが重要である。この点で多数事例に基づく統計的な解析が、事例解析と並んで進められるべきであると言える。しかし、統計解析による集中豪雨の研究はこれまで数少なかった。近年、レーダーや衛星による高頻度・高分解能のデータの蓄積が進んだことで、集中豪雨や降水系の統計的な研究がなされるようになってきた。津口・加藤¹²⁾は、1995～2009年という長期間にわたる期間を対象とし、4～11月に発生する集中豪雨を解析雨量データから客観的に抽出し、豪雨をもたらす降水系の実態を統計的に調べた。解析の結果、降水系の形状は、抽出された事例の 2/3 程度の場合に線状であることが分かった。このことから、集中豪雨をもたらす降水系の多くは、線状降水帯であると言える。

Unuma and Takemi¹³⁾は、気象庁の全国合成レーダーデータ (1 km メッシュ, 1 時間毎) を用いて、2005～2012 年の 8 年間を対象とし、5～10 月の暖候期における停滞または低速で移動する降水系 (準停滞性降水系) の特徴と発生環境条件を調べた。図-4-1 は、日本全国での準停滞性降水系の発生頻度を示す。発生頻度の高い地域は、太平洋側、九州地方、中国地方、中部地方内陸部、関東地方内陸部に分布していることが分かる。一方、図-4-2 は、準停滞性降水系のうち線状に組織化したものの割合 (百分率) の全国分布を示したものである¹⁴⁾。線状に組織化した準停滞性降水系の割合は全般として高いことが分かり、とりわけ図-4-1 で発生頻度の高い地域では線状降水系の割合も高いことが見てとれる。

図-4-1 および図-4-2 において九州北部地域を見ると、準停滞性降水系の発生頻度は全国的に見ても高く、準停滞性降水系のうち 9 割以上は線状に組織化することが分かる。さらに、線状の準停滞性降水系の走向で最も高い頻度で出現する方位の全国分布を図-4-3 に示す。南西・北東の走向の場合が全国で最も出現頻度が高く、九州北部でも同様の傾向が見て取れる。ただし、九州北部の一

部の地域 (福岡県南部) では、西・東の走向の頻度が最も高い。

このように九州北部では、準停滞性降水系の出現頻度が全国でも最も高い地域のひとつであり、準停滞性降水系のほとんどが線状に組織化し、その走向は南西・北東が卓越するものの一部の地域では東西方向の場合も見られる。こういった気候的な背景に基づき、平成 29 年 7 月九州北部豪雨が発生したのである。

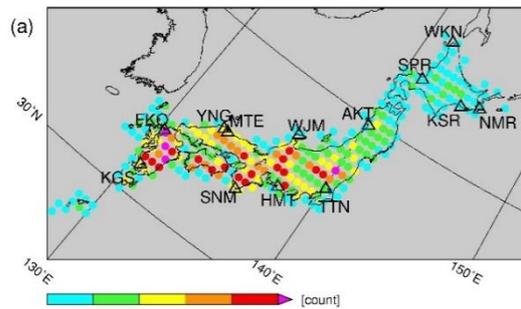


図-4-1 準停滞性降水系の地域別の発生頻度の全国分布 (Unuma and Takemi¹³⁾より)

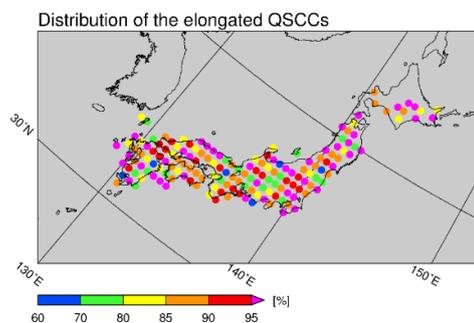


図-4-2 準停滞性降水系のうち線状の割合の全国分布 (Unuma and Takemi¹⁴⁾より)

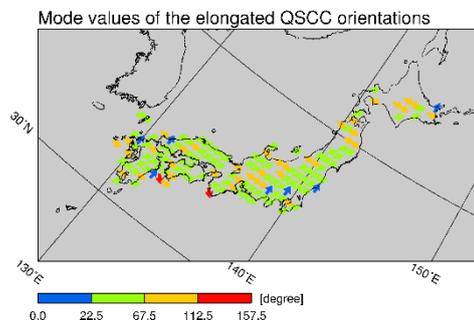


図-4-3 準停滞性降水系の走向の全国分布 (Unuma and Takemi¹⁴⁾より)

(2) 総観気象場の特徴

気象研究所の解析¹⁵⁾によると、2017年7月5-6日における福岡県・大分県での豪雨発生時には、大気下層で東シナ海から九州地方に流入した暖湿流と、対流圏中層で流入した寒気に伴い、大気成層の安定度が低下し、対流性降水が発生しやすい大気状態であったことが指摘されている。

そこで、当時の総観スケールの大気環境場が同時期における過去の状態と比べ、どの程度極端であったのかをを検証するため、津口¹⁶⁾を参考に、1958年～2017年までの過去60年間の気象庁長期再解析データ(JRA-55)を用いて、対流圏中層の温度、大気下層の暖湿流の強さ、及び大気成層の安定度の年平均偏差について調査した。なお、JRA-55再解析データとして、緯度経度1.25度格子の日平均p-面解析値を用いた。

a) 対流圏中層の温度

まず、豪雨発生時の2017年7月5日における500hPa温度について解析した。その結果、豪雨発生時には、九州付近には -6.4°C の寒気が流入していたことが明らかになった。この寒気に伴う温度偏差は、気候学的標準偏差で規格化すると、九州付近で -1.3 、東シナ海で -1.6 (図-4-4)となり、当時の大気中層の温度は、平年値に比べやや低温ではあるが、さほど極端な低温ではなかったことが分かる。

次に、7月上旬における九州北部(33.75°N , 130°E)での500hPa温度の経年変動を調査した(図-4-5)。その結果、同時期に九州北部には、幾度も -10°C に達する寒気が流入していたことが分かる。従って、2017年7月5日に観測した九州北部付近における対流圏中層の寒気の強さは、さほど顕著ではないことがこの図からも明らかとなった。

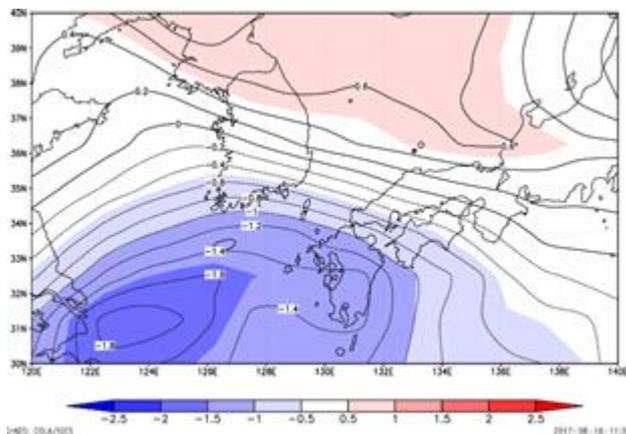


図-4-4 気候学的標準偏差で規格化した2017年7月5日における500hPa温度偏差。

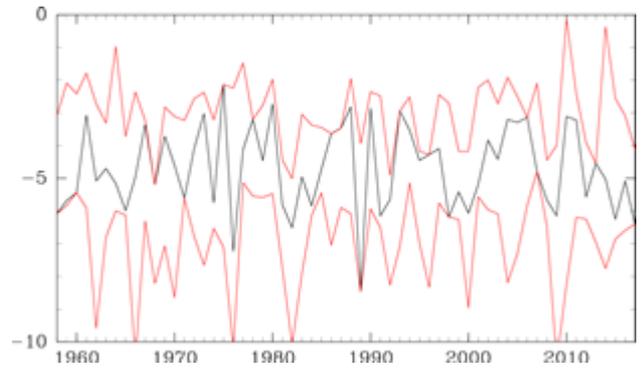


図-4-5 6月30日から7月10日の期間における九州北部(33.75°N , 130°E)での500hPa温度の最高・最低値の経年変動(赤実線)。黒実線は、7月5日の値の経年変動。横軸は年(西暦)。

b) 大気下層での水蒸気流入量

発生した豪雨の影響を受けない大気環境場の特徴を抽出するため、豪雨発生直前の時期(7月4日と5日の2日間での平均値)における豪雨発生域の上流域を解析対象領域として、大気下層での水蒸気流入量について調査した。ここで、解析対象領域を、図-4-6で示された白枠で囲まれた矩形領域($31.25^{\circ}\text{N} \sim 33.75^{\circ}\text{N}$, $126.25^{\circ}\text{E} \sim 130.0^{\circ}\text{E}$)と定義した。この図から、東シナ海から九州へ大気下層(950hPa)で多量の水蒸気が流入していることが確認できる。また、東シナ海で大気下層の水蒸気量が増加していることから、海面からの水蒸気供給も無視できないことが示唆される。なお、解析対象領域において、7月4日と5日の2日間で平均した500hPa温度の年平均偏差は約 -1.6°C 程度(規格化偏差は -1.4)であった。

次に、過去60年間の再解析データを用いて、7月上旬

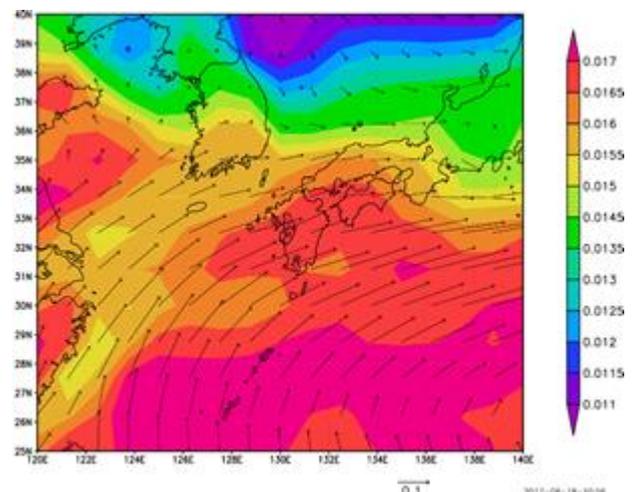


図-4-6 平成29年7月4日と5日で平均した、950hPaにおける水蒸気フラックス(矢印: $\text{kg}/\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$)と、比湿(色塗り: kg/kg)。白枠は解析対象領域。

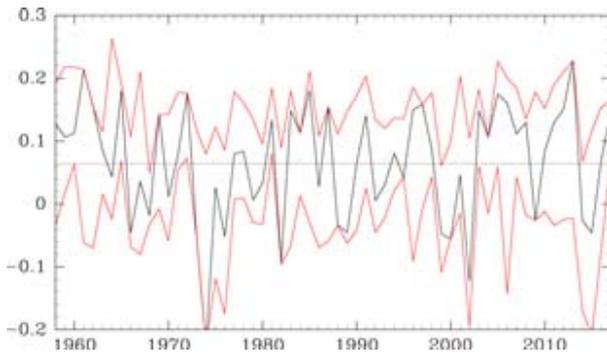


図4-7 6月30日から7月10日の期間における連続した2日間及び、解析対象領域（図-3参照）で平均した950hPa水蒸気フラックスの東向き成分（kg/kg・m/s）の最大・最小値（赤実線）の経年変動。黒実線は、7月4日と5日の2日間での平均値。横軸は年（西暦），水平線は平年値。

の解析対象領域における大気下層（950hPa）での水蒸気フラックスの東向き成分（kg/kg・m/s）の経年変動について調査した（図4-7）。この図から、2017年の7月上旬に観測した大気下層水蒸気フラックスの東向き成分の大きさは平年値よりも大きく、確かにこの時期としては多量の水蒸気が大気下層で九州北部に流入していたことが分かる。しかし、その偏差は、さほど顕著では無く、同程度の正偏差を持つ暖湿流は、過去にも多数出現していることも明らかである。従って、2017年に観測された大気下層の暖湿流の強さもさほど顕著ではないことが確認できる。

c) 大気の成層安定度

次に、同時期における大気成層の安定度について解析を行った。ここでは、500hPa飽和相当温位と950hPa相当温位の差（前者から後者を差し引いた値）を大気成層

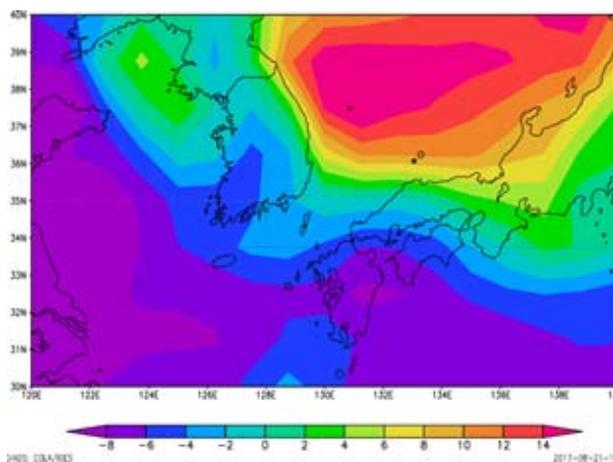


図4-8 2017年7月5日における大気成層の安定度の水平分布。大気成層の安定度は、500hPa飽和相当温位と950hPa相当温位の差（K）として定義した。白枠は解析対象領域（図-3と同じ）。

の安定度の指標とした。この値は、950hPaに存在した空気塊を500hPaに持ち上げたときに空気塊に働く浮力の大きさを示しており、その値が負で大きいほど大気の成層状態は不安定で対流性降水が発生しやすいと考えられる。

図4-8に、2017年7月5日における大気成層の安定度の水平分布を示す。この図から、九州からその西方域にかけて、その値が-6K以下と大きな負となる領域が広がっており、この時期、九州では大気の成層状態はかなり不安定であったことが分かる。このように、九州北部で大気の成層状態が不安定となったのは、図4-6で示されたように、大気下層の水蒸気量が大きかったことと、大気中層で寒気が流入していたことが原因である。一方、その他の西日本では、安定度の値が正となる領域が広がっており、大気成層は安定していた。

また、図4-9に、過去60年間の再解析データを用いて、7月上旬の解析対象領域における安定度（K）の経年変動について調査した結果を示す。この図から、2017年7月上旬における大気の成層状態は、この時期の平均的な状態に比べて不安定ではあるが、さほど極端に成層不安定な状態ではなかったことが分かる。但し、赤実線で示されるように、2017年7月上旬では安定度は常に4K程度以下であり、大気成層が持続して不安定な状態であったことは特徴的である。このように大気成層状態が持続的に不安定となったのは、過去60年間で5回程度出現したことも見て取れる。

d) 大気環境場の出現頻度分析

以上の解析から、2012年7月上旬の九州豪雨発生時の大気環境場は、大気下層での暖湿流の存在と、対流圏の中層での寒気に伴う不安定な大気成層状態として特徴付けられることが明らかになった。次に、このような大気環境場の出現頻度に関する解析を行い、豪雨発生時の大気環境場の特異性について吟味する。

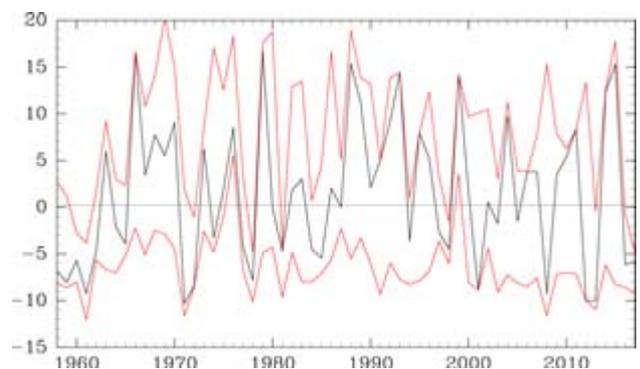


図4-9 6月30日から7月10日の期間において、解析対象領域（図-5参照）で平均した大気成層の安定度（K）の最大・最小値（赤実線）の経年変動。水平線は7月5日の平均値。黒実線は7月5日の値の経年変動。横軸は年（西暦）。

図4-10の小さな点は、過去60年間の6月30日から7月10日の期間において、解析対象領域及び連続した2日間で平均した水蒸気フラックスの東向き成分の大きさ（横軸）と、日平均値より求めた大気成層の安定度（縦軸）の年平均偏差の分布を示す。なお、それぞれの値は、気候学的標準偏差で規格化した。また、等値線は、これらのデータ点より、カーネル法¹⁷⁾を用いて推定した出現確率密度関数（PDF）の値を示す。この値の大きい領域に相当する大気状態が7月上旬に九州西方の解析対象領域で出現しやすい。また、赤い星印は、2017年7月5日の値を示す。この図から、赤い星印はPDFが極大となる領域付近に存在していることが分かる。すなわち、2017年7月5日の大気状態は、この時期に、九州西方領域で出現する典型的な大気環境場の状態であったことが明らかになった。

なお、九州北部では、2012年7月中旬（14日）にも豪雨が発生している。このため、7月中旬における大気環境場の状態を、同様の指標を用いて解析した（図4-11）。まず、図4-11と図4-10の比較から、7月中旬は7月上旬に比べ、大気下層での東向き水蒸気フラックスが大きいときに大気成層状態のバラツキが大きくなることや、大気成層状態が不安定なときに水蒸気フラックス量のバ

ラツキが大きくなることを除くと、両時期におけるPDFはよく似ていることが分かる。また、2012年の場合も、豪雨発生時の大気環境場（赤い星印）は、PDFが極大となる領域に位置しており、やはり、この時期としては典型的な大気環境場の状態であったことが分かる。なお、7月上旬に比べ7月中旬のPDFの分布が広がったのは、7月中旬には九州地方は年によって梅雨明けする場合があります。大気状態の年々変動が梅雨最盛期の7月上旬に比べ大きくなるためと考えられる。

e) まとめ

2017年7月上旬に発生した九州豪雨時の総観スケールでの大気環境場の特徴を吟味するため、過去60年間の気象庁長期再解析データ（JRA-55）を用いた解析を行った。その結果、豪雨発生時には、大気の成層状態は平年に比べやや悪く、東シナ海から流入する水蒸気フラックスが平年に比べやや多い状態であったことが明らかになった。但し、そのような大気環境場の状態は、7月上旬に最も出現しやすいことも明らかになった。従って、今回のような豪雨は、この時期の九州地域ではいつ発生しても不思議ではないことが示唆される。

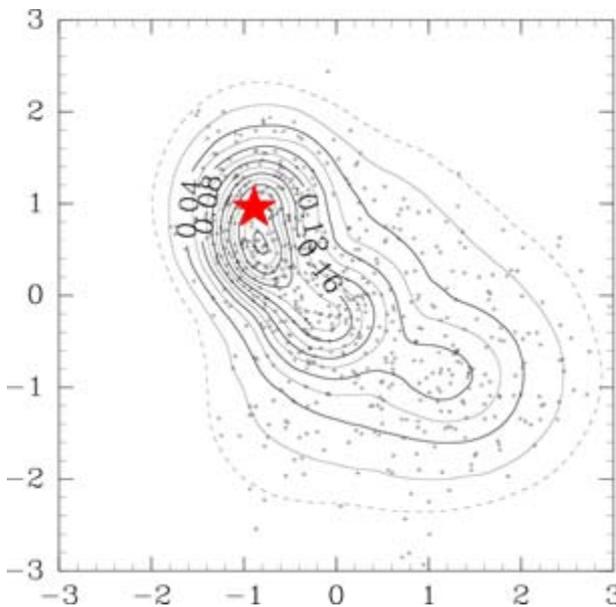


図4-10. 6月30日から7月10日の期間において、解析対象領域で平均した大気成層の安定度（横軸）と、950hPaにおける水蒸気フラックスの東向き成分の大きさ（縦軸）の年平均偏差の分布。それぞれの値は気候学的標準偏差で規格化した。小さな点は過去60年間の解析値、赤い星印は2017年7月5日の値。等値線は、データ点よりカーネル法を用いて求めた確率密度関数（PDF）を示す。この値の大きな領域の大気状態が出現しやすい。

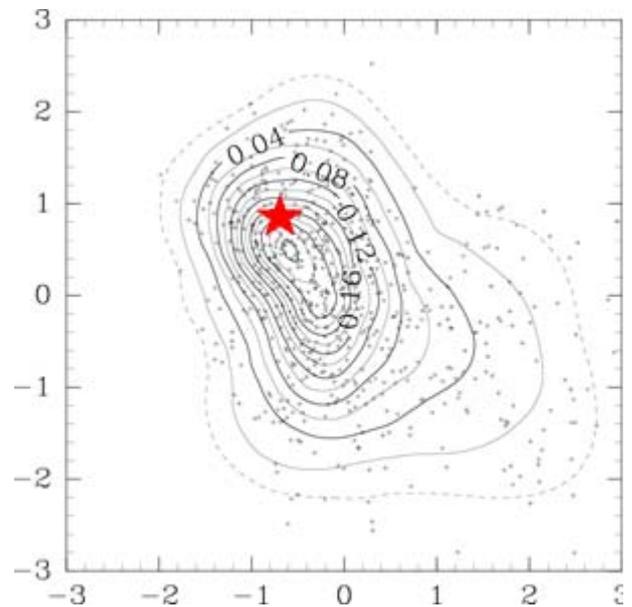


図4-11. 図4-10と同じ。但し、7月6日から7月19日の期間。赤い星は2012年7月14日の解析値。

5. 平成 29 年 7 月九州北部豪雨の温暖化影響評価

竹見 哲也

(1) はじめに

伊勢湾台風級の台風が将来気候に発生したとしたら、その気象外力はどうなるのか？こういった問いに対する回答を与えてくれる手法のひとつが擬似温暖化実験手法である¹⁸⁾。これまで、1959年伊勢湾台風、1991年台風19号、2004年台風18号、2011年台風12号といった過去に甚大な風水害を及ぼした顕著台風のダウンスケール実験および擬似温暖化実験をすることにより、将来の温暖化気候条件下でこういった顕著台風による気象外力がどのように変化するかを調べた。一方、台風起源ではない豪雨災害については、平成26年8月豪雨といった停滞前線活動による豪雨の擬似温暖化実験も試み、梅雨前線や秋雨前線といった停滞前線に伴う集中豪雨の温暖化影響についての今後の方向性を示した。

前線性の集中豪雨について温暖化影響の分析を深化させるため、「平成29年7月九州北部豪雨」を対象として擬似温暖化実験により温暖化影響を探った。

(2) 擬似温暖化実験の手順

ダウンスケール実験には、領域気象モデル WRF を用いた。豪雨をもたらした線状に組織化した降水系を十分に解像するため、ネスティング機能を用いて対象領域の最も細かい解像度が 500 m となるように領域設定した。WRF モデルの計算領域は図-2-1 から図-2-3 の3段階ネストとした。Domain 1 が 4.5 km 格子・2025 km×2025 km 領域、Domain 2 が 1.5 km 格子・450 km×450 km 領域、Domain 3 が 500 m 格子・220 km×200 km 領域である。初期値・境界値の3次元気象データおよび地表面データとして、JRA-55 を用いた。500 m 格子の Domain 3 の地形データの作成には、国土地理院 50 m メッシュ標高データを用いた。擬似温暖化実験のための温暖化差分データは、気象研究所 MRI-AGCM3.2S による現在気候再現実験および RCP8.5 シナリオに基づく将来気候実験のうち CMIP5 モデルアンサンブル平均の SST でドライブしたケース¹⁹⁾の月平均値データ²⁰⁾を用いた。7月に発生した豪雨のため、7月平均の温暖化差分データを利用した。

計算開始時刻を7月3日00 UTC、3日12 UTC、4日00 UTC、4日12 UTCとずらして計算し、初期時刻別のアンサンブルの再現実験および擬似温暖化実験を実施した。

(3) 結果

7月3日00 UTCおよび4日00 UTCを計算初期時刻とした再現実験および擬似温暖化実験の Domain 3 での7月4日18 UTCから7日00 UTCまでの積算雨量の分布を図-5-1 と図-5-2 に示す。再現実験結果から、九州北部豪雨

災害が顕著であった福岡県南部での積算雨量の分布パターンは、初期時刻によらずに似ているものの、定量的には大きな差が生じてしまうことが分かる。4日12 UTCの場合のほうが現実に近い結果である。一方、擬似温暖化実験の結果からは、初期時刻によらず豪雨の空間パターンは似ており、また、定量的にも大きな差はないことが分かる。再現実験と擬似温暖化実験との違いを見ると、3日00 UTCを開始時刻とした場合には温暖化条件で積算雨量が増加しているものの、4日00 UTCを開始時刻とした場合には温暖化条件で雨量が増加していない。このように初期時刻の違いに対して温暖化条件の感度の現れ方が違うという結果となった。

再現実験と擬似温暖化実験との中の積算雨量および時間雨量強度の違いを見るため、Domain 3 全格子点での7月4日18 UTCから7日00 UTCの間の時系列データから、積算雨量および時間雨量の頻度を求めた。その頻度分布を図-5-3 に示す。

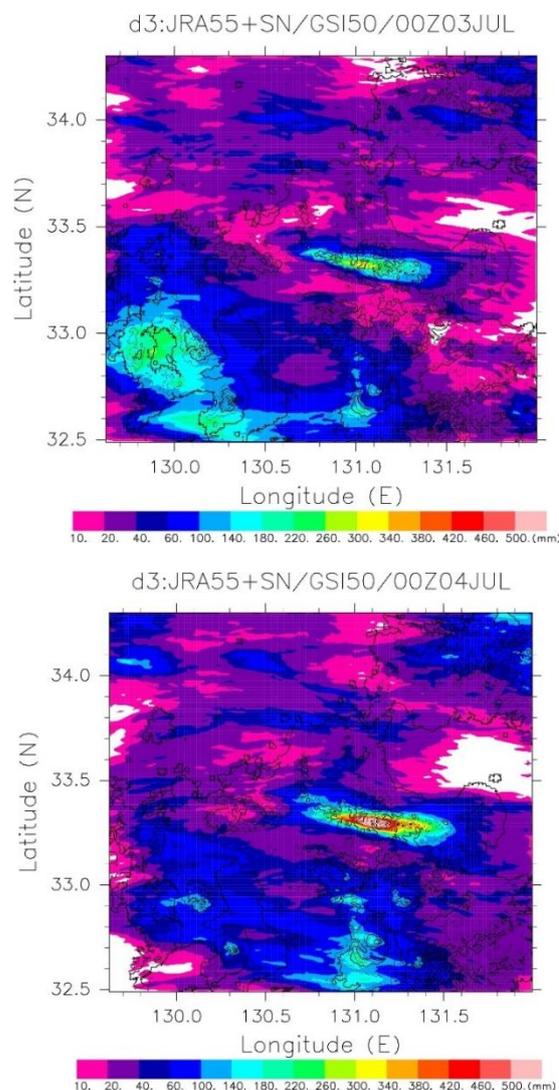


図-5-1 再現実験で得られた7月4日18 UTCから7日00 UTCの期間のDomain 3での積算雨量の分布。計算初期時刻は、上が7月3日00 UTC、下が7月4日00 UTCである。

積算雨量については、計算開始時刻に対する違いはあるものの、おおよそ擬似温暖化実験の場合に積算雨量が多い場合の頻度が増大していることが分かる。一方、時間雨量については、擬似温暖化実験の場合に強い降水強度の頻度が減少している。これまでの理解では、強い降水強度の頻度は温暖化条件で増加するとわれてきたため、それと反対の結果を図-5-3は示している。Domain 3での可降水量を見ると温暖化条件で増加しているものの、対流圏の気温減率は温暖化条件で小さくなっている（すなわち大気が安定化している）ことが分かる。可降水量の増加は降水量の増大に繋がるものの、気温減率の低下は対流活動を抑制する作用がある。この相反する効果のいずれが勝るかによって降水の強弱が決まると考えられるため、今回の結果からは気温減率の安定化効果が温暖化条件で現れたと言える。

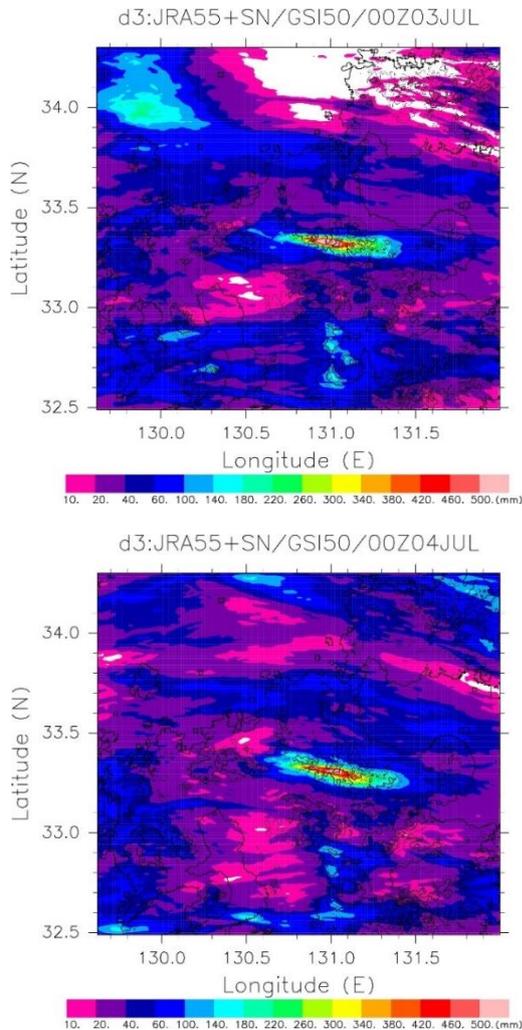


図-5-2 擬似温暖化実験で得られた7月4日18 UTCから7日00 UTCの期間のDomain 3での積算雨量の分布。計算初期時刻は、上が7月3日00 UTCの場合、下が7月4日00 UTCの場合である。

そもそも積乱雲の発達には、弱い強制力の場合には、ランダム性の高い現象である。こういった現象に対して温暖化影響を分析するためには、より緻密なアプローチが求められている。今回の結果は、前線性の集中豪雨、さらには局地的な豪雨といった事象について温暖化影響を分析するための今後の手法開発の必要性を示唆している。

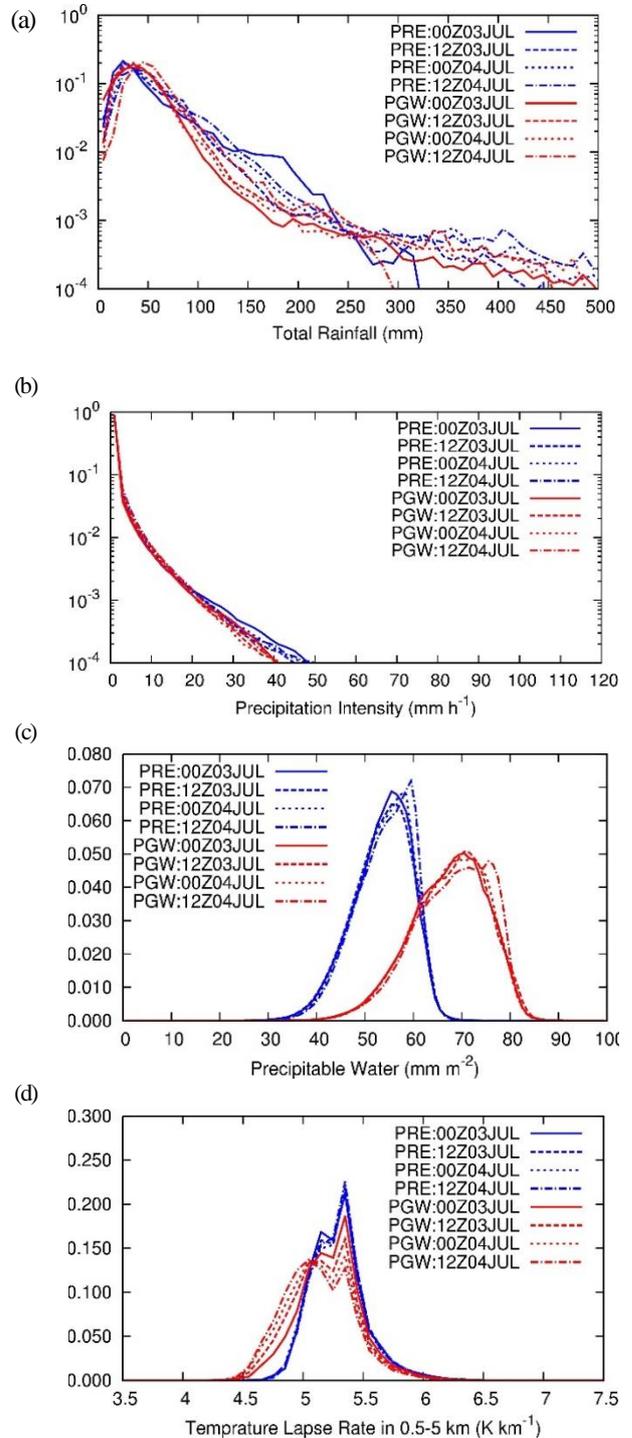


図-5-3 Domain 3での (a) 積算雨量および (b) 時間雨量の頻度分布。図中凡例の PRE は再現実験、PGW は擬似温暖化実験を、時刻は異なる計算開始時刻の数値実験の場合を意味する。また、Domain 3での (c) 可降水量および (d) 対流圏の気温減率も示す。

6. おわりに

中北 英一

今回の豪雨は、梅雨タイプの豪雨、そして土砂や流木流出としては最悪クラス（国土交通省が洪水や高潮外力に用いている Level1, Level2 で言うと Level2）に匹敵すると考えられる。気候変動による影響がどれくらいあるかは今後気候変動影響評価研究のなかで明らかにされて行かれる中、日本中で梅雨タイプの豪雨の頻度が増加することは明らかになってきている²¹⁾。またこれまでは九州と東海以東とでは梅雨豪雨をもたらす南方からの水蒸気の流入具合が異なる中、気候変動によって東日本でも九州タイプの梅雨豪雨が生起し出すことも推測されている¹⁾。そういう意味では、今回のような最悪クラスの梅雨豪雨は九州以外でも生起し出す可能性が高い。

したがって、50年後をイメージすると下記のようになる。すなわち、気候変動適応になるということも含め、王道として降雨予測技術の飛躍的な向上とそのための降雨観測技術のさらなる向上と水蒸気観測技術の飛躍的な向上が実現されていることを期待する。

- 1) 夜中から未明に発生しやすい梅雨豪雨の場合、前日の遅くとも午後9時には、数時間後には梅雨豪雨がどこに発生するという予報が必要である。何故か、逃げるしかないからである。
- 2) そのためには、大気上層の寒気浸潤や下層の水蒸気浸潤が的確に予測される必要がある。
- 3) そのためには、リモートセンシング技術の向上、特に水蒸気の動きを詳細にセンシングできる技術の実現を果たす必要がある。
- 4) また、降水レーダーにより降水粒子はかなりの精度、空間分解能で観測できるようにはなってきたが、それをはるかに凌駕する技術、すなわち、多周波で全天の気流、水蒸気、雲、降水粒子を一瞬に観測できる技術が現業化されているべきである。
- 5) 雲物理プロセスも飛躍的に理解が進んでそれをベースにした大気モデルが開発されているべきである。
- 6) 上記の超理想的なセンシング技術を大気モデル計算の初期情報として利用する技術も必要である。
- 7) そして、それらが現業の実時間手法となるためには、超々スーパーコンピューターが実現している必要がある。
- 8) また、降雨予測情報を的確に利用する技術も発展している必要がある。いくら上記の超理想的なセンシング技術が現業化されても、初期の場にはノイズが存在する。すなわち、一つだけの予報計算だけでは現実に生起する豪雨を予測できない。し

たがって、超多数のアンサンブル計算が必要であるとともに、そのアンサンブル予測情報を避難などの減災にどう実時間で利用するかという考え方、技術が飛躍的に向上している必要がある。

以上が、豪雨の予測技術として実現しておくべきである。

最後に、梅雨豪雨の特徴と減災について触れておく。

梅雨豪雨で我が国の大河川が越水氾濫する危険性は小さい。むしろ、大河川に流れる支川、いわゆる中小河川で洪水や土砂流出が生起する。そして局地的だから故に一旦豪雨があると本川よりいきなりシビアな人的被害を伴う災害になる。このことが長年繰り返されている。中小河川は全国あまたあるからなかなか対策がおぼつかない。しかし、「いきなりシビアな人的被害を伴う災害」である。したがって、中小河川にもしっかりした外力（大気以外の河川や斜面諸量）の観測態勢と減災計画が必要である。このことは気候変動適応にもなる。特に、「いきなりシビアな人的被害を伴う災害」であるが故に、中小河川においても最大クラス想定は極めて重要である。そのためにも、降雨予測技術の飛躍的な向上とそのための降雨観測技術のさらなる向上は大きく役に立つことになる。勿論、気候変動下での最大クラス想定においてもである。

参考文献

- 1) Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K. and Yasuda, T.: Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.41, pp.5106-5113, 2014.
- 2) Mori, N., and Takemi, T.: Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean, *Weather and Climate Extremes*, Vol.11, pp.53-69, 2016.
- 3) Takemi, T., Okada, Y., Ito, R., Ishikawa, H., and Nakakita, E.: Assessing the impacts of global warming on meteorological hazards and risks in Japan: Philosophy and achievements of the SOUSEI program, *Hydrol. Res. Lett.*, Vol.10, pp.119-125, 2016.
- 4) 宮脇航平, 立川康人, 田中智大, 石井大貴, 市川温, 萬和明, 竹見哲也: 最大クラス台風を想定した淀川流域における洪水流出シミュレーション, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.72, No.4, pp.L31-L36, 2016.
- 5) Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J.G.: A description of the Advanced Research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-47 + STR, 113pp., 2008.
- 6) Weisman, M. L., Skamarock, W. C., and Klemp, J. B.: The resolution dependence of explicitly modeled convective systems, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.125, pp.527-548, 1997.
- 7) Takemi, T., and Rotunno R.: The effects of subgrid model mixing and numerical filtering in simulations of mesoscale cloud systems. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.131, pp.2085-2101, 2003.
- 8) Bryan, G.: Spurious convective organization in simulated squall lines owing to moist absolutely unstable layers. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.133, pp.1978-1997, 2005.
- 9) Takemi, T.: High-resolution numerical simulations of surface wind variability by resolving small-scale terrain features. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.57, pp.421-428, 2009.
- 10) Oku, Y., Takemi, T., Ishikawa, H., Kanada, S., and Nakano, M.: Representation of extreme weather during a typhoon landfall in regional meteorological simulations: A model intercomparison study for Typhoon Songda (2004). *Hydrol. Res. Lett.*, Vol.4, pp.1-5, 2010.
- 11) 津口裕茂: 線状降水帯, *天気*, Vol.63, pp.727-729, 2016.
- 12) 津口裕茂, 加藤輝之: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析, *天気*, Vol.61, pp.455-469, 2014.
- 13) Unuma, T. and Takemi, T.: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.142, pp.1232-1249, 2016.
- 14) 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, *Sci. Online Lett. Atmos.*, Vol.12, pp.111-115, 2016.
- 15) 気象研究所: 平成 29 年 7 月 5-6 日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について, 気象研究所報道発表資料
(http://www.jma.go.jp/jma/press/1707/14b/press_20170705-06_fukuoka-oita_heavyrainfall.pdf), 2017.
- 16) 津口裕茂: 集中豪雨が発生する総観~メソ α スケール環境場の統計解析-7月(梅雨末期)の九州地方について-, 気象庁「量の予報技術資料」, Vol. 19, pp.72-83, 2014.
- 17) Silverman, B. W.: *Density estimation for statistics and data analysis*, Chapman and Hall, 1986.
- 18) Takemi, T., Okada, Y., Ito, R., Ishikawa, H., and Nakakita, E.: Assessing the impacts of global warming on meteorological hazards and risks in Japan: Philosophy and achievements of the SOUSEI program. *Hydrological Research Letters*, Vol. 10, pp. 119-125, 2016.
- 19) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H., and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, Vol. 10, pp. 167-171, 2014.
- 20) Ito, R., Takemi, T., and Arakawa, O.: A possible reduction in the severity of typhoon wind in the northern part of Japan under global warming: A case study. *SOLA*, Vol. 12, pp. 100-105, 2016.
- 21) 中北英一, 小坂田ゆかり: 気候変動に伴う梅雨期集中豪雨と大気場の将来変化に関するマルチスケール解析, *土木学会論文集, B1(水工学)*, pp.139-144, 2018.

謝辞

レーダー情報は、国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画室よりご提供いただきました。ここに謝意を表します。本研究の2章、3章、4.1章、5章の内容は、科学研究費・特別研究促進費「平成29年7月九州北部豪雨災害に関する総合的研究」(代表:九州工業大学 秋山壽一郎教授)、文部科学省・統合的気候モデル高度化研究プログラム・領域テーマD「統合的ハザード予測」(代表:京都大学 中北英一教授)、科学研究費・基盤研究(S)「ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測と豪雨災害軽減に向けた総合研究」(代表:京都大学 中北英一教授)の支援を受けて実施されました。

地表變動

地表変動

千木良雅弘¹・松四雄騎²・堤大三³・王功輝⁴・松浦純生⁵・土井一生⁶・
橋本学⁷・釜井俊孝⁸

1, 2, 5 地盤災害研究部門
3 流域災害研究センター
4, 6, 8 斜面災害研究センター
7 地震予知研究センター

2017年7月の九州北部豪雨による斜面崩壊について、多面的な研究を行った。その結果、崩壊は特に3時間雨量が200mm以上の個所に多かったこと、花崗閃緑岩と泥質片岩地域でそれぞれの風化および重力変形過程を反映し、崩壊が多かったことが明らかになった。花崗閃緑岩の表層崩壊は、土層形成のモデル化によって長期的な評価が可能である見通しが得られた。降雨浸透過程と斜面の安定解析を組み合わせた数値解析は進行中である。大規模な崩壊は、地震計記録によって大まかな場所を決定された。また、SARによって、広域的な斜面の“荒れ具合”を見積もれる可能性が示唆された。流木が多かったのは、崩壊の多くが樹木根の到達深度よりも深かったことと、大径木が大量に残されていたことに起因している。

Key Words: rainstorm, landslide, granodiorite, pelitic schist, SAR, landslide dam

1. 概要

2017年九州北部豪雨災害は、豪雨による膨大な数の斜面崩壊と土石流、さらには出水による災害であった。本災害は福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市にまたがる中山間地で発生し、人的被害は死者37名行方不明者4名とともに、林地や耕作地への甚大な被害が発生した。発生した斜面崩壊の多くは深さ1m~5m程度の表層崩壊であったが、基盤岩まで崩壊する深層崩壊もいくつか発生し、また、河道閉塞も生じた。被災地は林業の盛んな地域でもあり、斜面崩壊と溪岸侵食によって大量の材木

について記述する。

本災害を引き起こした降雨は、7月5日から6日にかけてのものであり、特に7月5日の午後強い降雨が引き続いた。被災地の朝倉では、5日の午後約500mmの降雨があり、最大時間雨量106mmに達した(図-1-1)。東西25km、南北15kmの範囲で斜面崩壊と土砂流出が生じた。特に強い降雨のあった朝倉市から東峰村にかけて、幅4km、長さ12kmの範囲に特に密集した斜面崩壊が発生した。

本章の各節の筆者は、地質、地形、水文、地震、リモートセンシングを専門とするメンバーであり、本災害発生前より、多くの地表変動による災害について研究を続けてきた。本災害後も、現地調査、室内分析・解析を行った。本章は、次のような構成になっている。

2. 崩壊と地質との関係(千木良)
3. 崩壊発生の水文地形過程と長期的な土層形成と崩壊について(特に花崗閃緑岩地域を対象として)(松四)
4. 崩壊発生機構について、小野地区の大規模な深層崩壊と赤谷の花崗閃緑岩の小規模な崩壊を対象とした数値解析(堤)
5. 小野地区の崩壊の発生・運動機構および2次災害(王)
6. 山地斜面の植生と斜面崩壊(松浦)
7. 地震記録による地表変動の検出(土井)

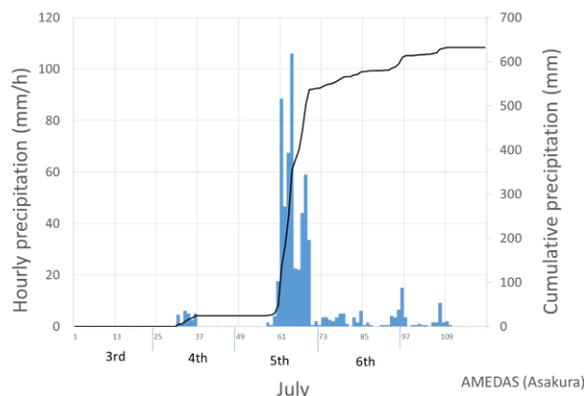


図-1-1 朝倉のハイレートグラフ (AMEDAS, 朝倉)

が流出した。本章では、斜面崩壊を主とする地表変動に

8. 衛星データによる地表変動の検出(橋本)

9. 林業の衰退と流木の起源について(釜井)

研究期間が短いため、未だに検討途中のものもあるが、現段階でとりまとめ、今後の課題を洗い出したい。

2. 斜面崩壊と地質

千木良雅弘

協力者：凌斯祥

(1) はじめに

福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市の被災地は、最高標高約 600m の中山間地で、南部を筑後川が東から西に流下し、筑後川の谷は大分—福岡県境から西に向けて広がっている。筑後川の河床レベルは 40-50m である。当該地域の地質は、古い方から、ジュラ紀の周防変成岩類、それに貫入した白亜紀の杷木花崗閃緑岩、それらを覆う古第三紀の堆積岩類と新第三紀の火山岩類からなる(北野・池田, 2012)¹⁾。この地域の地質図としては、縮尺 20 万分の 1 地質図幅「福岡」²⁾と縮尺 7 万 5 千分の 1 地質図幅「豆田」³⁾とがあり、地質調査所のシームレス地質図は 20 万分の 1 地質図幅をもとにしている。しかしながら、筆者らが調査した結果では、詳細な地質分布に

ついては、豆田図幅の方が正確であった。そのため、以降の地質と崩壊との関係などについては、豆田図幅を用いた。その際、筆者らの調査によって地質境界などを多少修正した。

調査にあたっては、地理院地図に提供されている災害後の正射画像、その判読図を参考にして、崩壊源を判読した。また、災害前後の 1m メッシュの DEM を用いて地形変化を分析した。これは国土交通省九州地方整備局によって取得されたもので、2017 年 1 月および 10 月に取得されたものである。現地調査は、7 月 15-17 日、9 月 5-7 日、および 1 月 26-30 日に行った。調査箇所は、西側から東に向けて、妙見川、奈良ヶ谷川、黒川上流、堂所山、赤谷川(正信、真竹、杷木赤谷、乙石)、日田市鶴河内、そして日田市小野である。

(2) 降雨状況と斜面崩壊

地理院地図の正射像判読によれば、合計 3925 か所の崩壊が判読され、それと降雨量の分布と比較した。

国土交通省の運用している XRRAIN から 7 月 5 日の雨量データを取得し、7 月 5 日の合計雨量、7 月 5 日の中の 3 時間最大雨量、4 時間最大雨量、5 時間最大雨量を

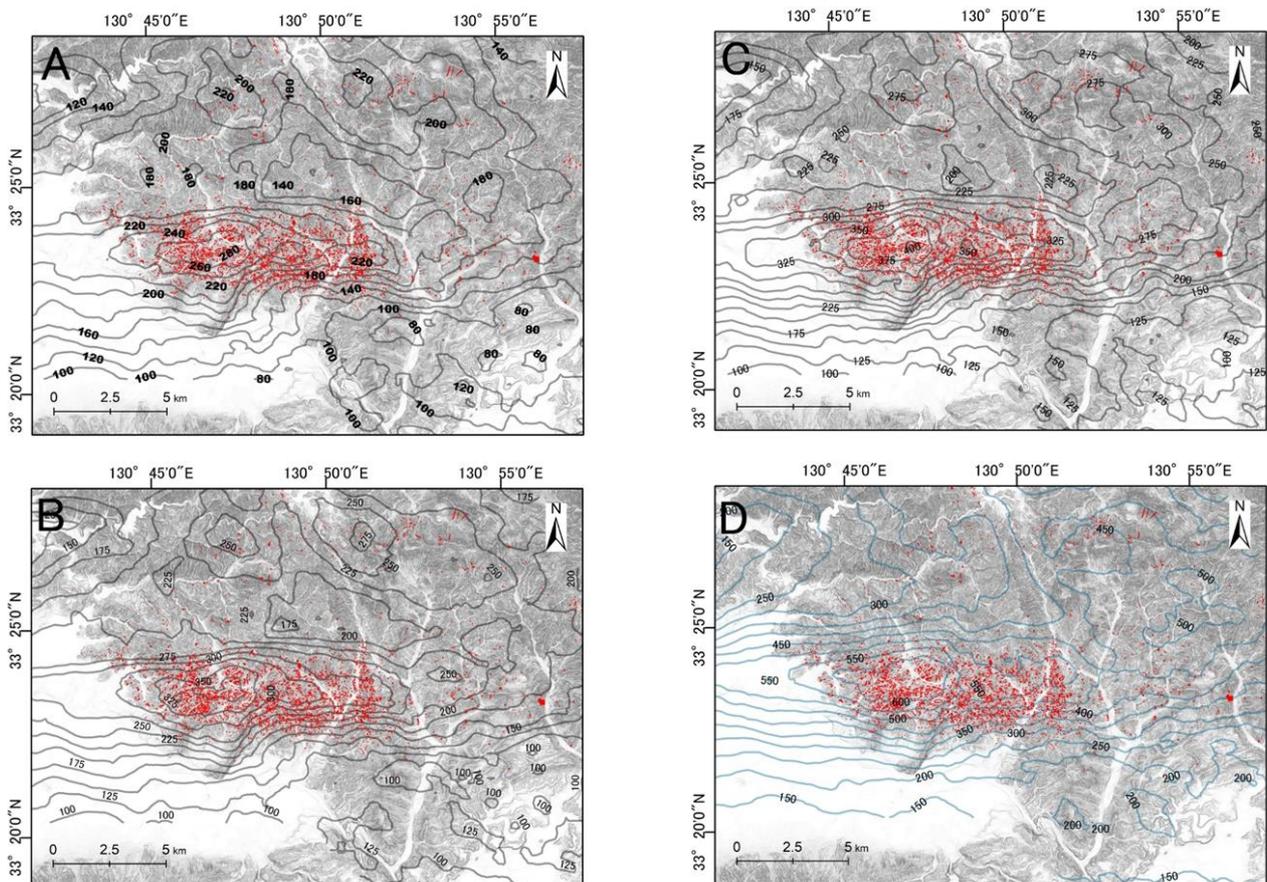


図2-1 XRRAINによる7月5日の降雨量分布。A:3時間最大雨量。B:4時間最大雨量。C: 5時間最大雨量。D:7月5日の合計雨量。いずれの降雨量分布も同様のパターンを示す。

計算し、崩壊の分布と重ね合わせて図示した(図 2-1).
 これによれば、降雨パターンはいずれも同様に、崩壊の
 密集地域で多量の降雨があったことを示していた。その
 ため、どの降雨が崩壊の発生に最も強く影響したのかは
 定かではない。一方で、2014 年広島豪雨災害の時には 3
 時間降雨量が崩壊の発生と密接に関係していたことがわ
 かっている(松四他, 2015) 4). 図-2-1A は 3 時間最大降
 雨量の分布であるが、これによれば、3 時間降雨量が
 200 mm以上の領域に崩壊が多数発生したことがわかる。
 崩壊密集地域は、南北の幅 4 km、東西の長さ 12km の範
 囲であった。

(3) 崩壊と地質との関係

図-2-2 に、地質と崩壊の分布を示す。泥質片岩は花崗
 閃緑岩との境界から数百メートル接触変成作用によって
 ホルンフェルス化しているが、赤谷川の東側では両者は
 断層で接している。この断層は赤谷北方の葛生では、幅
 50m のカタクレイサイト化帯を伴っていた。また、赤谷
 の真竹東方では、図-2-2 から、崩壊が泥質片岩地域と花
 崗閃緑岩地域に密集して発生したことがわかる。ただし、
 これは、3 時間降雨量が 200 mm以上の地域とほぼ重なる。

図の東部は火山岩類が分布し、崩壊の密度は相対的に小
 さいが、雨量も西部に比べて少ない。なお、泥質片岩と
 花崗閃緑岩との境界は基本的には貫入関係で、前者は後
 者の接触変成作用を受けている。ただし、赤谷川の東側
 では、両者は断層で接し、赤谷川北方の葛生では、幅
 50m のカタクレイサイト帯が認められた。また、赤谷川
 の真竹東方でもガウジを伴う破碎帯が確認された。

図-2-2 の内、3 時間雨量が 200 mm以上の地域で、崩壊
 が密集して発生した範囲について、地質毎の崩壊発生数
 と密度とを計算した。その結果、図-2-3 に示すように、
 花崗閃緑岩地域では 942 個の崩壊が 89/km²の密度で発生
 し、泥質片岩地域では 1216 個の崩壊が 77/km²の密度で
 発生したことがわかった。次に崩壊の数が多かったのは、
 緑色片岩の 158 個と少なかったが、この場合、密度は
 63 個/km²と大きかった。

泥質片岩と花崗閃緑岩とを比較すると、泥質片岩の崩
 壊の方が広くて深いことがわかる(図-2-4)。崩壊の源
 の面積を比較すると、花崗閃緑岩地域で平均 806m²、泥
 質片岩地域で平均 1130m²であった(図-2-5)。

(a) 泥質片岩地域の崩壊

泥質片岩は、花崗閃緑岩との境界付近数 100m はホル

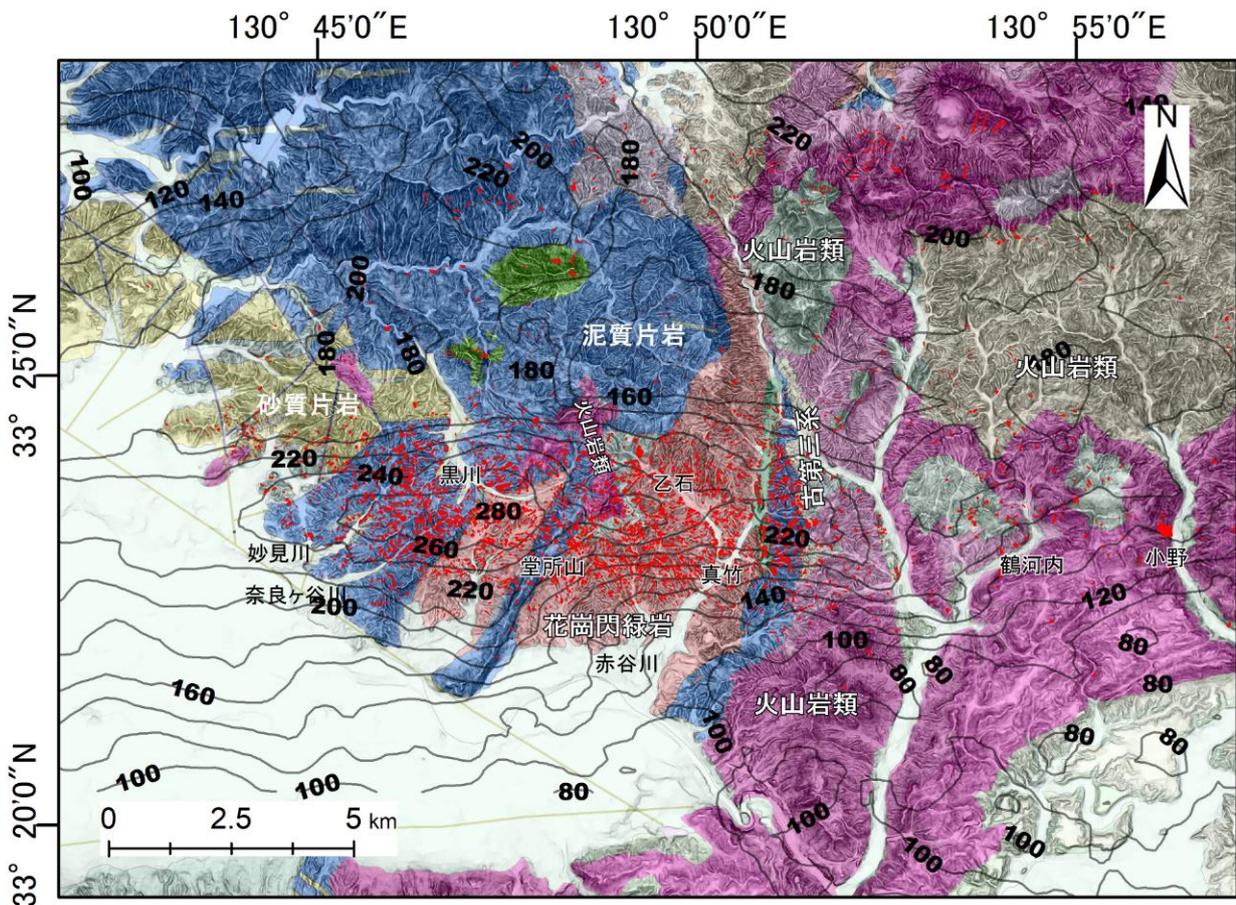


図-2-2 地質と崩壊分布との関係。雨量は7月5日の3時間最大雨量。地質は、縮尺7万5千分の1地質図幅「豆田」をもとにしてコンパイルした。地質境界は筆者らの調査によって多少改変してある。

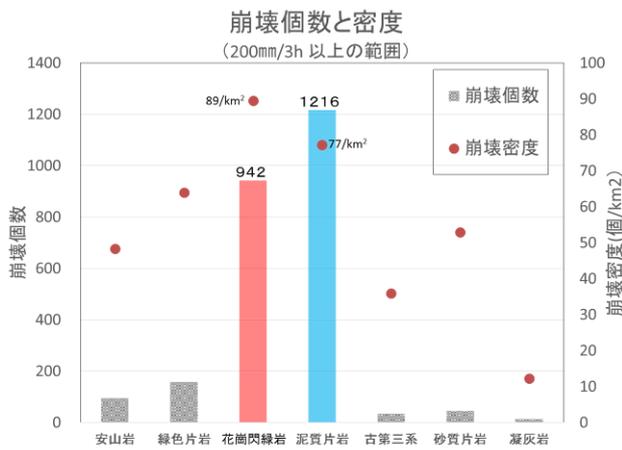


図-2-3 崩壊の発生個数と密度。図-2-2の3時間雨量200mm以上、かつ崩壊が密集した範囲内の崩壊を対象とした。

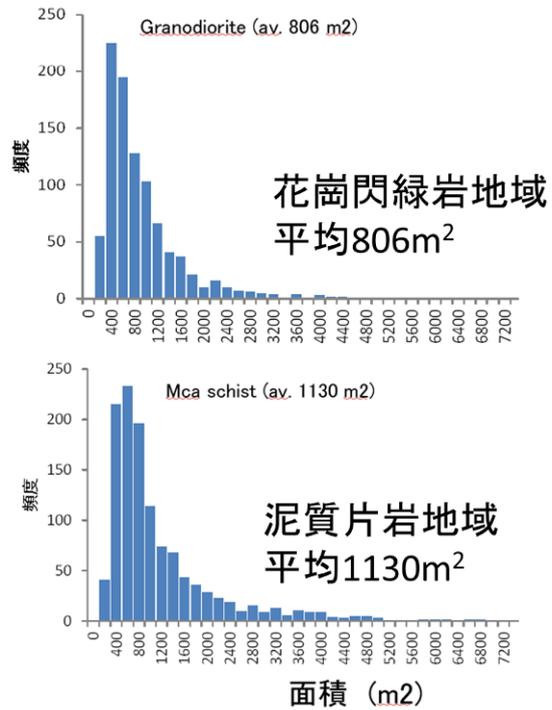


図-2-5 崩壊源の面積の分布

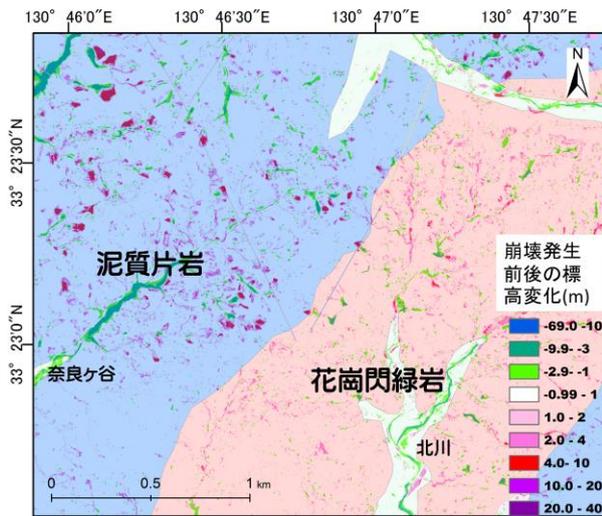


図-2-4 崩壊発生前後の標高変化

ンフェルス化している。ホルンフェルス化していない地域、例えば妙見谷川や奈良ヶ谷川沿いでは、広く重力斜面変形が生じていること、そして2017年7月の豪雨では、重力変形した斜面の縁が崩壊したことが読み取れる(図-2-6)。実際、野外調査では、重力斜面変形によって破碎した泥質片岩が一般的に認められた(図-2-7)。

泥質片岩には、片理面と節理あるいは断層との組み合わせによって楔型の岩盤が崩壊した事例も認められた。これは、ホルンフェルス化した岩盤によく認められた。

重力変形していない場合でも、泥質片岩にはガウジや角礫など非固結破碎物質を伴う破碎帯が発達しており、それに起因して地下水の流れが遮水されて崩壊が発生したとみられるものが多数認められた。

泥質片岩の崩壊は、たいていの場合、根茎の到達深度よりも深いところで分離しており、そのために、樹木も土砂とともに滑り落ちた。

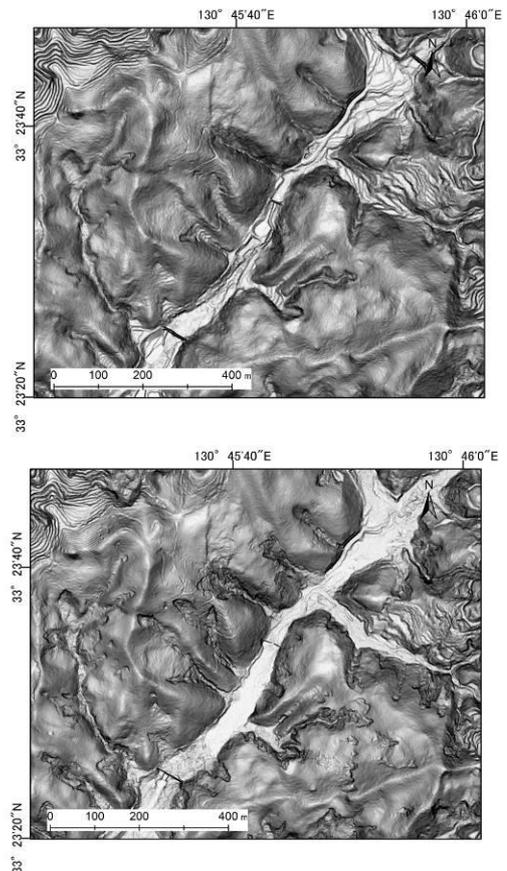


図-2-6 泥質片岩分布域の崩壊発生前後の傾斜図。妙見谷川流域。上：崩壊発生前。下：崩壊発生後。



図-2-7 重力変形していない泥質片岩（左）と重力変形によって座屈した泥質片岩（右）



図-2-9 小野地区の深層崩壊

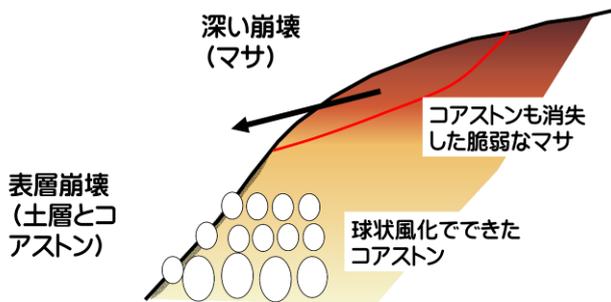


図-2-8 花崗閃緑岩の模式風化断面

(b)花崗閃緑岩地域の崩壊

花崗閃緑岩は特徴的な風化形態をしており、崩壊もそれに応じたものであった。花崗閃緑岩は、球状風化を呈しており、低標高部にコアストンの多く残存する部分があり、高標高部ではコアストーンが失われて脆弱なマサからなる部分が分布するのが一般的であった(図-2-8)。コアストーンが残存する部分では、マサも比較的良好に締まっております、それが斜面表層部で土層化した部分がコアストーンとともに崩壊した個所が多数認められた。コアストーンは土砂とともに土石流化し、土石流の破壊力を増大しているように見受けられた。これらの崩壊はたいていの場合 1m 程度以下と薄いものであった。

一方で、コアストーンも失われて脆弱なマサからなる斜面では、単に表層の土層だけでなく、その下の深さ 6m 程度のマサも滑り落ちた事例があった。

いずれも、樹木の根茎の到達位置よりも深いところからすべっていた。

(c)その他の地質と崩壊

黒川の上流域では、泥質片岩の上に火山岩（安山岩熔岩）が載っており、その球状風化によって形成されたコアストーンが斜面下方に移動し、強く風化した泥質片岩起源ホルンフェルス斜面の上に堆積し、それが崩壊した事例が多く認められた。ここでは従来の地質図に示されているよりも火山岩の分布が広がった。

日田市の鶴河内と周辺では、強く風化した凝灰岩（一部礫岩）の上に上方の安山岩溶岩からの岩屑が載り、そ

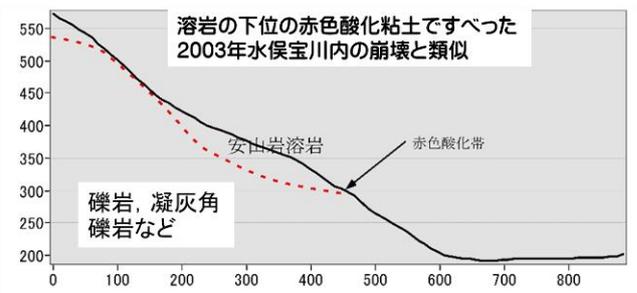


図-2-10 小野地区の深層崩壊のすべり面と断面図

れが崩壊した個所が多く認められた。これは、強く風化した凝灰岩の透水性が低いことに起因していると思われる。

(4) 深層崩壊

深部の岩盤の構造と性質に起因する崩壊する深層崩壊は、日田市小野地区と朝倉市乙石で発生した。

小野地区では、小野川の右岸が崩壊して河道を閉塞して、小規模な湖を形成した。崩壊斜面は、河床から 100m 程度までは緻密な礫岩などが露出し、崩壊したのはここよりも斜面上部であることがわかる。そこには、広く赤褐色の層が露出し、そこにせん断面が所々認められたことから、この層にすべり面が形成され、その上の安山岩熔岩が崩壊したことが示唆される。この赤褐色の層は、粘土化した凝灰角礫岩であり、赤色は、上位の安

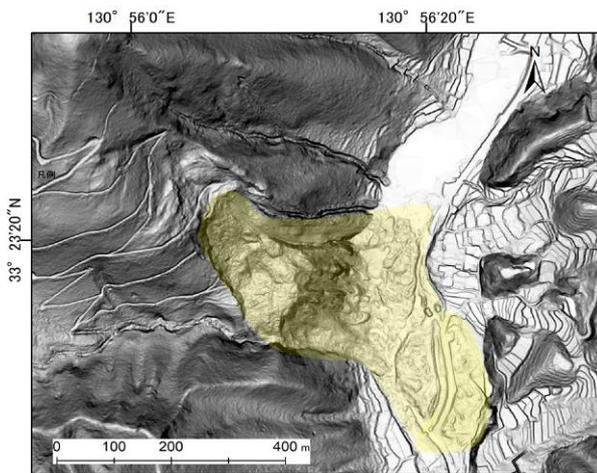


図-2-11 小野地区 災害後の傾斜図

山岩熔岩が流れた時の高温下の酸化によって生じたものと思われる。この粘土が遮水ゾーンをなし、そこから上の層が飽和して水圧が上昇して崩壊が発生したものと考えられる。崩壊発生前の空中写真と発生後の 1mDEM によれば、崩壊地の上方に明瞭な滑落崖が認められるので、今回崩壊した個所は過去の地すべり移動体であると解釈でき、この地形から、崩壊危険個所として認定できたものと考えられる。

乙石地区の崩壊では、崩壊地の西側の縁は南北方向で東に傾斜する断層で境されており、そこから東側の斜面がすべった。岩盤は緑色片岩起源のホルンフェルスである。この断層の近傍で角礫交じりの粘土が認められたので、この断層は、断層ガウジを伴うものであると推定される。このガウジが遮水層の役割を果たしたものと考えられる。崩壊発生前には、斜面中央部の凸部と斜面上部の馬蹄形小滑落崖が認められるが、この小滑落崖は傾斜図でわずかに認められるのみであり、崩壊の前兆として認められるかどうかは、微妙である。

(5) 他の豪雨による斜面崩壊発生事例との比較

花崗岩地域は、豪雨による斜面崩壊災害を数多く経験してきた。表-2-1 に、それらを降雨量とともに示す。雨量は累積最大雨量、1日最大雨量、時間最大雨量を示した。これを見ると、2017年九州北部豪雨災害は、いずれも、過去第3位以内に入り、時間最大雨量では最も大きかったことがわかる。次には、1976年小豆島災害、1967年羽越災害の時の降雨量が多かった。花崗岩の風化形態には大きく2種類あり、1つは今回の被災地で認められた球状風化、もう一つは、コアストーンを伴わないシーティングおよびマイクロシーティングを伴う風化である。後者は、2014年広島豪雨災害の時の広島花崗岩に典型的に認められた。表-2-1 に示した災害の中では、同様に強く大量の降雨のあった1967年羽越災害の時に、球状風化した花崗岩が数多く崩壊したことが報告されて

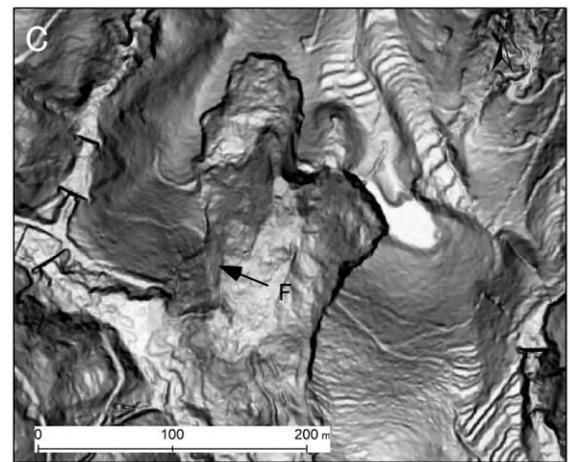
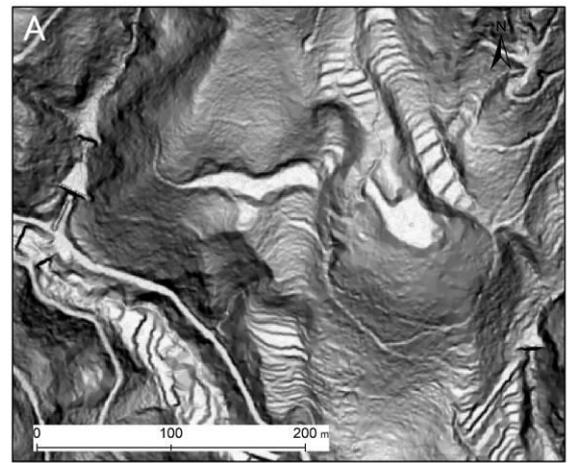


図-2-12 乙石の崩壊の傾斜図。A:発生前。B:発生前。破線は小滑落崖、○は不自然な膨らみ。C:発生後。Fは断層

いる^{6,7)}。このことは、球状風化した花崗岩は、強く大量の雨で崩壊しうることを示唆している。

鹿児島島の紫尾山の花崗閃緑岩では、崩壊して土層が取り去られた後、120年から150年程度で70cm程度の土層が形成され、新たな崩壊の準備がなされると推定されている⁸⁾。

表-2-2 に、近年の豪雨による災害を地質によって整理した。これによると、表層崩壊が群発するが深層崩壊の発生しない地質と、深層崩壊が発生するが表層崩壊の非

表 - 2-1 花崗岩地域の豪雨災害の降雨量(データは、千木良, 2002による)

| 花崗岩地域の豪雨災害 | 累積最大雨量 (mm) | 1日最大雨量(mm) | 時間最大雨量 (mm) |
|-------------------|-------------|------------|-------------|
| 1938六甲災害 | 462 | 270 | 61 |
| 1945広島災害 | 219 | — | 57 |
| 1961天竜川36災害 | 579 | 325 | — |
| 1967羽越災害 | 748 | 644 | 89 |
| 1967呉市災害 | 317 | — | 75 |
| 1967広島災害 | 317 | — | 75 |
| 1967六甲災害 | 379 | 319 | 76 |
| 1972丹沢災害 | 545 | 516 | 87 |
| 1972西三河災害 | 219 | 219 | 86 |
| 1976小豆島災害 | 1433 | 778 | 76 |
| 1988広島災害 | 264 | — | 57 |
| 1999広島災害 | 271 | — | 81 |
| 2014広島災害 | — | 217 | 101 |
| 2017九州北部災害 | 586 | 545 | 129 |

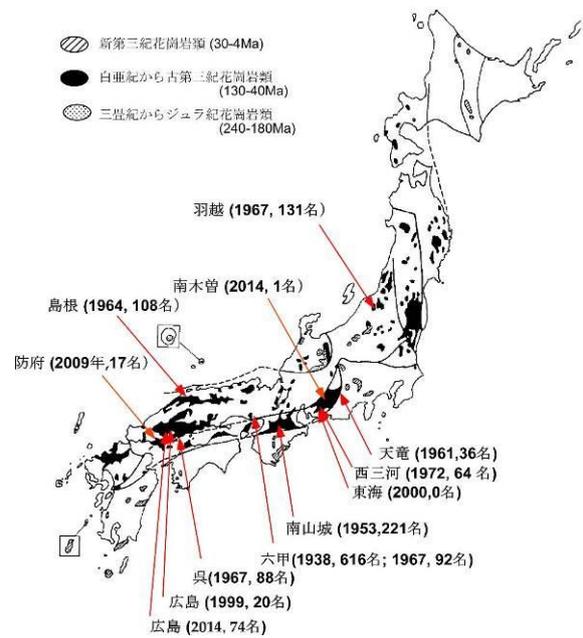


図-2-13 花崗岩地域の降雨土砂災害の分布(千木良, 2002 に加筆)

表 - 2-2 近年の雨による斜面災害

| 発生時 | 誘因 | 場所 | 地質 | 深層崩壊 | 表層崩壊群発 |
|--------------|-----------|-----------|-----------------|------|--------|
| 1999/6/29 | 雨(梅雨前線) | 広島市 | 花崗岩 | — | ○ |
| 1999/7/28-29 | 雨(前線) | 北海道留萌 | 堆積軟岩 | — | ○ |
| 2000/7/1-9 | 地震と雨 | 神津島 | 流紋岩質火砕物 | — | ○ |
| 2000/9/11-12 | 雨(前線+T14) | 東海地方 | 花崗岩 | — | ○ |
| 2003/7/20 | 雨(前線) | 水俣、菱刈 | 安山岩溶岩 | △ | ○ |
| 2003/8/9-10 | 雨(T10) | 北海道日高 | 第三紀堆積岩剥離砂岩と礫岩 | — | ○ |
| 同上 | | 同上 | 付加体(メランジュ) | — | ○ |
| 2004/7/13 | 雨(梅雨前線) | 新潟県長岡西方 | 泥岩 | — | ○ |
| 同上 | | 福井足羽川 | 火山岩地帯? | — | ○ |
| 2004/9/28-29 | 雨(T21) | 三重県宮川村 | 付加体(硬質の堆積岩) | ○ | △ |
| 2004/8/1 | 雨(T10) | 徳島県木沢村 | 付加体(硬質の堆積岩と緑色岩) | △ | △ |
| 2004/9/29 | 雨(T21) | 愛媛県西条~香川県 | 硬質の砂岩(強風化) | — | ○ |
| 2004/9/29 | 雨(T21) | 愛媛県西条 | 片岩 | ○ | ○ |
| 2005/9/6 | 雨(T14) | 宮崎県耳川流域 | 付加体(硬質の堆積岩) | ○ | △ |
| 2006/7/19 | 雨(梅雨前線) | 長野県岡谷 | 火山灰 | — | ○ |
| 2009/7/21 | 雨(梅雨前線) | 山口県防府 | 花崗岩 | — | ○ |
| 2009/8/9 | 台風モラコット | 台湾 | 堆積岩・スレート | ○ | ○ |
| 2010/7/16 | 雨(前線) | 広島県庄原 | 風化土、黒土 | — | ○ |
| 2011/9/3-4 | 雨(T12) | 紀伊山地 | 付加体(硬質の堆積岩) | ○ | — |
| 2012/7/12 | 雨(梅雨前線) | 阿蘇 | 火山灰 | — | ○ |
| 2013/10/16 | 雨(T26) | 伊豆大島 | 火山灰 | — | ○ |
| 2014/8/20 | 雨(前線) | 広島 | 花崗岩・ホルンフェルス | — | ○ |

常に少ない地質とがある。花崗岩の場合は、前者であり、これは風化帯構造と土層の形成過程によると考えられる。一方で、付加体の硬質の堆積岩は、表層崩壊が少なく、深層崩壊が発生する傾向があることがわかる。また、2006年岡谷の災害、2012年の阿蘇の災害や2013年の伊豆大島の災害の場合、表層に堆積した火山灰土や火山灰

の表層崩壊群発であった。従来片岩地域に大量の降雨があった事例は少ないが、2004年の愛媛県西条の災害の時に表層崩壊と深層崩壊とが発生した。ただ、この時には、航空レーザー計測による詳細地形データがなく、今回の九州北部豪雨の場合と同様の状況であったかどうかは明確ではない。それでも、泥質片岩は最も重力による

斜面変形を受けやすい岩石であり、今回と同様の状況であった可能性は高い。

小野地区の深層崩壊のすべり面は高温赤色酸化を受けた粘土化した凝灰角礫岩に生じており、これは、2003年の水俣宝川内の崩壊と同様で、九州に広く分布する新第三紀の火山岩類に同様の地質条件がある可能性を示唆している。

(6) まとめと今後の課題

2017年九州北部豪雨による斜面崩壊は、3時間雨量200 mm以上、または日雨量450 mm以上の範囲に高密度に発生した。斜面崩壊は、花崗閃緑岩地域と泥質片岩地域に特に多く発生した。崩壊のほとんどは、根茎到達層よりも下位ですべっており、そのために流木が多く生産された。花崗閃緑岩は球状風化しており、そのコアストーンが崩壊土砂に混じり、被害を拡大させた。コアストーンも消失し、強く風化した花崗閃緑岩(マサ)は数mと深くまで崩壊した。今回の被災地に分布する花崗閃緑岩は、広島地域に分布する花崗岩とは風化形態が異なり、崩壊土石の挙動も異なっていたと思われる。

今後の斜面崩壊の危険性について考えると、花崗閃緑岩の崩壊予備物質は大量に存在しており、数十年たつうちに次の崩壊の準備が整い、今回と同様の降雨があれば、今後も崩壊が発生すると思われる。また、ホルンフェルス化していない泥質片岩は重力によって変形・破砕しており、その縁の部分で崩壊が多発した。このような崩壊は今後も強い雨によって発生することが懸念される。

大規模な崩壊の内、小野地区で発生したようなものは、地形的に予測可能であることがわかった。

引用文献

- 1) 北野一平, 池田剛, 2012. 朝倉地域に産する周防変成岩類の接触変成作用の温度圧力条件-上昇過程の制約-. 地質学雑誌, 118(12): 801-809.
- 2) 久保和也, 松浦浩久他, 1993, 縮尺20万分の1地質図幅「福岡」. 通商産業省工業技術院地質調査所.
- 3) 縮尺7万5千分の1地質図幅「豆田」, 商工省, 1933
- 4) 松四雄騎, 渡壁卓磨, 鄒青穎, 平田康人, 千木良雅弘, 2015. 2014年広島災害における表層崩壊の発生メカニズムと降雨閾値. 京都大学防災研究所年報, 58: 24-33.
- 5) 千木良雅弘, 2002. 群発する崩壊-花崗岩と火砕流-. 近未来社, 名古屋, 228 pp.
- 6) 昭和42年度文部省科学研究費特定研究(災害科学)「昭和42年8月羽越水害の総合的研究(研究代表者岩崎敏夫)」265p.
- 7) 昭和42年度文部省科学研究費特定研究(特定研究)「羽越豪雨(昭和42.8.28)による崩災の調査と

その防災研究(研究代表者西田彰一)」84p

- 8) Shimokawa, E., 1984. Natural recovery process of vegetation on landslide scars and landslide periodicity in forested drainage basins. Proceedings of the Symposium on Effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability: 99-107.

謝辞

本研究を進めるにあたって、京都大学防災研究所地盤災害研究部門の松四雄騎准教授および学生諸氏の多大の協力を得た。また、本研究を遂行するにあたり、文部科学省の2017年度科学研究費補助金(特別研究促進費)

「平成29年7月九州. 北部豪雨災害に関する総合的研究」(研究代表者: 秋山壽一郎), 2016-2017年度京都大学グローバル生存基盤展開ユニット萌芽研究「山地斜面における森林生態系の基盤としての土層の存続条件の定量化」(研究代表者: 松四雄騎)を使用した。ここに記して感謝の意を表します。

3. 崩壊発生の水文地形過程

松四雄騎

(1) はじめに

基盤岩石の風化によって生成する土層は、温暖湿潤帯における山地斜面の大部分を覆い、水の貯留や栄養分供給を通じて、森林生態系の生存基盤を構成している。山地斜面に森林が成立している場合、土層の材料的強度のみからすれば力学的に存在が困難に見える急勾配の斜面においても、樹木根系の捕縛効果によって一定以上の厚みの土層が保持される。土層を構成する土粒子は、ソイルクリープによって斜面を緩慢に移動し、数百年程度の時間スケールで谷頭凹地に集積して、やがて、樹木根系がその底部に到達しない程度の厚みにまで発達する。

谷頭凹地に発達した土層は、植生および腐植層の被覆による効果で浸透能が高く、かつ動植物活動による団粒構造やマクロポア、あるいは経時的な細粒分の地中侵食に伴って形成されたソイルパイプなどが発達したバルク透水性の高いものとなっていることが一般的である。この土層は、通常の降雨に対しては十分な貯留・排水機能を有し、流域源頭部からの基底流出および洪水流出を形成する。この状況はひとつの定常状態を創り出すが、しかし、永続的に安定というわけではない。斜面は、より長い時間スケールで見れば、それを覆う土層の水貯留容

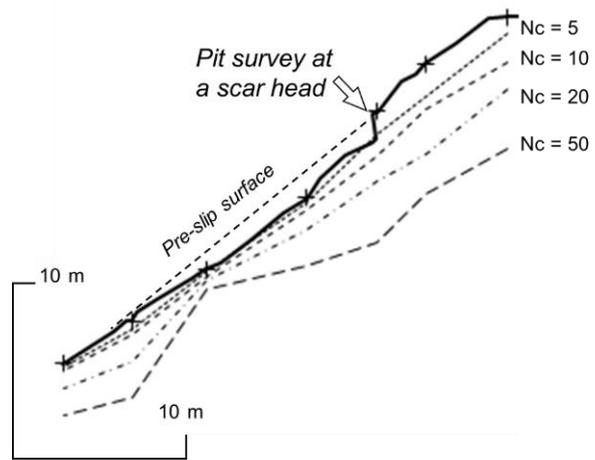


図-3-1 花崗閃緑岩を基盤とする代表的斜面の地盤構造

量・排水容量を超過する豪雨を誘因とする表層崩壊あるいはガリー形成によって侵食され、部分的に土層を失って裸地へと遷移する。裸地形成後は、植生の侵入と風化およびソイルクリープによる土粒子の再集積によって土層が回復し、斜面は数百年周期での遷移と復元を繰り返す。

自然流域の斜面は、土粒子の生成・輸送と水循環、および森林生態系の発展の相互作用により土層の発達させるとともに、豪雨などの外的強制力によって揺らぎつつ、準動的平衡を保っているといえよう。このサイクリックな準動的平衡システムをモデル化して、地理情報システム上での土層発達—水文過程—崩壊発生のサイクルシミ

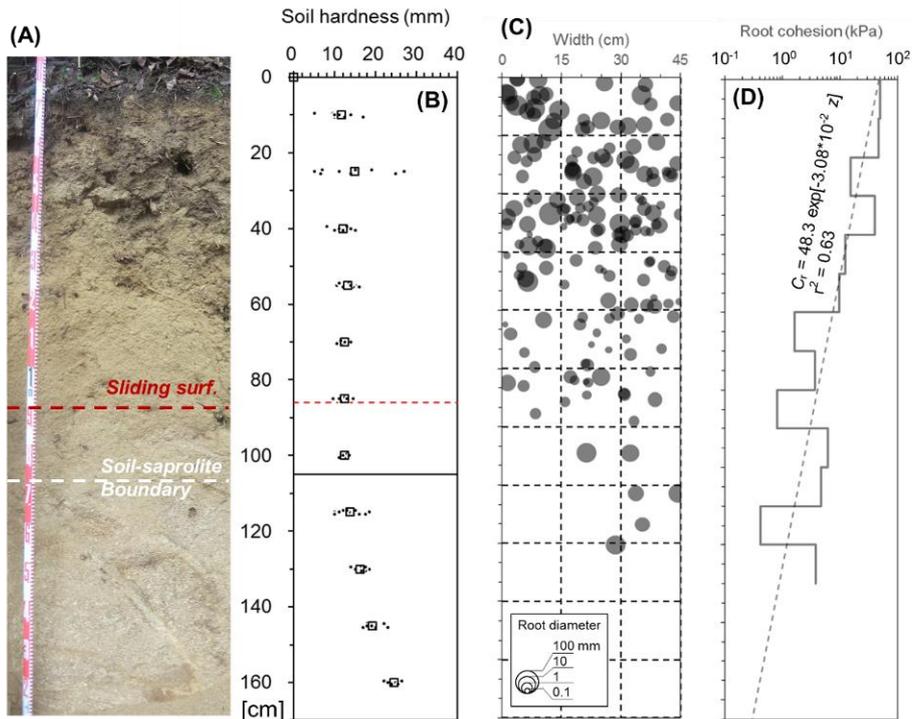


図-3-2 花崗閃緑岩を基盤とする斜面の浅部構造および樹木根系分布と根系による粘着力増強効果

シミュレーションを実行することは、水文地形学的な知見に立脚した表層崩壊の予測にとって重要である。そしてその予測の確度と精度は、実際の表層崩壊等の土砂移動実態に照らして検証される必要がある。本研究では、2017年7月の九州北部豪雨により発生した表層崩壊地を対象に、土層の厚みの空間分布および土層底面での樹木根系によるせん断強度増分を組み込んだ斜面安定解析により、実際の表層崩壊の空間分布が説明可能かどうかを評価する。また、斜面水文過程のモデル化における課題についても簡単に述べる。

(2) 調査対象斜面とその浅部地下構造

2017年7月の九州北部豪雨により表層崩壊を生じた斜面のうち、花崗閃緑岩を基盤とする代表的な場所を選定した。この斜面において縦断測量を行い、斜面調査用簡易貫入試験器によるサウンディングを行って、地盤の浅部構造を調べた。ここでは直径1.5 cmで先端角60°のコーンを、3 kgの錘を高さ50 cmから自由落下させることによる打撃で地盤に貫入させ、コーンが10 cm貫入するのに要する打撃回数を動的貫入抵抗値(Nc値)とした。図1にその結果を示す。コアストーンと推定される硬岩が浅部に存在している場合もあるが、基本的に地表に準平行に風化帯が発達しており、Nc値が5以下の弱層が崩壊したことがわかる。

図3-1に示した滑落崖頂部においてピットを掘削し、浅部の地盤構造を観察した。図2にその結果を示す。深度105-115 cm以深には花崗閃緑岩の強風化岩(サブロライト)が存在し、それをサブロライトから分離して斜面を匍行(ソイルクリープ)しつつある土層が覆っている(図3-2A)。サブロライトと土層の境界部(深度86-105 cm)には漸移層が存在し、サブロライトから分離してからの移動距離がごく短いと推定される強風化礫などが含まれる。表層崩壊のすべり面はこの漸移層の上面(深度86 cm)に形成された。山中式土壌硬度計でピット壁面の硬度を調査したところ、土層浅部の含礫層を除いて土層中での硬度は一樣に軟弱であり、サブロライトでは深さとともに硬度が増大することがわかった。

(3) 樹木根系の深度分布とその土層補強効果の定量化

このピットにおいて、樹木根系の深度方向の分布とそれによる土層の粘着力増強について定量化を試みた。まずピット壁面における樹木根系の露出位置と根直径を調べ、ついで異なる直径の根について、引張破断強度を測定した。樹木根の数密度は表層で最も多く、深度方向に素早く減衰して、サブロライトではほとんどみられなくなる。根直径と引張破断強度との間には、図3-3に示すようにべき関数で回帰される関係がみられた。これは先行研究で示されているものと調和的である。根直径の出

現頻度および直径階層ごとの土層補強効果を図4に示す。この図から、直径10⁰ mm以上の樹木根による効果が卓越していることがわかる。直径が10⁰ mm以下の細根は、その数は多いものの、土層の補強における効果はごく限定的であることになる。現場における根系の分布調査では、細根全てを把握することは難しいが、そのことが樹木根系による土層補強効果推定の精度に及ぼす影響は小さいものと推定される。図3-2Cに示された根系の深度分布および図3に示された回帰式から、樹木根系によって発揮される土層の粘着力増分を計算した(図3-2D)。この図から、樹木根系による粘着力増分は深度方向に指数関数的に減少することが明らかになった。表層崩壊のすべり面形成においては、無機的な地盤構成物の硬度(図3-2B)と有機的な構成物による補強効果(図3-2D)の両方が影響しているものと推察される。

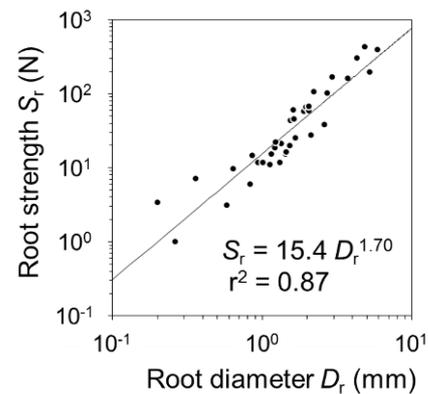


図3-3 樹木根の直径とその引張破断強度の関係

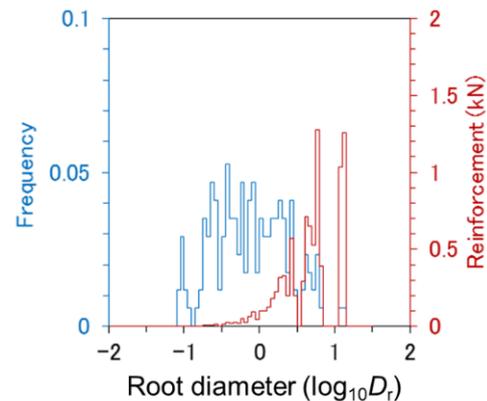


図3-4 樹木根直径の出現頻度と土層補強効果

(4) 土層発達のモデル化と土層の生成・輸送・集積のシミュレーション

モデル化のために、図5に示すような凸型尾根斜面を覆う土層における物質収支を考える。サブロライトの上面では鉱物粒子が剥離して土層が形成され、土層中ではソイルクリープにより斜面下方へ土粒子の輸送が起こる。このとき斜面における土層の形成と輸送における連続の

式は、

$$\rho_{\text{soil}} \frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla q + D \quad (1)$$

と書ける¹⁾。ここで、 h は土層の鉛直深さ(L)、 t は時間(T)、 q は土粒子の移動フラックス($\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$)、 ρ_{soil} は土層の密度(ML^{-3})、 D は土層の形成速度(ML^2T^{-1})である。

ソイルクリープは土層の湿潤乾燥、凍結融解、生物活動といった傾斜の法線方向に土粒子が持ち上げられ、重力に従って鉛直方向に落ちるというプロセスに起因する。このとき土粒子の移動フラックスは、斜面の勾配に比例することになり、

$$q = -\rho_{\text{soil}} K \nabla z \quad (2)$$

となる。ここで、 K は拡散係数(L^2T^{-1})、 z は標高(L)である。Eq.(2)をEq.(1)に代入すると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} = K \nabla^2 z + \frac{D}{\rho_{\text{soil}}} \quad (3)$$

を得る。この式は、斜面の地形曲率 ($-\nabla^2 z$) に依存した土粒子の輸送と土層の形成速度のバランスによって、土層の厚みが決定されることを示す。況は、温暖湿潤帯の山地斜面では極めて一般的にみられる。この土層の生成と輸送をモデル化を試みる。

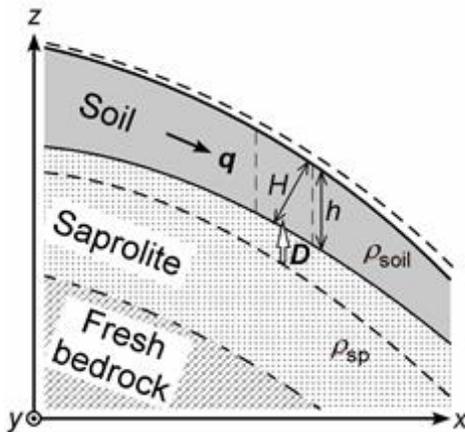


図-3-5 斜面尾根部における模式的地下構造と土層の物質収支

いま、図-3-5のような、地形曲率が正 ($-\nabla^2 z > 0$) の領域すなわち凸型尾根斜面を考えると、土粒子の輸送による収支が土層の形成速度と等しいか、少ない場合にのみ土層が存在することになる。温暖湿潤帯の山地では尾根においても、一部の露岩域(トアなど)を除き、薄い土層に覆われていることがほとんどである。すなわち、土層に覆われた尾根は、土粒子の輸送と土層の形成がバランスした場であると捉えることができる。逆に言えば、土層の生成と削剥がもし釣り合っていないければ、現在のように「薄い土層に覆われた」状態が観測されないはずで

ある。このとき、土層の厚みは時間変化しない ($\partial h / \partial t = 0$) と仮定できるので、

$$D = -\rho_{\text{soil}} K \nabla^2 z \quad (4)$$

と書ける。この式は、尾根においては、曲率の大きな場所ほど土層の形成速度すなわちサブロライト最上面の高度低下速度が大きいことを意味する。

ところで、土層の形成速度は、風化の影響が小さくなる地下深部ほど小さくなるという予測がなされてきた。近年の造岩鉱物中の宇宙線生成核種を用いた研究により、この予測はほぼ証明され、土層の形成速度は土層の厚みに対して指数関数的に減少することが示されている^{1,2,3)}。この土層の厚みと土層の形成速度との関係を、土層形成関数とよぶ。関数型として、指数関数を採用すると、

$$D = D_0 \exp(-\alpha h \cos \theta) \quad (5)$$

と書くことができる。ここで D_0 は被覆が無い場合の土層の形成速度(ML^2T^{-1})、 θ は斜面の局所傾斜 ($^\circ$)、 α は指数係数(L^{-1})である。Eq.(5)をEq.(4)に代入し、地形曲率について解くと、

$$-\nabla^2 z = \frac{D_0}{\rho_{\text{soil}} K} \exp(-\alpha h \cos \theta) \quad (6)$$

となる。この式は、Eq.(2)の仮説(土粒子の地形勾配に比例した輸送法則)が正しいとき、凸型尾根斜面における地形曲率と土層の厚みの間に、指数関数的な負の相関関係が存在することを予測する。この予測は、尾根において曲率および土層の厚みの空間分布を調査することによって検証可能である。事実、オーストラリア東部やアメリカ西部、日本中西部などにおいて、凸型尾根斜面の地形曲率と土層の厚みの間には負の相関関係が観測されているが²⁵⁾、両者の関係が線型的であるか指数関数的であるかについては、議論の余地がある。いずれにせよ、宇宙線生成核種の分析によって、 D_0 や α などのパラメータが経験的に決定されていれば、土粒子の輸送に関わる係数 K も経験的に決定することができ、地形曲率が負 ($-\nabla^2 z < 0$) の領域すなわち凹型谷斜面も含めて、土層の厚みの空間分布の時間変化(すなわち Eq.(3))を計算することが可能となる。本研究では、このアプローチに基づき、航空レーザー測量によって得られた細密地形モデル上で、土層の形成・輸送シミュレーションを行う。発災地のうち花崗閃緑岩を基盤とする代表的な地形を呈する領域を対象に、上述のモデルを適用して、土層厚の空間分布を予測するための計算を行った。計算領域は図6に示すとおりである。図では航空レーザー測量に基づく5mメッシュのデジタル地形情報から作成した傾斜陰影等高線図にオルソ写真から判読した表層崩壊および土石流経路の分布を重ねてある。この図から多数の谷頭

凹地で表層崩壊が発生し、土石流化して溪流を流下したことがわかる。図1および2に示した調査を行った地点もこの領域内に含まれている。

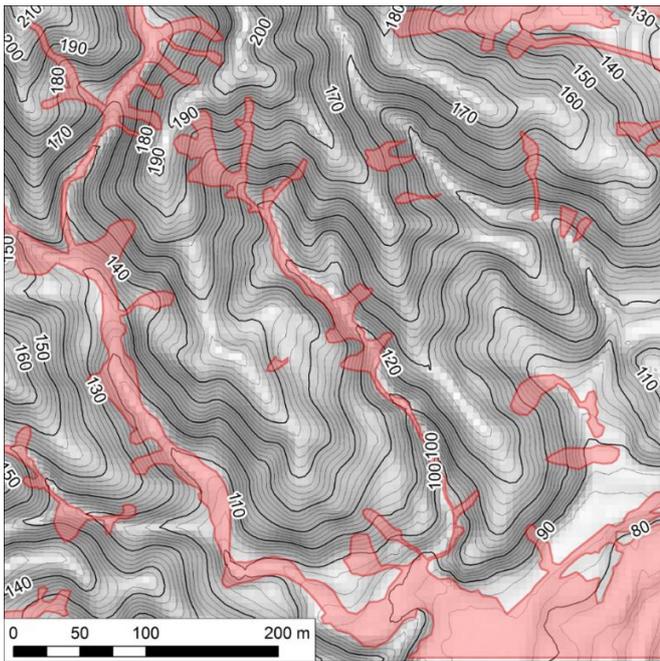


図3-6解析対象範囲の地形と土砂移動発生状況（赤色部）

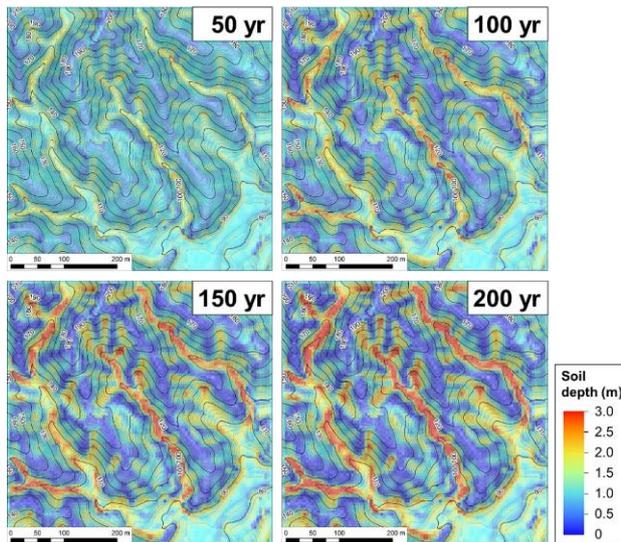


図3-7土層発達シミュレーション結果

この領域を対象に、ArcGIS (ESRI Inc.) を用いて地理情報システム上で5 mメッシュ、1年の時空間解像度で、Eq (3)に従ってセルベースの繰り返し計算を行った。計算のためのパラメータとしての土層の生成速度および輸送速度は、発災地と同様の花崗岩系を基盤岩とする日本の斜面で得られたもの(松四ほか, 2016)を用い、土層深の初期値は、斜面における代表的な値を採用して1.0

mで空間的に一様とした。

図7に計算結果を示す。土層の厚みは、経時的に斜面尾根部で0.5 m以下程度の定常状態となる一方、谷頭凹地では時間とともに増大し、200年程度を経過させた時点で、実際の表層崩壊および土石流流下による削剥深相当の値となった。この土層厚の空間分布は、今後、より詳細な多地点でのピット掘削調査などによって検証する必要があるが、ここではこの200年経過時点での計算結果を用いて、斜面の安定性の評価に用いることとした。

(5) 降水浸透の観測とモデル化

図1に示した滑落崖直上地点において、発災後にテンシオメータを設置し、降雨浸透に対する斜面内での圧力水頭応答の観測を開始した。設置したテンシオメータは4本で、ポーラスカップ埋設深度は0.3, 0.6, 0.9, 1.2 mである。0.9 m以浅は土層内、1.2 m深のポーラスカップはサプロライト内に位置している (cf. 図2A)。雨量は転倒ます型雨量計を用いて観測し、樹冠遮断のない崩壊跡地での降水捕捉とした。いずれもデータはロガーを用いて5分間隔で記録した。

図8Aに観測結果を示す。凍結により冬季は観測困難となるため、今調査期間中に捉えられた降水イベントはこの1回のみである。総雨量50 mm程度の降水浸透に伴い、斜面浅部から間隙水圧が上昇していることがわかる。重要なことは、この程度の少量の降水浸透でも、それほど大きな遅れ時間を伴わず、すべり面近傍の0.9 m深においても、有意な圧力水頭の上昇がみられることである。このことは、花崗閃緑岩の風化物(いわゆるマサ土)で構成される土層内では、濡れ前線が素早く降下し、深部に間隙水圧上昇をもたらすことを意味している。また、0.9 m深と1.2 m深での圧力水頭が、ほぼ同時に上昇をはじめ、その後も同様の経過を示していることも興味深い。この現象は、サプロライトが土層に比べて緻密で、間隙が相対的に少なく、水分貯留容量が小さいことを示唆している。

表層崩壊の直接的な引き金となる水文過程は複数あるが、重要なものの一つは、土層が飽和状態に近づいた状態で生じる圧力伝搬現象であると考えられている⁹⁾。土のような多孔質媒体において、間隙が流体で満たされた飽和状態では、流体分子の移動よりも、圧力変化が伝播することで、地表における降水入力、素早く、深部での間隙水圧応答に変換される。Iverson⁹⁾は圧力拡散方程式を用いてこの過程をモデル化している。モデルの詳細はここでは省略するが、初期条件を与えることで解析的に解けることがこのモデルの有利な点であり、離散的な降雨入力に対して、応答関数を計算し、それを積算することで、間隙水圧の経時変化を表現することができる。

このモデルは、一般的に斜面水文過程の数値計算で用

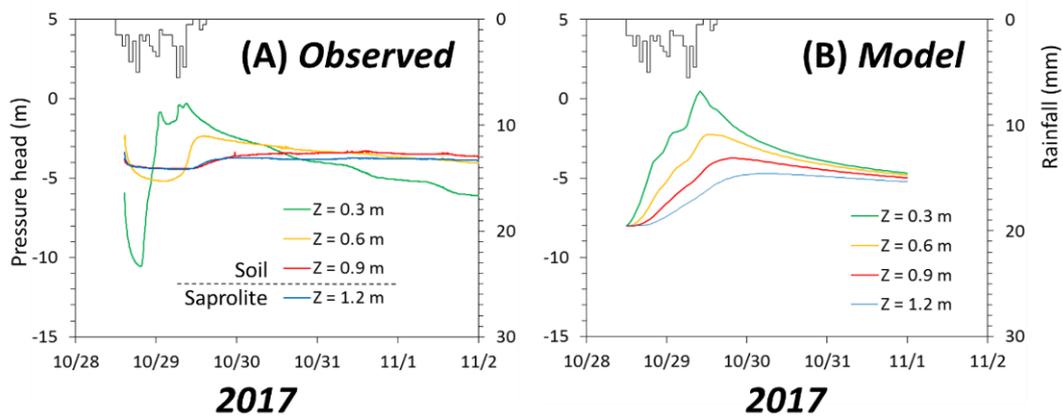


図3-8 土層中の間隙水圧の観測結果と圧力拡散モデルによるシミュレーション結果

いられる飽和不飽和浸透流解析に比べると、仮定が多く、例えば、図3-8Aに示された観測結果のピークや応答の経時的序列を再現しようとする、図3-8Bのような波形になる。水文現象として不飽和状態での濡れ前線の降下が卓越する降水イベントの初期では、再現性が低い。この部分では明らかに、モデルの前提が成立しておらず、現象を説明するには不適となる。土層が飽和状態に近ければ、このモデリングで圧力水頭の変動が高い再現性で計算できることはわかっているの、不飽和帯における浸透の簡便なモデル化とカップリングが重要であるといえる。現在広く使用されている汎用的な地理情報システムは2次元的なものであり、その上で駆動するモデルは解析的に解けるものが望ましい。今後、多くの観測データへのモデルフィッティングや土層コアなどの供試体に対する実験的なアプローチでの測定により、パラメータを決定してゆく方針である。

なお、図 8B のように、観測された間隙水圧のピークをおおよそ再現するようなパラメータとしての圧力拡散係数や透水係数を用いて、表層崩壊をもたらした 2017 年 7 月 5 日の豪雨を入力とし、間隙水圧の経時変化を計算すると、どのような斜面勾配の条件においても、標準的な土層の厚みに相当する水頭をはるかに超える値が出力される。このことは、今回の災害をもたらした豪雨が、ほぼ全ての流域斜面を全層飽和させるだけの大きな雨量であったことを示唆している。よって、前節の計算によって得られた土層の厚みを考慮した斜面の安定解析においては、まず全層飽和状態を水文条件として評価を行うこととした。

(6) 地理情報システム上での斜面安定解析による表層崩壊の発生場予測

実測によって得られた傾向を考慮して、樹木根系による土層の粘着力増分が深さ方向に指数関数的に逓減するモデルを作成した。ただし、斜面上に土層が無い、ご

く薄い状態では森林が成立せず、樹木根系による土層の補強効果は当然ゼロであるので、図3-9に示すようなパターンでのモデル化を行った⁵⁾。ここでは土層底面に於ける樹木根系由来の粘着力を考え、その大きさは土層の厚みが 30 cm のときにピークを持ち、土層の厚みが増大すると底面に根系が及ばなくなることにより指数関数的に逓減するものとしている。計算においては、ピーク値の大きさが異なる 3 つのケースを与え (図 9) , 図 7 に示された 200 年経過時点での土層の厚みを場の条件とし、無機的な土のせん断強度定数として、他の花崗岩地域で得られている粘着力 1.4 kPa, せん断抵抗角 29°を使用する。また土層は全層飽和とし、土層の厚みと同じ水頭に相当する間隙水圧を、土層の底面に与え、土層底面にすべり面が形成されるとして、斜面安全率を計算した。

得られた計算結果を図 10 に示す。これらの図から、樹木根系による土層補強効果が中程度のケース 2 の計算結果が、実際の表層崩壊分布をよく説明できることがわかる。このケースで想定している粘着力増分は、最大 40 kPa 程度まで至るものであるが、この値は滑落崖ピットでの実測で得られたデータと整合的であるといえる (図3-2D)。ケース 2 の計算結果において、不安定と判定されたにも関わらず、今災害では表層崩壊の発生しなかった谷頭凹地も存在するが、そうした場所では、過去に表層崩壊が発生したことによって、現在は土層が回復途上 (崩壊免疫期間中) にある可能性があり、古い滑落崖などの崩壊痕跡が認められるかどうか、現場で確認すべきであると考えている。

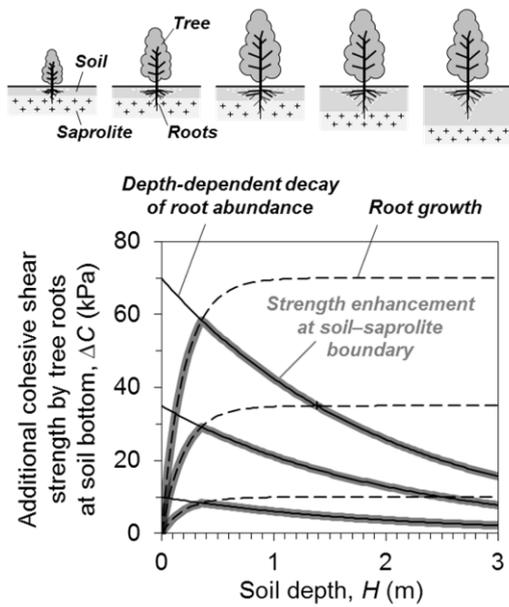


図3-9 樹木根系による土層の粘着力増大効果モデル

7. まとめと今後の課題

本研究により、土層の厚みを空間的に評価し、樹木根系の土層補強効果を組み入れ、また必要に応じて降雨浸透過程を組み込んで、地理情報システム上で斜面の安定性評価を行う方法論の道筋が見つかったと考えている。今後は、より多くのデータを取得し、計算に用いるパラメータの確度と精度を高めていくことが望まれる。具体的には、1) サプロライト中の宇宙線生成核種を分析し、土層の生成速度を決定すること、2) 多地点でのピット掘削調査によって、土層の移動速度および樹木根系の土層補強効果を定量化すること、3) 土層から乱れの少ない供試体を採取して、かさ密度、せん断強度定数、透水係数、水分特性曲線、圧力拡散係数、といった水理学的な物性

データを精緻に取得すること、4) 継続的な水文観測によって間隙水圧の変動特性を把握し、モデルによる再現性を高めることなどが、今後の課題であると言えよう。

このように、表層崩壊については、その発生場や、発生規模、発生時刻を予測できる展望が見通せる状態にあるが、これは流域内で発生する全ての表層崩壊について、決定論的な予測が可能になるということを意味するものではない。表層崩壊がどこで、いつ、どのような広がりをもって生じるのか、ということは、確率的なファクターにも左右される。こうした確率的なファクターには、岩盤特性に影響を受けた地盤の風化状態や土層の力学的・水理的物性あるいは生物活動の空間的不均質性、また、過去の崩壊発生と豪雨のタイミングといった経時的履歴効果などがある。これらは、表層崩壊の発生にとって重要であるものの、任意の場所、任意の時点での状態を見積もることが不可能である。ただし、流域斜面のハザード評価に対し、決定論的な予測を可能にしてさえおけば、そうした確率的ファクターを、不確かさの範囲で与えるモンテカルロ法のようなアプローチにより、一定の範囲の斜面からの表層崩壊による土砂生産量を確率的に論じることは可能であろう。そのような方法論の開拓が今後の課題である。

また、流域災害の発生形態としては、表層崩壊が土石流を誘発し、流域出口での被災を生じさせるというパターンが圧倒的に多い。土石流は表層崩壊を起点として生じ、渓床土砂の取り込みによって規模を増大させる。土石流に関するモデリングは既に数多いが、表層崩壊とのカップリングはまだ完全でない。この点を強化してゆくことも今後の重要な課題といえる。

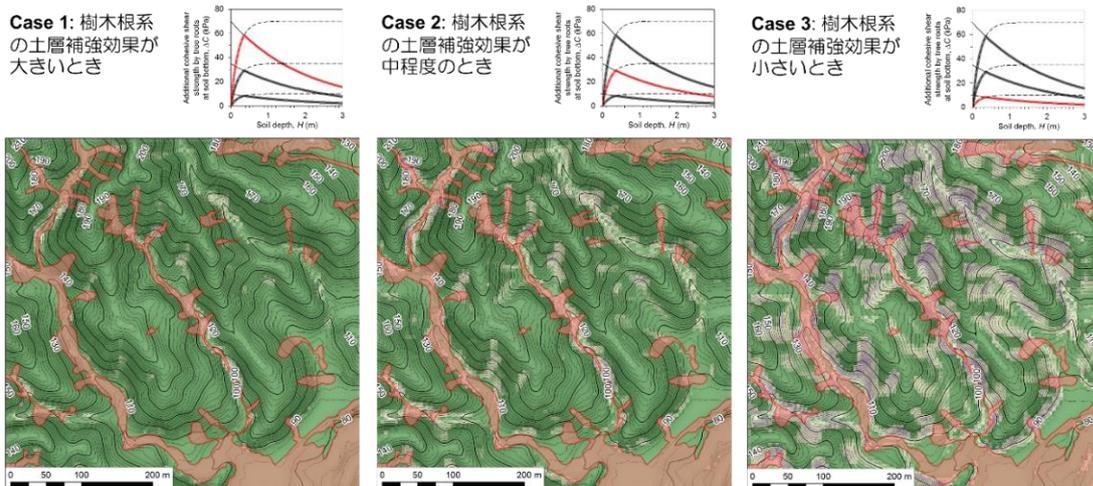


図3-10 樹木根系による土層補強効果を考慮した斜面安定性評価。緑色は安定領域、黄色および紫色が不安定領域を表す。赤色部は実際の土砂移動痕跡。

謝辞

発災後の現地調査においては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および傾斜地保全研究分野の学生諸氏による多大な協力を得た。本研究を遂行するにあたり、文部科学省の 2017 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）「平成 29 年 7 月九州. 北部豪雨災害に関する総合的研究」（研究代表者: 秋山壽一郎）、2017 年度京都大学防災研究所拠点研究（一般推進研究 29A-03）「降水—浸透—斜面崩壊—土石流の発生をシームレスに連結した流域土砂災害予測モデルの構築と検証」（研究代表者: 松四雄騎）、2016-2017 年度 京都大学グローバル生存基盤展開ユニット 萌芽研究「山地斜面における森林生態系の基盤としての土層の存続条件の定量化」（研究代表者: 松四雄騎）を使用した。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Dietrich, W.E., Reiss, R., Hsu M.-L., Montgomery, D.R.: A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data, *Hydrological Processes*, Vol.39, pp.383–400, 1995.
- 2) Heimsath, A.M., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C.: The soil production function and landscape equilibrium, *Nature*, Vol.388, pp. 358–361, 1997.
- 3) Heimsath, A.M., Chappell, J., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C.: Soil production on a retreating escarpment in south-eastern Australia, *Geology*, Vol.28, pp. 787–790, 2000.
- 4) Heimsath, A.M., Furbish, D.J., Dietrich, W.E.: The illusion of diffusion: field evidence for depth-dependent sediment transport, *Geology*, Vol.33, pp. 949–952, 2005.
- 5) 松四雄騎・外山 真・松崎浩之・千木良雅弘. 土層の生成および輸送速度の決定と土層発達シミュレーションに基づく表層崩壊の発生場および崩土量の予測, *地形*, Vol.37, pp.427–453, 2016.
- 5) Iverson, R. M.: Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resources Research*, Vol.36, pp.1897–1910, 2000.

4. 崩壊発生機構の数値解析

堤大三

(1) はじめに

単独の大崩壊と面的に分布する表層崩壊とを区別し、それぞれの発生メカニズムについて検討する。単独崩壊としては日田市小野地区の斜面崩壊を、面的に分布する崩壊としては、朝倉市赤谷川流域の一部（乙石川流域）をそれぞれ対象とした。それぞれの崩壊地での土層を採取し、透水試験と pF 試験を実施し、透水係数と水分特性曲線を求めた。対象流域を stream tube で分割し、それぞれの tube を対象に、降雨流出解析、斜面安定解析を行い、斜面崩壊発生時の水分状態や斜面安定性を検討する。これらの解析には時間がかかり、現時点では解析は終了しておらず、斜面発生機構を明らかにするにはさらなる検討が必要である。

(2) 現地調査

2017年8月3-4日と9月15-17日に被災地において、主に斜面崩壊発生現場の現地調査を行った。その中で、福岡県側では赤谷川流域の小崩壊群を、大分県側では花月川流域小野地区の大規模崩壊を重点的に調査した。赤谷川流域では、支流の一つである乙石川の近傍の崩壊跡地（図4-1）において、崩壊地近縁部の代表的な土層を100 cm³の円筒サンプラーを用いて採取した。採取深度は0, 17, 38, 100 cmの4深度である。この崩壊地は地質図上では花崗閃緑岩に分類される領域に位置している。また、同じ赤谷川流域の支流である小河内川の小崩壊跡地においても同様に崩壊地近縁部の代表的な土層を採取した。採取深度は0, 30 cmの2深度である。この崩壊地は地質図上では泥質片岩に分類される領域に位置している。一方、花月川流域小野地区の大規模崩壊地（図4-2）においても、崩壊地近縁部の代表的な土層を100 cm³の円筒サンプラーを用いて採取した。採取深度は0.0, 1.8, 3.0 mの3深度である。この崩壊地は地質図上では火山岩類に分類される領域に位置している。斜面崩壊跡地において土層を採取している様子を図4-3に示す。



図4-1 赤谷川流域 乙石川の近傍に多数見られる小規模崩壊のひとつ



図4-2 花月川流域 小野地区の大規模崩壊



図4-3 水理特性試験のため土層採取を行っている様子
（上図：赤谷川流域 乙石川の近傍の小規模崩壊、
下図：花月川流域 小野地区の大規模崩壊）

(3) 土層の水理特性

現地調査において採取した土層サンプルを持ち帰り、実験室において透水試験と pF 試験を実施した。透水試験は変水位法を採用して飽和透水係数 K_s を計測した。pF 試験はポーラスプレートと圧力容器を用いた加圧板法を採用した。pF 試験によって計測した圧力水頭 ψ - 体積含水率 θ の関係を、以下に示す対数正規分布モデル¹⁾でフィッティングし、その係数によって圧力水頭 ψ - 不飽和透水係数 K 関係を推定した。

$$C(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\sqrt{2\pi}\sigma(-\psi)} \exp\left\{-\frac{[\ln(\psi/\psi_m)]^2}{2\sigma^2}\right\}$$

(1)

$$K(\psi) = K_s \left[F_{RND}\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma}\right) \right]^{1/2} \left[F_{RND}\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} + \sigma\right) \right]^2$$

(2)

ここで、 θ_s [m³/m³] は飽和体積含水率、 θ_r [m³/m³] は残留体積含水率、 ψ_m [m] は土層の間隙径のメディアンに対応する圧力水頭、 σ は土層の間隙径分布の分散を表す無次元パラメータである。式(2)中の関数 $F_{RND}(x)$ は正規分布の残差であり、次式によって表される。

$$F_{RND}(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

(3)

計測された土壌水分特性曲線と透水係数を対数正規分布モデルでフィッティングした曲線とともに図4-4, 5, 6に示す。赤谷川流域崩壊跡地（花崗閃緑岩, 図4-4）の土層は、表層部分に飽和透水係数が大きく、難透水性の部分があるが、その下は透水性が高く、花崗岩マサ土に近い水理特性を持つ比較的均質な土層で占められている。深度 1m になると、基岩部に近づくためか、空間的にばらつきはあるものの透水性の低い性質を表し始めている。赤谷川流域のもう一箇所の崩壊跡地（泥質片岩, 図4-5）の土層は、表層（0 cm）から基岩層に至る全層で透水係数の高い比較的均質な水理特性を表している。

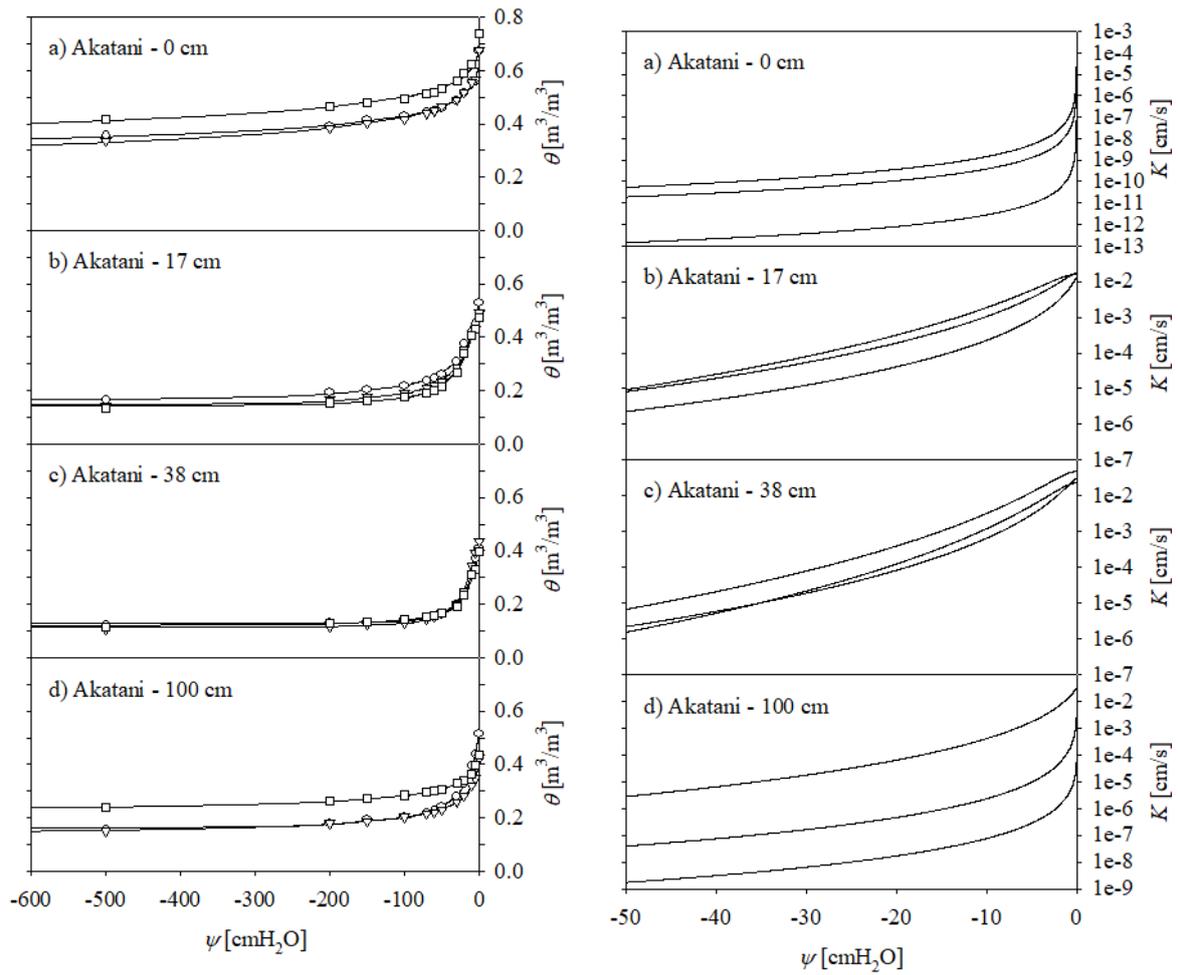


図-4-4 赤谷川流域崩壊跡地1で採取した土層の水理特性試験の結果
(左図：水理特性曲線，右図：透水係数)

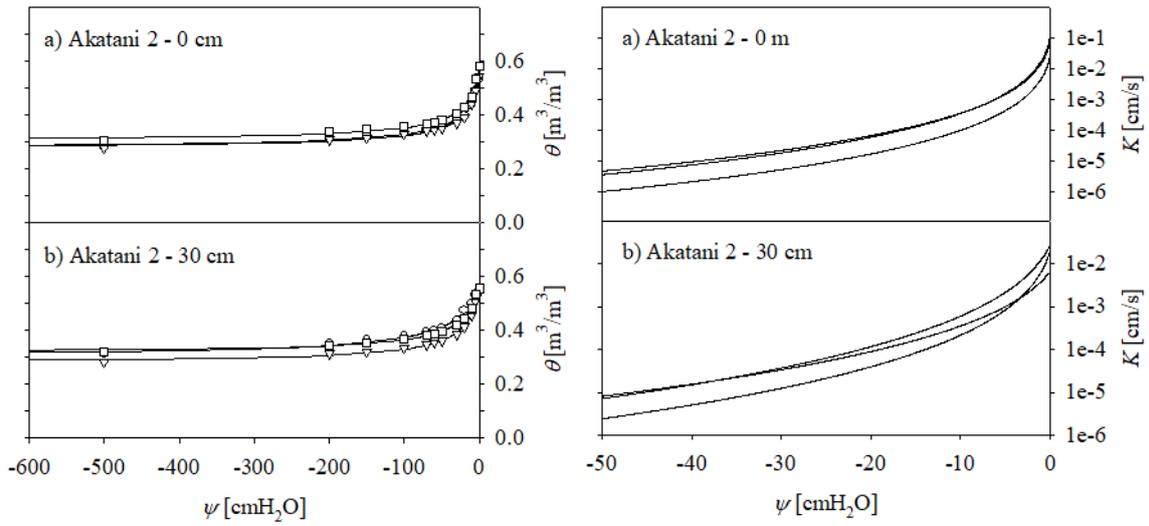


図-4-5 赤谷川流域崩壊跡地2で採取した土層の水理特性試験の結果
(左図：水理特性曲線，右図：透水係数)

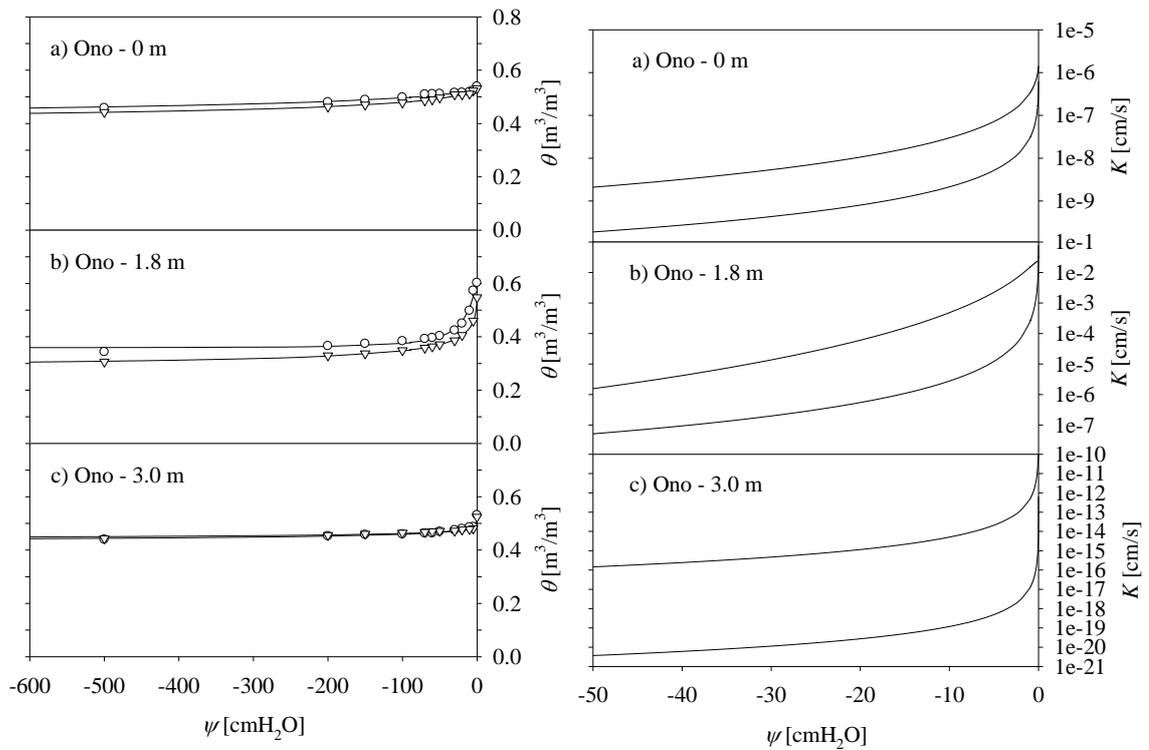


図-4-6 小野地区崩壊跡地で採取した土層の水理特性試験の結果
(左図：水理特性曲線，右図：透水係数)

(4) 斜面崩壊解析

➤ 斜面分割法

このあと述べる臨界すべり面解析法は、崩壊の縦断面形状を推定できる手法であることから、表層崩壊解析手法として、有効な手法である。ただし、対象域を流域全体とするような広範囲にわたる解析を行う際、一般的なグリッド分割法では隣接するグリッド間の地形的な連続性を正確に表せないため、臨界すべり面解析を適用することができない。そこで、地形分割手法として Moore (1991)²⁾ や Wu & Sidle(1995)³⁾らが提案した等高線に基づく地形分割手法を用いた。図4-7 にこの分割法の概念図を示す。この手法は各等高線とそれらを横切る流線によって地形を分割する手法であり、分布型水文モデルにおいて斜面で発生する地表流の流下の方向や連続性を再現できる利点がある。このため正方形グリッドを基礎とした地形解析と比べて、水流出計算を単純化することができる。この流線に囲まれた要素群は上流から下流までの水の流下方向を表した一つなぎの斜面（以降 Tube と呼ぶ）として捉えることができ、表層崩壊解析に活用することができる。

解析対象とする領域の等高線図を図4-8 に示す。等高線は 10 m 間隔である。小野地区の斜面は、ひとつの流域として扱うことができないため、3つの区域に分割して解析を行う。

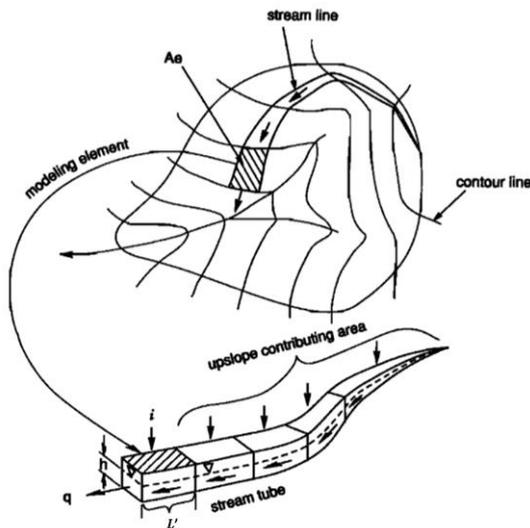


図4-7 Stream tubeによる斜面分割法の概念図
(Wu & Sidle, 1995)

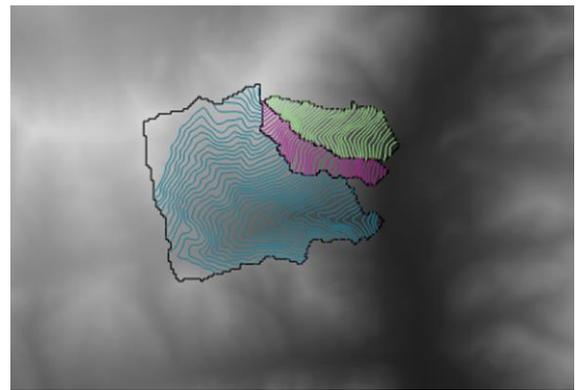
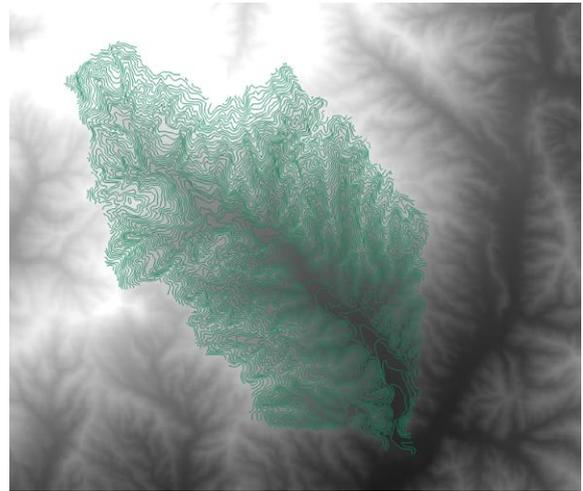


図4-8 解析対象流域の等高線図
(上図：赤谷川流域 乙石川の近傍の小規模崩壊,
下図：花月川流域 小野地区の大規模崩壊)

➤ 斜面降雨流出解析

降雨浸透解析を精緻に実施するためには、Richards 式を解いて飽和・不飽和浸透解析を実施する手法がある。その際、土層の推理特性には図4-4 から 6 に示した結果を用いることができる。ただし、ここでは流域規模を対象とするために、計算負荷を小さくする目的で Diffusion Wave 法を用いる。式(4)、(5)に示すように表面流には Manning 則を、中間流にはダルシー則を適用する統合型の解析モデルである。

$$\begin{cases} Q = BK_s h I & (0 \leq h < D \cos \theta_{slope}) \\ Q = B \left(K_s D \cos \theta_{slope} I + \frac{1}{n_m} (h - D \cos \theta_{slope})^{\frac{5}{3}} \sqrt{I} \right) & (h \geq D \cos \theta_{slope}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{B \cdot L'} \cdot \frac{dQ}{dx} + \frac{r}{\varepsilon} \cos \theta_{slope} \quad \begin{cases} (0 \leq h < D \cos \theta_{slope} \text{ のとき } \varepsilon = E) \\ (h \geq D \cos \theta_{slope} \text{ のとき } \varepsilon = 1) \end{cases} \quad (5)$$

ここで Q [m³/s]は、 B [m]はエレメントの平均幅、 h [m]は中間流と表面流の合計水深、 θ_{slope} は斜面傾斜角、 I は動水勾配、 D [m]はエレメントの層厚、 n_m [m^{1/3}・s]はマンニングの粗度係数、 E は土層の空隙率、 L' [m]はエレメント長さ、 r [m/s]降雨強度である。ここで、飽和透水係数と空隙率には現地採取した土層サンプルの値を用いることができる。

解析では、浸透水の流出経路を考慮した地形の分割を行っているため、エレメントごとの上流からの流入と下流への流出、降雨の浸透を考えるが、隣接する Tube 同士の横方向の水移動は考慮しない。また Tube は上流から下流に向かって、合流することはないが分岐はしないので、上流からの流入は複数となることがあるが、下流への流出は一つである。

➤ 斜面安定解析

斜面崩壊解析手法として久保田ら (1991) ⁴⁾等が提案した臨界すべり面解析を採用する。この解析手法は、安定解析として任意のすべり面形状に適用できる簡易 Janbu 法を、すべり面探査法として動的計画法を用いた。これら手法を Tube (上流から下流まで一つなぎのエレメントによって構成された斜面) に適用することで、最小の安全率とそのときのすべり面形状を推定することが可能である。また算定されたすべり面形状から崩壊土砂量を計算できる。この解析を、流域を構成する全ての Tube に適用することで、崩壊の面的分布を推定する

(5) 解析

現在、解析を実行中であるが、結果を取りまとめる段階までは至っていない。解析実施の例として、小野地区大規模崩壊を対象とした Stream tube による分割した解析対象地を図-8-9に示す。

(6) おわりに

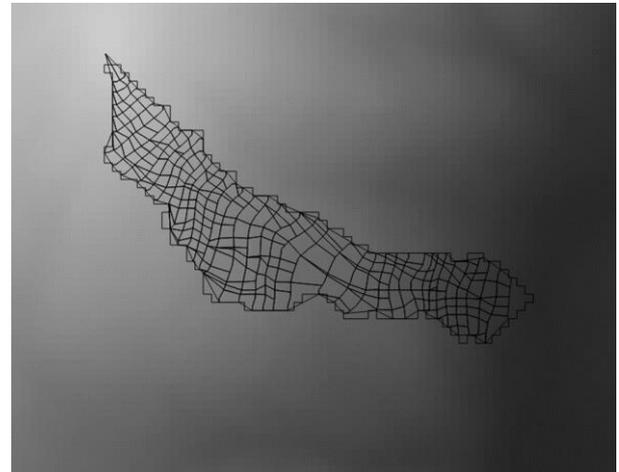


図4-9 解析対象流域の Stream tube による分割図
(花月川流域 小野地区の大規模崩壊部分流域)

対象斜面や流域を Stream tube で分割し、降雨流出解析・斜面安定解析を行うことで、流域全体に広く分布する小崩壊群と比較的大規模な単独崩壊の双方を再現計算することを試みた。現在、解析を実施中であるため、その結果については言及することができないが、再現性の検証を今後行う予定である。この手法は、特に表層崩壊の解析に適しているが、単一の比較的大規模な崩壊の再現が可能かという点に関しても検証することが必要である。

参考文献

- 1) Kosugi, K, Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resources Research, Vol. 32, No. 9, pp. 2697-2703, 1996.
- 2) Moore, LD, Terrain-Based Catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data, Water Resources Research, vol. 27, No. 6, pp. 1177-1191, 1991.
- 3) Wu, W and Sidle, RC, A distributed slope stability model for steep forested basins, Water Resources Research, Vol.31, No.8, pp. 2097-2110, 1995.
- 4) 久保田哲也, 中村浩之, 臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法, 地すべり, 27巻, 4号, 1991.

5. 小野地区地すべりの発生・運動機構および二次災害

王功輝・土井一生・釜井俊孝

(1) はじめに

2017年7月6日午前10時ごろに大分県日田市小野地区において大規模地すべりが発生し、地すべり土塊が小野川を堰き止め、天然ダムを形成したうえで、斜面对岸の集落までも押し寄せた(図-5-1)。この地すべりの発生・運動機構を解明するために、現地調査および室内土質実験を実施した。また、これらの結果に基づいて、源頭部の不安定土塊および天然ダムの決壊などによる二次災害の危険度評価をも行った。



図-5-1 小野地区地すべり地全景(アジア航測(株)2017年7月9日撮影)

(2) 小野地区の地すべり

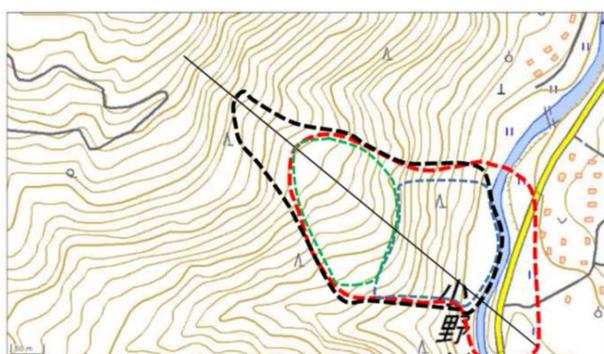


図-5-2 崩壊地の地形図。赤破線は今回の崩壊ブロック、緑・青破線は今回の崩壊の上部・下部ブロック、黒破線は地形図で判読された地すべりブロックを表す。黒線は図-5-6における断面線。

図-5-2に当地区の地理院地図を掲載する。地形判読や空中写真判読から黒破線で囲んだ地すべりブロックが同定された。今回の崩壊域はこのブロックとほぼ一致し

た。この地すべりブロックの末端部においては河川が屈曲し、過去に地すべりの活動があったことが推察された。その後の河川による侵食のため末端部の土砂が取り去られたところに、今回の豪雨による大量の地下水の集積によって再度地すべりが活動し、崩壊が発生したことが考えられる。

地すべりは、おおむね標高 170-200 m の等高線を境として、上部(図-5-2 緑破線)と下部(図-5-2 青破線)の2つのブロックに大きく分かれる。下部ブロック内の滑落崖付近においては、上側に白色の安山岩溶岩、下側に赤色化した凝灰角礫岩が明瞭に分かれて存在していた。上部ブロックに崩壊土(の一部)は、斜面中腹の遷緩線より下側に大量に留まっていた(図-5-1)。崩壊域内ではすべり面が露出していた(図-5-3)。これらの様子から安山岩溶岩と凝灰角礫岩の境界ですべてていることが推察された。露出したすべり面を観察したところ、凝灰角礫岩の上部は風化が進行し粘土化し、粘土化した土層内には過去の斜面変動により生じた擦痕が明瞭に見られる(図-5-4)。また、図-5-4に示す擦痕方向と斜面の最大斜面方向から、古い地すべりが、斜面の最大傾斜方向に斜交する方向へ移動していたことが認められる。



図-5-3 上部ブロックに露出したすべり面



図-5-4 斜面最大傾斜方向と擦痕の方向

崩壊域の上方においては、何重にもたくさんの段差亀

裂が見られた。大きいものでは 130cm もの段差が生じており（図-5-5）、非常に不安定な状態となっていることがわかった。このような変状から推定される不安定領域の大きさは、幅 50 m 程度、長さ 100 m、比高 80 m 程度であった。



図-5-5 崩壊域上方の段差亀裂

(3) 地すべりの地質断面図と変動過程

地すべり地内で測量を実施し、縦断面図を得た。これに観察された地質の情報を加え、図-5-6の地質断面図を作成した。凝灰角礫岩の上位に安山岩溶岩が存在し、凝灰角礫岩の最上部は粘土化し軟弱かつ難透水性となっていた。安山岩溶岩と凝灰角礫岩の境界をすべり面として古くから地すべりの活動があった。今回の崩壊域上部には古い地すべり土塊が溜まっていた。また、古い地すべり運動によって押し出された土塊が河川に削られたため、降雨等によって今回の崩壊域がすべりやすい状態となっていたと考えられた。

このような状況下で、極端な豪雨によって多量の水が地面から透水性の高い安山岩溶岩を通過して地下に浸透し

た。地下水は難透水性を示す凝灰角礫岩最上部の粘土化した層でとどまり、安山岩溶岩と凝灰角礫岩の境界付近の水圧が高められ、移動土塊が不安定な状態となり崩壊に至ったと考えられる。

地すべり移動土塊の殆どは、安山岩溶岩土層からのものであるため、地すべり移動機構の解明および移動土塊により形成された天然ダムの安定性評価を実施するために、地すべり源頭部のすべり面附近における安山岩土層内部（図-5-7）から土試料を採集し、そのせん断挙動を調べた。



図-5-7 地すべり源頭部から土試料の採取場所

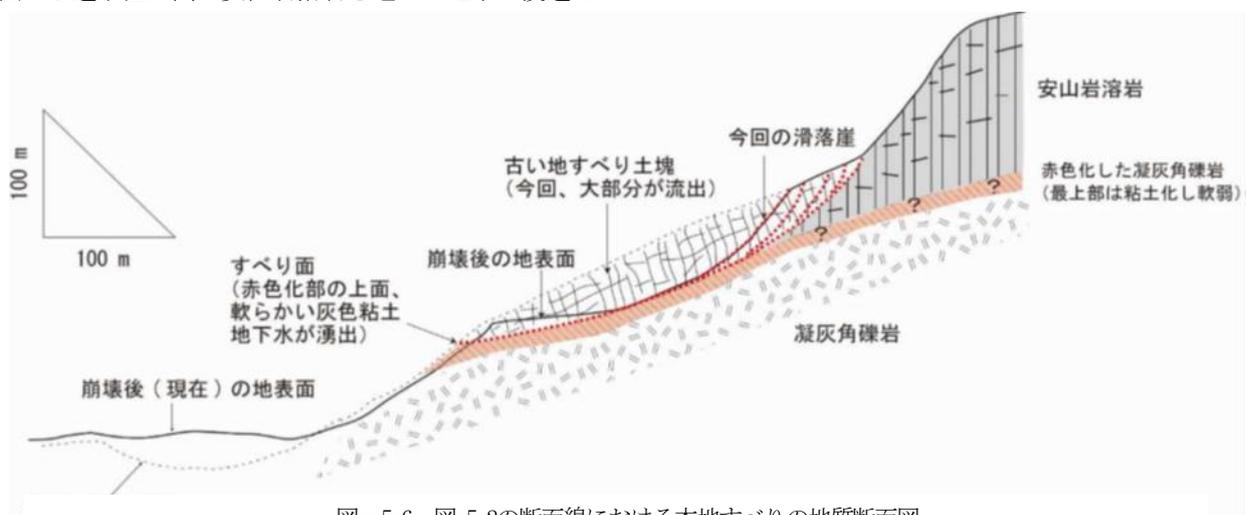


図-5-6 図-5-2の断面線における本地すべりの地質断面図

(4) 室内実験結果

現地で採取した土試料に対して、リングせん断試験機を用いて、飽和非排水・自然排水せん断試験を行った。飽和非排水せん断試験は、下記の手順で実施した。①現地で採取した土試料を 110°C の温度で 24 時間をかけて炉乾燥する。②乾燥した試料をリングせん断試験機のせん断箱に入れる。③試料内の飽和度を高めるために上部排水口を解放し、下部排水口から炭酸ガスを 1 時間注入して試料内の空気を置換させ、その後、脱気水を下部排水口から 12 時間をかけて注水する。④飽和度を確認した後、地すべり土塊の深さ (約 30m) およびすべり面傾斜により算出した垂直応力 (456 kPa) とせん断応力 (194 kPa) で試料を正規圧密する。⑤全部の排水口を締めてせん断箱を非排水状態にし、せん断応力を上昇させて実験を実施する。⑥土試料のせん断抵抗が一定になった事を確認した後、実験を停止する。実験中において、垂直応力、せん断応力 (抵抗)、過剰間隙水圧、せん断変位および垂直変位を記録した。

図-5-8 に試料に対する飽和非排水せん断実験の時系列データおよび有効応力経路を示す。この図より応力経路は、せん断応力の上昇に伴って過剰間隙水圧が発生したが、せん断破壊が発生した後に、せん断変位の増加に伴って過剰間隙水圧が急激に上昇し、最終的にほぼ 400 kPa (垂直応力の約 88%) の高い値になった。これにより、土試料のせん断抵抗が大きく低下した。

図-5-8 から、降雨時に、安山岩溶岩により風化した土層において流動性の高い地すべりが発生しやすいことが推察される。

(5) 天然ダムによる二次災害

地すべり土塊が小野川を堰き止め、幅約 500 m の天然ダムを形成した。流動化した地すべり土砂により形成されたため、ダム堤体の勾配は緩い ($< 2^\circ$)。また、ダム堤体が低い場合、形成された堰き止め湖の容量は小さい。ダム形成直後に越流が発生したと考えられるが、越流水は、元の道路や畑を流下したため、地すべり堆積土砂における急激な浸食決壊が発生しなかった。その後、排水路の作成や除石作業などの緊急対策が実施され、下流部への被害拡大はなかった。

(6) まとめと今後の課題

今回の豪雨により、福岡県朝倉市東側において数多くの表層崩壊が発生したが、小野川地域においては、発生した土砂災害の数は著しく少なかった。しかし、小野地区地すべりの規模は一番大きかった。その原因としては、安山岩溶岩と凝灰角礫岩の境界をすべり面として古くから地すべりの活動があったと考えられる。こういった地質特徴を有する斜面を抽出し、地すべりの分布を地形判

読等により詳細に把握することは、今後の同様の災害を軽減するうえで重要である。また、風化の進行に伴う凝灰角礫岩の力学特性変化を解明することは、小野地区地すべり斜面と同様な斜面変動の解明および地すべり災害予測には必要である。これらを今後の課題にする。

豪雨時の地すべりにより形成された天然ダムの決壊による二次災害がよく報道されている。また、実際に決壊した天然ダムの殆どは天端からの越流によるものと報告されている。小野川地すべりで形成された天然ダムのように、形成された直後には越流が発生した。結果としては、下流には大きな災害を引き起こすことはなかったが、こういった天然ダムの形成・決壊過程に対する研究は、降雨・地震時に発生した斜面崩壊や地すべりによる二次災害の危険度を軽減するうえで重要で不可欠である。これをも今後の研究課題にしたい。

謝辞：

国土地理院による地理院地図およびアジア航測 (株) により撮影された写真を用いました。記して感謝いたします。

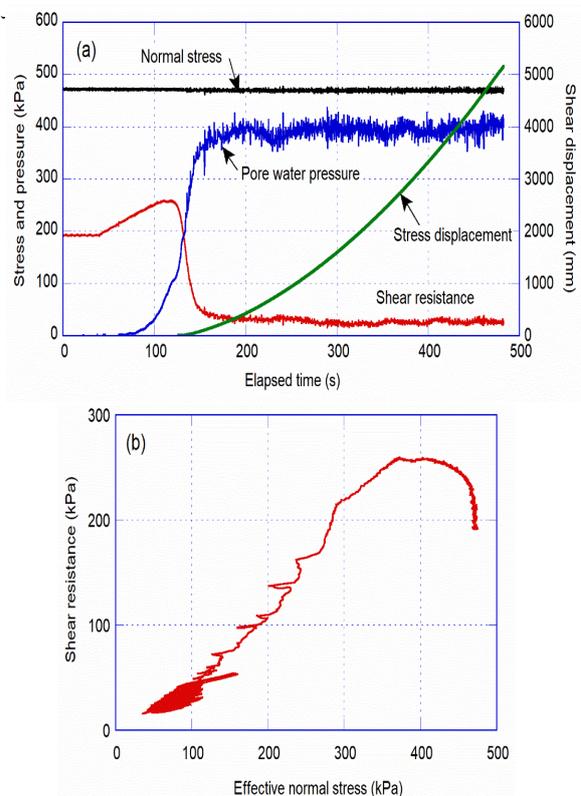


図-5-8 安山岩土層から採取した試料に対する飽和非排水実験結果。(a)垂直応力、せん断抵抗、過剰間隙水圧、およびせん断変位の時系列データ、(b)有効応力経路

6. 山地斜面の植生と崩壊発生の関係

松浦純生

(1) 崩壊の概要

九州北部豪雨では多量の降雨により、きわめて多数の崩壊や地すべりが発生した。崩壊した箇所の基盤地質は変成岩類、深成岩類、火山岩類などである。

しかし、崩壊の大部分は基岩の上位に堆積する土層で発生した表層崩壊で、基盤岩内部からの深層崩壊は少ない。表層崩壊は、地下に浸透した水が集まりやすい0次谷と呼ばれる凹地形を呈する箇所が多発した(図-6-1)。

一方、短時間降雨強度が大きかったため各溪流で洪水流や土石流などが発生し、溪岸が著しく横方向に侵食されることで、溪流と接続する山腹下部斜面での溪岸崩壊も発生した(図-6-2)。

(2) 表層崩壊の特徴

表層崩壊の深さは浅いところで約0.5m、深いところで5m程度もあった。平均して1~3m程度で、ほとんどの土層は風化残積土であると考えられる。

深成岩類である花崗閃緑岩地帯では、土層が深部まで発達したため、5m以上の深さを持つ表層崩壊があった(図-6-3)。それらの崩壊面は、マサ土とサプロライトのそれぞれの層内と境界付近(図-6-4)、サプロライトと基岩の境界近傍で発生していた。

一方、変成岩類に属する泥質片岩地帯では受け盤部分では比較的浅い表層崩壊が多く、流れ盤構造の箇所ではやや深いすべり面を持つ表層崩壊が発生していた。

(3) 崩壊と森林との関係

被災した箇所では林業が盛んなため、スギやヒノキの人工針葉樹林(10~13 齢級)が広がっている。一般にヒノキは乾燥に強いため尾根筋に、スギはそれ以外の部



図-6-1 多発した谷頭(0次谷)での崩壊



図-6-2 溪岸崩壊と尾根まで達した表層崩壊



図-6-3 マサ土化が進んだ箇所でのやや深い表層崩壊



図-6-4 マサ土とサプロライトの境界付近で発生した表層崩壊

分に植栽されている。立木の根系は樹齢や地位にもよるが、深さおよび水平方向に概ね 1~2m まで伸張していた。九州地方の人工林は挿し木苗が多く、実生苗に比べて垂直根の発達が一般にやや劣る傾向がある。しかし、現場の観察では垂直根が発達した箇所も見られたことから、根系の生長は土壌層の深さや水分環境などに大きく依存すると考えられる。

箇所数は少ないが、天然広葉樹林でも表層崩壊が発生している場合があった(図-6-5)。また林齢でみると、

幼齡人工針葉樹林および壯齡人工針葉樹林のどちらも表層崩壊の発生が確認された（図-6-6,7）。

以上から、現時点では山地斜面の植生（樹種、林齢）と表層崩壊の関係は希薄と思われる。これは、大部分の表層崩壊が森林の根系よりも深い箇所が発生していたことによる。ただし、森林整備との関係については、人工林の施業履歴が不明なため、枝打ちや間伐などがどのような効果があったかは分かっていない。

一方、森林土壌が薄く、根系が基岩層に発達する節理などに伸張している場合には、崩壊や土石流を抑止する効果があったと考えられる（図-6-8,9）。これに対し、片岩地帯で片理面が良く発達している箇所では根系が基岩内に侵入できず、そのまま片理面で崩壊した箇所もあった（図-6-10）。このように、森林の根系が崩壊防止機能を発揮できるかどうかは、森林土壌の厚さや基岩面の状態に大きく依存するものと考えられる。

(4) 今後の課題について

日本の山地は製塩、製陶、製鉄、薪炭採取などにより、長期間にわたって著しく荒廃し、洪水や土砂流、土石流などが頻発していた。しかし、戦後の森林造成によって、現在では山地のほとんどが森林に覆われ、相対的に侵食や表層崩壊は少なくなっている。一方で、地球温暖化の影響を受け森林の崩壊防止効果を超える極端な降雨が増えつつあることから、生育基盤である土層とともに立木が流出するリスクが増大している。今回の災害も壯齡林で崩壊が数多く発生し、土砂と混在した大径木の流木が長距離にわたり流下し、下流域に大きな災害をもたらした。

今後の課題としては、流木の発生メカニズムと被害状況についての詳細な調査・解析結果を踏まえながら、発生源対策や流下区域での対策、さらに堆積域での対策をソフトとハードの両面から検討する必要がある。

降雨による表層崩壊は、いわゆる凹部や谷頭部分に集中する傾向がある。このような部分は水分環境が良いので、植生の適地となり樹木の生長も早い。このため、リスクが大きい箇所では適切な指定施業要件を設定するとともに、渓床勾配の緩和や斜面下部の安定を図るための治山ダムや山腹工などで対処することが望ましい。

溪畔部に成立している立木は一般に根張りが浅く、また、生育基盤が洪水流や土石流などで容易に流亡するため、流木災害の原因となることが多い。このため、渓流周辺では立木の伐採や倒伏木の撤去などを行う必要があることに加え、渓流の接続斜面では切り捨て間伐などは認めないなどの処置が必要であろう。また、下流域への流木災害を未然に防ぐために、透過型の治山ダムや砂防堰堤を、不透過型のものを含め、流域一体となって計画的に配置することが求められる。



図-6-5 幼齡天然樹林での表層崩壊



図-6-6 幼齡人工針葉樹林での表層崩壊



図-6-7 壯齡人工針葉樹林での表層崩壊



図-6-8 泥質片岩の節理内に生長した根系
(樹木根系が基岩内の割れ目などに伸張すると、土層と基岩を繋ぎ止める効果が発揮され、表層崩壊防止機能が高まる。)

一方、堆積域では流速が遅くなることから、流木や土砂を捕捉するための緩衝帯を造成することも考えられる。もちろん、重要な保全対象がある部分では、不透過型の砂防堰堤などの建設も必要になる。



図-6-9 土砂流によっても流木とならなかった溪畔林

(土層が浅く、根系が基岩内に伸張していたため、ある程度の洪水流や土砂流あるいは土石流でも流木にならなかったと考えられる。)



図-6-10 流れ盤構造の片理面をすべり面とした表層崩壊

(土層が厚く、樹木の根系が基岩まで到達できなかったか、もしくは根系が到達したとしても基岩に節理が少なく、根系が基岩内に伸張できなかったと考えられる。)

7. 地震計記録による地表変動の検出：日田市小野地区における斜面崩壊の例

土井一生

(1) 背景

近年、地震観測網の充実に伴って、斜面崩壊によって励起された地震動が地震計によって捉えられた事例が増え、その記録から斜面崩壊の発生時刻や規模、発生メカニズムが議論されてきた（例えば、Yamada et al., 2012）¹⁾。しかしながら、斜面崩壊による地震動記録から崩壊の自動検出や崩壊場所推定には現時点では至っていない。九州北部豪雨を誘因として、多数の斜面崩壊が発生したが、その中でも最大規模のものは大分県日田市小野地区で発生した。主要な崩壊は幅 200 m、長さ 200 m の領域で 7 月 6 日午前 10 時ごろに発生したとされる。本研究では、周囲の高感度地震計の地震波形記録を調べ、崩壊域近傍より放射された地震動が検出されるかどうか調べた。

(2) 地震計の記録

小野地区の崩壊発生域の周囲 35 km 以内に位置する 9 観測点の連続地震波形記録を図 1 に示す。9 時 45 分と 9 時 46 分ごろに 2 回のシグナルが複数の観測点で得られていることが窺えた。崩壊発生域からの距離に従って見かけ速度約 3 km/s で伝播している様子が見られた。これらの時刻は矢野ほか（2017）²⁾による目撃証言の情報と一致した。

シグナルは立ち上がり不明瞭であり、時間の経過とともに紡錘型の形状を示した。ランニングスペクトル（図-7-2）によると、シグナルの卓越周波数は、0.5-3 Hz であった。得られた卓越周波数や波群の形状は、伊豆大島豪雨災害^{3A)}や 2017 年 5 月の飯山市の土石流³⁾による地震動の波形記録とほぼ同じであった。

(3) 震動源の推定

観測された地震動が小野地区の崩壊によるものであることを確かめるため、火山性微動の震動源の推定に用いられている地震波の振幅の性質を利用した震源決定法（ALS 法⁶⁾）を本事例に適用した。結果を図-7-3 に示す。9 時 45 分、46 分のどちらのシグナルも小野地区が震源決定誤差の小さな領域に含まれた。

(4) 地震計による崩壊発生検知の可能性と問題点

本研究の結果のように、長さ・幅が 100 m 規模の崩壊が Hi-net によって検知され得たことは、今後、同様の規模以上の崩壊のリアルタイムな検知に可能性を見出すことができることを示唆している。ただし、本研究においては、崩壊の発生場所が分かっただけで目撃証言の情報

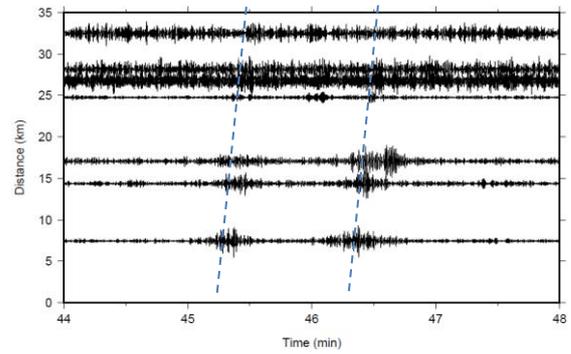


図-7-1：周辺の Hi-net 9 観測点における上下動速度記録。点線は見かけ速度 3.0 km/s を表す。2 度にわたる崩壊が地震動として記録されている。

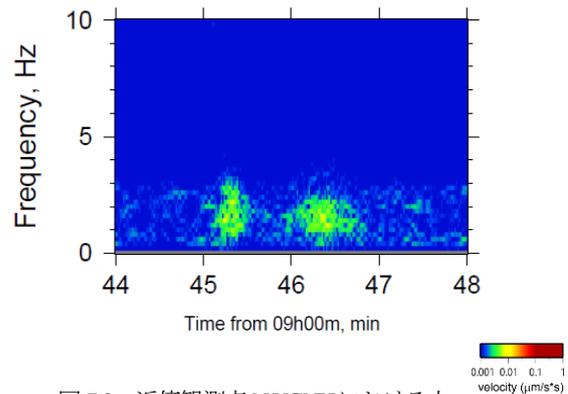


図-7-2：近傍観測点 N.YGNH における上下動のランニングスペクトル。

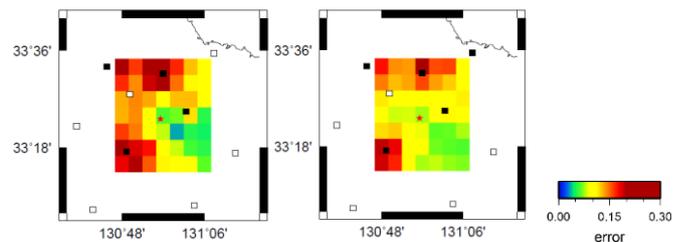


図-7-3：ASL 法による 9 時 45 分(左)と 46 分(右)のシグナルの震源決定結果。V=3.3 km/s, Q=200 の S 波を仮定した。

を参照しながら、崩壊による地震動を認識した。先見情報なく崩壊による地震動を自動認識するのは困難で、仮に認識できたとしても、図-7-3 に示されるように、推定誤差が小さな範囲は半径 10 km 以上と広く、どの尾根または谷で崩壊が発生したかを絞り込むことは難しい。利点と限界を認識したうえで、本手法を活用、発展させていくことが重要であると考えます。

謝辞

防災科学技術研究所 Hi-net による地震観測記録を利用しました。また本研究は京都大学防災研究所と東京大学地震研究所の拠点間連携共同研究（2017-K-04）の支援を受けました。ここに記して感謝致します。

引用文献

- 1) Yamada et al. (2012): Geophys. Res. Lett., L13301.
- 2) 矢野ほか (2017): 土木学会ホームページ.
- 3) Doi et al. (2014): Proc. 2014 JpGU, HDS05-12.
- 4) Ogiso and Yomogida (2015): J. Volcanology and Geothermal Res., 298, 15- 26.
- 5) 土井ほか (2018): 京都大学防災研究所研究発表講演会, D05.
- 6) Kumagai et al. (2010): J. Geophys. Res., 115, B08302.

8. 衛星データによる地表変動の検出

橋本 学

(1)はじめに

大規模災害発生時には、その発生源と被災地域の位置・規模の迅速な把握が求められる。このためには、地表での調査が最も正確であることは言うまでもない。しかし、労力やアクセスの問題があり、面的かつ迅速に把握することは不可能である。航空写真は有力な手法であるが、気象条件に左右される上、撮影範囲が狭い。人工衛星の光学・赤外画像は撮影範囲が広いが、雲の下は見えないし、衛星の再来間隔で撮影のタイミングが規定される。これらに対して、人工衛星搭載合成開口レーダーは、光学衛星観測と同様にタイミングに制約があるものの、気象条件に左右されずに広域の観測が高分解能で行える利点がある。近年は、世界各国・機関が複数の衛星を打ち上げ・運用しており、いずれかの衛星を用いることで発災後時を置かず観測を行えるようになっている。

2017年7月5~6日の九州北部豪雨災害に伴って多くの土砂崩れ・山体崩壊が生じた。この全容を把握し、さらに今後の斜面災害発生可能性を評価することを目的として、我が国の宇宙航空開発機構（JAXA）が運用している地球観測衛星だいち2号（Advanced Land Observation Satellite 2: ALOS-2）搭載の合成開口レーダー画像を解析した。その結果の概要を報告する。

(2)ALOS-2 観測と解析の概要

ALOS-2は、2014年5月24日に打ち上げられ、同年8月の運用開始以来、順調に観測を続けている。ALOS-2は、波長236 cmのLバンドの合成開口レーダーを搭載しており、観測幅と分解能・偏波の異なる多くのモードで観測が可能である。同じ場所を同じ条件で観測することができるまでの回帰周期は14日である。しかし、複数の軌道から電波の射出角度や方向を変えることにより、いずれかのモードで災害発生後数日以内に地表面の観測をできる。日本国内であれば、運用初期に全国の被災前のデータがほぼ全てのモードで取得されており、被災後との比較が可能である。

今回使用したALOS-2画像を、表-8-1にまとめる。発災後の観測日に示すように、発災後2日~1週間程度の間観測がなされた。図1にそれぞれの観測範囲を示す。ALOS-2の標準的な高分解モードの観測は、2偏波（HH+HV）右観測で入射角が35°前後である。このため、7月10日の南行軌道からの観測以外のものについては観測頻度が低く、発災前の観測が2016年のものになることに留意が必要である。

解析にはGamma Remote Sensing社のGamma®を用いた。

基本的には通常の2パス干渉法で、2つのSAR画像（HH偏波のみ使用）の位置合わせを行い、位相差を計算した。その際、電波の射出方向・衛星進行方向にマルチルックをとって、空間分解能を12~16 m程度にして解析した。DEMはASTER-GDEM-2（1秒サンプリング）をオーバーサンプリングして10m間隔にした。ただし、スペckル・ノイズ低減のためフィルタリング処理した後に、地図投影を行なっている。斜面崩壊や地すべり等が生じた領域では数mを超える変動が生じるため、位相変化が得られない。このような場合、コヒーレンスと呼ばれる位相情報も含めた地表面の電波散乱特性の変化の指標が低下する。また、通常の写真のような強度画像にも明瞭な変化が現れることがある。そこで、発災前の強度画像を赤、発災後の強度画像を緑、コヒーレンス画像を青に着色し、加色混合画像を作成する。加色混合方法は、2回の観測の間に地表面の散乱特性に大きな変化があれば、それを検出するのに有力な手法である。例えば、山林は散乱強度が一般に低い。斜面崩壊などにより地肌が露出すると散乱強度が上がるとともにコヒーレンスが低下するため、加色混合すると緑色が卓越する。一方、河川など水域では電波の散乱強度は0に近い。ここに土砂が堆積すると散乱強度が上がる（コヒーレンスはもともと低い）。このため、河川に土砂が堆積したところは緑に色付けられる。逆に、洪水の湛水域は発災後の強度が低くコヒーレンスも下がるため、赤くなる。変化がないところは、青く描画される。

4偏波観測データについては、やや異なる。4偏波観測は、1回の観測において水平偏波と鉛直偏波を射出し、散乱して戻ってくる水平偏波と垂直偏波をそれぞれ受信する。地表面で偏波方向の変化が生じるので、水平→水平（HH）、水平→垂直（HV）、垂直→水平（VH）、及び鉛直→鉛直（VV）の4つのデータが得られる。一般に、HHやVVは裸地での散乱、HV及びVHは体積散乱（樹木の樹幹や樹冠で複雑に散乱するケース）に感度がある。HHとVVでは、例えば一定間隔で植えられた稲の茎の並びに対する感度が異なり、この性質を利用して稲の生育状況を推定することにも利用されている。一般に、HHを赤、HVを緑、VVを青に着色し加色混合することで、地表面の状況を面的に捉えられる（例えば、大内、2009）²⁾。今回、P130-660の4偏波データに対してこの手法を適用し、地表面の状態変化を議論する。

表-8-1. 本調査で使用した ALOS-2 画像の概要

| 観測パス・フレーム | 観測日 (発災前) | 観測日 (発災後) | モード (観測方向) | 軌道 | 入射角 (°) | 軌道間距離 (m) |
|-----------|------------|------------|------------|----|---------|-----------|
| 23-2940 | 2017年6月12日 | 2017年7月10日 | 高分解能 (右) | 南行 | 36.1 | 87.1 |
| 28-2910 | 2016年4月29日 | 2017年7月7日 | 高分解能 (左) | 南行 | 32.4 | -284.9 |
| 130-660 | 2016年8月11日 | 2017年7月13日 | 4偏波 (右) | 北行 | 33.9 | -47.1 |

(3)強度・コヒーレンスの加色混合法による地表変動箇所の抽出

図-8-2に P130-660 および P23-2940 の2ペアの強度・コヒーレンス加色混合画像を示す。発災直近の観測であった P28-2910 は、軌道間距離が大きく、災害前の観測から14ヶ月経過していることから、全体的にコヒーレンスが低く、山地がほとんど緑で表示されるため、変化の検出には適していないとして、示していない。なお、ところどころに見られる赤い部分は、衛星の方に向けた斜面で (P130-660 に対しては西向き, P23-2940 に対しては東向き斜面), フォアショートニングを起こしているところである。P130-660 と P23-2940 は全体的に青く表示されており、コヒーレンスが高いことを示している。ただし、P130-660 は観測間隔が約1年であるので、P23-2940 にくらべて全体にコヒーレンスが低く、やや緑がかって表示されている。両画像共に朝倉市杷木町・うきは市北方の山地が顕著に緑色になっている。この領域でコヒーレンスが低下し、発災後の散乱強度が大きくなったことを示している。すなわち、山地の植生がなくなり裸地が出現したと推定される。国土地理院が公開している航空写真からの被災地域の判読結果と整合する [国土地理院, 2017] ¹⁾。この地域を拡大し、南上空からの俯瞰に変更

したものを図-8-3に示す。観測日の間隔が長い P130-660 の方が緑の領域が多く、コヒーレンスが低いことがわかる。P23-2940 の画像では、緑の領域が標高の高いところに顕著である。

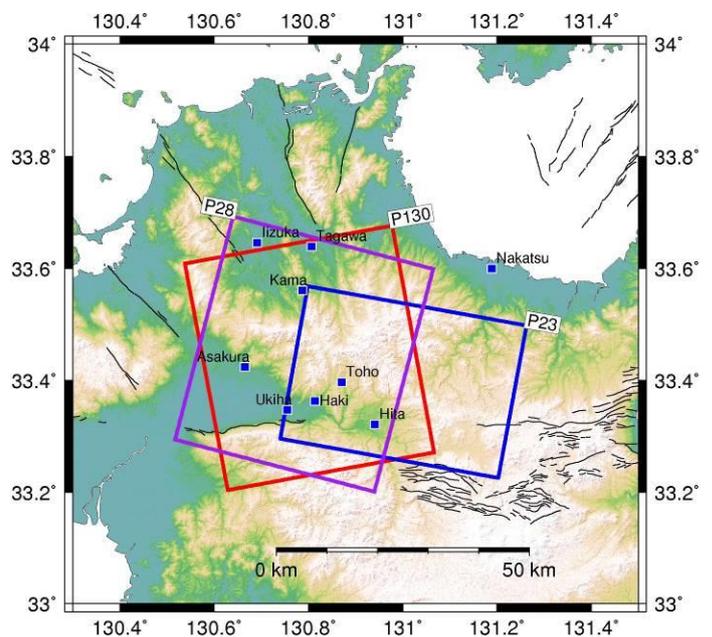


図-8-1 本調査で使用した ALOS-2 画像の解析範囲

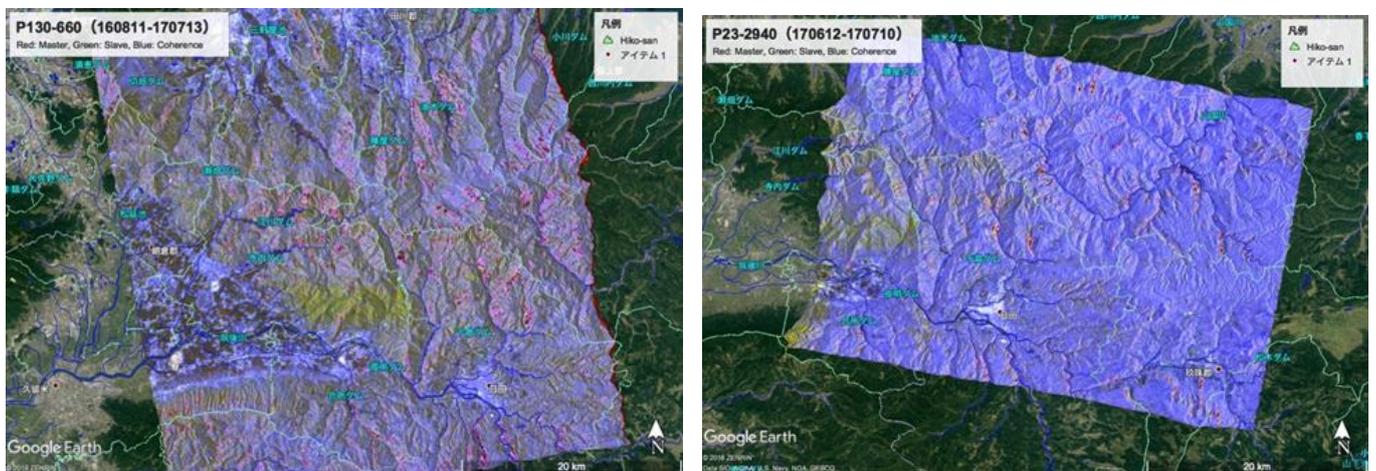


図-8-2 強度画像とコヒーレンスの加色混合法による処理結果: (a)パス 28 フレーム 2910. 2016年4月29日と2016年7月7日. (b)パス 130 フレーム 660. 2016年8月11日と2017年7月13日. (c)パス 23 フレーム 2940. 2017年6月12日と7月10日.

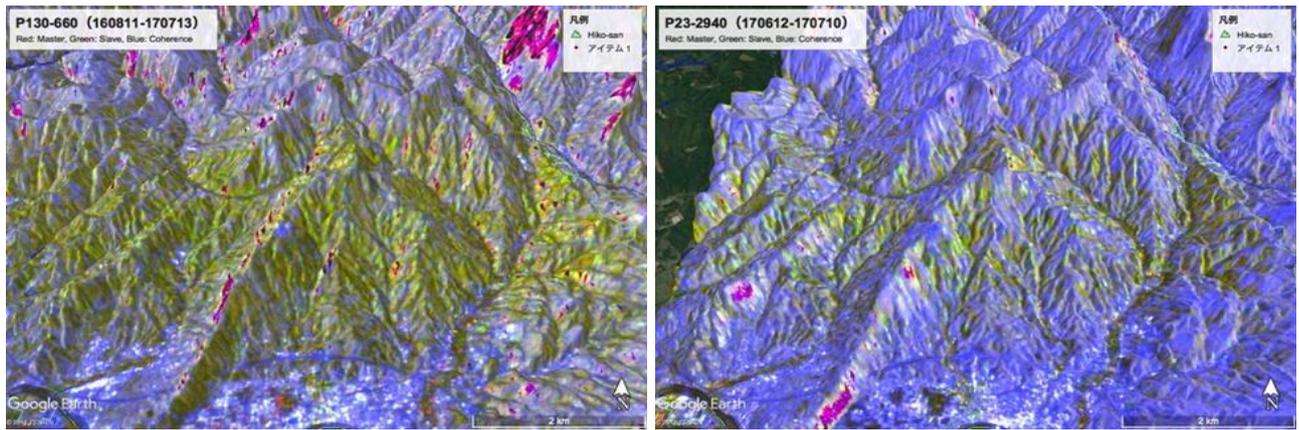


図-8-3 図-8-2中のうきは市北方の山地のクローズアップ。南上空から俯瞰した視点に変更している。

強度とコヒーレンス画像の加色混合法は、フィルタリング処理の影響もあり、必ずしも個別の斜面崩壊箇所を同定するまでにはいかないが、一定以上の規模の崩壊が多発した地域を把握することに適していると考えられる。

(4) 偏波データの加色混合法による地表変動箇所の抽出

P130-660 の観測は4偏波を用いて行われているので、観測時の散乱特性を把握することができる。図-8-4に、2016年8月11日と2017年7月13日の各偏波の強度画像の加色混合法による処理結果を示す。図-8-3と同様に南上空からの俯瞰図であるが、筑後川を越えて朝倉市杷木町・うきは市の平野部を含めている。2016年8月11日の画像でも、図-8-3(左)でコヒーレンスが低下した斜面の多くは下部がややピンクがかっている。このことは2016年時点ですでに裸地が露出していた、あるいは植生が少なかったと推定される。上部は緑が卓越しており、森林と推定される。一方、平野部では2016年にはピンク色であった地域が、2017年7月には黒くなっているところが認められる。これはVV偏波の強度が低下したことを示しており、これらの地域が湛水していた可能性

を示唆する。ただし、時期的に水田の湛水の可能性もあるため、現地の情報で確認する必要がある。

(5) 2パス干渉法による微小変形の検出

本調査では強度画像の加色混合を行う前処理として、干渉処理をしている。このため、十分なコヒーレンスが得られた領域では、変位を検出することができる。ただし、干渉画像には大気(対流圏及び電離圏)の影響やDEMの誤差等による見かけの変位が重畳しているため、解釈には注意が必要である。例えば、地形と相関があるような場合は、大気の成層構造によるものと考えられる。図-8-5と図-8-6は、解析範囲で微小な変形の可能性がある領域を抽出したものである。それぞれ見やすいように視点を変えて表示している。図-8-5は、P130-660のクローズアップで、江川ダム下流の小石原川右岸の斜面に、局所的な位相の変化が認められる。周囲と比較して5~6cm程度衛星から遠ざかる変位を示している。左の地形を見ると斜面の下部にあたるので、微小な沈降が生じた可能性がある。ただし、2016年8月11日から2017年7月13日の間のいつ発生したものは、わからない。図-

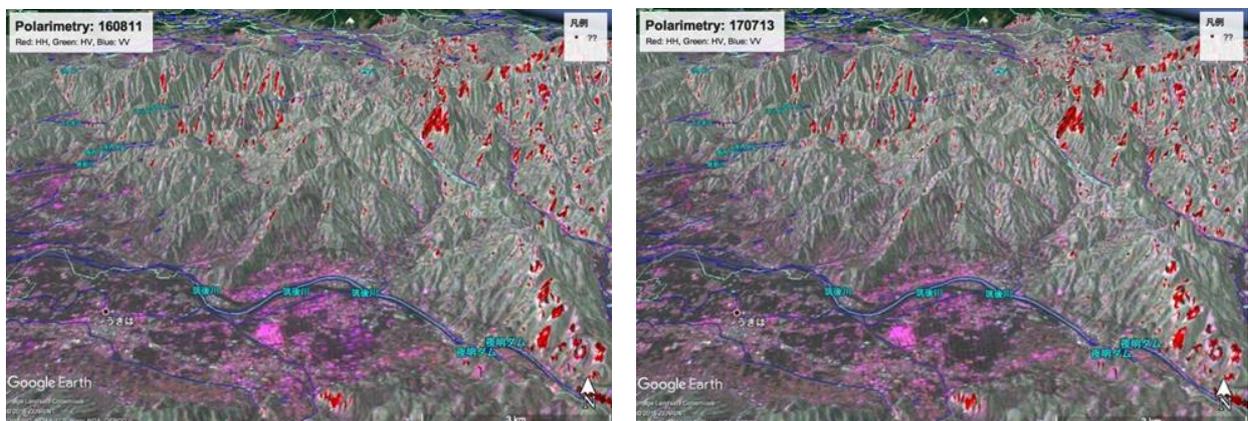


図-8-4 偏波観測による P130-660 の 2016 年 8 月 11 日 (発災前) と 2017 年 7 月 13 日 (発災後) の比較。南上空からの俯瞰図。

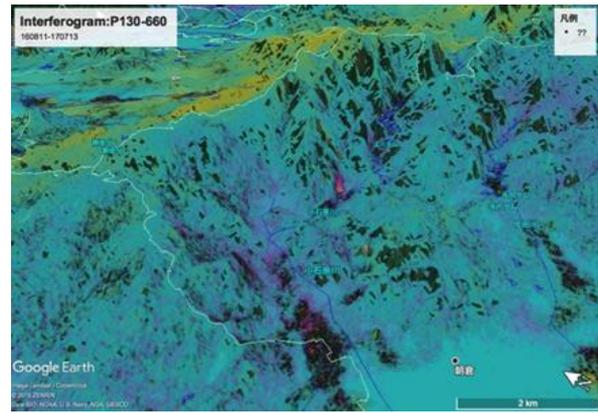
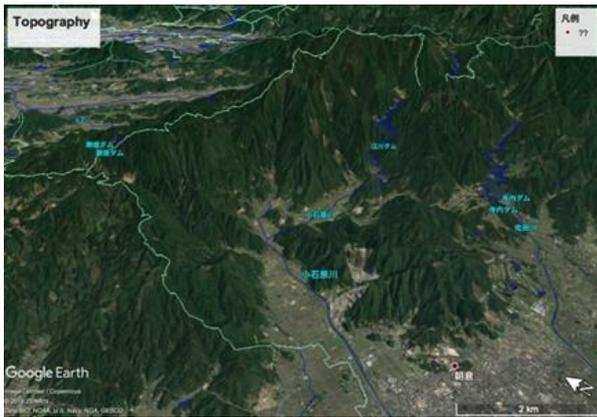


図-8-5 微小な変形が生じた可能性のある例（その 1）．江川ダム下流，小石原川右岸の斜面．（左）Google Earth に掲載の航空写真．（右）干渉画像を Google Earth に貼り込んだもの．変位のカラースケールを右端に示す．青→ピンク→黄→青の順番で衛星との距離が伸びていることを示す．1 サイクルで 11.8 cm の変化．

8-6 は，P23-2940 の北西隅の嘉麻市南部にある斜面である．画像中央部に局所的な位相変化が認められる．周辺には地形に相関するような位相変化がみられるが，この斜面の変化は標高とは相関していない．斜面の上部が衛星に対して約 4 cm 近づいたと推定される．衛星が東南東の上空にあるので，この斜面は東方に動いた可能性がある．観測日が 2017 年 6 月 12 日と 7 月 10 日なので，この 1 ヶ月間に生じた変動である．

干渉画像を仔細に検討すると，これらの他にも微小変形が見つかる可能性があるが，大気擾乱等の誤差の影響などがあり，あくまで可能性を指摘することとどまる．複数の独立した SAR 観測による検証と，現地情報を取得して確認することが不可欠である．

(6) まとめ

2017 年 7 月 5~6 日の九州北部豪雨災害前後に取得されたいち 2 号の合成開口レーダー画像を解析し，複数の手法で地表変動の検出を試みた．強度とコヒーレンス画像の加色混合法により，電波の散乱特性が大きく変化した領域を同定し，それが航空写真などによる判読結果と概ね一致することを確認した．ただし，詳細な地点を特

定するには，分解能をあげると同時にノイズを低減する工夫が必要である．4 偏波の観測でも，地表面の散乱特性の変化が抽出できることを確かめた．

一方，干渉画像中のコヒーレンスの高い領域において，複数の微小変形が認められた．大気擾乱等の影響も重畳していることから解釈には注意を要するが，斜面変動の可能性のある地域と考えられる．今後独立な SAR 観測結果の解析と現地調査により，これらの地域のモニタリングが重要と考える．

筆者はこれまで地殻変動など主に地表面の変位計測を行ってきたので，ここで紹介した手法による解析結果の活用には精通しておらず，定性的な議論にとどまっている．しかし，これらのデータは GIS にとりこめるので，GIS の専門家との共同作業により定量的な議論に発展することを期待したい．

衛星搭載型 SAR 観測は，広域の変動を同時に捉えることができる利点大きい．しかし，観測が衛星の再来間隔に規定されることから，発災直後のタイミングでの観測が難しいことが難点である．しかし，近年欧州宇宙機関が打ち上げた Sentinel-1A/B はじめ，複数の衛星を同じ軌道で運用することにより再来間隔を短くすることが

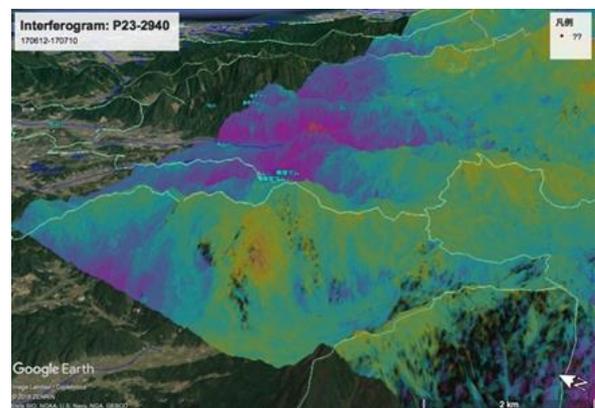
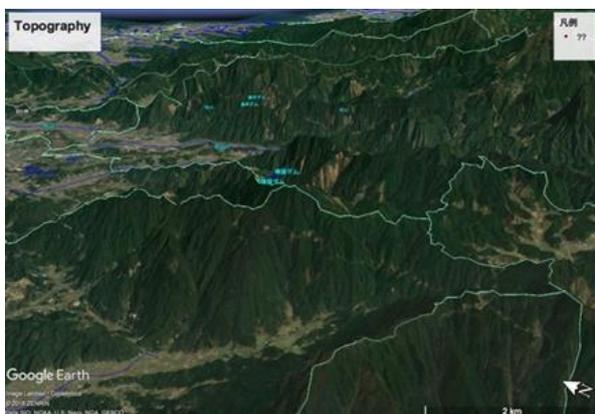


図-8-6 微小な変形が生じている可能性のある例（その 2）．嘉麻市南部の斜面．カラースケールは図-8-5 と同じ．

できるようになっている (Sentinel-1A/B の場合は, 7 日間) . また, だいち 2 号は左右両方向に電波を射出するなどの工夫により, 緊急時の観測要請に対応できる. 衛星観測による大規模災害時の地表変動の把握の重要性と可能性は高まる一方と考えられ, 今後分野横断的な研究体制の整備が必要である.

参考文献

- 1) 国土地理院, 2017, 平成 29 年北九州豪雨に伴う被害状況判読図, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_ooita-heavyrain.html, (2018 年 2 月 23 日アクセス)
- 2) 大内和夫, 2009, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 [第 2 版], 東京電機大学出版局, 371pp.

9.現代住宅と林業の衰退—花粉症と流木の起源—

釜井俊孝

(1)はじめに

最近の豪雨災害では、土砂と一緒に大量の流木が流下し、下流の住宅地に被害を及ぼす状況が続いている。今回の豪雨でも、朝倉市とその周辺地域で、流木による被害が目立った。もちろん、こうした流木は、上流の山地斜面からもたらされたものである。斜面に生えていた木々が斜面崩壊に巻き込まれた場合や、伐採後に現地に残置されていた木材が洪水に巻き込まれた場合などが考えられる。しかし、問題の根本は、そもそも多量の流木が生み出される現在の森林の状況にあり、その点で花粉症と流木災害は、原因が共通している。ここでは、そうした視点から今回の豪雨災害の現代的意味について述べたい。

(2)花粉の森

花粉症は、今や国民病となった。その原因は様々であるが、多くは杉の花粉に対するアレルギーとされている。杉花粉症の患者は、1960年頃に出現し、1970年頃から徐々に増え始め、1970年代後半になると急激に増加した。急増した原因は、戦後復興のために大量に植林された杉が成長し、花粉を一斉にまき散らすようになったからだと言われている。つまり、山の斜面と都市は花粉によっても繋がっている。戦後の復興期（昭和20年～30年代）には、住宅建設のため、国内の木材需要が急増した。しかし、それに対応するだけの森林が、山には無かった。戦時中、山の木を徹底的に伐採したためである。そこで、政府は、広葉樹からなる天然林や里山の雑木林を、杉や檜の人工林に置き換える、「拡大造林政策」を推進した。しかし、1964年（昭和39年）に、外国産木材の輸入が完全に自由化されると、価格が高く、大量・安定供給に向かない国産材は売れなくなった。同時に、家庭用燃料が薪炭から化石燃料へと置き換わり、日本の森林資源は、建材としても燃料としても価値を失い、林業は衰退した。拡大造林政策は、花粉症という深刻な副作用を生んだにもかかわらず、林業としても裏目に出ってしまったのである。

(3)山地災害における流木の起源

経済的価値が薄れてしまった人工林では、間伐や砂防工事などの手入れを十分に行う事ができない。結果的に、そうした人工林は、森としての健全性を失い荒廃した。このような荒廃した杉の人工林は、斜面災害の点からも悪影響を与えている。杉の人工林では、根の深さがほぼ一定でしかも浅いため、根よりも少し深いところがすべり

面となる。人工林を載せたままシート状にすべるタイプの斜面崩壊が多く発生するのである。しかも、急勾配のところは、伐採が後回しになり、成長しすぎた太い杉が残されるケースが多い。こうした急斜面は、大雨が降れば崩壊しやすい場所である。したがって、災害時には巨大な流木が大量に発生し、土石流や洪水の被害を拡大することになる。

例えば、2014年（平成26年）南木曾豪雨災害や2017年（平成29年）九州北部豪雨災害は、そうした状況を象徴している。これらの災害では、発生した場所が木曾や日田といった伝統的な木材生産地であるがゆえに、おびただしい流木が発生し、災害をいっそう深刻なものにした。長年の努力によって、稜線近くの急斜面まで植林が進んでいたからである。現在の日本の森林は、木の使い過ぎによる危機ではなく、木を使わなくなったことによる歴史上初めての危機を迎えていると言える。

(4)国産の材木が使われない理由

花粉と流木を減らすには、もっと山の木を切って使えば良いはずであるが、そう簡単にはいかない事情がある。わが国において、木材の最大の消費者は住宅産業である。しかし、今や、住宅に使われる木材のほとんどが外国産になってしまった。

例えば、在来工法と呼ばれる木造軸組構法の住宅は、新築住宅全体の7割程度を占めている。工業化住宅の発展にもかかわらず、伝統的な構造への信頼性が高いためである。そして、そうした在来工法の住宅は、かつては、ほとんどが国産の木材で作られていた。しかし、現在、これらの在来工法の住宅においてすら、木材自給率は約3割しかない。つまり、外国産の木材を約7割も使っている。工業化住宅に至っては、さらに国産材の比率は低く、木材自給率は1割以下が普通である。メーカーによっては0に近い。したがって、全体でも国産の木材が使われる割合は、2割程度であろう。つまり、国内で家を建てれば建てるほど、山の木は余ってしまう仕組みになっている。

こうなってしまったのは、ハウスメーカーやパワースタイルに代表される住宅産業が、住宅建築のコスト削減のために、均一な品質、大量仕入れ、安定・大量供給を求めたためである。しかも、工期を短縮するため、木材は人工的に乾燥させ、事前にカット（プレカット）したものが要求された。一般の工務店にとっても、その方が合理的なので、その方式が、しだいに業界の常識となったのである。しかし、国内の林業は企業としては零細で、そうした住宅産業側の要求に応えられなかった。そのため、住宅用木材の調達先は、海外ということになり、だぶついた国産木材の価格は大幅に下落、国内林業は壊滅状態になったのである。例えば、杉丸太は、米ツガ丸太

よりも安いですが、それでも住宅の構造材には輸入材が使われている。つまり、国産材は、価格が高いからというよりも、現代流の住宅生産方式に合わないから売れないという方が正しい。

(5) おわりに

以上述べたように、今年年中行事のようになった流木災害の背景には、下流の都市住民が輸入材で建築された住宅に住み、そのおかげで上流の山林が放置され荒廃しているという、わが国の林業を取り巻く産業構造がある。その結果、下流の都市も流木の被害を受けるのである。この構図は、林業が盛んな地域でも変わらない。例えば、林業県である富山県においても、住宅に使われる木材の9割は輸入材である。流木を減少させ、洪水・土石流被害を軽減するには、林業を復興し、森林の木材循環を正常に戻す必要がある。そのためには、“住宅は工業製品（商品）のように買うもの”というマインドコントロールから、都市住民が解放される必要がある。自分の家を自らの手に取り戻すことが大事という点で、問題解決の方向性は、宅造地における谷埋め盛土地すべりの場合と共通している。



図-9-1 妙見川の状況（7月9日）。土砂に混じって多量の流木が堆積している。（撮影：アジア航測）

10. まとめと今後の課題

2017年九州北部豪雨災害は、記録的な豪雨によって4000近い斜面崩壊を発生させ、土砂と流木の流出によって甚大な災害を引き起こした。本章では、大きく地表を変動させた斜面崩壊に主体を置いて、今までの調査研究結果をとりまとめた。従来も花崗岩地域では、豪雨によって多数の斜面崩壊が発生し、被害を引き起こした。2014年の広島豪雨災害は記憶に新しいところである。

花崗岩には、大きく分けて花崗岩と花崗閃緑岩があり、後者の風化物は前者に比べて崩壊しにくいことが知られている。また、花崗岩類には球状風化とマイクロシーティングという2つの風化様式があり、前者由来の土層の方が崩壊しにくいと考えられている。九州北部豪雨災害では、どちらを考へても、相対的には崩壊しにくい岩石に多数の斜面崩壊が生じたことになる。同様の地質条件のところで発生した豪雨災害には、1967年の羽越豪雨災害があった。この時の豪雨も記録的なもので、災害も甚大なものであった。この羽越豪雨災害の教訓がどの程度行かされたのか、検討の必要がある。また、その他の花崗岩地域と降雨による崩壊発生状況にどのような違いがあるのか検討の必要がある。

花崗岩類の風化は深く、また広域的に進むものであり、広い範囲に今後の崩壊予備群が存在するとみるべきである。今回の被災地でも、将来同様の雨がふれば、今回のような現象が繰り返されると考えられるが、どの程度の期間たてば次の崩壊の準備がなされるのか、150年程度という報告もあるが、今後検討の必要がある。

花崗岩はわが国の面積の13%を占めており、今まで多くの豪雨災害を経験してきたが、東北から北海道にかけての地域では、強い雨がなかったせいか、大きな災害を経験していない。見方を変えれば、不安定な土砂が多量に残存しているとみることができる。今後、雨の降り方が変わる可能性もあり、十分に注意していく必要がある。

風化花崗岩斜面の表層部で岩石組織が壊れた土層が形成され、それが崩壊していく過程は、長期的な時間メモリを入れたモデル化が可能になりつつある。土層を形成する母岩の風化程度や様式も考慮することによって、より広い範囲の崩壊危険度を的確に評価につながることを期待される。

今回新たに大きな問題となった泥質片岩では、風化花崗岩のように風化岩石が土層化して崩れる、というよりも、重力によって長期的に変形して破碎し、それが崩れた、というものが多かった。地中の水の挙動はおそらく風化花崗岩とは異なると思われる。いずれにしても、この岩石もわが国には広く分布しており、重力による変形は一般的に生じていることであることから、今回と同様

の降雨があれば、同様の現象が発生する可能性が高い。

豪雨があつて、斜面崩壊が発生するまでの過程について、降雨浸透と斜面の安定解析を組み合わせ、モデル化と実際の物性を用いた数値計算を進めており、崩壊の発生を再現可能になりつつある。それでも、地盤の中の構造は多様であり、広い範囲について、それを知ることは難しい状態であり、このギャップを埋めることが必要である。

今回の災害では、河道閉塞による天然ダムは小規模で深刻な問題にはならなかったが、地震観測によって、その発生場所を大まかには特定できることが確認された。今後、深層崩壊の発生検知システムとして実用化が期待される。ただし、この場合も、地震によるものは検知できないことは認識しておく必要がある。

従来、地殻変動に伴う微小変位の観測に適用されてきた SAR 技術が斜面崩壊の調査に適用された。その結果、個々の崩壊を特定するというよりも、崩壊の密集して発生した地域を領域として識別できる可能性が示された。また、崩壊に至らないまでも、まったく地表の情報がなくとも、微小変位が生じた斜面を抽出できる可能性も指摘された。

大規模な深層崩壊の発生場所は、事前に大小の滑落崖が形成されていた個所であることがわかり、それが発生場所予測のカギになることが確認された。また、2か所ともに、すべり面は粘土層に形成されており、降雨によって発生する深層崩壊は、遮水層としての粘土層を要す可能性が認められた。

今回の豪雨災害では、土砂とともに大量の流木が被害を拡大させた。大量の樹木が斜面の土砂とともに流出したのは、崩壊のすべり面が樹木根の到達深度よりも深いところにあったためであり、崩壊が起これば樹木もともに移動することは避けられない。むしろ、大量の大径木が斜面に残されていたことが問題であり、中山間地の安全性の面からも、林業施策は重大な課題である。

SURFACE CHANGE

Masahiro CHIGIRA, Yuki MATSUSHI, Daizo TSUTSUMI, Gonghui WANG, Sumio
MATSUURA, Issei DOI, Manabu HASHIMOTO, Toshitaka KAMAI

We investigated landslide hazards induced by 2017 July rainstorm in northern Kyushu from various view points. We found landslides occurred concentratedly in areas with rainfalls over 200 mm in 3 hours, and that landslides dominated in granodiorite and pelitic schist areas because of their weathering process and gravitational deformation processes. Shallow landslides in granodiorite areas could be evaluated in a long term by modelling soil formation. Numerical analysis involving water filtration and slope stability is now going on. Location of a large landslide was detected by the analysis of seismic records and the SAR technique was helpful to evaluate the effects of landslides. Numerous numbers of tree logs discharged with debris and water is due to the presence of large trees remaining on slopes without enough maintenance.

治 水

治水面から見た被害の概要と着目点

角 哲也¹

¹ 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: sumi.tetsuya.2s@kyoto-u.ac.jp

本稿は 2017 年九州北部豪雨を対象に、防災研究所内部で構成された研究グループのうち、治水面から見た被害の概要と着目点、さらには、これを踏まえた治水グループの取組みを概説する。着目点は、1) 筑後川北側はこれまでの災害未経験地域であったこと、2) 日田の林業地域における山林崩壊・河岸侵食により大量の流木が発生したこと、3) 風化花崗岩地域から大量の土砂流出が発生したこと、4) 洪水・土砂・流木の複合災害の形態を示していること、5) ダムの無い小河川では、洪水が短期間にそのまま流出して災害化したこと、6) 多くのため池のうち、決壊で被害拡大がクローズアップした一方で、決壊せずに、むしろ、流木・土砂を受け止めて被害防止に貢献したのものもあること、7) 砂防ダムでは土砂のみではなく、流木を受け止めたものもあること、8) 貯水ダム（寺内ダム）では、洪水・土砂・流木の 3 要素をコントロールして、絶大な役割を働き果たし、ダムが無ければ下流で大きな氾濫が発生していた可能性があること、などである。こうした被害の特徴を踏まえて、降雨の極値統計と流出・氾濫解析、豪雨における斜面崩壊と洪水の統合解析、土砂流出による流路・河床変動と洪水氾濫特性、下流域における土砂・氾濫解析、ダムにおける流木捕捉効果と下流洪水リスク軽減効果の各観点から報告を行う。

Key Words: *Characteristic of flood disasters, Rainfall statics, Rainfall-runoff model, Rainfall induced land slides, Morphological effects on flood inundation, Trapping of floating debris in reservoirs and its effect on flood risk reduction downstream*

1. 洪水被害の概要

今回の洪水の特徴は、従来から洪水の経験が少ない筑後川北側流域に、線状降水帯による短時間で大量の降水がもたらされたことである。朝倉では、24 時間雨量で実に 500mm 以上の降水強度となっている（図 1）¹⁾。この地域における戦後の水害では、筑後川本川の治水計画の基本を塗り替え、松原・下笠ダム建設計画の契機となった昭和 28 年の西日本大水害（死者約 1,000 人（うち福岡約 300 人）、全壊家屋約 5,000 棟、被災エリア熊本・福岡・大分・佐賀）が有名である。さらに、記憶に新しいところで、平成 24 年の同じ名称の九州北部豪雨（死者 30 人、全壊 360 棟、被災エリア熊本・福岡）があり、今回の被害規模（死者 37 人、全壊 300 棟、被災エリア福岡・大分）とほぼ同規模であるが、図 1 に示すように雨域がより南側の福岡南部・熊本中心であり、今回の朝倉市あたりの福岡中部エリアとは雨域が異なっている。

このように、これまであまり洪水被害の発生していなかった地域に極めて強い降雨がもたらされたことから、比較的流域の小さい赤谷川を始めたとした中小河川の氾濫が発生（図 2）し、特に、新規崩壊による大量の土砂流出による河床上昇が洪水被害を拡大させた（写真 1）。

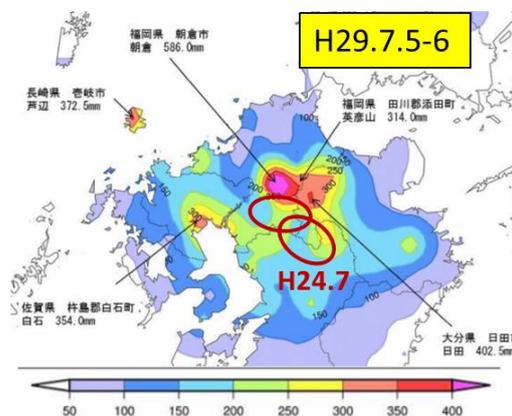


図 1 H29 九州北部豪雨の降雨強度と H24 九州北部豪雨の雨域（500mm 以上）の比較（気象庁データに加筆）¹⁾



図 2 被災状況（朝倉市・東峰村）（国土交通省資料）



写真1 氾濫した赤谷川



写真2 決壊した山の神ため池（奈良ヶ谷川）
（上：決壊前（Google Earthより），下：決壊後）

また、同地域は、灌漑用のため池が山裾に沿って多数点在し、これらの一部が洪水によって決壊したことによる洪水被害の拡大も見られた（写真2）。一方で、この地域は度重なる渇水に見舞われてきた歴史から水資源の確保も重要であり、（独）水資源機構の管理する寺内ダム（昭和53年完成）が、今回の降雨域に所在していた。今年の5、6月は平年の半分以下の少雨のために利水容量を使って下流に水を補給し、洪水直前には約半分450万 m^3 の貯水量であった（図3）²⁾。今回の洪水では、既往最大となる約880 m^3/s の流入量がダムに流入し、利水容量の約半分とその上の洪水調節容量を合わせて約1,150万 m^3 の貯水量を用いて、流入した洪水のほぼ全量をカットした（図4,5）³⁾。この容量は、ダムの流域面積51 km^2 全体に対して225 mm もの降水量分を貯留したことになり、その結果、近隣の河川で甚大な氾濫被害が発生する中、寺内ダム下流の佐田川流域では被害がほとんど発生していないのは特筆すべき特徴である。

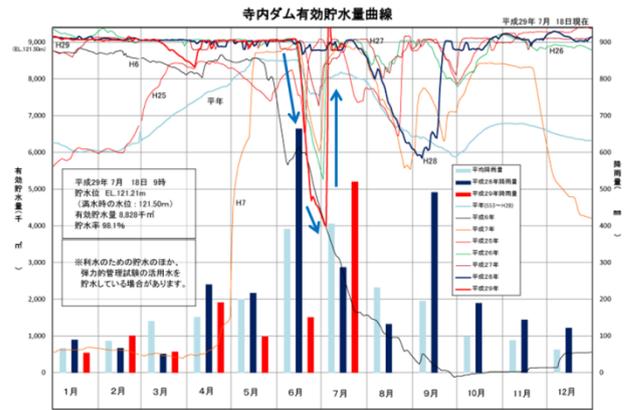


図3 寺内ダム貯水容量変化（水資源機構データに加筆）²⁾

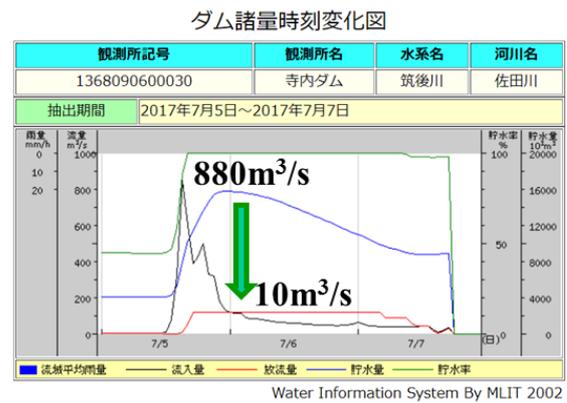


図4 寺内ダム洪水調節（国交省データに加筆）

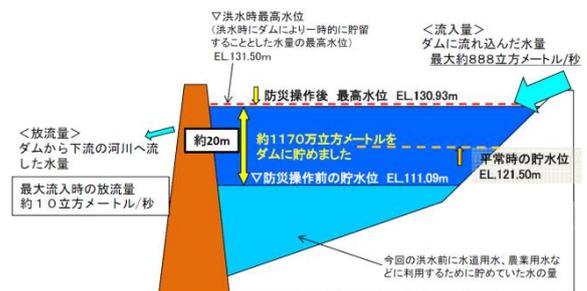


図5 寺内ダム洪水調節の模式図（水資源機構）³⁾

今回の洪水のもう一つの特徴は、山地から大量の流木が流れてきたことである。近年、平成25年の京都・桂川の水害⁷⁾や、平成27年鬼怒川水害など、洪水時に大量の流木が発生するケースが増加している。こうした流木は、河道内の橋梁を閉塞させて洪水を拡大させるリスクがあるが（写真3）、寺内ダムでは、今回の洪水で約10,000 m^3 もの流木が捕捉（写真4）⁸⁾され、ダムが無ければ、洪水と流木の組み合わせで下流は大氾濫が生じていた可能性がある。

水資源環境研究センターでは、平成26年度の拠点研究課題で、「流域一貫の総合流木管理に向けて」と題する流木研究の課題に取り組んでおり、その際に、これまでの既往の大規模出水時にダム湖で捕捉された流木量と流域面積の関係を分析している^{7,9)}。



写真3 流木で閉塞した橋梁（寺内ダム上流黒川）



写真5 ダム湖直上流の河岸侵食（侵食部に植えられていた木が流出）



写真4 ダム湖で捕捉された流木（寺内ダム）



写真6 寺内ダム上流の黒川の景観（20m弱の長尺の立木の足元が流水に洗われた様子が確認される）

Vg(流木量(m³))

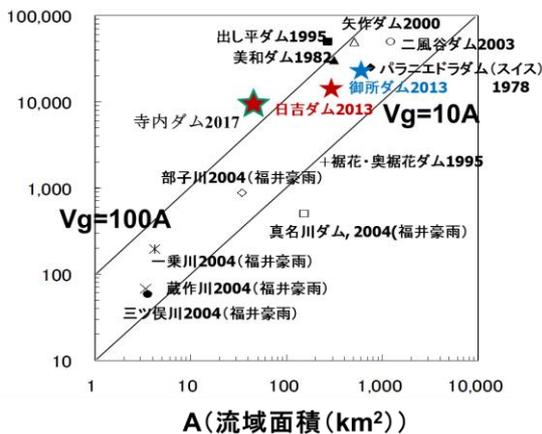


図6 流域面積と流木量の関係⁸⁾

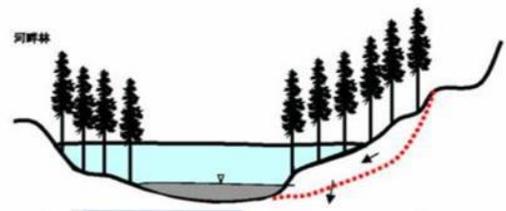


図7 H16福井豪雨時の足羽川流木発生原因と割合（河岸横侵食が全体の55%）

図6に、今回の寺内ダムの結果を含めて示すが、寺内ダムの流木流入量はこれまでの実績を考慮しても国内最大クラスであったことが伺える。

次に問題となるのは、このような流木がどこから生産されてきたかである。国土交通省九州地方整備局による流木発生量の速報値は、10河川の合計で210,000m³であり、その内訳は山林が63%、溪畔林が28%、河畔林が6%であった。しかしながら、下流で被害をもたらす可能性の高い長尺ものの流木は比較的ダム湖に近い上流の河道の河岸侵食によって流出してきている可能性が高いことが現地調査から確認された（写真5, 6）。

平成16年の福井豪雨時に福井県によって実施された流木発生源調査によれば、その約半数が図7に示すような河岸横侵食により発生したことが報告されている⁹⁾。今回の流木流入に関しても、割合は低いものの、リスクのより高い流木の発生源である可能性が高い。

さらに、このような河岸沿いに植えられた木は長尺になるまで育つためには、少なくとも30年程度の間の大規模洪水を受けていないことがポイントであり、今回のこの地域の過去の災害履歴が少なく、低頻度の洪水生起であったことと符合する。洪水頻度が低い流域（河道）ほど、植林後の成長が見込まれ（低木段階で流木化しない）、洪水時に流木ポテンシャル（特に長い流木）が高まることが考えられる一方で、河川・ダム管理者および林業関係者・地域住民の危機意識が醸成されにくいことが課題である。従って、今後はこのようなリスクに対して、より強く意識する必要がある。その具体的なアクションとして、ダムの有無にかかわらず、山地河道における河岸から一定幅（超過洪水時に侵食リスクがある範囲）の立木に対する管理義務とリスク軽減（優先伐採）の制度化が望まれる。

2. 研究チーム構成と着眼点

ここでは、治水グループの各研究メンバーの取組みについて概要を示す。詳細は各レポートを参照いただきたい。

| 担当者 | 研究テーマ | 着目場所 (河川など) | 想定されるアウトプット (30～50年先の防災・減災に向けた提言) | 検討概要 |
|-----------------------------------|---|--|--|---|
| 田中茂信・佐山敬洋 | 降水量空間分布、頻度解析、山地中小河川の洪水流出 | 今回豪雨に関連した水資源開発施設、筑後川に流入する中小河川(特に赤谷川、白木谷川) | 「将来の計画外力推定」計画を大幅に超える降雨外力での流出推定、気候変動による将来の極値降雨の推定とそれによる流出の推定 | 赤谷川や白木谷川を含む190.4 km ² の領域を対象に、分布型水文モデル(RR)を用いて降雨流出量を推定し、中下流部における水・土砂氾濫解析の境界条件を推定 |
| 藤田正治 | 複合土砂災害シミュレータを用いたマルチハザードの再現 | 赤谷川流域 | マルチハザードシミュレーション技術を活用した新たな豪雨時の警戒避難情報作成ツールを開発し、とくに崩壊、土石流による河床変動が影響する洪水氾濫に対する将来のソフト対策に向けて、一つの方向性を提言 | 赤谷川流域の地形データに対して崩壊、河道における土砂の堆積と侵食、氾濫の危険性をSiMHIS(豪雨時のマルチハザード情報シミュレータ)により解析。その後、斜面の土壌や河床材料の試料を採取して、シミュレータに含まれるパラメータの修正を行い、再度、シミュレーションを実施 |
| 竹林洋史 | 山地部から平野部への土砂流出と氾濫堆積 | 赤谷川の土砂流出、JR久大本線の落橋、比良松中学校周辺の河岸浸食 | 数値シミュレーションにもとづいた、土石流渓流の土砂流出特性の把握。出水中の河床・流路変動を考慮した洪水水位の予測 | 斜面崩壊の数を変化させた赤谷川・杷木星丸地区で発生した土石流の数値シミュレーションを実施。また、現地調査によってJR久大本線の落橋、比良松中学校周辺の河岸浸食について検討 |
| 角哲也・Sameh Kantoush・竹門康弘・野原大督・小林草平 | ダム操作および洪水調節効果(流木捕捉効果を含む)、ため池被災、ため池の効果(被害拡大・軽減の両面) | 佐田川(寺内ダム) 奈良ヶ谷川(山の神ため池、鎌塚ため池) 妙見川(上流砂防ダム+ため池で大量流木捕捉) | ダムによる多面的な洪水調節効果の把握手法の確立 ため池の洪水リスク評価および管理方法に対する提言 洪水管理上リスクとなる流木を流出させない管理手法(河岸立木の優先伐採など)の提言 | 佐田川(寺内ダム)、奈良ヶ谷川(山の神ため池)、妙見川(上流砂防ダム+ため池で大量流木捕捉)、赤谷川、夜明ダムの現地調査を行い、得られた知見を整理。特に流木に着目し、寺内ダムで捕捉された流木量を画像解析から推定する手法を検討。また、寺内ダムの効果について、ダムの洪水調節の有無、流木流下の有無について、佐田川の氾濫リスクの観点から検討 |
| 川池健司 | 洪水氾濫シミュレーション | 桂川、荷原川、新立川、妙見川の氾濫 | 氾濫シミュレーションによる桂川水系の洪水氾濫プロセスの理解。土砂流出による洪水外力激甚化のリスク評価 | 痕跡浸水深の現地調査を実施。桂川流域において、土砂を考慮しない場合と考慮した場合の再現計算を実施し、調査結果と比較 |

3. 九州北部豪雨の特徴 (まとめ)

以下に、九州北部豪雨における治水面での特徴をまとめる。

- 1) (降水特性) 全ての降雨継続時間で既往最大(特に朝倉で)であり、近年の洪水未経験地での大災害であった(S28, H24九州北部豪雨とも相違)。
- 2) (降雨流出現象のメカニズム) 赤谷川西側の筑後川支川は、花崗岩の比較的薄い土層と早い流出に対して、大肥川流域以東は地質が異なり、流出特性も相違している。
- 3) (氾濫特性) 河道内の土砂堆積により氾濫が助長され、氾濫域が拡大した。
- 4) (ダムの効果) 寺内ダムは、洪水+流木を大きく調節し、下流の氾濫被害を大幅に軽減した。
- 5) (大量の流木発生) 洪水頻度が低い流域(河道)ほど植林後の成長が見込まれ(低木段階で流木化しない)、

洪水時の流木ポテンシャル(特に長い流木)が増大している。

- (緊急提言) 河岸から一定幅(大規模洪水時に侵食リスクがある範囲)の立木に対する管理義務とリスク軽減(優先伐採)の制度化が必要
- 6) (流域規模のハザードシミュレータ) 九州北部豪雨中の崩壊発生タイミング、崩壊土の河道での堆積、土砂流出による河床変動の時間変化などを解析し、ハザードレベルの時間的な変化を示した
- 7) (橋梁災害) 高水敷や砂州上に建設された古い橋脚には根入れが浅いものがあり、みお筋の変化や河床低下による倒壊の注意が必要である。

参考文献

- 1) 気象庁：[平成 29 年 7 月九州北部豪雨について](http://www.jma.go.jp/jma/press/1707/19a/20170719_sankou.pdf), http://www.jma.go.jp/jma/press/1707/19a/20170719_sankou.pdf (2018.2.28)
- 2) (独) 水資源機構寺内ダム管理所：有効貯水量曲線, <https://www.water.go.jp/chikugo/terauchi/jigyo/kyokusen.html>
- 3) (独) 水資源機構筑後川局・国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統合管理事務所：平成 29 年 7 月 5 日・6 日の記録的豪雨における寺内ダムの防災操作の効果について, 2017.
- 4) 国土交通省：水文水質データベース
- 5) 角 哲也, 田中茂信, 本間基寛 (2014) 京都・滋賀における 2013 年台風 18 号の豪雨の特徴と桂川流域被害調査, 京都大学防災研究所年報第 57 号 A pp.1-16.
- 6) (独) 水資源機構筑後川局：平成 29 年 7 月九州北部豪雨における寺内ダムの流木処理について, 2017.
- 7) 京都大学防災研究所：平成 26 年度京都大学防災研究所水資源セミナー報告, <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/news/2174/>
- 8) 角 哲也：治水・利水・環境の観点からの流域一貫の総合土砂・流木管理, 土木学会第 51 回水工学に関する夏期研修会テキスト, 2015.
- 9) 角 哲也, 谷崎 保 (2007) 2004 年福井豪雨における九頭竜川上流ダム群の洪水調節効果, 大ダム, 198, pp.114-124.

OVERVIEW AND FOCUS POINTS ON FLOOD DISASTERS

Tetsuya SUMI

This manuscript reports the summary of flood damages and each focusing points that the flood control research group in the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. Selected focus points are as follows: 1) the north side of the Chikugo River was a disaster inexperienced area so far, 2) a large amount of driftwood occurred due to forest collapse and river bank erosion in Hita's forestry area, 3) large amount of sediment discharged from the weathered granite area, 4) it is showing the form of complex disaster of flood, sediment and driftwood, 5) in small rivers without dam, floods flowed out as it is in a short period and caused disasters, 6) out of many irrigation ponds, some expanded disaster damages because of pond collapses, whereas, without collapses, some reduced damages downstream by trapping driftwood and sediment, 7) some Sabo dams trapped not only sediment but also some driftwoods 8) In the dam reservoir, Teraiuchi dam has played an enormous role by controlling three elements of flood, sediment and driftwood, and large flooding possibly occurred downstream without dam. Based on the characteristics of such damage, we reported from the viewpoints of extreme value statistics of rainfall and runoff / flood analysis, integrated analysis of slope failures and floods in heavy rainfall, flow path / bed fluctuation due to sediment discharge and flood damage characteristics, sediment and flooding analysis in the downstream area, the driftwood trapping effect and the downstream flood risk mitigation effect in the dam.

朝倉市赤谷川流域を対象とした平成 29 年九州北部豪雨における斜面崩壊と洪水の統合解析

藤田 正治¹・山野井 一輝¹

¹ 京都大学防災研究所 流域災害研究センター (〒612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)
E-mail: fujita.masaharu.5x@kyoto-u.ac.jp yamanoi.kazuki.6s@kyoto-u.jp

本災害の特徴は、斜面崩壊が同時多発的に発生しただけでなく、崩土が河道に供給され、河床上昇を引き起こしたことに起因して、甚大な洪水被害が発生したことにある。本研究では、朝倉市赤谷川流域を対象とし、筆者らがこれまで開発してきた降雨流出、斜面崩壊による土砂生産、崩土の河道への供給、および河道部での水と土砂の輸送モデルを統合したシミュレータを適用した。さらに、災害の発生期間中の複数の時点における斜面崩壊と洪水の発生状態と危険度の分布について整理・検討した。

Key Words: shallow landslide, river bed aggradation, sediment transport, heavy rainfall, multi hazard

1. はじめに

平成 29 年九州北部豪雨による災害の一つの特徴は、降雨流出過程のみによる単純な洪水ではなく、斜面崩壊が流域スケールで多発し、土砂が河道に供給されたことに起因した河床上昇が発生したため、非常に大規模な被害が生じたことにあると考えられる。筆者らはこれまで、降雨流出過程、土中水分量を斜面崩壊発生指標として利用する斜面崩壊予測モデル（土砂生産モデル）、土石流としての河道外への堆積量を評価する土砂供給モデル、および流域土砂流出モデルを統合し、斜面崩壊と洪水に関連するハザード群の危険度レベルの面的分布を同時に解析するシミュレーション手法を構築してきた¹⁾。本研究では、これを朝倉市赤谷川流域に適用し、斜面崩壊と洪水の発生プロセスについて検討した。

2. 解析手法および解析条件

(1) 解析モデルの概要

本解析モデルは、流域地形モデル、斜面崩壊モデル、土砂供給モデル、水・土砂の流出モデルから構成される。流域地形モデルは図 1 のように、河道網を節点毎に区切り、各節点間を直線に近似した単位河道と、単位河道の兩岸を 1 つの矩形斜面に近似した単位斜面からなるモデルを用いる。ただし斜面崩壊の解析には、単位斜面を尾根線と谷線ですらに分割した²⁾斜面要素を用いる。

斜面崩壊モデルには、土中水分量を崩壊指標として用い崩土量までを算出可能なモデル³⁾、土砂供給モデルに

は地形から河道外への堆積土砂量を算出し、これを超過した量が河道に供給すると扱う手法⁴⁾を用いている。水・土砂の流出モデルには、斜面部の降雨流出と河道部の水の流れを Kinemati wave 法によって解析し、さらに河道部の貯留土砂量の変化を流砂量式に基づいて解析する江頭・松木のモデル⁴⁾を使用している。

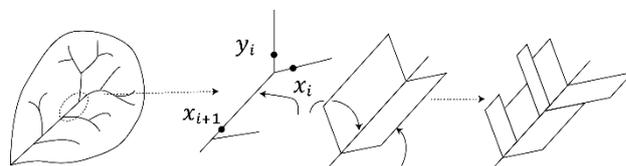


図 1 流域地形モデルの概要

(2) 解析条件

赤谷川本流域を対象に抽出した単位河道・単位斜面および斜面要素からなる地形条件を図 2 に示す。降雨条件にはレーダーアメダス解析雨量を用い、解析雨量メッシュ内の降雨強度は一律であると仮定して、単位斜面・斜面要素領域ごとに面平均雨量を算出して与えた。図 2 には与えた降雨条件から求めた、7 月 4 日から 7 日までの総降雨量を併記している。流域の北部から中部にかけて総降雨量が 600mm 以上の領域が見られ、中央付近には 800mm を超えた領域も存在する。次に流域中央部 Point A のある単位斜面における降雨強度の時間変化を図 3 に示す。7 月 5 日の 15:00 以降の 3 時間で総降雨量が 300mm 以上増加しており、この時間帯に短時間で災害が発展したことが想定される。

河道幅は現地における測量と航空写真を参考にして図

2に記したように設定した。ただし、本解析では河道断面を副断面として扱い、水位が主流路の高さを超過した場合には、水深を高水敷幅 B2 を考慮して算出するものとした。なお、単位河道の流砂量は主流路部の水理量から評価するが、土砂が堆積する場合には高水敷にも堆積するものとし、侵食する場合は主流路部のみが侵食するものとして扱っている。高水敷幅 B2 は図4に示すよう、高水敷領域を地形条件から求め、その平均幅を算出して与えている。本解析では、高水敷領域は勾配が5度以下、河道からの比高が5m以下、かつ河道からの距離が100m以下の領域としている。

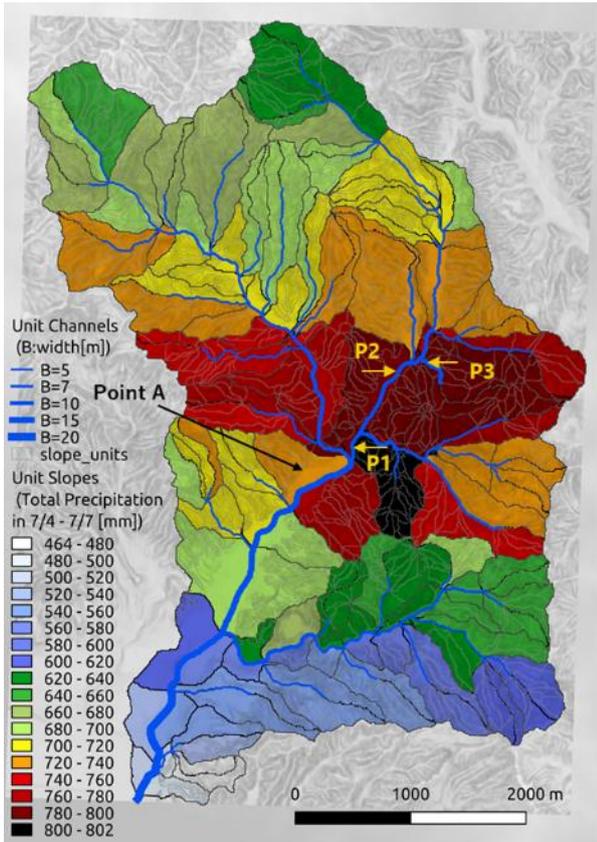


図2 赤谷川流域の地形条件および河道幅条件と総降雨

量(7/4-7)の分布

また、河床および生産土砂の粒度分布は、図5に示した条件を与えた。これは現地 P1-P3 でサンプリングしふるい分け試験によって得たものであり、河床には P1 の粒度分布を、生産土砂は地質図をもとに、片岩領域と花崗閃緑岩領域にそれぞれ P2, P3 の粒度分布を与えている。なお、P1 では元河床の材料に近いと考えられる箇所、P2, P3 では実際に河道に供給されたとみなせる箇所にてサンプリングを行った。写真-1 は P3 にて採取した土砂サンプルである。ただし、現地での採取が困難であった大粒径成分を考慮するため、いずれの粒度分布にも 20% ずつ代表粒径 100mm の成分を加えている。

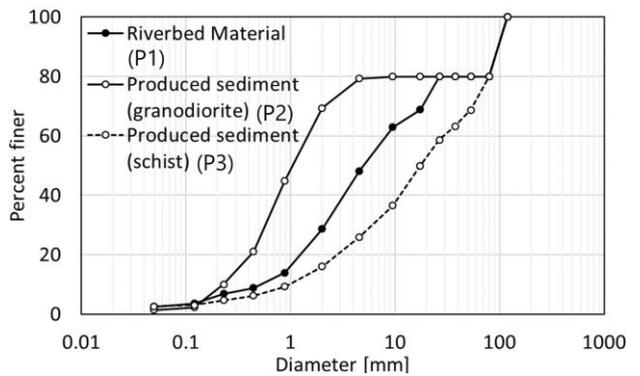


図5 設定した粒度分布条件(採取地点 P1-3 は図2に記載)



写真-1 P3 にて採取した土砂サンプル

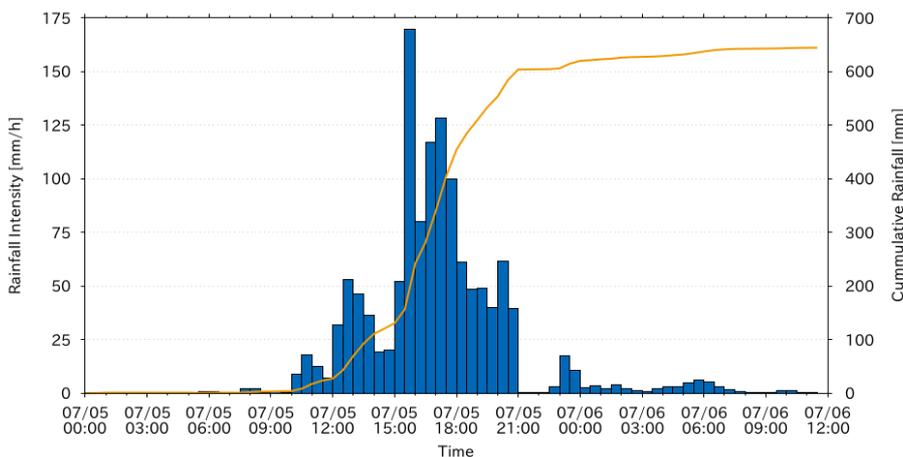


図3 Point A におけるハイエトグラフ(7/4-7/5)

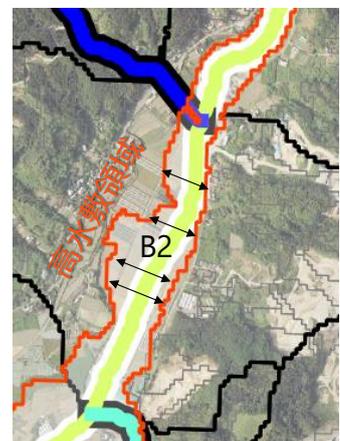


図4 副断面幅 B2 の算出手法

3. 解析結果および考察

避難所として利用された松末小学校の位置する PointA において得られた斜面崩壊指標と河床位・水位の解析結果を図6に示す。この地点では降雨が強まった16時～18時にかけて斜面崩壊の発生危険度が徐々に上昇し、18時直前に崩壊指標の最大値が1を超過して斜面崩壊が発生し始める結果となった。これに対し、水位で表現される洪水の危険度は、18時頃に河床上昇を伴って急激に上昇した結果となった。18時以降は洪水と斜面崩壊に関連する現象の危険度が双方非常に高い状態になったと考えられる。

次に、解析上で概ね崩壊の発生が落ち着き、水位が低下し始めたタイミングである21:00時点における降雨強度の分布と、水位、崩壊個数の解析結果を図7に示す。流域の中央部では降雨強度が50mm/h以上の状態が継続

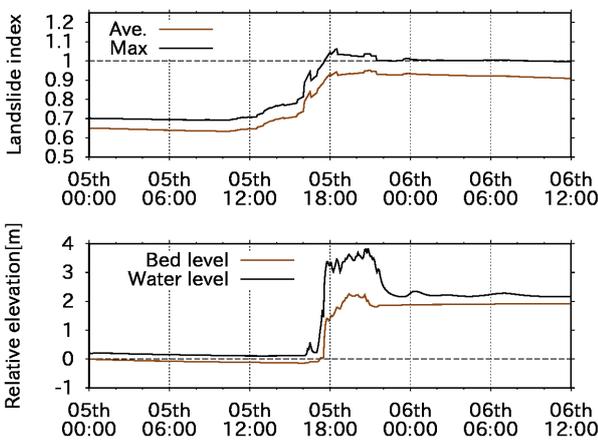


図6 PointAにおける斜面崩壊指標と水位、河床位の解析結果

しているが、赤谷川本川部では3~4mの水位の状態となっている。この付近の河道の高さ2.5m程度であり、水・土砂を合わせて0.5~1.5m程度の深さの氾濫が発生した状態となったといえる。また同時点で、乙石川上流部や赤谷川の左岸支川等では水位が5m以上の状態にあり、すでに大きな被害が生じていたものと推定される。

ただし、流域南東部の支川の流域では実際にはほとんど崩壊が発生していないが、計算では崩壊・洪水ともある程度発生した結果となった。今後、降雨データの質、斜面の土層パラメータの妥当性などについて、検証を進める必要がある。

次に、既往研究^りと同様、崩壊関連ハザード群（斜面崩壊、がけ崩れ、土石流等）、洪水関連ハザード群（洪水、氾濫、橋梁被害等）の危険度情報として、4段階にレベル化して表示したものを図8に示す。洪水関連ハザード群の評価基準は、初期河床位を基準として水位の河道の高さとの比を R_w として、

- Level 1: $R_w < 0.8$
- Level 2: $0.8 \leq R_w < 1.0$
- Level 3: $1.0 \leq R_w < 1.2$
- Level 4: $1.2 \leq R_w$

としている。すなわち、Level 3となると河道から水が溢れて洪水が発生し始める状態となる。また崩壊関連ハザード群に関しては、単位斜面内に存在する斜面要素の崩壊指標の最大値 R_{smax} 、平均値を、 R_{save} として、

- Level 1: $R_{smax} < 0.9, R_{save} < 1.0$
- Level 2: $0.9 \leq R_{smax} < 1.0, R_{save} < 1.0$
- Level 3: $R_{smax} \geq 1.0, R_{save} < 1.0$
- Level 4: $R_{smax} \geq 1.0, R_{save} \geq 1.0$

としている。すなわち、Level 3では単位斜面内のいずれ

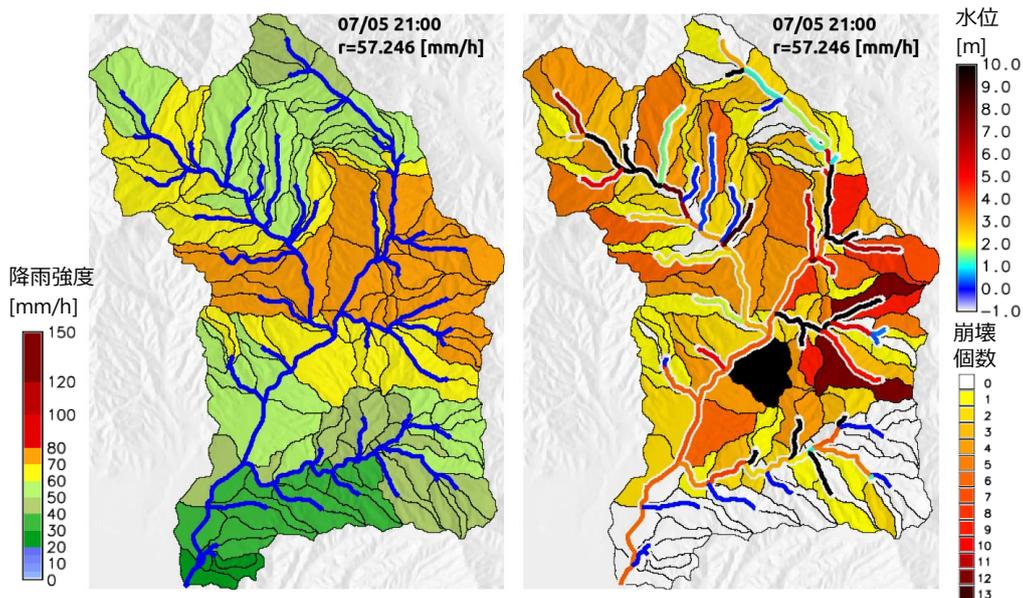


図7 7/5 21:00時点における降雨強度と、水位、崩壊個数の推定結果 r: 流域平均降雨強度

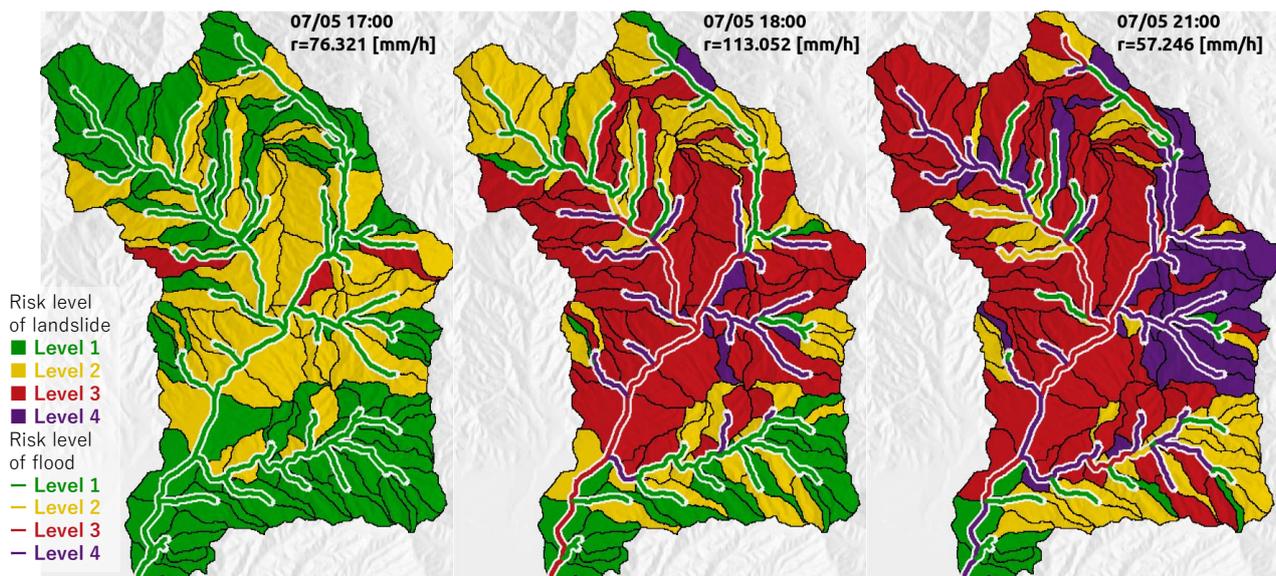


図 83 時点における各ハザード群の危険度分布 r: 流域平均降雨強度

かの斜面要素で崩壊が発生し、Level 4 では単位斜面内の崩壊危険度が全体的に上昇した状態である。

図 8 によると、17 時の時点では一部で崩壊関連ハザード群危険度の上昇が確認できるが、ほとんど洪水は発生していない状態にある。この状態から 1 時間後の 18 時には流域中央付近での崩壊・洪水のリスクレベルが急激に上昇して 3 に到達し、その後 21 時には流域全体がさらに危険な状態に推移した。また、以上の計算結果を基にすると、16-18 時にかけての時間帯に流域外への避難ができれば、人的被害を抑えられた可能性はあると考えられる。しかしながら、この時間帯は 75 mm/h 以上の降雨のピーク時間とも一致しており視界も悪く恐怖感を感じるような状態であったと考えられ、現実的には避難は困難な状態にあったと推定される。

4. 結論

本研究では、赤谷川流域を対象として斜面崩壊・と洪水の統合解析を実施し、各時点でのそれぞれの発生状態

と危険度について検討した。今後、現地での調査結果を元にした現象の発生時間情報の検証と、降雨データや斜面土層の土質条件等のパラメータについて詳細に検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 山野井, 藤田: 豪雨時の水・土砂災害に関わるハザード群の発生リスク評価, 土木学会論文集 B1, Vol. 72, No. 4 p. I_1291-I_129, 2016
- 2) 周国云・江崎哲郎・謝諱文・佐々木靖人: GIS を用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出する方法の開発と適用, 応用地質, Vol. 46, No. 1, pp. 28-37, 2005
- 3) Chen-Yu CHEN, Masaharu Fujita: A Method For Predicting Landslides on a Basin Scale Using Water Content Indicator, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 70, No.4, pp.I13-I18, 2014
- 4) 江頭進治, 松木敬: 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp.735-740, 2000

(2018.2.28 受付)

INTEGRATED SIMULATION OF LANDSLIDE AND FLOOD ON A HEAVY RAINFALL EVENT IN AKADANI RIVER BASIN, ASAKURA CITY

Masaharu FUJITA and Kazuki YAMANOI

The disaster happened by huge rainfall in Northern Kyu-shu island, 2017 is characterized by the multiple hazards related to flood and landslides. We have been developing a multi hazard simulator integrating a landslide prediction model, sediment supply model, and rainfall/sediment runoff model. In this study, we applied the model to Akadani river basin located in Asakura city employing Radar-AMeDAS composite rainfall data and grain size distribution data obtained by field sampling. As a result, the risk of landslides was gradually increased during the term of rainfall peak. In contrast, the risk of flood rapidly increased with the riverbed aggradation due to the sediment transport and production by landslides. In this disaster, evacuation seemed to be difficult because of strong rainfall after increasing the landslide index and flood risk.

降雨の極値統計と流出・氾濫現象の 現地調査及びモデリング

田中茂信¹・佐山敬洋²

¹ 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

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

本稿は 2017 年九州北部豪雨を対象に、降雨の極値統計と降雨流出・洪水氾濫の解析結果を報告する。朝倉地点、日田地点の時刻降雨量を用いて統計解析した結果、比較的短い継続時間の降雨量がいずれも既往最大を記録しており、特に朝倉地点では継続時間が 4~20 時間の降雨が既往第二位の 2 倍を超過していた。また災害前後の地形データを用いて、筑後川右岸に流入する中小河川の降雨流出と洪水氾濫を解析した。その結果、今回の洪水現象を説明する上で地形変化の影響が重要であり、多数の表層崩壊地から流出した多量の土砂が、河床および底部段丘面に堆積し、洪水氾濫の拡大に結びついていることが示された。

Key Words: statistical analysis, extreme rainfall, rainfall-runoff and inundation simulation, topographic change

1. 背景と目的

平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害では、筑後川右岸に流入する中小河川において、土砂流出による地形変化を伴う甚大な洪水被害が発生した。今回の被災地を含め、多くの中小河川流域は水文観測情報が存在しない非観測流域である。特に中山間地域における豪雨災害では、孤立集落が多発し、周辺住民はもとより災害対策にあたる河川管理者や自治体職員も被害の全容を把握することが困難になる。

本稿は今回の洪水被害をもたらした豪雨の極値統計解析を行うとともに、降雨流出と洪水氾濫の特性を把握する。具体的には、朝倉地点、日田地点で観測された時刻降雨量を極値統計によって解析するとともに、筑後川右岸に流入する中小河川を対象に分布型モデルを用いて降雨流出量を推定する。また浸水状況を詳細に調べるため、ウェアラブル移動体計測機器（以下、モバイルマッピングシステム: MMS）を用いた白木谷川流域の調査結果を報告する。さらに MMS によって推定された地形変化の影響を反映し、流域一体の降雨流出氾濫解析を実行し、今回の洪水氾濫に対する地形変化の影響について考察する。

2. 降雨の極値統計解析

ここでは気象庁の観測地点である朝倉（観測期間 1976.1-2017.12）と日田（1942.8-2017.12）の 2 地点について時刻降雨量を用いて解析する。

図-1 は継続時間内の既往最大雨量を示したもので、1 時間を除き比較的短い時間の既往最大値は 2017 年のイベントであることがわかる。また、朝倉は 9 時間、日田は 6 時間以降継続時間が長くなってもそれほど継続時間内雨量が増えていない。図-2 は既往最大値と既往第 2 位の比を取ったものであり、ここでは日田の資料は朝倉の観測期間と合わせている。朝倉の 4-20 時間の値は 2 倍を超えている。これらのことから、朝倉は 9 時間、日田は 6 時間の雨量がより極端であったと考え、確率評価の対象とする。

図-3 は 3, 10, 24 および 48 時間の年最大雨量の経年変化を示したものであり、両地点ともに 1970 年代中頃から大きくなる傾向が見えるが、有意水準 5% の MannKendall のトレンドテストでは、ともに有意ではない。日田では 1950 年ごろから 1970 年代にかけて減少するのが見える。

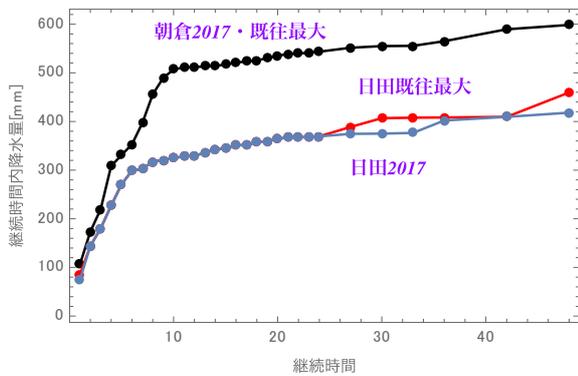


図-1 継続時間と継続時間内雨量の関係
朝倉は2017年の事象が既往最大を更新，日田は2～24時間で既往最大を更新

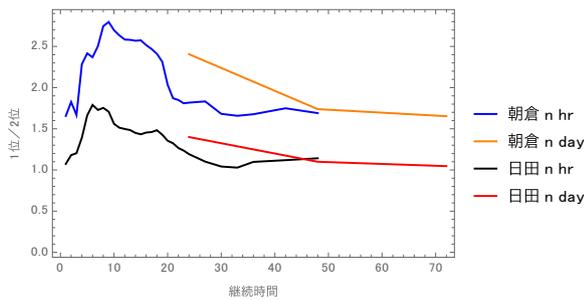


図-2 継続時間と既往最大第二位の関係
朝倉は継続時間4～20時間で2倍を超過している。

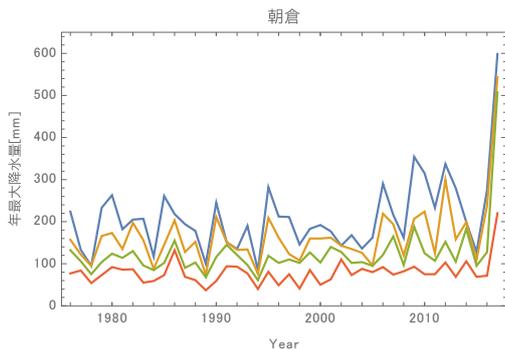


図-4 は1981-2010の期間の平均値を基準とした年最大雨量，閾値超過雨量の計，閾値超過事象数，閾値超過事象あたりの雨量の11年移動平均値をプロットしたものである。黒線で示した日田の1970年代中頃までをみると，事象あたりの雨量の比率はほぼ1であり，閾値超過雨量の計は閾値超過事象数で説明できることを示している。一方，1970年代後半以降は事象あたりの雨量が増加傾向にあり，閾値超過雨量の計と閾値超過事象数の関係は事象あたりの雨量が増加する傾向に対応した変動を示している。

赤線で示した朝倉は1990年過ぎから全ての値が増加している。この期間の事象あたりの雨量は日田と朝倉ともに似たような増加傾向を示している。

図-5は朝倉9時間，日田6時間の2016年までの年最大雨量の確率プロットであり，Gumbel分布とGEV分布をあてはめた確率分布も合わせて示している。2017年のイベントを赤線で示しており，グンベル分布でそれぞれの再現期間は4千5百万年，3万1千年と非常に稀な事象と評価された。

3. 流出解析の対象範囲

図-6に本章で対象とする流出解析の対象範囲を示す。解析領域の上端は筑後川夜明ダム，下端は筑後川と佐田川の合流地点とし，この区間に右岸側から流入する全ての河川流域を対象とする。190.4 km²の解析領域には緑の

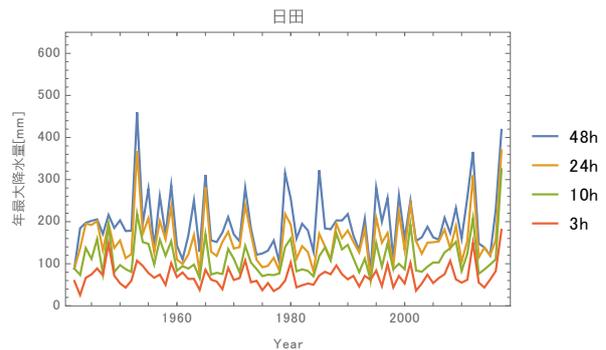


図-3 3, 10, 24 および 48 時間の年最大雨量の経年変化 (左: 朝倉, 右: 日田)

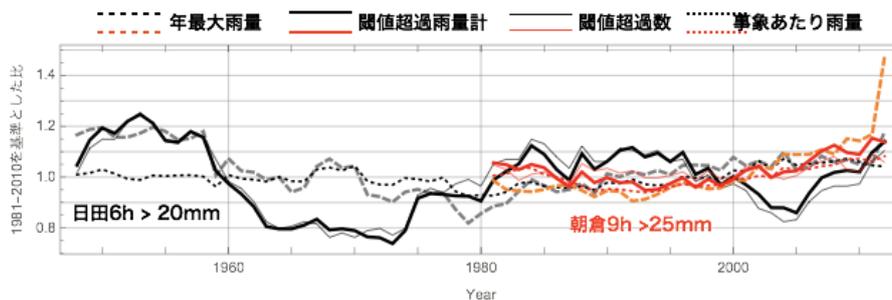


図-4 年最大雨量，閾値超過雨量計，閾値超過数，超過事象あたりの雨量の時系列変化

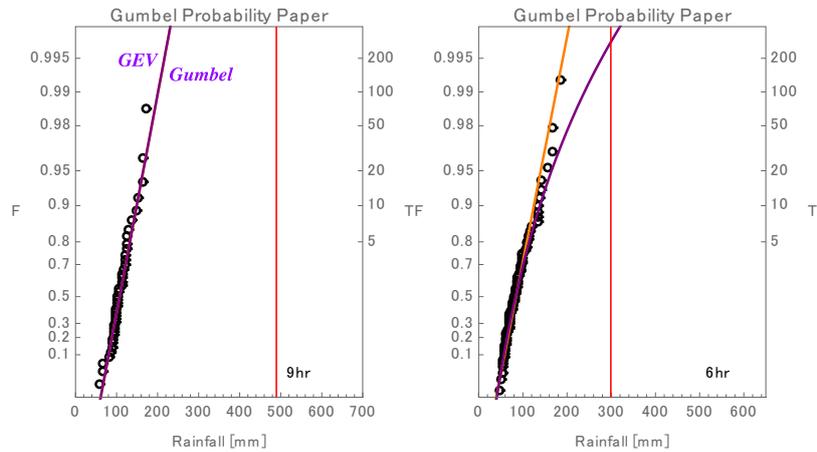


図-5 朝倉9時間および日田6時間の年最大雨量の確率プロット (左:朝倉, 右:日田)
赤線は2017年事象の値

線で示した寺内ダム流域 (51.0 km²) を含み、ダム流入量の観測値をもとに流出モデルを同定する。また解析領域には赤谷川流域 (20.1 km²) や白木谷川流域 (3.5 km²) を含む。赤谷川、白木谷川の中下流域は花崗岩質の深成岩、その上流域及びその西側の地域は泥岩起源の変成岩帯に属する。花崗岩の地域では比較的浅い土層の表層崩壊が多数発生し、その結果多量の流出土砂や流木が河川や河岸段丘を埋めた。また赤谷川東側は大肥川流域があり、この流域の地質は安山岩や玄武岩などの火山岩に分類される。大肥川も上流の降水量の多い地域で土石流が発生した溪流が多数確認されているが、図-6の黄色で示されるように崩壊面積率はその西側に比べて相対的に小さく、大肥川の下流では赤谷川に見られるような顕著な

河床の上昇は確認されていない。

4. 降雨の空間分布

図-7に7月5日0時から6日0時までの24時間積算雨量を示す。本稿では250m分解能のCX合成レーダ雨量⁹⁾を用いて解析する。

積算雨量の分布は、線状降水帯の影響によって東西方向に伸びた分布となっており、この推定結果によれば24時間雨量の最大値は698.1mmとなる。また、この雨地上雨量計で比較した5地点の平均では、相対誤差が6.8%となった。

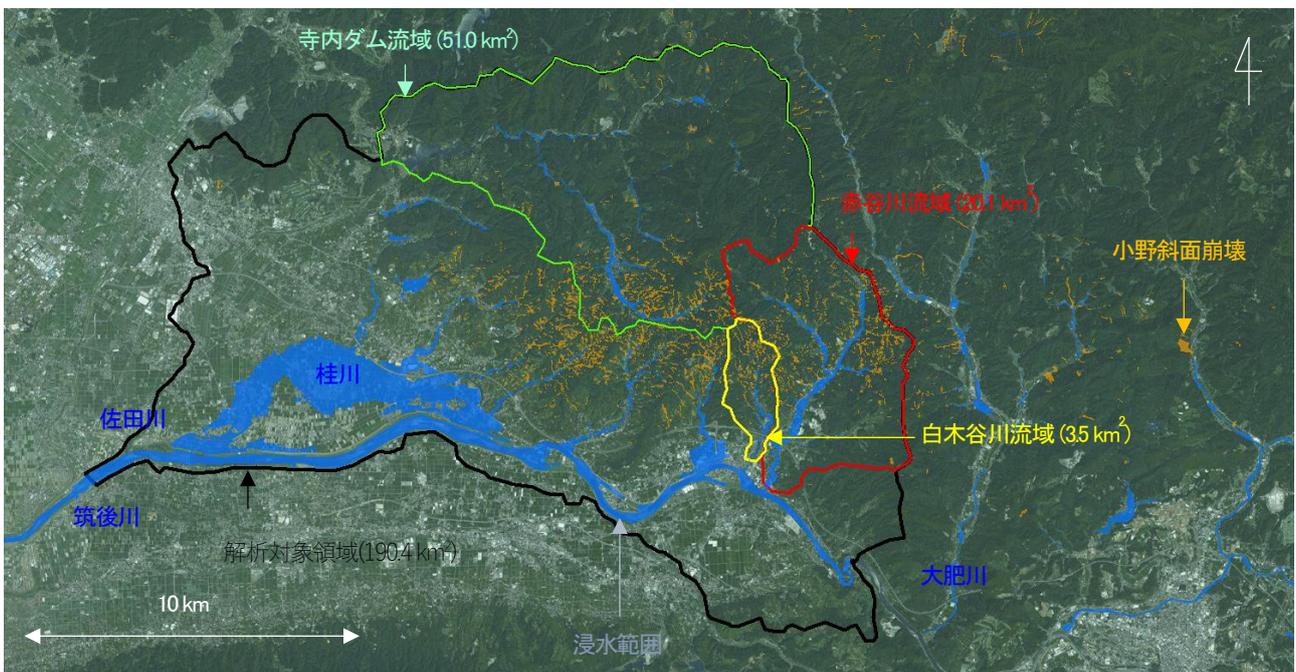


図-6 朝倉市周辺の解析対象領域

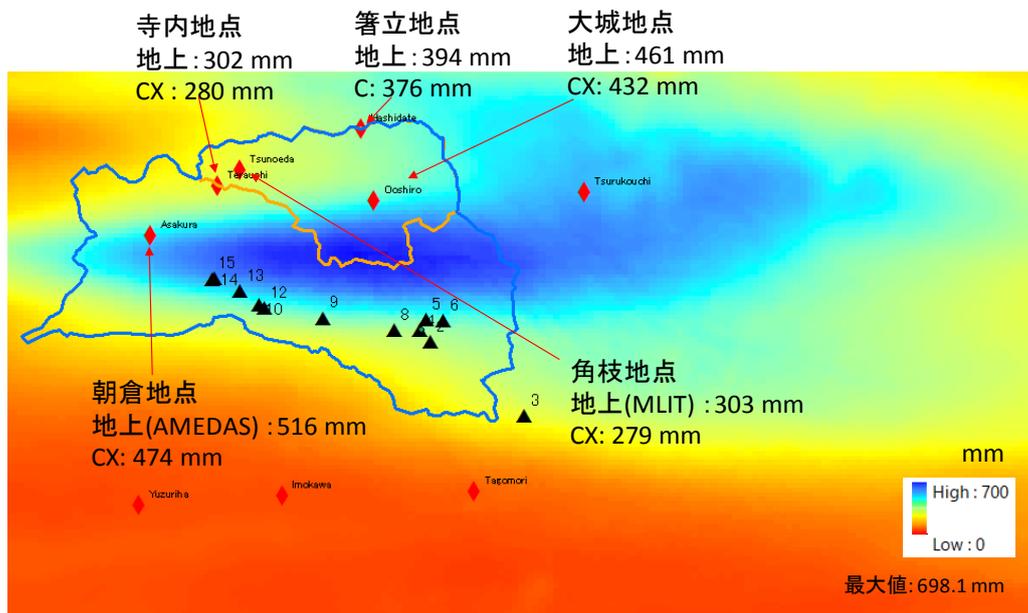


図-7 CX 合成レーダ雨量による積算雨量分布
(2017年7月5日0時～6日0時)
図中の▲印はRTK-GPSによる浸水痕跡調査地点

4. 降雨流出氾濫解析の方法

(1) 分布型モデルを用いた解析

本稿では CX 合成レーダ雨量と分布型水文モデルを用いた中小河川流域の流出量を推定する。本解析では RRI モデル²⁾を用いて、まず対象領域全体を 50m の空間分解能で解析した。RRI モデルは二次元拡散波近似型の分布型モデルであり、流域と河道の水のやりとりを考慮することで内水・外水を分けることなく、流域一体で降雨流出と洪水氾濫を推定する。山地森林斜面では、土層中の側方流や表面流を再現する。同モデルは任意の断面形状を反映することもできるが、ここでは情報が限られていることから簡易的に矩形断面を仮定し、その幅と深さをそれぞれ $W=C_w A^{S_w}$, $D=C_d A^{S_d}$ という経験式で推定した。ここで A は各地点の集水面積 [km^2] であり、 C_w , S_w , C_d , S_d のパラメータは、各支川の下流部で計測した 8 地点の河道幅と深さから推定し、それぞれ 4.73, 0.58, 1.57, 0.33 と設定した。

(2) MMS を用いた浸水痕跡調査

浸水や地形変化の状況を効率的に調査するため、本稿ではライカ・ジオシステムズ社の協力を得て、MMS による現地調査を実施した。この機材は高性能 GPS、5 台の動画撮影カメラ、レーザスキャナ、慣性計測装置

(IMU) が一体となった機材であり、従来は自動車に搭載されることが一般的であった MMS を一つのバックパックに収容したものである。可搬性に優れ、特に自動車では入ることの難しい災害現場での情報収集や現地調査にも活用も期待されている。これまでの RTK-GPS を用いた浸水痕跡調査では、各計測地点で止まりながら痕跡水位を調査する必要があった³⁾。一方、本 MMS を活用することで、対象領域（本事例では白木谷川流域の氾濫原）においてバックパックを背負って歩くことで、三次元の座標情報をもった動画を記録することができるので、後日作業によって浸水痕跡水位の水平座標や標高を特定できる（図-8）。



図-8 MMS による浸水痕跡調査の様子

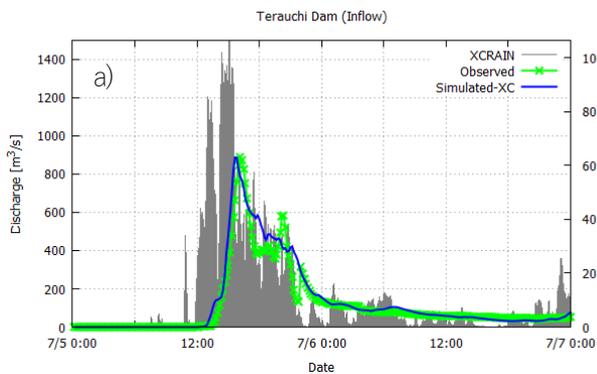
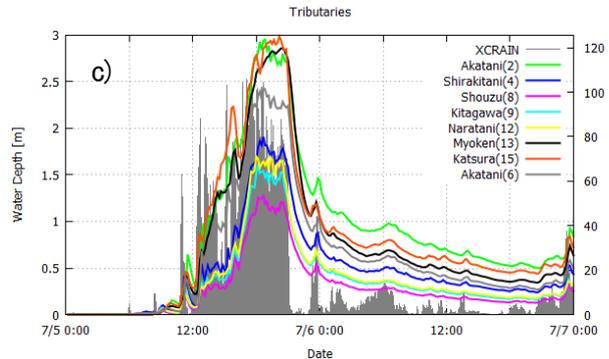
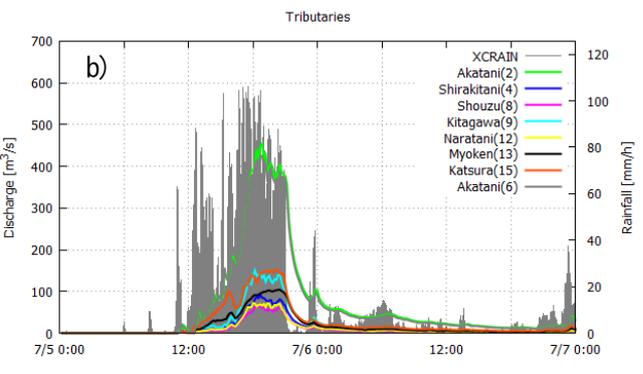


図-9 流出解析の結果: a) 寺内ダム流入量、b) 筑後川流入河川の流量、c) 同水深

** a) は寺内ダムの流域平均雨量、b), c) は赤谷川流域の平均雨量を灰色で表示。



5. 結果

(1) 各中小河川の流出量推定結果

CX 合成レーダ雨量を RRI モデルに入力して各中小河川の河川流量を推定した。モデルパラメータは寺内ダム流入量の観測値を対象に同定した(図-9 a)。今回同定したパラメータは、山体地下への浸透を考慮せず、土層厚を比較的薄く(0.6 m)設定することによって同流入量を妥当に再現できることが分かった。寺内ダムで設定したパラメータを用いて各支川のピーク流量を推定した結果を図-9 b)に示す。この結果から例えば赤谷川下流域ではピーク流量が7/5 18:40にピーク(454m³/s)に達することが推定される。

上述の通り RRI モデルは降雨流出と洪水氾濫を一体的に解析するモデルであり、河道断面を詳細に設定することで、中小河川周辺の浸水状況を妥当に再現できることが最近の研究で確認されている(山本ら, 2017)。今回の事例は矩形断面を用いた簡単な設定であるが、どの程度浸水の状況を再現するかを確認するため、RRI モデルによる最大浸水深分布の推定結果と国土院による浸水範囲の調査結果を比較した(図は省略)。桂川下流部の比較的勾配の緩やかな平野部においては浸水の状況をある程度再現しているものの、特に今回被害の大きかった中小河川沿いで氾濫を再現できていないことが分かった。各中小河川の下端における水位変化の推定結果(図-9 c))は、例えばピーク流量が最大となる赤谷川においても、その水位上昇が約3 mとなっている。この水位上昇量は、下流部の河道を満杯にする程度の水位上昇であ

り、実際に発生した谷底平野を埋めるような氾濫とはならない。これは土砂堆積に伴う河川の流下能力低下や氾濫原における地形変化が大規模な浸水に影響していることを示唆している。同様のことは、後述する白木谷川流域を対象にした10 m空間分解の詳細なシミュレーション結果でも確認されており、災害前の地形情報を用いたシミュレーションでは中小河川沿いの大規模な氾濫が再現できないことが分かった。

(2) 白木谷川を対象にした現地調査とモデル解析結果

白木谷川の地形変化や浸水の状況をより詳細に調べるため、前述のMMSを用いた浸水痕跡調査を実施した。この機材を用いて調査をすれば周辺の3次元地形情報が得られるので、その結果から災害後の数値標高(DEM)を推定できる。図-9 a)はMMSで推定した災害後のDEMから国土院による災害前のDEMを差し引いて推定した地形変化量を示す。この結果によると、最も変化の大きい河川付近では4から5 m程度の堆積が確認されている。上述の通り災害前のDEMを用いた解析結果は周囲に浸水が広がらない結果となる(図-9 b), 図-10 b)。一方、図-9 c), 図-10 c)に示すように、災害後の地形を用いて解析した結果は、国土院提供による浸水範囲(図中青線)とよく対応する。

6. まとめ

筑後川に流入する中小河川を対象に、現地調査と分布型モデルを用い洪水解析を実施した。以下に調査結果を

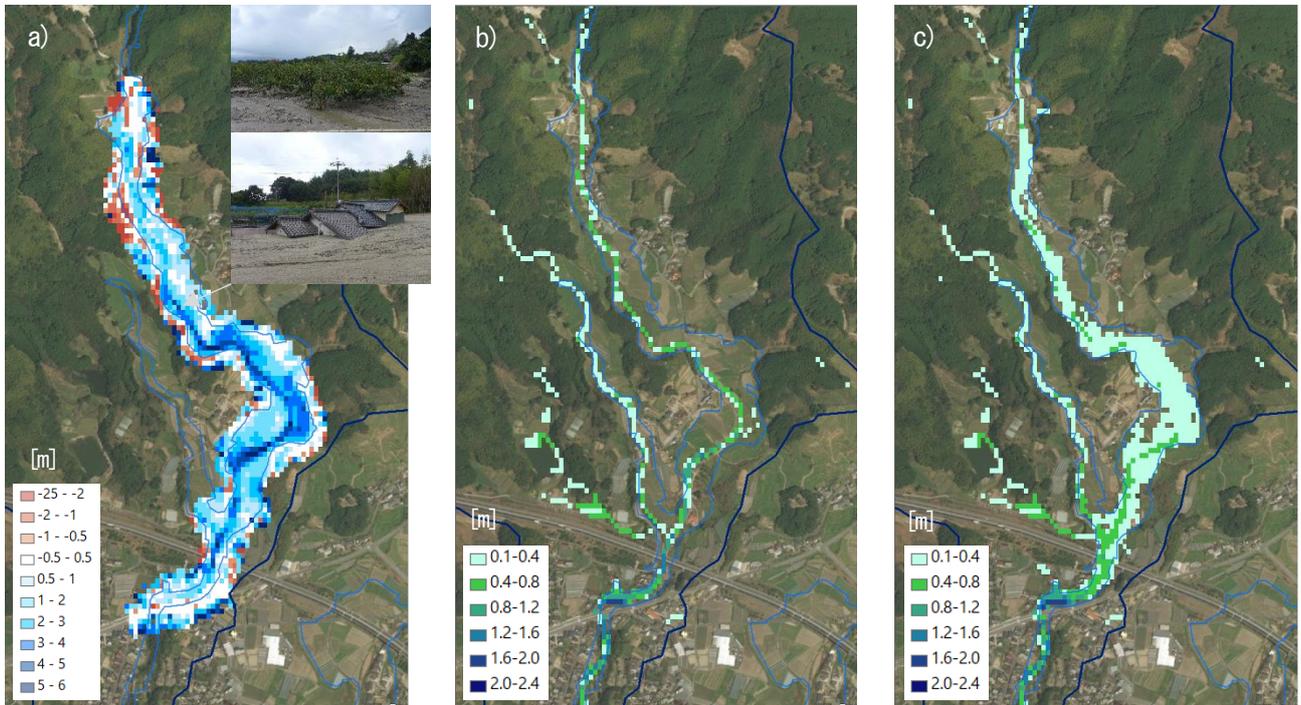


図-10 白木谷川流域下流部の a) 地形変化量(MMSによる災害後のDEMと国土地理院による災害前のDEMの差分)、10 m空間分解能のRRIモデルによって推定された最大浸水深分布：b) 災害前の地形を用いた場合、c) MMSによって推定された災害後の地形を用いた場合。

まとめる。

- (1) 朝倉地点、日田地点の時刻雨量を用いて極値統計解析を行った結果、1時間を除いて、比較的短い継続時間の降雨は、いずれも本事象が既往最大のイベントとなった。朝倉で9時間程度、日田で6時間程度の継続時間を有する雨量がより極端であり、朝倉地点では既往第2位の2倍を超過していた。再現期間を計算すると、4千5百万年、3万1千年と非常に稀な事象と評価された。
- (2) 年最大雨量を対象にしたMannKendallのトレンドテストでは、両地点ともに統計的に有意な増加・減少傾向は見られなかった。しかし、閾値超過の事象数やその雨量を解析した結果は、1970年代後半以降、超過事象あたりの雨量が増加している傾向が両地点で認められた。
- (3) 寺内ダムを対象にしたRRIモデルの流出解析結果から、今回の洪水を再現するうえで、比較的浅い土層厚(0.6 m)と山体地下への浸透を考慮しない設定が適することが分った。この結果は、同領域内の花崗岩や変成岩帯で確認されている表層崩壊の実態とも概ね整合的であった。
- (4) 寺内ダムで同定したモデルパラメータとCX合成レーダ雨量を用いて各中小河川流域の流量や水位変化を推定した。その結果、例えば赤谷川下流ではピーク流量が450 m³/s、水位の上昇量は3 m程度と推定された。
- (5) 赤谷川下流部における3 mの水位上昇量は、実際に

発生した大規模な氾濫被害の実態を説明するには過小と考えられた。実際に、50 m分解能で適用したRRIモデルによる浸水シミュレーション結果は、各中小河川沿いの氾濫域の状況を妥当に再現できていなかった。

(6) 浸水の状況をより詳細に調べるため、ウェアラブル移動体計測機器(MMS)を用いて地形変化と浸水痕跡を調査した。土砂堆積後の地表面から計測した最大浸水深は概ね1 m以内であり、災害後の地形を用いてシミュレーションすることで、1 m程度以内の浸水深で谷底平野に広く広がる浸水の状況を再現できた。今回の災害において地形変化の状況をモデルで反映することが重要であることが改めて確認された。

(7) 中山間地域の豪雨によって谷底平野の地形が変化するような極端な豪雨災害は、河川の氾濫、斜面崩壊、土石流など種々の災害事象が複合し、絶対に安全と言い切れる対策を見いだすことは困難である。しかし、今回の災害でも少し高い場所にある校舍など、壊滅的な被害を免れた場所もある。解析に用いたCX合成レーダ雨量など、高分解能かつ高精度の気象情報を活用し、豪雨が検知された場合に迅速かつ確実に洪水氾濫や土砂災害の状況を推定し、住民避難を含めた減災策に結びつけることが大切である。ただし、豪雨による中小河川の流下能力低下が引き起こす浸水の拡大については、地形変化量の

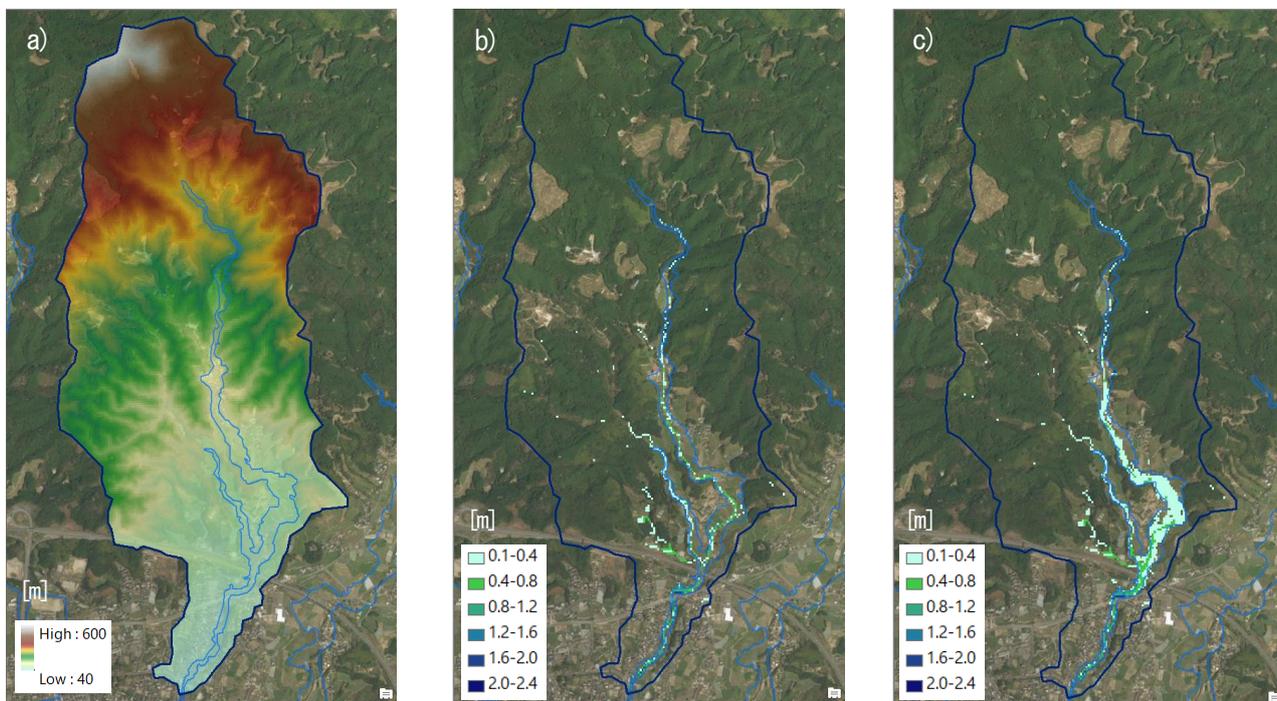


図-11 白木谷川流域の a) 標高分布と 10 m 空間分解能の RRI モデルによって推定された最大浸水深分布 : b) 災害前の地形を用いた場合、c) MMS によって推定された災害後の地形を用いた場合

簡易的な推定も含めて今後の研究と技術開発が望まれる。(8) 予測技術の検証や被害の状況を詳細に調べるうえでも、高性能 GPS を用いた浸水痕跡水位の調査とその結果のアーカイブが重要である。本調査で導入した MMS を用いることで、3 次元座標の情報を付与した被災地の動画を作成することができて、これを用いて最大浸水位や災害後の地形を推定することができる。

今回起きた事象は、朝倉や日田では未曾有の災害外力であったが、全国の記録からするとそれほど大きいものではない。気象庁の Web にある日降水量のランキングの 20 位は 626 mm である。さらに、その様な地点は必ずしも大雨が頻繁に起きている場所ばかりでなく、一般に雨が少ないと思われている所も少しではあるが含まれている。また、希有な事象を含むか否かで確率評価は非常に大きく異なる。人命優先のソフト対策は重要ではあるが、外力の変動や迅速な復旧困難性などを踏まえ、超過外力が生じた場合においてもできるだけ計画で期待されている防災効果を発揮し、越流・溢流などの超過分のみの対策で済むような工夫が必要である。

参考文献

- 1) 河川情報センター：河川情報数値データ配信事業、

<http://www.river.or.jp/01suuchi/index.html>, 2017.

- 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), DOI: 10.1111/jfr3.12147, pp. 298-312, 2012.
- 3) 佐山敬洋, 田中茂信, 寶 馨：分布型流出モデルと時空間起源追跡法による鬼怒川洪水の流出解析, *水文水資源学会誌*, 第 30 卷, 第 3 号, pp. 161-172, 2017.
- 4) 山本浩大, 佐山敬洋, 近者敦彦, 中村要介, 三宅慎太郎, 寶 馨：千種川流域を対象にした RRI モデルによる降雨流出・洪水氾濫統合型解析, *自然災害科学*, 36, pp. 139-151, 2017.

謝辞

本調査を実施するにあたり、ライカ・ジオシステムズ社の桑野裕一様他には MMS を用いた現地調査で多大な協力をいただいた。またレーダ雨量情報、地点雨量・ダム流入量情報は、それぞれ河川情報センター、水資源機構より提供いただいた。さらに、第二著者は、科学研究費補助金(特別研究促進費, 研究代表者：九州工業大学秋山壽一郎教授)の支援を受け現地調査を実施した。本稿の一部は同上報告書にも記載している。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 AND FIELD
INVESTIGATION AND MODELING OF RUNOFF-INUNDATION PROCESS FOR
NORTHERN KYUSHU FLOODING IN 2017

Shigenobu TANAKA and Takahiro SAYAMA

This article reports statistical analysis of extreme rainfall and rainfall-runoff-inundation simulation for the 2017 Northern Kyushu flooding. Statistical analysis based on hourly rainfall at Asakura and Hita indicated that rainfall depths with relatively short durations record broke the historical maximum records at each location. In particular, rainfall depths recorded at Asakura during this event exceeded more than two times of historically recorded values in case of rainfall durations between 4 to 20 hours. In terms of flood simulations, this study used both original and post disaster topographic data to simulate flooding in tributaries of the Chikugo river. The simulation suggested that the topographic change associated to large volume of sediment inflow from upstream landslides is important to simulate this flooding. The deposit sediment in the rivers and floodplains caused the expansion of flood inundation areas.

2017年7月の九州北部豪雨での土石流による 土砂生産特性と河岸・河床変動による被災

竹林洋史¹

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

本研究では、2017年7月の九州北部豪雨時に発生した同時多発表層崩壊が土石流の流動特性に与える影響について現地調査と数値シミュレーションにより検討した。また、河岸浸食や河床変動に起因した河川周辺の構造物の被災特性について現地調査により検討した。その結果、斜面崩壊が同時に発生することにより、土石流による土砂生産特性が大きく影響を受けることが明らかとなった。また、比良松中学校周辺の桂川の河岸浸食は、河道湾曲により流速の速い流れが外岸側によることによる典型的な湾曲外岸の河岸浸食と推察された。さらに、JR久大本線の橋梁は、流路変動に伴う橋脚周辺の河床の浸食によって倒壊した可能性が示された。

Key Words: debris flow, bed and channel deformation, sediment yield, numerical simulation, bridge

1. 背景と目的

2017年7月の九州北部豪雨では、最大6時間雨量が600mmを超える豪雨によって、多数の斜面崩壊や土石流が発生し、甚大な災害を引き起こした。

朝倉市・日田市を中心とする地域には複数の種類の地質が存在するとともに、大規模崩壊・表層崩壊・土石流など様々な形態の土砂移動が発生した。また、一つの流域内において複数の崩壊が発生しており、崩壊によって発生した土石流が重ね合わさり、土石流の規模に影響を与えたと考えられる。さらに、河岸浸食や河床変動に起因した河川周辺の構造物の被災も多く発生した。

本研究では、同時多発表層崩壊が土石流の流動特性に与える影響、河岸浸食や河床変動に起因した河川周辺の構造物の被災特性について検討した。

2. 複数の表層崩壊が土石流の流動特性に与える影響

2017年7月の九州北部豪雨では、一つの流域内においても非常に多くの表層崩壊が発生した。土石流現象は数分程度の現象であり、一つの流域内で同時に発生することはまれであるが、これほど多く表層崩壊が発生すると、崩壊によって発生した土石流が重ね合わさることも考えられる。また、重ね合わせが発生しなくても、同じ溪流を土石流が複数回通過すると、河道内の不安定土砂の量が増加し、土石流の規模に影響を与えたと考えられる。

ここでは、図14に示す杷木星丸地区において、赤谷川に右岸側から流れ込んだ土石流を対象として、複数の表層崩壊が土石流の流動特性に与える影響を検討する。

(1) 現地調査

図15(a)に、土石流によって被害を受けた杷木星丸地区の家屋を示す。溪流が赤谷川に流れ込む場所に溪流を横断するように道路があり、その道路に沿って家屋が存在していた。つまり、道路沿いの家屋の列を横切るように土石流が流れ、数軒の家屋を破壊した。流出した土砂の粒径は1m以上のものから数mm以下のものまで存在し、非常に粒度分布幅が広い。図15(b)は、赤谷川との合流部から300m程度上流地点の様子である。写真左の暗渠が発災前の流路であり、被災後に写真右側(左岸側)が新しく流路となっている。土石流発生時に土砂や流木が暗渠を閉塞させ、流路が左岸側に移動したことがわかる。本溪流の計画流量を流すことができるように暗渠の大きさは決定されていたとすると、土石流の流量は雨のみの計画流量よりもかなり大きかったことが推察される。

(2) 数値解析法

本流域を対象として、土石流の数値シミュレーションを実施した。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。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り、複数の崩壊が発生した場合の土石流の取り扱いが困難となる。そこで、本解析では全解析区間を平面二次元の基礎式を用いる竹林 (2016) の平面二次元土石流数値シミュレーション法²⁾を用いる。

水及び土砂の混合物の質量保存則³⁾は以下のである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 h は泥流の流動深である。 u と v は x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の堆積濃度、 E は河床の浸食速度であり、以下の江頭らの式³⁾を用いる。

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

ここに、 θ は流動方向の河床勾配であり、以下の関係がある。

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

ここに、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配である。 θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 \bar{c} に関する流動方向の平衡河床勾配であり、図-1のように、水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考えると⁴⁾、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (4)$$

ここに、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。流体中の土砂の質量保存則³⁾は以下のである。

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hu}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hv}{\partial y} = E \quad (5)$$

運動量保存則³⁾は以下のである。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (7)$$

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

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho \quad (8)$$

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

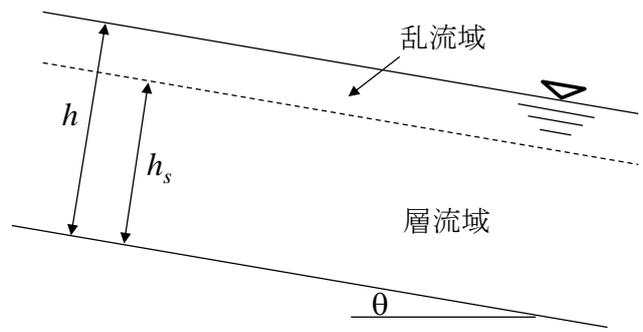


図-1 二層流モデル

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (10)$$

τ_y は降伏応力であり、本解析では以下の関係を用いる³⁾。

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{2}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h_s \cos \theta \tan \phi_s \quad (11)$$

f_b は抵抗係数であり、本解析では以下の関係を用いる。

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{5}{3}}}{\bar{c}^{\frac{5}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) \bar{c}^{-\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} + 9\alpha^2 \left(1 - \frac{h_s}{h} \right) \quad (12)$$

ここに、 $k_f=0.16$ 、 $k_d=0.0828$ 、 e は粒子の反発係数、 d は土砂の平均粒径である。河床位方程式³⁾は以下のである。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \quad (13)$$

初期地形は、国土地理院による被災前の10mDEMを用いた。解析条件は、流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合 (Case 1) と崩壊が一カ所の場合 (Case 2) の2種類である。流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合の崩壊の場所は、被災後に航空写真から判読された崩壊の場所と一致している。崩壊が一カ所の条件では最も上流の崩壊を対象とした。流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合の崩壊土量は、崩壊が一カ所の場合の約6倍である。

(3) 結果と考察

図-2と図-3に土石流の深さの時間的な変化を示す。流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合 (Case 1) は、流域の途中で発生した土石流が先に下流に到達するため、

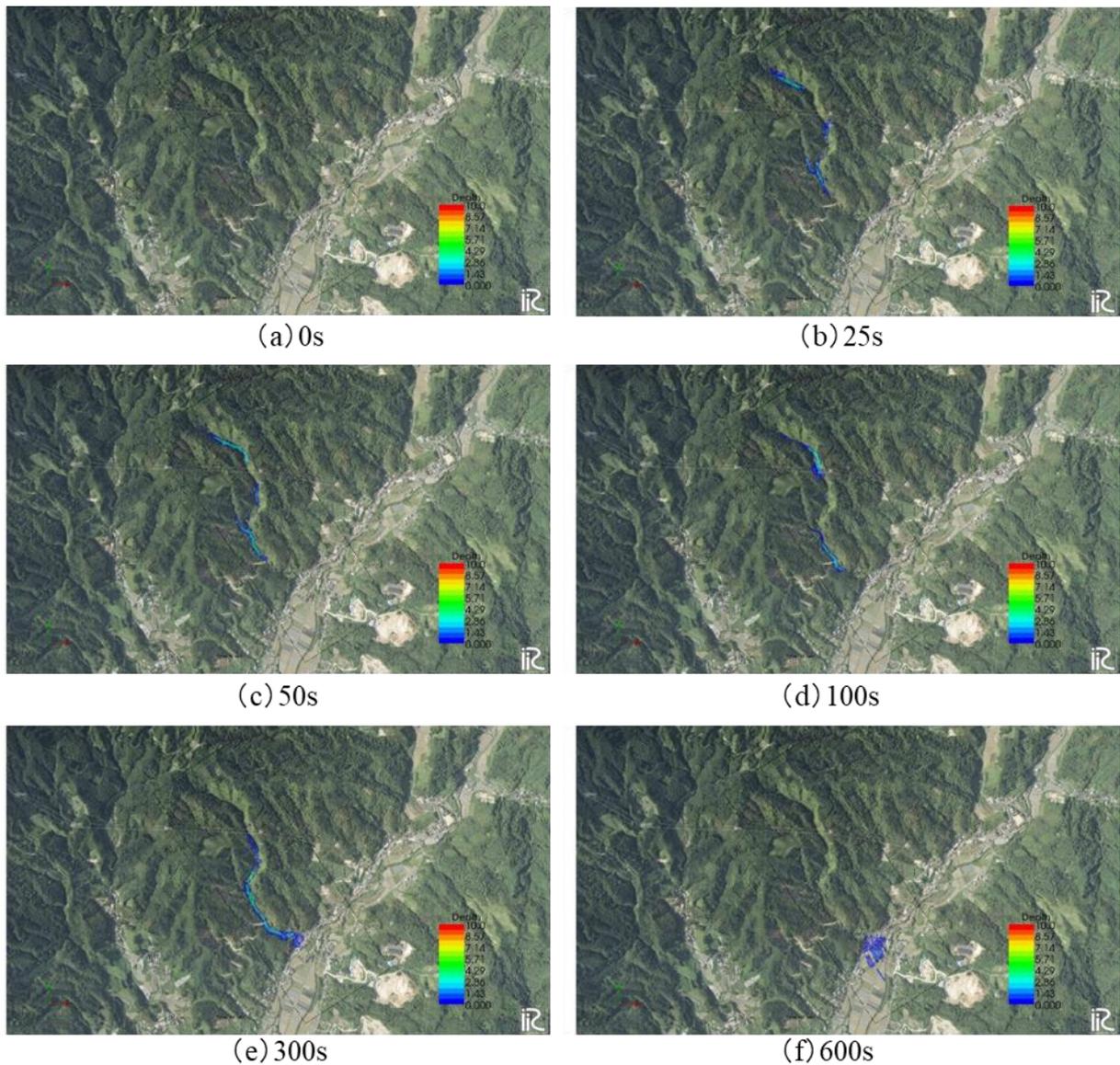


図-2 複数の斜面崩壊が同時に発生した場合の土石流の流動深の時間変化

斜面崩壊が発生してから 200 秒後に宅地に到達している。一方、崩壊が一カ所の場合 (Case 2) は 400 秒後であり、斜面崩壊発生から宅地に到達するまでの時間が長い。表層崩壊による生産土砂量は 6 倍の違いがあるが、流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合の宅地に到達した土量は、崩壊が一カ所の場合の土量に比べてわずか 1.7 倍である。これは、複数の崩壊が発生した場合、最初の土石流は十分に浸食される不安定土砂が河道の基岩の上に存在しており土石流の規模が大きくなるが、二波目以降の土石流は、最初の土石流によって不安定土砂が浸食されているため、不安定土砂の少ない状態の溪流を流れ下ることになり、土石流の規模が大きくなる。そのため、崩壊土量が 6 倍となっても流出土砂量は 6 倍とはならない。なお、崩壊が一カ所の場合の土石流の流出土砂量に対する複数の崩壊が同時に発生した場合の増分は、河道内に残っていた不安定土砂の浸食と崩壊地から河道までの斜面を崩土が浸食されたためである。

3. 河岸浸食や河床変動に起因した河川周辺の構造物の被災特性

洪水流が河道を流れることにより、河岸が浸食されたり橋脚周辺の河床が洗掘され、護岸の破壊や橋梁の倒壊が発生する。図-4(c)と(d)は朝倉市比良松中学校横を流れる桂川での河岸浸食であり、比良松中学校の建物の一部が破壊されている。比良松中学校周辺の桂川は、洪水時の川幅・水深比が 5 程度の河川であり、交互砂州や網状流路が形成されるような河道ではない。また、河岸浸食が発生した領域は、河道湾曲部の外岸に位置していることを考えると、河道湾曲により流速の速い流れが外岸側によることによる典型的な湾曲外岸の河岸浸食と考えられる。また、図-4 (a)に示すように下流域の橋梁の左岸、さらに図-4 (b)に示すように下流域の右岸で河岸浸食が発生している。これらは、比良松中学校の横の湾曲によ

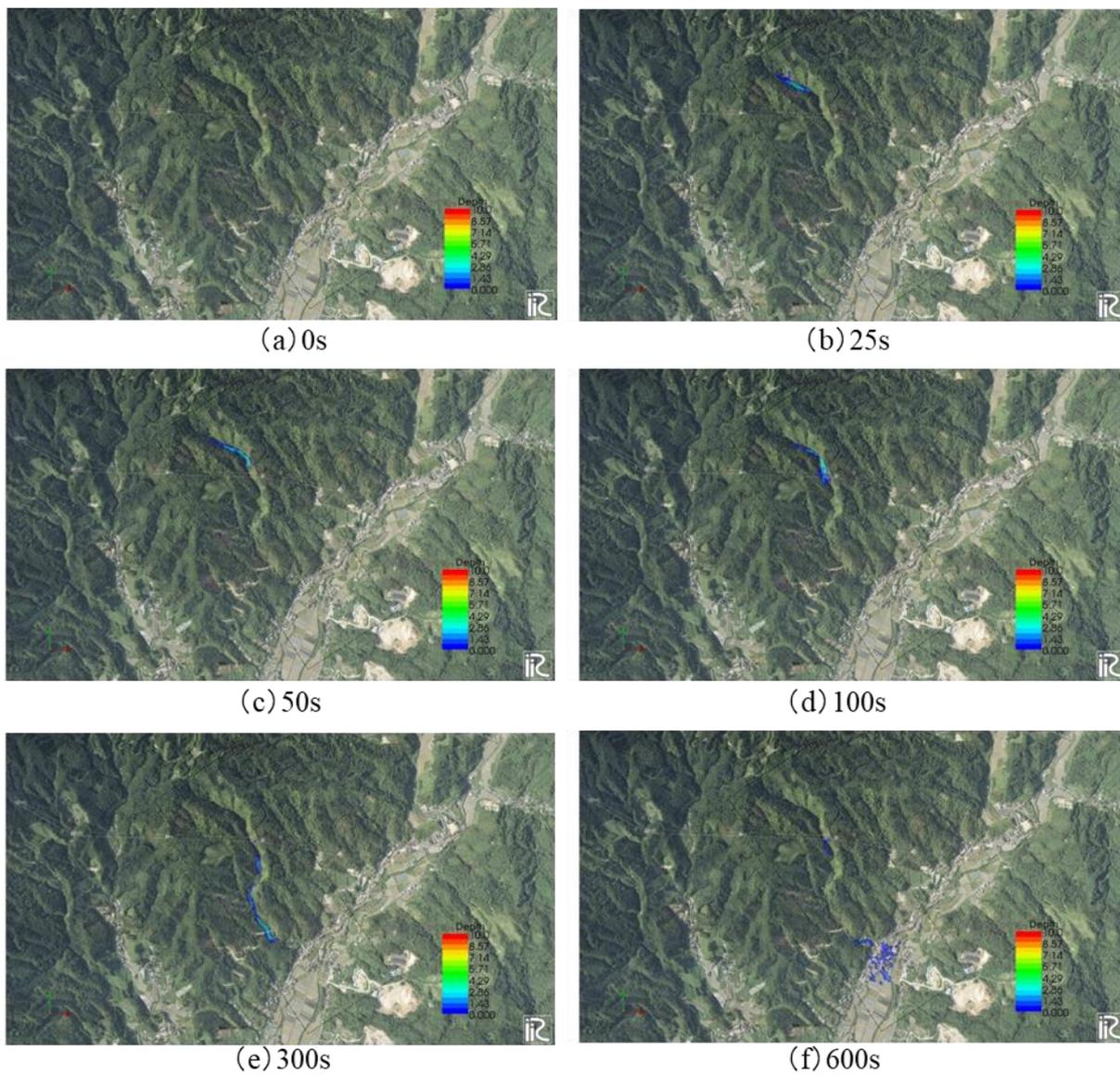


図-3 一つの斜面崩壊による土石流の流動深の時間変化

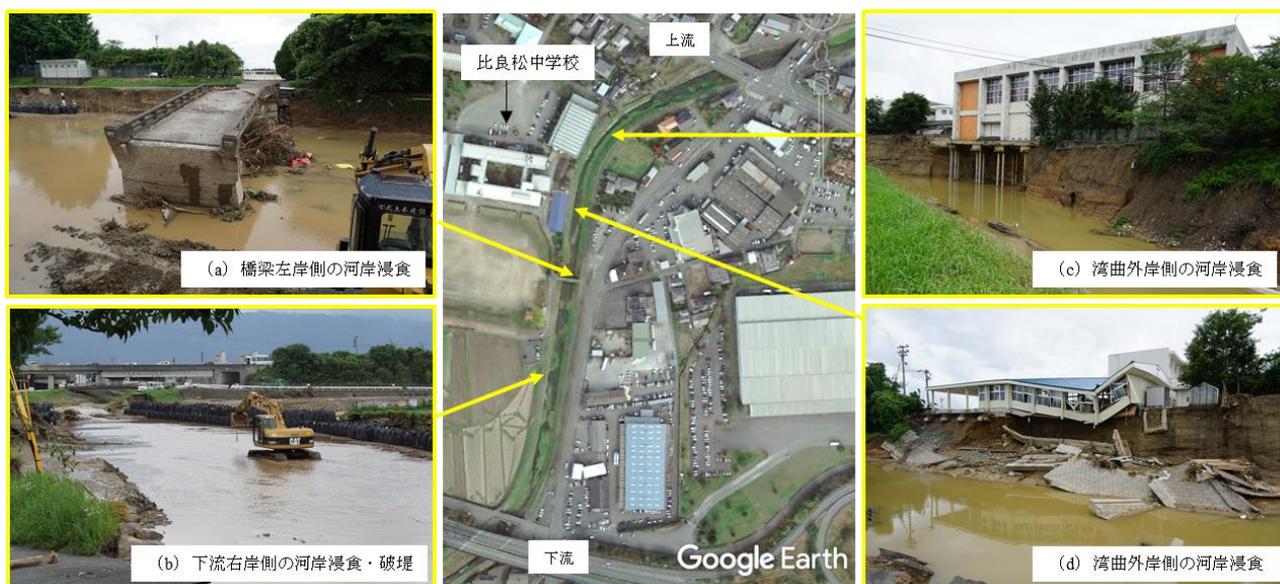


図-4 比良松中学校横を流れる桂川での河岸浸食



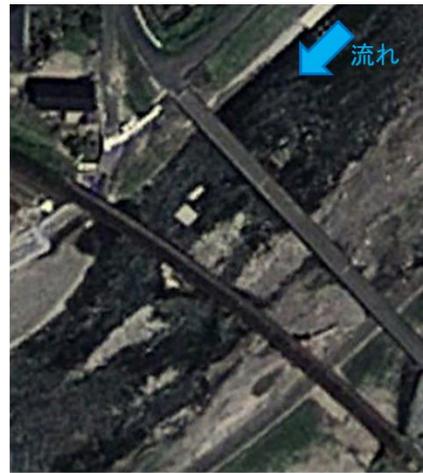
図-5 JR久大本線の落橋の様子



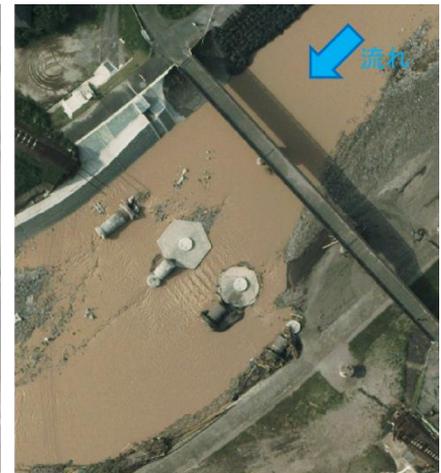
図-6 被災直後の上流側の橋梁の様子 (GSI)



2012年4月 (Google Earth)



2012年8月 (Google Earth)



2017年7月 (被災後)

図-7 JR久大本線周辺の流路形状の変化

って形成された偏流が比良松中学校が存在する湾曲外岸（右岸）に衝突し、跳ね返った流れが橋梁左岸に衝突し、さらに跳ね返った流れが下流の右岸側の堤防を浸食し、下流域の氾濫を発生させている。河道湾曲部の存在による下流域の交互河岸浸食は、2011年の紀伊半島南部豪雨災害で那智川下流域でも発生している。このように、川幅・水深比が小さい河道の湾曲部およびその下流域は、交互に水衝部が形成されて河岸浸食を発生させるため、河川整備を実施する上で注意しておく必要がある。

図-5は、日田市内を流れる花月川に架かるJR久大本線の落橋の様子である。写真の左が上流側である。低水路内に橋脚を4本有する橋梁であり、それらすべてが破壊されている。ただし、破壊の種類は異なっている。左岸側（写真の奥側）の3本の橋脚は、コンクリート打設時の境界に沿って根元から水平に切断されている。一般に、橋脚は洪水流のみによる応力では根元から切断されるような破壊は発生しないため、橋桁付近に大きな応力が下流方向に作用した可能性が考えられる。一方、最右岸側（写真の手前側）の橋梁は根固工とともに倒れている。さらに、図-6の被災直後の様子を見ると、倒壊し

た橋梁のすぐ上流の橋梁の橋桁には全く流木が集積されておらず、橋脚にもわずかの流木しか集積していない。橋桁に流木などが集積し、大きな応力が下流方向に作用して橋脚が破壊される現象はよく見られるが、本落橋については上流の橋梁を見る限り、その可能性は低いと考えられる。これらのことを総合すると、JR久大本線の橋梁は、最右岸側の橋梁が橋脚周辺の河床の浸食によって倒壊し、橋桁によって連結された他の橋梁が橋桁に引っ張られて、下流方向に倒壊したと考えられる。また、根固工の大きさが4本の橋梁で大きく異なることがわかる。図-7(c)と合わせて見ると、中央の二本の橋梁の根固工は大きい、両岸付近の二本の橋梁の根固工は中央の二本に比べて小さいことがわかる。このような根固工の大きさの違いは、低水路内の河床形状の変化に起因していると考えられる。図-7に2012年4月、2012年8月、2017年の被災後の橋梁の航空写真を示す。図に示すように、2012年4月の時点では、中央の二本の橋脚は平水時の流路の中に存在するが、両低水路護岸に近い二本の橋梁は、砂州の中に存在している。つまり、強い流体力を受けるとともに洗掘が形成されやすい流路内の二本の橋

脚について強固な根固工を設置し、河床に土砂が十分にあり、洗掘の影響を受ける可能性が低い砂州中の橋脚については小規模な根固工を設置したものと推察される。しかし、2012年7月に前回の九州北部豪雨が発生し、花月川も氾濫するほどの流量が流れた。その結果、もしくは被災した護岸の改良・補修のため、2012年8月の航空写真では流路が右岸側に移動し、右岸側の橋脚周辺の砂州が消滅していることがわかる。その結果、右岸側の橋脚は、橋脚周辺の土砂が減少しているにもかかわらず、根固工が小さい状態で2017年7月の出水を受けたことになる。このように、河道内の流路の位置は時間とともに変化している。流路形状の時空間的な変化特性は場所ごとに異なり予測は容易ではない。しかし、平面二次元河床変動解析を用いると、流路の時空間的な変化をある一定レベルで予測可能である。そのため、橋梁の保守管理を実施する時に流路の変化についても注意するとともに、特に重要な橋梁については、平面二次元河床変動解析による流路形状の予測結果に基づいた橋梁倒壊対策を実施しておくことが重要である。

4. まとめ

本研究では、2017年7月の九州北部豪雨時に発生した同時多発層崩壊が土石流の流動特性に与える影響について現地調査と数値シミュレーションにより検討した。また、河岸浸食や河床変動に起因した河川周辺の構造物の被災特性について現地調査により検討した。得られた成果をまとめると以下の様である。

- (1) 本解析条件では、流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合、崩壊が一カ所の場合に比べて、表層崩壊による生産土砂量は6倍の違いがあるが、流域内で複数の崩壊が同時に発生した場合の宅地に到達した土量は、崩壊が一カ所の場合の土量に比べてわずか1.7倍である。これは、複数の崩壊が発生した場合、最初の土石流は十分に浸食される不安定土砂が河道の基岩の上に存在しており土石流の規模が大きくな

るが、二波目以降の土石流は、最初の土石流によって不安定土砂が浸食されているため、不安定土砂の少ない状態の溪流を流れ下ることになり、土石流の規模が大きくならないためである。

- (2) 比良松中学校周辺の河岸浸食は、河道湾曲により流速の速い流れが外岸側によることによる典型的な湾曲外岸の河岸浸食と考えられる。また、川幅・水深比が小さい河道の湾曲部およびその下流域は、交互に水衝部が形成されて河岸浸食を発生させるため、河川整備を実施する上で注意しておく必要がある。
- (3) JR久大本線の橋梁は、流路変動により、最右岸側の橋梁が流水域になり、橋脚周辺の河床の浸食によって倒壊し、橋桁によって連結された他の橋梁が橋桁に引っ張られて、下流方向に倒壊したと考えられる。そのため、橋梁の保守管理を実施する時に流路の変化についても注意するとともに、特に重要な橋梁については、流路形状の予測結果に基づいた橋梁倒壊対策を実施しておくことが重要である。

参考文献

- 1) 中谷加奈・小杉 恵・里深好文・水山高久：家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響—2014年8月に発生した広島土砂災害を対象として—, 砂防学会誌, Vol.69, No.5, pp.3-10, 2017.
- 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, 第64巻, 第4号, pp12-15, 2016.
- 3) 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.
- 4) 江頭進治, 佐藤隆宏, 千代敬三：砂粒子を高濃度を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.359-30, 1994.

謝辞

本調査を実施するにあたり、科学研究費補助金(特別研究促進費, 研究代表者:九州工業大学秋山壽一郎教授)の支援を受け現地調査を実施した。本稿の一部は同上報告書にも記載している。ここに記して謝意を表す。

SEDIMENT YIELD CHARACTERISTICS OF DEBRIS FLOWS AND SEDIMENT DISASTER DUE TO BED AND CHANNEL DEFORMATION DURING 2017 NORTHERN KYUSHU FLOOD

Hiroshi TAKEBAYASHI

Effect of multiple surface landslides on the flow characteristics of debris flow is discussed by use of field survey and numerical analysis. Additionally, sediment disasters due to bed and channel deformation which were happen during 2017 Northern Kyusyu flood. Results of numerical analysis show that multiple surface landslides affect on the sediment yield characteristics of debris flow well. Additionally, the possibility that channel shifts form local scouring around the bridge pier of JR Kyudai-honsen and causes the callapse of it is discussed.

桂川流域における土砂・氾濫災害の 現地調査と再現計算

川池 健司¹・山田 祐樹²・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 京都大学学部学生 工学部地球工学科土木工学コース (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:yamada.yuki.35u@st.kyoto-u.ac.jp

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

筑後川の右支川である桂川の流域では、平成29年7月九州北部豪雨災害において甚大な氾濫災害が生じた。災害後の現地調査により、桂川流域の西寄りに位置する支川の荷原川や新立川では50cm程度の浸水痕跡が見られ、河川の護岸が被災している箇所がいくつか見られたものの、土砂濃度はそれほど大きくはなかった。それに対し、桂川流域の東寄りに位置する妙見川では、1mを越える浸水痕跡が見られ、氾濫水は土砂を大量に含んでいたことがうかがえた。続いて、数値解析によって桂川流域の土砂・氾濫災害の再現を試みたところ、排水システムを考慮していないために浸水を過大評価してしまった箇所があるものの、流域の西側では土砂の堆積を考慮しなくても精度良く再現できた。ただし、土砂濃度の大きい妙見川周辺の氾濫状況は、土砂の堆積を考慮した解析でもうまく再現できなかった。

Key Words: *inundation, field survey, numerical simulation, sediment deposition*

1. はじめに

2017年7月5日に発生した九州北部豪雨災害では、福岡県朝倉市から大分県日田市にかけて局地的な豪雨に見舞われ、筑後川の右支川でとくに甚大な被害が生じた。とくに赤谷川や白木谷川や奈良ヶ谷川などでは、大量の土砂と流木が流出して下流に壊滅的な被害を与えた。降雨量が大きかったことは当然のことながら、それに加えて土砂と流木が河道内に堆積し、河床上昇を引き起こし、氾濫被害を助長したことが予想される。

それらの河川よりも筑後川の下流側（西側）に位置し、流域に多くの平地部を含む右支川が桂川である。桂川流域では、とくに下流の平地部で広範な内・外水氾濫が発生した。赤谷川や白木谷川ほどの人的被害や壊滅的な被害がなかったため大きな注目を集めるには至らなかったが、床上浸水家屋や河岸侵食などが多く見られた。同じ桂川流域の中でも、西側の荷原川や新立川では土砂濃度はそれほど大きくはなかったものの、東側の強雨域に近いところに流域を持つ妙見川からは大量の土砂が流出した痕跡があり、浸水深も他の河川に比較して大きくなるなど、同じ桂川流域でも異なる氾濫状況が見られた。

本研究では、桂川流域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、洪水と土砂による氾濫状況を数値解析によって再現し、土砂の流出による氾濫流への影響を検討することを試みる。

2. 桂川流域の現地調査

(1) 桂川流域の概要

桂川は、流域面積が約51km²の筑後川の右支川であり、福岡県が管理する二級河川である。途中で妙見川、新立川、荷原川などと合流して筑後川に流れ込む。流域内に水位観測地点は設けられていない。

(2) 現地調査

災害発生から2週間余りが経過した7月22～23日に、浸水痕跡等を記録することを目的として桂川流域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。浸水深に幅があるのは、一つの地点において複数個所で計測しているためである。

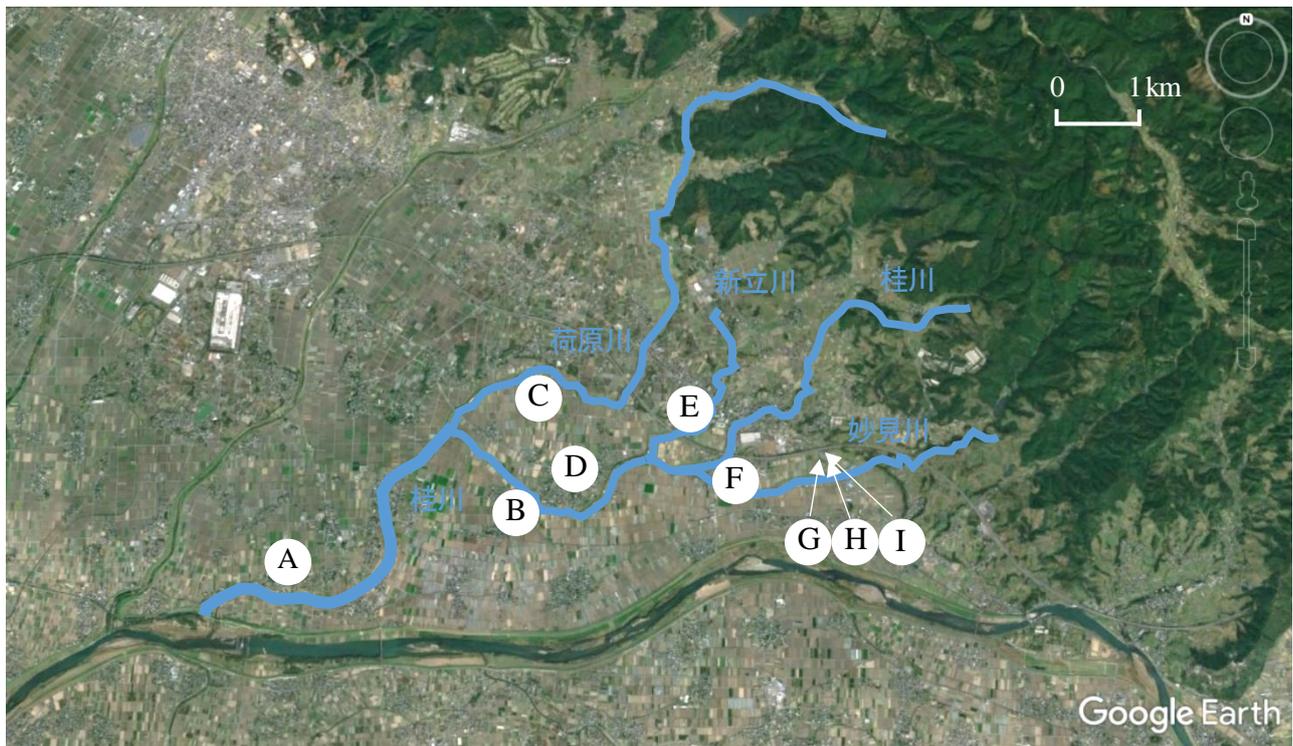


図-1 浸水痕跡の計測地点

表-1 各地点の浸水痕跡深

| 地点 | 浸水痕跡深 |
|----|----------|
| A | 0.5～1.0m |
| B | 0.6～0.7m |
| C | 0.4～0.5m |
| D | 0.4～0.8m |
| E | 0.4～0.5m |
| F | 0.5～1.1m |
| G | 1.2m |
| H | 1.3m |
| I | 0.8m |



図-2 新立川上流部の護岸の被災

a) 桂川下流域

道路面に土砂が薄く堆積していたほか、植生に薄く土砂が付着していた程度で、痕跡があまり明瞭でないことから、土砂濃度はそれほど大きくなかったことが推測される。水田も浸水した跡があり一部の稲が流失していたが、長時間の浸水がなかったのか、残っている稲は問題ないように見られた。水田に土砂が堆積している様子も見られなかった。

b) 荷原川, 新立川, 桂川中流域

河川の周辺で 0.4～0.5m 程度の浸水痕跡が見られた。ところどころ、河岸が侵食されて護岸が被災している箇所が見られた (図-2)。

c) 妙見川

F地点周辺の住宅地域において、1m程度の浸水痕跡が見られた。家屋や敷地内に堆積した土砂を片付けている様子が見られ、浸水痕跡がかなり明瞭に残っていたこ



図-3 妙見川上流部の河岸侵食

とからも、氾濫水の土砂濃度がかなり高かったことが推察される。G, H, I 地点の妙見川上流区間では河岸の侵食 (図-3) と越水した痕跡があり、また付近の水路が流木で閉塞していた影響などから、付近の家屋には道路面から最大 1.3m ほどの浸水痕跡が残っていた。

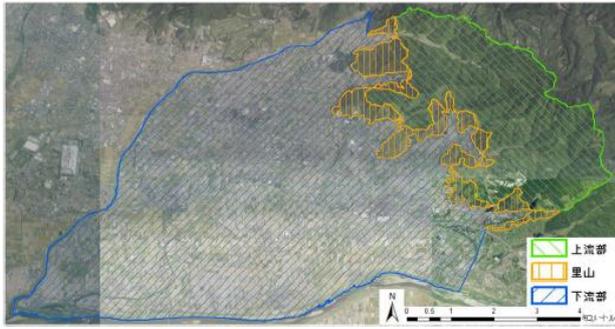


図-4 上流部, 下流部, 里山の解析範囲

3. 桂川流域の氾濫現象の数値解析

本節では, 数値解析により, 桂川流域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と土砂の流量を解析し, 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. 図-4は, 本解析における上流部, 下流部, ならびにその間の領域(以下, 「里山」)を示す.

(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. 斜面では雨水の流出のみを考慮して, kinematic wave モデルとして流量を解析し, それを横流入流量として河道内の洪水流量を計算する.

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.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

ここに, h : 斜面の水深, q : 斜面上の単位幅流量, r : 降雨強度, α , m : それぞれ係数で $\alpha = \sqrt{\sin \theta} / N$, $m = 5/3$ であり, θ : 斜面の勾配, N : 斜面の等価粗度である.

図-5は, 上流部ならびに里山において用いた河道と分割した斜面を示す. 斜面の総数は147である. ここでは, 国土地理院から発行されている10mメッシュの数値標高データを用いて流域分割した.

河道部分の河床には, 斜面の崩壊で生産された土砂が堆積していて, この渓床堆積物が洪水とともに流出する. 各河道の下流端における流量と土砂の体積濃度を出力し, 下流部の境界条件として用いる.

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.

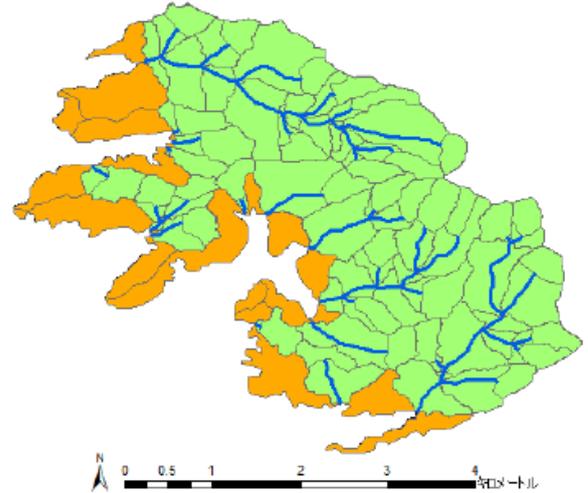


図-5 上流部および里山の流域分割

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = i + r \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} = iC_* \quad (3)$$

ここに, h : 河道の水深, u : 河道の流速, $M (=uh)$: 河道の流量フラックス, i : 土砂の堆積(侵食)速度, z_b : 河床標高, τ_b : 底面せん断応力, ρ_T : 流れにおける水と土砂粒子の混合物の密度, C : 河道流中の体積土砂濃度, C_* : 河床土砂の体積濃度である. 土砂の堆積(侵食)速度は, エネルギー勾配に応じて計算される平衡土砂濃度と河道流中の体積土砂濃度との比較から計算される. 底面せん断応力は, 高橋・中川²⁾にならひ, 土砂濃度に応じて抵抗則を変更する. なお, 土砂が流出するにしたがって侵食により河床は低下していくが, 本解析においては計算の安定のため, 侵食されただけ斜面から土砂の供給が起こると仮定して河床標高の変動は起こらないと仮定する.

図-5に示すように, 下流部の平面2次元氾濫解析に接続する河道の下流端は15ヶ所ある.

b) 下流部のモデル

下流部では, 桂川などの河道を含めた対象領域を三角形非構造格子に分割し, 土砂を含んだ氾濫流の挙動を解析する. 下流部の土砂・氾濫解析に用いた基礎式は下記のとおりである.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i + r \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_T} \quad (2)$$

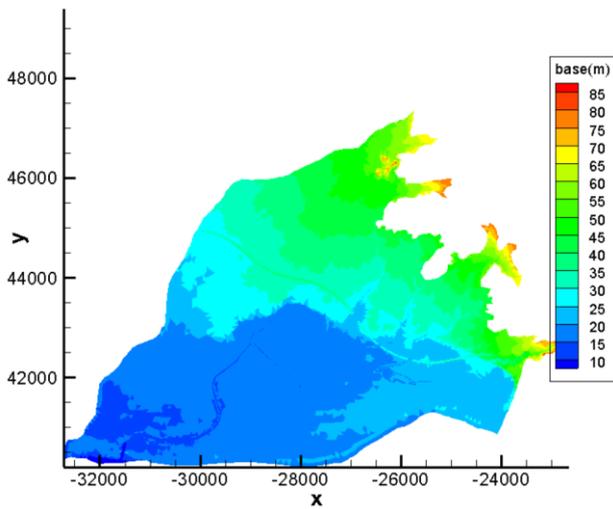


図-6 下流部の解析格子とその標高

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} + \frac{\partial(CN)}{\partial y} = iC_* \quad (4)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + i = 0 \quad (5)$$

ここに、 i ：土砂の堆積（侵食）速度、 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、 τ_{bx}, τ_{by} ： x, y 方向の底面せん断応力である。土砂の堆積（侵食）速度や底面せん断応力については、河道流の解析と同様である。なおここでは標高の変動を計算することで、土砂の堆積・侵食を考慮する。

対象領域は、71,760個の解析格子に分割した。このうち桂川などの河道として扱ったのは9,030個である。この各解析格子に、国土地理院の5mメッシュ数値標高データを用いて標高を与える。図-6に、解析格子の標高を示す。なお、河川の堤防高は数値標高データの値が直接解析格子に反映されており、河床高は現地調査で簡易に計測した掘り込み深さを各河川に与えた。

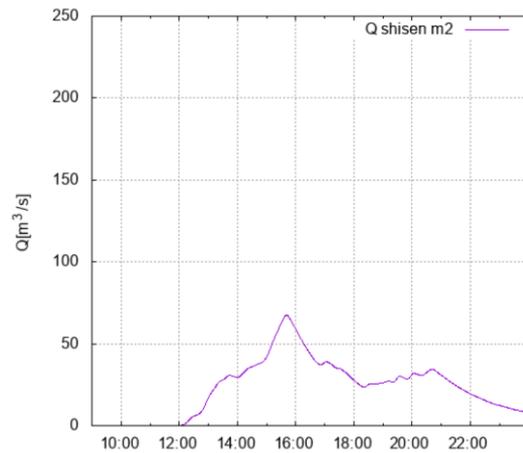
氾濫の外力は、気象庁のアメダスの朝倉地点で観測された10分間降雨ハイトグラフを一律に与えた。用いたハイトグラフを図-7に示す。桂川の下流端（筑後川との合流点）では、国土交通省の水文水質データベースから得た筑後川の片ノ瀬と荒瀬の水位を、桂川・筑後川の合流点までの距離で内挿補間して作成した筑後川の水位ハイドログラフを与えた。底面せん断応力や平衡土砂濃度の計算の際に土砂の粒径を考慮するが、ここでは一様粒径と仮定し、現地で採取してきた妙見川の氾濫による堆積土砂から得られた0.109mmを平均粒径として用いる。

(2) 解析結果と考察

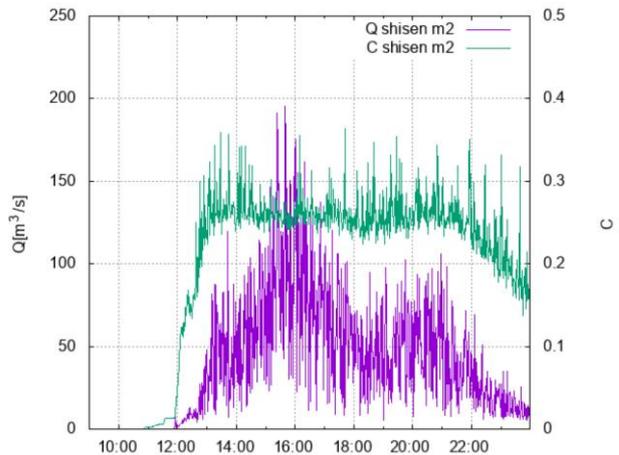
上流部における流出解析結果の一例として、妙見川の



図-7 アメダス朝倉地点で観測された10分間雨量



(a) 土砂を考慮しない場合の洪水流量ハイドログラフ



(b) 土砂を考慮した場合の洪水流量と土砂濃度ハイドログラフ

図-8 妙見川支川下流端でのハイドログラフ

支川下流端での洪水流量と土砂濃度のハイドログラフを図-8に示す。土砂を考慮した場合において数値振動がみられるが、土砂を考慮しない場合に比べて考慮した場合の方が全般的に流量が大きくなっていることがわかる。他の河道においても傾向は同様であった。

つぎに、この洪水流量と土砂濃度のハイドログラフを境界条件として、下流部の解析を行った結果を示す。図-9には7月5日13時、17時、7月6日0時の各時刻における浸水深を、図-10には最大浸水深を示す。

図-9より、5日13時の時点ですでに浸水が始まっているが、これはモデル上、水路等からの排水を考慮してい

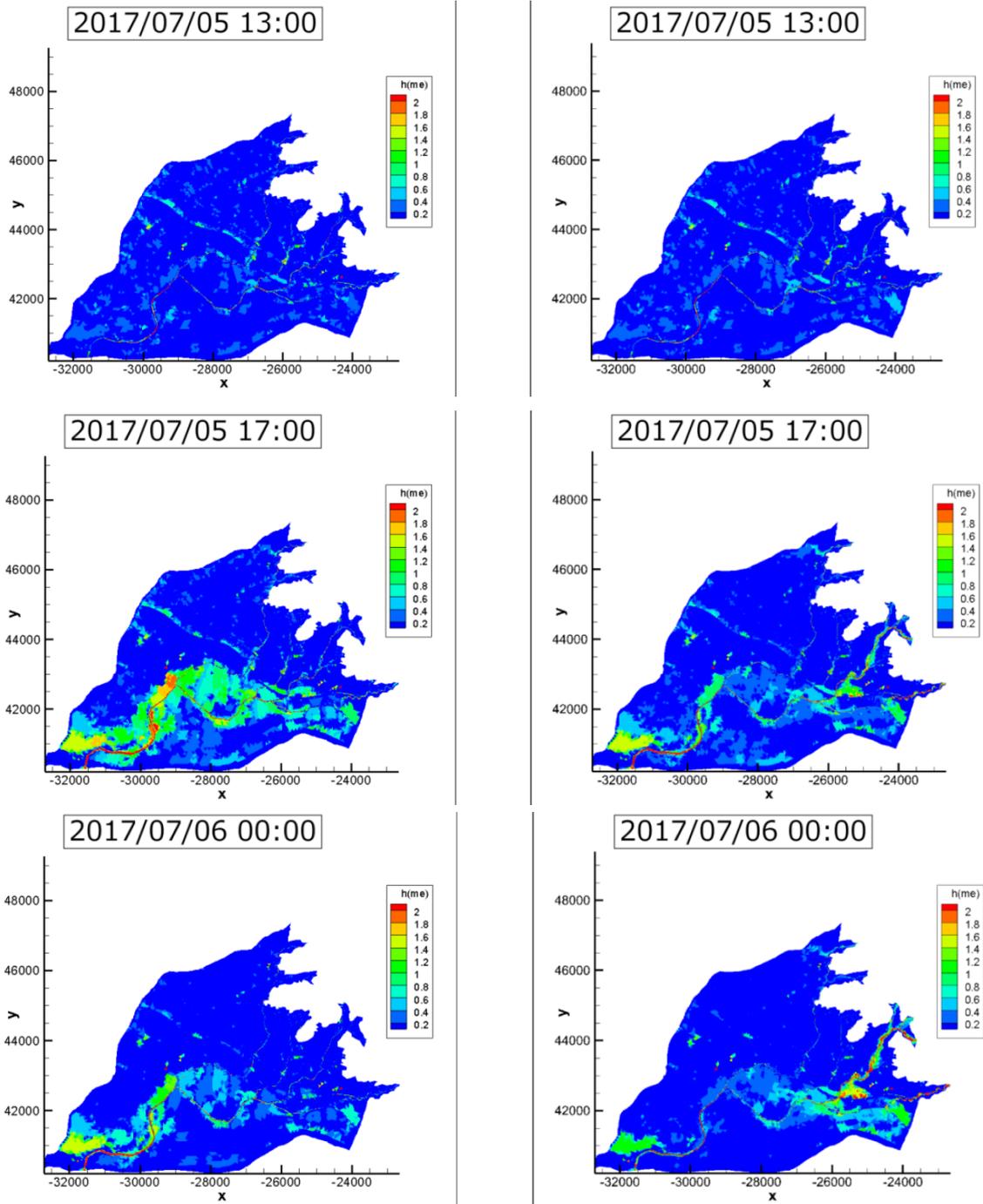


図-9 下流部の浸水深の時間変化 (左：土砂を考慮しないケース，右：土砂を考慮したケース)

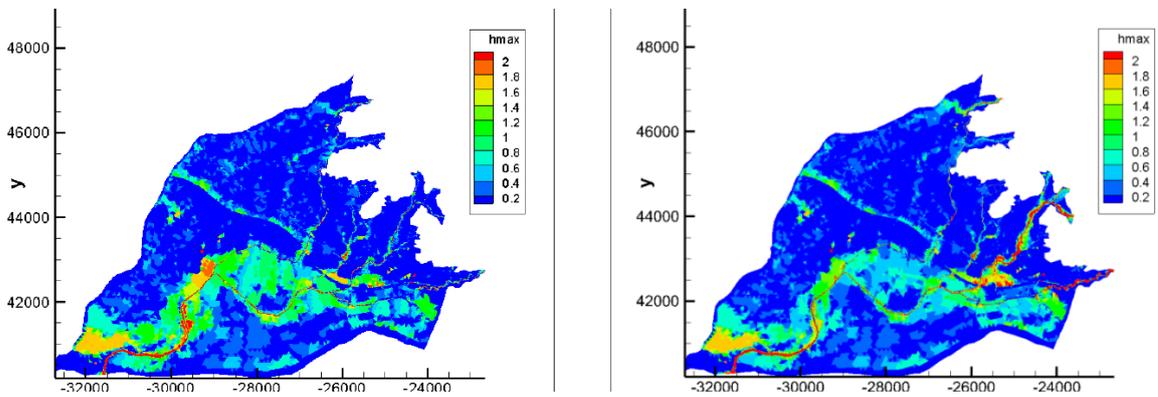


図-10 下流部の最大浸水深 (左：土砂を考慮しないケース，右：土砂を考慮したケース)

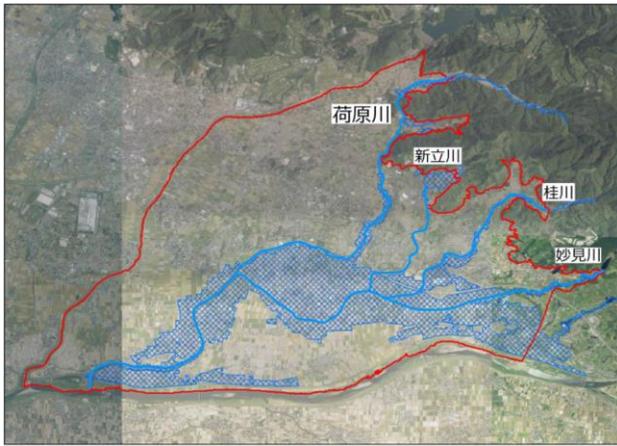


図-11 国土地理院が推定する浸水域

ないためと考えられる。5日17時ごろに浸水深のピークを迎えるが、土砂を考慮しないケースと土砂を考慮したケースで浸水箇所が大きく異なっている。土砂を考慮しないケースにおいては、桂川下流域で、とくに荷原川との合流点付近で大きな浸水がみられる。それに対して、土砂を考慮したケースでは桂川や妙見川において河床に土砂が堆積した結果、とくに桂川の周辺で氾濫が集中して起こったために下流にまで氾濫水が供給されなかったと考えられる。

つぎに、国土地理院の推定する桂川流域の浸水深を図-11に示す。これと図-10の最大浸水深を比較すると、土砂を考慮しないケースも土砂を考慮したケースも、浸水域はおおむね一致していることがわかる。ただし、妙見川周辺の浸水状況が解析では過小評価となり、桂川の最下流端付近ならびに土砂を考慮したケースの桂川周辺は逆に過大評価となっている。

表-1に示した現地調査による痕跡浸水深と、解析で得られた最大浸水深との比較を表-2に示す。地点A～Fでは、土砂を考慮しないケースも土砂を考慮したケースも、痕跡浸水深の範囲と解析結果は概ね一致している。地点G～Iは、両ケースの結果とも痕跡浸水深の過小評価となっている。妙見川においては、上流部で斜面崩壊が多数

表-2 痕跡浸水深と解析結果との比較

| | 痕跡浸水深 | 土砂を考慮しないケース | 土砂を考慮するケース |
|---|-----------|-------------|------------|
| A | 0.5～1.0 m | 1.069 m | 0.787 m |
| B | 0.6～0.7 m | 0.609 m | 0.719 m |
| C | 0.4～0.5 m | 0.533 m | 0.369 m |
| D | 0.4～0.8 m | 0.593 m | 0.577 m |
| E | 0.4～0.5 m | 0.400 m | 0.401 m |
| F | 0.5～1.1 m | 0.413 m | 0.735 m |
| G | 1.2 m | 0.203 m | 0.531 m |
| H | 1.3 m | 0.281 m | 0.412 m |
| I | 0.8 m | 0.204 m | 0.303 m |

発生しており、解析において発生土砂量が過小に計算されていた可能性がある。上流からの土砂の生産量の推定は今後の課題であるが、土砂を考慮することによって下流の氾濫状況が大きく影響を受けることは本解析結果からも明らかである。

4. おわりに

本研究の数値解析において、土砂の影響を考慮しない場合と考慮した場合で大きく異なる解析結果が得られた。従来の河道計画においては、土砂の影響が考慮されていないが、とくに土砂生産の多い中山間部では河床変動による洪水への影響は無視できない。今後は、単に洪水の流量のみを増加させる現在の浸水想定手法に代わる、河道の設計手法が必要と考えられる。

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.
- 2) 高橋 保, 中川 一: 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 新砂防, Vol.118, pp.1-128, 1979.

(2018.2.28 受付)

FIELD SURVEY AND NUMERICAL SIMULATION OF FLOOD AND SEDIMENT INUNDATION IN KATSURA RIVER BASIN

Kenji KAWAIKE, Yuki YAMADA and Hajime NAKAGAWA

In the Katsura River basin, one of tributaries of the Chikugo River, severe flood inundation happened in July, 2017. According to the authors' field survey, in the western area of the Katsura River basin, 0.5 m inundation mark and small sediment concentration was found. On the other hand, in the eastern area, we found several clear mark of more than 1 m inundation, and large amount of sediment deposition.

Numerical simulation was carried out to reproduce the situation of flood and sediment inundation. In the western part of the river basin, the calculated inundation area agreed well with the observed one even without sediment effects. However, in the eastern area with high sediment concentration, it was difficult to reproduce the inundation area and water depth even in the case considering the sediment effects.

寺内ダムの流木捕捉量の把握と 下流河道の洪水被害軽減効果の評価

角 哲也¹・鈴木湧久²・小木曾友輔³・小林草平⁴・竹門康弘⁵・Sameh
KANTOUSH⁶

¹ 京都大学防災研究所水資源環境研究センター教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:sumi.tetsuya.2s@kyoto-u.ac.jp

² 京都大学工学部地球工学科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:suzuki.waku.56m@st.kyoto-u.ac.jp

³ 京都大学工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:soccer.ogi@gmail.com

⁴ 京都大学防災研究所水資源環境研究センター特任助教 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:kobayashi.sohei.8u@kyoto-u.ac.jp

⁵ 京都大学防災研究所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)
E-mail:takemon.yasuhiro.5e@kyoto-u.ac.jp

⁶ 京都大学防災研究所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)
E-mail:kantoush.samehahmed.2n@kyoto-u.ac.jp

平成 29 年 7 月九州北部豪雨では流木被害が特徴の 1 つであったが、寺内ダムを有する佐田川流域では目立った被害が見られなかった。本報では、豪雨直後に寺内ダム上空で撮影された画像から、貯水池に貯留した流木のサイズや体積を簡易に推定する手法を示すと同時に、貯水池内の流木の空間分布を明らかにした。また、ダムがなかった場合（洪水調節がなく橋脚に流木が集積したとき）に氾濫が生じた可能性を数値計算により検討した。

空撮画像から推定された流木量は、現地で実際に撤去された流木量とほぼ同等であり、流木量推定に本報で新たに開発した手法が有効であることが示された。流木は貯水池上流域に集中し、中でも流木の密度やサイズに偏りがあった。数値計算により、佐田川流域における低被害には、寺内ダムによる洪水調節と流木貯留の効果が大きかったことが示された。

Key Words: drift wood, reservoir, wood accumulation volume, wood size, image analysis, TELEMAC-2D, bridge clogging

1. はじめに

平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、筑後川中流域右岸側の支川上流域で山腹崩壊による大量の流木が発生し、家屋や橋脚に集積することで甚大な被害をもたらされた。7 月 28 日に発表された国土交通省九州地方整備局による流木発生量の速報値は、10 河川の合計で 210,377m³ であり、その内訳は山林が 63%、溪畔林が 28%、河畔林が 6%であった。国土交通省水管理・国土保全局砂防部による本災害と過去の土砂災害との比較では、これまでの流木発生量は概ね 1,000m³/km² 程度以下であるのに対し、本災害では 288 の溪流中、約半数にあたる 134 の溪流が

1,000m³/km² を超え、最も多い赤谷川の溪流ではその約 20 倍に達した。流木は橋脚に集積するとともに、今回の豪雨では川から溢れた大量の立木が住宅に押し寄せ被害を大きくした。流木は貯水池内にも滞留し、撤去、処分に多大な時間と費用を要した。

本豪雨で筑後川中流域右岸側の赤谷川や花月川などの支川では、多くの場所で浸水被害が生じたが、寺内ダム下流の佐田川では、一部で護岸損壊の被害があったものの、他の支川に比べると目立った被害がなかった。寺内ダムは 1978 年完成の総貯水量 1,800 万 m³、高さ 83.0m のロックフィルダムで、独立行政法人水資源機構が管理する洪水調節・水道用水・灌漑用水が主の多目的ダムであ

【寺内ダムによる流木捕捉状況（H29.7.6 7:00頃）】



図-1 寺内ダムにおける流木の集積状況（上：集積範囲，下左：貯水池下流，下右：貯水池上流）

る。豪雨の発生前、寺内ダムは5月から渇水状態にあり、普段に比べ約10m水位が低かった。7月5日7時から6日4時までのダム上流の箸立地点の総雨量は412mmで、5日15時から16時までの時間雨量は106mmを記録した。これによって寺内ダムでは既往最大となる888m³/sのピーク流入量を記録した。寺内ダムは事前に低水位であったことが幸いし、ピーク流入時には約99%に当たる878m³/sの水を貯留し、ダム下流の河川水位を低減した。寺内ダム下流8.5km地点の金丸橋水位観測所における最高水位は3.50mで氾濫危険水位を下回った。水資源機構は、寺内ダムがなかった場合の金丸橋での最高水位は6.88mと推定しており、被害が発生した可能性があったとしている。また寺内ダムには、豪雨に伴い大量の流木が流れ込んだ。これらの流木は貯水池内に留まったため、ダムがなかった場合には下流側に流木災害が発生していた可能性もある。貯水池に集積した流木のほとんどは10月末までに撤去されその量は8,400m³に達した。

著者らは寺内ダム貯水池に集積した流木量に注目した。ダムによる流木捕捉量は、重機で実際に引き上げるまで正確には求まらず、通常は流木の処分にかかる費用を決められない。流木の流入後に捕捉量を素早く推定することができれば、災害復旧の計画も立てやすく有益である。本豪雨の直後に、水資源機構ではドローン飛ばし貯水

池全域の流木集積状況を画像に記録した。貯水池に集積した流木は水面に浮いているものが多く、空から確認しやすい。そこで、この空撮画像を用いて流木量を推定する手法の開発に取り組んだ。流木の推定量と貯水池から撤去実際の流木量を比較するとともに、流木のサイズや貯水池内空間分布について考察を行った。また、ダムが無かった場合に想定される河川水位や氾濫域を二次元水理解析モデルを用いて調べ、ダムによる洪水調節と流木貯留の効果を評価した。

2. 空撮画像を用いた流木サイズや量の推定

(1)使用画像

豪雨から約2週間後の平成29年7月19日に、寺内ダム貯水池上空においてドローンによる高度100m以上からの撮影が行われた。流木の大部分は貯水池の上流末端から河道域に集中しており、貯水池上流域の網場に到達した流木もみられたが、網場の下流側で流木は水面にまばらにあるか全く見られない状態であった(図-1)。なお、取水ゲートに流木は到達せず被害はなかった。

貯水池上流域においても特に流木が集中していた2箇所を中心にドローンによる撮影が行われた(図-1)。上

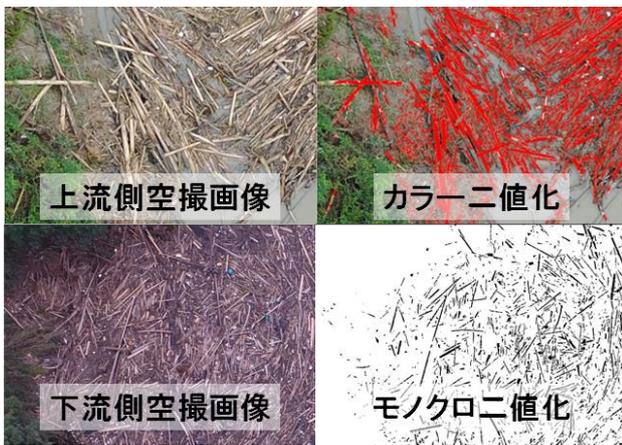


図-2 寺内ダムにおける流木の集積状況（上：集積範囲，下左：貯水池下流，下右：貯水池上流）

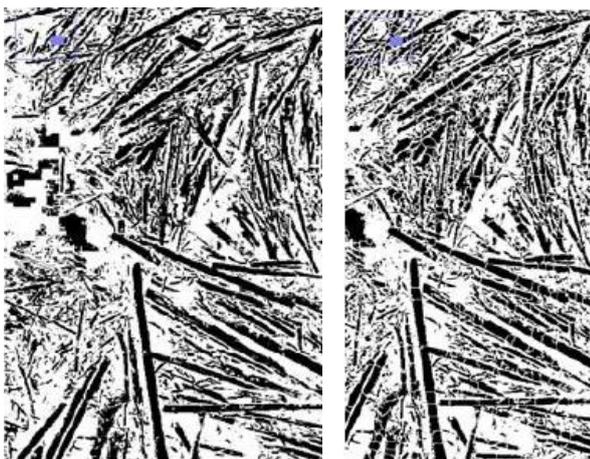


図-3 分水嶺変換前（左）と後（右）の例

流側は主に河道域で、下流側は貯水池上流末端部にあたる。上空からカメラを真下に向けた状態で 4,000 × 3,000 ピクセルの画像が計 150 枚以上撮影された。上流側と下流側では飛行高度が若干異なり、画像に写るドラム缶等のサイズが既知のものを利用して推定された解像度は、上流側は 28mm/pixel、下流側は 40mm/pixel であった。

(2) 流木抽出、流木量推定の手順

パブリックドメインの画像処理ソフトウェアである ImageJ を活用した。ImageJ は主に生物学の分野で利用されているほか、画像処理を必要とする様々な分野のプロジェクトにおいて広く活用されている。

空撮画像を 8bit のモノクロ画像に変換し、輝度閾値を用いて二値化することによって流木の機械的抽出を試みた（図-2）。輝度閾値を設定することで概ね流木の抽出は可能であったが、流木と同時に水域の一部が抽出される場合があった。このモノクロ二値化法で流木を抽出するためには、予め水域を除去する必要がある。

水域を除去することが困難な範囲には、色相によって

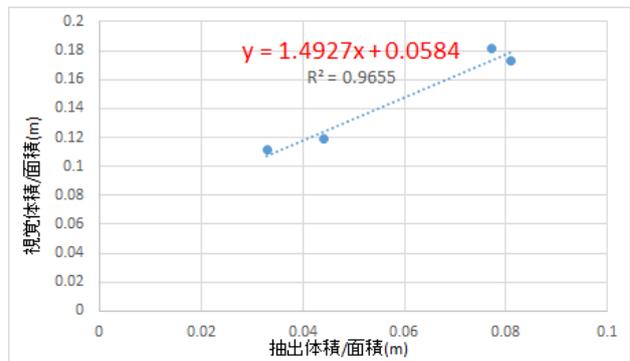


図-4 上流側の流木量推定の補正式

流木の機械的抽出を試みた結果、色相閾値を 30 に設定すると、流木だけが抽出された（図-2）。ただし、このカラー二値化法は色相閾値を決定することが難しく、上流側では色相閾値 30 で流木の流出に成功したが、下流側ではうまくいかなかった。また現時点で下流側の流木が抽出できる色相閾値の決定には至っていない。以上の理由より、寺内ダムでは下流側にはモノクロ二値化法を適用し、上流側ではカラー二値化法を適用した。

モノクロ二値化法もしくはカラー二値化法によって抽出した流木は、個々の流木に分割しサイズの自動測定を行った。画像上で流木が重なっている箇所では、重なり合っている流木群が大きな 1 本の流木として判定されてしまう。そこで Watershed 機能（分水嶺変換）を用いて、流木の重なりを分割した（図-3）。分水嶺変換により流木の重なりを分割できたが、同時に 1 本の流木が複数に分割されてしまう。これにより流木の長さの推定は難しくなるが、全体の体積の推定に対する影響は少ないと考えられる。Fit Ellipse 機能を用いて流木に楕円をフィッティングさせて楕円の長軸と短軸の長さから各流木の長さとし、円錐の形状を仮定し体積を求めた。

上記の機械的抽出では、流木の判定には幾分かのエラーがあることが画像を見て明らかであった。画像から標本を目視で抽出して流木の体積を計測し、機械的抽出による推定の補正式を求めた。画像の輝度閾値が 140～170 のとき、機械的抽出と目視判断による推定流木量の相関係数が 0.95 を超えた。当研究ではわずかに水域を抽出してしまうが、過剰抽出がなくなる輝度閾値 170 を採用した。抽出された流木の体積を流木による被覆面積で割った値（対象エリアに存在する流木を平滑に均した際の厚みを意味する）を物理量として補正を行った。補正式は最小二乗法により、上流側の補正式は $y=1.4927x+0.0584$ 、下流側の補正式は $y=0.5452x+0.0672$ と求められた（図-4）。

画像による流木抽出と体積推定の方法について図にフローチャートを示す（図-5）。

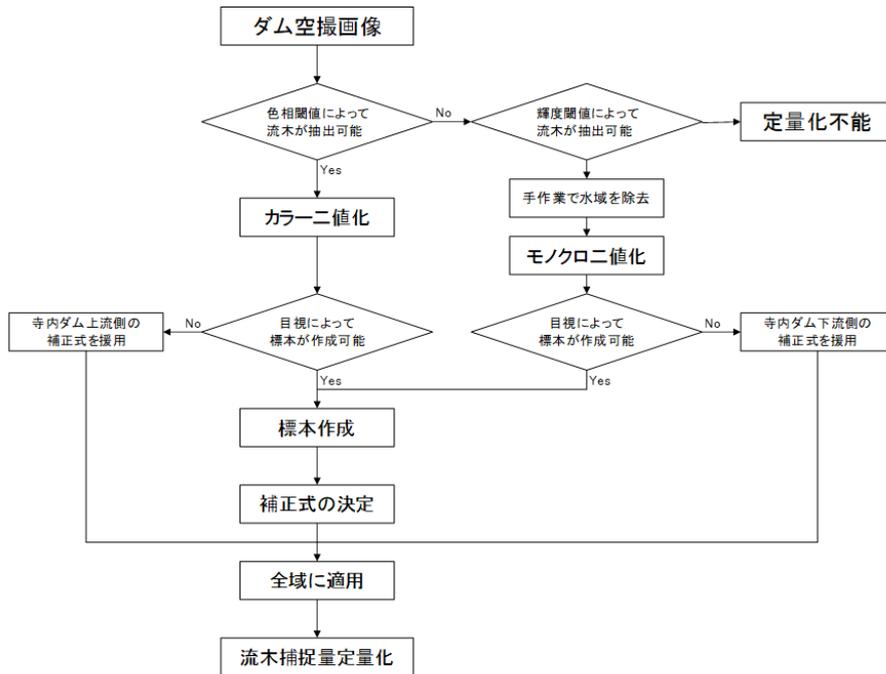


図-5 画像からの流木抽出と流木量推定のフローチャート

(3)推定流木量

カラー二値化法を適用して求めた上流側の流木捕捉量は 5,630m³、モノクロ二値化法を適用して求めた下流側の流木捕捉量は 2,107m³であり、合計で 7,737m³の流木量と推定された。平成 29 年 10 月末時点で、ダム湖から回収された流木は約 8,400m³と報告されており、回収量の約 92%と、ほぼ同等の流木量が推定された。

約 700m³過小評価になった原因として、空撮画像からは表面の流木しか抽出できないため、重なった流木を抽出できなかったことや、水深方向に立った流木の長さを実際よりも小さく計測してしまったことが考えられる。また、国土交通省九州地方整備局が平成 29 年 7 月 28 日に発表した佐田川流域の流木発生量の推定量は 19,010m³であることから、佐田川流域で発生した流木の 4 割強が寺内ダムに到達し、残りはダム貯水池より上流側河道内で捕捉されたとみられる。

独立行政法人水資源機構後川局が平成 29 年 7 月 28 日に発表した寺内ダムの流木捕捉量の速報値は約 10,000 m³であった。この速報値は流木が捕捉されている面積に、過去の出水時のデータに基づくダム貯水池による単位面積当たり流木捕捉量を掛けることによって求められた値である。回収量と比べると過大評価であるが、速報値としては良い値である。

(4)流木のサイズ

分水嶺変換を行ったために機械的抽出からは流木の正確な長さを求めることはできない。目視判定のデータより、上流側と下流側の長さや幹径の度数分布を表した。上流側は 4 枚の標本画像から計 824 本、下流側は 4 枚の標本画像から計 547 本の流木を計測した。

長さのピークは上流側が 1.5~2m、下流側は 1~1.5m、長さの中央値は上流側が 2.18m、下流側は 1.66m であることから、上流側で長い流木が多いことが分かった(図-6)。長さの最大値は上流側が 16.26m、下流側は 10.67m であった。長さが 5m を超える流木の割合は上流側が 7.4%、下流側は 2.2%であり、長さが 3m を超える流木の割合は上流側が 27.3%、下流側は 11.3%であった。

幹径は上流側も下流側も 0.15~0.25m でピークを示し、幹径の中央値は上流側で 0.21m、下流側で 0.22m であり、上下流の大きな違いは認められなかった。一方、最大値・幹径が 0.5m や 0.3m を超える流木の割合は下流側に比べ上流側の方がやや大きかった。

以上をまとめると長く太い流木は上流側で捕捉されやすく、短い流木や折れた流木は下流側まで辿り着きやすいということがわかる。河川においては流木全体や幹が漂流する場合よりも、折れた枝が漂流するケースが多いという報告とも一致している。

(5)流木の縦断分布

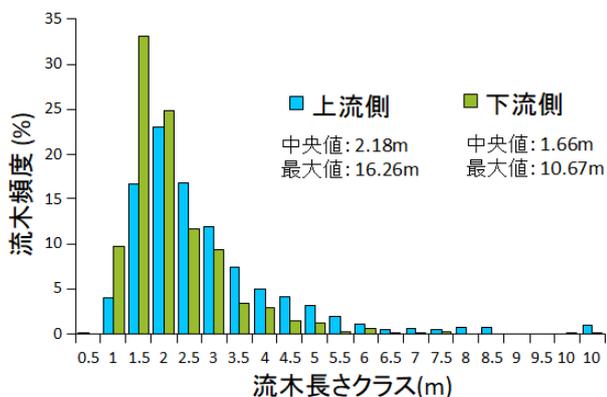


図-6 寺内ダムに集積した流木の長さ

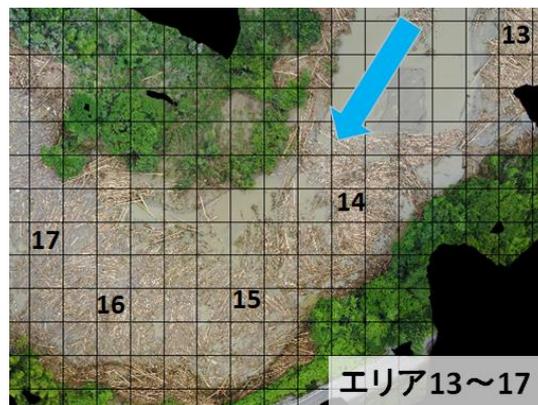


図-7 エリア抽出の例

空撮画像から 50 箇所の 100m³ のエリアを抽出し (図-7), それぞれ機械抽出により流木捕捉量を求めた. 上流からの距離をもとに縦断分布図を作成した結果, 上流から下流に向かって流木捕捉量が減少傾向にあった (図-8). 長く太い流木は上流側で捕捉されやすく, 短い流木や折れた流木は下流側まで辿り着きやすいためと考えられる. ただし, 上流からの距離が 0~900m にあるポイントでは, 流木捕捉量のばらつきが大きかった.

幹径~20cm,20~40cm,40cm~の 3 区分に分けると, 幹径が 40cm より大きい流木は, 全体の体積が大きいエリアに多く存在した. 一方, 幹径が 20cm 以下の流木量はエリアごとの増減が比較的小さかった.

上流側の川幅が狭まるエリアでは, 流木捕捉量が大きかった (図-9). ただし, 川幅が狭まるにも関わらず, 流木捕捉量は小さいエリアもあった. また, 下流側では網場に近づくにつれ川幅が広がる傾向にあるが, 下流側の流木捕捉量はほぼ一定であった. 上流側の 3つの大きなカーブ内に位置するエリアについて, 河道の曲率を求めたが, 曲率の大きいエリアの流木捕捉量は大きいという傾向は見られなかった. 水深が小さいエリアほど流木捕捉量が大きい傾向にあった.

また 1K800 地点では, 流木捕捉が見られなかった. 1K800 地点の水深の横断測量図を見ると, 左岸側に比べて右岸側の水深が大きくなっていることがわかる. これには 1K800 地点付近で左岸側から流入する支流の影響があると推測される. 支流との合流によって流速が大きくなり, この付近に流木が捕捉されなかったと考えられる.

以上より, 上流側の水深の浅い地点に長く太い流木が詰まりやすく, 下流側の網場付近には短い流木や折れた流木が浮かんでいると推察される.

3. 寺内ダムによる流木捕捉効果の評価

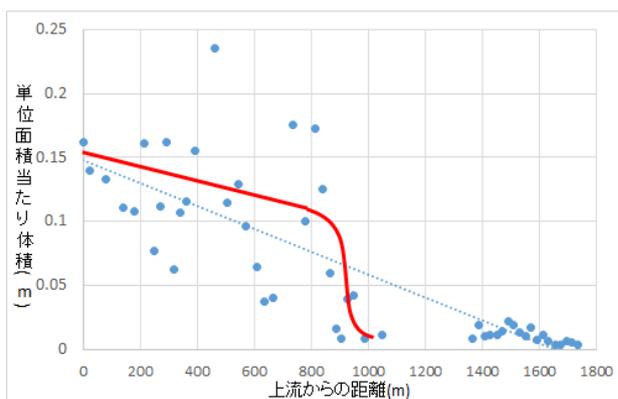


図-8 ダム上流部における流木の縦断分布

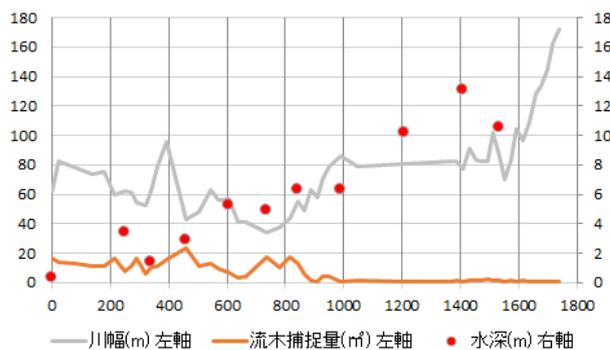


図-9 川幅, 水深と流木量の関係

(1) 想定した状況

本豪雨では佐田川流域では被害はほとんどなかったため, ダム貯水池による流木捕捉がどれくらいの効果があったのかは分からない. そこで, 数値計算により①実際の寺内ダムによる洪水調節が行われた場合, ②ダムがなく (=洪水調節が行われない) 橋梁に流木の集積がない場合, ③ダムがなく橋梁に流木の集積がある場合の 3通りについて, 水位上昇と氾濫域を比較した. なお, ダムによる流木貯留効果は, ②と③の差分を主に評価した.

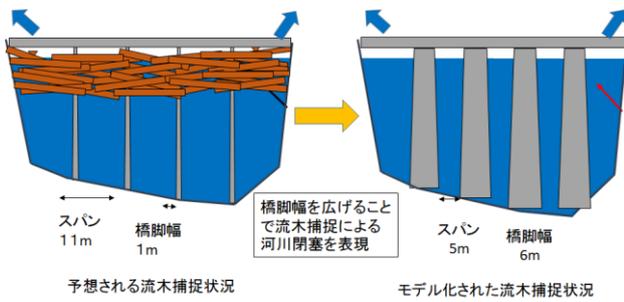


図-10 モデルにおける流木集積の設定

表-1 モデルで使用した各パラメータ

| Main Parameters | Model |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| メッシュサイズ | 3 m |
| 境界条件 | Open boundary |
| 粗度係数 (Strickler coefficient) | $27 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ |
| 計算時間 | 61200 sec |
| 間隙率 | 0.1 |
| 透水係数 | 1.0×10^{-6} |

(2)計算条件

数値計算には Electricité de France (EDF)が開発した TELEMAC-2D を用いた。このモデルは、非構造格子（三角形）に基づく有限要素法を用い、浅流方程式を解き二次元のシミュレーションを行うのが特徴である。対象は寺内ダム下流の佐田川流域で、上流端はダム直下、下流端は本流筑後川との合流部とした。地形データは、レーザープロファイラで得られた陸域の DEM と、河川横断測量のデータを組み合わせて作成した。モデルで用いた主要なパラメータを表に示す（表-1）。上流端における流量は、実際の寺内ダム放流量のヒドログラフ（①）、または寺内ダム流入量のヒドログラフ（②と③）を与えた。

寺内ダムから約 3km 下流にある屋形原橋に流木が集積することを想定した。予想される集積状況は、水面近くに流木が横に積み重なるものであるが、計算上は橋脚幅を広げることで河道の断面積を減らした。実際は橋脚幅が 1m でスパンが 11m のところ、集積した状況では橋脚幅を 6m、スパンを 5m と想定した（図-10）。

(3)計算結果

洪水調節がない場合、あった場合に比べて（いずれも橋梁での流木集積なし）、屋形原橋におけるピーク水位は約 1.5m 高く、複数個所で越流が起これり、その結果両岸から 200-300m の範囲で浸水が起これり、最大で 2m の水深が生じた（図-11、図-12）。

洪水調節がなく橋梁に流木集積がある場合、流木がない場合に比べて、屋形原橋におけるピーク水位は約 1m 高く、浸水深が最大で 1m 大きくなった（図-13）。

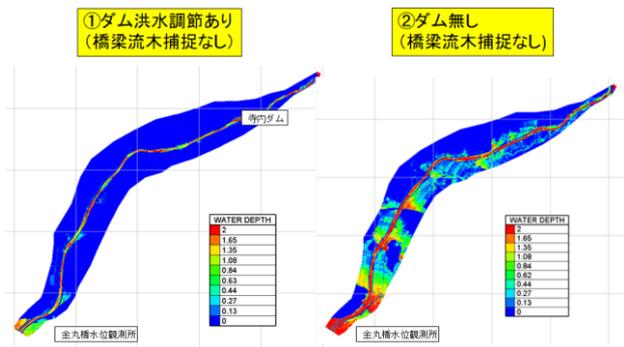


図-11 洪水調節ありとなしの計算結果

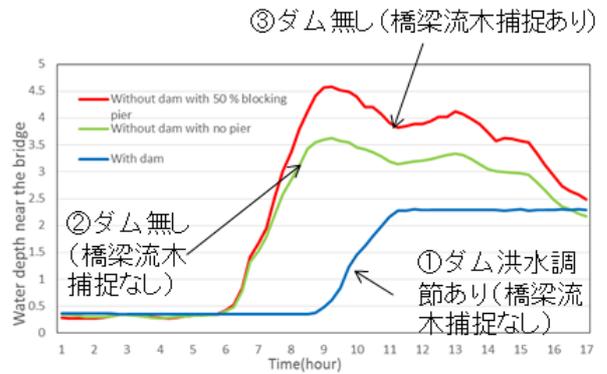


図-12 尾形原橋における水位の変化

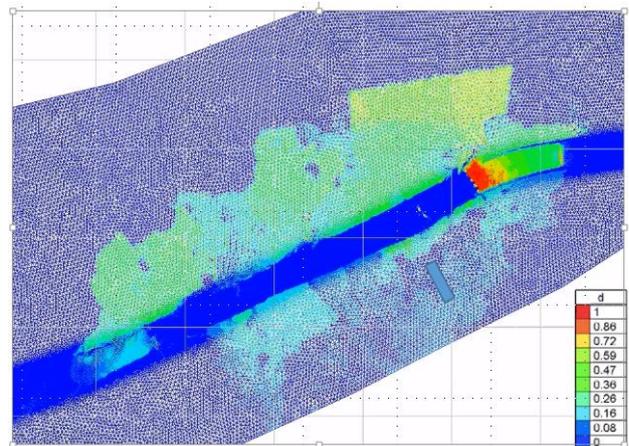


図-13 尾形原橋における流木集積有無による氾濫水深差

以上の結果は、本豪雨において寺内ダムによる洪水調節と流木貯留の効果は大きかったことを示すものである。

4. 結論

本研究では寺内ダム貯水池の上空で撮影された画像を用いて、貯水池に集積した流木の定量評価を試みた。画像からの個々の流木の機械的抽出、短径と長径を基にした体積の推定により、貯水池全体の流木量を推定したと

ころ、実際の流木撤去量とほぼ同じ値を得ることができた。水面下に潜った流木の部分があり、それが過小評価になった。貯水池に流入直後に素早く体積量を推定するのに本研究の手法が有効であることが示された。

画像解析により流木は貯水池の上流域に集中し、さらにその中でも上流側に長い流木が多く存在した、などの流木の縦断分布も明らかとなった。

本豪雨で筑後川支流の多くが氾濫により甚大な被害を受けたが、寺内ダムを有する佐田川流域だけ目立った被害がなかった。TELEMAC-2Dの数値計算により、寺内ダムがなかった場合（洪水調節なし、流木が橋梁に集積）を想定し、河川水位や氾濫域の検討を行った。その結果、洪水調節がなかった場合河川のピーク水位は1.5m高く、越流して兩岸200-300mに渡って浸水し、流木が集積するとさらに1m水位が高まり、氾濫の度合いが増すことが示された。このことは、本豪雨において寺内ダムによる洪水調節と流木貯留の効果が高かったことを示すものである。

謝辞：独立行政法人水資源機構寺内ダム事務所の方々には、現地を案内していただき、また画像をはじめとするデータや本豪雨の情報をいただき厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁：平成29年7月九州北部豪雨について、2017。
- 2) 気象庁：平成29年7月5日から6日に九州北部地方で発生した豪雨の命名について、2017
- 3) 国土交通省九州地方整備局：平成29年7月九州北部豪雨に伴う流木発生量（速報値）について、2017
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平

- 成29年7月九州北部豪雨と既往災害の発生流木量の比較、2017
- 5) 小松利光・山本晃一・財団法人河川環境管理財団：流木と災害発生から処理まで、技法堂出版、pp.16-20、2009
- 6) 総務省：ドローンの現状について、2016
- 7) 独立行政法人水資源機構筑後川局・国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統管理事務所：平成29年7月5日・6日の記録的豪雨における寺内ダムの防災操作の効果について、2017
- 8) 倉橋実・角哲也・永谷言・川村育男・石田裕哉・水野直弥：ダム貯水池における流木発生特性に関する研究、河川技術論文集、第23巻、pp.317-322、2017
- 9) 吉田登：ダム流木に関する考察と流木量推計の試み、和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告、第1巻、第1号、2017
- 10) 手計太一・佐々木謙吾・角哲也・竹門康弘・サメカントシュ・小林草平・藤田士郎・森田賢治：流木動態の解明手法の提案とH27年連携排砂時における黒部川下流域への適用、河川技術論文集、第22巻、pp.493-498、2016
- 11) 南まさし・二瓶泰雄・西島拓駿・片岡智哉・日向博文：最上川における漂流ごみ全体及び流木輸送量の把握と漂流ごみ対策技術の検討、河川技術論文集、第22巻、pp.499-504、2016
- 12) 三浦耕太・塚田祐基：ImageJではじめる生物画像解析、学研メディカル秀潤社、pp.8-11、2016
- 13) 独立行政法人水資源機構筑後川局：平成29年7月九州北部豪雨における寺内ダムの流木処理について、2017
- 14) 独立行政法人水資源機構：平成29年7月九州北部豪雨に対する水資源機構の対応、2017

(2018.2.28 受付)

Estimation of Driftwood Trapping in the Terauchi Dam Reservoir and its Mitigation Effects on Downstream Flood Damages

Tetsuya SUMI, Waku SUZUKI, Yusuke OGISO, Sohei KOBAYASHI, Yasuhiro TAKEMON and Sameh KANTOUSH

By the heavy rain in the northern part of Kyushu in July 2017, many rivers in the Chikugo River system were flooded and caused serious damage. In the Sata River located in the middle basin of the Chikugo River system, a large amount of driftwood flowed into the Terauchi dam due to the intensive flood. If driftwood had flowed into the downstream and had been clogged by the bridge piers, the Sata River might have overflowed in wide area near the bridges. Actually, there was little damage in the downstream area because Terauchi dam had effects of flood control and driftwood trapping. In this study, the quantitative estimating method was developed by using the image processing software, Image J, to estimate driftwood volume and sizes over the reservoir area. In addition, the influence of driftwood trapping by the Terauchi dam on the downstream flood damage reduction was estimated by using two-dimensional hydraulic TELEMAC -2D model.

情報・避難・災害対応

避難のためのマイスイッチ・地域スイッチ

矢守 克也¹・竹之内 健介²・加納 靖之³

¹ 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@dri.dpri.kyoto-u.ac.jp

² 京都大学特定助教 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: takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

³ 京都大学助教 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: kano@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

局所的かつ短時間に生じる豪雨災害における避難行動においては、専門機関や地元自治体が提供する防災気象情報にのみ依存するのは危険である。それらは有効活用されねばならないが、最終的には、個人、地域社会、組織（学校など）が、早期避難のタイミングや基準を「マイスイッチ・地域スイッチ」として自ら設定し行動することが重要である。平成 29 年九州北部豪雨でも、こうした仕組みによって人命を守った事例が複数存在する。「スイッチ」の設定にあたっては、専門機関から提供される防災気象情報のみならず、地域住民が自ら観察可能な現象や歴史災害の事例など、広範な情報を活用することが望まれる。今後数十年先の防災・減災を見据えた場合、防災気象情報本体の高度化よりも、「スイッチ」に資する情報の多様化・複線化が重要である。

Key Words: *evacuation, "my own signal," disaster information, early warning*

1. 「未曾有」か—平成 29 年九州北部豪雨

平成 29 年 7 月 5 日から 6 日にかけて、福岡県朝倉市、大分県日田市を中心とする九州北部地域を豪雨が襲った。同年 11 月時点でのとりまとめ資料によると、死者・行方不明者は 41 名に上った。

はじめに、自然現象として見たこの災害の特徴をおさえておこう。今回の事例に、「これまでにない」、「未曾有の」と形容したくなるような側面がまったくないわけではない。特に、朝倉市付近での雨量はまさに記録的なもので、朝倉市寺内で 5 日午後に観測された 1 時間降水量 169mm は、日本における最大記録（1982 年の長崎大水害において長崎県長与町で観測された 187mm）に迫るものだった。また、3 時間降水量約 400mm、12 時間降水量約 900mm も、気象観測史上最大級と言えるものだった。

しかし、今後の防災対策を考える上では、今回の集中豪雨がこれまでもたびたび繰り返し発生してきたタイプの災害でもあることを認識することも、同時に大切だと思われる。別の言い方とすれば、今回の災害は空前絶後の特異事例というわけではなく、これまでも似たような災害はあったし、これからも各地で同種の災害が起る可能性が十分あるということでもある。

このことは、次のような事例を思い起こしてみるとすぐに理解できる。平成 21 年 7 月 19 日から 26 日にかけての「中国・九州北部豪雨」（山口県内の高齢者福祉施設に土石流、死者 31 名）、平成 24 年 7 月 11 日から 14 日にかけての「九州北部豪雨」（熊本県阿蘇市などで大被害、死者行方不明者 32 名）、平成 25 年 7 月 28 日の島根県と山口県の大雨（死者行方不明者 4 名）といった事例である。加えて、少し年月をさかのぼるが、先にも言及した「長崎大水害」（昭和 57 年 7 月 23 日）も付け加えておこう。「長崎大水害」は、長崎市内だけで死者行方不明者 299 名（うち 262 名が土砂災害の犠牲者）を数えた大災害である。

ここに列挙した災害事例はすべて、九州北部（山口県を含む）を襲ったもので、いずれも豪雨をきっかけとした土砂災害で多くの犠牲者を生んだ事例である。かつ、すべて 7 月の梅雨末期に起こった災害である。また、長崎大水害を除けば、いずれもここ数年の間に発生した災害である。発生月は変わるが、平成 26 年 8 月、広島市北部の住宅地を襲い、死者 77 名を数えた土砂災害もこのリストに加えてもよい。

要するに、梅雨末期、太平洋高気圧の縁をまわりこむ形で九州北部に流れ込む暖湿気流や、そうした気流が積乱雲を次々と生み出し組織化した積乱雲群を発生させ、

数時間にわたってほぼ同じ場所を通過または停滞することで作り出される「線状降水帯」がもたらす豪雨災害は、けっして珍しいものではない。しかも、どの場所が危険エリアに入るかは、気圧配置や地形的条件によってさまざまに変化する。たとえば、太平洋高気圧の勢力がより強いと、このエリアは北方に移動する。「新潟・福島豪雨」（7月13日）、「福井豪雨」（7月18日）が相次いで発生した平成16年は、まさにそのようなケースであった。

2. マイスイッチ／地域スイッチ

(1) 防災気象情報の高度化？

平成29年九州北部豪雨で、被災地周辺には、数多くの災害情報が提供された。一部を列挙してみる。「大雨特別警報」「警報級の発表可能性情報」「記録的短時間大雨情報」「土砂災害警戒情報」「土砂災害警戒判定メッシュ情報」「大雨警報（浸水害）の危険度分布」「避難指示（緊急）」「避難準備・高齢者等避難開始」「×川×観測点水位情報」「×川氾濫危険情報」など。これだけたくさんあると「よくわからない、ついていけない」と感じる一般住民が多数いても不思議はない。

災害情報は、近年、専門家に言わせれば、どんどん「高度化」している。しかし、「高度化」とは、イコール、「複雑化」や「多様化」でもあって、極度に入り組んだ情報群は、気象や防災の素人である受け手にはかえって「使いにくい」という印象をもたれてしまっている。

実際、ある防災の専門家が、今回の災害を特集したテレビ番組で次のような発言をしていた。「みなさんも、大雨警報くらいならご存じでしょう。それ以外の聞いたこともないような名前の情報がゾロゾロ出てきたら、アブナイと思って下さい」。いささか乱暴な言いまわしが、筆者は的を射た指摘だと感じた。専門家はいざ知らず、一般の人が欲しいのは微に入り細をうがった情報ではなく、「まだ大丈夫なのか、それとも本当にアブナイのか」、次の行動につながるスイッチをオンオフしてくれる単純明快な情報だからである。

ただし、ここで、一般住民の側に立ったとき、最初におさえおくべき大原則は、そのような便利な情報が、専門機関（気象台や自治体）から与えられると思っはならないということである。スイッチは他人におしてもらうものではない。専門機関が出す情報を参考にしつつも、最終的には、住民が自前の「マイスイッチ」を作り、自らスイッチをおす。この覚悟と姿勢（を支援するシステム作り）が決定的に大切である。

(2) 九州北部豪雨の被災地から

九州北部豪雨の被災地に格好のお手本がある。それは、

朝倉市平榎地区（37世帯92人）の事例である（図1）。この事例については、NHKの番組¹⁾に詳細な報告があるので、ここでは、それに依拠して要点をまとめておく。



図-1 朝倉市平榎地区（床上浸水した家があった場所）
[竹之内撮影]

同地区でも、複数の住宅が流されたり床上まで浸水したりして大きな被害が出たが、住民は全員無事であった。その背景に、住民たちが自主避難のための「マイスイッチ」を作っていたことがある。実は、この地区は、5年前、「平成24年九州北部豪雨」で、小さな川のそばにある住宅が床上まで水につかる被害が出た。それ以来、住民たちは、この住宅の状況を避難のための目安（「マイスイッチ」）にしていたのである。住民同士すぐに声をかけ合って高い場所にある住宅に避難を始めた。すると、その約1時間後に濁流が地区を襲った。「マイスイッチ」が、早期の自主避難、人的被害ゼロにつながった。



図-2 東峰村鶴地区（橋脚の流失場所） [竹之内撮影]

類例は他にも存在する。筆者らの調査によれば、たとえば、日田市大鶴地区では、「水位計も何カ所かあるが、実際には地域の人の長年の感覚が重要となる。5年前にひどい目にあっているのだから、川を見たらわかる」との証言が得られている。また、東峰村鶴地区では、「コミュ

ニティテレビがあるが、光ケーブルが被害を受けて使えず、行政無線も何を言っているのかまったくわからなかった…少し北の橋は浸かりそうになることはあるので、大雨のバロメーターにはなっていた。今回も落ちてしまっている。過去に3、4回かけなおしている」との声があった(図2)。

いずれのケースでも、5年前にも類似の事象が発生した河川の様子、近所の橋周辺の状況が、自分の避難のための「マイスイッチ」、あるいは、集落住民の避難のための「地域スイッチ」として機能していたことがわかる。

(3) 秋田県大仙市に見る「職場スイッチ」

もう一つモデルになる事例を紹介しておこう²⁾。これは、平成29年7月23日、秋田県を襲った豪雨災害での事例である。大仙市にある特別養護老人ホーム「愛幸園」では、前年(平成28年)の台風10号による災害で、お隣岩手県の岩泉町のグループホームが濁流に飲まれ、お年寄り9人が亡くなった事例に学んで対策を練っていた。施設が平屋建てで逃げ場がないのに、近くを流れる雄物川が氾濫すると5mを超える浸水が予想されていたからである。愛幸園は、岩泉町の事例をうけて、平成28年10月には避難計画を策定、避難訓練も行っていた。

これが功を奏した。激しい雨が続き、雄物川の水位計が「あらかじめ決めていた基準」に達したため全職員を招集、訓練の手順に従って入所者のお年寄り81人を予定していた避難先の中学校まで無事避難させることができた。何でもない事例のように見えるが、示唆するところは深い。河川水位情報を「ホームページで公開」しただけでは道半ば以下で、それを見てもらうこと、避難判断に使ってもらうことまでケアしてはじめて防災・減災対策であることを知らねばならない。裏を返せば、河川水位情報本体を高度化・細密化するよりも、防災・減災上、はるかに重要な対策(コストパフォーマンスがよい対策)があることを、この事例は示唆している。

このように、本事例では、前もって決めておいた河川の水位(基準)が「マイスイッチ」としてうまく機能している。さらに付け加えておけば、一人一人がいくら「マイスイッチ」をもっても、人間だから、ついつい、「たぶん大丈夫だろう」、「今回は逃げなくていいかも」などと思ってしまうこともある。そこは、集落の中での声かけ(平復地区)、職場内での相互チェック(愛幸園)などを通じて、複数の人びとの連携でカバーする必要もある。「マイスイッチ」を、「地域スイッチ」や「職場スイッチ」にバージョンアップさせるのである。

3. 「平常時の利用」

災害情報の利用について大切なことをもう一つ追加し

ておこう。それは、「平常時」の利用が大切ということである。2節冒頭で列挙した数々の災害情報は、質量ともに豊富すぎてたしかにわかりにくい。

しかし、「災害情報はわかりにくい…」という不満をすべて、情報の提供者である気象関係者や自治体関係者に向けるのは一方的というものだ。責任の一端は、一般住民の側にもあるからである。特に、一般住民が、「平常時」、こうした気象情報をほとんど気にかけていない点は要改善である。多くの気象情報、河川情報、災害情報は、関係機関のホームページ等でいつでも見ることができる。たとえば、近くを流れる河川の水位情報を、日頃から折に触れてチェックしてみる。あるいは、ちょっとまとまって雨が降ったと感じたときに、「土砂災害警戒判定メッシュ情報」を眺めてみる。こうしたことを行うことで、「平常時」や「平常時」から少し逸脱した状況をベースラインとして知ることができる。

もっとも、「私はスマホも、パソコンも使わないから」という声があちこちから聞こえてきそうである。たしかにその通りで、専門家は、災害発生のたびに「高齢者が多く犠牲になっている、災害時要支援者対策が課題だ」との反省を口にしながら、出てくる対策は、ハイテクなもの、つまり、インターネットを駆使できることを前提にしたものが多い。しかし、肝心の高齢者の多くは、ネットと始終接点をもった生活などしていない。

そこで、筆者らは、ささやかではあるが、こんな活動をしている³⁾。それは、地域のスーパーマーケットや学校に、気象情報、河川情報などを「平常時」から気軽に見ることができるモニターテレビ(「地域気象情報モニター」と呼んでいる)を設置する試みである(図3)。



図3 スーパーマーケットに設置した「地域気象情報モニター」(三重県伊勢市) [竹之内撮影]

地域住民が「平常時」から立ち寄る場所にこうしたモニターを設置することで、「明日は雨…」と同じ感覚で、近くを流れる川の水位や、雲の動きを示すレーダー映像などを見てもらう。さらに、「××さん、これ知って

る？」とモニター前で井戸端会議が起これば、なおよい。「まさか」のとき（だけ）情報を見ても、その情報から「ただ事ではない」ことを察知することはむずかしい。「ふだん（平常時）」と「まさか（災害時）」とのギャップこそが、「ただ事ではない」ことを教えてくれるからだ。防災の専門家は、災害時だけでなく平常時から情報を見ている。だからこそ、上で紹介した発言にも見られるように、「これだけ多種多様な災害情報が同時に出ているのは、ただ事ではない、今こそ、避難スイッチをオンにすべきときだ」と気づくことができる。まさに、「小難を知って大難を避ける」である。

4. 「スイッチ」の策定を支援するシステム

以上を踏まえれば、今後は「マイスイッチ／地域スイッチ」の設定に資すると考えられる 3 種類の基礎情報—気象庁など専門機関から提供される既存の防災気象情報、地域住民が直接観察可能な環境変化に関する情報、当該地域の歴史災害情報—について、それらを有効に組み合わせて、住民が「スイッチ」を自主的に設定する作業を支援するための研究や実践が重要となる。

まず、既存の防災気象害情報については、現在提供されている情報群（たとえば、土砂災害警戒判定メッシュ情報など、最近新たに提供され始めた情報を含めて）については、先に強調したように、まずそれらの情報（平常時にも）一般住民に見てもらおうための仕組み作りが重要である。特に、情報の時系列変化とそれに対する反応について、第三者が事後的に回顧する視点ではなく、災害事象の渦中にある当事者がその時点で未来と見通そうとする視点に立って検証するための工夫が必要である。

たとえば、これらの情報を GIS マップ上で再現した動画等を作成し、情報の「スイッチ」としての有効性と課題について実証的に検証する作業などが有効かつ必要であろう。

次に、住民が直接観察可能な環境変化情報については、3 節で述べた「地域気象情報」のフレームワークを「スイッチ」に応用する方法の開発が求められる。また、地域の歴史災害については、古文書等の文献資料と最新のハザードマップとの重ね合わせ作業を行うなどして、歴史災害を将来を予測するための資料として活用するための仕組みを整備することが重要である⁴⁾。今後数十年先の防災・減災を見据えた場合、防災気象情報本体の高度化よりも、このような作業を通じて、「スイッチ」に資する情報の多様化・複線化とともに、防災気象情報をめぐる関係者の関係性を再構築することが肝要である。

参考文献

- 1) NHK : 「5年前の豪雨経験もとに住民が無事避難 福岡朝倉」 (2017年7月11日) <http://www3.nhk.or.jp/news/html/20170711/k10011054291000.html>, 2017.
- 2) NHK : 「時事公論」 「7月の豪雨から学ぶ ～九州北部豪雨1ヶ月～」 (2017年8月4日放映) <http://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/100/277098.html>, 2017年
- 3) 竹之内健介 : 地域気象情報というコミュニケーション 矢守克也・宮本匠 (編) 「現場でつくる減災学 : 共同実践の5つのフロンティア」 新曜社, 2016.
- 4) 加納靖之・竹之内健介・矢守克也 : ハザードマップへの歴史災害地点の重ね合わせ : 宇治市と朝倉市での例, 防災研究所平成29年度研究発表講演会, 2017.

(2018. ■. ■1 受付)

SETTING “MY OWN SIGNAL” FOR EARLY EVACUATION

Katsuya YAMORI, Kensuke TAKENOUCI and Yasuyuki KANO

It is not safe to rely totally on disaster informations (early warnings) provided by Japanese Meteorological Agency and local government in the case of evacuations from extremely local and temporal heavy rain disasters. This type of information should be utilized effectively, however, it is more important for local residents to set “my own signal” for early evacuation. We can find a couple of good practices in the 2017 heavy rain disaster in Northern Kyushu, in which local people saved their lives successfully by their own, based on a “my own signal” framework. It is necessary to make full use of various types of information, including historical knowledge on regional disasters in the past and actual observations by local people on on-going emergent phenomena. A radical reconstruction of the relationship between information producer (governmental organizations) and user (local people) is needed for future improvement of disaster reduction, rather than a straightforward advancement of disaster information technology itself.

住民行動の時系列分析を通じた災害情報のあり方に関する考察

—地域防災と災害情報の新たな連携—

竹之内 健介¹・加納 靖之²・矢守 克也³

¹ 京都大学特定助教 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: takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

² 京都大学助教 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: kano@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

³ 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

本研究では、平成 29 年九州北部豪雨の被災地において、地域住民が無事避難することができた成功事例等を対象に住民への聞き取り調査を行い、詳細な対応行動や無事の避難につながった背景等を確認した。併せて、当時の住民行動の時系列分析を行い、防災気象情報を中心とした災害情報との対応関係を分析した。調査の結果、成功事例では、地域独自の判断基準により住民自身で対応行動が取られているとともに、それらが地域で継続して定着するような防災文化に近い社会環境が存在していることが確認された。また時系列分析からは、実際にそのような地域独自の判断基準が災害時に有効に機能していることが確認された。これらの研究結果を踏まえ、地域独自の対応基準（地域の防災文化）を支援し、災害時に機能させる災害情報の検討と推進が必要と考えられる。

Key Words: local action, disaster prevention culture, time-line analysis, weather information

1. 背景と目的

2017 年 7 月 5 日に発生した平成 29 年九州北部豪雨の特徴として、降雨強度 100mm/hr 前後の猛烈な雨が局所的に継続し、筑後川に流れ込む各地の支川沿いを中心に被害が発生した点が挙げられる¹⁾。このような局地的で短時間に発生する豪雨災害では、避難情報も重要であるが、地域の危険に住民自らが早期に気づき行動することが重要となる。実際、朝倉市平槻地区では、平成 24 年九州北部豪雨の経験を活用し、自主的な避難行動がなされたことが報道されている²⁾。

一般的な災害調査は、災害による被害状況や災害の発生要因など、災害を既に起きた事実として、現在から過去を振り返るバックワード型の視点で行われることが多い。一方で、災害時の適切な判断や避難の成功事例など、当時の当事者の視点から災害をこれから起こるものとして、過去から未来を振り返るフォーワード型の視点については議論が十分でない。しかし、今後の災害対応を鑑み、このような地域や個人の成功事例としての災害対応を調査分析することは、「住民を救う」ために何が

できるかという住民にとって受動的な方策ではなく、「住民が行動する」ために何ができるかという住民にとって能動的な方策への転換を促す上で有効であり、またそのために有効な災害情報の開発につながりうる。

本研究では、2017 年九州北部豪雨における地域の特徴や経験を活かし、無事避難することができた災害対応事例について調査を行い、「地域の防災文化」とも言える独自の地域の災害対応の特徴やその形成要因を確認し、また当時の住民行動について時系列分析を行い、各種災害情報との対応関係を比較する。そして、これらの結果を基に、今後の災害情報のあり方について考察する。

2. 調査方法

(1) 調査対象

平成 29 年九州北部豪雨の被災自治体である朝倉市、日田市、東峰村の数地区を調査対象として、事前に著者らにて選定した。また現地調査の状況に応じ、現地にて数地区を追加し、計 7 地区を調査対象とした。調査対象

を図-1 に示す。またそれぞれの地区の特徴を表-1 に示す。

(2) 調査内容

調査は、2017年9月7日から8日の2日間にかけて実施した。調査では、調査対象地区の住民を訪問し、半構造化インタビュー形式で、対面式の聞き取りにより実施した。聞き取り時間は、対象者により異なるが1時間前後である。なお、本研究は地域の災害対応を量的に分析するのではなく、地域の取組状況や当時の災害対応を把握することが目的であるため、調査対象人数は特に定めていない。ただし、当時の地区の状況を把握していた住民を中心に聞き取り調査を実施した。

主な調査項目は、「地域独自の取組や災害時の判断基準」および「災害発生当時の対応状況」である。また補足として、「災害時の防災気象情報の活用状況」および「地域の災害史」についても確認している。これらの調査項目を基に、個人や地域の災害発生当時の対応状況や地域防災の取組状況を把握するとともに、災害に対する

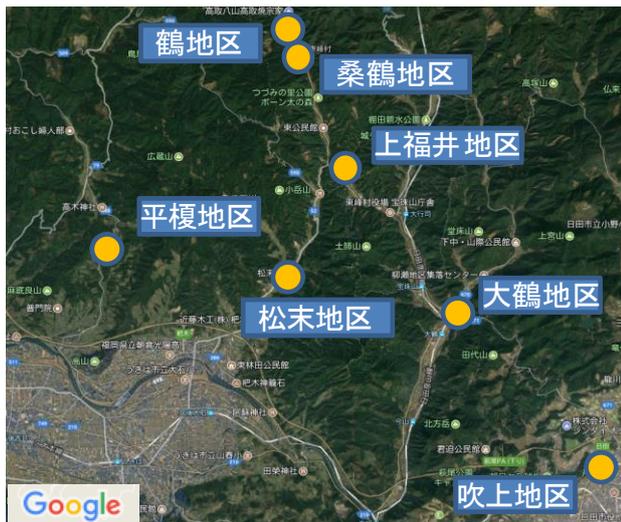


図-1 調査対象地区

意識や地域防災の取組などの背景を分析し、地域社会が災害に備える上で重要となる視点や要素を確認した。

3. 調査結果

(1) 災害対応と地域社会の関係性

各調査対象地区における聞き取り調査の結果を表-2 に示す。

(a) 地域の取組及び災害時の地域独自の判断規準

聞き取り調査から、地区における防災への取組については、多くの地区が行政主導の避難訓練を主体としており、自治会自身で特徴のある取組を行っていたのは日田市吹上地区だけであった。一方で、防災に関係のない、地域の連携につながる日頃の取組はそれぞれの地区で内容が異なっていた。朝倉市平履地区では柿農業に関連する作業を通じた連携、大鶴地区では防犯パトロールや農業を通じた連携、日田市吹上地区では子どもや高齢者の見守りなどを通じた連携、東峰村の3地区では集落内に

表-1 調査対象地区の特徴

| 地区 | 特徴 |
|----------|--------------------------------------|
| 朝倉市平履地区 | 5年前の豪雨災害時の教訓を活かし、地域ぐるみで避難した。 |
| 朝倉市松末地区 | 本災害により甚大な被害が発生した。 |
| 日田市大鶴地区 | 豪雨災害を受け、今後地域防災の取組の推進を検討している。 |
| 日田市吹上地区 | 5年前の豪雨災害以降、地域防災の取組を見直した。 |
| 東峰村上福井地区 | 東峰村地域福祉計画に基づき地域の支えあい・助け合いの取組を実施している。 |
| 東峰村桑鶴地区 | |
| 東峰村鶴地区 | |

表-2 各地区における地域の取組の特徴

| 地区 | 防災の取組 | 地域の結びつき | 地域独自の判断基準 |
|----------|-------------------|------------------------------|---------------------------|
| 朝倉市平履地区 | — | 柿農業などを主体とした日頃の連携 | 小川の様子・傍の家屋の浸水状況(過去の災害経験) |
| 朝倉市松末地区 | 避難訓練 | — | — |
| 日田市大鶴地区 | 避難訓練 防災士の活用 | 防犯パトロールや農業を通じた連携 | — |
| 日田市吹上地区 | 100人体制の自治会組織による取組 | 先人から引き継いだ団結力 見守りを通じた日頃の連携 | 目の前を流れる川の様子(日頃の感覚) |
| 東峰村上福井地区 | 避難訓練 消防訓練 | 各集落の日頃の助け合い | — |
| 東峰村桑鶴地区 | 避難訓練 | 同上 | — |
| 東峰村鶴地区 | 避難訓練 | 同上 | 近所の小さな橋の水没状況(過去の経験・日頃の経験) |

※「—」は、本調査においては確認できなかったことを意味する。

おける日頃からの家族同士のような助け合いが確認された。

平成 29 年九州北部豪雨において、地域独自の判断基準により実際に地域で対応した事例は、今回の聞き取り調査では 3 地区で確認された。朝倉市平覆地区では 5 年前の豪雨経験を踏まえた判断基準が、日田市吹上地区では目の前に位置する花月川に対する日頃の感覚が、東峰村鶴地区では豪雨時に水没する橋の浸水状況などが独自の判断基準となっていた。これらの 3 地区の独自の判断基準の特徴として、特に明文化したり明確なものを決めてはならず、日頃の感覚や過去の経験を活かしているという点が大きな特徴と言える。

これらの地区ではその判断基準への意識を風化させない仕組みも形成されていた。朝倉市平覆地区では、5 年前に住民同士で土嚢を積んだ経験があり、この共同作業を通じた判断基準の形成は、共同作業があったからこそ地区の判断基準となり、住民の意識に根付いた可能性が高い。日田市吹上地区では、地域が連携することが以前から一つの地域の文化となっており、その団結力が地域の判断基準を本当の意味で地区全体の災害対応の判断基準と成らしめていると言える。東峰村鶴地区では、小さな集落という点と度々発生する前兆現象が独自の判断基準を地区全体の基準として自然と認識されるに至っていたと考えられる。そして、これらの 3 地区では、他の地区と比較して、事前の災害対応に着実につながっていたという点は注目すべき点と言える。

(b) 平成 29 年九州北部豪雨災害時の対応

本聞き取り調査から災害発生時、様々な対応が取られていたことが確認された。その中でも多く確認されたのは、各地区での助け合いと連携である。本災害は特に筑後川に流れ込む多数の谷沿いの集落において山地洪水が発生し、これらの地域で特に被害が多くなった。このような谷沿いの地域では、集落が分散している場合が多い。実際、これらの集落では隣接地区との交通及び連絡手段が途絶し、各集落で対応を迫られた状況が聞き取り調査においても確認されている。一方、日田市吹上地区は比較的土が開けた地域であり人口も比較的多いため、他の調査対象地区とは異なり、地区内の各班で組織的に対応が取られていた。

それぞれの避難等の行動時期は、独自の判断基準を活用した場合を除き、基本的に行政の避難情報に合わせて行動が取られていた。本災害では、過去の災害事例と比較した場合に、比較的早い段階で避難情報が発令されていた。しかしながら、実際には避難情報が出た時点では既に取れる行動が限られていた地区も確認される（朝倉市平覆、東峰村 3 地区）。このような場合、それぞれの地区及び個人の対応が生還につながっており、その対応

内容によっては人的被害につながった可能性も十分考えられる。このような場合、どのような対応行動を採るのかある程度決めておくことがより生還につながる確率上昇につながると考えられる。

高齢化が顕著な地域の場合は、特に対応行動が限定される可能性がある。本調査においても、朝倉市平覆地区、日田市吹上地区、東峰村 3 地区では高齢者を助ける体制が取られたことで人的被害の軽減につながった可能性が高い。東峰村の東峰村地域福祉計画による高齢者支援にあるように、高齢者は特に対応行動をどのように採るか、取れないなら地区としてどうするか、そういった事前検討は特に重要と考える。

(c) 災害時の防災気象情報の活用

本調査において、防災気象情報の活用についてはあまり確認されなかった。関連する情報として確認されたのは、朝倉市平覆地区における今後の降水予想（TV から情報と思われる）、日田市吹上地区における花月川上流の河川ライブカメラのみであった。無論、各個人により何らかの情報を利用して可能性はあるが、少なくとも地域の災害対応に直接的に利用されていたわけではないようである。水位情報についても、「水位情報を見なくても家の前を見ればそれでわかる」という発言は、確かにそうであると思う一方で、住民にとっての防災気象情報の対応行動への利活用意識の低さも併せて感じさせる言葉である。

一方で、本災害事例では、前日の 7 月 4 日から大雨警報（浸水害）や洪水警報の危険度分布の運用が気象庁により開始されており、地域性を評価できる危険度分布情報が地域においても利用できたのではないかという議論も聞かれる³⁾。しかしながら、これまでも繰り返されている議論であるが、本調査結果から言えることとして、情報が利用できたかどうかは重要ではなく、住民が利用できる情報として認識かつ利用できる条件になっているかということが非常に重要である。つまり、自然科学情報として伝えるだけでは地域の災害対応行動との関係が十分に形成されない可能性がある。地域の独自条件など、地域の災害対応や過去の災害経験等の防災文化と結び付けて認識できるようにシステムを形成するという点が非常に重要である。

(d) 地域の災害史の地域防災への活用

100 年以上前の地域の災害史の地域防災への活用については別途の報告とし⁴⁾、本調査では、調査対象者から言及のあった平成 24 年九州北部豪雨及び昭和 28 年筑後川洪水の事例が、住民の中で本災害においてどのような意味を持っていたのか確認する。

平成 24 年九州北部豪雨が発生したこともあり、この

5年前の災害はまだ記憶に残っていた可能性が高く、本調査においても5年前と比較する発言がいくつか確認された。肯定的な意見としては、朝倉市平槻地区における5年前の災害経験を活かした避難行動、日田市吹上地区における災害対応の見直しが挙げられる。日田市大鶴地区においては言及はあったものの、本災害においてどのように活用されたかは不明であった。一方、山間部の高齢者においては、5年前よりも昭和28年の筑後川洪水と比較する場面がいくつか確認された。5年前の平成24年九州北部豪雨では山間部での降水はそれほどひどくなく、むしろ昭和28年の筑後川洪水の際に山地洪水に近い現象があったため、この災害との比較がなされたようである。

このようなことから、住民はある程度被害が発生した場合の事例を基に災害対応を検討する傾向があり、日頃の小規模な災害との比較は東峰村鶴地区の落橋以外確認されなかった。一方で、本災害のように近年これまでに経験したことのないような降雨パターンによる災害事例も多く見られ、過去の事例との比較が逆に安心感や地域の災害リスクの固定化につながる可能性もある。そのため、地域の災害史を通じて地域の災害リスクの認識を向上させるだけでなく、それを超えるような災害が発生し

た場合にどのような行動が取れるのか、過去に経験した災害リスクにとどまらない地域の災害を考える地域防災につなげる必要がある。

(2) 災害対応と防災気象情報の時系列分析

聞き取り調査の結果を踏まえ、実際に地域独自の災害対応基準がどの程度有効に機能したのか、住民行動の時系列分析を行った。時系列分析では、聞き取った内容を、個人や地域によるもの、生活行動・災害認識・防災活動・避難行動等に分類した。また、併せて洪水警報の危険度分布・大雨警報（浸水害）の危険度分布・土砂災害警戒判定メッシュ情報（以下、危険度分布情報と言う）の3つの防災気象情報および自治体からの避難情報などの災害情報との対応関係を評価した。図-2に朝倉市における地域独自の判断基準が有効に機能した事例と個人の判断に依存していた事例について、時系列分析の結果を示す。

地域独自の判断基準が有効に機能した事例では、13時台に地域独自の判断基準により、災害が地域内で認識され、地域による防災活動が開始されている。この時点では、危険度分布情報も警戒を示す赤色に留まっており、自治体からの避難情報も発表されていない。その後、災



図-2 被災地における災害発生当時の対応状況の時系列分析結果

害が拡大するに連れて、15時台には地域の対応も避難行動に移行し、17時台には避難が完了している。

一方で、個人の判断に依存していた事例では、個人の判断で災害認識が行われている。この場合、聞き取り対象者は、14時台に別の住民から「避難した方がいいよ」という声掛けが行われているが、結果的に災害認識までは至っていない。その後、災害が拡大し、17時台になってようやく今回は危険だという認識に至っている。また地域による防災活動も今回の聞き取りでは、17時台に見回りが行われたという程度に留まっていた。この時点では、危険度分布情報もすべて「極めて危険」を意味する濃い紫色となっており、避難指示も出されている状況となっていた。

このように、時系列分析の結果、地域独自の判断基準が有効に機能した場合、仮に各種防災情報が発表されていないまたは行き渡っていない状況においても、地域独自の判断で的確な避難行動につながっていることがわかる。一方、地域での対応行動が明確になっておらず、結果的に災害対応が個人の判断に依存している場合、個人間で災害への認識が異なっていることが、結果的に避難の遅れにつながっていることがわかる。東峰村では、特に停電や携帯の不通等が顕著であったことが聞き取り調査で確認されており、地域独自の判断基準は、情報が途絶した場合の対策としても有効に機能し得る点も重要である。

4. 地域の防災文化と災害情報の文化

前節の聞き取り調査結果および時系列分析の結果を踏まえ、地域独自の判断基準が「地域の防災文化」として定着し、有効に機能する条件の検討を行った。

災害時の行動プロセスについては、行動意図の規定や不安感の形成など様々な視点からの研究が存在するが⁹⁾、多くに共通するものとして、災害認知過程とその条件が挙げられる。

今回の豪雨災害の重要な特徴の一つとして、冒頭でも触れたように、当該被災地域では5年前にも大規模な豪雨災害を経験しているという点が挙げられる。また、当該被災地域は、従来から水害多発地帯として知られている。このようなことから、今回の豪雨災害においても、住民の意識は比較的高かったことが予想される。そのため、災害認知過程において、認知に至る条件つまり①地域独自の判断基準がどのように形成されたのか、そしてそれがどのようにして地域内で継続したのか、つまり②防災文化として定着し得たのが重要となる。ここでは、聞き取り調査において有効に機能した地域独自の判断基準（地域の防災文化）と十分に利用されなかった災害情報の両者について、この2つの視点から考察する。

朝倉市平槻地区では、5年前の災害経験により、災害イメージが住民間で共有され、柿農業を通じた日常的なつながりが潜在的にその共通認識を地域社会で継続させることにつながっていた。日田市吹上地区では、地区のすぐ傍を流れる花月川の変化という日常の感覚に基づく変化が判断基準となっており、長年に渡って築かれてきた地域内での協力関係や日頃の様々な取組がそういった防災意識を潜在的に継続させることにつながっていた。東峰村鶴地区では、度々発生していた地域住民が利用する橋の流出経験が判断基準となり、それが日頃の集落内の緊密なつながりを通じて、共通する認識として、潜在的に継続されていた。このように、それぞれの地区により、その地域の判断基準やそれが共有および継続される社会的環境は異なるものの、地域の防災文化につながる特徴として、「地域内で共通する災害想起要因の存在」および「それが潜在的に継続する社会環境」が確認される。

一方で、災害情報が持つ社会的文化は、地域の防災文化とは大きく異なっている。災害情報が地域で利用されていない場合、基本的にその利用は個人の判断に委ねられ、個人の判断でその災害リスクの認識が規定される。またそのような判断は、日常的なものではなく、あくまで災害時にのみ情報の発表とともに顕在化するものである。つまり災害情報の文化の特徴として、「個人理解に依存する災害リスク」および「災害時のみ強制的に顕在化する社会環境」が挙げられる。

このように、両者には明確な違いが存在しており、これらの連携が十分になされていない点が、災害情報が災害時に住民の災害対応励起に有効に機能しない要因となっている可能性がある。では、両者の連携は不可能なのだろうか。図-2の時系列分析の結果から、地域独自の対応基準による対応行動と災害情報の間に一定の対応関係が確認されている。重要なのは、これらを連携させるための社会システムの構築である。

5. まとめ

本研究では、平成29年九州北部豪雨の被災地における住民への聞き取り調査を通じて、フォーワード視点から「地域独自の取組や災害時の判断基準」および「災害発生当時の対応状況」を確認した。その結果、地域独自の判断基準が3地区で確認されるとともに、住民行動についての時系列分析からそれらが有効に機能していたことを各種災害情報との対応関係からも確認した。

また地域独自の判断基準を地域の防災文化として捉えた際、それが形成される要因として、「地域内で共通する災害想起要因の存在」および「それが潜在的に継続す

る社会環境」が確認されるとともに、災害情報の文化との特徴として挙げられる「個人理解に依存する災害リスク」および「災害時のみ強制的に顕在化する社会環境」と比較した際、そこには大きな差異が確認された。

今後、このような差異を埋めるためには、双方の連携が重要となるのは言うまでもない。地域においては、どのような状況になった際に、どのような対応を行うのか検討する必要がある。一方、災害情報においては、住民が検討した地域の判断基準に該当する災害情報を提示することが必要である。加えて、住民が日頃の感覚では認識できていない経験したことのないような災害については、自然科学研究による災害予測を通じて提示していくことも重要である。

このような視点での取組は、既に地域気象情報⁹⁾や防災スイッチ¹⁰⁾という形で検討されている部分もある。地域の防災文化が地域のみで形成されるのではなく、災害情報と連携し形成されるような取組の推進が重要である。

参考文献

- 1) 平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害を踏まえた避難に関する検討会：資料 2 平成 29 年 7 月九州北部豪雨の被害状況（参照年月日：2018 年 2 月 28 日），http://www.bousai.go.jp/fusuigai/kyusyuu_hinan/pdf/dai1kai/siryu2.pdf, 2018.
- 2) NHK：5 年前の豪雨経験もとに住民が無事避難 福岡朝倉（参照年月日：2017 年 8 月 31 日），<http://www3.nhk.or.jp/news/html/20170711/k10011054291000.html>, 2017.
- 3) 消防庁：「洪水警報の危険度分布」の活用について，平成 30 年 2 月 14 日付け消防第 24 号，2018.
- 4) 加納靖之，竹之内健介，矢守克也：ハザードマップへの歴史災害地点の重ね合わせ - 災害史と地域防災の新たな連携 -，京都大学防災研究所平成 29 年九州北部豪雨災害調査報告書，2017.
- 5) 池田謙一：緊急時の情報処理，東京大学出版会，1986.
- 6) 田中孝治，梅野光平，池田満，堀雅洋：知識と行動の不一致に見られる不安全避難行動の危険認知に関する心理実験的検討，特集-判断と意思決定の認知科学，認知科学，Vol.22，No.3，pp.356-367，2015.
- 7) 元吉忠寛，高尾堅司，池田三郎：家庭防災と地域防災の行動意図の規定因に関する研究，社会心理学研究，Vol.23，No.3，pp.209-220，2008.
- 8) 黒川正流，生和秀敏：河川流域住民の水害不安と対処行動に及ぼす地域同視の効果，心理学研究，Vol.57，No.2，pp.91-94，1986.
- 9) 竹之内健介，中西千尋，矢守克也，澤田充延，竹内一男，藤原宏之：地域気象情報の共同構築の試行～伊勢市中島学区における取組～，自然災害科学，Vol.34，No.3，pp.243-258，2015.
- 10) 矢守克也，竹之内健介，加納靖之：避難のためのマイスイッチ・地域スイッチ，京都大学防災研究所平成 29 年九州北部豪雨災害調査報告書，2017.

(2018.2.28 受付)

CONSIDERATION ON ROLE OF DISASTER INFORMATION THROUGH TIME-LINE ANALYSIS ON RESIDENTS' ACTIONS - COOPERATION IN FUTURE BETWEEN LOCAL DISASTER PREVENTION AND DISASTER INFORMATION -

Kensuke TAKENOUCI, Yasuyuki KANO and Katsuya YAMORI

We had the survey on cases of successful evacuation in Northern Kyushu Heavy Rainfall in 2017 and check the details of residents' actions and the local background. In addition, the relationship between the actions and disaster information was analyzed through time-line. As a result, we found the disaster actions by their judgements based on their original standards and there are various kinds of backgrounds (local disaster prevention culture) to share such disaster prevention in local areas. Moreover, the result of the time-line analysis showed their standards can function efficiently in disasters. From the results, we considered role in future of disaster information and suggested new disaster information which can support local residents' action based on their original standards and can make them function in real disasters.

ハザードマップへの歴史災害地点の重ね合わせ -災害史と地域防災の新たな連携-

加納 靖之¹・竹之内 健介²・矢守 克也³

¹ 京都大学助教 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: kano.yasuyuki.4w@kyoto-u.jp

² 京都大学特定助教 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: takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

³ 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

歴史上の災害に関する情報は、災害情報のひとつとして活用できる可能性がある。平成 29 年九州北部災害で被害の発生した朝倉市において、過去の大雨災害の記録を収集、分析した。1720 年（享保五年）や 1758 年（宝暦八年）の大雨により、同地域では浸水、家屋の流出、土砂崩れなどが発生していた。具体的な被害地点や時系列がわかる事例を抽出し、地図への表示や時系列の分析を通じて災害情報としての歴史災害情報のあり方を検討した。

Key Words: local disaster history, historical disaster, hazard map, historical documents

1. 背景と目的

平成 29 年九州北部豪雨を受けて、5 年前の平成 24 年九州北部豪雨だけでなく、さらに過去の大雨災害についても話題になっている¹⁾。大雨や地震による災害が発生するたびに、過去の災害が注目され、自然現象としての解明が進み、また、防災情報として活用することが提言されてきた²⁾。

たとえば、地震に関する研究のひとつの分野として、歴史上の地震について調べる歴史地震研究がある³⁾。地震学において、たかだか 100 年程度しか行なわれていない近代的な観測によるデータや経験の不足を補い、地震の時空間分布や被害の発生状況などを明らかにすることが目的とされてきた。自然科学的に過去に発生した地震を解明しようとする研究だけでなく、過去の災害経験を将来の防災に生かそうとする取り組みも行なわれてきている⁴⁾。大きな災害が発生したあとで、地域の災害履歴が見直されることもあるが、時間の経過とともに具体的な災害の記憶が失なわれ、避難行動に結びつくことは少ないのが現状であると考えられる。

歴史上の災害の記録が持つ豊かな情報を、避難行動につながる情報に結びつけるために必要な事項の検討のため、過去の災害事例から、被害地点や被害の発生時刻を抽出し、地図や時系列にまとめた。また、これらをハザ

ードマップに重ねて描き、それらの特徴について検討した。

2. 調査手法

福岡県においては、『福岡県災異誌』⁵⁾や『福岡県近世災異誌』⁶⁾に過去に発生した災害についてまとめられている。また、自治体史である『杷木町史』⁷⁾や『甘木市史』⁸⁾にも歴史上発生した災害に関する記述がある。特に『福岡県近世災異誌』は、近世以降に発生した災害（気象、地震、火災）について、根拠となる史料からの抜粋・翻刻がまとめられている。収録されているのは、甘木市史編さん史料を中心であり、筑前、筑後、豊前の記録も合わせて収録されている。

『福岡県近世災異誌』の「気象の部」を通覧し、大雨災害に関する記事を抜粋した。記事の種別として「大雨」「大風雨」「大風大雨」「永雨」「長雨」「洪水」「大水」を含むものを抽出した。単独で「大風」とあるものは、風による被害記事と考えられるため、今回は対象としなかった。記事中に地名や時刻がわかる記述があるものを抽出し、一覧表を作成した。地名の情報をもとに、GIS ソフトウェアを利用し、地理院地図の上に災害の発生地点をプロットした。地名の検索には、地理院地

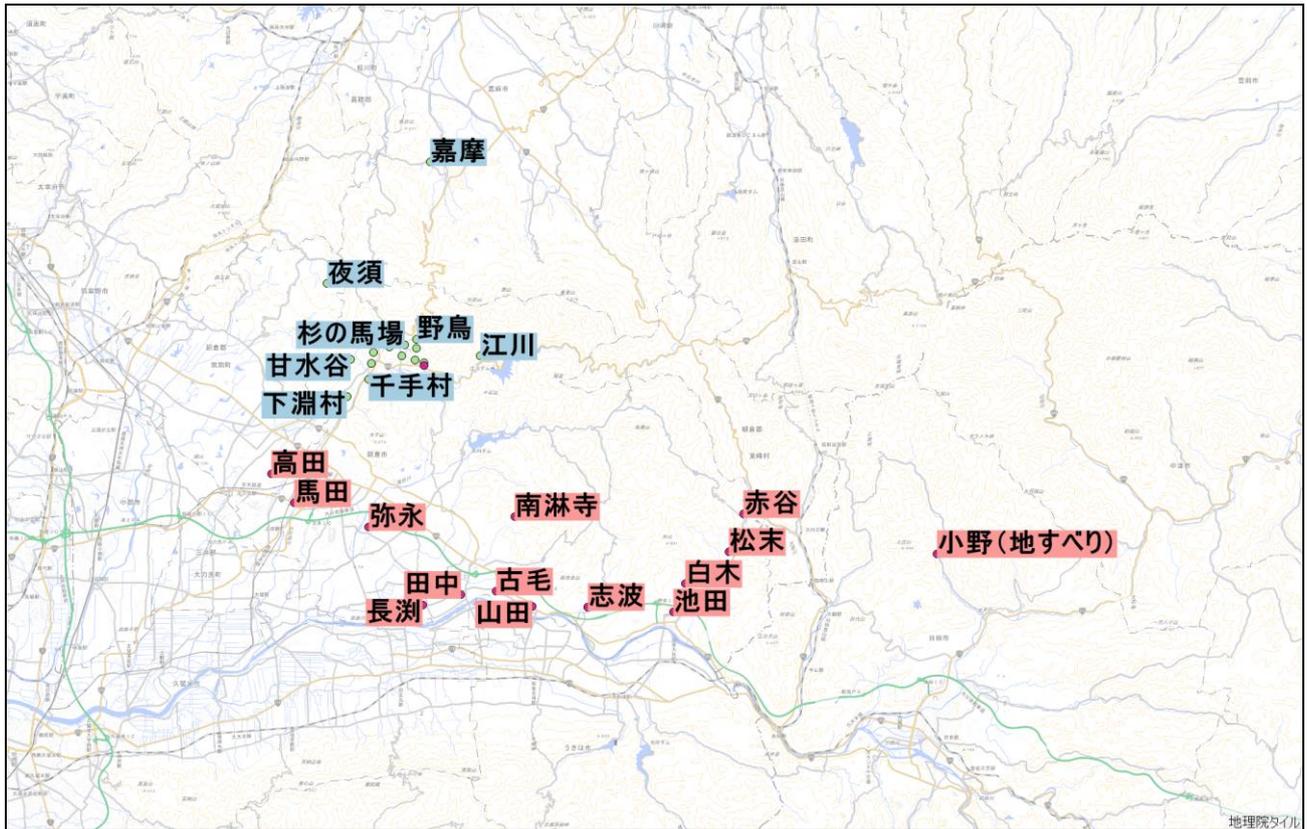


図-1 歴史災害発生地点の地図上への広域のプロット例。背景に国土地理院の電子地形図（タイル）を利用した。地名は災害の発生した地点で、赤が享保五年の大雨災害、青が宝暦八年の大雨災害による災害発生地点をしめす。

図 9 および旧高旧領取調帳データベース¹⁰を使用した。

また、朝倉市での歴史災害のこれまでの調査状況を把握するため、甘木歴史資料館での調査を実施した。上述の『福岡県近世災異誌』の編纂のために収集された史料のコピーや翻刻原稿などが甘木歴史資料館に保管されており、その収集状況についても調査した。本報告では、『福岡県近世災異誌』に収録された記事を参照した。本来、収録された史料の来歴なども調査し、個々の記事の信頼性などを評価すべきだが、この作業は今後の課題とする。『福岡県近世災異誌』の編纂史料が残されていることは、個々の記事の信頼性の評価のためにも重要である。

以下では、和暦は漢数字で、西暦（グレゴリオ暦）は算用数字で表記する。

3. 過去の大雨災害の具体例

『福岡県近世災異誌』から、1720年（享保五年）と1758年（宝暦八年）の大雨災害に関する記事を抜粋し、検討に用いた。

(1) 享保五年の大雨災害

1720年7月26日（享保五年六月二一日）に大雨、洪水の被害があった。『福岡県近世災異誌』には、『秋城御年譜』『村中定法記録』『小田村記録』『医王山南林寺縁起』『望春日記』のほか、筑前、筑後、豊前の8件の記録が収録されている。なお、この大雨では、現在の福岡市域でも洪水被害が発生している。

『秋城御年譜』には六月一九日から二一日まで大雨が降り、片時も止まず降り続き、50年以來の大水になったことが書かれている。「上秋月」「馬田」「高田」「弥永」で田畑に損害が出た。

『村中定法記録』には「あらい田柳原土手」が切れ、田畑に損害が出たとある。『小田村記録』には複数の井樋が破損したとある。

『医王山南林寺縁起』の記述は、上述のように、平成29年九州豪雨災害のあとで「再発見」される動きがあった。この記録には、六月二一日に「大雨雷電山汐洪水」が発生し、「所々山崩れ石流る」という状況であったことが記され、さらに大雨による同寺および下流側の被害が記録されている。「山田」「古毛」「田中」「長

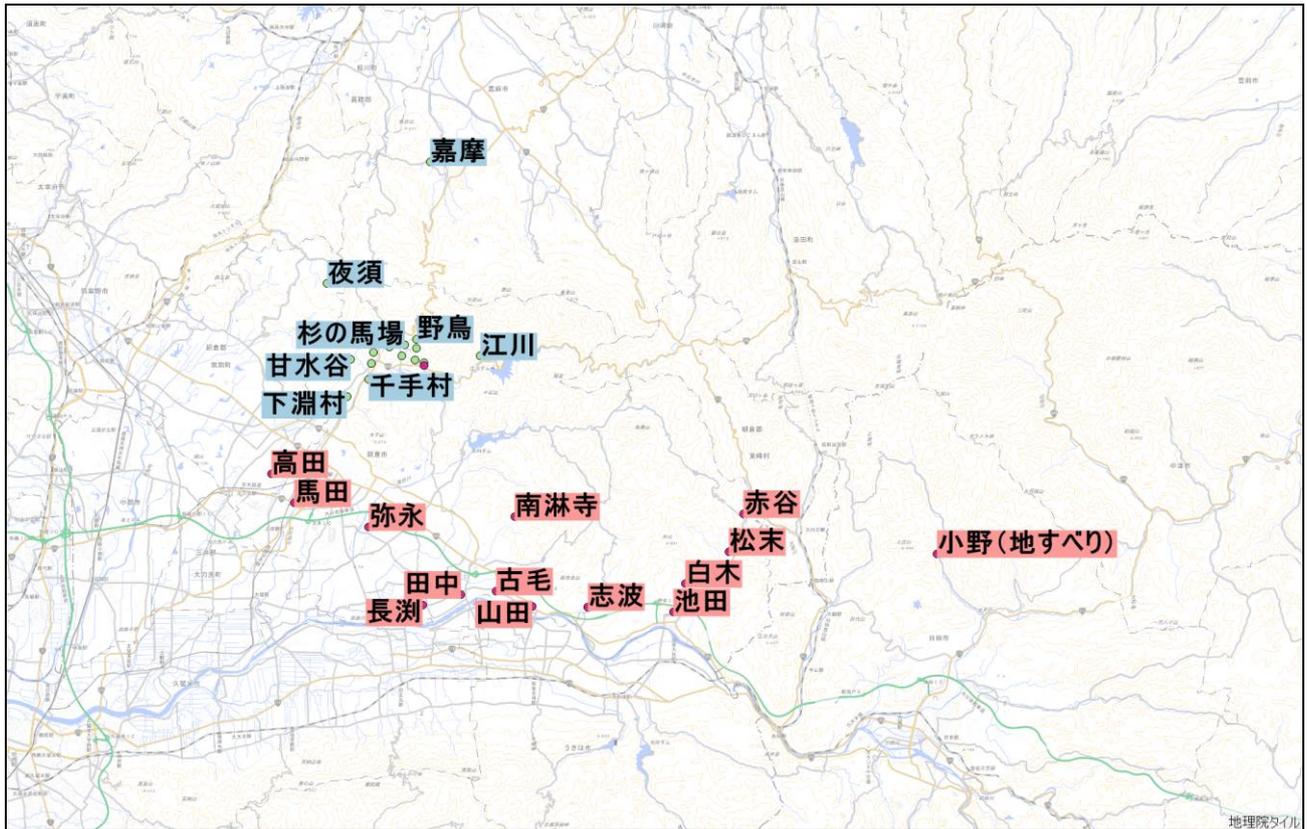


図-2 歴史災害発生地点の地図上へのプロット例。図-1 を拡大したもの。背景に国土地理院の電子地形図（タイル）を利用した。地名は災害の発生した地点で、赤が享保五年の大雨災害、青が宝暦八年の大雨災害による災害発生地点をしめす。

淵」, 「白木」「池田」「松末」「赤谷」「志波」「里城」などで田畑の損失が多く, 「永荒」(災害などで荒廃した耕作地のことを指す) となった場所も多数あった。この記録では, 同寺の以外の地名は村名程度にとどまり, 具体的な災害発生地点を特定するのは難しい。この記録によれば死者はなかったようである。

『医王山南林寺縁起』に登場する地名を, 現在の字名などからおおよその位置に表示すると図-1 および図-2 のようになる。既に指摘されているように, 平成 29 年九州北部豪雨での被害発生地点と重複する部分がある。このことをもって今回の災害は, 過去の繰り返しであって未曾有とまではいえない, と短絡的に結論することはできない。しかしながら, 少なくとも数百年の時間スケールでみた場合には, 同じような範囲で災害の発生するような大雨があったことは重要な情報である。また, 福岡市域でも洪水が発生していることから, より広域で大雨が降ったことによる災害であった可能性もある。

(2) 宝暦八年の大雨災害

1758 年 7 月 2 日(宝暦八年五月二七日) の大雨では, 秋月城下および領内を中心に被害が発生した。『福岡県

近世災異誌』によれば, 『長邦公御代記』『秋城御年譜』『自家記録』『風説記』『望春随筆』『荒歳備観』『遠藤家記録一』『国計亀鑑』が収録されている。これらの記録から, 大雨が降り, 野鳥川の増水, 堤防の決壊や落橋, 土砂崩れや土石流が発生したことを読みとることができる。などである。被害の発生地点を地図に落とすと図-1 のようになる。この災害においては, 秋月城下の通りや橋, 屋敷などのランドマークが記述され, かなり詳細に災害発生地点を推定することができる。

たとえば, 「夫婦石」(「女男石」とも) は, 秋月藩成立当初(江戸時代初期)に設置された護岸設備であるが¹⁴⁾, 洪水に関するランドマークとして, 複数の資料に繰り返し登場する。その他地点を特定できる以下のような情報がある。「杉の馬場」や「原小路」は川のようになった。多数の屋敷が流失あるいは浸水被害を受けた。落橋は「野鳥橋」「帰陣橋」「本寿院橋」(現在の目鏡橋) など 4 か所で発生した。「はせ山」「千手山」「甘水山」「檜原山」「弥永山」および「上秋月にかけ」山崩れが発生し, 「虚空坂日照院」や「鳴戸谷奥」, 「甘水谷」が崩壊した。また, 「浦泉口」の家屋の裏の崖が崩れて 1 人が亡くなった。具体的な地点の特定は難しい

が、道路の損傷や、田畑の被害も多数記録されている。

図-1 および図-2 にこれらの地点をしめした。

この大雨災害に関しては、『風説記』や『望春随筆』など、時系列のわかる記録が残っているのも特徴的である。時刻がわかる記述のみ抽出すると表-1 のようになる。ただし、現代語に訳してある。なお、史料に記された時刻の情報を用いる際には注意が必要である¹²⁾。史料のなかでは、「刻」で時刻が表記されている。当時の刻時は不定時法であり、1 刻はおよそ 2 時間になる。刻時法の違いおよび刻時精度から、おおよそ 2 時間程度の誤差があり得る。

お昼前後から大雨が降りはじめ、午後になってますます雨が強くなり、夕方になっていったん雨がやんだが、その頃から災害が発生しはじめ、その後、雨がまた降りはじめ災害が拡大していく様子が記録されている。

史料からは、気象状況の変化や災害の発生に対して住民がどのような対応をおこなったかも記録されている。家屋や敷地への浸水対策や、交通の遮断と復旧、親戚や知人間での情報伝達の様子を読みとることができる。

上記のように、時系列情報には、雨の降り方（強弱や時間、空間的広がり）あるいは川の流量に関するものがある、これらをもとにして、災害の原因となった降雨の状況などを再現できる可能性がある。また、平成 29 年九州北部豪雨での被災地での対応状況の時系列分析と対照することによって、現在と過去における災害の発生状況について、類似点と異なる点などを抽出できる可能性がある。

4. 地域のハザードマップとの重ね合わせ

朝倉市では、自主防災マップが作成されている。そのうちのひとつに安川地区自主防災マップ¹³⁾がある（図-3）。安川地区のマップには、「昭和 28 年の大洪水時腰の高さまで浸水」とされ、その範囲が図示されている。過去の災害の経験をハザードマップに生かす取り組みが行なわれている（図-3 の左下）。

図-3 には、図-1 および図-2 に示したような過去の歴史災害の発生地点も重ねて描いてある。「夫婦石」より下流の「千住村」「下淵村」は、自主防災マップでも浸水の可能性がある領域となっている。また 1758 年（宝暦八年）に土砂災害のあった記録のある「甘水谷」は、土砂災害警戒・特別警戒地区となっている。

過去の災害履歴とハザードマップにしめされる想定される災害とは、重なり合う部分がある。たとえば、土砂災害や浸水の発生地点である。ここでは両者を単純に重ね合わせるにとどまるが、今後は、マップ上の表示方法や、コンテンツの工夫など、過去の災害履歴を災害情報

表-1 宝暦八年の大雨災害のおもな時系列
(時刻は 2 時間程度の誤差があることに注意)

| 時刻 | 史料の記述 |
|------|---|
| 10 時 | <ul style="list-style-type: none"> 午前 11 時ごろから大雨。〔『風説記』〕 11 時ごろからの大雨は桶の水を移すようであった。〔『望春随筆』〕 |
| 12 時 | <ul style="list-style-type: none"> 雨が強くなる。14 時ごろまで激しく降り、川々が満水になり並々ならない状況。〔『秋城御年譜』〕 |
| 14 時 | <ul style="list-style-type: none"> 15 時ごろから雷がはげしくなり雷雨となった。〔『風説記』〕 14 時ごろから雷が激しく、通行人は尻もちをつき、座敷に座っている者は飛びあがるほどに雨風は止まなかった。〔『望春随筆』〕 |
| 16 時 | <ul style="list-style-type: none"> また大雨となり、雷鳴も強くなった（時刻不明）野鳥筋の関屋谷が「笠」から崩れたのでこの谷は水が大量に出た。その他の谷から出る水も多く、野鳥川が大洪水になった。〔『秋城御年譜』〕 その後少々小降りになった。〔『秋城御年譜』〕 16 時ごろ川の水の色が赤土をたてたようになり、17 時ごろ今小路町の番所の前が下り坂なので小さな淵ようになった。18 時ごろ少々水が減った。〔『風説記』〕 16 時ごろ水の色が赤土を立てたようになった。これは山汐というに違いない。〔『望春随筆』〕 17 時ごろ水嵩が増え、番所の前段が下りなので、「打ぼぎ」ができて小さな淵となり、そのため水はいよいよ横に流れた。〔『望春随筆』〕 |
| 18 時 | <ul style="list-style-type: none"> 18 時ごろ少々水が減った。〔『風説記』〕 18 時過ぎると水が少し減った。家々では提灯をかけてさらに水を防いだ。〔『望春随筆』〕 |
| 20 時 | <ul style="list-style-type: none"> 勘定所横の石橋も落ちたが、夜 21 時ごろ長い板をならべ、ようやく諸士が通行できるようになった。〔『風説記』〕 21 時ごろうどん屋の市次が、ようやく水をしのいで渡り見回りに来た。〔『望春随筆』〕 |

として発信するための手法を開発していくべきであろう。GIS を活用し、歴史災害と想定される災害など、複数のレイヤを持たせたり、過去の災害や近年発生した災害の

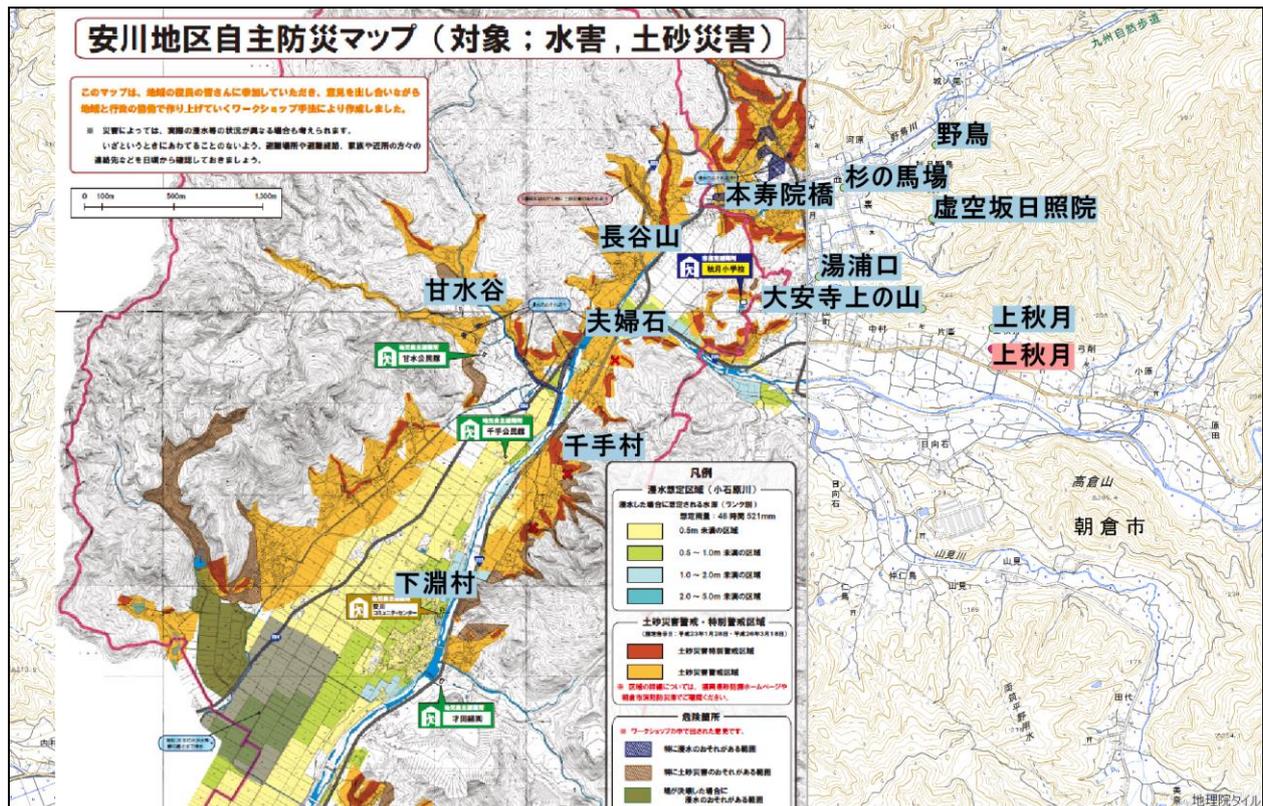


図-3 歴史災害発生地点のハザードマップへの重ね合わせ例。

背景に国土地理院の電子地形図（タイル）および朝倉市：自主防災マップを利用した。

気象状況や災害発生状況を時間のレイヤとして示すことで、時系列を含んだ想定をしめしたりすることなどが考えられる。

ハザードマップと歴史上の災害履歴は、前者は一定の想定にもとづいた予測であり、後者は過去に発生した事実（ただし、史料や記憶に基づくため精度に限界がある）である。いずれも、地図の上に起こり得る災害を描き出すための情報といえる。災害履歴をハザードマップで活用するためには、発生した現象の推定とともに、場所の特定が重要である。史料中の地名には、地域住民のほうが馴染みがあり、より効率的に特定できることが多い。また、地域住民が歴史災害を振り返り、過去の災害を実感するためにも、地名は重要な媒介となり得る。

5. まとめ

ハザードマップ上に歴史上の災害地点をプロットすることで、地点を媒介として歴史災害の情報を避難や防災活動に結びつけられる可能性を検討した。災害時の住民行動の時系列分析との比較など、より効果的な歴史災害情報の整理について検討を進めたい。

謝辞：甘木歴史資料館の遠藤啓介氏には、朝倉市周辺の歴史および史料の状況、および『福岡県近世災異誌』の編纂資料についてご教示いただいた。本研究は、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および「京都大学 SPIRITS 2017」の支援を受けました。図の作成には QGIS を用いた。

参考文献

- 1) 西日本新聞：朝倉 300 年前の水害風化 同じ被災地名、寺の古文書に（参照年月日：2018 年 2 月 28 日），
<https://www.nishinippon.co.jp/feature/attention/article/368659/>, 2017
- 2) 高橋和雄：災害伝承-命を守る地域の知恵, 古今書院, 2014.
- 3) Matsu'ura, R.S.: A short history of Japanese historical seismology: past and the present, Geoscience Letters, Vol.4, <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0069-4>, 2017.
- 4) 内閣府：災害教訓の継承に関する専門調査会（参照年月日：2018 年 2 月 28 日），
<http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeshou/>, 2017.
- 5) 福岡管区気象台：福岡県災異誌, 224 pp., 1965.
- 6) 立石 豊：福岡県近世災異誌, 713 pp., 福岡県近世災

- 異誌刊行会, 1992.
- 7) 杷木町史編さん委員会：杷木町史, 516 pp., 杷木町史刊行委員会, 1981.
- 8) 甘木市史編さん委員会：甘木市史（上）, 871 pp., 1982.
- 9) 国土地理院：地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/>.
- 10) 国立歴史民俗博物館：旧高旧領取調帳データベース, <http://www.rekihaku.ac.jp/doc/t-db-index.html>.
- 11) 甘木歴史資料館：第 56 回企画展「川と人とのものがたり～女男石護岸施設と治水と利水の歴史～」, 24 pp., 2016.
- 12) 宇佐美龍夫：歴史地震事始, 185 pp., 1986.
- 13) 朝倉市：自主防災マップ（秋月地区・安川地区・馬田地区）について（参照年月日：2018 年 2 月 28 日）, <http://www.city.asakura.lg.jp/www/contents/1332484402391/index.html>, 2016.
- (2018.2.28 受付)

**PLOTTING HISTORICAL DISASTER ON HAZARAD MAP
—COLABORATION BETWEEN LOCAL DISASTER HISTORY AND DISASTER
PREVENTION—**

Yasuyuki KANO, Kensuke TAKENOUCI and Katsuya YAMORI

Informations extracted from historical disasters can be used as disaster information. We collected historical articles describing dsasters caused by heavy rain around Asakura city damaged by Northern Kyushu Heavy Rainfall in 2017. Disaster caused by heavy rain occurred repeatedly. Here we focused on articles from which place and time of disasters can be extracted. Hevy rains in 1720 and 1758 caused inundation and landslide. The places are plotted on topographical map and haard map. The time series are listed. We examined the mothod to utilize historical disaster information for disaster information.

今後の未経験・想定外災害に対する 「三本の矢」による地域の水害対策への提言

竹之内 健介¹・加納 靖之²・矢守 克也³

¹ 京都大学特定助教 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: takenouchi.kensuke.3x@kyoto-u.ac.jp

² 京都大学助教 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: kano@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

³ 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

風水害が発生するたびに議論が繰り返される地域の水害対策について、地域の災害を理解しいかに行動するか、その本質的問題に対し、平成 29 年九州北部豪雨における調査を通じて、大きく災害史研究・災害情報研究・地域防災研究の立場から地域の災害現場の現状を確認するとともに、それぞれの研究領域の立場から今後の地域の災害対策の検討を行った。本研究では、その結果を踏まえ、未経験・想定外災害に対する地域の水害対策として、災害史研究を通じた地域の災害史とハザードマップの連携（災害史を現在に）、災害情報研究を通じた水文気象情報と地域の災害感覚の連携（自然科学情報を地域に）、地域防災研究を通じた地域防災と個人の災害対応の連携（防災文化を未来に）という「三本の矢」による対策を提言としてまとめた。

Key Words: local disaster history, hydrological and meteorological information, local disaster prevention culture

1. 地域の災害現場が抱える課題

風水害が発生するたびに、日本では今後の防災・減災のために様々な課題を掲げ、それを改善すべく新たな方針や政策を描き、対策の実施を推進されてきた。一方で、地域の災害現場では、住民の災害意識が十分でなかったり、災害時における避難の遅れが発生するなど、依然基本的な課題が十分に解決できていないのも事実である。このような地域の災害現場が抱える課題の背景には、現在の日本における地域の水害対策において、本質的な問題へのアプローチが不足している可能性がある。

(1) 未経験災害・想定外災害の流布

近年、「経験したことのない災害（未経験災害）」や「こんなことになるとは思わなかった災害（想定外災害）」という言葉が、風水害においてもよく使われるようになった¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。一方で、過去に発生した災害や近年の災害の発生状況を振り返った場合、そのような災害が起こりうるものが全く想定できていなかったかと思われる場合、そうとも言い切れない場合もある。例えば、確

率降水量に関連して、「何十年、何百年に一度」といった言葉もよく聞かれるようになった⁶⁾⁵⁾などが、日本人の平均寿命が男性 80.75 年、女性 86.99 年（厚生労働省平成 27 年第 22 回生命表）であることを考えれば、確率降水量が 100 年を超えるような災害は、未経験災害となりうる可能性を確かに秘めている。しかし、それが想定外災害であるのかという点については、過去の災害史を振り返った場合に、慎重に議論すべきである。

平成 29 年九州北部豪雨が発生した地域では、5 年前にも周辺地域において大きな被害をもたらした平成 24 年九州北部豪雨が発生している⁶⁾。そして、この地域は「坂東太郎、筑後次郎、四国三郎」という日本における暴れ三川を意味する言葉にも表れているように、過去から災害が繰り返し発生してきた地域である。専門家から見れば、未経験災害や想定外災害と呼ばれ得るような「何十年、何百年に一度の水害」は、単に過去の観測データを基にした統計的な表現である。しかし、このような地域における住民から見れば、過去の地域における災害が地域で継承されていなかったり、振り返られていない、また他の地域における災害を他人事としてしか捉え

られていないことを示している可能性がある。

(2) 水文気象情報の充実

平成 29 年九州北部豪雨では、その発生前日の 2017 年 7 月 4 日から気象庁により運用が開始された新たな危険度分布情報⁷⁾が注目された。著者らの検証においても危険度分布情報が本災害において、十分に機能しえたことが時系列分析から確認している。

近年、水文気象情報の充実が顕著であることは、危険度分布情報に加え、特別警報・時系列情報・高解像度降水ノウキャストなどの新たな情報の導入が続いていることから明らかである。一方で、従来からいかに情報を充実させても、そもそもこれらの情報が住民の災害時の対応行動に十分につながっていない点が確認されているのも事実である⁹⁾。

(3) 地域防災と住民行動

災害対策基本法において、2014 年 4 月 1 日に地区防災計画が施行されるなど、これまで以上に共助の重要性と必要性が高まっている。その一方で、少子高齢化は全国的に顕著となっており¹⁰⁾、地域コミュニティの活動の低下も深刻な課題となっている¹¹⁾。そのような中で、地域防災の活動と個人の災害対応が十分に結びついていた地域においても、これから先もそのような連携関係を維持可能かどうかは、大きな課題である。

平成 29 年九州北部豪雨においても、各地域で様々な地域防災の取組が行われていた。しかし、著者らの調査では、それらが災害意識の向上につながり得たとしても、災害からの生還に直接的な効果を発揮したかどうかは十分な議論が必要な状況も確認されている。一方で、地域の連携が災害時に大きな役割を果たしうることも確認されている。

このように、地域の災害現場の現状とそれに対する様々な政策を振り返った際に、現在の日本における地域の水害対策が、地域の災害を理解し、いかに行動するかという本質的な問題の解決にどれほどつながりうるのかどうか、改めて振り返る必要がある。そして、平成 29 年九州北部豪雨は、結果的に、そのような議論の必要性を顕在化させていると言える。

2. 提言内容

著者らは、平成 29 年九州北部豪雨における調査を通じて、大きく災害史研究・災害情報研究・地域防災研究の立場から前節で挙げたような地域の災害現場の現状を確認した。そして、それぞれの研究領域と既存の各種防

災対策の連携による今後の地域の災害対策の検討を行った。本研究では、その結果を踏まえ、未経験・想定外災害に向けた地域の災害対策として、災害史研究を通じた地域の災害史とハザードマップの連携（災害史を現在に）、災害情報研究を通じた水文気象情報と地域の災害感覚の連携（自然科学情報を地域に）、地域防災研究を通じた地域防災と個人の災害対応の連携（防災文化を未来に）という「三本の矢」による対策を提言としてまとめる（図-1）。

(1) 災害史研究を通じた地域の災害史とハザードマップの連携

過去にも地域の災害史の重要性については議論されており、過去の災害史について様々な分析が行われている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾など。これらの災害史については、過去に地域で発生した災害を知ること、今後起こりうる災害への啓発を行うという意味付けが存在する。しかしながら、そのような災害史が明確に継承されていくプロセスが十分でない現状も確認される。つまり、地域の災害史を確認することがまずは主眼とされ、それを地域の防災文化として継承していくプロセスが十分でない。そこで、まず災害史研究の視点からの提言として、既存のハザードマップに過去の災害史を掲載することにより、未経験災害を現在の地域にも起こりうるものとして、明確にすることが重要と考える。このような考え方に基づくハザードマップとして、実際に地域住民の過去の経験をハザードマップに掲載する取り組み¹⁵⁾や過去の地図と比較するもの¹⁶⁾なども見られるが、数百年スケールのような現象の再現には災害史研究の役割が重要となってくる。また災害史研究だけでは十分に評価が難しい未経験災害や評価ができない想定外災害については、自然科学のアプローチによる災害予測の結果の活用も必要である。

(2) 災害情報研究を通じた水文気象情報と地域の災害感覚の連携

水文気象情報の充実の一方で、リスク認知の醸成に成功していたとしても、上述のとおり災害時の行動に結びついていない状況も確認されている。一方で、今回の調査結果からは、地域性を表現可能な防災気象情報と地域の災害感覚である地域独自の判断基準を連携させることにより、防災気象情報を有効活用し、地域自らの判断で、地域に応じた自主的な避難を推進可能なことが推測される。地域気象情報¹⁷⁾のような地域に寄り添った防災気象情報を社会的に構築していくことは、そのために有効な方法である。また、未経験災害や想定外災害については、避難情報の発令が間に合わない場合も想定される。その意味でも、水文気象情報と日頃の地域の災害感覚を連携させることは重要と言える。

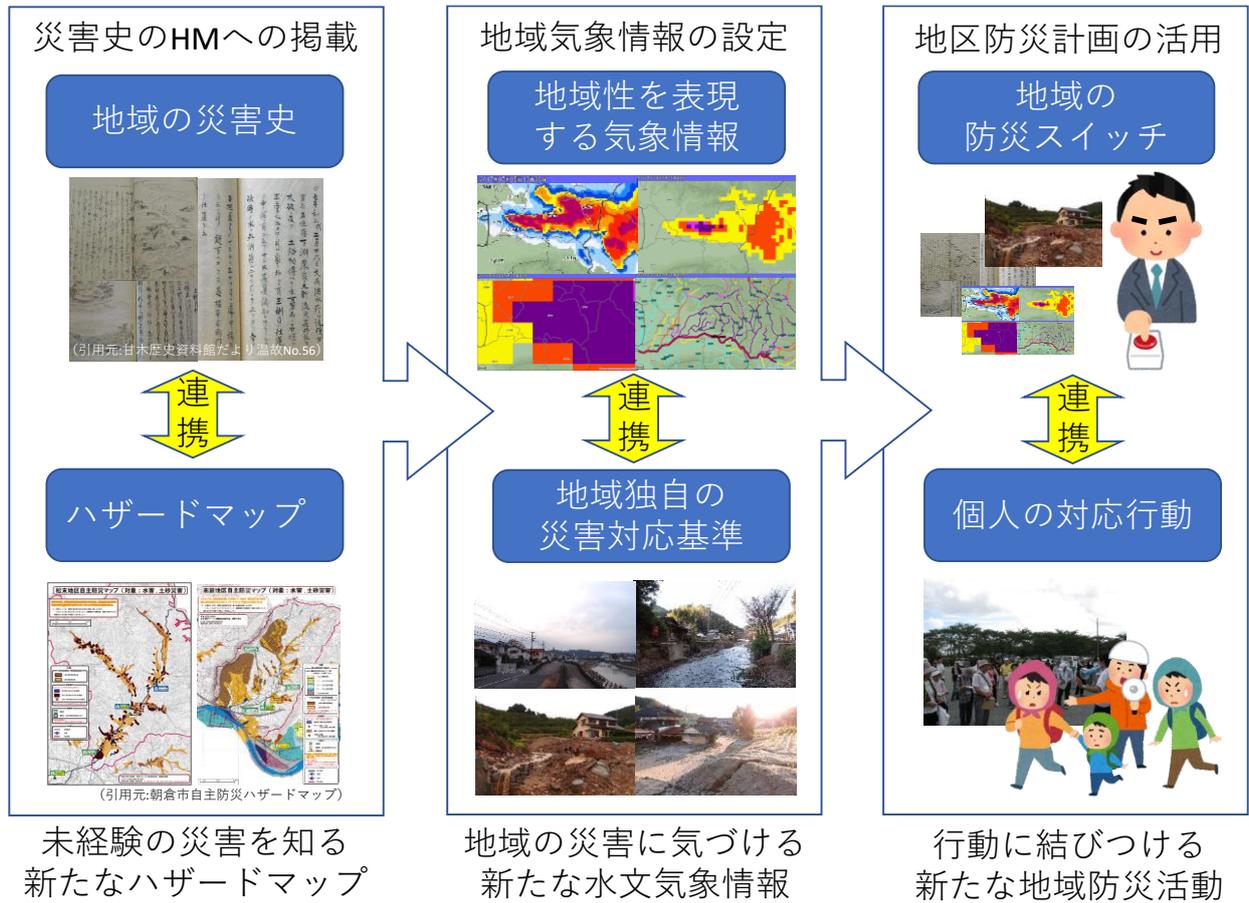


図-1 各災害研究分野における連携を通じた今後の地域の水害対策への提言

(3)地域防災研究を通じた地域防災と個人の災害対応の連携

調査結果から、災害からの生還に結び付ける要因として、地域の連携が重要な役割を果たしていることが確認された。著者らの研究では、地域において日常モードから災害モードへ意識を転換する仕組みを「防災スイッチ（マイスイッチ・地域スイッチ）」と名付けた。これは、スイッチの切り替えを通して、個々に依存しがちな災害対応の判断を明確に地域で連携して行うものへと転換させるものである。つまり、地域コミュニティの衰退に伴って、同様に衰退が危惧される地域防災と各個人の災害対応の関係を、災害時に防災スイッチを通じて連携させようとするものである。特に社会的な協調性が重要視される傾向にある日本社会では効果的な考え方と言える。また上述の地区防災計画は、このような地域防災と個人の災害対応の連携に寄与できる政策の一つと言える。

このように、本研究では災害史研究・災害情報研究・地域防災研究のそれぞれの立場からの連携方策について提言を行う。一方で、これらは別々のものでなく、相互に関係づけられるものである。図-1 に示すように、日

頃取組となる災害史研究を通じた連携は、地域独自の災害対応基準の作成を支援し、災害情報研究を通じた連携は、災害切迫時に防災スイッチを押す判断を支援する。そして、地域防災研究を通じた連携は、実際に地域全体による災害対応の実施を支援する。このように、それぞれが相互に時系列で連携し合うものであり、各研究視点からの成果を別々に活用するのではなく、相互の役割を考慮する形で地域社会において活用することを目指している。

3. まとめ

平成 29 年九州北部豪雨における調査を通じて、未経験災害や想定外災害に地域社会として備えていくために、各研究分野を軸とした相互の連携として、今後の地域の水害対策への提言をまとめた。

社会において少子高齢化が進む中で、地域コミュニティの衰退と連動して地域の防災文化の衰退が危惧される。このような状況は、より一層住民の感覚として未経験災害や想定外災害とみなしうる災害を増やす可能性を秘めており、そして、より一層地域防災と個人の災害対応の

連携を災害時にどのように進めるかという課題を顕在化させる。そのような中で、提言内容にあるように、地域の災害現場における本質的な問題にアプローチするための政策と連携が、災害研究にも求められていると考える。今後、これらの連携を実践するための手法や社会システムの検討を進めて行くとともに、その中で自然科学の研究成果の活用も進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：新たなステージに対応した防災・減災のあり方, 2015.
- 2) 田中隆文編著：想定外を生まない防災科学-すべてを背負う「知の野生化」-, 古今書院, 2015.
- 3) 近藤宏二：巻頭言 想定外の災害, 日本風工学会誌, Vol.39, No.1, 2014.
- 4) 気象庁：特別警報について（参照年月日：2018年2月28日）, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/tokubetsu-keiho/>, 2018.
- 5) 内閣府：平成28年版防災白書, 日経印刷, 2016.
- 6) 内閣府：平成25年版防災白書, 日経印刷, 2013.
- 7) 平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた避難に関する検討会：資料2 平成29年7月九州北部豪雨の気象概況(参照年月日：2018年2月28日), http://www.bousai.go.jp/fusuigai/kyusyu_hinan/pdf/dai1kai/siryol.pdf, 2018.
- 8) 消防庁：「洪水警報の危険度分布」の活用について, 平成30年2月14日付け消防災第24号, 2018.
- 9) 気象庁：防災気象情報の利活用状況等に関する調査結果, 平成29年3月10日, 2017.
- 10) 内閣府：平成29年版高齢社会白書, 日経印刷, 2017.
- 11) 内閣府：社会意識に関する世論調査（平成29年1月調査）（参照年月日：2018年2月28日）, <https://survey.gov-online.go.jp/h28/h28-shakai/2-1.html>, 2018.
- 12) 内閣府：災害教訓の継承に関する専門調査会報告書（参照年月日：2018年2月28日）, <http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunokeishou/>, 2018.
- 13) 高橋和雄編著：災害伝承-命を守る地域の知恵, 古今書院, 2014.
- 14) 北原糸子編：日本災害史, 吉川弘文館, 2006.
- 15) みなかみ町：みなかみ町ハザードマップ（参照年月日：2018年2月28日）, <http://www.town.minakami.gunma.jp/politics/10bousai/2016-1012-1540-12.html>, 2018.
- 16) 中井春香, 久世晋一郎, 陶俊：過去地図と史跡から災害を考えるヒストリカルハザードマップ, 日本災害情報学会第19回学会大会予稿集, pp.206-207, 2017.
- 17) 竹之内健介, 中西千尋, 矢守克也, 澤田充延, 竹内一男, 藤原宏之：地域気象情報の共同構築の試行～伊勢市中島学区における取組～, 自然災害科学, Vol.34, No.3, pp.243-258, 2015.

(2018.2.28 受付)

COMMUNITY POLICY ON WATER-RELATED DISASTER PREVENTION IN FUTURE AGAINST UNEXPERIMENTED AND UNEXPECTED DISASTERS

Kensuke TAKENOUCI, Yasuyuki KANO and Katsuya YAMORI

Policies on water-related disasters have some essential issues and these issues have been discussed in each past disaster. However, they haven't been resolved enough, so we check situations which cause such issues through the surveys on Northern Kyushu Heavy Rainfall in 2017 from view of research fields; disaster history, disaster information and local disaster prevention, and considered the community policy in future. This report summarized the community policy on water-related disaster prevention against unexperienced and unexpected disasters based on the results of the researches. This proposal includes three cooperations; the one between local disaster history and hazard map (introduction of disaster history into the present), the one between hydrological and meteorological information and residents' disaster consciousness (use of natural science information in community) and the one between local disaster treatment and personal disaster action (creation of disaster prevention culture in future).

AI・IT 技術

先端的な情報技術の 災害対応へ適用に関する考察

畑山 満則¹

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

Society5.0 を実現する先端技術として IoT、ドローンによるデータ収集技術、AI 技術を用いた推論による意思決定支援が注目を浴びている。これらの技術は平常時の生活を豊かにするだけでなく、災害時の人的資源の枯渇問題の解消の一端を担うものとしても期待されている。今回の平成 29 年九州北部豪雨では、これらの技術が災害対応に大きく貢献した事例は報告されていないが、過去の災害時と比較して利活用の試みは増加、高度化傾向にある。ここでは、これらの試みの一部を実活用への課題と共に紹介する。

Key Words: Society 5.0, Internet of Things(IoT), Drone, Text Mining, Social Networking Service(SNS)

1. はじめに

2011 年に発生した東日本大震災では、先端的な情報技術 (ICT) が様々な局面で利用された。これは、スマートフォンの普及により、「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」がインターネットを初めとしたネットワークにつながることににより、様々なサービスが提供され人々の生活をより豊かにするユビキタスネットワーク社会が現実化されてきたことが大きな要因である。ユビキタスネットワーク社会の実現に伴い、IoT (Internet of Things) で全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出すことで、これらの課題や困難を克服したり、人工知能 (AI) により、必要な情報が必要な時に提供されるようになることで、ロボットや自動走行車などの技術を通じて、少子高齢化、地方の過疎化、貧富の格差などの課題が克服されることを目指した「Society 5.0」が科学技術イノベーション総合戦略 2017 において提唱された¹⁾。防災・減災システムは、Society 5.0 のプラットフォームの応用として、位置づけられており²⁾、災害対応における先端技術利用への期待は高まりを示すものとなっている。

Society5.0 を実現する先端技術として IoT、ドローンによるデータ収集技術、AI 技術を用いた推論による意思決定支援が注目を浴びている。これらの技術は平常時の生活を豊かにするだけでなく、災害時の人的資源の枯渇問題の解消の一端を担うものとしても期待されている。平成 29 年九州北部豪雨では、これらの技術が災害対応

に大きく貢献した事例は報告されていないが、過去の災害時と比較して利活用の試みは増加、高度化傾向にある。本稿では、これらの試みの一部を実活用への課題と共に紹介する。

2. Society 5.0

「Society 5.0」とは、①サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることにより、②地域、年齢、性別、言語等による格差なく、多様なニーズ、潜在的なニーズにきめ細かく対応したモノやサービスを提供することで経済的発展と社会的課題の解決を両立し、③人々が快適で活力に満ちた質の高い生活を送ることのできる、人間中心の社会をされており、狩猟社会 (Society 1.0)、農耕社会 (Society 2.0)、工業社会 (Society 3.0)、情報社会 (Society 4.0) といった人類がこれまで歩んできた社会に次ぐ第 5 の新たな社会をイノベーションによって生み出すという意味で名付けられた。

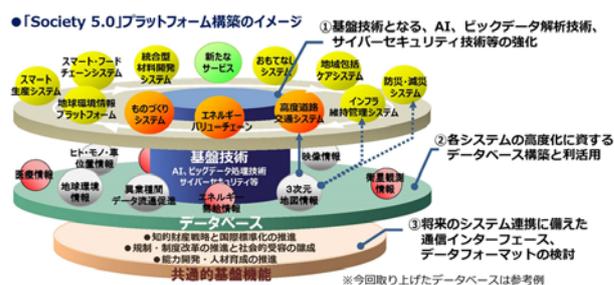


図-1 Society 5.0 プラットフォーム構築のイメージ²⁾

Society5.0 を実現する先端技術として IoT、ビッグデータ、人工知能、ロボットが挙げられており、図-1 に示されるように構築が期待されるプラットフォームの基盤技術と位置付けられている。防災・減災システムは、これらの基盤技術の応用先として位置づけられており、図-2 に示すような事例が期待されている³⁾。

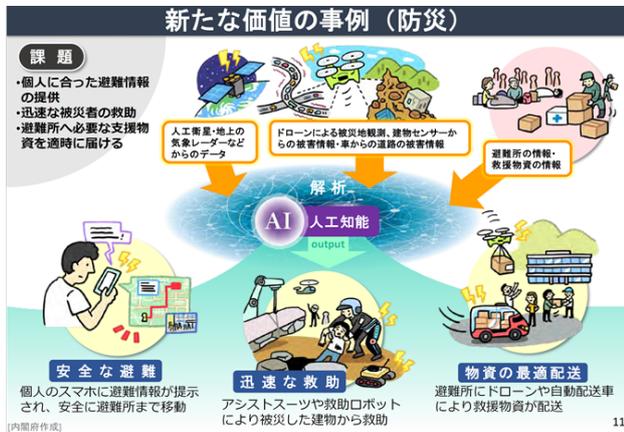


図-2 Society 5.0での新たな価値の事例（防災）³⁾

3. 携帯電話の位置情報の利用

携帯通信端末を IoT デバイスと考え、通信アンテナや GPS から得られる位置情報から人間行動を分析する手法は交通や観光の分野で活用されており、東日本大震災以降、災害対応での活用の試みが始まっている。



図-3 携帯端末位置からの避難場所探索の運用イメージ案

畑山らは、NTT ドコモ社が提供するモバイル空間統計を用いて熊本地震での避難場所を同定する手法の開発に取り組み、指定されていない避難場所の特性について分析するとともに、災害対応において、このような集計ベースの位置情報の使い方について提案してきた⁴⁾。利用法としては、研究機関とデータ提供機関が検討した手法により分析結果を出し、それを現地活動を行っている

災害支援団体ネットワークに提供し、現地や仮想空間上の調査により情報の信頼度を高めた上で、行政に提供するというものである。図-3 は、研究機関を京都大学、データ提供機関をドコモ・インサイトマーケティング社、災害支援団体ネットワークを JVOAD（全国災害ボランティア支援団体ネットワーク）、仮想空間での候補絞り込みに ITDART（情報支援レスキュー隊）を想定した運用体制案のイメージ図である。このイメージ図を含む提案は、2017 年に内閣府主催で開催された防災 4.0 遂行作戦における「民間企業からのアイデア募集」において、今後送球に実現すべき課題として選ばれており、現在は、内閣府主体の災害情報ハブ推進チーム⁵⁾が扱う情報の一つと位置付けられ利用に関する検討がなされている。

畑山は、ドコモ・インサイトマーケティング社の協力を得て、九州北部豪雨においてもこの手法の適用を試みた。対象は朝倉市、日田市と朝倉市の南部に隣接した久留米市である。朝倉市、久留米市では、平常時との違いが明確でなく、避難所候補の同定には成功できなかった。日田市は、避難場所候補の同定には成功したが、その結果は、指定避難場所に避難していることを示すのみであった。このため、行政や支援団体にこれまでにないデータを提供するには至らなかった。広域で断続的な地震活動が想定を越える人数の長期的な一時避難を促した熊本地震のような災害と、ある程度の予測が可能で局所的な被害にとどまる災害では分析結果の価値が変わることを示す事例となった。

4. ドローンによるデータ収集

災害直後の上空からのデータ収集は、阪神・淡路大震災以降、災害のたびに注目を浴びている。阪神・淡路大震災の前後では高解像度衛星の打ち上げが行われており、衛星写真の利用に注目が集まった。近年では、被災状況を正確かつ迅速に収集・把握することを目的に、発災直後に緊急撮影が実施され、空中写真から作成されたオルソ画像が地理院地図上で公開されている。しかし、これら一連の航空機や衛星からの情報は、取得のハードルが高いため、空白時間帯が生まれることも事実である。そこで、このような時間帯を埋める技術として無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）が注目されることとなった。

UAV の災害への活用は、大都市大震災軽減化特別プロジェクト⁶⁾を契機に本格的に始まったといえる。本プロジェクトでは、国際レスキューシステム研究機構を中核機関とした「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」がテーマとして掲げられており、この中で UAV を用いた上空からの災害調査手法に関する研究が行われた。プロジェクトが終了した 2007 年前後からカメラが搭載された外国メーカーの安価なマルチコプター（クワッドコプターが中心）が、国内で販売されるよう

になり、ドローンと呼ばれるようになった。ドローンは「空の産業革命」の中心技術として注目を集め、Society 5.0 を実現するための未来投資戦略にも位置づけられることとなり⁷⁾、その流れの中で災害後の調査活動などで利用されるようになった。さらに、2015 年の航空法の改正で、法体系に無人航空機（ドローン・ラジコン機等）が位置づけられたこと、平成 27 年関東・東北豪雨において災害直後に国土地理院がドローンを投入したことを契機として、災害直後の現況情報の収集手段としてドローンが位置づけられるようになり、2016 年に発生した熊本地震以降、災害時には積極的に利活用されるようになってきている。

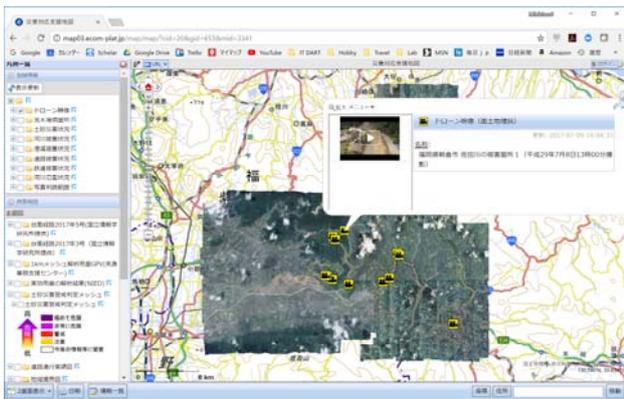


図-4 ドローン映像のマッピング

(<http://map03.ecom-plat.jp/map/map?cid=20&gid=653&mid=3341>)

九州北部豪雨でも国土地理院がドローン撮影を行っており、撮影された映像は撮影位置とともに公開されている。図-4 は、防災科学技術研究所が公開する災害対応支援地図にマッピングされたドローン映像のイメージである。



図-5 タフ・ロボティクス・チャレンジのコンセプト

九州北部豪雨では、これまでに実績のあるドローンを用いた撮影に加えて、全天候型の機体を用いた雨の中の撮影も行われている。これは革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) のタフ・ロボティクス・チャレンジ

の成果の一部を利用したものである⁸⁾。タフ・ロボティクス・チャレンジ (図-5) では、厳しい極限の災害現場でも、へこたれず、タフに仕事ができる遠隔自律ロボットの実現を目指したプロジェクトであり、飛行ロボットの目標として「悪環境下でのロバスト飛行 (風 15m/s、雨 100mm/h、構造物近傍 30cm) と状況の計測・伝送・認識・マッピングによる、作業支援」が掲げられている。災害時のドローン活用においては、これまで降雨状況下での運用に不安があったが、着実な進化を見せたと言えるだろう。

5. SNS やミニブログの活用

SNS やミニブログを分析し災害対応に活用する技術は、東日本大震災以降、研究から実践のフェーズに移行している。九州北部豪雨でも利用の試みは行われているが、災害対応に必要な技術としては位置づけられていない。ここでは、災害時での利活用を目指した3つの試みについて、九州北部豪雨以外の災害での利用例なども用いて紹介する。

(1) SoLT (Social Learning Team)

NHK は、東日本大震災の経験を受けて、2013 年 10 月にソーシャルメディアやミニブログに投稿された情報 (ソーシャルデータ) から事件事故の発生やネット独自のトレンドをつかんで放送につなげることを目的として SoLT (Social Learning Team) を発足し、鮮度の高い情報の獲得を行っている⁹⁾。SoLT では、人手を使った情報の絞り込みと現地支局への問い合わせによる情報の信頼性確保を行っており、鮮度と精度が確保された情報が得られる仕組みとなっている。社会的に重要な案件については、NHK ニュースとして速報的に取り扱われることもあるが、それ以外の価値として、ソーシャルメディア上の間違った情報 (デマなど) を指摘し、それを正す情報を発信できることがあげられる。災害時の間違った情報は、悪意がなくても現地や周辺を混乱させることも多いため、このような地道な活動は、災害対応として重要である。SoLT では、平成 28 年台風 10 号にともなう岩手豪雨災害において、他の機関も気づくことができなかった災害情報の発見に成功した事例もあり、今後の災害対応の核となる可能性を秘めている。

(2) 対災害 SNS 情報分析システム DISAANA

AI 技術の 1 つであるテキストマイニングを用いてミニブログサービス Twitter におけるツイート分析を行う対災害 SNS 情報分析システム DISAANA (情報通信研究機構が開発・提供) は 2015 年よりシステムを公開している¹⁰⁾。図-6 にその画面イメージを示す。このシステムでは、Twitter での災害に関するつぶやきをリアルタイムに検索できるため、情報収集の 1 つの手段として期待されており、熊本地震や九州北部豪雨でもシステムが提供

されたことが報告されている。しかしながら、現場側の声として大きな成果につながった事例はまだ存在しないのが現状である。



図-6 DISAANA のイメージ

畑山は、このシステムの利活用の可能性について、平成 29 年台風 21 号時に検討してみたので、その結果を用いて考察してみたい。平成 29 年台風 21 号は、2017 年 10 月 21 日から 22 日にかけて日本の南を北上し、23 日 3 時ごろに静岡県御前崎に上陸したのち、同日 15 時に北海道の東の海上で温帯低気圧となった。22 日は、第 48 回衆議院議員総選挙が行われた日であり、テレビが速報を伝えていたが、ソーシャルデータには奈良県、大阪府を流れる大和川が下流で氾濫しているという情報が流れていた。そこで、DISAANA を利用し、この情報について 22 日の 22 時ごろから、検索を試みた。対象日時を、10 月 20 日から検索時点までとし、大阪府堺市、大阪府大阪市を検索エリアとし、回答候補として「氾濫が発生している」を指定すると、回答候補に関連付けられたツイートが表示される。大阪府堺市を検索エリアとしたときの結果を図-7 に示す。この図では、回答候補である「氾濫が発生している」に対し、「回答候補として抽出したツイート」と「回答候補と矛盾するかもしれないツイート」が併記されている。これは、ソーシャルメディア上に矛盾する意見があることを示している。筆者は大和川河川事務所の HP などから、「回答候補と矛盾するかもしれないツイート」の内容が現状を示していたことが確認できたが、このシステムのみを見た場合、多くの意見がある「回答候補として抽出したツイート」を、現状を正しく示している情報と勘違いしてしまうユーザーもいると思われる。このことから、どちらが正しい見解かを AI は判断できないことを理解し、慎重に情報を扱うことができるのであれば、この情報は有益な情報であるが、全ての人に有益な情報とは、まだ、なりえていないことを示唆した結果ととらえられるだろう。

回答候補:氾濫が発生している

検索条件

対象日時: 2017/10/20 06:29:34 ~ 2017/10/23 07:47:38
 検索モード: エリア検索
 エリア: 大阪府堺市

回答候補を抽出したツイート

回答候補と矛盾するかもしれないツイート



おりた
@toronei

いま堺市で氾濫しているのは、大和川ではなく、この辺の細い川なので、危険なものにはわかりませんが、大和川が氾濫しているというのはデマですから落ち着きましょう。！＼Google マップ
[htm.to/dPFYaAfzRS](https://www.google.com/maps/@34.590901,135.7590901,15z)
 9:04 PM - Oct 22, 2017

Yamato-gawa
 〒590-0901 大阪府堺市堺区...
[google.co.jp](https://www.google.co.jp)

1 11 6

久保真史
@kubotakashisebe

繋がりにくくなっているので近くの方はどうぞ #堺市 #大和川 #氾濫 #ハザードマップ
[twitter.com/osami_sakai/s...](#)
 9:08 PM - Oct 22, 2017

45 23

MITSURU NAKAGAWA
@Manzosan

大和川の南岸、浅香山に氾濫とな。杉本町も危ないんじゃない。
 11:14 PM - Oct 22, 2017

Ayako
@yumetasu

堺区もう氾濫して救命隊出てるのにこのツイートとかカスやな
[twitter.com/osami_sakai/s...](#)
 12:02 AM - Oct 23, 2017

19 16

ねずみ王様
@yeuxqui

堺区氾濫して、首までつかるとるやんか。
 12:02 AM - Oct 23, 2017

14 4

MAKI
@Flower802

大和川氾濫して、堺区のマンションの1階がえらいことになってる！
 12:03 AM - Oct 23, 2017

puraha
@puraha

23日0時、堺市堺区、大和川氾濫してます。肩に浸かるくらい冠水してます。
 12:03 AM - Oct 23, 2017

4 462 105

nei
@neixine

堺区で氾濫して一階部分浸水起きてる
 12:04 AM - Oct 23, 2017

こうと
@C15_16P

大和川の支流が氾濫して堺市内で道路冠水ですと
 12:04 AM - Oct 23, 2017

4 3

図-7 DISAANA を利用した検索結果

(3) IBM Watson Explorer

九州北部豪雨において、畑山は、災害支援団体である情報支援レスキュー隊 (IT DART) と連携し、IBM Watson Explorer (WEX) を用いたツイート分析¹¹⁾を試みた。WEX は、蓄積された文書に対してテキストマイニングの技術を用いた高度な分類・分析を行うことにより業務の知見を獲得する、オンプレミス型の構造化および非構造化コンテンツ分析プラットフォームである。図-8 は、「救助」のキーワードと関係するツイート数の推移を時系列で示した WEX の分析画面である。各時系列の棒グラフをクリックすると、対応するツイートが右のウインドウで確認できるようになっている。

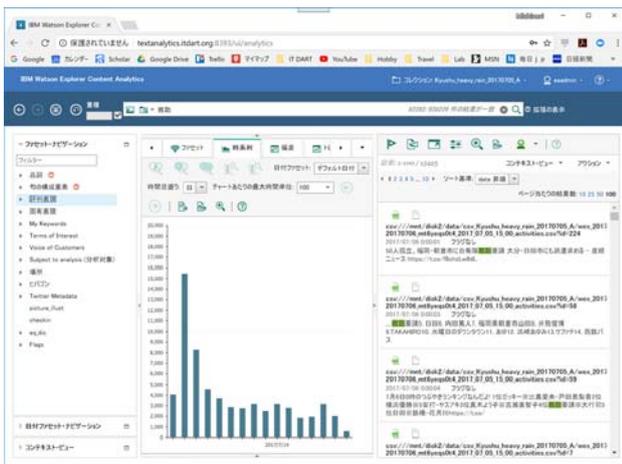


図-8 IBM Watson Explorer のイメージ

今回の災害では、救助依頼に関するツイートが多く拡散されたことが報道等で指摘されている。この依頼には「#救助」というハッシュタグがつけられているため、テキスト分析を行いやすいと考え、分析を行ってみた。結果として、「救助」に相関のある語として「朝日新聞」「妨害する」といったものが多くあらわれる結果となった。これは、朝日新聞が「#救助」という言葉を見出しにといった記事を配信し、この記事が Twitter で拡散されたことにより、本当に救助を求めている人の発したツイートが埋もれてしまったことを示している¹²⁾。朝日新聞はこの記事を午前 0 時 40 分ごろに配信し、午前 3 時半ごろに削除したため、救助に影響が出たか否かは把握されていないが、今後、ツイート分析による災害対応を実現するための経験としては、価値のあるものであったと考えられる。災害対応に利用できるツイートに関してメディアが記事にする際には、被災者から寄せられたツイートが検索時に埋もれてしまわないような工夫が必要であること (# をハッシュタグと片仮名標記するだけ

でも効果あり)、また、ツイート受け取った人は拡散するだけでなく、対策本部に通報することが、今回の教訓とすべきことであると思われる。

6. おわりに

今後期待される IoT、ビッグデータ、AI、ロボットの技術について、平成 29 年九州北部豪雨と前後に発生した災害での事例を用いて紹介した。これらの技術は今後活用への期待が一層高まることが予想されるが、提供側と利用側でのユースケースのすり合わせが、今以上に求められると考えられる。

参考文献

- 1) 内閣府：科学技術イノベーション総合戦略 2017 (本文)，2017 年 6 月 2 日，<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2017.html>。
- 2) 内閣府：科学技術イノベーション総合戦略 2017 (概要)，2017 年 6 月 2 日，<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2017.html>。
- 3) 内閣府：Society 5.0 「科学技術イノベーションが拓く新たな社会」説明資料 2，http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/society5_0-2.pdf。
- 4) 畑山満則，船越康希：熊本地震における避難場所の分布に関する分析，土木計画学研究発表会・講演集，Vol.55，CDROM，2017.6。
- 5) 内閣府：国と地方・民間の「災害情報ハブ」推進チームについて，http://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h29/87/news_05.html。
- 6) 文部科学省：「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(通称「大大特」)とは，http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203.htm。
- 7) 内閣官房，未来投資戦略 2017，2017 年 6 月 9 日，https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2017_t.pdf。
- 8) タフ・ロボティクス・チャレンジ，http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/kakushintekikenkyu/siryo/plan07_tadokoro.pdf。
- 9) 足立 義則：震災ビッグデータからソーシャルリスニングへ，放送メディア研究 (11)，pp. 290-293，丸善プラネット，2014。
- 10) Junta Mizuno, Masahiro Tanaka, Kiyonori Ohtake, Jong-Hoon Oh, Julien Kloetzer, Chikara Hashimoto, Kentaro Torisawa: WISDOM X, DISAANA and D-SUMM: Large-scale NLP Systems for Analyzing Textual Big Data, Proc. of COLING 2016, pp.263-267, 2016。
- 11) 石井 旬，村上 明子：ビッグデータ・テクノロジーを駆使して Twitter を分析する，Provision (89)，pp.40-47，日本アイビーエム，2016。
- 12) JCAST ニュース：朝日新聞が「不注意」見出し 大雨「救助タグ」効果を一時阻害，<https://www.j-cast.com/2017/07/06302623.html?p=all>

(2018.3.8 受付)

2017 年九州北部豪雨災害調査報告書

2018年 3月 30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



Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University