

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。

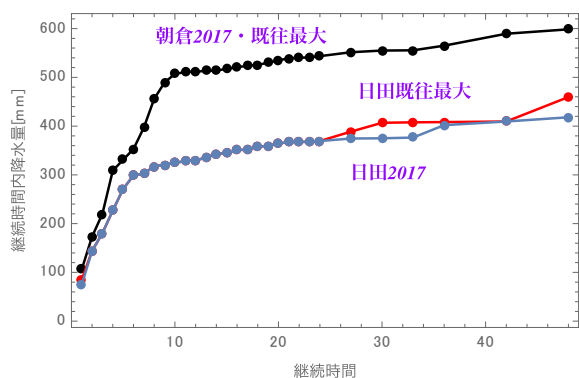


図-1 継続時間と継続時間内雨量の関係

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

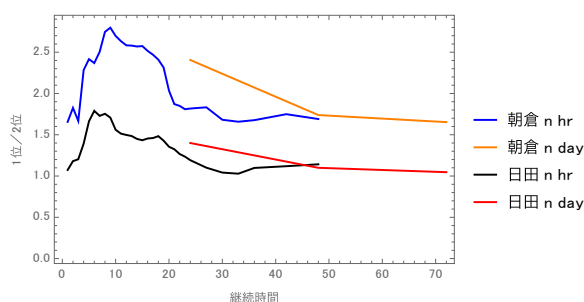


図-2 継続時間と既往最大第二位の関係

朝倉は継続時間4～20時間で2倍を超過している。

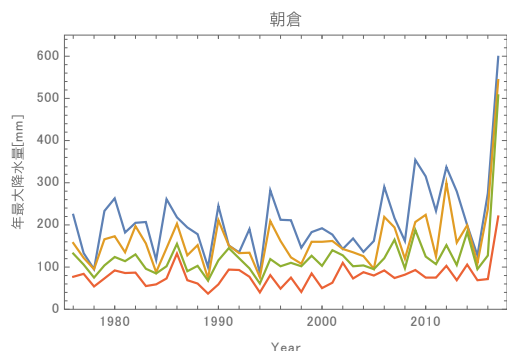


図-4 は1981-2010の期間の平均値を基準とした年最大雨量，閾値超過雨量の計，閾値超過事象数，閾値超過事象あたりの雨量の11年移動平均値をプロットしたものである。黒線で示した日田の1970年代中頃までをみると，事象あたりの雨量の比率はほぼ1であり，閾値超過雨量の計は閾値超過事象数で説明できることを示している。一方，1970年代後半以降は事象あたりの雨量が増加傾向にあり，閾値超過雨量の計と閾値超過事象数の関係は事象あたりの雨量が増加する傾向に対応した変動を示している。

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

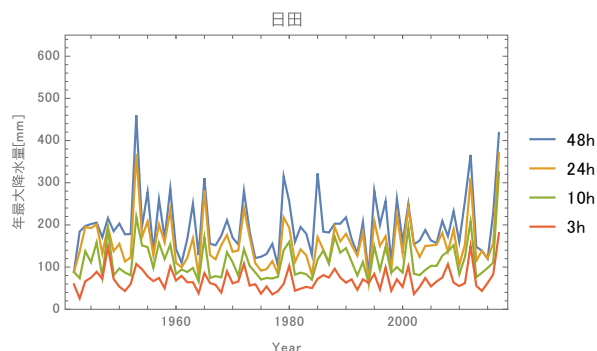


図-3 3, 10, 24および48時間の年最大雨量の経年変化 (左：朝倉，右：日田)

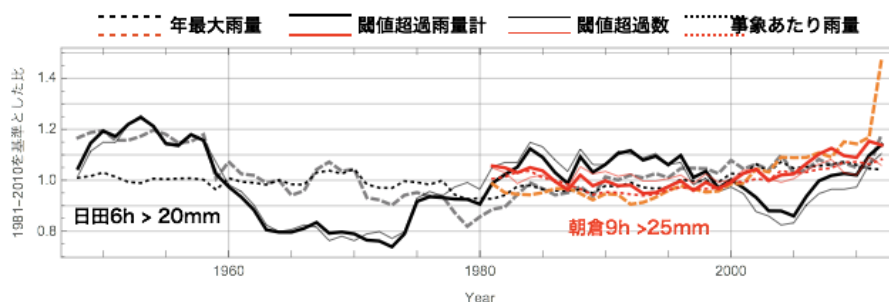


図-4 年最大雨量，閾値超過雨量計，閾値超過数，超過事象あたりの雨量の時系列変化

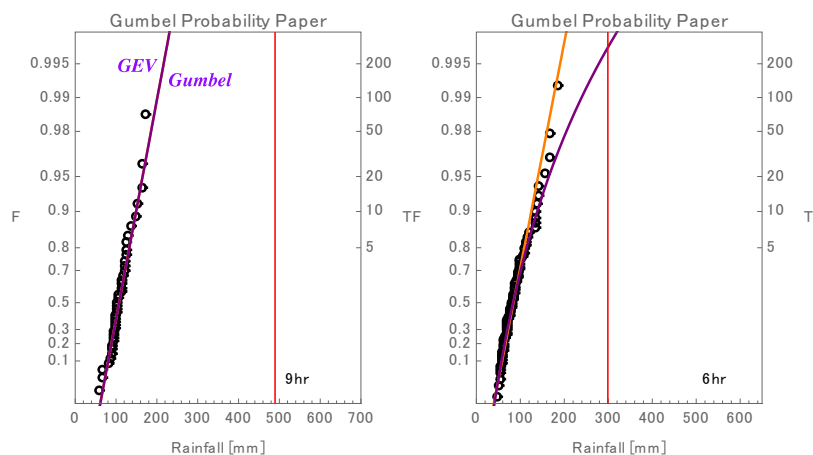


図-5 朝倉9時間および日田6時間の年最大雨量の確率プロット（左：朝倉，右：日田）
赤線は2017年事象の値

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時間積算雨量量を示す。本稿では250 m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延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698.1 mm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。

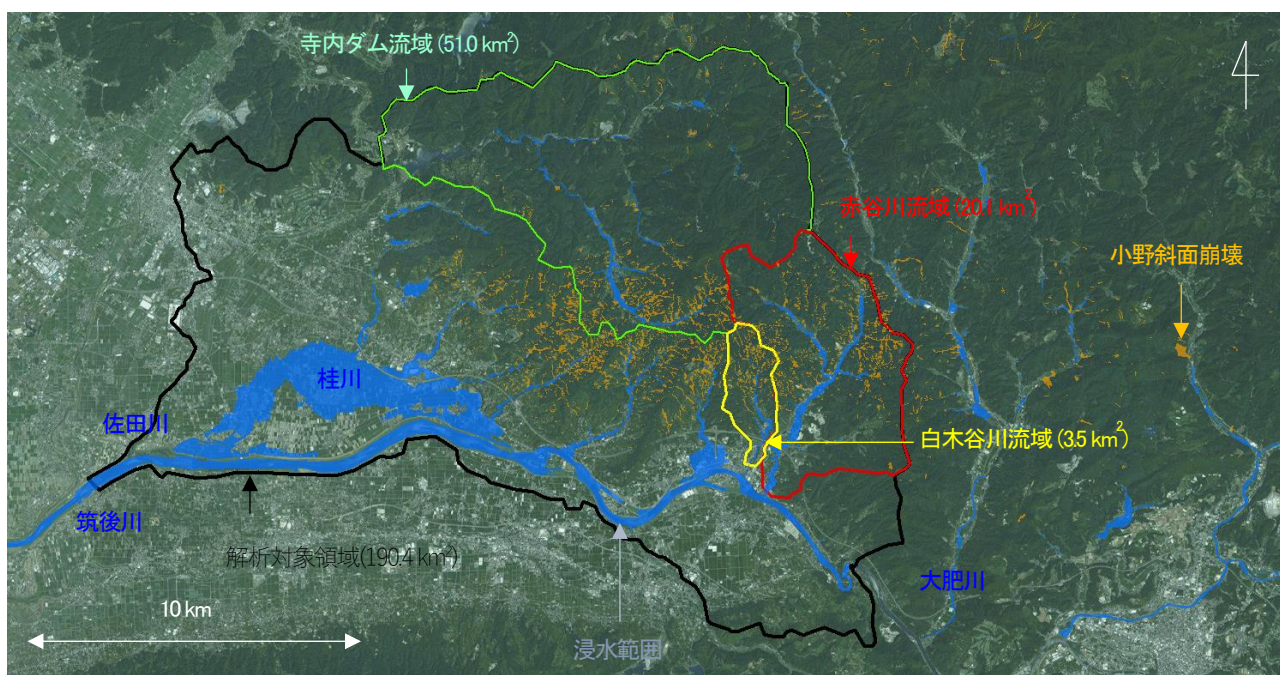


図-6 朝倉市周辺の解析対象領域

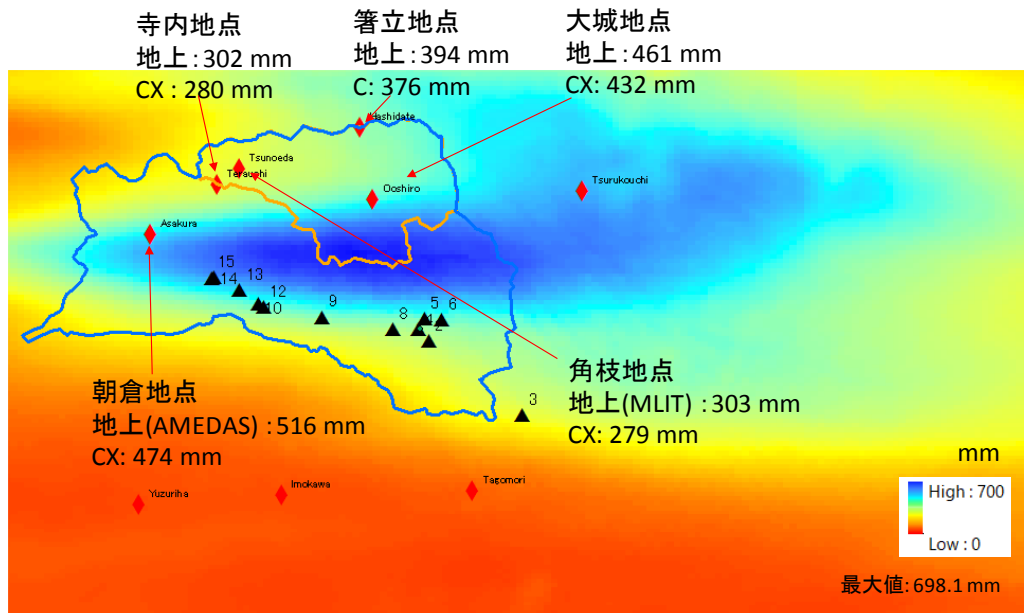


図-7 CX 合成レーダ雨量による積算雨量分布
(2017 年 7 月 5 日 0 時～6 日 0 時)
図中の▲印は RTK-GPS による浸水痕跡調査地点

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、後日内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）。

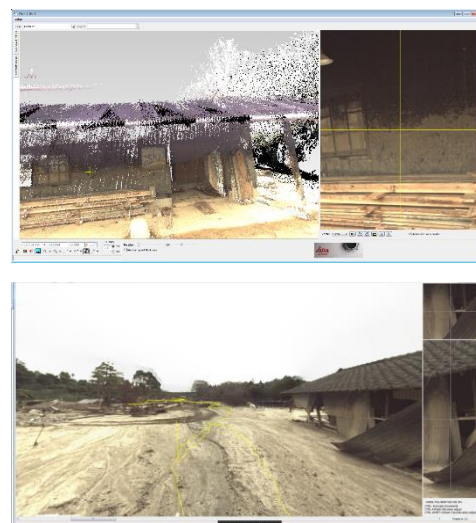


図-8 MMS による浸水痕跡調査の様子

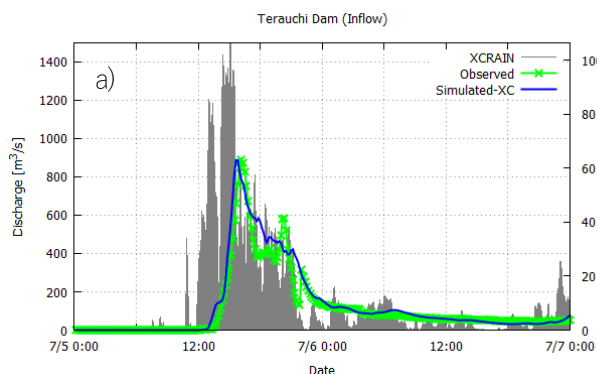
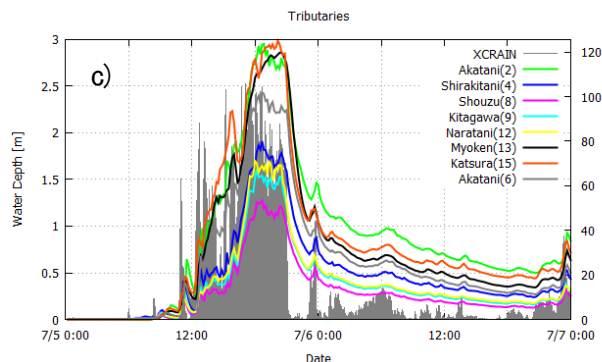
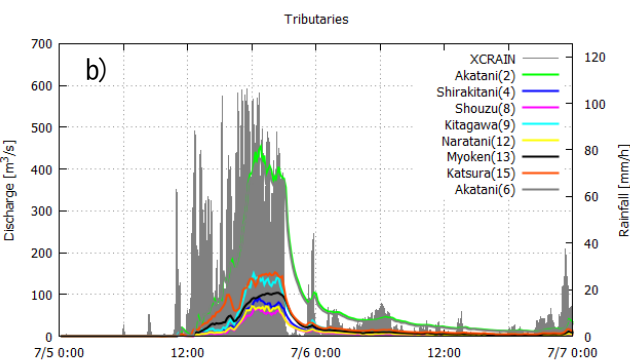


図-9 流出解析の結果: a) 寺内ダム流入量、b) 筑後川流入河川の流量、c) 同水深

** 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地理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から国土地理院による災害前の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、国土地理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

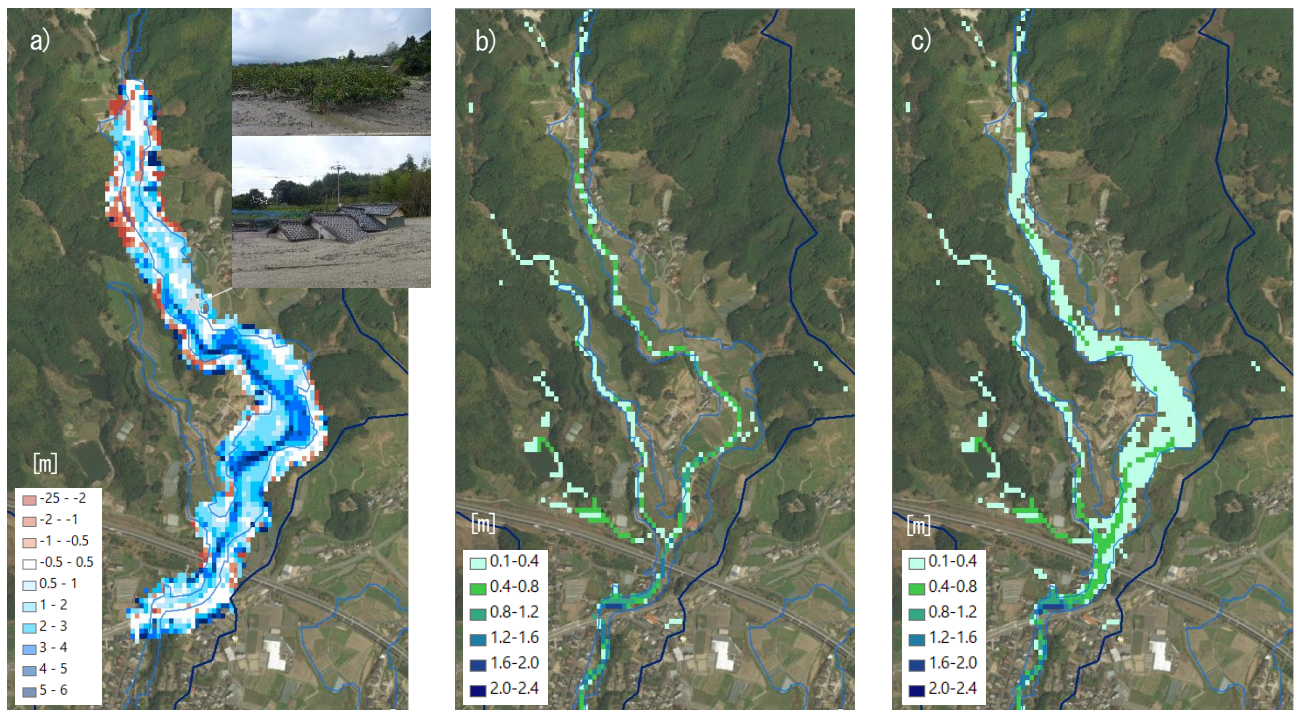


図-10 白木谷川流域下流部の a) 地形変化量(MMSによる災害後のDEMと国土地理院による災害前のDEMの差分)、10 m空間分解能のRRIモデルによって推定された最大浸水深分布：b) 災害前の地形を用いた場合、c) MMSによって推定された災害後の地形を用いた場合。

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舎など、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的確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

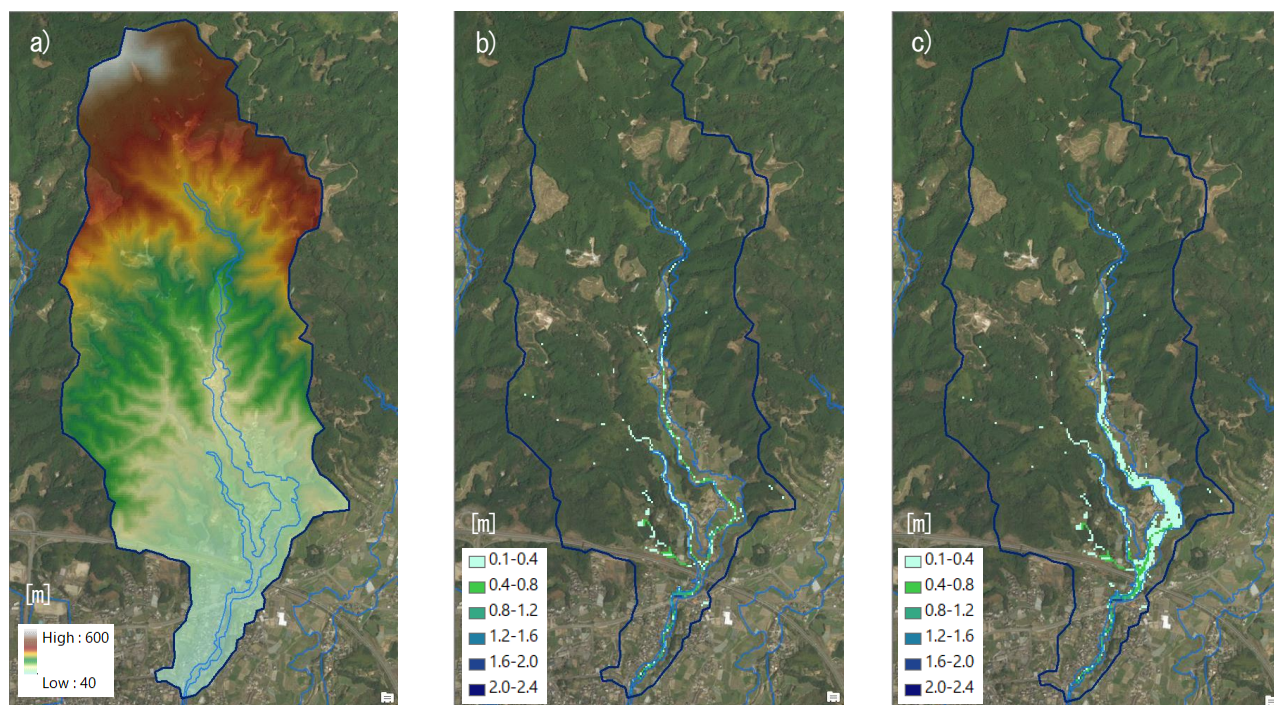


図-11 白木谷川流域の a) 標高分布と 10 m 空間分解能の RRI モデルによって推定された最大浸水深分布 : b) 災害前の地形を用いた場合、c) MMS によって推定された災害後の地形を用いた場合

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、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域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、超過外力が生起し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 巻, 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.