

SiMHiS と NHRCM05 出力データを用いた 土砂・洪水災害の将来変化に関する研究

山野井 一輝¹・藤田 正治²・鈴木 豪太³

¹正会員 京都大学助教 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: yamanoi.kazuki.6s@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター

³一般財団法人日本気象協会

気候変動に伴う土砂災害および洪水災害の将来変化を評価することを目的に、降雨流出と土砂の生産・輸送が統合的に計算できる SiMHiS に、局所的な豪雨が十分捉えられる 5km 解像度 30 分間隔の NHRCM05 出力データから抽出した豪雨データを入力とすることで、福岡県朝倉市赤谷川と同じ地形・地質を持つ流域で発生する現象の将来変化を考察した。赤谷川流域の流量および土砂生産量を降雨流出タイプ毎に整理した結果、双方の値が将来にかけて顕著に増加する傾向が確認された。また、支川乙石川流域からの土砂流出量と最大流量、および下流河道の最大水位と河床位を同時に比較したところ、各値の増加傾向だけでなく、発生する現象のばらつきも増加することから、これまでと異なる傾向の災害も高頻度で発生しうる可能性が推察された。

Key Words: *sediment-related disaster, future change, rainfall runoff, landslide prediction, NHRCM05*

1. 研究の背景と目的

気候変動に伴い、災害をもたらすような雨の増加が懸念されている。このため、豪雨が外力となる洪水災害や土砂災害が増加および甚大化する可能性がある。外水氾濫を対象とする場合、河川の流量と降雨には明瞭な関係性がある。このため、気象・気候モデルが出力する降雨データを入力とした、流出・氾濫解析を行なうことで、そのリスクの変化を定量的に評価することができる¹⁾。内水氾濫についても、地表付近の水の輸送を正確にモデル化することで、その変化を定量的に評価できる²⁾。

しかしながら、土砂災害を対象とする場合は、洪水災害と比べて次のようなことが問題となる。まず、山地で発生する土砂災害は、降雨量に対して土砂流出量が線形に増加せず、ある閾値を超えると増加するような非線形性がある。また、10~30分等、短期的な降水量が土砂災害発生に大きな影響を及ぼす場合も多い³⁾。さらに、洪水災害よりも相対的に稀な現象であり、例えば 2017 年九州北部豪雨災害では、朝倉市 9 時間雨量の再現期間は 45,000,000 年、日田 6 時間雨量の再現期間は 31,000 年と評価されている⁴⁾。このため、このような現象を対象とする場合、高々 数百年程度のアンサンブル降雨データセ

ットを利用して、将来変化を直接かつ十分に捉えることは困難である。

そこで、本研究では降雨の流出と斜面崩壊による土砂の生産、および河道内での土砂の輸送を一体的に解析可能な SiMHiS⁵⁾を利用して、非線形性の大きい土砂・洪水災害の将来変化を評価する。対象領域は九州北部豪雨朝倉市赤谷川流域とする。降雨データは 30 分、5km 解像度で現在 20 年×2 アンサンブル、将来 20 年×4 アンサンブルの NHRCM⁶⁾によって出力されたデータセットを利用する。ただし先述のように、当データを用いて対象領域で発生する降雨データのみを追跡した場合、現在 40 年分、将来 80 年分のデータのため、九州北部豪雨で発生したような大規模(大再現期間)現象の表現は困難である。そこで、本研究では九州北部(福岡県、大分県、佐賀県、長崎県、熊本県)のどこかで発生しうる降雨が赤谷川流域にもたらされると仮定して、発生する現象を予測することで、このような領域で発生する土砂災害および洪水災害の将来変化を考察する。

2. 実際の降雨データを入力した再現計算

SiMHiS(Storm induced Multi Hazard information Simulator)⁵⁾は、

流域地形を単位河道・単位斜面・斜面要素の集合でモデル化し、降雨を入力条件として、単位斜面における降雨の流出、斜面要素における斜面崩壊の発生と生産土砂量(崩壊土砂量)の予測、および河道部における水・土砂(掃流砂および浮遊砂)の輸送を一体的に解析するシミュレーションモデルである。生産土砂量は、斜面崩壊モデルが出力するすべり面の断面積と予条件である斜面崩壊幅の積で求める。本モデルで予測される生産土砂量は土石流による河道部の侵食によるものは含まれないが、斜面要素の下部には土石流痕跡部分も含まれるため、土石流侵食によるとみなされる領域の生産土砂量も擬似的に含む値である。本研究の対象領域である福岡県朝倉市赤谷川流域を対象に抽出した地形モデルを図-1(a)に示す。

粒径分布は現地の3地点(花崗閃緑岩および片岩の崩壊土および河床)で2017年9月15~17日に採取し、ふるい分け試験によって得たデータを参考に、図-2のように設定した。ここでは生産土砂に与える粒径分布は、流域内の地質に応じて斜面毎に与えている。なお10cm以上の礫分の採取が困難であったため、いずれも10cmの粒径成分を20%ずつ加えてある。また、降雨データには、30分間隔の解析雨量を斜面毎に与えている。その他の代表的なパラメータは表-1に示すとおりであるが、より詳細な計算条件については参考文献⁸⁾⁹⁾を参照願う。

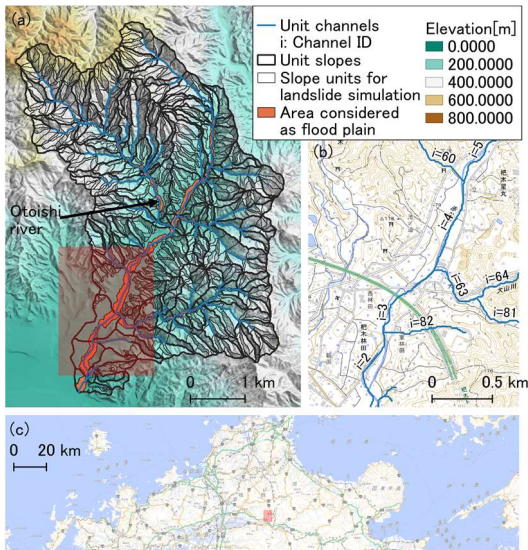


図-1 対象領域(福岡県朝倉市赤谷川流域)(a)赤谷川流域を対象に抽出した地形モデル、(b)赤谷川下流部の拡大図、(c)対象領域の位置

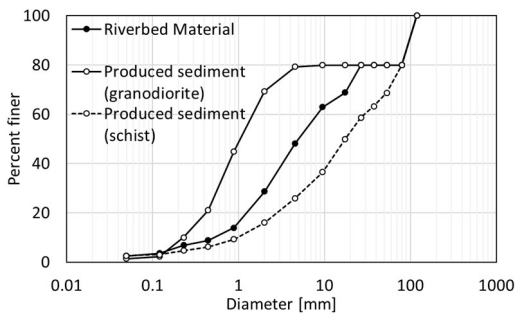


図-2 入力した粒径分布⁸⁾

平成30年7月豪雨の実際の降雨データを与えた場合の、河道 i=2 および i=5 地点における水位と河床位の計算結果を図-3に示す。いずれの地点も上流から輸送された土砂が河床に堆積した上で、甚大な洪水氾濫が発生した地点である。これらの地点では、初期河床位を基準として2~3mの河床上昇と3~4mの最大水位が計算されている。次に図-4に河道 i=2, i=5 付近の被災後の航空写真と、河床からの比高 hr のコンターを示す。河道 i=5 の上流側や i=2 の下流側では、被災範囲の痕跡が概ね hr=4~5[m] のコンターで囲まれる領域と一致している。このことから、計算値の最大水位は実績値に比べて若干小さく評価されている可能性はあるものの、大きくは矛

表-1 代表的なパラメータ

Parameter	Value [Unit]	Parameter	Value [Unit]
飽和透水係数 (花崗閃緑岩)	1.44×10^{-4} [m/s]	タイムステップ	0.1 [s]
飽和透水係数 (その他)	4.49×10^{-4} [m/s]	交換層厚さ	0.20 [m]
土層厚	2.0 [m]	斜面崩壊幅	23 [m]
河道のマニング粗度係数	0.03 [m ^{1/3} s]	崩壊時の限界水分量との比	1.21 [-]

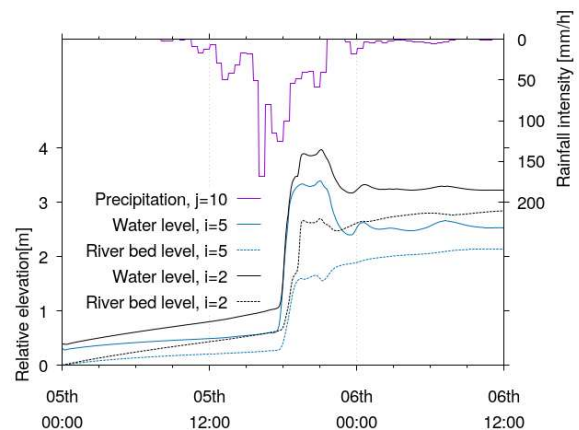


図-3 河道番号 i=2, 5 における水位と河床位(初期河床位基準)の計算結果および入力した降雨条件の j=10 (i=5 右岸側)地点における値

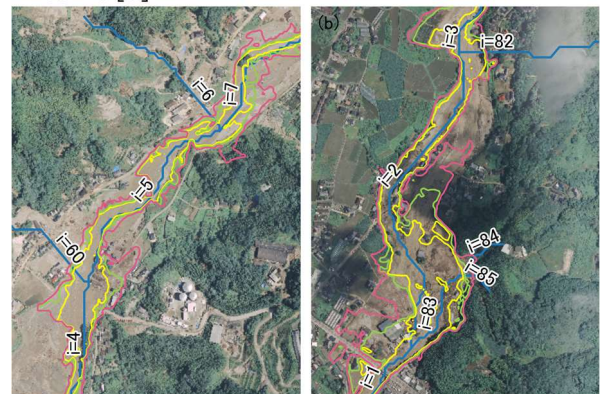
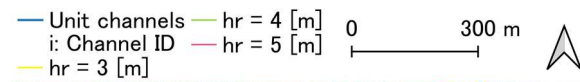


図-4 河道番号 i=2 および 5 周辺の被災直後の航空写真と、河道部からの比高コンター

盾しない結果が得られていると評価できる。また、流域内で生産された土砂量は、253.5万m³と算出された。九州地方整備局の報告書によると、流域内の発生土砂量はLidar計測による解析から291万m³と評価されており¹⁰、これにも矛盾しない結果と言える。

3. 現在と将来の降雨データを入力したシミュレーション

(1) NHRCM05 データセットからの降雨条件の抽出

本研究では領域気候モデルNHRCM05⁷⁾によって出力された、30分間隔5km解像度の降雨データから、中北・小坂田¹¹⁾によって、時間雨量換算で50mm以上の雨域が同じ地域に2時間以上停滞することなどの客観的条件に基づいて抽出された、梅雨期の豪雨イベントの降雨データを用いる。ただし、九州北部で発生している豪雨イベントのデータのみを対象とする。当データは1セットあたり20年間分のイベント中の全国の降雨データが格納されており、現在2アンサンブル(合計40年分,p,p2)と将来4アンサンブル(合計80年分,c0,c1,c2,c3)相当のデータを利用する。なお、降雨イベントの期間は、豪雨イベントの発生日に前後1日ずつを付加した3日間としている。このため、豪雨発生日の2日前以前の先行降雨は考慮できないが、降雨継続時間が2日程度であった平成29年7月豪雨に類似する豪雨事象の大半は捉えられるものと考えられる。対象としたイベント数を表-2に示す。イベント数だけを見ても、現在は40年中51イベントであるものが、将来は80年中148イベントであることから、中北・小坂田の基準¹¹⁾で抽出される降雨イベントが約1.5倍に増加していることが分かる。

次に、このデータに含まれる5km解像度の降雨データから、九州北部の領域内で最も災害を発生させうる極大地点のハイトグラフを抽出し、シミュレーションの入力として流域全体に与える。ただし、一つの降雨イベン

表-2 計算に使用した降雨イベント数

現在データ	イベント数	将来データ	イベント数
p	33	c0	37
p2	18	c1	46
		c2	32
		c3	33
計	51	計	148

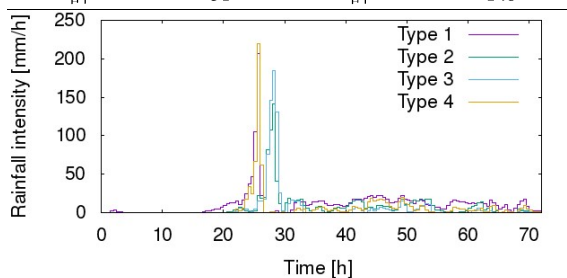


図-5 降雨データの一例 (c0,2093年8月22-24日のデータ)

トでも地点・地域によって降雨の波形は異なる上、異なる波形の雨でも災害が発生する可能性がある。このことを考慮するため、極大地点の選定には、下記の4タイプの手法を用いた。

まず、Type 1では九州北部(福岡、大分、熊本、佐賀、長崎)の陸地部の中で3日間の総降雨量が最大の地点を、極大地点とみなす。次にType 2、Type 3は九州北部の陸地で、連続雨量が最大の地点を選定する。ただし、連続雨量はType 2では無降雨状態が30分以上継続した場合に、Type 3では50mm/h以下の状態が30分以上継続した場合にゼロにリセットする手法で計算する。最後にType 4は積算雨量に関わらず、30分間の降雨強度が最大となる地点を選定したものである。なお、Type 3は、中北・小坂田の梅雨豪雨の判定基準が50mm/h以上の雨域停滞を基準としている¹¹⁾ことを根拠に設定したものである。type 1, 2, 4で用いる量大きい降雨イベントは、梅雨豪雨の抽出時の基準で見落とされているものも存在するが、type 3であれば見落としは少ないものと考えられる。c0データ中のある降雨イベントを対象に、type 1~4の手法で抽出したハイトグラフを図-5に示す。4種類の方法で異なるハイトグラフが抽出されていることが確認できる。ただし、イベントによっては同じ地点のハイトグラフが抽出され重複するため、以後抽出タイプ別に現在と将来の差を考察する。

(2) 赤谷川流域全体の将来変化に関する考察

まず、赤谷川流域全体の変化傾向を考察するため、流域下流端直上の単位河道*i*=2における最大流量の計算結果を箱ひげ図にて図-6に示す。まずtype 1とtype 2の計算結果を対象に、外れ値を除外して最大値、第3四分位値、中央値を比較すると、現在データ(p,p2)よりもすべての将来データ(c0,c1,c2,c3)で大きい結果となったことが分かる。また、c0~c3とp,p2のすべての値が含まれるc_allとp_allを比較した場合にも、最大流量が、将来において明瞭に増加している。これらのことから、将来に発生する上位イベントにおいて、現在のイベントよりも流量が増大する傾向があることが確認できる。

同様にtype 3、type 4の場合でも最大値、第3四分位値の増加傾向が確認できるが、中央値以下の変化は明瞭には確認できない。これは、type 3、type 4の抽出条件がいずれも短時間で強度の大きい降雨イベントも抽出されるものであることから、相対的にピーク前の先行降雨が小さく最大流量が小さいイベントが、結果に含まれたためと考えられる。

次に、赤谷川流域全域における斜面崩壊による土砂生産量の計算結果を図-7に示す。最大流量と同様に、type 1とtype 2では外れ値を除外した最大値、第3四分位値、中央値のいずれも将来のほうが大きい結果となった。

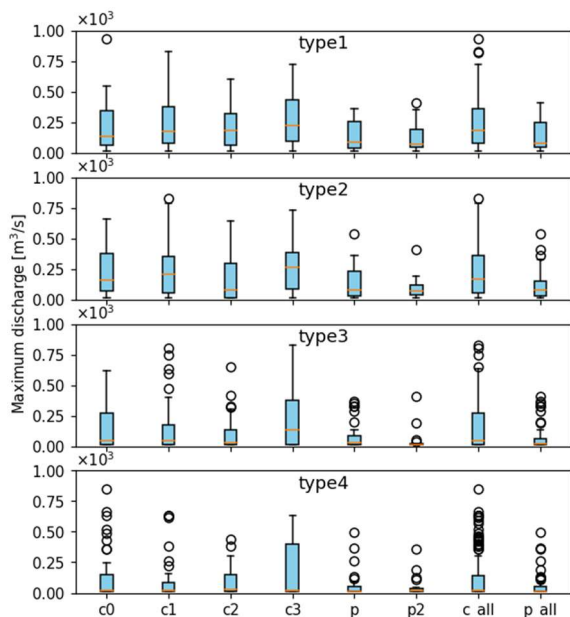


図-6 河道i=2における最大流量の計算結果。Typeは降雨の抽出タイプを示す。c0~c3は将来気候、p,p2は現在気候の20年相当分の降雨イベントを示す。C_all,p_allは将来および現在のすべての結果を統合したものである。

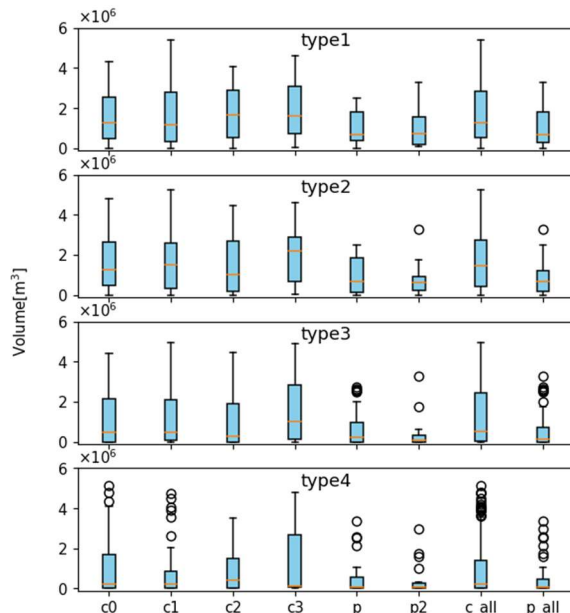


図-7 赤谷川流域内の斜面崩壊による土砂生産量の計算結果。

表-3 土砂生産量の計算結果が253.5m³以上となったイベント数

	現在(51イベント中)	将来(148イベント中)
Type 1	3(5.88%)	49(33.1%)
Type 2	2(3.92%)	46(31.1%)
Type 3	5(9.80%)	37(25%)
Type 4	4(7.84%)	29(19.6%)

type 3, type4 でも同様に最大値、第3四分位値の上位イベントの増加傾向が確認できるが、中央値の変化は type 1,type2に比較すると小さい結果となった。次に、表-3に九州北部豪雨災害の生産量 253.5 万 m³ を超過した降雨イベント数を示す。いずれの降雨抽出手法を用いた場合でも、九州北部豪雨災害以上の規模の土砂生産を生じさせる降雨イベントの個数は、現在気候だと 51 イベント中 2

~5 イベントであるのに対し、将来気候だと 148 イベント中 29~49 イベントと、比率にして 2.5~8 倍程度増加していることが分かる。

(3) 支川乙石川における分析

九州北部豪雨災害で顕著な被害が生じたのは、赤谷川下流部での、河床上昇を伴った水位上昇である。この原因は、上流からの土砂の輸送にあり、特に北西側支川の乙石川において、生産・流量が大きいことが確認されている¹⁰。このことから、乙石川流域における土砂の流出量と最大流量の変化について検討する。図-8は、乙石川流域を対象とし、最大流量を横軸に、土砂の総流出量を縦軸にとって全ての計算ケースの値をプロットしたものである。これらのうち、現在のイベントと将来のイベントの統計値(各四分位値)を箱ひげ図で併記している。まず、乙石川下流地点において、流量と土砂流出量は双方とも将来にかけて増加することが分かる。また、散布図の左上にあるプロットのように、type 1,type2では最大流量が少ないにもかかわらず土砂生産量の大きいイベントが複数生じている。すなわち、現在気候で得られている範囲よりも大規模に土砂が流下するものの、最大流量はさほど大きくないものであり、降雨継続時間が長く、最大降雨強度が比較的小さいものが該当する。このような現象の場合、下流への土砂輸送量が増加することから、単純な洪水災害よりもより土砂の影響の大きい災害と捉えることができる。このような現象の比率が増加するか、減少するかについては、今回の計算だけでは評価が困難であるが、本計算では全ての抽出タイプにおいて、最大流量および土砂流出量のばらつきが増加していることから、現在気候に含まれない特徴を持った現象が将来気候では発生するということが推察される。

(4) 下流河道部における分析

前節で支川流域からの流量と土砂流出量の変化が捉えられた。しかしながら、例えば流量が最大となったタイミングで下流側の河積が確保され、その流量を十分に流すことができる状態であれば被害は生じない。このため、災害時の被害の将来変化を捉えるには、単に最大流量や流出土砂量を評価するだけでは不十分である。

そこで、直接被害を生じさせる量として、水位を取り上げ、水位上昇に寄与する河床上昇と共に将来変化を考察する。ここでは、甚大な被害が生じた河道 i=5 地点を対象とし、横軸に最大水位を、縦軸に最大河床位(いずれも初期河床位を 0 を基準とした比高)をプロットしたものを図-9に示す。まず、type 1, 2の散布図を見ると、最大水位が 3m 程度まで最大水位との線形な関係があるが、3m 以上の領域では最大河床位が 2.5m 程度で頭打ちとなり、それ以上は増加しない傾向となっている。これ

が本モデルの特性やパラメータに起因するものなのか、それとも実現象として頭打ち点が生じるのか、については更なる検証が必要であるが、例えば頭打ち点の高さが高精度に定量化できれば、堤防等の嵩上げの目安として活用できる可能性がある。また、すべてのタイプにおいて、3.5m程度の同程度の水位を記録していながら、最大河床位には1.5-2.5m程度のばらつきが大きい領域があることがわかる。上部ほど水位に対する土砂の寄与が大きい領域である。それぞれのタイプの抽出した範囲では、上部・下部プロットの比率について現在と将来に明瞭な差は見られない。ただ、type1,2では上部のプロットの比率が大きく、type3,4ではtype1,2よりも下部プロットの比率が大きい。このことから、仮にtype1,2で抽出され

るような長期の降雨と、type3,4で抽出されるような短期の降雨の増減がそれぞれ評価できれば、同じ程度の水位に対する河床上昇の寄与の将来変化まで評価できると期待できる。

4. 結論

本研究では、NHRCM05 出力データから抽出された梅雨豪雨発生時の降雨データから、さらに4種類の手法で抽出した地点の降雨をSimHiSの入力条件とすることで、現在・将来に発生しうる現象の性質に関する将来変化について検討した。赤谷川流域や、支川の乙石川流域、および下流の河道部を対象として、最大流量・生産土砂

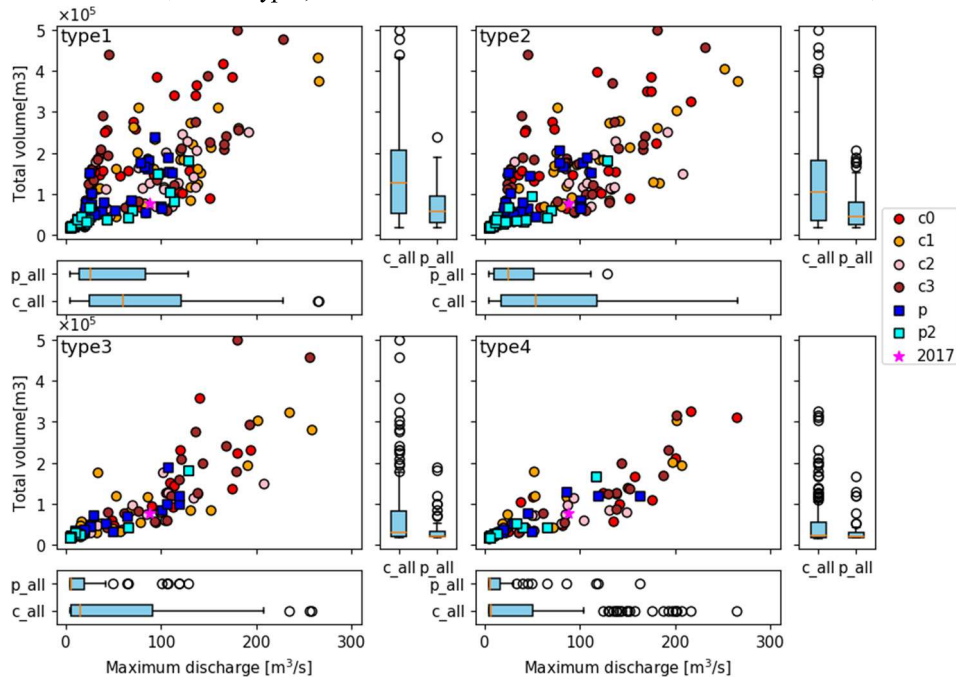


図-8 乙石川下流端における最大流量と総土砂流出量の関係

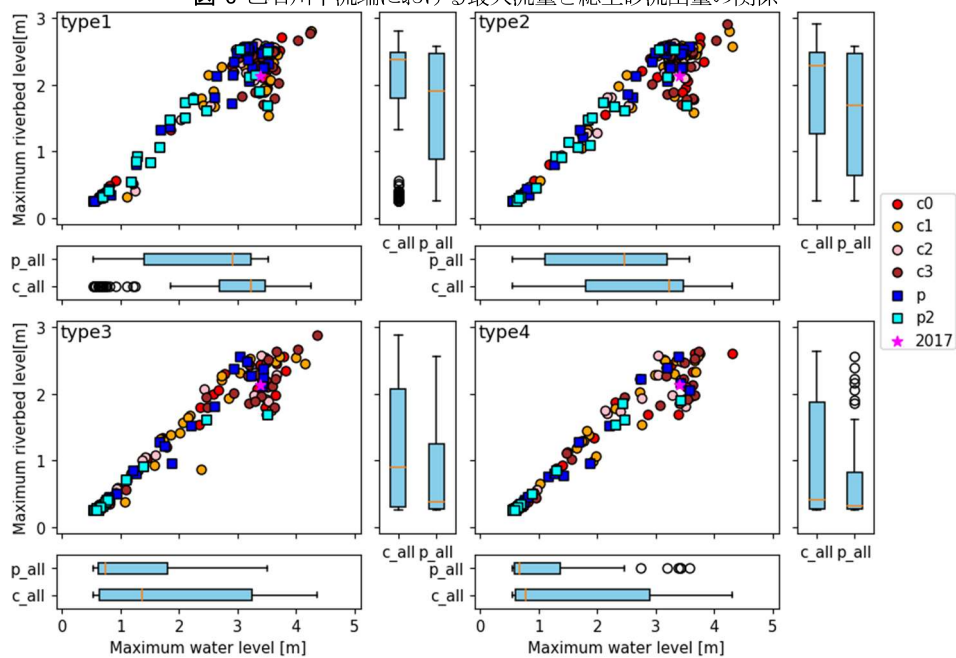


図-9 河道 i=5 における最大水位と最大河床位(いずれも初期河床位からの変位)の関係

量・流出土砂量・最大水位・最大河床位を比較した。これにより、豪雨によって生じる出水の規模、斜面崩壊の流域内の規模、生産土砂の河道への流入・流下による河床上昇とそれに起因した水位上昇が、将来に向けて増加することが評価された。ただし、本モデルで表現されない土石流の流動特性の変化や、梅雨豪雨以外の降雨イベントや、梅雨期間でも 50mm/hour 以下の降雨が長期間継続するような降雨イベントは評価されていない点に注意が必要である。

また、降雨の抽出手法によって、発生しうる現象の傾向が異なる上、将来変化の傾向・ばらつきが大きく異なることが確認され、例えばピーク流量は小さいながら土砂流出量の大きい現象など、現在では発生しない範囲の現象が発生する可能性が指摘された。なお、本研究での降雨抽出手法では、小規模な降雨イベントや、台風のような他の原因で生じる降雨は除外されており、降雨への地形の影響も考慮されていない。このため、本結果をそのまま赤谷川流域の将来変化として捉えることはできないが、本研究の仮定のもと、九州北部で梅雨期に発生しうる現象の傾向変化を示すことができたと考える。なお、本研究では赤谷川の単一条件に限った検討であるが、同様の手法で、異なる地形・地質条件下、例えば土砂生産がより活発・非活発な領域での現象がどう変化するか等についても検討可能である。今後、同様の手法を拡張することで、より一般性をもたせた評価を進めていくことを考えている。

謝辞：本研究の実施にあたり、京都大学防災研究所拠点研究（一般）気候変動下での土砂災害の発生形態の将来予測に関する研究の補助を受けた。また文科省気候変動リスク情報創生プログラム、統合的気候モデル高度化研究プログラムの協力のもとに気象庁気象研究所が開発した気候モデルの出力データを使用した。またデータ提供時、京都大学防災研究所水文気象災害研究分野の皆様の

協力を得た。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 天口英雄, 河村明: NHRCM 5km 降水量 10 分値データを用いた神田川上流域の洪水流出・浸水リスク評価, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.13-18, 2020.
- 2) 戸田敦仁, 尾崎平, 石垣泰輔, 橋本彰博, 戸田圭一: d4PDF を用いた将来降雨に基づく内水氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_727-I_732, 2020.
- 3) 池田暁彦, 水山高久, 原口勝則: 土石流の発生を支配する降雨量に関する考察, 砂防学会誌, Vol. 60, No.3, pp.26-31, 2007
- 4) 田中茂信, 佐山敬洋: 降雨の局地統計と流出・氾濫現象の現地調査及びモデリング, 2017 年九州北部豪雨災害調査報告書, 京都大学防災研究所, pp.72-79, 2018.
- 5) 山野井一輝, 藤田正治: 豪雨時の水・土砂災害に係るハザード群の発生リスク評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No.4, I_1291-I_1296, 2016
- 6) 山野井一輝, 藤田正治: 複合土砂災害シミュレータ SiMHIS を用いた山間地域における土砂災害の警戒避難情報の提供に関する一考察, 砂防学会誌, Vol.69, No.6, pp.15-23, 2017.
- 7) Sasaki, H., et al.: Preliminary Experiments of Reproducing the Present Climate Using the Non-hydrostatic Regional Climate Model, SOLA, Vol.4, pp.25-28, 2008.
- 8) 山野井一輝, 藤田正治: 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, 2017 年九州北部豪雨災害調査報告書, 京都大学防災研究所, pp.68-71, 2018.
- 9) 鈴木豪太: マルチハザード情報を用いた土砂災害警戒避難への SiMHIS の活用に関する研究, 京都大学修士論文, 2020
- 10) 国土交通省九州地方整備局, 筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書, 2017
- 11) 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), Vol.74, No.4, pp. I_139-I_144, 2018.

(Received June 30, 2021)

(Accepted September 3, 2021)

EVALUATION OF FUTURE CHANGE ON SEDIMENT- AND WATER-RELATED DISASTERS EMPLOYING SIMHIS AND NHRCM05 OUTPUTS

Kazuki YAMANOI, Masaharu FUJITA, and Gota SUZUKI

In order to evaluate the future change of sediment- and water-related disasters under climate change, this study compared the simulation results of the water and sediment runoff model considering sediment yield by landslides. The output of NHRCM05, a regional climate model, was employed as rainfall inputs. As a result of applying to the Akatani river basin, which was damaged in the heavy rainfall disaster in northern Kyushu, 2017, both the maximum water discharge and total sediment yield volume in the target basin were increased in the future rainfall data. Additionally, the variation of the relationship among total sediment runoff volume and maximum water discharge was also increased. These results implied that the possibility that disasters with a different trend will appear in the future.