

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03019

研究課題名(和文) 気候変動により増大する災害リスク定量化のための洪水・土砂流出量予測手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of flood and sediment discharge predicting method to quantify disaster risk increased by climate change

研究代表者

内田 太郎 (Uchida, Taro)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：60370780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：気候変動により近年、土石流や土砂・洪水氾濫による被害が頻発している。さらに、気候変動により降雨の規模が増大することが懸念されている。そこで、降雨規模の増大にともない土石流や洪水による災害リスクがどの程度増大するかを定量的に評価することが重要と考えられる。本研究では、降雨規模の増大にともなう水・土砂流出現象の変化について、現地水文観測、災害データの分析等により解明を進めた。その結果、降雨規模と水・土砂流出現象の規模の関係は強い非線形性があること、降雨規模により、水・土砂流出現象の4段階に分類できることを実証的に示した。その上で、これらの段階を考慮し、災害リスクを評価することの重要性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨時の山地流域の水・土砂流出現象と降雨規模の関係について、包括的な研究は従来限られていた。これに対して、本研究では、現地水文観測、災害前後の航空レーザー測量データを活用した土石流ピーク流量の推定および流出土砂量の空間分布様式の把握、災害記録の分析といった複数の手法を組み合わせることにより、比較的降雨規模が小さい年に数回発生する豪雨から、数10～100年一度といった極めてまれな豪雨による現象まで包括的に研究した。その結果、降雨規模の増大にともなう水・土砂流出現象に及ぼす影響を実証的に示すことができた。これは今後の気候変動による災害リスク評価の基礎となる知見であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Recently, damage caused by debris flows, landslides, and flooding has become more frequent due to climate change. Furthermore, there are concerns that the scale of rainfall will increase due to climate change. Therefore, it is considered important to quantitatively evaluate future risk of disasters caused by debris flows and floods with an increase in the scale of rainfall. In this study, we have attempted to clarify the changes in water and sediment runoff phenomena that accompany an increase in the scale of rainfall through hydrological observations and analysis of disaster data. As a result, we have empirically demonstrated that the relationship between the scale of rainfall and the scale of water and sediment discharge phenomena is strongly nonlinear, and that water and sediment discharge phenomena can be classified into four stages depending on the scale of rainfall. Based on this, we have demonstrated the importance of evaluating disaster risk by taking these stages into account.

研究分野：砂防学

キーワード：気候変動 土砂災害 山地流域 斜面水文 土砂流出 土石流

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始前に日本全国で豪雨の発生頻度が高まっており、中山間地域において豪雨による深刻な災害が頻発していた(例えば、2018年西日本豪雨による災害、2017年九州北部豪雨、2016年北海道十勝川の災害)。また、中山間地域では、過疎化の進行などのため防災力が低下しており、災害後の復興には多大の時間がかかり、最悪の場合、集落の消滅といった不可逆的な被害をもたらす場合も生じていた。

一方、我が国の財政状況、経済状況から考え、森林の管理や対策施設の整備には限界があり、中山間地集落のすべてを対策施設等により保全することは困難であると考えられた。そこで、中山間地域の強靱化をはかるためには、災害リスクが大きいところを事前に把握し、優先的に対策を実施する必要があると考えられた。そのためには気候変動にともなう降雨規模の変化が山地の洪水、土砂災害に及ぼす影響を定量的に評価することが重要となると考えられた。

しかし、降雨規模が山地の洪水、土砂災害の発生、規模に及ぼす影響については十分に評価できるとはいいがたかった。評価が困難な原因として、山地では多様な水や土砂の移動現象が生じていること、山地の場の条件は多様であり、場所による違いが大きいこと、が考えられた。その結果、「山地流域における降雨規模の変化に対する洪水・土砂流出の応答特性」が包括的に明らかになっていないと考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、気候変動による豪雨の激甚化が中山間地集落の自然災害リスクに及ぼす影響を定量的に評価するために、災害を引き起こすような豪雨時の山地流域における降雨規模と水・土砂流出量の関係を包括的かつ実証的に解明することである。

3. 研究の方法

本研究では、以下の4つのテーマについて研究を実施した。

テーマ1: 山地流域の降雨強度に鋭敏な流出応答の存在確認と機構解明

テーマ2: 土石流発生条件およびピーク流量の決定機構解明

テーマ3: 降雨規模が斜面崩壊による生産土砂量に及ぼす影響の評価

テーマ4: 降雨規模が中山間地域の洪水・土砂災害リスクに及ぼす影響評価手法の提案

テーマ1に関しては、筑波大学井川演習林および東京大学秩父演習林において、水文観測を実施した。7流域で水文観測を継続的に実施した。いずれの演習林においても、流域面積の異なる多数の流域で水位観測、水温、電気伝導度等の観測を実施し、大起伏山地流域における豪雨時の洪水の遅れ時間と地形量の関係を分析した。

テーマ2では、土石流発生前後の航空レーザー測量結果を用いた。測量データから求めた侵食範囲は土石流が通過した範囲と一致すると仮定し、土石流ピークの流速・流量の推定を行った。流速の推定に関しては、流体の偏流に関する既往の理論式および実験式を用いた。その上で、土石流のピーク流量の縦断変化を把握した。

テーマ3においては、豪雨前後の航空レーザー測量結果および国土交通省が収集している全国の土砂災害に関するデータを分析した。豪雨前後の航空レーザー測量結果は、2017年九州北部豪雨による福岡県赤谷川、2019年東日本台風による宮城県内川の事例を主な対象とした。流出土砂量を航空レーザー測量結果を用いて求めた上で、解析雨量と関係性の分析を行った。

さらに、テーマ4において、テーマ1~3の成果を集約し、降雨規模と水・土砂流出現象の関係の概念モデルを構築した。その上で、概念モデルに応じた水・土砂流出量の評価手法を提案し、適用性を検証した。

4. 研究成果

(1) 山地流域の降雨強度に鋭敏な流出応答の存在確認と機構解明

筑波大学井川演習林においては、流域面積の異なる7流域で継続的に水位と電気伝導度の観測を実施した。その上で、洪水の遅れ時間を流域面積が概ね等しいが、起伏量が大きく異なる東京大学樹芸研究所の既発表データと比較し、大起伏山地の降雨流出応答について検討した(図1)。その結果、大起伏山地で斜面長が長い井川演習林であっても、洪水の遅れ時間は、中起伏山地の樹芸研究所の遅れ時間と差がないことを示した(Hajika et al., 2024)。また、大起伏山地であっても、年に数回程度生じる降雨の規模であっても、斜面が飽和に達し、斜面の流下過程において顕著な遅れが生じない可能性を示した。

また、従来は、斜面上において洪水流は主として土層と岩盤境界面で発生

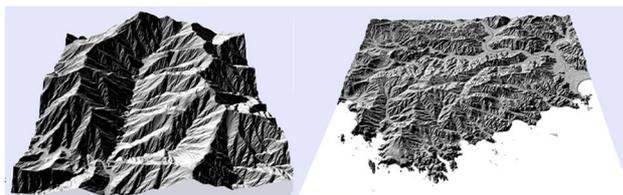


図1 井川演習林周辺(8×8 km²)の地形(左)と比較した樹芸研究所周辺の地形(右);地理院地図より作成

する中間流によって形成されていると考えられていた。大起伏山地の洪水流出経路を明らかにするために、秩父演習林における水位、水温の連続観測データや溶存シリカ濃度、水の安定同位体比のデータを解析した。その結果、洪水時においても、大起伏山地においては、岩盤中の流出経路も洪水流出に関与していることを示した (Asano et al., 2023)。

(2) 土石流発生条件およびピーク流量の決定機構解明

2014年に長野県梨子沢で発生した土石流などを対象に、土石流発生前後の航空レーザー測量結果により、土石流の流下範囲(痕跡)の推定を試みた。ここでは、2時期の航空レーザー測量により求めた侵食範囲が土石流の流下範囲と等しいと仮定し、現地で求めた痕跡との整合性を確認した(平田ら、2023)。その上で、流下断面積を求めた上で、偏流高から流速を理論式および経験式を用いて推定した。同手法で推定した流速と現地で取得された土石流の映像から算出した結果を比較し、同手法による推定精度が十分であることを確認した。

続いて、航空レーザー測量結果を用いて、ピーク時の流下断面積と流速から流量を上流から下流の縦断方向に多地点で算出した。その結果、土石流の堆積が生じていない範囲では、ピーク流量は上流では小さく、下流に行くに従いピーク流量が大きくなった。すなわち、土石流が河床材料を侵食するに従い、ピーク流量が大きくなることを示した。

(3) 降雨規模が斜面崩壊による生産土砂量に及ぼす影響の評価

2017年の福岡県赤谷川で生じた土砂・洪水氾濫を対象に流出土砂の発生源に関する分析、降雨規模が流出土砂量に及ぼす影響について分析を行った。その結果、1次谷流出土砂量には、赤谷川流域の中であっても、2オーダー程度違いがあること、流出土砂量の違いは降雨量の違いでは十分に説明できないこと、流出土砂量は斜面崩壊土砂量に強く依存し、溪床の侵食土砂量との関係は明瞭ではないことを明らかにした。

(4) 降雨規模が中山間地域の洪水・土砂災害リスクに及ぼす影響評価手法の提案

以上の成果より、降雨規模と山地流域の水・土砂流出現象は下記の4段階に分類できることを示した(図2)。

- A. 降雨規模が小さいときは、降雨の一部は、土層内に貯留され、流出には寄与せず、比流量 < 降雨強度となる。
- B. 降雨規模が年に数回程度生じる降雨の規模に達すると流域全体で斜面が「飽和」に達するなどし、井川演習林等で確認されたように、降雨が時間遅れなく流出するようになる。このとき、降った雨が比流量 = 降雨強度となると考えられる。
- C. 降雨規模がさらに大きくなる(数年から数10年に1度程度の規模になる)と、梨子沢で見られたように、河床の堆積土砂を土石流が侵食することによって、河床に蓄えられていた土砂と水が土石流に取り込まれ、ピーク流量が大きくなる。このとき、比流量 > 降雨強度となると考えられる。
- D. 降雨規模が一段と大きくなる(数10年に1度の豪雨以上の規模になる)と、赤谷川で見られたように、溪床の土砂移動のみならず、斜面崩壊が同時多発し、1次谷流域からの流出土砂量は斜面崩壊による土砂量にコントロールされる。このため、斜面に蓄えられていた地下水が土砂とともに流出し、一段と流量及び流出土砂量が大きくなると考えられた。

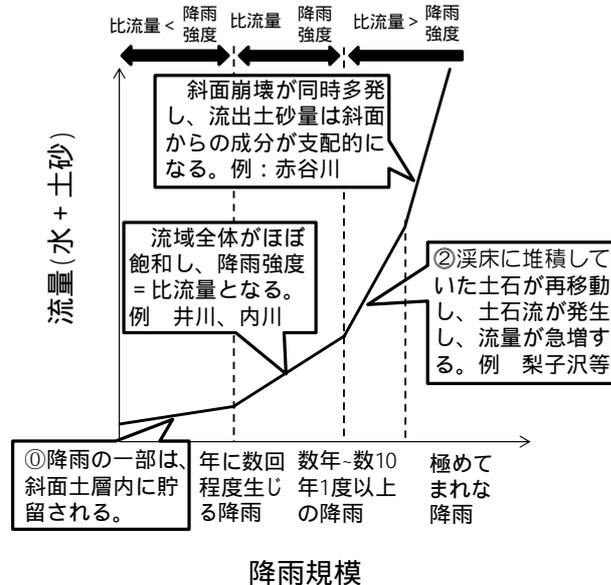


図2 本研究のまとめ

本研究では、図2の各段階に水・土砂流出現象に応じた流出量の評価手法を検討した。Bの段階の流出量の予測手法として、流量の低減特性から求めたパラメータを同定した貯留関数法による手法を検証した。2019年に東日本台風により土砂・洪水氾濫が生じた宮城県内川流域の流出現象を対象に手法の精度検証を行った。その結果、提案手法で降雨波形から豪雨時の流出波形は概ね予測できることを示した(栗原ら、2022)。また、Cの段階については、運動量方程式、平衡濃度式、侵食速度式からなる土石流計算が有効であることを確認した(Nishiguchi and Uchida, 2022)。さらに、Dの段階では、土層厚の空間分布を計測することによって、浸透流解析と斜面安定解析で評価できることを示した(Liang and Uchida, 2021)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Takafumi Hajika, Yosuke Yamakawa, Taro Uchida	4. 巻 38
2. 論文標題 Spatial distribution of rainfall-runoff characteristics and peak lag time in high-relief meso-scale mountain catchments where observations are scarce	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e15177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.15177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 平田育士; 内田 太郎; 山越隆雄	4. 巻 76(3)
2. 論文標題 土石流ピーク流量推定のための航空レーザ測量データを用いた流下痕跡把握手法の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 15-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yuko Asano, Masatoshi Kawasaki, Kae Takatoku, Taro Uchida, Sotaro Hiroki	4. 巻 37
2. 論文標題 Lateral flow in bedrock dominates baseflow and flood flow in a catchment underlain with permeable sedimentary rock in the high-relief Chichibu Mountains	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e15011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.15011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 栗原淳一; 内田 太郎; 山越隆雄; 奥山遼佑	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 土砂・洪水氾濫が発生する山地流域での流出解析における降雨の空間的集中度の違いと河道計算の影響に関する事例研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 3-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11475/sabo.75.2_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kaihara, S., Tadakuma, N., Saito, H. and Nakaya, H.	4. 巻 115
2. 論文標題 Influence of below-threshold rainfall on landslide occurrence based on Japanese cases.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Natural Hazard	6. 最初と最後の頁 2307-2332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11069-022-05639-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Asano, Y. Suzuki, S.N., Kawasaki, M	4. 巻 610
2. 論文標題 Peak discharges per unit area increase with catchment area in a high-relief mountains with permeable sedimentary bedrock	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 127876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2022.127876	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Liang Wei-Li, Uchida Taro	4. 巻 19
2. 論文標題 Performance and topographic preferences of dynamic and steady models for shallow landslide prediction in a small catchment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 51 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10346-021-01771-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishiguchi Yuki, Uchida Taro	4. 巻 127
2. 論文標題 Long Runout Landslide Induced Debris Flow: The Role of Fine Sediment Deposition Processes in Debris Flow Propagation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Earth Surface	6. 最初と最後の頁 1 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JF006452	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 栗原淳一; 内田 太郎; 山越隆雄; 奥山遼佑	4. 巻 74(6)
2. 論文標題 近年の土砂・洪水氾濫時の水の流出の実態と予測可能性の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 20~31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11475/sabo.74.6_20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Saito, H., Uchiyama, S., Teshirogi, K.	4. 巻 398
2. 論文標題 Rapid vegetation recovery at landslide scars detected by multitemporal high-resolution satellite imagery at Aso volcano, Japan.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geomorphology	6. 最初と最後の頁 107989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geomorph.2021.107989	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 羽鹿 孝文、内田 太郎、山川 陽祐
2. 発表標題 大起伏山地における流出の遅れ時間の空間分布
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 對馬美紗, 内田太郎
2. 発表標題 1次谷流域における生産土砂量の空間分布の評価の試み
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山川 陽祐; 輿水 康二; 内田 太郎
2. 発表標題 付加体堆積岩の大規模崩壊多発地における降雨流出特性の空間分布 (その2)
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 / 2022-05-22 - 2022-06-03
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤 仁・内田太郎・松山 洋
2. 発表標題 日本列島での斜面崩壊の発生と降雨特性 - 降雨の再現期間
3. 学会等名 2022年度土砂災害予測に関する研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saito, H., Uchida, T. and Matsuyama, H.
2. 発表標題 Frequency of landslide triggering rainstorms in Japan.
3. 学会等名 The International Workshop on Climate, Water, Land, and Life in Monsoon Asia. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野友子、川崎雅俊、高德佳絵
2. 発表標題 秩父山地の堆積岩からなるバケモノ沢における降雨 流出特性
3. 学会等名 日本森林学会133回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野友子、鈴木智之、川崎雅俊
2. 発表標題 付加体堆積岩からなる大起伏な山地流域で流域面積が大きくなるにつれ大きくなるピーク比流量
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽鹿 孝文、内田 太郎、山川 陽祐
2. 発表標題 大起伏山地の降雨流出特性の空間分布
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会 2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 對馬美紗, 内田太郎
2. 発表標題 1次谷流域における生産土砂量の空間分布の評価の試み
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽鹿 孝文、内田 太郎、山川 陽祐
2. 発表標題 大起伏山地における流出の遅れ時間の空間分布
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 羽鹿 孝文; 内田 太郎; 山川 陽祐	4. 発行年 2022年
2. 出版社 砂防学会	5. 総ページ数 12
3. 書名 砂防の観測の現場を訪ねて3 ~水の動きの不思議~ (第1章 大起伏山地における洪水流出の観測)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	齋藤 仁 (Saito Hitoshi) (00709628)	名古屋大学・環境学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	山川 陽祐 (Yamakawa Yousuke) (20611601)	筑波大学・生命環境系・助教 (12102)	
研究分担者	浅野 友子 (Asano Yuko) (80376566)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・講師 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------