

研究テーマ：寒冷地における土砂生産・流出特性に気候予測データの空間解像度の与える影響の分析
研究代表者：井上 卓也（広島大学）

【研究概要】

現在、アンサンブル気候予測データ d4PDF を用いた河川流量の将来変化に関する研究が全国各地で進められている。降雨の増加は山地流域からの流出土砂量を増加させ、土砂洪水氾濫の増加に繋がることが予想される。流出土砂量を予測するためには、斜面崩壊による土砂生産と生産された土砂の山地河道における移動の両方を考慮した計算を行う必要がある。本研究では、土砂生産・移動の両方を考慮した数値解析モデル(SiMHIS)を用い、気候変動による流出土砂量の変化を予測する。また、気候予測データの空間解像度が流出土砂量の予測精度に与える影響を分析する。

【研究成果の要旨】

1. 十勝川流域の砂防エリアの現地観測の概要

凍結融解による土砂生産量を推定するために、山地斜面を対象に観測を実施した。斜面の土砂生産量は、侵食ピンを用いて、斜面に正対した水平方向の地形変化量から評価した。冬季を挟む約半年間の観測により、斜面上部（傾斜約 90 度）で平均 18 cm、斜面下部（傾斜約 60 度）で平均 6 cm の侵食が確認された。勾配によって侵食深が異なる主な理由として、積雪の有無が挙げられる。

2. 豪雨による土砂生産・流出解析

はじめに土砂生産・流出モデル SiMHIS(山野井・藤田, 2016)の精度検証を行うために、2016 年豪雨時の観測雨量を用いて、観測された流出土砂量を再現した。次に d4PDF 降雨量(5km 及び 20km 解像度)を入力値として流出土砂量の解析を実施した。5km 解像度を用いた場合、観測最大の流出土砂量と同規模のイベントが現在気候データに含まれるが、20km 解像度を用いた場合、流出土砂量の計算値は 5km のそれと比べ 1 オーダー小さく、観測最大の流出土砂量は含まれなかった。これは、20km 解像度では山地における地形性降雨を十分な精度で再現できないためである。このことから、流出土砂量の予測には地形性降雨が考慮できる十分な解像度の降雨データを用いる必要があることが確認された。

5km 解像度の d4PDF 降雨の増加率は 1.4 倍から 1.6 倍であったのに対し、この降雨から計算された流出土砂量の増加率は 2.9 倍から 5.5 倍であり、降雨量の増加率より流出土砂量の増加率の方が大きかった。降雨量より流出土砂量の増加率の方が大きい原因について考察するため、降雨パターンの分析を行った。その結果、ベケレベツ川流域では、気候変動によって最大降雨量が大きくなるだけでなく、短期的な降雨パターンとピーク後も雨が降り続ける後期型の降雨パターンが増加することが分かった。さらに、短期的な降雨パターンでは斜面崩壊が他パターンより頻繁に起きていること、後期型の降雨パターンのときは流出土砂量が他パターンより多いことが明らかとなった。

3. 凍結融解に起因した土砂生産量の気候変動による変化

凍結融解による侵食深の推定には、地表面の熱収支式と風化基岩を対象とした伝導解析モデルを組み合わせて開発した風化基岩温度を推定するモデル(泉山ら, 2010)を用いた。このモデルで地温と同時に計算される含水率が 0 から初期含水率になった回数、つまり土壌内の水分が完全に凍った回数を凍結融解回数として数え、回数とそれが起きた深さの積である凍結融解強度指数を用いて凍結融解を評価した。5km 解像度の d4PDF の気温、日射量、積雪深、風速、湿度のデータを入力し、凍結融解風化の将来変化を分析した。その結果、積雪の無い箇所(急斜面)では、気温の上昇に伴い凍結融解の発生時期が日射量の少ない時期に移るため、凍結融解回数は減少する。一方、気温上昇に伴い積雪がなくなる斜面では、雪による保温効果が失われ、地温の変動が大きくなるため、凍結融解は増加することが明らかとなった。

4. 凍結融解に起因した土砂生産量が気候変動による流出土砂量に与える影響

斜面における凍結融解による土砂生産が流出土砂量に与える影響を評価するため、SiMHIS の斜面崩壊モデルを風化による土層の復活を考慮するよう変更した。具体的には、斜面上の土層厚が十分にあれば崩壊可能であり、その土層厚は風化によって増加し、崩壊によって 0 になる条件とした。その結果、風化を考慮すると考慮しなかった場合に比べて、崩壊土砂量は増加したが、確率年 100 年の流出土砂量はほとんど同じであった。その要因として、風化の影響が出てくるまでかなり時間がかかること、風化によって増えた崩壊土砂の一部は流域内に堆積するため流出土砂にならないことが考えられる。

**河川砂防技術研究開発
【成果概要】**

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職	
		井上 卓也（いのうえ たくや）	広島大学大学院 先進理工系科学研究科	准教授	
②研究テーマ	名称	F S型（該当を残して、他を削除してください） 【テーマ名】寒冷地における土砂生産・流出特性に 気候予測データの空間解像度の与える影響の分析			
③研究経費 （単位：万円） ※端数切り捨て。		令和4年度	令和5年度	令和6年度	総 合 計
		298万円	920万円	745万円	1,964万円
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏 名		所属機関・役職（※令和5年3月31日現在）			
山田 朋人		北海道大学・准教授			
山野井 一輝		京都大学・助教			
久加 朋子		富山県立大学・准教授			
水垣 滋		寒地土木研究所・主任研究員			
⑤技術研究開発の目的・目標 （様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 【FS型の場合は、FS研究と一般研究を別立てで記入してください】 ◆研究全体における目的 現在、アンサンブル気候予測データd4PDFを用いた降雨の将来変化に関する研究が全国各地で進められている。しかし、20km解像度のd4PDFでは強い雨の頻度が実績に比べ少なく、地形等の影響を詳細に反映できる5km解像度へのダウンスケーリングの重要性が指摘されている。土砂の生産・流出は、山地斜面における局所的な降水量(斜面崩壊・土砂移動に影響)と気温(斜面の風化に影響)に依存する。このため、気候予測の空間解像度が土砂生産・流出に与える影響は大きいと予想されるが、その影響は定量的に解明されていない。本研究は、北海道十勝川流域を対象に20km解像度と5km解像度の気候予測による土砂の生産・流出量計算を行い、気候予測の空間解像度が土砂の生産・流出量に与える影響を明らかにすることを目的とする。 ◆FS研究（1年目の目標） 研究1年目は、①十勝川流域の砂防エリアの現地観測（観測機器の設置、※データが取れるのは2年目の春）、②土砂の生産・流出量計算モデルの再現検証、③現在気候を用いた土砂生産・流出解析(5km解像度)、④現在気候を用いた土砂生産・流出解析(5km解像度)を実施した。 ◆一般研究（2年目以降の目標） 研究2年目以降は、①十勝川流域の砂防エリアの現地観測（融雪後のデータの回収と分析）、⑤現在気候を用いた土砂生産・流出解析(20km解像度)、⑥将来気候を用いた土砂生産・流出解析(20km解像度)を行い、最終的に⑦気候変動による土砂流出解析の留意点等を取りまとめる。					

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

【FS型の場合は、FS研究と一般研究を別立てで記入してください】

1. 十勝川流域の砂防エリアにおける現地観測

1. 1 観測方法

凍結融解による土砂生産量を推定するために、山地斜面を対象に、2022年11月（冬前）～2023年5月（融雪後）、2023年11月（冬前）～2024年5月（融雪後）の二期間観測を実施した。侵食深を計測するために侵食ピンを水平方向5本（約50 cm間隔）×高さ別4段（約1 m間隔）の計20本を打設し、侵食ピンの地上露出長の変化を計測した（図-1）。また、気象観測（気温、地温（深さ 15cm）、日射量）も行った。

1. 2 観測結果

一期目の観測結果について、まず、図-2に観測した気温と地温を示す。グレーの期間はタイムラプスカメラから斜面上に積雪が確認できた期間である。積雪期間は、気温の変動に対して地温の変動が少なくなっている。また、図-3に侵食ピンの地上露出長の変化を示す。20本中7本が抜け落ちていたが、黄色で示す斜面上部（傾斜約90度）で平均18 cm、緑色で示す斜面下部（傾斜約60度）で平均6 cmの侵食が確認された。斜面上部の侵食深の方が大きくなる要因として、傾斜が急なため斜面の安定性が低いこと、積雪や植生が地表を覆いづらく、地温が変動しやすいことの二つが考えられる。また、二期目は一期目より多くのピンが抜け落ちていた。二期目の方が積雪のない期間が長かったため、凍結融解がより活発に起きたと考えられる。

2. 土砂生産・流出モデルSiMHISの再現検証

2. 1 モデルの概要

土砂流出プログラムとして山野井らが開発した土砂の生産・供給・輸送の統合モデル¹⁾を用いて、降雨データから流量、土砂生産量、流出土砂量を計算する。まず、土砂生産モデルで斜面崩壊により生産される土砂量を算出する。土中水分量が閾値を上回ったら崩壊が発生するとしている。次に土砂供給モデルで、斜面から河道に供給される土砂量を算出する。地形データから斜面の堆積可能量を計算し、斜面崩壊により生産された土砂が堆積可能量を上回った分を土砂供給量としている。最後に、土砂堆積輸送モデルで溪床において侵食と堆積を繰り返しながら河道を流れる掃流砂量と浮遊砂量を算出する。単位幅掃流砂量は芦田・道上の式、無次元限界掃流力は修正 Egiazaroff の式、浮遊砂浮上量は板倉の式、沈降量は Rubey の式で算定される。

2.2 2016 年北海道豪雨の再現検証

2016 年北海道豪雨における対象流域下流端ピーク流量は 402 m³/s²⁾。流出土砂量は 380,300 m³であった³⁾。そのうち7割が溪床から発生している⁴⁾。豪雨時のアメダス降雨と宮崎ら⁴⁾が2016年豪雨後に行った粒径調査の結果を SiMHIS に入力し、川幅を決めるレジーム則の係数や斜面崩壊発生指標補正係数等を調整することで再現検証を行った。その結果、ピーク流量 397 m³/s、流出土砂量 387,381 m³、溪床から流出した土砂の割合 67%を出力し、2016 年北海道豪雨を再現できた（図-4）。

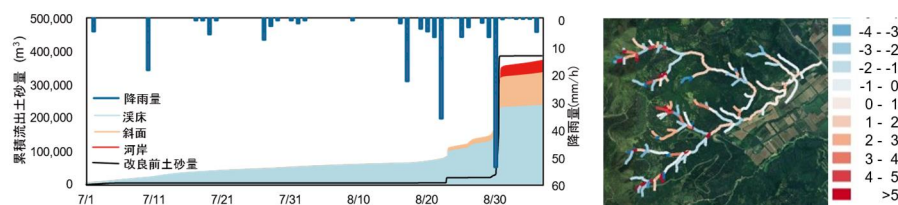


図-4 SiMHIS による再現計算結果。左：流出土砂の時系列変化。右：山地河道の地形変動高 (m)

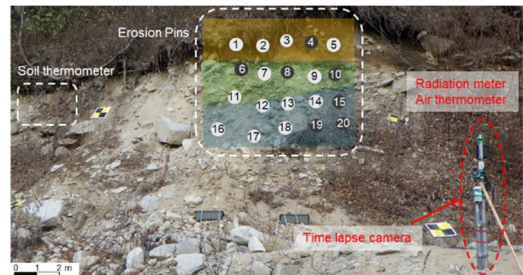


図-1 観測機器設置状況

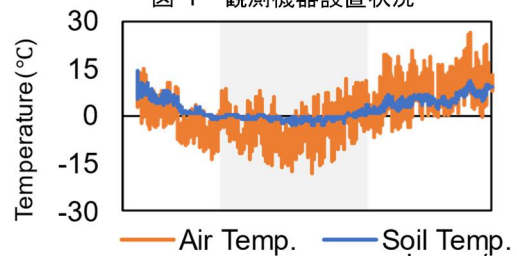


図-2 観測気温・観測地温

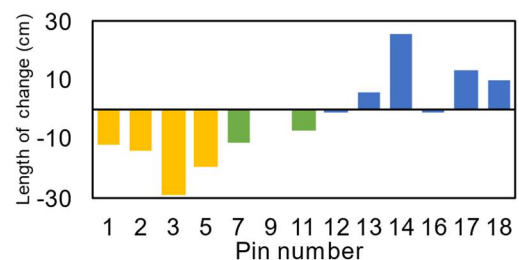


図-3 侵食ピン結果

3. 降雨データの空間解像度が流出土砂量の変化に与える影響

次に、大量アンサンブル気候予測データ d4PDF の 20km 解像度の降雨量と 5km 解像度にダウンスケーリングされた降雨量の現在気候と将来気候それぞれ約 600 年分を入力し、気候変動による流出土砂量の変化に降雨データの空間解像度が与える影響の分析を行った。なお、前年の降雨の影響が翌年に出ないよう、各年の d4PDF 降雨 10 日分の間に少雨期間を 7 日設けている。そのため本計算での一年は雨季（夏）10 日と乾季（冬）7 日の 17 日である。表-1 に確率年 50 年の空間解像度別の年最大時間降雨量、流出土砂量及び 20km 解像度の値に対する 5km 解像度の値の倍率を示す。5 km 解像度の年最大時間降雨量は 20km 解像度のものの 2 倍程度であるのに対し、5km 解像度の流出土砂量については 20km 解像度の 10 倍から 17 倍とかなり大きい。

20 km 解像度の年最大時間降雨量のほとんどは 15 mm/h 以下であり、5 km 解像度で表現されているような強い地形性降雨が表現されていない。この結果、20 km 解像度の降雨量を用いた場合の流出土砂量は、5 km 解像度の降雨量を用いた場合の流出土砂量に比べ小さい。

（図-5）。加えて、20km 解像度では緑線で示す 2016 年豪雨で観測された流出土砂量 380,000 m³ が現在気候でも将来気候でも表現できていないが、5km 解像度では現在気候の最大値がそれと近い値を示している。このように、強い地形性降雨が流出土砂の主要因となる山地流域で流出土砂量を正確に予測するには、十分な解像度の気候予測データを使用する必要がある。

4. 気候変動による土砂流出解析の留意点等のとりまとめ

4. 1 降雨イベントの頻度・雨量変化による土砂流出の変化

5km解像度のd4PDF降雨の増加率は1.5倍程度であったのに対し、この降雨から計算された流出土砂量の増加率は3倍から5倍であり、降雨量の増加率より流出土砂量の増加率の方が大きかった。この原因について考察するため、図-6のヒートマップのように現在気候、将来気候それぞれ約600年分の降雨のグループ分けを行った。横軸では降雨波形から6パターンに分類した。降雨波形のクラスタリングは、まず、確率年2年以上の降雨波形のピーク前後60時間を抽出し、現在気候と将来気候それぞれで、最大値で割ってピークを1に揃える。次に、得られた降雨波形をk-means法⁵⁾を用いて6つにクラスタリングした。

タイプ1は短期降雨を、タイプ2は長期降雨であり、タイプFはピーク前の降雨が多いパターン、タイプMはピーク付近の降雨が多いパターン、タイプLはピーク後の降雨が多いパターンである。縦軸では降雨波形のクラスタリングの際にピークを1にそろえたため考慮されていない最大降雨量から3パターンに分類した（閾値15mm/h、25mm/h）。ヒートマップの色は各パターンに当てはまる降雨の存在率の変化を表している。図-6より、最大降雨量15mm/h以下の降雨が減少していること、さらに最大降雨量が多い短期降雨や後期型の降雨(M-1、L-1)の増加率が特に高いことが分かる。

最大降雨量が多い短期的な降雨パターン(M-1)では、その他の降雨パターンに比べ、流出土砂のうち斜面から生産された土砂の割合が高かった。つまりM-1パターンでは斜面崩壊が活発に起きたと考えられる。斜面から供給される土砂は河床に既にある土砂に比べて粒径が小さい。粗粒化した河床に斜面崩壊によって生産された細かい土砂が流入すると、土砂の内

表-1 確率年 50 年の降雨量，土砂量

	20km		5km		5km/20km	
	現在	将来	現在	将来	現在	将来
最大降雨量 (mm/h)	17.3	24.3	33.5	47.7	1.93	1.97
流出土砂量 (m ³ /10days)	5497	9288	52107	152833	9.48	16.45

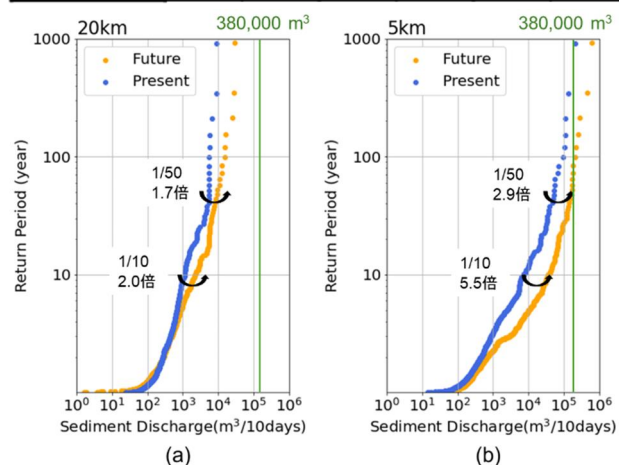


図-5 流出土砂量の確率年

(a) : 20km 解像度, (b) : 5km 解像度

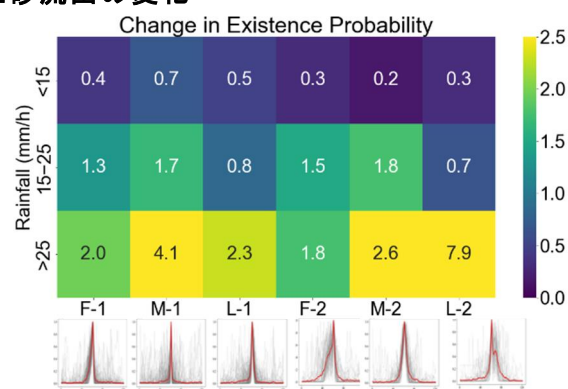


図-6 降雨パターン分類

部摩擦角が小さくなり、限界掃流力が小さくなるため、河道内の土砂が動きやすくなる。このようにM-1パターンでは、斜面からの細かい土砂の供給が土砂の流出を増加させると考えられる。また、最大降雨量が多い後期型の降雨パターン(L-1)の雨では、ほかの降雨パターンに比べて流出土砂量が多かった。これは強い雨によって土砂が生産された後も、雨が降り続け流量が多い状態が続き、土砂が流出し続けたためであると考えられる。このように、気候変動によって降雨量が増えるだけでなく、土砂が流出しやすい降雨パターンも増加するため、土砂流出量予測を行う際は降雨パターンの変化にも注意を払う必要がある。

4. 2 凍結融解に起因した土砂生産量の気候変動による変化

凍結融解による侵食深の推定には、泉山⁶⁾が地表面の熱収支式と堤ら⁷⁾の風化基岩を対象とした伝導解析モデルを組み合わせで開発した風化基岩温度を推定するモデルを用いた。堤らのモデルの基礎式は水分の潜熱を考慮した深度方向の一次元熱伝導式、含水率と含水率の質量保存則、はJame & Norum⁸⁾の土壌を対象にした実験に基づく含水率と土壌温度の経験式の三つである。本研究では、このモデルで地温と同時に計算される含水率が0から初期含水率になった回数、つまり土壌内の水分が完全に凍った回数を凍結融解回数として数え、回数とそれが起きた深さの積である凍結融解強度指数を用いて凍結融解の増減を評価した。

まず、2022年の現地観測で得られた深さ15cmの地温の変化をモデルで再現することで、モデル内の各係数の設定および精度検証を行った。計算領域は地表面から深さ14m地点までの一次元カラム、計算期間は観測を行った2022年11月5日から2023年5月15日である。気象データとして、気温、日射量は現地観測で得た斜面付近のものを、風速、湿度、降雪量は観測地点から最も近い観測所である新得観測所のものを用いた。また、計算領域下端の温度は、地中深くの温度は年間平均気温に近いことから、新得観測所における2022年の年間平均気温を用いた。地形条件としては、現地観測を行った斜面の中部を想定して勾配を60度、方位を南東方向と設定した。アルベドを0.4、風化基岩熱伝導率を1.5W/m/K、風化基岩比熱を3500J/kg/Kと設定することで、地温の変化を再現した。

次に、5km解像度のd4PDFの気温、日射量、積雪深、風速、湿度のデータをこのモデルに入力し、凍結融解風化の変化を分析した。対象としたのはペケレベツ川流域を含む5km解像度d4PDFの4メッシュである(図-7)。また、雪が積もりづらい急勾配斜面における凍結融解風化の予測を行うため、積雪データを入力するケースに加えて積雪が一年中ない条件で計算するケースでの予測も行った。

図-8に凍結融解強度指数の累積値を示す。積雪なしのケースでは、いずれのメッシュにおいても凍結融解が減少した。これは気温の上昇によるものであると考えられる。凍結融解は地温が0度をまたぐ時期に活発に起きる。地温が0度をまたぐのは気温が0度を少し下回っている時期(日射が地温を上昇させるため)である。気候変動によって気温が上昇することで、この時期が11月頃と4月頃であったのが、12月頃と3月頃に変わるため、凍結融解が活発に起きる時期も同様に変わる。北半球では11月や4月より12月や3月の方が、日射量が少ないため、日射による地温の変動が小さくなる。このように気温が上昇すると、凍結融解が活発に起きる時期が日射量の少ない時期に移るため、凍結融解は減少すると考えられる。

積雪ありのケースでは、山地側にあるA,B,Cメッシュの凍結融解はほぼ変化しないのに対し、平地のDメッシュでは、大きく増加した。これは、A,B,Cメッシュでは将来気候でも保温効果が見られるのに十分な積雪があるのに対し、Dメッシュでは将来気候の積雪深が小さくなったためであると考えられる。積雪には気温の変化が地中に伝わるのを防ぎ地温を一定に保つ保温効果がある。積雪の保温効果がなくなること、凍結融解が起きることができ期間が長くなり、一冬を通した凍結融解の強度に大きな差が生じたと考えられる。

このように気候変動による凍結融解の変化は、気温上昇と積雪減少の両方の影響を受け、これらの変化パターンによって増加することもあるれば減少することもある。

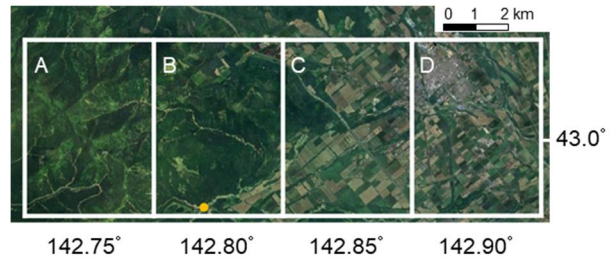


図-7 凍結融解予測範囲

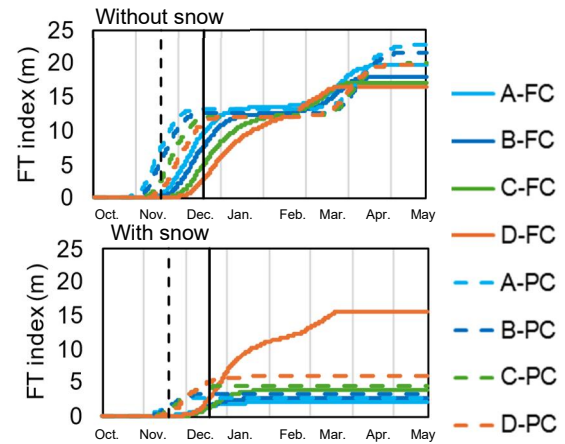


図-8 凍結融解の進行度

4. 3 凍結融解に起因した土砂生産量が気候変動による流出土砂量に与える影響

4. 3. 1 SiMHiS斜面崩壊モデルの変更

斜面における凍結融解による土砂生産が流出土砂量に与える影響を評価するため、SiMHiSの斜面崩壊モデルが風化による土砂生産を考慮できるよう変更を行った。一度斜面崩壊が起きると、その斜面の土層が失われるため、同じ斜面で再び斜面崩壊が起きることはしばらくしない。そのため、SiMHiSでも一度斜面崩壊が起きると同じ斜面で再び崩壊が起きることはない設定になっている。しかし、気候変動予測を行うにあたって50年を超えるような長期間の計算を行う場合、風化による土層の復活を考慮する必要がある。そこで、斜面上の土層厚が十分にあれば崩壊可能であり、その土層厚は風化によって増加し、崩壊によって0になるモデルに変更した。また、同じ斜面内であっても勾配は局所的に異なり、緩斜面部分と急斜面部分に分けられる。緩斜面部分では生産土砂が堆積可能であり、基岩が土で覆われると風化が起きづらくなるが、急斜面では土砂が堆積できないため、毎年風化が起きる。そのため、緩斜面では崩壊が起きて土層がなくなった年のみ風化が起き、急斜面では毎年風化が起きるとした。風化深の算出方法を式(1)に示す。

$$D_w = E_{w,m} + E_{w,s} \times P / (1 - P)$$

D_w は風化深、 $E_{w,m}$ は緩斜面における風化深、 $E_{w,s}$ は急斜面における風化深、 P は斜面全体の面積に対する急斜面面積の割合である。本研究では0.2としている。崩壊可能な土層厚の閾値は再現検証時の土層厚から70cmとした。風化深は4. 2章の結果から入力値として与え、毎年一定とする。緩斜面風化深 $E_{w,m}$ は雪も積もりやすいため積雪ありの結果から、反対に急斜面風化深 $E_{w,s}$ は雪が積もりづらいため積雪なしの結果から算出した。また、現地観測で雪融けの時期に土砂が動いていたことから、風化によって土層厚が増加するタイミングを各年の乾季（冬）の終わりとした。このような変更を行うことで、風化によって斜面の土層が十分な厚さになると再び崩壊可能になることを考慮した。

4. 3. 2 土砂生産が流出土砂量に与える影響

風化による斜面の復活を考慮したケースとしなかったケースの予測結果を比較した。考慮したケースで与えた風化深は、4. 2章のBメッシュの結果を用いて、急斜面で96mm/year、緩斜面で16mm/yearとした。

確率年100年の流出土砂量について、斜面の復活を考慮しなかったケースは、現在気候131,454m³、将来気候で202,526 m³であったのに対し、考慮したケースは、現在気候131,492 m³、将来気候で210,915 m³であり、風化を考慮しても確率年100年の流出土砂量はほとんど変わらなかった。しかし、図-9の各ケースの崩壊土砂量の累積値を見ると、崩壊土砂量の合計は風化を考慮することで倍近く大きくなっている。風化を考慮することで、崩壊土砂量の合計は増加しても確率年100年の流出土砂量はほとんど変わらない要因として二つ考えられる。一つ目はデータ数である。図-9より、計算開始直後に一気に崩壊が起き、32年後再び一気に崩壊している。これは、風化によって斜面が復活するのにかかる年数が32年であるためと考えられる。そのため、計算開始から32年目までは両ケースではほぼ同じ計算結果となる。さらに、崩壊が起きそれが流出するのは豪雨イベントのときのみであり、両ケースで流出土砂量に差が出る年の数はさらに限られる。二つ目は崩壊した土砂が流域内に堆積することである。図-10に、将来気候における計算終了時の風化を考慮したケースの河床高と考慮しなかったケースの河床高の差を示す。正の値（赤色）は風化を考慮したケースの河床高の方が高いことを意味する。全体的に河床高が高くなっており、特に一次河川では5m以上の河床上昇が見られた。また、現在気候でも同様の傾向が見られた。このように、風化を考慮することで増加した生産土砂の一部は流出しきれず河床に堆積したままであり、流出土砂量への影響が弱まったと考えられる。

本研究の解析では、風化を考慮することにより、土砂生産量は増加したが、流出土砂量への影響は小さかった。風化によって再び崩壊が起きるようになるには30年程の時間がかかるため、風化の影響を調べるためにはこれまで（60年）以上の長期的な予測計算が必要と考えられる。また、生産されたものの流出しなかった土砂は山地河道に蓄えられており、これらの土砂が次の豪雨で流出する危険性もあるため留意が必要である。

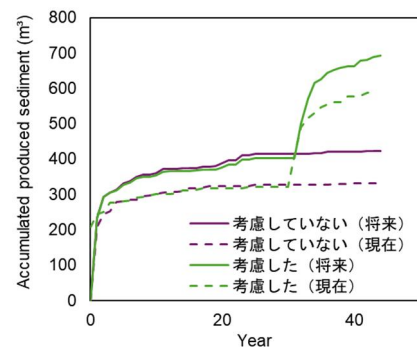


図-9 累積崩壊土砂量



図-10 風化を考慮したことによる河床高の変化(m)

参考文献

- 1) 山野井一輝, 藤田正治: 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, 水工学論文集, 72, I_1291-I_1296, 2016. doi.org/10.2208/jscejhe.72. I_1291
- 2) 土木学会2016 年8月北海道豪雨災害調査団: 北海道豪雨災害調査団報告書, 2017.
- 3) 国土交通省北海道開発局・北海道: 第2回十勝川流域砂防技術検討会配付資料, 2017.
- 4) 宮崎知与, 澤田雅代, 松岡直基, 立川義通, 高嶋繁則, 吉田安範, 林真一郎, 古市剛久, 笠井美青, 小山内信智: 周氷河性斜面の崩壊・侵食に起因する大規模な土砂移動の実態, 砂防学会誌, 71(2), 22-33, 2018. doi.org/10.11475/sabo.71.2_22
- 5) Macqueen J: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability 5, 1, 281-297, 1967.
- 6) 泉山寛明, 堤大三, 藤田正治: 地球温暖化が全国の裸地斜面の凍結融解特性に与える影響, 京都大学防災研究所年報, 53B, 2010.
- 7) 堤大三, 藤田正治, 伊藤元洋, 手島宏之, 澤田豊明, 小杉賢一郎, 水山高久: 凍結融解による土砂生産に関する基礎的研究-田上山地裸地斜面における現地観測と数値シミュレーション-, 砂防学会誌, 59(6), 3-13, 2007. doi.org/10.11475/sabo1973.59.6_3
- 8) Jame and Norum: Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium, Water Resources Research, 16(4), 811-819, 1980.

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

・これまでに発表した代表的な論文

1. 木戸理歩, 井上卓也, 鳩野美佐子, 山野井一輝: アンサンブル気候変動予測を用いた流出土砂量への影響評価, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.78, No.2, 2022.
2. 平田智道, 村上泰啓, 水垣滋, 巖倉啓子: 地震により発生した裸地斜面におけるUAV-SfM測量を用いた土砂動態解析. 寒地土研月報 Vol. 835 (2022年9月号), pp.28-33, 2022.
3. 水垣滋, 村上泰啓, 巖倉啓子: 平成28年8月北海道豪雨に伴うパンケヌーシ川の河床変動による土砂流出. 寒地土研月報Vol. 836 (2022年10月号), pp.27-35, 2022.
4. 大屋祐太, 宮本真希, 山田朋人: 大量アンサンブルデータを用いた北海道周辺で抽出した線状降水帯の多発年・寡少年における夏季総観場の特徴, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.78, No.2, 2022.
5. 大屋祐太, 山田朋人: 北海道周辺における過去・将来気候下での線状かつ停滞性を有する降水帯の出現特性, 土木学会論文集G(環境) Vol.78, 2022.
6. Sumner, T., Mishra, J., Inoue, T., & Shimizu, Y.: Numerical study of the interaction between wet-dry weathering and bedload induced abrasion. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030952, 2022.
7. サムナー圭希, 井上卓也, 泉典洋, 清水康行: 岩盤河川の川幅変化がニックポイント後退に与える影響, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.79, No.2, 2023.
8. Kido, R., Inoue, T., Hatono, M., Yamanoi, K.: Assessing the impact of climate change on sediment discharge using a large ensemble rainfall dataset in Pekerebetsu River basin, Hokkaido, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10 (54), 2023.
9. Inoue, T., Izumi, N., Scheingross, J. S., Hiramatsu, Y., Tanigawa, S., Sumner, T.: Waterfall height sets the mechanism and rate of upstream retreat. *Geology*, 51 (7), 2023.
10. Masuya, S., Inoue, T., Iwasaki, T., Kido, R., Ogawa, K., Shimizu, Y.: Assessment of risks associated with development of river meandering under climate change using a physics-based free-meandering model, *Environmental Fluid Mechanics*, 2024.
11. Inoue, T., Hiramatsu, Y., Scheingross, J. S., Yamaguchi, S., & Takahashi, K.: Controls on erosion and cyclic step-formation upstream of waterfalls. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL110751, 2024.
12. 木戸理歩, 井上卓也, 山野井一輝: 山地流域における河岸侵食による川幅の拡大と遮蔽効果を考慮した土砂流出モデル. 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 81, No.16, 2025.

・国際会議、学会等における発表状況

1. 山野井一輝, 藤田正治, 鈴木豪太: 流域土砂動態モデルと領域気候モデル出力を用いた災害時の土砂生産・流出の将来変化に関する研究, 2022年度砂防学会研究発表会.
2. 水垣 滋, サムナー圭希, 木戸理歩, 井上卓也: ペケレベツ川の溪岸裸地における土砂生産観測, 砂防学会北海道支部研究発表会, 2023
3. Kido, R., Inoue, T., Hatono, M., Yamanoi, K.: Impact Assessment of Climate Change on Sediment Discharge using d4PDF, *The 9th International Conference on Flood Management*, 2023.
4. Kido, R., Inoue, T., Mizugaki, S., Tamaki, S.: The Changes in Erosion Depth Caused by Freezing and Thawing Due to Climate Change, 21th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, South Korea, 2024.
5. Kido, R., Inoue, T., Mizugaki, S., Tamaki, S.: Freezing and Thawing Changes due to Climate Change in Pekerebetsu River, GEWEX, Sapporo, 2024.
6. 木戸理歩, 井上卓也, サムナー圭希, 水垣滋: 気候変動が凍結融解による土砂生産に与える影響, 令和6年度砂防学会, 2024.
7. 笠置豊, 井上卓也, 内田龍彦: 地下水を考慮した河岸浸食モデルの再現性に関する研究, 土木学会中国支部研究発表会, 2024

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

特になし

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

1. 令和6年度砂防学会若手優秀発表賞 (2024)

内 容：気候変動が凍結融解による土砂生産に与える影響
受賞者：木戸理歩,井上卓也,サムナー圭希,水垣滋

2. AGU 2023 Outstanding Reviewer Certificate (2024)

内 容：Journal of Geophysical Research: Earth Surface 誌において優れた査読を通じて著者および読者へ貢献したことが認められ、アメリカ地球物理学連合 (AGU)から授与された。
受賞者：井上卓也

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究では、①凍結融解による土砂生産量の現地調査、②土砂生産・流出モデルを用いた気候変動の影響分析、③気候予測モデルの空間解像度が土砂生産・流出予測に与える影響分析、④凍結融解を考慮した土砂生産・流出量の予測を行った。

②③において、気候変動による土砂流出量の増加率は2.5～5.5倍であり、これは降雨量の増加率1.4～1.6倍に比べ大きいことが確認された。また、土砂流出量の予測は、気候予測の空間解像度に強く影響を受けることが確認された。地形性降雨が考慮できる高解像度の降雨を用いることが望ましい。

①④においては、ペケレベツ川流域を対象とした調査により、北海道では冬季に10cm程度の凍結融解風化が発生することが確認された。また気候変動によって凍結融解は、積雪が無いような急斜面では減少するが、現在気候で積雪があり将来気候で積雪が無くなる地域では、雪による保温効果が失われ、凍結融解が増えることが確認された。凍結融解による土砂生産量は、気候変動によって変化するが土砂の流出量は、凍結融解を考慮してもしなくても変わらないことが分かった。これは生産した土砂を下流に運ぶの水の作用であり、降雨量に強く依存しているためである。

今後の課題として、SiMHiSの他流域への適用性である。これを調べるために、日本全国・海外の流域を対象とした再現検証を行うことが望まれる。また、本研究では山地河川の出口（扇状地頂部）までの土砂移動は計算したが、その下流で発生する土砂洪水氾濫は分析していない。気候変動に伴う土砂洪水氾濫リスクの評価は今後の必要な研究と考えられる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究によって気候変動を踏まえた土砂生産・流出予測を行うでの留意点が整理できたことが実務・砂防政策の質的向上に繋がる点と考える。以下に留意点を列記する。

- ① 入力する気候予測データの降雨量が地形性降雨を考慮できているかどうかの精査が重要。地形性降雨を考慮できていない場合、土砂流出予測の精度は著しく低下する。
- ② 気候予測モデルの解像度が低い場合、観測雨量を気候予測モデルの降雨量増加率で引き延ばす方法が考えられるが、この場合は、降雨パターンの変化に留意する必要がある。本研究の分析では、土砂が流出しやすい雨のパターンが存在し、そのパターンが将来的に増加することが確認された。既往観測降雨のパターンをそのまま使うのではなく、様々な降雨パターンを引き延ばし、その中で土砂生産・流出量が最大となるケースを探す必要がある。(4.1章参照)
- ③ 土砂流出量の確率年を計算する際は、降雨量の確率年計算で良く用いられるグンベル分布などが適合しない場合がある。この場合は、ノンパラメトリックな確率密度関数を用いることが望ましい。

また、本研究で開発したモデルを帯広開発建設部が管理する戸蔦別川に適用し、気候変動による土砂流出量の変化を考慮した土砂洪水氾濫・河道安定化対策（帯工計画）の検討が行われることになった。以上のことから本研究開発は砂防行政に貢献する研究であったと考えられる。