

流砂系の領域間連携をふまえた土砂の連結性評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平31～令3

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：村山雅昭、巖倉啓子、谷瀬敦、
水垣滋、村上泰啓、秋田寛己

【要旨】

本研究は、山地領域の斜面～溪流～河川の土砂移動における連結性の評価手法を構築するため、沙流川流域パンケヌーシ川を主対象に平成28年8月北海道豪雨で発生した斜面崩壊と河床変動による土砂生産・流出実態の解明と、GISによる微地形解析を試みた。豪雨前後の標高差解析、衛星画像解析、河床材料調査等により崩壊土砂量と粒径別の河床変動量を評価した結果、深成岩地域の斜面崩壊や河床変動が流域からの浮遊土砂流出に相当程度寄与することがわかった。また、斜面から河道への連結性指標は地質によって異なり、豪雨直後の濁水流出状況とも対応していたことから、地質による浮遊土砂生産・流出特性への影響が示唆された。

キーワード：斜面崩壊、河床変動、NDVI、標高差解析、連結性指標

1. はじめに

「山地から海岸まで一貫した流砂系の総合的な土砂管理の取り組みを推進」することが国土形成計画（全国計画）(H27.8.14閣議決定)で謳われており、基盤情報として山地から海岸までシームレスな土砂動態の時空間情報が必要である。ダム領域や河川領域では比較的長期的なデータが蓄積されている一方、山地領域の土砂動態はデータの蓄積が不足しており、従来からの課題となっている。その主な要因として、調査に多大な労力的・経済的コストが必要なこと、森林・砂防・発電・河川など様々な管理機関により領域や情報が分断されていることが挙げられる。

近年、気候変動・地殻変動に伴う水や土砂動態の規模・頻度が激化しており、全国で甚大な水・土砂災害をもたらしている。このような大規模イベント時には、山地からダム・河川・海岸へと大量の土砂が流出するため、土砂生産・流出量の定量評価や、その後の土砂流出の量・継続時間を明らかにすることは、流砂系の総合土砂管理上、重要である²⁾。大規模イベント時には各機関で各々の目的に応じた調査を実施するが、それらの調査データ・情報を統合・整理して山地領域の土砂動態情報として活用できる可能性がある。

本研究の目的は、流砂系の総合土砂管理に係る関係機関との連携をふまえて、山地領域の土砂の連結性を解明し、定量評価・モニタリング手法を構築することである。平成28年8月北海道豪雨による洪水・土砂災害がもたらされた沙流川流域を対象に、リモートセン

シング(LP、衛星画像等)を活用して斜面～流域スケールの土砂生産・流出実態の解明を試みた。また、近年提案されたGIS解析手法を用いて、斜面～溪流～下流河川の土砂移動における場の連結性の評価と地域特性について検討した。最後に、これらの土砂の連結性の解明に向けたモニタリング手法の課題等を整理した。

2. 平成28年(2016年)8月30-31日の豪雨による沙流川上流域での崩壊地分布

2.1 目的

平成28年(2016年)8月17日～29日にかけて、台風第7号・第11号・第9号・第10号が北海道へ連続で襲来・接近し、北海道各地で甚大な被害が発生したことは記憶に新しい。流砂系の総合的な土砂管理を検討している、沙流川流域においても大規模な出水が生じ³⁾、沙流川では法面・斜面の崩壊や土砂流出、河道の洗堀・侵食が多数確認され、流域内の道路や橋梁施設などに多大な被害がもたらされたことが報告されている⁴⁾。

台風10号に伴う豪雨で発生した沙流川上流域での斜面崩壊は、72時間雨量250mm以上で崩壊面積率1.0%を超えるとされ、上流域全体の崩壊実態が報告されている⁵⁾。沙流川上流域での崩壊発生に影響を与えた要因や分布特性についての詳細は議論されておらず、土砂生産源となる崩壊地から、どの程度の土砂が河道に供給されたのかはよく分かっていない。これらを明らかにするには、流域スケールで崩壊地分布と降雨・地形・地質との関連性を解析し、知見を蓄積することが必要

となる。崩壊発生 の 要因は 決定論的に 定まるものではなく、多種多様な流域特性（降雨・地質・地形）の影響をうけることが指摘され^{6,7)}、これまでも多くの研究が進められている。近年の研究を見ても、山地 上流域からの単位面積あたりの流出土砂は、地域や地質・降雨を同一条件に揃えて解析しても、その空間分布に明瞭な偏りが見られず、ランダムに分布することなどが報告されている⁸⁾。

それらをふまえ、さきの豪雨による沙流川上流域の崩壊発生へ影響を与えた要因と崩壊地からの生産土砂量を把握できれば、流砂系における生産源から供給される土砂の量と質（粒径）の評価につながる可能性がある。そこで、本章では沙流川上流域で斜面崩壊が多数発生したパンケヌーシ川流域を対象とし、崩壊地分布の傾向を整理した上で、降雨・地形・地質との関連性を明らかにすることを目的とする。

2.2 方法

2.2.1 研究対象流域

対象流域は、北海道沙流郡の沙流川水系パンケヌーシ川流域である（図-1）。流域面積は95.8 km²で、本川（6次谷）の平均河床勾配は1/20.4（2.9°）程度である。

流域内は全域が国有林である。流域内には北海道所管の砂防堰堤1基（昭和60年竣工；満砂）と林野庁所管の治山堰堤3基（昭和32年～昭和45年竣工）が本川沿いに設置され、北海道電力株式会社所管の取水設備3基（昭和38年運転開始）が支川を含めて設置されている。

2.2.2 解析方法

崩壊地は、Sentinel-2/MSIの衛星画像（解像度：10.0 m）から、正規化植生指数 Normalized Difference Vegetation Index（以下、NDVI値と略述：植物の量や活性度をあらわす指数）を計算し抽出した。NDVI値は以下の（1）式⁹⁾で計算され、裸地では植生の被覆範囲と比較し値が小さくなるため、NDVI値を用いて裸地化した崩壊地を判別できる。

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

ここで、NIRは近赤外波長域の観測値（Band 8）、REDは赤色波長域の観測値（Band 4）となる。

NDVI値を用いた判別手法はこれまでも検討がなされ、Landsat/TMやSPOT/HRVの衛星画像を用いた解析事例では、崩壊地内でのNDVI値の閾値による画素数で判別した際の精度が約71%以上となり、崩壊総面積も大差ないことから実用性が報告されている¹⁰⁾。

本研究においても、あらかじめ対象流域でNDVI値を計算したところ、解像度がやや粗いSentinel-2/MSIの衛星画像を用いた場合に面積サイズの大きな崩壊地をよく抽出できていることを確認している¹¹⁾。台風10号に伴う豪雨で発生した崩壊地のみを抽出の対象とするため、Sentinel-2/MSIの衛星画像は台風10号が襲来した時期をはさみ、2016年7月9日及び2017年7月14日撮影の2時期を用いた。GIS（ArcGIS ver.10.7.1, ESRI）により、NDVI値のラスタをポリゴンに変換し、台風10号の到達前から存在していた裸地は除外し、新規の崩壊地のみを抽出した。さらに、その判別結果を高精細なWorldView-2/WVcameraの衛星画像と照らし合わせ、個々の崩壊地の範囲を修正した。なお、崩壊地面積を求めるにあたり、河道内に分布する裸地の範囲と分離するため、1 m DEM（国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部：2013年2月作成）から2 m間隔で等高線を発生させ、等高線の形状と裸地を重ね、あきらかな斜面崩壊のみを抽出した。降雨は、1 kmメッシュ解析雨量（気象庁：平成28年8月29日1時～31日23時）を使用し、1時間～72時間雨量までをGISで整理した。

地形データは崩壊発生前の1 m DEMを使用し、個々の崩壊地の傾斜・集水面積・平面曲率・断面曲率をGISで計算した。なお、崩壊地内の地形特性をあらわすことを考える際に、地形データの解像度を適切に扱う必要性が議論されている¹²⁾。流域内の崩壊地には面積サイズの大きなものが多数確認され、本研究では崩壊地の範囲内を代表する地形特性を求めるため、高精細な1 m DEMの解像度をそのまま用いずに、セルサイズを

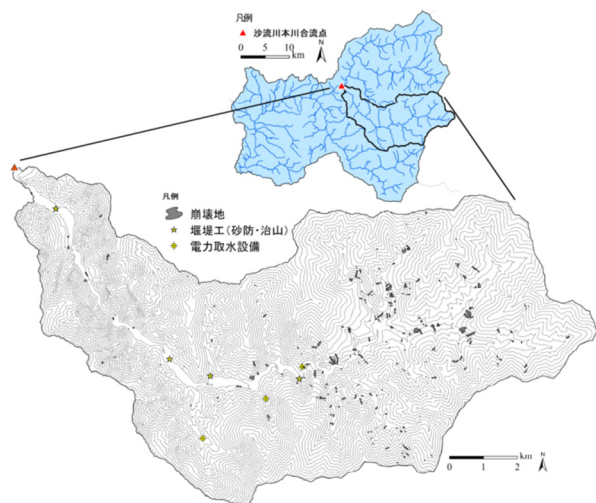


図-1 調査地位置と地形
等高線は50 m間隔

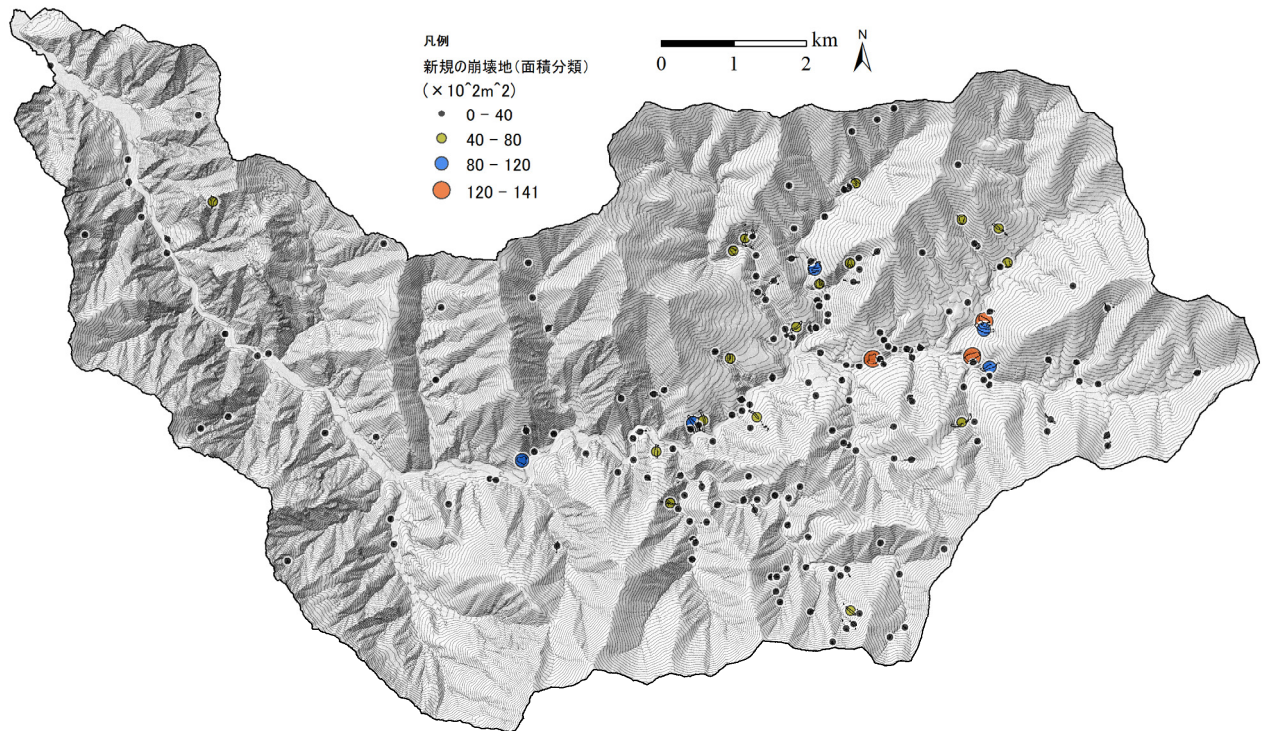


図-2 パンケヌーシ河流域の崩壊地分布

10 m へ最近傍法でリサンプリングし計算に用いた。10 m は、Sentinel-2/MSI の衛星画像の分解能に合わせるという意味もある。この地形データを用いて、傾斜・平面曲率・断面曲率は、崩壊地ポリゴン内のセルの中央値を個々の崩壊地で集計した。集水面積は、崩壊地ポリゴンをラインに変換し、縁辺部のセルの中央値を個々の崩壊地で集計した。地質データは、5 万分の 1 地質図幅^{13)~15)}を GIS でトレースし、地質図に記載のある地質区分で整理した。

2.3 結果と考察

2.3.1 崩壊地分布

パンケヌーシ河流域の崩壊地分布は図-2となる。崩壊地面積に応じ、プロットの円のサイズを変えている。流域内の広範囲において、大小様々な面積サイズの崩壊地が分布し、0~4,000 m²のサイズの崩壊地が多いことが外観的に読み取れる。また、上流域に崩壊地が多く分布する傾向がある。

崩壊地面積の頻度分布を図-3に示す。新規崩壊地は197個を抽出しており、0~500 m²程度のサイズの小さな崩壊地が多く分布する傾向である。崩壊地の個数に対する相対割合で見ると、1,000 m²程度以上から全体の半数を超える。一方、流域内の新規崩壊地の崩壊総面積に対する相対割合で見ると、半数は4,000 m²程度以上の面積サイズの崩壊地 (197個のうち25個) が占め

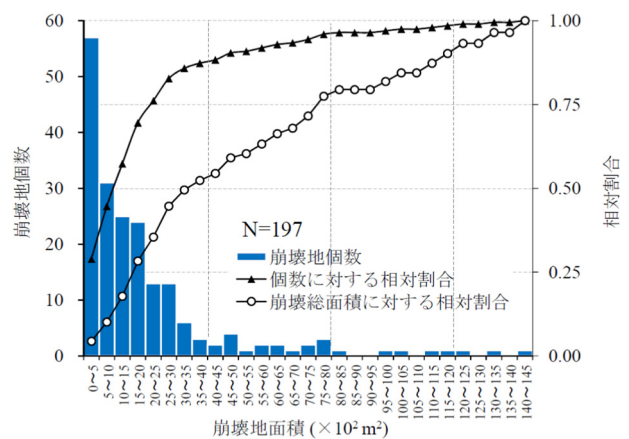


図-3 崩壊地の頻度分布

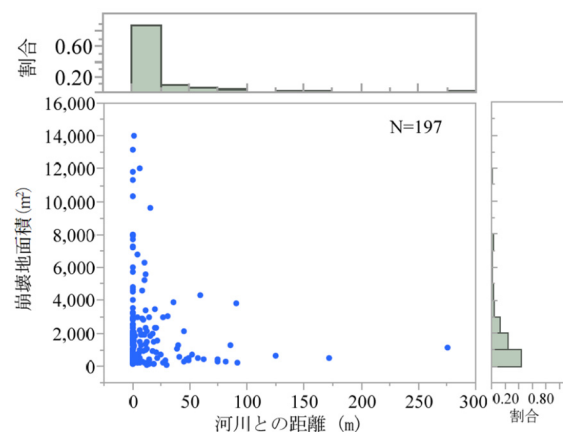


図-4 河川からの距離と崩壊地面積の関係

ていることが読み取れる。そのため、面積サイズの大きな崩壊地は個数が少ないものの、流域全体の崩壊総面積への寄与が大きく、生産土砂の供給に影響していることが推察される。

生産土砂量を計算するには、個々の崩壊地面積と崩壊深の情報が必要となる。ここで、本研究で求めた個々の崩壊地面積を積み上げ、生産土砂量を試算した場合（＝新規の崩壊総面積40万 m^2 ×平均崩壊深1.0 m^{16,17}）と仮定）、約40万 m^3 となり、流砂系における生産土砂の量的なオーダーが概観できる。

さらに崩壊地の分布特性を把握するため、河川との距離と崩壊地面積の関係を図-4に示している。河川は2次谷以上を対象とし、崩壊地の重心から最近傍の河川までの距離を求めている。なお、図-4のヒストグラムは、度数を示している。崩壊地の内、163個（83%）が河道沿い5m以内の位置に分布している。さらに、4,000 m^2 程度以上のサイズの崩壊地が河道沿いに多く分布する傾向であり、本川河道への土砂供給を考えると、

河道沿いの崩壊地が寄与している可能性がある。

2.3.2 降雨との関連性

降雨量と崩壊地の分布特性を把握するため、図-5に時間雨量と崩壊地の分布の例を示す。いずれの時間雨量でも、流域の上流側で降雨量大きい傾向がある。中でも24時間雨量の分布を見ると、崩壊地分布とよく対応していることが読み取れる。

さらに、図-6に降雨量と崩壊地面積の関係を示す。降雨量は崩壊地ポリゴンの重心のセルと重なる位置を抽出している。いずれの時間雨量においても、降雨量が大きくなるにつれ、雨量階における崩壊地面積の上限值が大きくなる傾向が読み取れる。24時間雨量との関連性を例にとると、新規崩壊地のうち、155個（79%）が300 mm以上の範囲に分布している。以上のことから、形成される崩壊地のサイズには、降雨量が影響している可能性があると推察される。

2.3.3 地形、地質との関連性

地形との関連性について、崩壊地面積と傾斜及び集

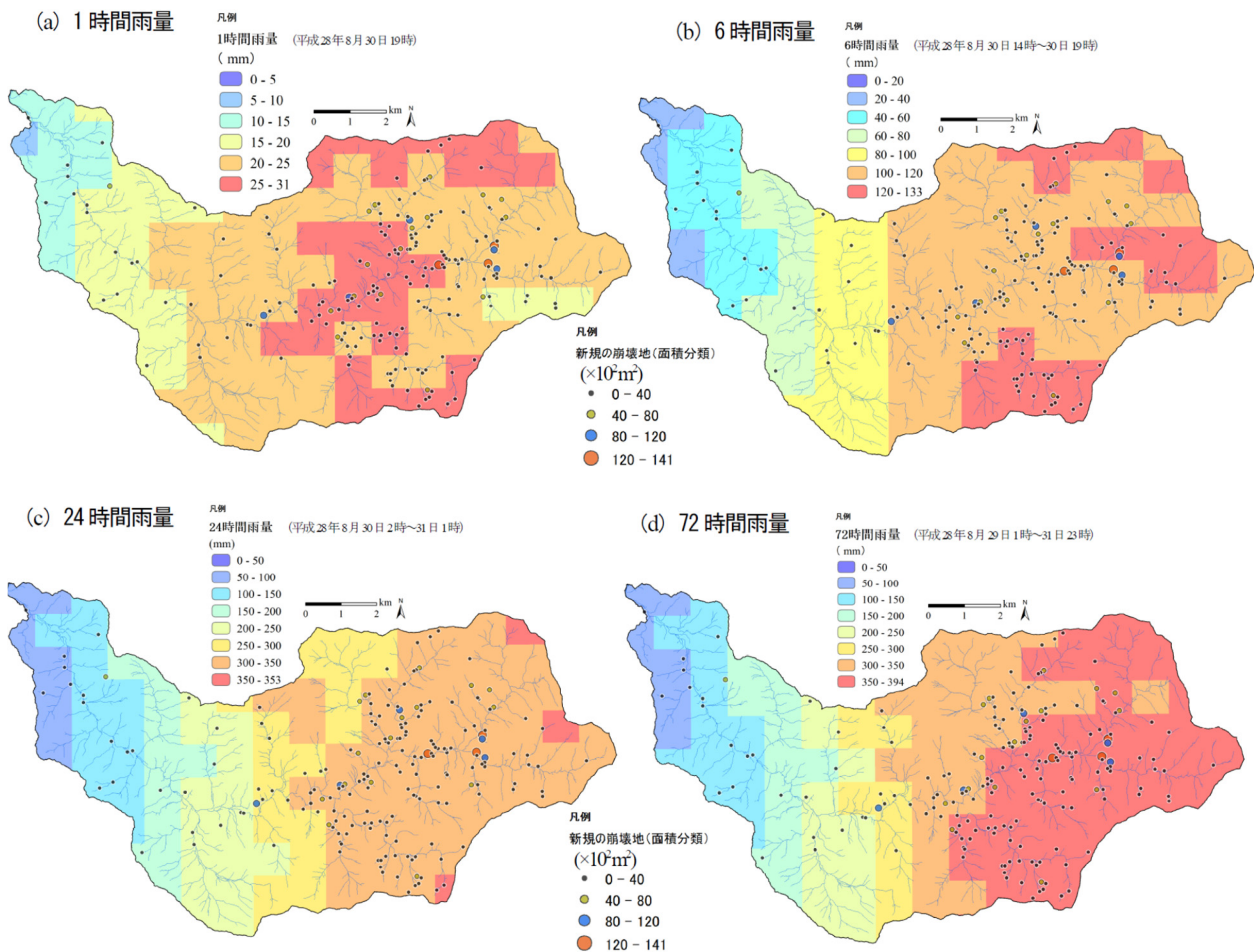


図-5 時間雨量と崩壊地の分布

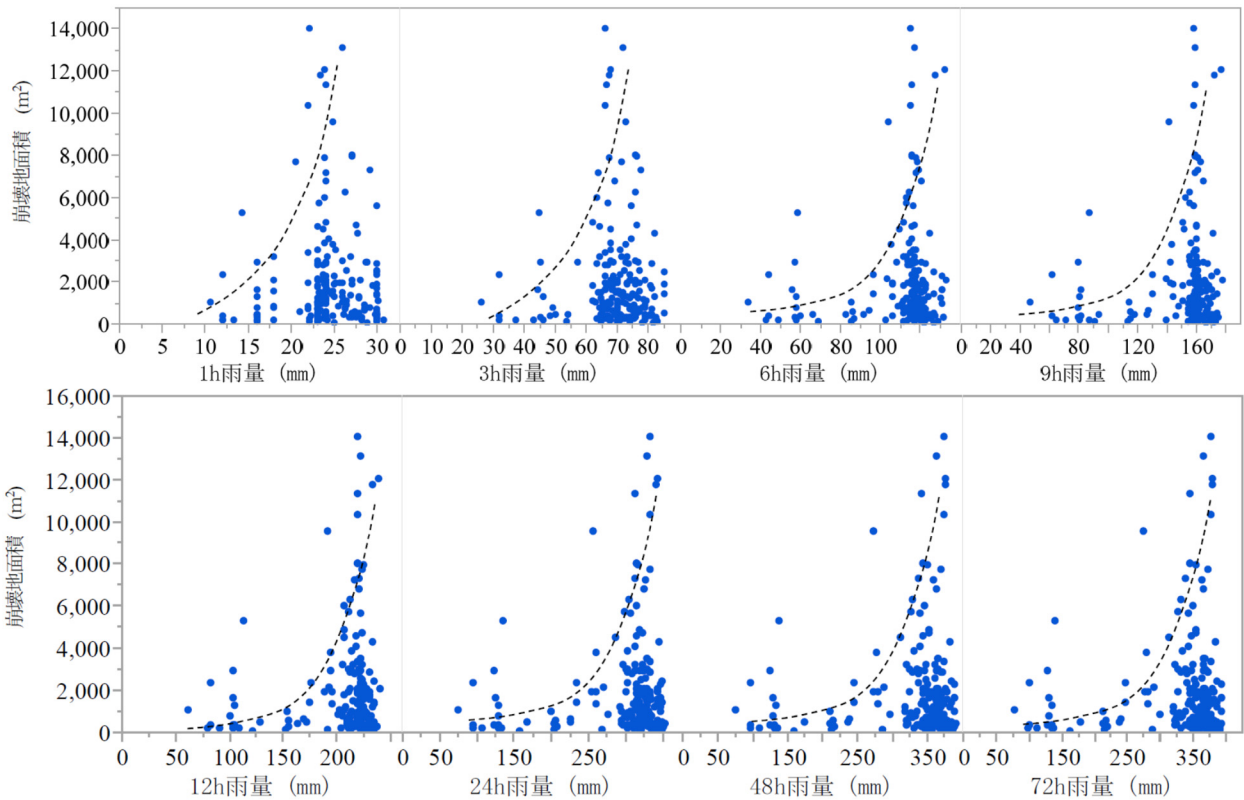


図-6 降雨量と崩壊地面積の関係

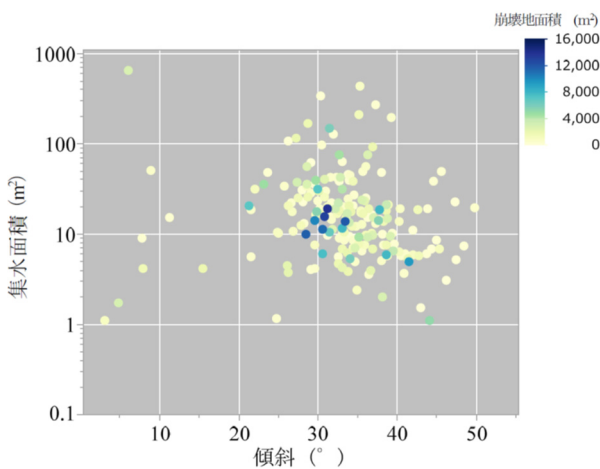


図-7 崩壊地面積と傾斜及び集水面積の関係

水面積との関係を崩壊地の面積サイズで色分けして示す(図-7)。これを見ると、傾斜が 30° かつ集水面積が 10m^2 以上のあたりに、面積サイズの大きな崩壊地が分布している傾向が読み取れる。このことは、地形的に急峻で、集水しやすい斜面において、崩壊地面積が大きくなる可能性があることを示唆する。

つぎに、崩壊地面積と断面曲率及び平面曲率との関係を崩壊地の面積サイズで色分けして示す(図-8)。なお、曲率があらわす斜面形状¹⁸⁾を凡例に編集している。第IV象限から第II象限にかけて崩壊地が多く分布して

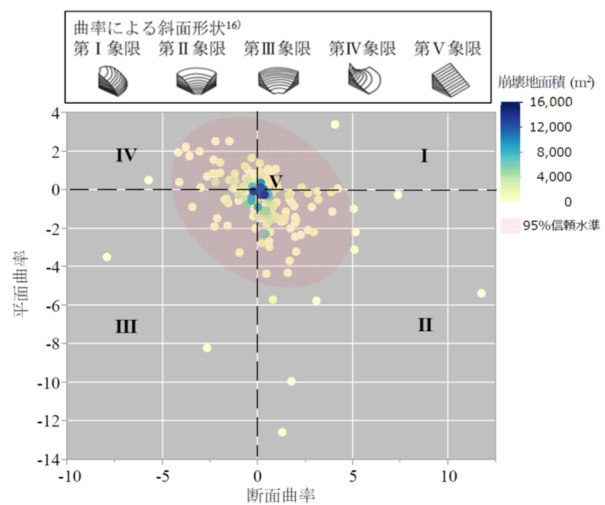


図-8 崩壊地面積と断面曲率及び平面曲率の関係

いる傾向が見られる。さらに、第V象限に面積サイズの大きな崩壊地が集中していることが読み取れる。このことは、平衡形状に近い斜面に崩壊地が多く分布していることを示唆しており、河川の距離との関連性で見られる(図-4参照)、河川沿いの斜面に崩壊地が多く分布する傾向を支持している結果と考えられる。

崩壊地と地質の分布は、図-9に示すとおりである。流域内は東西方向で複雑に地質が分布していることが読み取れる。地質は北海道立地下資源調査所の5万分の

1地質図幅^{13)~15)}を引用し分類している(表-1)。主な地質は火成岩類・堆積岩類・変成岩類に大別され、岩種は19種類と多岐にわたる。崩壊地分布は、流域上流側の火成岩類のエリアで比較的多く分布する。

崩壊地の分布特性として、河道沿いに面積サイズが大きい崩壊地が分布していたため(図-4参照)、ここでは、雨量と19種類の岩種ごとの最大崩壊地面積との関係を調べた(図-10)。図-10では、崩壊地分布と比較的よく対応していた24時間雨量の例を示し、該当する地

表-1 対象流域の地質・岩種分類

地質・岩種	領域面積 (km ²)	新規崩壊地面積 (m ²)	最大崩壊地面積 (m ²)	新規崩壊地個数 (個)
No. 火成岩類 小計	70.6	379,891	-	174
1 片状はんれい岩	3.3	976	604	2
2 閃緑質はんれい岩	21.3	135,220	14,052	51
3 蛇紋岩	0.1	0	0	0
4 輝緑岩質岩	12.7	12,607	5,255	11
5 ノーライト	5.3	69,253	13,137	24
6 ソーシユル石はんれい岩	1.7	16,617	9,595	4
7 かんらん石はんれい岩	23.1	140,932	8,028	79
8 かんらん岩	2.6	4,287	2,155	3
9 片麻状花崗岩	0.5	0	0	0
No. 堆積岩類 小計	17.3	8,745	-	12
10 頁岩・シルト岩	2.1	2,364	2,364	1
11 頁岩質粘板岩・砂岩	6.0	105	105	1
12 粘板岩・砂岩	8.2	3,542	1,034	7
13 チャート	0.4	1,285	1,285	1
14 氾濫原堆積物	0.6	1,449	1,075	2
No. 変成岩類 小計	7.9	12,497	-	11
15 緑色片岩	0.3	0	0	0
16 緑色角閃石片状角閃岩	4.6	3,782	2,328	2
17 黒雲母片麻岩	2.2	7,848	2,551	8
18 褐色角閃石角閃岩	0.1	0	0	0
19 ホルンフェルス	0.8	867	867	1
計	95.8	401,133	-	197

質エリア全域での雨量(1kmメッシュ)の中央値を抽出している。まず、24時間雨量の分布(図-5参照)は、上流域の火成岩類で値が大きく、堆積岩類と変成岩類はそれより小さい傾向があらわれている。最大崩壊地面積がゼロの岩種は地質・岩種の領域面積がそもそも小さいといったことがある。最大崩壊地面積は火成岩類の岩種を見ると、No.2~7の岩種で4,000m²以上と大きくなる一方、雨量の増加と最大崩壊地面積との間に正の相関が見られない岩種があり、プロットにばらつきがある。他方で、堆積岩類と変成岩類の岩種では、雨量の増加と最大崩壊地面積との間に正の相関が見られず、4,000m²未満にプロットされる。そのため、岩種

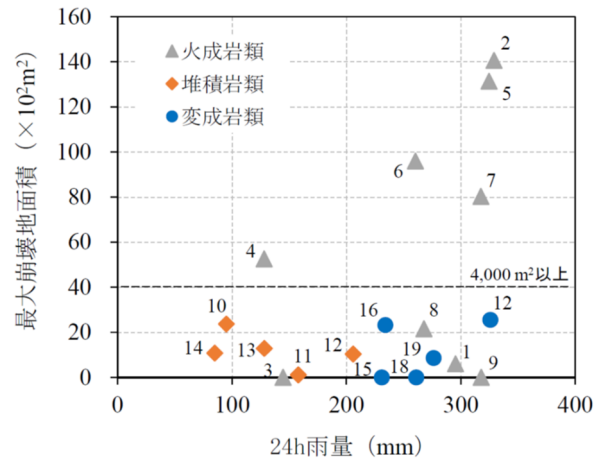


図-10 24時間雨量と最大崩壊地面積の関係

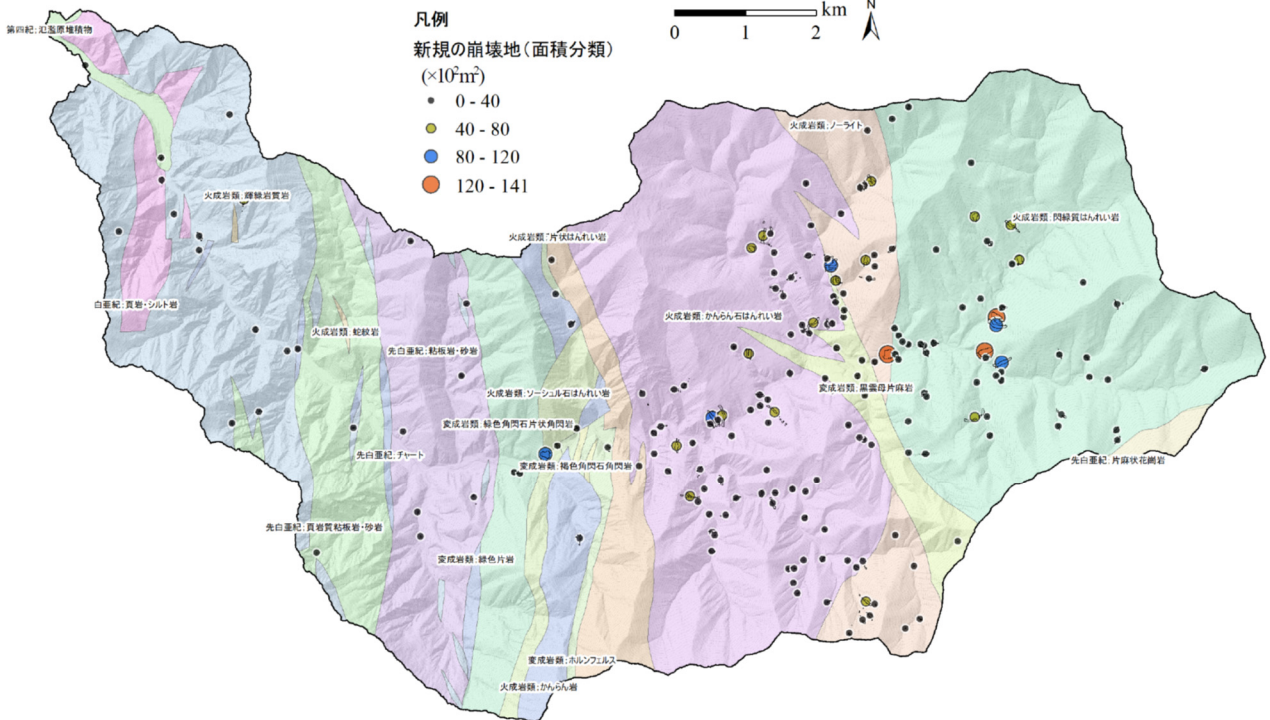


図-9 崩壊地と地質の分布

の違いが最大崩壊地面積に影響を及ぼしていることが示唆される。このことから、堆積岩類と変成岩類の岩種では、火成岩類の岩種と比較し、斜面崩壊に伴う土砂供給のポテンシャルが低い可能性があることが推察される。

2.4 おわりに

パンケヌーシ川流域の崩壊地分布は24時間雨量の分布と比較的よく対応し、その多くは河道沿い5 m以内の平衡形状に近い斜面に分布しているため、崩壊発生による本川河道への土砂供給が示唆された。

本章の分析により、地質区分した上での斜面形状と崩壊地面積との関連性といった、地質・地形・降雨との相互の関連性の解明が今後の課題に残っている。次の分析では、それらを視点とした考察を加えていきたい。

3. 解像度の異なる NDVI 画像を用いた崩壊地面積の評価

3.1 目的

流砂系の総合的な土砂管理では、山地から海岸まで広域の流域スケールを対象に生産土砂の量と質(粒径)の情報を取得することは最も重要な課題の一つである。これらの情報を得るには、通常、主要な土砂生産源となる崩壊地を抽出し、崩壊前後の地形変化量から生産土砂量を評価することとなる。その初期段階として、流域内の崩壊地の分布とその大きさ(面積)を網羅的に調べる必要があり、空中写真や衛星画像の判読に多大なコストと労力を要する場合が多い。

衛星画像による解析は、農業や防災といった多方面の分野で活用され、画像の種類も多岐にわたる。これまでは有償の衛星画像が多くコストがかかる上、入手までの手間や時間を要していたが、近年、欧州の衛星画像(例えば Sentinel-2/MSI^{19),20})をはじめ、解像度 10 m 程度の衛星画像がウェブを通じて、誰でも無償かつ短時間で入手できるようになった。Sentinel-2/MSI の衛星画像を用いた事例として、農業分野では、水田の圃場区画単位の取水開始時期を広域スケールで把握するために用いられている²¹)。有償の衛星画像では、異なる衛星画像をシームレスに繋ぐ技術が開発され²²)、解像度 0.5 m~2.5 m 程度の高精細な画像を比較的安価に入手できるようになった。このような衛星画像の無償公開・低コスト化は進みつつあり、ユーザーが GIS 等で解析可能な衛星画像の種類が増してきている。

防災分野では、斜面崩壊に伴う生産土砂量の把握を視野に入れた崩壊地面積の抽出について、衛星画像に

よる解析手法が検討され²³)、中でも正規化植生指数 Normalized Difference Vegetation Index (以下、NDVI 値)を用いた事例が多い。NDVI 値は植物の量や活性度をあらわす指数であり、裸地と植生の判別に用いられる。戎ら⁸)は、Landsat/MSS (解像度: 80 m) と Landsat/TM (解像度: 30 m)、SPOT/HRV (解像度: 20 m) の衛星画像から NDVI 値を計算し(以下、NDVI 画像)、裸地(崩壊地)と植生の判別を行った結果、崩壊地面積の約 70%以上を抽出できたと報告している。一方、崩壊地にかかる樹木の影や河道裸地の除去といった抽出手法自体の技術的な課題が残ることも指摘している⁸)。

流域スケールで斜面崩壊による土砂生産量を評価する上で、崩壊地面積の抽出精度を高めることは重要であり、高解像度の衛星画像を用いることで改善が期待される。しかし、NDVI 値による崩壊地抽出手法において、近年公開された衛星画像の解像度の違いが抽出結果へ及ぼす影響についてはほとんど知見が見あたらない。そこで本研究では、衛星画像から作成する NDVI 画像の解像度の違いが崩壊地面積の抽出結果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。事前に新規の崩壊地を写真判読した結果²⁴)を解とした上で、解像度の異なる 2 種類の NDVI 画像による崩壊地面積の抽出結果と比較する。なお、本報は崩壊地面積の抽出結果を考察するもので、NDVI 値による抽出手法自体の技術的な課題には切り込まず、今後の議論とする。

3.2 方法

3.2.1 研究対象流域

対象流域は、北海道沙流郡の沙流川水系パンケヌーシ川流域である(図-1)。対象流域が位置する沙流川上流域では、2016年8月30-31日の台風10号に伴う豪雨で大規模な出水が生じた³)。この豪雨に伴う広域的な斜面崩壊の発生により、道路や橋梁に甚大な被害が生じた⁹)。流域面積は 95.8 km² で、本川 6 次谷の平均河床勾配は 1/20.4 (2.9°) 程度である。流域内は全域が国有林であり、天然林が 7 割を占める森林流域である¹⁷)。地質は流域の東西方向で複雑に分布し、火成岩類・堆積岩類・変成岩類に大別され、岩種は多く 19 種類にも及ぶ¹³⁾⁻¹⁵)。流域内の崩壊地を確認すると(写真-1)、明瞭に裸地化したものや崩壊地内に倒木が残るものがある。

3.2.2 比較方法

本章では、解とする写真判読した崩壊地と NDVI 画像で抽出する崩壊地の面積を比較する。なお、解とする崩壊地は高精細な解像度の WorldView-2 画像と 1 m × 1 m の標高モデル(2012年9月計測、国土交通省北海



写真-1 対象流域の植生と裸地

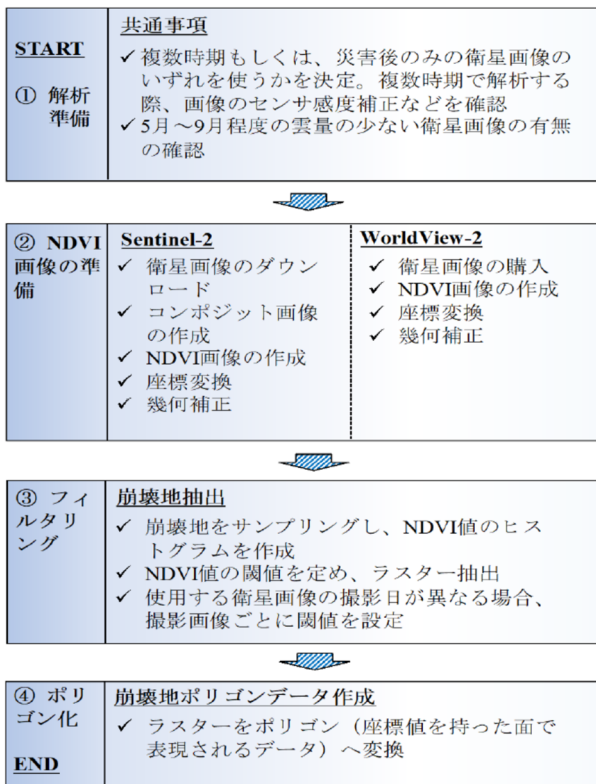


図-11 崩壊地の抽出過程

道開発局室蘭開発建設部。以下、1 m DEM) から生成した等高線を重ねることで写真判読している²⁴⁾。

NDVI 画像を作成するための NDVI 値は、第 2 章の式 (1) ⁹⁾ で計算する。NDVI 値による崩壊地の抽出手法としては、複数時期の衛星画像を用い、NDVI 値の差分から抽出する手法と、斜面崩壊発生後の衛星画像のみを用いて抽出する手法がある。本研究では、入手できた衛星画像が限定的であったため、後者の手法を採用した。なお、NDVI 値の計算には ArcGIS (ver. 10.7.1;

ESRI) のバンド間演算の機能を使用した。

3.2.3 崩壊地の抽出

NDVI 画像を用いた崩壊地抽出の過程について、留意事項を交えて記述する (図-11)。

①解析の準備として、あらかじめ確認すべき事項がある。NDVI 画像を作成する際に、雲や山影・樹木影がかかると白黒の画素情報のみが得られることになり、裸地の NDVI 値に類似した値が計算される。そのため、作業前の衛星画像の選定が重要となる。なお、異なる衛星の画像データで比較する場合は、処理レベル (センサ感度補正や幾何補正等の段階) の条件をある程度合わせておく必要がある。

②NDVI 画像の準備では、解析に供する衛星画像の種類によって、手順が異なる。比較する 2 種類の衛星画像は Sentinel-2/MSI (解像度 10 m、2017 年 7 月 14 日撮影; 図-12(a)) と、WorldView-2/WV10camera (AW3D[®]: 解像度 2.5 m、2017 年 6 月 30 日 (流域下流側: 面積=75.2 km²) と 2018 年 7 月 29 日撮影 (流域上流側: 面積=20.6 km²); 図-12(b)) が撮影したものである。Sentinel-2 画像ではウェブ上で NDVI 画像を確認できるものの、公開される Tiff には RGB 値のみであるため、解析の際には、Band 8 と Band 4 の画像をダウンロードし、コンポジット画像を作成する必要がある。一方で、WorldView-2 画像は、購入時に複数の Band をもつコンポジット画像を選択することで、GIS のバンド間演算の機能を使用し NDVI 画像を作成できる。また、両者の衛星は観測幅に違いがあり、Sentinel-2 は 290 km で、WorldView-2 は 16.4 km であり、精細な解像度の衛星ほど観測幅も狭くなる。広域スケールの流域で解析する際は、観測幅も広い方が複数の画像を繋ぐ手間を省略できる。

③フィルタリングでは、NDVI 画像を用いて崩壊地を抽出する。ここで、衛星画像による崩壊地の選択の例を図-13(a) と (b) に示す。崩壊地内は倒木等を含んだ範囲とすると、NDVI 値が裸地と異なる値が混じるため、抽出に影響が及ぶと予想される。そこで、判読した崩壊地 197 個²⁴⁾ の全数を対象に、倒木の有無を画像の色調から判断し選択することで、純粋な崩壊地を解析に用いる。次に、生産土砂の発生源である崩壊地の抽出が目的であるため、河道裸地・植生・崩壊地に分類した NDVI 値のヒストグラムを作成した。河道裸地は GIS で河川ラインを発生させ、100 m 間隔でポイントに変換し、明らかな裸地と判断できる 5 次谷以上の NDVI 値を集計した。植生は対象流域が広域であるため、100 m のグリッド間隔で集計した。崩壊地の NDVI

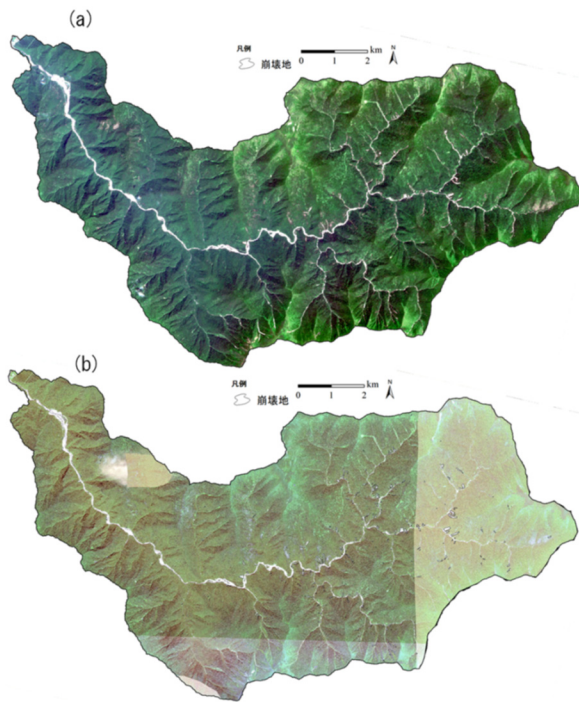


図-12 崩壊地抽出手法に用いた衛星画像
(a) Sentinel-2, (b) WorldView-2

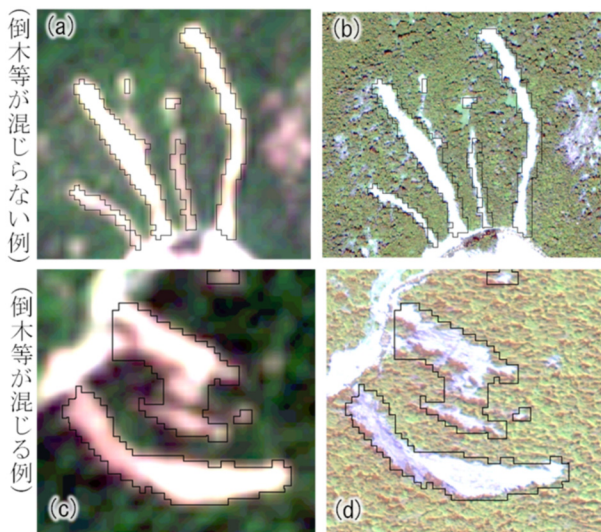


図-13 崩壊地の選択の例
黒枠線は新規の崩壊地の範囲、(a) (c) Sentinel-2、
(b) (d) WorldView-2

値は 10 m のグリッド間隔で集計した。これらの過程で作成したヒストグラムの分位点を整理し、崩壊地抽出のための NDVI 値の閾値を定める。

④ポリゴン化では、NDVI 値の閾値で抽出した結果を GIS で解析しやすいベクター（ポリゴン）に変換する。NDVI 値は浮動小数点（小数点の位置を固定せずに表現された数）であるため、GIS で整数値に変換す

る作業を行った後、ポリゴンに変換する。

3.3 結果と考察

3.3.1 NDVI 画像による崩壊地抽出

衛星画像別の河道裸地・植生・崩壊地の NDVI 値のヒストグラムを図-14(a)～(c)に示し、表-2には分位点を示す。河道裸地・植生・崩壊地のヒストグラムにおいて分布の形状に違いが見られ、河道裸地の NDVI 値が比較的低く、植生では高い傾向が見られる。崩壊地の NDVI 値の分布は、それらの中間程度に位置する。

画像別に比較すると、Sentinel-2 と WorldView-2 の画像によってヒストグラムの分布の形状が異なり、さらに同じ WorldView-2 の画像であっても撮影時期により異なる傾向である（図-14）。このことは、戎ら（2000）による Landsat/MSS と Landsat/TM、SPOT/HRV の解析結果からも指摘され⁶⁾、NDVI 値を用いた崩壊地抽出手法を用いる際の留意すべき点の一つと考えられる。

ここで崩壊地の NDVI 値のヒストグラムを作成するには、どの程度の崩壊地のサンプルを衛星画像から選択すればよいのかという点が問題になる。本研究では、2種類の衛星画像による崩壊地面積の抽出結果を比較するため、崩壊地の全数を用いている。このような崩壊地のサンプル数や選び方も、NDVI 値のヒストグラムに影響を及ぼすことが想定される。

NDVI 画像は、図-15(a)と(b)のように作成した。解像度 10 m の Sentinel-2 の衛星画像による NDVI 画像でも、裸地化した範囲が表現されている。いずれの衛星画像を見ても、崩壊地及び河道の裸地化した範囲は NDVI 値が低くなり、植生のある山腹では高くあらわれている。両者を比較すると WorldView-2 の衛星画像では、Sentinel-2 よりも NDVI 値が低い傾向である。

次に NDVI 値の分位点によって、崩壊地の抽出を試行する。崩壊地は、植生ならびに河道裸地の範囲から分離し抽出することを考える。崩壊地の NDVI 値は、河道裸地と植生の NDVI 値の中間程度に位置する傾向が見られるため（図-14(a)～(c)参照）、ヒストグラムにおける下限及び上限の2つの分位点を閾値と定め、3パターンで崩壊地を抽出する。パターンは①2.5%確率値と 97.5%確率値、②10%確率値と 90%確率値、③25%確率値と 75%確率値の組み合わせとする。

図-16(a)－①～③及び図-16(b)－①～③に分位点の3パターンによる崩壊地の抽出結果を画像別に示す。いずれの画像でも、2.5%確率値と 97.5%確率値を用いると植生及び河道裸地のセルが残る傾向で、25%確率値と 75%確率値を用いると、崩壊地のセルまでも除去

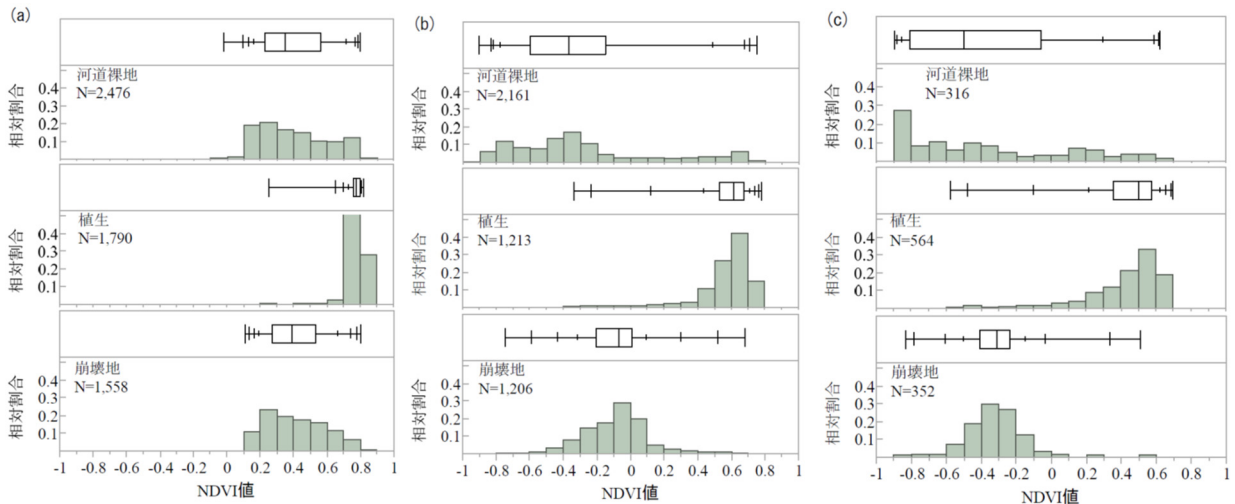


図-14 NDVI 値のヒストグラム

ボックスプロットは分位点の位置。(a) Sentinel-2、(b) WorldView-2 (2017.6.30 撮影)、(c) WorldView-2 (2018.7.29 撮影)、(b) (c) で N が異なるのは衛星画像の面積の違いによる

表-2 NDVI 値の分位点

分位点	NDVI値								
	Sentinel-2			WorldView-2(2017.6.30)			WorldView-2(2018.7.29)		
	河道裸地	植生	崩壊地	河道裸地	植生	崩壊地	河道裸地	植生	崩壊地
100.0 最大値	0.80	0.82	0.80	0.75	0.78	0.68	0.62	0.70	0.51
99.5	0.78	0.81	0.78	0.71	0.76	0.52	0.61	0.69	0.34
97.5	0.77	0.81	0.74	0.67	0.74	0.30	0.59	0.66	-0.04
90.0	0.71	0.80	0.66	0.49	0.71	0.09	0.29	0.62	-0.15
75.0 四分位点	0.56	0.80	0.53	-0.15	0.68	0.01	-0.06	0.58	-0.24
50.0 中央値	0.34	0.78	0.39	-0.37	0.62	-0.07	-0.50	0.50	-0.31
25.0 四分位点	0.23	0.76	0.27	-0.60	0.53	-0.21	-0.81	0.36	-0.41
10.0	0.16	0.73	0.19	-0.78	0.44	-0.32	-0.86	0.22	-0.50
2.5	0.13	0.70	0.16	-0.82	0.12	-0.44	-0.88	-0.10	-0.61
0.5	0.10	0.65	0.13	-0.83	-0.24	-0.59	-0.89	-0.48	-0.79
0.0 最小値	-0.02	0.25	0.11	-0.91	-0.33	-0.75	-0.89	-0.58	-0.83

される傾向である。10%確率値と90%確率値を閾値とすると、崩壊地のみを植生及び河道裸地の範囲からある程度抽出できている。ここで、WorldView-2の抽出結果では、衛星画像から植生と判断される山腹にもNDVI値の低い値が散見する(図-17)。これは、解像度が高いために、樹木影や倒木等を鋭敏にとらえていることが影響していると考えられる。

ポリゴン変換した後のNDVI画像を図-18に示す。ここでの抽出結果は、閾値10%及び90%確率値のパターンを用い、解とする写真判読した崩壊地ポリゴンと重なる範囲のみを抽出し、以降の議論もこの閾値による。これを見ると、Sentinel-2から作成した画像は崩壊地の外枠を上回るように抽出しており、WorldView-2から作成した画像は、崩壊地内での中抜けが見られる。これらは解像度の違いがあらわれていると思われ、高解像度画像の崩壊地内での中抜けしたのは崩壊地内の小規模な植生分布や、河道裸地のNDVI値に近いセルが閾値外になり除去されたと考えられる。

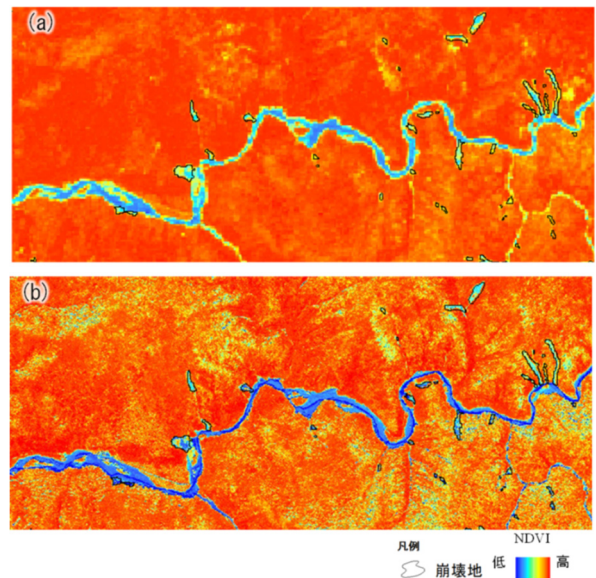


図-15 NDVI 値の作成結果

(a) Sentinel-2、(b) WorldView-2

3.3.2 個々の崩壊地面積の比較

解とする崩壊地はあらかじめ、衛星画像を目視し197個を判読している⁷⁾。崩壊地面積の分布は、図-19の指数分布を呈しており、0~1,000 m²の面積階の崩壊地数が最も多く、面積階が大きくなるにつれ、個数が減少する。この分布を解とし、2種類の衛星画像から崩壊地面積を抽出した結果とを比較する。

図-20に写真判読した崩壊地面積とNDVI値で抽出した崩壊地面積の関係を示す。WorldView-2画像の抽出結果は判読した崩壊地面積を全体的に下回り、Sentinel-2画像の抽出結果は上回る傾向がみられた。

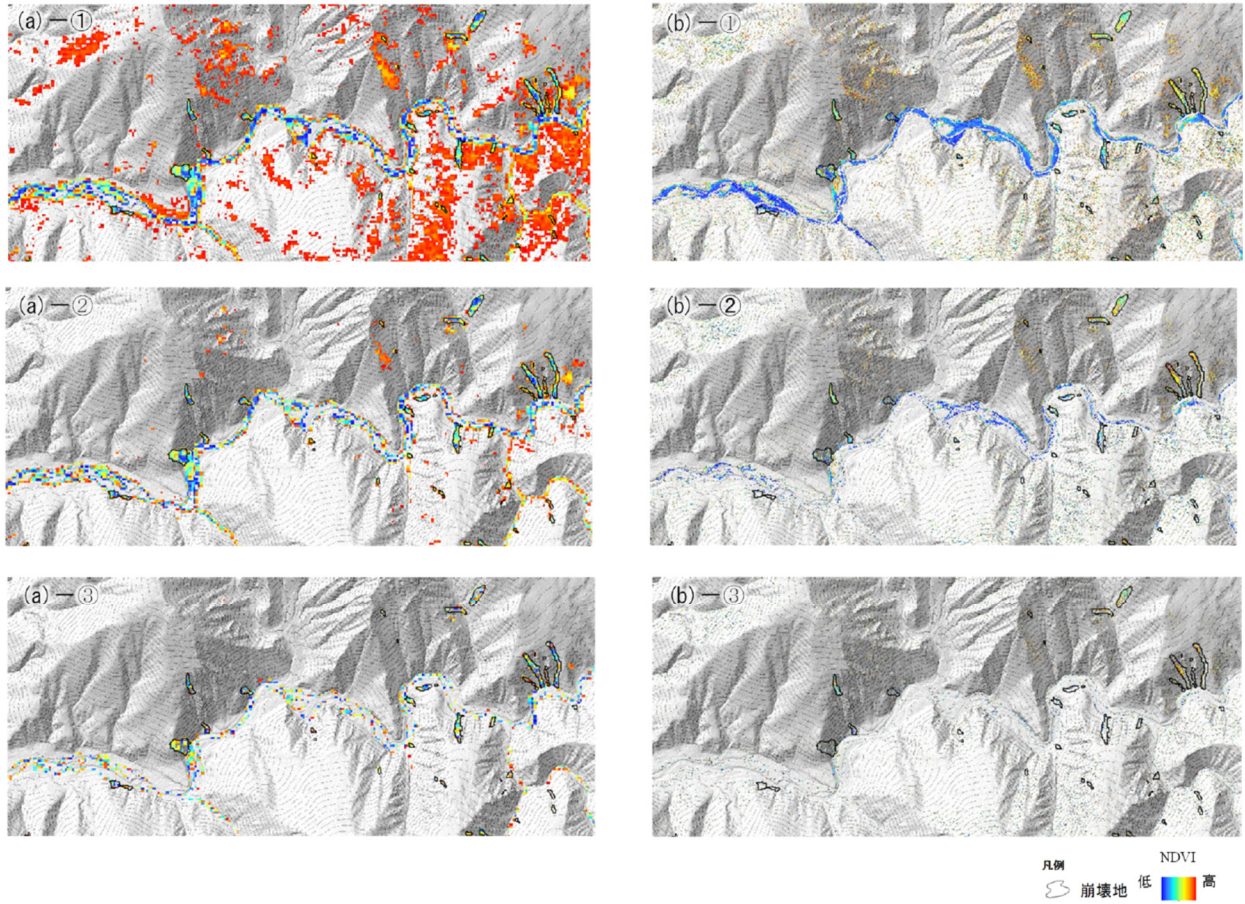


図-16 分位点のパターンによる崩壊地の抽出結果
(a) Sentinel-2, (b) WorldView-2

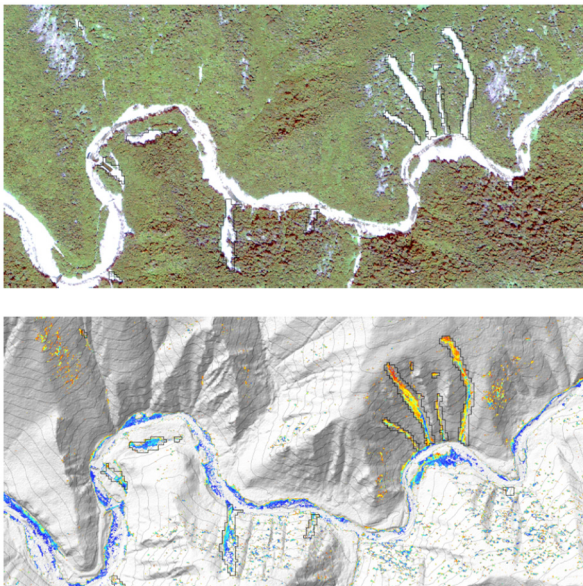


図-17 WorldView-2 の衛星画像の例
山腹の黒色は樹木影であり、灰色は倒木

Sentinel-2 画像では、崩壊地面積が大きくなるにつれ、判読した崩壊地面積に近付いており、10,000m²以上の

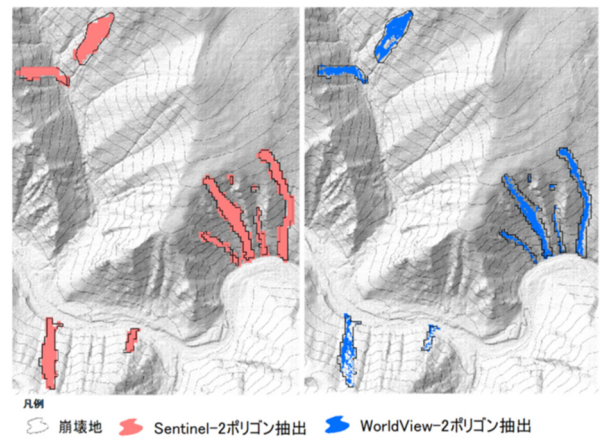


図-18 ポリゴン変換した後の NDVI 画像の比較

崩壊地は回帰直線が 1:1 の線形とほぼ重なっている。WorldView-2 画像では、崩壊地面積の規模によらず、ほぼ一定の傾きをもち、解よりも過小であった。このことから、Sentinel-2 画像は、崩壊地面積の大きな崩壊地の抽出に適用できる可能性があると考えられる。

写真判読した崩壊地面積のうち、どの程度の面積割合を NDVI 値の手法で抽出できたかを調べるため、以

下の式で抽出率を定義した。

$$\text{抽出率 (\%)} = \frac{\text{NDVI 値で抽出した崩壊地面積}}{\text{衛星画像で判読した崩壊地面積}} \times 100 \quad (2)$$

計算した抽出率と対象とする崩壊地面積の関係を図-21 に示した。抽出率は、2 種類の衛星画像いずれも面積の小さい崩壊地でばらつきが大きく、崩壊地面積が大きいほど収束する傾向がみられた。Sentinel-2 画像は小規模な面積の崩壊地を見落としたり、4 倍以上の面積に過大評価したりする場面が見られたが、全体的に過大評価傾向であり、崩壊地面積が大きいほど抽出率が 100% に漸近することがわかる。一方、WorldView-2 画像は、面積の小さい崩壊地でも概ね過小評価傾向で、抽出率は 50% 程度を中心にばらつき、面積が大きくなっても抽出率は 50% 程度に収束する傾向が見られた。

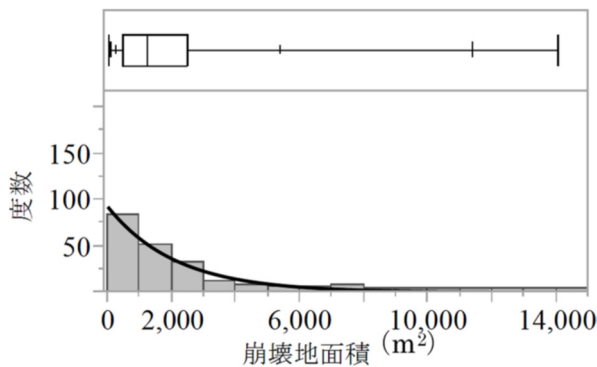


図-19 写真判読した崩壊地面積の頻度分布

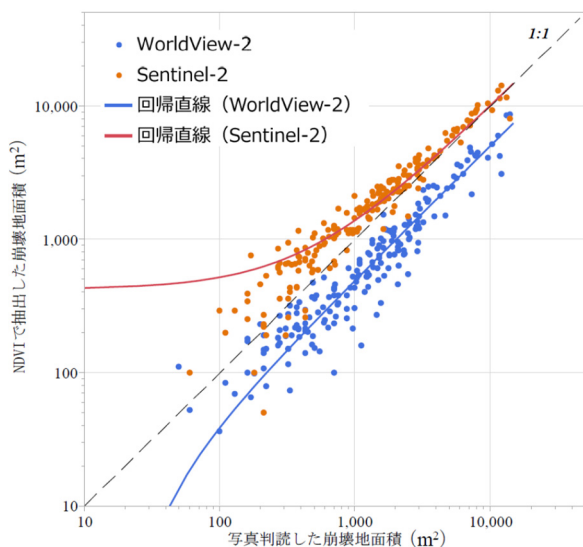


図-20 写真判読した崩壊地面積と NDVI 値で抽出した崩壊地面積の関係

本章と同様に衛星画像の解像度と抽出率との関係を調べた既往研究について、戎ら⁸⁾の判別精度（本研究でいう抽出率）は解像度 20 m の SPOT/HRV 画像では 71.3%~74.4%、解像度 30 m の Landsat/TM 画像では 73.1%~73.7%、解像度 80 m の Landsat/MSS 画像では 43.3%~53.3%と報告されている。解析対象とする崩壊地の面積や個数等の詳細は不明だが、崩壊地面積を過小評価する要因として、使用する衛星画像の解像度より小さい崩壊地を見落とす可能性があることが考えられ、崩壊地の大きさに見合った地上分解能（解像度）の高い衛星データを用いる必要があることが指摘されている⁸⁾。

本章では、さらに解像度の高い Sentinel-2 画像 (10 m) および WorldView-2 画像 (2.5 m) を用いた場合、崩壊地の抽出率は崩壊地面積によって異なること、必ずしも解像度が高いほど抽出率がよいとは限らないことがわかった。とくに、WorldView-2 画像で抽出率が著しく低かったのは、崩壊地内の小規模な植生分布を鋭敏にとらえていることが影響している可能性がある。写真判読による崩壊地面積は、崩壊地の外周を囲うことで評価しているため、崩壊地内に分布する植生も含めた面積となっている。したがって、高解像度画像では裸地の抽出を高精度にできる一方、崩壊地面積としては過小評価になる可能性がある。また、本研究では NDVI 値により河道裸地・植生・崩壊地の 3 区分に判別しようとしたために、実際の崩壊裸地斜面を河道裸地と誤判読した可能性もある。

3.3.3 流域全体の崩壊総面積の比較

流域全体での累積の崩壊面積を崩壊総面積とし、2 種類の衛星画像と解の写真判読結果とを比較する (図

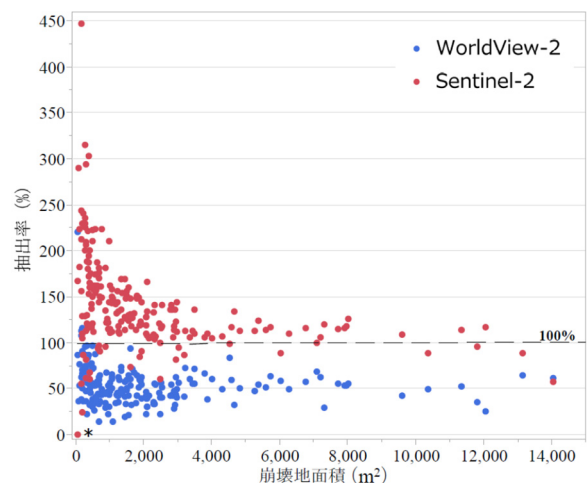


図-21 写真判読した崩壊地面積と抽出率の関係
*は見落とした崩壊地

-22)。写真判読した崩壊総面積の 419,370 m² に対し、WorldView-2 画像の抽出結果は 211,836 m² (-51%)、Sentinel-2 画像は 492,540 m² (+17%) であった。累加曲線は個々の崩壊地面積の積み上げが反映されており、2 種類の衛星画像は面積階 0~3,000 m² 程度の立ち上がり時点から差が広がっている。WorldView-2 画像は、面積階 3,000 m² 以上の累加曲線の傾きが写真判読よりも緩く、さらに過小評価の傾向が広がっている。一方、Sentinel-2 画像は、面積階 3,000 m² 以上の累加曲線の傾きは写真判読結果に比較的近く、面積階 3,000 m² 未満の立ち上がりの差が崩壊総面積にそのまま反映したものと考えられる。

3.4 まとめ

本研究では、沙流川上流域のパンケヌーシ川を対象に、衛星画像の解像度の違いが NDVI 値による崩壊地面積の推定精度にどのような影響を及ぼすかを検討した。高解像度 (2.5 m) の衛星画像では、崩壊地内の小規模な植生分布をとらえるため、崩壊地外周を囲う写

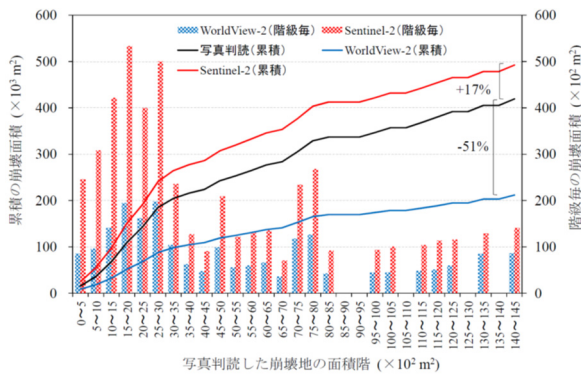


図-22 流域全体の累積崩壊面積

表-3 衛星画像の崩壊地抽出における長所・短所

名称	Sentinel-2/MSI	WorldView-2/WV110camera
解像度	10 m	2.5 m
観測頻度	約3日	約2日
観測幅	290 km	16.4 km
入手費用	無償	有償
入手手順	ダウンロード可能	購入手続きが必要
長所	<ul style="list-style-type: none"> ある程度の解像度と観測頻度を有し、広域な観測幅を有する。解析する場所と日時の画像をウェブ上で容易に確認可能。 費用と入手の手間がかからず、複数時期の解析が容易。 大規模な崩壊地面積をよくとらえている。 	<ul style="list-style-type: none"> 解像度と観測頻度が優れる。 解像度が高く、目視での崩壊地判読にも適している。 複数バンドを備えるため、NDVI画像の作成が容易。
短所	<ul style="list-style-type: none"> 目視による崩壊地判読には適さない(元々の植生が裸地化したかどうかの判断には利用可能)。 NDVI値による崩壊地面積の抽出では、写真判読よりも大きくなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 観測幅が狭く、広域スケールの流域での解析にはあまり適さない。 画像入手の手間がかかる。 NDVI値による崩壊地面積の抽出では、樹木影や倒木等をとらえやすい。 高解像度のため、NDVI値は崩壊地内の小規模な植生分布をとらえやすく、崩壊地面積が小さくなる。

(2020年1月15日現在)

真判読結果と比較して、個々の崩壊地面積が小さく抽出され、結果的に流域全体の崩壊総面積も小さくなることわかった。一方、解像度が 10 m の衛星画像では、崩壊地面積が大きいほど抽出率が高く、流域全体の崩壊総面積も比較的良好に推定された。

表-3 に NDVI 値による崩壊地抽出手法へ今回解析した衛星画像の長所と短所を整理する。解像度の違いによって、各々適する用途があり、他の衛星画像の解析例を蓄積することで、徐々に明らかになると思われる。一方、NDVI 値による崩壊地抽出手法自体の技術的な課題も残されている。それは先行研究^{たとえ8)}や本報で指摘した、河道裸地の除去の仕方、NDVI 値のヒストグラムを作成する際の崩壊地サンプルの選び方や閾値の設定、樹木影・倒木の誤抽出の削減等がある。さらに、本研究は一時期の解析のために考慮していなかったが、異なる衛星画像を用いて複数時期で解析する場合には、放射量補正 (センサ補正・太陽高度地形補正・大気補正) を行い、衛星画像間の条件を合わせることに留意する必要がある。

4. 豪雨に伴う新規崩壊による流域スケールの土砂生産量推定 - 沙流川水系パンケヌーシ川流域における平成 28 年台風 10 号の事例 -

4.1 目的

北海道沙流川流域では、平成 28 年 (2016 年) 8 月 30 日~31 日に襲来した台風 10 号の豪雨に伴い、大規模な出水が生じ、斜面崩壊や河道の侵食・堆積が多数確認された³⁾。流砂系の総合的な土砂管理を検討する上で、豪雨イベント後に形成された新規崩壊地から供給される土砂量は重要な情報の一つとなる。2 時期の地形変化量をレーザープロファイラ (LP) で計測する手法は精度が高い反面、コストがかかる。そのため、流砂系の広域スケールで土砂量を求めるには、経済的な推定手法が必要とされるが、崩壊地面積から土砂量を推定する Guzzetti ら²⁵⁾をはじめとする予測式 (以下、Guzzetti 式) の精度検証は不十分であり、解析例を蓄積することは土砂収支を理解する上でも有用となる。そこで本章は、衛星画像と 2 時期の LP データを用いた解析手法により、沙流川水系パンケヌーシ川流域 (95.8 km²) を対象に崩壊生産土砂量の予測式を構築し、Guzzetti 式で計算される推定値との定量的な違いを明らかにすることを目的とした。

4.2 方法

本章の解析フローを図-23 に示す。豪雨イベント後の新規裸地を抽出するため、①台風 10 号前後の 2 時

期の衛星画像 (Sentinel-2 : 解像度 10 m、2016 年 7 月及び 2017 年 7 月撮影) を用い、GIS で NDVI 値 (正規化植生指数) を計算した。次に、新規裸地のうち崩壊地のみを抽出するため、②台風 10 号前の 1 mDEM (北海道開発局室蘭開発建設部 : 2012 年 9 月計測) から作成した 2 m 等高線と衛星画像 (WorldView-2 : 解像度 2.5 m、2017 年 6 月及び 2018 年 8 月撮影) を判読し河道裸地と崩壊地を分離した。この新規崩壊地のポリゴンデータを作成し、崩壊地面積を GIS で計測した。その後、土砂生産量を求めるため、崩壊地分布が集中する中下流域の本川沿いにおいて、2019 年 10 月に台風 10 号後の地形変化量を LP で計測した (図-24)。これらの台風 10 号前後の 2 時期の LP 計測データを重ね、1

mセルで差分解析した。崩壊深は崩壊地内で負の差分を示したセルの平均値とし、これに負のセルの面積を乗じ崩壊地毎の崩壊生産土砂量を計算した。この差分解析の値を解とし、Guzzetti (2009)と同様に、崩壊地面積から崩壊生産土砂量を累乗回帰して求めた推定値とを比較した。

4.3 結果と考察

4.3.1 LP 計測範囲内での崩壊生産土砂量の計算

図-23 の①~②の解析結果として、上流部の火成岩類エリアで 24h 雨量 300 mm 以上が集中し、崩壊地が多くなった可能性を第 2 章で報告した²⁴⁾ (図-24)。LP 計測範囲内には、流域全体の崩壊地個数の 3 割 (56/197 個) があり (図-24)、平均崩壊深は 9 割 (49/56 個) が 2 m 未満に分布していた (図-25)。一部で 2 m を超える大規模な崩壊地が見られたものの、土砂生産源の主体は表層崩壊と考えられた。次に崩壊生産土砂量の予測式を構築するため、計算した崩壊生産土砂量と崩壊地面積との関連を地質別に調べた (図-26)。堆積岩類と変成岩類は N が少ないものの、累乗式で回帰され、崩壊地面積から崩壊生産土砂量を推定できる可能性があった。崩壊地個数が多い火成岩類エリアでは、累乗の指数が 1.03 となり、堆積岩類 (1.33) や変成岩類 (1.56)、Guzzetti 式 (1.45) よりも小さく、これは面積サイズの大きな崩壊地においても平均崩壊深が 2 m 未満と浅かったことが影響していると考えられた。

差分解析による崩壊生産土砂量を解とし、本研究の地質別累乗式と Guzzetti 式の推定値とを比較した (図-27)。地質別累乗式の推定値は 1:1 の線形に近い一方で、Guzzetti 式の推定値は過大評価になる傾向が見ら

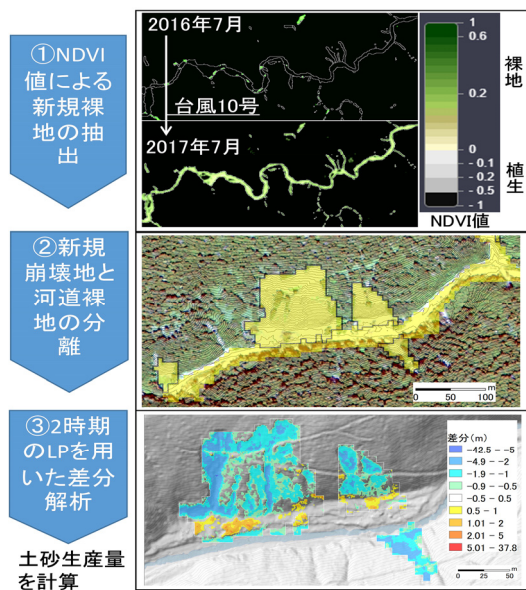


図-23 本章の解析フロー

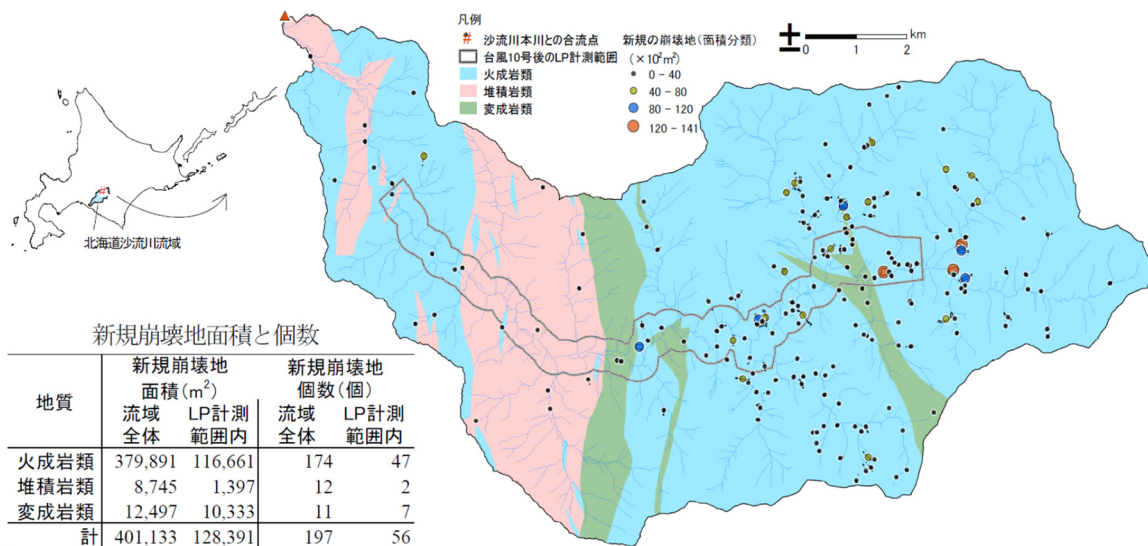


図-24 パンケヌーシ川流域の地質と崩壊地の分布

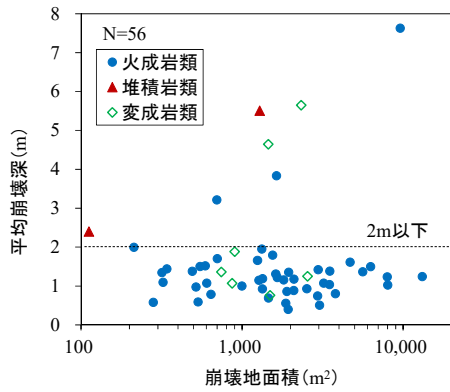


図-25 崩壊地面積と平均崩壊深の関係

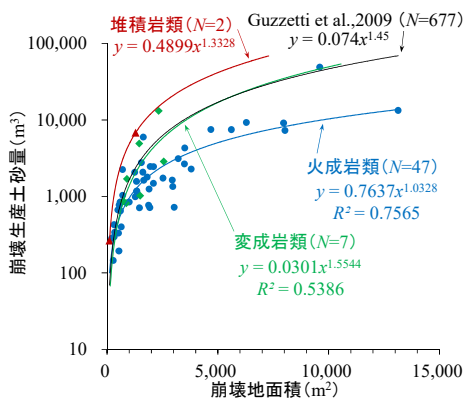


図-26 崩壊地面積と崩壊生産土砂量の関係

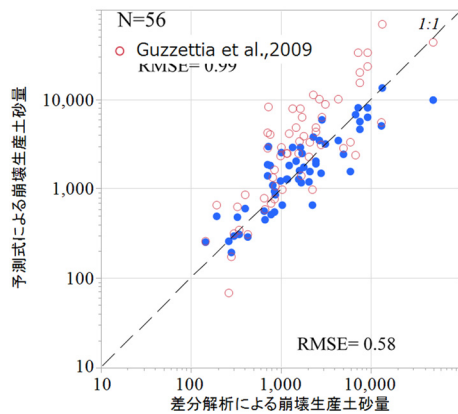


図-27 差分解析と予測式による崩壊生産土砂量の関係

れた。

4.3.2 流域全体での崩壊生産土砂量の推定

LP 計測範囲内にある崩壊地 (N=56) の崩壊生産土砂量の合計値を地質別累乗式と Guzzetti 式で計算し、差分解析の解とを比較すると (図-28)、Guzzetti 式 (2.8 倍) よりも地質別累乗式 (0.7 倍) の方が解の結果に近かった。さらに流域全体の崩壊地 (N=197) から崩壊生産土砂量を計算すると、地質別累乗式と Guzzetti 式との間に 2.6 倍の差があり、流域スケールで考えると、

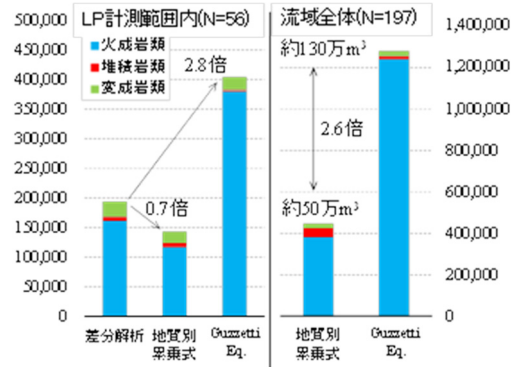


図-28 崩壊生産土砂量の合計値の比較

両者の推定値が大きく異なることがわかった。

4.4 まとめ

今回の対象流域のように崩壊地面積が大きく、平均崩壊深が浅い崩壊地が卓越したケースに Guzzetti 式を適用すると、崩壊生産土砂量が過大に推定されることが示唆された。今後は、堆積岩類や変成岩類の解析データを蓄積し、地質別累乗式の妥当性を検証していきたい。

5. 2 時期の標高差分解析による山地河道の土砂動態の解明

5.1 目的

流砂系の総合的な土砂管理では、山地から下流河川・海岸・沿岸への土砂動態において、山地における土砂生産量の評価は重要な課題の一つである。平成 28 年 (2016 年) 8 月の北海道豪雨では、来襲した台風第 7 号、第 11 号、第 9 号と引き続き台風第 10 号に伴う地形性豪雨により、沙流川上流域で斜面崩壊や河岸・溪岸侵食、土砂・洪水はん濫が発生し、宅地・農地・道路・橋が被災する大災害となった。沙流川から海域に流出する浮遊土砂について、濁度計観測や放射性同位体トレーサ解析により、台風第 10 号に伴う出水時の浮遊土砂の主要な生産源が沙流川上流域に分布する深成岩や付加コンプレックス地域であると推定されている²⁷⁾。しかし、上流域の土砂生産・流出実態について斜面崩壊に関するいくつかの調査・解析事例があるものの^{24),26)}、河道も含めた侵食・堆積実態については未解明であり、下流への浮遊土砂流出との関連は十分な知見がない。そこで、本研究では流砂系の土砂動態解明に向けて沙流川上流域の土砂動態を明らかにすることを目的に、2 時期の航空レーザ測量成果を用いた標高差分解析により土砂収支をもとめ、地質・河川地形との関係を調べた。

5.2 方法

5.2.1 調査地

調査流域は、沙流川（流域面積 1350 km²）の上流支川パンケヌーシ川（95.8 km²）とした（図-29）。主な表層地質は、上～中流域に深成岩（主にはんれい岩、かんらん岩）、中～下流域に付加コンプレックス（主に堆積岩、玄武岩ブロック）、下流の沙流川合流点付近に白亜紀の堆積岩（主に頁岩・シルト岩）が分布している。本川沿いには、下流から砂防堰堤が1基、治山堰堤が2基、水力発電用取水設備が1基設置されている。平成28年（2016年）8月30～31日の台風10号に伴う地形性豪雨では、降水量300 mm以上の範囲に対応した上流域の深成岩地域に表層崩壊が多数発生した（図-24参照；秋田ら, 2020a）。

5.2.2 材料及び解析方法

地形変化量を評価するために、平成28年（2016年）8月北海道豪雨前後に実施された航空レーザ測量（2012年・北海道開発局、2019年・寒地土研）の成果を用いて1 mメッシュのDEMを構築した。解析対象範囲は2019年DEMの取得範囲（図-29; 23.5 km²）とした。2時期のDEMの差分解析に際し、2019年DEMの位置補正として水平補正（位相限定相関法；POC法）及び3次元補正（ICP法）を行い、標高値の誤差検証により最適な補正方法を選択することとした。また微地形解析により斜面と河道に区分し、地形区分ごとに地形変化量を整理した。

5.3 結果と考察

5.3.1 位置精度の検証と補正量

2019年DEMの位置補正方法による差分解析精度を比較するため、水平距離100～200 m程度の測線を25箇所設定し、標高差（誤差）の比較を行った。図-30はその一例であるが、位置補正なしの場合に比べて水平補正（POC法）は誤差平均が改善されたがばらつきが大きく、3次元補正（ICP法）では誤差の平均、ばらつきともに大幅に改善されていることがわかる。本研究では小流域単位でICP法を適用し、地形変化のない領域の標高誤差を最小化するように位置補正し2019年DEMとして再構築した。

5.3.2 土砂収支

斜面・河道の土砂収支を把握するために、2時期DEMの差分解析から得られた正負の標高差をそれぞれ堆積量・侵食量とし、斜面・河道の地形区分ごとに整理した。河道部分は50 m間隔で区切って侵食量と堆積量を集計した（図-31）。河道における侵食量・堆積量と河川地形・地質との関係調べるため、河川縦断形・

河床勾配（上流250 m区間）、平均河道幅、地形変化量、平均河床高変化量を図-32に示した。河道幅は地質の影響を大きく受け、8700 mより上流の深成岩区間は狭く、中流（3700～8700 m）のミグマタイト質深成岩から付加コンプレックス苦鉄質岩類・堆積岩類の区間で約2倍に広くなり、さらに下流の付加コンプレックス・玄武岩区間で急激に狭くなる。地形変化量は河道幅の広い区間で侵食・堆積量の振れ幅が大きく、崩壊地が多く発生した上流の深成岩区間では比較的小さかった。河床高の変化量は、下流の付加コンプレックス・玄武岩の区間でもっとも小さく（平均-0.687 m）、

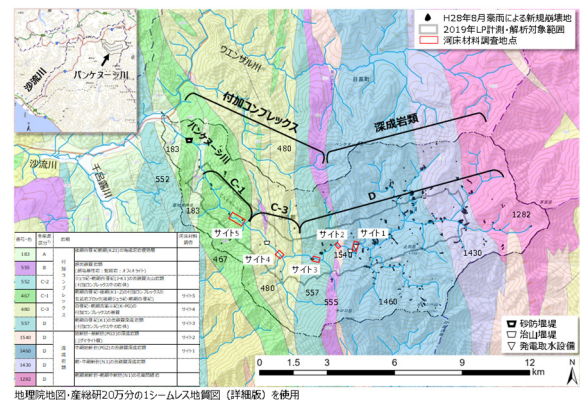


図-29 パンケヌーシ川流域の地質と解析対象範囲

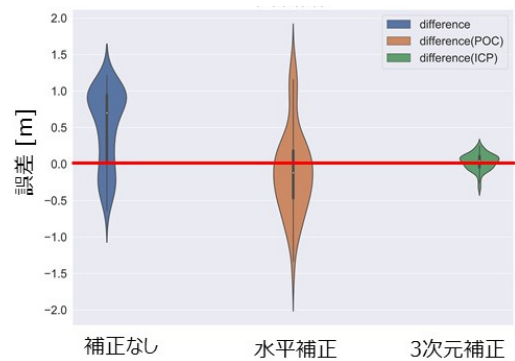


図-30 位置補正法による標高値誤差の比較例

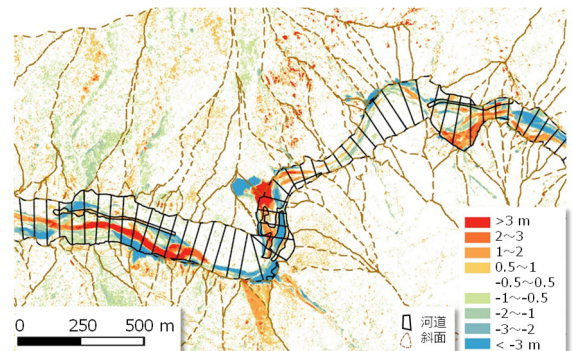


図-31 差分解析による地形変化量の評価事例

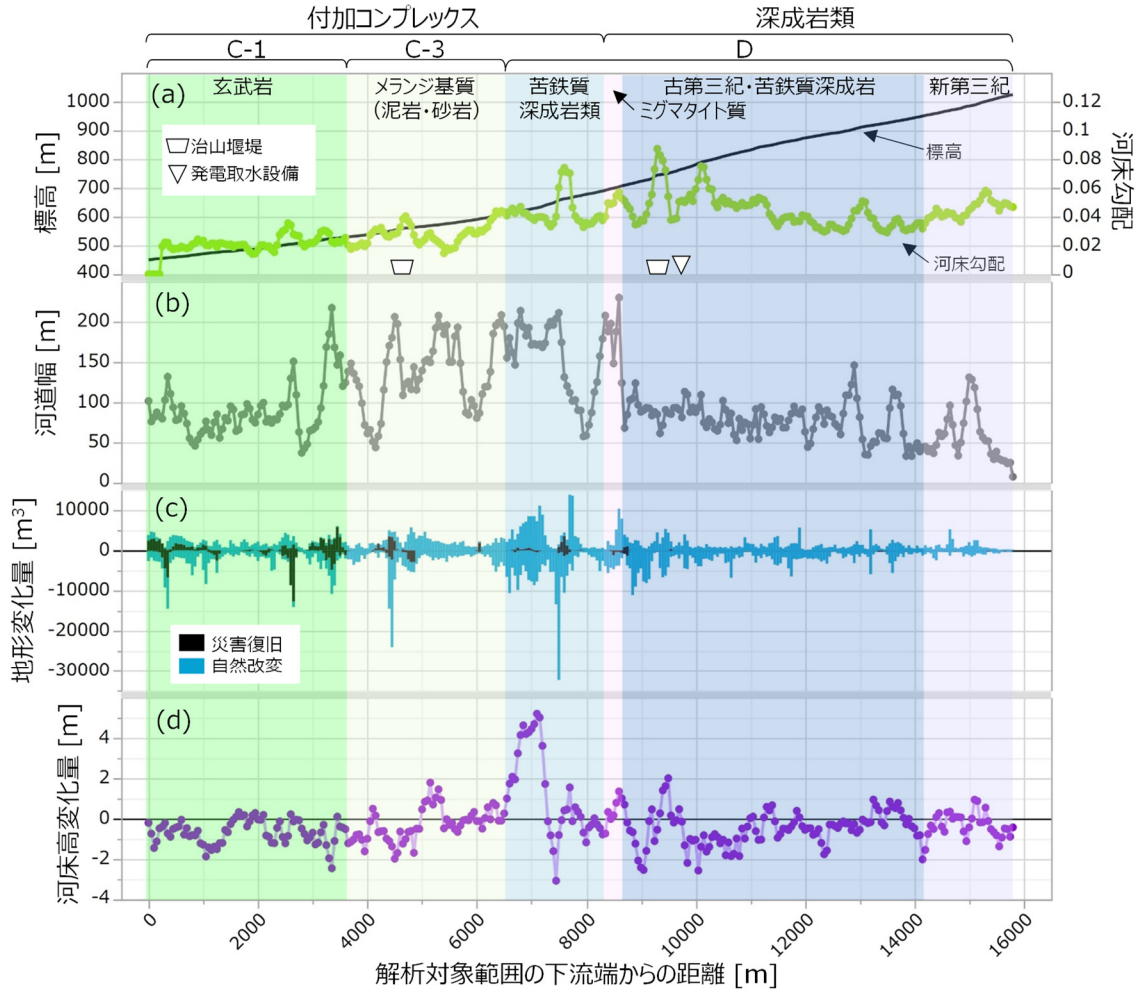


図-32 パンケヌーシ川の河川地形と地形変化量の縦断変化
 地質区分は産総研 20 万分の 1 シームレス地質図（詳細版）を使用

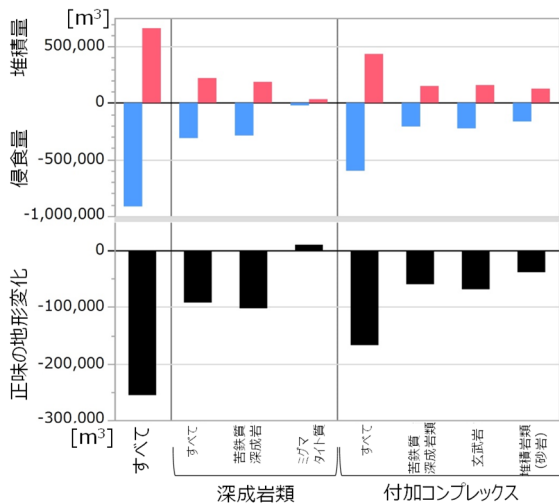


図-33 地質別の土砂収支

流路の蛇行に伴う河岸侵食が顕著であったと考えられる。

解析対象範囲の河道部分全体における侵食量、堆積

量及び正味の地形変化量はそれぞれ 91.6 万 m^3 、66.0 万 m^3 及び -25.6 万 m^3 であった（図-33）。地質別では付加コンプレックスの侵食量・堆積量が深成岩の約 2 倍であった。第 4 章で述べたとおり、パンケヌーシ川流域の斜面崩壊土砂量は約 45 万 m^3 と推定されており²⁶⁾、本章の付加コンプレックス地域の河岸侵食量はそれよりも多いことから、相当量の細粒土砂が流出したと考えられる。このことは、沙流川下流での浮遊土砂生産源推定の結果²⁷⁾と概ね整合する。

5.4 まとめ

本章では、平成 28 年 8 月北海道豪雨前後の 2 時期の LP 計測で得た高解像度 DEM を用いて標高差分析を行い、河床変動に伴う侵食・堆積量を空間体積で評価した。今後、斜面・河道区間の粒径分布を把握することで、細粒土砂の地質別流出量をより詳細に検討する必要がある。

6. 平成 28 年 8 月北海道豪雨による沙流川上流域の土砂生産・流出量の推定

6.1 はじめに

流砂系の総合的な土砂管理では、山地から下流河川・海岸・沿岸への土砂動態において、山地領域は主要な土砂生産源であり、土砂生産量を量的・質的（粒径別）に評価することが重要な課題の一つである。とくに、斜面から河道へ供給される土砂の量や粒径分布は、河道内の土砂動態を数値モデル等で再現する際の境界条件であり、下流河川・海域へ流出する土砂量との関係を検討する際にも重要な情報となる。

斜面崩壊や溪岸侵食による土砂生産量は、2 時期の LP 計測データによる高解像度 DEM を用いて標高差分解析による地形変化量として求められ、単位は通常、空間体積（ m^3 ）で評価される。しかし、空隙率や粒径についてはほとんど調査・評価されずに、侵食量と堆積量の収支が議論される場合も少なくない^{たとえ}

28)。一方、山地から海域まで一出水で流下する浮遊土砂（ウォッシュロードと浮遊砂が混合した微細土砂）は、単位時間や年あたりの対象流域からの流出量として評価される場合が多く、単位は重量（kg または t）で表される。浮遊土砂は、一般に流域斜面全体（ノンポイントソース）の表面侵食や溪岸・河岸侵食により生産・流出すると考えられるが^{たとえ}29)、豪雨等による大規模土砂生産が生じた場合はそれらが流出土砂の主要な生産源となる。流砂系の土砂動態において山地から海域まで一貫した土砂収支を把握するには、異なる単位で評価された土砂生産量と流出量を同一粒径階の土砂重量として単位を統一して再評価する必要がある。

そこで本章では、平成 28 年 8 月北海道豪雨により大規模土砂生産が生じた沙流川流域を対象に、浮遊土砂流出量と比較するために、山地上流域の河床変動に伴う侵食・堆積量を粒径階別に評価することを目的とした。豪雨前後の LP 計測による DEM があるパンケ



※背景図に地質図Naviによる地理院地図、産総研20万分の1シームレス地質図（詳細版）を使用。

図-34 パンケヌーシ川流域の河床材料調査地点（赤枠）

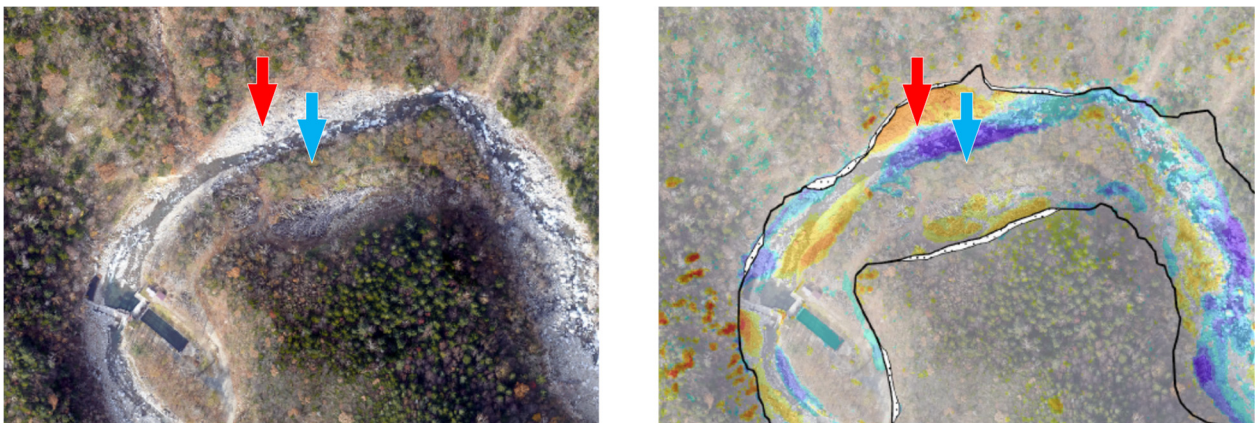


図-35 河床材料調査地点の選定例（赤矢印：河床の砂礫堆、青矢印：河岸段丘。図-1 の概念図に対応）

ヌーシ川において、河道区間の標高差分解析により出水による侵食域と堆積域を抽出し、河床材料調査を行った。

6.2 方法

研究対象流域は、第2章～第5章と同じく、平成28年8月北海道豪雨(台風10号)により河岸・溪岸侵食、河床変動及び斜面崩壊が生じた沙流川水系パンケヌーシ川流域とした(図-34)。沙流川流域から流出した浮遊土砂の生産源は、地質図と放射性同位体トレーサにより6つに地域区分される³²⁾。パンケ

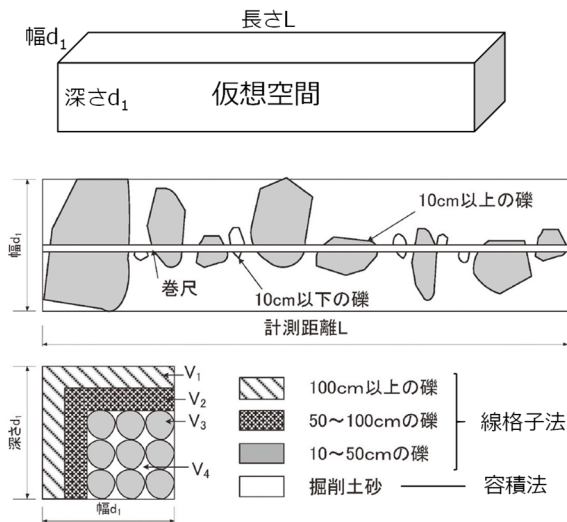


図-36 線格子法と容積法による粒度分布合成の概念図
村上(2019)³⁰⁾に加筆

ヌーシ川流域はそれらのすべてが含まれているが、本研究の対象とする河道区間はLP計測が実施された河道区間には、上流から深成岩(D; 苦鉄質深成岩、ミグマタイト質深成岩、付加コンプレックス・苦鉄質深成岩類)、付加体堆積岩(C-3)及び付加体玄武岩ブロック(C-1)が分布している(図-34)。これらの地質の異なる5地点に調査地点を設定した。

河岸・溪岸侵食や河床変動による土砂収支と細粒土砂流出量を検討するには、侵食土砂と堆積土砂の粒径分布と単位体積当たりの土砂量を把握する必要がある。そこで、各調査地点において、侵食土砂と同等の構成材料が想定される河岸段丘と、堆積土砂が保存されている砂礫堆を、それぞれ1箇所ずつ選定し、河床材料調査地点とした(図-35)。

河床材料調査は、線格子法と容積法の組み合わせによる粒径分布調査³⁰⁾を採用した。これは、線格子法の測線長を長さ、礫の最大長径を幅・深さとした仮想空間において、線格子法による礫の間隙が、容積法で掘削した土砂により充填されたと仮定し、粒径分布を合成するものである(図-36)。線格子法では、個数分布による粒径加積曲線、統計値を調べるために、各調査地点に設置した測線上の中径100mm以上のすべての礫について短径・中径・長径を計測した。測線長は50m程度とし、計測試料数が100個以上となるように設定した。容積法は、線格子法で設

R : 河床



T : 段丘



図-37 線格子法と容積法による河床堆積地と河岸段丘の調査状況

置した測線近傍において方形区(1 m×1 m)を設置し、表層のゴミを除く、深さ 50 cm 程度以内に存在する土砂を採取した。採取した土砂試料のうち、中径 100 mm 以上のすべての礫について短径・中径・

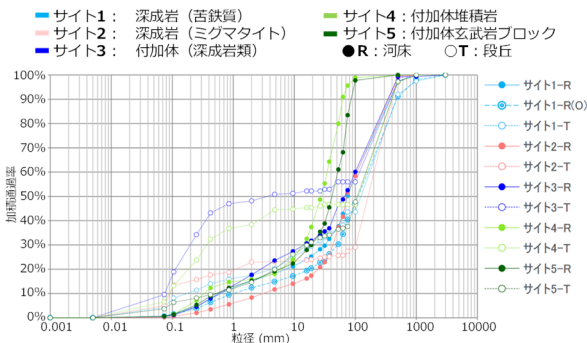


図-38 線格子法と容積法による合成粒径加積曲線

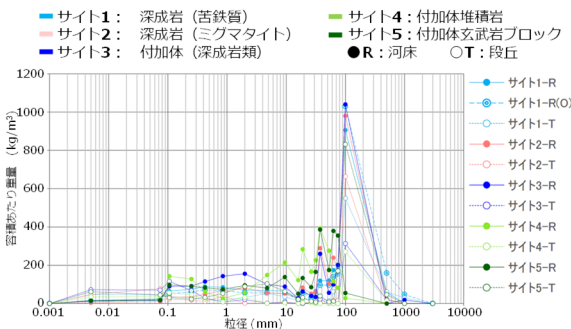


図-39 粒径階別の容積あたり重量

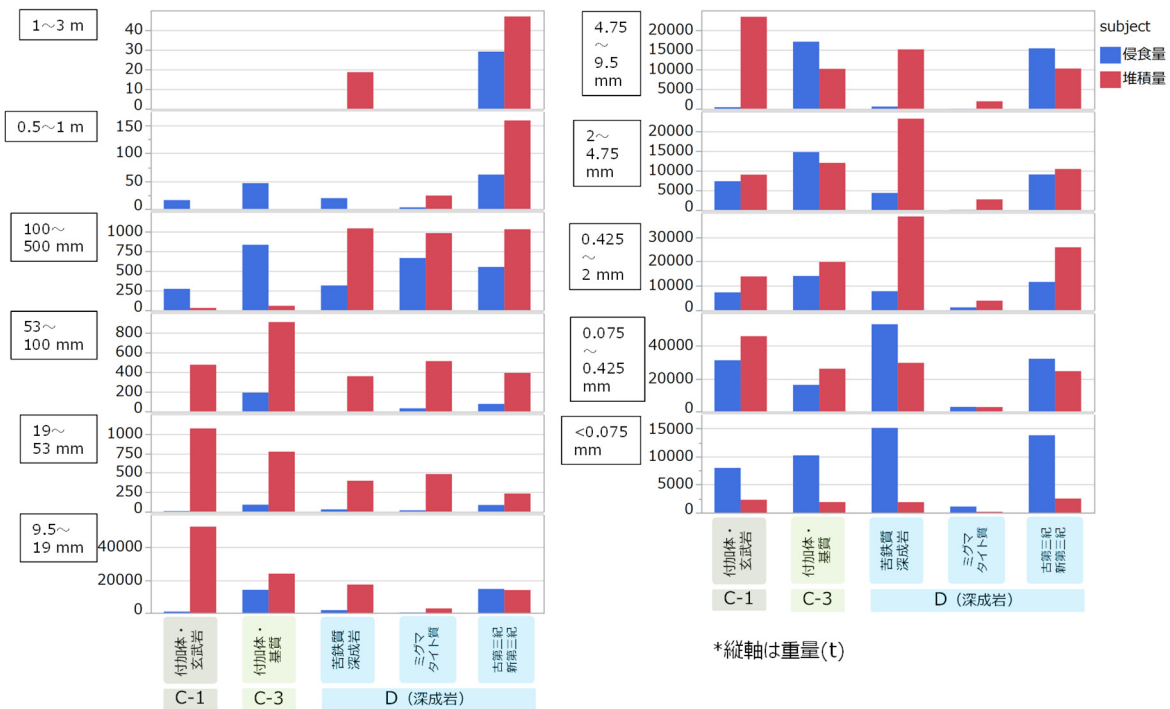


図-40 河床変動にともなう粒径階別の侵食量・堆積量

長径と重量を計測した。中径 100 mm 未満の砂礫について、その全重量を計測し、粒度分布測定等の室内試験のため、四分法を複数回実施して 30 kg 程度を分取した。室内試験は、ふるい試験およびレーザ回折・散乱式粒度分布測定を実施した。

6.3 結果と考察

河床堆積地と侵食されたであろう河岸段丘では、ほとんどの地点において掘削した土砂の粒径が明らかに異なっていた(図-37)。各調査地点の粒径分布を比較するために、全地点の合成粒径加積曲線を図-38に示した。河床堆積地では、サイト1からサイト5(図-34参照)へと下流に向かって90%粒径が小さくなる傾向が見られた。河岸段丘では、サイト3とサイト4が粒径2 mm未満の砂の含有率が他の地点よりも顕著に高いことが特徴的であった。

各調査地点において、容積あたりの全重量(kg/m³)に各粒径階の重量比を乗じて、各粒径階の容積あたり重量を算出した(図-39)。粒径100 mm以上の礫が500 kg/m³以上と突出している地点が多く、一方、粒径0.005 mm~0.075 mm及び0.075 mm~0.106 mmの重量は100 kg/m³以下であった。

河道区間における土砂収支と細粒土砂流出量を評価するために、地質別・粒径階別の容積当たり重量を空間体積で評価した地質別の地形変化量に乗じて、いくつかの粒径階に区分して侵食・堆積土砂の重量を算出

した(図-40)。その結果、粒径 100 mm 以上の礫のほとんどは深成岩(D; サイト 3 より上流)の区間で堆積していることがわかった。また、粒径 100 mm~500 mm の画分は付加体堆積岩(C-3)及び付加体玄武岩ブロック(C-1)で侵食量に比べて堆積量が少ないため、ほとんどが下流へ流出したものと考えられる。粒径 19 mm~53 mm 及び 9.5 mm~19 mm の画分では下流ほど堆積量が多い傾向がみられ、侵食量は比較的小さい。また対象区間全体をみると、粒径 0.425 mm 以上の画分で侵食量より堆積量が多く、堆積傾向であることがわかった(図-40)。

一方、下流へ流出する浮遊土砂を構成する粒径 0.425 mm 未満の画分では、侵食量が堆積量を上回る傾向がみられる。浮遊砂成分となりうる粒径 0.075 mm~0.425 mm の画分(細砂)では、深成岩(D)で 88,000 t(深成岩類 35,000 t、付加体・苦鉄質深成岩 53,000 t)が段丘の侵食で生産された一方、河道内で 56,000 t が堆積し、正味 32,000 t が流出したと推定された(図-40 右)。付加体堆積岩(C-3)と玄武岩ブロック(C-1)でそれぞれ 16,000 t 及び 31,000 t が段丘の侵食で生産され、堆積量はそれぞれ 46,000 t 及び 26,000 t と推定された。対象区間全体では侵食量が 135,000 t、堆積量が 128,000 t、下流への流出量は 7,000 t 弱と推定された。細砂であっても、山地上流域に相当量の土砂が滞留することが示唆された。

ウォッシュロードの主成分となる粒径 0.075 mm 未満の画分(シルト・粘土)では、堆積量が侵食量に比べて少なく、侵食された土砂のほとんどが下流へ流出したと考えられた(図-40 右)。地質別では、深成岩(D; 深成岩類及び付加体・苦鉄質深成岩でそれぞれ約 15,000 t)で 30,000 t、付加体堆積岩(C-3)で 10,000 t、付加体玄武岩ブロック(C-1)で 8,000 t が段丘の侵食により流出したと推定された。対象区間全体では侵食量 48,000 t、堆積量は 9,000 t 弱となり、39,000 t の浮遊土砂が下流へ流出したと推定された。

6.4 まとめ

本章では、沙流川水系パンケヌーシ川を対象にした河床材料調査により粒径階別の河道侵食・堆積量を評価し、下流へ流出する浮遊土砂流出量を地質別に定量評価した。その結果、ウォッシュロードの主成分となりうる粒径 0.075 mm 未満の画分は、河岸侵食による生産された量のほとんどが下流へ流出し、深成岩(D)地域からは少なくとも 30,000 t が流域の浮遊土砂に貢献したと考えられる。一方、沙流川下流端では平成 28 年 8 月北海道豪雨に伴う出水時の浮遊土砂流出量を地

質別生産源地域ごとに推定されている²⁷⁾。本章で明らかにした河道侵食により生産・流出した浮遊土砂や斜面崩壊による生産土砂が、流域末端から海域に流出する浮遊土砂にどの程度貢献しているかを明らかにすることで、流砂系の上流から下流への土砂動態の理解がより深まる可能性があり、今後の課題である。

7. 沙流川流域全域の崩壊土砂量の推定

7.1 はじめに

平成 28 年(2016 年)8 月北海道豪雨にともなう沙流川流域からの浮遊土砂流出について、濁度計を用いた流砂水文観測により定量的に推定されてきた³¹⁾。また、放射性同位体トレーサを用いた浮遊土砂の生産源推定手法により、流域内の 6 つの地質別生産源地域からの浮遊土砂流出量が推定され、支流域単位の浮遊土砂流出量マップも示されている³¹⁾。一方、沙流川流域全体での土砂生産量については評価されていない。そこで本章では、平成 28 年 8 月北海道豪雨にともなう沙流川流域の土砂生産量を把握することを目的に、衛星画像の裸地判読にもとづく崩壊土砂量の推定を行った。

7.2 方法

本章の対象流域は沙流川である(図-41)。平成 28 年

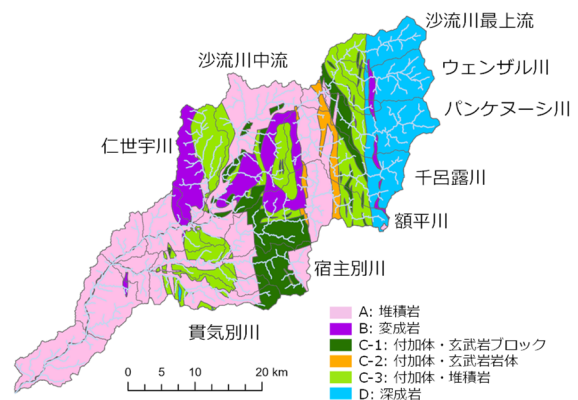


図-41 沙流川流域の地質別生産源区分³²⁾

表-4 沙流川流域の地質別生産源区分³³⁾

地質	平均崩壊深(m)
A 沖積層	1.10
T 段丘堆積物	2.00
N-S 新第三紀の堆積岩	1.94
HK 函淵層群	1.17
Y 蝦夷層群	2.22
MS 中生代~古第三紀の堆積岩	1.37
H-M 日高変成岩、深成岩	0.75
K-M カムイ枯淡変成岩類及び異地性岩	0.75
SP 蛇紋岩	1.36

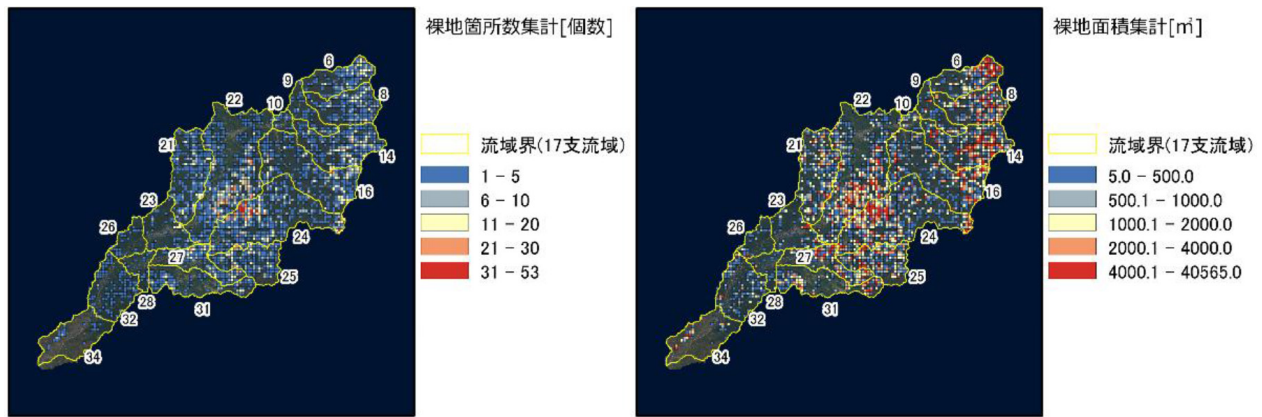


図-42 500 m メッシュ集計による沙流川流域の崩壊地分布

8月北海道豪雨による斜面崩壊等による生産土砂量を推定するため、豪雨前後で撮影された衛星画像を用いて、沙流川流域全域において新規に生じた裸地の抽出を試みた。使用した衛星画像は、幾何補正済みの複合衛星画像（シームレス衛星画像）であり、対象領域で雲に覆われた部分がないように、複数のセンサで異なる時期に撮影された衛星画像を合成したものである。裸地抽出の労力と作業者によるばらつきを軽減するために、衛星画像の特徴量（RGB、NDVI等）を用いた機械学習手法（ランダムフォレスト法）を採用し、同一のセンサ・撮影時期の画像範囲ごとにモデルの構築を行った。裸地ではない箇所が裸地として誤分類された領域は、目視判読により修正し、最終的に得られた裸地領域をGISにより個数、面積等を整理した。

また崩壊土砂量については、抽出した新規裸地領域がすべて崩壊地であると仮定し、裸地面積に崩壊深を乗じて推定した。計算に使用した崩壊深は、平成15年（2003年）の台風第10号による豪雨災害時に調査された地質別の平均崩壊深³³⁾を用いた（表-4）。

7.3 結果と考察

衛星画像から判読した平成28年8月北海道豪雨により沙流川流域において新規に生成された裸地は3,895個あり、総面積は1,694,655m²であった。パンケヌーシ川流域を含む上流域では、崩壊箇所数は少ないながら崩壊面積総数が大きく（図-42）、主に深成岩で大規模崩壊が発生していたことがわかる。中流域では小規模な裸地が多数存在し、特に額平川上流と沙流川本川中流域の境界部分で集中的に崩壊総面積が高い傾向にある（図-42）。抽出された新規裸地領域がすべて豪雨時に発生した斜面崩壊であると仮定し、地質別の崩壊深を乗じて崩壊土砂量（空隙込み）を算出したところ、約177万m³となった。

沙流川流域から流出する浮遊土砂の生産源は、放射

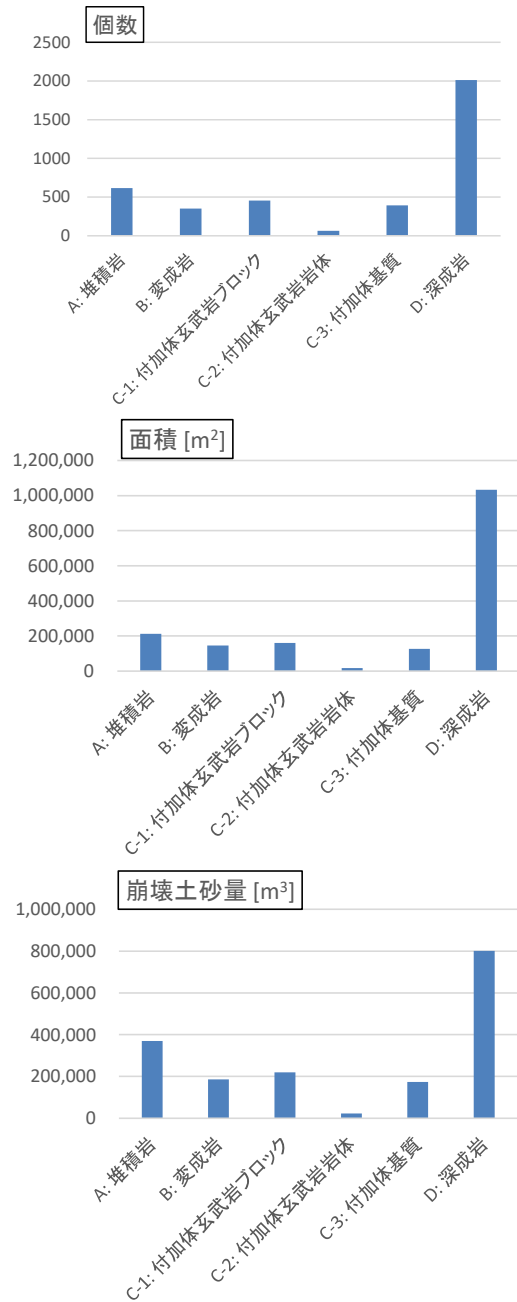


図-43 崩壊地の個数・面積・土砂量の地質別比較

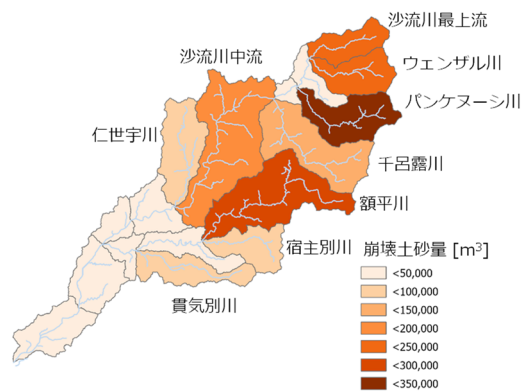


図-44 支川流域別の崩壊土砂量

性同位体トレーサにより6つの地質地域に区分されている(図-41)(Mizugaki et al., 2012)。流域から流出した浮遊土砂量との関係を検討するため、地質別生産源地域ごとに崩壊地の個数、面積及び生産土砂量を整理した結果を図-43に示した。崩壊地は沙流川上流域に分布する深成岩(D)で2013箇所(全体の52%)と最も多く、面積は100万m²(61%)、崩壊土砂量は80万m³(45%)であった。

支流域ごとに崩壊土砂量を整理し、GISで地図上に示した(図-44)。パンケヌーシ川流域は、崩壊土砂量が最も多く、約32.7万m³(全体の18%)で、沙流川最上流、ウェンザル川、千呂露川と併せて約91万m³(52%)となる。パンケヌーシ川に次いで崩壊土砂量が多いのが額平川上流域で、25.7万m³(15%)、沙流川中流域で18.3万m³(10%)であった。

7.4 まとめ

衛星画像解析により平成28年8月北海道豪雨により生成された裸地の判読を行い、崩壊土砂量の推定を行った。これらの崩壊土砂量のうち、浮遊土砂となる粒径0.1mm未満の画分は1~2割程度と推察され、さらに河道へ供給されるのも一部であると考えられる。一方、沙流川の下流端では浮遊土砂流出量を地質別生産源地域ごとに推定されており³¹⁾、崩壊土砂量と浮遊土砂流出量の関係を地質別に検討することで、斜面から河道への土砂供給実態を解明できる可能性がある。そのためには、崩壊土砂の粒径分布や、斜面から河道への連結性の影響を考慮する必要があり、今後の課題である。

8. 斜面から河道への水・土砂移動における連結性の評価

8.1 はじめに

流砂系の総合的な土砂管理では、山地から下流河川・

海岸・沿岸への土砂動態において、山地領域は主要な土砂生産源であり、土砂生産量を量的・質的(粒径別)に評価することが重要な課題の一つである。とくに、斜面から河道へ供給される土砂の量や粒径分布は、河道内の土砂動態を数値モデル等で再現する際の境界条件であり、下流河川・海域へ流出する土砂量との関係を検討する際にも重要な情報となる。

流域スケールの浮遊土砂生産・流出の既往のモデルは数多く提案されている(たとえば³⁴⁾)。多くの場合は表面侵食の規定要因となる土地利用や植生等の地被、斜面勾配や斜面長等の地形特性、土壌タイプなどが単位斜面ごとに考慮される。一方、単位斜面の全域が土砂生産・流出に寄与しているのではなく、リル・ガリ侵食といった斜面の表面流が集中する部分で斜面から河道へと土砂が供給される。したがって、斜面の集水地形や水・土砂の輸送経路といった微地形を適切に表現することが、斜面から河道への土砂供給の理解と定量評価、モデル化への展開において重要となる。

近年、LP計測が普及し、高解像度のDEMが構築できるようになってきたこともあり、詳細な微地形をGISで表現できるようになってきた。Borselliら³⁵⁾は、斜面から河道への土砂輸送において、生産源(Source)となる斜面の任意地点から河道等の土砂の堆積地点(Sink)までの輸送経路の連結性を数値的に表現する指標(index of connectivity; 連結性指標)を提案した。解像度の高いDEMを用いてGIS上で連結性指標を計算することで、流域斜面と河道との連結性の高い部分と低い部分(尾根部や平坦な堆積地形)とを判別でき、現地状況と整合的であることが確認されている^{35), 36)}。

流域の斜面勾配や河床勾配、水系次数や水系密度といった水文地形学的特性は、流域を構成する地質によって大きく異なる場合があり³⁷⁾、浮遊土砂流出に影響を及ぼしている可能性が考えられる。しかし、斜面から河道への連結性指標は、これまで国内の土砂動態研究において検討された事例はみあたらない。そこで本章では、高解像度DEMを用いた連結性指標を試み、地質による土砂の連結性の違いを評価することを目的とした。

8.2 方法

8.2.1 Borselliら³⁵⁾の連結性指標

連結性指標は、潜在的な土砂生産源(source)である斜面上の任意地点から、土砂の堆積地点(sink)としての河道まで、輸送経路の連結性を数量化したものであり、数値標高モデル(DEM)を用いてGISで計算できる。斜面の任意の地点の河道に対する連結性指標は、

斜面下方と斜面上方の 2 つの要素で構成される (図-45)、斜面下方の要素は河道への輸送経路の距離、地表面粗度及び勾配で定義され、式 (3) で計算される。また斜面上方の要素は集水面積、地表面粗度、斜面勾配によって定義され、式 (4) で計算される。任意地点 k における連結性指標は、これら斜面下方及び上方の要素の比の対数で定義され、式 (5) によって計算される。

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i} \quad (3)$$

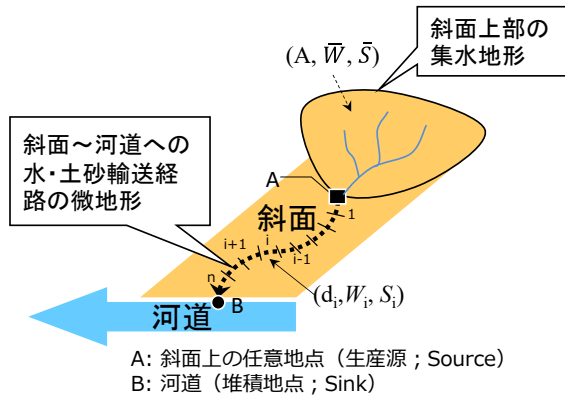


図-45 連結性指標の概念図
(Borselli ら³⁵⁾を基に作成)

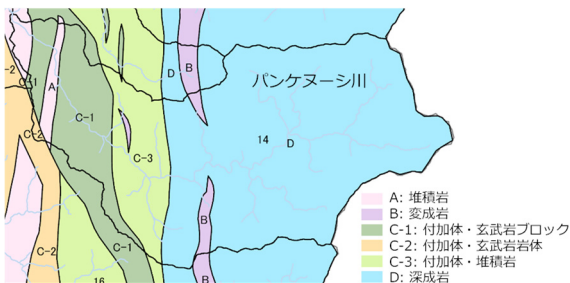


図-46 パンケヌーシ川流域の地質 (土砂生産源区分)

$$D_{up} = \bar{W} \bar{S} \sqrt{A} \quad (4)$$

$$IC_k = \log_{10} \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) \quad (5)$$

ここに D_{dn} 、 D_{up} はそれぞれ斜面下方及び上方の連結性要素、 d_i 、 W_i 及び S_i はそれぞれ任意地点から河道への輸送経路の i 番目のセルの距離、粗度係数、及び勾配、 \bar{W} 、 \bar{S} 及び A はそれぞれ斜面上方の集水域の平均粗度係数、平均斜面勾配及び面積、 IC_k は連結性指標である。

8.2.2 解析方法

研究対象流域は、平成 28 年 8 月北海道豪雨 (台風 10 号) により河岸・沿岸侵食、河床変動及び斜面崩壊が生じた沙流川水系パンケヌーシ川流域とした (図-46)。斜面から河道への土砂の連結性を評価するため、Borselli ら³⁵⁾や Cavalli ら³⁶⁾に準じて index of connectivity (連結性指標; 以下 IC) を ArcGIS で計算し、0~1 までの相対値として標準化した³⁸⁾。使用した DEM は対象とする範囲によって異なり、2012 年の LP 計測成果から作成した 1 m DEM 及び 2 m DEM と国土地理院の基盤地図情報・数値標高モデル (10 m DEM) を使用した。

8.3 結果と考察

8.3.1 支溪流での連結性指標の計算事例

パンケヌーシ川の支川、曲り沢流域 (2.2 km²) を対象に 1 m DEM を用いて連結性指標を計算した。図-47 は、2 種類の流路網 (集水域が 1 ha 以上 (A) と 1 km² 以上 (B) を湧水点とする) を堆積地点 (sink) に設定したときの連結性指標を示している。流路網 A を sink とした場合、流域全域の源頭部付近まで流路網が分布するため、連結性指標も流路網沿いに高くなり、連結性指標が高い範囲が全域に均等に分布している (図-

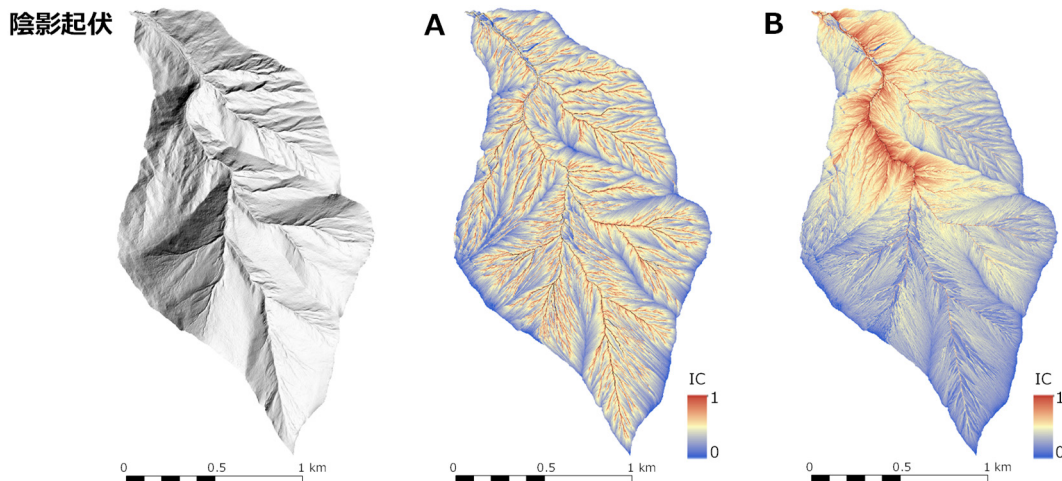


図-47 曲り沢流域の陰影起伏図と連結性指標の計算結果

47A)。一方 B では、sink の流路網が本川の中流までであり、上流域や右岸から合流する支流は連結性が低く、下流域の本川沿いに連結性の高い地域がみられる (図-47B)。このように、流域内の sink の設定条件によって、連結性指標 (IC) の分布が大きく異なることがわかった。連結性指標と流域の土砂生産源の空間分布とを関連付けるためには、sink の設定条件について妥当性を検証する必要がある。

8.3.2 地質による連結性指標の比較

連結性指標の計算には、計算機にかかる負荷が大きく、DEM の空間解像度や対象流域の面積によっては計算時間が数日から 1 週間以上もかかる場合がある。地質による連結性指標の違いを検討するためには、ある程度大きい面積の流域を対象にする必要がある。そこで、計算機の負荷を軽減するために、便宜的に基盤地図情報の数値標高モデル (10 m DEM) を用いて連結性指標を計算した。図-48 は、sink を集水域 1 km² 以上を湧水点とする流路網とし、連結性指標を計算したものである。沙流川流域では、地質情報をもとに放射性同位体トレーサを用いて 6 つの土砂生産源地域に区分されている³²⁾。そこで、支流ごと、土砂生産源地域による連結性指標の値を比較することとした。パンケヌーシ川流域の主要な 3 つの生産源地域 (C-1 : 付加体

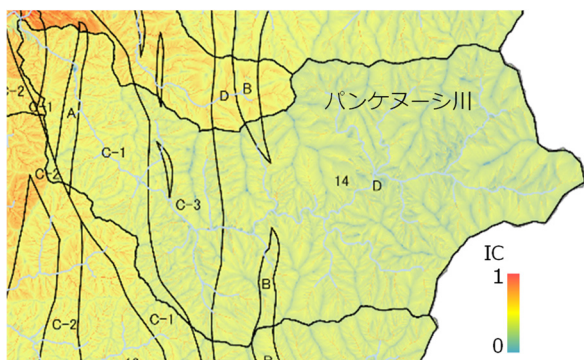


図-48 パンケヌーシ川流域の連結性指標 (IC)

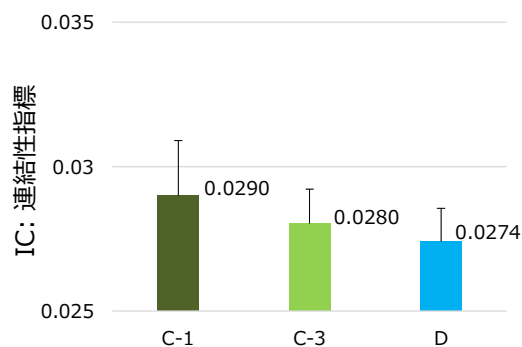


図-49 パンケヌーシ川流域の地質別連結性指標

玄武岩ブロック、C-3 : 付加体堆積岩、D : 深成岩) の連結性指標の平均値を比較したところ、C-1、C-3、D の順に小さいことがわかった (図-49)。このことから、地質により斜面から河道への土砂供給のされやすさが異なる可能性が示唆される。実際に、平成 28 年 (2016 年) 8 月 30 日~31 日の台風第 10 号による地形性豪雨の 4 日後に北海道電力 (株) が撮影したパンケヌーシ川の出水状況を図-50 に示した。それを見ると、下流の C-1 から上流の C-3、D に向かって河川の濁りが薄くなっている様子がわかる。この状況が、斜面から河道への表面流による土砂流出を反映していたならば、



図-50 豪雨後のパンケヌーシ川の出水・濁水発生状況 (平成 28 年 9 月 4 日 ; 北海道電力 (株) 日高水力センター撮影・提供)

流域の浮遊土砂流出には、地質による風化特性の違いだけでなく、連結性指標の違いが影響を及ぼした可能性がある。

8.4 まとめ

本章では、斜面から河道への土砂移動における連結性を評価するため、Borselli ら³⁵⁾が提案した連結性指標を計算した。その結果、流域内の連結性指標の空間分布を把握することが可能なこと、地質によって連結性指標に違いがあり、出水時の浮遊土砂流出に影響を及ぼしている可能性があることがわかった。沙流川流域における浮遊土砂流出量は、放射性同位体トレーサを用いた研究によって地質によって異なることが報告されており³¹⁾、連結性指標を分布型土砂動態モデルの表面侵食に関する地形・土壌パラメータとして活用できる可能性がある。一方、連結性指標の空間分布は sink の設定条件によって大きく異なることから、モデルパラメータに組み込むにあたっては、適当な連結性指標の計算条件を検討する必要がある。そのためには、流域の浮遊土砂流出量と連結性指標との関係を解明する必要があり、今後の課題である。

9. 全体まとめ

本研究は、平成 28 年 8 月北海道豪雨により大規模な土砂生産・流出が生じた沙流川流域を対象に、斜面崩壊や河床変動による土砂生産・流出実態の把握と斜面～溪流～河川への土砂輸送経路の連結性の評価を試みた。第 2 章から第 6 章では、最も斜面崩壊・河床変動が顕著であった上流支川流域のひとつであるパンケヌーシ川流域を対象に、崩壊地の分布特性や崩壊土砂量、河床変動による侵食・堆積量を調査した。さらに第 7 章では沙流川流域全体の崩壊土砂量を推定し、支流域単位の崩壊土砂量の分布を示した。第 8 章では、GIS による地形解析により斜面から溪流への土砂輸送経路の連結性を評価し、地質による違いを明らかにした。主に以下のような研究成果が得られた。

- 1) パンケヌーシ川流域における崩壊地を衛星画像から判読したところ、台風第 10 号にともなう 24 時間雨量が 300 mm 以上の深成岩地域で多く分布していることがわかった。
- 2) 豪雨前後の衛星画像の NDVI 値より豪雨により発生した崩壊地を抽出でき、衛星画像の空間解像度によって抽出精度が異なることがわかった。
- 3) 2 時期の航空レーザ測量による標高差解析により豪雨より発生した崩壊土砂量を定量評価した。

地質別に崩壊面積から崩壊土砂量を推定するモデルを構築し、パンケヌーシ川流域全域の崩壊土砂量を推定できた。

- 4) 2 時期の航空レーザ測量による標高差解析と河床材料調査により豪雨前後の河床変動量を地質別・粒径別に定量評価し、河岸侵食によるウォッシュロードの流出が確認された。
- 5) 沙流川流域全体のシームレス衛星画像から RGB 比や NDVI 値等を用いた機械学習により豪雨にともなう新規裸地を抽出でき、支流域別の崩壊地分布と崩壊土砂量を評価した結果、パンケヌーシ川流域が最も多かったことがわかった。
- 6) パンケヌーシ川流域の連結性指標を計算した結果、上流から下流へと地質の違いによって指標値が大きくなり、現地調査による豪雨直後の濁水発生状況と対応していることが確認された。

このように、豪雨に伴う流域の土砂生産・流出実態を解明するために採用した、複数時期の LP 計測に基づく標高差解析や衛星画像解析 (NDVI 等) を用いた土砂生産量評価手法は、今後も継続してリモートセンシングデータが取得・蓄積されれば、大規模土砂生産が生じた際の定量的な土砂動態モニタリング手法として活用されることが期待される。

一方、現時点でのリモートセンシングの測量精度では、斜面の表面侵食量を標高差解析で定量推定するのは困難である。空間解像度の高い DEM を使用した連結性指標では、リル・ガリといった表面流による土砂輸送経路の連結性を数量評価できる可能性があり、表面侵食による斜面から河道への土砂供給ポテンシャルを相対的に評価可能と考えられる。また、流域の浮遊土砂流出量と連結性指標との間に有意な関係が見いだせれば、分布型土砂動態モデル等の地形要素として反映することで、浮遊土砂流出量の再現性向上が期待される。そのためには、使用する DEM の空間解像度や sink の設定条件による連結性の空間分布の違い等、さらなる解析が求められ、今後の課題としたい。

本研究を進めるにあたり、林野庁北海道森林管理局日高北部森林管理署及び北海道電力株式会社日高水力センターには現地調査にご協力いただいたほか、豪雨災害時の調査資料等、貴重な情報を提供頂いた。また、衛星画像や航空レーザ測量成果の使用にあたっては、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部にご協力いただいた。ここに記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 後藤宏二、内田太郎：大規模土砂生産後の流砂系土砂管理のあり方に関する研究、建設マネジメント技術、2012年7月号、pp.49-53、2012.
- 2) 行方敏剛：安倍川流砂系における総合土砂管理の取り組み、砂防学会誌、Vol. 71、 No. 3、 pp.29-34、2018.
- 3) 水垣滋、捧雅章、小田島大祐：鶴川・沙流川水系における2016年8月豪雨による浮遊土砂流出量、第61回(平成29年度)北海道開発技術研究発表会、防37(治)、2018.
- 4) 倉橋稔幸、伊東佳彦、日外勝仁、角田富士夫、山崎秀策：2016年8～9月の北海道における豪雨災害に関する報告2 道路の被害(斜面・法面)について、769、寒地土木研究所月報(平成29年6月号)、pp.48-57、2017.
- 5) 早川智也、村上泰啓、水垣滋、渡辺浩司：平成28年8月台風10号に伴う沙流川上流の土砂動態特性について、第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集、2018.
- 6) 村野義郎：豪雨型山くずれの研究、新砂防、56巻、pp.1-8、1965.
- 7) 岩橋純子、山岸宏光、神谷泉、佐藤浩：2004年7月新潟豪雨と10月新潟県中越地震による斜面崩壊の判別分析、地すべり学会誌、45巻、1号、pp.1-12、2008.
- 8) 對島美紗、内田太郎：航空レーザ測量データを活用した豪雨時の土砂生産に関する分析、第68回2019年度砂防学会研究発表会概要集、p-028、2019.
- 9) Tucker, C. J.: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, Vol.8, pp.127-150, 1979.
- 10) 戒信宏、村瀬悠、丸谷知己：衛星データとGISを用いた崩壊地の判別に関する研究、砂防学会誌、53巻、1号、pp.3-9、2000.
- 11) 秋田寛己、水垣滋、村上泰啓、村山雅昭：解像度の異なるNDVI画像から抽出した崩壊地面積の比較、寒地土木研究所月報、No. 805、pp.2-11、2020.
- 12) 岩橋純子、神谷泉、山岸宏光：LiDAR DEMを用いた表層崩壊のアセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定、地形、30巻、1号、pp.15-27、2009.
- 13) 北海道立地下資源調査所：5万分の1地質図幅(千呂露 釧路-第40号)、1962.
- 14) 北海道立地下資源調査所：5万分の1地質図幅(御影 釧路-第41号)、1954.
- 15) 北海道立地下資源調査所：5万分の1地質図幅(幌尻岳 釧路-第50号)、1961.
- 16) 北海道森林管理局日高北部森林管理署：平成17年度沙流川上流外治山流域別調査業務、業務報告書、2005.
- 17) 北海道森林管理局日高北部森林管理署：平成30年度パンケヌシ川流域治山流域別調査業務(北海道沙流郡日高町)、業務報告書、2018.
- 18) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門、古今書院、200p、1997.
- 19) ESA sentinel online (Web): <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home> (2019年7月24日確認)
- 20) Sentinel-hub EO Browser (Web): <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?lat=42.8377&lng=142.6583&zoom=12> (2019年7月24日確認)
- 21) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門：Sentinel-2 衛星データを用いた水田の取水開始時期の把握手法、報告書、p.66、2019.
- 22) 筒井健、市川真弓、高久淳一：AW3D®全世界デジタル3D地図提供サービスの展開-「見る3D地図」から「使える3D地図へ」-、日本リモートセンシング学会誌、36巻、5号、pp.515-522、2016.
- 23) 水野正樹、林真一郎、清水孝一、小山内信智：衛星リモートセンシング技術の土砂災害への応用、土木技術資料、53巻、1号、pp.16-19、2011.
- 24) 秋田寛己、水垣滋、村上泰啓：平成28年8月30-31日の豪雨による沙流川上流域での崩壊地分布、第63回北海道開発技術研究発表会、防8、2020.
- 25) Guzzetti, F., Ardizzonea, F., Cardinalia, M., Rossia, M., Valigi, D.: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 279, pp.222-229, 2009.
- 26) 秋田寛己、水垣滋、村上泰啓：豪雨に伴う新規崩壊による流域スケールの土砂生産量推定-沙流川水系パンケヌシ川流域における平成28年台風10号の事例-、2020年度砂防学会研究発表会概要集、pp.71-72、2020.
- 27) 水垣滋、村上泰啓、谷瀬敦、村山雅昭：鶴川・沙流川における平成28年8月豪雨時の浮遊土砂流出と生産源の定量評価、2019年度砂防学会研究発表会概要集、pp.55-56、2019.
- 28) 三上孝敏、桑村貴志、川井淳一：戸蔭別川流域における平成28年8月豪雨時の土砂動態について-LPデータを用いた流出土砂量の算定-、第63回(2019年度)北海道開発技術研究発表会、pp.481-486、2020.
- 29) Walling, D.E.: Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems, *Science of the Total Environment*, Vol. 344, No.1-3, pp. 159-184, 2005
- 30) 村上正人：河床材料調査、砂防学会誌、Vol. 71、No. 6、pp.59-63、2019.
- 31) 水垣滋、村上泰啓、巖倉啓子：放射性同位体トレーサを用いた流砂系の土砂動態モニタリング技術の開発、第65回(2021年度)北海道開発技術研究発表会、防16(治)、

2022.

- 32) Mizugaki S, Abe T, Murakami Y, Maruyama M, Kubo M: Fingerprinting suspended sediment sources in the Nukabira River, northern Japan. *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 5, No.1, p. 60-69, 2012.
- 33) 村上泰啓、中津川誠：斜面崩壊・土砂生産・流木発生. 土木学会水工学委員会(編). 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査団報告書、土木学会、pp. 46-56、2004.
- 34) Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., Jha, M. K.: SWAT: Model Use, Calibration, and Validation, *Transactions of the ASABE*, Vol. 55, No. 4, pp. 1491-1508, 2012.
- 35) Borselli, L., Cassi, P., Torri, D.: Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *CATENA*, Vol. 75, No. 3, pp. 268-277, 2008.
- 36) Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L.: Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, Vol. 188, No.15, pp 31-41, 2013.
- 37) 村上泰啓、水垣滋：山地溪流における水系網の地質別の特徴、第 5 回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp. 195-200、2010.
- 38) Nicoll, T., Brierley, G: Within-catchment variability in landscape connectivity measures in the Garang catchment, upper Yellow River, *Geomorphology*, Vol. 277, No.15, pp. 197-209, 2017.

STUDY ON THE SEDIMENT CONNECTIVITY FOR INTEGRAL MANAGEMENT ON SOURCE TO SINK SEDIMENT TRANSPORT SYSTEM

Research Period: FY2019-2021

Research Team: River and Dam Hydraulic Engineering Research
Team, Bridge Structure Research Group

Author: TUKUBA Tarou

KANCHI Hanako

DOBOKU Jirou

Abstract: In order to develop a method for evaluating connectivity in slope-to-stream sediment transport in mountainous regions, this study evaluated the amount of collapsed sediment and riverbed fluctuations using satellite image analysis and DEM difference analysis. In addition, connectivity of sediment transport pathways from slopes to river channels was evaluated by GIS.

Keywords: Shallow Landslides, River Bed Degradation, NDVI, DEM Differential Analysis, Index of Connectivity