

斜面崩壊で荒廃した北海道の山地流域における 地形変化，植生変化，土砂流出変化の実態解明

石川県立大学 生物資源環境学部
森林研究・整備機構 森林総合研究所
石川県立大学 生物資源環境学部

大丸 裕武
古市 剛久
柳井 清治

斜面崩壊で荒廃した北海道の山地流域における地形変化、植生変化、土砂流出変化の実態解明

Monitoring of changes in landform, vegetation and sediment discharge
in a mountainous catchment disturbed by landslides in Hokkaido

大丸 裕武¹・古市 剛久²・柳井 清治³
Hiromu DAIMARU, Takahisa FURUICHI, Seiji YANAI

¹ 石川県立大学 生物資源環境学部 教授

² 森林研究・整備機構 森林総合研究所 特別研究員

³ 石川県立大学 生物資源環境学部 特任教授

要 旨

2018年北海道胆振東部地震に伴う斜面崩壊で生じた大量の土砂が斜面脚部及び谷底面に堆積した厚真川支流の東和川流域では、2024年8月27日に3時間で100 mmを超える雨が降って2019年以来最大の出水が起こり、東和川は下流部で流路を変えた。この大出水イベントにより2024年の約8ヶ月間の積算土砂流出量は2019年以来の各年間流出量を上回った。厚真観測所の過去の雨量データを見ると日雨量100 mmを超える豪雨イベントは49年間で11回記録されており、この規模及び頻度の大出水イベントこそが流域スケールで地形を変化させ、大量の土砂を移動させていることが示唆された。一方、斜面スケールでは、2018年の斜面崩壊で生じた裸地斜面での植生回復が数年以上の時間を要しており、その間、裸地斜面からの土砂流出は収束しない状態が続いている。この状態を生むメカニズムを探るため、初冬期及び初春期に見られる霜柱クリープに焦点を当てた調査を昨年度から始め、本年はより詳細な画像で斜面表土の動きを記録したところ、時には地表の土砂粒が一晩の霜柱クリープで斜面下方へ約12 cmも移動することが分かった。霜柱クリープは南斜面では初冬から初春にかけて2.5ヶ月～3ヶ月間断続的に発生するが、より冷涼な環境にあり初春期にも積雪が残る北斜面では初冬期の3～4週間のみ見られることが分かった。更に本年は、裸地斜面に形成されたガリー地形における土砂の埋積と運搬（ガリーの底部や側壁の侵食）を検討するために、ガリー中に簡易な土砂トラップを施設し、また斜面を定期的にドローンで空撮した。今後これらデータの解析を進めてガリーの地形変化と土砂流出を検討し、斜面と水系をつなぐ土砂の動きを説明することを試みていきたい。また、裸地化した斜面での植生回復過程に関しては、本年は航空写真判読及び現地調査から示された2018年と2023年の植生分布の違いから、木本および草本の分布の時系列的変化を定量化し、植生分布の変化と地形要因及び環境要因との関係を分析した。その結果、2018年時点で裸地斜面に残存していた木本（植生ブロック）が2023年の植生回復に重要な影響を与えたことが示された。

《キーワード：霜柱クリープ、ガリー侵食、植生回復、土砂流出、豪雨イベント》

1. はじめに

2018年9月6日の早朝、北海道胆振地方中東部の地下約35 kmを震源とするM 6.7の内陸直下地震が発生し、その地震の揺れによって、東西約20 km、南北約20 kmの範囲に拡がる地域で多数の表層崩壊が発生した。この地震性斜面崩壊イベント（以下、「2018年イベント」）の結果、多くの斜面が裸地化し、斜面から移動した大量の崩壊土砂が斜面脚部や谷底面を厚く埋め、流域の地形は大きく変化した。筆者らは斜面崩壊で荒廃した典型的な流域として厚真川支流の東和川流域に注目し、2019年4月からこの流域の経年的な変化を調査してきた。

調査開始当初の主たる注目点は流域スケールでの土砂流出量と流出の特徴であった。2023年までの4年9ヶ月間のデータを経年に見ると、2020年から2021年にかけては年雨量は増加した（前年比151%）にも関わらず土砂流出量は大きく減少し、その翌年2022年は流域スケールで「特別地拵え」が実施されて斜面や谷底面から倒木が除去され倒木除去作業に伴って表土も攪乱された（特に林道の設置と利用）結果、年雨量は減少した（前年比93%）にもかかわらず土砂流出量は一転して増加に転じ、2023年も流域スケールでの攪乱の影響は継続したと見られ、年雨量は減少した（前年比81%）にも関わらず土砂流出量は増加した（融雪出水期の流出増が増加の一因）。一般に、流域に運搬される土砂が十分存在し、流域特性に有意な変化がない場合、年流量（=年雨量）が増加すれば比土砂流出量も増加すると考えられるが、イベント後5年間の年間土砂流出量データは、雨量の増加に伴い比土砂流出量は減少する傾向を示している。また一般に、荒廃イベントの発生から時間が経過するに従って植生回復や堆積土砂の安定化（地形化）によって地形は安定化し、侵食量（=比土砂流出量）は減少していくが、イベント後5年が経過した現在までに比土砂流出量の顕著な減少傾向は認められない。このような理論と実態の乖離を議論する際には、1) 土砂流出量が平衡状態に戻る（あるいは、平衡に至る）までにどのくらいの時間がかかるのか、2) その間土砂流出量はどのように減少するのか（どのような地形プロセスの変化があるのか）、3) その土砂流出量の減少（あるいは変化）において地形プロセスと植生回復との間にはどのような関係があるのか、といった面での検討が重要である（図1）。

また、流域環境の変化としては、2018年の斜面崩壊で裸地化した斜面における植生回復が数年経過してもなかなか進まないことが次第に分かってきた。植生回復の遅れは、倒木除去や地表面攪乱という人為プロセスと並んで土砂流出に影響しており、植生回復が進まない主要な理由の一つとして、初冬及び初春の霜柱クリープによる植生活着の阻害があるのではないかということが推察された。このような経緯から、2023年の調査からは裸地斜面にコドラートを設けて霜柱クリープの実態に関するモニタリングを開始した。その結果からは、霜柱凍上は最大12 cm程度であったこと、凍上によって地面から抜けた杭の移動距離を基にすると初春の35日間に斜面距離で110 cmの霜柱クリープが起こったこと、斜面に対して鉛直に掘り珪砂を流し込んだ試孔の観察からは霜柱クリープで動く表土は地表下3 cm程度までであることが明らかになった。しかしながら、流域スケールでの土砂流出を把握する際に重要な土砂の流出源、あるいは流出プロセスを明らかにする上では、裸地斜面での植生回復の遅れを生んでいる霜柱クリープだけでなく、降雨イベントでの地表流による土砂流出にも注目していく必要があるのではないかとの指摘もなされた。

こうした調査経過を踏まえ、本年の調査では、支流域スケールでの土砂流出量の観測を継続するとともに、降雨イベントにおける斜面からの土砂流出を検討するため、霜柱クリープ→ガリー埋積→ガリー侵食という土砂移動経路に注目して、斜面から水系への土砂流出／土砂運搬の流れについて可能な範囲で検討を進めた。一方、裸地化した斜面での植生回復過程に関する調査も継続し、航空写真判読及び現地調査から示された2018年と2023年の植生分布の違いから、木本および草本の分布の時系列的変化を定量化し、植生分布の変化と地形要因及び環境要因との関係を分析した。

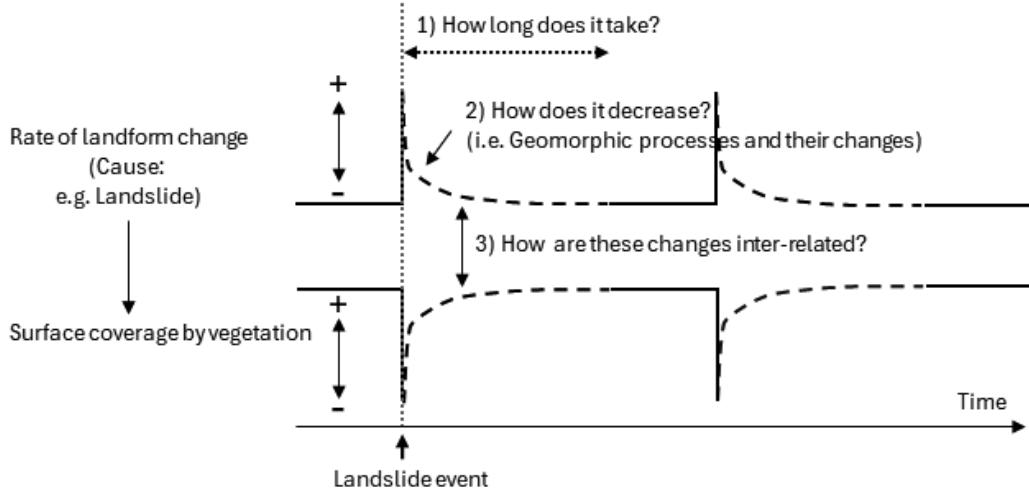


図1 流域攪乱後の地形プロセスと植生回復の推移を単純化した模式図とその論点

2. 東和川流域

東和川流域は厚真川流域の中流部左岸に位置し、東西方向に伸びる北支流と南支流からなる（図2）。流域の最高標高は234 m、最低標高は25 m、比高は209 m、面積は4.88 km²、平均傾斜は21.3°（標準偏差11.2°）である。流出観測を行った南支流の流域面積は2.95 km²である。斜面観測のサイトのうち、南斜面に設けたサイトは南支流域にあり、北斜面に設けたサイトは北支流域にある（図2）。南支流中流部から下流部、及び北支流は新第三系振老層、南支流上流部は新第三系軽舞層を基盤とする（図2）。これまでの報告によれば東和川流域での崩壊面積率はイベント地域内の他流域と比べても最も高く¹⁾、表層崩壊は248箇所に上る²⁾。崩壊地の合計面積は1.1 km²、崩壊面積率は0.23である。斜面崩壊に伴って斜面下方へ移動した大量の土砂は東和川谷底面を上流から下流へほぼ連続的に埋積した。

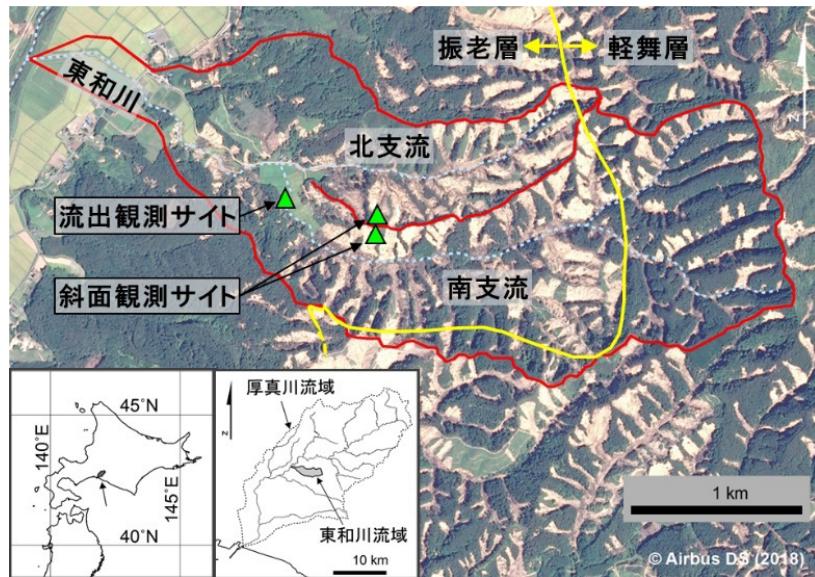


図2 東和川流域の流域界（赤線）、地質境界（黄線）、流出観測及び斜面観測のサイト（緑三角）

3. 調査方法

(1) 河川流出

南支流埋塞部下流端付近（図2）に水位計、濁度計、水温計、インターバルカメラを設置し、流域土砂流出観測点とした（図3）。水位計はセンシズ製HM910及びデータロガーLM-1を使用し、濁度計と水温計はJFEアドバンテック製小型メモリー濁度計Infinity-Turbidを使用した。インターバルカメラはBrinno製タイムラプスカメラTLC200を用いた。水位データはデータ回収時にメジャーで水位を計測して水位計による観測値と対照させ、河床変化に対する補正を行った。濁度計には中濁度用（0-1200 FTU；ホルマジン濁度）と高濁度用（0-100000 ppm；カオリン濁度）の2種の後方散乱方式センサーが装備されている。濁度計を用いた観測データにはスパイクやノイズが生じることがあり、異常値として取り除く必要がある。その作業として、濁度の測定では1測定につき1秒間隔で10回計測し、計測した濁度を値でソートして最大から2つ、最小から2つを取り除いた中央の6つ値の平均値を濁度値とした。その上で、濁度の変化パターン、水位との関係、インターバルカメラ画像やデータ回収時に現地で確認したサイト（濁度計）の状況を基に判定を行い、異常値を除外した。土砂運搬量の計算では基本的に中濃度用センサーの限界値である1200 FTUまでの濃度は中濃度センサーの値、それ以上の濃度では高濃度用センサーの値を用いた。また、濁度データが得られなかった期間は、これまでと同様に、水位と流量、流量と浮遊土砂量の関係式から土砂流出量を見積もった。本年度の濁度観測は、厳冬期明けの2023年3月25日に濁度計を設置して10分間隔で計測を開始し、集中豪雨による大出水で観測サイトが土砂で埋まり流路が変わった8月27日に終了した。8月27日までの観測では、昨年まで取り組んだ水路改修（計器設置区間の直線化）と自然石を用いた水制工導入によって（図3）、以前に比較して良好なデータが得られた。



図3 流域土砂流出観測点

(2) 斜面侵食

a) コドラー調査

2023年に南斜面と北斜面に設定した2 m x 2 m のコドラー・サイトを2024年10月下旬及び11月下旬に改修して、裸地斜面における初冬及び初春の霜柱クリープの観察、観測を実施した（図2、図4、図5）。コドラーを設置した斜面の斜度は南斜面、北斜面とも25°である。コドラーの側面には、地表面からの深度0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cmに地温計（HOBO® Tidbid MX2203）を、深度5 cmに土壤水分計（HOBO® MX2307）を設置した。コドラーの下端には、2023年秋に検土杖を用いて斜面に対して鉛直方向に約30 cmの穴を南斜面に5本、北斜面に4本掘り、珪砂を流し込んでおり、2024年春にそれぞれ1本づつ掘り返したが、残りは手付かずである。また、今年は昨年設置したトレイルカメラ（塚本無線WTW-TC32AP）に加え、コドラーの真横にも近距離で設置し、1時間間隔で地表面の状況をモニタリングした。南斜面については、2025年3月24日～25日に各種観測データを回収し、珪砂穴の一本を掘削して2023年11月以来の変化を観察した。

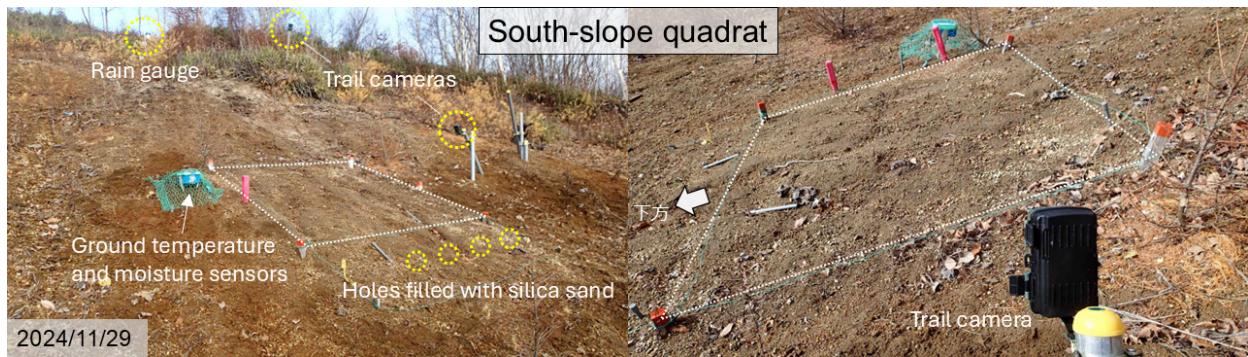


図4 南斜面のコドラート・サイト



図5 北斜面のコドラート・サイト

b) ガリー調査

裸地斜面に刻まれたガリーからの土砂流出を精密に観測するには、斜面脚部に堰を設けるなど大掛かりな施設の建設が必要となり、出張ベースでの調査体制では施設の建設及び維持管理とその後の精密な計測の実現は現実的でないとの判断から、斜面中部に簡易な土砂トラップを設けた（図6）。土砂トラップに溜まった土砂の堆積を計測した。



図6 南斜面ガリーからの流出土砂トラップ

(3) 気象調査

雨量データ及び地上気温はアメダス厚真における時間雨量及び毎時気温を用いた。積雪の観測はアメダス厚真では行っていないため、アメダス種別のデータを用いた。流量観測点からアメダス厚真観測所までは直線距離で約4 km離れているため、本年新たに斜面観測サイト（南斜面）に雨量計を2024年5月に設置した（図4及び図7）。



図7 斜面観測サイト南斜面に設置した雨量計

(4) 植生調査

東和川流域を対象に、2018年と2023年に撮影された航空写真のオルソ画像を使用し、RGB画像を基に植生の分布を分類した。使用したデータは以下の通りである。

- 航空写真画像（2018年（北海道胆振振興局林務課2018年9月11日撮影）、2023年（北海道室蘭建設管理部河川課2023年8月12～9月23日））
- 崩壊地ポリゴン（ID付き）（地域環境計画作成ポリゴン）を修正し、また柳井³⁾の地形区分により、斜面を遷急線に基づき細分化したもの
- 植生分類結果ラスター（教師付きSVM分類による）
- 地形環境要因：傾斜（Slope），方位（Aspect），日射量（Solar Radiation），侵食量（Erosion）

これらデータを用いて、以下の分析を実施した。

a) 教師付き分類

ArcGIS Proの「Image Classification」機能を用いて、RGB画像に対して教師付き分類（SVM）を実施した。クラスは木本、草本、裸地、影に分け、それぞれ十分な数のサンプルポリゴンを作成した。分類後、ラスターをポリゴンに変換し、10m²未満の小ポリゴンを削除、Dissolve処理を行い、分類結果を整理した。

b) 面積抽出と時系列比較

2018年、2023年の木本・草本の分類ポリゴンを崩壊地ポリゴンとIntersectし、崩壊地ごとに植生クラスの面積を集計した。地形や樹木などの被陰による面積が崩壊地面積の33%以上を占めるポリゴンはノイズと判断して除外した。

c) 環境要因の抽出と統合

2018年に計測されたLiDARデータからDEMを作成し、そのDEMを基に、ArcGIS ProのSpatial Analystツールを用いて、斜面傾斜、方位を計算した。その際DEMメッシュサイズは1 mにリサンプルしたもの用いた。次に日射量については、2023年に計測されたLiDARデータのうちオリジナルデータを用いてDSMを作成し、Spatial Analystツール、フィーチャの日射量（Feature Solar Radiation）を用いて、崩壊ポリゴンごとの日射量計算を行った。この際、日射量は2023年1月から12月末までの1年間として計算した。

また侵食量に関しては2018年のLiDARデータによるDEM（各0.2 mメッシュ）と2023年のDEMをRaster Calculatorを用いて差分し、侵食と堆積の空間分布を示すラスターを作成した。これらのラスターをZonal Statisticsを用いて、各崩壊地ポリゴン内の傾斜、方位、日射量、侵食量の平均値を計算し、植生面積と結合して統合データセットを作成した。

d) 統計解析

回帰分析を用いて、草本および木本の2023年面積と環境要因との関係を箱ひげ図を用いて検討した。また、多重共線性の確認としてVariance Inflation Factor (VIF) を評価した。さらに、2018年木本面積が2023年の草本・木本面積に与える影響を評価するため、回帰分析および相関図を作成した。方位や傾斜をカテゴリ変数として分け、分散分析と多重比較検定も実施した。

4. 結果と考察

(1) 降雨

2024年の年雨量は1077.5 mm、流域出口での観測データに基づいて流出土砂量を見積もった1月1日から8月27日までの積算雨量は691.0 mm であった。調査開始年以来の年雨量は、2019年849.0 mm、2020年797.5 mm、2021年1200.5 mm、2022年1118.0 mm、2023年906.0 mmであった（2020年以降のデータは表2に記載）。

2024年の時間雨量の最大値は41.5 mm（8月27日 5:00）で、2019年の調査開始以来最大（最高水位）の出水イベントがあった8月27日には5:00から7:00の3時間で101.5 mmを記録している。日雨量の最大値は122.5 mm（8月27日）、日雨量50 mm以上と15 mm以上の降雨イベントはそれぞれ5回と18回であった。

斜面観測サイトに設置した雨量計からは、2024年5月13日から7月6日及び9月16日から12月19日の期間のデータが得られた（7月7日から9月15日のデータは欠損）。雨量計データが得られた期間の日雨量10 mm以上の降雨イベントについてアメダス厚真の日雨量データと比較したところ、雨量計の値に対してアメダス厚真の値は全14イベントで平均して19% 大きな値を示した。14イベントのうち6イベントでは違いが±10% 未満で良く一致したが、50% 以上大きな値を示すイベントも4回あった（図8、表1）。これまでのアメダス厚真の雨量と東和川の水位のデータにおいて、両者に整合性が見られない場合が散見されたが、その理由として東和川流域とアメダス厚真との間の距離（約4 km）を反映した降雨データ上の制約があった可能性が今回のデータ比較から指摘できるだろう。

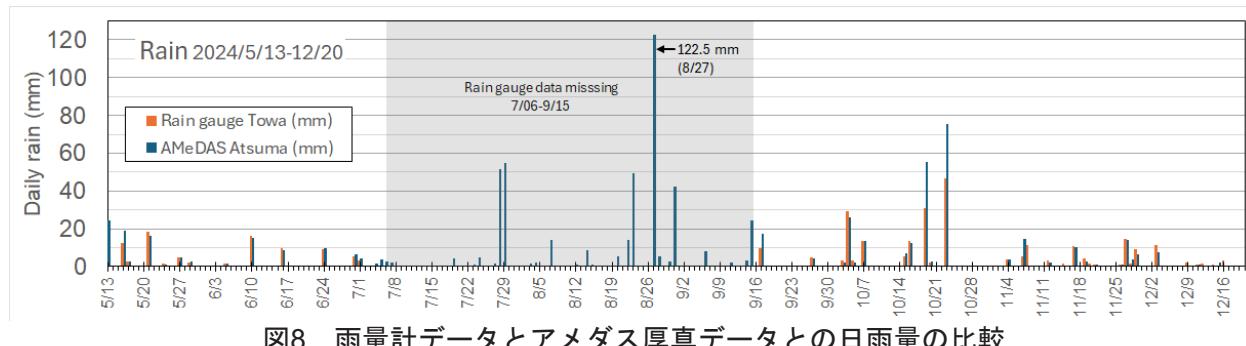


図8 雨量計データとアメダス厚真データとの日雨量の比較

表1 雨量計とAMeDAS厚真との日雨量10 mm以上のデータの比較

Date	Rain gauge (mm) (1)	AMeDAS (mm) (2)	(2)/(1)
2024/5/13	25.4	24.5	0.96
2024/5/16	12.2	19.0	1.56
2024/5/21	18.6	16.0	0.86
2024/6/10	16.0	15.0	0.94
2024/9/17	10.0	17.5	1.75
2024/10/4	29.2	26.0	0.89
2024/10/7	13.8	13.5	0.98
2024/10/16	13.8	12.5	0.91
2024/10/19	30.8	55.5	1.80
2024/10/23	46.8	75.5	1.61
2024/11/7-8	17.0	15.0	0.88
2024/11/17	11.0	10.5	0.95
2024/11/27	14.8	14.0	0.95
2024/12/3	11.6	7.5	0.65
Total	271.0	322.0	1.19

Note: Available data in 2024 of daily rain > 10 mm

(2) 流域からの土砂流出

a) 降雨流出

2024年の水位データは、8月27日の豪雨による大出水イベントで河川流路が変わったことから、1月1日から8月27日までの期間であり、この間は連続的に得られた（図9）。2024年は水位が30 cmを上回る降雨流出イベントが2月26日の第1回以降10回あり、最大水位は8月27日の121.0 cmであった。水位が30 cmを上る10回の降雨流出イベント中6回のイベントで日雨量20 mm以上が記録されている。

b) 土砂の高濃度流出

濁度データは、データ回収に伴う停止時間を除き8/01-03（約3日間）の欠損以外は連続的に記録できた（図9）。2024年にはカオリン濁度10000度（濃度おおよそ 13.8 kg/m^3 ）を超える高濃度の浮遊土砂流出イベントが4回あり（3月29日、7月29日、8月23日、8月27日），そのうち8月の2回のイベントでは最高濁度が30000度を超えた（図9）。

c) 土砂流出量

水位データ及び濁度データから計算された東和川南支流における2024年の1月1日から8月27日の浮遊土砂流出量（暫定値）は2060.4 tonnesであり、同期間の比浮遊土砂流出量（Specific suspended sediment yield）は698.4 t/km²である（表2、図10）。この間の積算雨量と共に、比浮遊土砂流出量を2019年以来のデータ（2019年を除き12ヶ月間）と比較すると、期間が短かった（8ヶ月間）にも関わらず2024年が最も大きな値を記録したことが分かる。これは8月27日の大出水イベント（図11）での土砂流出量の影響が大きく、2024年8月の月間土砂流出量約1670 tonnesは、他の年の年間土砂流出量に匹敵する値であった（表2）。

2019年から2023年までの土砂流出量については、2018年の斜面崩壊による流域荒廃後の流域の反応として、地形の安定化や人為による攪乱の影響を議論してきたが（図10；下点線），2024年は2019年から2023年までは見られなかった強度での侵食と土砂運搬のプロセスが生じたと理解でき、その土砂流出現象の要因は経年変化で検討していた範囲では捉えられないと考えられる（図10；上点線）。厚真で気象

観測が開始された1976年から2024年まで約49年間の雨量データを見ると、例えば、日雨量80 mmを超えるイベントは23回、100 mmを超えるイベントは11回記録されており、これらのレベルの極端な豪雨は同年に複数回起こることもあり（1979年、1981年、1992年、2016年）、100 mm以上のイベントであれば1年以内から20年程度に一度の頻度で起こる（表3、図12）。裸地での広範な地表流発生や河川の流路変更など2024年8月27日のイベントで起きた大規模な土砂流出（と地形変化）を生じさせるのはこうしたレベルの極端な豪雨イベントであることを2024年8月27日の大出水イベントは示唆していると考えられる。このように、北海道胆振東部の気候環境においては、1年以内から20年程度に一度の頻度の「極端な豪雨」時の流域での地形プロセスと、極端な豪雨と次の極端な豪雨との間の期間（ここでは「平穏期」と呼ぶ）における降雨イベントでの地形プロセスには流域地形の変化に対するインパクトに関して有意な違いがあり、単位時間当たりの降雨流出の増加に伴って土砂流出量が指数的あるいは不連続に増加する、すなわち平穏期の降雨イベントによる地形変化と土砂流出のモニタリングだけでは長期に亘る流域地形の変化を捉えることは出来ない、という可能性がある。「極端な豪雨」イベントを定義する地形プロセス及び土砂流出プロセスの枠組みやそのプロセスを引き起こす雨量の閾値については、今後の課題である。

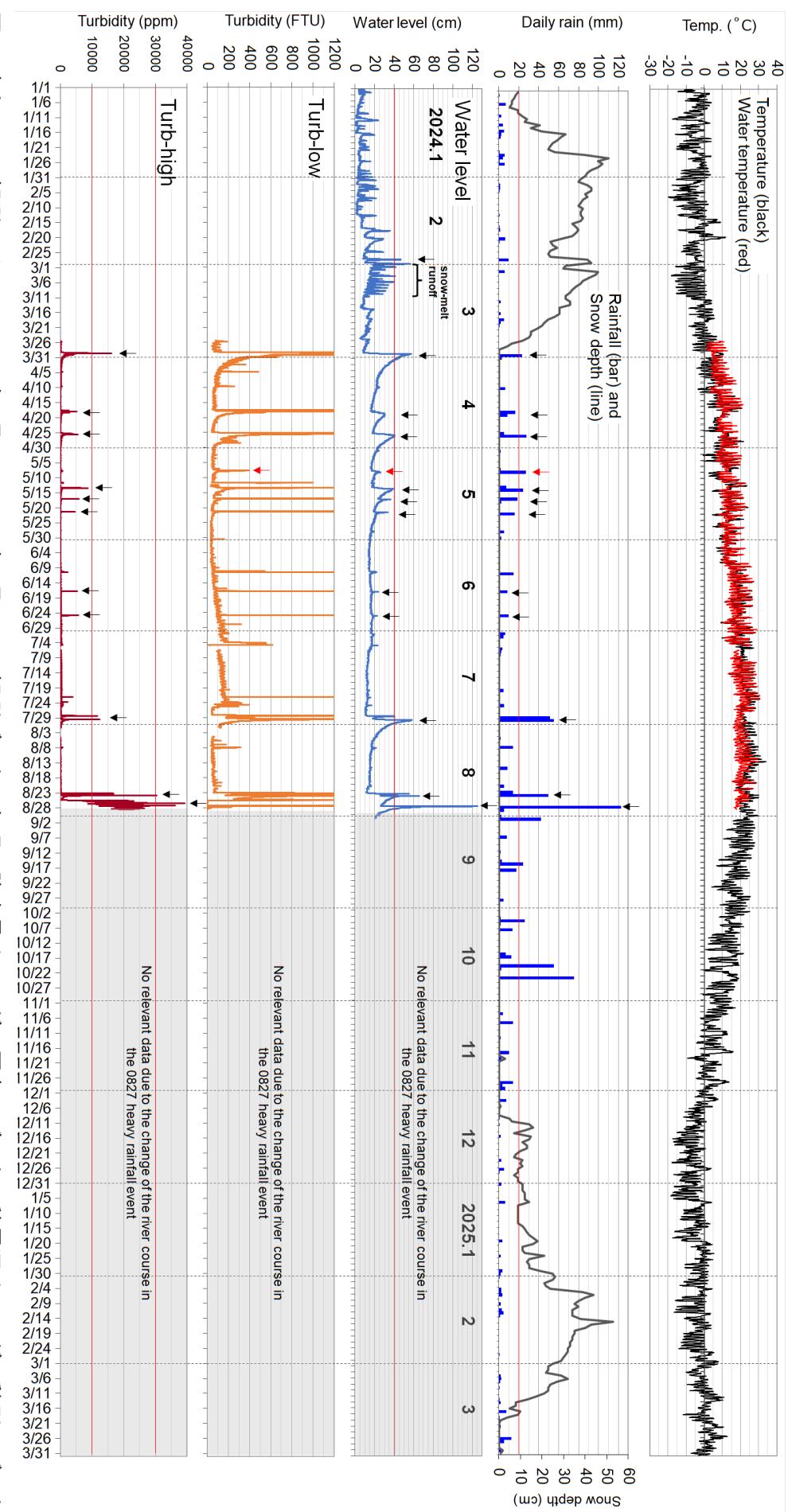


図9 東和川河川観測サイトでの2024年1月1日～2025年3月31日の観測データ。気温、降水量はアメダス厚真のデータ、積雪深はアメダス穂別のデータ。
濁度データは異常値を除外したもの。矢印は降雨流出イベント

表2 東和川南支流における2019年～2024年の浮遊土砂流出量とその変化

Month	Suspended sediment yield (tonnes)	Monthly contribution	Month	Suspended sediment yield (tonnes)	Monthly contribution	Month	Suspended sediment yield (tonnes)	Monthly contribution	Month	Suspended sediment yield (tonnes)	Monthly contribution	Month	Suspended sediment yield (tonnes)	Monthly contribution	
2020.01	4.0	0.3%	2021.01	0.2	0.0%	2022.01	4.9	0.5%	2023.01	3.0	0.2%	2024.01	1.7	0.1%	
2020.02	1.7	0.1%	2021.02	1.8	0.2%	2022.02	5.4	0.5%	2023.02	1.1	0.1%	2024.02	14.7	0.7%	
2020.03	1019.6	69.2%	2021.03	23.7	3.2%	2022.03	59.0	5.5%	2023.03	260.7	20.1%	2024.03	152.2	7.4%	
2019.04*	15.8	1.4%	2020.04	54.1	3.7%	2021.04	157.6	21.3%	2022.04	18.1	1.7%	2023.04	76.0	5.9%	
2019.05	27.9	2.5%	2020.05	27.0	1.8%	2021.05	7.0	0.9%	2022.05	42.8	4.0%	2023.05	14.5	1.1%	
2019.06	108.0	9.6%	2020.06	15.3	1.0%	2021.06	26.4	3.6%	2022.06	91.1	8.5%	2023.06	19.3	1.5%	
2019.07	20.7	1.8%	2020.07	41.9	2.8%	2021.07	4.3	0.6%	2022.07	38.3	3.6%	2023.07	64.4	5.0%	
2019.08	715.6	63.5%	2020.08	29.9	2.0%	2021.08	9.3	1.3%	2022.08	577.2	53.6%	2023.08	94.4	7.3%	
2019.09	116.1	10.3%	2020.09	127.8	8.7%	2021.09	4.7	0.6%	2022.09	120.7	11.2%	2023.09	559.0	43.2%	
2019.10	85.5	7.6%	2020.10	32.1	2.2%	2021.10	9.5	1.3%	2022.10	90.3	8.4%	2023.10	28.1	2.2%	
2019.11	27.4	2.4%	2020.11	102.7	7.0%	2021.11	477.1	64.3%	2022.11	20.4	1.9%	2023.11	167.9	13.0%	
2019.12	10.6	0.9%	2020.12	18.2	1.2%	2021.12	20.0	2.7%	2022.12	8.1	0.8%	2023.12	6.2	0.5%	
Total	1127.5	100.0%	Total	1474.4	100.0%	Total	741.7	100.0%	Total	1076.1	100.0%	Total	1294.5	100.0%	
Specific sediment yield	382.2 t/km ² /mon			499.8 t/km ² /y			251.4 t/km ² /y			364.8 t/km ² /y			438.8 t/km ² /y		
Annual or unit rainfall	787.5 mm **			797.5 mm			1200.5 mm			1118.0 mm			906.0 mm		
Yield per rainfall	0.485 t/km ² /mm			0.627 t/km ² /mm			0.209 t/km ² /mm			0.326 t/km ² /mm			0.484 t/km ² /mm		

(Notes: *: Not whole month, **: Unit rainfall from 01 Apr to 31 Dec 2019, ***: Unit rainfall from 01 Jan to 28 Aug 2024)

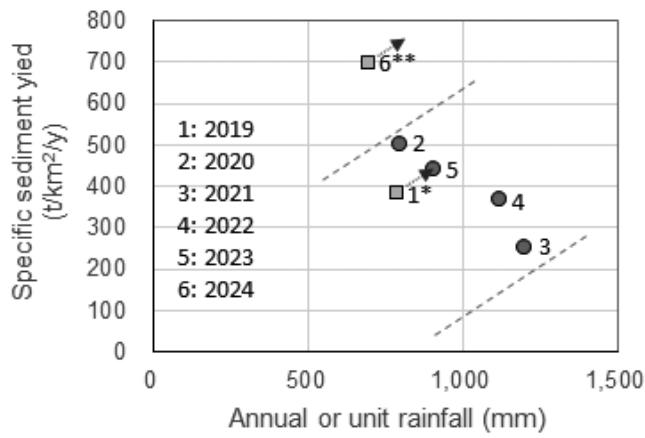


図10 東和川南支流における2019年～2024年の年降水量と比浮遊土砂流出量

(注)* 2019年及び** 2024年はそれぞれ9ヶ月間、8ヶ月間のデータを想定した際のプロットの動きの方向。二本の点線で挟まれる領域は極端な豪雨と次の極端な豪雨との間の期間における雨量と土砂流出量の関係を示すと想定できるが、2024年のプロットは極端な豪雨がもたらす地形変化・土砂流出プロセスによる異なるレベルの雨量と土砂流出量の関係の存在を示唆している。



図11 流域土砂流出観測点における2024年8月27日の大出水イベント

表3 厚真気象観測所（1976年設置）における日雨量80 mm以上のイベント（雨量順）

	Date	Daily rain (mm)		Date	Daily rain (mm)
1	2001/09/11	187.0	13	2016/06/17	95.5
2	1981/08/05	166.0	14	1985/09/01	95.0
3	2006/08/18	157.0	15	1976/08/12	94.0
4	1992/08/09	136.0	16	1981/08/04	93.0
5	2024/08/27	122.5	17	1981/09/04	92.0
6	2005/09/07	118.0	18	1992/09/25	88.0
7	1990/04/23	103.0	19	2022/08/16	86.0
8	1996/08/23	102.0	20	2016/08/23	82.5
9	1998/08/28	102.0	21	1981/08/23	82.0
10	2003/08/09	102.0	22	2010/08/12	82.0
11	1979/10/01	101.0	23	2016/08/17	81.5
12	1979/10/19	99.0			

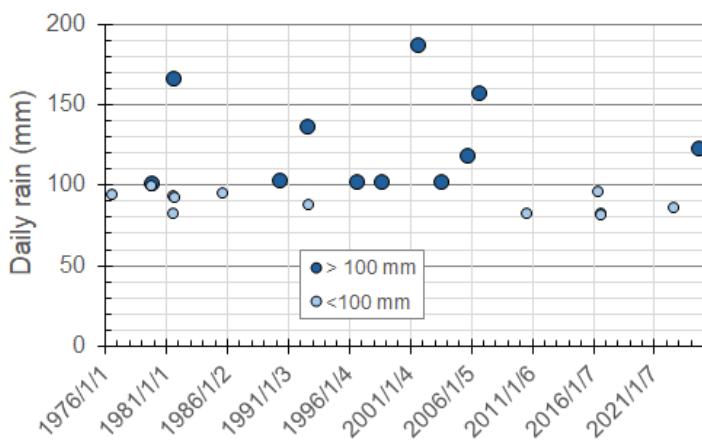


図12 厚真気象観測所（1976年設置）における日雨量80 mm以上のイベント（時系列）

d) 中長期的な変化

東和川流域における2019年から2024年の6年間に亘る土砂流出の観測データは、流域攪乱後の地形プロセスと植生回復の推移について、次のことを示している（図13）。

- 1) 攪乱後6年が経過した時点で、流域からの土砂流出が平衡状態に戻った（至った）状況にはなっていない。
- 2) この間、年間土砂流出量は土地利用の変化（「特別地拵え」による人為的な攪乱）及び極端な豪雨イベントによって増加した。すなわち、流域が大きく攪乱された後、その流域からの土砂流出量は一貫して減少するのではなく、様々な要因による増加のスパイクを経ながら変化（漸減）していく。
- 3) 増加のスパイクの要因には、地表面の人為的な攪乱（植生被覆の減少）や極端な豪雨による攪乱（極端な地形変化プロセスの発生）などがあり、地形と植生が原因と結果の役割を変えながら双方向で担っている。特に日雨量100 mmを超えるような極端な豪雨による増加スパイクは顕著であり、極端な豪雨イベントによって流域の地形環境（土砂流出環境）が一変することがある。

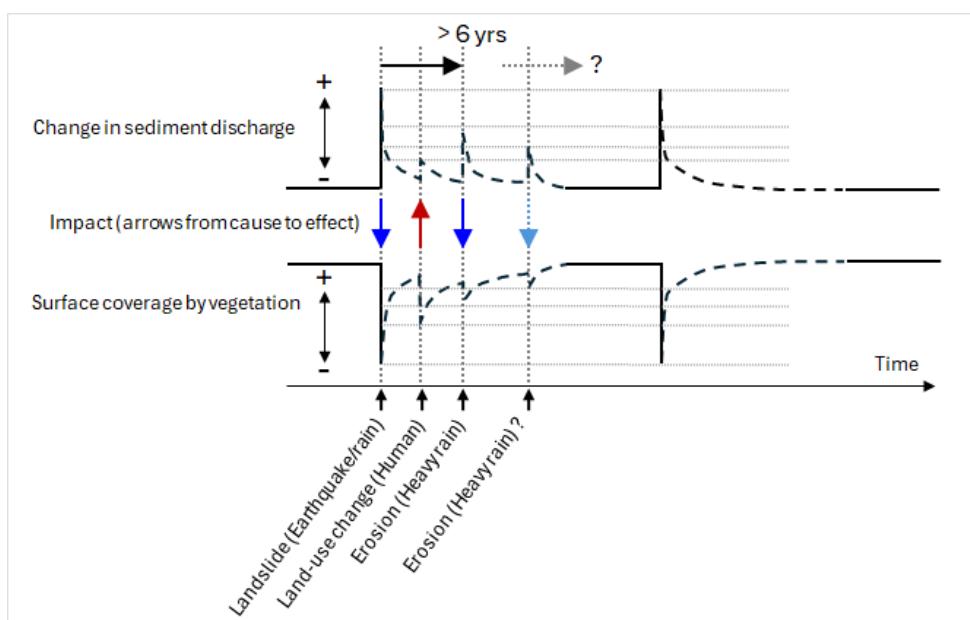


図13 東和川流域で見られた流域攪乱後の地形プロセスと植生回復の推移の模式図（図1参照）

(3) 斜面表土の霜柱クリープ

a) 初冬期及び初春期における表土の移動

冷涼な環境において、霜柱、凍土、アイスレンズなどの形成（凍結）と融解に伴って斜面の表層部で起こる緩い速度のマスマーブメントは、「霜柱クリープ（霜柱匍行）」や「ソリフラクション（霜柱凍上及びジェリーフラクション）」という術語を用いて説明されているが、東和川流域の斜面では霜柱の形成・融解によるプロセスが卓越していることを踏まえ、本調査では、初冬期及び初春期に斜面の表層部で起こる緩い速度のマスマーブメントを「霜柱クリープ」と呼ぶことにする。

コドラーートの真横に設置したトレイルカメラの画像では、霜柱クリープによる土砂粒子レベルの動きが記録された。例えば、2024年11月29日夕刻から翌日11月30日午前にかけて記録された画像では、土砂粒子（軽石）が霜柱凍上（frost creep）で上方へ移動し、霜柱の融解（gelification）で下方へ移動した結果、この一晩で斜面下方へ12 cm移動したことが分かる（図14）。また、昨年も記録された通り、地面に埋めた杭が凍結凍上で地面へ抜けその後霜柱クリープによって斜面下方へ移動したが、その様子も本年はより鮮明に記録された（図15）。コドラーート西側の木杭と凍上計（塩ビ管）はそれぞれ1月2日、1月6日に地面へ抜け、3月23日までのそれぞれ81日間、77日間に両者とも200 cm 移動し、コドラーート東側の木杭と凍上計（塩ビ管）は両者とも2月10日に地面へ抜け、3月23日までの42日間にそれぞれ55 cm, 65 cm 移動した。

南斜面コドラーート下端の珪砂穴を掘り返して観察したところ、地表下2.2 cm までは珪砂は見られないことから霜柱クリープの深度は2~3 cm程度であると考えられる（図16上）。また、地表下7 cm に5 mm程度のずれが認められ、この面の上位にある砂層が下位の砂質シルト層に対して匍行していると見られる（図16下）。2023年11月の珪砂穴設置以来1年4ヶ月で5 mmという移動量になる。

東和川流域の環境では霜柱クリープによる地表下2~3 cmの表土の移動は、少なく見積もって、ひと冬で斜面距離200 cmに達する。霜柱クリープが植生の活着を阻害していることが改めて強く示唆された一方、裸地斜面におけるこうした強度の面的土砂移動は、斜面脚部へ向けて土砂を移動させると同時に、斜面上に相対的な凹地があれば、その凹地を埋積する。裸地斜面に形成されている無数のガリーを融雪期に観察すると、初冬期に露出していた基盤岩は見られず、ガリー地形は細粒土砂で埋められている。ガリーを埋めた細粒土砂は初春期の降雨流出イベントでガリー内に発生する流水によって侵食され、水系へ運搬される。この一連のプロセスは厚真川流域において斜面と水系を結ぶ土砂移動プロセスとして重要であると思われる。

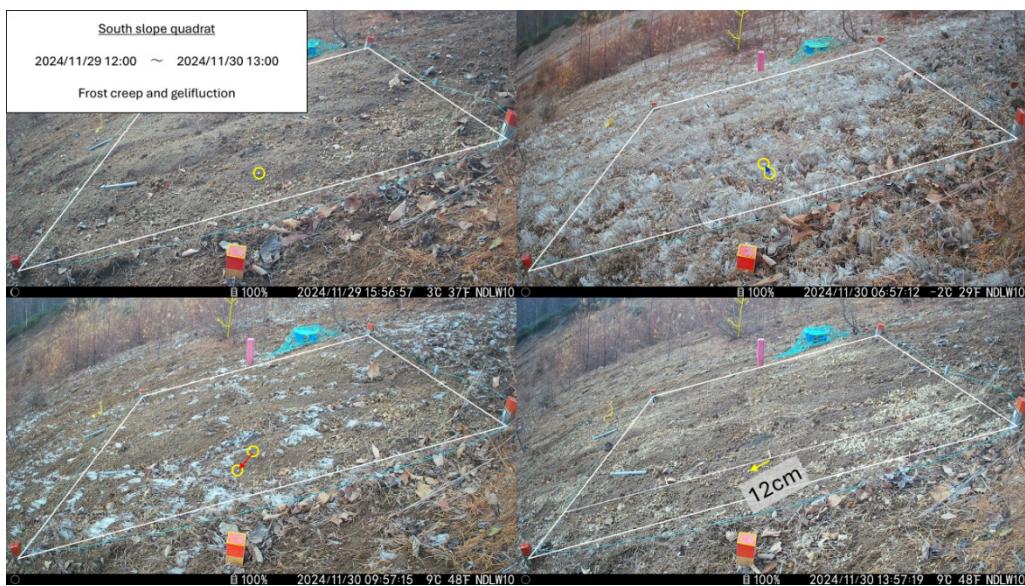
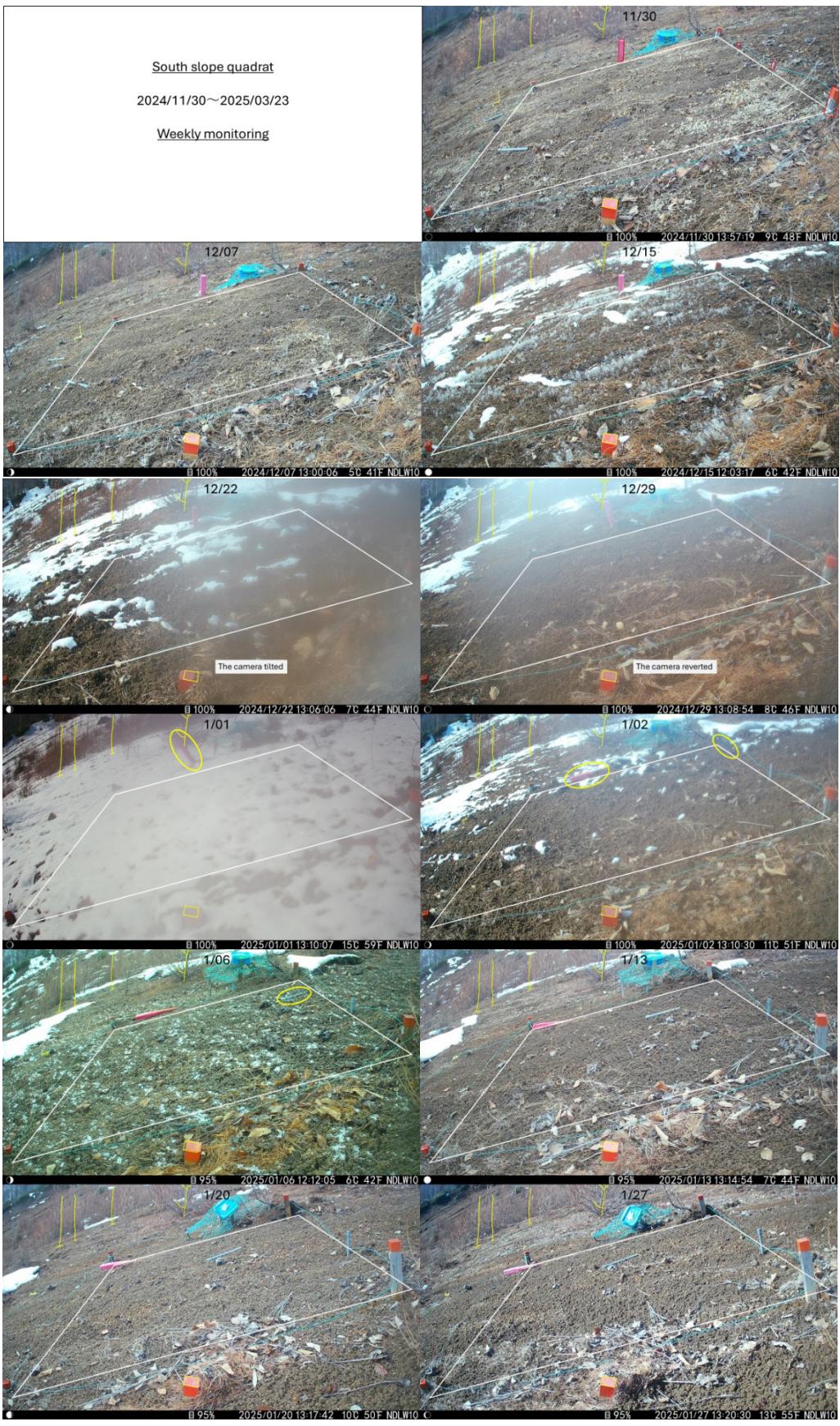


図14 南斜面コドラーートにおける霜柱クリープ例（2024/11/29夕刻～11/30正午）



(次ページへ続く)

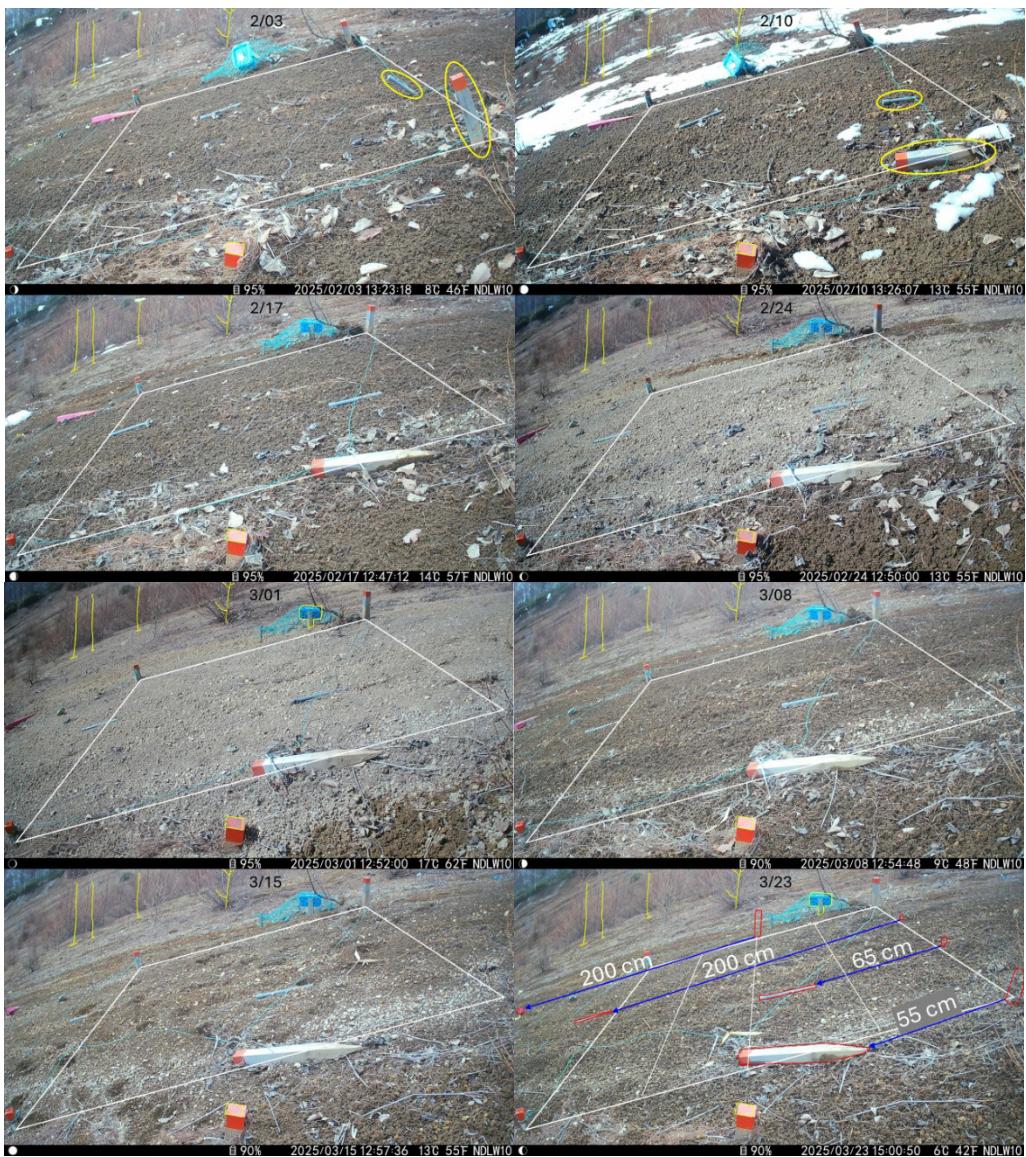


図15 南斜面コドラーでの初冬から初春（2024/11/30～2025/03/23）にかけての地表面変化
(約1週間毎の記録)

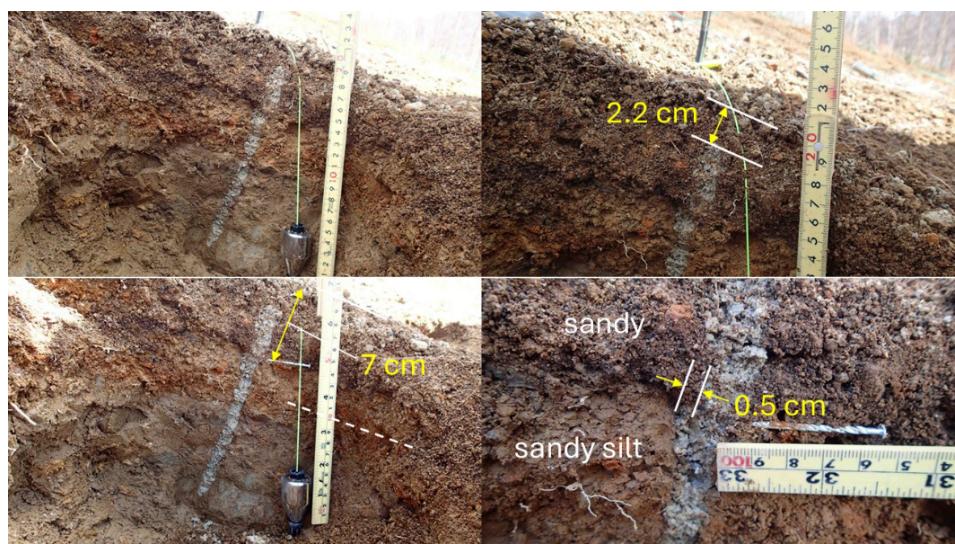


図16 2025年3月の南斜面コドラー珪砂穴断面

b) 地温・土壤水分

南斜面コドラートの地温計データを見ると、深度方向に漸増する温度分布が認められ、地下5 cm の地温は厳冬期でも0°C以上であり氷点下にはならず、霜柱が発生する土層は地下5 cm 以浅であることを示している（図17下段）。南斜面では地表面（0 cm）の地温及び土壤水分のデータが12月18日以降欠損しているが、気温と5 cm深地温からは、12月中旬から1月第1週、2月前半は日中も気温が上がりず、5 cm深地温も上がりず（プロット上のスパイクがない）、霜柱クリープの強度は弱かったと考えられる。但し、厳冬期であるはずの1月は第2週から月末までは日中の気温が上がり、霜柱クリープが発生した（トレイルカメラ画像でも確認した）。南斜面における霜柱クリープは11月下旬から3月下旬までの期間内に、延べ期間として約2.5ヶ月（2023/2024）～3ヶ月（2024/2025）程度発生すると考えられる（図17）。

北斜面コドラートの地温計データは、北斜面の地表環境が南斜面とは全く異なることを示している（図18）。トレイルカメラ画像は北斜面コドラートの地表は11月下旬から3月下旬まで積雪に覆われることを示しており、地温計データも地表面（0 cm）及び5 cm深の地温は零度から数度のほぼ定常状態であること示しており（プロット上のスパイクが見られない）、この間は霜柱クリープは発生していないと考えられる。初春期は3月末の雪融けと同時に夜間気温が氷点下に下がらず、この時期にも霜柱クリープは殆ど発生しないと見られる。従って北斜面で霜柱クリープが起こるのは積雪前の11月下旬から12月前半にかけての約3～4週間程度であると考えられる。但し、初冬期の北斜面における霜柱凍上は南斜面のそれよりも大きく、状況次第では前日の霜柱が解けずに翌日その下に新たな霜柱が出来て、総凍上量を大きくしている場合がある。

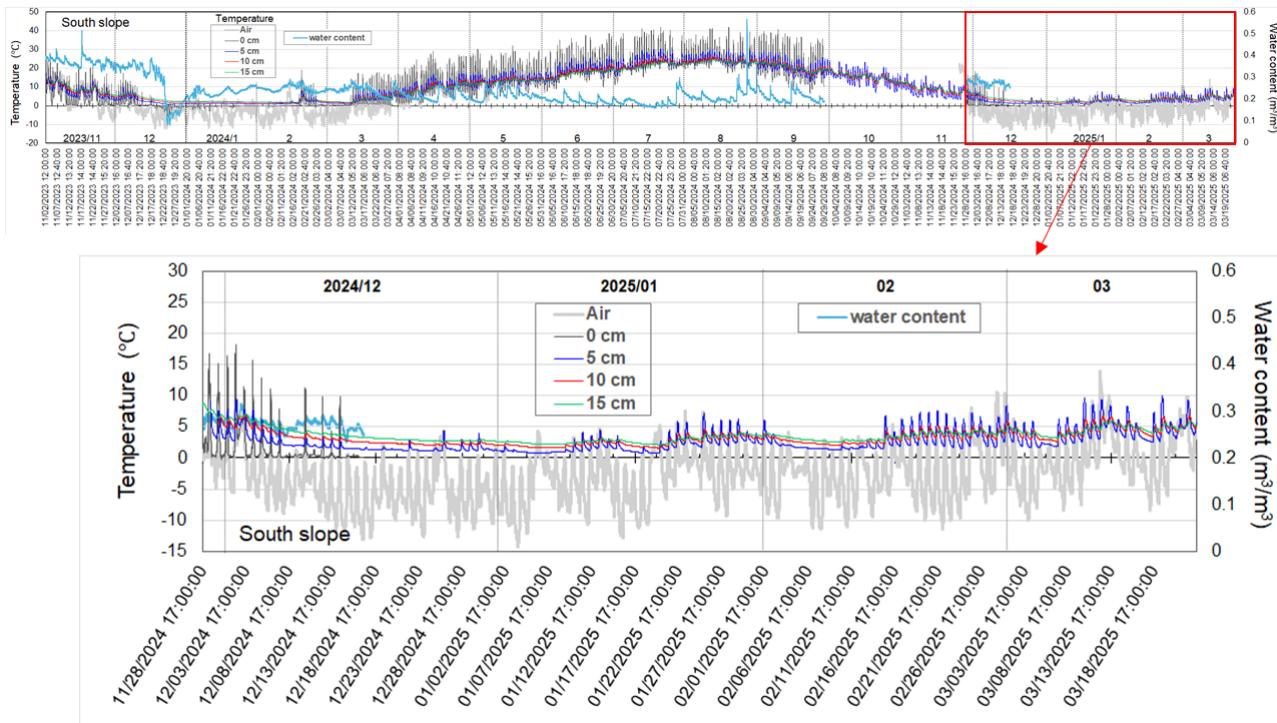


図17 南斜面コドラーの地温と土壤水分

上段：2023/11/02～2025/03/23、下段：2024/11/28～2025/03/23。気温も南斜面での観測。

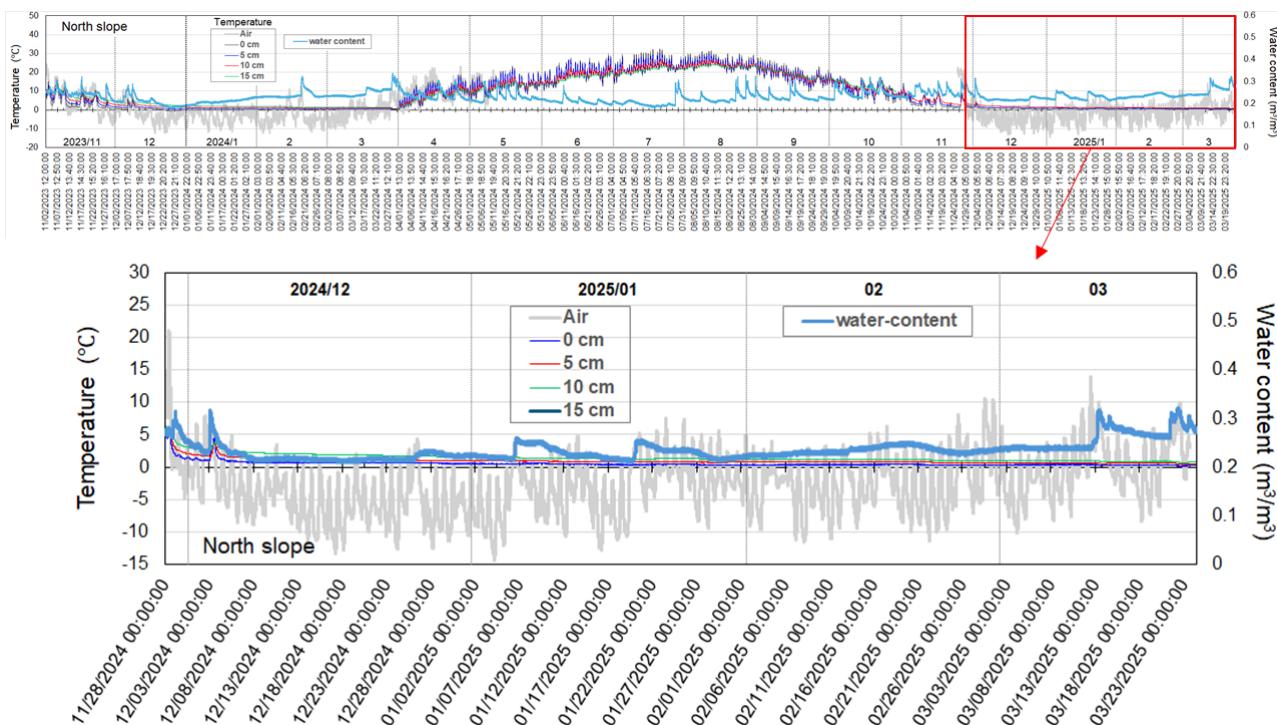


図18 北斜面コドラーの地温と土壤水分

上段：2023/11/02～2025/03/23、下段：2024/11/28～2025/03/23。気温は南斜面での観測。

c) 極端な豪雨イベントでのリル侵食

8月27日の大出水イベントは東和川の流路を変えただけでなく、斜面でも特異な現象を引き起こした。南斜面コドラーの画像を見ると、この極端な豪雨（3時間で101.5 mm）が降った間にコドラーの地表面にはリル（rills）が形成されており、地表流が発生したことを見ている（図19）。この状況が観察されたのは、少なくとも本調査でコドラーを設けてから初めてのことである。恐らくは、1年以内から20年程度に一度の頻度の極端な豪雨時にのみ見られるプロセスであり、こうした極端な豪雨時の地形変化と土砂流出を考える際には重要な観察結果であると思われる。コドラー設置以前の2022年8月にあった日雨量86 mmのイベント（表3、図12）でも同様な斜面プロセスが起きたかもしれない。

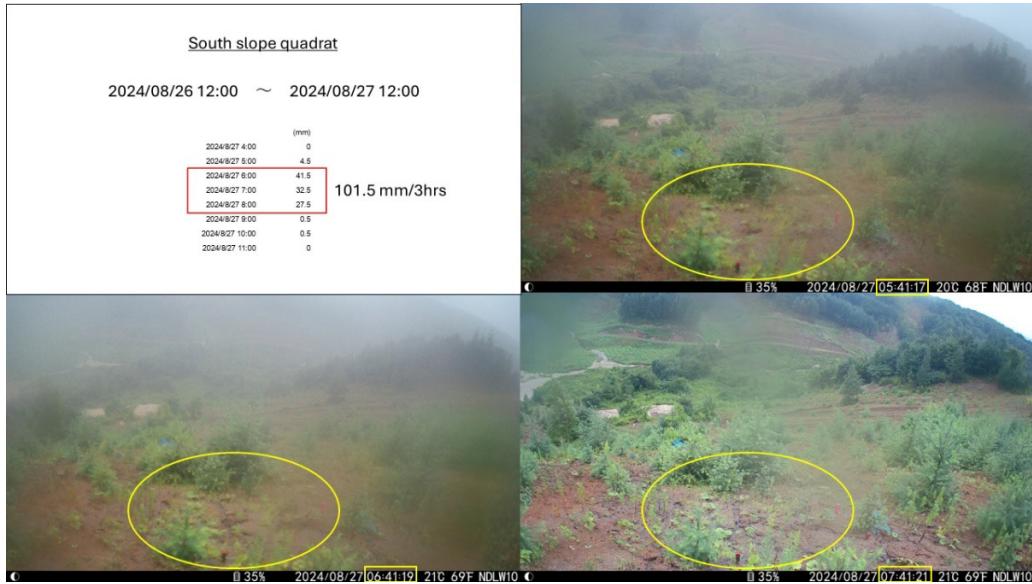


図19 南斜面コドラーにおける豪雨イベントでのリルの形成（2024年8月27日朝）

(4) 斜面ガリー地形での土砂の埋積と流出

ドローン画像を用いてDEMを構築し、南斜面中部に設置した簡易土砂トラップで捕捉する土砂が流出する範囲（小流域）を特定して（図20），補足した流出土砂量から侵食量を計算した（表4）。流出土砂量に関し、9月16日～10月29日の土砂捕捉過程ではトラップ内の水位が徐々に上昇していることが記録されており、水位が上面に達した10/19までは降雨流出に伴う流出土砂の捕捉率は低くないと考えられる（図21）。ガリーからの土砂流出量から見積った侵食量はあくまで下限値を示すに過ぎないが、厚真川流域における数多くの調査事例を見渡しても、現場での流出量観測を基にしたデータとしては数少ない実測値になると思われる。

ドローン画像を用いて構築したDEMの精度は垂直方向に10 cm以上の誤差があるとの解析結果が示され、この精度では時系列のガリー地形変化（埋積と侵食）をドローン画像から作成するDEMで見積もることは難しい。今後の技術的な課題としたい。

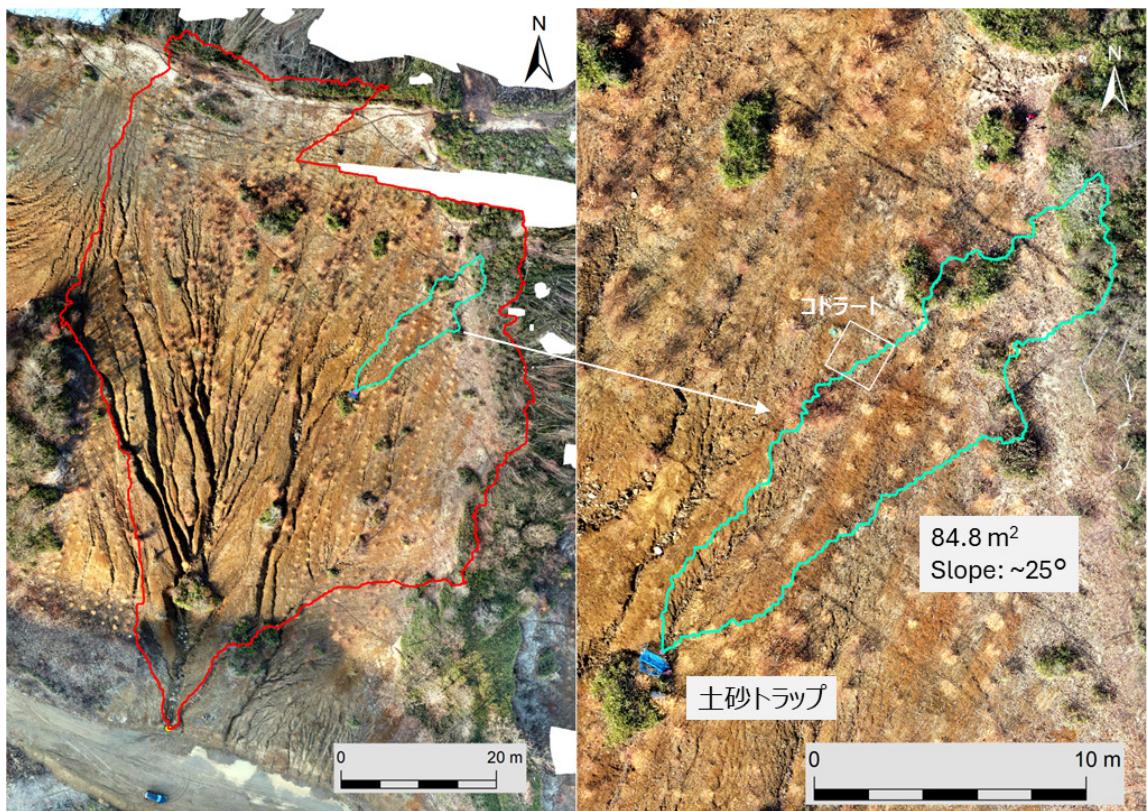


図20 南斜面ガリーに設置した土砂トラップ

表4. 南斜面ガリー土砂トラップで捕捉した土砂量及び流出流域からの侵食量

start	end	period (days)	total rain (mm)	max daily rain (mm)	trapped sediment volume (cm^3)	erosion rate equivalent (mm)	capacity filled
2024/8/21	2024/9/15	26	275	122.5	114500	1.36	100%
2024/9/16	2024/10/29	44	212	75.5	43500	0.51	38%
2024/11/1	2024/11/29	29	62	14.5	39250	0.46	34%

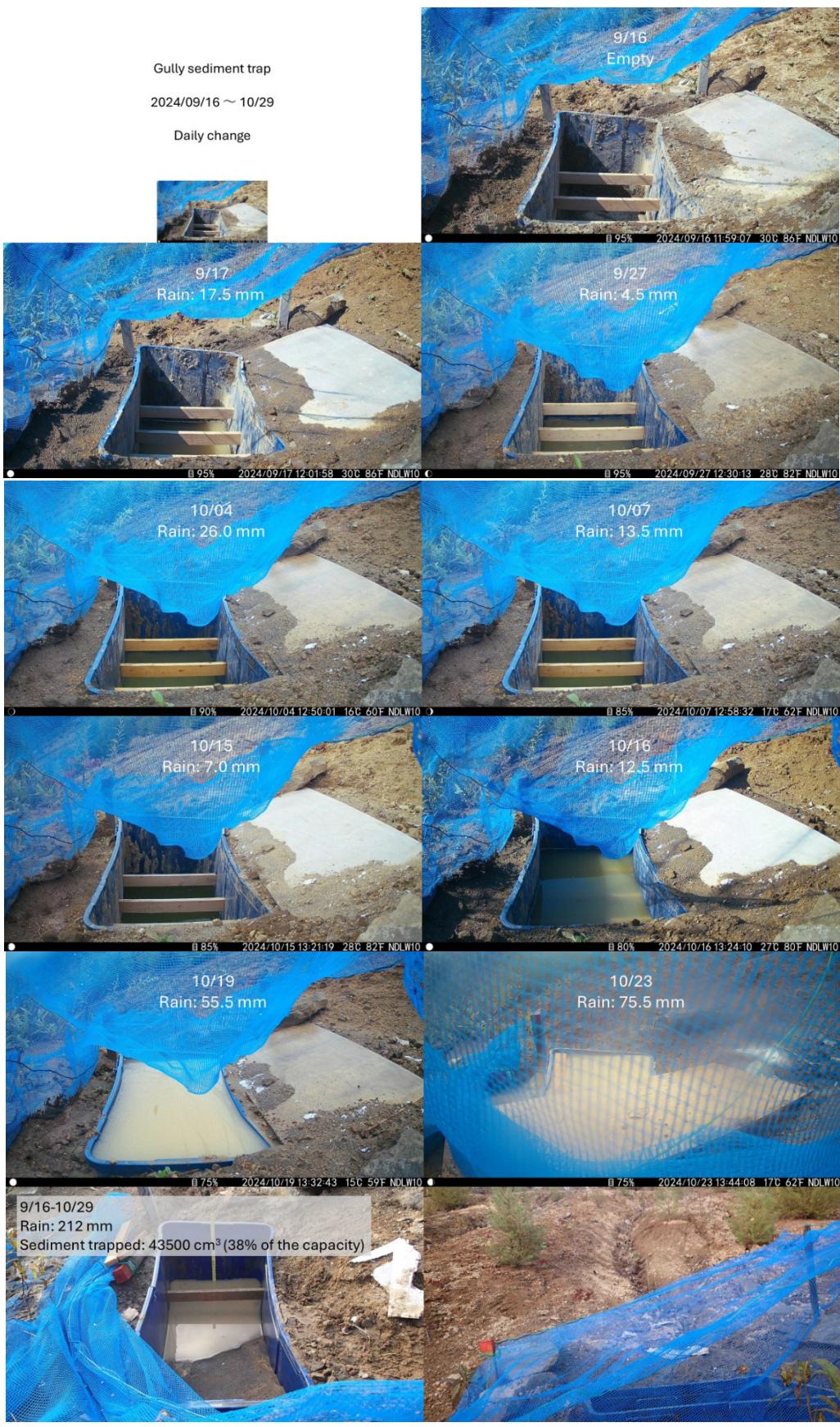


図21 南斜面ガリーに設置した土砂トラップでの土砂捕捉（9/16-10/29）

(5) 東和川流域での裸地化した斜面での地形プロセス

東和川流域の裸地化した斜面では寒冷期のソリフラクションによる面的な土砂移動が卓越しており、その面的な土砂移動が水系に繋がる特異点がガリーである。ソリフラクションによるガリーへの土砂移動、降雨流出によるガリーからの土砂流出（ガリー侵食）という土砂移動上のつながり（connectivity）が、東和川流域の裸地斜面における主要な地形プロセスになっている（図22）。

今回得られた土砂移動・地形変化に関するデータを更に解析し、特にガリーについては追加のデータを得て、土砂流出の定量化へ向けて研究を進めたい。

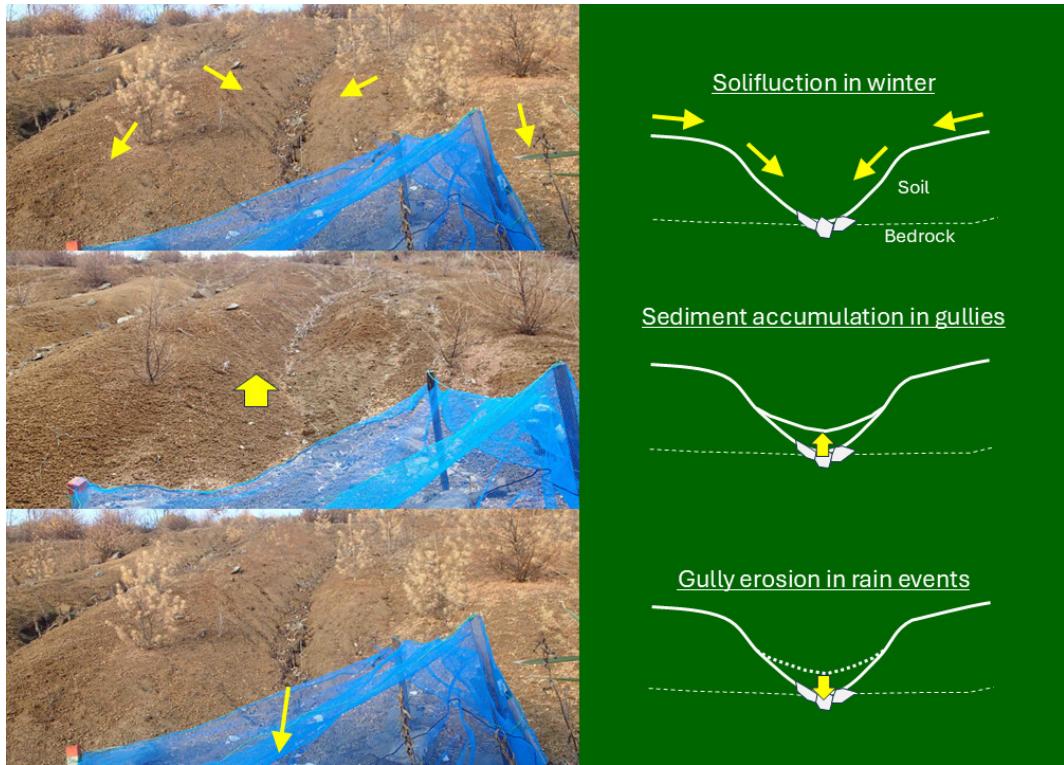


図22 東和川流域の裸地斜面でのソリフラクションとガリー侵食のつながりを示す模式図

(6) 植生変化と植生回復に関する要因分析

a) 航空写真による植生変化と教師付き分類

図23及び図24は前節で述べた固定プロット周辺における植生変化を、航空写真により示したものである。地震直後に撮影された左側の写真には筋状に表層土が滑動した痕跡がみられ、林縁には白いテフラ、すなわちTa-b（1667年噴出）が露出していることが判読された。また崩壊地内には表層土のブロックが複数見られ、そこには樹木も残存していることが確認された。右はそれから5年後に撮影された航空写真である。Plot1のある南斜面とPlot2のある北側斜面での植生の回復状況が大きく異なっていた。2018年に斜面に残存していた植生ブロックはそのまま維持され、さらにその周辺も点状に多くの稚樹群が広がっているのが観察される。これは後述するようにほとんどがカラマツの稚樹群である。

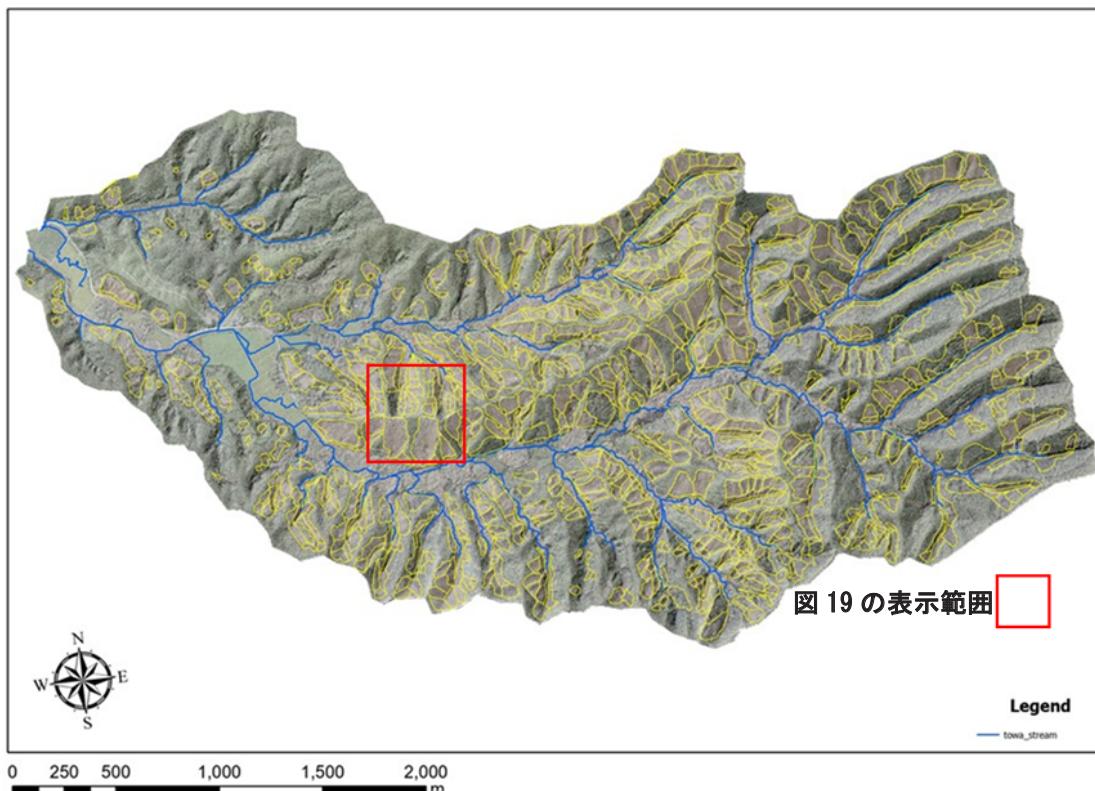


図23 東和川流域の崩壊地分布

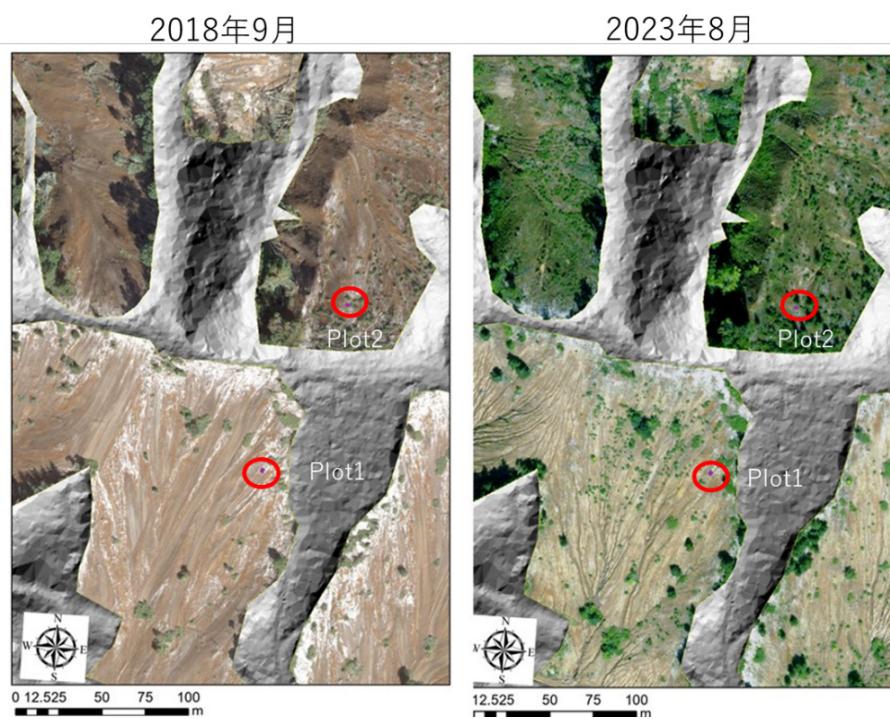


図24 2018年と2023年における植生変化

図25に2時期の航空写真にSVM法を使った教師付き分類により区分した事例を示す。2018年には崩壊地内には周辺の森林から滑動してきた植生ブロックが点状に分布しているのみである。しかし、2023年にはそのブロック周辺に点状の稚樹群が確認され、さらに北側斜面の大部分も黄緑色（草本）に覆われていることが判明し、方位による植生被覆の違いが明確に判読することができた。現地調査においても、

2023年の崩壊地にはオオアワダチソウやアキタブキ、オオハンゴンソウなどを主とする大型草本群落と、カラマツを主とし、バッコヤナギやウダイカンバ、シラカンバを混成する木本群落が発達し、これらは明瞭に判別することができた（図26）。

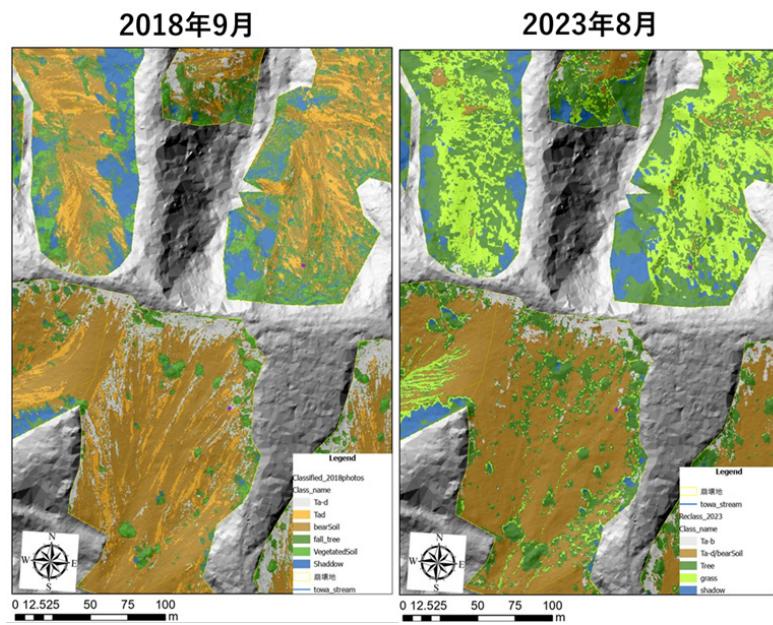


図25 SVMによる教師付き分類結果



図26 現地における植生構造の違い。（左）草本群落、（右）カラマツ群落

b) 環境要因と植生回復率の関係

図27は環境要因である、斜面の傾斜、方位、日射量そして侵食量を調査地周辺で示したものである。調査地域の斜面は20～35度のやや急な斜面に区分されるが、北側斜面で遷急線下部斜面は45度以上の急斜面（濃い青色）となっている。斜面方位については尾根を挟んで方位が大きく異なるが、同じ向きの斜面でも微妙な違いがみられる。その方位によって日射量も異なり、特に南側斜面に日射量が高い（赤色）。また侵食量に関しても南側斜面はガリー地形が線状に発達するが、北側斜面は面的な侵食（青色）が卓越しているように見られる。

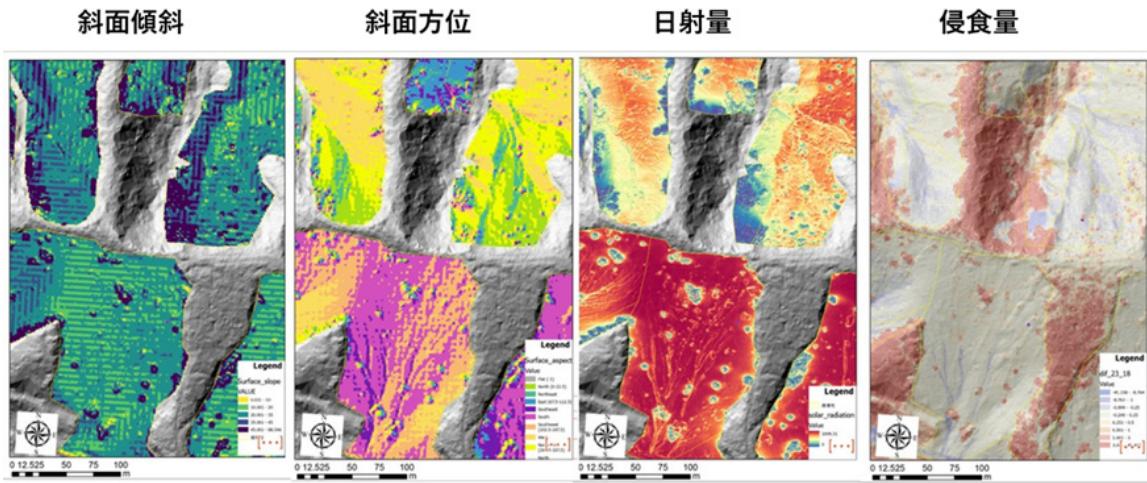


図27 各環境要因のラスター図

環境要因のラスターを崩壊地ポリゴンごとに平均値をとり、環境要因との関係を明らかにするために木本と草本ごとに箱ひげ図を作成した。斜面勾配と傾斜区分ごとの植生回復率大きな違いがみられ、草本の回復率は傾斜が急なほど高く、木本は斜面勾配と違いは見られなかった(図28)。分散解析の結果では、草本において傾斜クラス間で有意な差が認められ ($p < 0.01$)、急斜面よりも中斜面で回復が促進される傾向があった。

図29に示す方位クラス別の分析では、草本は北西から北東向き斜面で高い回復率を示し、南向き斜面では極めて低い傾向が見られた。一方で木本では、南西もしくは南東向きでやや高く西側でやや低く、全体として方位による大きな偏りは認められなかった。しかし分散分析においては草本・木本ともに有意差が確認された(草本 $p < 0.001$ 、木本 $p < 0.01$)。

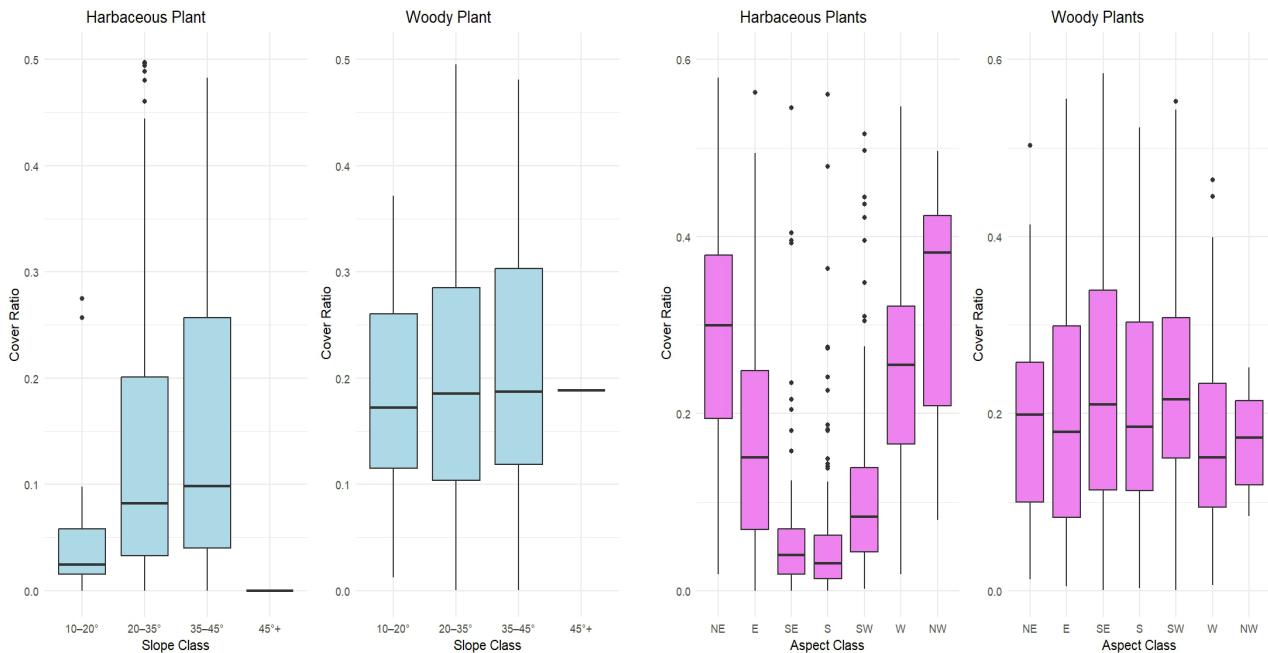


図28 斜面勾配と植生回復率

図29 斜面方位と植生回復率

図30では、日射量クラスごとの回復率の違いを示しており、草本は日射量が低い区分側で大きな増加率を示したが、高い場所では極端に低かった。一方、木本は中程度の日射環境で安定した成長を示しており、極端な日射量ではやや低下する傾向が見られた。図31は、侵食量と植生回復率の関係を示している。草本は侵食量が少ない区域で優勢であり、侵食が進行する区域では定着が困難であることが分かった。一方、木本は侵食量の影響を受けながらも、ある閾値までは回復が可能である傾向が認められた。

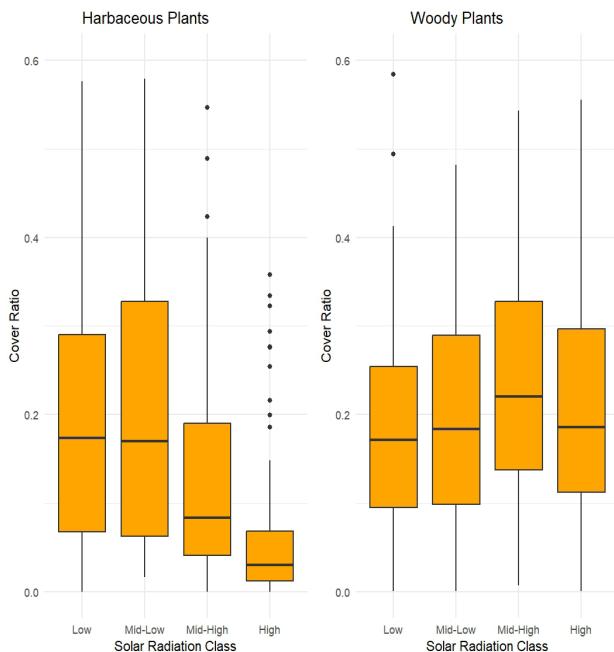


図30 日射量と植生回復率

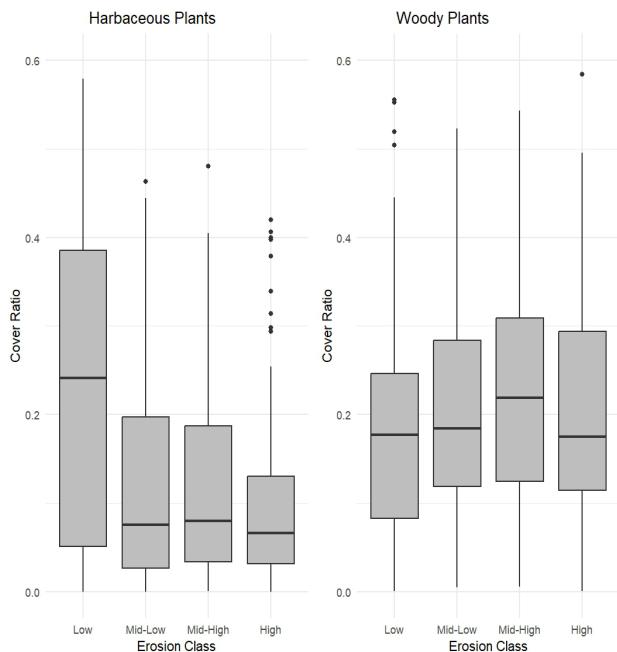


図31 侵食量と植生回復率

また木本群落は図24や図26に示すように、残存植生との関連性が大きかった。つまり残存植生周辺や母樹が倒伏した周辺に多く更新しているのが観察された。そこで2018年の木本植生面積と2023年草本、木本面積の相関をとったところ、2023年の木本植生面積は、2018年の植生ブロック面積と強い正の相関を示し ($R^2 = 0.68, p < 0.01$)、また草本面積との間には弱い負の相関が見られた ($R^2 = 0.13, p > 0.1$; 図32)。これは生物レガシー構造が木本の更新に重要な役割を果たす一方で、草本の侵入とはほとんど影響を及ぼさないことを示している。

環境要因との関係では、傾斜が急なほど木本割合が高く、草本は日射量の小さい北向きの緩傾斜で多く確認された。多重共線性の検討では、aspectとsolar間にやや高い相関が見られたが、VIF値は10未満であり解析上問題ないと判断された。

さらに、lmモデルを用いて2023年の草本および木本の回復率に影響を与える環境要因を検討した結果、草本については日射量および侵食量が有意な説明変数であり ($p < 0.001$)、日射量が高いほど、侵食量が低いほど草本の回復が促進される傾向が確認された。一方、木本においては、傾斜、方位、日射、侵食のすべての要因において有意な傾向が見られたが、その説明力は草本よりも低く、 R^2 は0.05程度にとどまった (表5、表6)。これらの結果は、草本が強く環境条件に制約される一方で、木本はレガシー構造など他の要因の影響を受けやすい可能性を示唆している。

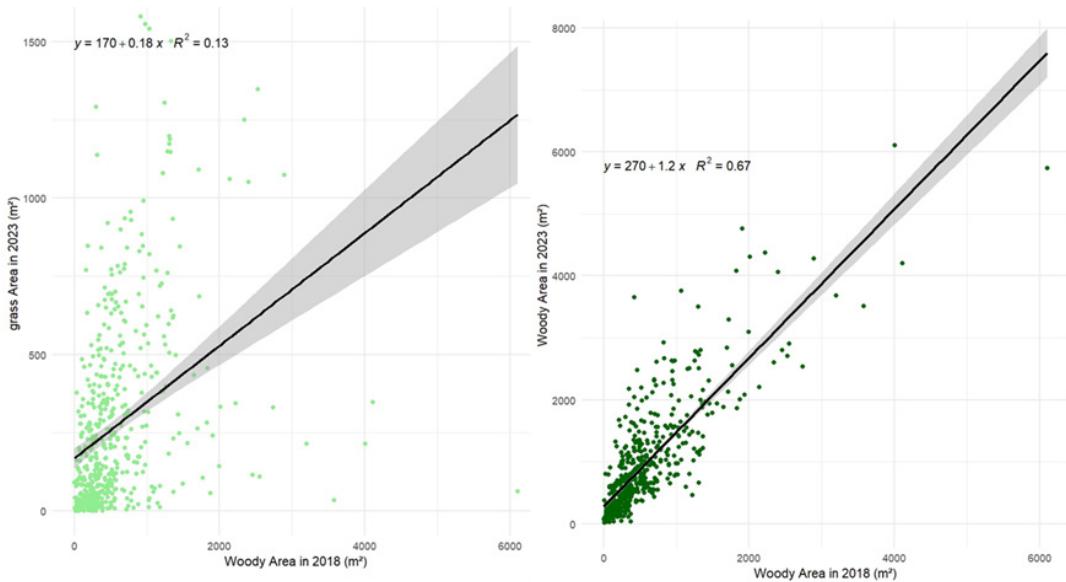


図32 2018年の植生ブロック面積と2023年草本（左）・木本面積（右）の関係

表5 線形回帰モデルによる草本回復率と説明要因の関係

Coeffient	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	5.62E-01	4.68E-02	12.015 < 2e-16	***
slope	5.83E-04	9.53E-04	0.611	0.54117
aspect	2.49E-04	7.68E-05	3.241	0.00127 **
solar	-6.87E-04	4.34E-05	-15.841 < 2e-16	***
erosion	-8.06E-02	5.26E-03	-15.332 < 2e-16	***

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.1208 on 534 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3848, Adjusted R-squared: 0.3802

F-statistic: 83.49 on 4 and 534 DF, p-value: < 2.2e-16

表6 線形回帰モデルによる木本回復率と説明要因の関係

Coefficient	Estimate	Std.	Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.77E-01	6.74E-02	2.624	0.008934 **	
slope	-3.03E-03	1.38E-03	-2.205	0.027895 *	
aspect	-3.28E-04	1.11E-04	-2.957	0.003245 **	
solar	2.14E-04	6.25E-05	3.427	0.000657 ***	
erosion	1.68E-02	7.59E-03	2.218	0.026962 *	

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.1743 on 534 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.04753, Adjusted R-squared: 0.0404

F-statistic: 6.662 on 4 and 534 DF, p-value: 3.088e-05

c) 植生変化と植生回復に関する考察

2018年に崩壊地内に残存した植生ブロックは、2023年における植生回復において「核」として機能し、木本の更新を支える役割を担っていたと考えられる。これは、先行植生の残存が物理的な遮蔽や保湿効果を提供し、実生の生存率を高める「レガシー効果」の典型といえる。

木本回復が比較的傾斜の大きな箇所でも普遍的であったことは、侵食リスクの高い急斜面においても、残存植生や倒木が微地形を保持することで土壤流出や日射を抑え、定着可能な環境を局所的に維持して可能性を示唆している。一方で草本の侵入は、日射や方位といった微環境条件に強く依存しており、レガシーの直接的影響よりも局所環境の制約を受けやすい傾向が示唆された。特に北東～北西向き斜面では、草本被度が高くなる傾向が見られ、方位や周辺植生、そして日射量の多寡が植生タイプの空間的分化を規定している可能性がある。

また、回帰分析によって、草本は侵食量の高い場所では逆に定着しにくく、木本はある程度の侵食に耐えうる構造を持つ点も明らかになった。植生タイプごとにレガシーと環境要因の感受性が異なることは、崩壊地の再生過程における競争・補完関係を示しており、将来的な群集構造や景観の異質性にも影響を与えると考えられる。このように、崩壊地の植生回復は、レガシー構造と環境要因の複合的な相互作用によって規定されることが明らかとなった。他地域の研究との比較においても、本研究の結果と共通する点が多い。たとえば中部山岳地域における豪雨災害後の植生回復では、倒木帯や残存林縁が樹木の定着率を高める傾向が確認されており⁴⁾、レガシー構造が回復速度の地域差を生む要因として注目されている。

さらに、本研究の知見は、一次遷移や搅乱後の生態系回復に関する理論的枠組みにおいても意義を持つ。たとえば、Walker & del Moral⁵⁾、Walker et al.⁶⁾による一次遷移の概念では、レガシー構造が遷移過程の出発点を形成する重要な要素として強調されており、本研究でも2018年時点の木本残存が2023年の植生構成を大きく左右していた。また、Fukami⁷⁾が指摘する歴史依存性 (historical contingency) や優先効果 (priority effects) の観点からは、早期に定着した木本が草本の侵入を空間的に制限する可能性が示唆される。これは本研究における草本と木本の空間的分離傾向とも一致し、空間競争や資源獲得における非対称性を反映していると考えられる。

本研究の知見は、崩壊地における自然植生回復の理解にとどまらず、今後の森林再生・生態系修復の現場への応用にも貢献できる。特に、レガシー構造が木本回復を支える役割を果たすことが明らかとなった点は、能登半島地震のような大規模な崩壊が起こった場所における森林再生方向に大きな示唆を与えるものとなっている。実際に倒木や残存植生を保全・活用するレガシー保持型修復計画がたてられている。復旧作業において伐採跡地や土砂移動域でも既存の木本植生や倒木帯を除去せずに残すことで、微気候や種子源の提供により回復の「核」となることが期待される。また、日射量や傾斜といった環境条件に応じて、草本の自然侵入が見込まれる区域と人工的な導入が必要な区域を区別し、効率的な修復施策のゾーニングに活用することができる。さらに、植生タイプごとの定着感受性の違いに着目し、草本優占型の早期緑化と木本主体の長期的な林分再構成を段階的に進める「時系列的修復戦略」の設計にも貢献できる。残存植生や倒木が更新に果たす役割の詳細については、今後さらに調査を進めて予定である。

d) 植生変化と植生回復に関する結論

教師付き分類と統合的統計解析により、2018年の残存木本植生が2023年の回復に重要な影響を与えていたことが示された。環境要因との関係も定量的に明らかになり、崩壊地における生態系回復プロセスの理解に貢献した。

5. まとめ

2019年以来6年間の土砂流出データからは、斜面崩壊や特別地拵えなどの搅乱によって土砂流出が増大することが実態データとして記録され、また降雨特性による流域の反応（土砂流出量）についても2024年8月の極端な豪雨イベントを通じて得られたデータがより深い理解を可能にした。

裸地斜面での霜柱クリープについても詳細な画像データの解析を進め、土砂移動量としての見積りにつなげていきたいと考えている。また、ガリーでの土砂埋積や土砂流出についてもドローン画像からDEMを構築して地形変化から検討を進める計画である。そして、斜面と水系のカップリングについて考察を進めていきたい。

植生変化と植生回復については、今回の手法を用いて他地域や異なる災害条件下での比較研究を行い、植生回復における共通パターンの抽出や、効果的な修復計画への応用が期待される。

謝辞

森林総合研究所北海道支所寒地環境保全研究グループの溝口康子グループ長には現地調査にご協力頂いた。

参考文献

- 1) 村上泰啓・水垣滋・西原照雅・伊波友生・藤浪武史 (2019). 平成30年北海道胆振東部地震において発生した斜面崩壊の特徴. 河川技術論文集, 25, 645–650.
- 2) 古市剛久・柳井清治・奥野充・五味高志・鳥井真之・小山内信智・檜垣大助・早川智也・水垣滋・村上泰啓・林真一郎 (2020). 東和川流域における表層崩壊と土砂流出. 日本地すべり学会北海道支部・日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会 (編)「地震による斜面災害－2018年9月北海道胆振東部地震による斜面災害」, 北海道大学出版会, 136–141.
- 3) 柳井清治 (1989). 斜面変動の年代解析による土砂害危険地判別に関する研究, 北海道林業試験場研究報告, 27, 49–83.
- 4) 村山祐司・中川一郎 (2019). 崩壊地における植生回復過程とその空間分布特性, 地理学評論, 92 (2), 123–136.
- 5) Walker, L. R. & del Moral, R. (2003). Primary succession and ecosystem rehabilitation. Cambridge University Press.
- 6) Walker, L. R. et al. (2013). The role of biological legacies in forest resilience: linking disturbance to long-term forest development. Forest Ecology and Management, 330, 57–64.
- 7) Fukami, T. (2015). Historical contingency in community assembly: integrating niches, species pools, and priority effects. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 46, 1–23.