

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 〇平田 智道 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 村上 泰啓 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 水垣 滋

厚真川流域周辺では2018年9月の胆振東部地震により7,000か所以上の斜面崩壊が発生した。 表層崩壊によって裸地化した斜面では侵食作用に伴う土砂流出の長期化が懸念されており、斜 面の土砂生産実態のモニタリングが重要である。本研究では東和川の崩壊裸地斜面でGNSS測 量及びUAV-SfMにより地形モデルを作成し、地震直後のLP測量データとの標高差分解析により、 地震後3年間の斜面侵食量の推定を試みた。

キーワード:土砂動態、UAV-SfM、斜面崩壊、北海道胆振東部地震

1. はじめに

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震では、厚 真川流域を中心に大規模な斜面崩壊が生じた。一般的に 崩壊発生後は、大規模な土砂生産が生じ、長期間に及ぶ 土砂流出が発生することが報告されている¹。崩壊裸地 斜面では降雨に伴って表面流が発生し、土砂が運搬され ることが確認されているほか、冬期の融雪や積雪のグラ イドによってガリー侵食や面的侵食が生じ、下流へ土砂 が流出することが報告されている²³。厚真川水系東和川 流域における流砂水文観測結果によると⁴⁵、震災から1 ~2年後も出水時に高濃度の濁水の発生が観測されてい ることから、今後も山地からの土砂流出や濁水の影響の 長期化が懸念される。

これまで地震に伴う土砂動態に関しては、主に地震時 の崩壊そのものと、斜面下に堆積した土砂の再移動に注 目されており、崩壊により露出した裸地斜面の土砂動態 に関する知見は少ないのが現状である³。崩壊裸地斜面 では時間とともに表層土壌が安定化し、徐々に植生が回 復する場合がある。植生の存在は、地表面粗度を増加さ せ、浸透能が改善することで、表面侵食を抑制する効果 がある⁹。崩壊跡地の植生回復過程は斜面の地形・地質、 および気候条件の影響を受けるため⁷、植生回復によっ て表面侵食が抑制されるかは、個々の斜面の条件によっ て異なると考えられる。したがって、崩壊裸地斜面にお ける土砂動態の推移や植生の変遷をモニタリングするこ とが、今後の長期的な土砂流出や濁水の影響を予測する うえで重要な情報となる。そこで、2018年から2021年ま での崩壊裸地斜面における地震後3年間の土砂動態を把 握することを目的とし、2018年及び2021年の測量データ を用いた標高差分解析によって地形変化量から斜面侵食 量を推定することを試みた。2021年の測量データには、 地震後のガリー侵食等による数十cmの地形変化を把握 できる高精細なデータが必要となる。そこで、測量デー タを取得するため、近年急速に発展・普及している無人 航空機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)と、物体の3次 元モデルを作成する画像処理技術(Structure from Motion: SfM)を組み合わせたUAV-SfM解析による高精細 な3次元地形モデルの作成を行った。まず、本報では崩 壊裸地斜面の土砂動態を適切に把握するために、UAV-SfM解析で作成した2021年の3次元地形モデルの精度検証 を行った。そのうえで、2021年測量データと2018年に実 施されたLP測量データを用いた2時期の標高差分解析に よって崩壊裸地斜面の斜面侵食量を推定した。

2. 方法

(1)研究対象地

研究対象地は厚真川水系東和川流域に位置する崩壊裸 地斜面(42.73°N,141.93°E)である(図-1)。東和川流域 では地震により流域面積の35.6%で斜面崩壊が発生し、 谷底平野に膨大な土砂が堆積した²。図-1に示す崩壊直 後(2018年9月16日)と3年後(2021年6月11日)の斜面の様子 から、地震直後(2018年9月16日)と現在(2021年6月11 日)の崩壊裸地斜面の状況を比較すると、現在の斜面で は地震直後には無かったガリーの発達が見られ、約 50cm~1mの侵食が生じていることが分かる。この地域 の崩壊裸地斜面は降雨・融雪や積雪のグライドの影響を



図-1 厚真川水系東和川流域における崩壊裸地斜面 (背景地図は Arc GIS proの地形図を使用)



図-2 GNSS 測量箇所と Slope A 及び Slope B (背景地 図は UAV 画像から作成したオルソ画像)

受けて、地震後も土砂流出源になっていると推測される。 なお、UAV-SfM解析の対象斜面は図-2に示すSlope Aと Slope Bとした。Slope Aは平均勾配28.7°、面積は約7,900 m² で斜面中央に窪みのある谷型の形状を有す。一方、 Slope Bは平均勾配24.1°、面積は約10,300 m²で比較的起伏 は少ない平滑な斜面形状であった。なお、斜面方位につ いては、Slope AとSlope Bはどちらも南向きである。地形 的特徴の異なる2斜面を対象に標高差分解析結果を整理 し、斜面侵食特性との関係を検討した。

(2) 現地調査

UAVによる崩壊裸地斜面の撮影を2021年10月8日10:00



写真-1 Autel EVO II pro6K



写真-2 CLAS 方式による GNSS 測量

~14:30に数回実施した。撮影日の気象条件は風速0.7 m/s、 気温24℃の晴天日であった。撮影データを確認し、風に よる機体の揺れが無く、ガリ内部が影になっていない撮 影時のデータを解析に使用した。使用機体はAutel EVO II pro6K (Autel Robotics, 米国)である(写真-1)。本機体は電 子シャッター式の光学カメラを搭載した画像・動画撮影 を行うUAV機体である。撮影はオーバーラップ率80%、 サイドラップ率80%、高度120 mの自律飛行撮影によっ て行い、計91枚の撮影データを取得した。

SfM解析では3次元地形モデルに位置情報を付加する ために、地上基準点(Ground Control Point:GCP)を設け る必要がある。図-2のように斜面上部2か所と斜面下部 の3か所にGCPを設定し、UAV空撮画像からGCP地点を 検出できるように各GCPには対空標識を設置した。さら に、撮影データとGCPの位置情報から構築した3次元地 形モデルの推定値と同一地点における実測値を比較する ために、精度検証点(Check Point:CP)を図-2に示す3か 所に配置した。

GCPとCPの座標値(x, y, z)を取得するために、2021 年11月1日に各地点でGNSS測量を行った。GNSS受信機 はChronosphere-L6 II(株式会社コア、日本)を使用し、 測位方式はCLAS方式(Centimeter Level Augmentation Service) を使用した(写真-2)。CLAS方式では準天頂衛星シス テムみちびき(QZSS)の発信するL6信号をGNSS受信機 で直接受信することで、電波の届きにくい山間地でも受 信機1台で運用できる測位方式である。CLAS方式の測位 精度は水平座標で1.8 cm、垂直座標で4.2 cm(いずれも二 乗平均平方根(RMS)による精度評価の事例)である⁸。

地震後の崩壊裸地斜面における植生の変遷を把握する ために、タイムラプスカメラを設置し、2018年12月から 2021年12月まで継続して植生モニタリングを実施してい る。タイムラプスカメラの設置地点はUAV-SfM解析の 対象斜面の東側に隣接する斜面稜線部付近である。2018 年・2019年・2020年・2021年の各年の撮影画像を整理・ 比較し、斜面崩壊後の植生変遷について検討した。

(3) 数值地形解析

2021年の測量データを取得するため、UAVの撮影デー タとGNSS測量値を用いて、SfM解析を行った。使用し たSfM解析ソフトウェアはAgisoft Metashape Professional 1.7.2 である。ソフトウェアの一般的な使用方法に従い、写真 のアライメント(画像間の特徴点を抽出し、写真撮影位 置を推定する処理)を行い、GCPの座標値を付加した。 通常、写真測量では撮影レンズの歪みの影響で、作成し た3次元地形モデルには推定誤差が含まれるため、レン ズの自動キャリブレーション機能によって、カメラパラ メーターを調整し、レンズの歪みを補正した。

3次元地形モデルの精度検証は平均二乗誤差平均 (Root Mean Square Error: RMSE)を用いた。GCPとCPの 各地点のモデルによる推定値とGNSS測量値からRMSE を算出し、モデルの再現性を確認した。次に3次元地形 モデルに基づき、オルソ画像と数値表層モデル(Degital Surface Model: DSM)を作成した(以下、2021年DSM)。 植生箇所はSfM解析ソフトウェアのオブジェクト分類に よって除去し、除去しきれない植生は目視判別できる箇 所のみ植生除去を行った。

2018年の地震直後の測量データには、2018年9月に北 海道開発局で実施された厚真川流域のLP測量成果から 作成した0.5 m/pixelの数値標高モデル(Degital Elevation Model: DEM)を利用し(以下、2018年DEM)、2021年 DSMとの標高差分解析を行った。地形変化量(m)は、 2021年DSMから2018年DEMを差し引くことで算出した。

Slope A及びSlope Bの斜面侵食特性を比較するため、 Slope A及びSlope Bの単位面積当たりの年間の侵食土砂量 を算出した。侵食土砂量 (m³/km²/year) は標高差分値がマ イナスとなったセルの積算値にセルサイズを乗じて求め た。また、2021年DSMの空間解像度が4.46 cm/pixelであっ たため、標高差分解析と侵食土砂量の算出では、セルサ イズを4.46cmに統一した。





図-4 UAV-SfMにより作成した 2021 年 DSM

(1) UAV-SfMによる3次元地形モデルの精度検証

UAV-SfMによって作成した3次元地形モデルの精度検 証のため、GCPとCPのモデル推定値とGNSS測量値から、 それぞれのRMSE値を計算した結果を図-3に示す。GCP のRMSE値は水平座標で0.5 cm、鉛直座標で0.3 cmであり、 3次元座標では0.6 cmとなった。CPのRMSE値を見ると、 水平座標で4.2 cm、鉛直座標で4.5 cm、3次元座標では6.1 cmとなった。各CP間でRMSEにはバラつきがあるが、い ずれの地点でもRMSEは10 cm未満であった。本結果から、 UAV-SfM解析による3次元地形モデルの地形面は誤差 10cm程度の精度を持つとみなせる。

次に、3次元地形モデルからDSMを作成し、斜面侵食

3. 結果

箇所のモデルの再現結果を確認した(図4)。既往研究 ³によると、太陽高度の影響によってガリー内部には影 が生じ、SfMによる3次元点群データが欠損することが 課題として指摘されている。一方で、本結果を見ると、 ガリー内部が明瞭に撮影できたデータを使用したため、 深いガリー侵食が生じている箇所の点群もほとんど欠損 は無かった。よって、作成した2021年DSMを2018年DEM と差分処理を行っても、ガリー内部の侵食量も把握可能 であると判断した。

(2) 地震後3年間の地形変化の特徴

2018年 DEM と 2021 年 DSM の標高差分解析によって、 地震後 3 年間の地形変化量を求め、斜面侵食状況を調べ た(図-5)。Slope A では、斜面下部の中心部に深さ 1.0 m ~1.4 m のガリーが見られ、、ガリー幅は最大で 2.4 m~ 2.8 m と推定された。斜面中央部東側では広範囲に深さ 0.2 m~0.4 m ほどの面的侵食が生じ、斜面中央部〜斜面 上部には、深さ 0.3 m~0.4 m、幅が約 0.3 m~0.4 mの細い ガリーが複数形成されていた。また、これらのガリーが 水みちに沿って一か所に合流し、斜面中心部の深さ 1m 前後の深いガリーを形成していることが把握できた。

次に、Slope Bの差分解析結果を見ると、斜面下部のガ



図-5 2時期の標高差分解析結果

リーが形成された部分は、深さ0.85m~0.95mほどの地形 変化が見られ、ガリー幅は約2.0m~2.2mであった。ま た、斜面の中央部〜斜面上部ではガリーの深さは0.5m 前後であり、幅が約0.4m~0.6mの比較的細いガリーが4 ~5本程度確認できた。Slope Aと比較すると、Slope Bは 斜面中心部で大きなガリーが発達するといった顕著な地 形変化は見られなかった。

図-5を見ると、侵食(マイナス)方向の地形変化だけ でなく、+10 cm~+20cmほどの堆積(プラス)方向の地 形変化が全体的に見られた。プラス方向の箇所の一部 は、UAV撮影データから作成したオルソ画像で確認す ると、植生箇所の周辺との対応が認められる。一方で、 植生が確認できない箇所においてもプラスの地形変化 が生じる箇所も多く存在し、植生以外の影響を受け、 プラス方向の変化が生じる結果となった。



図-6 2018年12月-2021年12月の植生変遷

HIRATA Tomomichi, MURAKAMI Yasuhiro, MIZUGAKI Shigeru

(3) 斜面別の侵食土砂量の推定

Slope AとSlope Bの単位面積当たりの年間侵食土砂量 (m³/km²/year)を算出し、比較検討した。標高差分値がマ イナスとなったセルの積算値にセルサイズ4.46cmを乗じ て侵食土砂量を算出すると、Slope Aが24,801 m³/km²/year、 Slope Bが6,171 m³/km²/yearと推定された。個々の斜面の侵 食土砂量を比較すると、Slope Bの侵食土砂量はSlope Aよ り少なく、Slope Aの約25%であった。

(4) 斜面崩壊後の植生変遷状況

崩壊裸地斜面の植生変遷の状況をタイムラプスカメラ で撮影した結果を図-6に示す。これらは、2018年~2021 年の各年における12月の撮影データを抽出したものであ る。2018年12月の撮影データを見ると、斜面崩壊で残存 した植生が数箇所に確認できる。2018年12月と2019年12 月の撮影データを比較すると、1年間で画像から判別で きるような明確な植生変化は見られなかった。同様に 2020年12月と2021年12月の撮影データについても、残存 する植生の草丈は多少成長しているようにも見えるが、 残存植生の面積の拡大や新たな植生の定着といった明確 な植生回復の様子は確認されなかった。

4. 考察

(1) LP 測量データの誤差が差分解析に与える影響

図-5を見ると、Slope A及びSlope Bの多くの箇所で10 cm ~20 cm程度のプラス方向の変化が見られる結果となった。この原因として、LP測量データに含まれる測量誤差の影響により2時期の標高値の差分をとると、斜面全体が上昇あるいは下降しているような結果が生じる可能性が指摘されている⁹。本結果でも同様の現象が生じているため、図-5の地形変化量はLP測量データの10 cm~20cm程度の誤差を含んでいる可能性が高い。しかし、LP測量の誤差の問題を踏まえても、数十 cm程度の表面侵食による地形変化であれば把握可能であると考え、以下では崩壊裸地斜面の侵食土砂量について議論した。

(2) 地形的特徴の異なる斜面の侵食土砂量の比較

Slope A と Slope B の侵食土砂量は 24,801 m³/km²/year、 6,171 m³/km²/year と算出された。さらに、北海道胆振東部 地震による崩壊裸地斜面で土砂動態解析を行った既往研 究³の解析結果からも同様に侵食土砂量を算出し、本結 果と比較した。

既往研究の対象地は厚真町高丘地区にある南向きの崩 壊裸地斜面である。また Slope A 及び Slope B も南向き斜 面であるため、斜面方位による気象条件の違いはほとん ど無いと判断した。既往研究の崩壊裸地斜面は面積約 3,500m²、平均傾斜角は 33°~44°であるため、Slope A 及び Slope B よりも崩壊面積は小さく、斜面傾斜角は大きかった。また、平滑な地形形状を有しており、谷型の地形形状の Slope A とは異なり、Slope B とは類似した形状である。既往研究は 2018 年 9 月~2020 年 10 月の約 2 年間を解析期間とし、数ヶ月おきに UAV-SfM 測量データの差分解析を行い、時期別の侵食土砂量を算出している。既往研究は解析期間や数ヶ月ごとの差分解析を行っている点で、本報とは侵食土砂量の算出条件は少し異なるが、斜面侵食特性を検討可能なデータを増やすために、算出を行った。既往研究の時期別の侵食土砂量を積算すると 2 年間で侵食土砂量は 328m³となり、これを換算すると 47,000 m³/km²/year と推定された。

既往研究の侵食土砂量は Slope A とオーダーは同じで あるが、Slope A の侵食土砂量の約 1.9 倍の量であった。 一方、Slope B と比較すると、既往研究の侵食土砂量は Slope B の 7.6 倍とかなり大きかった。侵食土砂量の大小 関係は大きい順に、既往研究>Slope A>Slope B の順であ った。侵食土砂量に影響を及ぼす要因を検討したところ、 斜面傾斜角の大小関係についても既往研究>Slope A>Slope B の順であり、斜面傾斜角と侵食土砂量に対応 が認められた。したがって、斜面傾斜角の大きさが侵食 土砂量を規定する要因の一つと考えられる。

さらに、Slope A と Slope B の侵食土砂量の違いに関し ては、斜面形状も影響している可能性がある。図-5 を見 ると、Slope A では水みちに沿って複数のリル・ガリー が合流し、谷底で大規模なガリーを形成している。一方、 Slope B は平滑な斜面形状であるため、Slope A のような 大きなガリーは形成されなかった。斜面形状は斜面の集 水条件に影響を与え、ガリーの形成過程を規定している と考えられる。これらの地形的要因と侵食土砂量の対応 関係から、崩壊裸地斜面の土砂動態には地形的特徴が大 きく関係しており、崩壊斜面からの土砂流出を明らかに するうえで、地形的特性を踏まえた侵食土砂量の分析が 必要であると言えよう。

(3) 植生回復と土砂流出の関係

崩壊裸地斜面の植生変遷状況をタイムラプスカメラで 撮影し、各年の撮影データを比較したところ(図-6)、 地震後3年間では明確な植生の変化は見られなかった。 崩壊跡地では侵食作用の影響で、植物の生育基盤となる 表層土壌の安定性が低く、植生回復には数十年を要する 事例も報告されていることから¹⁰、3年間では明確な植 生変化を捉えられなかったと推測される。厚真川流域に おける汎用土壌流亡予測式(USLE式)によるシミュレ ーションでは、地震に伴う崩壊裸地の出現により、地震 前後で土砂侵食率(tyear)が14.5倍に増大する可能性が指 摘されている¹¹⁾。したがって、崩壊裸地斜面に植生回復 が見られなかったことは、現在も生砂侵食率は高止まり しており、大雨による出水等の際に大量の土砂流出が生 じること可能性を示唆している。植生回復がどの程度の 時空間スケールで進行し、さらに土砂流出の抑制に寄与 するのかを検討するためにも、今後も植生のモニタリン グを継続する必要がある。

5. まとめ

本報では厚真川水系東和川流域の崩壊裸地斜面で GNSS測量及びUAV-SfM解析によって3次元地形モデルを 作成し、2018年9月のLP測量データとの標高差分解析に よって、地震後3年間の斜面侵食量の推定を試みた。

その結果、UAV-SfM解析によって作成した3次元地形 モデルは誤差10cm未満で地形を再現しており、土砂動 態の把握に有用であることが示された。差分解析結果か ら算出した斜面別の侵食土砂量はSlope Aが24,801 m³km²/year、Slope Bが6,171 m³km²/yearであり、斜面傾斜 角や斜面形状が侵食土砂量に影響を及ぼすと考えられた。 また、タイムラプスカメラによるモニタリング結果では、 地震後3年間で斜面の植生変遷状況に変化は見られなか った。

UAV-SfM解析による土砂動態の把握は従来利用され てきたLP測量や地上レーザー測量と比べ、低コストで3 次元地形データを取得でき、解析方法も比較的容易であ ることが利点である。また、本報で使用した準天頂衛星 システムみちびき(QZSS)によるCLAS方式のGNSS測 量のように、山間地でも運用可能な利便性の高い測量技 術も発展し、崩壊裸地斜面におけるUAV-SfM解析の有 用性はより一層高まると考えられる。したがって、 UAV-SfM解析が様々な斜面崩壊地の現場で適用され、 データの蓄積が進むことで、長期的な土砂動態の推移や 植生回復に伴う侵食作用の変化が解明されることが期待 される。

謝辞:現地調査において当研究所の星野剛氏にご協力 いただきました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 内田太郎,丹羽諭,蒲原潤一(2014):大規模土砂生 産後の土砂流出,土木技術資料, Vol.55, No.10, pp. 24-27.
- 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,No.25, pp.645-650.
- 3) 輿水健一,石丸聡,川上源太郎,中田康隆,高見雅三, ト部厚志(2021):地震による崩壊裸地斜面の降雨, 融雪に伴う土砂動態:高頻度UAV-SfM測量による検 討,砂防学会誌, Vol.74, No.3, pp.26-3.
- 4)水垣滋,村上泰啓,藤浪武史(2020):北海道胆振東 部地震後の厚真川からの浮遊土砂流出,北海道開発技 術研究発表会論文,pp.436-441.
- 5) 水垣滋,村上泰啓,藤浪武史(2021):厚真川流域に おける北海道胆振東部地震後の濁度計観測,北海道開 発技術研究発表会論文,pp.286-291.
- 6) 北原曜(2002): 植生の表面侵食防止機能,砂防学会 誌, Vol.54 (5).pp.92-101.
- 7) 石垣逸朗(2005):北海道八雲地域における表層崩壊の発生と植生回復の特徴,日本緑化工学会誌,Vol.30 (3).pp.572-581.
- 8) コアグループ Cohac∞ Chronosphere-L6IIみちびき対応 cm 精度測位受信機 URL:https://www.core.co.jp/service/gnss/chr onosphere-l62. (2021年1月5日閲覧)
- 9) 平川泰之(2006) : 航空レーザ測量による地形変化把 握のための標高差分値の最適化,砂防学会誌, Vol.58, No.6, pp18-22.
- 10) 寺本行芳, 下川 悦郎, 全槿雨, 金錫宇, 江崎次夫, 松本淳一, 土居幹治(2016): 堆積岩斜面の表層崩壊 跡地における木本植生および表層土の回復, 日本緑化 工学会誌, Vol.42(1): pp.141-144.
- 宮崎功太郎,星野剛,山田朋人(2021):2018年北 海道胆振東部地震に伴い発生した大規模崩壊斜面にお ける土砂侵食率の定量的評価,水文・水資源学会研究 発表会要旨集,Vol.34.