

新潟大学災害・復興科学研究所  
共同研究報告書

マルチセンサ高精度無人航空機を用いた大規模崩壊地における  
土砂生産プロセスの定量的評価：多層的3次元データの活用

研究代表者氏名 早川 裕弼<sup>1)</sup>  
研究分担者氏名 今泉 文寿<sup>2)</sup>  
研究分担者氏名 西井 稜子<sup>3)</sup>

1) 北海道大学地球環境科学研究院 2) 静岡大学農学部 3) 新潟大学災害・復興科学研究所

研究要旨

大規模崩壊地で卓越する土砂生産プロセスを明らかにするために、南アルプス早川流域に位置する七面山崩れ ( $3.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ ) を対象に、マルチセンサ高精度無人航空機を用いて、計3回の計測を実施した。その結果、レーザ測距 (Lidar)、熱赤外 (TIR)、マルチスペクトル (MS) といった異なるセンサデータを組み合わせることにより、従来の可視画像による SfM 写真測量だけでは得られない、より詳細で多次元的な地表面空間情報を観測することができた。とくに、Lidar 計測では、滑落崖における岩盤侵食 (崩壊) や谷底における崖錐や崩落物の堆積・侵食などの変化が明らかになった。また、TIR 計測から、大規模崩壊地では、冬季地表面温度の日変化が斜面方位等によって大きく異なることが面的に明らかになった。今後、現地観測データと対比を行い、詳細な土砂生産プロセスを検討していく。

A. 研究目的

土砂物質循環の出発点である山地斜面からの土砂生産量 (土砂供給量) の増減は、下流域での洪水頻度や河川構造物の維持管理、水資源の利用などに多大な影響を及ぼすため、流域内の上流から下流への土砂コネクティビティの観点からも、流域全体の治水を考える上でその実態を把握することは重要である (Wohl et al. 2019; Faisal and Hayakawa, 2022, 2023, 2024)。とくに、湿潤変動帯に位置する日本列島では、世界的にも山地斜面の削剥速度が高いことが、ダムの堆砂観測データや宇宙線生成核種年代測定によって明らかにされている (e.g. Yoshikawa, 1974; Matsushi and Matsuzaki, 2010)。そのような高い削剥速度を維持するための土砂生産プロセスについて、これまで、大起伏山地では低頻度な大規模崩壊の発生による土砂供給の寄与が大きいと考えられてきた。しかし、申請者らの研究 (Nishii et al., 2018; 西井ほか, 2022) によって、南アルプスでは、新規の大規模崩壊の発生時よりも、大規模崩壊地が形成された後の裸地斜面からの継続的な土砂生産が、長

期的には流域の主要な土砂生産を占めることが明らかになってきた。ただし、その具体的なプロセスについては、定量的かつ面的な計測がこれまで充分には行われておらず、実態は明らかになっていない。

そこで、本研究では、マルチセンサ高精度無人航空機を用いて定期的に測量を実施し、大規模崩壊地で卓越する土砂生産プロセスを明らかにすることを目的とした。

B. 研究方法

調査対象は、南アルプス (富士川水系早川流域) の大規模崩壊地「七面山崩れ ( $3.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ )」である。七面山崩れは、複数時期の航空レーザ測量データの地形解析から、数年～十年単位での活発な土砂生産が生じていることが明らかになってお

表1 想定される主な土砂生産プロセス

季節	土砂生産プロセス
夏季 (5-10月)	降雨に関連する地表面侵食、崩壊
冬季 (11-4月)	地盤の凍結破砕作用に伴う侵食

り(西井ほか, 2022), より細かい季節周期の土砂生産プロセスを明らかにする上で, 最適な場所といえる。崩壊斜面は, 標高約 1,350~1,950 m に位置しており, 夏季と冬季では卓越する土砂生産プロセスが異なることが予想される(表 1)。そこで, 夏季(5~10月)と冬季(11~4月)の侵食量を把握するため, レーザ測距(Lidar)センサあるいは RGB 可視・マルチスペクトル(MS)センサを搭載したリアルタイムキネマティック(RTK)補正型無人航空機(UAS)を用いて, 春・夏・秋の計 3 回(2023 年 5 月 14 日, 8 月 13 日, 10 月 14 日)の測量を実施した。また, 2023 年 11 月 26 日, 2024 年 2 月 22 日には UAS 観測を伴わない現地調査を行い, 観測データの収集や機器設置を行った。

調査に使用した主な UAS は DJI 社 Matrice 300 RTK および DJI 社 Mavic 3M, Mavic 3T であり, Matrice 300 には Lidar センサである DJI 社 Zenmuse L1 (重量 930 g, 計測可能距離最大 450 m, 取得可能点数最大 480,000 pts/sec, 測距精度 3 cm @ 100 m, 視野角 70°, 20 MP 可視画像センサ付属)を搭載し Lidar 測量を行った。Lidar 計測時の飛行高度は対地 80~100 m (地形追従)とし, 計測範囲の重複率は飛行経路に対してサイドオーバーラップ 40~50%とした。DJI 社 Mavic 3T は TIR センサであるサーマルカメラ(非冷却 VOx マイクロボロメータ, 解像度 640×512 ピクセル)を搭載する。TIR 計測の設定は飛行高度対地 120 m, サイドオーバーラップ 60%, 前方オーバーラップ 80%とした。DJI 社 Mavic 3M (重量 951 g) は 5 つの CMOS センサ (RGB: 4/3 インチ有効画素数 20 MP, その他 1/2.8 インチ有効画素数 5MP) をもち, それぞれ可視 (RGB), Green (560 nm ± 16 nm), Red (650 nm ± 16 nm), Red edge (730 nm ± 16 nm), Near infrared (860 nm ± 26 nm) の波長域を観測する。RGB/マルチスペクトル観測時の飛行高度は, 取得画像の地上解像度が 8 cm 程度となるよう, 120~150 m と設定した。いずれのセンサも, 搭載された RGB センサによる撮影で同時に可視画像が得られており, 3 次元地形形状とオルソ画像を得るため, これらの RGB 画像は SfM 多視点ステレオ写真測量で処理を行った。

Lidar 計測により得られた色付きの点群データは, DJI Terra ソフトウェアを用いて一次処理を行

ったのち, オンライン処理サービスである ScanX により点群オブジェクトの自動区分を行った上で, CloudCompare や ArcGIS 等のソフトウェアを用いて, 地面を示す DTM (digital terrain model) として出力する。また TIR 画像は R-JPEG 形式で得られるため, 温度情報を示す TIFF 形式に ATygeo Thermal ソフトウェアを用いて変換した上で, Agisoft Metashape を用いて SfM 多視点ステレオ写真測量によりオルソ補正モザイク画像として出力する。RGB/マルチスペクトル画像からは, Agisoft Metashape を用いた SfM 他視点ステレオ写真測量により, 観測した全波長帯の情報を含む TIFF 画像として, オルソ補正モザイク画像を出力した。また, いずれの UAS も RTK 補正された GNSS 測位による機体位置情報から, 撮影画像の位置情報を数 cm の精度で得られる。

UAS による測量・計測調査に加えて, 現地での地上気象観測(降水, 気温, 地温, 積雪)や定点カメラを用いた土砂生産タイミングの把握も 2019 年から継続している。

## C. 研究結果

### 現地の気象状況

2023/24 年の気象データは未回収のため, それ以前の観測結果から現地気象状況を報告する。年平均降水量(2019 年 10 月~2022 年 9 月)は 2,886 mm であり, そのうちの 75%は夏季にもたらされる。積雪ピークは, 例年 2 月であり最大積雪深は 60 cm 前後を記録する。崩壊地縁に設置した地表面温度計の観測結果(2019/20 年)から, 主に 11~4 月の期間に凍結融解が発生することが明らかになっており, 東~南向きの A~C 地点では厳冬期でも日周期の凍結融解が卓越する。一方, 北向きの D 地点では日周期の凍結融解に加えて, 年周期の凍結も顕著に発生する特徴を示す。

### 無人航空機による計測

Lidar および SfM 計測は 2023 年 5 月と 10 月に, MS 計測は 2023 年 5 月, 8 月と 10 月にそれぞれ実施した。しかし, TIR 計測を行おうとした 2024 年 2 月の調査時は, 降雪と霧の悪天候により観測が実施できなかった。

Lidar および SfM 写真測量による地形計測から得た侵食・堆積による地形変化の例を図 1 に示す。位置合わせの誤差の問題が残るものの, 滑落崖に

おける岩盤侵食（崩壊）や、小流域内の斜面上部での崩壊・侵食、斜面下部や谷底における崖錐や崩落物の堆積、北向き斜面における積雪などによる表層の変化が定量的に観察された。崩落した岩屑は、一度に下流まで流下することはあまりなく、崖錐堆積物として崩壊地内斜面に一度定置し、さらに流水の侵食で削られるものが多いといった特徴が観察された。

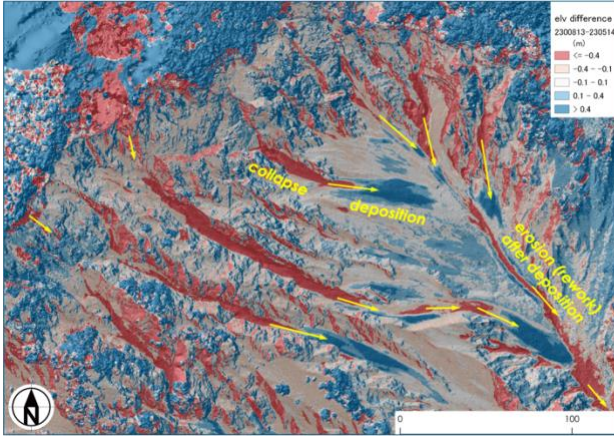


図1 地形計測結果の一部. 2023年5月から2023年8月までの標高の差分で、赤は侵食域、青は堆積域をそれぞれ示す。

TIR 計測による結果を図2, 3に示す。UAS 飛行中の天候の変化（主には雲の移動）により、一時期のものでも温度分布にばらつきが生じるが、それ以上に斜面方向の差異が大きく観察された。南向き斜面では日が上がるに同調し地温も  $10^{\circ}\text{C}$  以上上昇する部分が多く現れる。これにより、北向き斜面では夜間の凍結部が融解しないのに対し、南向き斜面では容易に融解して、活発に凍結融解が生じていると考えられる。

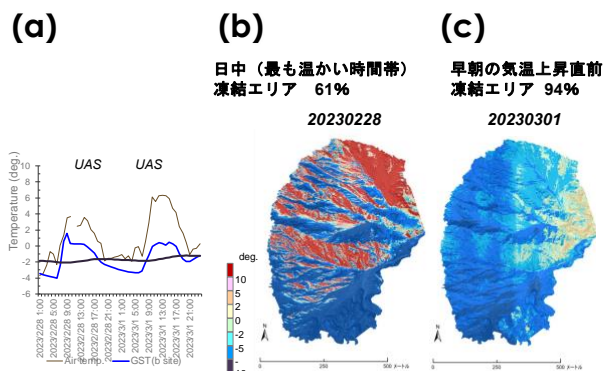


図2 TIR（熱赤外）計測の解析。(a) 定点観測による

る気温・地温の時系列変化と UAS 観測のタイミング。(b) 午後、日射の当たる状態での崩壊地内の温度空間分布 (2023年2月28日 13:30~14:30)。(c) 朝、直射日光の当たらない曇天での崩壊地内の温度空間分布 (2023年3月1日 7:20~8:35)。

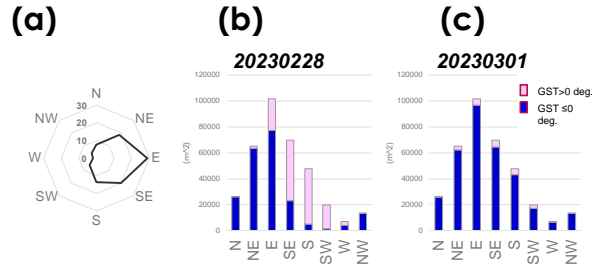


図3 斜面方位と地表面温度の関係。(a) 崩壊地の斜面方位分布。(b) 午後の方角別地表面温度 (GST: ground surface temperature) (2023年2月28日 13:30~14:30)。(c) 朝の方角別地表面温度 (2023年3月1日 7:20~8:35)。

MS 計測により得られたオルソ補正画像から、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 正規化植生指標) や NDRE (Normalized Difference Rededge Index) などの指標を算出し、地表区分に用いる可能性を検討した (図4)。NDVIは植生の分布を明瞭に示すが、加えて、水分状況の異なるであろう露岩や崖錐堆積物の領域においても異なる値を示した。すなわち、可視領域である RGB に加えて、近赤外領域の反射値を加味することで、崩壊地内のより精細な地表区分が可能になると考えられる。



図4 MS (マルチスペクトル) 計測結果から算出した崩壊地内における NDVI (正規化植生指標) の例

(2023年8月13日).

#### D. 考察

本研究により、無積雪期だけでなく、積雪・融雪期の無人航空機による面的なマルチセンサデータが七面山崩れの大規模崩壊地において初めて取得された。Lidar, TIR, MSといった異なるセンサデータを組み合わせることにより、従来の可視画像による SfM 写真測量だけでは得られない、より詳細で多次元的な地表面空間情報を観測することができた。

Lidar 計測では、植生被覆下の領域も含めた地表面変動を把握することができた。これは、植生被覆の上面のみを取得する従来の可視画像による SfM 写真測量では、評価が困難だったものである。とくに滑落崖縁辺部における線状凹地の分布が細かに明らかとなり、これらの時系列的な変化について注視することで、滑落崖の崩壊危険度を評価できる可能性がある。一方、急傾斜地における地表面抽出は Lidar による点群データであっても容易でなく、とくに低木などと急傾斜な尾根部との区別が自動分類では適切に行えない状況であった。そのため、点群の区分アルゴリズムの改善や手動による調整が必要である。

TIR 計測では、日射による温度上昇が南向き斜面で顕著であることが明らかとなった。一方、北向き斜面では一日を通して寒冷な環境が保持されることも明瞭に示された。こうした差異は、凍結融解作用の発生頻度や凍結深に強く影響すると考えられ、温度上昇率などの空間分布も詳細に解析する必要性が示唆される。実際、現場観測を実施している最中にも、日射があると落石が生じる場面が多く見られ、逆に雲天がしばらく続くと落石も収まるといった状況がよく観察された。こうした落石は凍結融解の直接的な影響であると考えられる。これを明瞭にするために、より高頻度（時間単位）でのモニタリングによる温度変化と落石頻度との対応についても検討課題となる。

MS 計測では、近赤外情報を用いた NDVI や NDRE といった指標の空間分布の算出と、詳細な地表区分の可能性が示された。露岩や崖錐堆積物との NDVI 等の差異は、地表の水分状況や表面粗度の違いによりもたらされている可能性があり、凍結融解の発生との関連や、降水後の湿潤・乾燥

状況との関連など、今後より詳細な検証が必要である。

#### E. 結論

七面山の大規模崩壊地において卓越する土砂生産プロセスの状況が、無人航空機に搭載されたマルチセンサ観測による多次元的な空間情報解析により、定量的に明らかとなってきた。今後も、継続的な現地観測による面的データ収集が必要であり、これにより、短期的な季節サイクルから、長期的な年単位での変動まで、総合的に評価できる可能性が示された。

一方、現地観測データとの対比については、空間的には密でも時間的に疎な面データと、空間的には疎でも時間的には密な点データの相補が必要である。2024年度も観測を継続し、マルチセンサで明らかにした面的な土砂生産と定点カメラによる点的な土砂生産との比較解析を行う予定である。

#### 参考文献

- Faisal, B.M.R., Hayakawa, Y.S., *Progress in Earth and Planetary Science*, 9, 41, 2022.
- Faisal, B.M.R., Hayakawa, Y.S., *Geomorphology*, 429, 108665, 2023.
- Faisal, B.M.R., Hayakawa, Y.S. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 10.1080/04353676.2024.2323347, 2024.
- Matsushi and Matsuzaki, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 268, 1201–1204, 2010.
- Nishii et al., *Geomorphology*, 312, 51–59, 2018.
- 西井ほか, 地球惑星連合日本地球惑星科学連合 2022年大会, 招待講演 HDS11-11, 2022.
- Wohl et al., *Earth Surf. Process. Landforms*, 44, 4–26, 2019.
- Yoshikawa, *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, 6, 1–14, 1974.