

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

研究代表者氏名 早川 裕弐<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 (Faisal and Hayakawa, 2022, 2023)。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。しかし、そのような高い土砂生産速度を維持するため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計測を実施し、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 1350~1950 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・秋・冬の計3回(2022年6月11~12日, 10月15~16日, 2023年2月28日~3月1日)の測量を実施した。また, 2023年2月28日, 3月1日に, 熱赤外(TIR)センサを搭載した RTK-UAS を用いて, 冬季の岩盤表面温度を面的に計測した。また, マルチスペクトル(MS)センサを搭載した RTK-UAS を用いて, 崩壊地内の植生分布を調査した。調査に使用した主な UAS は DJI 社 Matrice 300 RTK および DJI 社 P4 Multispectral であり, 前者には 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)と TIR センサである DJI 社 Zenmuse H20T (非冷却 VOx マイクロボロメータ, 重量 828 g, 解像度 640×512 ピクセル)をそれぞれ搭載した。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 20~40%とした。TIR 計測時は飛行高度 100 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。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) として出力した。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した。P4 Multispectral (重量 1,487 g) は 6 つの CMOS センサ (1/2.9 インチ, 2MP) をもち, それぞれ可視 (RGB), Blue (450 nm ± 16 nm), Green (560 nm ± 16 nm), Red (650 nm ± 16 nm), Red

edge (730 nm ± 16 nm), Near infrared (840 nm ± 26 nm) の波長域を観測する。飛行高度はおよそ 120~150 m と設定し, 取得画像の地上解像度は 8 cm 程度となった。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 年から実施中である。

## C. 研究結果

### 現地の気象状況

2022/23 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 2886 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 計測による地形情報とその変化の例を図 1 に示す。滑落崖における岩盤侵食(崩壊)や, 主に南向き斜面における崩壊・侵食, 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の変化が定量的に観察された。

TIR 計測による朝と日中の崩壊地内における地表面温度の空間分布の例を図 2 に示す。朝, 日射の当たらない環境では, 広い範囲で地表面温度は -5°C 以下であった。一方, 日射の当たる日中の南向き斜面では, 部分的に +20°C を超える領域も見られた。朝から日中への温度上昇は, 南向き斜面で顕著であり, 北向き斜面では +/-5°C 以下のわずかな変化のみであった。

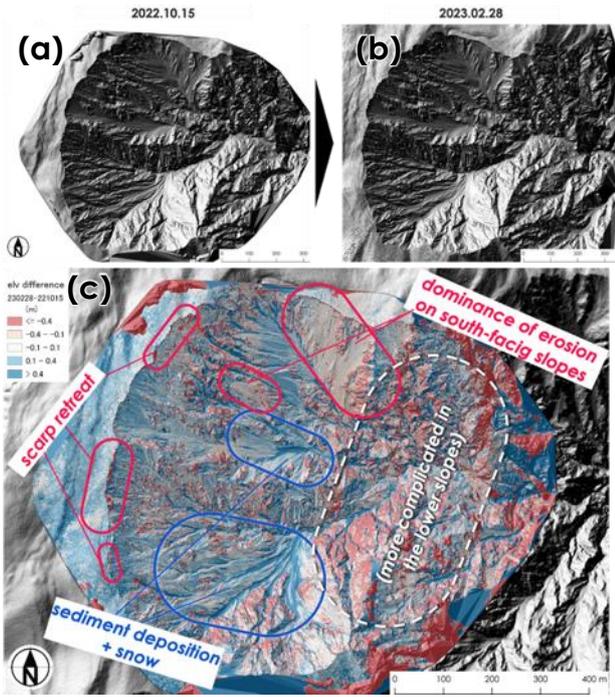


図1 Lidar (レーザ) 計測結果の一部. (a) 2022年10月計測によるDTM. (b) 2023年2月計測によるDTM. (c) 2022年10月から2023年2月までの標高の差分.

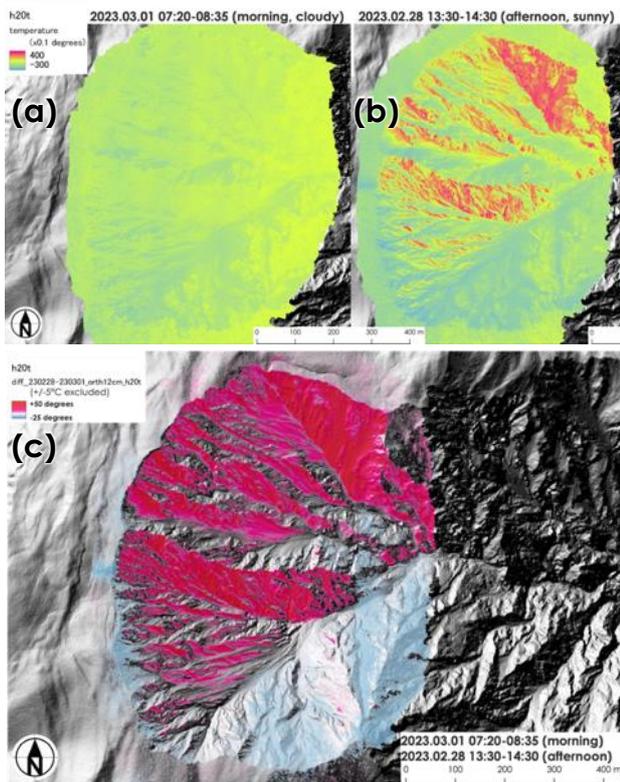


図2 TIR (熱赤外) 計測結果. (a) 朝、直射日光の当たらない曇天での崩壊地内の温度空間分布 (2023年3月1日 7:20~8:35). (b) 午後、日射の当たる状態での崩壊地内の温度空間分布 (2023年2月28日 13:30~14:30). (c) 朝から日中にかけての上昇温度の分布 (bとaとの差分).

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3). 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.

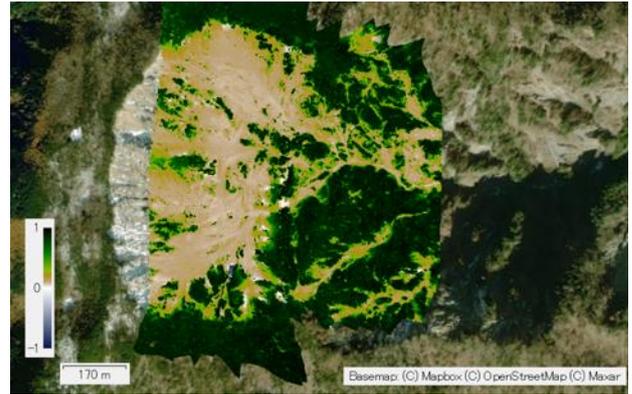


図3 MS (マルチスペクトル) 計測結果から算出した崩壊地内における NDVI (正規化植生指標) の例 (2022年6月12日).

#### 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. ただし、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い面もあり、今後、点群の自動区分アルゴリズムの改善や調整も必要である.

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的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、逆に曇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。とくに、2022～2023 年冬季の現地観測データは今後、2023 年春に回収予定であり、これを用いて、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.  
<https://doi.org/10.1186/s40645-022-00500-8>
- Faisal, B.M.R., Hayakawa, Y.S., *Geomorphology*, 429, 108665, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108665>
- 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.

Yoshikawa, *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, 6, 1–14, 1974.