

速やかに雪崩の発生規模、堆積状況等を把握するためのUAVの活用

判田乾一・奥山悠木

1. はじめに

雪崩災害発生時は、迅速な状況把握と状況に応じた二次災害防止対策が必要である。しかし、斜面下部より、斜面上方の発生区から堆積区に至る全域を迅速に把握することは困難なことが多い。また、現地踏査には時間と労力・危険を伴い、迅速な状況把握を行うことも困難な場合も多い。

近年、UAVを用いた調査や撮影画像の解析が進み、斜面等の調査にも活用されてきている¹⁾²⁾。雪崩も斜面で積雪期に発生する現象であり、UAVを雪崩災害の現場でも活用していくことが期待される。しかし、複数の写真を合成するSfM (Structure from Motion) により3次元点群データを作成する際の課題として、色調変化に乏しい雪面ではSfM処理に失敗し、点群データに欠損が生じる場合があることが挙げられる。また、雪崩が樹林内を通過・堆積した場合には、SfMでは雪崩の流下範囲と堆積域を把握することが困難なことも挙げられる。

このため、令和元年度から、実際に発生した雪崩を対象にUAV撮影画像を用いた写真測量とレーザ測量を実施し、雪崩調査への活用方法について検討してきた。本稿では、雪崩発生現場でのUAV撮影画像を用いた写真測量とレーザ測量による事例を紹介するとともに、積雪環境下における測量精度の調査結果を紹介する。

2. UAVを活用した雪崩の3次元測量

2.1 UAV撮影画像からの写真測量

実際に雪崩が発生した現場においてUAVによる空中写真撮影を行い、SfMソフトウェアにより3次元点群データを作成した。撮影は、新潟県妙高市樽本地区において実施した。使用機材は、UAVにDJI Phantom 4 Pro V2.0、SfMソフトウェアにAgisoft Metashapeを用いた。

対象とした雪崩は、道路から発生区までの距離

が約700 m、標高差が約200 mある谷の奥で発生しており、道路上からでは発生区の一部しか視認できず、雪崩の全域を把握することができない。また、発生区までアクセスできる道はなく、地上からの踏査は困難であった。雪崩の発生日は不明である。撮影は令和3年1月18日に実施した。

UAVにより撮影した垂直写真245枚からSfMにより3次元点群データを作成した。現場周辺は一面積雪に覆われていたが、大きな欠損なく点群が生成された。これは、地形の凹凸により陰影が生じていたことや樹木が分布していたことから、SfMにおいて写真同士の結合に必要な特徴点が多分抽出できたためと考えられる。一連の作業に要した時間は、現地作業に2時間、内業に3.5日であった。ただし、内業に時間を要したのは点群生成精度を向上させるため試行錯誤を重ねた結果であり、概略を把握する場合は1日程度で作業可能である。

作成した点群データを図-1に示す。発生区の縦断面図を作成して破断面高さを計測し、雪崩発生層厚を推定した。また、発生区の面積を計測し、これらを掛け合わせることで雪崩発生量を480 m³と推定した。さらに、走路～堆積区の経路長を計測し雪崩流下距離を170 m、発生区上端と堆積区末端との間の見通し角を31°と算定した。

そのほか、発生区周辺斜面の状況を点群上で確認し、明瞭なクラックがないことを把握でき

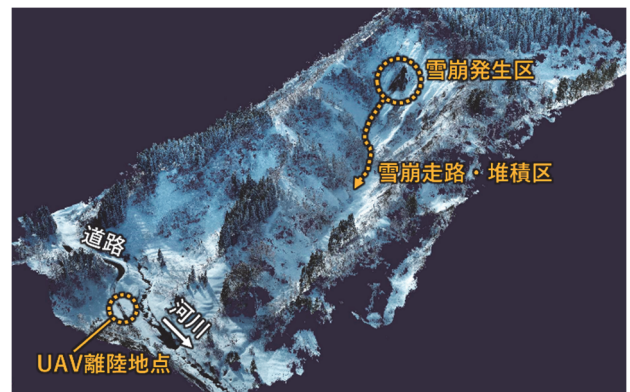


図-1 UAV撮影画像から作成した樽本地区の3次元点群

た。このように、SfMにより3次元点群データを作成することにより、ソフトウェア上で発生量・流下距離・見通し角の計測や、周辺斜面の状況を把握可能であった。

2.2 UAVによるレーザ測量

雪崩が樹林内を通過・堆積した現場において UAVによるレーザ測量を実施し、3次元点群データを作成した。測量は、新潟県上越市大島区上達地区において実施した。使用機材は、UAVにAir Ray X、レーザスキャナーにRIEGL VUX-1を用いた。対象とした雪崩は、道路から発生区までの距離約700 m、標高差約200 mであり、道路上から発生区は視認できるものの、雪崩が樹林帯の中で停止しているため堆積末端が確認できなかった。雪崩の発生日は不明である。撮影は令和3年3月9日に実施し、UAV離陸地点周辺に地上基準点を3点設置した。

レーザ測量により作成した3次元点群データを図-2に示す。点群作成時に、別途UAVで撮影した写真から作成したオルソ画像を用いて色付き点群データを生成した。自動生成した点群にはノイズが発生するため、ソフトウェア上での目視確認によりノイズ除去を行っている。一連の作業に要した時間は、地上基準点の設置・撤去含め現地作業に3時間、内業に2日であった。

写真測量と同様に、雪崩発生層厚と発生量、雪崩流下距離、発生区上端と堆積区末端との間の見通し角の計測が可能であった。また、雪崩発生域周辺の状況を把握できた。しかし、樹林帯に流入した堆積末端については図-2のような俯瞰視点からでは確認ができないため、視点を樹林内に移し堆積末端と想定される付近を拡大表示したものが図-3である。樹林下の雪面も点群が生成されており、谷底部に雪崩デブリの堆積形状を確認することができた。

また、図-2の上達地区で撮影した写真測量とレーザ測量結果を比較するため、それぞれの点群から樹林内の縦断面図を作成したものが、図-4①と②である。レーザ測量では、UAVから照射したレーザ光の一部が樹冠を通過して雪面に到達し反射波が記録されることにより樹林下の雪面にも点群が生成される。このため、樹林内の堆積範囲を含めて雪崩痕跡を確認することが出来た。

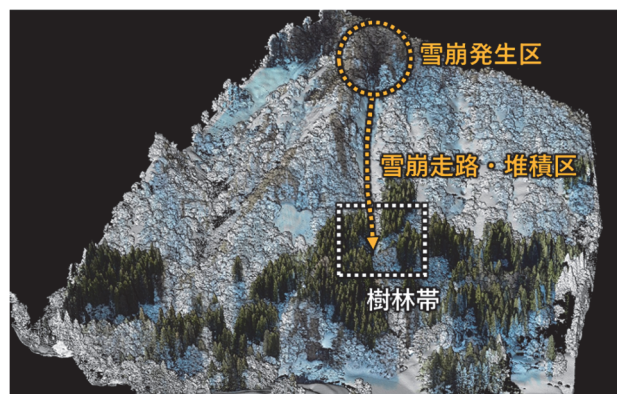


図-2 レーザ測量による上達地区の3次元点群

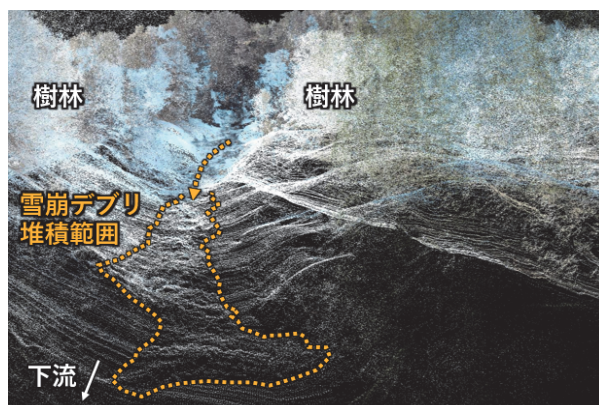


図-3 レーザ点群による雪崩堆積範囲判読

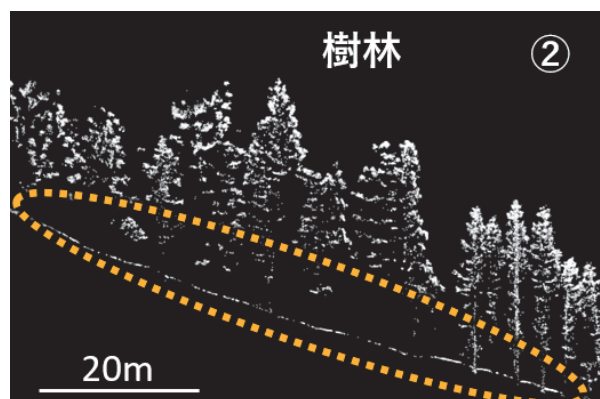
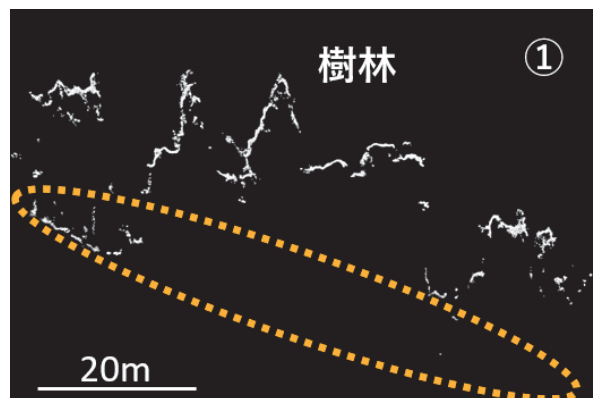


図-4 樹林内の点群縦断面図：①写真計測、②レーザ計測

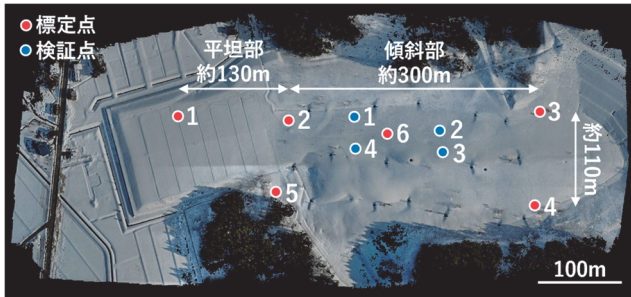


図-5 対象地における標定点及び検証点の配置

3. 積雪環境下における測量精度の調査

積雪環境下でUAVを用いた場合の位置座標の測量精度を把握するため、雪崩現場を想定し新潟県上越市国川地区の裸地斜面でUAVにより写真測量及びレーザ測量を実施した。測量対象範囲は長さ約430 m、幅約110 m、高低差約50 m、傾斜部の平均勾配約9°である。撮影は令和4年1月24日、25日に実施した。使用機材は、写真測量用UAVにDJI Phantom 4 Pro V2.0、レーザ測量用UAVにAir Ray X、レーザスキャナーはRIEGL VUX-1、SfMソフトウェアにAgisoft Metashapeを用いた。

測量対象範囲では、図-5に示すとおり標定点及び検証点を設置した。標定点及び検証点の配置は、標定点1がUAV離陸地点、標定点2～5に囲まれた範囲が雪崩発生域を想定したものである。位置座標は可搬型のRTK-GNSS測量機により測量した。

SfM 処理において位置座標を入力する標定点の設定ケースは、表-1に示す通り、標定点を用いないNo.1、用いる標定点を1点、3点、6点と変化させたNo.2～4を設定した。また、レーザ測量では、標定点を用いないNo.5、標定点を6点としたNo.6を設定した。さらに、天候及び露出設定の影響を検討するため、晴れの日に露出補正を+3.0としたNo.7と、くもりの日に露出を通常の設定としたNo.8を設定した。

検証点1～4では位置座標と実測の座標値との誤差を算出し、水平位置及び標高の二乗平均平方根誤差（RMSE）を整理するとともに、写真測量の6ケースについて、点群欠損率（対象範囲のうち1m²あたりの点密度が4点に満たない面積の割合）を整理した。

3.1 写真測量とレーザ測量による精度の違い

写真測量の場合、標定点を用いていないNo.1のRMSEが水平方向に1.31 m、標高方向に80.67

mの誤差が、標定点を6点使用したNo.4は水平方向0.11 m、標高方向0.51 mと最も誤差が小さい。レーザ測量の場合、標定点を用いないNo.5で水平方向0.03 m、標高方向0.09 m、標定点を6点使用したNo.6で水平方向0.01 m、標高方向0.02 mとなり、最高精度の写真測量よりもRMSEで1桁高い精度である。

3.2 標定点の数・配置による精度の違い

標定点を設置しないNo.1ではRMSEは水平方向1.31 m、標高方向80.67 m、標定点をUAV離陸地点付近に1点設置したNo.2では水平方向21.61 m、標高方向41.36 mで標高方向の誤差は1/2程度まで小さくなったが、水平方向の誤差は標定点なしの場合の約16倍と逆に大きくなった。これは使用したSfMソフトウェアの処理の特性上、座標を入力した1点を中心に点群全体が過度に補正され歪んだ影響により、標定点から離れた範囲では標定点を設置しない場合よりも精度が低下したと考えられる。一方、標定点をUAV離陸地点付近に3点設置したNo.3では、誤差が水平方向0.48 m、標高方向10.56 m、標定点を6点設置したNo.4は、No.1～4の中で最も誤差が小さくなった。

表-1 ケース毎の精度調査結果

No.	測量方法	天候	露出	使用標定点	検証点1-4のRMSE (m)	欠損率
1	写真	晴れ	通常	なし	水平 1.31 標高 80.67	7.4%
2				1	水平 21.61 標高 41.36	
3				1,2,5	水平 0.48 標高 10.56	
4				1～6	水平 0.11 標高 0.51	
5	レーザ	くもり	—	なし	水平 0.03 標高 0.09	—
6				1～6	水平 0.01 標高 0.02	
7	写真	晴れ	+3.0	1～6	水平 0.24 標高 0.43	5.1%
8		くもり	通常	1～6	水平 0.21 標高 0.80	51.0%

以上より、現場の状況から可能な場合にはNo.4のように測量範囲全域に標定点を設置することで誤差を最小限に抑えることが可能であるが、これが困難な場合には、次善の策としてNo.3のようにUAV離陸地点付近に3点程度の標定点を設置することで誤差を小さくできる可能性がある。

3.3 天候・露出設定による欠損率の違い

天候及び露出設定を変えて撮影した写真の例を図-6に示す。No.1～4で用いた晴れの写真は図-6

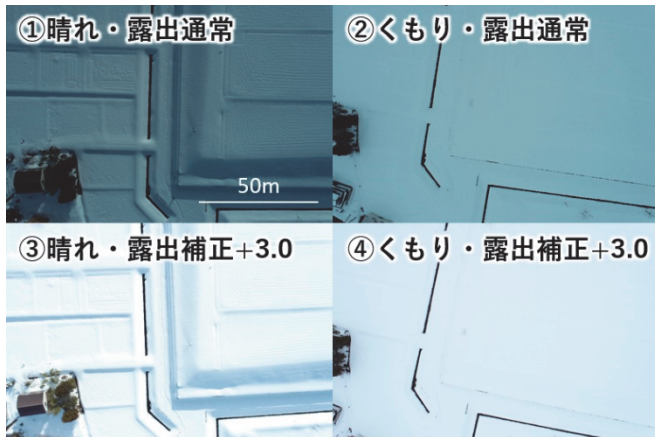


図-6 撮影条件ごとの写真の例
① No.1～4、②No.8、③No.7、④表-1対象外

①に示す通りで、SfM処理後の点群欠損率は7.4%であった。一方、No.6で用いたくもりの日の写真は図-6②に示すとおりであり、SfM処理後の欠損率は51.0%と約7倍大きくなった。図-6②のくもりの日の写真では雪面の陰影が少なくなり、SfMソフトウェアの処理で複数写真の結合に必要な特徴点が抽出できなかつたと考えられる。一方、図-6①のように晴れの日の写真では雪面に陰影が生じており、特徴点として使用できる画素が多かつたため、欠損率が大きく異なつたと考えられる。

カメラの露出設定の影響については、通常設定としたNo.1～4（図-6①）では欠損率が7.4%であったのに対し、露出を+3.0としたNo.7（図-6③）では5.1%と大きな違いは生じていない。露出を+3.0としても特徴点の抽出に必要な陰影情報がほとんど失われていなかったことによるものと考えられる。

今回の調査では、露出設定の影響よりも天候の違いによる雪面の陰影の影響が大きい結果となった。雪崩現場を撮影する際は、可能であれば、晴れの日に陰影が出やすい条件で撮影する方が点群生成密度の向上につながると考えられる。

4. まとめ

雪崩発生現場でUAV撮影画像を用いた写真測量により雪崩の諸元が確認可能であり、レーザ測量によって樹林内の堆積範囲を含めて雪崩の痕跡を確認することが可能であることが確認された。また、積雪環境下における測量精度の調査結果、測量範囲全体に標定点を設置することが困難な場

合、UAV離着陸地点付近に複数の標定点を設置することで誤差を小さく出来る可能性があることが確認された。

現地での測量事例から明らかになった雪崩調査時の留意点等は、調査の手順とあわせて、手引きとして取りまとめる予定としている。主に自治体職員やコンサルタントが活用することを想定し、UAVを活用することのメリットや、基本的な作業の流れと作業にあたり留意すべき事項が理解できる内容とする予定である。また、調査時チェックリスト、UAVによる雪崩3次元計測事例なども記載する予定である。

今年度からの土木研究所の第5期中期計画においては、UAV測量結果を活用して雪崩災害発生の危険性が高い範囲を推定する手法を検討し、雪崩シミュレーションによりハザードエリアを設定する手法の検討を行っていくこととしている。検討に当たっては、UAVにより雪崩発生箇所の3次元データを取得し蓄積を図りながら、解析に活用していく予定である。UAVによる測量ができるようになったことをきっかけとし、これまでより一歩進んだ迅速な対応が豪雪時にとれるよう、今後も技術開発を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：地すべり災害対応のBIM/CIMモデルに関する技術資料、土木研究所資料第4412号、35p、2021.4
- 2) 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター：UAVの自律飛行による天然ダムの緊急調査及び被災状況把握に関する手引き、225p、2020.3

判田 乾一



研究当時 土木研究所 土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター 上席研究員、現 国土交通省砂防部砂防計画課 地震・火山砂防室長
HANDA Kenichi

奥山 悠木



研究当時 土木研究所 土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター 主任研究員、現 地すべりチーム 主任研究員
OKUYAMA Yuki