

高精度空間情報を用いた雪崩の三次元計測に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：判田乾一、奥山悠木

【要旨】

本研究では、無人航空機（以下、UAV と記す）を活用した雪崩の 3 次元形状を迅速かつ高精度に計測する手法について、実際の雪崩発生現場での計測に基づき検討を行った。その結果、UAV を用いた写真測量及びレーザ測量から 3 次元点群データを作成することにより、雪崩の全体状況が迅速かつ安全に把握でき、発生量や流下距離等の諸元計測が可能になることを示した。また、写真測量及びレーザ測量による計測精度を現場実証から明らかにし、精度を向上させる方法を示した。

キーワード：雪崩、UAV、SfM、UAV レーザ測量、3 次元点群データ

1. はじめに

雪崩災害発生時の初動期においては、迅速な全体状況の把握と、現場状況に応じて二次災害を防止するための警戒避難対策や応急対策が必要となる。しかしながら、雪崩発生区は斜面上方に位置することが多く、平地からでは全体状況の把握が困難な場合があること、雪崩発生区までの現地踏査は非常に労力と危険を伴うことから、迅速な状況把握が困難であることが多い。

一方、近年 UAV を用いた調査技術や、UAV で取得したデータから現場の 3 次元モデルを作成する解析技術が発展してきており、災害現場での活用も進んでいる^{例えば、1), 2)}。これらの技術を雪崩災害の現場でも活用することにより、迅速かつ効率的な全容把握や、高精度空間情報に基づく効果的な警戒避難対策及び応急対策の検討が可能になると期待される。

しかし、これまで UAV を活用した雪崩の 3 次元計測手法について体系的にとりまとめた資料はなく、その計測精度についても定量的に検証した事例は少ない。また、複数の写真を合成し 3 次元点群データを作成する Structure from Motion（以下、SfM と記す）処理を行う際、解析対象とする領域の色調が雪面のように変化に乏しい一面である場合には、点群データに欠損が生じる可能性があることや、雪崩が樹林内を通過・堆積した場合には、SfM では雪崩形状を抽出することが困難であるが、そのような現場で UAV によるレーザ測量を活用することで、どの程度の雪崩形状が抽出可能かを検証した事例はなく、雪崩現場への適用性が不明である。

そこで、本研究では、UAV を活用して雪崩の 3 次元

形状を迅速かつ高精度に取得するために、計測手法について検討し、本手法を実際の雪崩発生現場で活用するための具体的な手順や留意点を取りまとめることとした。

2. 研究方法

2.1 UAV を活用した雪崩の 3 次元計測手法の検討

2.1.1 UAV 写真測量による計測手法の検討

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。作成したデータを点群処理ソフトウェア上で処理し、雪崩発生量や流下距離といった諸元の計測を行った。また、雪崩発生区の周辺斜面におけるクラック有無等の変状を点群上で確認した。計測は、新潟県妙高市・上越市・糸魚川市の 6 地区における雪崩発生現場を対象に実施した。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。

2.1.2 UAV レーザ測量による計測手法の検討

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。作成したデータを点群処理ソフトウェア上で処理し、樹林内の雪崩堆積範囲を判読した。また、同箇所でも UAV 写真測量を実施し、SfM による 3 次元点群データを作成した。写真測量とレーザ測量による 3 次元点群データそれぞれについて、樹林範囲の縦断面図を作成し、樹林下の雪面における点群の分布状況を比較した。計測は、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。

2.1.3 UAV による計測精度の検証

雪崩現場を想定した積雪環境において UAV 写真測量及び UAV レーザ測量を実施し、現地に設置した地上基準点の位置座標の計測精度を検証するとともに、天候及びカメラの露出設定による SfM の点群生成密度の違いを検証した。対象地は新潟県上越市国川地区の裸地斜面とし、計測対象範囲は長さ約 430m、幅約 110m、高低差約 50m、傾斜部の平均勾配 9° である。図-1 に示す位置に地上基準点（標定点及び検証点）を設置した。基準点の配置は、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。各基準点の位置座標は可搬型の RTK-GNSS 測量機により計測した。

天候及び露出設定の影響を検討するため、晴れとくもり、露出通常と露出補正+3.0 の設定でそれぞれ UAV 写真撮影を行った。計測手法の比較のため、同範囲で UAV レーザ計測を行った。使用機材は、写真用 UAV に DJI Phantom 4 Pro V2.0、レーザ用 UAV に Air Ray X、レーザスキャナーに RIEGL VUX-1、SfM ソフトウェアに Agisoft Metashape を用いた。SfM 処理において、位置座標を入力する標定点の数を 0~6 個に変えてそれぞれ点群生成を行った。各ケースの条件を表-1 に示す。

各ケースにおいて、検証点 1~4 についてモデル上の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）を整理した。また、SfM 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。

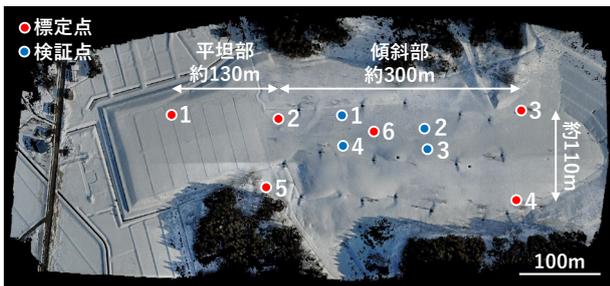


図-1 対象地における地上基準点の配置

3. 研究結果

3.1 UAV を活用した雪崩の 3 次元計測手法の検討

3.1.1 UAV 写真測量による計測手法の検討

ここでは、計測を実施した 6 地区のうち、妙高市樽本地区における結果について述べる。当地区で対象とした雪崩は、道路から発生区までの距離が 700m、標高

表-1 UAV による計測ケース一覧

| ケース | 天候 | 計測方法 | 使用する標定点 |
|-----|-----|----------------|----------|
| 1 | 晴れ | 写真計測（露出通常） | なし |
| 2 | | | 標定点1 |
| 3 | | | 標定点1,2,5 |
| 4 | | | 標定点1~6 |
| 5 | 晴れ | 写真計測（露出補正+3.0） | 標定点1~6 |
| 6 | くもり | 写真計測（露出通常） | 標定点1~6 |
| 7 | くもり | レーザ計測 | なし |
| 8 | | | 標定点1~6 |

差が 200m 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、雪崩の全体状況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、地上からの踏査は非常に困難である。

現場で 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（図-2）。現場周辺は一面積雪に覆われた状態であったが、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十分抽出できたためと考えられる。なお、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、実際の災害時に概略精度でよい場合は 1 日程度で作業可能である。

作成した点群データより、図-2 のように雪崩発生域周辺の全体状況を把握することができた。特に、3 次元化したことによりソフトウェア上で自由に拡大・縮小・回転することができ、雪崩発生区・走路・堆積区の詳細な把握が可能となった。

また、点群データは各点に 3 次元座標を保持しているため、ソフトウェア上で距離等の計測が可能である。当地区で雪崩の諸元を計測したものが図-3 である。ここでは、発生区の縦断面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、発生区的面積を計測し、これらを掛け合わせることで雪崩発生量を 480m³ と推定した。さらに、走路～堆積区の間を計測し雪崩流下距離を 170m、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、発生区周辺斜面の変状を点群上で確認し、明瞭なクラックがないことを把握することができた。

上記の通り、地上からの調査では全体状況の把握に時間を要するような困難な現場であっても、UAV を活用することにより、迅速かつ安全に全体状況が把握できることがわかった。さらに、SfM 処理で 3 次元点群データを作成することにより、雪崩の発生状況を机上

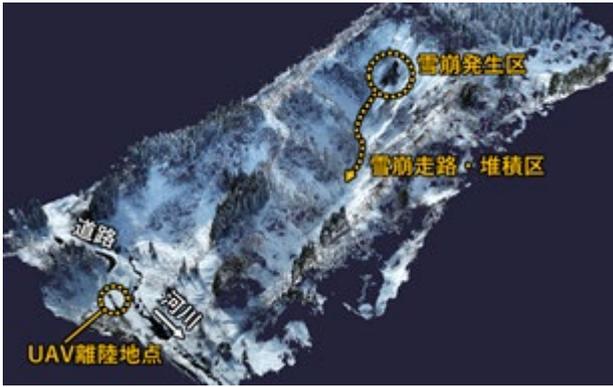


図-2 SfMにより作成した3次元点群データ
(樽本地区)



図-3 点群データから確認した雪崩の諸元
(樽本地区)

で把握できるとともに、発生量・流下距離・見通し角の計測や、周辺斜面の変状有無についても確認可能であることがわかった。

3.1.2 UAV レーザ測量による計測手法の検討

上越市上達地区で実施した UAV レーザ測量の結果について述べる。当地区で発生した雪崩は、道路から発生区までの距離 700m、標高差 200m 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おり堆積末端が確認できなかったため、UAV レーザ測量による計測を実施した。

レーザ測量により作成した 3 次元点群データを図-4 に示す。なお、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もあわせて行った。一連の作業に要した時間は、現地作業に 3 時間（地上基準点の設置・撤去含む）、内業に 2 日であった。

作成した点群データにより、図-4 のように雪崩発生域周辺の全体状況を把握することができた。ただし、樹林内の堆積末端については俯瞰視点からでは確認ができない。そこで、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-5①である。図より、樹林下の雪面に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。これにより雪崩堆積範囲を判読し、流下距離の把握が可能となった。

樹林下の雪面における点群生成状況について、写真測量による SfM とレーザ測量の比較を行うため、それぞれの点群から樹林内の縦断面図を作成した(図-5②③)。これらを比較すると、図-5②の SfM では樹林表面には点群が分布しているものの、樹林下の雪面には点群が生成されていないことが分かる。一方、図-5③のレーザ測量では、樹林表面に加え、樹林下の雪面にも点群が生成されていることが確認できる。これらの違いは、SfM では写真に記録されていない樹林下の情報は原理的に復元不可能である一方、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、反射光が記録されることに起因している。

上記の通り、樹林内に堆積した雪崩痕跡は SfM による写真測量では把握が困難であるが、UAV レーザ測量を活用することにより樹林内の堆積範囲を含めて確認可能であることが本検証から把握できた。したがって、



図-4 レーザ測量により作成した 3 次元点群データ
(上達地区)

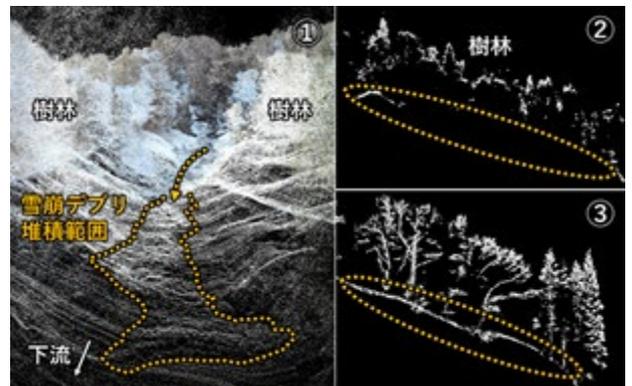


図-5 樹林内の 3 次元点群 (上達地区)
①レーザ点群による雪崩堆積範囲判読
②SfM による樹林内の点群縦断面図
③レーザ測量による樹林内の点群縦断面図

現場状況に応じて適切に計測手法を選択することにより、より正確な雪崩発生状況の把握が可能になると考えられる。

3.2 UAVによる計測精度の検証

UAVによる各計測ケースの精度検証結果を表-2に示す。RMSEは、SfMのケース1~4の中でケース4が水平位置0.11m、標高0.51mでいずれも最小、ケース2が水平位置21.61mで最大、標高ではケース1が80.67mで最大であった。レーザ計測では最大でもケース7の水平位置0.03、標高0.09であった。欠損率は、ケース1~4、5、6の中ではケース1~4と5がそれぞれ7.4%と5.1%と大きな差はなく、ケース6が51.0%で最大であった。

3.2.1 SfM及びレーザ計測による精度の違い

SfMのケース1と4を比較すると、標定点を用いないケース1でRMSEが水平位置1.31m、標高80.67mと誤差が大きくなったが、標定点を6点使用したケース4では水平位置0.11m、標高0.51mまで誤差が小さくなった。一方、レーザ計測のケース7と8を比較すると、標定点を用いないケース7で水平位置0.03m、標高0.09m、標定点を6点使用したケース8で水平位置0.01m、標高0.02mとなり、SfMと比較して精度が高い結果となった。

3.2.2 標定点の数・配置による精度の違い

標定点の数・配置を変えたケース1~4を比較すると、標定点を設置しないケース1では、RMSEは水平位置1.31m、標高80.67mであるのに対し、標定点をUAV離陸地点付近に1点設置したケース2では水平位置21.61m、標高41.36mとなり、標高誤差は1/2程度まで小さくなったものの、水平位置誤差は標定点なしの場合の約16倍とむしろ大きくなる結果となった。これは、今回使用した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でしまうことにより、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ものと考えられる。

一方、標定点をUAV離陸地点付近に3点設置したケース3では、誤差が水平位置0.48m、標高10.56mとなった。さらに、標定点を6点設置したケース4は3.2.1で述べた通り、ケース1~4の中で最も誤差が小さい結果となった。

以上より、現場状況から可能な場合には、ケース4のように計測範囲全域に標定点を配置することで誤差を最小限に抑えることができるが、それが困難な場合には、次善の策としてケース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が水平位置で1/3程度、標高で1/8程度まで小さくなる可能性がある。

3.2.3 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。天候の影響についてケース1~4とケース6を比較すると、晴れのケース1~4では点群欠損率が7.4%であるのに対し、くもりのケース6では51.0%と欠損率が約7倍に増加する結果となった。これは、図-6②のようにくもりの条件では雪面の陰影が少なくなり、SfMソフトウェアの処理において複数写真の結合に必要な特徴点が抽出できなかったことによるものと考えられる。一方、図-6①のように晴れの条件において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ったものと考えられる。

カメラの露出設定の影響についてケース1~4とケース5を比較すると、通常設定のケース1~4で欠損率7.4%に対し、露出過多に設定したケース5で5.1%と、大きな差は生じない結果となった。これは、ケー

表-2 ケース別精度検証結果

| ケース | 天候 | 計測方法 | 使用する標定点 | 検証点1~4 RMSE(m) | 欠損率 | |
|-----|-----|--------------------|---------|----------------|-------|-------|
| 1 | 晴れ | 写真計測 (露出通常) | なし | 水平 | 1.31 | 7.4% |
| | | | | 標高 | 80.67 | |
| | | | | 水平 | 21.61 | |
| | | | | 標高 | 41.36 | |
| 2 | 晴れ | 写真計測 (露出通常) | 1 | 水平 | 0.48 | 7.4% |
| | | | | 標高 | 10.56 | |
| 3 | 晴れ | 写真計測 (露出通常) | 1,2,5 | 水平 | 0.11 | 7.4% |
| | | | | 標高 | 0.51 | |
| 4 | 晴れ | 写真計測 (露出補正+3.0) | 1~6 | 水平 | 0.24 | 5.1% |
| | | | | 標高 | 0.43 | |
| 5 | 晴れ | 写真計測 (露出補正+3.0) | 1~6 | 水平 | 0.21 | 51.0% |
| | | | | 標高 | 0.80 | |
| 6 | くもり | 写真計測 (露出通常) | 1~6 | 水平 | 0.03 | - |
| | | | | 標高 | 0.09 | |
| 7 | くもり | レーザ計測 | なし | 水平 | 0.03 | - |
| | | | | 標高 | 0.09 | |
| 8 | くもり | レーザ計測 | 1~6 | 水平 | 0.01 | - |
| | | | | 標高 | 0.02 | |

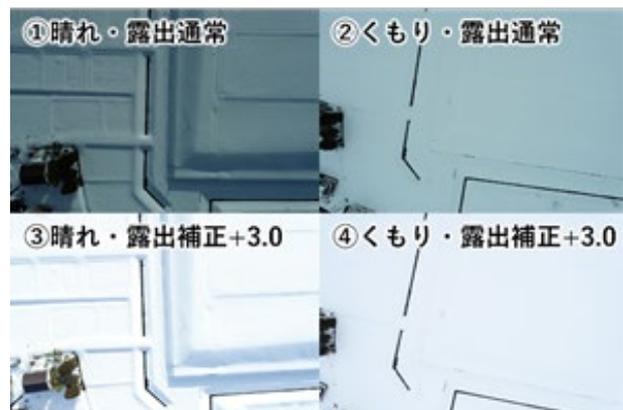


図-6 撮影条件ごとの写真の例

- ①ケース1~4、②ケース6
- ③ケース5、④表-2 対象外

ス5で設定した露出過多の条件でも大幅な白飛びは発生しておらず、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。

今回の検証では、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、晴れの日かつ陰影が出やすい条件で撮影する方が、点群生成密度を向上させることが可能となると考えられる。

3.2.4 検証結果まとめ

雪崩現場を想定した積雪環境で UAV による 3 次元計測の精度を検証したところ、以下の結果が得られた。

- ・ 標定点なしの場合、SfM では水平位置 1m 程度、標高 80m 程度の大きな誤差が生じたが、レーザ計測では水平位置 0.03m、標高 0.09m の誤差であった。
- ・ 標定点を計測範囲全域に配置することで誤差を最小化できるが、標定点 3 点でもある程度誤差を低減できる可能性がある。
- ・ 今回の検証では、露出設定よりも天候による雪面の陰影の違いが点群欠損率に大きく影響する結果となった。

4. まとめ

本研究では、UAV を活用した雪崩の 3 次元計測手法について検討し、次のような成果を得た。

- ・ UAV で撮影した写真から SfM により 3 次元点群データを作成することにより、雪崩の全体状況が迅速かつ安全に把握でき、発生量や流下距離等の諸元計測、周辺斜面の変状確認が可能になることを示した。
- ・ 樹林内の雪崩堆積範囲は SfM では把握が困難であるが、UAV レーザ測量を活用することにより樹林内の堆積範囲が把握できることを示した。
- ・ SfM 及びレーザ測量による計測精度を明らかにするとともに、SfM において生じる誤差や点群欠損率を低減する方法を示した。

雪崩災害調査の分野ではこれまで、UAV の活用手法や計測精度を現場実証に基づき詳細に検討した事例はほとんどなく、調査手法を体系的に取りまとめた資料もない。そのため、本検討結果は、雪崩災害調査の効率化・安全性向上及び効果的な警戒避難対策・応急対策の一助となると考えられる。

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、31p.、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、223p.、2020.3

A Study of Three-Dimensional Measurement of an Avalanche Based on High-Precision Spatial Information

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Snow Avalanche and Landslide Research Center

Author: HANDA Ken'ichi

OKUYAMA Yuki

Abstract: In this study, based on measurements at avalanche sites, we investigated a method of measuring the three-dimensional shape of an avalanche quickly and with high precision, using an unmanned aerial vehicle (UAV). Our results showed that it was possible to obtain an overall picture of an avalanche quickly and safely, and measure its volume, runout distance and other properties by generating 3D point cloud data from photogrammetry and laser scanning using a UAV. We have determined the accuracy of photogrammetry and laser scanning through field demonstrations and shown a method of improving the accuracy of measurement.

Keywords: avalanche, UAV, SfM, UAV laser scanning, 3D point cloud data