

# 土木研究所資料

## 雪崩調査における UAV 活用の手引き

令和5年2月

国立研究開発法人土木研究所  
土砂管理研究グループ  
雪崩・地すべり研究センター

Copyright © (2023) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P. W. R. I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# 雪崩調査における UAV 活用の手引き

|               |       |                     |
|---------------|-------|---------------------|
| 雪崩・地すべり研究センター | 上席研究員 | 判田 乾一 <sup>※1</sup> |
|               | 上席研究員 | 吉柳 岳志               |
|               | 主任研究員 | 奥山 悠木 <sup>※2</sup> |
|               | 主任研究員 | 高原 晃宙               |

※1 現 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 砂防計画課 地震・火山砂防室長

※2 現 地すべりチーム主任研究員

## 要旨：

本手引きは、発生した雪崩を対象に小型無人航空機（UAV）を使用して雪崩調査を行う際の具体的な調査手法や留意点を取りまとめたものである。

キーワード：雪崩、災害調査、UAV、SfM 解析、航空レーザ測量

## 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| まえがき .....                   | 1  |
| 1 はじめに .....                 | 2  |
| 1.1 目的 .....                 | 2  |
| 1.2 適用範囲 .....               | 3  |
| 1.3 用語の定義 .....              | 4  |
| 1.4 UAV 活用の利点 .....          | 6  |
| 1.5 調査手法ごとの特性 .....          | 8  |
| 1.6 UAV 活用時の留意事項 .....       | 10 |
| 2 UAV による空中写真測量に基づく調査 .....  | 15 |
| 2.1 調査手法の概要 .....            | 15 |
| 2.2 使用機材の準備 .....            | 16 |
| 2.3 撮影コース作成 .....            | 20 |
| 2.4 地上基準点設置 .....            | 23 |
| 2.5 空中写真撮影 .....             | 25 |
| 2.6 三次元点群データ作成 .....         | 27 |
| 2.7 モデル上での計測・確認 .....        | 29 |
| 3 UAV による航空レーザ測量に基づく調査 ..... | 32 |
| 3.1 調査手法の概要 .....            | 32 |
| 3.2 使用機材の準備 .....            | 34 |
| 3.3 計測コース作成 .....            | 35 |
| 3.4 地上基準点設置 .....            | 38 |
| 3.5 レーザ計測 .....              | 39 |
| 3.6 三次元点群データ作成 .....         | 40 |
| 3.7 モデル上での計測・確認 .....        | 42 |
| 4 参考 .....                   | 44 |
| 4.1 調査時チェックリスト案 .....        | 44 |
| 4.2 計測方法別の精度検証事例 .....       | 45 |
| 4.3 UAV による雪崩三次元計測事例 .....   | 50 |

## まえがき

近年、土砂災害などの災害調査には小型無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, 以下 UAV という) の活用が進められている<sup>例えば、1)~3)</sup>。一方で、雪崩の調査では、色調変化の乏しい写真から三次元モデルを作成する技術的課題など、雪崩の特性をふまえた調査を行う必要がある。

そこで、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では、実際に発生した雪崩を対象に UAV による空中写真測量及び航空レーザ測量を実施し、UAV を使用して雪崩調査を行う際の具体的な調査手法や留意点を取りまとめた。

UAV を活用することで、これまでより迅速かつ安全に雪崩の発生区から堆積区まで (以下、雪崩全体) の状況把握ができるようになり、雪崩に関する諸データの収集及び蓄積が可能となるため、本手引きを参考にして積極的に UAV での調査が行われることを期待している。

## 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，[https://www.pwri.go.jp/team/landslide/kanrisya/cim/cim\\_model.pdf](https://www.pwri.go.jp/team/landslide/kanrisya/cim/cim_model.pdf)，参照 2022-07-31，2021
- 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，[https://www.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/center/img/uav\\_guidance.pdf](https://www.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/center/img/uav_guidance.pdf)，参照 2022-07-31，2020
- 3) 国土交通省東北地方整備局東北技術事務所：UAV による河川調査・管理への活用の手引き (案)，[https://www.thr.mlit.go.jp/tougi/kensetsu/hozen/pdf/uav\\_kasentyos.pdf](https://www.thr.mlit.go.jp/tougi/kensetsu/hozen/pdf/uav_kasentyos.pdf)，参照 2022-07-31，2016

## 1 はじめに

### 1.1 目的

本手引きは、雪崩災害発生後の初動期において、迅速に雪崩全体の状況把握を行い、二次災害防止（警戒避難計画）や応急対策計画検討に資するための調査について UAV を活用して実施する際の具体的な方法や留意点を取りまとめたものである。

#### 【解説】

集落や道路沿い等の斜面で雪崩の発生が確認された場合、発生状況を迅速に把握し、今後懸念されるリスクや保全対象への影響を検討した上で、住民や通行者に対する警戒避難対策や保全対象に対する応急対策を実施する必要がある。

雪崩の現場は、その後の降雪や融雪の影響により状況が刻一刻と変化していくため、迅速な調査が求められるが、雪崩発生源は斜面上部に位置する場合も多く、積雪により地上からの踏査が困難なために雪崩全体の状況把握が十分にできない場合がある。一方、近年 UAV の活用が災害調査の現場でも進んできており、雪崩災害でも UAV を活用することにより、迅速な雪崩全体の状況把握や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。また、本手引き第 4 章にて調査時チェックリストや計測等事例を記載しているので参考にされたい。

なお、UAV の技術進歩や、運航に関する法制度が改正されることもあるため、本手引きに示す参考文献のほか、最新の情報を入手し、適切な調査手法を選択することが必要である。

## 1.2 適用範囲

本手引きでは、雪崩災害発生後の初動期において、二次災害の防止や応急対策の検討のために、UAV を用いて数日程度の短期間で雪崩の諸元及び周辺地形などの三次元モデルを作成することを想定し、調査手法の選択、UAV の準備、UAV の撮影コース設定、地上基準点設置、空中写真撮影、三次元点群データ作成、モデル上での計測・確認を行う段階の各作業を対象としている。

なお、雪崩に対する恒久対策の調査には、施設設計に用いる測量の精度などから、必要に応じて別途求められる精度で調査を行うため、本手引きの対象外とする。

### 【解説】

雪崩災害発生後の対応は、図 1 のような流れとなっている。

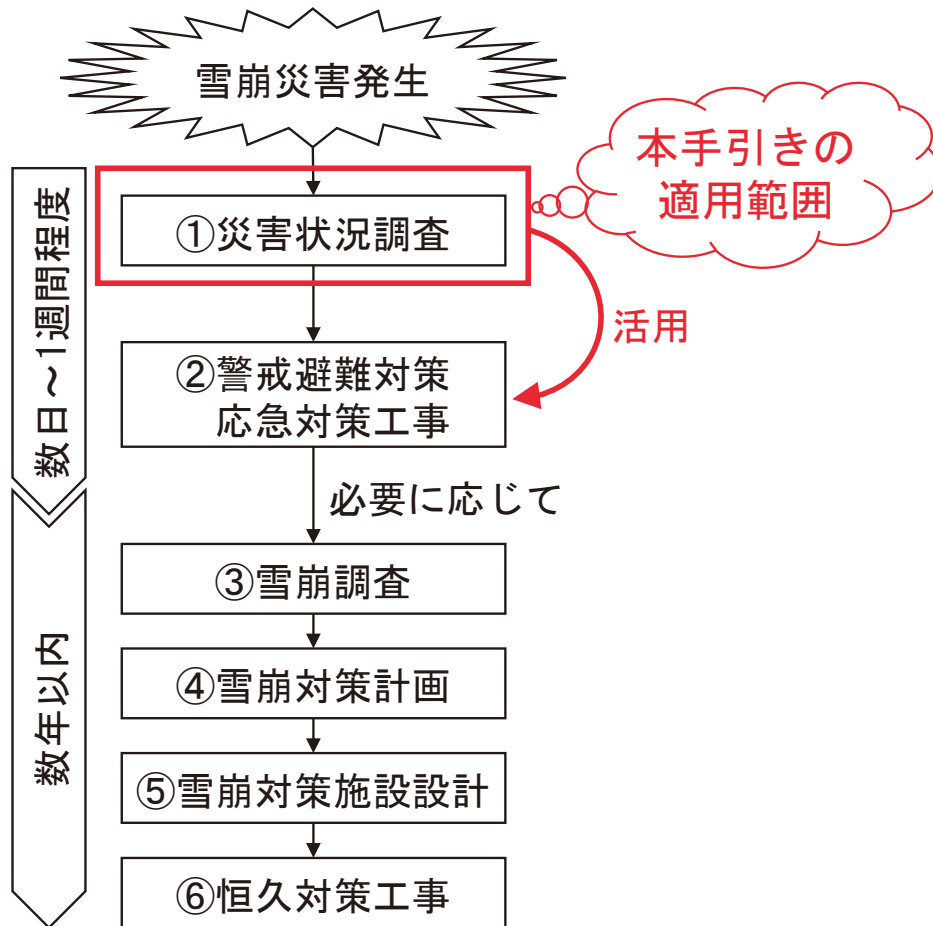


図 1 雪崩災害発生後の対応フロー

本手引きで取り扱う調査手法は、図 1 の「①災害状況調査」を想定したものである。

この段階では、雪崩全体の状況を把握し、その後生じうるリスクを検討した上で、必要な警戒避難対策及び応急対策を迅速に行う必要がある。したがって、UAV による調査においても迅速さを重視し、災害発生後数日程度で三次元モデルを作成することを想定した手法についてまとめた。

### 1.3 用語の定義

本手引きで用いる用語の定義を以下に示す。

| 用語                  | 用語の定義   |
|---------------------|---|
| <b>UAV 測量に関する用語</b> |   |
| UAV                 | Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機。本手引きでは、小型のマルチコプターを想定して記述している  |
| GNSS                | Global Navigation Satellite System：全球測位衛星システム。アメリカのGPS、ロシアのGLONASS、日本の準天頂衛星QZSSなどを用いる衛星測位システムの総称  |
| RTK-GNSS            | Real Time Kinematic-GNSS：GNSS 測位方式の1つで、基準局と観測点で同時にGNSS 観測を行い、両点で観測した電波の位相を用いて誤差を消去することで、数cmの誤差で位置を決定可能な測位方式   |
| IMU                 | Inertial Measurement Unit：慣性計測装置。UAV 機体の姿勢や運動を計測する加速度センサーとジャイロセンサーからなる  |
| SfM                 | Structure from Motion（三次元形状復元計算）：異なる視点から撮影された複数の写真（または動画）から対象物の三次元形状を復元する技術。正確には、「MVS（Multi-View Stereo）：多視点ステレオ」と組み合わせたSfM/MVS 技術と呼ばれるが、本手引きでは総称してSfMと表記する |
| DSM                 | Digital Surface Model：数値表層モデル。植生や人工物を含む表層高さのデータ。レーザ計測におけるオリジナルデータに相当  |
| DEM                 | Digital Elevation Model：数値標高モデル。植生や人工物を除去した地盤高さのデータ。地表面や雪面形状を表すモデルとなる。レーザ計測におけるグラウンドデータに相当  |
| 三次元点群               | 地形に係わる情報の水平位置、標高に加え、空中写真の色情報を属性として、計算処理が可能な状態として表現したもの  |
| 三次元点群データ            | 平面位置座標を有する標高の集合   |
| 三次元モデル              | 三次元点群データをもとに形成される多角形の集合体により構成され、解析に活用しやすい形にしたポリゴンモデル  |
| オリジナルデータ            | レーザ計測で取得した全ての点を含む点群データ  |
| グラウンドデータ            | 植生や人工物等の地物を除去した地表面を表わす点群データ   |
| グリッドデータ             | 点群データから作成する一定の格子間隔における標高データ   |
| フィルタリング             | オリジナルデータから植生や人工物等の点群を除去する作業   |
| 地上基準点               | SfM に必要となる水平位置及び標高の基準となる点（標定点）と、三次元点群の検証を行う点（検証点）の総称。GCP（Ground Control Point）とも呼ばれる。   |



| 用語              | 用語の定義  |
|-----------------|--|
| <b>雪崩に関する用語</b> |  |
| 雪崩              | 斜面に積もった雪が重力の作用により斜面上を肉眼で識別できる速さで流れ落ちる現象  |
| 表層雪崩            | すべり面から下層の積雪を残し、上部の積雪のみが崩落する雪崩 <sup>1)</sup>  |
| 全層雪崩            | 積雪の表層から地面までの全層が崩落して落下する雪崩 <sup>1)</sup>  |
| 発生区             | 雪崩の発生した形跡のひとつで、積雪が破壊し動き始める区域 (図 2(a))  |
| 堆積区             | 雪崩の発生した形跡のひとつで、崩れ落ちた雪の運動が停止し運ばれた雪が堆積する区域 (図 2(a))  |
| 走路              | 雪崩の発生した形跡のひとつで、発生区から堆積区までの雪崩の道筋 <sup>1)</sup> (図 2(a))   |
| デブリ             | 雪崩により運ばれた雪が堆積区で堆積した雪崩堆積物   |
| 見通し角            | 堆積区の末端から発生区を見通した仰角。見通し角は、表層雪崩では $18^\circ$ 以上、全層雪崩では $24^\circ$ 以上となることが経験的に知られている <sup>1)</sup> (図 2(b))。 |

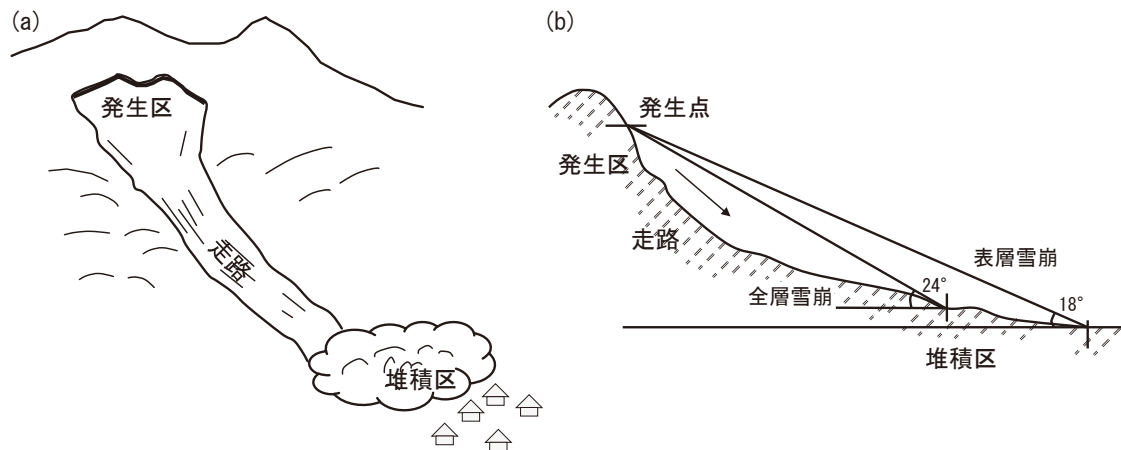


図 2 雪崩発生区・走路・堆積区イメージ(a)及び見通し角イメージ(b)

## 1.4 UAV 活用の利点

UAV を活用した調査は、遠隔地点から面的な調査が実施できるため、調査の安全性が向上し、迅速な雪崩全体の状況把握により住民避難や応急対策の迅速な立案が可能となる。加えて、三次元モデルを作成することで、雪崩の諸元をより詳細に把握して効果的な対策を検討することが可能となる。

### 【解説】

#### (1) 従来の雪崩災害調査の課題

雪崩は山間地で発生し、発生区は斜面上部であり、冬季には現地へのアクセスが限られ、調査者にも積雪地での調査の装備及び経験が必要となる。また、経験ある調査者の準備や広い範囲を現地踏査で確認するためには時間を要し迅速さには限界があった。そのため、以下のような課題があった。

- ①発生区の範囲や規模の把握が難しい。
- ②堆積区の範囲や規模の把握が難しい。
- ③周辺斜面の状況が把握できず、迅速に二次発生リスクの判断が難しい。
- ④上記に伴い、住民避難の必要性など、効果的な警戒避難対策が難しい。
- ⑤調査に入るまでの時間経過による降雪や融雪により雪崩の痕跡が消え、雪崩の状況が不明となる。
- ⑥雪崩の二次発生に伴う被災リスクなど調査従事者の危険が大きく、調査の安全確保に課題。

#### (2) UAV 活用の利点

UAV を活用した調査は、雪崩発生源とその周辺斜面などを、遠隔の安全が確保された地点から調査が可能となる。また、短時間で広い範囲の状況を把握するなど迅速かつ効率的な調査が可能となる。

三次元モデルを作成できる精度で調査を行えば、発生面積、破断面の高さ、堆積範囲の計測から発生量の推定が可能となり、発生区の周辺斜面における積雪分布・積雪深やクラック有無などを確認することで、二次的な雪崩発生リスクの判断材料が得られ、これに基づき警戒避難対策や量的な判断材料に基づく効果的な応急対策工の検討が可能となる。

##### ①雪崩の発生量の推定

三次元モデル上で、発生面積の計測、破断面の高さから発生層厚の計測ができ、ここから発生量の推定が可能となる。

##### ②発生区～堆積区までの状況・到達距離の把握

雪崩全体を三次元モデル化することにより、発生区～堆積区までの状況や到達距離が把握できる。UAV 航空レーザ測量を使用すれば樹林内の堆積範囲も含めて正

確な堆積範囲の把握が可能となる。

**③二次発生リスクの判断**

UAV による写真や三次元モデルから雪崩発生区周辺斜面における積雪状況やクラックの有無を確認することにより、二次的な雪崩発生リスクの判断材料とすることが可能となる。

**④調査の安全性の向上**

地上からの雪崩発生源周辺への到達が困難かつ危険を伴う場合であっても、平地から安全に調査することが可能となる。

**⑤調査の迅速性向上**

従来の地上踏査では非常に時間を要していた調査も、UAV により迅速かつ効率的な調査が可能となる。

**⑥現地状況に応じたリスク評価に基づく警戒避難対策の検討**

三次元モデルで把握した周辺斜面の積雪状況やクラックの有無等から、現地状況に応じた二次発生リスクの評価に基づき警戒避難対策を講じることが可能となる。

**⑦定量的な把握に基づく応急対策の検討**

三次元モデルで把握した発生量や到達距離等の把握に基づき、雪堤や土のう積み等の応急対策工の規模検討が可能となる。

## 1.5 調査手法ごとの特性

UAV を活用した調査手法には、以下の通り、主に①空中写真撮影、②空中写真測量、③航空レーザ測量がある。

- |          |                                |
|----------|--------------------------------|
| ①空中写真撮影  | 上空から斜め写真または垂直写真を撮影するもの         |
| ②空中写真測量  | 撮影した写真を合成し、三次元モデルを作成するもの       |
| ③航空レーザ測量 | レーザプロファイラによる計測により三次元モデルを作成するもの |

### 【解説】

本手引きでは、以下の構成で調査手法ごとに具体的な手順を示す。

第2章…②空中写真測量についての具体的な手順

第3章…③航空レーザ測量についての具体的な手順




第4章…②及び③の調査時チェックリスト案(4.1)、計測方法別の精度検証事例(4.2)及び雪崩計測事例(4.3)

なお、①空中写真撮影についての手順は、②空中写真測量に準じたものとなるため、第2章を参考とする。

雪崩調査の場合、①空中写真撮影は、発生区や堆積区の状況の確認などの雪崩全体の状況把握を優先して迅速な調査を行う場合に適している。②空中写真測量は、写真撮影に加えて三次元で形状を把握し雪崩諸元を計測して、二次発生を検討や避難の判断を行う場合などに用いる。③航空レーザ測量は、②よりも高精度に計測が必要な場合や樹林内の流下・堆積範囲を確認する場合に有効である。各手法の特性を比較した結果を表1、各手法の作業の流れ及び概略の所要時間の目安を表2に示す。

なお、各手法が適用できる現場条件、各手法で得られる情報・精度、各手法の着手から完了までの迅速性や難易度、費用などの特性が異なるため、各現場に適した手法を選択することが重要である。

表 1 UAV 調査手法ごとの特性比較※<sup>1</sup>

| 調査手法         | ①空中写真撮影<br> | ②空中写真測量<br> | ③航空レーザ測量<br> |
|--------------|--|---|---|
| 発生区から堆積区等の把握 | ○  | ○   | ○   |
| 三次元形状の把握     | —  | ○   | ◎   |
| 雪崩諸元計測       | —  | ○   | ◎   |
| 計測精度         | —  | ○ <sup>※2</sup>   | ◎ <sup>※2</sup>   |
| 欠損領域の低減      | ○  | △ <sup>※3</sup>   | ○   |
| 樹林内の計測       | —  | —   | ○   |
| 調査の迅速性       | ○  | ○   | △ <sup>※4</sup>   |
| 調査の難易度       | 容易   | 中程度   | 高度  |
| 費用           | 安  | 中   | 高   |

※<sup>1</sup> 他手法と比較して、◎：特に優れる、○：優れる、△：劣る、—：把握もしくは計測できないため比較不可 を表わす。

※<sup>2</sup> 適切に標定点を設置し、必要な補正を行った場合

※<sup>3</sup> 雪面の写真合成において、特徴点が少ない場合に欠損領域が生じる場合がある

※<sup>4</sup> 有人航空機と比べれば機動性に優れるが、機体の運搬性の面で写真用 UAV には劣る

表 2 各調査手法の作業ごとの所要時間の目安※<sup>1</sup>

| 調査手法                     | ①空中写真撮影              | ②空中写真測量              | ③航空レーザ測量             |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 基準点設置・測量                 | —                    | 1 時間                 | 1 時間                 |
| 飛行準備 <sup>※2</sup>       | 0.5 時間               | 1 時間                 | 1 時間                 |
| 撮影・計測                    | 0.5 時間 <sup>※3</sup> | 0.5 時間 <sup>※3</sup> | 0.5 時間 <sup>※3</sup> |
| 撤収作業                     | 0.5 時間               | 1 時間                 | 1 時間                 |
| 三次元点群データ作成 <sup>※4</sup> | —                    | 0.5～1 日              | 1～2 日                |
| 合計                       | 1.5 時間               | 1～2 日                | 2～3 日                |

※<sup>1</sup> 所要時間は、雪崩・地すべり研究センターで実施した調査における概略時間を記載（調査範囲は、おおむね 900m×900m 程度の規模）。なお、離発着地点から調査対象領域までの距離や当該領域の地形、その他環境によって、所要時間は大きく影響を受けることを留意する必要がある。

※<sup>2</sup> 出発前に実施する機体準備やリチウムイオンポリマーバッテリー充電にかかる時間は含まない。

※<sup>3</sup> 市販されている標準的な UAV での 1 フライトの時間

※<sup>4</sup> ここでの三次元点群データは、DSM を指し、DEM の作成は含まない。

## 1.6 UAV 活用時の留意事項

UAV を活用した調査を行う際は、航空法、小型無人機等飛行禁止法、電波法などの UAV に関する法令、飛行経路周辺の土地所有権・プライバシーへの配慮や森林法や自然公園法などの関係法令及び条例、各種手続きの最新の情報を把握する必要がある。

また、第三者に危険が及ばないように、必要な安全管理を行う。さらに、上空からの不可視や陰影が少ない雪面の撮影手法などの技術的特性をよく理解して適切な調査を実施することが必要となる。

### 【解説】

#### (1) 各種法令等に係る確認・申請

UAV の飛行に係る法令には主に以下のものがある。各法令では、飛行が禁止される場所や方法、必要な申請手続きが定められており、これを遵守する。

##### ・航空法<sup>2)~7)</sup>

飛行禁止区域や飛行方法が定められており、空港等の周辺の上空の空域、地表又は水面から 150m 以上の高さの空域（地上又は水上の物件から 30m 以内の空域は除く）又は、人口集中地区の空域、目視外飛行、人又は物件との 30m 未満の飛行など規定の範囲を超えた場所・方法での飛行には事前に許可申請が必要となる<sup>7)</sup>。

また、令和 4 年 6 月 20 日以降、機体本体とリチウムイオンポリマーバッテリー（以下、リポバッテリーという）重量合計 100 グラム以上の無人航空機は、機体登録、登録記号の表示、識別措置（リモート ID）が義務化されている。なお、UAV の飛行ルールについては、最新の情報<sup>例えば、3)</sup>を常に把握するように努める必要がある。

##### ・電波法<sup>8), 9)</sup>

UAV の操縦等に使用する無線機器について、電波法で周波数・出力が定められており、技術基準適合証明を取得した機体を用いる。

##### ・重要施設の周辺地域の上空における小型無人機等の飛行の禁止に関する法律（小型無人航空機飛行禁止法）<sup>10), 11)</sup>

特定の場所の周辺地域及びその上空について、小型無人機等の飛行に関する事項が定められている。特定の場所とは、国会議事堂などの国の重要な施設等、外国公館等、防衛関係施設、空港及び原子力事業所である。対象施設の敷地又は区域及びその周囲おおむね 300 メートルの地域を対象施設周辺地域と定められ当該地域での小型無人機等の飛行が原則禁止されている。

#### (2) 関係者との調整

UAV を飛行させる場合は、上記法令以外に手続きが必要となる場合があり、該当する区域や施設がある場合には各法令の規程や手続きを確認する。

主に想定されるものを以下に示す。

- ・河川、海岸、道路（河川法、海岸法、道路法）  
それぞれの区域において、無人航空機を飛行させようとする場合、許可申請が必要な場合や、管理者がルールを定めている場合があるので、事前に飛行可能な区域かを管理者に相談・確認をする。
- ・道路（道路交通法）  
道路上を離発着地点に定める場合、第76条の禁止行為に該当する可能性があるため、所轄警察署に事前に相談・確認をする。
- ・鉄道  
調査対象領域内もしくは近傍において、鉄道関係施設が確認された場合は、物件（鉄道車両、高圧線、変電所、電波塔等の関係施設）との30m未満の飛行<sup>2)</sup>に該当する可能性があることや高圧線等からの電波干渉によりUAVが操縦不能となるおそれがあるため、十分な距離（50m以上）<sup>12)</sup>を保った飛行の計画を立てた上で、鉄道会社に事前に相談・確認をする。
- ・国有林（森林法）  
国有林内での飛行には、森林管理署へ入林届が必要となる<sup>例えば、13)</sup>。
- ・国立公園（自然公園法）  
国立公園内での飛行には、事前に管理者に相談が必要となる<sup>例えば、14)</sup>。
- ・都市公園（都市公園法）  
都市公園内での飛行には、飛行を禁止することが多いため、事前に管理者に相談が必要となる。
- ・文化財（文化財保護法）  
重要文化財周辺での飛行には、UAV落下時に重要文化財を傷つけてしまうおそれもあることから、飛行前には事前に、施設管理団体に相談が必要となる。
- ・その他（民法、刑法、軽犯罪法、迷惑防止条例など）<sup>例えば、15), 16)</sup>  
土地の所有権は土地の上空にも及ぶため、私有地や民間施設の上空での飛行は土地所有者等への配慮（事前承諾）が求められる。また、UAVで撮影した画像についてプライバシーや肖像権への注意が必要となる。

### （3）安全管理に係る作業

UAVの飛行にあたっては、操縦者自身及び第三者に危険が及ばないよう各段階において安全管理を行う。以下に、各段階における主な確認・実施事項を挙げる。なお、下記以外の事項を含め、詳細は「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン<sup>2)</sup>」や「公共測量におけるUAVの使用に関する安全基準（案）<sup>12)</sup>」を参照する。

#### ①飛行計画作成時

- ・コース設定  
飛行禁止区域、人家、道路、高圧線などから十分な離隔を取った上で、UAVが目視できる範囲内でのコース設定を行う（目視外飛行は航空法による申請が必

要)。なお、高圧線や電波塔などの周辺では電波干渉により UAV が操縦不能となるおそれがあるため、十分な距離（50m 以上）を保った飛行を考慮した計画とする<sup>2), 12)</sup>。

- ・フライト設定

使用する UAV の機体性能（飛行可能時間や飛行可能高度等）を考慮した無理のないフライト設定を行う。

- ・人員配置

必要な資格を有し十分な経験を有する操縦者及び機体確認や周囲の安全確認に必要な人数の補助員を配置する。

## ②現地作業時

- ・作業時間

飛行は日の出から日没までの日中とする。（夜間飛行は航空法による申請が必要）

- ・降雨や強風等の気象状況

降雨時や降雪時、強風時などは UAV の安全飛行に支障が生じるため調査ができない。降雨時に飛行が可能な機種もあるが、多くの UAV は防水仕様でないこと、レンズに雨滴が付着すると撮影が困難な場合があることから、調査時は気象状況（降雪・降雨・霧の有無、風速や気温が機体性能の範囲内等）を事前に把握する必要がある。

- ・作業場所の安全確保

離陸地点や操縦場所周辺の安全確認、UAV が目視できる位置での操縦、周囲の通行者や交通への安全が確保できているかを確認する。

- ・機体確認

使用する機体の点検・整備、リポバッテリーの残量・損傷状況・温度などを確認する。

- ・衛星捕捉状況

安全な飛行に必要な GNSS 衛星捕捉数を満たしているか（※自律飛行を行う場合）

- ・電波状況

機体と送信機との通信電波強度を確認する。

## （４）UAV 空中写真測量・レーザ測量及び UAV 機体の性能限界

- ・空中からの不可視部分について

UAV による空中写真測量では、上空から不可視となる樹林内の雪崩流下・堆積範囲は調査できないため、レーザ計測など適切な手法の選択が必要となる。

- ・雪面の陰影について

くもりの天候などで雪面の陰影が乏しい状況では、写真合成による三次元モデル作成が困難または不完全となる場合があり、カメラの設定や調査時の気象及び時間帯などに留意して実施することが必要となる。



- ・積雪内部の詳細調査について

雪崩発生区の破断面の詳細な観察や、積雪層構造・雪質・密度など積雪内部の情報は UAV による空中写真測量やレーザ測量では取得できないため、目的によって適切に使い分け、組み合わせた調査が必要となる場合もある。

- ・UAV 機体本体の性能限界

UAV では機体ごとの性能によって、飛行限界高度、送信機との伝送距離（通信可能距離）等の制約があり、これを越えた飛行はできない。また、UAV に使用されるリポバッテリー一本あたりの駆動時間を把握した上で、複数本のリポバッテリーを準備する必要がある。なお、リポバッテリーは、低温環境時には急激に性能が落ちるため、雪崩調査実施にあたっては、リポバッテリーを保温するとともに、UAV の送信機においてリポバッテリーの温度を確認した上で UAV による調査を実施する必要がある。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人日本雪氷学会編：新版雪氷辞典，古今書院，2014
- 2) 国土交通省航空局：無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン，<https://www.mlit.go.jp/common/001303818.pdf>，参照 2022-07-31，2022
- 3) 国土交通省航空局：無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール，[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)，参照 2022-07-31，2022
- 4) 国土交通省航空局：無人航空機の飛行ルール，<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001465741.pdf>，参照 2022-07-31，2022
- 5) 国土交通省航空局：無人航空機を屋外で飛行させるために必要な手続きフロー，<https://www.mlit.go.jp/common/001485447.pdf>，参照 2022-07-31，2022
- 6) 国土交通省航空局：航空法第 132 条の 3 の適用を受け無人航空機を飛行させる場合の運用ガイドライン，<https://www.mlit.go.jp/common/001110204.pdf>，参照 2022-07-31，2022
- 7) 国土交通省航空局：無人航空機の飛行許可・承認手続，[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html)，参照 2023-01-17
- 8) 総務省：ドローン等に用いられる無線設備について，<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>，参照 2022-07-31
- 9) 総務省：外国製無線機，<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/monitoring/summary/qa/yunyumusenki/index.htm>，参照 2022-07-31
- 10) 警察庁警備局：小型無人機等飛行禁止法関係，<https://www.npa.go.jp/bureau/security/kogatamujinki/index.html>，参照 2022-07-31
- 11) 警察庁警備局：小型無人機等飛行禁止法の概要，<https://www.npa.go.jp/bureau/security/kogatamujinki/pdf/gaiyou.pdf>，参照 2022-07-31
- 12) 国土交通省国土地理院：公共測量における UAV の使用に関する安全基準（案），[https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/doc/anzen\\_kijun\\_160330.pdf](https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/doc/anzen_kijun_160330.pdf)，参照 2022-07-31，2016
- 13) 林野庁中部森林管理局：国有林野内で無人航空機（ドローン、ラジコン機等）を飛行させる場合，[https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/introduction/gaiyou\\_kyoku/nyurinkyoka/dorohikou.html](https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/introduction/gaiyou_kyoku/nyurinkyoka/dorohikou.html)，参照 2022-07-31
- 14) 環境省信越自然環境事務所：国立公園内におけるドローンの使用について【注意喚起】，[https://chubu.env.go.jp/shinetsu/pre\\_2022/drone\\_R4.html](https://chubu.env.go.jp/shinetsu/pre_2022/drone_R4.html)，参照 2022-07-31，2022
- 15) 総務省：「ドローン」による撮影映像等のインターネット上での取扱いに係るガイドライン，[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000376723.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000376723.pdf)，参照 2022-07-31，2015
- 16) 国土交通省航空局：無人航空機の飛行を制限する条例等，<https://www.mlit.go.jp/common/001370402.pdf>，参照 2022-07-31，2022

## 2 UAVによる空中写真測量に基づく調査

### 2.1 調査手法の概要

UAVによる空中写真測量は、UAVにより撮影した空中写真から三次元モデルを作成して、必要な諸元を計測できるデータを得るものである。

雪崩調査においては、三次元点群データから三次元モデルを作成することにより、写真撮影のみではわからない高さ、長さや量などの諸元や保全対象のある斜面下部側の地形を詳細に把握する。これにより、雪崩の規模・発生メカニズム、被害想定範囲などの検討を実施することが可能となる。

#### 【解説】

空中写真測量に基づく調査の流れを図3に示す。

手順①～③の現場作業により空中写真を撮影し、手順④⑤の内業により三次元点群データを作成して雪崩諸元を計測する。

なお、雪崩全体の状況把握のみを目的とし計測精度を求めない場合は、手順②地上基準点設置を省略することもできる。また、雪崩諸元の計測を必要としない場合は、手順⑤モデル上での計測を省略することができる。

調査により入手したい情報と精度を念頭に置いた上で、作業手順を定め、選択することが重要である。

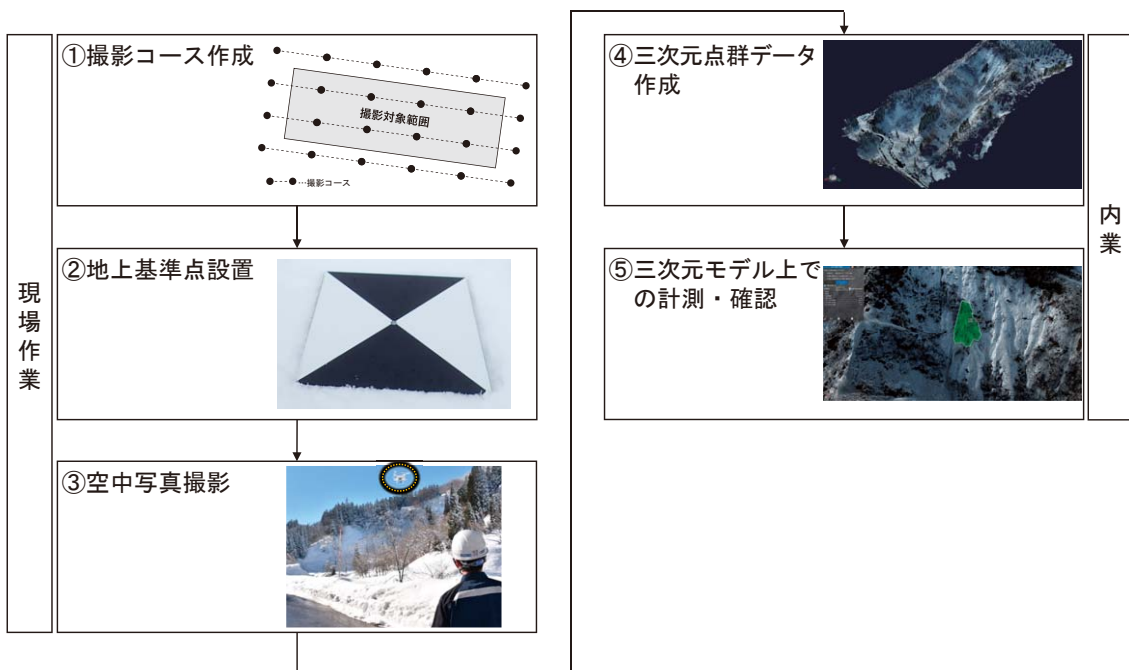


図3 空中写真測量に基づく調査の流れ

## 2.2 使用機材の準備

UAV による空中写真測量では、UAV 本体、操作端末、自動操縦ソフトウェアなどの空中写真撮影に使用する機材のほか、三次元点群データ作成のために SfM ソフトウェア及び点群処理ソフトウェアを準備する。

雪崩発生後の調査には迅速性が求められることから、平時より機材の確認・保守を行うとともに、定期的な訓練を通じて扱い方に習熟しておくことが必要である。

### 【解説】

空中写真撮影及び三次元点群データ作成・編集に使用する主な機材は以下のものがある。それぞれ製品ごとに性能や特徴が異なるため、最終的に得たいデータの精度や使用目的に応じて適したものを選定する。

- (1) UAV (機体及び送信機)
- (2) UAV 操作端末
- (3) 自動操縦ソフトウェア
- (4) 対空標識・測量機材 …… 災害前地形との比較など絶対座標値が必要な場合。
- (5) SfM ソフトウェア
- (6) 点群処理ソフトウェア

各機材の概要については以下の通りである。なお、例として挙げる機材は本手引き作成時点で一般的に用いられるものを参考として記載しているため、機材選定にあたっては最新の情報を収集することが望ましい。

### (1) UAV (機体及び送信機)

UAV として一般的に用いられるのは、マルチコプターと呼ばれる複数のプロペラを持つ回転翼機である。マルチコプター型 UAV (たとえば、図 4) として多くの機種が販売されており、機種ごとに性能も様々である。なお、日本国内で使用が認められている無線機には、「技術基準適合マーク (技適マーク) (図 5)」が技術基準適合証明等を受けた証明として付けられているため、当該マークのある UAV を使用する必要がある。

以下に選定時の主なポイントを示す。

- ①飛行可能距離：離陸地点から到達可能な最大距離
- ②飛行可能高度：離陸地点から上昇可能な最大高度
- ③飛行可能時間：1 回あたりの最大飛行時間
- ④自動操縦機能：自動で飛行・撮影を行う機能の有無
- ⑤機体の安定性：風に対する機体の安定性や障害物検知機能の有無
- ⑥カメラの性能：画角や解像度等カメラの性能
- ⑦RTK-GNSS 測位機能の有無

①～③は、調査実施に必要なフライト数に影響する。このため、雪崩調査において、目視内飛行を実施する前提で、



図 4 UAV 機体  
(例 DJI Phantom4)



図 5 技術基準適合マーク

最大伝送距離 2km 以上（この距離は、①に関係する）、高度 100m 以上、飛行可能時間 30 分程度以上の能力があることが望ましい。

④の自動操縦機能がない場合は、送信機による遠隔操作で飛行・撮影も可能だが、SfM 処理のためには規定の重複度（重複度については、2.3 に記載）があることと、手動での操作には高い熟度を要するため、基本的には自動操縦機能を有する機体を使用する方が良い。

⑤は機体の大きさやプロペラ枚数等によって異なるが、機体安定性が高いほど風の影響を受けにくく安定した飛行が可能である。また障害物検知機能を搭載した機種であれば、周囲の障害物から一定距離を自動で確保した飛行ができるため安全性に優れる。雪崩調査では、発生区斜面での調査を実施することを考慮すると、前方向の障害物検知機能があると望ましい。

⑥は SfM 処理の精度に影響するため、できる限り高性能なカメラが望ましい。雪崩調査では、本手引き作成にあたって使用した UAV に付属していたカメラの性能で十分な成果を得ることができたことから有効画素数 2,000 万画素以上を推奨する。なお、有効画素数だけでなく、レンズ（画角、感度や絞りなど）や撮像素子などの全体としての性能が SfM 処理の精度に影響されることに留意する必要がある、どれだけ詳細に記録できるかについては、1 画素あたりの撮影幅すなわち画素分解能（mm/px、ミリメートル/ピクセル）が重要となる。たとえば、画素数が多くても広角レンズを使用した場合、画素分解能（撮影範囲）は広くなり、望遠レンズの場合は狭くなる。なお、カメラについては、機体に専用カメラが付属するものと任意のカメラを搭載可能なものがある。カメラの選定については、既往研究<sup>1)</sup>において撮像素子やレンズ、画像記録フォーマット、インターバル撮影機能の有無などについて述べているものがあり参考となる。

⑦は RTK-GNSS と呼ばれる方式の測位機能であり、近年搭載機が販売されてきている。従来の GNSS 測位と比較して、高精度の位置情報を取得することができるため、地上基準点の設置を省略しても高い測量精度を確保することが可能である。RTK-GNSS を搭載した UAV で空中写真撮影測量した結果、平均で 0.438m の誤差であった事例<sup>2)</sup>もあり、高精度の測量成果を求める場合は、当該機能を有した UAV を使用することも方法として考えられる。

## （2） UAV 操作端末

UAV の操作や飛行コース作成に使用する端末。UAV メーカー純正のものと一般的なタブレット端末（たとえば、図 6）やスマートフォンが使用可能。使用するソフトウェアにより機種が限定される場合がある。画面が大きい端末の方が飛行中の映像確認がしやすい。ただし、日射方向によっては、モニタ上の画像が見づらくなることもあるため、輝度が高いモニタの使用もしくはモニタに対してサンシェードの使用等を考慮する。



## （3） 自動操縦ソフトウェア

送信機から UAV を操縦する「遠隔操作」ではなく、予め

図 6 UAV 操作端末  
（例 タブレット）

設定した飛行ルートに沿って機体を自動操縦するためのソフトウェア（たとえば、図 7）。飛行コースを作成するだけでなく、複数枚の撮影画像から地形データ作成を行う場合は、撮影画像の重複度（重複度については、2.3 に記載）を設定することができるソフトウェアもあるため、要件を満たした写真を得るためには自動操縦が適当。

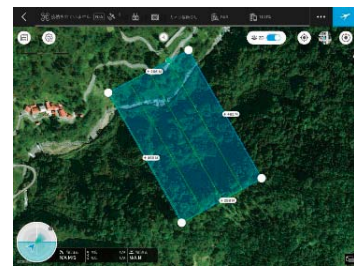


図 7 自動操縦ソフトウェア画面

#### (4) 対空標識・測量機材

地上基準点を設置する場合に使用する対空標識（図 8）と位置座標を測量するための機材（図 9）である。

対空標識は、空中写真上で明確に識別可能な大きさ、模様とする。対空標識を使うことにより、SfM 実施時に水平位置や標高の基準として用いることができるとともに、SfM によって作成した三次元点群の検証が可能となる。なお、対空標識は、調査対象領域で広範囲に多地点設置することが理想であるが、雪崩発生現場において、そのような対応は現実的でない。そのため、空中写真上で周辺地物との色調差が明瞭な構造物が測定できる場合は、その構造物を対空標識に替える、徒歩でアクセスしやすい箇所のみに対空標識を配置する、雪崩の発生区から堆積区の状況把握のためだけの調査であれば対空標識を配置しないなど、最終的な使用目的に合わせて、対空標識の配置方法を判断する。

位置座標の測量には、一般的なトータルステーションを用いる方法の他、RTK-GNSS 型の測量機器を用いる方法がある。後者は、機材が軽量で運搬性に優れ、簡易な作業で測量が可能である。

(例 DJI GS Pro)



図 8 対空標識



図 9 測量機材

#### (5) SfM ソフトウェア

UAV で撮影した空中写真から三次元形状復元計算を行い、三次元点群データを作成するソフトウェア（たとえば、図 10）。基本的には空中写真を指定するだけで自動的に合成処理が可能。ソフトウェアごとに合成精度や特性に差異がある。

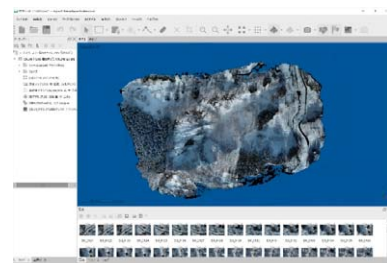


図 10 SfM ソフトウェア操作画面

(参考：ソフトウェアの一例)

・Agisoft Metashape

デスクトップ版に加えクラウド処理も可能

(例 Agisoft Metashape)

(Professional 版)。多くの出力ファイル形式に対応。生成される点群形状の見栄えがよい一方で形状変化点が平滑化されやすい特徴がある。

- Pix4D Pix4Dmapper

デスクトップ版に加えクラウド版がある（別製品）。出力ファイル形式は Metashape より少ない。生成される点群形状にばらつきが見られるが、形状変化点の再現性が比較的高い。

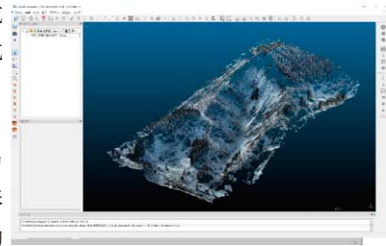


図 11 点群処理ソフトウェア  
操作画面

## (6) 点群処理ソフトウェア

作成した三次元点群データを表示・編集するソフトウェア（たとえば、図 11）。地図情報や既存の測量成果（基盤地図情報など）との重ね合わせをする場合は、GIS ソフトウェアを用いる必要がある。

(例 Cloud Compare)

(参考：点群処理ソフトウェアの一例)

- Cloud Compare

オープンソースで開発されているフリーのソフトウェア。点群の表示・編集・計測ができ、断面図作成や点群同士の差分解析も可能。

- 福井コンピュータ TREND-POINT

ICT 施工への活用を想定した多様な機能を持つソフトウェア。価格が 100 万円以上と高価な分、差分解析や数量計算をはじめ様々な計測・分析ツールを備える。

(参考：GIS ソフトウェアの一例)

- QGIS

オープンソースで開発されているフリーのソフトウェア。有志により様々な拡張機能が開発されており、それらを用いることで様々な分析が可能。

- ESRI ArcGIS

多様な機能を持つ商用ソフトウェア。基本機能は 40 万円程度であり、さらに有償の追加機能を用いることで高度な分析ツールが使用可能。

## 2.3 撮影コース作成

UAV 空中写真測量の撮影コース設定では、撮影された写真から三次元モデルを作成するため、目的とする三次元点群データの精度にあわせて、撮影範囲、対地高度、写真重複度、離発着地点の条件、対空標識・地上基準点の配置など所定の要件を満たすようコース設定を行う。

雪崩調査の場合には、雪崩の発生区、走路とデブリの堆積が想定される堆積区を対象に設定することを基本とするが、二次災害の防止や被害想定などを行う場合には下流側の保全対象を包含した区域まで連続した範囲を撮影範囲とする。

なお、現場条件によっては、地上から発生区や堆積区の正確な範囲が視認できない場合がある。その場合は、撮影対象範囲の確認のため、現場において本撮影前に遠隔操作で UAV を飛行し、モニタ上で範囲を確認した上で撮影コースを設定することがあるため、コース設定にあたっては現場での修正等を前提に計画する必要がある。

### 【解説】

飛行の安全性及び作成する三次元点群データの精度を確保するため、以下の点に留意してコースを設定する。

#### ① UAV 離着陸地点

周囲の安全が確保できる平坦な場所で、GNSS 衛星が捕捉できるよう上空視界が開けた場所を離着陸地点として選定する。

#### ② 撮影対象範囲

雪崩全体を包含する範囲を対象とすることが基本であるが、三次元点群データの精度を確保するため、それより一回り広い範囲を設定する必要がある（図 12(a)）。目安としては、雪崩発生域より外側に少なくとも 1 枚の写真が撮影されるよう撮影コースを設定する（図 12(b)）。

また、UAV 離着陸地点周辺に地上基準点を設置した場合は、それら基準点を含め、雪崩発生域まで連続した撮影範囲を設定する。

さらに、作成する三次元点群データの用途として二次発生危険性判断や応急対策工検討への活用を想定している場合は、雪崩発生区の周辺斜面や、堆積末端から下流の保全対象までを含む範囲を対象とするなど、目的に応じて広めの範囲を設定する。



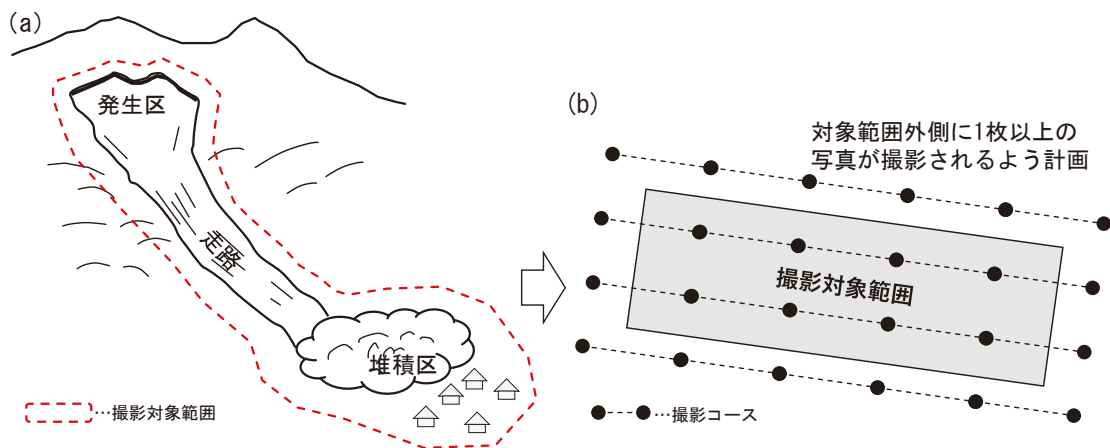


図 12 撮影対象範囲及び撮影コース設定イメージ

### ③対地高度

対地高度を上げれば1枚の写真に納まる範囲が広がり、撮影コース数や撮影枚数を減らすことができるが、地上分解能が落ちることとなり三次元点群データの精度低下につながる。一方で、対地高度を低く設定すると撮影コース数が増えるため、UAVの飛行可能時間との兼ね合いを考慮する必要がある。

対地高度が150mを超える場合は、地上等から150m以上の高さの空域を管轄する管制機関に対し事前調整を行い、支障の有無を確認のうえ、航空法により航空局への申請が必要になる<sup>3)~5)</sup>。ただし、地表又は水面から150m以上の空域であっても、物件から30m以内の空域については飛行禁止区域から除外される。なお、高度設定の方法には以下の2種類がある。

方法1：離陸地点からの高度を一定に保つ飛行方法（図13(a)）

方法2：地表面に対する高度（対地高度）を一定に保つ飛行方法（図13(b)）

地上分解能を一定に保ち SfM 処理の精度を上げるためには、地形に沿って飛行する方法2（図13(b)）の方が望ましい。ただし、コースを作成するソフトウェアの種類により高度設定の方法に制限があるため、目的に応じて適したソフトウェアを選択する必要がある（例えば、VC Technology Litchi は方法1と2の両方の設定が可能であるが、DJI GS Pro は方法1のみ可能）。

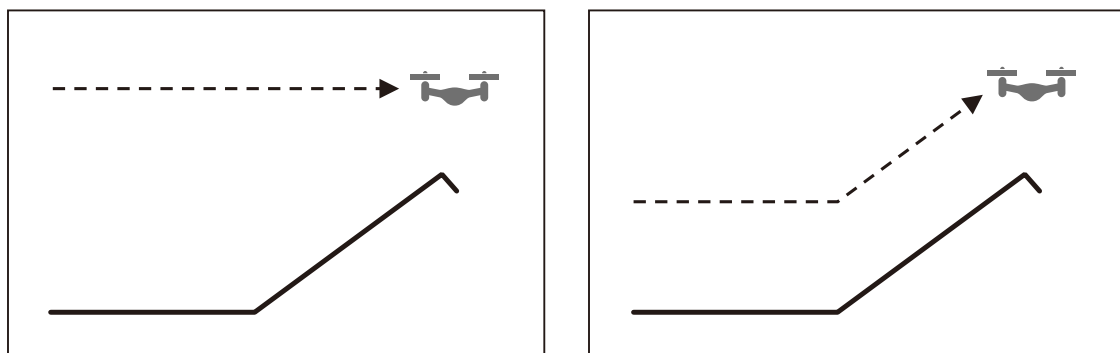


図 13 UAV 飛行高度の種類

(a)：方法1（高度一定）、(b)：方法2（対地高度一定）

#### ④写真重複度（オーバーラップ率、サイドラップ率）

三次元点群データ生成の精度を確保するため、隣接する撮影画像同士は所定の重複度（重なり合いの割合）を確保する。機体進行方向に対しての撮影画像の重複度をオーバーラップ率、機体進行方向に対して横（並行するコース間）の撮影画像の重複度をサイドラップ率と言う。それぞれの割合は、撮影後に写真の重複度の確認が困難な場合は、90%以上、60%以上が確保できるよう撮影計画を立案することを標準とすることが規定されている<sup>6)</sup>。なお、これら重複度のイメージを図 14 に示す。

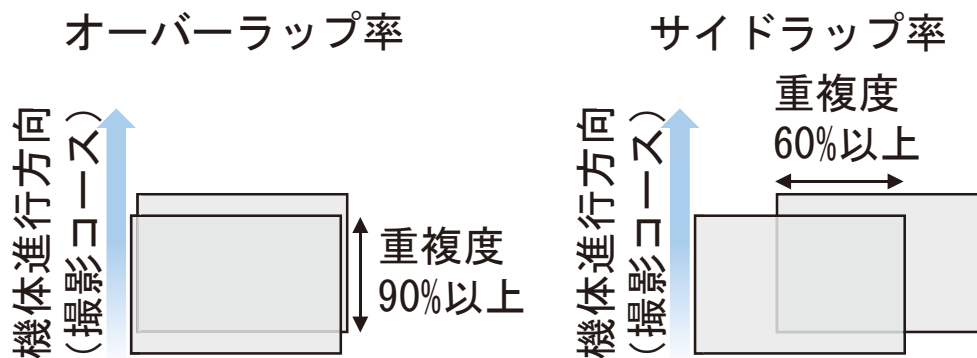


図 14 撮影画像重複度のイメージ

#### ⑤障害物の回避

現場に存在する鉄塔や電線といった障害物から十分な離隔を確保し、安全に飛行可能なコースを設定する。なお、飛行の方法として UAV と物件（工作物、車両等）との間に 30m 以上の距離を確保することが示されている（30m 未満の場合は、承認が必要）<sup>7)</sup>。ただし、送電関係施設（高圧線・変電所等）が撮影対象範囲周辺にある場合、電波干渉により UAV が操縦不能となるおそれがあるため、十分な距離（50m 以上）を保った飛行とする必要がある。

そのため、飛行計画作成時に、事前に現地において、これら物件の位置を確認し、障害物を回避する計画を立てることが重要である。

## 2.4 地上基準点設置

作成する三次元点群データに正確な位置座標を与えるため、空中写真撮影範囲内に地上基準点を設置する。

地上基準点は、全体の位置誤差を最小化するために、撮影対象範囲全域にわたって均等に配置することが望ましい。

雪崩発生域など地上基準点の配置ができない場合、UAV 離着陸地点周辺に1点から数点の地上基準点を設置することで、大幅に位置誤差を低減することができる。

なお、SfM ソフトウェアの特性によっては、地上基準点を偏った配置にすると全体がゆがんだ形に補正されることがあるため、ソフトの特性をあらかじめ把握しておく。

### 【解説】

一般的な UAV は GNSS による測位機能を有しており、UAV により撮影した写真にも撮影時点の機体位置を表わす緯度経度や高度情報が書き込まれていることが多い。これらの座標情報を用いることで、SfM により作成した三次元点群データにも位置座標を付与することが可能である。

しかし、GNSS には数m以上の誤差が存在しており、また機体高度の計測に用いられる気圧センサーにも大きな誤差が生じる場合がある。結果として、特に高度情報には大きい場合で数十m単位の誤差が生じる場合もある。

上記の位置誤差は、雪崩の発生区周辺斜面での雪庇、雪庇等の崩落によるスノーボールの発生、クラック、雪しわの有無確認、走路での残雪の有無確認及び堆積区でのデブリの堆積状況の確認など、雪崩全体の状況を確認する目的のみであれば大きな問題とはならない。

一方、既存の地図情報との重ね合わせをする場合や、雪崩発生前の地形データとの差分解析を行う場合には、上記の位置誤差は大きな問題となるため、SfM に必要となる水平位置及び標高の基準としてさらに三次元点群の検証を行うためにも、地上基準点を設置する。

地上基準点として対空標識 (図 15) を設置する場所は、上空が開けており、複数の写真に写り込む場所が効果的である。設置した対空標識の中心位置を GNSS やトータルステーション等で測量することにより、基準点の位置座標を得る。

ここで得られた位置座標を、SfM ソフトウェア上で各写真に写り込んだ対空標識の平面位置座標及び標高として指定することにより、精度の良い三次元点群データを作成することが可能である。

地上基準点は、撮影対象範囲全域にわたってほぼ均等に配置 (対象範囲の外周及び内部に配置) することが望ましい (図 16(a))。しかし、雪崩の発生現場において、発生域に近づくことが困難な場合が多く、均等配置は現実的でない。そのため、アクセスのしやすい UAV 離着陸地点周辺に複数点の地上基準点を設置する、空中写真上で周辺地物との色調差が明瞭な構造物が測定できる場合は、その構造物を対空標識に代える (図 16(b)) などの対応をすることで、大幅な位置誤差の発生を防ぐことができる。

ただし、SfM ソフトウェアの特性によっては、偏った配置の地上基準点を用いると、全

体が歪んだ形に補正されてしまう場合もあるため注意が必要である（詳細は 4.1 参照）。

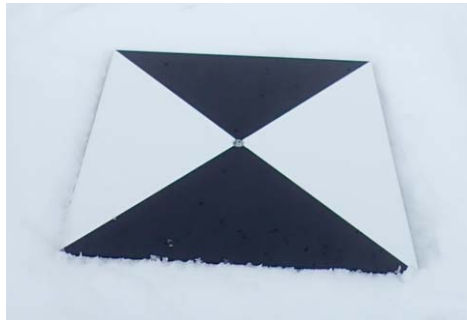


図 15 対空標識の例

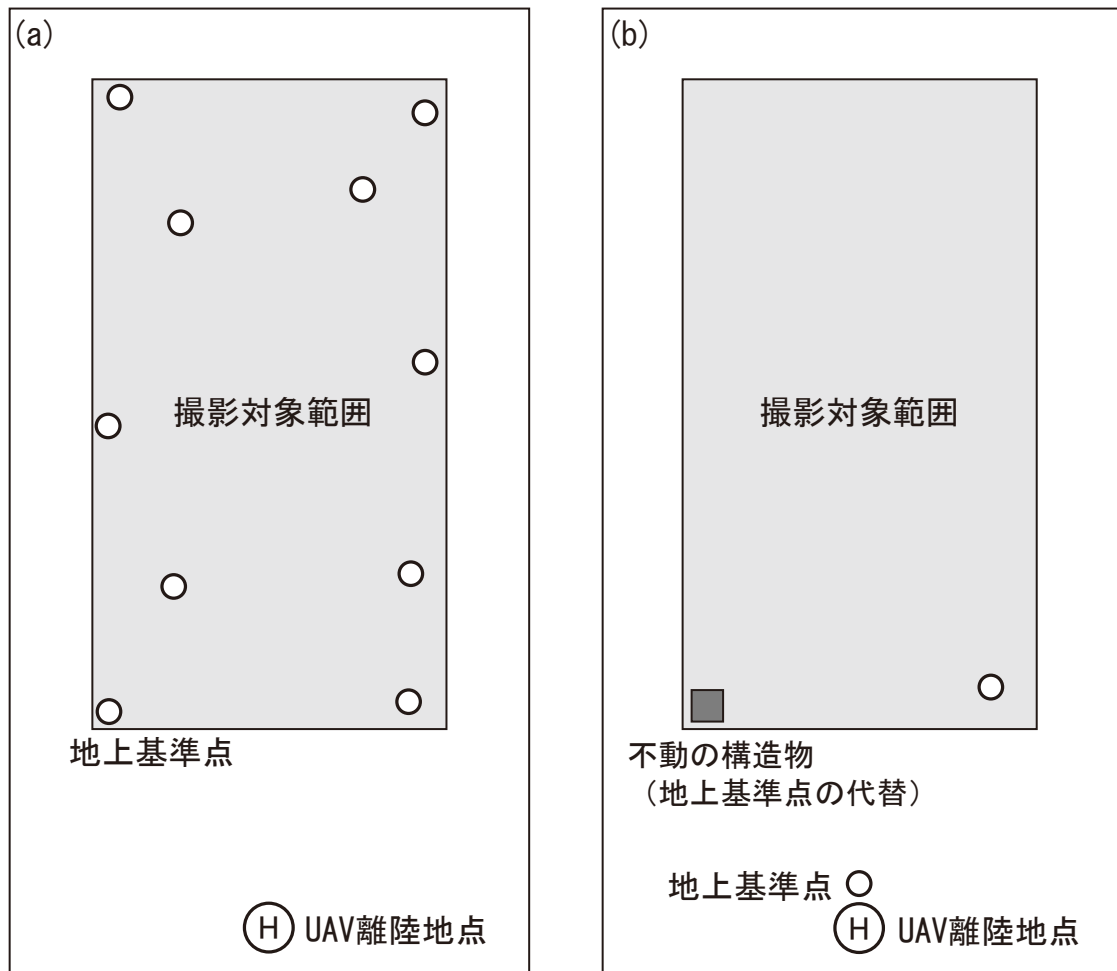


図 16 地上基準点の配置イメージ

(a) : 対象範囲全域に均等配置する場合

(b) : UAV 離陸地点付近に数点設置する場合

## 2.5 空中写真撮影

空中写真測量の撮影を行う場合、事前に作成した撮影コースに沿って UAV を飛行させ、撮影を行う。

SfM 処理に適した写真を得るためには、撮影時の天候や時間帯、一定速度での飛行並びに等間隔での撮影などの UAV 及びカメラの設定・調整を適切に行うことが必要である。

### 【解説】

自動操縦の場合、離発着時以外は高度な操作は必要としないが、雪崩撮影時に特有の課題があるため、撮影条件への配慮が必要である。また、本撮影の前に手動による事前飛行を行い、撮影画像を画面上で確認しながらカメラ設定等を調整することが望ましい。本撮影の実施後にも範囲や画質など適切な写真が撮影されているか確認し、問題がある場合はコース設定やカメラ設定等を修正して再撮影を行う。

雪崩撮影時の特有の課題として、雪面を撮影した写真は明度や色相など色調の変化に乏しくなりがちであり、SfM による写真同士のマッチングに使用する特徴点が不足すると三次元点群生成の精度が著しく低下し、条件によっては大部分の点群が生成できない場合もある (図 17(b))。

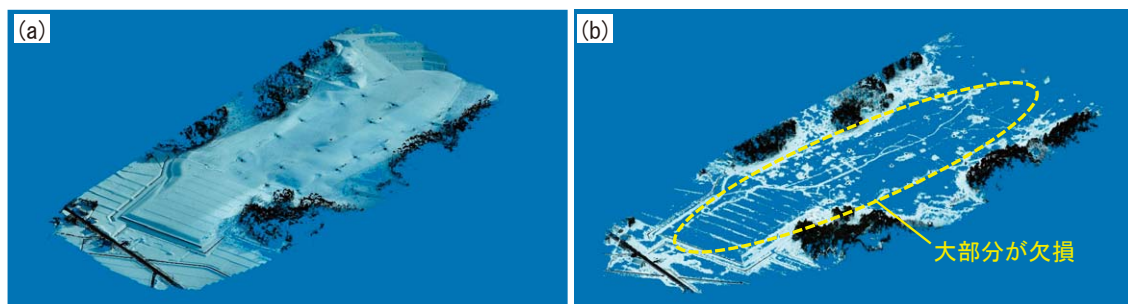


図 17 撮影条件による点群欠損率の違い

(a) : 欠損率小 (晴れで陰影大)、(b) : 欠損率大 (くもりで陰影に乏しい)

これらの対策としては下記が考えられる。現場状況や撮影時の条件に応じてこれらの方法を組み合わせて SfM 処理に適した写真が得られるよう工夫する必要がある。

### 【SfM 処理に適した写真を得るための留意事項】

#### ・撮影時の天候

晴天時の方が雪面に陰影が出やすく SfM 処理に適しているが、雪面の反射が強すぎると白飛びが発生するため、後述のカメラ設定などで調整が必要となる。

#### ・撮影の時間帯

陰影ができてにくい現場環境の場合は、早朝や夕方など陰影が出やすい時間帯に撮影を行うことで SfM 処理に適した写真が得られる場合がある。

#### ・カメラ設定

写真に白飛びや黒つぶれがあると SfM 処理の精度が低下するため、それらが発生しないようカメラ設定を調整する。具体的には下記の項目で調整を行う (カッコ内は一般

的な UAV のカメラ設定画面における表記)。

\* ISO 感度 (ISO)

: 光に対する感度。数字が大きいほど明るく写るがノイズが増える

\* 絞り (Aperture)

: レンズに入る光を絞る量。数字が大きいほど暗く写る

\* シャッタースピード (Shutter)

: シャッターを開く速さ。数字が大きいほど暗く写る

\* 露出値 (EV)

: 写真の明るさを表わす値。数字が大きいほど明るく写る

なお、天候や露出設定を変更した際の UAV 写真の例を図 18 に示す。晴れの時と比べて、くもり時に撮影した写真の方が陰影に乏しく (図 18①と②)、露出値を大きくすると、場所によっては画像の明るい部分が真っ白に写る「白とび」が発生することが確認された (図 18①と③もしくは図 18②と④)。

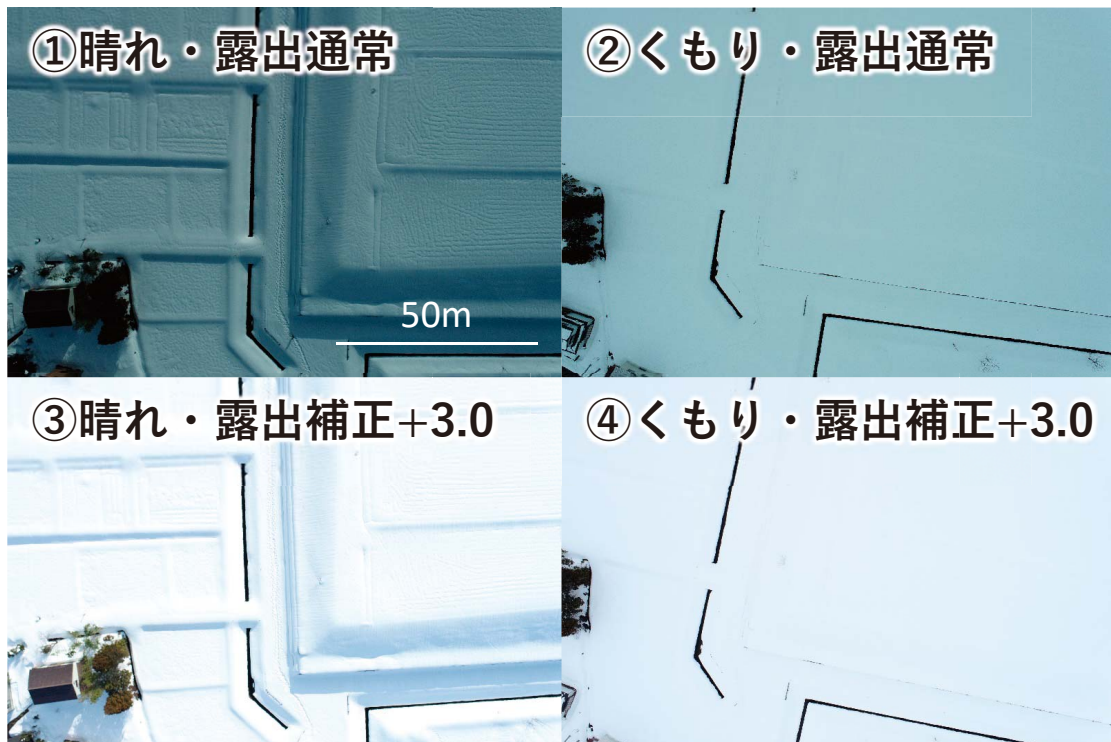


図 18 天候及び露出設定ごとの UAV 写真の例

## 2.6 三次元点群データ作成

UAVで撮影した空中写真からSfMソフトウェアを用いて三次元点群データを作成する。SfMでの点群データでは絶対座標値を持たないため、UAVのGNSSデータや地上基準点の座標を与えることで絶対座標化された三次元点群データを作成する。

自動処理による点群作成の精度が低い場合は、必要な精度の情報が得られるように地上基準点や特徴点を指定するなど手作業での調整を行う。

### 【解説】

SfM (Structure from Motion) とは、複数の写真（または動画）から対象物の三次元形状を復元する技術である。基本的な仕組みとしては、複数の写真に共通して写り込んでいる特徴点（明るさや色などが周囲と異なる画素）を抽出し、写真間の視差を利用して三次元座標を求め、全体の三次元形状を復元する。

SfMで作成した三次元点群データは、UAVに搭載されたGNSSの位置座標や、設置した地上基準点を測量して得た位置座標を与えることで平面位置座標を有する標高データを持たせることが可能となる。

近年、SfM処理を行うソフトウェアが多数登場しており、多くの作業工程を自動で処理できるため、利用者に高度な知識がなくとも簡易に三次元モデルを作成することができる。一般的なSfMソフトウェアにおける基本的な処理の流れを図19に示す。

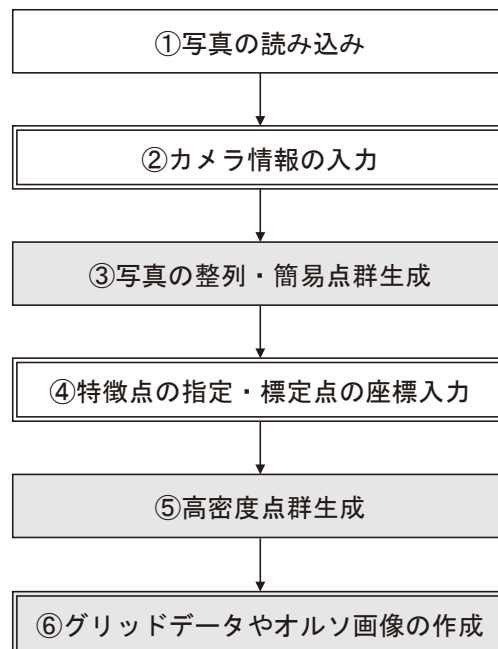


図 19 SfMソフトウェアによる基本的な処理の流れ

※二重線は必要に応じて実施する工程

※網掛けは基本的に自動処理

#### ①写真の読み込み

UAVで撮影した一連の写真をソフトウェアに読み込む。なお、使用するソフトウ

ウェアによっては、読み込み可能な画像形式が限定されているが、一般的な jpeg 形式や tiff 形式であれば問題なく読み込みが可能である。

#### ②カメラ情報の入力（省略可）

撮影に使用したカメラの情報を入力する。基本的には読み込んだ写真の付加情報（EXIF）から自動で入力されるが、焦点距離など不足する情報がある場合は手作業で入力する。

#### ③写真の整列・簡易点群生成

読み込んだ写真を整列し、簡易な点群を生成する。基本的にソフトウェアにより自動で処理される。

#### ④特徴点の指定・地上基準点の座標入力（省略可）

手順③で生成された簡易点群を確認し、点群生成がうまく処理されていない部分があれば、複数の写真に共通して写り込む特徴点を手作業で指定することにより、点群生成精度を向上させる。

また、現地で測量した地上基準点の位置座標を用いる場合は、写真上で対空標識の中心点を指定し、座標を入力する。

#### ⑤高密度点群生成

手順③④の情報を基に高密度の点群を生成する。基本的にソフトウェアにより自動で処理される。生成された点群データを任意の形式で出力する。点群データの形式は多数存在するが、使用する点群編集ソフトウェアや GIS ソフトウェアなどにより読み込める形式が決まっているため、用途に応じて選択する。

#### ⑥グリッドデータやオルソ画像の作成（省略可）

手順⑤からさらに、グリッドデータ（5m や 10m などの格子状の標高データ）やオルソ画像（対象範囲全域を 1 枚の平面画像に変換したもの）を作成することができる。

グリッドデータを作成するメリットは、データ量を減らすことでファイルサイズを小さくでき、パソコンのスペックが低い場合でも軽快に表示できることである。ただし、グリッド化する過程で情報が失われるため、細かな形状を確認したい場合などは注意が必要である。

オルソ画像を作成するメリットは、三次元モデルを表示する特別なソフトウェアがなくても閲覧可能であることが挙げられるが、高さの情報が失われるため、目的に応じて作成する。

なお、③と⑤ではそれぞれ処理の精度を選択することができるが、精度を高くするほど処理時間が長くなるため、求める精度と処理時間のバランスを考慮して精度を設定する。



## 2.7 モデル上での計測・確認

作成した三次元点群データを用いて距離や面積を計測することにより、雪崩の発生量や流下距離等の諸元を把握する。

雪崩発生後の調査では、発生区の幅・長さ・勾配や破断面の高さなど雪崩の規模に関する諸元や見通し角・堆積区の地形や発生区上部や隣接斜面の積雪深など今後の被害想定に関する諸元などを計測する。

なお、積雪深などの計測には元地形や雪崩発生前の既存 DEM が必要となる場合もある。

雪崩の諸元や周辺斜面の状況を把握することで、応急対策や警戒避難対策を検討する際の判断材料として活用することが可能となる。

### 【解説】

必ずしも全ての項目を計測・確認する必要はなく、目的に応じて必要な項目を確認する。以下に区域ごとの計測・確認項目を示す。

#### ①発生区（図 20(a)）

- ・発生区の幅、長さ、勾配、面積
- ・破断面の高さ：主測線で縦断面を作成し計測する。
- ・雪崩発生量：次式により求める。

$$\text{雪崩発生量} = \text{発生区面積} \times \text{破断面高さ}$$

発生区面積は平面積（水平投影面積）、破断面高さは鉛直方向の高さである。三次元点群上で面積を計測すると傾斜方向の面積となる場合があるため注意が必要である。その場合は、次式により傾斜面積を平面積に変換する。

$$\text{平面積} = \text{傾斜面積} \times \cos \theta \quad (\theta : \text{発生区勾配} (^\circ))$$

雪崩発生量を把握することで、応急対策として設置する土のう積みや雪堤などのポケット容量を検討する際の参考材料とすることができる。

#### ②走路～堆積区（図 20(a)）

- ・流下距離：流下経路に沿った距離を計測する。
- ・見通し角：堆積区末端から発生区上端を見上げた見通し角を計測する。

なお、見通し角は多くの場合、表層雪崩では  $18^\circ$  以上、全層雪崩では  $24^\circ$  以上となる（図 20(b)）ことが経験的に知られており<sup>8)</sup>、見通し角を把握しておくことで今後警戒すべき範囲を想定する際の参考とする。

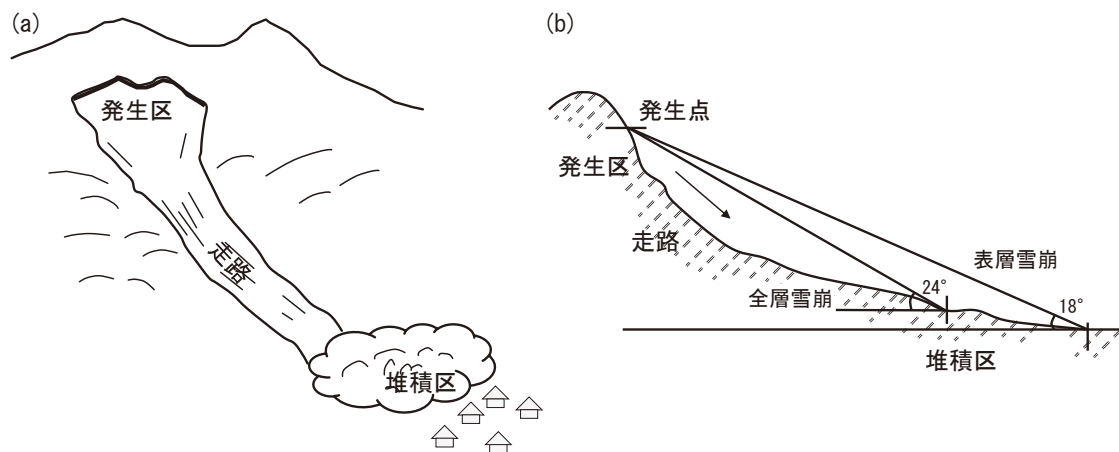


図 20 雪崩発生区・走路・堆積区イメージ(a)及び見通し角イメージ(b) (図 2 再掲)

### ③雪崩発生域周辺

#### ・周辺斜面の変状

発生区の上方面斜面や隣接斜面にクラックや雪しわ、雪庇(せっぴ)の発達、吹き溜まりによる雪面の平滑化など、雪崩の前兆となる変状がないかを確認する。これにより、今後の二次発生の可能性を検討する際の判断材料とする。

#### ・周辺斜面の勾配

周辺斜面の勾配を計測することで、雪崩が発生する恐れのある斜面を把握することができる。一般的に、雪崩は勾配  $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$  の斜面で特に発生しやすいことが知られており<sup>9)</sup>、この勾配区分に属する斜面は特に注意が必要である。

周辺斜面の勾配を把握する際は、三次元点群データをグリッドデータ化し、傾斜区分図を作成することで平面的な勾配分布を視覚的に確認することが可能となる。

#### ・周辺斜面の積雪深分布

三次元点群データからグリッドデータ(DSMデータ)を作成し、既存のDEMデータ(例えば基盤地図情報など)と重ね合わせて差分解析を行うことで、周辺斜面における積雪深分布を把握することができる。これにより、積雪が厚く堆積している箇所を把握し、二次発生危険性を判断する材料とすることができる。

#### ・保全対象までの距離・見通し角

斜面下方に保全対象が位置する場合、堆積区末端から保全対象までの距離や、保全対象から発生区上端までの見通し角を計測することで、警戒避難対策を検討する上での判断材料とすることができる。

### ④対策施設

#### ・対策施設の状況

斜面や保全対象上方に設置されている対策施設について、機能が十分発揮される状態となっているかを確認する。

雪崩予防柵などの予防工であれば、雪で埋没していないか、施設天端からの雪

底、巻きだれの発生状況、施設の破損状況などを確認する。雪崩防護擁壁などの防護工であれば、施設上方に十分な捕捉容量が確保されているか確認する。

#### 参考文献

- 1) 内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子：SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究，防災科学技術研究所研究報告，第81号，p.37-60，2014
- 2) 小室隆・浦川貴季・米原千絵・宮崎真弘・神野有生・赤松良久：RTK-GNSS搭載型UAVによる複数天底角・複数高度撮影に基づく標定点を用いない河道写真測量，河川技術論文集，第25号，p.237-242，2019
- 3) 国土交通省航空局：無人航空機の飛行許可・承認手続，[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html)，参照 2023-01-17
- 4) 国土交通省航空局：地表又は水面から150m以上の空域での飛行（航空法関係），<https://www.mlit.go.jp/common/001515201.pdf>，参照 2023-01-17，2022
- 5) 国土交通省航空局：空港等設置管理者・空域を管轄する機関の連絡先について，[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000004.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000004.html)，参照 2023-01-17
- 6) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル（案），<https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf>，参照 2022-07-31，2017
- 7) 国土交通省航空局：無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン，<https://www.mlit.go.jp/common/001303818.pdf>，参照 2022-07-31，2022
- 8) 社団法人日本建設機械化協会・社団法人雪センター：2005除雪・防雪ハンドブック〔防雪編〕，p.67，2005
- 9) 国土交通省砂防部保全課：雪崩についての解説，<https://www.mlit.go.jp/common/001018269.pdf>，参照 2022-07-31，2006

### 3 UAVによる航空レーザ測量に基づく調査

#### 3.1 調査手法の概要

UAVによる航空レーザ測量は、UAVに搭載したレーザスキャナを用いてより詳細に現地地形を測量するものである。

雪崩調査においては、樹林内の堆積範囲の把握など SfM を使った空中写真測量では困難なデータを取得できることや数 cm 単位水準まで把握できる高精度な計測が可能となる。一方で、機材の調達や費用の点など空中写真測量より不利な点もあるため、特徴を理解した上で目的に応じて活用する。

#### 【解説】

空中写真測量と比較した航空レーザ測量の特徴として、レーザ光が樹木等を透過して雪面に到達することにより、空中写真測量では困難な樹林内の雪崩堆積範囲の把握が可能になることが挙げられる。

また、空中写真測量における SfM 処理においては、特に雪面を合成する際に、特徴点が不足すると三次元点群データに欠損領域が生じる場合があるが、航空レーザ測量であればそのような問題を回避することができる。よって、対象範囲全域において欠損の少ないデータを得たい場合にも航空レーザ測量は有効である。

さらに、使用する UAV の測位方式に起因する特徴として、空中写真測量に用いる一般的な UAV では GNSS と気圧計による測位のため条件によって数十 m 単位の位置誤差が生じる場合がある。これに対し、航空レーザ測量に用いる UAV では GNSS 測位方式が二周波を用い、近傍の電子基準点の情報を利用する高精度なものであることに加え、IMU（慣性計測装置）による機体姿勢情報と合わせた最適軌跡解析を実施することから、一般的に位置誤差が数 cm 以内と非常に高精度であることが特徴である。このため、二時期の測量データを用いた差分解析を実施する際には、航空レーザ測量のデータを用いることで精度の高い成果を得ることができる。

以上のように空中写真測量と比較して有利な面がある航空レーザ測量であるが、一般的に計測コストが高いこと、作業に高度な知識を要求することなどがあるため、目的に応じて必要な場面で活用すると効果的である。

航空レーザ測量に基づく調査の流れを図 21 に示す。

手順①～③の現場作業によりレーザ計測を実施し、手順④⑤の内業により三次元点群データを作成して雪崩諸元を計測する。

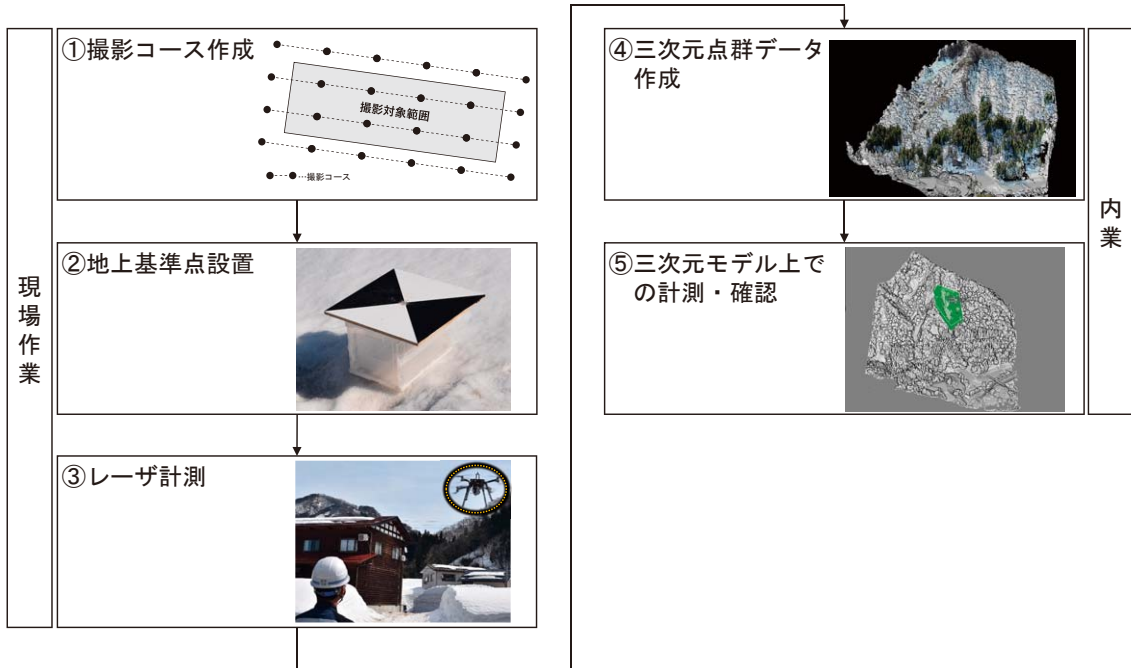


図 21 航空レーザ測量に基づく調査の流れ

### 3.2 使用機材の準備

調査にあたっては、航空レーザ測量に使用する機材やソフトウェア等を準備する。  
測量精度を確保するため、平時から UAV レーザ機材のキャリブレーションを行うなど必要な準備を行っておくことが重要である。

また、雪崩発生後の調査には迅速性が求められることから、平時より機材の確認・保守を行うとともに、定期的な訓練を通じて扱い方に習熟しておくことが必要である。

#### 【解説】

航空レーザ測量による測量精度を確保するため、使用する UAV 及び UAV に搭載する GNSS 受信アンテナ、GNSS 受信機、IMU（慣性計測装置）、レーザ測距装置各機器、そして、解析ソフトウェアの UAV レーザ機材には性能に関する要件が定められており、これらを満足する機材を使用する必要がある。

使用する機材で作成できるデータの品質を確認するため、本調査前に必要な UAV レーザ機材のキャリブレーションや精度試験を行っておく必要がある。キャリブレーションは、各機材で生じる誤差を規定の範囲内に収める作業である。平面位置座標を有する標高の集合である三次元点群データの位置情報に影響するため、この作業は非常に重要となる。その上で、使用する機材がキャリブレーションでは調整が困難な特性を有するか判断するために計測精度を確認する必要がある。詳細については、既往マニュアル（案）<sup>1)</sup>の「第3章 UAV レーザ測量の作業仕様の策定」に関する項目を参照する。

また、雪崩発生後の調査には迅速性が求められることから、平時より機材の確認・保守を行うとともに、定期的な訓練を通じて扱い方に習熟しておくことが必要である。あわせて、雪崩が頻発している地区では、夏季等消雪時期において、実際の現場において、飛行ルート・支障物の確認や飛行訓練を実施することも検討すると良い。

### 3.3 計測コース作成

UAV でのレーザ計測では、作成する三次元点群データの精度にあわせて、撮影範囲、対地高度、レーザ走査角、オーバーラップ率、離発着地点の条件、対空標識・地上基準点の配置など所定の要件を満たすようコース設定を行う。

なお、現場条件によっては、地上から発生区や堆積区の正確な範囲が確認できない場合がある。その場合は、撮影対象範囲の確認のため、現場において本撮影前に手動操縦で UAV を飛行し、モニタ上で範囲を確認した上で撮影コースを設定するため、コース設定にあたっては現場での修正等を前提に計画する必要がある。

#### 【解説】

飛行の安全性及び作成する三次元点群データの精度を確保するため、以下の点に留意してコースを設定する。詳細については、既往マニュアル（案）<sup>1)</sup>を参照する。

#### ①計測成果に求める内容・精度

レーザ計測の目的・計測成果からどのような情報を得るかを明確にした上で、計測成果に求める内容（オリジナルデータ、グラウンドデータ、グリッドデータ等）や精度（点密度、位置精度等）を定める。計測成果のイメージを図 22 に示す。

精度の目安として、樹林内の雪崩堆積範囲を概略で把握することを想定した場合、オリジナルデータの要求点密度（標準値）は「20～200 点/m<sup>2</sup>」、要求精度（標準値）は、対象を標高として、「0.1m（標準偏差）」と設定することが標準と考えられる<sup>1)</sup>。

- ・オリジナルデータ：レーザ計測で取得した全ての点を含む点群データ
- ・グラウンドデータ：植生や人工物などの地物を除去した地表面を表わす点群データ
- ・グリッドデータ：点群データから作成する一定の格子間隔における標高データ

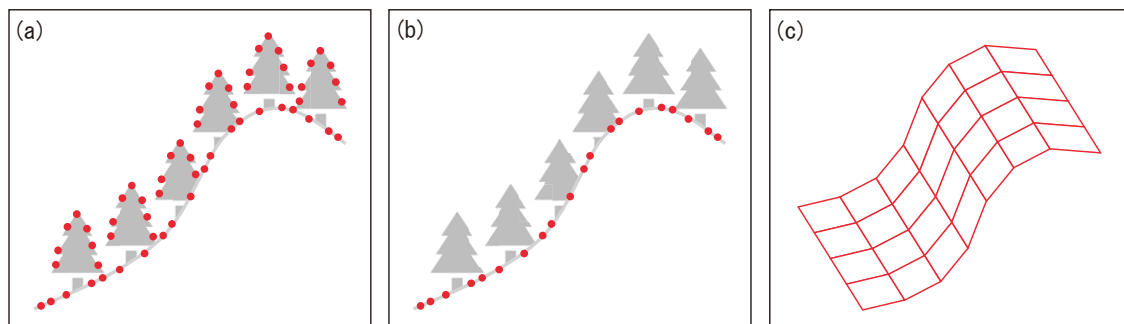


図 22 データ種別ごとのイメージ

(a)：オリジナルデータ、(b)：グラウンドデータ、(c)：グリッドデータ

## ②UAV 離着陸地点

周囲の安全が確保できる平坦な場所で、GNSS 衛星が捕捉できるよう上空視界が開けた場所を離着陸地点として選定する。

## ③計測対象範囲

雪崩発生区～堆積区の全域（以下、雪崩発生域という）を包含する範囲を対象とすることが基本であるが、三次元点群データの精度を確保するため、それより一回り広い範囲を設定する必要がある。目安としては、雪崩発生域より外側に 10m または計測幅の 50%以上広い範囲を対象とする<sup>1)</sup>。

また、UAV 離着陸地点周辺に地上基準点を設置した場合は、それら基準点を含め、雪崩発生域まで連続した計測範囲を設定する。

さらに、作成した三次元点群データの用途として、二次発生危険性判断や応急対策工の検討への活用を想定している場合は、雪崩発生区の周辺斜面や、堆積末端から下流の保全対象までを含む範囲を対象とするなど、目的に応じて広めの範囲を設定する。

## ④対地高度・レーザ走査角

レーザ計測の際の欠測を防ぐため、対地高度やレーザ走査角（レーザ光を照射する横方向の角度）は所定の要件を満たすよう設定する必要がある。具体的には、レーザ走査角は対象物へのレーザ入射角が  $45^\circ$  以上となるよう設定する。また、計測距離がレーザ測距装置の最大測距距離を超えないよう対地高度を設定する<sup>1)</sup>。

対地高度が 150m を超える場合は航空法により航空局への申請が必要になる（2.3③参照）。ただし、地表又は水面から 150m 以上の空域であっても、物件から 30m 以内の空域については飛行禁止区域から除外される。なお、高度設定の方法には以下の 2 種類があるが、点密度を一定に保つためには、地形に沿って飛行する方法 2 の方が望ましい。

方法 1：離陸地点からの高度を一定に保つ飛行方法（図 23(a)）

方法 2：地表面に対する高度（対地高度）を一定に保つ飛行方法（図 23(b)）

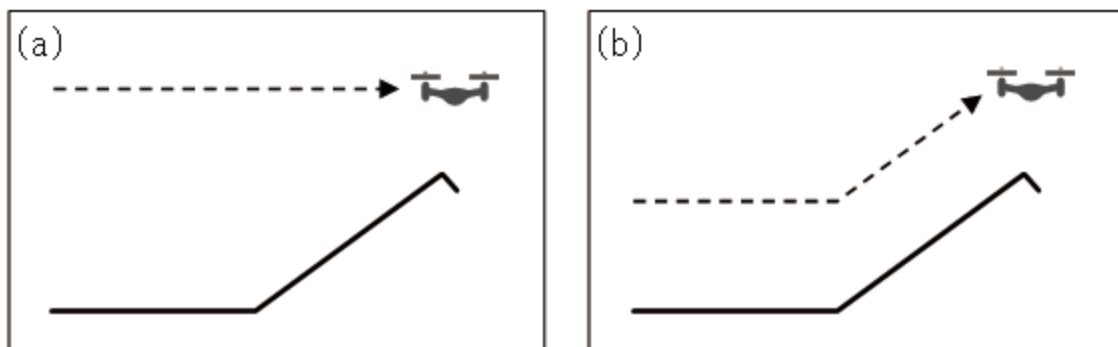


図 23 UAV 飛行高度の種類

(a)：方法 1（高度一定）、(b)：方法 2（対地高度一定）



### ⑤コース間重複度（ラップ率）

対地高度とレーザ走査角から計測幅が定まる。隣接するコース間の計測幅の重複度（ラップ率）は、欠測が生じないこと及びコース間重複部における標高値の検証が可能となるよう設定する必要がある。具体的には、図 24 のようにコース間重複度は 30% とすることを基本とする<sup>1)</sup>。

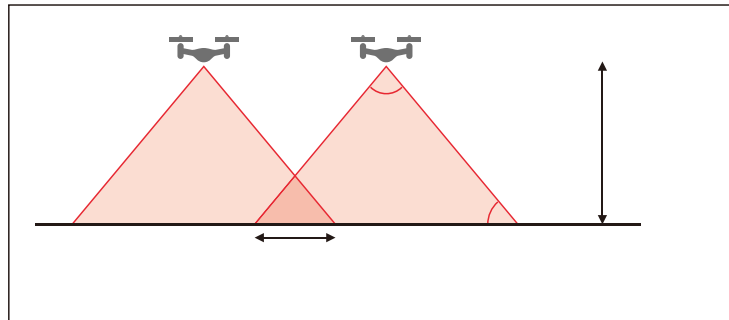


図 24 計測諸元のイメージ

### ⑥障害物の回避

現場に存在する鉄塔や電線といった障害物から十分な離隔を確保し、安全に飛行可能なコースを設定する。なお、飛行の方法として UAV と物件（工作物、車両等）との間に 30m 以上の距離を確保することが示されている（30m 未満の場合は、承認が必要）<sup>2)</sup>。ただし、送電関係施設（高圧線・変電所等）が撮影対象範囲周辺にある場合、電波干渉により UAV が操縦不能となるおそれがあるため、十分な距離（50m 以上）を保った飛行とする必要がある。

そのため、飛行計画作成時に、事前に現地において、これら物件の位置を確認し、障害物を回避する計画を立てることが重要である。

### 3.4 地上基準点設置

作成する三次元点群データに正確な位置座標を与えるため、計測対象範囲内に地上基準点を設置する。

地上基準点は2点以上を計測対象範囲内で偏りなく設置することを基本とするが、それが困難な場合は UAV 離陸地点周辺に 1~2 点程度の地上基準点を設置する。

#### 【解説】

地上基準点として設置する対空標識は、点群データから水平・標高位置が特定できるよう、地表から突出した構造とする。これは、単純なレーザ計測による点群データは色情報を持たないため、対空標識を識別するためには地表との高さの差を与える必要があるためである。ただし、反射強度を取得できるレーザ計測装置を用いる場合は、反射強度の強弱による模様を描いた対空標識も使用可能である。例えば、図 25 のように白黒の模様を描いた対空標識を用いれば、白部と黒部で反射強度が異なるため点群データ上で対空標識が判別できる。

地上基準点は 2 点以上を計測対象範囲内で偏りなく設置することを基本とするが、現場状況によりそれが困難な場合は、UAV 離陸地点周辺に 1~2 点程度の地上基準点を設置する。



図 25 対空標識の例  
(地表から高さを設けている)

### 3.5 レーザ計測

レーザ計測を行う場合、事前に作成した計測コースに沿って UAV を飛行させ、計測を行う。

斜面の積雪状況、露岩状況や植生分布状況など視覚的な情報を確認する場合など、必要に応じて、同時に色情報を取得するか、別途、空中写真撮影のための UAV 飛行を行う。

#### 【解説】

事前に作成した計測コースを読み込み、UAV を飛行させてレーザ計測を行う。なお、飛行の前後において、所定の方法により UAV レーザ機材の初期化処理を行う必要がある。この作業は、UAV の姿勢を記録する IMU の初期化等を行うことにより、軌跡解析における意図しない誤差を防ぐ目的で実施するものである<sup>1)</sup>。

なお、用いる UAV レーザ機材によって、レーザ測距装置とともに対象物の色情報を記録するためのカメラを搭載する場合としない場合がある。前者の場合、一度の飛行で点群データと色情報の取得が可能であるが、後者の場合、レーザ計測のための飛行と別に、写真撮影用の UAV 飛行を行う必要がある。この場合の空中写真撮影は、第 2 章に沿って実施する。

### 3.6 三次元点群データ作成

レーザ計測で取得したデータから三次元点群データ（オリジナルデータ）を作成する。  
必要に応じて、オリジナルデータに処理を加えて、目的に合ったデータ（グラウンドデータやグリッドデータ）を作成する。

グラウンドデータは、樹林内の雪崩堆積状況を確認する場合などに使用し、グリッドデータは2時期の比較を行う場合に使用する。

#### 【解説】

レーザ計測による点群データ作成の基本的な流れを図 26 に示す。

詳細は、既往マニュアル（案）<sup>1)</sup>の「第4章 UAV レーザ測量によるオリジナルデータの作成」に関する項目を参照する。

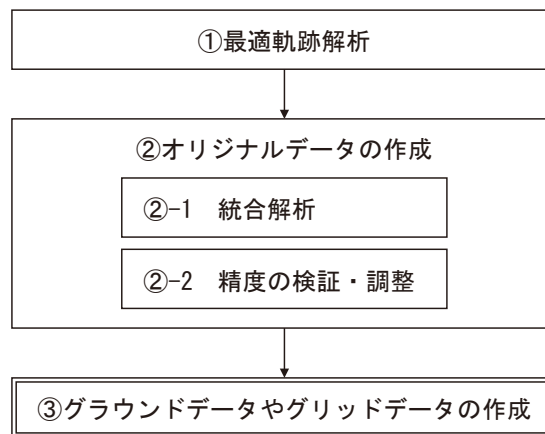


図 26 SfM ソフトウェアによる基本的な処理の流れ  
（二重線は必要に応じて実施する工程）

#### ①最適軌跡解析

UAV 搭載の GNSS データと IMU データを用いて、レーザ計測時の機体位置と姿勢を再現する。最適軌跡解析の精度は、レーザ計測成果の精度に直接影響するため、解析結果について異常値がないか入念に確認する必要がある。

#### ②オリジナルデータの作成

##### ②-1 統合解析

最適軌跡解析の結果とレーザ計測で得たレーザ測距データを統合し、三次元点群データを作成する。作成した点群データに含まれるノイズ等の異常な点は目視で確認し除去する。

##### ②-2 精度の検証・調整

作成した点群データについて、以下の各項目について精度検証を行い、要求精度を満たすよう調整を行う。調整を行っても精度を満たさない場合は再計測・追加計測を行うことも検討する。

- ・コース間重複部における標高値の検証
- ・地上基準点による検証
- ・点密度の検証

### ③グラウンドデータやグリッドデータの作成（省略可）

必要に応じて、オリジナルデータにフィルタリングやグリッド化の処理を加えて目的に沿ったデータを作成する。

グラウンドデータは、オリジナルデータから植生や人工物を除去（フィルタリング）し、地表面（雪面）を表わすデータのみとしたものであり、例えば樹林内の雪崩堆積範囲を把握したい場合などに適している。

グリッドデータは、グラウンドデータを内挿補間し格子状の標高データとしたものであり、例えば 2 時期の計測データを用いた差分解析を行う場合などに適している。また、グリッドデータはデータ量を減らすことで低スペックのパソコンでも軽快に表示できるメリットがあるが、その分微地形情報が失われるため、雪崩のデブリ形状や細かなクラックを判読したい場合などには注意が必要である。

### 3.7 モデル上での計測・確認

作成した三次元点群データを用いて距離や面積を計測することにより、雪崩発生量や流下距離等の諸元を把握する。(2.7 参照)

レーザ計測のグラウンドデータを使用した場合、空中写真測量では把握しづらい樹林内の堆積範囲の確認や正確な積雪深分布の把握が可能となる。

また、地上基準点が十分に配置できない条件の地区での積雪深の把握など、二時期の比較にはレーザによる点群データからの計測が適していると考えられる。

#### 【解説】

計測項目の基本的な部分は「2.7」を参照することとし、ここでは、レーザ計測の特性を生かした分析方法について以下に示す。

#### (1) 走路～堆積区（樹林内）

- ・流下距離・見通し角

雪崩が樹林内で停止しており、空中写真から SfM で作成した点群データでは堆積範囲が把握できない場合がある。そのような場合でも、レーザ計測を用いることで堆積範囲を把握できる場合がある。

具体的には、オリジナルデータから樹木を除去（フィルタリング）したグラウンドデータ（雪面を表わすデータ）を作成することで、樹林内の堆積範囲を確認し、流下距離や見通し角を把握することができる。

または、オリジナルデータのままでも、三次元モデル上での視点を工夫したり（できる限り雪面に近づいた視点とするなど）、点群の表示方法を工夫したり（標高値により色分けした標高段彩図など）することにより、樹林内のデブリ形状を把握できる場合もある。正確なフィルタリング作業には手間と時間を要するため、まずは表示方法を試行錯誤するなど、目的と求める精度に応じて対応を工夫する。

#### (2) 雪崩発生域周辺

- ・周辺斜面の変状

空中写真から作成した点群データは、特に陰影の少ない雪面においては SfM 処理がうまくいかず欠損が生じる場合があり、そのような場所ではクラックや雪しわ、吹き溜まりによる雪面の平滑化などの変状を確認することが困難であるが、レーザ計測を用いると、雪面の陰影の大小に影響されることなく点群データを作成することが可能であり、周辺斜面の状況を網羅的に確認することが可能となる。

- ・周辺斜面の積雪深分布

三次元点群データからグリッドデータ（DEM データ）を作成し、既存の DEM データ（例えば基盤地図情報など）と差分解析を行うことで、周辺斜面における積雪深分布を把握することができるが、空中写真から作成した点群データの場合、樹木があると正確な差分解析が困難である。レーザ計測により作成した点群データを用いれば正確な積雪深分布を把握することが可能となる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土地理院: UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案), [https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uavls/doc/uavsl\\_manual.pdf](https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uavls/doc/uavsl_manual.pdf), 参照 2022-07-31, 2020
- 2) 国土交通省航空局: 無人航空機(ドローン、ラジコン機等)の安全な飛行のためのガイドライン, <https://www.mlit.go.jp/common/001303818.pdf>, 参照 2022-07-31, 2022

## 4 参考

### 4.1 調査時チェックリスト案

UAV による調査を実施する際の確認用チェックリスト案を表 3 に示す。詳細は各項及び関連するマニュアル等を参照。主に空中写真測量を対象として記載しているが、航空レーザ測量の場合も「3. 内業時の使用機材」以外は基本的に共通（詳細は、既往マニュアル（案）<sup>1)</sup>の「第3章 UAV レーザ測量の作業仕様の策定」に関する項目を参照）。

表 3 調査時チェックリスト案

| 項目                                   | 説明                       |
|--------------------------------------|--------------------------|
| <b>1. 確認・申請事項</b>                    |                          |
| <input type="checkbox"/> 法令等に係る確認・申請 | 航空法・道路交通法・電波法・自治体条例等     |
| <input type="checkbox"/> 関係者との調整     | 土地所有者・施設管理者等             |
| <b>2. 現場作業時の使用機材</b>                 |                          |
| <input type="checkbox"/> UAV 本体      | 飛行可能距離・高度・時間が現場に適用可能なもの  |
| <input type="checkbox"/> UAV 操作端末    | 自動操縦用ソフトウェアを入れるタブレット等    |
| <input type="checkbox"/> 自動操縦用ソフトウェア | 自動操縦コース作成に使用するソフトウェア     |
| <input type="checkbox"/> 対空標識        | 地上基準点として設置する標識           |
| <input type="checkbox"/> 測量機材        | 地上基準点の位置座標を測量する機材        |
| <b>3. 内業時の使用機材</b>                   |                          |
| <input type="checkbox"/> SfM ソフトウェア  | 三次元点群データを作成するソフトウェア      |
| <input type="checkbox"/> 点群処理ソフトウェア  | 三次元点群を表示・編集するソフトウェア      |
| <b>4. 安全管理</b>                       |                          |
| <input type="checkbox"/> コース・フライト設定  | 安全性と UAV 機体性能を考慮した設定     |
| <input type="checkbox"/> 人員配置        | 操縦者と安全確認等に必要な人数の補助員      |
| <input type="checkbox"/> 事故発生時の連絡体制  | 連絡体制、警察署・病院等の位置確認        |
| <input type="checkbox"/> 保険加入        | UAV 専用の賠償責任保険への加入        |
| <input type="checkbox"/> 時間帯・気象状況    | 日中で UAV 飛行に支障のない気象条件     |
| <input type="checkbox"/> 作業場所の安全確保   | 操縦場所周辺や通行者・交通への安全確保      |
| <input type="checkbox"/> 機体確認        | 機体異常有無、必要機材、バッテリー残量      |
| <input type="checkbox"/> 衛星捕捉状況・電波状況 | GNSS 衛星捕捉数、機体と送信機の通信電波強度 |
| <b>5. 事故発生時の対応</b>                   |                          |
| <input type="checkbox"/> 被災者の救助      | 被災者がいる場合は救助を最優先          |
| <input type="checkbox"/> 二次災害の防止     | 作業員や通行者の二次災害防止           |
| <input type="checkbox"/> 関係機関への連絡    | 警察・消防・所属組織・保険会社等への連絡     |
| <input type="checkbox"/> 事故状況の記録     | 事故状況を記録し所属組織に報告          |



## 4.2 計測方法別の精度検証事例

UAV を用いた写真計測 (SfM) 及びレーザ計測による三次元点群データの精度について、現場において試験計測を行った結果から計測方法別の精度検証を実施した事例を示す。

### (1) 検証目的

以下について精度検証を行うことを目的に作業を実施した。

- ①計測手法及び標定点の有無による精度の違い
- ②写真計測において、標定点の数及び配置による精度の違い
- ③写真計測において、UAV の測位方式による精度の違い
- ④写真計測において、天候及びカメラの露出設定による点群生成密度の違い

### (2) 検証方法

実際の雪崩現場では雪崩発生域に入っの現地作業が困難なため、地上作業が可能な現場として新潟県上越市の裸地斜面を使用し、積雪期に作業を行った。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  $9^\circ$  である。図 27 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。また、天候による比較を行うため、晴れの日とくもりの日でそれぞれ UAV による写真計測及びレーザ計測を行った。写真計測に用いる UAV として、通常の GNSS 搭載機 (DJI Phantom 4) と精度の高い RTK-GNSS 搭載機 (DJI Matrice 300 RTK) の 2 種類で計測を行った。レーザ計測用 UAV にはエアフォートサービス Air Ray X を用いた。

写真計測における SfM ソフトウェアには、Agisoft Metashape を使用した。SfM 処理において、位置座標を入力する標定点の数を変えて (0~6 個)、表 4 に示すとおりケース設定を行い、それぞれ点群生成を行った。

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、誤差の平均値、標準偏差、最大値を整理した。また、写真計測において、点群生成の欠損率 (対象範囲のうち  $1\text{m}^2$  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。

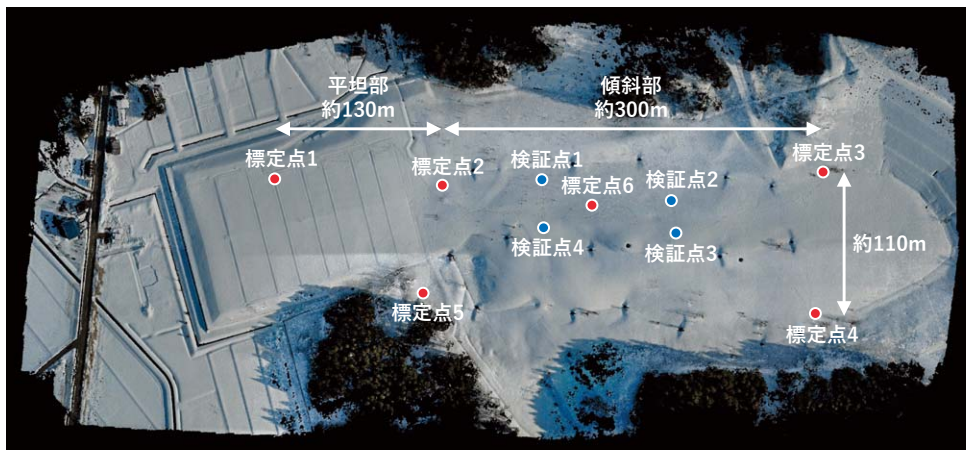


図 27 地上基準点の配置

### (3) 検証結果

各ケースの検証結果を表 4 に示す。

表 4 精度検証結果一覧

| No. | 天候 | 計測方法               | UAV<br>測位方式  | 使用する<br>標定点  | 検証点における位置誤差 (m) |        |        |        |        |        |       |      |       |       | 欠損率   |      |       |
|-----|----|--------------------|--------------|--------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
|     |    |                    |              |              | 検証点1            | 検証点2   | 検証点3   | 検証点4   | 平均     | 水平     | 標準偏差  | 最大   | 水平    |       |       |      |       |
|     |    |                    |              |              |                 |        |        |        |        |        |       |      |       | X     |       | Y    | Z     |
| 1   | 晴れ | 写真計測<br>(露出通常)     | GNSS         | なし           | X               | 0.29   | 0.21   | 0.20   | 0.28   | 0.24   | 1.31  | 0.04 | 0.29  | 1.52  | 7.4%  |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | -1.26  | -1.29  | -1.09  | -1.49  | -1.28  |       |      |       |       |       | 0.14 | -1.50 |
|     |    |                    |              |              | Z               | -81.02 | -80.42 | -80.34 | -80.91 | -80.67 |       |      |       |       |       |      |       |
| 2   | 曇り | レーザ計測              | GNSS<br>/IMU | なし           | X               | -0.03  | -0.03  | 0.01   | -0.03  | -0.02  | 0.02  | 0.02 | -0.03 | 0.03  | —     |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | -0.02  | -0.01  | 0.01   | 0.00   | -0.01  |       |      |       |       |       | 0.01 | -0.02 |
|     |    |                    |              |              | Z               | 0.11   | 0.11   | 0.08   | -0.01  | 0.07   |       |      |       |       |       |      |       |
| 3   | 晴れ | 写真計測<br>(露出通常)     | GNSS         | 標定点<br>1~6   | X               | 0.02   | -0.03  | -0.12  | -0.07  | -0.05  | 0.06  | 0.05 | -0.12 | 0.15  | 7.4%  |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | -0.03  | 0.07   | -0.04  | -0.13  | -0.03  |       |      |       |       |       | 0.07 | -0.13 |
|     |    |                    |              |              | Z               | 0.44   | -0.35  | -0.84  | -0.09  | -0.21  |       |      |       |       |       |      |       |
| 4   | 曇り | レーザ計測              | GNSS<br>/IMU | 標定点<br>1~6   | X               | 0.01   | -0.01  | 0.00   | -0.01  | 0.00   | 0.01  | 0.01 | -0.01 | 0.02  | —     |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | -0.01  | -0.01  | 0.00   | 0.01   | -0.01  |       |      |       |       |       | 0.01 | -0.01 |
|     |    |                    |              |              | Z               | 0.02   | 0.02   | 0.01   | -0.01  | 0.01   |       |      |       |       |       |      |       |
| 5   | 晴れ | 写真計測<br>(露出通常)     | GNSS         | 標定点<br>1     | X               | -3.24  | -4.16  | -1.82  | 0.47   | -2.19  | 21.30 | 1.75 | -4.16 | 25.08 | 7.4%  |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | 17.19  | 23.70  | 25.01  | 18.83  | 21.18  |       |      |       |       |       | 3.26 | 25.01 |
|     |    |                    |              |              | Z               | -26.00 | -44.82 | -52.72 | -37.11 | -40.16 |       |      |       |       |       |      |       |
| 6   | 晴れ | 写真計測<br>(露出通常)     | GNSS         | 標定点<br>1,2,5 | X               | 0.02   | -0.30  | -0.27  | -0.10  | -0.16  | 0.41  | 0.13 | -0.30 | 0.67  | 7.4%  |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | 0.13   | 0.59   | 0.61   | 0.17   | 0.37   |       |      |       |       |       | 0.23 | 0.61  |
|     |    |                    |              |              | Z               | -4.61  | -13.31 | -14.62 | -5.83  | -9.59  |       |      |       |       |       |      |       |
| 7   | 晴れ | 写真計測<br>(露出通常)     | RTK-<br>GNSS | なし           | X               | 0.81   | 1.07   | 1.04   | 1.26   | 1.04   | 1.07  | 0.16 | 1.26  | 1.27  | 7.1%  |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | 0.19   | 0.03   | 0.57   | 0.10   | 0.22   |       |      |       |       |       | 0.21 | 0.57  |
|     |    |                    |              |              | Z               | 0.40   | 0.35   | -0.19  | 0.20   | 0.19   |       |      |       |       |       |      |       |
| 8   | 曇り | 写真計測<br>(露出通常)     | GNSS         | 標定点<br>1~6   | X               | 0.05   | 0.28   | 0.13   | 0.10   | 0.14   | 0.16  | 0.09 | 0.28  | 0.28  | 51.0% |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | -0.06  | 0.01   | 0.00   | -0.26  | -0.08  |       |      |       |       |       | 0.11 | -0.26 |
|     |    |                    |              |              | Z               | 0.25   | -0.56  | -1.47  | -0.06  | -0.46  |       |      |       |       |       |      |       |
| 9   | 晴れ | 写真計測<br>(露出EV+3.0) | GNSS         | 標定点<br>1~6   | X               | 0.10   | 0.12   | 0.04   | -0.01  | 0.06   | 0.19  | 0.05 | 0.12  | 0.41  | 5.1%  |      |       |
|     |    |                    |              |              | Y               | -0.04  | -0.14  | -0.41  | -0.10  | -0.17  |       |      |       |       |       | 0.14 | -0.41 |
|     |    |                    |              |              | Z               | 0.38   | -0.31  | -0.70  | -0.13  | -0.19  |       |      |       |       |       |      |       |

#### ①計測手法及び標定点の有無による精度の違い

標定点を用いない場合、写真計測では平均誤差が水平 1.31m、標高 80.67m (表 4 中 No. 1)、レーザ計測では水平 0.02m、標高 0.07m (No. 2) であった。一方標定点を 6 点使用した場合は、写真計測で水平 0.06m、標高 0.21m (No. 3)、レーザ計測で水平 0.01m、標高 0.01m (No. 4) であった。

レーザ計測では標定点を設置しない場合でも誤差を数 cm 単位に抑えることができる一方、写真計測では標定点を設置しない場合は水平で数 m 以内、標高で数十 m 単位の大きな誤差が生じる結果となった。しかし、写真計測でも適切に標定点を配置することで誤差を水平・標高とも数十 cm 単位まで縮小することができた。

#### ②写真計測において、標定点の数及び配置による精度の違い

標定点を設置しない場合、平均誤差は水平 1.31m、標高 80.67m (No. 1) であるのに対し、標定点を UAV 離陸地点付近に 1 点設置した場合は水平 21.30m、標高 40.16m (No. 5) となり、標高誤差は若干縮小できるものの、水平誤差は標定点なしの場合よりも大きくなる結果となった。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 点を中心に三次元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なしの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3点設置した場合は、平均誤差が水平0.41m、標高9.59m (No. 6) となった。このことから、標定点を UAV 離陸地点に加えて計測対象範囲により近い場所に追加で2点設置することで、水平誤差を数十 cm 単位、標高誤差を数 m 単位まで縮小できる可能性がある。

標定点を6点設置した場合は①の通りであり、現場状況から可能な場合には、計測範囲全域に均等に標定点を配置することで水平・標高とも誤差を数十 cm 単位まで縮小できる可能性がある。

### ③写真計測において、UAV の測位方式による精度の違い

UAV の測位方式の違いとして、通常の GNSS 搭載機と RTK-GNSS 搭載機での精度を比較した。ここでは、いずれも標定点を用いない場合の精度について述べる。

通常の GNSS 搭載機の場合、平均誤差は水平1.31m、標高80.67m (No. 1) と、特に標高誤差が大きい結果となった。一方、RTK-GNSS 測位による場合、水平1.07m、標高0.19m (No. 7) となり、特に標高精度については標定点を設置しなくとも数十 cm 単位まで向上できることが分かる。なお、RTK-GNSS であれば一般的に水平・標高とも cm 単位の精度が出ると言われているが、今回使用したカメラ (DJI Zenmuse H20T) が光学カメラとして最上位モデルでなく性能面で十分でなかったために、水平で m 単位の誤差が生じた可能性がある。

以上より、現地への標定点設置が難しい雪崩現場においては、RTK-GNSS 搭載の UAV を用いることで標高精度数十 cm 単位での計測が可能となる。ただし、現時点では RTK-GNSS 搭載機は一般的な UAV と比較して非常に高価なため、専門業者への委託を含め選択肢の1つとして検討するとよい。

### ④写真計測において、天候及びカメラの露出設定による点群生成密度の違い

光環境の違いによる雪面の点群生成密度を検証するため、天候が晴れの日とくもりの日でそれぞれ撮影を行い、点群密度を比較検証した。さらに、撮影時のカメラの露出設定を変えて撮影を行い、それによる密度の差についても検証した。点群生成密度は、欠損率の大小により評価した。各条件で撮影した写真の例を図 28 に示す。

天候の影響については、晴れの場合の欠損率が7.4% (No. 1, 3, 5, 6) であるのに対し、くもりの場合の欠損率は51.0% (No. 8) と大幅に欠損率が高くなる結果となった。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と考えられる (図 28①)。一方で、くもりの条件では雪面の陰影が少なくなり、SfMに必要な特徴点が抽出できなかつたと考えられる (図 28(2))。

カメラの露出設定の影響については、通常設定の場合の欠損率7.4% (No. 1, 3, 5, 6) に対し、露出過多の条件として露出補正を+3.0 に設定した場合の欠損率は5.1% (No. 9) と、大きな差は生じない結果となった。ただし、条件により白飛びが発生すると点群生成密度が低下することが想定されるため、適正露出で撮影するよう留意することが望ましい。

今回の結果からは、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と言える。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ことにより、点群生成密度を向上させることができると考えられる。

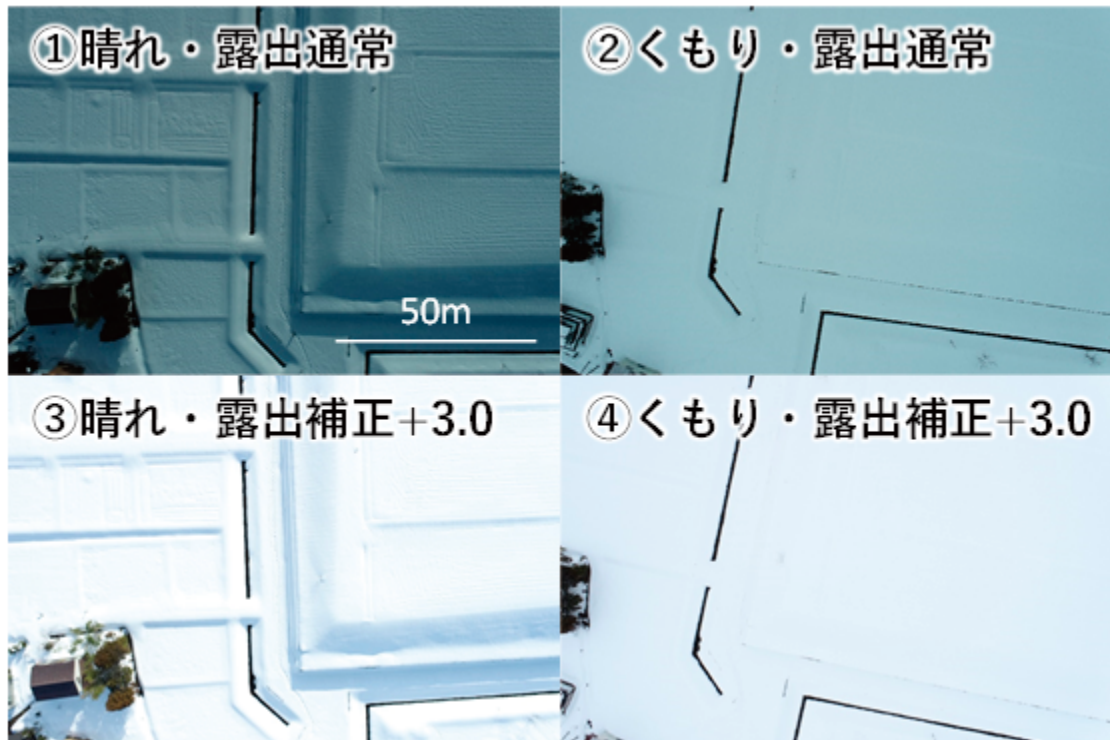


図 28 天候及び露出設定ごとの UAV 写真の例（使用機体 DJI Phantom 4 での撮影結果）

#### (4) まとめ

今回の検証結果をまとめると以下の通りである。

- ① レーザ計測は位置精度が高く、厳密な精度が要求される場面では最も有効と言える。一方、写真計測では標定点を設置しない場合は特に標高方向で最大数十 m 単位の誤差が生じる場合がある。ただし、適切に標定点を設置することで誤差を数十 cm 単位まで低減できる可能性がある。
- ② 写真計測において、標定点を対象範囲に均等に配置すると数十 cm 単位の精度を確保できる場合があるが、標定点が 1 点で対象範囲から離れている場合は水平方向の精度が標定点なしの場合よりも低下する場合がある。この場合、対象範囲に近い位置に標定点を数点追加することで、誤差を一定程度低減できる可能性がある。
- ③ 写真計測において、現地への標定点設置が難しい現場であっても、RTK-GNSS 搭載の UAV を用いることで数十 cm 単位の精度を確保することができる可能性がある。ただし、現時点で RTK-GNSS 搭載機は非常に高価なため、目的に応じて選択するとよい。
- ④ 写真計測において、撮影時の天候がくもりの場合は雪面の陰影が乏しく SfM に

必要な特徴点の抽出が困難となり、点群生成密度が低下する場合がある。そのため、撮影は可能であれば晴れの日に陰影が出やすい条件で行うことが望ましい。一方、カメラの露出設定の影響は天候と比較すると相対的に小さい可能性があるが、白飛びが発生しないよう露出設定に留意して撮影することが望ましい。

#### 4.3 UAV による雪崩三次元計測事例

UAV を用いた空中写真測量に基づく調査、及び航空レーザ測量に基づく調査結果を事例として示す。

##### (1) UAV を用いた空中写真測量に基づく調査結果事例

###### ○調査に関する主な事項

地区名：新潟県妙高市樽本地内

調査実施日：2021 年 1 月 18 日

天気：晴れ

使用 UAV：DJI Phantom4 Pro V2.0

UAV 付属カメラの画素数：約 2000 万画素

撮影枚数：245 枚

撮影間隔：2 秒

飛行スピード：15m/s

オーバーラップ率：80%以上

対地高度：100m

飛行時間：約 40 分

その他：自動航行アプリケーションソフト「VC Technology Litchi」による自動航行の実施

使用した SfM ソフト：Agisoft Metashape

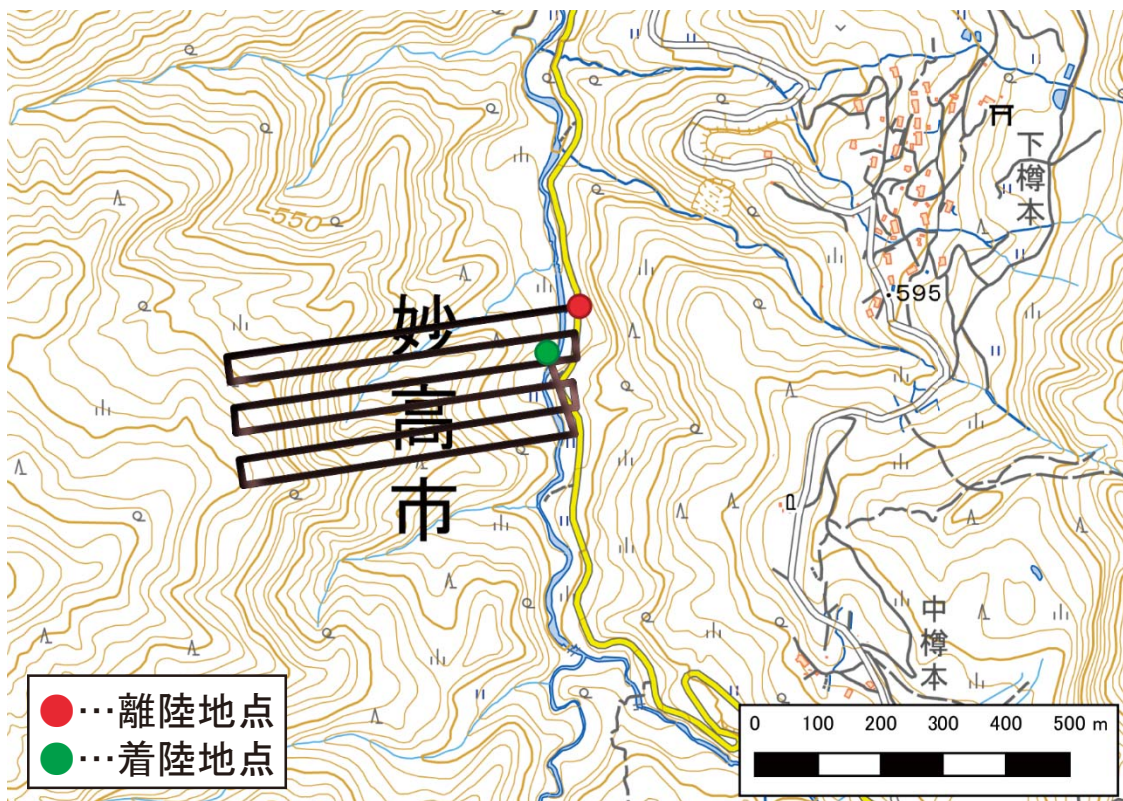
SfM 処理に使用した写真枚数：245 枚

SfM 処理に費やした解析時間：3.5 日



地理院タイル（ベースマップ）をもとに加工

図 29 現地状況（新潟県妙高市樽本地内）



地理院タイル（ベースマップ）をもとに加工

図 30 飛行コース図



図 31 SfM 処理により作成した三次元モデル

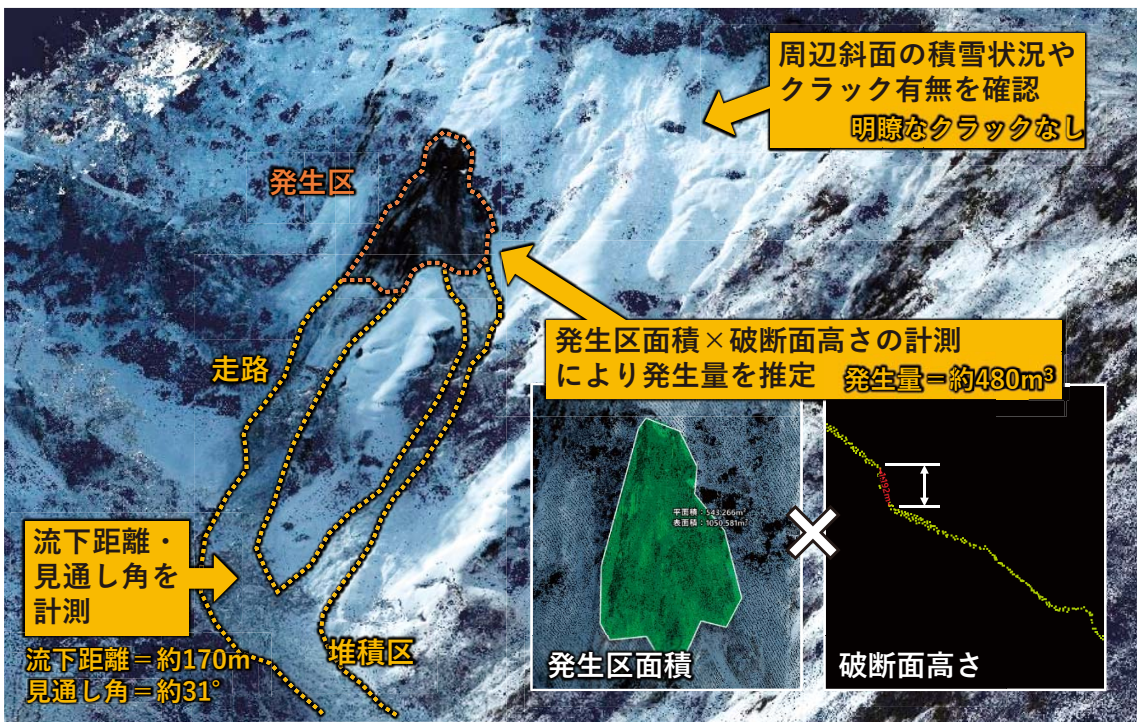


図 32 三次元モデルから雪崩諸元の計測等結果



## (2) UAV を用いた航空レーザ測量に基づく調査結果

### ○調査に関する主な事項

地区名：新潟県上越市大島区上達地内

調査実施日：2021年3月9日

天気：晴れ

使用 UAV：エアフォートサービス Air Ray X

使用したレーザスキャナ：RIEGL VUX-1

飛行スピード：5m/s

対地高度：100m

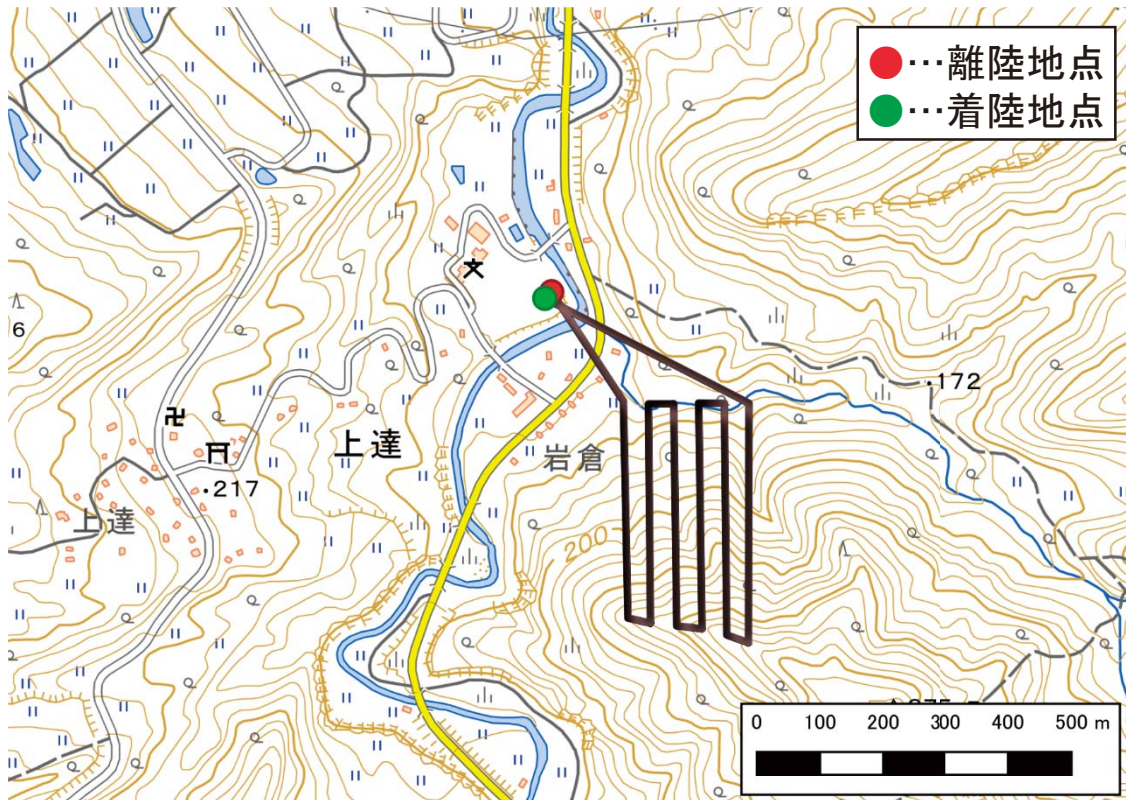
飛行時間：約 30 分

三次元点群データの作成に費やした解析時間：2.0 日



地理院タイル（ベースマップ）をもとに加工

図 33 現地状況（新潟県上越市大島区上達地内）



地理院タイル（ベースマップ）をもとに加工

図 34 飛行コース図

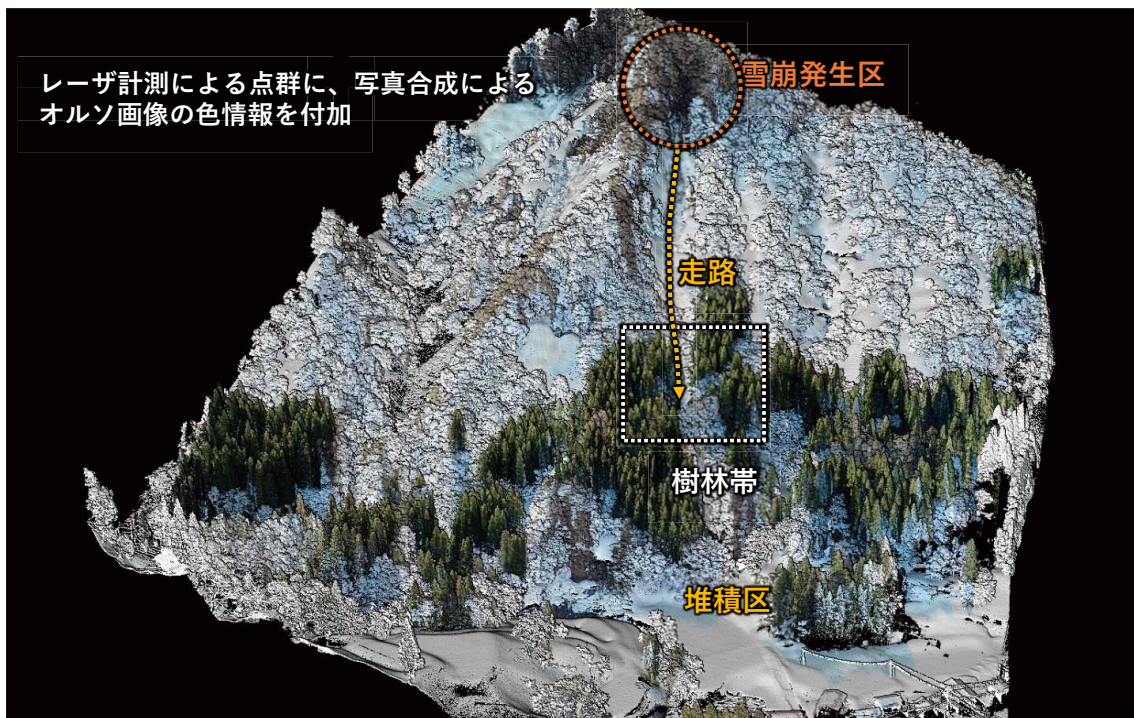


図 35 レーザ計測結果から作成した三次元モデル

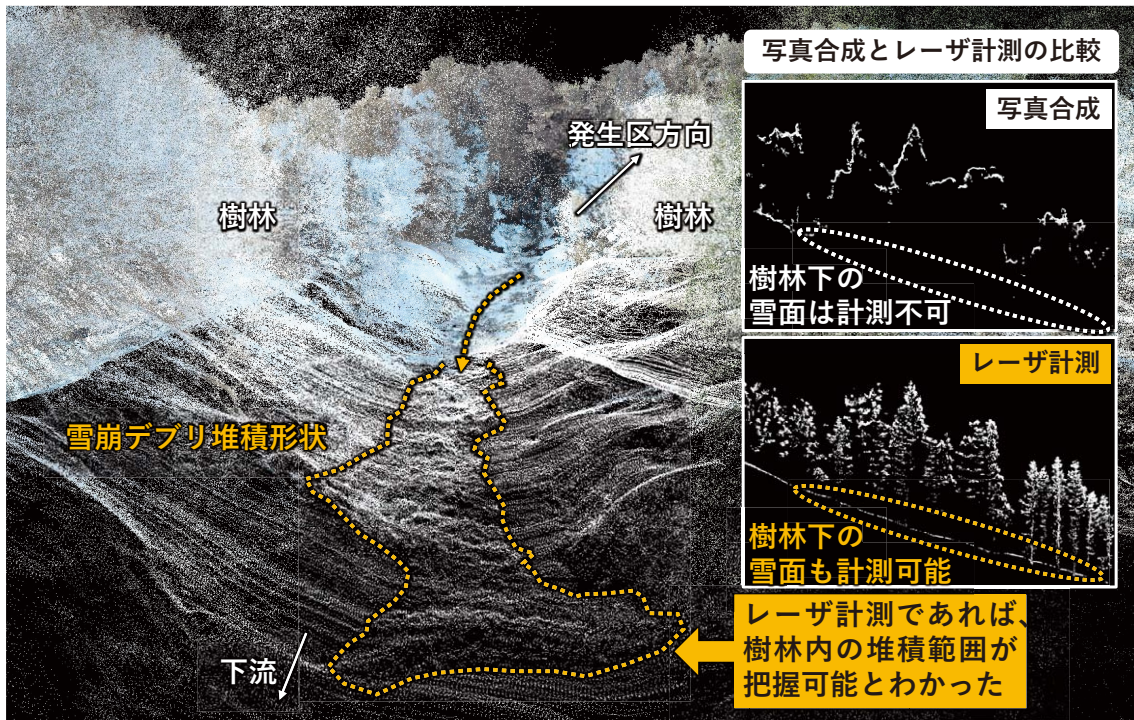


図 36 樹林内の三次元モデル及び写真合成とレーザ計測の比較結果

### (3) まとめ

雪崩発生後に UAV を活用した調査で、三次元モデル作成の解析時間に時間を要した一方で、以下のことが確認できた。

- UAV 及び三次元モデルを活用することで、雪崩の発生区から堆積区までの全体状況を把握可能
- さらに、雪崩の発生量や到達距離等の諸元も把握可能
- UAV レーザ計測を併用することで、樹林内のデブリ堆積状況が把握可能

### 参考文献

- 1) 国土交通省国土地理院: UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案), [https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uavls/doc/uavsl\\_manual.pdf](https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uavls/doc/uavsl_manual.pdf), 参照 2022-07-31, 2020



---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No. 4435 February 2023

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは  
国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754