

博 士 論 文

UAV-SfM を利用した雪氷防災のための
雪面計測法に関する研究

2024年9月

高 橋 浩 司

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 わが国の現状	1
1.1.2 防雪対策工の現状と維持管理の重要性	3
1.2 研究の目的	5
1.3 論文の構成	7
第 2 章 UAV-SfM 計測の概要と既往の研究および課題	11
2.1 概説	11
2.2 UAV-SfM 計測の概要	11
2.2.1 UAV について	11
2.2.2 SfM/MVS について	15
2.2.3 UAV-SfM 計測について	16
2.3 既往の研究	18
2.3.1 航空レーザ測量による雪面計測に関する研究（従来手法）	18
2.3.2 UAV-SfM による雪面以外の計測に関する研究	19
2.3.3 航空写真と SfM による雪面計測に関する研究	20
2.3.4 UAV-SfM による雪面計測に関する研究	21
2.3.5 UAV-SfM を補完する LiDAR 計測に関する研究	22
2.4 研究の課題	24
第 3 章 雪面計測を目的とした UAV の撮影条件の最適化検討	27
3.1 概説	27
3.2 検討条件	27
3.3 検討結果および考察	28
3.4 まとめ	41

第4章 UAV-SfM計測による防雪設備周辺の雪面形状の計測実験	43
4.1 概説	43
4.2 実験方法	44
4.2.1 実験場所および気象観測	44
4.2.2 UAV撮影	46
4.2.3 地上基準点の設置	47
4.2.4 SfM解析手順	48
4.2.5 積雪深の推定方法と実測による精度検証	49
4.3 実験結果および考察	50
4.3.1 積雪環境特性とSfM解析	50
4.3.2 地上基準点を用いた点群の精度検証	52
4.3.3 UAV-SfM計測における雪面形状の再現性	53
4.3.4 センサーサイズの異なるUAV-SfM計測の精度検証	55
4.3.5 撮影高度および撮影時刻の異なる場合のUAV-SfM計測の精度検証	56
4.4 まとめ	61
第5章 積雪期のUAV-SfM計測における地上基準点設置作業の効率化実験	63
5.1 概説	63
5.2 実験方法	64
5.2.1 実験場所および実験方法	64
5.2.2 UAV撮影およびドローンレーザ計測	65
5.2.3 地上基準点の配置	68
5.2.4 SfM解析の手順	69
5.2.5 雪面の高さおよび積雪深の推定方法	69
5.2.6 実験ケース	70
5.3 実験結果	72
5.3.1 天候および雪面の雪質	72
5.3.2 基準となるレーザ計測の精度	72
5.3.3 SfM解析	73

5.4	考察	77
5.4.1	UAV の測位方式の違いによる雪面形状の計測精度	77
5.4.2	GCP 点数の違いによる雪面計測精度	80
5.5	まとめ	84
第 6 章	雪崩予防柵が設置された道路法面を対象とした雪面形状計測実験	87
6.1	概説	87
6.2	実験概要	89
6.2.1	実験場所および気象観測	89
6.2.2	実験方法	89
6.3	UAV-SfM による雪面計測実験	91
6.3.1	UAV 撮影の方法	91
6.3.2	SfM 解析の方法	92
6.3.3	計測精度の検証方法	93
6.4	モバイルスキャンによる雪面計測実験	94
6.4.1	モバイルスキャンによる雪面計測の方法	94
6.4.2	モバイルスキャンによる雪面計測精度の検証方法	95
6.5	気象観測の結果	96
6.6	UAV-SfM 計測による雪面計測実験の結果と考察	97
6.6.1	UAV-SfM 計測による雪面形状の再現性	97
6.6.2	UAV-SfM 計測による積雪深の計測精度	98
6.7	モバイルスキャンによる雪面計測実験の結果と考察	101
6.7.1	モバイルスキャンによる雪面形状の再現性	101
6.7.2	モバイルスキャンによる積雪深の計測精度	103
6.8	まとめ	106
第 7 章	結論	109

参考文献	116
研究業績	120
謝辞	122

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 わが国の現状

わが国は世界の中でも有数の多雪地域であり、積雪寒冷地が広く分布している。積雪寒冷地は日本海側に広く集中しており、国土面積の約 60%に及んでいる（図 1.1）。特に札幌市や青森市などは、世界と比較しても降雪量の多い都市により多くの人が生活している（図 1.2）。

国は、積雪寒冷の度が特に厳しい地域における道路の交通を確保するため、当該地域内の道路（表 1.1）についての除雪、防雪および凍雪害の防止に特別な措置を定めた「積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法（通称：雪寒法）」¹⁾を昭和 31 年に制定、また、昭和 37 年には「豪雪地帯対策特別措置法」²⁾を制定し、豪雪地帯の特性を踏まえた防災施策の促進に取り組んできた。

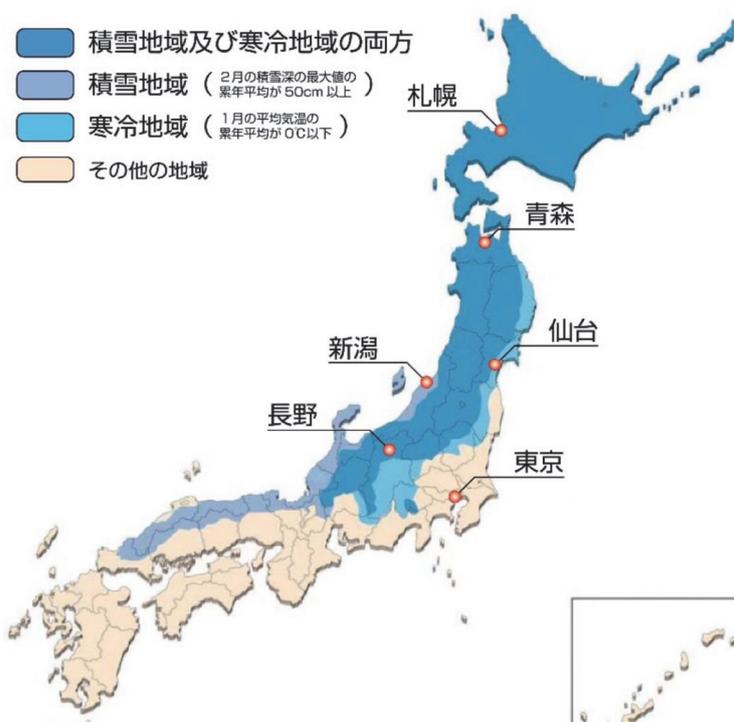


図 1.1 積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法にて指定された積雪寒冷地域¹⁾。

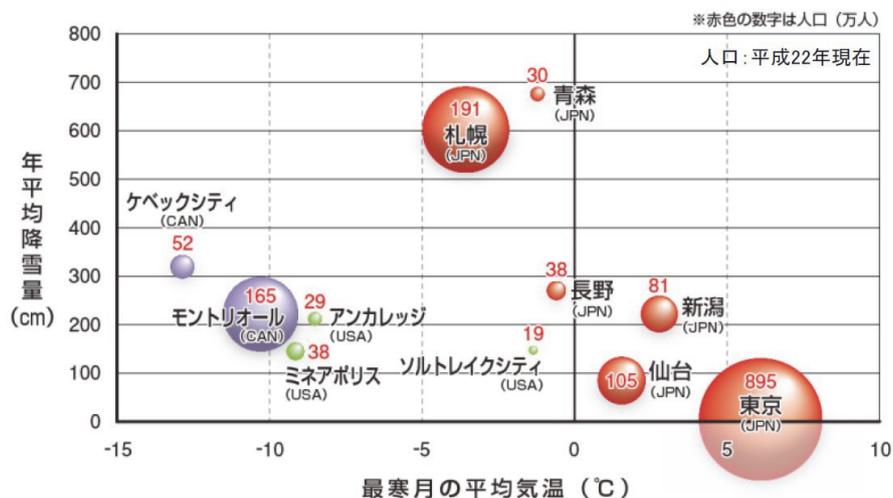


図 1.2 世界の都市の年平均降雪量と最寒月の平均気温および人口³⁾。

表 1.1 積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法にて指定された道路の延長⁴⁾。

道路全体	約147,830 km
国道	約25,820 km
道府県道	約51,190 km
市町村道	約70,820 km

一方、近年は気候変動の影響を受け、短期間で集中的に大雪が降ったり、暴風雪が発生したりする傾向にある。また、北海道内各地においても積雪水量の増加や雪質変化が確認されている⁵⁾。

特に道路交通に影響を与える主な雪氷災害としては、強風により舞い上がった積雪粒子と降雪のために視程が悪くなる「吹雪」や、斜面上に降り積もった雪が重力の影響で移動する「雪崩」があげられる⁶⁾。これまで道路を通行する人や車両を守る対策として、吹雪に対する防雪柵や、雪崩に対する雪崩予防柵等の対策⁷⁾が数多く講じられてきた。しかし、吹きだまりによる防雪柵の埋没や、雪崩予防柵上の雪庇の発達に伴う崩落雪等により、既存の対策の有効性が懸念されている。このため対策工があるにもかかわらず、雪氷災害予防の目的で実施される法面除雪・雪踏み等の維持管理が必要であり、予算減少の現状から、安全管理および維持管理の最適化が求められている。

1.1.2 防雪対策工の現状と維持管理の重要性

図 1.3 に防雪対策工の現状の事例を示す。図 1.3a には、冬期視程障害対策として設置された防雪柵（吹き払い柵）の事例を示す。吹き払い柵は、防雪板で風を制御し、柵の下部間隙から加速されて吹き抜ける強い風で道路の路側や路面の雪を払うことで、視程障害を緩和する機能を有する。しかし、この事例では下部間隙に吹きだまりが発生し、本来の機能を果たせず道路交通の支障となっている。

また、図 1.3b には、道路法面の雪崩対策として設置された雪崩予防柵の事例を示す。雪崩予防柵は雪崩の発生を防止する柵で、予防施設の中では最も確実な工法である。しかし、この事例では雪崩予防柵が埋没して雪庇が発生しているため、雪庇の分離による崩落雪や新たな降雪による表層雪崩が懸念される状況となっている。このような場合には、図 1.4 のように法面積雪の事前除雪や一時的な通行止めにより対処しているのが現状である。



図 1.3 防雪対策工の現状の事例。(a) 防雪柵周辺の吹きだまりの事例、(b) 雪崩予防柵周辺の雪庇発達の事例。

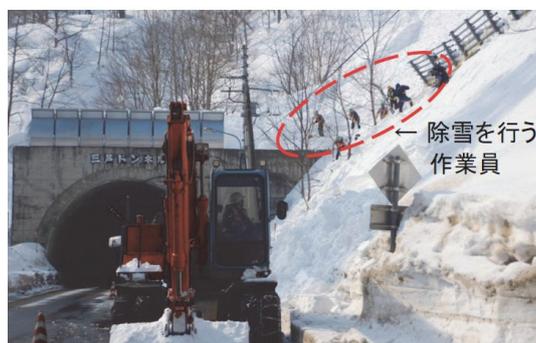


図 1.4 雪崩予防を目的として法面の除雪を行っている事例。

図 1.5 には、道路横の斜面で発生した雪崩災害の事例を示す。図 1.5a、図 1.5b の事例においては、雪崩対策が講じられていたにもかかわらず、雪崩が道路に達し、通行止めを余儀なくされている。このため、雪崩災害から道路交通を守るためにはスノーシェッド⁷⁾の様なハード対策が望ましいと考えられるが、全ての危険箇所に対して対策を実施するためには、整備にかかる費用と時間の問題から現実的ではない。

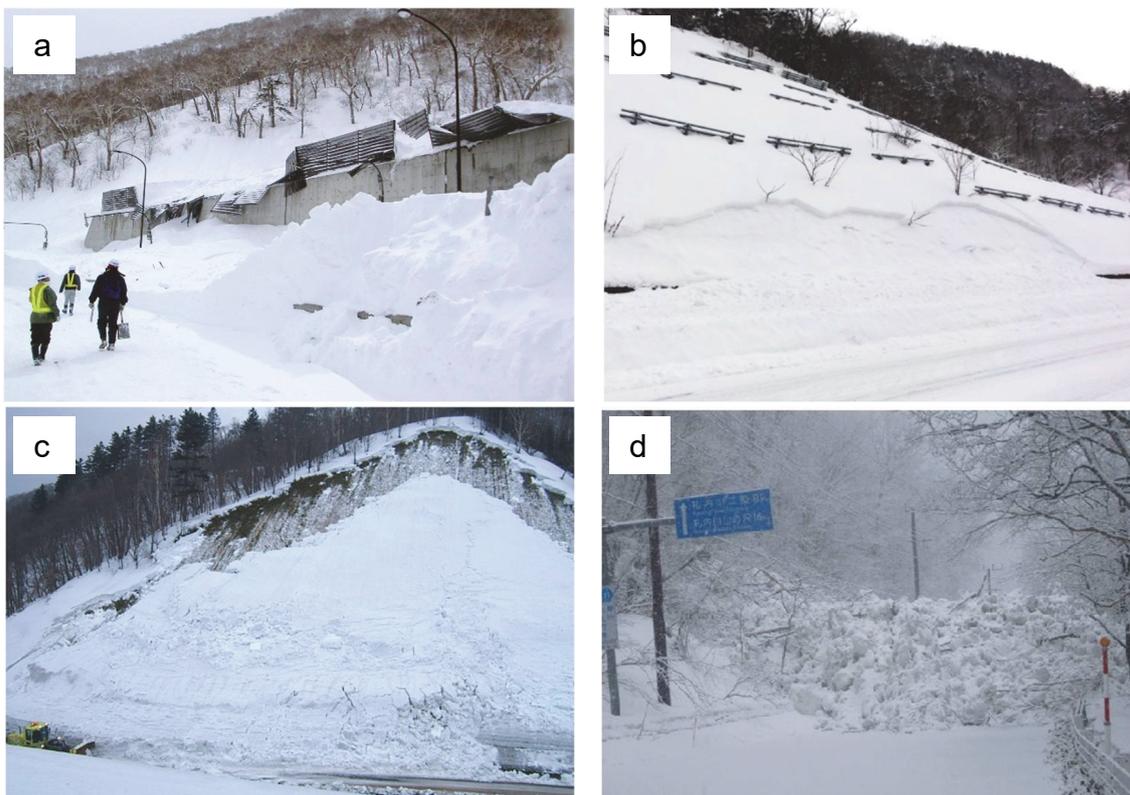


図 1.5 道路横の斜面で発生した雪崩災害の事例.

このような雪氷災害を未然に防ぎ、安心・安全な道路交通を確保するには、道路横の斜面や切土法面における積雪深の変化を適切に把握し、法面の事前除雪や一時的な通行止め等のタイミングの適正化を図るなど、予算減少の現状から安全管理および維持管理の最適化が非常に重要となる。

1.2 研究の目的

これまで冬期防災における維持管理として、**図 1.6** のような手法で雪面計測が行われてきた。道路防災点検や積雪観測調査など斜面における積雪深や平坦地における吹きだまり量の分布等を把握する際には、**図 1.6a**、**図 1.6b** のように現地で雪尺⁸⁾やスノープローブ（測深棒）⁹⁾を用いて人が点で直接計測する直接的手法で行われることが多く、広範囲な調査領域を面的に把握することは困難であった。また、山岳地域等の大規模な斜面においては、航空写真¹⁰⁾や**図 1.6c** のように実機による航空レーザ測量のような間接的手法を用いて、広範囲に面的な測定事例があるものの、高頻度の計測や解像度の高い計測値を求めた場合に高コストかつ時間を要するなど問題があると指摘されている^{11), 12)}。このため、迅速性が必要な場面や数多くある道路際斜面等の維持管理において課題が多いのが現状である。

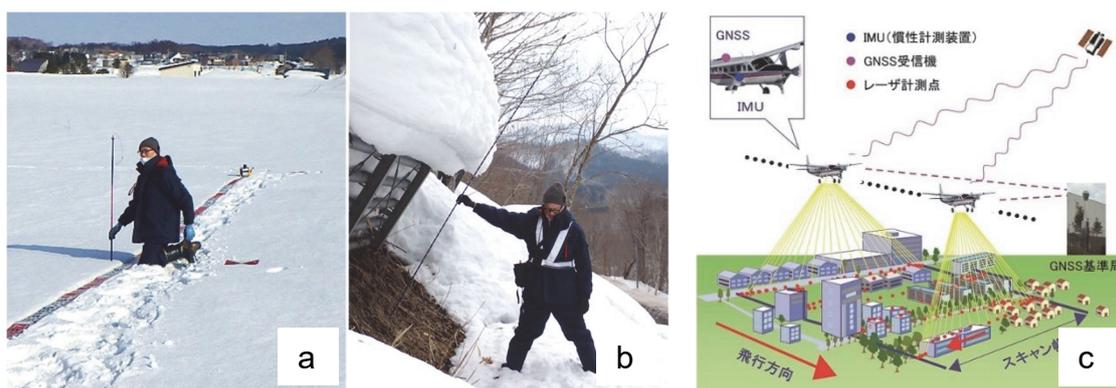


図 1.6 従来の雪面計測の手法。(a), (b) スノープローブによる計測の事例, (c) 航空レーザによる計測の概要¹³⁾。

道路法面の積雪分布を安全に計測する方法として、航空レーザ計測などの上空からの点群取得が有効である。上空から点群を取得するプラットフォームには、航空機や、衛星のほか、近年利用が増加している UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機) 等がある。**図 1.7** には上空から点群を取得可能な 3 次元計測手法の点密度と適用範囲¹⁴⁾、**表 1.2** に主な 3 次元計測手法の概要を整理した。3 次元計測手法は、その方式の違いにより、1 回の計測や撮影で得られる計測精度、面的な密度、計測可能範囲が異なる。

これらの中でも UAV は、2010 年代後半頃から低コストで特殊技術を必要とせず、作業者が安全な場所から操作できるため、その活用が期待される。

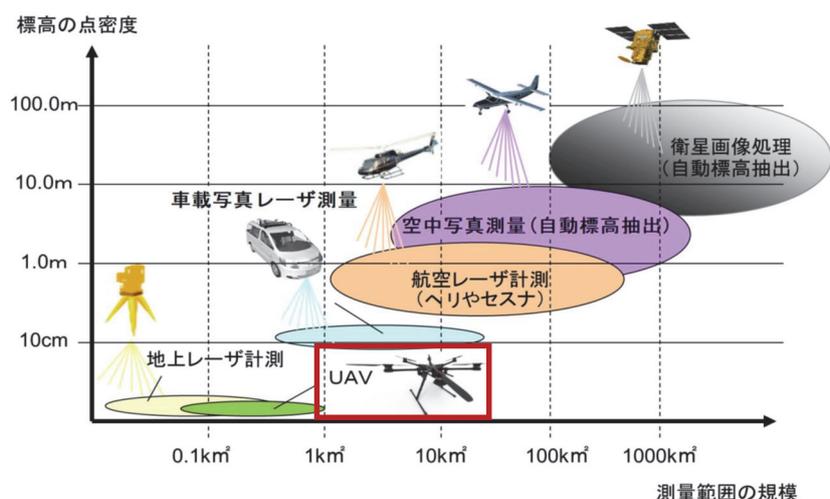


図 1.7 3次元計測手法の点密度と適用範囲¹⁴⁾.

表 1.2 主な3次元計測手法の概要.

	UAV	航空機	衛星
精度	◎ ±10 cm※	△ ±30 cm	× 0.3~45 m
点密度	◎ 0.05~0.1 m	△ 0.15~0.45 m	× 0.5~90 m
分解能	◎ 100~400点/m ²	△ 5~50点/m ²	× 0.5~90 m
範囲	◎ 局所的	◎ 広範囲	◎ 広範囲
費用	◎	×	×
迅速性	◎	×	×

※ UAV：使用機材、対地高度の設定等により±5cm以下の精度とすることが可能
 [凡例] ◎：最も適する，○：適する，△：やや問題あり，×：適さない
 (本評価は道路法面を対象とした積雪分布を対象した場合)

UAV を利用した 3 次元計測の手法の一つに、UAV による空中写真撮影と、近年の新技术である SfM/MVS (Structure-from-Motion / Multi-view Stereo：多視点ステレオ画像を用いた写真測量、以下、SfM 解析) を組み合わせ、高分解能 3 次元数値標高モデル (DEM：Digital Elevation Model) を作成する方法がある。

この手法は UAV-SfM と呼ばれ、2010 年代後半から普及し始めた。低コストで特殊技術

を必要とせず、かつ作業者が安全な場所にいながら撮影可能な UAV と SfM 解析を組み合わせたこの測量技術（以下、UAV-SfM 計測）は、自然災害調査の分野^{15), 16)}や地形学的な分野¹⁷⁾で導入されている。

建設分野においても、平成 28 年 3 月に国土交通省が進める i-Construction にかかる測量作業において「UAV を用いた公共測量マニュアル(案)」(平成 29 年 3 月改正)¹⁸⁾が制定され、測量作業の円滑かつ安全な実施による生産性向上が促されている。しかし、積雪寒冷地の重要な課題である積雪表面を的確に捕捉できるかどうかに関する検討は未だ行われていないのが現状である。

また、防災のための積雪分布の把握においては、緊急を要する場合や広域的概略的な把握が必要な場合が多い点等から、UAV の活用が期待されている。

そこで、本研究では、低コストかつ特殊技術を必要としない UAV による空撮および SfM/MVS を活用し、雪氷防災のための維持管理上必要な精度の雪面計測法を確立することを目的とする。

1.3 論文の構成

本論文は、全 7 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、本研究の背景について、わが国の積雪環境の厳しさと防雪対策工のおかれた現状から、冬期道路の維持管理の重要性を示し、UAV-SfM による雪面計測の適用に向けた研究目的を明確にした。

第 2 章では、本研究で取り扱う UAV の種類や定義、SfM 解析と組み合わせて計測分野に導入されてきた経緯を示した。本研究を進めるにあたり、既往の研究について、以下の通り整理した。

- ・従来の計測手法に関する既往の研究
 - 2.3.1 航空レーザ測量による雪面計測に関する研究
- ・間接的な既往の研究
 - 2.3.2 UAV-SfM による雪面以外の計測に関する研究
 - 2.3.3 航空写真と SfM による雪面計測に関する研究

- ・直接的な既往の研究

2.3.4 UAV-SfMによる雪面計測に関する研究

2.3.5 UAV-SfMを補完するLiDAR計測に関する研究

第3章では、一つ目の課題について、UAV撮影時の雪面の表面的特徴としての雪質、気象条件としての下向き短波放射・雪面反射率・太陽高度・天気の違いに着目し、SfM解析による点群生成の可否との関係について解析実験を行い、雪面計測を目的としたUAVの撮影条件の最適化に関する検討を行い、最適な撮影条件を明らかにした。

第4章では、基礎実験として防雪設備の一例である防雪柵の周囲に形成された雪面形状についてUAV-SfM計測実験を行った。また、UAV-SfMを利用して雪面を計測する際の撮影条件について、積雪環境特有の条件である雪面の雪質や下向き短波放射(明るさの基準)、積雪表面の反射率(下向き短波放射と上向き短波放射の比)に着目し、使用する撮影機材、撮影高度および撮影時刻を変化させ、点群生成の可否とその精度を検証した。結果、防雪設備周囲の雪面に対してUAV-SfM計測を適用した場合、積雪深の計測において実用上問題ないことを明らかにした。

第5章では、二つ目の課題に対応したUAV-SfMを利用して雪面を計測する際の精度向上を目的に、撮影条件について2機種(UAV(RTK搭載/非搭載))を用いた撮影実験を行い、測位方式(相対測位/単独測位)の違いによる計測精度を検証した。また、斜面上における地上基準点設置作業の効率化を目的に、SfM解析の際に入力する地上基準点数の違いが点群作成に与える影響に着目し、その精度を検証した。結果、積雪深の計測誤差は+6.4cm(8%)に抑えられ、実用上問題ないことを確認した。また、積雪期のUAV-SfM測量における地上基準点設置作業の効率化が図れることを明らかにした。

第6章では、UAV-SfMを利用した防雪設備周辺の雪面形状計測法の確立と検証を目的に、雪崩予防柵が設置された実際の道路法面を対象として、UAV-SfM計測実験を行った。また、UAV-SfM計測を補完する目的で、モバイルスキャン(モバイル端末を用いたLiDAR計測)の適用可能性について、点群生成の可否とその精度について検証した。結果、第3章～第5章で検討したUAV-SfMによる雪面計測法の撮影条件が適切であることを明らかにした。さらに、モバイルスキャン計測機器の特性や仕様を理解し、適切に使用することで、ばらつきが少なく5%以内の誤差に収まる計測結果が得られたことから、モバイルスキャン計測を用いた雪面形状測定が、道路管理に十分な精度を持つことを明らかにした。

第7章では、本研究で得られた結論について総括する。

なお, 図 1.8 に UAV-SfM を利用した雪氷防災のための雪面計測法の確立に向けた本論文のフローチャートを示す.

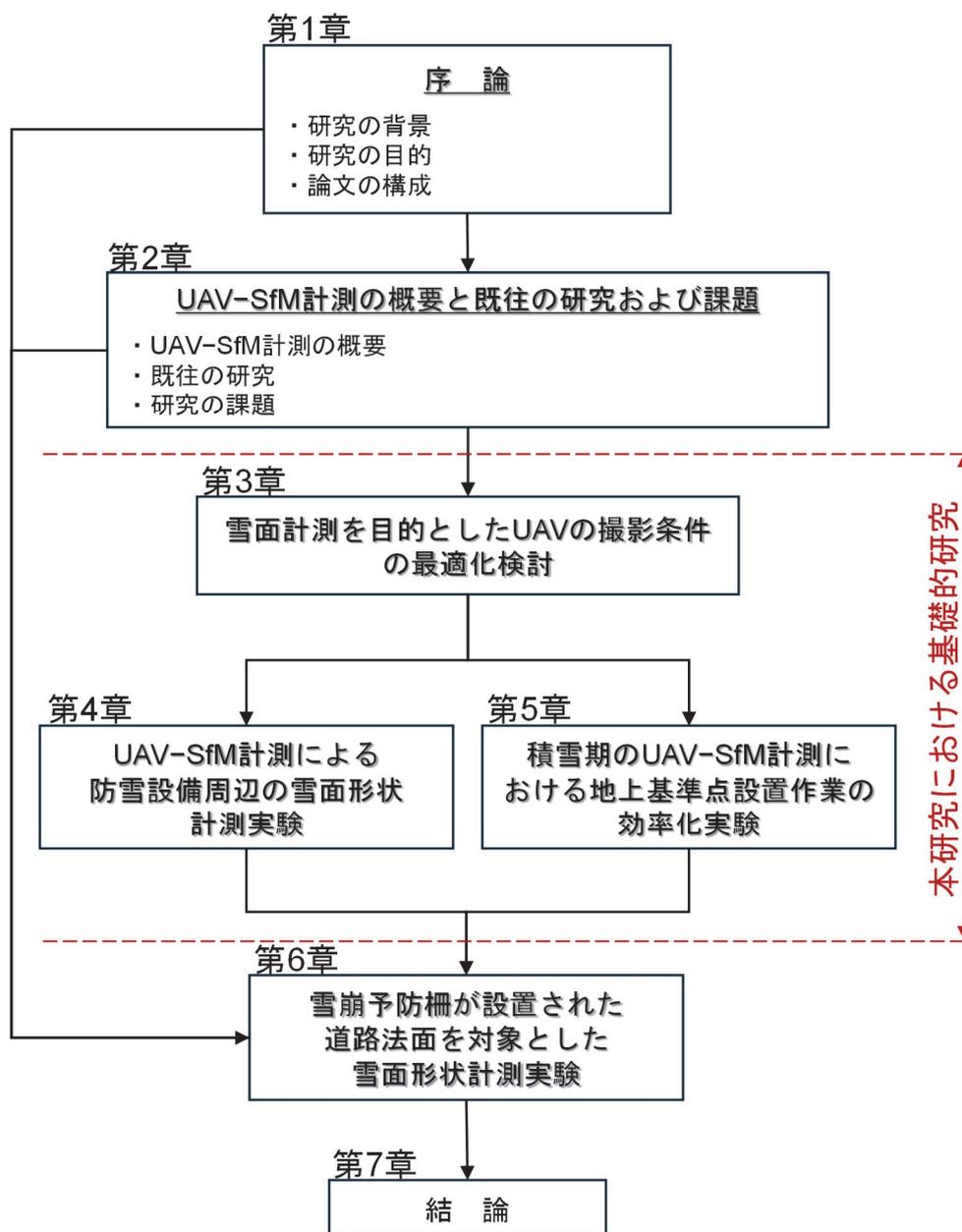


図 1.8 本論文のフローチャート

第2章 UAV-SfM 計測の概要と既往の研究および課題

2.1 概説

UAV-SfM 計測は, UAV による撮影技術と SfM/MVS 技術を組み合わせた計測手法である. この手法は, 低コストで特殊技術を必要とせず, かつ安全な場所から撮影可能であるため, あらゆる分野において研究が進められている. これまで, この手法は土砂災害の把握や3次元地形モデルの作成などで活用されており, 有用性が報告されている.

一方, 雪面を対象とした場合, 特有の可視光反射率の高さや, 色調および凹凸の少なさから, 点群作成の可否や精度低下などの問題が指摘されており, 研究が進んでいないのが現状である.

本章では, はじめに本研究で取り扱う UAV の種類, 定義, SfM 計測と組み合わせて計測分野に導入されてきた経緯を述べる. 次に, 既往の研究に関して, 以下の5点に整理し述べるものとする.

- 1) 航空レーザ測量による雪面計測に関する研究
- 2) UAV-SfM による雪面以外の計測に関する研究
- 3) 航空写真と SfM による雪面計測に関する研究
- 4) UAV-SfM による雪面計測に関する研究
- 5) UAV-SfM を補完する LiDAR 計測に関する研究

2.2 UAV-SfM 計測の概要

2.2.1 UAV について

UAV は, 今や一般的に「ドローン (Drone)」と呼ばれることが多くなっているが, 「無人航空機」や「マルチコプター」と呼ばれる航空機の呼称である. 海外では「Unmanned Aerial Vehicle 無人航空機」の頭文字を取って「UAV」と呼ばれている.

元々は軍用の無人偵察機として開発されていた機体を UAV と呼び, 空中からの偵察や攻撃等, 幅広い用途に使用されているが, 「ロボット」を意味する言葉としてドローンと呼ば

れるようになったという説や、ドローンのプロペラが回る音が蜂の羽音に似ていることより、英語の「蜂の羽音」という意味の「Drone：ドローン」と呼ばれるようになったという説等、語源は諸説ある¹⁹⁾。

ドローンには様々な種類があるが、マルチコプターは実装されているローターや羽根の数により呼び名が異なる。ローターや羽根の数が「4つ」のマルチコプターのことを「クワッドコプター」と呼ぶが、現在使われている種類の中では、ホビー用途や産業用途を問わず、最も普及しているマルチコプターと言える。

ドローンには「回転翼機」と「固定翼機」など様々な種類（図 2.1）があるが、マルチコプターは「回転翼機」に該当する。回転翼機の利点は、垂直での離着陸が可能のため滑走路が不要であること、その場でのホバリング（空中静止）や低速飛行が可能であること、後方飛行やその場での左右への飛行が可能であることが上げられる。

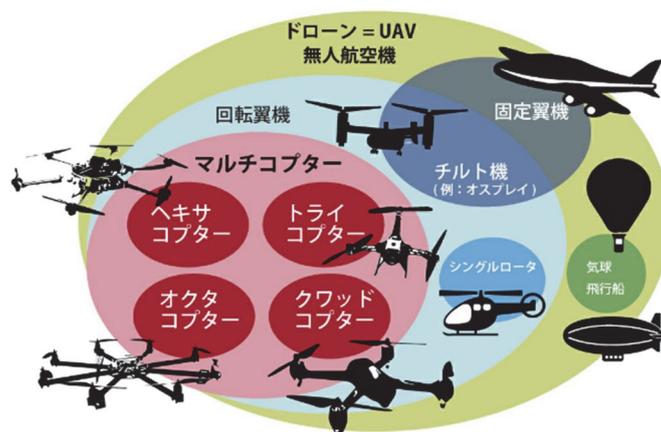


図 2.1 ドローンの種類¹⁹⁾。

わが国では、2015年に改正された航空法において「無人航空機」に定義されている。

無人航空機とは、航空法第11章では「飛行機、回転翼飛行機、滑空機、飛行船であって構造上人が乗ることが出来ないもののうち、遠隔操作又は自動操縦により飛行でさせることが出来るもの（100g未満の重量（機体本体の重量とバッテリーの重量の合計）のものを除く）」と定義されている。図 2.2 に示すドローン（マルチコプター）、ラジコン機、農薬散布用ヘリコプターが該当する。

図 2.2 UAV（無人航空機）の例²⁰⁾。

2000 年代初頭は、UAV 技術が商業利用に向けて大きく進展した時期である。この時期には、次のような技術的な進展が見られた。

1) GPS 技術の向上：

高精度の GPS 技術の進歩により、UAV の自動飛行と位置特定が飛躍的に向上した。これにより、UAV はより精密な航行が可能となり、測量やマッピングでの利用が現実的になった。

2) センサー技術の発展：

軽量で高解像度のカメラやセンサーの開発が進み、UAV に搭載することが可能となった。これにより、画像解析やデータ収集の精度が向上し、様々な応用が可能となった。

2010 年代に入ると、UAV 技術はさらに成熟し、商業利用が急速に拡大した。この時期の重要な進展としては以下の点が挙げられる。

1) 法規制の整備：

多くの国で、UAV の商業利用に関する法規制が整備され始めた。FAA（米連邦航空局）は 2016 年に Part 107 規則を施行し、商業利用の UAV 運用に関する基準を定めた。これにより、UAV の商業利用が法的に認められ、広範な分野での利用が進んだ。

2) バッテリー技術の進歩：

リチウムポリマーバッテリー（LiPo バッテリー）の性能向上により、UAV の飛行時間が延長された。これにより、長時間のデータ収集や広範囲の監視が可能となり、測量や農業、インフラ点検などでの利用が増加した。

3) クラウドコンピューティングとデータ解析：

クラウドコンピューティングの発展により、UAV で収集した大量のデータを迅速に解析することが可能となった。これにより、リアルタイムでのデータ解析や即時の意思決定が可能となり、特に災害対応や緊急監視などでの有用性が高まった。

4) 自律飛行技術：

自律飛行技術の進歩により，UAV は事前に設定されたルートに従って自律的に飛行し，障害物を回避する能力を持つようになった．これにより，複雑な地形や危険地域での飛行が可能となり，測量や搜索救助活動での利用が進められてきている．

これまで，航空機による写真測量やレーザ測量により地表面や雪面の計測が行われた事例があるが，航空機は航空法施行規則 174 条により家屋の密集している地域以外においても「地表面又は水面から 150 m 以上の高度」を確保し，飛行する必要があった．このため，航空機による計測においては，計測精度は低く，費用も高いものとなっていた．

一方，マルチコプター型ドローンは，これまで述べた通り，垂直方向の離着陸及び空中でのホバリングが可能であり，狭い場所でも運用しやすい．また，操縦装置から手を離せばホバリングするため，初心者でも扱いやすい．最大飛行速度は時速 50～70 km 程度，実用上の航続時間は 20～30 分程度のもが多く，活用が期待されている²¹⁾．

図 2.3 に UAV での撮影状況の事例を示す．SfM/MVS に使用する撮影画像は，「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」（平成 29 年 3 月改正）¹⁸⁾に基づき，図 2.4 のように雪面のオーバーラップ率（重複度）を進行方向に 80%以上，隣接コースに 60%以上で撮影する．



図 2.3 UAV の撮影状況の事例．

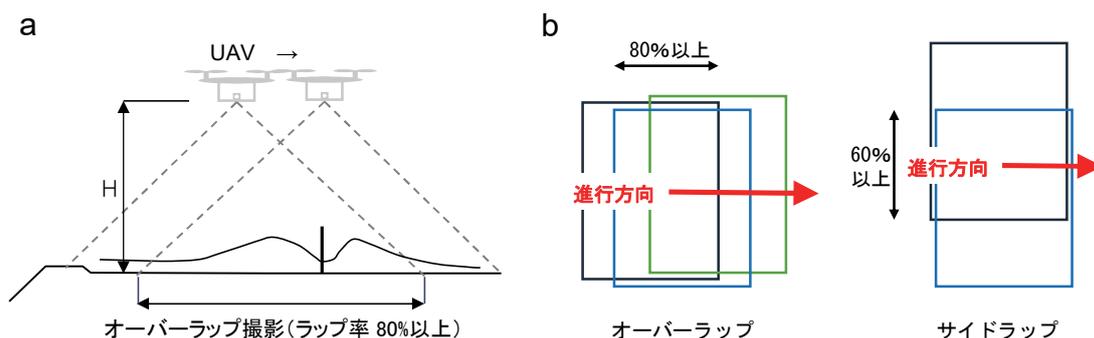


図 2.4 オーバーラップ撮影の概要. (a) 側面のイメージ, (b) 平面のイメージ.

2.2.2 SfM/MVS について

UAV-SfM 計測で使用する点群作成の解析技術は, SfM/MVS (Structure-from-Motion / Multi-View Stereo : 多視点ステレオ画像を用いた写真測量) である. SfM/MVS とは, UAV にて連続重複撮影した画像の特徴点の分状況を推定する写真測量をベースに, コンピュータビジョンで発展した技術である. 画像の特徴点と複数のステレオペア画像より, 外部標要素 (カメラ位置, 姿勢) と, 内部標定要素 (焦点距離と, レンズの歪みなど) を推定して, 高密度の点群データを作成する. SfM では, カメラの位置と姿勢 (傾き) を推定して疎らな点群データを生成し, MVS により地形や構造物などの高密度な点群データを生成する. 多視点から撮影した画像を同時に利用して自動マッチングを行うことから, 構造物の隠蔽領域の影響を受けにくい色付き点群データが生成できることが特徴である²²⁾. 図 2.5 には SfM 解析による撮影位置復元の事例, 図 2.6 には SfM 解析により生成した点群の事例を示す.

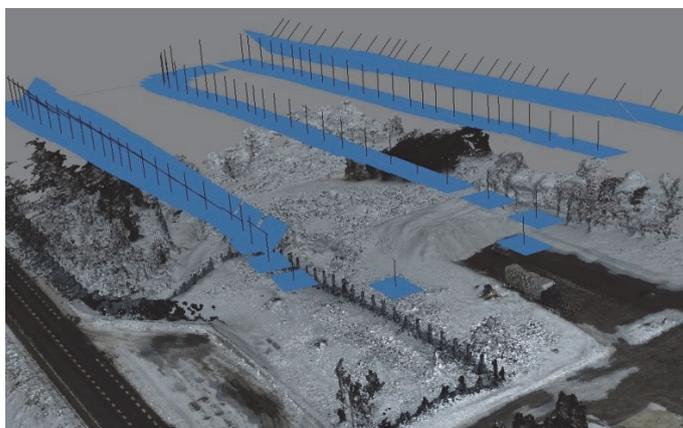


図 2.5 SfM 解析による撮影位置復元の事例 (2017 年 2 月 23 日, 撮影場所: 羅臼町).



図 2.6 SfM 解析により生成した点群の事例 (2017 年 2 月 23 日, 撮影場所: 羅臼町).

2.2.3 UAV-SfM 計測について

UAV-SfM 計測とは, UAV による撮影と SfM/MVS を組み合わせて点群データや高分解能 3 次元数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) を作成する画像解析技術である. この組み合わせは, 2000 年代後半から 2010 年代にかけて急速に進展してきた. 2.2.1 で述べたとおり, UAV の飛行安定性や GPS による高精度な位置情報取得技術が進化し, これにより UAV を用いた空中写真測量が現実のものとなった. さらに, SfM 技術の進歩により, 取得した画像から高精度な 3 次元モデルを迅速に生成することが可能となったものである.

このような背景から, UAV-SfM 計測は従来の地上測量や航空測量に比べて, 以下の利点といえる.

1) コストの低減 :

UAV は従来の有人航空機に比べて運用コストが低く, 小規模なプロジェクトでも利用可能.

2) 迅速なデータ取得 :

UAV は短時間で広範囲のデータを取得できるため, プロジェクトの迅速な進行が可能.

3) 高精度なデータ :

SfM 技術を用いることで, 高精度な 3 次元モデルを生成可能.

これらの利点から, UAV-SfM 計測は建設業, 農業, 災害対策, 環境保全などの分野で広く導入されるようになった. 特に測量分野では, 地形図作成や土量計算, インフラ点検などの用途でその有効性が確認され, 急速に普及してきている.

図 2.7 には道路法面の点群から断面作成位置を指定した事例、図 2.8 には生成した点群から断面図を作成した事例を示す。

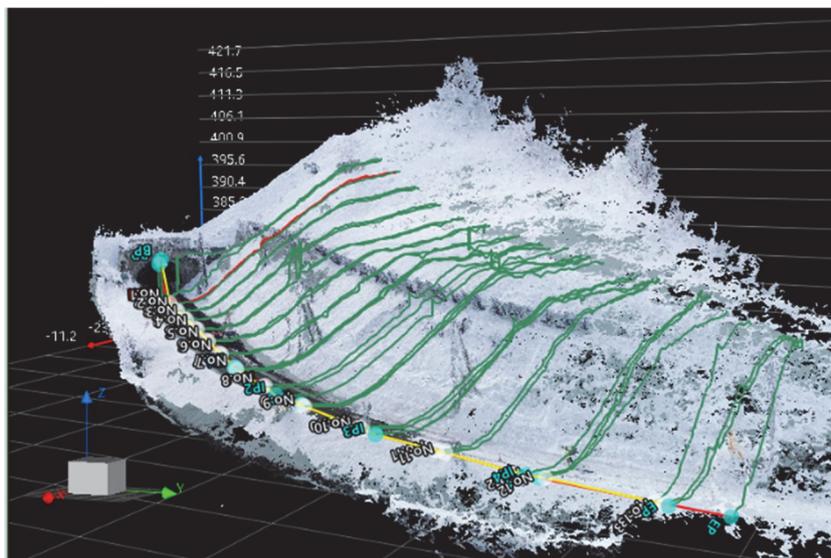


図 2.7 道路法面の点群から断面作成位置を指定した事例（2020年2月18日，撮影場所：芦別市）。

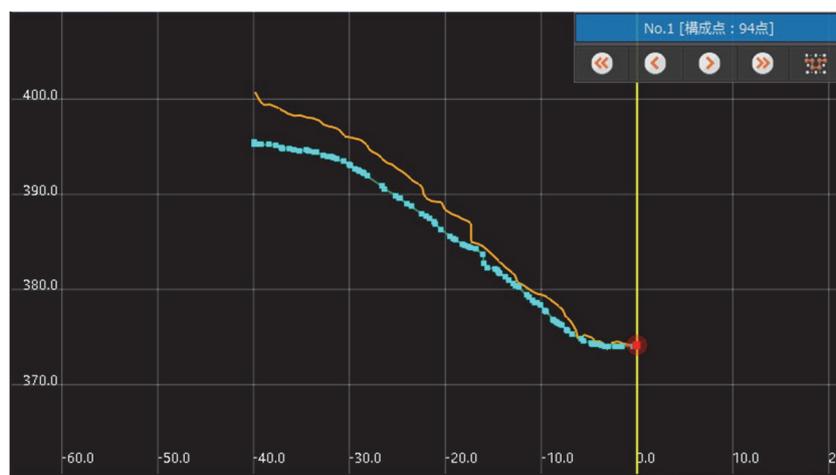


図 2.8 生成した点群から断面図を作成した事例。

技術の進歩は近年加速しており，将来的には自動計測による危険度評価など，さらなる革新が期待される。

2.3 既往の研究

本研究を進めるにあたり、はじめに広範囲の雪面形状を計測する従来手法として、航空レーザ計測を用いた雪面計測に関する既往の研究について整理した。次に間接的な既往の研究として、UAV-SfMによる雪面以外の計測に関する主な研究、航空写真とSfMによる雪面計測に関する主な研究について整理した。最後に直接的な既往の研究として、UAV-SfMによる雪面計測に関する主な研究、UAV-SfMを補完するためのLiDAR計測に関する主な研究について整理した。

これらの既往の研究の概要に関して、以下に示す。

2.3.1 航空レーザ測量による雪面計測に関する研究（従来手法）

航空レーザ測量による雪面計測に関する主な既往の研究^{23)~25)}の概要を以下に示す。

小林ら²³⁾は、航空機搭載型レーザスキャナデータを利用し、斜面の雪崩危険度を面的かつ機械的に均一に評価する方法を検討している。この方法では、レーザデータから得られる高精度な標高データと積雪深分布を使用し、植生、傾斜、積雪深の3要素から発生危険度を算出する。さらに、流下距離と比高から到達危険度を評価することで、従来手法と同様に雪崩危険度を求める。この方法により、広範囲を面的に評価でき、危険箇所の見逃しを防ぐことができ、個人差を排除した客観的な評価が可能になったと結論づけている。また、この手法は広範囲にわたる評価を迅速に行うことができるため、雪崩予防対策の策定に大いに役立つと考えられると述べている。

内山ら²⁴⁾は、災害後に撮影された広域の垂直写真と被災前の航空LiDARデータを用いて雪崩箇所を抽出すべくSfM/MVS解析により3次元数値標高モデルを作成し、雪崩発生状況の把握を試みている。各種解析結果のSfM/MVS処理で作成した3次元数値標高モデルの精度の検証、航空LiDARとの差分によって求めた雪崩デブリ厚さの検証など、本技術の信頼性、汎用性を高めるための基礎的な調査が必要と結論づけている。また、地上基準点の設置点数、配置の最適化を示した。

西原ら²⁵⁾は、山間部における積雪分布と地形の関係を明らかにするため、航空レーザ測量を活用した事例を示している。ダム流域を対象に、2012年と2015年の2回にわたり広範囲の航空レーザ測量を実施した。これにより、地上からのアプローチが困難な高標高帯も含む詳細な積雪分布データを取得することができている。2カ年分のデータを用いて、過去の

地上調査結果で明らかになっていた積雪分布と地形の関係を検証し、さらに、高標高帯における風の影響など、より一般性の高い積雪分布と地形の関係を新たに分析することができる。

雪崩危険度評価等について、写真判読のような個人の経験や主幹に基づく評価に比べて、航空レーザ測量により点群を広範囲に取得し評価する手法は、客観的なデータに基づいて危険度を評価することが可能となるため道路管理においては非常に有効な方法である。同じ点群を生成する手法として、UAV-SfM 計測についても同様の利点があるといえる。

2.3.2 UAV-SfM による雪面以外の計測に関する研究

間接的な既往の研究として、UAV-SfM による雪面以外の計測に関する主な既往の研究^{15), 17), 26)~30)}の概要を以下に示す。

井上ら¹⁵⁾は、マルチコプター (UAV) を用いた低空空撮の災害調査研究への活用方法と、安全運用のための対策を検討している。マルチコプターの機材、操縦法、自律飛行システム、安全対策、関連法規を整理し、実際の地すべり地形調査などの事例で検証している。結果、GPS 搭載により自動帰還や自律飛行が可能になり、写真から 3D モデル再構築でき、高精度な地形測量が可能になったと結論づけている。

早川ら¹⁷⁾は SfM が地形学分野での応用についてレビューし、斜面地形や河川地形、海岸地形、火山地形など広範な地形学的応用が可能であることを示した。SfM/MVS 技術は、従来の写真測量と比較してデジタルカメラや UAV を使用して迅速かつ正確に高解像度の地形データを取得できるため、地形変化の詳細なモニタリングや解析に大きく寄与することを明らかにした。

小花和ら^{26,27)}は、アクセスが困難な場所の地形計測を目的として、UAV-SfM 計測と地上レーザスキャナ計測を同時に実施し、得られた 3 次元数値標高モデルを比較し検証している。UAV 撮影においては UAV に民生用デジタルカメラを搭載して撮影しているが、UAV-SfM 計測の計測精度は約 10 cm 以内で、地上レーザスキャナ計測とほぼ同等の点群密度が得られている。結果、一部の特殊な場所を除き、UAV-SfM 計測による地形の再現性は高く、経済的で運用が容易であり、アクセス困難地の観測に有用であると結論づけている。

内山ら²⁸⁾は、UAV-SfM により低コストで高精度な三次元モデルや地形モデルを生成し、災害調査・観測への活用可能性を検討し、小型 UAV と民生用デジタルカメラで撮影した写真を SfM ソフトウェアに入力することで、安全かつ簡便に精密な三次元モデルや DSM を

生成できることを実証した。生成した DSM からは 0.5 m オーダーの細密地形図やオルソフォトも作成している。撮影計画の最適化や精度検証手法など検討課題はあるが、小型 UAV と SfM の組み合わせは自然災害や地形、歴史災害資料の調査研究に革新的なツールとなり得ると結論付けている。

石田ら²⁹⁾は、UAV による出来形計測の適切な手法を検討するため、対地高度、撮影方向、標定点数、初期カメラ位置を変えた 6 ケースの条件で撮影を行い、地上実測値との比較により精度検証を実施した。その結果、対地高度 50 m で垂直・水平誤差ともに 5 cm 以内であり、出来形管理基準 ± 50 mm を満たす精度が得られた。一方、対地高度 150 m では垂直誤差が 20 cm 程度と大きくなった。標定点数の多少は精度に影響しなかった。斜め写真の追加は精度低下に大きな影響はなく、構造物等が含まれる場合は有効であった。以上より、対地高度 50 m 程度で地上画素寸法 1 cm 程度に設定することが、UAV を用いた出来形計測の適切な手法であると結論付けている。

James *et al.*³⁰⁾は、UAV および地上撮影の画像から高品質の DEM を作成するためには、斜め方向の画像の追加取得が重要であることを示した。これらの研究は、UAV と SfM 技術の活用により、災害調査や地形測量の効率化と精度向上を実現することを目指している。UAV を利用することで、従来の方法ではアクセスが難しい場所や危険な場所でも安全かつ効率的にデータを収集することができ、災害現場の迅速な状況把握や被害評価が可能となり、迅速な対応策の策定が促進されると述べている。また SfM 技術を組み合わせることで、高精度な三次元モデルを簡便に作成できるため、地形変化の詳細なモニタリングや解析が可能となる。

2.3.3 航空写真と SfM による雪面計測に関する研究

間接的な既往の研究として、航空写真と SfM による雪面計測に関する主な既往の研究の概要を以下に示す。

Nolan *et al.*¹²⁾は、低コストの航空機搭載カメラと SfM 解析を用いて高解像度かつ高頻度で積雪深を広域にマッピングする手法を提案し、低コストで高解像度・高頻度の積雪深マッピングが可能であることを実証した。民生用デジタルカメラと GPS を使用した低コストシステムを構築し、積雪期と無雪期に撮影した画像から 3 次元数値標高モデルを作成し、その差分を算出して積雪深を推定する方法を提案している。精度検証の結果、3 次元数値標高モデルにおける位置精度は 30 cm、繰り返し精度は 8 cm であり、推定された積雪深は手測り

値と 10 cm の標準偏差で一致する結果が得られた。この手法により、従来法に比べて低コストで高解像度・高頻度の積雪深マッピングが可能となり、積雪圏の変動研究が革新的に進展することが期待されると結論づけている。

2.3.4 UAV-SfM による雪面計測に関する研究

直接的な既往の研究として、UAV-SfM による雪面計測に関する研究^{11), 31)~34)}の概要を以下に示す。

小花和ら¹¹⁾は、小型 UAV と SfM 写真測量技術を用いて積雪期と無雪期の 3 次元モデルを作成し、積雪深分布を推定する手法を提案し、実測値と比較して 8% の相対誤差で推定できることを示したが、広範囲・長時間観測や降水・強風時の運用が課題であると結論づけた。この研究では、積雪期と無雪期に UAV を用いて空撮を行い SfM 解析により 3 次元モデルを作成する方法が検討された。この方法により、積雪面でも平均 110 点/m² の高密度点群と 2 cm 解像度のオルソ画像が得られ、実際の地表環境変化を正確に反映することができる。積雪深分布は実測値と比較して 8% の相対誤差で推定でき、任意の測線や範囲の積雪深や体積を定量化することが可能となる。しかし、広範囲・長時間観測や降水・強風時の運用には課題が残ると結論づけている。

Mizinski *et al.*³¹⁾は、地上基準点を用いずに UAV によるカメラ画像から SfM 解析を適用し、リアルタイムで積雪深の数値地図を作成する新しい手法を提案している。平均的な精度は実用に足りるが、空間分布の再現性には課題が残ることを示した。また、UAV による斜め方向の空中写真を用いた SfM 解析で積雪深を推定する手法を提案した。ポーランド南西部での実証実験では、平均絶対誤差 0.33~0.43 m の範囲内で積雪深を推定できたが、空間分布の再現性には課題が残ることが示された。この手法は、リアルタイムでの積雪深マッピングを可能にする一方で、精度と再現性の向上が今後の課題となっていると結論づけている。

内山ら³²⁾は、積雪表面の凹凸が小さく陰影が少ないことにより、画像全域でのコントラストが小さいこと、SfM 解析では十分な数の画像特徴点を抽出できないこと、またそれに続く三次元的な計測処理を行うことができない場合があることを指摘している。しかし、実際の適用にあたっては、積雪環境特有の可視光反射率の高さや、色調および凹凸の少なさから、点群作成の可否や精度低下などの問題があると指摘している。

千葉ら³³⁾は、特に曇天で周囲がやや暗いときに撮影した画像では、被写体表面の模様が単調で同じ色の画素が広がって分布すること、撮影位置が正しく推定された場合においても

雪面の模様が捉え難いこと、さらに3Dメッシュデータも生成されない場合があることを指摘している。これによりSfM解析の適用範囲や精度が制約される可能性がある。

Hawley *et al.*³⁴⁾は、構造物周辺での雪堆積の詳細なモニタリングを行い、建物の設計や配置を最適化するためのデータを提供する手法を提案し、雪堆積の低減に有効であることを示した。この手法により、雪堆積のパターンを詳細に測定し、その影響を最小限に抑える建物の設計や配置を探ることが可能となると結論づけている。

2.3.5 UAV-SfM を補完する LiDAR 計測に関する研究

直接的な既往の研究として、UAV-SfM を補完するための LiDAR 計測に関する主な研究^{35)~37)}の概要を以下に示す。

Harder *et al.*³⁵⁾は、UAV-LiDAR と SfM 解析を比較し、UAV-LiDAR が植生下の積雪深観測に有効であることを実証し、積雪モデルの検証や流域スケールの積雪蓄積量の推定に有用であることを示した。本研究では、カナダ・ロッキー山脈の観測所と草原地域で UAV-LiDAR と UAV-SfM 計測を用いて積雪深のマッピングを行い、その精度を比較した。結果、UAV-LiDAR は開けた場所で 0.1 m 以下、植生下で 0.17 m 以下の高い精度で積雪深を測定できることが示された。一方、UAV-SfM 計測では、植生下の積雪面を検知できず、点群が疎になるなどの問題があることがわかった。この研究により、UAV-LiDAR が植生下の積雪深観測において非常に有効であることが実証され、今後の積雪モデルの検証や流域スケールの積雪蓄積量の推定に大いに役立つことが期待されると結論づけている。

Westoby *et al.*³⁶⁾は、南極大陸ヘリテージ山地の氷堆石において、UAV-SfM を用いた新たな堆積物粒度分析手法を提案し、従来手法との比較検証を行っている。従来の粒度分析手法は現場での手作業によるふるい分けが主流で、労力がかかり物理的に攪乱を伴うことが問題だった。しかし、UAV-SfM を活用することで、広範囲の高解像度データを効率的に取得できるため、氷河堆積物の起源や運搬履歴、堆積機構の解明に有用であることが示された。

King *et al.*³⁷⁾は、スマートフォンに搭載された LiDAR センサーを用いて、リアルタイムで手持ち式の雪深観測が可能かを検証した。実験場所カナダのオンタリオ州南部の2カ所で、iPhone 12 Pro の LiDAR センサーによる雪深推定値と実際の雪尺計測値を比較した。実験は75日間にわたり実施したが、LiDAR による雪深推定値と実測値の相関係数が 0.99 を超え、平均絶対誤差は 1 mm 未満、二乗平均平方根誤差は約 6 mm であった。LiDAR センサーは日々の雪深変化を正確に捉えられることが分かった。iPhone 12 Pro の LiDAR センサーは、

高精度で雪深変化を観測できる実用的な手段であることが実証されたと結論づけている。

◆既往の研究のまとめ

- 1) 航空レーザ測量による雪面計測に関する研究（従来手法）
 - ・地上調査では困難だった広範囲・高標高地域のデータ収集が可能
 - ・技術の精度検証と信頼性・汎用性の向上が今後の課題
 - ・客観的なデータに基づいて評価出来るため、道路管理においては非常に有効な方法
- 2) UAV-SfM による雪面以外の計測に関する研究
 - ・GPS 搭載により自動帰還や自律飛行が可能になり、写真から 3D モデルを再構築して高精度な地形測量が実現できることを示した
 - ・従来の方法ではアクセスが難しい場所や危険な場所でも安全かつ効率的にデータ収集が可能
 - ・従来の写真測量と比較して迅速かつ正確に高精度の地形データを取得できる
- 3) 航空写真と SfM による雪面計測に関する研究
 - ・上空からの撮影画像と SfM の組み合わせにより、高解像度かつ広域の積雪深マッピングを行う手法を検討し、位置精度は 30 cm、積雪深精度は 10 cm の標準偏差が得られることを示した
 - ・精度と再現性の向上が今後の主要な課題
- 4) UAV-SfM による雪面計測に関する研究
 - ・積雪期と無雪期の 3 次元モデルを作成し、その差分から積雪深分布を推定出来ることが示された
 - ・暗い条件下では、雪面の模様が捉えにくくなり、点群が生成されない場合があることが示された
 - ・雪面の特性により、SfM 解析に必要な画像特徴点の抽出が困難になる場合があることが示された
- 5) UAV-SfM 計測を補完する LiDAR 計測に関する研究
 - ・スマートフォン搭載型の LiDAR センサーが実用的な積雪深計測ツールとなる可能性が示された
 - ・異なる雪質や気象条件下での検証が課題であることが示された

◆本研究の新規性

- ・道路法面の雪面を対象とした UAV-SfM 計測に関する研究が行われていない
- ・ UAV-SfM 計測における雪面の反射特性と撮影条件が画像解析に与える影響について明らかにされていない
- ・道路法面での積雪前後の点群データを効率的かつ高精度に重ね合わせる手法について明らかにされていない
- ・モバイルスキャンの雪氷防災分野での適用事例はなく、検証されていない

2.4 研究の課題

UAV-SfM を雪面計測に適用するにあたり、積雪環境特有の以下の課題が上げられる。

【課題 1】 雪面の反射特性と撮影条件が画像解析に与える影響

一つ目の課題は、雪面の表面的特徴と撮影時の気象条件である。雪面の反射率（アルベド）は、海面や草地と比べ高い値（新雪や乾雪：0.9，古い雪や湿雪：0.4 程度）を示す。また、反射輝度の範囲も狭く、露出過度で撮影画像が白飛びを起しやすいため、特に積雪初期の新雪のように積雪表面に凹凸が少なく滑らかな場合や、曇天で直達日射強度が低下（ほぼ散乱日射強度のみとなり）して影ができない場合、南中時刻前後で太陽が直上にあって積雪表面に影ができてにくい場合など、積雪表面上の陰影が弱くなり、UAV による撮影画像の特徴点がほとんど得られず、SfM 解析を行う上で大きな障害となる指摘されている³²⁾。

図 1.7 に UAV-SfM 計測による雪面の点群作成の成功事例と失敗事例を示す。この二つの事例では、同日の別時刻に UAV にて雪面を撮影している。結果、日射条件の違いから、雪面での陰影のでき方が異なり、図 1.7a では、撮影範囲全体の点群が欠けることなく生成できているが、一方図 1.7b では、撮影範囲全体の点群が大きく欠損する結果となっている。

図 1.7b の中で一部の箇所において点群が生成されているが、この部分は人が歩いてできた雪面の凹みがあり、周囲に比べ陰ができていことから点群が生成されたものと推察する。

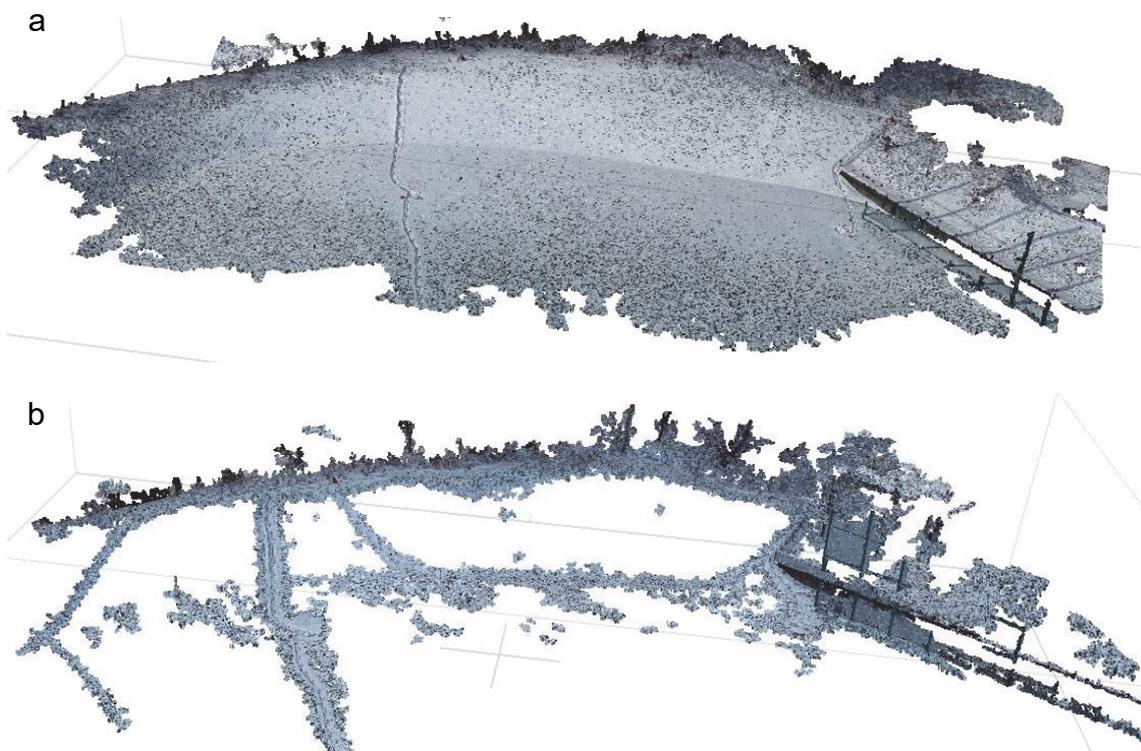


図 1.7 UAV-SfM 計測による雪面の点群作成の事例。(a) 成功事例(2019年2月14日10時頃撮影), (b) 失敗事例(2019年2月14日14時頃撮影, 撮影場所: 北見市).

UAV-SfM 計測の活用事例は増えてはいるが、雪面の反射特性と撮影条件が計測可否および計測精度に与える影響について明らかになっていないのが現状。

【課題2】道路法面での積雪前後の点群データの高精度な重ね合わせ

二つ目の課題は、地表面と雪面の点群の高精度な重ね合わせである。UAV-SfM 計測により積雪分布を推定するためには、例えば積雪前後のように複数時期の計測結果を正確な位置座標に基づき重ね合わせてその差分を計算する必要がある³⁸⁾。通常、UAVはGNSSアンテナを内蔵しているが、その測位方式は単独測位方式であるため、SfM解析に必要な高精度の位置情報が付与されず、作成した点群データを高い精度で重ね合わせることができない。そこで位置精度を向上させるため、計測エリア周辺に複数の地上基準点(以下、GCP: Ground Control Point)を設置する方法がある。座標を地上で事前計測し、その後、SfM解析

時に GCP の計測値を代入する方法がある。しかしこの方法は、積雪による GCP の埋没、融雪による沈下や移動が発生するため、積雪環境下における経時的に安定した恒常的な GCP を複数設置することは極めて難しいとも指摘している³⁸⁾。この課題に対し RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) を搭載した UAV (以下, RTK 搭載型 UAV) を用いて GCP 点数を削減し計測する方法が提案されている^{39),40)}。しかし、現状は積雪表面計測への適用にあたり、データ精度の検証等が未だ十分とはいえない。

道路法面を対象とした UAV-SfM 計測による雪面の点群データを高精度かつ効率的に重ね合わせる手法が明らかになっていないのが現状。

第3章 雪面計測を目的とした UAV の撮影条件の最適化 検討

3.1 概説

「2.4 研究の課題」において、UAV-SfM を雪面計測に適用する場合、雪面の表面的特徴と UAV 撮影時の気象条件によっては、SfM 解析時に画像の特徴点がほとんど得られず、点群が作成できない場合があると課題を示した。

本章では、UAV 撮影時の雪面の表面的特徴としての雪質、気象条件としての下向き短波放射・雪面反射率・太陽高度・天気の違いに着目し、SfM 解析による点群生成の可否との関係について解析実験を行い、雪面計測を目的とした UAV の撮影条件の最適化に関する検討を行った。

3.2 検討条件

2019年2月14日～2021年3月1日に実施した UAV-SfM 計測結果について整理を行う。撮影場所は北海道北見市と北海道当別町の2箇所である。表 3.1 に条件を示す。

表 3.1 UAV-SfM 計測の条件.

機種	PHANTOM 4 PRO (DJI)
撮影方法	自動航法(鉛直下向き)
重複度	進行方向80%以上, 隣接コース60%以上
対地上高	30m
画像形式	jpeg
SfM解析	Agisoft Metashape Professional Version1.7.1 build 11797

3.3 検討結果および考察

表 3.2 に気象観測結果と点群作成の可否について整理した。撮影開始時刻は 9:23~16:26 で、日射があり撮影可能な時間帯全体を網羅している。気象条件である下向き短波放射は 8~883 W/m²，雪面反射率は 0.597~0.910，太陽高度は 48°~1°であった。天候*は全 20 ケースのうち直達日射の割合が多く，雪面に影ができやすい晴が 9 ケース，散乱日射の割合が多く，影ができにくい曇が 11 ケースであった。雪質は，撮影時期が 1 月下旬の厳冬期から 3 月下旬の融雪期であったため，新雪，ざらめ雪，こしまり雪，こしまり・ざらめ雪と冬期の雪面に一般的に確認される雪質全体を網羅した結果となった。

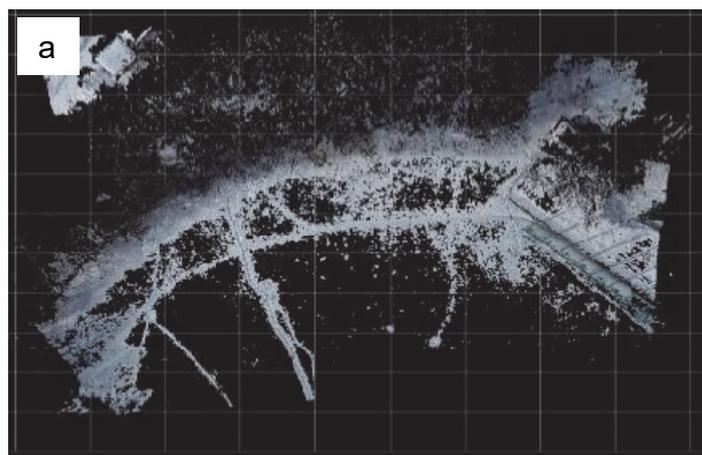
表 3.2 気象観測結果および点群作成可否。

	撮影日	撮影開始時刻	下向き短波放射 (W/m ²)	雪面反射率	雪質	太陽高度 (°)	天候	点群作成可否	
a	2019	10:04	476	0.835		29	晴	×	
b	2.14	11:57	391	0.870	新雪	33	曇	×	
c		13:58	226	0.865		25	曇	×	
d		2019	10:01	398		0.877	39	曇	×
e	3.14	12:04	444	0.881	新雪	43	曇	×	
f		13:53	299	0.879		33	曇	×	
g	2019	10:05	781	0.597	ざらめ雪	44	晴	○	
h	3.26	11:50	205	0.676		48	曇	○	
i	2020	11:46	202	0.910	新雪	34	曇	×	
j		2.17	13:38	547		0.857	29	晴	○
k		15:53	47	0.865		9	曇	×	
l	2020	9:23	721	0.737	ざらめ雪	40	晴	○	
m		3.25	11:04	883		0.693	48	晴	○
n		12:32	826	0.660		46	晴	○	
o	2021	14:22	299	0.778	こしまり雪	19	晴	○	
p		1.25	15:29	65		0.825	10	晴	○
q		16:26	8	0.786		1	晴	○	
r	2021	11:26	238	0.770	こしまり・ざらめ雪	39	曇	×	
s		3.1	13:29	369		0.670	34	曇	×
t		15:05	89	0.765		23	曇	×	

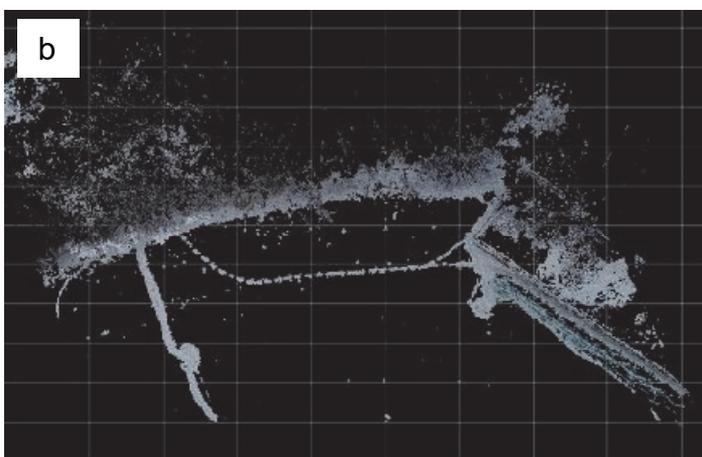
[撮影場所] a~n: 北見市, o~t: 当別町

※ 天候：晴れは雲量 8 以下，曇りは雲量 9 以上とする雲量とは雲が全天を覆う割合を示す（通常雲量は 0+, 10-を含む 13 段階で 0~10 の整数で表される）。

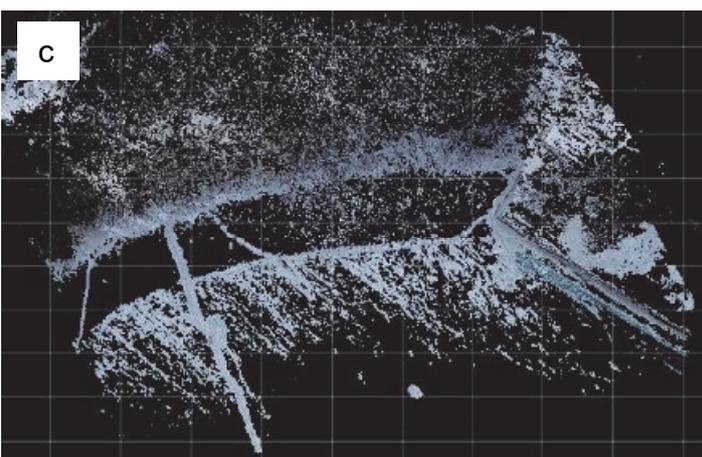
図 3.1～3.7 に UAV-SfM 計測により作成した雪面の点群を示す。雪面計測が可能な点群の作成可否については、表 3.2 右欄に示した。可能と判定した“○”は 9 ケースで、点群の未作成箇所や解像度が極端に落ちる箇所もなく点群が作成できた。一方、不可と判定した“×”は 11 ケースで、実験範囲内に点群の未作成箇所が大きく存在する結果となった。



s:476 W/m², a:0.835, 晴, +

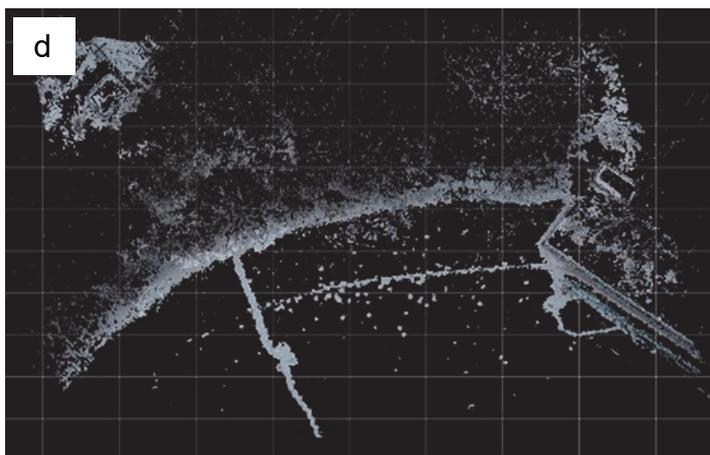


s:391 W/m², a:0.870, 曇, +

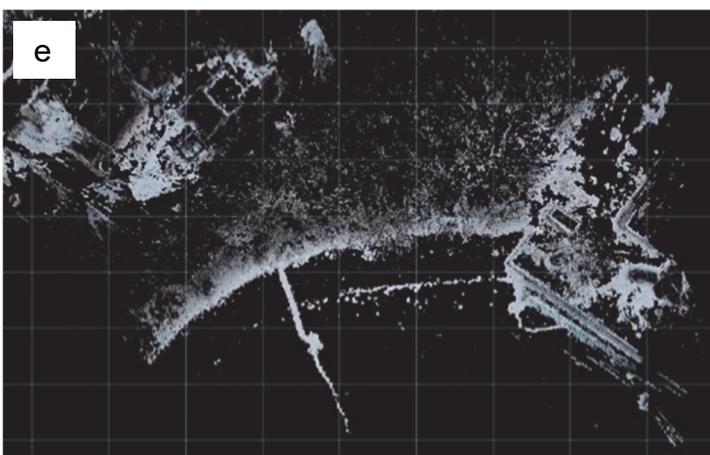


s:226 W/m², a:0.865, 曇, +

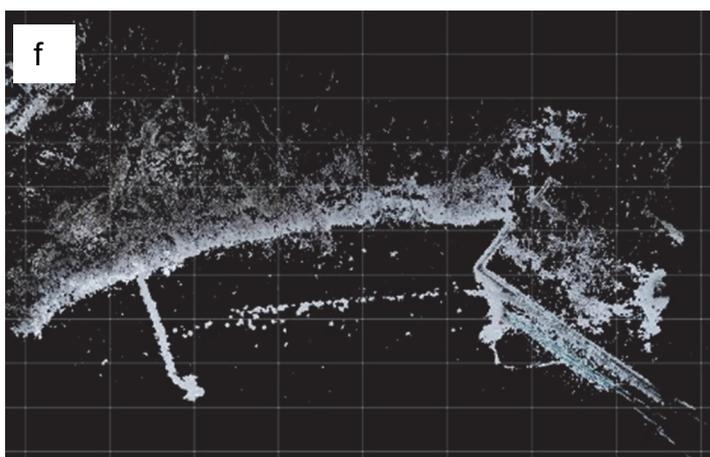
図 3.1 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2019 年 2 月 14 日). [凡例] s: 下向き短波放射, a: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.



s:398 W/m², a:0.877, 曇, +

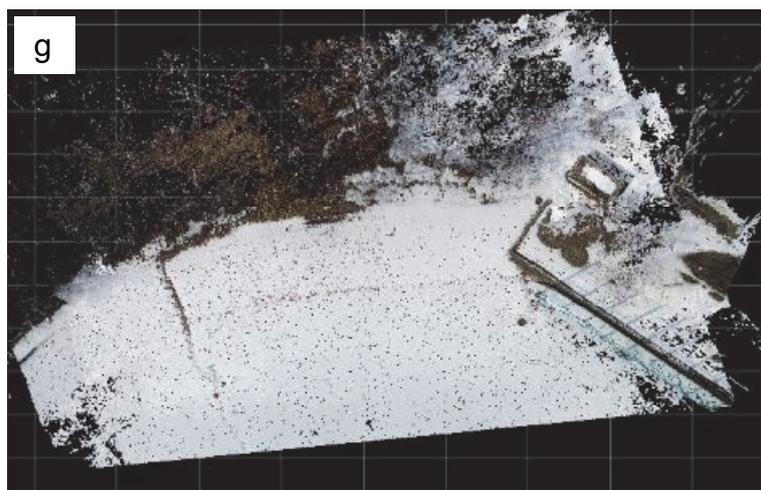


s:444 W/m², a:0.881, 曇, +

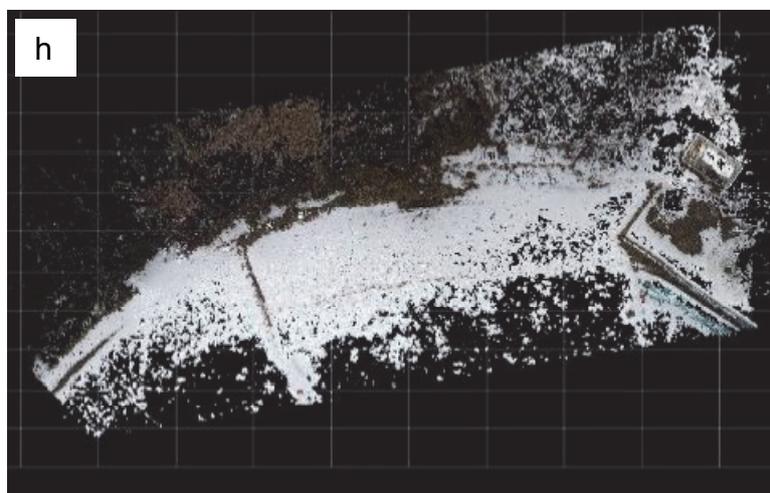


s:299 W/m², a:0.879, 曇, +

図 3.2 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2019 年 2 月 14 日). [凡例] **s**: 下向き短波放射, **a**: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.



s:781 W/m², a:0.597, 晴, ○

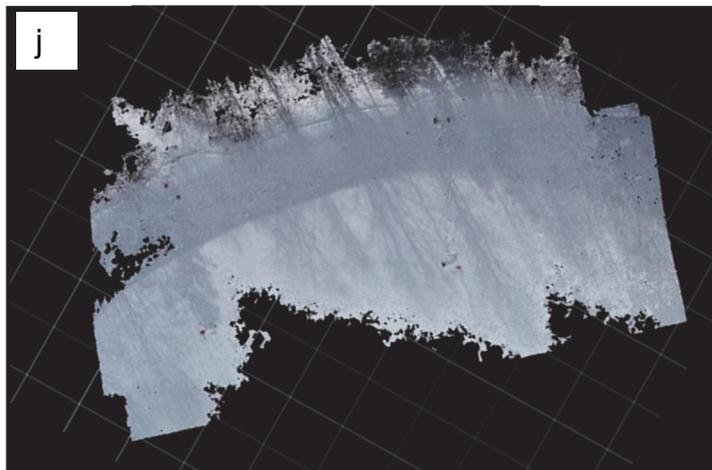


s:205 W/m², a:0.676, 曇, ○

図 3.3 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2019 年 3 月 26 日). [凡例] **s**: 下向き短波放射, **a**: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.



s:202 W/m², a:0.910, 曇, +



s:547 W/m², a:0.857, 晴, +



s:47 W/m², a:0.865, 曇, +

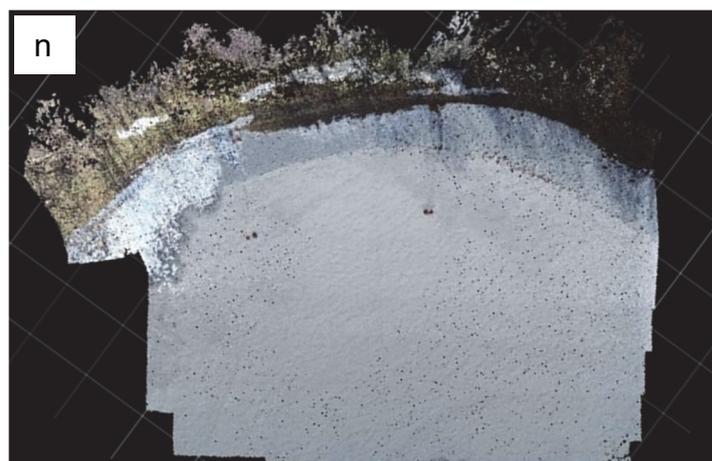
図 3.4 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2020 年 2 月 17 日). [凡例] **s**: 下向き短波放射, **a**: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.



s:721 W/m², a:0.737, 晴, ○



s:883 W/m², a:0.693, 晴, ○



s:826 W/m², a:0.660, 晴, ○

図 3.5 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2020 年 3 月 25 日). [凡例] s: 下向き短波放射, a: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.



s:299 W/m², a:0.778, 晴, ○

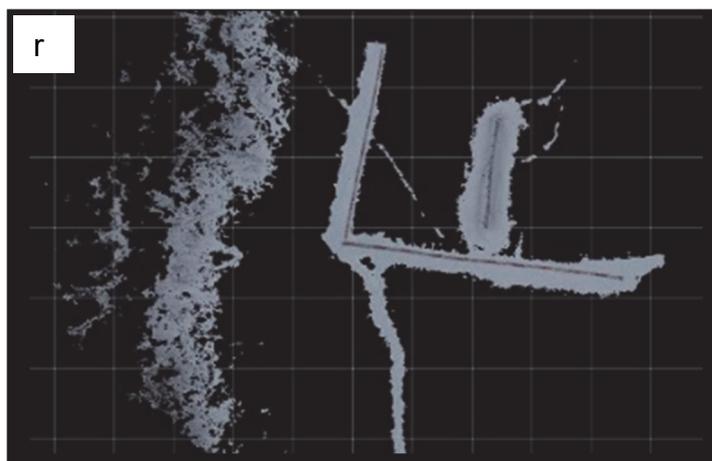


s:65 W/m², a:0.825, 晴, ○

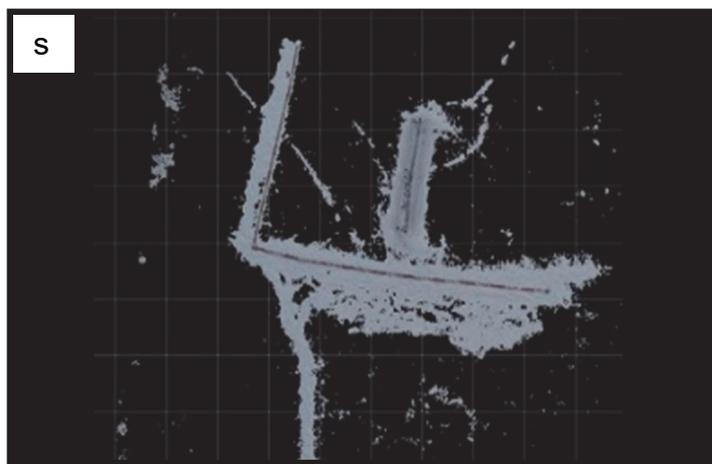


s:8 W/m², a:0.786, 晴, ○

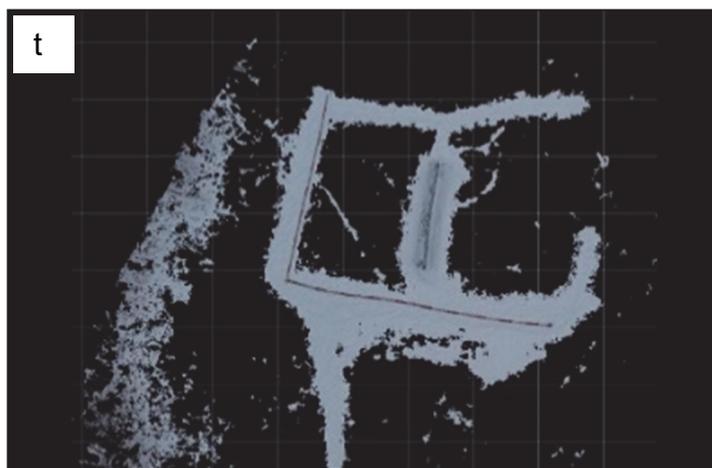
図 3.6 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2021 年 1 月 25 日). [凡例] **s**: 下向き短波放射, **a**: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.



s:238 W/m², a:0.770, 曇, /○



s:369 W/m², a:0.670, 曇, /○



s:89 W/m², a:0.765, 曇, /○

図 3.7 UAV-SfM 計測により作成した点群 (撮影日: 2021 年 3 月 1 日). [凡例] **s**: 下向き短波放射, **a**: 雪面反射率, +: 新雪, ○: ざらめ雪, /: こしまり雪, /○: こしまり・ざらめ雪.

a~f は、雪質は新雪で、天気は晴（下向き短波放射 476 W/m^2 ）または曇（下向き短波放射 $444\sim 226 \text{ W/m}^2$ ）であった。全てのケースで天気に関係なく積雪表面の点群は作成できていない。これは、新雪の特性上、雪面反射率が $0.835\sim 0.881$ と極めて高く、積雪表面に凹凸が殆どないことが影響したものと推定する。

g, h は、天気が晴または曇のどちらにおいても積雪表面の点群は作成できている。これは、撮影時の気温が3度以上で、積雪表面の融雪が進んでいる状態であり、積雪表面の雪質がざらめ化したことが理由と考える（l~n についても同様）。

i~k は、雪質は a~f と同様に新雪で、点群が作成できにくい条件下であったが、j においては、斜面頂部にある林帯の影が実験範囲にできており、積雪表面に大きなコントラスト差ができていたため、点群が作成できたものとする。

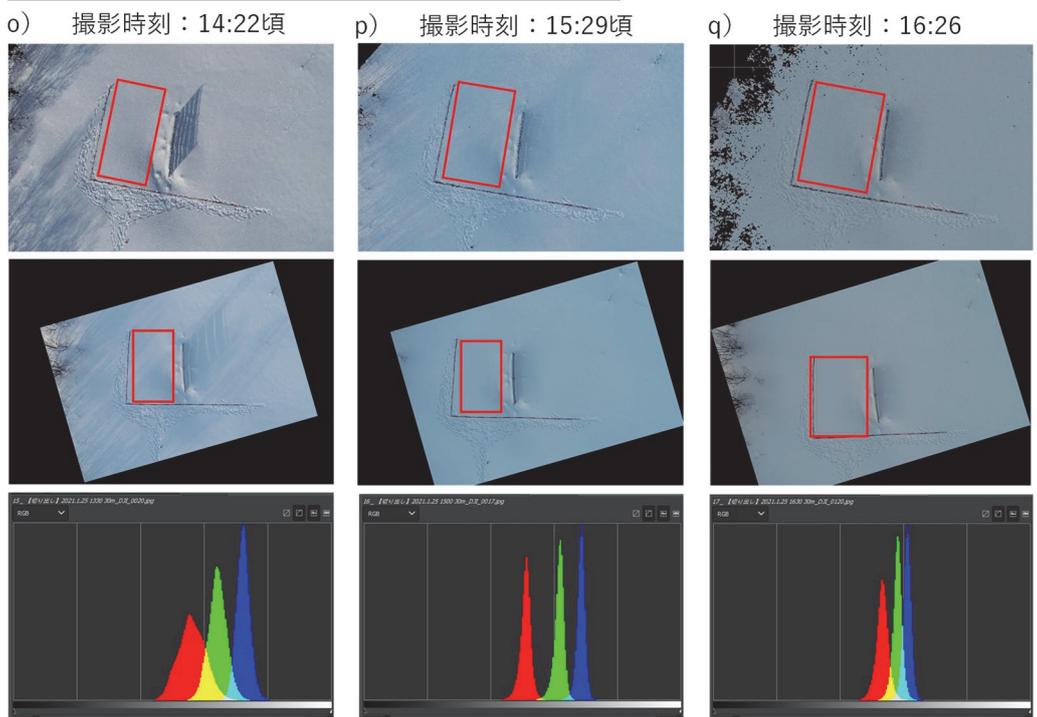
l~t は、雪質はざらめ雪またはこしまり雪で、点群作成の可否については、天気が晴の場合が可、曇の場合が否と明確に分かれた。

結果、雪質が新雪の場合、天気が曇の場合については、UAV-SfM 計測による積雪表面の点群の再現は困難であることがわかった。ただし、新雪は雪面反射率の高い板状結晶群（樹枝状結晶など）で構成され、雪面反射率が高く降雪中および直後は計測が難しいが、時間経過と共に雪結晶が変化して圧密した「こしまり雪」や凝結した「こしもざらめ雪」になると新雪に比べ雪面反射率が低下し撮影に適するため、積雪表面の雪質を観察することで撮影が可能になるものとする。一方、雪質が新雪以外で、晴れていて日射がある場合（少しでも積雪表面に影ができていた場合）、ほとんどのケースにおいて点群を作成できていることがわかった。この結果から、日射による影の出現が、点群作成の可否に大きく影響しているものと考えられる。

また、ここでは点群が生成できたケースとできなかったケースの色階調を比較し、検証する。図 3.8a には、点群が生成できた事例（o~q）の色階調の分布を、図 3.8b には、点群が生成できずに大きく欠損した事例（r~t）の色階調の分布を示す。点群が生成できた事例では色階調幅が広く SfM 解析を行う際に画像特徴点が特定しやすかったものと推察する。一方、点群が生成できなかった事例では、色階調の幅が極めて狭く画像特徴点が取得できなかったために、点群が生成できなかったものと推察する。

このことから、雪面の特性上、色階調が極端に狭くなる雪質および気象条件の場合、SfM 解析を行っても画像特徴点が得られず、点群が生成されないことを明らかにした。

a 撮影日：2021.1.25 撮影高度：H = 30m



b 撮影日：2021.3.1 撮影高度：H = 30m

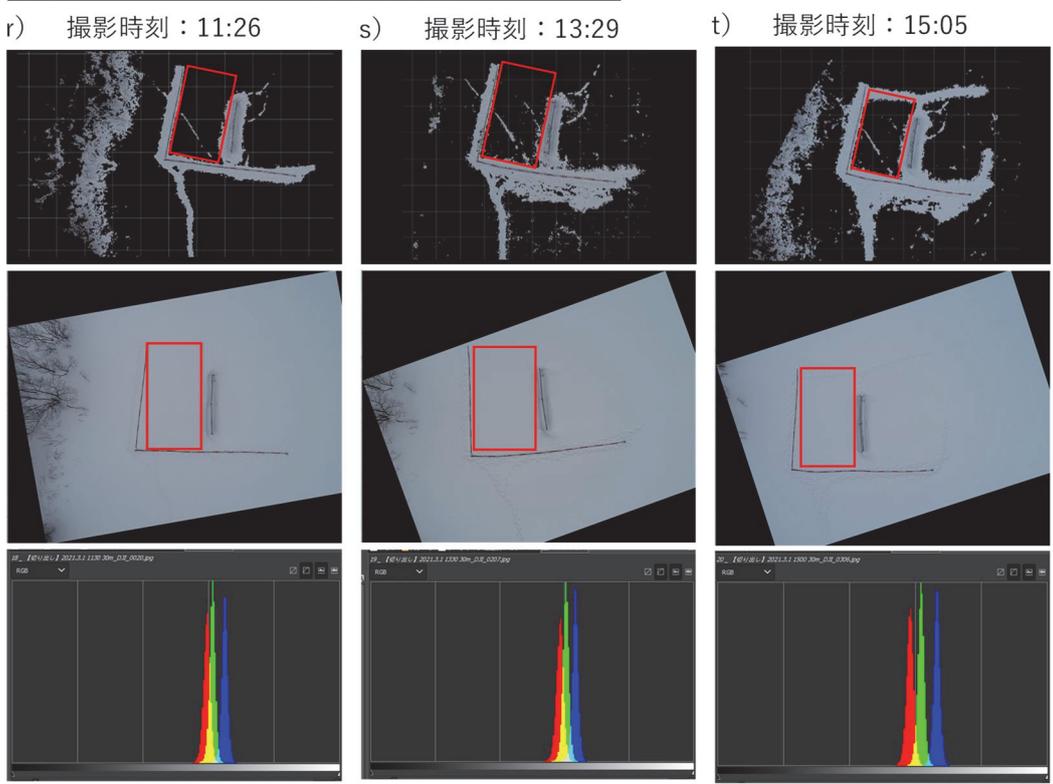


図 3.8 色階調の分布の事例.

◆撮影画像の形式について

図 3.9 に、JPEG と RAW のダイナミックレンジ調整のイメージを示す。撮影画像形式を JPEG(8bit: 256 階調)ではなく、RAW(12bit: 4096 階調)で取得し、現像処理を経て JPEG に変換する方法があるが、以下の問題がある。

- SfM 解析ソフトウェアに画像を入力する際、RAW から JPEG に形式変換する必要があるため、結果的に 256 階調になる
- 現像処理の際、レンジを調整して必要な階調を広げる方法があるが、JPEG に変換した際に、コントラストが軟調となり、点群生成上のデメリットとなる
- 撮影機材によるが、本実験においては画像 1 枚あたりのファイルサイズは JPEG で 3MB、RAW で 18MB(6 倍)程度であった
- RAW→JPEG 変換は、調整も含め 1 分/画像程度（画像 100 枚あたり 2 時間近く）かかる場合がある

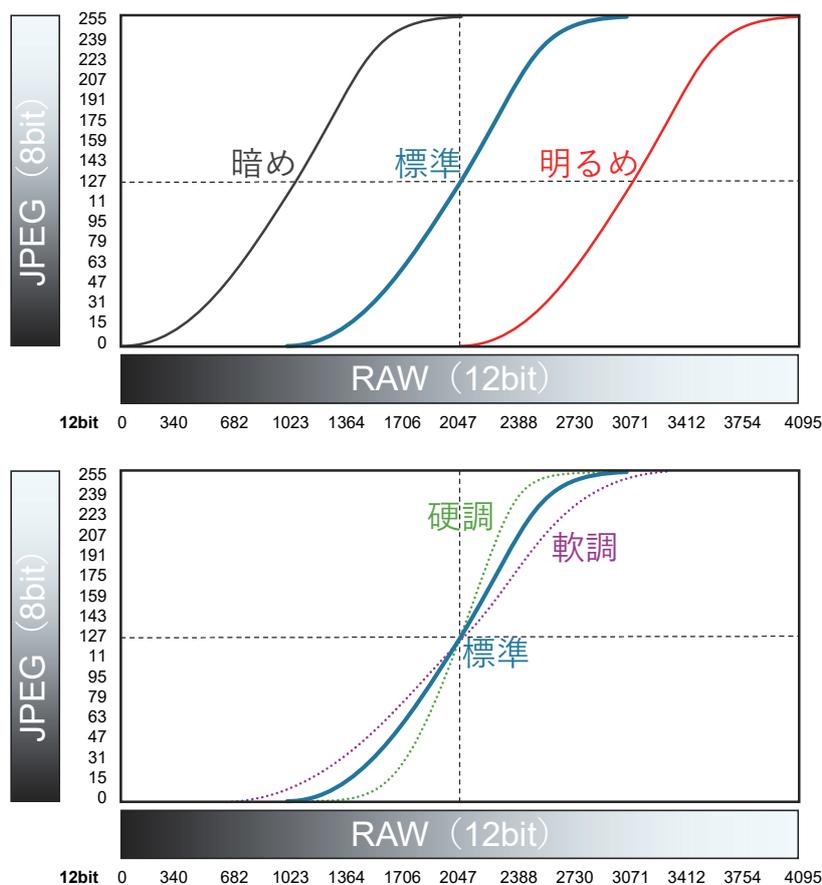


図 3.9 JPEG と RAW のダイナミックレンジ調整のイメージ

雪面計測においては、画像形式を RAW 形式とした場合、画像処理にかなりの時間を要すること、点群生成上の改善は見込めない場合が多いことから、JPEG 形式が適切である。

◆UAV のカメラ設定について

[撮影設定]

AUTO : オート, A : 絞り優先, S : シャッタースピード優先, M : マニュアル設定があるが、基本“オート”または、“シャッタースピード優先”を推奨

[絞り値]

被写界深度を制御、通常 f/4 - f/8 が適切

[シャッタースピード]

動きのブレを防ぐため、1/800 秒以上を推奨

[ISO 感度]

低いほどノイズが少ない、明るい環境では 100 - 200、暗い場合は必要に応じて上げる必要があるが 800 以下が適切

[測光モード]

“中央部重点測光”や“スポット測光”などあるが、“中央部重点測光”が適切

[露出]

適切な明るさを確保

[露出補正]

必要に応じて±1~2 程度で微調整

[ホワイトバランス]

オートまたは、光源に応じて選択（晴天や曇天など）

撮影画像は、雪質や気象条件や、UAV に搭載されたカメラの性能によって異なるため、本撮影前に予備撮影を行い、撮影画像にブレや白飛び・黒つぶれが無いか確認し、設定を決めることが適切である。

3.4 まとめ

得られた知見を以下に示す.

- 1) 明るさの基準となる下向き短波放射は、天候と時間帯で変化するが、 $8\sim 883\text{ W/m}^2$ の範囲で点群が作成できているため、写真撮影が可能な時間帯であれば、直接影響しない.
- 2) 雪面反射率は雪質と関連するが、新雪時の様に 0.9 に近い値の場合、点群が作成できない場合がある.
- 3) 雪質は、降雪直後の新雪の場合、雪面反射率が極めて高く、雪面の凹凸もできにくいいため、点群作成には適さない.
- 4) 太陽高度は、積雪表面の影のでき方に影響するが、点群作成に直接影響しない.
- 5) 天気は、直達日射が卓越する晴に比べ、散乱日射が卓越する曇の際に積雪表面に凹凸を明瞭にする影ができにくいことから、UAV 撮影に最も適さない.

本検討では、以上より得られた知見をもとに、雪面の UAV-SfM 計測における最適な撮影条件として、時間帯は下向き短波放射が適度に高い日中、雪質は降雪直後の新雪以外（雪面反射率 <0.9 ）、天気は直達日射が卓越する晴（雲量 ≤ 8 ）であることを明らかにした.

図 3.10 に、雪面計測に最適な撮影状況の事例を示す.



図 3.10 雪面計測に最適な撮影状況の事例（撮影場所：北広島市）.

第4章 UAV-SfM 計測による防雪設備周辺の雪面形状の計測実験

4.1 概説

UAV-SfM 計測については、積雪期の数値標高モデル (DSM : Digital Surface Model) および無雪期の DEM の 2 時期の差分を取ることにより積雪深を算出した事例がある¹¹⁾。しかしながら、実際の適用にあたっては、積雪環境特有の可視光反射率の高さや、色調および凹凸の少なさから、点群作成の可否や精度低下などの問題があると指摘されている³²⁾。

SfM 解析は、撮影画像に対して画像の特徴点の抽出、タイポイントの決定を自動で行う。これに基づき、外部標定要素 (撮影時の 3 次元座標と 3 軸の傾き) と内部標定要素 (レンズのゆがみパラメータ) から高密度な 3 次元点群が構築される。ここで、積雪表面は可視光反射率が高く、輝度の範囲が狭くピークが大きいスペクトル特性を有する。内山ら³²⁾は、積雪表面の凹凸が小さく陰影が少ないことにより、画像全域でのコントラストが小さいこと、SfM 解析では十分な数の画像特徴点を抽出できないこと、またそれに続く三次元的な計測処理を行うことができない場合があることを指摘している。千葉ら³³⁾は、特に曇天で周囲がやや暗いときに撮影した画像では、被写体表面の模様が単調で同じ色の画素が広がって分布すること、撮影位置が正しく推定された場合においても雪面の模様が捉え難いこと、さらに 3D メッシュデータも生成されない場合があることを指摘している。

UAV-SfM 計測の活用事例は増えつつあるが、積雪表面計測への適用では、撮影条件と計測可否およびデータ精度の検証等が未だ十分とはいえないのが現状である。

第3章にて課題に対して検討し、雪面の UAV-SfM 計測における最適な撮影条件として、時間帯は下向き短波放射が適度に高い日中、雪質は降雪直後の新雪以外 (雪面反射率 <0.9)、天気は直達日射が卓越する晴 (雲量 ≤ 8) であることを明らかにした。

そこで本章では、得た知見を基に UAV-SfM 計測で積雪表面を計測する際の撮影条件について、積雪環境特有の条件である雪面の雪質や下向き短波放射 (明るさの基準)、積雪表面の反射率 (下向き短波放射と上向き短波放射の比) に着目し、使用する撮影機材、撮影高度および撮影時刻を変化させ、点群生成の可否とその精度を検証した。検証事例としては、防雪柵の周囲に形成される吹きだまりや雪丘など、実用上の利用頻度が高い雪面形状とした。

4.2 実験方法

4.2.1 実験場所および気象観測

実験場所は、図 4.1 に示す北海道ドローン協会当別ドローン練習場（北海道当別町）である。実験場所では、防雪柵前後の吹きだまり等を再現する目的で、撮影範囲内に図 4.2 に示す防雪柵（吹きだめ柵：柵高 $H=3.07$ m，延長 $L=7.80$ m）を設置し、これを中心に幅 20 m × 延長 20 m 程度の平坦な場所を実験範囲とした。

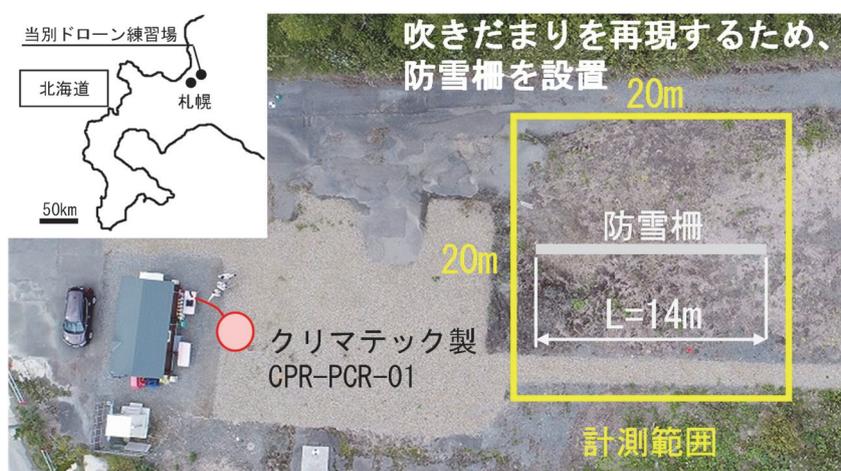


図 4.1 実験場の概要と平面配置.



図 4.2 防雪柵設置状況.

気象観測では、図 4.3 に示すクリマテック製 CPR-PCR-01 の日射計を設置し、撮影時の明るさの基準として上向き・下向き短波放射を計測し、その比率を積雪表面の反射率として算出する。また、撮影時の天候および積雪表面の雪質を記録する。

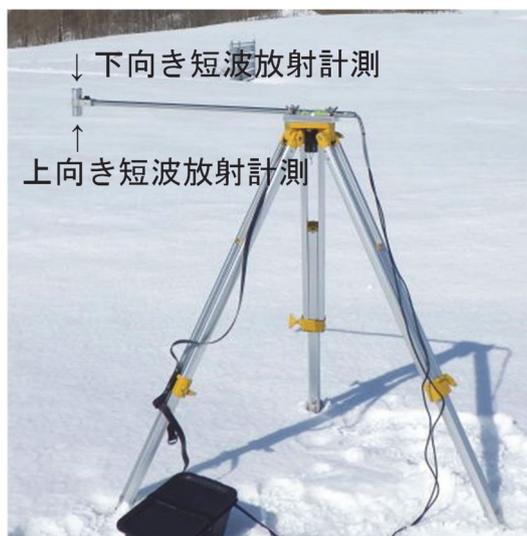


図 4.3 クリマテック製 CPR-PCR-01.

4.2.2 UAV 撮影

撮影に使用する機材は、積雪表面の凹凸情報を得るための画像の解像度に着目し、表 4.1 に示すセンサーサイズの異なる 2 機種とする。実験では、普及型モデル (UAV-1) および、高解像度モデル (UAV-2) を使用する。撮影方法は、鉛直下向きに俯瞰撮影、それに加えて手動航行により俯角 60°の斜め方向にも撮影する。撮影画像の積雪表面でのオーバーラップ率 (重複度) は、「UAV を用いた公共測量マニュアル (案) (平成 29 年 3 月改正) ¹⁸⁾ に基づき、進行方向に 80%以上、隣接コースで 60%以上とする。撮影高度は、積雪表面での解像度に着目し、対地高度 15 m, 30 m, 50 m とする。撮影時刻は、太陽高度の変化に伴い短波放射の雪面からの反射が異なる時間帯として、太陽高度が高くなる 13:30 頃、および低くなる 16:00 頃の 2 回とする。画像の記録形式は JPEG 形式とする。積雪期の撮影日は、既存研究の取り組み整理結果をもとに決定する。また、無雪期の撮影日は、積雪がなく植生が極力繁茂していない時期とする。

表 4.1 実験に使用した UAV 機体およびカメラ仕様.

No.	UAV-1	UAV-2
機体写真		
機種	PHANTOM 4 PRO	MATRICE 600 PRO
メーカー	DJI	DJI
カメラ	付属	SONY α7R IV
カメラ特性		
画素数	2000 万画素	6100 万画素
センサーサイズ	13.2×8.8 mm	35.7×23.8 mm
解像度	5472×3648 pixl	9504×6336 pixl
ピクセルサイズ	2.41×2.41 μm	3.79×3.79 μm
画角	84 °	84 °
35mm換算焦点距離	24 mm	24 mm

4.2.3 地上基準点の設置

UAV-SfM 計測による 3 次元モデルの位置情報（座標値）は、一般的に UAV 本体、またはデジタルカメラに搭載された GNSS（Global Navigation Satellite System：全球測位衛星システム）位置情報を Exif（Exchangeable image file format）で記録し、3 次元モデルの位置情報付与の際に利用される。しかし搭載された GNSS は単独測位であることが多く、この手法で得られた 3 次元モデルの精度は撮影条件や使用機材に影響を受け、位置情報の精度は 10 m 程度であるが、キネマティック測量は数 cm の精度が得られる¹¹⁾。

本研究では、点群の位置精度を向上させるため、UAV 撮影前に実験範囲周辺の地表面上または積雪表面に地上基準点（以下、GCP：Ground control point）を配置する。図 4.4 に設置概要を示す。無雪期には、現地に設置されていた標定 6 点を GCP として使用し、積雪期には既設の標定が積雪で埋没するため、雪面上に GCP となる標定を 4 点配置する。それぞれの GCP については、GNSS 測量（VRS：Virtual Reference Station）で計測する。また、積雪表面の点群の精度を検証する目的で、図 4.4b に示す GCP “H001”と“H004”の中間に検証点を 1 点設ける。

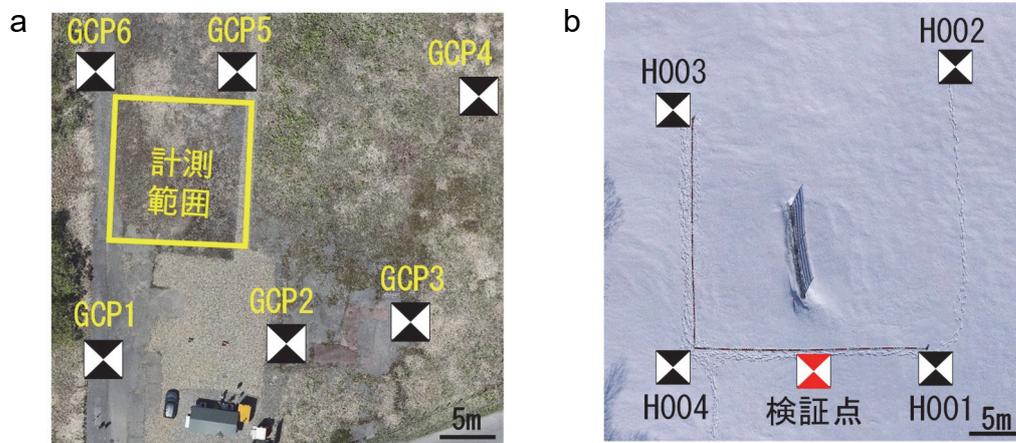


図 4.4 地上基準点の設置概要。(a) 無雪期、(b) 積雪期。

4.2.4 SfM 解析手順

SfM 解析は、UAV にて撮影した画像を SfM 解析用ソフトウェアに読み込み、以下の手順で処理する。順に、「1. 画像特徴点の抽出及びタイポイントの検索」→「2. バンドル調整（内部及び外部標定要素の推定）と低密度点群データの出力」→「3. 地上基準点及び精度検証点の設置と座標入力及び地上基準点を利用した再バンドル調整（内部及び外部標定要素の高精度化）」→「4. 精度検証点を用いた精度検証」→「5. 高密度点群及び TIN (Triangulated irregular network) の作成」→「6. DSM およびオルソ画像の作成と出力」の 6 ステップで構成させる²¹⁾。解析時のパラメータは、過去の経験から以下とした。写真のアライメントは精度：中，マスク適用先：静止したタイポイント除外とした。メッシュ構築は、ソースデータ：高密度クラウド（品質：中），深度フィルタ：弱（頂点カラーを計算，内挿補間：有効），サーフェスタイプ：自由形状（3D），ポリゴン数：高（1400000）とした。評定点の入力および補正は有効とした。

図 4.5 に SfM 解析の事例を示す。図 4.5a に積雪期の写真のアライメント後の画像の例，図 4.5b に積雪期の生成された画像特徴点とタイポイント画像の例を示す。写真のアライメント処理後，写真測量の原理で全ての写真および特徴点の相対的な 3 次元位置関係を推定した後，3 次元メッシュモデルの生成およびオルソモザイクを構築により，点群データを作成する。無雪期の SfM 解析についても同様の手順で実施した。本研究では，先行研究と同様に SfM 解析に Agisoft Metashape Professional Version1.7.1 build 11797 を使用する。

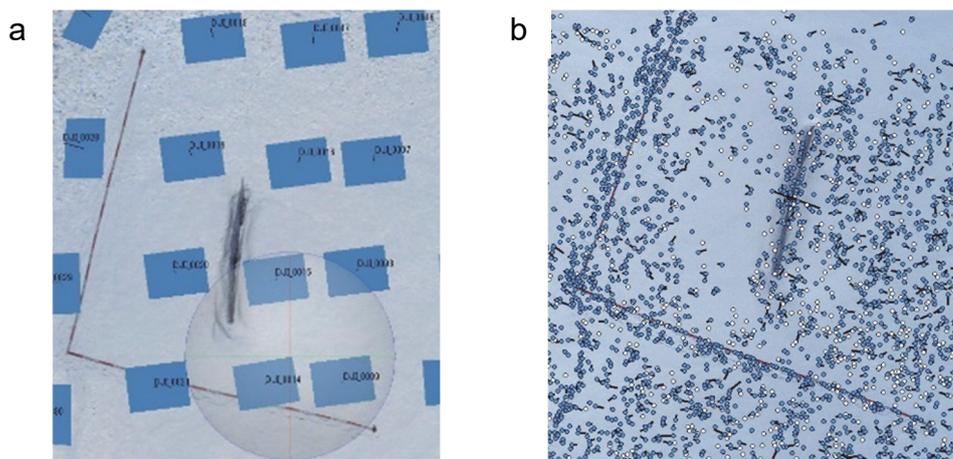


図 4.5 SfM 解析の事例。(a) アライメント後の撮影位置の例，(b) 画像特徴点およびタイポイントの例。

4.2.5 積雪深の推定方法と実測による精度検証

積雪深の推定方法については、積雪期および無雪期の点群データを TREND-POINT ver.9 で同時に読み込み、測線上の計測点の標高差により算出する。また、求めた積雪深の推定値とスノープローブを使用して現地計測で得た積雪深との比較を行い、点群の精度を検証する。積雪深の推定および現地計測は図 4.6 に示す 2 測線（主測線：防雪柵中心、副測線：防雪柵がない区間）とし、計測間隔は防雪柵を中心に延長 20 m の範囲を 1 m 間隔（1 測線あたり 21 点）で計測した。

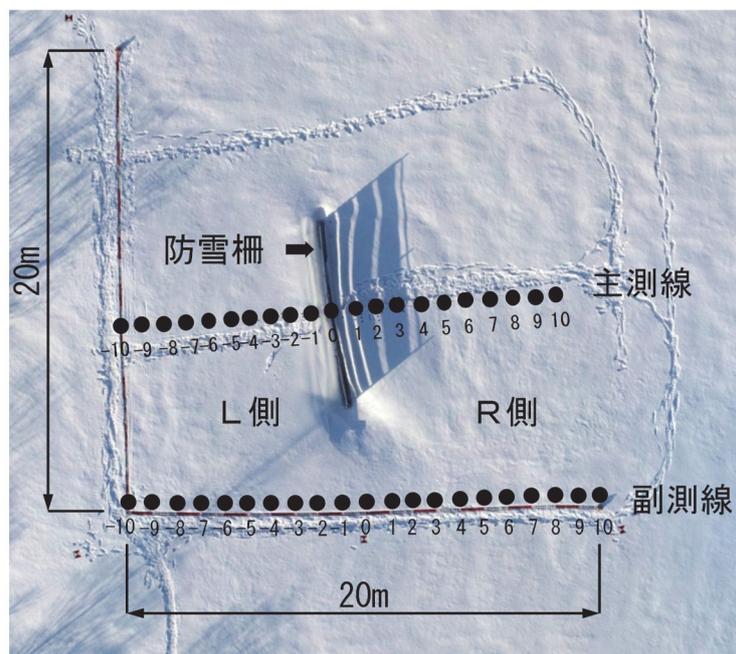


図 4.6 積雪深計測箇所の概要（中心を [0] とし、R 側に 1m 離れる毎に [1] ~ [10]，L 側に 1m 離れる毎に [-1] ~ [-10] とする）。

◆実用上の計測精度（計測誤差の目標値）

図 4.7 に積雪期の道路法面の状況と従来法による積雪深計測事例を示す。UAV-SfM を利用した積雪深計測時に、以下の誤差が想定される。

- ・衛星測位による誤差（衛星に関する誤差，電波伝達に関する誤差，受信機に関する誤差：一般的に 3~4 cm 程度）
- ・地表面の凹凸や植生，積雪表面の凹凸による誤差（数 cm~数十 cm）
- ・検証時の実測と作成した点群上の計測位置のずれによる誤差（数 cm~十数 cm）

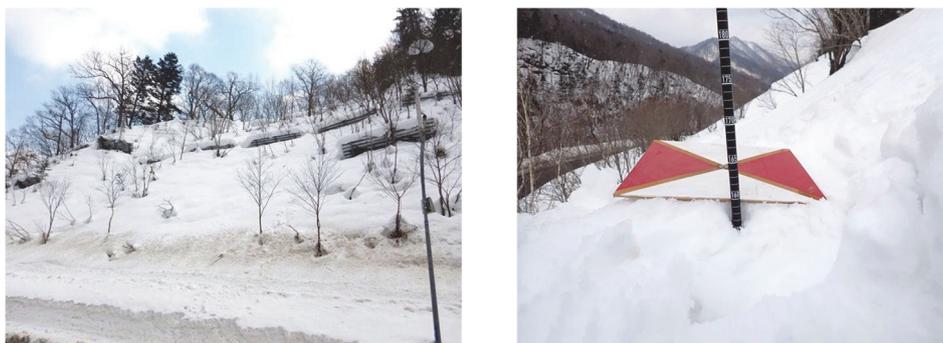


図 4.7 積雪期の道路法面の状況と従来法による積雪深計測事例.

以上より，UAV-SfM を利用した積雪深計測における実用上の計測精度は，積雪深の 10% 程度以下*を目標とする（※ 対象とする北海道内の道路法面での積雪深を 1~2 m 程度と想定した場合，誤差の目標値は 10~20 cm）.

4.3 実験結果および考察

4.3.1 積雪環境特性と SfM 解析

表 4.2 に撮影条件と気象観測の結果を示す. 積雪期の UAV 撮影は，2021 年 3 月 8 日に実施し，太陽高度の異なる 2 つの時間帯として，13:00 頃（case 1~3, 7, 8）および 16:00 頃（case 4~6）に，撮影した. 天候は晴（直達日射の割合が多く雲量が少ない）で，太陽高度は 36°から 13°に変化した. 積雪表面の雪質は，撮影時が 3 月上旬の融雪期であり，水を含んで粗大化したざらめ雪であった.

表 4.2 撮影条件と気象観測の結果.

(2021.3.8 撮影)	撮影高度	地上解像度	撮影時刻		下向き短波放射	雪面反射率	雪質	太陽高度	太陽方位	天気	気温 (°C)
case	機種	(m)	(mm/px)	開始	終了	(W/m ²)		(°)			
1		15	4	13:44	13:47	606	0.651	35	南西		0.4
2	UAV-1	30	8	13:32	13:36	611	0.654	36	南南西	晴	0.4
3		50	13	13:39	13:42	609	0.654	35	南西		0.4
4		15	4	16:11	16:23	123	0.816	13	西南西		0.1
5	UAV-1	30	8	15:41	15:50	232	0.760	18	西南西	晴	0.2
6		50	13	15:51	15:54	216	0.782	18	西南西		0.2
7	UAV-2	15	2	13:55	13:59	557	0.660	33	南西	晴	0.3
8		30	4	13:47	13:48	605	0.654	35	南西		0.4

図 4.8 に UAV-SfM 計測により得られた点群を示す。積雪表面の影のつき方は、撮影時間帯により大きな違いが見られた。

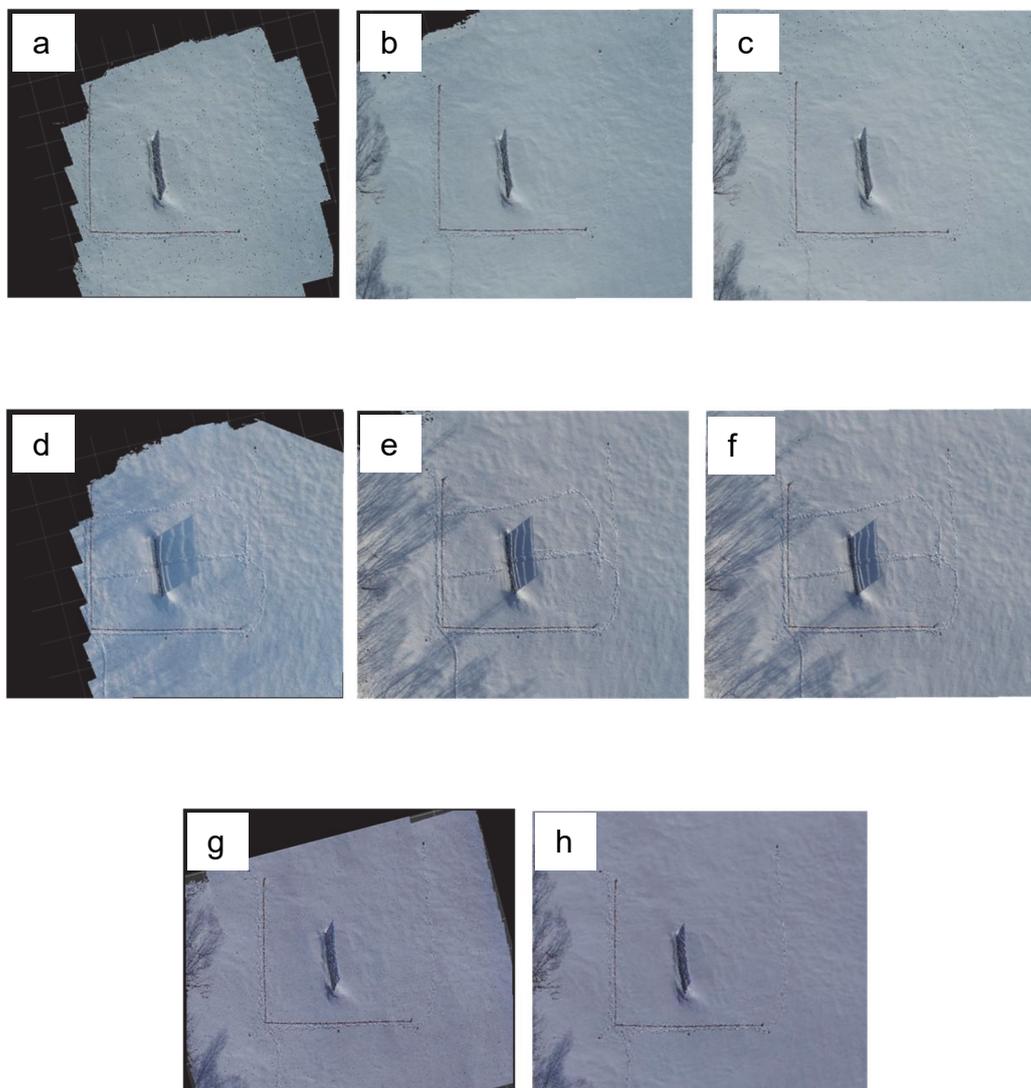


図 4.8 UAV-SfM 計測により得られた点群。(a) case1, (b) case2, (c) case3, (d) case4, (e) case5, (f) case6, (g) case7, (h) case8.

図 4.9 に撮影箇所の明るさを示す下向き短波放射と積雪表面反射率の計測値を示す。下向き短波放射は、13 時頃は 557~611 W/m²であったが、日没前の 16 時頃は 123~232 W/m²となった。また、積雪表面の反射率は 0.651~0.816 で、これは海面や草地の反射率（海面 0.05~0.4, 草地 0.15~0.3⁴¹⁾）に比べ高い値を示した（地球全体の反射率は一般に 0.3）⁴²⁾。

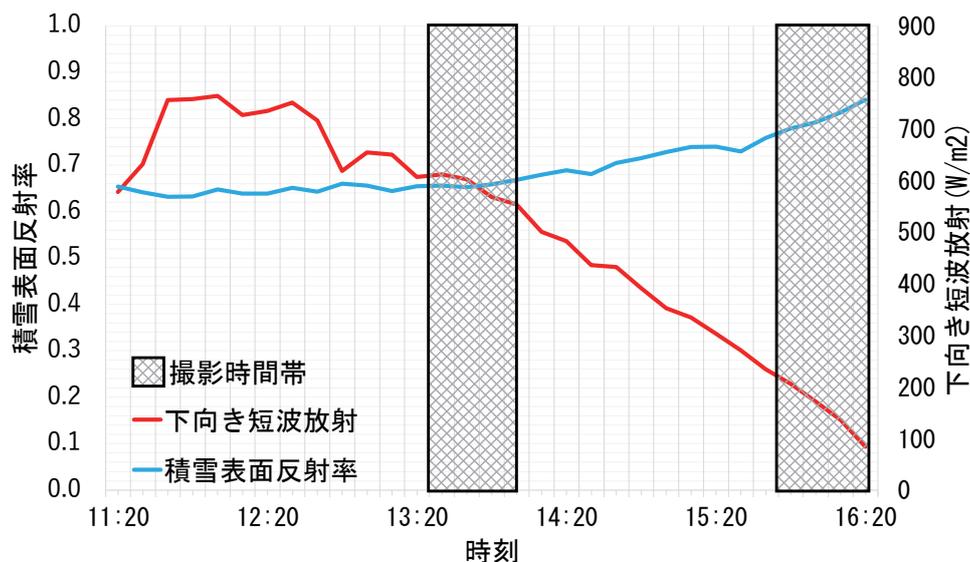


図 4.9 下向き短波放射および積雪表面反射率。

SfM 解析の結果、全 8 ケースにおいて積雪深を推定可能な状態で、実験範囲内の点群の未作成箇所や解像度が著しく低下する箇所もなく、点群が作成できた。この結果は、既存研究での点群作成可能な条件に合致しており、被写体である積雪表面の反射率が高い条件においても、日射強度の強弱が点群作成の可否に影響を与えていないことを確認した。

4.3.2 地上基準点を用いた点群の精度検証

SfM 解析の際、UAV 撮影により得られた画像と GNSS 測量により計測した GCP の位置座標 4 点を使用し、ジオリファレンスを行った。表 4.3 に作成した積雪表面の点群の精度検証として SfM ソフトウェアにより出力した 4 点の GCP の RMSE (Root Mean Squared Error : 平均二乗誤差) 事例を示す。結果、GCP における誤差 (RMSE) はどの撮影高度においても 5 mm 以下であり、一般的なスノープローブによる現地計測単位 (cm) より値が小さいことから、積雪深を推定する上で作成した点群に十分な精度が得られていることを確認した。表 4.4 に検証点での誤差の事例を示す。検証点の座標は、ターゲット中心から半径 10 cm 以内

の点群の平均座標とした。結果、最大誤差は平面上 12 mm、高さ 7 mm 以下であり、積雪深を推定する上で十分な精度が得られていることを確認した。

表 4.3 誤差の例 (case2, case3).

標定点 (撮影高度)	$\Delta X(\text{mm})$		$\Delta Y(\text{mm})$		$\Delta Z(\text{mm})$	
	30	50	30	50	30	50
GCP1	5	5	0	-1	-5	-3
GCP2	0	1	0	0	5	3
GCP3	0	-3	-6	-6	-5	-3
GCP4	-6	-3	5	8	6	4
RMSE	4	4	4	5	5	3

表 4.4 検証点での誤差の例.

検証点	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$
case1	1	0	-5
case2	-2	-1	-1
case3	4	1	-2
case4	1	-1	-4
case5	0	1	-1
case6	12	-1	-7

4.3.3 UAV-SfM 計測における雪面形状の再現性

積雪表面形状の再現性については、SfM 解析により得られた点群の計測点での標高と、地表面の標高に実測した積雪深を加えた積雪表面の標高との比較を行った。SfM 解析により得られた標高とは、各計測点から XY 距離が最も近い点群の標高を算出したものである。

図 4.10 に作成した断面図の一例 (case7) を示す。(a) 主測線、(b) 副測線ともに実測値に比べ UAV-SfM 計測による推定値が一律に低い値を示しているが、積雪表面の形状は概ね再現できていることがわかった。

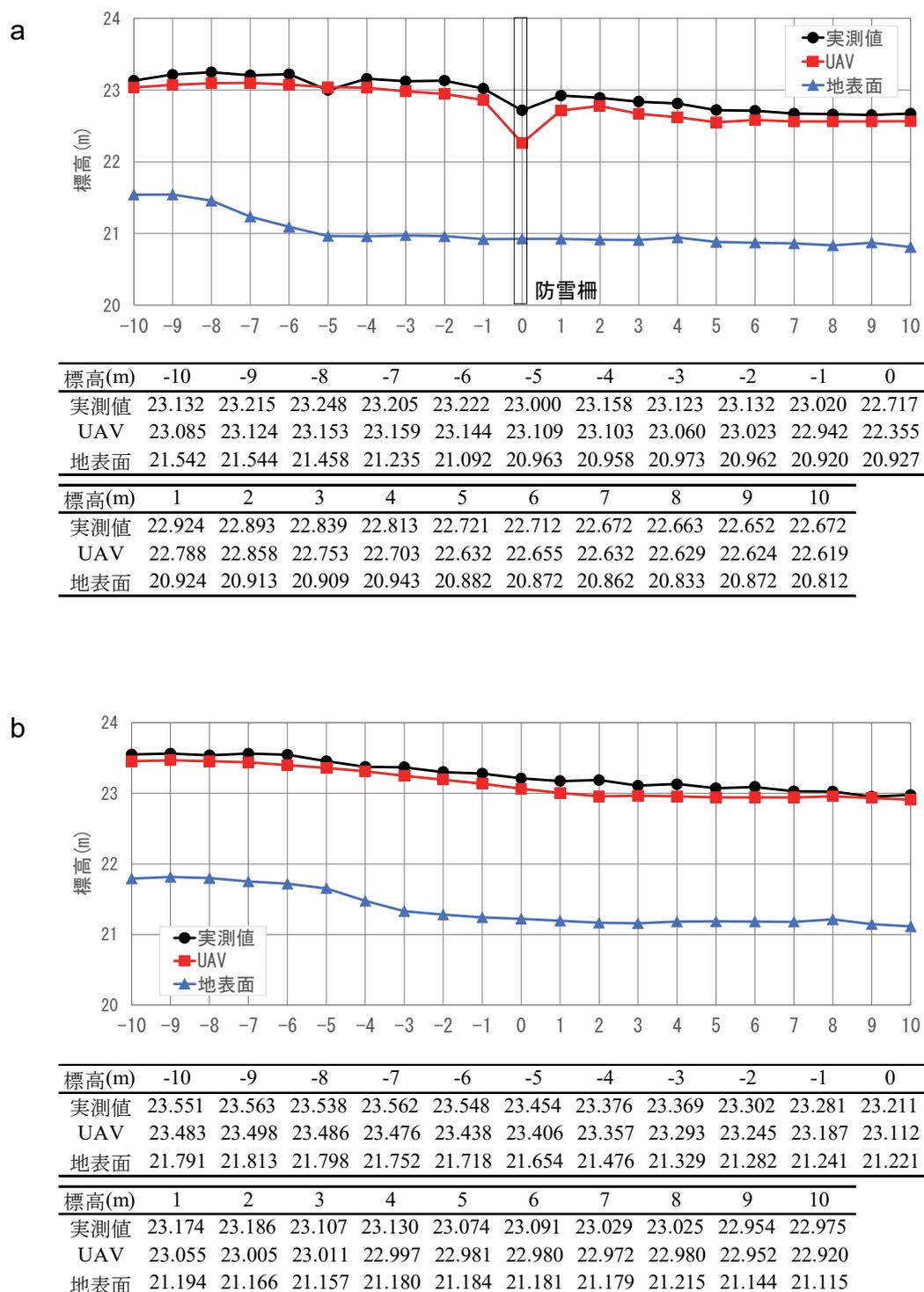


図 4.10 実測値と UAV-SfM 計測による積雪断面比較の例 (case7). (a) 主測線, (b) 副測線.

4.3.4 センサーサイズの異なる UAV-SfM 計測の精度検証

図 4.11 および図 4.12 に、センサーサイズの異なる 2 機種種の UAV-SfM 計測による推定値と実測値との比較結果の事例を示す。UAV-SfM 計測による推定値 case2 と case8 を比較すると、図 4.11 主測線および図 4.12 副測線のどちらも値に大きな差は見られなかった。これは、本実験では撮影高度が 30 m で平面的な地上解像度がそれぞれ 8 mm/px (case2), 4 mm/px (case8) であったことから、推定値に大きな違いが見られなかったものと推察する。

実測値との比較では、図 4.11 主測線は中央部の防雪柵周辺を除き、最大誤差が 14 cm (7%) であった。一方、防雪柵周辺の最大誤差は 39 cm (21%) となったが、撮影位置によって積雪表面が直立する防雪柵により遮られたこと、防雪柵周辺の積雪表面は極端な凹形状部で、さらに防雪柵の影で暗部となっていたことが原因で点群の作成精度が低下したと推察する。また、今回の撮影条件においては、防雪柵自体の点群データは生成されなかったことから、必要に応じて柵の側面に対し垂直方向の撮影画像を追加するなどの対策が必要であることがわかった。図 4.12 副測線は、主測線と異なり、計測範囲内に画像内に映り込む障害物がなかったことから極端な誤差は生じなかったが、最大誤差は 20 cm (10%) となった。

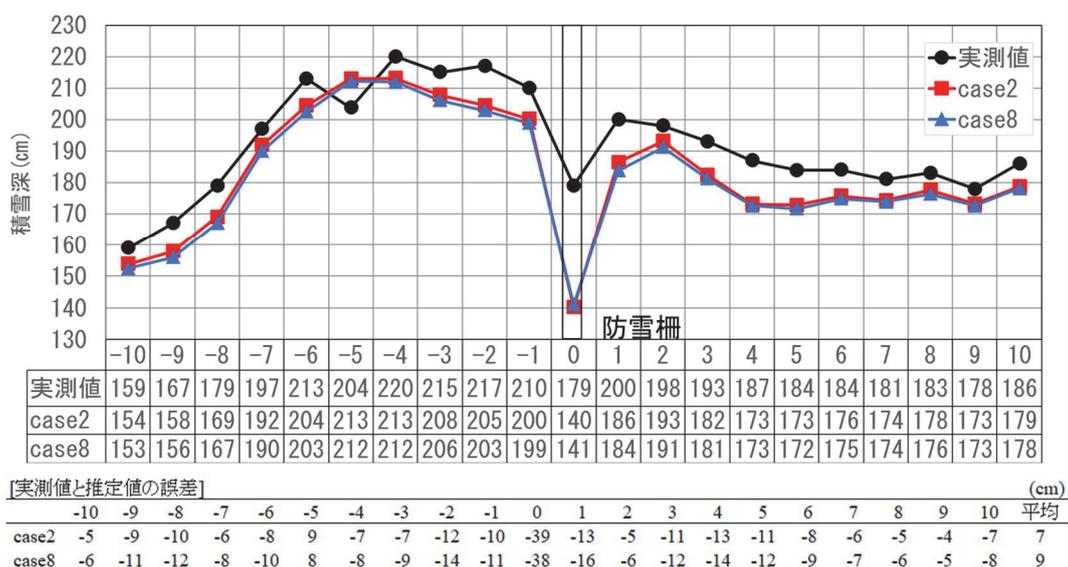


図 4.11 主測線における実測値とセンサーサイズの異なる UAV-SfM 計測結果比較 (撮影時刻: 13:30 頃, 撮影高度: 30 m, UAV 機体: case2: UAV-1, case8: UAV-2),

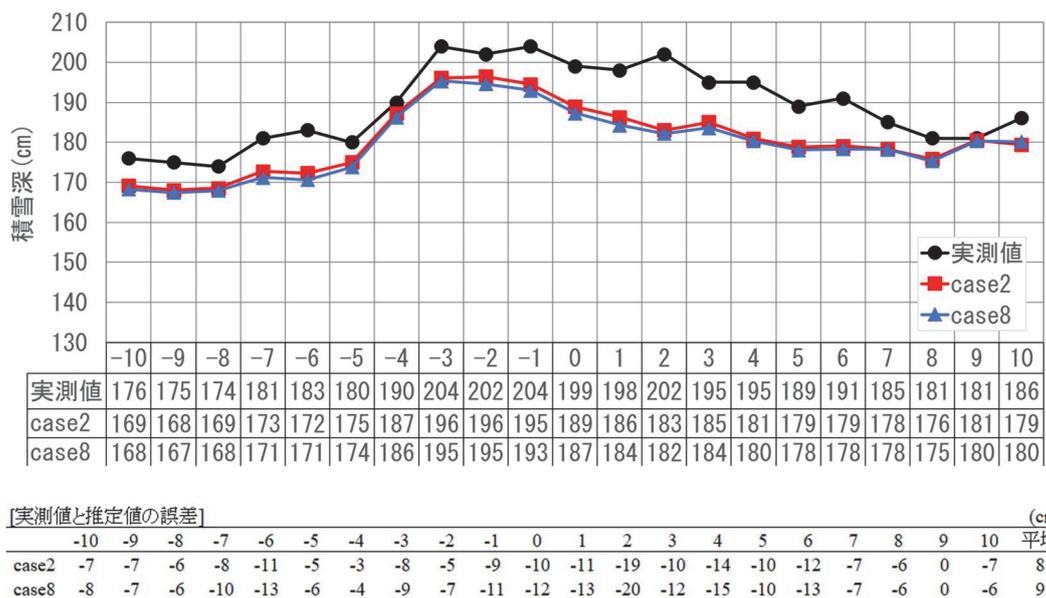


図 4.12 副測線における実測値とセンサーサイズの異なる UAV-SfM 計測結果比較 (撮影時刻 : 13:30 頃, 撮影高度 : 30 m, UAV 機体 : case2 : UAV-1, case8 : UAV-2).

4.3.5 撮影高度および撮影時刻の異なる場合の UAV-SfM 計測の精度検証

図 4.13 および図 4.14 に, 撮影時刻 13:30 頃および 16:00 頃に実施した UAV-SfM 計測による推定値と実測値の結果を示す. 撮影機材は表-3 に示す UAV-1 で, 撮影高度は 15 m, 30 m, 50 m の各 3 ケース (合計 6 ケース) である. 図 4.13a には, 撮影時刻 13:30 頃, 撮影高度 (case1 : 15 m, case2 : 30 m, case3 : 50 m), 計測位置は主測線での結果を示す. 図 4.13b には, 撮影時刻 16:00 頃, 撮影高度 (case4 : 15 m, case5 : 30 m, case6 : 50 m), 計測位置は主測線での結果を示す. 図 4.14a には, 撮影時刻 13:30 頃, 撮影高度 (case1 : 15 m, case2 : 30 m, case3 : 50 m), 計測位置は副測線での結果を示す. 図 4.14b には, 撮影時刻 16:00 頃, 撮影高度 (case4 : 15 m, case5 : 30 m, case6 : 50 m), 計測位置は副測線での結果を示す.

ここでは, 撮影条件と UAV-SfM 計測の精度検証として, 撮影時刻 13:30 頃および 16:00 頃に撮影した各撮影高度の積雪深推定値と実測値との違いに着目した. 主測線のグラフを図 4.13a, 図 4.13b に示す. 防雪柵中心部の計測点 [0], [1] および [-5] を除き積雪表面の凹凸を概ね再現できている. 計測点 [0] は防雪柵があり, 計測点 [1] は防雪柵の真西にあたり, 防雪柵の影の影響で暗部となっていたことから誤差が大きくなったと推察する. また, 計測点 [-5] では, 他の計測点と異なり計測値が逆転している. これは狭い範囲で現地

形が凸部または雪面が凹部となっており、細かな再現ができていなかったといえる。次に副測線のグラフを図 4.14a, 図 4.14b に示す。計測点 [2] を除き積雪表面の凹凸を概ね再現できている。計測点 [2] は、主測線の計測点 [-5] と同様に、現地地形が狭い範囲で凹部または雪面が凸部に変化しており、細かな再現が不十分だったといえる。

再現性はどのケースにおいても大差がなく、測線毎の誤差平均は 4% (図 4.13, 図 4.14) であった。しかし実測値との比較の結果、撮影範囲端部の一部分を除き、全体的に UAV-SfM 計測による推定値が実測値に比べ低い値を示している。推定値が実測値より低くなった原因として、積雪期と無雪期で異なる GCP を用いて、異なる時期に GNSS 測量したため、基準点の誤差が累積した可能性がある。一般的に、GNSS 測量の鉛直方向の誤差は 3~4 cm とされている。また、無雪期の撮影の際、俯瞰撮影のみだったため、点群全体でドローミング現象が発生し、実際の地表面より高く評価されていた可能性がある。このドローミング現象について、小花和ら³⁸⁾は、鉛直下向き撮影画像のみで 3 次元モデルを作成した場合、モデル全体が凸型に歪む doming あるいは bowl-effect と呼ばれる現象が発生することがあると指摘している。しかしながら、UAV-SfM 計測による推定値が実測値に比べ低い値を示す点については、カメラの性能、撮影条件、SfM 解析ソフトの特性など、諸条件が影響した可能性があり、明確な原因はわかっていない。今回の実験では、実測値との誤差平均が 4% であり、どのケースにおいても積雪表面形状をよく捉えていることから、実験データとしては問題ないものと考えられる。しかしながら、広範囲を UAV-SfM 計測する際には、地上基準点を多く設置するなどの対策が必要である。

本研究では、いずれのケースにおいても作成した点群にケース毎の大きな差異がないことを確認した。撮影時刻の違いについては、雪質がざらめ雪、天候が晴れの場合においては、障害物による極端な暗部以外は、いずれの条件においても差異なく積雪深を推定できることを確認した。また、撮影高度の違いについては、15, 30, 50 m の範囲においては、点群の作成精度にほとんど差が無かった。これは、推定積雪深の誤差が最大 20 cm (計測点 [0] を除く) であったのに対し、積雪表面上での分解能が 13 mm/px (撮影高度 50 m) 以下であったことが要因と推察する。

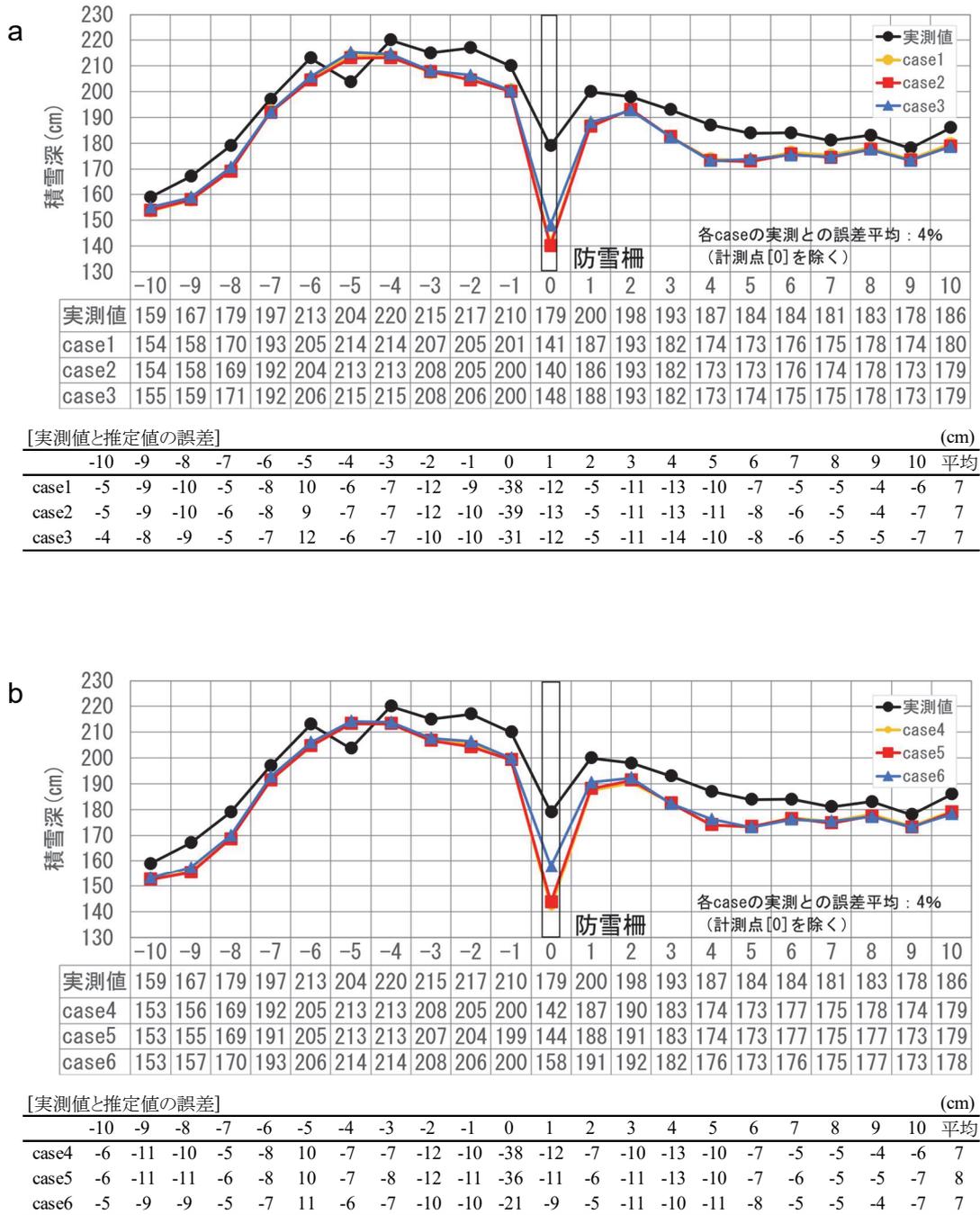


図 4.13 主測線における実測値と撮影時刻・撮影高度の異なる UAV-SfM 計測による推定値。(a) 撮影時刻：13:30 頃，撮影高度：15, 30, 50 m (主測線)，(b) 撮影時刻：16:00 頃，撮影高度：15, 30, 50 m.

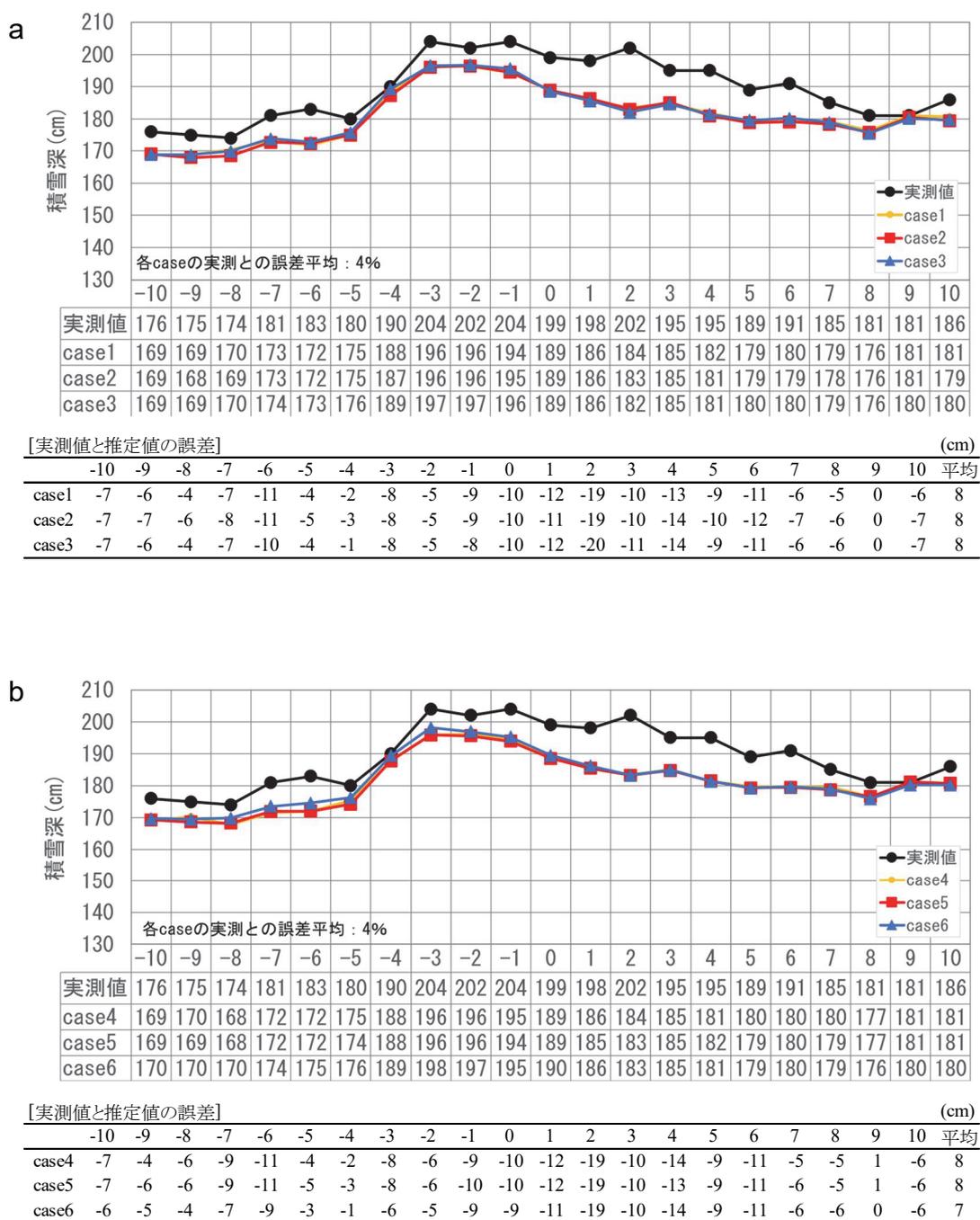


図 4.14 副測線における実測値と撮影時刻・撮影高度の異なる UAV-SfM 計測による推定値。(a) 撮影時刻 : 13:30 頃, 撮影高度 : 15, 30, 50 m (副測線), (b) 撮影時刻 : 16:00 頃, 撮影高度 : 15, 30, 50 m.

図 4.15 に、撮影時刻 13:30 頃に実施した UAV-SfM 計測による推定値と実測値との比較を示す。各推定値は、実測値に比べ主測線での一部を除き低い値となったが、ケース毎の差異はほとんど見られなかった。誤差は防雪柵中央部の計測点 [0] を除き -11~+14 cm、各ケースの誤差の絶対値の平均は 7~8 cm、相対誤差（誤差絶対値/積雪深×100%）の平均値は -4%であった。一定程度の誤差（-4%）要因として、GNSS 測量上の誤差（一般的に 3~4cm 程度以下）および無雪期の地表面上の植生の影響（数 cm）と推察する。ちなみに実測値はこれらの影響は受けない。また、誤差のばらつきの要因として、SfM 解析では地表面または雪面の局所的な凹凸を再現できないことがあること、人がスノープローブで計測する位置とソフトウェア上で計測する位置を正確に合わせることで困難なことによる誤差の影響と考えられる。

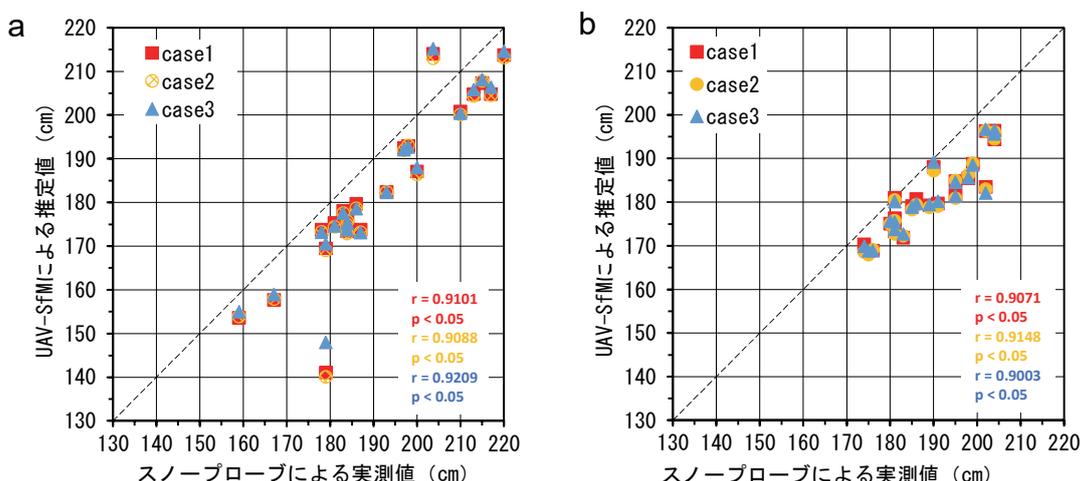


図 4.15 実測値と撮影時刻・撮影高度の異なる UAV-SfM 計測による推定値との比較

(UAV 機体 : UAV-1). (a) 撮影時刻 : 13:30 頃, 撮影高度 : 15, 30, 50 m (主測線), (b) 撮影時刻 : 13:30 頃, 撮影高度 : 15, 30, 50 m (副測線).

全計測点における実測値に対する推定値の誤差の分布を図 4.16 に示す。ここでは、実測値との相対誤差として、推定値から実測値を減算した値を誤差としている。誤差の大半は負の値であり、誤差は平均値 -4%、標準偏差 2%であった。すなわち、今回実施した UAV-SfM 計測による積雪深の推定値は、実測値に比べ 4%程度低く、標準偏差が 2%未満であった。

このことから、積雪環境下においても、点群が無雪環境と変わらず問題なく作成できることを確認した。

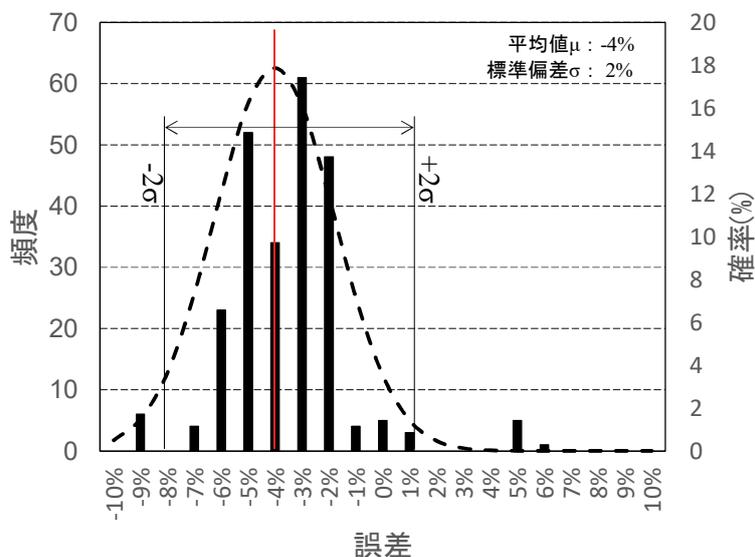


図 4.16 UAV-SfM による推定値とスノープローブによる実測値の誤差分布.

4.4 まとめ

本研究では、既往研究の取り組み整理および 2021 年 3 月に実施した実験結果をもとに、UAV-SfM 計測による雪面形状の計測法について、雪面の雪質や下向き短波放射、積雪表面の反射率に着目し、撮影条件を変化させ、点群作成の可否とその精度を検証した。検証によって得られた知見を以下に述べる。

- 1) 天候が晴、雪質はざらめ雪の条件において、積雪環境特有の高い可視光反射率 (0.651 ~ 0.816) であっても点群が問題なくできた。また、撮影時間帯が日中から日没前 (下向き短波放射 123~611 W/m²) の時間帯で撮影図化できたことから、積雪表面に影ができる状況下であれば、撮影時刻に関わらず点群が作成できることがわかった。
- 2) センサーサイズ、高度を変化させて撮影したが、いずれのケースにおいても作成した点群の精度には大きな差異がなかった。このことから、撮影機材の選定および撮影高度の設定においては、計算される分解能が、積雪表面で求める計測精度以下になるように設定すれば問題ない。
- 3) 地上基準点 (GCP) を 4 点設置し、GNSS 測量した座標値を SfM 解析の補正に使用

した。検証点において、作成した点群データと実測値の高さの誤差は 5 mm 以下であり、積雪深を推定する上で十分な精度が得られていることを確認した。

- 4) 防雪柵中央部の特異値を除き-19~+11 cm, 各ケースの誤差の絶対値の平均は 8~10 cm, 相対誤差 (誤差絶対値/積雪深×100) の平均値は 4%であった。また, 全計測点における実測値に対する推定値の誤差の大半はマイナス側で, 誤差の平均値 μ が -4%, 標準偏差 σ は 2%であった。すなわち, 今回実施した UAV-SfM 計測による積雪深の推定値は, 実測値に比べ 4%程度低く, 誤差が 2%であった。
- 5) 一定程度の誤差 (-4%) 要因として, GNSS 測量上の誤差 (一般的に 3~4 cm 程度以下) および無雪期の地表面上の植生の影響 (数 cm) と推察する。ちなみに実測値はこれらの影響は受けない。
- 6) 誤差のばらつきの要因として, SfM 解析では地表面または雪面の局所的な凹凸を再現できない場合があること, 人がスノープローブで計測する位置とソフトウェア上で計測する位置を正確に合わせることで困難なことによる誤差の影響と考えられる。

このことから, 防雪設備周囲の雪面に対して UAV-SfM 計測を適用した場合, 積雪深の計測において実用上問題ないことを明らかにした。

しかしながら, 雪質や天候が異なる条件である場合, 撮影高度を樹木や障害物を避けるために 50 m 以上にする場合は, 積雪表面上での撮影分解能が下がり, SfM 解析精度に影響を及ぼす。このことから, 求める撮影精度と分解能の関係については, 事前に確認が必要である。

実空間での適用に際し, 使用する UAV の耐風性能が現地風速以下であること, 飛行中に降雪がないことを確認する必要がある。また, 計測対象箇所の周辺で, 積雪期に埋没せず, 車両の通行に影響のない場所に, 無雪期と積雪期に共通して使用可能な GCP を設置しておくことが望ましい。

第5章 積雪期の UAV-SfM 計測における地上基準点設置作業の効率化実験

5.1 概説

「2.4 研究の課題」において、UAV-SfM 計測を雪面計測に適用し、積雪分布を推定するためには、積雪前後の複数時期の計測結果を正確な位置座標に基づき重ね合わせてその差分を計算する必要があることを示した。

積雪の計測においては、小花和ら¹¹⁾が無雪期および積雪期の2時期の差分から積雪深を算出し、実測値との相対誤差は平均8%であると述べている。高橋ら⁴³⁾は、UAV-SfM 計測を利用した防雪設備周辺の雪面形状を計測する際の最適な撮影条件として、1) 雪質が降雪直後の新雪以外であること、2) 雪面の反射率が0.9未満であること、3) 天気が雪面に陰影のできやすい直達日射が卓越する晴れであることを示した。ここで反射率とは、入射太陽放射量と地球で反射された放射量との比⁴²⁾であり、アルベドメーターを現地に設置して上向きおよび下向き短波放射を取得し、その比率を積雪表面の反射率として算出している(通常、反射率の範囲は0~1.0で示される)。また、防雪柵周辺を対象としたUAV-SfM 計測の場合、計測値の相対誤差は平均値-4%、標準偏差±2%が得られ、実用上問題ないことを明らかにしている⁴³⁾。

一方で、小花和ら³⁸⁾は、UAV-SfM 計測により積雪分布を推定するためには、例えば積雪前後のように複数時期の計測結果を正確な位置座標に基づき重ね合わせてその差分を計算する必要があると指摘している。通常、UAVはGNSSアンテナを内蔵しているが、その測位方式は単独測位方式であるため、SfM解析に必要な高精度の位置情報が付与されず、作成した点群データを高い精度で重ね合わせることができない。そこで位置精度を向上させるため、計測エリア周辺に複数の地上基準点(以下、GCP: Ground Control Point)を設置する方法がある。座標を地上で事前計測し、その後、SfM解析時にGCPの計測値を代入する方法がある。しかしこの方法は、積雪によるGCPの埋没、融雪による沈下や移動が発生するため、積雪環境下における経時的に安定した恒常的なGCPを複数設置することは極めて難しいとも指摘している³⁸⁾。

この問題に対しRTK-GNSS(Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System)を搭

載した UAV（以下、RTK 搭載型 UAV）を用いて GCP 点数を削減し計測する方法が提案されている^{39),40)}。しかし、現状は積雪表面計測への適用にあたり、データ精度の検証等が未だ十分とはいえない。

そこで本章では、UAV-SfM 計測で雪面を計測する際の条件について、2 機種 of UAV (RTK 搭載 / 非搭載) を用いた撮影実験を行い、測位方式 (相対測位 / 単独測位) の違いによる計測精度を検証した。また、斜面上における GCP 設置作業の効率化を目的に、SfM 解析の際に入力する GCP 点数の違いが点群作成に与える影響に着目し、その精度を検証した。

5.2 実験方法

5.2.1 実験場所および実験方法

実験場所は、図 5.1 に示す Sky-View 輪厚ドローンフィールド (北海道北広島市) である。実験範囲は、南北方向に約 140 m、東西方向に約 70 m の範囲で、南西方向に緩やかな下り傾斜を呈し、植生は計測に影響の出ない程度に刈り取られている。

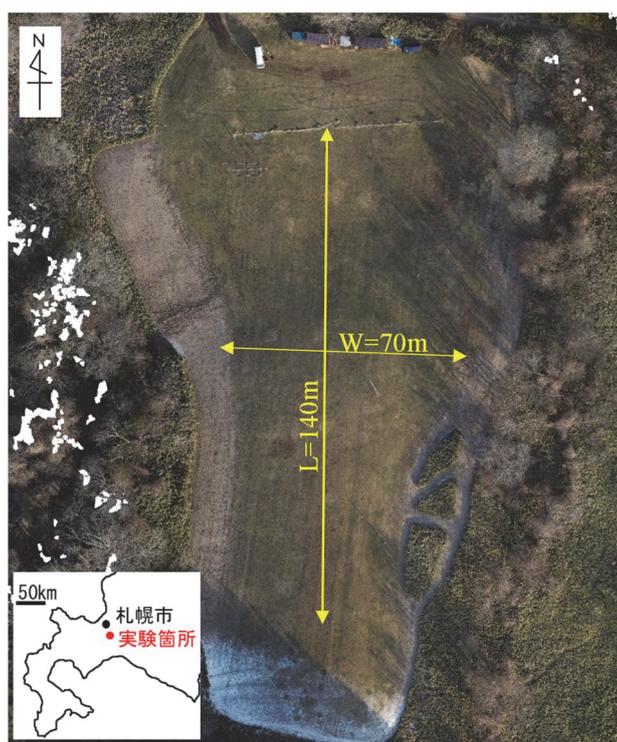


図 5.1 実験場所 (Sky-View 輪厚ドローンフィールド)。

図 5.2 に検証方法を示す。実験方法は、無雪期および積雪期の 2 時期に実験範囲外側に複数の GCP を設置し、RTK 搭載型および RTK 非搭載型の 2 機種 of UAV によって空中写真を撮影する。その撮影画像をもとに SfM 解析により、デジタル表層モデル (以下、DSM: Digital Surface Model) を作成する。SfM 解析では、GCP の数を変化させ、複数の DSM を作成する。この DSM についてドローンレーザ計測 (以下、レーザ計測) を基準に、その精度を検証する。ドローンレーザ計測の精度については、地上で実施したネットワーク型 RTK-GNSS 測量による任意の 6 点における座標値と比較し、精度を検証する。

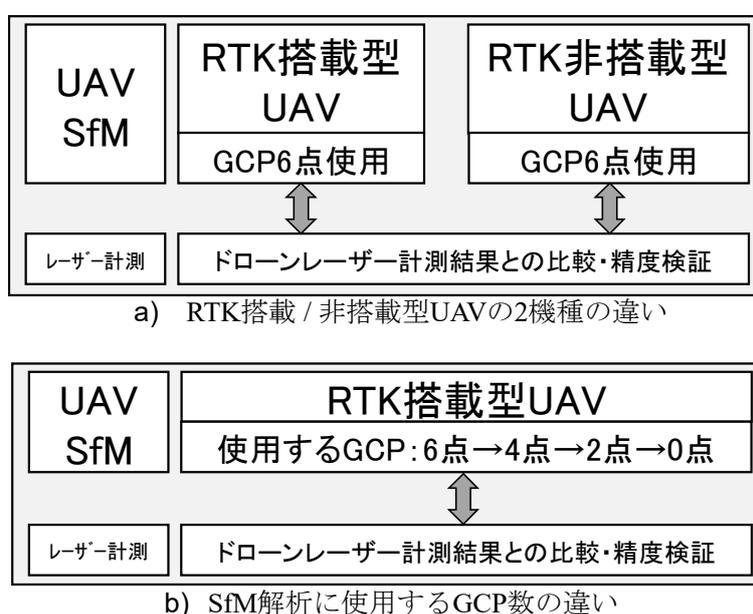


図 5.2 検証方法.

5.2.2 UAV 撮影およびドローンレーザ計測

撮影に使用する UAV 機体およびカメラ仕様を表 5.1 に示す。撮影は、鉛直下向きの俯瞰撮影とする。撮影画像における雪面でのオーバーラップ率 (重複度) は、「公共測量作業規程の準則」に基づき、進行方向に 80%以上、隣接コースで 60%以上とする。撮影対地高度は、地上解像度が 1 cm 程度となる 50 m に設定する。平面的な地上解像度は、RTK 搭載型 UAV で 0.6 cm/px, RTK 非搭載型 UAV で 1.4 cm/px である。画像の記録形式は SfM 解析の処理時間コストを考慮し JPEG 形式とする。

表 5.1 撮影に使用する UAV 機体およびカメラ仕様.

RTK-GNSS	搭載型	非搭載型
機体写真		
機種	Matrice 300 RTK	Phantom 4 Pro
メーカー	DJI	DJI
カメラ	Zenmuse P1	付属
カメラ特性		
画素数	4500 万画素	2000 万画素
センサーサイズ	35.9×24 mm	13.2×8.8 mm
解像度	8192×5460 pixl	5472×3648 pixl
ピクセルサイズ	4.4×4.4 μm	2.41×2.41 μm
画角	84°	84°
35mm換算焦点距離	24 mm	24 mm

図 5.3 に RTK 搭載型 UAV による撮影の概要を示す. 現地には RTK 固定基地局を設置し, これと UAV 本体とをワイヤレスで接続し, 撮影する. RTK 固定基地局については, 事前に電子基準点を基準とした RTK-GNSS 測量を行い, 取得した位置座標および標高値を入力する.

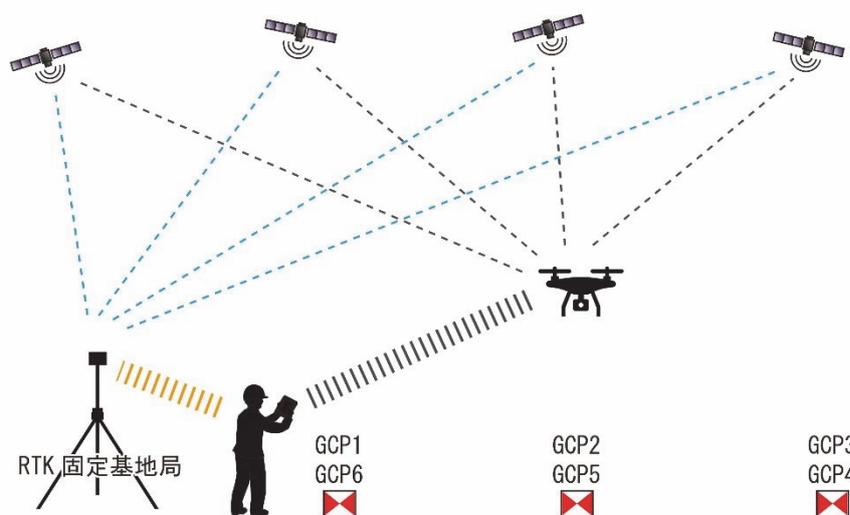


図 5.3 RTK 搭載型 UAV による撮影の概要.

また，基準となるレーザ計測は，表-1 に示す RTK-GNSS 搭載型 UAV（Matrice 300 RTK）に，カメラの代わりに表 5.2 に示すレーザスキャナを搭載し，雪面の計測を行う．計測高度は，撮影と同様に対地高度 50 m とし，対象エリア全体の点群が計測可能となるよう自動航法で計測する．

表 5.2 レーザスキャナ仕様.

	機種	Zenmuse L1
	メーカー	DJI
	システム性能	
	測定距離	450 m @ 反射率80%, 0 klx 190 m @ 反射率10%, 100 klx
	点数	シングルリターン:最大240,000pt/s マルチリターン :最大480,000pt/s
	レンジ精度	3cm@100m

5.2.3 地上基準点の配置

本実験では、UAV 撮影の直前に GCP を配置する (図 5.4)。無雪期に設置した GCP は積雪によって埋没するため、撮影時に雪面上へ GCP を 6 点配置し、各 GCP について RTK-GNSS 測量により公共座標を算出する。ここで公共座標の高さは、一般に標高 (楕円体高 - ジオイド高) で示される。しかし、UAV に記録される高さは楕円体高が採用されているため、両者の高さには違いがある。本実験においては、UAV 測量結果にジオイド高を減じた標高に統一し比較する。本実験におけるジオイド高は、国土地理院の測量計算サイト「ジオイド高計算」にて位置座標を入力し、算出した。また、GCP 箇所の積雪表面高さを検証点とする場合は、図 5.4 に示す GCP 板の周囲 4 点の高さの平均値を用いる。

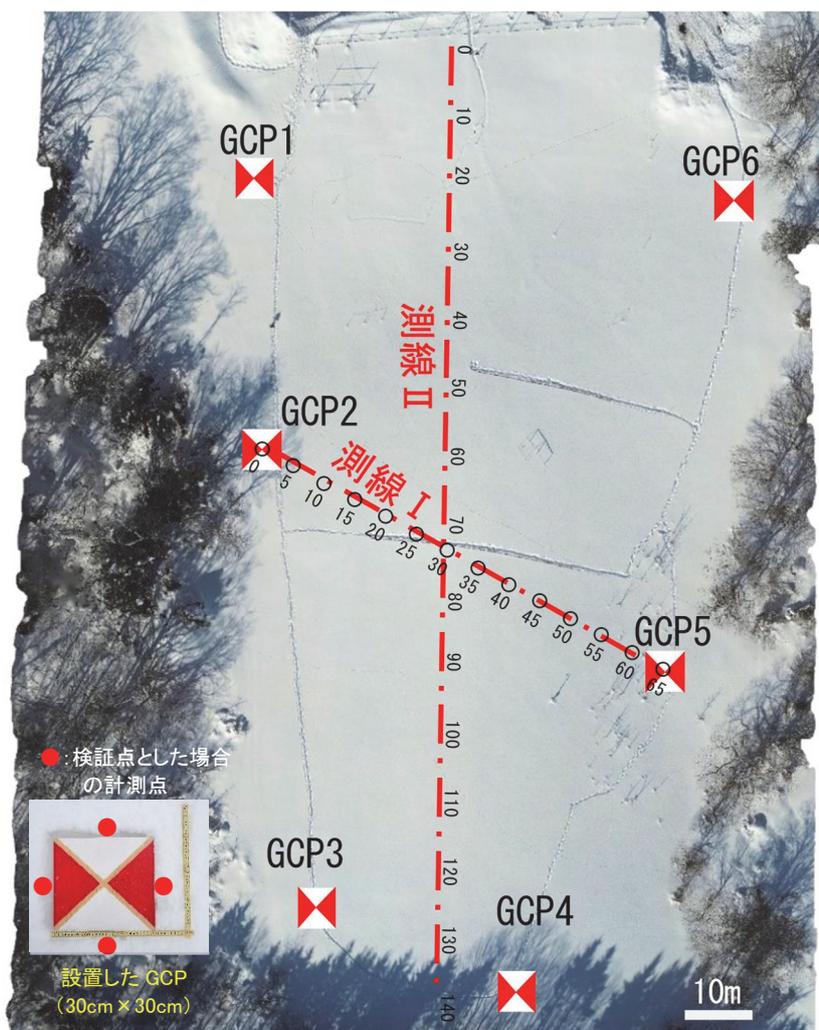


図 5.4 本実験における GCP の配置.

5.2.4 SfM 解析の手順

本章では、第4章と同様、SfM 解析に Agisoft Metashape Professional Version 1.8.4 build 14856、点群処理に TREND-POINT ver.9 を使用する。

UAV で撮影した画像は SfM 解析用ソフトウェアに読み込み、以下の手順で解析する。順に、「1. 画像特徴点の抽出及びタイポイントの検索」→「2. バンドル調整（内部及び外部標定要素の推定）と低密度点群データの出力」→「3. 地上基準点及び精度検証点の設置と座標入力及び地上基準点を利用した再バンドル調整（内部及び外部標定要素の高精度化）」→「4. 精度検証点を用いた精度検証」→「5. 高密度点群及び TIN (Triangulated irregular network) の作成」→「6. DSM およびオルソ画像の作成と出力」の 6 ステップで構成である 11)。また、雪面画像を SfM 解析する場合には、積雪環境特有の可視光反射率の高さや、色調および凹凸の少なさから、点群の欠損等が生じることがある 6)。このため、撮影画像の位置情報が重要であることから、SfM 解析ソフトウェアに画像を読み込む際には RTK-GNSS または GNSS により画像に付与された Exif (Exchangeable image file format) 情報による座標値を有効とする。

解析時のパラメータは、先行研究から以下のように設定した。写真のアライメント（写真を読み込み、撮影位置、姿勢等を推定）は、精度：中、マスク適用先：静止したタイポイントを除外した。メッシュ構築は、ソースデータ：高密度クラウド（品質：中）、深度フィルタ：弱（頂点カラーを計算、内挿補間：有効）、サーフェイタイプ：自由形状（3D）、ポリゴン数：高（1400000）とした。標定点の入力および補正は有効とした。計測範囲全体の点群は、写真のアライメント処理後、写真測量の原理で 3 次元メッシュモデルの生成およびオルソモザイクを構築し作成する。無雪期の SfM 解析についても同様の手順で実施した。

5.2.5 雪面の高さおよび積雪深の推定方法

雪面の高さおよび積雪深の推定位置は、図 5.4 に示す 6 箇所の GCP 位置、および 2 測線（測線 I：5 m 間隔、測線 II：10 m 間隔）上とする。積雪深は、積雪期および無雪期の点群データを TREND-POINT ver.9 で同時に読み込み、測線上の計測点の標高差により算出する。

5.2.6 実験ケース

表 5.3 および図 5.5 に実験ケースおよび概要を示す。撮影においては、case1～case4 は RTK 搭載型 UAV，case5 は RTK 非搭載型 UAV を使用する。SfM 解析においては、case1 および case5 では GCP6 点 (図 5.5a)，case2 においては、南側の GCP2 点 (GCP3, GCP4) を除いた計 4 点 (図 5.5b)，case3 においては、南側 GCP2 点 (GCP3, GCP4) および中間部の GCP2 点 (GCP2, GCP5) 計 4 点を除いた 2 点の GCP (GCP1, GCP6) のみ (図 5.5c) を用いる。case4 は、全ての GCP を使用しない (図 5.5d)。

なお、RTK 非搭載型 UAV においては、GCP 点数を削減し SfM 解析を行った結果、点群の計測誤差が数 m 以上となったことから、本章の対象から除外した。

表 5.3 実験ケース.

機種	RTK搭載型 UAV				RTK非搭載型 UAV	
	case1	case2	case3	case4	case5	case6
GCP1	○	○	○		○	○
GCP2	○	○			○	○
GCP3	○				○	
GCP4	○				○	
GCP5	○	○			○	○
GCP6	○	○	○		○	○

凡例 ○ : GCPを使用

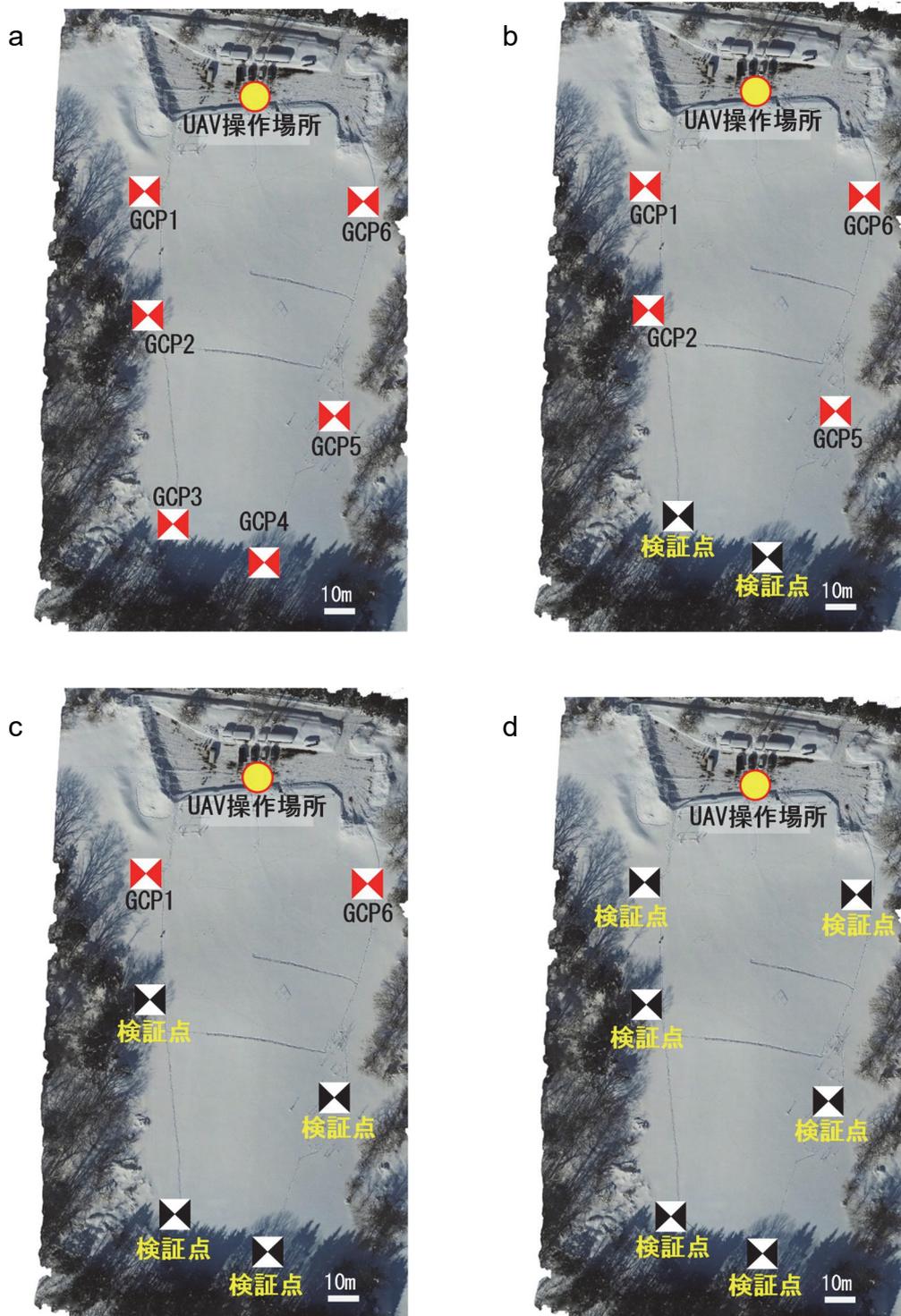


図 5.5 解析に使用する GCP と検証点, (a) case1, 5, (b) case2, (c) case3, (d) case4.

5.3. 実験結果

5.3.1 天候および雪面の雪質

積雪期の UAV 撮影については、2022 年 2 月 10 日 14 時頃に実施した。天候は晴（直達日射の割合が多く、雲量が 8 以下）、実験場内に設置した気象観測装置（ヤング社 CYG-5103）によると、気温： $-0.8\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ 、風速： $0.9\sim 1.5\text{ m/s}$ であった。ここで雲量とは雲が全天を覆う割合を示す（通常雲量は 0+, 10-を含む 13 段階で 0~10 の整数で表され、8 以下が晴れと定義されている）。また雪面の雪質は、撮影時が 2 月上旬の厳冬期であったため、新雪・こしもざらめ雪の混合型であった（図 5.6）⁴⁴⁾。第 3 章より、確実に点群が作成可能な条件は、雪質は降雪直後の新雪以外、雪面の反射率は 0.9 未満（参考：地球全体の反射率は一般に 0.3⁴²⁾）、天候は晴れ、時間帯は下向き短波放射が適度にあり、雪面に影ができやすい日中であるため、点群作成のための撮影に適するものと判断した。

無雪期の UAV 撮影については、2021 年 12 月 16 日（天候：晴れ）に実施した。



図 5.6 積雪表面の雪結晶（新雪，こしもざらめ雪の混合型）。

5.3.2 基準となるレーザ計測の精度

レーザ計測により取得した点群を TREND-POINT ver.9 で読み込み、GCP の中心座標 6 点を検証点として計測した。計測方法については、GCP 版の中心点に最も近接した点群の座標値を読み取った。この値に対して、地上で実施したネットワーク型 RTK-GNSS 測量による座標値と比較し、精度を検証した。表 5.4 にレーザ計測による検証点での計測誤差を示

す。各検証点における誤差は、平面 ($\Delta X, \Delta Y$) および高さ (ΔZ) 方向で -5.2 cm 以下、検証点 6 点の RMSE (Root Mean Squared Error : 平均二乗誤差) は 4.4 cm 以下であった。一般的な GNSS 測定の誤差は数 cm 程度とされており、今回のレーザ計測結果は実験の基準として問題ないと判断した。

表 5.4 レーザ計測による検証点での計測誤差.

	誤差 (cm)			検証点
	ΔX	ΔY	ΔZ	
GCP1	-2.3	-5.2	1.0	○
GCP2	-0.5	-2.2	4.6	○
GCP3	0.0	4.8	0.8	○
GCP4	-1.8	-4.8	-3.3	○
GCP5	-4.9	4.5	-3.0	○
GCP6	3.4	4.1	-0.2	○
RMSE	2.7	4.4	2.7	

5.3.3 SfM 解析

SfM 解析は、無雪期および積雪期についてそれぞれ実施した。ここで、SfM 解析にあたり、RTK-GNSS 測量により得られた GCP の位置座標の入力点数を 6 点、4 点、2 点、0 点と変化させた。図 5.7、図 5.8、図 5.9 に GCP を 6 点使用し SfM 解析により作成した点群の例を示す。図 5.7 は、RTK 搭載型 UAV による地表面の点群 (タイポイント数 : 287,562 点)、図 5.8 は、RTK 搭載型 UAV による雪面の点群 (タイポイント数 : 94,484 点)、図 5.9 は、RTK 非搭載型 UAV による雪面の点群 (タイポイント数 : 32,965 点) の事例である。いずれのケースにおいても SfM 解析で認識できたタイポイント数に大きな違いがあるが、積雪深を計測するための標高値は取得可能な状態で、実験範囲内の点群未作成箇所や解像度が著しく低下する箇所もなく、点群が作成できていたことを確認した。

図 5.9 については、積雪期に RTK 非搭載型 UAV での撮影画像を SfM 解析した結果で、画像中央付近より南側の一部に点群の抜けが見られるものの、図 5.4 に示す 2 測線上の点群は欠けることなく作成できているため、本計測実験では問題無いものとする。



図 5.7 RTK 搭載型 UAV による地表面の点群の例 (2021.12.16 撮影).



図 5.8 RTK 搭載型 UAV による雪面の点群の例 (2022.2.10 撮影).

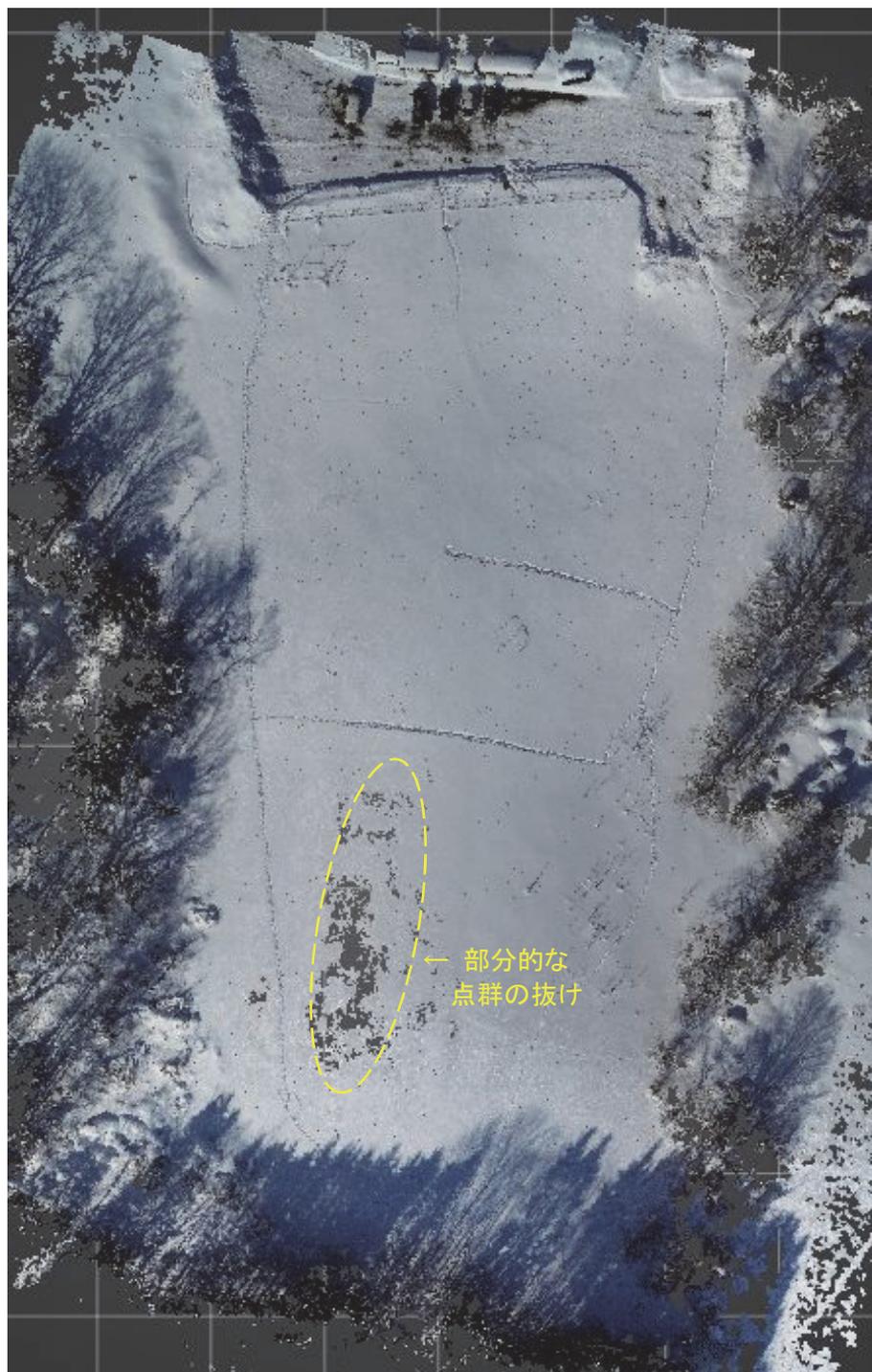


図 5.9 RTK 非搭載型 UAV による雪面の点群の例 (2022.2.10 撮影).

5.4 考察

5.4.1 UAV の測位方式の違いによる雪面形状の計測精度

UAV の測位方式については、RTK 搭載型（相対測位）および非搭載型 UAV（単独測位）による 2 機種の写真画像をもとに点群を作成し、その計測精度について検証した。SfM 解析は、各撮影画像と GNSS 測量による GCP 座標 6 点を全て使用し行った。表 5.5 に、UAV-SfM 計測による計測誤差を示す。結果、GCP における誤差（RMSE）は、RTK 搭載型（case1） / 非搭載型（case5） UAV いずれも誤差 1.7 cm 以下であり、レーザ計測の結果と同様に一般的な GNSS 測量の誤差程度に収まっていることがわかる。これにより作成した点群は積雪深を計測する上で実用的な精度が得られた。

表 5.5 UAV-SfM 計測による計測誤差（case1, case5）

case1	誤差 (cm)			検証点	case5	誤差 (cm)			検証点
	ΔX	ΔY	ΔZ			ΔX	ΔY	ΔZ	
GCP1	0.3	2.7	1.0		GCP1	0.7	-0.6	0.1	
GCP2	0.6	-0.9	0.5		GCP2	-1.4	0.2	-0.3	
GCP3	1.6	0.4	-0.3		GCP3	0.7	2.9	0.2	
GCP4	-0.2	-0.6	0.1		GCP4	2.0	-3.0	0.1	
GCP5	-1.8	0.5	-1.1		GCP5	-3.0	0.0	-0.1	
GCP6	-0.5	-0.1	-0.2		GCP6	0.9	0.5	0.1	
RMSE	1.0	1.2	0.7		RMSE	1.7	1.7	0.2	

雪面形状の再現性については、計測点での雪面および地表面の標高から断面図を作成し比較を行った。図 5.10 に、図 5.4 に示す測線Iおよび測線IIにおける UAV-SfM 計測による地表面および雪面の計測値（標高）を示す。地表面は、無雪期に実施した UAV-SfM 計測結果である。積雪期に実施した case1 および case5 は、いずれも無雪期に実施した地表面の凹凸を捉えており、RTK 搭載型 / 非搭載型による大きな違いが見られなかった。

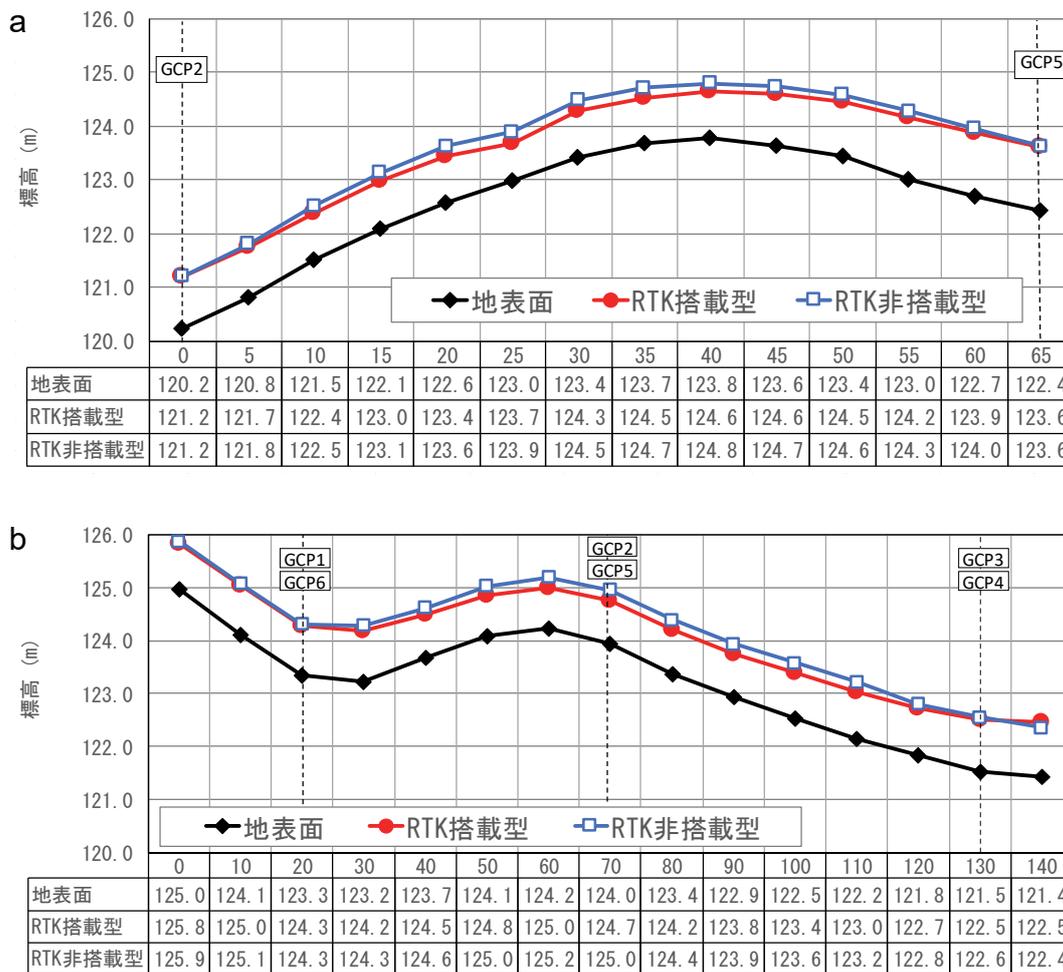


図 5.10 UAV-SfM 計測による地表面および雪面の計測値. (a) 測線 I, (b) 測線 II.

図 5.11 に、測線Iおよび測線IIにおける UAV-SfM 計測とレーザ計測による積雪深の計測結果を示す。case1 は RTK 搭載型 UAV による計測結果であるが、測線Iおよび測線IIともにレーザ計測の結果とほぼ一致している。最大誤差は、測線I計測点 0 m で+5.3 cm と全体に比べて比較的大きな値となっているが、この点については、両端の計測点 0 m, 65 m に GCP2 および GCP5 があり、SfM 解析時に公共座標で補正されていることから、レーザ計測の誤差と考えられる。これを除外した最大誤差は、測線II計測点 50 m で+3.4 cm となっており、一般的な GNSS 測量の鉛直誤差の範囲に収まった。

一方、case5 は積雪期に実施した RTK 非搭載型 UAV による推定結果だが、case1 に比べレーザ計測結果と乖離している。測線Iでは、両端部の計測点 0 m, 65 m では GCP 点上的ため誤差は小さいが、中間部に向かって、最大誤差は計測点 30 m で+19.8 cm と大きい。測線II

では、端部の最大誤差は計測点 140 m で-11.0 cm であるが、中間部の最大誤差は計測点 110 m で+22.0 cm であった。また、測線IIは、測線Iと異なり端部の計測点 0 m, 140 m に GCP がないことから広範囲でずれが大きくなったものと推察される。SfM 解析は画像 1 枚ごとに記録される Exif データをもとに、撮影位置の推定、画像特徴点の抽出、タイポイントの検索が行われる。ただし、RTK 非搭載型 UAV の撮影画像は GNSS 単独測位のため位置座標の精度が低く、特に高さについては、UAV に搭載された気圧高度計より推定しているためさらに精度が低下し、解析結果に影響したものと推察される。

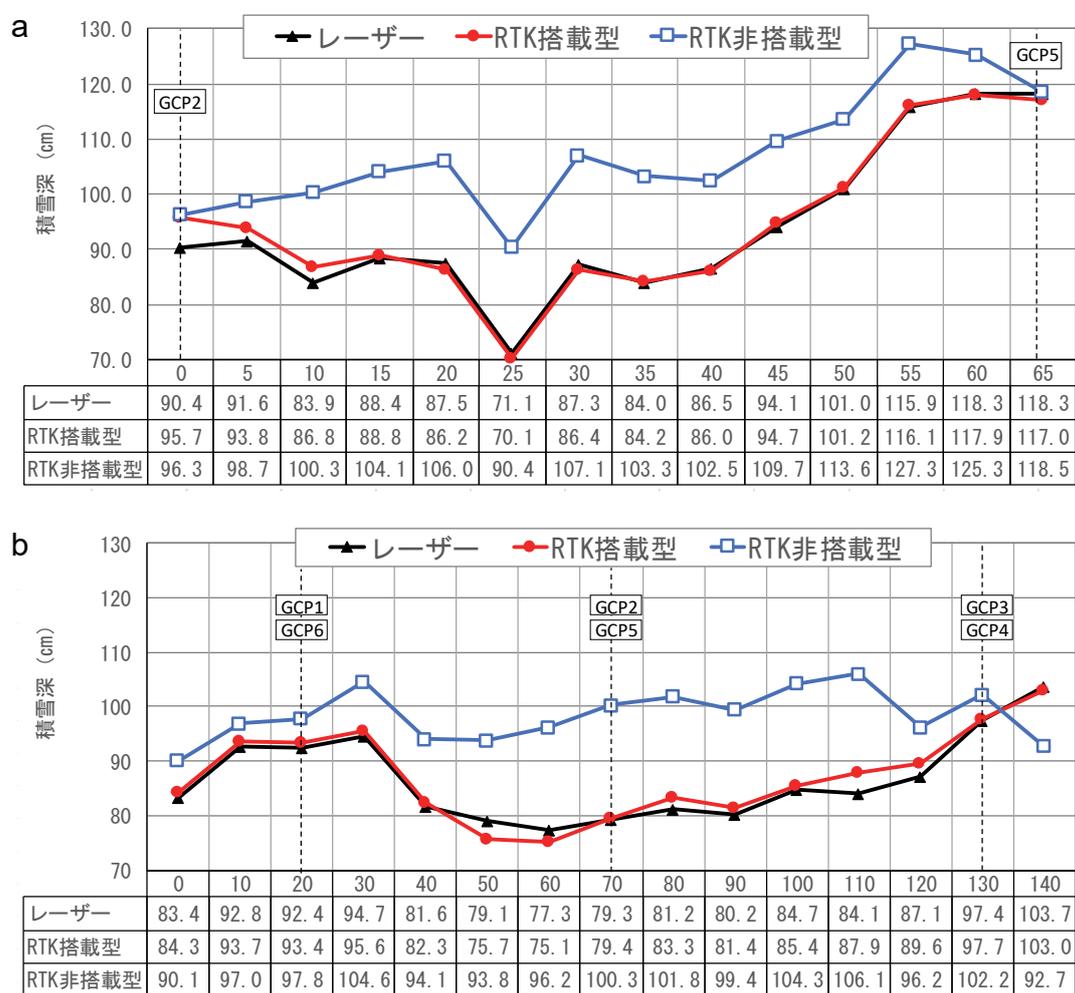


図 5.11 UAV-SfM 計測およびレーザー計測による積雪深。(a) 測線 I, (b) 測線 II.

5.4.2 GCP 点数の違いによる雪面計測精度

GCP 点数の違いについては、RTK 搭載型 UAV による撮影画像をもとに GCP 点数を変化させて SfM 解析を行い、作成した点群をもとに、その計測精度について検証した。

a) 検証点での雪面計測の精度

表 5.6 に、各ケースにおける検証点での計測誤差を示す。検証点での計測誤差は、UAV-SfM 計測により計測した点群上の GCP 位置座標について、地上で実施した RTKGNSS 測量結果を比較した。case2 (GCP を 4 点使用) および case3 (GCP を 2 点使用) においては、検証点での X および Y 方向の誤差 (平面での誤差) はいずれも $-3.9\text{ cm} \sim +9.7\text{ cm}$, Z 方向の誤差 (高さの誤差) は $-1.9\text{ cm} \sim +3.5\text{ cm}$ だった。このうち GCP3 の X 方向の最大誤差が case3 で 9.7 cm と比較的大きな値であり、GCP3 の位置が解析に使用した GCP1, 2, 5, 6 から最も離れていたことが影響したものと推察される。しかし、地形に極端な凹凸がないこと、高さ方向の誤差が 3.5 cm 以下に抑えられていることから、積雪深を算定する上で影響はないものとする。一方、case4 (GCP 不使用) においては、X および Y 方向の誤差は $-1.4\text{ cm} \sim +5.6\text{ cm}$ と case2, case3 と同程度であるのに対し、Z 方向の誤差は $+23.7 \sim +29.2\text{ cm}$ で、case2, case3 と比較し誤差は大きい。ただし、いずれの検証点においても高さ方向に一定程度のずれが発生しており、ずれの平均値 $+27.1\text{ cm}$ を平行移動した場合の標準偏差は $\pm 2.1\text{ cm}$ となるため、点群の高さ方向の歪みは case2 および case3 同程度であると考えられる。この一定程度のずれは、使用した UAV の特性と考えられるため事前にこのずれの量を把握することが実用上重要である。

表 5.6 検証点での計測誤差.

case2	誤差 (cm)			検証点	case3	誤差 (cm)			検証点	case4	誤差 (cm)			検証点
	ΔX	ΔY	ΔZ			ΔX	ΔY	ΔZ			ΔX	ΔY	ΔZ	
GCP1	0.0	2.5	0.7		GCP1	0.6	1.9	0.5		GCP1	-0.9	1.3	29.2	○
GCP2	1.4	-1.5	0.2		GCP2	0.6	-0.1	-1.9	○	GCP2	-1.3	-0.5	26.0	○
GCP3	8.4	2.9	3.3	○	GCP3	9.7	3.0	3.5	○	GCP3	-0.1	1.5	28.7	○
GCP4	-1.4	-3.6	-1.0	○	GCP4	-3.9	-2.4	-1.9	○	GCP4	5.6	0.2	25.8	○
GCP5	-1.6	1.3	-0.8		GCP5	-3.6	4.7	3.3	○	GCP5	-1.4	3.0	28.9	○
GCP6	-0.1	0.1	-0.1		GCP6	-0.8	-0.1	-0.5		GCP6	-1.0	2.0	23.7	○
RMSE	3.6	2.3	1.5		RMSE	4.5	2.6	2.3		RMSE	2.5	1.7	27.1	

このことから、積雪期に RTK 搭載型 UAV を用いて UAV-SfM 計測を行う場合には、撮影時に少なくとも 2 点以上の GCP を設置することにより、高さの計測誤差は 3.5 cm 以下に抑えられたことから、積雪深計測における実用上問題ないと考えられる。

b) 測線上での雪面高さの再現性

図 5.12 に、各ケースの UAV-SfM 計測およびレーザ計測による積雪深の誤差を示す。積雪深は式 (1)、計測誤差は式 (2) より算出する。

$$H = h_s - h_g \quad (1)$$

$$E = \frac{(H_{SfM} - H_L)}{H_L} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 H : 積雪深 (m)、 h_s : 各計測点の雪面高 (m)、 h_g : 地表面高 (m)、 E : 計測誤差 (%), H_{SfM} : UAV-SfM 計測による積雪深 (m)、 H_L : レーザ計測による積雪深 (m) を示す。

図 5.12a, 図 5.12b は、測線Iにおける計測誤差を示す。case4 を除く全てのケースで、西側端部の計測点 0 m から中央付近の計測点 35 m までの誤差が大きい。この範囲は、現場が西側への下り傾斜であること、または前述の通りレーザ計測による誤差の可能性がある。一方、計測点 35 から東側端部の計測点 65 m に向け誤差が小さくなっている。

図 5.12c, 図 5.12d は、測線IIにおける計測誤差を示す。case4 を除く全てのケースで、中間部の計測点 50 m から南側端部の計測点 140 m までの誤差が大きくなっているが、計測点 50 m を境に計測点 140 m に向け地形が傾斜しており、この影響が考えられる。一方、計測点 0 m から中間部の計測点 40 m までは、誤差は小さい。これは図 5.4 に示す通り測線上に GCP はないものの、計測点の周囲 50 m 以内の範囲に GCP1, GCP6 の 2 点があり、この 2 点の誤差が -0.5 ~ 1.0 cm と小さかったことが影響したものと推察する。

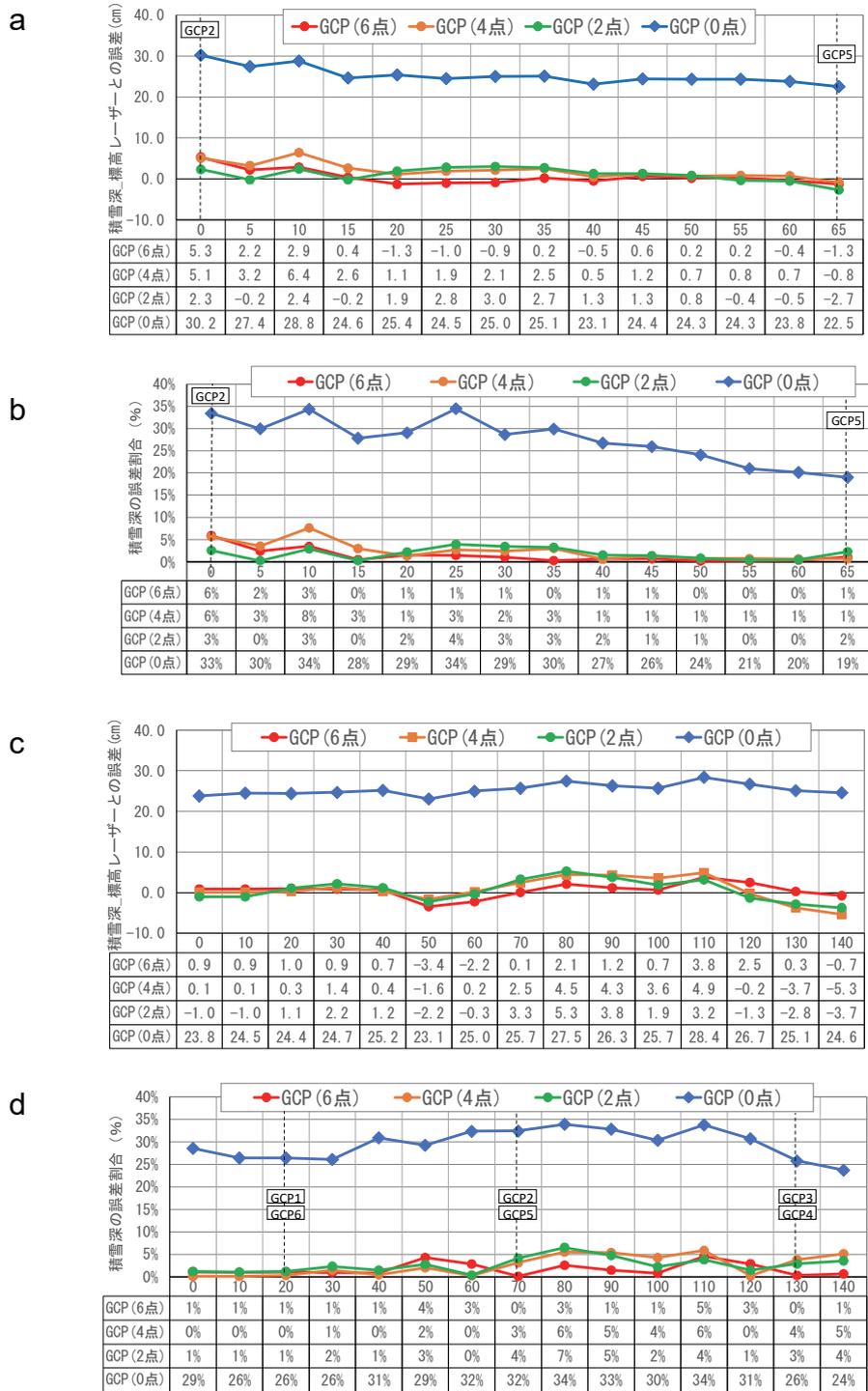


図 5.12 UAV-SfM 計測およびレーザ計測による積雪深の誤差。(a) 測線 I (レーザ計測との誤差 [cm]), (b) 測線 I (レーザ計測との誤差比率 [%]), (c) 測線 II (レーザ計測との誤差 [cm]), (d) 測線 II (レーザ計測との誤差比率 [%])。

表 5.7 に、各 case の誤差の最大値を示す。ただし、測線Iの計測点 0 m については、前述の通りレーザ計測の誤差と考えられるため、評価の対象外とした。

表 5.7 計測誤差の最大値.

	GCP数	測線 I		測線 II	
		誤差 (cm)	比率	誤差 (cm)	比率
case1	6	2.9	3%	3.8	5%
case2	4	6.4	8%	4.9	6%
case3	2	3.0	3%	5.3	7%
case4	0	28.8	34%	28.4	34%
case4 [※]	0	1.7	2%	1.3	2%

※ -27.1cm補正した場合

GCP 数を図 5.4 に示す 6 点全てを使用した case1 は、レーザ計測との誤差が測線Iの計測点 10 m で最大 2.9 cm (3%)、測線IIの計測点 110 m で最大 3.8 cm (5%) であり、各ケースの中で最も再現性が高かった。これは、計測範囲を囲うように GCP を配置したことにより、同範囲内の誤差が最小限に抑えられたものと考えられる。

GCP 数を図 5.4 に示す 4 点使用した case2 では、レーザ計測との誤差が測線Iの計測点 10 m で最大 6.4 cm (8%)、測線IIの計測点 110 m で最大 4.9 cm (6%) であった。また、GCP 数を図 5.4 に示す 2 点使用した case3 では、レーザ計測との誤差が測線Iの計測点 30 m で最大 3.0 cm (3%)、測線IIの計測点 80 m で最大 5.3 cm (7%) であった。これまで、法面上の積雪深を把握するためには、あらかじめ法面に設置した雪尺を離れた場所から目視により 10 cm 単位で読み取っていた。本実験結果では、いずれのケースも case1 に比べばらつきはあるものの、最大誤差は 6.4 cm (8%) で 10 cm 以下に抑えられおり、実用上は積雪深の計測にあたり大きな問題ないと考えられる。

図 5.13 に、GCP 点数の異なる UAV-SfM 計測およびレーザ計測による積雪深の比較を示す。各ケース共に UAV-SfM による推定値は実測値に比べ高い傾向にあるが、GCP 点数の違いによる差異は小さかった。このことから、雪面を対象として UAV-SfM 計測を行う場合には、RTK 搭載型 UAV を使用すること、計測範囲周辺を囲うように GCP を配置することにより、計測誤差を 5%以内に抑えられることがわかった。また、GCP 数を減じた場合においても誤差が大きく変わらなかったことから、計測範囲内に GCP を 2 点以上配置することにより、計測誤差は 8%以下に抑えられることがわかった。

一方、GCP を全く使用していない case4 は、測線 I, II 全てにおいて、誤差が大きい。レーザ計測との誤差が測線 I の計測点 10 m で最大 28.8 cm (34%)、測線 II の計測点 110 m で最大 28.4 cm (34%) であった。撮影に使用した UAV は RTK-GNSS を搭載しているが、高さ方向は一定の誤差が出ていることから、少なくとも 2 点以上の GCP を配置する必要があるといえる。

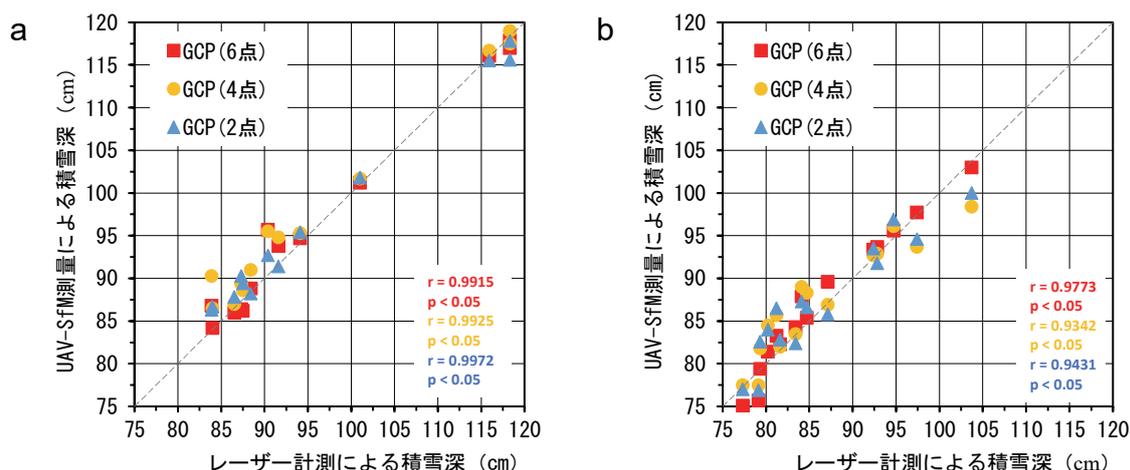


図 5.13 GCP 点数の異なる UAV-SfM 計測およびレーザ計測による積雪深の比較，(a) 測線 I，(b) 測線 II.

5.5 まとめ

本章では、積雪期の UAV-SfM 計測における地上基準点設置作業の効率化を目的に、測位方式の異なる UAV による撮影実験および SfM 解析の際に入力する GCP 点数を変化させた実験を行い、その計測精度を検証した。本章により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 測位方式の異なる UAV (RTK 搭載 / 非搭載型) で雪面を撮影し、GCP を 6 点使用し SfM 解析を行った結果、GCP 点での高さの計測誤差はいずれも 1.7 cm 以下であり、大きな違いが見られなかった。
- 2) RTK 非搭載型 UAV で撮影し、GCP を 6 点使用し SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は、測線 II の計測点 110 m において +22.0 cm (26%) で、計測点でのばらつきも大きい結果となったため、積雪期の計測に適さないと考えられる。

- 3) RTK 搭載型 UAV で撮影し、GCP を 6,4,2 点と変化させ SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は、GCP を 6 点使用した場合+3.8 cm (5%)、GCP を 4 点使用した場合+6.4 cm (8%)、GCP を 2 点使用した場合+5.3 cm (7%) で、計測程度に大きな差はなかったことから、GCP 点数を減らした場合においても、積雪深計測における実用精度には問題ないことを確認した。
- 4) RTK 搭載型 UAV で撮影し、GCP を使用せず SfM 解析を行った結果、検証点での高さの最大誤差は+29.2 cm で、一定程度のずれが確認された。ずれの平均値+27.1 cm を平行移動した場合の標準偏差は±2.1 cm となるため、この一定程度のずれの量を把握することが実用上重要である。このずれの量を把握する方法として、地形条件の異なる場所や衛星捕捉数の異なる場所での撮影実験を数多く行い、傾向を分析するのが望ましく、今後の課題と考える。
- 5) 本実験においては、計測範囲周辺を囲うように GCP を配置し、計測誤差は+3.8cm (5%) 以下に抑えられることができた。また、計測範囲付近に GCP を 2 点以上配置することにより、計測誤差は+6.4 cm (8%) 以下に抑えられることがわかった。一方、GCP を全く使用しない場合には、高さ方向には一定の誤差が生じることがわかった。

以上より、RTK 搭載型 UAV を用いた UAV-SfM 計測により雪面形状計測を行う場合、撮影時の地上画素寸法を 1 cm 相当に設定し、GCP を 2 点以上配置することにより、積雪深計測における精度を確保でき、実用上問題ないと考えられる。

このことから、積雪期の UAV-SfM 計測における地上基準点設置作業の効率化が図れることを明らかにした。

第6章 雪崩予防柵が設置された道路法面を対象とした雪面形状計測実験

6.1 概説

本研究では、UAV と SfM 解析を組み合わせた、低コストかつ特殊技術不要の雪面計測法の確立による雪氷防災のための維持管理に必要な計測精度の実現を目的に、様々な基礎的実験を行ってきた。第3章では、雪面の UAV-SfM 計測における最適な撮影条件として、時間帯は下向き短波放射が適度に高い日中、雪質は降雪直後の新雪以外（雪面反射率 <0.9 ）、天気は直達日射が卓越する晴（雲量 ≤ 8 ）であることを明らかにした。第4章では、防雪柵が設置された平坦地（ $W \times L = 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ）の実験場で UAV-SfM による計測実験を行い、防雪設備周囲のような凹凸のある積雪表面に UAV-SfM 計測を適用し、対地高度 15~50 m で撮影した場合、推定値は実測値-4%とすれば誤差が 2%であり、実用レベルにおいて問題ないことを明らかにした⁴³⁾。第5章では、広範囲な平坦地（ $W \times L = 70 \text{ m} \times 140 \text{ m}$ ）の実験場で UAV-SfM による計測実験を行い、RTK 搭載型 UAV を用いることを条件に、撮影時の地上画素寸法を 1 cm 相当に設定し、地上基準点を 2 点以上配置することにより、積雪深計測における精度を確保でき、実用上問題なく、積雪期の UAV-SfM 計測における地上基準点設置作業の効率化が図れることを明らかにした。

本章では、本研究で得た知見を基に、雪崩予防柵が設置された実際の道路法面（ $W \times L = 160 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ）を対象とした、UAV-SfM による雪面計測実験を行う。

また、UAV-SfM を用いて防雪設備周囲の雪面を計測する際、風速が強い場合に UAV を飛行させられない、前述した最適な撮影条件以外では点群が生成されない、上空からの撮影画像のみでは雪崩予防柵周囲の死角となる部分の点群が作成されない等の問題があることを確認した（図 6.1）。この他、地上レーザスキャナを用いた積雪分布の計測事例⁴⁵⁾があるが、機材が高価であり、機器を設置した位置から死角になる範囲を計測できないこと等が指摘されている⁴⁶⁾。



図 6.1 点群が欠損した UAV-SfM 計測の事例 (黒が欠損).

近年土木工事の出来形管理においては国土交通省により「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」⁴⁷⁾が2023年に改訂され、モバイル端末を利用したスキャニング技術(以下、モバイルスキャン)の活用が促されている。モバイルスキャンは、LiDAR (Light Detection And Ranging) センサーとカメラが搭載された端末 (iPad Pro 等) と専用のソフトウェアを使用し、対象物の計測が可能である。また、計測者自身が対象物の周りを移動することにより、これまで死角となっていた部分を計測できる利点がある。

モバイルスキャンは、UAV-SfM 計測と異なり、モバイル端末のセンサー部からレーザー光が対象物との間を往復するのにかかる時間を記録することによって、その距離を直接測定し、手軽に点群を取得できる。このため土木工事において活用事例は増えつつあるが、積雪表面計測への適用では 2.5 m×2.5 m の平坦な土地に積もった雪の計測事例³⁷⁾はあるものの、道路法面に比べ範囲が極端に狭く起伏も存在しないため、計測の可否およびデータ精度の検証等が未だ十分とはいえないのが現状である。

そこで本章では、UAV-SfM 計測を基本とし、点群が欠損する防雪設備周囲の雪面形状計測へのモバイルスキャンの適用可能性について、点群生成の可否とその精度を併せて検証した。比較対象としては、これまで一定の精度評価が確立している UAV-SfM 計測結果を使用する。

6.2 実験概要

6.2.1 実験場所および気象観測

実験場所は、北海道芦別市に位置する道路法面である。実験場所の法面は、道路からの比高は約 30 m、法面勾配は約 40°の片側切土、法面勾配は 1:1.2 程度で、勾配が比較的緩い一部を除いて雪崩予防柵（柵高 $H=1.5$ m、幅 $W=5.5$ m）が一面に設置されており、冬期間は積雪により雪崩予防柵周辺に雪庇が発達している。冬期間は積雪の影響により雪崩予防柵上部に雪庇が形成され、一部の雪崩予防柵において埋没している状況であった。実験範囲は、平面的に 160 m×40 m 程度の範囲とした（図 6.2）。



図 6.2 実験場所.

気象観測では、気温および積雪深については、気象庁芦別地域気象観測所（以下、芦別アメダス）での観測結果をインターネットより取得した。短波放射については、アルベドメーターを現地に設置して測定した（図 4.3 参照）。また、取得した上向きおよび下向き短波放射の比率を雪面の反射率として算出する。また、実験時の天候および雪面の雪質を記録する。

6.2.2 実験方法

上空より UAV-SfM 計測、地上よりモバイルスキャンによる計測を行い、数値標高モデル（点群）を各々作成する（図 6.3）。作成した数値標高モデル（点群）を重ね合わせ、シームレスな雪庇形状の数値標高モデル（点群）を作成する。

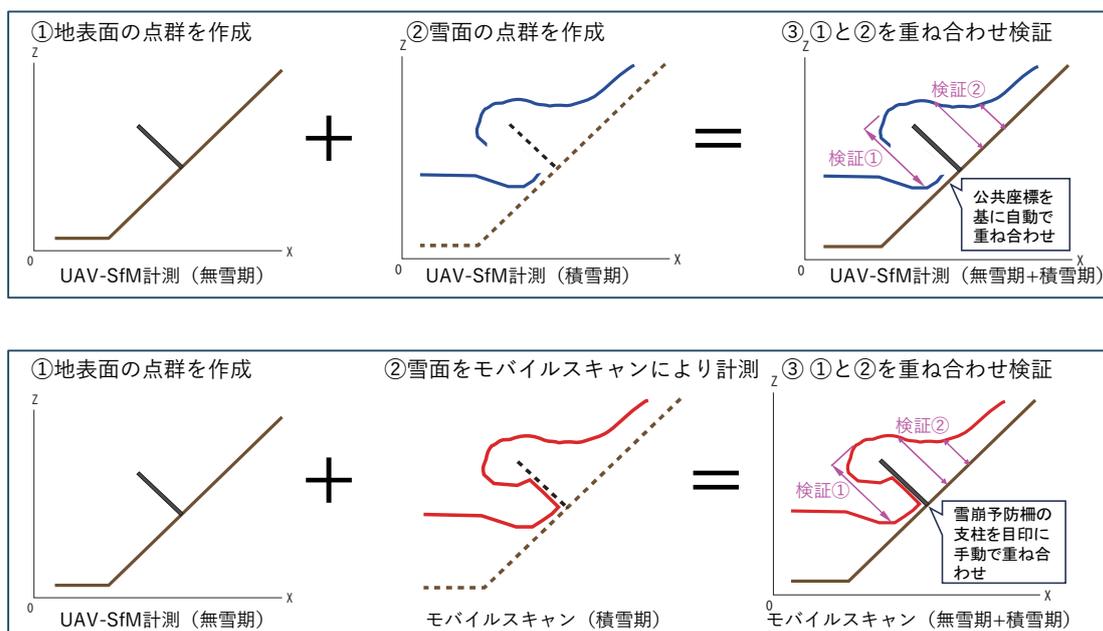


図 6.3 UAV-SfM 計測およびモバイルスキャン計測の概念図.

重ね合わせは通常、点群に付与された公共座標をもとに行うが、今回使用した 3 次元計測アプリでは公共座標が付与されないため、露出している雪崩予防柵支柱の位置を基準として、手動で重ね合わせた (図 6.4).

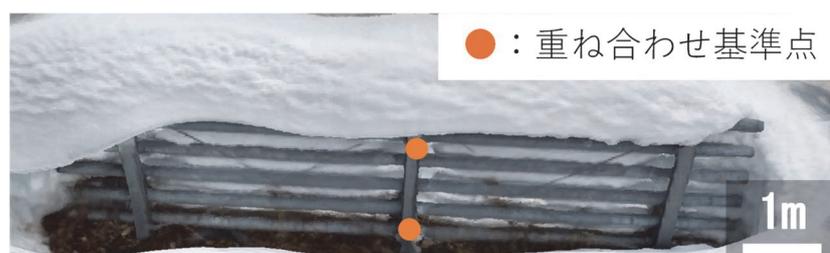


図 6.4 点群の重ね合わせ基準点.

6.3 UAV-SfM による雪面計測実験

6.3.1 UAV 撮影の方法

本実験では高い計測精度を得る目的で RTK-GNSS を搭載した UAV を使用する。撮影に使用する UAV 機体およびカメラ仕様を表 6.1 に示す。撮影は、鉛直下向きの俯瞰撮影とする。撮影画像における雪面でのオーバーラップ率（重複度）は、「公共計測作業規程の準則（国土地理院）」に基づき、進行方向に 80%以上、隣接コースで 60%以上とする。撮影対地高度は、地上解像度が 1 cm 程度となるよう 70 m に設定した。画像の記録形式は SfM 解析の処理時間コストを考慮し JPEG 形式とする。

現地には RTK 固定基地局を設置し、これと UAV 本体とをワイヤレスで接続し、撮影する。RTK 固定基地局については、事前に電子基準点を基準とした RTK-GNSS 計測を行い、取得した位置座標および標高値を入力した。

表 6.1 撮影に使用する UAV 機体およびカメラ仕様。

機体写真	
機種	Matrice 300 RTK
メーカー	DJI
カメラ	Zenmuse P1
カメラ特性	
画素数	4500 万画素
センサーサイズ	35.9×24 mm
解像度	8192×5460 pixel
ピクセルサイズ	4.4×4.4 μm
画角	84 °
35mm換算焦点距離	24 mm

また、UAV-SfM による計測範囲全体の点群の位置精度を向上させるため、既往研究⁴⁸⁾をもとに UAV 撮影の直前に図 6.5 に示す地上基準点（GCP）を配置する。無雪期に設置した GCP は積雪によって埋没するため、撮影時に雪面上へ GCP を 5 点配置し、各 GCP について RTK-GNSS 計測により公共座標を算出した。ここで公共座標の高さは、一般に標高（楕円体高 - ジオイド高）で示される。しかし、UAV に記録される高さは楕円体高が採用され

ているため、両者の高さには違いがある。本実験においては、UAV 計測結果にジオイド高を減じた標高に統一し比較した。本実験におけるジオイド高は、国土地理院の計測計算サイト「ジオイド高計算」にて位置座標を入力し、算出したものを用いる。

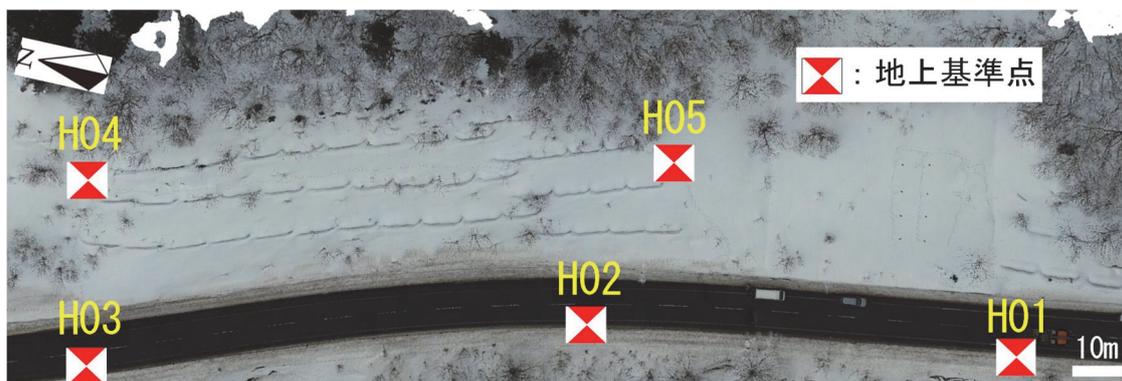


図 6.5 地上基準点（GCP）の配置概要。

6.3.2 SfM 解析の方法

SfM 解析においては、SfM/MVS ソフトウェア（Agisoft 社製、Metashape Professional Version1.8.4 build 14856）および点群処理ソフトウェア（福井コンピューター株式会社製、TREND-POINT ver.10）を使用する。

図 6.6 に解析の手順を示す。UAV で撮影した画像は SfM/MVS ソフトウェアで読み込み、以下の手順で解析する。順に、「1. 画像特徴点の抽出及びタイポイントの検索」→「2. バンドル調整（内部及び外部標定要素の推定）と低密度点群データの出力」→「3. 地上基準点及び精度検証点の設置と座標入力及び地上基準点を利用した再バンドル調整（内部及び外部標定要素の高精度化）」→「4. 精度検証点を用いた精度検証」→「5. 高密度点群及び TIN（Triangulated irregular network）の作成」→「6. DSM およびオルソ画像の作成と出力」の 6 ステップで構成である。

また、雪面画像を SfM 解析する場合には、積雪環境特有の可視光反射率の高さや、色調および凹凸の少なさから、点群の欠損等が生じることがある。このため、撮影画像の位置情報が重要でソフトウェア、SfM 解析ソフトウェアに画像を読み込む際には RTK-GNSS または GNSS により画像に付与された Exif（Exchangeable image file format）情報による座標値を有効とすることで点群の欠損を極力回避する。

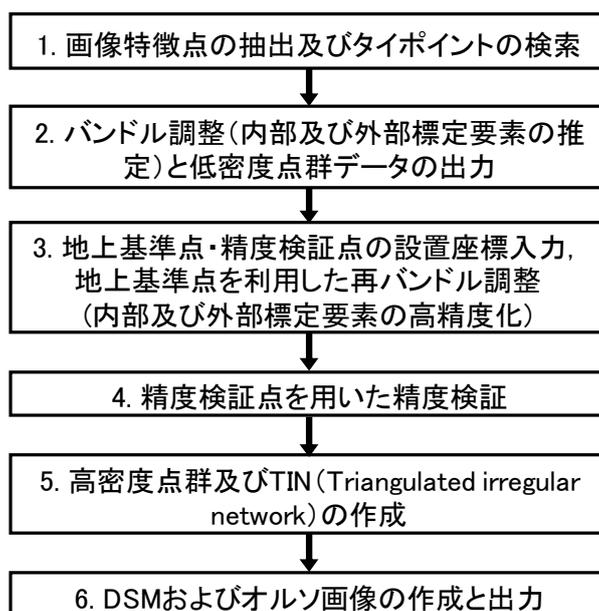


図 6.6 SfM 解析手順.

解析時のパラメータは、先行研究から以下のように設定した。写真のアライメント（写真を読み込み，撮影位置，姿勢等を推定）は，精度：中，マスク適用先：静止したタイポイントを除外した。メッシュ構築は，ソースデータ：高密度クラウド（品質：中），深度フィルタ：弱（頂点カラーを計算，内挿補間：有効），サーフェスタイプ：自由形状（3D），ポリゴン数：高（1400000）とした。標定点の入力および補正は有効とした。計測範囲全体の点群は，写真のアライメント処理後，写真計測の原理で 3 次元メッシュモデルの生成およびオルソモザイクを構築し作成する。無雪期の SfM 解析についても同様の手順で実施した。

6.3.3 計測精度の検証方法

SfM 解析の際に UAV 撮影により得られた画像と GNSS 計測により計測した GCP の位置座標 5 点すべてを使用し，ジオリファレンスを行う。作成した点群の GCP における位置座標を計測し，GNSS 計測結果と比較し，その精度を検証する。

また，5 箇所に設置した GCP 全てを使用して SfM 解析を実施し得られた点群座標（Case-1）を基準とする。道路付近に設置した 3 箇所の GCP（H01, H02, H03）のみを使用して得られた点群から，法面上方の GCP（H04, H05）座標（Case-2）を計測し，Case-1 の座標と比較する形で検証する。これは冬期道路における災害発生時，または災害発生の恐れがある場合に，法面上に GCP を設置することが困難な状況を想定している。

6.4 モバイルスキャンによる雪面計測実験

6.4.1 モバイルスキャンによる雪面計測の方法

本研究では、モバイルスキャン端末は LiDAR センサーが搭載された民生用タブレット (Apple 社製 iPad pro A2377) を、3次元計測アプリケーションは Scaniverse ver.2.1.4 (Niantic 社製) を使用する (表 6.2)。

表 6.2 モバイルスキャン計測仕様.

使用端末	iPadPro A2377 (Apple社製)
	
3次元計測アプリ	Scaniverse ver.2.1.4 (ナイアンティック社製)
	【設定】 計測範囲：5.0m 処理方式：Area 点群出力：PLY形式
	
点群処理ソフト	TREND-POINT ver.10 (福井コンピュータ株式会社製)

計測箇所は、図 6.7 に示す A、B 部の雪崩予防柵 (幅 5.5 m、高さ 1.5 m) 2 基の周辺に発達した雪庇を対象とした。



図 6.7 モバイルスキャン計測位置.

現地での計測方法は、雪崩予防柵（幅 5.5 m、高さ 1.5 m）1 基を対象物とし、**図 6.8** に示す通り、対象物から 5 m 以下の距離を保ち、周囲を移動しながら計測する。アプリケーションの設定は、計測範囲を 5.0 m、処理方式を Area、点群の出力を PLY 形式とする（点群処理は福井コンピュータ株式会社製 TREND-POINT Ver.10）。

計測方法は下記の通りである。

- 1) アプリを起動し、慣性計測ユニット（IMU： Inertial Measurement Unit）の安定を待つ
- 2) 計測可となったら対象物に正対し、計測開始
- 3) 計測精度向上のため、急な回転は避け、一定の距離（5 m 以内）を保ちながら計測
- 4) 未計測の箇所がないか計測画面を確認し、終了



図 6.8 モバイルスキャンによる計測状況.

6.4.2 モバイルスキャンによる雪面計測精度の検証方法

図 6.9 には、計測精度の検証方法を示す。無雪期の UAV-SfM 計測結果と積雪期のモバイルスキャンおよび UAV-SfM 計測による雪面のデジタル表層モデル（以下、DSM：Digital Surface Model）を重ね合わせて、断面形状を比較し点群作成の可否および精度を検証する。また、無雪期および積雪期の 2 時期の差分により積雪深を算出し、実測値との計測精度を検証する。

- ・最大雪庇高さをスノープローブ（測深棒）による現地計測結果と比較
- ・雪庇背面の積雪深 8 点を UAV-SfM 計測による計測結果と比較

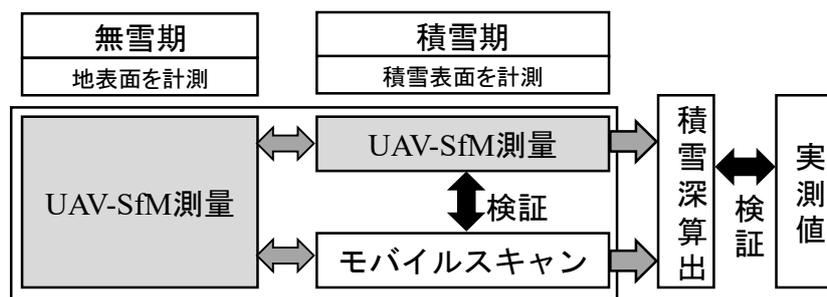


図 6.9 積雪深の計測精度の検証方法.

6.5 気象観測の結果

図 6.10 に芦別アメダスの日平均気温と日最大積雪深の推移を示す。芦別アメダスは、実験箇所から北方約 20 km 離れた芦別市北 2 条東（北緯 43 度 31.2 分，東経 142 度 11.4 分）に位置している。積雪深は 1 月 20 日頃から増加し，2 月 3 日に最深積雪深 96 cm に達している。また，2 月 27 日から融雪が始まり，3 月 26 日には消雪している。

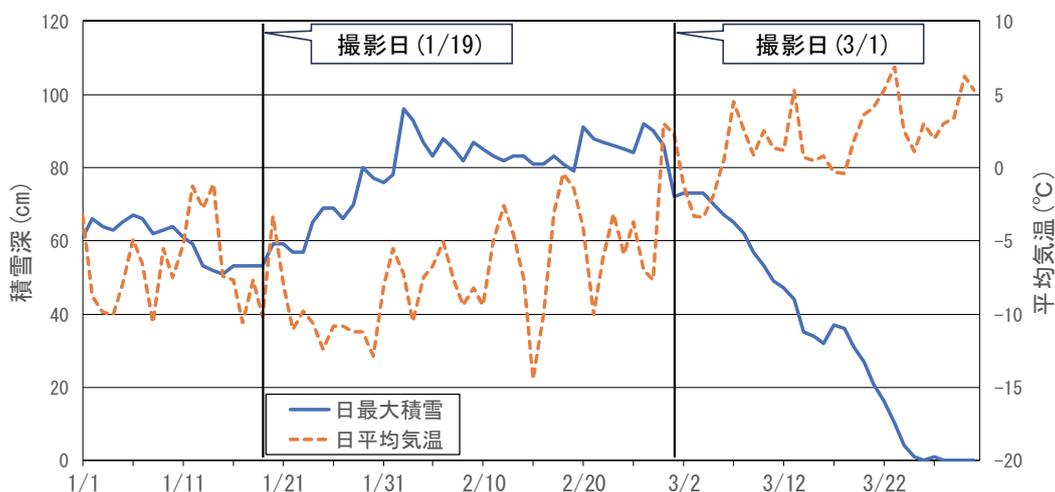


図 6.10 芦別アメダスによる積雪深と気温の推移 (2023 年 1 月 1 日～3 月 31 日).

表 6.3 に実験実施日の気象条件を示す。実験 1 回目の天候は晴，雪面の雪質は，新雪とこしもざらめ雪（小さな温度勾配の作用でできた平らな面を持った積雪粒子）が混合していた。

撮影時間帯の下向き短波放射は $254\sim 478\text{ w/m}^2$ で、雪面の反射率は 0.8 であった。実験2回目の天候は曇、雪面の雪質は3月上旬であったためざらめ雪であった。撮影時間帯の下向き短波放射は $85\sim 430\text{ w/m}^2$ で、雪面の反射率は 0.5 であった。既往研究⁴³⁾では、点群が確実に作成可能な雪質の条件は、降雪直後の新雪以外（雪面の反射率 <0.9 ）、天候は晴、時間帯は下向き短波放射が適度にある日中とされているが、今回は1回目、2回目ともに雪面の雪質が降雪直後の新雪以外であったこと、雪面の反射率が 0.9 未満であったことから、点群作成のための撮影に適するものと判断した。なお無雪期の UAV 撮影については、2022年11月30日に実施した。

表 6.3 実験日の気象条件.

	1月19日	3月1日
実験時刻	12:18~12:20	10:51~10:54
下向き短波放射	$254\sim 478\text{ w/m}^2$	$85\sim 430\text{ w/m}^2$
雪面の反射率	$0.799\sim 0.843$	$0.459\sim 0.549$
雪質	新雪・ざらめ雪	ざらめ雪
天気	晴	曇

6.6 UAV-SfM 計測による雪面計測実験の結果と考察

6.6.1 UAV-SfM 計測による雪面形状の再現性

図 6.11a にオルソ画像（航空写真における歪みを修正した画像）を、図 6.11b に SfM 解析により作成した点群の事例を示す。実験範囲内の点群は全体的に解像度が著しく低下する箇所もなく点群が作成できている。しかし、オルソ画像と比較すると雪崩予防柵設置部分では明らかに点群が欠損している。上空から雪崩予防柵を見た際に、発達した雪庇の影になる部分の点群が全く作成できていないことが確認できた。



図 6.11 UAV-SfM 計測による点群の欠損事例（黒い部分は点群が欠損）. (a) UAV-SfM によるオルソ画像, (b) UAV-SfM による点群.

6.6.2 UAV-SfM 計測による積雪深の計測精度

UAV-SfM 計測による雪面形状の再現性について、SfM 解析の際に UAV 撮影により得られた画像と GNSS 計測により計測した GCP の位置座標 5 点を使用し、ジオリファレンスを行った。SfM 解析にて作成した雪面の点群の精度を検証するため、表 6.4 に SfM ソフトウェアで出力した 5 点の GCP の RMSE (Root Mean Squared Error : 平均二乗誤差) 事例を示す。結果、H01 の ΔZ を除く 4 点の誤差 (RMSE) は概ね 2 cm 程度の範囲に収まっており、一般的なスノープロブによる現地計測の誤差と同程度であった。H01 については、 ΔZ が 4.9 cm と他の GCP に比べ誤差が大きな値となっている。これは点群作成の際、H02 と H05, H03 と H04 と点群が対になっているのに対し、H01 は道路側のみのため、誤差が大きくなったものと推察する。この点については今後検証が必要である。

表 6.4 UAV-SfM 計測における地上基準点での誤差.

	誤差 (cm)		
	ΔX	ΔY	ΔZ
H01	0.2	-0.8	4.9
H02	-0.6	0.8	-1.9
H03	0.4	0.0	1.4
H04	2.1	1.4	-1.4
H05	-0.5	1.9	-1.5
RMSE	1.0	1.2	2.6

表 6.5 に、Case-2 で使用していない GCP (H04, H05) における標高値を、RTK-GNSS 計測による観測値と比較した結果を示す。表より、H04, H05 とともに検証値の最大の誤差は Case-1 では 15 mm, Case-2 では 26 mm であった。Case-1 に比べ Case-2 の誤差が+8~11 mm 大きくなったが、積雪深計測における実用上、問題のない範囲と考える。

表 6.5 GCP における標高値の比較.

基準点	(m)	RTK-GNSS	GCP*5 (Case-1)	GCP*3 (Case-2)
H04	標高値	296.811	296.796	296.785
	差分	-	-0.015	-0.026
H05	標高値	292.983	292.969	292.961
	差分	-	-0.014	-0.022

図 6.12 に断面図を作成する測線位置を示す。図 6.13 に点群から作成した測線 1, 2, 3, 4 の断面図を示す。図 6.13a, 図 6.13b の断面図では、雪崩予防柵位置での点群に乱れはあるものの、柵間の雪面は大きなずれなく再現できている。図 6.13c の断面図では、法面上部の樹木のある位置で点群の乱れはあるが、それ以外の範囲においては、同様にずれなく一致している。

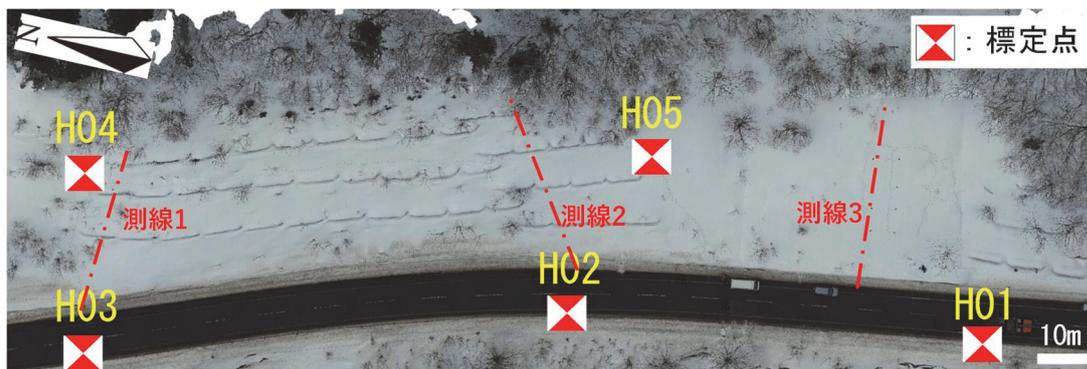


図 6.12 測線位置図.

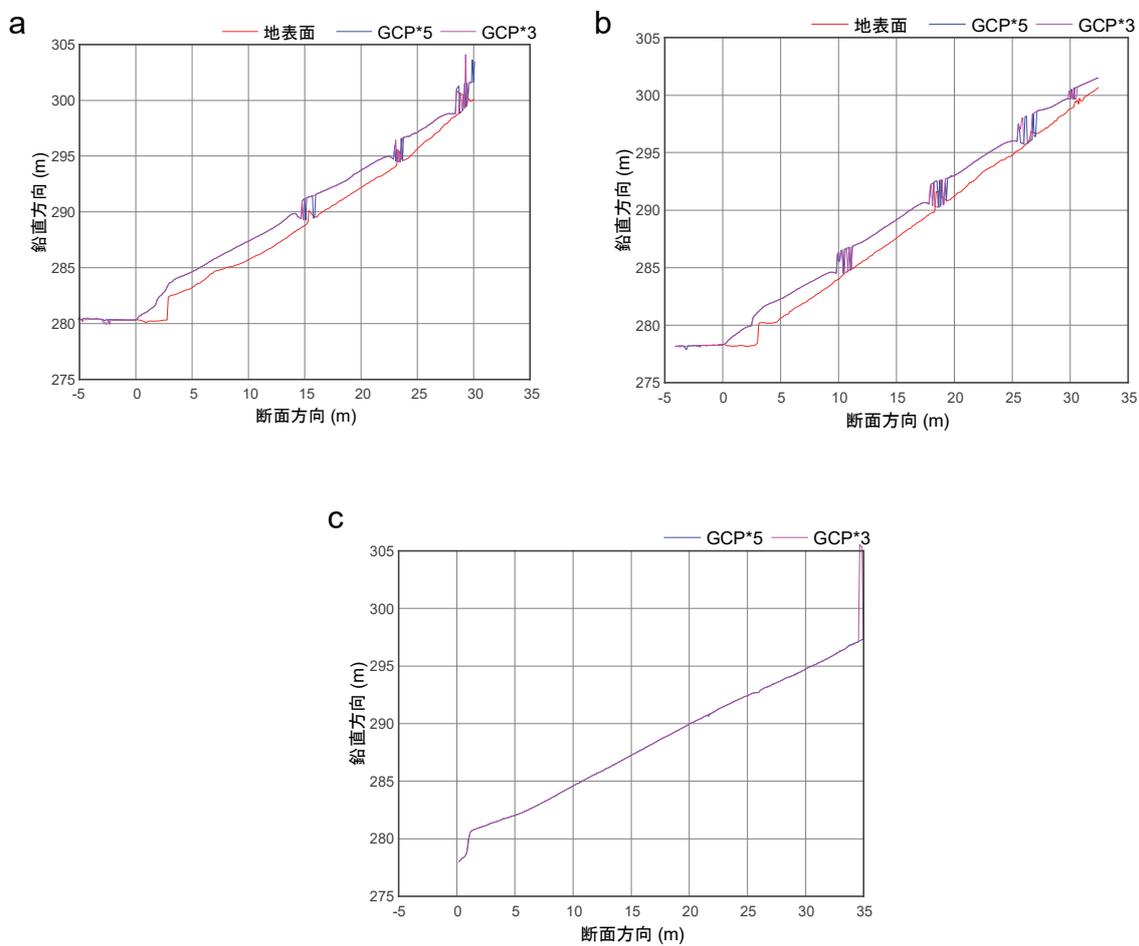


図 6.13 積雪断面図. (a) 測線 1, (b) 測線 2, (c) 測線 3.

結果、雪崩予防柵が設置された道路法面を対象とし、RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた UAV-SfM により雪面形状の計測を行う場合、撮影時の地上画素寸法を 1 cm 相当に設定し、地上基準点 (GCP) を道路側に 3 点配置することにより、積雪深計測において実用上問題ない精度を確保できることを確認した。このことから、本研究の第 3 章～第 5 章で示した基礎的研究成果の妥当性が得られたものと考えられる。

6.7 モバイルスキャンによる雪面計測実験の結果と考察

6.7.1 モバイルスキャンによる雪面形状の再現性

図 6.14 にモバイルスキャンにより作成した点群事例を示す。A 部では 1 月 19 日および 3 月 1 日の計 2 回、B 部では 3 月 1 日の 1 回計測を実施した。どのケースも雪庇形状の点群は概ね作成できているものの、一部分に点群の抜けや乱れが確認された。

図 6.14a では、雪崩予防柵と背後の積雪表面の点群が殆ど抜けることなく作成できている。ただし丸印箇所においては、点群に現地では確認できなかった凹凸や乱れが見られる。これは、計測時にタブレットを急激に動かしたことにより、内蔵された慣性計測ユニット (IMU : Inertial Measurement Unit) が行う自己位置推定に誤差が生じたものと推察する。

一方、図 6.14b では、丸印箇所において図 6.14a で見られた凹凸や乱れが見られない。これは、図 6.14a での結果を受けて、図 6.14b の計測時における撮影の工夫 (タブレットの傾きと対象物の距離を一定に保ち、急激な動きは避ける) による結果と推察する。図 6.14c では、雪崩予防柵背後の点群が大きく欠損している。これは、現地の状況から雪崩予防柵背後からの計測ができず、左右横方法からの計測のみであったため、レーザ照射距離が部分的に 5 m 以上となり、計測範囲外となったものと推察される。

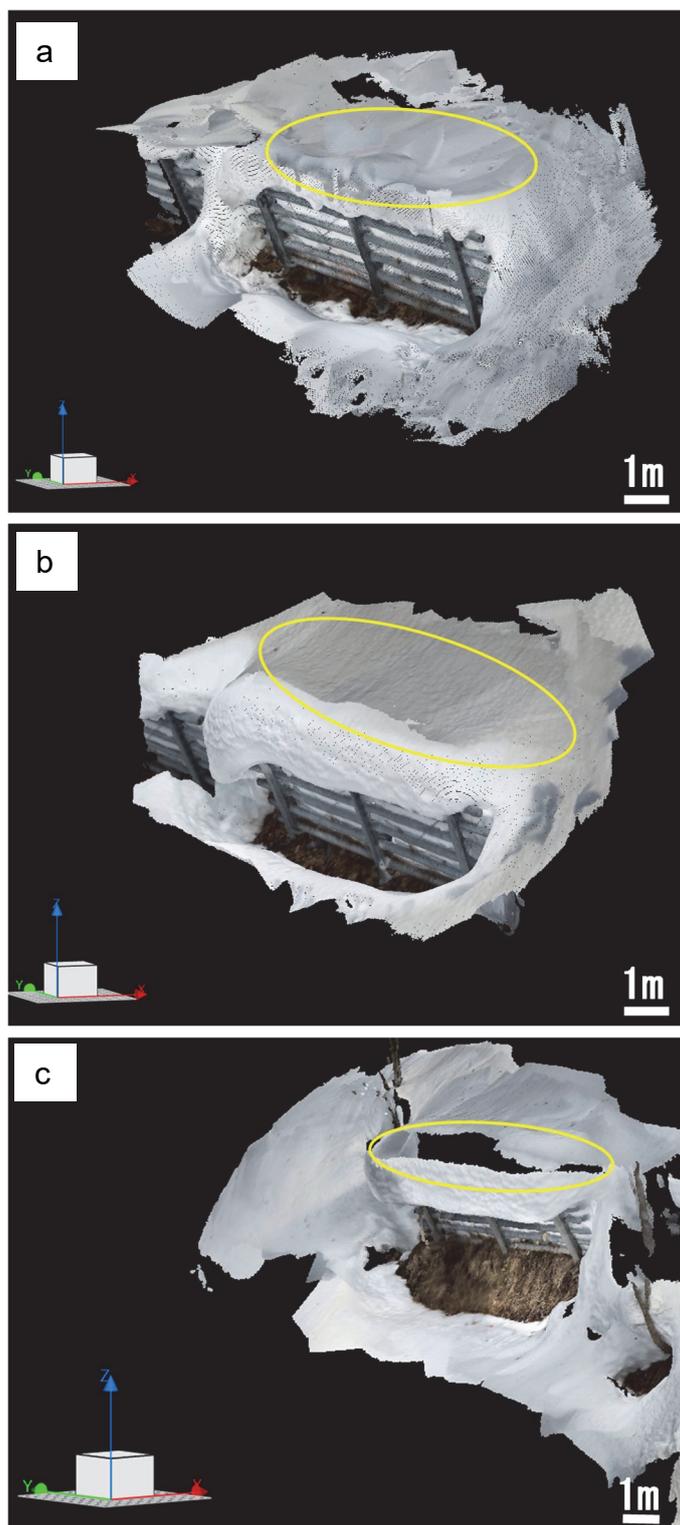


図 6.14 モバイルスキャンにより作成した点群事例. (a) A 部 (計測日 : 1 月 19 日) , (b) A 部 (計測日 : 3 月 1 日), (c) B 部 (計測日 : 3 月 1 日).

6.7.2 モバイルスキャンによる積雪深の計測精度

モバイルスキャンによる積雪深計測については、はじめに無雪期に UAV-SfM 計測を行い、地表面の DSM を作成する。積雪期に、事前に選定した雪崩予防柵（幅 5.5 m、高さ 1.5 m）1 基周辺の積雪表面を対象としてモバイルスキャンを行い、雪面の DSM を作成する。その後、積雪深は、無雪期および積雪期の DSM を点群処理ソフトウェアでの重ね合わせにより算出する。モバイルスキャンによる点群データは、今回使用した 3 次元計測アプリケーションでは公共座標が付与されないため、基準点は露出している雪崩予防柵支柱位置として、手動で重ね合わせる。

UAV-SfM 計測を基準として、図 6.15 に示す雪庇背後の任意の 6 点における積雪深を算出し、モバイルスキャンの計測精度について比較を行った。計測結果を表 6.6 に示す。1 月 19 日の結果では、計測誤差が 4.7~22.8 cm (3~21%) とばらつきがあり、最大誤差が 22.8 cm (21%) と大きい。一方、3 月 1 日の結果では、計測誤差が 1.1~8 cm (3~5%) とばらつきが少なく、かつ 5%以内の計測誤差となる結果を得られた。

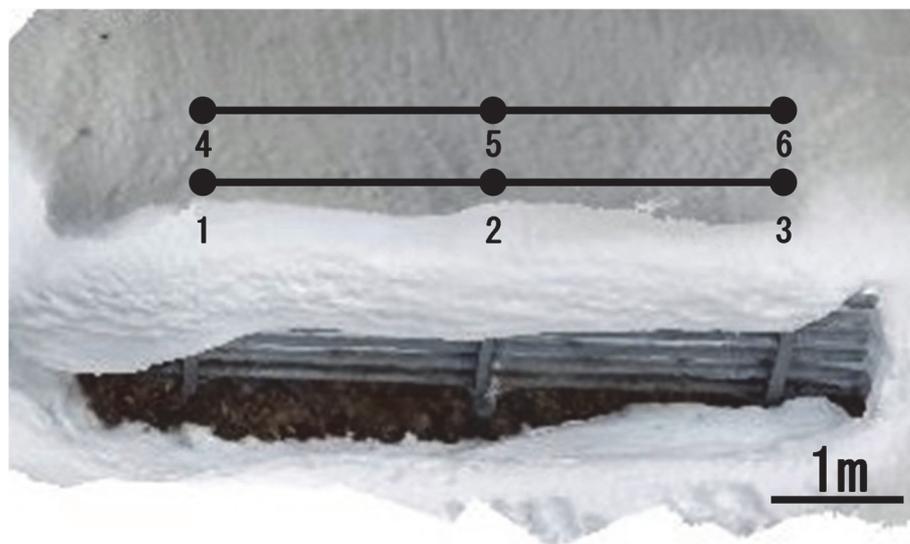


図 6.15 積雪深の推定位置.

表 6.6 積雪深の推定結果と誤差

日付	計測点	標高 (m)			積雪深 (cm)		誤差	
		地表面		積雪表面				
		UAV	UAV	Mobile	UAV	Mobile	cm	%
1/19	1	290.138	291.246	291.415	110.8	127.7	16.9	15
	2	290.019	291.097	291.325	107.8	130.6	22.8	21
	3	289.038	290.881	290.834	184.3	179.6	-4.7	3
	4	289.755	291.228	291.449	147.3	169.4	22.1	15
	5	289.613	291.094	291.027	148.1	141.4	-6.7	5
	6	289.434	290.885	290.937	145.1	150.3	5.2	4
3/1	1	290.138	291.545	291.524	140.7	138.6	-2.1	1
	2	290.019	291.392	291.370	137.3	135.1	-2.2	2
	3	289.038	291.145	291.182	210.7	214.4	3.7	2
	4	289.755	291.579	291.544	182.4	178.9	-3.5	2
	5	289.613	291.446	291.435	183.3	182.2	-1.1	1
	6	289.434	291.200	291.280	176.6	184.6	8	5

UAV : UAV-SfM測量による計測値, Mobile : モバイルスキャンによる計測値

また、雪庇の最大高さをスノープローブによる現地実測結果と比較することにより検証する。図 6.16 に UAV-SfM 計測およびモバイルスキャンにより作成し、重ね合わせた点群の断面図および積雪深（地表面から雪庇頂部までの高さ）を示す。図 6.16a は、1 月 19 日に実施した A 部の点群断面図であるが、図 6.16a に丸印で示したとおり、雪崩予防柵頂部の雪庇高さは概ね一致しているが、背後の雪面の高さが UAV-SfM 計測結果に比べて全体的に低く再現されている。雪庇の最大高さはモバイルスキャンによる計測値は 187 cm である。一方、スノープローブによる実測値は 180 cm、誤差は 7 cm（4%）だった。図 6.16b は、3 月 1 日に実施した A 部の点群断面図であるが、雪崩予防柵前後を含めて雪庇形状を精度良く再現できている。これは先述したように、計測方法に配慮することによって、点群作成精度を向上させることができたためと推察される。雪庇の最大高さはモバイルスキャンによる計測値は 202 cm、スノープローブによる実測値は 197 cm であり、誤差は 5 cm（3%）であった。これらの誤差の発生要因としては、点群処理ソフトウェア上での読み取り位置の誤差、地表面または雪面の局所的な凹凸の影響、観測者がスノープローブで計測する際に離れた位置からの目視による読み取りで発生する誤差、さらに、ばらつきの影響が考えられるが、いずれのケースにおいても、誤差は実用上許容される範囲と考えられる。図 6.16c は、3 月 1 日に実施した B 部の点群断面図であるが、雪崩予防柵前後を含めて雪庇形状を精度良く再現できているものの、雪庇頂部の断面は欠損する結果となった。

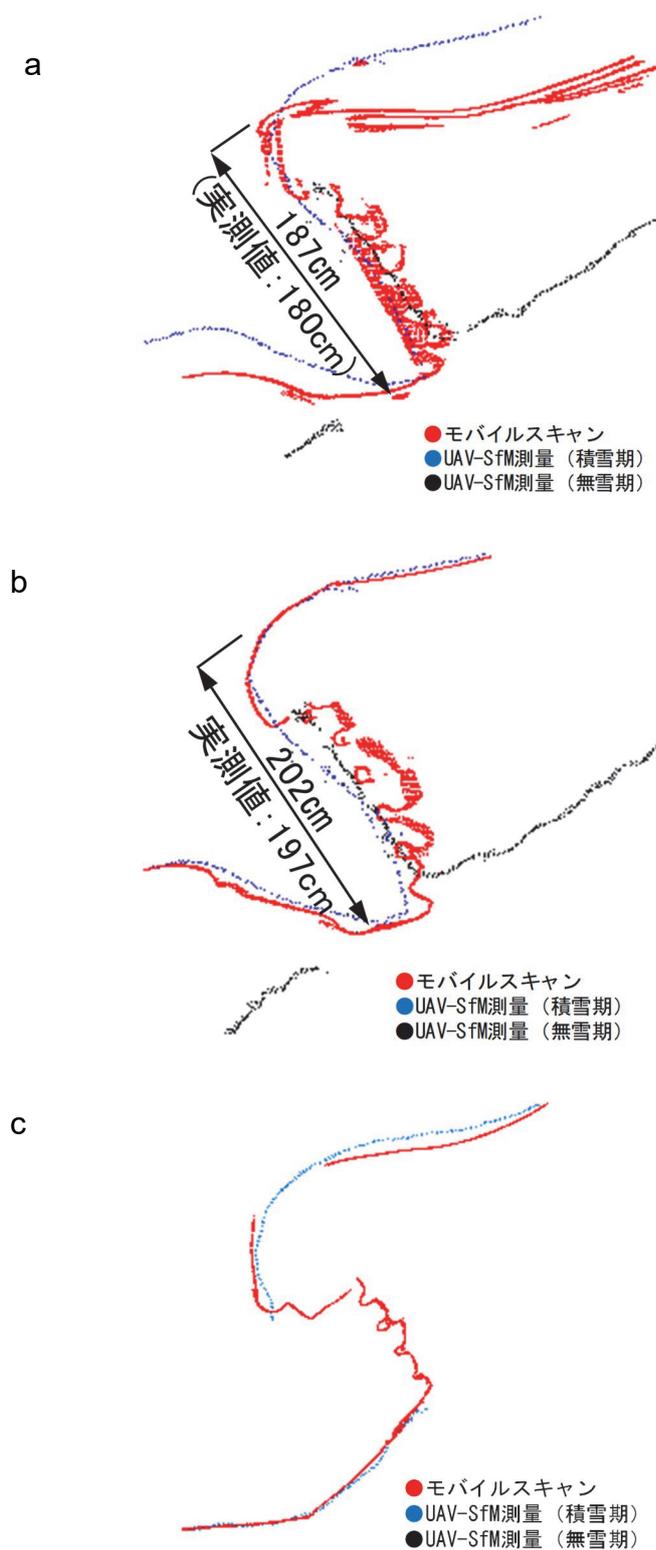


図 6.16 モバイルスキャンにより作成した点群事例。(a) A 部 (計測日: 1 月 19 日), (b) A 部 (計測日: 3 月 1 日), (c) B 部 (計測日: 3 月 1 日)。

図 6.17 に、UAV-SfM 計測とモバイルスキャン計測による積雪深推定値の比較を示す。1 月 19 日の推定値は、先述の通りばらつきが大きく、平均誤差は 11% と大きな値となっている。一方、3 月 1 日の推定値では、どの積雪深においてもばらつきが少なく、平均誤差は 2% であった。

したがって、モバイルスキャンによる雪面形状の計測は、モバイルスキャン計測機器の特性や仕様に対して適切な取り扱いをすることにより、道路管理に活用可能な精度を有することが分かった。

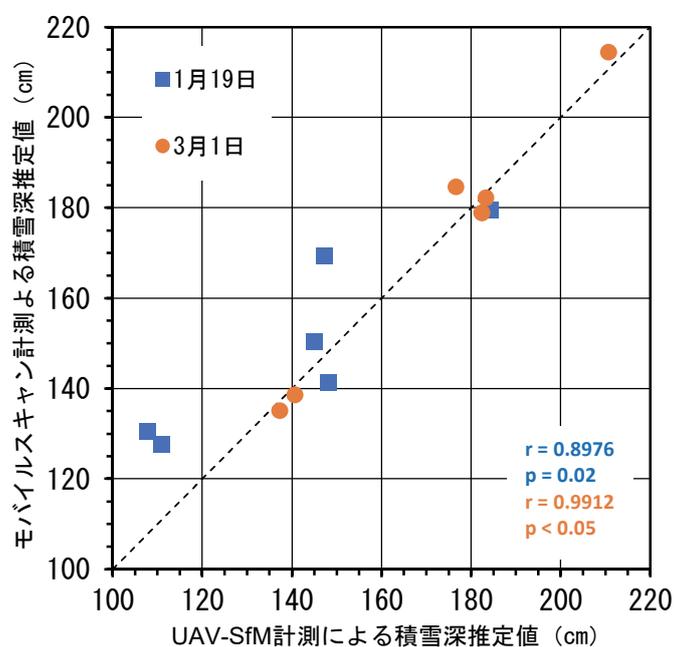


図 6.17 モバイルスキャン計測による積雪深の推定誤差.

6.8. まとめ

本章では、本研究で得た知見を基に、雪崩予防柵が設置された実際の道路法面 (W×L=160 m×40 m) を対象とした、UAV-SfM による雪面計測実験を行った。また、近年急速に普及が進んでいるモバイルスキャンについて、これまで事例のない冬期道路防災分野での適用性を検証した。

得られた知見を以下に述べる。

- 1) UAV-SfMによる点群の地上基準点での高さの最大誤差は4.9 cmであった
- 2) SfM解析に入力する地上基準点を道路付近の3点に限定したが、標高値の誤差はH04: -15 mm → -26 mm (Δ -11 mm) , H05: -14 mm → -22 mm (Δ -8 mm)となり、積雪深計測における実用上問題ないことを確認した。
- 3) モバイルスキャンによる雪面計測においても点群が欠けることなく UAV-SfMによる点群を補完できることを確認した。
- 4) 本計測で使用したモバイルスキャン端末では、雪面を計測する際、タブレットに内蔵された慣性計測ユニットによる自己位置推定の誤差が計測精度に及ぼす影響が大きいことを確認した。
- 5) モバイルスキャンを雪面計測に適用する際の条件として、モバイル端末の急な動作は避けること、レーザ照射距離の設定値(5 m)を越え無いことを前提に、ばらつきが少なくかつ誤差5%以内の計測が可能であることを確認した。

以上より、第3章～第5章で検討した UAV-SfMによる雪面計測法の撮影条件が適切であることを明らかにした。

さらに、雪崩予防柵背面のような起伏の大きい雪面にモバイルスキャン計測を適用した場合においても、モバイルスキャン計測機器の特性や仕様を理解し、適切に使用することで、ばらつきが少なく5%以内の誤差に収まる計測結果が得られたことから、モバイルスキャン計測を用いた雪面形状測定が、道路管理の実用上十分な精度を持つことを明らかにした。

なお、実用可能な精度を確保するために、地上基準点等の公共座標を付与し、座標値を用いて重ね合わせる必要があることから、積雪期に埋没せず、車両の通行に影響のない場所に、無雪期と積雪期に共通して使用可能なGCPを設置しておくことが望ましい。

第7章 結論

近年の気候の変化により，北海道内各地の積雪水量の増加や雪質変化が確認されている．過去10年にわたり，私は北海道内の国道の防災点検業務の管理技術者を担当し，道路法面での雪崩予防柵の雪庇の発達に伴う崩落雪や，雪崩予防柵をすり抜ける表層雪崩の発生に伴う通行止めや緊急点検を幾度も経験している．道路管理者は，災害を未然に防ぎ，安心・安全な道路交通を確保するため，法面除雪や雪踏みなどの維持管理を行っているが，予算の減少により，数多くある全ての道路法面に対応するのは困難な状況である．そのため，維持管理が必要な法面の抽出や適切な実施時期を見極めるために，法面等の積雪分布を適切に把握することが重要となる．しかし，従来の積雪観測は，現地で雪尺や測深棒を使った直接的手法で行われることが多く，広範囲な調査領域を安全に面的に把握することは困難であった．また，山岳地域などでは，航空レーザ測量のような間接的手法を用いられることもあるが，高コストで時間を要するため，迅速な対応が求められる道路管理の場面には適していないのが現状であった．

本研究では，低コストかつ特殊技術を必要としない UAV（無人航空機）および SfM/MVS（多視点ステレオ写真測量）を組み合わせた計測手法（UAV-SfM 計測）に着目し，積雪環境における実用化を検討した．この計測手法の雪面への適用においては，撮影条件と計測可否や計測精度の検証など未だ十分とはいえない状況であった．しかし，道路管理上，緊急を要する場合や広域的かつ概略的な把握が必要な場合が多く，またレーザ測量ほどの精度は必要としていないことなどから，維持管理への実用化が大いに期待されている．

本研究の結果，UAV-SfM による雪面計測は，UAV 撮影時の雪質や気象条件，UAV の測位方式や地上解像度，地上基準点の配置等を適切に設定することで，冬期維持管理に必要な計測精度を確保できることを明らかにした．これにより，維持管理の適正化が図られ，コスト縮減に寄与できる可能性があることを示した．

本研究によって得られた主な成果を以下に示す。

まず、UAV-SfM を雪面計測に適用する際、雪面の表面的特徴や気象条件が、SfM 解析による点群生成に与える影響について調査した。これにより、雪面を対象とした UAV 撮影の適切な条件を明確にした。この条件のもと、防雪柵の周囲に形成される吹きだまりや雪丘など、実用上の利用頻度が高い雪面形状を対象に計測実験を行い、気象条件、撮影機材、撮影高度および撮影時刻の変化が点群生成の可否とその精度に与える影響を検証した。

また、UAV-SfM による雪面計測を社会に実装する際の効率化を目的に、UAV の測位方式の違いや地上基準点設置数の違い、SfM 解析時に入力する地上基準点の数の違いが点群作成に与える影響を調査し、その精度を検証した。

基礎的研究の成果を基に、雪崩予防柵が設置された実際の道路法面を対象に UAV-SfM による雪面形状の計測実験を行い、上記の妥当性を検証した。さらに、UAV-SfM 計測を補完する計測手法としてモバイルスキャンの適用性についても検証した。冬期の道路防災分野におけるモバイルスキャンの適用事例はこれまでにない。

以下に、各章で得られた主な知見をまとめて、本論文の結論とする。

第1章では、本研究の背景について、わが国の積雪環境の厳しさと防雪対策工のおかれた現状から、冬期道路の維持管理の重要性を示し、UAV-SfM による雪面計測の適用に向けた研究目的を明確にした。UAV-SfM 計測は低コストで特殊技術を必要とせず、作業者が安全な場所にいながら撮影可能であり、本研究を実施することで、雪氷防災のための維持管理の効率化に寄与すること明確にした。

第2章では、本研究で取り扱う UAV の種類や定義、SfM 解析と組み合わせて計測分野に導入されてきた経緯を示した。本研究を進めるにあたり、まず広範囲の雪面形状を計測する従来手法に関する既往の研究として、「航空レーザ計測による雪面計測に関する研究」について整理した。次に、本研究の間接的な既往の研究として、「UAV-SfM による雪面以外の計測に関する研究」および「航空写真と SfM による雪面計測に関する研究」について整理した。そして本研究の直接的な既往研究として、「UAV-SfM による雪面計測に関する研究」および「UAV-SfM を補完する LiDAR 計測に関する研究」に大別した整理を行い、本研究の課題を以下の通り明確に示した。

【課題1】 雪面の反射特性と撮影条件が画像解析に与える影響

UAV-SfM 測定の活用事例は増えつつあるが、雪面の反射特性と撮影条件が計測可否および計測精度に与える影響について明らかになっていないのが現状である。

【課題2】 道路法面での積雪前後の点群データの高精度な重ね合わせ

道路法面を対象とした UAV-SfM 計測による雪面の点群データを高精度かつ効率的に重ね合わせる手法が明らかになっていないのが現状である。

第3章では、UAV を用いた SfM 解析手法による雪面計測の精度向上を目指し、雪面の表面状態や気象条件が点群生成に与える影響を評価した。実験の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 明るさの基準となる下向き短波放射は、天候と時間帯で変化するが、 $8\sim 883\text{ W/m}^2$ の範囲で点群が作成できているため、写真撮影が可能な時間帯であれば、直接影響しない。
- 2) 雪面反射率は雪質と関連するが、新雪時の様に 0.9 に近い値の場合、点群が作成できない場合がある。
- 3) 雪質は、降雪直後の新雪の場合、雪面反射率が極めて高く、雪面の凹凸もできにくいため、点群作成には適さない。
- 4) 太陽高度は、積雪表面の影のでき方に影響するが、点群作成に直接影響しない。
- 5) 天気は、直達日射が卓越する晴に比べ、散乱日射が卓越する曇の際に積雪表面に凹凸を明瞭にする影ができにくいことから、UAV 撮影に最も適さない。

結論として、以上より得られた知見をもとに、雪面の UAV-SfM 計測における最適な撮影条件として、時間帯は下向き短波放射が適度に高い日中、雪質は降雪直後の新雪以外（雪面反射率 <0.9 ）、天気は直達日射が卓越する晴（雲量 ≤ 8 ）であることを明らかにした。

第4章では、UAV-SfM による積雪期の3次元データ取得における撮影条件の最適化を目指し、撮影条件として、雪質、天候、撮影時刻、撮影高度、機材の影響を検証した。実験の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 天候が晴、雪質はざらめ雪の条件において、積雪環境特有の高い可視光反射率（ $0.651\sim 0.816$ ）であっても点群は作成可能。
- 2) 撮影時間帯が日中から日没前（下向き短波放射 $123\sim 611\text{ W/m}^2$ ）の時間帯で撮影図化できていることから、積雪表面に影ができていない状況下であれば、撮影時刻に関わらず点群が作成可能。

- 3) 撮影機材の選定および撮影高度の設定においては、計算される地上分解能が積雪表面で求める計測精度以下になるように設定すれば点群作成精度に大きな差がない。
- 4) 地上基準点を設置し補正することで、積雪深推定値の誤差は実測値に対する推定誤差の平均値は-4%、標準偏差 σ は2%程度に抑えられる。
- 5) 一定程度の誤差(-4%) 要因として、GNSS 測量上の誤差(一般的に3~4 cm 程度以下) および無雪期の地表面上の植生の影響(数 cm) と推察する。ちなみに実測値はこれらの影響は受けない。
- 6) 誤差のばらつきの要因として、SfM 解析では地表面または雪面の局所的な凹凸を再現できない場合があること、人がスノープローブで計測する位置とソフトウェア上で計測する位置を正確に合わせることが困難なことによる誤差の影響と考えられる。結論として、防雪設備周囲の雪面に対して UAV-SfM 計測を適用した場合、積雪深の計測において実用上問題ないことを明らかにした。

第5章では、積雪期の UAV-SfM 計測における地上基準点の設置作業の効率化を目指し、RTK-GNSS 搭載型 UAV と非搭載型 UAV の比較実験を行った。さらに、地上基準点数が計測精度に与える影響を検証した。実験の結果、以下の知見が得られた。

- 1) RTK 非搭載型 UAV で撮影し、地上基準点を6点使用し SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は、+22.0 cm (26%) で、計測点でのばらつきも大きい結果となったため、積雪期の計測に適さない。
- 2) RTK 搭載型 UAV で撮影し、地上基準点を6点使用し SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は、+3.8 cm (5%) であった。
- 3) RTK 搭載型 UAV で撮影し、地上基準点を4,2点と変化させ SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は+6.4 cm (8%) で、各ケースの計測誤差に大きな差はなかったことから、地上基準点数を2点まで減らした場合においても、積雪深計測における実用精度には問題ないことを確認した。

結論として、RTK 搭載型 UAV を用いた UAV-SfM 計測により雪面形状計測を行う場合、撮影時の地上画素寸法を1 cm 相当に設定し、地上基準点を2点以上配置することにより、積雪深計測における精度を確保でき、実用上問題ないことを示した。

このことから、積雪期の UAV-SfM 計測における地上基準点設置作業の効率化が図れることを明らかにした。

第6章では、基礎的研究で得た知見を基に、雪崩予防柵が設置された実際の道路法面を対象とした、UAV-SfMによる雪面計測実験を行った。また、UAV-SfM計測を基本とし、点群が欠損する防雪設備周囲の雪面形状計測へのモバイルスキャンの適用可能性について、点群生成の可否とその精度を併せて検証した。検証の結果、以下の知見が得られた。

- 1) UAV-SfMによる点群の地上基準点での高さの最大誤差は4.9 cmであった
- 2) SfM解析に入力する地上基準点を道路付近の3点に限定したが、標高値の最大誤差は-11 mmとなり、積雪深計測における実用上問題ないことを確認した。
- 3) モバイルスキャンによる雪面計測においても点群が欠けることなくUAV-SfMによる点群を補完できることを確認した。
- 4) 本計測で使用したモバイルスキャン端末では、雪面を計測する際、タブレットに内蔵された慣性計測ユニットによる自己位置推定の誤差が計測精度に及ぼす影響が大きいことを確認した。
- 5) モバイルスキャンを雪面計測に適用する際の条件として、モバイル端末の急な動作は避けること、レーザ照射距離の設定値(5 m)を越え無いことを前提に、ばらつきが少なくかつ誤差5%以内の計測が可能であることを確認した。

結論として、第3章～第5章で検討したUAV-SfMによる雪面計測法の撮影条件が適切であることを明らかにした。UAV-SfM計測とモバイルスキャンによる補完により、雪崩予防柵周辺の起伏の大きい雪面形状においても高精度に計測できることを示した。モバイルスキャンは適切な計測方法を守ること、道路管理に十分適用可能な精度を有することを示した。

第7章（本章）は本研究の総括である。得られた成果の要約を示す。

◆本研究で得られた知見

- 1) 最適な撮影条件として、時間帯は下向き短波放射適度に高い日中、雪質は降雪直後の新雪以外(雪面反射率 <0.9)、天候は雪面に陰影のできやすい直達日射が卓越する晴れ(雲量8以下)であることを示した。
- 2) 撮影機材の選定、撮影高度の設定では、地上分解能が雪面で求める計測精度(1 cm)程度以下になるよう設定すれば問題ないことを示した。
- 3) 撮影には RTK 搭載型 UAV を使用することを前提に、撮影時の地上画素寸法を 1 cm 相当に設定し、道路際等に地上基準点を2点以上配置すれば、積雪深計測おける精度を確保できることを示した。
- 4) モバイルスキャンは、撮影時に適切な取り扱いを前提に、ばらつきが少なく、計測誤差は最大5%が得られ、UAV-SfM 計測を補完できることを示した。

◆結論

UAV-SfM 計測による雪面計測法は、UAV 撮影時の雪質や気象条件、使用する UAV の測位方式や地上解像度の設定、地上基準点の最適な配置を行うことにより、UAV が有する機動性に加え、冬期維持管理に必要な計測精度を確保できること明らかにした。

このことから、本研究の成果は、雪氷防災における調査時の安全性の確保、維持管理の適正化、さらにメンテナンスコスト低減等、多くの面で貢献できることを示した。

UAV-SfM を道路法面等の雪面計測に適用する際の条件

UAV 撮影時の雪質および気象条件

- 1) 時間帯は下向き短波放射適度に高い日中であること
- 2) 雪質は降雪直後の新雪以外(雪面反射率 <0.9)である
- 3) 天候は雪面に陰影のできやすい直達日射が卓越する晴れ(雲量 ≤ 8)であること

UAV の撮影条件

- 1) RTK 搭載型 UAV を用いること
- 2) 地上画素寸法を 1 cm 相当で撮影すること
- 3) 地上基準点を 2 点以上設置し, SfM 解析で使用する

UAV-SfM 計測の補完としてモバイルスキャンを使用する際の条件

- 1) 急激な動作を避け, モバイル端末を対象物との間隔を一定に保つ
- 2) 使用するモバイル端末のレーザー照射距離 (5 m) を超えないこと

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法，国土交通省，1956.
- 2) 国土交通省国土政策局，総務省自治行政局，農林水産省農村振興局：豪雪地帯対策特別措置法，国土交通省，総務省，農林水産省，1962.
- 3) 国土交通省北陸雪害対策技術センターウェブサイト：“雪国日本～世界有数の雪国ならではの知恵～”，国土交通省，2015，
www.hrr.mlit.go.jp/hokugi/yukinavi/pdf/archive/leaflet/t_02.pdf，（参照 2024-05-04）.
- 4) 国土交通省道路局：積雪寒冷特別地域道路交通確保五箇年計画，国土交通省，2013.
- 5) 白川龍生，亀田貴雄：北海道の道央・道東地域における 5 冬期の積雪特性と気象要素との関係-2014 年冬期から 2018 年冬期に実施した広域積雪調査-，雪氷 **81** (4)，pp.163-182，2019，doi.org/10.5331/seppyo.81.4_163.
- 6) 亀田貴雄，高橋修平：雪氷学，古今書院，pp.252-278，2017.
- 7) 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)，社団法人日本建設機械化協会，社団法人雪センター，pp.142-303，2005.
- 8) 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，p.2，1991.
- 9) 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，p.38，1991.
- 10) 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，pp.187-196，1991.
- 11) 小花和宏之，河島克久，松元高峰，伊豫部勉，大前宏和：小型 UAV を用いた積雪分布の 3 次元計測，雪氷，78(5)，pp. 317-328，2016，https://doi.org/10.5331/seppyo.78.5_317.
- 12) Nolan, M., Larsen, C. and Sturm, M.: Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry, *The Cryosphere*, **9**, pp.1445-1463, 2015, <https://doi.org/10.5194/tc-9-1445-2015>.
- 13) 国土交通省国土地理院：“航空レーザ測定の仕組み”，国土交通省，
https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html，（参照 2024-05-04）.
- 14) 一般財団法人日本建設情報総合センター：CIM 技術検討会平成 26 年度報告，一般財団法人日本建設情報総合センターCIM 技術検討会，p.23，2015.

- 15) 井上公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子: 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術, 防災科学研究所研究報告, **81**, pp. 61-98, 2014.
- 16) Yildiz, S., Akyurek, Z. and Binley, A.: Quantifying snow water equivalent using terrestrial ground penetrating radar and unmanned aerial vehicle photogrammetry, *Hydrological Processes*, **35** (5), pp.1-15, 2021, <https://doi.org/10.1002/hyp.14190>.
- 17) 早川裕弐, 小花和宏之, 齋藤仁, 内山庄一郎: SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学適応用, 地形, **37** (3), pp. 321-343, 2016.
- 18) 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), 国土交通省, 2016 (2017.3 改正).
- 19) 溝部公憲: 日本ドローン協会公式教科書 [第 2 版], 一般社団法人日本ドローン協会, pp.5-10, 2021.
- 20) 国土交通省ウェブサイト: “飛行ルール (航空法第 11 章) と対象となる機体”, 国土交通省, 2015, www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000040.html, (参照 2024-05-04).
- 21) 内山庄一郎: 新版必携ドローン活用ガイド-災害対応実践編-, 東京法令出版, p.150, 2018.
- 22) ジオメトリストの会: 点群データの取得と処理, 公益社団法人日本測量協会, p.22, 2022.
- 23) 小林容子, 本間信一, 松田宏: 航空レーザ測量を用いた最近の雪崩危険度評価技術, 雪氷 **76** (6), pp.441-450, 2014, doi.org/10.5331/seppyo.76.6_441.
- 24) 内山庄一郎, 上石勲: 平成 26 年 2 月豪雪での山梨県早川町における SfM による雪崩発生状況解析, 寒地技術シンポジウム講演論文集, **30**, pp.43-46, 2014.
- 25) 西原照雅, 谷瀬敦: 2 カ年の航空レーザ測量結果を用いた山間部における積雪分布と地形の関係に関する研究, 北海道の雪氷, **35**, pp.131-134, 2016.
- 26) 小花和宏之, 早川裕弐, ゴメスクリストファー: UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング, 地形, **35**, pp.283-294, 2014.
- 27) 小花和宏之, 早川裕弐, 齋藤仁, ゴメスクリストファー: UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較, 写真測量とリモートセンシング, **53**, pp.67-74, 2014.
- 28) 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, 防災科学研究所研究報告, **81**, pp.37-60, 2014.

- 29) 石田大輔, 服部聡子, 織田和夫, 近藤弘嗣, 長山真一, 重高浩一: UAV を用いた 3 次元出来形計測と精度検証, *先端測量技術*, **108**, pp.62-69, 2016.
- 30) James, M. and Robson, S.: Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks, *Earth Surf. Process. Landforms*, **39**, pp.1413-1420, 2014, doi.org/10.1002/esp.3609.
- 31) Mizinski, B. and Niedzielski, T.: Fully-automated estimation of snow depth in near real time with the use of unmanned aerial vehicles without utilizing ground control points, *Cold Regions Science and Technology*, **138**, pp.63-72, 2017, doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.03.006.
- 32) 内山庄一郎, 鈴木比奈子, 上石勲, 中村一樹: 雪崩災害調査への UAV-SfM の適用: 2017 年那須町雪崩災害の事例, *自然災害科学*, **37** (S05), pp. 119-135, 2018.
- 33) 千葉隆弘, Thomas Thiis, 高橋徹, 苔米地司: デジタル画像を用いた写真測量による屋根上積雪深の測定精度について, *北海道科学大学研究紀要*, **40**, pp. 35-43, 2016.
- 34) Hawley, R. and Millstein, J.: Quantifying snow drift on Arctic structures: A case study at Summit, Greenland, using UAV-based structure-from-motion photogrammetry, *Cold Regions Science and Technology*, **157**, pp.163-170, 2019, doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.007
- 35) Harder, P., Pomeroy, J. and Helgason, W.: Improving sub-canopy snow depth mapping with unmanned aerial vehicles: lidar versus structure-from-motion techniques, *The Cryosphere*, **14**, pp.1919-1935, 2020, doi.org/10.5194/tc-14-1919-2020.
- 36) Westoby, M., Dunning, S., Woodward, J. Hein, A., Marrero, S., Winter, K. and Sugden, D.: Instruments and Methods Sedimentological characterization of Antarctic moraines using UAVs and Structure-from-Motion photogrammetry, *Journal of Glaciology*, **61**(230), pp.1088-1102, 2015.
- 37) King, F., Kelly, R. and Fletcher, C.: Evaluation of LiDAR-Derived Snow Depth Estimates From the iPhone 12 Pro. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **19**, 2022, DOI: 10.1109/LGRS.2022.3166665.
- 38) 小花和宏之, 坂上清一, 八木隆徳: 積雪深計測における RTK-UAV の有効性, *地形*, **41** (1), pp. 15-26, 2020, doi.org/10.24762/jnds.37.S05_119.

- 39) 小林裕之, 高岸且, 森川英治, 細野賢一, 江口輝, 小島光平: RTK 機能搭載 UAV と GNSS 移動基地局の組み合わせによる写真測量の精度検証, 森林計画誌, **55**(1), pp.23-29, 2021.
- 40) 小花和宏之, 坂上清一, 八木隆徳: RTK-UAV を用いた地形計測の測位性能および省力効果, 地形, **40** (2), pp. 125-134, 2019.
- 41) 木村健一, 木内俊明: 建築士技術全書 2 環境工学, p.10, 彰国社, 1952.
- 42) 小倉義光: 一般気象学 (第2版補訂版), p.114, 東京大学出版会, 2020.
- 43) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳: UAV-SfM 測量による防雪設備周囲の雪面形状計測法, 土木学会論文集, **79** (9), ID:22-00139, pp.1 - 11, 2023, doi.org/10.2208/jscej.22-00139.
- 44) 公益社団法人日本雪氷学会: 積雪観測ガイドブック, 株式会社朝倉書店, pp.97-105, 2010.
- 45) Fey, C., Schattan, P., Helfricht, K. and Schöber, J.: A compilation of Multitemporal TLS Snow Depth Distribution Maps at the Weisssee Snow Research Site(Kaunertal, Austria), *Water Resources Research*, **55**, pp.5154-5164, 2019, doi.org/10.1029/2019WR024788.
- 46) 山田嵩, 西原照雅, 村上泰啓: 地上レーザー測量および UAV 写真測量による積雪分布の計測, 北海道開発技術研究発表会論文, **64**, pp.280-285, 2020.
- 47) 国土交通省: 3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案), 国土交通省, pp.14-32-14-83, 2023.
- 48) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳: 積雪期の UAV-SfM 測量における地上基準点設置作業の効率化に関する研究, 土木学会論文集, **80** (22), ID:23-22005, pp.1-10, 2024, doi.org/10.2208/jscej.23-22005.

研究業績

1. 学術論文（学位論文関係）

- 1) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳 : UAV-SfM 測量による防雪設備周囲の雪面形状計測法, 土木学会論文集, **79** (9), 22-00139, pp.1 - 11, 2023, doi.org/10.2208/jscej.22-00139.
- 2) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳 : 積雪期の UAV-SfM 測量における地上基準点設置作業の効率化に関する研究, 土木学会論文集, **80** (22), 23-22005, pp.1-10, 2024, doi.org/10.2208/jscej.23-22005.

2. 研究報告（学位論文関係）

- 1) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 猿渡久人 : 小型 UAV および SfM を用いた雪面粗さの現場測定, 雪氷研究大会講演要旨集 (2021・千葉-オンライン) 2021.9.13-9.16.
- 2) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳, 猿渡久人 : UAV-SfM およびドローンレーザを用いた積雪表面計測に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 77 回, 2022.
- 3) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳, 猿渡久人 : UAV-SfM 測量における積雪期の地上基準点削減に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 78 回, 2023.
- 4) 保木和弘, 白川龍生, 高橋浩司, 長沼芳樹, 猿渡久人 : UAV-SfM を用いた積雪面計測における地上基準点設置数が観測結果に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 78 回, 2023.
- 5) 坂下ひなの, 白川龍生, 高橋浩司, 保木和弘 : モバイルスキャンによる積雪表面の計測に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 78 回, 2023.
- 6) 高橋浩司, 白川龍生, 長沼芳樹, 佐野至徳 : 積雪期の UAV-SfM 測量における地上基準点削減に関する研究, 土木情報学シンポジウム講演集, 第 48 回, 2023.
- 7) 坂下ひなの, 高橋浩司, 白川龍生, 保木和弘 : モバイルスキャンによる積雪表面の計測に関する研究, 2024 ふゆトピア・フェア in 北広島論文集, p.44, 2024.
- 8) 高橋浩司, 白川龍生, 坂下ひなの, 保木和弘 : LiDAR 機能搭載型タブレットによる雪面形状の計測に関する検討, 土木情報学シンポジウム講演集, 第 49 回, 2024.

3. 研究報告（その他）

- 1) 高橋浩司, 長沼芳樹, 本田秀樹, 保木和弘, 白川龍生: 小型 UAV による空撮画像を用いた積雪断面測定, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 72 回, 2017.
- 2) 高橋浩司, 長沼芳樹, 本田秀樹, 白川龍生: 小型 UAV による空撮画像を用いた積雪断面測定, 雪氷研究大会講演要旨集 (2017・十日町) 2017.9.24-9.27.
- 3) 高橋浩司, 佐野至徳, 長沼芳樹, 川瀬良司, 白川龍生: UAV および SfM を活用した雪面観測手法の研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 74 回, 2019.
- 4) 高橋浩司, 長沼芳樹, 白川龍生: 下向き短波放射と雪面反射率が空撮図化に及ぼす影響, 2020 ふゆトピア・フェア in とまこまい論文集, p.55, 2020.
- 5) 白川龍生, 尾関俊浩, 高橋浩司, 細川和彦, 大鐘卓哉: 2021-2022 年冬期の札幌都市圏における大雪について (その 2) - 積雪断面観測 (札幌都市圏と道央・道東・道北域との比較) -, 北海道の雪氷, **41**, pp.9-12, 2022.
- 6) 白川龍生, 尾関俊浩, 高橋浩司: 2021/22 大雪の記録 - 雪に強い都市を目指して -, 雪氷研究大会講演要旨集 (2022・札幌) 2022.10.1-10.5.
- 7) 尾関俊浩, 白川龍生, 丹治和博, 松岡直基, 金田安弘, 金村直俊, 小松麻美, 高橋浩司, 細川和彦, 大鐘卓哉, 中林宏典, 高橋翔, 小倉美紀, 森脇豊一, 伊藤俊明, 永田泰浩, 小西信義, 千葉隆弘, 堤拓哉, 大川戸貴浩, 萩原亨: 2021-2022 年冬期の札幌都市圏における大雪の調査報告, 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム (2022・札幌大雪), 2023.3.
- 8) 坂下ひなの, 白川龍生, 高橋浩司, 保木和弘: UAV-SfM および簡易地上レーザスキャナを用いた雪面計測に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 79 回, 2024.

謝辞

本論文は、国立大学法人 北海道国立大学機構 北見工業大学 工学部社会環境系准教授 白川龍生博士のご指導のもとにまとめられたものであります。白川先生には雪氷防災の難しさや、雪氷学と土木工学の見地から社会の持続的発展に貢献する重要性を教えていただき、本研究に結びつけることができました。また、浅学非才な私に対し、研究へのアプローチ方法、読み手にわかりやすい論文の書き方、研究の面白さを懇切丁寧かつ熱心にご指導いただきましたことに、深く感謝いたします。また、本研究の副指導教員をお引き受けいただきました工学部社会環境系教授 亀田貴雄博士、同准教授 舘山一孝博士、および本論文の審査をお引き受けいただきました同教授 吉川泰弘博士、工学部機械電気系准教授 高橋理音博士には、本論文のとりまとめに際して数多くの貴重なご意見とご指摘をいただきました。心より御礼申し上げます。

実験の遂行にあたり、株式会社ジオリサーチ取締役 北野智也氏、同社（現・株式会社アイバック）猿渡久人氏、富安株式会社札幌支店土木・マルエイ三英チーム 伊藤和彦氏、ならびに関係諸氏の皆様方には多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。また実験に際し、敷地の使用をお認めいただき、実験日の除雪作業にも快くご協力いただいた北海道ドローン協会の皆様、同じく敷地の使用をお認めいただいた合同会社北海道スカイビュー福山武治氏には、この場を借りてあらためて御礼申し上げます。

本研究に関して、雪氷合同ゼミでの発表会にて貴重なご意見をいただきました北見工業大学 雪氷防災研究室・雪氷科学研究室・氷海環境研究室の学生諸氏ならびに卒業生諸氏に心より感謝いたします。また、博士論文公開発表会にて貴重なご意見をいただきました北見工業大学 名誉教授 早川博博士ほか発表会にご参加いただいた皆さまには、心より感謝いたします。

著者の博士課程への入学を後押ししていただきました株式会社構研エンジニアリング 池田憲二社長、五十嵐隆浩専務をはじめとする役員の方々に心より御礼申し上げます。特に取締役 牛渡裕二博士には、同社に入社以来、土木技術者の先達として、また防災分野を研究する先駆者として、適切なご助言と数多くのご指導をいただきました。ここに深く感謝い

たします。そして佐光正和執行役員，小林一人部長をはじめとする防災施設部の方々には，業務多忙の中，著者に研究の時間を与えていただき多大なご迷惑をお掛けしましたことをお詫びするとともに，心より感謝いたします。また，技術管理部 長沼芳樹氏，佐野至徳氏，保木和弘氏，防災施設部 坂下ひなの氏，KE サービス株式会社 渡辺淳子氏には，実験の計画段階から極寒な実験場での試行錯誤に至るまで，多大なご協力とご助言をいただきました。心より感謝いたします。

なお，本研究の一部は，国土交通省新道路技術会議『道路政策の質の向上に資する技術研究開発（FS 研究・短期研究）』の助成を受けて実施したものです。ここに記して感謝の意を表します。

最後に私事ながら，著者の研究活動を陰ながら支え，応援してくれた妻と娘，そして母と義父母に深く感謝します。

本論文は，多くの方々のご支援とご協力により完成することができました。ここに深く感謝の意を表すとともに，皆様の今後のますますのご活躍とご健勝を心よりお祈り申し上げ，謝辞の結びとさせていただきます。

2024年9月 高橋 浩司