

斜面の積雪深計測手法に関する検討 —実験場における積雪法面測定—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム ○吉井 昭博
松下 拓樹
西村 敦史

近年は雪崩対策として事前通行止を実施するケースがある。その後の交通開放は現地において道路防災有識者等が斜面積雪の状況や過去の雪崩発生実績を参考に決定する機会が多い。斜面積雪の状況は現地での目視や安全な箇所からの形状計測により行われるが、不完全な形状計測となる場合もある。そこで離れた箇所から非接触で積雪状況を把握するための方法を考案し、実験場にて計測を行った結果、形状把握できる程度の精度が示された。

キーワード：防災、吹雪、自然災害、維持管理

1. はじめに

道路の雪崩対策として予防柵等の施設による対策と通行止め等の対策が行われている。また、近年では雪崩による被害が発生する前に現地の積雪状況や気象予報を参考に事前に通行止めを実施するケースもある。事前通行止めや通行止め後の交通開放については現地において道路防災有識者や道路管理者等が斜面積雪の状況や過去の雪崩発生実績を参考に決定することが多い。

この現状や背景から、筆者らは降雪が止んだ後に乾雪表層雪崩発生の可能性がいつ低くなるのかといった通行止め解除の判断に資する検討を行い、斜面積雪の安定性の時間変化を計算し降雪後、経時とともに斜面積雪が安定化して雪崩発生の可能性が低くなることを明らかにした¹⁾。ただし、安定計算に必要な積雪・降雪深は、風や吹き溜まり、斜面の状況によって異なるため、これらの降雪深や斜面積雪の時間変化を計測する技術の開発が求められる。本技術資料では、既存の非接触型計測手法により、石狩吹雪実験場の斜面における積雪深を計測し、これらの計測精度を比較検討した結果を報告する。

2. 調査概要

積雪深の現地計測は、石狩吹雪実験場にある切土法面工区(以下；1工区と記す)、盛土区域(以下；2工区と記す)と平地に設置した木柵箇所(以下；3工区と記す)において、新雪が20cm以上積もった後の5日間以内の曇りか晴れの日に計測した。今回の計測は、無雪期の2021年12月8日と2022年1月18日、2月15日、3月18日に実施した。

当箇所の積雪深の推移を図-1に示す。今回は各工区に法長3m×延長方向10mの計測範囲を設け、範囲中に3つの横断線を設置し計測対象とした(図-2)。計測手法は現

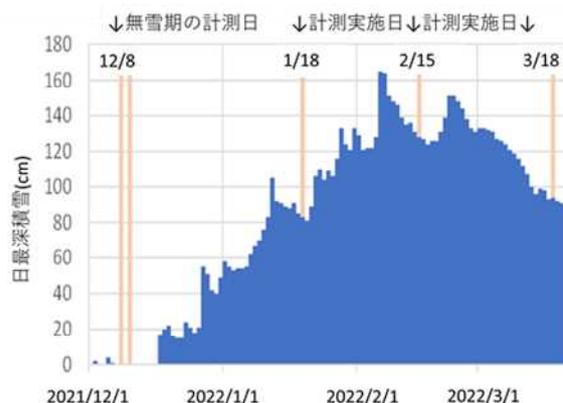


図-1 2021年シーズンの石狩における積雪深の推移

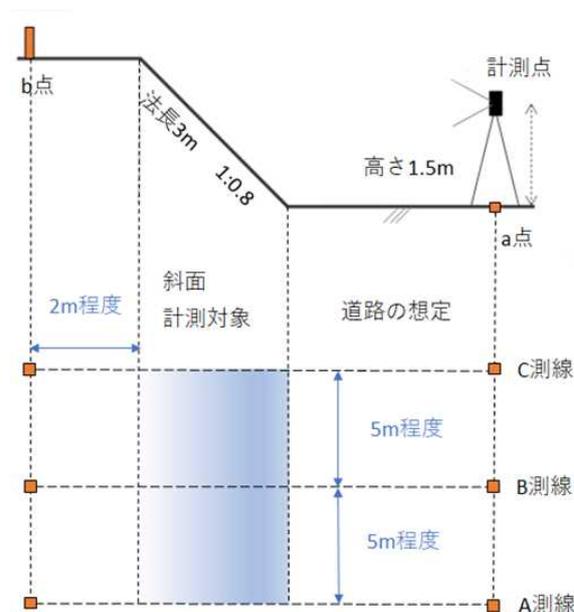


図-2 1工区における計測箇所の横断面図と平面図(例示)

在想定しうる5種類を検討した(表-1)。また、一部の画像解析には、Structure from Motion技術(以下；SfM技術)を使用した²³⁾。

また、本検討においては積雪深計測の精度向上を図る目的で解析後の計測精度が低い手法が発生した場合は、計測途中でも計測手法の変更を検討し再度の計測を実施している。

表-1 計測手法一覧

計測手法	解析処理	計測状況
人力横断計測	CADソフト等を用いたデータ処理	
ステレオカメラ計測	専用ツール(SfM)でデータ作成	
車載カメラ計測	UAV用SfMツールを用いてデータ作成	
UAV写真計測	UAV用SfMツールを用いてデータ作成	
レーザー計測	点群データ処理ソフトを利用したデータ処理	

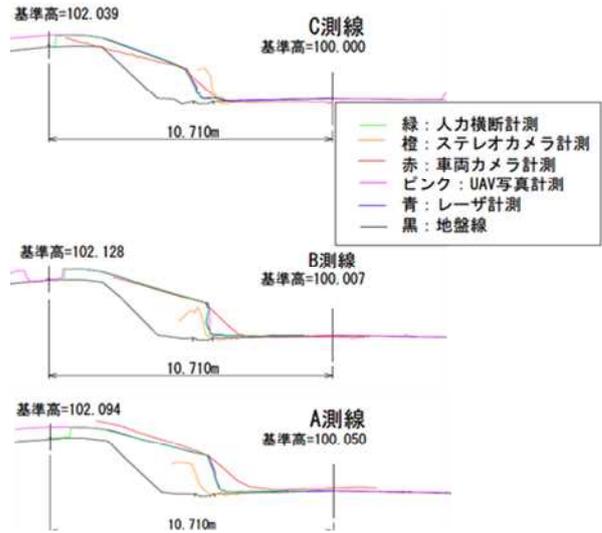


図-3 1工区の1月18日_法面上の積雪深の測定結果

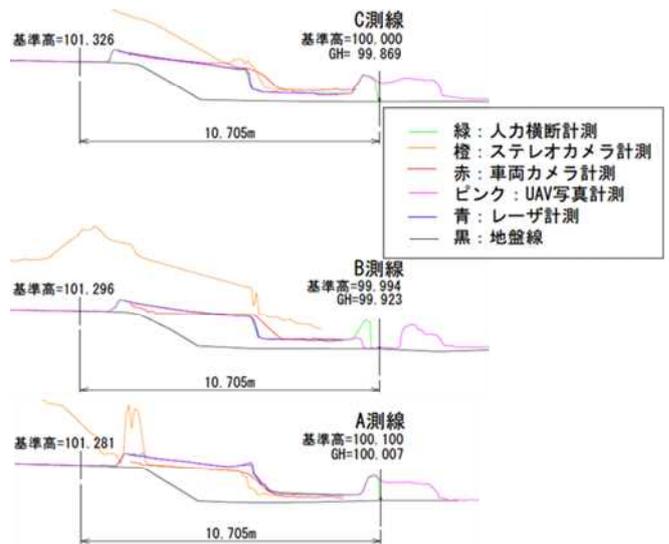


図-4 2工区の1月18日_法面上の積雪深の測定結果

3. 計測結果

(1) 1月18日の計測 (天候：曇り)

計測結果を図-3~5に示す。UAV写真計測とレーザー計測による積雪深は人力横断計測とほぼ同じであった。ステレオカメラ計測の1、2工区については、天候が曇りであったにもかかわらず、太陽光の反射により車道側除雪跡と法面の勾配変化点を認識できず、法面の積雪深自体も計測できなかったが、撮影向き異なる3工区では、法面の積雪深を計測できた。車載カメラ計測については、車道側除雪跡と法面の勾配変化点は認識し、一部法面を捉えることができたが法面の角度によっては計測できない所もあった。ステレオカメラ計測の解析ソフトはUAV写真計測や車載カメラ計測の解析ソフトとは違うものだったため、解析ソフトを変更して解析してみたが、太陽光反射による影響が大きく、法面の勾配変化点は認識できなかった。

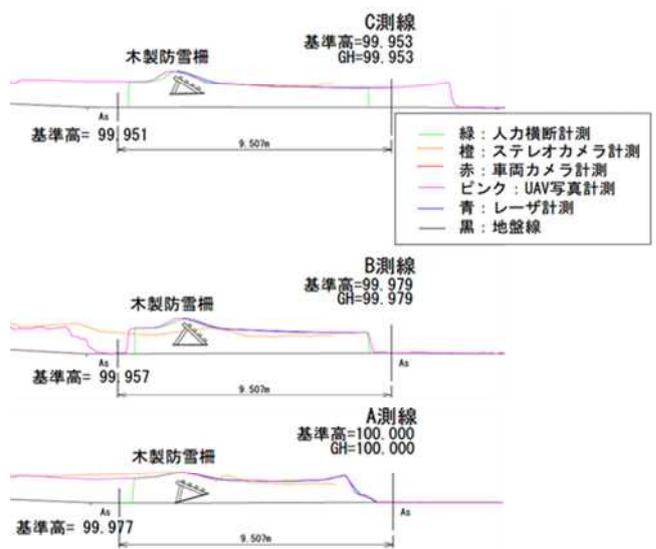


図-5 3工区の1月18日_法面上の積雪深の測定結果

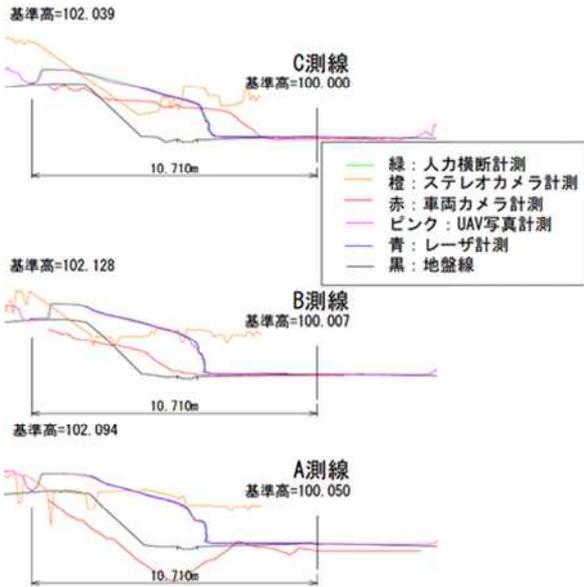


図-6 1工区の2月15日_法面上の積雪深の測定結果

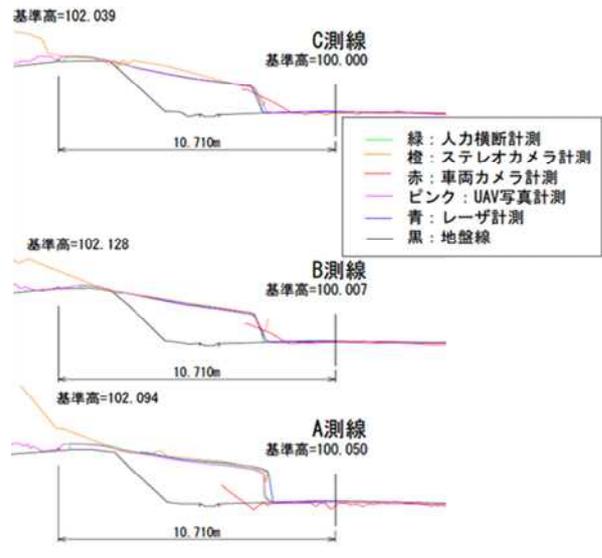


図-9 1工区の3月18日_法面上の積雪深の測定結果

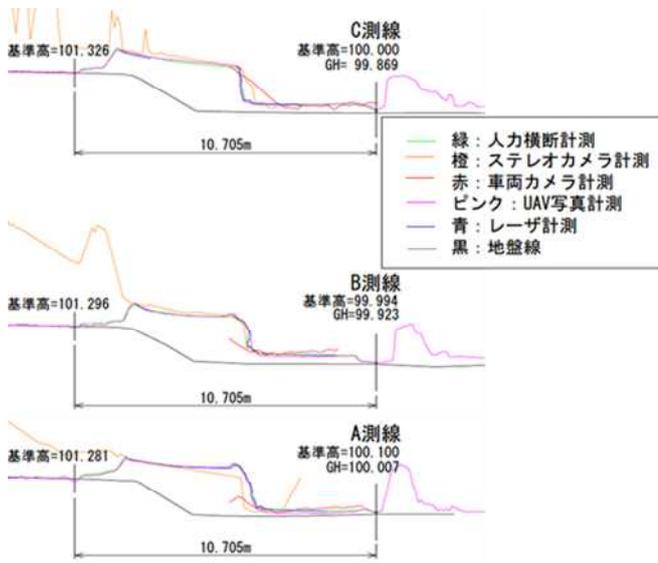


図-7 2工区の2月15日_法面上の積雪深の測定結果

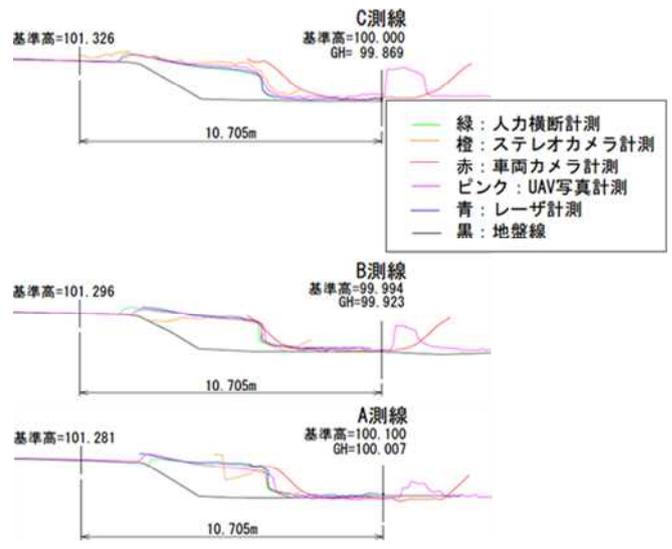


図-10 2工区の3月18日_法面上の積雪深の測定結果

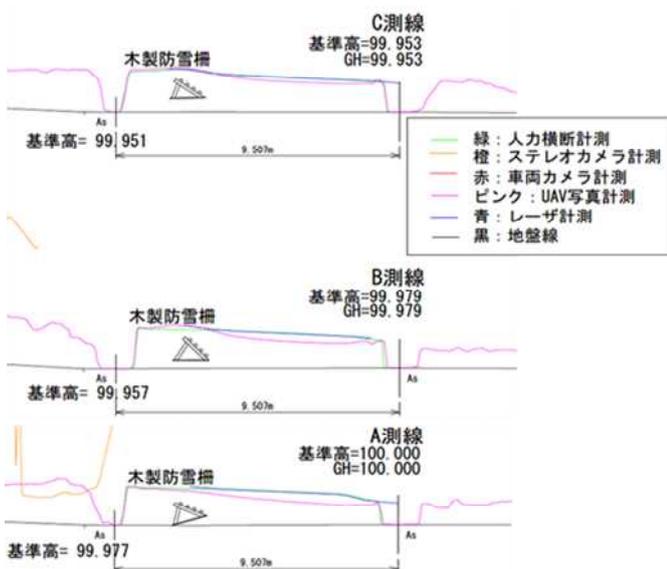


図-8 3工区の2月15日_法面上の積雪深の測定結果

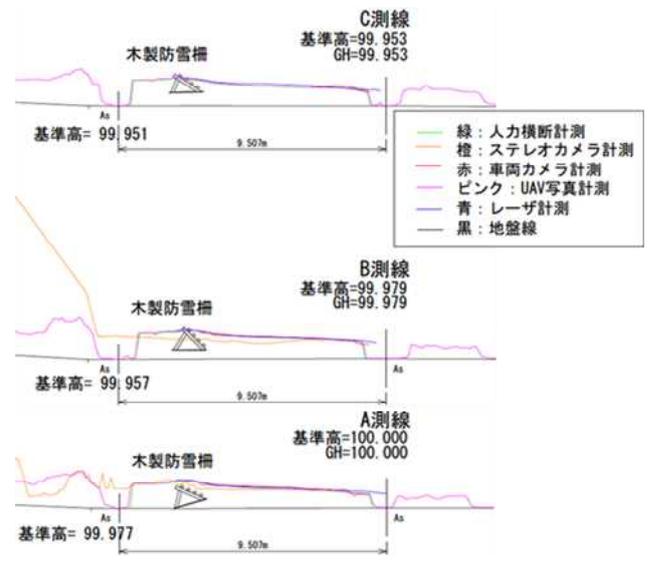


図-11 3工区の3月18日_法面上の積雪深の測定結果

(2) 2月15日の計測(天候:晴れ)

計測結果を図-6~8に示す。UAV写真計測とレーザー計測は人力横断計測とほぼ同じ横断線を計測することができたが、レーザー計測は法面途中の勾配変化点にて計測できなく、横断線が途切れている。ステレオカメラ計測や車載カメラ計測については、太陽光の反射により車道側除雪跡と法面の変化点を認識できず法面自体も計測できなかったため、太陽光の反射を勘案し、ステレオカメラレンズに写真-1に示す偏光フィルターを使用することとした。



写真-1 計測で使用した偏光フィルター(ケンコートキナー社製PRO ND8(W))

(3) 3月18日の計測 (天候:晴れ)

計測結果を図-9~11に示す。UAV写真計測とレーザー計測は人力横断計測とほぼ同じ横断線を計測することができた。ステレオカメラ計測については偏光フィルターの効果により法面部分が認識され、人力横断計測に近い積雪深を計測できたが、画像のひずみが大きくなる写真の上端部の積雪深横断線は大きく乖離している。写真の上部はステレオカメラより10m程度離れた箇所を計測していることからステレオカメラには撮影距離に限界があることを確認できた。車載カメラ計測については、レンズ形状の違いで偏光フィルターを付けることができなかったため、太陽光の反射による影響で法面の変化点を認識できず、法面上の積雪深自体も計測できなかった。

4. 考察

(1) 太陽光の反射

上記の調査の結果から、UAV写真計測とレーザー計測では太陽光の反射による影響を受けにくいこと、車載カメラ計測やステレオカメラ計測では太陽光の反射による影響を受けやすく、斜面の変化点を認識できない場合があることが分かった。太陽光の影響への対策として偏光フィルターを使用することで、車道路側の除雪跡と法面の変化点を認識できることが分かった。また、ステレオカメラ計測では、撮影距離が10m程度以上になると撮影画像のSfM解析に不都合が生じ、正確な計測結果が得られなくなる傾向があった。

(2) 精度検証

人力横断計測結果を真値として扱い、それに対する4種類の計測手法の誤差を、計測回・横断線ごとに算出した。ここで算出した誤差は、二乗平均平方誤差(以下;RMSEと記す)であり、式(1)で表される。RMSEは正の値を取り、0に近いほど誤差が小さいことを示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 y_i : 計測結果による地盤・雪面の高さ(n箇所)、 \hat{y}_i : 地盤・雪面の高さの真値 (n箇所:ここでは普通現地計測・作図結果とした)である。なお、 y_i と \hat{y}_i は同じ箇所を対象とした値である。RMSEの算出の流れとして、①データのサンプリング、②誤差の算出、③内挿による誤差の代表値算出を順に行った。真値と計測結果の線形の変化点を代表値としそれぞれを比較してその差を算出する。サンプリングは人力横断計測結果と比較するため、人力横断計測が実施された測点を対象として、計測結果による地盤・雪面の高さの線形内挿によるリサンプリングを行った(図-12)。ただし、過剰な内挿を防ぐため、対象とした測点から隣の測点までの間に計測結果が無い場合は、内挿を行わず、データを算出しなかった。

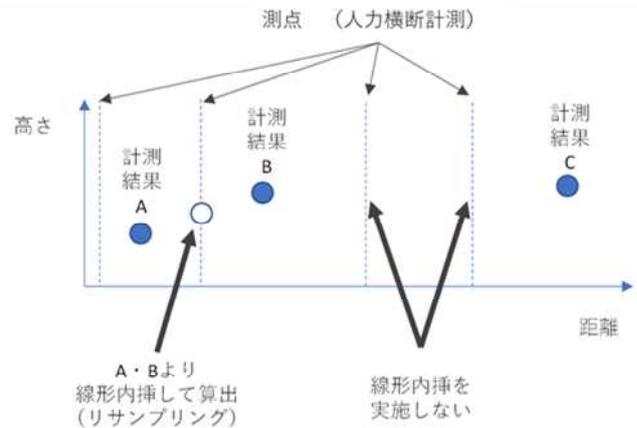


図-12 線形内挿によるリサンプリングのイメージ

次に、測点ごとに誤差(計測結果-真値)を算出した。ここで言う誤差とは、式(1)における $(y_i - \hat{y}_i)$ のことである。最後に各測点における誤差より、RMSEを算出した。測定日ごとの各測線におけるRMSEを図-13、14に示す。

計測手法毎の精度を比較するため、前項で説明した工区の値を合算して求めたRMSEの分布を図-15にて、整理した。分布を示す代表値として、RMSEの最大・最小値および四分位数を整理した。なお、代表値の抽出にあたり利用したデータ(RMSE)の数を、図-15にnとして標記した。計測手法ごとに、4回の計測×3箇所の工区×3横断線/工区の観測を実施したため、最大36個のR

MSEから代表値を統計した。ただし、ステレオカメラ計測や、車載カメラ計測では、nが36より小さかった。これは、計測を実施したもののデータの解析が困難であり地盤・雪面の形状を得ることができず、RMSEを算出できない場合があったためである。図-15より、レーザー計測やUAV写真計測のRMSEが比較的小さく、精度が高いことが分かった。次いで車載カメラ計測、ステレオカメラ計測の順にRMSEが小さい傾向であった。

なお、レーザー計測における最小値~75%タイル値はUAV写真計測の場合より小さいが、最大値ではUAV写真計測よりレーザー計測の値が大きく、統計値により計測手法間の関係が逆転していた。レーザー計測のRMSEが大きかった要因としては3工区3月18日の横断線Aが原因となっている(図-14)。3工区3月18日の横断線Aは、木柵が露出した状態で計測したため、木柵の間からレーザーが空隙を通して木柵部材の下側までもレーザー照射された。人力横断計測では木柵の下側は計測されていないため、レーザー計測結果のRMSEが3工区3月18日の横断線Aで大きくなったと考えられる。なお、1・2工区は法面を対象としており空隙のある構造物はなく、また3工区3月18日の横断線A以外の計測では積雪が木柵を覆った状態で空隙がなくなっており、RMSEの増加は見られなかった。



図-13 カメラを使った計測における誤差(RMSE)

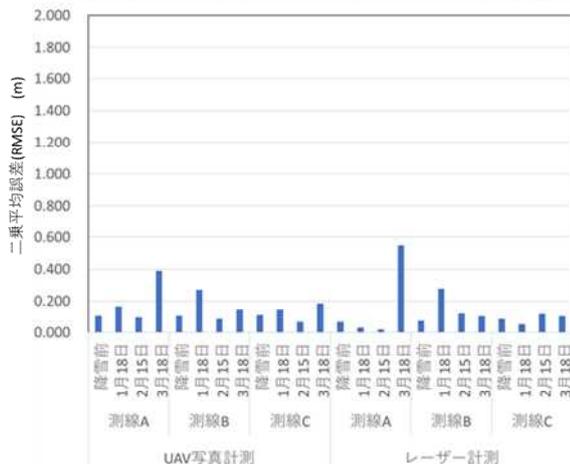
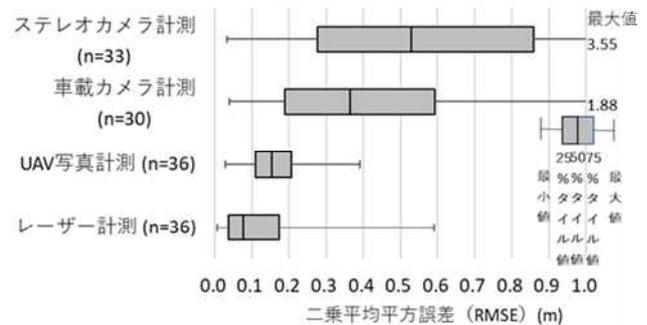


図-14 UAVレーザーを使った計測における誤差(RMSE)

また、計測手法によっては、センサーからの距離が遠い測点ほど、誤差が大きくなる可能性がある。そこで、センサーからの距離と計測精度の関係を把握するため、α点からの距離と誤差の関係を整理した。図-16は、α点からの距離帯ごとに分け、それぞれの距離帯ごとにRMSEを整理した結果である。なお、UAVによる計測では、センサー(UAVに搭載されたカメラ)が計測領域を移動(飛行)しながら計測しており、原理上RMSEに距離依存性が無いと考えられるため、参考として掲載した。図-16より、ステレオカメラ計測や車載カメラ計測では、距離が大きくなるほどRMSEが大きくなる傾向が見られた。一方で、UAV写真計測やレーザー計測ではRMSEに明瞭な距離依存性は見られなかった。



※2021年度に同時に計測した結果を合算している

図-15 計測手法ごとのRMSEの分布

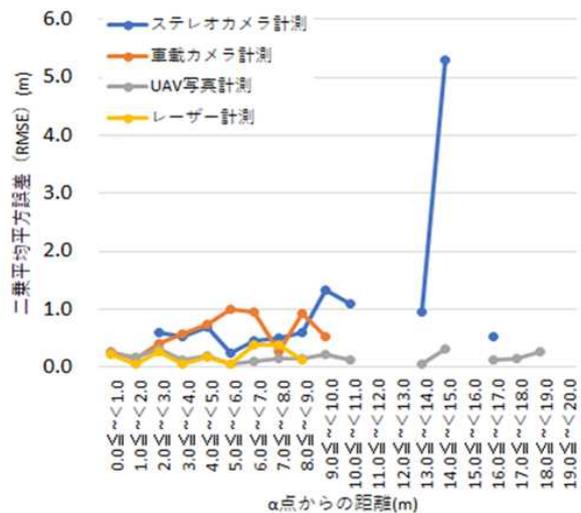


図-16 計測距離とRMSEの関係

(3) 精度以外の法面上の積雪深計測手法の比較

法面上の積雪深計測法は、道路維持管理において斜面から発生する雪崩の危険性を検知するための手法の一環として想定している。ここでは、本技術資料による計測手法を対象に、特徴を比較表として整理した(表-2)。比較表に整理した項目は、コストに関する項目(機器価格や作業人数、作業時間、講習等想定日数)、計測で得られるデータの特性(計測範囲、データの精度)である。

表-2 計測手法毎のイニシャルコストと作業時間、データ精度等の比較表

	使用機器	機器価格	作業人数、作業時間 (3工区1回あたり)		技術習得の時間	計測範囲	データ精度
			計測	データ整理			
人力横断計測	・TS ・測深棒	計170～520万円 TS：150～500万 測深棒：20万	2人、4時間	2人、5時間	長	線的（～500m程度先） ※見通すことができない場所は計測不可	高い
ステレオカメラ計測	・スリカメラ ・PC ・専用ソフト	計70万円 カメラソフト：50万 PC：20万	1人、0.5時間	1人、3時間	短	面的（～15m先程度） ※見通すことができない場所は計測不可	低い
車載カメラ計測	・自動車 ・ビデオ ・PC ・SfMソフト	計110万円 ※自動車除く カメラソフト：60万 PC：50万	1人、0.5時間	1人、12時間	長	面的（～15m先程度） ※見通すことができない場所は計測不可	中程度
UAV写真計測	・UAV ・PC ・SfMソフト	計150万円 UAV・ソフト：100万 PC：50万	2人、1.5時間	1人、30時間	長	面的（500m四方程度） ※UAVを目視可能な範囲として想定	高い
レーザー計測	・3Dレーザースキャナ ・PC ・点群処理ソフト	計1150万円 3Dレーザースキャナ・ソフト：1100万 PC：50万	2人、1.5時間	1人、24時間	長	面的（～500m程度先） ※見通すことができない場所は計測不可	高い

①人力横断計測

直接計測を行うためデータ取得の信頼性が高く、また測深棒で容易に計測できるが、他手法より計測に時間を要し、道路パトロール時に多数箇所を計測することは現実的ではない。また、傾斜が急な斜面では計測できない事例もあり、さらに計測者の転倒や転落、雪崩の誘発や雪崩への巻き込みなどのリスクが大きい。

②ステレオカメラ計測

安価な機材で、短時間で容易に計測できるものの、精度が低いデメリットがある。特に明るい光を反射した、表面テクスチャに乏しい雪面で精度が低下する傾向であり、対策として偏光フィルターを利用することが有効である。また、精度に距離依存性があり、実用的な計測範囲を検討することが望ましい。加えて、夜間や霧などで対象を写真撮影できない場合は計測できない。作成される点群データは、カメラ設置位置を基準とした相対座標ではあるが実際のスケールになっており、データ整理は比較的容易である。

③車載カメラ撮影

安価な機材で、短時間で容易に計測できるものの、精度が中程度である。ビデオカメラの向きや設置台数、ビデオカメラの設定を検討すること、映像の解像度やフレームレートを向上させることで、精度が向上する可能性がある。なお、夜間や霧などで対象を撮影できない場合は計測できない。データ整理にも課題がある。映像から抽出した多数の静止画像から、SfMにより地盤・雪面形状の点群データを作成したものの、点群の座標の修正（向きやスケールの変更）に手間を要した。UAVの場合と同様に、座標が既知の基準点を設定し、基準点を含めて映像を撮影して解析することで、正しい向き・スケールの点群座標をSfMから得ることができると推測される。適切な基準点の配置の検討や、基準点を設置した場合の精度検証が、今後の課題であると考えられる。また、SfMや点群の修正には、各種ツールの習得が必要な点も課題として挙げられる。

④UAV写真計測

比較的安価な機材で計測ができ、計測者が立ち入ることができない領域の写真撮影も容易であること、また精度が比較的高いという特徴がある。計測には、UAV飛行操作の技術のみならず、航空法など関連法規や規制の知識、また飛行計画を立案するためにはUAVによる写真測量の知識も必要となる。ただし、UAV飛行操作に関

しては、起伏などの障害物が少ない場所であれば専用ツールを用いることで、マニュアル操作がほぼ不要となる。なお、夜間や霧などで写真撮影できない場合や、強風・降水などUAVの飛行に不適な気象の場合には計測できない。データ整理にはSfMツールを利用するため、その習得が必要である。ただし、SfMを行うクラウドサービス（撮影した画像や、GCPの座標をアップロードすれば、SfMが実施される）も存在する。SfMにはある程度の時間を要するが、コンピューターの性能向上やクラウドサービスの利用で解析時間を短縮できる可能性がある。

⑤レーザー計測

レーザー計測器は精度が高く、その場で点群データを得られる利点があるものの、現状では機器が高価であり、また見通しができない場所は計測できない。計測は比較的短時間で行うことができる。ただし、降雪がレーザーを反射してしまうため、降雪時は計測が困難となる。また、データ整理には点群処理ツールを利用し、その習得が必要となる。

5. おわりに

本論文では、現在考えられる法面上の積雪深計測手法の計測精度、使用機器の価格や作業時間・計測難易度を整理・比較した。コストをかけると法面上の積雪深を精度よく計測できるが、比較的安価な調査方法では精度が低くなり解析時間も長かかった。しかし、比較的安価な計測手法である車載カメラ計測やステレオカメラ計測でも非接触かつ、ある程度の精度で計測できる可能性があると考えられた。長大な斜面を持つ道路維持現場にて本技術を適用するためには、更なる精度向上の検討等の課題がまだ多くあるが、土木DX政策でさらに発展していく技術も加味しつつ、より良い計測方法を検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 松下拓樹、吉井昭博、西村敦史 降雪終了後の雪崩発生判断手法について 寒地土木研究所月報 P20-28. 2022.6
- 2) 織田和夫 解説：Structure from Motion (SfM) 第1回 SfMの概要とバンドル調整 写真とリモートセンシング 55巻3号 P206-209.
- 3) 三輪寛、森田堅次 ドローン・SfM技術の土木分野での活用検討 電力土木 420号 P65-68.