

一般財団法人新潟県建設技術センター 研究助成事業（2022 年度）

除雪業務の DX 化促進に関する事業

令和 5 年 3 月 18 日

代表者 長岡技術科学大学 環境社会基盤系 准教授 高橋一義

1. 事業の概要

除雪作業従事者の高齢化や担い手不足を背景に、除雪作業の ICT 化が進められている。これに関しては、道路交通の直接確保につながる新雪除雪や拡幅除雪等を対象とした ICT 化が進められている。しかし、道路堆雪（積雪）の状況に則した除雪作業体制が構築できなければ、費用対効果の最大化は実現できない。道路堆雪に関する情報は、除雪パトロールにより取得されているが、その結果は、おもにパトロール路線の堆雪状況が集約された点情報である。このため、パトロール路線全体にわたる堆雪状況を把握するには至っていない。路線に沿って空間的に変化する堆雪状況も把握し、AI 技術を利用して道路堆雪状況の時間的・空間的な特性を把握できれば、除雪作業の ICT 化を基軸に道路堆雪状況に則した除雪体制の構築、すなわち除雪業務の DX 化が達成可能である。

本事業では、除雪業務の DX 化の先鞭として、地域全体の道路堆雪状況のビッグデータ化を推進すべく、3D 計測センサの LiDAR をベースとした除雪パトロールに導入可能な「低コストな堆雪状況記録装置」の開発と評価を実施する。

2. 堆雪状況記録装置の開発

2. 1 LiDAR と GNSS/INS

除雪パトロールカーを走行させながら周辺の堆雪状況を記録する形式は、土木分野で導入・活用されているモバイルマッピングシステムと同じである。本事業では、LiDAR センサに、車載 LiDAR のエントリーモデルである Velodyne 社製の VLP-16 を採用する。また、LiDAR 位置の測位と LiDAR の姿勢角の記録に BYNAV 社製の GNSS/INS のエントリーモデルである A1-3L を採用（評価ボード込みで購入時価格は\$902）、堆雪状況記録装置を構成する。これらの諸元を表 1^{1,2)}に示す。

VLP-16 のレーザ走査周期 10Hz に対して、A1-3L が出力する LiDAR の位置・姿勢データの間隔は 20Hz である。LiDAR 点群への地図情報付与を 1 レーザ走査単位で実施するケースでは、20Hz で出力される位置・姿勢データでも十分である。しかし、想定する車両の移動速度が時速 30～50km の範囲であること、走行時の LiDAR が動揺の大きさが不明であることから、A1-3L の出力結果の妥当性を相対的に評価する目的で、A1-3L よりも高時間分解能で LiDAR の位置・姿勢角を記録可能な GNSS/INS により並行して LiDAR の位置・姿勢角を記録する。

表 1 主要機器の諸元

a. VLP-16		b. A1-3L	
測距限界距離(m)	100	測位精度(RTK時)	
測距精度(cm)	3	水平	1cm + 1ppm
レーザ波長(nm)	905	鉛直	1.5cm + 1ppm
レーザ走査周期(Hz)	10	姿勢角精度 (RTK時)	
レーザ走査範囲・角度分解能		Roll, Pitch, Azimuth	0.03度, 0.03度, 0.11度
水平方向	360度・0.1度～0.4度	最大データレート(Hz)	20
垂直方向	30度・2度		

表 2 GNSS/INS の諸元

a. i3D pro+		b. Spatial Dual	
測位精度(RTK時)		測位精度(RTK時)	
水平	0.6cm + 0.5ppm	水平	0.8 cm
鉛直	1cm + 1ppm	鉛直	1.5 cm
姿勢角精度 (RTK時)		姿勢角精度 (RTK時)	
Roll,Pitch,Azimuth	0.02度,0.02度,0.15度	Roll,Pitch,Azimuth	0.1度,0.1度,0.1度
最大データレート(Hz)	100	最大データレート(Hz)	1000

本事業では、比較用の GNSS/INS として、セプテントリオ社製 i3D pro+ と Advanced Navigation 社製 Spatial Dual を用いる（表 2）。

2. 2 堆雪状況記録装置の概要

堆雪状況記録装置は、おもに堆雪状況を点群として記録するための LiDAR（車載式）、LiDAR の位置・姿勢を記録する GNSS/INS、データ通信機器（LAN と USB）と給電回路から構成される。機器類を防水性の高い筐体に格納し（図 1 a, 1b）、金属フレームに筐体、GNSS アンテナ、マグネット（車両に金属フレームを固定する）を取り付け、堆雪状況記録装置（以降、開発装置）とした（図 1c）。なお開発装置へは、車両のバッテリーあるいは車内に設置したポータブルバッテリーからの給電する形をとった（直流 12V）。また、開発装置にはデータロギング機能がないため、機器の操作やデータロギングは車内のノート PC で行った。

LiDAR で記録した点群に地図情報を付与するには、LiDAR のシステム時刻と GNSS/INS のシステム時刻（UTC 時刻）が同期する必要がある。開発装置では、A1-3L が出力する PPS(Pulse Per Second)信号と GPRMC センテンスを VLP-16 へ入力することで、VLP-16 のシステム時刻を UTC 時刻に同期させた。

2. 3 A1-3L が出力する位置・姿勢角データの評価

同一区間を走行して、A1-3L、i3D pro+、Spatial Dual にて LiDAR の位置と姿勢を記録し、それらの経時変化を相互比較した。A1-3L の記録時刻に対応する i3D pro+ と Spatial Dual の位置

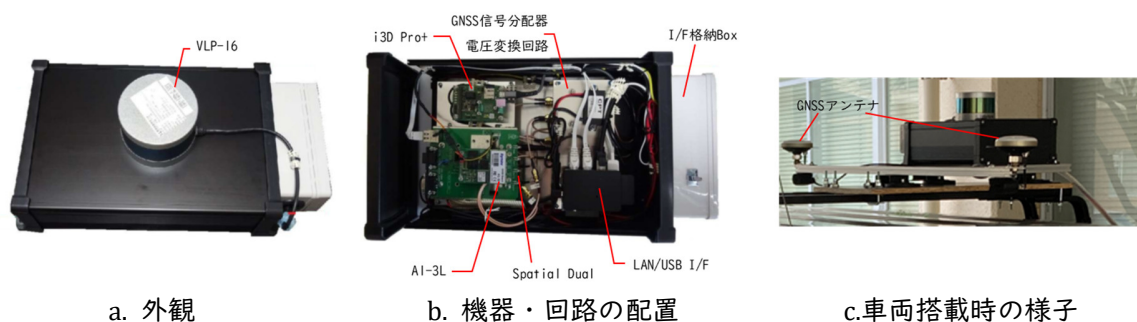


図 1 堆雪状況装置の外観と車両搭載時の様子

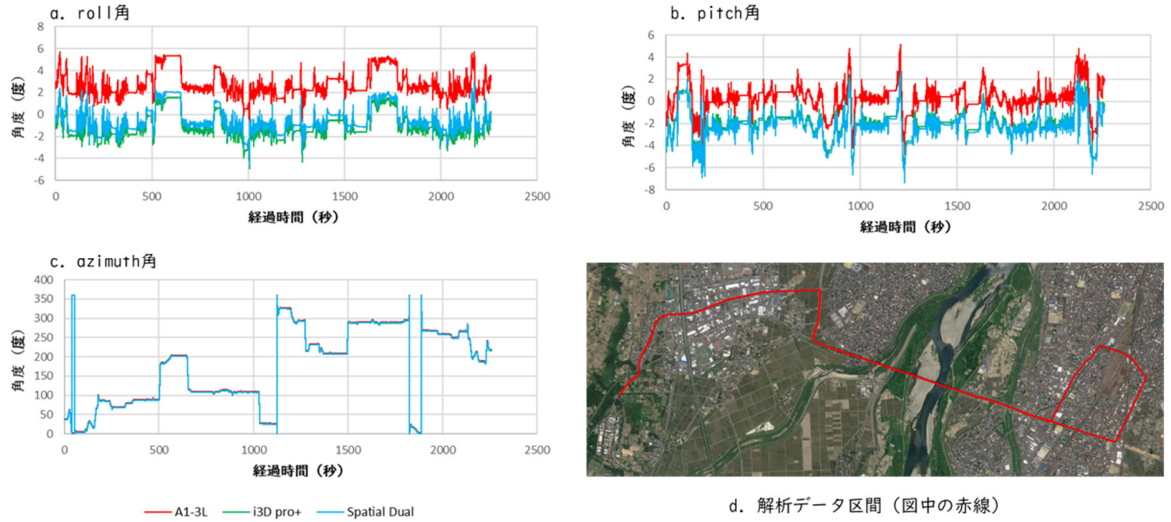


図2 GNSS/INS の位置・姿勢角の経時変化の例（2023 年 1 月 23 日のログデータ）。

と姿勢角を割り出し（直線内挿）、それぞれの値の変化を見比べた。その一例を図2に示す。

roll 角と pitch 角において、A1-3L の出力値が他の2つの GNSS/INS の出力値と乖離していることが分かる（azimuth 各は概ね一致）。そこで、姿勢角のカatalog精度が一番よい i3D pro+ を基準に A1-3L の出力値を調整することにした。2023 年 1 月 23 日のログデータから算出した調整量は、roll 角、pitch 角、azimuth 角それぞれ、-3.783 度、-2.317 度、-1.735 度となった。

別の日時のログデータにおいても、出力値の乖離状況と調整量を調べたところ、1 月 23 日のログデータから決定した調整量と同程度であった。最終的に、本事業では期間内に記録したすべてのログデータに対して、前述した値を調整量として採用することとした。なお調整後の姿勢角は次の式により計算される。

$$\Omega_c = \Omega_{obs} + \Delta\Omega \quad (1)$$

ここで、 Ω_c は補正後の姿勢角、 Ω_{obs} は A1-3L が出力した姿勢角、 $\Delta\Omega$ は調整量である。

3 LiDAR 点群への地図情報の付与

VLP-16 が 1 回の走査で記録する点の個数は、レーザ走査頻度が 10Hz、角度分解能が 0.2 度の場合、約 3 万点となる。本事業では、車両を移動させながらレーザ走査するため、走査の開始時点と終了時点では LiDAR の位置と姿勢が変化する。そこで、記録された点一つ一つについて、LiDAR の位置と姿勢を割り出し、次の式により地図情報を付与することとする。

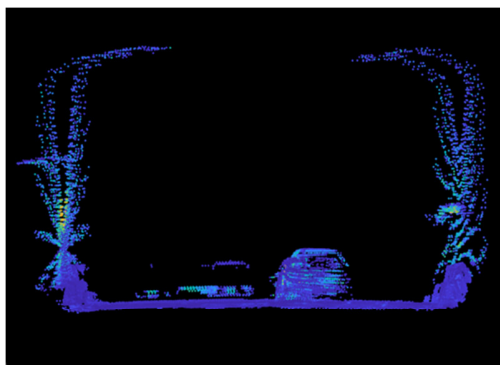
$$X_t^{global} = R_t^{ins} R^b X_t^{lidar} + X_t^{GNSS} \quad (2)$$

ここで、 X_t^{global} と X_t^{lidar} と X_t^{GNSS} はそれぞれ時刻 t に記録された点の地図座標(3 行 1 列)、LiDAR 固有座標系における点の座標、LiDAR 固有座標系の原点の地図座標である。また、 R_t^{ins} に時刻 t における LiDAR の姿勢角(roll, pitch, azimuth)から得られる回転行列(3 行 3 列)、 R^b は LiDAR と GNSS/INS の取り付け角誤差(boresight 角)を調整する回転行列である。

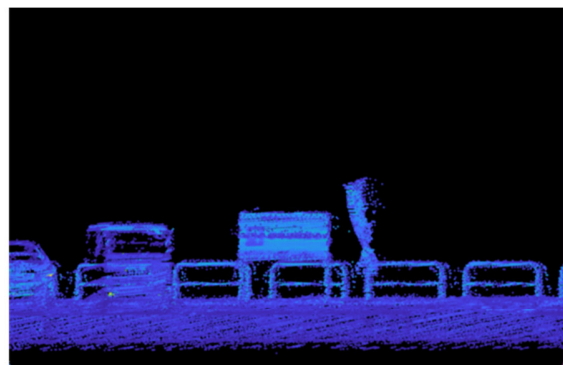
3. Ⅰ LiDAR と GNSS/INS の取り付け角誤差の校正

LiDAR と GNSS/INS は、それぞれの 3 軸が平行になるよう固定する必要がある。しかしこの作業を精密に実施することは容易でない。筐体に LiDAR と GNSS/INS を固定した状態では、式 2 の R^b は単位行列になる。そこで、 R^b の値を地物の形状が明瞭に再現されるまで試行錯誤的に変化させ、LiDAR と GNSS/INS の取り付け角誤差を決定した。

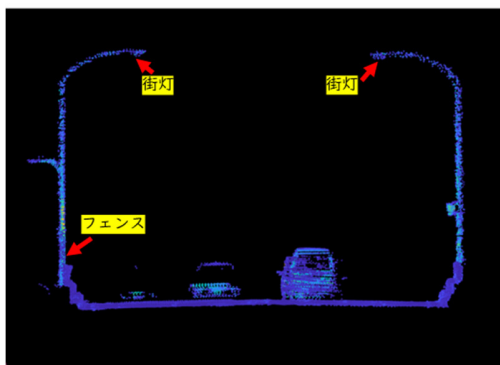
今回、2023 年 1 月 23 日に記録した点群データの内、棒状・線状の構造物が多く記録されている領域と平坦な路面が続く領域の点群を用いて、校正作業を実施した。校正前後の点群と点



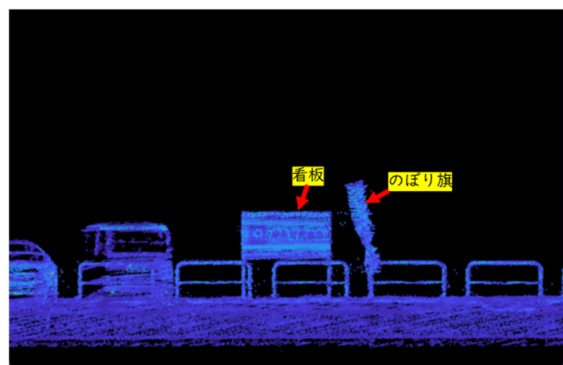
a. 校正前（領域-1）



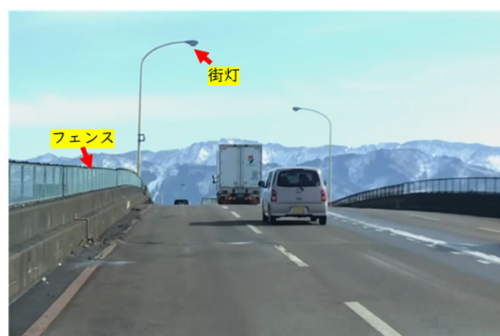
d. 校正前（領域-2）



b. 校正後（領域-1）



e. 校正後（領域-2）



c. 領域-1 の様子



f. 領域-2 の様子

図3 校正前後の点群と点群領域の様子(領域-1 と領域-2)

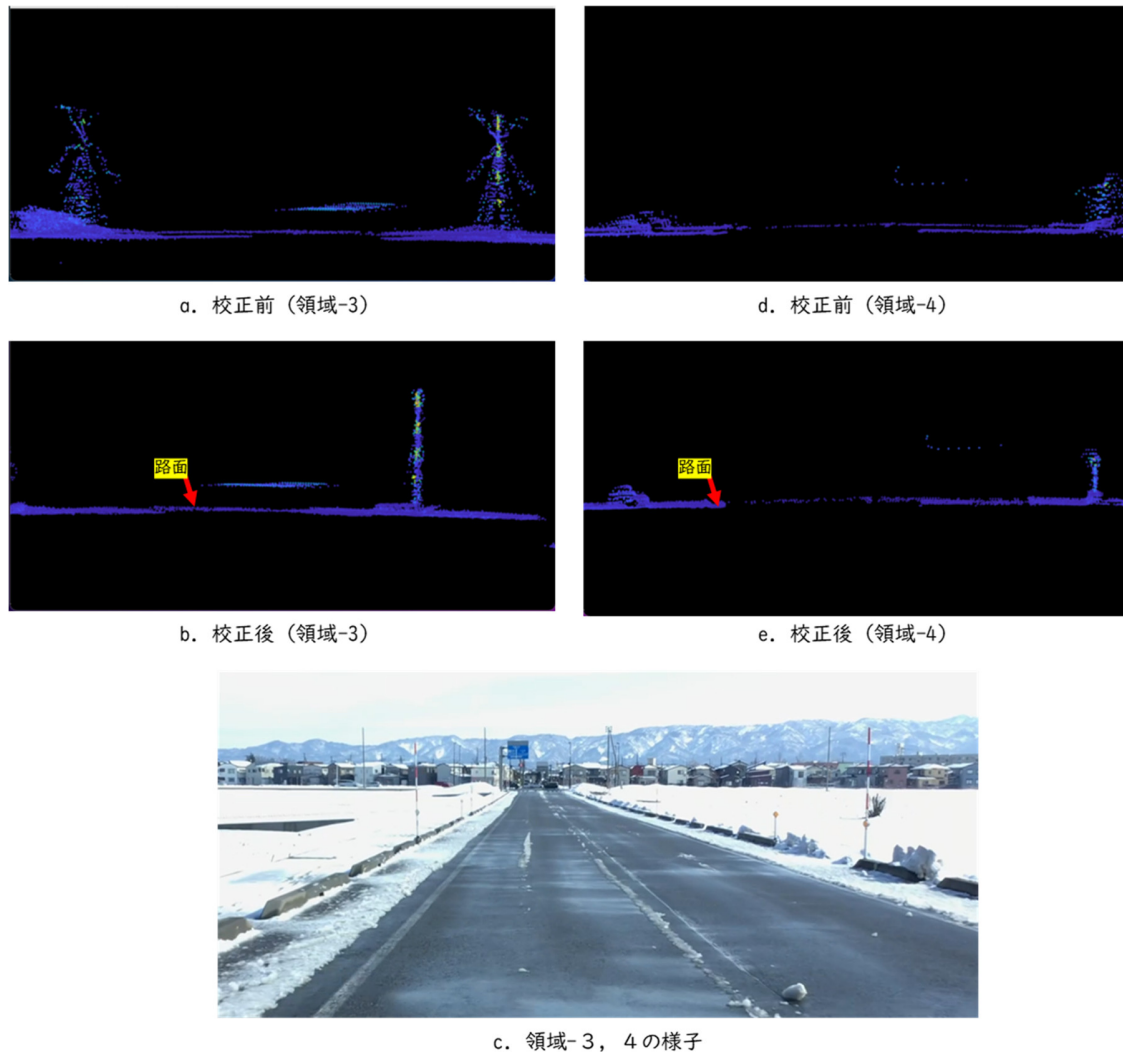


図4 校正前後の点群と点群領域の様子(領域-3 と領域-4)

群が記録された領域の様子を図3に示す。

棒状・線状の構造物を含む領域-1と領域-2（図3cと3f）にある街灯、フェンス、看板、のぼり旗が校正前点群では、その形状が不明瞭であることが分かる（図3aと図3d）。また、領域-3と領域-4では路面の位置が二重に見えている（図4aと図4d）。とくに車両進行方向に位置している街灯のポールが多重に現れ、街灯やポールの存在を一見して読み取れない状態である（図4aについても同じ）。これに比べて、車両進行方向と直交する位置にある看板やのぼり旗は形状がぼやけているものの、それらの存在は読み取れる状態である。ここから、開発装置のLiDARとGNSS/INSの取り付け角誤差の内、azimuth角（方位角）は、roll角とpitch角にくらべて大きな値をもつことが予想される。

街灯やポールなどの形状が明瞭に再現され、かつ2重に見える路面位置が1つに重なるよう、

表 3 LiDAR と GNSS/INS の取り付け角誤差の校正值（度）

roll	-0.092958
pitch	0.106091
azimuth	-0.878753

校正量を試行錯誤的に変動させ校正值を決定した（表 3）。図 3 と 4 の校正後の点群は、表 3 の校正值を用いて再計算して得た点群である。校正後点群では、街灯のポールが直線状に現れ、看板やのぼり旗の形状のより明瞭になり（図 3b と図 3e）。また 2 重に見えていた路面位置も概ね一つの直線に重なる状態である（図 4b と図 4e）。

4. 道路堆雪状況の記録と積雪深調査

開発装置で、2023 年 1 月 30 と 31 日、2 月 3 日に道路堆雪状況を記録した。また開発装置の性能を評価するため 1) 中日本航空株式会社製の簡易 MMS (N-Quick) ⁵⁾ による堆雪記録と、2) 雪尺による積雪調査を実施した。

4. 1 道路堆雪状況の記録

軽バンのルーフキャリアに開発装置を取り付け（図 5a）、走行しながら道路堆雪状況を記録した。N-Quick は開発装置とは異なり、車両後方のみをレーザ走査する。そこで、車両の最も後方に N-Quick を取り付けた（図 5b と 5c）。軽バン内では、計測領域の様子を記録するカメラ(USB 接続)をフロントガラスに取り付け、RTK 測位用の基準局データを受信するため、モバイルルータへ介して開発装置を制御・データロギング用 PC をインターネットへ接続した。データロギング用の PC の性能では、データロギングと並行して動画記録するスムーズに実行できなかった。そこで、動画記録用に別途 PC を用意・利用した（図 6）。

降雪時は、VLP-16 のレーザ走査面（車両前方方向）に着雪が起こり、車両周辺の地物を点群として記録できない状況が発生する。着雪によるデータ欠損を最小限に抑えるため、データロギング中の VLP-16 のレーザ走査状況を時折り PC 画面上で確認した（着雪時は、レーザ走査面の雪を手作業で取り除いた）。

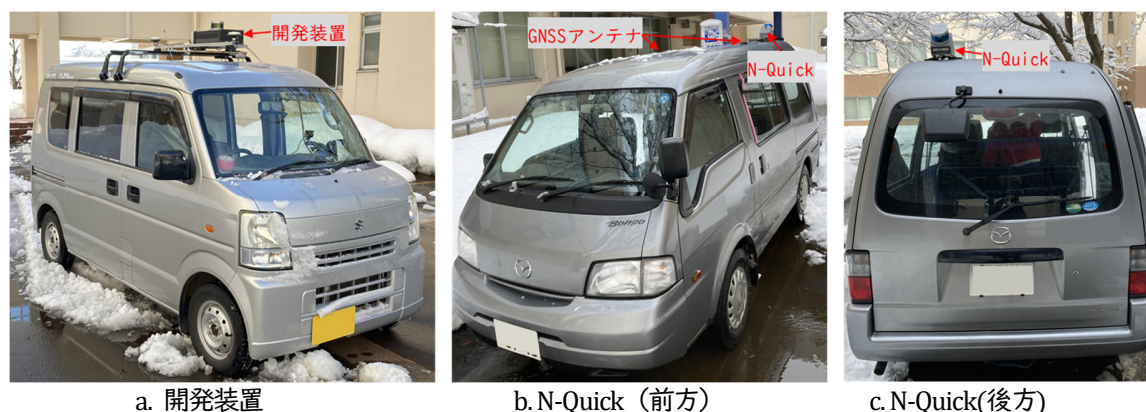


図 5 車両に取り付けた開発装置と N-Quick の様子



図6 データロギングの様子

4. 2 地図情報付き点群の生成

記録点群と A1-3L（GNSS/INS）が記録した LiDAR の位置・姿勢データを用いて、前述した方法により地図情報付き点群を生成した。点群を生成した範囲は、後述する積雪調査地点周辺（図7）である。生成した点群の例（図8）を見ると、電信柱など棒状の構造物や建物の形状が概ね再現されていることが分かる。路面と堆雪の反射強度の差が大きいので、道路路肩の堆雪だけでなく、路面の残雪も読み取れる（地点D）。また、軽バンの前方と後方の車両に対応している点群が空中に現れている（地点B,D,E）。とくに車両の密度が高い場合や片側2車線以上の区間で追い越し車線を走行している場合、反対車線の路肩などの堆雪状況を点群として記録できない可能性がある。このような場合、同一区間を往路と復路の2回に分けて点群を記録するなどの工夫が必要である。

4. 2 積雪深調査（堆雪深調査）

開発装置による堆雪深計測性能を評価する基準データを取得するため、点群記録と同期して雪尺（直尺）による積雪深（堆雪深）調査を複数地点で実施した（調査地点を図7に示す）。開発装置で計測し

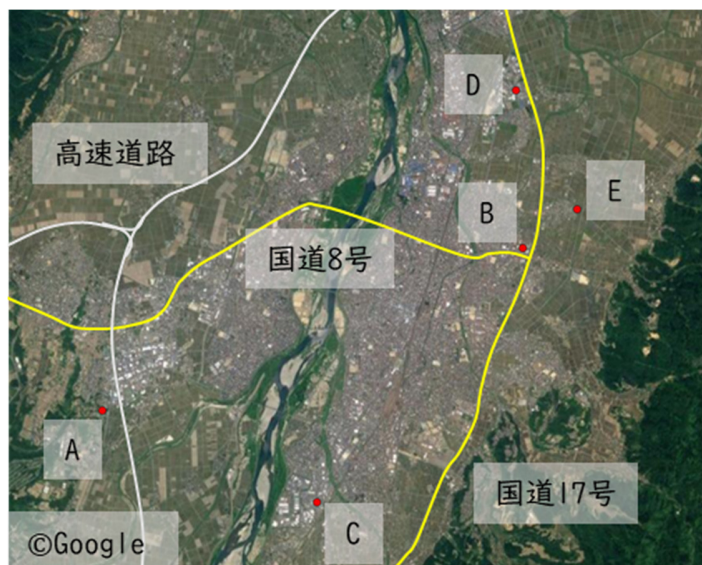


図7 積雪深調査地点

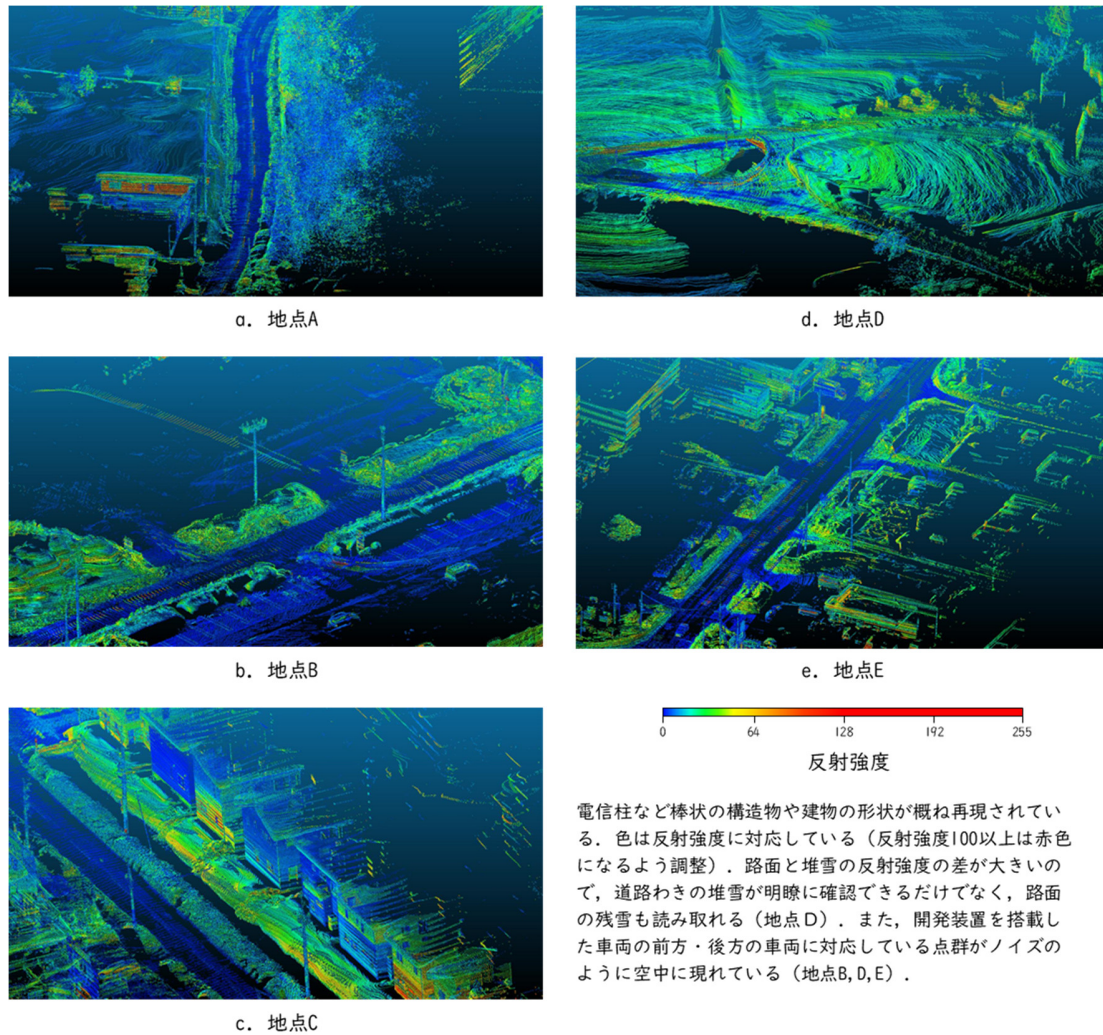


図8 地図情報付き点群の例

た堆雪深は、積雪深調査時に GNSS 測位した調査点の地盤高と積雪調査範囲（1m×0.5m の広さ）の点群の平均高さとの差分とした。また開発装置の比較対象として、N-Quick で記録した点群からも同様に堆雪深を計算した。

堆雪深の再現性は、式3に示す絶対平均誤差（MAE）により評価した。ここで、 N は調査堆雪深データ数、 D_i^{ruler} と D_i^{lidar} は、それぞれ各調査地点における雪尺で計測した堆雪深と開発装置（あるいはN-Quick）で計測した堆雪深である。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i^n |D_i^{ruler} - D_i^{lidar}| \quad (3)$$

MAE の値は、N-Quick で 5.3cm，開発装置で 6.5cm であった。筆者らが 2022 年に実施した雪尺と N-Quick による堆雪深調査における MAE は 5.2cm⁶⁾である。N-Quick による堆雪深の計測性能が概ね MAE

5cm とすると、開発装置の性能はこれよりも若干劣る程度である。このことから、購入価格が 10 万円台の安価な GNSS/INS を用いても、600 万円台の市販システムと同程度の誤差で堆雪状況を路線に沿って空間的に把握する装置を開発することが十分に可能といえる。

5. まとめ

本事業では、3D 計測センサの一つで低コスト化・高機能化が進展している車載 LiDAR（VLP-16）と低性能・安価な GNSS/INS（位置・姿勢計測センサ、A1-3L）から構成される「低コストな堆雪状況記録装置」の開発と評価を実施した。その結果、堆雪深計測において開発装置は、市販システムの N-Quick には及ばないものの、それに迫る性能をもつ可能性が示された。LiDAR で記録された点群に地図情報を付与する場合、LiDAR の位置・姿勢の精度が地図付与後の点群の位置精度を大きく左右する。A1-3L は、データ出力頻度が 20Hz と VLP-16 のレーザ走査頻度 10Hz に対して十分に高くないものの、堆雪深計測という用途に限れば、A1-3L あるいは A1-3L 相当の性能の GNSS/INS を用いても実用的な装置の開発が可能である。なお、今回の結果は、積雪深調査点におけるものであり、場所や時間が異なる状況でも同様の成果が得られるかは保証できない。これに関しては、今後、本事業で記録した膨大なログデータを用いて、場所や時間が異なる状況で記録した点群を解析し、堆雪状況の再現性が大きく損なわれていないかを詳細に解析する予定ある。

現時点では「低コストな堆雪状況記録装置」の実現可能性が示された段階である。一方、道路路肩の堆雪深計測に対する、道路管理の現場における要求性能は明らかでない。除雪業務の DX 化を進展させるには、除雪業務従事者・自治体へのヒアリングを通じて堆雪深計測に対する要求を明確にする作業と並行して、本事業の成果を発展させ、道路の堆雪情報を高い即時性をもって提供するシステムの構築を実現する必要がある。

謝辞

本事業を推進するにあたり、株式会社 長岡計器の竹内祐貴様、株式会社 スノーテック新潟の山倉祐也様、中日本航空株式会社の千田良道様、福田航希様、長岡技術科学大学 中村健様らに多大なるご支援・ご協力を頂きました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献・資料

- 1) Velodyne LiDAR PUCK,VLP-16 Datasheet, Velodyne LiDAR Inc, https://velodynelidar.com/wp-content/uploads/2019/12/63-9229_Rev-K_Puck-Datasheet_Web.pdf,2019
- 2) GNSS/INS Receiver A1 USER MANUAL (UG015), bynav, 2021.
- 3) AsteRx-i3 D Pro+ Datasheet, Septentrio,2021
- 4) SPATIAL DUAL Datasheet, Advanced Navigation,2020
- 5) 千田良道，國枝信吾，高野正範，猿渡辰也，須甲光，田中星矢，簡易 MMS の開発と実証実験結果の報告，第 43 回 測量調査技術発表会要旨集，4-5，2021
- 6) 中村健，千田良道，菅原和也，木歩士理来，高橋一義，簡易 MMS による道路路肩の積雪分布の記録と積雪深計測，第 38 回寒地技術シンポジウム，38-42,2022