

# 低コストなスクリーニングを目的とした自転車移動型 LiDAR-SLAM による堤防天端の変状計測

## BICYCLE-BASED LIDAR-SLAM FOR LOW-COST SCREENING OF LEVEE CREST DEFORMATION

山本 道輔<sup>1,2</sup>・西山 哲<sup>3</sup>・吉田 圭介<sup>4</sup>

Michisuke YAMAMOTO, Satoshi NISHIYAMA and Keisuke YOSHIDA

<sup>1</sup>正会員 株式会社オーエスエー (〒709-4622 岡山県津山市戸脇494-7)

<sup>2</sup>正会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 博士後期課程 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 教授 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 准教授 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)

本研究は、河川堤防の維持管理効率化を目的とし、自転車移動型LiDAR-SLAMを用いた低コストな一次スクリーニング（トリアージ）手法を提案する。相対的な変状抽出に特化して地上基準点(GCP)設置を省略した「GCPレス運用」の有効性を検証するため、基礎実験と実地検証を行った。基礎実験により、点群位置合わせ(ICP)による相対補正下ではGCP無しでも最小検出厚(MDT) 20mmの精度を確保できることを実証した。実環境での長距離計測においてはSLAM特有の「軌跡波状誤差(TWE)」が課題となるが、これを抑制するため分割ICPと統計的最適化を統合した条件分岐型ワークフローを構築した。吉井川での検証の結果、登録誤差は48mmから13mmへ低減され、既往MMSデータとの比較から延長約90mの区間における約70mmの変状の抽出に成功した。本手法は点群解析の高度な専門知識を有しない実務者であっても客観的な品質評価が可能であり、予算や人員に制約のある現場の実運用に適合する。

**Key Words:** LiDAR-SLAM, GNSS, M3C2 algorithm, ICP algorithm, river management

### 1. はじめに

我が国において、河川堤防は国民の生命・資産を保全する基盤であり、人口の約1/2、資産の約3/4がその治水システムによって守られている<sup>1)</sup>。しかし、近年の気候変動に伴う降雨の集中化・激甚化により、大規模水害が続発している<sup>2)</sup>。例えば、令和元年台風第19号では東北・関東地方を中心に140か所で堤防が決壊し、そのうち約85%にあたる120か所において越水が主因であったことが確認されている<sup>3)</sup>。こうした背景から、堤防決壊を未然に防ぐため、堤防の健全性を定量的かつ面的に把握する技術の確立が喫緊の課題となっている。

現状、河川堤防の点検は目視による巡視が主体であるが、これは技術者の熟練度に依存し、評価結果に一貫性を欠く定性的な判断に留まりやすい<sup>4)</sup>。また、主要な測量手法である河川定期縦横断測量<sup>5)</sup>は、距離標等の限定的な測線に基づく「線の管理」であり、測線間で生じる数センチ単位の微小な天端沈下や変位を見落とすリスク

が内在している。国土交通省の「河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)」では、堤防の一次スクリーニングにおいて5cm程度の標高精度での面的把握が期待されているが<sup>6)</sup>、既存技術には実務上の制約が多い。

面的管理を実現する既存技術として、航空レーザ測量や、UAVレーザ、地上型レーザ、車載型MMS等がある。これらは絶対座標系における厳密な地形把握(標高管理)には不可欠であるが、高額な運用コストや航空法による規制等の制約があり、限られたリソースの中で異常箇所を効率的に抽出し、従来の詳細測量へと繋ぐ『一次スクリーニング技術』の実装が必要である。

本研究はこれら既存の精密測量と競合・代替するものではない。絶対座標の厳密な計測ではなく、2時期間の「相対的な形状変化」の抽出に特化することで、コストを要するGCP(地上基準点)を省略した「GCPレス運用」による低コストな面的スクリーニング手法の確立を目的とする。

そこで本研究では、図-1に示す自転車移動型LiDAR-SLAMを用い、長距離計測時に残留する計測軌跡が波



図-1 自転車走行によるLiDAR-SLAM観測

打つように歪む現象である「軌跡波状誤差 (Trajectory Waviness Error : 以下, TWE)」に着目し, これをLague らによる M3C2 理論<sup>7)</sup>を応用した解析フローによって抑制・評価する手法を提案する. これにより, 専門的なプログラミング技術を持しない実務者であっても, 汎用的な点群処理オープンソフトウェア(CloudCompare)の操作により, 管理基準の目安となる 50mm 以上の変状を面的にスクリーニングし, 異常箇所を効率的に絞り込む実務的なモニタリング体制の実現を目指す.

## 2. 計測システムおよび実験概要

本研究では, 市販の携帯型LiDAR-SLAM装置であるGreenValley LiBackpack DGC50H (以下, DGC50H)を使用した. 本装置は, 上下に2基の16ライン回転式LiDARを搭載し, マルチバンドGNSS-RTK受信機, 三軸MEMS-IMU, 360°カメラを一体化したバックパック型システムである<sup>8)</sup>. LiDAR部は最大64万点/秒の点群を取得可能であり, 公称距離精度は±10mmである. 0.20°の水平角分解能により高密度な地形表現を実現する. 計測体制には, 機動性と経済性に優れた自転車移動を採用した. 自転車による走行は, 徒歩計測に比べ河川堤防における身体的負担を軽減し, 一定の機動性を維持しながら, 変状抽出に必要な点群密度を確保しつつ, 実務的なパトロール速度 (時速20km程度) での効率的な計測を可能とする.

SLAM機器は一般的にアルゴリズムが非公開であることから, 観測条件等が変状検出性能に与える影響を定量的に評価するため, 図-2に示すとおり, アスファルト舗装路上において基礎実験を実施した.

実験では, 実際の変状を模擬するため, 厚み5, 10, 20, 30, 50mmの5種類の白色樹脂板を試験片として配置した. 精度に影響を及ぼす要因を科学的に解明するため, 表-1に示すとおり速度 (因子A: 徒歩4km/h・自転車10km/h), 座標拘束方式 (因子B), LiDARからの距離 (因子C) の3因子を組み合わせた要因計画法 (フルファクタリアル実験) を定義し, 全12ケースの解析デー

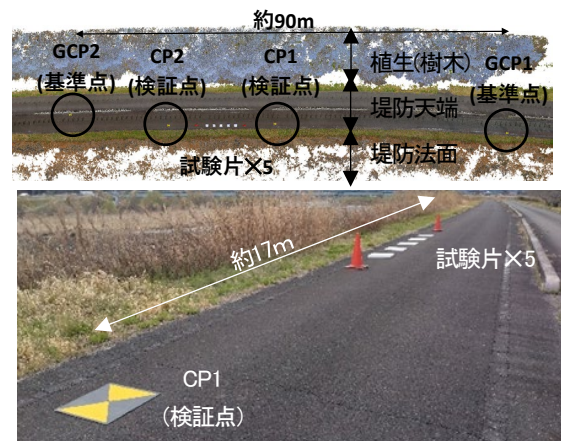


図-2 基礎実験の設置物の配置状況  
(上図は1次点群データ)

表-1 実験条件の組み合わせ (全12ケース)

| Run | A (速度) | B (拘束方式)       | C (距離) |
|-----|--------|----------------|--------|
| 1   | 徒歩     | GNSS only      | 0.5 m  |
| 2   | 徒歩     | GNSS only      | 4.0 m  |
| 3   | 自転車    | GNSS only      | 0.5 m  |
| 4   | 自転車    | GNSS only      | 4.0 m  |
| 5   | 徒歩     | GNSS ON + GCP  | 0.5 m  |
| 6   | 徒歩     | GNSS ON + GCP  | 4.0 m  |
| 7   | 自転車    | GNSS ON + GCP  | 0.5 m  |
| 8   | 自転車    | GNSS ON + GCP  | 4.0 m  |
| 9   | 徒歩     | GNSS OFF + GCP | 0.5 m  |
| 10  | 徒歩     | GNSS OFF + GCP | 4.0 m  |
| 11  | 自転車    | GNSS OFF + GCP | 0.5 m  |
| 12  | 自転車    | GNSS OFF + GCP | 4.0 m  |



図-3 実地検証 (700m区間) のGCP/CPの配置状況

タセットから各因子の影響を統計的に評価した.

さらに, 実環境における妥当性を検証するため, 図-3に示すとおり, 岡山県下の一級河川である吉井川右岸堤防700m (距離標1.3k.p.~2.0k.p.) にて実地検証を行った.

当該地区は, ゼロメートル地帯を背後に抱える治水上の最重要区間である<sup>9)</sup>. 本検証では, 実務的なパトロール速度を想定した時速10kmおよび20kmの観測速度を設

定し、長距離計測における軌跡の累積誤差（ドリフト）への影響を評価した。

また、2017年取得の車載型MMSデータという特性の異なる既往点群との比較解析に本提案ワークフローを適用し、GCPを省略した「GCPレス運用」による面的スクリーニングの実用性と経年変化抽出能力を検証した。

なお基礎実験と実地検証も含め検証で扱うGCPやCP（検証点）などの座標は、水平位置（XY）をネットワーク型RTK法により、標高（Z）は自動レベルによる直接水準測量により取得した。また、基礎実験および実地検証における変状抽出の基本フローとして、2時期の点群データをICP（Iterative Closest Point）アルゴリズムによって相対的に位置合わせしたのち、M3C2法<sup>7)</sup>を用いて法線方向の距離差（変状量）を算出する手法を共通して適用した。

### 3. 基礎実験による相対精度の検証結果

本章では、第2章で述べた基礎実験のデータに基づき、観測条件が変状検出精度に与える影響を定量的に評価した結果を述べる。評価指標には、LagueらによるM3C2法<sup>7)</sup>によって算出された試験片設置前後の点群間距離と真値との差である「絶対検出誤差」および、統計的に有意な変化として識別可能な「最小検出厚（MDT）」を用いた。

まず、観測速度（因子A）、座標拘束方式（因子B）、LiDARからの距離（因子C）の3因子が厚み検出精度に与える影響を明らかにするため、図-4に示す厚み検出誤差と、50mm厚試験片の絶対検出誤差を従属変数とした三元配置分散分析（ANOVA）を実施した<sup>10)</sup>。分析の結果、因子B（座標拘束方式）の主効果のみが統計的に有意（ $F(2, 2) = 374.25, p = .003$ ）であり、厚み検出誤差のばらつきの96%以上（ $\eta^2 = 0.966$ ）を説明した。一方、因子AおよびCの主効果や交互作用に有意差は認められず（いずれも  $p > .05$ ）<sup>10)</sup>、本実験範囲の速度や距離の変動は正確性を左右する主要因ではないことが示された。

続いて、テューキーのHSD法<sup>10)</sup>による多重比較の結果、GNSS補正のみとGNSS+GCP補正間に統計的な有意差は認められなかった（ $p = .783$ ）。平均絶対検出誤差の差も0.1mmに留まり、第2章で述べたICPによる相対的な位置合わせを経ることでGNSSの系統誤差が低減され、GCPを省略しても同等の変状抽出精度が得られることが確認された。したがって、面的スクリーニングを目的とする場合、手間とコストを要するGCPを省略した「GCPレス運用」は、実務上の合理的な選択肢であると考えられる。

本システムの性能限界を規定する最小検出厚（MDT）について述べる。各試験片内でM3C2法<sup>7)</sup>によって有意な変化として判定された点の割合が80%を超える最小の

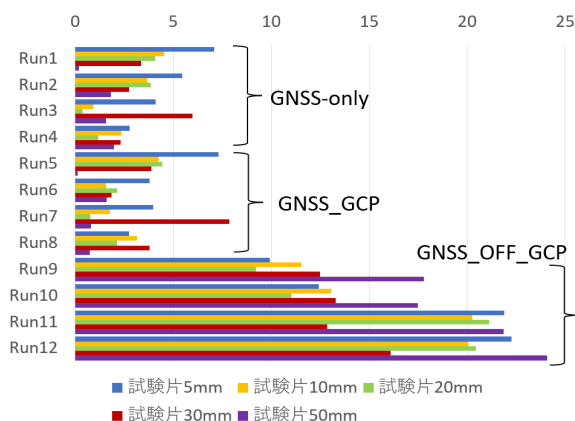


図-4 厚み検出誤差(mm)

厚みを算出した結果、GNSSを有効にした全ての条件下

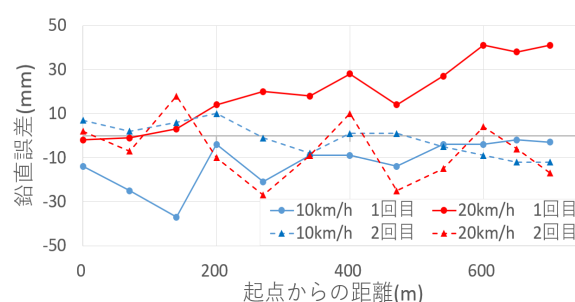


図-5 700m区間における鉛直誤差の縦断プロファイル

においてMDTは20mmであった。5mmおよび10mmの厚みについては、システムのノイズレベルに埋没し、統計的に有意な面的変状として識別されなかった。この結果は、本システムが理想的な環境下において、河川管理における一次スクリーニングの目安とされる50mm<sup>6)</sup>に対し、その半分以上の変状を識別可能なポテンシャルを有していることを示している。

### 4. TWEの特定と解析ワークフロー

本章では、実地検証で顕在化した誤差要因を特定し、それを克服するために開発した条件分岐型の解析ワークフローについて述べる。

#### (1) TWE（軌跡波状誤差）の定義と残留メカニズム

基礎実験では短距離（約90m）かつ理想的な観測条件下であったため高い相対精度が得られたが、実地検証における長距離（700m）かつ特徴点の少ない堤防計測の結果、GNSS-RTK 測位解が固定（Fix）された安定条件下であっても、生成される点群には局所的に変動する「歪み」が残留することが確認された。

図-5は、取得された点群の標高値と、自動レベルを用いた約70m間隔の直接水準測量により取得した値（TP及びGCP/CP）との「差分（鉛直誤差）」を縦断方向に

プロットしたものである。同図が示すように、誤差分布はゼロに収束せず、数十 mm の振幅を持って周期的に変動する挙動を示している。この波状のプロファイルは、実際の地形（堤防天端）の不陸を示しているのではなく、SLAM の自己位置推定誤差そのものを表したものである。

本現象は、GNSS/IMU/LiDARの複合システムにおいて、GNSSの遮蔽やマルチパス、IMUのドリフト等が時間的に変動する系統誤差を生じさせ<sup>11)</sup>、算出される軌跡が真の軌道に対して連続的に揺らぐことで発生する。本研究では、この残留誤差をTWE（軌跡波状誤差）と定義した。

TWE は空間的に変動する非線形な誤差成分である。そのため、700m区間全体を単一の剛体とみなして補正する従来の一括 ICP（Iterative Closest Point）では除去が困難であり、本手法が目的とする cm 級の微小変状抽出における支配的な阻害要因であることが特定された。

## (2) 登録誤差（2時期の点群間の位置合わせ誤差）の許容閾値決定の根拠

前項で述べたICP等による位置合わせを経てもなお、2時期の点群間に残留するズレを、本研究では「登録誤差（Registration Error）」として評価する。本解析ワークフローでは、データの信頼性を判定する指標としてこの登録誤差を用い、その許容閾値を統計的および実務的視点から導出した。国土交通省の「河川管理用三次元データ活用マニュアル（案）」では、堤防点検の一次スクリーニングに求められる標高の許容誤差は「50mm程度」と定義されている<sup>9)</sup>。一般にこの値は絶対座標の正確さを指すが、本研究が目的とする変状抽出においては、「50mm 以上の変状を見逃さずに抽出すること」が実務上の管理目標とした。一方、LagueらによるM3C2法の誤差伝播理論<sup>7)</sup>に基づく、95%信頼区間においてノイズと区別して有意な変化であると断定できる最小の変状量、すなわち統計的検出限界（LOD 95%）は、本研究の対象である舗装された堤防天端等においては点群の表面粗さが登録誤差に比べて十分に小さく無視できると仮定し、登録誤差（reg：2時期の点群間の位置合わせ誤差）を用いて数式(1)で近似される。

$$LOD95\% \approx 1.96 \times reg \quad (1)$$

管理目標である 50mm の変状を統計的に有意な変化として確実に検出するためには、検出限界（LOD 95%）が 50mm 以下である必要がある。この条件式に上式を代入して登録誤差の許容値を逆算すると、以下のようになる。

$$1.96 \times reg \leq 50mm \quad (2)$$

$$reg \leq \frac{50mm}{1.96} \approx 25.5mm \quad (3)$$

以上の理論的背景から安全側の余裕を考慮し、登録誤差の運用許容閾値を25mmとした。この閾値から導かれ

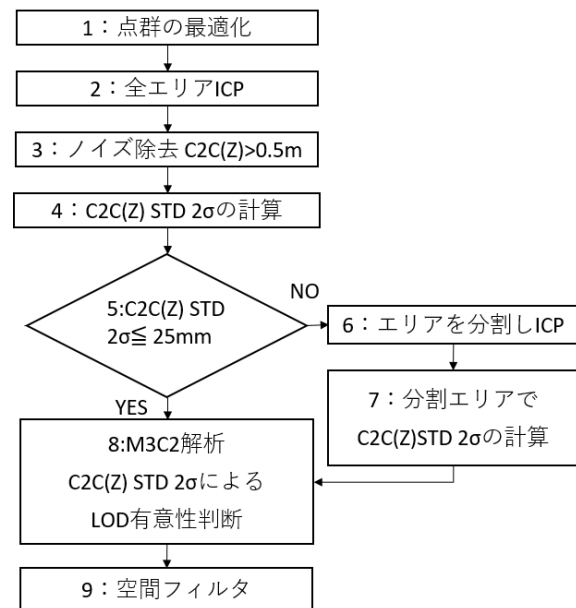


図-6 条件分岐型フロー

る検出限界（約49mm）は基礎実験の基本性能（MDT：20mm）を上回り、ハードウェアに過度な要求を課さず実務上の管理目標を達成し得る妥当な設定である。

## (3) TWE抑制のための自己診断フロー

本フローでは、解析条件の統一と計算負荷の軽減を目的として、前処理として比較する全データの点密度を1,000点/m<sup>2</sup>に均一化する（図-6 1.）。その上で、TWEの影響を抑制し、閾値をクリアするため、以下の3つ技術を体系化した。

### a) 2σ基準による登録誤差の統計的最適化

一括 ICP（図-6 2.）後の点群間距離（C2C(Z)距離）のヒストグラムには、植生等のグロスノイズが含まれるため、本研究の検出対象（50mm級）と明らかにスケールが異なる ±0.5m 以上の変位を粗大なノイズとして事前除去する（図-6 3.）。その上で、TWEに起因する誤差分布が概ね正規分布に従う特性に着目し、登録誤差を算出するプロセスにおいて、データの約95%が含まれる範囲（平均値から±2σ）を基準とした統計的フィルタリングを導入する。これにより、点群データそのものを改変することなく、分布の両端にある外れ値を客観的に除外し、算出される登録誤差 std(2σ) を TWEの実態に近い適正な値へと最適化する（図-6 4.）。

### b) 分割 ICP（局所的補正）

非線形な歪みを持つTWEを補正するため、対象区間を分割して局所的な点群位置合わせを行う「分割ICP」（図-6 6.）を適用<sup>12)</sup>し登録誤差を再評価する（図-6 7.）。解析長については感度分析の結果、300m分割（登録誤差10.5mm）、200m分割（9.3mm）、100m分割（8.3mm）となり、精度向上が飽和した。加えて、河川堤防のように平坦かつ直線的な構造物において解析長を極端に短くすると、ICPの位置合わせに必要な幾何学的

特徴（凹凸や勾配変化）が不足し、計算が不安定になる（スリップする）リスクが高まる。したがって、計算コストと幾何学的拘束の安定性のバランスが最適となる200mを採用した。

#### c) 連結成分フィルタ（空間的なノイズ排除）

最適化された登録誤差を用いてM3C2解析を実行後（図-6 8.）微小なノイズを変状として誤検知を防ぐため、連結成分（Connected Components）解析を適用する。前処理で均一化した点密度（1,000点/m<sup>2</sup>）に対し河川堤防における実務的な変状規模（50cm四方）に相当する250点以上の連続したクラスタのみを変状として抽出し、空間的に孤立した微小なノイズを排除する（図-6 9.）。

#### d) 条件分岐型解析ワークフローの提示

以上の技術を統合したワークフローを図-6に示す。最適化後の登録誤差が25mmを超過する場合は分割処理へと分岐させる（図-6 5.）定量的な品質判定プロセスを備えている。このフローにより、点群解析に関する高度な専門知識を有しない実務者であっても、データの客観的な品質を担保しながら、実務上の管理基準（50mm）に適合した変状抽出を遂行することが可能となった。

## 5. 実地検証結果および社会実装に向けた考察

本章では、実地検証（吉井川700m区間）における誤差低減の成果および変状抽出事例に基づき、本システムの有効性を考察する。

まず、誤差低減の定量的成果について述べる。同一機器による2時期のSLAM点群を用いた自己ノイズ評価において、従来の一括ICPによる位置合わせでは、軌跡波状誤差（TWE）の影響により登録誤差（C2C(Z)\_std）が48mmに達し、微小変状がノイズに埋没する課題があった。これに対し、提案ワークフローの前処理（ノイズ除去と2 $\sigma$ 統計的最適化）を適用した結果、図-7に示す通り登録誤差は13mmまで改善し、分割ICPはスキップされた。この13mmという値に基づき、統計的な検出限界（LOD 95%）は約25mm（13mm $\times$ 1.96）と算出された。これは、4章で設定した実務上の管理基準（50mm）に対し十分な余裕があり、当該規模の変状を安定して抽出するために必要な精度を有していることを意味する。

次に、実変状の抽出事例として、GNSS/IMU複合航法により測位されたMMS（2017年）と本手法のSLAM（2025年）を用い、改修工事の影響がない400m区間に限定して比較結果を示す。両者は位置推定原理が異なる異種点群であるが、ワークフローの相対補正と品質判定を経ることで統一的な定量評価が可能となる。

差分解析の結果、堤防天端と側道の境界にある擁壁部において、図-8のとおりCP1からTP3区間の延長約90mの範囲において約70mmの変状をカラーマップ上で抽出できた。この変状を確認するため、図-9のとおりMMS

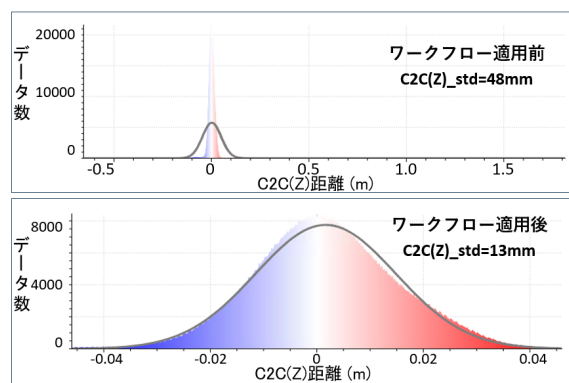


図-7 ワークフロー適用前後の登録誤差の分布  
(黒線は理論正規分布曲線)

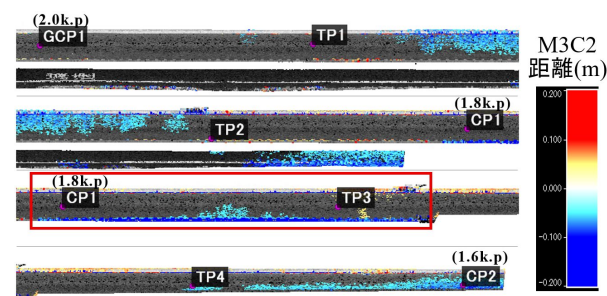


図-8 2時期点群のM3C2距離による  
カラーマップ (赤：隆起 青：沈下)

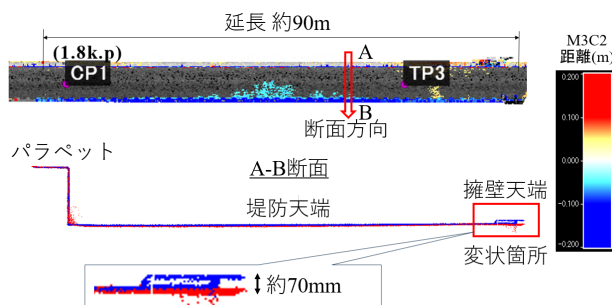


図-9 変状部分の解析結果と断面図 延長約90mの区間  
(図-8赤枠) において約70mmの変状を抽出  
(青：2017年MMS 赤：2025年SLAM)

および SLAM の点群から当該箇所の横断プロファイルを作成し、形状比較を行った。

その結果、2017年時点では擁壁天端と舗装面との間に存在した約70mmの鉛直段差が、2025年時点では消失(0mm)し、両者がフラットな状態に変化していることが確認された(図-9)。当該箇所について現地確認を行うと舗装修繕が実施されており、2025年SLAMデータの結果は妥当であった。これにより、局所的な相対形状の変化を本手法が的確に捉え得ることを示唆している。

本ワークフローでは絶対標高の厳密な保証はなされないが、この断面形状における構造物と地盤の「相対的な位置関係の変化」と、解析上の抽出結果が整合したことは、本手法が絶対座標の誤差を含みつつも、実務上重要な局所変状（不同沈下等）を面的にスクリーニングする有効な手法であることを示唆している。

本手法の社会実装に向けた実務運用モデルについて考察する。本検証では、作業効率を最大化する観測速度として時速 20km を設定し、その妥当性を検証した。観測速度を時速 10km から時速 20km へと倍速にした際、鉛直の絶対位置精度 (RMSE) の低下が確認されたが、一般に絶対精度の低下は変状抽出の信頼性を損なう懸念があるが、本手法の目的においては以下の理由により許容される。本手法は 2 時期間の「相対的な」形状変化の抽出を目的としており、速度向上に伴い点群全体に生じる絶対座標の系統的なオフセット (平行移動成分) は、前段の ICP (位置合わせ) プロセスによって効果的に低減されるためである。事実、第3章の基礎実験 (分散分析) においても、速度の違いが MDT (最小検出厚) に与える統計的な有意差は認められていない。速度が上昇するに伴い、取得される点群密度は低下するが、最大 64 万点/秒のスキャンレートにより時速 20km においても約 8000 点/m<sup>2</sup> のデータが取得される。これは、本解析ワークフローの前処理で要求される点密度 1,000 点/m<sup>2</sup> を十分に満たす情報量であり、20mm 級の相対的な変状検出能力を維持している。

高い絶対精度を有する従来の観測手法 (航空レーザや MMS 等) と比較して、本手法はそれらを完全に代替するものではないが、車両進入の制約を受けず日常業務の延長で機動的に面的計測を行える利点がある。

なお、本手法の実運用上の適用限界として、分割 ICP エリアよりも大きく周辺地形を含む広域的な一様沈下は、原理的に検出できない点に留意する必要がある。

適用可能な堤防条件として、幅員は走行軌跡から 4m (幅員約 8m) まで cm 級の精度を検証している。また表面状況は、舗装天端では cm 級の抽出が可能だが、植生被覆部等では正確な地表面抽出が困難になるため、数十 cm 規模の変状抽出へ運用を切り替える必要がある。

第1章で述べた線の管理の見落としリスク等の課題に対し、時速 20km の自転車パトロールを一次スクリーニングとして運用し、変状抽出箇所のみ従来の詳細測量 (水準測量等) を投入するトリアージ体制の構築が実務上有効である。計測間隔は実務リソースを考慮し、全区間は年1回を基本としつつ、改築後等の懸念箇所は数ヶ月単位で機動的に比較する運用が推奨される。

## 6. 結論

本研究では、自転車移動型の GNSS 統合型 LiDAR-SLAM システムを用い、河川堤防の高効率な変状スクリーニング手法を確立した。本手法は、従来の測線に基づく「線的」な定期縦横断測量を、広域かつ高密度な「面的」管理へと進化させるものであり、堤防管理の高度化と効率化を両立するものである。

技術面においては、実環境での長距離計測で課題とな

る軌跡波状誤差 (TWE) の発生メカニズムを特定し、「分割 ICP」を核とした条件分岐型解析ワークフローを構築した。これにより、一括処理ではノイズに埋没していた cm 級の変状に対し、実務上の管理目標値である 50mm を統計的な裏付け (LOD 95%) を持って担保できる、約 25mm という検出感度を確保した。さらに、登録誤差  $\text{std}(2\sigma)$  を指標とした自己診断機能を導入することで、点群解析に関する高度な専門知識を有しない実務者であっても、データの客観的な品質を判断し、信頼性の高い変状抽出を遂行できる実務運用モデルを提示した。

本手法の社会的意義は、相対的な変状抽出に特化して GCP 設置を省略した「GCP レス運用」と時速 20km での計測を組み合わせることで、絶対座標を要する従来の観測手法では予算・人員的に困難であった「高頻度な広域スクリーニング」を、低コストかつ省力的に実現した点にある。これは、深刻な技術者不足と予算制約に直面している地方自治体や、広大な管理延長を持つ中小河川の維持管理現場における課題解決に直結する成果である。

今後は、本研究で得られた知見を異なる機器での観測や、道路法面や海岸護岸といった他の線状インフラへと展開し、インフラ DX の推進を通じた持続可能な社会基盤管理体制の構築に寄与することを目指す。

## 参考文献

- 1) 吉川 勝秀: 河川堤防システムの整備・管理に関する実証的考察, 水文・水資源学会誌, 第24巻, 第1号, pp.21-36, 2011.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局: 水害レポート2023, p.5, 2023.
- 3) 国土交通省: 令和元年台風19号による決壊要因や特徴の分析, p.2, 2020.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局: 堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領, pp.2-4, 2023.
- 5) 国土交通省: 河川定期縦横断測量業務 実施要領・同解説, p.6, 2018.
- 6) 国土交通省: 河川管理用三次元データ活用マニュアル (案), pp.14-20, 2020.
- 7) Lague, D., Brodeur, N., Leroux, J., et al.: Accurate 3D Comparison of Complex Topography with Terrestrial Laser Scanner, *arXiv preprint*, pp.1-26, 2013.
- 8) GreenValley International: LiBackpack DGC50H Mobile Backpack 3D Mapping System User Guide, 2023.
- 9) 国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所: 吉井川水系河川維持管理計画, pp.1-3, 2021.
- 10) The jamovi project: jamovi (Version 2.3) [Computer software], 2024. <https://www.jamovi.org>
- 11) Kalenjuk, S. and Lienhart, W.: A Method for Efficient Quality Control and Enhancement of Mobile Laser Scanning Data, *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 4, 857, 2022.
- 12) Yang, Y. and Holst, C.: Piecewise-ICP: Efficient and robust registration for 4D point clouds in permanent laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp.481-500, 2025.

(2026. 4. 2受付)